

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΔΙΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ**

Διπλωματική εργασία

ΛΥΚΙΑΡΔΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΔΙΛΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ**

Διπλωματική εργασία

ΛΥΚΙΑΡΔΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Επιβλέπων: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς πεδίων ελεύθερης κατάδυσης που εκτελούν ημιπεριστροφική ταλάντωση ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας ενώ συγχρόνως υπόκεινται σε μεταφορική κίνηση κατά μήκος υδροδυναμικής σήραγγας. Η αξιολόγησή τους έγινε μέσω της μέτρησης των υδροδυναμικών φορτίων, σε διεύθυνση παράλληλη και κάθετη στην μεταφορική κίνηση, με χρήση επιμηκυνσιομέτρων στον βραχίονα στήριξης των πεδίων. Παράλληλα, η κίνηση των πεδίων καταγράφηκε από κάμερα, για την συσχέτιση της παραμόρφωσής τους με τα υδροδυναμικά φορτία.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF NAVAL ARCHITECTURE AND MARINE ENGINEERING

**EVALUATION OF FREE DIVING FINS PERFORMING A PITCHING AND
TRANSLATION MOTION**

Diploma Thesis

LYKIARDOPOULOS NIKOLAOS

October 2012, Athens

Advisor: DIMITRIOS MATHIOULAKIS
Associate Professor NTUA

ABSTRACT

The aim of the present diploma thesis is the quantification of the efficiency of eight free diving fins, performing a pitching and translational motion, for various pitching periods and translational speeds. Hydrodynamic loading was measured via strain gauges along two mutually perpendicular axes, one along the translational direction and the other normal to this on a plane which coincided with the pitching plane. At the same time their shape was recorded in order to correlate it with the hydrodynamic loads.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Δημήτριο Μαθιουλάκη για την άψογη συνεργασία μας , την διδακτική καθοδήγηση, την υπομονή και το ευχάριστο κλίμα καθ' όλο το διάστημα της διπλωματικής εργασίας . Επίσης, τον Διευθυντή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ,Καθηγητή κ. Τζαμπίρα Γ. που μας παραχώρησε τις εγκαταστάσεις της πειραματικής δεξαμενής για την διεξαγωγή των μετρήσεων, καθώς και τα μέλη του εργαστηρίου κ. Φ. Κασάπη (Ε.Ε.ΔΙ.Π.), κ. Ι. Τραχανά, (Ε.Τ.Ε.Π.) και τον κ. Δ. Λιαροκάπη (Ι.Δ.Α.Χ.), για την πολύτιμη βοήθειά τους, την αμέριστη υποστήριξή τους και την υπομονή που επέδειξαν κατά τον χειρισμό του φορείου της δεξαμενής. Ακόμα, τον Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Φ. Μουζάκη του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) για την σημαντική βοήθειά του αναφορικά με την τοποθέτηση των επιμηκυνσιομέτρων και την βαθμονόμησή τους. Τέλος ευχαριστώ τους φίλους μου Αριστείδη και Μάκη Γραϊκούση που με βοήθησαν στα πειράματα και όποτε τους χρειάστηκα...

.....την αφιερώνω σ' εκείνους που όλα αυτά τα χρόνια βαδίσαμε χέρι χέρι ανακαλύπτοντας τις έννοιες της αλληλεγγύης , της συλλογικότητας, της διεκδίκησης..... Αποφοιτώ με την βαθιά πεποίθηση ότι μ' αυτές θα πορευτούμε ενάντια στον κανιβαλισμό και την εξαθλίωση της 'κρίσης'για μια ζωή με αξιοπρέπεια!

