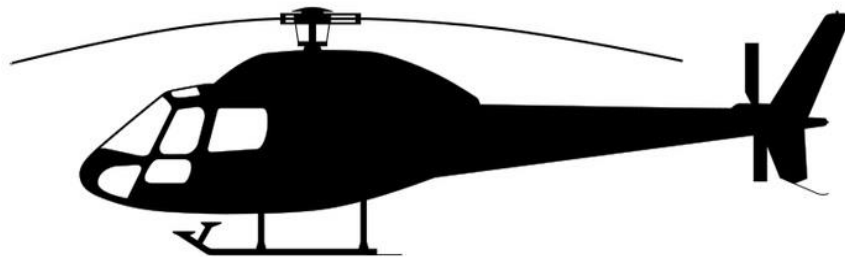


ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΩΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΠΤΕΡΥΓΑΣ ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟΥ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ**



Ριζούλη Έλλη

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

Επιβλέπων Καθηγητής : Ε. Σταπουντζής

ΒΟΛΟΣ 2017

Ευχαριστίες

Η Διπλωματική αυτή 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.

Από τη θέση αυτή αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω:

Τον κ. Ερρίκο Σταπουντζή, καθηγητή του τμήματος, επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Τους καθηγητές κ. Αναστάσιο Σταματέλλο και κ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου, ως μελών της εξεταστικής επιτροπής.

Τον κ. Αθανάσιο Βέργο, για την υποστήριξη στις μηχανουργικές κατεργασίες κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται πειραματικά τη μελέτη της ελαστικής και ταλαντωτικής συμπεριφοράς πτέρυγας ελικοπτέρου Bell Huey II κάτω από την επίδραση στατικών και δυναμικών φορτίων.

Σκοπός των εργαστηριακών πειραμάτων, είναι η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τις δυνατότητες και αντοχές μιας πτέρυγας ελικοπτέρου σε πραγματικές συνθήκες πτήσης.

Η πτέρυγα εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αφού πακτώθηκε στο ένα της άκρο, στη συνέχεια καταπονήθηκε με στατικά σημειακά φορτία καθώς και με μια σειρά εξαναγκασμένων ταλαντώσεων ορίζοντας κάθε φορά διαφορετική συχνότητα διεγέρτη.

Στα αρχικά κεφάλαια, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη στον σχεδιασμό των πτερυγίων τόσο από αεροδυναμική όσο και από κατασκευαστική σκοπιά, από την εποχή των πρώτων ελικοπτέρων μέχρι και σήμερα. Αναφέρονται επίσης οι βασικές αιτίες καταπόνησης των πτερυγίων κατά τη διάρκεια της πτήσης αλλά και οι αναμενόμενες μορφές ταλάντωσης που πραγματοποιούνται, με σχετική αναφορά στη βασική θεωρία κάμψης και ταλαντώσεων.

Ακολουθεί στη συνέχεια αναλυτική περιγραφή σχετικά με τον τρόπο διεξαγωγής των εργαστηριακών πειραμάτων, ενώ τέλος παρουσιάζονται τα αριθμητικά και ποιοτικά αποτελέσματα που προέκυψαν με εκτενή σχολιασμό βασισμένο στη θεωρία.

ABSTRACT

The present postgraduate thesis deals with the experimental study of the flexibility and the oscillatory behavior of the Bell's Huey II helicopter blade, under the effect of static and dynamic loading. The aim of experiments, is to export useful conclusions on the possibilities and resistances of the blade of helicopter in real conditions of flight.

The helicopter blade was installed in the Fluid Mechanics and Turbomachinery laboratory of the Mechanical Engineering department of University of Thessaly.

After been clumped in the one of the edges, forced by specific static loading. Furthermore, the blade forced into oscillations, with different frequency of excitation.

In the first chapter, a short historical literature review takes place which is about the blade design development from the era of the first helicopters till today. The design study includes the aerodynamic and the manufacturing part as well.

Also the main causes of loading of the blades, at the duration of flight, are reported as also as the basic principles of bending and oscillations.

In the next chapter, it is described the experimental process and the laboratorial equipment.

Finally the numerical and qualitative results are presented with extensive annotation based on the theory in the final chapter.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	15
2.1 Η εξέλιξη του ελικοπτέρου.....	15
2.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας ελικοπτέρου.....	17
2.1.2 Οι σύγχρονες αεροτομές.....	21
2.1.3 Η συμβολή των νέων υλικών στην κατασκευή πτερυγίων.....	22
2.1.4 Κύριοι παράγοντες καταπόνησης των πτερυγίων.....	25
2.2 Το ελικόπτερο Bell UH.....	28
2.3 Περιγραφή τεχνολογικού προβλήματος.....	31
2.3.1 Βασικές αρχές θεωρίας κάμψης.....	31
2.3.2 Βασικές αρχές θεωρίας ταλαντώσεων.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	38
3.1 Εργαστηριακή διάταξη.....	38
3.1.1 Πάκτωση της πτέρυγας.....	40
3.1.2 Όργανα μετρήσεως.....	41
3.1.3 Προσδιορισμός Συστήματος Συντεταγμένων.....	44
3.2 Μεθοδολογία διεξαγωγής πειράματος.....	45
3.2.1 Στατική Φόρτιση.....	46
3.2.2 Δυναμική Φόρτιση.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	52
4.1 Αποτελέσματα Στατικών πειραμάτων.....	52

4.1.1 Φορτίσεις στη διεύθυνση y	53
4.1.2 Φορτίσεις στη διεύθυνση x	68
4.2 Αποτελέσματα Δυναμικών Πειραμάτων.....	69
4.1.1 Μετρήσεις επιτάχυνσης με χρήση επιταχυσιόμετρου.....	70
4.1.2 Μετρήσεις επιτάχυνσης από ανάλυση των <i>video</i>	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	84

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

c : Μήκος χορδής πτέρυγας (m)

τ : Πάχος πτέρυγας (m)

A.C : Αεροδυναμικό κέντρο

C.P : Κέντρο πίεσης

M : Ροπή (Nm)

L : Άνωση (N)

D : Οπισθέλκουσα δύναμη (N)

α : Γωνία προσβολής (rad)

σ : Ορθή τάση (N/m^2)

I_x : Ροπή αδράνειας ως προς τον άξονα x (m^4)

W_b : Ροπή αντίστασης σε κάμψη (m^3)

K : Σταθερά δυσκαμψίας N/m

Q : Συντελεστής ποιότητας

m : Μάζα (Kg)

t : Χρόνος (sec)

ω : Γωνιακή ταχύτητα (rad/s)

ϕ : Αρχική φάση (rad)

f_0 : Ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης (Hz)

f : Συχνότητα διεγέρτη (Hz)

F_T : Συχνότητα ταλάντωσης (Hz)

u : Στιγμαία ταχύτητα (m/s)

a : Στιγμιαία επιτάχυνση (m/s^2)

A : Πλάτος ταλάντωσης (m)

T : Περίοδος ταλάντωσης (sec)

H_0 : Αρχική θέση σημείου πάνω στην y διεύθυνση (m)

H : Τελική θέση σημείου πάνω στην y διεύθυνση (m)

ΔH : Μετατόπιση κατά τον y άξονα (m)

F_y : Κατακόρυφο φορτίο (N)

ΔL : Μετατόπιση κατά την x διεύθυνση

F_x : Οριζόντιο φορτίο (N)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- Σχήμα 2.2 Τα τμήματα του ελικοπτέρου αναλυτικά
- Σχήμα 2.3 Περιστροφή περί εγκάρσιου άξονα
- Σχήμα 2.4 Κλίση μπροστά και πίσω
- Σχήμα 2.5 Περιστροφή ως προς κάθετο άξονα
- Σχήμα 2.6 Αρχή διατήρησης στροφορμής στο σύστημα ρότορας - άτρακτος
- Σχήμα 2.7 Ο ρόλος του ουραίου στροφείου στη λειτουργία του ελικοπτέρου
- Σχήμα 2.8 Απεικόνιση της ροής γύρω από πτέρυγα
- Σχήμα 2.9 Ξύλινη πτέρυγα ελικοπτέρου
- Σχήμα 2.10 Κυψελοειδής δομή σε μεταλλικά πτερύγια
- Σχήμα 2.11 Τυπική διατομή πτέρυγας από σύνθετα υλικά
- Σχήμα 2.12 Κάθετες δονήσεις από λάθος ανίχνευση
- Σχήμα 2.13 Περιπτώσεις όπου τα πτερύγια δεν κινούνται στο ίδιο ίχνο
- Σχήμα 2.14 “Vortex Interaction”
- Σχήμα 2.15 Τα βασικά είδη ταλαντώσεων πτέρυγας ελικοπτέρου
- Σχήμα 2.16 Φωτογραφία ελικοπτέρου Bell UH
- Σχήμα 2.17 Σκαρίφημα ελικοπτέρου Bell-Huey (κάτοψη-πρόσοψη-πλάγια όψη)
- Σχήμα 2.18 Απεικόνιση καμπτόμενης δοκού
- Σχήμα 2.19 Βέλος κάμψης απλής μονόπακτης δοκού ορθογωνικής διατομής
- Σχήμα 2.20 Απλός αρμονικός ταλαντωτής
- Σχήμα 2.21 Διάγραμμα θέσης ως προς χρόνο
- Σχήμα 2.22 Διάγραμμα ταχύτητας ως προς χρόνο
- Σχήμα 2.23 Διάγραμμα επιτάχυνσης ως προς χρόνο
- Σχήμα 2.24 Καμπύλη πλάτους για εξαναγκασμένη ταλάντωση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- Σχήμα 3.1 Η εργαστηριακή διάταξη της πτέρυγας
- Σχήμα 3.2 Φωτογραφίες από την εργαστηριακή διάταξη της πτέρυγας- Το μοτέρ του διεγέρτη και η κατασκευή της πάκτωσης στο βάθος
- Σχήμα 3.3 Σκαρίφημα της πακτωμένης πτέρυγας
- Σχήμα 3.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πτέρυγας – πάκτωσης σε Solidworks.
- Σχήμα 3.5 Επιταχυνσιόμετρο KISTLER 8632C10T με το βέλος να δείχνει τη διεύθυνση μέτρησης
- Σχήμα 3.6 Σκαρίφημα επιταχυνσιόμετρου KISTLER 8632C10T
- Σχήμα 3.7 Ενισχυτής KISTLER
- Σχήμα 3.8 Μετατροπέας σήματος
- Σχήμα 3.9 Απεικόνιση της αεροτομής NACA 0012 της πτέρυγας με την εφαρμογή του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

- Σχήμα 3.10 Οι δυο κάθετοι άξονες που σχηματίζονται από το λείζερ
- Σχήμα 3.11 Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης με τις διαδοχικές θέσεις φόρτισης κατά μήκος του εκπετάσματος στη διεύθυνση z.
- Σχήμα 3.12 Σύστημα επιβολής στατικών σημειακών φορτίσεων από κάτω προς τα επάνω στην κατακόρυφη διεύθυνση y.
- Σχήμα 3.13 Ο τρόπος άσκησης στατικού σημειακού φορτίου με φορά προς τα πάνω μέσω ανυψωτικού μηχανισμού.
- Σχήμα 3.14 Το σύστημα του διεγέρτη
- Σχήμα 3.15 Απεικόνιση αρχικών παραμέτρων στο πρόγραμμα *Labview National Instruments*.
- Σχήμα 3.16 Απεικόνιση της πολυωνυμικής μορφής του σήματος, $y=x$ του προγράμματος LabView.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

- Σχήμα 4.1 Φόρτιση κατά την y διεύθυνση και φορά από πάνω προς τα κάτω.
- Σχήμα 4.2 Μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 1
- Σχήμα 4.3 Μετατόπιση στη θέση $z_2=1m$ για φόρτιση στη θέση 1
- Σχήμα 4.4 Μετατόπιση στη θέση $z_3=2m$ για φόρτιση στη θέση 1
- Σχήμα 4.5 Μετατόπιση στη θέση $z_4=3m$ για φόρτιση στη θέση 1
- Σχήμα 4.6 Μετατόπιση στη θέση $z_5=4m$ για φόρτιση στη θέση 1
- Σχήμα 4.7 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 2 Σχήμα
- Σχήμα 4.8 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_2=1m$ για φόρτιση στη θέση 2
- Σχήμα 4.9 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_3=2m$ για φόρτιση στη θέση 2
- Σχήμα 4.10 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_4=3m$ για φόρτιση στη θέση 2
- Σχήμα 4.11 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_5=4m$ για φόρτιση στη θέση 2
- Σχήμα 4.12 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 3
- Σχήμα 4.13 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_2=1 m$ για φόρτιση στη θέση 3
- Σχήμα 4.14 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_3=2 m$ για φόρτιση στη θέση 3
- Σχήμα 4.15 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_4=3 m$ για φόρτιση στη θέση 3
- Σχήμα 4.16 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_5=4 m$ για φόρτιση στη θέση 3
- Σχήμα 4.17 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 4
- Σχήμα 4.18 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_2=1m$ για φόρτιση στη θέση 4
- Σχήμα 4.19 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_3=2m$ για φόρτιση στη θέση 4
- Σχήμα 4.20 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_4=3m$ για φόρτιση στη θέση 4
- Σχήμα 4.21 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_5=4m$ για φόρτιση στη θέση 4
- Σχήμα 4.22 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 5
- Σχήμα 4.23 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_2=1m$ για φόρτιση στη θέση 5
- Σχήμα 4.24 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_3=2m$ για φόρτιση στη θέση 5
- Σχήμα 4.25 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_4=3m$ για φόρτιση στη θέση 5
- Σχήμα 4.26 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_5=4m$ για φόρτιση στη θέση 5

- Σχήμα 4.27 Μετατόπιση κατά την x διεύθυνση
- Σχήμα 4.28 Αποσβενύμενη ταλάντωση όπως καταγράφεται από το πρόγραμμα *Labview (National Instruments)*
- Σχήμα 4.29 Η τυπική απόκλιση σε σχέση με την συχνότητα, f , του διεγέρτη για $t=60\text{sec}$
- Σχήμα 4.30 Η μέση επιτάχυνση σε σχέση με τη συχνότητα, f , του διεγέρτη για $t=60\text{sec}$
- Σχήμα 4.31 Καθορισμός της διάρκειας των video μέσα από το πρόγραμμα *Solveig*
- Σχήμα 4.32 Ανάλυση των video σε frames με το πρόγραμμα *FreeStudio*
- Σχήμα 4.33 Υπολογισμός θέσης με το πρόγραμμα *ImageJ 1.50i*.
- Σχήμα 4.34 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,169\text{ Hz}$
- Σχήμα 4.35 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,169\text{ Hz}$
- Σχήμα 4.36 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,180\text{ Hz}$
- Σχήμα 4.37 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,187\text{ Hz}$
- Σχήμα 4.38 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,193\text{ Hz}$
- Σχήμα 4.39 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,200\text{ Hz}$

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πίνακας 2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά ελικοπτέρου UH-1 Huey II

Πίνακας 2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά ελικοπτέρου UH-1 Huey II

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πίνακας 4.1 Χωρίς φόρτιση

Πίνακας 4.2 Συχνότητες βραχίονα σε αντιστοιχία με τις συχνότητες inverter (Hz)

Πίνακας 4.3 Οι συχνότητες των ταλαντώσεων ανάλογα με την περίοδο

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1 Αρχική θέση Ισορροπίας

Πίνακας 2 Οι θέσεις του ακροπτερυγίου ανάλογα με τη φόρτιση

Πίνακας 3 Φόρτιση στη θέση $z_1=0$ από πάνω προς τα κάτω

Πίνακας 4 Φόρτιση στη θέση $z_2=1\text{m}$ από πάνω προς τα κάτω

Πίνακας 5 Φόρτιση στη θέση $z_3=2\text{m}$ από πάνω προς τα κάτω

Πίνακας 6 Φόρτιση στη θέση $z_4=3\text{m}$ από πάνω προς τα κάτω

Πίνακας 7 Φόρτιση στη θέση $z_5=4\text{m}$ από πάνω προς τα κάτω

Πίνακας 8 Φόρτιση στον x άξονα

Πίνακας 9 Το πρώτο σετ δυναμικών φορτίσεων

Πίνακας 10 Το δεύτερο σετ δυναμικών φορτίσεων

Πίνακας 11 Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f= 1,169$ Hz

Πίνακας 12 Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f= 1,178$ Hz

Πίνακας 13 Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f= 1,180$ Hz

Πίνακας 14 Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f= 1,187$ Hz

Πίνακας 15 Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f= 1,193$ Hz

Πίνακας 16 Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f= 1,200$ Hz

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη του τομέα της αεροναυπηγικής και της επιστήμης των υλικών έκανε πραγματικότητα για τον άνθρωπο την ιδέα της κατακόρυφης πτήσης. Το ελικόπτερο, χάρη στη δυνατότητα κατακόρυφης απογείωσης και προσγείωσης αλλά και πτήσης προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, εισέβαλε δυναμικά στη ζωή του ανθρώπου ως μια από τις πιο περίπλοκες πτητικές και όχι μόνο μηχανές. Αποτελεί έναν ιδιαίτερα ευέλικτο τύπο αεροσκάφους, κατάλληλο ακόμη και σε δυσπρόσιτα σημεία όπου η κατασκευή αεροδρομίων δεν είναι εφικτή, ή στην επιφάνεια θαλασσών και λιμνών. Η συμβολή του ελικοπτέρου λοιπόν, ως εργαλείο και μέσο μεταφοράς είναι καθοριστικής σημασίας για την έγκαιρη επέμβαση και αντιμετώπιση έκτακτων αναγκών (πλημμύρες, πυρκαγιές), για τη διάσωση και μεταφορά ανθρώπων και αντικειμένων καθώς και για την ανύψωση και μεταφορά φορτίων σημαντικού βάρους. Επίσης βρήκε ευρεία εφαρμογή στον στρατιωτικό τομέα, κυρίως μετά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο.

Βάση των παραπάνω, γίνεται και η βασική διάκριση των ελικοπτέρων σε πολιτικά (επιβατικά, εμπορικά), στρατιωτικά, πυροσβεστικά ελικόπτερα καθώς και ελικόπτερα επιστημονικών ερευνών. Υπάρχουν τέλος και τα ελικόπτερα θαλάσσης, όπου έχουν τη δυνατότητα να προσθαλασσώνονται και να αποθαλασσώνονται.

Βάση λοιπόν των αυξημένων απαιτήσεων και της πολυπλοκότητας ως προς τη χρήση των ελικοπτέρων, η συνεχής επιστημονική έρευνα οδήγησε στην ταχεία εξέλιξή τους ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Παρόλες όμως τις καινοτομίες που διέπουν το σύγχρονο ελικόπτερο, οι μηχανικοί καλούνται ακόμα 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.

Στα πλαίσια λοιπόν της παρούσας εργασίας, θα μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά πτέρυγας στρατιωτικού ελικοπτέρου Bell UH-1, κάτω από την επιβολή διαφορετικών φορτίσεων. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια εργαστηριακής πειραματικής διάταξης, η πτέρυγα υποβάλλεται σε μια σειρά στατικών και δυναμικών φορτίσεων, ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναλύονται προσομοιώνοντας την πτέρυγα με μια μονόπακτη δοκό.

Μέσα από την παρούσα πειραματική διαδικασία και την κατάλληλη επεξεργασία των παραγόμενων μετρήσεων, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα στα πλαίσια της ανάλυσης των δυνατοτήτων των σύγχρονων αεροτομών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Η εξέλιξη του ελικοπτέρου

Η ιδέα της κατασκευής ελικοπτέρου είναι πολύ παλιότερη από του αεροπλάνου. Ο Λεονάρντο ντα Βίντσι είχε επινοήσει ένα τύπο ανυψωτικού μηχανήματος, ανάλογο με το ελικόπτερο. Πολύ αργότερα, το 1842, ο W. H. Phillips επινόησε έναν τύπο ελικοπτέρου με έκρηξη πυρίτιδας. Συνεχώς τελειοποιούταν και εξελισσόταν ο τύπος από διάφορους επιστήμονες μέχρι τις παραμονές του Β' παγκόσμιου πόλεμου το, όταν ο Igor Sikorsky, αεροπόρος και αεροναυπηγός, κατασκεύασε το πρώτο ελικόπτερο με τη μορφή που το γνωρίζουμε σήμερα.

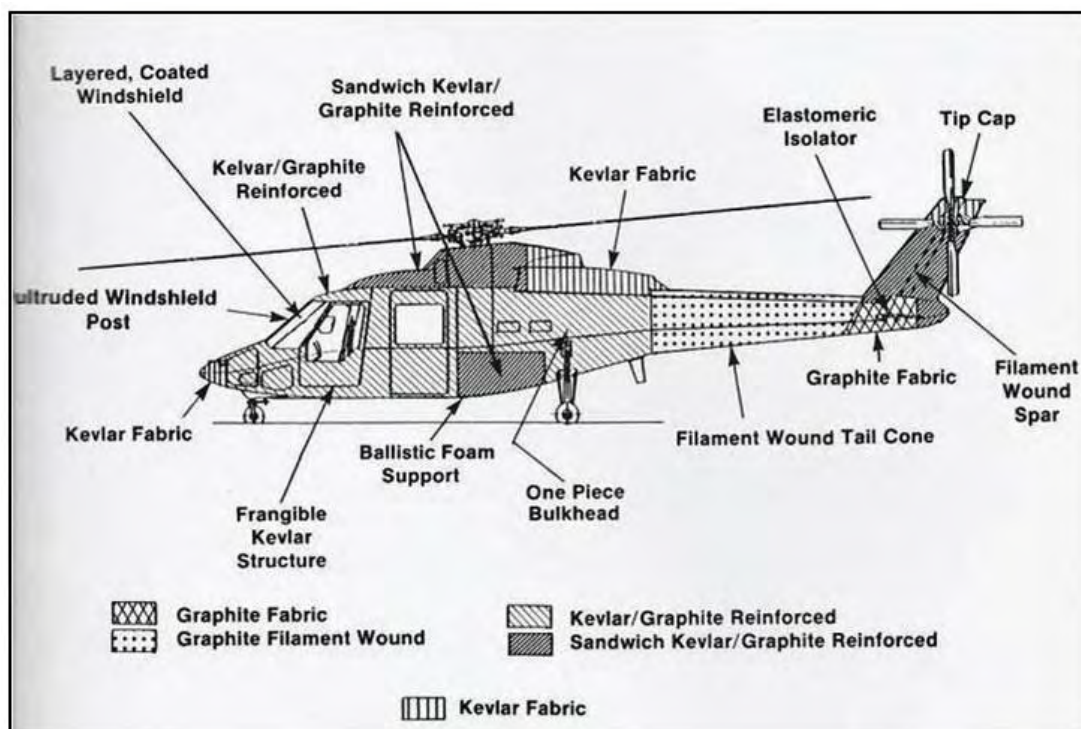
Με τη πάροδο των χρόνων, η ανάπτυξη και χρήση των στροβιλοκινητήρων εξέλιξε τις δυνατότητες των ελικοπτέρων, κάνοντάς τα ταχύτερα και ικανά να μεταφέρουν ακόμα και μεγαλύτερα από το βάρος τους φορτία.

Σήμερα το ελικόπτερο θεωρείται ένα από τα πιο σύγχρονα μέσα μεταφοράς, με ταχύτητες που κυμαίνονται από 220-250 χλμ./ώρα. Για τα στρατιωτικά ελικόπτερα 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. [1]

Όσον αφορά κυρίως τα στρατιωτικά ελικόπτερα σημαντικές βελτιώσεις σημειώθηκαν και στον εξοπλισμό τους με ηλεκτρονικά συστήματα, αισθητήρες και άλλες διατάξεις. Έχει βελτιωθεί η ικανότητά τους για μεταφορά πυροβόλων και πολυβόλων, και ρίψη αντιαρματικών πυραύλων, πυραύλων αέρος-αέρος, ρουκετών κ.λπ. Ορισμένες από τις σύγχρονες διατάξεις με τις οποίες εξοπλίζονται τα σύγχρονα στρατιωτικά ελικόπτερα είναι: όργανα διακυβέρνησης ψηφιακής τεχνολογίας, διόπτρες νυκτερινής όρασης, σύστημα για τη μείωση του υπέρυθρου ίχνους στο σημείο εξαγωγής καυσαερίων, παρεμβολέας υπέρυθρων για παραπλάνηση βλημάτων που κατευθύνονται προς αυτό, συστήματα προειδοποίησης ραντάρ, συστήματα ελέγχου βολής, αισθητήρας στοιχείων αέρος για τη διόρθωση της σκόπευσης, θερμικό σκοπευτικό για νυκτερινές βολές βλημάτων, αποστασιόμετρο λέιζερ κ.λπ.

Πέρα όμως από την ανάπτυξη της έρευνας στα μηχανολογικά και ηλεκτρονικά μέρη του ελικοπτέρου, ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συντέλεσε στην προώθηση του σχεδιασμού, της παραγωγής και εν τέλη των επιδόσεων των σύγχρονων ελικοπτέρων, ήταν η χρήση των σύνθετων υλικών.

Λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων των "έξυπνων υλικών", μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα μέρη του ελικοπτέρου αποφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε κάθε περίπτωση. Ένα από αυτά για παράδειγμα, είναι η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, ιδιαίτερα κατά την διεύθυνση των ινών. Έτσι λοιπόν, από το χώρο του κινητήρα, μέχρι την άτρακτο και το ουραίο πτερύγιο, τα σύνθετα υλικά, αποτελούν αναπόσπαστο μέρος στο σχεδιασμό του ελικοπτέρου.



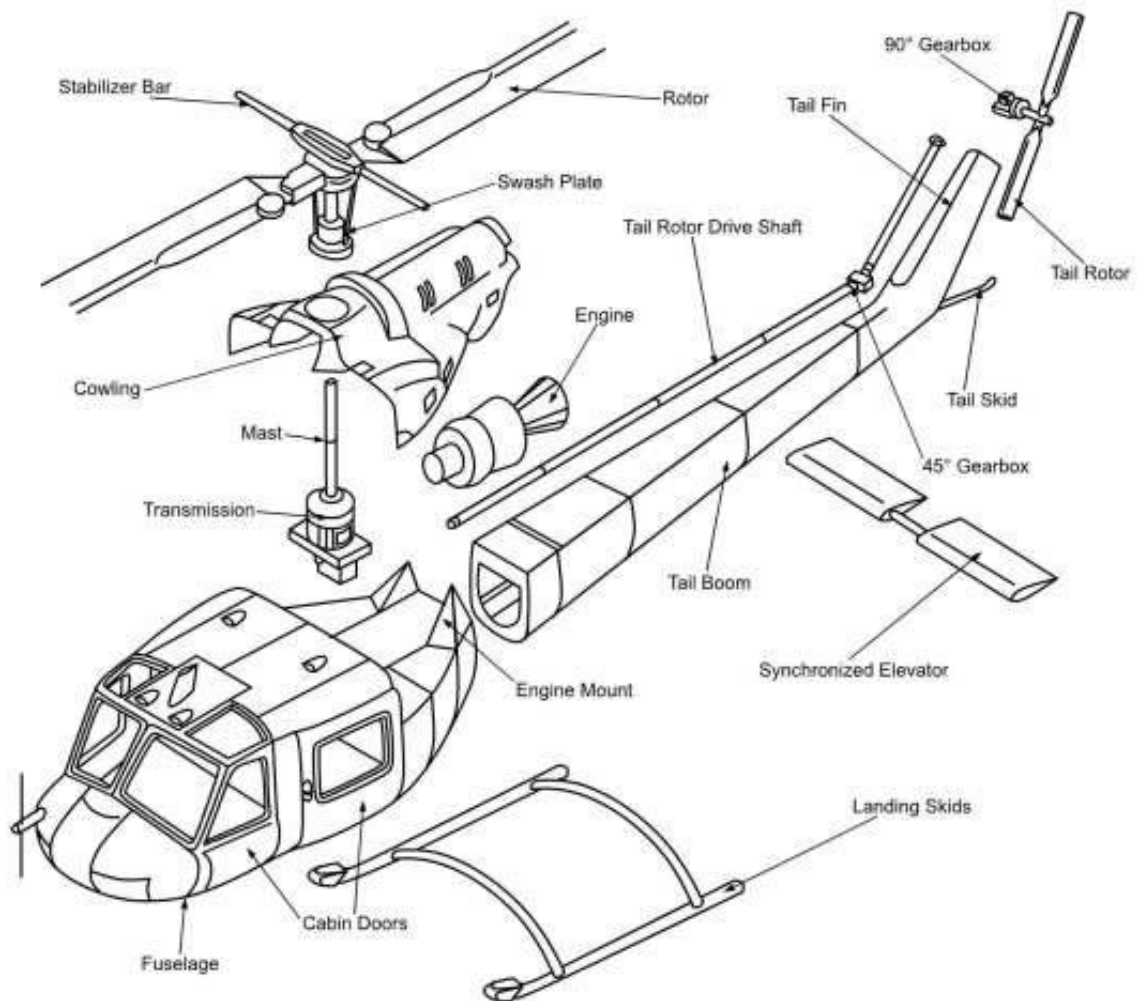
Σχήμα 2.1 Είδη σύνθετων υλικών σε άτρακτο ελικοπτέρου

2.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας ελικοπτέρου

Τα ελικόπτερα θεωρούνται αρκετά περίπλοκες πτητικές μηχανές κυρίως ως προς τη χρήση τους. Αυτή η ίδια η περιπλοκότητά τους, είναι που δίνει στον χειριστή την δυνατότητα να έχει τον έλεγχο και των τριών διαστάσεων στον χώρο. Όσον αφορά τον χειριστή του ελικοπτέρου, χρειάζεται να “σκέφτεται” σε τρεις διαστάσεις και να χρησιμοποιεί διαρκώς όλα του τα άκρα για να κρατάει το ελικόπτερο σε ισορροπία.

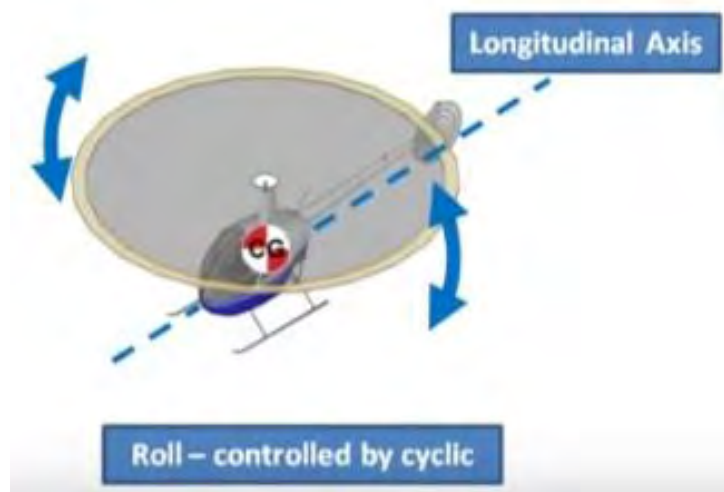
Τα κύρια τμήματα ενός ελικοπτέρου, είναι τα εξής:

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 (για παράδειγμα, ένα ελικόπτερο που επιχειρεί προσγείωση στον Βόρειο Πόλο διαθέτει πέδιλα στο σύστημα προσγείωσης του και όχι ρόδες, ακάτους κλπ., που θα διέθετε για την προσγείωση στην θάλασσα), το σύστημα μεταφοράς κίνησης και το σύστημα ελέγχου πτήσης.

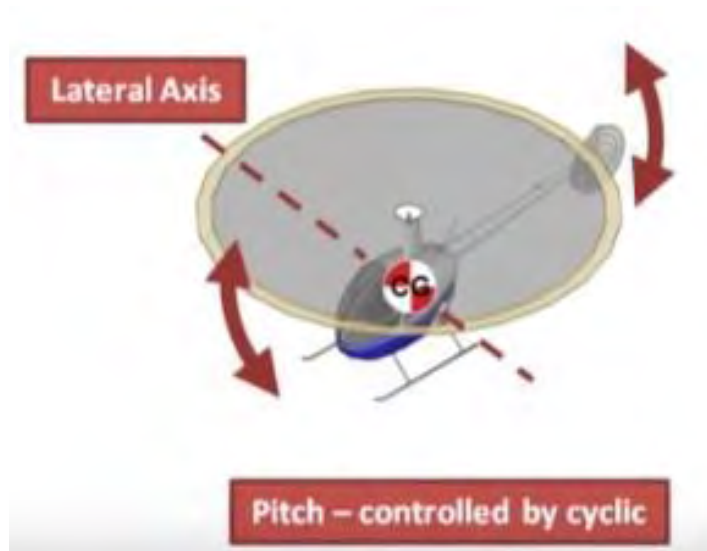


Σχήμα 2.2 Τα τμήματα του ελικοπτέρου αναλυτικά

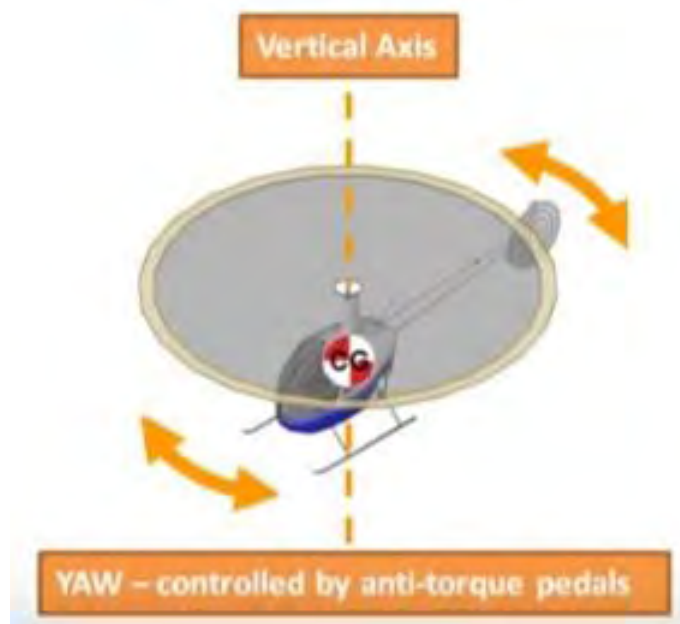
Το βασικό πτητικό εξάρτημα του ελικοπτέρου είναι το στροφέιο ή ρότορας. Το στροφέιο αποτελείται από 2-5 συνήθως μακρόστενες λεπίδες (blades), οι οποίες έχουν σχήμα πτέρυγας και είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν τους στροβιλισμούς (vortex) στην άκρη τους όπου η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη. Το στροφέιο παράγει άντωση και ώση και είναι υπεύθυνο για τους πιο πολλούς χειρισμούς του ελικοπτέρου. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια του swashplate το οποίο είναι ένας δίσκος στο κάτω μέρος του στροφείου που μεταβάλλει θετικά το βήμα, δηλαδή την γωνία προσβολής του στροφείου συνολικά αλλά και κάθε λεπίδας ξεχωριστά. Η ισχύς του ελικοπτέρου για να περιστραφεί ο ρότορας, παράγεται από τον κινητήρα και ελέγχεται από το κιβώτιο ελέγχου. Για να καταφέρει το ελικόπτερο να απογειωθεί, πρέπει η άνωση να υπερνικήσει το βάρος του. Αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας τις στροφές του κινητήρα καθώς και τη γωνία προσβολής. Στον αέρα το ελικόπτερο έχει την ικανότητα να ίπταται του εδάφους. Όταν συμβαίνει αυτό το βάρος του ισούται με τη δύναμη άνωσης. Για να πετάξει το ελικόπτερο ευθεία, κάθε πτέρυγά του κλίνει μπροστά, συνεπώς η πτέρυγα πέφτει μπροστά και ανεβαίνει πίσω καθώς περιστρέφεται. Κατά τη διάρκεια της περιστροφής των πτερύγων δημιουργείται ένας νοητός δίσκος, που είναι ουσιαστικά το εμβαδό που σαρώνουν οι πτέρυγες του ελικοπτέρου. Όταν ο δίσκος κλίνει μπροστά τότε το διάνυσμα της συνισταμένης δύναμης κλίνει αντίστοιχα. Η ίδια αρχή ισχύει και για την πίσω ώση όπου η πτέρυγα ανυψώνεται μπροστά και πέφτει πίσω καθώς και για τη στροφή αριστερά ή δεξιά. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι δυνατότητες κίνησης του ελικοπτέρου ως προς τους τρεις άξονες. [3]



Σχήμα 2.3 Περιστροφή περί εγκάρσιου άξονα

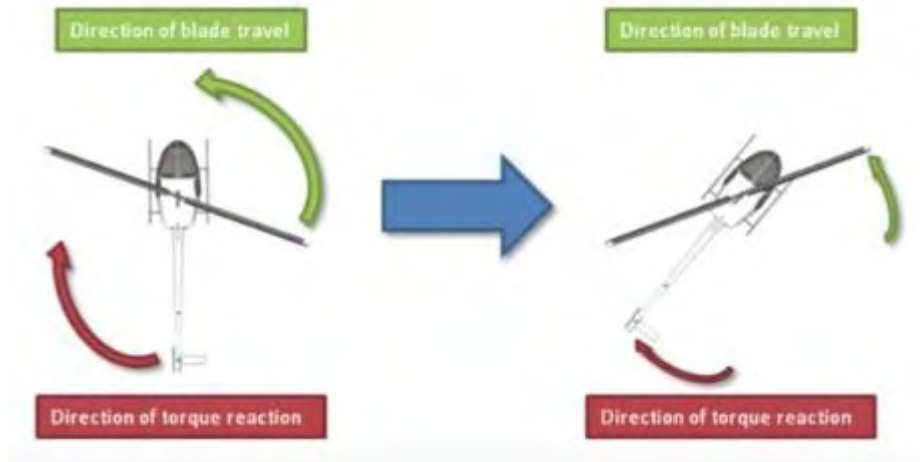


Σχήμα 2.4 Κλίση μπροστά και πίσω



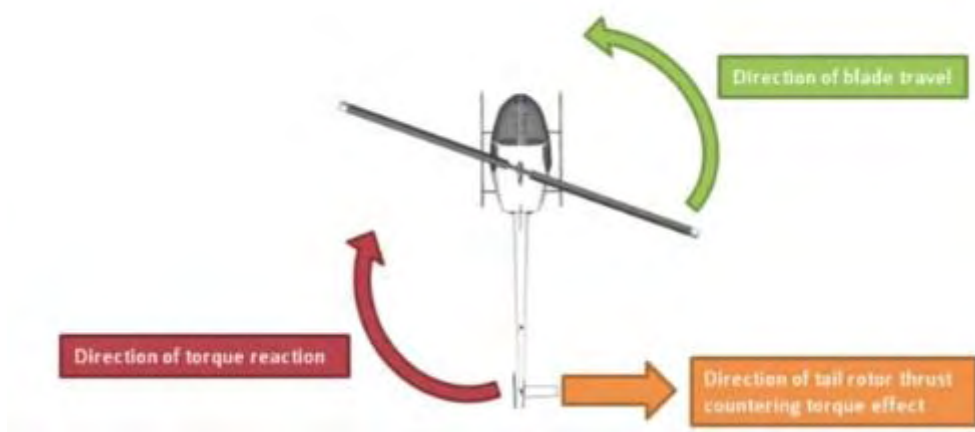
Σχήμα 2.5 Περιστροφή ως προς κάθετο άξονα

Όπως σε όλα τα περιστρεφόμενα αντικείμενα στην φύση έτσι και στο στροφέιο ισχύει η αρχή διατήρησης στροφορμής. Συνεπώς, όταν ο ρότορας περιστρέφεται, το σκάφος αποκτά την τάση να περιστραφεί και αυτό προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Σχήμα 2.6 Αρχή διατήρησης στροφορμής στο σύστημα ρότορας - άτρακτος

Το πρόβλημα αυτό λύθηκε από τους μηχανικούς με την τοποθέτηση ενός μικρότερου στροφείου στην ουρά του ελικοπτέρου (tail rotor). Το στροφέιο ουράς εξισορροπεί την στροφορμή, παράγοντας μια πλευρική ώση, αλλά δίνει και τον έλεγχο του εγκάρσιου άξονα (yaw) στον χειριστή μέσω των ποδοστηρίων.[2]



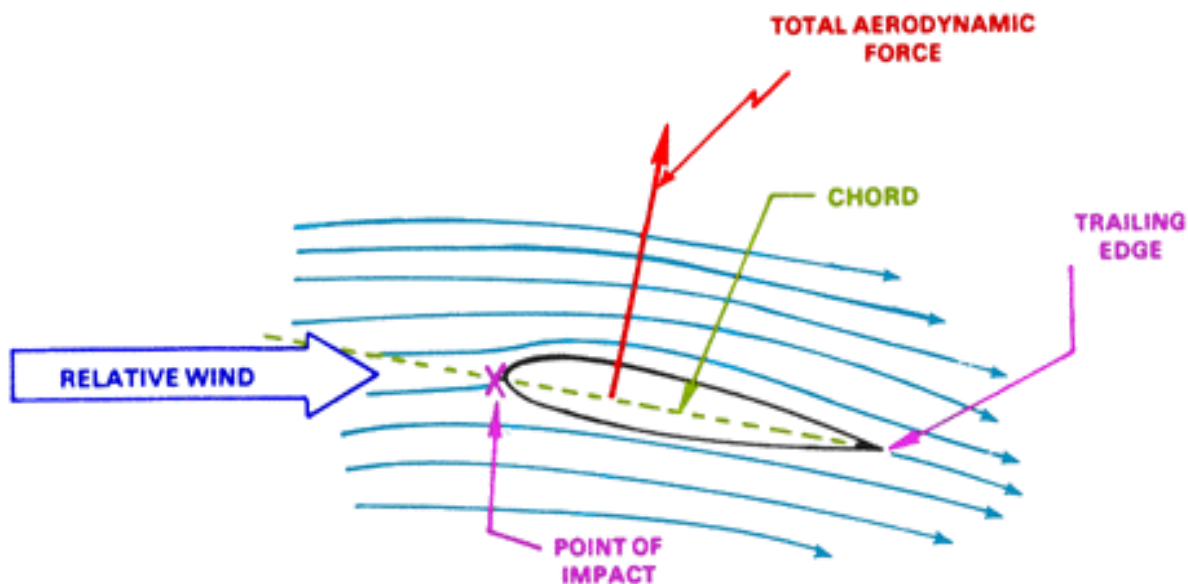
Σχήμα 2.7 Ο ρόλος του ουραίου στροφείου στη λειτουργία του ελικοπτέρου

2.1.2 Οι σύγχρονες αεροτομές

Η σύλληψη της ιδέας για την κατασκευή της πτέρυγας από τον άνθρωπο έγινε προφανώς παρατηρώντας τα φτερά των πουλιών και τα πτερύγια και το σώμα των ψαριών. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η πιο απλή φέρουσα επιφάνεια (lifting surface), υπό τη μορφή μιας λεπτής επίπεδης πλάκας και αργότερα με τη μορφή μιας κυρτωμένης πλάκας. Έτσι λοιπόν, οι πρώτες αεροτομές παρουσιάστηκαν από τους Lilienthal (1889) και Eiffel (1910), ενώ ακολούθησαν οι αδερφοί Wright, των οποίων οι αεροτομές εξακολουθούσαν να είναι λεπτές και κυρτές.

