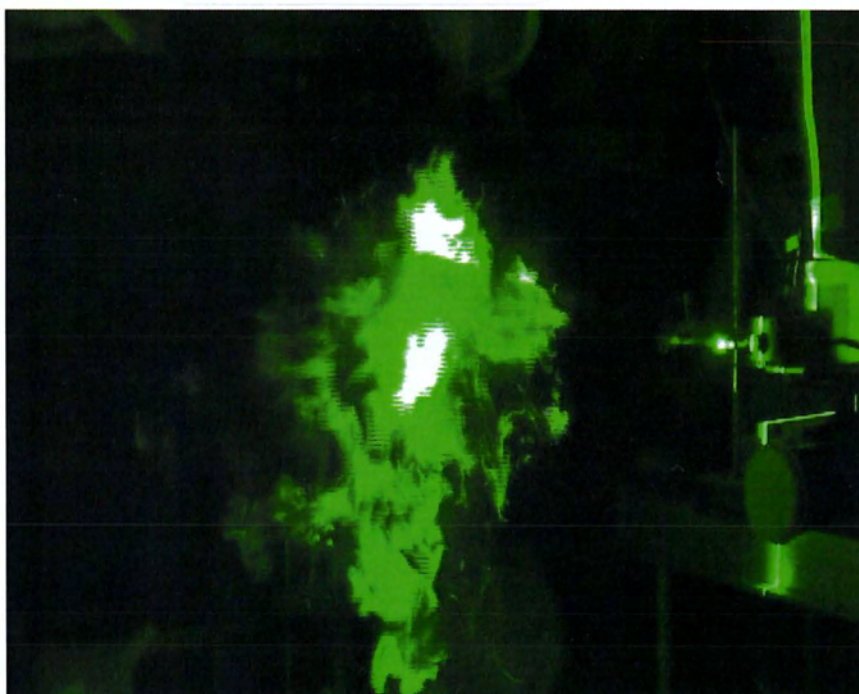


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΟΜΟΙΟΓΕΝΟΥΣ
ΤΥΡΒΗΣ ΣΕ ΑΕΡΙΑ ΤΥΡΒΩΔΗ ΔΕΣΜΗ ΚΑΙ
ΠΛΟΥΜΙΟ**



Επιμέλεια εργασίας: Ηλίας Κωνσταντίνος
Μπαλοδήμος Κωνσταντίνος

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Σταπουντζής Ερρίκος

Βόλος, 2013



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

Αριθ. Εισ.: 11850/1

Ημερ. Εισ.: 05-08-2013

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ

2013

ΗΛΙ

Εξεταστική Επιτροπή

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής,
Αναπληρωτής Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης,
Αναπληρωτής Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τρίτος Εξεταστής

Dr. Georgios Charalampous
Research Associate
Imperial college, London

Ευχαριστίες

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

Επιπλέον, για τη βοήθεια σε καίρια σημεία, την υποστήριξη και την παροχή πολύτιμων πληροφοριών θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον διδάκτορα του τμήματος Δημήτριο Τζιουρτζούμη και τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Αθανάσιο Μπάρλα. Επίσης, ευχαριστούμε τον προπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Αναστάσιο Δροσάτο, για την ανταλλαγή πληροφοριών κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, ευχαριστούμε τον μηχανοτεχνίτη του τμήματος Βέργο Αθανάσιο για τη βοήθεια στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης.

Ακόμη, ευχαριστούμε όλους τους φίλους και φίλες μας για την συμπαράσταση, την ανοχή όλο το διάστημα της εργασίας καθώς και τη βοήθεια που λίγο πολύ όλοι μας προσέφεραν. Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για όλα τα εφόδια που μας έχουν προσφέρει και για την συνεχή υποστήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί, αναφέρεται στην πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της ομοιογενούς και ισότροπης τύρβης με σχεδόν μηδενική μέση ταχύτητα σε αέρια τυρβώδη δέσμη και πλούμιο. 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. Πιο συγκεκριμένα το πείραμα το οποίο πραγματοποιήθηκε είναι βασισμένο στην προσπάθεια ενός άλλου μελετητή, του Birouk, ο οποίος το 1996 τοποθέτησε οχτώ περιστρεφόμενους ανεμιστήρες σε σχήμα κύβου με σκοπό να παράγει ισότροπη και ομοιογενή τύρβη στον αέρα με σχεδόν μηδενική μέση ταχύτητα. Κατ' επέκταση η διαφορά του πειράματος με το πείραμα του Birouk έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκαν μεγάφωνα που στην έξοδο τους τοποθετήθηκαν ίδια ακροφύσια με σκοπό την μελέτη του τυρβώδους πεδίου ακριβώς στο κέντρο του κύβου και όχι σε μια σφαιρική επιφάνεια γύρω από αυτό. Ξεκινώντας την εργασία, αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο στήθηκε το πείραμα καθώς και ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια αναλύονται οι τρόποι με τους οποίους έγινε η μέτρηση της ταχύτητας της τύρβης καθώς και οι περιπτώσεις δημιουργίας τυρβώδους πεδίου. Επιπλέον, αναφέρεται το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις και από την οπτικοποίηση της τυρβώδους ροής. Στο τελικό κομμάτι, γίνεται μια προσπάθεια μέσω των αποτελεσμάτων να εμβαθύνει η μελέτη του φαινομένου. Μέσα από γραφήματα και εικόνες δίνεται μια εμπειριστατωμένη άποψη για τις μεταβολές και την συμπεριφορά του τυρβώδους πεδίου ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν κάθε φορά.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εξεταστική Επιτροπή	1
Ευχαριστίες	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	14
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	17
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	17
2.1 Εισαγωγή στις τυρβώδεις ροές	17
2.2 Ομοιογένεια, στασιμότητα και ισοτροπία της τύρβης	18
2.3 Πειράματα πάνω στην παραγωγή ισότροπης ομοιογενούς τύρβης στο παρελθόν	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	23
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	23
3.1. Πειραματικός εξοπλισμός	23
3.1.1 Θάλαμος τύρβης.....	24
3.1.2 Ηχεία : Προδιαγραφές και τοποθέτηση	26
3.1.3 Ενισχυτές και σύνδεση ηχείων.....	29
3.2 Συστήματα μέτρησης και οπτικοποίησης της ροής	31
3.2.1 Laser Doppler Velocimetry (LDV)	31
3.2.2 Οπτικοποίηση της ροής.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	35
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	35
4.1. Μέτρηση ακουστικού πεδίου	35
4.2. Μέτρηση ταχύτητας με τη χρήση LDA (Laser Doppler Anemometer)	35
4.2.1. Μέτρηση ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου ενός ηχείου	35
4.2.2. Μέτρηση ταχύτητας στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου	36
4.2.3. Πρόγραμμα FLOWSIZER	37
4.3. Οπτικοποίηση της ροής.....	38
4.3.1 Πειραματική μεθοδολογία	38
4.3.2. Υπολογιστική μεθοδολογία – διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	48
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	48
5.1. Αποτελέσματα μέτρησης έντασης ακουστικού πεδίου	48
5.2. Αποτελέσματα μέτρησης ταχυτήτων στην έξοδο ακροφυσίου ενός ηχείου	50
5.3. Αποτελέσματα μέτρησης ταχυτήτων στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου τύρβης.....	52
5.4. Αποτελέσματα οπτικοποίησης της ροής	55
5.4.1.Περίπτωση «CROSS».....	55
5.4.2.Περίπτωση «ΠΛΟΥΜΙΟ»	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	167
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	167
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	168
ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB	168

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-Παράμετροι μέτρησης έντασης ακουστικού πεδίου	35
Πίνακας 2- Παράμετροι μέτρησης στην έξοδο του μεγαφώνου	36
Πίνακας 3-Παράμετροι μέτρησης στο κέντρο ροής (σταθερή ισχύς)	37
Πίνακας 4 Παράμετροι μέτρησης στο κέντρο ροής (σταθερή συχνότητα)	37
Πίνακας 5- Παράμετροι περίπτωσης CROSS.....	39
Πίνακας 6- Παράμετροι περίπτωσης ΠΛΟΥΜΙΟ	39
Πίνακας 7-Ένταση ακουστικού πεδίου.....	49
Πίνακας 8- Ταχύτητα U_{mean} στην έξοδο μεγαφώνου	50
Πίνακας 9- Ταχύτητα U_{rms} στην έξοδο μεγαφώνου	51
Πίνακας 10-Ταχύτητες U_{rms} και U_{mean} στο κέντρο της ροής(Σταθερή ισχύς).....	53
Πίνακας 11- Ταχύτητα U_{rms} στο κέντρο της ροής(Σταθερή συχνότητα)	54
Πίνακας 12- Μέσες υδραυλικές ακτίνες CROSS	109
Πίνακας 13 -Τυπική απόκλιση Cross.....	110
Πίνακας 14- Μέσες υδραυλικές ακτίνες ΠΛΟΥΜΙΟ	165

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1- Τοποθετημένα ηχεία στο πλαίσιο	23
Εικόνα 2- Σχέδιο μεταλλικού πλαίσιο	24
Εικόνα 3- Μεταλλικοί σφικτήρες.....	25
Εικόνα 4- Γρύλλος με τοποθετημένη τη βάση τραπέζιου.....	26
Εικόνα 5- Ηχείο SP-W200-PP	27
Εικόνα 6- Διάταξη ηχείου	28
Εικόνα 7-- Διάταξη ηχείου	28
Εικόνα 8– Διακόπτες αποδέσμευσης ηχείων	30
Εικόνα 9- no_power- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)	55
Εικόνα 10-50Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	56
Εικόνα 11-60Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	56
Εικόνα 12-70Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	57

Εικόνα 13-73Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	57
Εικόνα 14-75hz- ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	58
Εικόνα 15-80hz- ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	58
Εικόνα 16-90Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	59
Εικόνα 17-100Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	59
Εικόνα 18-120Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	60
Εικόνα 19-140Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	60
Εικόνα 20-no_power- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)	111
Εικόνα 21-40Hz-- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)	112
Εικόνα 22-50Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	112
Εικόνα 23-60Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	113
Εικόνα 24-70Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	113
Εικόνα 25-73Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	114
Εικόνα 26-75Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	114
Εικόνα 27-80Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	115
Εικόνα 28-90Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	115
Εικόνα 29-100Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	116
Εικόνα 30-120Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	116
Εικόνα 31-140Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10).....	117

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1-Ένταση ακουστικού πεδίου	48
Γράφημα 2- Ταχύτητα U_{mean} στην έξοδο μεγαφώνου.....	50
Γράφημα 3- Ταχύτητα U_{rms} στην έξοδο μεγαφώνου	51
Γράφημα 4- Ταχύτητα U_{mean} στο κέντρο της ροής(Σταθερή ισχύς)	52
Γράφημα 5 -Ταχύτητα U_{rms} στην έξοδο μεγαφώνου(Σταθερή ισχύς)	52
Γράφημα 6- Ταχύτητα U_{rms} στο κέντρο της ροής(Σταθερή συχνότητα)	53
Γράφημα 7- No_power- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ	62
Γράφημα 8-50Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	63

Γράφημα 9- 60Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	63
Γράφημα 10- 70Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	64
Γράφημα 11- 73Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	64
Γράφημα 12- 75Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	65
Γράφημα 13- 80Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	65
Γράφημα 14- 90Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	66
Γράφημα 15- 100Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	66
Γράφημα 16- 120Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	67
Γράφημα 17- 140Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	67
Γράφημα 18- 160Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^0 καρέ.....	68
Γράφημα 19- no_power -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames .	69
Γράφημα 20-50Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	70
Γράφημα 21-60Hz-Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	70
Γράφημα 22- 70Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	71
Γράφημα 23- 73Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	71
Γράφημα 24- 75Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	72
Γράφημα 25- 80Hz-Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	72
Γράφημα 26- 90Hz-Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	73
Γράφημα 27- 100Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	73
Γράφημα 28-120Hz-Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	74
Γράφημα 29-140Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	74
Γράφημα 30- 160Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεων των pixel για όλα τα frames.....	75
Γράφημα 31- No_power- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσεων των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames	76
Γράφημα 32- 50Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσεων των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames	77
Γράφημα 33- 60Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσεων των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames	77
Γράφημα 34- 70Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσεων των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames	78
Γράφημα 35- 73Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσεων των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames	78
Γράφημα 36- 75Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσεων των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames	79
Γράφημα 37- 80Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσεων των pixel σε μια κάθετη	

φέτα από όλα τα frames	79
Γράφημα 38- 90Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames	80
Γράφημα 39 -100Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames.....	80
Γράφημα 40- 120Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames.....	81
Γράφημα 41- 140Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames.....	81
Γράφημα 42- 160Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames.....	82
Γράφημα 43- No_power- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames .	83
Γράφημα 44- 50Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	84
Γράφημα 45- 60Hz-Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	84
Γράφημα 46-70Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	85
Γράφημα 47- 73Hz-Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	85
Γράφημα 48- 75Hz-Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	86
Γράφημα 49-80Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	86
Γράφημα 50-90Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	87
Γράφημα 51-100Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	87
Γράφημα 52-120Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	88
Γράφημα 53-140Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	88
Γράφημα 54-160Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	89
Γράφημα 55-no_power- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	90
Γράφημα 56-50Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	91
Γράφημα 57-60Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	91
Γράφημα 58-70Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	92
Γράφημα 59-73Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	92
Γράφημα 60-75Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	93
Γράφημα 61-80Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	93
Γράφημα 62-90Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	94
Γράφημα 63-100Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	94
Γράφημα 64-120Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	95
Γράφημα 65-140Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	95
Γράφημα 66-160Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	96

Γράφημα 67-no_power-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3).....	96
Γράφημα 68-50Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	97
Γράφημα 69-60Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	97
Γράφημα 70-70Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	98
Γράφημα 71-73Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	98
Γράφημα 72-75Hz--Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3).....	99
Γράφημα 73-80Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	99
Γράφημα 74-90Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	100
Γράφημα 75-100Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	100
Γράφημα 76-120Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	101
Γράφημα 77-140Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)	101
Γράφημα 78-: no_power- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames	103
Γράφημα 79-50Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	104
Γράφημα 80-60Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	104
Γράφημα 81-70Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	105
Γράφημα 82-73Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	105
Γράφημα 83-75Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	106
Γράφημα 84-80Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	106
Γράφημα 85-90Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	107
Γράφημα 86-100Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	107
Γράφημα 87-120Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	108
Γράφημα 88-140Hz-- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames	108
Γράφημα 89-160Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	109
Γράφημα 90- Μέσες υδραυλικές ακτίνες CROSS	110
Γράφημα 91-no_power- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ	118
Γράφημα 92-40Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	119
Γράφημα 93-50Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	119
Γράφημα 94-60Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	120
Γράφημα 95-70Hz Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	120
Γράφημα 96-73Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	121
Γράφημα 97-75Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	121
Γράφημα 98-80Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	122
Γράφημα 99-90Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	122
Γράφημα 100-100Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	123
Γράφημα 101-120Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10 ⁰ καρτέ.....	123

Γράφημα 102-140Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ.....	124
Γράφημα 103-no_power- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames	125
Γράφημα 104-40Hz Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames.....	126
Γράφημα 105-50Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames.....	126
Γράφημα 106-60Hz Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames.....	127
Γράφημα 107-70Hz Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames.....	127
Γράφημα 108-73Hz Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames.....	128
Γράφημα 109-75Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames.....	128
Γράφημα 110-80Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames.....	129
Γράφημα 111-90Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames.....	129
Γράφημα 112-100Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames....	130
Γράφημα 113-120Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames....	130
Γράφημα 114-140Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames....	131
Γράφημα 115-no_power-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	132
Γράφημα 116-40Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	133
Γράφημα 117-50Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	133
Γράφημα 118-60Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	134
Γράφημα 119-70Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	134
Γράφημα 120-73Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	135
Γράφημα 121-75Hz--Μέση ένταση φωτός για $x=100$	135
Γράφημα 122-80Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	136
Γράφημα 123-90Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	136
Γράφημα 124-100Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	137
Γράφημα 125-120Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	137
Γράφημα 126-140Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$	138
Γράφημα 127-no_power- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames	139
Γράφημα 128-40Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames.....	140
Γράφημα 129-50Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames.....	140
Γράφημα 130-60Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames.....	141
Γράφημα 131-70Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames.....	141
Γράφημα 132-73Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames.....	142
Γράφημα 133-75Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames.....	142
Γράφημα 134-80Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames.....	143
Γράφημα 135-90Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames.....	143

Γράφημα 136-100Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	144
Γράφημα 137-120Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames.....	144
Γράφημα 138-140- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames	145
Γράφημα 139-no_power- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	146
Γράφημα 14040Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	147
Γράφημα 141-50Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	147
Γράφημα 142-60Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	148
Γράφημα 143-70Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	148
Γράφημα 144-73Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	149
Γράφημα 145-75Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	149
Γράφημα 146-80Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	150
Γράφημα 147-90Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	150
Γράφημα 148-100Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	151
Γράφημα 149-120Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	151
Γράφημα 150-140Hz- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	152
Γράφημα 151-no_power- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	152
Γράφημα 152-40Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	153
Γράφημα 153-50Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	153
Γράφημα 154-60Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	154
Γράφημα 155-70Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	154
Γράφημα 156-73Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	155
Γράφημα 157-75Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	155
Γράφημα 158-80Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	156
Γράφημα 159-90Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)	156
Γράφημα 160-100Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	157
Γράφημα 161-120Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	157
Γράφημα 162-140Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135).....	158
Γράφημα 163-no_power- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames	159
Γράφημα 164-40Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	160
Γράφημα 165-50Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	160
Γράφημα 166-60Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	161
Γράφημα 167-70Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	161
Γράφημα 168-73Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	162
Γράφημα 169-75Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	162
Γράφημα 170-80Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	163

Γράφημα 171-90Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	163
Γράφημα 172-100Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	164
Γράφημα 173-120Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	164
Γράφημα 174-140Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames.....	165
Γράφημα 175- Μέσες υδραυλικές ακτίνες ΠΛΟΥΜΙΟ.....	166

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τύρβη είναι το πιο περίπλοκο είδος συμπεριφοράς ενός ρευστού αλλά ταυτόχρονα και το πιο συνηθισμένο. Εξαιτίας του ανομοιομορφου και τυχαίου χαρακτήρα της, η τυρβώδης κίνηση περιγράφεται καλύτερα μέσα από κάποιες στατιστικές μέσες συναρτήσεις. Διάφορα παραδείγματα τυρβώδους ροής υπάρχουν σε αφθονία στη φύση, στην μηχανουργία, στην ιατρική και σε διάφορες άλλες επιστήμες. Μερικά από αυτά είναι: τα ρεύματα νερού κάτω από τις επιφάνειες των ωκεανών, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, η ροή σε ποταμούς, η ροή σε έναν θάλαμο καύσης και πολλά άλλα. Μιλώντας γενικά τώρα, θα λέγαμε ότι η τύρβη έχει ορισμένα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία την ξεχωρίζουν από άλλα είδη ροής. Αυτά είναι τα εξής:

- **Έντονη ανάμειξη:** Οι τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται από πολύ αποτελεσματική ανάμειξη όπως ορμή, θερμότητα και μάζα.
- **Υψηλός αριθμός Reynolds και τρισδιάστατες διακυμάνσεις στροβιλότητας:** Η δυναμική της στροβιλότητας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της τυρβώδους ροής και είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της τύρβης.

Κάθε τυρβώδης ροή εν τέλει είναι καθαρά ντετερμινιστική, αφού το ρευστό ικανοποιεί τις εξισώσεις Navier Stokes. Ωστόσο, η περιπλοκότητα της είναι τόσο μεγάλη που οδηγεί αρκετά συχνά σε χρήση στατιστικών μεθόδων για την περιγραφή της.

Τα τελευταία εικοσιπέντε χρόνια έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην αριθμητική προσομοίωση της τύρβης με την βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Μιλώντας για προσομοίωση εισάγουμε τον όρο “Αυστηρή” προσομοίωση της τύρβης, δηλαδή χωρίς την ταυτόχρονη βοήθεια εμπειρικών δεδομένων από πειραματικές μετρήσεις, αλλά αυτό μέχρι σήμερα έχει επιτευχθεί μόνο για σχετικά χαμηλούς αριθμούς Reynolds και για απλές γεωμετρίες. Προχωρώντας βέβαια τα χρόνια και με την πρόοδο των υπολογιστών φαίνεται πολύ πιθανή η αυστηρή προσομοίωση πολλών τυρβωδών ροών πρακτικού ενδιαφέροντος. Έτσι, με τα πρότυπα ροής που θα δημιουργηθούν από την προσομοίωση, θα έχουμε την δυνατότητα να αναπτύξουμε και να αναλύσουμε μαθηματικά τα πρότυπα αυτά. Αυτό, όπως αναφέραμε παραπάνω μπορεί να γίνει με τις εξισώσεις Navier-stokes. Ωστόσο όμως, το γενικό πρόβλημα της τύρβης, δηλαδή μελέτη σε πολύ υψηλό αριθμό Reynolds (π.χ. γεωφυσικές ροές) δεν φαίνεται πιθανό να επιλυθεί τελειώς, τουλάχιστον στο εγγύς μέλλον.

Ξεκινώντας μια πιο συγκεκριμένη ανάλυση των τυρβωδών ροών θα λέγαμε ότι η πιο απλή μορφή τύρβης που μπορεί να παρατηρηθεί είναι η ισότροπη τύρβη, η οποία είναι ομοιογενής και διασπείρεται σε όλες τις κατευθύνσεις του χώρου. Η βασικότερη προσέγγιση και η πιο γνωστή μέθοδος για την παραγωγή ισότροπης και ομοιογενής τύρβης είναι η τοποθέτηση ενός πλέγματος μέσα σε μια αεροδυναμική σήραγγα ή υδροσήραγγα. Η ένταση της τύρβης που θα παραχθεί μέσα σε μια αεροσήραγγα καθορίζεται από την ένταση του ρεύματος αέρα, ενώ οι κλίμακες μήκους της από το μέγεθος του πλέγματος. Ωστόσο, αυτό το είδος της τύρβης, παρόλο που παρουσιάζεται σε πάρα πολλές εφαρμογές, έχει και κάποια μειονεκτήματα που είναι δύσκολο να ξεπεραστούν. Ξεκινώντας με την αναφορά ενός μειονεκτήματος, θα μπορούσαμε να πούμε ότι με αυτόν τον τρόπο παραγωγής τύρβης, δεν μπορούμε να πετύχουμε υψηλό αριθμό Reynolds, καθώς η ταχύτητα της ροής δεν μπορεί να ξεπεραστεί επ' αόριστον, ενώ αν προσπαθήσουμε να πετύχουμε υψηλό αριθμό Reynolds, λόγω της μεγάλης μέσης ταχύτητας της ροής, θα έχουμε δυσκολία διεξαγωγής των μετρήσεων στο εργαστήριο.

Πηγαίνοντας τώρα σε άλλες εγκαταστάσεις που παράγουν ομοιογενή και ισότροπη τύρβη με σχεδόν μηδενικό μέσο όρο ταχύτητας μπορούμε να αναφέρουμε τις κλειστές τετραγωνικές περιοχές μέσα στις οποίες έχουν τοποθετηθεί σε σχήμα κύβου σε συγκεκριμένες διαστάσεις, ανεμιστήρες ή μεγάφωνα, τα οποία παρέχουν μια σταθερή πηγή ενέργειας για την παραγωγή τύρβης στο κέντρο του κύβου και γύρω από αυτό. Η παραγωγή τύρβης με αυτή τη διαδικασία είναι πολύ χρήσιμη για την έρευνα ενός πλήθους από διεργασίες όπως η καύση, η θερμική διάχυση, η διαμόρφωση τύρβης κ.α. Δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα μιας τέτοιας εγκατάστασης έναντι μιας παραδοσιακής αεροσήραγγας ή μιας υδροσήραγγας είναι οι στάσιμες στατιστικές τύρβης καθώς και οι λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις διασποράς της για την καλύτερη μελέτη της.

Τα τελευταία χρόνια, αρκετοί επιστήμονες έχουν ασχοληθεί με την μελέτη και την προσπάθεια κατανόησης της τύρβης και της τυρβώδους συμπεριφοράς γενικότερα, εκτελώντας διάφορα πειράματα και βγάζοντας κάποια αποτελέσματα και συμπεράσματα μελετώντας την τύρβη σε διάφορες μορφές. Ξεκινάμε με τον Birouk, ο οποίος το 2001 έκανε μια προσπάθεια να μελετήσει πειραματικά την ισότροπη τύρβη σε χαμηλό αριθμό Reynolds. Μετά τον Birouk οι επόμενοι που ασχολήθηκαν με την προσπάθεια κατανόησης της τυρβώδους συμπεριφοράς ήταν οι επιστήμονες W.Hwang και J.K.Eaton (2004). Αυτοί οι δύο ασχολήθηκαν και έβγαλαν κάποια αποτελέσματα παράγοντας ομοιογενή και ισότροπη τύρβη χωρίς μέση ροή. Μετά από τρία περίπου χρόνια το 2007, οι J.de Jong και L.Cao ασχολήθηκαν με την εκτίμηση του ποσοστού διασκεδασμού από το ρ_{in} στην μηδενική μέση ισότροπη τύρβη αλλά τα αποτελέσματα που έβγαλαν δεν ήταν και τόσο ικανοποιητικά. Τα επόμενα χρόνια έως το 2009, τέσσερις ακόμα μελετητές, οι Charles Goepfert, Jean-Louis Marie, Delphine Chareyron και Michel Lance ασχολήθηκαν με τον χαρακτηρισμό ενός συστήματος που παράγει ομοιογενές και ισότροπο τυρβώδες πεδίο με την

χρήση ελεύθερων συνθετικών δεσμών.

Εμείς στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε πειραματικά την επίδραση ισότροπης ομοιογενούς τύρβης σε αέρια τυρβώδη δέσμη και πλούμιο. Η εγκατάσταση του πειράματος μας είναι ένας κλειστός κύβος που στις ακμές του έχουν τοποθετηθεί οχτώ μεγάφωνα, στα οποία στην έξοδο τους έχουν τοποθετηθεί 8 ακροφύσια τα οποία είναι κατάλληλα τοποθετημένα γεωμετρικά ώστε να δείχνουν το κέντρο του. Στόχος μας είναι να μελετήσουμε την ταχύτητα της τύρβης στο κέντρο του κύβου κάνοντας αρκετές μετρήσεις, είτε κρατώντας σταθερά τα watt και αλλάζοντας την συχνότητα, είτε αντιστρόφως. Οι μετρήσεις των ταχυτήτων καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων έγιναν με την βοήθεια του LDV το οποίο θα αναλύσουμε στη συνέχεια. Επιπλέον, σε όλα τα πειράματα που έγιναν κάναμε και οπτικοποίηση της ροής, για να παρατηρήσουμε το τυρβώδες πεδίο που δημιουργείται στο κέντρο του κύβου και πως με τις εναλλαγές των watt και των συχνοτήτων εξαπλώνεται γύρω από το κέντρο του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή στις τυρβώδεις ροές

Η τύρβη προκύπτει στη φύση ως αποτέλεσμα των ασταθειών της ροής σε υψηλούς αριθμούς Reynolds. Γενικά, ενώ η τύρβη είναι πολύ δύσκολο να καθοριστεί ακριβώς, οι τυρβώδεις ροές αποτελούνται συνήθως από τις τυχαίες και χαοτικές διακυμάνσεις της ταχύτητας. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν από μια ασυνέχεια μήκους και χρόνου σε διάφορες κλίμακες που αλληλεπιδρούν με τρόπο μη γραμμικό. Λόγω της τυχαίας φύσης της συμπεριφοράς ενός τυρβώδους πεδίου, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε μια στατιστική προσέγγιση που περιγράφει και που αναλύει τις τυρβώδεις ροές. Ένα κοινό χαρακτηριστικό που έχουν όλες οι τυρβώδεις ροές είναι ότι η κινητική τους ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Κατά συνέπεια, η τύρβη δεν μπορεί να διατηρηθεί και στηρίζεται όπως είναι κατανοητό πάντα σε μια συνεχή πηγή ενέργειας.

Όπως προαναφέραμε, οι εξισώσεις για την κίνηση ενός ασυμπίεστου νευτωνικού ρευστού είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes, οι οποίες αντιστοιχούν στη διαφορική μορφή συντήρησης της μάζας και της ορμής αντίστοιχα.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

Τα σύμβολα p , ρ και ν αντιπροσωπεύουν την πίεση, την πυκνότητα του ρευστού και το κινηματικό ιξώδες αντίστοιχα. Στις τυρβώδεις ροές η ταχύτητα κυμαίνεται τυχαία, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η εξαγωγή αποτελεσμάτων. Τελικά έχουμε μια προκύπτουσα εξίσωση στην οποία όλοι οι όροι υπολογίζονται κατά μέσο όρο για να δώσουν τον Reynolds. Η εξίσωση αυτή υπολογισμένη κατά μέσο όρο είναι των Navier-Stokes (Pope, 2000):

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}$$

2.2 Ομοιογένεια, στασιμότητα και ισοτροπία της τύρβης

Οι τυρβώδεις ροές υπάρχουν μόνο, όταν οι στατιστικές ροής είναι ανεξάρτητες από τον χρόνο. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι στάσιμες ροές δεν είναι σταθερές δεδομένου ότι η ταχύτητα αλλάζει. Η στασιμότητα δηλαδή υπονοεί ότι η μέση ροή είναι σταθερή και ως εκ τούτου είναι αρκετά χρήσιμο να εφαρμοστεί ο χρόνος υπολογισμού μέσου όρου σε αυτήν την κατηγορία ροών.

Μιλώντας τώρα για την ομοιογένεια των τυρβωδών πεδίων θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτή εμφανίζεται όταν οι στατιστικές ροής είναι ανεξάρτητες από τις συντεταγμένες του χώρου. Στην ομοιογενή ροή δηλαδή, ο όρος μεταφοράς στην εξίσωση της κινητικής ενέργειας της τύρβης είναι μηδέν:

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \right)}{\partial t} = 0$$

και οι μέσες κλίσεις ταχύτητας είναι σταθερές. Πηγαίνοντας τώρα στις ισότροπες ροές θα λέγαμε ότι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι η μέση ταχύτητα είναι μηδέν. Οι ισότροπες ροές χαρακτηρίζονται επίσης από ίσα μέγεθος του κανονικού αριθμού Reynolds καθώς επίσης και από πιέσεις που είναι περίπου ίσες με το μηδέν. Επιπλέον, η περίπτωση αποσύνθεσης της ισότροπης τύρβης εμφανίζεται όταν δεν υπάρχει καμία παραγωγή κινητικής ενέργειας. Τέλος, όσον αφορά το ποσοστό διασκεδασμού θα μπορούσαμε να πούμε ότι η θεωρία για την τοπική ισοτροπία μας δείχνει ότι στους υψηλούς αριθμούς Reynolds, οι μικρές δομές κλίμακας της τύρβης είναι στατιστικά στάσιμες, ισότροπες και ανεξάρτητες από τις μεγάλες κλίμακες.

2.3 Πειράματα πάνω στην παραγωγή ισότροπης ομοιογενής τύρβης στο παρελθόν

Ξεκινώντας είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονίσουμε ότι ισότροπη ομοιογενής τύρβη μικρής κλίμακας έχει παραχθεί μέσω διαφόρων πειραματικών τεχνικών. Ένας από τους πιο συνήθεις τρόπους για την παραγωγή αυτού του είδους τύρβης είναι το πλέγμα με ταλάντωση. Η αρχή λειτουργίας αυτής της κατασκευής είναι ένα πλέγμα το οποίο ταλαντώνεται μέσα στη δεξαμενή και παρέχει στο ρευστό, στο οποίο βρίσκεται μέσα το πλέγμα, κινητική ενέργεια παράγοντας σχεδόν ισότροπη τύρβη σε αποστάσεις αρκετά μακριά από το πλέγμα.

Δύο από τους πρώτους επιστήμονες που ασχολήθηκαν και μελέτησαν το φαινόμενο της ισότροπης τύρβης ήταν ο Thompson και ο Turner το 1975. Αυτοί οι δύο επικεντρώθηκαν στην ποικιλία των πειραματικών παραμέτρων πάνω στα τυρβώδη χαρακτηριστικά που παράγονται από ένα ταλαντωμένο πλέγμα. Τα πειράματα τα οποία έκαναν, έλαβαν χώρα σε μια Perspex δεξαμενή, χρησιμοποιώντας συχνότητες από 2 έως 5 Hz καθώς και εύρη μεταξύ 10 έως 15 χιλιοστών. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένα περιστρεφόμενο θερμό φιλμ για να μετρήσει τις διακυμάνσεις της ταχύτητας και φωτογραφίες για να ερευνήσουν τα διαφορετικά καθεστώτα ροής τα οποία παράγονται από κυκλικά και τετραγωνικά πλέγματα. Το πλέγμα ταλαντώνεται από την τυρβώδη ροή που παράγεται από τις δέσμες που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ της ταχύτητας της τύρβης και η συχνότητα ταλάντωσης του πλέγματος εξαρτώνται από την διαμόρφωση του πλέγματος. Τέλος λοιπόν, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι δύο αυτοί μελετητές μας δείχνουν την καθολική φύση της τύρβης που παράγεται από ένα ταλαντούμενο πλέγμα.

Στα επόμενα χρόνια και άλλοι επιστήμονες ασχολήθηκαν με την μελέτη αυτού του φαινομένου με κάποιες όμως διαφοροποιήσεις. Αυτοί ήταν οι Hopfinger και Toly (1976), de Silva και Fernando (1992) με παρόμοιες συσκευές. Οι δύο πρώτοι χρησιμοποίησαν μέτρηση του ανέμου καυτών και διαγώνιων καλωδίων για να βρουν ακριβώς την χωρική αποσύνθεση. Τελικά διαπίστωσαν ότι η κινητική ενέργεια της τύρβης αποσυντέθηκε ως νόμος δύναμης. Το 1979 ο Mc Dougall χρησιμοποίησε το LDV για να μετρήσει την ένταση της τύρβης σε μια περιοχή κοντά στο πλέγμα. Επιπλέον παρατήρησε ότι η ανομοιομορφία της τύρβης δεν συσχετίζεται άμεσα με την γεωμετρία του πλέγματος. Ένα χρόνο περίπου αργότερα, το (1980) δύο άλλοι μελετητές, οι Dickey και Mellor χρησιμοποίησαν έναν μηχανισμό ρυμούλκησης του πλέγματος έτσι ώστε να μελετήσουν την τύρβη στις ουδέτερες και στρωματοποιημένες επιφάνειες. Έτσι λοιπόν έφτιαξαν ένα πλέγμα το οποίο αποτελούνταν από στρόγγυλους φραγμούς με την απόσταση ανάμεσα τους να είναι 5 εκατοστά και ρυμουλκήθηκε κάθετα από μια δεξαμενή με σκοπό να μελετηθεί η ένταση της τύρβης

με τη βοήθεια μιας φωτογραφικής μηχανής. Η ροή που υπήρχε είχε έναν αρκετά υψηλό βαθμό ισοτροπίας και οι ακέραιες κλίμακες μήκους ήταν ανάλογες προς την τετραγωνική ρίζα του χρόνου. Ωστόσο αυτό το πείραμα είχε ένα μεγάλο μειονέκτημα, καθώς μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί σε έναν μόνο τρόπο παραγωγής τύρβης, αυτόν με το ρυμουλκούμενο πλέγμα.

Στη συνέχεια, περίπου το 1984, ο Dickey και κάποιοι άλλοι χρησιμοποίησαν μια παραλλαγή της προηγούμενης συσκευής με το πλέγμα ταλάντωσης, έτσι ώστε να ερευνήσουν την σχέση μεταξύ της τύρβης και του αερίου πέρα από την διεπαφή αερίου-νερού. Τα πειράματα αυτά εκτελέστηκαν σε μια δεξαμενή Plexiglas με ένα ταλαντευμένο πλέγμα 5 εκατοστών που χρησιμοποιήθηκε σε διαφορετικά μήκη, συχνότητες και αποστάσεις από την διεπιφάνεια. Οι μετρήσεις της ταχύτητας της τύρβης έγιναν πάλι με την βοήθεια φωτογραφιών. Τέλος οι διακυμάνσεις της ταχύτητας της τύρβης, που μειώνονταν με την απόσταση από το πλέγμα, καθώς και η ακέραια κλίμακα μήκους λ , αυξήθηκαν γραμμικά με την απόσταση από το πλέγμα. Φεύγοντας από τους δύο αυτούς επιστήμονες έχουμε το 1987 δύο άλλους τον Brumley και τον Jirka οι οποίοι μελέτησαν τις τυρβώδεις δομές οι οποίες παράγονταν από το ταλαντούμενο πλέγμα μέσα στην επιφάνεια στρώμα μιας ελεύθερης διεπιφάνειας υγρού-αερίου. Τα αποτελέσματα που είχαμε από αυτό το πείραμα ήταν γενικά συγκρίσιμα με τα προηγούμενα θεωρητικά αποτελέσματα, ενώ οι αποκλίσεις οφείλονταν σε ανακρίβειες πάνω στις ακέραιες μετρήσεις κλίμακας μήκους που προκαλούνται από την πολύ μεγάλη κυκλοφορία που παράγονταν μέσα στην δεξαμενή.

Αργότερα και συγκεκριμένα το 1994 οι De Silva και Fernando ασχολήθηκαν και μελέτησαν τα φάσματα συχνότητας Euler στην στάσιμη τύρβη που παράγεται από κάθετο ταλαντούμενο πλέγμα. Για το πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο δεξαμενές και τα πλέγματα, τα οποία τοποθετήθηκαν με την βοήθεια ενός μηχανισμού, με μια μεταβλητή ταχύτητα και παρήγαγαν τύρβη μέσα στις δεξαμενές. Η ταχύτητα μετρήθηκε με το LDV, ενώ οι μετρήσεις της στάσιμης τυρβώδους ροής έγιναν κατά μήκος της κάθετης κεντρικής γραμμής της δεξαμενής. Τα αποτελέσματα που είχανε έδειξαν ότι η σχεδόν ισοτροπική με μηδενική μέση ταχύτητα τύρβη παράχθηκε με μια οριζόντια στην κατακόρυφο $vr.m.s$, αναλογία ταχύτητας (v/v). Η τύρβη άρχισε να διαλύεται με την λήξη των ταλαντώσεων του πλέγματος. Ωστόσο ο προσδιορισμός για την ακριβή πορεία της κινητικής ενέργειας της τύρβης δεν ήταν δυνατός λόγω της δυσκολίας στον εντοπισμό των διαφορετικών περιοχών αποσύνθεσης.

Στην συνέχεια είχαμε μια καινοτομία από τον Cheng και τον Law το 2001, οι οποίοι χρησιμοποίησαν την ψηφιακή εικόνα ταχύτητας μορίων (DPIV) για να ερευνήσουν την παραγμένη τύρβη στο πλέγμα. Αυτή η τεχνική μέτρησης επιτρέπει την πιο λεπτομερή έρευνα στην δομή της ροής στην κοντινή περιοχή του πλέγματος και επιπλέον διευκολύνει πάρα πολύ στην αξιολόγηση του χωρικού συσχετισμού των διακυμάνσεων της ταχύτητας. Το πλέγμα τοποθετήθηκε στη μέση της δεξαμενής του γυαλιού με τέσσερις μπάρες χάλυβα. Επιπλέον μια μηχανή ελεγχόμενης

ταχύτητας λειτουργούσε το πλέγμα και το μετακινούσε σε μια απόσταση τεσσάρων εκατοστών σε ένα εύρος συχνοτήτων από (1-4) Hz. Τα αποτελέσματα τα οποία πήρανε έδειξαν ότι κοντά στο πλέγμα οι διακυμάνσεις της ταχύτητας ήταν μέγιστες, το οποίο οφείλεται πιθανότατα στην αλληλεπίδραση των δινών που υπήρχαν στις κάθετα ευθυγραμμισμένες μπάρες. Το πιο σημαντικό είναι ότι, ομοιογενής τύρβη σε οριζόντιο επίπεδο επιτεύχθηκε μόνο σε απόσταση που ισοδυναμεί με τρία μεγέθη πλέγματος από το κύριο πλέγμα. Τέλος, η χωρική παραλλαγή των διακυμάνσεων της ταχύτητας και οι ακέραιες κλίμακες μήκους ήταν σε συμφωνία με τα προηγούμενα πειραματικά αποτελέσματα.

Εκτός τώρα από την παραγωγή τύρβης με την βοήθεια του ταλαντωμένου πλέγματος χρησιμοποιήθηκαν και άλλες τεχνικές για την παραγωγή και μελέτη σχεδόν ισότροπης τύρβης στον εργαστήριο.

Πρώτος ο Semenov το 1965 χρησιμοποίησε αναμίκτες για να παράγει τεχνητά ένα τυρβώδες πεδίο αέρα σε μια κλειστή περιοχή και έβγαλε αποτελέσματα πολλαπλών πιέσεων και πυκνότητας μέσα σε έναν κλειστό όγκο γύρω από το κέντρο της περιοχής και τους τυρβώδεις συντελεστές μήκους κλίμακας και διάχυσης. Η εγκατάσταση ήταν τέσσερις χωριστά ελεγχόμενοι αναμίκτες που ο καθένας είχε οχτώ λεπίδες και τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να κοιτάνε μια σφαιρική επιφάνεια. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένα θερμοηλεκτρικό ανεμόμετρο που διάβαζε, με την επίλυση μιας σειράς εξισώσεων που αφορούν την μεταφορά ενέργειας από μια θερμαινόμενη ίνα, τις στιγμιαίες ταχύτητες. Ωστόσο, αυτή η εξίσωση έδινε κατά προσέγγιση λύσεις για τις αληθινές μετρήσεις της ταχύτητας και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα από αυτό το πείραμα είχαν υψηλή αβεβαιότητα.

Την χρονολογία 1996 ένας άλλος μελετητής, ο Birouk και κάποιοι άλλοι έκαναν ένα πείραμα το οποίο μοιάζει αρκετά με το πείραμα στο οποίο αναφέρεται η συγκεκριμένη εργασία. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές χρησιμοποίησαν μια τετραγωνική περιοχή και τοποθέτησαν οχτώ περιστρεφόμενους ανεμιστήρες σε σχήμα κύβου, με σκοπό να παράγουν ισότροπη και ομοιογενή τύρβη στον αέρα με σχεδόν μηδενική μέση ταχύτητα. Αυτό το πείραμα έδωσε την δυνατότητα να μελετηθούν τα αποτελέσματα της τύρβης στα ποσοστά εξάτμισης των σωματιδίων. Επίσης, η ταχύτητα περιστροφής των ανεμιστήρων ήταν ποικίλη για να παράγει μια σειρά εντάσεων για την τύρβη. Οι ενιαίες μετρήσεις ταχύτητας για το κάθε σημείο μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας το **Laser Doppler Velocimetry** (LDV). Επιπλέον, η τύρβη που παράχθηκε με τις διάφορες ταχύτητες περιστροφής των ανεμιστήρων βρέθηκε να είναι ισότροπη και ομοιογενής γύρω από μια σφαιρική επιφάνεια στο κέντρο του κύβου 40 χιλιοστών. Οι μέσες οριζόντιες και κάθετες ταχύτητες ήταν πολύ κοντά στο μηδέν και η ορθογώνια ένταση διακύμανσης της ταχύτητας ήταν από 0,95-1,05 για κάθε ένα επίπεδο έντασης. Εκτός απ αυτό, οι διακυμάνσεις της ταχύτητας και η ένταση της

τύρβης αυξήθηκαν γραμμικά, ανάλογα με την ταχύτητα των ανεμιστήρων. Τέλος, η ακέραια κλίμακα μήκους βρέθηκε να είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα περιστροφής των ανεμιστήρων.

Στη συνέχεια το 2001, οι Hwang και Eaton ασχολήθηκαν και μελέτησαν τα αποτελέσματα των στερεών μορίων από την ισοτροπική ομοιογενή τύρβη στον αέρα σε ένα περιβάλλον μικροβαρύτητας. Γενικά η εγκατάσταση αποτελούνταν από ένα κυβικό κιβώτιο Plexiglas στο οποίο στις ακμές του ήταν τοποθετημένες συσκευές που παρήγαγαν τύρβη. Οι συσκευές αυτές ήταν μεγάφωνα, τα οποία παρήγαγαν συνθετικές παλλόμενες δέσμες. Αυτή η πειραματική οργάνωση είχε σαν αποτέλεσμα να παράγει μιας μηδενικής ροής μάζας κίνηση για το μόριο, αφού δεν υπήρχε καμία δυσμενής αλληλεπίδραση μεταξύ της παραγωγικής πηγής που παρήγαγε την τύρβη και των μορίων. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το PIV το οποίο παρείχε διδιάστατες εικόνες για τις μετρήσεις της ταχύτητας των μορίων. Οι μετρήσεις της ταχύτητας της τύρβης λήφθηκαν από κάθε μεγάφωνο το οποίο ακολουθούσε ένα ημιτονοειδές σήμα των 100 Hz. Βασικά, η ροή που υπήρχε και που παράχθηκε από τα οχτώ μεγάφωνα βρέθηκε να είναι σχεδόν ισότροπη και ομοιογενής κοντά στο κέντρο του κύβου. Επιπλέον, η αναλογία των ορθογώνιων διακυμάνσεων u/v της ταχύτητας σε αυτήν την περιοχή ήταν γενικά από 0,9-1,1. Επίσης η ροή είχε μια αρκετά ομοιόμορφη διανομή της κινητικής ενέργειας της τύρβης. Τέλος, τα αποτελέσματα από το πείραμα αυτό έδειξαν ότι οι κυμαινόμενες ταχύτητες μειώνονται σχετικά γρήγορα, αλλά ακόμα και σε αυτή την περίπτωση η τύρβη είναι αρκετά ισότροπη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

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

3.1. Πειραματικός εξοπλισμός

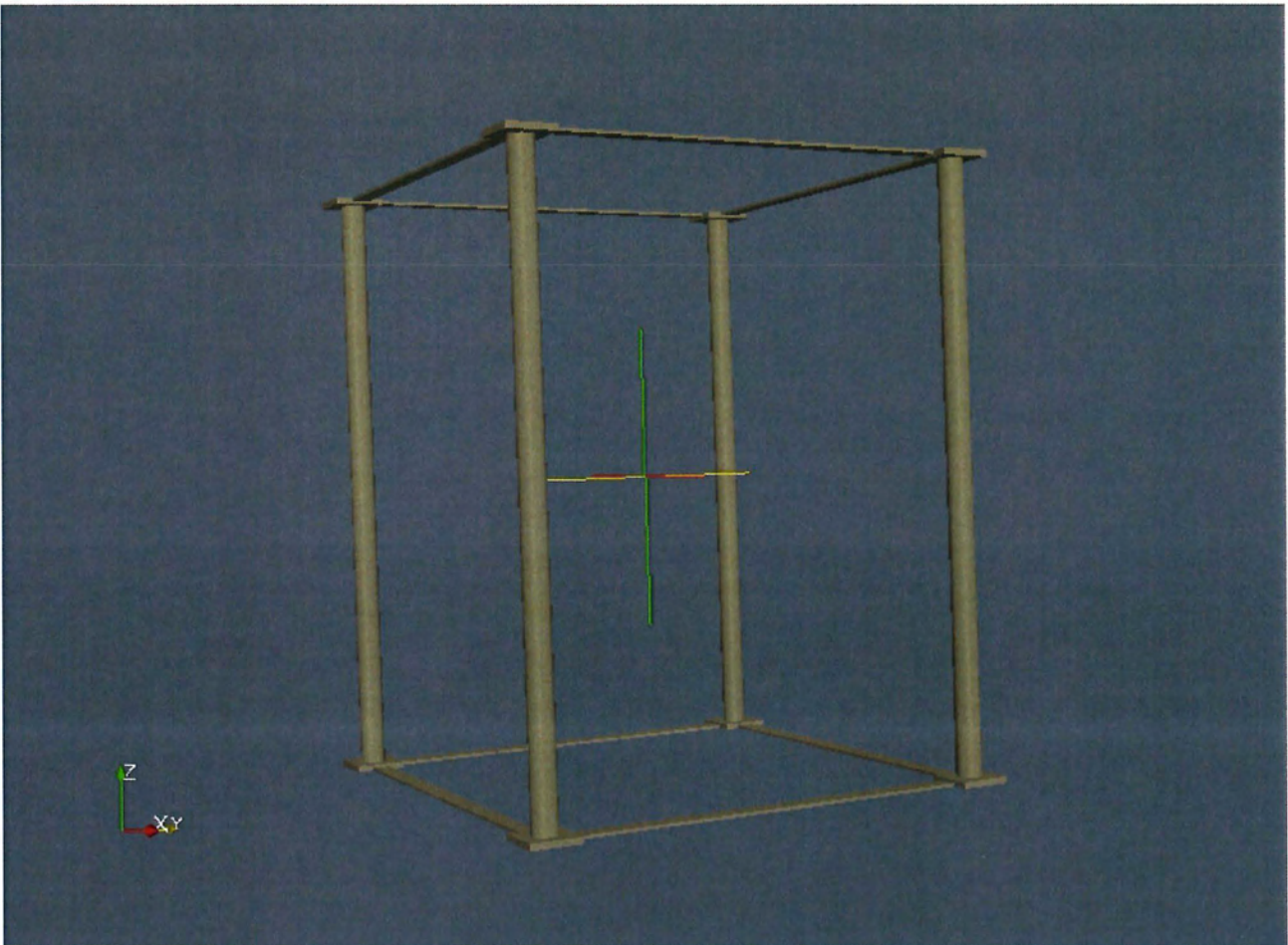
Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος “ανοιχτού” θαλάμου, όπως έχει αναφερθεί και στην βιβλιογραφία. Ως μέσο παραγωγής της τυρβώδους ροής επιλέχθηκαν 8 ηχεία, τα οποία τοποθετήθηκαν πάνω σε μεταλλικό πλαίσιο, έτσι ώστε να σχηματίζουν έναν κύβο, στο κέντρο του οποίου θα υπάρχει παραγωγή ομογενούς ισότροπης τύρβης. Για τον σκοπό του πειράματος τοποθετήθηκαν στα ηχεία χωνιά. Στην παρακάτω εικόνα (εικ.1) φαίνεται το πλαίσιο με τοποθετημένα ηχεία.



Εικόνα 1- Τοποθετημένα ηχεία στο πλαίσιο

3.1.1 Θάλαμος τύρβης

Ο “ανοιχτός” θάλαμος τύρβης , τοποθετήθηκε πάνω σε ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο μεταλλικό πλαίσιο διαστάσεων (1440mm)x(1440mm)x(1950mm) όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα (εικ.2). Η πρόσβαση , καθώς και η οπτική επαφή ήταν δυνατή και από τις τέσσερις πλευρές του πλαισίου, καθώς και απο την επάνω βάση του. Ο θάλαμος σε σχήμα κύβου που σχηματίστηκε είχε διαστάσεις (60mm) x (60mm) x (60mm). Οι διαστάσεις αφορούν τις αποστάσεις μεταξύ των ακροφυσίων των χωνιών.

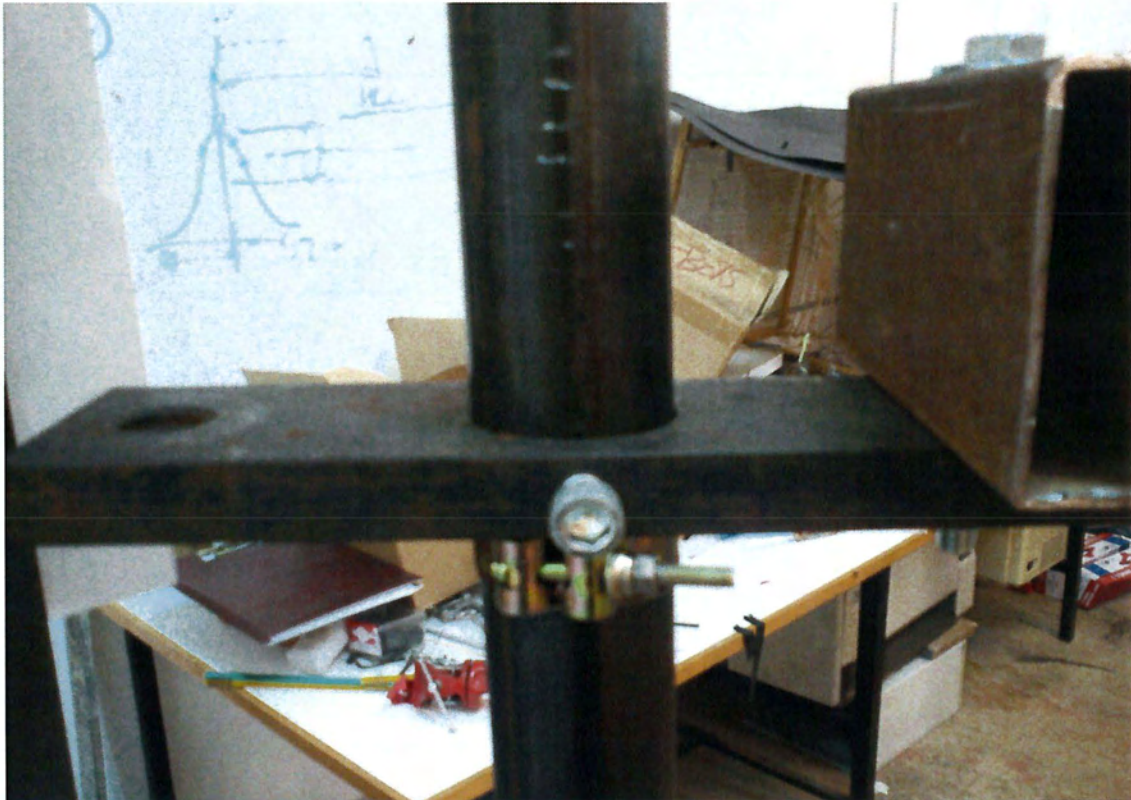


Εικόνα 2- Σχέδιο μεταλλικού πλαισίου

Σε κάθε κατακόρυφο στύλο του πλαισίου τοποθετήθηκαν δύο βάσεις ρυθμιζόμενες καθ' ύψος και περιστρεφόμενες (δυνατότητα πλήρους περιστροφής 360 μοιρών), οι οποίες για επιπλέον στήριξη και ασφάλεια τοποθετήθηκαν πάνω σε μεταλλικούς σφιγκτήρες (εικ.3).

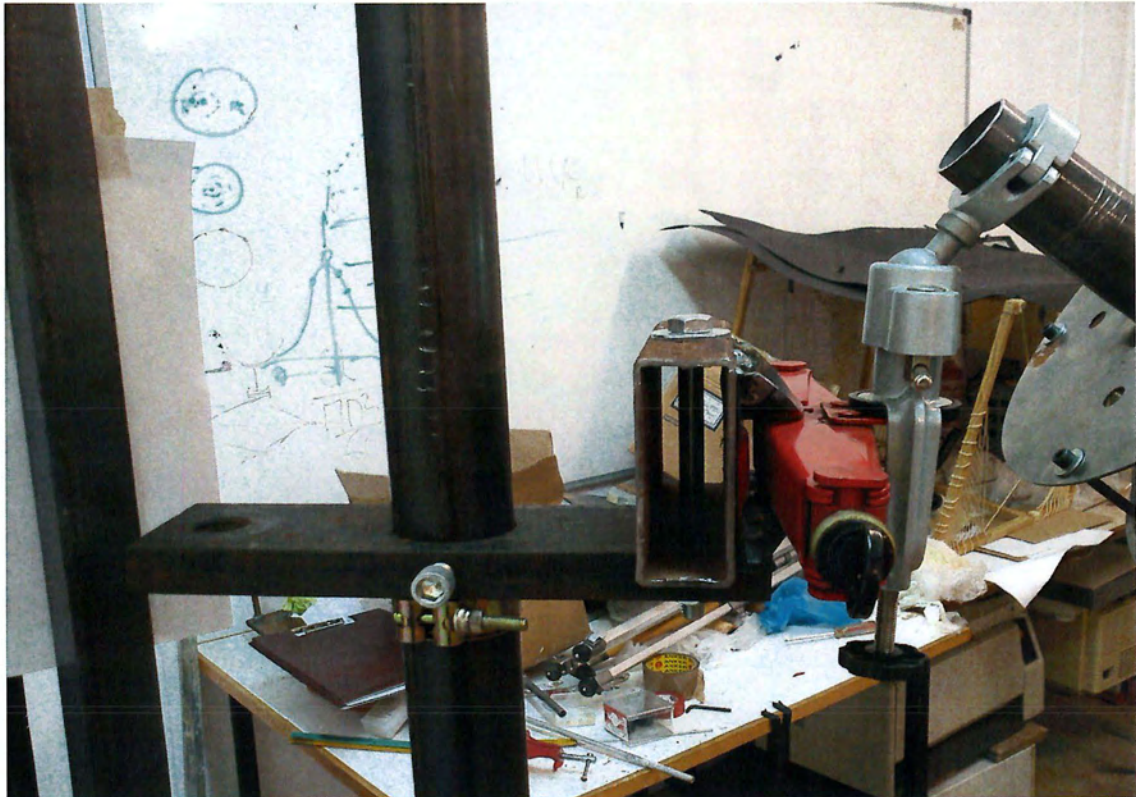
Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν κατακόρυφες σταθερές βάσεις πάνω στις προηγούμενες περιστρεφόμενες με σκοπό την προσαρμογή , πάνω τους, γρύλλων αυτοκινήτου. Οι γρύλλοι έδιναν την δυνατότητα αλλαγής της οριζόντιας απόστασης του ηχείου απο το στύλο στον οποίο στηρίζε-

ται , και συνεπώς και απο τα υπόλοιπα ηχεία στους υπόλοιπους στύλους. Στην περίπτωση που περιγράφεται , οι γρύλλοι ήταν κλειστοί, με σκοπό την μέγιστη αποσταση μεταξύ των ηχείων και την επίτευξη των διαστάσεων (60mm) x (60mm) x (60mm).



Εικόνα 3- Μεταλλικοί σφιγγκήρες

Τέλος, στην άκρη του κάθε γρύλλου τοποθετήθηκε βάση τραπεζίου, στην κατάληξη της οποίας τοποθετήθηκε η διάταξη του ηχείου (εικ.4).



Εικόνα 4- Γρύλλος με τοποθετημένη τη βάση τραπεζίου

3.1.2 Ηχεία : Προδιαγραφές και τοποθέτηση

Στα πειράματα που διενεργήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν ηχεία τύπου woofer και μάρκας **SPHYNX**. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα ηχεία **SP-W200-PP** (εικ.5), των συγκεκριμένων προδιαγραφών:

- ΒΑΡΟΣ (Συνολικό) : 1400 g
- ΒΑΡΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗ : 540 g
- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ : 200 mm
- ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗ : 100 mm
- ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ : 8 Ohm
- ΙΣΧΥΣ (RMS) : 60 Watt
- ΙΣΧΥΣ (max) : 150 Watt
- ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΣΟΔΟΥ : 45 Hz – 5000 Hz
- ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ : 91 dB SPL (Sound Pressure Level)



Εικόνα 5- Ηχείο SP-W200-PP

Τα ηχεία , με τη βοήθεια του μαγνήτη στη βάση τους, τοποθετήθηκαν και σταθεροποιήθηκαν αξονοσυμμετρικά στο κέντρο μεταλλικών δίσκων. Στη συνέχεια , τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια των ηχείων χωνιά τα οποία σταθεροποιήθηκαν μέσω μεταλλικών δακτυλίων , οι οποίοι συνδέθηκαν μέσω κοχλοσύνδεσης με τους μεταλλικούς δίσκους στη βάση των ηχείων. Η διάμετρος του στομίου εξόδου της ροής , που συμπίπτει με την διάμετρο του στομίου του χωνιού είναι 14mm. Τέλος, στην ελεύθερη επιφάνεια των κυκλικών μεταλλικών δίσκων τοποθετήθηκε, αξονοσυμμετρικά και με ηλεκτροσυγκόλληση, μεταλλικός κύλινδρος με σκοπό την τοποθέτησή της όλης διάταξης στην βάση τραπέζιου. Με αυτό τον τρόπο, τα ηχεία εγκαταστάθηκαν επάνω στο μεταλλικό πλαίσιο.

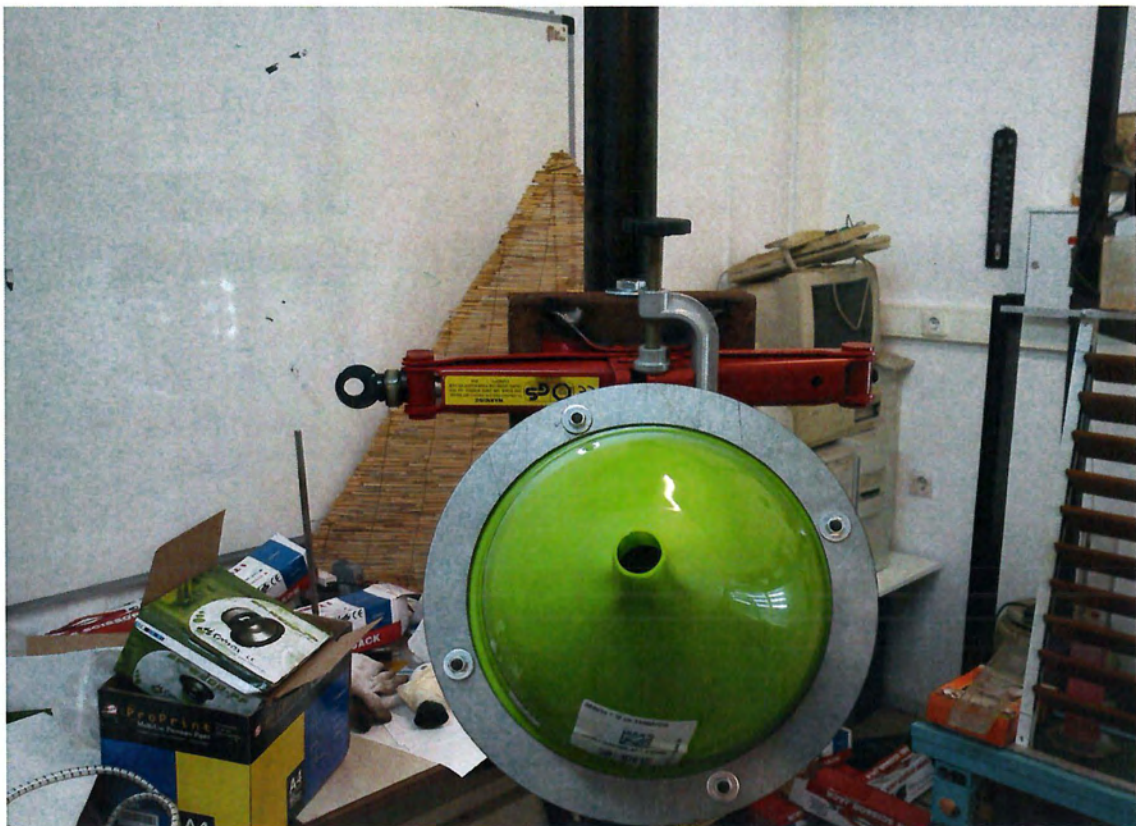
Στις παρακάτω εικόνες (εικ. 6), (εικ. 7) φαίνεται η διάταξη του ηχείου, αφού έχει ασφαλιστεί στην βάση τραπέζιου.

Αντικατάσταση ηχείων

Κατα τη διάρκεια δοκιμών, λόγω χαμηλών συχνοτήτων και μη κατάλληλης αποδέσμευσης των ηχείων από τους ενισχυτές, τέσσερα ηχεία καταστράφηκαν και χρειάστηκε η αντικατάστασή τους.



Εικόνα 6- Διάταξη ηχείου



Εικόνα 7-- Διάταξη ηχείου

3.1.3 Ενισχυτές και σύνδεση ηχείων

Ο αρχικός προγραμματισμός των πειραμάτων αφορούσε τη χρησιμοποίηση δύο (2) ενισχυτών , με σκοπό την σύνδεση 4 ηχείων στον καθένα. Οι ενισχυτές **AMM-2000** δύο καναλιών, τροφοδοτούνταν απο μπαταρία αυτοκινήτου , η οποία συνδέονταν με τους ενισχυτές διαμέσω ενός διακόπτη (ON/OFF). Σκοπός της χρήσης του διακόπτη ήταν η εύκολη αποκοπή της τροφοδοσίας , ώστε να μην αποφορτίζεται συνεχώς η μπαταρία.

Προδιαγραφές ενισχυτών **AMM-2000** :

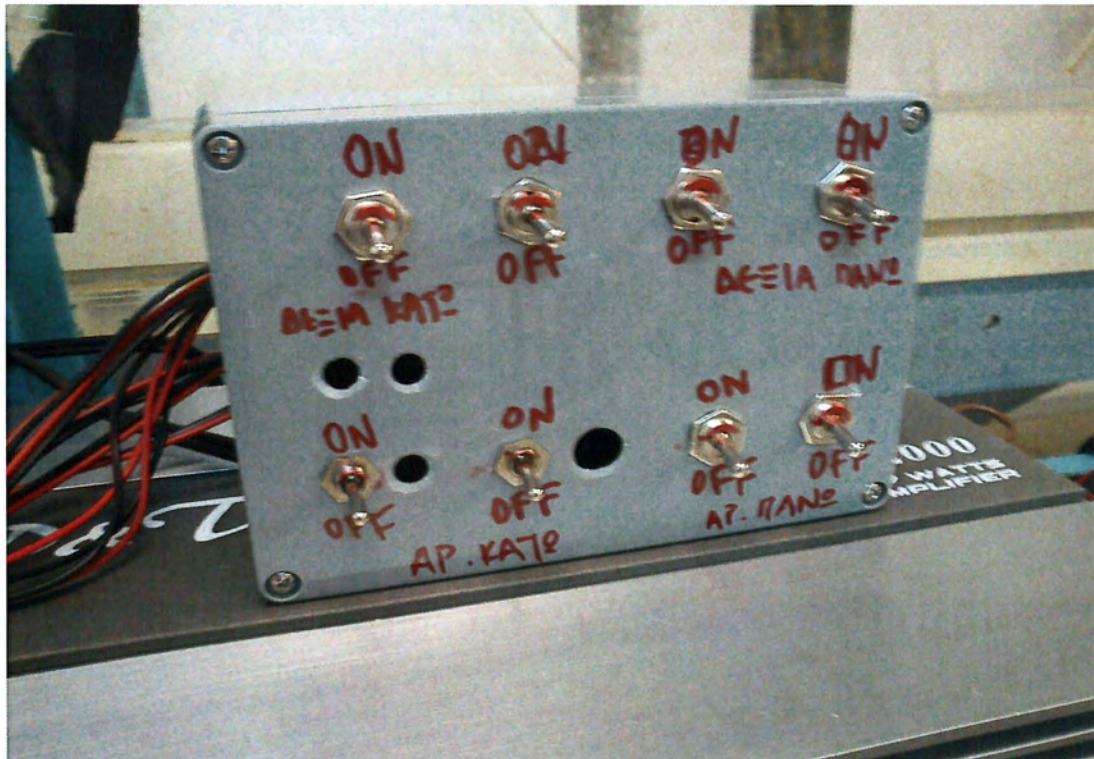
- ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ : (320mm)x(245mm)x(50mm)
- ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΝΑΛΙΩΝ : 2
- ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ (max) : 800 Watt X 2
- ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ (rms) : 200 Watt X 2
- ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ : 25 Hz – 20000 Hz (Ανοχή : +/- 1.2 dB)

Τελικά χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής 2 καναλιών , ισχύος 100 Watt σε κάθε κανάλι, τροφοδοτούμενος από εναλλασόμενο ρεύμα 230 V.

Σύνδεση Ηχείων

Παράλληλη σύνδεση: Ο αρχικός προγραμματισμός , όπως προαναφέρθηκε, είχε σκοπό την παράλληλη σύνδεση τεσσάρων (4) ηχείων σε κάθε ενισχυτή . Ανά δύο τα ηχεία συνδέθηκαν σε ένα κανάλι του ενός ενισχυτή. Για τα δύο κανάλια του κάθε ενισχυτή συνδέθηκαν οκτώ (8) ηχεία.

Για την παρειτέρω ασφάλεια των ηχείων, χρησιμοποιήθηκαν 8 διακόπτες (εικ. 8) , ένας για κάθε ηχείο, ώστε να αποδεσμεύονται από τον ενισχυτή όποτε κριθεί αναγκαίο.



Εικόνα 8– Διακόπτες αποδέσμευσης ηχείων

Σύνδεση ηχείων σε σειρά: Με την αλλαγή του ενισχυτή, και τη χρησιμοποίηση ενός ενισχυτή για όλα τα ηχεία, επιλέχθηκε ,ως καλύτερη και πιο ασφαλής λύση, η σύνδεση των ηχείων σε σειρά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα ηχεία στην επάνω θέση του πλαισίου συνδέθηκαν με τον πρώτο ενισχυτή, ενώ αυτά της κάτω θέσης στον δεύτερο . Σε κάθε κανάλι του ενισχυτή συνδέθηκαν δύο ηχεία.

Ηχητικό σήμα

Για την παραγωγή ηχητικού σήματος ως είσοδο στον ενισχυτή , χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια τριγωνικών, τετραγωνικών και ημιτονοειδών παλμών, με εύρος συχνοτήτων 1 Hz – 999 Hz. Για την οπτικοποίηση του σήματος έγινε χρήση ηλεκτρικού παλμογράφου.

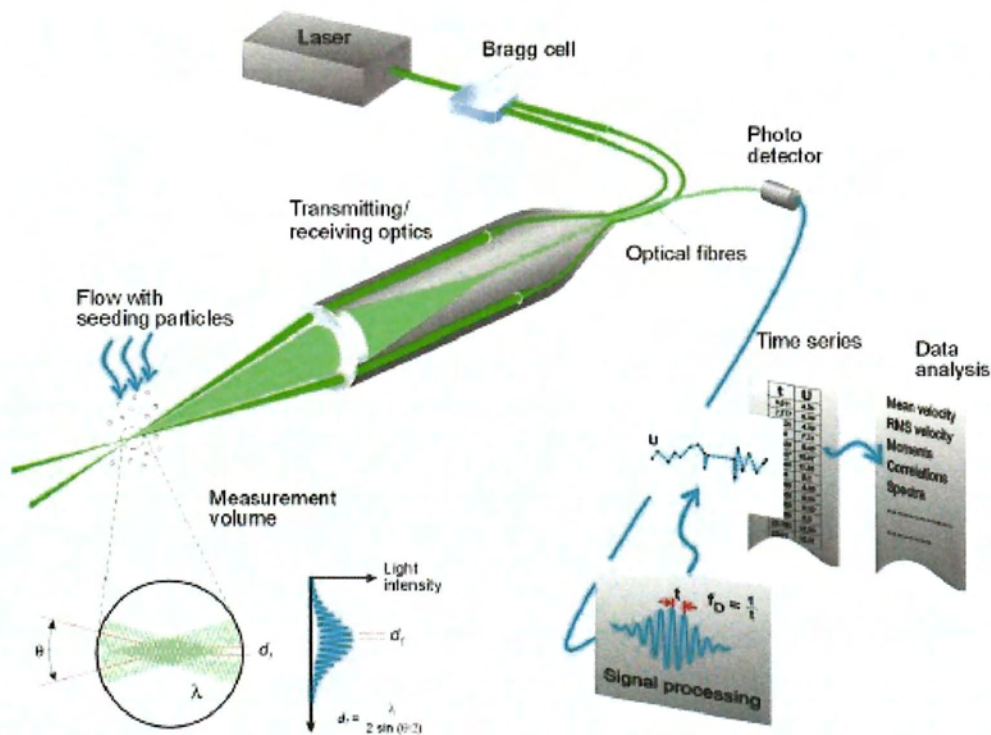
3.2 Συστήματα μέτρησης και οπτικοποίησης της ροής

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των παραμέτρων της ροής που μας ενδιαφέρουν, καθώς και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για να γίνει η οπτικοποίηση αυτής της ροής και η καταγραφή της.

3.2.1 Laser Doppler Velocimetry (LDV)

Αρχή λειτουργίας

Με τη χρήση του **LDV** ή **LDA** (Laser Doppler Anemometry) μετράται η ταχύτητα των μικρών σωματιδίων που κινούνται στο ρευστό που γίνεται αντικείμενο μελέτης. Υποθέτοντας ότι τα σωματίδια είναι μικρά, η ταχύτητα των σωματιδίων αυτών μπορεί να υποθεθεί ότι είναι και η ταχύτητα του ρευστού. Η φυσική αρχή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των ταχυτήτων των σωματιδίων είναι η σκέδαση του φωτός από τα σωματίδια. Το σημείο τομής των δύο δεσμών laser (για κάθε συνιστώσα της ταχύτητας) καταλήγει σε ένα μοτίβο από σειρές φωτεινών και σκοτεινών κροσσών. Καθώς ένα σωματίδιο κινείται μέσα στον όγκο μέτρησης, όταν διασχίζει ένα φωτεινό κροσσό διασκορπίζει φως, ενώ δε διασκορπίζει φως καθώς περνά έναν σκοτεινό κροσσό. Αυτό οδηγεί σε ένα κυμαινόμενο μοτίβο έντασης διάχυτου φωτός με συχνότητα ανάλογη προς την ταχύτητα των σωματιδίων. Δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ των κροσσών και ο χρόνος για το σωματίδιο να πάει από το έναν κροσσό στον επόμενο είναι γνωστά, η μετρούμενη συχνότητα του σήματος μπορεί να μετατραπεί σε ταχύτητα. Το σκεδαζόμενο φως συλλέγεται με φακό και μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα από τους σωλήνες φωτοπολλαπλασιαστών. Έτσι μετράται η συχνότητα του σήματος, που είναι γνωστή ως **συχνότητα Doppler f_D** , και στη συνέχεια υπολογίζεται με πολλαπλασιασμό της συχνότητας επί το πλάτος του κροσσού ΔF η ταχύτητα **u** .



Χαρακτηριστικά

Η συσκευή LDV που χρησιμοποιήθηκε, βασίζεται σε ένα Ar-Ion laser που εκπέμπει ακτίνα μήκους κύματος 514.5 nm. Η συνεχής ακτίνα εξόδου χωρίζεται σε δύο ακτίνες ίσης έντασης από ένα διαιρέτη δέσμης, καθώς και μια αλλαγή συχνότητας έως 40 MHz δημιουργείται από μια κυψέλη Bragg. Οι δύο ακτίνες ευθυγραμμίστηκαν και εστιάστηκαν στο εσωτερικό της ροής για να σχηματιστεί ένα μοτίβο κροσσών στο σημείο που μας ενδιέφερε η μέτρηση. Το σημείο αυτό ήταν το γεωμετρικό κέντρο του κύβου που σχημάτισαν τα ακροφύσια των χωνιών. Το σήμα από το διάσπαρτο φως συλλέχθηκε χρησιμοποιώντας ένα φωτοπολλαπλασιαστή και έναν επεξεργαστή συχνότητας συνδεδεμένο σε έναν Η/Υ.

Κεφαλή Laser (Melles Griot, LA300)	300 mW
Φωτοανιχνευτής (PDM 1000)	
Έυρος συχνοτήτων	0 Hz to 175 MHz
Μέγιστη ισχύς	3 mW
Μήκος κύματος	635 nm

Επεξεργαστής σήματος (FSA 3500)	
Έυρος συχνοτήτων	300 Hz to 1000 MHz
Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας	400 MHz
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	100 kHz
Μέγιστος αριθμός δειγμάτων /Burst	256
TR 60 Series Probe (Model TLN06-135)	
Μήκος κύματος	514.5 nm
Probe διάμετρος ακτίνας	2.65 mm
Probe Beam Spacing	50.0 mm
Απόσταση εστίασης φακού	122.2 mm
Διάμετρος φακού	61.5 mm
Αριθμητικό άνοιγμα	0.228
Γωνία διασταύρωσης ακτινών (Kappa)	10.7
Διάμετρος όγκου μέτρησης	34 μm
Μήκος όγκου μέτρησης	0.18 mm
Πλάτος κροσσών	1.39 μm
Αριθμός κροσσών	24
Probe μήκος	464.3 mm
Probe Διάμετρος	82.3 mm

Για τη δημιουργία σωματιδίων εντός της ροής (seeding), πάνω στα οποία θα μπορούσε να γίνει η μέτρηση ταχυτήτων από το LDV, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικό καπνογόνο χειρός, καθώς και λιβάνι για την παραγωγή πλουμίου.

3.2.2 Οπτικοποίηση της ροής

Για την οπτικοποίηση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε laser με κυλινδρικό φακό ή περιστρεφόμενο κάτοπτρο, με σκοπό την δημιουργία φωτεινού κατακόρυφου επιπέδου πάχους **3mm**.

Τα χαρακτηριστικά του λέιζερ είναι

- ΙΣΧΥΣ : $P_0 = 1,277 \text{ W}$
- ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ : $F = 10000 \text{ Hz}$
- ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ : $\lambda = 532 \text{ nm}$.

Για την καταγραφή της εικόνας χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) διαφορετικές ψηφιακές βιντεοκάμερες, οι οποίες στήθηκαν εκτός του μεταλλικού πλαισίου και εστίασαν στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου τύρβης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι των μετρήσεων, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τις μετρήσεις, καθώς και τα προγράμματα (software) που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό και την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

4.1. Μέτρηση ακουστικού πεδίου

Με τη χρήση ντεσιμπελόμετρου τύπου ‘**dBmeter Wohler**’ έγινε μέτρηση της έντασης του ήχου που παρήγαγαν τα οκτώ ηχεία. Η μέτρηση του πεδίου έγινε στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου, και οι παράμετροι μέτρησης αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα. Σκοπός αυτής της μέτρησης ήταν ο συσχετισμός της ακουστικής έντασης στο κέντρο με την ένταση της τύρβης εκεί.

<u>Ισχύς(W)</u>	<u>Συχνότητα (Hz)</u>	<u>Σήμα εισόδου (mV)</u>
25	40	±100
25	50	±100
25	60	±100
25	70	±100
25	73	±100
25	75	±100
25	80	±100
25	90	±100
25	100	±100
25	120	±100
25	140	±100
25	160	±100

Πίνακας 1-Παράμετροι μέτρησης έντασης ακουστικού πεδίου

4.2. Μέτρηση ταχύτητας με τη χρήση LDA (Laser Doppler Anemometer)

4.2.1. Μέτρηση ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου ενός ηχείου

Με τη χρήση του LDA, μετρήθηκε η ταχύτητα (U_{rms} και U_{mean}) στην έξοδο του ενός

ηχείου, έχοντας ως τροφοδοσία πλούμιο σωματιδίων δημιουργούμενο από την καύση λιβανιού. Η παραγωγή σωματιδίων ήταν αρκετά μεγάλη, ώστε το laser να μην έχει πρόβλημα τροφοδοσίας. Οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση **105mm** από την έξοδο της δέσμης (jet) και είχαν διάρκεια **200 sec** η καθεμία. Η τάση εξόδου του ηχείου ήταν ίση με **V=6,25 Volts**. Η ισχύς του ενισχυτή παρέμεινε η ίδια καθ'όλη την διάρκεια των πειραμάτων, ενώ η συχνότητα άλλαζε. Οι παράμετροι μέτρησης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Τα αποτελέσματα μπόρεσαν να εξαχθούν με τη χρήση του προγράμματος **Flowsizer**, και θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Σκοπός αυτής της μέτρησης ήταν να εξακριβωθεί η επίδραση της **συχνότητας f (Hz)**, στη συμπεριφορά μιας ξεχωριστής δέσμης ροής (jet) από το μεγάφωνο. Έτσι γίνονται γνωστές οι οριακές συνθήκες.

