



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Προσομοίωση πτήσης εντόμου με χρήση
στροβιλών μεθόδων**

Συγγραφέας
Ζης Θαλής

Επιβλέπων καθηγητής
Βουτσινάς Σπυρίδων

ΑΘΗΝΑ 2008

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θέλω να ευχαριστήσω ειλικρινά τα άτομα εκείνα που με βοήθησαν τον τελευταίο χρόνο σε αυτήν.

Πρωτίστως τον επιβλέποντα καθηγητή Σπύρο Βουτσινά, για την ουσιαστικότερη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της εργασίας, και κυρίως για την υπομονή που είχε απέναντι μου ιδιαίτερα τον πρώτο καιρό της εργασίας. Χωρίς τα παραπάνω η εργασία αυτή δεν θα ολοκληρωνόταν. Επίσης τον ευχαριστώ και για τις γνώσεις και την εμπειρία που απέκτησα σε θέματα στα οποία δεν είχα ιδιαίτερη τριβή, και για το γεγονός ότι μου προσέφερε ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα για να ασχοληθώ.

Σημαντική βοήθεια και παρότρυνση πήρα από φίλους και φίλες όχι μόνο κατά τη διάρκεια του τελευταίου χρόνου που εκπονήθηκε η εργασία αλλά και τα προηγούμενα χρόνια κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο τμήμα. Ιδιαίτερη αναφορά θα ήθελα να κάνω στον φίλο μου Γιώργο που τους τελευταίους 4 μήνες αποδεικνύει καθημερινά τη σημασία της προσπάθειας.

Ευχαριστώ επίσης από το εργαστήριο τους Παπαδάκη Γιώργο και Ριζιώτη Βασίλη για τη βοήθεια που μου προσέφεραν σε τεχνικά θέματα.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ οφείλω να το εκφράσω στην οικογένεια μου. Τον πατέρα μου Βασίλη για την συμπαράσταση του, την μητέρα μου Μαίρη για την ενθάρρυνση της, και τα αδέρφια μου Κατερίνα και Τάκη που ήταν δίπλα μου τις στιγμές που ένιωθα μακριά από το στόχο μου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	11
1.1 Ιπτάμενα έντομα	12
1.1.1 Εισαγωγή	12
1.1.2 Ιστορία	12
1.1.3 Εξέλιξη	14
1.1.4 Ικανότητα πτήσης	15
1.1.5 Διακρίσεις	16
1.2 Η επιστήμη σε σχέση με τα ιπτάμενα έντομα	20
1.2.1 Εισαγωγή	21
1.2.2 Βασική αεροδυναμική	22
1.2.3 Στρόβιλος ακμής πρόσπτωσης - Leading edge vortex	23
1.2.4 Clap and fling mechanism	26
1.2.5 Παρατήρηση εντόμων και πειραματικές προκλήσεις	27
1.2.6 Τρέχουσα έρευνα – το επόμενο βήμα	28
1.3 Βιβλιογραφία	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΙΑ	30
2.1 Θεωρητικό πλαίσιο	30
2.1.1 Εισαγωγή	30
2.1.2 Η μέθοδος των στοιχείων στροβιλότητας	30
2.1.3 Το θεώρημα Helmholtz	31
2.1.4 Το θεώρημα Green	32
2.1.5 Φύλλο στροβιλότητας	33
2.1.6 Η κινηματική συνθήκη μη εισχώρησης	35
2.1.7 Η συνθήκη Kutta-Joukowski	35
2.1.8 Υπολογισμός των αεροδυναμικών δυνάμεων	35
2.1.9 Χαρακτηριστικά μεθόδου στοιχείων στροβιλότητας	37
2.2 Διακριτοποίηση του προβλήματος	37
2.2.1 Εισαγωγή	37
2.2.2 Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας ενός σώματος	38
2.2.3 Η αναπαράσταση του φύλλου στροβιλότητας	39
2.2.4 Οι βαθμοί ελευθερίας	41
2.2.5 Η αποβολή στροβιλότητας από λεπτές ανωστικές επιφάνειες	42
2.2.6 Η αποβολή στροβιλότητας από το ακροπτερύγιο	43
2.2.7 Η αποβολή στροβιλότητας από τη ακμή προσβολής (leading edge)–το πρότυπο του διπλού ομόρρου.	44
2.2.8 Ο υπολογισμός των φορτίων	46
2.2.9 Η αεροελαστική σύζευξη	47
2.2.10 Η Αλληλεπίδραση στερεών επιφανειών και ελεύθερης στροβιλότητας	48
2.2.11 Αριθμητικές και υπολογιστικές λεπτομέρειες	49
2.2.12 Υπολογιστικό κόστος μεθόδου	50
2.2.13 Ροή με άξονα συμμετρίας	51
2.2.14 Η κίνηση των σωμάτων	51
2.3 Βιβλιογραφία	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	53
3.1	Εισαγωγή	53
3.2	Μεθοδολογία αποτελεσμάτων	54
3.2.1	Η εργασία στην οποία στηρίχτηκε η παρούσα εργασία	54
3.2.2	Επεξήγηση των διαγραμμάτων	56
3.3	Αποτελέσματα	58
3.3.1	Εφαρμογή σε λεπτή πλάκα	58
3.3.2	Εφαρμογή σε δύο πλάκες	63
3.3.3	Πλάκες με πολυωνυμικές εξισώσεις γωνιών	70
3.3.4	Γεωμετρία από μηχανικό έντομο με γωνίες manduca sexta.	73
3.3.5	Μελέτη επίδρασης γεωμετρίας στη δυσκολία υπολογισμού με leading edge separation	85
3.3.6	Μελέτη επίδρασης φάσης μεταξύ των γωνιών κίνησης	92
3.3.7	Γραμμική συσχέτιση γωνιών κίνησης – βασικών δυνάμεων.	101
3.3.8	Προσομοίωση manduca sexta με τον κώδικα του εργαστηρίου	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	107
4.1	Συμπεράσματα	107
4.2	Προτάσεις	107

SUMMARY

The goal of this work is to simulate the flight of an insect using vortex methods, and to study the model's aerodynamic behavior with the change of certain basic parameters of flight. The results we received using the code of the laboratory will be compared with the results of previous papers, from which we took certain basic data. A moth's (*manduca sexta*) forewing and hindwing, and the wing of a mechanic insect designed from a Harvard's paper, were modeled and used in this work. A non-accelerated horizontal flight will be studied, with an extensive parametric analysis, aiming at the better comprehension of not permanent development of forces during the flight.

In the first chapter, there is given basic information on the varieties of insects that are using the same flight-mechanism as the one modelled here. The understanding of the subject, demanded an extensive bibliographic search. After these informations, we present the progress of science in the study and comprehension of the phenomenon, and also the potential applications of an operational mechanic insect.

In the second chapter, there is a brief description of the basic theoretical analysis of the governing equations of the system. Using Helmholtz theorem to describe the velocity of the flow, the velocity field is described as the sum of a vortex and an irrotational field. The vortex part of the field contains the vorticity that already exists in the flow field, and at the same time the free vorticity that is emitted from the lifting bodies. Here is also presented how the governing equations were discretized. Non penetration conditions were applied on the solid body surfaces, and Kutta conditions demand the pressures to be equal on the upper and lower parts of the emitting edges.

In the third chapter we initially present the previous works which guided us, and then the results we received from various case scenarios using the laboratory's code. These results confirmed the particular importance of the leading edge vortex. In numerous cases, a propulsion force was noted during an important part of the movement's cycle, which renders the model capable of not only hovering, but direct flight as well.

In the final chapter, the main conclusions of this work are given, and unanswered questions and unexamined subjects are offered for future works.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιστημονική κοινότητα από πολύ παλιά έδειξε ενδιαφέρον για τον μηχανισμό πτήσης των εντόμων εξαιτίας των εξαιρετικών δυνατοτήτων ελέγχου της πορείας τους. Το γεγονός ότι μπορούν γρήγορα να αλλάξουν την κατεύθυνση της κίνησης κρατώντας παράλληλα πλήρη έλεγχο της θέσεως τους (ως αποτέλεσμα εκατομμυρίων ετών εξέλιξης) τα τοποθετεί στην κορυφή (από άποψη δυνατοτήτων) όλων των ζώων με ικανότητα πτήσης. Μπορούν να απογειωθούν ή να προσγειωθούν κάθετα, να αιωρηθούν για αρκετά δευτερόλεπτα με ελάχιστη μετατόπιση, να κινηθούν πλευρικά, να οπισθοχωρήσουν ενώ ορισμένα έχουν τη δυνατότητα να πετάξουν και ανάποδα.

Μέχρι σήμερα, οι ερευνητές δεν ήταν σε θέση να γνωρίζουν με ακρίβεια τις σύνθετες κινήσεις των φτερών των ιπτάμενων εντόμων ούτε να μετρήσουν τις δυνάμεις και τις ροές γύρω από τα φτερά τους. Η σημαντική όμως πρόοδος στην τεχνολογία της βιντεοσκόπησης και τα εργαλεία για την υπολογιστική και μηχανική διαμόρφωση έχουν επιτρέψει στους ερευνητές να σημειώσουν γρήγορη πρόοδο στην κατανόηση της πτήσης εντόμων.

Έτσι με την παράλληλη πρόοδο στις μικροτεχνολογίες, η επιστήμη βρίσκεται σε θέση να ερευνήσει τη δυνατότητα πραγματοποίησης, με μια ηλεκτρομηχανική συσκευή, αυτόνομη πτήση η οποία θα μιμείται πραγματικά ιπτάμενα έντομα. Αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση, και σε πολλά πανεπιστήμια αναπτύσσονται μικρομηχανικά προγράμματα ιπτάμενων εντόμων, (micromechanical flying insects – MFI).

Παρόλο όμως που ξεπεράστηκαν κάποια βασικά προβλήματα σχετικά με τη γνώση βασικών δεδομένων (γεωμετρία πτερύγων, συχνότητες κίνησης, θέση πτερών ανά πάσα στιγμή) πολύ λίγα είναι σήμερα γνωστά για τους αισθητήρες που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν (συλλογή δεδομένων – αντίστοιχα της όρασης ενός πραγματικού εντόμου), της βιομηχανικής δομής (υλικά που θα χρησιμοποιηθούν με κύριους στόχους το μικρό βάρος την καλή αντοχή, την προσομοίωση της ελαστικότητας των ιστών ενός αληθινού εντόμου), της αεροδυναμικής φτερών (στις πρώτες υλοποιήσεις τα φτερά έχουν ελάχιστο πάχος χωρίς να ακολουθείται κάποια από τις γνωστές αεροτομές), των αλγορίθμων ελέγχου πτήσης και του προγραμματισμού τροχιάς στα ιπτάμενα έντομα (κατά αντιστοιχία με τη νευρική επεξεργασία των εξωτερικών πληροφοριών που πραγματοποιεί ένα πραγματικό έντομο ούτως ώστε να αποφασίσει την επόμενη κίνηση του). Επομένως, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τομείς της μηχανολογίας που πρέπει να συνδυαστούν για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσομοίωση της πτήσης ενός εντόμου.

Στόχος της παρούσης εργασίας είναι η προσομοίωση της πτήσης ενός εντόμου, και η μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς με την αλλαγή κάποιων βασικών παραμέτρων πτήσης. Τα αποτελέσματα από τη χρήση του κώδικα του εργαστηρίου θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών, από τις οποίες πήραμε κάποια βασικά δεδομένα (γεωμετρίες, κατανομές γωνιών-χρόνου). Θα εξετάσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις εντόμων. Το πρώτο είναι η *manduca sexta* (λεπιδόπτερο, χρησιμοποιεί 4 πτερά για το πέταγμα του), ενώ το δεύτερο είναι ένα μηχανικό

μοντέλο που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε από το Harvard από βίντεο του οποίου πήραμε τη γεωμετρία των πτερύγων. Θα μελετήσουμε την ευθεία πτήση, μετρώντας μέσω του κώδικα τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα φτερά για κάθε περίπτωση, και τις αλλαγές που σημειώνονται με τις διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους που εξετάζουμε.

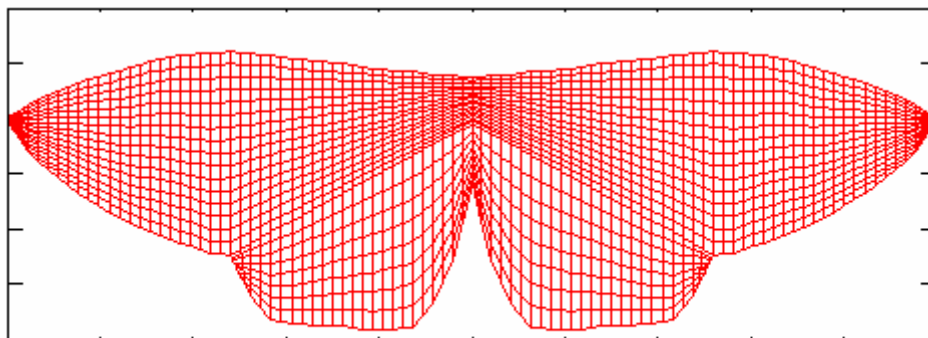
Παρακάτω (εικόνες 1,2) φαίνεται μία *manduca sexta* σε φωτογραφία, και ακολουθεί η γεωμετρία που χρησιμοποιήσαμε στον κώδικα. (εικόνα 3) Ακολουθούν (εικόνες 3-6) φωτογραφίες του μηχανικού εντόμου που κατασκεύασε το Harvard.



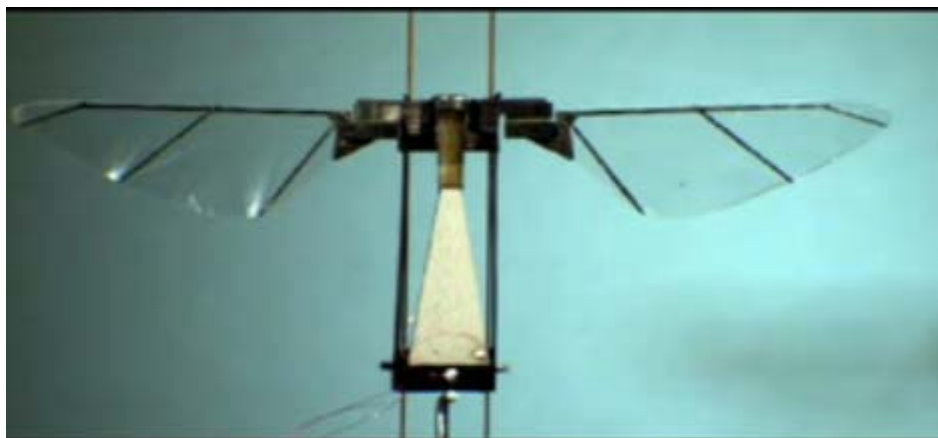
Εικόνα 1: *Manduca Sexta*



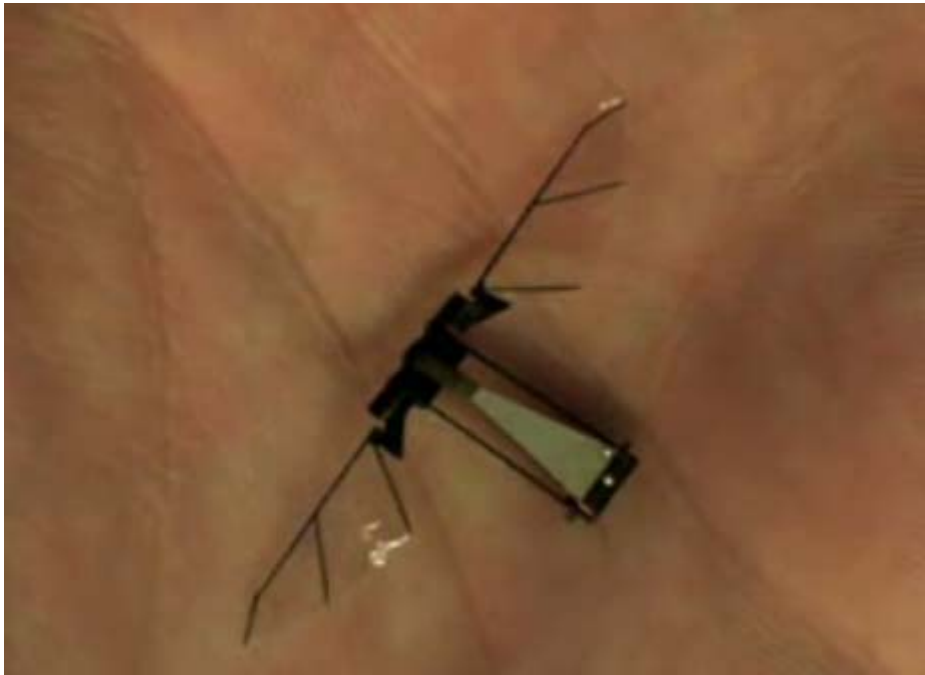
Εικόνα 2: Διαστάσεις της Manduca Sexta



Εικόνα 3: Πλέγμα γεωμετρίας Manduca Sexta



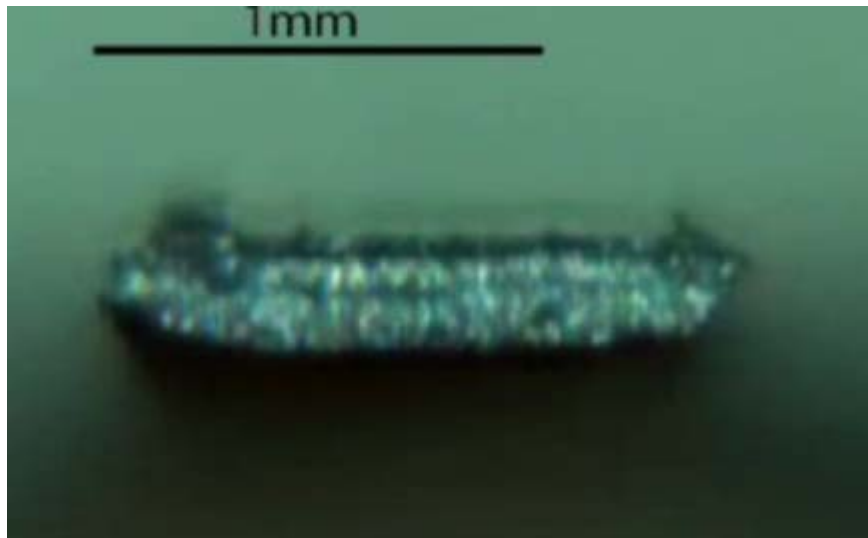
Εικόνα 4: Πειραματική διάταξη Harvard. Η μηχανή στηρίζεται σε κατακόρυφες μπάρες-οδηγούς καθώς σκοπός της εργασίας ήταν απλά να μελετηθεί κατά πόσο παράγεται άνοση



Εικόνα 5: το μοντέλο πάνω σε ανθρώπινη παλάμη, ενδεικτικό του μεγέθους του

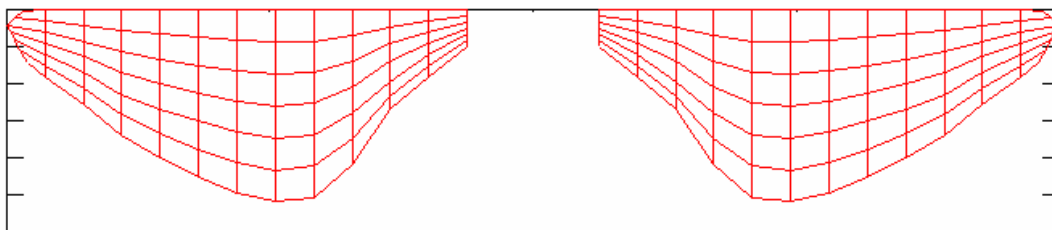


Εικόνα 6: πρόοψη πτέρυγας



Εικόνα 7: πλάγια όψη - αεροτομή

ακολουθεί η γεωμετρία (εικ.7) που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση στηριγμένοι στα παραπάνω



Εικόνα 8: το πλέγμα της γεωμετρίας του μοντέλου

Διάρθρωση της εργασίας

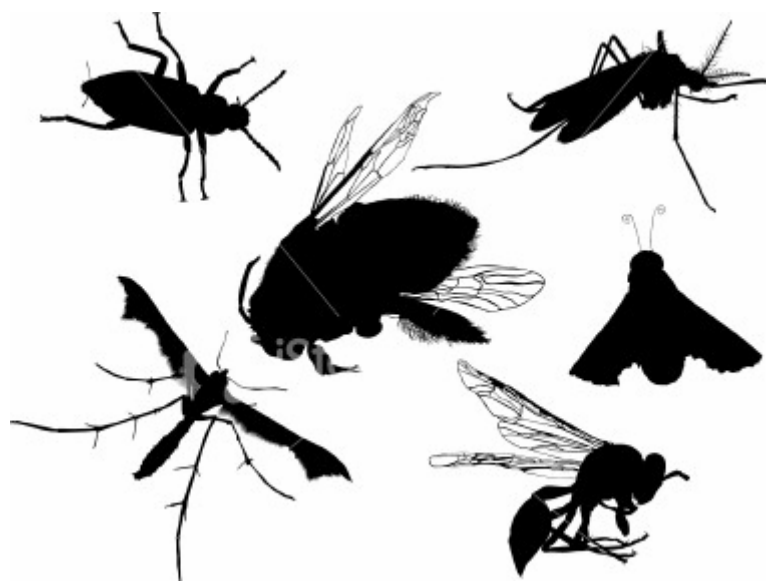
Σε αυτή τη παράγραφο έγινε μια πρώτη εισαγωγή στην εργασία και ακολουθεί η διάρθρωση της.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται βασικές πληροφορίες για τα έντομα που πήραμε μετά από βιβλιογραφική αναζήτηση. Παράλληλα, γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση της προόδου της επιστήμης στην μελέτη, την κατανόηση και τις εφαρμογές στην πτήση των εντόμων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο πάνω στο οποίο στηρίζεται η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος και υπολογισμού των αεροδυναμικών φορτίων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά η εργασία στην οποία κυρίως στηριχθήκαμε, και κατόπιν αποτελέσματα από τρεξίματα του κώδικα για διάφορες περιπτώσεις. Γίνεται παραμετρική ανάλυση με σύγκριση των αποτελεσμάτων για αλλαγές στις επιμέρους παραμέτρους.

Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική επισκόπηση



1.1 Ιπτάμενα έντομα

1.1.1 Εισαγωγή

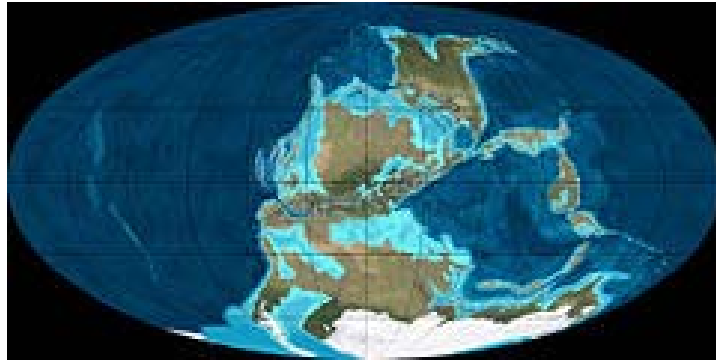
Τα έντομα έχουν κεντρίσει μεγάλο ενδιαφέρον σε πολλές επιστημονικές ομάδες. Στους φυσικούς και τους μηχανικούς έχει προκαλέσει μεγάλη εντύπωση το γεγονός πως εκ πρώτης όψεως η ικανότητα να πετάνε τους φαίνεται απίθανη και αδύνατη να εξηγηθεί χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη αεροδυναμική θεωρία. Έτσι για να αποδειχθεί επιστημονικά πως παράγεται ικανοποιητική άνοση και προώσεις που να αντιστοιχούν στις παρατηρούμενες κινήσεις τους, έχουν εισαχθεί νέες θεωρίες που στηρίζονται στην μη μόνιμη αεροδυναμική. Το μικρό μέγεθος, η υψηλή συχνότητα κτυπήματος των φτερών και ιδιαίτερα το αμοιβαίο χτύπημα των φτερών στην πλάτη τους (σε κάποια είδη, clap and fling mechanism) αποτελούν στοιχεία που έχουν συνδυαστεί ούτως ώστε να ανατρέψουν τις απλές εξηγήσεις της αεροδυναμικής πτήσης των εντόμων και να κατανοηθεί σε βάθος το φαινόμενο.

Τα έντομα οφείλουν ένα μεγάλο μέρος της εξαιρετικής εξελικτικής επιτυχίας τους στην πτήση. Σε σχέση με τους προγόνους τους που δεν είχαν δυνατότητα πτήσης, τα ιπτάμενα έντομα είναι καλύτερα εξοπλισμένα για να αποφεύγουν τα αρπακτικά ζώα, να αναζητήσουν τροφή και να αποικίσουν νέους βιότοπους. Η εξέλιξη τους λοιπόν σε κορυφαία σε έλεγχο πτήσης ζώα, είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η επιβίωση τους εξαρτάται αποφασιστικά από την απόδοση της πτήσης τους.

Τα έντομα είναι η μόνη ομάδα ασπόνδυλων ζώων που έχουν καταφέρει μέσω της εξέλιξης να επιτύχουν να πετάξουν. Κατέχουν μερικά αξιοπρόσεκτα χαρακτηριστικά πτήσης, και δυνατότητες ανώτερες από πολλές απόψεις σε σχέση με ό,τι έχει εφευρεθεί από την ανθρωπότητα. Ακόμη και η κατανόησή της αεροδυναμικής των εύκαμπτων, φτερών που εκτελούν παλινδρομική κίνηση (flapping wings) των εντόμων είναι ατελής.

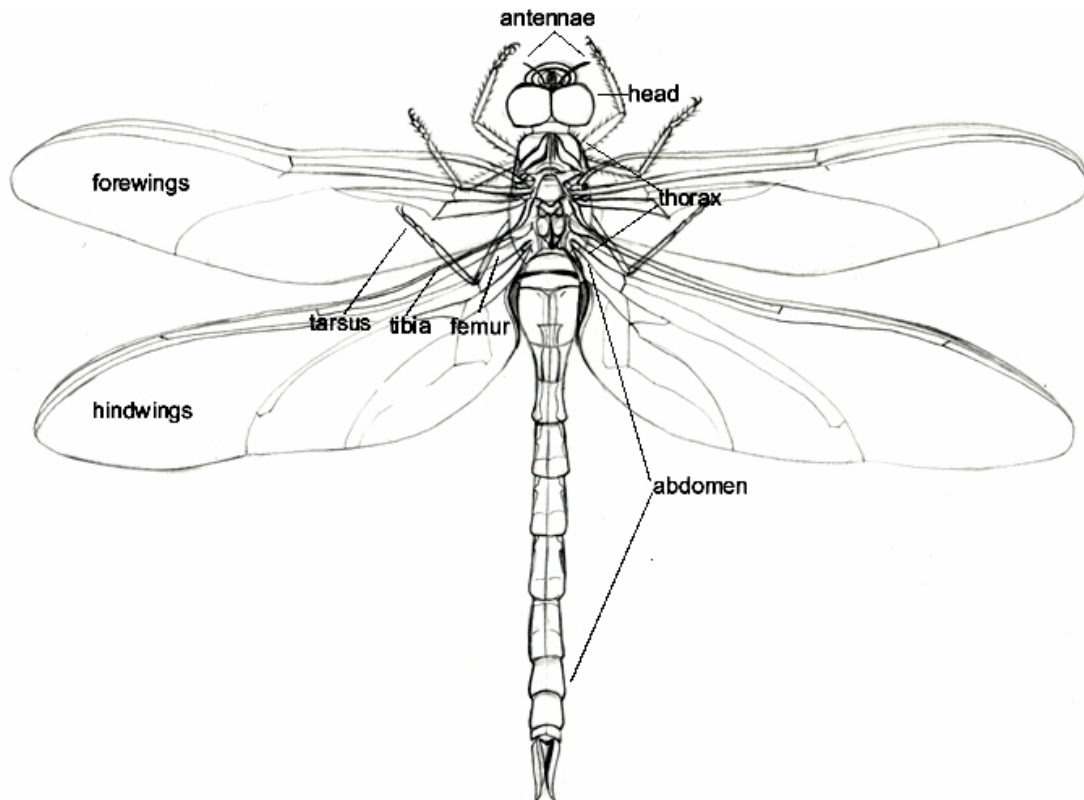
1.1.2 Ιστορία

Περίπου 350 εκατομμύρια έτη πριν (Carboniferous period), όταν υπήρχαν μόνο δύο σημαντικές περιοχές εδάφους (ήπειροι, εικ.8), τα έντομα ξεκίνησαν να πετούν. Με ποιο τρόπο και γιατί τα έντομα ανέπτυξαν φτερά είναι ερωτήματα που δεν έχουν γίνει ακόμα πλήρως κατανοητά. Οι δύο κύριες θεωρίες όσον αφορά στην προέλευση των φτερών των εντόμων είναι πως αναπτύχθηκαν από κάποιους λοβούς που προϋπήρχαν ως επεκτάσεις του θώρακα ή ότι αποτελούν μεταλλάξεις των κοιλιακών βραγχίων (αυτά είχαν δυνατότητα κίνησης) όπως αυτά που βρίσκονταν σε υδρόβια ζώα.

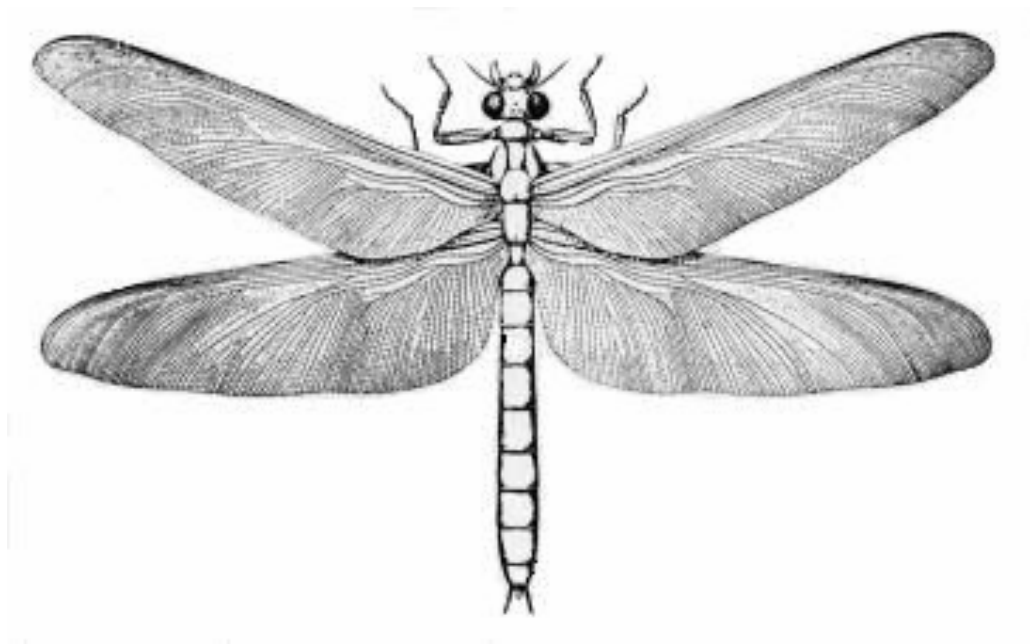


Εικόνα 9: η Γη κατά τη διάρκεια της λιθανθρακοφόρου περιόδου

Παρόμοια με τις σημερινές λιβελλούλες (dragonflies, εικ.9), τα πρώτα ιπτάμενα έντομα (εικ.10) έφεραν δύο ζεύγη φτερών, είχαν αναπτύξει μύες πτήσης (μόνο για τη πτήση), και ήταν ανίκανα να διπλώσουν τα φτερά τους πάνω από την κοιλία τους.



Εικόνα 10: Μια σημερινή λιβελλούλα (dragonfly)



Εικόνα 11: Μια meganevra στην λιθανθρακοφόρο περίοδο. Ανήκει στην οικογένεια των λιβελλούλων, και είναι το μεγαλύτερο έντομο που εμφανίστηκε ποτέ στον πλανήτη με wingspan κοντά στα 75 cm.

1.1.3 Εξέλιξη

Τα περισσότερα σημερινά έντομα, που αποτελούν εξέλιξη από τα πρώτα ιπτάμενα, έχουν απλοποιήσει τα φτερά τους είτε σε ένα ζευγάρι φτερών είτε σε δύο ζευγάρια που όμως λειτουργούν ως ενιαίο ζευγάρι. Επιπλέον τα σημερινά χρησιμοποιούν ένα μυϊκό σύστημα έμμεσης λειτουργίας (οι ίδιοι μύες εξυπηρετούν και άλλες κινήσεις πέρα από τις απαραίτητες για το πέταγμα) Η φυσική επιλογή έχει διαδραματίσει έναν τεράστιο ρόλο στην βελτιστοποίηση των φτερών, του ελέγχου και των αισθητήριων συστημάτων των εντόμων, και του γενικά σε οτιδήποτε έχει να κάνει με την αεροδυναμική και την κινηματική του εντόμου.

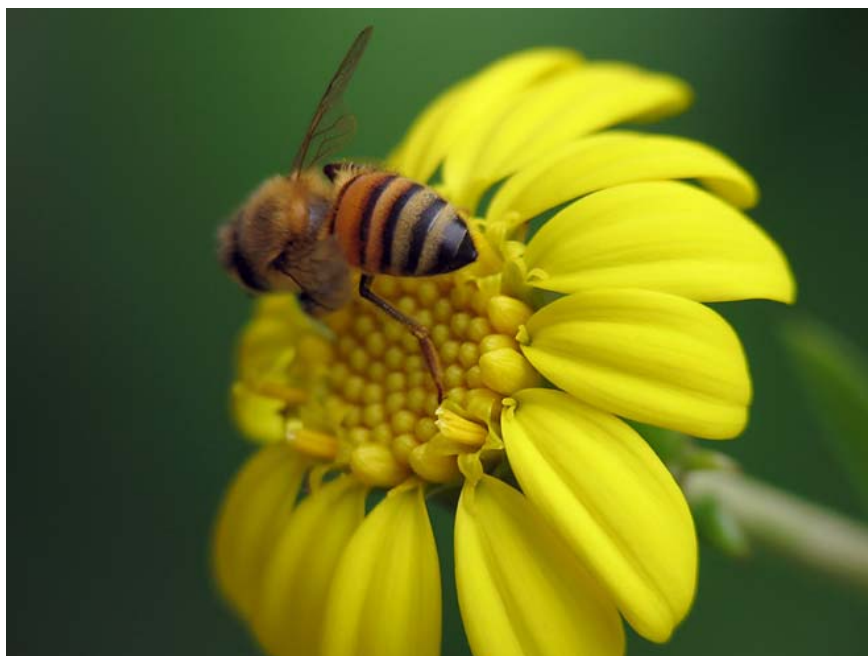
Ένα αξιοσημείωτο γνώρισμα είναι συστροφή φτερών. Σε πολλά έντομα τα φτερά είναι στριμμένα, όπως τα πτερύγια ελικοπτέρων, έτσι ώστε να έχουν μια υψηλότερη γωνία πρόσπτωσης στη βάση. Η συστροφή σε αυτά έχει εύρος μεταξύ 10 και 20 μοιρών. Επιπλέον της συστροφής, οι επιφάνειες φτερών δεν είναι απαραίτητα επίπεδες.

Ιδιαίτερα στα μεγαλύτερα έντομα, η μεμβράνη των φτερών τους διαστρεβλώνεται μεταξύ των φλεβών κατά τέτοιο τρόπο ώστε η διατομή του φτερού να προσεγγίζει μια αεροτομή με αποτέλεσμα καλύτερους συντελεστές άνωσης, ενώ παράγεται μικρή αλλά σημαντική άνωση ακόμα σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης.

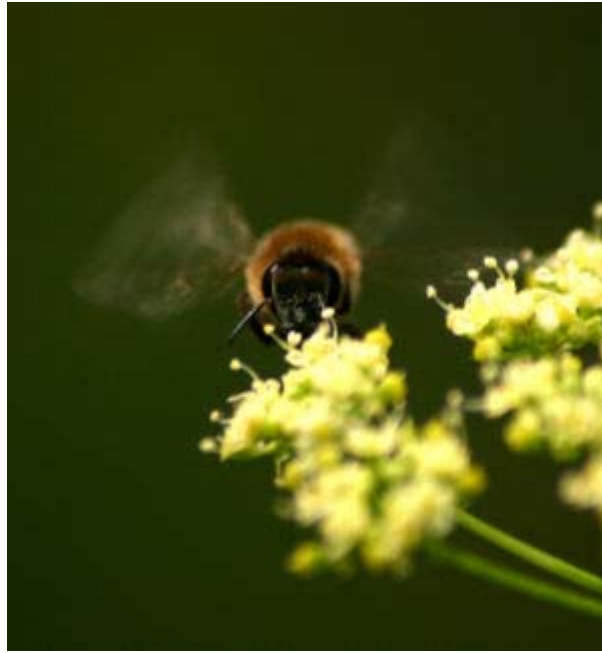
Τα περισσότερα έντομα εξελίχθηκαν έτσι ώστε να ελέγχουν τα φτερά τους με τη ρύθμιση της κλίσης, της ακαμψίας και της συχνότητας χτυπήματος των φτερών τους μέσω μικροσκοπικών μυών που ανέπτυξαν στο θώρακα τους. Μερικά έντομα εξέλιξαν άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα στα φτερά τους που μπορεί να μην είναι συμφέροντα για την πτήση αλλά διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο σε κάτι άλλο όπως τη διευκόλυνση του ζευγαρώματος τους και την προστασία τους από άλλα είδη που τα κυνηγούν.

1.1.4 Ικανότητα πτήσης

Μερικά έντομα, για να εκπληρώσουν τις βιολογικές τους ανάγκες, χρειάζεται να είναι απίστευτα ευέλικτα. Πρέπει να μπορούν να εντοπίσουν τα τρόφιμά τους, να μπορούν να τα πάρουν από στενές περιοχές (για παράδειγμα οι μέλισσες για να πάρουν γύρη από τα λουλούδια, μπορεί να πρέπει να προσγειωθούν σε πολύ μικρή επιφάνεια (εικ.11) ή ακόμα και να την πάρουν μένοντας μετέωρα (εικ.12), να παράγουν αρκετή άνωση για να μπορούν να τα μεταφέρουν στη φωλιά τους (τα περισσότερα κουβαλάνε σχεδόν συνέχεια φορτία της τάξης του 50-70% του βάρους τους) και ταυτόχρονα να είναι ικανά να αποφύγουν μεγαλύτερα αρπακτικά ζώα για τα οποία αποτελούν θήραμα. Άλλα έντομα πρέπει να μπορούν (αν τα ίδια είναι αρπακτικά) να συλλάβουν το θήραμα τους το οποίο είναι μικρότερο επίσης ευέλικτο και μπορεί να είναι ιπτάμενο ή επίγειο ζώο.



Εικόνα 12: Μια μέλισσα ‘εργάζεται’ σε πολύ μικρή επιφάνεια



Εικόνα 13: Μια μέλισσα αιωρείται για να συλλέξει γύρη

Η ικανότητα διάπραξης ελιγμών τους, από αεροδυναμική άποψη, παρέχεται από τις υψηλές δυνάμεις άνωσης και ώθησης. Τα ιπτάμενα έντομα μπορούν να επιτύχουν δυνάμεις άνωσης μέχρι τρεις φορές το βάρος τους και οριζόντιες δυνάμεις ώθησης μέχρι πέντε φορές το βάρος τους. Αν λάβουμε υπόψη τα φορτία που κουβαλάνε, είναι ικανά να κινηθούν κατακόρυφα προς τα πάνω κουβαλώντας ταυτόχρονα φορτία.

1.1.5 Διακρίσεις

Σε αυτή τη παράγραφο διακρίνονται τα ιπτάμενα έντομα ανάλογα με το μηχανισμό πτήσης που ακολουθούν. Υπάρχουν δύο ουσιαστικά διαφορετικοί μηχανισμοί πτήσης εντόμων, και κάθε ένας έχει τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά του. Το ότι κάποια έντομα (π.χ. *odonates*) έχουν έναν πιο πρωτόγονο μηχανισμό πτήσης δεν σημαίνει ότι είναι αεροδυναμικά υποδεέστερα από άλλα έντομα. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις θεωρούνται πιο ευέλικτα και ευκίνητα από οτιδήποτε εξελίχθηκε-εμφανίστηκε κατόπιν

Η σύνθετη κίνηση των φτερών των εντόμων μπορεί να απλοποιηθεί αρκετά αν αναλυθεί σε τρεις περιστροφές. Αυτές είναι η περιστροφή γύρω τον άξονα που διέρχεται από το σώμα του εντόμου (*flapping*), η περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (κινεί το φτερό μπρος πίσω *lead lag movement*) και η περιστροφή του φτερού γύρω από τον άξονα του ίδιου του φτερού (*twist movement*).

Κατά τη διάρκεια της πρώτης περιστροφής(*flapping*) η οποία χωρίζεται σε 2 φάσεις το *upstroke* και το *downstroke*, η κίνηση των φτερών μέσω του αέρα γίνεται με υψηλές γωνίες πρόσπτωσης, και της δεύτερης περιστροφής που περιγράφηκε νωρίτερα φάσεων (*pronation* και *supination* οι 2 φάσεις της), τα φτερά περιστρέφονται γρήγορα (*twist*) και αντιστρέφουν την κατεύθυνση τους.

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι τα τετράπτερα έντομα εκτελούν μία ακόμα περιστροφή (στην απλοποιημένη περίπτωση). Η περιστροφή αυτή αφορά στο πίσω

πτερό (hindwing) γύρω από το εμπρός πτερό (forewing), ενώ τα 2 ζεύγη πτερών έχουν και διαφορετική κατανομή της twist γωνίας τους, αλλά αυτές είναι συμμασικές.

	Weight, G (gf)	Wing length, R (cm)	Wing chord, c (cm)	Wing shape (cf. Table 1)	Wing- stroke frequency, π (sec ⁻¹)	Stroke angle, ϕ (rad)	Stroke-arc Wing-chord λ	Lift/drag diagram, references, aspect ratio	Moment of inertia, I (gf cm s ²) $\times 10^{-7}$	References on stroke data	
Bats: <i>Plecotus auritus</i> *	9.0	11.5	5.5	(a)	12.5	2.09	2.5	—	—	(9)	
Birds: hummingbirds, Trochili											
<i>Archilochus colubris</i>	3.7	4.5	1.5	(a)	52	2.09	3.6	(6, 17) 1:6	—	(13, 14)	
<i>Amasilia fimbriata fluvialis</i>	5.1	5.9	2.0	(a)	35	2.09	3.5	(6, 17) 1:6	8200	(6, 22)	
<i>Patagona gigas</i>	20.0	13.0	4.3	(a)	15	2.09	3.6	(6, 17) 1:6	—	(14, 16)	
Coleoptera: beetles											
<i>Melolontha vulgaris</i>	0.60	2.8	1.0	(a)	62	3.14	5.1	(18)	(0.60	(1)
<i>Amphimallon solstitialis</i>	0.29	2.0	0.7	(a)	78	3.14	5.1			0.29	(1)
<i>Helicopraxis</i> sp.	7.8	7.0	2.4	(a)	38	3.14	5.2			—	(11)
<i>H.</i> sp.	12.8	7.7	2.7	(a)	41	3.14	5.1			—	(11)
<i>Cetonia aurata</i>	0.46	2.2	0.7	(a)	103	3.14	5.7			—	(12)
Cerambycid species	0.14	1.55	0.48	(a)	80	3.14	5.8		0.14	(1)	
Lepidoptera: butterflies & moths											
<i>Pieris napi</i> **	0.04	2.4	3.6	(e)	6	2.62	1.7	—	—	(1)	
<i>P. brassicae</i> **	0.14	3.4	5.1	(e)	11	2.09	1.4	(19)	423	(1)	
<i>Sphinx ligustri</i>	1.6	5.0	2.3	(a)	30	2.09	2.6	(18)	3000	(10, 12)	
<i>Manduca sexta</i>	2.12	5.4	2.5	(a)	27.3	2.09	2.6	(18)	4780	(15)	
<i>M. sexta</i>	1.12	5.0	2.3	(a)	29.1	2.09	2.6	(18)	3950	(15)	
<i>Macroglossum stellatarum</i>	0.28	2.1	1.0	(a)	73	2.09	2.5	(18)	59	(1)	
<i>Amathes bicolorago</i>	0.09	1.6	1.1	(a)	50	2.09	1.7	—	—	(2)	

Πίνακας 1-1: Βασικά γεωμετρικά και αεροδυναμικά μεγέθη για διάφορα ιπτάμενα ζώα

Οι δύο βασικοί μηχανισμοί πτήσης με τους οποίους διακρίνονται τα έντομα είναι ο άμεσος και ο έμμεσος.

Άμεσος μηχανισμός πτήσης

Αντίθετα από τα περισσότερα άλλα έντομα, οι μύες που κινούν τα φτερά των εφημερόπτερον (mayflies, εικ.13) και των λιβελλούλων (odonata) (οι δύο μεγάλες ομάδες αυτές ταξινομούνται παραδοσιακά ως παλαιόπτερα (Paleoptera), ελέγχουν άμεσα τις βάσεις των φτερών στο εσωτερικό του σώματος, οι οποίες είναι αρθρωμένες έτσι ώστε με μικρή μετατόπιση της βάσης προς τα κάτω να ανυψώνεται το ίδιο το φτερό προς τα πάνω (μηχανισμός που μοιάζει με την κωπηλασία και τη κίνηση των κουπιών που λόγω της άρθρωσης είναι αντίθετη από τη κίνηση του χεριού του κωπηλάτη).

Στα mayflies, τα οπίσθια φτερά έχουν μικρό μέγεθος συγκριτικά με άλλα έντομα, σε μερικά είδη απουσιάζουν πλήρως, και γενικά διαδραματίζουν μικρό ρόλο στην πτήση τους, η οποία ως χαρακτηριστικό έχει το ότι δεν είναι ιδιαίτερα ευκίνητη ούτε έχει χάρη. Οι λιβελλούλες από την άλλη, δεν μπορούν να αιωρηθούν τέλεια στον αέρα με αυτόν τον πρωτόγονο μηχανισμό (μόνο με προσεκτική χρήση των ρευμάτων αέρα, μπορούν να παραμείνουν σχεδόν στάσιμες), υπάρχουν όμως κάποια odonata (γνώστα ως damselflies, εικ.14) που επιτυγχάνουν τέλεια αιώρηση (hovering). Σε αυτά, τα πρόσθια και τα οπίσθια φτερά είναι παρόμοια στη μορφή και το μέγεθος, και λειτουργούν τελείως ανεξάρτητα, γεγονός το οποίο τους επιτρέπει έλεγχο υψηλού βαθμού της κίνησης τους με το οποίο μπορούν να αλλάξουν εξαιρετικά γρήγορα την κατεύθυνση και την ταχύτητα τους.



Εικόνα 14: Mayfly



Εικόνα 15: coachella blue damselfly

Αυτό δεν προκαλεί έκπληξη, δεδομένου ότι τα περισσότερα odonata είναι εναέρια αρπακτικά ζώα, και έχουν χάρη στις ιπτάμενες ικανότητες τους έχουν επικρατήσει έναντι άλλων αερομεταφερομένων εντόμων που υπήρχαν πριν ακόμη και από τους δεινοσαύρους (εάν δεν θα μπορούσαν να είναι ικανότερα στο πέταγμα από το θήραμά τους, θα είχαν εκλείψει πολύ καιρό πριν). Αυτός ο μηχανισμός πτήσης καταρρίπτει το επιχείρημα διάφορων εταιρειών παραγωγής εντομοαπωθητικών που

υποστηρίζουν ότι η συσκευή που παράγει συχνότητες πλησίον του wingbeat μιας λιβελλούλης (και φοβίζει υποθετικά τα κουνούπια διώχνοντας τα μακριά), δεδομένου ότι οι μύες που ελέγχουν τα φτερά στις λιβελλούλες παρεμβάλλονται άμεσα, και τα φτερά μπορούν να κτυπήσουν ανεξάρτητα μεταξύ τους, χωρίς να έχουν μια σταθερή συχνότητα wingbeat (και η ταχύτητα του wingbeat μπορεί να είναι εντελώς τυχαία-κατά βούληση, όπως σε ένα πουλί), που να ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μοτίβο. Έτσι καμία συσκευή δεν μπορεί να αναπαράγει πλήρως αυτές τις συχνότητες, και τελικά να απομακρύνει τα κουνούπια.

Έμμεσος μηχανισμός πτήσης

Όλα τα άλλα φτερωτά έντομα πετούν χρησιμοποιώντας έναν διαφορετικό μηχανισμό, που περιλαμβάνει τους έμμεσους μύς πτήσης. Αυτός ο μηχανισμός εξελίχθηκε μία φορά, και είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα που διακρίνει τα Neoptera. Επιτρέπει στα έντομα Neopteran να διπλώσουν τα φτερά τους πέρα από την κοιλία όταν σε βρίσκονται σε στάση (αν και αυτή η δυνατότητα χάθηκε μεταγενέστερα σε μερικές ομάδες, όπως όλες οι πεταλούδες). Στις περισσότερες εξελιγμένες ομάδες που φέρουν δύο λειτουργικά ζευγάρια φτερών, και τα δύο ζευγάρια συνδέονται μηχανικά με διάφορους τρόπους, και τη λειτουργούν ως ενιαίο φτερό, κάτι που δεν συμβαίνει στις πιο πρωτόγονες ομάδες.

Αυτό που είναι κοινό σε όλα Neoptera, εν τούτοις, είναι ο τρόπος με τον οποίο εργάζονται οι μύες του θώρακα. Αντί να συνδεθούν με τα φτερά, συνδέονται με το θώρακα και τον παραμορφώνουν δεδομένου ότι τα φτερά είναι επεκτάσεις του θώρακα (θεωρούνται μέρος ενός exoskeleton). Οι παραμορφώσεις του θώρακα αναγκάζουν τα φτερά να κινηθούν.