Γρήγορα διαπιστώθηκε πως οι συγκεκριμένες γεωμετρίες δεν μπορούσαν να ανταποκριθούν στις αεροδυναμικές απαιτήσεις, λόγω της αποκόλλησης της ροής στην πάνω επιφάνειά τους. Όπως είναι γνωστό, αποκολλημένη ροή συνεπάγεται έντονους ακατάστατους στροβιλισμούς, μειωμένες ανωστικές δυνάμεις και αυξημένη αντίσταση. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε, με την πρόσδοση πάχους αλλά και κυρτότητας στην πτέρυγα. Πλέον, ακόμα και όταν η πτέρυγα δεν βρίσκεται υπό κλίση ως προς την παράλληλη ροή, δέχεται δυναμική άνωση.

Όλα τα παραπάνω στηρίζονται στο Θεμελιώδες Θεώρημα της Υδροδυναμικής που δεν είναι άλλο από το Θεώρημα του Bernoulli.[4]



Σχήμα 2.8 Απεικόνιση της ροής γύρω από πτέρυγα

Όπως φαίνεται αναλυτικά και στο παραπάνω σχήμα, το μήκος της ευθείας μεταξύ ακμής προσβολής και φυγής ονομάζεται χορδή και συμβολίζεται με c . Όπως είναι φυσικό, για συμμετρικές αεροτομές η μέση γραμμή κυρτότητας και η χορδή συμπίπτουν.

Με την πάροδο του χρόνου δημιουργήθηκαν πολλά είδη αεροτομών με διαφορετικές επιδόσεις, που ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις. Οι αεροτομές αυτές τυποποιήθηκαν και τα γεωμετρικά και αεροδυναμικά τους χαρακτηριστικά έχουν καταγραφεί σε πίνακες και διαγράμματα.[4]

Από τις πιο πλήρης συστηματοποιήσεις των αεροτομών που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα, είναι της Αμερικανικής N.A.C.A. (National Advisory Committee for Aeronautics). Η Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή Αεροναυτικής, ιδρύθηκε το Μάρτιο του 1915. Την 1η Οκτωβρίου του 1958, ο οργανισμός διαλύθηκε, και τα περιουσιακά στοιχεία και το προσωπικό της μεταφέρθηκαν στη νεοσύστατη Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος NASA.

Το σχήμα των αεροτομών NACA περιγράφεται χρησιμοποιώντας μια σειρά από ψηφία που ακολουθούν τη λέξη "NACA». Οι παράμετροι στον αριθμητικό κώδικα μπορούν να εισαχθούν σε εξισώσεις για να δημιουργηθεί με ακρίβεια η διατομή της αεροτομής και να υπολογισθούν οι ιδιότητές της.

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

Η διανομή του πάχους στις συγκεκριμένες πτέρυγες δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$y_t = \frac{\delta_{max}}{20} \left[0.2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.126 \frac{x}{c} - 0.3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2483 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad 2.1$$

Τέλος, αεροδυναμικό κέντρο A.C. ορίζεται το σημείο πάνω στη χορδή, στο οποίο η ροπή M είναι πάντα σταθερή και ανεξάρτητη από τις ποσότητες L (άνωση), D(οπισθέλκουσα δύναμη), και α (γωνία προσβολής). Σε υποηχητική ροή το αεροδυναμικό κέντρο είναι το σημείο c/4 , ενώ σε συμμετρικές πτέρυγες το αεροδυναμικό κέντρο συμπίπτει με το κέντρο πίεσης C.P .

2.1.3 Η συμβολή των νέων υλικών στην κατασκευή πτερυγίων

Μεγάλη εξέλιξη στο σχεδιασμό των αεροτομών, σημειώθηκε και στο τομέα των υλικών. Βασική παράμετρος που πρέπει να ικανοποιείται κατά το σχεδιασμό των πτερυγίων και κατ' επέκταση στην επιλογή του υλικού, είναι οι δυνάμεις που το καταπονούν. Αν τα πτερύγια των αεροσκαφών παρουσίαζαν μεγάλη δυσκαμψία, θα προκαλούνταν διάφορα προβλήματα αστοχιών κατά τη διάρκεια της πτήσης. Για το λόγο αυτό μεγάλη σημασία κατά το σχεδιασμό, δίνεται στην κατάλληλη ελαστικότητα που πρέπει να έχουν οι πτέρυγες ώστε να αντέχουν τις έντονες αναταράξεις κατά την πτήση.

Με το πέρασμα των χρόνων, η ανακάλυψη και χρήση νέων υλικών βελτίωσε σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των αεροτομών, βελτιώνοντας συνολικότερα την απόδοση των αεροσκαφών.

Οι πρώτες πτέρυγες ελικοπτέρων κατασκευάστηκαν από ξύλο και ύφασμα σύμφωνα με την τεχνολογία της εποχής. Μάλιστα οι κατασκευαστές χρησιμοποιούσαν περισσότερο από ένα είδος ξύλου, προκειμένου το καθένα να προσδίδει τις δικές του ιδιότητες στην κατασκευή. Ο συνδυασμός διαφορετικών υλικών με διαφορετικές ιδιότητες είναι αυτό που σήμερα ονομάζουμε “σύνθετα υλικά”, τα οποία με την ίδια φιλοσοφία σχεδίασης χρησιμοποιούνται και σήμερα για την κατασκευή των σύγχρονων πτερυγίων. Η κατασκευή πτερυγίων από ξύλο, απαιτούσε άριστες δεξιότητες ξυλουργικής και ιδιαίτερη υπομονή αφού κατασκευάζονταν χειροποίητες χρησιμοποιώντας καλούπια. [6]



Σχήμα 2.9 Ξύλινη πτέρυγα ελικοπτέρου

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα του ξύλου, ως υλικό, είναι η απορρόφηση της υγρασίας, με άμεση συνέπεια την αλλαγή της μάζας της πτέρυγας. Τις ώρες για παράδειγμα που το αεροσκάφος δεν βρίσκεται σε πτήση και είναι εκτεθειμένο στις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος, η απορρόφηση υγρασίας ανομοιόμορφα από τις πτέρυγες του, επιφέρει έντονες δονήσεις ιδιαίτερα στο ξεκίνημα της πτήσης. [6] Τέλος, σε περίπτωση βλάβης και αντικατάστασης κάποιας πτέρυγας επιβάλλεται και η αντικατάσταση της άλλης, αφού από την κατασκευή τους βρίσκονται ανά ζεύγη.

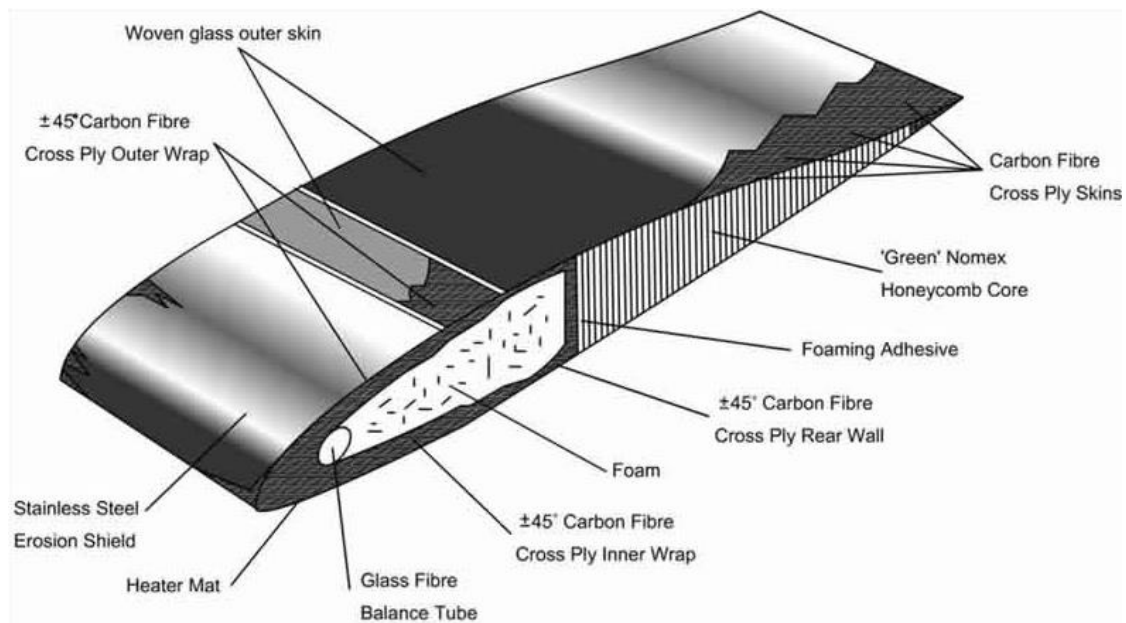
Από τη δεκαετία του 1960 και έπειτα ξεκίνησε η κατασκευή των πρώτων πτερυγίων από χάλυβα και αλουμίνιο. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής ήταν ότι η διαδικασία κατασκευής έγινε ευκολότερη αλλά και αρκετά πιο οικονομική. Επίσης τα υλικά αυτά δεν παρουσιάζουν την ίδια ευαισθησία σε εξωτερικούς παράγοντες όπως η υγρασία. Ένα όμως σημαντικό μειονέκτημα αυτών των υλικών είναι η μικρή αντοχή σε κόπωση. Οι μεταλλικές πτέρυγες σχεδιάζονταν με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και με σκοπό την αντικατάστασή τους μετά από προκαθορισμένο αριθμό πτήσεων. [7]

Αργότερα, η εισαγωγή της κυψελοειδούς δομής στο σχεδιασμό βελτίωσε σημαντικά την απόδοση των πτερυγίων αλλά και την αντοχή τους. Παρόλα αυτά, οι κατασκευαστικές μέθοδοι που ήταν διαθέσιμες την εποχή εκείνη στάθηκαν τροχοπέδη στην περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής.



Σχήμα 2.10 Κυψελοειδής δομή σε μεταλλικά πτερύγια

Η σημαντικότερη πρόοδος στην τεχνολογία των πτερυγίων των αεροσκαφών επιτεύχθηκε με την ανάπτυξη και τη χρήση των σύνθετων υλικών. Η κεντρική ιδέα των υλικών αυτών, είναι ο συνδυασμός δυο ή και περισσότερων διαφορετικών υλικών. Με άλλα λόγια, μέσα από το συνδυασμό των ιδιοτήτων διαφορετικών υλικών, το νέο υλικό προκύπτει ενισχυμένο με νέες ιδιότητες, πολλές φορές τελείως διαφορετικές από τις αρχικές. Τέτοια παραδείγματα, αποτελούν τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού ή ίνες άνθρακα, αλλά και πολλά άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. [7]
Το κύριο χαρακτηριστικό των υλικών αυτών είναι η μεγάλη ευκαμψία που παρουσιάζουν ώστε να αντέχουν τις καμπτικές καταπονήσεις που υφίστανται, όπως και η σημαντική αντίσταση στη διάδοση των ρωγμών.



Σχήμα 2.11 Τυπική διατομή πτέρυγας από σύνθετα υλικά

2.1.4 Κύριοι παράγοντες καταπόνησης των πτερυγίων

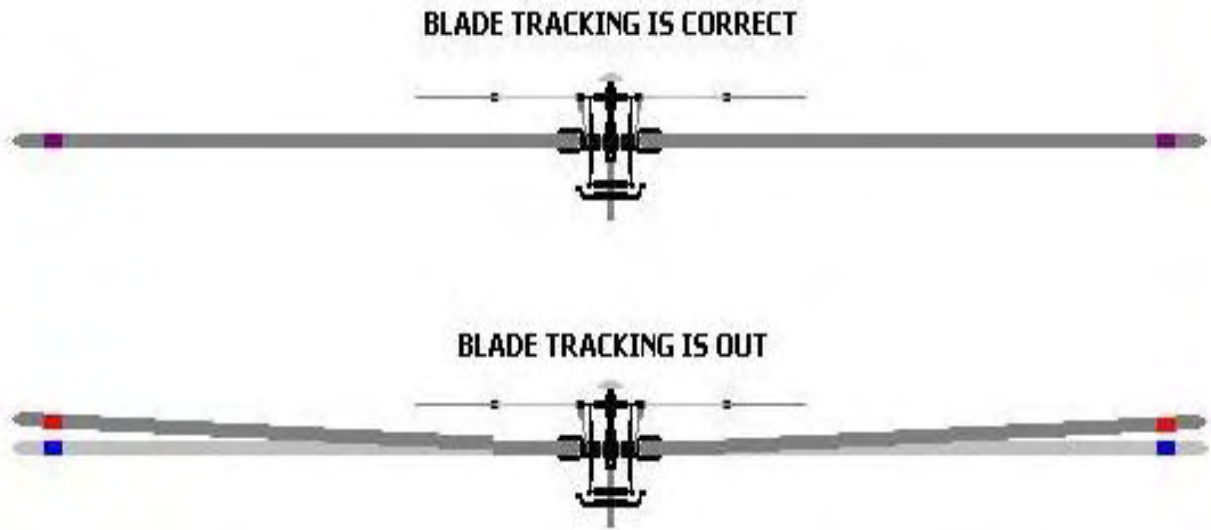
Το μέρος του ελικοπτέρου που είναι περισσότερο εκτεθειμένο σε διαφόρων ειδών καταπονήσεις είναι, όπως είναι φυσικό, τα πτερύγια του ρότορα. Έτσι, μια ιδιαίτερως σημαντική φάση κατά τη σχεδίαση των ελικοπτέρων είναι η Αεροελαστική ανάλυση, η οποία επικεντρώνεται κυρίως στη στερεότητα των πτερυγίων για αντοχή σε φορτία, σε κόπωση καθώς και στην παραμόρφωσή τους. Από τη δεκαετία του 1960, όπου και ξεκίνησε η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη στην κατασκευή των πτερυγίων των αεροσκαφών, για τον έλεγχο των απαιτούμενων μηχανικών επιδόσεων, κυριαρχεί η χρήση πειραματικών δοκιμών ενώ οι υπολογισμοί χρησιμοποιούνταν επικουρικά. Οι δοκιμές αυτές ήταν φυσικά δαπανηρές, ενώ υπήρχε ανάγκη για ακριβέστερες και καλύτερες σχεδιάσεις καθώς και για συντόμευση στο μισό της φάσης ανάπτυξης μέχρι το τελικό προϊόν. Έτσι από τη δεκαετία του 1980 και κυρίως το 1990, οι υπολογιστικές διαδικασίες σχεδίασης κερδίζουν έδαφος.

Οι δυνάμεις που καταπονούν τα πτερύγια ενός ελικοπτέρου κατά τη διάρκεια της πτήσης, μπορεί να είναι αεροδυναμικής φύσεως καθώς και να οφείλονται στη λειτουργία της μηχανής και στο σύστημα του κεντρικού ρότορα.

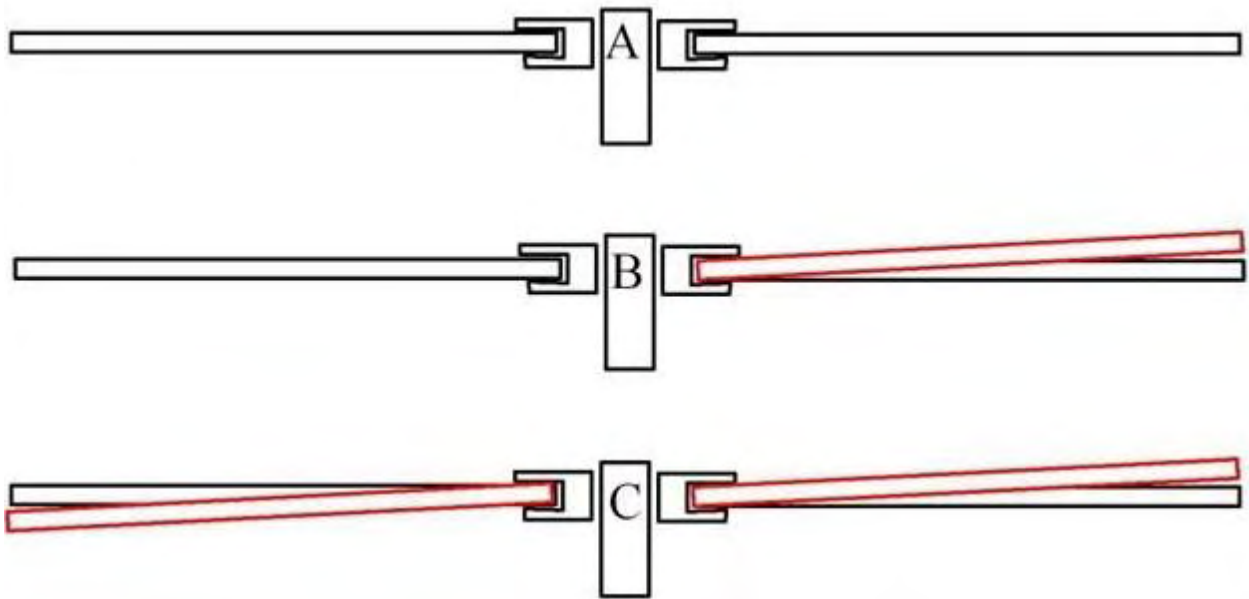
Όσον αφορά τη μηχανή (mechanical causes), ο κινητήρας του ελικοπτέρου δουλεύει συνεχώς σε υψηλές στροφές και θερμοκρασίες προκειμένου να περιστρέφει το στροφέιο για την πρόωση του αεροσκάφους. Όπως είναι φυσικό, έντονοι κραδασμοί μεταφέρονται μέσω του κεντρικού στροφείου στα πτερύγια αποτελώντας ένα σημαντικό παράγοντα καταπόνησής τους. [5]

Το σύστημα του κεντρικού ρότορα, εξαιτίας του ασταθούς αεροδυναμικού περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί είναι υπεύθυνο για έντονες ταλαντώσεις κατά τη διάρκεια της πτήσης. Ιδανικά αν όλες οι πτέρυγες του ελικοπτέρου είναι εγκατεστημένες με ακριβή εκτέλεση των προδιαγραφών, στο κεντρικό σημείο πάνω στο ρότορα. Πρακτικά αυτό σημαίνει, ότι κατά την πτήση όλες οι πτέρυγες θα πρέπει να περνούν από τα ίδια σημεία του κύκλου που διαγράφουν κατά την κίνησή τους. Για το λόγο αυτό, σε συνδυασμό με τις μεγάλες ταχύτητες που αναπτύσσουν τα περιστρεφόμενα πτερύγια, η σωστή τοποθέτησή τους στο σύστημα είναι ύψιστης σημασίας για τους κατασκευαστές.

Η ανίχνευση (Blade tracking), είναι μια διαδικασία που ελέγχει ότι όλα τα πτερύγια του ελικοπτέρου, κινούνται μέσα στο ίδιο μονοπάτι (ίχνος) του ακροπτερυγίου. Αν για παράδειγμα ένα πτερύγιο βρίσκεται έξω από το ίχνος, το ελικόπτερο θα έχει μια 1:1 κάθετη δόνηση. Προβλήματα ανίχνευσης μπορούν να δημιουργηθούν σε όλους τους τύπους στροφείων. Συνήθως το ελικόπτερο υποβάλλεται σε έλεγχο ίχνους όταν τα πτερύγια, οι κεφαλές, τα παρελκόμενα του βήματος της κεφαλής ή οι μηχανισμοί αλλαγής βήματος, αντικαθίστανται. Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνονται με ακρίβεια μια σειρά από περιπτώσεις ανίχνευσης.[5]

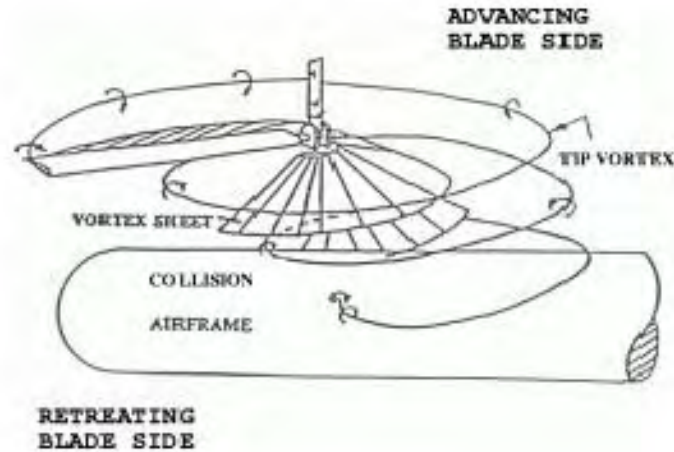


Σχήμα 2.12 Κάθετες δονήσεις από λάθος ανίχνευση



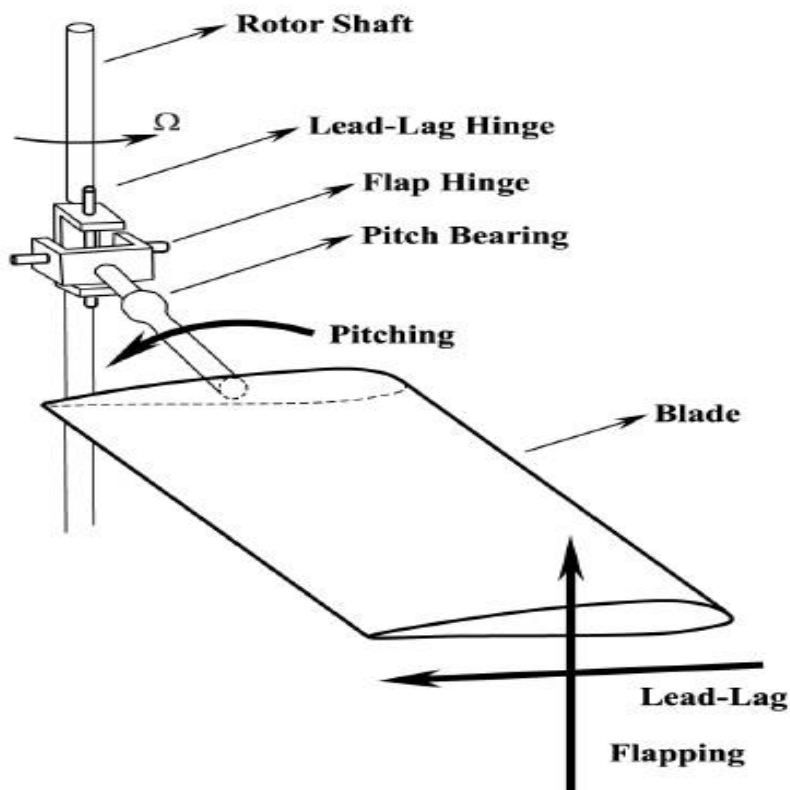
Σχήμα 2.13 Περιπτώσεις όπου τα πτερύγια δεν κινούνται στο ίδιο ίχνος

Από αεροδυναμική σκοπιά, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων καθώς κινούνται με μεγάλη ταχύτητα στον αέρα δημιουργώντας ισχυρές δίνες, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αιτίες καταπόνησης των πτερυγίων του ρότορα. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως “Blade Vortex Interaction” και αποτελεί μία από τις βασικότερες αιτίες θορύβου στα ελικόπτερα.[11]



Σχήμα 2.14 "Vortex Interaction"

Ως αποτέλεσμα στα φορτία που υφίστανται, οι πτέρυγες των ελικοπτέρων εκτελούν εγκάρσια και οριζόντια ταλάντωση, καθώς και περιστροφική. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.19 η εγκάρσια ταλάντωση ονομάζεται "Flapping" ενώ η διαμήκης ταλάντωση "Lead-lag oscillation". Τέλος η στροφική ταλάντωση καλείται "Pitching vibration".



Σχήμα 2.15 Τα βασικά είδη ταλαντώσεων πτέρυγας ελικοπτέρου

2.2 Το ελικόπτερο Bell UH

Το πλήρες όνομα του ελικοπτέρου είναι Bell UH-1H Iroquois, (Huey). 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.[12]

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 στροφέιο δύο πτερυγίων και ουραίο στροφέιο.



Σχήμα 2.16 Φωτογραφία ελικοπτέρου Bell UH

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 εργατωρών 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 στροφέιου με τα μεγαλύτερα και αποδοτικότερα της Bell 212, η αντικατάσταση του προωστικού ουραίου στροφέιου 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.[12]

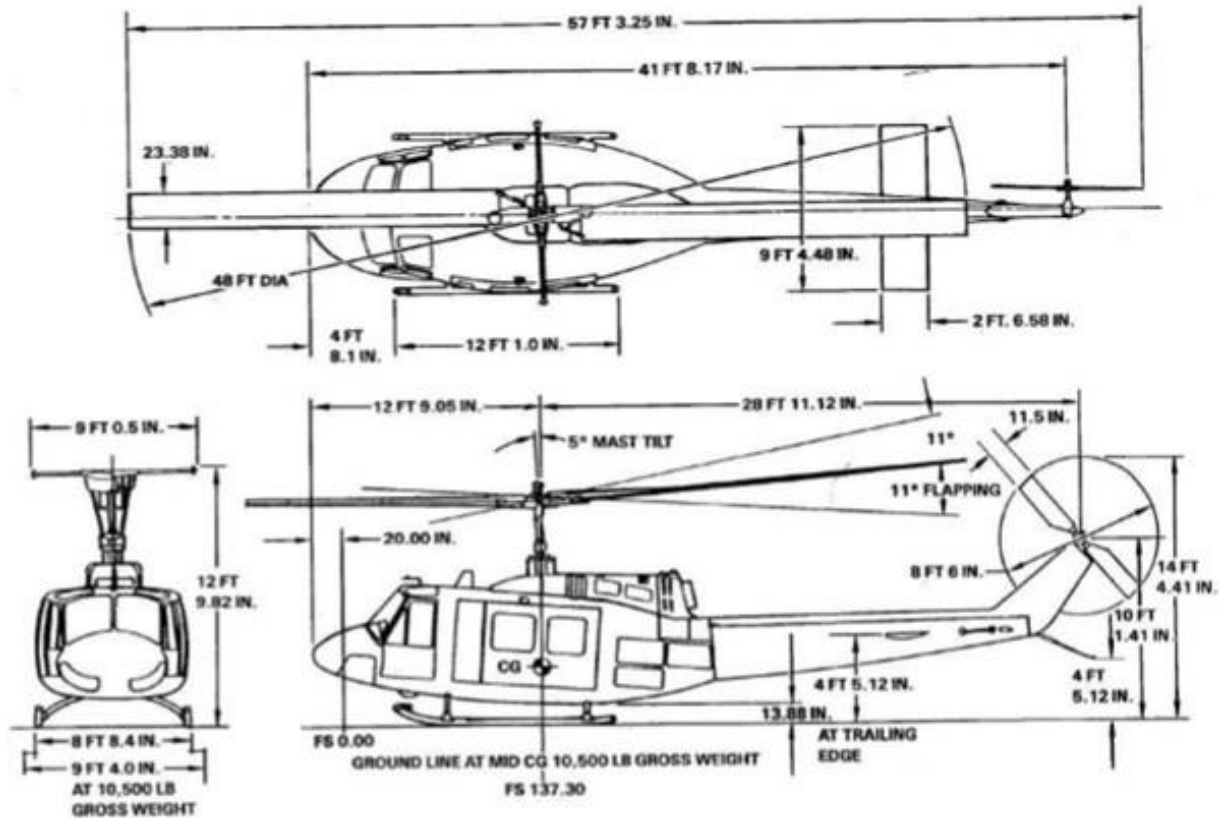
Το συγκεκριμένο ελικόπτερο, ελέγχεται από έναν έως δύο πιλότους, ενώ μπορεί να μεταφέρει πλήρωμα έως και δεκατεσσάρων ατόμων. Το μέγιστο εξωτερικό βάρος του ανέρχεται στα 5,080 Kg, ενώ έχει τη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου 2,210 kg. Παρακάτω ακολουθούν πίνακες όπου αναγράφονται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου ελικοπτερού, καθώς και σκαρίφημα με λεπτομερή αναπαράσταση των τριών όψεων, κάτοψη-πρόσοψη-πλάγια όψη.

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ελικοπτερού UH-1 Huey II [12]

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

Πίνακας 2.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ελικοπτερού UH-1 Huey II [12]

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



Σχήμα 2.17 Σκαρίφημα ελικοπτήρου Bell-Huey (κάτοψη-πρόσοψη-πλάγια όψη)

Η πτέρυγα του συγκεκριμένου ελικοπτήρου, όπου και θα χρησιμοποιηθεί για τα πειράματα που ακολουθούν, είναι συνολικού μήκους 7m (με ενεργό μήκος 6,70 m) ενώ το πάχος της, τ , είναι 0,065 m.

Μετρώντας τη χορδή της, όπου προκύπτει $c = 0,53$ m, υπολογίζουμε τον τύπο της αεροτομής σύμφωνα με τη θεωρία ως εξής:

$$\tau/c = 0,065/0,53 = 0,12 \quad 2.2$$

Προκύπτει έτσι συμμετρική αεροτομή τύπου NACA 0012.

$$A.R. = b/c \sim 13 \quad 2.3$$

$$A.C. = c/4 = 0,1325 \quad [m] \quad 2.4$$

Τέλος, η πτέρυγα είναι κατασκευασμένη από κράμα αλουμινίου, ενώ στο εσωτερικό της υπάρχει γέμιση από χαλύβδινο, κυψελώδες εξαγωνικό πλέγμα για απορρόφηση των κραδασμών καθώς και για αύξηση του παράγοντα απόσβεσης σε συνδυασμό με τη βελτίωση της δυσκαμψίας.

2.3 Περιγραφή τεχνολογικού προβλήματος

Στόχος της παρούσας μελέτης, είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς πτέρυγας ελικοπτέρου κάτω από τη επίδραση διαφορετικών φορτίων.

Δεδομένου ότι δεν είναι επακριβώς γνωστά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της πτέρυγας όπως για παράδειγμα, η εσωτερική της δομή ή το μέτρο ελαστικότητας, η ελαστική της συμπεριφορά καταγράφεται μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Συγκεκριμένα, στο εργαστηριακό πείραμα που εκτελείται, η πτέρυγα υποβάλλεται αρχικά σε στατικές και στη συνέχεια σε μια σειρά από δυναμικές καταπονήσεις.

Αρχικά όσον αφορά τα στατικά πειράματα, στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας ασκούνται κατακόρυφα φορτία με φορά από πάνω προς τα κάτω. Στη συνέχεια η κατακόρυφη φόρτιση γίνεται με αντίθετη φορά, σε πέντε διαδοχικά σημεία κατά μήκος της πτέρυγας, με το κάθε σημείο να απέχει απόσταση 1m από το προηγούμενο, με αρχή το άκρο της πτέρυγας. Τέλος ακολουθεί η φόρτιση κατά τον οριζόντιο άξονα με φορά από δεξιά προς αριστερά και αντίστροφα. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται πειραματικά τα βέλη κάμψης και κατ' επέκταση αποτυπώνεται η ελαστική συμπεριφορά της πτέρυγας, αν δηλαδή η σχέση φορτίου - μετατόπισης είναι ανάλογη. Η σύνθετη γεωμετρία και κυρίως η πολυπλοκότητα της δομής στο εσωτερικό της πτέρυγας, καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη την ακριβή εκτίμηση της ελαστικής της συμπεριφοράς με χρήση της τεχνικής θεωρίας κάμψης. Είναι όμως εφικτή μια αρχική ποιοτική εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς, παρομοιάζοντας την πτέρυγα με απλή μονόπακτη δοκό, αγνοώντας την εσωτερική δομή της.

Όσον αφορά στη συνέχεια τα δυναμικά πειράματα, χρησιμοποιώντας κατάλληλη διάταξη η πτέρυγα υποβάλλεται σε μια σειρά ταλαντώσεων με διαφορετική κάθε φορά συχνότητα ταλάντωσης. Με τον τρόπο αυτό θα γίνει μια πρώτη προσπάθεια να μελετηθεί η ταλαντωτική της συμπεριφορά, 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.

Στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση στη βασική θεωρία κάμψης και ταλαντώσεων για απλή μονόπακτη δοκό, πάνω στην οποία θα βασιστεί και η ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων.

2.3.1 Βασικές αρχές θεωρίας κάμψης

Η μηχανικές δοκιμές σε κάμψη, θεωρούνται οι βασικότερες δοκιμές για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των μεταλλικών αλλά και μη μεταλλικών κατασκευών.

Ο επιθετικός προσδιορισμός «καθαρή κάμψη», υποδηλώνει την ύπαρξη αποκλειστικά και μόνο καμπτικών ροπών στη φορτισμένη δοκό, με τελικό αποτέλεσμα την κάμψη της και την ανάπτυξη ορθών μηχανικών τάσεων, οι οποίες

δεν οφείλονται σε αξονικά φορτία αλλά σε καμπτικές ροπές, για αυτό και καλούνται καμπτικές τάσεις ή ορθές τάσεις λόγω κάμψης.