<u>ΙΣΧΥΣ (W)</u>	<u>ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)</u>	<u>Χρονος καταγραφης (sec)</u>
25	0	200
25	40	200
25	50	200
25	60	200
25	70	200
25	73	200
25	80	200
25	100	200
25	120	200
25	140	200

Πίνακας 2- Παράμετροι μέτρησης στην έξοδο του μεγαφώνου

4.2.2. Μέτρηση ταχύτητας στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου

Με τη χρήση του LDA μετρήθηκαν οι ταχύτητες U_{rms} και U_{mean} της ροής μέσα στο **τυρβώδες πεδίο** που παρήγαγε συνάντηση των δεσμών (jet) από τα οκτώ ηχεία. Η συγκεκριμένη μέτρηση είχε σκοπό τη συσχέτιση της έντασης της τύρβης στο κέντρο με τις παραμέτρους ανάμειξης/διάχυσης του ρύπου (πλούμιο). Η τροφοδοσία έγινε με πλούμιο σωματιδίων από την καύση λιβανιού. Το λιβάνι τοποθετήθηκε σε απόσταση **L=5cm** κάθετα από το σημείο μέτρησης των ταχυτήτων. Οι μετρήσεις χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες. Αρχικά η ισχύς διατηρήθηκε σταθερή στα **25W**, με τις συχνότητες να αλλάζουν, ενώ στη συνέχεια η συχνότητα του παλμού διατηρήθηκε σταθερή στα **40 Hz** με την ισχύ να εναλλάσσεται σε ένα εύρος τιμών. Οι παράμετροι μέτρησης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Τα αποτελέσματα μπόρεσαν να εξαχθούν με τη χρήση του προγράμματος **Flowsizer**, και θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

<u>Ισχύς(W)</u>	<u>Συχνότητα (Hz)</u>	<u>Σήμα εισόδου (mV)</u>	<u>Διάρκεια (sec)</u>
25	40	±100	200
25	60	±100	200
25	80	±100	200
25	100	±100	200
25	120	±100	200
25	140	±100	200

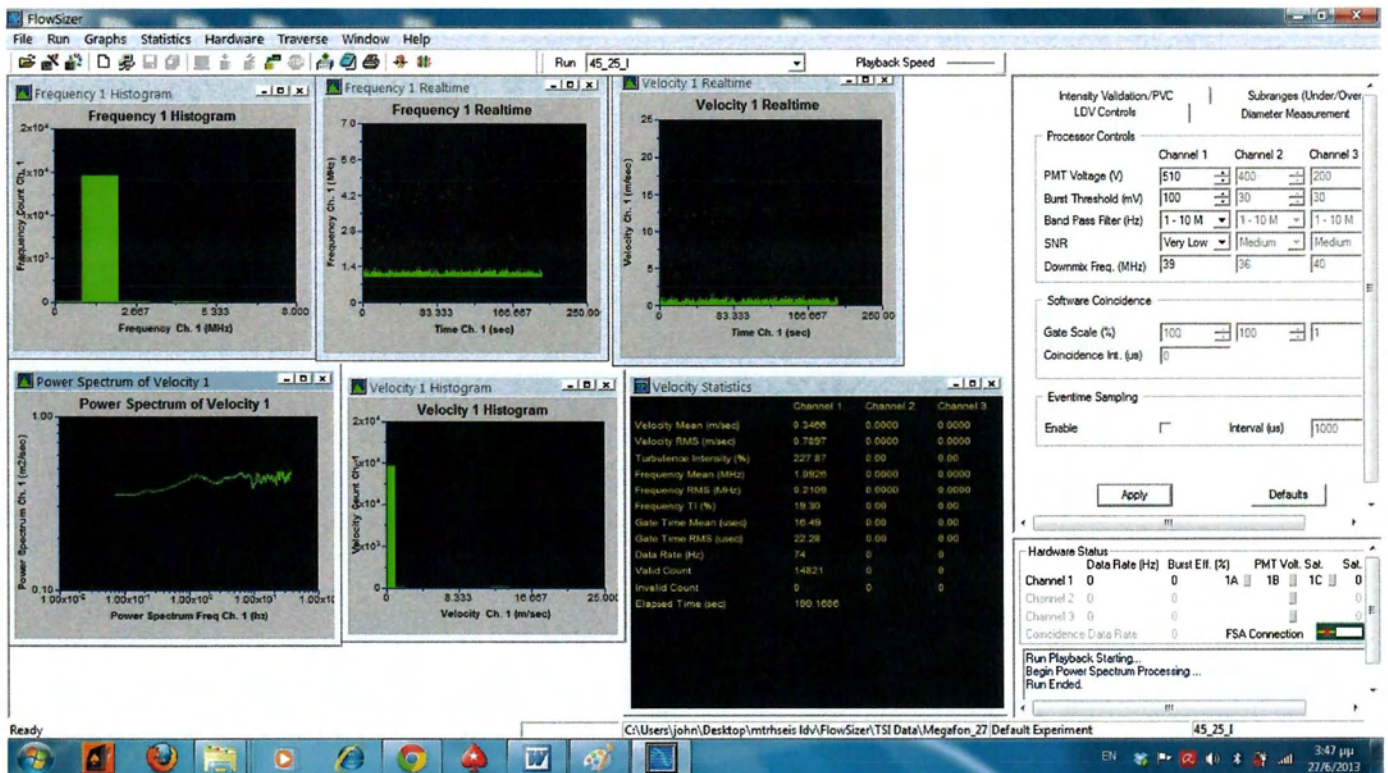
Πίνακας 3-Παράμετροι μέτρησης στο κέντρο ροής (σταθερή ισχύς)

<u>Ισχύς(W)</u>	<u>Συχνότητα (Hz)</u>	<u>Σήμα εισόδου (mV)</u>	<u>Διάρκεια (sec)</u>
1	40	±100	200
2.5	40	±100	200
5	40	±100	200
15	40	±100	200
10	40	±100	200
25	40	±100	200

Πίνακας 4 Παράμετροι μέτρησης στο κέντρο ροής (σταθερή συχνότητα)

4.2.3. Πρόγραμμα FLOWSIZER

Το πρόγραμμα Flowsizer, είναι ένα λογισμικό απόκτησης και ανάλυσης δεδομένων συστημάτων όπως το LDA και το PDPA. Είναι απλό στη χρήση του και μπορεί να μετατρέψει τα στατιστικά και τα δεδομένα των μετρήσεων σε αντίστοιχα γραφήματα, καθώς και να τρέξει από την αρχή την μέτρηση σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα μπορούν να εξαχθούν σε άλλες μορφές αρχείων , όπως **.dat** και **.xls** . Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται στιγμιότυπο από το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού.



4.3. Οπτικοποίηση της ροής

Η εξαγωγή και ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε βάσει της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (digital image analysis). Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι παράμετροι (συνθήκες) των πειραμάτων καθώς και η υπολογιστική διαδικασία (προγράμματα).

4.3.1 Πειραματική μεθοδολογία

Όπως προαναφέρθηκε, για την οπτικοποίηση της ροής χρησιμοποιήθηκε αρχικά ατμοπαραγωγός 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 $d=3,5\text{mm}$, ενώ η ταχύτητα εξόδου της ροής $U=4,17\text{ m/s}$. Η τυρβώδης αυτή ροή του ατμού έτεμνε κάθετα το επίπεδο φωτός, και ήταν παράλληλη στην επιφάνεια του δαπέδου (περίπτωση CROSS).

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ειδική αντίσταση (15 Watt) η οποία σε επαφή με ειδικό λάδι παρήγαγε καπνό υπό μορφή πλουμίου. Η ροή του καπνού υπήρξε κάθετη στο δάπεδο και παράλληλη στο επίπεδο φωτός. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, (περίπτωση ΠΛΟΥΜΙΟ), η ροή χωρίς την επίδραση του τυρβώδους πεδίου ήταν στρωτή.

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, και 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.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται ξεχωριστά για τις δύο περιπτώσεις στους παρακάτω πίνακες. Η ισχύς αναφέρεται στην ισχύ του ενισχυτή, ενώ η συχνότητα αναφέρεται στη συχνότητα του ηχητικού σήματος. Αναφέρεται, ότι σε όλη την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδές σήμα εισόδου.

«CROSS»

<u>Ισχύς(W)</u>	<u>Συχνότητα (Hz)</u>
0	-
25	50
25	60
25	70
25	73
25	75
25	80
25	90
25	100
25	120
25	140
25	160

Πίνακας 5- Παράμετροι περίπτωσης CROSS

«ΠΛΟΥΜΙΟ»

<u>Ισχύς(W)</u>	<u>Συχνότητα(Hz)</u>
0	-
25	40
25	50
25	60
25	70
25	73
25	75
25	80
25	90
25	100
25	120
25	140

Πίνακας 6-- Παράμετροι περίπτωσης ΠΛΟΥΜΙΟ

4.3.2. Υπολογιστική μεθοδολογία – διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων των πειραμάτων βασίστηκε στο γενικό πλαίσιο της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας με το λογισμικό MATLAB και freeware λογισμικό από το internet (Virtualdub, Irfan view). Η καταγραφή των πειραμάτων γινόταν στο σκληρό δίσκο της βιντεοκάμερας (HDD) , και στη συνέχεια τα αρχεία μεταφέρονταν μέσω καλωδίου σύνδεσης (usb) σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Στην περίπτωση του ατμοπαραγωγού ,η ανάλυση των αρχείων καθώς και των εικόνων που προέκυψαν από αυτά ήταν **720x576 pixels** . Ο ρυθμός δειγματοληψίας (frame rate) ήταν 25 καρέ το δευτερόλεπτο (**25 fps**), δηλαδή ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών ήταν με **0.04sec**. Η εξαγωγή των καρέ έγινε με τη βοήθεια του **Virtual Dub** , ενώ στη συνέχεια έγινε ‘κόψιμο’ των εικόνων καθώς και μετατροπή του φάσματος των χρωμάτων σε ‘grayscale’ με τη βοήθεια του προγράμματος **Irfanview**. Οι νέες εικόνες είχαν μέγεθος **270x300 pixels** , και σκοπός της προσαρμογής του μεγέθους ήταν η καλύτερη και πιο εστιασμένη στη ροή επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

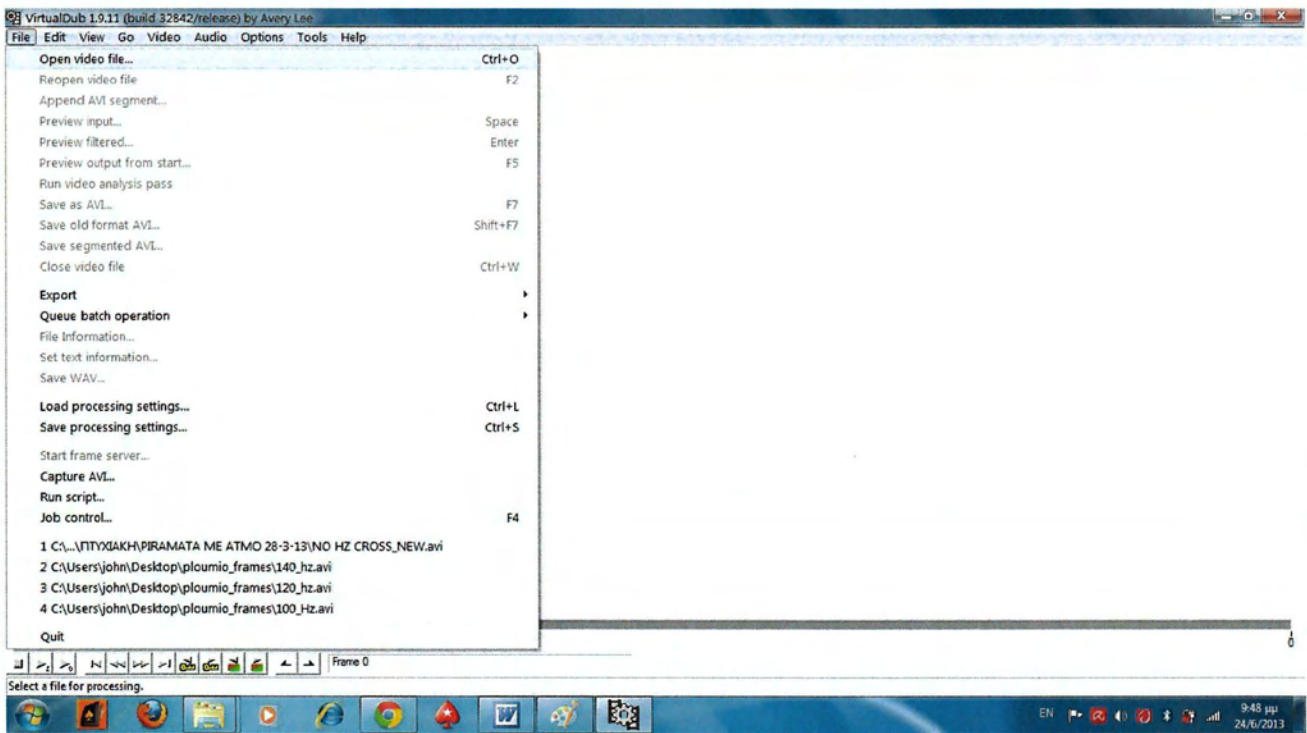
Στην περίπτωση της αντιστάσεως, η ανάλυση των αρχείων καθώς και των αντίστοιχων καρέ ήταν **720x576 pixels** ,ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας 30 καρέ το δευτερόλεπτο (**30 fps**) . Η εξαγωγή των καρέ έγινε με τη βοήθεια του **Virtual Dub** , ενώ στη συνέχεια έγινε ‘κόψιμο’ των εικόνων καθώς και μετατροπή του φάσματος των χρωμάτων σε ‘grayscale’ με τη βοήθεια του προγράμματος **Irfanview**. Οι νέες εικόνες είχαν μέγεθος **267x200 pixels**.

Και στις δύο περιπτώσεις, τα αρχεία εξόδου ήταν της μορφής **jpeg**.

Πρόγραμμα “Virtual dub”

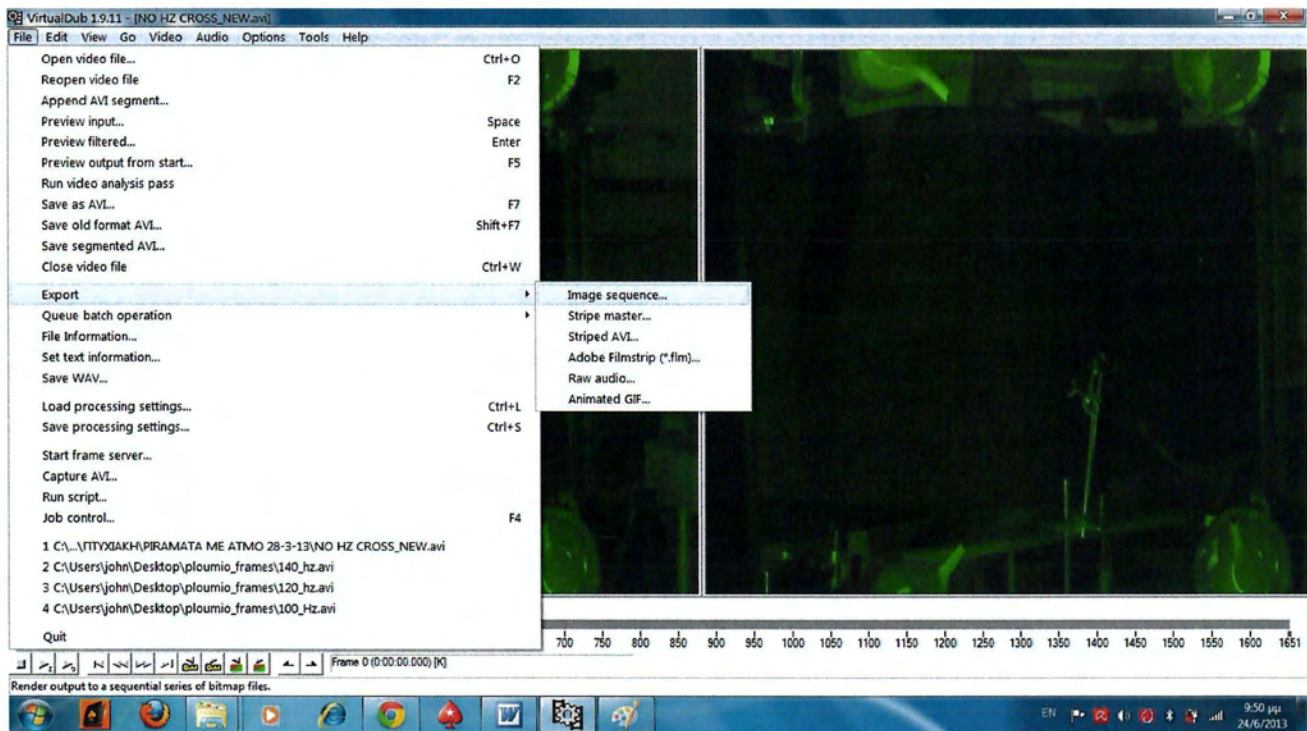
Για το ‘κόψιμο’ των εικόνων από τα αρχεία **avi** χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα **Virtual dub** το οποίο μετατρέπει κάθε καρέ του αρχείου **avi** σε μια φωτογραφία ,αρχείο τύπου **jpeg** ή οποιουδήποτε άλλου τύπου επιλεχθεί. Για να γίνει αυτό επιλέγεται:

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

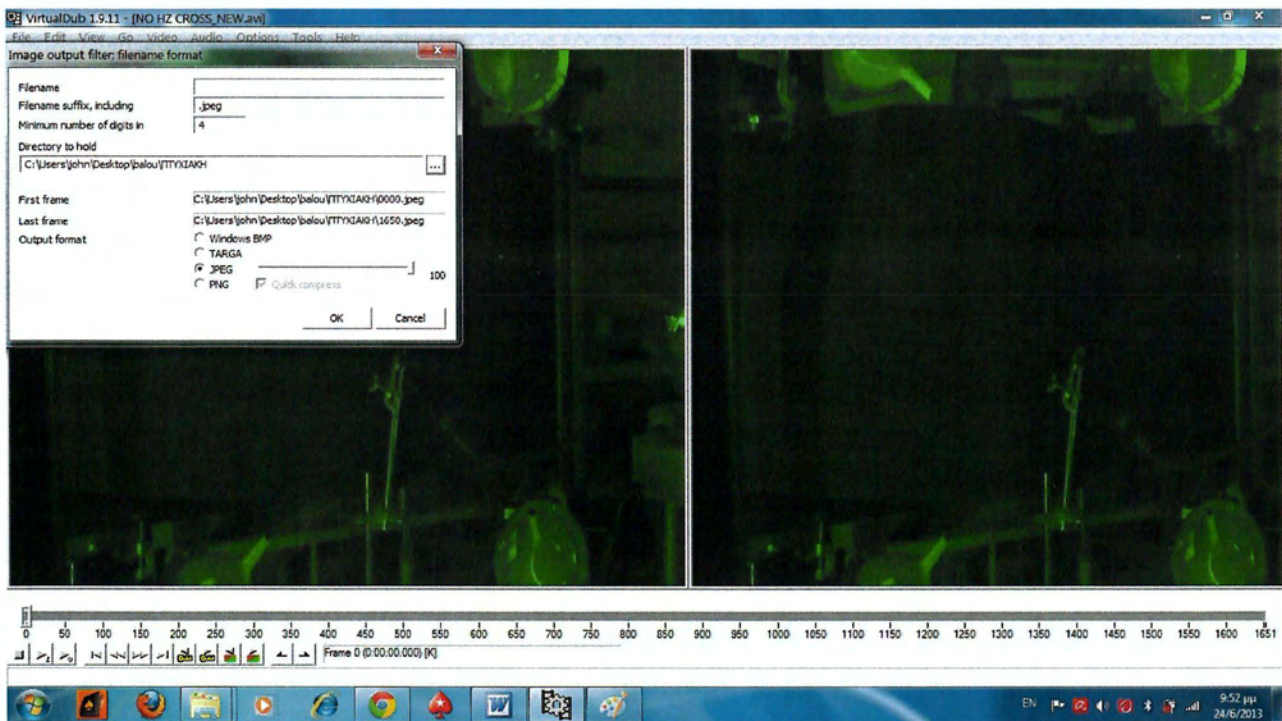


Αφού εισαχθεί το βίντεο που επιλέξαμε στο πρόγραμμα επιλέγουμε:

File → Export → Image Sequence



Επιλέγουμε το φάκελο προορισμού των καρτέ καθώς και τη μορφή τους.

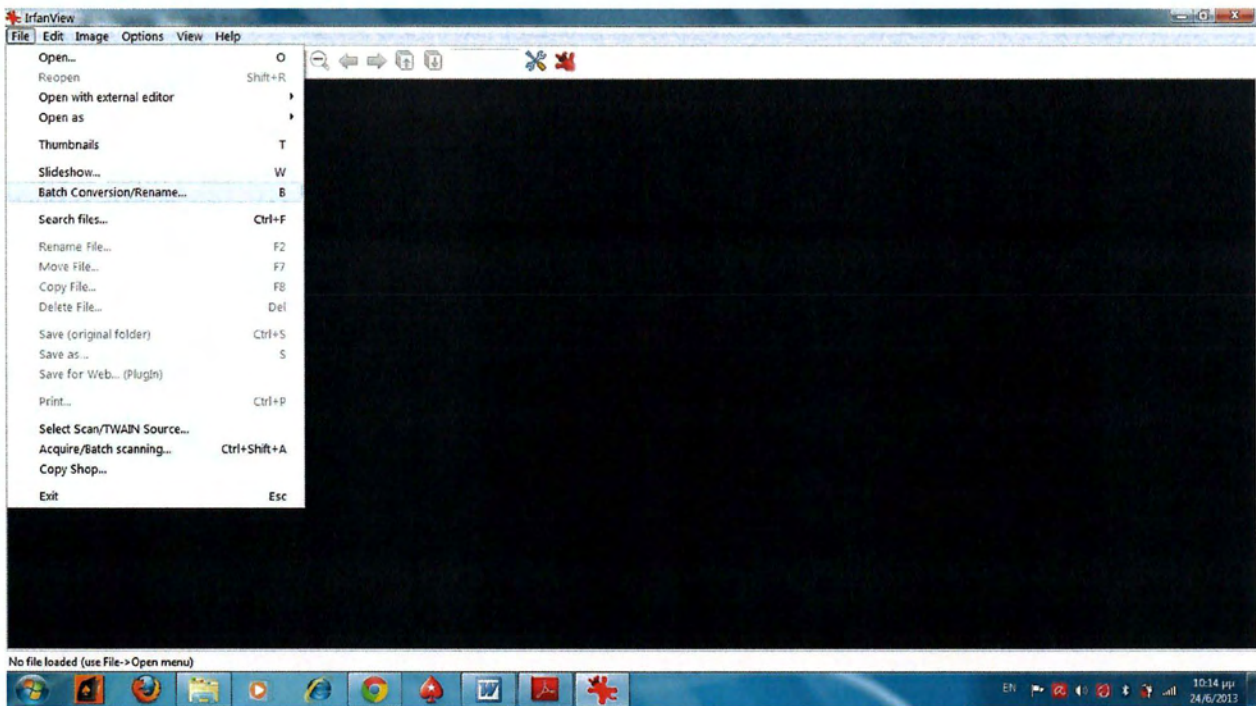


Πρόγραμμα 'Irfanview '

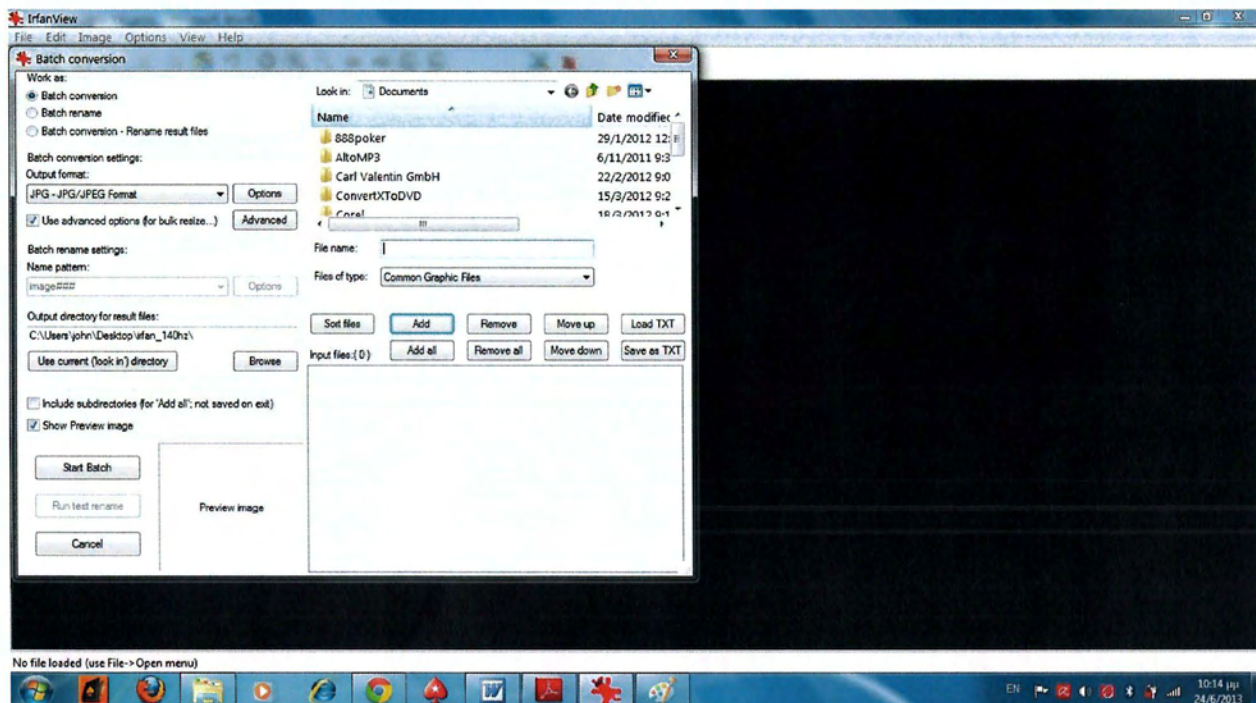
Η ανάλυση των εικόνων είναι ίδια με αυτή των αρχείων avi. Αρχικά οι φωτογραφίες αποθηκεύτηκαν σαν αρχεία **jpeg**. Επειδή ορισμένα **avi** ήταν έγχρωμα (βάθος ανάλυσης 24 RGB) χρειαζόταν να γίνει η μετατροπή των έγχρωμων εικόνων (RGB)σε γκρι(**gray scale**). Γι αυτή τη διαδικασία χρησιμο-ποιήθηκε το πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας **Irfanview** . Επίσης έγινε προσαρμογή του μεγέθους των εικόνων για την καλύτερη εστίαση στην ροή. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αναφέρεται παρακάτω.

Ανοίγουμε το πρόγραμμα και επιλέγουμε:

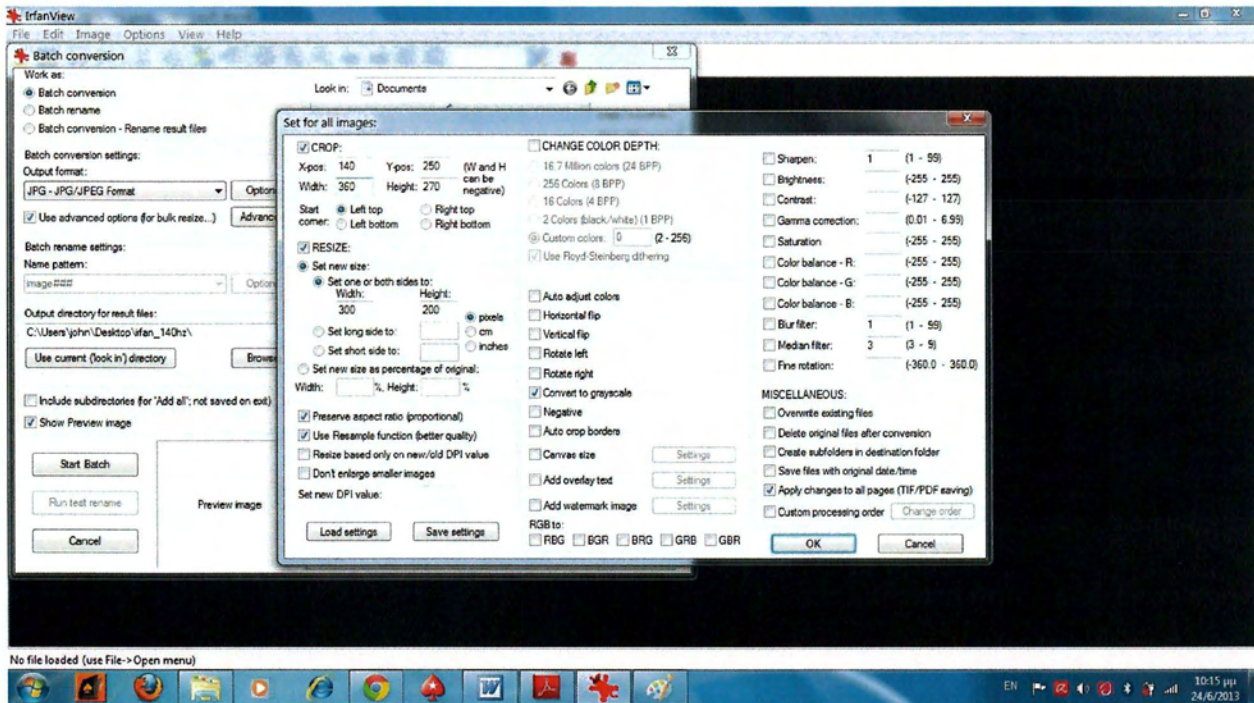
File → Batch conversion/Rename



Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγουμε όπως φαίνεται παρακάτω τον 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'**.



Τέλος επιλέγουμε τον φάκελο προορισμού των νέων επεξεργασμένων αρχείων.

Χρήση MATLAB για την υπολογιστική μέθοδο ψηφιακής ανάλυσης εικόνας

Τέλος, με την χρήση ενός κώδικα σε περιβάλλον **MATLAB 2011** , έγινε επεξεργασία των εικόνων για τον υπολογισμό των παρακάτω:

- Μέση ένταση φωτός για όλα τα pixel (**average light intensity matrix**)
- Ένταση φωτός για κάθετη τομή στο $x=100$ στο 10ο σε σειρά καρέ (**light intensity at $x=100$, vertical slice at frame 10**)
- Μέση ένταση φωτός για κάθετη τομή στο $x=100$ (**average light intensity at $x=100$, vertical slice**)
- Μέση ένταση φωτός για το γεωμετρικό κέντρο των καρέ (**average light intensity at frame center**)
- Ένταση φωτός για το 10^ο σε σειρά καρέ (**light intensity for frame 10**)
- Διακύμανση της υδραβλικής ακτίνας (**hydraulic radius for every frame**)
- Μέσος όρος υδραβλικής ακτίνας (**average mean hydraulic radius**)
- Συχνότητα Fourier στο γεωμετρικό κέντρο (**FFT for light intensity at frame center**)

Αναλυτικότερα, ο κώδικας επεξεργάζεται τα καρέ , διαβάζοντας μια τιμή έντασης του φωτός για κάθε ξεχωριστό pixel (**pixel intensity**). Η μεταβλητή αυτή μπορεί να πάρει τιμή ανάλογη με το χρώμα του pixel , έναν ακέραιος αριθμό μεταξύ **0-255**. Η τιμή **0** αντιστοιχεί στο **μαύρο** χρώμα , ενώ η τιμή **255** στο **άσπρο**.

Average light intensity matrix

Εδώ παρουσιάζεται η μέση τιμή της έντασης για κάθε ξεχωριστό pixel των καρέ. Η τιμή της έντασης ‘διαβάζεται’ για όλα τα καρέ που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη συχνότητα, και έπειτα βγαίνει ο μέσος όρος . Η τιμές αυτές αποτυπώνονται σε

Light intensity for frame 10

Στο δέκατο σε σειρά καρέ κάθε συχνότητας που επεξεργαζόμαστε, αποτυπώνουμε την στιγμιαία ένταση φωτός για όλα τα pixel.

Average light intensity at x=100, vertical slice

Σε συγκεκριμένη τιμή του **x-άξονα** , και συγκεκριμένα για **x=100**, μετράται για όλα τα pixel του **y-άξονα** η τιμή της έντασης , εξάγεται ο μέσος όρος για όλα τα καρέ που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη συχνότητα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γράφημα. Ο **x-άξονας** του γραφήματος αντιστοιχεί στην ένταση του φωτός, ενώ ο **y-άξονας** αντιστοιχεί στον αριθμό του pixel στον y-άξονα του καρέ. Το συγκεκριμένο γράφημα μπορεί να μας δείξει τη διασπορά της ροής στον κατακόρυφο άξονα.

Light intensity at frame center

Στο γεωμετρικό κέντρο κάθε καρέ, μετράται η ένταση του φωτός και αποτυπώνεται σε ένα γράφημα με x-άξονα τις τιμές της έντασης του φωτός , και y-άξονα τον αριθμό του καρέ που εξετάστηκε.

Hydraulic radius for every frame

Η υδραυλική ακτίνα **R_H** υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_H = \frac{A}{S}$$

,όπου **A**: φωτεινή επιφάνεια και **S**: Περίμετρος της φωτεινής επιφάνειας

Η υδραυλική ακτίνα υπολογίζεται για κάθε καρέ, και η διακύμανσή της αποτυπώνεται σε ένα γράφημα με x-άξονα τον άξοντα αριθμό των καρέ, και y-άξονα την υδραυλική ακτίνα.

Mean hydraulic radius

Οι τιμές των υδραυλικών ακτινών που υπολογίστηκαν για κάθε καρέ προσθέτονται και διαιρούνται με τον αριθμό των επεξεργασμένων καρέ, ώστε να υπολογιστεί ο αριθμητικός μέσος των υδραυλικών ακτινών για κάθε συχνότητα ξεχωριστά. Στη συνέχεια παρουσιάζεται γράφημα με x-άξονα την τιμή της συχνότητας και y-άξονα την μέση υδραυλική ακτίνα.

Τυπική απόκλιση υδραυλικής ακτίνας

Έστω δείγμα $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$

- Θεωρούμε ότι οι παραπάνω αριθμοί αποτελούν ολόκληρο τον πληθυσμό. Στην περίπτωση που αποτελούν μέρος του πληθυσμού (δείγμα), ο τύπος υπολογισμού διαφέρει

- Τυπική απόκλιση: $S' = \sqrt{S^2}$

- όπου
$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το δείγμα είναι οι υδραυλικές ακτίνες σε κάθε καρέ σε μια συγκεκριμένη συχνότητα στην οποία γίνεται ο υπολογισμός.

Fast Fourier Transform

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει τις μετατοπίσεις των σωματιδίων βασίζεται στη μέθοδο συσχέτισης συχνοτήτων. Το επίπεδο συσχέτισης δημιουργείται από τη μετατροπή της έντασης στο χώρο σε πεδίο των συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας τον **διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT)**. Ένα **FFT** υπολογίζει γρήγορα τη μετατροπή αυτή. Η μέγιστη συχνότητα του αναλογικού σήματος που μπορούμε να μετρήσουμε σωστά, σύμφωνα με τη θεωρία του **Nyquist** είναι $f_m < \frac{f_s}{2}$, όπου **fs**, η συχνότητα δειγματοληψείας. Δεδομένης της χρησιμοποίησης Home Video Camera και όχι High Speed Camera, με συχνότητα δειγματοληψείας 25fps ή 30fps, η εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει μόνο στις χαμηλές συχνότητες. Η χρησιμοποίηση High Speed Camera θα είχε ως αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του οπτικού πεδίου.

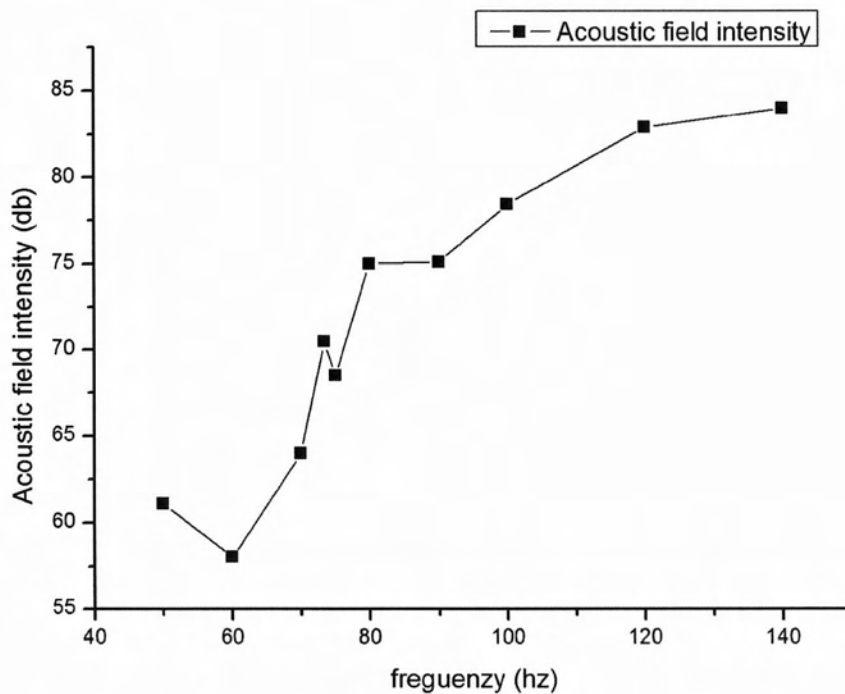
Στη συνέχεια, το διάγραμμα λογαριθμίζεται και γίνεται προσπάθεια εύρεσης της κλίσης $-5/3$ σε έναν υποχώρο του φάσματος συχνοτήτων. Σύμφωνα με τη θεωρία του **Kolmogorov**, η κλίση αυτή προσδιορίζει την ένταση του τυρβώδους πεδίου. Το φάσμα συχνοτήτων στο οποίο βρίσκεται αυτή η κλίση, είναι λογικό να συμπίπτει με το φάσμα της θεωρίας του **Nyquist** που αναφέρθηκε παραπάνω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1. Αποτελέσματα μέτρησης έντασης ακουστικού πεδίου

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη βοήθεια ντεσιμπελόμετρου τύπου ‘**dBmeter Wohler**’ στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου των οκτώ ηχείων παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα. Υπενθυμίζεται ότι το σήμα εισόδου στον ενισχυτή, μέσω της γεννήτριας συχνοτήτων, ήταν ημιτονοειδές.



Γράφημα 1-Ένταση ακουστικού πεδίου

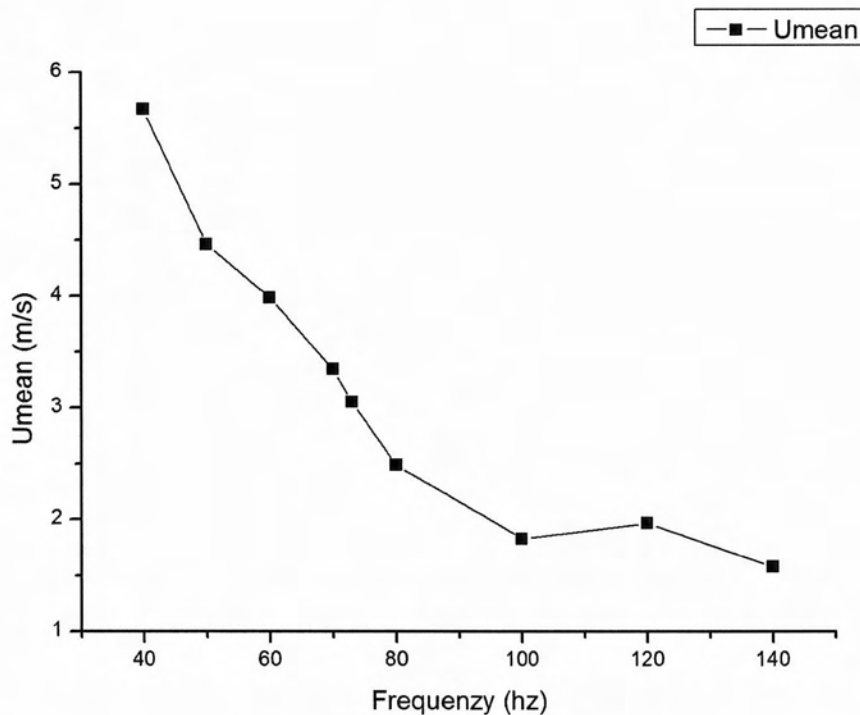
<u>ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)</u>	<u>ΕΝΤΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (dB)</u>
50	61,1
60	58
70	64
73,4	70,5
75	68,5
80	75
90	75,1
100	78,4
120	82,9
140	84

Πίνακας 7- Ένταση ακουστικού πεδίου

Οι μετρήσεις ξεκίνησαν με την συχνότητα του παλμού να βρίσκεται σχετικά χαμηλά, στα 40Hz, όπου το φαινόμενο της τύρβης ήταν ιδιαίτερα έντονο. Συνεχίζο-ντας στα 50 Hz, η ένταση του πεδίου μειώνεται, ενώ σταδιακά αυξάνεται μέχρι να φτάσουμε τα 140Hz. Στη συχνότητα των 73,4 Hz , όπου παρατηρήθηκε κάποιο είδος συντονισμού των ηχείων, η ένταση αυξάνεται απότομα, για να επιστρέψει στην ομαλή αύξησή της από τα 75 Hz και μετά.

5.2. Αποτελέσματα μέτρησης ταχυτήτων στην έξοδο ακροφυσίου ενός ηχείου

Η μέση ταχύτητα U_{mean} , φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, τα στοιχεία του οποίου παραθέτονται και σε πίνακα. Η μέτρηση έγινε σε απόσταση **105mm** από το κέντρο του χωνιού, για σταθερή ισχύ **25W**.

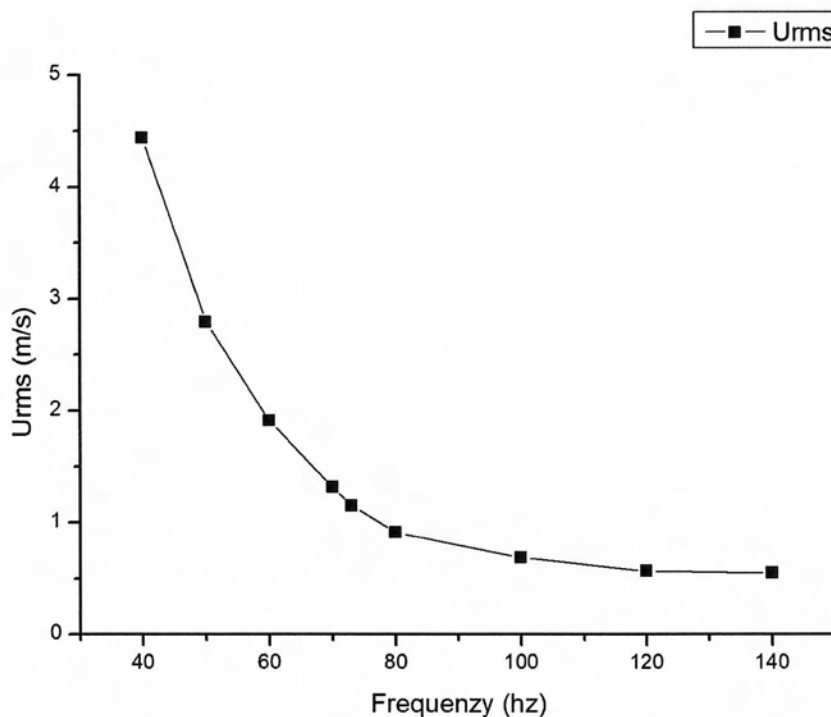


Γράφημα 2- Ταχύτητα U_{mean} στην έξοδο μεγαφώνου

<u>ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)</u>	<u>U_{mean} (m/s)</u>
40	5.668
50	4.4597
60	3.9833
70	3.3428
73	3.0499
80	2.4883
100	1.8236
120	1.966
140	1.5768

Πίνακας 8- Ταχύτητα U_{mean} στην έξοδο μεγαφώνου

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ταχύτητα U_{rms} , που δείχνει τη δύναμη της τύρβης, συναρτήσει των συχνοτήτων των παλμών που παρήγαγε η γεννήτρια συχνοτήτων. Η διακύμανση φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί. Η ισχύς παρέμεινε σταθερή στα **25W**.



Γράφημα 3- Ταχύτητα Urms στην έξοδο μεγαφώνου

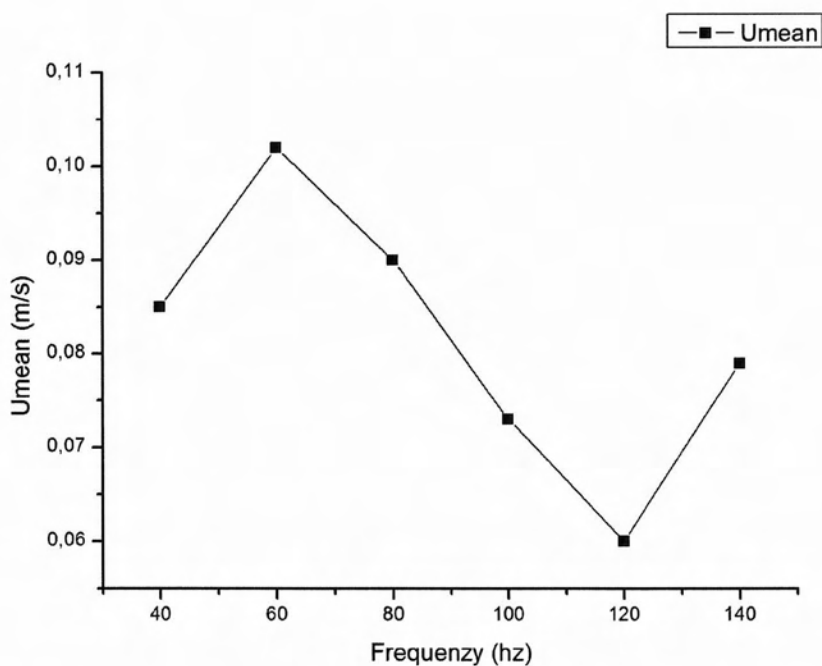
<u>ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)</u>	<u>Urms (m/s)</u>
40	4.4401
50	2.7932
60	1.9062
70	1.3150
73	1.1454
80	0.9112
100	0.6864
120	0.5654
140	0.5526

Πίνακας 9- Ταχύτητα Urms στην έξοδο μεγαφώνου

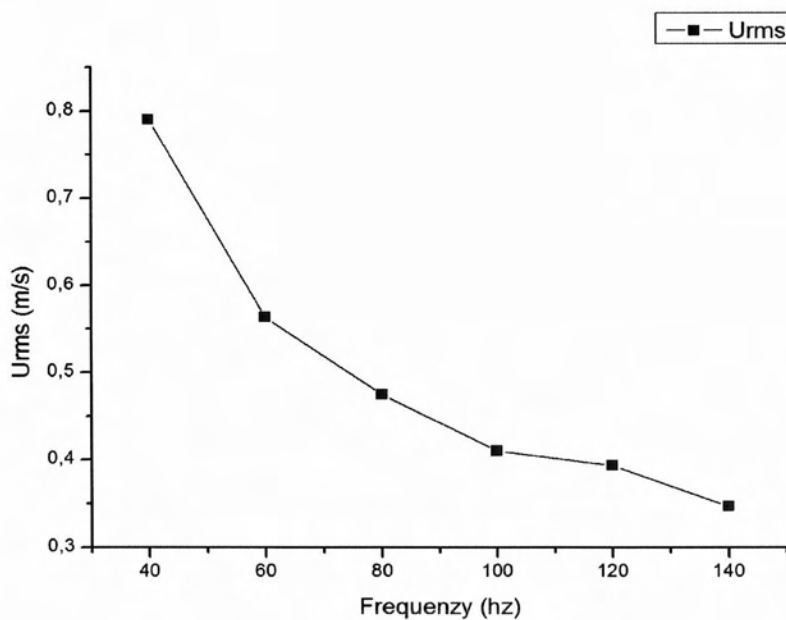
Όπως μπορεί εύκολα να διακριθεί, η δύναμη του φαινομένου εξασθενεί, καθώς η συχνότητα του παλμού αυξάνεται. Στις πιο χαμηλές συχνότητες, η μείωση της Urms είναι πιο έντονη, ενώ όσο αυξάνεται η τιμή των συχνοτήτων, οι διακυμάνσεις είναι λιγότερο έντονες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, οι διαφορές 40-50 Hz, και 120-140 Hz. Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο της τύρβης της ροής της εξόδου από το ακροφύσιο, είναι ιδιαίτερα έντονο στις χαμηλές συχνότητες, ενώ εξασθενεί αρκετά στις μεγαλύτερες.

5.3. Αποτελέσματα μέτρησης ταχυτήτων στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου τύρβης

Στους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τη ροή πλουμίου υπό την επίδραση του τυρβώδους πεδίου που δημιουργούν τα μεγάφωνα. Τα αποτελέσματα αυτά, στη συνέχεια, αποτυπώνονται σε γραφήματα για την καλύτερη εποπτεία τους.



Γράφημα 4- Ταχύτητα Umean στο κέντρο της ροής(Σταθερή ισχύς)



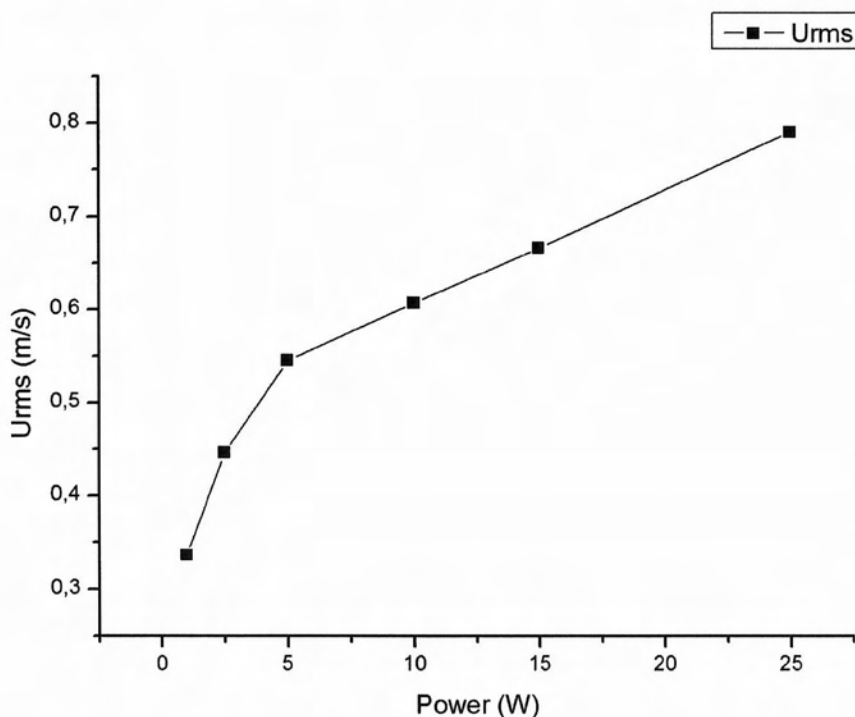
Γράφημα 5 -Ταχύτητα Urms στην έξοδο μεγαφώνου(Σταθερή ισχύς)

<u>Ισχύς(W)</u>	<u>Συχνότητα (Hz)</u>	<u>Urms(m/s)</u>	<u>Umean(m/s)</u>
25	40	0.7897	0.085
25	60	0.5633	0.102
25	80	0.4749	0.09
25	100	0.4098	0.073
25	120	0.3932	0.06
25	140	0.3466	0.079

Πίνακας 10-Ταχύτητες Urms και Umean στο κέντρο της ροής(Σταθερή ισχύς)

Για σταθερή ισχύ **25W** γίνεται κατανοητό ότι το τυρβώδες πεδίο είναι ιδιαίτερα δυνατό στις χαμηλές συχνότητες, με την rms ταχύτητα να παίρνει την ψηλότερη τιμή της στην συχνότητα των **40Hz**. Στη συνέχεια , διακρίνεται η μεγαλύτερη διαφορά μέχρι τα **60Hz**, μείωση η οποία δεν είναι τόσο έντονη στις υπόλοιπες συχνότητες. Η χαμηλότερη τιμή της εμφανίζεται στα **140Hz** , όπου το φαινόμενο έχει εξασθενήσει αρκετά. Τα αποτελέσματα της **μέσης ταχύτητας της ροής** , **Umean** , δείχνουν την **ισοτροπία** του φαινομένου. Η τύρβη είναι **ισότροπη** και αυτό είναι φανερό από τις πολύ μικρές τιμές (σχεδόν μηδενικές) της **Umean**.

Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερή τη συχνότητα στα 40Hz , και αλλάζοντας την ισχύ η ταχύτητα **Urms** παίρνει τις τιμές που παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα αλλά και σε πίνακα.



Γράφημα 6- Ταχύτητα Urms στο κέντρο της ροής(Σταθερή συχνότητα)

<u>Ισχύς(W)</u>	<u>Συχνότητα (Hz)</u>	<u>Urms(m/s)</u>
1	40	0.33581
2.5	40	0.4459
5	40	0.5454
10	40	0.6068
15	40	0.6659
25	40	0.7897

Πίνακας 11- Ταχύτητα Urms στο κέντρο της ροής(Σταθερή συχνότητα)

Διατηρώντας σταθερή τη συχνότητα στα **40Hz** , όπου η τύρβη είναι πιο έντονη από τις υπόλοιπες συχνότητες, εναλλάσσουμε την ισχύ του ενισχυτή για να γίνει κατανοητή η επίδραση της έντασης της ισχύος στο φαινόμενο. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα αποτελέσματα, η ταχύτητα **rms** , η οποία δείχνει και την ένταση του φαινομένου (δύναμη της τύρβης) μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και η ένταση της ισχύος.

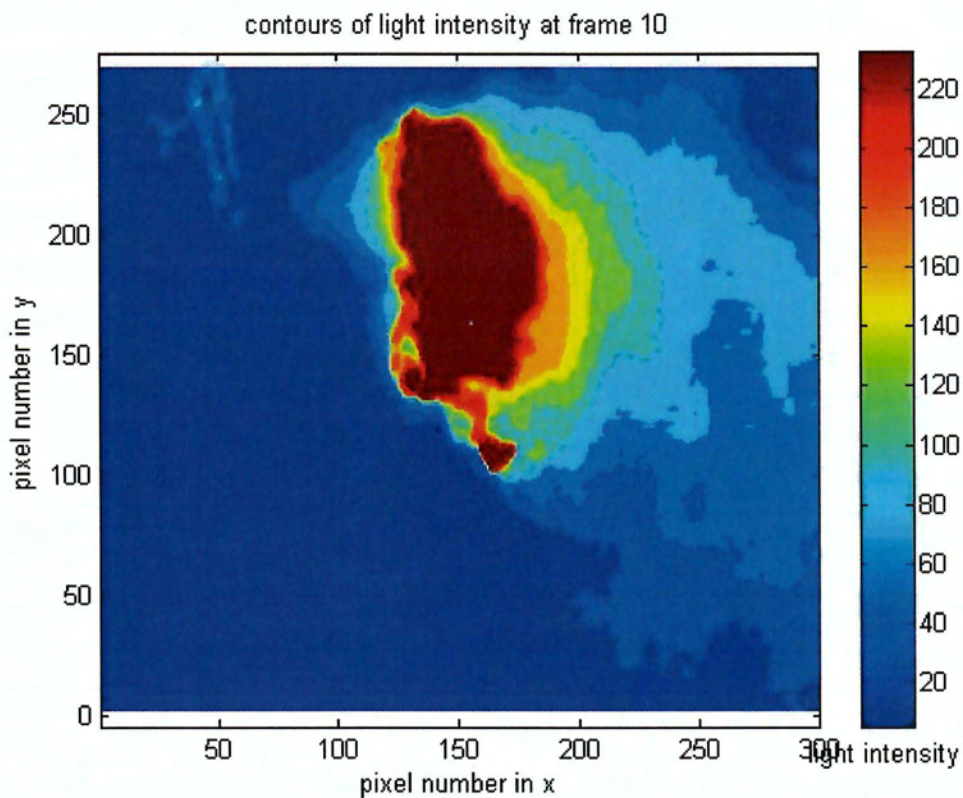
5.4. Αποτελέσματα οπτικοποίησης της ροής

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των καρτέ (frames) για τις δύο περιπτώσεις οπτικοποίησης της ροής που περιγράφησαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

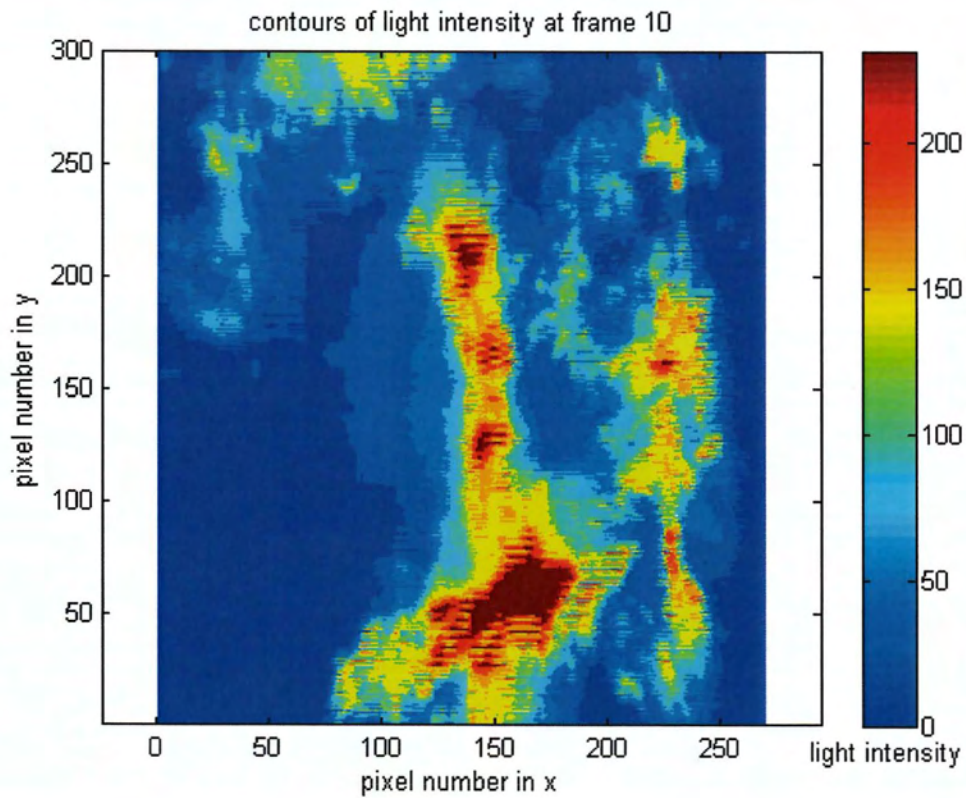
5.4.1. Περίπτωση «CROSS»

Ένταση φωτός για το 10^0 σε σειρά καρτέ (light intensity for frame 10)

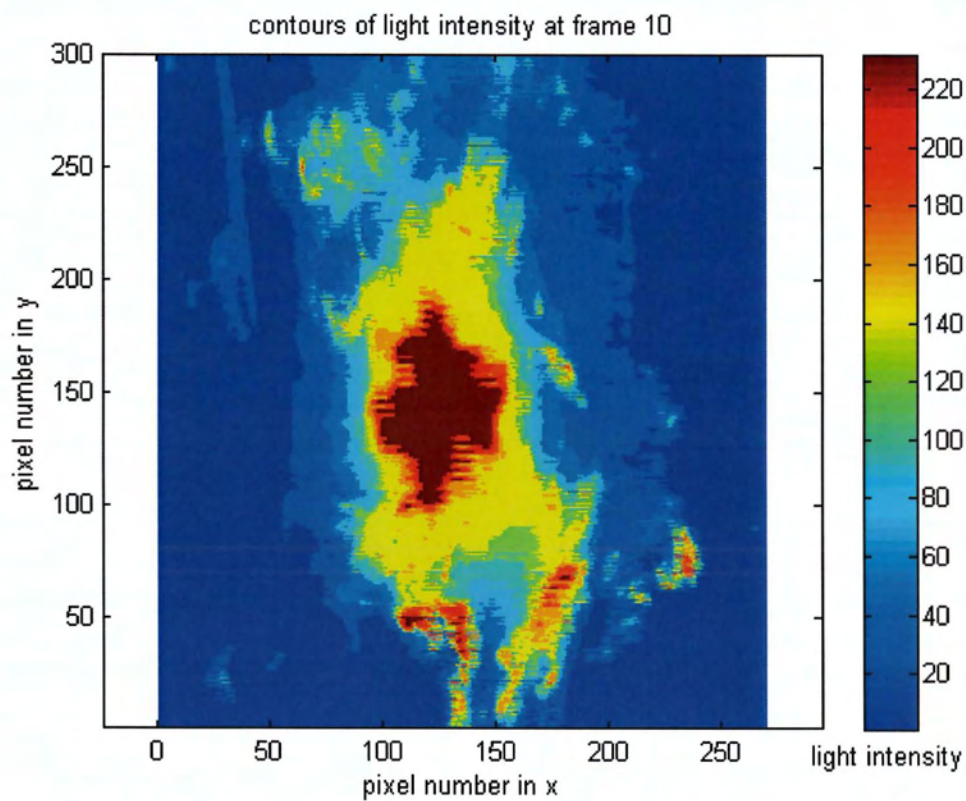
Στο δέκατο σε σειρά καρτέ κάθε συχνότητας που επεξεργαζόμαστε, αποτυπώνεται η στιγμιαία ένταση φωτός για όλα τα pixel. Στις παρακάτω εικόνες φαινονται οι ισοσταθμικές για κάθε συχνότητα ξεχωριστά.



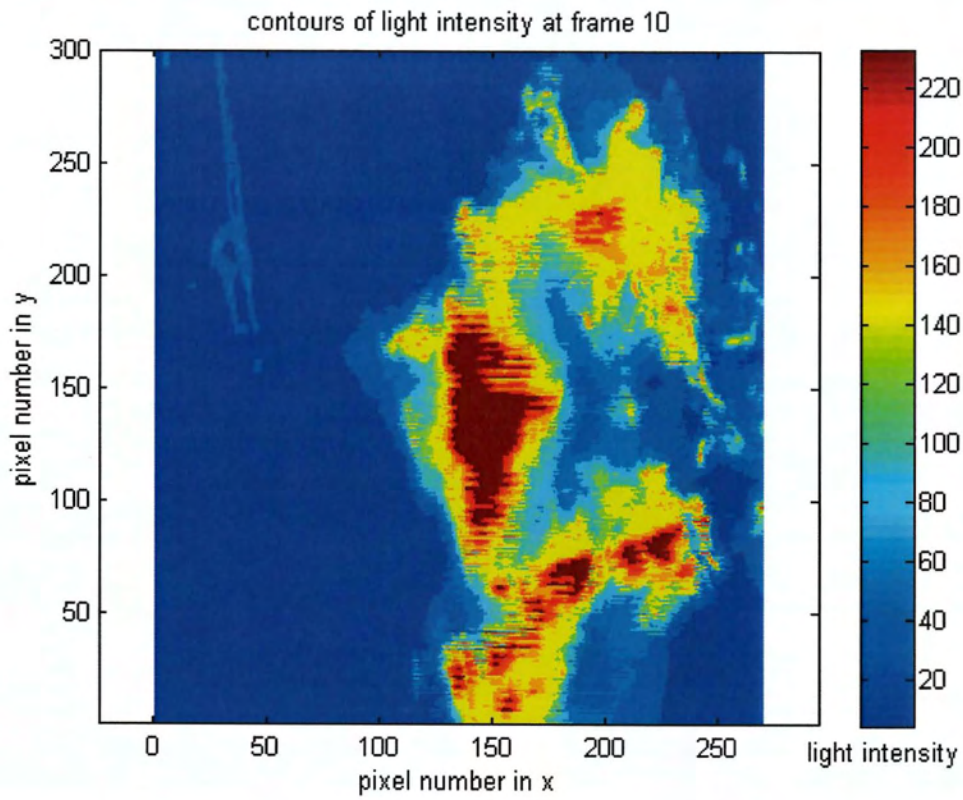
Εικόνα 9- no_power- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



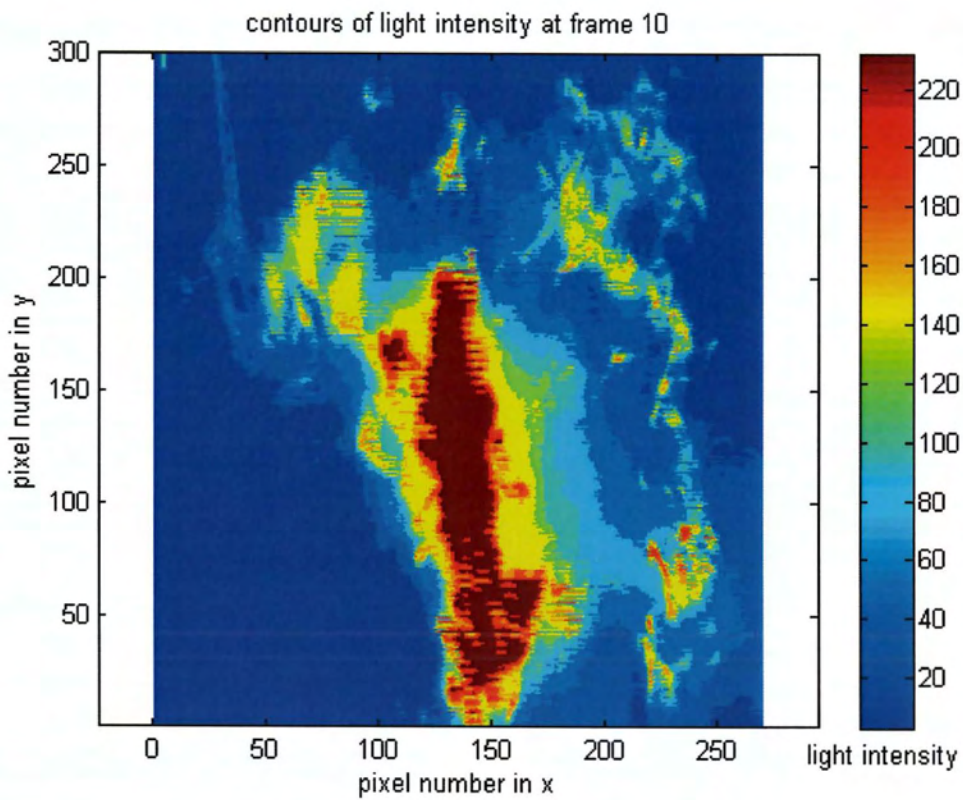
Εικόνα 10-50Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



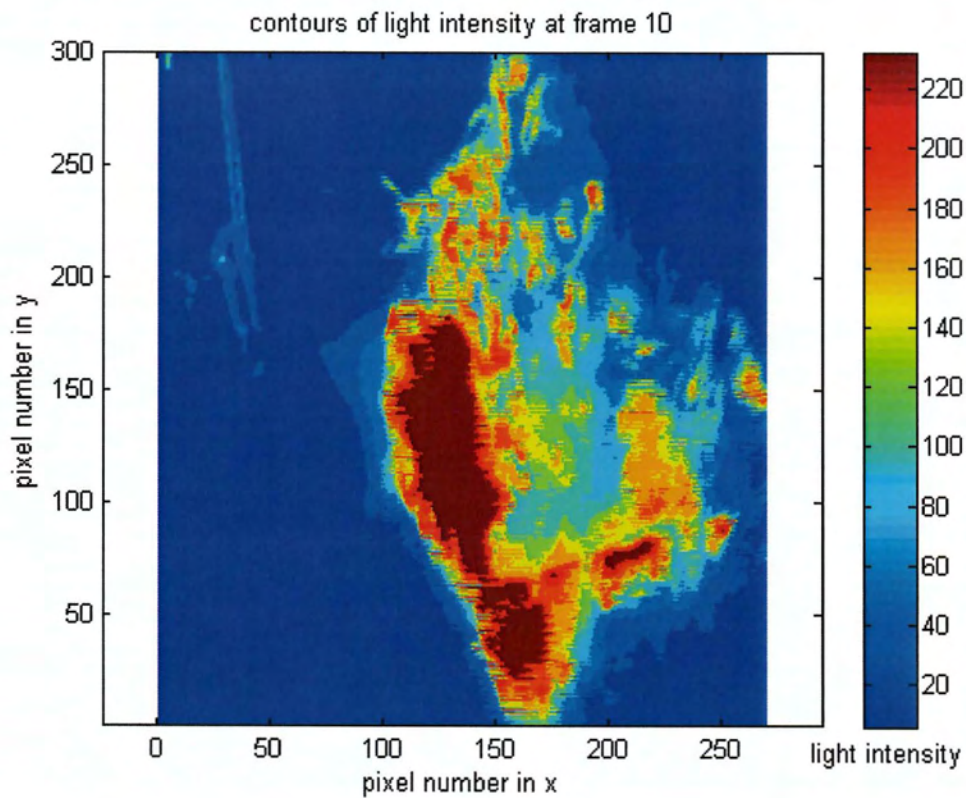
Εικόνα 11-60Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



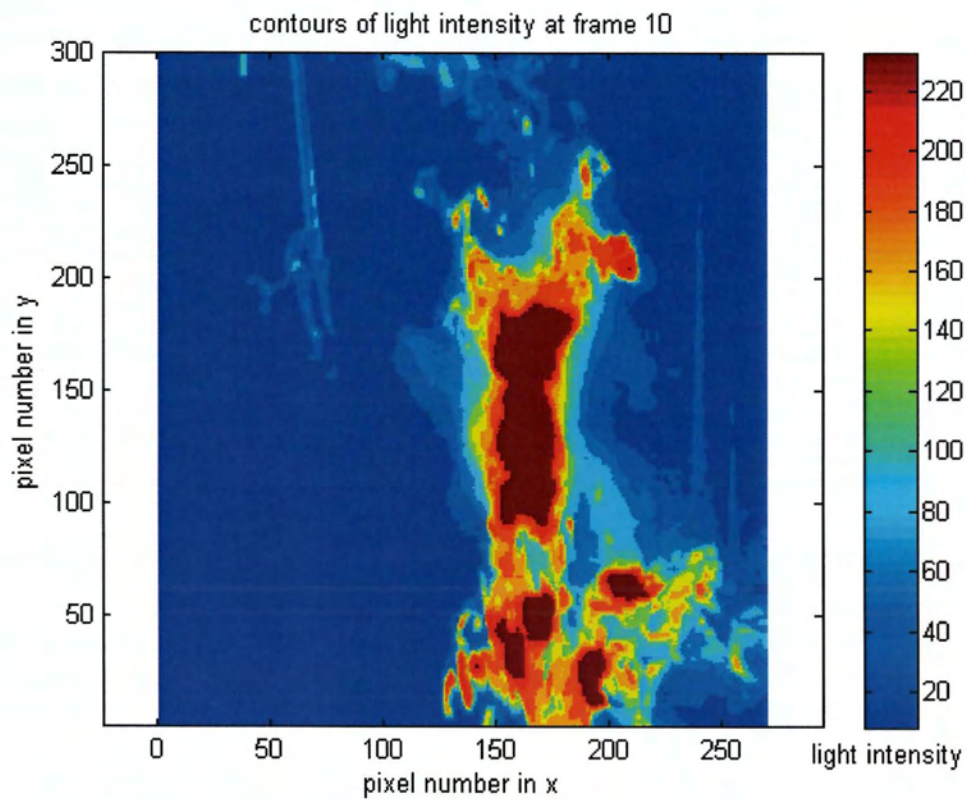
Εικόνα 12-70Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



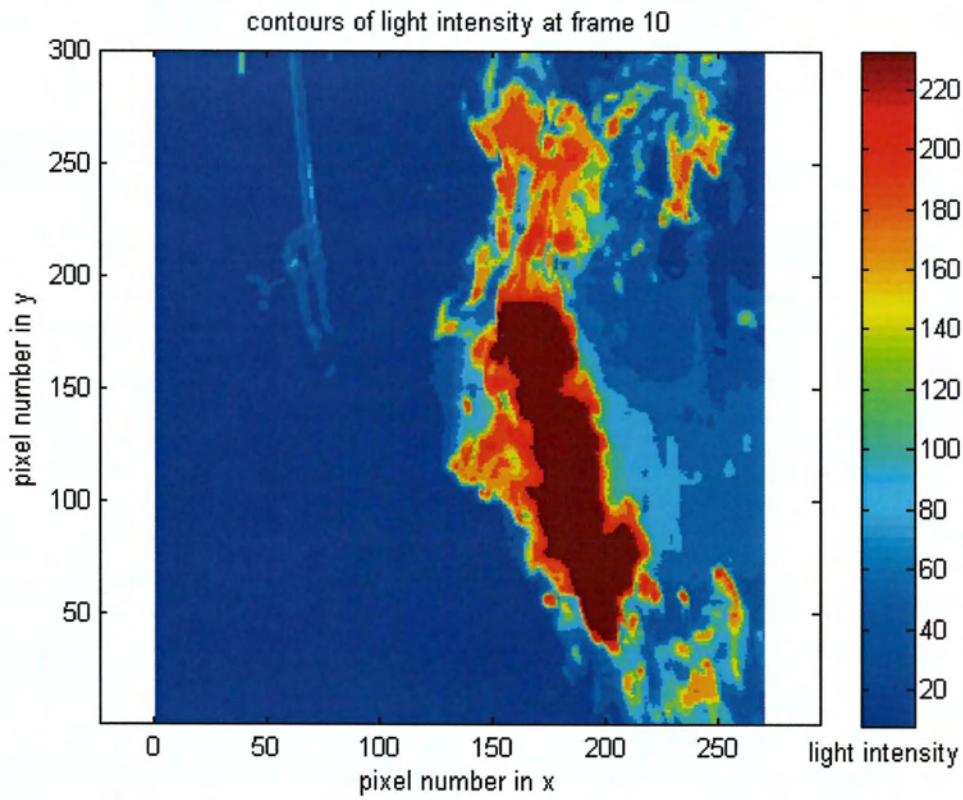
Εικόνα 13-73Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



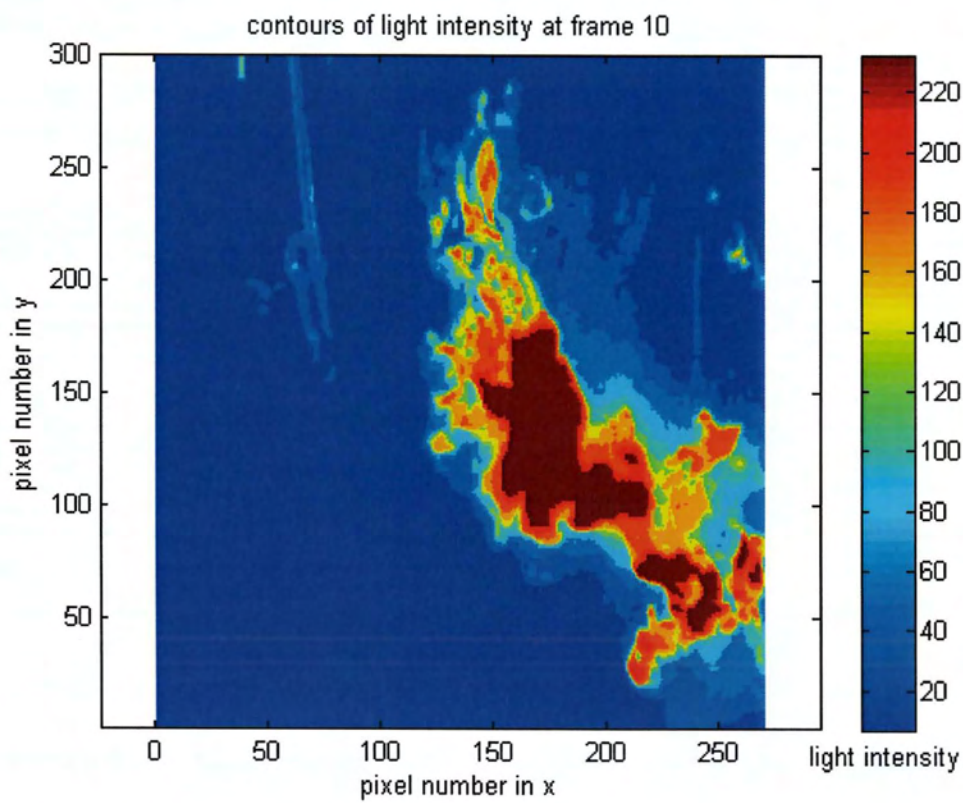
Εικόνα 14-75hz- ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



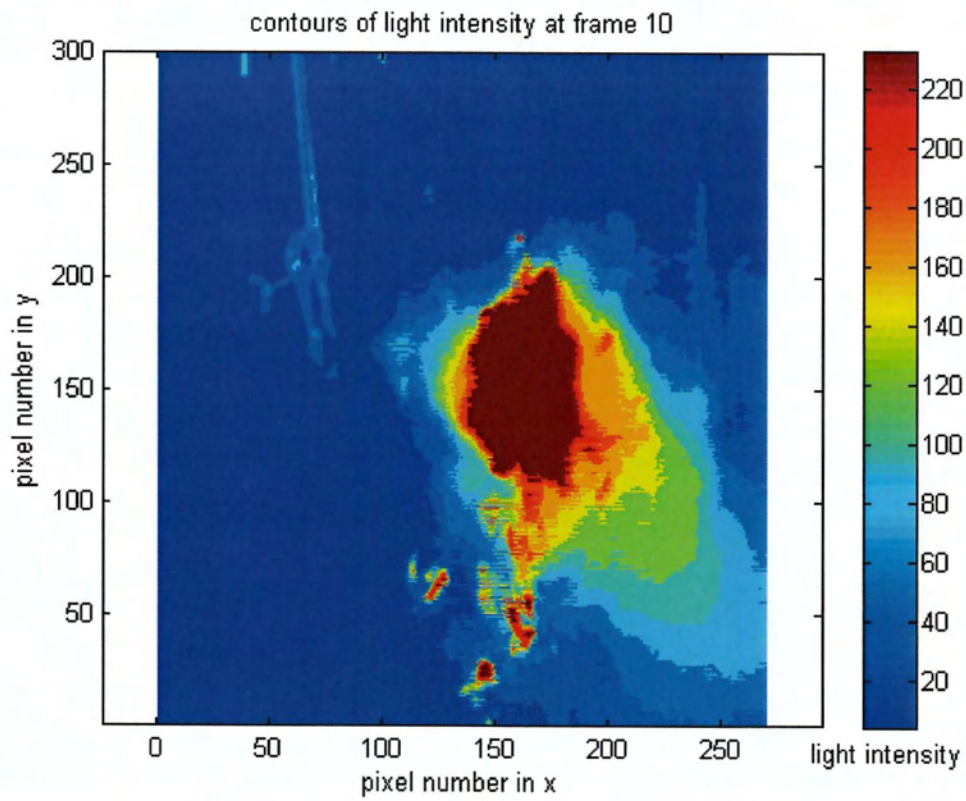
Εικόνα 15-80hz- ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



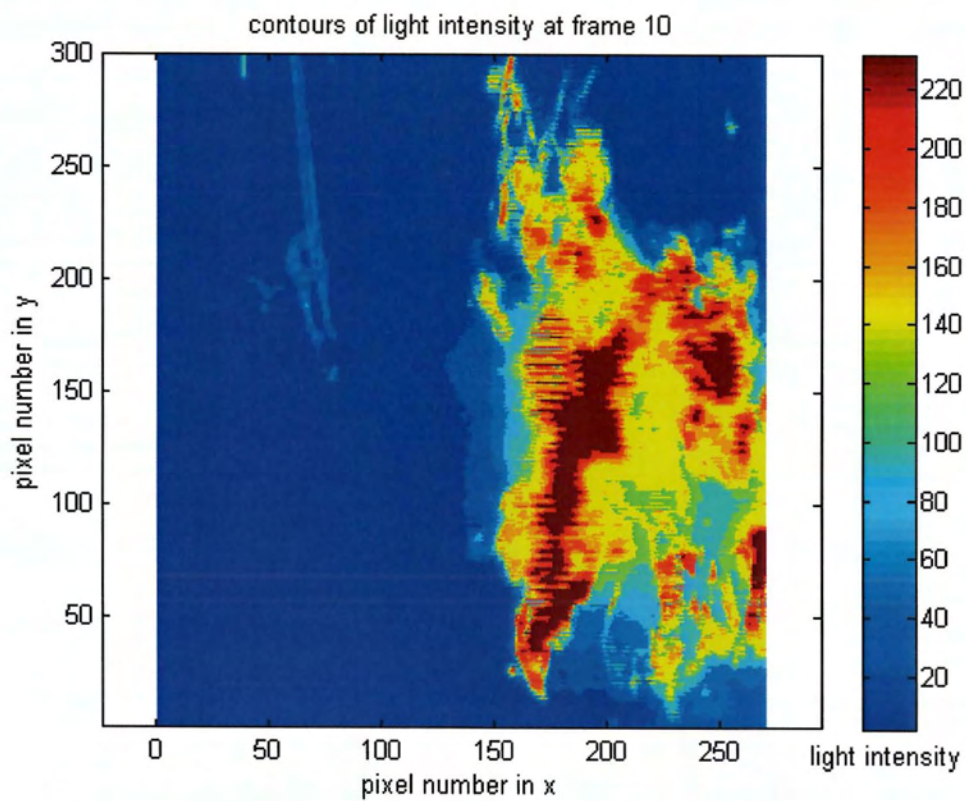
Εικόνα 16-90Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



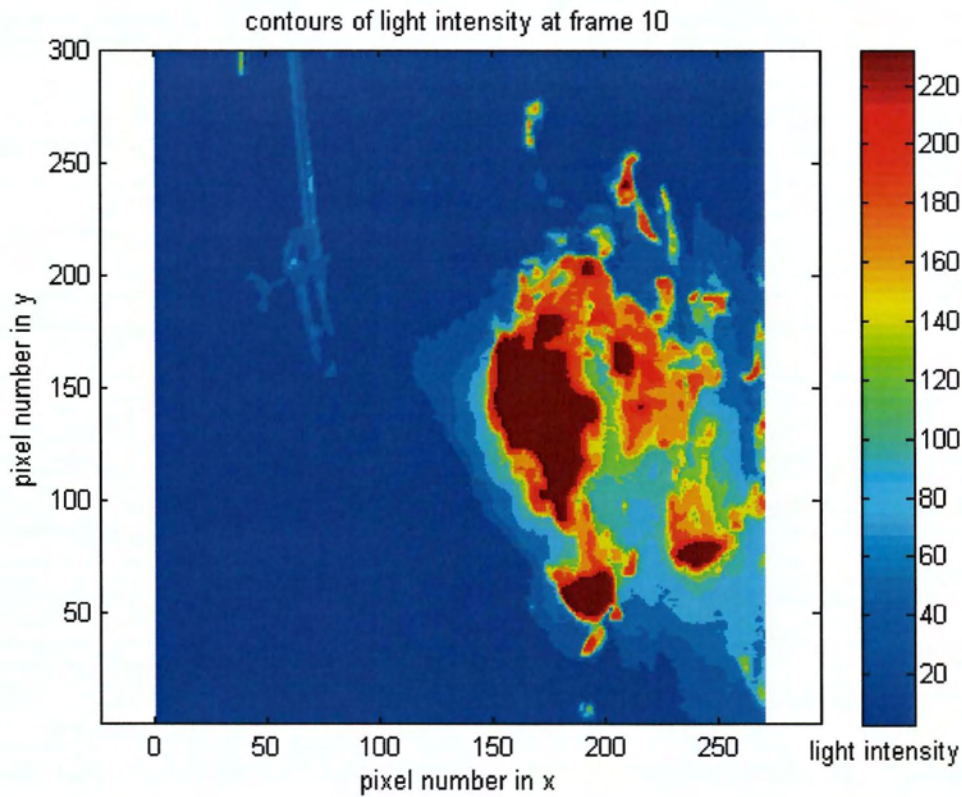
Εικόνα 17-100Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



Εικόνα 18-120Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



Εικόνα 19-140Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)

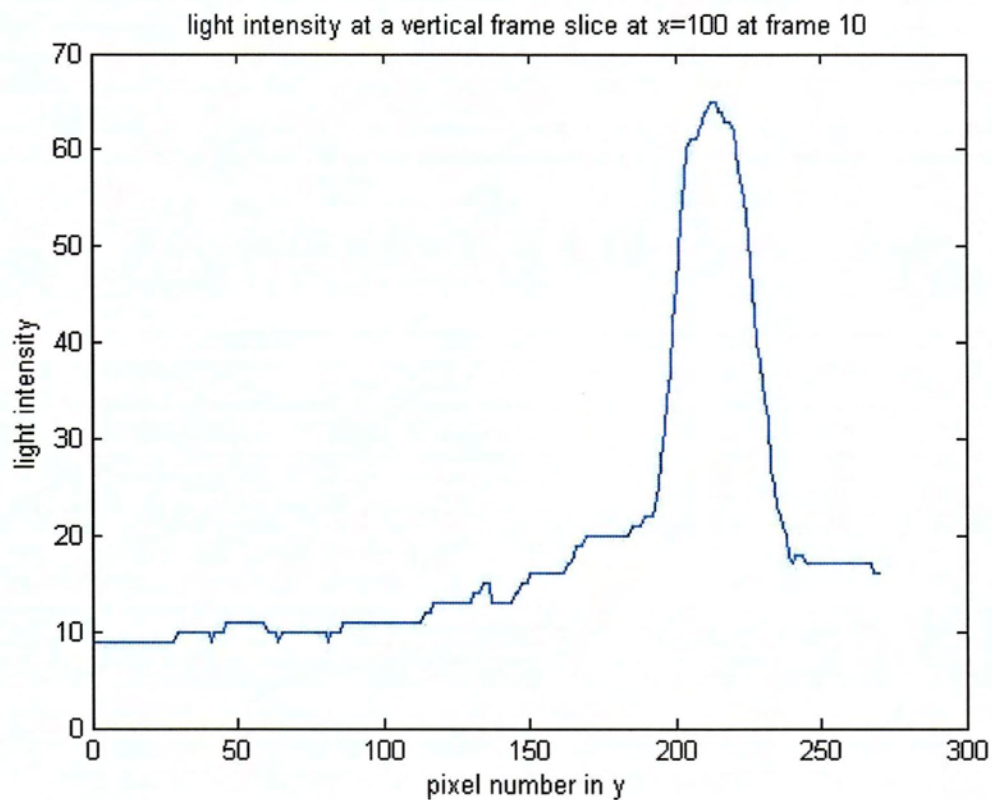


Εικόνα 12: 160Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)

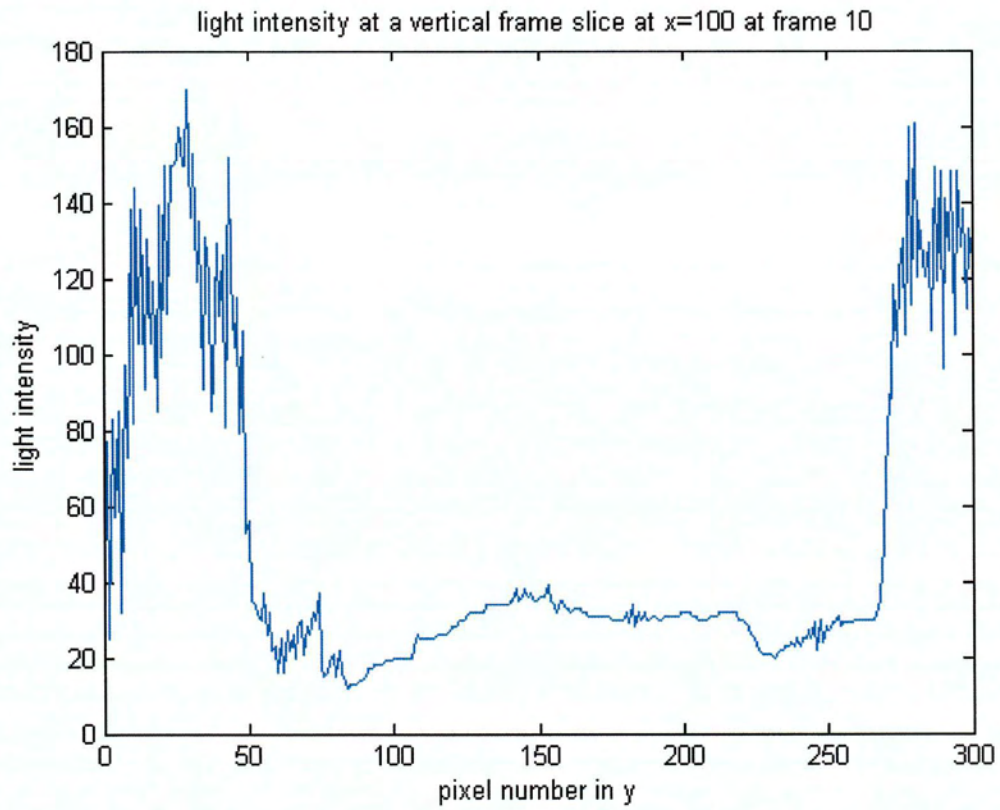
Οι χρωματισμοί μας δείχνουν ότι όσο πλησιάζουμε προς το κέντρο, τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της τύρβης καθώς έχουμε ολόενα και πιο έντονα χρώματα. Στα 50 Hz, βλέπουμε ότι το τυρβώδες πεδίο που δημιουργείται έχει διασπείρει τα σωματίδια προς διάφορες κατευθύνσεις, χωρίς να υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση σωματιδίων στο κέντρο της ροής. Στα 60 και 70 Hz, η διασπορά των σωματιδίων συνεχίζεται, αλλά λιγότερο έντονα, ενώ η ομοιόμορφη διασπορά των σωματιδίων στα 60Hz μας δείχνει την ισοτροπία του φαινομένου. Στις επόμενες συχνότητες μέχρι και τα 100 Hz το φαινόμενο της τύρβης γίνεται συνεχώς πιο έντονη γιατί βλέπουμε ότι το βαθύ κόκκινο χρώμα αυξάνεται συνεχώς και διασπείρεται. Η τύρβη στα 120 Hz είναι αρκετά ισότροπη καθώς το σχήμα τείνει να στρογγυλοποιηθεί, χωρίς όμως το τυρβώδες πεδίο των μεγαφώνων να είναι ιδιαίτερα έντονο. Τέλος αρκετά έντονη και ισότροπη τύρβη έχουμε στα 0 hz (no power) δηλαδή όταν δεν έχουμε καθόλου επιρροή του πεδίου που δημιουργούν τα μεγάφωνα. Πιο ακριβή αποτελέσματα προκύπτουν από τις μέσες ισοσταθμικές, όπου αποτυπώνεται σε βάθος χρόνου η επίδραση του τυρβώδους πεδίου στη ροή, και όχι η στιγμιαία αποτύπωση.