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
-----------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Trust Force Characteristics of Propulsion Mechanism in Fluid Using Fin with Dynamic Variable- Effective-Length Spring.....	15
1.2 A new system for analyzing swim fin propulsion based on human kinematic data.....	21
1.3 Performance Evaluation of Swim Fins under Zero Translation Speed.....	26
1.4 Wave drag on human swimmers.....	34
1.5 Evaluation of the performance of free diving fins.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Oscillating foils of high propulsive efficiency.....	39
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Ορισμός κινηματικών παραμέτρων.....	48
3.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	51
3.2.1 Έλεγχος κύριων κινηματικών παραμέτρων.....	52
3.2.2 Περιγραφή μηχανικών στοιχείων της πειραματικής διάταξης.....	52
3.2.3 Περιγραφή μετρητικών διατάξεων και λοιπών οργάνων της πειραματικής διάταξης.....	56
3.3 Βαθμονόμηση πειραματικής διάταξης και επιλογή των πεδίων δοκιμών.....	60
3.3.1 Βαθμονόμηση επιμηκυνσιομέτρων (strain gauges) βραχίονα.....	60
3.3.2 Επιλογή πτερυγίων δοκιμών, και καθορισμός των χαρακτηριστικών τους μεγεθών.....	67
3.4 Εκτέλεση πειράματος.....	74
3.4.1 Εκτίμηση της επίδρασης του βραχίονα και του καλαποδιού στις μετρήσεις των δυνάμεων.....	76
3.5 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων.....	79
3.5.1 Υπολογισμός της περιόδου (T) της ημιπεριστροφικής ταλάντωσης του πτερυγίου.....	80
3.5.2 Εξαγωγή μέσου κύκλου ταλάντωσης και ανάλυση των μετρούμενων δυνάμεων ως προς το σύστημα XY (άξονας Y παράλληλος στην διεύθυνση της μεταφορικής κίνησης)	80
3.5.3 Υπολογισμός της εφαπτομενικής ταχύτητας u(m/s) του πτερυγίου κατά την διάρκεια μιας περιόδου στην θέση L/4 από την ακμή πρόσπτωσης.....	83
3.5.4 Υπολογισμός καταναλισκόμενης, ωφέλιμης ισχύος & υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης.....	86
3.5.5 Υπολογισμός απόδοσης στην στατική κατάσταση (μηδενική ροή ελεύθερου ρεύματος V=0).....	88
3.5.6 Υπολογισμός αριθμού Strouhal και συντελεστών πλάγιας και ωστικής δύναμης.....	88
3.5.7 Υπολογισμός ALE, ATE, A(L/4 from LE) και προσδιορισμός του σχήματος του πτερυγίου κατά την διάρκεια της κίνησής του.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Παρουσίαση και σύγκριση αποτελεσμάτων	91
4.1.1 Σύγκριση υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης EC για περίοδο T=1.6sec (+/-0.06sec) και μεταβλητή τιμή μεταφορικής ταχύτητας V(m/s).....	102
4.1.2 Σύγκριση υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης EC για κάθε τιμή της μεταφορικής ταχύτητας (V) ,στις δύο περιόδους δοκιμών.....	104
4.1.3 Σύγκριση υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης της δεξιόστροφης (ECdownstroke) και της αριστερόστροφης (ECupstroke) κίνηση του κάθε πτερυγίου, για περίοδο ταλάντωσης T=1,6sec (+/-0,06s) και όλες τις ταχύτητες δοκιμών.....	106
4.1.4 Σύγκριση της πλάγιας δύναμης Fx (Fvertical) για περίοδο T=1.6sec (+/-0.06sec) και μεταβλητή τιμή μεταφορικής ταχύτητας V(m/s).....	109
4.1.5 Σύγκριση της παραγόμενης ωστικής δύναμης Fy (thrust) των πεδίων για περίοδο T=1.6sec (+/-0.06sec) και μεταβλητή τιμή μεταφορικής ταχύτητας V(m/s).....	111
4.1.6 Διαγράμματα μεταβολής της ωστικής Fy(Fthrust) και πλάγιας Fx(Fvertical) δύναμης κατά την διάρκεια μιας τυπικής περιόδου και η αντίστοιχη μορφή των πτερυγίων σε οχτώ χρονικές στιγμές ενός κύκλου.....	113
4.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων	199
4.2.1 Επίδραση του αριθμού Strouhal στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης και στα δυναμικά χαρακτηριστικά των πεδίων.....	199
4.2.2 Επίδραση της ακαμψίας στις παραγόμενες δυνάμεις.....	202
4.2.3 Συσχέτιση της παραμόρφωσης των πτερυγίων με τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά.....	203
4.2.4 Η κίνηση της ακμής εκφυγής (trailing edge) των πτερυγίων.....	206

