



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΤΕΡΥΓΑΣ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟΥ ΣΕ ΦΟΡΤΙΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΩΝ

---

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΤΕΡΥΓΑΣ  
ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟΥ BELL HUEY II

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΡΑΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ Α.Μ.: 1490

Επιβλέπων:  
Σταπουντζής Ερρίκος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Βόλος, Ιούνιος 2017



Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....

Σταπουντζής Ερρίκος  
Καθηγητής Π.Θ.

.....

Πελεκάσης Νικόλαος  
Καθηγητής Π.Θ.

.....

Σταματέλλος Αναστάσιος  
Καθηγητής Π.Θ.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή, κύριο Ερρίκο Σταπουντζή, επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, για την συνεχή καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μελέτης αυτής, για τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές του και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους καθηγητές, κύριο Σταματέλλο Αναστάσιο, και κύριο Πελεκάση Νικόλαο για την παροχή εξοπλισμού, απαραίτητου για την διεξαγωγή των πειραμάτων και ως μελών της εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος, τους κυρίους, Βέργο Αθανάσιο, Δαφερέρα Αναστάσιο και Μαρίνο Μιχάλη για την τεχνική υποστήριξη στις μηχανουργικές κατεργασίες που παρείχαν κατά τη διάρκεια κατασκευής της πειραματικής εγκατάστασης αυτής και κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών, του τομέα Ενέργειας, Βιομηχανικών Διεργασιών και Αντιρρυπαντικής Τεχνολογίας, του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και πραγματεύεται πειραματικά τη μελέτη της συμπεριφοράς της πτέρυγας ελικοπτέρου Bell Huey II που είναι εγκατεστημένη σε αυτό.

Σκοπός της εργασίας, είναι η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τις δυνατότητες και αντοχές μιας πτέρυγας ελικοπτέρου σε πραγματικές συνθήκες πτήσης συνδυάζοντας γνώσεις περί ταλαντώσεων, μηχανικής υλικών και ρευστομηχανικής.

Στα αρχικά κεφάλαια, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη στον σχεδιασμό των ελικοπτέρων, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ελικοπτέρου Bell Huey II. Ακολουθεί αεροδυναμική μελέτη αεροτομών και της μηχανικής της πτήσης και παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της θεωρίας των ταλαντώσεων. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος διεξαγωγής των εργαστηριακών πειραμάτων, που περιλαμβάνει μετρήσεις συχνοτήτων, επιταχύνσεων και μετατοπίσεων της πτέρυγας με την μηχανική μέθοδο ανάλυσης από το επιταχυνσιόμετρο και με την οπτική μέθοδο ανάλυσης από την βιντεοσκόπηση, ύστερα από δυναμική περιοδική διέγερση της στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα αριθμητικά και ποιοτικά αποτελέσματα-συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων και γίνεται σύγκριση των δύο μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων με εκτενή σχολιασμό βασισμένο στη θεωρία και τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία.

# ABSTRACT

The present diploma thesis elaborated in Fluid Mechanics and Turbomachinery Laboratory of Industrial Process Energy and clean technology, Department of Mechanical Engineering of the Polytechnic School of University of Thessaly and experimental study deals with the behavior of the Bell Huey II helicopter blade that is installed on it.

The aim of the work is useful conclusions about the possibilities and strengths of a helicopter blade under real flight conditions combining knowledge of vibration, materials engineering and fluid mechanics.

In the early chapters, becomes a brief historical overview of the evolution in the design of helicopters, presented the basic principles of operation and listed the technical characteristics of the helicopter Bell Huey II. Follows aerodynamic design of airfoils and mechanics of flight and the basic principles of oscillation theory are presented. Then describing the details how the laboratory experiments are carried out, which include measurements of frequencies, accelerations and shifts of the wing with the mechanical method of analysis from the accelerometer and with the optical method of analysis from the video recording, after its dynamic periodic stimulation in  $x$  and  $y$ . The next chapters present the numerical and qualitative results-conclusions that resulted from the experiments and compare the two methods of data processing with extensive theory-based commentary and finally presents the bibliography.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας Συμβόλων.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Εισαγωγή.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	10
2.1 Η ιστορική εξέλιξη του ελικοπτέρου μέσω της εταιρίας BELL.....	10
2.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας ελικοπτέρου.....	11
2.1.2 Το ελικόπτερο Bell Huey II.....	14
2.1.3 Τεχνικά δεδομένα του ελικοπτέρου Bell-Huey II.....	16
2.2 Η ροή γύρω από μια αεροτομή και η μηχανική της πτήσης.....	17
2.3 Χαρακτηριστικά της πτέρυγας.....	23
2.4 Βασικές αρχές θεωρίας Ταλαντώσεων.....	24
2.4.1 Η φθίνουσα ταλάντωση.....	29
2.4.2 Η εξαναγκασμένη ταλάντωση.....	30
2.4.3 Φαινόμενο συντονισμού.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Σχεδιασμός και κατασκευή της πειραματικής διάταξης, όργανα μετρήσεως και αποθήκευσης δεδομένων.....	33
3.1 Τρόπος στηρίξεως.....	34
3.2 Το σύστημα του διεγέρτη-ηλεκτροκινητήρα.....	36
3.3 Όργανα μετρήσεως εργαστηρίου.....	38
3.3.1 Εξοπλισμός εργαστηρίου για την μηχανική μέθοδο ανάλυσης.....	38
3.4 Προσδιορισμός συστήματος συντεταγμένων για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.....	42
3.5 Η πειραματική διάταξη της οπτικής μεθόδου ανάλυσης.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Μεθοδολογία διεξαγωγής πειραμάτων.....	44
4.1 Μηχανική μέθοδος ανάλυσης από επιταχυνσιόμετρο.....	44
4.2 Οπτική μέθοδος ανάλυσης από βίντεο.....	49
4.3 Εύρεση της συχνότητας του διεγέρτη-ηλεκτροκινητήρα.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
Αποτελέσματα οπτικής μεθόδου ανάλυσης των ταλαντώσεων από βίντεο.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
Αποτελέσματα μηχανικής μεθόδου ανάλυσης των ταλαντώσεων με επιταχυνσιόμετρο.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
Συγκριτικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	
Συμπεράσματα της ανάλυσης.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	
Βιβλιογραφία.....	99

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

## ΞΕΝΑ ΣΥΜΒΟΛΑ

$a$ /acceleration [ $m/s^2$ ]: επιτάχυνση  
 $a_{\text{video}}$  [ $m/s^2$ ]: επιτάχυνση από βίντεο  
 $a_{\text{accelerometer}}$  [ $m/s^2$ ]: επιτάχυνση από επιταχυνσιόμετρο  
 $A$  [ $m^2$ ]: επιφάνεια  
 $A_{\text{max}}$  : μέγιστο πλάτος ταλάντωσης  
 $A.R.$  : aspect ratio  
 $A.C.$  : αεροδυναμικό κέντρο  
 $b$  [ $m$ ]: πλάτος πτέρυγας  
 $b$  : απόσβεση ταλάντωσης  
 $c$  [ $m$ ]: χορδή πτέρυγας  
 $C_D$  : συντελεστής οπισθέλκουσας  
 $C_L$  : συντελεστής άνωσης  
 $C_M$  : συντελεστής ροπής  
 $C_{M0,25}$  : συντελεστής ροπής στο αεροδυναμικό κέντρο  
 $c_{\text{max}}$  [ $m$ ] : μέγιστη απόσταση γραμμής χορδής και γραμμής κυρτότητας πτέρυγας  
 $C_p$  : συντελεστής πίεσης  
 $C_{p^*}$  : κρίσιμος συντελεστής  
Coulomb : μονάδα μέτρησης ηλεκτρικού φορτίου  
 $D$  [ $N$ ]: οπισθέλκουσα δύναμη  
 $d$  [ $mm$ ]: πλάτος ενισχυτή  
 $Du$  [ $m/s$ ]: μεταβολή ταχύτητας  
 $Dy$  [ $mm$ ]: μετατόπιση στην διεύθυνση  $y$   
 $Dt/\Delta t$  [ $sec$ ]: μεταβολή χρόνου  
 $Dx$  [ $mm$ ]: μετατόπιση στην διεύθυνση  $x$   
 $f$  [ $Hz$ ]: συχνότητα  
 $f_0$  [ $Hz$ ]: ιδιοσυχνότητα  
 $f_{\text{accelerometer}}$  [ $Hz$ ]: συχνότητα πτέρυγας υπολογισμένη από το επιταχυνσιόμετρο  
 $f_{\text{inverter}}$  [ $Hz$ ]: συχνότητα inverter  
 $f_{\text{video}}$  [ $Hz$ ]: συχνότητα πτέρυγας υπολογισμένη από το βίντεο  
 $f_{\text{motor}}$  [ $Hz$ ]: συχνότητα του βραχίονα του τριφασικού μοτέρ-διεγέρτη  
 $F$  [ $N$ ]: δύναμη  
 $F_0$  [ $N$ ]: μέγιστη δύναμη του διεγέρτη  
 $F_b$  [ $N$ ]: δύναμη απόσβεσης  
 $F_{\text{ex}}$  [ $N$ ]: εξωτερική δύναμη που προκαλεί ταλάντωση  
FFT : Fast Fourier Transform  
Frames : στιγμιότυπα  
Frame number : αριθμός στιγμιότυπου  
Fps/frames per second : καρέ το δευτερόλεπτο  
 $G$  : κέντρο πίεσης  
 $g$  [ $m/s^2$ ]: επιτάχυνση βαρύτητας  
GAIN : ενίσχυση  
 $g_{\text{rms}}$  : κατώφλι τιμών  
 $h$  [ $m$ ]: μέγιστο ύψος αεροτομής  
 $K$  : τραχύτητα αεροτομής  
 $k$  : σταθερά ελατηρίου  
 $kW$  : μονάδα μέτρησης ηλεκτρικής ισχύος  
 $L$  [ $N$ ]: άνωση  
 $L_f$  : διαμήκης ή εγκάρσια ολοκληρωτική κλίμακα της τύρβης

L.E. : ακμή προσβολής  
 m : μάζα σώματος  
 M [Nm]: ροπή  
 M : αριθμός Mach  
 MIG : ηλεκτροσυγκόλληση τόξου που το ηλεκτρόδιο αποτελεί και το συγκολλητικό υλικό  
 N : αριθμός επαναλήψεων  
 P/p [Pa]: πίεση  
 $P_{\infty}$  [Pa]: πίεση στον αέρα  
 Q [Pa]: δυναμική πίεση  
 Re : αριθμός Reynolds  
 RPM : στροφές το λεπτό  
 s [m]: εκπέτασμα  
 Standard deviation [mm]:  
 T [sec]: περίοδος  
 T.E. : ακμή φυγής  
 TOC : αναλογία του μέγιστου πάχους της αεροτομής με το μήκος της χορδής  
 TIG : ηλεκτροσυγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου  
 t [m]: μέγιστο πάχος αεροτομής  
 t [sec]: χρόνος  
 U [m/s]: ταχύτητα  
 $U_{\infty}/v$  [m/s]: ταχύτητα στον αέρα  
 $U_i^2$  : ένταση τύρβης  
 VDC : Volts συνεχούς ρεύματος  
 Volts : μονάδα μέτρησης ρεύματος  
 W [mm]: μήκος ενισχυτή  
 $x''(t)$  ή  $d^2x/dt^2$  : δεύτερη παράγωγος μετατόπισης στην διεύθυνση x ως προς τον χρόνο  
 $X_{mean}$  [mm]: μέση τιμή μετατόπισης στην διεύθυνση x  
 $X_{rms}$  [mm]: τυπική απόκλισης μετατόπισης στην διεύθυνση x  
 x,y,z : άξονες καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων  
 $x_h$  [m]: θέση μέγιστου ύψους  
 $Y_{mean}$  [mm]: μέση τιμή μετατόπισης στην διεύθυνση y  
 $Y_{rms}$  [mm]: τυπική απόκλισης μετατόπισης στην διεύθυνση y  
 $Z^t(x)$  [m]: διανομή πάχους  
 $Z^s(x)$  [m]: διανομή κυρτότητας  
 $Z_u$  [m]: συντεταγμένες της πάνω επιφάνειας της πτέρυγας  
 $Z_l$  [m]: συντεταγμένες της κάτω επιφάνειας της πτέρυγας

## ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑ

$\alpha$  [°]: γωνία προσβολής  
 $\delta_{max}$  [m]: μέγιστο πάχος  
 $\mu$  [Pa\*s]: μοριακό ιξώδες  
 $\nu$  [1/Pa\*s]:κινηματικό ιξώδες  
 $\pi$  : μαθηματική σταθερά 3,14159265  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]: πυκνότητα  
 $\varphi$  [°] : φάση ταλάντωσης  
 $\varphi_0$  [°]:αρχική φάση ταλάντωσης  
 $\omega$  [rad/s]: κυκλική συχνότητα  
 $\omega_0$  [rad/s]: κυκλική συχνότητα (υπολογισμένη για την ιδιοσυχνότητα)  
 $\omega_{ex}$  [rad/s]: κυκλική συχνότητα εξαναγκασμένης ταλάντωσης



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα το ελικόπτερο είναι ένα από τα πιο ευέλικτα μέσα μεταφοράς. Πολλοί προτιμούν αυτό το μέσο μεταφοράς από άλλα, για την ταχύτητα αλλά και για την ασφάλεια. Αν και από πρώτη άποψη το ελικόπτερο φαίνεται επικίνδυνο, δεν είναι περισσότερο επικίνδυνο από ένα αυτοκίνητο. Λόγω όμως των αυξημένων απαιτήσεων και της πολυπλοκότητας ως προς τη χρήση του, οι μηχανικοί καλούνται ακόμα και σήμερα να αντιμετωπίσουν σειρά προβλημάτων, με σημαντικότερα το θόρυβο αλλά και τους κραδασμούς.

Όπως είναι γνωστό, το μέρος του ελικοπτέρου που είναι περισσότερο εκτεθειμένο σε διαφόρων ειδών καταπονήσεις, είναι τα πτερύγια του ρότορα. Οι έντονοι κραδασμοί κατά τη διάρκεια της πτήσης, μεταφέρονται και στα υπόλοιπα δομικά μέρη του ελικοπτέρου, προκαλώντας πρόωρη φθορά και βλάβες. Το γεγονός αυτό φυσικά έχει άμεση επίπτωση στη διάρκεια ζωής της κατασκευής, ενώ αυξάνεται σημαντικά και το κόστος συντήρησης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την απόκριση της πτέρυγας του στρατιωτικού ελικοπτέρου Bell-Huey II που βρίσκεται εγκατεστημένη σε εργαστηριακές συνθήκες, ως σύστημα μονόπακτης δοκού ή αλλιώς προβόλου, όταν αυτή υπόκειται σε φορτίσεις-ταλαντώσεις και μελετάται η οριζόντια μετατόπιση της πτέρυγας κατά μήκος της χορδής της, η επιτάχυνση της και η συχνότητα της.

Πιο συγκεκριμένα η πτέρυγα, αφού πακτώθηκε στο ένα άκρο της με τρόπο τέτοιο που θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, καταπονήθηκε με μια σειρά εξαναγκασμένων ταλαντώσεων, ορίζοντας κάθε φορά διαφορετική συχνότητα περιστροφής διεγέρτη-ηλεκτροκινητήρα από έναν inverter. Στην συνέχεια ακολούθησε επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από το επιταχυνσιόμετρο που είχε τοποθετηθεί στο ακροπτερύγιο της πτέρυγας και της οπτικής ανάλυσης του βίντεο που τραβήχτηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Από την πειραματική αυτή διαδικασία και την κατάλληλη επεξεργασία των παραγόμενων μετρήσεων, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τις πτέρυγες των ελικοπτέρων αλλά και για τις δυνατότητες των σύγχρονων αεροτομών.

Στο παρελθόν, να τονιστεί πως έχουν ολοκληρωθεί δύο ακόμα διπλωματικές εργασίες στην συγκεκριμένη πτέρυγα, οι οποίες όμως μελέτησαν την κατακόρυφη μετατόπιση του ακροπτερυγίου και την ελαστική συμπεριφορά της υπό την επίδραση στατικών και δυναμικών φορτίων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### *2.1 Η ιστορική εξέλιξη του ελικοπτέρου μέσω της εταιρίας BELL.*

Μετά από το πρώτο επιτυχημένο και καταγεγραμμένο ελικόπτερο που για πρώτη φορά ήταν ολοκληρωμένο και έτοιμο για πτήση, με πολλές δυνατότητες, του Sikorsky, ο δρόμος πλέον είχε ανοίξει και για πολλές μετατροπές, νέα σχέδια, καινούργιες τεχνολογίες. Η εταιρία Bell όμως ήταν η μόνη που προχώρησε και υλοποίησε την ιδέα της για ένα μεγάλο, δικινητήριο ελικόπτερο. Το όνομα του, Bristol Type-173. Το ελικόπτερο αυτό είχε ένα μακρόστενο ' κορμό ', με πολλές θέσεις για επιβάτες, ενώ είχε δύο στροφεία , ένα μπροστά και ένα στο πίσω μέρος, πάνω από την ουρά. Με ισορροπία, με νέες ιδέες και σχέδια , η τεχνολογία και η ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα θα έκαναν τα ελικόπτερα να αρχίσουν να θυμίζουν αυτά που υπάρχουν και σήμερα. Είναι γεγονός πως είχαν γίνει σημαντικά βήματα.

Πολλά μοντέλα άρχισαν να κάνουν την εμφάνιση τους, όπως το K-125A του Charles Kaman το XH-44 που αργότερα εξελίχθηκε σε Model 360, UH-12A και τέλος σε H-23, από την εταιρία που εργαζόταν ο Stanley Hille όπου και πούλησε χιλιάδες ελικόπτερα. Το XH-44, το οποίο πέταξε με επιτυχία το 1944, διέθετε ένα παραπάνω στοιχείο. Είχε ένα αυτόματο στροφείο, όπου ο έλεγχος του βήματος γινόταν με ένα σετ από βοηθητικούς έλικες που βρίσκονταν τοποθετημένοι κάθετα σε σχέση με τους έλικες του κυρίως στροφείου. Αυτό είχε σκοπό να δώσει περισσότερη σταθερότητα στο ελικόπτερο. Στις μέρες μας, αυτό γίνεται μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων, από ένα αυτόματο σύστημα πτήσης, το Hiller paddle.[1]

Κατά την διάρκεια του 1950, πολλά από τα ελικόπτερα άρχισαν να γίνονται γρηγορότερα και πιο ασφαλή. Ήταν κατασκευασμένα έτσι ώστε να μπορούν να πιλοτάρονται πιο εύκολα, να μεταφέρουν πάνω από 2 επιβάτες και να έχουν καλύτερη και σταθερότερη πτήση. Αυτή η χρονική στιγμή, είναι γνωστή για την μαζική παραγωγή ελικοπτέρων στην Αμερική αλλά και στην Ευρώπη.

Τα Sikorsky S-55 και S - 58 ήταν τα μοντέλα με την μεγαλύτερη ζήτηση. Αυτό συνέβαινε γιατί είχαν αρχικά μια μεγάλη καμπίνα για τους επιβάτες, κάτω ακριβώς από το στροφείο τους, δίνοντας τους την μέγιστη κατανομή του κέντρου βάρους, με την μηχανή να είναι τοποθετημένη στο μπροστινό τμήμα του ελικοπτέρου, στην μύτη του. Η εταιρία Westland συνεργάστηκε με την Sikorsky και μαζί, κυκλοφόρησαν μια νέα έκδοση των προηγούμενων 2, τα S-55 Whirlwind και S-58 Wessex.

Το 1960, έδωσε μια ακόμα δυναμική ώθηση στην κατάκτηση των αιθέρων από τα ελικόπτερα. Παρουσιάστηκε το Sikorsky S-61 Sea King, το βαρύτερο S-64 Sky Crane και το μεγαλύτερο των 5 και 7 blades CH-53 μοντέλο. Λίγο αργότερα το S-70 (UH-60) ή Blackhawk, Sikorsky S-70 Blackhawk, Cheyenne, Wyoming που το ξέρουμε όλοι με αυτή την ονομασία ως τις μέρες μας , ήταν το ελικόπτερο που η παραγωγή του ξεπέρασε κάθε προηγούμενο. Ο κινητήρας του, κατασκευαζόταν ως τον 21 αιώνα. Ακολούθησε το παρόμοιο, αλλά πιο ελαφρύ S-76, που οι αποστολές του ήταν να εκτελεί γρήγορες πτήσεις και ακριβείς, ως μεταφορικό μέσο, για τραυματίες αλλά και άλλες δραστηριότητες. Κάποια από τα μοντέλα αυτά υπάρχουν ακόμα και σήμερα σε μουσεία σε διάφορες χώρες. [2]

Η εξέλιξη ήταν τόσο ραγδαία, με τα ηλεκτρονικά και μηχανικά μέρη των ελικοπτέρων να γίνονται όλο και πιο σύγχρονα και να φτάνουν σε ανώτερα επίπεδα σχεδίασης. Σε αυτόν τον τομέα, πολλές βιομηχανίες κατασκευής ελικοπτέρων έκαναν την εμφάνισή τους. Η Bell Corporation και η επιτυχία του Model-47, έκανε τους μηχανικούς της να δημιουργήσουν το UH-1 Huey, όπου η παραγωγή του ξεκίνησε το 1959. Το Bell 204, και το Huey-Cobra, ανήκαν στην σειρά UH-1. Ο τύπος αυτός συνέχισε να παράγεται μέχρι και το 1999, με κάποιες παραλλαγές όπως το AH-1W Super-Cobra. Το Bell 412 ήταν σχεδόν ίδιο με το 212, αλλά το πιο κοινό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1966 και έμεινε για πολλά χρόνια στην πρώτη γραμμή , ήταν το 206 Jet-Ranger. Από εκεί και πέρα το ελικόπτερο για πολιτική χρήση ήταν το Bell 427.[1]

### *2.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας ελικοπτέρου.*

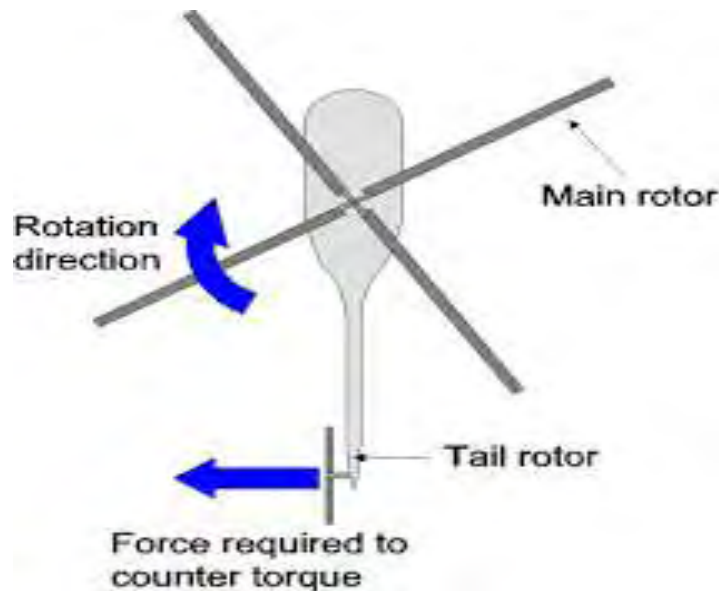
Τα ελικόπτερα πάνε παντού και με οποιεσδήποτε σχεδόν συνθήκες, μπορούν να αιωρηθούν, να ανέβουν κατακόρυφα, να κινηθούν αργά, να κάνουν όπισθεν, να στρίψουν επιτόπου, και μοιάζουν να είναι το πιο ικανό μέσο μεταφοράς που έχει επινοήσει ο άνθρωπος.

Είναι γεγονός, ότι το ελικόπτερο περιορίζεται σε ταχύτητα από αεροδυναμικά φαινόμενα στα στροφεία του, χρειάζεται σημαντικά μεγαλύτερη ισχύ από ένα αντίστοιχο αεροπλάνο, έχει πολύ μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, και επίσης κόστος απόκτησης, χρήσης και συντήρησης. Αεροδυναμικά είναι ένας εφιάλης αλληλοσυγκρουόμενων απαιτήσεων και συμβιβασμών, μηχανολογικά είναι «ζορισμένο» και πολύπλοκο, ενώ ποτέ δεν θα καταφέρει να απαλλαγεί εντελώς από κάποιους κραδασμούς και να πετάξει με τη «γλυκιά» αίσθηση ενός αεροπλάνου.

Επιπλέον, σε περίπτωση βλάβης του κινητήρα είναι πιο απαιτητικό στον χειρισμό του για να προσγειωθεί ομαλά απ' ότι ένα αεροπλάνο και τέλος, ακόμα και για τα ελαφρά ελικόπτερα δεν υπάρχει η δυνατότητα εφοδιασμού τους με βαλλιστικό αλεξίπτωτο για να αντιμετωπιστεί μια σοβαρή δομική αστοχία.

Πράγματι, όπως είναι φανερό, το ελικόπτερο αποκτά την άνωσή του από τη μεγάλη έλικα που περιστρέφεται οριζόντια από πάνω του (κύριο στροφείο). Ο κινητήρας όμως δεν ξέρει ότι η δουλειά του είναι να γυρίζει μόνο το στροφείο. Αυτό που ξέρει είναι ότι πρέπει να γυρίζει τον άξονά του σε σχέση με τον ίδιο, και φυσικά περισσότερο θα γυρίσει ότι προβάλλει μικρότερη αντίσταση.[3]

Επειδή όμως ο κινητήρας μαζί με το ελικόπτερο έχει πολύ μεγαλύτερη αδράνεια σε σχέση με το στροφείο και τους μηχανισμούς του, το τελευταίο θα περιστραφεί προφανώς πολύ περισσότερο, αλλά και ο κινητήρας μαζί με το ελικόπτερο θα θέλει να περιστραφεί (πολύ λιγότερο όμως), και μάλιστα αντίστροφα. Αυτό φυσικά θα πρέπει να αντιμετωπιστεί, και η συνηθέστερη μέθοδος είναι το ουραίο στροφείο, που ακριβώς αντισταθμίζει αυτή την αντίδραση ροπής του κινητήρα του ελικοπτερου.



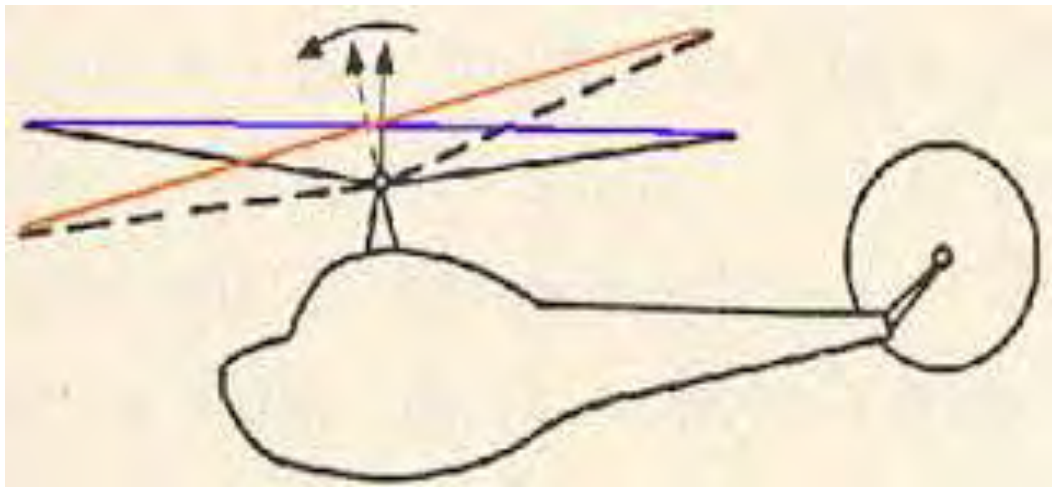
Σχήμα 2.1 Πώς το ουραίο στροφείο αντισταθμίζει τη ροπή του κινητήρα.

Πηγή: <https://2.bp.blogspot.com/-ez8ccC8ef6g/Vddb08RqoEI/AAAAAAAAAgU/Lie4wE5-3Dw/s1600/HELICO6.png>

Μάλιστα, το ουραίο στροφείο συνδέεται με άξονα με το κύριο στροφείο, ώστε να παίρνει κίνηση ακόμα και στην περίπτωση που ο κινητήρας σταματήσει. Στην τελευταία περίπτωση ο κινητήρας αποσυμπλέκεται αυτόματα από τα στροφεία για να μην τα φρενάρει, ώστε να εξακολουθούν να κινούνται με το ανοδικό ρεύμα του αέρα που δημιουργεί η (αναγκαστική πλέον) κάθοδος του ελικοπτερου.

Το πιο πολύπλοκο σύστημα όμως του ελικοπτερου είναι οι μηχανισμοί των αρθρώσεων των πτερύγων των στροφείων. Τα δύο στροφεία περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα σε όλο το φάσμα της πτήσης, και μπορούν να μεταβάλουν το βήμα τους (δηλαδή την κλίση των πτερυγίων τους) ομοιόμορφα αλλά ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, ενώ ειδικά το κύριο στροφείο

μπορεί να δώσει διαφορετικό βήμα στις πτέρυγές του κατά τη διάρκεια κάθε περιστροφής. Η πρώτη δυνατότητα καθορίζει την ανυψωτική δύναμη του ελικοπτέρου, και φυσικά πρέπει να συνδυαστεί με μεταβολή στο μοχλό του γκαζιού, ώστε να διατηρηθούν οι στροφές των στροφείων σταθερές. Η δεύτερη δυνατότητα είναι αυτή που καθορίζει την οριζόντια κίνηση του ελικοπτέρου, καθώς για να κινηθεί προς τα εμπρός πχ, τα πτερύγια του κύριου στροφείου πρέπει να έχουν μεγαλύτερο βήμα όταν περνούν από το πίσω τόξο, παρά από το εμπρός, και φυσικά αυτό πρέπει να γίνεται όπως προαναφέρθηκε σε κάθε περιστροφή τους.



Σχήμα 2.2 Πώς το ελικόπτερο κινείται προς τα εμπρός.

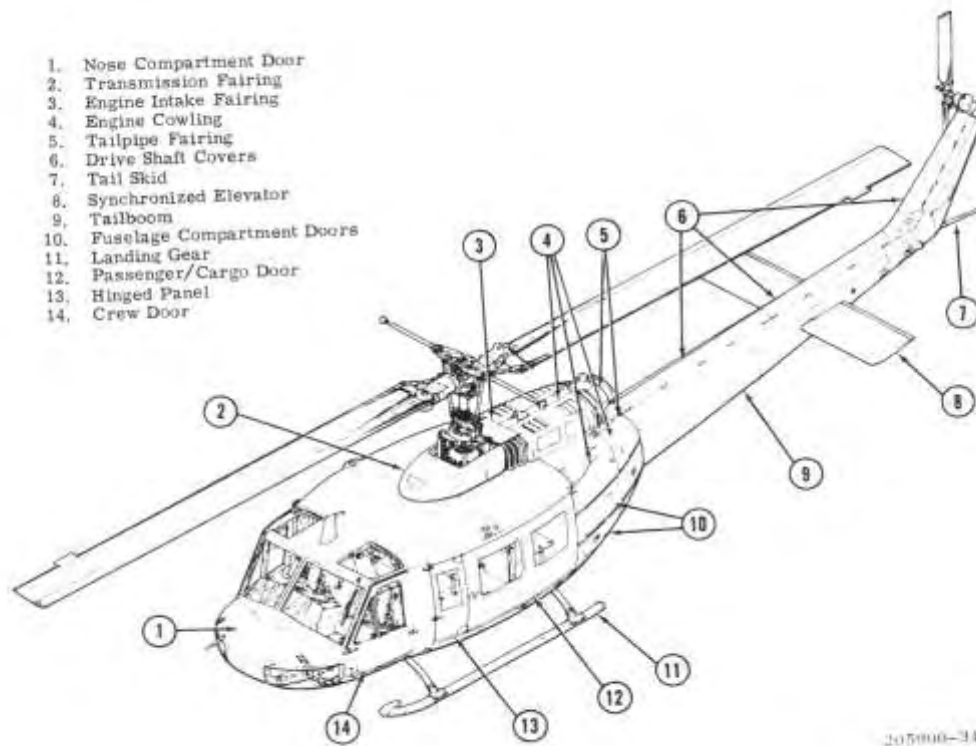
Πηγή: [https://1.bp.blogspot.com/-](https://1.bp.blogspot.com/-7qF5IHsqadE/VddCX3q2pdI/AAAAAAAAAgs/E5hILPboh1U/s320/HELICO3.jpg)

[7qF5IHsqadE/VddCX3q2pdI/AAAAAAAAAgs/E5hILPboh1U/s320/HELICO3.jpg](https://1.bp.blogspot.com/-7qF5IHsqadE/VddCX3q2pdI/AAAAAAAAAgs/E5hILPboh1U/s320/HELICO3.jpg)

Με αντίστοιχο τρόπο το ελικόπτερο παίρνει πλάγιες κλίσεις, που του επιτρέπουν να κινηθεί προς το πλάι (σε αιώρηση), ή να στρίψει όταν κινείται προς τα εμπρός. Το ελικόπτερο για να στρίψει πρέπει να πάρει κλίση όπως τα αεροπλάνα, το ουραίο στροφέιο μπορεί να το περιστρέψει πρακτικά μόνο σε αιώρηση.

Η δυνατότητα του ελικοπτέρου να πετάει σιγά και να απογειώνεται και προσγειώνεται κάθετα, κάνει πολλούς να νομίζουν ότι ο χειρισμός του είναι εύκολος όμως ισχύει ακριβώς το αντίθετο. Το ελικόπτερο από τη φύση του είναι ασταθές, και σε αντίθεση με το αεροπλάνο που όταν το ρυθμίσεις μπορεί να πετάει σταθερά χωρίς ο πιλότος να αγγίζει τα χειριστήρια, το ελικόπτερο απαιτεί συνεχείς μικροδιορθώσεις.[3]

Τα κύρια τμήματα ενός ελικοπτέρου, είναι τα εξής: Η άτρακτος, το κύριο στροφέιο, ο κινητήρας, το στροφέιο ουράς (όταν υπάρχει), το σύστημα προσγείωσης, το οποίο διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του ελικοπτέρου και τον ρόλο του, το σύστημα μεταφοράς κίνησης και το σύστημα ελέγχου πτήσης.[4]



Σχήμα 2.3 Κύρια μέρη ελικοπτέρου

Πηγή: <http://www.huey.co.uk/images/servicebook/Model%20205A-1%20Helicopter%205-2.jpg>

### 2.1.2 Το ελικόπτερο Bell Huey II.

Πρόκειται για το πλέον επιτυχημένο στρατιωτικό ελικόπτερο στον κόσμο, καθώς κατασκευάστηκε σε τεράστιους αριθμούς και χρησιμοποιήθηκε από τον στρατό 48 και πλέον χωρών.

Η μαζική παραγωγή του UH-1H για τον στρατό των ΗΠΑ ξεκίνησε το 1967 και μέχρι τη λήξη της γραμμής παραγωγής το 1982 κατασκευάστηκαν περίπου 5.500 ελικόπτερα μονάχα εντός των Ηνωμένων Πολιτειών. Η αντίστροφη μέτρηση για τον συγκεκριμένο τύπο ξεκίνησε το 2004, όταν ο αμερικανικός στρατός ξεκίνησε την ταχεία εφαρμογή προγράμματος γενικής απόσυρσης. Η Ελλάδα ξεκίνησε την παραλαβή των ελικοπτέρων UH-1 το 1969, η οποία ολοκληρώθηκε το 1981. Ο στόλος της Αεροπορίας Στρατού, με την παραλαβή μερικών ακόμα μεταχειρισμένων από τον αμερικανικό στρατό το 1993, έφθασε να αριθμεί περίπου 100 ελικόπτερα του τύπου όμως σήμερα σχεδόν τα μισά μπορούν να θεωρηθούν επιχειρησιακώς διαθέσιμα. Ο δείκτης ατυχημάτων για τα Huey παραμένει στα χαμηλά επίπεδα του 0,07, δηλαδή σε ένα μείζον ατύχημα ανά 62.500 ώρες πτήσης.

Το UH-1 ήταν το πρώτο στροβιλοκινητήριο ελικόπτερο που μπήκε στην παραγωγή για το στρατό των Ηνωμένων Πολιτειών. Τροφοδοτείται από ένα κινητήρα turboshaft, με κύριο στροφείο δύο πτερυγίων και ουραίο στροφείο.

Το UH-1 Huey II, αποτελεί την νεότερη βελτιωμένη έκδοση των UH-1. Με τον εκσυγχρονισμό αυτό, προτάθηκε η επιχειρησιακή ζωή του ελικοπτέρου να επεκτείνεται στα 25 χρόνια, ενώ ταυτόχρονα επιτεύχθηκε η μείωση του λειτουργικού κόστους κατά 50%, υποτριπλασιασμός των εργατοωρών συντήρησης και βελτίωση των επιδόσεων, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η έκδοση UH-1 Huey II διατηρεί όλα τα συστήματα/υποσυστήματα του ελικοπτέρου, όπως το σύστημα καυσίμων, ενώ εισάγει σειρά βελτιώσεων, όπως η αντικατάσταση της πλήμνης και των πτερυγίων του κύριου στροφείου με τα μεγαλύτερα και αποδοτικότερα της Bell 212, η αντικατάσταση του προωστικού ουραίου στροφείου με ελκτική μονάδα μεγαλύτερης ισχύος, η ενσωμάτωση του συστήματος μετάδοσης κίνησης και του ουραίου του Bell 212, η μετατροπή του κινητήρα Honeywell T53-13B στο επίπεδο -703, η αναβάθμιση του συστήματος μετάδοσης κίνησης κ.ά. Έτσι, η αναβαθμισμένη έκδοση, με σαράντα ώρες πτήσης μηνιαίως κάνει απόσβεση του κόστους της σε πέντε χρόνια.[15]

Το συγκεκριμένο ελικόπτερο, ελέγχεται από έναν έως δύο πιλότους, ενώ μπορεί να μεταφέρει πλήρωμα έως και δεκατεσσάρων ατόμων. Το μέγιστο εξωτερικό βάρος του ανέρχεται στα 5,080 Kg, ενώ έχει τη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου 2,210 kg. Κάθε πτέρυγα μπορεί να αντέξει εγκάρσιο (κατακόρυφο) φορτίο τουλάχιστον 2540 kg, με τις πτέρυγες του ελικοπτέρου να είναι δύο.[5]



Σχήμα 2.4 Φωτογραφία ελικοπτέρου Bell Huey II

Πηγή: <http://www.airliners.net/photo/Dominican-Republic-Air-Force/Bell-UH-1H-Huey-II-%28205%29/738569>

### 2.1.3 Τεχνικά δεδομένα του ελικοπτέρου Bell Huey II.

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες όπου αναγράφονται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου ελικοπτέρου.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1**

Weights	kg
Empty Weight (VFR Std Config.)	2,552
Max Gross Weight (Internal)	4,763
Max Gross Weight (External)	5,080
Useful Load (Internal, VFR Std Config.)	2,210
Cargo Hook Capacity	2,268

*Πηγή: Bell Huey II Production Specification, © Bell Helicopter Textron Inc. , February 2013*

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2**

Max Continuous Power (kW)	846
Fuel Type	Aviation Turbine
Capacity (Usable)	799 liters

*Πηγή: Bell Huey II Production Specification, © Bell Helicopter Textron Inc. , February 2013*



## 2.2 Η ροή γύρω από μια αεροτομή και η μηχανική της πτήσης.

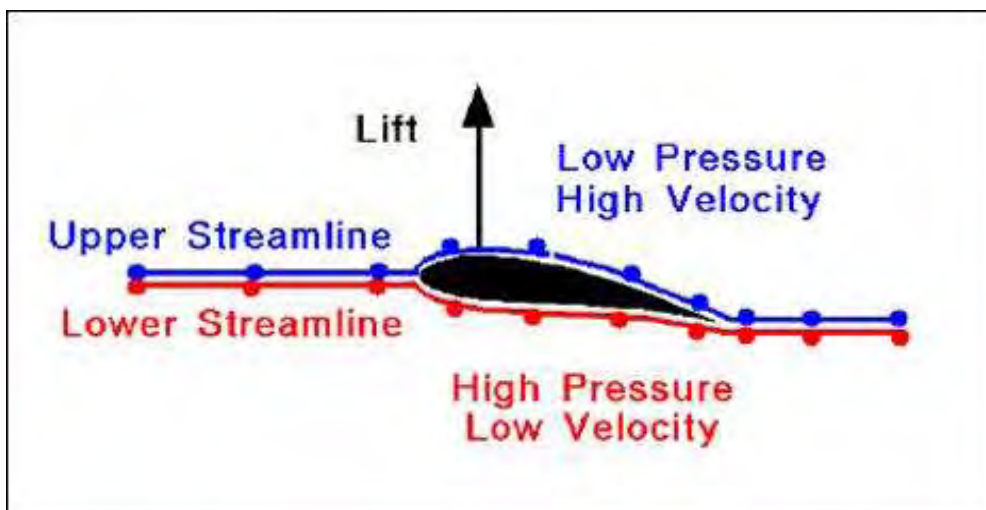
Σήμερα το ελικόπτερο θεωρείται ένα από τα πιο σύγχρονα μέσα μεταφοράς, με ταχύτητες που κυμαίνονται από 220-250 χλμ./ώρα. Για τα στρατιωτικά ελικόπτερα ειδικά οι ταχύτητες φτάνουν τα 330-370 χλμ./ώρα. Οι ταχύτητες αυτές, αν και είναι μικρές σε σχέση με εκείνες των αεροπλάνων, δημιουργούν σημαντικές μεταβολές πίεσης και ροής του αέρα στα άκρα των πτερυγίων. Σε αυτές οφείλεται κατά κύριο λόγο ο θόρυβος που προκαλεί το ελικόπτερο, η αντιμετώπιση και ο περιορισμός του οποίου αποτελούν ακόμα και στις μέρες μας αντικείμενο μελέτης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά ο παραπάνω μηχανισμός από αεροδυναμική σκοπιά. [6]

Αεροδυναμικά σώματα, θεωρούνται εκείνα τα σώματα που κινούνται μέσα σε ένα ρευστό εξασκώντας μικρή αντίσταση. Με άλλα λόγια θεωρούνται τα σώματα εκείνα όπου η κάθετη διάσταση στη διεύθυνση κίνησης καταλαμβάνει μικρό ποσοστό σε σχέση με τη διάσταση που βρίσκεται παράλληλα στη ροή. Σε αυτά τα σώματα η δυναμική άνωση είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίσταση. Γενικότερα ένα σώμα θεωρείται αεροδυναμικό όταν ο λόγος της κάθετης διεύθυνσής του στη κίνηση (πάχος- $t$ ) ως προς τη παράλληλη διεύθυνσή του (χορδή- $c$ ) είναι  $t/c \leq 0.3$ .

Στις πτέρυγες των αεροσκαφών μας ενδιαφέρουν ταυτόχρονα δύο πράγματα: πρώτον η όσο το δυνατόν μικρότερη παραμόρφωση της ροής και δεύτερον, η απόκτηση της μέγιστης δυναμικής άνωσης του φορτίου μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού των πτερυγίων.