Ένταση φωτός για κάθετη τομή στο $x=100$ στο δέκατο καρέ (light intensity at $x=100$, vertical slice at frame 10)

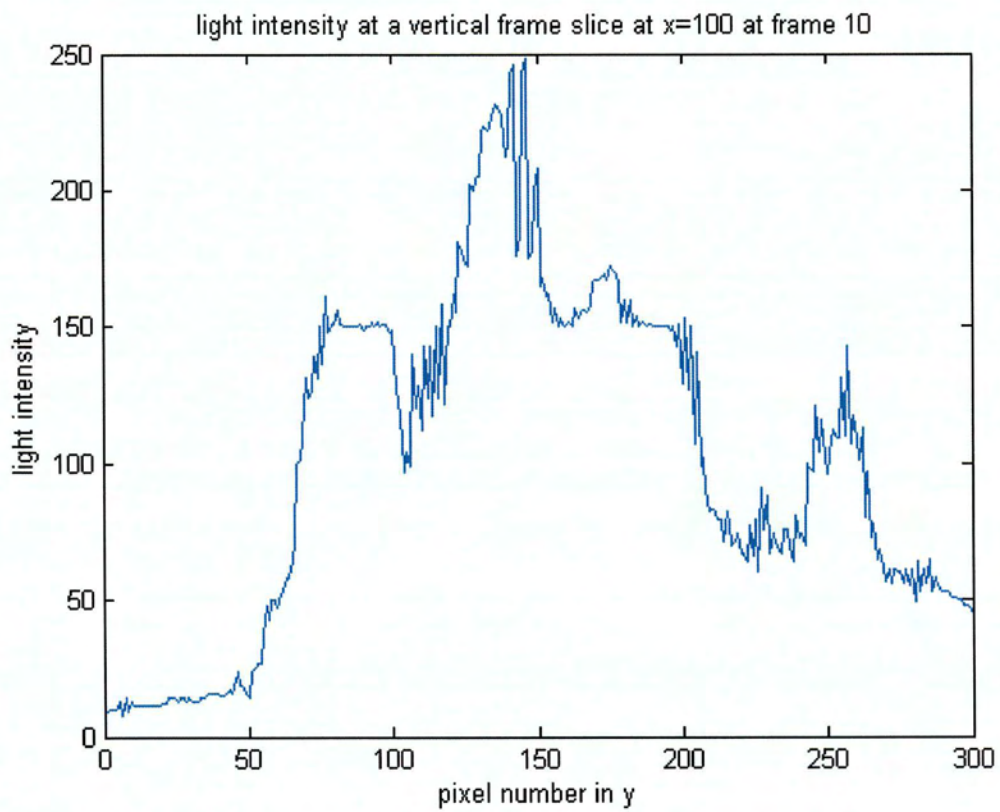
Παρακάτω παρουσιάζονται ,για κάθε συχνότητα, τα γραφήματα της έντασης του φωτός για κάθε pixel στον y -άξονα, σε συγκεκριμένο (σημείο $x=100$) στον x -άξονα. Η αποτύπωση είναι στιγμιαία, στο δέκατο σε σειρά καρέ.



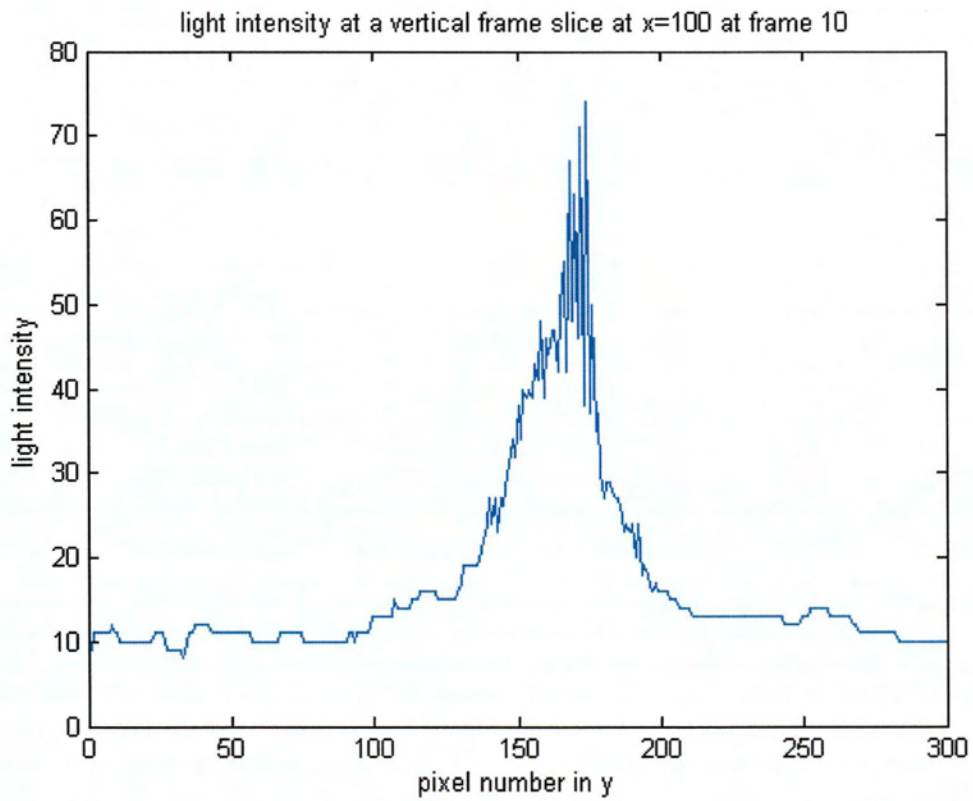
Γράφημα 7- No_power- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^ο καρέ



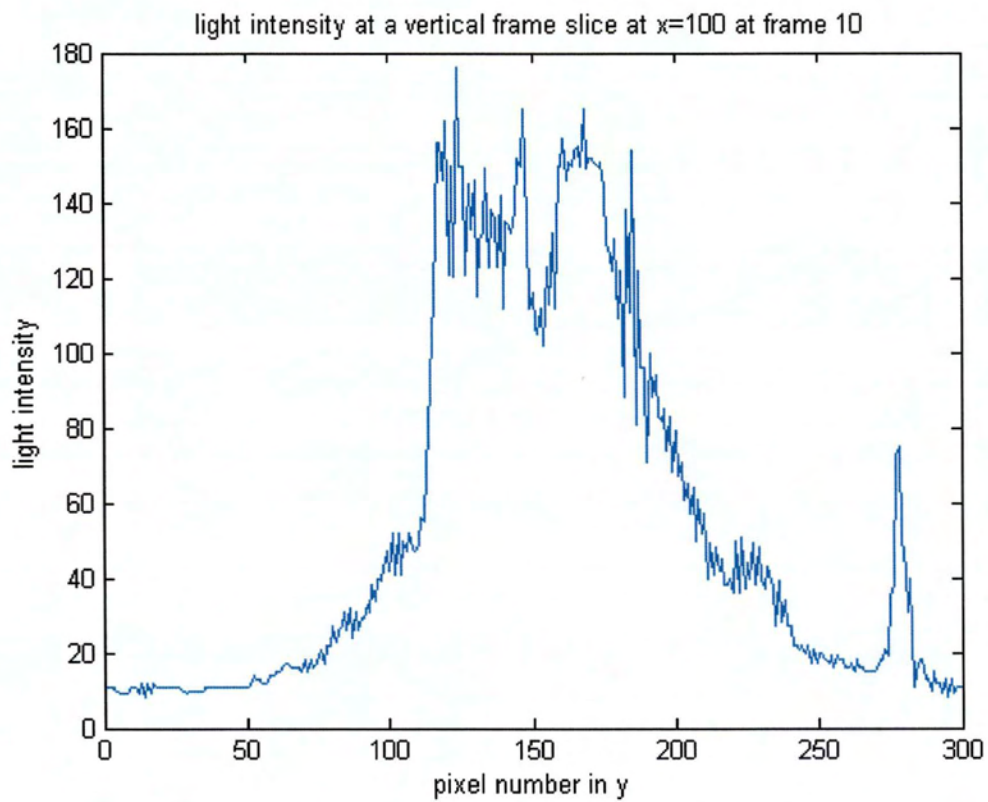
Γράφημα 8-50Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10^ο καρέ



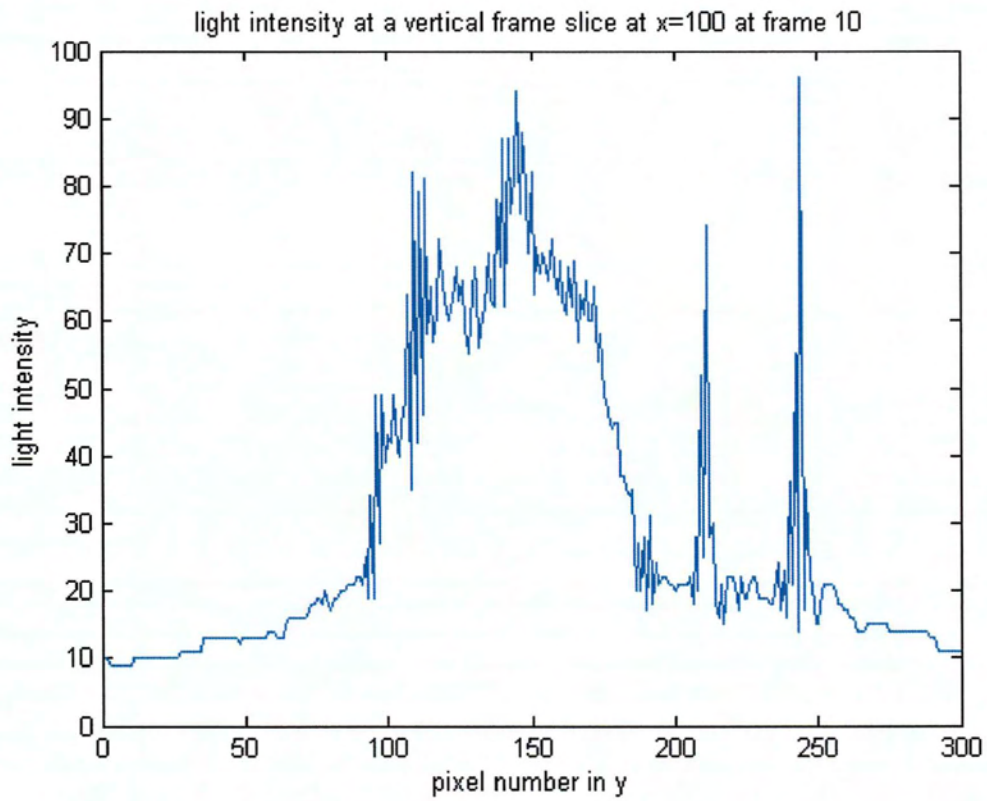
Γράφημα 9-- 60Hz- Ένταση φωτός για x=100 στο 10^ο καρέ



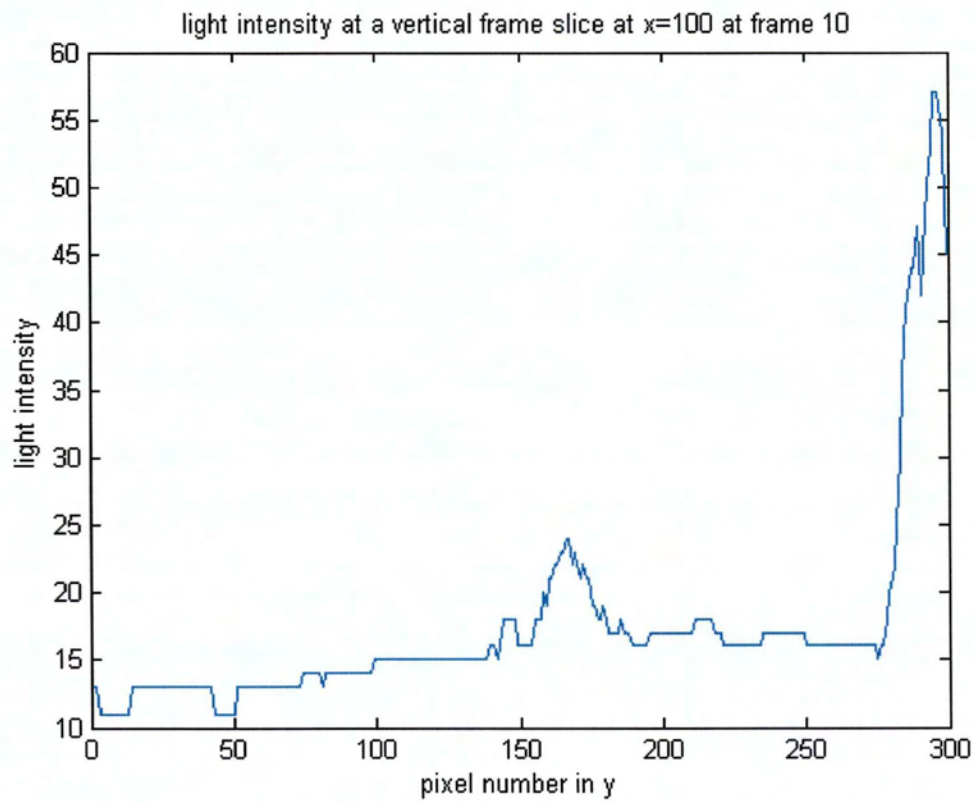
Γράφημα 10- 70Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^9 καρέ



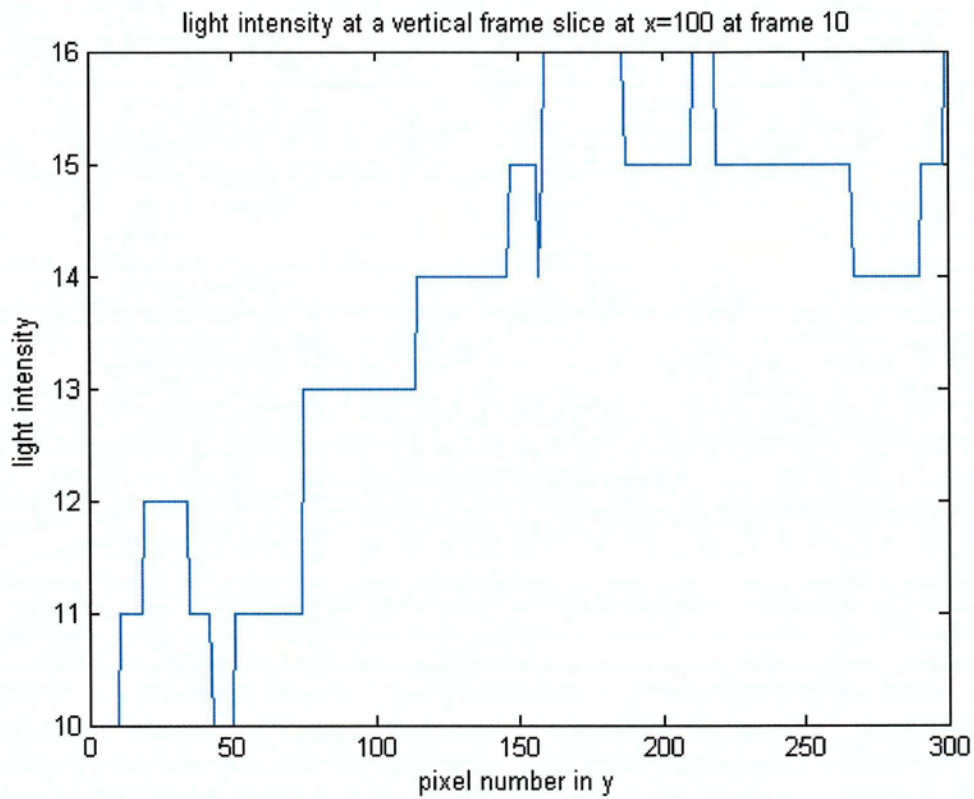
Γράφημα 11- 73Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^9 καρέ



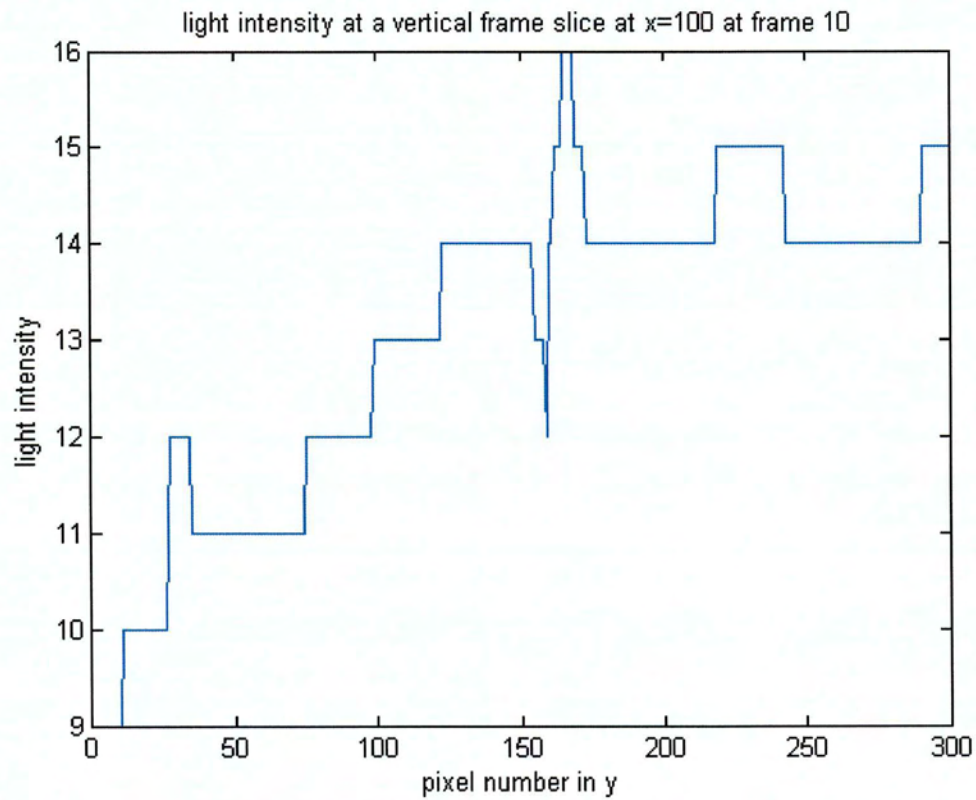
Γράφημα 12- 75Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^9 καρέ



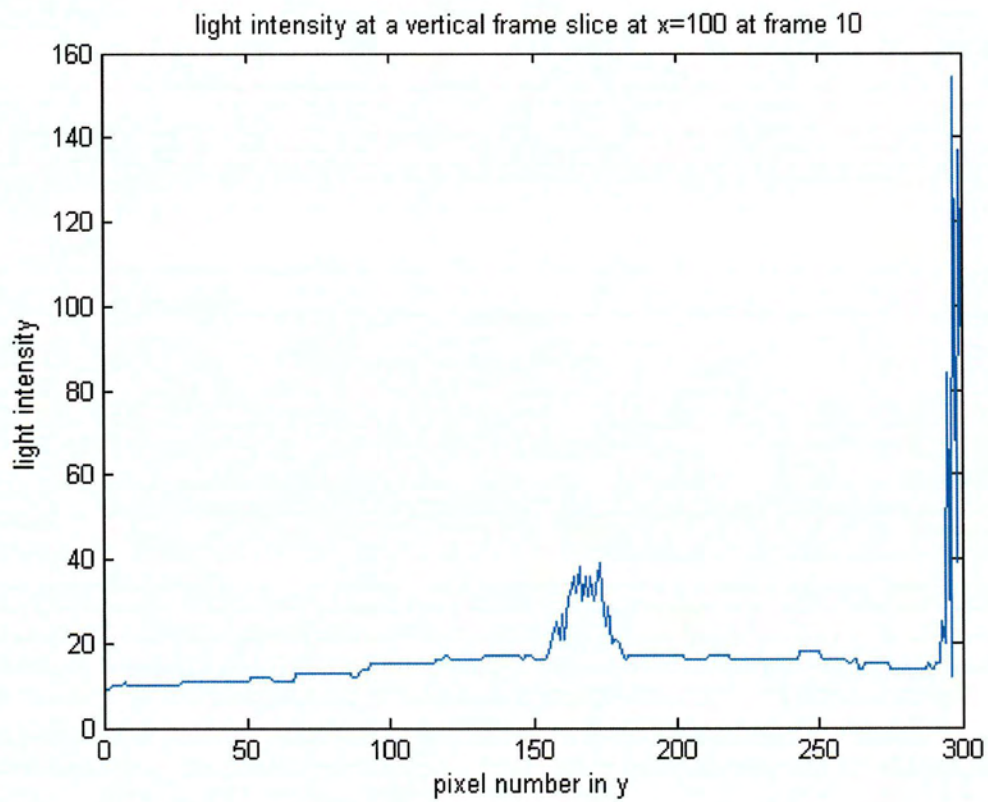
Γράφημα 13- 80Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^9 καρέ



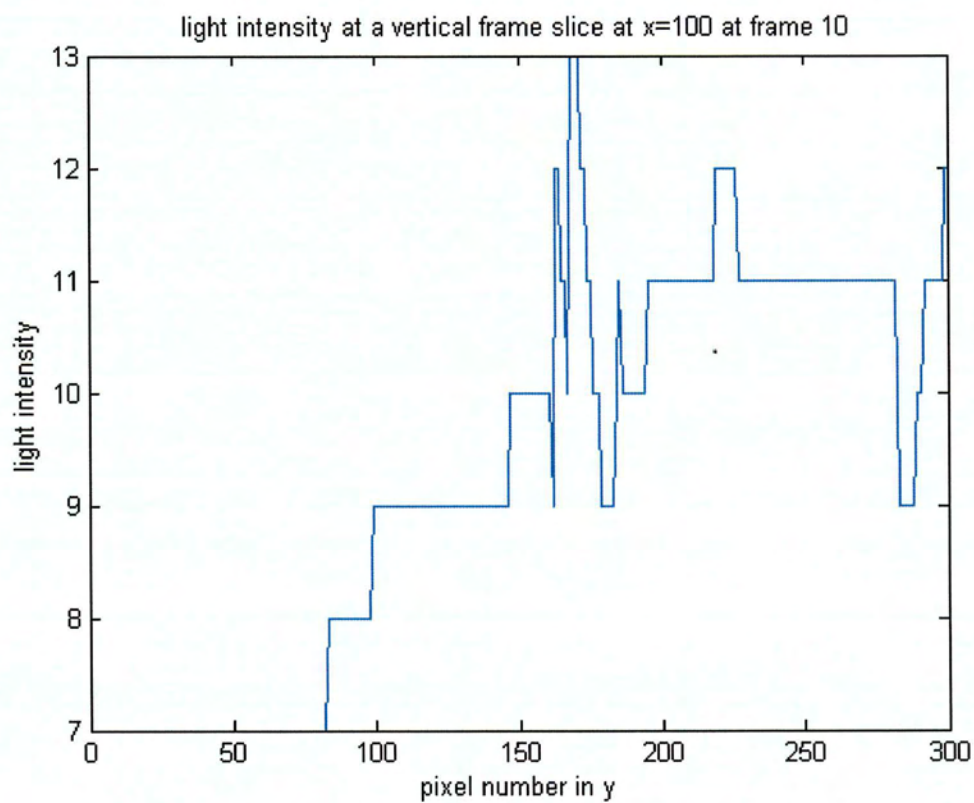
Γράφημα 14- 90Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



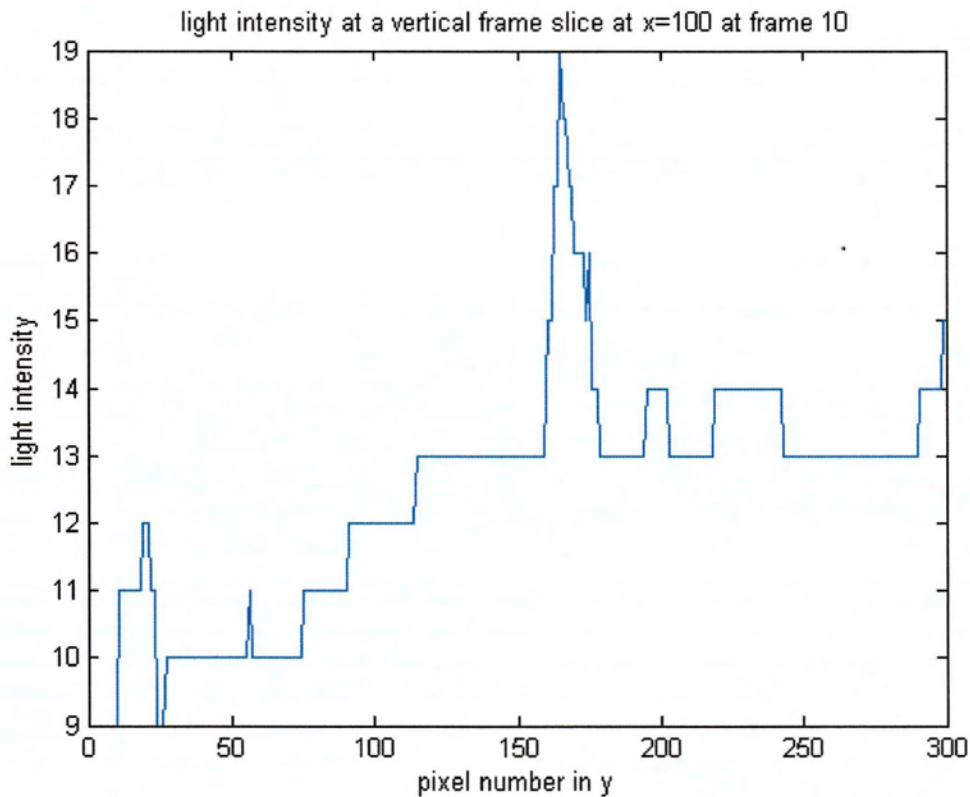
Γράφημα 15- 100Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



Γράφημα 16- 120Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



Γράφημα 17- 140Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ

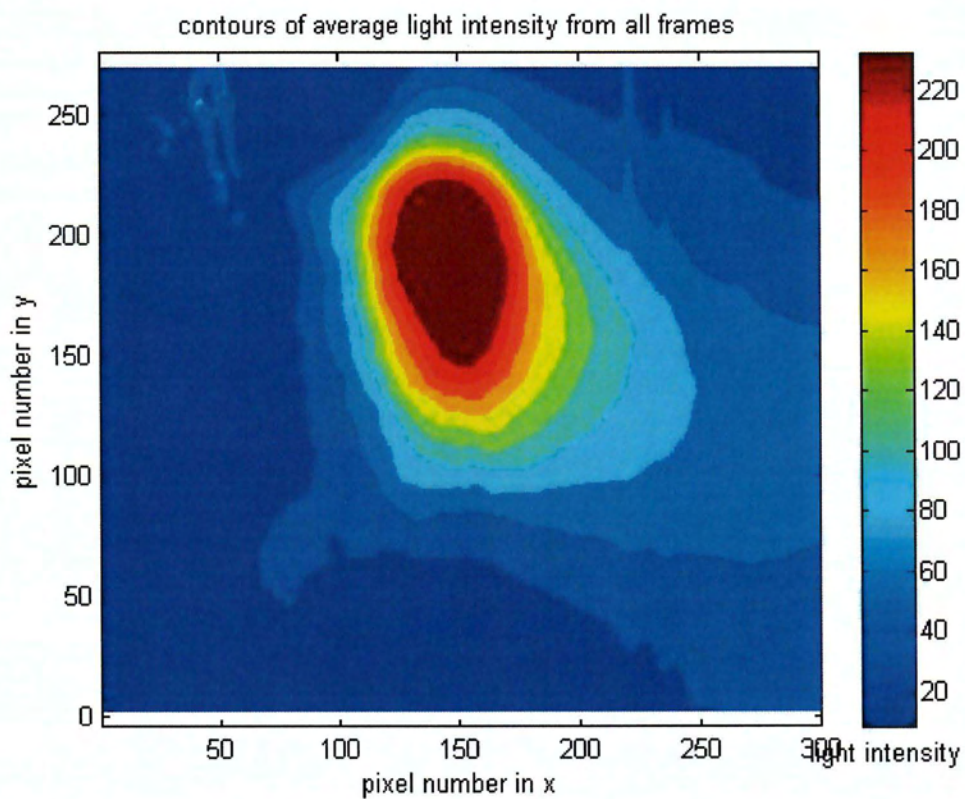


Γράφημα 18- 160Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ

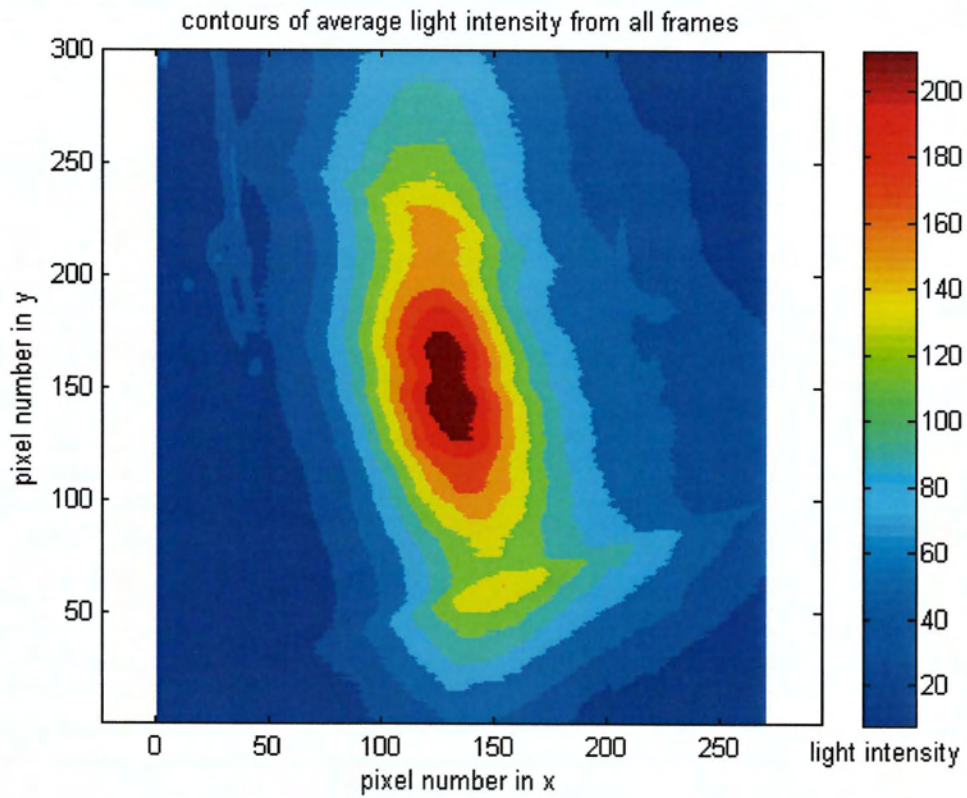
Συγκρίνοντας τα γραφήματα με το γράφημα της ροής χωρίς την επίδραση των μεγαφώνων, και θεωρώντας το $x=100$, σημείο εκτός του κέντρου της ροής, γίνεται προσπάθεια καταγραφής του φαινομένου στιγμιαία. Στα 50Hz το φαινόμενο της διασποράς είναι έντονο, με την ένταση του φωτός να μεγαλώνει πάνω και κάτω από το κέντρο της αρχικής ροής. Οι διακυμάνσεις της έντασης καθιστούν φανερή την επιρροή του τυρβώδους πεδίου. Το φαινόμενο φαίνεται να ομαλοποιείται στα 60Hz με την επίδραση της τύρβης να είναι και πάλι εμφανής. Από τα 70Hz έως και τα 75Hz, η ένταση είναι πιο έντονη στο κέντρο, με αρκετές διακυμάνσεις, ενώ στα 80Hz η ένταση του φωτός γίνεται εντονότερη στα ψηλότερα pixel. Στα 90Hz και 100Hz η ένταση ανεβαίνει που σημαίνει ότι στιγμιαία το φαινόμενο έχει μεταφέρει τα σωματίδια. Στα 120Hz, το φαινόμενο εξασθενεί, για να ξαναγίνει εμφανές στα 140Hz και 160Hz. Σαφέστερα αποτελέσματα θα δοθούν με τις μέσες τιμές, όπου θα αναλυθεί το φαινόμενο σε βάθος χρόνου.

Μέση ένταση φωτός για όλα τα pixel (average light intensity matrix)

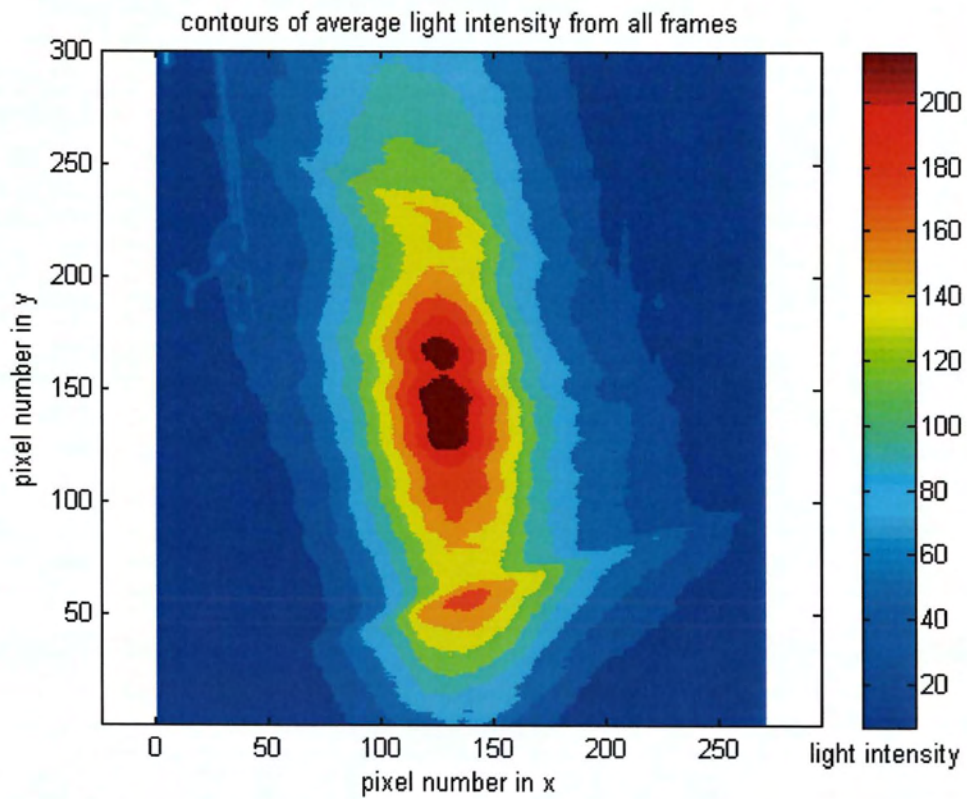
Στα γραφήματα (matrix) που ακολουθούν παραθέτονται οι ισοσταθμικές των μέσων τιμών της έντασης του φωτός σε κάθε pixel. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την γενική τάση του φαινομένου, για κάθε συχνότητα παλμού, και είναι πιο ασφαλή από τα στιγμιαία που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.



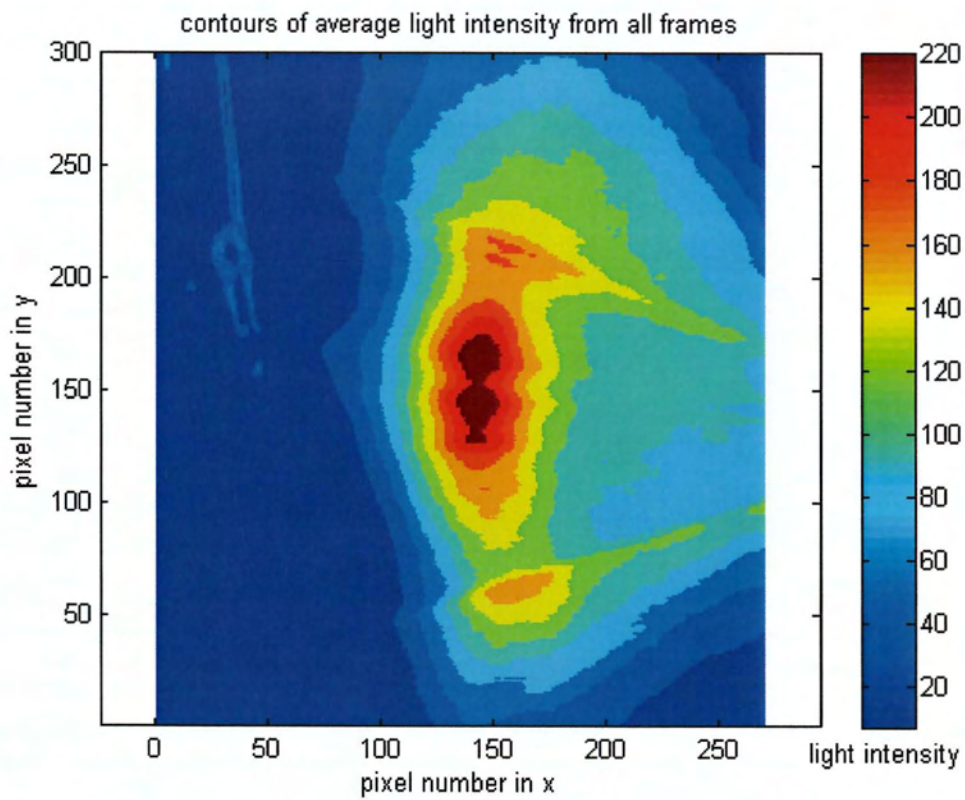
Γράφημα 19- no_prower -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



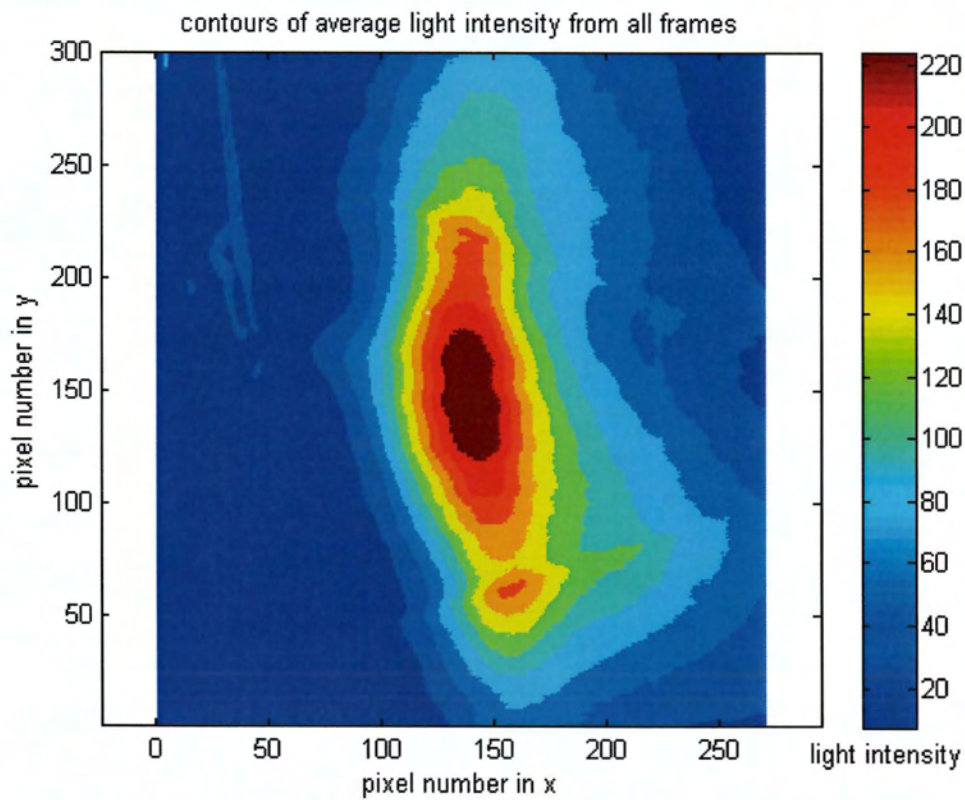
Γράφημα 20-50Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



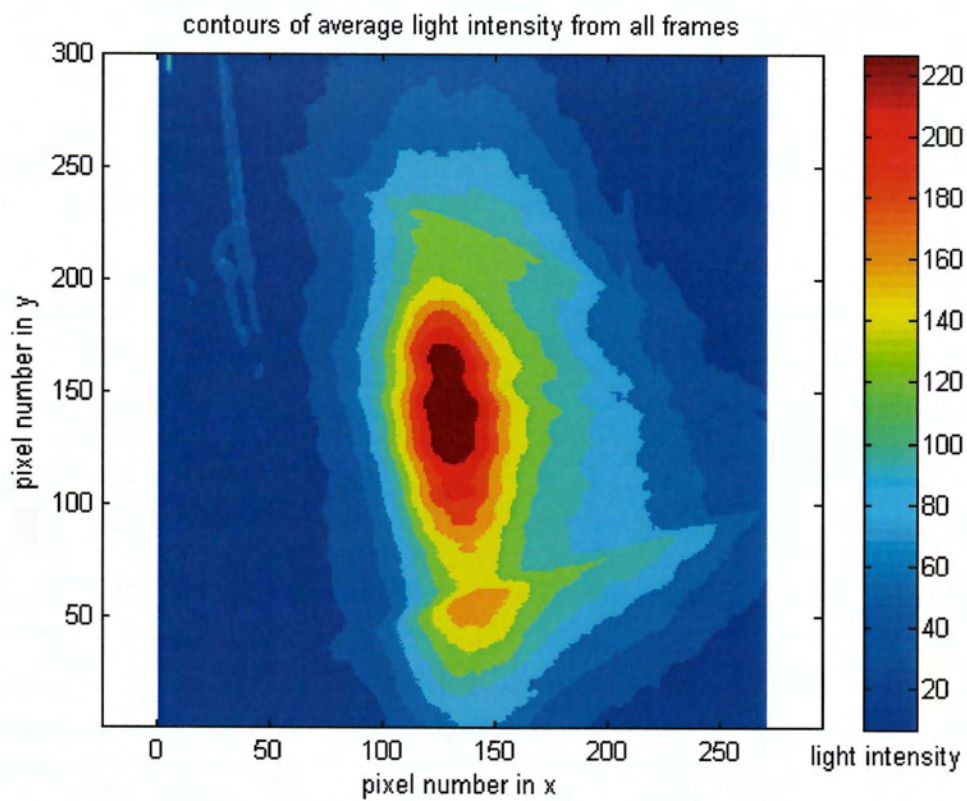
Γράφημα 21-60Hz-Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



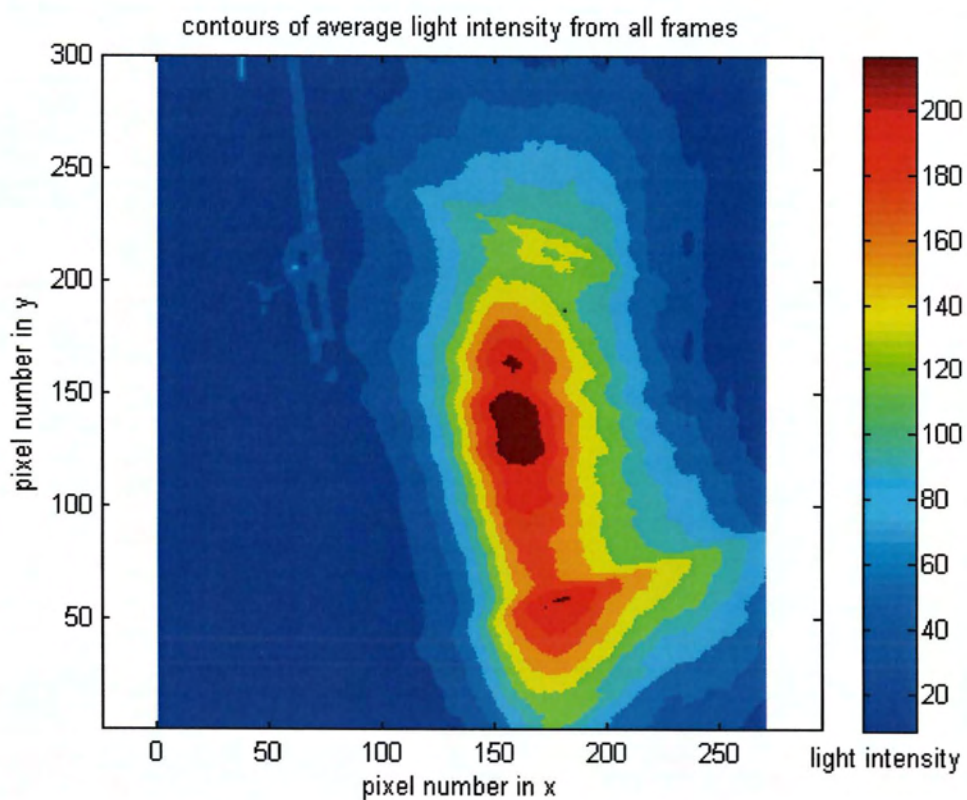
Γράφημα 22- 70Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



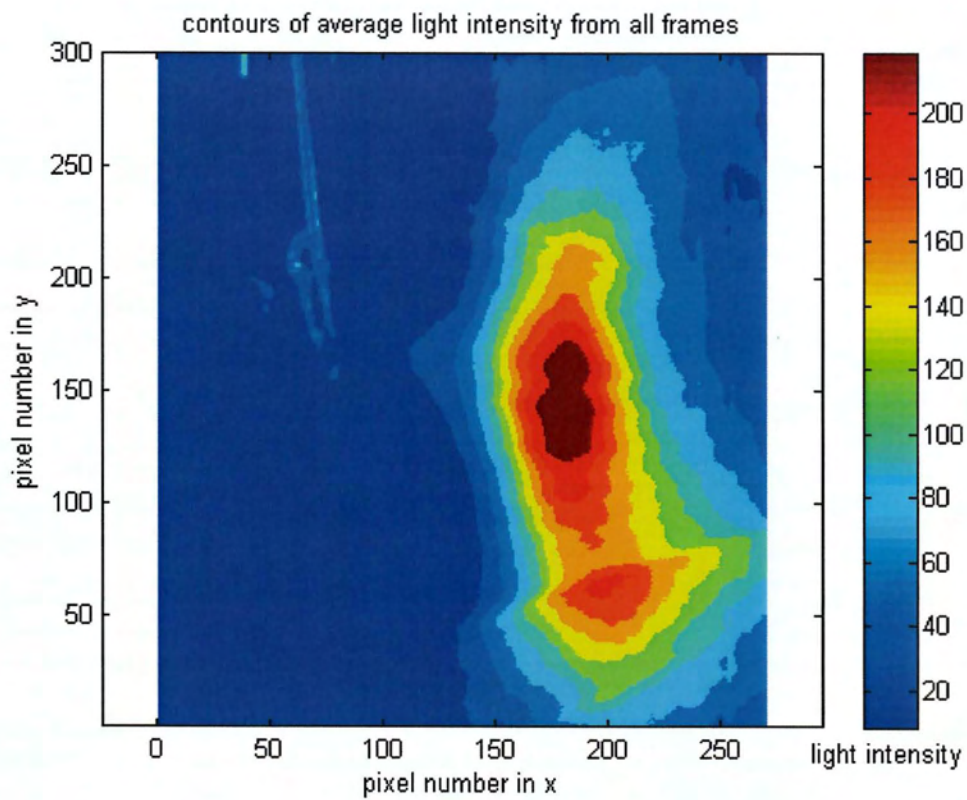
Γράφημα 23- 73Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



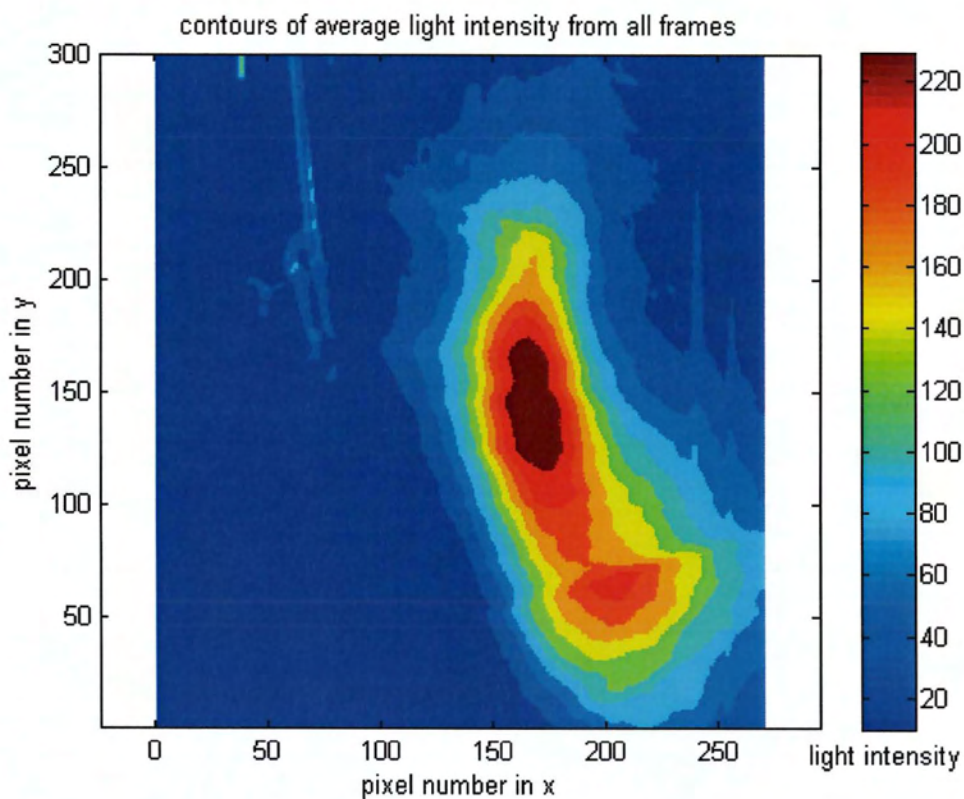
Γράφημα 24- 75Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



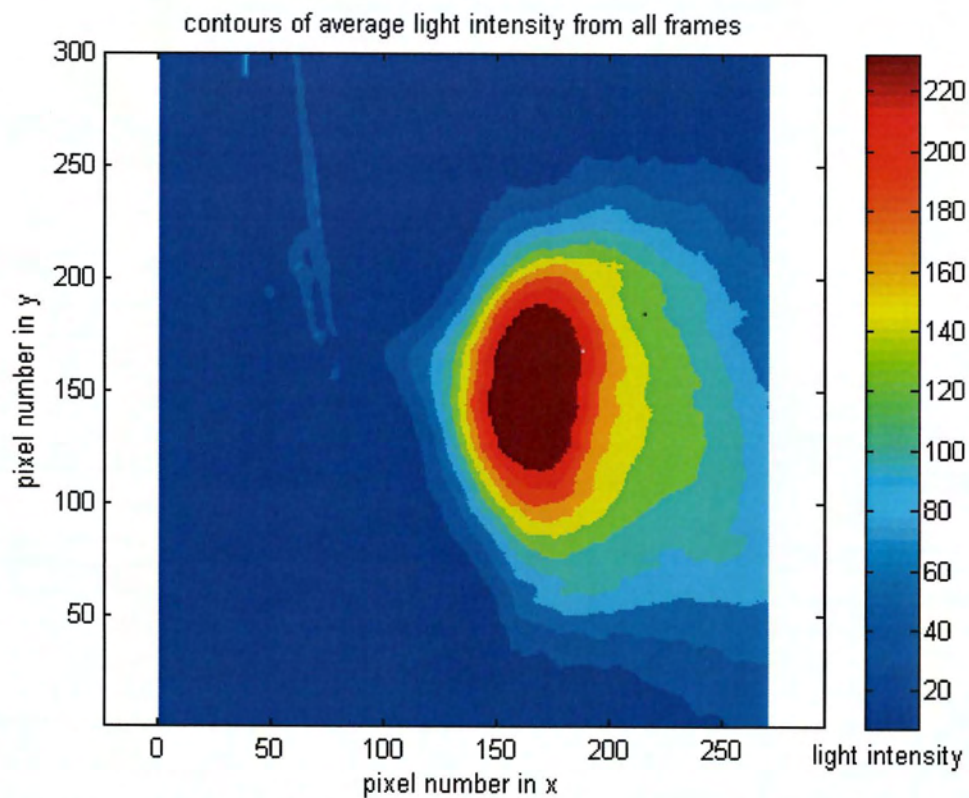
Γράφημα 25- 80Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



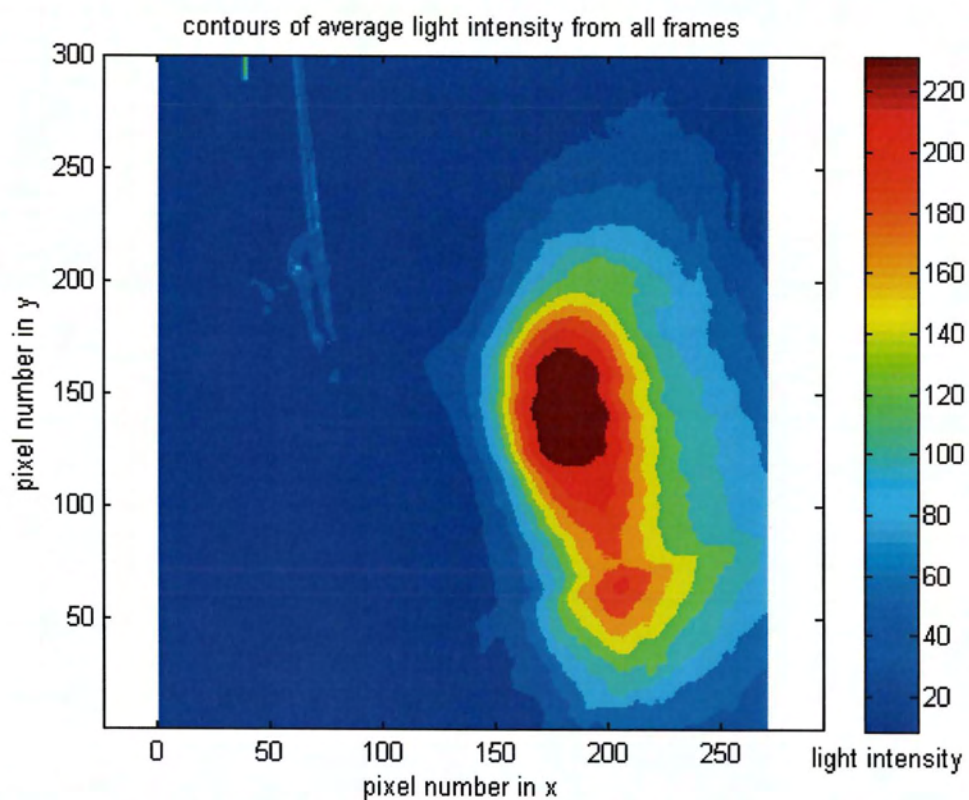
Γράφημα 26- 90Hz-Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



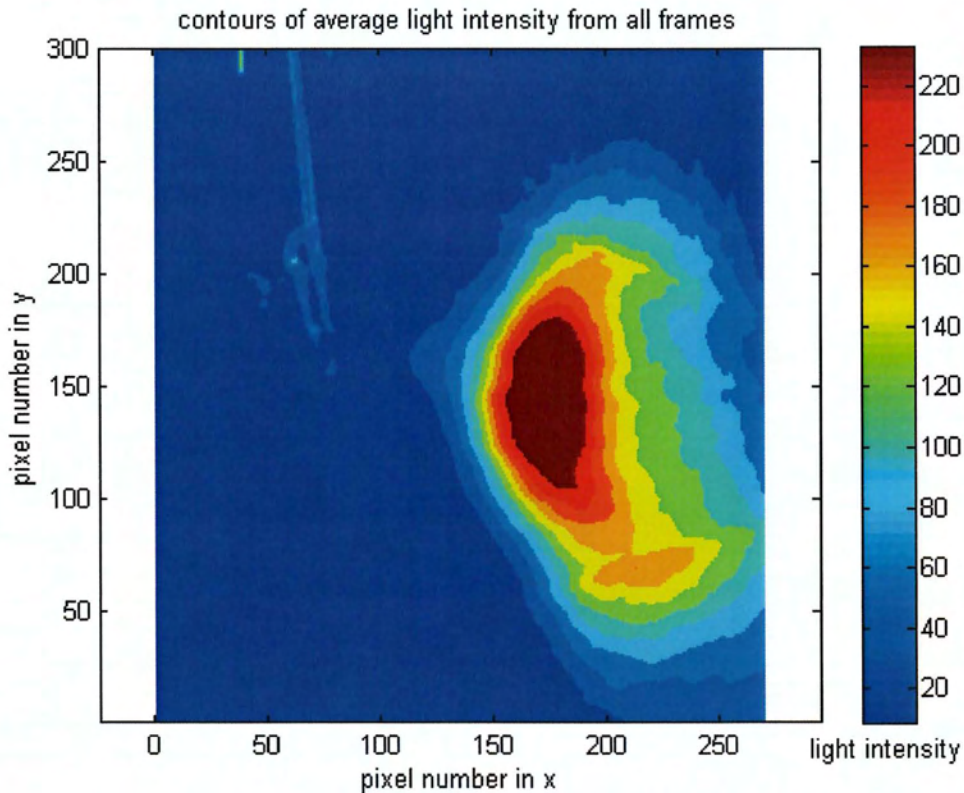
Γράφημα 27- 100Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



Γράφημα 28—120Hz-Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



Γράφημα 29-140Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames

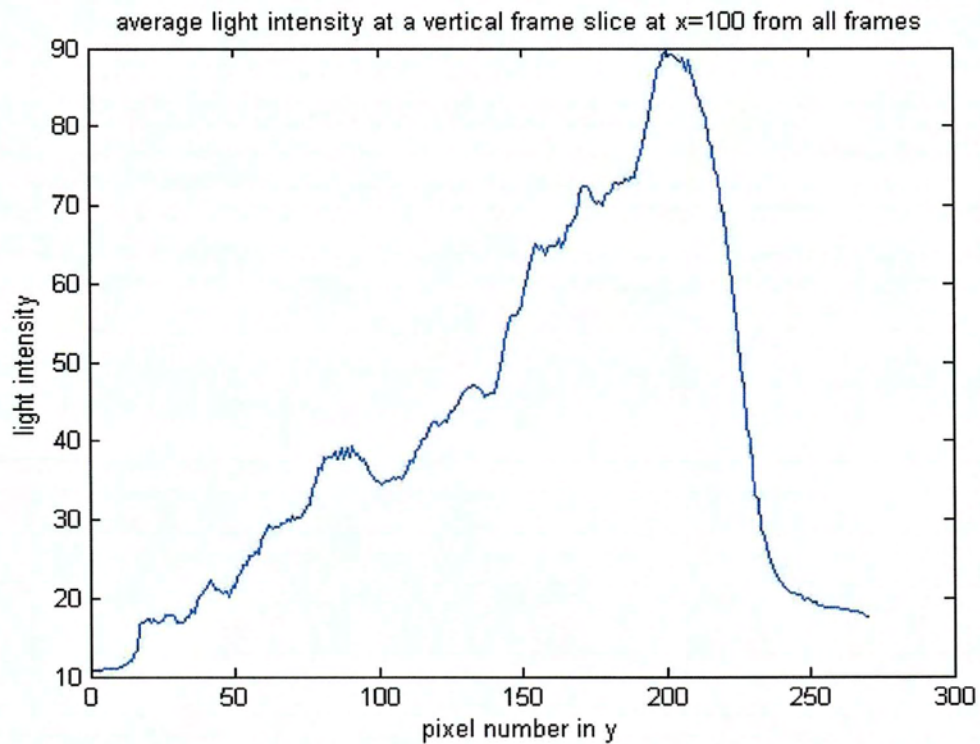


Γράφημα 30- 160Hz -Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames

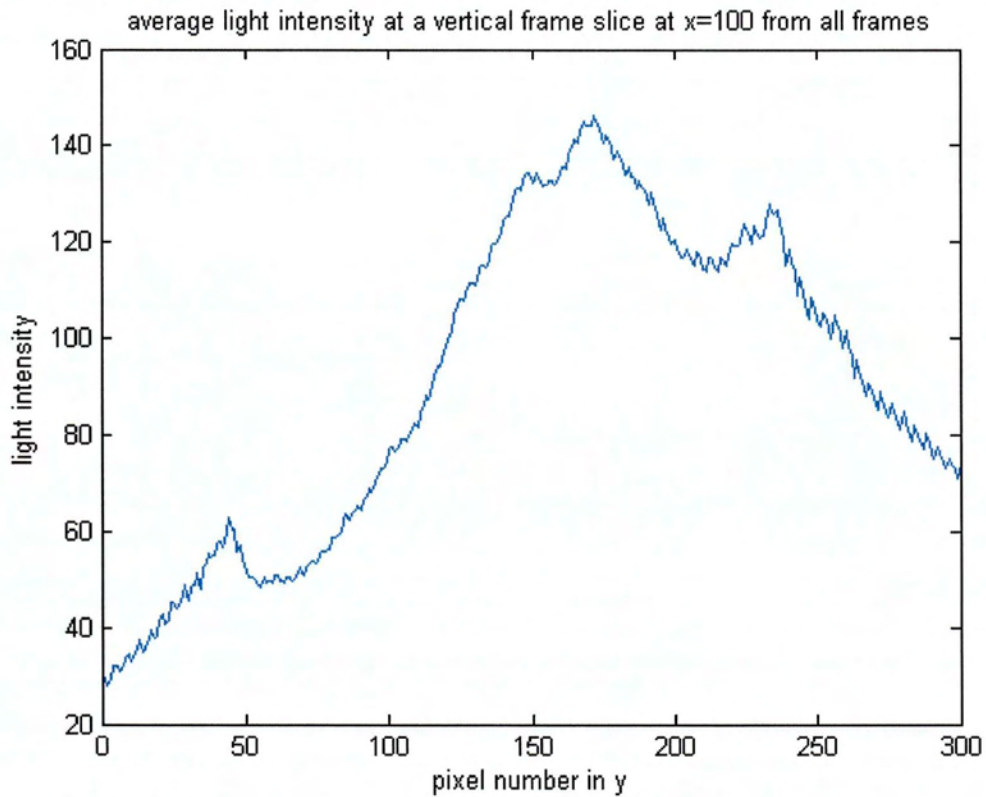
Ξεκινώντας από τα 50 hz και συγκρίνοντας με την αρχική ροή (απου-σία ηχητικού παλμού) βλέπουμε ότι τα σωματίδια του ατμού απλώνονται, λό-γω της επίδρασης της τύρβης. Τα έντονα χρώματα (κόκκινο , κίτρινο) καταλαμβάνουν μεγαλύτερη επιφάνεια, χωρίς ωστόσο να υπάρχει εμφανής διασπορά των σωματιδίων. Επιπλέον, η ισοτροπία της είναι αρκετά μικρή καθώς το σχήμα των χρωμάτων που υπάρχουν δεν είναι τόσο στρόγγυλο. Συνεχίζοντας, στα 60 Hz η διασπορά είναι μεγαλύτερη, με το φαινόμενα να είναι πιο έντονο πάνω και κάτω από το κέντρο. Η μέση ένταση της φωτεινότητας στο κέντρο μειώνεται, κάτι που δείχνει ότι η και συγκέντρωση των σωματιδίων έχει μειωθεί. Στα 70Hz, τα σωματίδια έχουν μια τάση προς τα αριστερά της ροής Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται μέχρι και τα 100 Hz, με την μεγαλύτερη ανισο-τροπία να εμφανίζεται στα 80Hz.Στις συχνότητες των 80, 90 και 100Hz, υπάρχει μια τάση κίνησης των σωματιδίων προς τα πάνω, κάτι που φαίνεται και από το έντονο κόκκινο χρώμα μακριά από το κέτρο της ροής. Στα 120Hz η τύρβη γίνεται σχεδόν ισότροπη και η ένταση της γίνεται μέγιστη στο κέντρο όπως φαίνεται από τα χρώματα που σχηματίζονται. Το φαινόμενο δείχνει να εξασθενεί. Στα 120Hz, η τύρβη φέρνει τη ροή προς τα πάνω ξανά, ενώ στα 160Hz ξαναγίνεται ισότροπη.

Μέση ένταση φωτός για κάθετη τομή στο $x=100$ (average light intensity at $x=100$, vertical slice)

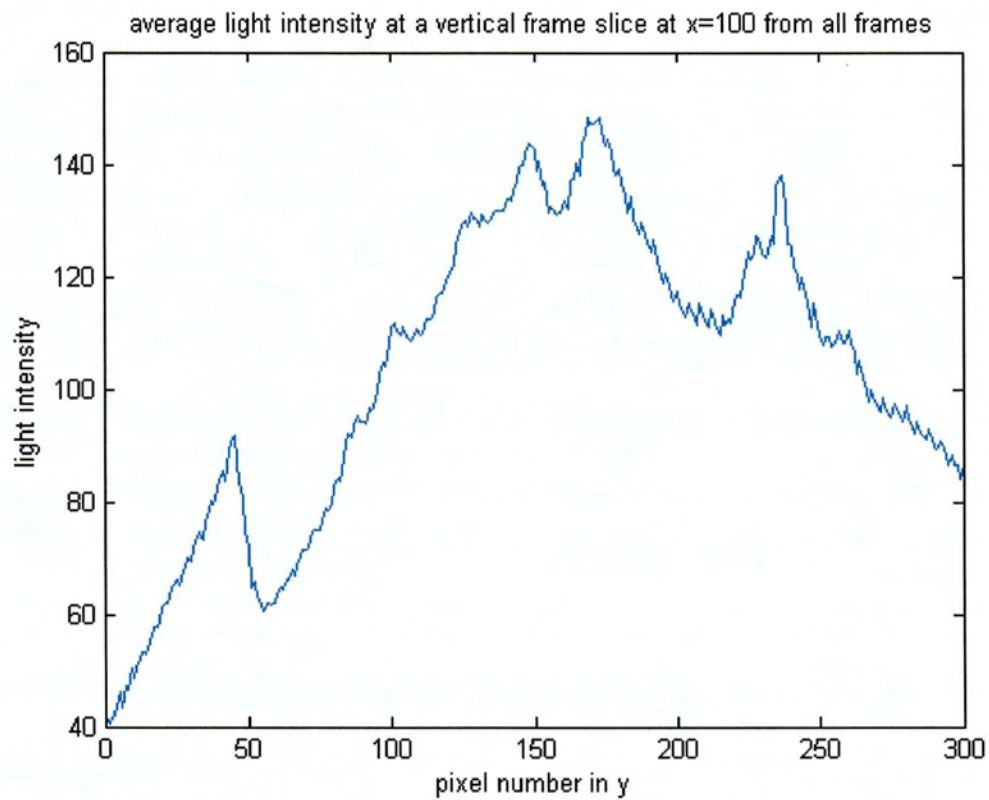
Στη συνέχεια, παραθέτονται τα γραφήματα του μέσου όρου της έντασης του φωτός συναρτήσει των pixel για όλα τα σημεία του y -άξονα σε συγκεκριμένη τιμή του x , για όλα τα frames των συχνοτήτων που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα.