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	213
-----------------------------	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	216
---	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α- Παρουσίαση κώδικα ανάλυσης δεδομένων	218
--	-----

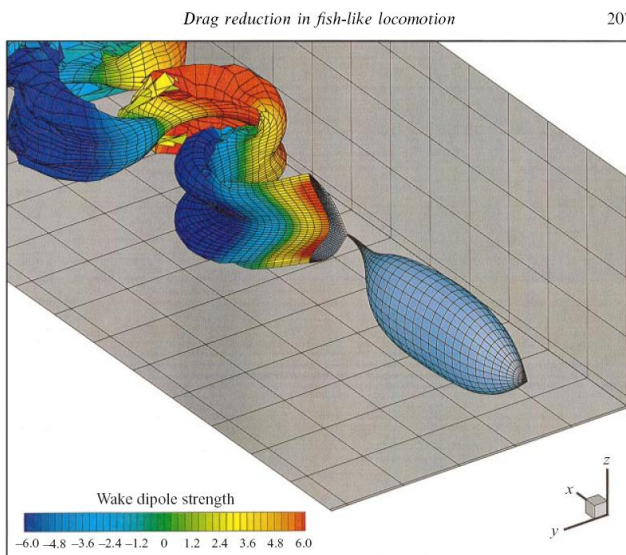
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	229
---------------------------	-----

Εισαγωγή

Η φυσική εξέλιξη των υδρόβιων και ιπτάμενων ζώων, συνέβαλε στην βελτιστοποίηση των μηχανισμών που χρησιμοποιούν για να κινούνται στο φυσικό τους περιβάλλον. Συνεπώς, αποτέλεσαν και αποτελούν, σημείο αναφοράς και πηγή έμπνευσης για τον άνθρωπο στην προσπάθειά του ώστε να ανακαλύψει τρόπους κίνησης σε χώρους που η ίδια η φύση μας δεν το επιτρέπει. Έτσι λοιπόν, αυτά τα ζώα εκλαμβάνονται απ' τον ανθρώπινο νου ως μηχανές εν ζωή που κάτω απ' τον έλεγχο του νευρικού τους συστήματος χρησιμοποιούν τους μυς σαν κινητήρες μετατροπής της βιοχημικής ενέργειας σε μηχανική για να κινήσουν τους πρωσθήριους μηχανισμούς τους.

Μια κοινή στρατηγική των υδρόβιων και ιπτάμενων ζώων ώστε να κινηθούν μέσα σε ένα ρευστό, είναι χρησιμοποιώντας παρελκόμενα ,όπως τα φτερά και τα πτερύγια, κάνοντας ρυθμικές επαναλαμβανόμενες κατακόρυφες και περιστροφικές κινήσεις.

Τα ψάρια κινούν τον εαυτό τους μέσω ρυθμικών αλλά και 'ασταθών' κινήσεων του σώματός τους, των πτερυγίων και της ουράς τους, δηλαδή χρησιμοποιώντας έναν τελείως διαφορετικό συνδυασμό κινήσεων απ' ότι τα συμβατικά θαλάσσια μέσα πρόωσης. Η πρόωση επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας δινών απ' τις ακμές της ουράς τους, ενώ η ώση προκύπτει επειδή οι δίνες ενεργοποιούν στην ροή του ομόρρου έναν πίδακα (jet flow) με κατεύθυνση αντίθετη της κατεύθυνση του ψαριού. Η άποψη ότι η αστάθεια της ροής που προκύπτει απ'



τις κινήσεις των ψαριών αποτελεί πλεονέκτημα βασίζεται σε πολλές εργασίες (Wu, 1961; Lighthill, 1969; Triantafyllou et al., 2000) που καταλήγουν ότι τα ψάρια α) ενεργοποιούν αποδοτικά μεγάλες αλλά μικρής διάρκειας δυνάμεις, β) συνδυάζουν την ασταθή ρυθμική κίνηση του σώματος και της ουράς ελαχιστοποιώντας την ενέργεια που απαιτείται για σταθερή κίνηση προς μια κατεύθυνση.