Λόγω του σχήματος των αεροτομών η ταχύτητα αέρα πάνω από αυτές είναι αυξημένη και η ταχύτητα αέρα κάτω από αυτές είναι μειωμένη, με αποτέλεσμα να δημιουργείται διαφορά πιέσεων που εξηγείται με το νόμο Bernoulli. Ουσιαστικά η άνωση είναι η διαφορά πιέσεων μεταξύ της κάτω και της πάνω πτέρυγας.

$$\text{Νόμος Bernoulli: } \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 + P_{\infty} = \frac{1}{2} \rho U_1^2 + P_1 \quad (2.1)$$

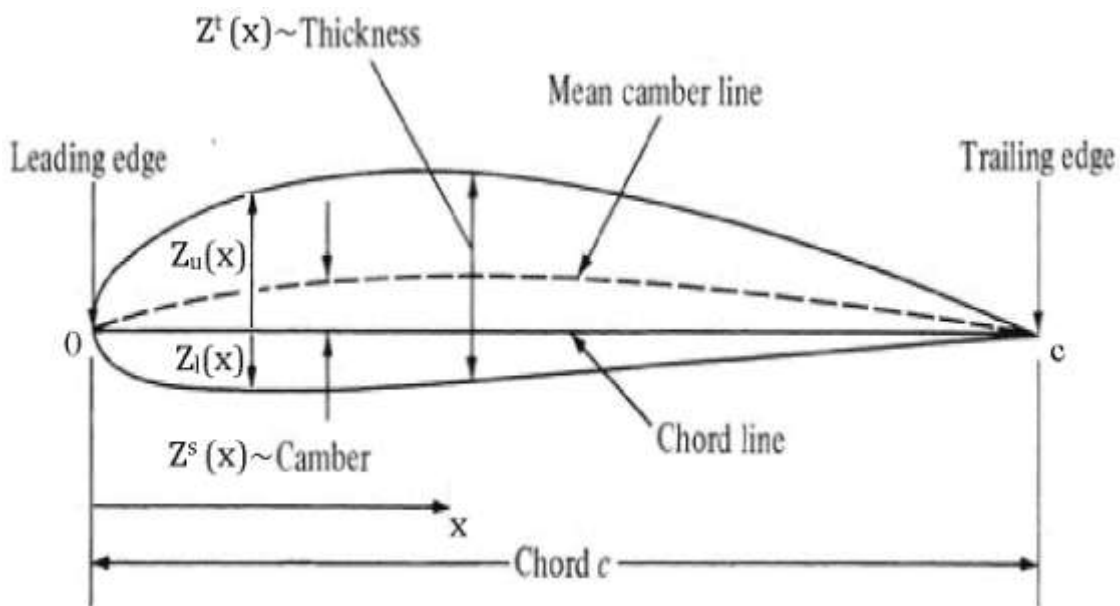


Σχήμα 2.5 Γραφική απεικόνιση των ροϊκών γραμμών γύρω από μια πτέρυγα.

Πηγή: [http://www.ae.utexas.edu/courses/ase463q/design\\_pages/spring03/active\\_wing/ATAK%20Technologies%20Website/Final%20Report/Web%20Theory.htm](http://www.ae.utexas.edu/courses/ase463q/design_pages/spring03/active_wing/ATAK%20Technologies%20Website/Final%20Report/Web%20Theory.htm)

Για υποηχητικές πτέρυγες οι αεροτομές είναι στρογγυλεμένες μπροστά και έχουν οξείες ακμές πίσω. Με τη πρόσδοση πάχους στην αεροτομή και με το στρογγύλευμα της ακμής προσβολής η ροή διατηρείται προσκολλημένη για μεγαλύτερες γωνίες προσβολής και η δυναμική άνωση αυξάνει κατά κόρον. Με την πρόσδοση κυρτότητας δημιουργείται μια μη συμμετρική αεροτομή με επίσης αυξημένη δυναμική άνωση. Φυσικά υπερβολικά παχιές αεροτομές φέρνουν αντίθετο αποτέλεσμα, όπως αύξηση της αντίστασης, δηλαδή αύξηση σε προωθητική δύναμη και κόστος πρόωσης.[7]

Η ονοματολογία των αεροτομών μας δείχνει τα χαρακτηριστικά τους, όπως φαίνεται από το σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.6 Γραφική απεικόνιση των κυρίων χαρακτηριστικών των αεροτομών.  
 Πηγή: <https://www.studyblue.com/notes/note/n/exam-1/deck/4158747>

Αναλυτικότερα, η διανομή πάχους δίνεται από τη σχέση:

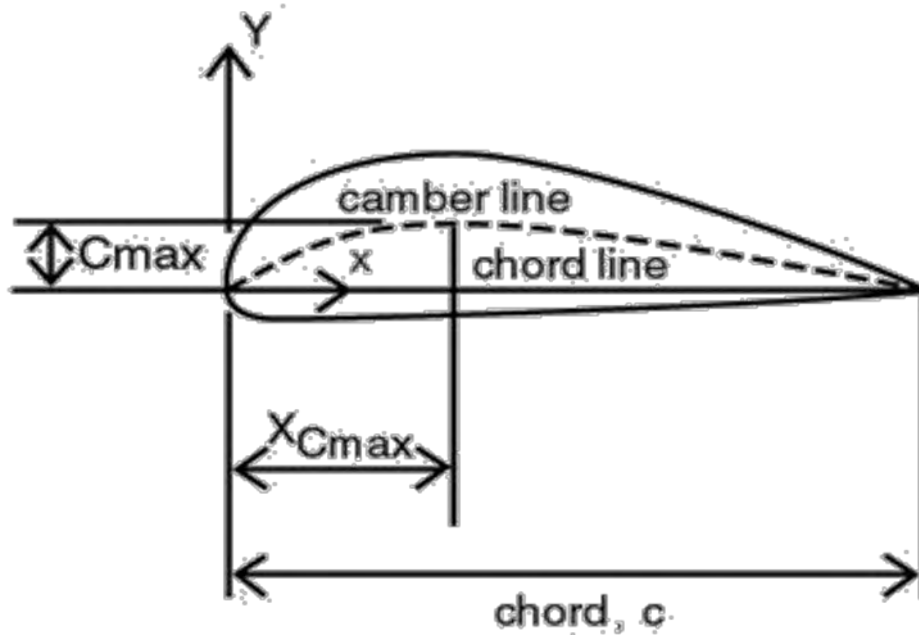
$$Z^t(x) = (Z_u - Z_l) \quad (2.2)$$

Η διανομή κυρτότητας δίνεται από τη σχέση:

$$Z^s(x) = (Z_u + Z_l)/2 \quad (2.3)$$

όπου  $Z_u$ ,  $Z_l$  είναι οι συντεταγμένες της πάνω (upper) και κάτω (lower) επιφάνειας της αεροτομής.

Χορδή ονομάζεται η ευθεία γραμμή που ενώνει το κέντρο καμπυλότητας της μύτης της αεροτομής με την οξεία ακμή φυγής. Εκεί όπου η χορδή τέμνει τη μύτη λέγεται ακμή προσβολής.



Σχήμα 2.7 Η αεροτομή και τα βασικά της χαρακτηριστικά.  
 Πηγή: <http://www.akti.ca/NACA4Bkgrnd.html>

Αρχικά οι αεροτομές ήταν εξαιρετικά λεπτές και με μεγάλη κυρτότητα, μιμούμενες τα φτερά των πουλιών. Οι συγκεκριμένες αεροτομές ήταν κατάλληλες για χαμηλές ταχύτητες. Οι πρώτες αεροτομές παρουσιάστηκαν από τους Lilienthal (1889) και Eiffel (1910). Ακολούθησαν οι αδερφοί Wright, των οποίων οι αεροτομές εξακολουθούσαν να είναι λεπτές και κυρτές. Κατά το 1921-1925 αναπτύχθηκαν οι αεροτομές Gottingen με σημαντικότερη την Go-535, καθώς και οι Clark-Y και Raf-34.

Καθοριστικό παράγοντα στην εξέλιξη των αεροτομών αποτέλεσε η θεωρία των αεροτομών Joukowski με τη χρήση του σύμμορφου μετασχηματισμού.[6]

Με την εφαρμογή του σύμμορφου μετασχηματισμού επιτράπηκε η μελέτη της επίδρασης του πάχους της αεροτομής και της μέσης γραμμής στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά όπως αυτά εκφράζονται με τους συντελεστές άνωσης:

$$C_L = 2L / \rho U_\infty^2 S \quad (2.4)$$

και ροπής:

$$C_M = 2M / \rho U_\infty^2 S c \quad (2.5)$$

όπου  $S$ , span ή εκπέτασμα της αεροτομής:

$$S = bc \quad (2.6)$$

Συστηματοποίηση των γνώσεων πάνω στις αεροτομές αποτέλεσε η σειρά NACA 4 ψηφίων που παρουσιάστηκε το 1913. Στη σειρά αυτή το μέγιστο πάχος της αεροτομής βρίσκεται στο 30% της χορδής, η δε μέση γραμμή αποτελείται από δύο παραβολές με κοινή εφαπτόμενη στο σημείο τομής τους. Παράμετροι που καθορίζουν μονοσήμαντα την αεροτομή είναι η θέση της μέγιστης κυρτότητας, η μέγιστη κυρτότητα της μέσης γραμμής καθώς και το μέγιστο πάχος της αεροτομής. Η γνωστότερη αεροτομή της οικογένειας αυτής είναι η 4412.

Τα ψηφία 4412 υποδηλώνουν:

$$h/c = 0.04, \quad x_h/c = 0.4, \quad t/c = 0.12 = \delta_{\max}$$

Δηλαδή, το μέγιστο ύψος αποτελεί το 4% και βρίσκεται στο 40% της χορδής με το ύψος να αποτελεί το 12% και να βρίσκεται στο 30% της χορδής.[6]

Εμείς, στη παρούσα εργασία θα μελετήσουμε πτέρυγα NACA 0012, το οποίο δείχνει συμμετρική πτέρυγα με  $t/c = 0.12$ .

Με τη πάροδο του χρόνου οι αεροτομές NACA βελτιώθηκαν σε 5 και σε 6 ψηφία. Οι αεροτομές NACA με 5 ψηφία έχουν τη θέση της μέγιστης κυρτότητας της μέσης γραμμής όσο το δυνατό πιο μπροστά ούτως ώστε να αυξηθεί ο μέγιστος συντελεστής άνωσης της αεροτομής. Η διανομή του πάχους παρέμεινε η ίδια. Για το ίδιο πάχος και κυρτότητα η αεροτομή 5 ψηφίων έχει έως και 20% μεγαλύτερο συντελεστή άνωσης σχετικά με την αεροτομή των 4 ψηφίων. Η πιο γνωστή αεροτομή της σειράς 5 ψηφίων είναι η αεροτομή NACA 23012.

Οι διατομές NACA 6 ψηφίων σχεδιάστηκαν με τρόπο ώστε να διατηρείται κατά το δυνατό στρωτή ροή γύρω από την αεροτομή. Ταυτόχρονα επιτυγχάνεται χαμηλή αντίσταση και αυξημένος κρίσιμος αριθμός Mach. Οι συγκεκριμένες αεροτομές έχουν μεταφέρει το μέγιστο πάχος τους λίγο πιο πίσω ούτως ώστε να υπάρχει δεδομένη κατανομή πίεσης με σκοπό τη καθυστέρηση της μετάβασης από τη στρωτή στη τυρβώδη ροή.

Η άνωση δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S C_L \quad [\text{N}] \quad (2.7)$$

και η οπισθέλκουσα δύναμη από τη σχέση:

$$D = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S C_D \quad [\text{N}] \quad (2.8)$$

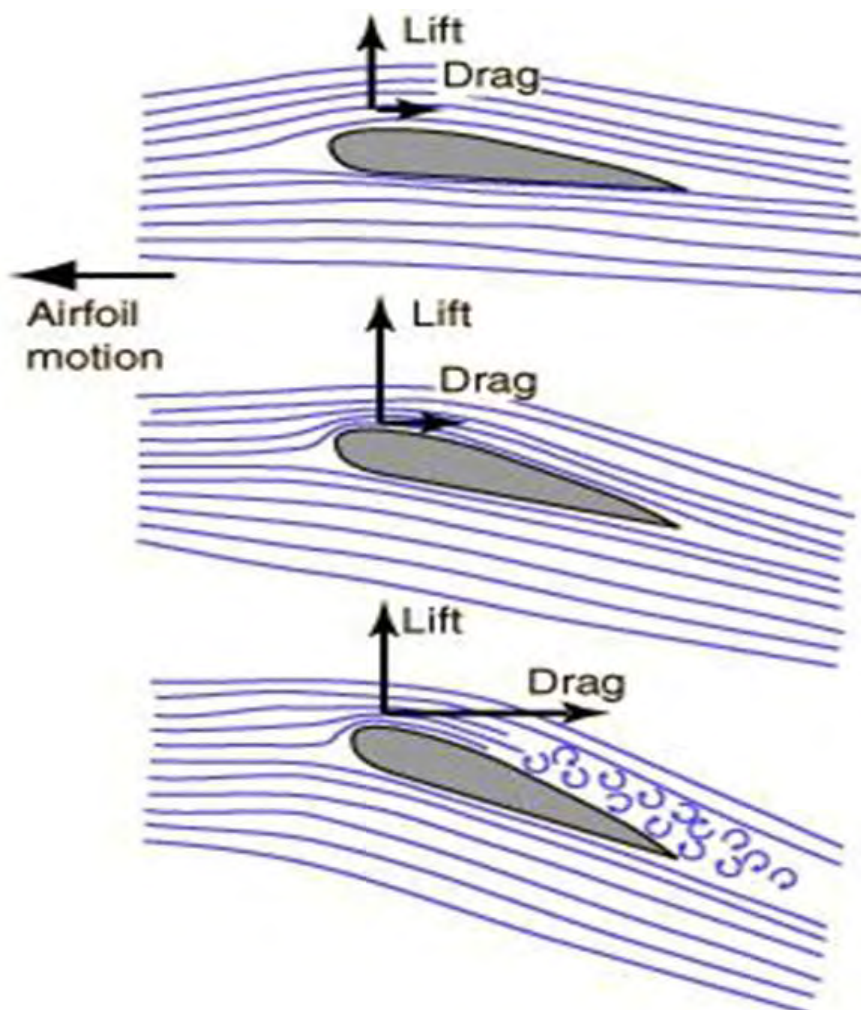
Τα μεγέθη  $C_L$ ,  $C_D$  ονομάζονται συντελεστές δυναμικής άνωσης και αντίστασης αντίστοιχα και είναι αδιάστατοι. Είναι συναρτήσεις της γεωμετρίας της πτέρυγας και των χαρακτηριστικών της ροής.

$C_L = f(\alpha, AR, Re, M, k, U_1^2, L_f)$  , όπου  $\alpha$  = γωνία προσβολής,  $AR$  = διάταμα ( $b/c$ ),  $Re$  = αριθμός Reynolds ,  $M$  = αριθμός Mach ,  $k$  = τραχύτητα της επιφάνειας,  $U_1^2$  = ένταση της τύρβης ,  $L_f$  = διαμήκης ή εγκάρσια ολοκληρωτική κλίμακα της τύρβης.

Ο αριθμός Reynolds ισούται με  $U_\infty c/\nu$  όπου  $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα,  $\mu/\rho$ . Γενικά προτιμούνται μεγάλοι αριθμοί Reynolds διότι τα οριακά στρώματα είναι πιο λεπτά και πλησιάζουν τα θεωρητικά στρώματα, διατηρώντας τα προσκολλημένα, για περισσότερο καιρό σε μεγαλύτερες γωνίες προσβολής, αυξάνοντας το συντελεστή δυναμικής άνωσης.

Για μικρές γωνίες προσβολής  $\alpha \ll 1$  rad και λεπτή συμμετρική αεροτομή ο συντελεστής δυναμικής άνωσης γίνεται:

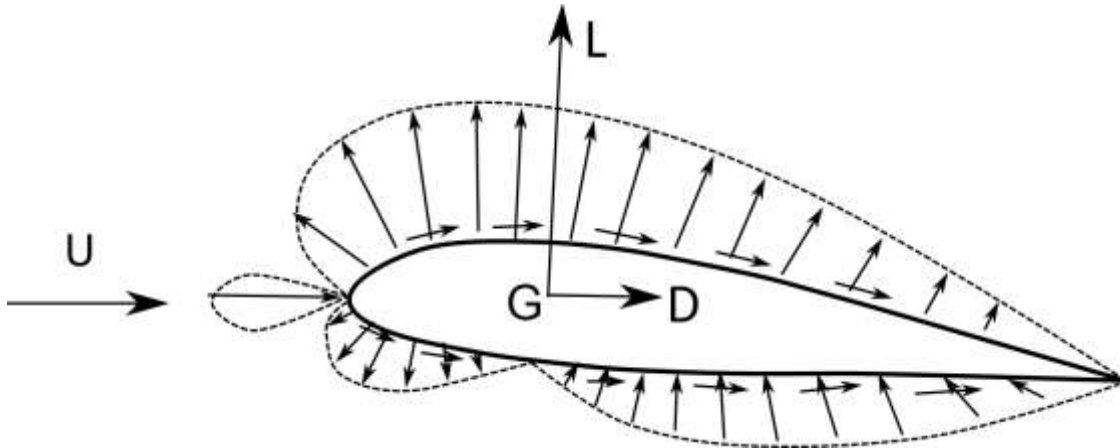
$$C_L = 2\pi\alpha \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.8 Γραφική απεικόνιση των ροϊκών γραμμών και μεγέθους άνωσης και αντίστασης σε διαφορετικές ακτίνες προσβολής.

Πηγή: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/pber.html>

Το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων L,D λέγεται κέντρο πίεσης G και μπορεί να κείται εκτός χορδής.[7]



Σχήμα 2.9 Απεικόνιση της διανομής πίεσης και του κέντρου πίεσης.

Πηγή: [http://repfiles.kallipos.gr/html\\_books/3395/00\\_master\\_document.html](http://repfiles.kallipos.gr/html_books/3395/00_master_document.html)

Ο συντελεστής πίεσης:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{Q} \quad (2.10)$$

όπου  $p_\infty$ , η ατμοσφαιρική πίεση και Q η δυναμική πίεση, η οποία ορίζεται ως:

$$Q = \rho \frac{V^2}{2} \left[ \frac{N}{m^2} = Pa \right] \quad (2.11)$$

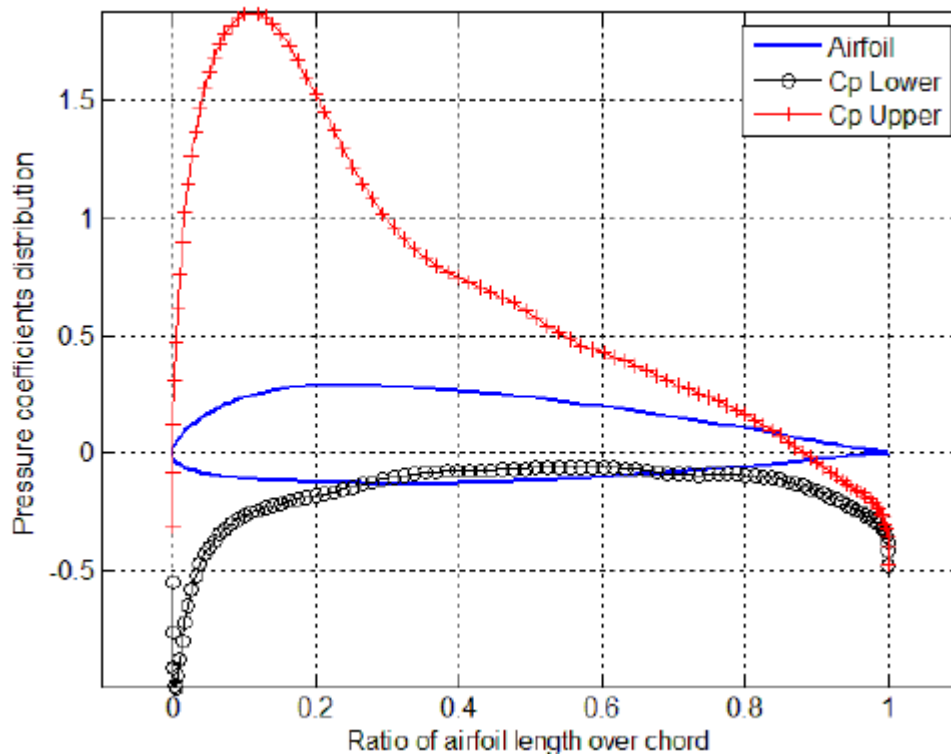
Η ροπή M είναι θετική όταν τείνει να περιστρέψει ένα σημείο ωρολογιακά και ορίζεται ως:

$$M = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S c C_M \quad [Nm] \quad (2.12)$$

Όπου  $C_M$  ορίζεται ο συντελεστής ροπής.

Η διανομή των πιέσεων για μικρές γωνίες προσβολής δείχνει ότι υπάρχει υπερπίεση κάτω από τη μύτη και υποπίεση πάνω από τη μύτη της πτέρυγας. Σε πολύ μικρές γωνίες προσβολής οι δυνάμεις πάνω και κάτω της επιφάνειας της αεροτομής αλληλοαναιρούνται λόγω του τρόπου που διανέμονται οι πιέσεις. Επομένως το κέντρο πίεσης G βρίσκεται στο άπειρο, όμως ο συντελεστής ροπής  $C_M$  δεν είναι αναγκαστικά μηδενικός.

Ονομάζουμε αεροδυναμικό κέντρο A.C. το σημείο πάνω στη χορδή, στο οποίο η ροπή M είναι πάντα σταθερή και ανεξάρτητη από τις ποσότητες L, D,  $\alpha$ . Σε υποηχητική ροή το αεροδυναμικό κέντρο είναι το σημείο  $c/4$ , ενώ σε συμμετρικές πτέρυγες όπως αυτή που μελετάμε, το αεροδυναμικό κέντρο συμπίπτει με το κέντρο πίεσης.[8]



Σχήμα 2.10 Απεικόνιση των συντελεστών πίεσης κα δυναμικής άνωσης σε διάγραμμα αδιαστοποιημένων συντεταγμένων μιας πτέρυγας.

Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/228531008\\_fig1\\_Figure-9-Pressure-coefficient-distribution-for-the-baseline-airfoil-geometry](https://www.researchgate.net/figure/228531008_fig1_Figure-9-Pressure-coefficient-distribution-for-the-baseline-airfoil-geometry)

### 2.3 Χαρακτηριστικά της πτέρυγας.

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ: 7 m  
 ΕΝΕΡΓΟ ΜΗΚΟΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ: 6,70 m  
 ΧΟΡΔΗ, c: 0,53 m  
 ΠΑΧΟΣ, t: 0,065 m

$$t/c = 0,065 / 0,53 = 0,12 \quad (2.13)$$

Προκύπτει συμμετρική αεροτομή NACA 0012. Τα δύο πρώτα ψηφία δείχνουν την καμπυλότητα του προφίλ όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μηδενικά και η πτέρυγα προκύπτει συμμετρική. Τα δύο τελευταία ψηφία δείχνουν ότι η αναλογία του μέγιστου πάχους της αεροτομής με το μήκος της χορδής είναι 12% (TOC = 0,12). Η NACA-0012 είναι μια κοινή δοκιμή στην υπολογιστική ρευστοδυναμική.[9]

$$A.R. = b/c \sim 13 \quad (2.14)$$

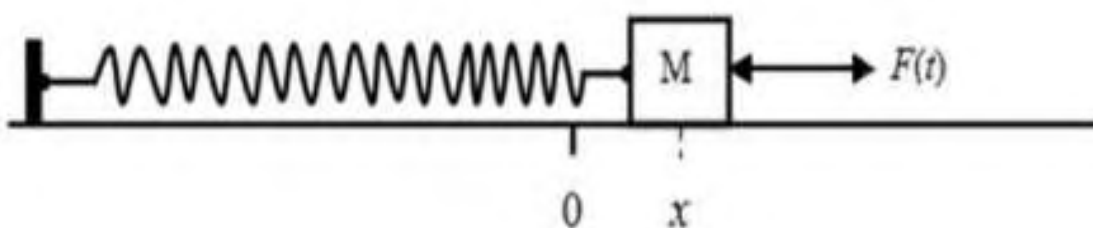
$$A.C. = c/4 = 0,1325m \quad (2.15)$$

Εσωτερικά της πτέρυγας, υπάρχει γέμιση από κυψελώδες εξαγωνικό πλέγμα για απορρόφηση των κραδασμών καθώς και για αύξηση του παράγοντα απόσβεσης σε συνδυασμό με τη βελτίωση της δυσκαμψίας.[10]

## 2.4 Βασικές αρχές θεωρίας Ταλαντώσεων.

Όταν σε ένα σώμα επιδρά δύναμη της μορφής  $F = - Dx$  τότε το σώμα εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση. Ως απλή αρμονική ταλάντωση ονομάζεται η ταλάντωση κατά την οποία η τροχιά είναι ευθύγραμμη και η απομάκρυνση του κινητού από τη θέση ισορροπίας του είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου.

Παραδείγματα απλού αρμονικού ταλαντωτή είναι το σύστημα ιδανικού ελατηρίου - μάζας και το απλό εκκρεμές για μικρές γωνίες εκτροπής, με την προϋπόθεση και για τα δύο παραδείγματα ότι δεν υπάρχουν απώλειες μηχανικής ενέργειας, όπως λόγω τριβών.



Σχήμα 2.11 Απλός αρμονικός ταλαντωτής.

Πηγή: <http://physiclessons.blogspot.gr/2012/02/1.html>

Περίοδος ονομάζεται το χρονικό διάστημα που χρειάζεται, για να ολοκληρωθεί μία επανάληψη του φαινομένου. Συμβολίζεται με  $T$  και μετριέται σε  $s$  (δευτερόλεπτα). Εξ' ορισμού προκύπτει ότι:

$$T = \Delta t / N, \quad (2.16)$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$ .

Συχνότητα ονομάζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των επαναλήψεων διά του χρονικού διαστήματος στο οποίο μετρήσαμε. Συμβολίζεται με  $f$  και μετριέται σε δευτερόλεπτα εις τη μείον ένα ή  $s^{-1}$ , ή Hz. Έτσι, ισχύει:

$$f = N / \Delta t, \quad (2.17)$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$ .

Η συχνότητα είναι αντίστροφο μέγεθος της περιόδου και ισχύει:

$$f = 1/T \quad (2.18)$$

Κυκλική συχνότητα ονομάζεται το φυσικό μέγεθος το οποίο συνδέεται με την συχνότητα με την σχέση:

$$\omega = 2\pi f, \quad (2.19)$$



Αν και η έννοια της συχνότητας είναι πιο πρακτική, δεν περιέχει καμία πληροφορία για τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται μια περιοδική κίνηση κατά την διάρκεια μιας περιόδου. Όταν ένα περιοδικό φαινόμενο εκτελείται με σταθερή κυκλική συχνότητα σε ολόκληρη την διάρκεια μιας περιόδου, τότε είναι αυτό που λέμε αρμονική ταλάντωση. Η μονάδα της είναι το rad/s, οι φυσικές διαστάσεις της οποίας είναι  $s^{-1}$ , όπως ακριβώς και της συχνότητας  $f$ , κάτι το οποίο συχνά αποτελεί αιτία σύγχυσης. Έτσι, όταν αναφερόμαστε στην συχνότητα  $f$ , χρησιμοποιούμε ως μονάδα το Herz με τις ίδιες φυσικές διαστάσεις.[11]

Σχεδόν όλα τα σώματα τείνουν να δονούνται κατά κύριο λόγο σε συγκεκριμένη συχνότητα (ή συχνότητες) όταν τα χτυπάμε, τα τρίβουμε, τα τεντώνουμε και τ' αφήνουμε απότομα, τα διαταράσσουμε ξαφνικά κλπ. Οι συχνότητες αυτές καλούνται φυσικές συχνότητες ή ιδιοσυχνότητες των συγκεκριμένων αντικειμένων.

Ιδιοσυχνότητα ενός ταλαντωτή ονομάζεται η συχνότητα που πρέπει να ταλαντώνεται ο ταλαντωτής έτσι ώστε, να παρουσιάζει την ελάχιστη απόσβεση κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Θεωρητικά οι ταλαντώσεις που εκτελούν τα διάφορα σώματα όπως π.χ. ο απλός αρμονικός ταλαντωτής δεν παρουσιάζουν εξασθένιση/απόσβεση και διατηρούν το πλάτος ταλάντωσής τους σταθερό. Στην πραγματικότητα αυτό δεν συμβαίνει αλλά παρουσιάζουν μικρή ή μεγαλύτερη απόσβεση με αποτέλεσμα να χρειάζεται να τους δίνουμε τακτικά ενέργεια ίση με αυτή που έχασαν για να διατηρούν σταθερό το πλάτος τους κατά το πέρασμα του χρόνου.

Η συχνότητα με την οποία πρέπει να δίνουμε ενέργεια ονομάζεται ιδιοσυχνότητα και ισούται με:

$$f_0 = (1/2\pi) * \nu(D/m) \quad (2.20)$$

όπου  $D$  η σταθερά της ταλάντωσης και  $m$  η μάζα του σώματος που ταλαντώνεται.

Στην πιο απλή περίπτωση όπου ο ταλαντωτής αποτελείται από ένα ελατήριο σταθεράς  $k$  και μια μάζα  $m$  που ταλαντώνεται, η συχνότητα (σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο) με την οποία πρέπει να ταλαντώνεται ο ταλαντωτής έτσι ώστε να διατηρεί σταθερό το πλάτος του ισούται με:

$$f_0 = (1/2\pi) * \sqrt{(k/m)} \quad (2.21)$$

όπου  $k$  η σταθερά του ελατηρίου και  $m$  η μάζα του σώματος που ταλαντώνεται.

Για να είναι μια δύναμη κατάλληλη να συντηρήσει μια ταλάντωση, θα πρέπει να τείνει να κρατήσει το σύστημα σε μια θέση ισορροπίας, οπότε θα πρέπει να είναι αντίθετη προς την απομάκρυνση από την θέση αυτή και όσο αυξάνεται η

απομάκρυνση, τόσο να αυξάνεται και το μέτρο της δύναμης. Τέτοια χαρακτηριστικά διαθέτει η δύναμη ενός ελατηρίου  $F(x) = -kx$ , η οποία, σε συνδυασμό με τον 2ο νόμο του Νεύτωνα για την κίνηση δίνει:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -kx(t) \quad (2.22)$$

ή

$$x''(t) + \omega_0^2 x(t) = 0 \quad (2.23)$$

όπου:

$$\omega_0^2 = k/m \quad (2.24)$$

και η γενική λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας συναρτήσει του χρόνου είναι

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2.25)$$

όπου  $A$  το πλάτος της ταλάντωσης και  $\varphi_0$  η αρχική φάση που εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες.

Το πλάτος είναι το μέγεθος που διαταράσσεται και λαμβάνει μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή. Είναι αδύνατον να διαταράσσεται περιοδικά ένα μέγεθος, δηλαδή να είναι περιοδικό φαινόμενο, χωρίς να λαμβάνει μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή. Θεωρώντας ως μηδέν το σημείο όπου μηδενίζεται η δύναμη που συντηρεί την ταλάντωση, μετράμε ως πλάτος την μέγιστη απομάκρυνση από αυτό το σημείο, ως θετικά ορισμένη ποσότητα. Σε συμμετρικές ταλαντώσεις η μέγιστη θετική και η μέγιστη αρνητική απομάκρυνση είναι ίσες. Αυτή η απόλυτη τιμή της μέγιστης απομάκρυνσης ονομάζεται πλάτος της ταλάντωσης και μετριέται στις κατάλληλες μονάδες, ανάλογα με την φύση της ποσότητας που μεταβάλλεται. Το πλάτος μιας ταλάντωσης δεν είναι πάντα σταθερό αλλά μπορεί να εξαρτάται, όπως και η φάση, από το χρόνο και άλλα μηχανικά στοιχεία του συστήματος.[12]

Κατά τη μελέτη των ταλαντώσεων αποδείχθηκε ότι η φάση είναι βασικό μέγεθος αυτής της συνάρτησης και μετριέται όπως και οι γωνίες σε rad (ακτίνια).

Συνηθως μια ταλάντωση που περιγράφεται (προσεγγιστικά) από την εξίσωση:

$$a(t) = A \sin \varphi(t) \quad (2.26)$$

όπου  $\varphi(t)$  η συνάρτηση της φάσης συναρτήσει της στιγμής  $t$  και  $a(t)$  το μέγεθος που διαταράσσεται.

Η φάση στις ταλαντώσεις εξαρτάται από το χρόνο για τον οποίο μελετάμε και συνήθως είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή της μορφής:

$$\varphi(t) = \omega t \quad (2.27)$$

οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.28)$$

όπου η  $\varphi_0$  αποτελεί την αρχική φάση, η οποία εξαρτάται από το σημείο αρχής μέτρησης του χρόνου. Αν έχουμε να κάνουμε με μία μόνο ταλάντωση, τότε επιλέγουμε την αρχή μέτρησης του χρόνου έτσι ώστε να είναι  $\varphi_0=0$ . Συχνά ως φάση αναφέρεται η αρχική φάση.[11]

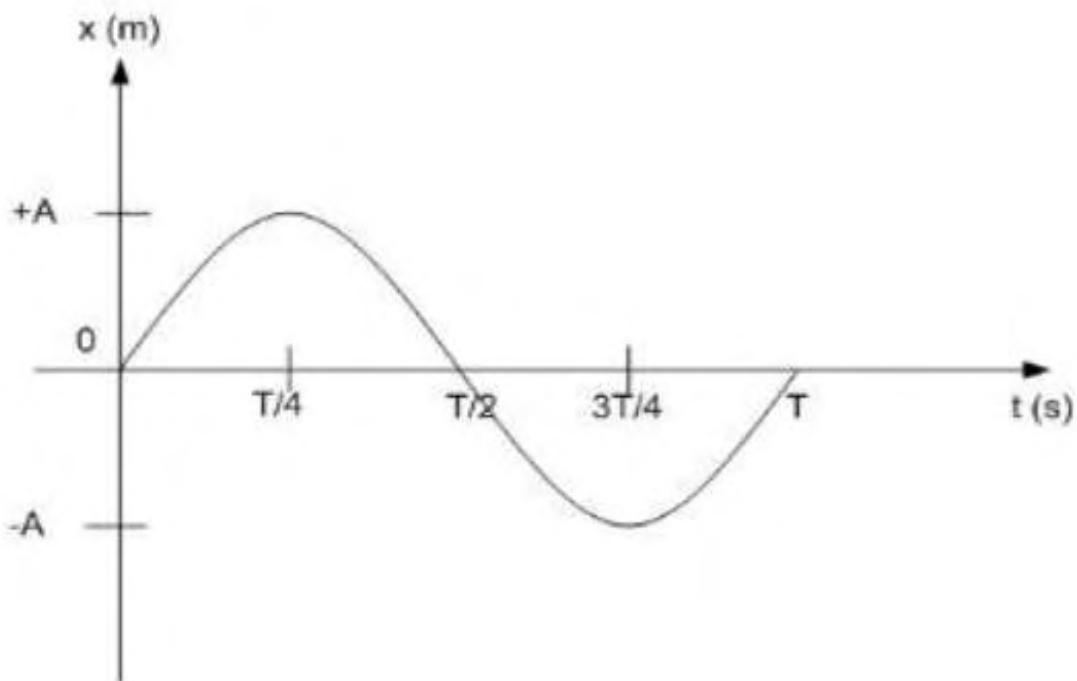
Με παραγωγή της θέσης ως προς το χρόνο προκύπτουν οι αντίστοιχες σχέσεις για την ταχύτητα και την επιτάχυνση ως εξής:

$$v = dy/dt = d(A \sin(\omega t + \varphi_0))/dt = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2.29)$$

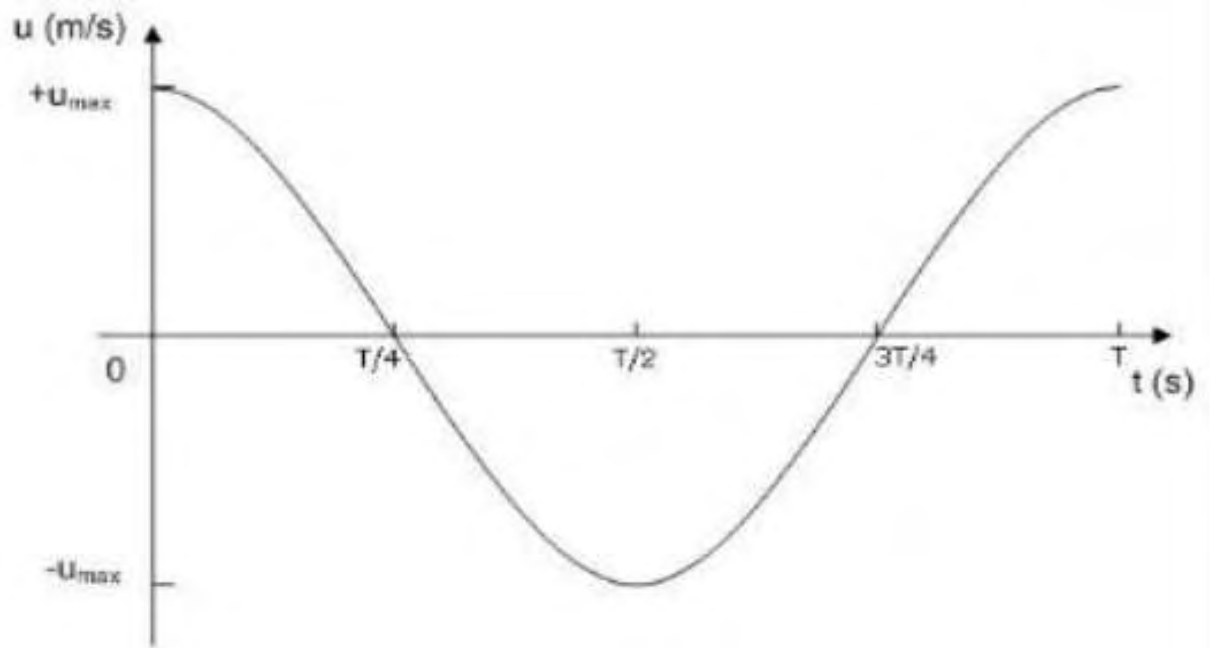
και

$$a = dv/dt = d(\omega A \cos(\omega t + \varphi_0))/dt = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.30)$$

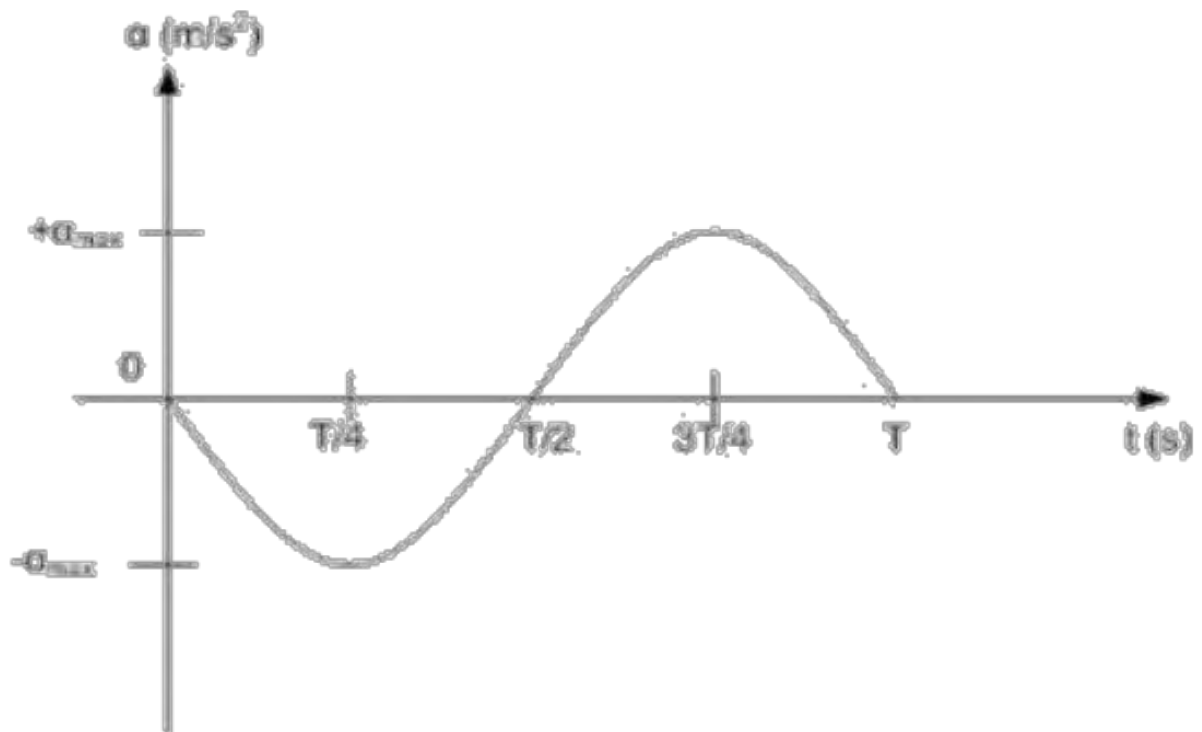
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για σώμα που εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση χωρίς αρχική φάση:



Σχήμα 2.12 Η γραφική παράσταση της απομάκρυνσης συναρτήσει του χρόνου για αρχικές συνθήκες  $x(0)=0$  και  $v(0)=0$ .



Σχήμα 2.13 Η γραφική παράσταση της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου για αρχικές συνθήκες  $x(0)=0$  και  $v(0)=0$ .



Σχήμα 2.14 Η γραφική παράσταση της επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου για αρχικές συνθήκες  $x(0)=0$  και  $v(0)=0$ .

Πηγή: <https://fysikafysikh.wordpress.com/>

### 2.4.1 Η φθίνουσα ταλάντωση.

Στην πιο ρεαλιστική περίπτωση, την φθίνουσα ταλάντωση, παίρνουμε υπόψη τις απώλειες ενέργειας εξαιτίας των τριβών, αντίστασης του αέρα κ.λ.π.. Η μελέτη αυτής της ταλάντωσης στα βιβλία φυσικής γίνεται θεωρώντας ότι η δύναμη απόσβεσης συνήθως είναι ανάλογη της ταχύτητας και σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$F_b = -bv \quad (2.31)$$

όπου  $b$  είναι η απόσβεση του συστήματος και  $v$  η ταχύτητα.