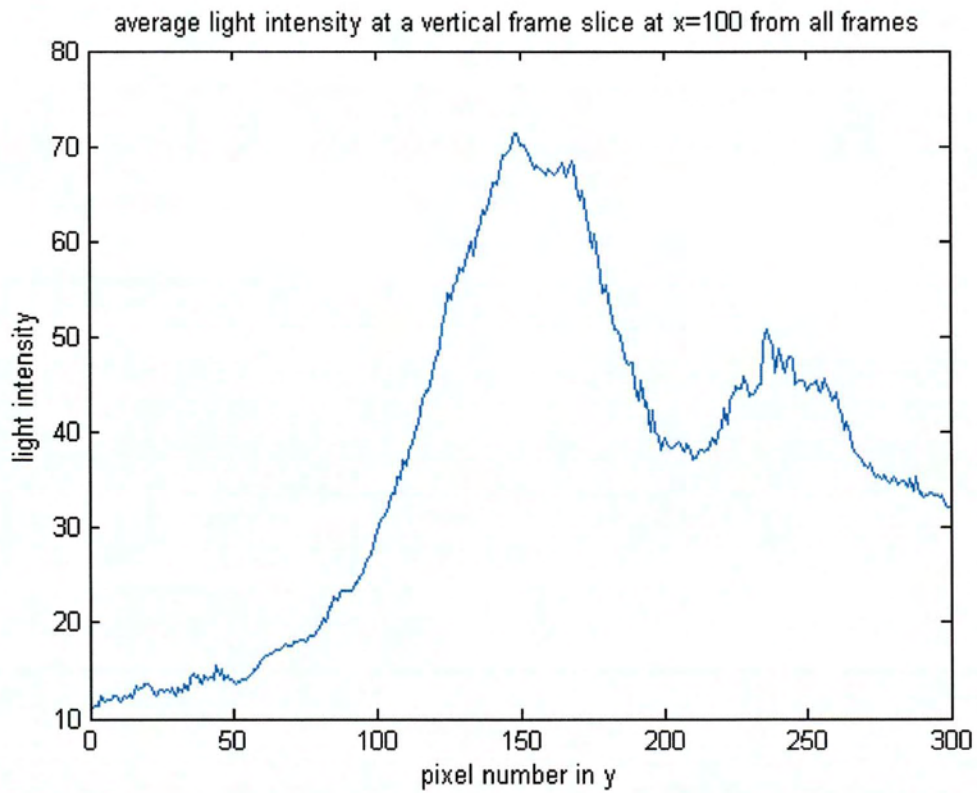
Γράφημα 31- No_power- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



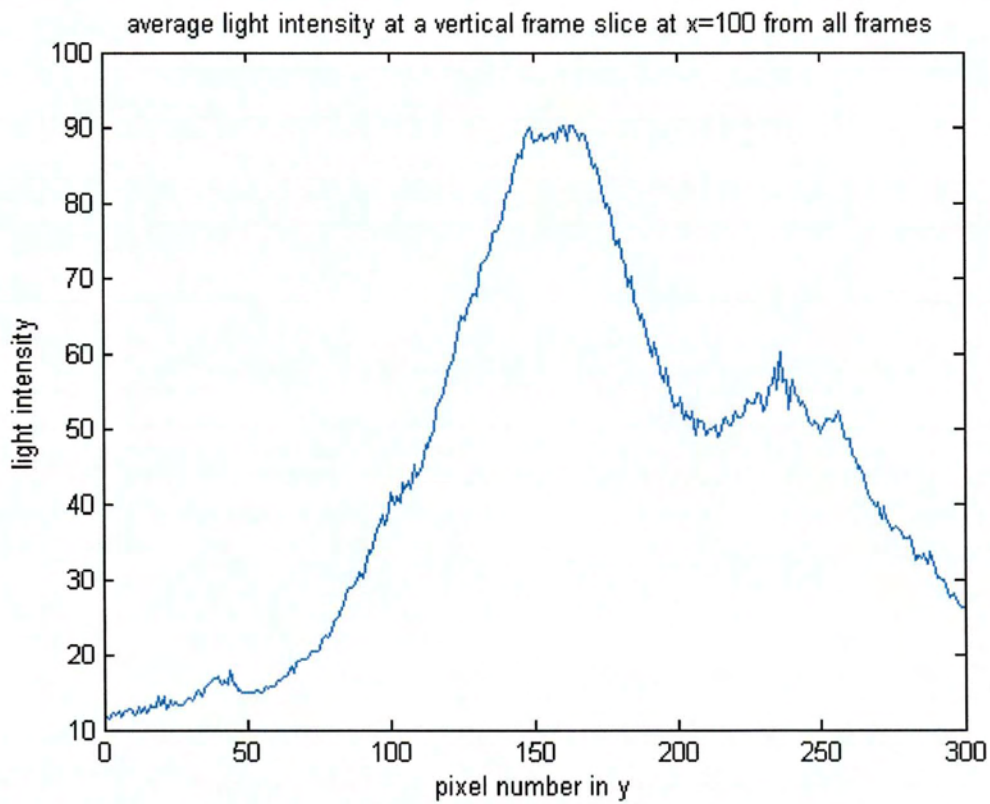
Γράφημα 32- 50Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



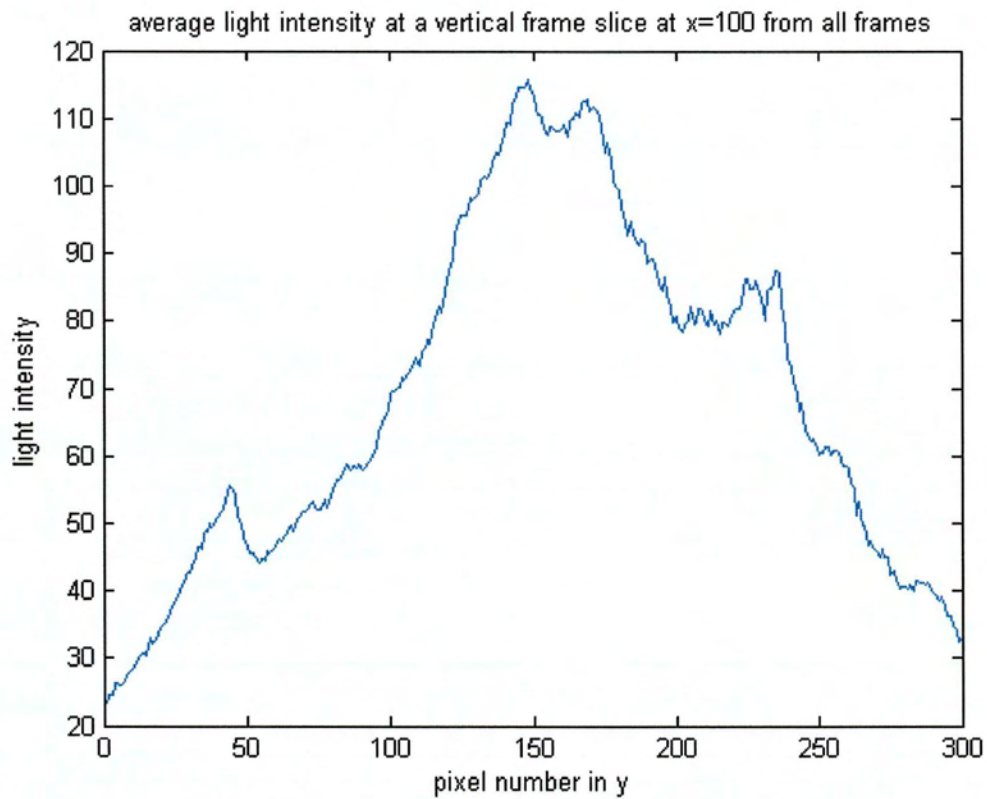
Γράφημα 33- 60Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



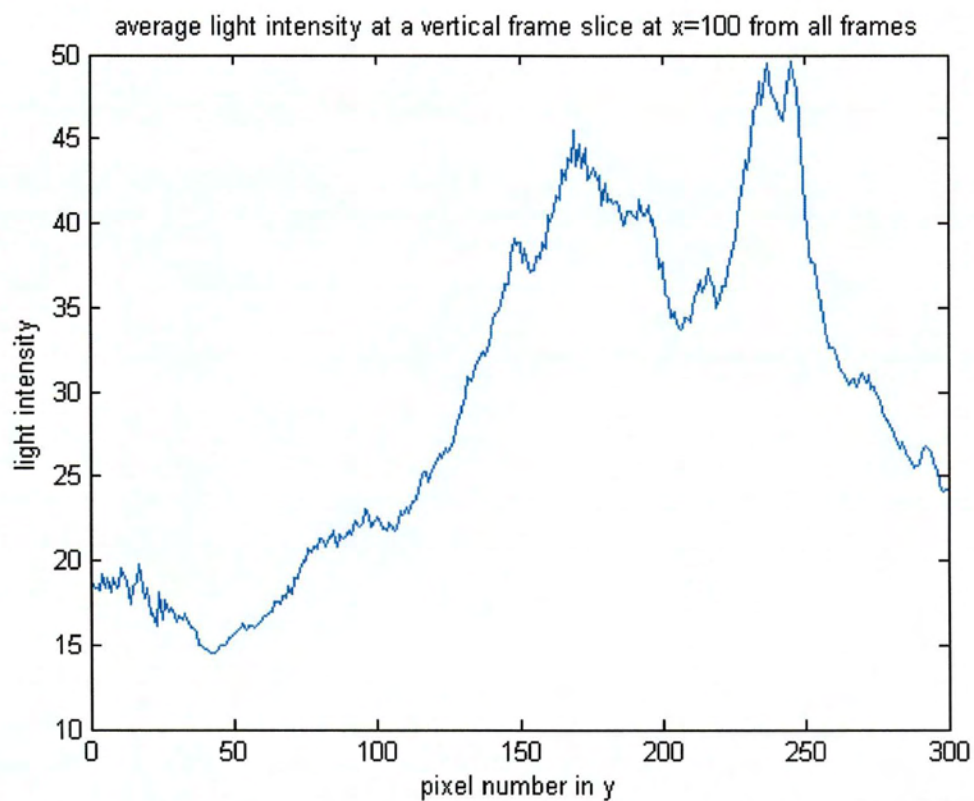
Γράφημα 34- 70Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



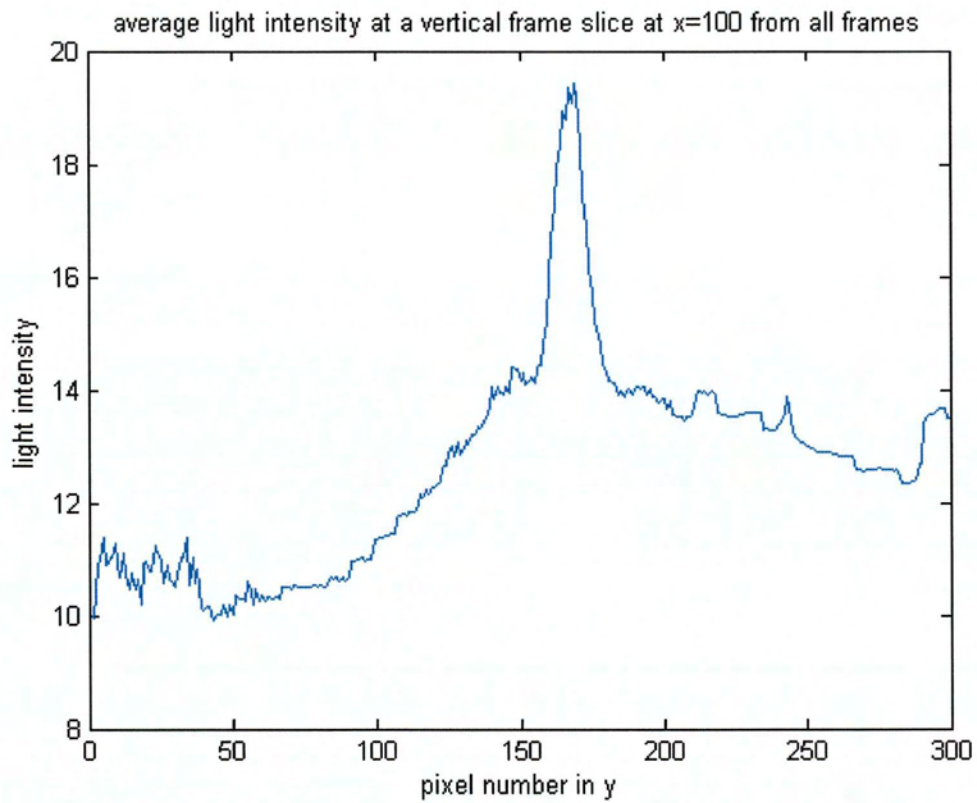
Γράφημα 35- 73Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



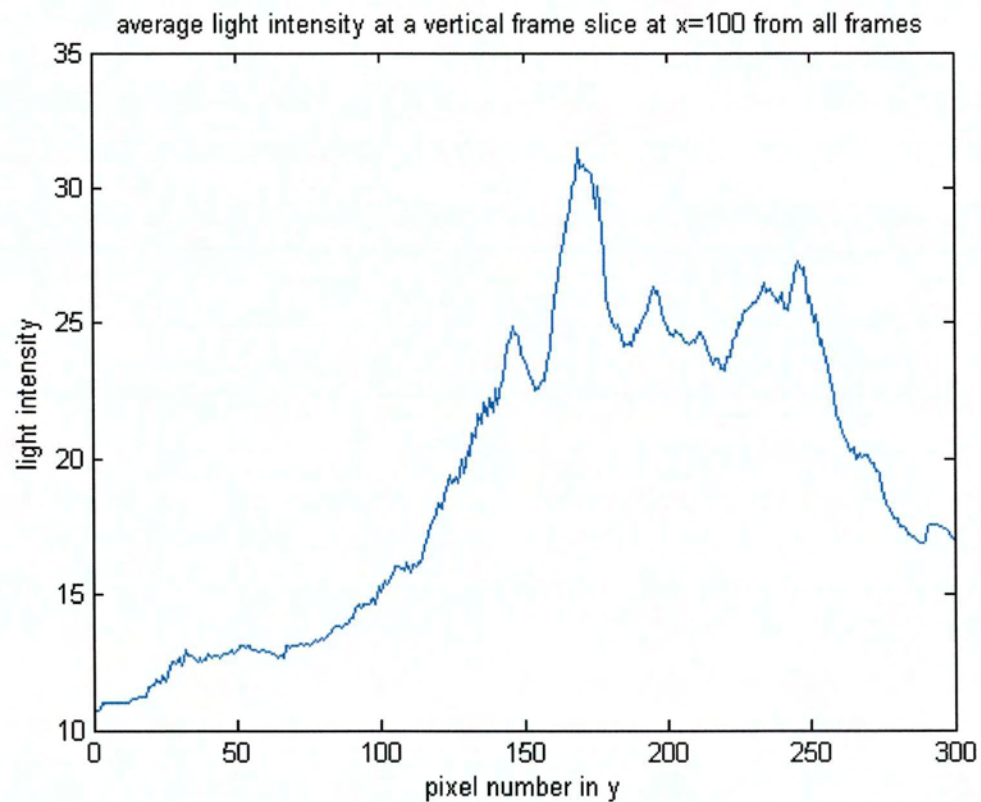
Γράφημα 36- 75Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



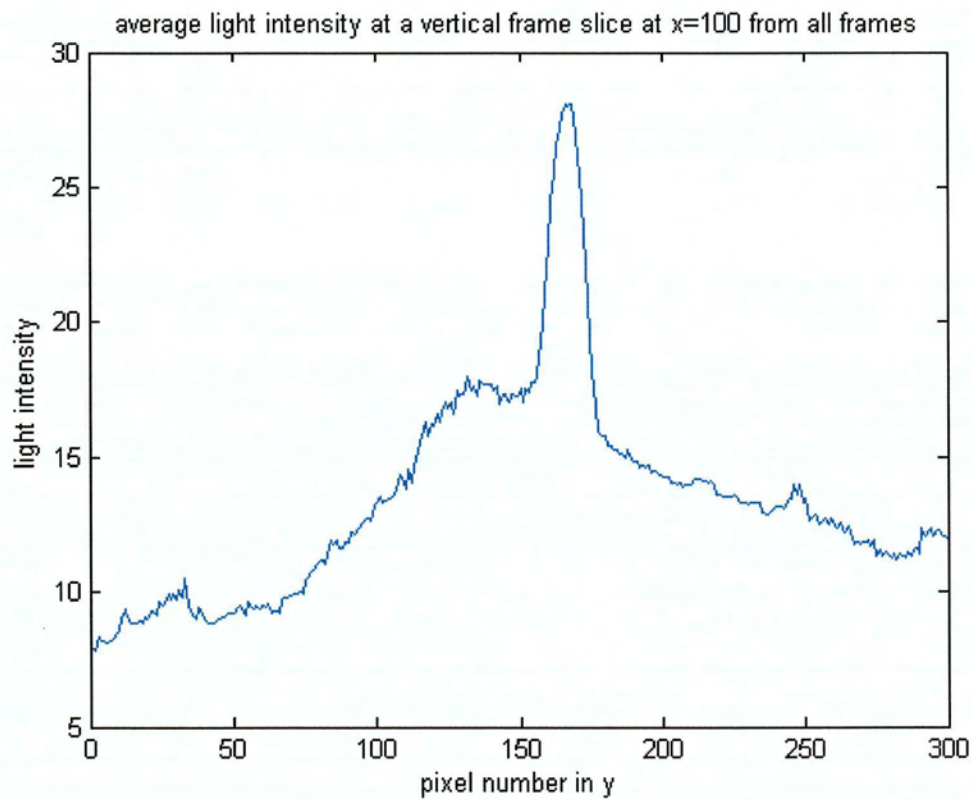
Γράφημα 37- 80Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



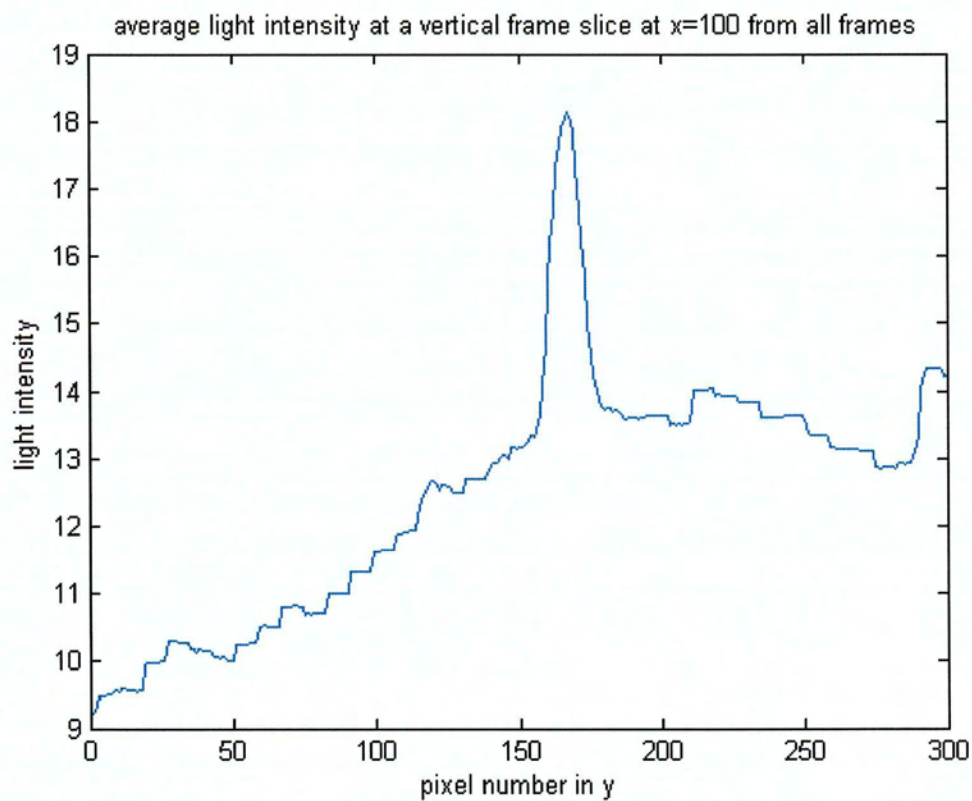
Γράφημα 38- 90Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



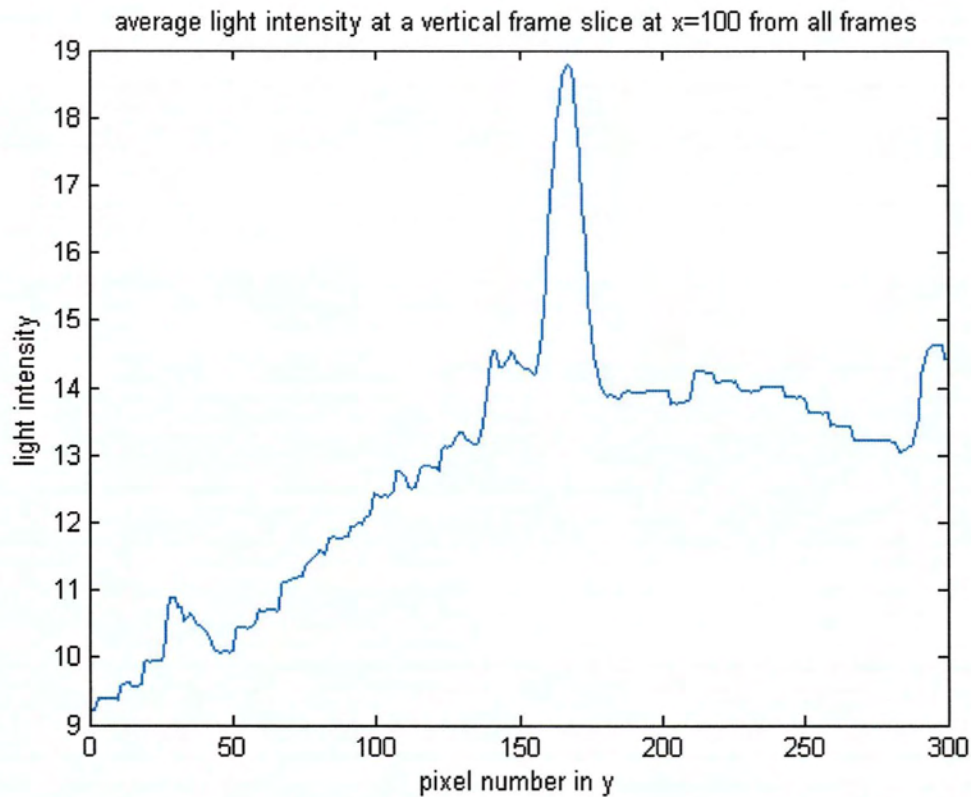
Γράφημα 39 -100Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



Γράφημα 40- 120Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames



Γράφημα 41- 140Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames

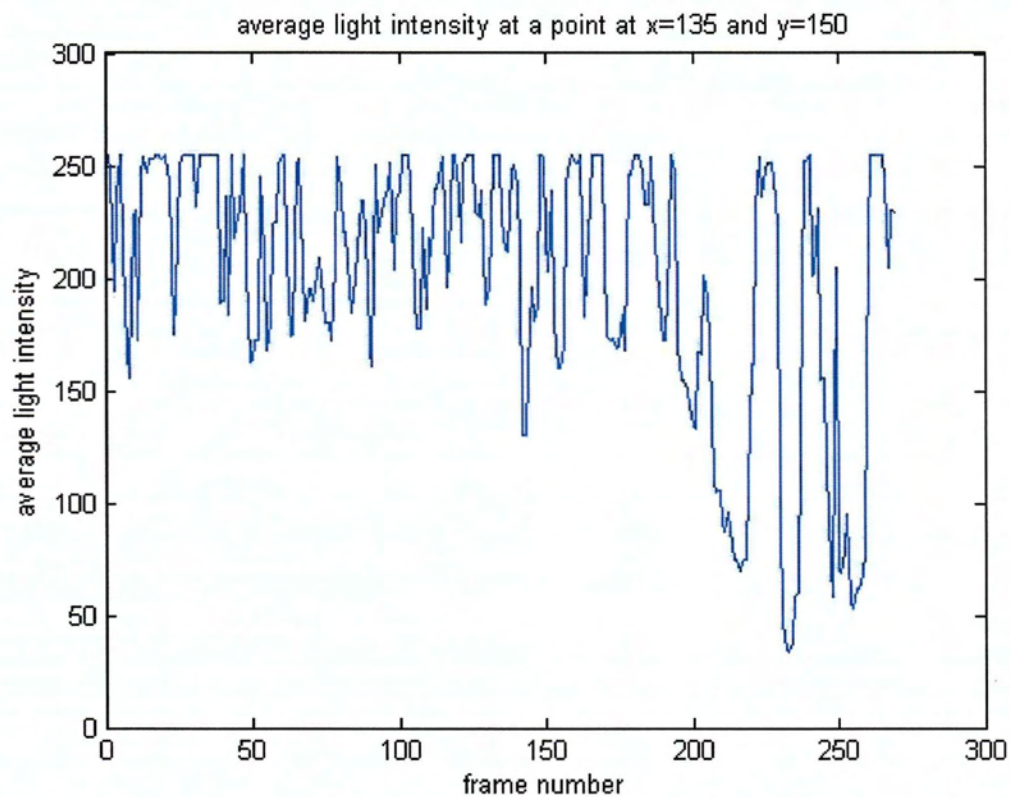


Γράφημα 42- 160Hz- Γράφημα μέσης τιμής της έντασης φωτός συναρτήσει των pixel σε μια κάθετη φέτα από όλα τα frames

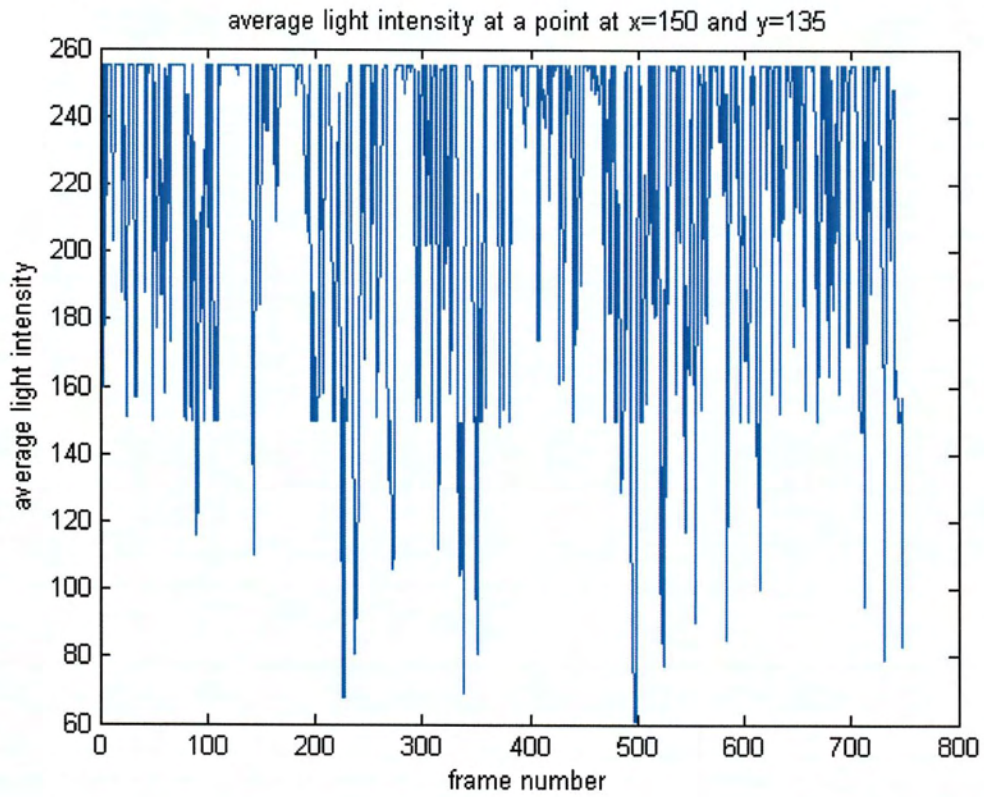
Στα παραπάνω γραφήματα μας έχουμε τους μέσους όρους από όλα τα frames για συχνότητες από 0 μέχρι 160 hz. Συγκρίνοντας, πάντα, με το γράφημα στο οποίο δεν έχουμε επίδραση των μεγαφώνων, γίνεται αντιληπτή η διασπορά στον κατακόρυφο άξονα. Όπως διαπιστώσαμε και στα στιγμιαία γραφήματα για το frame 10, έτσι και εδώ μπορούμε να πούμε ότι στο κέντρο υπάρχει μεγάλη διακύμανση που μας δείχνει ότι έχουμε έντονη τύρβη. Μια σημαντική διαφορά ωστόσο είναι ότι στους μέσους όρους ομαλοποιείται η διασπορά της τύρβης και γίνεται εντονότερη στο κέντρο, με αποτέλεσμα να είναι πιο ισότροπη απ ότι στα στιγμιαία. Συγκεκριμένα, στα 50-80 Hz βλέπουμε ότι υπάρχει η πιο έντονη τύρβη από την καμπύλη στο διάγραμμα, και η διασπορά των σωματιδίων σχετικά με το κέντρο είναι έντονη. Όσο ανεβαίνει η συχνότητα αρχίζει να εξασθενεί, με αποτέλεσμα στις συχνότητες των 120,140 και 160 Hz, η συγκέντρωση σωματιδίων να υπάρχει μόνο σε συγκεκριμένο σημείο.

Ένταση φωτός για το γεωμετρικό κέντρο των καρτέ (Light intensity at frame center)

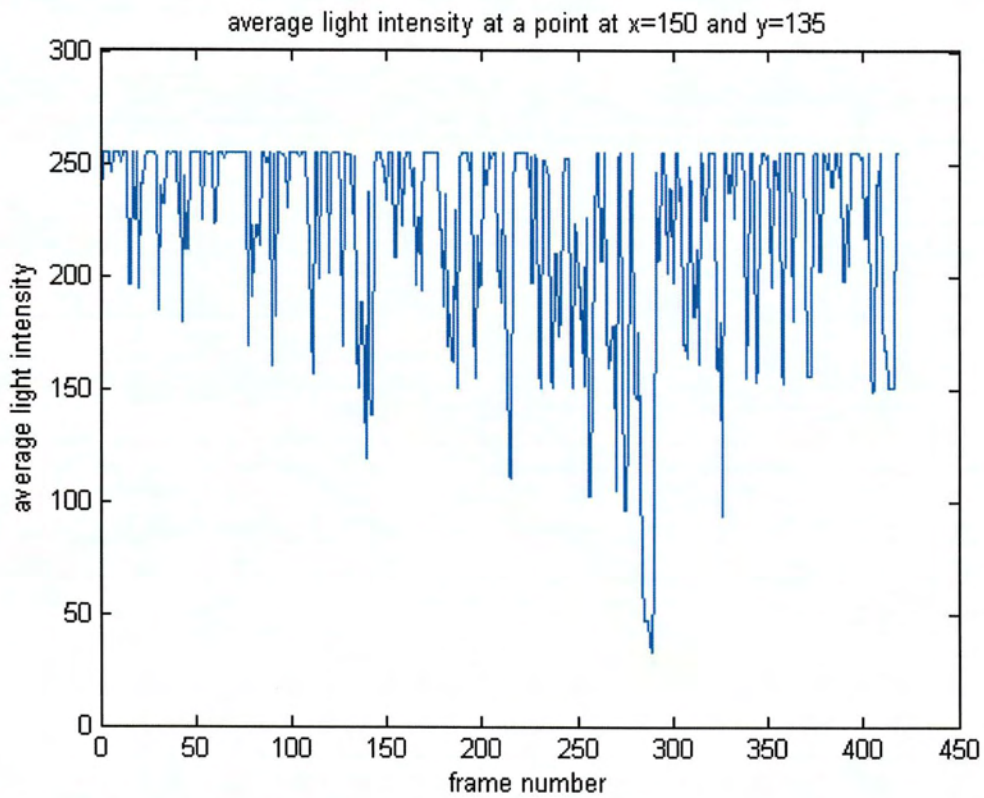
Στα συγκεκριμένα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τιμής της έντασης του φωτός σε ένα συγκεκριμένο σημείο ($x=150$, $y=135$) σε συνάρτηση με τον αριθμό των καρτέ. Το σημείο που επιλέξαμε είναι το γεωμετρικό κέντρο των καρτέ. Οι συχνότητες που χρησιμοποιήσαμε είναι ίδιες με τις προηγούμενες περιπτώσεις.



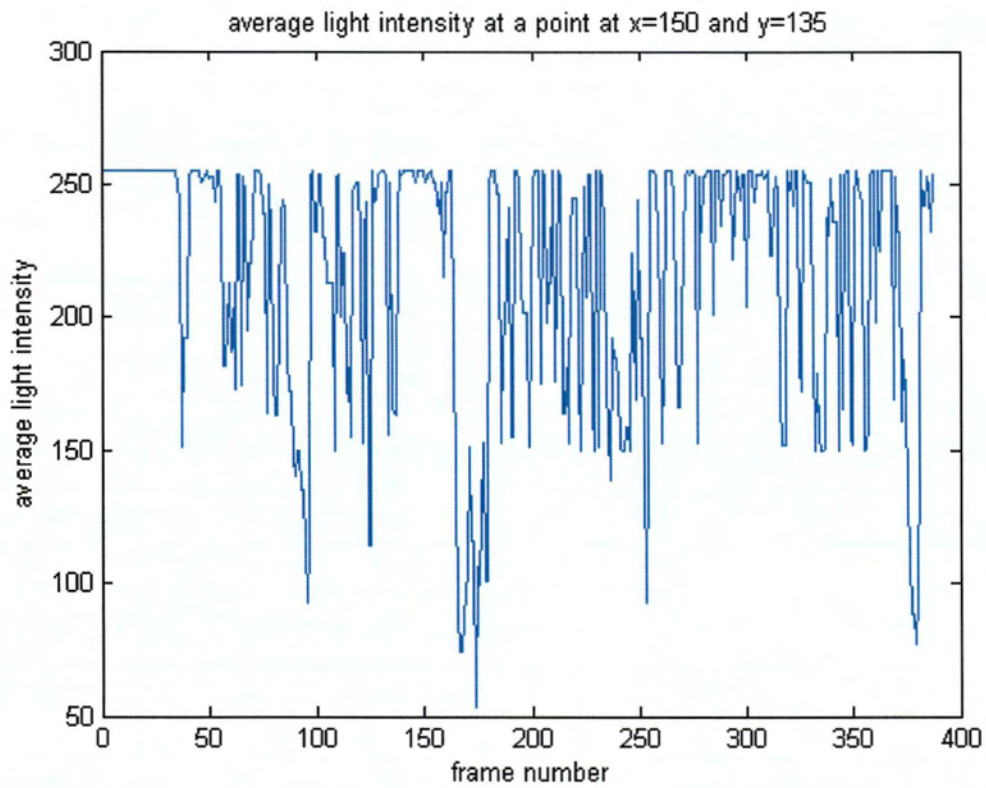
Γράφημα 43- No_power- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150$, $y=135$) συναρτήσει των frames



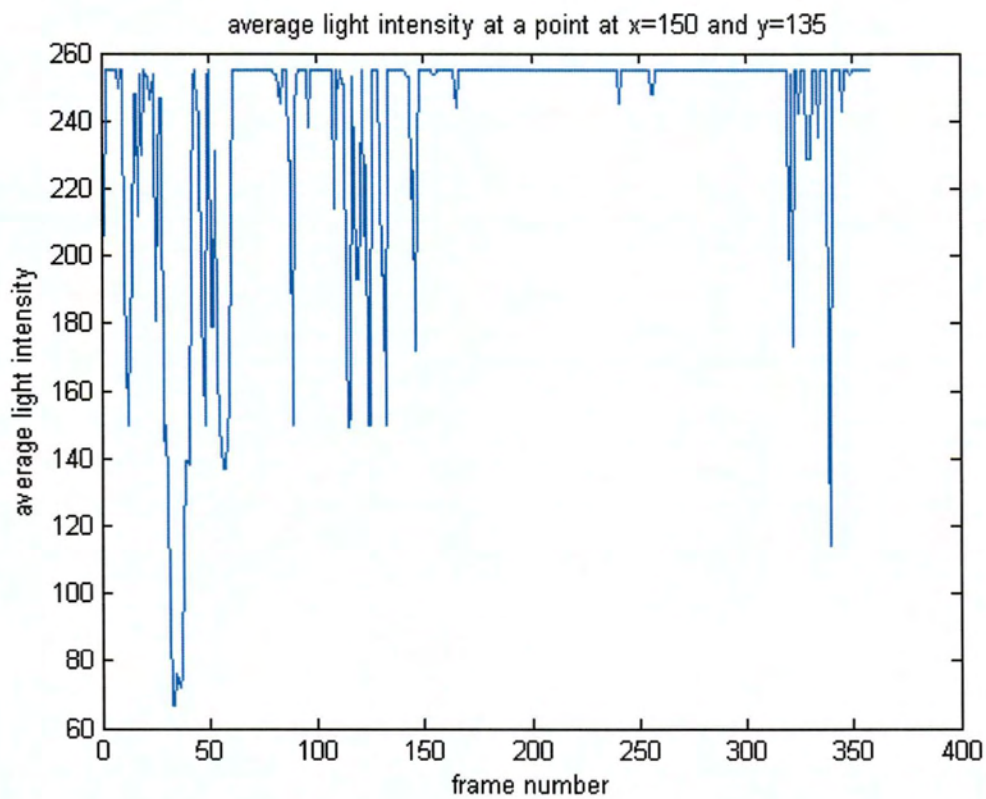
Γράφημα 44- 50Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



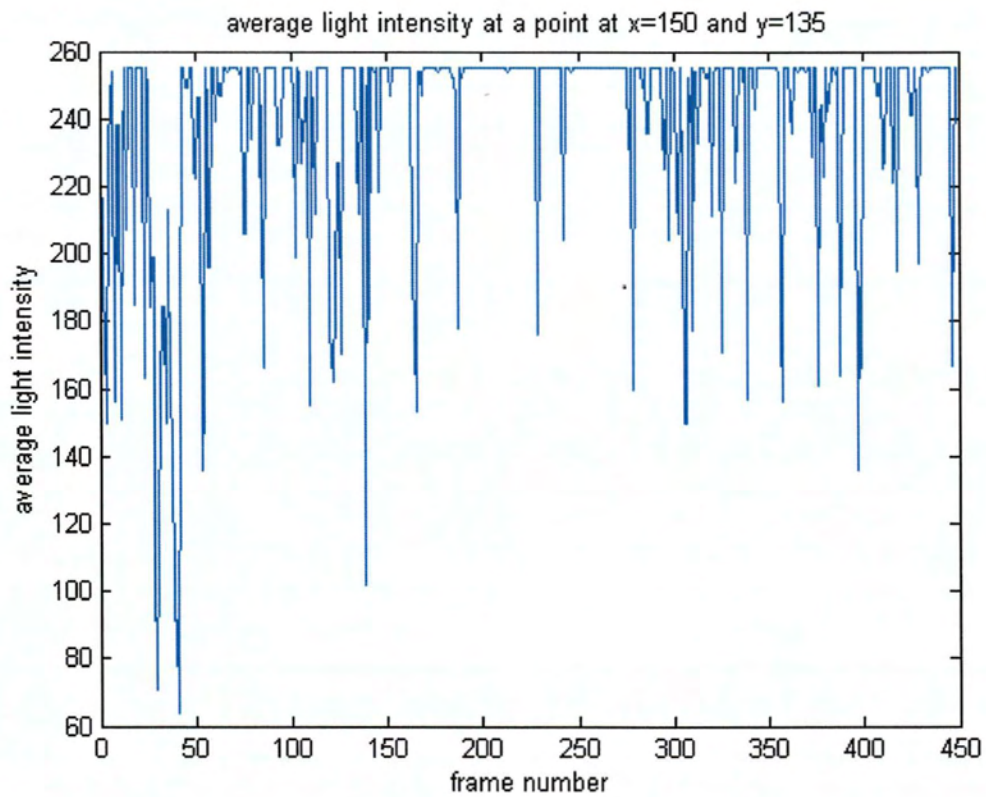
Γράφημα 45- 60Hz-Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



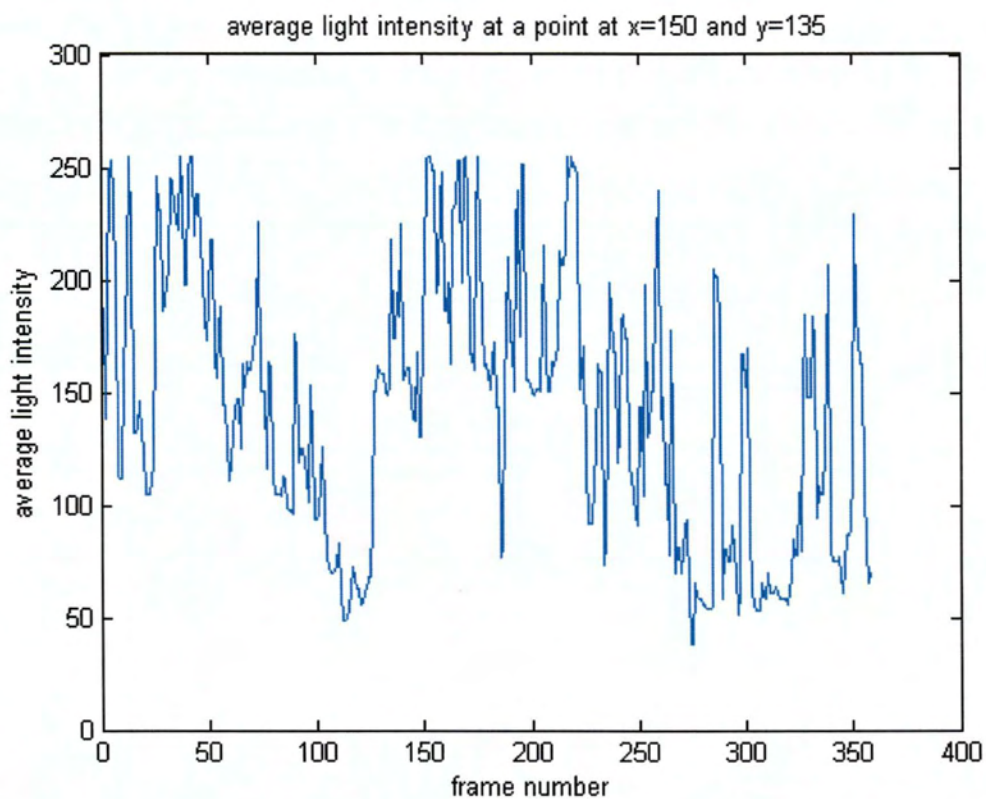
Γράφημα 46-70Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150$, $y=135$) συναρτήσει των frames



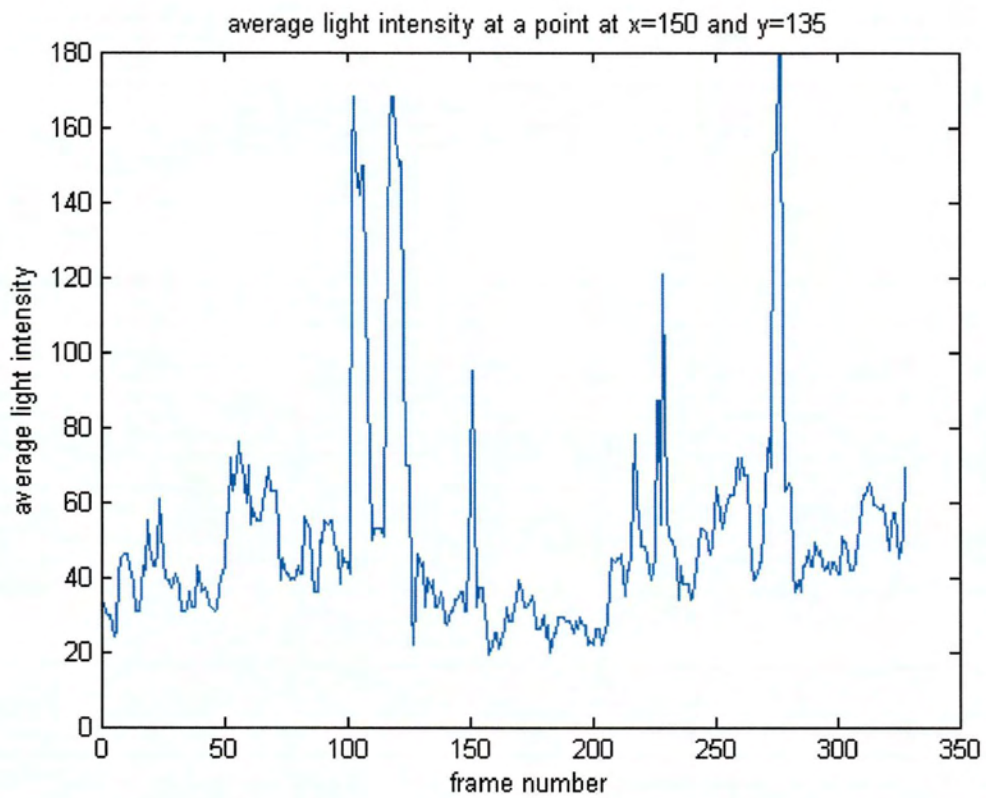
Γράφημα 47- 73Hz-Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150$, $y=135$) συναρτήσει των frames



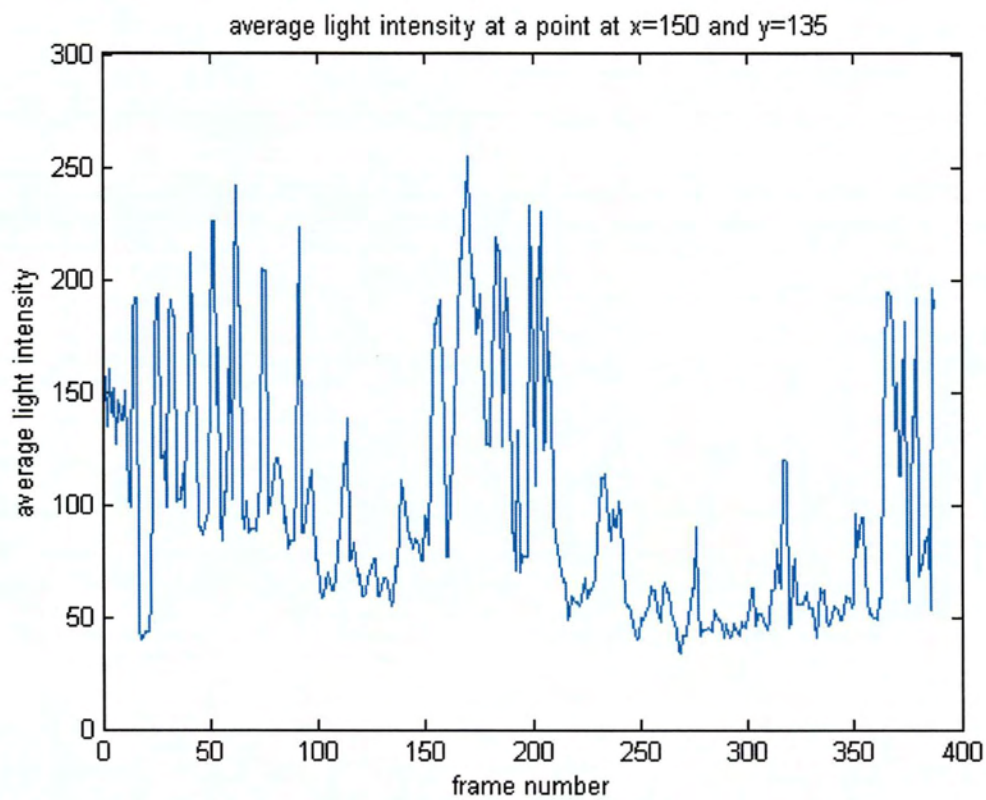
Γράφημα 48- 75Hz-Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames



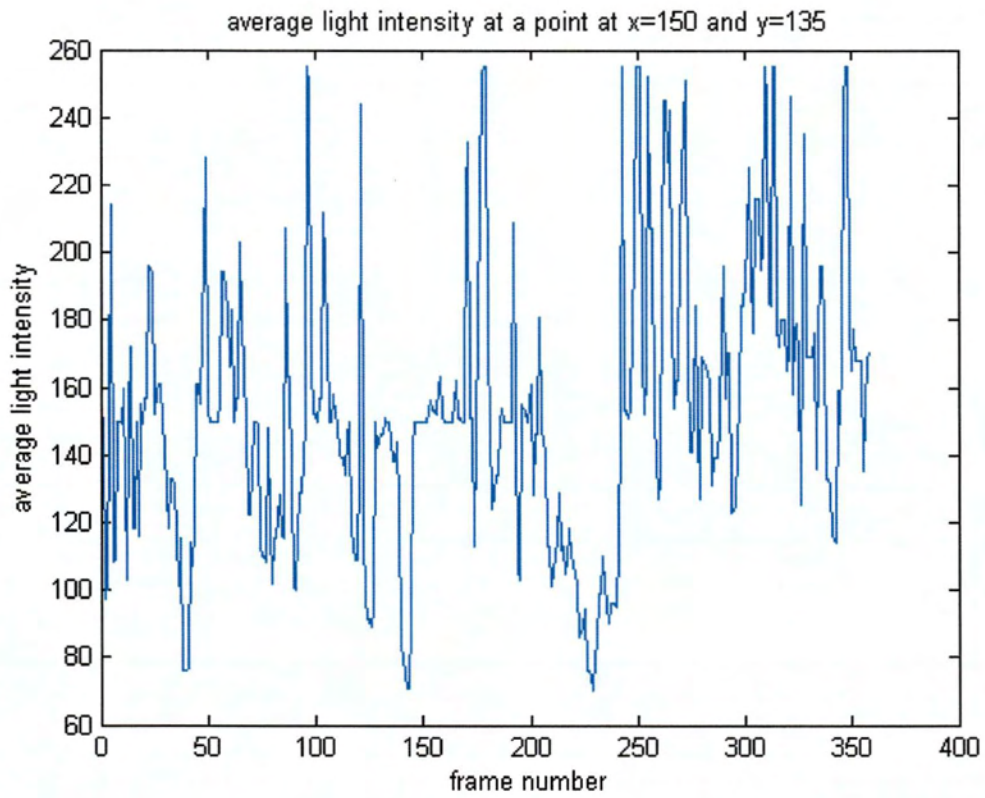
Γράφημα 49-80Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames



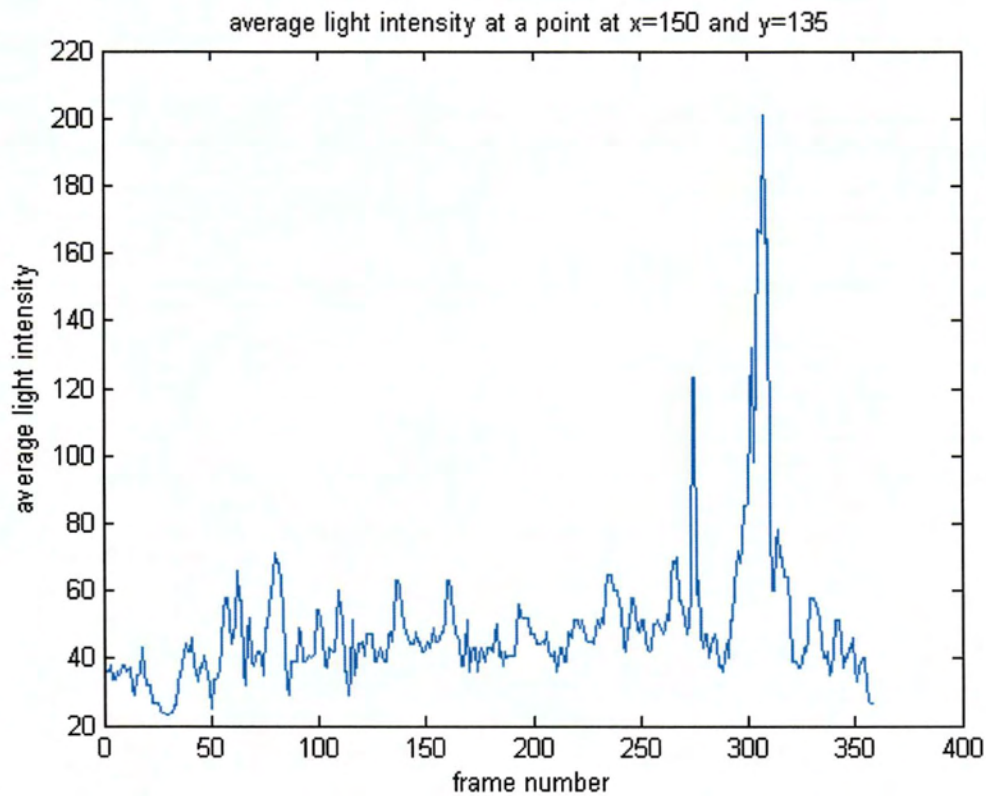
Γράφημα 50-90Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



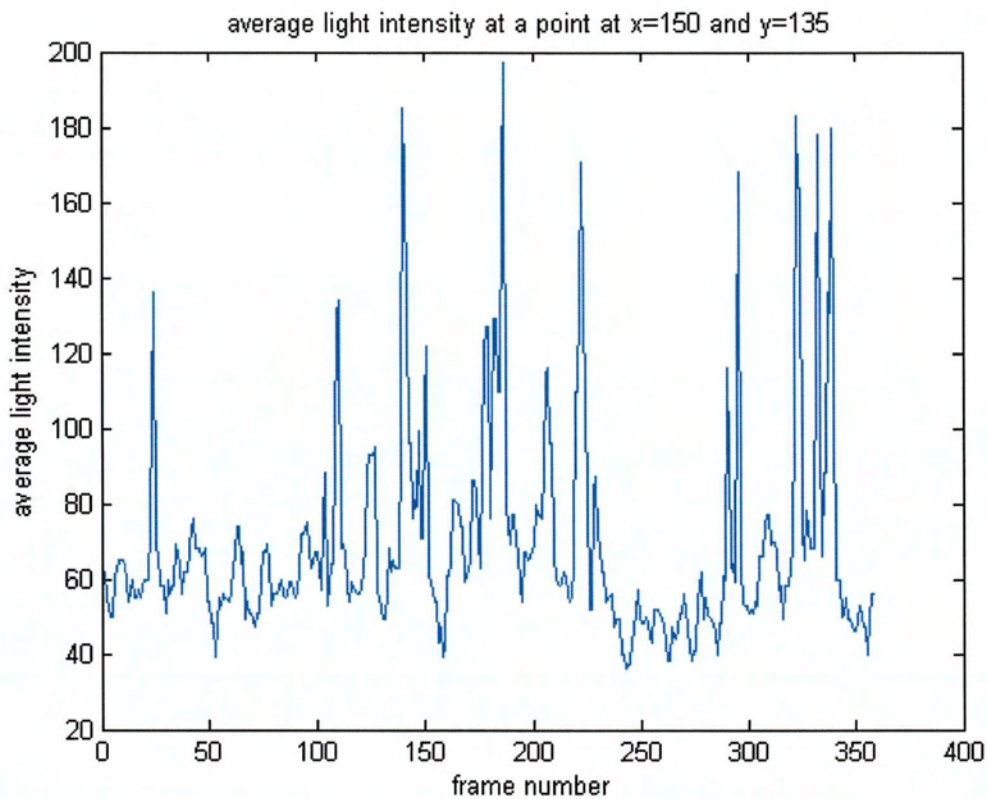
Γράφημα 51-100Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



Γράφημα 52-120Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



Γράφημα 53-140Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames

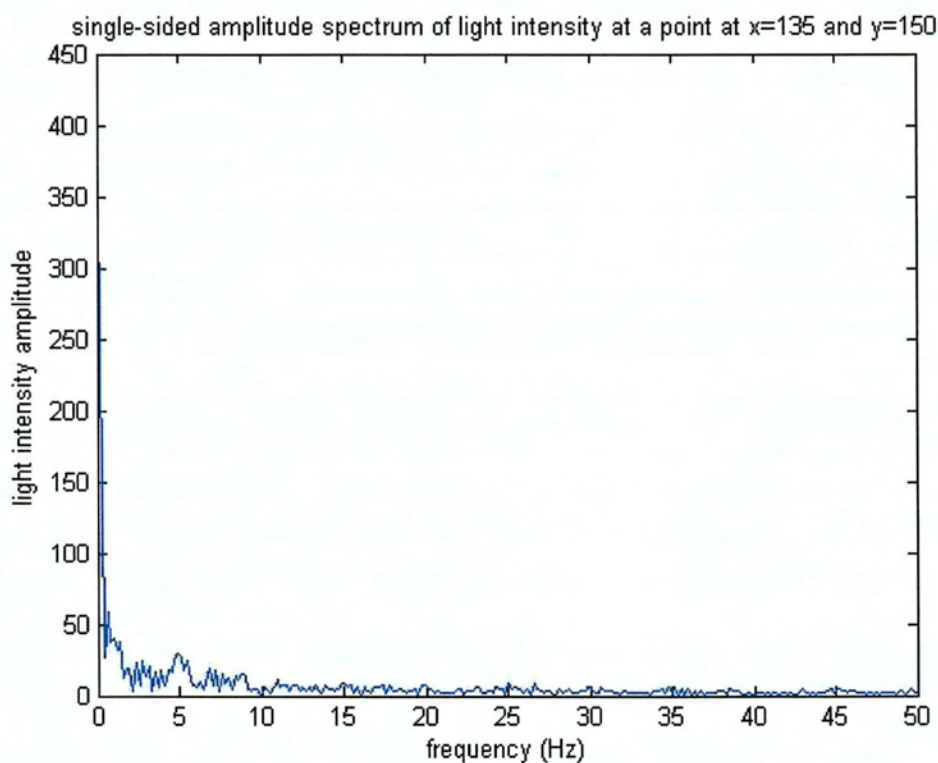


Γράφημα 54-160Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο (x=150, y=135) συναρτήσει των frames

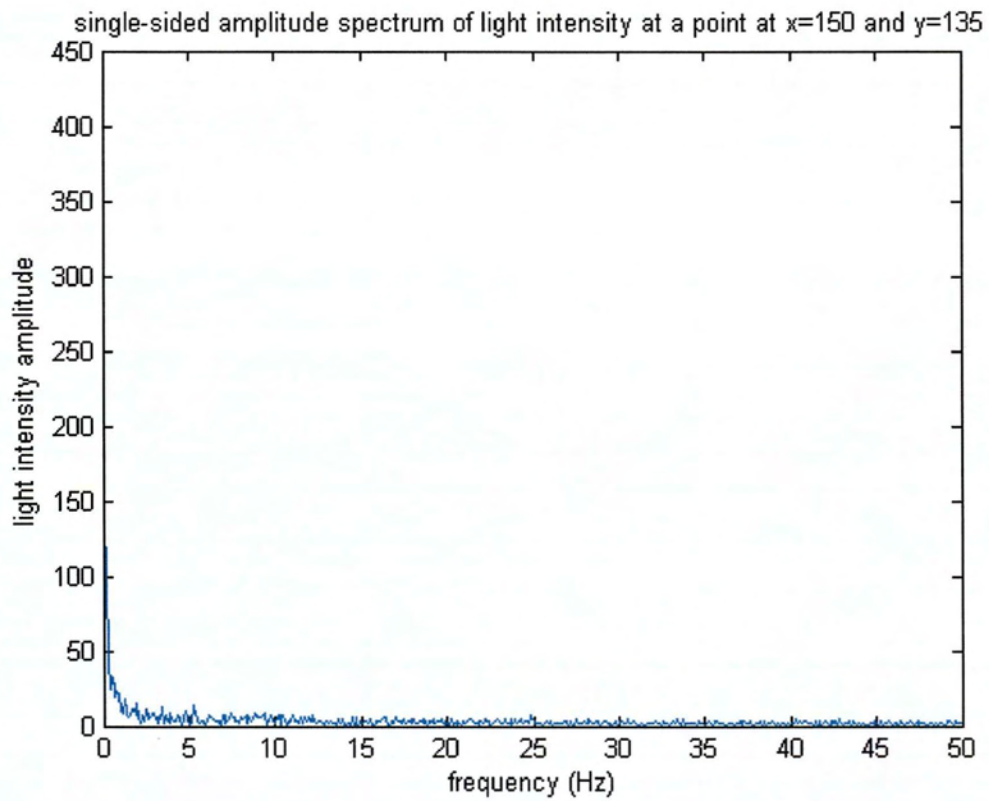
Χωρίς την επίδραση του τυρβώδους πεδίου που δημιουργούν τα μεγάφωνα, η διακύμανση της έντασης του φωτός στο κέντρο των καρτέ είναι αποτέλεσμα της τυρβώδους ροής του ατμού. Η ένταση του φωτός κυμαίνεται σε σχετικά υψηλά επίπεδα, κάτι που σημαίνει ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων στη συγκεκριμένη περιοχή είναι υψηλή. Στα 50Hz, το φαινόμενο της τύρβης γίνεται ιδιαίτερα έντονο, με τη διακύμανση της φωτεινότητας να είναι αρκετά μεγάλη, παίρνοντας τιμές από τη μέγιστη έως και τη μηδενική. Στα 60 και 70Hz το φαινόμενο δείχνει να εξασθενεί και το εύρος των τιμών περιορίζεται. Στα 73Hz οι διακυμάνσεις δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες, με το σημείο να έχει τη μέγιστη φωτεινότητά του για αρκετά μεγάλο αριθμό καρτέ. Το φαινόμενο ξαναγίνεται έντονο στη συχνότητα των 75Hz, και φαίνεται από τις μεγάλες διακυμάνσεις. Στην τιμή των 80 και 100 Hz, οι διακυμάνσεις δεν είναι μεγάλες, ενώ στα 90 και 140Hz η φωτεινότητα έχει σχετικά μικρές τιμές, κάτι που σημαίνει ότι η συγκέντρωση στη συγκεκριμένη περιοχή είναι σχετικά μικρή. Στα 120 Hz, βλέπουμε μεγάλη διακύμανση της φωτεινότητας, καθώς παρουσιάζεται και μια περιοδικότητα του φαινομένου. Τέλος για τη συχνότητα των 160 Hz, οι τιμές της έντασης είναι χαμηλές, με ένα περιοδικό φαινόμενο απότομης αύξησής της.

Διαγράμματα FFT

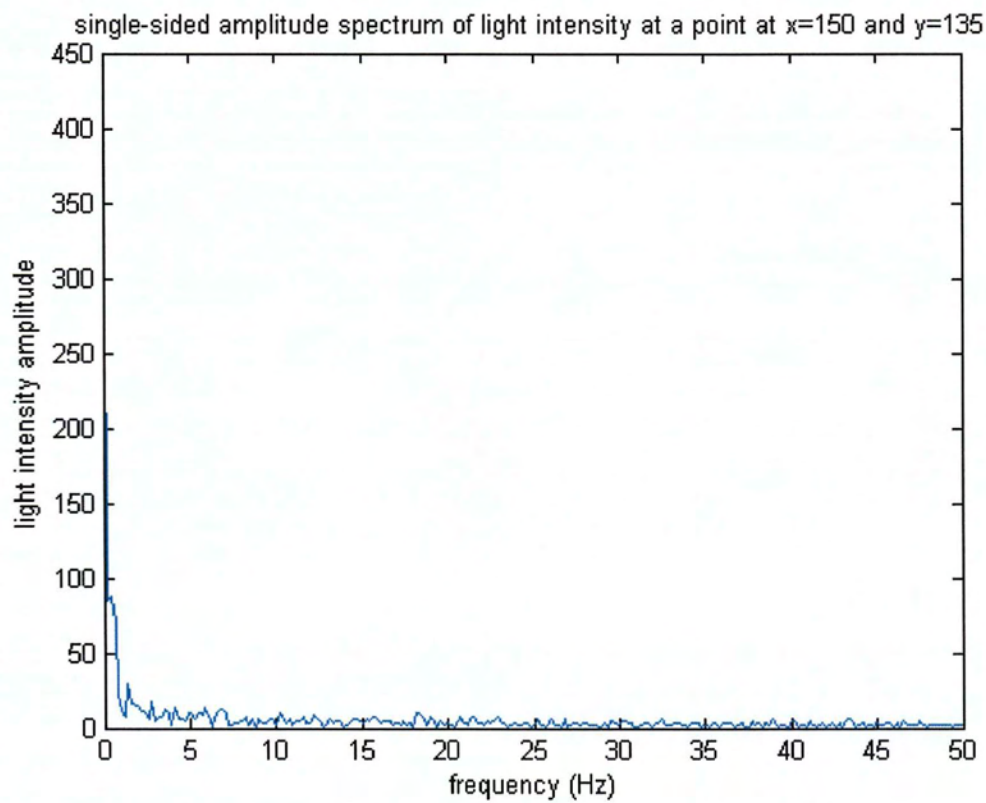
Τα διαγράμματα FFT του πλάτους της έντασης του φωτός, στο φάσμα των συχνοτήτων παρουσιάζονται παρακάτω. Κάθε ένα από αυτά παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα, ώστε να βρεθεί η κλίση του διαγράμματος **slope=5/3** σε κάποια υποπεριοχή του φάσματος συχνοτήτων (**inertial subrange slope**), με σκοπό το χαρακτηρισμό της έντασης της τύρβης.



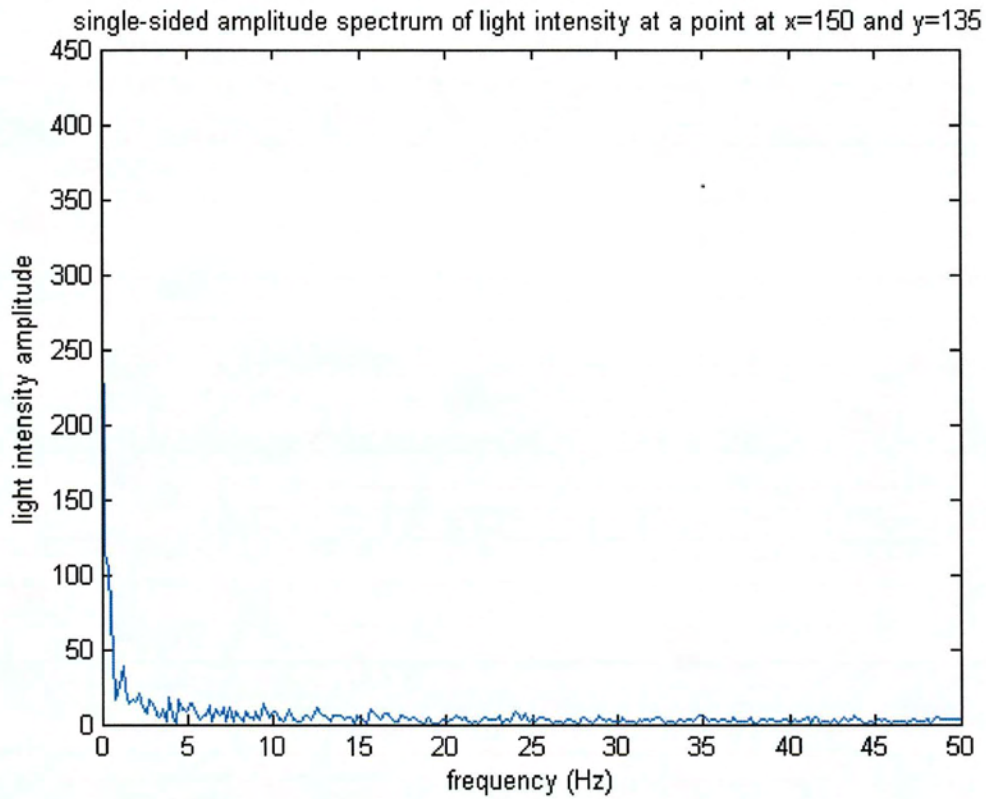
Γράφημα 55-no_power- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



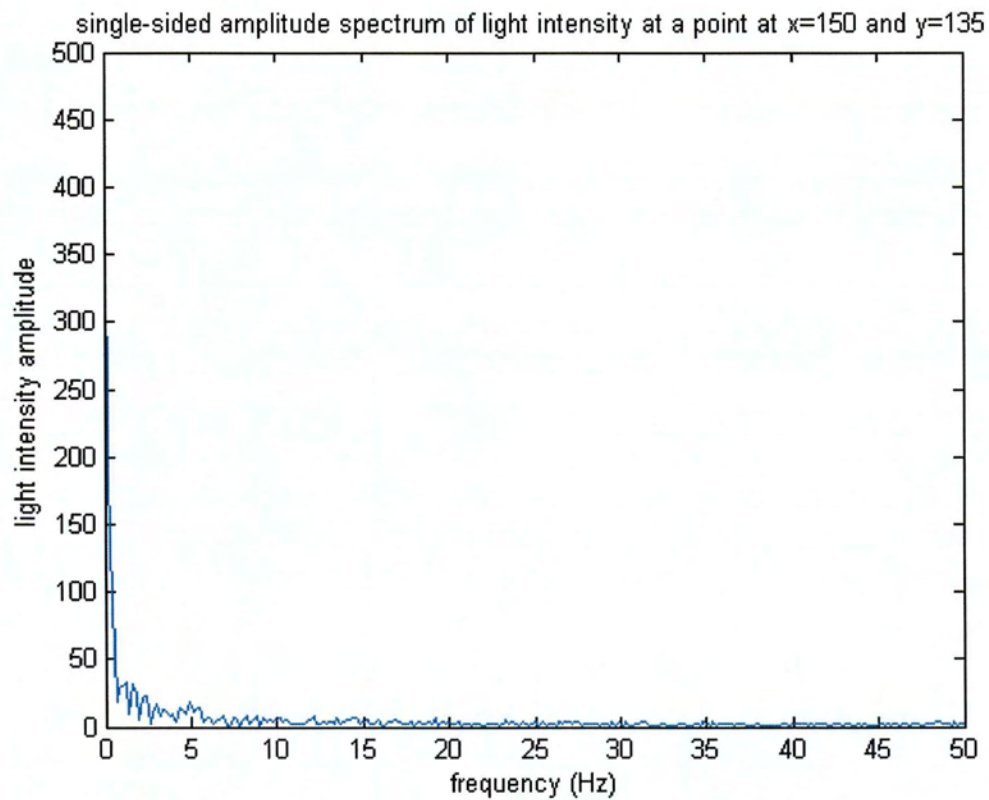
Γράφημα 56-50Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150$, $y=135$)



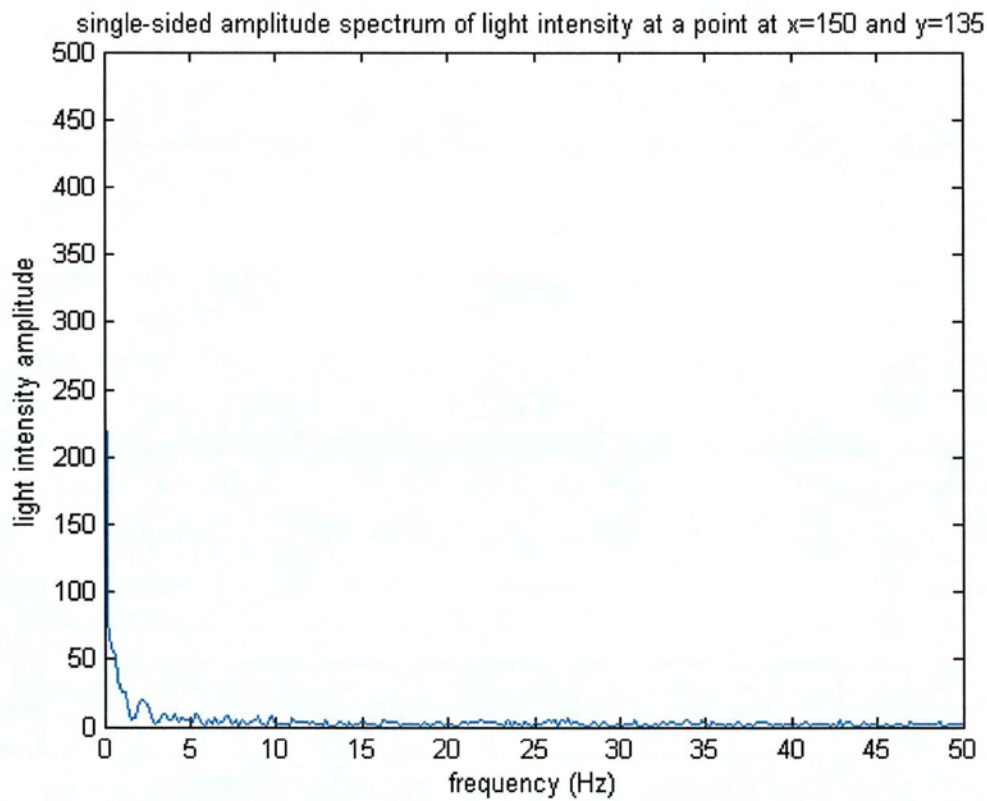
Γράφημα 57-60Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150$, $y=135$)



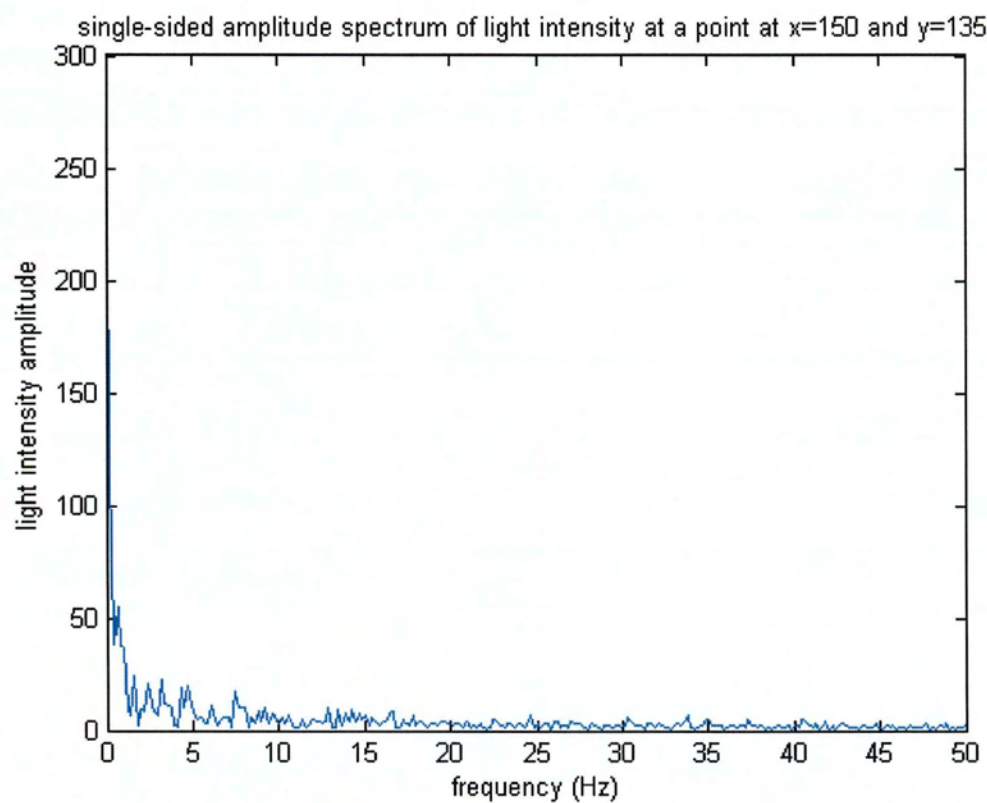
Γράφημα 58-70Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



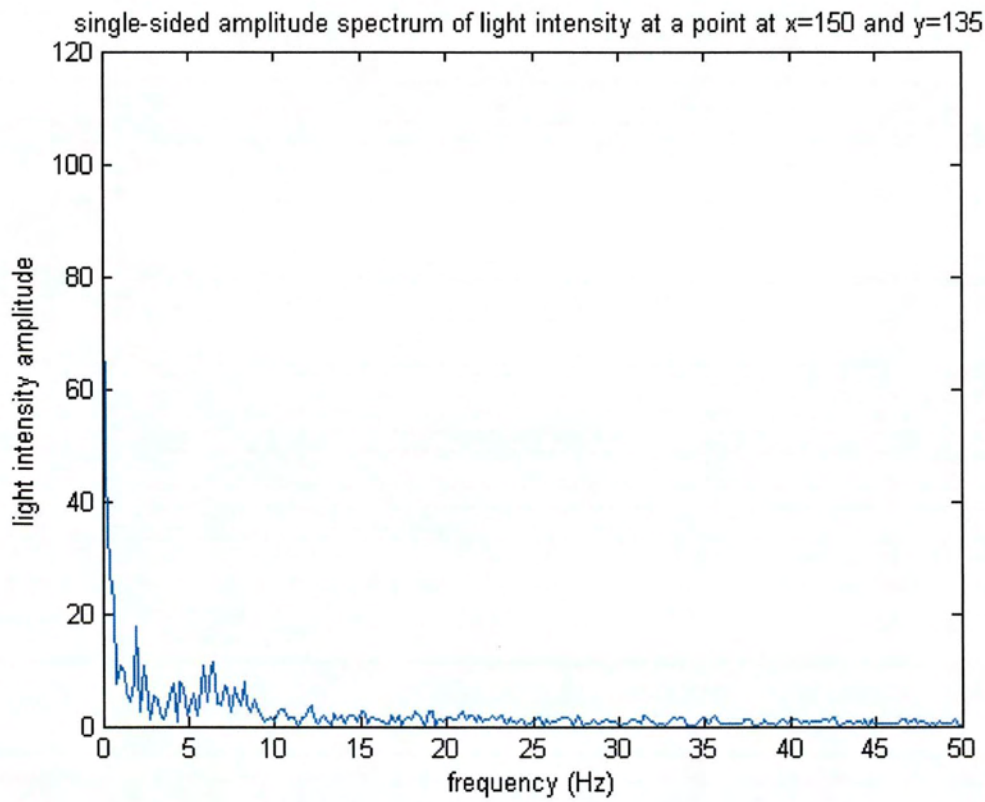
Γράφημα 59-73Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



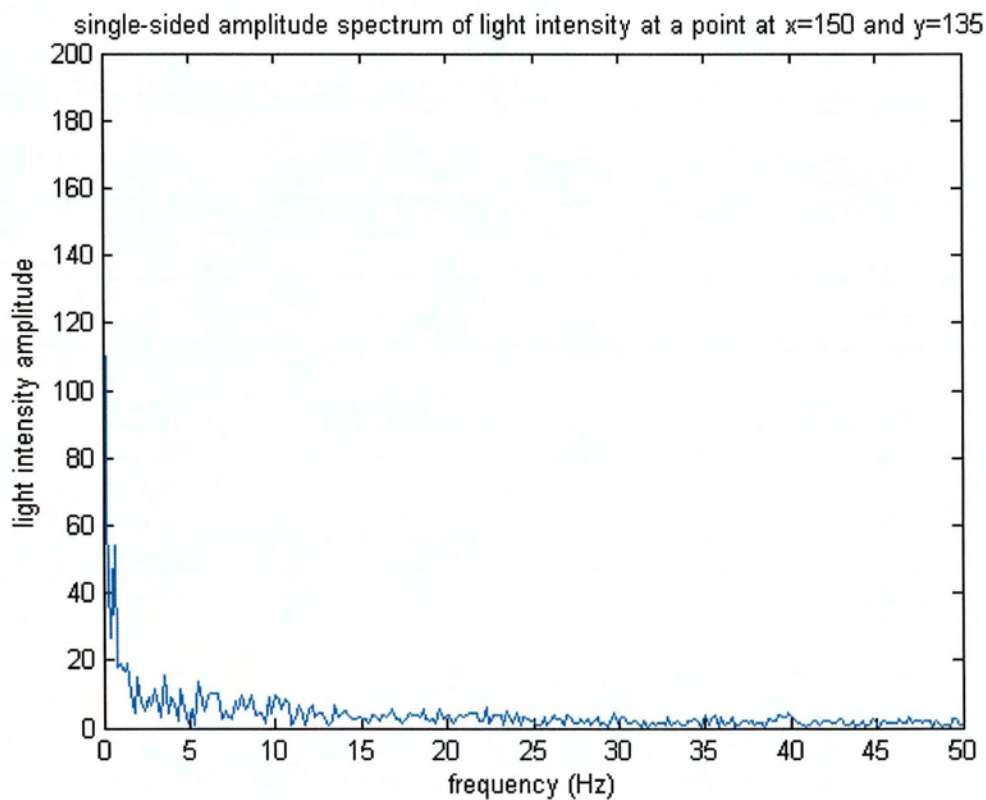
Γράφημα 60-75Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



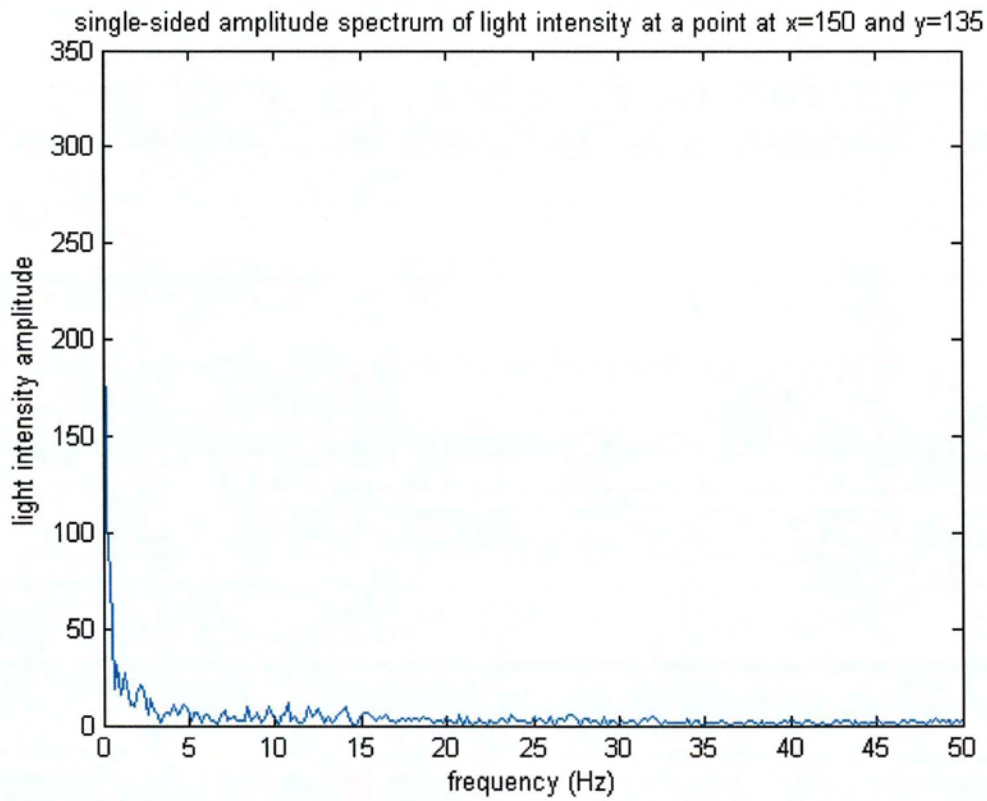
Γράφημα 61-80Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



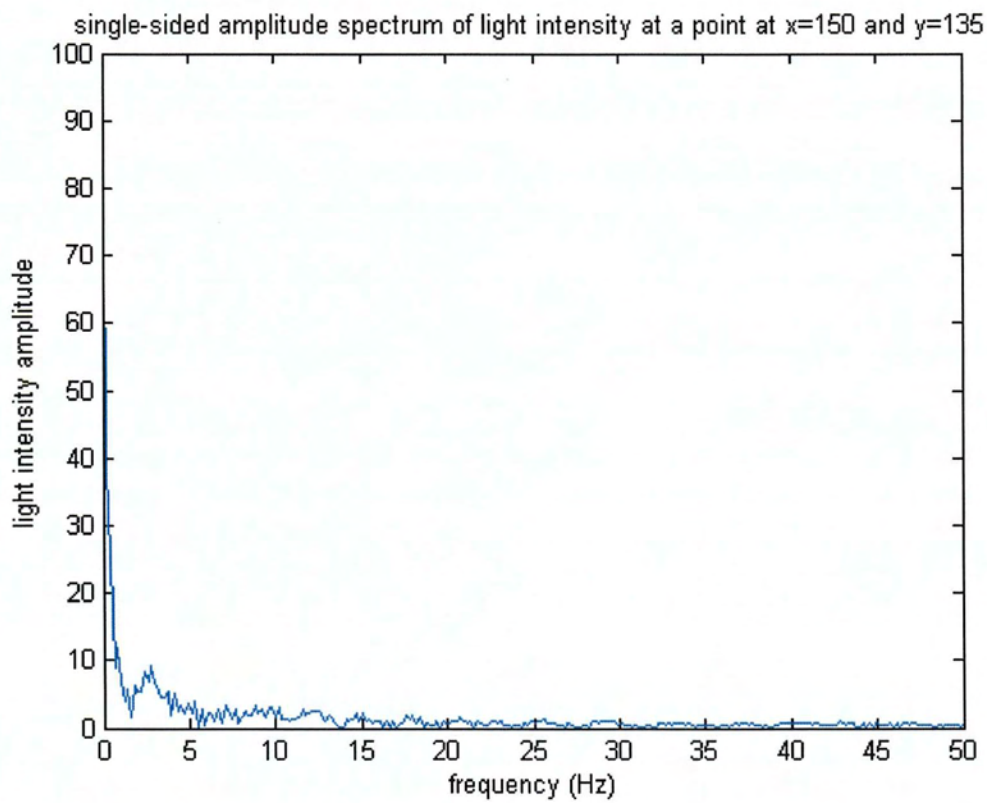
Γράφημα 62-90Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



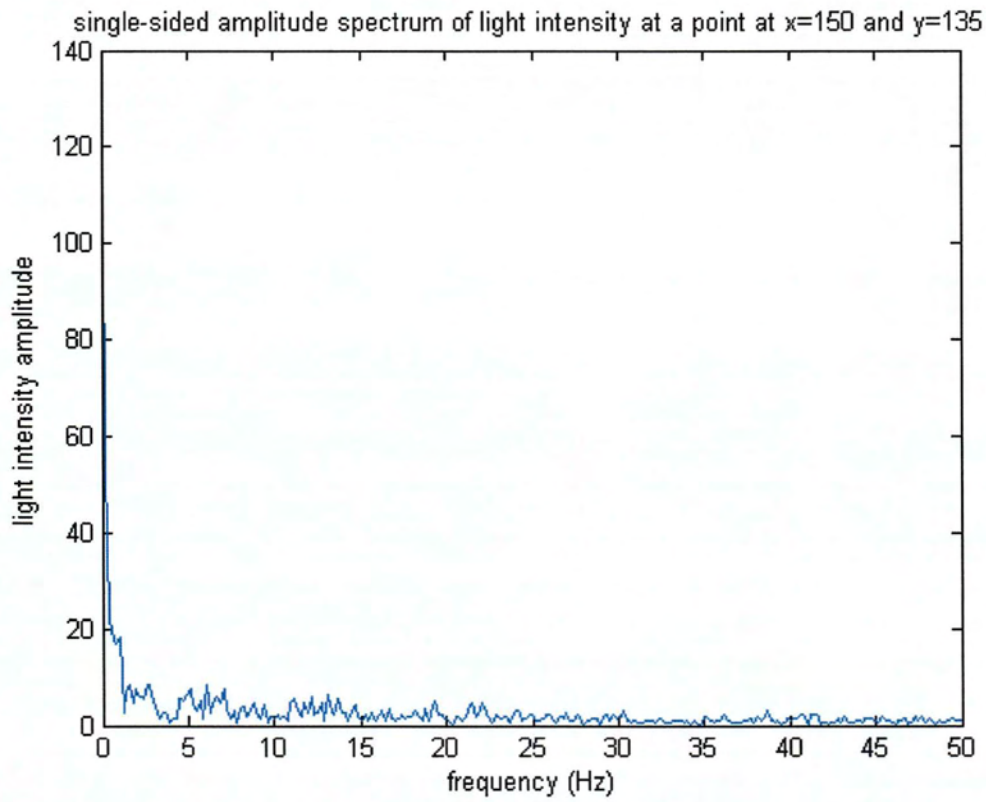
Γράφημα 63-100Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