Αρκετές καινοτόμες ιδέες που βασίζονται στον έλεγχο της ασταθούς ροής έχουν εφαρμοστεί στην ρομποτική, με τους 'ασταθής' μηχανισμούς πρόωσης και τα οχήματα που μιμούνται την κίνηση των ψαριών να έχουν βρει πολλές τεχνολογικές εφαρμογές.

Η ανωτερότητα των κινήσεων του ψαριού ως μηχανισμός πρόωσης, παρατηρήθηκε ήδη απ' τον Gray το 1936. Ο ίδιος σύγκρινε της ενέργεια που χρειάζεται για να ρυμουλκηθεί ένα ακίνητο μοντέλο δελφινιού σε ταχύτητα 20 κόμβων, με την εκτιμώμενη μυϊκή ενέργεια που καταναλώνει το δελφίνι για να κινηθεί στην ίδια ταχύτητα. Υπολόγισε ότι η απαιτούμενη μυϊκή ενέργεια ήταν κατά **επτά φορές** μικρότερη απ' την ενέργεια που καταναλώθηκε για να ρυμουλκηθεί ακίνητο (το παράδοξο του Gray), έτσι κατέληξε ότι σημαντική μείωση της αντίστασης λαμβάνει χώρα κατά την κίνηση του ζωντανού δελφινιού. Το συμπέρασμα αυτό έμεινε για πολλά χρόνια ανοιχτό λόγω της δυσκολίας δυναμικών μετρήσεων σε ζωντανά ψάρια, μέχρι πρόσφατα, που τεκμηριώθηκε επαρκώς από πολλές εργασίες με ποιο χαρακτηριστική αυτή των Triantafyllou et al. (1999), όπου κατασκεύασαν έναν ρομποτικό μηχανισμό που μιμείται τις κινήσεις του τόνου.

Συνεπώς, η γνώση του τρόπου με τον οποίον τα ψάρια κινούνται ή αλλιώς η υδροδυναμική της κίνησης των ψαριών και η εμβάθυνση στις βασικές παραμέτρους που τα καθιστούν τόσο αποδοτικά, αποτελεί πρόκληση για την επιστήμη της υδροδυναμικής αλλά και μια σειρά τομείς που σχετίζονται μ' αυτήν.

Θα μπορούσε να πει κανείς ότι η πιο κοινότυπη εφαρμογή της κίνησης των ψαριών, βέβαια πολύ πιο πριν αυτή κατανοηθεί, είναι τα πτερυγία κολύμβησης.



Με την άνθηση μιας σειράς δραστηριοτήτων απ' το υποβρύχιο ψάρεμα, την κατάδυση με χρήση συσκευής οξυγόνου, τους τεχνικούς αγώνες κολύμβησης μέχρι την ελεύθερη κατάδυση με χρήση πτερυγίων, δημιουργήθηκε η ανάγκη στην εμβάθυνση στον τρόπο λειτουργίας, στο τρόπο χρήσης (τεχνικής) και προφανώς στην κατασκευή πτερυγίων κολύμβησης. Η χρήση τους σε περιβάλλον βιολογικά ξένο προς τον άνθρωπο, λόγω της απουσίας του ζωτικού οξυγόνου, καθιστά την παράμετρο της απόδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας ως καθοριστικής

σημασίας για την ασφαλή λειτουργία του δύτη κάτω απ' αυτές τις συνθήκες. Η ποικιλία βέβαια των θαλάσσιων και υποβρύχιων δραστηριοτήτων δεν καθιστά δυνατή την χρήση ενός τύπου πτερυγίου, καθώς σε κάθε δραστηριότητα ιεραρχούνται διαφορετικά οι απαιτήσεις του δύτη ή του κολυμβητή, απ' τα πτερύγια που χρησιμοποιεί. Π.χ. κατά την κατάδυση με χρήση συσκευών οξυγόνου δίνεται μεγαλύτερη σημασία στην ελκτικότητα και έτσι χρησιμοποιούνται μικρότερα και πιο εύχρηστα πτερύγια.