Μέσω της δύναμης αυτής, η μηχανική ενέργεια του συστήματος που ταλαντώνεται μετατρέπεται σε θερμική και το τελικό αποτέλεσμα είναι η ταλάντωση κάποια στιγμή να σταματήσει.[12]

Η διαφορική εξίσωση της κίνησης στην περίπτωση αυτή είναι:

$$x''(t) + 2\gamma x'(t) + \omega_0^2 x(t) = 0 \quad (2.32)$$

όπου

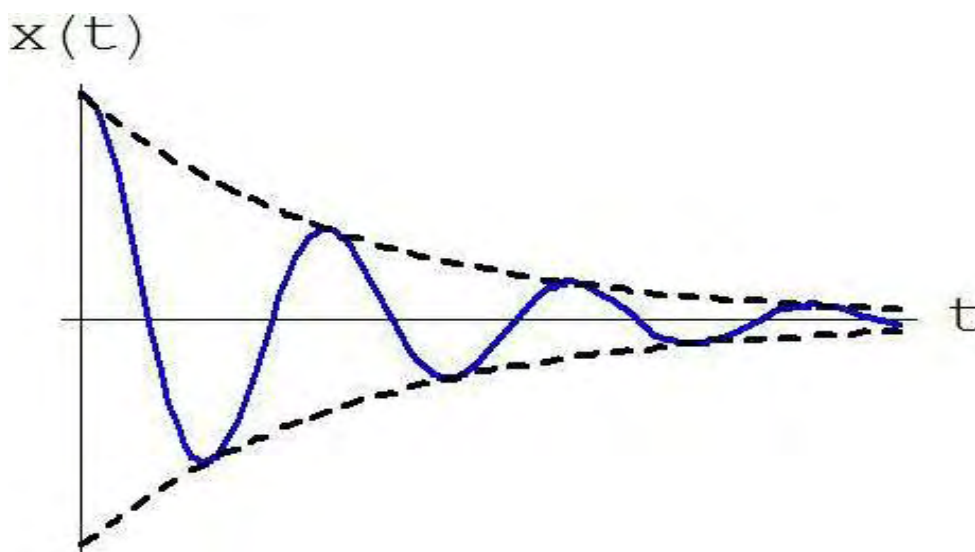
$$2\gamma = b/m \quad (2.33)$$

και η γενική λύση της εξίσωσης είναι:

$$x(t) = Ae^{-\gamma t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.34)$$

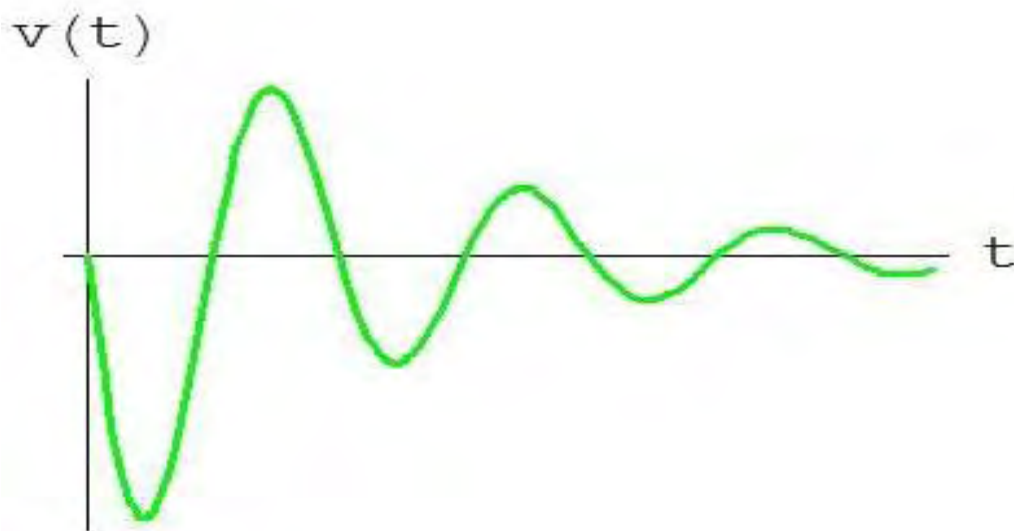
όπου

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad (2.35)$$



Σχήμα 2.15 Η γραφική παράσταση της απομάκρυνσης συναρτήσει του χρόνου στην φθίνουσα ταλάντωση με αρχικές συνθήκες  $x(0)=0$  και  $v(0)=0$ .

Πηγή: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B1%CE%BB%CE%AC%CE%BD%CF%84%CF%89%CF%83%CE%B7#/media/File:Exponential\\_loss\\_blue.svg](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B1%CE%BB%CE%AC%CE%BD%CF%84%CF%89%CF%83%CE%B7#/media/File:Exponential_loss_blue.svg)



Σχήμα 2.16 Η γραφική παράσταση της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου στην φθίνουσα ταλάντωση με αρχικές συνθήκες  $x(0)=0$  και  $v(0)=0$ .

Πηγή: <https://physicsgg.files.wordpress.com/2011/11/oscillat.jpg>

#### 2.4.2 Η εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Για να μην σταματήσει η φθίνουσα ταλάντωση πρέπει να ασκούμε μια επιπλέον εξωτερική δύναμη, τη διεγείρουσα δύναμη:

$$F_{εξ} = F_0 \sin(\omega_{εξ} t) \quad (2.36)$$

μέσω της οποίας αναπληρώνεται η ενέργεια που χάνεται ως θερμότητα. Έτσι προκύπτει η εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Η διαφορική εξίσωση της κίνησης στην περίπτωση διεγείρουσας δύναμης της μορφής είναι:

$$x''(t) + 2\gamma x'(t) + \omega_0^2 x(t) = F_0 \sin(\omega_{εξ} t) \quad (2.37)$$

Για αρχικές συνθήκες  $x(0)=0$  και  $v(0)=0$ , η γενική λύση της εξίσωσης είναι της μορφής:

$$x(t) = (-e^{-\gamma t} A \omega_{εξ} / \omega) \sin(\omega t - \varphi_1) + A \sin(\omega_{εξ} t - \varphi) \quad (2.38)$$

Μετά από αρκετό χρόνο ο πρώτος όρος μηδενίζεται (διότι  $e^{-\gamma t} \rightarrow 0$ ) και η ταλάντωση περνάει στο στάδιο της μόνιμης κατάστασης και περιγράφεται από τον δεύτερο όρο ως εξής:

$$x(t) = A \sin(\omega_{εξ} t - \varphi) \quad (2.39)$$

όπου

$$A = F_0 / (\omega_{εξ} \sqrt{(D/\omega_{εξ} - m\omega_{εξ})^2 + b^2}) \quad (2.40)$$

και

$$\tan\varphi = 2\gamma \omega_{εξ} / (\omega_0^2 - \omega_{εξ}^2) \quad (2.41)$$

Όμως, μέχρι να επικρατήσει η μόνιμη κατάσταση, η γενική λύση θα επηρεάζεται και από τον όρο που περιέχει τον παράγοντα  $e^{-\gamma t}$ . Σ' αυτό το χρονικό διάστημα η απομάκρυνση έχει μια «ακανόνιστη» μορφή μέχρι να αποκτήσει την αρμονική μορφή της.

Αυτή η μετάβαση προς την αρμονικότητα που άλλοτε γίνεται σχεδόν αμέσως και άλλοτε καθυστερεί συνιστά τα μεταβατικά φαινόμενα των εξαναγκασμένων ταλαντώσεων. Πολλές φορές μιλάμε για μεταβατικά διακροτήματα γιατί η γενική λύση της εξαναγκασμένης ταλάντωσης περιέχει αρμονικούς όρους με δυο διαφορετικές συχνότητες, την συχνότητα της φθίνουσας ταλάντωσης  $\omega$  και την συχνότητα της εξωτερικής δύναμης  $\omega_{εξ}$ .

Όταν το σύστημα αφήνεται ελεύθερο, τότε «επιθυμεί» να ταλαντώνεται με κυκλική συχνότητα  $\omega$ , ενώ ο εξωτερικός διεγέρτης «προσπαθεί να το εξαναγκάσει» σε ταλάντωση με συχνότητα  $\omega_{εξ}$ . Η σύνθεση των δυο αυτών ταλαντώσεων οδηγεί στα ονομαζόμενα μεταβατικά διακροτήματα, που υπό προϋποθέσεις μπορούν να έχουν κάποια διάρκεια.[11]

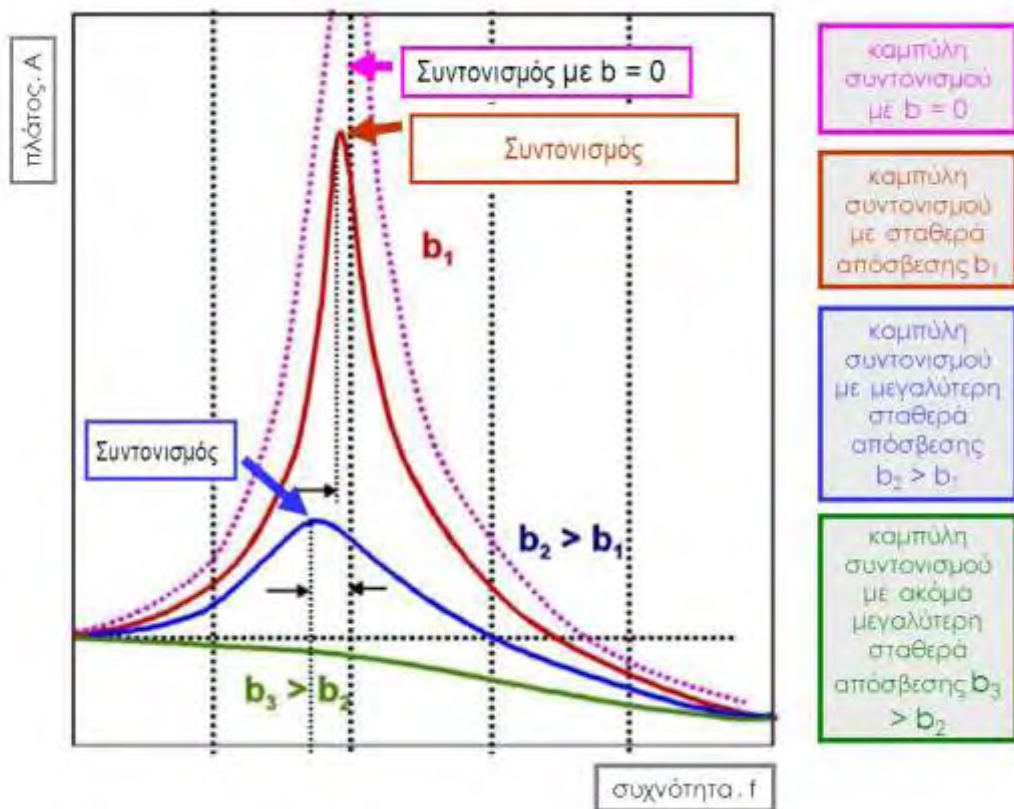
Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η παρουσία διεγέρτη τροφοδοτεί το σύστημα με ενέργεια με τρόπο περιοδικό. Συνεπώς πρόκειται για περίπτωση εξαναγκασμένης ταλάντωσης με εφαρμοζόμενη περιοδική δύναμη της μορφής:

$$F = F_0 \sin(\omega t) \text{ [N]} \quad (2.42)$$

Όπου  $F_0$  η μέγιστη δύναμη διεγέρτη σε N.

### 2.4.3 Φαινόμενο συντονισμού .

Από τη θεωρία είναι γνωστό ότι όταν η συχνότητα διέγερσης  $f$ , πλησιάζει την ιδιοσυχνότητα του συστήματος  $f_0$ , το πλάτος  $A$  της ταλάντωσης του συστήματος αυξάνεται μέχρι που μεγιστοποιείται, φτάνοντας την τιμή  $A_{\max}$  όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα συντονισμού.



Σχήμα 2.17 Καμπύλες συντονισμού με διαφορετικές αποσβέσεις για εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Πηγή: <http://slideplayer.gr/slide/2795702/>

Σε αυτή την κατάσταση, δηλαδή όταν  $f=f_0$ , ισχύει  $A=A_{\max}$  το σύστημα λέμε ότι βρίσκεται σε συντονισμό και η συχνότητα αυτή ονομάζεται αντίστοιχα συχνότητα συντονισμού.

Συντονισμός στη φυσική καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο σε μια εξαναγκασμένη ταλάντωση η συχνότητα του διεγέρτη είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή, με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση του πλάτους. Κάθε ταλαντωτής μπορεί να ταλαντώνεται σε μία περιοχή συχνοτήτων. Η στιγμιαία διέγερση ενός ταλαντωτή ισοδυναμεί με την απόδοση στην ταλάντωση ενός συγκεκριμένου ποσού ενέργειας. Αυτή είναι η ελεύθερη ταλάντωση η οποία συμβαίνει με συχνότητα που ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή. Όταν η ταλάντωση είναι εξαναγκασμένη, η συχνότητα της είναι η συχνότητα του διεγέρτη.

Κατά το συντονισμό το σύστημα έχει το μέγιστο δυνατό πλάτος και τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Αν δεν υπάρχουν αποσβεστικές δυνάμεις, τότε το πλάτος της ταλάντωσης γίνεται θεωρητικά άπειρο. Έτσι, η ταλάντωση μπορεί να γίνει τόσο έντονη, ώστε να καταστραφεί ο ταλαντωτής. Αν η προσφορά ενέργειας είναι μεγαλύτερη, τότε υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του ταλαντωτή.[12]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ, ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια εκτενής περιγραφή του τρόπου διεξαγωγής των πειραμάτων της πτέρυγας ελικοπτέρου Bell-Huey II. Θα αναλυθούν λεπτομερώς οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, ο τρόπος μέτρησης των πειραμάτων καθώς και η διαδικασία χρήσης των οργάνων μέτρησης, καταγραφής και αποθήκευσης πειραματικών δεδομένων.

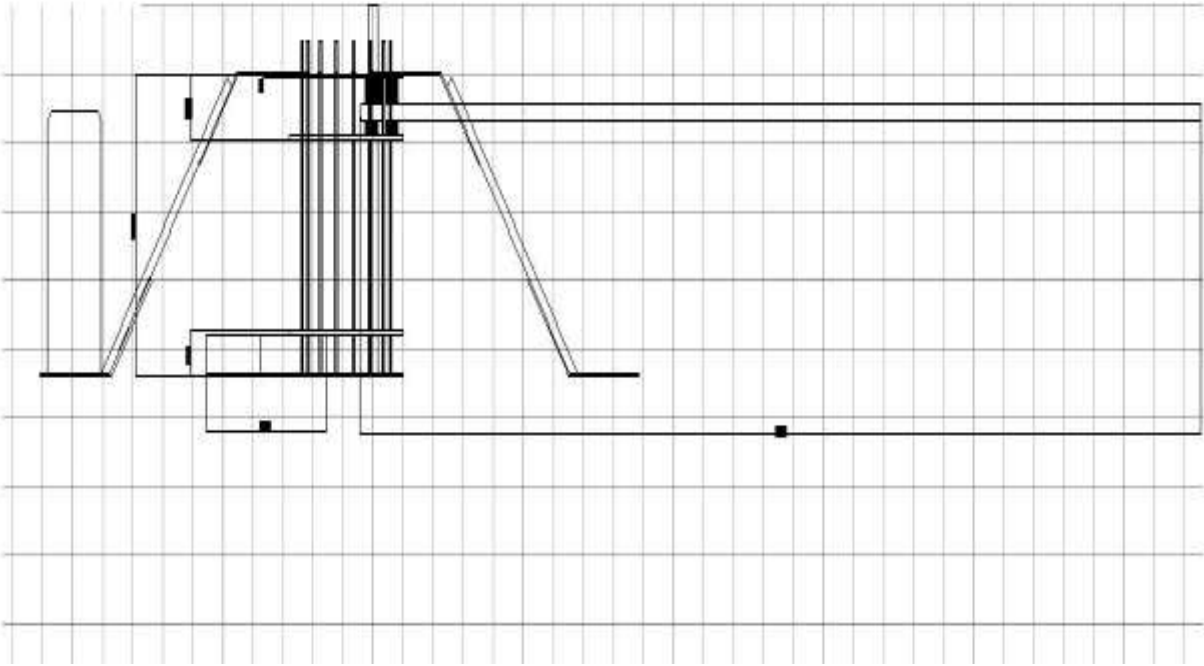
Στο σχήμα 3.1 που ακολουθεί φαίνεται φωτογραφία ολόκληρης της πειραματικής διάταξης που βρίσκεται στο εργαστήριο, δηλαδή, της πτέρυγας μαζί με τον τριφασικό ηλεκτροκινητήρα και την προστατευτική εγκατάσταση του καθώς και την πάκτωση της πτέρυγας στο βάθος.



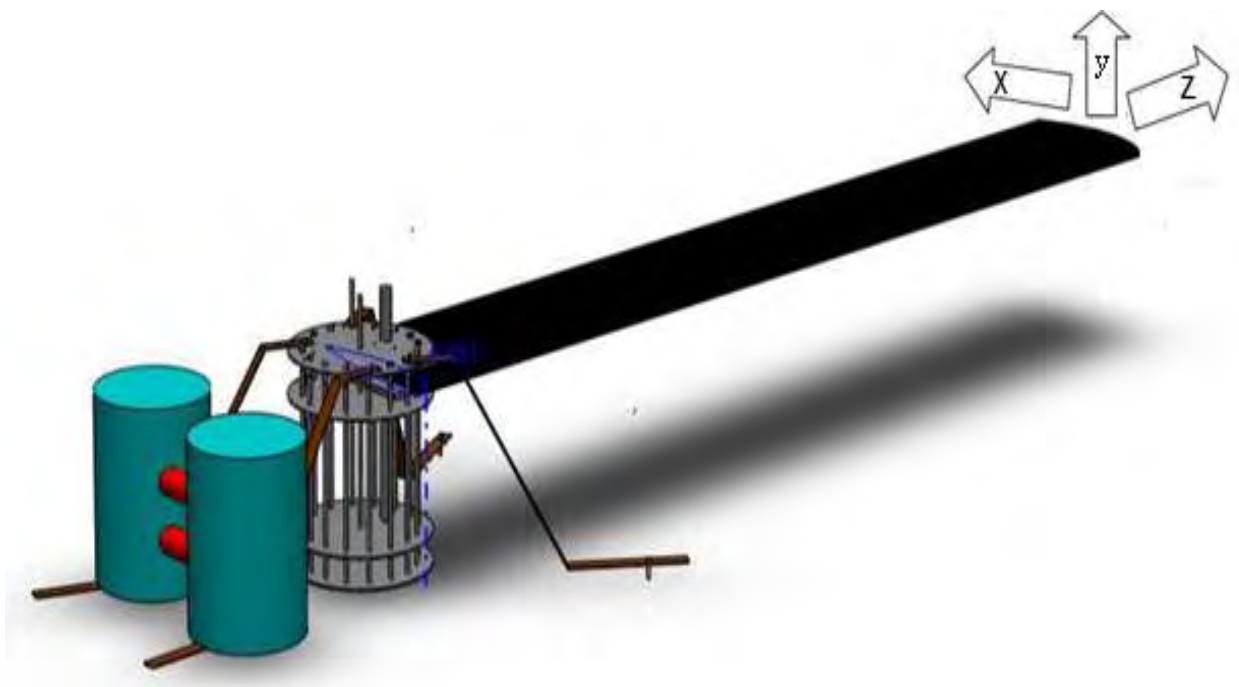
Σχήμα 3.1 Φωτογραφία ολόκληρης της πτέρυγας που είναι εγκατεστημένη στο εργαστήριο.

### 3.1 Τρόπος στηρίξεως.

Για την ασφαλή διεξαγωγή των πειραμάτων η πτέρυγα πακτώθηκε μέσω της διάταξης που παρουσιάζεται στο παρακάτω σκαρίφημα:



Σχήμα 3.2 Απεικόνιση του μηχανισμού πάκτωσης με τη πτέρυγα, σχεδιασμένη στο AutoCAD (student version).



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση του μηχανισμού πάκτωσης με τη πτέρυγα, σχεδιασμένη στο SolidWorks (student version) και των αξόνων αναφοράς.

Ο μηχανισμός στήριξης αποτελείται από:

- 4 μεταλλικές πλάκες διαμέτρου 950mm με 12 κυκλικές οπές περιμετρικά των 22mm, 5 κυκλικές οπές των 26mm εκ των οποίων η μία βρίσκεται στο κέντρο της πλάκας και οι υπόλοιπες περιμετρικά και μία των 76mm, πάχους 12mm.
- 35 τετραγωνικά πλακίδια 60x60mm με κεντρική οπή των 24mm πάχους 2mm, σφηνωμένα πάνω και κάτω από την πτέρυγα.
- 8 πλάκες 160x500mm με τρεις κυκλικές οπές των 66mm και 28mm, πάχους 12mm.
- 2 πλάκες 900x108mm τριών κυκλικών οπών 26, 26 και 72mm, πάχους 12mm.
- 8 τριγωνικά πλακίδια 100x100mm, πάχους 10mm.
- 4 πλάκες 700x400mm με 5 κυκλικές οπές 12mm, πάχους 4mm.
- 2 βαρέλια γεμισμένα με μπετόν.
- 4 μεταλλικές αντηρίδες, συνδεδεμένες ανά δύο με μεταλλικό έλασμα για περαιτέρω ασφάλεια.
- Πτέρυγα ελικοπτέρου Bell-Huey II, βάρους 80kg και μήκους 7m.
- Βύσματα M20 σφηνωμένα στο δάπεδο.

Ενδεικτικά, χρησιμοποιήθηκαν περίπου 100 κοχλιοσυνδέσεις, ενώ έγινε ηλεκτροσυγκόλληση τύπου MIG σε καίρια σημεία του υποστηρικτικού συστήματος για την εξασφάλιση της ασφαλούς πειραματικής λειτουργίας της προβόλου. Η πτέρυγα είναι ουσιαστικά σφηνωμένη στον κεντρικό άξονα της κατασκευής, ενώ έχει συνδεθεί και η δεύτερη οπή της πτέρυγας στις μεταλλικές πλάκες μέσω ενός μικρότερου άξονα. Στις οπές των πλακών έχουν βιδωθεί ντίζες, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί επιπλέον αντηρίδες. Πάνω στα πέλματα των δύο αριστερών αντηρίδων, με βάση το παραπάνω σκαρίφημα, έχουν εγκατασταθεί 2 βαρέλια με μπετόν ενώ έχει προβλεφθεί θέση για ένα ακόμη βαρέλι στο μέσον μεταξύ των δύο αντιστηρίξεων τα οποία θα λειτουργούν ως αντίβαρο.

Σε αυτό το σημείο, σκόπιμη είναι μια σύντομη αναφορά στην ηλεκτροσυγκόλληση τύπου MIG. Γενικά ως συγκόλληση, ορίζεται η ένωση δύο ή περισσότερων τεμαχίων μέσω θερμότητας ή και συμπίεσης με στόχο την κρυσταλλική ένωση των τεμαχίων. Στόχος της συγκόλλησης είναι το τελικό τεμάχιο να έχει την ίδια αντοχή με τα αρχικά κομμάτια.

Στη μέθοδο ηλεκτροσυγκόλλησης Metal Inert Gas ή αλλιώς M.I.G. το ηλεκτρόδιο αποτελεί και το συγκολλητικό υλικό. Το ηλεκτρόδιο δηλαδή καταναλώνεται και τροφοδοτείται στη συγκόλληση από μια κουλούρα σύρματος. Το αέριο που χρησιμοποιείται είναι αργό ή μείγμα αργού με άλλα αδρανή αέρια, όπως διοξείδιο του άνθρακα. Το ηλεκτρόδιο στη συγκόλληση M.I.G. συνδέεται στο θετικό πόλο, σε αντίθεση με το ηλεκτρόδιο στη μέθοδο T.I.G., (Tungsten Inert Gas) που συνδέεται στον αρνητικό πόλο με αποτέλεσμα να λιώνει ευκολότερα.[16]

### *3.2 Το σύστημα του διεγέρτη-ηλεκτροκινητήρα.*

Κατά τη διάρκεια των δυναμικών πειραμάτων, η πτέρυγα υποβλήθηκε σε εξαναγκασμένη ταλάντωση με διαφορετική κάθε φορά συχνότητα. Η διεγείρουσα δύναμη προέρχεται από το σύστημα που απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



*Σχήμα 3.4 Το σύστημα του διεγέρτη και η προστατευτική του διάταξη.*



*Σχήμα 3.5 Το τριφασικό μοτέρ που χρησιμοποιήθηκε για να διεγείρει την πτέρυγα και να την θέσει σε εξαναγκασμένη ταλάντωση.*

Όπως φαίνεται, ένα τριφασικό μοτέρ περιστρέφει με διαφορετική κάθε φορά συχνότητα, η οποία ορίζεται στην αρχή κάθε πειράματος, έναν δίσκο με δύο διαφορετικού μήκους, παράλληλους και ομοαξονικά συνδεδεμένους βραχίονες (ο πάνω 0,65 εκατοστά και ο κάτω 0,85) με ακτινικός έκκεντρες μάζες. Αυτή η διάταξη δημιουργεί επάνω στη πτέρυγα έκκεντρα φορτία, με αποτέλεσμα να ταλαντώνεται και στις δύο διευθύνσεις, σημαντικότερα των οποίων είναι τα κατακόρυφα περιοδικά φορτία τα οποία όμως μελετήθηκαν σε προηγούμενη διπλωματική. Σε αυτήν την διπλωματική θα μελετηθούν αυστηρά και μόνον οι ταλαντώσεις στον οριζόντιο άξονα.

Μπροστά από το σύστημα τοποθετήθηκε προστατευτικό κάλυμμα για την ασφαλή διεξαγωγή των πειραμάτων στο εργαστήριο. Το μοτέρ τοποθετήθηκε πάνω στην πτέρυγα σε θέση εκπετάσματος 4,25 μέτρα (απόσταση κεντρικού άξονα μοτέρ από το ακροπερύγιο) και πακτώθηκε με την χρήση δύο λεπτών λαμαρινών και συνολικά οχτώ κοχλιοσυνδέσεων ,εκ των οποίων τέσσερις μεταξύ των δύο λαμαρινών και τέσσερις μεταξύ μοτέρ-επάνω λαμαρίνας. Σημειώνεται πως το συγκεκριμένο μοτέρ είναι της εταιρίας KRAFT type T100 τριφασικό, με αποδοόμενη ισχύ 5,5 ίππων (4 KW), 2850 στροφών ανά λεπτό (RPM) και συχνότητας 50 Hz.

### 3.3 Όργανα μετρήσεως εργαστηριού.

Για την καταγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εργαστηριακά μετρητικά και αποθηκευτικά όργανα.

- επιταχυνσιόμετρο KISTLER 8632C10T
- σταθερός υπολογιστής
- ενισχυτής σήματος KISTLER 5134
- ψηφιακός παλμογράφος LEADER LBO
- μετατροπέας σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα National Instruments
- βιντεοκάμερα υψηλής ανάλυσης SONY 50fps
- βιντεοκάμερα κινητού μέτριας ανάλυσης LG 29fps
- πρόγραμμα καταγραφής των πειραματικών δεδομένων LabView National Instruments usb card+software
- Προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων όπως: Microsoft Excel, OriginPro (*student version*), Free Video to JPG Converter, JavaFoil, Notepad++, Microsoft Word, SolidWorks (*student version*), Wondershare Filmora, AutoCAD (*student version*), Ζωγραφική κ.α.
- κόκκινο laser
- ταινία μέτρησης (μέτρο)
- αλφάδι

#### 3.3.1 Εξοπλισμός εργαστηρίου για την μηχανική μέθοδο ανάλυσης.

Παρακάτω παρουσιάζεται επεξηγηματική φωτογραφία της πτέρυγας με το επιταχυνσιόμετρο τοποθετημένο επάνω της, με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μετρά αποκλειστικά τις οριζόντιες επιταχύνσεις που δημιουργούνται στην διεύθυνση x, κατά μήκος της χορδής της. Επίσης φαίνεται και η θέση του κόκκινου λέιζερ καθώς και το πράσινο καλώδιο KISTLER TYPE 1631C κάτω δεξιά, που ενώνει το επιταχυνσιόμετρο με τον ενισχυτή σήματος.



Σχήμα 3.6 Απεικόνιση της θέσης του κόκκινου λέιζερ, του επιταχυνσιόμετρου και της διεύθυνσης μέτρησης του.

Παρατίθενται κάποιες επιπλέον πληροφορίες για το επιταχυνσιόμετρο μίας διεύθυνσης της εταιρείας **KISTLER** καθώς και σκαρίφημα αυτού [17]:

ΤΥΠΟΣ: 8632C10T

ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ (g):  $\pm 10$

ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ  $\pm 5\%$  (mV/g): 498

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (Hz)  $\pm 5\%$  :1-5000

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΕΥΡΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (°C): 0-65

ΚΑΤΩΦΛΙ ΤΙΜΩΝ ( $g_{rms}$ ): 0,00028

ΜΑΖΑ (gr): 6

ΓΕΙΩΣΗ: ΝΑΙ

ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ: ΚΑΛΩΔΙΟ ΤΥΠΟΥ 1631C, ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ 2mm, ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ ΥΨΗΛΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

CROSSTALK ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ (%):  $< 1$

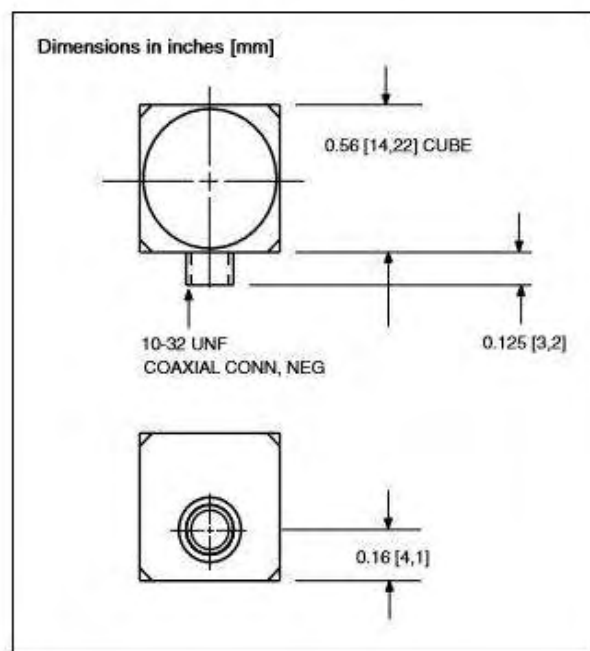
ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ (FSO):  $\pm 1$

ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ (mA / VDC): 2-18/20-30

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ( $\Omega$ ):  $< 500$

ΥΛΙΚΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ: ΔΙΜΟΡΦΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟ/ ΚΑΜΠΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

ΥΛΙΚΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΑΤΟΣ: ΣΚΛΗΡΑ ΑΝΟΔΙΩΜΕΝΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ



Σχήμα 3.7 Σκαρίφημα του επιταχυνσιόμετρου KISTLER 86C10T.

Πηγή: [kistler.com](http://kistler.com)



Σχήμα 3.8 Το πράσινο καλώδιο KISTLER TYPE 1631C του επιταχυνσιόμετρου.

Πηγή: [kistler.com](http://kistler.com)

Παρατίθενται κάποιες επιπλέον πληροφορίες για τον ενισχυτή της εταιρείας **KISTLER** [17]:

ΤΥΠΟΣ: 5134B

ΡΕΥΜΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (mA): 0-15

ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (VDC): 24

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (Hz)  $\pm 5\%$  : 0,1 -68000

ΕΞΟΔΟΣ (V):  $\pm 5 / \pm 10$

ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ (VAC): 115/230

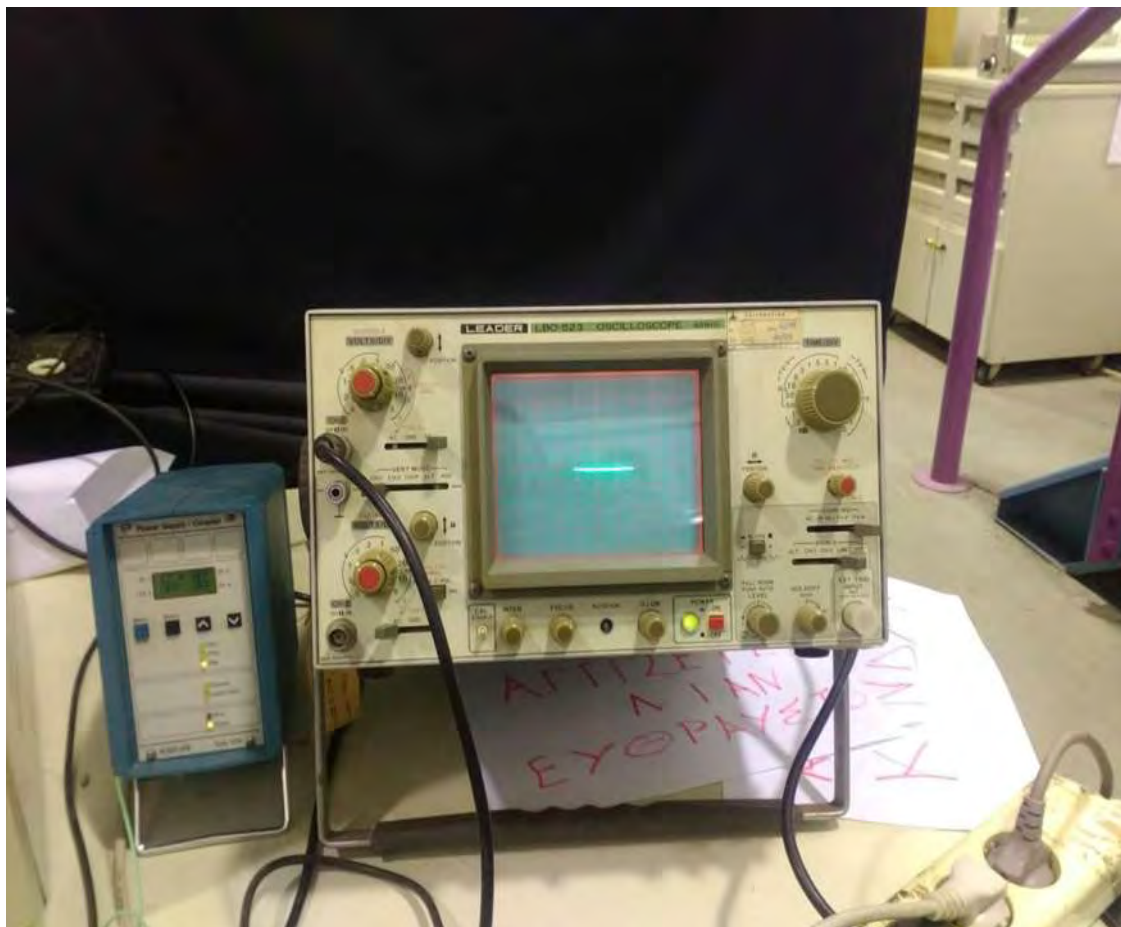
ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ (GAIN): 0,5 -150

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΕΥΡΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ( $^{\circ}\text{C}$ ): 0-50

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (WxHxd) (mm):196x94x150

ΒΑΡΟΣ (kg) : 1,8

Στο σχήμα 3.9 φαίνεται στα αριστερά ο ενισχυτής σήματος KISTLER TYPE 5134B και στα δεξιά του ο ψηφιακός παλμογράφος LEADER LBO ενώ στην επόμενη εικόνα φαίνεται ο μετατροπέας σήματος USB από αναλογικό σε ψηφιακό της National Instruments.



Σχήμα 3.9 Φωτογραφία ενισχυτή και ψηφιακού παλμογράφου.





Σχήμα 3.10 Φωτογραφία του μετατροπέα σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό της National Instruments.

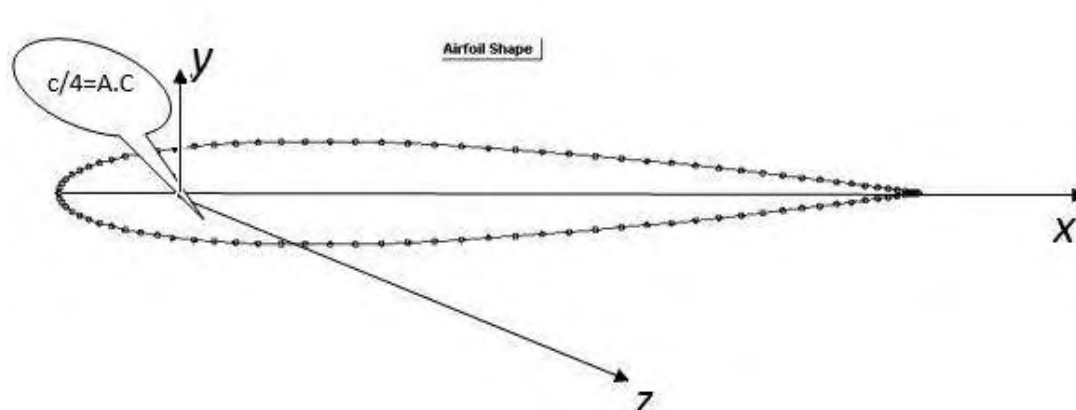
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια εικόνα του υπολογιστή συνδεδεμένου με τα προαναφερθέντα όργανα μέτρησης του εργαστηρίου ώστε να αποθηκεύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των πειραμάτων για την μετέπειτα επεξεργασία τους. Επίσης, στη συγκεκριμένη εικόνα φαίνεται και ο inverter που είναι συνδεδεμένος με το μοτέρ-διεγέρτη ώστε να μεταβάλλονται οι στροφές του.



Σχήμα 3.11 Φωτογραφία όλου του ηλεκτρονικού εξοπλισμού του εργαστηρίου για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

### 3.4 Προσδιορισμός συστήματος συντεταγμένων για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων ορίστηκαν οι παρακάτω άξονες στην πτέρυγα.



Σχήμα 3.12 Απεικόνιση του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων της πτέρυγας για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μέσω του προγράμματος JavaFoil.



Σχήμα 3.13 Φωτογραφία της πτέρυγας με σχεδιασμένο επάνω της το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μέσω του προγράμματος ζωγραφική.

Οι παρακάτω άξονες ισχύουν στη συντριπτική πλειοψηφία των πειραμάτων, όπως θα φανεί στη συνέχεια. Όπως φαίνεται και από την φωτογραφία, η πτέρυγα NACA 0012 διατρέχεται κατά το εκπέτασμα από τον z άξονα, ενώ ως αρχή αξόνων θεωρείται το σημείο c/4, γνωστό και ως Αεροδυναμικό Κέντρο της πτέρυγας.

Επομένως, ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι να μελετήσει τις επιταχύνσεις, τις μετατοπίσεις, τις συχνότητες και το εύρος των διαμήκη ταλαντώσεων (edgewise vibrations) στην οριζόντια διεύθυνση  $x$  παράλληλα με το μήκος της χορδής της πτέρυγας.

### *3.5 Η πειραματική διάταξη της οπτικής μεθόδου ανάλυσης.*

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη του συστήματος πτέρυγα-βιντεοκάμερα SONY. Η κάμερα τοποθετήθηκε στην τρίποδη βάση της ακριβώς μπροστά από το ακροπερύγιο της πτέρυγας στο εργαστήριο και σε απόσταση 1,112 μέτρα. Επιπλέον, αλφαδιάστηκε με το κόκκινο λέιζερ, έτσι ώστε να 'χτυπάει' ακριβώς στο κέντρο του φακού της, για την ευκολότερη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων κατά την διάρκεια της οπτικής ανάλυσης.



*Σχήμα 3.14 Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης της οπτικής μεθόδου ανάλυσης των ταλαντώσεων της πτέρυγας BELL HUEY II στο εργαστήριο.*

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Αφού σχεδιάστηκε όλη η πειραματική διάταξη όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προγραμματίστηκε στη συνέχεια και η μεθοδολογία διεξαγωγής των πειραμάτων ως εξής: Πραγματοποιήθηκαν ταλαντώσεις τύπου flapwise (εγκάρσιες) και edgewise (διαμήκης), ελεύθερες, με απόσβεση και εξαναγκασμένες. Με τον τρόπο αυτό έγινε μια πρώτη προσπάθεια να μελετηθεί η ταλαντωτική συμπεριφορά της πτέρυγας, κάτω από εξαναγκασμένη συνεχή ταλάντωση, όπως δηλαδή σε συνθήκες πραγματικής πτήσης. Στόχος είναι η καταγραφή των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα και η ανάλυσή τους με βάση τη θεωρία των ταλαντώσεων για τη διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων όπως το εύρος των ταλαντώσεων και οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται.

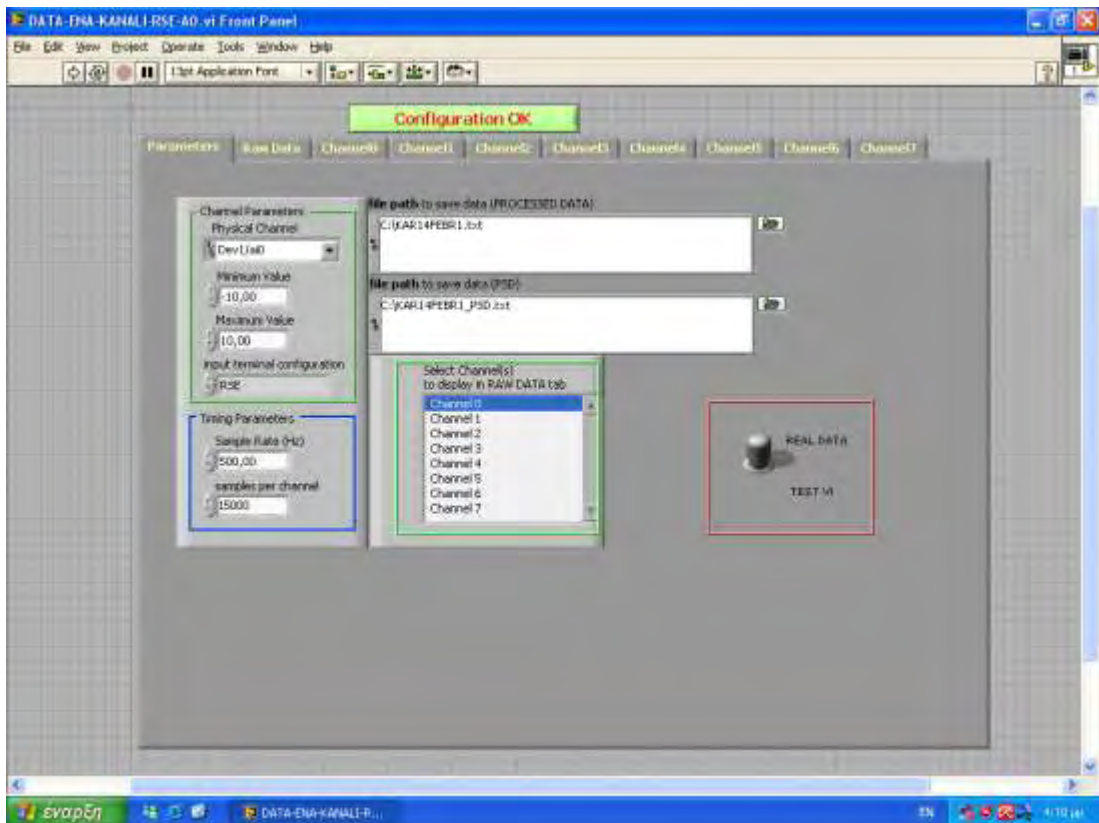
Τα δεδομένα που προέκυψαν από τα όργανα μέτρησης του εργαστηρίου επεξεργάστηκαν με δύο διαφορετικές μεθόδους για ακριβέστερη διεξαγωγή αποτελεσμάτων και στην συνέχεια συγκρίθηκαν ώστε να παρατηρηθούν και σχολιασθούν οι διαφορές τους.