Αναλυτικότερα ο μηχανισμός λειτουργεί ως εξής: Ένα σύνολο ραχιαίων διαμήκων μυών συμπιέζει το θώρακα από το μέτωπο στην πλάτη, αναγκάζοντας τη ραχιαία επιφάνεια του θώρακα (notum) να κινηθεί προς τα πάνω προκαλώντας το κτύπημα των φτερών κάτω. Ένα σύνολο μυών (tergosternal) τραβά το notum προς τα κάτω πάλι, αναγκάζοντας τα φτερά για να κτυπηθούν προς τα πάνω. Σε μερικές ομάδες, το downstroke ολοκληρώνεται απλώς μέσω της ελαστικής οπισθοχώρησης του θώρακα αποτέλεσμα της χαλάρωσης των μυών tergosternal.

Υπάρχουν διάφορα μικρά σκληρά κομμάτια στη βάση των φτερών που ελέγχονται από χωριστούς μύες και χρησιμοποιούνται για τον ακριβέστερο έλεγχο της βάσης φτερών με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτραπούν οι διάφορες ρυθμίσεις της κλίσης και του εύρους της κίνησης του φτερού. Μία από τις τελευταίες βελτιώσεις που έχουν εμφανιστεί σε μερικά από τα πιο εξελιγμένα Neoptera (κολεόπτερα, δίπτερα, και υμενόπτερα) είναι ένας τύπος μυϊκού/ νευρικού συστήματος ελέγχου όπου μια ενιαία ώθηση των νεύρων αναγκάζει μια ίνα μυών για να συσπαστεί πολλαπλές φορές, κάτι που επιτρέπει τη συχνότητα από τα wingbeats να υπερβεί σε αριθμό την αντίστοιχη συχνότητα που το νευρικό σύστημα μπορεί να στείλει εντολές. Αυτή η εξειδικευμένη μορφή μυός καλείται ασύγχρονος μύς πτήσης, και είναι μια προσαρμογή της φυσιολογίας του εντόμου που δεν μπορεί εύκολα να αναπαραχθεί από τις τεχνητές ιπτάμενες συσκευές όπως τα αεροπορικά οχήματα μικροϋπολογιστών. Το τελικό αποτέλεσμα από τα παραπάνω είναι ότι πολλά Neoptera(εικ.15) μπορούν να αιωρηθούν, να πετάξουν προς τα πίσω, και να εκτελέσουν κινήσεις που απαιτούν έναν υψηλότερο βαθμό λεπτού ελέγχου, βαθμό που τα έντομα με τους άμεσους μύς πτήσης δεν μπορούν να επιτύχουν.

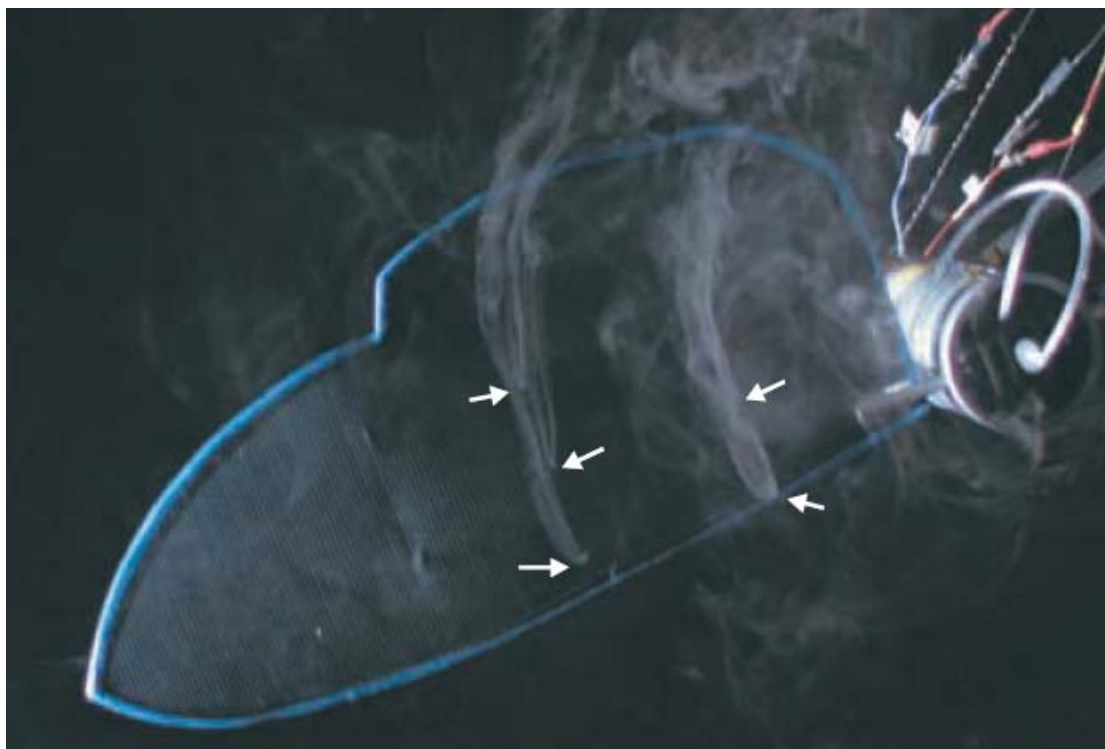


Εικόνα 16: Neoptera

1.2 Η επιστήμη σε σχέση με τα ιπτάμενα έντομα



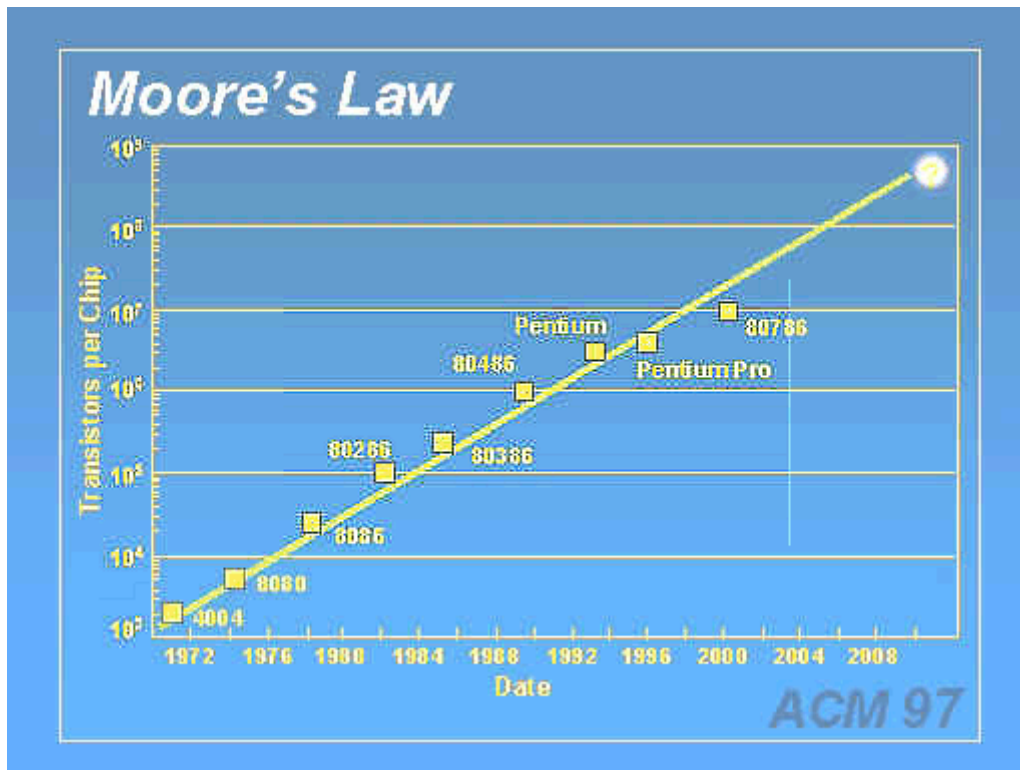
Εικόνα 17: Στόχος η υλοποίηση ενός μηχανικού εντόμου



Εικόνα 18: καρτέ από βιντεοσκόπηση πτέρυγας

1.2.1 Εισαγωγή

Η πρόοδος της επιστήμης σε σχέση με την μελέτη και κατανόηση της πτήσης των εντόμων τα τελευταία χρόνια έχει εκτιναχθεί κάτι που εκτός από το ενδιαφέρον των αεροδυναμιστών μπορεί να αποδοθεί κυρίως στις εφαρμογές που θα ακολουθήσουν την πλήρη διαλεύκανση της. Η τεράστια πρόοδος στις εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου(εικ.16), την ταχύτητα των ηλεκτρονικών υπολογιστών (σημαντική ώθηση στην γρηγορότερη επίλυση εξισώσεων για την προσομοίωση της πτήσης), τις ανεπτυγμένες τεχνικές βιντεοσκόπησης (για τον πλήρη καθορισμό των κινήσεων κάθε εντόμου,εικ.17) επιταχύνουν ακόμα περισσότερο τις διαδικασίες που θα οδηγήσουν στην κατασκευή ιπτάμενων μικρορομπότ που θα έχουν τις ίδιες δυνατότητες με τα έντομα.



Εικόνα 19: Ο νόμος του Moore προβλέπει την πρόοδο της υπολογιστικής ισχύος των επεξεργαστών

Η πρόοδος στην κατανόηση των μηχανισμών πτήσης έχει επιτρέψει την ανάπτυξη απλών αναλυτικών και εμπειρικών προτύπων που μας επιτρέπουν να υπολογίζουμε τις στιγμιαίες δυνάμεις στα flapping φτερά εντόμων ακριβέστερα από ήταν προηγουμένως δυνατός. Διεπιστημονικές συνεργασίες μεταξύ φυσικών που επιδιώκουν να εξηγήσουν τα φαινόμενα, βιολόγων που επιδιώκουν να καταλάβουν τη σχέση της αεροδυναμικής με τη φυσιολογία και την εξέλιξη των εντόμων, και μηχανικών που εμπνέονται για να κατασκευάσουν μικρό-ρομποτικά έντομα χρησιμοποιώντας αυτές τις αρχές είναι το επόμενο βήμα. Παρακάτω καλύπτονται οι βασικές φυσικές αρχές που ακολουθεί η πτήση των εντόμων καθώς επίσης και οι διαφορετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για να εξηγήσουν αυτά τα φαινόμενα.

Οι κύριες κατευθύνσεις της έρευνας στα ιπτάμενα ζώα είναι η προσομοίωση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, η απευθείας μελέτη των αεροδυναμικών φαινομένων κατά την πτήση ενός αληθινού εντόμου (σε αεροδυναμική σήραγγα) και η κατασκευή απλών μηχανών που να παράγουν ανωστικές ή και προωστικές δυνάμεις αντίστοιχες με αυτές που απαιτούνται για την αιώρηση ή και την κίνηση ενός εντόμου.

1.2.2 Βασική αεροδυναμική

Υπάρχουν δύο βασικά αεροδυναμικά πρότυπα της πτήσης εντόμων. Τα περισσότερα έντομα χρησιμοποιούν μια μέθοδο που δημιουργεί μια σπειροειδή δίνη που εκφεύγει από την μπροστινή ακμή της πτέρυγας (leading edge vortex). Η άλλη μέθοδος είναι ο μηχανισμός clap and fling όπου τα δύο φτερά χτυπούν μεταξύ τους πάνω από το σώμα του εντόμου.

Η πρόοδος στην κατανόηση των άνωθεν μηχανισμών έχει επιτρέψει την ανάπτυξη απλών αναλυτικών και εμπειρικών προτύπων που μας επιτρέπουν να υπολογίζουμε τις στιγμιαίες δυνάμεις στα flapping φτερά εντόμων ακριβέστερα από ήταν προηγουμένως δυνατός. ναρπαστικές διεπιστημονικές συνεργασίες μεταξύ των φυσικών που επιδιώκουν να εξηγήσουν στη φαινομενολογία, τους βιολόγους που επιδιώκουν να καταλάβουν τη σχετικότητα της στη φυσιολογία και την εξέλιξη εντόμων, και τους μηχανικούς που εμπνέονται για να χτίσουν τα μικροϋπολογιστή-ρομποτικά έντομα χρησιμοποιώντας αυτοί αρχές. Αυτή η αναθεώρηση καλύπτει τις βασικές φυσικές αρχές που κρύβονται κάτω από τη χτυπώντας πτήση στα έντομα, τα αποτελέσματα των πρόσφατων πειραμάτων σχετικά με την αεροδυναμική της πτήσης εντόμων, καθώς επίσης και τις διαφορετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν αυτά τα φαινόμενα.

1.2.3 Στρόβιλος ακμής πρόσπτωσης - Leading edge vortex

Η κίνηση των πτερών αποτελείται από 2 βασικά στάδια το downstroke και το upstroke. Κατά τη διάρκεια του downstroke το φτερό χτυπά προς τα κάτω τον αέρα και παράγει άνωση και ανάλογα με το twist που έχει παράγονται και προωστικές δυνάμεις, ενώ το upstroke είναι η κίνηση επαναφοράς του φτερού στην αρχική θέση ούτως ώστε να συνεχιστεί ο κύκλος. Στο upstroke η άνωση παίρνει αρνητικές τιμές. Όταν το έντομο αιωρείται, τα δύο κτυπήματα παίρνουν τη ίδια ποσότητα του χρόνου με αποτέλεσμα η συνολική άνωση κατά τη διάρκεια του κύκλου να εξισορροπεί το βάρος του εντόμου και η συνολική παραγόμενη προωστική δύναμη να είναι μηδενική. Ένα πιά αργό downstroke παρέχει την ώθηση. Όταν το έντομο εκτελεί ευθεία πτήση, οι δυνάμεις που παράγονται κατά τον διαμήκη άξονα των φτερών είναι ίσες και αντίθετες στα δύο φτερά με αποτέλεσμα μηδενική συνισταμένη δύναμη κατά αυτή τη κατεύθυνση.

Το φάσμα συχνότητας στα έντομα με σύγχρονους μυς πτήσης είναι μεταξύ 5 έως 200 Hz. Σε εκείνα με ασύγχρονους μυς πτήσης, η συχνότητα του wingbeat μπορεί να υπερβεί τα 1000 Hz

Ο προσδιορισμός σημαντικών δυνάμεων είναι κρίσιμος για την κατανόηση της πτήσης εντόμων. Οι πρώτες προσπάθειες να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός των φτερών που χτυπάνε (flapping wings) υπέθεσαν ότι η ροή αέρα πέρα από το φτερό οποιαδήποτε στιγμή θα ήταν η ίδια όπως η ροή αν το ίδιο φτερό δεν εκτελούσε κίνηση και απλά βρισκόταν υπό την ίδια γωνία πρόσπτωσης. Χωρίζοντας την κίνηση του φτερού σε πολλές ακίνητες θέσεις και εξετάζοντας τα αεροδυναμικά φορτία που θα είχε ακίνητο το φτερό υπό τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης, θα ήταν δυνατό να πάρουμε μια πρώτη ένδειξη των στιγμιαίων δυνάμεων που αναπτύσσονται κάθε στιγμή στο φτερό ως προς το χρόνο.

Με την παραπάνω μέθοδο η υπολογισμένη άνωση ήταν πάρα πολύ μικρή (περίπου το ένα τρίτο από αυτό που υπολογίστηκε ότι πρέπει να παράγεται). Έτσι η έρευνα στράφηκε στα μη μόνιμα φαινόμενα που θα μπορούσαν να εξηγήσουν τις αεροδυναμικές δυνάμεις. Αρκετοί αναπτύσσουν αναλυτικά πρότυπα που προσπαθούν να προσεγγίσουν τη ροή κοντά σε ένα flapping φτερό. Μέσω της υπολογιστικής ρευστομηχανικής, υποστηρίζεται ότι οι υψηλότερες δυνάμεις προκαλούνται από μια αλληλεπίδραση του φτερού με τα ίχνη που συναντά από το προηγούμενο κτύπημα.

Τα φαινόμενα που συνδέονται με τα χτυπώντας φτερά δεν γίνονται κατανοητά εντελώς. Επειδή κάθε πρότυπο που χρησιμοποιείται είναι μια προσέγγιση, τα διάφορα πρότυπα αφήνουν έξω τα αποτελέσματα που υποτίθεται ότι ήταν αμελητέα. Παραδείγματος χάριν, η επίδραση του φαινομένου Wagner λέει ότι η κυκλοφορία αυξάνεται σιγά-σιγά λόγω της συνεκτικότητας όταν ένα κεκλιμένο φτερό επιταχύνεται μετά από ανάπαυση. Αυτό το φαινόμενο θα εξηγούσε μια μικρότερη άνωση από την προβλεπόμενη. Όμως σκοπός της έρευνας είναι να βρεθούν οι αιτίες για την μεγαλύτερη άνωση από την προβλεπόμενη. Έχει υποστηριχτεί ότι αυτή η επίδραση του φαινομένου Wagner είναι αμελητέα για ροές με έναν αριθμό Reynolds κοντά σε αυτούς της πτήσης εντόμων. Έτσι αγνοήθηκε συνειδητά σε αρκετά πρόσφατα πρότυπα.

Ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της πτήσης των εντόμων είναι η λεγόμενη αναρρόφηση στην μπροστινή ακμή (leading edge suction). Η έννοια της εισήχθηκε αρχικά για να περιγράψει την άνωση των δινών σε λεπτά φτερά σχήματος δέλτα. Στις υψηλές γωνίες πρόσπτωσης, η ροή χωρίζεται σε ένα σημείο της μπροστινής ακμής από την αιχμή αλλά επανενώνεται πλίν φθάνει στη πίσω ακμή (trailing edge) Μέσα σε αυτήν την φυσαλίδα της χωρισμένης ροής είναι μια δίνη.

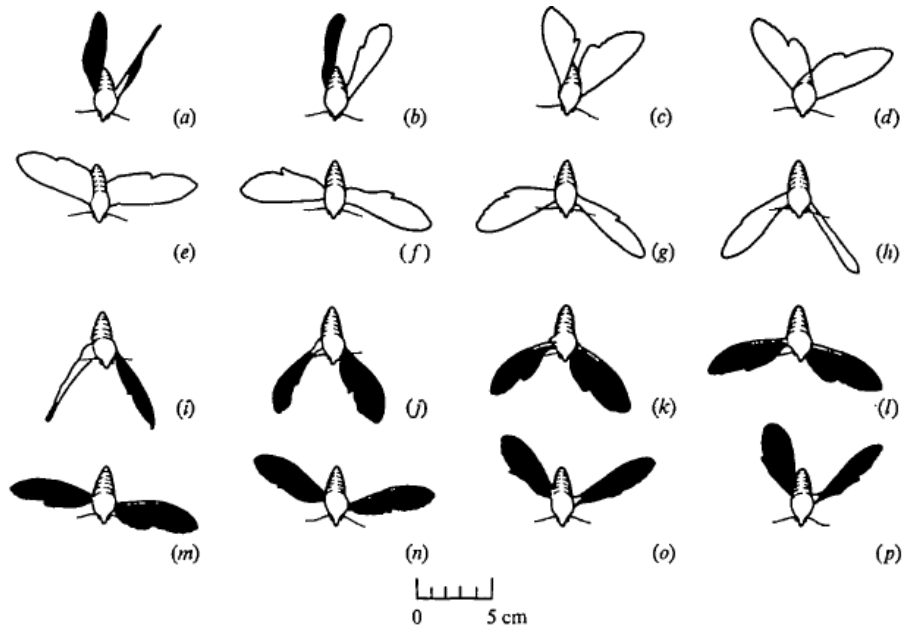
Αυτό δημιουργεί μια μεγάλη δύναμη άνωσης ποσού καθώς επίσης και κάποια πρόσθετη οπισθέλκουσα. Το σημαντικό εντούτοις, είναι η ανωστική δύναμη. Επειδή η ροή έχει χωρίσει, όμως παρέχει ακόμα άνωση μεγάλων τιμών, αυτό το φαινόμενο καλείται delayed stall. Αυτή η επίδραση παρατηρήθηκε στην πτήση εντόμων, και αποδείχθηκε ικανή για να παράγει αρκετή άνωση για να συμπληρώσει την άνωση που έλειπε από τις μελέτες μόνιμων ροών.

Όλα τα αποτελέσματα ενός flapping φτερού μπορούν να αποδοθούν σε τρεις πηγές αεροδυναμικών φαινομένων: τη δίνη στην ακμή αιχμής (leading edge vortex, εικ.20), τις αεροδυναμικές δυνάμεις που θα είχαμε σε περίπτωση μόνιμης ροής, και την αλληλεπίδραση του φτερού με τα ίχνη που αφήνει από προηγούμενες χρονικές στιγμές..

Το βάρος των περισσότερων ιπτάμενων εντόμων παίρνει τιμές από περίπου 20 μικρογραμμάρια έως περίπου 3 γραμμάρια. Όσο η μάζα των σωμάτων αυξάνεται, τόσο μεγαλώνει η επιφάνεια των φτερών και τόσο μειώνεται η συχνότητα των κινήσεων. Για τα μεγαλύτερα έντομα, ο αριθμός Reynolds μπορεί να πάρει υψηλές τιμές (π.χ. 10000). Για τα μικρότερα έντομα, μπορεί να είναι χαμηλός έως και μόλις 10. Αυτό σημαίνει ότι τα συνεκτικά φαινόμενα είναι σημαντικότερα στα μικρότερα έντομα, αν και η ροή είναι στρωτή ακόμη και στα μεγαλύτερα ιπτάμενα έντομα.

Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό γνώρισμα της πτήσης εντόμων είναι η κλίση του σώματος (κορμού). Όταν η ταχύτητα πτήσης αυξάνεται, το σώμα τείνει να γείρει τη μύτη προς τα κάτω και να γίνει πιο οριζόντιο. Αυτό μειώνει τη μετωπική περιοχή (που προσβάλλει το πεδίο ροής) και επομένως μειώνεται η οπισθέλκουσα που ασκείται στο ζώο. Έτσι παρόλο που η οπισθέλκουσα αυξάνεται εξαιτίας της μεγαλύτερης ταχύτητας το έντομο καθιστά την πτήση του αποδοτικότερη καθώς η η ταχύτητα αυξάνεται πιο γρήγορα από ότι η οπισθέλκουσα (μεγαλύτερη ταχύτητα με μικρότερες αεροδυναμικές αντιστάσεις, άρα μικρότερη ενέργεια που πρέπει να καταναλωθεί). Επιπλέον, με την αλλαγή της γεωμετρικής γωνίας πρόσπτωσης κατά τη διάρκεια του downstroke, το έντομο είναι σε θέση να κρατήσει την πτήση του κοντά στη βέλτιστη αποδοτικότητα χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερους ελέγχους.

Η ανάπτυξη της πρόωσης είναι μικρή σε σύγκριση με την άνωση. Η άνωση μπορεί να είναι έως και τρεις φορές το βάρος του εντόμου, ενώ η ώθηση και σε σχετικά υψηλές ταχύτητες μπορεί να είναι χαμηλή όπως 20% του βάρους.



Εικόνα 20: Ένας πλήρης κύκλος μιας *Manduca sexta*



Εικόνα 21: Η ανάπτυξη της δίνης από την ακμή πρόσπτωσης

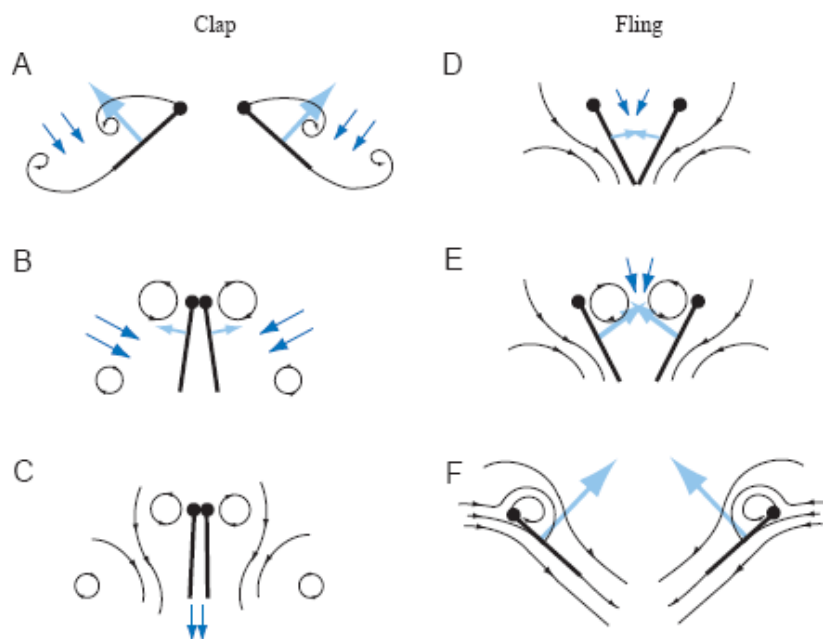
1.2.4 Clap and fling mechanism

Η δεύτερη μέθοδος πτήσης (clap and fling mechanism) λειτουργεί διαφορετικά. Σε αυτήν την διαδικασία, τα φτερά χτυπούν μαζί επάνω από το σώμα του εντόμου και πετούν έπειτα χώρια. Καθώς ανοίγουν ο αέρας απορροφάται μέσα και δημιουργεί μια δίνη στο κάθε φτερό. Αυτή η δεσμευμένη πλέον δίνη, κινείται πάνω στο φτερό και, στο 'πλάκωμα' (clap) με το άλλο φτερό, ενεργεί ως αρχική δίνη για αυτό.

Μ' αυτό τον τρόπο, η κυκλοφορία και η άνωση είναι μεγαλύτερες και από αυτές που δημιουργούνται με την πρώτη μέθοδο πτήσης. Ένας από τους λόγους αυτή η μέθοδος δεν υιοθετείται από περισσότερα έντομα είναι η ζημιά και η γήρανση στα φτερά που προκαλούνται με το επαναλαμβανόμενο χτύπημα. Επικρατεί στα έντομα που έχουν χαμηλούς αριθμούς Reynolds και είναι πολύ μικρά (πχ *encarsia formosa*, εικ.21). Επειδή στην παρούσα εργασία δεν εξετάζουμε τέτοια περίπτωση για παραπάνω πληροφορίες παραπέμπουμε σε εργασίες Weis-fogh, και απλά παραθέτουμε τα επιμέρους στάδια του μηχανισμού(εικ.22)



Εικόνα 22: Μια *encarsia formosa*



Εικόνα 23: Ο clap and fling mechanism στα επιμέρους στάδια του

1.2.5 Παρατήρηση εντόμων και πειραματικές προκλήσεις

Όπως με πολλά προβλήματα στη βιολογία, μια βαθιά κατανόηση της πτήσης εντόμων εξαρτάται από τις μικρές λεπτομέρειες που μπορούν εύκολα να αγνοηθούν σε λεπτομερείς θεωρητικές ή πειραματικές αναλύσεις. Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές έχουν ωφεληθεί πολύ από τη διαθεσιμότητα πολλών βιντεοσκοπήσεων ιπτάμενων εντόμων.

Λόγω του μικρού μεγέθους και των υψηλών συχνοτήτων των κινήσεων των φτερών, είναι συχνά αρκετά δύσκολο να μετρηθούν με ακρίβεια οι κινήσεις των φτερών. Παραδείγματος χάριν, ένα μεσαίου μεγέθους έντομο όπως η κοινή *Drosophila* (φρουτόμυγα) είναι περίπου 23mm σε μήκος και χτυπά τα φτερά της με συχνότητα 200Hz. Ο προσδιορισμός της κίνησης για τέτοια μικρά και γρήγορα σώματα συνεχίζει να θέτει σημαντικές προκλήσεις στην τρέχουσα τεχνολογία.

Μέθοδοι όπως η *velocimetry digital particle image velocimetry (DPIV)* που χρησιμοποιείται σε ροές, με βοήθεια ισχυρών υπολογιστών για την προσομοίωση και ανάλυση της ροής βρίσκει εφαρμογή και στην παρατήρηση εντόμων. Χρησιμοποιώντας αυτές και άλλες νέες μεθόδους, οι ερευνητές μπορούν να συνεχίσουν με λιγότερους αγνώστους που απλοποιούν τις υποθέσεις στις οποίες παλαιότερα στηρίζονταν για να θέσουν πρότυπα για την πτήση εντόμων. Αυτή η πιο λεπτομερής άποψη των κινήσεων, των δυνάμεων και των ροών που έχουν σήμερα οι επιστήμονες, έχει οδηγήσει στη σημαντική πρόοδο στην κατανόησή της αεροδυναμικής πτήσης εντόμων.

Οι πρώτες προσπάθειες να βιντεοσκοπηθούν φτερά κατά τη πτήση (όπως η έρευνα του Ellington το 1984) αν και αρκετά πληροφοριακές, δεν μπορούν να παρέχουν μια ακριβή χρονική πορεία της γωνίας πρόσπτωσης των δύο φτερών και του *twist* την κάθε στιγμή.

Οι πιο πρόσφατες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιήσει πιο σύγχρονες τεχνολογίες (Willmott και Ellington, 1997b), οι οποίες προσφέρουν μεγαλύτερη ευαισθησία με καλύτερη ανάλυση εικόνας. Στις έρευνες όπου προσδένεται ένα έντομο σε μια αεροδυναμική σήραγγα για να μελετηθεί πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, ότι τα έντομα στηρίζονται πολύ σε οπτικό ανατροφοδοτούν (η κίνηση τους εξαρτάται από αυτό που βλέπουν), και ως εκ τούτου πρέπει να εξασφαλίζεται ότι ο φωτισμός στο πείραμα δεν επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά ενός εντόμου.

Στη καλύτερη περίπτωση, οι δυνάμεις πτήσης έχουν μετρηθεί σχετικά με το σώμα του εντόμου και όχι σχετικά με τα φτερά του, κάτι που καθιστά πολύ δύσκολο να διαχωριστούν οι δυνάμεις αδράνειας από τις αεροδυναμικές δυνάμεις που παράγονται από κάθε φτερό. Επιπλέον, η πρόσδεση μπορεί να αλλάξει την κίνηση φτερών, και κατά συνέπεια οι δυνάμεις να μην είναι αντιπροσωπευτικές με αυτές στην ελεύθερη πτήση. Οι ερευνητές έχουν υπερνικήσει αυτούς τους περιορισμούς χρησιμοποιώντας δύο στρατηγικές. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει την κατασκευή μοντέλων στα οποία είναι ευκολότερο να μετρηθούν άμεσα οι αεροδυναμικές δυνάμεις και να απεικονιστεί η ροή, ενώ μια δεύτερη προσέγγιση είναι να γίνει προσομοίωση των φτερών των εντόμων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Και στις δύο περιπτώσεις η επιτυχία των μεθόδων εξαρτάται αυστηρά από την ακριβή γνώση κίνησης φτερών.

1.2.6 Τρέχουσα έρευνα – το επόμενο βήμα

Οι επιστήμονες μελετούν την πτήση εντόμων για ποικίλους λόγους: βιολογική ανάπτυξη και κατανόηση των ζώων, ένα καθαρώς επιστημονικό ενδιαφέρον για την μη μόνιμη αεροδυναμική, ενδιαφέρον της εφαρμοσμένης μηχανικής να αναπτυχθούν αεροπορικά οχήματα μικροϋπολογιστών (micro-air-vehicles(MAVs) ή παρόμοιες συσκευές. Η πιο χρήσιμη εφαρμογή είναι αεροπορικά οχήματα μικροϋπολογιστών. Με βάση το μέγεθος του MAV, οι διαφορετικές μέθοδοι πτήσης έχουν περισσότερο νόημα. Αυτήν την περίοδο, τα περισσότερα MAVs είναι μεγαλύτερα από τα έντομα και πετούν σε αριθμούς Reynolds πιο κοντά σε αυτούς στην πτήση πουλιών. Για ένα μικρότερο MAV που πετά σε έναν μικρότερο αριθμό Reynolds, η μηχανική της πτήσης των εντόμων είναι απαραίτητη. Επιπλέον, MAVs στο μέγεθος των εντόμων μπορούν να εκπληρώσουν διάφορους στόχους που τα μεγαλύτερα οχήματα δεν μπορούν.

Η ιστορία αυτού του τομέα της έρευνας προδίδει τα μελλοντικά βήματα της. Ένα επιτυχές MAV θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επιτήρηση σε χώρους εργασίας, να βοηθήσει καθοριστικά σε μια επιχείρηση διάσωσης(αναγνώριση χώρου). Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε εργοστάσια για πρόληψη ατυχημάτων, δίνοντας πληροφορίες για θέσεις όπου δεν είναι δυνατός ο έλεγχος (π.χ σε πυρηνικά εργοστάσια να μπούν σε θέσεις όπου λόγω ραδιενέργειας δεν μπορεί να πλησιάσει ένας άνθρωπος) ή είναι αρκετά δύσκολος (λόγω μικρού χώρου,μεγάλου ύψους κλπ). Βέβαια υπάρχουν και εργασίες στις οποίες θα αντικαταστήσουν ανθρώπους και προκαλέσουν αντίδραση, αλλά παράλληλα θα δημιουργούνται και θέσεις εργασίας για τον χειρισμό-έλεγχο τους.

Μερικά πράγματα που ένα MAV θα μπορούσε να κάνει είναι προφανώς καταστρεπτικά. Μικρές εκρηκτικές ύλες, χημικές και τοξικές ουσίες μπορούν να αποσταλούν σε ακριβή θέση για προσπάθειες δολοφονίας.

Η ύπαρξη MAVs στο στρατό σημαίνει ότι οι στρατιώτες δεν χρειάζεται να διακινδυνεύουν τις ζωές τους για κάποιες αποστολές

Συγχρόνως, αυτές οι αποστολές οδηγούν άμεσα στους θανάτους των εχθρών. Άλλες στρατιωτικές εφαρμογές είναι αναγνώριση και επιτήρηση. Έτσι, όπως με τόσες άλλες τεχνολογίες η εφαρμογή-υλοποίηση ιπτάμενων μικρο-ρομποτ που ακολουθούν το παράδειγμα των εντόμων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ειρηνικούς και πολεμικούς σκοπούς.

1.3 Βιβλιογραφία

1. 'Mathematical Biofluidynamics' Sir James Lighthill
2. 'The aerodynamics of insect flight' Sanjay P. Sane
3. 'A three-dimensional computational study of aerodynamic mechanisms of insect flight' Ravi Tamamurti, William C. Sandberg
4. 'Aerodynamics of flapping flight with application to insects' M.F.M. Osborne
5. 'The aerodynamics of revolving wings I. Model hawkmoth wings' J.R. Usherwood, C.P. Ellington
6. 'The novel aerodynamics of insect flight: applications to micro-air vehicles' C.P. Ellington
7. <http://www.youtube.com/watch?v=fFpov-ZSujA>

Κεφάλαιο 2: Θεωρία

2.1 Θεωρητικό πλαίσιο

2.1.1 Εισαγωγή

Για τη μελέτη και κατανόηση της πτήσης των εντόμων είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός των δυνάμεων που παράγονται. Αρκετά νωρίς, έγινε κατανοητό ότι η ροή αέρα πέρα από το φτερό οποιαδήποτε στιγμή δεν θα ήταν η ίδια όπως η ροή αν το ίδιο φτερό δεν εκτελούσε κίνηση και απλά βρισκόταν υπό την ίδια γωνία πρόσπτωσης.

Έτσι, χωρίζοντας δηλαδή την κίνηση του φτερού σε πολλές ακίνητες θέσεις και εξετάζοντας υπό τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης τα αεροδυναμικά φορτία που θα είχε ακίνητο το φτερό, δεν ήταν δυνατό να πάρουμε μια σωστή ένδειξη των στιγμιαίων δυνάμεων που αναπτύσσονται κάθε στιγμή στο φτερό ως προς το χρόνο (σωστή με βάση τα όσα γνωρίζουμε για τις απαιτούμενες δυνάμεις από την παρατήρηση των εντόμων).

Πιο συγκεκριμένα με την παραπάνω μέθοδο η υπολογισμένη άνωση ήταν πάρα πολύ μικρή (κοντά στο ένα τρίτο από αυτό που περιμέναμε). Έτσι η έρευνα στράφηκε στα μη μόνιμα φαινόμενα που θα μπορούσαν να εξηγήσουν τις αεροδυναμικές δυνάμεις. Μέσω της υπολογιστικής ρευστομηχανικής, βρέθηκε ότι οι υψηλότερες δυνάμεις προκαλούνται από μια αλληλεπίδραση του φτερού με τα ίχνη που συναντά από το προηγούμενο κτύπημα.

Η παρούσα εργασία στηρίζεται στη μη μόνιμη αεροδυναμική. Εξετάζονται αδύνατα σώματα (οι πτέρυγες με μηδενικό πάχος), ενώ το φαινόμενο εξετάζεται στις περισσότερες περιπτώσεις σε 4 περιόδους(πλήρεις κύκλους), όπου τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι είναι περιοδικά, δηλαδή σε κάθε κύκλο παράγονται σχεδόν ίδιες δυνάμεις. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίζεται ο κώδικας του εργαστηρίου, τον οποίο τρέξαμε σε αυτή την εργασία.

2.1.2 Η μέθοδος των στοιχείων στροβιλότητας

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα διαχωρισμού του πεδίου ταχυτήτων Helmholtz η ροή εκφράζεται σαν άθροισμα αστρόβιλων και στροβιλών τμημάτων. Στη συνέχεια, με βάση το θεώρημα του Green αναπαριστώνται τα αστρόβιλα τμήματα ως διανομές

ιδιομορφιών που αντιπροσωπεύουν τα στερεά σώματα. Οι ιδιομορφίες αυτές είναι διανομές πηγών για τα μη ανωστικά σώματα και διανομές διπόλων για τα σώματα με κυκλοφορία. Τα στροβιλιά τμήματα αποτελούνται από την ελεύθερη στροβιλότητα που αποβάλλεται από τα σώματα (ομόρρους) ή ήδη περιέχεται στο επερχόμενο πεδίο ροής (στροβιλότητα που μπορεί να προέρχεται από τον ομόρρου προπορευόμενων σωμάτων).

Για να υπολογιστεί το αστρόβιλο τμήμα, χρησιμοποιούνται οι κινηματικές συνθήκες, δηλαδή εφαρμόζοντας την συνθήκη μη εισχώρησης πάνω στα στερεά όρια. Για το στροβιλό τμήμα, που αποτελείται από τα αποβαλλόμενα φύλλα στροβιλότητας των σωμάτων, επιβάλλεται η συνθήκη Kutta-Joukowski στις ακμές εκφυγής.

Η εξέλιξη του ομόρρου προκύπτει από την ολοκλήρωση στο χρόνο των εξισώσεων μεταφοράς και παραμόρφωσης της στροβιλότητας. Τέλος, οι πιέσεις στα στερεά όρια υπολογίζονται εφαρμόζοντας την γενικευμένη εξίσωση Bernoulli.

Σε αυτό το σημείο, θα γίνει σύντομη περιγραφή του θεωρήματος του Helmholtz και του θεωρήματος του Green.

2.1.3 Το θεώρημα Helmholtz

Κάθε πεδίο ταχύτητας $\vec{U}(\vec{x}, t), \vec{x} \in D, t > 0$, όπου D το πεδίο ροής, μπορεί και αναλύεται σε άθροισμα ενός αστρόβιλου και ενός στροβιλού πεδίου μηδενικής απόκλισης.

$$\vec{U}(\vec{x}, t) = \vec{U}_\omega(\vec{x}, t) + \nabla\Phi(\vec{x}, t) \quad (1)$$

όπου $\Phi(\vec{x}, t), \vec{x} \in D$ κατάλληλη συνάρτηση δυναμικού, τέτοια ώστε:

$$\nabla^2\Phi(\vec{x}, t) = \nabla\vec{U}(\vec{x}, t) \quad (2)$$

$\vec{U}_\omega(\vec{x}, t), \vec{x} \in D, t > 0$ η επαγόμενη ταχύτητα από το γενικευμένο πεδίο χωρικά διανεμημένης στροβιλότητας $\vec{\omega}(\vec{x}, t)$.

Ισχύει:

$$\nabla\vec{U}(\vec{x}, t) = 0, \nabla \times \vec{U}_\omega(\vec{x}, t) = \vec{\omega}(\vec{x}, t) \quad (3)$$

οπότε προκύπτει:

$$\vec{U}_\omega(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_D \frac{\vec{\omega}(\vec{y}, t) \times (\vec{x} - \vec{y})}{|\vec{x} - \vec{y}|^3} d\vec{y}, \vec{x} \in D, \vec{y} \in D, t > 0 \quad (4)$$

Θεωρώντας το ρευστό ασυμπιεστο, εάν $D \in \mathbb{R}^3$ το πεδίο ροής, το οποίο εκτείνεται έως το άπειρο και το οποίο έχει σύνορα τις επιφάνειες των στερεών σωμάτων που βρίσκονται μέσα σε αυτό, τότε:

$$\nabla^2 \Phi(\vec{x}, t) = 0, \vec{x} \in D \quad (5)$$

Στη περίπτωση αυτή το αστρόβιλο τμήμα φροντίζει για την ικανοποίηση των συνοριακών συνθηκών στα στερεά όρια ενώ το στροβιλό υπάρχει για να λαμβάνει υπόψη τη χωρική στροβιλότητα που περιλαμβάνεται στον ομόρρου.

2.1.4 Το θεώρημα Green

Εστω ότι $\Phi^+(\vec{x})$ και $\Phi^-(\vec{x})$ δύο συναρτήσεις ορισμένες στο M3 για τις οποίες ισχύει:

$$\begin{aligned} \Phi^+(\vec{x}) &= 0, \vec{x} \in D^+ \\ \Phi^-(\vec{x}) &= 0, \vec{x} \in D^- \\ \nabla^2 \Phi^+(\vec{x}) &= 0, \vec{x} \in D^+ \\ \nabla^2 \Phi^-(\vec{x}) &= 0, \vec{x} \in D^- \end{aligned} \quad (6)$$

Εισάγοντας τις διανομές πηδήματος δυναμικού:

$$\llbracket \Phi(\vec{x}) \rrbracket = \Phi^+(\vec{x}) - \Phi^-(\vec{x}), \vec{x} \in S \quad (7)$$

και τις διανομές πηδήματος κάθετης παραγώγου,

$$\left\llbracket \frac{\partial \Phi(\vec{x})}{\partial n} \right\rrbracket(\vec{x}) = \vec{n}(\vec{x}) [\nabla \Phi^+(\vec{x}) - \nabla \Phi^-(\vec{x})], \vec{x} \in S \quad (8)$$

όπου η κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια S, αποδεικνύεται ότι:

$$\int_S \left\{ \left\llbracket \frac{\partial \Phi(\vec{x})}{\partial n} \right\rrbracket(\vec{x}) \cdot G(\vec{x}_0 - \vec{x}) - \llbracket \Phi \rrbracket(\vec{x}) \frac{\partial}{\partial n} G(\vec{x}_0 - \vec{x}) \right\} dS(\vec{x}) = \begin{cases} \Phi^+(\vec{x}_0), \vec{x}_0 \in D^+ \\ \Phi^-(\vec{x}_0), \vec{x}_0 \in D^- \\ [a\Phi^+ + \beta\Phi^-](\vec{x}_0), \vec{x}_0 \in S \end{cases} \quad (9)$$

$$G(\vec{x}) = -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{|\vec{x}|}$$

G(x) η στοιχειώδης λύση της Laplace και α, β συντελεστές για τους οποίους ισχύει

$$\alpha = \beta = 1/2 \text{ για λεία σημεία της επιφάνειας S.}$$

Εάν χρησιμοποιηθεί ο ταυτοτικός μηδενισμός του δυναμικού στο εσωτερικό ($\Phi^- = 0$)

είναι δυνατόν να προκύψουν ταυτόχρονα και τα δύο πεδία Φ^+ και Φ^- αν είναι γνωστές οι δύο επιφανειακές διανομές, οι οποίες προσδιορίζονται από τις συνοριακές συνθήκες των δύο προβλημάτων, του εσωτερικού και του εξωτερικού αντίστοιχα.

Οπότε

$$\llbracket \Phi \rrbracket(\vec{x}) = \Phi^+(\vec{x}), \quad \left\llbracket \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right\rrbracket(\vec{x}) = \frac{\partial \Phi^+}{\partial n}(\vec{x}) = g(\vec{x}), \vec{x} \in S$$

$$\left[\Phi \right] (\bar{x}) = \Phi^+ (\bar{x}), \left[\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right] (\bar{x}) = \frac{\partial \Phi^+}{\partial n} (\bar{x}) = g(\bar{x}), \bar{x} \in S \quad (10)$$

Με το παραπάνω, υπεισέρχονται ταυτόχρονα και τα δύο είδη διανομών. Η διανομή πηγών προκύπτει μέσω της συνοριακής συνθήκης ενώ η διανομή διπόλων από την ολοκληρωτική εξίσωση.

Έτσι η διατύπωση αυτή επιτρέπει τον χειρισμό, κατά ενιαίο τρόπο, όλων των δυναμικών ροών με ή χωρίς ανάπτυξη άνωσης

$$\left[\frac{\partial \Phi(\bar{x})}{\partial n} \right] (\bar{x}) = \vec{n}(\bar{x}) [\nabla \Phi^+(\bar{x}) - \nabla \Phi^-(\bar{x})], \bar{x} \in S \quad (11)$$

Το θεώρημα του Green καθιστά δυνατή την αναπαράσταση των σωμάτων κατανέμοντας στην επιφάνεια τους διανομές πηγών και διπόλων. Για να υπολογιστεί το πεδίο ταχύτητας, υπολογίζεται η ένταση, στο κάθε χρονικό βήμα, των πηγών και των διπόλων σε κάθε στοιχείο των σωμάτων. Κάθε ένταση πηγών και διπόλων αποτελεί ένα βαθμό ελευθερίας του προβλήματος, που επηρεάζει το πεδίο ροής. Για να γίνει ο υπολογισμός, απαιτείται πεπερασμένος αριθμός βαθμών ελευθερίας με τις αντίστοιχες οριακές συνθήκες.

2.1.5 Φύλλο στροβιλότητας

Κάθε κινούμενη ή μη επιφάνεια S_w , που παρουσιάζει ασυνέχεια της εφαπτομενικής ταχύτητας, σε πεδίο ροής ασυμπίεσου μη συνεκτικού ρευστού, ονομάζεται φύλλο στροβιλότητας. Από φυσική άποψη τα φύλλα στροβιλότητας αποτελούν μη συνεκτικές εκδοχές των οριακών στρωμάτων και των στρωμάτων διάτμησης. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές για προσομοίωση ροών μεγάλου αριθμού Reynolds όπου τα συνεκτικά φαινόμενα περιορίζονται σε χωρία πολύ μικρού πάχους όπως ο ομόρρους από ανωστικά σώματα.

Ένα φύλλο στροβιλότητας παράγεται ως επιφάνεια ασυνέχειας δυναμικού (ως μια διανομή διπόλων) και μαθηματικά περιγράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \left[\vec{U} \right] (\bar{x}) \cdot \vec{n}(\bar{x}) &= 0, \bar{x} \in S_w \\ \vec{n}(\bar{x}) \times \left[\vec{U} \right] (\bar{x}) &= \gamma(\bar{x}), \bar{x} \in S_w \end{aligned} \quad (12)$$

όπου $n(x_w)$ το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα στο σημείο x_w και $\gamma(x_w)$ η ένταση της επιφανειακής στροβιλότητας στην ίδια θέση.

Η μέση ταχύτητα μεταφοράς σε κάθε σημείο του φύλλου στροβιλότητας δίνεται από τη σχέση $u(x_w, t) = d(x_w)/dt$. Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη κινηματική εξίσωση του ομόρρου και καθορίζει τη χρονική εξέλιξη της γεωμετρίας του.

Η δυναμική εξίσωση του ομόρρου καθορίζει την πίεση στις εκατέρωθεν πλευρές του φύλλου στροβιλότητας και στην ουσία ρυθμίζει την χρονική εξέλιξη της έντασης της στροβιλότητας σε αυτό. Η δυναμική εξίσωση σε κάθε σημείο δίνεται από τη σχέση:

$$P(x_w) = 0$$

Το πεδίο ταχύτητας ασυμπίεστου μη συνεκτικού ρευστού σύμφωνα με το θεώρημα του Helmholtz (1) είναι

$$\vec{U}(\vec{x}, t) = \vec{U}_\omega(\vec{x}, t) + \nabla\Phi(\vec{x}, t)$$

Σε περίπτωση ροής γύρω από ανωστικό σώμα ο όρος

$$\nabla\Phi(\vec{x}, t)$$

μπορεί να συμπεριλάβει την αποβαλλόμενη στροβιλότητα αυτού του σώματος που μπορεί να διανέμεται ως ένα ελεύθερο φύλλο στροβιλότητας. Έτσι, ο ομόρρους μπορεί να αναπαρίσταται από μια επιφάνεια ασυνέχειας του δυναμικού, κατασκευασμένη από πλέγμα δινοσωλήνων.

Η γεωμετρία του ομόρρου δεν είναι δεδομένη και με τη παραπάνω θεώρηση μπορεί να παρουσιαστούν αριθμητικές αστάθειες, με μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης σε περιοχές 'αναδίπλωσης' του φύλλου στροβιλότητας. Αυτές αντιμετωπίζονται εάν το φύλλο στροβιλότητας αναπαρασταθεί μέσω του $u_w(x, t)$. Αν γίνει αυτό, ο ομόρρους αποτελεί περιοχή γενικευμένης στροβιλότητας και απαρτίζεται από ένα σύνολο στοιχείων στροβιλότητας, οι θέσεις των οποίων αποτελούν τη γεωμετρία του ομόρρου.