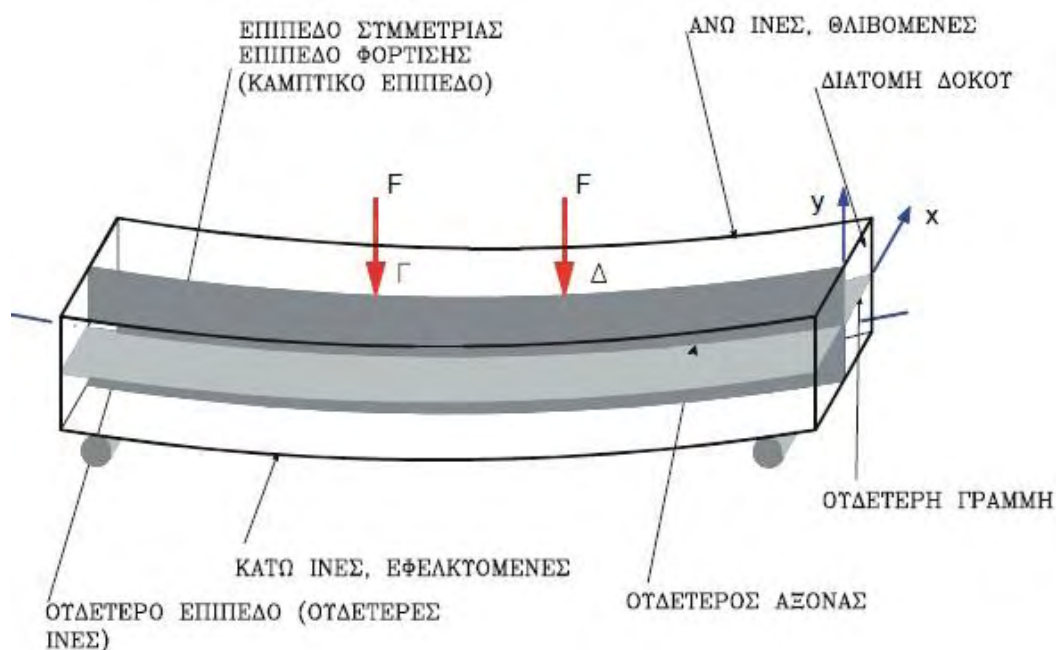
Για ένα σώμα που κάμπτεται, θα πρέπει σε κάθε σημείο του, οι εξωτερικές δυνάμεις να εξουδετερώνονται από άλλες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι η εμφάνιση των εσωτερικών τάσεων κατά την κάμψη. Οι τάσεις που είναι κάθετες στη διατομή του στοιχείου ονομάζονται ορθές. Οι εφελκυστικές θεωρούνται θετικές ενώ οι θλιπτικές αρνητικές. Η γραμμή όπου μηδενίζονται οι ορθές τάσεις ονομάζεται ουδέτερη γραμμή και χωρίζει τη διατομή στην εφελκυστική και τη θλιβόμενη περιοχή. [8]

Επομένως, όταν τα φορτία ενεργούν κατά τον ένα κύριο άξονα y της διατομής, ουδέτερη γραμμή είναι ο άλλος άξονάς της x .

Η παραπάνω διατύπωση αποτελεί τον Θεμελιώδη Νόμο της Κάμψης.

Ελαστική γραμμή είναι η μορφή της καμπύλης την οποία λαμβάνει ο ευθύγραμμος άξονας της δοκού.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται αναλυτικά η καθαρή κάμψη απλής ορθογωνικής διατομής.



Σχήμα 2.18 Απεικόνιση καμπτόμενης δοκού

Υποθέτοντας λοιπόν ότι η πτέρυγα είναι μια απλή μονόπακτη δοκός η οποία κάμπτεται κάτω από την επίδραση κάθετων στατικών φορτίων, σύμφωνα με τη τεχνική θεωρία κάμψης, για τον υπολογισμό των ορθών τάσεων στη διατομή ενός στοιχείου πρέπει να ισχύουν οι εξής συνθήκες και παραδοχές:

- Οι διατομές που πριν την κάμψη ήταν επίπεδες και κάθετες στον άξονα του στοιχείου παραμένουν επίπεδες και κάθετες ως προς τον παραμορφωμένο λόγω κάμψης άξονά του (παραδοχή Bernoulli).

- Το υλικό είναι γραμμικά ελαστικό, ομογενές και ισότροπο. Γραμμικά ελαστικό ονομάζεται το υλικό που υπακούει στο νόμο του Hooke, ενώ ισότροπο το υλικό που έχει την ίδια συμπεριφορά προς κάθε διεύθυνση.
- Το στοιχείο είναι αρχικά ευθύγραμμο και σταθερής διατομής. Ισχύει και στην περίπτωση που οι μεταβολές της διατομής είναι μικρές και ομαλές κατά το μήκος.

Αποδεικνύεται, ότι σε ένα τυχαίο σημείο Σ της διατομής, που υφίσταται ροπή κάμψης M , αναπτύσσεται ορθή τάση, που δίνεται από τον τύπο που εκφράζει το νόμο των ορθών τάσεων ως:

$$\sigma = \frac{M}{I_x} y \quad [\text{N/m}^2] \quad 2.5$$

Όπου,

M : Η ροπή κάμψης που ασκείται στη διατομή.

I_x : Η ροπή αδράνειας ως προς τον κεντροβαρικό άξονα που είναι και η ουδέτερη γραμμή της διατομής, ως προς την οποία καλείται να στραφεί αυτή, καθώς καμπυλώνεται η καμπτόμενη δοκός.

y : Η απόσταση του σημείου με τάση σ από τον παραπάνω άξονα.

Είναι φανερό πως η κάμψη αποτελεί συνδυασμό δύο καταπονήσεων, του εφελκυσμού και της θλίψης.

$$|\sigma|_{max} = \text{μέγιστη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα} = \frac{|M|}{I_x} y_{max} \quad [\text{N/m}^2] \quad 2.6$$

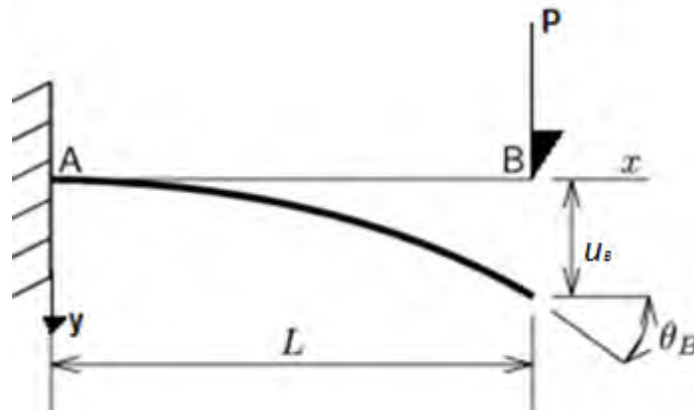
$$\text{Η ροπή αντίστασης σε κάμψη ορίζεται ως } W_b = \frac{I_x}{y_{max}} \quad [m^3] \quad 2.7$$

$$\text{Συνεπώς, η μέγιστη τάση } |\sigma|_{max} = \frac{|M|}{W_b} \quad [\text{N/m}^2] \quad 2.8$$

Με την επιβολή των καμπτικών φορτίων ο κεντροβαρικός άξονας της δοκού (ουδέτερος άξονας n-n) παραμορφώνεται παίρνοντας μορφή καμπύλης γραμμής, που καλείται, ελαστική γραμμή. Η κατακόρυφη μετατόπιση των σημείων του άξονα από την αρχική θέση, ονομάζεται βέλος κάμψης της δοκού στην αντίστοιχη θέση.

Όπως και τα υπόλοιπα μεγέθη, το βέλος κάμψης εξαρτάται από τη στατική μορφή του φορέα (είδος στήριξης, φόρτιση, άνοιγμα), από τη γεωμετρία του (ροπή αδράνειας) και από το υλικό (μέτρο ελαστικότητας). Τα μέγιστα βέλη κάμψης κατά τους υπολογισμούς απλών ορθογωνικών διατομών, δίνονται από κατάλληλους πίνακες.[8]

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η γραμμική σχέση μεταξύ φορτίου – μετατόπισης για κάμψη μονόπακτης δοκού.

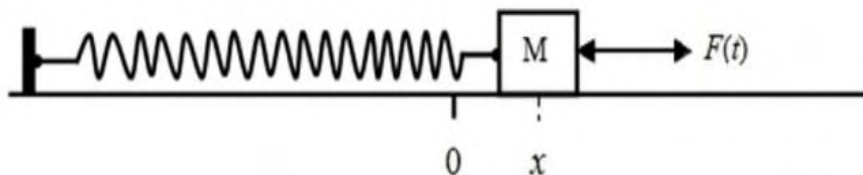


Σχήμα 2.19 Βέλος κάμψης απλής μονόπακτης δοκού ορθογωνικής διατομής

Βέλος κάμψης : $u_B = PL^3 / 3EI_x$ 2.9

2.3.2 Βασικές αρχές θεωρίας Ταλαντώσεων

Η περίπτωση των αρμονικών ταλαντώσεων χωρίς απώλεια ενέργειας είναι ιδανική και ασφαλώς αποτελεί μια προσέγγιση της πραγματικότητας, όταν ένα σώμα εκτελεί ταλαντώσεις μικρού πλάτους και με πάρα πολύ μικρή απόσβεση. [9]



Σχήμα 2.20 Απλός αρμονικός ταλαντωτής

Για μια τέτοια περίπτωση απλής αρμονικής ταλάντωσης, η απομάκρυνση x της μάζας από τη θέση ισορροπίας περιγράφεται από τη σχέση :

$$m\ddot{x}(t) = -kx(t) \Rightarrow x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad 2.10$$

όπου φ και x_0 είναι η αρχική φάση και μετατόπιση αντιστοίχως και ω_0 είναι η γωνιακή συχνότητα που δίνεται από :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad [\text{rad/sec}^2] \quad 2.11$$

Η ιδιοσυχνότητα f_0 της ταλάντωσης δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad [\text{Hz}] \quad 2.12$$

Όπου όπως φαίνεται από τον τύπο, στην ιδανική περίπτωση εξαρτάται μόνο από τις σταθερές k και M . Όπου k η ελαστική σταθερά και M η μάζα του σώματος.

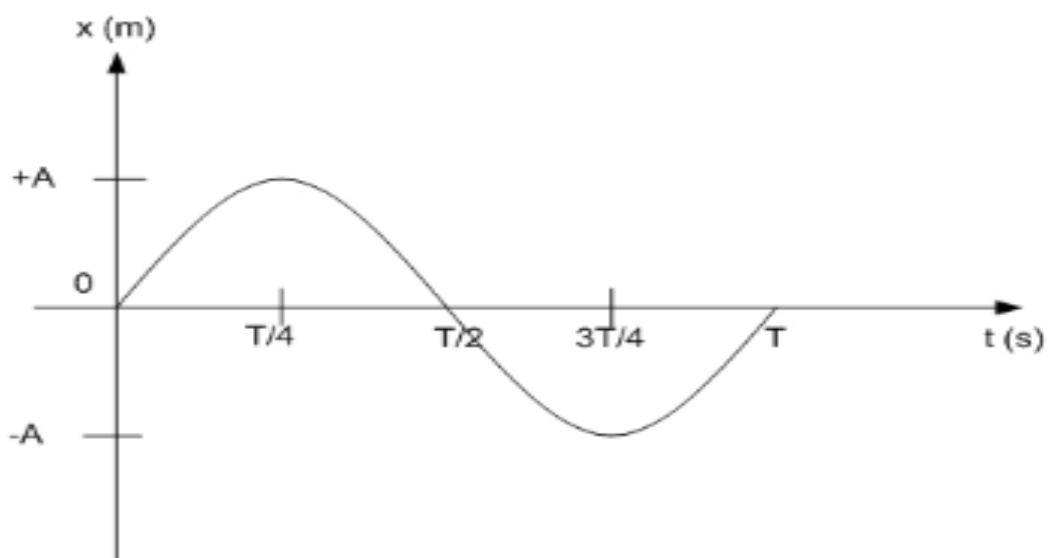
Με παραγωγή της θέσης ως προς το χρόνο προκύπτουν οι αντίστοιχες σχέσεις για την ταχύτητα και την επιτάχυνση ως εξής:

$$u = \frac{dy}{dt} = \frac{d(A \sin(\omega t + \varphi_0))}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad 2.13$$

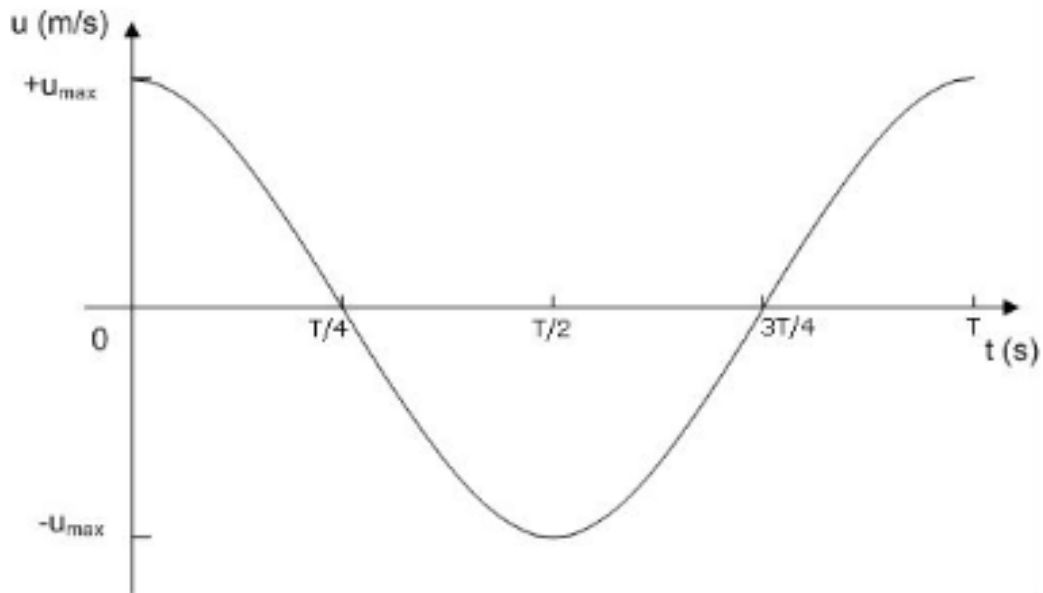
και

$$a = \frac{du}{dt} = \frac{d(\omega A \cos(\omega t + \varphi_0))}{dt} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad 2.14$$

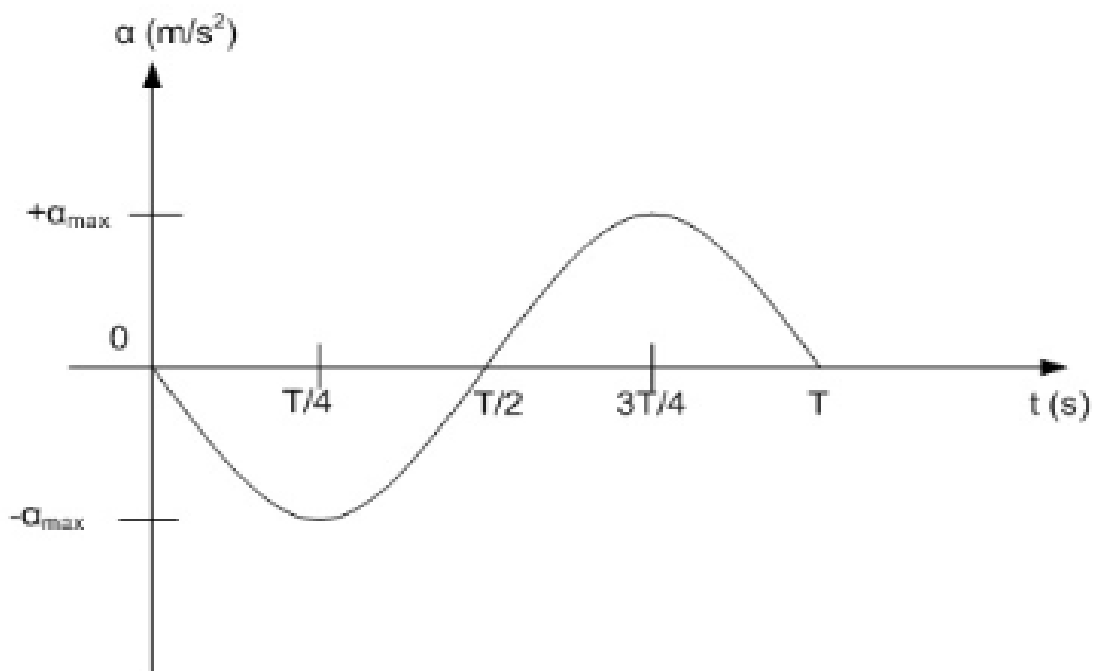
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης ως προς το χρόνο για σώμα που εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση χωρίς αρχική φάση:



Σχήμα 2.21 Διάγραμμα θέσης ως προς χρόνο



Σχήμα 2.22 Διάγραμμα ταχύτητας ως προς χρόνο



Σχήμα 2.23 Διάγραμμα επιτάχυνσης ως προς χρόνο

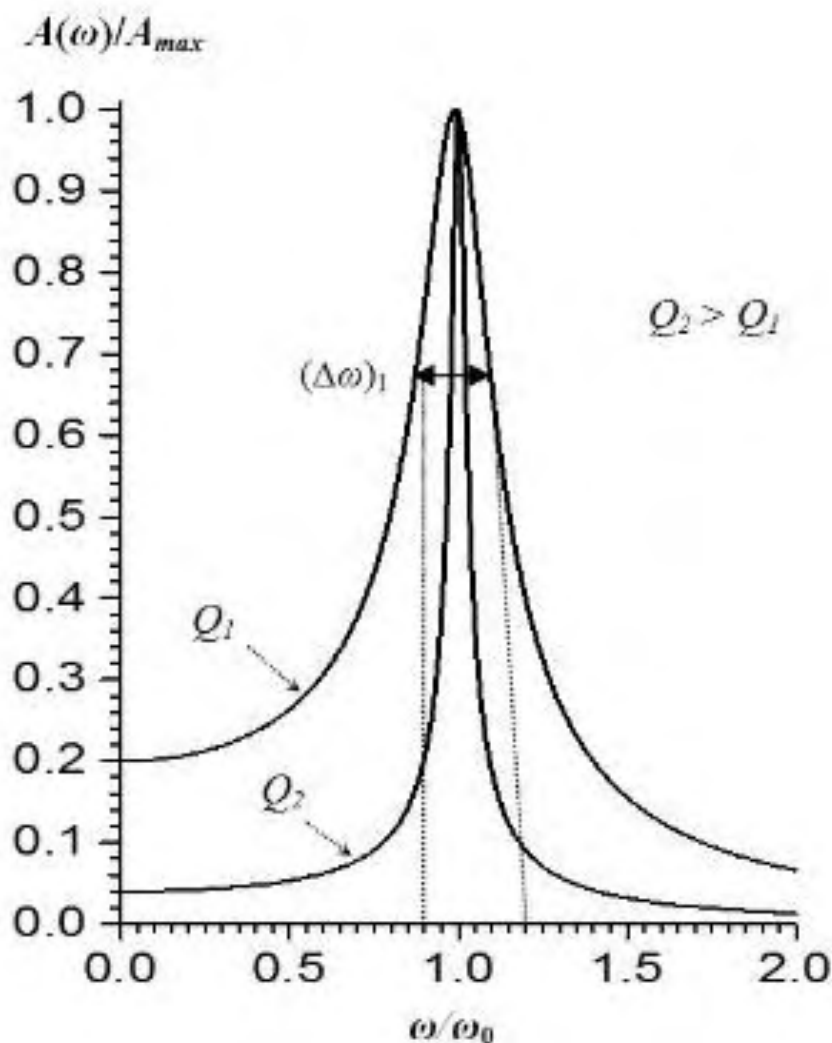
Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η παρουσία διεγέρτη τροφοδοτεί το σύστημα με ενέργεια με τρόπο περιοδικό. Συνεπώς πρόκειται για

περίπτωση εξαναγκασμένης ταλάντωσης με εφαρμοζόμενη περιοδική δύναμη της μορφής:

$$F=F_0 \cos(\omega t) \quad [N] \quad 2.15$$

Όπου F_0 Η μέγιστη δύναμη διεγέρτη σε N.

Από τη θεωρία είναι γνωστό ότι όταν η συχνότητα διεγερσης, 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. Σε αυτή την κατάσταση, δηλαδή όταν $f=f_0 \Rightarrow A=A_{max}$, το σύστημα βρίσκεται σε συντονισμό και η συχνότητα αυτή ονομάζεται αντίστοιχα συχνότητα συντονισμού.



Σχήμα 2.24 Καμπύλη πλάτους για εξαναγκασμένη ταλάντωση

Στο σχήμα απεικονίζονται δυο διαφορετικές καμπύλες ταλάντωσης όπως πλησιάζουν σε συντονισμό. Ο συντελεστής ποιότητας Q του συστήματος, εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο φθίνει η ενέργεια του ταλαντωτή και ορίζεται ως:

$$Q=2\pi N$$

2.16

όπου N ο αριθμός των ταλαντώσεων.[9]

Στα εργαστηριακά πειράματα που ακολουθούν θα φανεί αναλυτικά κατά πόσο η συμπεριφορά της πτέρυγας του ελικοπτέρου, προσεγγίζει τα θεωρητικά δεδομένα κάτω από δυναμική καταπόνηση με περιοδικό διεγέρτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

3.1 Εργαστηριακή Διάταξη

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών με πραγματική πτέρυγα ελικοπτέρου Bell Huey II. Η πτέρυγα βάρους περίπου 80 kg, πακτώθηκε στο ένα της άκρο, με την πάκτωση να λειτουργεί ως αντίβαρο περίπου 3 τόνων.

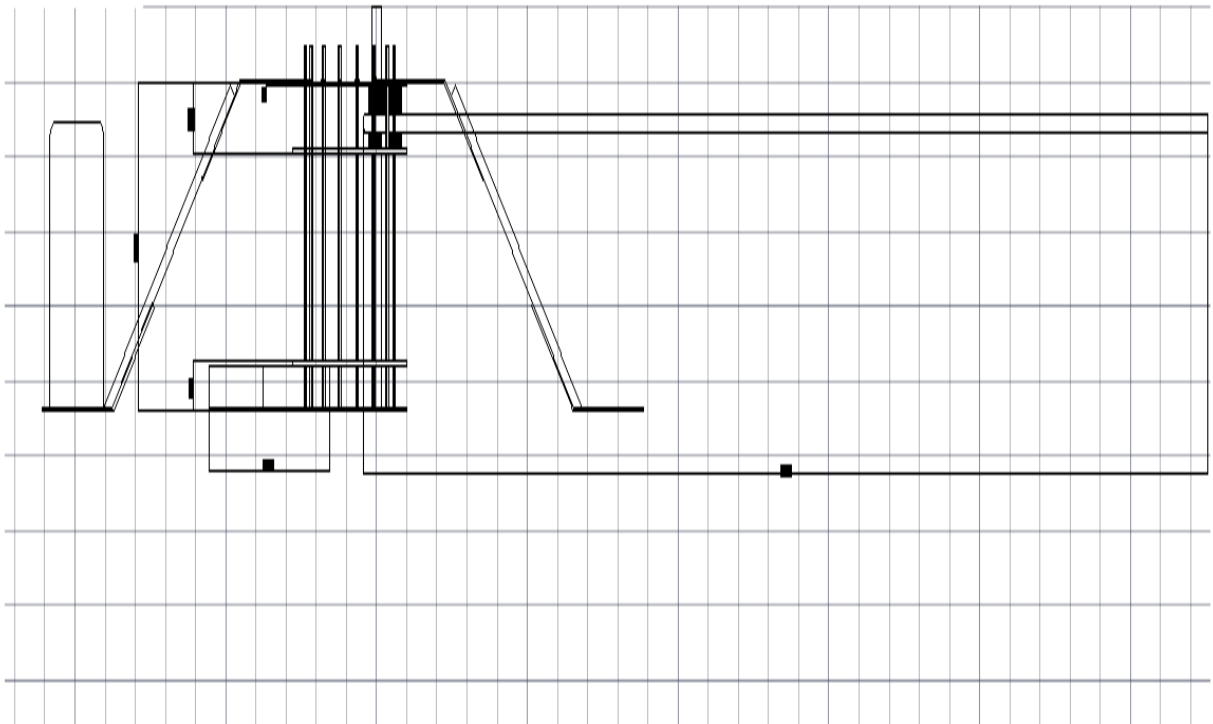
Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται αναλυτικά το σύστημα πτέρυγα – πάκτωση, αρχικά με φωτογραφία μέσα από το εργαστήριο και στη συνέχεια σε σκαρίφημα.



Σχήμα 3.1 Η εργαστηριακή διάταξη της πτέρυγας

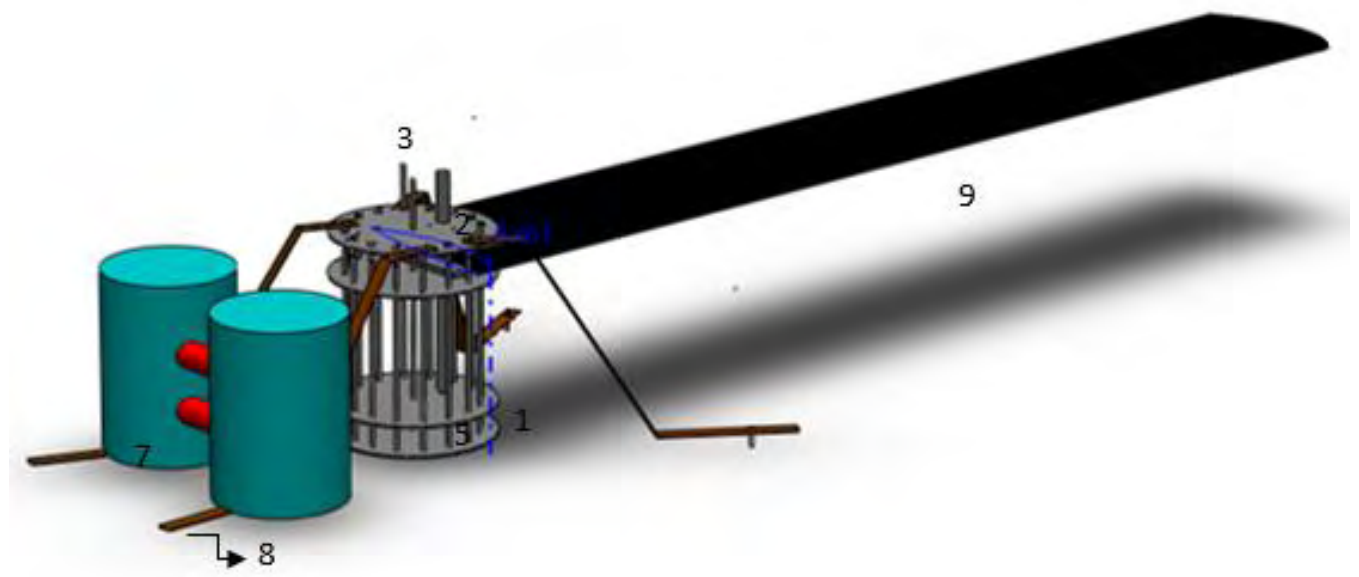


Σχήμα 3.2 Φωτογραφίες από την εργαστηριακή διάταξη της πτέρυγας- Το μοτέρ του διεγέρτη και η κατασκευή της πάκτωσης στο βάθος.



Σχήμα 3.3 Σκαρίφημα της πακτωμένης πτέρυγας

3.1.1 Η πάκτωση της πτέρυγας



Σχήμα 3.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση της πτέρυγας – πάκτωσης σε Solidworks.

Η κατασκευή της πάκτωσης έγινε εξ ολοκλήρου από την αρχή, προκειμένου να στηρίξει σωστά την πτέρυγα 7 μέτρων, για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη διεξαγωγή των μετρήσεων αλλά κυρίως για την ασφάλεια της κατασκευής.

Αναλυτικά για την κατασκευή της πάκτωσης χρησιμοποιήθηκαν:

1. 4 μεταλλικές πλάκες, διαμέτρου 950 mm με 12 κυκλικές οπές περιμετρικά των 22 mm, 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.
2. 35 τετραγωνικά πλακίδια 60x60mm με κεντρική οπή των 24mm πάχους 2mm, σφηνωμένα πάνω και κάτω από την πτέρυγα.
3. 8 πλάκες 160x500mm με τρεις κυκλικές οπές των 66mm και 28mm, πάχους 12mm.
4. 2 πλάκες 900x108mm τριών κυκλικών οπών 26, 26 και 72mm, πάχους 12mm.
5. 8 τριγωνικά πλακίδια 100x100mm, πάχους 10mm.
6. 4 πλάκες 700x400mm με 5 κυκλικές οπές 12mm, πάχους 4mm.
7. 2 βαρέλια γεμισμένα με μπετόν.
8. 4 μεταλλικές αντηρίδες, συνδεδεμένες ανά δύο με μεταλλικό έλασμα για περαιτέρω ασφάλεια.
9. Βύσματα M20 σφηνωμένα στο δάπεδο.

Ενδεικτικά, χρησιμοποιήθηκαν περίπου 100 κοχλιοσυνδέσεις, ενώ έγινε ηλεκτροσυγκόλληση τύπου MIG σε καίρια σημεία του συστήματος για την εξασφάλιση της ασφαλούς πειραματικής λειτουργίας της προβόλου. 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. 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 πέλαμα 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.

3.1.2 Όργανα μετρήσεως

Για την καταγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εργαστηριακά όργανα:

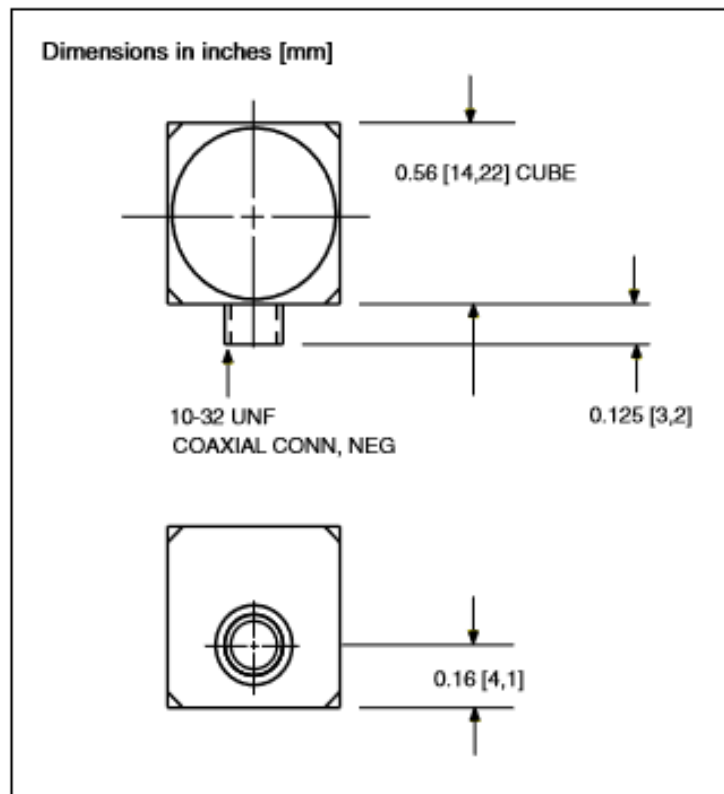
- Αναλογική ζυγαριά με εύρος τιμών από 0 έως 120 κιλά
- Υδραυλικός ανυψωτήρας
- Laser Light
- Ψηφιακή ζυγαριά SILVERCREST με εύρος τιμών 0 έως 50 κιλά
- Επιταχυνσιόμετρο KISTLER 8632C10T
- Ενισχυτής σήματος KISTLER 5134
- Ψηφιακός παλμογράφος LEADER LBO
- Μετατροπέας σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα National Instruments
- Βιντεοκάμερα υψηλής ανάλυσης SONY 50fps

Χαρακτηριστικά επιταχυνσιόμετρου KISTLER 8632C10T, μιας διεύθυνσης που σηματοδοτείται με βέλος:

- ΤΥΠΟΣ: 8632C10T
- ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ (g): ± 10
- ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ $\pm 5\%$ (mV/g): 498 mV/g
- ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (Hz) $\pm 5\%$:1-5000
- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΕΥΡΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ($^{\circ}\text{C}$): 0-65
- ΚΑΤΩΦΛΙ ΤΙΜΩΝ (g_{rms}): 0,00028
- ΜΑΖΑ (gr):6
- ΓΕΙΩΣΗ: ΝΑΙ
- ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ: Καλώδιο τύπου 1631C, διαμέτρου 2mm, κατάλληλο για χρήση σε επιταχυνσιόμετρα υψηλής εσωτερικής αντίστασης
- ΕΓΚΑΡΣΙΑ (crosstalk) ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ (%): <1
- ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ (FSO): ± 1
- ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ (mA / VDC): 2-18/20-30
- ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω): <500
- ΥΛΙΚΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ: Δίμορφο κεραμικό/ καμπτικού τύπου
- ΥΛΙΚΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΑΤΟΣ: Σκληρά ανοδιωμένο αλουμίνιο



Σχήμα 3.5 Επιταχυνσιόμετρο KISTLER 8632C10T με το βέλος να δείχνει τη διεύθυνση μέτρησης



Σχήμα 3.6 Σκαρίφημα επιταχυνσιόμετρου KISTLER 8632C10T

Χαρακτηριστικά του ενισχυτή της εταιρείας KISTLER:

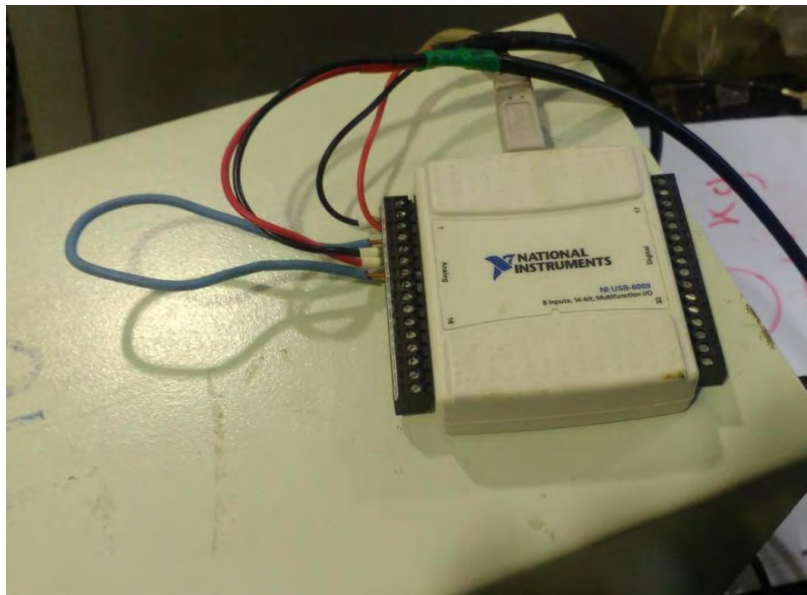


ΤΥΠΟΣ 5134B

- ΡΕΥΜΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (mA): 0-15
- ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (VDC): 24
- ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (Hz) $\pm 5\%$: 0,1 -68000
- ΕΞΟΔΟΣ (V): ± 5 / ± 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

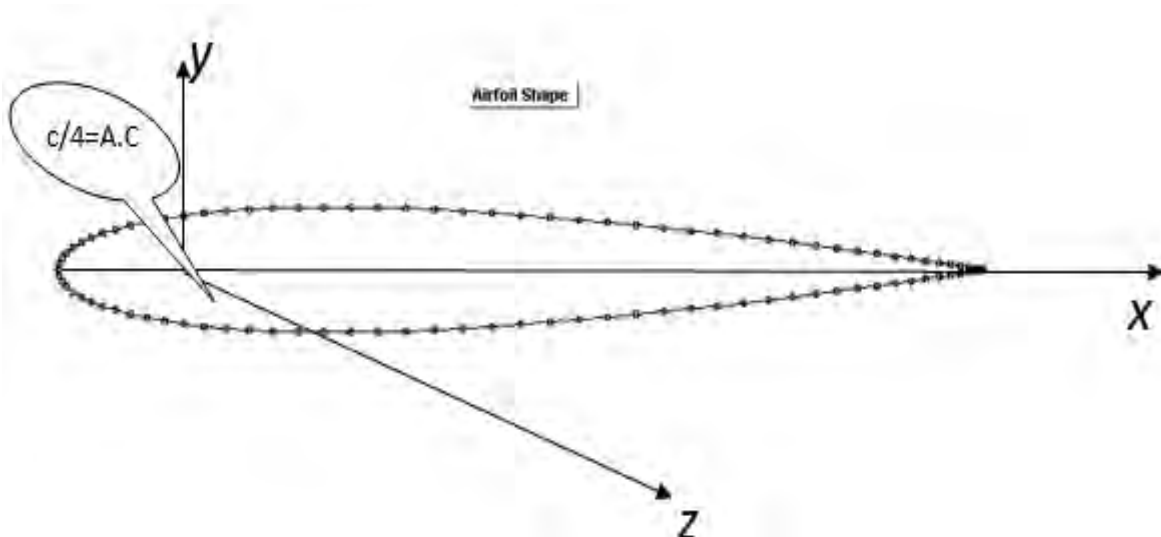
Σχήμα 3.7 Ενισχυτής KISTLER

Στη συνέχεια απεικονίζεται ο μετατροπέας της National Instruments, ο οποίος μετατρέπει το σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό.