### *4.1 Μηχανική μέθοδος ανάλυσης από επιταχυνσιόμετρο.*

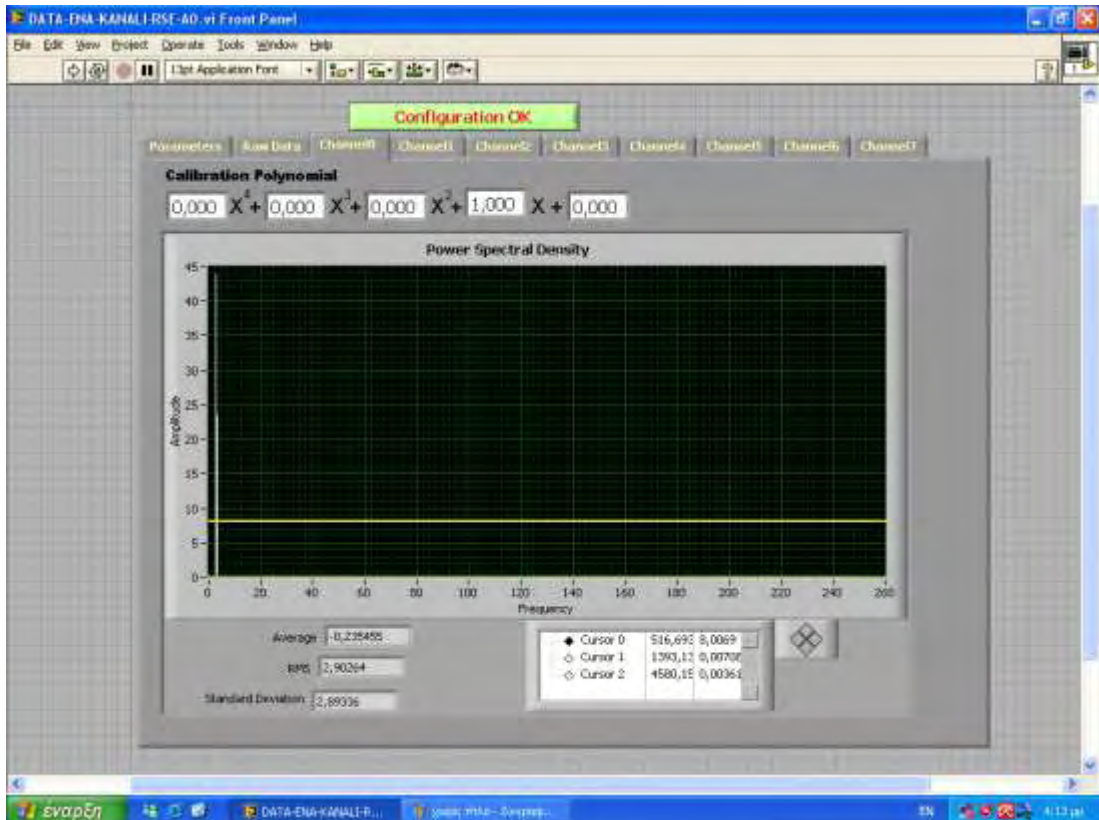
Η πρώτη μέθοδος επεξεργασίας ήταν η μηχανική όπου στη πτέρυγα Bell Huey II και συγκεκριμένα στο ελεύθερο άκρο της επικολλήθηκε ένα επιταχυνσιόμετρο τύπου KISTLER 8632C10T, το οποίο συνδέθηκε σε έναν ενισχυτή σήματος KISTLER 5134. Ο ενισχυτής συνδέθηκε σε ένα παλμογράφο LEADER LBO και σε έναν μετατροπέα σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό της National Instruments. Με τον τρόπο αυτό το επιταχυνσιόμετρο καταγράφει την κίνηση του ταλαντωμένου σώματος στέλνοντας ηλεκτρικό σήμα σε Coulomb. Το σήμα αυτό περνά από τον μετατροπέα και τον ενισχυτή, ψηφιοποιείται και ενισχύεται με αποτέλεσμα να δίνεται στην οθόνη του παλμογράφου και του υπολογιστή μια κυματομορφή σε Volts. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο για τη διεξαγωγή αυτών των μετρήσεων και την αποθήκευσή τους είναι της Labview National Instruments.

Συνολικά διεξήχθησαν 26 πειράματα όπου η πτέρυγα υποβλήθηκε σε εξαναγκασμένη ταλάντωση και για καθένα από αυτά είχε δοθεί διαφορετική συχνότητα διεγέρτη-ηλεκτροκινητήρα από τον inverter που είχε συνδεθεί. Για τις πρώτες 11 συχνότητες του inverter η ενίσχυση του σήματος στον ενισχυτή KISTLER 5134 βρισκόταν στην τιμή 10 ενώ για τις υπόλοιπες 15 (μεγαλύτερες) συχνότητες η ενίσχυση του σήματος βρισκόταν στην τιμή 5 αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο να χαθούν κάποιες τιμές.

Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες που ακολουθούν, ο ρυθμός δειγματοληψίας έχει οριστεί με συχνότητα 500 Hz, με τα δείγματα να είναι 15.000, δηλαδή συνολικός χρόνος δειγματοληψίας 30 δευτερόλεπτα και η μορφή της πολυωνυμικής εξίσωσης του σήματος ως  $y=x$  δηλαδή γραμμική.



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση αρχικών παραμέτρων στο πρόγραμμα Labview National Instruments.



Σχήμα 4.2 Απεικόνιση της πολυωνυμικής μορφής του σήματος,  $y=x$  του προγράμματος LabView.

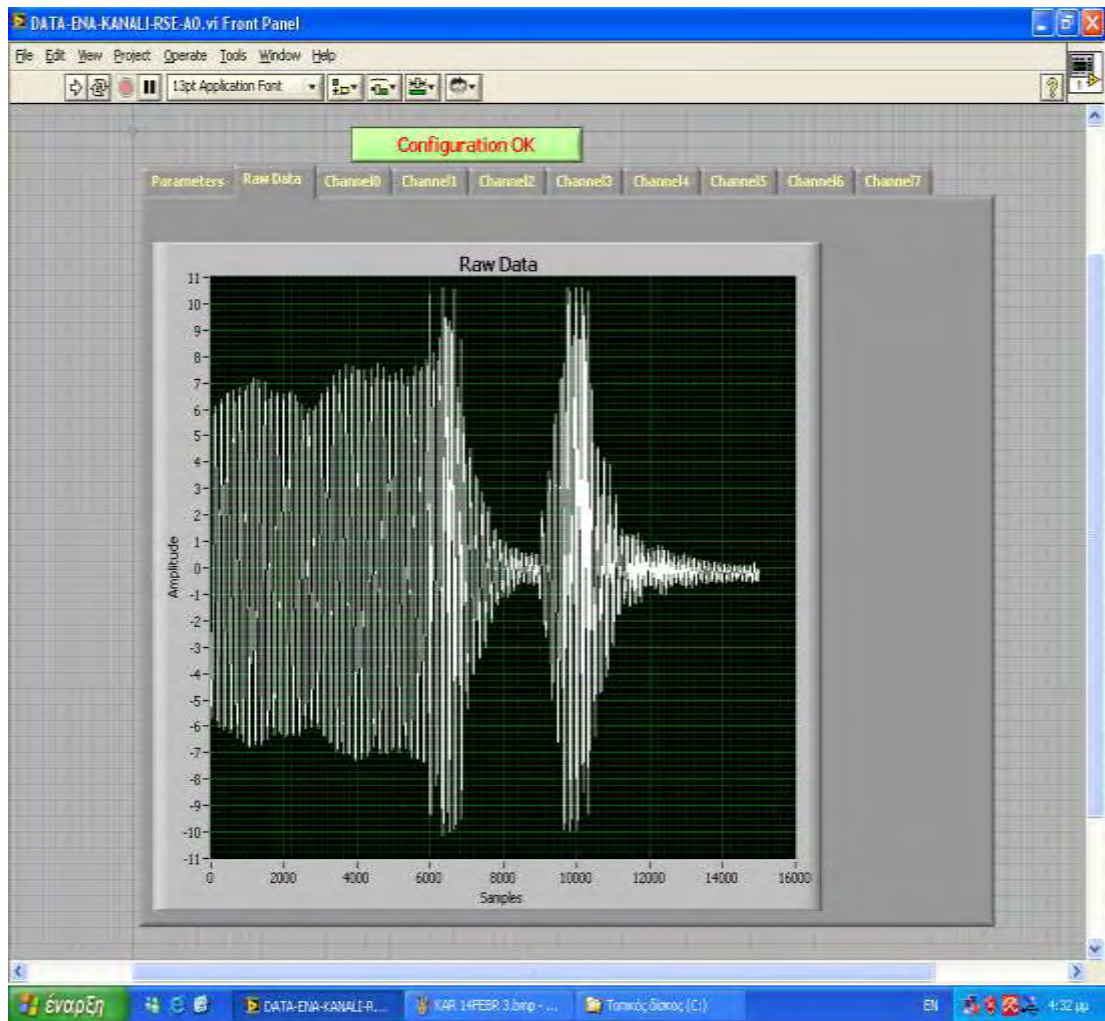
Εφόσον ορίστηκαν οι παράμετροι έγινε μια πρώτη δοκιμή της πειραματικής διάταξης δίνοντας διέγερση με το χέρι και όχι με το τριφασικό μοτέρ, προκειμένου να φανεί η μορφή και το εύρος της ταλάντωσης της πτέρυγας στον υπολογιστή μέσω του προγράμματος.



Σχήμα 4.3 Φωτογραφία από την δοκιμή με το χέρι πριν τεθεί σε λειτουργία το ηλεκτρικό μοτέρ.

Συγκεκριμένα δόθηκε διέγερση μη σταθερού πλάτους για να φανεί η διαφορετική μορφή της κυματοειδούς καμπύλης στο πρόγραμμα καθ' όλη την διάρκεια της δειγματοληψίας.

Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα στα πρώτα 12 sec (6000\*30/15000) δόθηκε σχεδόν σταθερή διέγερση με εύρος ταλάντωσης περίπου  $\pm 7$  Volts. Στα επόμενα 2 sec αυξήθηκε η διέγερση φτάνοντας το εύρος στα  $\pm 10$  Volts και αφέθηκε να κάνει αποσβεννύμενη ταλάντωση για άλλα 4 sec έως την τιμή  $\pm 0,75$  Volts. Τέλος, για τα επόμενα 3 sec αυξήθηκε σταδιακά η διέγερση με εύρος ταλάντωσης έως τα  $\pm 10,5$  Volts και αφέθηκε και πάλι ελεύθερη να ταλαντωθεί με την ιδιοσυχνότητα της μέχρι να τελειώσει ο χρόνος δειγματοληψίας, δηλαδή για τα επόμενα 9 δευτερόλεπτα που απέμεναν έως ότου συμπληρωθούν τα 30. Η ιδιοσυχνότητα της πτέρυγας στην οριζόντια διεύθυνση x υπολογίστηκε από την οπτική μέθοδο ανάλυσης μέσω των frames από το βίντεο που παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2 ίση με 2,95 Hz.



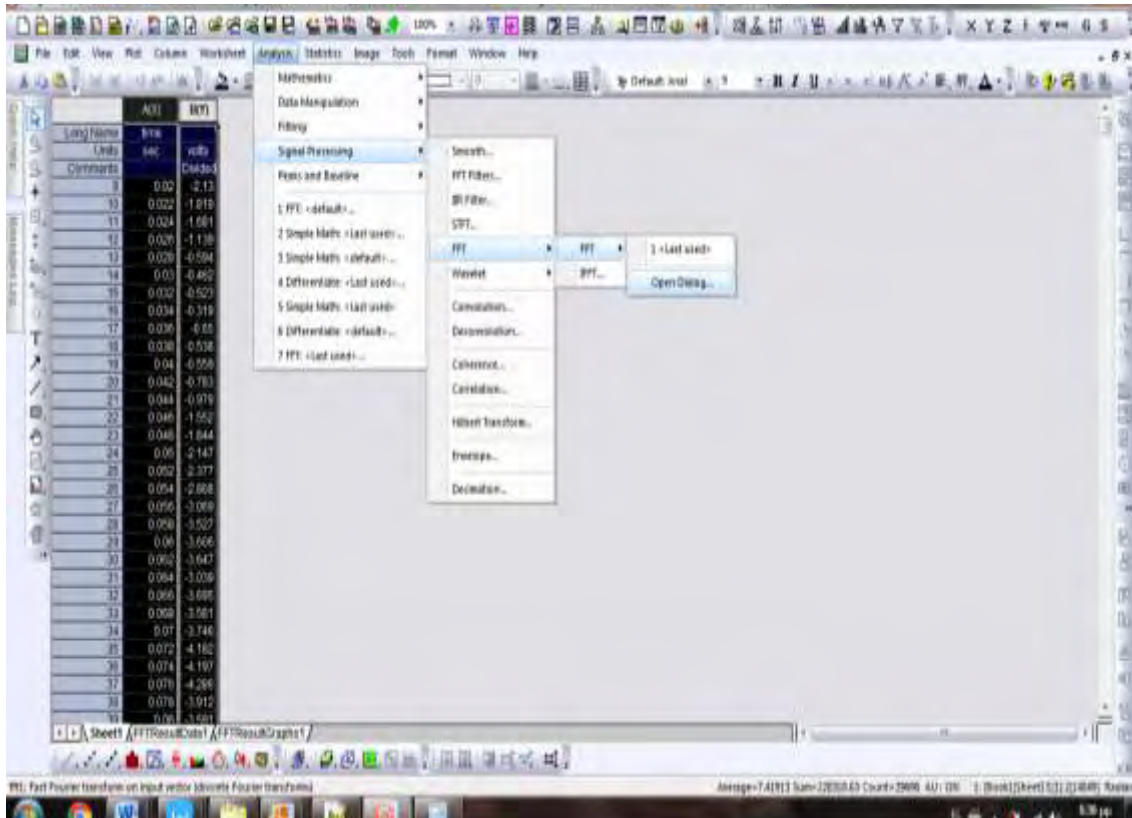
Σχήμα 4.4 Απεικόνιση της μορφής της εξαναγκασμένης ταλάντωσης από την πρώτη δοκιμή με το χέρι στο πρόγραμμα LabView.

Από το σχήμα 4.4 φαίνεται ξεκάθαρα λοιπόν, ότι το εύρος ταλάντωσης της πτέρυγας στην οριζόντια διεύθυνση  $x$ , εξαρτάται από την διέγερση που θα της δοθεί και τα μεγέθη αυτά είναι ανάλογα.

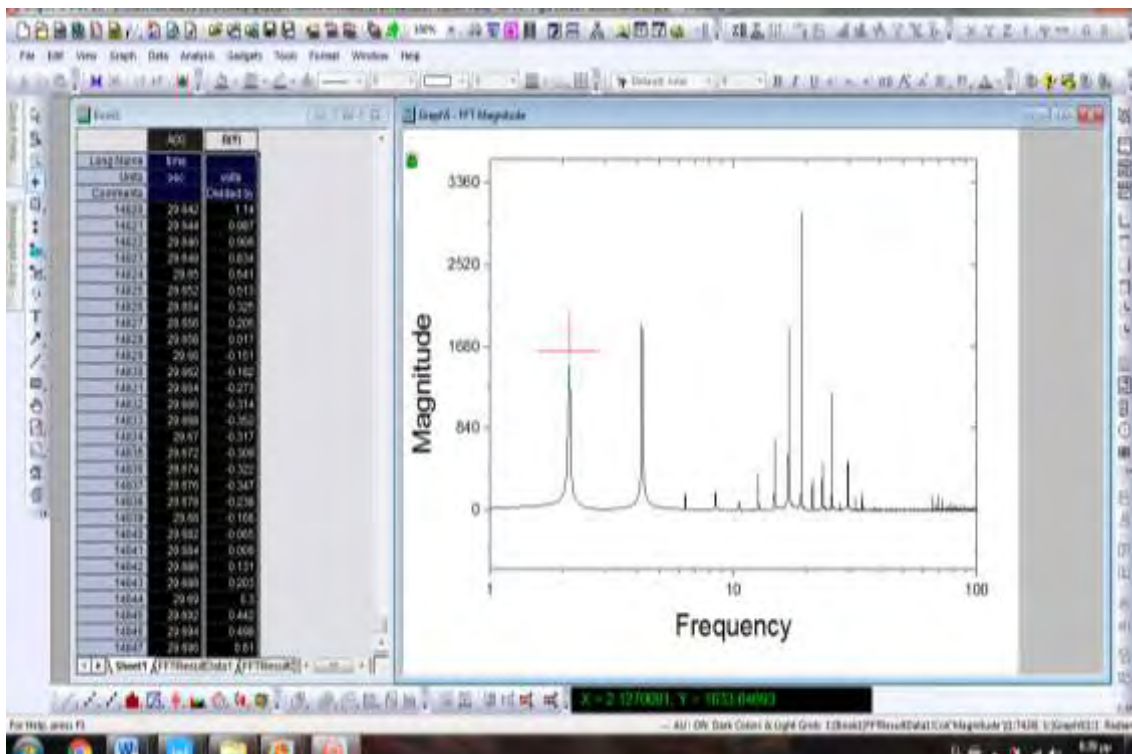
Εφόσον τώρα η πειραματική διάταξη δούλεψε σωστά και υπολογίστηκε η ιδιοσυχνότητά της, όλα τα αρχεία TXT με τις τιμές του εύρους ταλάντωσης σε Volts που προέκυψαν για τα 26 διαφορετικά πειράματα που διεξήχθησαν, αποθηκεύτηκαν στον υπολογιστή. Στη συνέχεια αναλύθηκαν στο πρόγραμμα OriginPro (*student version*) με τη μέθοδο FFT για την εξαγωγή των συχνοτήτων της πτέρυγας για τις αντίστοιχες συχνότητες του inverter.

Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη στήλη βρίσκονταν οι διαδοχικοί χρόνοι ανάμεσα στο κάθε δείγμα οι οποίοι ήταν  $1/500 \text{ Hz}=0,002 \text{ sec}$  για την πρώτη τιμή,  $2/500 \text{ Hz}=0,004 \text{ sec}$  για την δεύτερη τιμή και πάει λέγοντας και στην δεύτερη στήλη βρίσκονταν οι τιμές του εύρους ταλάντωσης σε Volts όπως αυτές προέκυψαν από το επιταχυνσιόμετρο.

Παρακάτω φαίνεται στις φωτογραφίες η διαδικασία που ακολουθήθηκε αναλυτικά, μέσα από το πρόγραμμα OriginPro (*student version*) καθώς και το διάγραμμα πλάτους-συχνότητας που προέκυψε, για την εξαγωγή της συχνότητας της πτέρυγας από την πρώτη αρμονική.



Σχήμα 4.5 Απεικόνιση των δεδομένων στο πρόγραμμα OriginPro (student version) και διαδικασίας εύρεσης συχνότητας ταλάντωσης πτέρυγας.



Σχήμα 4.6 Απεικόνιση των δεδομένων στο πρόγραμμα OriginPro(student version) και εύρεση της συχνότητας ταλάντωσης της πτέρυγας από την πρώτη αρμονική στο διάγραμμα πλάτους-συχνότητας.



Ακόμη από τα αρχεία TXT των οποίων οι τιμές ήταν σε Volts, δεδομένου ότι τα 0,498 Volts αντιστοιχούν σε επιτάχυνση βαρύτητας ίση με 1 (g), δηλαδή 9,81 (m/s<sup>2</sup>), με την χρήση του παρακάτω τύπου για την κατάλληλη τιμή κάθε φορά της ενίσχυσης (GAIN), επιτυγχάνθηκε η μετατροπή της τυπικής απόκλισης (RMS) των τιμών του εύρους ταλάντωσης της πτέρυγας από Volts σε επιτάχυνση (acceleration) σε m/s<sup>2</sup>.

$$\text{acceleration (m/s}^2\text{)} = [9,81 / (0,498 * \text{GAIN})] * \text{RMS (Volts)} \quad (4.1)$$

Ως ενίσχυση (GAIN) ορίζεται ο λόγος μεγέθους του σήματος εξόδου προς το αντίστοιχο μέγεθος του σήματος εισόδου.[13]

Τα διαγράμματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη μέθοδο επεξεργασίας των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται και σχολιάζονται εκτενώς στο κεφάλαιο 6.

#### 4.2 Οπτική μέθοδος ανάλυσης από βίντεο.

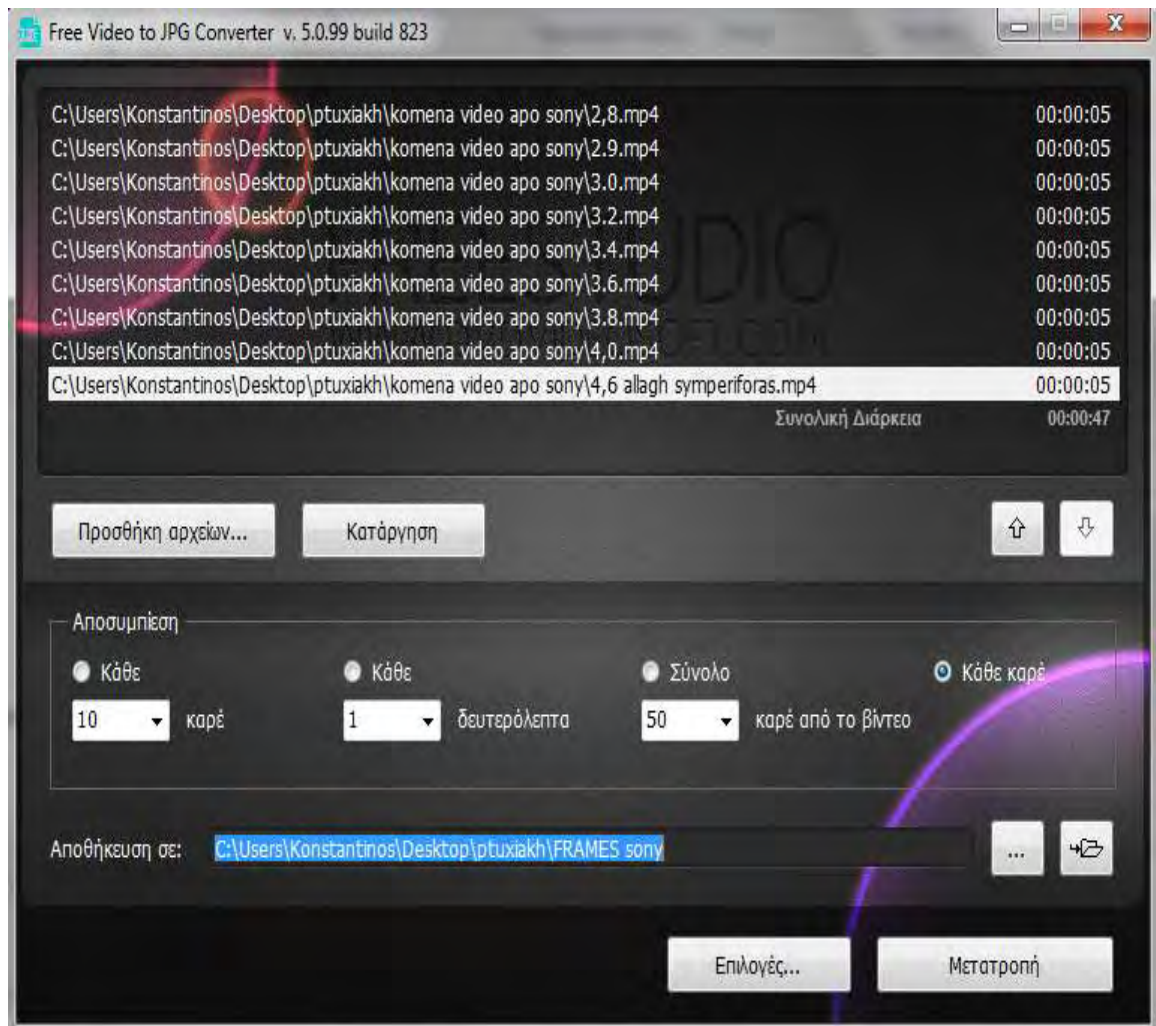
Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η οπτική, όπου βιντεοκάμερα υψηλής ανάλυσης και κάμερα κινητού (smartphone) κατέγραψαν την κίνηση του ελεύθερου άκρου της πτέρυγας για όλες τις συχνότητες διεγέρτη που δόθηκαν από τον inverter. Για την ακρίβεια καταγράφηκε η κίνηση του λείζερ, που ήταν πακτωμένο στο άκρο της πτέρυγας, με κολλητική ταινία και χτυπούσε ακριβώς μέσα στον φακό της βιντεοκάμερας.

Στη συνέχεια ακολούθησε επεξεργασία του βίντεο των ταλαντώσεων ώστε να κοπεί σε μικρότερης διάρκειας βίντεο μέσω του προγράμματος Wondershare Filmora και αναλύθηκαν σε frames μέσα από το πρόγραμμα Free Video to JPG Converter. Αρχικά το πρωτότυπο βίντεο της βιντεοκάμερας ήταν 50 frames/sec και κατά την περικοπή του σε μικρότερα μετατράπηκε σε 30 frames/sec. Η διάρκεια των βίντεο καθορίστηκε, στα 5 sec και έτσι προέκυψαν 150 στιγμιότυπα (frames) με χρονική απόσταση μεταξύ τους περίπου  $t=0,0333$  sec.

Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες από την διαδικασία περικοπής και ανάλυσης σε frames.



Σχήμα 4.7 Καθορισμός της διάρκειας των video με το πρόγραμμα Wondershare Filmora.



Σχήμα 4.8 Ανάλυση των video σε frames με το πρόγραμμα Free Video to JPG Converter.

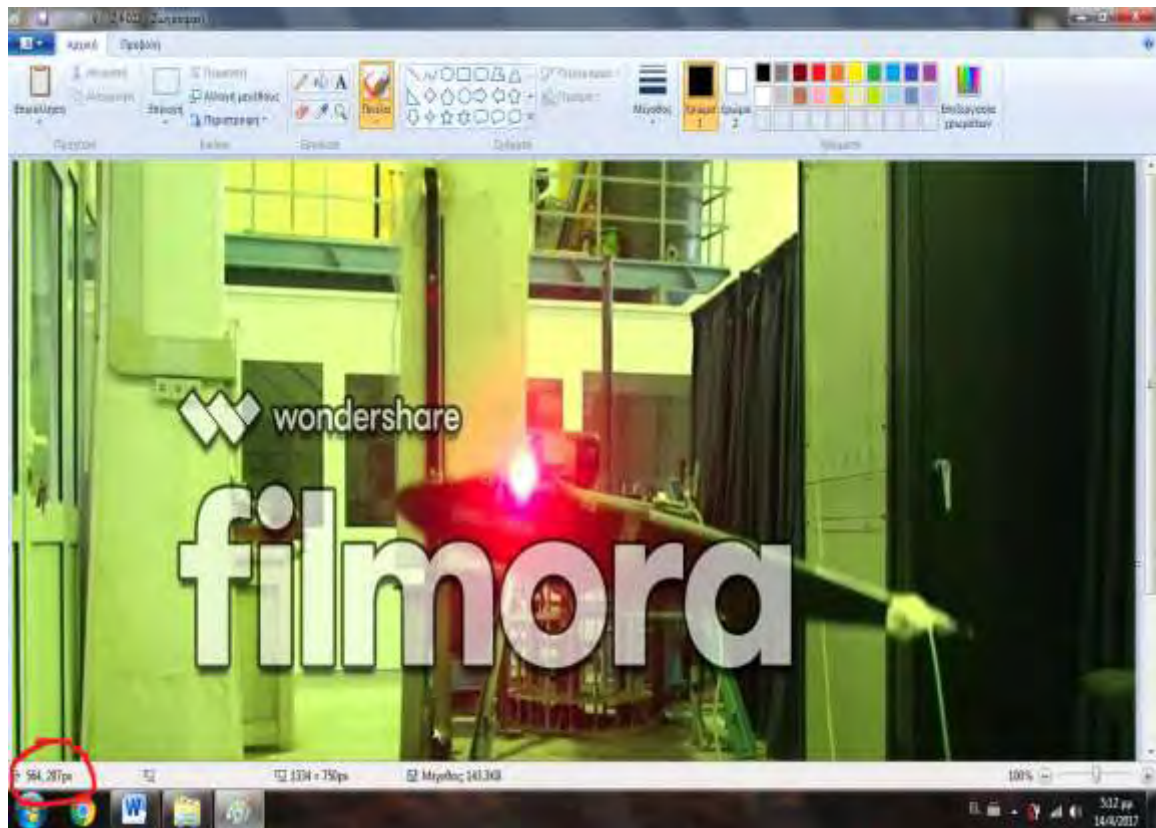
Με αυτόν τον τρόπο, μέσω των frames βρέθηκε η συχνότητα ταλάντωσης της πτέρυγας, αφού σύμφωνα με την θεωρία των ταλαντώσεων, η περίοδος ( $T$ ) της ταλάντωσης για βιντεοκάμερα των 30 frames per second εξάγεται από τον τύπο:

$$T \text{ (sec)} = \text{frame number}/30 \quad (4.2)$$

και η συχνότητα ( $f$ ) από τον τύπο:

$$f \text{ (Hz)} = 1/T \quad (4.3)$$

Το κόκκινο λείζερ σε κάθε στιγμιότυπο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη θέση-απόσταση του σημείου από την αρχή των αξόνων, για την αντίστοιχη χρονική στιγμή. Οι συντεταγμένες των θέσεων υπολογίστηκαν με τη χρήση του προγράμματος ζωγραφική όπως παρουσιάζεται στην επόμενη φωτογραφία.[14]



Σχήμα 4.9 Εύρεση των συντεταγμένων της θέσης του κόκκινου λέιζερ από το πρόγραμμα ζωγραφική.

Κάτω και αριστερά, κυκλωμένες με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι συντεταγμένες της θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels χρησιμοποιώντας ως σημείο μηδέν (0,0) την πάνω αριστερή γωνία για αρχή της μέτρησης. Να σημειωθεί πως τα στιγμιότυπα αυτά είχαν διαστάσεις 1334x750 pixels.

Στη συνέχεια τα pixels μετατράπηκαν σε χιλιοστά (mm) γνωρίζοντας πως το μήκος της χορδής της πτέρυγας NACA 0012 είναι 0,53 mm και στο πρόγραμμα ζωγραφική αυτή η απόσταση αντιστοιχεί σε απόσταση 660 pixels. Έτσι κάνοντας την αναλογία προέκυψε ο παρακάτω τύπος:

$$dx \text{ (mm)} = dx \text{ (pixels)} * 530/660 \quad (4.4)$$

Εφόσον λοιπόν υπολογισθούν η θέση και η αντίστοιχη χρονική στιγμή, μπορούν στη συνέχεια να εξαχθούν αποτελέσματα για την στιγμιαία ταχύτητα παραγωγίζοντας τη θέση ως προς το χρόνο με την χρήση του τύπου:

$$U = dx/dt \quad (4.5)$$

αλλά και για την στιγμιαία επιτάχυνση παραγωγίζοντας την ταχύτητα με τον χρόνο ως εξής [15]:

$$a = dU/dt \quad (4.6)$$

Μέσα και πάλι από τις δυνατότητες του προγράμματος OriginPro (*student version*).

Τελικά, από στατιστική ανάλυση των στιγμιαίων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων και πάλι με χρήση του προγράμματος OriginPro (*student version*), βρέθηκαν οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις τους, για τις μισές περίπου τιμές συχνοτήτων του inverter. Ακόμα, απεικονίστηκε σε διαγράμματα η ακριβής κίνηση του κόκκινου λέιζερ και στους δύο άξονες (x,y) σε pixels, επίσης για τις μισές περίπου τιμές συχνοτήτων του inverter, μόνο για 3 περιόδους ταλάντωσης του ακροπτερυγίου, και αναλύθηκαν στατιστικά με σκοπό να υπολογιστούν τα κέντρα βάρους τους. Όλα αυτά ομαδοποιήθηκαν και θα παρουσιαστούν αναλυτικά σε διαγράμματα με σχολιασμό στο κεφάλαιο 5 καθώς και θα παρουσιαστούν διαγράμματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μεθόδων στο κεφάλαιο 7.

#### 4.3 Εύρεση της συχνότητας του διεγέρτη-ηλεκτροκινητήρα.

Όπως ακριβώς βιντεοσκοπήθηκε το ακροπτερύγιο της πτέρυγας για κάθε συχνότητα του inverter, το ίδιο συνέβη και στους δύο παράκεντρους βραχίονες του τριφασικού μοτέρ-διεγέρτη, που θα παρουσιαστεί ακριβώς στο επόμενο κεφάλαιο, με μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκε κινητό LG αυτή την φορά με ανάλυση κάμερας 29 frames/sec. Τα βίντεο που τραβήχτηκαν αναλύθηκαν σε στιγμιότυπα, οπού και προέκυψε η συχνότητα ταλάντωσης του με την ίδια ακριβώς μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην οπτική μέθοδο ανάλυσης που παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 4.2. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα παρουσιαστούν και συγκριθούν με τις υπόλοιπες συχνότητες στο κεφάλαιο 7.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΒΙΝΤΕΟ




Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και σχολιασθούν τα αποτελέσματα της οπτικής μεθόδου ανάλυσης των ταλαντώσεων από την επεξεργασία των βίντεο που τραβήχτηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Με την εκτέλεση των πειραμάτων, στόχος είναι να προκύψουν αποτελέσματα σχετικά με το εύρος των επιταχύνσεων και των μετατοπίσεων που αναπτύσσει η πτέρυγα, καθώς ταλαντώνεται σε διάφορες συχνότητες.

Σημειώνεται πως όλα τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν και σε αυτό, αλλά και στα δύο επόμενα κεφάλαια, προέκυψαν μέσα από το πρόγραμμα OriginPro (*student version*).

Για την διαδικασία των ταλαντώσεων, το inverter του μοτέρ ρυθμίστηκε σε συγκεκριμένες συχνότητες, οι οποίες διαμόρφωσαν αντίστοιχα και τις συχνότητες του περιστρεφόμενου βραχίονα του τριφασικού μοτέρ. Συγκεκριμένα οι εξαναγκασμένες ταλαντώσεις εκτελέστηκαν σε συχνότητες inverter από 2,2 έως 9 Hz. Πρώτα απ' όλα όμως, έγινε πείραμα χωρίς την επίδραση κάποιου περιοδικού διεγέρτη, με σκοπό να υπολογιστεί η ιδιοσυχνότητα της πτέρυγας και στην κατακόρυφη διεύθυνση  $y$ . Συγκεκριμένα, στο ακροπερύγιο της πτέρυγας ασκήθηκε μια αρχική, σημειακή, στιγμιαία δύναμη με το χέρι και στη συνέχεια η πτέρυγα αφέθηκε να ταλαντωθεί με την ιδιοσυχνότητά της. Μέσα από τη διαδικασία αυτή (και με τη βοήθεια σχετικού video), υπολογίστηκε η ιδιοσυχνότητα της πτέρυγας ίση με  $f_0=1,25$  Hz. Συνεπώς για συχνότητες του βραχίονα (διεγέρτης) που πλησιάζουν στην τιμή αυτή, το πλάτος ταλάντωσης στην κατακόρυφη διεύθυνση  $y$  θα αυξάνεται και το σύστημα θα οδηγείται στο συντονισμό.

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα είδη ταλάντωσης της πτέρυγας και τα αντίστοιχα σύμβολα που τα αντιπροσωπεύουν ώστε να γίνεται κατανοητή στη συνέχεια η μορφή της ταλάντωσης ανάλογα με τις συχνότητες inverter, βραχίονα του μοτέρ και πτέρυγας.

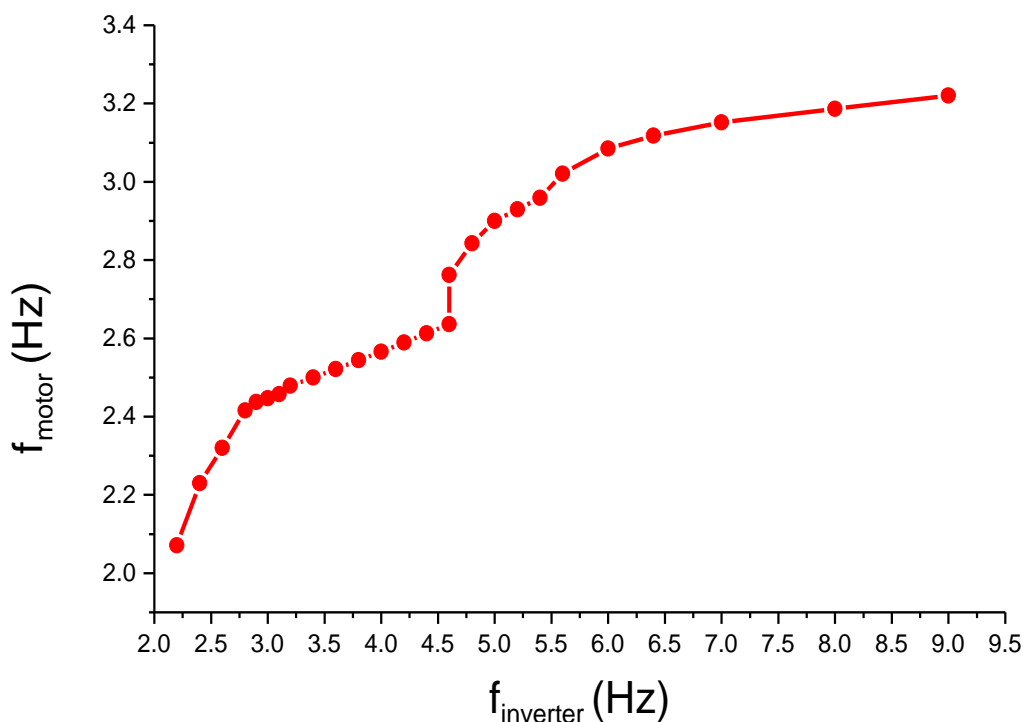
### ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

ΕΙΔΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ	ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ
<b>flapwise</b> (εγκάρσιες)	
<b>edgewise</b> (διαμήκης)	
<b>Μεικτά</b> (συνδυασμός των 2 προηγούμενων)	

Στον πίνακα 5.2 που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές των συχνοτήτων του μοτέρ, που προέκυψαν από την επεξεργασία των βίντεο του περιστρεφόμενου βραχίονα, που παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 4, για τις αντίστοιχες τιμές συχνοτήτων του inverter, καθώς και στο σχήμα 5.1 διάγραμμα αυτών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2

$f_{\text{inverter}}$ (Hz)	$f_{\text{motor}}$ (Hz)	ΕΙΔΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ
2.2	2.07	κυρίως ↓
2.4	2.23	κυρίως ↓
2.6	2.32	κυρίως ↓
2.8	2.41	κυρίως ↓
2.9	2.43	κυρίως ↓
3	2.44	κυρίως ↓
3.1	2.45	κυρίως ↓
3.2	2.47	κυρίως ↓
3.4	2.5	κυρίως ↓
3.6	2.52	κυρίως ↓
3.8	2.54	κυρίως ↓
4	2.56	κυρίως ↓
4.2	2.58	κυρίως ↓
4.4	2.61	κυρίως ↓
4.6 (before change of behavior)	2.63	κυρίως ↓
4.6 (after change of behavior)	2.76	↕
4.8	2.84	↕
5	2.9	↕
5.2	2.92	↕
5.4	2.95	↕
5.6	3.02	↕
6	3.08	↕
6.4	3.11	↕
7	3.15	↕
8	3.18	↕
9	3.22	↕



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα μεταξύ συχνοτήτων inverter και μοτέρ-διεγέρτη.

Αρχικά, από το σχήμα 5.1 παρατηρείται μια γραμμική συμπεριφορά μεταξύ των συχνοτήτων του inverter και του μοτέρ, με σταδιακές αλλαγές στην κλίση της καμπύλης, με εντονότερη αυτήν, στα 4,6 Hz συχνότητα inverter, η οποία δικαιολογείται, λόγω της ριζικής αλλαγής της συμπεριφοράς της πτέρυγας. Αυτή η απότομη αλλαγή έγινε, επειδή οι συχνότητες μοτέρ και πτέρυγας έφτασαν πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα της πτέρυγας στην οριζόντια διεύθυνση. Συγκεκριμένα το ακροπτερύγιο της πτέρυγας, ενώ πριν τα 4,6 Hz ταλαντωνόταν κυρίως κατά τον κατακόρυφο άξονα y, με ελάχιστη μετατόπιση στον οριζόντιο άξονα x (αναλογία 10:1 έως 5:1 όπως προκύπτει από τα επόμενα διαγράμματα του κεφαλαίου), ξαφνικά χωρίς να μεταβληθεί η συχνότητα στον inverter μέσα σε περίπου 15 δευτερόλεπτα, όπως προκύπτει από το βίντεο του πειράματος, η συμπεριφορά άλλαξε εντελώς, με το ακροπτερύγιο τώρα, να εκτελεί μια πιο ελλειψοειδή κίνηση, με μετατοπίσεις στον άξονα x ελάχιστα μικρότερες από αυτές του άξονα y. Στη συνέχεια όμως των πειραμάτων, και όσο αυξανόταν η συχνότητα στον inverter, οι μετατοπίσεις στον y έμεναν σταθερές ενώ του x αρχικά αυξήθηκαν και μετέπειτα μειώνονταν συνεχώς.