Πέρα απ' τους αντικειμενικούς παράγοντες που καθορίζονται απ' το στόχο κάθε φορά της υποθαλάσσιας δραστηριότητας και που αντανακλώνται στον σχεδιασμό και στην κατασκευή του πτερυγίου, καθοριστικής σημασίας είναι και ο υποκειμενικός παράγοντας του δύτη που ποικίλει απ' την ανατομία του, την φυσική του κατάσταση, την εμπειρία του και προφανώς την τεχνική του. Είναι χαρακτηριστικό ότι στην εργασία του G.Minak (2004) η απόδοση τριών αθλητών με διάφορα στάδια εμπειρίας και με την χρήση των ίδιων πτερυγίων, διέφερε κατά πολύ, με την διαφορά να εντοπίζεται στον τρόπο και στον ρυθμό κίνησης των ποδιών.

Η ελεύθερη κατάδυση με απουσία οποιουδήποτε μηχανισμού υποβοήθησης παρά μόνο με χρήση πτερυγίων, ίσως αποτελεί μεταξύ όλων των υποβρύχιων δραστηριοτήτων την πιο απαιτητική και δύσκολη διαδικασία. Ο Δύτης έρχεται αντιμέτωπος με τα βιολογικά του όρια καθώς σε συνδυασμό με την έλλειψη οξυγόνου καλείται να υπερνικήσει και την υδροστατική πίεση καταναλώνοντας ακόμα μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας, άρα και οξυγόνου. Έτσι είναι προφανές, ότι σε βάθη άνω των 20 μέτρων απαιτούνται πτερύγια, που δεν αρκεί να εξοικονομούν την πολύτιμη ενέργεια του δύτη, αλλά και να αποδίδουν ικανοποιητική ώση ώστε να υπερνικήσει τη υδροστατική πίεση και να αναδυθεί στην επιφάνεια.

Έτσι λοιπόν, η απόδοση με την έννοια του λόγου της αποδιδόμενης ενέργειας (ώσης) προς την ενέργεια που δαπανάται για την κίνησή τους, αποτελεί έναν ποιοτικό δείκτη αξιολόγησης των πτερυγίων, παραταύτα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και το μέτρο της ωστικής δύναμης που αποδίδουν.

Μέχρι και σήμερα, η αξιολόγηση των πτερυγίων ελεύθερης κατάδυσης βασίζεται στην υποκειμενικότητα του δύτη. Η προσέγγιση του φαινομένου σε θεωρητικό επίπεδο συναντά σημαντικά εμπόδια και καθιστά αναπόφευκτες τις απλοποιήσεις, που καταλήγουν σε αποκλίσεις απ' την πραγματικότητα. Έτσι, η πειραματική του προσομοίωση αποτέλεσε τον κατεξοχήν τρόπο διερεύνησης. Ο συνήθης τρόπος προσέγγισης είναι ως ενιαίο σύστημα δύτη-πτερυγίων,

αξιολογώντας την ενεργειακή απόδοση του συστήματος μέσω της μέτρησης κατανάλωσης οξυγόνου (Goff et al., 1956; Nomura and Matsuzaki, 1985; Hong et al., 1991; Pendergast et al., 1996, 2003; Zamparo et al., 2002, 2005a). Ωστόσο λίγες εργασίες επιδίωξαν να συνδέσουν την κατανάλωση του οξυγόνου με τις μηχανικές ιδιότητες του πτερυγίου ή με την τεχνική κολύμβησης. Η κινηματική ανάλυση των αθλητών κατά την διάρκεια της κολύμβησης επέτρεψε την μελέτη της τεχνικής των κολυμβητών με την χρήση διάφορων πτερυγίων (Pendergast et al., 1996; Zamparo et al., 2002), όμως είναι απαραίτητη η σύνδεσή της με δυναμικές μετρήσεις. Άλλες εργασίες επικεντρώνονται στην μελέτη της κίνησης των πτερυγίων σε στατική κατάσταση, συγκρίνοντας τις μέγιστες μετρούμενες δυνάμεις (Christianson et al., 1965; Lewis and Lorch, 1979; Yamaguchi et al., 1995; Minak, 2004; D.S. Mathioulakis, P. Bardis, 2011;). Στην περίπτωση των στατικών πειραμάτων η ροή γύρω απ' τον κολυμβητή αλλά κυρίως γύρω απ' το πτερύγιο, διαφέρει κατά πολύ απ' την πραγματικότητα, με αποτέλεσμα τα μετρούμενα μεγέθη να υπερεκτιμούνται. Μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο κολύμβησης, έγιναν από κάποιες εργασίες προσπαθώντας να ξεπεράσουν το προαναφερθέν πρόβλημα (McMurray, 1977; Pendergast et al., 1996; Zamparo et al., 2002, 2005).