Ο ομόρρους θεωρούμε ότι αποτελείται από δύο τμήματα. Τον κοντινό και τον μακρινό ομόρρου. Ο κοντινός ομόρρους αποτελεί το τμήμα του φύλλου στροβιλότητας που εκφεύγει άμεσα από το σώμα και αναπαρίσταται μέσω της δυναμικής θεώρησης με τη δημιουργία πλέγματος δινοσωλήνων. Ο μακρινός ομόρρους αποτελεί το υπόλοιπο τμήμα του φύλλου στροβιλότητας και αναπαρίσταται σύμφωνα με τη στροβιλή θεώρηση με στοιχεία στροβιλότητας. Αφού δημιουργηθεί ο κοντινός ομόρρους, η διανομή στροβιλότητας μετατρέπεται σε χωρική καθώς συγκεντρώνεται σημειακά σε στοιχεία στροβιλότητας. Έτσι ο μακρινός ομόρρους σχηματίζεται σε στροβιλή μορφή. Στη γενική έκφραση ενός πεδίου στροβιλότητας μπορούν να εισάγονται και φύλλα στροβιλότητας άλλων σωμάτων ή και διαταραχές της επ' άπειρον ροής με μορφή χωρικής στροβιλότητας. Σε αυτή τη περίπτωση οι θέσεις και οι εντάσεις των στοιχείων στροβιλότητας είναι γνωστές στο χρονικό βήμα όπου εισάγονται.

Η δυναμική αναπαράσταση του φύλλου στροβιλότητας γίνεται με τη θεώρηση πλέγματος ευθύγραμμων δινοσωλήνων έντασης μ_w , που προκύπτει από την εφαρμογή του θεωρήματος διατήρησης της κυκλοφορίας του Kelvin.

Θεωρητικές και πειραματικές μελέτες υποστηρίζουν ότι ένα ελεύθερο φύλλο στροβιλότητας καθώς εξελίσσεται στο χρόνο χάνει τη λεία γεωμετρικά μορφή του εξαιτίας του ιδιόμορφου χαρακτήρα των ολοκληρωμάτων που περιλαμβάνονται στον υπολογισμό του $V(p(x; t))$. Για να υπερβούμε αυτή τη δυσκολία εισάγεται μια γενίκευση του πεδίου στροβιλότητας.

Ανάλογα με τις υποθέσεις που εισάγονται για τον ομόρρου η σημασία των πεδίων $\omega(x, t)$ και $\Phi(x, t)$ είναι διαφορετική. Θεωρώντας ότι κατά την κίνησή τους τα σώματα συναντούν ρευστό που κινείται με ανομοιόμορφη ταχύτητα τότε η επερχόμενη ροή είναι στροβιλή. Τότε, υιοθετώντας το πρότυπο του φύλλου στροβιλότητας για τον ομόρρου του σώματος, το γενικευμένο πεδίο στροβιλότητας γράφεται:

$$\vec{\omega}(\vec{x}, t) = \vec{\omega}(\vec{x}, t) + \vec{\omega}_{[\Phi_n]}(\vec{x}, t) \quad (13)$$

Στην σχέση αυτή $\vec{\omega}(\vec{x}, t)$ είναι η χωρικά διανεμημένη στροβιλότητα που περιέχεται στην επερχόμενη ροή και $\vec{\omega}_{[\Phi_n]}(\vec{x}, t)$ η ιδιόμορφη στροβιλότητα που μεταφέρει ο ομόρρους και αντιστοιχεί σε διανομή πηδήματος δυναμικού. Στην περίπτωση αυτή η έκφραση του δυναμικού γράφεται:

$$\underline{\Phi}(\vec{x}, t) = \Phi(\vec{x}, t) + \Phi_w(\vec{x}, t) \quad (14)$$

όπου $\Phi_w(\vec{x}, t)$ η συνεισφορά στο δυναμικό από τον ομόρρου και $\Phi(\vec{x}, t)$ η συνεισφορά στο δυναμικό από τα σώματα.

2.1.6 Η κινηματική συνθήκη μη εισχώρησης

Για να ικανοποιείται η συνθήκη μη εισχώρησης σε σημείο x της επιφάνειας ενός σώματος, επιβάλλεται ο μηδενισμός της κάθετης ταχύτητας σε αυτό το σημείο.

$$(u(x,t) - U_B(x,t)) \cdot \nu(x) = 0,$$

όπου x	το σημείο της επιφάνειας,
$\nu(x)$	το κάθετο διάνυσμα στη θέση x
$U_B(x,t)$	η ταχύτητα του σώματος στο αδρανειακό σύστημα
$u(x,t)$	η ταχύτητα του πεδίου ροής στη θέση x .

2.1.7 Η συνθήκη Kutta-Joukowski

Το ρευστό θεωρείται μη συνεκτικό, έτσι για να εμφανιστεί κυκλοφορία γύρω από ανωστικά σώματα είναι απαραίτητη η επιβολή μιας επιπλέον συνθήκης. Η συνθήκη αυτή είναι η Kutta-Joukowski και επιβάλλεται με διαφορετικούς, ασυμπτωτικά ισοδύναμους μεταξύ τους τρόπους, ανάλογα με την διατύπωση του προβλήματος. Σύμφωνα με την συνθήκη απαιτείται εξισορρόπηση των πιέσεων στις οξείες ακμές των σωμάτων ή ισοδύναμα άρση των απειρισμών του πεδίου ταχύτητας που εμφανίζονται κατά το μήκος τους. Ακόμα αποτέλεσμα της επιβολής της συνθήκης Kutta-Joukowski είναι η τροφοδότηση του πεδίου ροής με ελεύθερη στροβιλότητα. Από ρευστομηχανικής πλευράς η Kutta-Joukowski ικανοποιείται στις καμπύλες όπου δύο διαφορετικά διατμητικά στρώματα συναντώνται. Στην περίπτωση της πτέρυγας η καμπύλη αυτή είναι η ακμή εκφυγής όπου συναντώνται το οριακό στρώμα της πάνω με το οριακό στρώμα της κάτω πλευράς.

2.1.8 Υπολογισμός των αεροδυναμικών δυνάμεων

Για τον υπολογισμό των μη μόνιμων αεροδυναμικών φορτίων πάνω σε κάθε ανωστική επιφάνεια εφαρμόζεται η εξίσωση Bernoulli μεταξύ της πάνω και της κάτω πλευράς του περυγίου στο τυχαίο σημείο x , και παίρνουμε την ακόλουθη έκφραση για το πηδύμα της πίεσης κατά μήκος της

επιφάνειας του περυγίου:

$$\frac{\partial[\Phi]}{\partial t}(\bar{x},t) + \bar{U}_m(\bar{x},t) \cdot [\bar{U}](\bar{x},t) = -\frac{[p]}{\rho} \quad (15)$$

όπου $-[\phi]=\mu$ η διανομή δίπολων πάνω στην πτέρυγα, $U_m(x,t)$ η μέση ταχύτητα μεταξύ πάνω και κάτω πλευράς, $[u](x;t) = V[\Phi](x,t)$ η τοπική ασυνέχεια της ταχύτητας και $[p]$ το πήδημα της πίεσης.

Στο διακριτό πρόβλημα η παραπάνω σχέση λαμβάνεται σε κάθε σημείο ελέγχου (δηλαδή στο κέντρο κάθε τμήματος) του k σώματος. Αν υποθέσουμε ότι $[p]_k^e$, $e = 1, Ek, k = 1, NB$ είναι το υπολογιζόμενο πήδημα της πίεσης σε κάθε σημείο ελέγχου k του σώματος, η δύναμη πάνω σε κάθε τμήμα e είναι:

$$F_k^e(t) = v_k^e \cdot [p]_k^e \cdot S_k^e \quad (16)$$

Η διανομή της δύναμης κατά μήκος του πτερυγίου, προκύπτει από την ολοκλήρωση των δυνάμεων σε κάθε strip (λωρίδα) του πτερυγίου και δίνεται από τη σχέση:

$$F_{strip}(t) = \sum v_k^e \cdot [p]_k^e \cdot S_k^e \quad (17)$$

$$F_{nstrip}(t) = \left(\sum v_k^e \cdot [p]_k^e \cdot S_k^e \right) e_n, \quad F_{tstrip}(t) = \left(\sum v_k^e \cdot [p]_k^e \cdot S_k^e \right) \cdot e_t \quad (18)$$

Όπου e_n, e_t , το μοναδιαίο κάθετο και παράλληλο στο επίπεδο του σώματος διάνυσμα αντίστοιχα. Η άθροιση γίνεται πάνω στο πλήθος των τμημάτων που απαρτίζουν το κάθε στοιχείο του πτερυγίου.

Αντίστοιχα η ροπή στρέψης του κάθε στοιχείου του πτερυγίου δίνεται από τη σχέση:

$$M_{strip} = \left(\sum_e (\vec{r}_0^e \times v_k^e) \cdot [p]_k^e \cdot S_k^e \right) \cdot \vec{e}_p \quad (19)$$

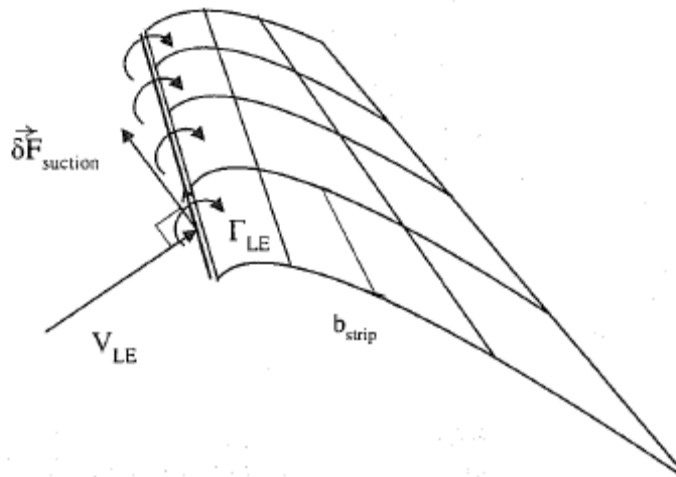
στην οποία \vec{r}_0^e το διάνυσμα θέσης του εκάστοτε σημείου ελέγχου ως προς τον διαμήκη άξονα του σώματος, γύρω από τον οποίο υπολογίζεται η ροπή στρέψης, και e_p το μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος αυτού του άξονα.

Λόγω του ιδιόμορφου χαρακτήρα της ροής (απειρισμός της ταχύτητας) στην ακμή πρόσπτωσης της πτέρυγας, μία επιπλέον δύναμη "αναρρόφησης" (suction force) προστίθεται στη δύναμη που υπολογίζεται. Η δύναμη αυτή υπολογίζεται με τη βοήθεια του θεωρήματος Joukowski:

$$\delta \vec{F}_{suction} = \rho \vec{V}_{LE} \times \vec{\Gamma}_{LE} \cdot b_{strip} \quad (20)$$

και αναπαριστά την επαγόμενη αντίσταση του σώματος. Στην παραπάνω σχέση η V_{LE} συμβολίζει το διάνυσμα της ταχύτητας υπολογισμένο κατά μήκος της ακμής πρόσπτωσης του σώματος και Γ_{LE} το διάνυσμα του στροβίλου που διέρχεται από την ακμή πρόσπτωσης, ενώ b_{strip} είναι το εύρος της κάθε λωρίδας .

Τα φορτία που υπολογίζονται με τις παραπάνω σχέσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τις επιδράσεις λόγω συνεκτικότητας, ούτε και την επίδραση της αποκόλλησης της ροής που γίνεται όλο και ισχυρότερη καθώς οι γωνίες πρόσπτωσης αυξάνουν



Εικόνα 24: Ο υπολογισμός της δύναμης αναρρόφησης

2.1.9 Χαρακτηριστικά μεθόδου στοιχείων στροβιλότητας

Η μέθοδος των στοιχείων στροβιλότητας είναι τρισδιάστατη και συμπεριλαμβάνει τον τρισδιάστατο χαρακτήρα της ροής εκτός από αυτόν που σχετίζεται άμεσα με τα συνεκτικά φαινόμενα. Ακόμα, είναι μη μόνιμη και επομένως μπορεί και προλέγει με ακρίβεια ροές γύρω από σώματα όταν το εισερχόμενο πεδίο ροής είναι χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενο ή παρουσιάζει ασυμμετρία σε σχέση με τον άξονα του σώματος (περιπτώσεις που δεν θα μας απασχολήσουν σε αυτή την εργασία). Έχει υπολογιστικό κόστος σχετικά χαμηλό, γεγονός που επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί σε αεροελαστικούς υπολογισμούς με στοχαστικό άνεμο, ενώ είναι και μέθοδος μη συνεκτική. Το γεγονός ότι η μέθοδος είναι μη συνεκτική καθιστά την χρήση της, τουλάχιστον στη μορφή που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, άνευ νοήματος σε περιπτώσεις όπου τα συνεκτικά φαινόμενα είναι ισχυρά. Αυτό κυρίως συμβαίνει όταν η ροή γύρω από ένα σώμα αποκολλάται.

2.2 Διακριτοποίηση του προβλήματος

2.2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι διαδικασίες με τις οποίες επιλύεται αριθμητικά το πρόβλημα της τρισδιάστατης μη μόνιμης ροής γύρω από κινούμενα σώματα. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, το πεδίο ροής χωρίζεται σε ένα αστρόβιλο τμήμα που αφορά τα στερεά όρια και ένα στροβιλό τμήμα που αφορά τον ομόρροο. Στην συνέχεια του κεφαλαίου καταγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μη πλεγματικών μεθόδων σε σχέση με τις πλεγματικές. Περιγράφεται ακόμα ο τρόπος επιλογής στην διακριτοποίηση της πτέρυγας, διατυπώνεται το προς επίλυση αριθμητικό πρόβλημα και περιγράφεται η δημιουργία του συστήματος γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων.

Αναπτύσσεται ο τρόπος που γίνεται η αποβολή στροβιλότητας και ικανοποιείται αριθμητικά η συνθήκη Kutta-Joukowski για τα λεπτά ανωστικά σώματα, και ο συσχετισμός της συνθήκης αυτής, με την επαναληπτική διαδικασία γραμμικοποίησης

του προβλήματος. Διαρθρώνεται το σύστημα των διακριτών εξισώσεων του προβλήματος που ικανοποιούν τη συνθήκη μη εισχώρησης στο στερεό σύνορο.

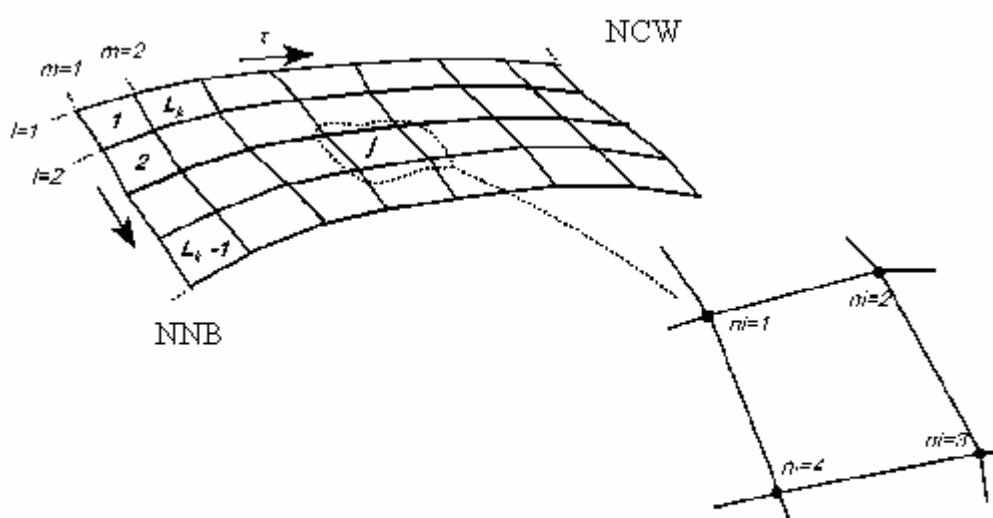
Τα σώματα αναπαρίστανται γεωμετρικά με πλέγμα που αποτελείται από τετράπλευρα επίπεδα στοιχεία, στα οποία κατανέμονται διανομές πηγών και διπόλων με τμηματικά σταθερή και διγραμμική ένταση αντίστοιχα.

Περιγράφεται ο τρόπος μετάβασης από επιφανειακά στοιχεία διπόλων σε στοιχεία στροβιλότητας, καθώς και το σχήμα εξέλιξης της στροβιλότητας στο χρόνο. Η ένταση της αρχικά αποβαλλόμενης στροβιλότητας υπολογίζεται σύμφωνα με το θεώρημα διατήρησης της κυκλοφορίας του Kelvin, ενώ η μεταφορά-παραμόρφωση του φύλλου στροβιλότητας υπολογίζεται με την επίλυση των υλικών εξισώσεων του Helmholtz. Δίνεται ο τρόπος υπολογισμού των φορτίων στα σώματα, καθώς και ο τρόπος σύζευξης του αεροδυναμικού προβλήματος με το ελαστοδυναμικό πρότυπο δοκού. Τέλος, αναφέρονται η επίδραση και ο τρόπος επιλογής των αριθμητικών παραμέτρων του προβλήματος.

2.2.2 Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας ενός σώματος

Βασικό δεδομένο στο πρόβλημα που εξετάζουμε αποτελεί η γεωμετρία της επιφάνειας της πτέρυγας. Για να εισαχθεί στο πρόβλημα, προσεγγίζεται από ένα επιφανειακό πλέγμα σημείων στο (global) αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Το πλέγμα αυτό ορίζεται από τις κατανομές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σώματος, και περιγράφεται από μια διπαραμετρική επιφάνεια $S(s_i, r_j)$

με τα i, j να παίρνουν τιμές $i:1 \sim NNB, j:1 \sim NCW$ με NNB, NCW ο αριθμός των κόμβων του πλέγματος κατά τις δύο διαστάσεις του (s και r).



Εικόνα 25: η αρίθμηση του πλέγματος

Οι γραμμές s συνήθως προσανατολίζονται στην κύρια κατεύθυνση της ροής για τη διευκόλυνση των αριθμητικών διαδικασιών αποβολής στροβιλότητας. Έτσι ξεκινάνε από την ακμή πρόσπτωσης (leading edge) και καταλήγουν στην ακμή εκφυγής (trailing edge). Η παράμετρος μήκους r αντιστοιχεί σε ακτινικές θέσεις πάνω στο σώμα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένα επιφανειακό πλέγμα ορίζεται από NNT κόμβους (total nodes number) που σχηματίζουν NTE τετράπλευρα επιφανειακά στοιχεία (total number of elements).

Έτσι ισχύει:

$$NNT = NNB * NCW$$

$$NTE = (NNB - 1) * (NCW - 1)$$

Η αρίθμηση των κόμβων και των στοιχείων του πλέγματος προκύπτει ως εξής:

$$NOD(i,j) = (j-1) * NNB + i, \quad i=1, NNB \quad j=1, NCW$$

$$NEL(i,j) = (j-1) * (NNB - 1) + i \quad i=1, NNB - 1 \quad j=1, NCW - 1$$

Οι κόμβοι που ορίζουν το επιφανειακό πλέγμα του σώματος βρίσκονται πάνω στην πραγματική επιφάνεια του σώματος. Ένα στοιχείο ορίζεται γενικά από 4 κόμβους. Τα σώματα αναπαρίστανται με επίπεδα στοιχεία γιατί έτσι απλουστεύονται οι αριθμητικοί υπολογισμοί με συνέπεια το γρηγορότερο τρέξιμο του κώδικα και την εξοικονόμηση χρόνου. Σώματα με γεωμετρικά χαρακτηριστικά που εμφανίζουν έντονες κλίσεις, είναι δυσκολότερο να προσεγγιστούν με μεγάλη ακρίβεια αφού δημιουργούνται κενά μεταξύ των στοιχείων στα άκρα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιείται πυκνότερο πλέγμα είτε σε όλο το σώμα είτε τοπικά. Τα παραγόμενα στοιχεία είναι κατά κανόνα τραπεζοειδή, αλλά παρουσιάζουν ικανοποιητική παραλληλία πλευρών κατά την ακτινική κατεύθυνση. Το γεγονός ότι στην εργασία αυτή οι πτέρυγες θεωρούνται επίπεδες περιορίζει το γεωμετρικό σφάλμα που θα υπήρχε με τη θεώρηση επίπεδων στοιχείων (όπως χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή του κώδικα) σε στερεές και καμπύλες επιφάνειες.

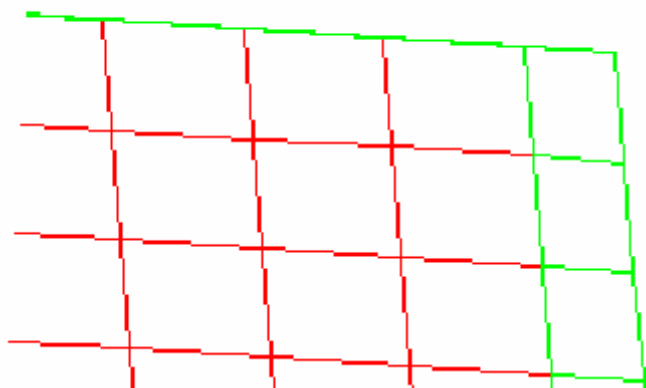
2.2.3 Η αναπαράσταση του φύλλου στροβιλότητας

Αφού υπολογιστούν οι άγνωστες διανομές πηγών και διπόλων στο αστρόβιλο πεδίο ροής, στο τέλος κάθε χρονικού βήματος γίνεται η παραγωγή και η εξέλιξη του φύλλου στροβιλότητας.

Στη γενική περίπτωση μη μόνιμης ροής, ο ομόρρους ενός σώματος μπορεί να αποτελείται από δύο τμήματα, τον κοντινό και τον μακρινό ομόρρου.

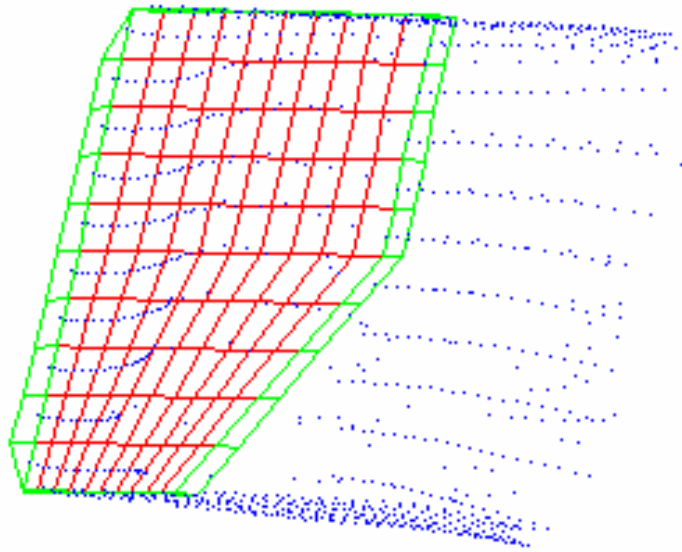
Ο κοντινός ομόρρους αποτελεί το τμήμα του φύλλου στροβιλότητας που εκφεύγει άμεσα από το σώμα και αναπαρίσταται μέσω της δυναμικής θεώρησης με τη δημιουργία πλέγματος δινοσωλήνων. Είναι το παραγόμενο τμήμα επιφανειακής στροβιλότητας που εκφεύγει από το σώμα με ένταση που προκύπτει από το θεώρημα διατήρησης της κυκλοφορίας του Kelvin. Η διακριτοποίηση του φύλλου στροβιλότητας αποτελεί συνέχεια της ακτινικής διακριτοποίησης της επιφάνειας ενός σώματος και αναπαρίσταται από τετράπλευρα στοιχεία που στην ουσία είναι προέκταση των γραμμών r κατά τη κατεύθυνση s του σώματος. Το θεώρημα Kelvin επιβάλλει αυτές οι γραμμές είναι κοινές για τον ομόρρου και για το σώμα. Η

γεωμετρία του ομόρρου αποτελείται από τους κόμβους του σώματος που βρίσκονται πάνω στην ακμή εκφυγής, καθώς και τους κόμβους που προκύπτουν από τη μεταφορά των κόμβων της προηγούμενης χρονικής στιγμής σύμφωνα με τη μέση ταχύτητα των σημείων ελέγχου στην ακμή εκφυγής. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η δημιουργία NCW-1 επιφανειακών στοιχείων που ορίζονται από 2NCW κόμβους (οι πρώτοι NCW είναι οι κόμβοι της ακμής εκφυγής του σώματος, ενώ οι επόμενοι NCW+1~2NCW είναι οι κόμβοι που προέκυψαν από τη μεταφορά λόγω της κίνησης).



Εικόνα 26: με κόκκινο το πλέγμα που περιγράφει το σώμα, με πράσινο ο κοντινός ομόρρος

Ο μακρινός ομόρρος αποτελεί το υπόλοιπο τμήμα του φύλλου στροβιλότητας και αναπαρίσταται σύμφωνα με τη στροβιλή θεώρηση με στοιχεία στροβιλότητας. Μετά τη δημιουργία του κοντινού ομόρρου, αυτή η διανομή στροβιλότητας μετατρέπεται σε χωρική καθώς συγκεντρώνεται σημειακά σε στοιχεία στροβιλότητας. Έτσι σχηματίζεται ο μακρινός ομόρρος σε στροβιλή μορφή. Στη γενική έκφραση ενός πεδίου στροβιλότητας μπορεί να εισαχθούν και φύλλα στροβιλότητας άλλων σωμάτων (αν π.χ. υπάρχουν πολλές πτέρυγες ή άλλα σώματα όπως μία βάση στήριξης μιας πτέρυγας)) όπως και διαταραχές της επ'άπειρον ροής (π.χ. εισερχόμενη τυρβώδης ροή) με μορφή χωρικής στροβιλότητας. Για τις παραπάνω περιπτώσεις, στο χρονικό βήμα που εισάγονται στο πρόβλημα πρέπει να είναι γνωστές οι θέσεις και οι εντάσεις των στοιχείων στροβιλότητας.



Εικόνα 27: με κόκκινο το πλέγμα που περιγράφει το σώμα, με πράσινο ο κοντινός ομόρρους, οι μπλε κουκκίδες είναι η αποβαλλόμενη στροβιλότητα – ο μακρινός ομόρρους μετά από κάποια χρονικά βήματα

2.2.4 Οι βαθμοί ελευθερίας

Κάθε σώμα μπορεί να αναπαρασταθεί αν κατανεμηθούν στην επιφάνεια του διανομές ιδιομορφιών (πηγών και διπόλων) με χρήση του θεωρήματος του Green. Σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίζεται η ένταση των πηγών και των διπόλων κάθε στοιχείου των σωμάτων του προβλήματος, και με βάση αυτές υπολογίζεται το πεδίο ταχύτητας. Έτσι, η κάθε ένταση πηγών και διπόλων αποτελεί ένα βαθμό ελευθερίας του προβλήματος, αφού επηρεάζει το πεδίο ροής.

Για να λυθεί συνεπώς το πρόβλημα, απαιτείται πεπερασμένος αριθμός βαθμών ελευθερίας και συνθηκών που πρέπει να ικανοποιούνται. Οι συνθήκες καθορίζουν τον τύπο των ιδιομορφιών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Ένα διπολικό σώμα μπορεί να είναι ανωστικό ή μη ανωστικό ανάλογα αν έχει ομόρρους ή όχι. Ο ομόρρους δημιουργεί μια επιφάνεια ασυνέχειας δυναμικού που οδηγεί στη δημιουργία κυκλοφορίας με αποτέλεσμα την άνωση.

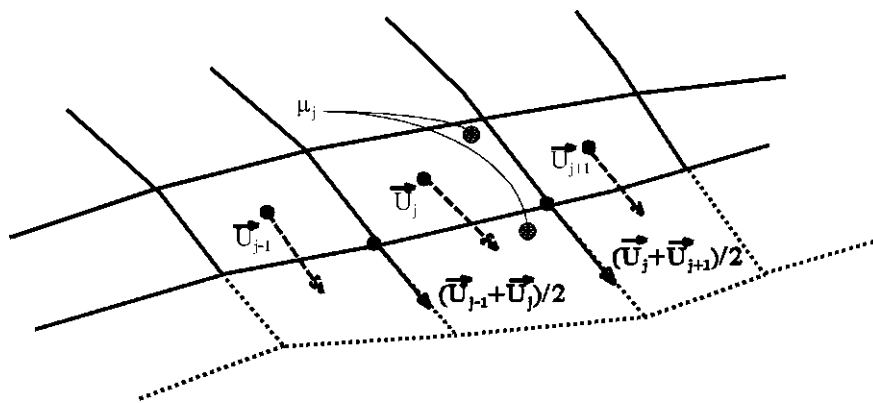
Σε λεπτά ανωστικά διπολικά σώματα (όπως οι πτέρυγες στο πρόβλημα που εξετάζουμε) οι βαθμοί ελευθερίας αποτελούνται από την κατανομή των διπόλων σε κάθε στοιχείο του πλέγματος που περιβάλλει την επιφάνεια του σώματος. Εφαρμόζοντας την συνθήκη μη εισχώρησης σε ένα σημείο πάνω στην επιφάνεια ενός σώματος (σημείο ελέγχου) και αντικαθιστώντας τις διακριτές αναπαραστάσεις των σωμάτων έτσι όπως αυτές ορίστηκαν παραπάνω, προκύπτει μια γραμμική αλγεβρική εξίσωση με αγνώστους τους βαθμούς ελευθερίας των εντάσεων των διανομών των ιδιομορφιών στις στερεές επιφάνειες. Ικανοποιώντας την συνθήκη μη εισχώρησης σε όλα τα σημεία ελέγχου που καθορίστηκαν κατά τη διακριτοποίηση προκύπτει ένα σύστημα N_e αλγεβρικών γραμμικών εξισώσεων με N_f αγνώστους.

Συγκεκριμένα για τις λεπτές ανωστικές επιφάνειες ο αριθμός των σημείων ελέγχου είναι ίσος με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας των αντίστοιχων ιδιομορφιών. Έτσι ο αριθμός των γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτει είναι ίσος με τον

αριθμό των αγνώστων. Γνωστά θεωρούνται η ταχύτητα κίνησης των σημείων ελέγχου που προκύπτει από την ταχύτητα κίνησης των σωμάτων, η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής και η επαγόμενη ταχύτητα από την ελεύθερη στροβιλότητα.

2.2.5 Η αποβολή στροβιλότητας από λεπτές ανωστικές επιφάνειες

Στις πτέρυγες χωρίς πάχος η συνθήκη Kutta-Joukowski ικανοποιείται επιβάλλοντας την συνέχεια στην επιφανειακή διανομή στροβιλότητας. Αυτό συμβαίνει σε όλο το μήκος της ακμής εκφυγής κατά την κάθετη διεύθυνση προς αυτήν. Αριθμητικά, αυτό επιτυγχάνεται εξισώνοντας την τιμή της επιφανειακής διανομής δίπολων μ για κάθε στοιχείο j της πτέρυγας που άπτεται στην ακμή εκφυγής με την τιμή του αντίστοιχου στοιχείου j' του φύλλου ελεύθερης στροβιλότητας.



Εικόνα 28: Η αποβολή του φύλλου στροβιλότητας από την ακμή εκφυγής λεπτής ανωστικής επιφάνειας

Θα εξετάσουμε τώρα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τη γεωμετρία του κοντινού ομόρρου. Όπως αναφέρθηκε, η μία καμπύλη του ορίου του φύλλου στροβιλότητας ταυτίζεται με την ακμή εκφυγής της ανωστικής επιφάνειας οπότε είναι γνωστή. Η δεύτερη καμπύλη του ορίου προκύπτει ως εξής:

α) Το φύλλο στροβιλότητας εκφεύγει με διεύθυνση ίδια με την διεύθυνση των στερεών επιπέδων στοιχείων που απαρτίζουν την ακμή εκφυγής, συνθήκη αναγκαία για την αποφυγή μη φυσικών ασυνεχειών στο πεδίο ροής.

β) Η ταχύτητα εκφυγής της στροβιλότητας είναι ίση με την ταχύτητα της ροής στα σημεία αποβολής. Η ταχύτητα της ροής στους κόμβους των στοιχείων προκύπτει προσεγγιστικά ως ημίθροισμα των ταχυτήτων της ροής στα σημεία ελέγχου των γειτονικών στοιχείων.

γ) Το μήκος του φύλλου στροβιλότητας υπολογίζεται από το γινόμενο του χρονικού βήματος με την ταχύτητα εκφυγής της στροβιλότητας, (το πόσο 'προχωράει' εξαρτάται από το χρονικό βήμα που επιλέγουμε αν η ταχύτητα είναι σταθερή)

Έτσι στον υπολογισμό της γεωμετρίας του κοντινού ομόρρου εμπλέκονται τιμές επιφανειακών ταχυτήτων σε σημεία πάνω στην στερεή επιφάνεια οι οποίες αποτελούν

αγνώστους του προβλήματος. Στη συνέχεια για τη λύση του προβλήματος ακολουθείται η εξής διαδικασία:

α) Θεωρούμε ότι η ταχύτητες εκφυγής της στροβιλότητας στους κόμβους εκφυγής είναι ίσες με αυτές του προηγούμενου χρονικού βήματος και δημιουργείται η γεωμετρία του κοντινού ομόρρου.

β) Λύνεται το σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων.

γ) Υπολογίζονται οι ταχύτητες εκφυγής και δημιουργείται η νέα γεωμετρία του κοντινού ομόρρου.

δ) Γίνεται έλεγχος σύγκλισης της διαδικασίας με σύγκριση των τιμών της διανομής δίπολων στην στερεή επιφάνεια. Στην περίπτωση που δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το β) βήμα.

Ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για την σύγκλιση εξαρτάται από το πόσο έντονα μεταβάλλεται το πεδίο ροής στο χρόνο. Τυπικός αριθμός επαναλήψεων για ροή γύρω από δρομέα είναι από πέντε έως δέκα. Για τις περιπτώσεις που εξετάζονται ο χρόνος σύγκλισης είναι σχετικά μικρός σε σχέση με τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για τις άλλες αριθμητικές διαδικασίες όπως η κατασκευή της κύριας μήτρας του συστήματος και της εξέλιξης του ομόρρου. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξετάζονται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

2.2.6 Η αποβολή στροβιλότητας από το ακροπτερύγιο

Η ροή κοντά στο ακροπτερύγιο χαρακτηρίζεται τοπικά από την εμφάνιση φαινομένων που προκαλούν την αποκόλληση της ροής και την ανάπτυξη έντονων τρισδιάστατων φαινομένων που οδηγούν σε αναδίπλωση του αποβαλλόμενου φύλλου στροβιλότητας.

Η θέση έναρξης της αποκόλλησης της ροής εξαρτάται από τη γεωμετρία της πτέρυγας και τις συνθήκες ροής στην περιοχή, και μπορεί να λαμβάνει χώρα σε μέρος της χορδής ή και σε όλο το μήκος της χορδής. Στην εφαρμογή του κώδικα, υπάρχει δυνατότητα επιλογής σε πόσα στοιχεία (panels) θα γίνει ο υπολογισμός.

Σε περιπτώσεις όπου το ακροπτερύγιο δεν ακολουθεί ευθεία αλλά κάνει γωνίες ή έχει καμπύλες (π.χ. στρογγυλεμένη άκρη), ορίζουμε από ποιο σημείο και μετά θα γίνει ο υπολογισμός. Υποθέτουμε δηλαδή ότι είναι γνωστή η θέση από όπου αποβάλλεται η στροβιλότητα. Το χρονικό βήμα πρέπει να είναι μικρό ούτως ώστε να σχηματιστεί ο στρόβιλος. Σε μεγάλα χρονικά βήματα η αποβαλλόμενη στροβιλότητα απομακρύνεται πολύ γρήγορα, και ειδικότερα στη περίπτωση αποβολής από το ακροπτερύγιο ή τη ρίζα όπου εμφανίζονται μεγάλες ταχύτητες είναι καλό να είναι πολύ μικρό το χρονικό βήμα. Τότε, ο ομόρρους δημιουργείται πολύ κοντά στο πτερύγιο.

Πρακτικά η στροβιλότητα αποβάλλεται με ένταση που προκύπτει από τη μη μδενική τιμή της κυκλοφορίας στην περιοχή αποβολής. Η γεωμετρία νός στοιχείου που ανήκει στον κοντινό ομόρρου του ακροπτερυγίου, προκύπτει από την μετακίνηση του με ταχύτητα αυτή που προκύπτει από τη μέση ταχύτητα των σημείων ελέγχου των στοιχείων εκατέρωθεν της ακμής εκφυγής. Κατόπιν, με το θεώρημα του Kelvin, εάν είναι γνωστές οι εντάσεις της κατανομής διπόλων στους κόμβους των στοιχείων του

σώματος, τότε η ένταση των διπόλων στους κόμβους του στοιχείου του κοντινού ομόρρου του ακροπτερυγίου δίνεται με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\mu_1^{wake} = \mu_2^{wing} - \mu_1^{wingtip} \quad (21\alpha)$$

$$\mu_2^{wake} = (\mu_1^{wake})^{old} \quad (21\beta)$$

$$\mu_3^{wake} = (\mu_4^{wake})^{old} \quad (21\gamma)$$

$$\mu_4^{wake} = \mu_3^{wing} - \mu_4^{wingtip} \quad (21\delta)$$

2.2.7 Η αποβολή στροβιλότητας από τη ακμή προσβολής (leading edge)–το πρότυπο του διπλού ομόρρου.

Λόγω του μη συνεκτικού χαρακτήρα των στροβιλών μεθοδολογιών, ροές με αποκόλληση δεν μπορούν να προσομοιωθούν με τη χρήση της μεθόδου των στοιχείων στροβιλότητας. Επέκταση της μεθόδου αυτής που να μπορεί όμως να προσομοιάζει τρισδιάστατες ροές με αποκόλληση, είναι η εφαρμογή της αρχής του διπλού ομόρρου για την προσομοίωση της απώλειας στήριξης. Σύμφωνα με αυτή, εκτός από τη στροβιλότητα που αποβάλλεται από την ακμή εκφυγής(trailing edge), ταυτόχρονα αποβάλλεται στροβιλότητα από την προεξέχουσα ακμή(leading edge). Με αυτόν τον τρόπο, σχηματίζεται ένα επιπλέον φύλλο στροβιλότητας το οποίο ,καθώς ενώνεται με αυτό που αποβάλλεται από την ακμή εκφυγής, διαμορφώνει την αποκολλημένη ζώνη πάνω από το πτερύγιο.

Επειδή η μέθοδος των στοιχείων στροβιλότητας είναι μη συνεκτική, και η θέση της αποκόλλησης βρίσκεται με συνεκτικές μεθόδους, γίνεται η υπόθεση ότι η θέση είναι γνωστή, και έτσι ο ρυθμός παραγωγής της στροβιλότητας στον ομόρρου της leading edge καθορίζεται με την ικανοποίηση της συνθήκης Kutta-Joukowski και του θεωρήματος του Kelvin (όπως δηλαδή και στην ακμή εκφυγής). Το γεγονός ότι η αποβολή του δεύτερου φύλλου στροβιλότητας γίνεται από την ακμή προσβολής και όχι από τη θέση όπου γίνεται η αποκόλληση, έχει ως αποτέλεσμα κάποια φαινόμενα και μεγέθη να μην αναπαράγονται σωστά όσον αφορά τη θέση τους (π.χ. η γεωμετρία της φουσαλίδας από την αποκόλληση). Όμως, με αυτή τη μέθοδο τα συνολικά φορτία που προβλέπει είναι αρκετά κοντά στα πραγματικά.

Η υπόθεση της αποβολής από την ακμή πρόσπτωσης συνδέεται άμεσα με την επιλογή του χρονικού βήματος, και οδηγεί σε μείωση του. Η επιπλέον αυτή μείωση του χρονικού βήματος οδηγεί σε αρκετά μεγαλύτερους υπολογιστικούς χρόνους, σε τέτοιο βαθμό που δεν 'συμφέρει' σε σχέση με τη βελτίωση στα αποτελέσματα. Με τη τοποθέτηση της θέσης αποκόλλησης στην leading edge ο ρυθμός παραγωγής στροβιλότητας δεν μπορεί να προσδιορισθεί από τη συνθήκη του Kelvin, διότι αυτό θα απαιτούσε ένας ισχυρός στρόβιλος ίσης έντασης με τον προσδεδεμένο στρόβιλο στην ακμή προσβολής να αποβάλλεται στον ομόρρου, κάτι που θα σήμαινε την έντονη απώλεια κυκλοφορίας κατά μήκος του πτερυγίου. Έτσι ο ρυθμός αποβολής της στροβιλότητας καθορίζεται εμπειρικά.

Στη διατύπωση του αριθμητικού προβλήματος, εισάγεται ένα επιπλέον φύλλο στροβιλότητας S_{sk} , $k=1, NB$ για κάθε σώμα με κάθετο διάνυσμα \vec{v}_s . Το φύλλο εκτείνεται στο συνολικό εύρος του πτερυγίου και υποθέτουμε ότι όπου η ροή είναι προσκολλημένη, η ένταση της αποβαλλόμενης στροβιλότητας στον ομόρρου είναι μηδέν. Η κατεύθυνση καθορίζεται από τα τοπικά χαρακτηριστικά της ροής στην ακμή προσβολής του πτερυγίου. Πάνω στο φύλλο λαμβάνεται πλέγμα που το διαιρεί σε S_{sk}^e τμήματα ($e=1, Esk$). Κάθε τμήμα έχει σταθερή διανομή διπόλων έντασης μ_{sk}^e . Έτσι το συνολικό δυναμικό διαταραχής γράφεται στη μορφή:

$$\begin{aligned} \vec{v}(\vec{x}_0, t) \cdot \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{e=1}^{E_k} \mu_k^e(t) \oint_{\partial S_k^e} \frac{d\vec{l}(\vec{x}) \times (\vec{x}_0 - \vec{x})}{4\pi \cdot |\vec{x}_0 - \vec{x}|^3} &= -\vec{v}(\vec{x}_0, t) \cdot \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{e=1}^{E_{wk}^\Delta} \mu_{wk}^{\Delta e}(t) \oint_{\partial S_{wk}^{\Delta e}} \frac{d\vec{l}(\vec{x}) \times (\vec{x}_0 - \vec{x})}{4\pi \cdot |\vec{x}_0 - \vec{x}|^3} - \\ -\vec{v}(\vec{x}_0, t) \cdot \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{e=1}^{E_{sk}^\Delta} \mu_{sk}^{\Delta e}(t) \oint_{\partial S_{sk}^{\Delta e}} \frac{d\vec{l}(\vec{x}) \times (\vec{x}_0 - \vec{x})}{4\pi \cdot |\vec{x}_0 - \vec{x}|^3} &+ \vec{v}(\vec{x}_0, t) \cdot (\vec{U}_{Bk}(\vec{x}_0, t) - \vec{U}_\infty(\vec{x}_0, t) - \vec{U}_w(\vec{x}_0, t)) \end{aligned} \quad (22)$$

Για την αναπαράσταση του δεύτερου φύλλου στροβιλότητας υποθέτουμε μια στοιχειακή προσέγγιση από ελεύθερα στοιχεία στροβιλότητας. Το κοντινό τμήμα του ομόρρου, αυτό δηλαδή που παράγεται στο τρέχον χρονικό βήμα, διατηρείται υπο τη μορφή του φύλλου στροβιλότητας. Η συνθήκη μη εισχώρησης για να ικανοποιείται σε ένα σημείο \vec{x}_0 πάνω σε κάποιο από τα σώματα γράφεται:

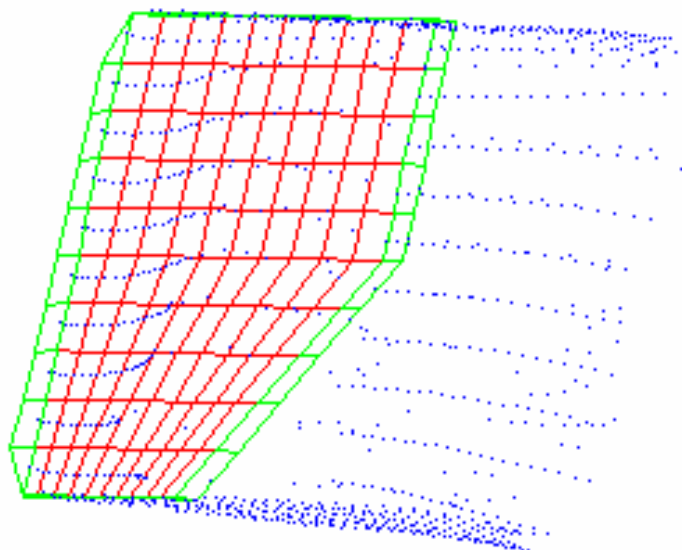
$$\begin{aligned} \vec{v}(\vec{x}_0, t) \cdot \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{e=1}^{E_k} \mu_k^e(t) \oint_{\partial S_k^e} \frac{d\vec{l}(\vec{x}) \times (\vec{x}_0 - \vec{x})}{4\pi \cdot |\vec{x}_0 - \vec{x}|^3} &= -\vec{v}(\vec{x}_0, t) \cdot \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{e=1}^{E_{wk}^\Delta} \mu_{wk}^{\Delta e}(t) \oint_{\partial S_{wk}^{\Delta e}} \frac{d\vec{l}(\vec{x}) \times (\vec{x}_0 - \vec{x})}{4\pi \cdot |\vec{x}_0 - \vec{x}|^3} - \\ -\vec{v}(\vec{x}_0, t) \cdot \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{e=1}^{E_{sk}^\Delta} \mu_{sk}^{\Delta e}(t) \oint_{\partial S_{sk}^{\Delta e}} \frac{d\vec{l}(\vec{x}) \times (\vec{x}_0 - \vec{x})}{4\pi \cdot |\vec{x}_0 - \vec{x}|^3} &+ \vec{v}(\vec{x}_0, t) \cdot (\vec{U}_{Bk}(\vec{x}_0, t) - \vec{U}_\infty(\vec{x}_0, t) - \vec{U}_w(\vec{x}_0, t)) \end{aligned} \quad (23)$$

όπου $\mu_{wk}^{\Delta e}, e=1, E_{wk}^\Delta$ και $\mu_{sk}^{\Delta e}, e=1, E_{sk}^\Delta$ οι εντάσεις των διπόλων των κοντινών τμημάτων των δύο ομόρρων και

$$\vec{U}_w(\vec{x}_0, t) = \sum_{a=w, s} \sum_{j_a \in J_a(t)} \frac{\vec{\Omega}_{aj}(t) \times (\vec{x}_0 - \vec{Z}_{aj}(t))}{4\pi |\vec{x}_0 - \vec{Z}_{aj}(t)|^3} \cdot \left(1 - e^{-\frac{|\vec{x}_0 - \vec{Z}_{aj}(t)|^3}{\epsilon^3}}\right) \quad (24)$$

όπου ο δείκτης a παίρνει τιμές w για τον ομόρρου που αποβάλλεται από την ακμή εκφυγής και s για τον ομόρρου που αποβάλλεται από την ακμή προσβολής. Η συνθήκη μη εισχώρησης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των εντάσεων των διπόλων πάνω στα σώματα \vec{U}_{em} . Οι εντάσεις των διπόλων στο κοντινό τμήμα του ομόρρου της ακμής εκφυγής $\mu_{wk}^{\Delta e}$ καθορίζονται από τη συνθήκη Kutta-Joukowski, και

είναι ίσες με τις εντάσεις των διπόλων των παρακείμενων τμημάτων πάνω στο σώμα κατά μήκος της ακμής εκφυγής.



Εικόνα 29: με κόκκινο το πλέγμα που περιγράφει το σώμα, με πράσινο ο κοντινός ομόρρους, οι μπλε κουκκίδες είναι η αποβαλλόμενη στροβιλότητα-μακρινός ομόρρους μετά από κάποια χρονικά βήματα, φαίνεται ο ‘διπλός ομόρρους’

Η γεωμετρία του κοντινού ομόρρου καθορίζεται με βάση τη ταχύτητα εκφυγής \vec{U}_{em} . Η ταχύτητα εκφυγής όπως και στην προσκολλημένη περίπτωση είναι η μέση ταχύτητα πάνω και κάτω της πλευράς κατά μήκος της ακμής εκφυγής και της ακμής προσβολής. Τα στοιχεία του μακρινού ομόρρου προσδιορίζονται με ολοκλήρωση της στροβιλότητας του κοντινού ομόρρου.

2.2.8 Ο υπολογισμός των φορτίων

Μέχρι τώρα στο πρόβλημα του πεδίου ροής, εξετάστηκαν τα μεγέθη της ταχύτητας, του δυναμικού, της κυκλοφορίας και της στροβιλότητας. Πολύ σημαντικό μέγεθος είναι η πίεση, ιδιαίτερα από τεχνολογικής σκοπιάς στα διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με πεδία ροής. Στις διαφορικές αριθμητικές μεθόδους επίλυσης πεδίων ροής η πίεση υπολογίζεται άμεσα. Είτε προκύπτει σαν λύση του προβλήματος είτε με τη χρήση Eulerian χωρικού πλέγματος.

Αντίθετα στη μέθοδο των ιδιομορφιών ο υπολογισμός της πίεσης απαιτεί την επίλυση μιας ακόμα εξίσωσης που την περιέχει σαν άγνωστο.