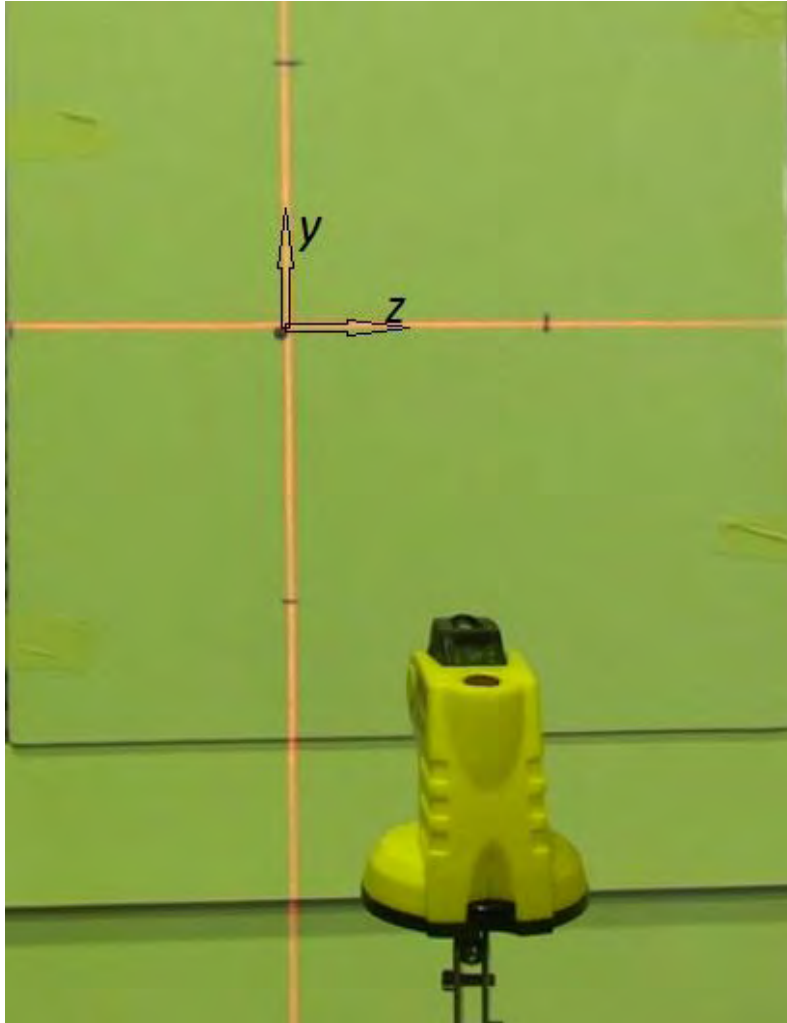
Σχήμα 3.8 Μετατροπέας σήματος

3.1.3 Προσδιορισμός Συστήματος Συντεταγμένων



Σχήμα 3.9 Απεικόνιση της αεροτομής NACA 0012 της πτέρυγας με την εφαρμογή του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στη φωτογραφία που ακολουθεί (σχήμα 3.10) φαίνεται ο τρόπος που ορίζεται το σύστημα συντεταγμένων. Το λέιζερ που είναι τοποθετημένο στο άκρο της πτέρυγας, είναι στραμμένο προς ένα λευκό ταμπλό όπου σχηματίζονται οι δύο κάθετοι άξονες με τον y να ορίζει την κατακόρυφη διεύθυνση και το z την οριζόντια διεύθυνση εκπετάσματος. Με τον τρόπο αυτό χαράζει την κίνηση του άκρου της πτέρυγας πάνω στο ταμπλό, η οποία μπορεί στη συνέχεια να αναλυθεί με κατάλληλο λογισμικό.



Σχήμα 3.10 Οι δυο κάθετοι άξονες που σχηματίζονται από το λέιζερ

3.2 Μεθοδολογία διεξαγωγής πειράματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών μετρήσεων, η πτέρυγα υποβλήθηκε αρχικά σε μια σειρά στατικών φορτίσεων προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά στην ελαστικότητά της. Στη συνέχεια ασκήθηκαν στην πτέρυγα περιοδικά δυναμικά φορτία που την οδήγησαν σε ταλάντωση ώστε να μελετηθεί η ταλαντωτική της συμπεριφορά.

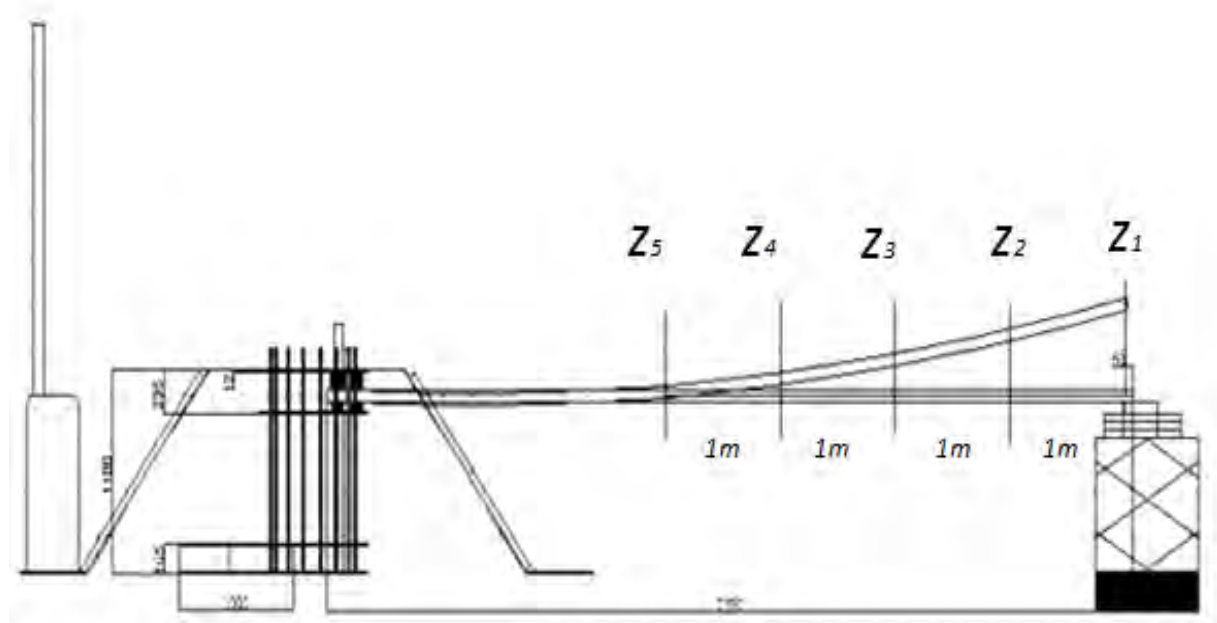
Αντίστοιχες με αυτές τις καταπονήσεις δέχεται η πτέρυγα και σε πραγματικές συνθήκες πτήσης και μάλιστα σε πολύ εντονότερους ρυθμούς, λόγω της αλληλεπίδρασης των πτερυγίων και της τυρβώδους ροής. Στη συνέχεια, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στον τρόπο διεξαγωγής των στατικών και στη συνέχεια των δυναμικών πειραμάτων, ώστε να γίνει ευκολότερη η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

3.2.1 Στατική φόρτιση

Κατά τη στατική φόρτιση ασκήθηκαν στη πτέρυγα “σημειακά” στατικά φορτία σε δυο διαφορετικές διευθύνσεις x και y .

Οι φορτίσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα y , έγιναν αρχικά με φορά από πάνω προς τα κάτω και στη συνέχεια αντίστροφα. Για τις πρώτες φορτίσεις με φορά προς τα κάτω χρησιμοποιήθηκαν βαρίδια των 8, 16.5, 25, 32.5 και 40 κιλών αντίστοιχα που τοποθετήθηκαν στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας. Υπολογίστηκε έτσι η μετατόπιση του άκρου της, μέσω της διαφοράς της αρχικής με την τελική θέση για την ακμή προσβολής και φυγής αντίστοιχα.

Στην συνέχεια ακολούθησαν οι στατικές καταπονήσεις αντίθετης φοράς, δηλαδή από κάτω προς τα πάνω.



Σχήμα 3.11 Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης με τις διαδοχικές θέσεις φόρτισης κατά μήκος του εκπετάσματος στη διεύθυνση z .

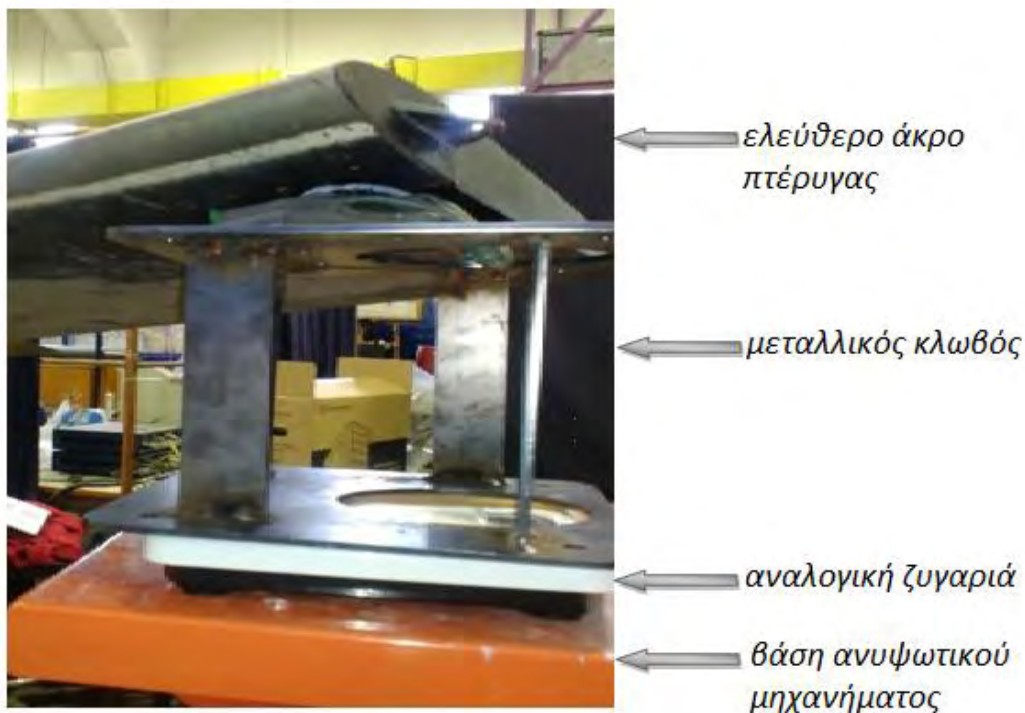
Όπως αναλυτικά φαίνεται στο επάνω σκαρίφημα (σχήμα 3.11), για τη διεξαγωγή των επόμενων στατικών πειραμάτων επιλέχθηκαν πέντε διαδοχικά σημεία κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας με απόσταση ενός μέτρου μεταξύ τους, δηλαδή στις θέσεις $z_1=0$, $z_2=1m$, $z_3=2m$, $z_4=3m$, $z_5=4m$ από το ακροπτερύγιο. Τα πέντε σημεία αυτά ορίζουν ένα τεχνητό άξονα ο οποίος απέχει $c/4=0.53/4=0,1325m$ από την ακμή προσβολής.

Με τη βοήθεια ανυψωτικού μηχανήματος ασκήθηκε στατικό σημειακό φορτίο σε κάθε θέση μετρώντας κάθε φορά την κάθετη απόσταση από το έδαφος.

Συγκεκριμένα, για κάθε θέση υπολογίζεται η απόσταση πρώτα της ακμής προσβολής και έπειτα της ακμής φυγής από το έδαφος.

Με τον υπολογισμό της διαφορά της τελικής από την αρχική απόσταση του κάθε σημείου από το έδαφος εκφράζεται το βέλος κάμψης του ελεύθερου άκρου της πτέρυγας αλλά και συνολικά η παραμόρφωση της ελαστικής γραμμής από την πάκτωση μέχρι το ελεύθερο άκρο. Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε πίνακες για την καλύτερη ανάλυσή τους.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, η φόρτιση έγινε με ανυψωτικό μηχανισμό. Επάνω βρισκόταν τοποθετημένη αναλογική ζυγαριά σε ειδικό μεταλλικό κλωβό, όπου στο πάνω μέρος του υπήρχαν προσκολλημένα ελάσματα για την εξασφάλιση μικρής εκκεντρότητας κατά την άσκηση του φορτίου. Η διάταξη φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.12 Σύστημα επιβολής στατικών σημειακών φορτίσεων από κάτω προς τα επάνω στην κατακόρυφη διεύθυνση γ .



Σχήμα 3.13 Ο τρόπος άσκησης στατικού σημειακού φορτίου με φορά προς τα πάνω μέσω ανυψωτικού μηχανισμού.

Όσον αφορά τα φορτία που ασκήθηκαν διαμορφώθηκαν ως εξής:

- ✓ Στη θέσεις 1 και 2, από 10 έως 80 kp δηλαδή από 98,1 έως 784,8 (N).
- ✓ Στη θέση 3, από 10 έως 70 kp, δηλαδή από 98,1 έως 686,7 (N).
- ✓ Στις θέσεις 4 και 5, από 10 έως 60 kp δηλαδή από 98,1 έως 588,6(N)

Τέλος, στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας ασκήθηκαν σημειακά φορτία κατά τον οριζόντιο άξονα x , αρχικά από αριστερά προς τα δεξιά και αντίστροφα. Τα φορτία κυμάνθηκαν από 2,5 έως και 30 kp, που ισοδυναμούν με 24,4 έως 294 (N). Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ειδική ψηφιακή εργαστηριακή ζυγαριά χειρός. Για κάθε φόρτιση μετρήθηκε η μετατόπιση του αεροδυναμικού κέντρου A.C. από τη αρχική του θέση.

3.2.2 Δυναμική φόρτιση

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 3.14 Το σύστημα του διεγέρτη

Όπως φαίνεται λοιπόν, ένα τριφασικό μοτέρ περιστρέφει με διαφορετική κάθε φορά συχνότητα η οποία ορίζεται στην αρχή κάθε πειράματος, έναν βραχίονα με ακτινικώς έκκεντρες μάζες. Ο περιστρεφόμενος βραχίονας δημιουργεί επάνω στη πτέρυγα έκκεντρα φορτία, σημαντικότερα των οποίων είναι τα κατακόρυφα περιοδικά φορτία, κατά αντίστοιχο τρόπο όπως ο στροφαλοφόρος διωστήρας και τα έμβολα που δημιουργούν έκκεντρα φορτία στη βάση στήριξης μιας εμβολοφόρας μηχανής εσωτερικής καύσης. Σημειώνεται πως μπροστά από το σύστημα τοποθετήθηκε προστατευτικό κάλυμμα για την ασφαλή διεξαγωγή των πειραμάτων στο εργαστήριο. Ο σκοπός των δυναμικών πειραμάτων είναι ο υπολογισμός των επιταχύνσεων που αναπτύσσει η πτέρυγα καθώς ταλαντώνεται καθώς και η καταγραφή τους σε διαγράμματα σε σχέση με το χρόνο αλλά και με τη συχνότητα του μοτέρ.

Όσο η ιδιοσυχνότητα της πτέρυγας πλησιάζει την συχνότητα του συστήματος του μοτέρ, αναμένεται η μεγιστοποίηση του πλάτους ταλάντωσης στη διεύθυνση y , στη διεύθυνση x , καθώς και στο συνδιασμό τους, ενώ δεν αποκλείεται και η εμφάνιση στροφικών ταλαντώσεων.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, το επιταχυνσιόμετρο τοποθετήθηκε έτσι ώστε να μετρώνται οι επιταχύνσεις αποκλειστικά στη διεύθυνση y .

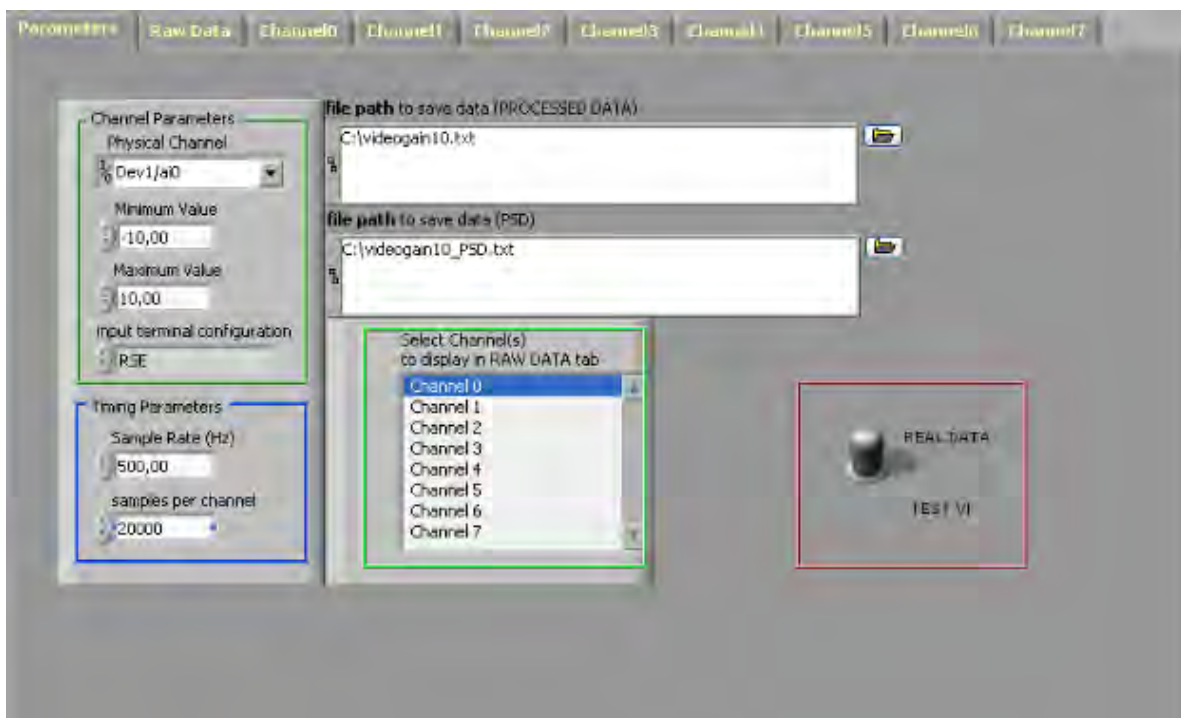
Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της επιτάχυνσης της πτέρυγας επιτυγχάνεται με δυο τρόπους:

- Με χρήση του επιταχυνσιόμετρου, όπου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4 σελ. 39, τοποθετείται επάνω στην πτέρυγα και συγκεκριμένα στο ελεύθερο άκρο της. Με τον τρόπο αυτό το επιταχυνσιόμετρο καταγράφει την κίνηση του ταλαντωμένου σώματος στέλνοντας ηλεκτρικό σήμα σε Coulomb.

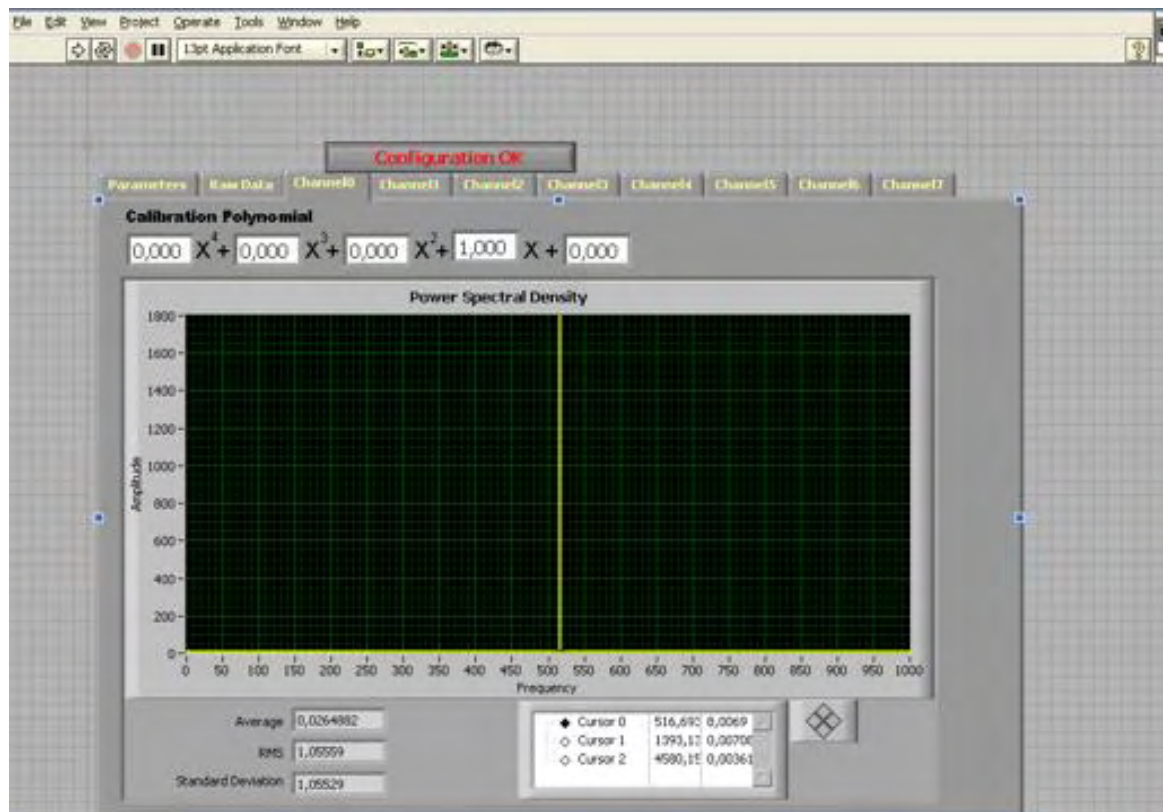
Το σήμα αυτό περνά από τον μετατροπέα και τον ενισχυτή, ψηφιοποιείται και ενισχύεται με αποτέλεσμα να δίνεται στην οθόνη του παλμογράφου και του υπολογιστή μια κυματομορφή σε Volts.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο για τη διεξαγωγή αυτών των μετρήσεων είναι της *LabVIEW National Instruments*.

Όπως φαίνεται και στη φωτογραφία που ακολουθεί, ο ρυθμός δειγματοληψίας έχει οριστεί με συχνότητα 500 Hz, με τα δείγματα να είναι 20.000.



Σχήμα 3.15 Απεικόνιση αρχικών παραμέτρων στο πρόγραμμα *LabVIEW National Instruments*.



Σχήμα 3.16 Απεικόνιση της πολυωνμικής μορφής του σήματος, $y=x$ του προγράμματος LabVIEW.

- Με την επεξεργασία των βίντεο των ταλαντώσεων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε βιντεοκάμερα υψηλής ανάλυσης η οποία κατέγραψε την κίνηση του ελεύθερου άκρου της πτέρυγας. Για την ακρίβεια καταγράφηκε η κίνηση του λέιζερ, που είναι πακτωμένο στο άκρο της πτέρυγας, πάνω σε λευκό βαθμονομημένο ταμπλό. Τα βίντεο στη συνέχεια αναλύθηκαν σε frames μέσα από το πρόγραμμα *FreeStudio* (www.videosoft.com). Η διάρκεια των βίντεο καθορίστηκε, για τις ανάγκες της ανάλυσης, στα 4 sec , μέσα από το πρόγραμμα *Solveig MM*, και έτσι προέκυψαν 200 στιγμιότυπα με χρονική απόσταση μεταξύ τους $t=0,02$ sec. Το 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 *ImageJ 1.50i*. Εφόσον λοιπόν υπολογισθούν η θέση και αντίστοιχη χρονική στιγμή, μπορούν στη συνέχεια να εξαχθούν αποτελέσματα για την στιγμιαία ταχύτητα παραγωγίζοντας τη θέση ως προς το χρόνο αλλά και για την στιγμιαία επιτάχυνση παραγωγίζοντας ξανά με τον ίδιο τρόπο.

Οι ταλαντώσεις όπως θα φανεί και στη συνέχεια ομαδοποιούνται ανάλογα με τη συχνότητα του inverter του τριφασικού μοτέρ. Συγκεκριμένα, η πτέρυγα αρχικά ταλαντώνεται με υψηλές συχνότητες από 5,4 έως και 7 Hz, ενώ στο τέλος ταλαντώνεται με χαμηλές συχνότητες της τάξης των 2,6 έως 4,4 Hz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΑΤΙΚΕΣ /ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 Αποτελέσματα Στατικών Φορτίσεων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν καταγράφονται οι καμπύλες των κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω της επιβολής των σημειακών φορτίων (σε mm), ως προς τα επιβαλλόμενα φορτία (σε N).

H_0 , είναι η αρχική κάθετη απόσταση των σημείων της πτέρυγας από το έδαφος όταν αυτή είναι πακτωμένη στο ένα της άκρο. Να σημειωθεί πως ακόμα και όταν η πτέρυγα είναι ελεύθερη από φορτία, παρατηρείται μια φυσική καμπύλωση από την πάκτωση μέχρι το ελεύθερο άκρο της λόγω της βαρύτητας.

Στον παρακάτω πίνακα (4.1) δίνονται οι αρχικές θέσεις των πέντε σημείων κατά μήκος της πτέρυγας, μετρώντας πάνω στη γραμμή προσβολής και φυγής αντίστοιχα. Αν και η πτέρυγα θεωρείται σχεδόν συμμετρική, παρατηρείται μια φυσική συστροφή που διαφοροποιεί τις αποστάσεις αυτές.

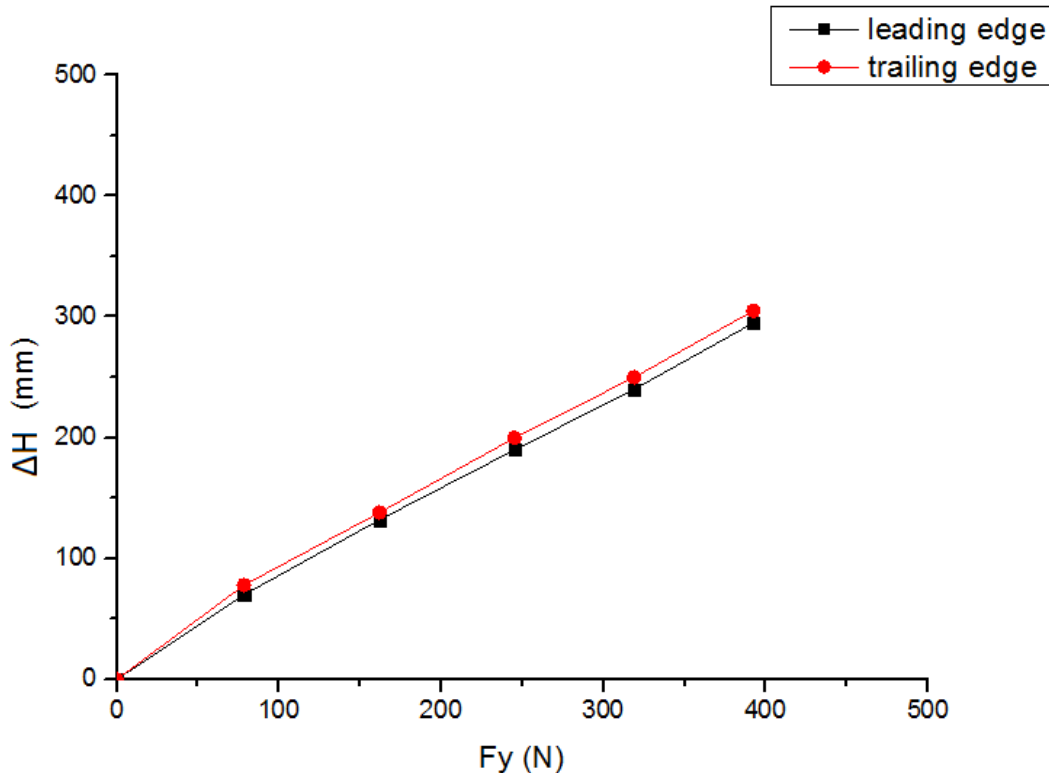
Πίνακας 4.1: Χωρίς φόρτιση

	θέση 1	θέση2	θέση3	θέση4	θέση5
ακμή προσβολής (mm)	1020	1020	1020	1030	1040
ακμή φυγής (mm)	930	930	950	970	1000

Όταν η πτέρυγα βρίσκεται στις παραπάνω θέσεις θεωρείται ότι βρίσκεται στη θέση ισορροπίας της.

4.1.1 Φορτίσεις στη διεύθυνση y .

Αρχικά στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φορτίσεων, με φορά από πάνω προς τα κάτω, κατά τον κατακόρυφο άξονα y , όπου ασκήθηκαν στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας.



Σχήμα 4.1 Φόρτιση κατά την y διεύθυνση και φορά από πάνω προς τα κάτω.

Όπως αναφέρθηκε, με την επιβολή του εκάστοτε στατικού φορτίου, μετρούνται οι κάθετες μετατοπίσεις των σημείων από τη θέση ισορροπίας, πάνω στον άξονα της ακμής προσβολής και φυγής αντίστοιχα. Οι νέες θέσεις που προκύπτουν συμβολίζονται με H . Όπου ΔH , είναι η διαφορά της τελικής θέσης H του σημείου από την αρχική θέση H_0 , δηλαδή $\Delta H = H_0 - H$ σε (mm) και εκφράζει την κατακόρυφη μετατόπιση.

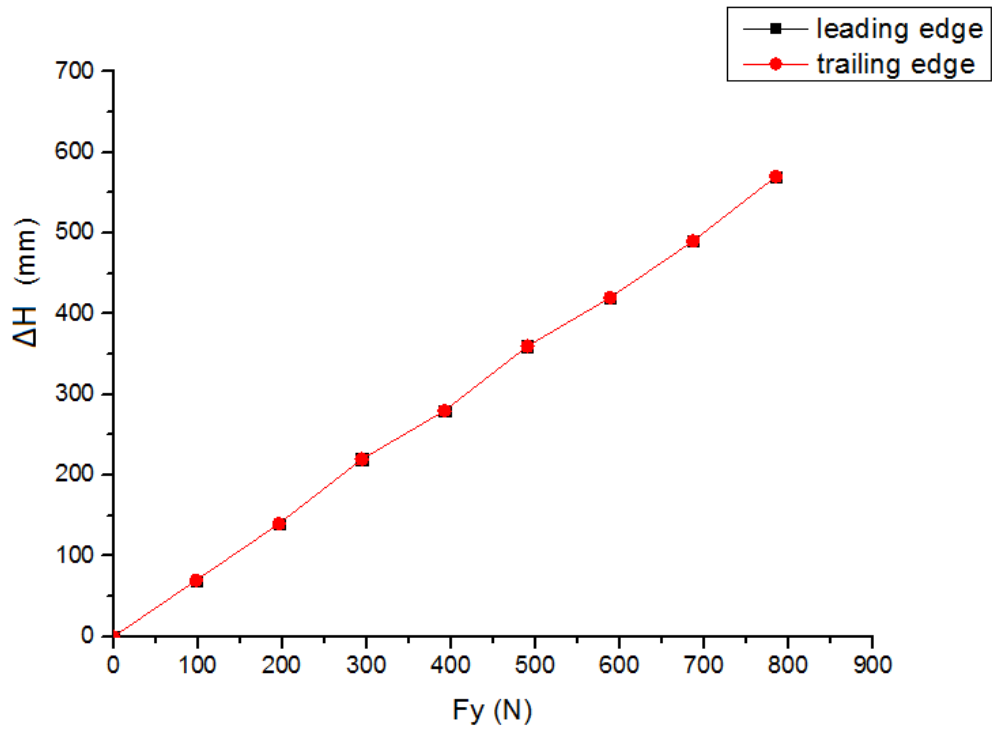
Όπου F_y είναι το φορτίο σε (N) που ασκείται στο ακροπτερύγιο με φορά από πάνω προς τα κάτω.

Όπως παρατηρείται από το σχήμα 4.1 η αύξηση του φορτίου οδηγεί σε ομαλή αύξηση της κατακόρυφης μετατόπισης της πτέρυγας, με αποτέλεσμα οι δυο καμπύλες που αντιπροσωπεύουν την ακμή προσβολής και φυγής, να είναι σχεδόν γραμμικές ενώ ταυτόχρονα τείνουν να ταυτιστούν.

Ακολουθούν αναλυτικά τα διαγράμματα για φόρτιση με αντίθετη φορά, δηλαδή από κάτω προς τα πάνω και κατά τον κατακόρυφο άξονα y , σε κάθε θέση (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5) και τις αντίστοιχες κατακόρυφες μετατοπίσεις.

□ Φόρτιση στη θέση 1 ($z_1=0$), που αντιστοιχεί στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας.

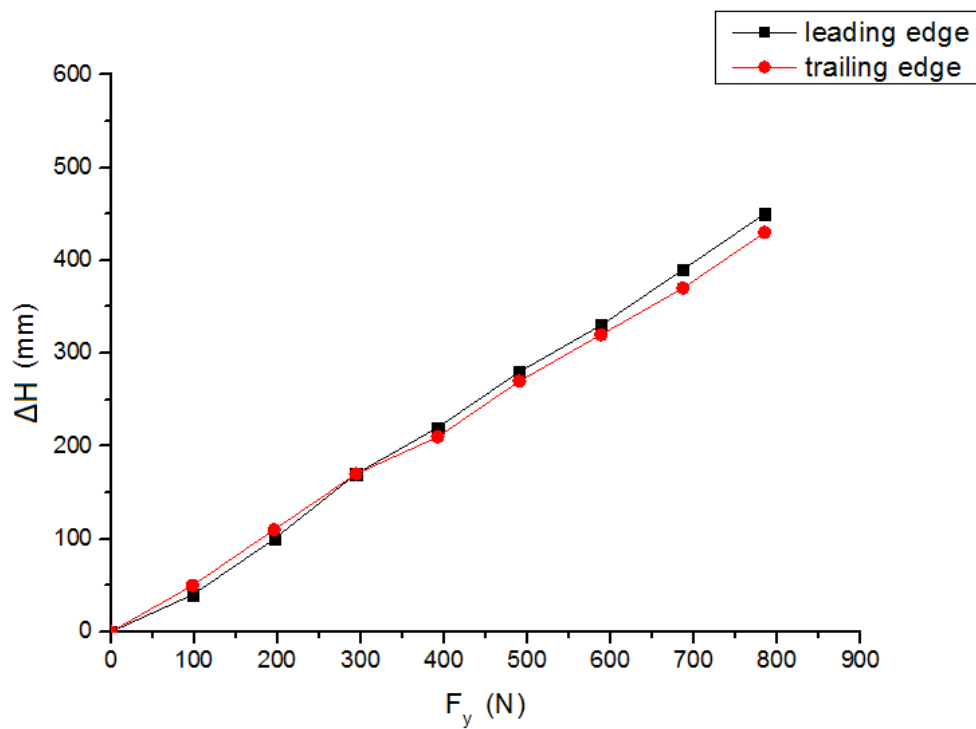
▪ Μετατοπίσεις στη θέση 1:



Σχήμα

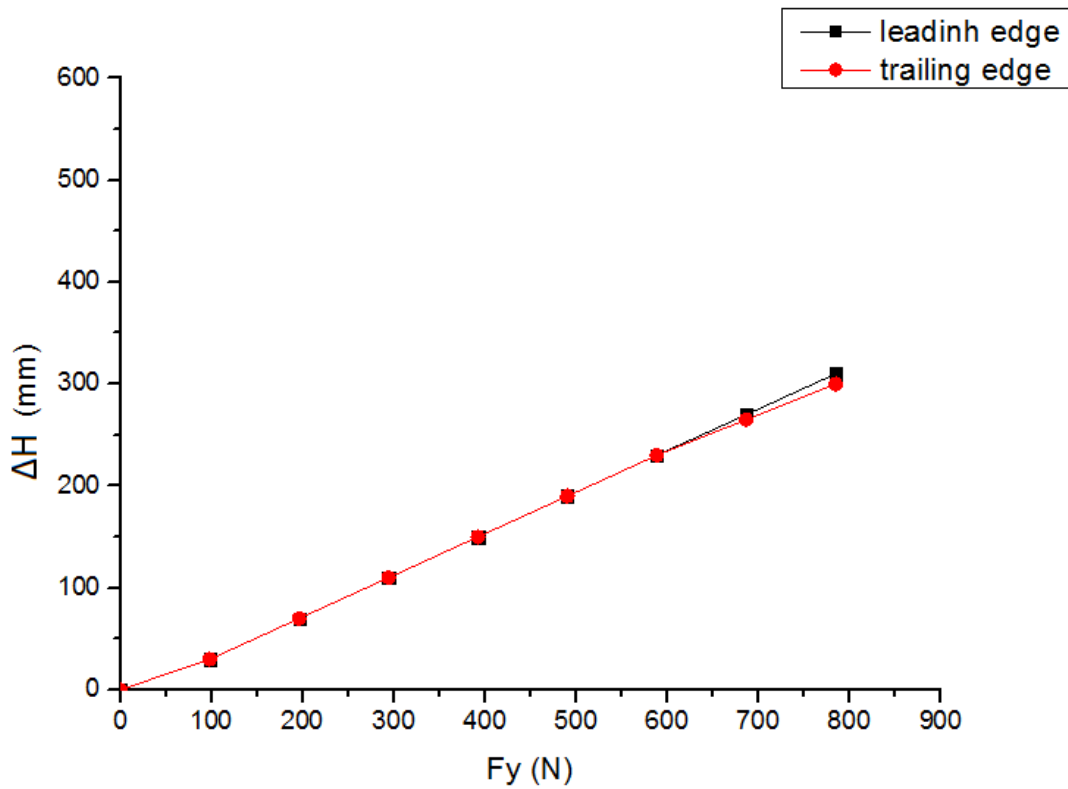
4.2 Μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 1

▪ Μετατοπίσεις στη θέση 2:



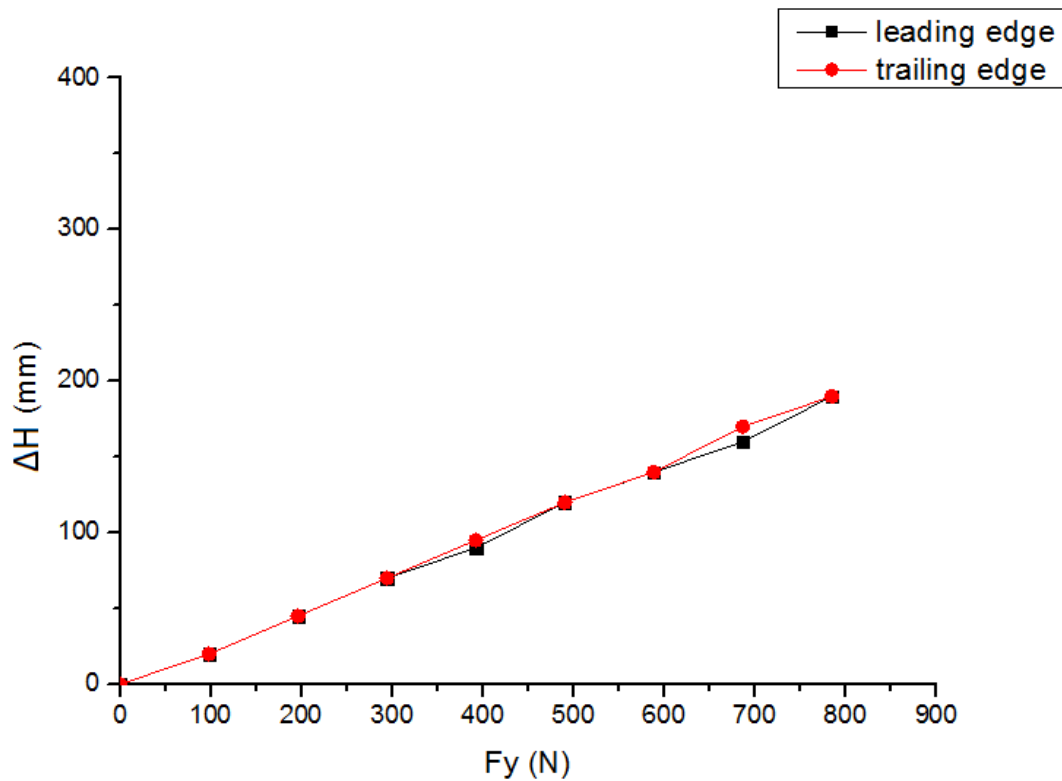
Σχήμα 4.3 Μετατόπιση στη θέση $z_2=1m$ για φόρτιση στη θέση 1

- Μετατοπίσεις στη θέση 3:



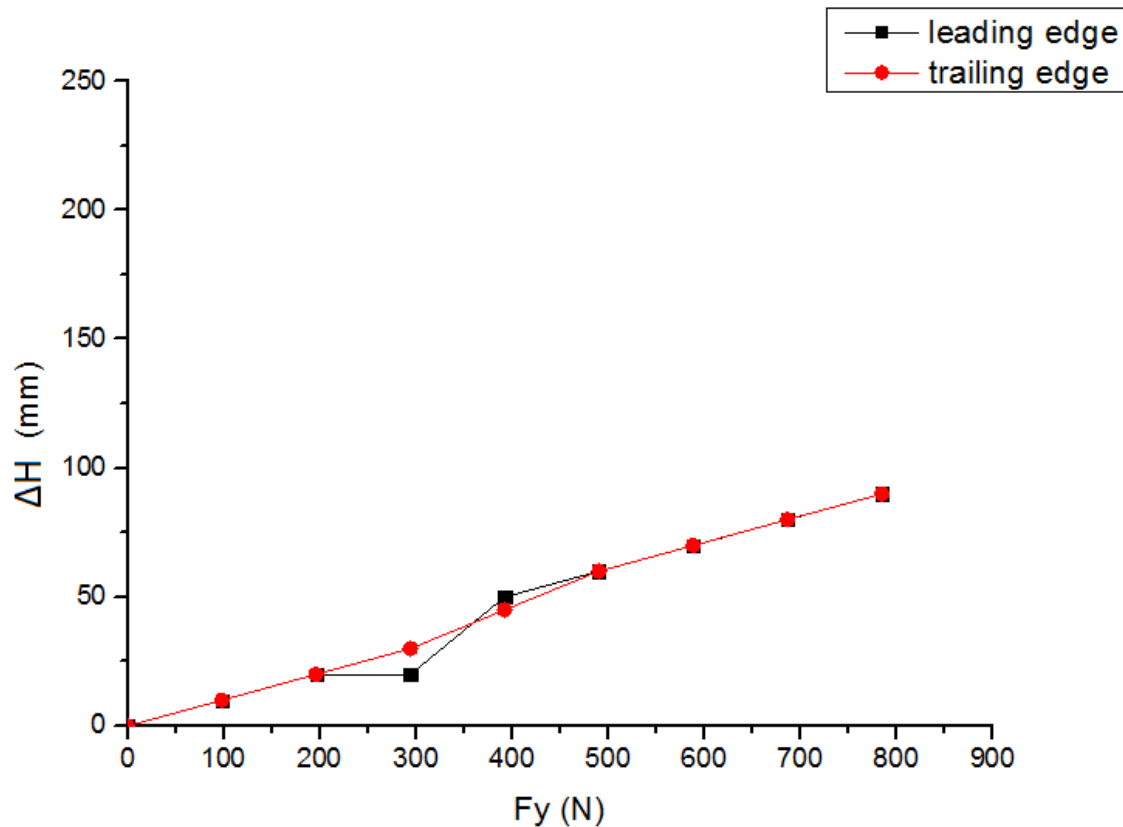
Σχήμα 4.4 Μετατόπιση στη θέση $z_3=2m$ για φόρτιση στη θέση 1

- Μετατοπίσεις στη θέση 4:



Σχήμα 4.5 Μετατόπιση στη θέση $z_4=3m$ για φόρτιση στη θέση 1

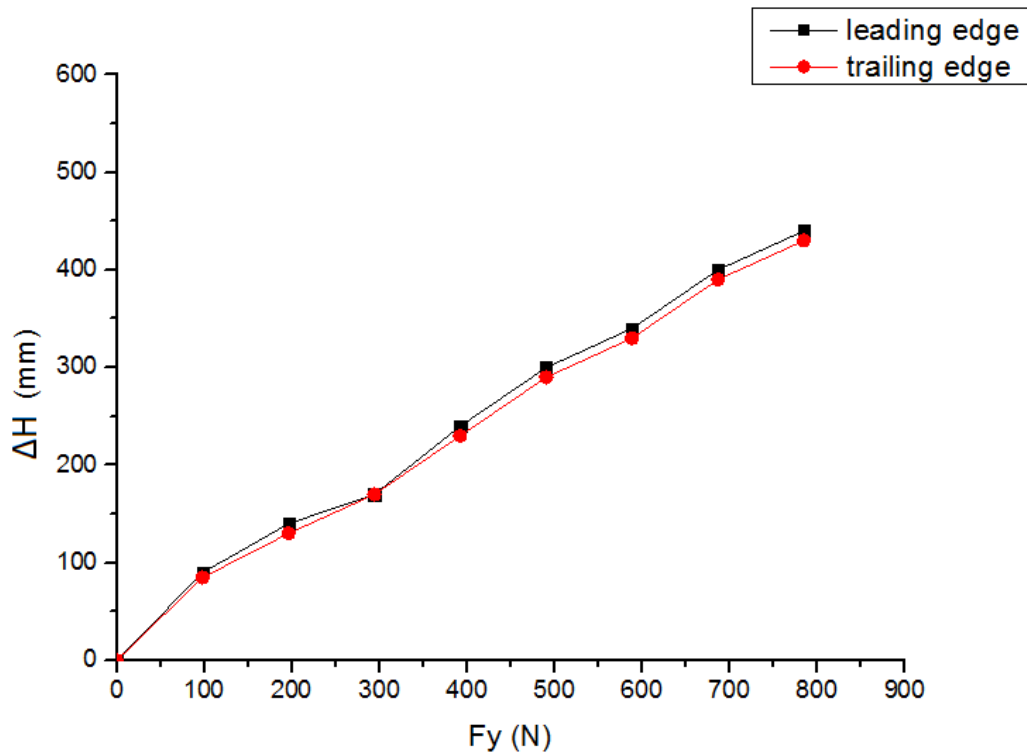
- Μετατοπίσεις στη θέση 5:



Σχήμα 4.6 Μετατόπιση στη θέση $z_5=4\text{m}$ για φόρτιση στη θέση 1

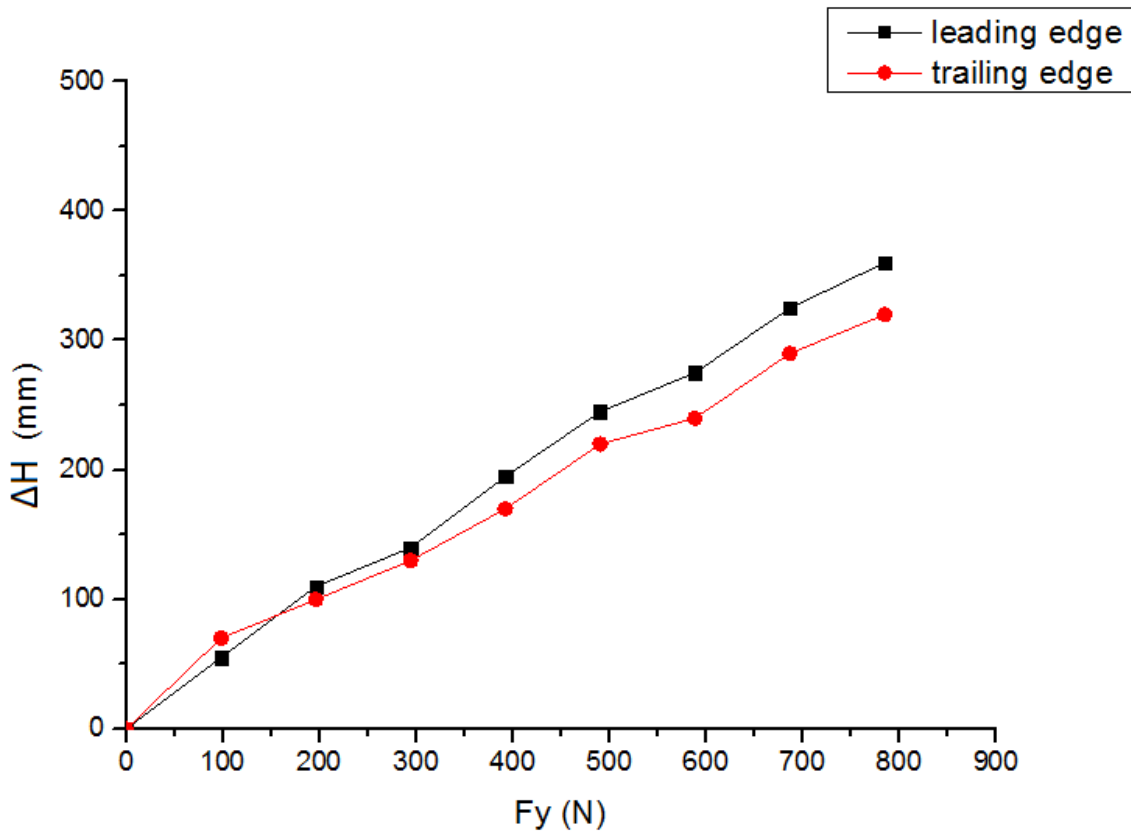
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα για κατακόρυφη φόρτιση στο ακροπτερύγιο, οι καμπύλες μετατόπισης (ΔH) – φορτίου (F_y), παρουσιάζουν γραμμικότητα προσεγγίζοντας την ευθεία γραμμή, κυρίως στις αρχικές θέσεις, ενώ υπάρχει σχεδόν σύγκλιση μεταξύ των καμπυλών προσβολής και φυγής. Συγκεκριμένα, για φόρτιση που κυμαίνεται από 98,1 (N) έως και 784,8 (N) παρατηρείται ότι για τα ίδια φορτία στις αρχικές θέσεις, κοντά στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας, οι μετατοπίσεις είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις μετατοπίσεις των θέσεων κοντά στη πάκτωση.

- Φόρτιση στη θέση 2 ($z_2=1\text{m}$)
- Μετατοπίσεις στη θέση 1:



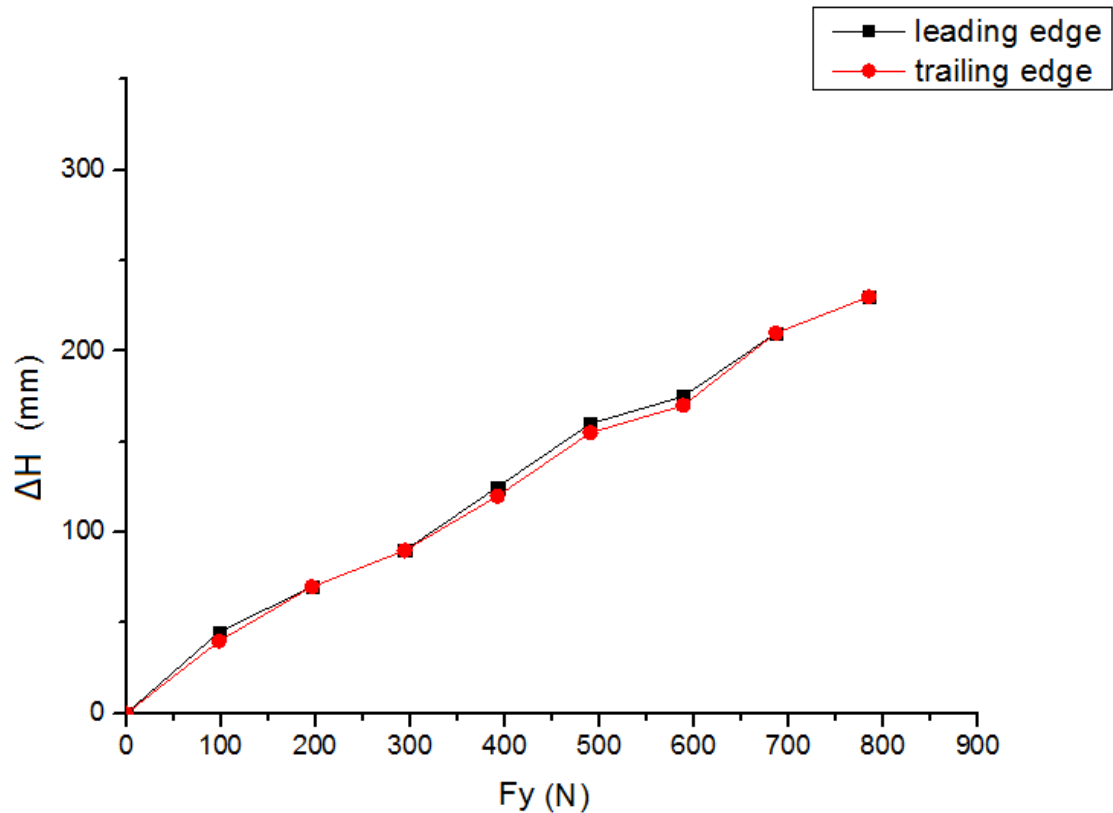
Σχήμα 4.7 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 2

- Μετατοπίσεις στη θέση 2:



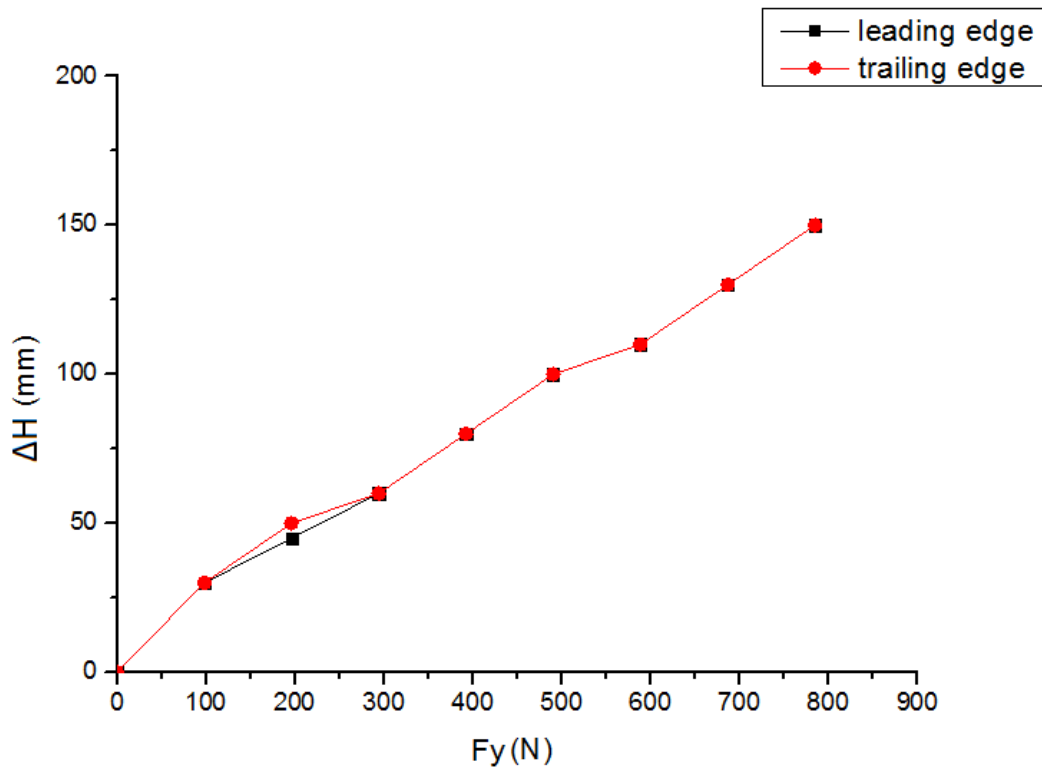
Σχήμα 4.8 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_2=1m$ για φόρτιση στη θέση 2

- Μετατοπίσεις στη θέση 3:



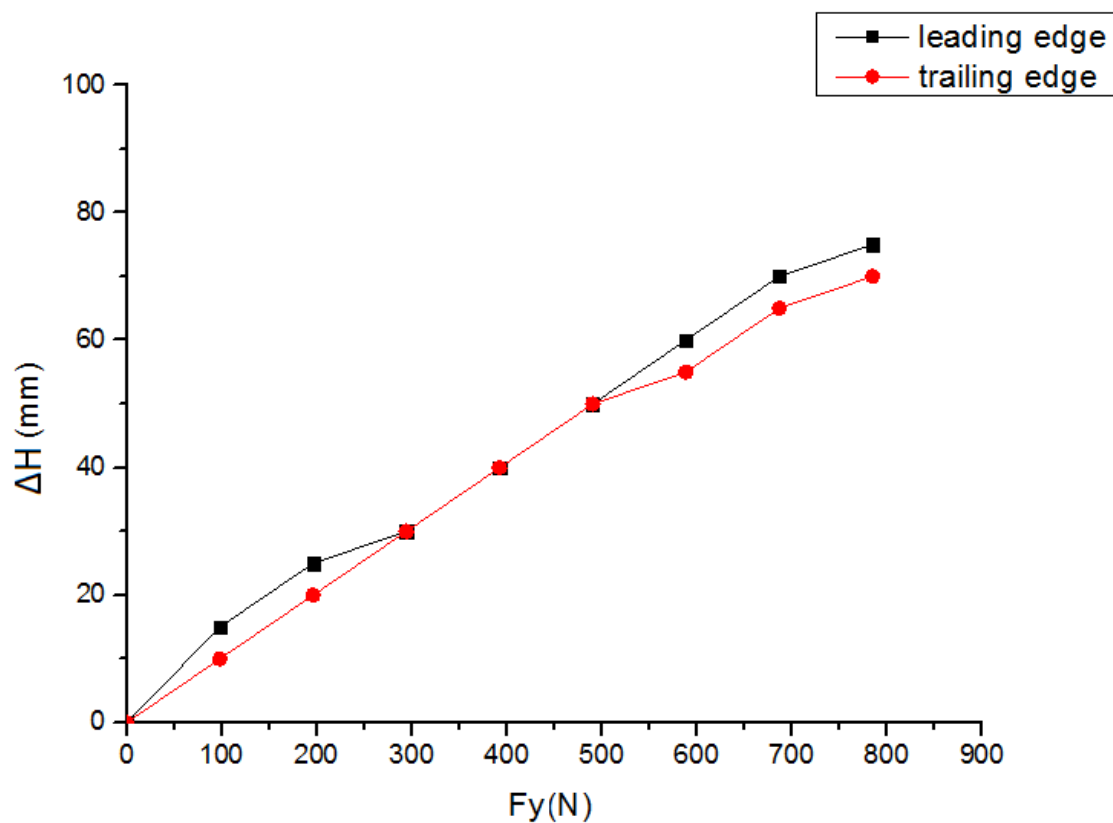
Σχήμα 4.9 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_3=2\text{m}$ για φόρτιση στη θέση 2

- Μετατοπίσεις στη θέση 4:



Σχήμα 4.10 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_4=3\text{m}$ για φόρτιση στη θέση 2

- Μετατοπίσεις στη θέση 5:

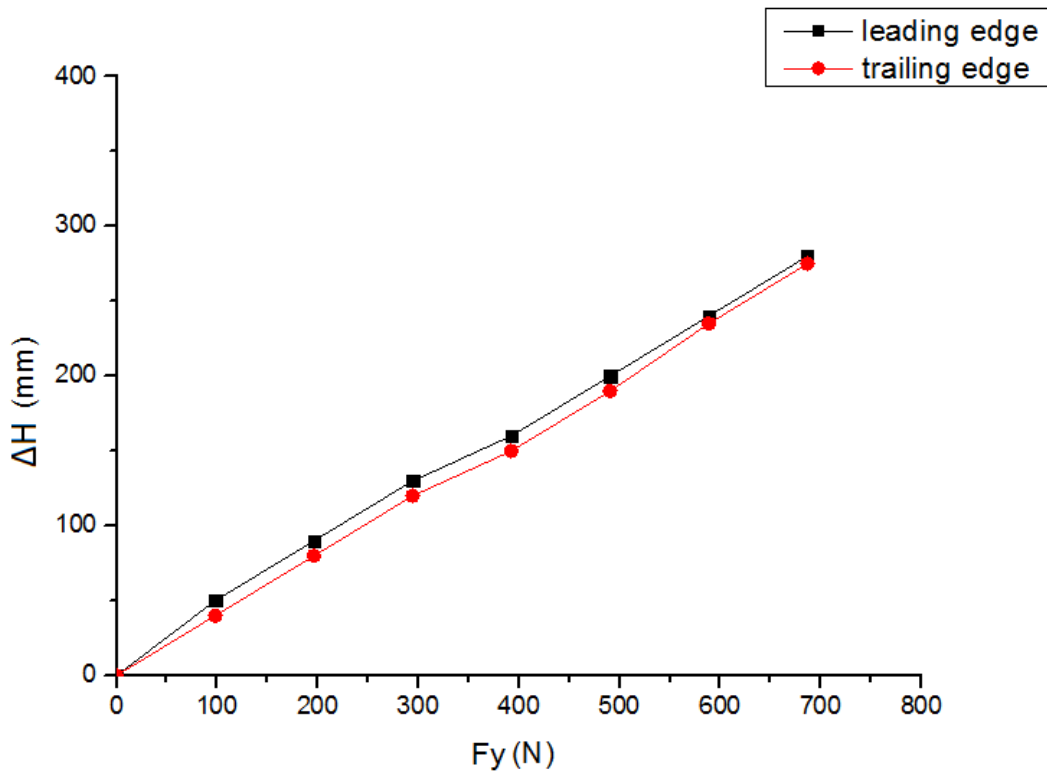


Σχήμα 4.11 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_5=4\text{m}$ για φόρτιση στη θέση 2

Για φόρτιση στη δεύτερη θέση ($z_2=1\text{m}$), παρατηρείται ότι όσο οι τιμές των φορτίων (F_y) αυξάνονται από 98,1 (N) έως και 784,8 (N), αυξάνεται και η μετατόπιση (ΔH) των σημείων χωρίς όμως να παρουσιάζεται η ίδια γραμμικότητα που παρατηρήθηκε στα αποτελέσματα για φόρτιση στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας. Παρατηρείται επίσης πως υπάρχει ταύτιση μεταξύ των ακμών προσβολής και φυγής εκτός από τις θέσεις 2 (σχήμα 4.8) και 5 (σχήμα 4.11), για τις οποίες η ακμή φυγής παρουσιάζει μικρότερες μετατοπίσεις σε σχέση με τη γραμμή προσβολής.

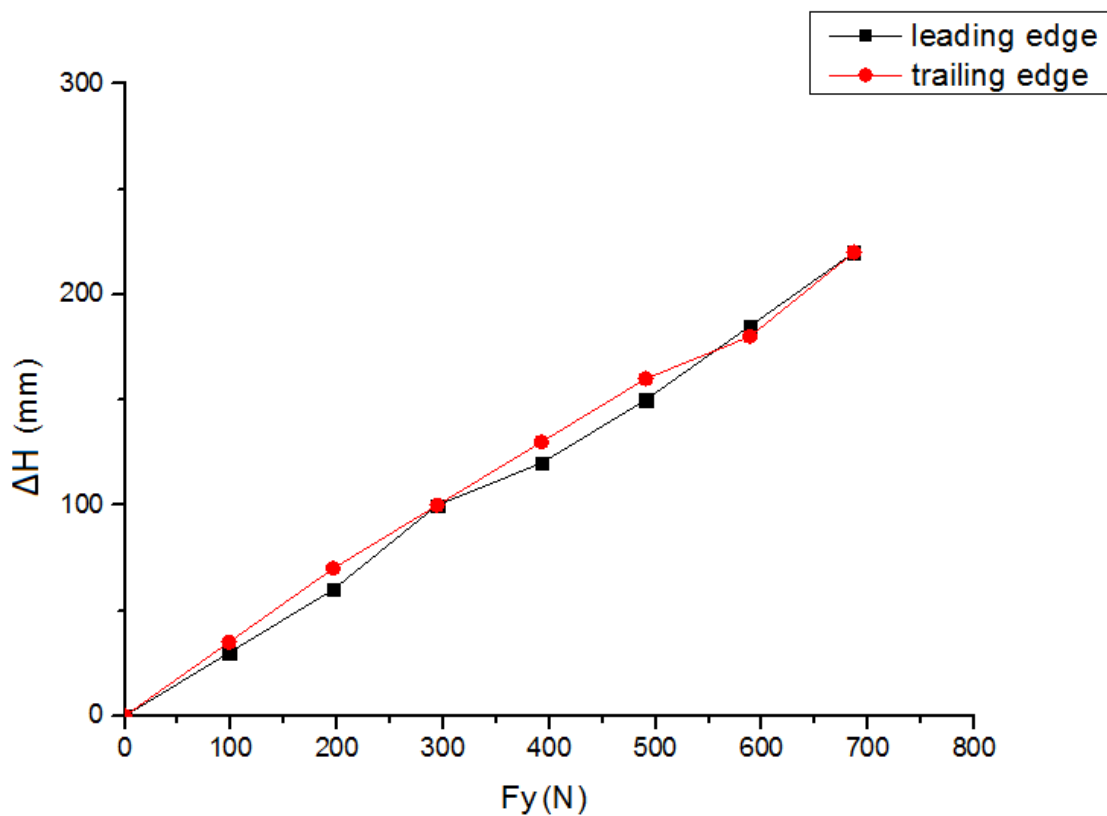
- Φόρτιση στη θέση 3, $z_3=2\text{m}$

- Μετατοπίσεις στη θέση 1:



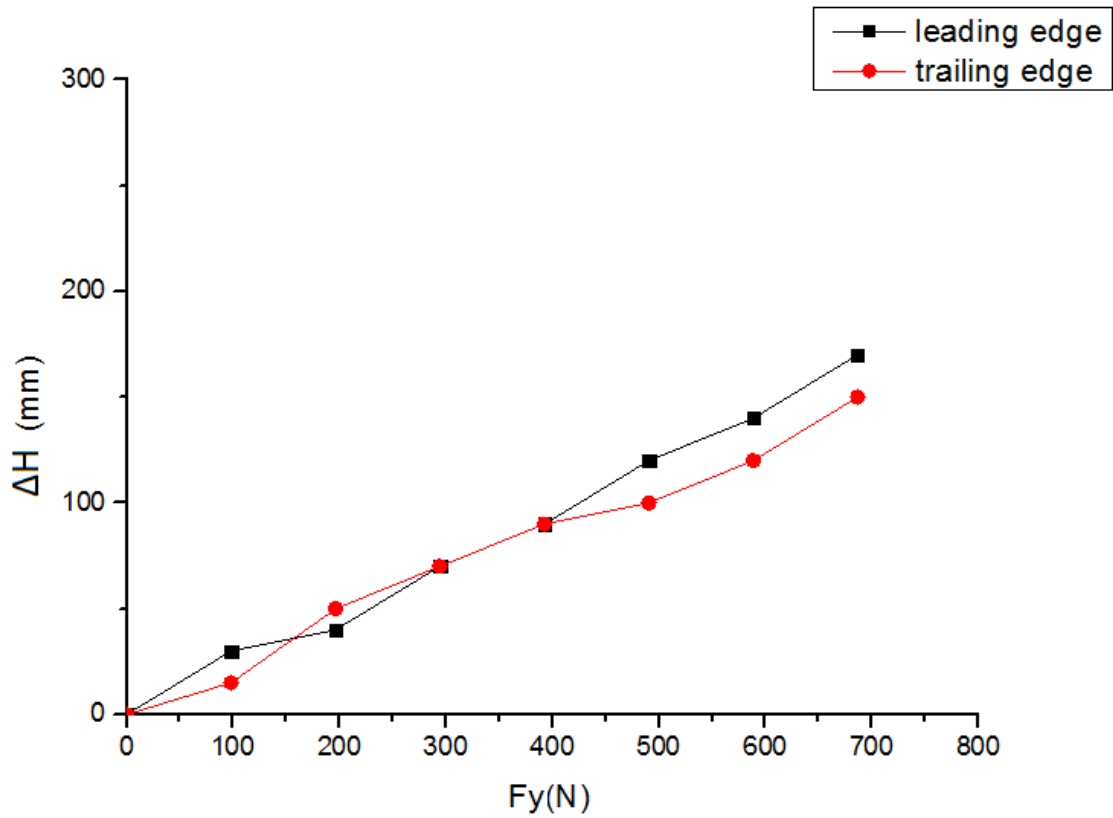
Σχήμα 4.12 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 3

- Μετατοπίσεις στη θέση 2:



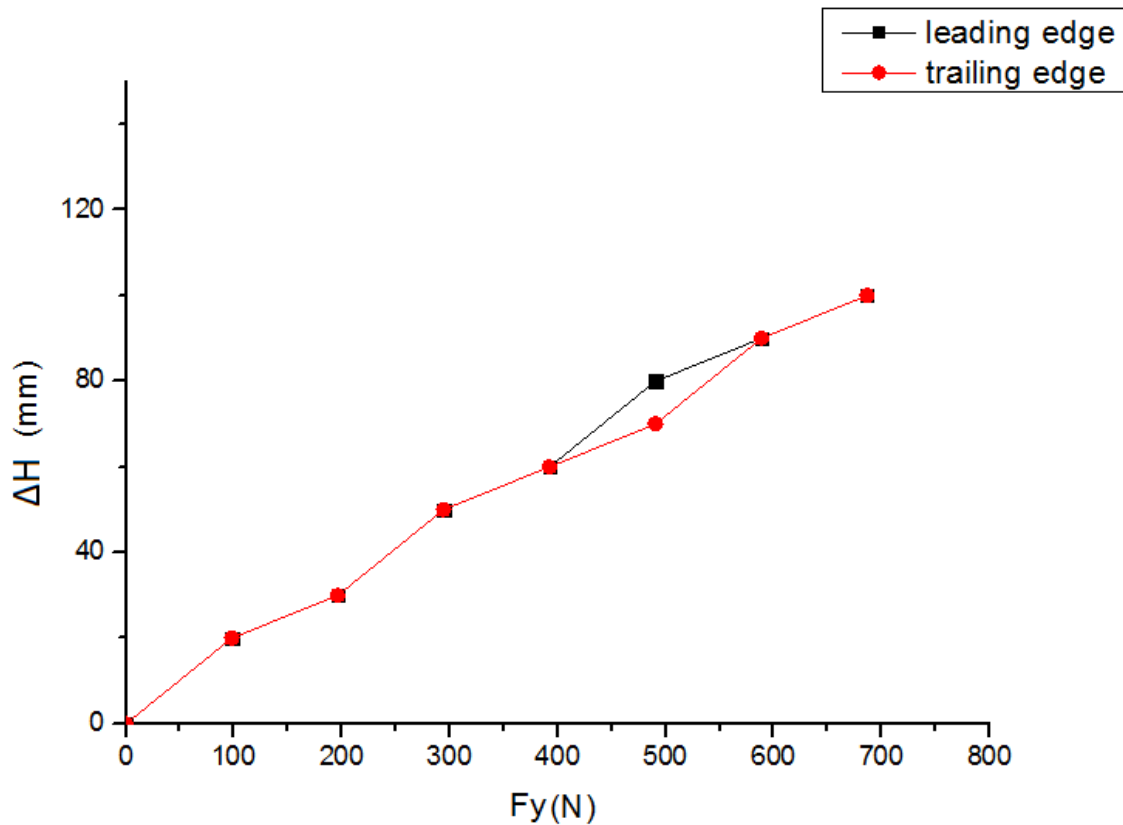
Σχήμα 4.13 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_2=1$ m για φόρτιση στη θέση 3

- Μετατοπίσεις στη θέση 3:



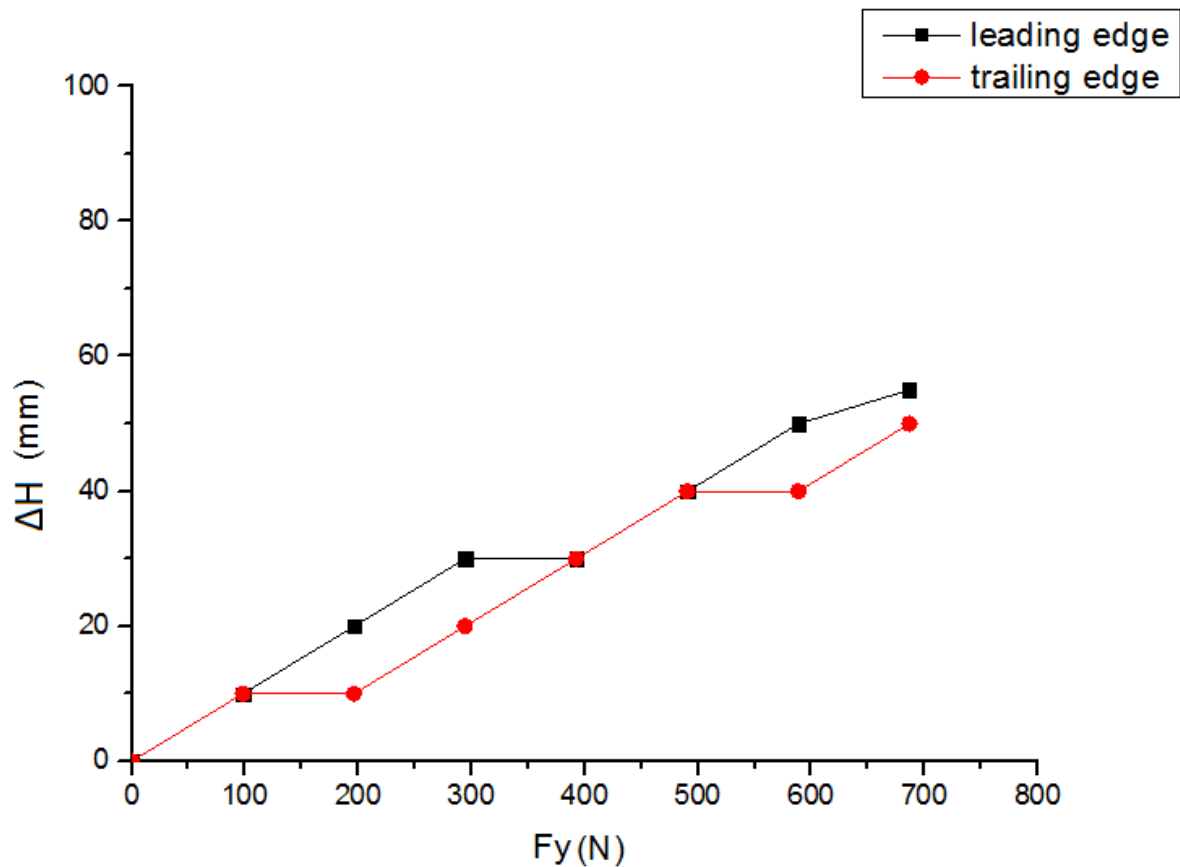
Σχήμα 4.14 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_3=2$ m για φόρτιση στη θέση 3

- Μετατοπίσεις στη θέση 4:



Σχήμα 4.15 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_4=3$ m για φόρτιση στη θέση 3

- Μετατοπίσεις στη θέση 5:

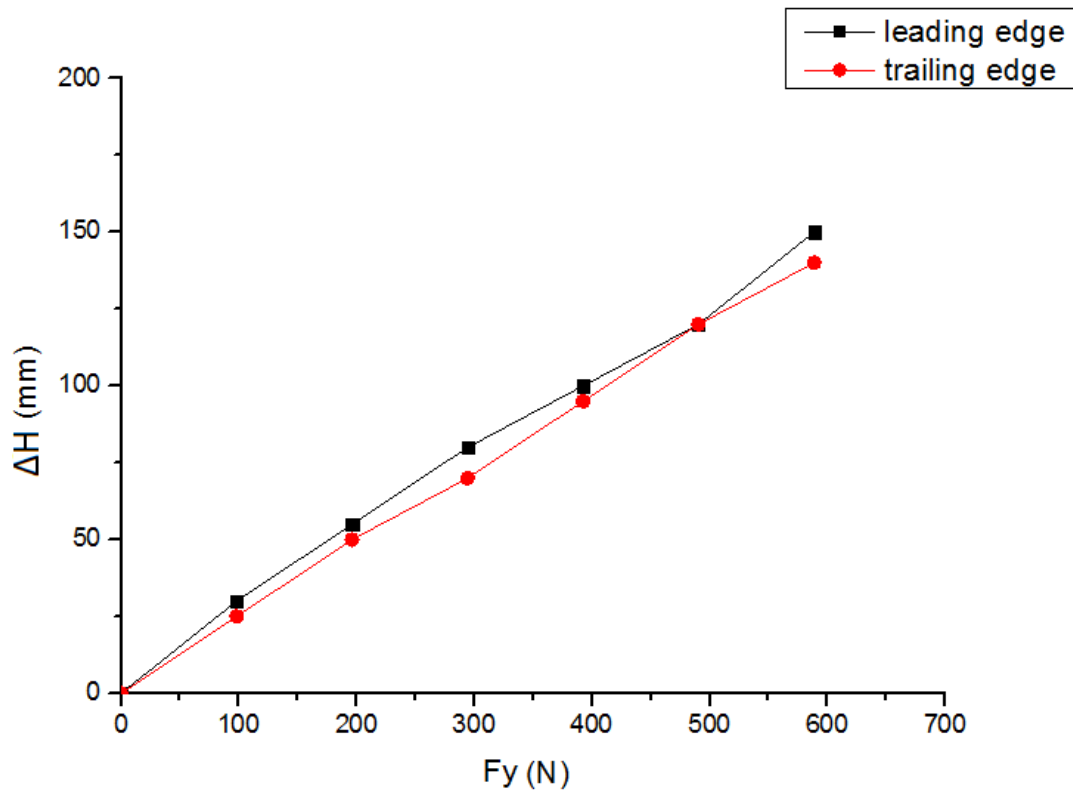


Σχήμα 4.16 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_5=4$ m για φόρτιση στη θέση 3

Για κατακόρυφη φόρτιση στη θέση 3, παρατηρείται ότι οι μετατοπίσεις (ΔH) στις δυο πρώτες θέσεις από το ελεύθερο άκρο της πτέρυγας, δηλαδή στις θέσεις $z_1=0$ (σχήμα 4.12) και $z_2=1$ m (σχήμα 4.13), παρουσιάζουν γραμμική μεταβολή, με σχετική ταύτιση των γραμμών προσβολής και φυγής. Από τη θέση $z_3=2$ m (σχήμα 4.14), η γραμμική σχέση μετατόπισης – φορτίου αρχίζει να χάνεται. Αυτό φαίνεται πιο έντονα στην θέση 5, $z_5=4$ m, (σχήμα 4.16) κοντά δηλαδή στην πάκτωση, όπου το διάγραμμα παρουσιάζει διαφορετική μορφή με τις μετατοπίσεις της ακμής φυγής να είναι αισθητά μικρότερες από την ακμή προσβολής.