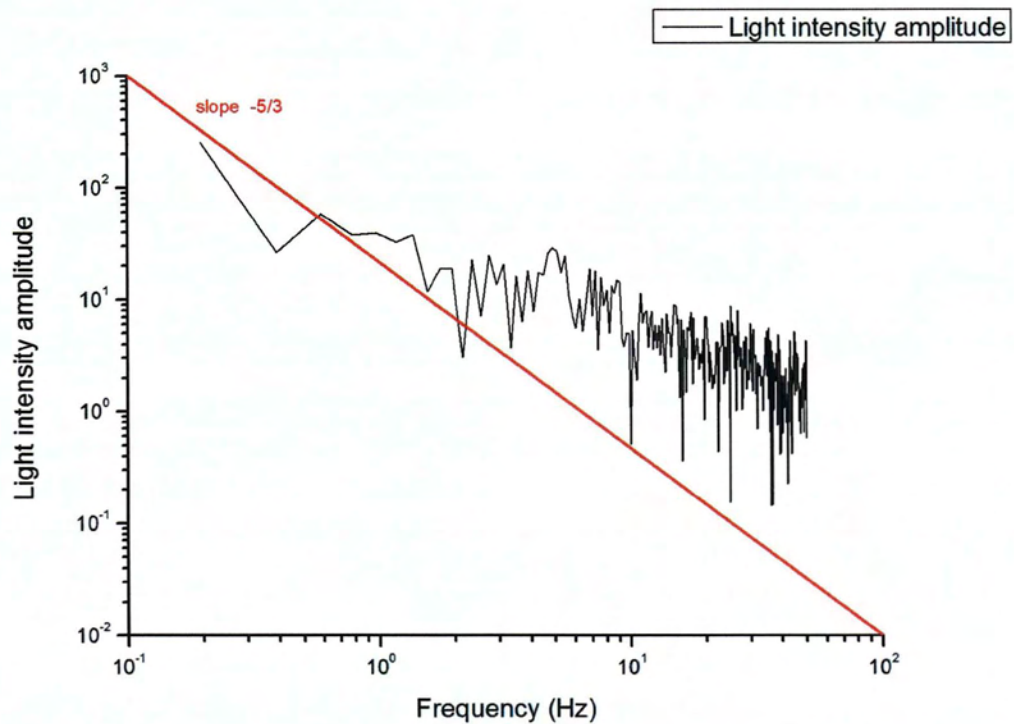
Γράφημα 64-120Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



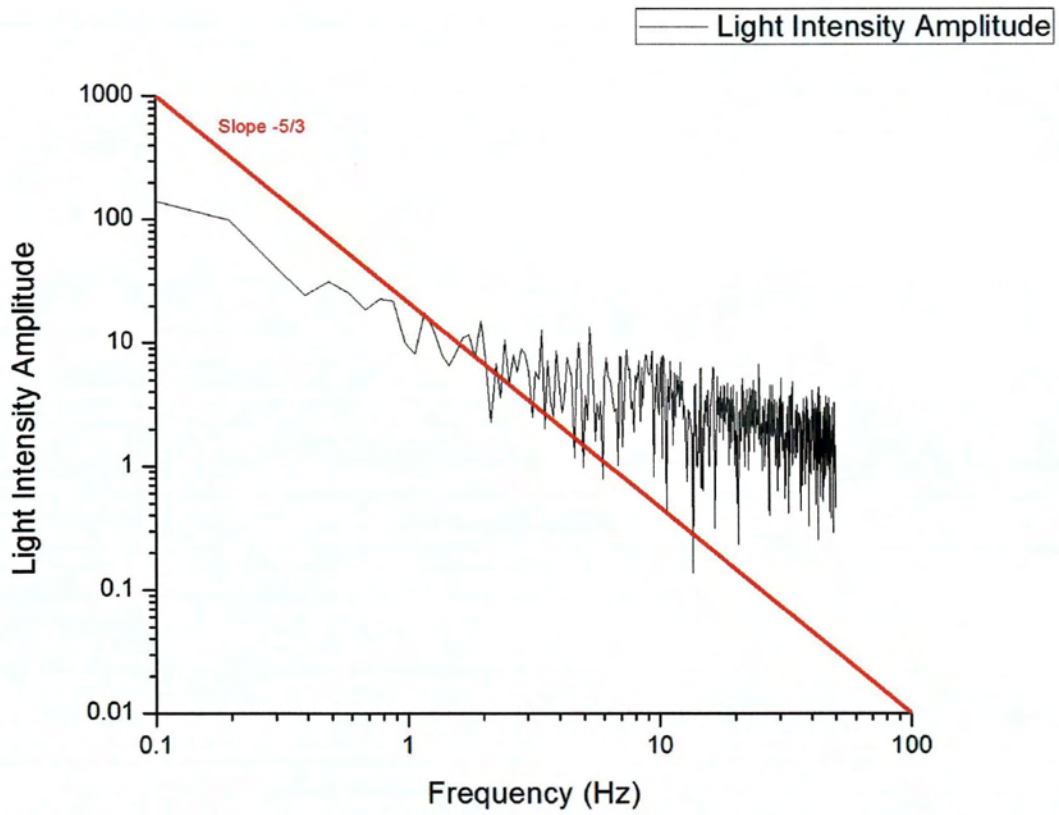
Γράφημα 65-140Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



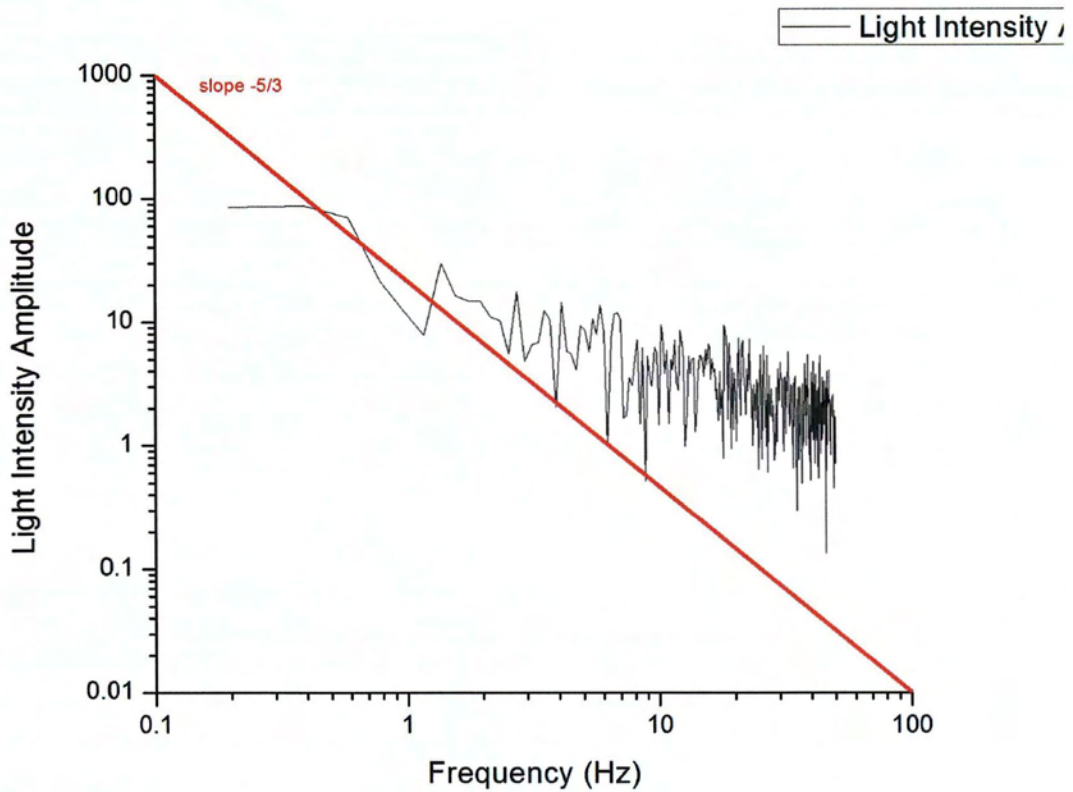
Γράφημα 66-160Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



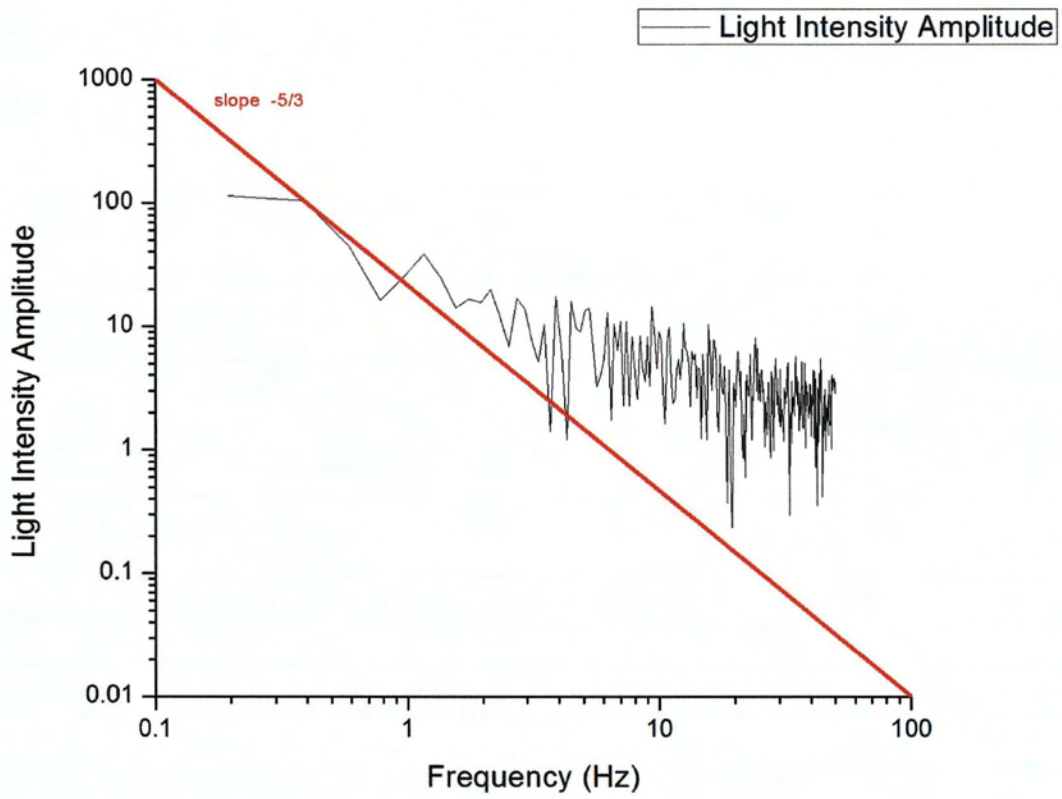
Γράφημα 67- \log_{10} -Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$) και κλίση $(-5/3)$



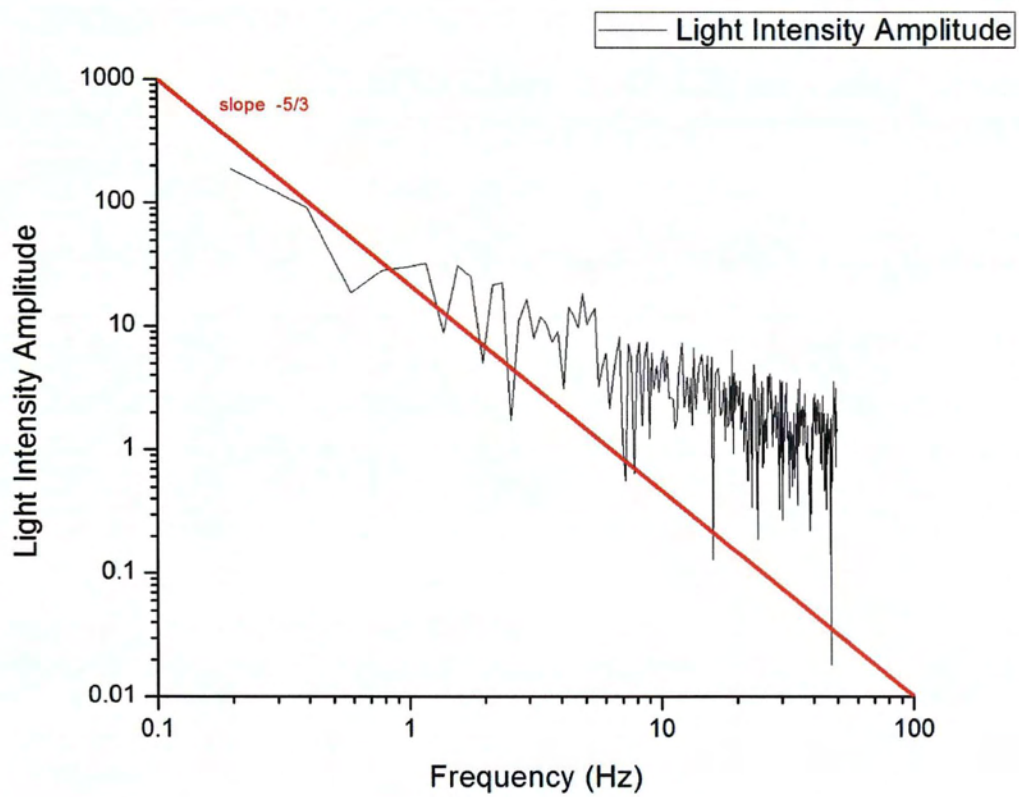
Γράφημα 68-50Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)



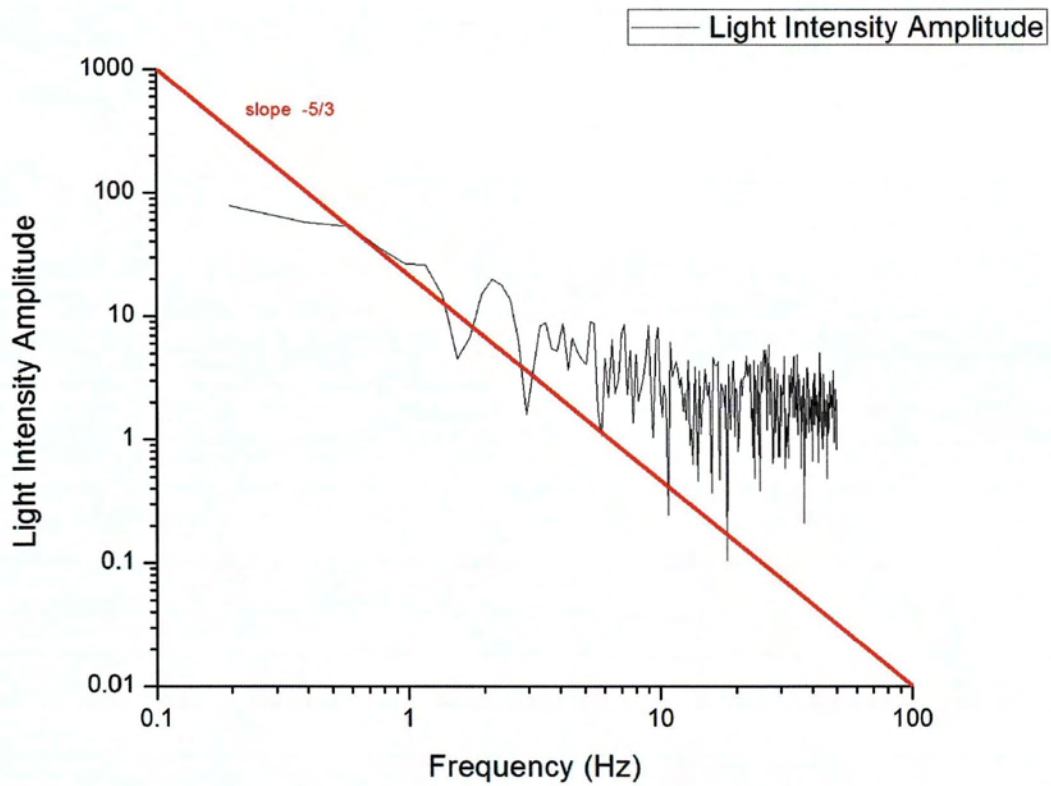
Γράφημα 69-60Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)



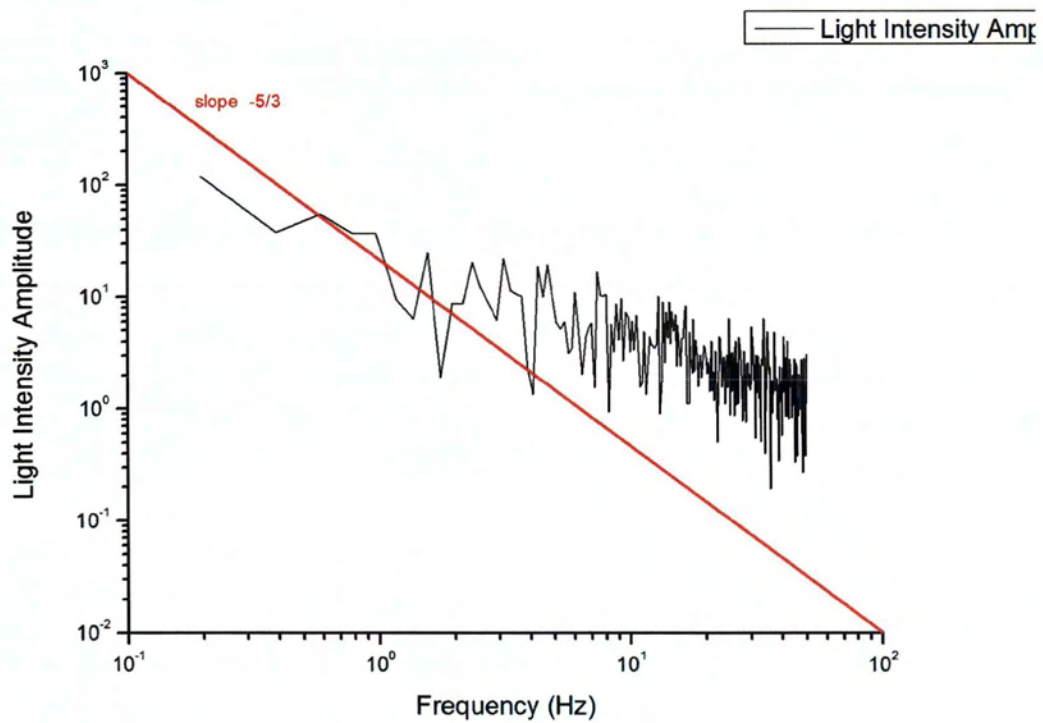
Γράφημα 70-70Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο $(x=150, y=135)$ και κλίση $(-5/3)$



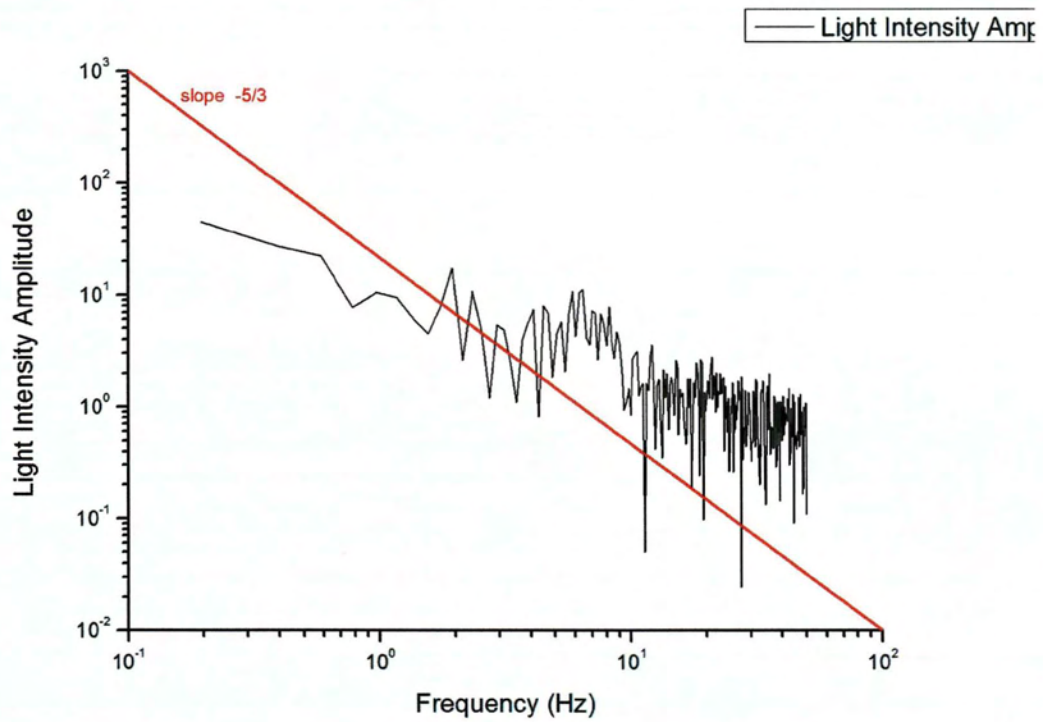
Γράφημα 71-73Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο $(x=150, y=135)$ και κλίση $(-5/3)$



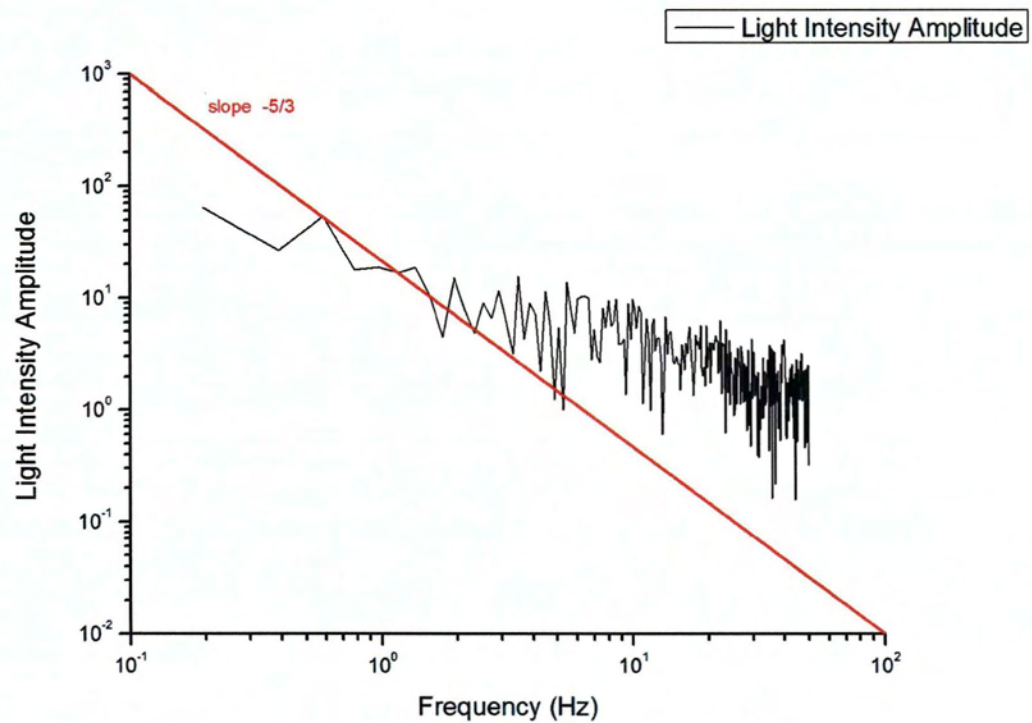
Γράφημα 72-75Hz--Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)



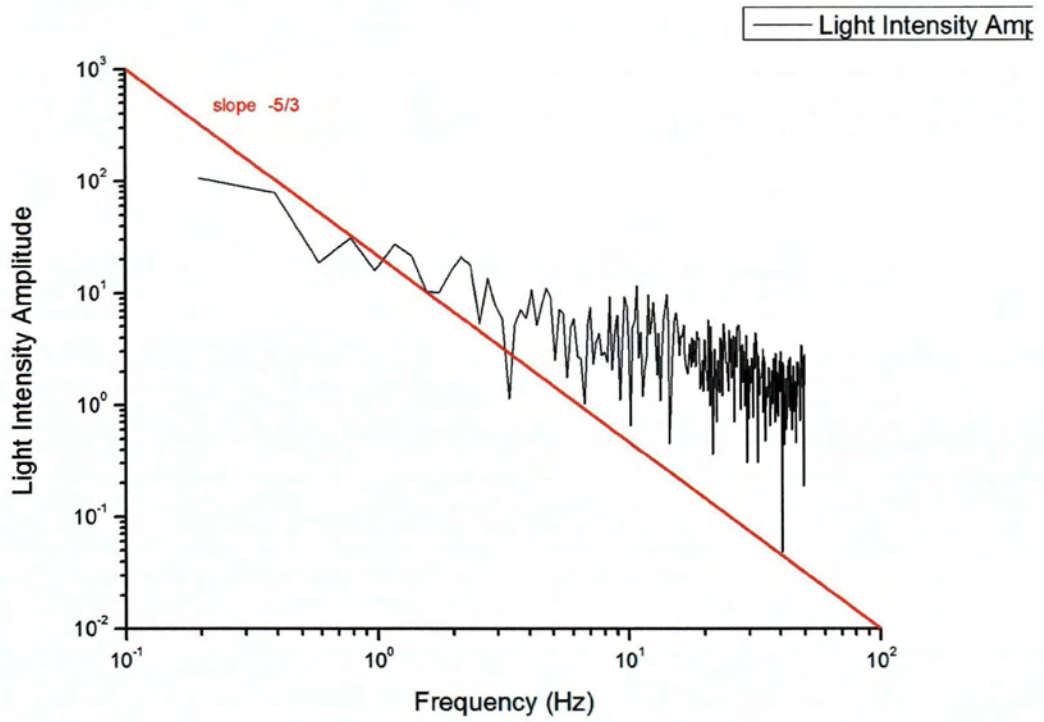
Γράφημα 73-80Hz--Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)



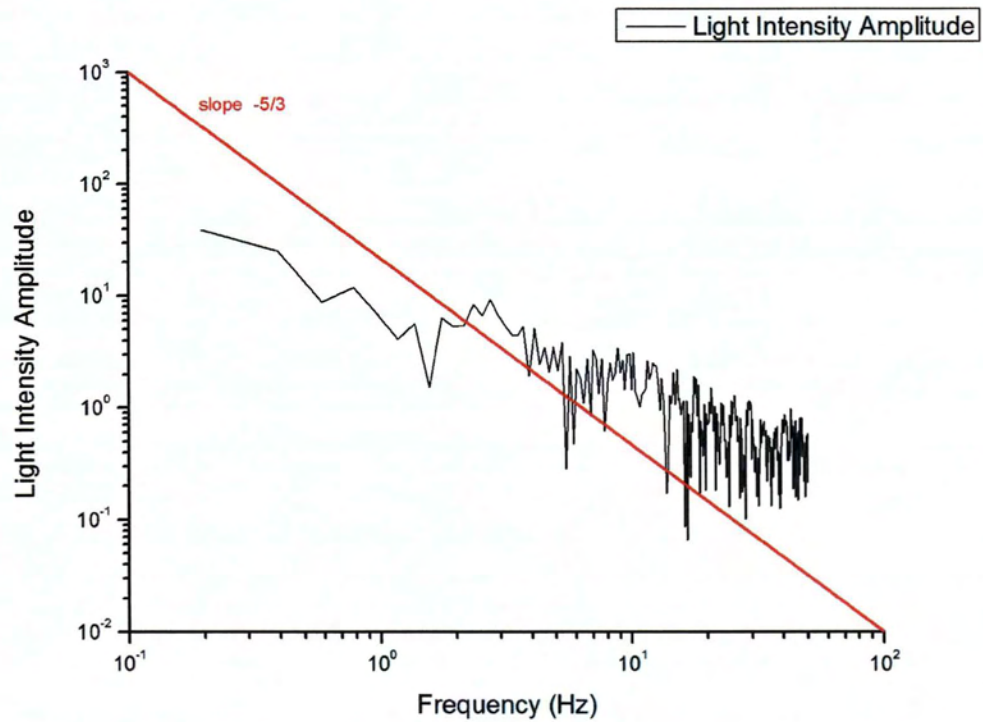
Γράφημα 74-90Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)



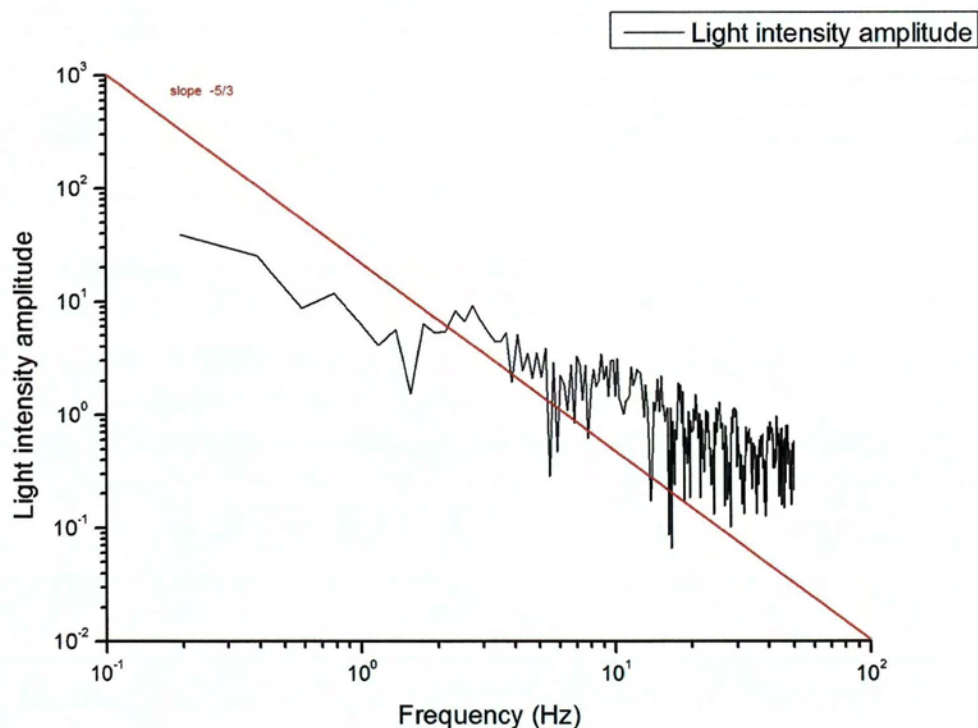
Γράφημα 75-100Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)



Γράφημα 76-120Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)



Γράφημα 77-140Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)

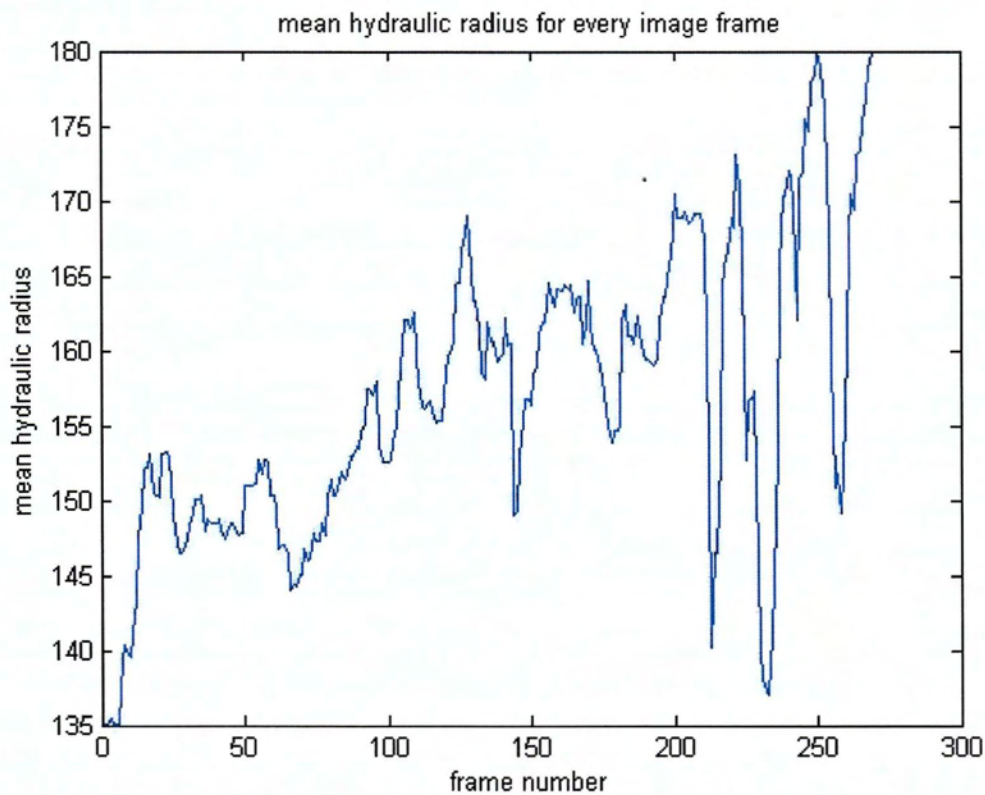


Γράφημα 78-160Hz-Λογαριθμικό Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135) και κλίση (-5/3)

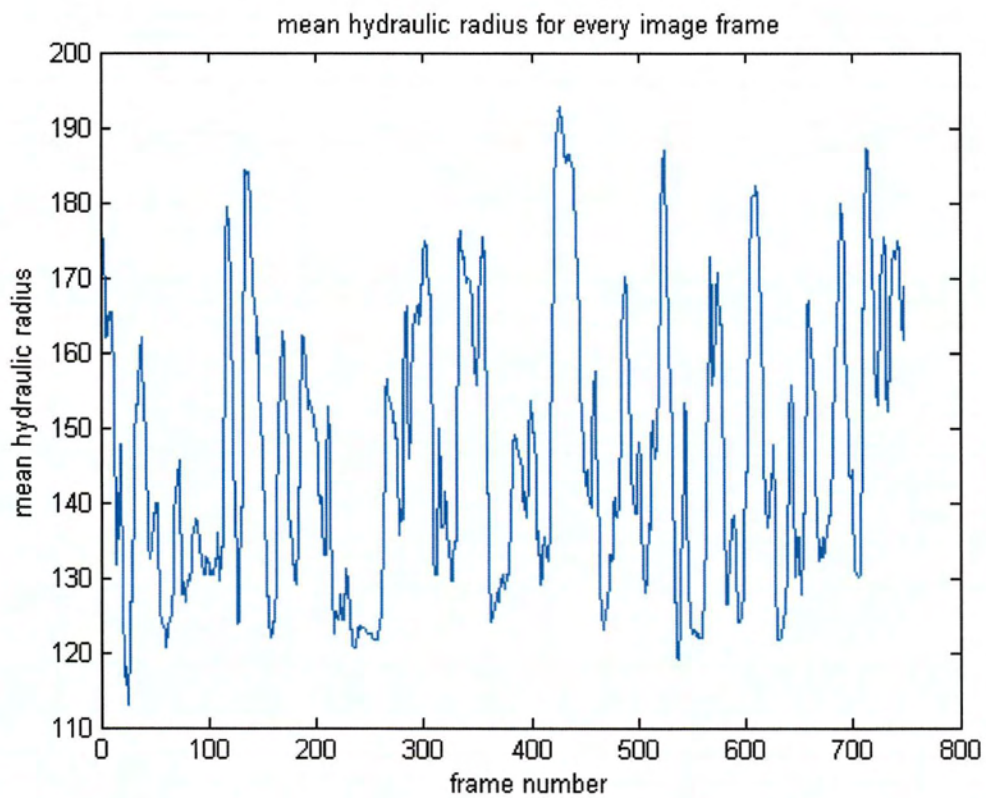
Από τη μετατροπή τους σε λογαριθμικά, και τοποθετώντας την κλίση $-5/3$ στα διαγράμματα, βλέπουμε ότι αυτή η κλίση ακολουθείται από το λογαριθμημένο διάγραμμα για μικρό εύρος συχνοτήτων και σε χαμηλές τιμές. Η κλίση αυτή βάσει της θεωρίας του **Kolmogorov**, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, δείχνει την ένταση της τύρβης. Από τα διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η τύρβη είναι εμφανής σε ένα μικρό φάσμα χαμηλών συχνοτήτων (**0.1 Hz– 4 Hz**). Η μη χρησιμοποίηση της High Speed Camera, δυσκόλεψε σημαντικά τη δειγματοληψία σε συχνότητες μεγαλύτερες των **12,5 Hz**, όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος είναι εμφανές ότι όσο μεγαλώνει η συχνότητα του παλμού, τόσο μειώνεται η δύναμη της τύρβης.

Διακύμανση της υδραυλικής ακτίνας (mean hydraulic radius for every frame)

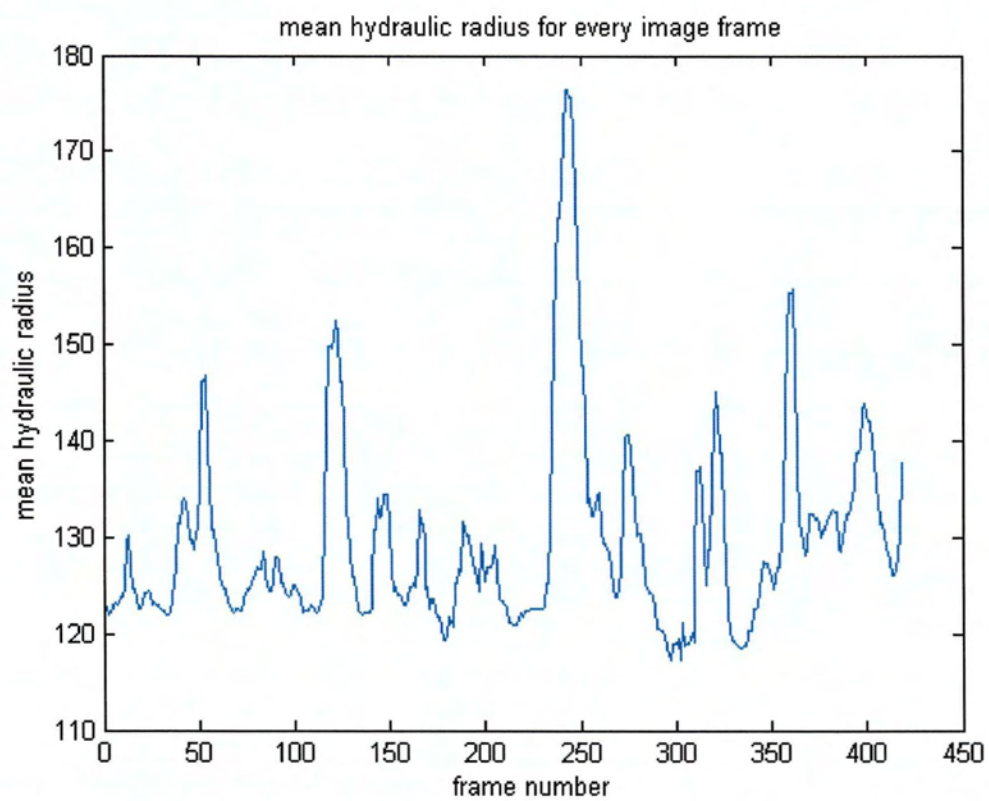
Στα γραφήματα που ακολουθούν αποτυπώνεται η διακύμανση της υδραυλικής ακτίνας που υπολογίστηκε για κάθε ξεχωριστό καρέ που επεξεργάστηκε ο κώδικας. Έπειτα παρατίθεται και ο πίνακας με τις μέσες υδραυλικές ακτίνες για κάθε συχνότητα.



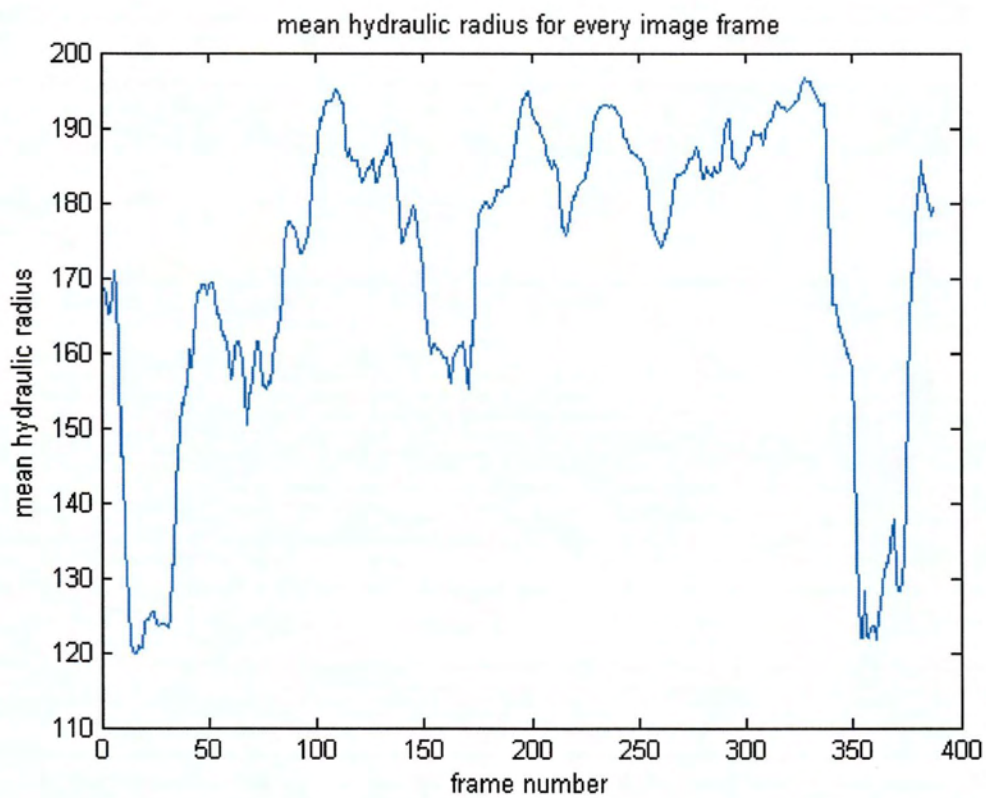
Γράφημα 79:- no_power- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



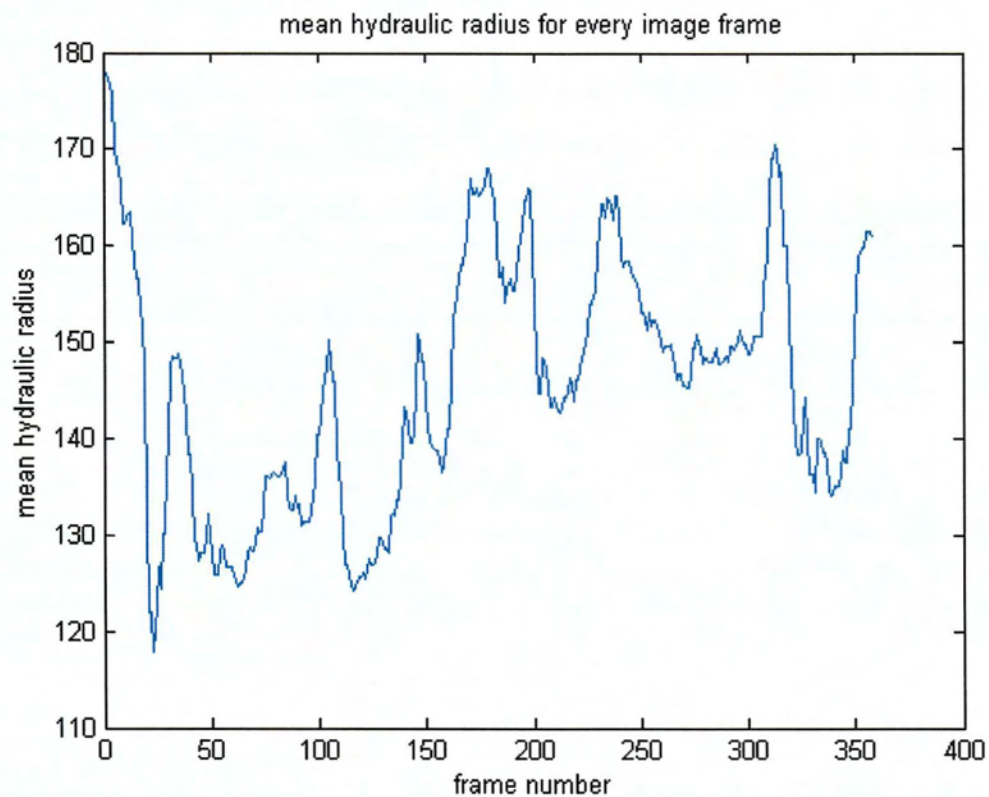
Γράφημα 80-50Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



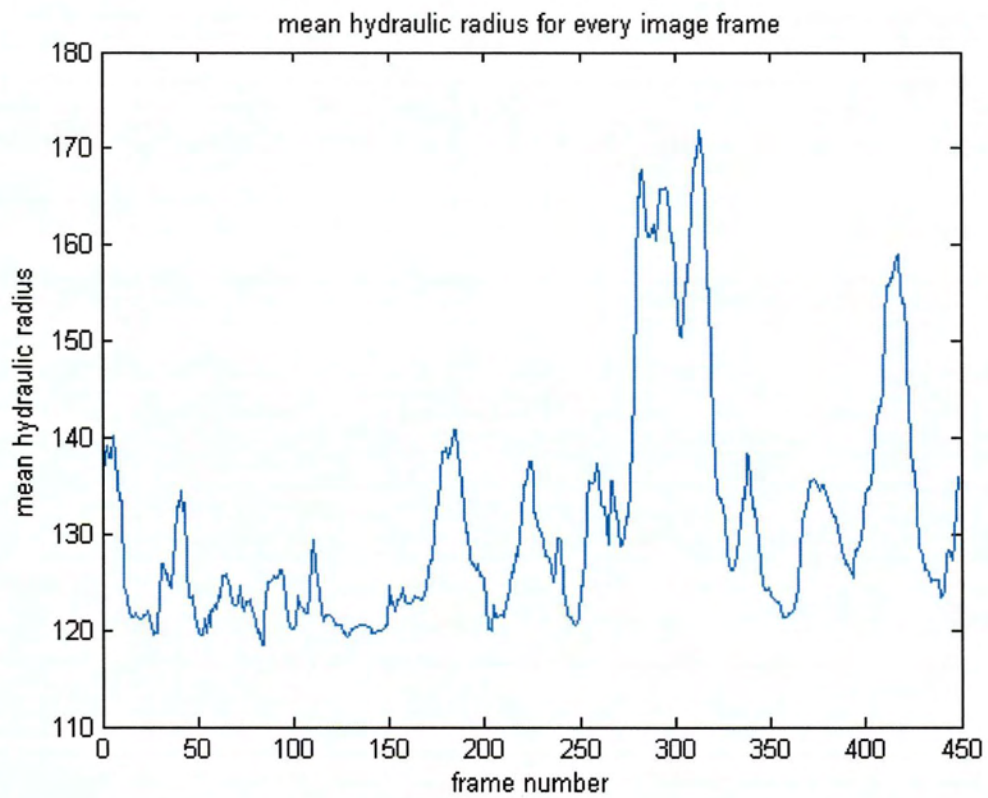
Γράφημα 81-60Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



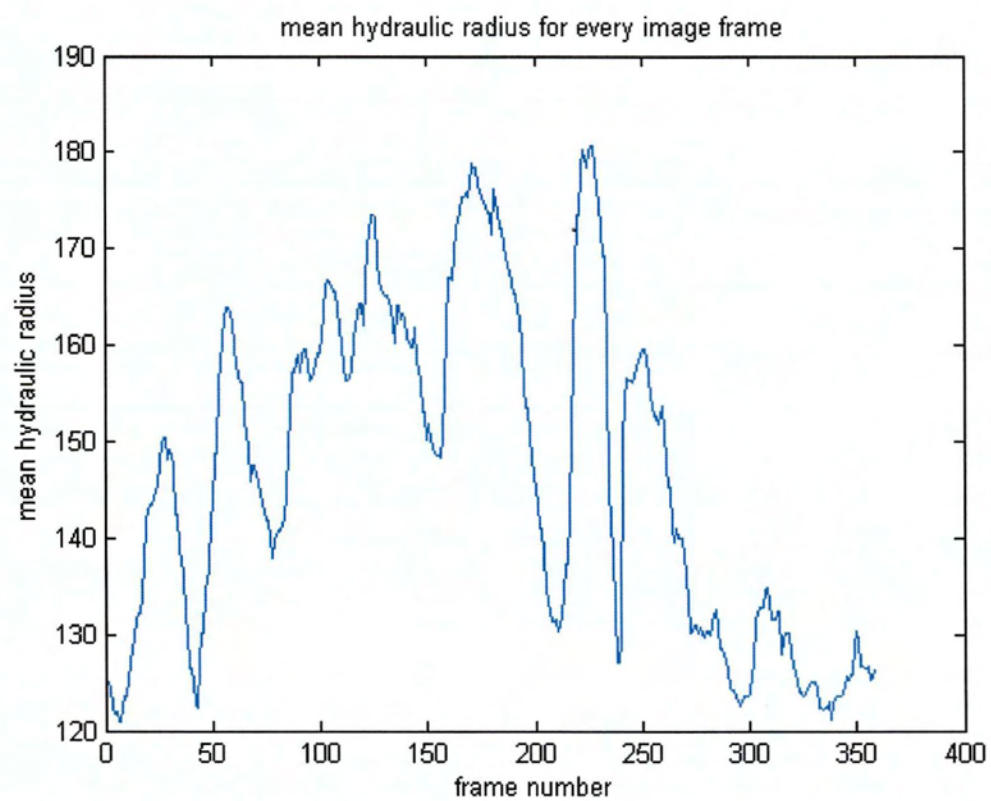
Γράφημα 82-70Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



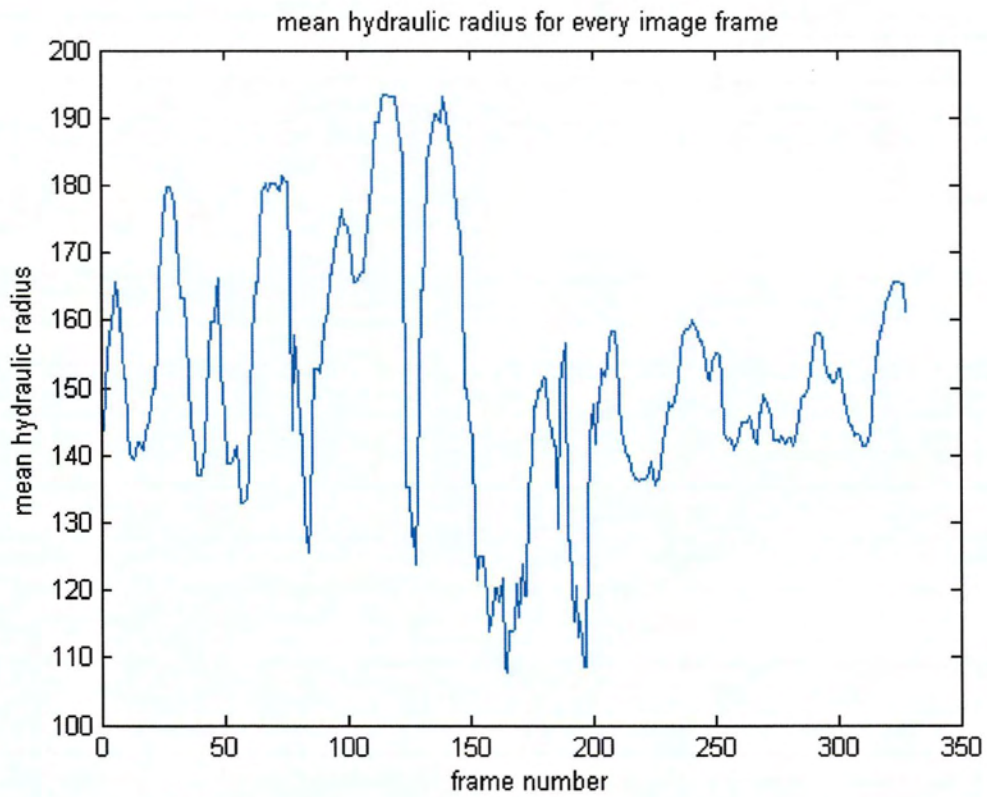
Γράφημα 83-73Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



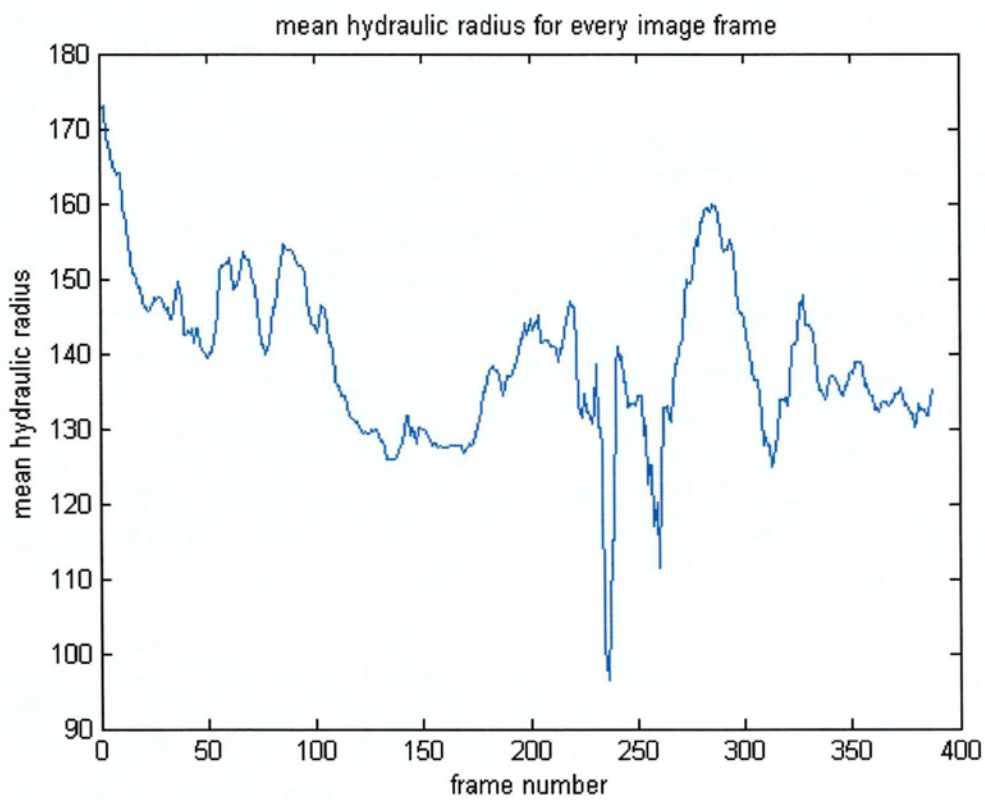
Γράφημα 84-75Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



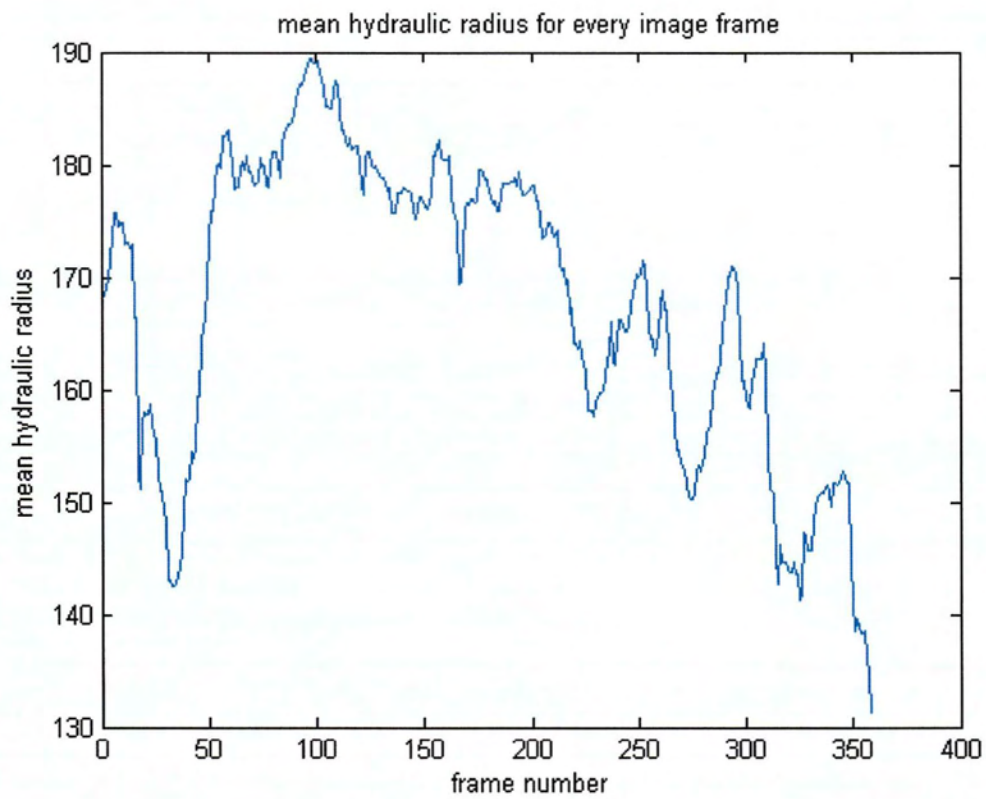
Γράφημα 85-80Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



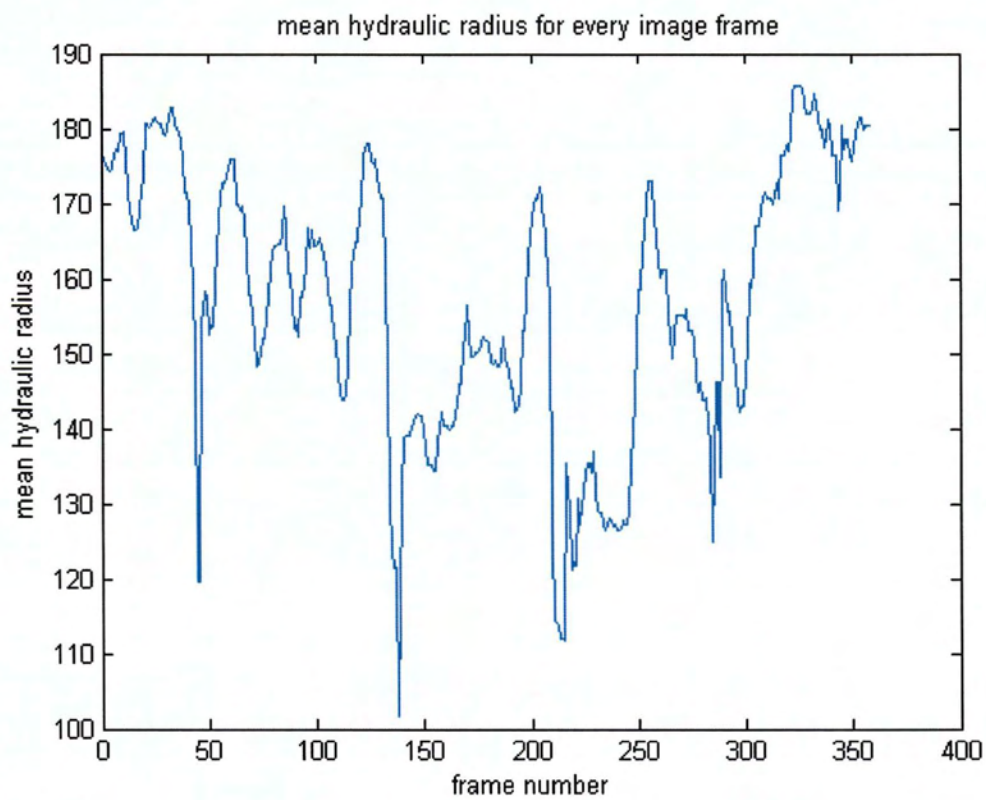
Γράφημα 86-90Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



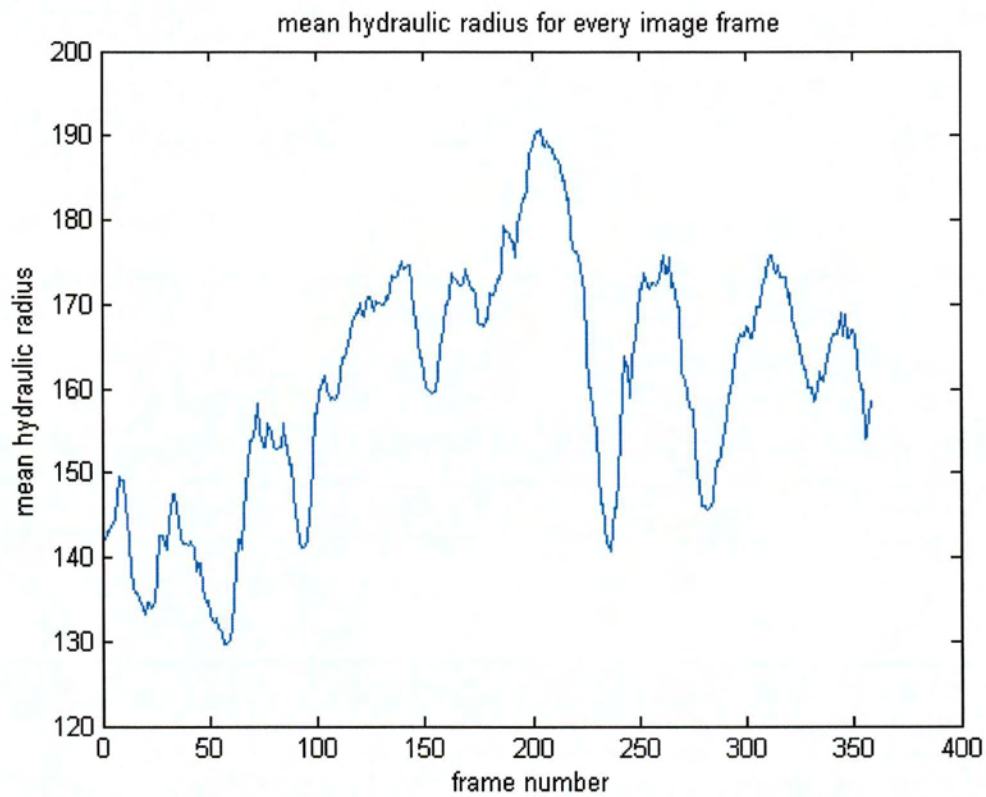
Γράφημα 87-100Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



Γράφημα 88-120Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



Γράφημα 89-140Hz-- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames

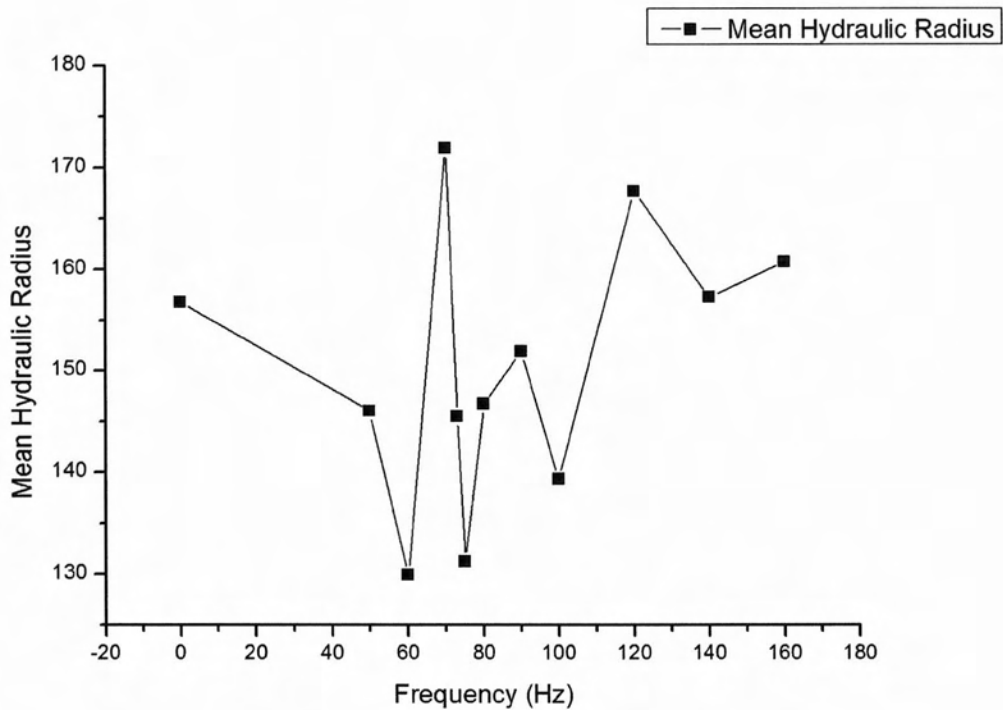


Γράφημα 90-160Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames

Μέσες υδραυλικές ακτίνες

<u>Συχνότητα (Hz)</u>	<u>Mean Hydraulic Radius</u>
0	156,78
50	146,04
60	129,92
70	171,91
73	145,53
75	131,24
80	146,79
90	151,88
100	139,32
120	167,61
140	157,27
160	160,72

Πίνακας 12- Μέσες υδραυλικές ακτίνες CROSS



Γράφημα 91- Μέσες υδραυλικές ακτίνες CROSS

Η υδραυλική ακτίνα παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις, κάτι που κάνει εμφανή την επίδραση της τύρβης. Οι μέσες υδραυλικές ακτίνες δεν έχουν κάποια συγκεκριμένη τάση, και αλλάζουν τυχαία συναρτήσει των συχνοτήτων παλμού όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η διαφορά τυπικής απόκλισης, που παρουσιάζεται παρακάτω, όμως, για τα διαγράμματα των **50Hz** και **no_power** (όπου δεν υπάρχει επίδραση μεγαφώνων), δείχνει την δύναμη του τυρβώδους πεδίου.

Πίνακας 13 -Τυπική απόκλιση Cross

no_power	50Hz
9.6762	18.4424

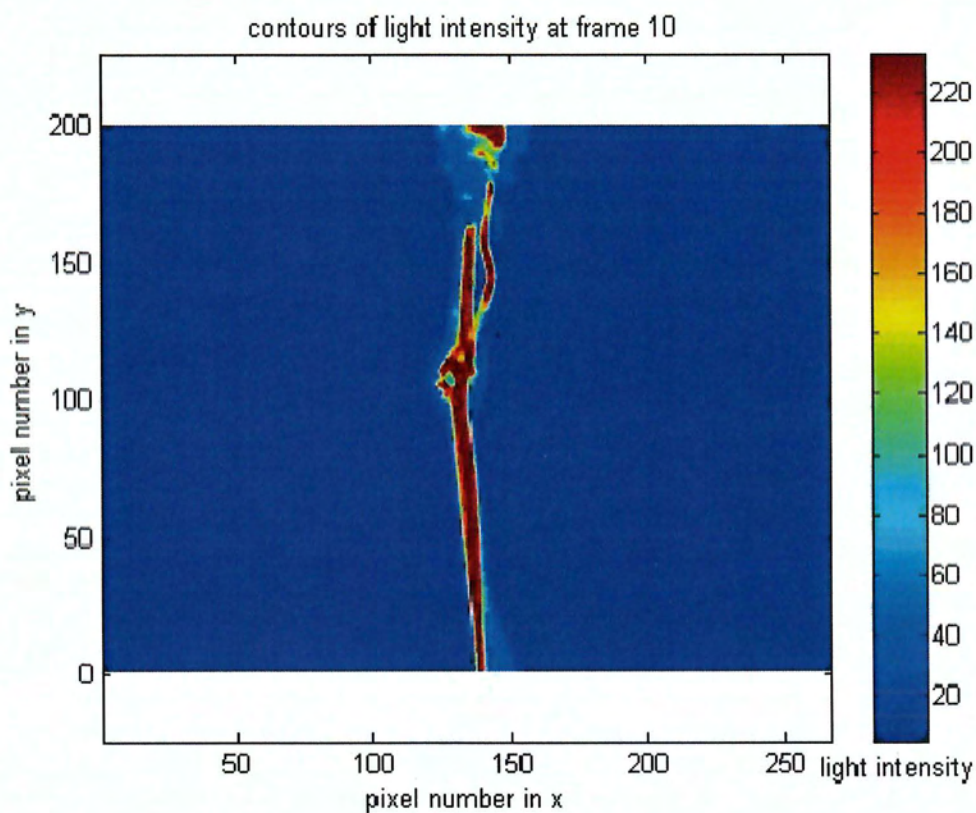
Συμπερασματικά, παρατηρείται η έντονη αλληλεπίδραση της τύρβης με τη δέσμη, κυρίως στις χαμηλότερες συχνότητες, όπου η U_{rms} είναι μεγαλύτερη. Η διασπορά της ροής, κατά τα φαινόμενα, είναι ισότροπη.

5.4.2. Περίπτωση «ΠΛΟΥΜΙΟ»

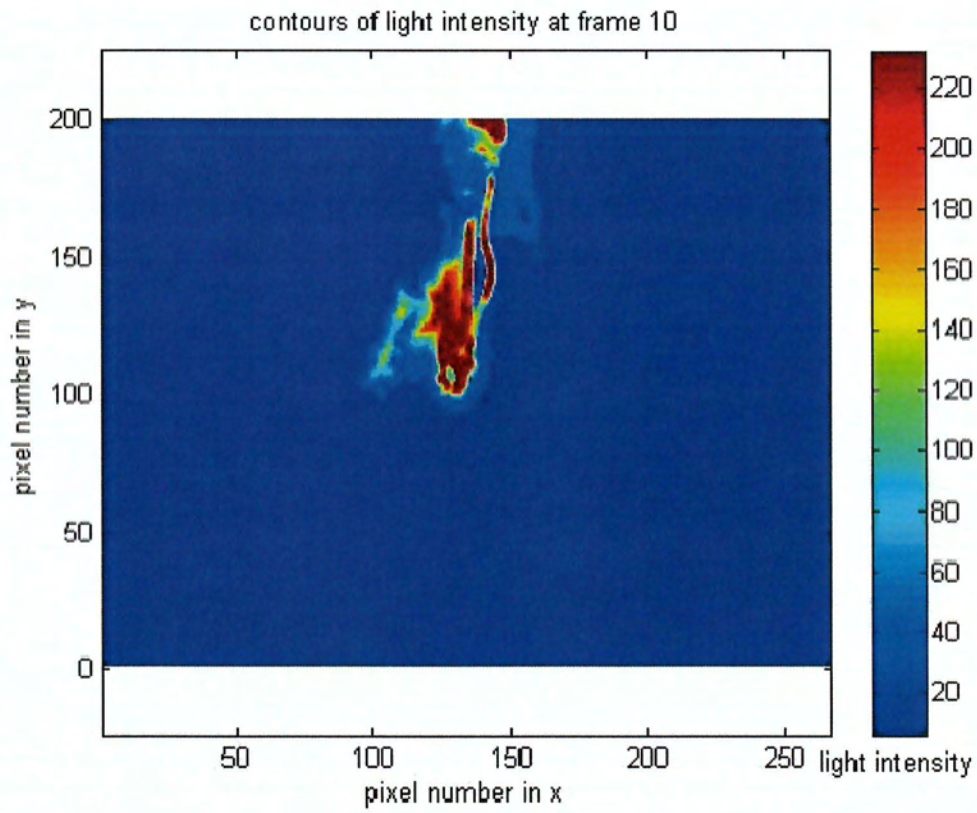
Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ροή σωματιδίων (πλούμιο) είναι μικρή, και γι'αυτό η διάσπαση της ροής λόγω της τύρβης είναι μεγάλη. Κυρίως σε συχνότητες με έντονο το φαινόμενο της τύρβης, η φωτεινότητα των σωματιδίων γίνεται μηδενική και δε μπορεί εύκολα να διακριθεί.

Ένταση φωτός για το 10^0 σε σειρά καρέ (light intensity for frame 10)

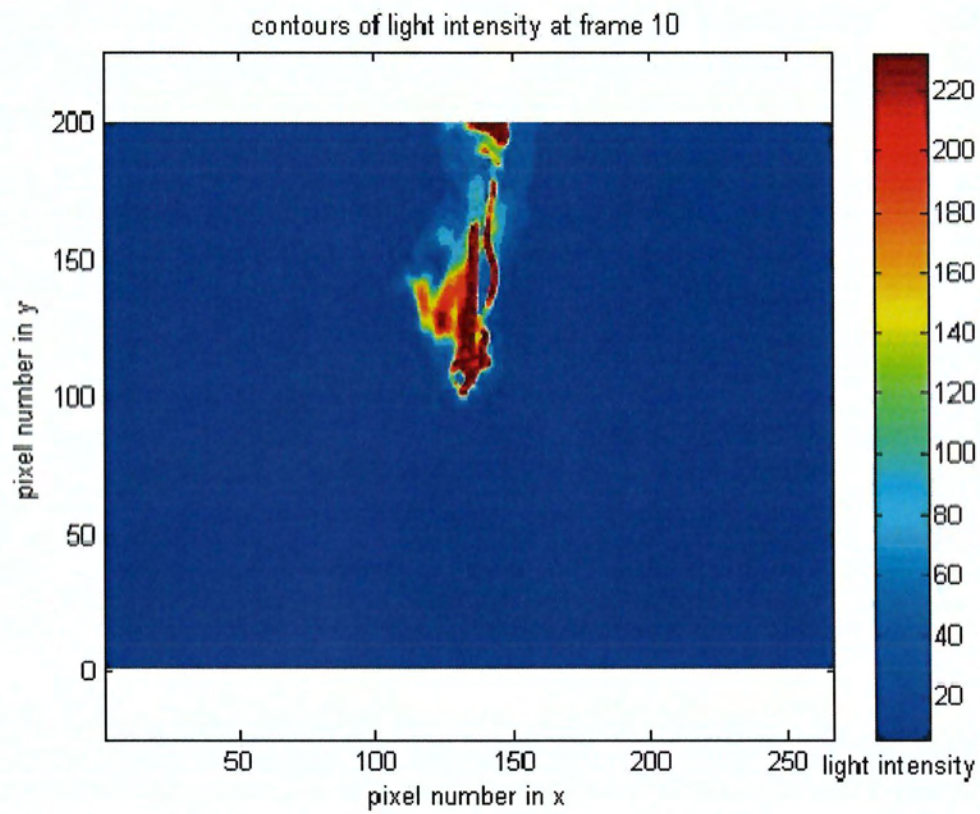
Στο δέκατο σε σειρά καρέ κάθε συχνότητας που επεξεργαζόμαστε, αποτυπώνεται η στιγμιαία ένταση φωτός για όλα τα pixel. Στις παρακάτω εικόνες φαινεται οι ισοσταθμικές για κάθε συχνότητα ξεχωριστά.