Η πίεση μπορεί να γραφεί ως άθροισμα συνεισφορών από το αστρόβιλο και το στροβιλό μέρος του πεδίου ροής.

$$p(\vec{x}, t) = p_\varphi(\vec{x}, t) + p_\omega(\vec{x}, t) \quad (25)$$

Στο απόλυτο σύστημα αναφοράς, σε ένα τυχαίο στοιχείο του πλέγματος που ανήκει στο σώμα και κινείται με σχετική ταχύτητα $U\vec{B}(\vec{x},t)$ θα ισχύει για τον υπολογισμό της πίεσης:

$$\frac{\partial \Phi(\vec{x},t)}{\partial t} + \vec{u}(\vec{x},t) \cdot \left(\frac{1}{2} \vec{u}(\vec{x},t) - \vec{U}_0 \right) + \frac{p(\vec{x},t)}{\rho} = e(t) \quad (26)$$

όπου Φ το ολικό δυναμικό διαταραχής, $u(\vec{x};t)$ η ταχύτητα, $p(\vec{x};t)$ η στατική πίεση, ρ η πυκνότητα του ρευστού και U_0 η ταχύτητα του συστήματος αναφοράς.

Η παραδοχή ότι η στροβιλότητα βρίσκεται μόνο μέσα σε κλειστές περιοχές ισχύει στις ροές που εξετάζονται. Η ελεύθερη στροβιλότητα χωροθετείται στον ομόρρου κατάντι της ροής και είναι κλειστό σύνολο. Οι γραμμές ροής του πεδίου στροβιλότητας είναι κλειστές καμπύλες. Σύμφωνα και με πειραματικές παρατηρήσεις, πολύ σύντομα μετά την αποβολή της η στροβιλότητα δημιουργεί κλειστές δομές οι οποίες διατηρούνται. Με βάση τις παρατηρήσεις αυτές μπορεί να θεωρηθεί ότι η παραπάνω εξίσωση ισχύει στα πεδία ροής που εξετάζονται και έτσι εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της πίεσης.

Ακόμα πρέπει να αναφερθεί ότι στην εξίσωση Bernoulli κατά τον υπολογισμό των φορτίων στις λεπτές ανωστικές επιφάνειες εμφανίζεται το πήδημα δυναμικού αφού υπολογίζεται το πήδημα της πίεσης (διαφορά πίεσης πάνω και κάτω πλευράς). Στην διακριτή μορφή του προβλήματος έτσι όπως αυτό διατυπώθηκε έως τώρα υπολογίζεται μόνο το δυναμικό διαταραχής από την συνεισφορά των σωμάτων. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ο υπολογισμός του επαγόμενου δυναμικού από την ελεύθερη στροβιλότητα του πεδίου ροής.

Η ακρίβεια της αναπαράστασης της γεωμετρίας του εξεταζόμενου σώματος επηρεάζει άμεσα τους υπολογισμούς των πιέσεων, όπως επίσης και η γεωμετρία του κάθε στοιχείου του πλέγματος που δημιουργούμε. Έχοντας υπολογίσει τη πίεση που αναπτύσσεται στο κάθε στοιχείο (επιφάνειας A), η κάθετη δύναμη σε αυτό υπολογίζεται με τη σχέση

$$\vec{F}(\vec{x},t) = p(\vec{x},t) \cdot A \cdot \nu \quad (27)$$

Η παραπάνω δύναμη δημιουργεί ροπή Q ως προς την αρχή των αξόνων που υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(\vec{x},t) = \vec{x} \times \vec{F}(\vec{x},t) \quad (28)$$

Τέλος, η συνολική δύναμη και ροπή στο κάθε σώμα υπολογίζεται αν αθροιστούν οι επιμέρους ροπές και δυνάμεις που αναπτύσσονται στο κάθε στοιχείο (panel) του σώματος.

2.2.9 Η αεροελαστική σύζευξη

Στις διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές που εξετάζονται στην αεροδυναμική συχνά συμβαίνει το ρευστομηχανικό πρόβλημα να είναι συζευγμένο και με άλλα φυσικά προβλήματα. Χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι η ελαστοδυναμική συμπεριφορά ανωστικών σωμάτων. Στην περίπτωση αυτή η χρονικά μεταβαλλόμενη διέγερση των σωμάτων λόγω των αεροδυναμικών και άλλων φορτίσεων, όπως η βαρύτητα, έχει σαν αποτέλεσμα την ταλάντωση τους. Με την ταλάντωση επέρχονται

αλλαγές στην κινηματική κατάσταση των σωμάτων, που επιδρούν ανάλογα στο πεδίο ροής με αποτέλεσμα την αλλαγή της δυναμικής κατάστασης κ.ο.κ. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι οι δυναμικές συνθήκες στα σώματα (φόρτιση) απαιτούν την λύση του αεροδυναμικού προβλήματος και ταυτόχρονα αποτελούν διέγερση του ελαστοδυναμικού προβλήματος. Αντίστροφα οι κινηματικές συνθήκες (παραμόρφωση γεωμετρίας, ταχύτητα παραμόρφωσης) απαιτούν την λύση του ελαστοδυναμικού προβλήματος και αποτελούν διέγερση του ρευστομηχανικού. Κατά αυτό τον τρόπο είναι αναγκαία η ταυτόχρονη, συζευγμένη επίλυση και των δύο προβλημάτων, δηλαδή του συζευγμένου αεροελαστικού προβλήματος.

Η ανάγκη για εισαγωγή του ελαστοδυναμικού χαρακτήρα των σωμάτων εμφανίστηκε κατά την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς πτερυγίων ανεμογεννήτριας. Το αεροδυναμικό με το ελαστοδυναμικό πρόβλημα είναι συνδεδεμένα σε τέτοιο βαθμό που απαιτείται η επίλυση του αεροελαστικού προβλήματος για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Συγκεκριμένα, σε κάθε χρονικό βήμα αφού τελειώσουν οι αεροδυναμικοί υπολογισμοί και υπολογιστούν τα αεροδυναμικά φορτία, αυτά μεταφέρονται από το πτερύγιο στην ελαστική δοκό. Οι αρχικές συνθήκες του ελαστοδυναμικού προβλήματος είναι η γνωστή εξωτερική φόρτιση που συμπεριλαμβάνει τα αεροδυναμικά φορτία και οι κινηματικές συνθήκες που υπήρχαν στο αμέσως προηγούμενο χρονικό βήμα. Έτσι επιλύεται το ελαστοδυναμικό πρόβλημα για χρονικό διάστημα ίσο με το χρονικό βήμα του αεροδυναμικού προβλήματος. Στο τέλος των ελαστοδυναμικών υπολογισμών προκύπτει η ταχύτητα παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στο επόμενο αεροδυναμικό χρονικό βήμα. Κατόπιν, μεταφέρονται οι ταχύτητες ελαστικών παραμορφώσεων από την δοκό στις ανωστικές επιφάνειες των πτερυγίων ως αλλαγή στις κινηματικές συνθήκες. Έτσι εάν $U_E(x_s; t)$ η ταχύτητα παραμόρφωσης του σώματος στο σημείο της επιφάνειας του x_s η ταχύτητα του σώματος που χρησιμοποιείται στην συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης γράφεται:

$$\vec{U}_B(\vec{x}_B, t) = \vec{V}(t) + \vec{\Omega}(t) \times [\vec{x}_s - \vec{x}_\Omega] + \vec{U}_E(\vec{x}_s, t) \quad (29)$$

2.2.10 Η Αλληλεπίδραση στερεών επιφανειών και ελεύθερης στροβιλότητας

Χαρακτηριστικό των ροών γύρω από πολλά σώματα είναι η αλληλεπίδραση στροβιλότητας και στερεών ορίων. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται όταν σώματα που προπορεύονται αποβάλλουν στροβιλότητα η οποία καθώς μεταφέρεται κατάντι συναντά σώματα που ακολουθούν. Τυπικό τέτοιο παράδειγμα είναι η αλληλεπίδραση στροβιλότητας που προέρχεται από αεροπορικό δρομέα (ομόρρους) με την επιφάνεια του κλωβού και της πτέρυγας που ακολουθούν (συνήθης διάταξη αεροσκάφους χαμηλών ταχυτήτων). Φαινόμενα αλληλεπίδρασης στροβιλότητας με στερεή επιφάνεια εμφανίζονται και αλλού όπως για παράδειγμα στρόβιλοι εκφυγής αεροσκάφους σε αεροδρόμια, ανεμοστρόβιλοι, ενώ και στην παρούσα εργασία το γεγονός ότι εξετάζονται δύο πτέρυγες σημαίνει ότι οι στροβιλότητες που αποβάλλονται από τη κάθε μια αλληλεπιδρούν. Από ρευστομηχανικής πλευράς τα φαινόμενα αυτά διαχωρίζονται ανάλογα με:

- Τον αριθμό Reynolds της ροής, δηλαδή τη σχέση μεταξύ συνεκτικών και δυναμικών όρων στην εξέλιξη του φαινομένου.

- Την κατεύθυνση της στροβιλότητας σε σχέση με την κύρια κατεύθυνση της ροής και την στερεή επιφάνεια.
- Την ένταση της προσπίπτουσας στροβιλότητας σε σχέση με την ένταση της στροβιλότητας του οριακού στρώματος. Η σχέση αυτή είναι καθοριστική για το φαινόμενο καθώς μεγάλες διαφορές μεταξύ τους μπορούν να οδηγήσουν σε ροή η οποία είτε χαρακτηρίζεται από το οριακό στρώμα το οποίο δεν διαταράσσεται σημαντικά από την επίδραση του στροβίλου (και ανάλογα με την φορά του είτε τον απορροφά είτε τον ανακλά), είτε χαρακτηρίζεται από τον στρόβιλο ο οποίος δεν διαταράσσεται από το οριακό στρώμα σημαντικά ενώ επιδρά σε αυτό αλλάζοντας την δομή του.

Πέρα από τα φυσικό πρόβλημα της αλληλεπίδρασης στροβιλότητας - στερεής επιφάνειας στην προσομοίωση του φαινομένου αυτού εμφανίζονται και προβλήματα αριθμητικού τύπου. Η αναπαράσταση του ομόρρου από στοιχεία στροβιλότητας ξεπερνά δυσκολίες σχετικά με την δομή του ομόρρου που εμφανίζονται στην περίπτωση της αναπαράστασης με δινοσωλήνες. Όμως, όπως και στην περίπτωση των δινοσωλήνων, καθώς τα στοιχεία στροβιλότητας πλησιάζουν το στερεό όριο οι κλίμακες μήκους και χρόνου γίνονται πολύ μικρότερες από αυτές της υπόλοιπης ροής. Έτσι τίθεται το ερώτημα κατά πόσο η διακριτοποίηση των σωμάτων και του χρόνου είναι επαρκής, αφενός για να αναπαραχθούν οι αστρόβιλοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης, και αφετέρου για να αποφευχθούν απειρισμοί και αριθμητικές αστάθειες, όπως για παράδειγμα διάτρηση του πλέγματος του σώματος από στοιχεία στροβιλότητας. Καθώς η συνθήκη μη εισχώρησης ικανοποιείται σε ορισμένα μόνο σημεία της επιφάνειας, το πεδίο ταχύτητας αναπαράγεται σωστά μόνο στα σημεία αυτά. Αντίθετα στα ενδιάμεσα σημεία το σφάλμα είναι σημαντικό με αποτέλεσμα να εμφανίζονται "τρύπες" στην επιφάνεια των σωμάτων. Ένας τρόπος για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο είναι η κατ' επιλογή πύκνωση της διακριτοποίησης, χρονικά και χωρικά όταν σε κάποια περιοχή η στροβιλότητα πλησιάσει πολύ κοντά την επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή αυξάνει σημαντικά τις υπολογιστικές απαιτήσεις χωρίς ανάλογη βελτίωση του αριθμητικού σφάλματος.

2.2.11 Αριθμητικές και υπολογιστικές λεπτομέρειες

Οι βασικές παράμετροι της μεθόδου που επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα των αποτελεσμάτων αλλά και στην ευστάθεια της μεθόδου είναι οι διαστάσεις (πυκνότητα) του πλέγματος που αναπαριστά την επιφάνεια της πτέρυγας, το χρονικό βήμα μελέτης του φαινομένου, και το μήκος αποκοπής (cut-off length) που χρησιμοποιείται για την αναίρεση των ιδιόμορφων υπολογισμών ταχυτήτων της ελεύθερης στροβιλότητας.

Όσον αφορά τις διαστάσεις του πλέγματος, αυτές πρέπει να είναι ικανές ώστε να εμπεριέχεται όλη η λεπτομέρεια των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σώματος. Έτσι για σύνθετες γεωμετρίες απαιτούνται πολλά και μικρά στοιχεία. Σημασία έχει το κάθε στοιχείο που δημιουργείται ανα 4 κόμβους (το κάθε panel) να έχει σχετικά 'τετράγωνικο' χαρακτήρα (να μην είναι πολύ μακρόστενο). Φυσικά όσο περισσότερα είναι τα panels (δηλαδή όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα τόσο παρυσσότερος υπολογιστικός χρόνος απαιτείται)

Το χρονικό βήμα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να καλύπτεται η χρονική κλίμακα εξέλιξης των μεταβατικών φαινομένων που εξετάζονται. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην περιγραφή του κοντινού ομόρρου, είναι προφανές ότι από το

χρονικό βήμα καθορίζεται και το μήκος του κοντινού ομόρρου, το οποίο καλό είναι να έχει μήκος της ίδιας τάξης μεγέθους με το γεωμετρικό πλέγμα σε αυτή τη περιοχή (ουσιαστικά να είναι σαν τη συνέχεια του σώματος)

Γενικά όταν απαιτείται λεπτομερής αναπαράσταση του πεδίου ροής επιβάλλεται η χρήση μικρού χρονικού βήματος. Εάν θέλουμε να μελετήσουμε σε συγκεκριμένο χρόνο (σε περιόδους π.χ.) το πρόβλημα, όσο μικρότερο είναι το χρονικό βήμα, τόσο περισσότερα είναι τα συνολικά βήματα που θα υπολογίσει ο κώδικας και άρα μεγαλύτερος ο χρόνος τρεξίματος.

Η επιλογή του μήκους αποκοπής της ελεύθερης στροβιλότητας είναι μια αριθμητική παράμετρος αναγκαία για την εξέλιξη των στοιχείων στροβιλότητας. Είναι σταθερή για κάθε στοιχείο στροβιλότητας και δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Η τιμή της συνήθως λαμβάνεται ίση με την ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δύο στοιχεία στροβιλότητας κατά μήκος της γραμμής αποβολής. Στα περισσότερα τρεξίματα στην παρούσα εργασία το μήκος αποκοπής δεν άλλαξε γιατί δεν επηρέασε ιδιαίτερα τα αποτελέσματα στις δυνάμεις που πήραμε.

Η συμβολή κάθε μιας εκ των παραπάνω παραμέτρων στα αποτελέσματα εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο σε μια απλή περίπτωση εφαρμογής του κώδικα.

2.2.12 Υπολογιστικό κόστος μεθόδου

Οι απαιτήσεις της μεθόδου σε υπολογιστική ισχύ είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές αντίστοιχων πλεγματοκέντρων μεθόδων λόγω του ότι στις δεύτερες χρησιμοποιούνται χωρικά αντί για επιφανειακά πλέγματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την χαμηλή χρήση μνήμης υπολογιστή.

Το τμήμα των υπολογισμών που απαιτεί το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου είναι οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων στροβιλότητας στον ομόρρο. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός τους αυξάνεται με το χρόνο γιατί σε κάθε χρονικό βήμα παράγονται νέα στοιχεία στροβιλότητας. Εάν σε κάθε χρονικό βήμα παράγονται k το πλήθος στοιχεία στροβιλότητας μέχρι το χρονικό βήμα n πρέπει να έχουν γίνει $k^2 - (n^3/3 + n^2/2 + n/6)$ υπολογισμοί αλληλεπίδρασης από στοιχείο στροβιλότητας σε στοιχείο στροβιλότητας. Δηλαδή, ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται υπέρμετρα με την αύξηση του αριθμού των χρονικών βημάτων.

Έτσι, συνοπτικά ο αριθμός των στοιχείων στροβιλότητας για την προσομοίωση του ομόρρου των ανωστικών σωμάτων αυξάνεται όταν:

μεγαλώνει ο αριθμός των χρονικών βημάτων. Σε κάθε χρονικό βήμα παράγεται ο ίδιος αριθμός νέων στοιχείων στροβιλότητας, οπότε όσο περισσότερα είναι τα χρονικά βήματα τόσο περισσότερα είναι τα στοιχεία στροβιλότητας.

Μειώνεται το χρονικό βήμα. Τότε κάθε περίοδος έχει περισσότερα χρονικά βήματα (υπό εξέταση) και άρα για μελέτη στον ίδιο αριθμό περιόδων, απαιτούνται περισσότερα βήματα.

Αυξάνονται τα ανωστικά σώματα. Με περισσότερα σώματα το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο, αφού συνδυάζονται περισσότερα σώματα (π.χ. τετράπτερο έντομο)

το καθένα από τα οποία έχει το δικό του ομόρρου που αλληλεπιδρά με τους ομόρρους των άλλων σωμάτων, επιβαρύνοντας πολύ το πλήθος των στοιχείων για την προσομοίωση και τον χρόνο που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος.

2.2.13 Ροή με άξονα συμμετρίας

Σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές συμβαίνει συχνά η σχετική θέση και κίνηση των σωμάτων μεταξύ τους καθώς και ως προς την κύρια κατεύθυνση της ροής να είναι τέτοια ώστε το πεδίο ροής να έχει άξονα ή επίπεδο συμμετρίας. Δεδομένου ότι τα πτερύγια είναι όμοια μεταξύ τους και συμμετρικά τοποθετημένα ως προς το σώμα (κορμό) του εντόμου, κάθε πτερύγιο αντιλαμβάνεται το ίδιο πεδίο ροής, δηλαδή ως προς το σύστημα συντεταγμένων του κάθε πτερυγίου το πεδίο ροής είναι όμοιο.

Με βάση την διαπίστωση αυτή είναι δυνατή η μείωση σε σημαντικό ποσοστό των απαιτήσεων του αλγόριθμου τόσο σε χρόνο όσο και σε μνήμη υπολογιστή. Συγκεκριμένα για την περίπτωση αξονικά συμμετρικής ροής γύρω από δρομέα με N πτερύγια, αποθηκεύονται στην μνήμη του υπολογιστή τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε ένα μόνο πτερύγιο (γεωμετρία, πίνακας συστήματος) και η ελεύθερη στροβιλότητα που αντιστοιχεί σε αυτό. Οι υπολογισμοί γίνονται μόνο για το ένα πτερύγιο όπου λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση του άλλου πτερυγίου με τον αντίστοιχο ομόρρου που βρίσκεται μετατοπισμένος κατά την διαφορά της θέσης των δύο πτερυγίων και συμμετρικός ως προς τον άξονα που περνάει από το σώμα του εντόμου. Έτσι γίνονται υπολογισμοί για το ένα από τα δύο ημίπαιρα τμήματα της ροής λαμβάνοντας υπόψη και το κατοπτρικό του

2.2.14 Η κίνηση των σωμάτων

Η επιβολή της κίνησης των σωμάτων στην αριθμητική διαδικασία γίνεται με την χρήση διαδοχικών μεταφορών και περιστροφών ή αλλιώς "επιπέδων κίνησης" (movement levels).

Ο τρόπος αυτός επιλέχθηκε ως ο πιο πρόσφορος δεδομένου ότι στις διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές τα αεροδυναμικά σώματα ακολουθούν ένα σύνολο από περιστροφές κυρίως που γίνονται ως προς διάφορους άξονες που είναι με την σειρά τους μετατοπισμένοι και περιστραμμένοι ο ένας σε σχέση με τον άλλο.

Έτσι η ταχύτητα κίνησης θέση ενός σημείου χ που βρίσκεται πάνω σε σώμα που ακολουθεί το επίπεδο κίνησης q δίνεται από την σχέση:

$$\vec{u}_q(t) = \vec{U}_q(t) + \vec{\Omega}_q(t) \times \vec{x}_{q-1} \quad (30)$$

όπου U η μεταφορική ταχύτητα κίνησης, Ω η περιστροφική ταχύτητα κίνησης του επιπέδου κίνησης q και χ_q η θέση του σημείου έτσι όπως προέκυψε από τις διαδοχικές μετακινήσεις των επιπέδων 1 έως $q-1$.

Προκαθορίζοντας τις παραμέτρους U και Ω για όλα τα επίπεδα κίνησης που συμμετέχει το κάθε ένα σώμα ξεχωριστά προκύπτει η ταχύτητα και η θέση του κάθε χρονική στιγμή από την αλληλουχία όλων των στοιχειωδών αυτών κινήσεων. Στην περίπτωση της πτέρυγας ενός εντόμου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, η

κίνηση της αναλύεται σε 3 περιστροφές (flapping, lead lag, twist), και θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

2.3 Βιβλιογραφία

1. “Σημειώσεις μαθήματος ‘Αεροελαστικότητα-Αεροακουστική’ έτους 2007-2008 Βουτσινάς Σπυρίδων
2. "Μηχανική των Ρευστών" Σωκράτης Τσαγγάρης
3. "Αεροδυναμική και Αεροελαστική Ανάλυση της Απώλειας Στήριξης σε Δρομείς Ανεμογεννητριών" Βασίλης Α. Ριζιώτης
4. "Ανάλυση μη μόνιμων ροών γύρω από περιστρεφόμενους δρομείς και αεροδυναμικά σώματα σε αλληλεπίδραση" Μιχαήλ Α. Μπέλεσης
5. "Αλληλεπίδραση στροβιλότητας-στερεού συνόρου σε δρομείς ελικοπτέρου και υβριδικών αεροσκαφών", Παπαδάκης Γεώργιος

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργασιών στις οποίες στηριχθήκαμε. Στη συνέχεια ακολουθεί μια απλή εφαρμογή του κώδικα σε μια λεπτή πλάκα που περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της με συγκεκριμένες συνθήκες, η οποία στην ουσία ‘επαληθεύει’ τον κώδικα ,καθώς τα αποτελέσματα υπό τις συνθήκες αυτές είναι συγκρίσιμα με αυτά που θα περιμέναμε, και στη συνέχεια αποτελέσματα από χρήση του κώδικα του εργαστηρίου υπό τις ίδιες συνθήκες με την εργασία Liu-Kawachi.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλα τα τρεξίματα που κάναμε και παρουσιάζονται από αυτό το σημείο και μετά, οι πτέρυγες θεωρούνται λεπτά ανώστικα σώματα δηλαδή έχουν μηδενικό πάχος (χρησιμοποιήθηκε ο ‘thin’ κώδικας), παραδοχή που δεν επηρεάζει την ποιότητα των αποτελεσμάτων αφού οι πτέρυγες (φτερά) αληθινών εντόμων και ρομποτικών μικρομηχανών που ακολουθούν αυτές τις αρχές, έχουν πάρα πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τη πτέρυγα.

Κατόπιν, γίνεται παραμετρική μελέτη, αλλάζοντας μια παράμετρο κάθε φορά. Οι βασικές παράμετροι που εξετάζονται είναι η γεωμετρία, η πυκνότητα του πλέγματος, η ταχύτητα αναφοράς, ο αριθμός των χρονικών βημάτων ανά περίοδο, οι πλευρές από τις οποίες αποβάλλεται στροβιλότητα και οι κατανομές των γωνιών σε σχέση με το χρόνο. Σε ότι αφορά τις γωνίες, όπως ήδη περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, αυτές είναι τρεις και είναι η γωνία flapping, η γωνία lead-lag και η γωνία twist.

Σε κάποια από τα τρεξίματα που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκαν κατανομές από ένα διάγραμμα της εργασίας Liu-Kawachi που δίνει τις γωνίες για μια *manduca sexta* όπως βρέθηκαν στην βιβλιογραφία ύστερα από βιντεοσκόπηση του εντόμου σε πτήση με σταθερή (όσο το δυνατόν) οριζόντια ταχύτητα.

Σε αυτές τις κατανομές μελετήσαμε την επίδραση της φάσης που έχουν η γωνία του twist με τη γωνία του flap μεταξύ τους, το πώς αλλάζουν τα αποτελέσματα αν αλλάξει το πλάτος του twist, ενώ όπως θα αναλυθεί παρακάτω, πήραμε 2 κατανομές για τη γωνία του twist.

Σε άλλα τρεξίματα, χρησιμοποιήθηκαν ημιτονοειδείς περιγραφές των γωνιών αυτών, με τιμές πλάτους, γωνιακής συχνότητας και φάσης επιλεγμένες σύμφωνα με κατανομές από την προαναφερθείσα εργασία και αλλη βιβλιογραφική έρευνα. Σε αυτά τα τρεξίματα γίνεται πιο κατανοητή η επίδραση της κάθε παραμέτρου.

3.2 Μεθοδολογία αποτελεσμάτων

3.2.1 Η εργασία στην οποία στηρίχτηκε η παρούσα εργασία

Βασική πηγή δεδομένων αλλά και κατανόησης του φαινομένου του πετάγματος ενός έντομου αποτέλεσε η εργασία των Liu και Kawachi ‘a computational fluid dynamic study of hawkmoth’. Σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε ,με υπολογιστική ρευστόμηχανική (CFD), μελέτη της ασταθούς αεροδυναμικής ενός hawkmoth με flapping φτερά.

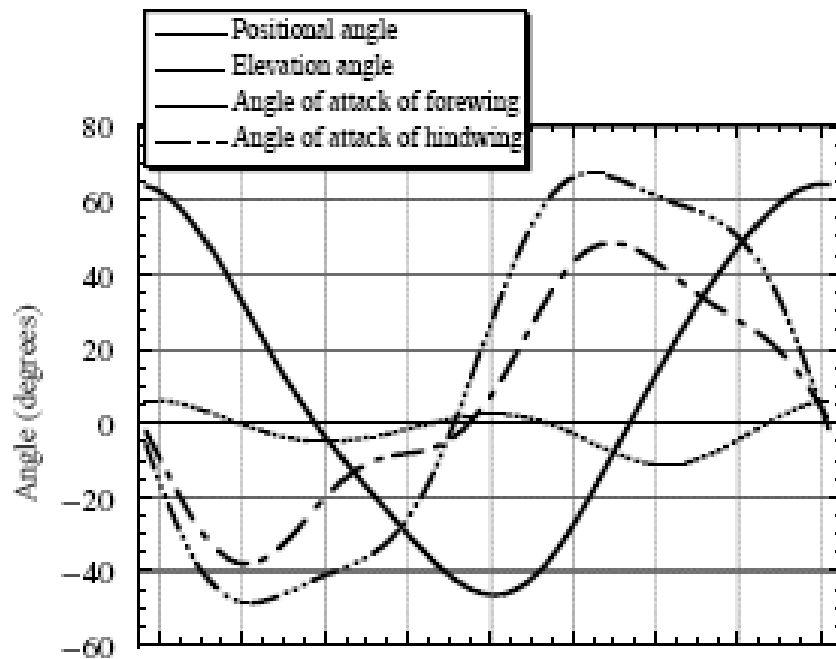
Χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία ενός ρομποτικού φτερού βασισμένου σε μια *Manduca sexta* για να καθορισθεί η μορφή ενός τρισδιάστατου «εικονικού» προτύπου φτερών και να μιμηθεί ακριβώς τις τρισδιάστατες μετακινήσεις του φτερού.

Η ανάλυση CFD αυτής της εργασίας αποκαλύπτει ότι η πτήση εξαρτάται από την μη μόνιμη αεροδυναμική και συνεπώς τη στιγμιαία δυναμική και την προηγούμενη ιστορία του φτερού. Μια δίνη στην προσπίπτουσα ακμή ανιχνεύθηκε κατά τη διάρκεια των μεταφραστικών κινήσεων τόσο στο upstroke όσο και στο downstroke. Η δίνη αυτή προκαλεί μια περιοχή αρνητικής πίεσης και, ως εκ τούτου, είναι αρμόδια για την ενίσχυση της παραγωγής άνωσης.

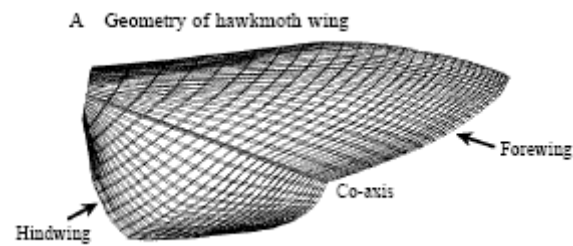
Η αξονική ροή σταθεροποιεί τη δίνη και της δίνει μια χαρακτηριστική σπειροειδή κωνική μορφή. Η δίνη που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της προηγούμενης μεταφραστικής κίνησης παραμένει συνημμένη κατά τη διάρκεια των περιστροφικών κινήσεων pronation και supination. Αυτή η δίνη, που είναι ουσιαστικά παραμορφωμένη λόγω της σύζευξης μεταξύ των μεταφραστικών και περιστροφικών κινήσεων, αναπτύσσεται σε μια σύνθετη δομή, και εκφεύγει τελικά πριν από την επόμενη μεταφραστική κίνηση.

Η εκτίμηση των δυνάμεων κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου δείχνει ότι η άνοση παράγεται κυρίως κατά τη διάρκεια του downstroke και του τελευταίου μισού upstroke, με λίγη δύναμη που παράγεται κατά τη διάρκεια pronation και supination.

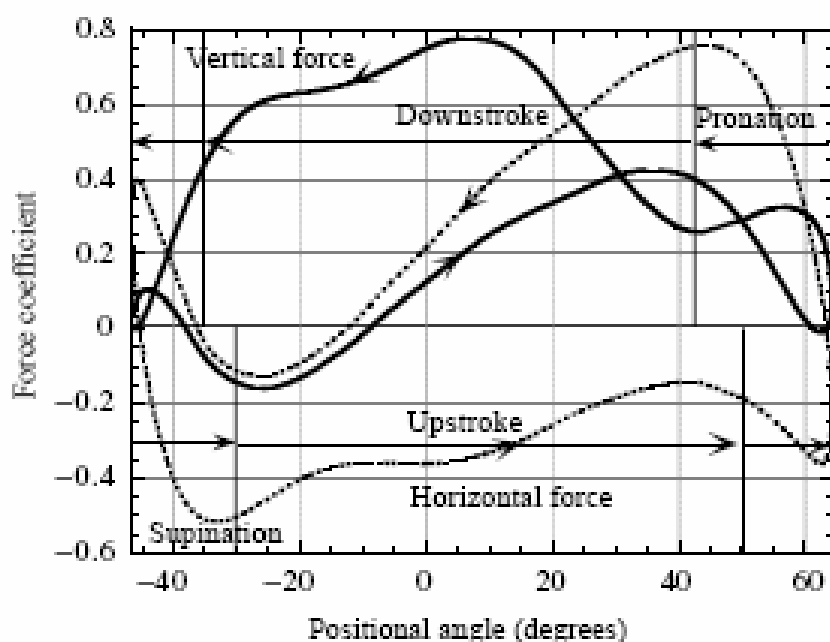
Η γωνία flapping που ικανοποιεί την οριζόντια ισορροπία δύναμης για να αιωρηθεί το έντομο βρίσκεται 23.6° , το οποίο παρουσιάζει άριστη συμφωνία με τις παρατηρηθείσες γωνίες περίπου $20-25^\circ$ σε ένα πραγματικό έντομο κατά τη διάρκεια της αιώρησης αυτού. Τέλος, η κατά μέσο όρο υπολογισμένη κάθετη δύναμη είναι 40% μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για να υποστηρίξει το βάρος του hawkmoth, πράγμα που δίνει περιθώρια στο έντομο να κουβαλήσει κάποιο φορτίο. Παρατίθενται παρακάτω το διάγραμμα των γωνιών που χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο στην παρούσα εργασία και προήλθε από την εργασία Liu-Kawachi (εικ.30), η γεωμετρία του φτερού(εικ.31) που χρησιμοποιήθηκε στη δική τους προσομοίωση και δύναμη όπως υπολογίστηκε συναρτήση της γωνίας flap κατά τη διάρκεια ενός κύκλου.



Εικόνα 30: Οι γωνίες κίνησης κατά τη διάρκεια ενός κύκλου που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία Liu-Kawachi



Εικόνα 31: Η γεωμετρία του φτερού στην εργασία Liu-Kawachi



Εικόνα 32: οι δυνάμεις κατά τη διάρκεια ενός κύκλου από τα αποτελέσματα της εργασίας Liu-Kawachi

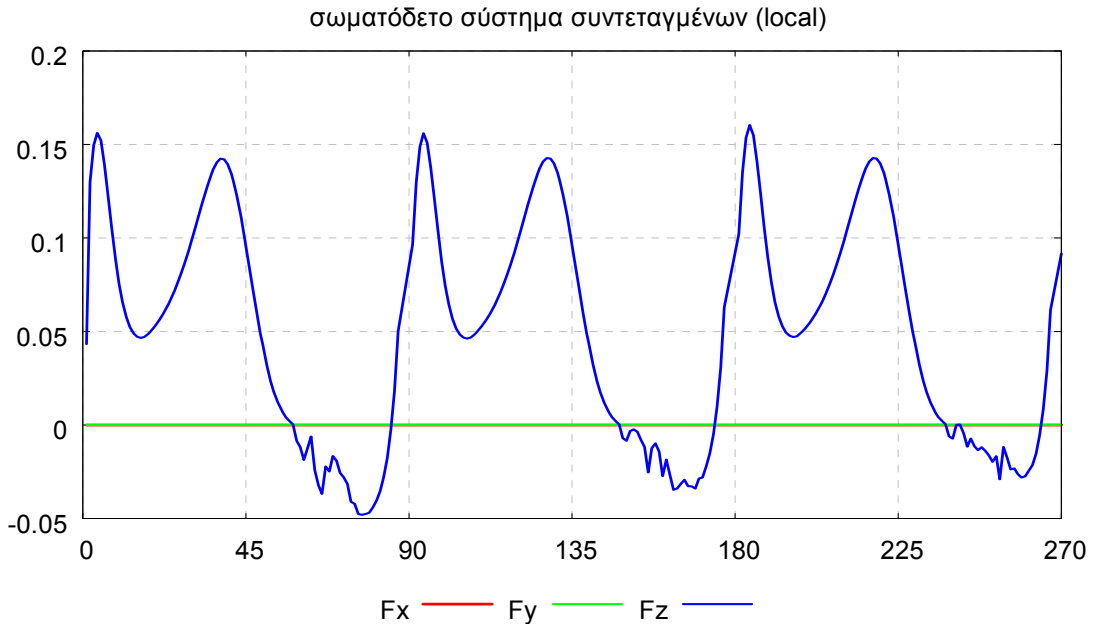
3.2.2 Επεξήγηση των διαγραμμάτων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι αεροδυναμικές δυνάμεις που δέχεται το σώμα κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Στον άξονα των τεταγμένων y των διαγραμμάτων είναι η δύναμη σε Newton F_y και στον άξονα των τεταγμένων x είναι ο χρόνος σε χρονικά βήματα (time steps)

Οι τρεις συνιστώσες της δύναμης αναφέρονται στο απόλυτο (global) σύστημα αξόνων. Με χρώμα μπλε είναι η άνωση F_z (δηλαδή η συνιστώσα με κατακόρυφη διεύθυνση), με κόκκινο η δύναμη πρόωσης ή αντίστασης F_x (συνιστώσα με διεύθυνση κάθετη στην ακμή πρόσπτωσης, και ίδια με την F_x επί άπειρον ταχύτητα), και με πράσινο η τελευταία συνιστώσα F_y με διεύθυνση κάθετη στις άλλες δύο. Σε όλα τα διαγράμματα αυτής της εργασίας, το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είναι το απόλυτο, καθώς είναι πιο κατανοητά και άμεσα τα αποτελέσματα και είναι και το πρότυπο που ακολουθείται και σε παρόμοιες εργασίες.

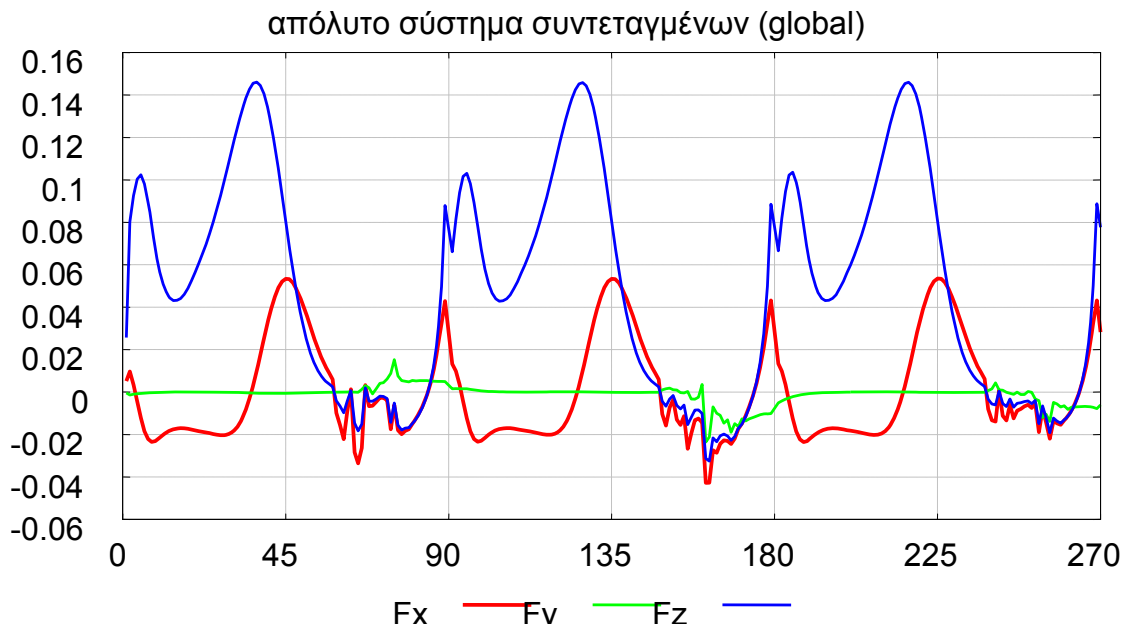
Στην πραγματικότητα, επειδή το σώμα είναι πολύ λεπτό, παράγεται μόνο μία δύναμη η οποία έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της πτέρυγας (και αναφέρεται στο σωματόδετο-local σύστημα συντεταγμένων). Αυτή η δύναμη αναλύεται στο απόλυτο σύστημα στις 3 δυνάμεις που μας ενδιαφέρουν.

Όπως είναι προφανές, με βάση το πυθαγόρειο θεώρημα το τετράγωνο αυτής της δύναμης ισούται με το άθροισμα των τετραγώνων των συνιστωσών του σωματόδετου συστήματος στις οποίες αναλύεται. Αυτό φαίνεται και στα ακόλουθα δύο διαγράμματα:



Διάγραμμα 1: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Στο παραπάνω διάγραμμα για συγκεκριμένες συνθήκες, παρουσιάζονται οι 3 συνιστώσες στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων. Παρατηρούμε, ότι οι F_x και F_y είναι μηδενικές, πράγμα που οφείλεται στο μηδενικό πάχος της πτέρυγας, εξαιτίας του οποίου δεν μπορεί να υπάρχουν αεροδυναμικές αντιστάσεις.



Διάγραμμα 2: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Στο παραπάνω διάγραμμα για τις ίδιες ακριβώς συνθήκες, παρουσιάζονται οι 3 συνιστώσες στο απόλυτο (καρτεσιανό) σύστημα συντεταγμένων. Εάν παρατηρήσει κάποιος προσεκτικά τα δύο διαγράμματα, θα δει ότι σε κάθε χρονικό βήμα (time step)

το τετράγωνο της τιμής στο πρώτο διάγραμμα (της μπλε γραμμής) ισούται με το άθροισμα των τετραγώνων των τιμών του δεύτερου διαγράμματος.

3.3 Αποτελέσματα

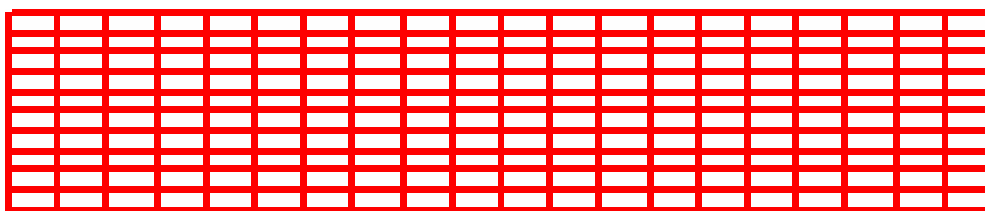
3.3.1 Εφαρμογή σε λεπτή πλάκα

Σε αυτή τη παράγραφο θα γίνει εφαρμογή του κώδικα σε μια απλή περίπτωση. Μελετήσαμε την αεροδυναμική συμπεριφορά μιας λεπτής πλάκας που περιστρέφεται γύρω από τον διαμήκη άξονα της με περιοδικό τρόπο. Στην ουσία η πλάκα κάνει την κίνηση που κάνουν τα flaps ενός αεροπλάνου.

Η πλάκα στην περίπτωση μας είχε διαστάσεις 4:1(μέτρα), και η έπ' άπειρον ταχύτητα ήταν 1m/sec. Από τα τρεξίματα που κάναμε, προσπαθήσαμε να καταλάβουμε τη σημασία της αποβολής στροβιλότητας από τις πλευρές της πλάκας στην αεροδυναμική συμπεριφορά που αυτή θα ακολουθούσε.

Έτσι, αρχικά η αποβολή γινόταν μόνο από την ακμή εκφυγής (trailing edge), στη συνέχεια επιτρέψαμε να εκφεύγει στροβιλότητα και από το ακροπερύγιο (tip), ύστερα και από τη βάση (root) και τέλος και από την ακμή πρόσπτωσης (leading edge). Στην περίπτωση της πλάκας βέβαια, λόγω της κίνησης που μελετήσαμε, root και tip στην ουσία είναι ακριβώς το ίδιο πράγμα και απλά τα ονομάσαμε έτσι για να υπάρχει εννιαία ονοματολογία με τα επόμενα τρεξίματα όπου ασχολούμαστε με 2 πτέρυγες (όπου root είναι η πλευρά κοντά στο σώμα του εντόμου και tip η απέναντι πλευρά μακριά από το σώμα).

Η πυκνότητα του αέρα λήφθηκε ίση με 1,265 gr/cm³, τιμή με βάση το γεγονός ότι τα έντομα πετάνε σε χαμηλά ύψη. Η πτέρυγα έχει 200 panels 20 κατά μήκος, και 10 σε κάθε λωρίδα(strip). Η πτέρυγα που χρησιμοποιήσαμε φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (εικ.33):



Εικόνα 33: πλάκα διαστάσεων 4:1

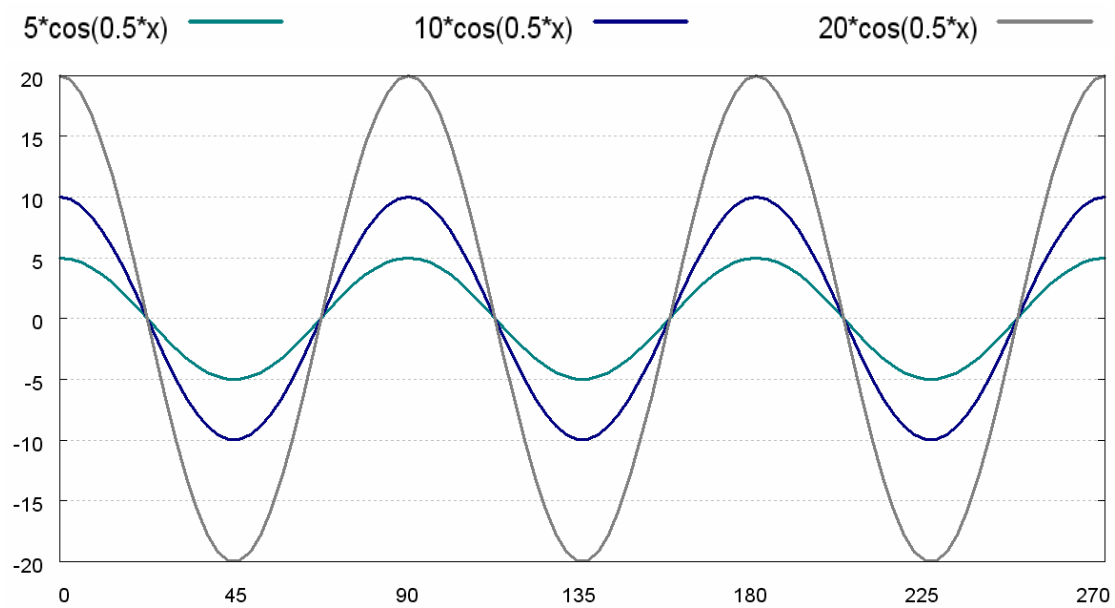
Σε κάθε τρέξιμο πραγματοποιούνται 3 κύκλοι, με 90 χρονικά βήματα ανά περίοδο. Παρά το σχετικά μικρό αριθμό κύκλων, τα αποτελέσματα είναι άμεσα περιοδικά, όποτε κρίνονται ως αρκετός ο αριθμός των επαναλήψεων του φαινομένου. Εξάλλου, κάθε επιπλέον επανάληψη αυξάνει πολύ το χρόνο τρεξίματος, χωρίς στην προκειμένη περίπτωση να βελτιώνει ποιοτικά τα αποτελέσματα.

Στη πρώτη περίπτωση που εξετάζουμε, η πλάκα περιστρέφεται γύρω από τον διαμήκη άξονα της, σύμφωνα με την εξίσωση $x = x_0 \cdot \cos(t - \varphi) \cdot \omega + c$, όπου x_0 είναι το πλάτος της συνημιτονοειδούς μεταβολής, φ η φάση, c σταθερά γύρω από την

οποία γίνεται η μεταβολή της γωνίας, και ω η γωνιακή συχνότητα (ισχύει $\omega=2\pi/T$ με T α την περίοδο).

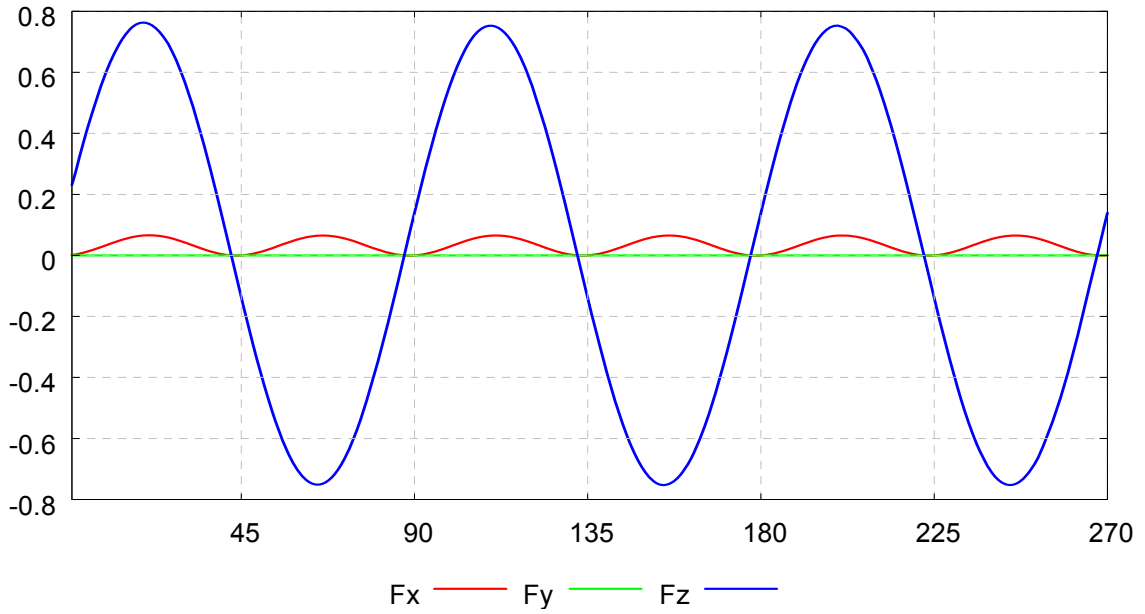
Στα παρακάτω τρεξίματα η τιμή της c είναι παντού μηδέν, το ω είναι 0,5 (και συνεπώς η περίοδος του φαινομένου 12,566 sec), η έπ' άπειρον ταχύτητα 1m/sec. Εξετάζεται το φαινόμενο σε 3 περιόδους, με 90 χρονικά βήματα ανά περίοδο. Το κάθε διάγραμμα στο τίτλο του λέει πιο είναι το πλάτος της μεταβολής, καθώς και από ποιες πλευρές αποβάλλεται στροβιλότητα, που είναι και η σημαντικότερη εξεταζόμενη παράμετρος σε αυτό το κομμάτι.

Στο παρακάτω διάγραμμα (διαγρ.3)φαινόνται οι μεταβολές των γωνιών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το κομμάτι της εργασίας συναρτήσει των χρονικών βημάτων.