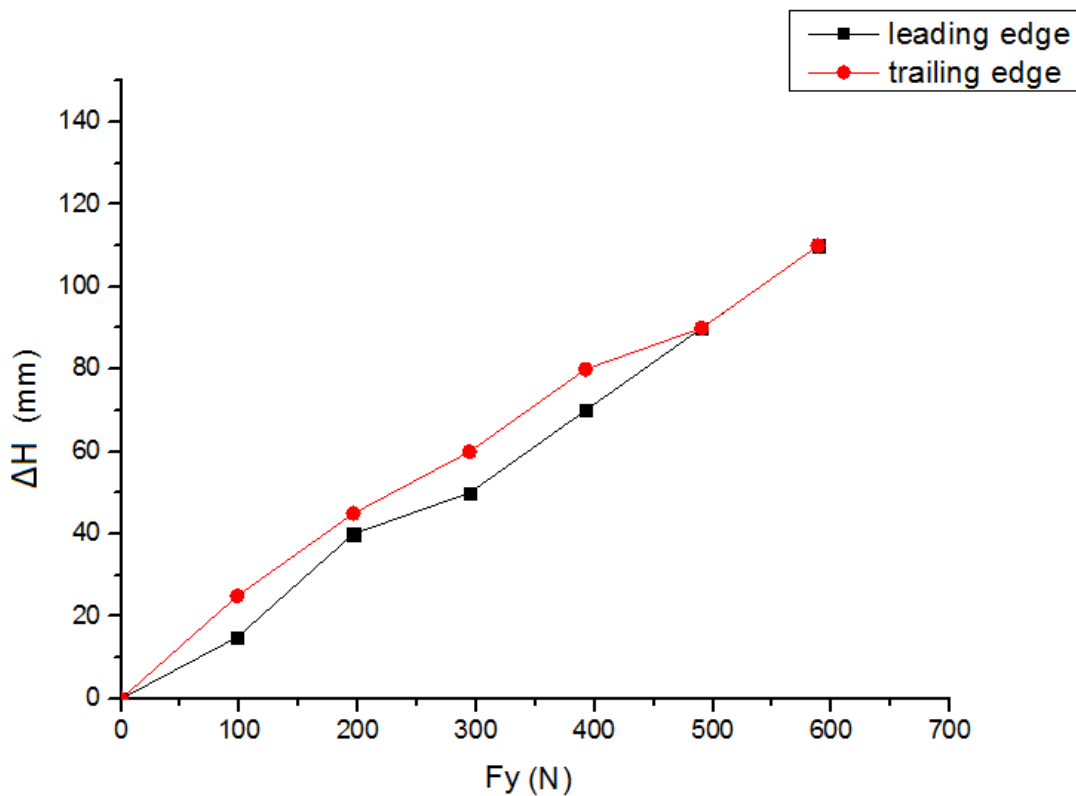
- Φόρτιση στη θέση 4, $z_4=3$ m

- Μετατοπίσεις στη θέση 1:



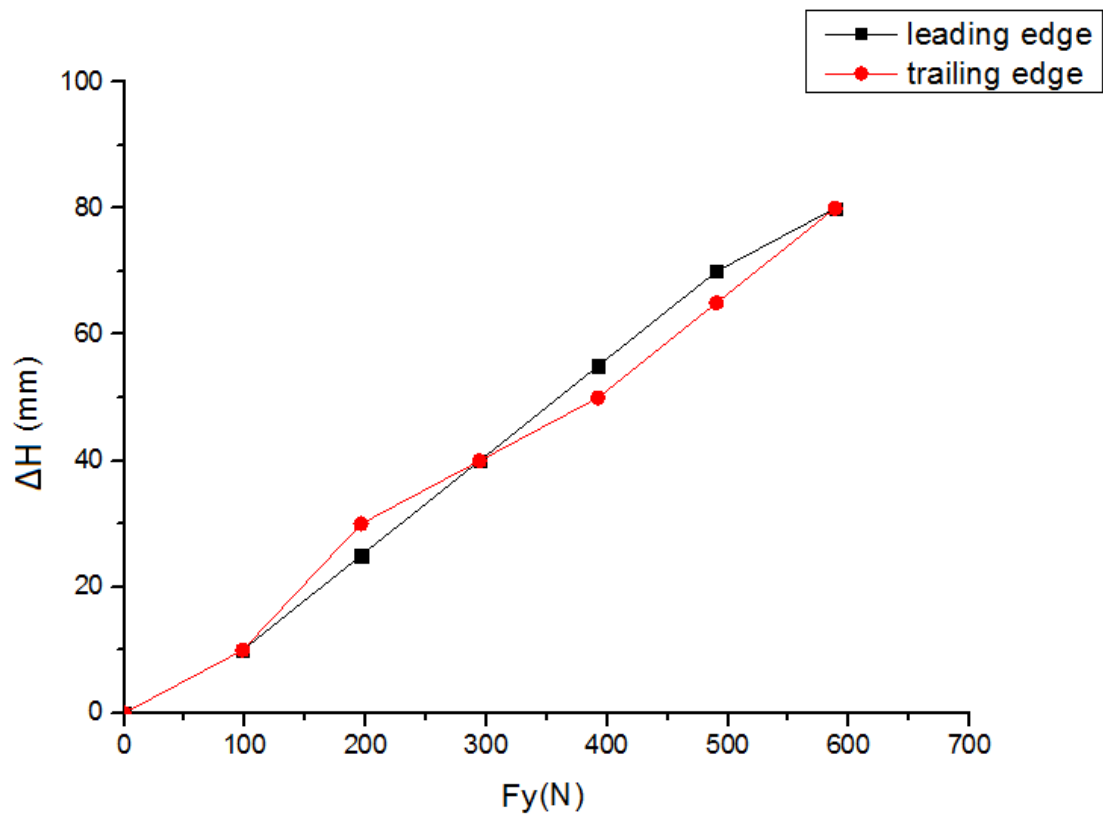
Σχήμα 4.17 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 4

- Μετατοπίσεις στη θέση 2:



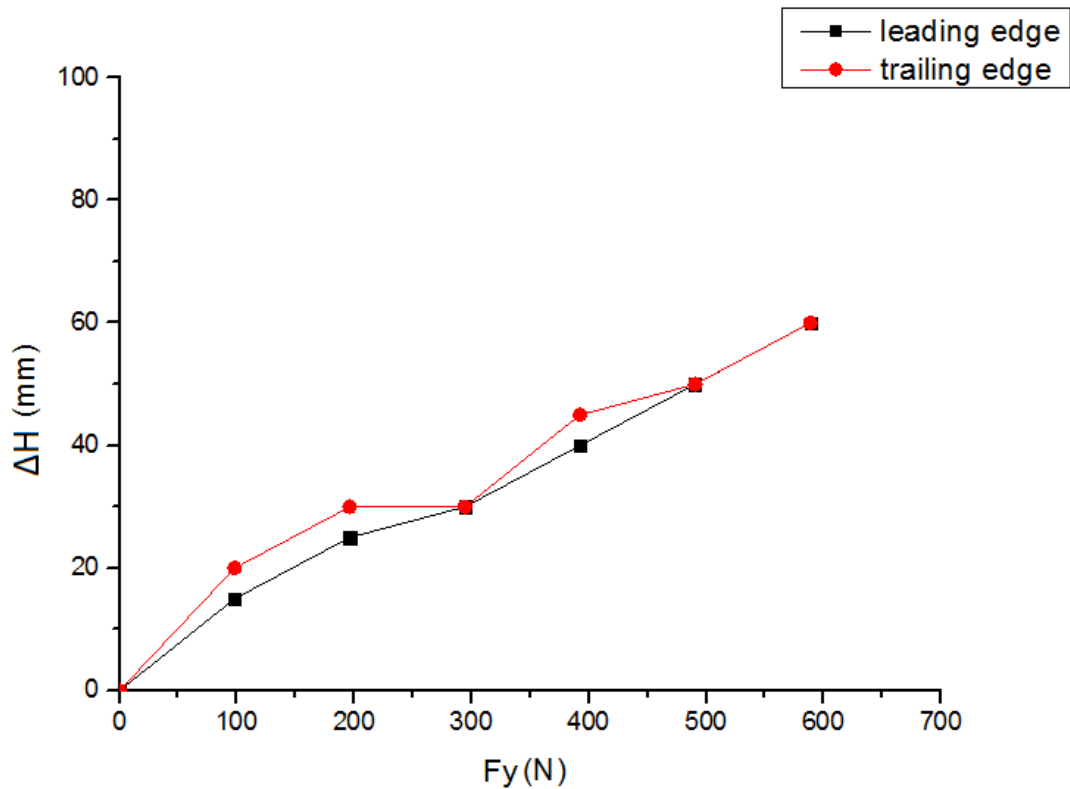
Σχήμα 4.18 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_2=1m$ για φόρτιση στη θέση 4

- Μετατοπίσεις στη θέση 3:



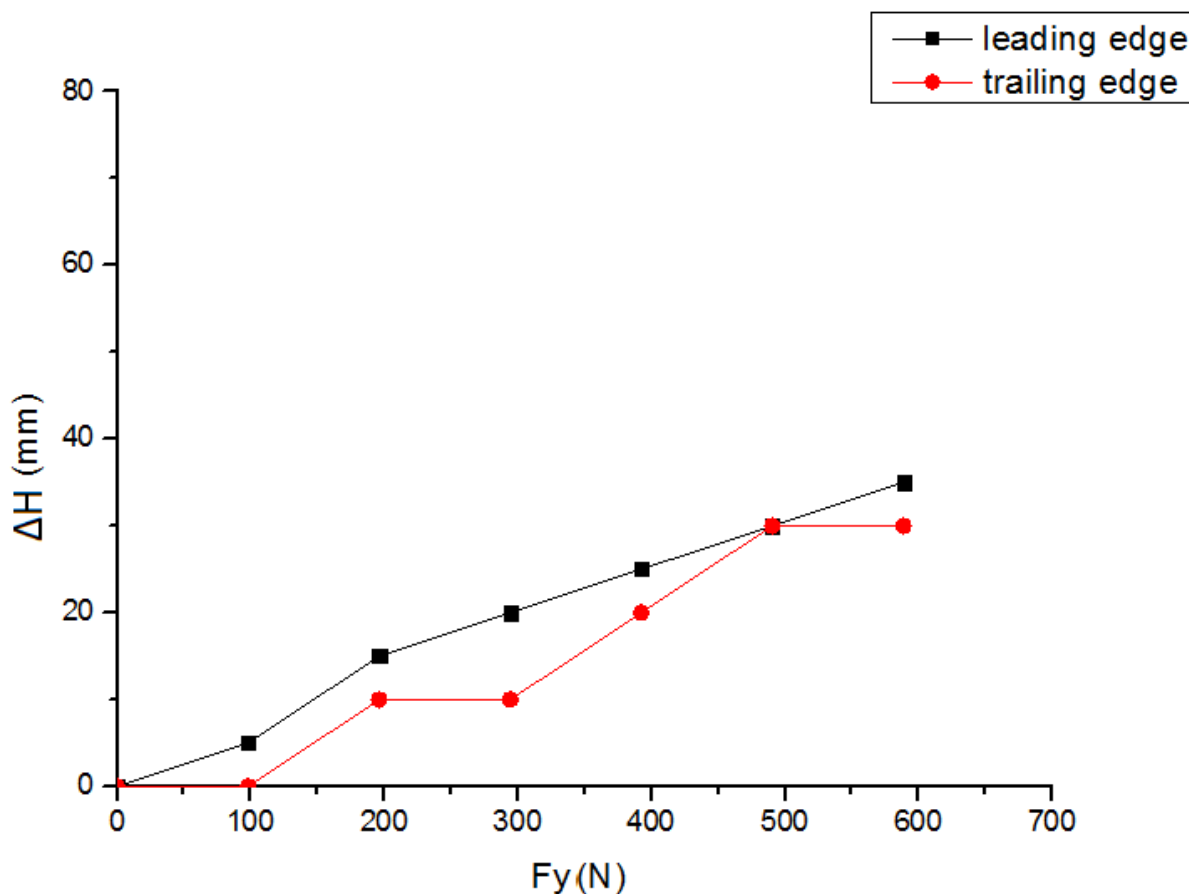
Σχήμα 4.19 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_3=2\text{m}$ για φόρτιση στη θέση 4

- Μετατοπίσεις στη θέση 4:



Σχήμα 4.20 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_4=3\text{m}$ για φόρτιση στη θέση 4

- Μετατοπίσεις στη θέση 5:

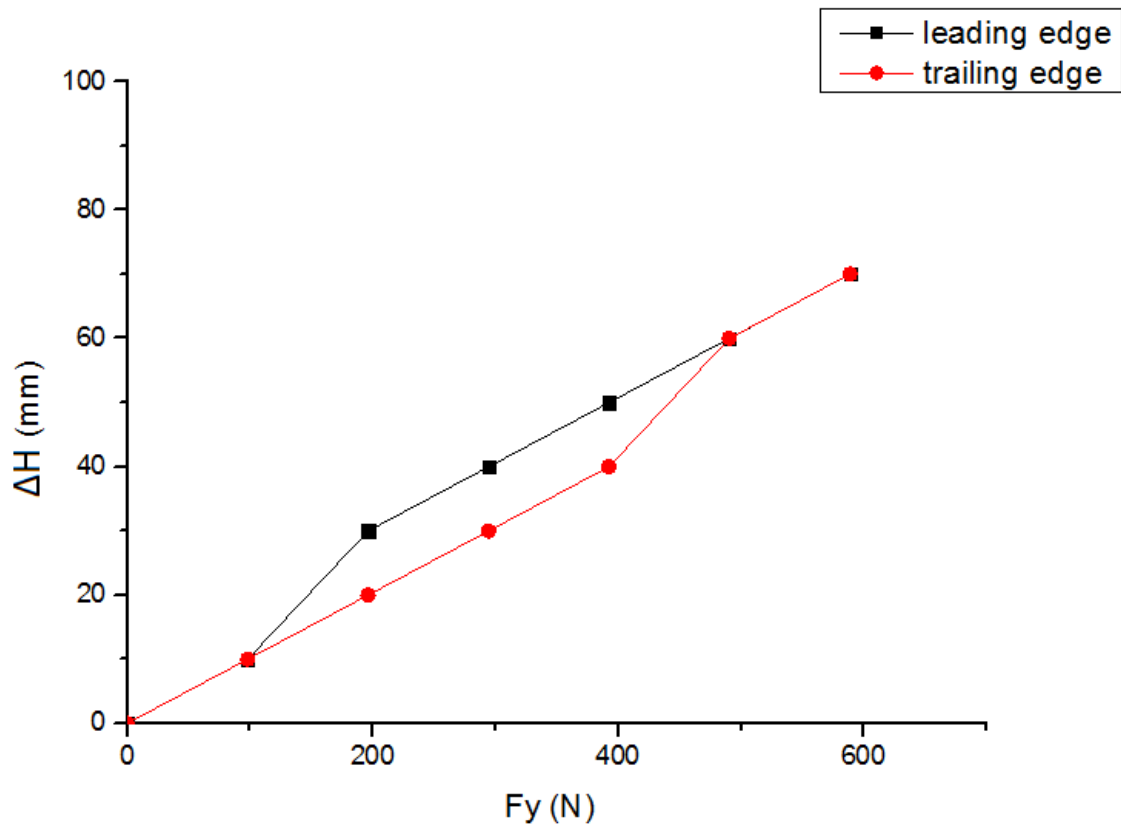


Σχήμα 4.21 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_5=4m$ για φόρτιση στη θέση 4

Για φόρτιση στη θέση 4 από 98,1 (N) έως και 588,6 (N), η σχέση μετατόπισης (ΔH) – φορτίου (N), εμφανίζεται γραμμική στη θέση 1 του ελεύθερου άκρου της πτέρυγας, $z_1=0$, (σχήμα 4.17) με τις μετατοπίσεις των ακμών προσβολής και φυγής να παίρνουν κοντινές τιμές. Στις επόμενες θέσεις τα διαγράμματα αποκτούν πιο ακανόνιστη μορφή ενώ παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των μετατοπίσεων της γραμμής προσβολής και φυγής. Παρατηρείται επίσης, ότι το εύρος των τιμών των μετατοπίσεων μειώνεται αισθητά σε σχέση με τις φορτίσεις στις προηγούμενες θέσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το διάγραμμα για τη θέση 5, $z_5=4m$, (σχήμα 4.21) όπου για μέγιστη τιμή φορτίου 588,6 (N) η μετατόπιση δεν ξεπερνά τα 35 mm για ακμή προσβολής και τα 30 mm για ακμή φυγής αντίστοιχα.

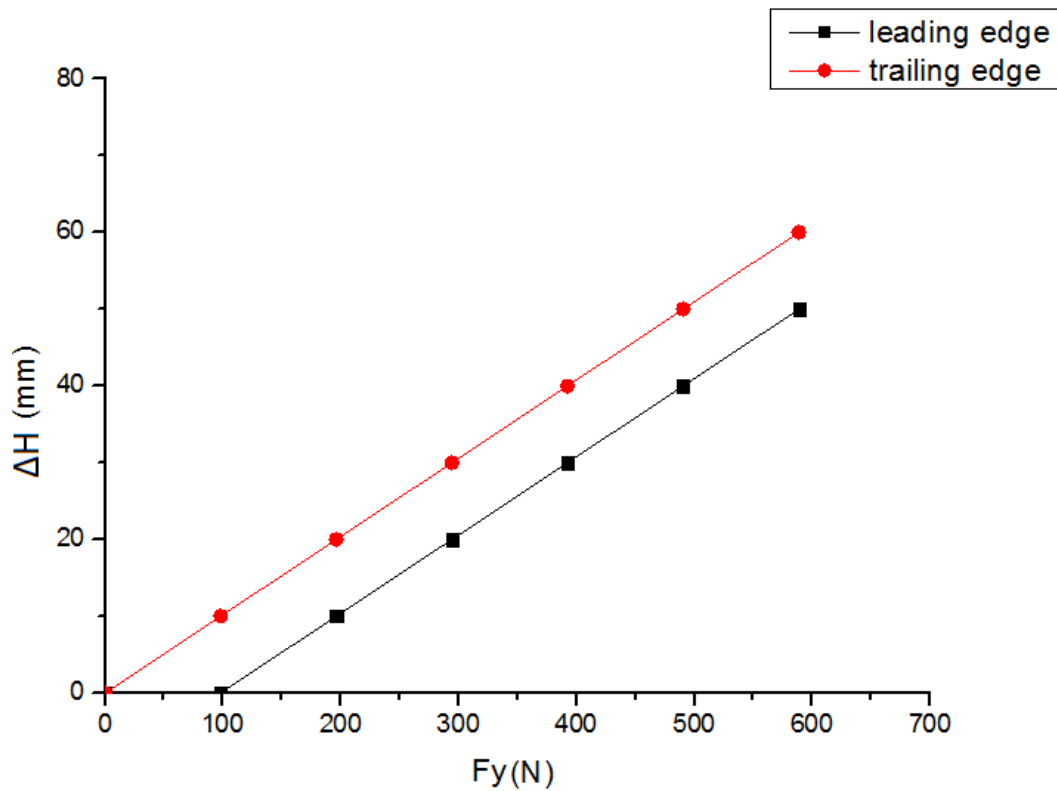
- Φόρτιση στη θέση 5, $z_5=4m$

- Μετατοπίσεις στη θέση 1:



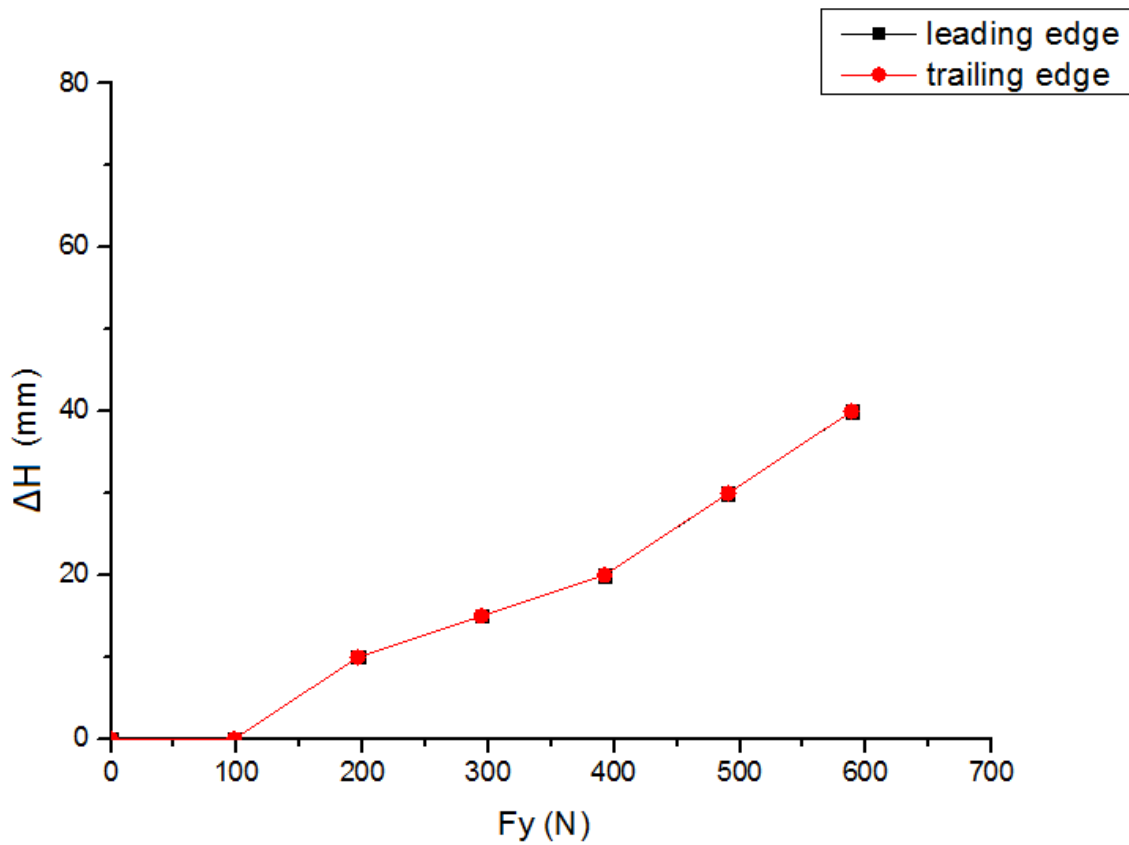
Σχήμα 4.22 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_1=0$ για φόρτιση στη θέση 5

- Μετατοπίσεις στη θέση 2:



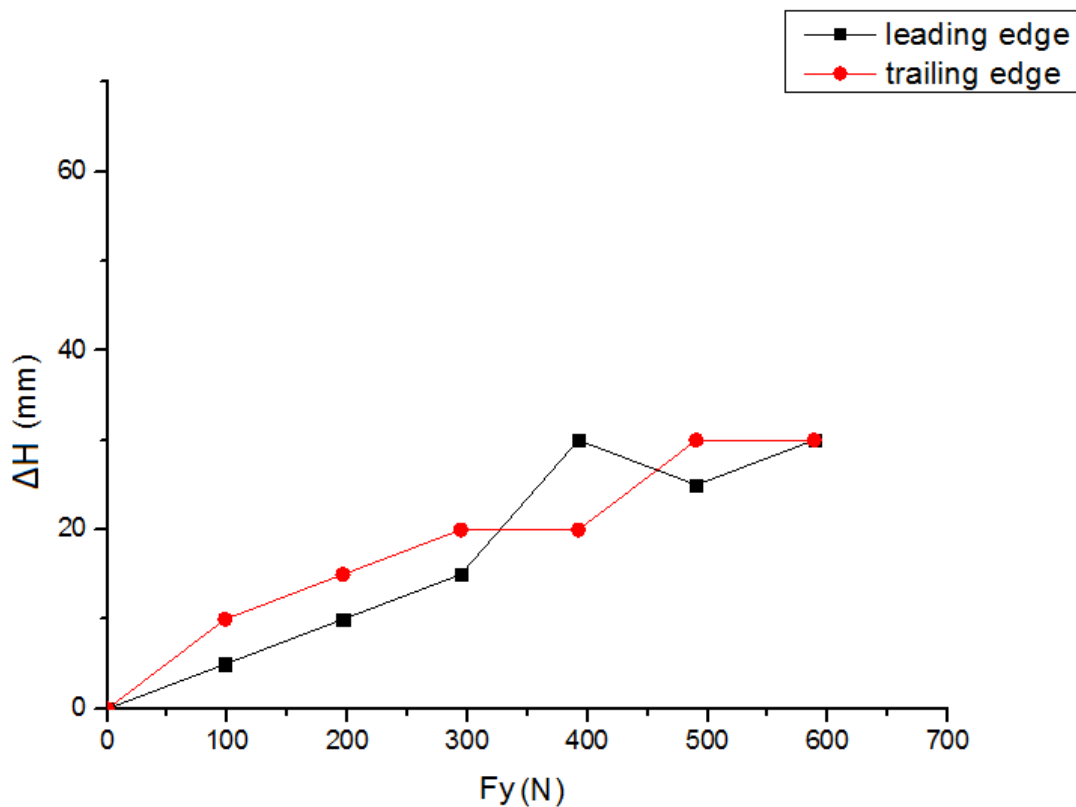
Σχήμα 4.23 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_2=1m$ για φόρτιση στη θέση 5

- Μετατοπίσεις στη θέση 3:



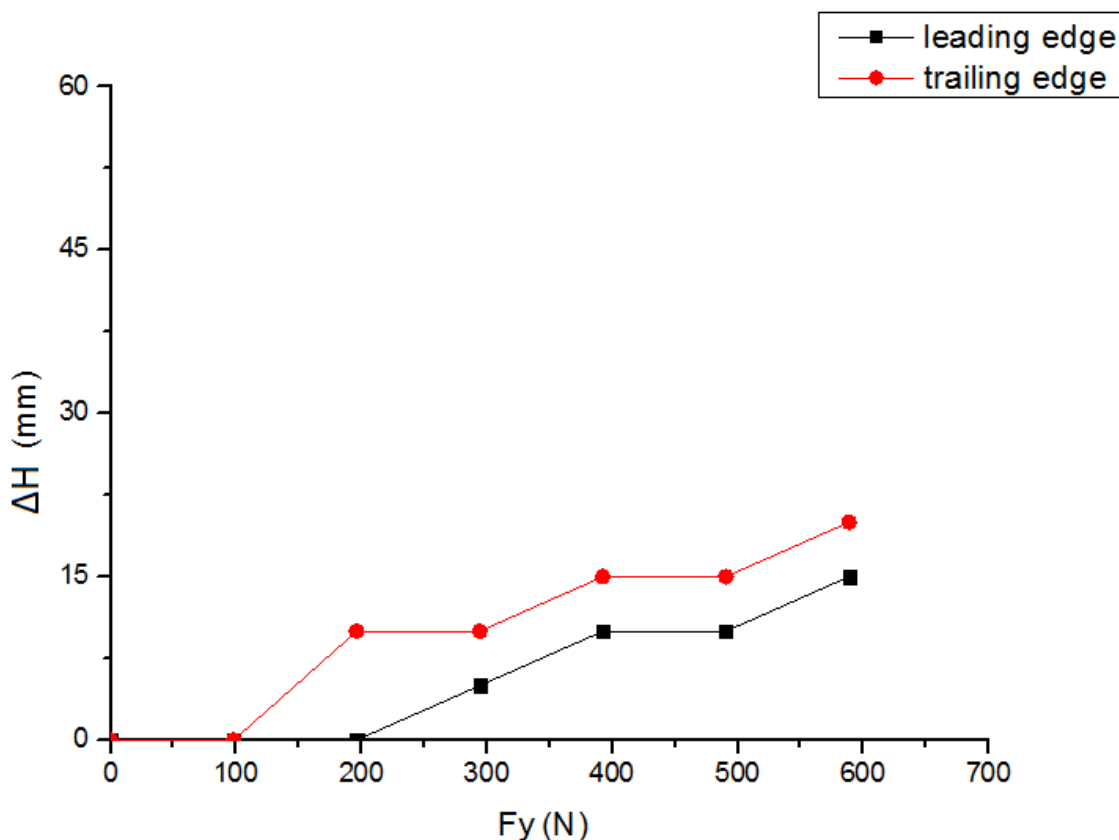
Σχήμα 4.24 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_3=2m$ για φόρτιση στη θέση 5

- Μετατοπίσεις στη θέση 4:



Σχήμα 4.25 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_4=3m$ για φόρτιση στη θέση 5

- Μετατοπίσεις στη θέση 5:

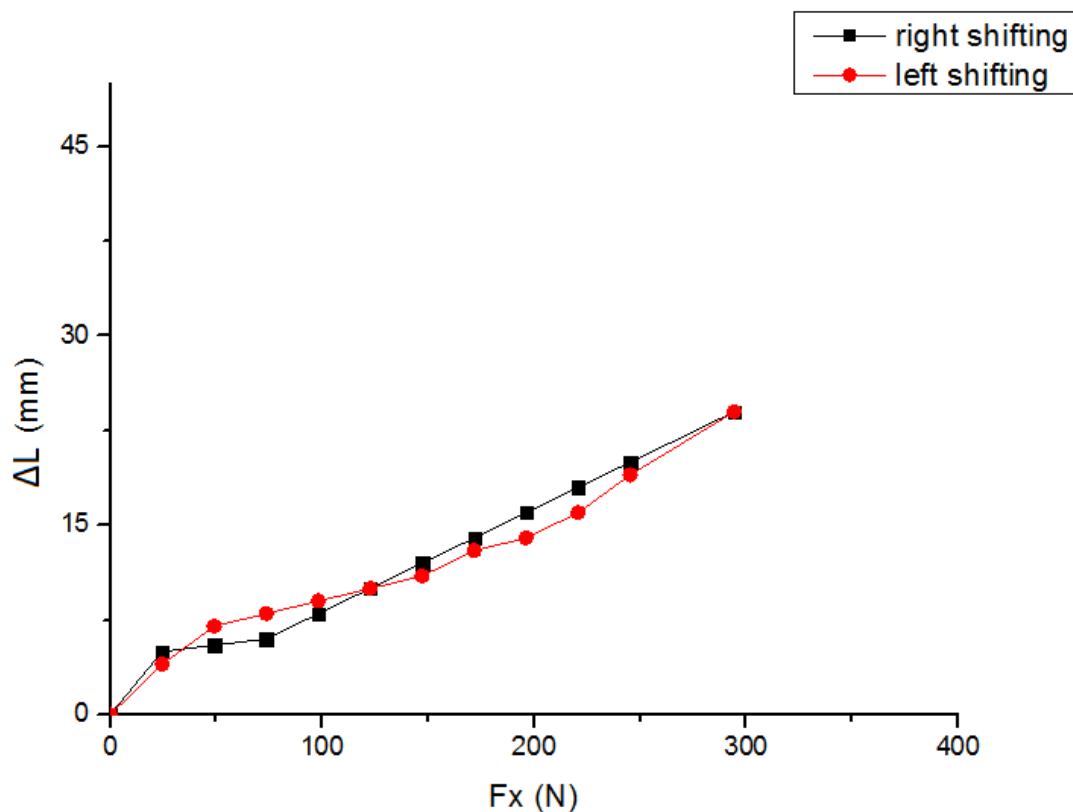


Σχήμα 4.26 Κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση $z_5=4m$ για φόρτιση στη θέση 5

Για φόρτιση στη θέση 5, $z_5=4m$, κοντά στην πάκτωση οι τιμές των μετατοπίσεων εμφανίζονται αισθητά μικρότερες. Συγκεκριμένα για φορτία από 98,1 (N) έως 588,6 (N), η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας στη θέση $z_1=0$, να είναι 70 mm για την ακμή προσβολής και για την ακμή φυγής αντίστοιχα. Οι γραμμές προσβολής και φυγής δεν ταυτίζονται, με εξαίρεση τη θέση 3 (σχήμα 4.24).

4.1.2 Φορτίσεις στη διεύθυνση x .

Στο υποκεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για φορτίσεις κατά την x οριζόντια διεύθυνση. Σε αυτές το ΔL εκφράζει την μετατόπιση του σημείου που ταυτίζεται με το αεροδυναμικό κέντρο της πτέρυγας $c/4$ (στο ακροπερύγιο). Η μάρνη καμπύλη αφορά τις φορτίσεις προς τη δεξιά διεύθυνση ενώ η κόκκινη κατά την αντίθετη φορά (αριστερά).



Σχήμα 4.27 Μετατόπιση κατά την x διεύθυνση

Για φόρτιση κατά την x διεύθυνση, με τις τιμές των φορτίων να κυμαίνονται 24,5 (N) έως και 294 (N), παρατηρούνται πολύ μικρότερες μετατοπίσεις (ΔL) σε σχέση με τις μετατοπίσεις για κατακόρυφη φόρτιση (ΔH). Χαρακτηριστικά αναφέρεται, ότι η μικρότερη μετατόπιση φτάνει μόλις τα 4 mm για φορτίο 24,5 (N). Η μέγιστη μετατόπιση για τιμή φορτίου 294 (N), φτάνει τα 24 mm, ενώ για το ίδιο φορτίο στο σχήμα 4.1 η μετατόπιση ξεπερνά τα 250 mm. Οι καμπύλες ωστόσο παρουσιάζονται κατά προσέγγιση γραμμικές, υπάρχουν όμως αποκλίσεις μεταξύ της ακμής προσβολής και φυγής.

Στο παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος των κεφαλαίων παρουσιάζονται αναλυτικά σε πίνακες οι αρχικές και τελικές θέσεις των σημείων κατά μήκος της πτέρυγας για την ακμή προσβολής και φυγής αντίστοιχα σε συνδιασμό με τα ανάλογα επιβαλλόμενα φορτία.

4.2 Αποτελέσματα Δυναμικών Πειραμάτων

Με την εκτέλεση των δυναμικών πειραμάτων στόχος είναι να προκύψουν αποτελέσματα σχετικά με το εύρος των επιταχύνσεων που αναπτύσει η πτέρυγα καθώς ταλαντώνεται σε διάφορες συχνότητες. Για την διαδικασία των ταλαντώσεων,

το inverter του μοτέρ ρυθμίστηκε σε συγκεκριμένες συχνότητες, οι οποίες διαμόρφωσαν αντίστοιχα και τις συχνότητες του περιστρεφόμενου βραχίονα.

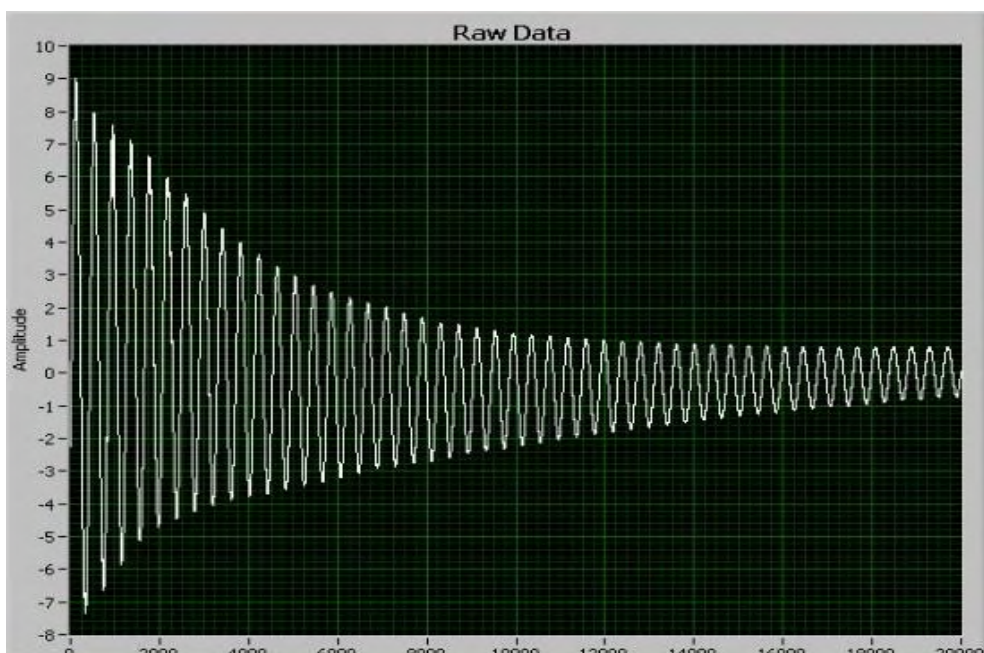
Συγκεκριμένα οι εξαναγκασμένες ταλαντώσεις εκτελέστηκαν σε δυο σετ συχνοτήτων. Το πρώτο σετ αφορά υψηλότερες συχνότητες του inverter του μοτέρ, από 5 έως και 7 Hz, ενώ το δεύτερο χαμηλότερες συχνότητες από 2,6 έως 4,4 Hz.