Η απομόνωση του πτερυγίου απ' το συνολικό σύστημα κολυμβητή-πτερυγίου, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Έτσι επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της επίδρασης του υποκειμενικού παράγοντα (κολυμβητή). Παράλληλα πρέπει να εξασφαλιστούν οι συνθήκες ροής γύρω απ' το πτερύγιο, ώστε να προσεγγίζουν αξιόπιστα την πραγματικότητα. Στην εργασία των Nicolas et al. (2010) με την χρήση μηχανισμού και με παράλληλη μεταφορική κίνηση εξασφαλίστηκαν οι δύο παραπάνω συνθήκες.

Καταληκτικά, για την μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών του πτερυγίου στην κολύμβηση πρέπει να εξασφαλίζονται οι τρεις παρακάτω συνθήκες:

- Η παραμετροποίηση της βέλτιστης τεχνικής κολύμβησης, ώστε με την χρήση μηχανισμού να αναπαράγονται αξιόπιστα και με ακρίβεια οι κινήσεις κολύμβησης με χρήση πτερυγίων.
- Η εξασφάλιση των συνθηκών ροής γύρω απ' το πτερύγιο, ώστε να προσεγγίζουν τις πραγματικές.
- Η αξιόπιστη μέτρηση των επαγόμενων, απ' τον πτερύγιο, δυνάμεων

Κεφάλαιο 1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Trust Force Characteristics of Propulsion Mechanism in Fluid Using Fin with Dynamic Variable- Effective-Length Spring

Shunichi Kobayamshi, Masataka Nakabayashi, Reiji Kobayashi, Ji Jie, and Hirohisa Morikawa
Department of Functional Machinery and Mechanics , Shinshu University, Tokida, Japan

Περίληψη

Στοχεύσαμε στο να εξελίξουμε ένα μηχανισμό πρόωσης χρησιμοποιώντας ένα μεταβλητής ελαστικότητας πτερύγιο . Η ελαστικότητα του πτερυγίου μπορεί να μεταβάλλεται, αλλάζοντας το ενεργό μήκος πλάκας που λειτουργεί σαν 'ελατήριο' και είναι συνδεδεμένη με το πτερύγιο. Μετρήσαμε την τριβική δύναμη του μηχανισμού πρόωσης και συνάμα οπτικοποιήσαμε την ροή γύρω απ' το πτερύγιο, ώστε να περιγράψουμε τα χαρακτηριστικά της τριβικής δύναμης σε σχέση με την μεταβαλλόμενη ελαστικότητα του πτερυγίου και ακόμα περισσότερο να ερευνήσουμε της σχέση αυτής της δύναμης με την ροή γύρω απ' το πτερύγιο.