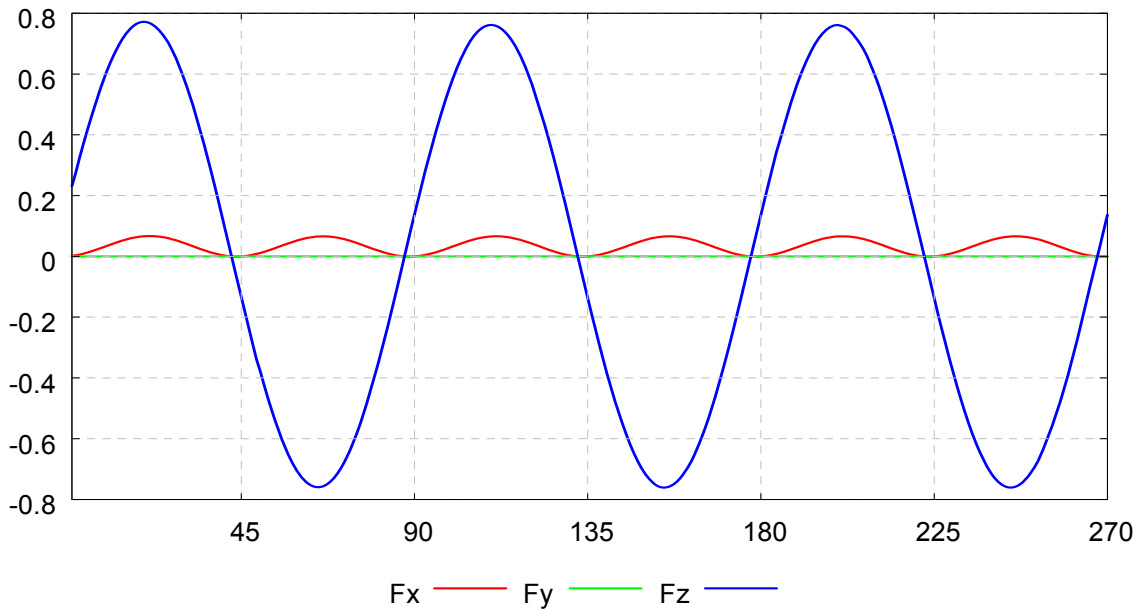
Διάγραμμα 3: Γωνίες συναρτήσει χρονικού βήματος

πλάκα ημίτονο πλάτους 5, αποβολή στροβιλότητας μόνο από trailing edge



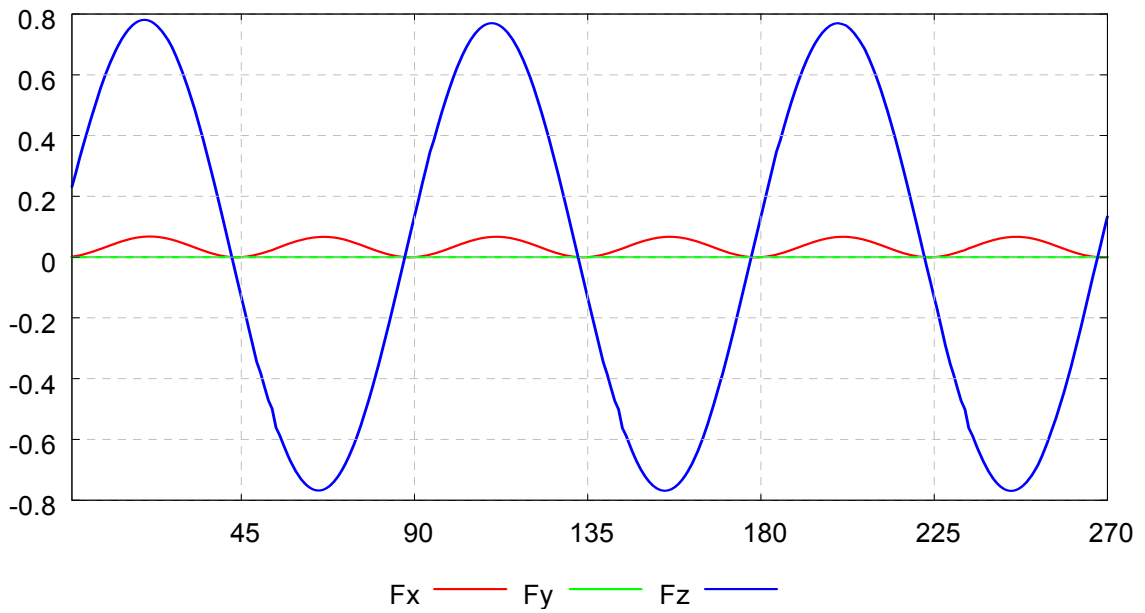
Διάγραμμα 4: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

πλάκα ημίτονο πλάτους 5, αποβολή στροβιλότητας μόνο από trailing edge και tip



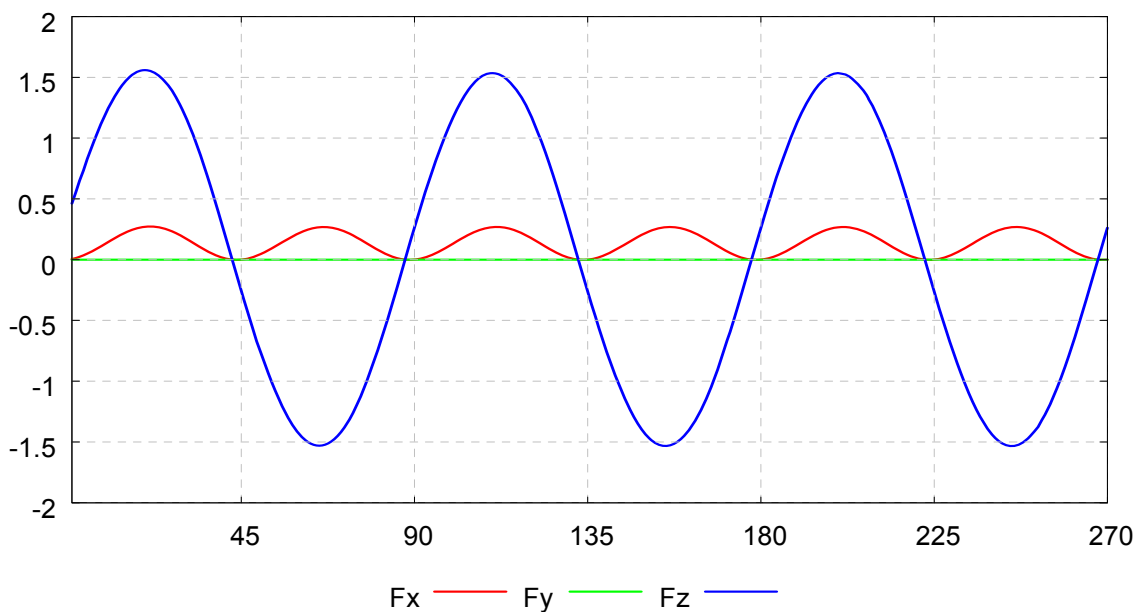
Διάγραμμα 5: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

πλάκα ημίτονο πλάτους 5, αποβολή στροβιλότητας μόνο από trailing edge, tip και root

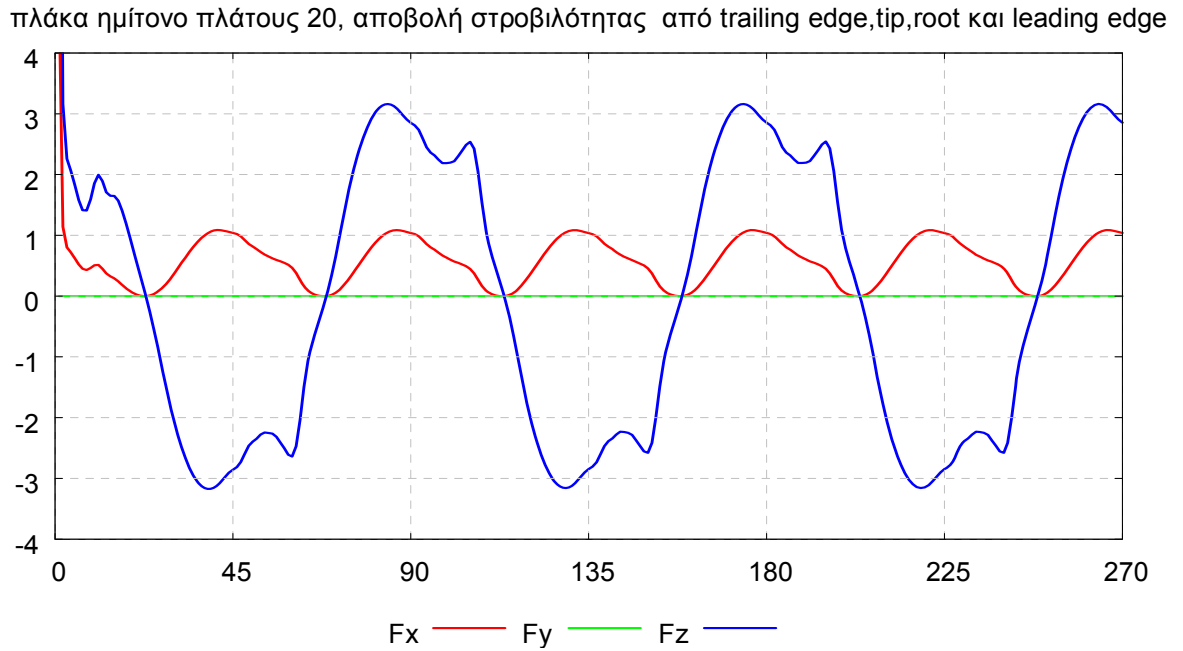
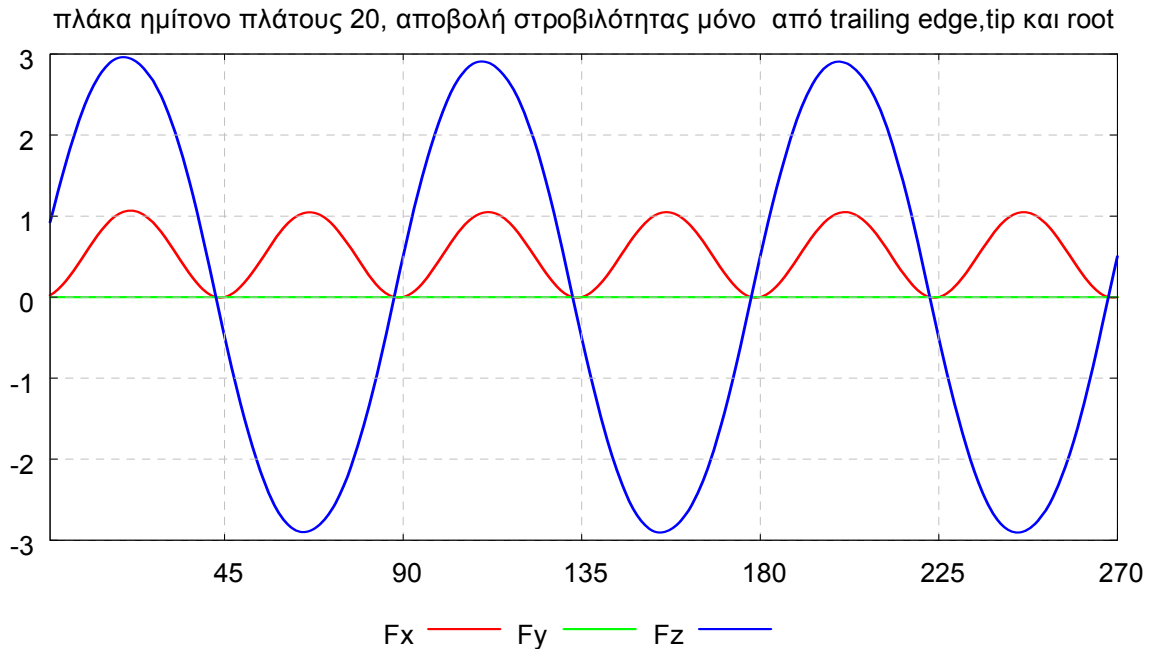


Διάγραμμα 6: δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

πλάκα ημίτονο πλάτους 10, αποβολή στροβιλότητας μόνο από trailing edge, tip και root



Διάγραμμα 7: δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



Στα παραπάνω διαγράμματα αυτό που παρατηρούμε είναι πως αυξανόμενου του πλάτους της ταλάντωσης αυξάνεται η άνωση, κάτι απόλυτα λογικό αφού έχει μεγαλύτερη διαδρομή να καλύψει η πτέρυγα. Επίσης, επειδή η ταλάντωση γίνεται γύρω από την οριζόντια θέση, η άνωση σε ένα κύκλο είναι συνολικά μηδέν, καθώς όση άνωση παράγεται κατά τη διάρκεια του downstroke, τόση αρνητική άνωση παράγεται κατά τη διάρκεια του upstroke. Πρόωση δεν υπάρχει σε κανένα σημείο του κύκλου, παρά μόνο αντίσταση, η οποία επίσης αυξάνεται όσο αυξάνεται το πλάτος της ταλάντωσης, κάτι το οποίο θα περιμέναμε αφού με μεγαλύτερες γωνίες αυξάνεται η επιφάνεια που συναντά αξονικά η ροή και συνεπώς αυξάνεται η δύναμη αντίστασης. Η δε δύναμη αντίστασης παίρνει μηδενικές τιμές στα σημεία όπου η γωνία είναι μηδέν (και συνεπώς η γωνία πρόσπτωσης) και άρα η ροή βλέπει μόνο μια ακμή χωρίς πάχος και δεν εμποδίζεται.

Βλέπουμε ακόμα πως η αποβολή στροβιλότητας και από το ακροπερύγιο και από τη βάση δεν αλλάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, παρά ελάχιστα αυξάνει την παραγόμενη άνωση, χωρίς να αλλάζει ούτε τη μορφή των καμπυλών. Όταν όμως αποβάλλεται στροβιλότητα και από την ακμή πρόσπτωσης (έχουμε δηλαδή την περίπτωση του διπλού ομόρρου) αλλάζει η ομαλότητα των καμπυλών, δεν αλλάζει το εύρος των παραγόμενων δυνάμεων αλλά μετατοπίζεται η στιγμή όπου αυτές παίρνουν τις μέγιστες θετικές και αρνητικές τιμές. Παρόλα αυτά όμως, το φαινόμενο παραμένει άκρως περιοδικό.

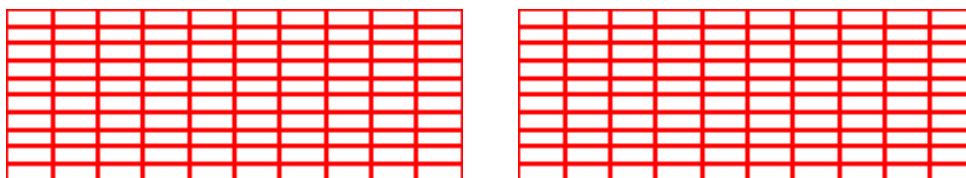
3.3.2 Εφαρμογή σε δύο πλάκες

Μετά τις παραπάνω εφαρμογές που έγιναν για να γίνει αντιληπτός ο τρόπος πρόβλεψης αποτελεσμάτων του κώδικα, ακολουθούν εφαρμογές σε 2 πτέρυγες.

Οι πτέρυγες στα επόμενα αποτελέσματα είναι στην ουσία η κάθε μια το μισό της προηγούμενης πλάκας. Στην πραγματικότητα, χωρίσαμε την πλάκα σε δύο ίσες μικρότερες πλάκες. Η κάθε μία συνεπώς έχει διαστάσεις 2:1 (m) και 100 panels (10x10). Οι διαστάσεις αυτές δεν επιλέχθηκαν τυχαία, αφού με αυτές τις τιμές 'προσομοιάζουν' (σε εμβαδόν και λόγο επιμήκους) τις πτέρυγες του ρομποτικού εντόμου που πήραμε για επόμενα πειράματα, με τη διαφορά πως έχουν πιο απλή γεωμετρική μορφή και είναι πιο εύκολο να βγουν συμπεράσματα για τον τρόπο που οι διάφορες παράμετροι επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

Στην περίπτωση των δύο πτερύγων, έχει νόημα να εισαχθούν και άλλες δύο γωνίες. Έτσι, εξετάζονται ακόμα η γωνία flapping και η γωνία lead-lag.

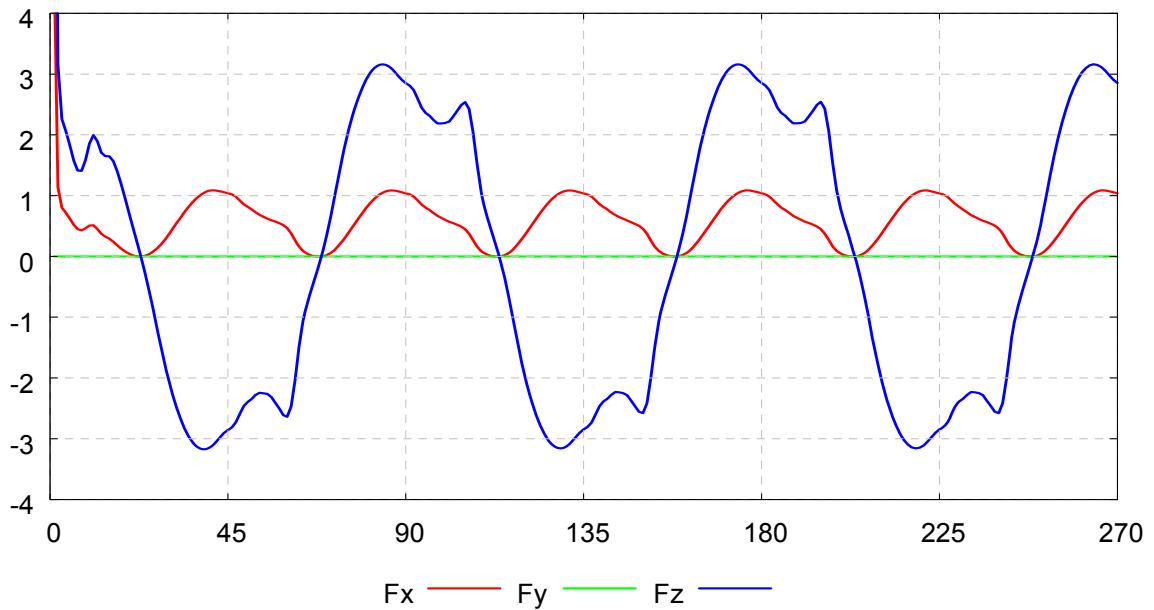
Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται οι δύο πτέρυγες.



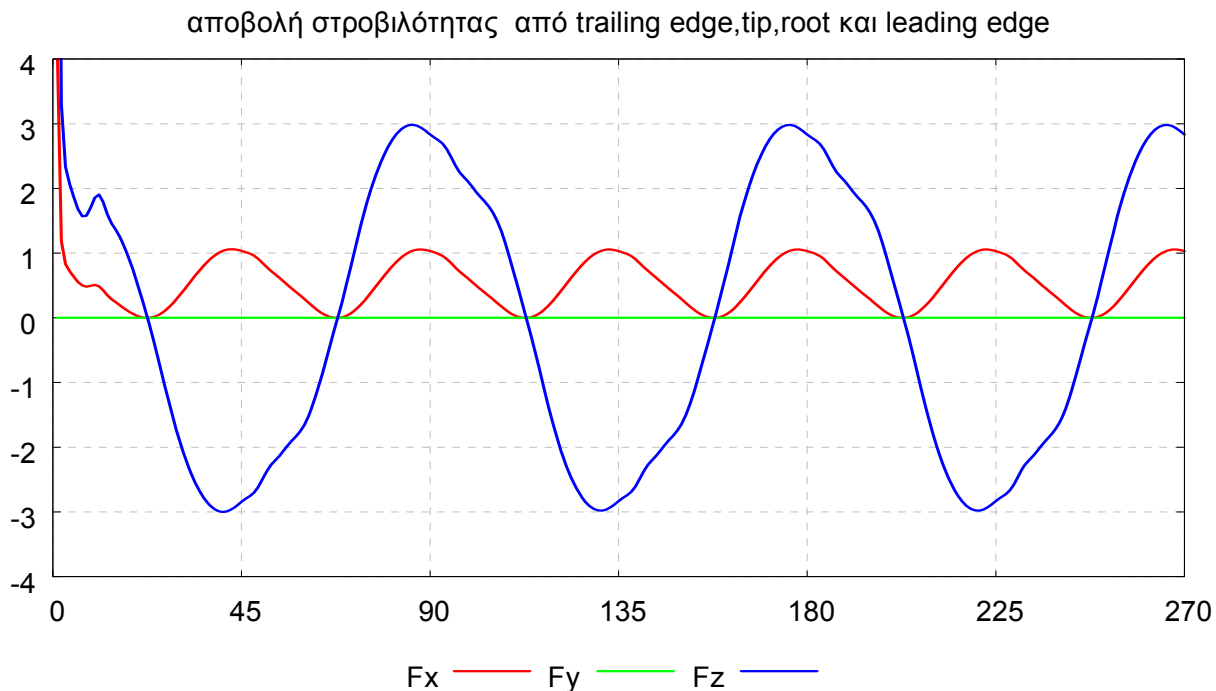
Εικόνα 34: οι δύο πλάκες διαστάσεων 2:1 η κάθε μια

Μια επιπλέον παράμετρος που θα εξεταστεί σε αυτό το πρόβλημα, είναι το κενό ανάμεσα στις δύο πλάκες. Μάλιστα, για να γίνει μια σύγκριση με τη περίπτωση της μίας πλάκας, κάναμε ένα τρέξιμο όπου στις δύο πλάκες επιβλήθηκε κίνηση περιστροφής γύρω από τον άξονα τους (twisting) με πλάτος 20 μοίρες και γωνιακή συχνότητα $\omega=0.5$ rad/sec, και αποβολή στροβιλότητας από όλες τις πλευρές. Αυτή η περίπτωση είναι ίδια με την τελευταία στο προηγούμενο κομμάτι, με τη διαφορά ότι υπάρχει ένα κενό. Στην επόμενη σελίδα παρατίθενται πρώτα η περίπτωση της μίας πλάκας (διάγραμμα 10) και ακολούθως η περίπτωση με τις δύο (διάγραμμα 11).

πλάκα ημίτονο πλάτους 20, αποβολή στροβιλότητας από trailing edge, tip, root και leading edge



Διάγραμμα 10: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



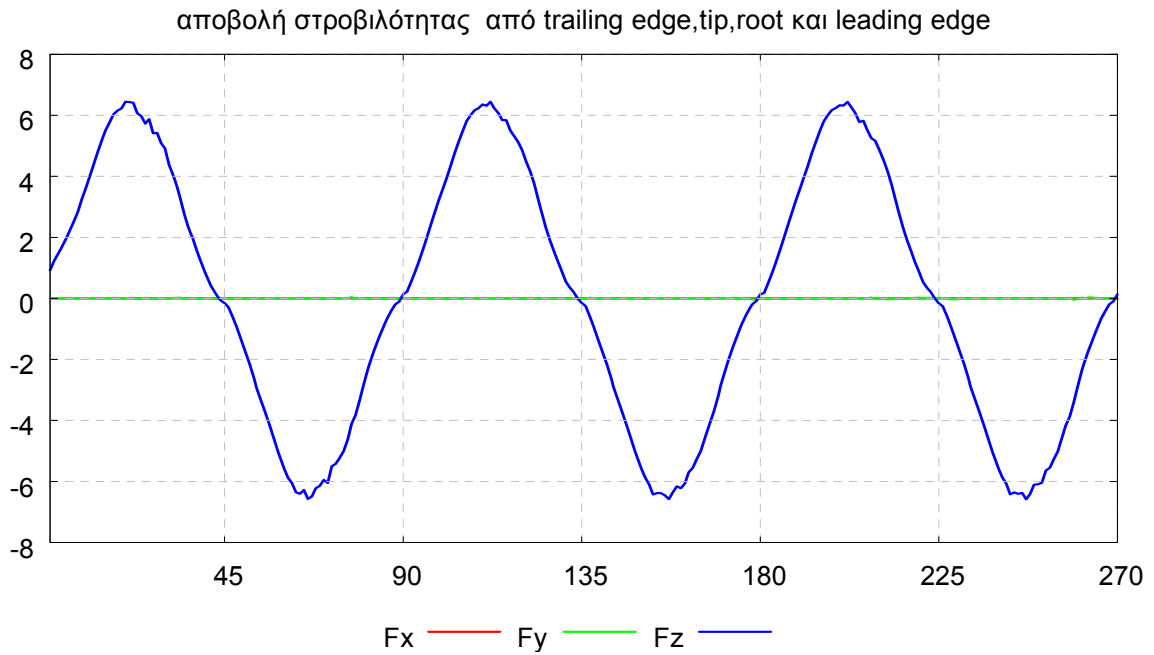
Διάγραμμα 11: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά και παρατηρείται μόνο μια εξομάλυνση κάποιων ανωμαλιών που παρατηρήθηκαν στην περίπτωση της πλάκας. Κατά τα άλλα τα εύρη των δυνάμεων είναι σχεδόν ίδια. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι όλα τα τρέξιμα από εδώ και πέρα σε αυτό το κομμάτι της εργασίας, έγιναν με αποβολή στροβιλότητας και από τις 4 πλευρές (trailing edge,tip,root,leading edge).

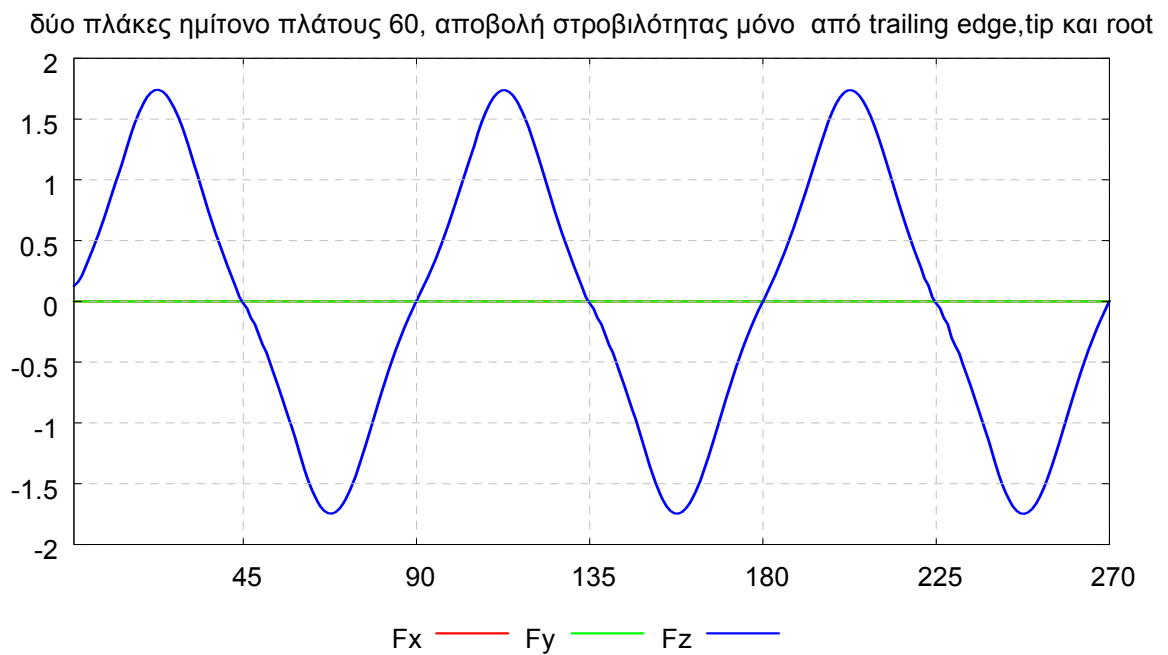
Το επόμενο τρέξιμο έγινε επιβάλλοντας μόνο flapping κίνηση στα δύο πτερύγια, με εύρος 60 μοίρες, και γωνιακή συχνότητα $\omega=0.5\text{rad/sec}$ (διαγρ.12). Αυτό το τρέξιμο έγινε για να συγκριθεί με το επόμενο του, στο οποίο αλλάζει μόνο η γωνιακή συχνότητα η οποία γίνεται 0.15 rad/sec (διαγρ.13) για να κινούνται οι πτέρυγες κατά μία περίπου χορδή ανά περίοδο (με μικρότερη γωνιακή συχνότητα το φαινόμενο πραγματοποιείται πιο αργά).

Συγκρίνοντας κανείς τα δύο επόμενα διαγράμματα παρατηρεί ότι η μορφή είναι σχεδόν ολόγρια με διαφορά στο ότι με τη μικρότερη συχνότητα λείπουν κάποιος 'θόρυβος' στις μέγιστες τιμές που υπάρχει στην μεγάλη συχνότητα, αλλά και κυρίως ότι η άνωση είναι σαφώς μικρότερη, πράγμα λογικό αφού το φαινόμενο γίνεται με μικρότερη ταχύτητα, δηλαδή τα φτερά χτυπιούνται με πιο αργό ρυθμό.

Τέλος, και στα δύο όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει μόνο άνωση αφού με κίνηση flapping σε κάθε χρονική στιγμή η ροή βλέπει μόνο την ακμή των φτερών, και συνεπώς δεν υπάρχει αντίσταση στο επίπεδο της πτέρυγας.



Διάγραμμα 12: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



Διάγραμμα 13:δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Τα τρεξίματα που ακολουθούν γίνονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσεγγισθούν σταδιακά με συναρτήσεις του τύπου $x = x_0 \cdot \cos(t - \varphi) \cdot \omega + c$, οι γωνίες που χρησιμοποιεί μια πραγματική manduca sexta για οριζόντια πτήση. Σε κάθε τρέξιμο μπαίνουν σταδιακά οι διάφορες παράμετροι ούτως ώστε να γίνει πιο ξεκάθαρη η επίδραση κάθε μιας στα αποτελέσματα.

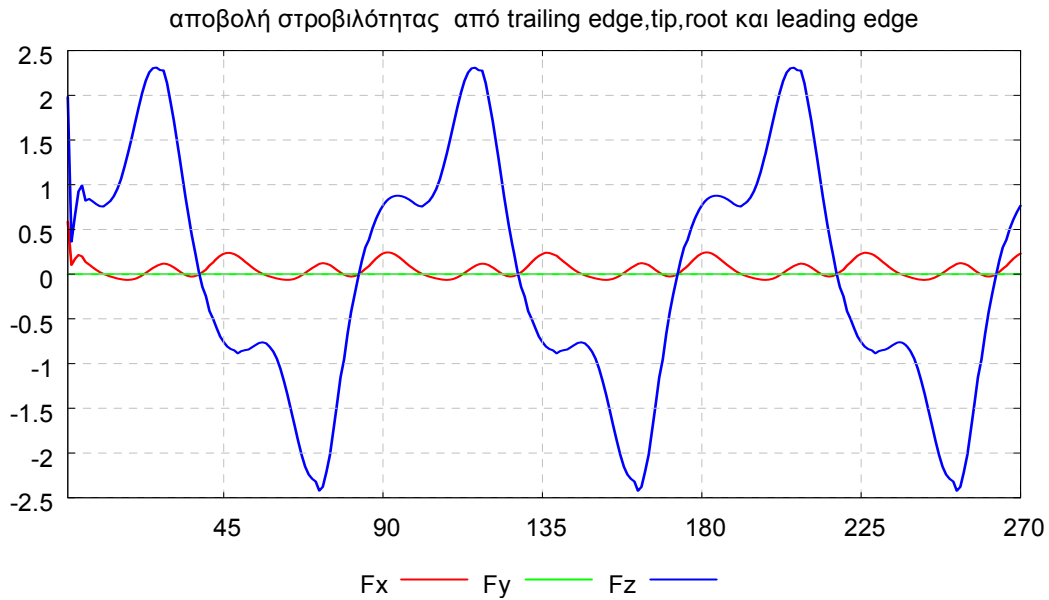
Έτσι, στο επόμενο διάγραμμα (διαγρ.14)φαίνονται οι δυνάμεις για την περίπτωση flapping (με πλάτος 60 μοίρες και γωνιακή συχνότητα 0.15) και lead lag (με πλάτος

10 μοίρες και γωνιακή συχνότητα 0.30-γιατι στα διαγράμματα φαίνεται να έχει περίπου τη μισή περίοδο αυτή η γωνία κίνησης).

flapping $x_0=10^\circ$, $\omega=0.15\text{rad/sec}$

90 timesteps per rotation

lead-lag $x_0=10^\circ$ $\omega=0.30\text{rad/sec}$



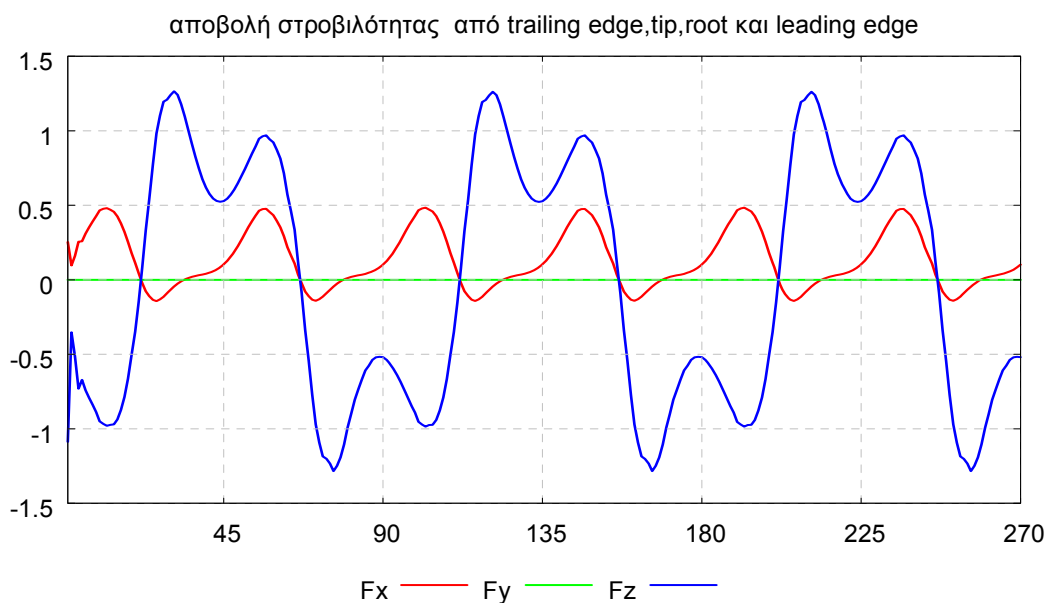
Διάγραμμα 14: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

flapping $x_0=10^\circ$, $\omega=0.15\text{rad/sec}$

90 timesteps per rotation

lead-lag $x_0=10^\circ$ $\omega=0.30\text{rad/sec}$

twist $x_0=20^\circ$ $\omega=0.15\text{rad/sec}$



Διάγραμμα 15:δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

flapping $x_0=10$, $\omega=0.15$ rad/sec

180 timesteps per rotation

lead-lag $x_0=10$ $\omega=0.30$ rad/sec

twist $x_0=20$ $\omega=0.15$ rad/sec



Διάγραμμα 16: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Στα προηγούμενα δύο διαγράμματα, έχοντας εισάγει και τη τρίτη κίνηση των πτερυγίων, γίνεται σύγκριση με μόνη παραμετρική αλλαγή τον αριθμό των χρονικών βημάτων. Συγκεκριμένα διπλασιάζοντας τα χρονικά βήματα ανά περίοδο(διαγρ.16), παρατηρούμε όμοια καμπύλη και εξέλιξη των δυνάμεων, με λίγο μεγαλύτερες τιμές στη περίπτωση των περισσότερων χρονικών βημάτων.

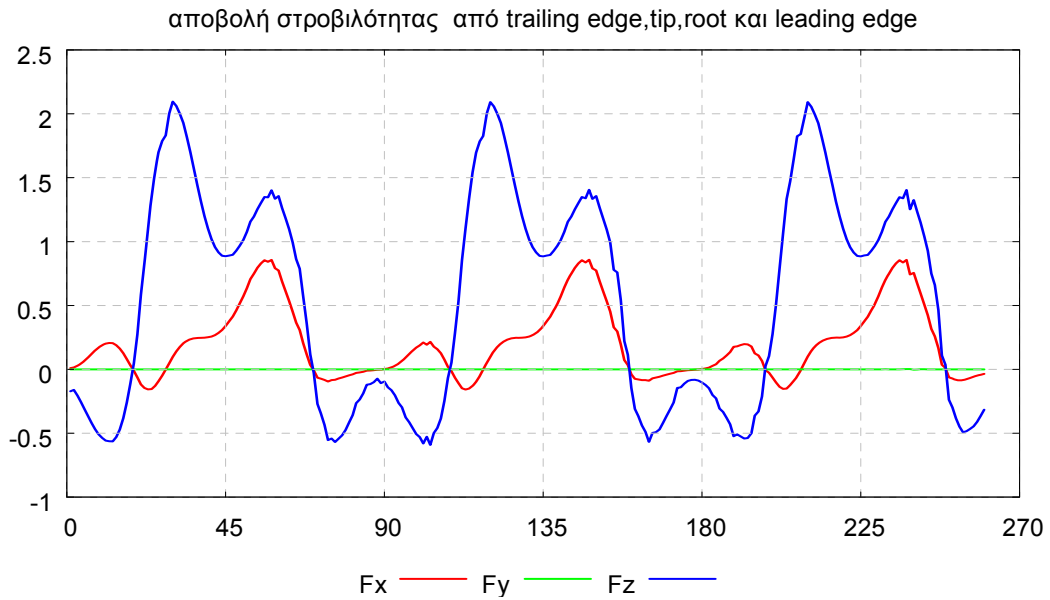
Η επόμενη παράμετρος που εισάγεται, είναι η σταθερά c στην περιστροφή των πτερυγίων. Τα ως τώρα αποτελέσματα είχαν flapping και twisting συμμετρικά ως προς το μηδέν. Με αποτέλεσμα, η άνοση που προέκυπτε να είναι επίσης συμμετρική, και συνολικά μηδέν σε ολόκληρο το κύκλο. Έτσι εισάγουμε τις σταθερές c , πρώτα στο twist και στη συνέχεια και στο flapping, με τιμές επιλεγμένες με βάση το διάγραμμα των τιμών της *Manduca sexta* και προσέχοντας βέβαια να μη ξεπεραστούν οι 90 μοίρες στο flapping(ή οι -90 μοίρες) καθώς κάτι τέτοιο θα μπορούσε να σημαίνει χτύπημα των φτερών εάν δεν υπάρχει αρκετό κενό (και στη περίπτωση του κώδικα, θα σήμαινε ότι το ένα φτερό μπαίνει μέσα στο άλλο με λανθασμένα αποτελέσματα. Βέβαια και στη φύση, όπως αναφέρθηκε στην βιβλιογραφική επισκόπηση της εργασίας υπάρχουν μόνο κάποια είδη που φτάνουν το flapping ώστε να κάνουν clap τα φτερά στις 90 μοίρες)

flapping $x_0=10$, $\omega=0.15$ rad/sec

90 timesteps per rotation

lead-lag $x_0=10$, $\omega=0.30$ rad/sec

twist $x_0=20$, $\omega=0.15$ rad/sec $c=5$



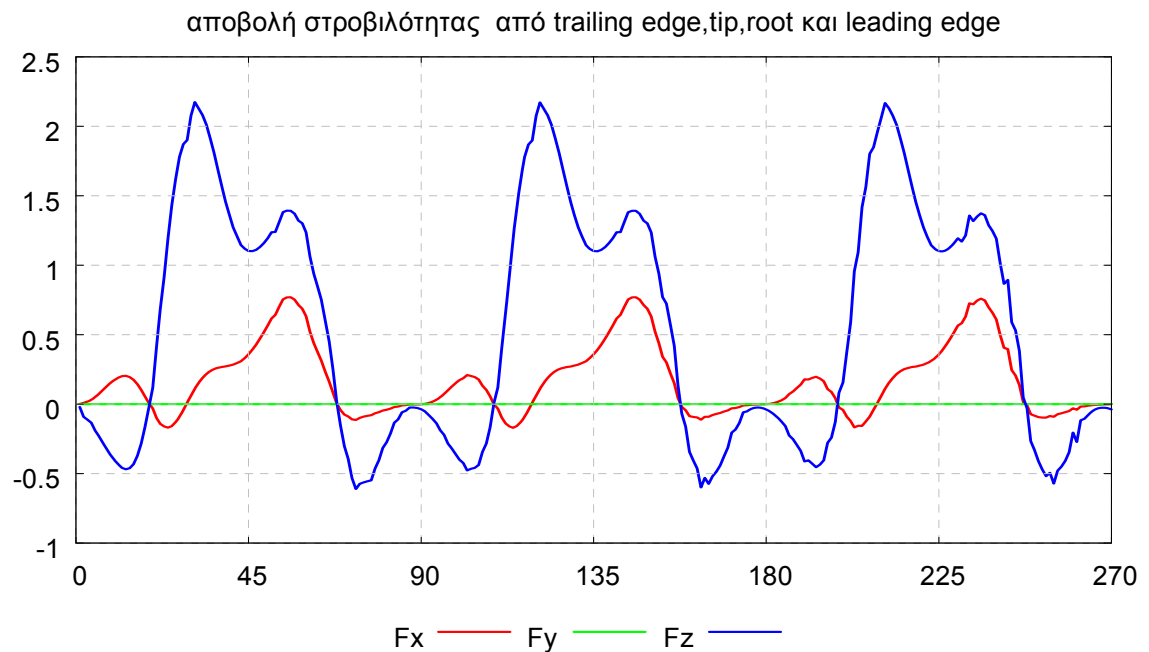
Διάγραμμα 17: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

flapping $x_0=10$, $\omega=0.15$ rad/sec $c=10$

90 timesteps per rotation

lead-lag $x_0=10$, $\omega=0.30$ rad/sec

twist $x_0=20$, $\omega=0.15$ rad/sec $c=5$



Διάγραμμα 18: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Στα παραπάνω διαγράμματα (διαγρ.17 και 18) παρατηρούμε ότι η άνωση ανεβαίνει (παραμένει συμμετρική αλλά γύρω από θετική τιμή, η οποία είναι και ο μέσος όρος της σε ένα κύκλο). Παράλληλα όμως αλλάζει και η F_x η οποία παίρνει μεγαλύτερες τιμές και αλλάζει κάπως και η μορφή της. Να θυμίσουμε εδώ, ότι θετική F_x σημαίνει αντίσταση και αρνητική σημαίνει δύναμη πρόωσης.

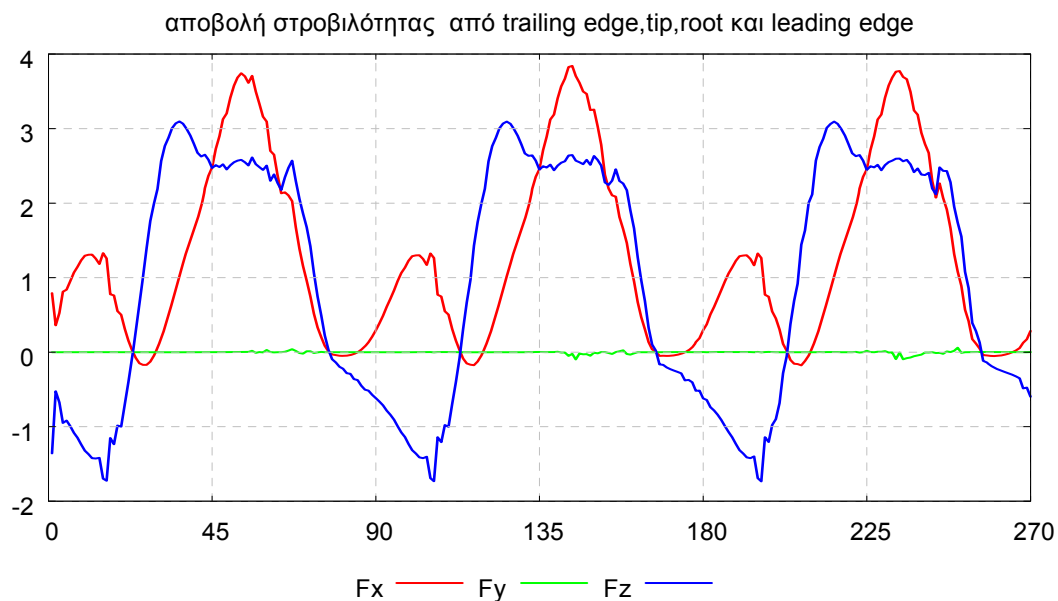
Στο επόμενο διάγραμμα(διαγρ.19), έγινε το ίδιο τρέξιμο με διπλάσιο εύρος και σταθερά c για τη γωνία του twist (το τελευταίο βήμα για την προσομοίωση των αληθινών γωνιών, με απλές συνημιτονοειδείς εξισώσεις).

flapping $x_0=100$, $\omega=0.15\text{rad/sec}$ $c=100$

90 timesteps per rotation

lead-lag $x_0=100$ $\omega=0.30\text{rad/sec}$

twist $x_0=400$ $\omega=0.15\text{rad/sec}$ $c=100$



Διάγραμμα 19: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι αυξάνεται πάρα πολύ η δύναμη αντιστάσεως, και λιγότερο η άνωση. Όμως τα τμήματα όπου υπάρχει πρόωση είναι τα ίδια, και η τιμή της πρόωσης αρκετά μικρότερη, συγκριτικά με τη προηγούμενη περίπτωση.

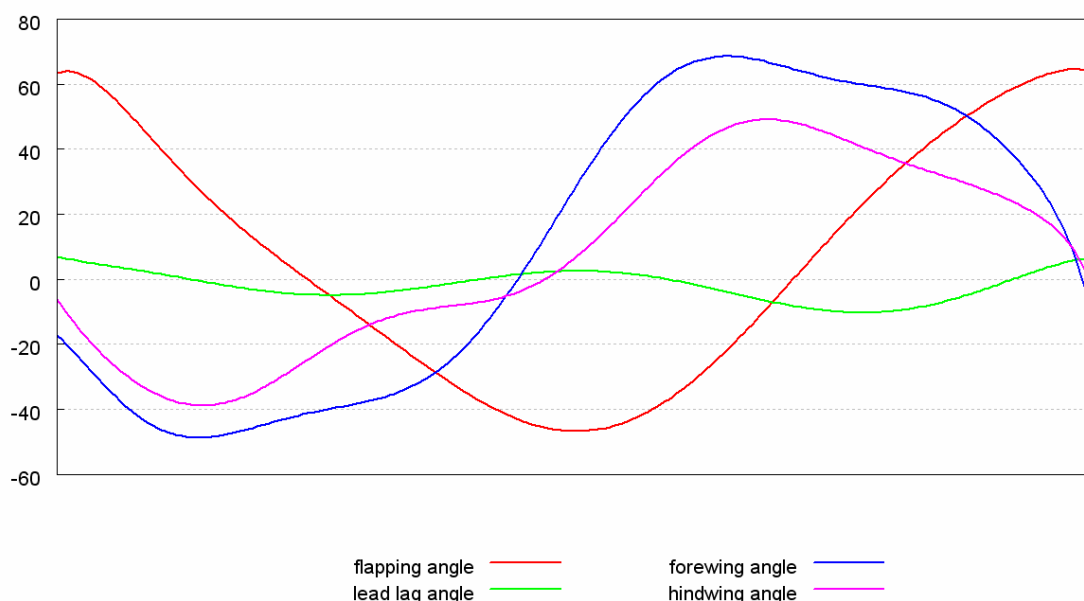
3.3.3 Πλάκες με πολυωνυμικές εξισώσεις γωνιών

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την κίνηση των πλακών, που χρησιμοποιήθηκαν στα προηγούμενα πειράματα, με χρήση των γωνιών μιας *manduca sexta*. Οι γωνίες αυτές εισήχθησαν ως πολυωνυμικές εξισώσεις.

Παίρνοντας πολλά σημεία πάνω στην κάθε καμπύλη, και με ειδικό λογισμικό (*windigit*) κάναμε *digitize* των καμπυλών. Έτσι το κάθε σημείο είχε δύο συντεταγμένες: χρονική στιγμή και τιμή γωνίας. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τη

μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων πήραμε μια πολυωνμική προσέγγιση των καμπυλών και αυτές εισήχθησαν ως δεδομένα στον κώδικα. Όπου χρησιμοποιήθηκαν οι πολυωνμικές εξισώσεις, η γωνιακή συχνότητα ήταν 0.78539rad/sec.

Η manduca sexta ως τετράπτερο έντομο, κάνει κινήσεις που περιγράφονται από 4 γωνίες. Μια για το flapping των φτερών, μια για τη lead lag κίνηση και 2 για το twisting. Το κύριο φτερό (forewing) κάνει περιστροφή γύρω από το σώμα με γωνία που από εδώ και πέρα ονομάζουμε forewing angle, ενώ το βοηθητικό φτερό είναι δεμένο στο trailing edge του forewing και εκτελεί ακόμη περιστροφή γύρω από αυτό με γωνία που στο εξής ονομάζουμε hindwing angle. στο παρακάτω διάγραμμα (διαγρ.20) φαίνονται οι γωνίες κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μετά από το digitize.



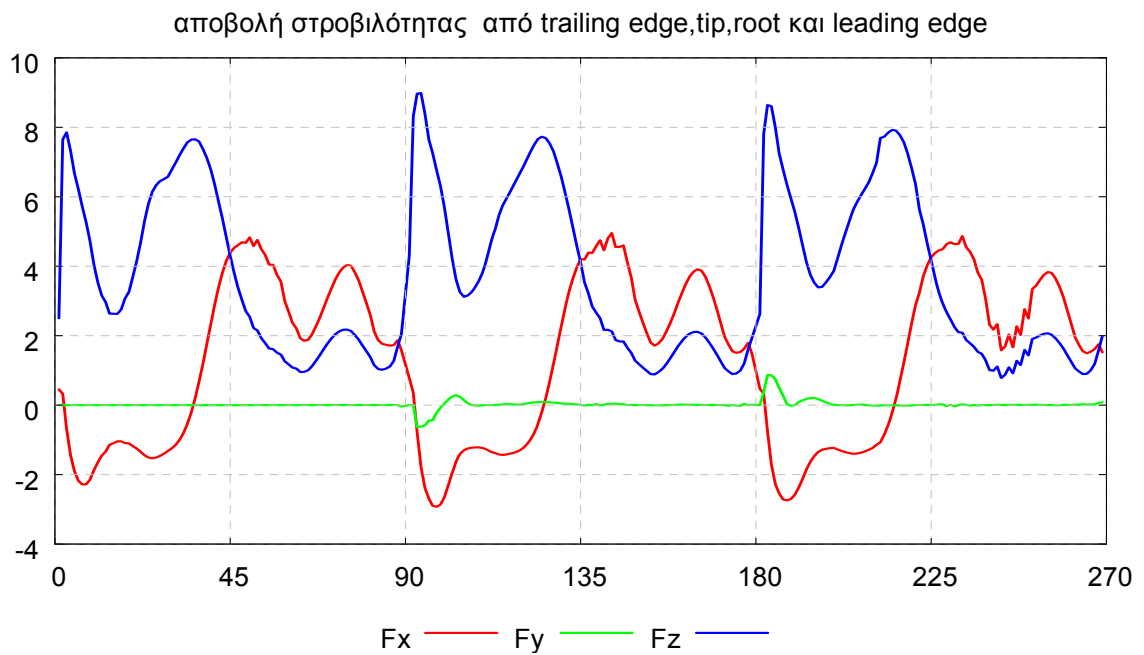
Διάγραμμα 20: Οι γωνίες κίνησης όπως αυτές εισήχθησαν στον υπολογιστή

Στα ακόλουθα τρεξίματα, χρησιμοποιήσαμε και τις δύο γωνίες σαν δεδομένα για τις δύο πλάκες. Σε αυτό το σημείο να παρατηρήσουμε ότι έως τώρα, στα τρεξίματα με τις δύο πλάκες, το κενό μεταξύ τους ήταν σε όλα τα τρεξίματα ίδιο και ίσο με 0.7 όταν το μήκος ήταν 2 για κάθε πτέρυγα.