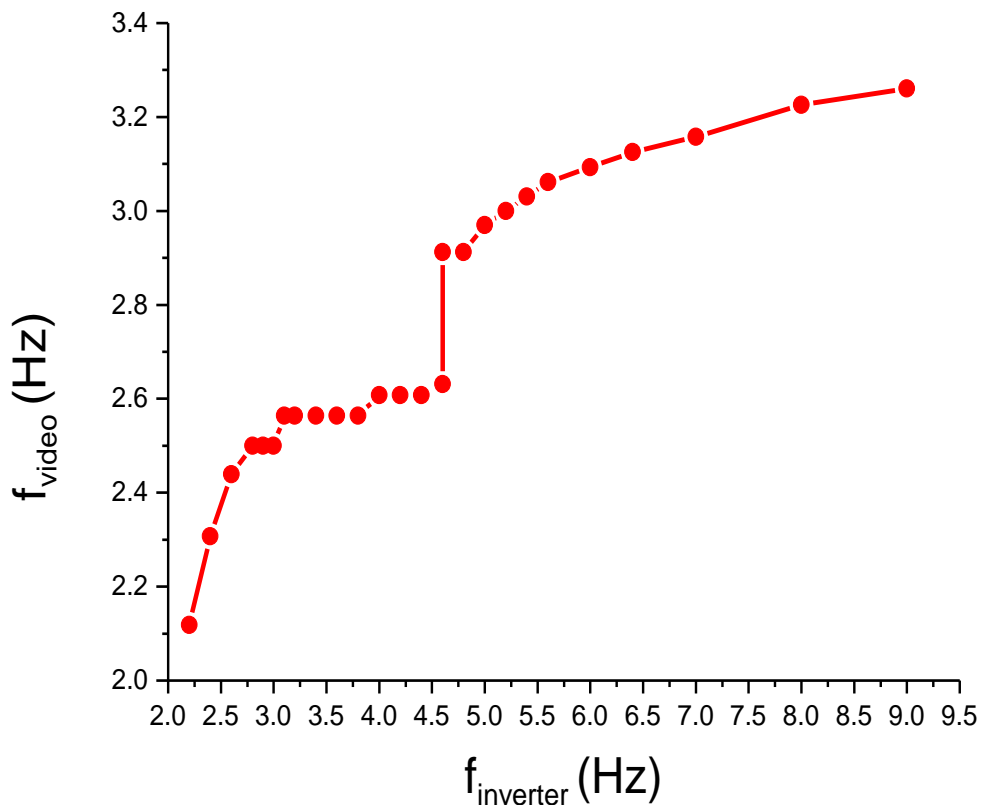
Επίσης, παρατηρώντας το διάγραμμα, ενώ αρχικά οι τιμές των συχνοτήτων ξεκινούν σχεδόν από την ίδια τιμή, η κλίση της καμπύλης σταδιακά μειώνεται, καταλήγοντας στο τελευταίο πείραμα να είναι σχεδόν τριπλάσια η τιμή συχνότητας του inverter από του μοτέρ. Όλα αυτά τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποδεικνύουν πως το μοτέρ που ήταν πακτωμένο πάνω στην πτέρυγα, λόγω αυτής της σύνθετης και περίπλοκης κίνησης που εκτελούσε αυτή, δεχόταν τέτοιες περιοδικές και σύνθετες δυνάμεις, καθώς ήταν και το γεγονός του διαφορετικού μήκους των 2 ενωμένων βραχιόνων του, που δεν του επέτρεπαν να ακολουθήσει επακριβώς τις μεταβολές του inverter.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας των τιμών των συχνοτήτων του ακροπτερυγίου της πτέρυγας ελικοπτέρου BELL HUEY II, που προέκυψαν από την οπτική μέθοδο ανάλυσης μέσω του κόκκινου λέιζερ που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, για τις αντίστοιχες τιμές συχνοτήτων του inverter καθώς και διάγραμμα αυτών.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3**

$f_{\text{inverter}}$ (Hz)	$f_{\text{video}}$ (Hz)	ΕΙΔΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ
2.2	2.11	κυρίως $\updownarrow$
2.4	2.30	κυρίως $\updownarrow$
2.6	2.43	κυρίως $\updownarrow$
2.8	2.5	κυρίως $\updownarrow$
2.9	2.5	κυρίως $\updownarrow$
3	2.5	κυρίως $\updownarrow$
3.1	2.56	κυρίως $\updownarrow$
3.2	2.56	κυρίως $\updownarrow$
3.4	2.56	κυρίως $\updownarrow$
3.6	2.56	κυρίως $\updownarrow$
3.8	2.56	κυρίως $\updownarrow$
4	2.60	κυρίως $\updownarrow$
4.2	2.60	κυρίως $\updownarrow$
4.4	2.60	κυρίως $\updownarrow$
4.6 (before change of behavior)	2.63	κυρίως $\updownarrow$
4.6 (after change of behavior)	2.91	$\updownarrow$
4.8	2.91	$\updownarrow$
5	2.97	$\updownarrow$
5.2	3	$\updownarrow$
5.4	3.03	$\updownarrow$
5.6	3.06	$\updownarrow$
6	3.09	$\updownarrow$
6.4	3.12	$\updownarrow$
7	3.15	$\updownarrow$
8	3.22	$\updownarrow$
9	3.26	$\updownarrow$

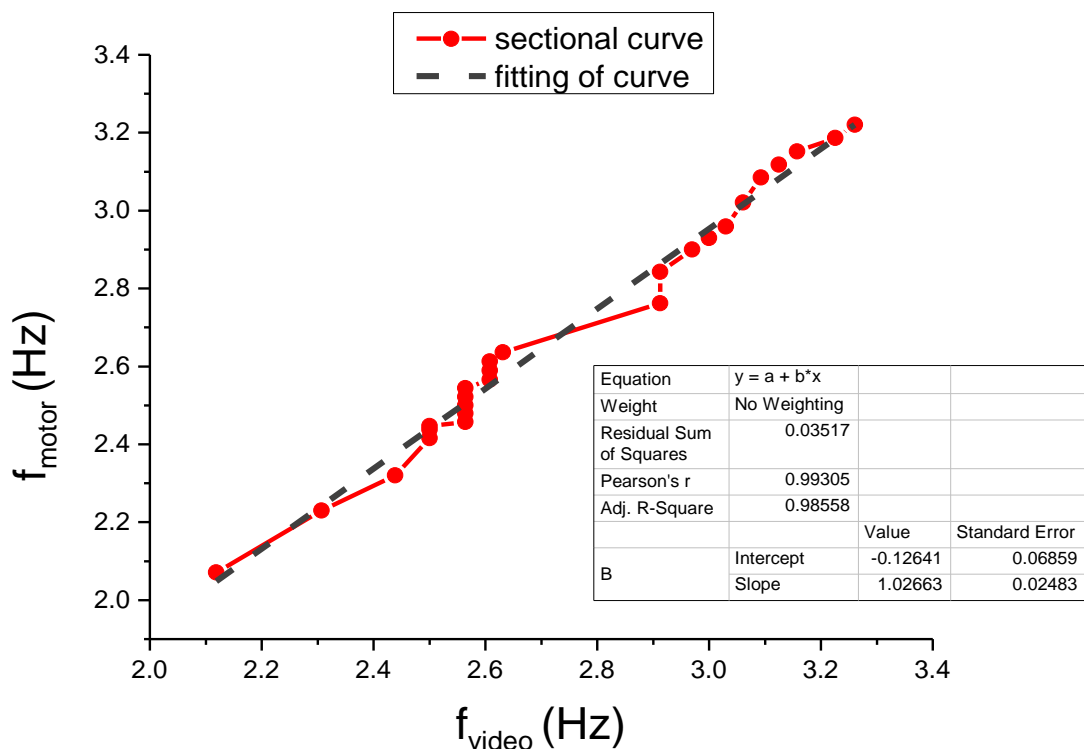




Σχήμα 5.2 Διάγραμμα μεταξύ συχνότητας inverter και συχνότητας ταλάντωσης του ακροπερυγίου της πτέρυγας, όπως αυτή προκύπτει μέσω της οπτικής μεθόδου ανάλυσης από το βίντεο.

Παρατηρώντας το σχήμα 5.2 φαίνεται μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ των 2 συχνοτήτων, με σταδιακές μεταβολές της κλίσης της καμπύλης με σημαντικότερη αυτήν στα 4,6 Hz όπου γίνεται  $90^\circ$  ως προς τον οριζόντιο άξονα, γεγονός λογικό, εφόσον εκεί συνέβη η αλλαγή στην συμπεριφορά της πτέρυγας και η τιμή της συχνότητας της μεταπήδησε ξαφνικά από τα 2,63 στα 2,91 Hz. Επίσης, να σημειωθεί πως ενώ αρχικά οι τιμές των συχνοτήτων ξεκινούν σχεδόν από την ίδια τιμή, καταλήγουν στο τελευταίο πείραμα να είναι σχεδόν τριπλάσια η τιμή της συχνότητας του inverter από της πτέρυγας.

Στη συνέχεια στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται διάγραμμα μεταξύ συχνότητας ταλάντωσης του μοτέρ-διεγέρτη και συχνότητας ταλάντωσης του ακροπερυγίου της πτέρυγας όπως αυτή προκύπτει μέσω της οπτικής ανάλυσης από το βίντεο. Ακόμα, στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η προσαρμογή της καμπύλης (fitting of curve) ώστε να φανούν οι αποκλίσεις των τιμών της.

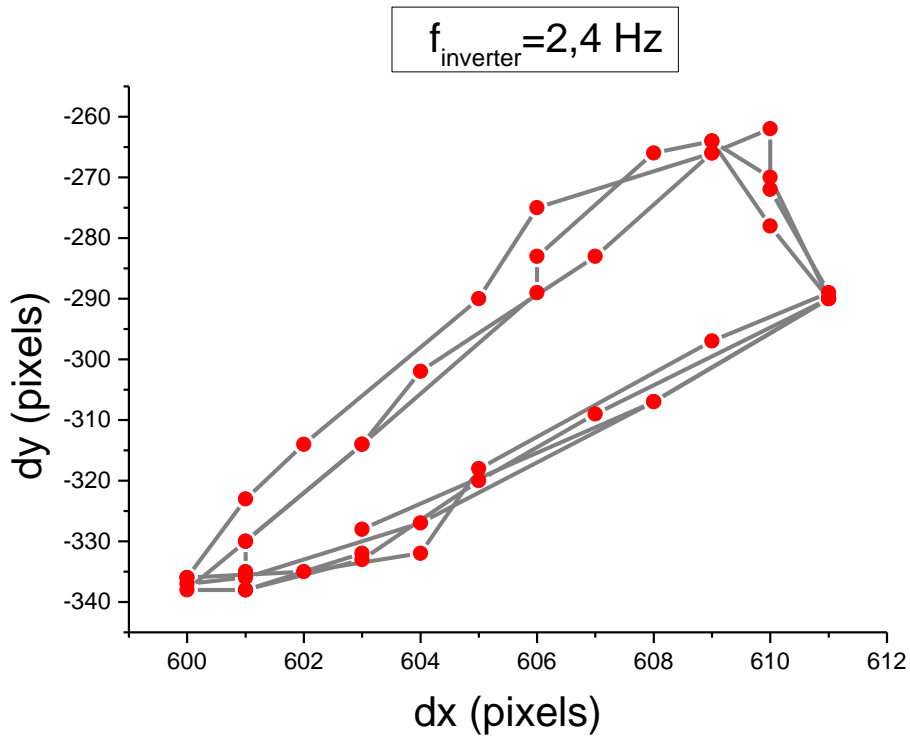


Σχήμα 5.3 Διάγραμμα μεταξύ συχνότητας ταλάντωσης του μοτέρ-διεγέρτη και συχνότητας ταλάντωσης του ακροπερυγίου της πτέρυγας όπως αυτή προκύπτει μέσω της οπτικής ανάλυσης από το βίντεο.

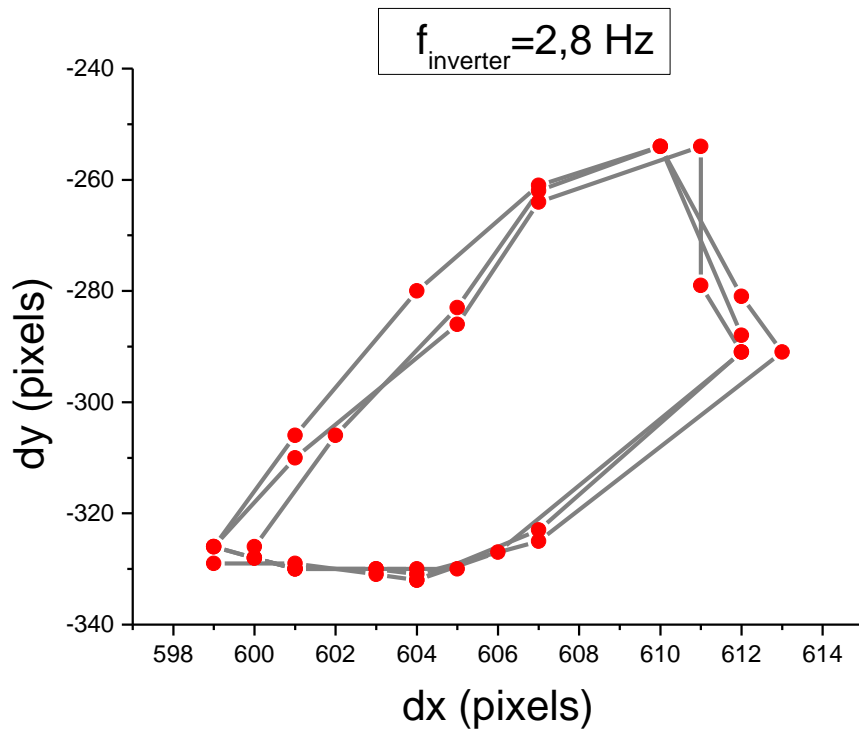
Από το σχήμα 5.3 παρατηρείται πως το ακροπερύγιο της πτέρυγας ακολουθεί σχεδόν ίδια συμπεριφορά με αυτή του μοτέρ, δηλαδή, κυρίως γραμμική με μικρές αλλαγές της κλίσης της καμπύλης, με σημαντικότερη, αυτήν στα 4,6 Hz συχνότητα inverter, όπου αλλάζει και η συμπεριφορά της πτέρυγας όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται και από την στατιστική ανάλυση του διαγράμματος, αφού η προσαρμοσμένη καμπύλη προκύπτει σχεδόν ευθεία με συντελεστή συσχέτισης Pearson r σχεδόν μονάδα, με ακρίβεια 2 δεκαδικών ψηφίων. Σε αυτό το σημείο λοιπόν, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως μοτέρ και πτέρυγα καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων ταλαντώνονταν με περίπου ίδιες συχνότητες.

Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις ομάδες διαγραμμάτων. Η πρώτη ομάδα απεικονίζει την ακριβή θέση του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων για 13 από τις 25 συχνότητες του inverter, η δεύτερη, τις μετατοπίσεις του κόκκινου λέιζερ σε χιλιοστά στο οριζόντιο άξονα x, με τους αντίστοιχους χρόνους σε δευτερόλεπτα για 17 από τις 25 συχνότητες του inverter ενώ η τρίτη, τις μετατοπίσεις του κόκκινου λέιζερ σε χιλιοστά στο κατακόρυφο άξονα y, με τους αντίστοιχους χρόνους σε δευτερόλεπτα για 13 από τις 25 συχνότητες του inverter. Σημειώνεται πως και οι τρεις ομάδες διαγραμμάτων έχουν υπολογιστεί για τρεις μόνο περιόδους ταλάντωσης του ακροπερυγίου.

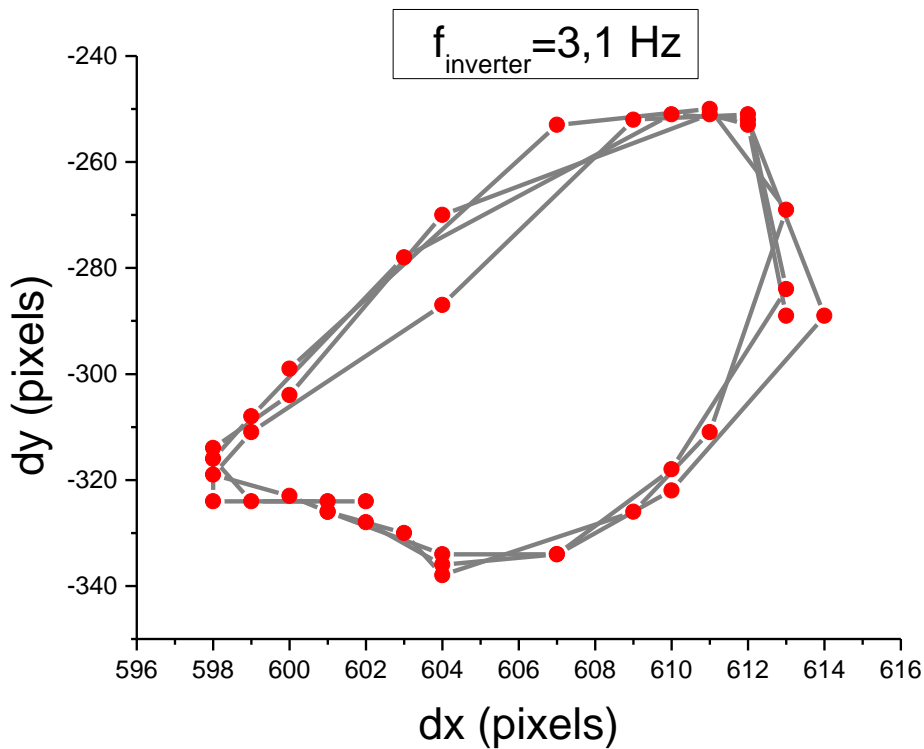
## 1η ΟΜΑΔΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ



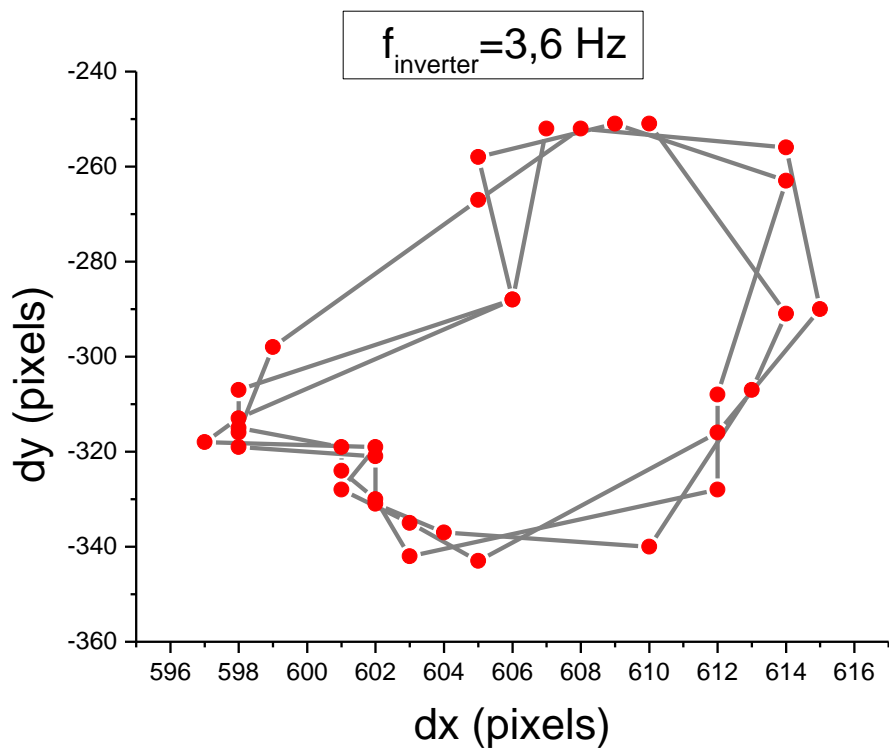
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{\text{inverter}}=2,4 \text{ Hz}$ .



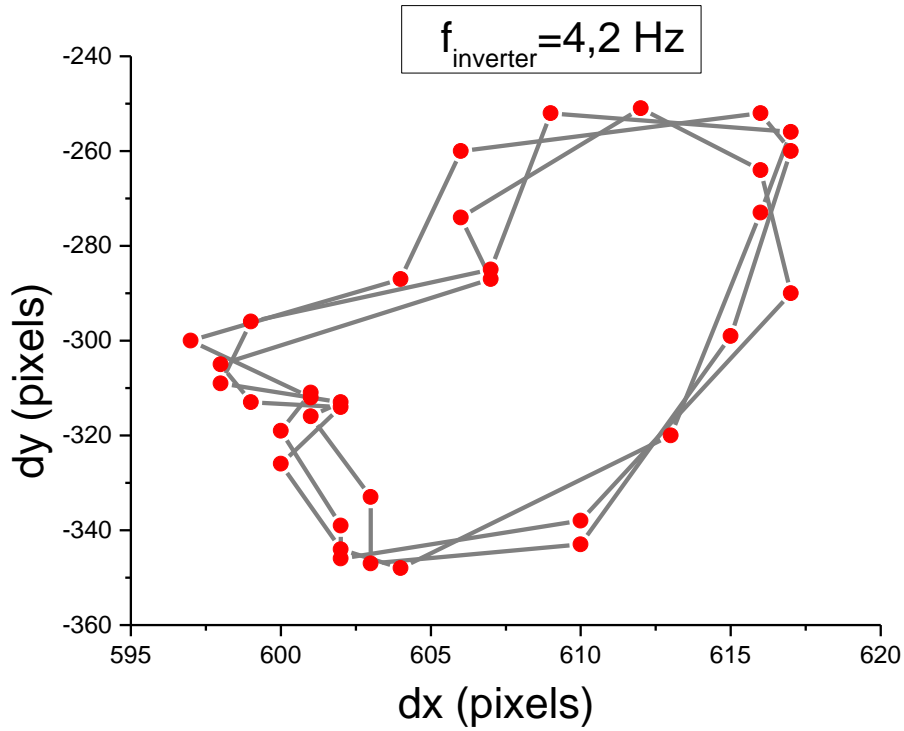
Σχήμα 5.5 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{\text{inverter}}=2,8 \text{ Hz}$ .



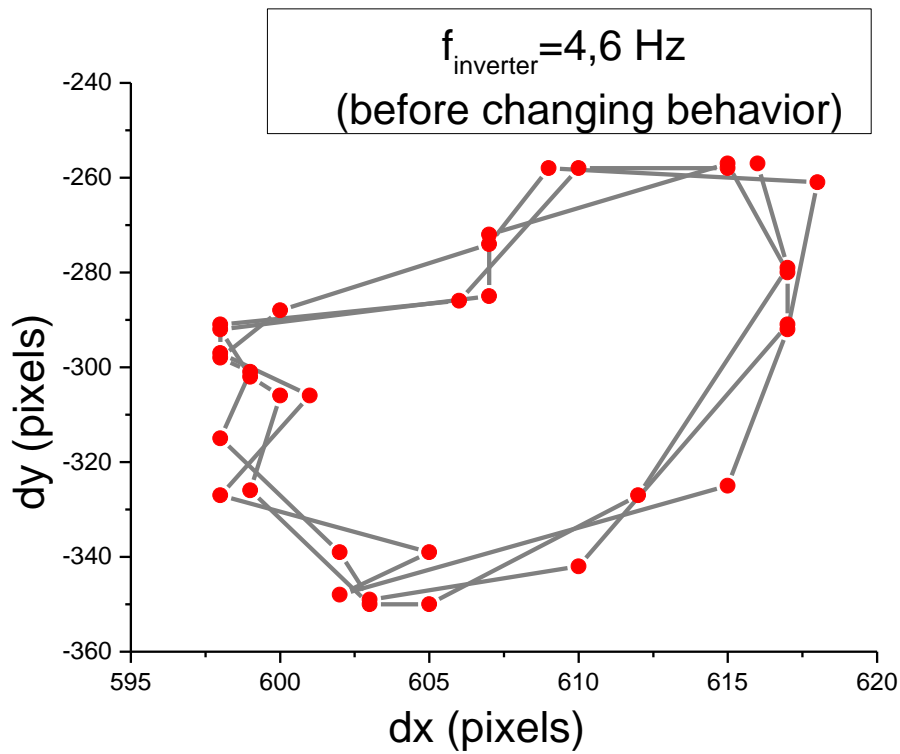
Σχήμα 5.6 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{inverter} = 3,1 \text{ Hz}$ .



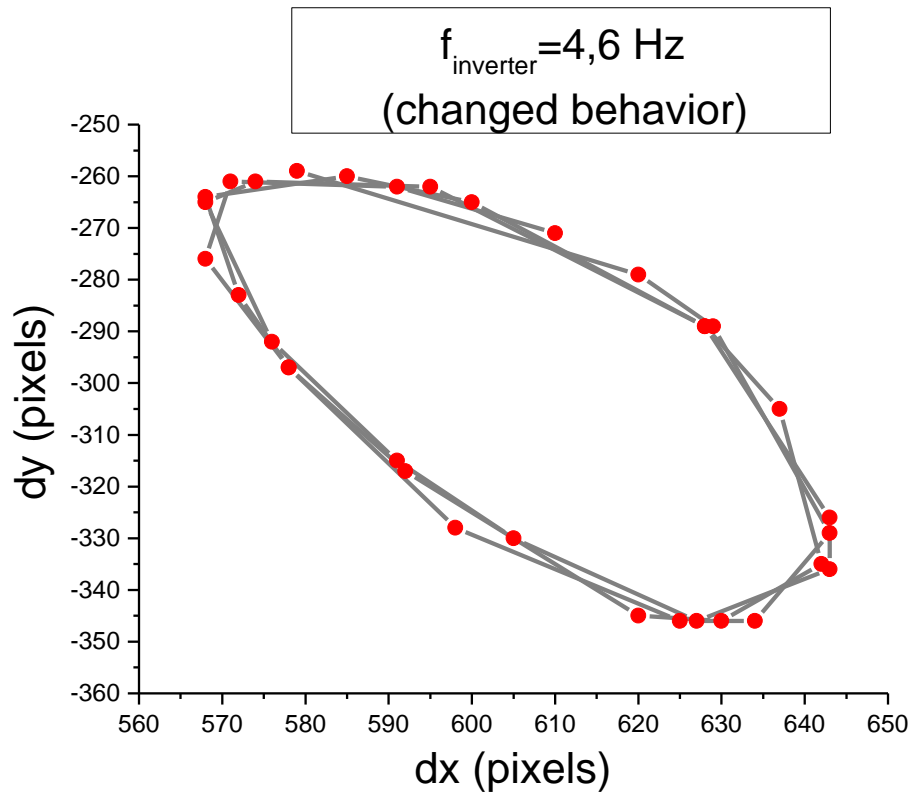
Σχήμα 5.7 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{inverter} = 3,6 \text{ Hz}$ .



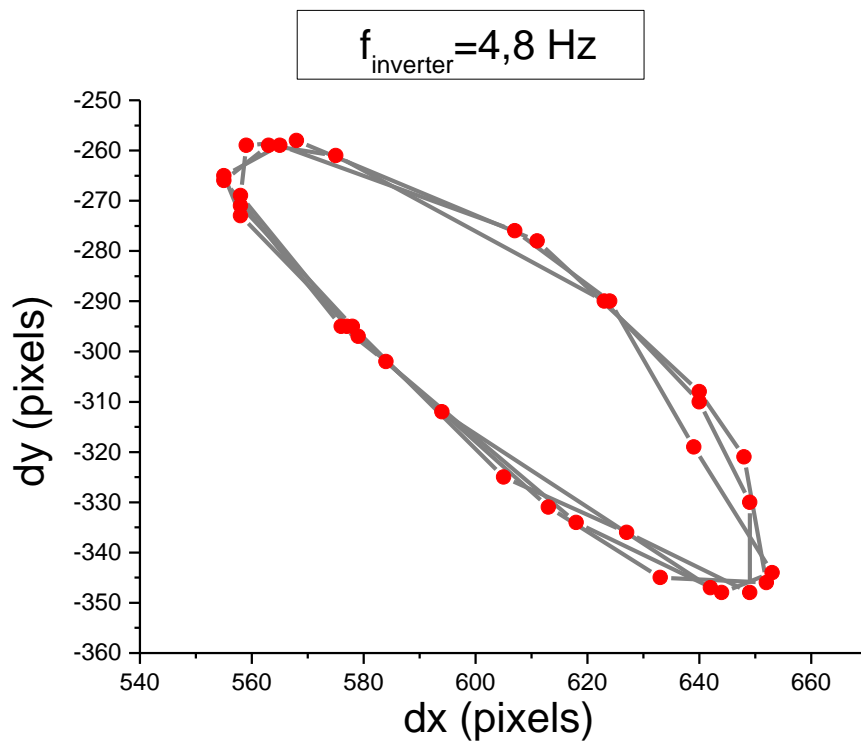
Σχήμα 5.8 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{\text{inverter}} = 4,2 \text{ Hz}$ .



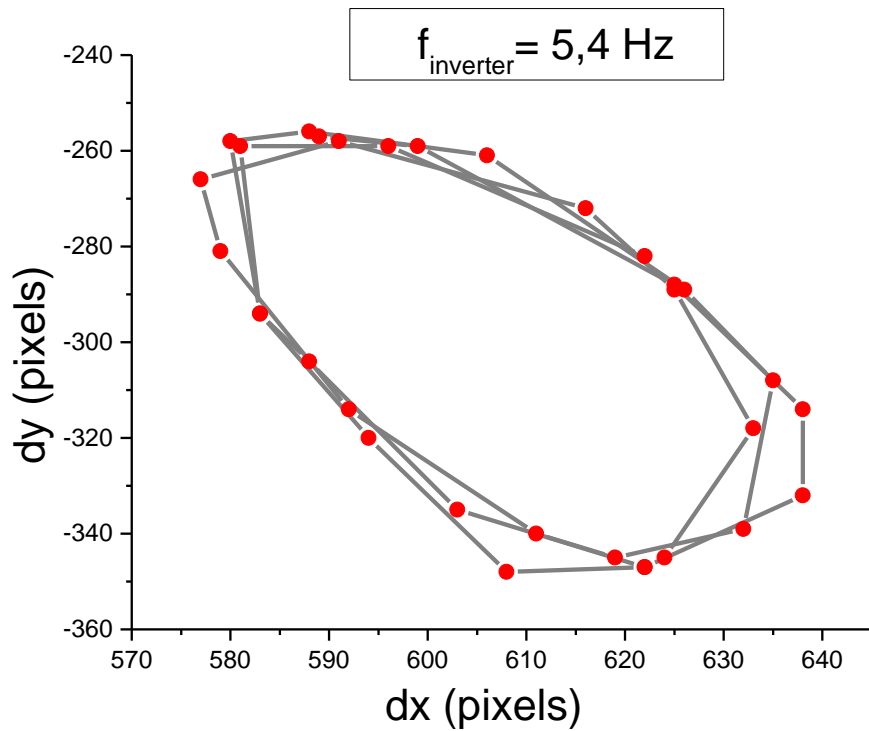
Σχήμα 5.9 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{\text{inverter}} = 4,6 \text{ Hz}$  ακριβώς πριν αλλάξει η συμπεριφορά της πτέρυγας.



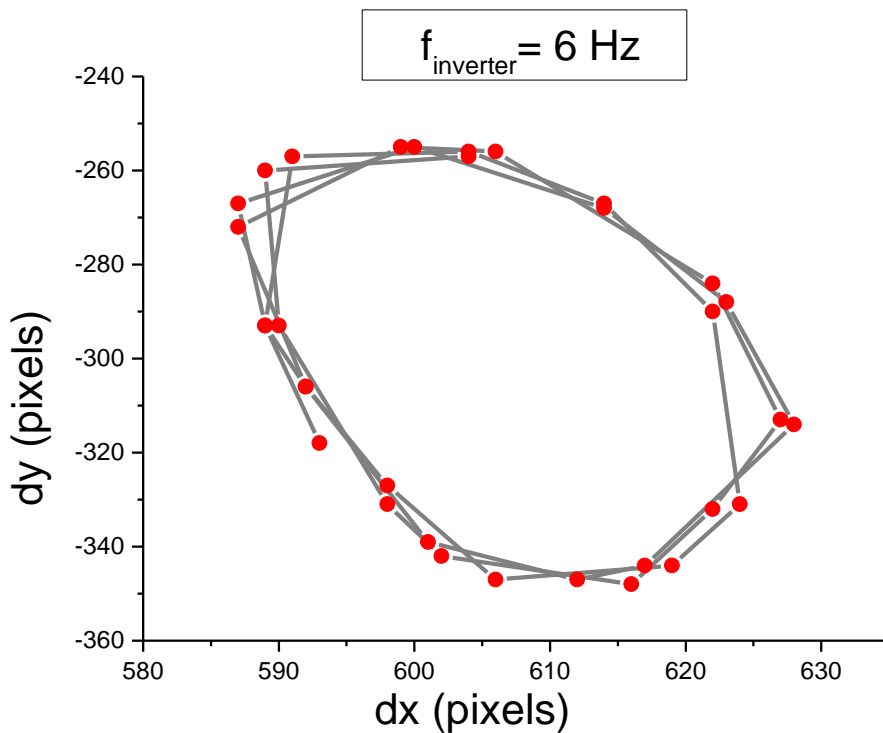
Σχήμα 5.10 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{\text{inverter}} = 4,6 \text{ Hz}$  και αλλαγμένη πλέον συμπεριφορά της πτέρυγας.



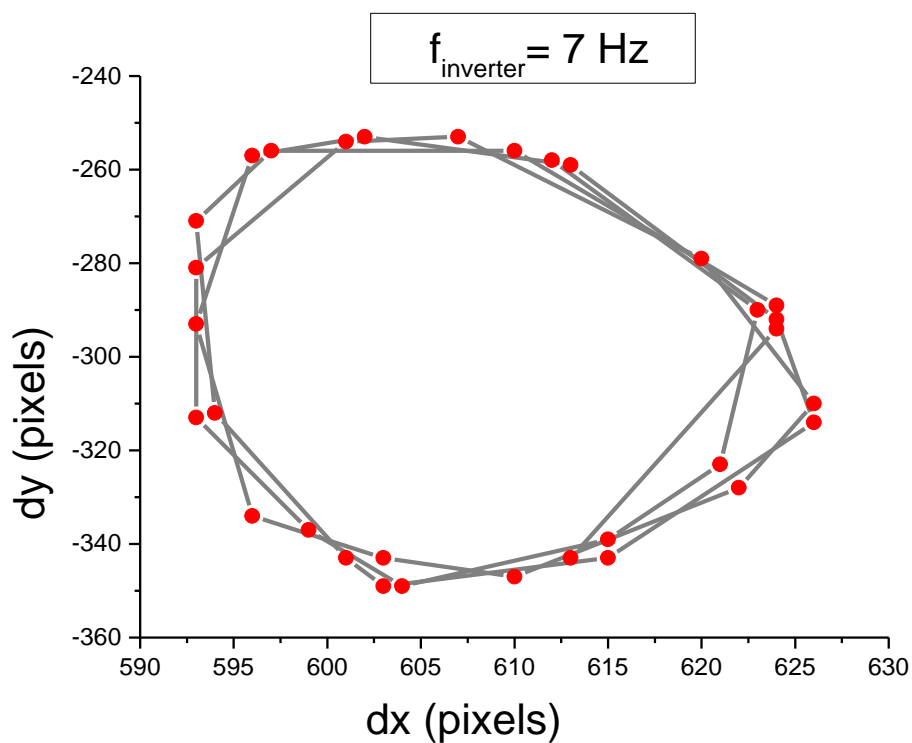
Σχήμα 5.11 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{\text{inverter}} = 4,8 \text{ Hz}$ .



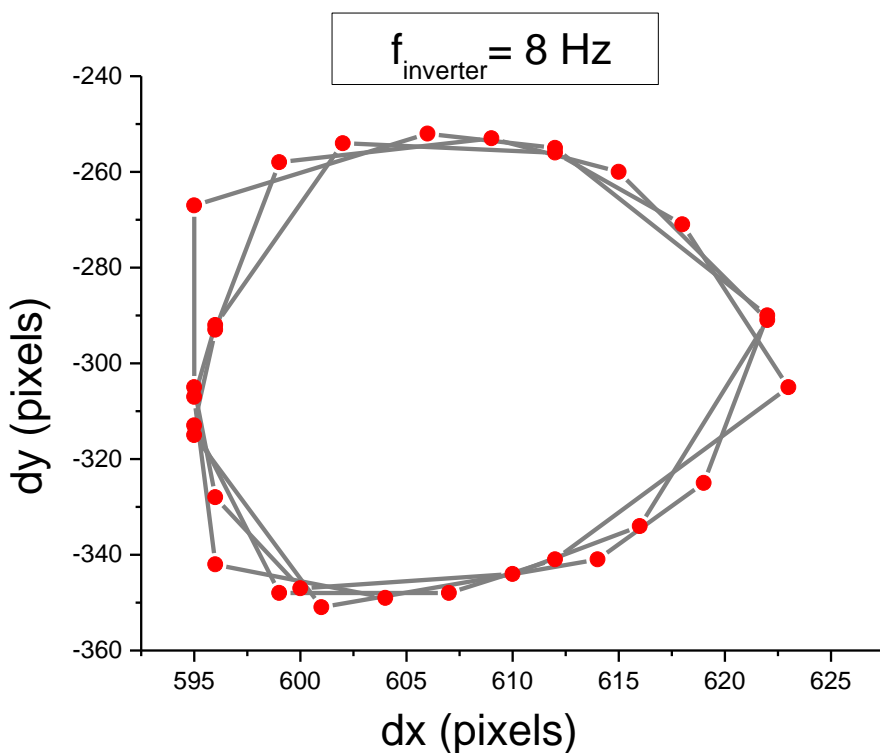
Σχήμα 5.12 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων (x,y) για  $f_{\text{inverter}}=5,4 \text{ Hz}$ .



Σχήμα 5.13 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων (x,y) για  $f_{\text{inverter}}=6 \text{ Hz}$ .

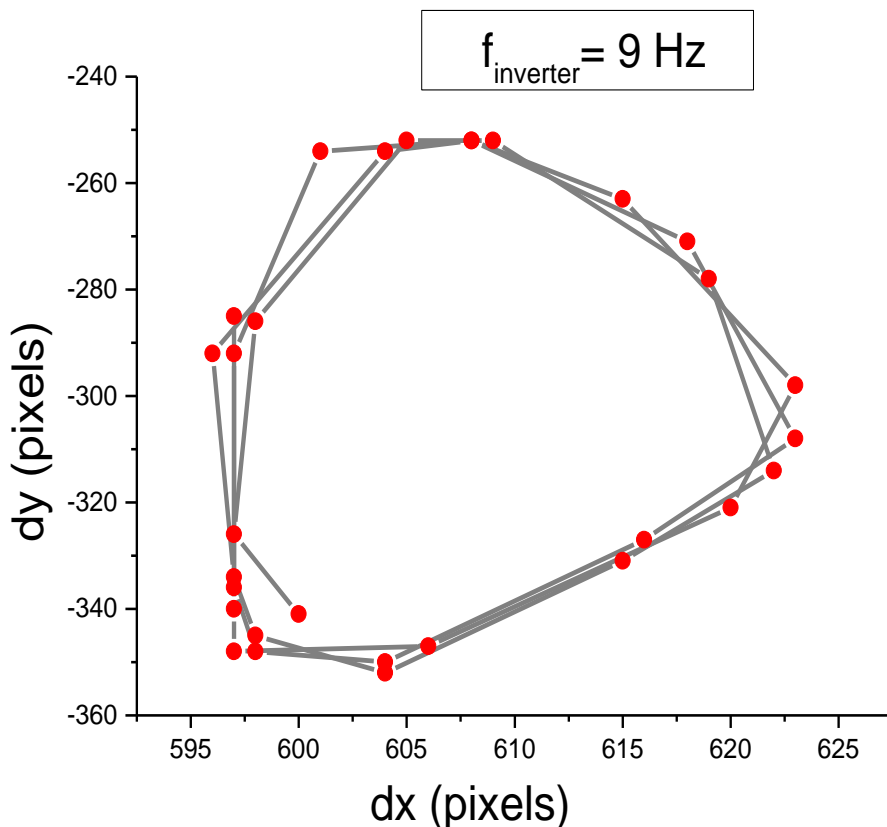


Σχήμα 5.14 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{\text{inverter}}=7 \text{ Hz}$ .



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{\text{inverter}}=8 \text{ Hz}$ .

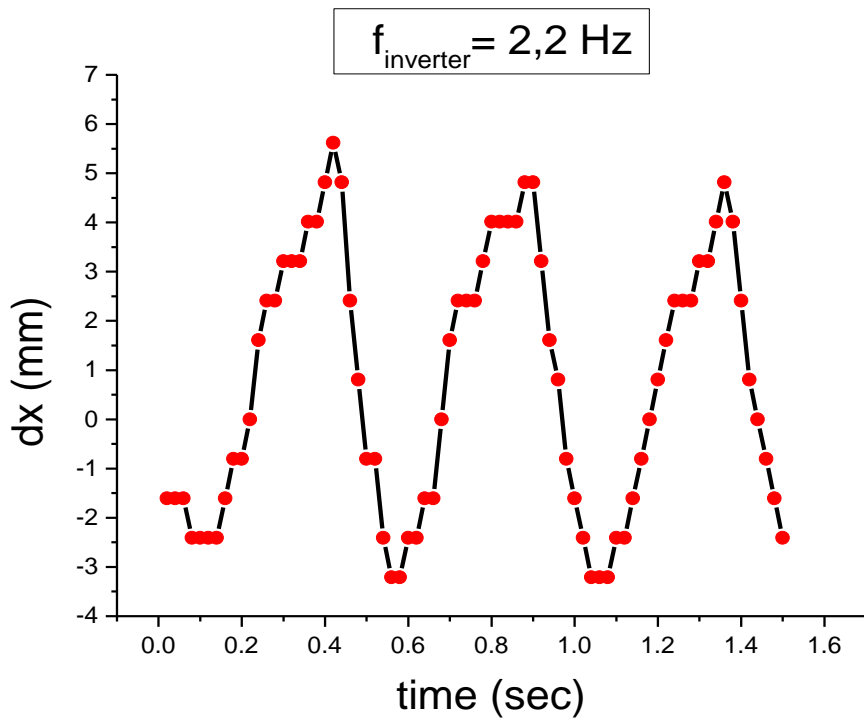




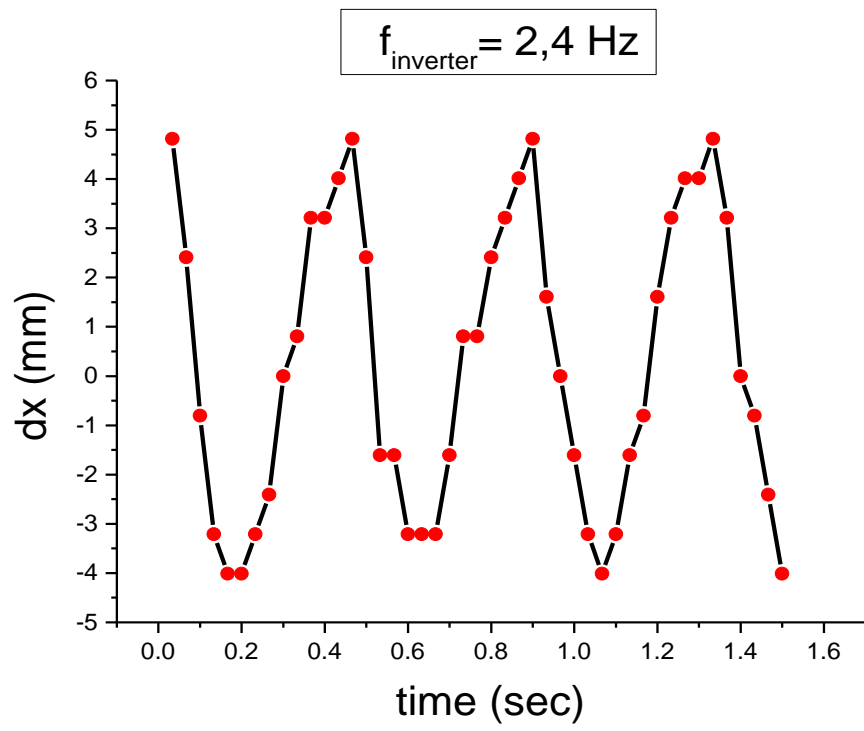
Σχήμα 5.16 Διάγραμμα της ακριβούς θέσης του κόκκινου λέιζερ σε pixels σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων  $(x,y)$  για  $f_{inverter}=9\text{ Hz}$ .