Στην ενότητα που ακολουθεί, παρατίθενται οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν με χρήση επιταχυνσιόμετρου για το πρώτο σετ ταλαντώσεων από 5 έως και 7 Hz, μέσω κατάλληλης διάταξης η οποία περιγράφηκε εκτενώς το κεφάλαιο 3, ενώ στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσα από την ανάλυση των video για τις συγκεκριμένες συχνότητες. Στην τελευταία ενότητα, θα ακολουθήσει και η ανάλυση του δεύτερου σετ ταλαντώσεων χαμηλότερων συχνοτήτων, η οποία θα γίνει μόνο ποιοτικά για λόγους που θα διευκρινιστούν με ακρίβεια στα πλαίσια της συγκεκριμένης ενότητας.

4.2.1 Μετρήσεις επιτάχυνσης με χρήση επιταχυνσιόμετρου.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, το επιταχυνσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στα εργαστηριακά πειράματα, δίνει αποτελέσματα για την επιτάχυνση αποκλειστικά και μόνο για τον κατακόρυφο άξονα γ. Συνεπώς αριθμητικά αποτελέσματα είναι δυνατόν να εξαχθούν μόνο για κατακόρυφη ταλάντωση η οποία όπως αναφέρεται και στη θεωρία αποτελεί το φαινόμενο “Flapping”.

Μέσα από το λογισμικό *LabVIEW (National Instruments)*, δίνονται οι κυματομορφές των ταλαντώσεων εκφρασμένες σε Volt. Για παράδειγμα στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η κυματομορφή αποσβενύμενης ταλάντωσης της πτέρυγας, χωρίς δηλαδή την επίδραση διεγέρτη με δειγματοληψία 500 Hz .



Σχήμα 4.28 Αποσβενύμενη ταλάντωση όπως καταγράφεται από το πρόγραμμα *LabVIEW (National Instruments)*

Η παραπάνω ταλάντωση της πτέρυγας, είναι μια φθίνουσα ταλάντωση χωρίς δηλαδή την επίδραση κάποιου περιοδικού διεγέρτη. Συγκεκριμένα στην πτέρυγα ασκήθηκε μια αρχική, σημειακή, στιγμιαία δύναμη 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 $f_0=1,4$ Hz. Συνεπώς για συχνότητες του βραχίονα (διεγέρτης) που πλησιάζουν στην τιμή αυτή, το πλάτος ταλάντωσης θα αυξάνεται και το σύστημα θα οδηγείται στο συντονισμό.

Για την ευκολότερη ανάλυση των αποτελεσμάτων, στις μετρήσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, θα μεταβάλλουμε την στάθμη της τάσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εργαστηριακού κυκλώματος. Συγκεκριμένα, ορίζεται στον ενισχυτή σήματος μία ενίσχυση, $gain=5$ (απολαβή).

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι συχνότητες (Hz) του βραχίονα-διεγέρτη, σε σχέση με τις συχνότητες στις οποίες ρυθμίζεται το Inverter του μοτέρ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση των βίντεο που αφορούν την περιστροφή του βραχίονα καθώς εξαναγκάζει την πτέρυγα σε ταλάντωση.

Πίνακας 4.2: Συχνότητες βραχίονα σε αντιστοιχία με τις συχνότητες inverter (Hz)

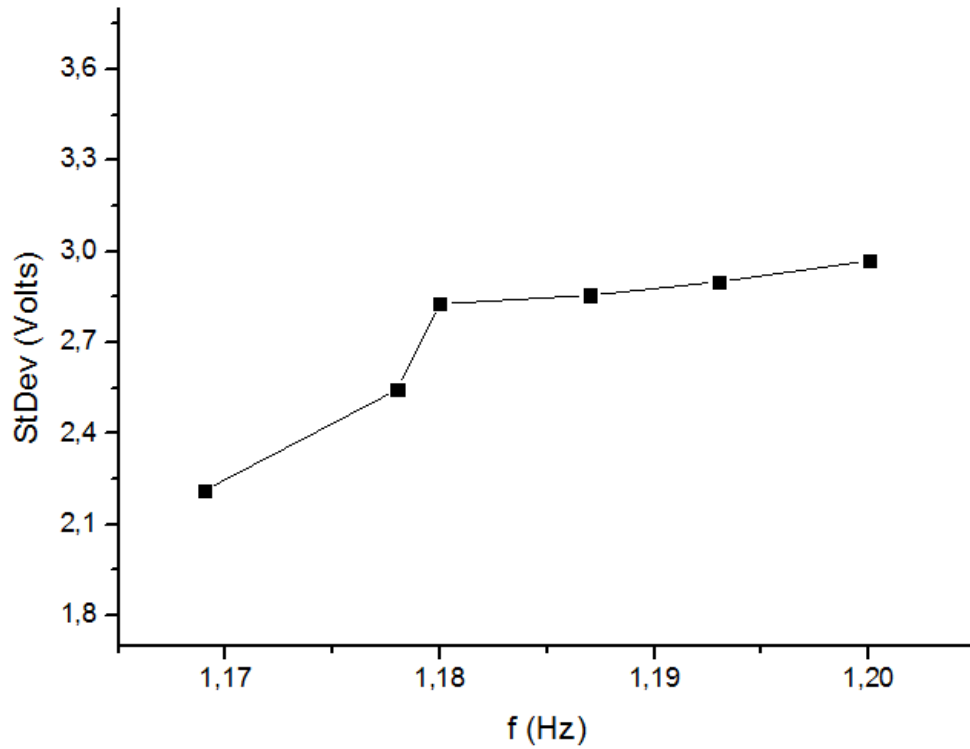
Frequency of Inverter	Frequency of Excitation
5,4	1,169
5,6	1,178
5,8	1,180
6	1,187
6,4	1,193
7	1,200

Προκύπτει έτσι, η τυπική απόκλιση των ταλαντώσεων εκφρασμένη σε Volt, ως προς τις συχνότητες του μοτέρ του διεγέρτη (Hz), οι οποίες αναγράφονται στον πίνακα 4.2, όπως αυτές δόθηκαν από το πρόγραμμα *Labview (National Instruments)* και παρουσιάζονται στο σχήμα 4.29.

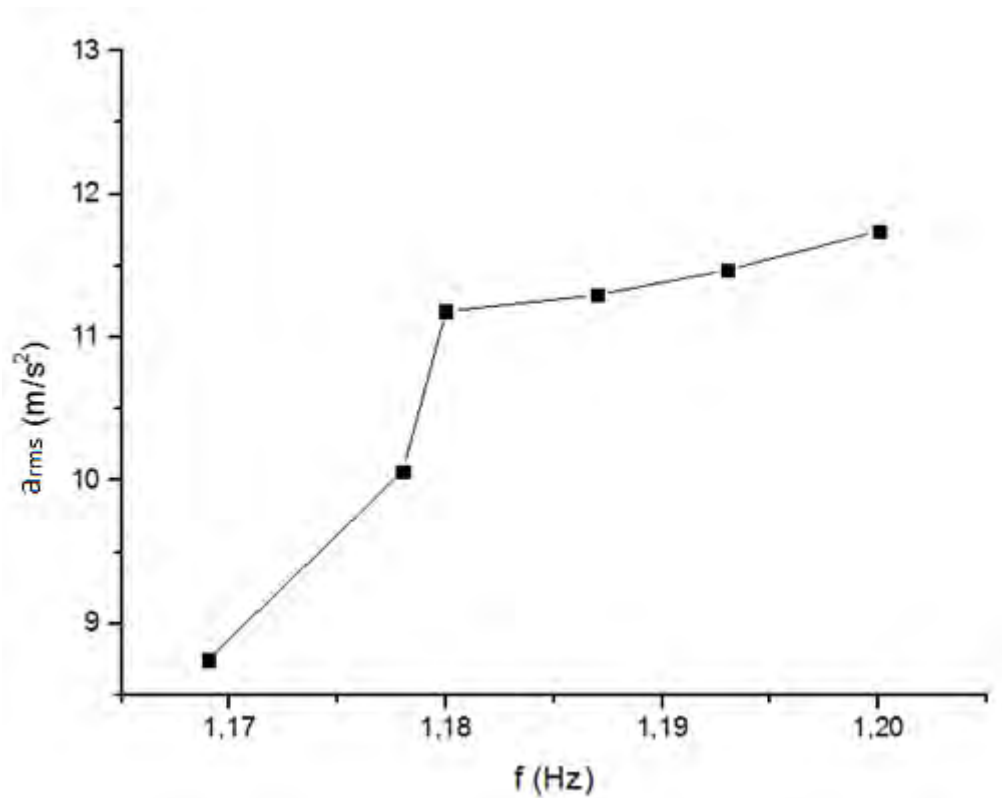
Από τον κατασκευαστή του ενισχυτή KISTLER 5134B, δίνεται η αντιστοιχία των Volts σε μονάδες επιτάχυνσης (m/s^2). Συγκεκριμένα δίνεται ότι:

$$g=9,81 \text{ m/s}^2 \Leftrightarrow 498 \text{ mV}$$

Συνεπώς κάνοντας τη μετατροπή προκύπτουν οι τιμές της τυπικής απόκλισης των επιταχύνσεων σε m/s^2 , σε σχέση με τις συχνότητες του διεγέρτη και παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.29 Η τυπική απόκλιση σε σχέση με την συχνότητα, f , του διεγέρτη για $t=60\text{sec}$



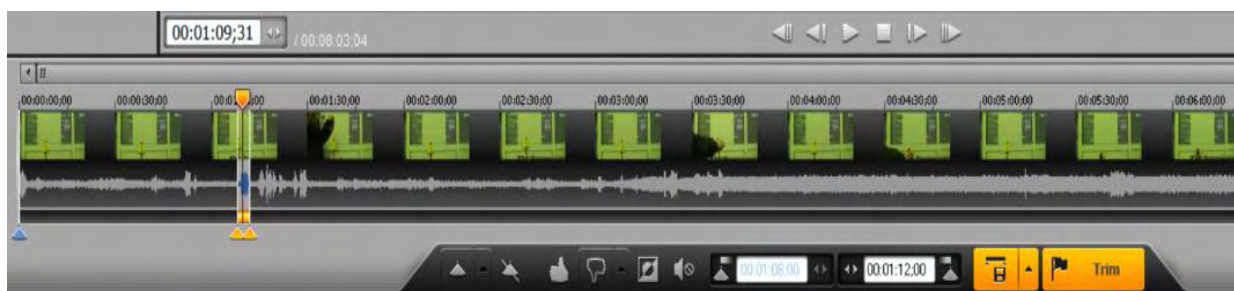
Σχήμα 4.30 Η μέση επιτάχυνση σε σχέση με τη συχνότητα, f , του διεγέρτη για $t=60\text{sec}$

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.29 και 4.30, οι καμπύλες οι οποίες είναι αντίστοιχες, παρουσιάζουν ελαφρώς ακανόνιστη μορφή γεγονός που οφείλεται κυρίως στα σφάλματα της πειραματικής διαδικασίας. Σύμφωνα με τα διαγράμματα, η αύξηση της συχνότητας του βραχίονα-διεγέρτη αυξάνει και τις επιταχύνσεις ενισχύοντας σημαντικά την καταπόνηση της πτέρυγας η οποία ταλαντώνεται με μεγαλύτερα πλάτη και αμείωτο ρυθμό. Η αύξηση αυτή παρατηρείται κυρίως από τη συχνότητα 1,18 Hz. Από αυτή την τιμή και έπειτα, οι τιμές των επιταχύνσεων σταθεροποιούνται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών, από 11,8 (Hz) έως 11,74 (Hz), και η καμπύλη γίνεται γραμμική. Όπως επαληθεύεται και από τη θεωρία των εξαναγκασμένων ταλαντώσεων, για εκείνες τις τιμές συχνοτήτων το ταλαντούμενο σύστημα, οδηγείται σταδιακά στο φαινόμενο του συντονισμού.

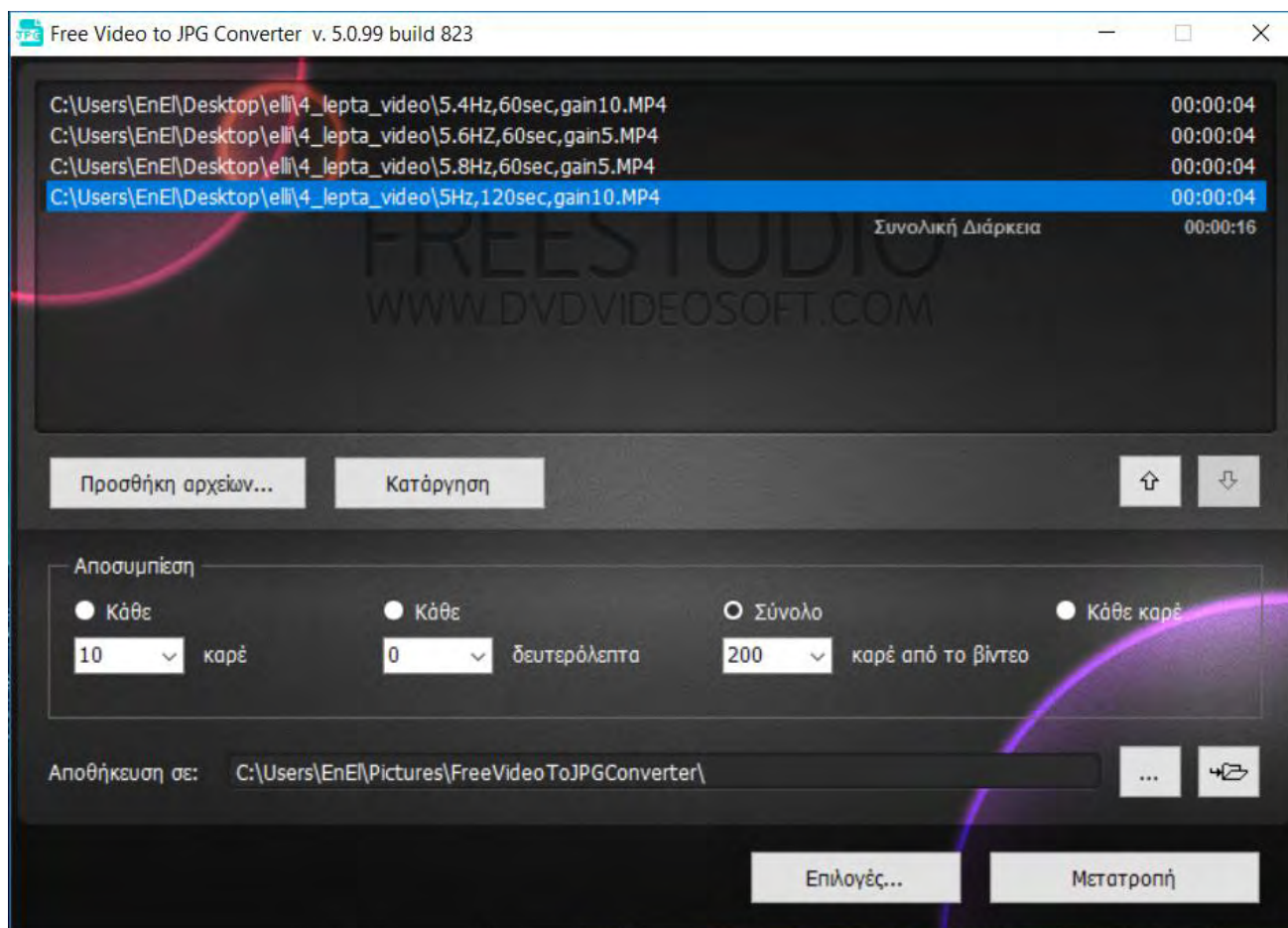
4.2.2 Μετρήσεις επιτάχυνσης από ανάλυση των video.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις στιγμιαίες επιταχύνσεις της πτέρυγας κατά την ταλάντωση ως προς το χρόνο, για τις συγκεκριμένες συχνότητες του μοτέρ.

Για την εύρεση των επιταχύνσεων, χρησιμοποιήθηκε βιντεοκάμερα υψηλής ανάλυσης (1:50) η οποία κατέγραψε την κίνηση του ελεύθερου άκρου της πτέρυγας. Για την ακρίβεια καταγράφηκε η κίνηση του λείζερ, που είναι πακτωμένο στο άκρο της πτέρυγας, το οποίο στοχεύει πάνω σε λευκό βαθμονομημένο ταμπλό. Η διάρκεια των βίντεο στη συνέχεια, μέσα από το πρόγραμμα *Solveig MM*, για λόγους της πειραματικής διαδικασίας καθορίστηκε στα 4 seconds. Γνωρίζοντας την ανάλυση της κάμερας καθώς και τη διάρκεια του κάθε βίντεο, αναλύοντας τα βίντεο σε 200 frames (μέσα από το πρόγραμμα *FreeStudio* / www.videosoft.com), προκύπτει ότι το κάθε frame απέχει από το επόμενο $t=0,02$ seconds.



Σχήμα 4.31 Καθορισμός της διάρκειας των video με το πρόγραμμα *Solveig MM*



Σχήμα 4.32 Ανάλυση των video σε frames με το πρόγραμμα *FreeStudio*

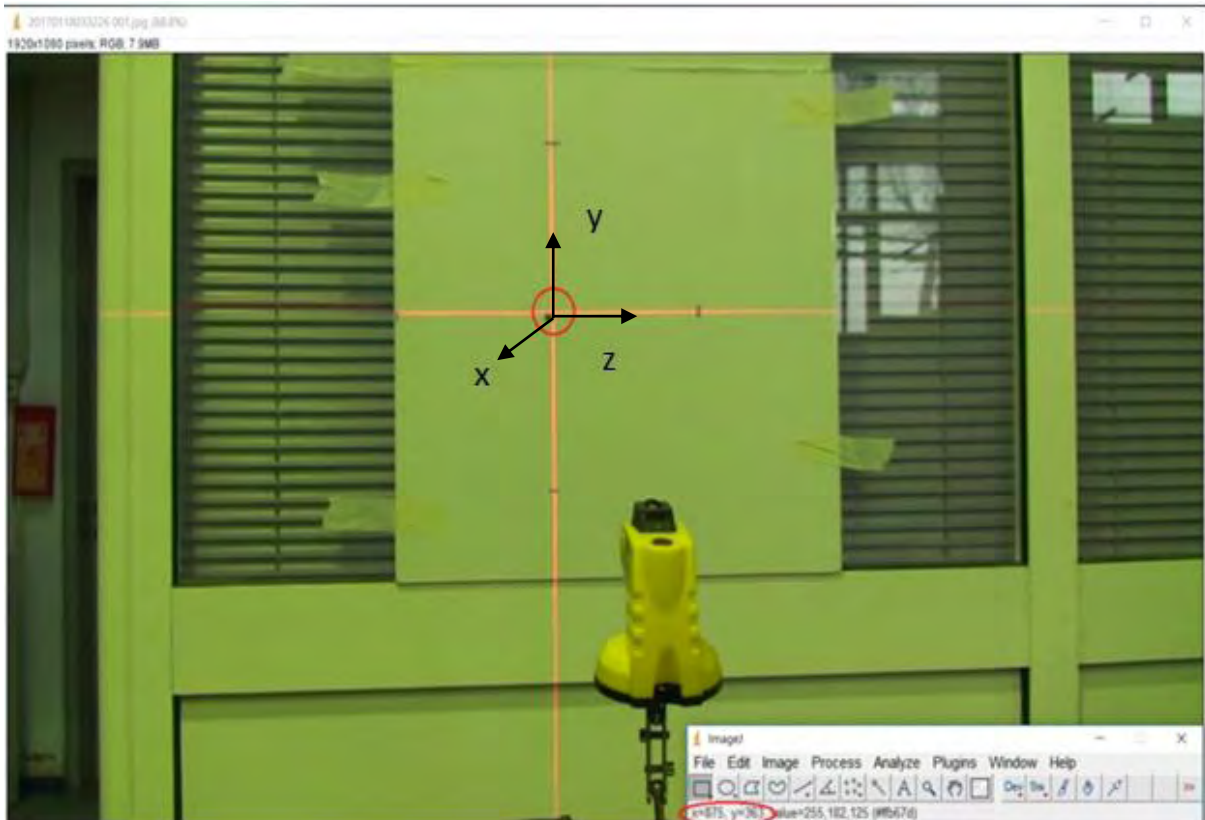
Έτσι, καθώς το λέιζερ στοχεύει στο βαθμονομημένο ταμπλό, μπορεί να υπολογιστεί και η θέση του γ , μετρώντας την απόσταση του σημείου από τη θέση ισορροπίας, αλλά και η χρονική στιγμή, t για κάθε frame.

Οι συντεταγμένες των θέσεων κατά τον κατακόρυφο γ άξονα, πάνω στον οποίο ταλαντώνεται η πτέρυγα, υπολογίστηκαν με τη χρήση του προγράμματος *ImageJ 1.50i*.

Συνεπώς, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας για δυο διαδοχικά frames από τον τύπο:

$$u = \frac{dy}{dt} \quad , \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad 4.1$$

Παρόλο που η πτέρυγα εκτελεί ταλάντωση και όχι ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, ο υπολογισμός της ταχύτητας είναι εφικτός από τον παραπάνω τύπο, καθώς τα διαστήματα χρόνου μεταξύ των διαδοχικών θέσεων, είναι πολύ μικρά.



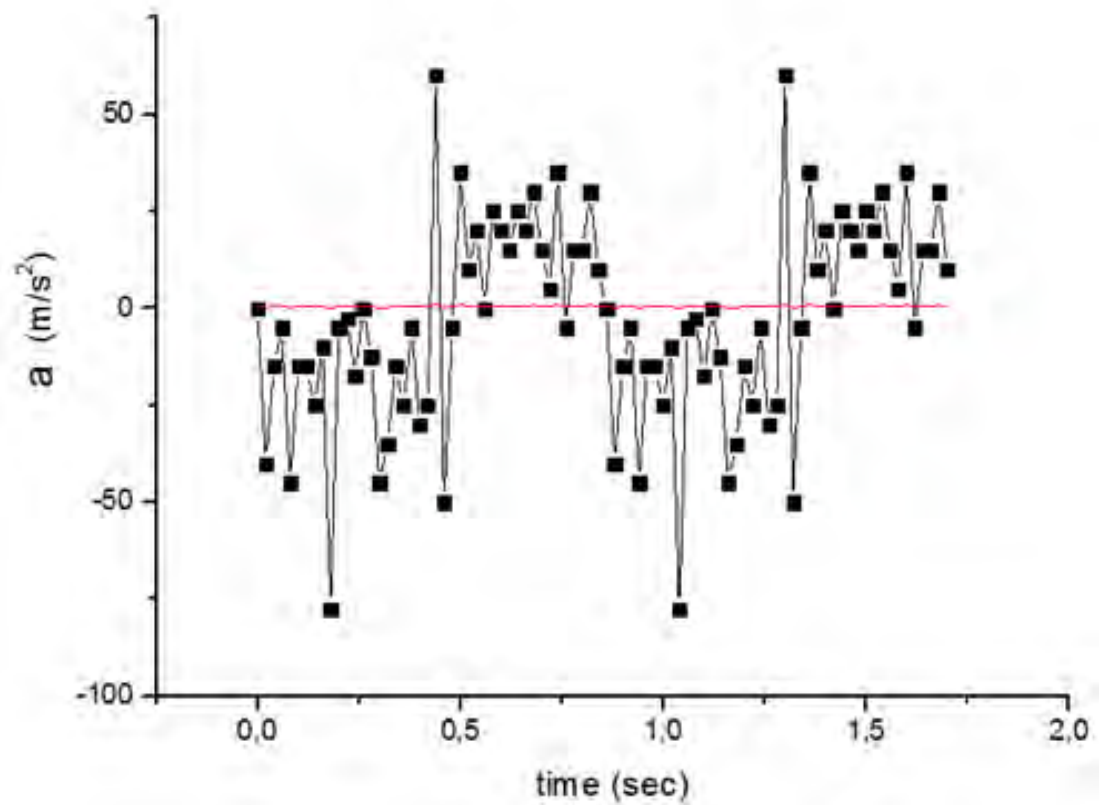
Σχήμα 4.33 Υπολογισμός θέσης με το πρόγραμμα *ImageJ 1.50i*.

Κατ' επέκταση είναι εύκολο να βρεθεί και η επιτάχυνση, ως πρώτη παράγωγος της ταχύτητας, για την αντίστοιχη χρονική στιγμή από τον εξής τύπο:

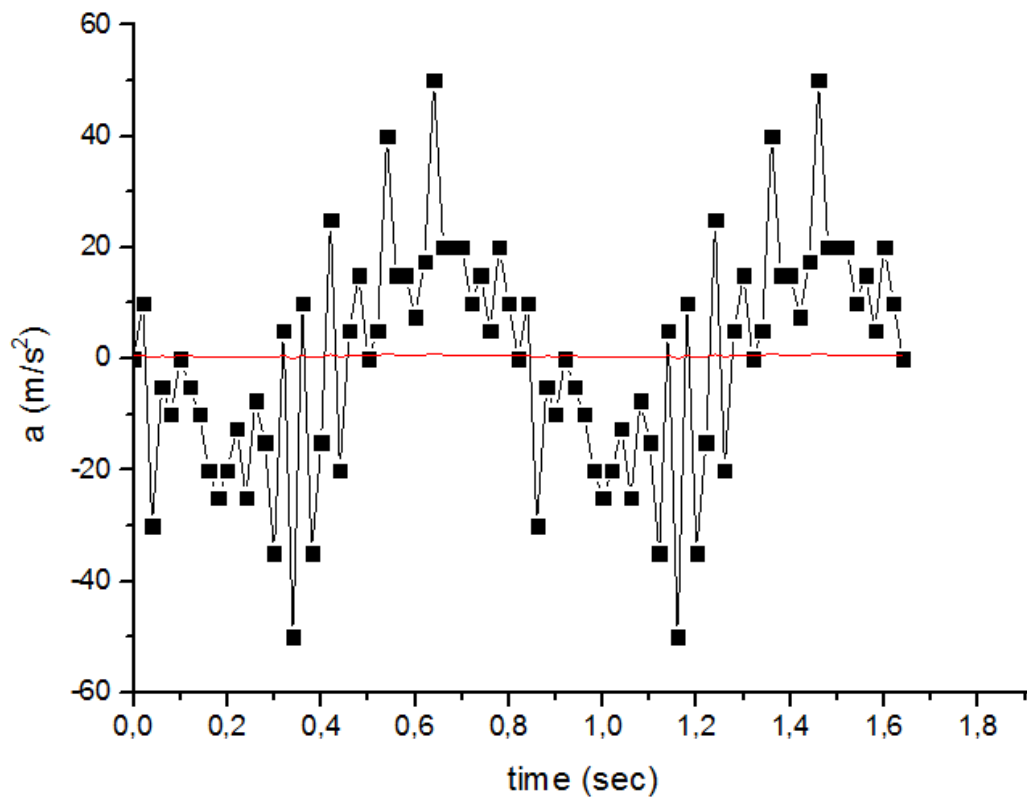
$$\alpha = \dot{u} = \frac{du}{dt}, \quad \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad 4.2$$

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας προκύπτουν τα διαγράμματα της επιτάχυνσης των ταλαντώσεων ως προς το χρόνο, με το Inverter του μοτέρ να είναι ρυθμισμένο σε συχνότητες από 5,4 (Hz) έως και 7 (Hz), και τις αντίστοιχες συχνότητες του περιστρεφόμενου βραχίονα-διεγέρτη, να κυμαίνονται από 1,169 (Hz) έως 1,200 (Hz).

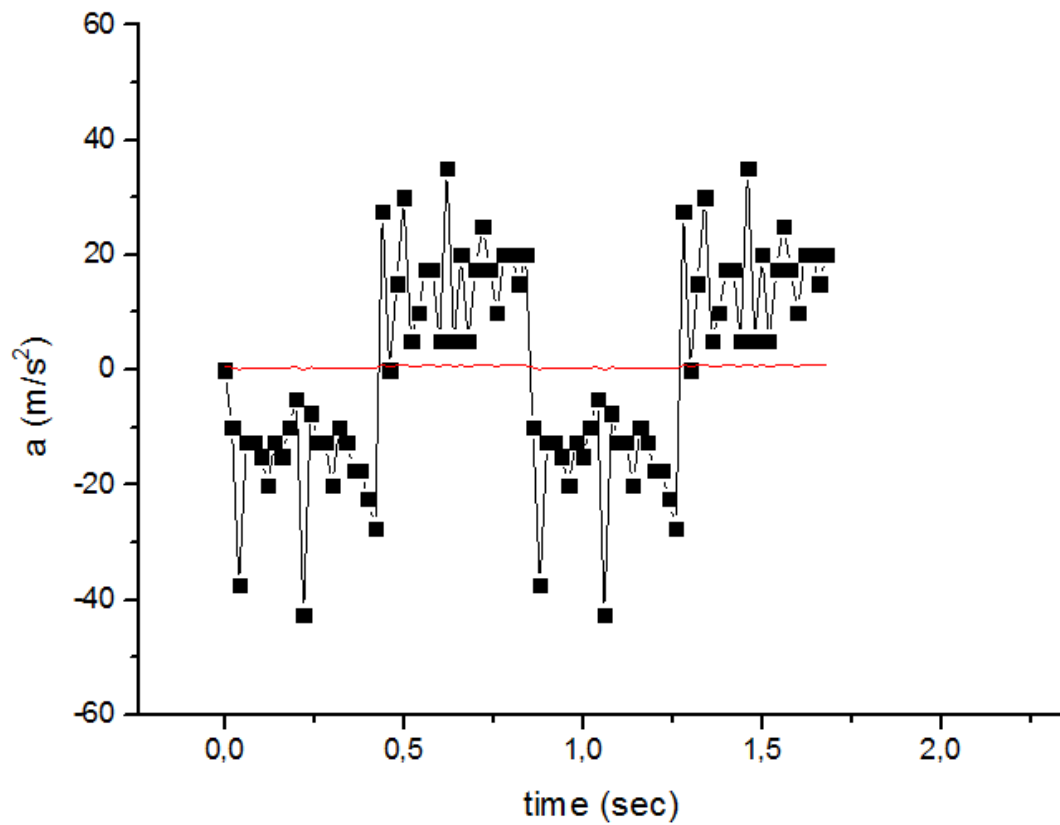
Οι συχνότητες αυτές δεν φτάνουν στον συντονισμό κυρίως για λόγους ασφαλείας κατά την διεξαγωγή των εργαστηριακών πειραμάτων, βρίσκονται όμως κοντά στη συγκεκριμένη περιοχή όπως φάνηκε και από το διάγραμμα της μέσης επιτάχυνσης (σχήμα 4.30), δίνοντάς μας μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις τιμές των μέσων αλλά και των στιγμιαίων επιταχύνσεων.



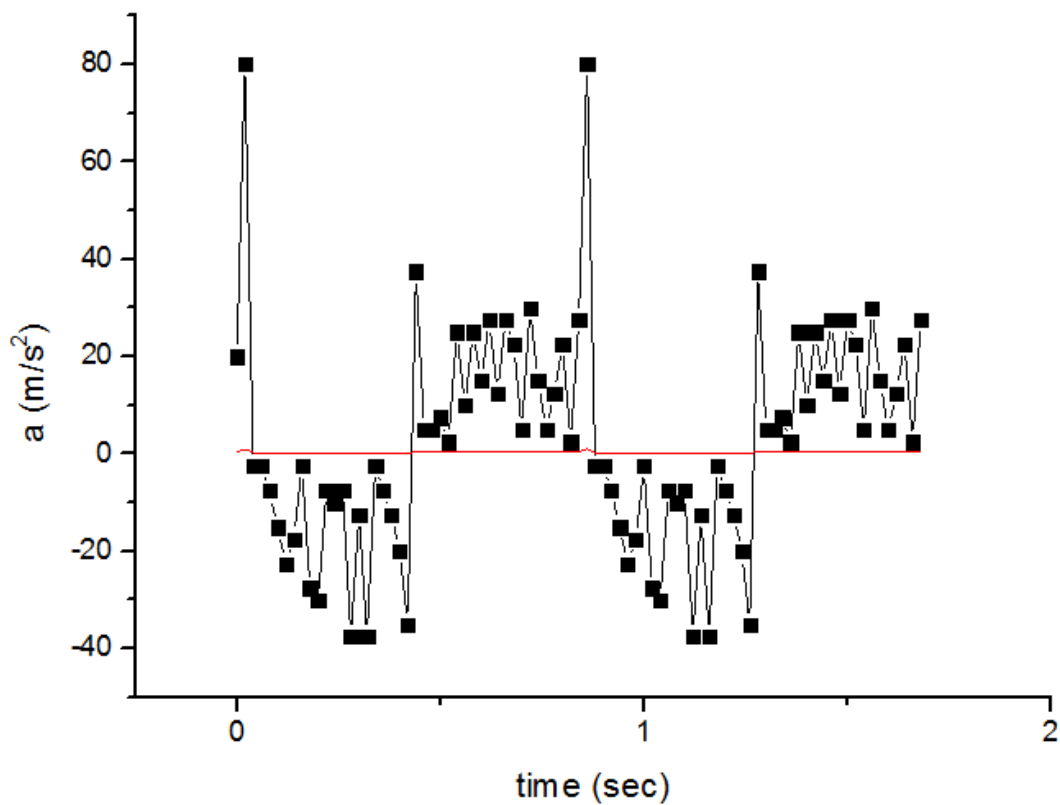
Σχήμα 4.34 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,169 \text{ Hz}$



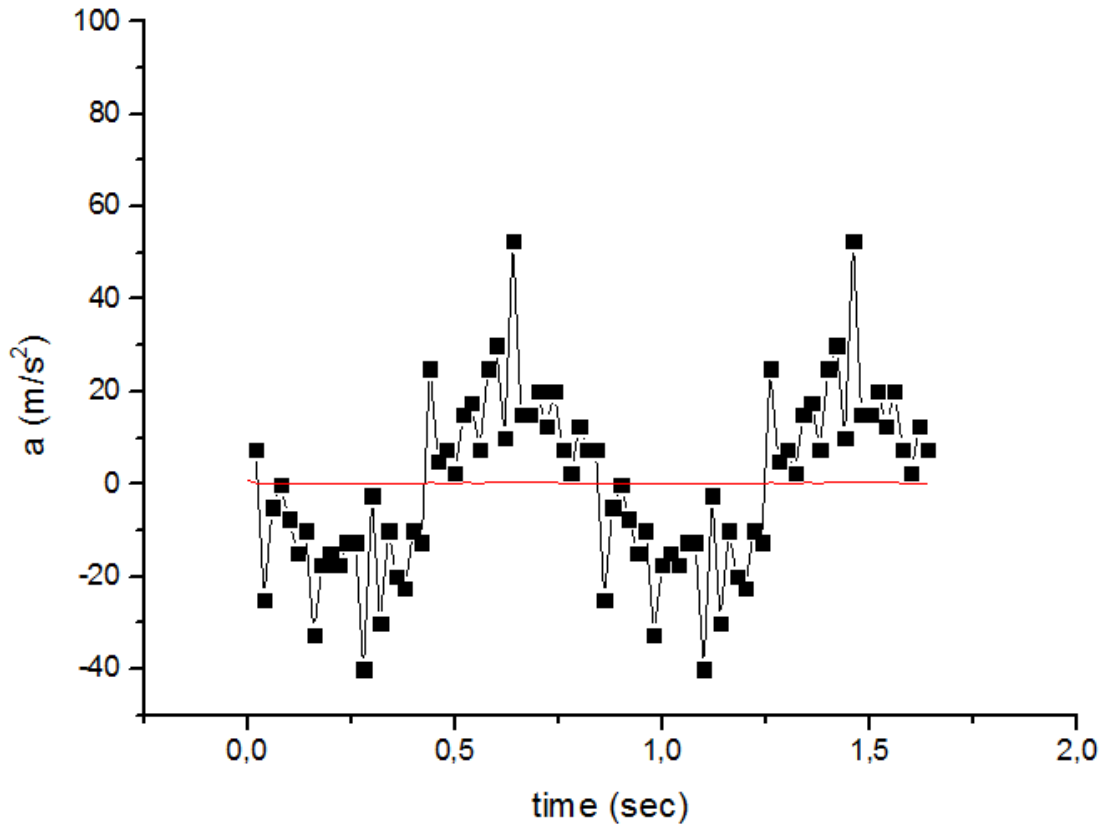
Σχήμα 4.35 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,169 \text{ Hz}$



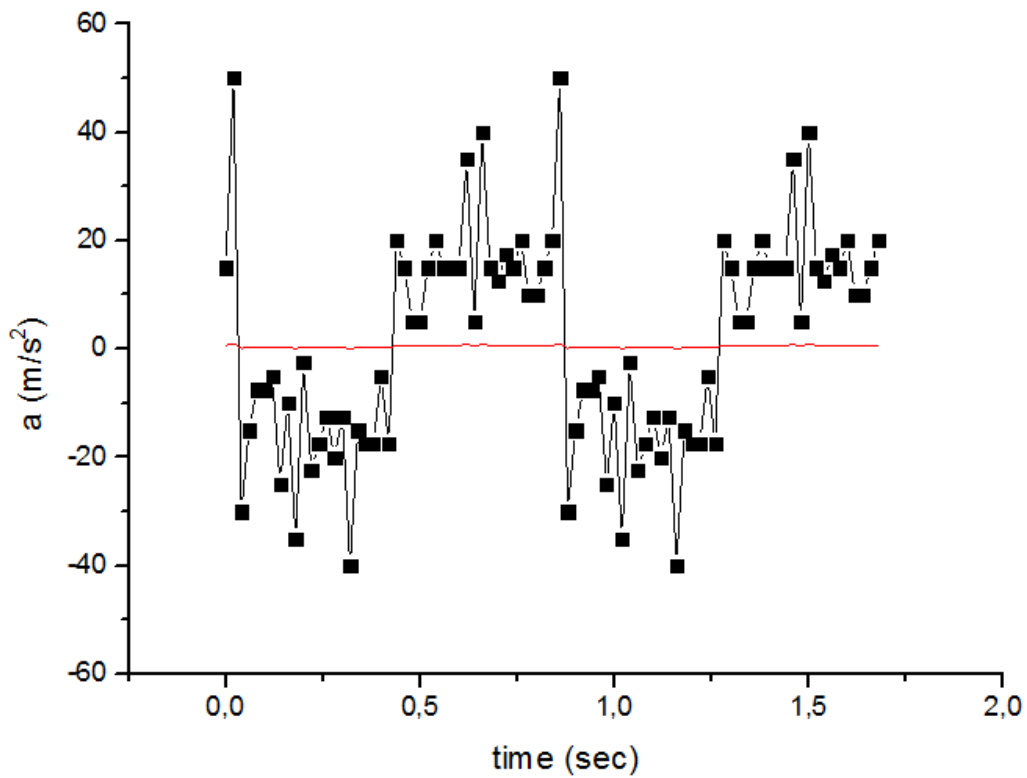
Σχήμα 4.36 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,180$ Hz



Σχήμα 4.37 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,187$ Hz



Σχήμα 4.38 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,193$ Hz



Σχήμα 4.39 Το διάγραμμα επιτάχυνσης -χρόνου για $f=1,200$ Hz

Τα άνω διαγράμματα της επιτάχυνσης ως προς το χρόνο, επαληθεύονται από τη θεωρία των ταλαντώσεων παρατηρώντας την περιοδική μορφή των καμπυλών, οι οποίες αντιπροσωπεύουν δυο πλήρεις ταλαντώσεις. Στο πρώτο μισό της περιόδου, οι τιμές των επιταχύνσεων είναι αρνητικές, στη συνέχεια μηδενίζονται και ακολουθεί το δεύτερο μισό της περιόδου με θετικές τιμές.