Παρουσιάζονται 3 αποτελέσματα, στο πρώτο (διαγρ.21) χρησιμοποιήθηκε ως γωνία twisting η forewing angle με συντελεστή 0.75 (συντελεστής πλάτους σε κάθε σημείο), στο δεύτερο (διαγρ.22) η ίδια γωνία αλλά με μεγαλύτερο κενό ανάμεσα στα φτερά (διπλάσιο), και στο τρίτο (διαγρ.23) η hindwing angle.

Forewing angle, coefficient= 0.75

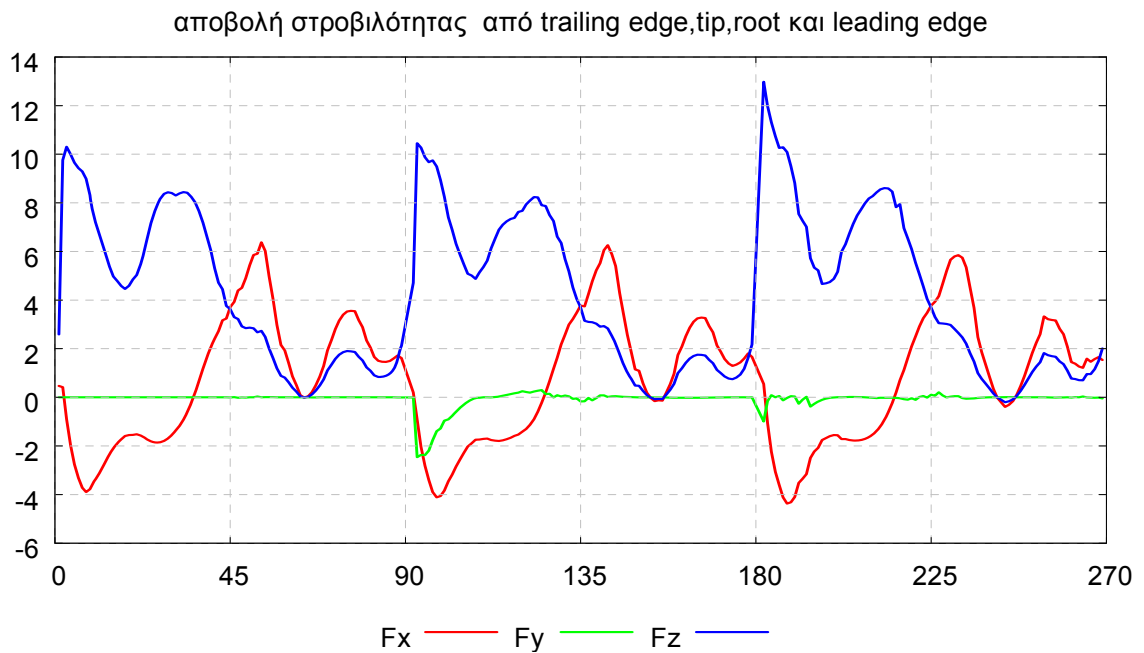
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 21: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing angle, coefficient= 0.75, double gap

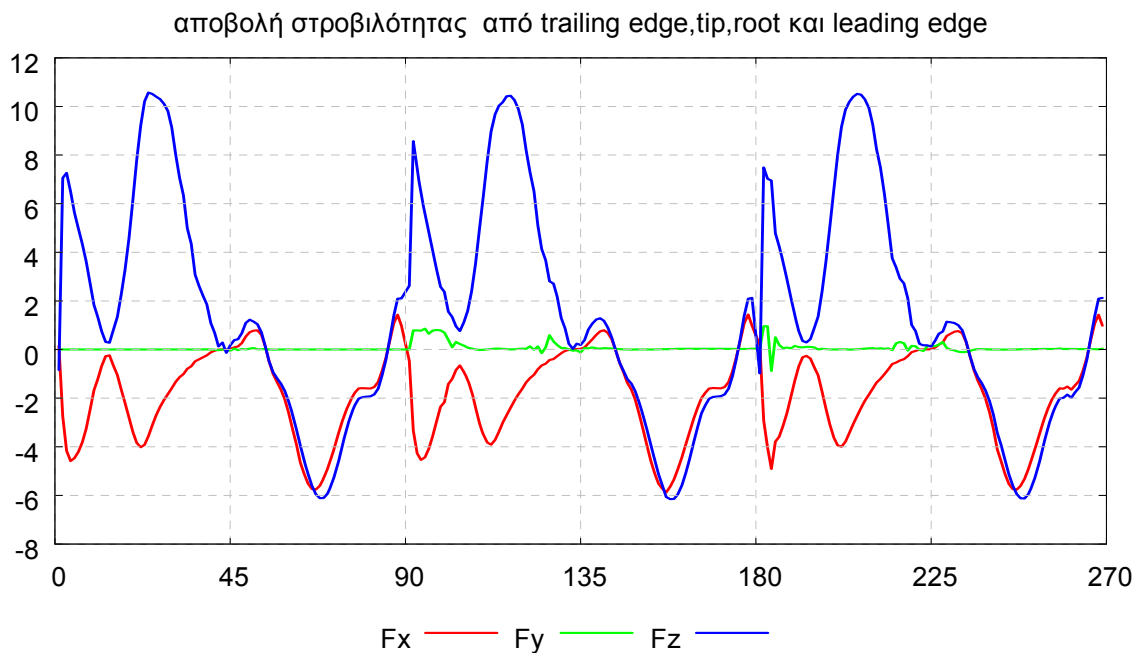
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 22: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

hindwing angle, coefficient= 1

90 timesteps per rotation

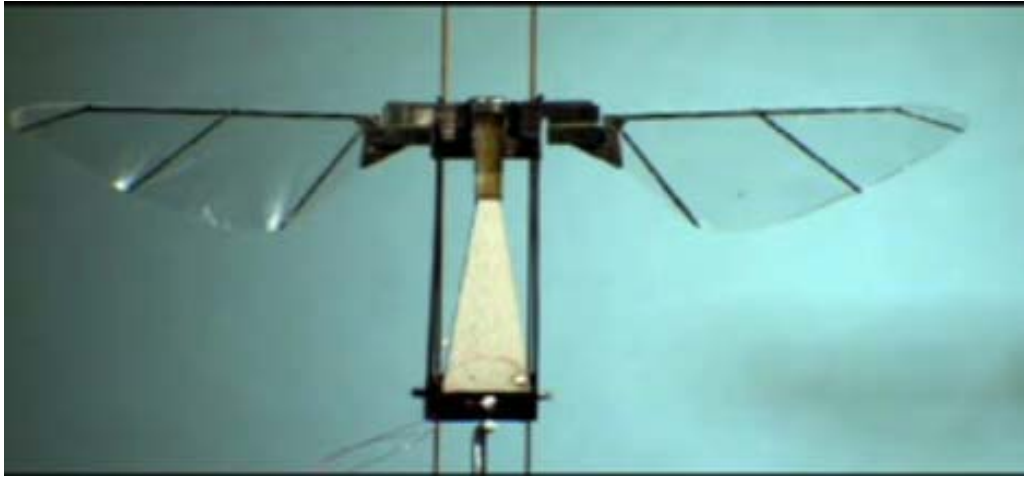


Διάγραμμα 23: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

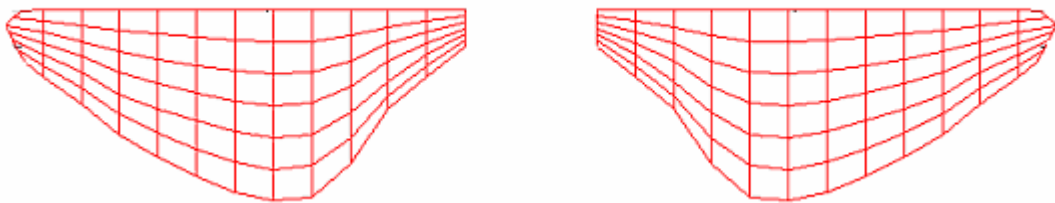
Στα παραπάνω τρεξίματα παρατηρούμε ότι με μεγαλύτερο κενό αυξάνεται η άνωση, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στην μικρότερη επίδραση του ομόρρου του ενός σώματος στον ομόρρου του άλλου, και άρα μικρότερες αεροδυναμικές απώλειες. Βλέπουμε ακόμα πώς η συνολική εικόνα των δυνάμεων δεν αλλάζει σημαντικά μορφή με αντικατάσταση της forewing angle από την hindwing angle.

3.3.4 Γεωμετρία από μηχανικό έντομο με γωνίες *manduca sexta*.

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται αποτελέσματα από τρεξίματα με γεωμετρία που πήραμε από digitize του περιγράμματος της πτέρυγας του μηχανικού εντόμου που κατασκεύασε το harvard. Η ταχύτητα αναφοράς U_{inf} ήταν σε όλα τα τρεξίματα 500, έκτος από ένα όπου ήταν 1000 και σημειώνεται πάνω από το διάγραμμα. Το τρέξιμο αυτό έγινε για να μελετηθεί η επίδραση της παραμέτρου αυτής στα αποτελέσματα.



Εικόνα 35: η πηγή της γεωμετρίας που χρησιμοποιήσαμε



Εικόνα 36: η παραπάνω γεωμετρία ως αποτέλεσμα digitize

Με τη παραπάνω γεωμετρία, και γωνίες κίνησης από τις καμπύλες των γωνιών που περιγράφουν την κίνηση μιας *Manduca sexta* κάναμε παραμετρική ανάλυση του εύρους της γωνίας twist. Για να γίνει αυτό, εισάγαμε έναν συντελεστή που πολλαπλασιάζει τη διαφορά της πολυωνμικής συνάρτησης με τη μέση της τιμή κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνουμε το ίδιο αποτέλεσμα που θα παίρναμε σε μια ημιτονοειδή συνάρτηση πολλαπλασιάζοντας επί ένα συντελεστή το εύρος x_0 .

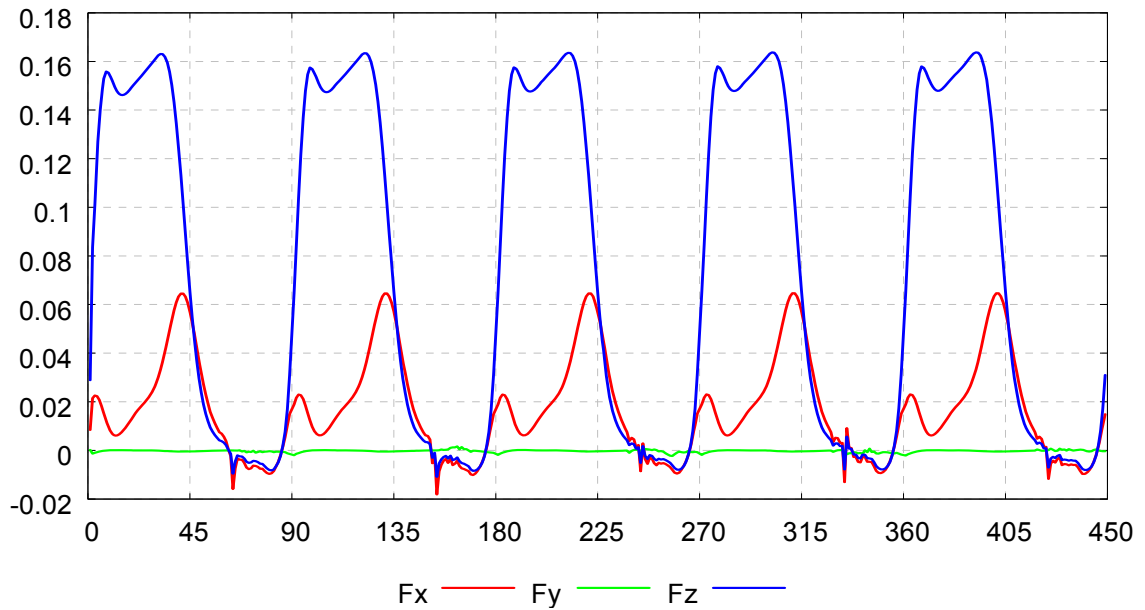
Τα πρώτα πειράματα που παρουσιάζονται έγιναν με γωνία twist την forewing angle (διαγρ. 24-36), και ακολουθούν αυτά με twist την hindwing angle (διαγρ.37-42). Μελετήθηκε η αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερύγων με αλλαγή της φάσης ϕ (στον τίτλο κάθε διαγράμματος που δεν είναι μηδέν γράφουμε $\text{phase} = \phi$) του twist σε σχέση με το flap και το lead-lag (η φάση ανάμεσα σε αυτές τις δύο κινήσεις έμεινε η ίδια).

Να παρατηρήσουμε ότι στα τρεξίματα αυτού του κεφαλαίου αποβολή στροβιλότητας γίνεται μόνο από την ακμή εκφυγής, το ακροπτερύγιο και τη βάση του φτερού, αφού ο κώδικας δεν έδινε ορθά αποτελέσματα για την περίπτωση διπλού ομόρρου λόγω της ιδιόμορφης γεωμετρίας των φτερών, όπως θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο.

Forewing coefficient 0.5

90 timesteps per rotation

αποβολή στροβιλότητας από trailing edge, tip, και root

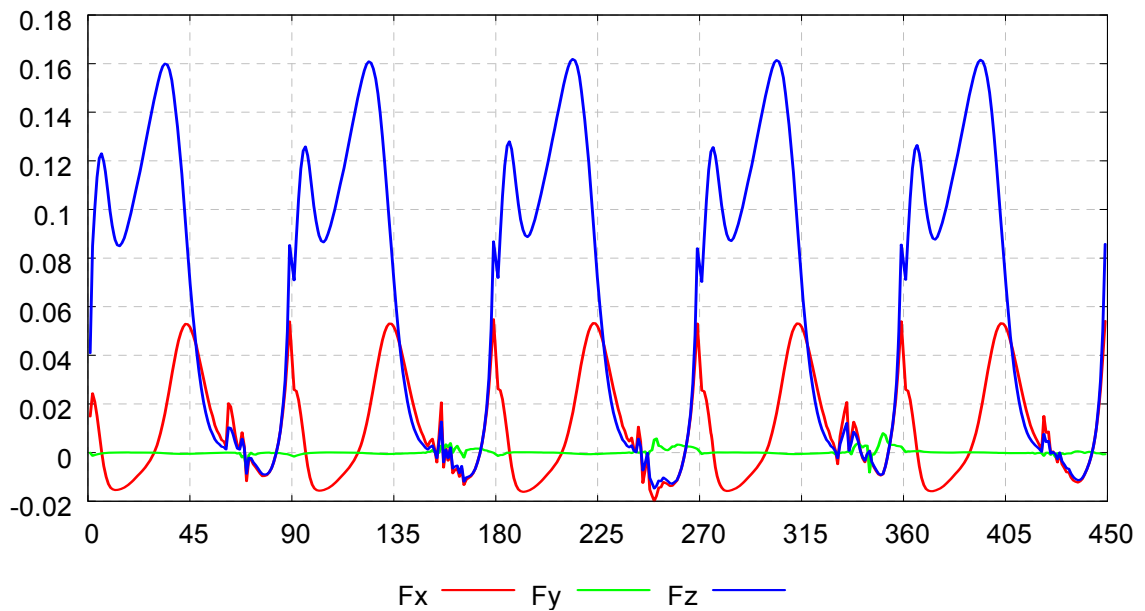


Διάγραμμα 24: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 0.625

90 timesteps per rotation

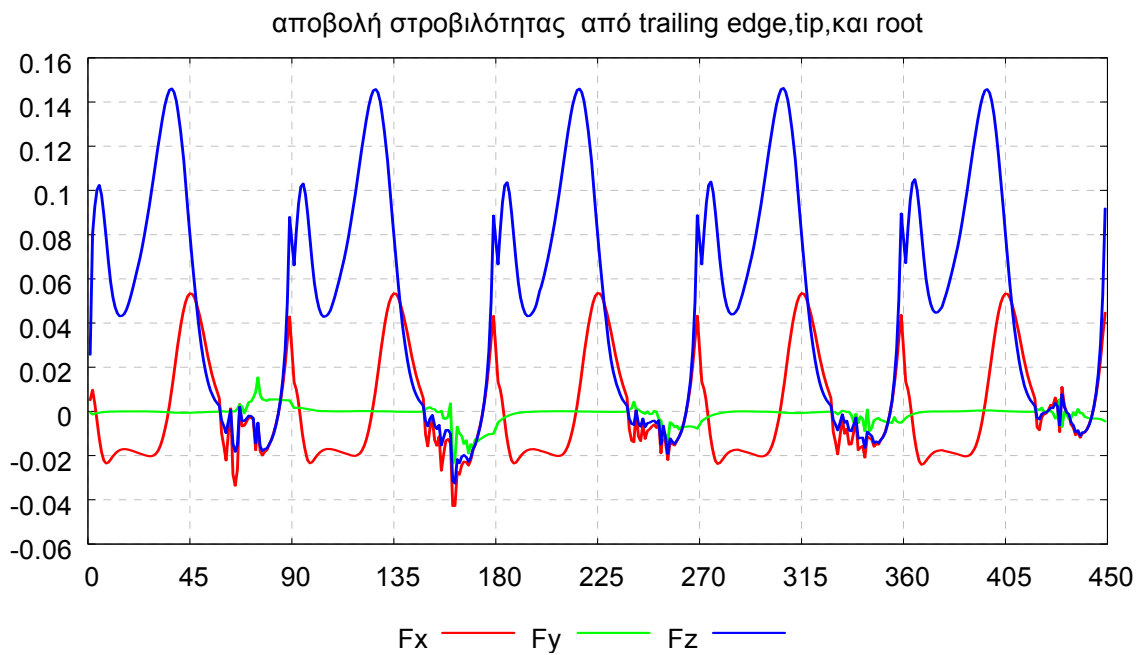
αποβολή στροβιλότητας από trailing edge, tip, και root



Διάγραμμα 25: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 0.75

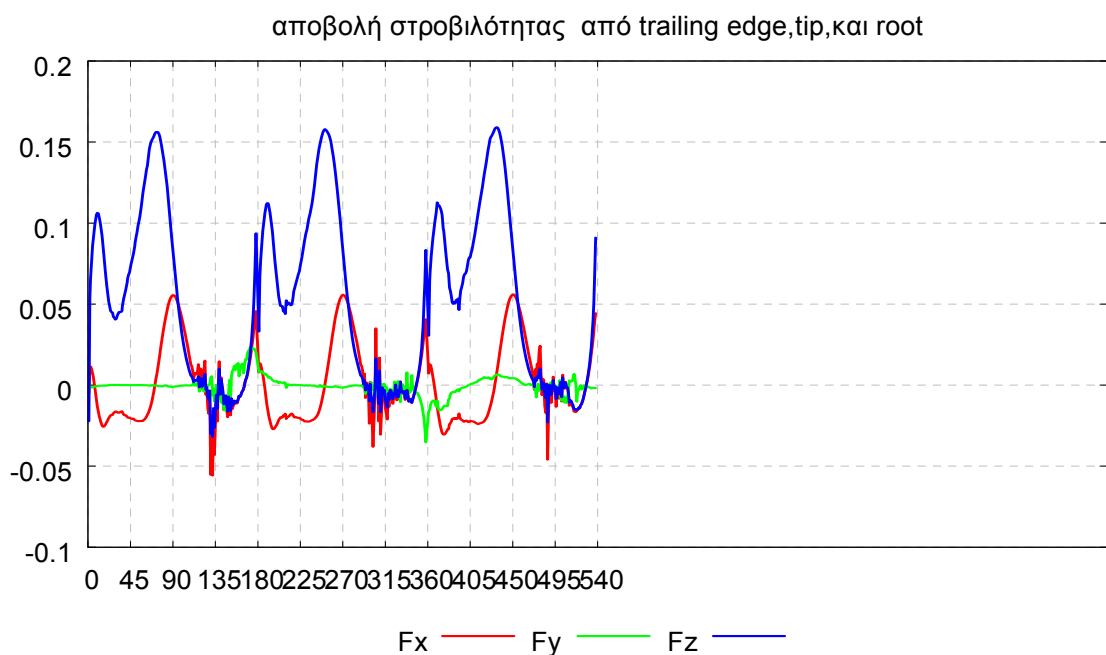
90 timesteps per rotation



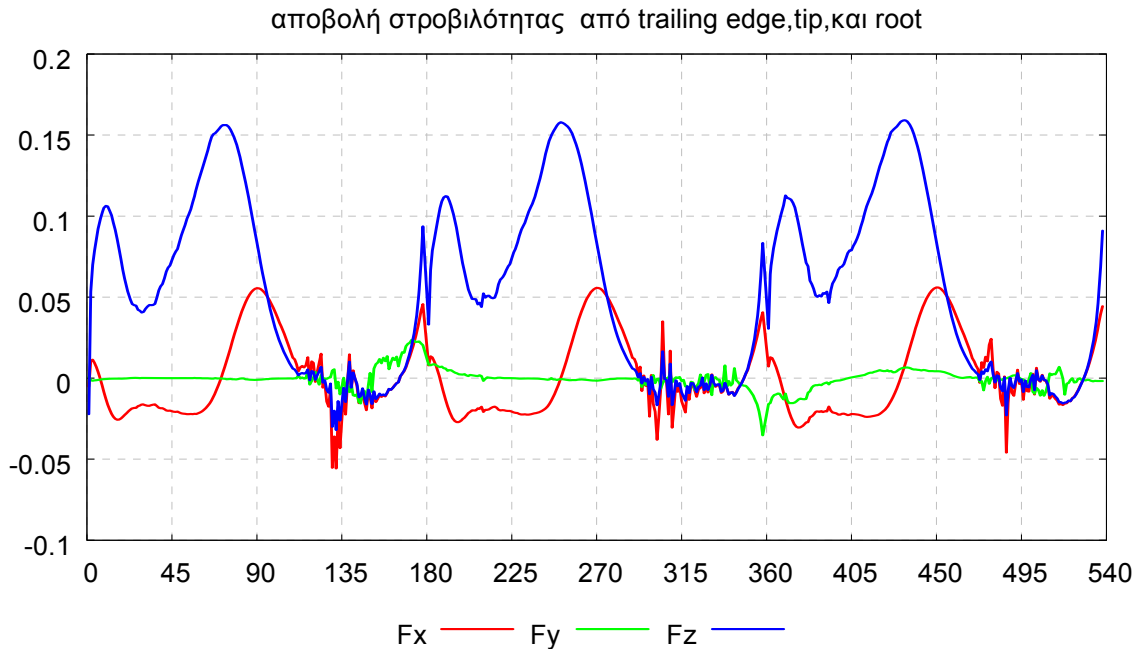
Διάγραμμα 26: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 0.75

180 timesteps per rotation



Διάγραμμα 27: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

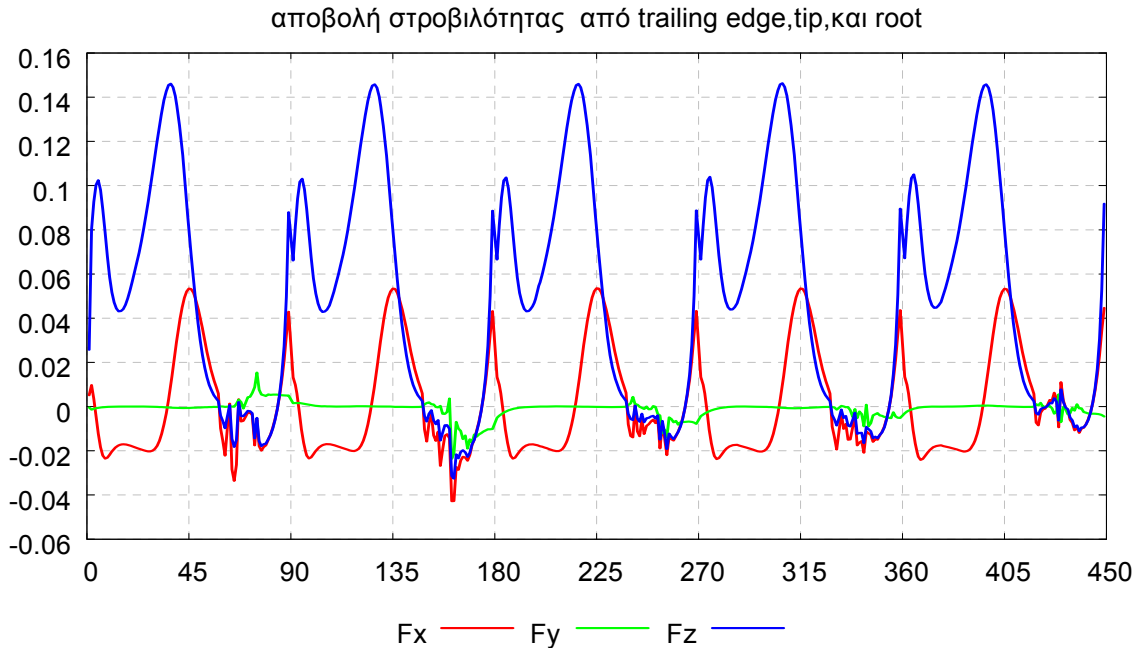


Διάγραμμα 28: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Αλλαγή στην παράμετρο Uinf

Forewing coefficient 0.75 Uinf=500

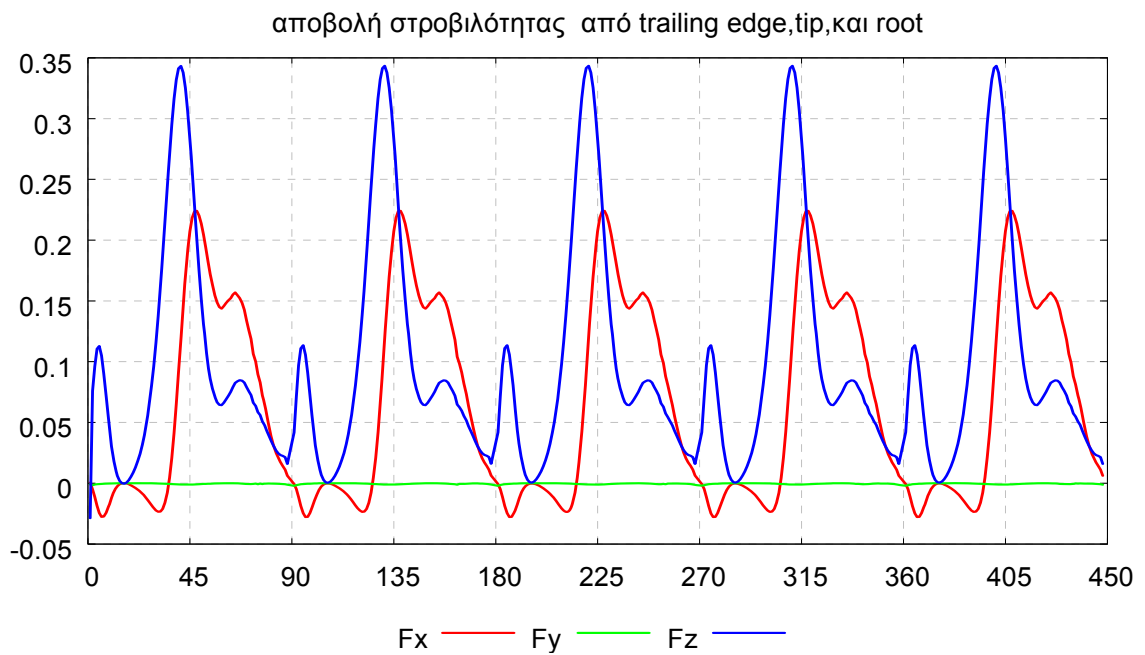
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 29: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 0.75 $U_{inf}=1000$

90 timesteps per rotation

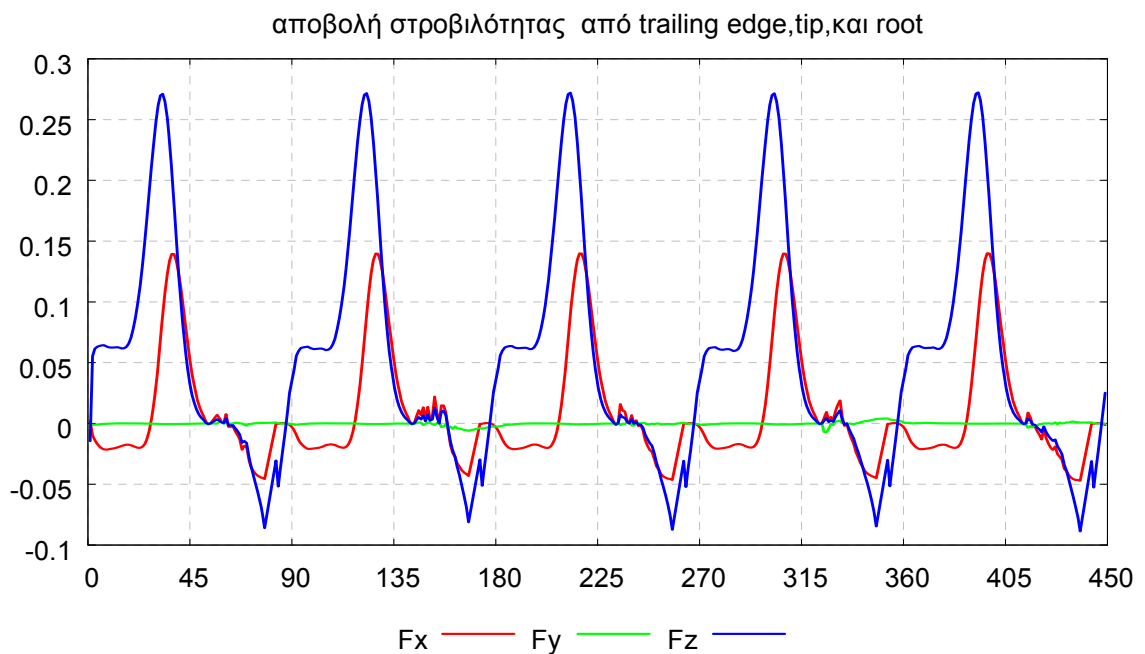


Διάγραμμα 30: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 0.75

90 timesteps per rotation

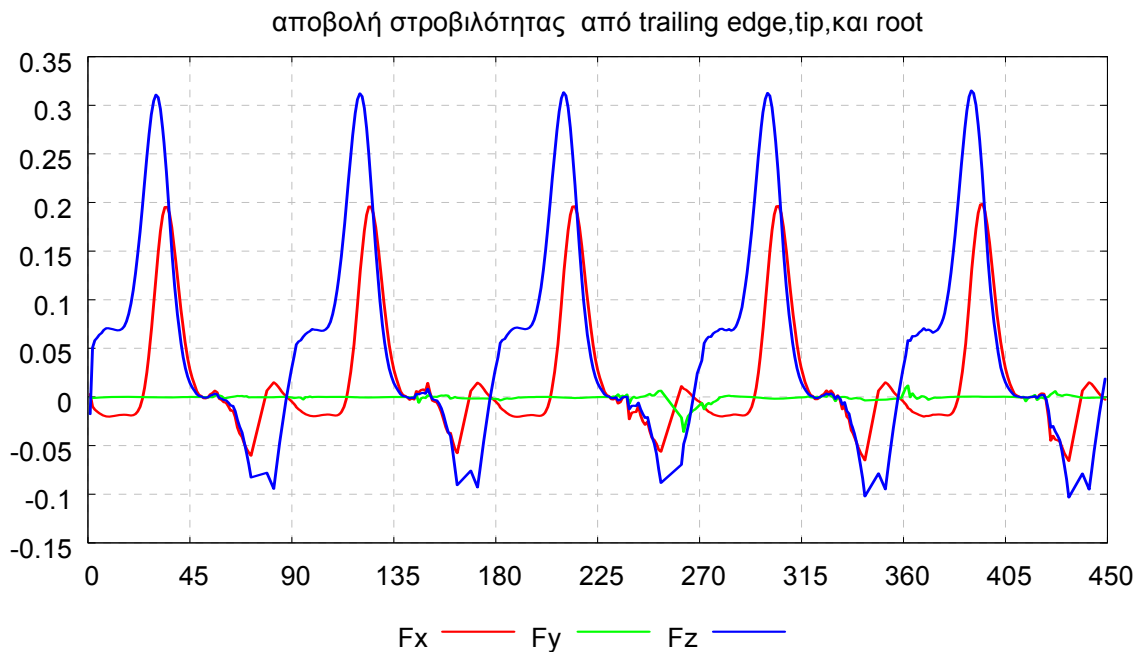
phase=30°



Διάγραμμα 31: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 0.75 phase=45o

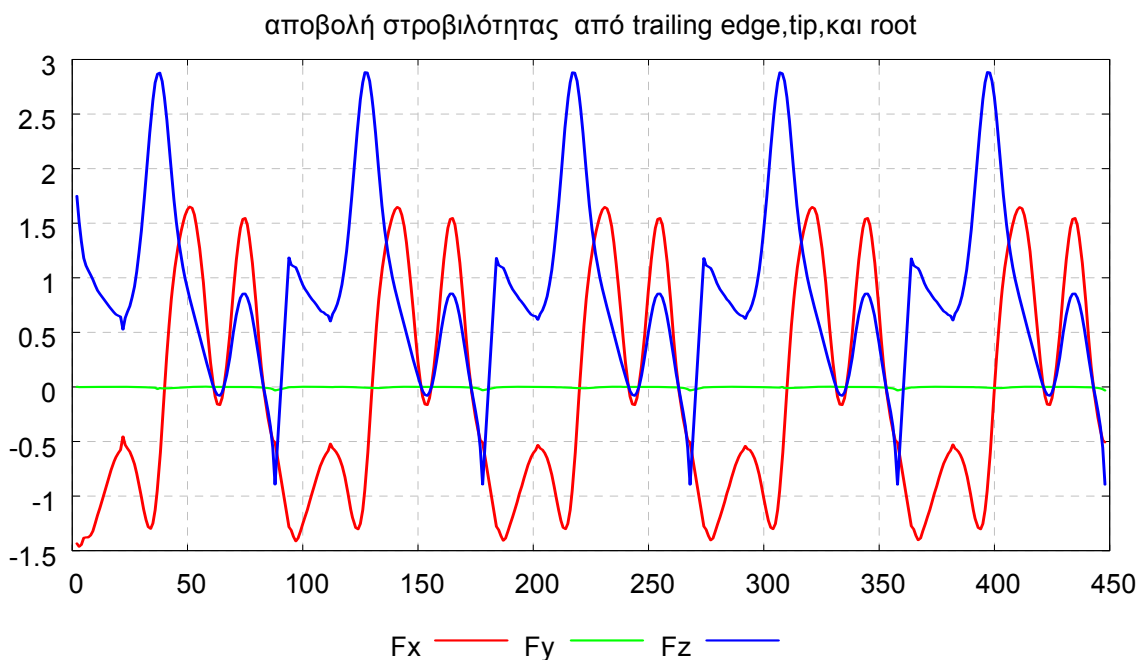
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 32: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 1

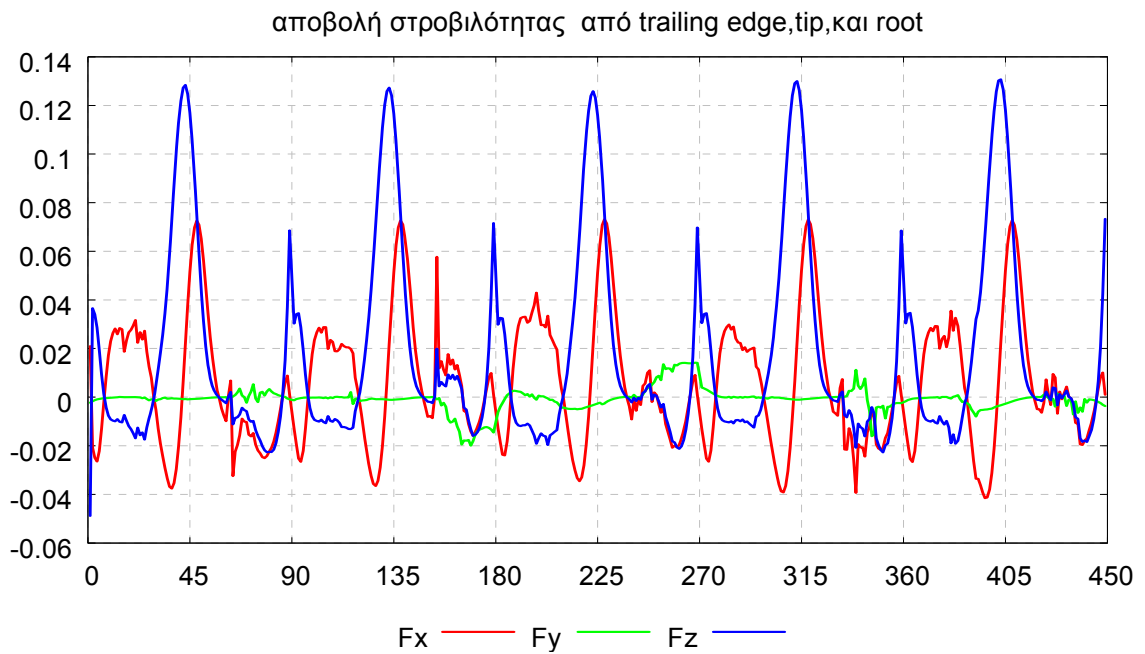
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 33: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 1.25

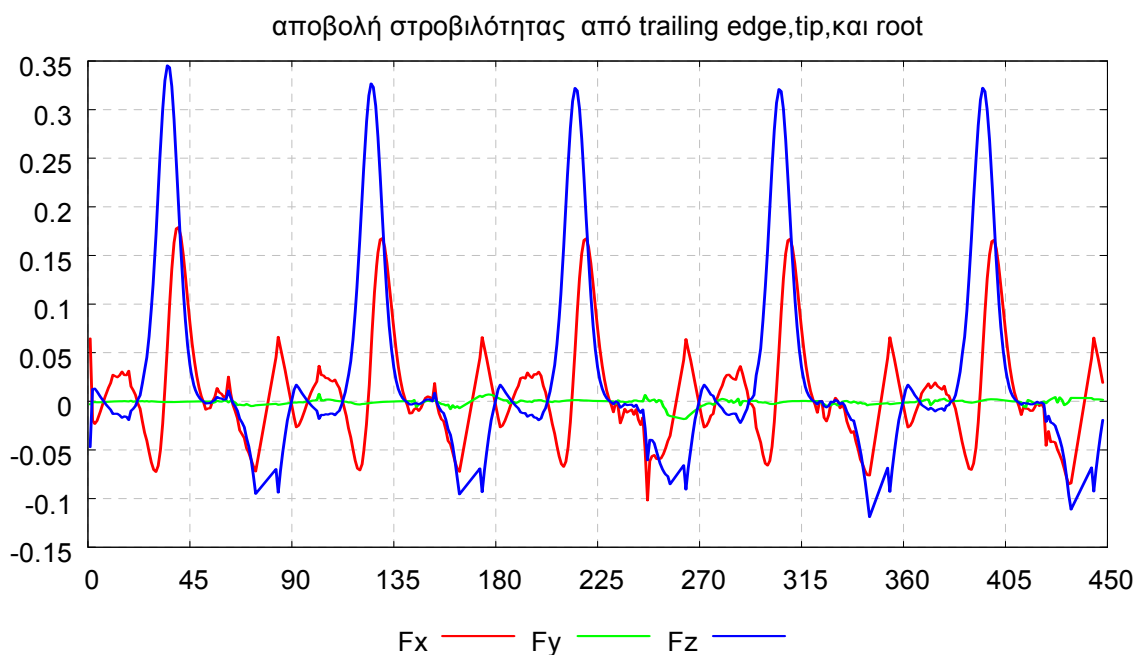
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 34: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 1.25 phase=30o

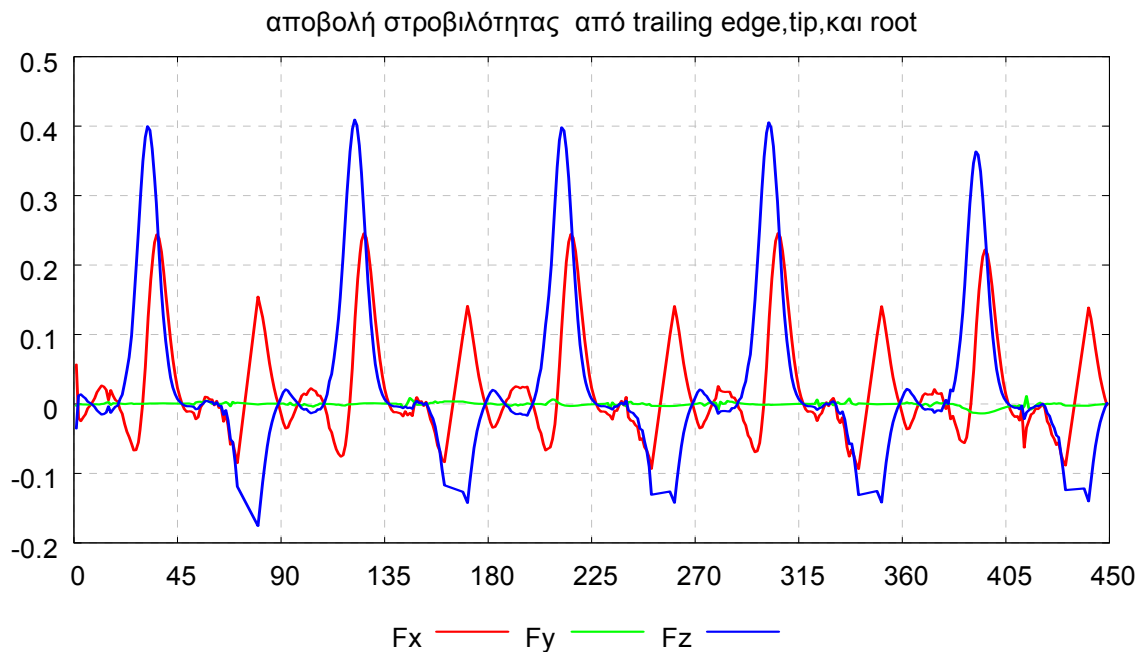
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 35: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Forewing coefficient 1.25 phase=45o

90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 36: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Με το παραπάνω ολοκληρώθηκαν τα τρεξίματα που χρησιμοποιήθηκε η forewing angle για να περιγράψει το twist. Από τις συγκρίσεις που μπορούν να γίνουν μεταξύ των αποτελεσμάτων, προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα. Έτσι, διπλασιάζοντας τον αριθμό των time steps ανά περίοδο, έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα με την περίπτωση που το κάναμε σε προηγούμενη παράγραφο. Δηλαδή, η μορφή των καμπυλών παραμένει η ίδια(αλλάζοντας πρόσημο και παίρνοντας μέγιστες τιμές στα ίδια σημεία) αλλά αυξάνεται λίγο η άνωση στην πιο ‘πυκνή’ καταγραφή των δυνάμεων.

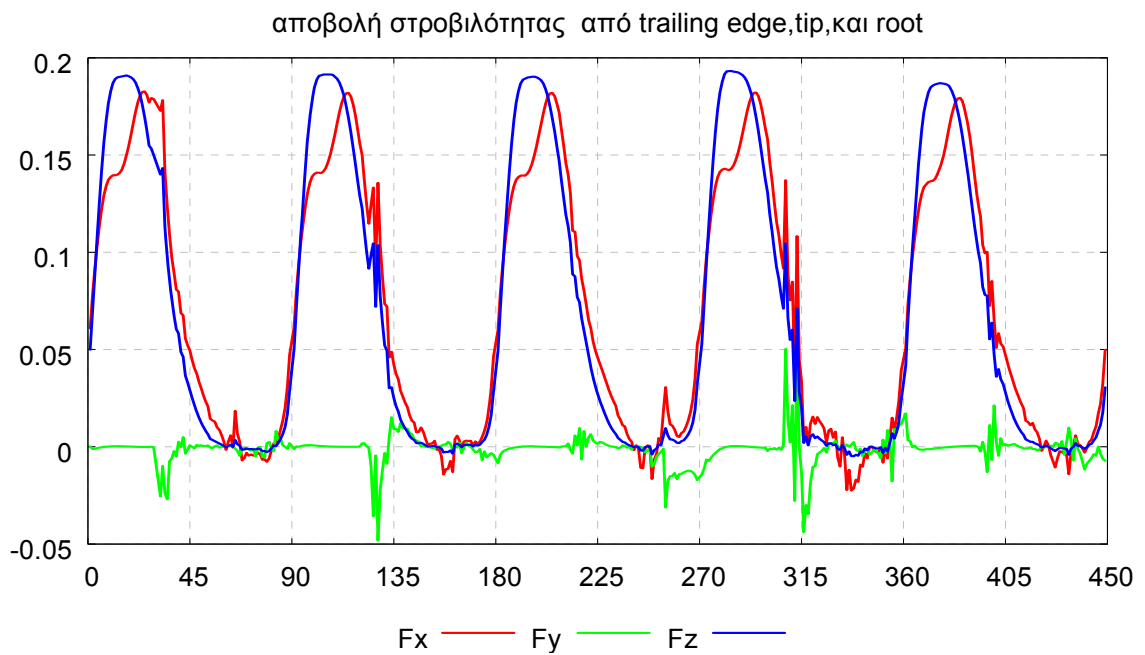
Διπλασιάζοντας την ταχύτητα αναφοράς κρατώντας ίδιες τις κινήσεις των σωμάτων, υπερδιπλασιάζονται οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων, ακολουθώντας όμως παρόμοια μορφή όσον αφορά το πότε αλλάζουν. Γενικά όμως τα διαγράμματα αλλάζουν αρκετά με αυτή την αλλαγή.

Σε ότι αφορά τον συντελεστή που αλλάζει το πλάτος της γωνίας forewing, η απόκριση των αποτελεσμάτων δεν είναι γραμμική. Δηλαδή, δεν υπάρχει αναλογία του τύπου όσο μεγαλώνει το πλάτος των τιμών να αυξάνονται οι δυνάμεις.

Τέλος, με αλλαγή στη ϕ βλέπουμε μετατόπιση των στιγμών όπου σημειώνονται οι μέγιστες δυνάμεις, καθώς και αύξηση των μέγιστων τιμών. Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και στα επόμενα διαγράμματα όπου γίνεται μελέτη της επίδρασης του πλάτους και της φάσης χρησιμοποιώντας τη γωνία hindwing για την περιγραφή του twist.