Βλέποντας λοιπόν, την τροχιά του κόκκινου λέιζερ φαίνεται ξεκάθαρα η αλλαγή στην συμπεριφορά της πτέρυγας με την αύξηση της συχνότητας στον inverter. Συγκεκριμένα παρατηρείται πως όσο η συχνότητα στον inverter αυξάνει μέχρι την τιμή 4,6 Hz όπου και συνέβη αυτή η αλλαγή, η ταλάντωση στον οριζόντιο άξονα  $x$  που μελετάμε, είναι πολύ μικρότερη από αυτήν στην διεύθυνση  $y$  και μεγαλώνει ελάχιστα. Όταν όμως γίνεται ξαφνικά η αλλαγή στα 4,6 Hz η τροχιά πλέον σχηματίζει μια έλλειψη και οι μετατοπίσεις στον  $x$  σχεδόν ισούνται με αυτές στον  $y$ . Στη συνέχεια όμως των πειραμάτων η μετατόπιση στον οριζόντιο άξονα αρχικά αυξάνει ξεπερνώντας τις μετατοπίσεις του άξονα  $y$  για λίγο (4,8-5 Hz) και μετά μικραίνει συνεχώς, ενώ στον κατακόρυφο παραμένει σταθερή. Παρατηρούμε δηλαδή ότι σε συχνότητα inverter 4,8-5 Hz που αντιστοιχεί σε συχνότητα ταλάντωσης της πτέρυγας 2,91-2,97 Hz έχουμε μεγιστοποίηση του πλάτους της ταλάντωσης στην οριζόντια διεύθυνση  $x$ . Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό αφού η πτέρυγα ‘έπιασε’ την ιδιοσυχνότητά της (2,95 Hz που υπολογίστηκε στην παράγραφο 4.1) και το σύστημα οδηγήθηκε σε συντονισμό.

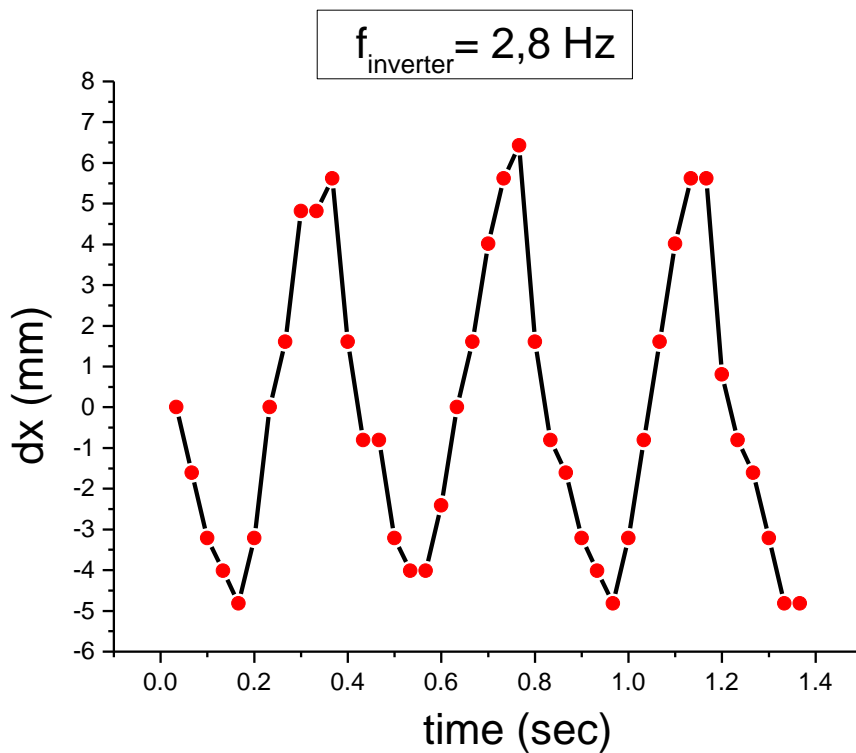
## 2η ΟΜΑΔΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ( $\leftrightarrow$ )



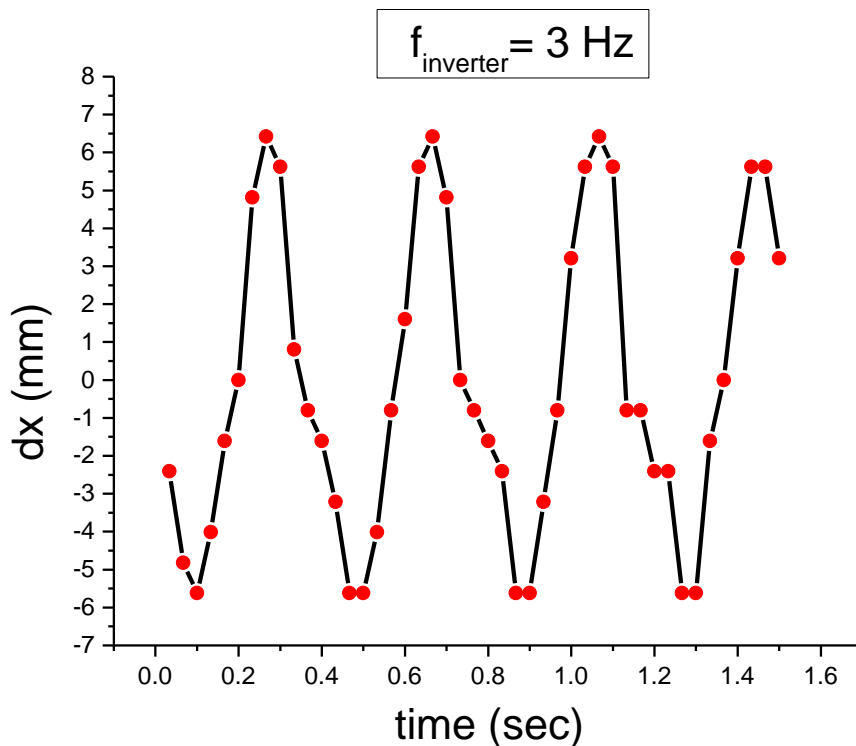
Σχήμα 5.17 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=2,2 \text{ Hz}$ .



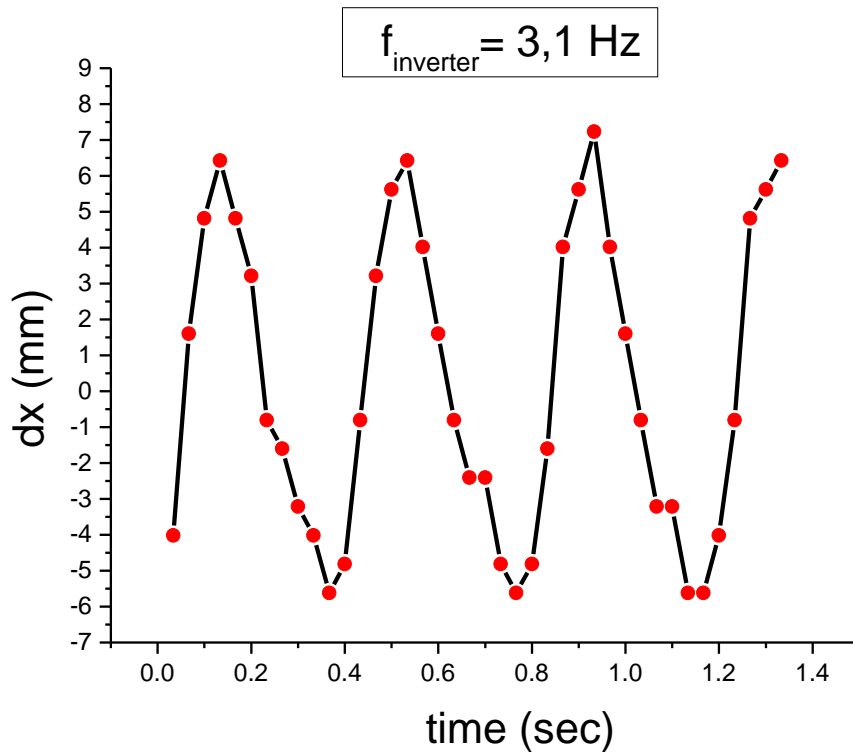
Σχήμα 5.18 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=2,4 \text{ Hz}$ .



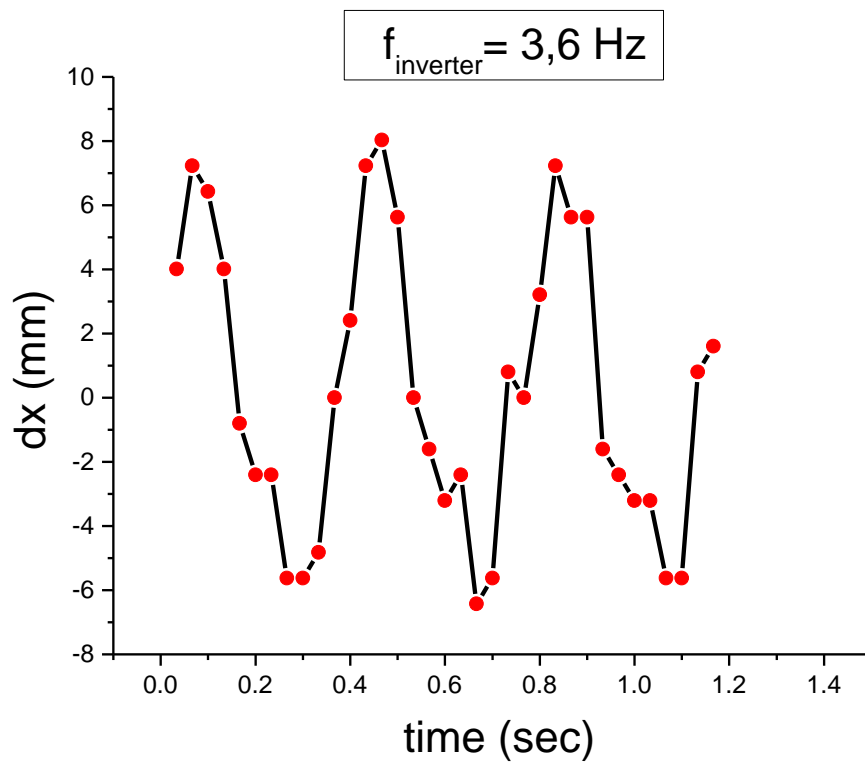
Σχήμα 5.19 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=2,8 \text{ Hz}$ .



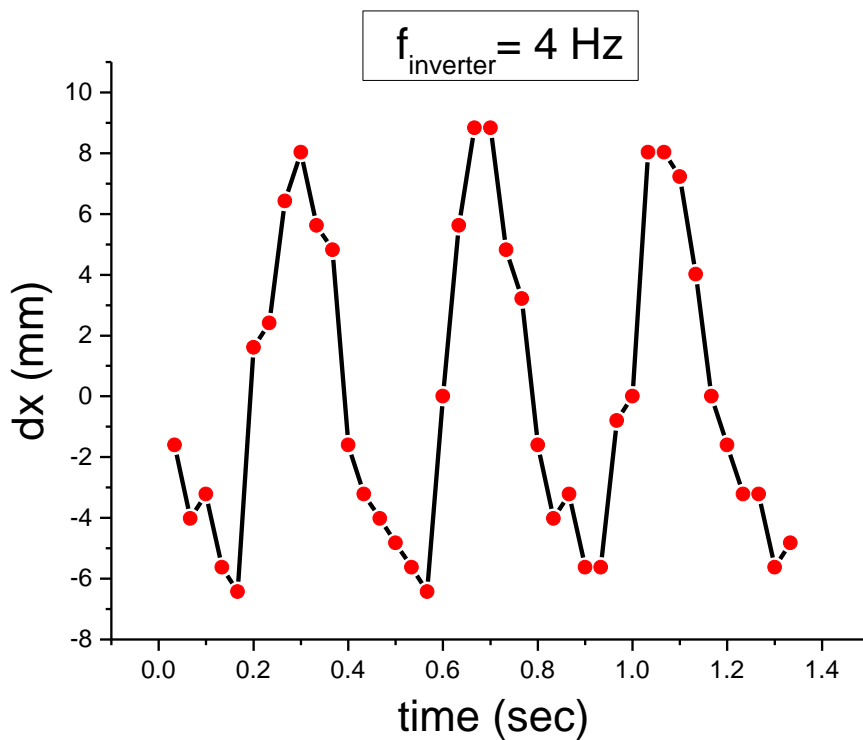
Σχήμα 5.20 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=3 \text{ Hz}$ .



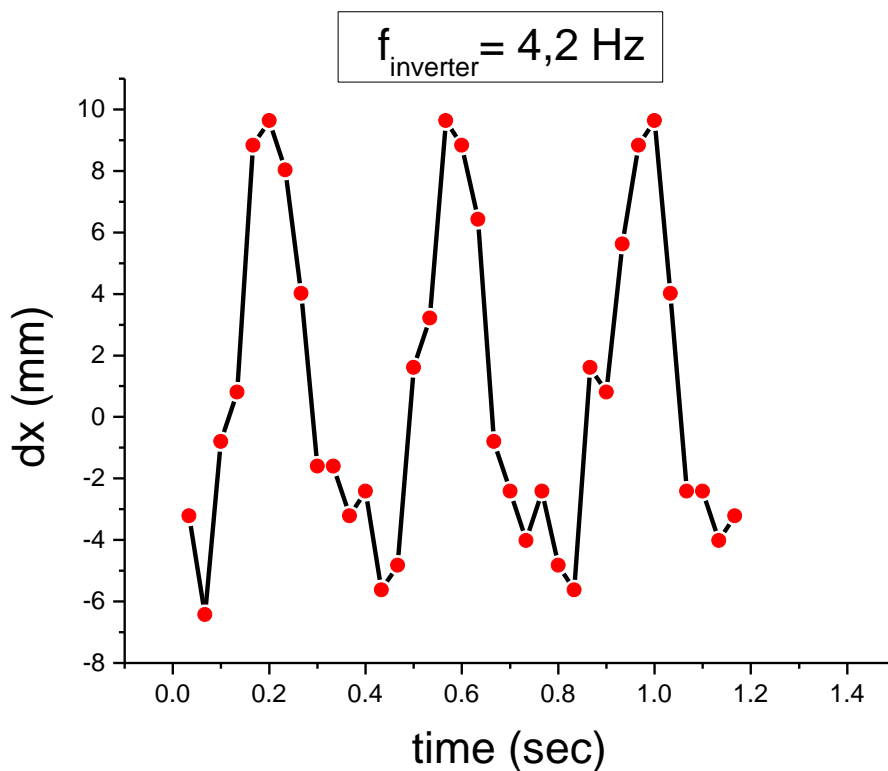
Σχήμα 5.21 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=3,1 \text{ Hz}$ .



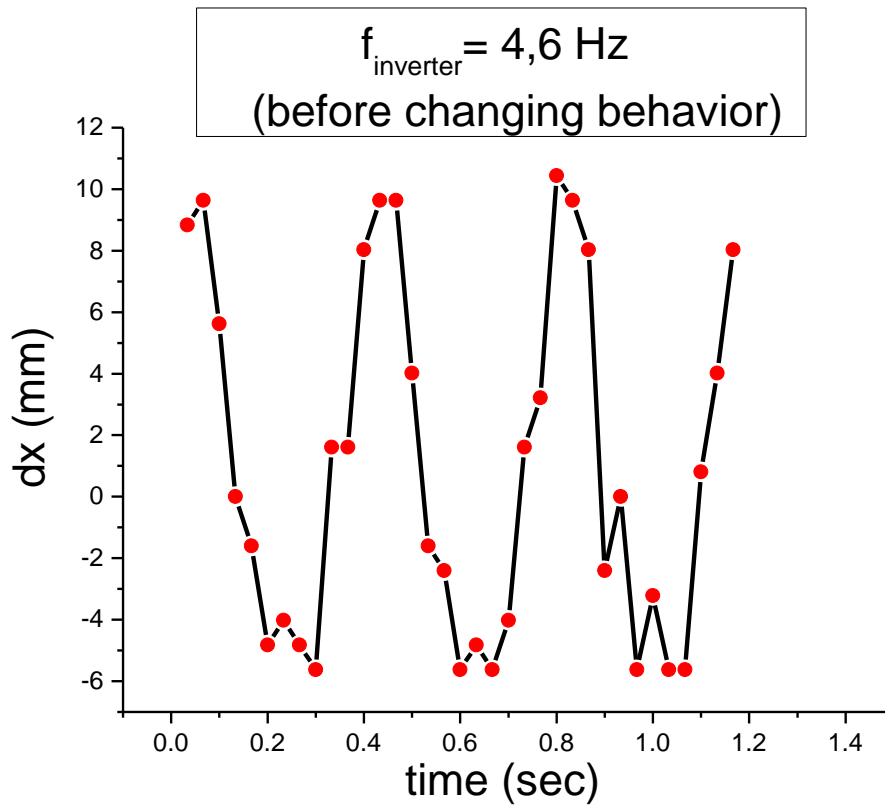
Σχήμα 5.22 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=3,6 \text{ Hz}$ .



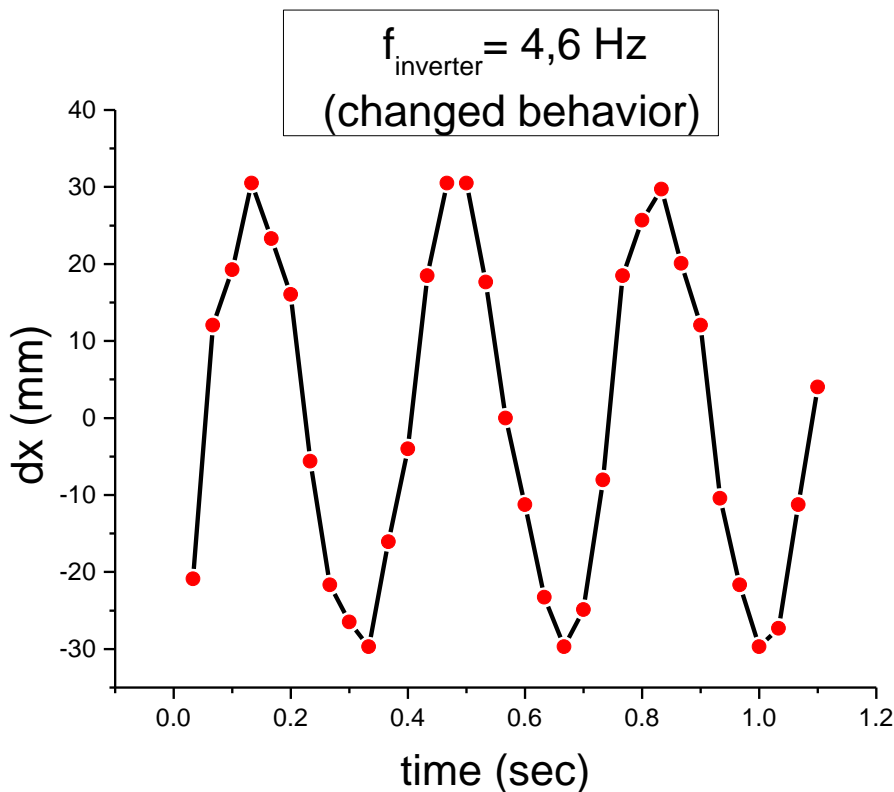
Σχήμα 5.23 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=4 \text{ Hz}$ .



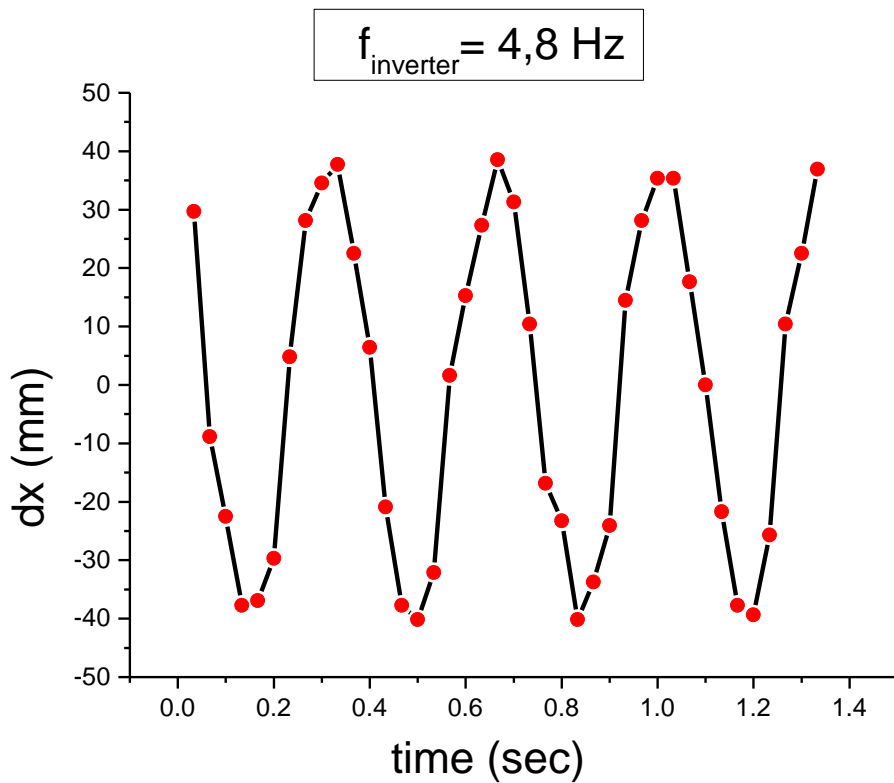
Σχήμα 5.24 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=4,2 \text{ Hz}$ .



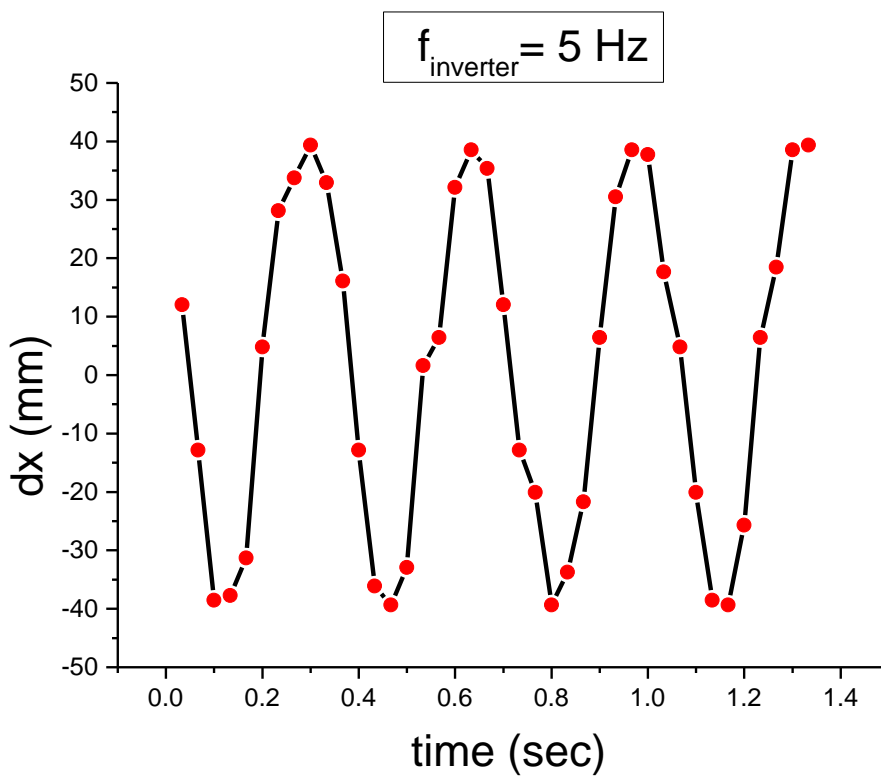
Σχήμα 5.25 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=4,6 \text{ Hz}$  σχεδόν ακριβώς πριν αλλάξει η συμπεριφορά της πτέρυγας.



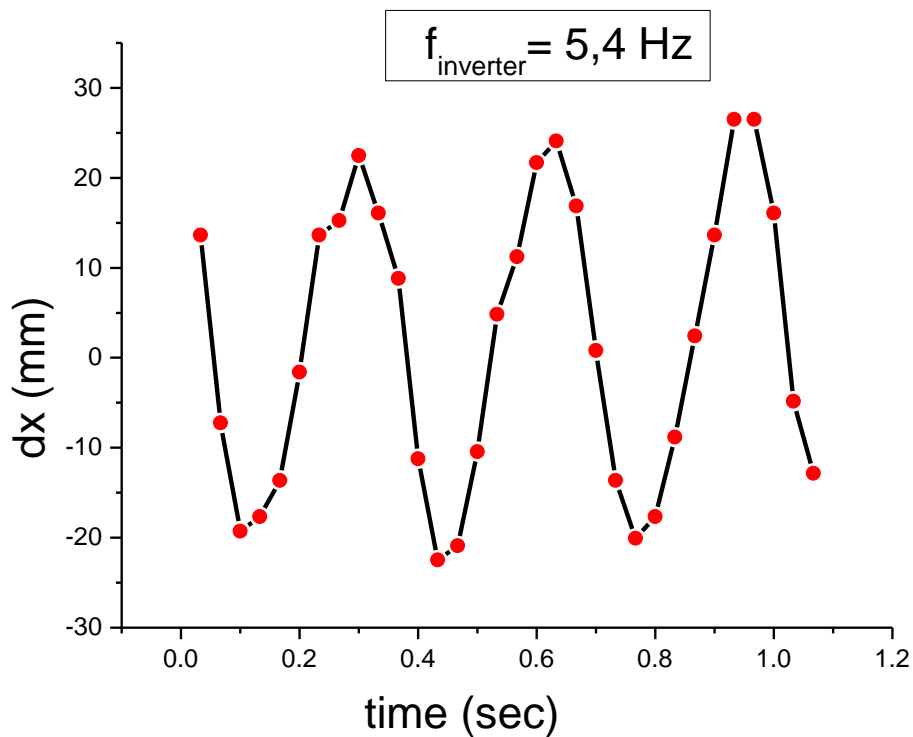
Σχήμα 5.26 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=4,6 \text{ Hz}$  και αλλαγμένη πλέον συμπεριφορά της πτέρυγας.



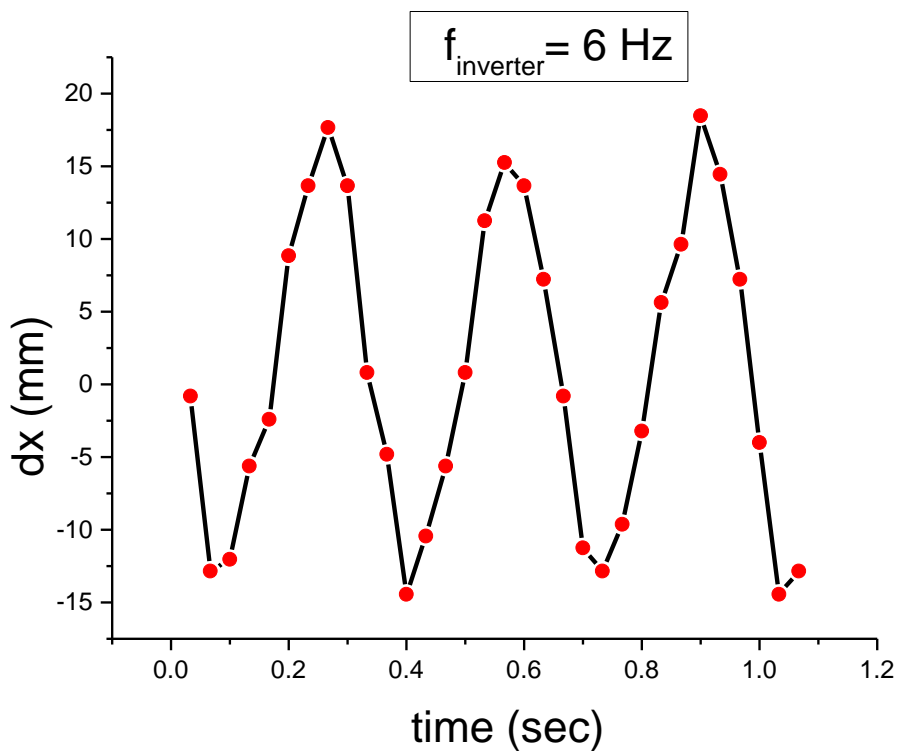
Σχήμα 5.27 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=4,8 \text{ Hz}$ .



Σχήμα 5.28 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=5 \text{ Hz}$ .

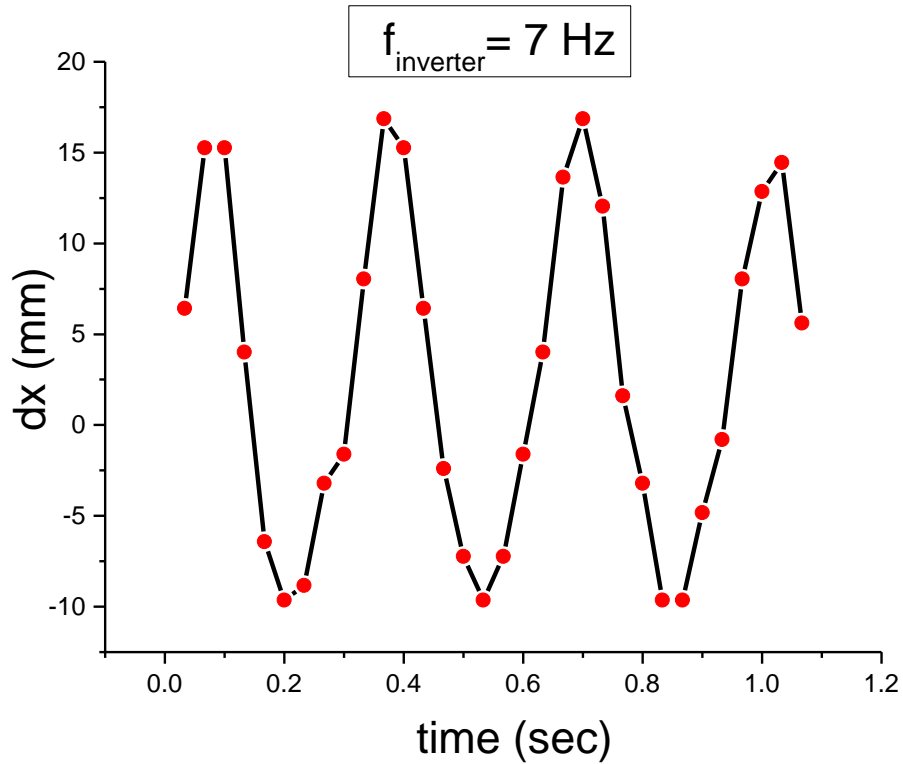


Σχήμα 5.29 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{inverter} = 5,4$  Hz.

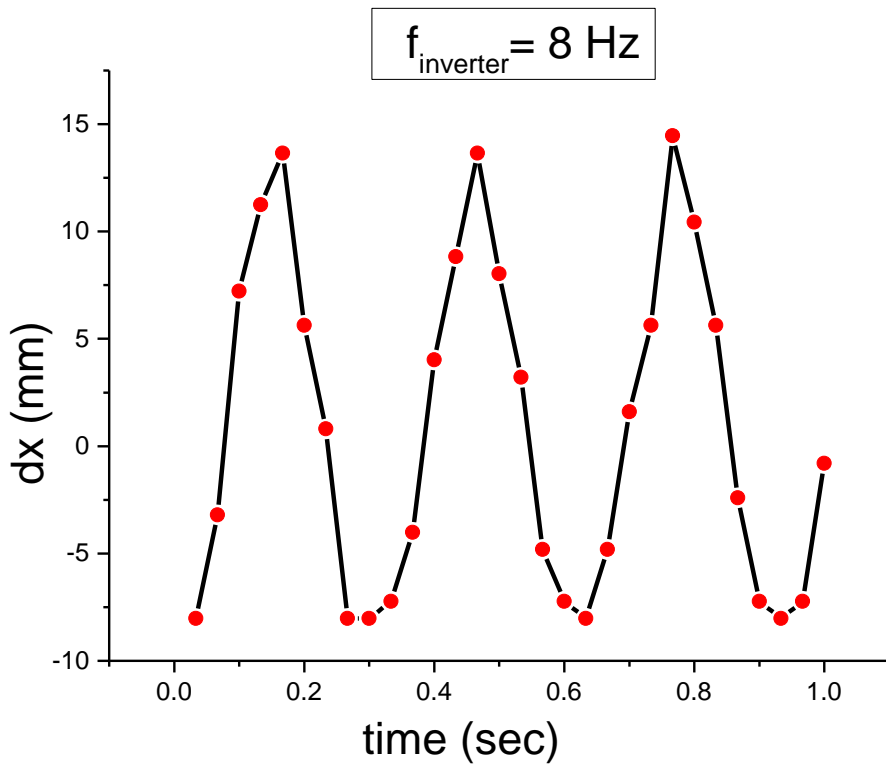


Σχήμα 5.30 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{inverter} = 6$  Hz.

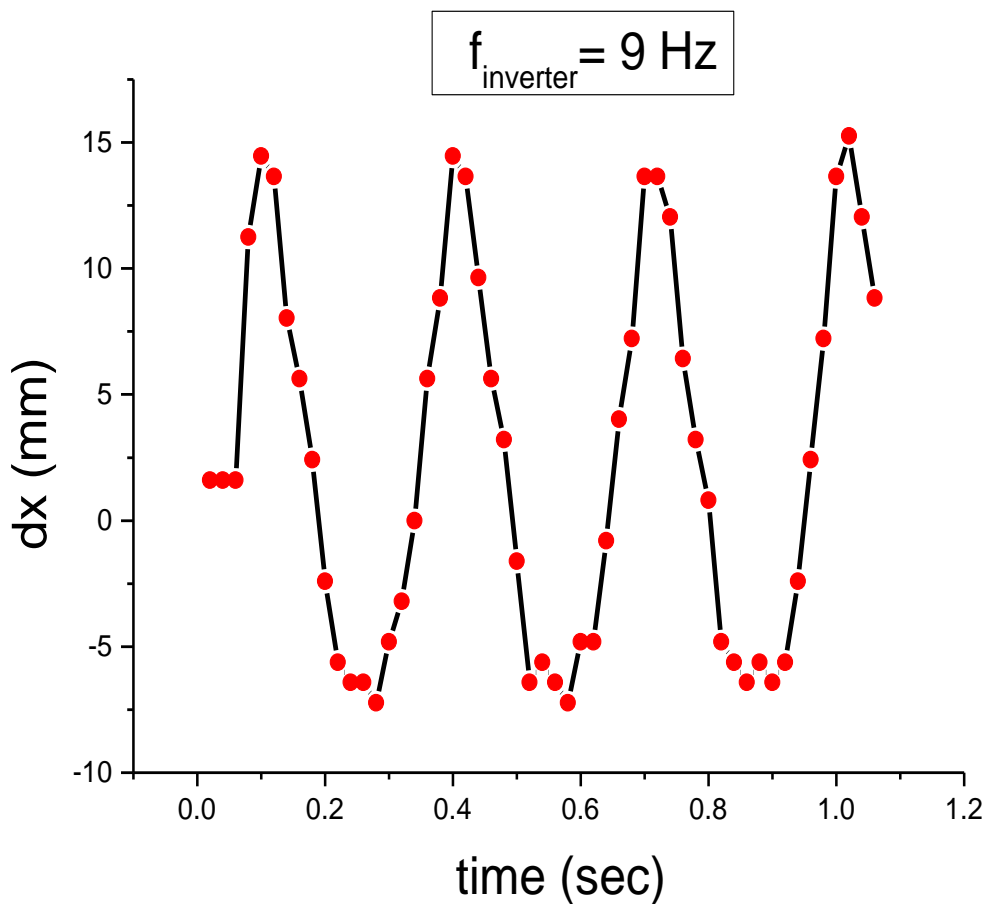




Σχήμα 5.31 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{inverter} = 7$  Hz.



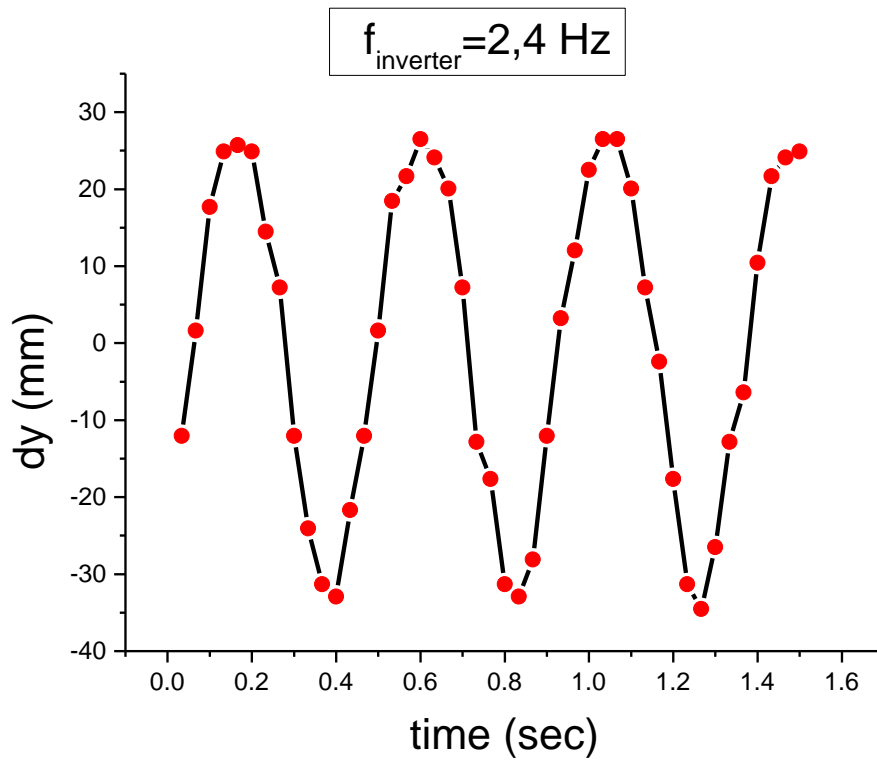
Σχήμα 5.32 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{inverter} = 8$  Hz.



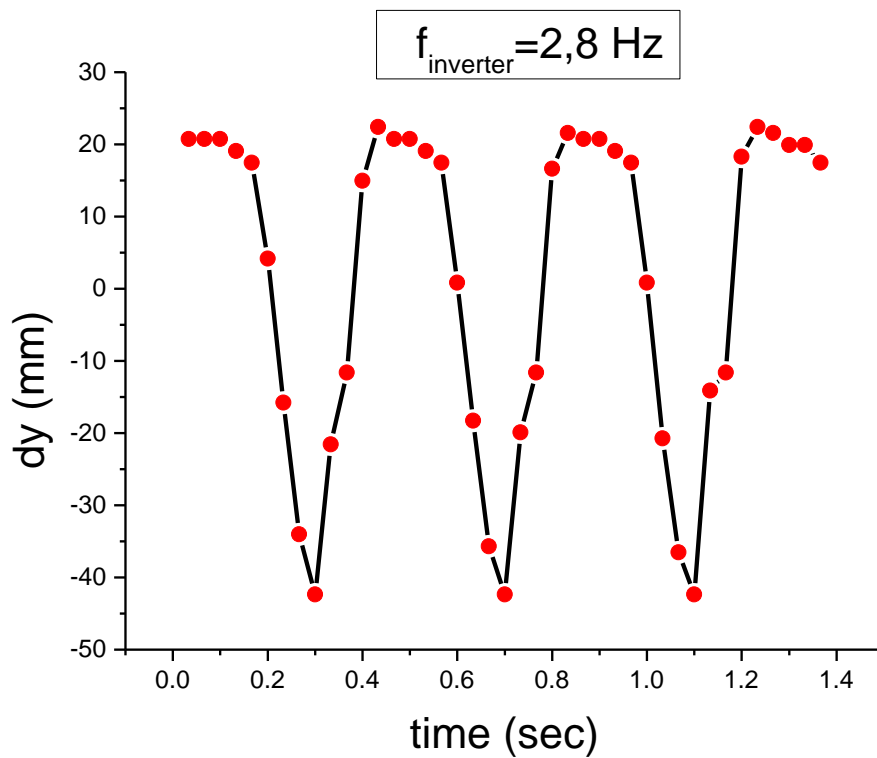
Σχήμα 5.33 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 9 \text{ Hz}$ .

Παρατηρώντας αυτήν την 2<sup>η</sup> ομάδα διαγραμμάτων επιβεβαιώνονται για ακόμα μια φορά όλα τα προαναφερθέντα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα η μετατόπιση στον οριζόντιο άξονα  $x$  στην αρχή των πειραμάτων (2,2 Hz) είναι 9 χιλιοστά και για όσο η πτέρυγα ακολουθεί την αρχική της συμπεριφορά συνεχώς αυξάνει έως τα 16 χιλιοστά. Ξαφνικά, μόλις αλλάζει η συμπεριφορά της, η τιμή αυτή γίνεται 65 χιλιοστά όπου και μεγιστοποιείται στα 4,8-5 Hz στα 80 χιλιοστά και τελικά φθίνει συνεχώς, μέχρι που στο τελευταίο πείραμα (9 Hz) φτάνει τα 22,5 χιλιοστά.

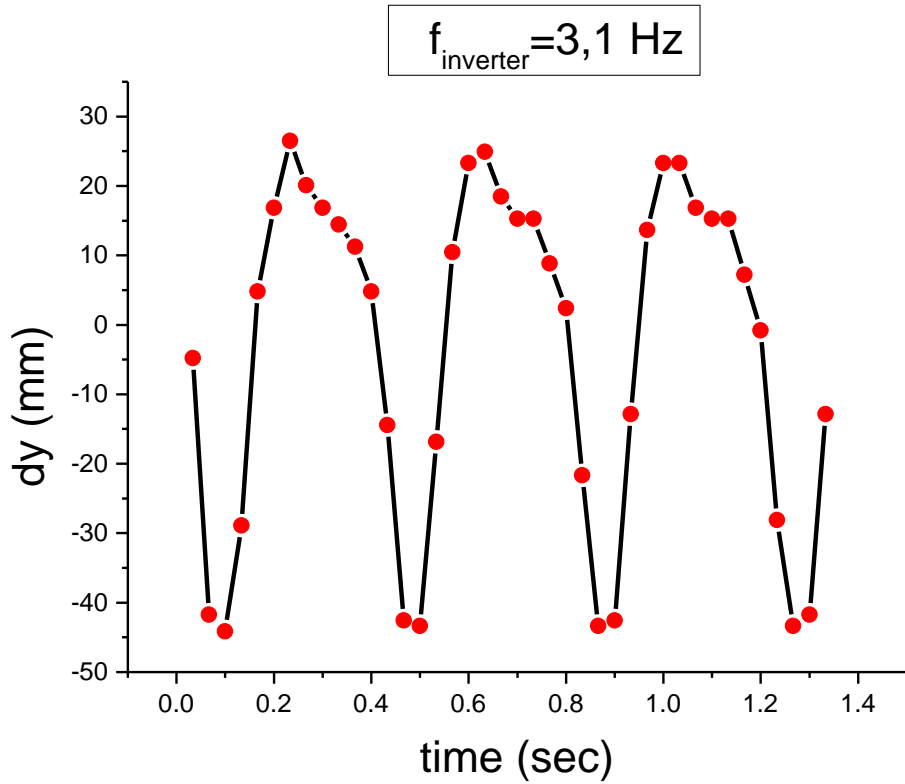
### 3<sup>η</sup> ΟΜΑΔΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ (↕)



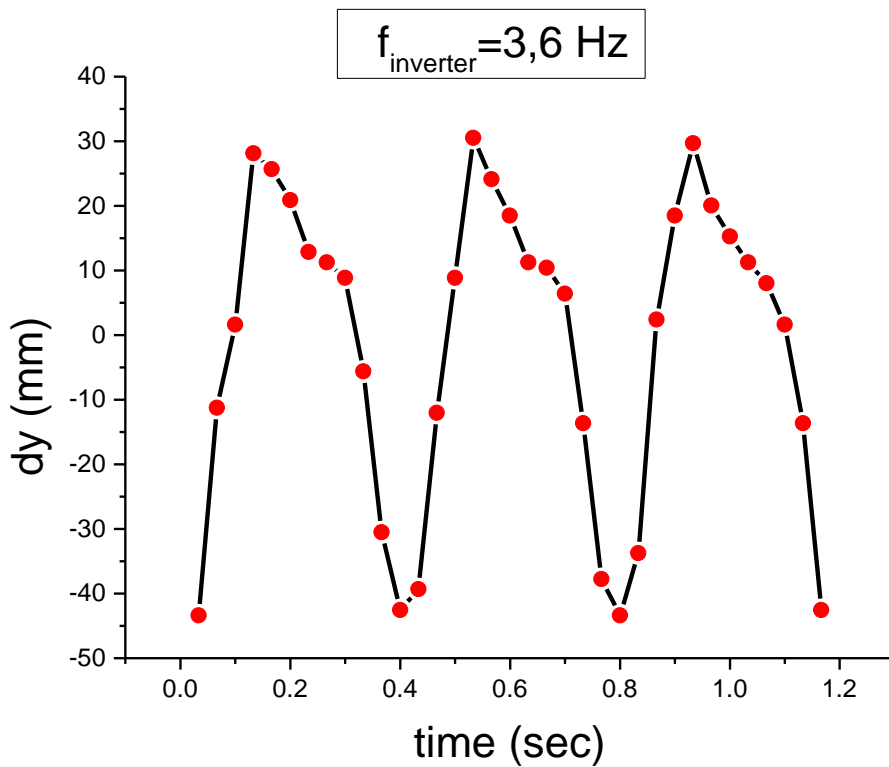
Σχήμα 5.34 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 2,4 \text{ Hz}$ .