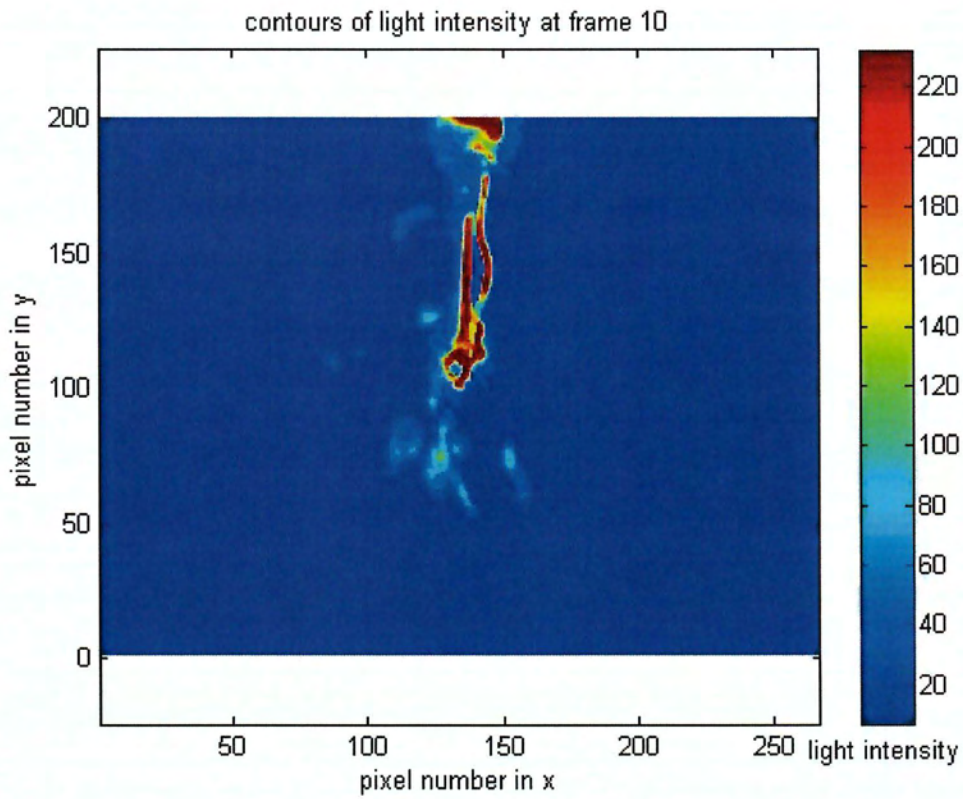
Εικόνα 20-no_power-- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



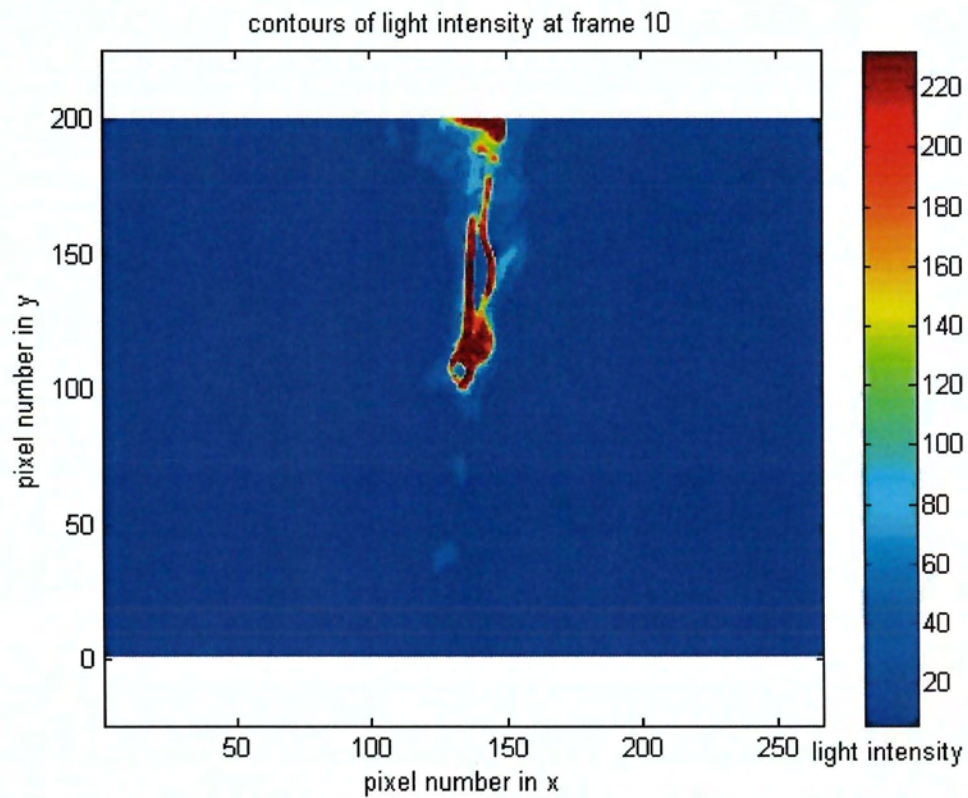
Εικόνα 21-40Hz-- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



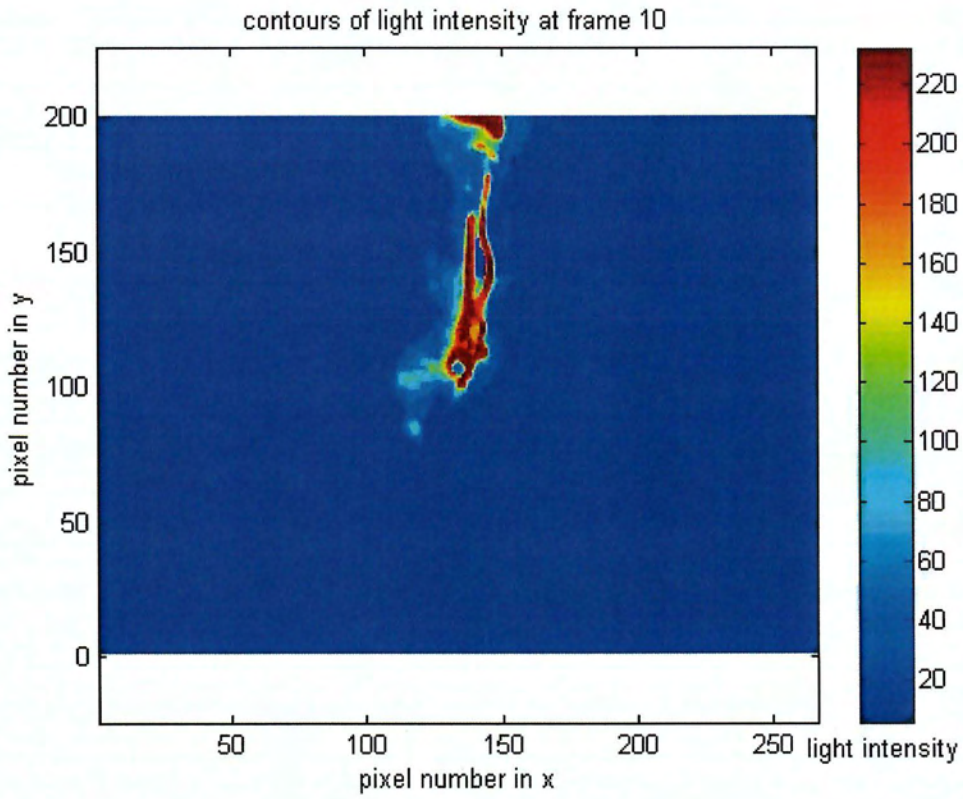
Εικόνα 22-50Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



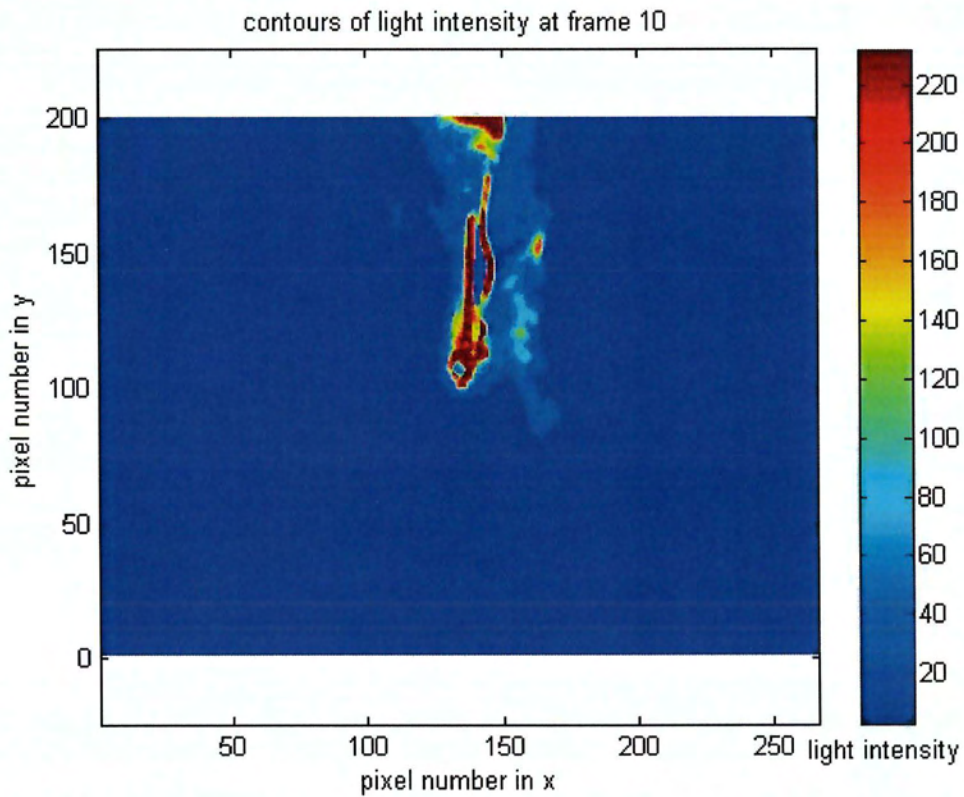
Εικόνα 23-60Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



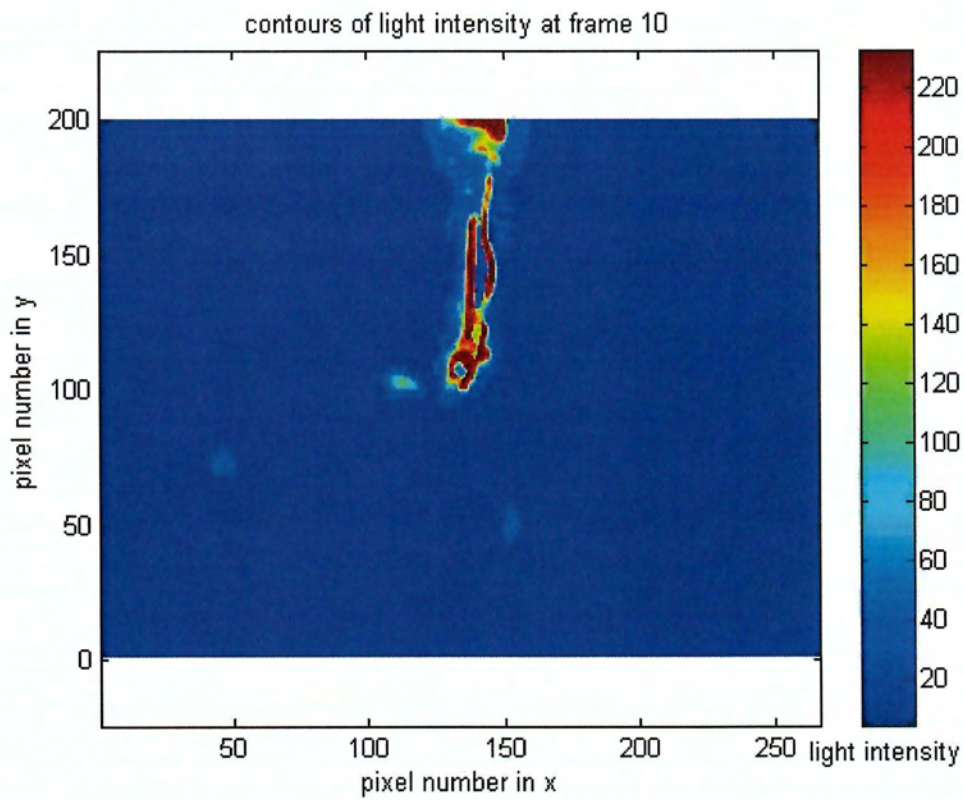
Εικόνα 24-70Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



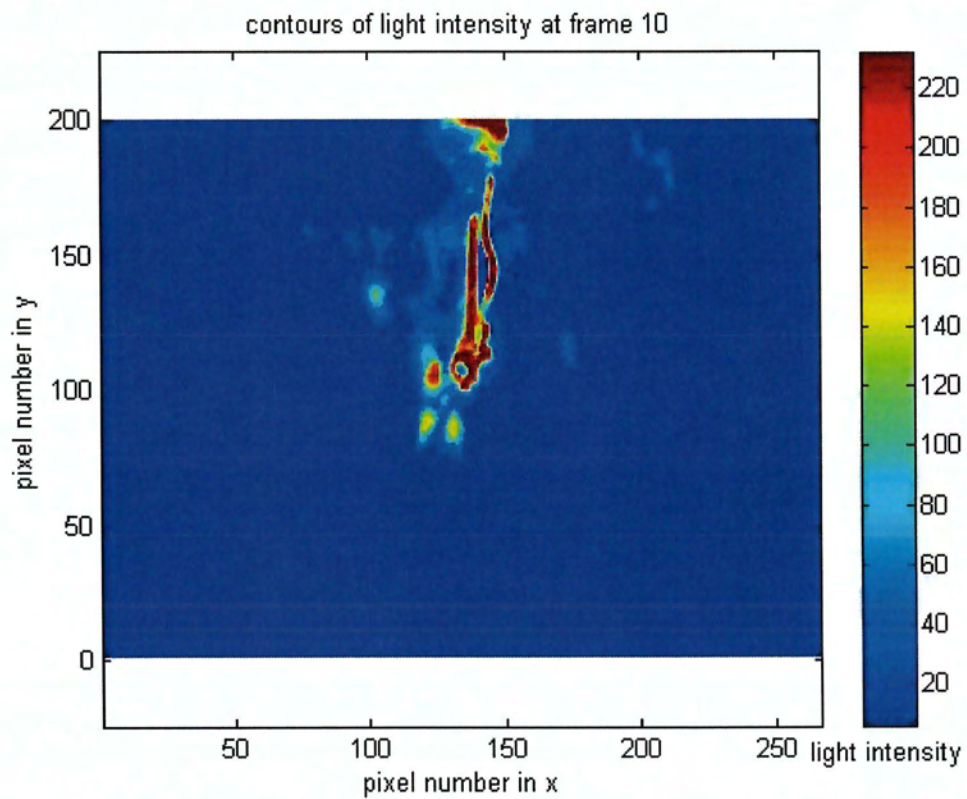
Εικόνα 25-73Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



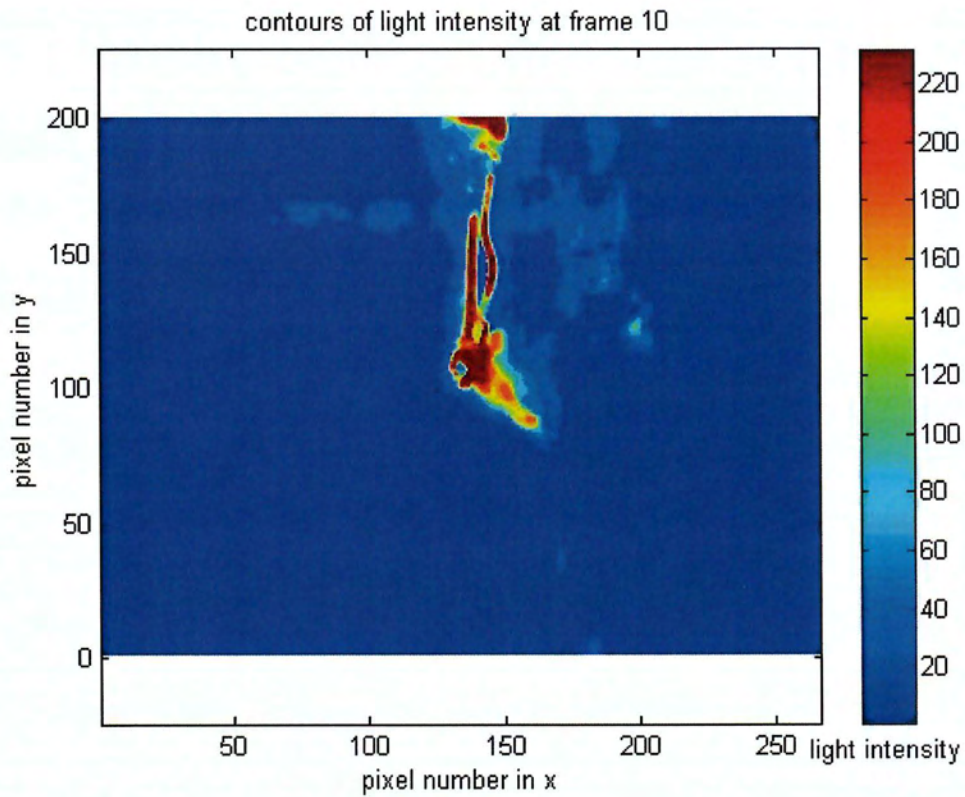
Εικόνα 26-75Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



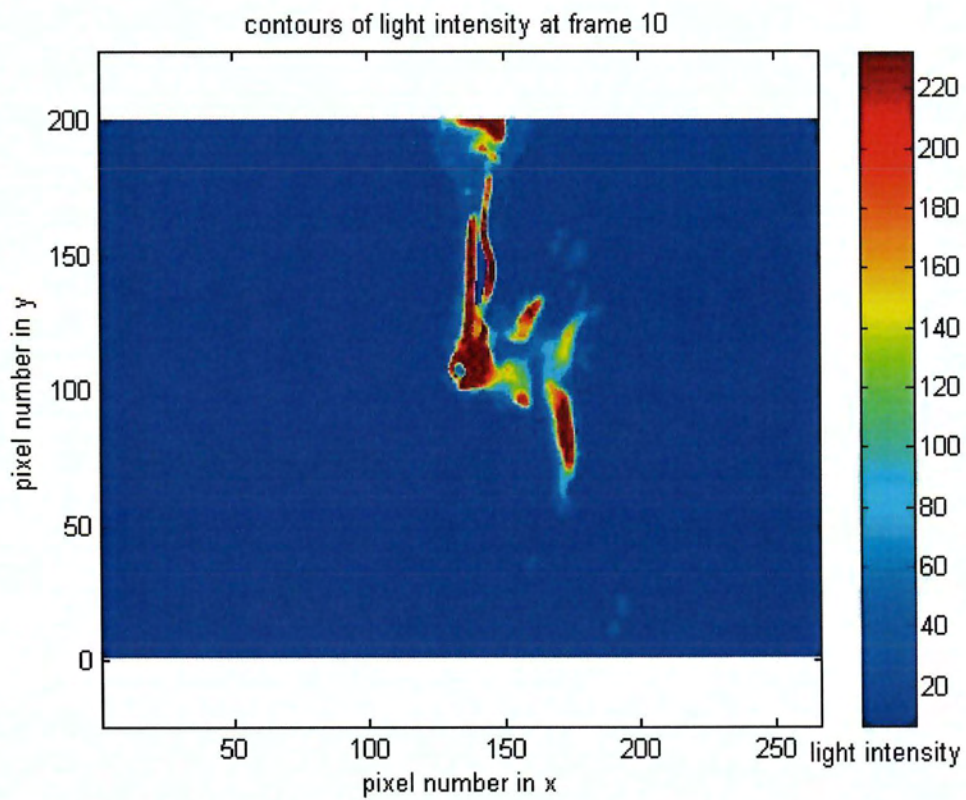
Εικόνα 27-80Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



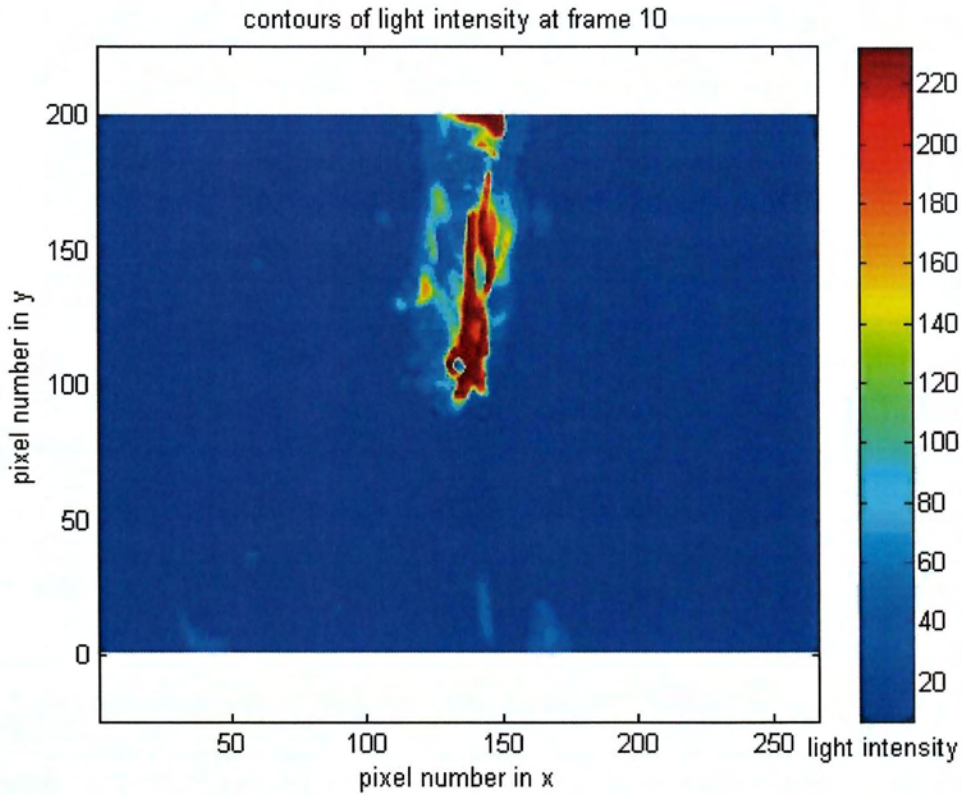
Εικόνα 28-90Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



Εικόνα 29-100Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)



Εικόνα 30-120Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)

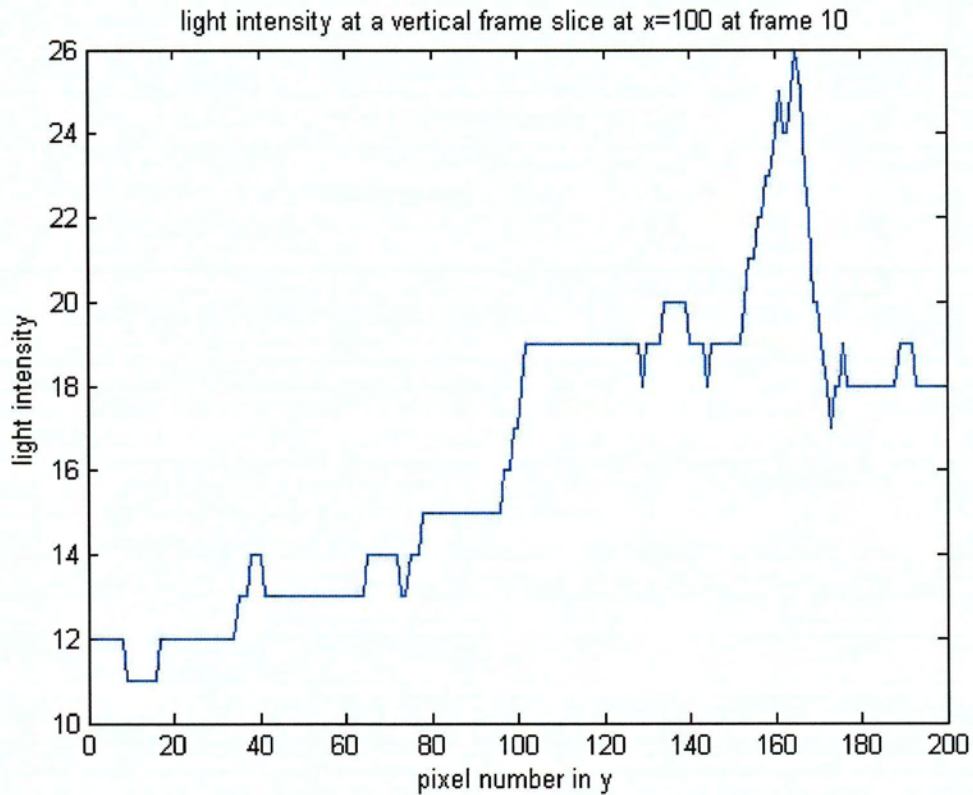


Εικόνα 31-140Hz- Ισοσταθμικές στιγμιαίες καμπύλες έναντι pixel στο (frame 10)

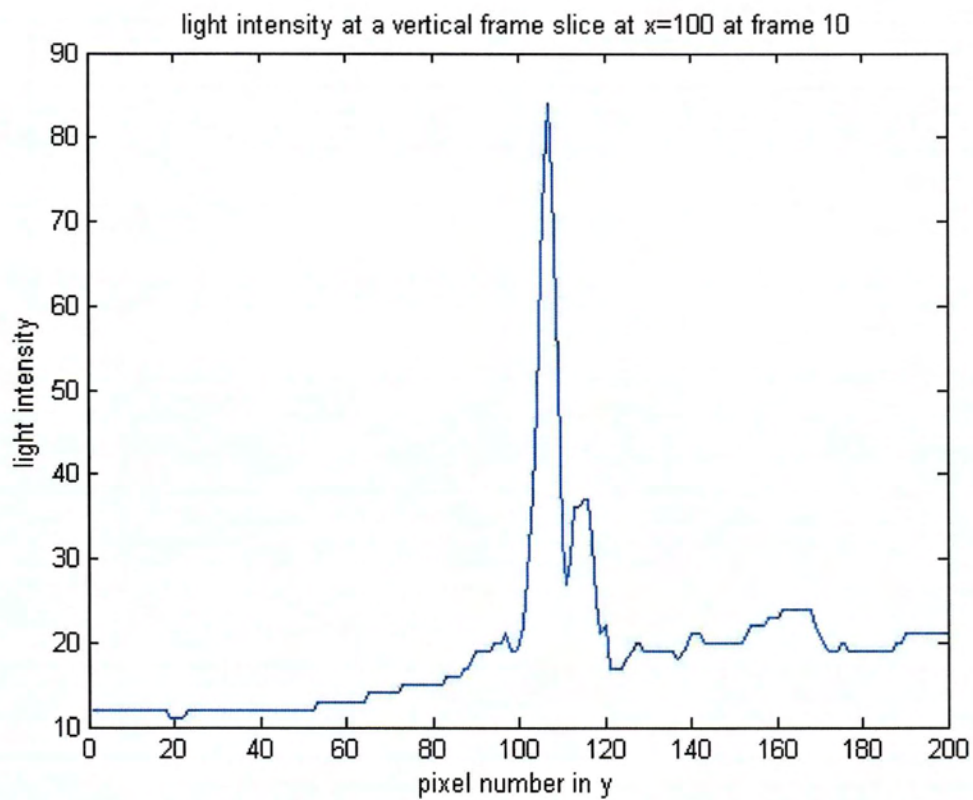
Αρχικά, στην περίπτωση που δεν υπάρχει επίδραση των μεγαφώνων, η ροή του πλουμίου αποτυπώνεται στρωτή. Στα 40 Hz, τα σωματίδια καπνού μαζεύονται προς την αφετηρία της ροής, με μια διασπορά προς τα αριστερά. Η επίδραση του φαινομένου είναι εμφανής στα 50 και 60Hz ,ενώ από τα 70 έως και τα 80Hz η ροή των σωματιδίων δεν είναι εμφανής λόγω της μειωμένης τροφοδοσίας και της διάσπασής της λόγω τύρβης. Στα 90, 100, 120 και 140Hz η ροή είναι διασπασμένη σε πολλά κομμάτια γύρω από το κέντρο, ως αποτέλεσμα του τυρβώδους πεδίου. Πιο ακριβή αποτελέσματα προκύπτουν από τις μέσες ισοσταθμικές, όπου αποτυπώνεται σε βάθος χρόνου η επίδραση του τυρβώδους πεδίου στη ροή, και όχι η στιγμιαία αποτύπωση. Επίσης μελετάται καλύτερα και η ισοτροπία της τύρβης.

Ένταση φωτός για κάθετη τομή στο $x=100$ στο δέκατο καρέ (light intensity at $x=100$, vertical slice at frame 10)

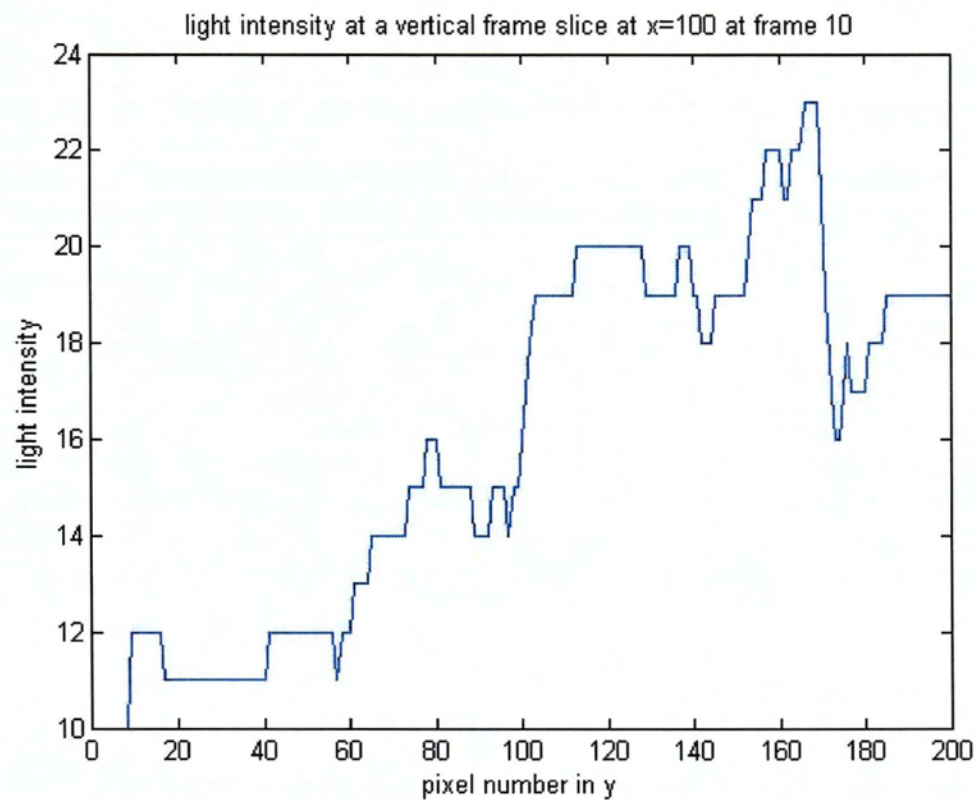
Παρακάτω παρουσιάζονται ,για κάθε συχνότητα, τα γραφήματα της έντασης του φωτός για κάθε pixel στον y -άξονα, σε συγκεκριμένο (σημείο $x=100$) στον x -άξονα. Η αποτύπωση είναι στιγμιαία, στο δέκατο σε σειρά καρέ.



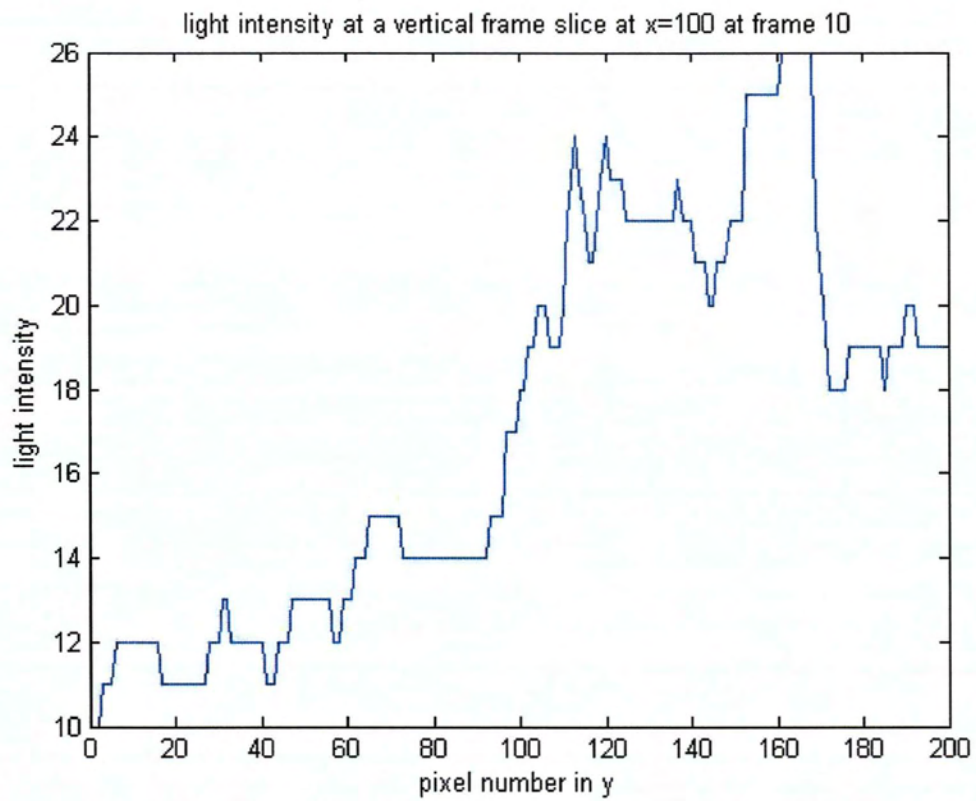
Γράφημα 92-no_power- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10^ο καρέ



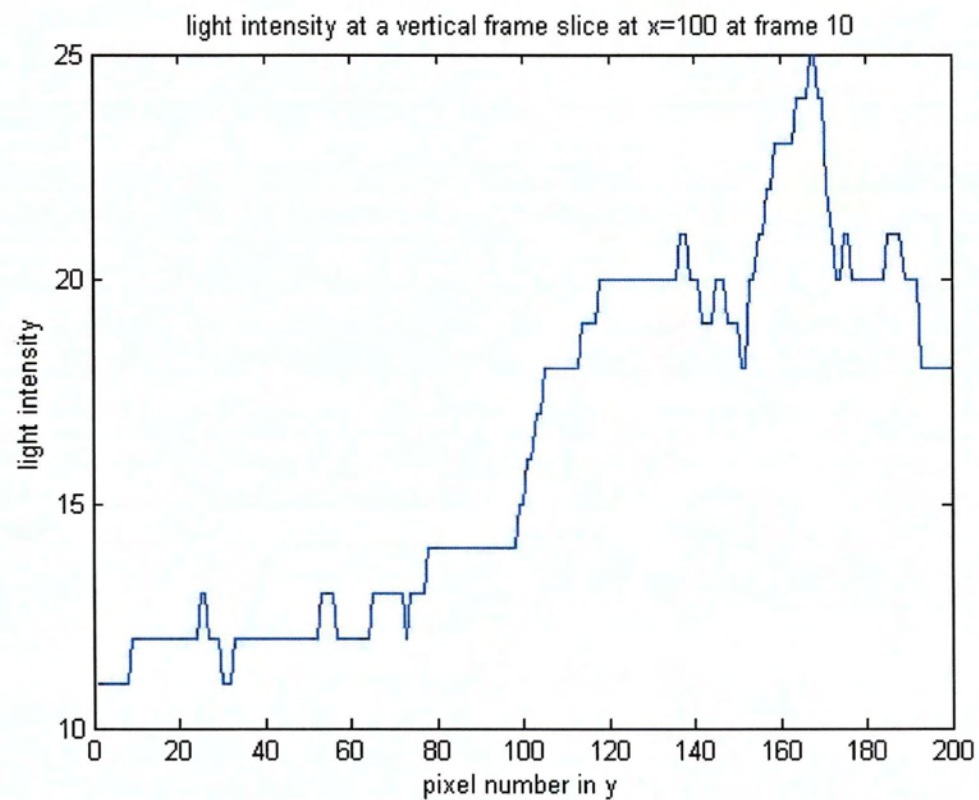
Γράφημα 93-40Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



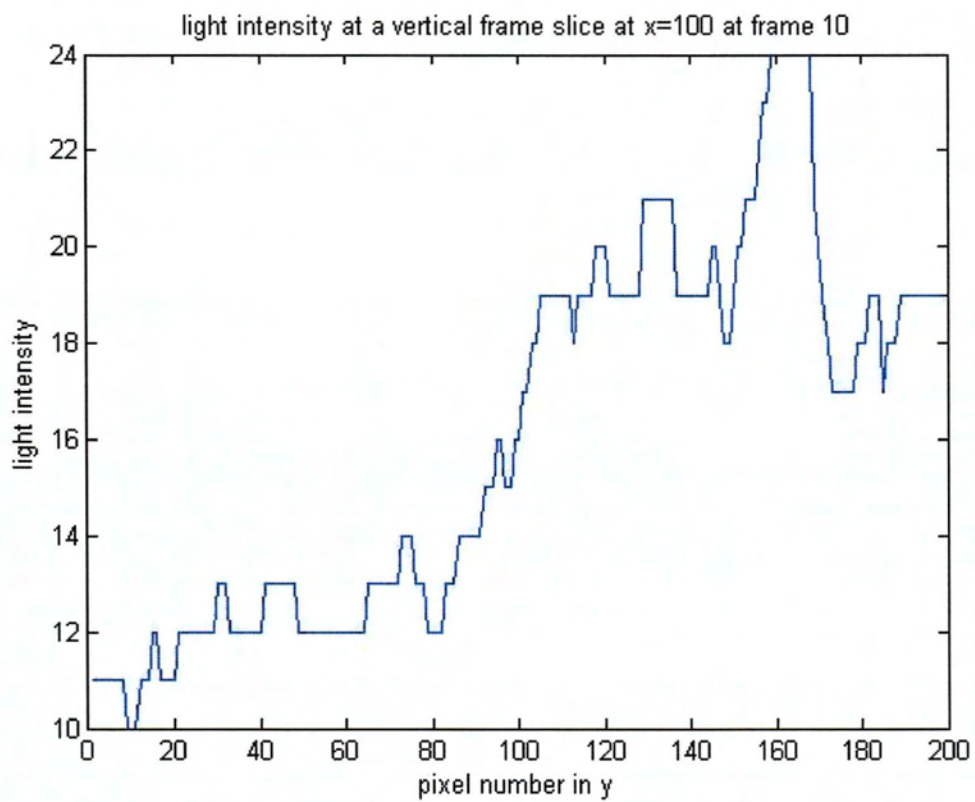
Γράφημα 94-50Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



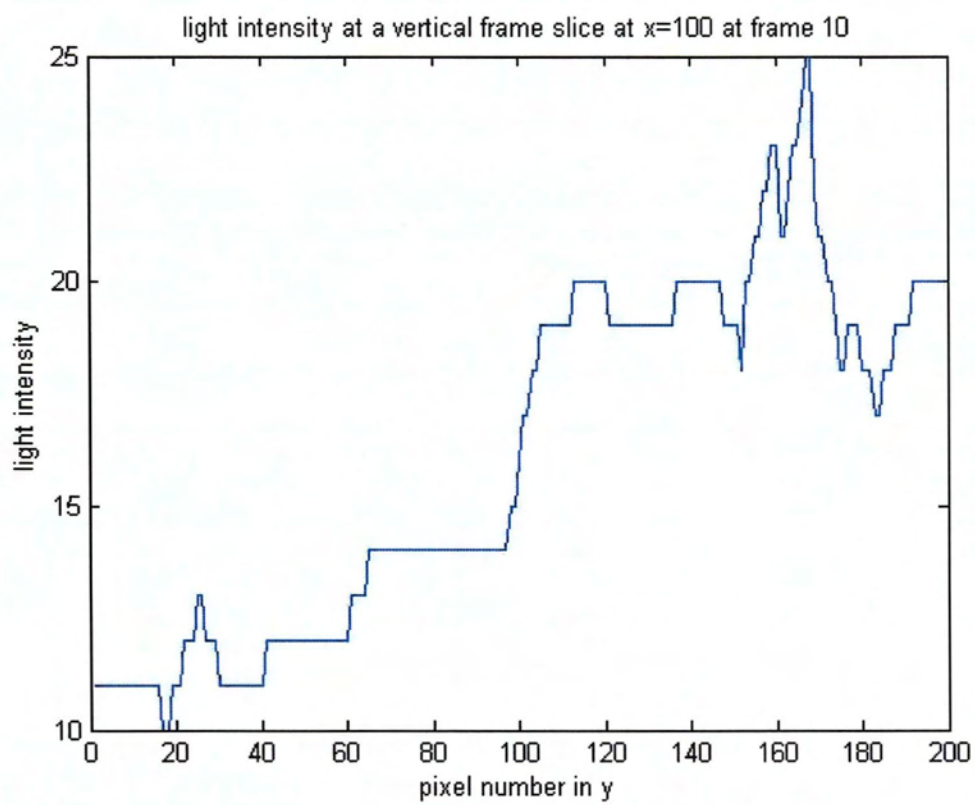
Γράφημα 95-60Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



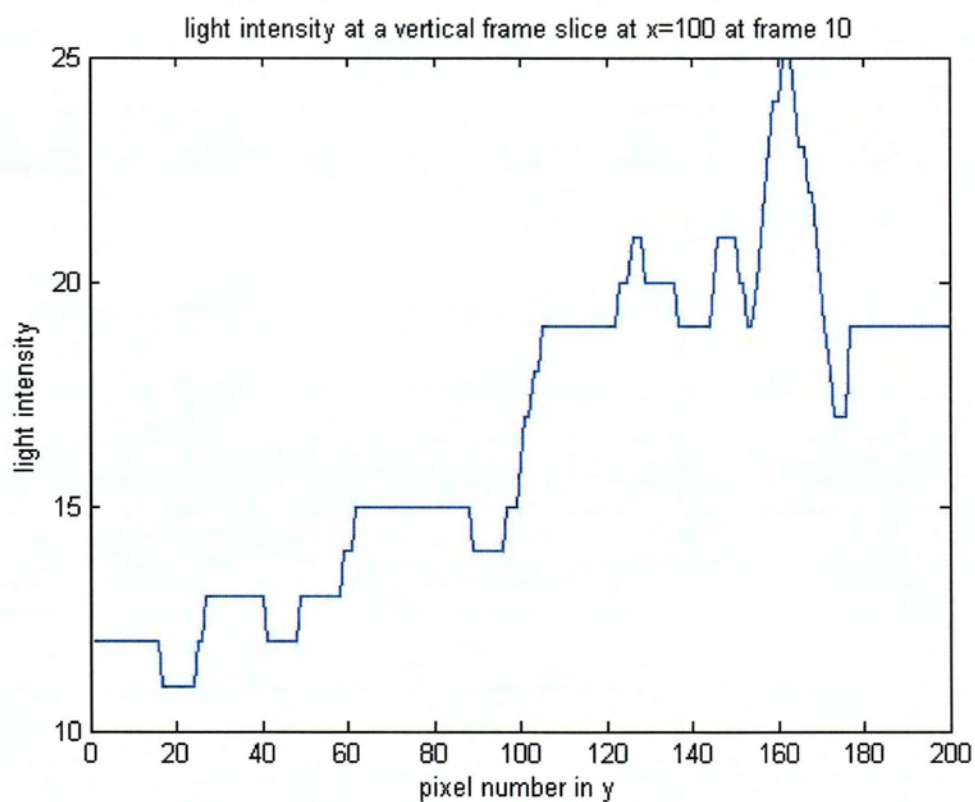
Γράφημα 96-70Hz Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



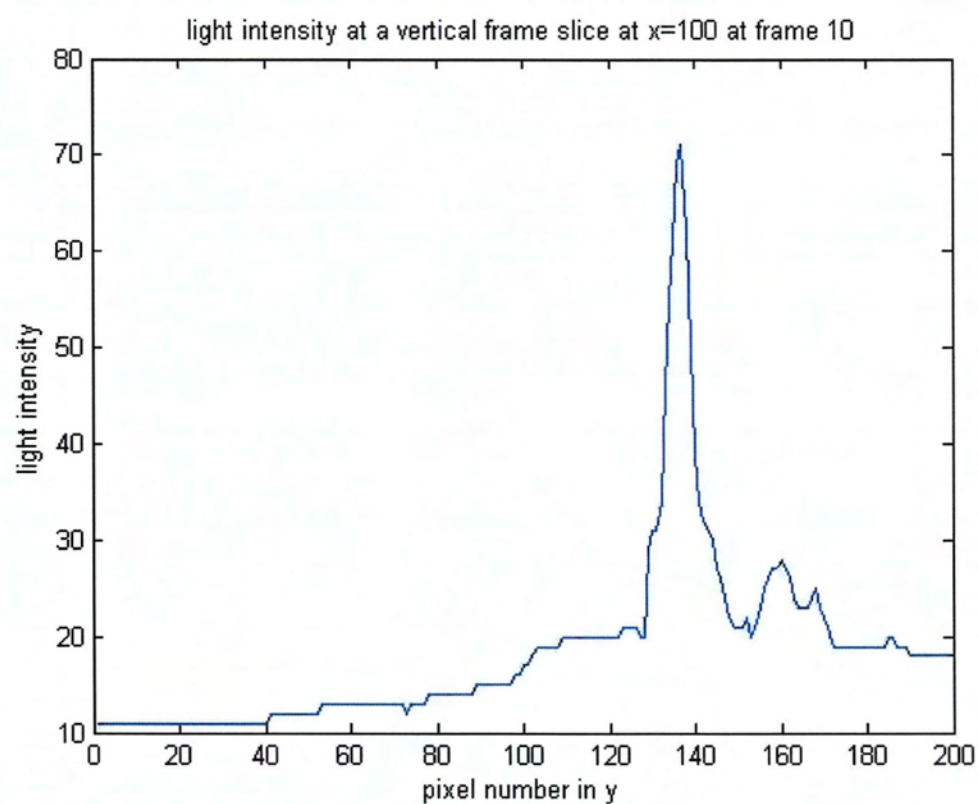
Γράφημα 97-73Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



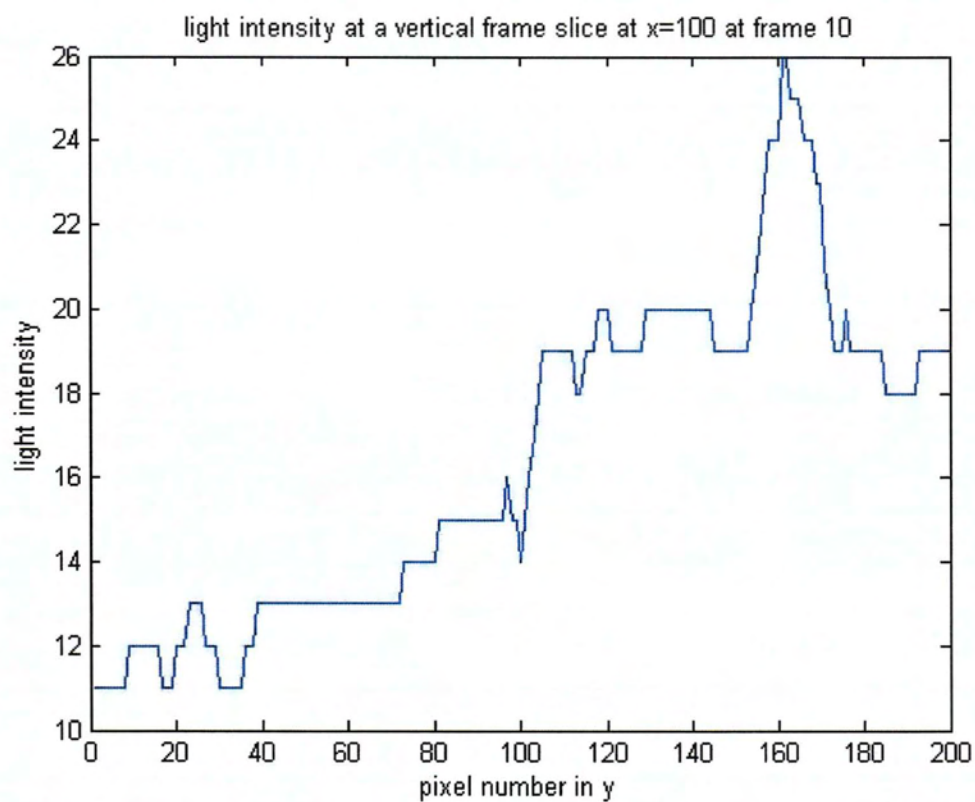
Γράφημα 98-75Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



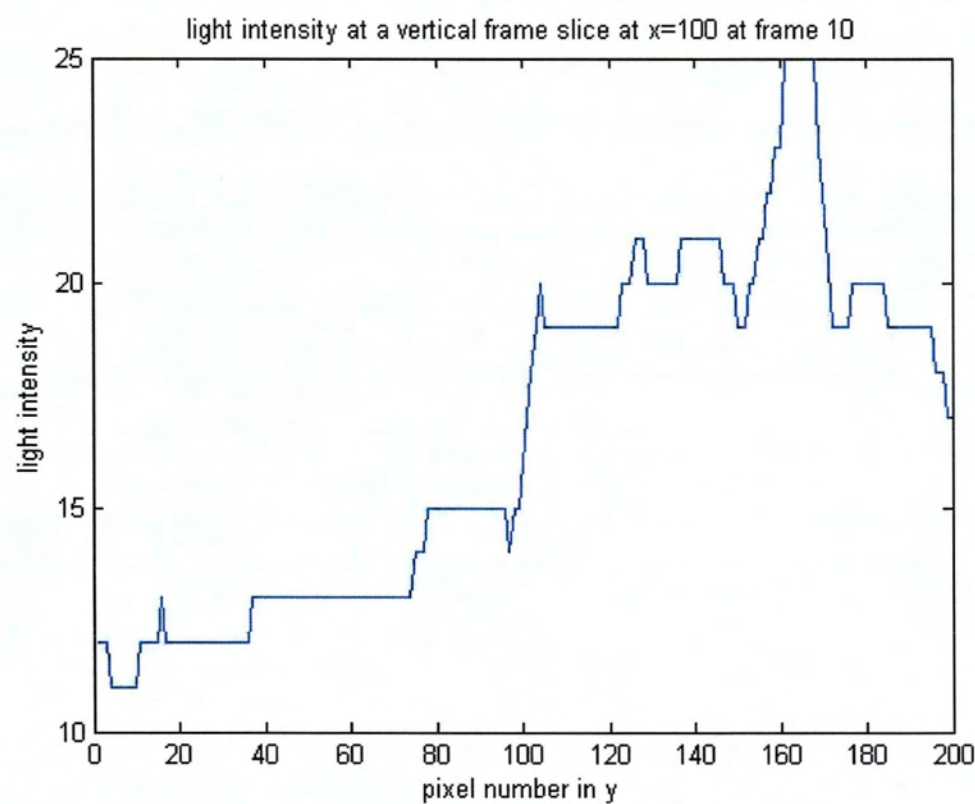
Γράφημα 99-80Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



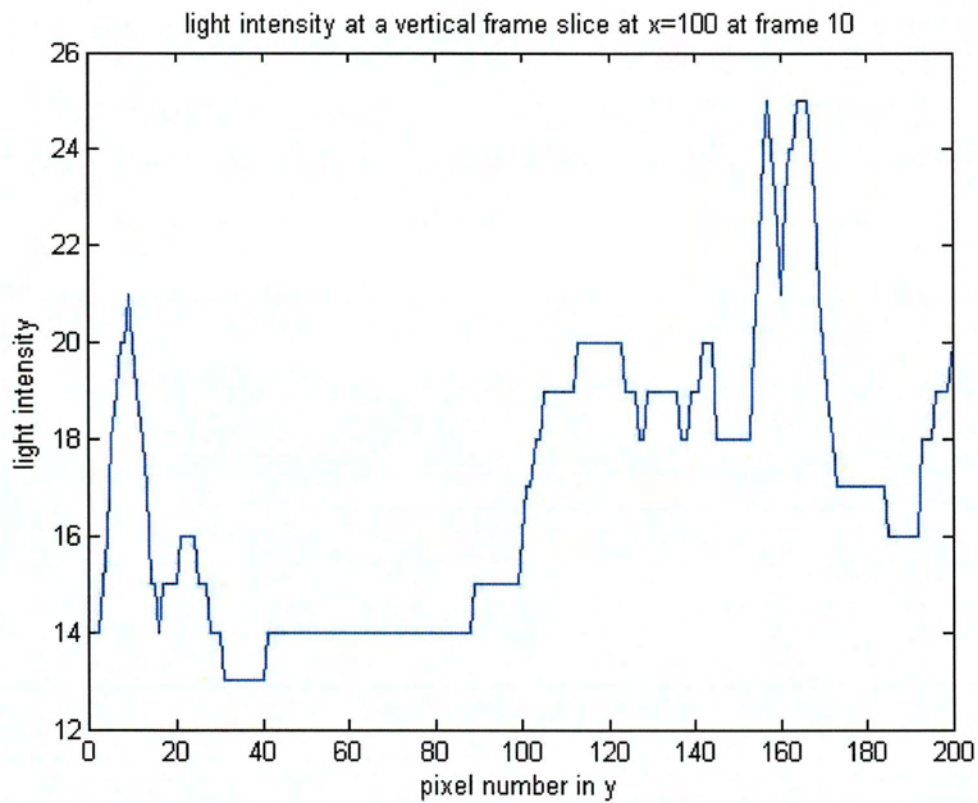
Γράφημα 100-90Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



Γράφημα 101-100Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ



Γράφημα 102-120Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρέ

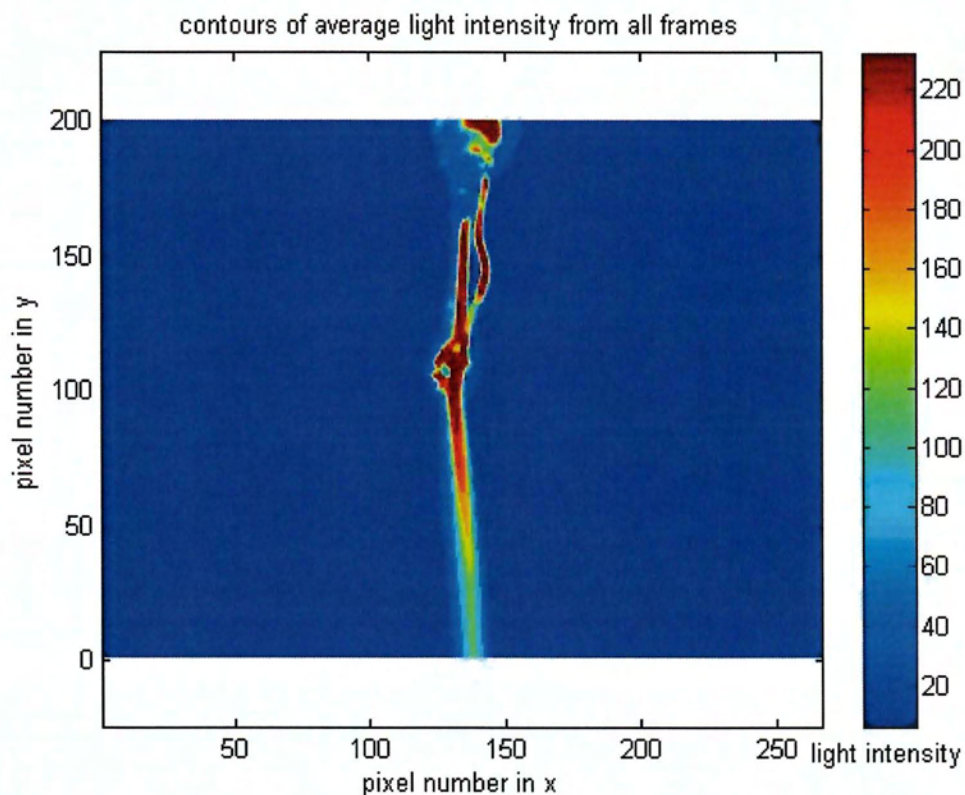


Γράφημα 103-140Hz- Ένταση φωτός για $x=100$ στο 10° καρτέ

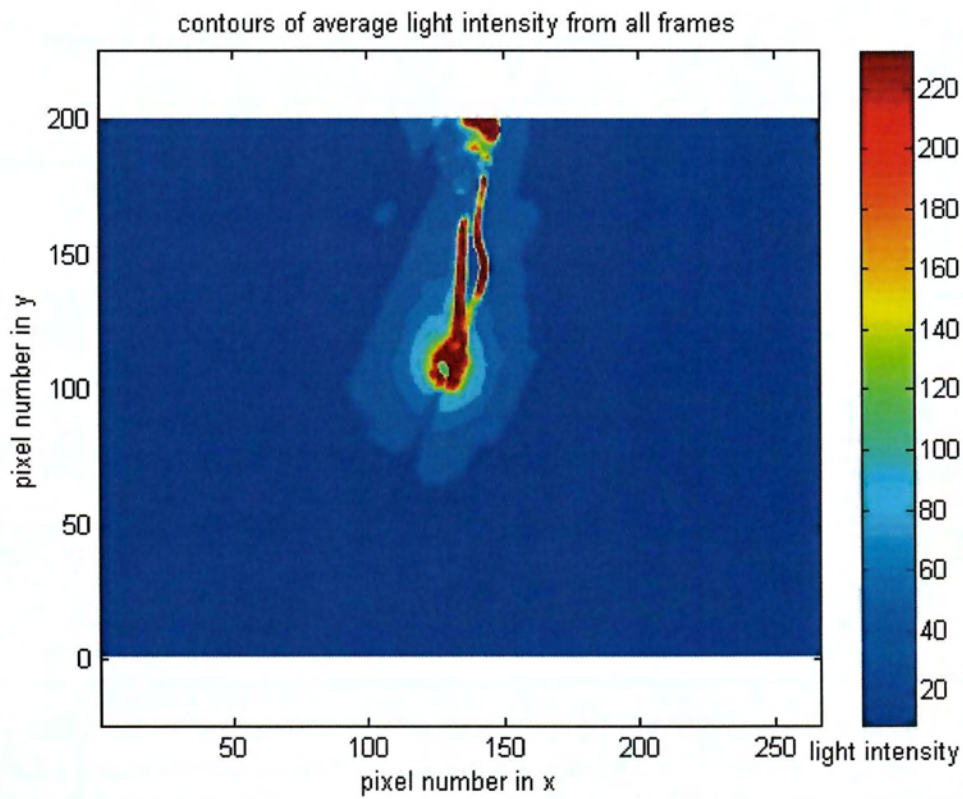
Από τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η ένταση του φωτός κυμαίνεται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Προφανώς η μικρή τροφοδοσία σωματιδίων, καθώς και η επίδραση της τύρβης στη διάσπαση της ροής επηρεάζουν την ένταση του φωτός για την κάθετη αυτή τομή στο $x=100$. Η μεγαλύτερη τιμή της εμφανίζεται στα 40Hz, όπου το φαινόμενο έχει βρεθεί πιο έντονο. Σαφέστερα αποτελέσματα θα δοθούν με τις μέσες τιμές, όπου θα αναλυθεί το φαινόμενο σε βάθος χρόνου.

Μέση ένταση φωτός για όλα τα pixel (average light intensity matrix)

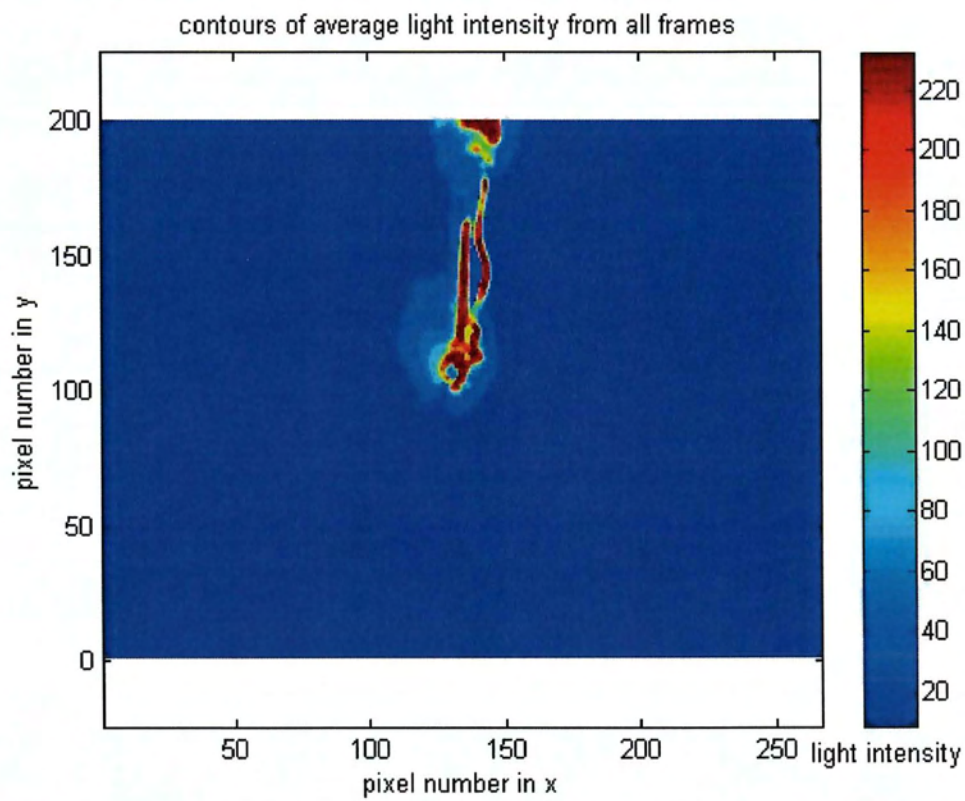
Στα γραφήματα (matrix) που ακολουθούν παραθέτονται οι ισοσταθμικές των μέσων τιμών της έντασης του φωτός σε κάθε pixel. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την γενική τάση του φαινομένου, για κάθε συχνότητα παλμού, και είναι πιο ασφαλή από τα στιγμιαία που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.



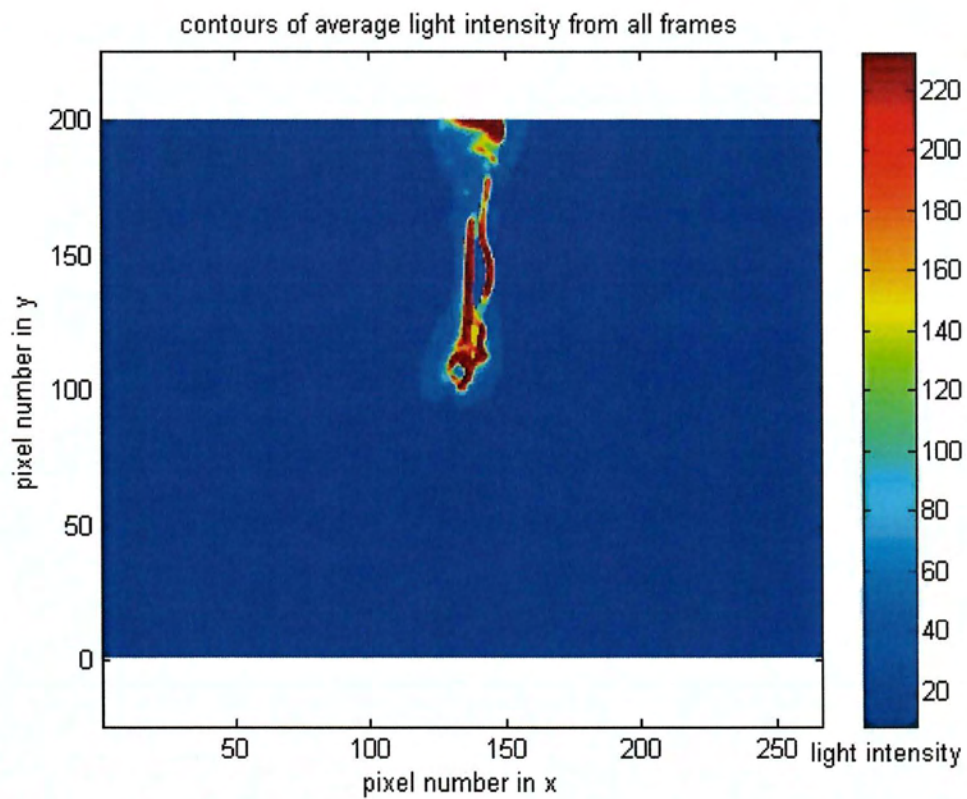
Γράφημα 104-no_power- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames



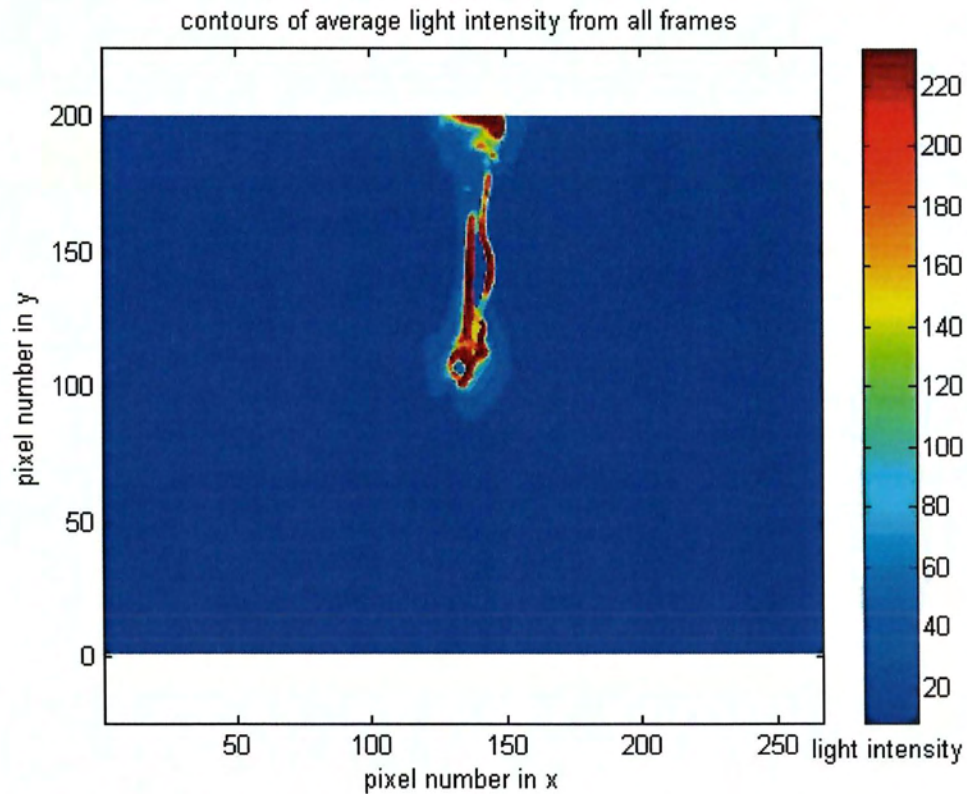
Γράφημα 105-40Hz Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



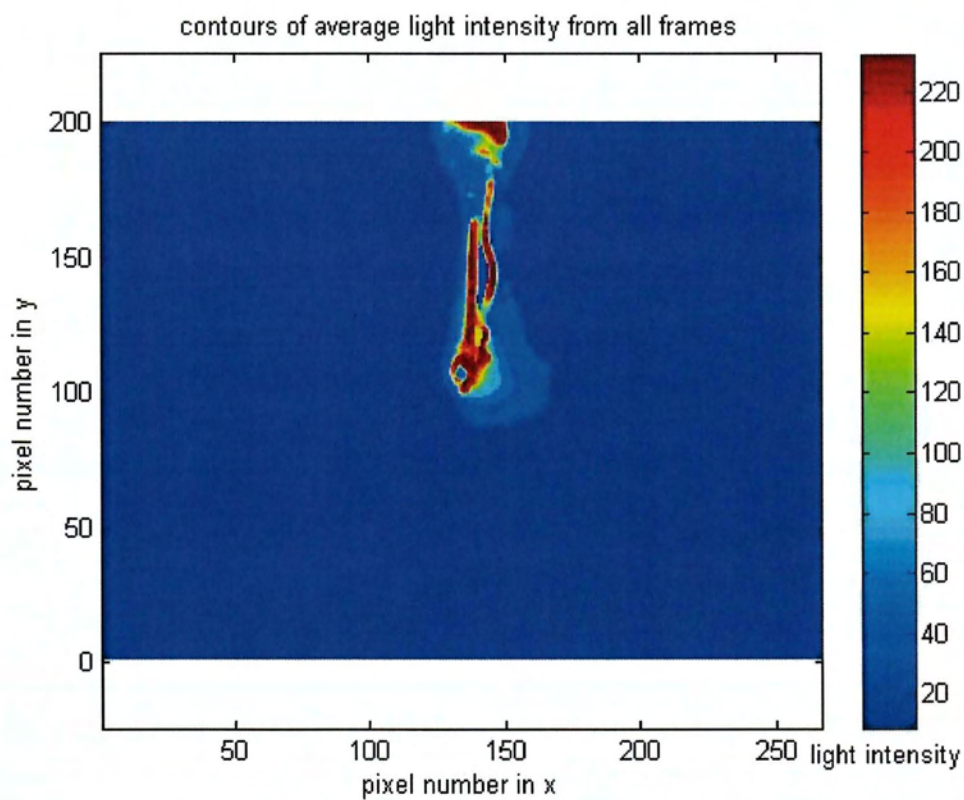
Γράφημα 106-50Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



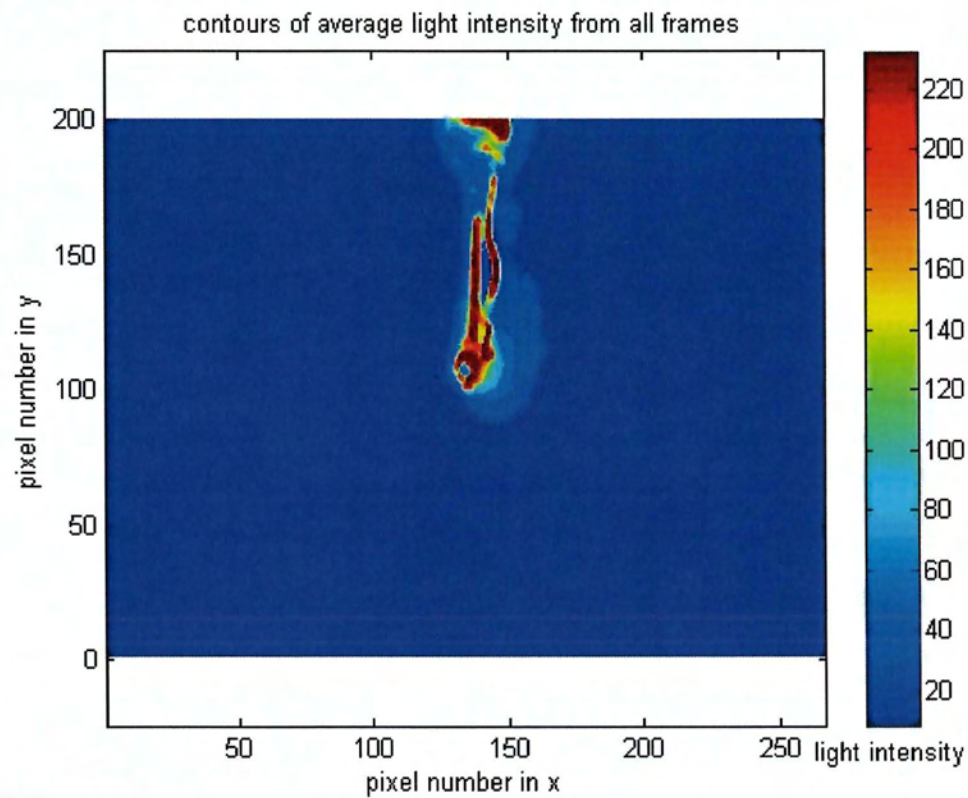
Γράφημα 107-60Hz Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



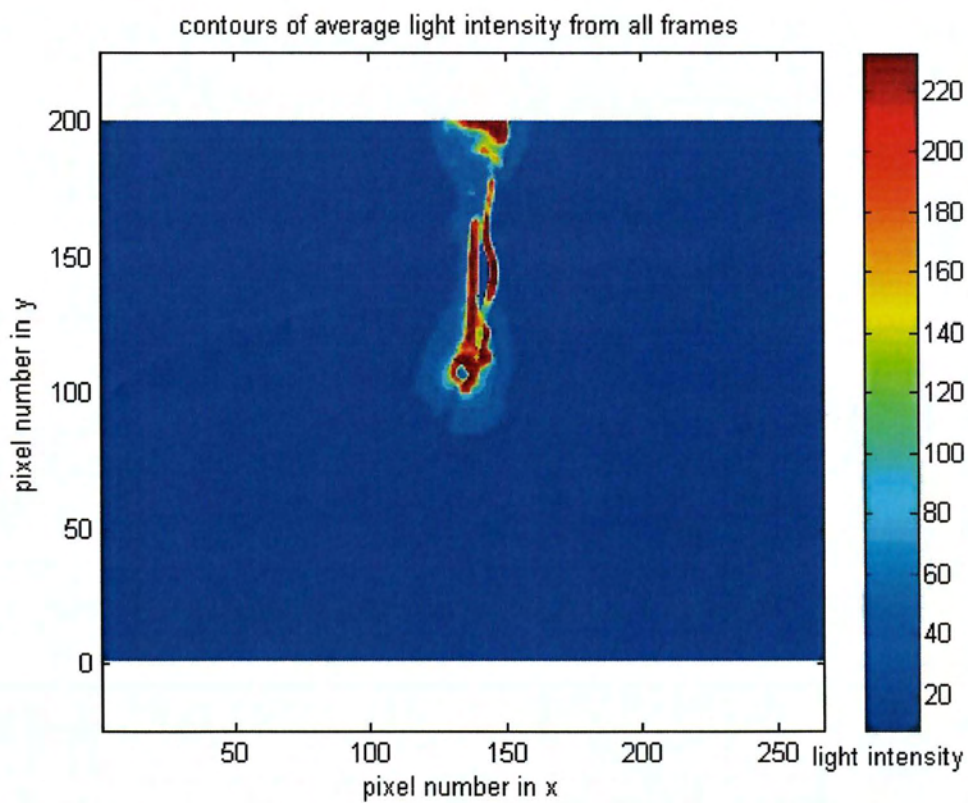
Γράφημα 108-70Hz Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



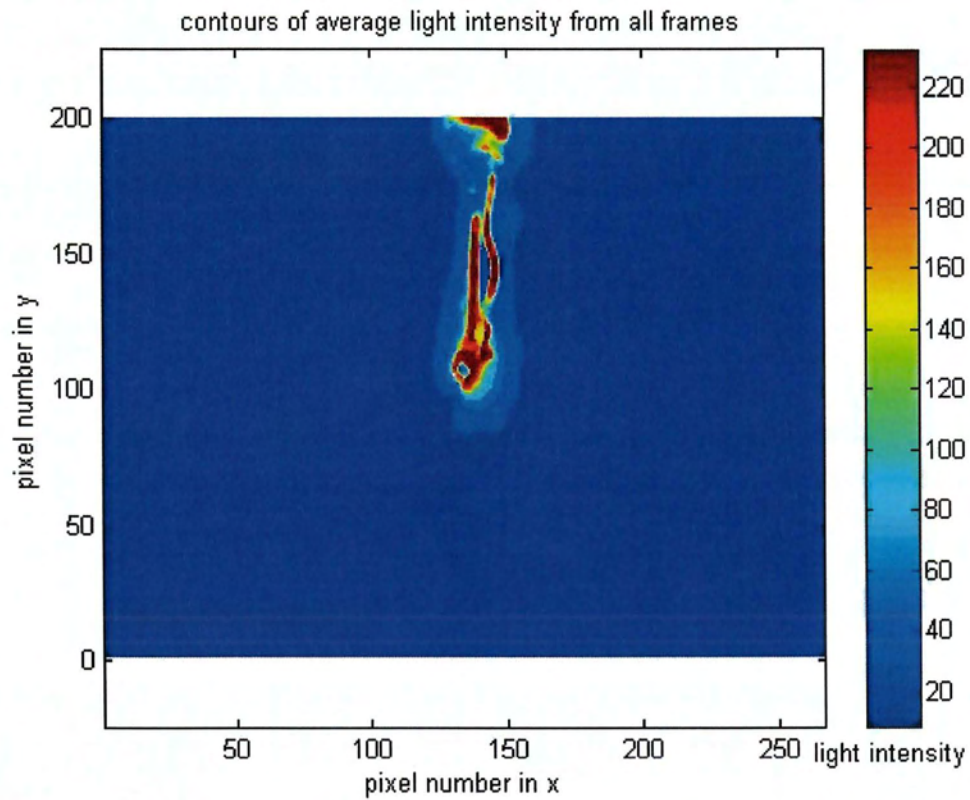
Γράφημα 109-73Hz Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



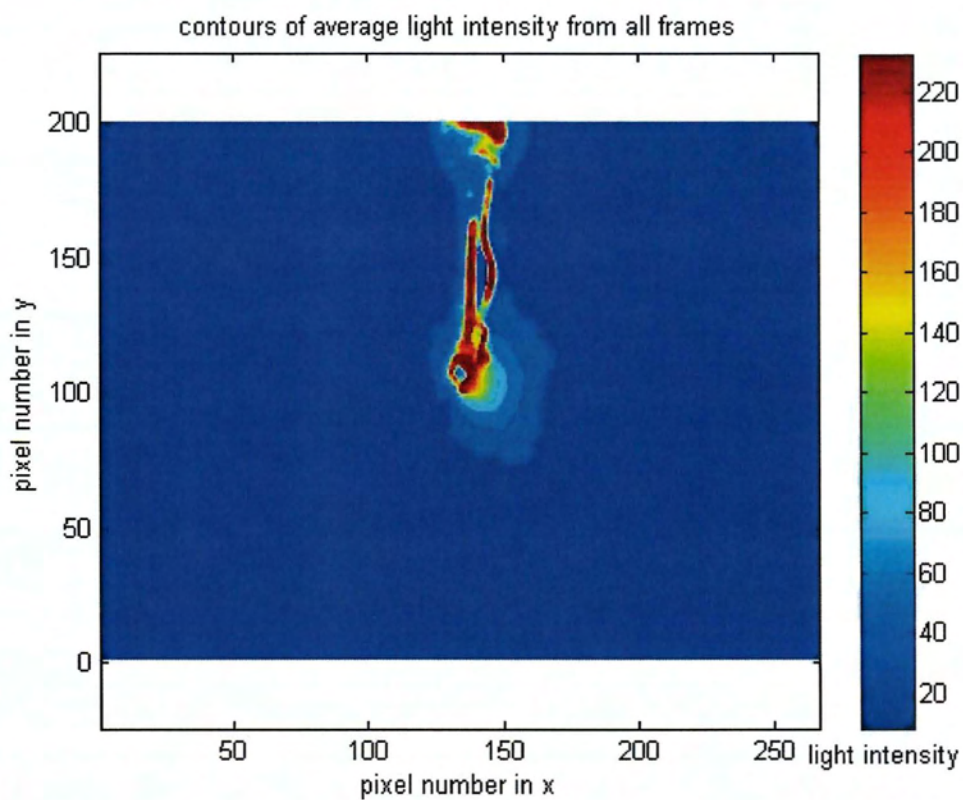
Γράφημα 110-75Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



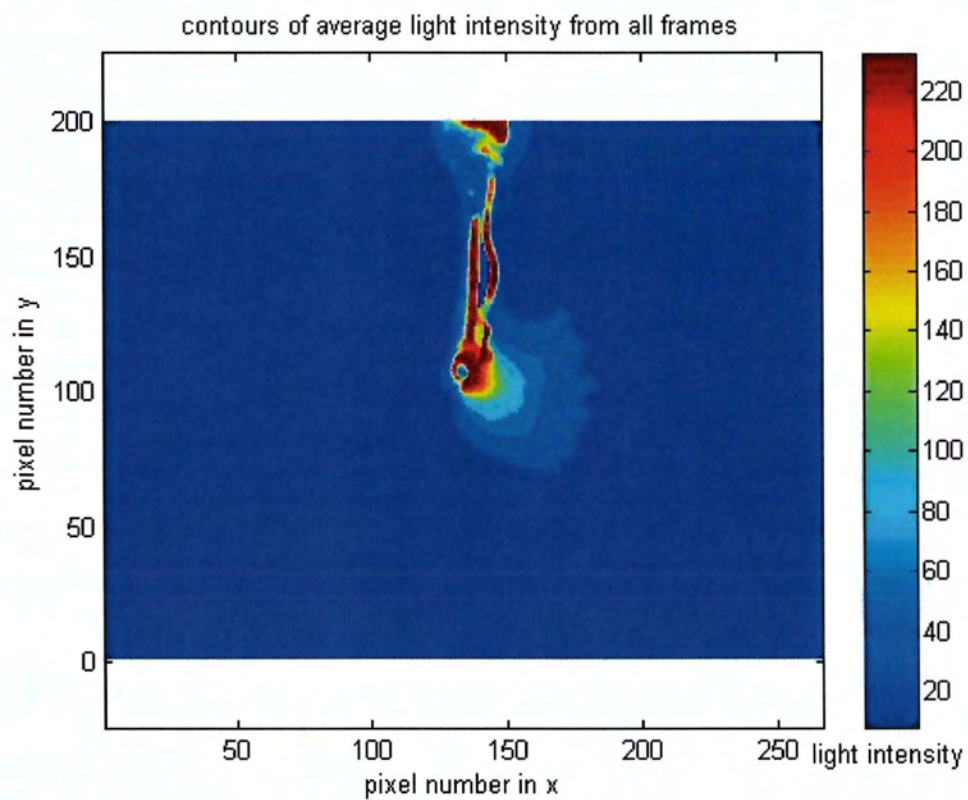
Γράφημα 111-80Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



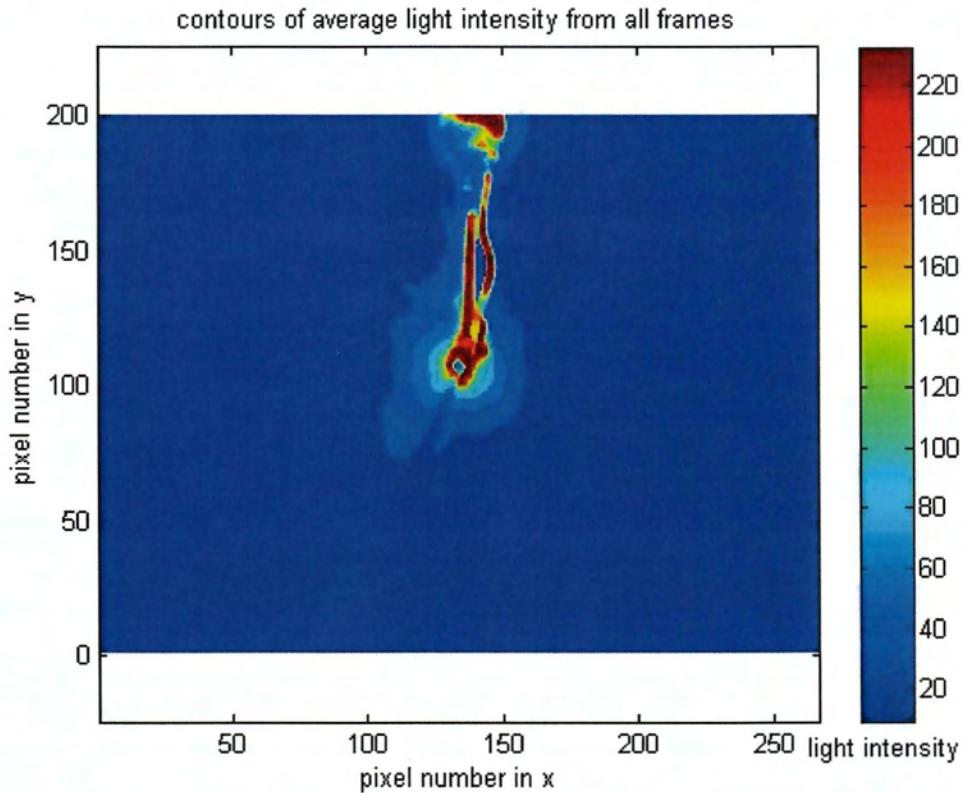
Γράφημα 112-90Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



Γράφημα 113-100Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames



Γράφημα 114-120Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσει των pixel για όλα τα frames

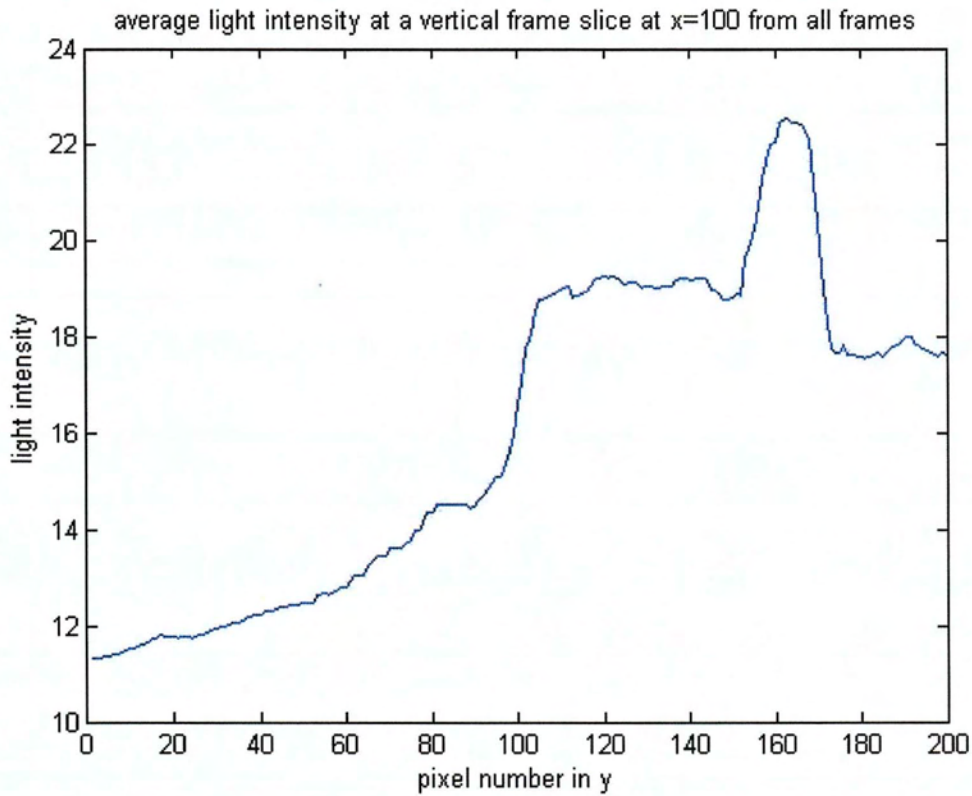


Γράφημα 115-140Hz- Ισοσταθμικές μέσες καμπύλες συναρτήσεϊ των pixel για όλα τα frames

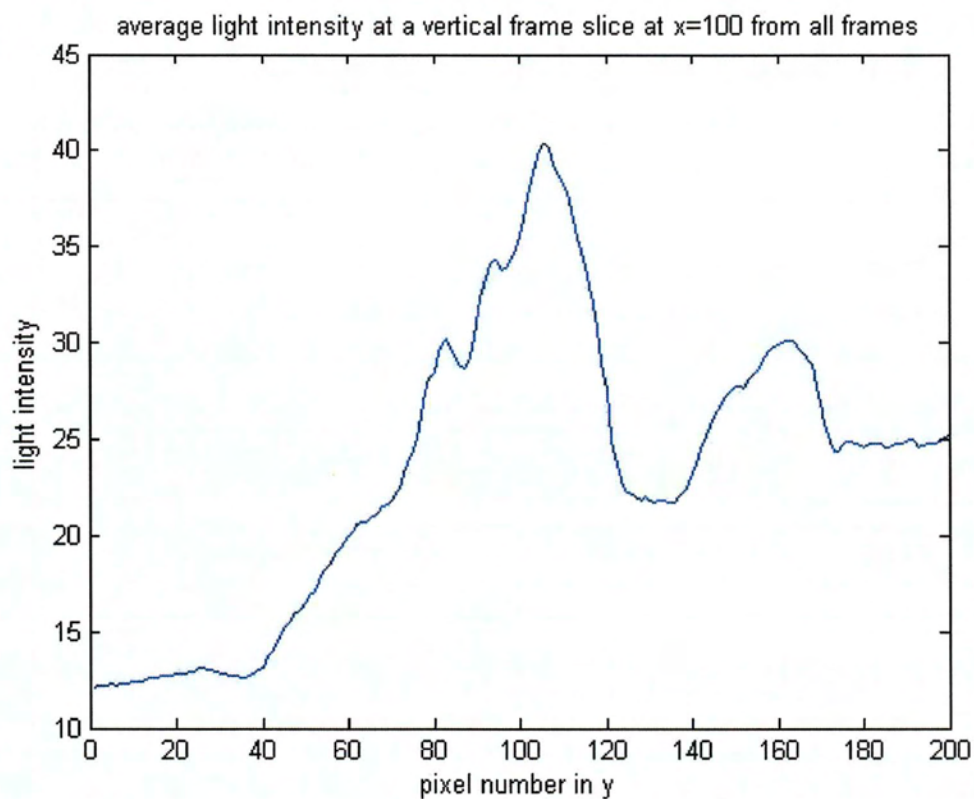
Όπως αναφέρθηκε και στις στιγμιαίες ισοσταθμικές καμπύλες, η ροή του πλουμίου χωρίς την επίδραση των μεγαφώνων παρουσιάζεται στρωτή. Με την συχνότητα παλμού στα 40Hz, η συγκέντρωση σωματιδίων είναι έντονη στην αφετηρία της ροής, ενώ το στρογγυλό του σχήματος (χρωματισμοί που απεικονίζουν την ένταση της φωτεινότητας) δείχνει ισοτροπία της τύρβης. Στα 50,60 και 70Hz η ισότροπη τύρβη είναι ξανά εμφανής χωρίς ωστόσο η παροχή σωματιδίων να είναι μεγάλη. Στα 73 και 75Hz η ροή τείνει να πηγαίνει προς τα αριστερά, ενώ η ισοτροπία επιστρέφει στα 80Hz, όπου η τύρβη έχει διασπάσει περισσότερο τη ροή σωματιδίων. Στα 90Hz βλέπουμε την τάση των σωματιδίων του πλουμίου να πηγαίνουν προς τα κάτω, κάτι που αλλάζει στα 100 Hz, με τη συγκέντρωση των σωματιδίων να κατανέμεται ισότροπα γύρω από την αφετηρία της ροής. Τέλος, στα 100, 120 και 140Hz η τροφοδοσία σωματιδίων μεγαλώνει, καθώς η τύρβη δεν είναι τόσο έντονη ώστε να διασπά αρκετά το πλούμιο. Η τύρβη στις τελευταίες τρεις συχνότητες που αναφέρθηκαν παρουσιάζεται ισοτροπική, κάτι που γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτό στα 140Hz.