Πιο συγκεκριμένα, μέσω των παραπάνω διαγραμμάτων αλλά και του διαγράμματος για τις μέσες επιταχύνσεις (σχήμα 4.30) παρατηρείται ότι:

- Στο σχήμα 4.31, για συχνότητα περιστρεφόμενου βραχίονα (διεγέρτη) $f=1,169$ Hz, η επιτάχυνση είναι μηδενική στην θέση ισορροπίας του συστήματος, παίρνει την ελάχιστη τιμή της $a=-77,5$ m/s², για $t=0,18$ sec και τη μέγιστη τιμή της, $a=60$ m/s² για χρόνο $t=0,44$ sec, ενώ η μέση επιτάχυνση ισούται με $a_{Rms}=8,7482$ m/s². Η περίοδος της ταλάντωσης ισούται με $T=0,848$ sec.
- Στο σχήμα 4.32, για συχνότητα περιστρεφόμενου βραχίονα (διεγέρτη) $f=1,178$ Hz, η επιτάχυνση είναι μηδενική στην θέση ισορροπίας του συστήματος, παίρνει την ελάχιστη τιμή της $a=-50$ m/s², για $t=0,34$ sec και τη μέγιστη τιμή της, $a=50$ m/s² για χρόνο $t=0,64$ sec, ενώ η μέση επιτάχυνση ισούται με $a_{Rms}=10,0621$ m/s². Η περίοδος της ταλάντωσης ισούται με $T=0,820$ sec.
- Στο σχήμα 4.33, για συχνότητα περιστρεφόμενου βραχίονα (διεγέρτη) $f=1,180$ Hz, η επιτάχυνση είναι μηδενική στην θέση ισορροπίας του συστήματος, παίρνει την ελάχιστη τιμή της $a=-42,5$ m/s², για $t=0,22$ sec και τη μέγιστη τιμή της, $a=35$ m/s² για χρόνο $t=0,62$ sec, ενώ η μέση επιτάχυνση ισούται με $a_{Rms}=11,1813$ m/s². Η περίοδος της ταλάντωσης ισούται με $T=0,844$ sec.
- Στο σχήμα 4.34, για συχνότητα περιστρεφόμενου βραχίονα (διεγέρτη) $f=1,187$ Hz, η επιτάχυνση είναι μηδενική στην θέση ισορροπίας του συστήματος, παίρνει την ελάχιστη τιμή της $a=-37,5$ m/s², για $t=0,28$ sec και τη μέγιστη τιμή της, $a=80$ m/s² για χρόνο $t=0,02$ sec, ενώ η μέση επιτάχυνση ισούται με $a_{Rms}=11,2950$ m/s². Η περίοδος της ταλάντωσης ισούται με $T=0,830$ sec.
- Στο σχήμα 4.35, για συχνότητα περιστρεφόμενου βραχίονα (διεγέρτη) $f=1,193$ Hz, η επιτάχυνση είναι μηδενική στην θέση ισορροπίας του συστήματος, παίρνει την ελάχιστη τιμή της $a=-40$ m/s², για $t=0,28$ sec και τη μέγιστη τιμή της, $a=52,5$ m/s² για χρόνο $t=0,64$ sec, ενώ η μέση επιτάχυνση ισούται με $a_{Rms}=11,4703$ m/s². Η περίοδος της ταλάντωσης ισούται με $T=0,819$ sec.
- Στο σχήμα 4.36, για συχνότητα περιστρεφόμενου βραχίονα (διεγέρτη) $f=1,200$ Hz, η επιτάχυνση είναι μηδενική στην θέση ισορροπίας του συστήματος, παίρνει την ελάχιστη τιμή της $a=-40$ m/s², για $t=0,32$ sec και τη μέγιστη τιμή της, $a=40$ m/s² για χρόνο $t=0,66$ sec, ενώ η μέση επιτάχυνση ισούται με $a_{Rms}=11,7411$ m/s². Η περίοδος της ταλάντωσης ισούται με $T=0,816$ sec.

Όπως προκύπτει για το πρώτο σετ ταλαντώσεων, όσο το σύστημα πλησιάζει στο συντονισμό, οι μέσες τιμές των επιταχύνσεων αυξάνονται. Οι μεμονωμένες τιμές των στιγμιαίων επιταχύνσεων ωστόσο, για κάθε μια από τις συγκεκριμένες συχνότητες διέγερσης, δεν ακολουθούν σταθερά αυτή την αύξηση, γεγονός που οφείλεται και σε σφάλματα της πειραματικής διαδικασίας.

Επίσης, κάνοντας τη μετατροπή των περιόδων των ταλαντώσεων (sec) σε συχνότητες (Hz), διαπιστώνεται ότι υπάρχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ της συχνότητας του βραχίονα f , και της πραγματικής συχνότητας F_T , με την οποία ταλαντώνεται το σύστημα, οι οποίες οφείλονται σε σφάλματα κατά τη πειραματική διαδικασία.

Πίνακας 4.3: Οι συχνότητες των ταλαντώσεων ανάλογα με την περίοδο

T (sec)	F_T (Hz)
0,848	1,17925
0,82	1,21951
0,844	1,18483
0,83	1,20482
0,819	1,221
0,816	1,22549

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, ακολούθησε το δεύτερο σετ ταλαντώσεων χαμηλότερων συχνοτήτων. Συγκεκριμένα η πτέρυγα ταλαντώθηκε με το inverter του μοτέρ να είναι ρυθμισμένο σε συχνότητες από 2,6 έως 4,4 Hz. Σε αυτές τις συχνότητες όμως, παρατηρήθηκε αρκετά διαφορετική συμπεριφορά του ταλαντευμένου συστήματος σε σχέση με το πρώτο σετ ταλαντώσεων.

Συγκεκριμένα, η ένταση των ταλαντώσεων ξεκίνησε να μειώνεται κατά τον κατακόρυφο άξονα, y και να αυξάνεται στον οριζόντιο άξονα, x . Η ένταση της ταλάντωσης κατά τον οριζόντιο άξονα δημιούργησε έντονους κραδασμούς, καθιστώντας αδύνατη την καταγραφή της κίνησης με τη χρήση του λέιζερ, το οποίο υπενθυμίζεται, ότι στηρίζεται με ειδικό σφικτήρα στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας καταγράφοντας την κίνηση. Εκτός αυτού, το επιταχυνσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, είναι μιας διεύθυνσης που στη προκειμένη περίπτωση σημαίνει ότι είναι ικανό να υπολογίσει την κίνηση αποκλειστικά και μόνο κατά τον κατακόρυφο άξονα y . Συνεπώς, για τις συγκεκριμένες ταλαντώσεις είναι εφικτή μια απλή ποιοτική ανάλυση μέσα από την προσεκτική παρατήρηση των video με την ταλαντωμένη πτέρυγα.

Η πτέρυγα λοιπόν, εμφανίζεται να εκτελεί έντονες διαμήκης ταλαντώσεις, φαινόμενο lead-lag oscillation, σε συνδυασμό με εγκάρσιες ταλαντώσεις μικρότερου πλάτους και αισθητά αυξημένων επιταχύνσεων, φαινόμενο flapping. Φαίνεται επίσης, ειδικά για συχνότητα inverter του μοτέρ από 2,8 Hz και μετά, ότι το ελεύθερο άκρο της πτέρυγας ξεκινά να ταλαντώνεται με διαφορά φάσης σε σχέση με το μέσο της. Η σύνθετη αυτή κατάσταση απαιτεί νέους υπολογισμούς για την ανάλυση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς, αφού διαμορφώνονται νέες συνθήκες και απαιτείται εκ νέου ο προσδιορισμός της συχνότητας συντονισμού. Οι

υπολογισμοί όμως αυτοί, δεν καθίσταται δυνατό να πραγματοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός των εργαστηριακών πειραμάτων που έγιναν κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν ο προσδιορισμός της ελαστικής συμπεριφοράς σύγχρονης πτέρυγας ελικοπτέρου.

Αρχικά η πτέρυγα υποβλήθηκε σε στατικές σημειακές φορτίσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα y , με φορά από πάνω προς τα κάτω και αντίστροφα. Μέσω των πειραμάτων αυτών προέκυψαν σημαντικά ποιοτικά συμπεράσματα σε σχέση με το βαθμό δυσκαμψίας της πτέρυγας. Συγκεκριμένα για φόρτιση στις αρχικές θέσεις, κοντά στο ελεύθερο άκρο, παρατηρήθηκε ότι οι καμπύλες στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης είναι γραμμικές. Η αύξηση δηλαδή του μεγέθους των φορτίων, οδηγεί σε ανάλογη αύξηση των μετατοπίσεων των σημείων κατά μήκος της πτέρυγας από την αρχική θέση ισορροπίας επιβεβαιώνοντας τη θεωρία της απλής κάμψης μονόπακτης δοκού (σχέση 2.9). Για αυτές τις θέσεις παρατηρείται επίσης σύγκλιση των καμπυλών της ακμής προσβολής και φυγής για τις ίδιες τιμές φόρτισης. Όσο οι σημειακές φορτίσεις πλησιάζουνε στην πάκτωση, αυτή η γραμμικότητα σιγά σιγά φθίνει, ενώ δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση στις δυο καμπύλες (ακμή προσβολής – ακμή φυγής). Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται απόλυτα, εξαιτίας της ίδια της πάκτωσης, όπου τα σημεία στη συγκεκριμένη περιοχή αντιστέκονται στις μετατοπίσεις.

Όπως παρατηρήθηκε γενικά με την ολοκλήρωση των συγκεκριμένων πειραμάτων, οι τάσεις που αναπτύχθηκαν διατηρήθηκαν σταθερά κάτω από την κρίσιμη τιμή του ορίου ελαστικότητας. Ως αποτέλεσμα αυτού, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η πτέρυγα παρουσίασε καθαρά ελαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες εξαλείφονταν μετά την απόσυρση της σημειακής δύναμης, χωρίς τη δημιουργία αστοχιών.

Οι επόμενες φορτίσεις που ακολούθησαν ως προς τον x άξονα φανέρωσαν ποιοτικά εμφανώς μεγαλύτερη δυσκαμψία. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα, για στατική φόρτιση κατά τον κάθετο άξονα y και για οριζόντια φόρτιση κατά τον x , στο ελεύθερο άκρο της πτέρυγας, για παρόμοια φορτία, προκύπτει σημαντική απόκλιση στις τιμές της μετατόπισης.

Φαίνεται συνεπώς πως το υλικό λόγω της πολυπλοκότητας της εσωτερικής δομής του, παρουσιάζει ιδιότητες που αλλάζουν ανάλογα με την διεύθυνση, χαρακτηρίζεται δηλαδή από ανισοτροπία, όπως άλλωστε και τα περισσότερα σύνθετα υλικά.

Στη συνέχεια, ακολούθησαν τα δυναμικά πειράματα με στόχο την καταγραφή των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται σε διαφορετικές συχνότητες. Έτσι η πτέρυγα υποβλήθηκε σε εξαναγκασμένες ταλαντώσεις με τις συχνότητες του Inverter να ρυθμίζονται από 5 έως και 7 Hz, και από 2,6 έως 4,4 Hz.

Στο πρώτο σετ συχνοτήτων, κυριαρχούν οι εγκάρσιες ταλαντώσεις (φαινόμενο flapping). Συγκεκριμένα, η πτέρυγα παρουσίασε ταλάντωση κατά τον κατακόρυφο y άξονα με τις αντίστοιχες επιταχύνσεις να αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας του διεγέρτη. Μάλιστα οι γραφικές παραστάσεις επιτάχυνσης - χρόνου, για αυτές τις συχνότητες, προσεγγίζουν κατά μέση τιμή την κυματομορφή της θεωρίας των απλών αρμονικών ταλαντώσεων.

Στο δεύτερο σετ μικρότερης κλίμακας συχνοτήτων, η ταλαντωτική συμπεριφορά της πτέρυγας είχε σημαντικές διαφοροποιήσεις. Εμφανίστηκε έντονη διαμήκης ταλάντωση, με το φαινόμενο των lead-lag να υπερισχύει.

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 (pitching). Ωστόσο αν και η περαιτέρω ανάλυση των δυο τελευταίων περιπτώσεων δεν αποτέλεσαν κομμάτι της παρούσας εργασίας, έγινε μια πρώτη ποιοτική ανάλυση του φαινομένου lead-lag μέσα από τα video του εργαστηρίου.

Τέλος, να σημειωθεί πως στην παρούσα πειραματική μελέτη ακολουθήθηκε μη καταστρεπτική μέθοδος για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Το γεγονός αυτό δεν μας επέτρεψε να φτάσουμε με ακρίβεια στην τιμή του συντονισμού, δίνει όμως τη δυνατότητα συνέχισης της διερεύνησης του θέματος με σκοπό την ανάλυση και τον υπολογισμό των ποιοτικών συμπερασμάτων που προέκυψαν. Εξασφάλισε επίσης την ασφαλή διεξαγωγή των μετρήσεων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Helis.com|Helicopter History Site.*
2. *How products are made|www.madehow.com/Volume-1/Helicopter.html*
3. *SLIDEPLAYER.com/slide/4420987*
4. *Ερρίκος Σταπουντζής, Σημειώσεις Αεροδυναμικής, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος 2013.*
5. *Helicopter Maintenance: "Rotor blade track and balance"*
6. *Helicopter Maintenance: "From wood to Composite Materials-The evolution of rotor blades"*
7. *University of Liverpool, School of Engineering: Materials Classroom www.whystudymaterials.ac.uk/casestudies/helicopter.asp*
8. *Κερμανίδης Θ., Αντοχή των Υλικών I & II, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2009*
9. *Δέντσορας Αργύρης, Μετρήσεις, Ταλαντώσεις δοκού (θεωρία και ασκήσεις), Εργαστήριο Υπολογισμού και Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστημίου Πατρών, 2013.*
10. *Robert P. Coleman, "A preliminary theoretical study of helicopter blade, Flutter involving dependence upon coning angle and Pitch setting", National Advisory Committee for Aeronautics.*
11. *Sudarshan N. koushik, "A new experimental approach to study helicopter blade-Vortex interaction noise", University of Maryland.*
12. *BellHelicopter.com/commercial/bell huey-ii.*
13. *Application of Bifurcation Methods to Nonlinear Flight Dynamics Problems, M. G. Goman, G. I. Zagainov, A. V. Khramtsovsky.*
14. *Aerodynamic design optimization of helicopter rotor blades including airfoils shape for hover performance. / Chinese Journal of Aeronautics.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

☐ Στατικές φορτίσεις από πάνω προς τα κάτω:

Σημείωση:

Στην πρώτη στήλη αναγράφεται η ασκούμενη δύναμη σε kg.

Στις επόμενες στήλες αναγράφεται η κάθετη απόσταση (σε mm) του πτερυγίου από το έδαφος στις θέσεις 1, 2, 3, 4 και 5 αντίστοιχα, μετρώντας κατά μήκος της γραμμής προσβολής και φυγής.

Για κάθε φορτίο οι μετρήσεις της επάνω γραμμής αφορούν την ακμή προσβολής ενώ της κάτω γραμμής την ακμή φυγής.

Πίνακας 1: Αρχική θέση Ισοροπίας

	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5
ακμή προσβολής (mm)	1020	1020	1020	1030	1040
ακμή φυγής (mm)	930	930	950	970	1000

Πίνακας 2: Οι θέσεις του ακροπτερυγίου ανάλογα με τη φόρτιση

Φορτίο (kg)	Φορτίο (N)	Θέση 1 (mm)
0	0	1020 930
8	78,48	950 852
16,5	161,8	888 792
25	245,25	830 730
32,5	318,82	780 680
40	392,4	725 625

Στατικές φορτίσεις από κάτω προς τα πάνω:

Πίνακας 3: Φόρτιση στη θέση $z_1=0$ από πάνω προς τα κάτω

Ασκούμενο στατικό φορτίο στη θέση 1						
Φορτίο (kg)	Φορτίο (N)	θέση 1 (mm)	θέση 2 (mm)	θέση 3 (mm)	θέση 4 (mm)	θέση 5 (mm)
10	98,1	1090	1060	1050	1050	1050
		1000	980	980	990	1010
20	196,2	1160	1120	1090	1075	1060
		1070	1040	102	1015	1020
30	294,3	1240	1190	1130	1100	1060
		1150	1100	1060	1040	1030
40	392,4	1300	1240	1170	1120	1090
		1210	1140	1100	1065	1045
50	490,5	1380	1300	1210	1150	1100
		1290	1200	1140	1090	1060
60	588,6	1440	1350	1250	1170	1120
		1350	1250	1180	1110	1080
70	686,7	1510	1410	1290	1190	1120
		1420	1300	1215	1140	1080
80	784,8	1590	1470	1330	1220	1130
		1500	1360	1250	1160	1090

Πίνακας 4: Φόρτιση στη θέση $z_2=1\text{m}$ από πάνω προς τα κάτω

Ασκούμενο στατικό φορτίο στη θέση 2						
Φορτίο (kg)	Φορτίο (N)	θέση 1 (mm)	θέση 2 (mm)	θέση 3 (mm)	θέση 4 (mm)	θέση 5 (mm)
10	98,1	1110	1075	1065	1060	1055
		1015	1000	990	1000	1010
20	196,2	1160	1130	1090	1075	1065
		1060	1030	1020	1020	1020
30	294,3	1190	1160	1110	1090	1070
		1100	1060	1040	1030	1030
40	392,4	1260	1215	1145	1110	1080
		1160	1100	1070	1050	1040
50	490,5	1320	1265	1180	1130	1090
		1220	1150	1105	1070	1050
60	588,6	1360	1295	1195	1140	1100
		1260	1170	1120	1080	1055
70	686,7	1420	1345	1230	1160	1110
		1320	1220	1160	1100	1065
80	784,8	1460	1380	1250	1180	1115
		1360	1250	1180	1120	1070

Πίνακας 5: Φόρτιση στη θέση $z_3=2\text{m}$ από πάνω προς τα κάτω

Ασκούμενο στατικό φορτίο στη θέση 3						
Φορτίο (kg)	Φορτίο (N)	θέση 1 (mm)	θέση 2 (mm)	θέση 3 (mm)	θέση 4 (mm)	θέση 5 (mm)
10	98,1	1070	1050	1050	1050	1050
		970	965	965	990	1010
20	196,2	1110	1080	1060	1060	1060
		1010	1000	1000	1000	1010
30	294,3	1150	1120	1090	1080	1070
		1050	1030	1020	1020	1020
40	392,4	1180	1140	1110	1090	1070
		1080	1060	1040	1030	1030
50	490,5	1220	1170	1140	1110	1080
		1120	1090	1050	1040	1040

60	588,6	1260	1205	1160	1120	1090
		1165	1110	1070	1060	1040
70	686,7	1300	1240	1190	1130	1095
		1205	1150	1100	1070	1050

Πίνακας 6: Φόρτιση στη θέση $z_4=3\text{m}$ από πάνω προς τα κάτω

Ασκούμενο στατικό φορτίο στη θέση 4						
Φορτίο (kg)	Φορτίο (N)	θέση 1 (mm)	θέση 2 (mm)	θέση 3 (mm)	θέση 4 (mm)	θέση 5 (mm)
10	98,1	1050	1035	1030	1045	1045
		955	955	960	990	1000
20	196,2	1075	1060	1045	1055	1055
		980	975	980	1000	1010
30	294,3	1100	1070	1060	1060	1060
		1000	990	990	1000	1010
40	392,4	1120	1090	1075	1070	1065
		1025	1010	1000	1015	1020
50	490,5	1140	1110	1090	1080	1070
		1050	1020	1015	1020	1030
60	588,6	1170	1130	1100	1090	1075
		1070	1040	1030	1030	1030

Πίνακας 7: Φόρτιση στη θέση $z_5=4\text{m}$ από πάνω προς τα κάτω

Ασκούμενο στατικό φορτίο στη θέση 5						
Φορτίο (kg)	Φορτίο (N)	θέση 1 (mm)	θέση 2 (mm)	θέση 3 (mm)	θέση 4 (mm)	θέση 5 (mm)
10	98,1	1030	1020	1020	1035	1040
		940	940	950	980	1000
20	196,2	1050	1030	1030	1040	1040
		950	950	960	985	1010

30	294,3	1060 960	1040 960	1035 965	1045 990	1045 1010
40	392,4	1070 970	1050 970	1040 970	1050 990	1050 1015
50	490,5	1080 990	1060 980	1050 980	1055 1000	1050 1015
60	588,6	1090 1000	1070 990	1060 990	1060 1000	1055 1020

☐ Στατικές φορτίσεις κατά τον x άξονα:

Σημείωση:

Στην πρώτη στήλη αναγράφεται η εφαρμοζόμενη δύναμη σε kg. Στην δεύτερη στήλη αναγράφονται οι μετατοπίσεις του σημείου που ταυτίζεται με το αεροδυναμικό κέντρο της πτέρυγας από τον αεροδυναμικό άξονα μετά την επιβολή του φορτίου, για μετατόπιση με φορά προς τα δεξιά (Δx_1). Στην τρίτη στήλη αναγράφονται οι αντίστοιχες τιμές για φόρτιση με αντίθετη φορά (Δx_2).

Πίνακας 8: Φόρτιση στον x άξονα

Φορτίο kg	Φορτίο N	Δx_1 mm	Δx_2 mm
2,5	24,525	5	4
5	49,05	5,5	7
7,5	73,575	6	8
10	98,1	8	9
12,5	122,625	10	10
15	147,15	12	11
17,5	171,675	14	13
20	196,2	16	14

22,5	220,725	18	16
25	245,25	20	19
30	294,3	24	24

□ Δυναμικές Φορτίσεις :

Πίνακες τιμών Τυπικής Απόκλισης και Επιτάχυνσης για συγκεκριμένη συχνότητα .

Σημείωση:

Οι τιμές προέκυψαν από επιταχυνσιόμετρο και μέσα από το λογισμικό *Labview* (*National Instruments*).

Οι τιμές της πρώτης στήλης εκφράζουν την τυπική απόκλιση (St.Dev) όπως αυτή καταγράφεται στην οθόνη του υπολογιστή ενισχυμένη με gain 5. Διαιρώντας συνεπώς την πρώτη στήλη με τον αριθμό πέντε (5), προκύπτει η δεύτερη στήλη που εκφράζει την καθαρή τυπική απόκλιση σε μονάδες mV.

Μέσα από τη σχέση:

$$a \text{ (m/s}^2\text{)} = \text{St.Deviation (mV)}_{\text{gain}=0} * 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)} / 498$$

προκύπτει η Τρίτη στήλη που εκφράζει την επιτάχυνση (a) για κάθε συχνότητα του inverter του μοτέρ, η οποία αναγράφεται στην τέταρτη στήλη (Συχνότητα Inverter).

Πίνακας 9: Το πρώτο σετ δυναμικών φορτίσεων

Από 5,4 έως 7 Hz για 60sec			
St.Dev, gain=5	St.Dev, gain=0	a Επιτάχυνση	Συχνότητα Inverter
V	mV	m/s ²	Hz
2,21159	442,318	8,748265	5,4
2,54375	508,75	10,06217	5,6
2,82667	565,334	11,1813	5,8
2,85542	571,084	11,29503	6

2,89974	579,948	11,47034	6,4
2,96821	593,642	11,74119	7

Πίνακας 10: Το δεύτερο σετ δυναμικών φορτίσεων

Από 2,6 έως 4,4 Hz για 40sec			
Τυπική Απόκλιση gain=5	Τυπική Απόκλιση gain=0	a Επιτάχυνση	Συχνότητα Inverter
V	mV	m/s ²	Hz
1,74438	348,876	6,900148	2,6
2,41432	482,864	9,550193	2,8
2,97331	594,662	11,76136	3
3,2644	652,88	12,91281	3,2
3,31363	662,726	13,10754	3,4
3,55865	711,73	14,07676	3,6
3,53721	707,442	13,99195	3,8
3,52723	705,446	13,95247	4
3,51897	703,794	13,9198	4,4

Πίνακες τιμών επιταχύνσεων ανά χρονική στιγμή για κάθε συχνότητα διέγερσης.

Όπου,

Time: η χρονική στιγμή

γ: η απόσταση από τη θέση ισορροπίας

Δγ: η απόσταση δυο διαδοχικών θέσεων

υ: η στιγμιαία ταχύτητα

α: η στιγμιαία επιτάχυνση

Πίνακας 11 Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f = 1,169 \text{ Hz}$

Time (sec)	y (mm)	Δy (mm)	u (m/sec)	a (m/sec ²)
0	0	0	4	0
0.02	64	64	3,2	-40
0.04	122	58	2,9	-15
0.06	182	60	3	5
0.08	224	42	2,1	-45
0.10	260	36	1,8	-15
0.12	302	42	2,1	15
0.14	334	32	1,6	-25
0.16	370	36	1,8	10
0.18	375	5	0,25	-77,5
0.20	378	3	0,15	-5
0.22	380	2	0,1	-2,5
0.24	375	-5	-0,25	-17,5
0.26	370	-5	-0,25	0
0.28	360	-10	-0,5	-12,5
0.30	332	-28	-1,4	-45
0.32	290	-42	-2,1	-35
0.34	254	-36	-1,8	15
0.36	208	-46	-2,3	-25
0.38	164	-44	-2,2	5
0.40	108	-56	-2,8	-30
0.42	42	-66	-3,3	-25
0.44	0	-42	-2,1	60
0.46	-62	-62	-3,1	-50
0.48	-126	-64	-3,2	-5
0.50	-176	-50	-2,5	35
0.52	-222	-46	-2,3	10
0.54	-260	-38	-1,9	20
0.56	-298	-38	-1,9	0
0.58	-326	-28	-1,4	25
0.60	-346	-20	-1	20
0.62	-360	-14	-0,7	15
0.64	-364	-4	-0,2	25
0.66	-360	4	0,2	20

0.68	-344	16	0,8	30
0.70	-322	22	1,1	15
0.72	-298	24	1,2	5
0.74	-260	38	1,9	35
0.76	-224	36	1,8	-5
0.78	-182	42	2,1	15
0.80	-134	48	2,4	15
0.82	-74	60	3	30
0.84	15	89	4,45	10

Πίνακας 12: Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f = 1,178$ Hz

Time (sec)	y (mm)	Δy (mm)	u (m/sec)	a (m/sec ²)
0	0	0	2,8	0
0.02	60	60	3	10
0.04	108	48	2,4	-30
0.06	154	46	2,3	-5
0.08	196	42	2,1	-10
0.10	238	42	2,1	0
0.12	278	40	2	-5
0.14	314	36	1,8	-10
0.16	342	28	1,4	-20
0.18	360	18	0,9	-25
0.20	370	10	0,5	-20
0.22	375	5	0,25	-12,5
0.24	370	-5	-0,25	-25
0.26	362	-8	-0,4	-7,5
0.28	348	-14	-0,7	-15
0.30	320	-28	-1,4	-35
0.32	294	-26	-1,3	5
0.34	248	-46	-2,3	-50
0.36	206	-42	-2,1	10
0.38	150	-56	-2,8	-35
0.40	88	-62	-3,1	-15
0.42	36	-52	-2,6	25
0.44	-24	-60	-3	-20

0.46	-82	-58	-2,9	5
0.48	-134	-52	-2,6	15
0.50	-186	-52	-2,6	0
0.52	-236	-50	-2,5	5
0.54	-270	-34	-1,7	40
0.56	-298	-28	-1,4	15
0.58	-320	-22	-1,1	15
0.60	-339	-19	-0,95	7,5
0.62	-351	-12	-0,6	17,5
0.64	-343	8	0,4	50
0.66	-327	16	0,8	20
0.68	-303	24	1,2	20
0.70	-271	32	1,6	20
0.72	-235	36	1,8	10
0.74	-193	42	2,1	15
0.76	-149	44	2,2	5
0.78	-97	52	2,6	20
0.80	-41	56	2,8	10
0.82	15	56	2,8	0

Πίνακας 13: Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f = 1,180$ Hz

Time (sec)	y (mm)	Δy (mm)	u (m/sec)	a (m/sec ²)
0	0	0	3,6	0
0.02	68	68	3,4	-10
0.04	121	53	2,65	-37,5
0.06	169	48	2,4	-12,5
0.08	212	43	2,15	-12,5
0.10	249	37	1,85	-15
0.12	278	29	1,45	-20
0.14	302	24	1,2	-12,5
0.16	320	18	0,9	-15
0.18	334	14	0,7	-10
0.20	346	12	0,6	-5
0.22	341	-5	-0,25	-42,5

0.24	333	-8	-0,4	-7,5
0.26	320	-13	-0,65	-12,5
0.28	302	-18	-0,9	-12,5
0.30	276	-26	-1,3	-20
0.32	246	-30	-1,5	-10
0.34	211	-35	-1,75	-12,5
0.36	169	-42	-2,1	-17,5
0.38	120	-49	-2,45	-17,5
0.40	62	-58	-2,9	-22,5
0.42	-7	-69	-3,45	-27,5
0.44	-65	-58	-2,9	27,5
0.46	-123	-58	-2,9	0
0.48	-175	-52	-2,6	15
0.50	-215	-40	-2	30
0.52	-253	-38	-1,9	5
0.54	-287	-34	-1,7	10
0.56	-314	-27	-1,35	17,5
0.58	-334	-20	-1	17,5
0.60	-352	-18	-0,9	5
0.62	-356	-4	-0,2	35
0.64	-358	-2	-0,1	5
0.66	-352	6	0,3	20
0.68	-344	8	0,4	5
0.70	-329	15	0,75	17,5
0.72	-304	25	1,25	25
0.74	-272	32	1,6	17,5
0.76	-236	36	1,8	10
0.78	-192	44	2,2	20
0.80	-140	52	2,6	20
0.82	-82	58	2,9	15
0.84	-16	66	3,3	20

Πίνακας 14: Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f = 1,187 \text{ Hz}$

Time (sec)	y (mm)	Δy (mm)	u (m/sec)	a (m/sec ²)
0	-8	8	0,4	20
0.02	48	56	2,8	120
0.04	103	55	2,75	-2,5
0.06	157	54	2,7	-2,5
0.08	208	51	2,55	-7,5
0.10	253	45	2,25	-15
0.12	289	36	1,8	-22,5
0.14	318	29	1,45	-17,5
0.16	346	28	1,4	-2,5
0.18	363	17	0,85	-27,5
0.20	368	5	0,25	-30
0.22	370	2	0,1	-7,5
0.24	368	-2	-0,1	-10
0.26	363	-5	-0,25	-7,5
0.28	343	-20	-1	-37,5
0.30	318	-25	-1,25	-12,5
0.32	278	-40	-2	-37,5
0.34	237	-41	-2,05	-2,5
0.36	193	-44	-2,2	-7,5
0.38	144	-49	-2,45	-12,5
0.40	87	-57	-2,85	-20
0.42	16	-71	-3,55	-35
0.44	-40	-56	-2,8	37,5
0.46	-94	-54	-2,7	5
0.48	-146	-52	-2,6	5
0.50	-195	-49	-2,45	7,5
0.52	-243	-48	-2,4	2,5
0.54	-281	-38	-1,9	25
0.56	-315	-34	-1,7	10
0.58	-339	-24	-1,2	25
0.60	-357	-18	-0,9	15
0.62	-364	-7	-0,35	27,5

0.64	-366	-2	-0,1	12,5
0.66	-357	9	0,45	27,5
0.68	-339	18	0,9	22,5
0.70	-319	20	1	5
0.72	-287	32	1,6	30
0.74	-249	38	1,9	15
0.76	-209	40	2	5
0.78	-164	45	2,25	12,5
0.80	-110	54	2,7	22,5
0.82	-55	55	2,75	2,5
0.84	11	66	3,3	27,5

Πίνακας 15: Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f = 1,193$ Hz

Time (sec)	y (mm)	Δy (mm)	u (m/sec)	a (m/sec ²)
0	0	0	2,85	0
0.02	60	60	3	7,5
0.04	110	50	2,5	-25
0.06	158	48	2,4	-5
0.08	206	48	2,4	0
0.10	251	45	2,25	-7,5
0.12	290	39	1,95	-15
0.14	325	35	1,75	-10
0.16	347	22	1,1	-32,5
0.18	362	15	0,75	-17,5
0.20	371	9	0,45	-15
0.22	373	2	0,1	-17,5
0.24	370	-3	-0,15	-12,5
0.26	362	-8	-0,4	-12,5
0.28	338	-24	-1,2	-40
0.30	313	-25	-1,25	-2,5
0.32	276	-37	-1,85	-30
0.34	235	-41	-2,05	-10

0.36	186	-49	-2,45	-20
0.38	128	-58	-2,9	-22,5
0.40	66	-62	-3,1	-10
0.42	-1	-67	-3,35	-12,5
0.44	-58	-57	-2,85	25
0.46	-113	-55	-2,75	5
0.48	-165	-52	-2,6	7,5
0.50	-216	-51	-2,55	2,5
0.52	-261	-45	-2,25	15
0.54	-299	-38	-1,9	17,5
0.56	-334	-35	-1,75	7,5
0.58	-359	-25	-1,25	25
0.60	-372	-13	-0,65	30
0.62	-381	-9	-0,45	10
0.64	-369	12	0,6	52,5
0.66	-351	18	0,9	15
0.68	-327	24	1,2	15
0.70	-295	32	1,6	20
0.72	-258	37	1,85	12,5
0.74	-213	45	2,25	20
0.76	-165	48	2,4	7,5
0.78	-116	49	2,45	2,5
0.80	-62	54	2,7	12,5
0.82	-5	57	2,85	7,5

Πίνακας 16: Ταλαντώσεις για συχνότητα βραχίονα $f = 1,200$ Hz

Time (sec)	y (mm)	Δy (mm)	u (m/sec)	a (m/sec ²)
0	6	6	0,3	15
0.02	72	66	3,3	150
0.04	126	54	2,7	-30
0.06	174	48	2,4	-15
0.08	219	45	2,25	-7,5

0.10	261	42	2,1	-7,5
0.12	301	40	2	-5
0.14	331	30	1,5	-25
0.16	357	26	1,3	-10
0.18	369	12	0,6	-35
0.20	380	11	0,55	-2,5
0.22	382	2	0,1	-22,5
0.24	377	-5	-0,25	-17,5
0.26	367	-10	-0,5	-12,5
0.28	349	-18	-0,9	-20
0.30	326	-23	-1,15	-12,5
0.32	287	-39	-1,95	-40
0.34	242	-45	-2,25	-15
0.36	190	-52	-2,6	-17,5
0.38	131	-59	-2,95	-17,5
0.40	70	-61	-3,05	-5
0.42	2	-68	-3,4	-17,5
0.44	-58	-60	-3	20
0.46	-112	-54	-2,7	15
0.48	-164	-52	-2,6	5
0.50	-214	-50	-2,5	5
0.52	-258	-44	-2,2	15
0.54	-294	-36	-1,8	20
0.56	-324	-30	-1,5	15
0.58	-348	-24	-1,2	15
0.60	-366	-18	-0,9	15
0.62	-370	-4	-0,2	35
0.64	-372	-2	-0,1	5
0.66	-358	14	0,7	40
0.68	-338	20	1	15
0.70	-313	25	1,25	12,5

0.72	-281	32	1,6	17,5
0.74	-243	38	1,9	15
0.76	-197	46	2,3	20
0.78	-147	50	2,5	10
0.80	-93	54	2,7	10
0.82	-33	60	3	15
0.84	35	68	3,4	20