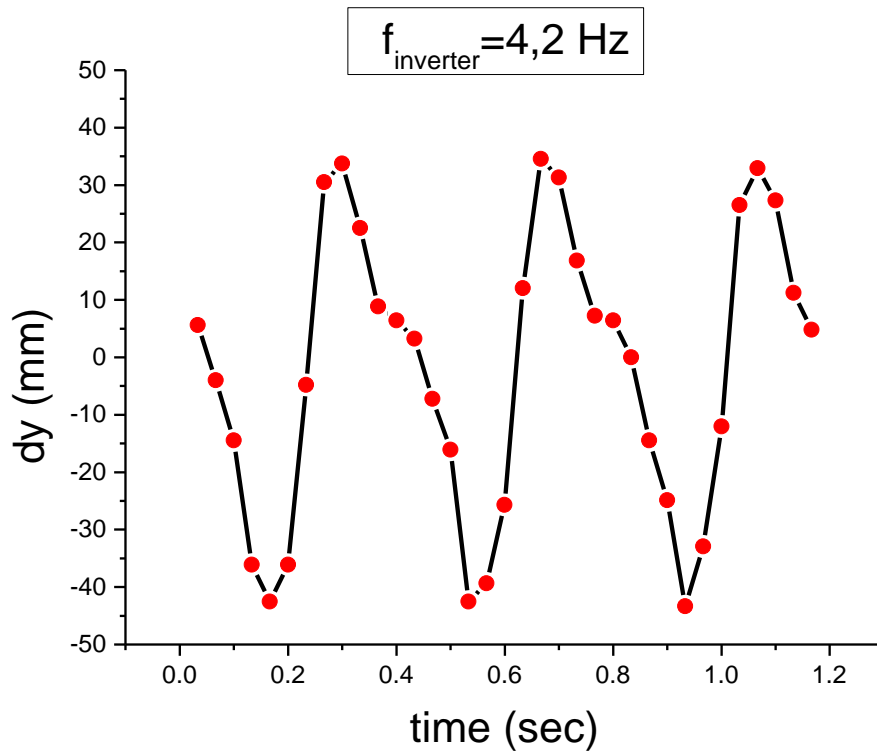
Σχήμα 5.35 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 2,8 \text{ Hz}$ .



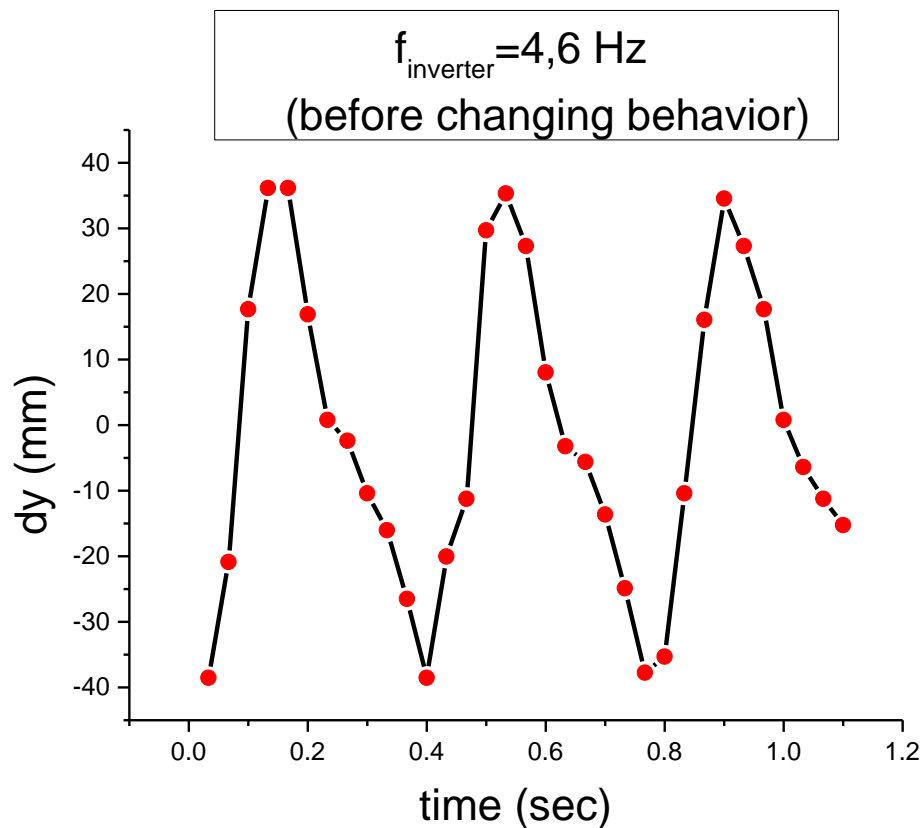
Σχήμα 5.36 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 3,1 \text{ Hz}$ .



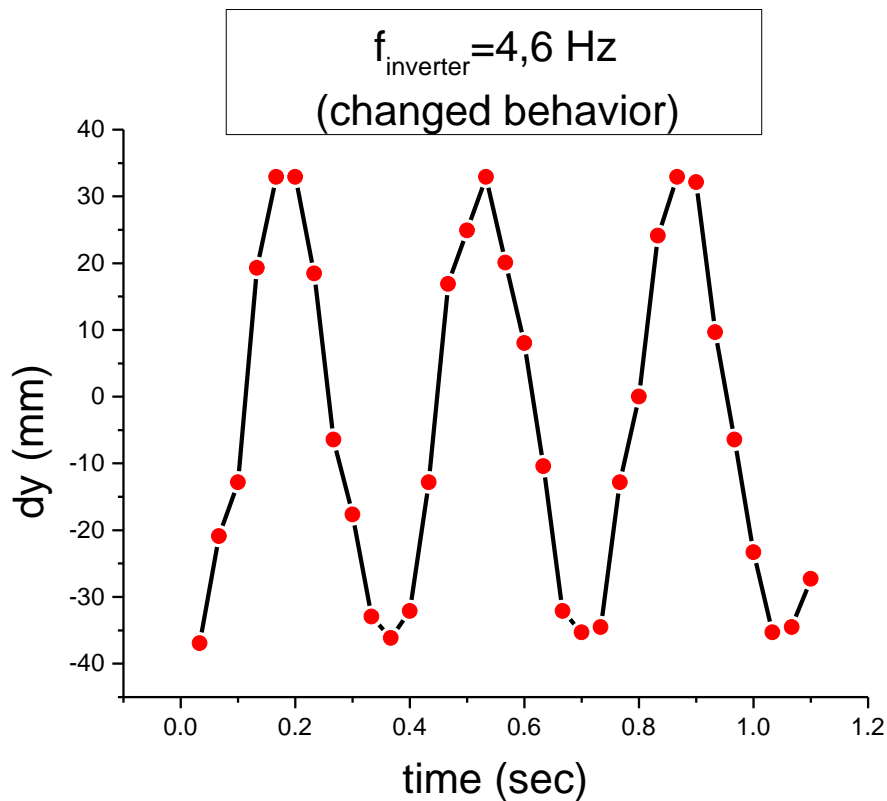
Σχήμα 5.37 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 3,6 \text{ Hz}$ .



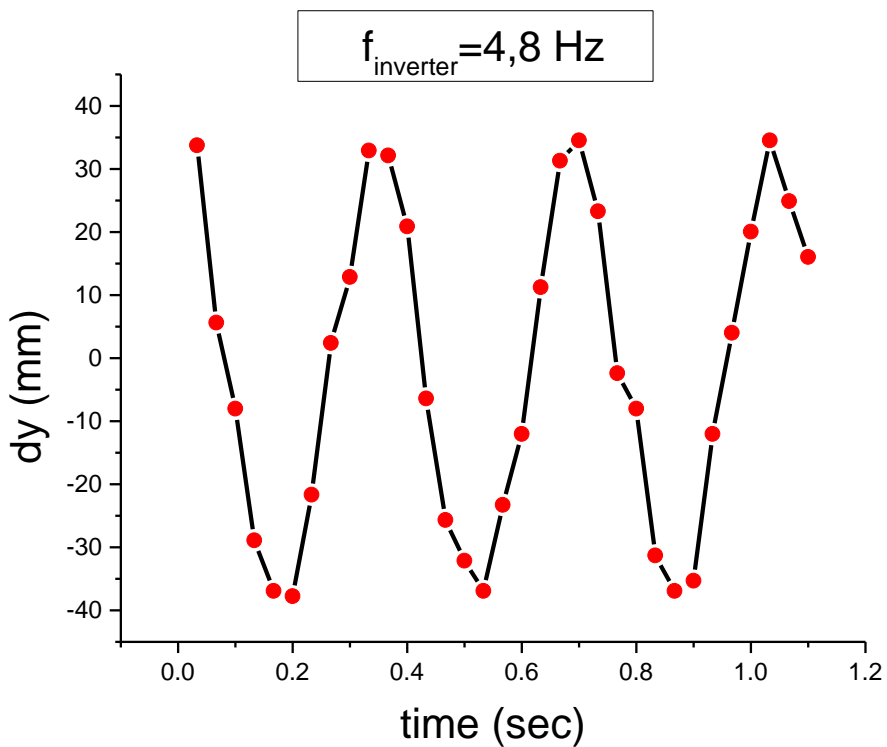
Σχήμα 5.38 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 4,2 \text{ Hz}$ .



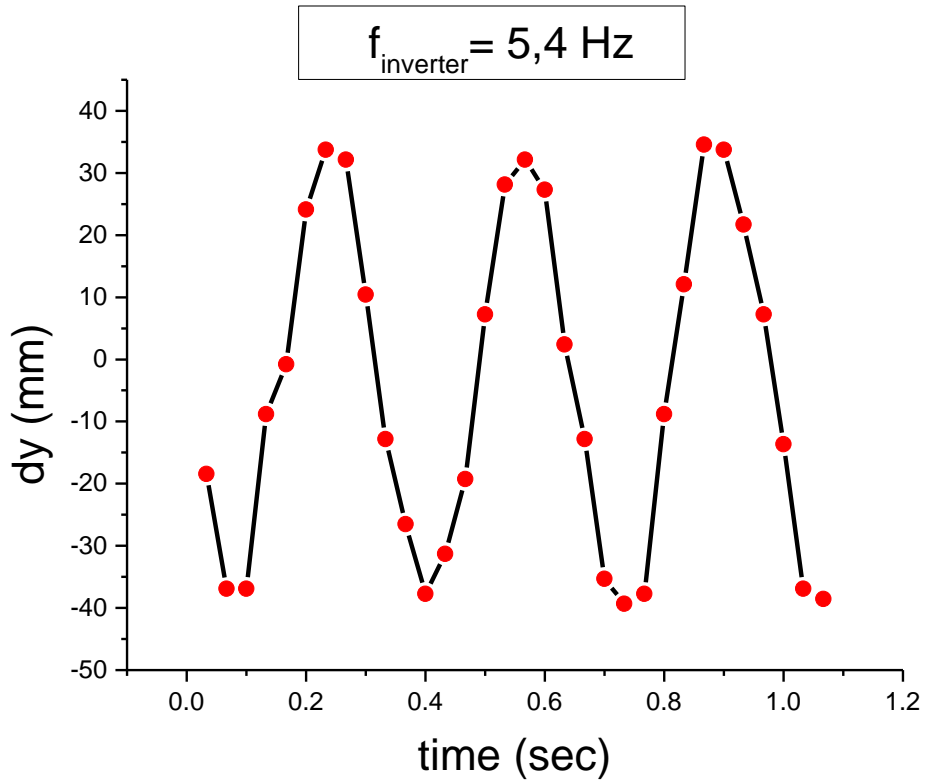
Σχήμα 5.39 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 4,6 \text{ Hz}$  σχεδόν ακριβώς πριν αλλάξει η συμπεριφορά της πτέρυγας.



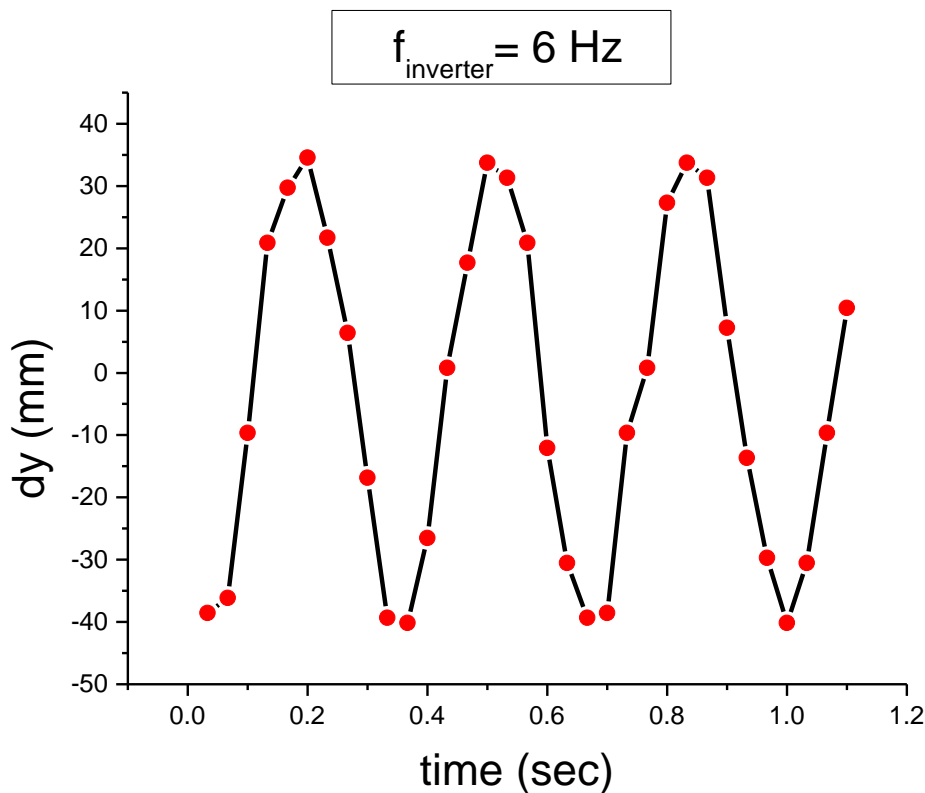
Σχήμα 5.40 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 4,6 \text{ Hz}$  και αλλαγμένη πλέον συμπεριφορά της πτέρυγας.



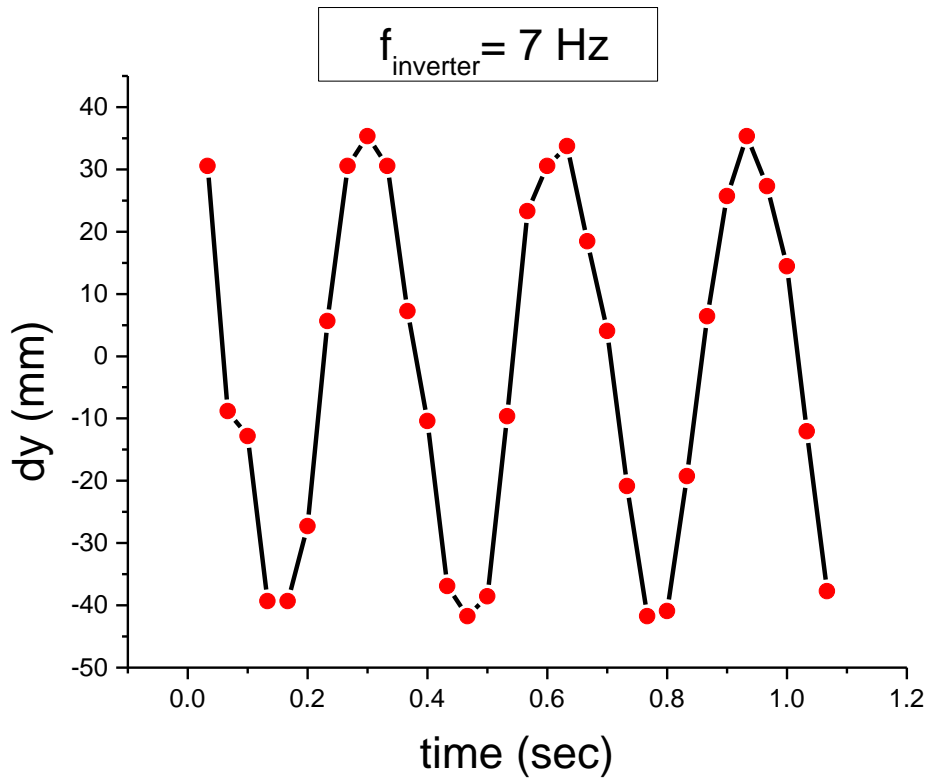
Σχήμα 5.41 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 4,8 \text{ Hz}$ .



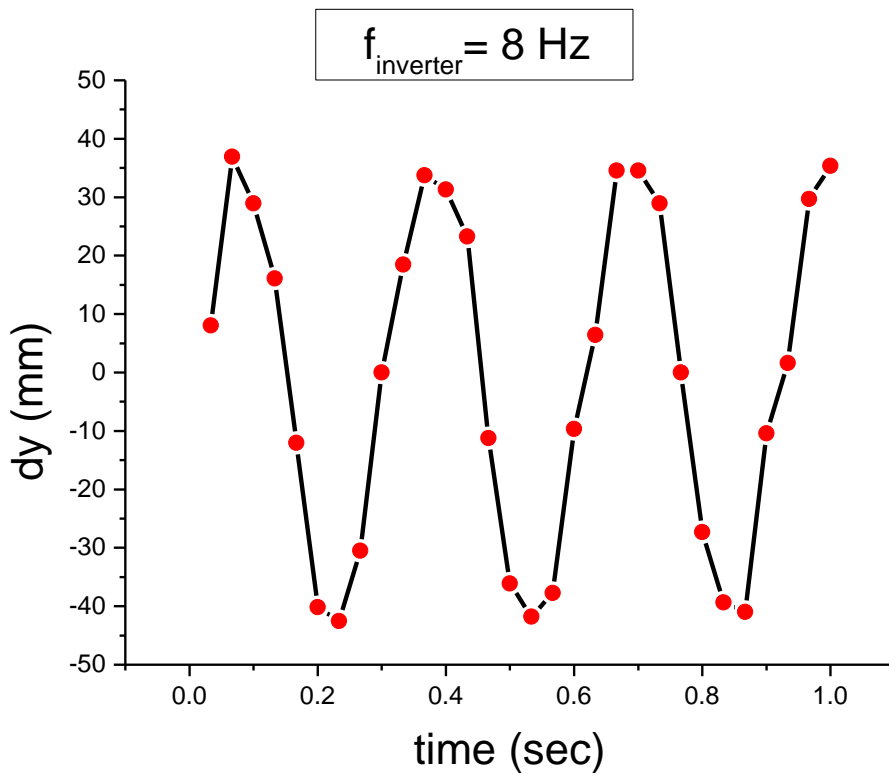
Σχήμα 5.42 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=5,4 \text{ Hz}$ .



Σχήμα 5.43 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}}=6 \text{ Hz}$ .

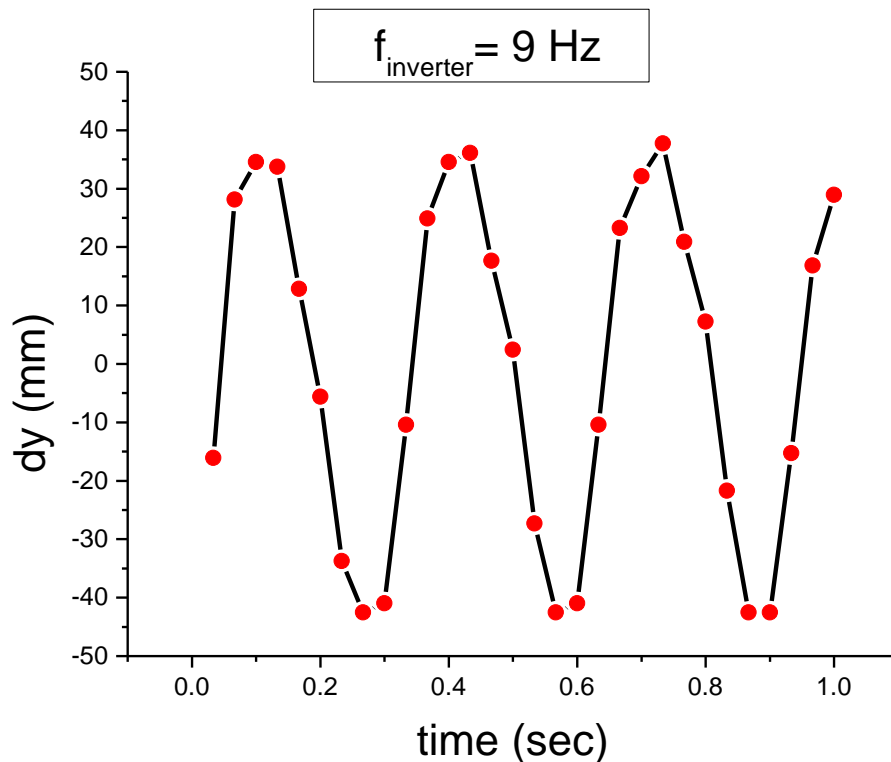


Σχήμα 5.44 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 7 \text{ Hz}$ .



Σχήμα 5.45 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{\text{inverter}} = 8 \text{ Hz}$ .





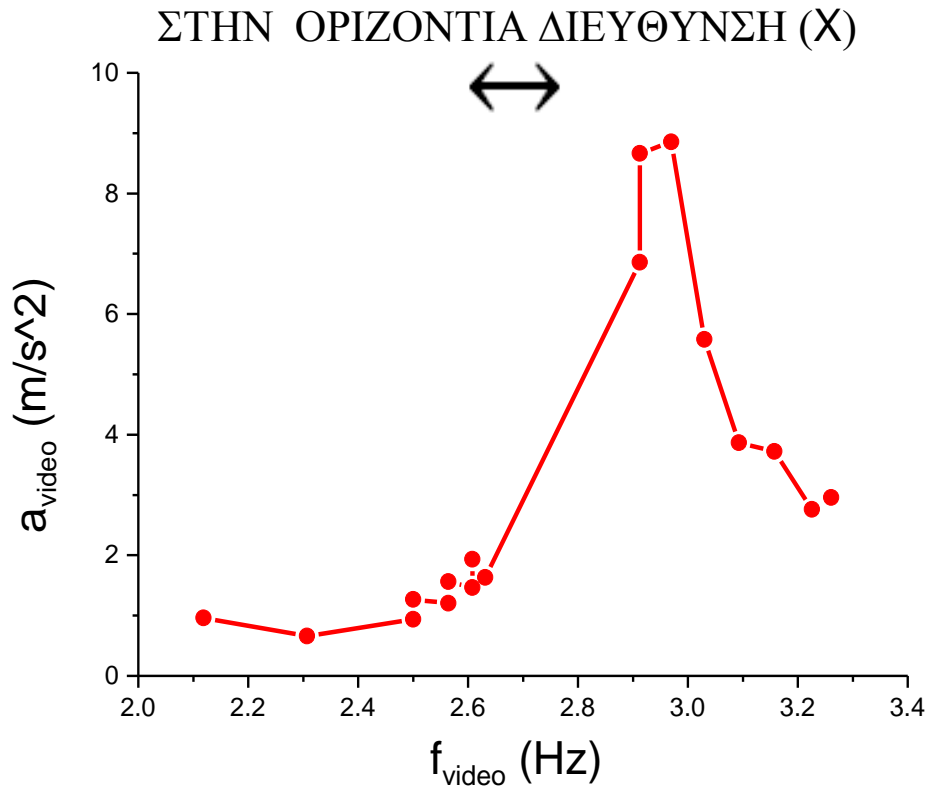
Σχήμα 5.46 Διάγραμμα των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  με τους αντίστοιχους χρόνους για  $f_{inverter}=9$  Hz.

Παρατηρώντας αυτήν την 3<sup>η</sup> ομάδα διαγραμμάτων, φαίνεται μια πιο σταθερή διακύμανση των τιμών των μετατοπίσεων στον κατακόρυφο άξονα  $y$  από τις αντίστοιχες της 2<sup>η</sup> ομάδας διαγραμμάτων στον οριζόντιο άξονα  $x$  που είδαμε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, η μετατόπιση στην αρχή των πειραμάτων (2,4 Hz) είναι περίπου 60 χιλιοστά και για όσο η πτέρυγα ακολουθεί την αρχική της συμπεριφορά συνεχώς αυξάνει με μικρό ρυθμό έως τα 80 χιλιοστά. Ξαφνικά, μόλις αλλάζει η συμπεριφορά της, η τιμή αυτή πέφτει στα 70 χιλιοστά όπου και σταδιακά αυξάνει και πάλι με μικρό ρυθμό έως τα 80 χιλιοστά. Βλέπουμε λοιπόν, πως η τιμή της μετατόπισης και στους δύο άξονες δεν ξεπερνάει σε κανένα από τα πειράματα τα 80 χιλιοστά.

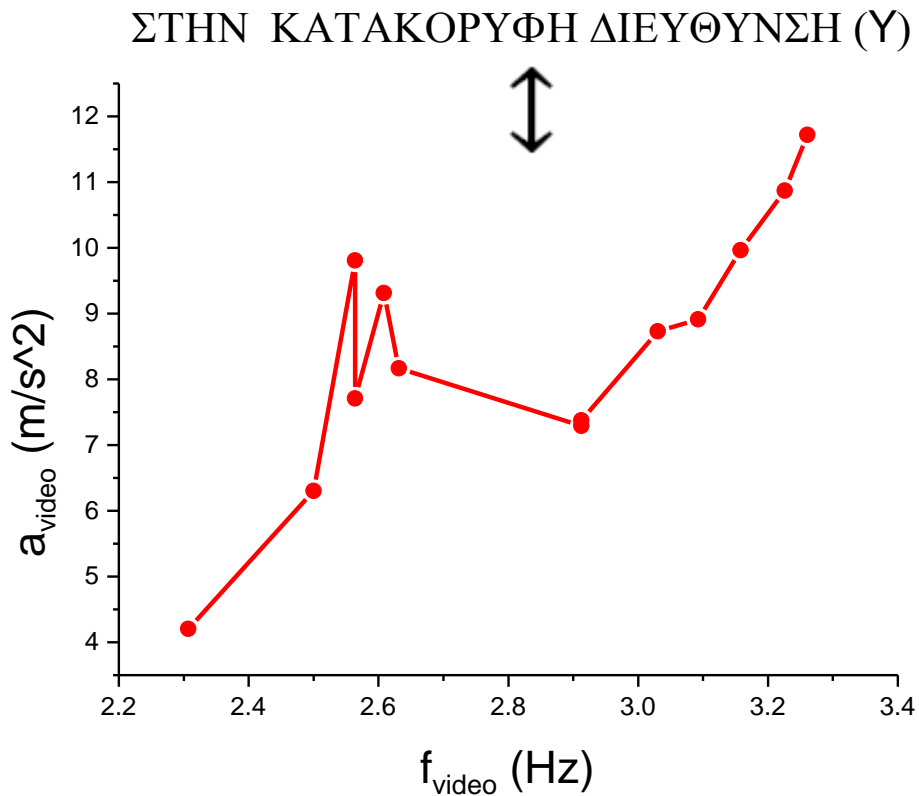
Στη συνέχεια, στο σχήμα 5.47 παρουσιάζεται διάγραμμα των επιταχύνσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  για τις αντίστοιχες τιμές συχνότητων ταλάντωσης της πτέρυγας από το βίντεο, ενώ στο σχήμα 5.48, διάγραμμα των επιταχύνσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$  για τις αντίστοιχες συχνότητες ταλάντωσης της πτέρυγας από το βίντεο.

Στο πρώτο σχήμα, παρατηρείται μια σταθερότητα στις τιμές της επιτάχυνσης μέχρι το σημείο αλλαγής της συμπεριφοράς της πτέρυγας, όπου η τιμή της επιτάχυνσης ξαφνικά τριπλασιάζεται και για λίγο ακόμα μεγαλώνει φτάνοντας σε μια μέγιστη τιμή όπου στην συνέχεια φθίνει συνεχώς με απότομο ρυθμό, επιβεβαιώνοντας και πάλι τα προηγούμενα αποτελέσματα.

Στο δεύτερο σχήμα, βλέπουμε μια πιο γραμμική συμπεριφορά των επιταχύνσεων με κάποια σκαμπανεβάσματα στις μεσαίες τιμές των συχνότητων και με μέγιστη τιμή 11,71 ( $m/s^2$ ) στο τέλος των πειραμάτων (9 Hz), σε αντίθεση με το πρώτο σχήμα που η μέγιστη τιμή είναι 8,85 ( $m/s^2$ ) στα 2.97 Hz.



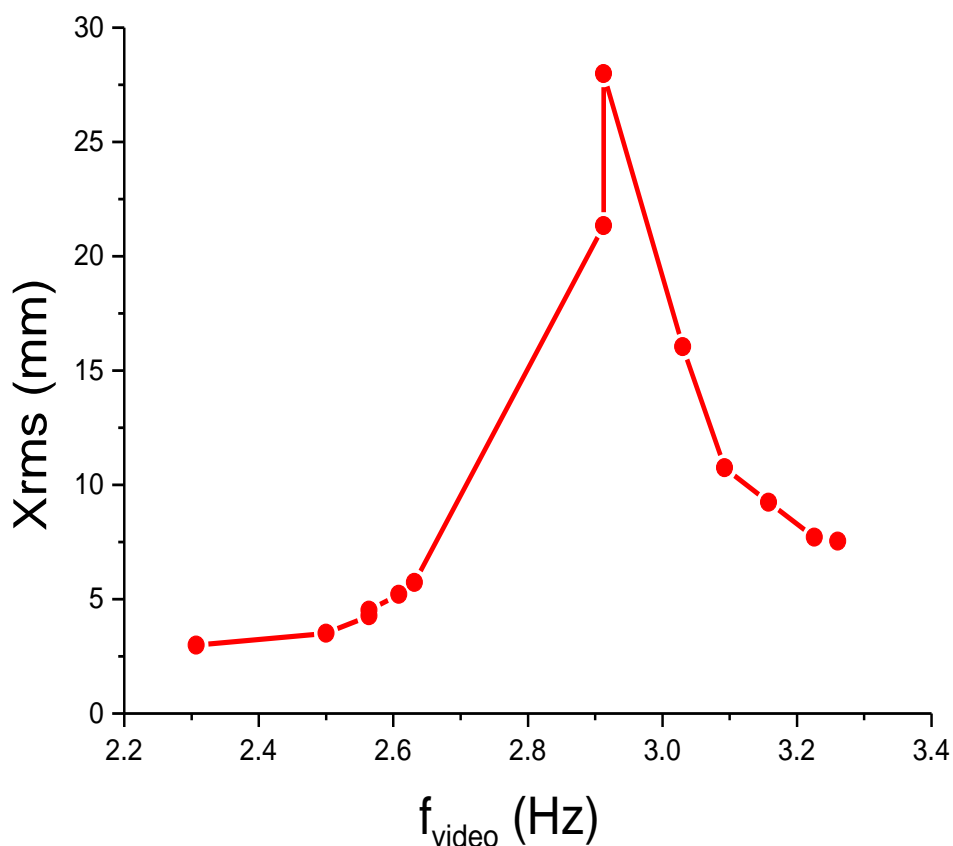
Σχήμα 5.47 Διάγραμμα των επιταχύνσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x με τις συχνότητες ταλάντωσης του από το βίντεο.



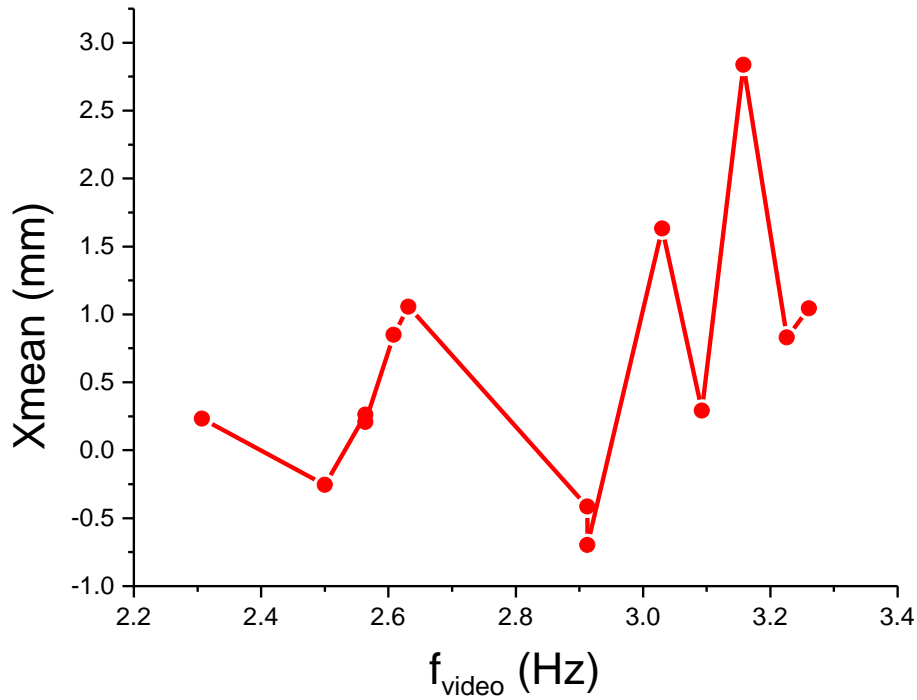
Σχήμα 5.48 Διάγραμμα των επιταχύνσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα y με τις συχνότητες ταλάντωσης του από το βίντεο.

Τέλος παρουσιάζονται 4 ακόμα διαγράμματα, εκ των οποίων τα 2 πρώτα μεταξύ συχνότητας ταλάντωσης πτέρυγας-τυπικής απόκλισης RMS και μέσης τιμής της μετατόπισης σε χιλιοστά στον οριζόντιο άξονα (x) και τα υπόλοιπα 2 μεταξύ και πάλι συχνότητας ταλάντωσης πτέρυγας-τυπικής απόκλισης RMS και μέσης τιμής της μετατόπισης σε χιλιοστά, αλλά τώρα στον κατακόρυφο άξονα (y). Με αυτήν την διαξονική ανάλυση θα φανεί για ακόμα μια φορά η διαφορά που έχουν τα εύρη τιμών των μετατοπίσεων στις δύο διευθύνσεις.

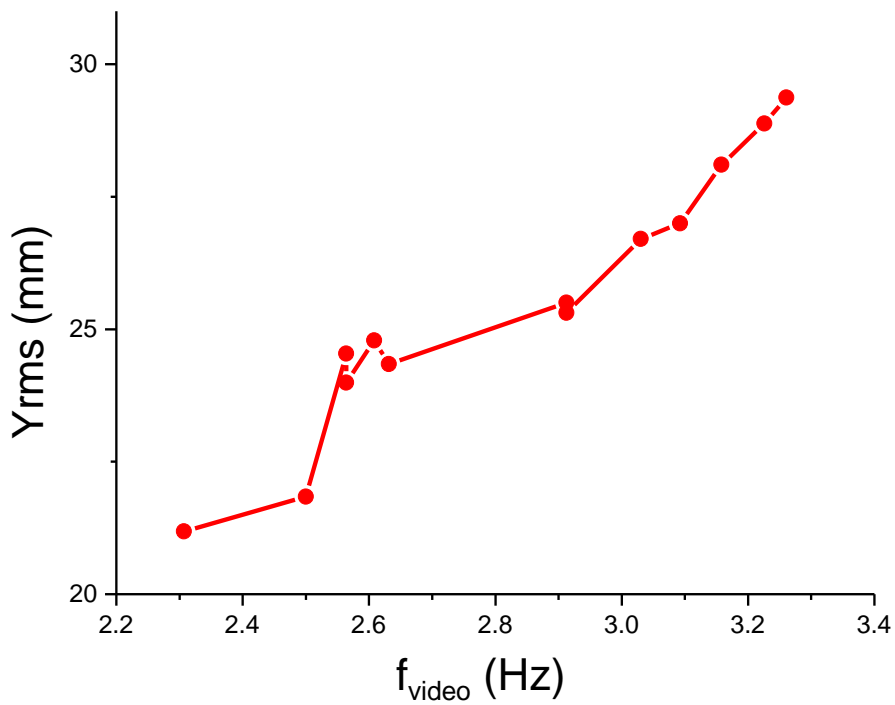
Σημειώνεται πως στα 2 διαγράμματα που δείχνουν τις μέσες τιμές των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ για τις 2 διευθύνσεις, στον κατακόρυφο άξονα φαίνονται οι τιμές τους όπως βρέθηκαν από το πρόγραμμα ζωγραφική (σε pixels δηλαδή) χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό (4.4) ώστε να προκύψουν σε χιλιοστά και θεωρώντας ως σημείο μηδέν των μετρήσεων το (605,-305) pixels.



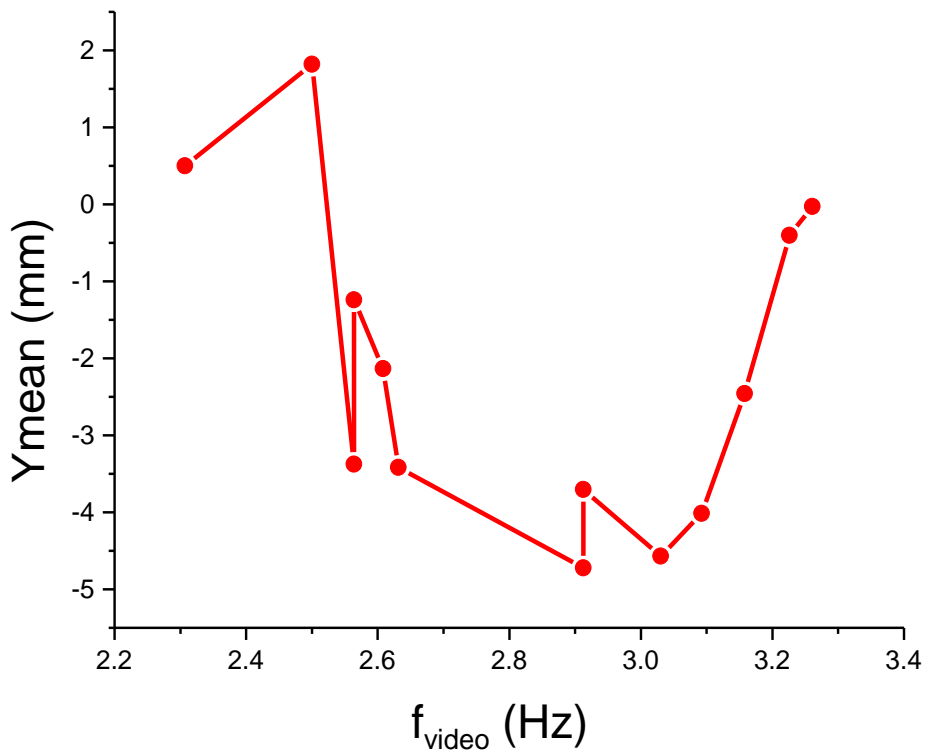
Σχήμα 5.49 Διάγραμμα μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης της πτέρυγας από το βίντεο και της τυπικής απόκλισης των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x.



Σχήμα 5.50 Διάγραμμα μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης της πτέρυγας από το βίντεο και της μέσης τιμής των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$ .



Σχήμα 5.51 Διάγραμμα μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης της πτέρυγας από το βίντεο και της τυπικής απόκλισης των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$ .



Σχήμα 5.52 Διάγραμμα μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης της πτέρυγας από το βίντεο και της μέσης τιμής των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$ .

Παρατηρώντας τα διαγράμματα μέσης τιμής (5.50) και (5.52) φαίνονται πολλά σκαμπανεβάσματα των τιμών με ελάχιστη τιμή και των 2 στα 2.9 Hz συχνότητα πτέρυγας από βίντεο που αντιστοιχεί στα 4,6 Hz συχνότητα inverter, όπου και έγινε η αλλαγή της συμπεριφοράς της πτέρυγας. Το γεγονός αυτό είναι λογικό γιατί από την πρώτη ομάδα διαγραμμάτων του κεφαλαίου φαίνεται πως την στιγμή της αλλαγής της συμπεριφοράς της πτέρυγας, αυτή άρχισε να ταλαντώνεται με εντονότερο ρυθμό και πιο κοντά στην αρχή των αξόνων, που όπως είδαμε πιο πάνω, αυτή είχε οριστεί στο σημείο (605,-305) pixels στο πρόγραμμα ζωγραφική μέσω του οποίου υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες του κόκκινου λέιζερ.