Μέση ένταση φωτός για κάθετη τομή στο $x=100$ (average light intensity at $x=100$, vertical slice)

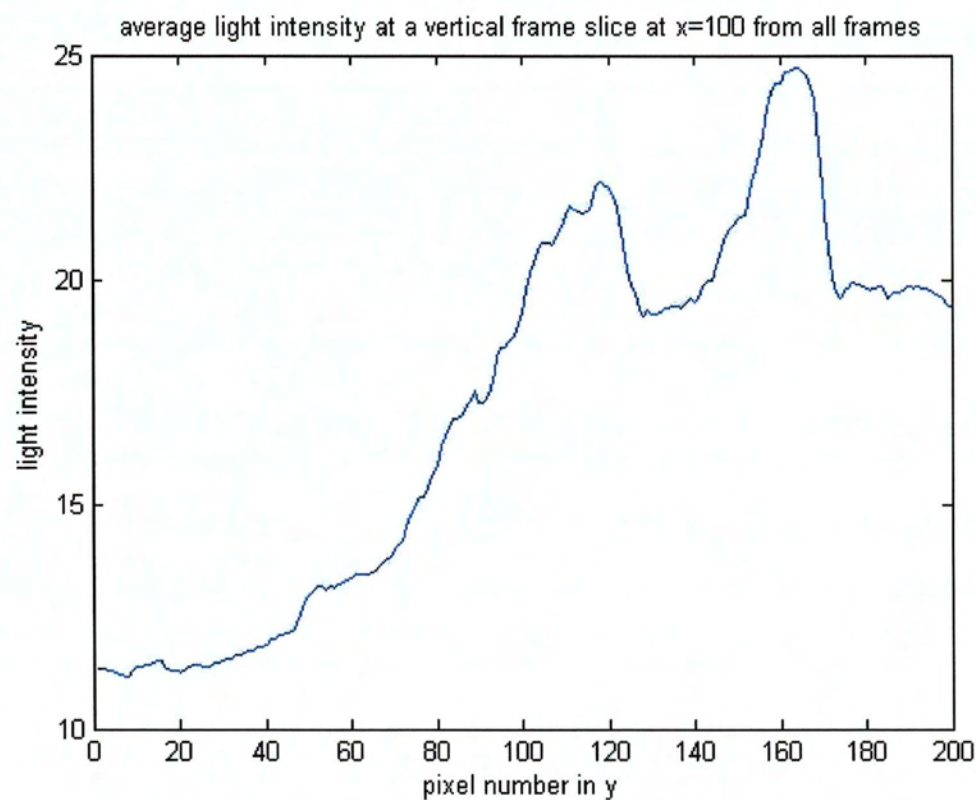
Στη συνέχεια, παραθέτονται τα γραφήματα του μέσου όρου της έντασης του φωτός συναρτήσει των pixel για όλα τα σημεία του y -άξονα σε συγκεκριμένη τιμή του x , για όλα τα frames των συχνοτήτων που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματα.



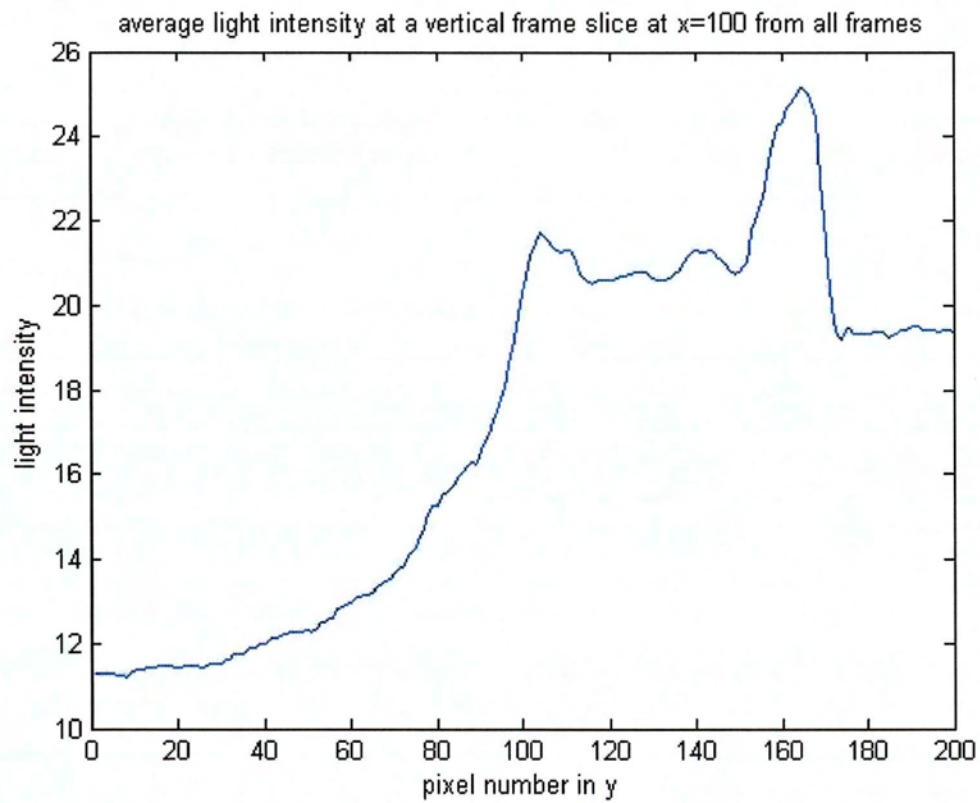
Γράφημα 116-no_power-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



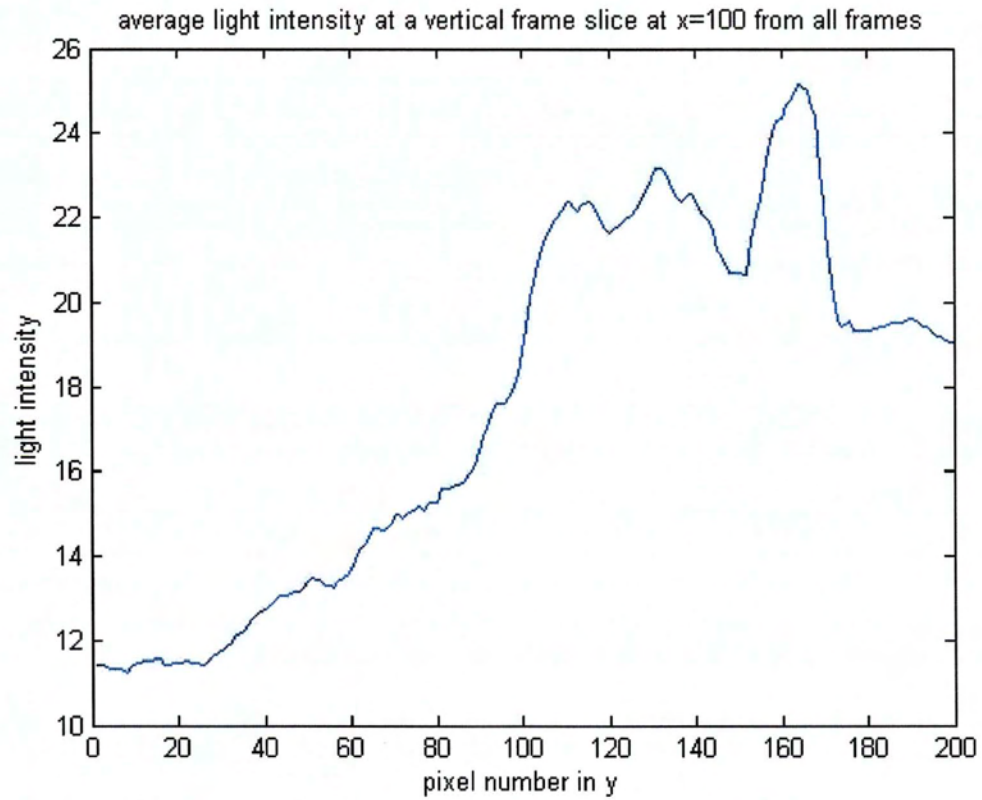
Γράφημα 117-40Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



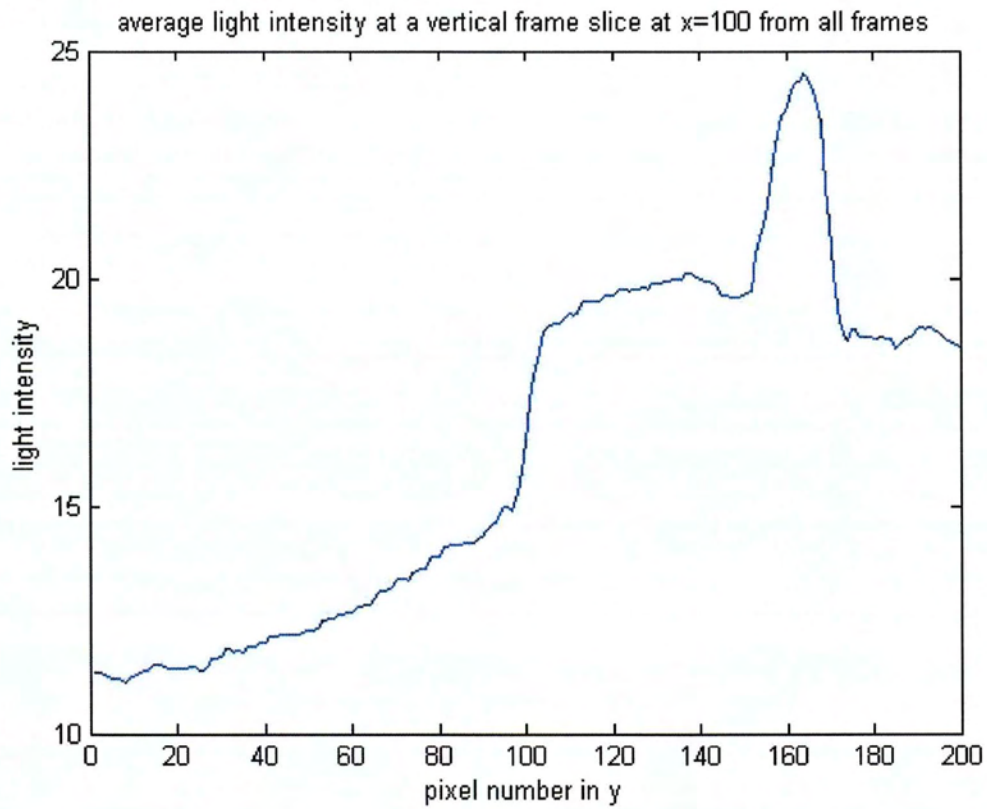
Γράφημα 118-50Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



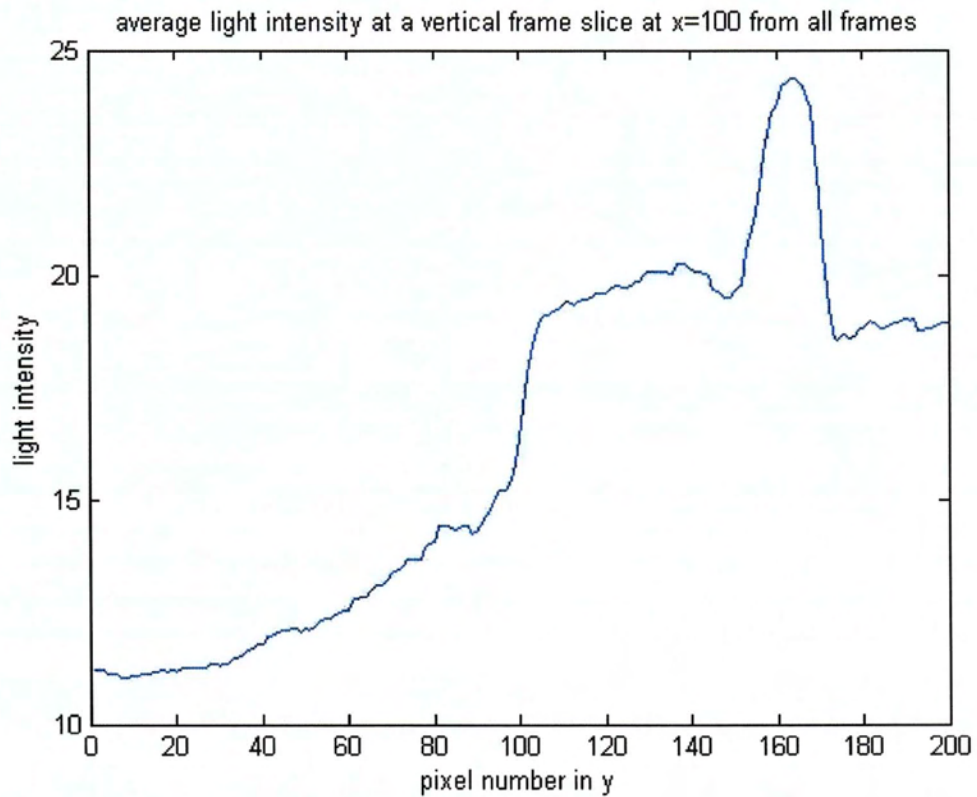
Γράφημα 119-60Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



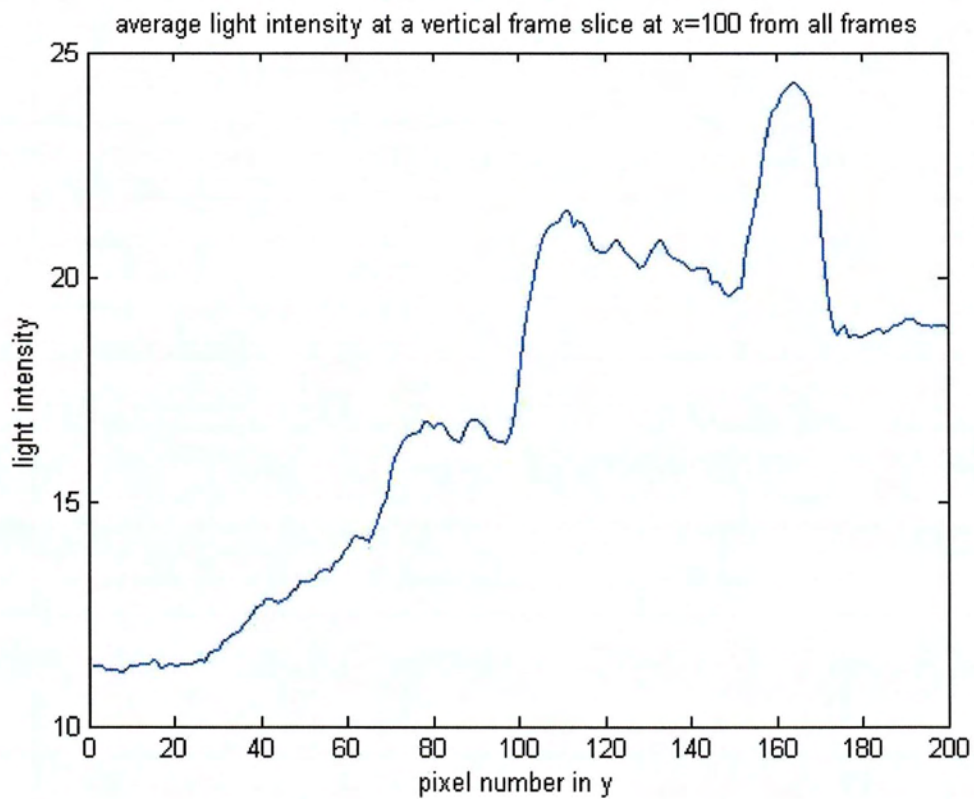
Γράφημα 120-70Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



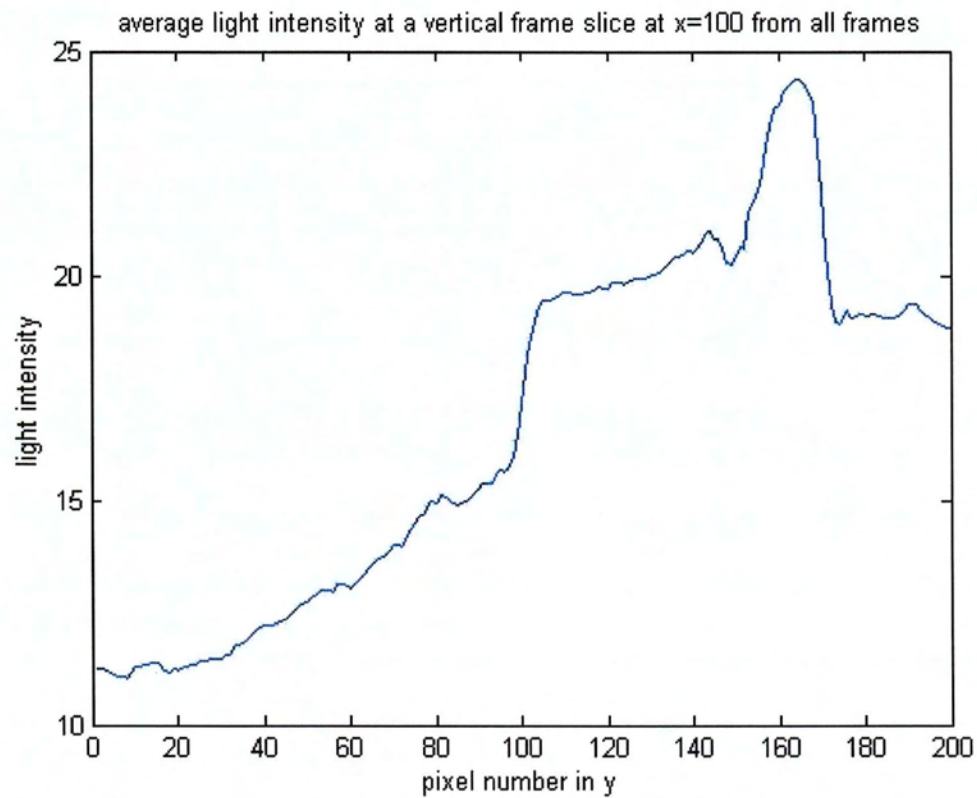
Γράφημα 121-73Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



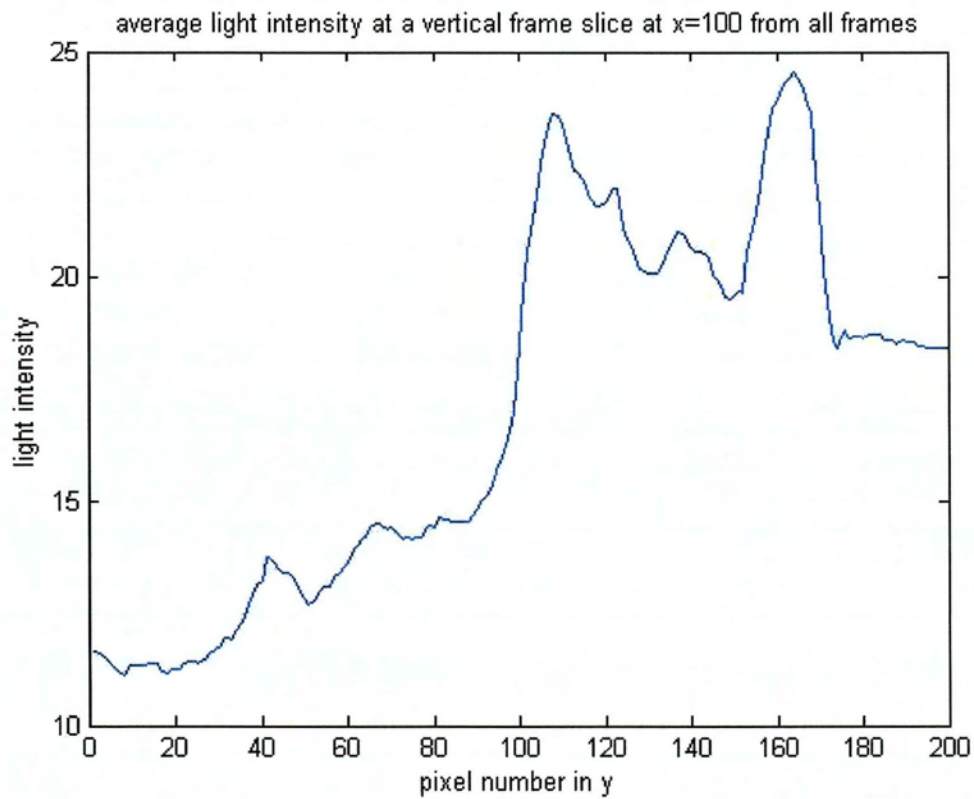
Γράφημα 122-75Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



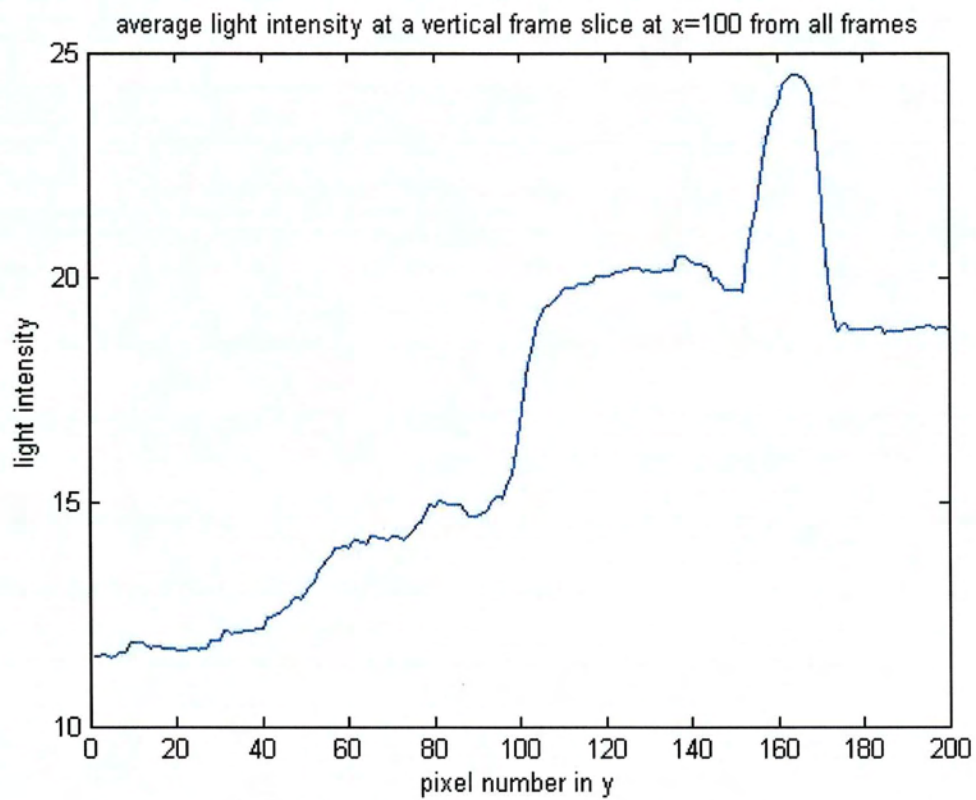
Γράφημα 123-80Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



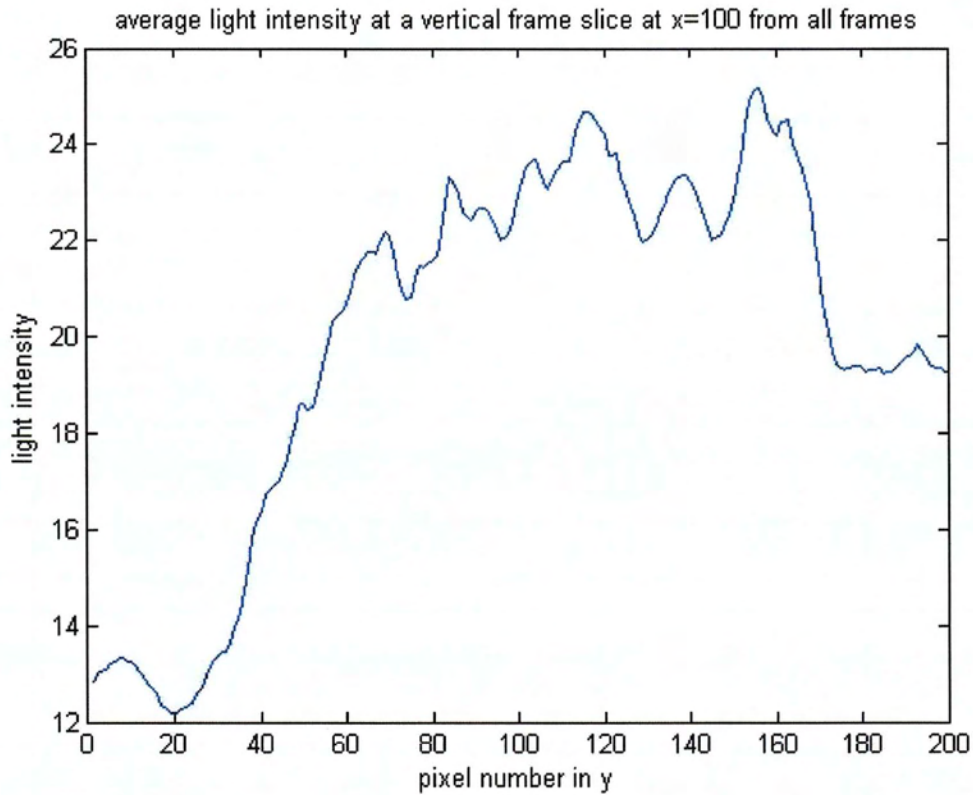
Γράφημα 124-90Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



Γράφημα 125-100Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$



Γράφημα 126-120Hz-Μέση ένταση φωτός για $x=100$

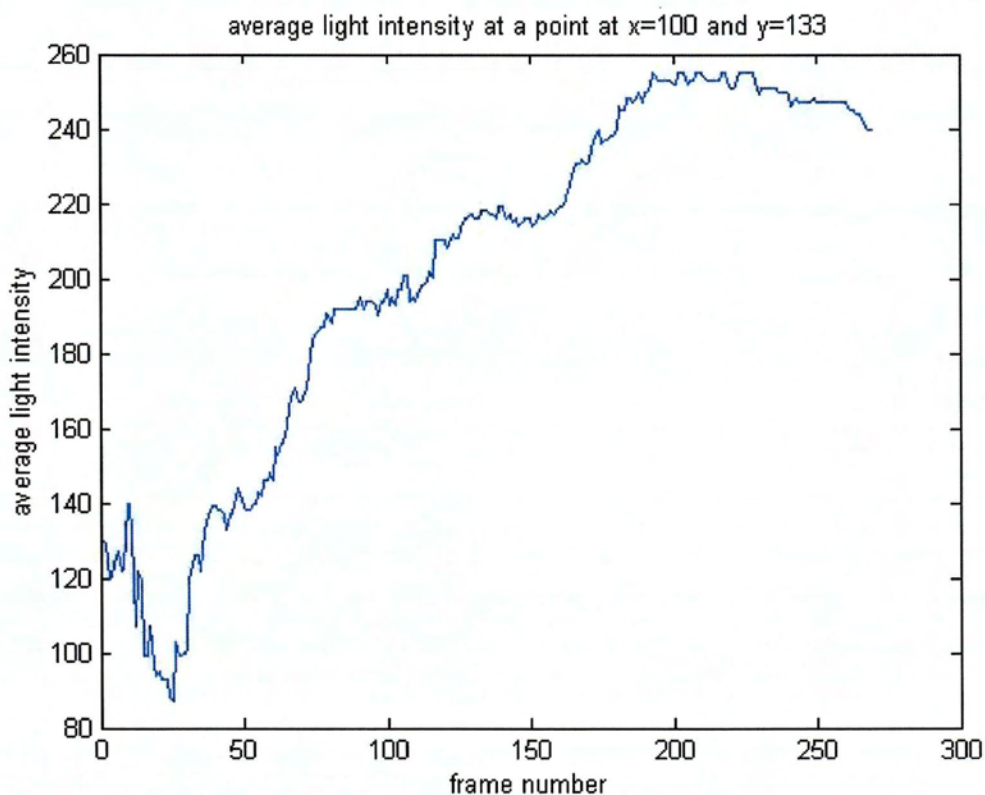


Γράφημα 127-140Hz-Μέση ένταση φωτός για x=100

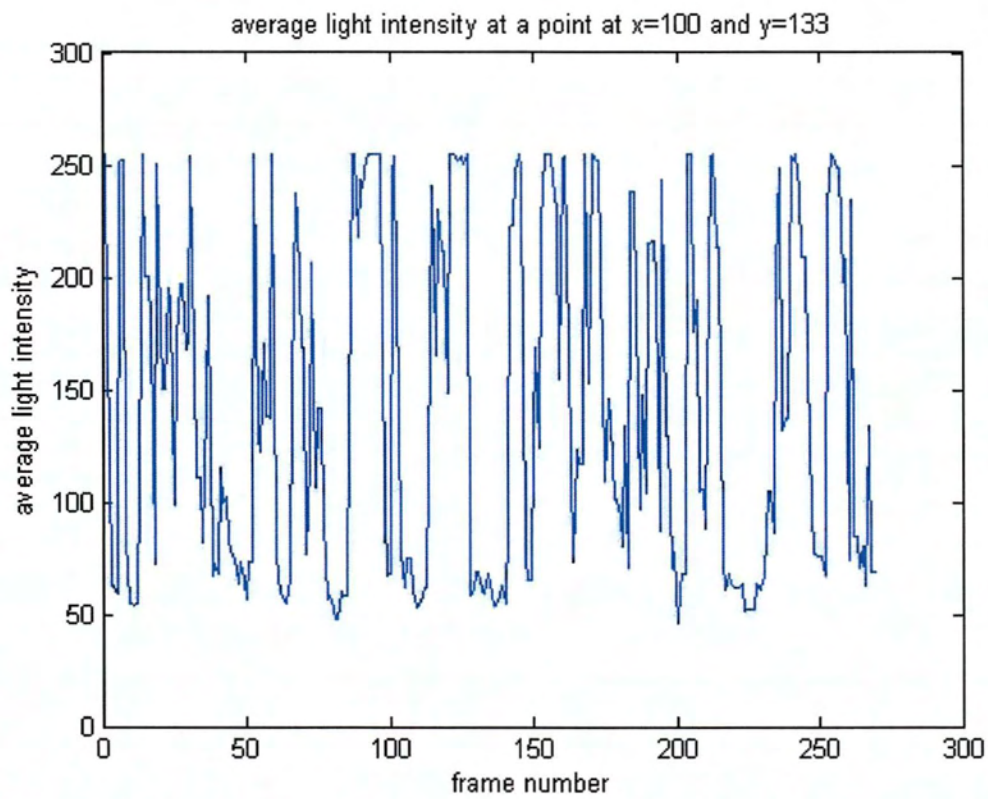
Από τα διαγράμματα των μέσων τιμών συμπεραίνουμε ότι η ένταση του φωτός κυμαίνεται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Προφανώς, όπως φάνηκε και από τα στιγμιαία διαγράμματα, η μικρή τροφοδοσία σωματιδίων, καθώς και η επίδραση της τύρβης στη διάσπαση της ροής επηρεάζουν την ένταση του φωτός για την κάθετη αυτή τομή στο $x=100$. Η μεγαλύτερη τιμή της εμφανίζεται στα 40Hz, ενώ στις υπόλοιπες συχνότητες η ένταση εξασθενεί για όλα τα pixel της τομής. Ασφαλή συμπεράσματα για το είδος και την ένταση της τύρβης δε μπορούν να δοθούν.

Ένταση φωτός για το γεωμετρικό κέντρο των καρτέ (Light intensity at frame center)

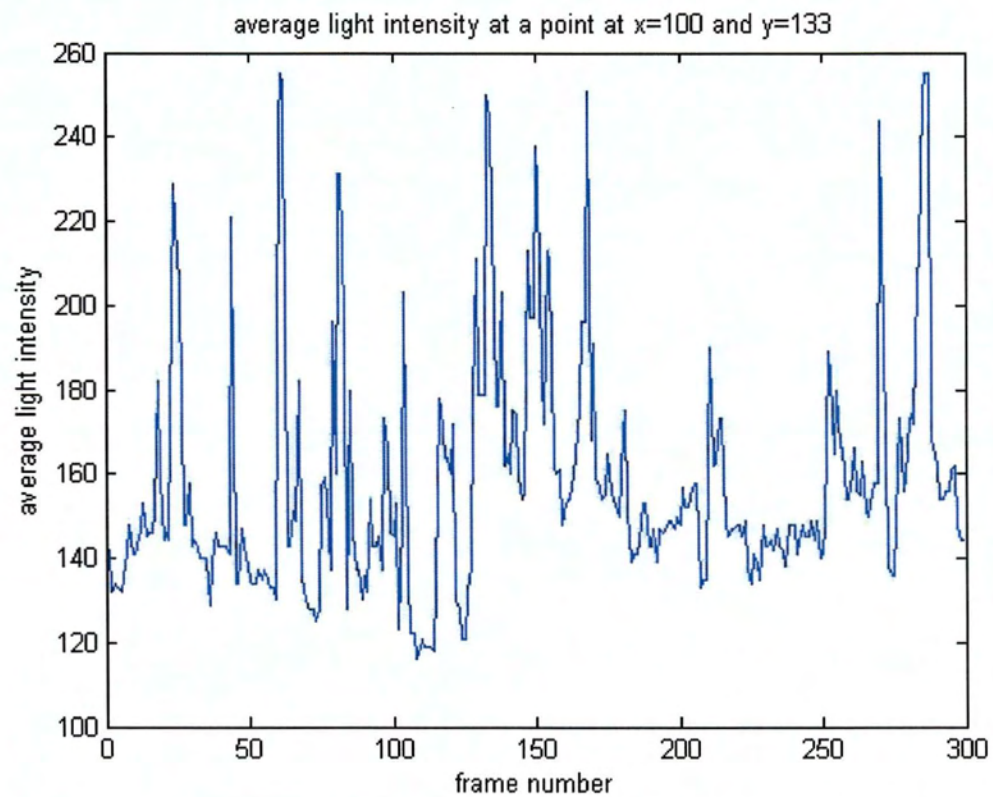
Στα συγκεκριμένα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τιμής της έντασης του φωτός σε ένα συγκεκριμένο σημείο ($x=100$, $y=133$) σε συνάρτηση με τον αριθμό των καρτέ. Το σημείο που επιλέξαμε είναι το γεωμετρικό κέντρο των καρτέ. Οι συχνότητες που χρησιμοποιήσαμε είναι ίδιες με τις προηγούμενες περιπτώσεις.



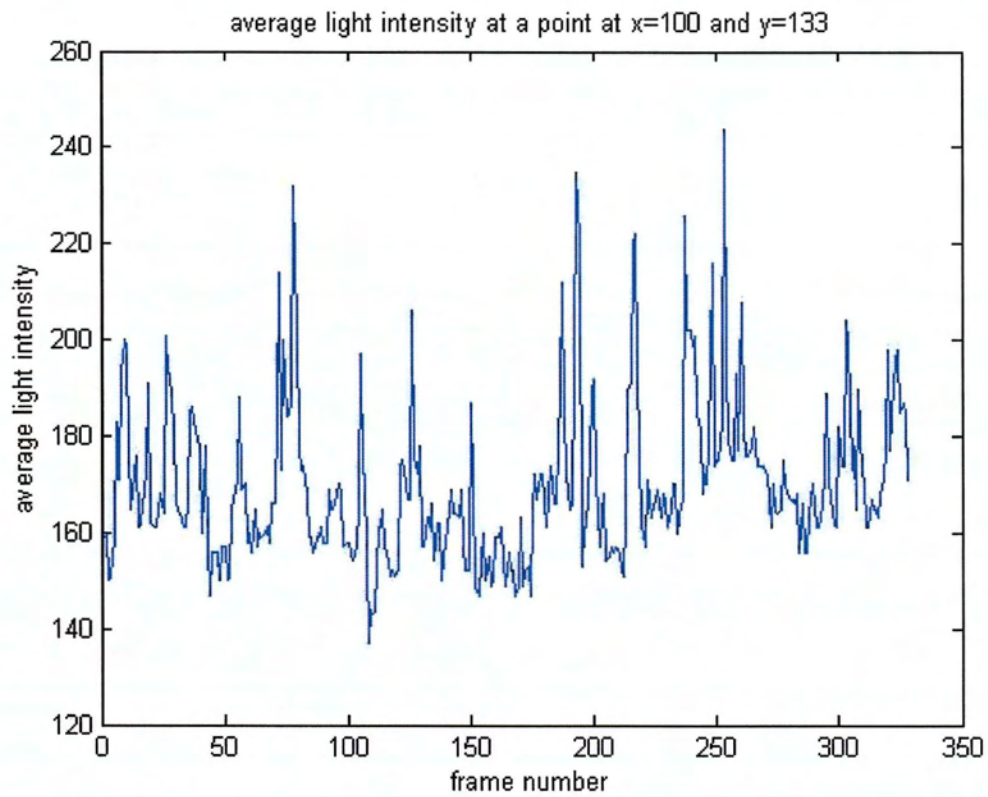
Γράφημα 128-no_power- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150$, $y=135$) συναρτήσει των frames



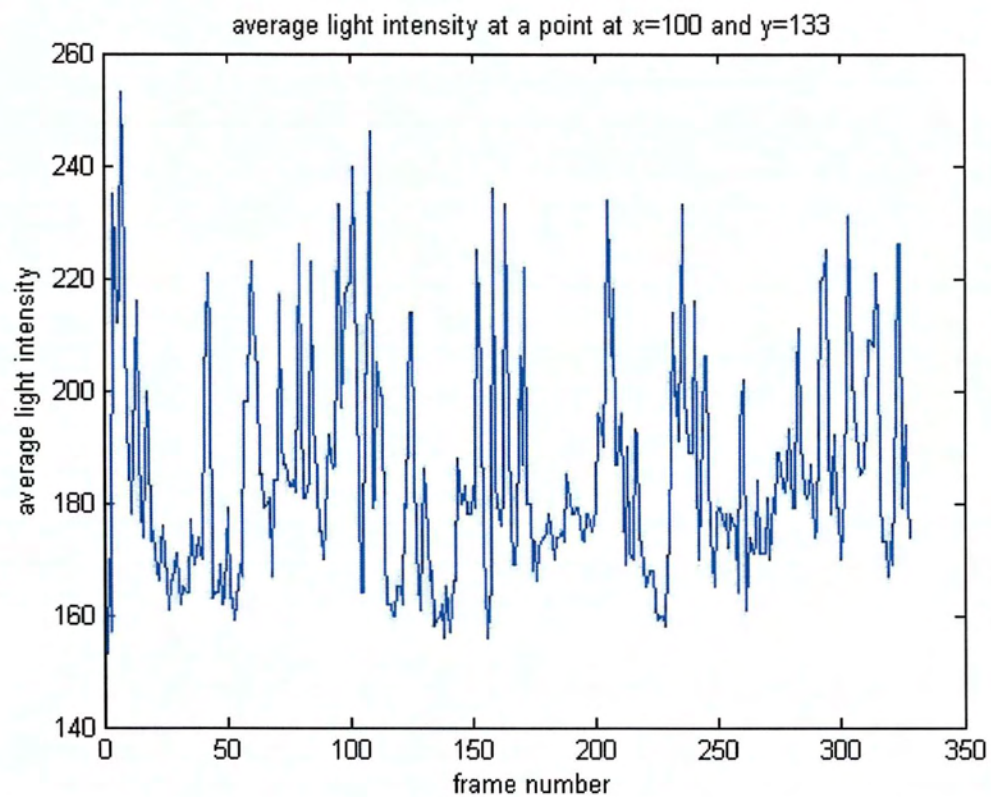
Γράφημα 129-40Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



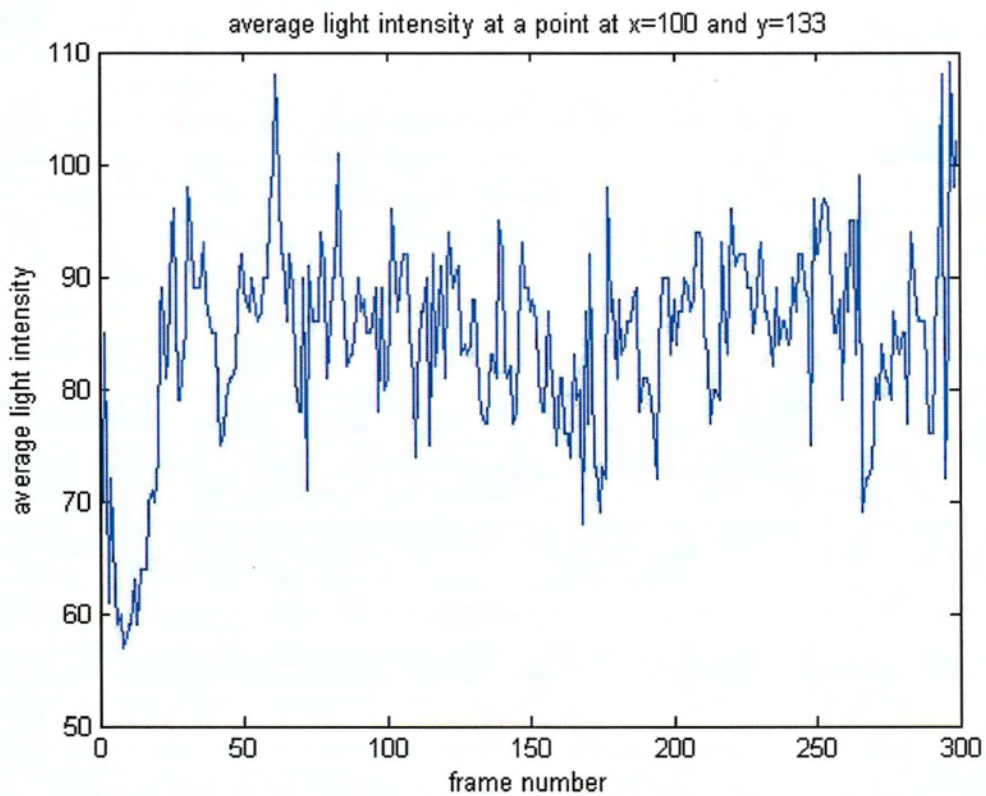
Γράφημα 130-50Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



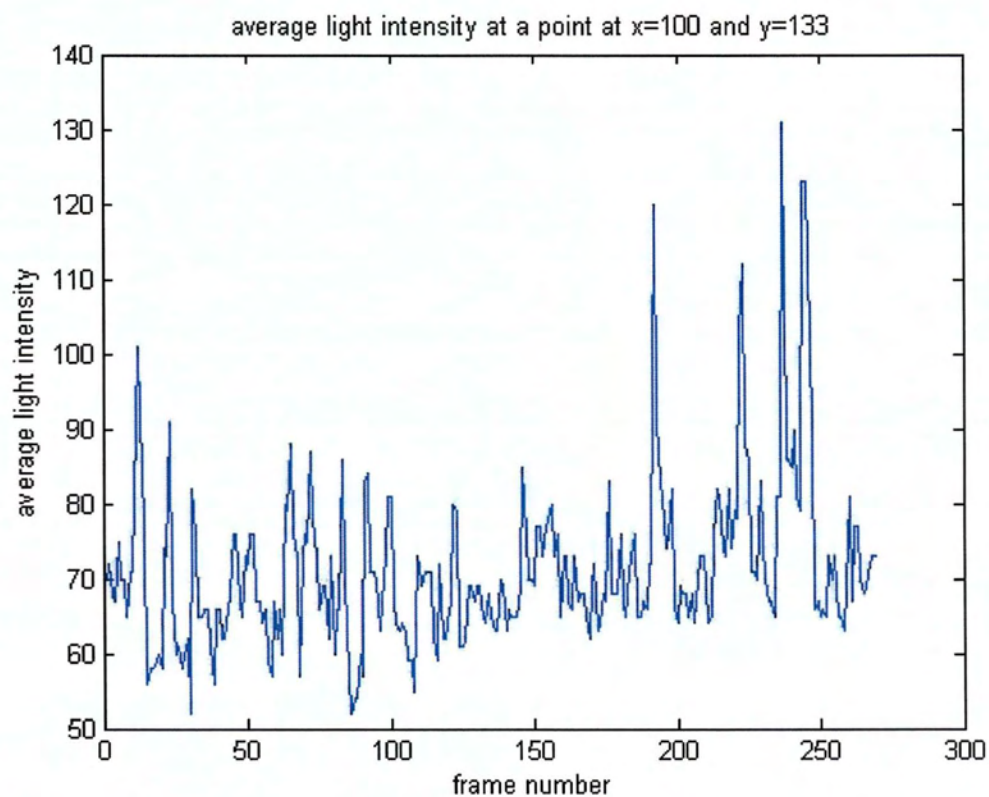
Γράφημα 131-60Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



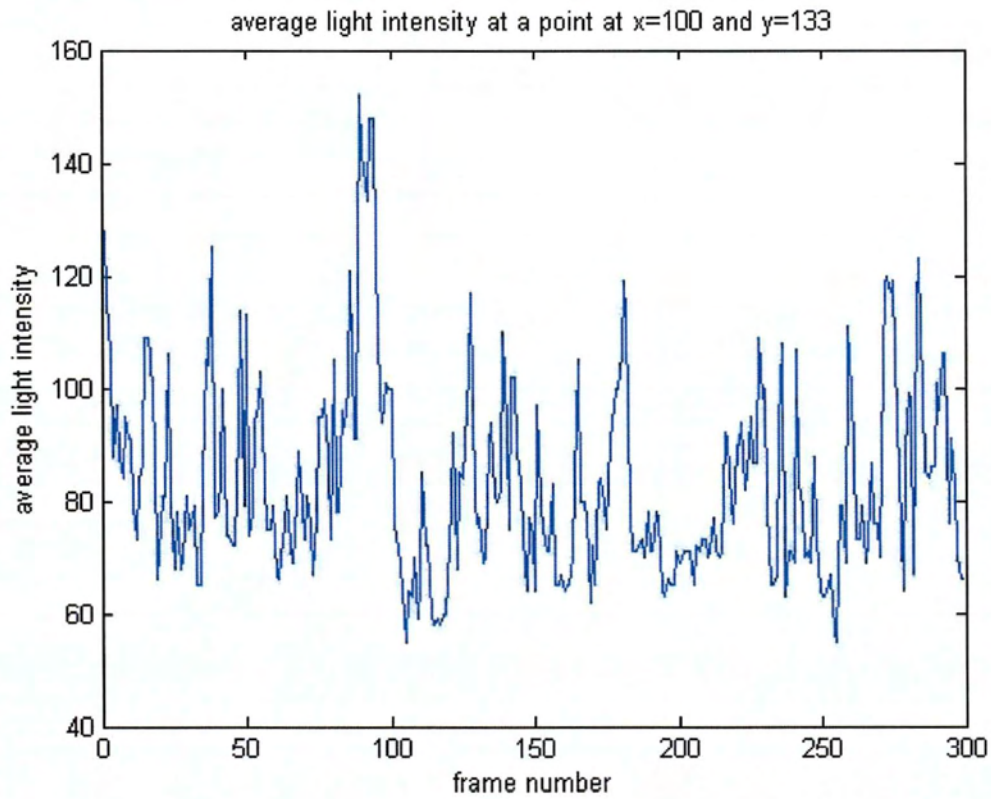
Γράφημα 132-70Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



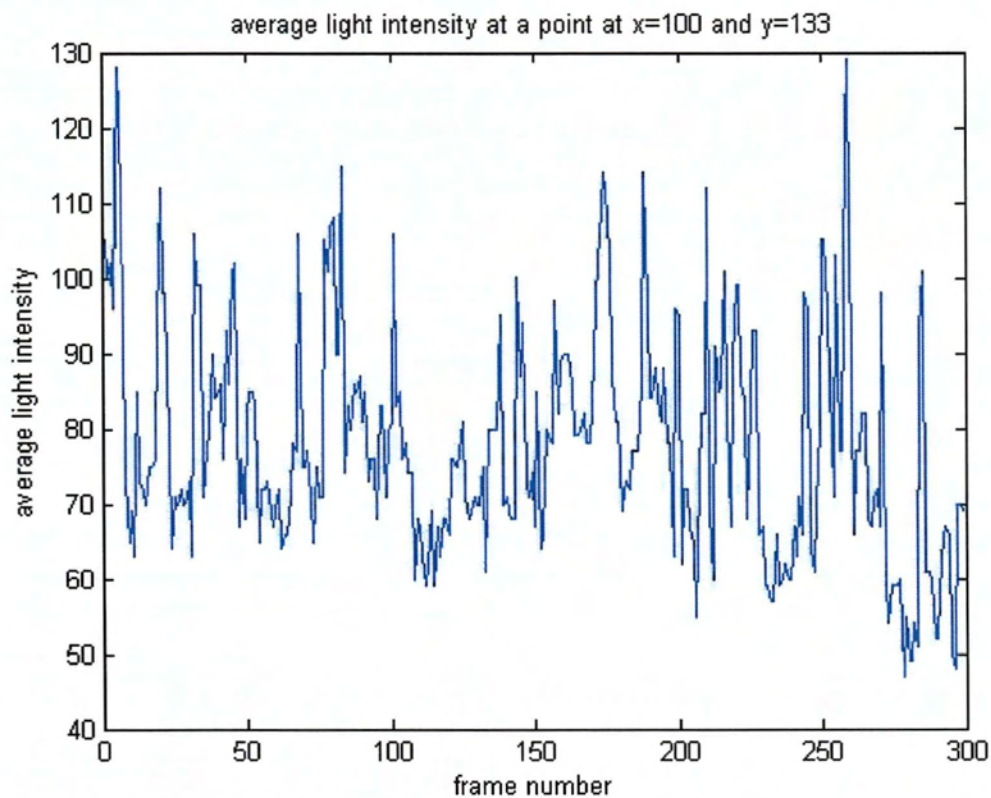
Γράφημα 133-73Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



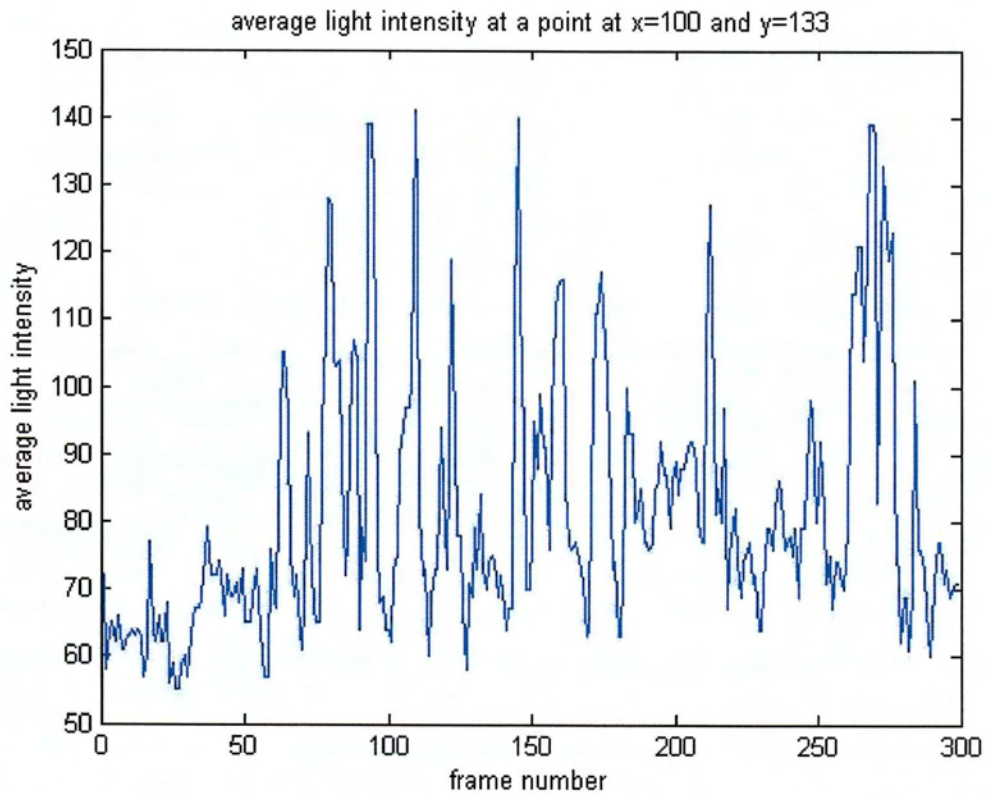
Γράφημα 134-75Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



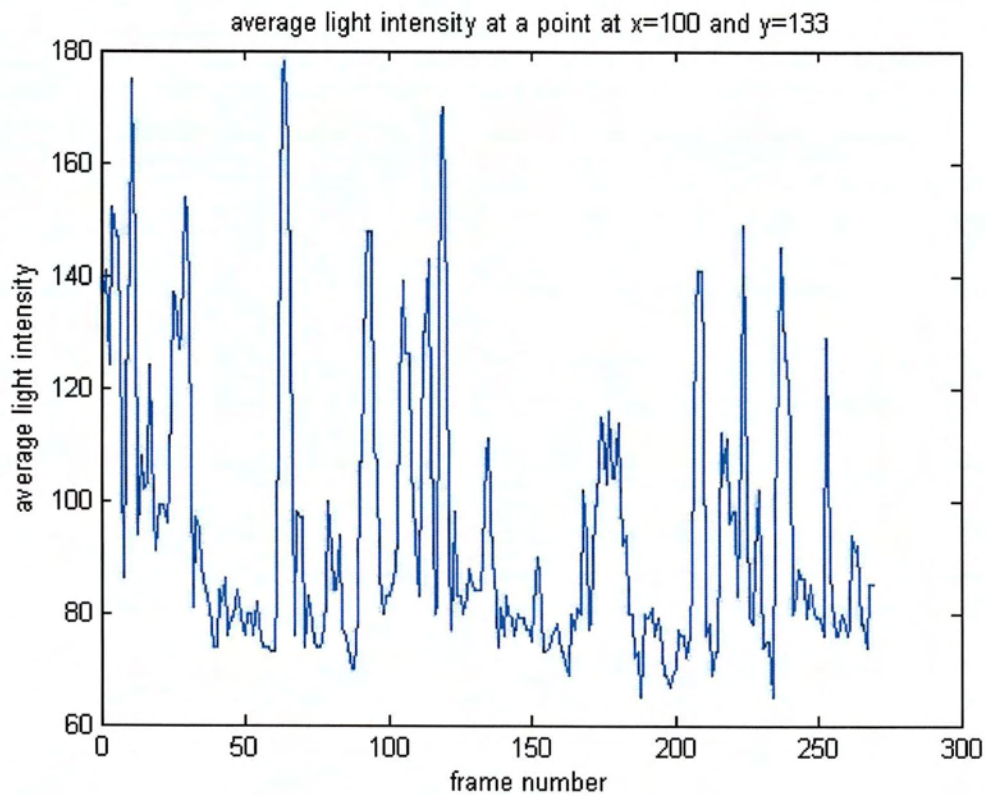
Γράφημα 135-80Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



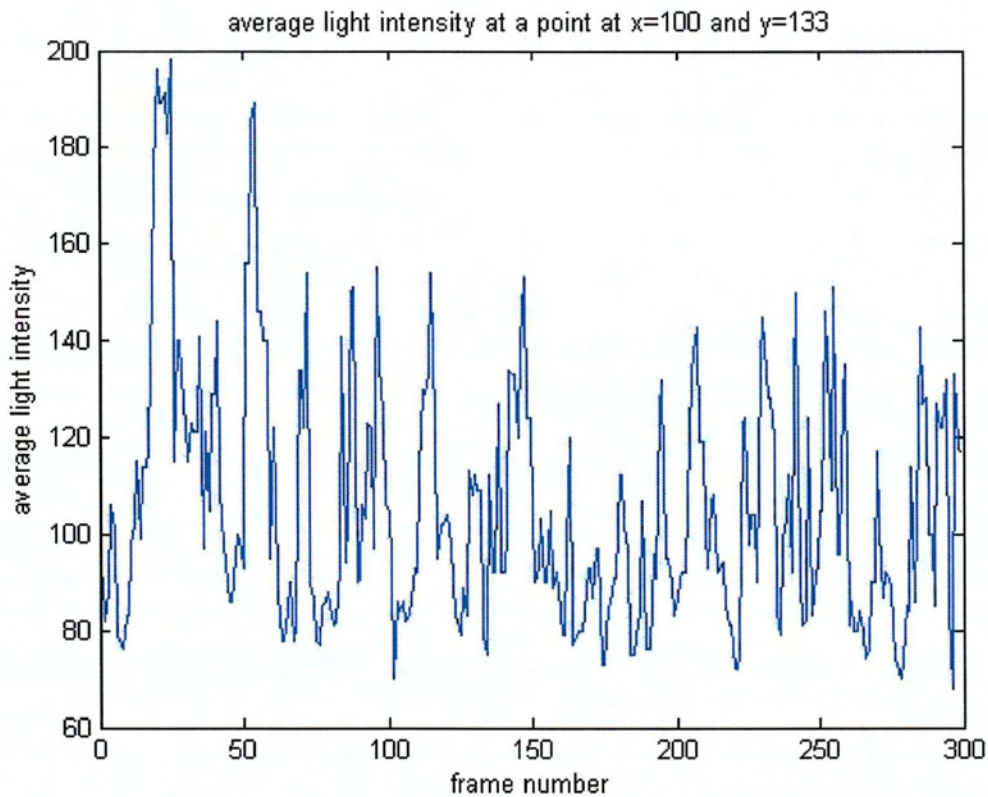
Γράφημα 136-90Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



Γράφημα 137-100Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames



Γράφημα 138-120Hz- Γράφημα έντασης φωτός στο ($x=150, y=135$) συναρτήσει των frames

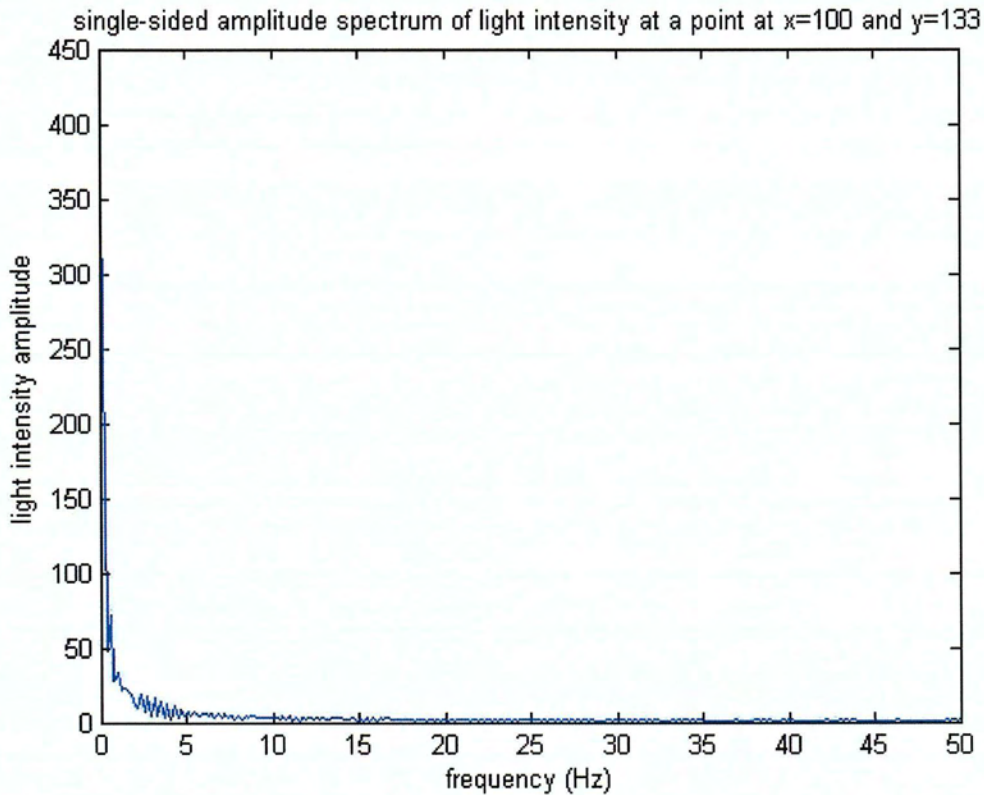


Γράφημα 139-140- Γράφημα έντασης φωτός στο $(x=150, y=135)$ συναρτήσει των frames

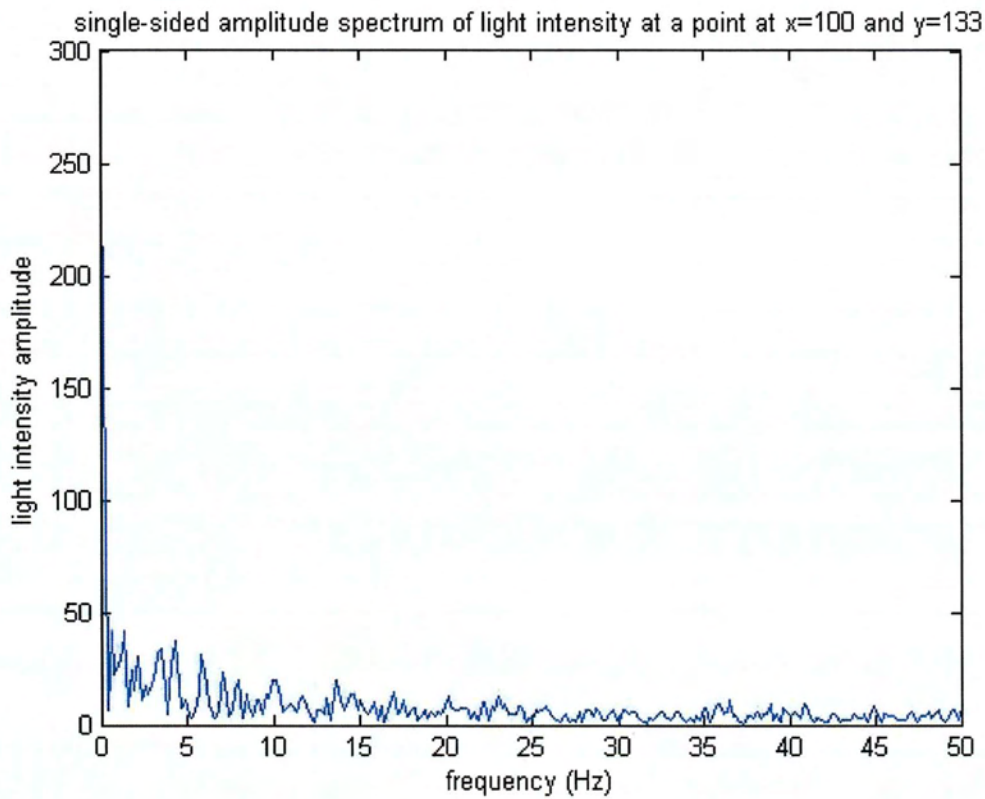
Η ένταση του φωτός κυμαίνεται σε σχετικά υψηλά επίπεδα, κάτι που σημαίνει ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων στη συγκεκριμένη περιοχή είναι υψηλή. Ξεκινώντας από τη συχνότητα των 40Hz, οι διακυμάνσεις της έντασης του φωτός στο γεωμετρικό κέντρο των καρτέ είναι έντονες, ενώ και το εύρος τιμών είναι μεγάλο (50-250), κάτι που καθιστά έντονη την επίδραση της τύρβης. Οι διακυμάνσεις συνεχίζονται στα 50,60 και 70Hz με το εύρος των τιμών να έχει μειωθεί. Οι τιμές της έντασης παραμένουν σε υψηλά επίπεδα, με την τροφοδοσία του πλουμίου να μην έχει εξασθενήσει. Στα 73Hz παρατηρείται ένα περιοδικό φαινόμενο διακύμανσης, με την ένταση, όμως, να μην κινείται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα, κάτι που συνεχίζεται και στις υπόλοιπες συχνότητες μέχρι τα 90 Hz. Το πλούμιο σε αυτές τις συχνότητες διαχέεται γρηγορά. Στα 100, 120 και 140Hz η τύρβη είναι ξανά έντονη, με τις διακυμάνσεις της έντασης να επιστρέφουν σε υψηλά επίπεδα του φαινομένου. Τέλος, σε όλες τις συχνότητες παρουσιάζεται μια περιοδικότητα στη διακύμανση των εντάσεων, φαινόμενο που δείχνει την ισοτροπία της τύρβης.

Διαγράμματα FFT

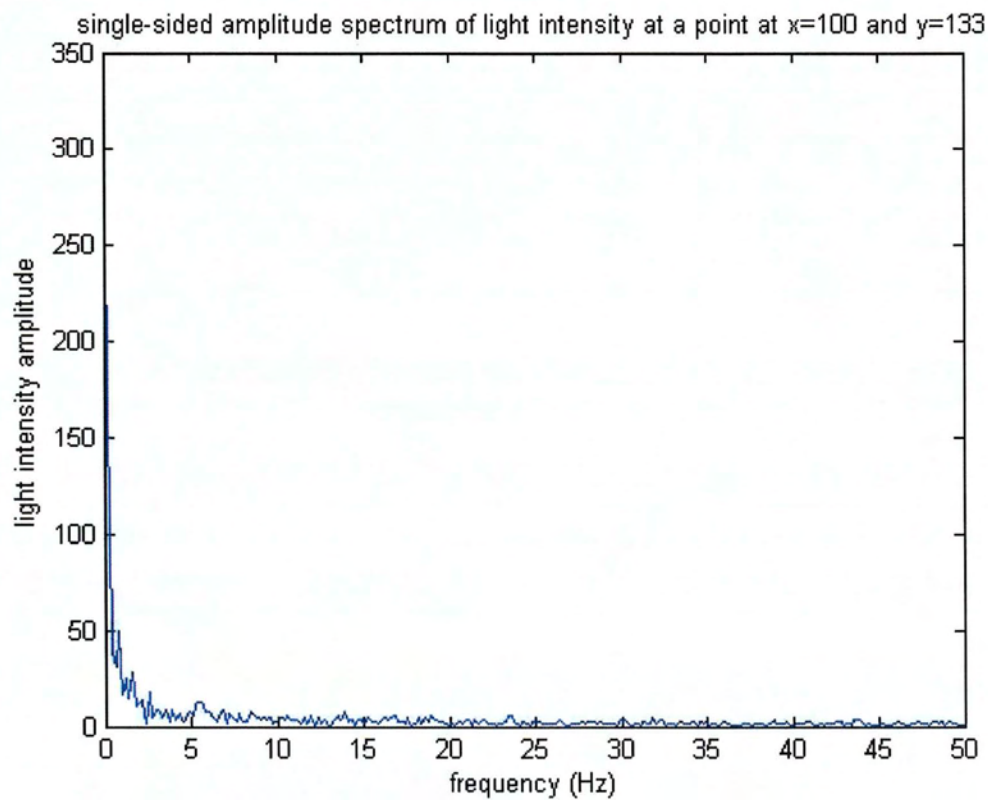
Τα διαγράμματα FFT του πλάτους της έντασης του φωτός, στο φάσμα των συχνοτήτων παρουσιάζονται παρακάτω. Κάθε ένα από αυτά παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα, ώστε να βρεθεί η κλίση του διαγράμματος **slope=5/3** σε κάποια υποπεριοχή του φάσματος συχνοτήτων (**inertial subrange slope**), με σκοπό το χαρακτηρισμό της έντασης της τύρβης.