Hindwing coefficient 0.50

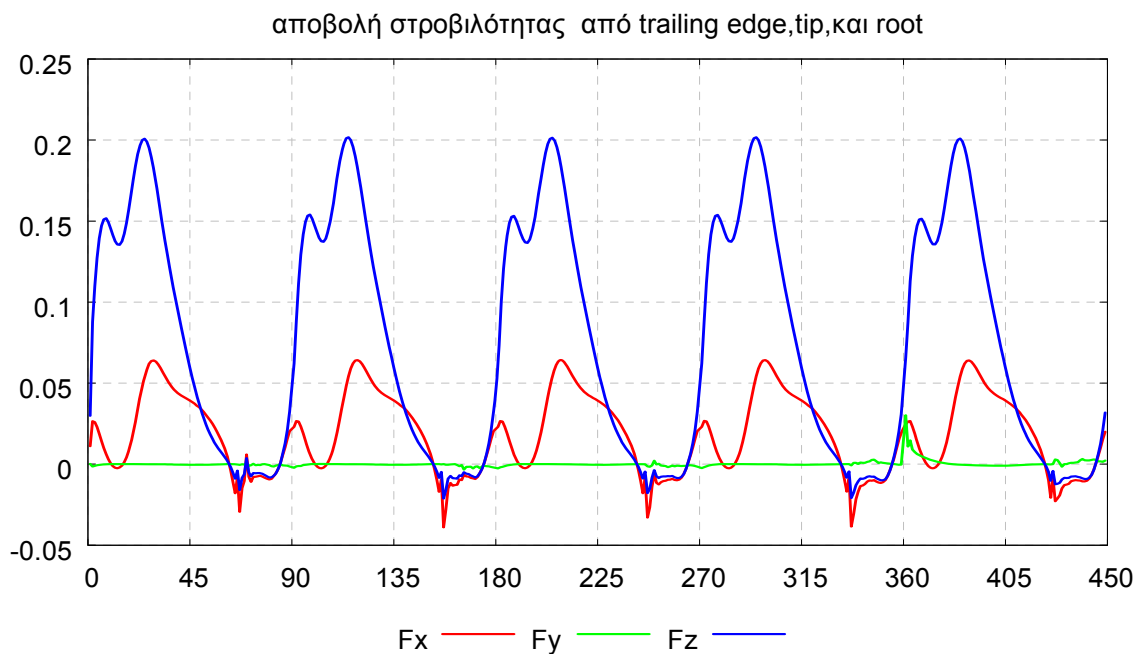
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 37: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Hindwing coefficient 0.75

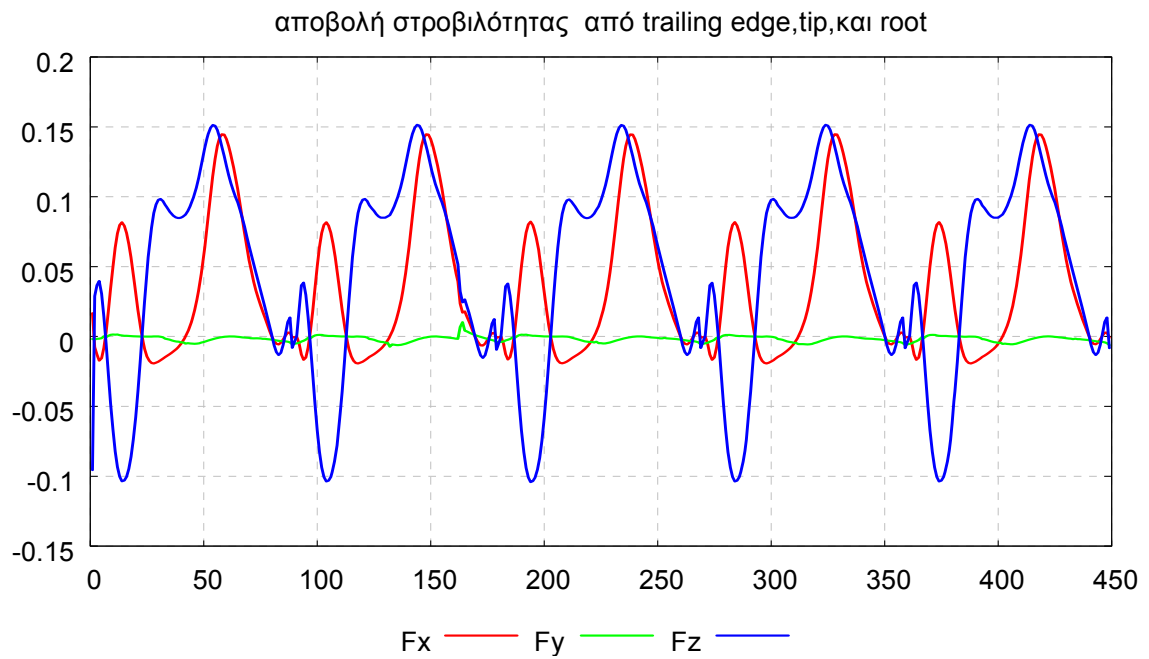
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 38: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Hindwing coefficient 1

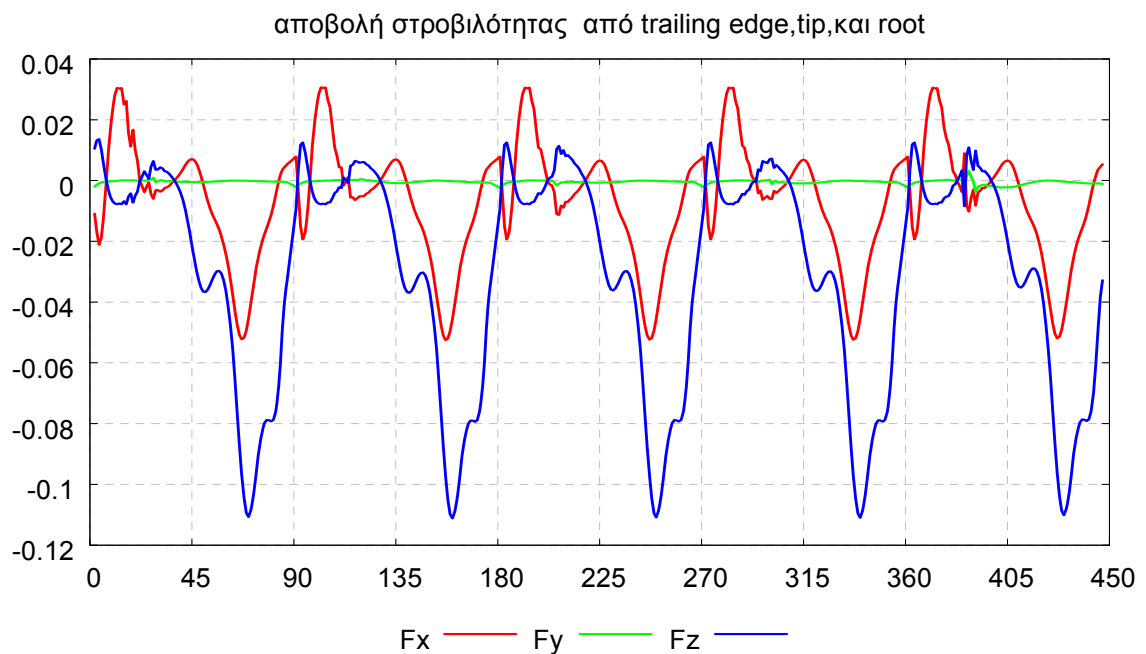
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 39: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Hindwing coefficient 1.25

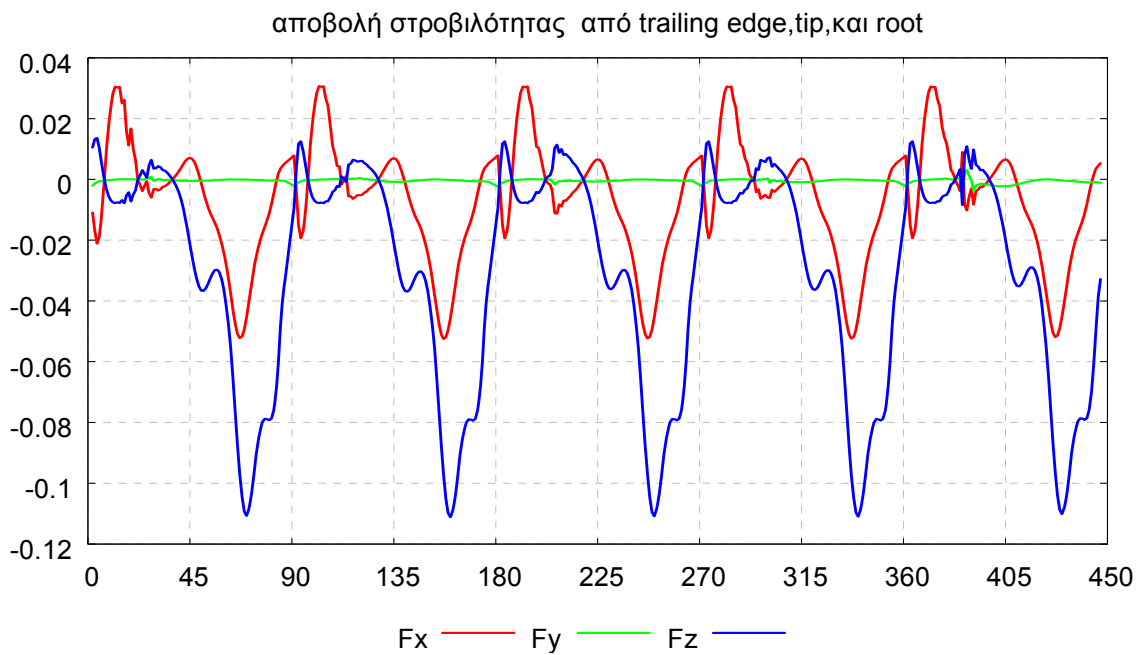
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 40: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Hindwing coefficient 1.25 phase=30o

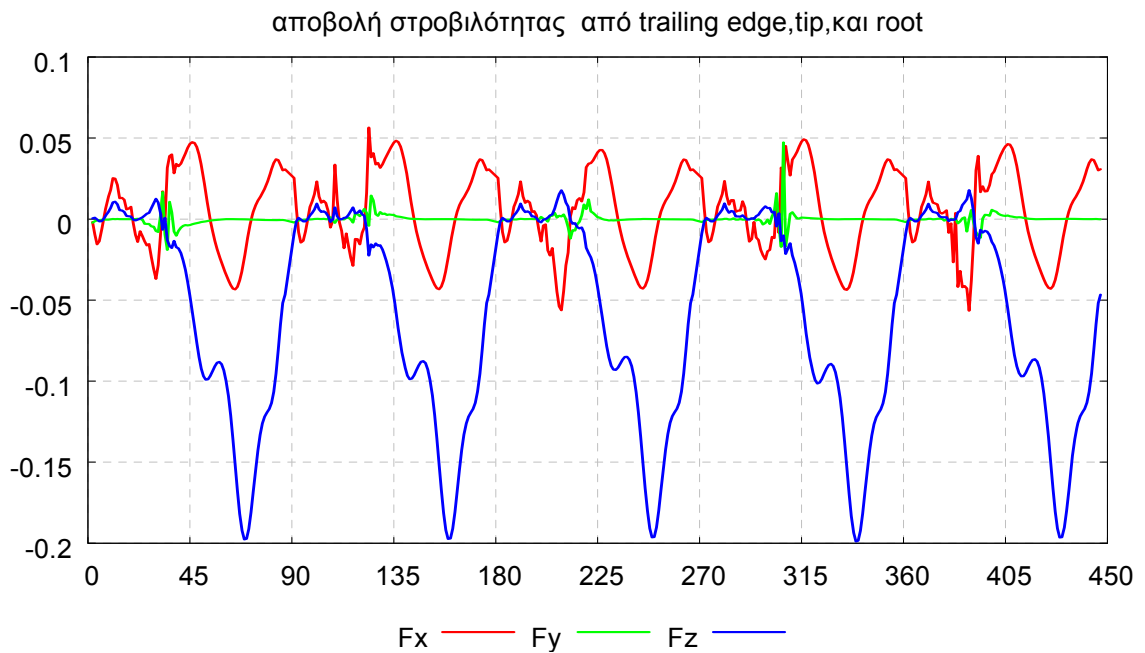
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 41: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Hindwing coefficient 1.50

90 timesteps per rotation

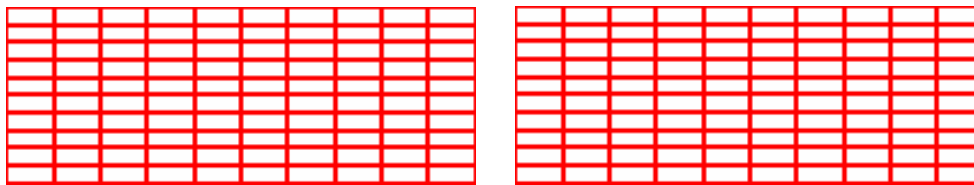


Διάγραμμα 42: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

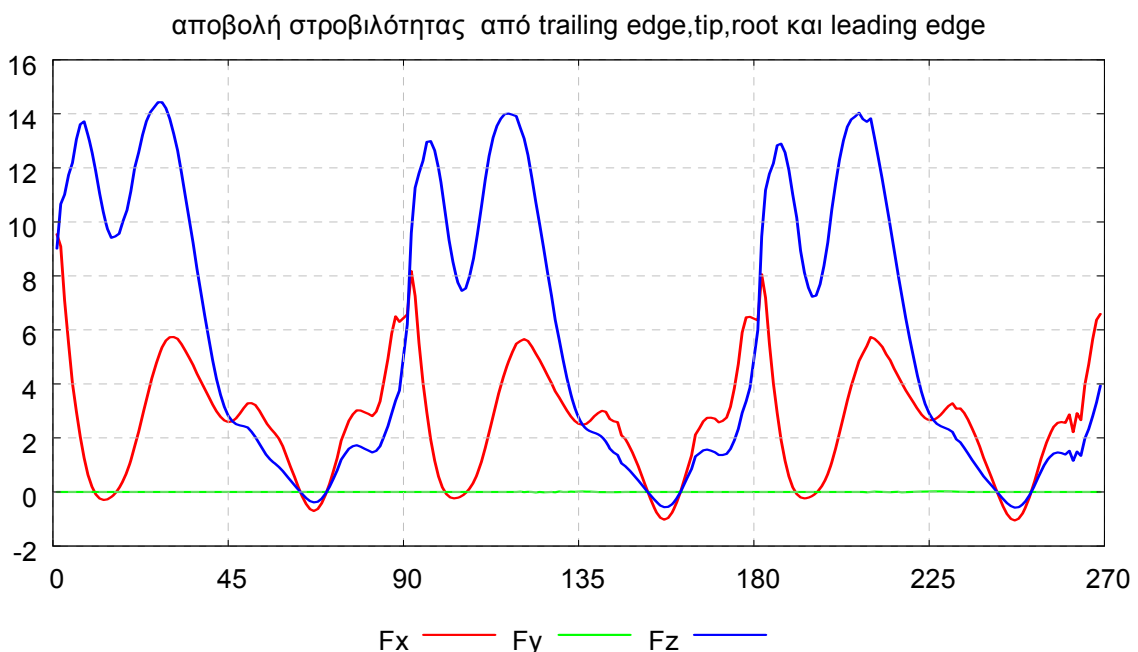
Αξιοσημείωτο στα παραπάνω διαγράμματα είναι το γεγονός πως με συντελεστή 1.25 και 1.50 η άνοση είναι αρνητική στο μεγαλύτερο μέρος του κύκλου. Βλέπουμε επίσης ότι η επίδραση της φάσης έχει τα ίδια αποτελέσματα όπως και με τη χρήση της forewing angle.

3.3.5 Μελέτη επίδρασης γεωμετρίας στη δυσκολία υπολογισμού με leading edge separation

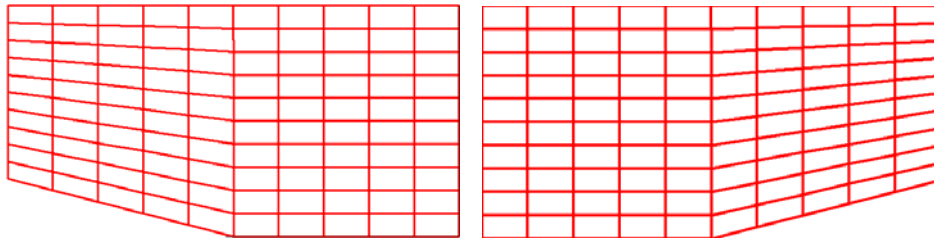
Όπως παρατηρήσαμε στη προηγούμενη παράγραφο, με τη γεωμετρία του μηχανικού εντόμου που χρησιμοποιήθηκε, δεν κατέστη δυνατός ο υπολογισμός με αποβολή στροβιλότητας και από την ακμή πρόσπτωσης. Για αυτό το γεγονός υπεύθυνη θεωρήθηκε η περίπλοκη γεωμετρία (περίπλοκη στο ότι αλλάζει απότομα η κλίση της ακμής εκφυγής). Για αυτό το λόγο ακολουθούν εφαρμογές του κώδικα για συγκεκριμένη περίπτωση (χρησιμοποιώντας flapping και lead lag γωνίες από μια manduca sexta και για τη περιγραφή του twist την hindwing angle με coefficient 0.75), σε διάφορες παραλλαγές των πλακών που χρησιμοποιήθηκαν στη δεύτερη παράγραφο του κεφαλαίου. Έτσι, αφαιρώντας ένα κομμάτι από τη βάση ή από το ακροπτερύγιο της πτέρυγας, και χρησιμοποιώντας και leading edge separation προσπαθούμε να δούμε σε ποιες περιπτώσεις ο κώδικας δεν καταφέρνει να λύσει το πρόβλημα. Το κομμάτι που αφαιρείται, εξετάζεται ως προς το από ποια πλευρά αφαιρείται (root ή tip) αλλά και ως προς το μέγεθος που αφαιρείται (από το 1/4, 2/4 ή 3/4 της χορδής έως το 1/2 της ακμής εκφυγής). Πριν το εκάστοτε αποτέλεσμα παρατίθεται η χρησιμοποιούμενη γεωμετρία, και για λόγους σύγκρισης ξεκινάμε με την επανάληψη του διαγράμματος (εδώ διάγραμμα 43) για την παραπάνω περίπτωση με ολόκληρες τις πλάκες.



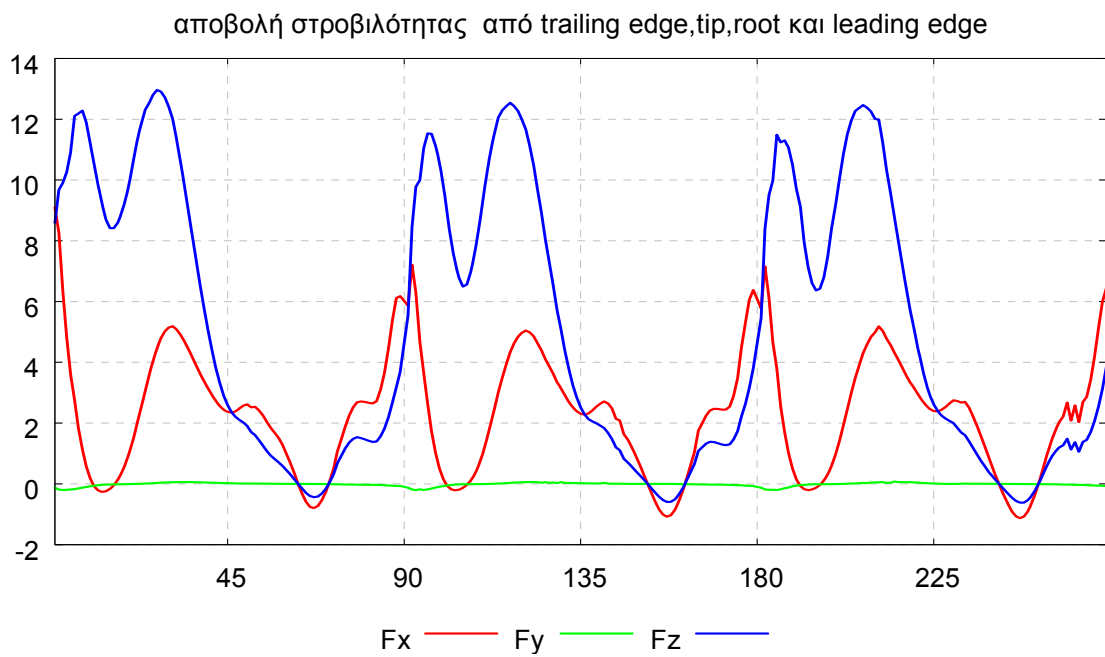
hindwing angle, coefficient= 0.75



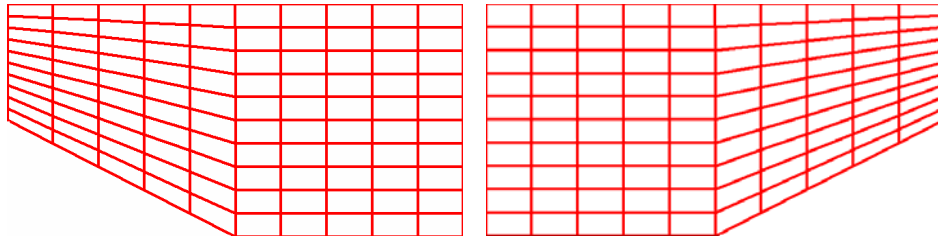
Διάγραμμα 43: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



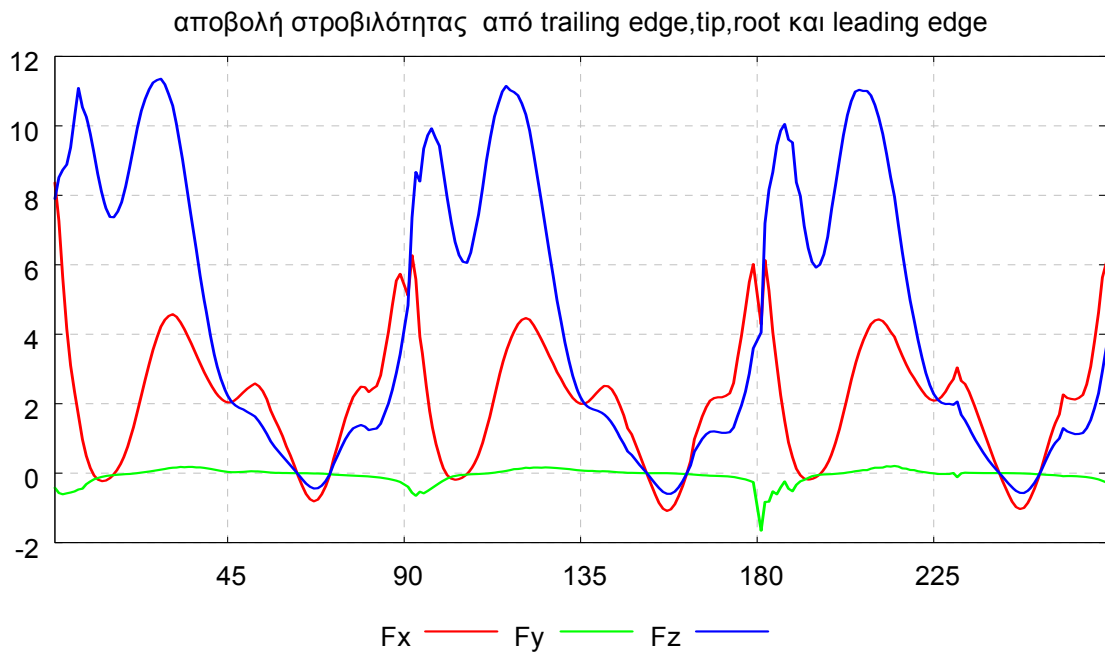
Εικόνα 37: αφαιρώντας από 1/4 της χορδής έως το 1/2 της ακμής εκφυγής στο tip



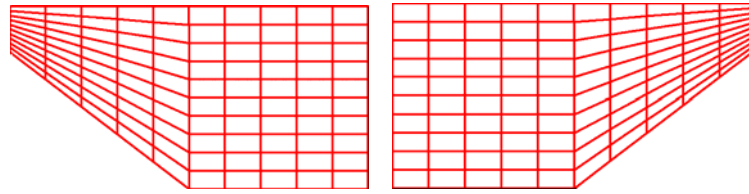
Διάγραμμα 44: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



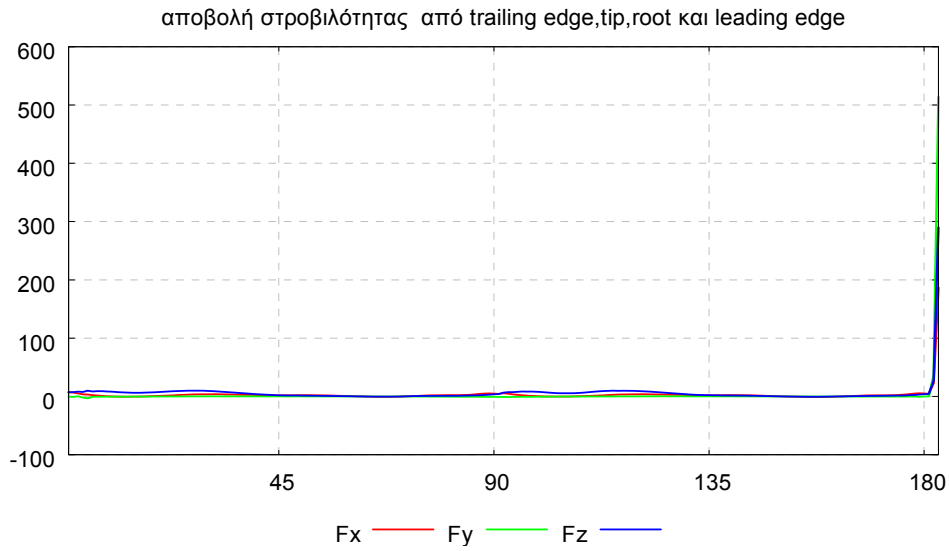
Εικόνα 38: αφαιρώντας από 1/2 της χορδής έως το 1/2 της ακμής εκφυγής στο tip



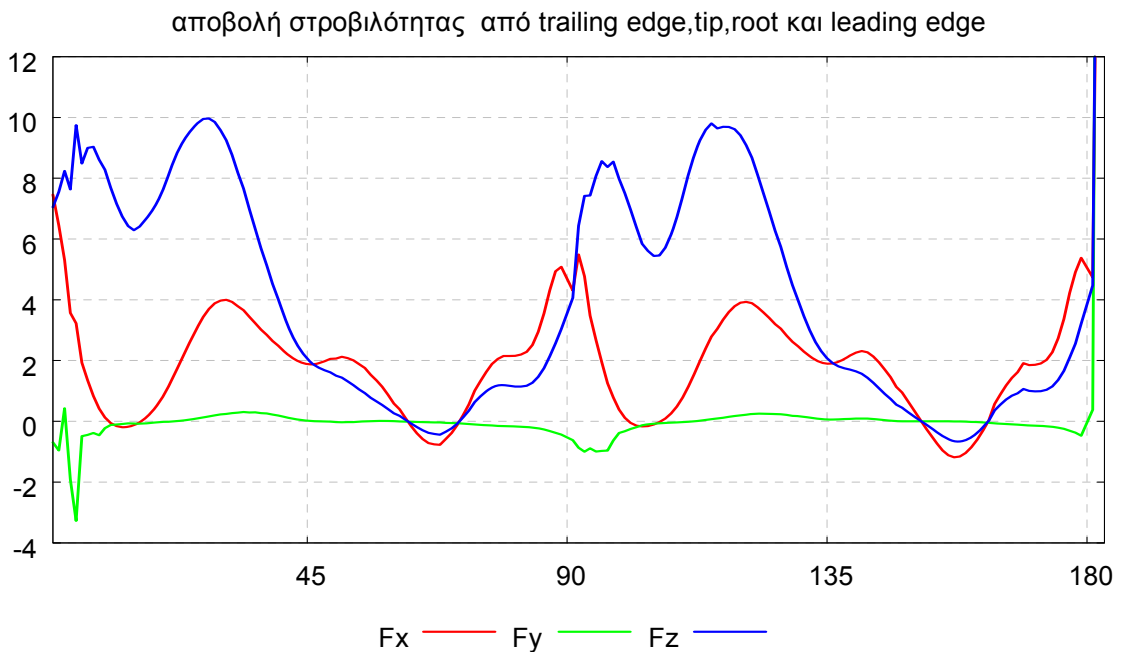
Διάγραμμα 45: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



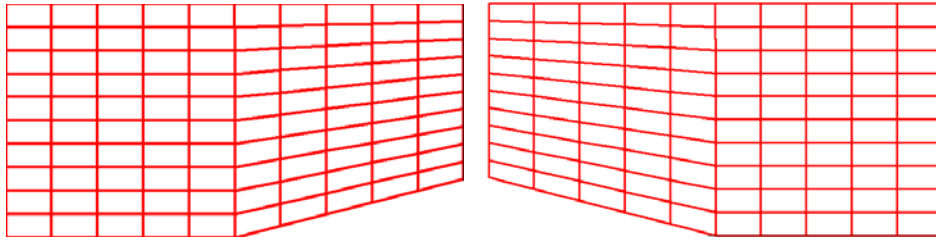
Εικόνα 39: αφαιρώντας από 3/4 της χορδής έως το 1/2 της ακμής εκφυγής στο tip



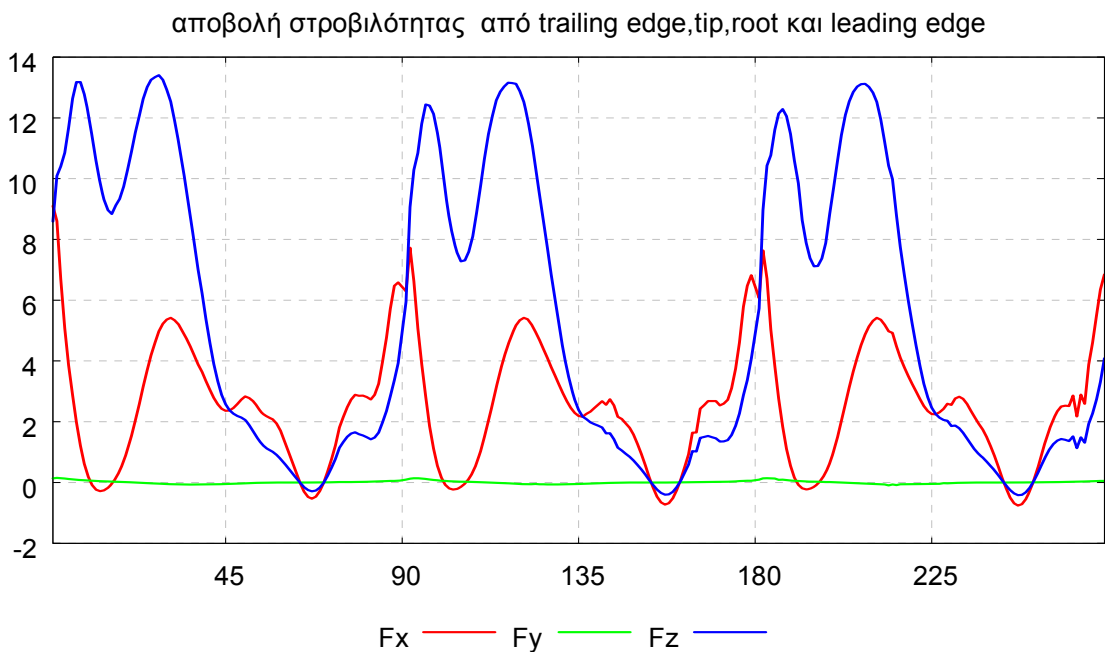
Διάγραμμα 46: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



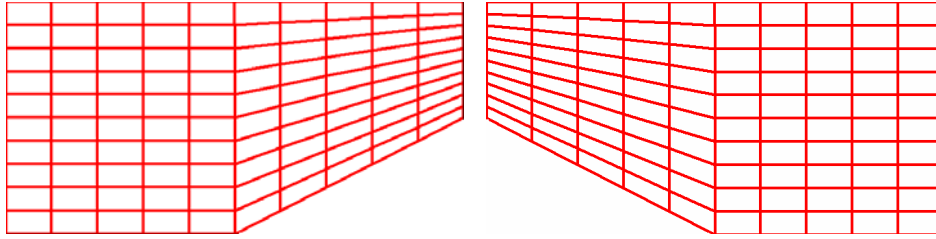
Διάγραμμα 47: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



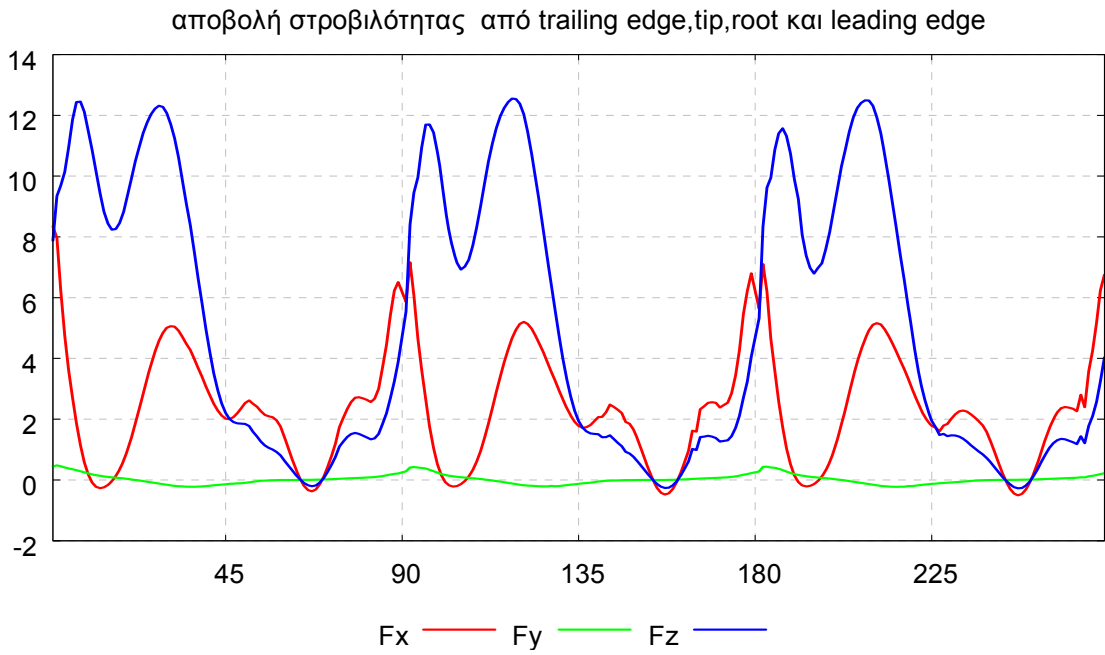
Εικόνα 40: αφαιρώντας από 1/4 της χορδής έως το 1/2 της ακμής εκφυγής στο root



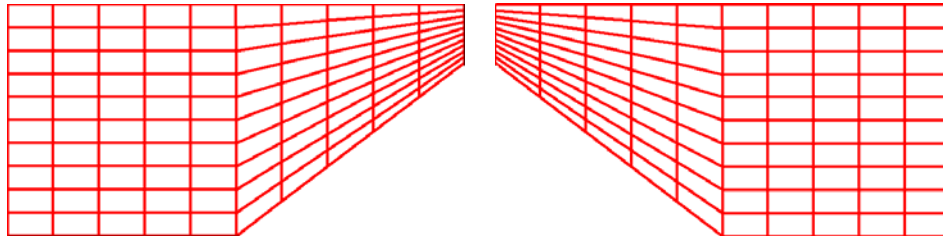
Διάγραμμα 48: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



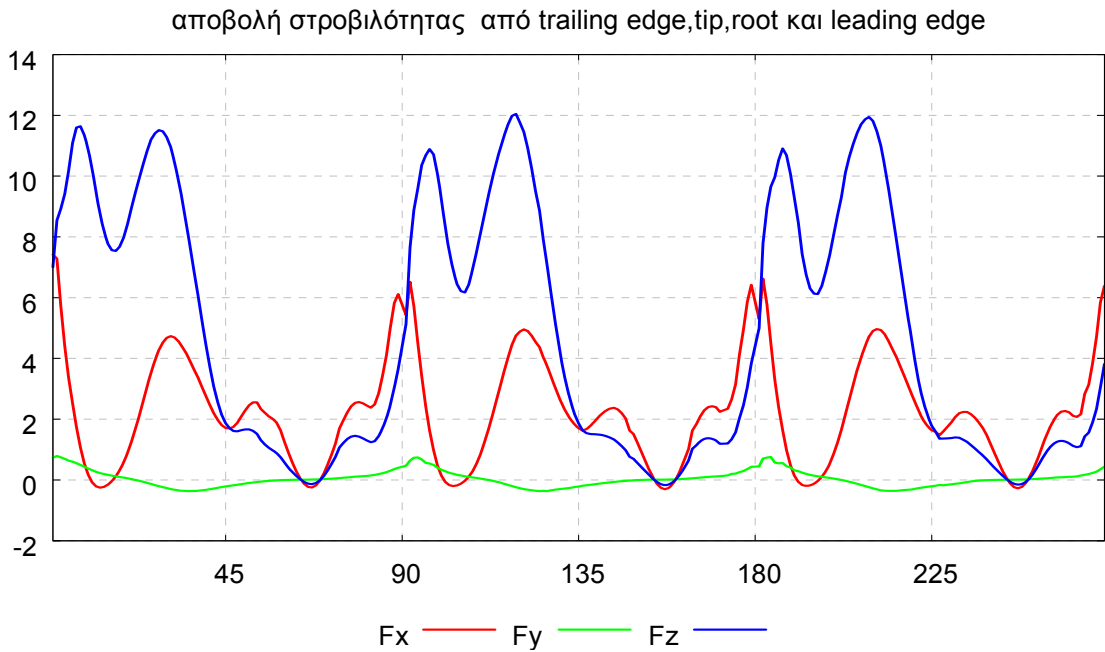
Εικόνα 41: αφαιρώντας από 1/2 της χορδής έως το 1/2 της ακμής εκφυγής στο root



Διάγραμμα 49: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος



Εικόνα 42: αφαιρώντας από 3/4 της χορδής έως το 1/2 της ακμής εκφυγής στο root



Διάγραμμα 50: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, βλέπουμε ότι υπολογισμός δεν γίνεται στην περίπτωση που λείπει κομμάτι από τα 3/4 της χορδής έως το 1/2 της ακμής εκφυγής στο tip. Συνεπώς η απότομη αλλαγή της γεωμετρίας στο ακροπτερύγιο είναι αυτή που πιθανότατα επηρράζει τον υπολογισμό με leading edge separation και στην περίπτωση της γεωμετρίας του μηχανικού εντόμου. Να παρατηρήσουμε ακόμα ότι όσο πιο μεγάλο κομμάτι λείπει, τόσο μειώνονται οι τιμές των δυνάμεων, κάτι απόλυτα λογικό αφού με αυτό τον τρόπο, εκτός από αλλαγή στη γεωμετρία, υπάρχει και αλλαγή στο εμβαδόν της πτέρυγας.

3.3.6 Μελέτη επίδρασης φάσης μεταξύ των γωνιών κίνησης

Σε αυτή τη παράγραφο έγιναν τρεξίματα που χρησιμοποιούσαν σχέση της μορφής

$$x = x_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) + c$$

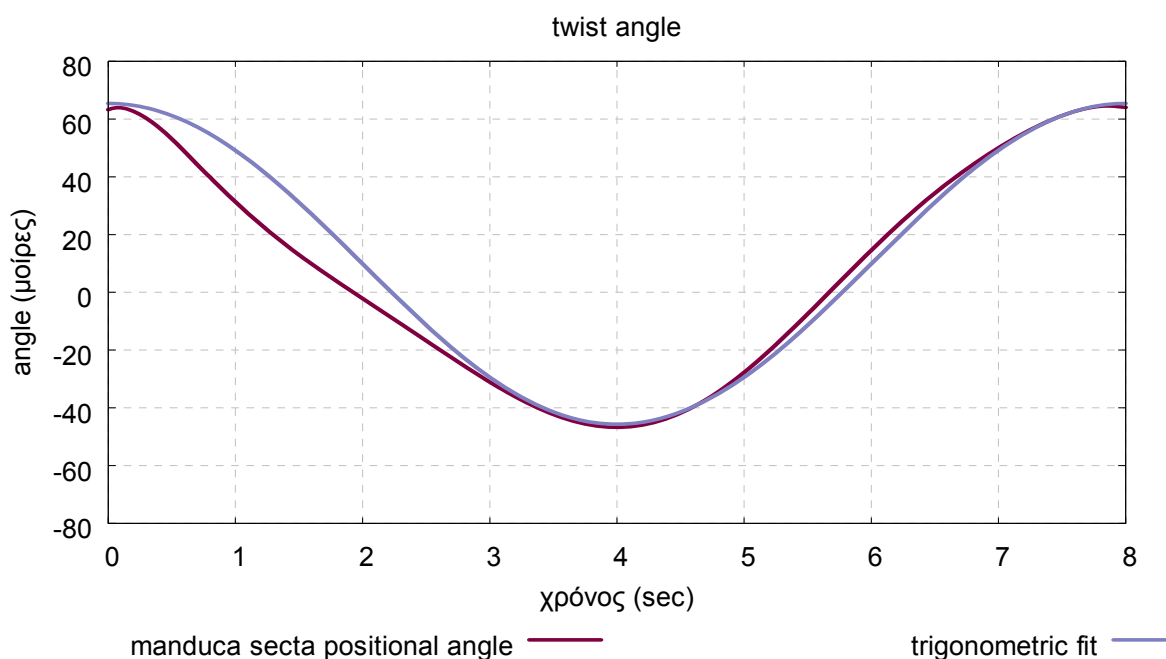
για να περιγραφούν οι τρεις κινήσεις των φτερών. Η κάθε γωνία περιγράφηκε από τιμές x_0, ω, φ, c ουτως ώστε να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα τις γωνίες flapping, lead lag και forewing angle μιας manduca sexta. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις για την περιγραφή των γωνιών,

$$\text{flapping angle } \varphi(t) = 55,56 \cdot \cos(0.78539 \cdot t) + 9.866$$

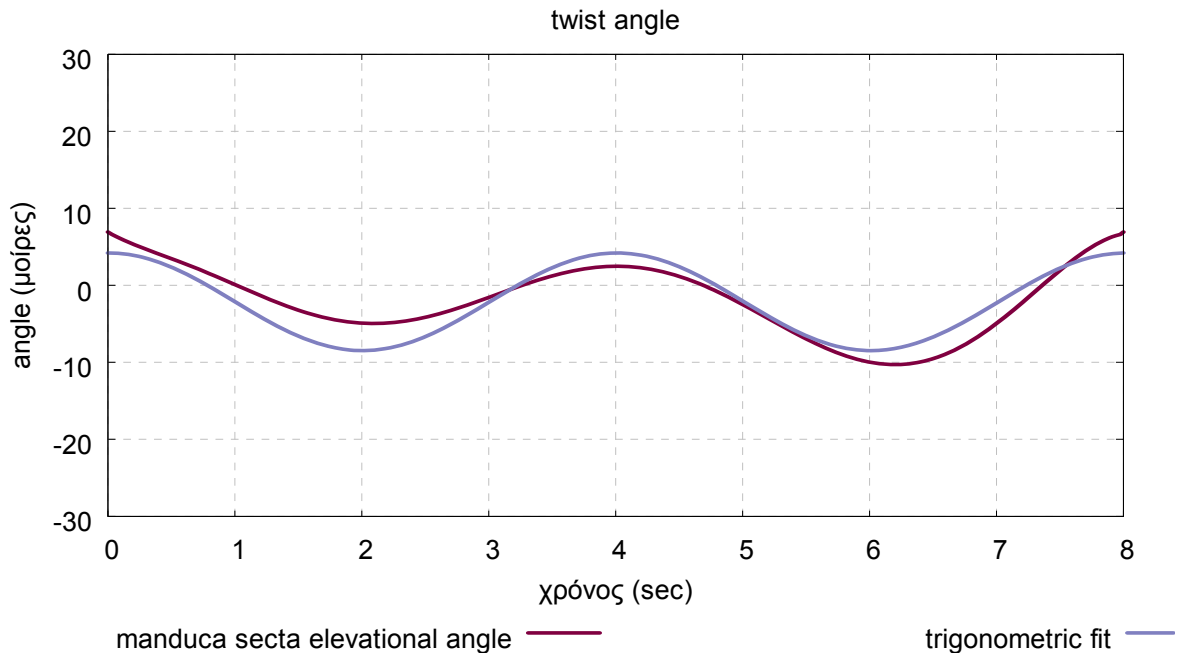
$$\text{lead lag angle } \psi(t) = 6,345 \cdot \cos(1.5708 \cdot t) - 2.135$$

$$\text{twist angle } \beta(t) = 58,455 \cdot \cos(0.78539 \cdot t + 2,356) + 9.856$$

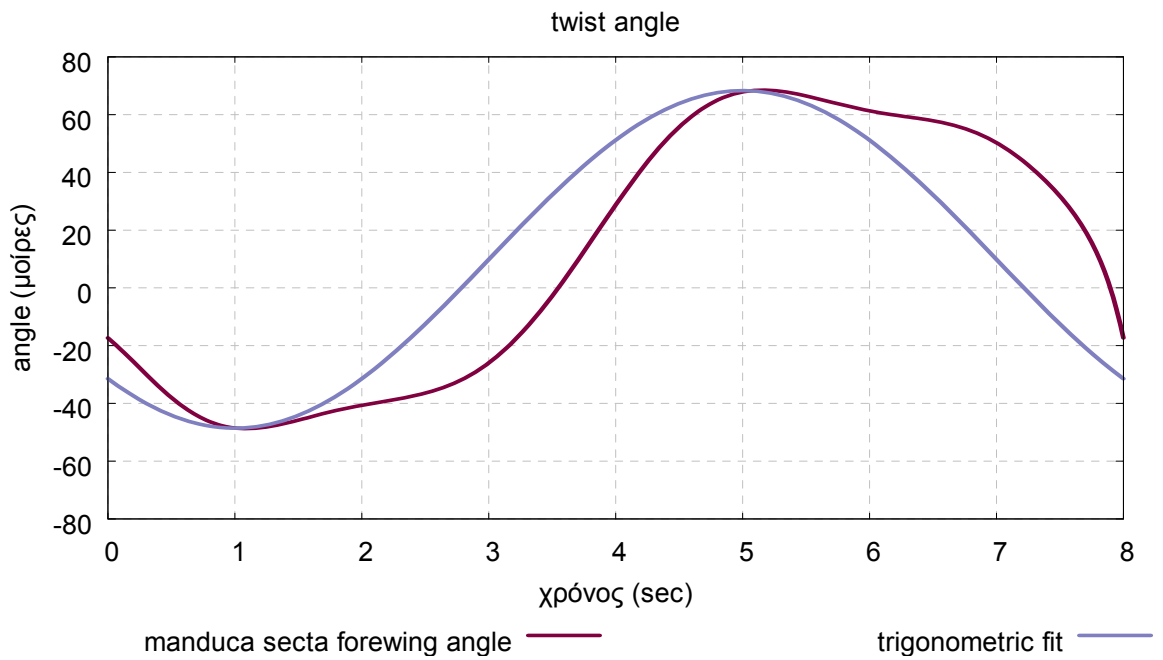
στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι παραπάνω εξισώσεις συγκριτικά με τις γωνίες από το διάγραμμα των κινήσεων της manduca sexta, όπου φαίνεται ότι το fit είναι αρκετά καλό και για τις τρεις γωνίες, τόσο στις τιμές όσο και στη φάση.



Διάγραμμα 51: twist angle $\beta(t) = 58,455 \cdot \cos(0.78539 \cdot t + 2,356) + 9.856$

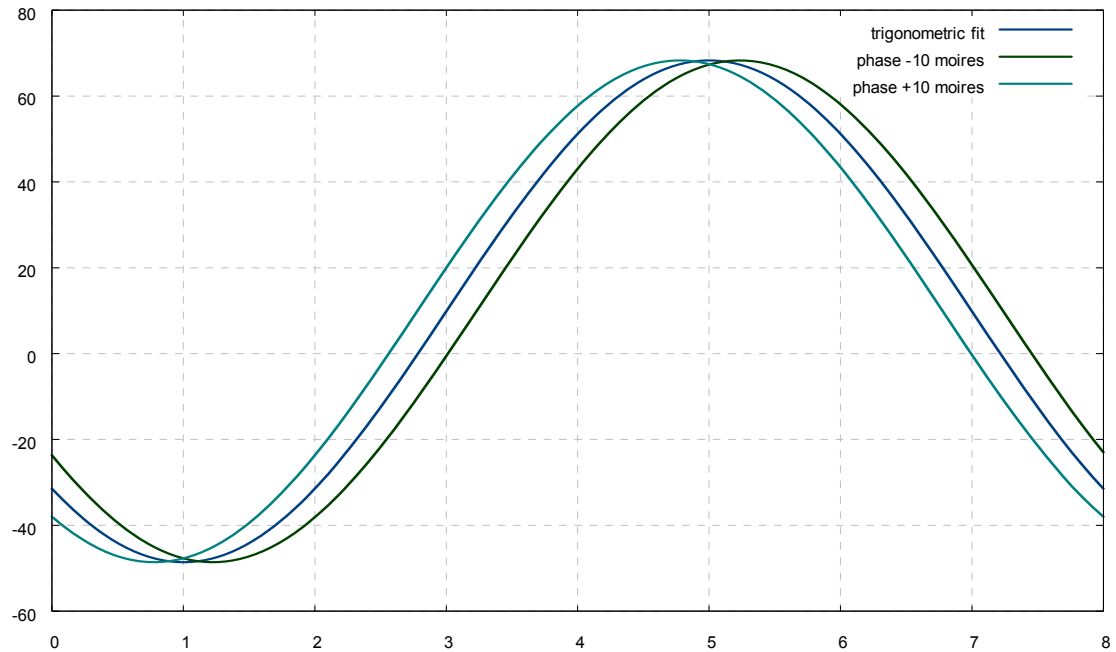


Διάγραμμα 52 : Lead lag angle $\psi(o)=6,345*\cos(1.5708*t)-2.135$



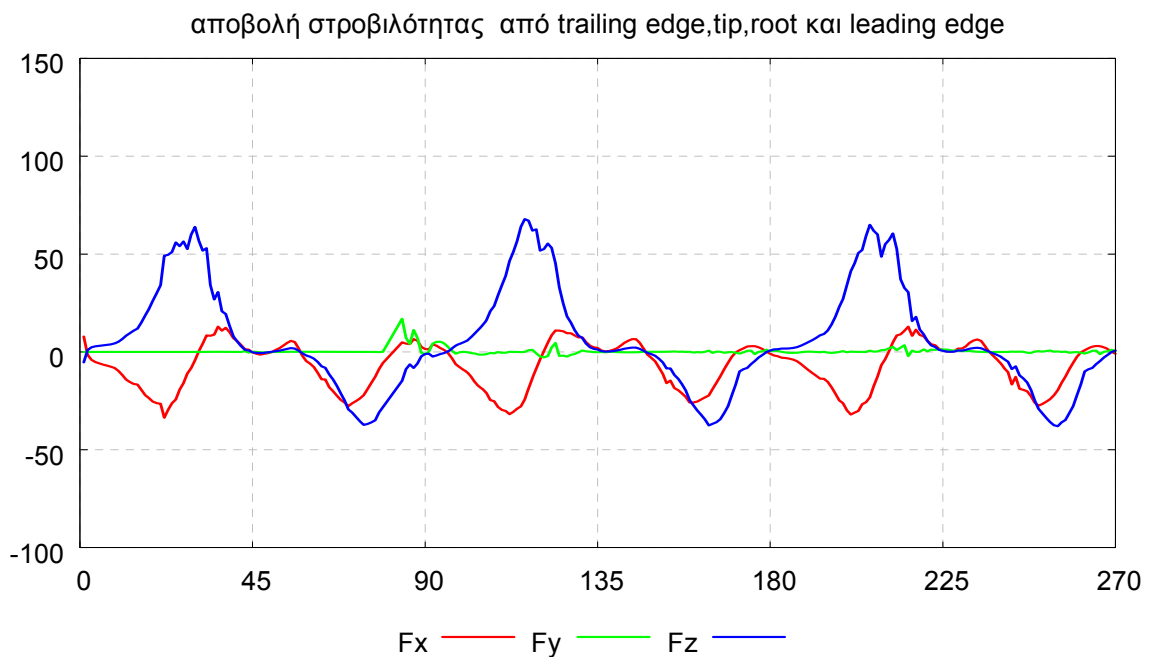
Διάγραμμα 53: Flapping angle $\varphi(o)=55,56*\cos(0.78539*t)+9.866$

στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η μετατόπιση μιας καμπύλης (εδώ της flapping fit) με αλλαγή φάσης κατά -10° και $+10^\circ$



Διάγραμμα 54: Αλλαγή φάσης κατά + και - 10 μοίρες

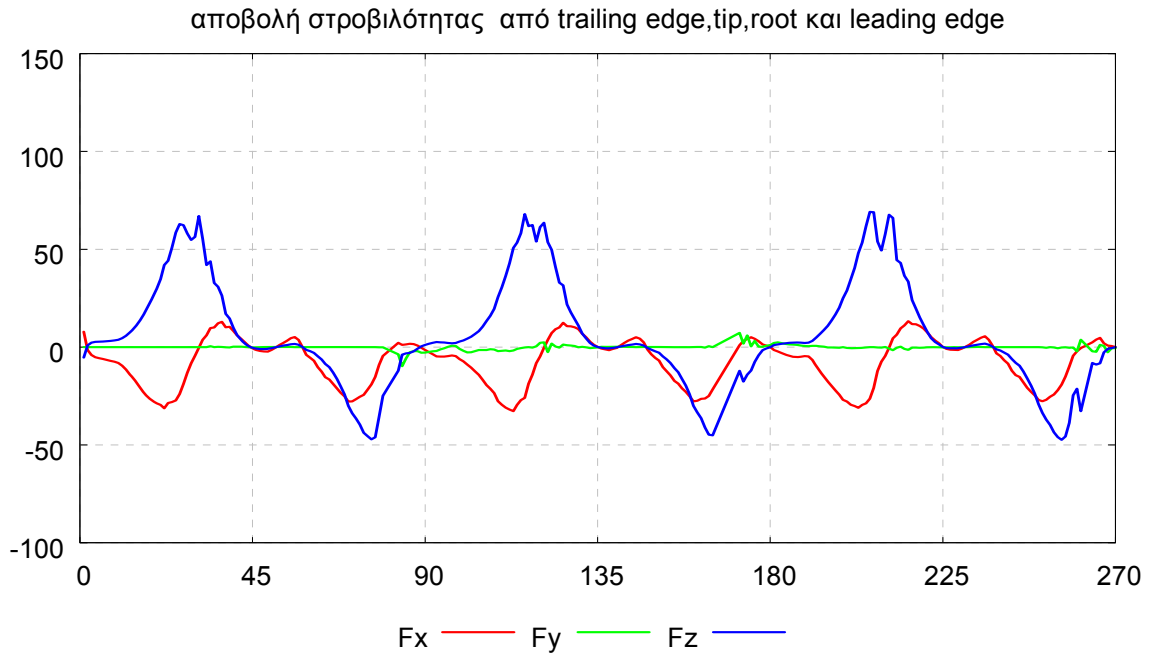
Στο διάγραμμα 55 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τις τριγωνομετρικές εξισώσεις, με φάση μεταξύ των γωνιών αντίστοιχη των πραγματικών.