Όσο αναφορά τώρα τα διαγράμματα τυπικής απόκλισης (5.49) και (5.51) στο πρώτο φαίνεται και πάλι η ίδια συμπεριφορά με αυτήν του διαγράμματος (5.47) της επιτάχυνσης που αναλύθηκε παραπάνω, ενώ στο δεύτερο φαίνεται ότι η τυπική απόκλιση των μετατοπίσεων στον κατακόρυφο άξονα  $y$  είναι συνεχώς αυξανόμενη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟ

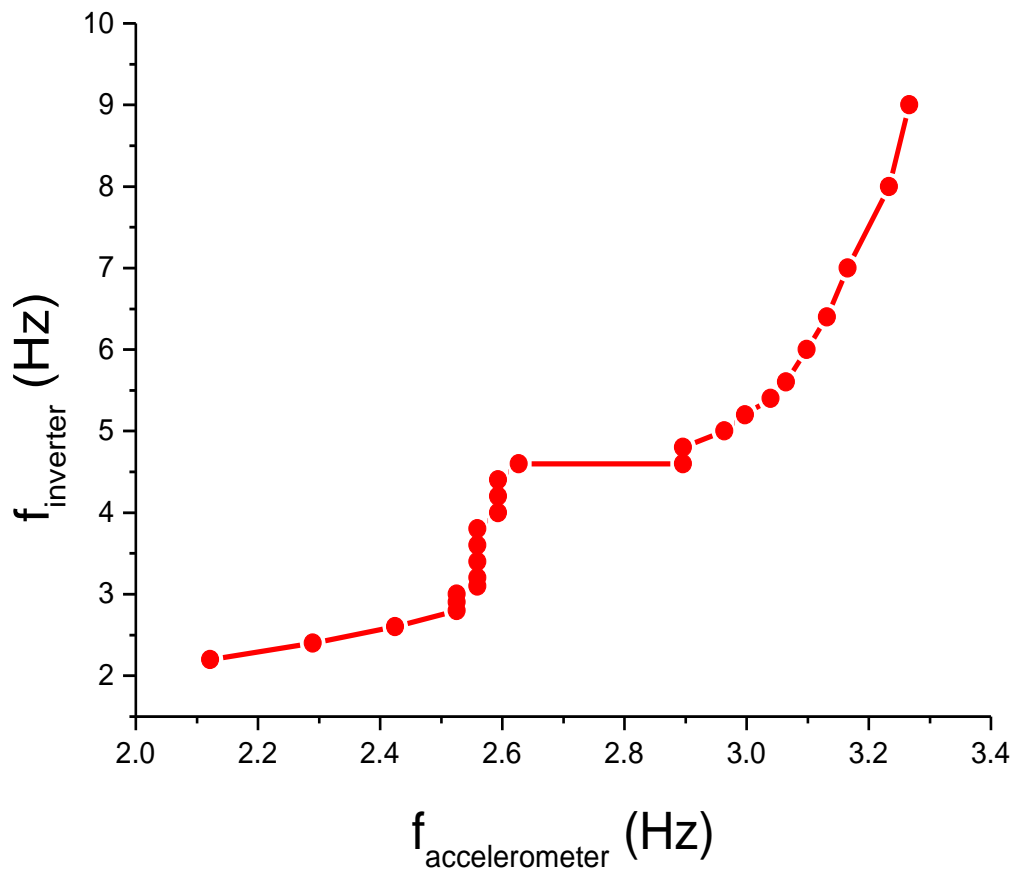
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται, αναλύονται και σχολιάζονται τα τελικά αποτελέσματα των μετρήσεων στην πτέρυγα με την μηχανική μέθοδο μέσω του επιταχυνσιόμετρου που αναλύθηκε εκτενώς στην ενότητα (4.1) του κεφαλαίου 4.

Αρχικά, παρατίθεται πίνακας των τιμών των συχνοτήτων του ακροπτερυγίου της πτέρυγας ελικοπτέρου BELL HUEY II που προέκυψαν από την μηχανική μέθοδο ανάλυσης για τις αντίστοιχες τιμές συχνοτήτων του inverter καθώς και διάγραμμα αυτών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1

$f_{\text{inverter}}$ (Hz)	$f_{\text{accelerometer}}$ (Hz)
2.2	2.12
2.4	2.29
2.6	2.42
2.8	2.52
2.9	2.52
3	2.52
3.1	2.55
3.2	2.55
3.4	2.55
3.6	2.55
3.8	2.55
4	2.59
4.2	2.59

4.4	2.59
4.6 (before change of behavior)	2.62
4.6 (after change of behavior)	2.89
4.8	2.89
5	2.96
5.2	2.99
5.4	3.03
5.6	3.06
6	3.09
6.4	3.13
7	3.16
8	3.23
9	3.26



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα μεταξύ συχνότητας inverter και συχνότητας ταλάντωσης του ακροπτερυγίου της πτέρυγας όπως αυτή προκύπτει μέσω της μηχανικής μεθόδου ανάλυσης με το επιταχυνσιόμετρο.

Παρατηρώντας το διάγραμμα φαίνεται μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ των 2 συχνοτήτων, με σταδιακές μεταβολές της κλίσης της καμπύλης με σημαντικότερη αυτήν στα 4,6 Hz, όπου η κλίση μηδενίζεται, γεγονός λογικό, εφόσον εκεί συνέβη η αλλαγή στην συμπεριφορά της πτέρυγας και η τιμή της συχνότητας της μεταπήδησε ξαφνικά από τα 2,62 στα 2,89 Hz.

Επίσης να σημειωθεί πως ενώ αρχικά οι τιμές των συχνοτήτων ξεκινούν σχεδόν από την ίδια τιμή, η κλίση της καμπύλης σταδιακά αυξάνει καταλήγοντας στο τελευταίο πείραμα να είναι σχεδόν τριπλάσια η τιμή της συχνότητας του inverter από της πτέρυγας.

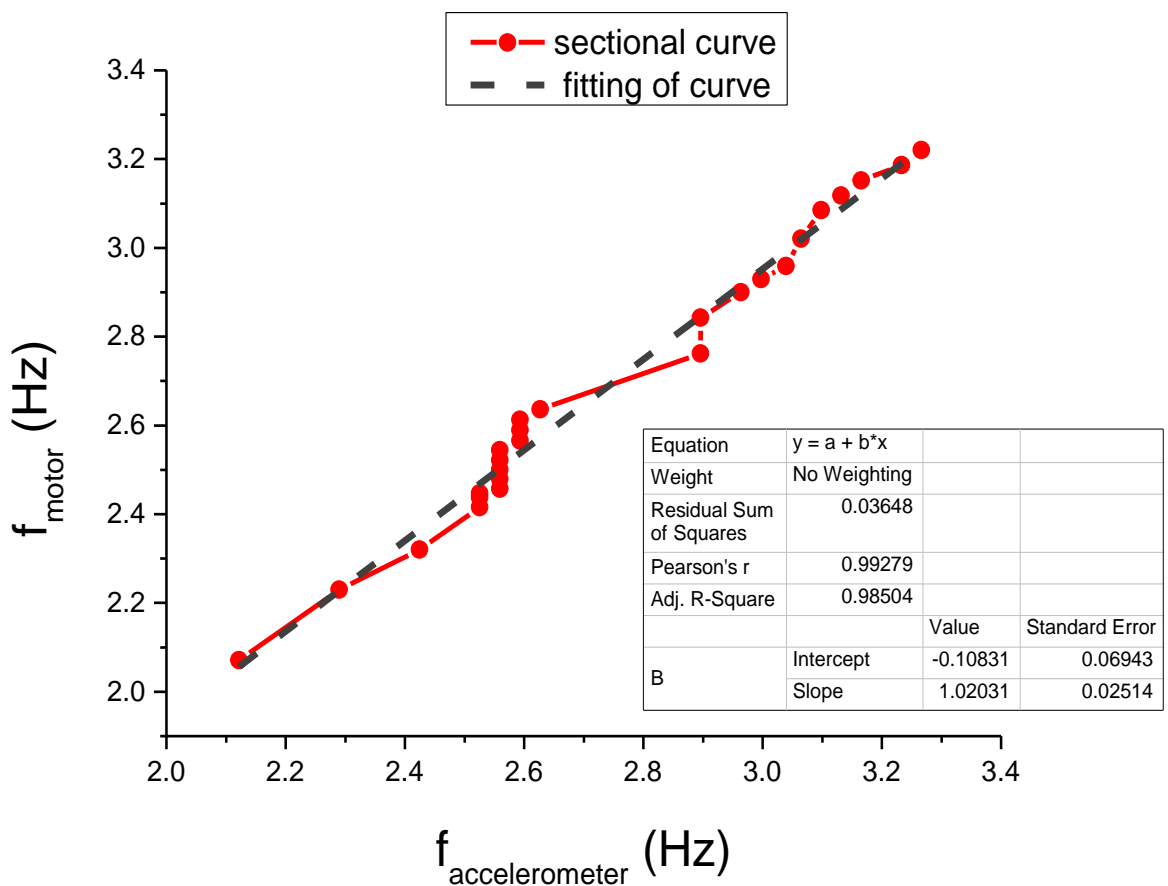
Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας των τιμών των συχνοτήτων του μοτέρ που προέκυψαν από την επεξεργασία των βίντεο του περιστρεφόμενου βραχίονα, που παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 4, για τις αντίστοιχες τιμές συχνοτήτων της πτέρυγας μέσω του επιταχυνσιόμετρου, καθώς και διάγραμμα αυτών.

## ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2

$f_{\text{motor}}$ (Hz)	$f_{\text{accelerometer}}$ (Hz)
2.07	2.12
2.23	2.29
2.32	2.42
2.41	2.52
2.43	2.52
2.44	2.52
2.45	2.55
2.47	2.55
2.5	2.55
2.52	2.55
2.54	2.55
2.56	2.59
2.58	2.59
2.61	2.59



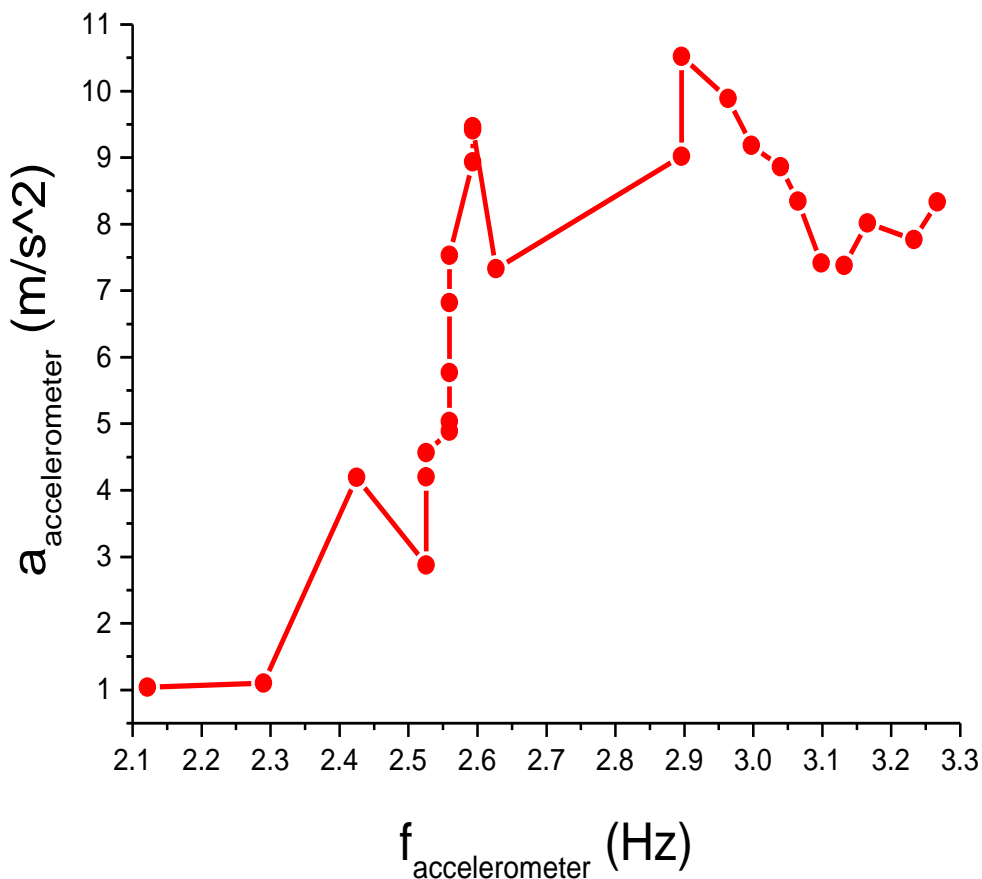
2.63	2.62
2.76	2.89
2.84	2.89
2.9	2.96
2.92	2.99
2.95	3.03
3.02	3.06
3.08	3.09
3.11	3.13
3.15	3.16
3.18	3.23
3.22	3.26



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα μεταξύ συχνοτήτων μοτέρ-διεγέρτη και συχνοτήτων ταλάντωσης του ακροπτερυγίου της πτέρυγας όπως αυτή προκύπτει μέσω της μηχανικής μεθόδου ανάλυσης με το επιταχυνσιόμετρο.

Από το σχήμα 6.2 παρατηρείται, πως το ακροπτερύγιο της πτέρυγας ακολουθεί σχεδόν ίδια συμπεριφορά με αυτή του μοτέρ, δηλαδή, κυρίως γραμμική με μικρές αλλαγές της κλίσης της καμπύλης, με σημαντικότερη, αυτήν στα 4,6 Hz συχνότητα inverter, όπου αλλάζει και η συμπεριφορά της πτέρυγας. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται και από την στατιστική ανάλυση του διαγράμματος, αφού η προσαρμοσμένη καμπύλη είναι σχεδόν ευθεία με συντελεστή συσχέτισης Pearson  $r$  σχεδόν μονάδα με ακρίβεια 2 δεκαδικών ψηφίων. Σε αυτό το σημείο λοιπόν μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως ο βραχίονας του μοτέρ και η πτέρυγα καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων ταλαντώνονταν με σχεδόν ίδιες συχνότητες.

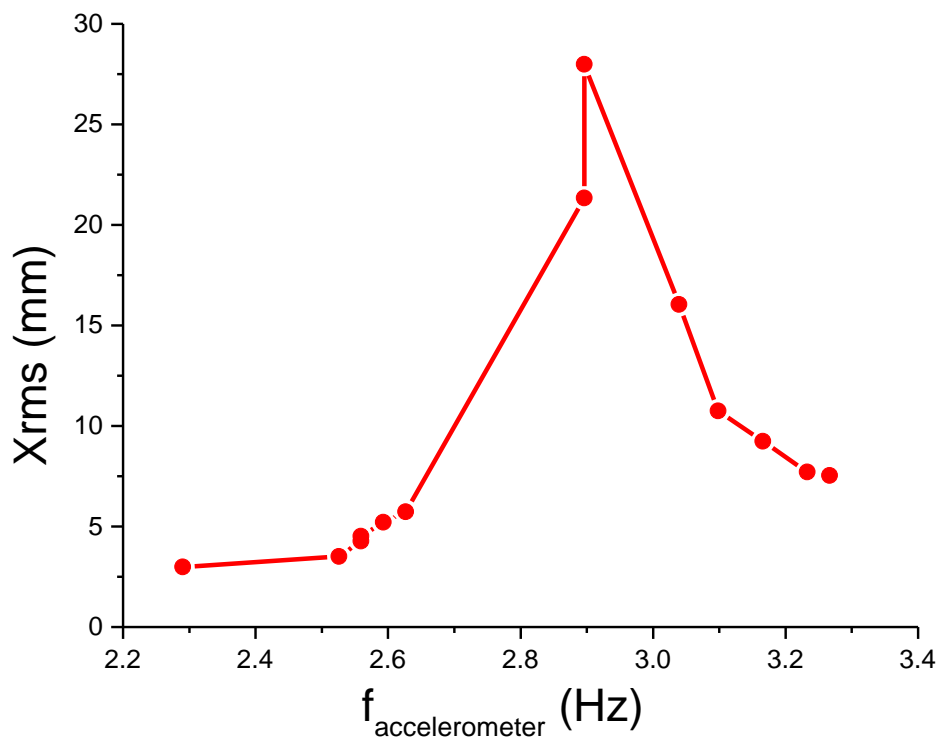
Στο σχήμα 6.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται διάγραμμα των επιταχύνσεων του ακροπτερυγίου της πτέρυγας στον οριζόντιο άξονα  $x$  μέσω του επιταχυνσιόμετρου, με τις αντίστοιχες συχνότητες ταλάντωσης του υπολογισμένες από την μηχανική μέθοδο ανάλυσης με το επιταχυνσιόμετρο.



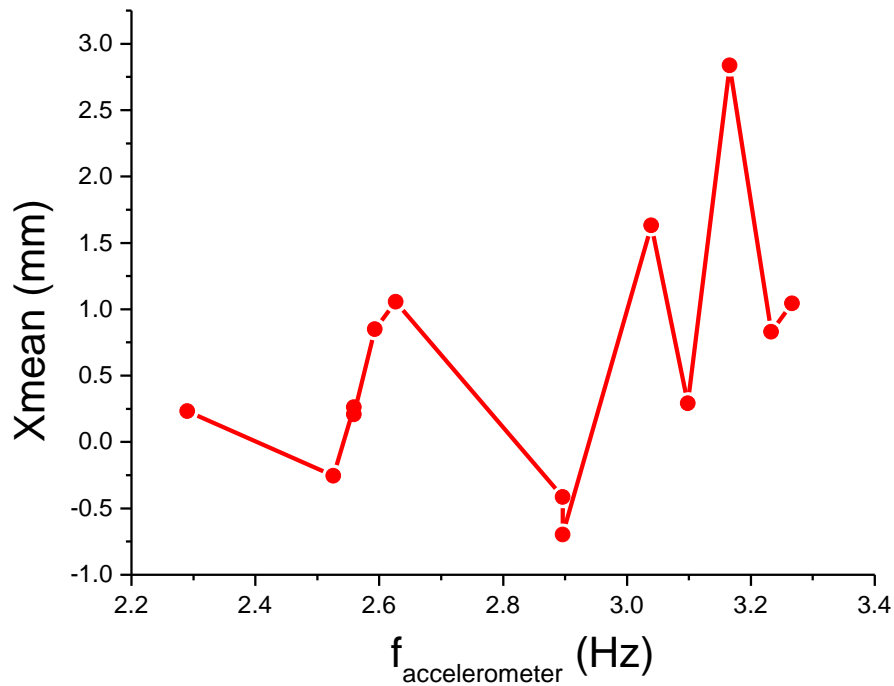
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα των επιταχύνσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα  $x$  με τις συχνότητες ταλάντωσης του από το επιταχυνσιόμετρο.

Από το σχήμα 6.3 παρατηρείται μια μεγάλη διακύμανση στις τιμές της επιτάχυνσης. Συγκεκριμένα οι τιμές όλο και αυξάνουν μέχρι το σημείο αλλαγής της συμπεριφοράς της πτέρυγας, όπου η τιμή της επιτάχυνσης αρχίζει να πέφτει και με το που γίνεται η αλλαγή, ξανά αυξάνει, φτάνοντας σε μια μέγιστη τιμή όπου στην συνέχεια φθίνει. Αυτή η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στα 4,8-5 Hz συχνότητα inverter, γεγονός που ταιριάζει με τα αποτελέσματα του πρώτου σετ διαγραμμάτων του προηγούμενο κεφαλαίου που είδαμε ότι εκεί μεγιστοποιήθηκε και η τροχιά του κόκκινου λέιζερ στον άξονα x.

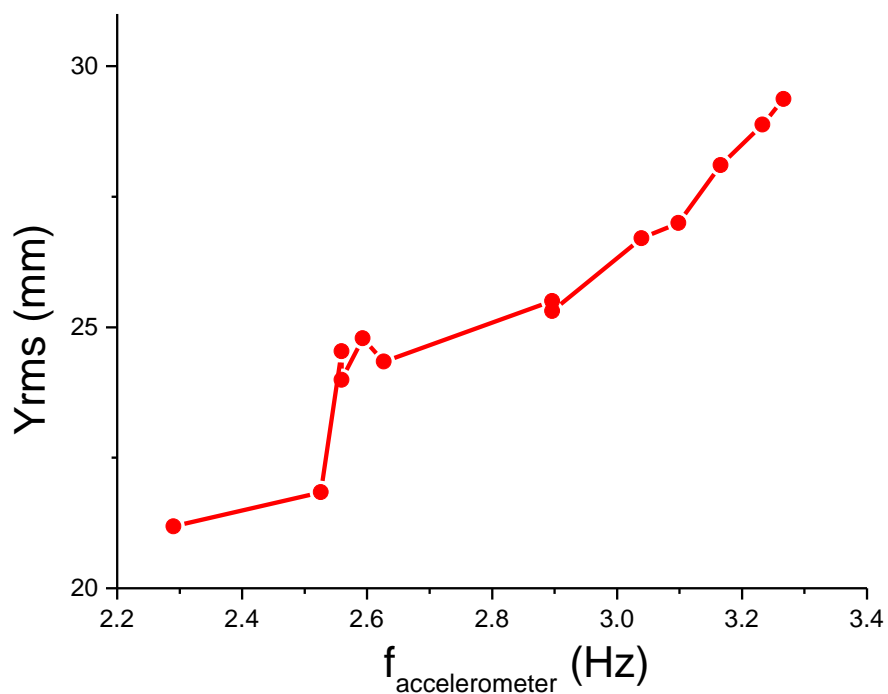
Τέλος, παρουσιάζονται 4 ακόμα διαγράμματα, εκ των οποίων τα 2 από αυτά μεταξύ συχνότητας ταλάντωσης πτέρυγας από μηχανική μέθοδο-τυπικής απόκλισης RMS και μέσης τιμής της μετατόπισης σε χιλιοστά στον οριζόντιο άξονα (x) και τα υπόλοιπα 2 μεταξύ και πάλι συχνότητας ταλάντωσης πτέρυγας από μηχανική μέθοδο-τυπικής απόκλισης RMS και μέσης τιμής της μετατόπισης σε χιλιοστά αλλά τώρα στον κατακόρυφο άξονα (y) προκειμένου να φανεί για ακόμα μια φορά η διαφορά των μετατοπίσεων στους 2 άξονες. Σημειώνεται πως στα 2 διαγράμματα που δείχνουν τις μέσες τιμές των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ για τις 2 διευθύνσεις, στον κατακόρυφο άξονα φαίνονται οι τιμές τους όπως βρέθηκαν από το πρόγραμμα ζωγραφική (σε pixels δηλαδή) χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό (4.4) ώστε να προκύψουν σε χιλιοστά.



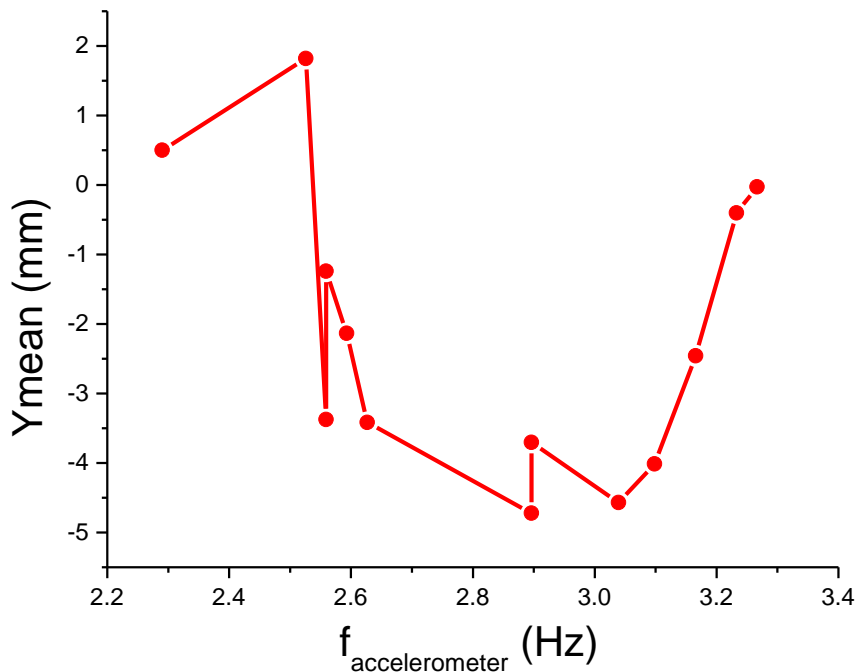
Σχήμα 6.4 Διάγραμμα μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης της πτέρυγας από το επιταχυνσιόμετρο και της τυπικής απόκλισης των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x.



Σχήμα 6.5 Διάγραμμα μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης της πτέρυγας από το επιταχυνσιόμετρο και της μέσης τιμής των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον οριζόντιο άξονα x.



Σχήμα 6.6 Διάγραμμα μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης της πτέρυγας από το επιταχυνσιόμετρο και της τυπικής απόκλισης των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα y.



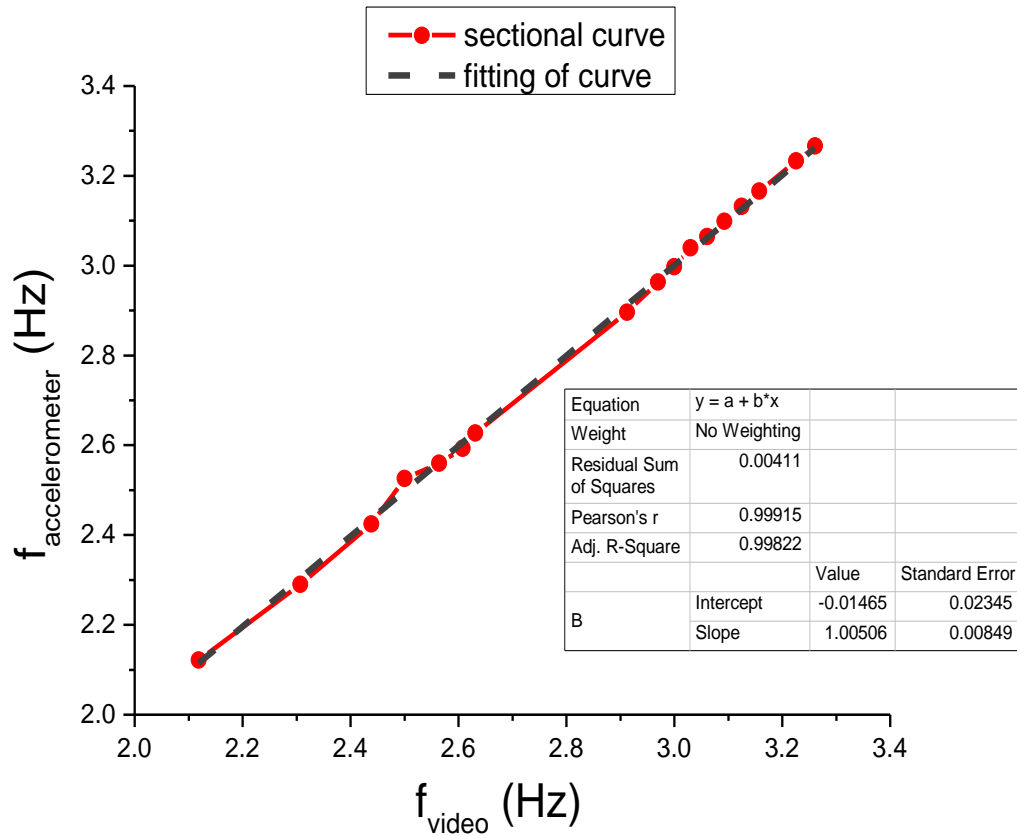
Σχήμα 6.7 Διάγραμμα μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης της πτέρυγας από το επιταχυνσιόμετρο και της μέσης τιμής των μετατοπίσεων του κόκκινου λέιζερ στον κατακόρυφο άξονα  $y$ .

Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο οι συχνότητες της πτέρυγας και από τις δύο μεθόδους εύρεσης τους, προκύπτουν σχεδόν ίσες, με αποτέλεσμα για τα παραπάνω τέσσερα διαγράμματα να ισχύουν οι ίδιοι σχολιασμοί με αυτούς που έγιναν στο κεφάλαιο 6.

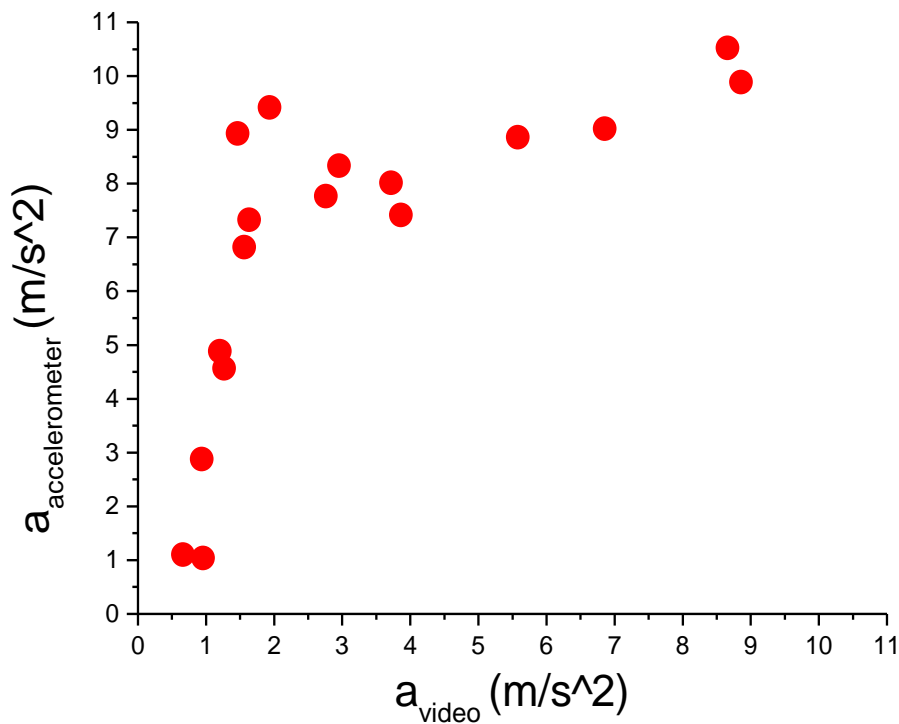
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται και σχολιάζεται η σύγκριση των δύο μεθόδων εύρεσης της συχνότητας ταλάντωσης του ακροπτερυγίου της πτέρυγας ελικοπτέρου BELL HUEY II, για 16 τιμές συχνότητας inverter από τις 25. Αυτή η σύγκριση όπως θα δούμε στην συνέχεια θα φανεί μέσω δύο διαγραμμάτων. Το πρώτο διάγραμμα είναι μεταξύ των συχνοτήτων της πτέρυγας και το δεύτερο μεταξύ των επιταχύνσεων που αναπτύχθηκαν στην οριζόντια διεύθυνση  $x$ .



Σχήμα 7.1 Διάγραμμα μεταξύ συχνοτήτων της πτέρυγας από τις δύο μεθόδους εύρεσής τους.



Σχήμα 7.2 Διάγραμμα μεταξύ επιταχύνσεων της πτέρυγας στην διεύθυνση x από τις δύο μεθόδους εύρεσής τους.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 7.1, οι συχνότητες από τις δύο μεθόδους σχεδόν ταυτίζονται. Από στατιστική ανάλυση της καμπύλης τους προκύπτει σχεδόν ευθεία γραμμή με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων και συντελεστή συσχέτισης Pearson's  $r$  σχεδόν μονάδα, με ακρίβεια τριών δεκαδικών.

Όσον αφορά τώρα τις επιταχύνσεις, φαίνεται πως οι δύο αυτές μέθοδοι εύρεσης τους, δεν έδωσαν τα ίδια αποτελέσματα, αλλά τουλάχιστον έδωσαν ίδιες συμπεριφορές ανάλογα με τις συχνότητες του inverter, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 7.1 που παρουσιάζεται παρακάτω. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται, και αν κάποιος προσέξει την διαφορά των διαγραμμάτων (5.34) και (6.3) που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 5 και 6 αντίστοιχα, όπου βλέπουμε 2 διαφορετικές καμπύλες παρόλο που στον οριζόντιο άξονα οι συχνότητες ταλάντωσης της πτέρυγας έχουν σχεδόν ίδιες τιμές .

Πιστεύεται, πως η διαφορά αυτή στις τιμές προέρχεται από την ανακρίβεια της οπτικής μεθόδου εύρεσης της επιτάχυνσης και τα σωστά αποτελέσματα είναι αυτά της μηχανικής μεθόδου για τους λόγους που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1

$f_{\text{inverter}}$ (Hz)	$a_{\text{video}}$ (m/s <sup>2</sup> )	$a_{\text{accelerometer}}$ (m/s <sup>2</sup> )
2.2	0.95	1.03
2.4	0.66	1.10
2.8	0.93	2.87
3	1.26	4.56
3.1	1.20	4.88
3.6	1.55	6.81
4	1.46	8.93
4.2	1.93	9.41
4.6 (after change of behavior)	1.63	7.32

4.6 (before change of behavior)	6.85	9.02
4.8	8.66	10.52
5	8.85	9.88
5.4	5.57	8.86
6	3.86	7.41
7	3.71	8.01
8	2.76	7.76
9	2.95	8.33

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Σκοπός των εργαστηριακών πειραμάτων που έγιναν κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν ο προσδιορισμός της ταλαντωτικής συμπεριφοράς πτέρυγας ελικοπτέρου. Συγκεκριμένα διεξήχθησαν 26 πειράματα όπου η πτέρυγα υποβλήθηκε σε εξαναγκασμένη ταλάντωση και για καθένα από αυτά είχε δοθεί διαφορετική συχνότητα διεγέρτη-ηλεκτροκινητήρα από τον inverter που είχε συνδεθεί.

Όπως παρατηρήθηκε γενικά, με την ολοκλήρωση των συγκεκριμένων πειραμάτων, στις πρώτες 15 συχνότητες του inverter (2,2-4,6 Hz), κυριαρχούν οι εγκάρσιες ταλαντώσεις (φαινόμενο flapping). Συγκεκριμένα, η πτέρυγα παρουσίασε πολύ μεγαλύτερη ταλάντωση κατά τον κατακόρυφο άξονα y από αυτές στον οριζόντιο άξονα x που θέλουμε να μελετήσουμε, με τις αντίστοιχες επιταχύνσεις στην διεύθυνση x να αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας του διεγέρτη.

Στις επόμενες 11 μεγαλύτερης κλίμακας συχνότητες του inverter (4,6-9 Hz), η ταλαντωτική συμπεριφορά της πτέρυγας είχε σημαντικές διαφοροποιήσεις. Εμφανίστηκε έντονη διαμήκης ταλάντωση (edgewise vibrations). Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε, πως όταν η συχνότητα του inverter φτάνει στα 4,6 Hz, για τα



πρώτα 15 δευτερόλεπτα ταλάντωσής της πτέρυγας, συνεχίστηκε η αρχική συμπεριφορά που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο ενώ στην συνέχεια και εντελώς ξαφνικά, η συμπεριφορά άλλαξε ριζικά με την τροχιά του ακροπτερυγίου πλέον να σχηματίζει μια έλλειψη και οι μετατοπίσεις στον  $x$  σχεδόν να ισούνται με αυτές στον  $y$ . Αυτή η απότομη αλλαγή έγινε, επειδή οι συχνότητες μοτέρ και πτέρυγας έφτασαν πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα της πτέρυγας στην οριζόντια διεύθυνση (2,95 Hz). Επίσης, σε συχνότητα inverter 4,8-5 Hz που αντιστοιχεί σε συχνότητα ταλάντωσης της πτέρυγας 2,91-2,97 Hz, έχουμε μεγιστοποίηση του πλάτους ταλάντωσης στη διεύθυνση  $x$ , στη διεύθυνση  $y$ , καθώς και στο συνδυασμό τους, με αποτέλεσμα το ακροπτερύγιο της πτέρυγας να λαμβάνει και την μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης του στην διεύθυνση  $x$  που μελετάμε. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, αφού η πτέρυγα 'έπιασε' την ιδιοσυχνότητά της και το σύστημα οδηγήθηκε σε συντονισμό.

Η πτέρυγα λοιπόν, φαίνεται να εκτελεί μια σύνθετη κίνηση διαγράφοντας τόξο κύκλου μην εκτελώντας μια απλή κατακόρυφη κίνηση. Από την ανάλυση του οπτικοακουστικού υλικού φαίνεται ότι η κατακόρυφη ταλάντωση είναι αρκετά εντονότερη από την οριζόντια σχεδόν σε όλα τα εύρη συχνοτήτων ταλάντωσης.

Αυτή η σύνθετη ταλαντωτική κατάσταση, αντιπροσωπεύει πλήρως τις καταπονήσεις των πτερυγίων των ελικοπτέρων κατά τη διάρκεια της πτήσης τους, επιδρώντας στη διάρκεια ζωής της κατασκευής καθώς και στη γενικότερη απόδοση του ελικοπτέρου. Σε πραγματικές συνθήκες πτήσης είναι σχεδόν αδύνατο να επιδρά μόνο ένα είδος ταλάντωσης στις πτέρυγες. Συνηθέστερη είναι η σύνθετη κατάσταση καταπόνησης, με ταλαντώσεις κατά την  $y$  διεύθυνση (φαινόμενο flapping), κατά την  $x$  διεύθυνση (φαινόμενο lead-lag oscillations), αλλά και στρεπτικές ταλαντώσεις γύρω από τον άξονα  $z$  (φαινόμενο pitching).

Σημαντικό αποτέλεσμα των πειραμάτων αποτελεί και το γεγονός πως ο βραχίονας του μοτέρ και η πτέρυγα, καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων ταλαντώνονταν με σχεδόν ίδιες συχνότητες. Επίσης, βρέθηκε πως και οι συχνότητες ταλάντωσης της πτέρυγας, και από τις δύο μεθόδους εύρεσης τους, (μηχανική και οπτική) σχεδόν ταυτίζονταν, γεγονός που αποδεικνύει πως και οι δύο μέθοδοι δούλεψαν σωστά. Ακόμα, να σημειωθεί πως το μοτέρ που ήταν πακτωμένο πάνω στην πτέρυγα, λόγω αυτής της σύνθετης και περίπλοκης κίνησης που εκτελούσε αυτή, δεχόταν τέτοιες περιοδικές και σύνθετες δυνάμεις, καθώς ήταν και το γεγονός του διαφορετικού μήκους των 2 ενωμένων βραχιόνων του, που δεν του επέτρεπαν να ακολουθήσει επακριβώς τις μεταβολές του inverter. Εξίσου, το ίδιο ισχύει και για την πτέρυγα, αφού η τελική τιμή ταλάντωσης της στο τελευταίο πείραμα προκύπτει σχεδόν τρεις φορές μικρότερη από αυτήν στον inverter. Στο τέλος των πειραμάτων, όπου ο

inverter ξαφνικά τέθηκε εκτός λειτουργίας ενώ ακριβώς πιο πριν ήταν στα 9 Hz, το σύστημα πτέρυγα-μοτέρ αφέθηκε να ταλαντωθεί ελεύθερο μέχρι να έρθει σε ηρεμία. Η πτέρυγα σε όλο αυτό το διάστημα μέχρι να σταματήσει τελείως, ακολούθησε διάφορες συμπεριφορές ταλάντωσης (edgewise, flapwise ή και συνδυασμό τους για κάποια δευτερόλεπτα) με αξιοσημείωτο το γεγονός πως κάποια στιγμή συνέβη μεγιστοποίηση του πλάτους της ταλάντωσης της στην κατακόρυφη διεύθυνση  $y$ , λόγω ότι ο βραχίονας του μοτέρ συντονίστηκε με την πτέρυγα που ταλαντωνόταν με την ιδιοσυχνότητά της (1,25 Hz).

Όσον αφορά τώρα τις επιταχύνσεις στην οριζόντια διεύθυνση  $x$ , οι δύο αυτές μέθοδοι δεν έδωσαν τα ίδια αποτελέσματα αλλά τουλάχιστον έδωσαν ίδιες συμπεριφορές ανάλογα με τις συχνότητες του inverter. Πιστεύεται, πως η διαφορά αυτή στις τιμές, προέρχεται από την ανακρίβεια της οπτικής μεθόδου εύρεσης της επιτάχυνσης και τα σωστά αποτελέσματα είναι αυτά της μηχανικής μεθόδου. Συγκεκριμένα, τα στιγμιότυπα που προέκυψαν από τα μικρής σχετικά ανάλυσης βίντεο (30 frames/sec), μελετήθηκαν, για μόνο τρεις από τις περιόδους ταλάντωσης της πτέρυγας και δεν ήταν ικανά να δώσουν σωστά αποτελέσματα, παρά μόνον μια εκτίμηση για την συμπεριφορά της πτέρυγας. Επίσης, σε αυτό έπαιξε καθοριστικό ρόλο και το λάθος του ανθρώπινου παράγοντα, αφού, στις ακρότατες θέσεις του ακροπτερυγίου της πτέρυγας, το κόκκινο λέιζερ έπαυε να φωτίζει εντός του φακού της βιντεοκάμερας, με αποτέλεσμα να μην φαίνεται καθόλου σε κάποια από τα στιγμιότυπα και να γίνεται μια πρόχειρη εκτίμηση της θέσης του από γειτονικά του σημεία.

Τέλος, να σημειωθεί πως στην παρούσα πειραματική μελέτη ακολουθήθηκε μη καταστρεπτική μέθοδος για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Το γεγονός αυτό δεν μας επέτρεψε να αυξήσουμε την συχνότητα στον inverter πάνω από τα 9 Hz, εξασφαλίζοντας την ασφαλή διεξαγωγή των μετρήσεων και δίνοντας έτσι τη δυνατότητα συνέχισης της διερεύνησης του θέματος σε επόμενη διπλωματική εργασία.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1].[http://3gym-zograf.att.sch.gr/karkanis/graptes\\_ergasies/elikoptero\\_dimitrios\\_giakoumis.pdf](http://3gym-zograf.att.sch.gr/karkanis/graptes_ergasies/elikoptero_dimitrios_giakoumis.pdf)
- [2].[The World Encyclopedia of Military Helicopters, Francis Crosby, April 16, 2013](#)
- [3].<http://mepolyaplalogia.blogspot.gr/2015/08/v-behaviorurldefaultvmlo.html>
- [4].Helis.com|Helicopter History Site.
- [5].BellHelicopter.com/commercial/bell\_huey-ii.
- [6].Γεώργιος Μπεργελές, Η Αεροδυναμική του Υποηχητικού Αεροσκάφους και η Μηχανική της Πτήσης, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2009
- [7].Ερρίκος Σταπουντζής, Σημειώσεις Αεροδυναμικής, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος 2013.
- [8].[http://repfiles.kallipos.gr/html\\_books/3395/00\\_master\\_document.html](http://repfiles.kallipos.gr/html_books/3395/00_master_document.html)
- [9]. [https://de.wikipedia.org/wiki/NACA-Profile#NACA-Profil\\_0012](https://de.wikipedia.org/wiki/NACA-Profile#NACA-Profil_0012)
- [10]. Ήρα Παπαμάλαμα, Ταλαντωτικά Φαινόμενα σε Πτέρυγα Ελικοπτήρου, Διπλωματική Εργασία Τ.Μ.Μ. Π.Θ., Βόλος, Ιούλιος 2016
- [11]. Χαράλαμπος Βάρβογλης, Φυσική για Επιστήμονες και Μηχανικούς Έκδοση 8η,καθηγητής του τμήματος Φυσικής στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012
- [12]. Δέντορας Αργύρης, Μετρήσεις, Ταλαντώσεις δοκού (θεωρία και ασκήσεις), Εργαστήριο Υπολογισμού και Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστημίου Πατρών, 2013.
- [13]. <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C123/487/3182,12880/>

- [14]. [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2052/1/02\\_chapter\\_5.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2052/1/02_chapter_5.pdf)
- [15]. Δημήτριος Κουζούδης, Θερμοδυναμική για μηχανικούς, Γενικό Τμήμα Πολυτεχνικής Σχολής, Πανεπιστημίου Πατρών, 2 Σεπτεμβρίου 2011
- [16]. Έλλη Ριζούλη, Μελέτη ελαστικής συμπεριφοράς πτέρυγας ελικοπτέρου υπό την επίδραση στατικών και δυναμικών φορτίων, Διπλωματική Εργασία Τ.Μ.Μ. Π.Θ., Βόλος, Μάρτιος 2017
- [17]. [www.kistler.com](http://www.kistler.com)