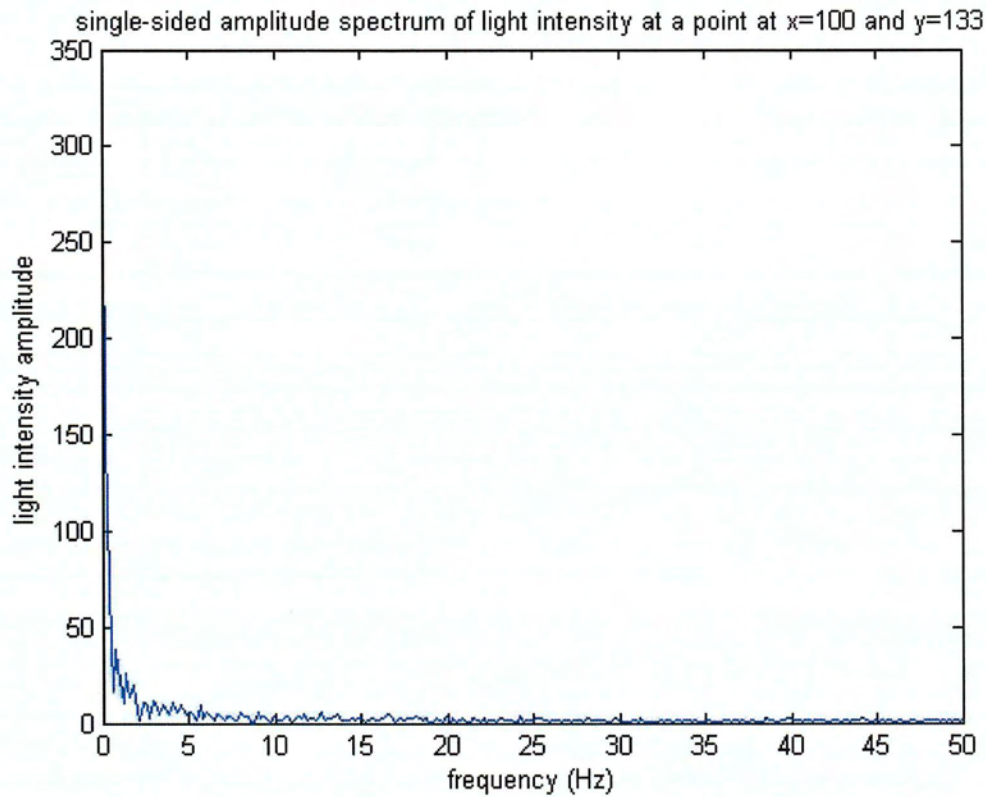
Γράφημα 140-no_power- Διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



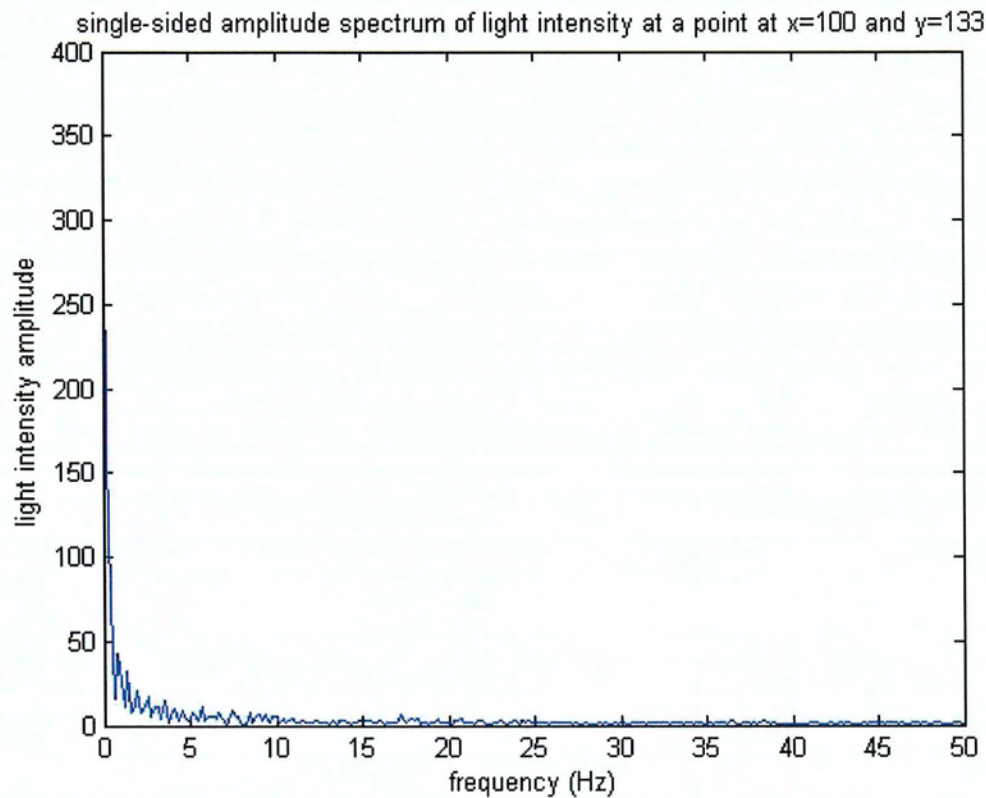
Γράφημα 14140Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



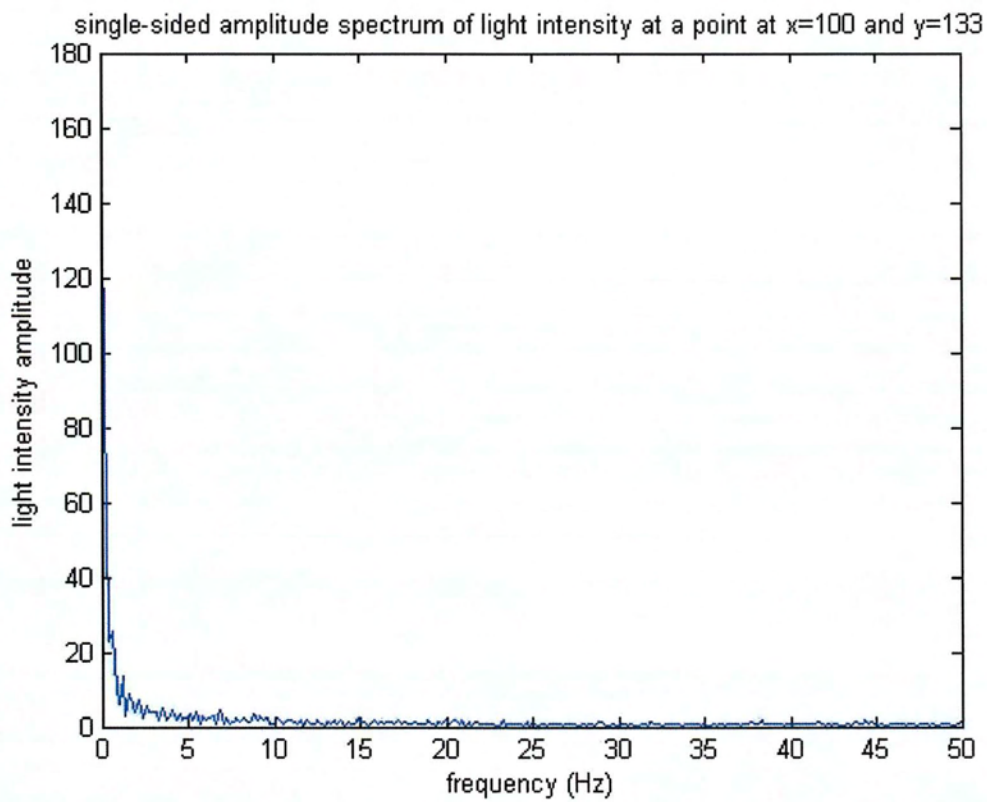
Γράφημα 142-50Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



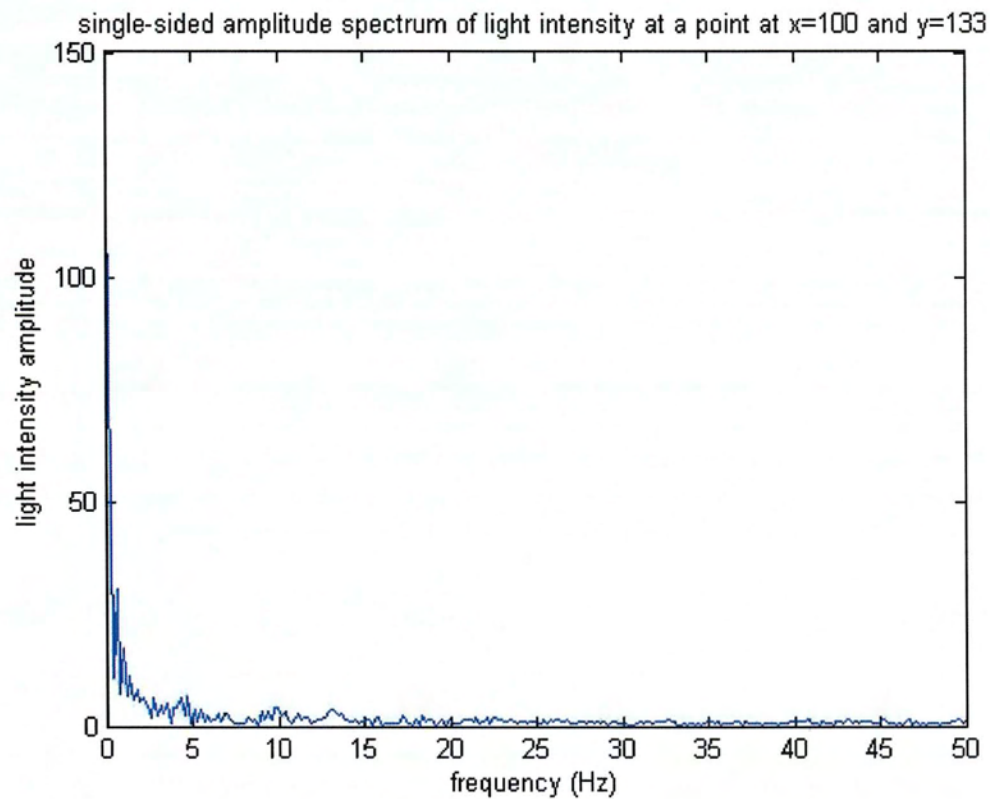
Γράφημα 143-60Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



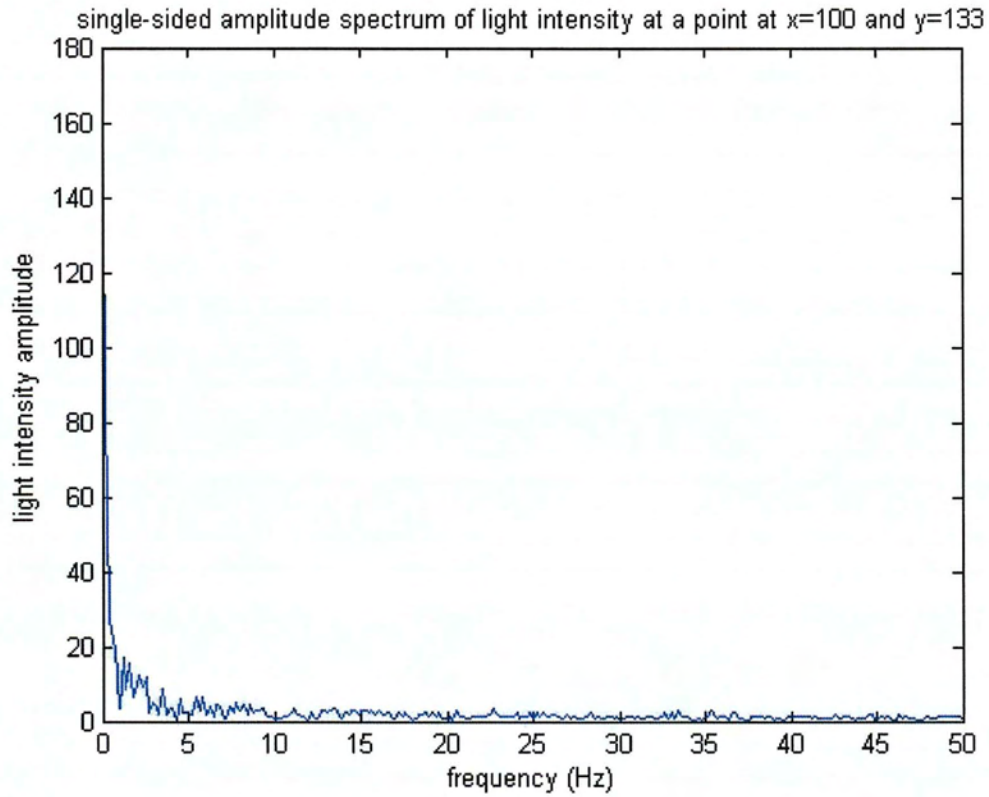
Γράφημα 144-70Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



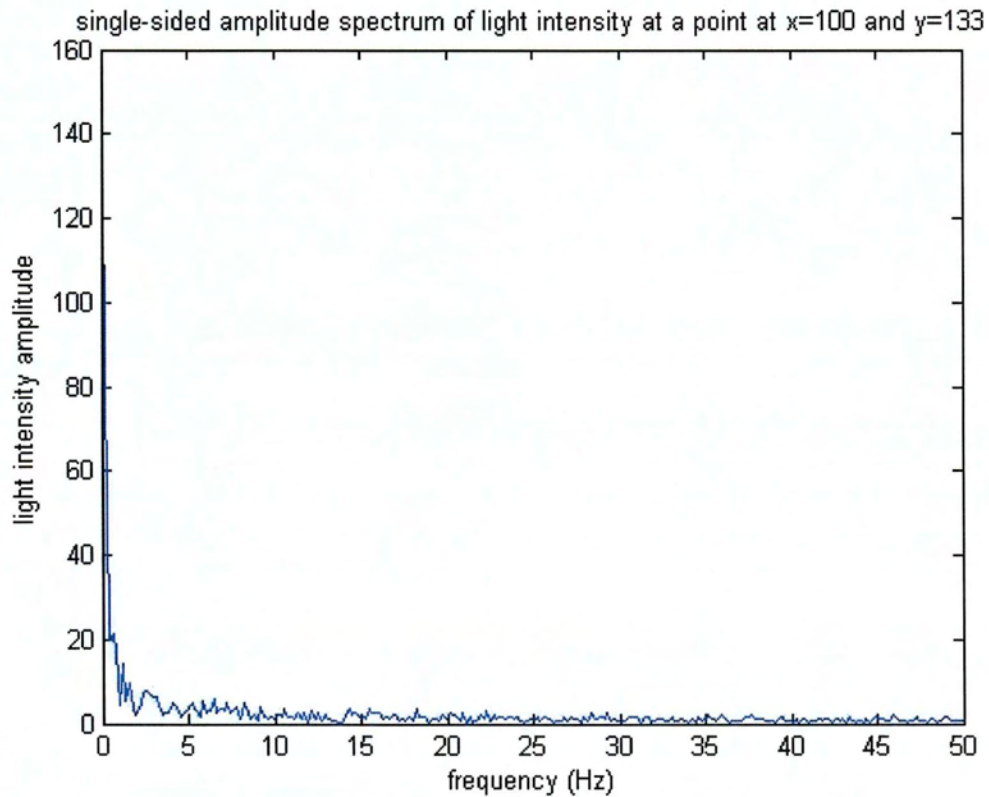
Γράφημα 145-73Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



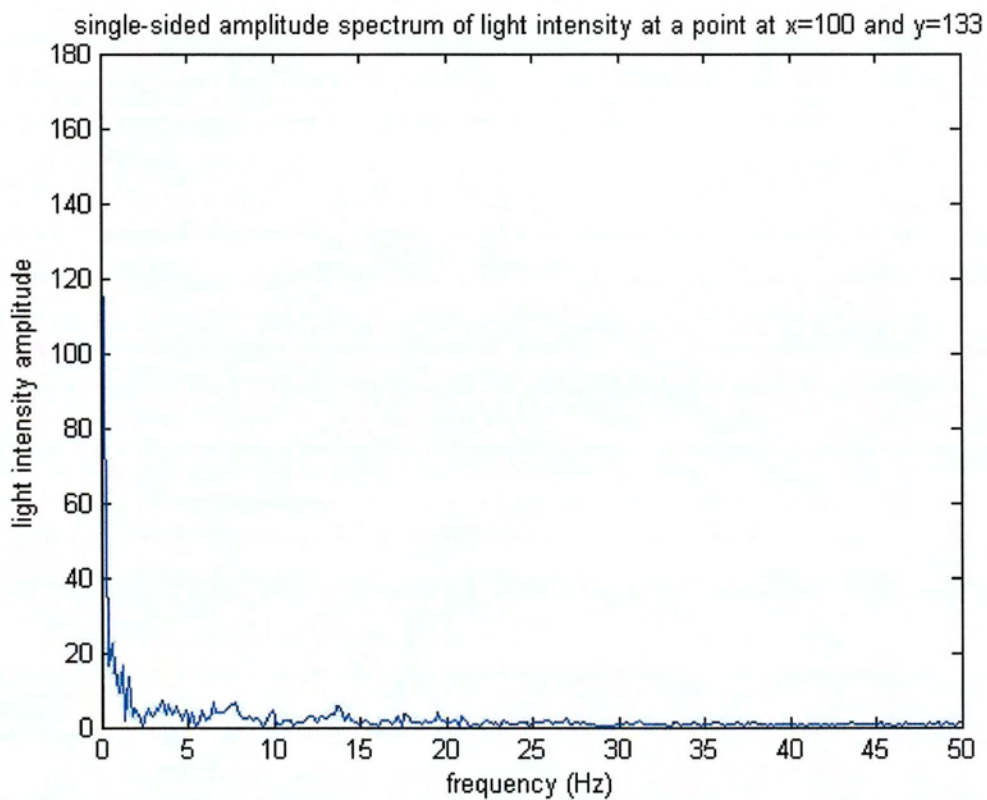
Γράφημα 146-75Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



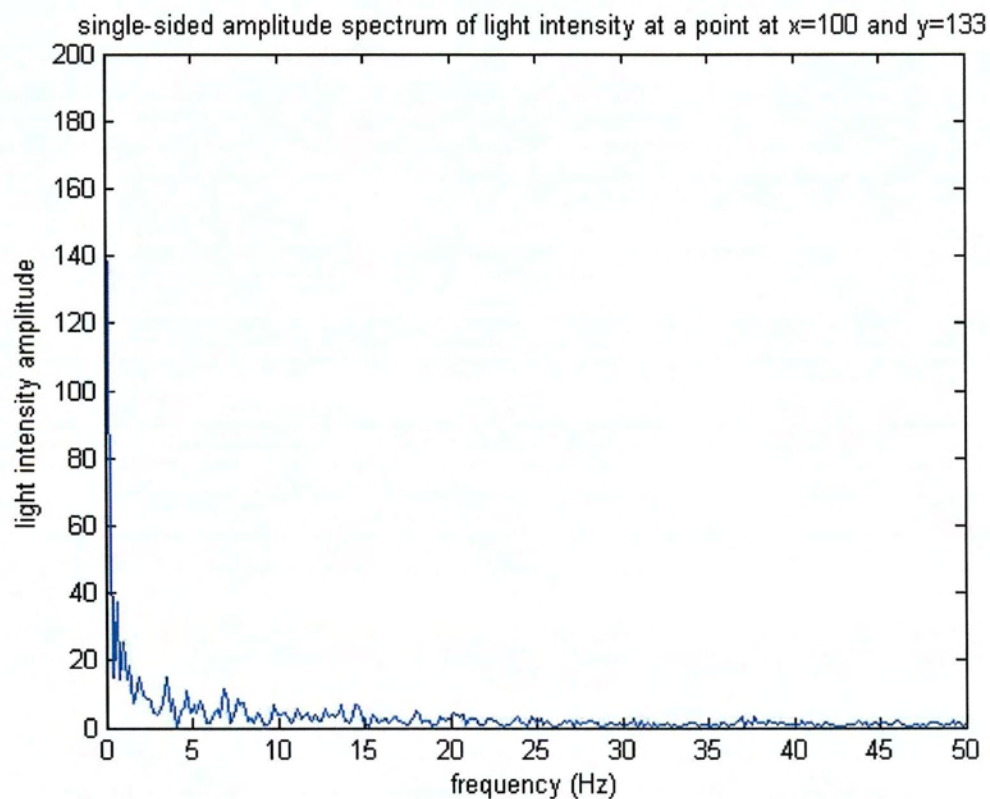
Γράφημα 147-80Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



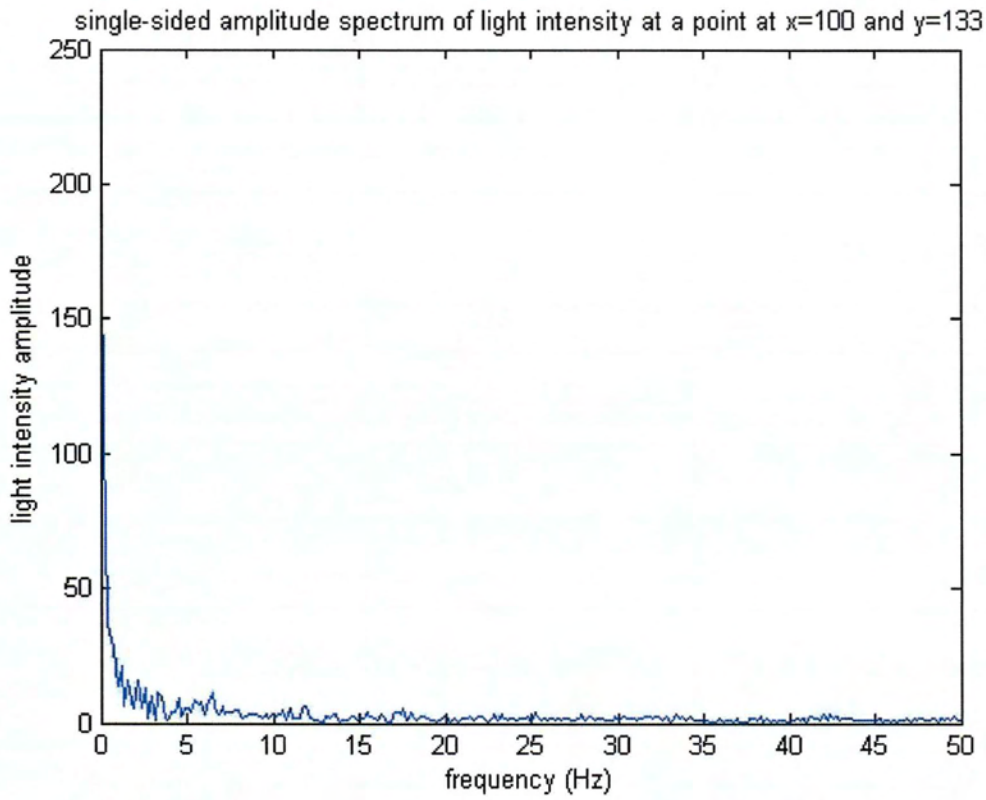
Γράφημα 148-90Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



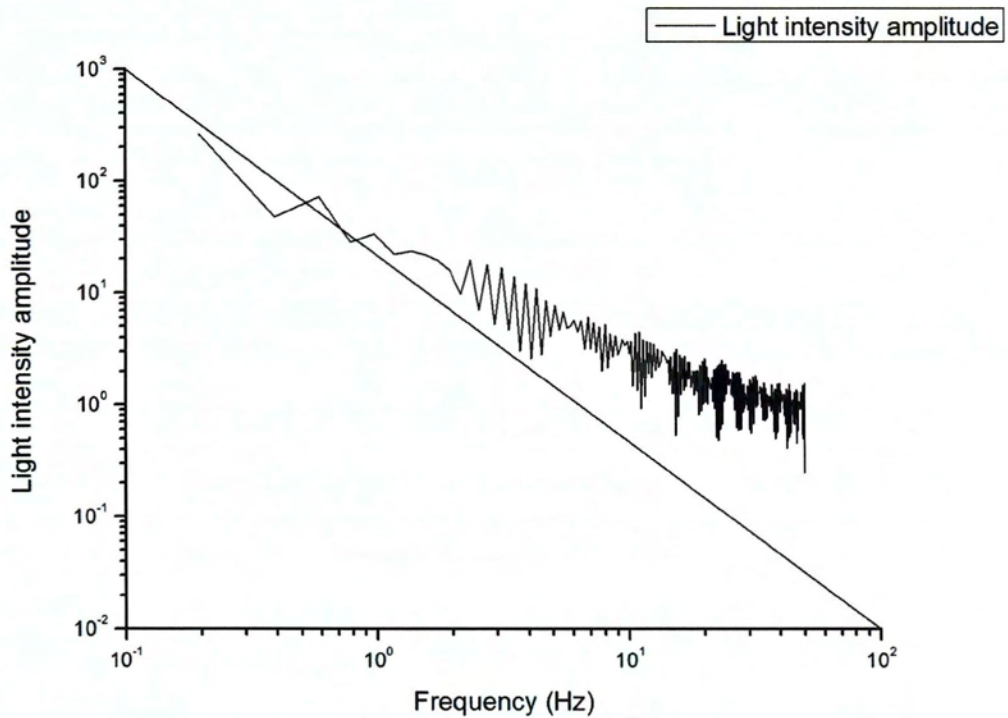
Γράφημα 149-100Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



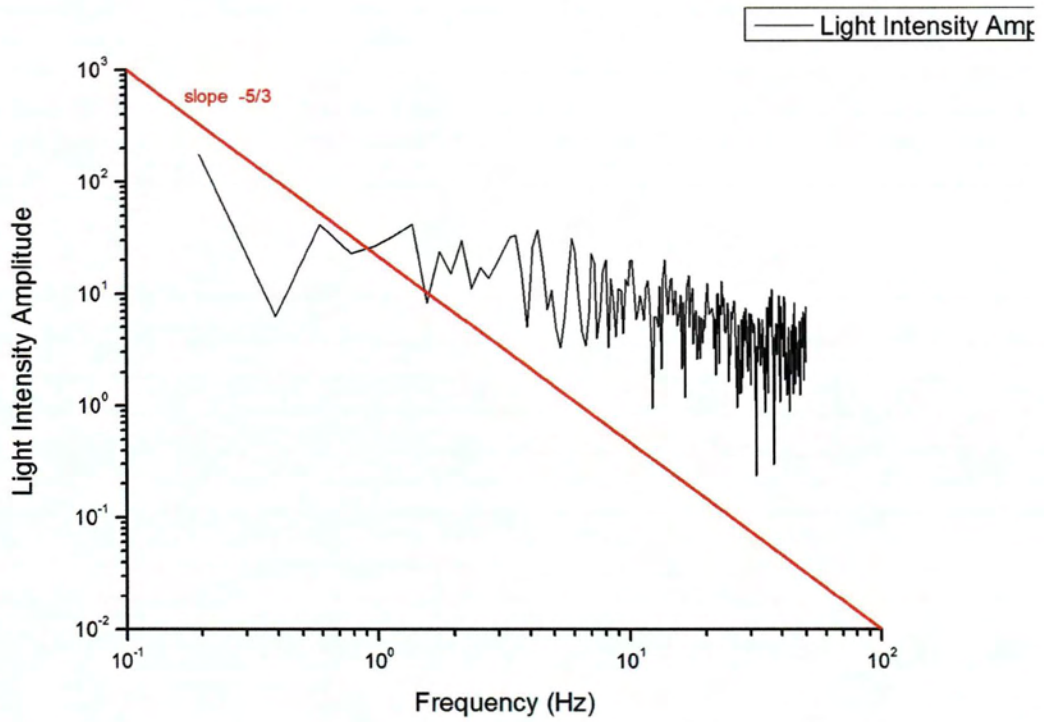
Γράφημα 150-120Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



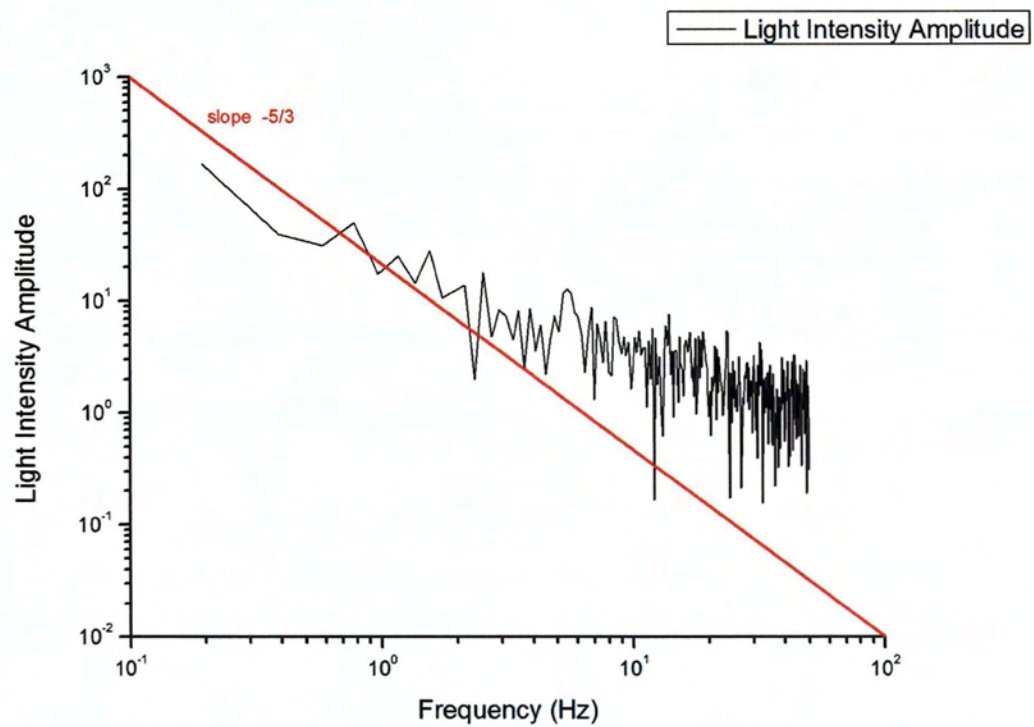
Γράφημα 151-140Hz- Διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



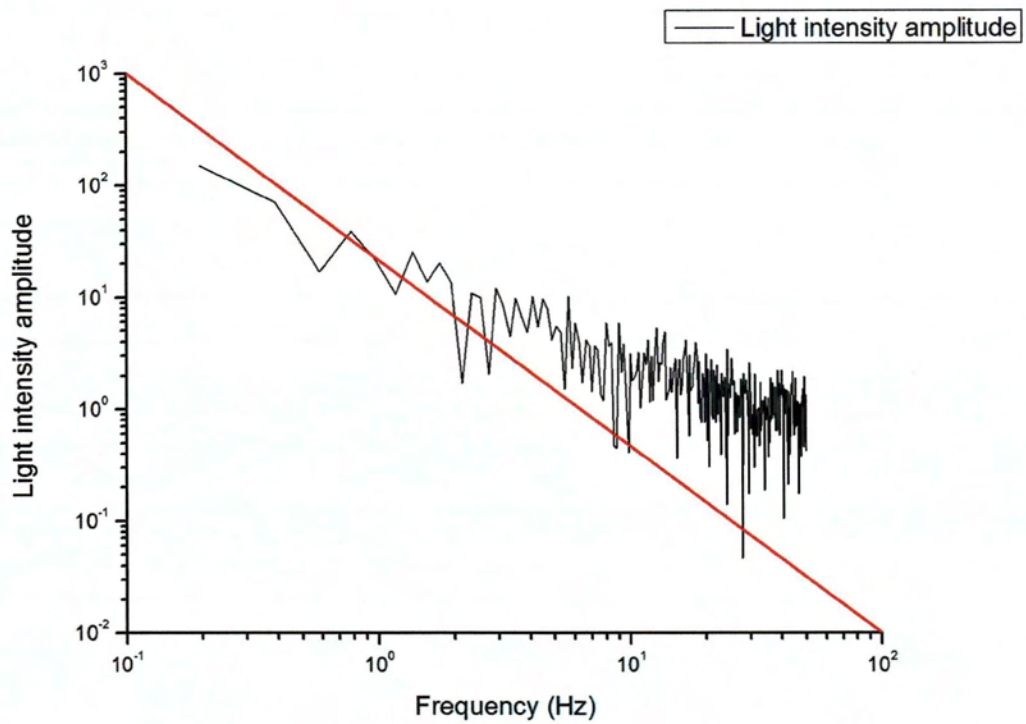
Γράφημα 152-no_power- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο ($x=150, y=135$)



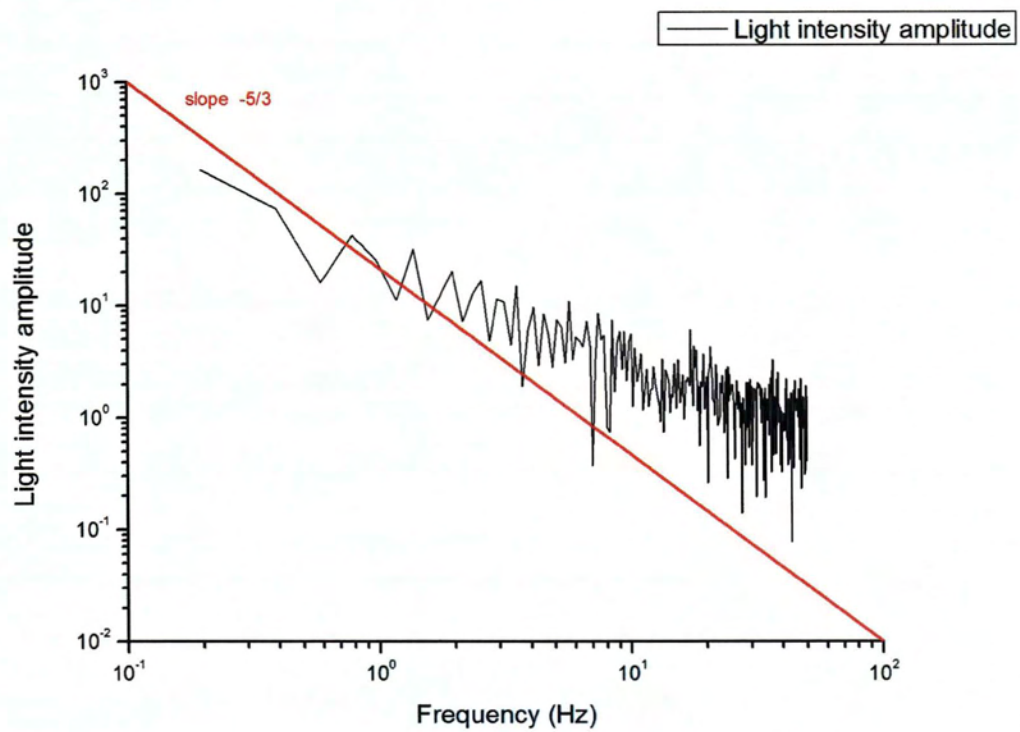
Γράφημα 153-40Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



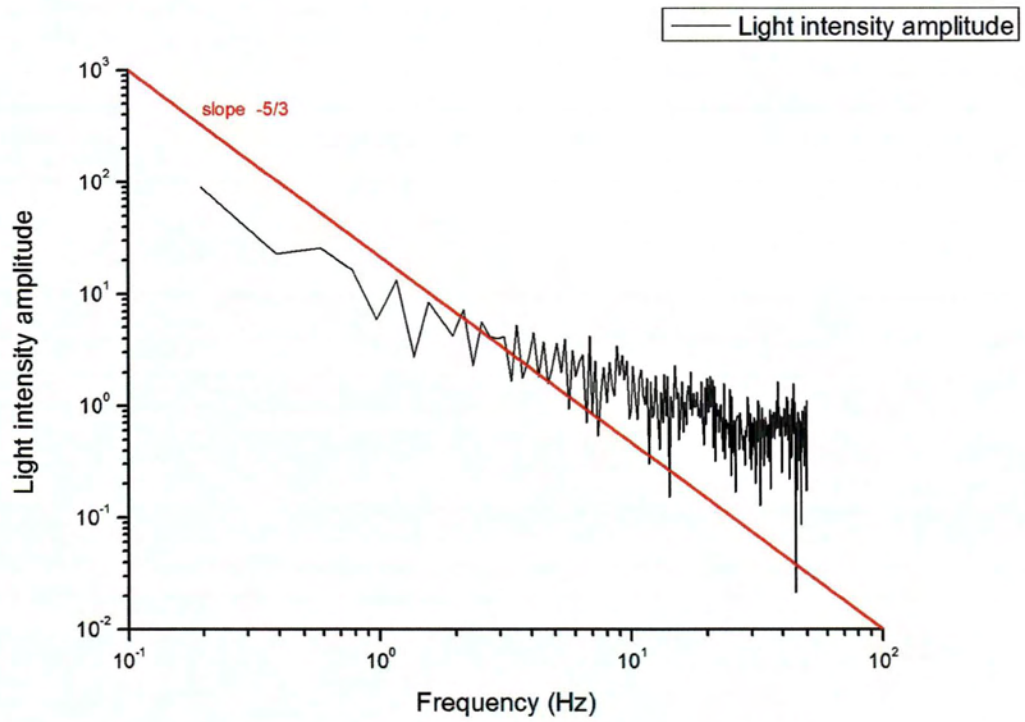
Γράφημα 154-50Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



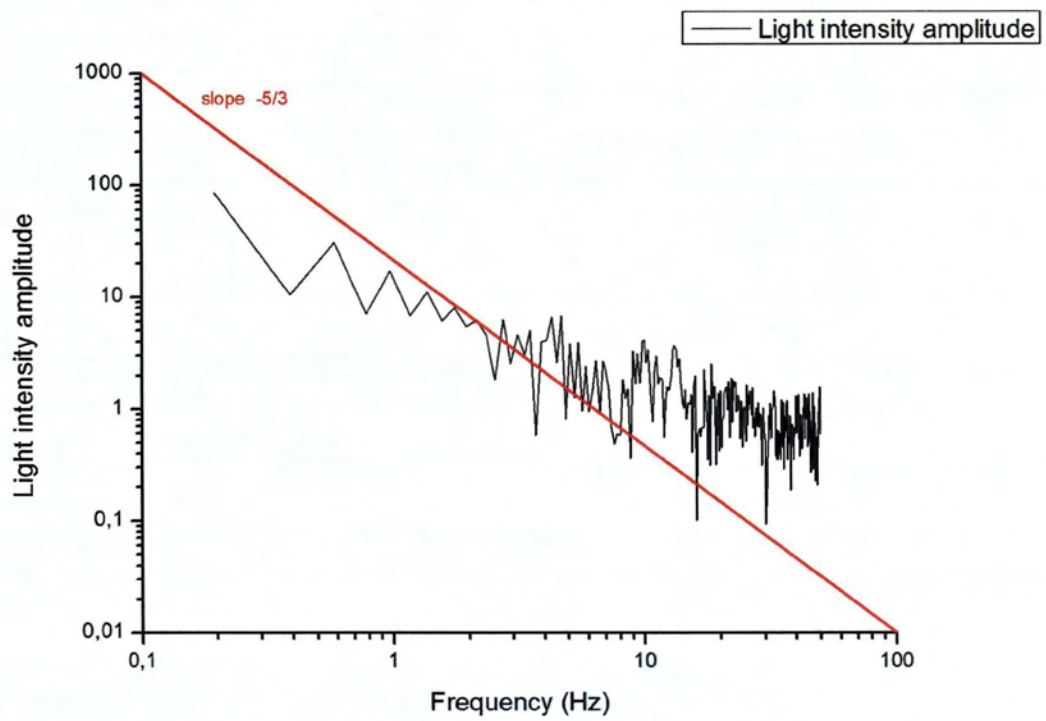
Γράφημα 155-60Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



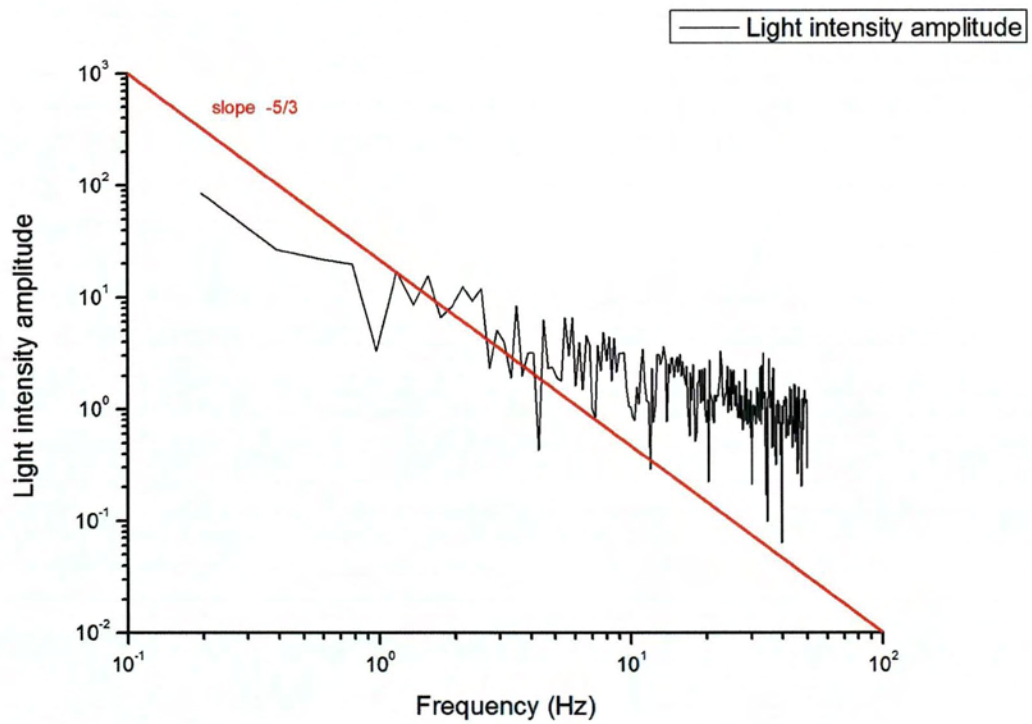
Γράφημα 156-70Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



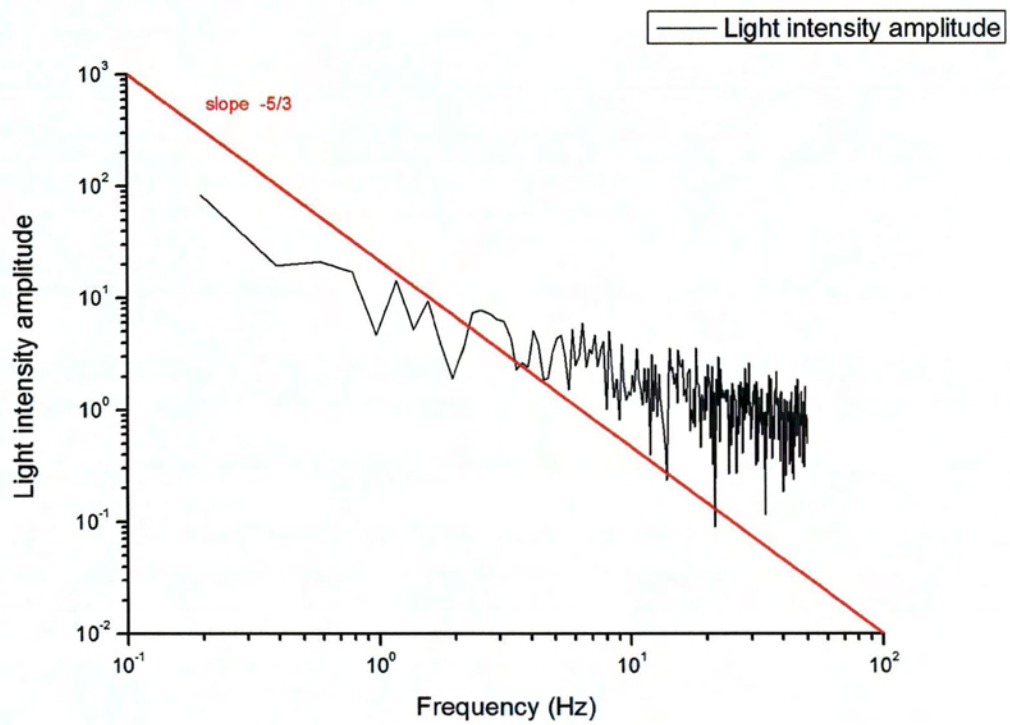
Γράφημα 157-73Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



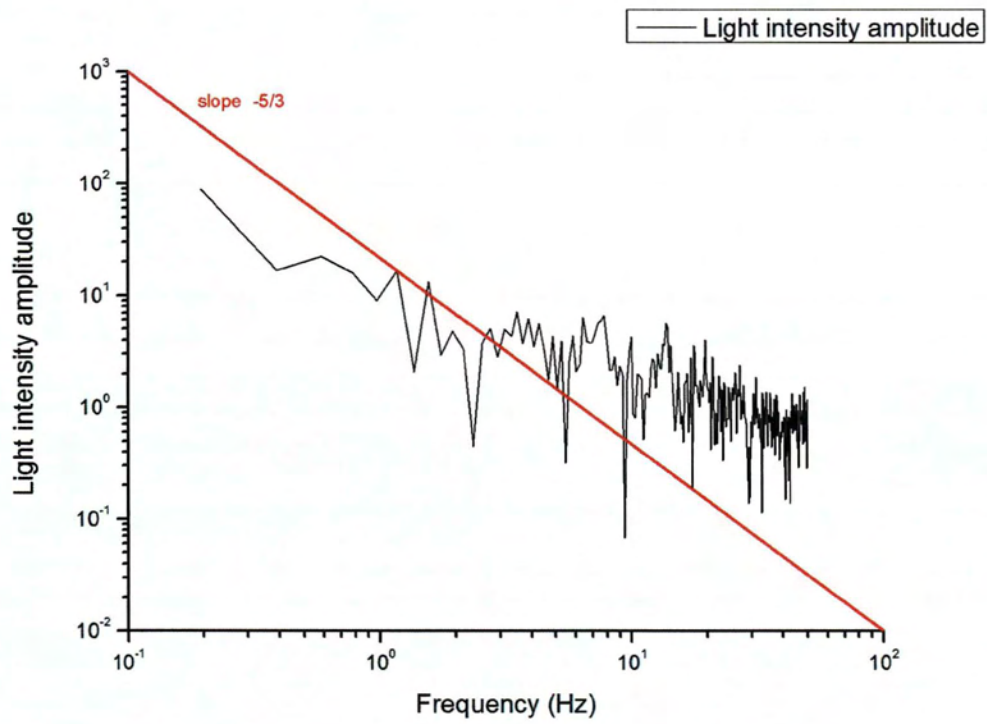
Γράφημα 158-75Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



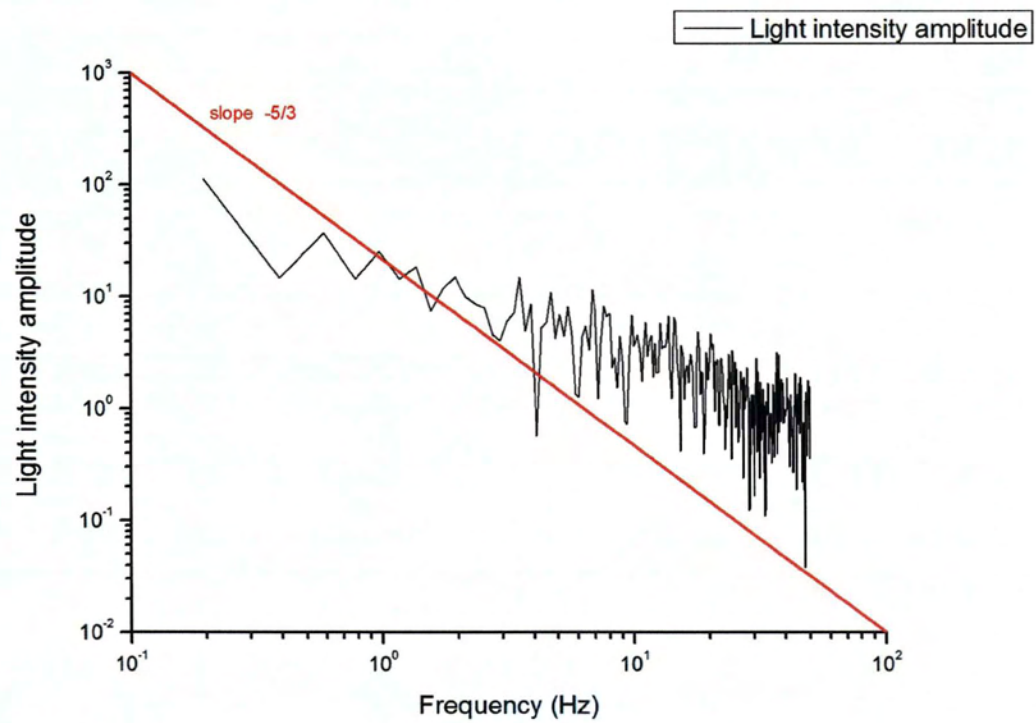
Γράφημα 159-80Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



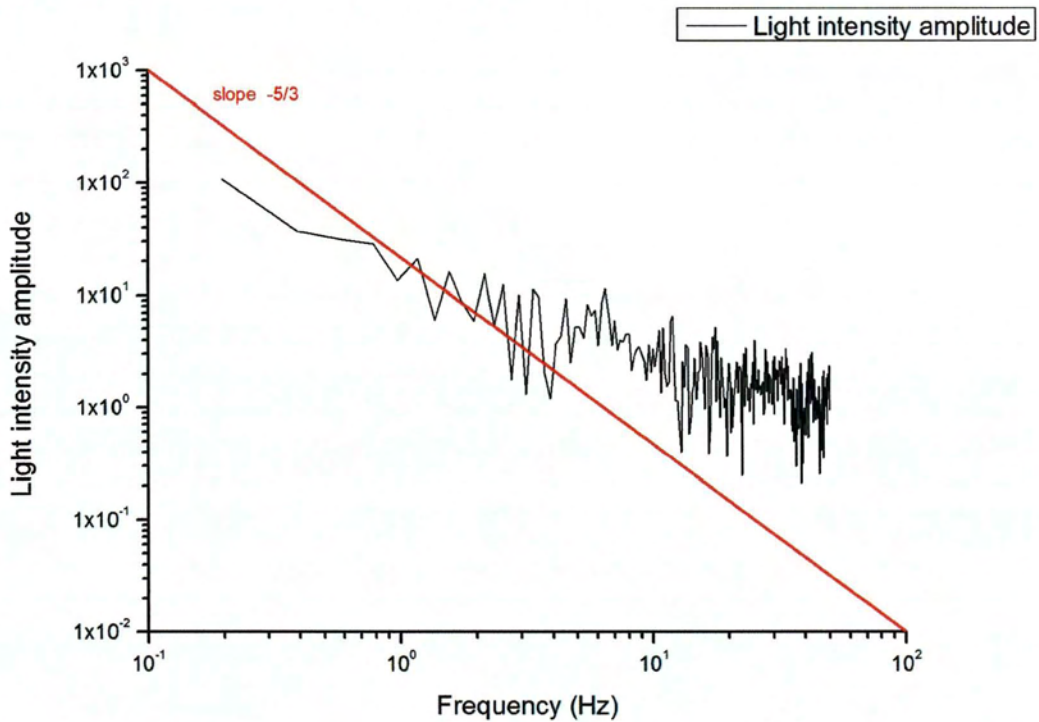
Γράφημα 160-90Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



Γράφημα 161-100Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)



Γράφημα 162-120Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)

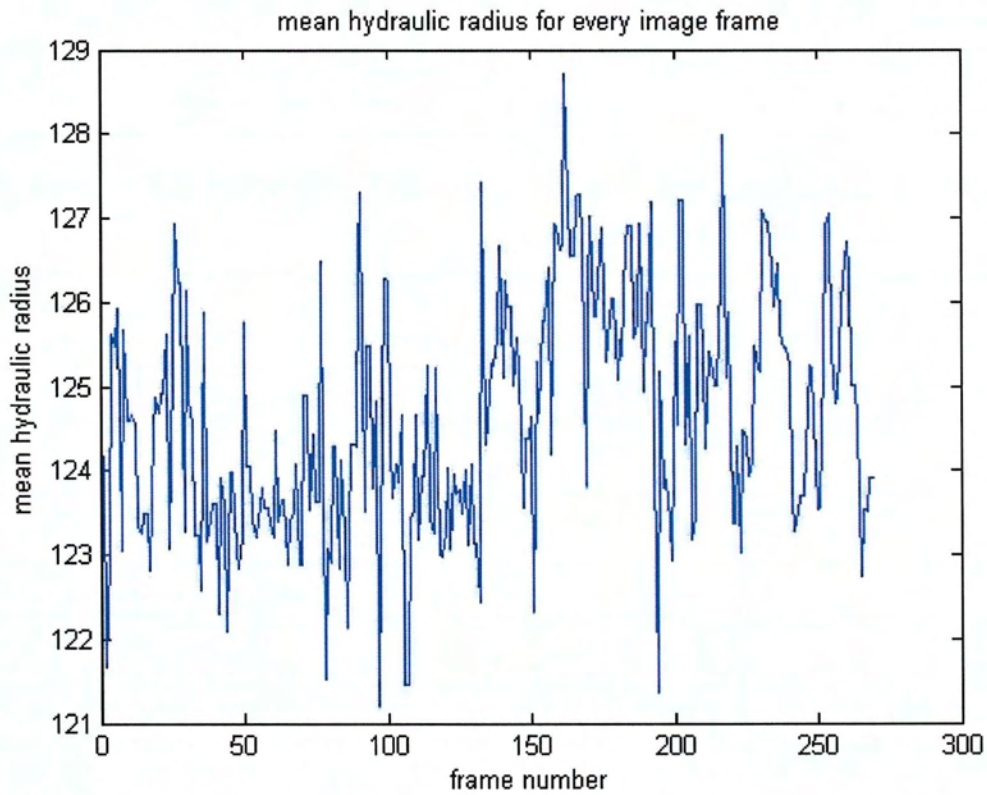


Γράφημα 163-140Hz- Λογαριθμικό διάγραμμα FFT στο (x=150, y=135)

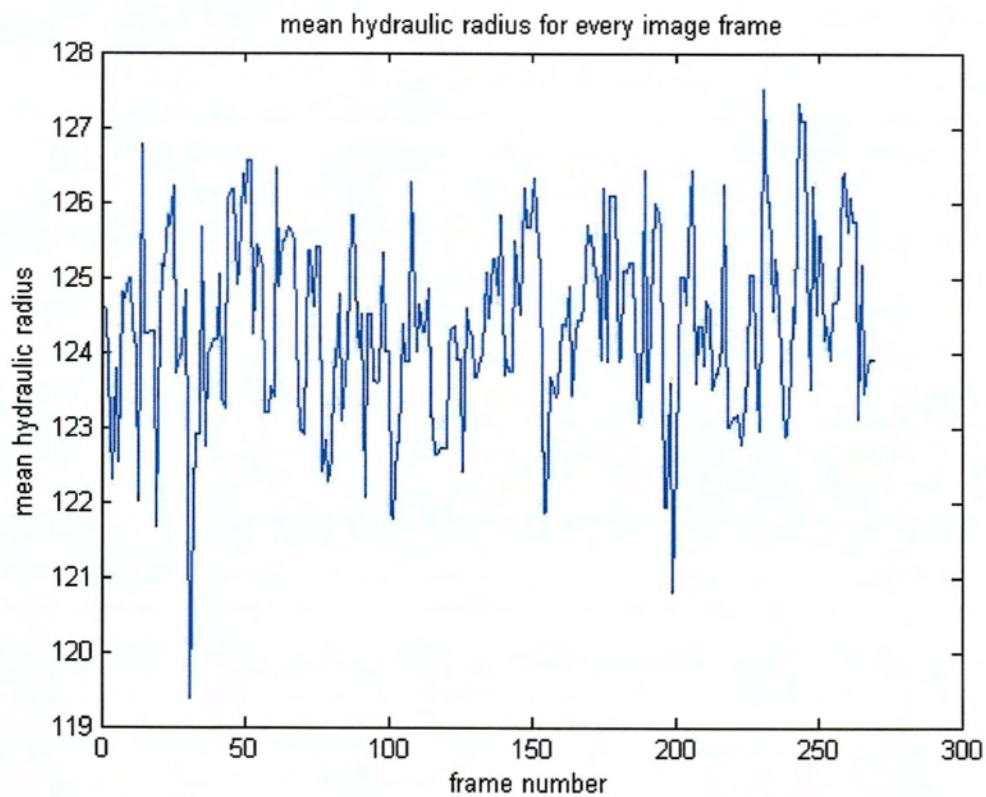
Από τη μετατροπή τους σε λογαριθμικά, και τοποθετώντας την κλίση $-5/3$ στα διαγράμματα, βλέπουμε ότι αυτή η κλίση ακολουθείται από το λογαριθμημένο διάγραμμα για μικρό εύρος συχνοτήτων και σε χαμηλές τιμές. Η κλίση αυτή βάσει της θεωρίας του **Kolmogorov**, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, δείχνει την ένταση της τύρβης. Από τα διαγράμματα συμπεριέρεται ότι η τύρβη είναι εμφανής σε ένα μικρό φάσμα χαμηλών συχνοτήτων (**0.1 Hz– 4 Hz**). Η μη χρησιμοποίηση της High Speed Camera, δυσκόλεψε σημαντικά τη δειγματοληψία σε συχνότητες μεγαλύτερες των **12,5 Hz**, όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη περίπτωση που δεν υπάρχει η επίδραση του τυρβώδους πεδίου των μεγαφώνων, η ροή δεν παρουσιάζεται τυρβώδης. Τέλος είναι εμφανές ότι όσο μεγαλώνει η συχνότητα του παλμού, τόσο μειώνεται η δύναμη της τύρβης.

Διακύμανση της υδραυλικής ακτίνας (mean hydraulic radius for every frame)

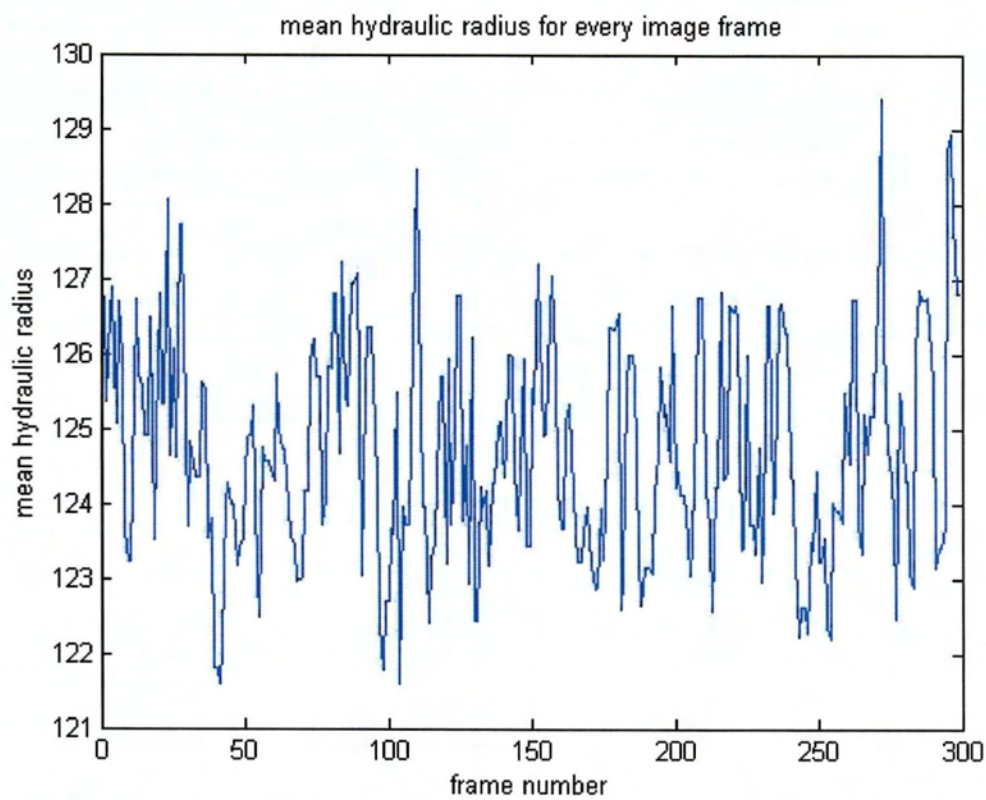
Στα γραφήματα που ακολουθούν αποτυπώνεται η διακύμανση της υδραυλικής ακτίνας που υπολογίστηκε για κάθε ξεχωριστό καρέ που επεξεργάστηκε ο κώδικας. Στη συνέχεια ,σε πίνακα , δίνονται οι μέσες υδραυλικές ακτίνες για κάθε συχνότητα.



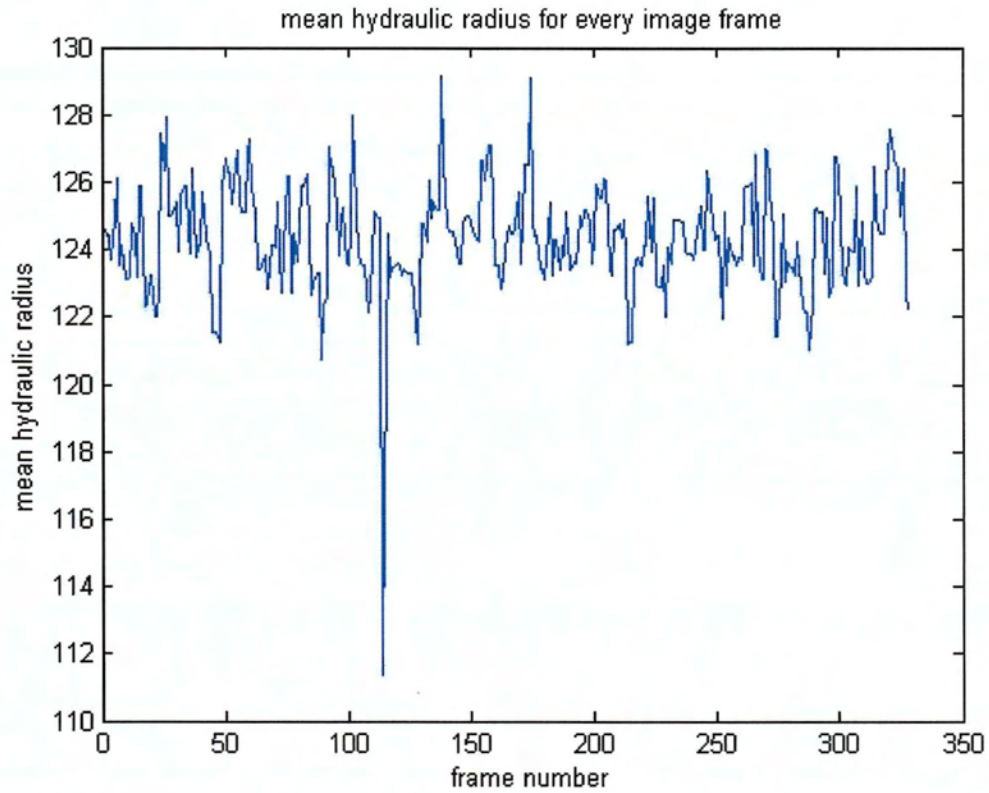
Γράφημα 164-no_pover- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



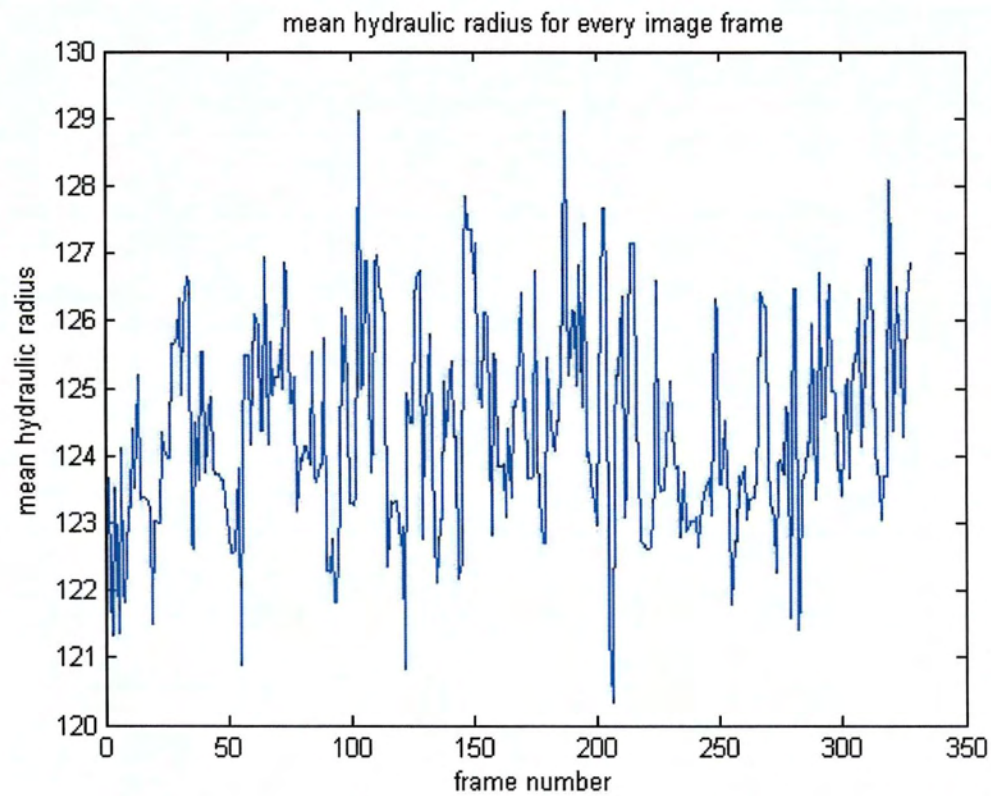
Γράφημα 165-40Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



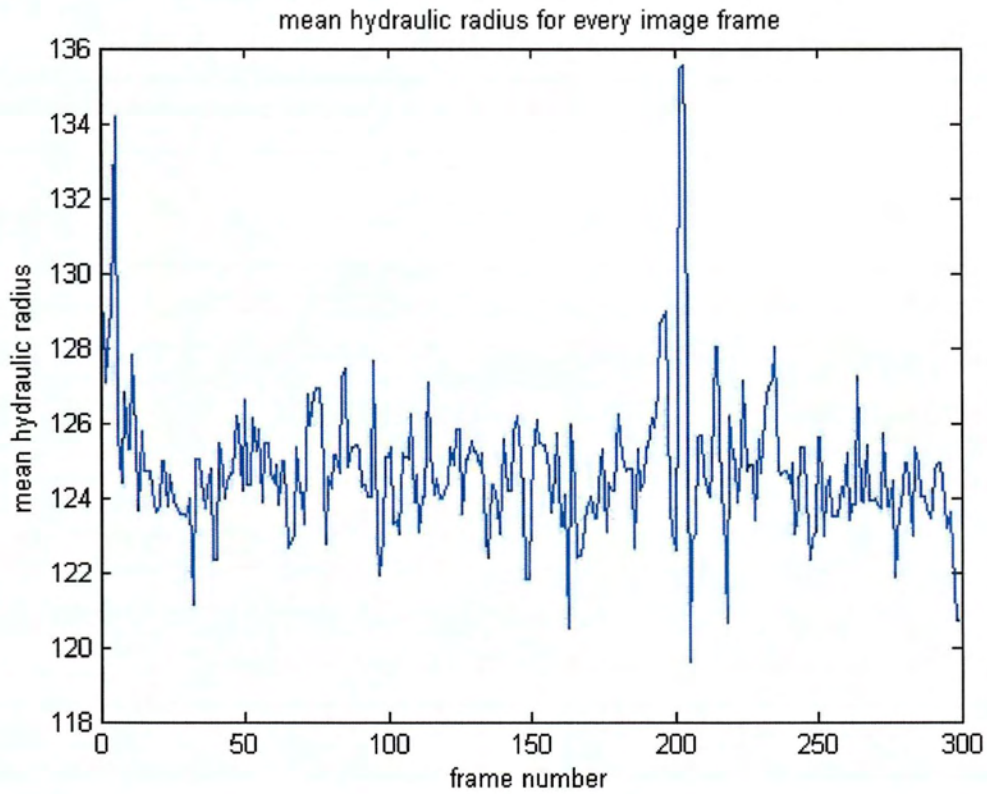
Γράφημα 166-50Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



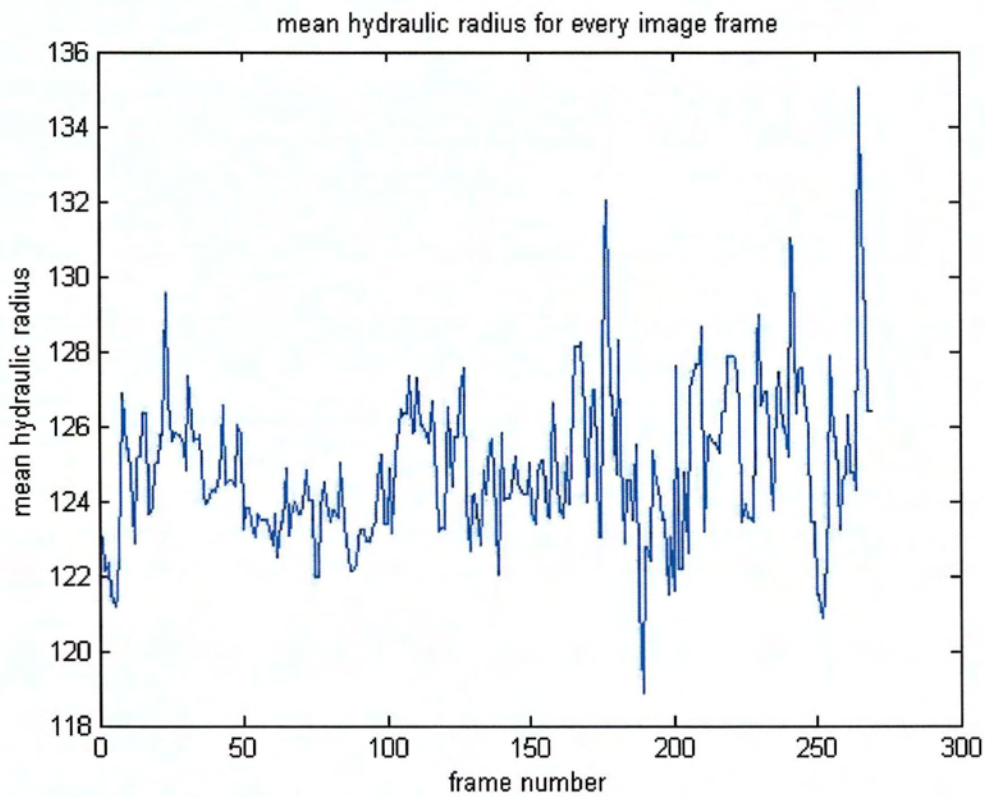
Γράφημα 167-60Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



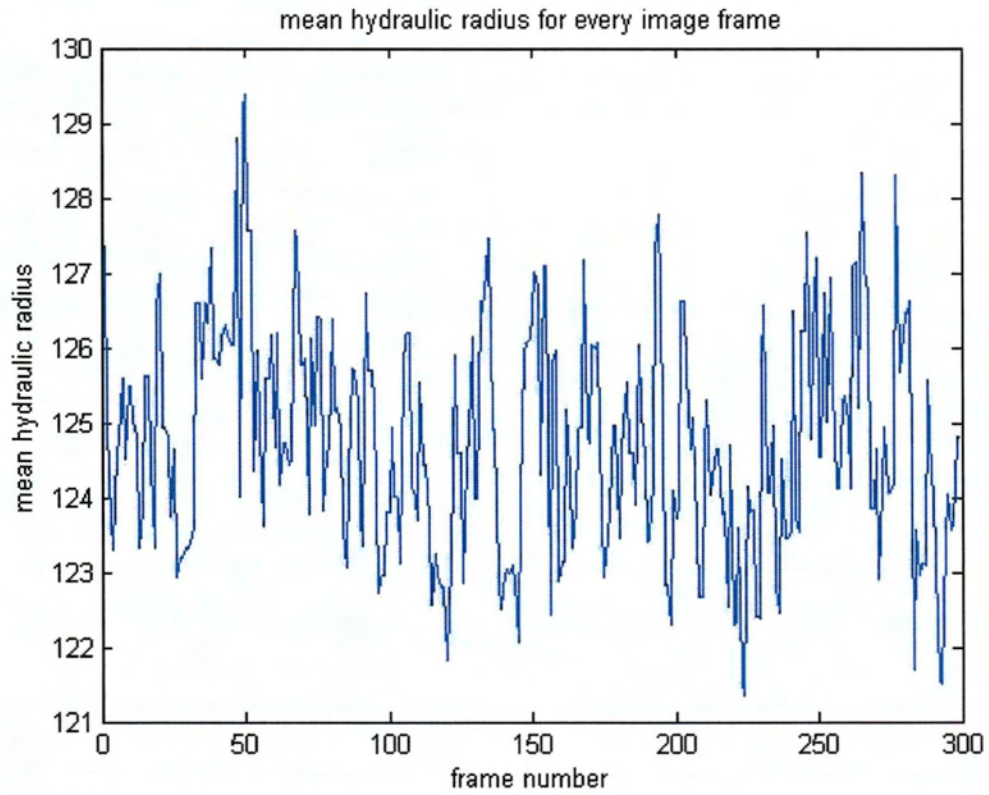
Γράφημα 168-70Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



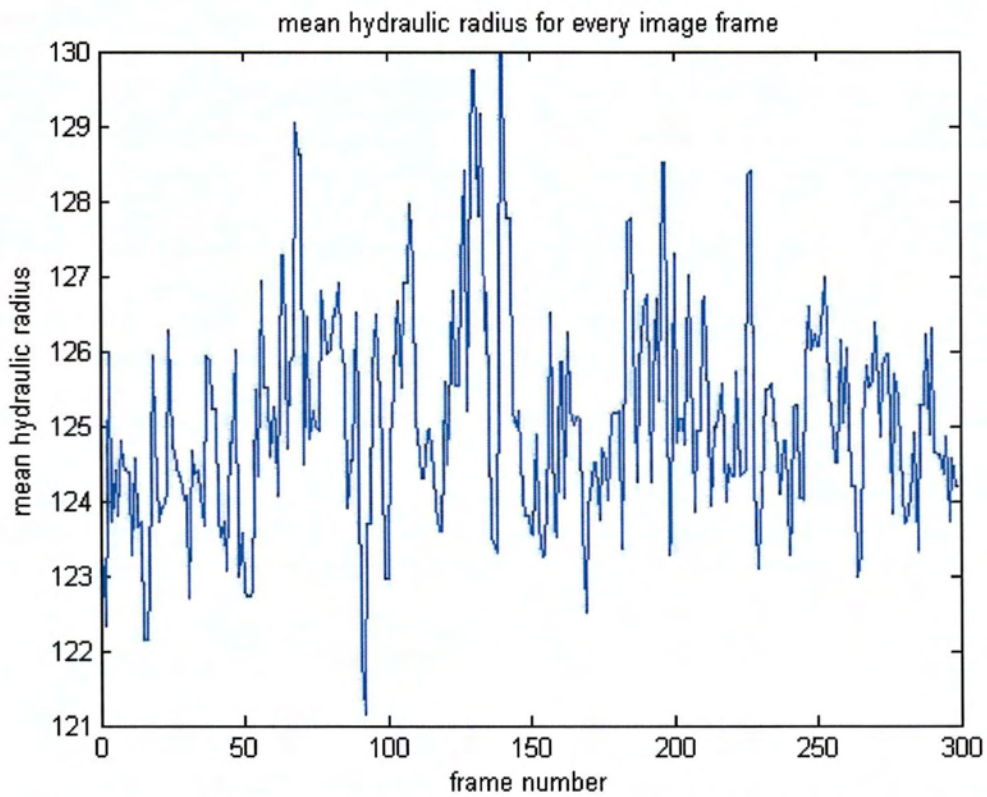
Γράφημα 169-73Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



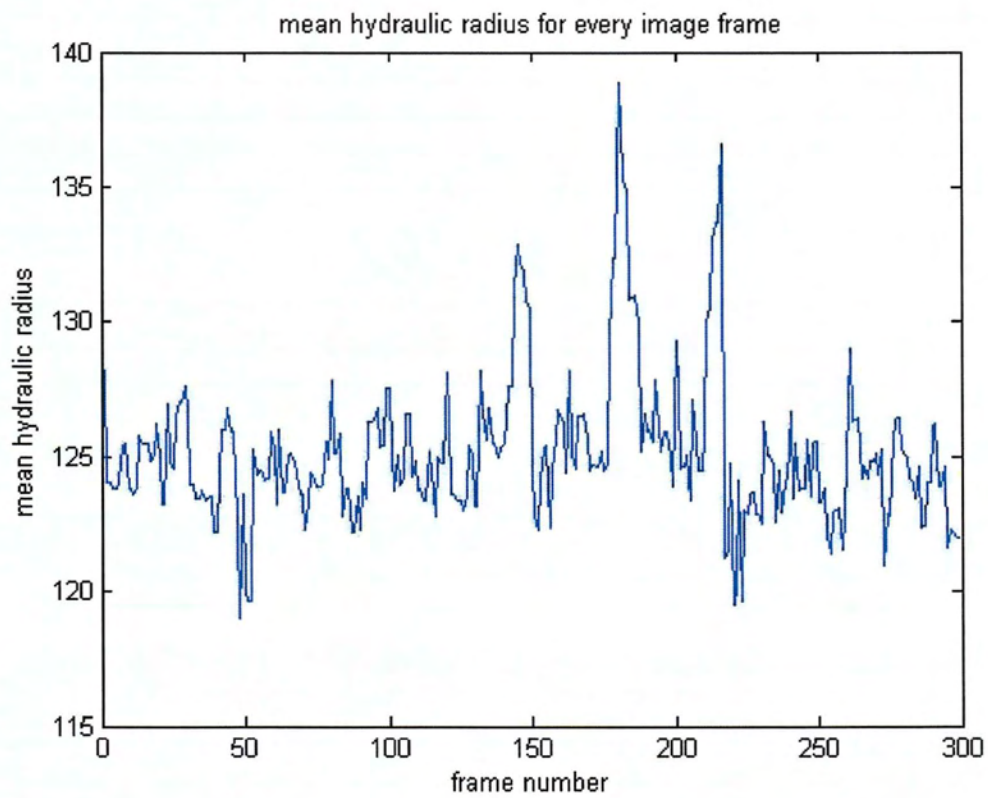
Γράφημα 170-75Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



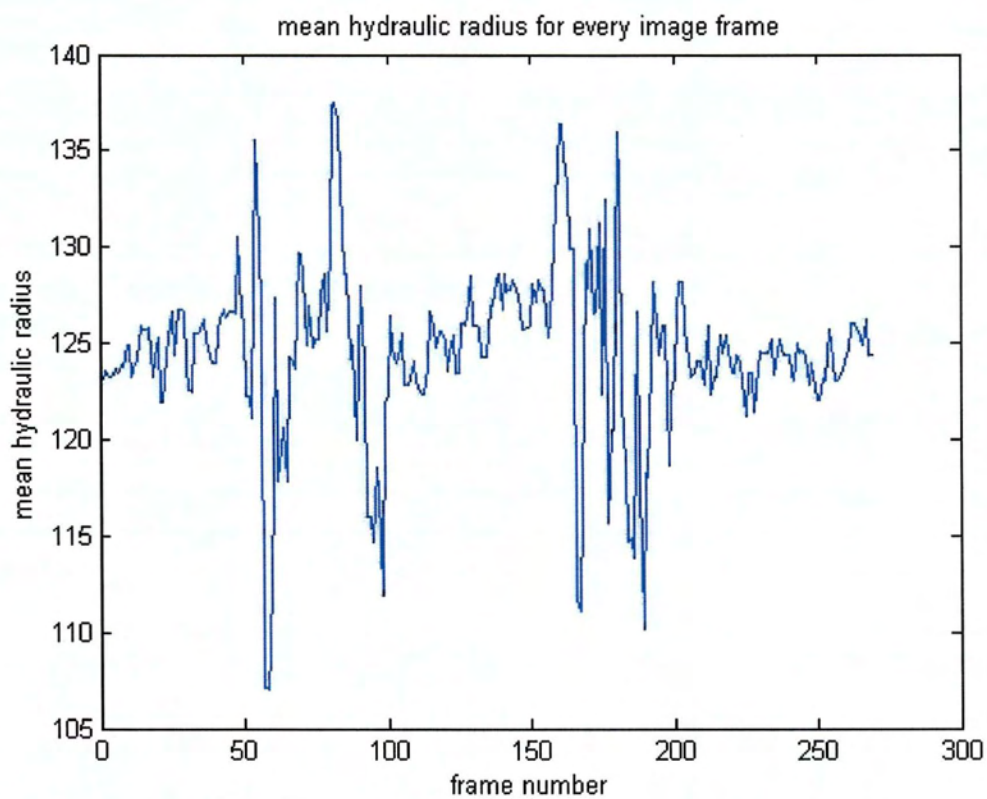
Γράφημα 171-80Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



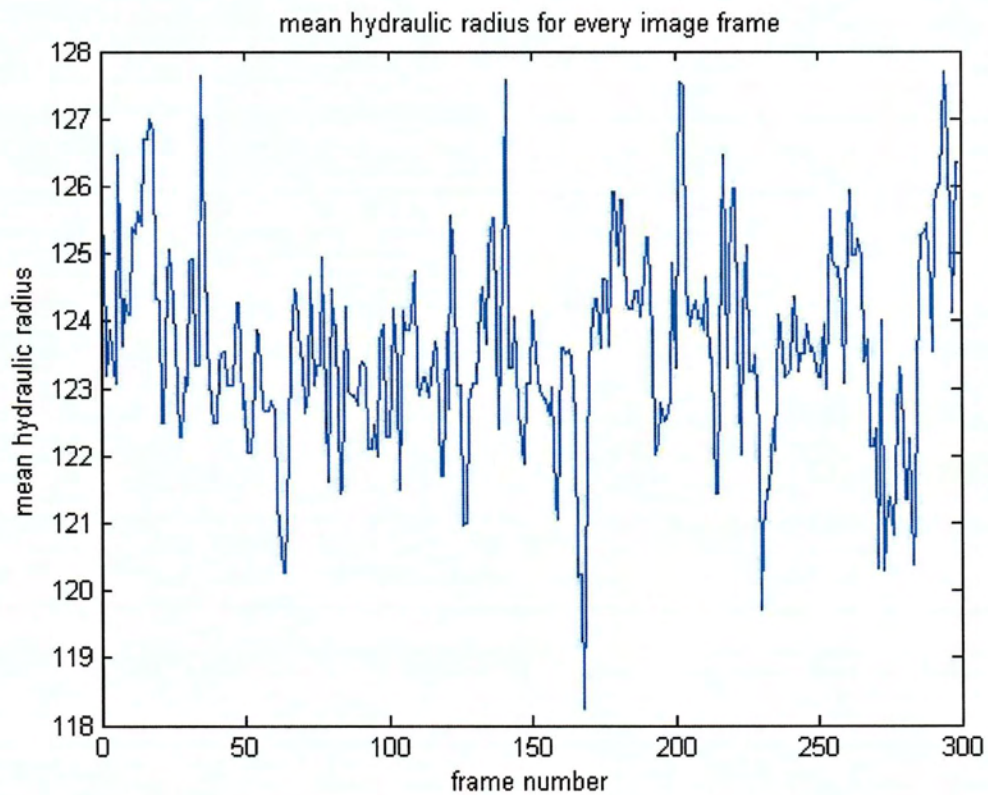
Γράφημα 172-90Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



Γράφημα 173-100Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



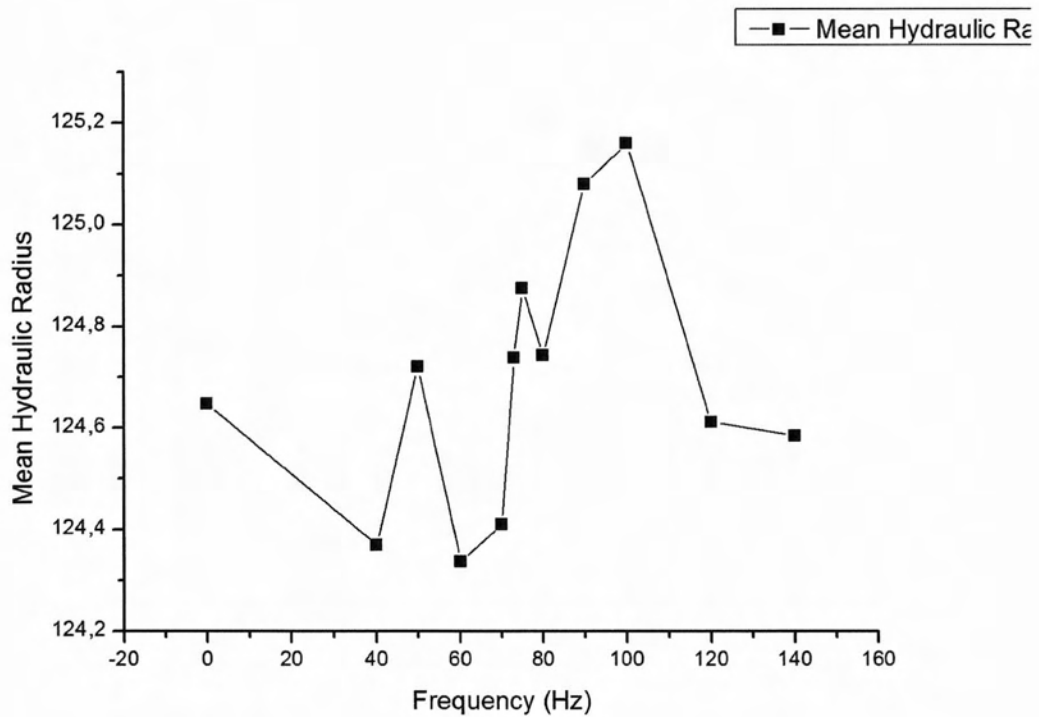
Γράφημα 174-120Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames



Γράφημα 175-140Hz- Υδραυλική ακτίνα, συναρτήσει του αριθμού των frames

<u>ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)</u>	<u>Mean Hydraulic Radius</u>
no_power	124.6476
40	124.3695
50	124.7197
60	124.3771
70	124.4096
73	124.7371
75	124.8751
80	124.7422
90	125.0800
100	125.1597
120	124.6110
140	124.5849

Πίνακας 14- Μέσες υδραυλικές ακτίνες ΠΛΟΥΜΙΟ



Γράφημα 176- Μέσες υδραυλικές ακτίνες ΠΛΟΥΜΙΟ

Οι διακυμάνσεις της υδραυλικής ακτίνας για κάθε συχνότητα είναι έντονες, το εύρος των τιμών όμως δεν είναι μεγάλο, καθώς η συσκευή παραγωγής του πλούμιου έχει μεγάλη φωτεινότητα και μέγεθος σε σχέση με το πλούμιο που παράγει. Έτσι, ένα μεγάλο κομμάτι της υδραυλικής ακτίνας ανήκει στη διάταξη αυτή.

Συμπερασματικά, φαίνεται πως το πλούμιοδέχεται ισχυρότερη επίδραση από την τύρβη στο κέντρο επειδή εξάλλου δεν έχει από μόνο του δική του εσωτερική δομή τύρβης, όπως συμβαίνει με τη δέσμη του ατμοκαθαριστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ερρίκος Σταπουντζής, *Σημειώσεις για το μάθημα Φαινόμενα Τύρβης*, (2008)
2. Tennekes, H. and Lumely, J.L., *A First course in Turbulence*. MIT Press, Cambridge, MA (1973)
3. Α.Θ. Παπαϊωάννου, *Μηχανική των ρευστών*, Τόμος Ι, Β' Έκδοση (2002)
4. Streeter/Wylie/Bedford, *Μηχανική των ρευστών*, (2009)
5. Arkady Tsinober, *An informal introduction to turbulence*, (2001)
6. Adrian Biran & Mosche Breiner , *Matlab 6 για Μηχανικούς*, (2003)
7. Madjid Birouk ,Brahim Sahr and Iskender Gokalp, *An Attempt to Realize Experimental Isotropic Turbulence at Low Reynolds Number*, (2003)
8. J. de Jong ,L. Chao, S.H. Woodward, J.P.L.C. Salazar, L.R. Collins, H. Meng , *Dissipation rate estimation from PIV in zero-mean isotropic turbulence*, (2008)
9. Charles Goepfert, Jean-Louis Marie, Delphine Chareyron, Michel Lance , *Characterization of a system generating a homogenous isotropic turbulence field by free synthetic jets* , (2009)
10. W. Hwang, J.K. Eaton, *Creating homogenous and isotropic turbulence without a mean flow* , (2004)
11. *Kolmogorov Microscales*, ανάκτηση από:
http://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov_microscales
12. *Nyquist Frequency*, ανάκτηση από: http://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist_frequency
13. *Laser Doppler Velocimetry*, ανάκτηση από:
http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Doppler_velocimetry
14. <http://www.djshop.gr/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

```
%%  
% Image processing script  
% - Reads single or multiple image frame files  
% - Creates matrix of light intensity for a given focus area  
% - Plots iso-contoures of light intensity  
% - Plots light intensity for a frame slice  
% - Calculates and plots FFT of light intensity for a single point  
% - Calculates and plots mean hydraulic radius  
% - Saves data in txt files  
% Thanasis Barlas 27/5/2013  
  
clear all; close all; clc; % clearing data  
  
%%  
% define user input parameters  
  
xl = 1; % focus area left corner x coordinate (in  
pixels)  
xr = 300; % focus area right corner x coordinate (in  
pixels)  
yl = 1; % focus area left corner y coordinate (in  
pixels)  
yr = 270; % focus area right corner y coordinate (in  
pixels)  
frame = 10; % single frame number to process  
frame_file = 'jpg'; % frame file type (string)  
contour_nr = 10; % number of iso-contours to plot  
frame_slice_x = 100; % x coordinate of vertical frame slice (in  
pixels) (numbering starting at left corner of focus area)  
frame_range = [0:(no. of frames)]; % frame number range (array)  
point_x = (ex.150); % x coordinate of point of  
interest (in pixels)  
point_y = (ex. 135); % y coordinate of point of interest  
(in pixels)  
Fs = 25; % sampling frequency of frames (in Hz)  
  
%%  
% read image frame, create matrix of light intensity, calculate average  
value, plot iso-contoures of  
% light intensity (for a single frame and for the average from all  
frames), plot light intensity at  
% a given vertical slice (for a single frame and for the average from  
all frames), calculate and plot  
% FFT of light intensity for a single point for all frames and save data  
in txt  
  
file = sprintf('Cross_50Hz%0.4i',frame); % set file name  
a = double(imread(file,frame_file)); % read image
```



```

I = a(xl:xr,yl:yr); % create matrix of intensity
for given focus area

% create 3D matrix with light intensity of all frames
for i=1:length(frame_range)
    file = sprintf('Cross_50Hz%0.4i',frame_range(i));
    a = double(imread(file,frame_file));
    I = a(xl:xr,yl:yr);
    I_all(:,:,i) = I;
end

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

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

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

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

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

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

```

```

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

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

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

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

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

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

```

```

for j=1:length(frame_range)
    file = sprintf('Cross_50Hz%0.4i',frame_range(j));
    a = double(imread(file,frame_file));
    I = a(xl:xr,yl:yr);
    [x y] = find(I==I);

% change reference frame to the center of focus area
    x2=x+xl-2;
    y2=y+yl-2;
    yf=y2-435;
    xf=311-x2;
    matr = [x2 y2 I(:)];
    matr2 = [xf yf I(:)];

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

        if yf(i)>=0 & xf(i)>=0
            w=abs(xf(i)./yf(i));
            angle(i) = (180/pi)*atan(w);
        elseif yf(i)<0 & xf(i)>0,
            w=abs(xf(i)./yf(i));
            angle(i) = (180/pi)*atan(w)+90;
        elseif yf(i)<0 & xf(i)<0
            w=abs(xf(i)./yf(i));
            angle(i) = (180/pi)*atan(w)+180;
        else
            w=abs(xf(i)./yf(i));
            angle(i) = (180/pi)*atan(w)+270;
        end
    end

% sort angle from low to high value
    [angleb ii] = sort(angle);
    I2 = I(:);
    I3 = I2(ii);
    r2 = r(ii);

    matr3 = [angle' r I(:)];
    matr4 = [angleb' r2 I3];

% interpolation
    [angle2,rad2] = meshgrid(0:1:360,0:1:245);
    [xi,yi]=pol2cart(angle2,rad2);
    [X,Y] = pol2cart(angleb(1:end-1),(r2(1:end-1))');
    Iint = griddata(X,Y,I3(1:end-1),xi,yi);
    rm(j) = sum(sum(Iint.*rad2))/sum(sum(Iint));
end

% calculate average hydraulic radius from all frames and print value on
screen
rm_av = mean(rm);
disp(['The average hydraulic radius from all frames is
',num2str(rm_av)]);
rm_ta = std(rm);

```

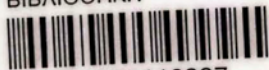


```
disp(['typiki apoklisi',num2str(rm_ta)]);

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



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000118227