Διάγραμμα 55: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

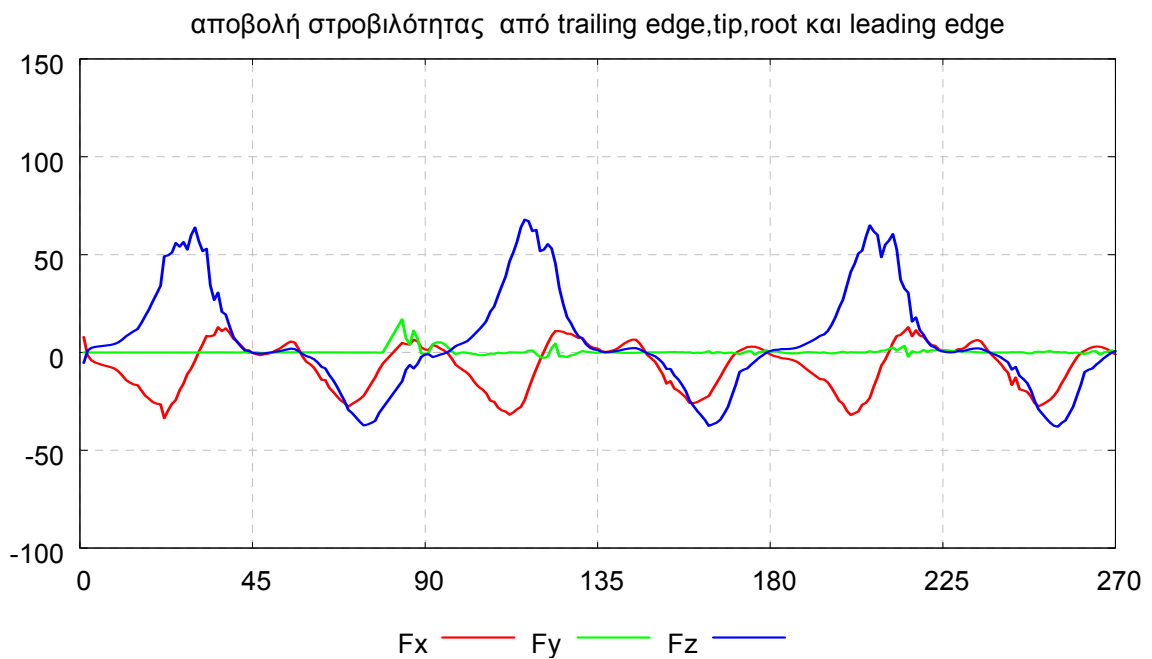
Παρακάτω (διαγρ.56,57,58)φαίνονται τα αποτελέσματα εάν ‘μετακινηθεί’ η γωνία flapping σε σχέση με τις άλλες κατά 10 μοίρες.

Αλλαγή φάσης flapping angle κατά -10 μοίρες



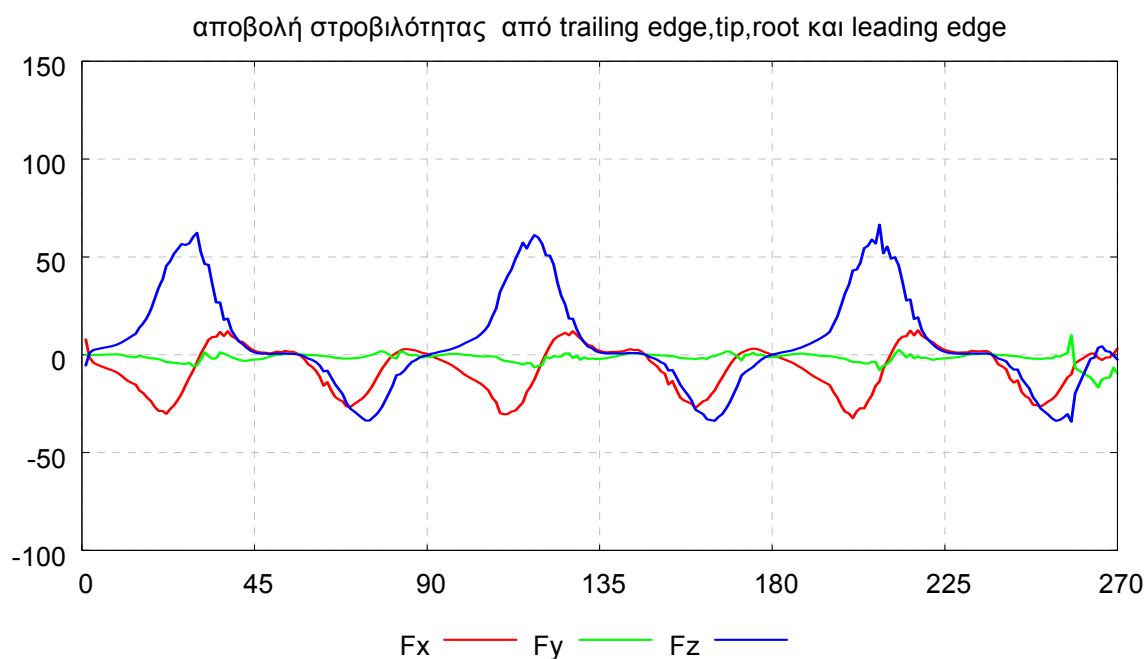
Διάγραμμα 56: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Αλλαγή φάσης flapping angle κατά 0 μοίρες



Διάγραμμα 57: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Αλλαγή φάσης flapping angle κατά +10 μοίρες

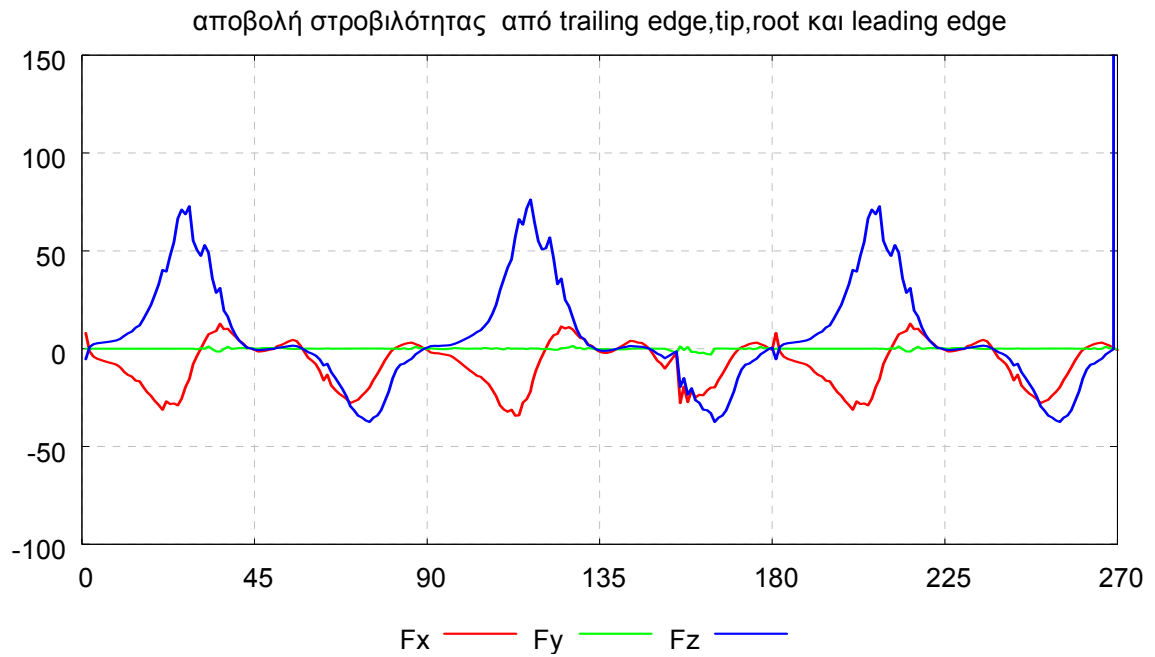


Διάγραμμα 58: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Παρατηρούμε μικρές αλλαγές στις δυνάμεις, που φαίνονται περισσότερο στις μέγιστες τιμές, και γύρω από αυτές, που παίρνουν κατά τη διάρκεια του κάθε κύκλου, ενώ υπάρχει και μικρή διαφορά στο χρονικό βήμα όπου εμφανίζονται τα μέγιστα φορτία, η οποία είναι μικρή καθώς είναι μικρή και η μεταβολή της φάσης που ορίσαμε. Πολύ μεγάλη διαφορά φάσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολύ άσχημα αποτελέσματα δεδομένου ότι θα υπήρχε παραδείγματος χάριν περίπτωση να γίνεται το upstroke με γωνία πρόσπτωσης που χρησιμοποιείται κανονικά στο downstroke

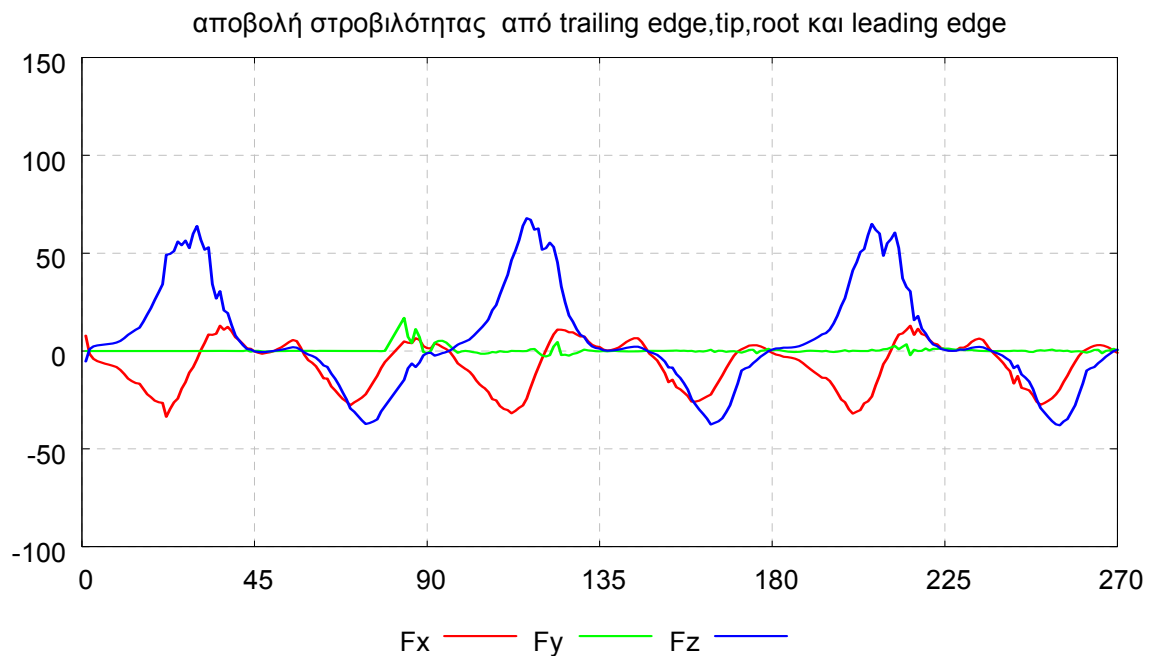
Παρακάτω (διαγρ. 59,60,61) φαίνονται τα αποτελέσματα εάν 'μετακινηθεί' η γωνία lead lag σε σχέση με τις άλλες κατά 10 μοίρες

Αλλαγή φάσης lead lag angle κατά -10 μοίρες



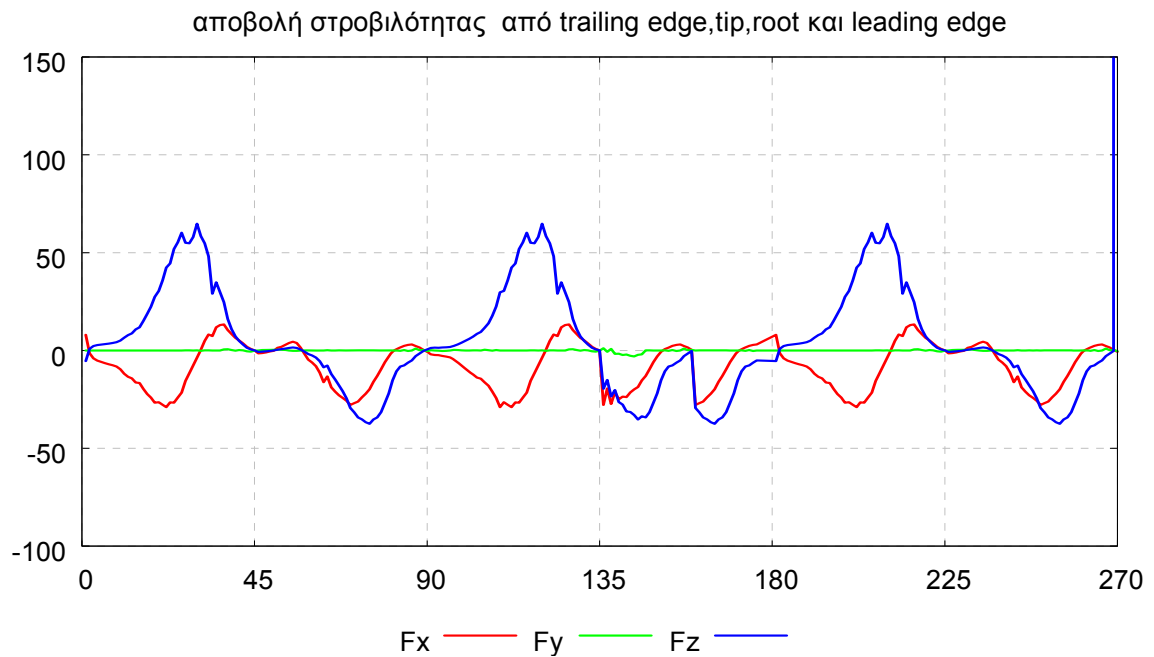
Διάγραμμα 59: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Αλλαγή φάσης lead lag angle κατά 0 μοίρες



Διάγραμμα 60: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Αλλαγή φάσης lead lag angle κατά +10 μοίρες

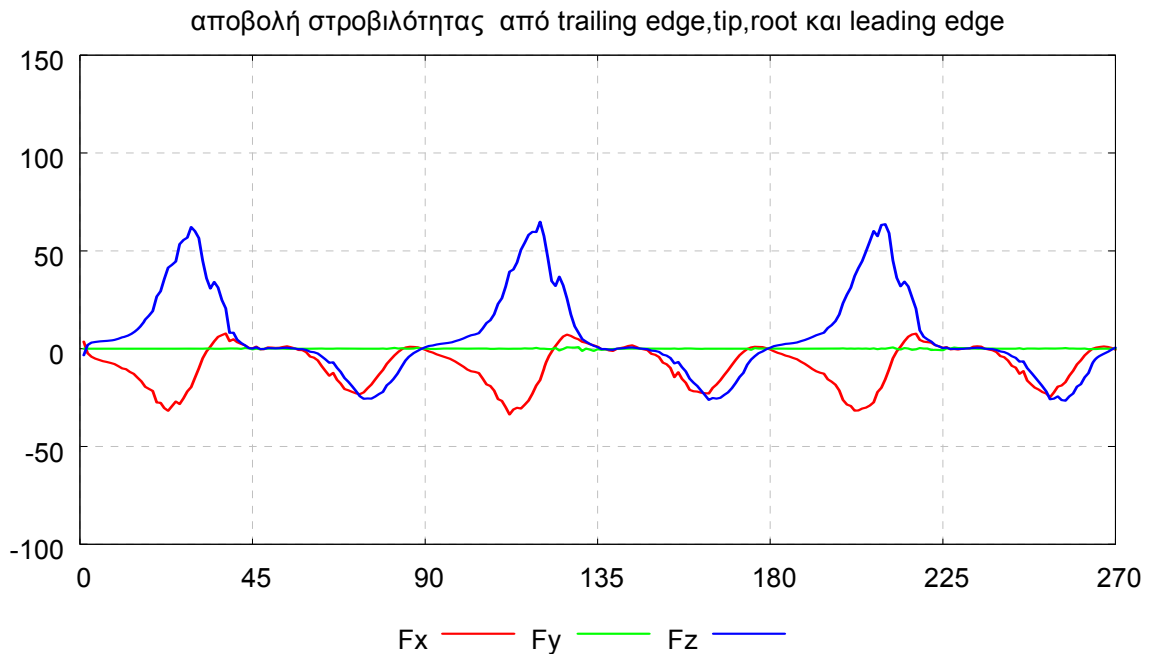


Διάγραμμα 61: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

και στα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται μικρές διαφορές στις περιοχές κοντά στα μέγιστα φορτία, και μια μικρή προήγηση των μεγίστων στην πρώτη περίπτωση. Να σημειωθεί εδώ ότι η διαφορά φάσης 10 μοιρών έχει πιο βαρύνουσα σημασία καθώς η lead lag γωνία έχει τη μισή περίοδο από τις άλλες γωνίες και συνεπώς μεταβολή 10 μοιρών είναι μεγαλύτερη από ότι μεταβολή 10 μοιρών στις άλλες γωνίες.

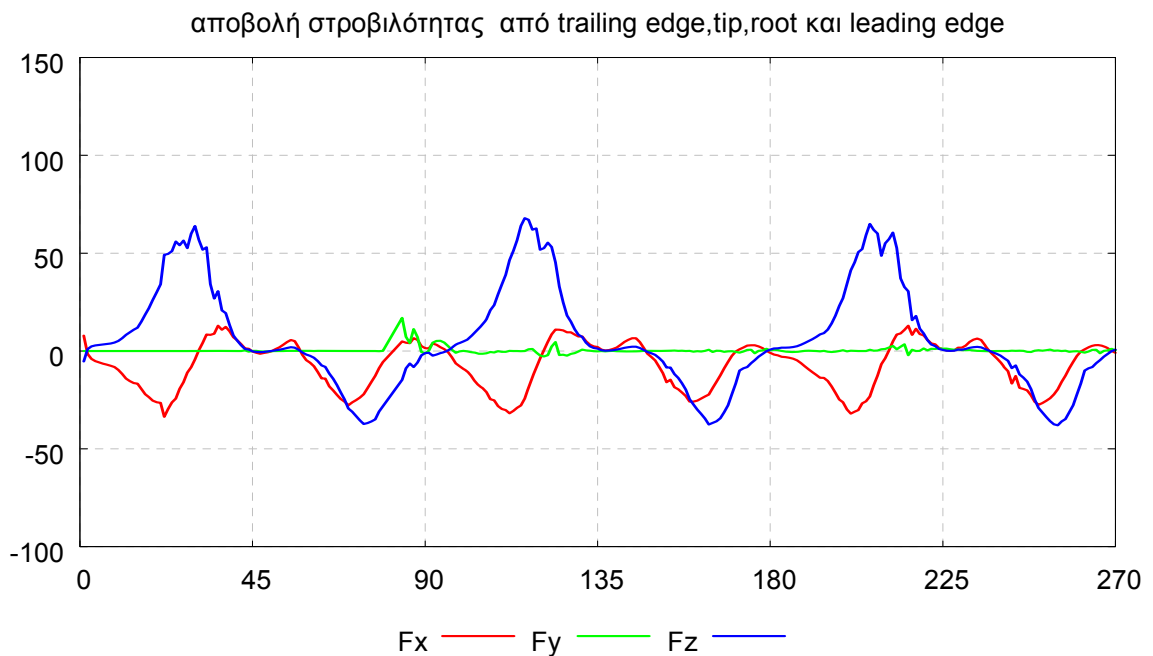
Παρακάτω (διαγρ. 62,63,64) φαίνονται τα αποτελέσματα εάν 'μετακινηθεί' η γωνία forewing σε σχέση με τις άλλες κατά 10 μοίρες

Αλλαγή φάσης forewing angle κατά -10 μοίρες



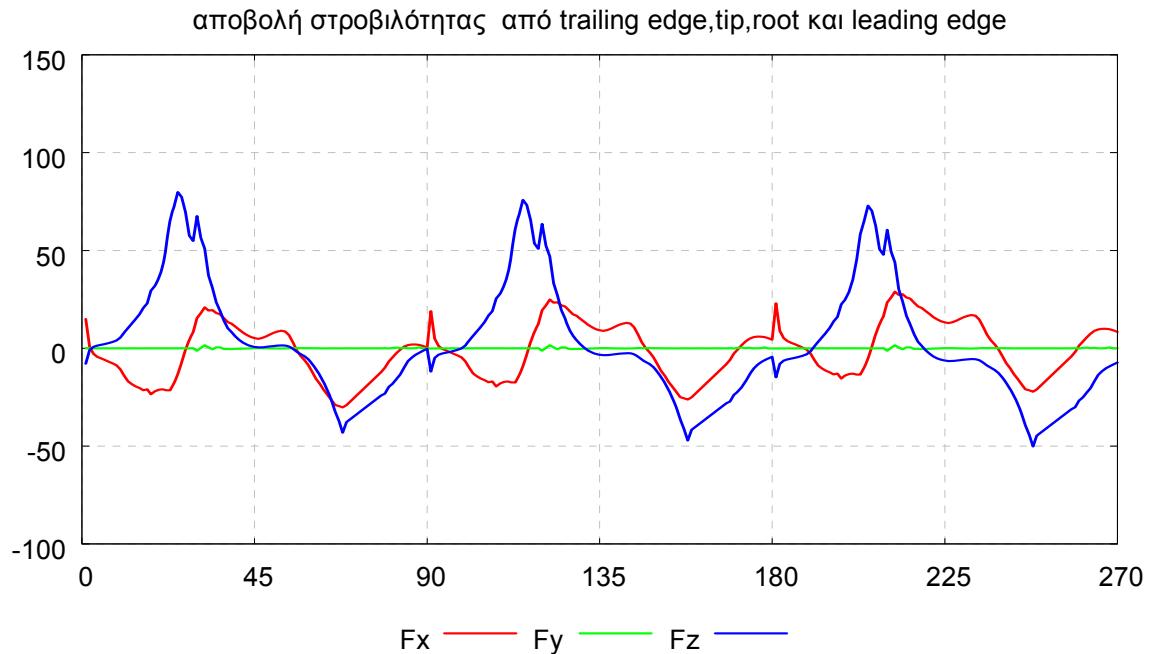
Διάγραμμα 62: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Αλλαγή φάσης forewing angle κατά 0 μοίρες



Διάγραμμα 63: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Αλλαγή φάσης forewing angle κατά +10 μοίρες



Διάγραμμα 64: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

ακριβώς τις ίδιες παρατηρήσεις με τα προηγούμενα διαγράμματα μπορούμε να κάνουμε και στην παραπάνω περίπτωση, όπου όμως είναι αρκετά πιο ευδιάκριτες οι διαφοροποιήσεις των καμπυλών των αποτελεσμάτων. Με βάση όλα τα παραπάνω, καταλαβαίνουμε ότι εάν στοχεύουμε σε βελτιστοποίηση της πτήσης του εντόμου, η φάση είναι ένας αρκετά σημαντικός παράγοντας, καθώς αλλάζει τόσο την ομαλότητα των φορτίων (αντικειμενικός στόχος), όσο και τις μέσες τιμές των φορτίων. Αντιλαμβάνεται, επίσης κανείς ότι ένα πραγματικό έντομο αλλάζει και την φάση των επιμέρους κινήσεων των πτερών του όταν θέλει να αλλάξει την τροχιά του.

3.3.7 Γραμμική συσχέτιση γωνιών κίνησης – βασικών δυνάμεων.

Μια πολύ σημαντική πληροφορία που μπορούμε να πάρουμε από τα αποτελέσματα, που θα είναι πολύ χρήσιμη στην περίπτωση προσπάθειας ελέγχου των κινήσεων, είναι ποια από τις τρεις βασικές κινήσεις σχετίζεται-ελέγχει περισσότερο τα βασικά αεροδυναμικά φορτία που μας ενδιαφέρουν.

Στο έντομο, από τη κίνηση των φτερών του ασκούνται 3 δυνάμεις και 3 ροπές. Από τις 3 δυνάμεις μας ενδιαφέρει η άνωση και η αντίσταση-πρόωση, ενώ η Τρίτη δύναμη δεν μας ενδιαφέρει καθώς είναι πρακτικά μηδενική σε οριζόντια πτήση αφού αλληλοεξουδετερώνεται η παραγόμενη από το ένα πτερό από την παραγόμενη του άλλου(συμμετρικό πρόβλημα).

Από τις τρεις ροπές, οι δύο αλληλοεξουδετερώνονται και μας ενδιαφέρει μόνο αυτή που τείνει να περιστρέψει το έντομο με τέτοιο τρόπο ώστε να ‘σηκώσει’ ή να ‘ρίξει’ το κορμό. Σε αυτή τη περίπτωση οι ροπές από το κάθε φτερό έχουν ίδιο πρόσημο, και μας ενδιαφέρει η συνολική ροπή να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη για την ευστάθεια της πτήσης.

Σε αυτή τη παράγραφο, παρουσιάζουμε το correlation (γραμμική συσχέτιση) που έγινε πάνω στα αποτελέσματα ενός τρεξίματος (hindwing angle parameter=1, παραμετρικές οι τρεις γωνίες). Για το correlation χρησιμοποιήθηκε η σχέση

$$correlation = \frac{\sum \alpha_i \cdot \beta_i}{\sqrt{\sum^2 \alpha_i * \sum^2 \beta_i}}$$

για τη σύνδεση των δύο μεγεθών α,β. Τα μεγέθη αυτά στη κάθε περίπτωση ήταν η κάθε γωνία σε μοίρες συνδυασμένη με την κάθε δύναμη. Το μέγεθος correlation προφανώς είναι αδιάστατο. Οι δε αθροίσεις, αφορούν σε όλα τα χρονικά βήματα μιας περιόδου(πλήρους κύκλου). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2

	Fx	Fz	My
Flapping angle	-0.37233118E-04	0.20651222E-05	-0.28946910E-02
Lead lag angle	0.76061430E-03	0.16341703E-03	0.66998200E-02
Pitching angle	-0.38386701E-04	-0.62110659E-04	0.35673662E-02

Με βάση τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι η lead lag angle παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε όλες τις γωνίες. Γενικά, κάθε γωνία επηρεάζει κάθε μία από τις εξεταζόμενες δυνάμεις, αλλά κάπως πιο άμεσα σχετίζονται η Lead lag angle με την πρόωση, η Pitching με την άνωση, και η ροπή κατά y με την flapping angle.

Έτσι στην περίπτωση που επιθυμούμε την άσκηση αναδραστικού ελέγχου των δυνάμεων αυτών με τροποποίηση των γωνιών, θα ήταν καλό να γίνει δίνοντας βαρύνουσα σημασία στα παραπάνω ζεύγη. Σε αυτή την εργασία έγινε προσπάθεια

ελέγχου της άνωσης κατά τη διάρκεια της πτήσης, θέτοντας έναν 'στόχο' τον οποίο θα έπρεπε να ικανοποιεί η παραγόμενη άνωση αλλάζοντας τη γωνία pitching κρατώντας τις άλλες δύο γωνίες σταθερές.

Έγιναν κάποια τρεξίματα αλλάζοντας τους συντελεστές K_i (integral), K_p (proportional), ασκώντας έλεγχο σε κάθε χρονικό βήμα. Τα αποτελέσματα σε κάποιες περιπτώσεις έδειξαν ότι αυτό δεν γίνεται με μία απλή εξίσωση ελέγχου, ενώ σε κάποια άλλα τρεξίματα όπου ικανοποιήθηκε σε μέρος της περιόδου ο 'στόχος' της άνωσης, έγινε εμφανές ότι ο έλεγχος θα πρέπει να γίνει ανά περίοδο και όχι ανά χρονικό βήμα. Κάτι τέτοιο θα απαιτήσει πάρα πολλές περιόδους ανά τρέξιμο, για να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα. Στην πραγματικότητα, το ίδιο το έντομο ελέγχει τις κινήσεις των πτερών του ανά κύκλο, προσπαθώντας για παράδειγμα στην περίπτωση οριζόντιας πτήσης, η συνολική άνωση κατά τη διάρκεια του κύκλου να αντισταθμίζει το βάρος (target lift), η συνολική ροπή κατά y να είναι μηδέν (για να είναι ευσταθής η πτήση), και η προωστική δύναμη να αντισταθμίζει τις αεροδυναμικές αντιστάσεις (συνισταμένη δύναμη $F_x=0$).

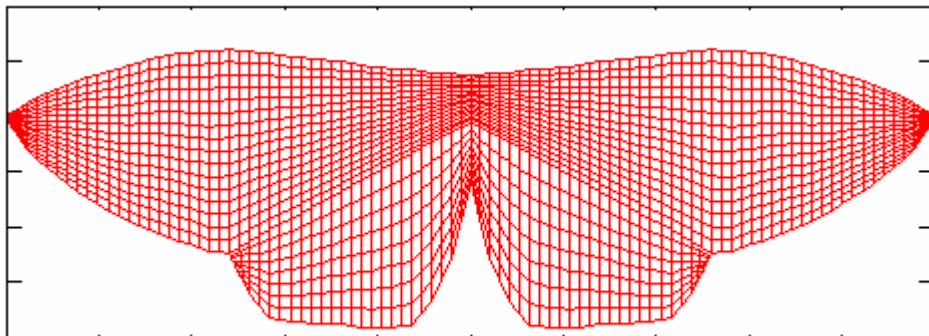
Επειδή ακόμα και τα καλύτερα τρεξίματα που έγιναν προς αυτή τη κατεύθυνση δεν δίνουν σαφή εικόνα, δεν παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία.

3.3.8 Προσομοίωση manduca sexta με τον κώδικα του εργαστηρίου

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη χρήση όλων των δεδομένων που περιγράφουν την πτήση μιας *Manduca sexta*. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία μιας *manduca sexta* (έγινε digitize από την φωτογραφία της εργασίας Liu-Kawachi) και οι 4 γωνίες που περιγράφουν τις κινήσεις των δύο φτερών. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην γεωμετρία ήταν αρκετά πυκνό ούτως ώστε να 'πιάνει' καλά τη μορφή των φτερών. Συγκεκριμένα, το πλέγμα αποτελούταν από 736 ($46*16$) στοιχεία (panels) για το κυρίως φτερό (forewing) και 192 ($24*8$) στοιχεία για το βοηθητικό φτερό (hindwing). Να παρατηρήσουμε ότι αποβολή στροβιλότητας πραγματοποιήθηκε μόνο από trailing edge, root και tip, και πως για λειτουργικούς λόγους, χωρίστηκε το forewing φτερό σε δύο τμήματα ($22*16$ και $24*16$), ούτως ώστε να μην αποβάλλει στροβιλότητα από το trailing edge το forewing φτερό στα panels που ενώνονται με το hindwing φτερό. Κάναμε ένα τρέξιμο με όλες τις γωνίες (διαγρ.65), ένα στο οποίο απουσίαζε η lead lag κίνηση (διαγρ.66), ένα τρέξιμο με όλες τις κινήσεις αλλά με μεγαλύτερο κενό ανάμεσα στα φτερά (διαγρ.67), και τέλος ένα τρέξιμο χωρίς το βοηθητικό φτερό (διαγρ.68).



Εικόνα 43: το έντομο στις πραγματικές του διαστάσεις

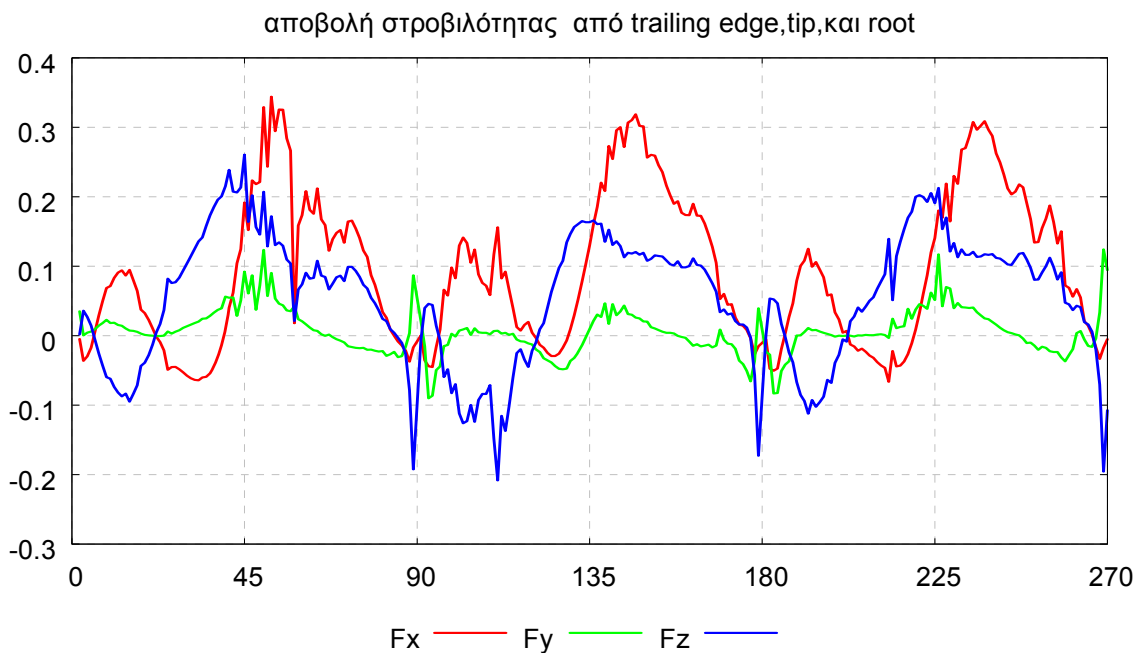


Εικόνα 44: το πλέγμα που κατασκευάσαμε μετά το digitize

Πήραμε τα ακόλουθα αποτελέσματα ($U_{inf}=500\text{m/sec}$)

Flapping, lead lag, twisting

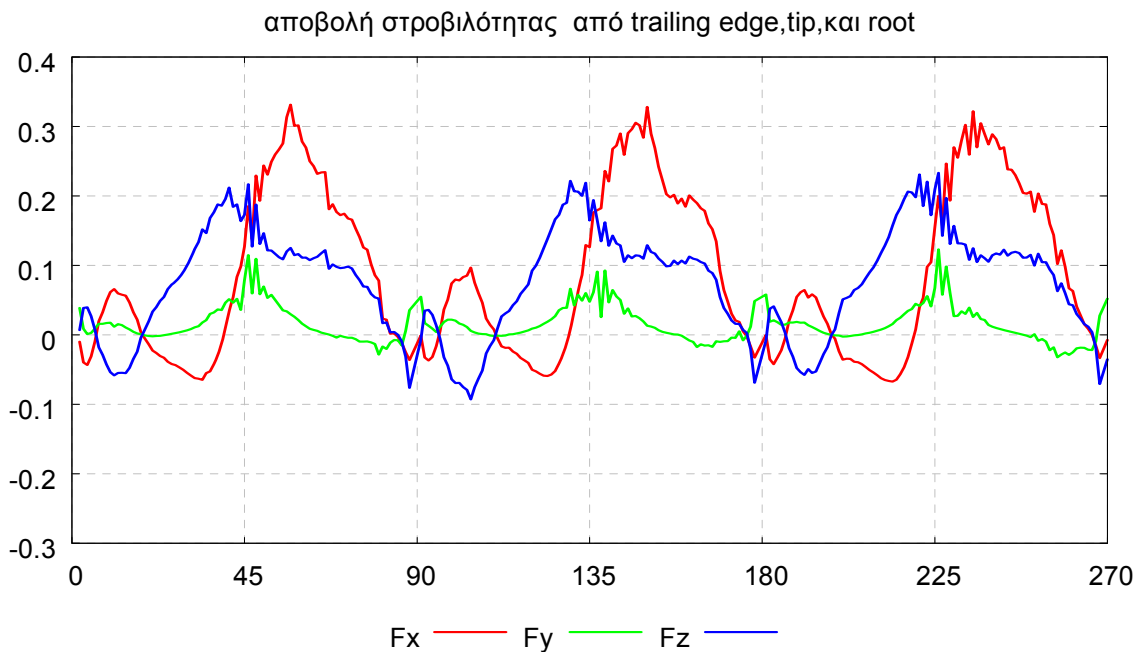
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 65: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Flapping, twisting

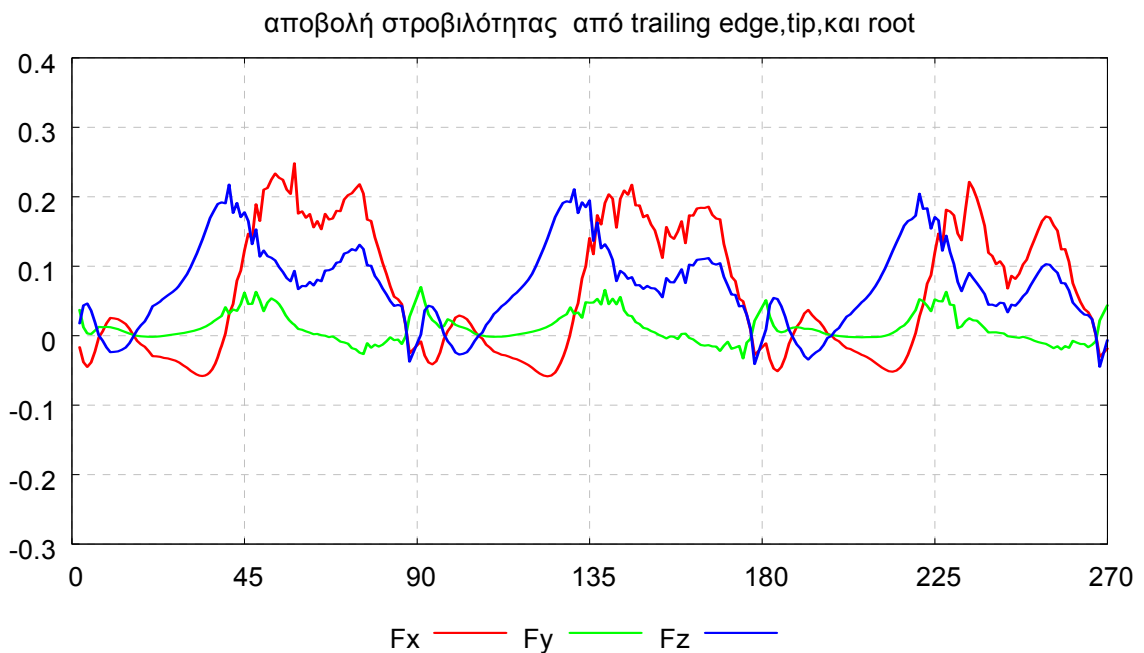
90 timesteps per rotation



Διάγραμμα 66: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

flapping,lead lag,twisting with doubled gap

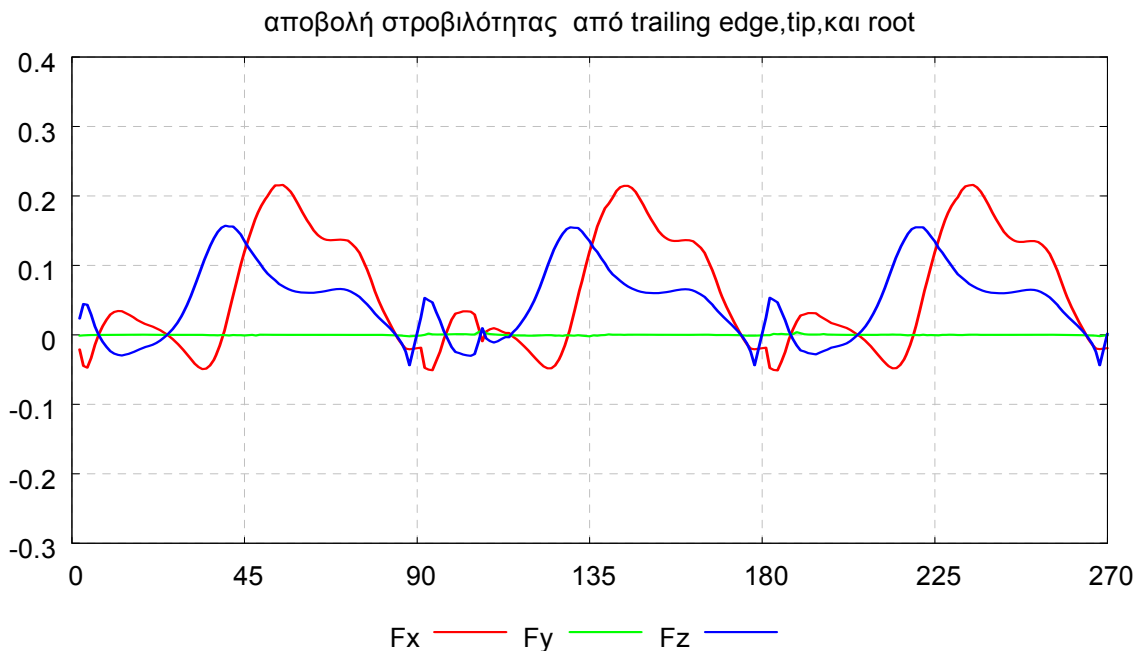
90 time steps per rotation



Διάγραμμα 67: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

forewing only, with flapping,lead lag twisting

90 time steps per rotation



Διάγραμμα 68: Δυνάμεις συναρτήσει χρονικού βήματος

Στα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε, ότι ενώ παράγεται ικανοποιητική άνωση σε ένα κύκλο, η αντίσταση παίρνει πολύ υψηλές τιμές, ενώ στην περίπτωση των τετράπτερων τρεξιμάτων, υπάρχει αρκετός 'θόρυβος' στα αποτελέσματα. Τα τρεξίματα αυτά χρειάστηκαν πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με τα

προηγούμενα, παρά την απουσία του leading edge separation κάτι που οφείλεται κατά κύριο λόγο στα πολύ περισσότερα panels (πολύ πυκνότερο πλέγμα) αλλά και στο ότι τα 3 από αυτά τα τρεξίματα έγιναν υπολογίζοντας 6 σώματα αντί για 2. Τέλος, συγκρίνοντας το τελευταίο τρέξιμο (μόνο με το forewing φτερό) με αντίστοιχα τρεξίματα που χρησιμοποιούσαν την γεωμετρία του μηχανικού εντόμου (λιγότερο μακρόστενη, και με μικρότερο εμβαδό) παρατηρεί κανείς χειρότερη αεροδυναμική συμπεριφορά με μικρότερες ανώσεις και μεγαλύτερες αντιστάσεις.

Κεφάλαιο 4: Αποτίμηση της εργασίας

4.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε προσπάθεια προσομοίωσης της ροής γύρω από ιπτάμενο έντομο. Στα πλαίσια αυτά διαμορφώθηκε υπολογιστικός κώδικας με βασικό χαρακτηριστικό την προσομοίωση της δημιουργίας στροβίλου κατά μήκος της ακμής πρόσπτωσης, καθώς προηγούμενες μελέτες οδήγησαν σε αυτή τη κατεύθυνση. Έγινε διεξοδική παραμετρική ανάλυση με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της μη μόνιμης εξέλιξης των δυνάμεων πάνω στο έντομο για διάφορα σενάρια πτήσης. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκε η ιδιαίτερη σημασία της αποβολής στροβιλότητας από την ακμή πρόσπτωσης. Φάνηκε η εξάρτηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων από παραμέτρους φάσης των βασικών γωνιών κίνησης, καθώς και η σημασία της γεωμετρίας του πτερυγίου. Το γεγονός ότι δεν επιλύονταν ταυτόχρονα οι εξισώσεις κίνησης δεν έδωσε τη δυνατότητα να διαπιστωθεί η συσχέτιση μεταξύ των γωνιών ελέγχου με την ίδια την πτήση. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις για σημαντικό μέρος του κύκλου προέκυψε προωστική δύναμη οπότε επιβεβαιώθηκε ποιοτικά η δυνατότητα πτήσης των εντόμων καθώς και η δυνατότητα θεωρητικής πρόλεξης του συσχετισμού της εκάστοτε γωνίας ελέγχου με την αντίστοιχη συνιστώσα - αεροδυναμικό φορτίο που δέχεται το πτερύγιο.

Ως ένα βαθμό δεν επιχειρήθηκε η διατύπωση και επίλυση των εξισώσεων κίνησης εξ' αιτίας έλλειψης δεδομένων. Σ' αυτά πέραν της μάζας θα απαιτούνταν και τα δομικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων είτε αυτά αφορούν σε μοντέλο είτε σε πραγματικό έντομο. Ενώ στην περίπτωση μοντέλου η εύρεση-θεώρηση των δομικών χαρακτηριστικών των πτερυγίων δεν θα παρουσίαζε ιδιαίτερες δυσκολίες, στην περίπτωση πραγματικού εντόμου θα υπήρχαν μεγαλύτερες επιπλοκές δεδομένου ότι οι ιστοί από τους οποίους συνίσταται το πτερύγιο, παρουσιάζουν αρκετές ανομοιομορφίες σε πάχος, πυκνότητα και ελαστικότητα.

4.2 Προτάσεις

Με την αποκτηθείσα εμπειρία από αυτή την εργασία, είναι δυνατόν να εξετασθούν πιο διεξοδικά κάποιες λεπτομέρειες της πτήσης ενός εντόμου. Ως πρώτο επόμενο βήμα προτείνεται η ανάλυση ενός απλού μοντέλου στο οποίο να προστεθούν οι εξισώσεις κίνησης, ούτως ώστε τα αποτελέσματα να μην είναι μόνο οι παραγόμενες δυνάμεις, αλλά η ίδια η πτήση.

Στη συνέχεια, και αφού διαπιστωθεί επαλήθευση των όσων είναι γνωστά από παλαιότερες έρευνες, να διερευνηθεί ο έλεγχος πτήσης με σκοπό το βέλτιστο συνδυασμό γωνιών ελέγχου, και συνεπώς ικανότητα οδήγησης του μοντέλου. Εάν αυτό γίνει, θα είναι δυνατή η προσομοίωση περιπλοκότερων σεναρίων πτήσης από αυτά της απλής αιώρησης ή της οριζόντιας πτήσης.

Τέλος σε τρίτο στάδιο, στόχος θα είναι να σχεδιαστεί η πτέρυγα (απλή ή διπλή, ανάλογα την εξεταζόμενη περίπτωση) για καλύτερα αποτελέσματα από αεροδυναμική άποψη. Βρίσκοντας την βέλτιστη γεωμετρία της πτέρυγας (και την βέλτιστη δομή), εκτός από σύγκριση με τα αληθινά έντομα, θα έχουν μπει οι βάσεις για την υλοποίηση ενός μηχανικού εντόμου.