1.Εισαγωγή

Η συμβατική έλικα χρησιμοποιείται ως γενικό μέσο πρόωσης σε πλοία και υποβρύχια οχήματα. Ως εναλλακτικό μέσο πρόωσης , ασφαλέστερο και με υψηλότερο βαθμό απόδοσης απ' την έλικα, έχει προταθεί ένα ταλαντευόμενο ελαστικό πτερύγιο, αναπαριστώντας την κίνηση ουραίων ή θωρακικών πτερυγίων ψαριών (Morikawa et al. 1980, Nakashima et al. 2000, Watanabe et al. 2002). Η βέλτιστη ελαστικότητα του πτερυγίου δεν είναι σταθερή και αλλάζει σύμφωνα με την κατάσταση της κίνησης και το περιβάλλον , όπως η ταχύτητα κολύμβησης και η συχνότητα ταλάντωσης (Nakashima et al. 2000). Ωστόσο είναι δύσκολο να αλλάξεις την ελαστικότητα του πτερυγίου ενώ αυτό κινείται. Απ' τη άλλη μεριά τα ψάρια μπορούν να προσαρμόζουν την κίνηση των πτερυγίων τους έτσι ώστε να αλλάζουν την επίδραση της εξωτερικής δύναμης αλλά και να χρησιμοποιούν με τέτοιο τρόπο τους μυς τους ώστε να μεταβάλλουν την ελαστικότητα αυτών.

2.Η διαμόρφωση του πρωσθήριου μηχανισμού στο ρευστό

Στην εικόνα 1 (figure 1) φαίνεται η αρχή λειτουργίας της ελαστικής πλάκας μεταβλητού ενεργού μήκους. Το ενεργό μήκος H της ελαστικής πλάκας

μεταβάλλεται, αλλάζοντας το μήκος των άκαμπτων 'ελασμάτων' που στηρίζουν την ελαστική πλάκα φτιαγμένη από PET. Η σχέση μεταξύ μετατόπισης της ελαστικής πλάκας και ενεργού μήκους (H) φαίνεται στο Figure 2 (σταθερό προστιθέμενο φορτίο 1.96N) . Στην εικόνα 3 (Figure 3) φαίνεται το πτερύγιο με την μεταβλητού ενεργού μήκους πλάκα. Το σύστημα αποτελείται από ένα αλουμινένιο κουτί (μήκος=130χιλ, πλάτος=25χιλ, ύψος=60 χιλ), το πτερύγιο φτιαγμένο από μια χλωριούχα πλάκα (μήκος=120χιλ, ύψος=60χιλ, πάχος=3χιλ) και την μεταβλητού ενεργού μήκους ελαστική πλάκα (μήκος=20χιλ, ύψος=43χιλ, πάχος=0.5χιλ). Ένας αδιάβροχος κινητήρας συνεχούς ρεύματος τοποθετημένος στο αλουμινένιο κουτί μετακινεί με την βοήθεια σπειρώματος τις άκαμπτες πλάκες. Όλος ο μηχανισμός τοποθετείται στο κέντρο ακίνητης δεξαμενής με το πτερύγιο να βρίσκεται 90 χιλ. κάτω απ' την επιφάνεια του νερού. Για την μέτρηση της ωστικής δύναμης χρησιμοποιείται load cell. Η κίνηση του πτερυγίου ενεργοποιείται από έναν συνεχούς ρεύματος σερβομηχανισμό ικανό να αλλάζει την γωνία (θ) και την περίοδο(T) της κίνησης (pitching). Τέλος με την βοήθεια υψηλής ανάλυσης βιντεοκάμερας και την χρήση PIV system , αναλύεται η ροή γύρω απ' το πτερύγιο.

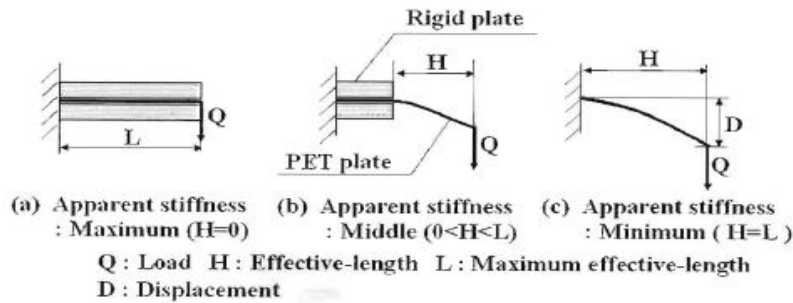


Fig. 1. Principle of effective length spring

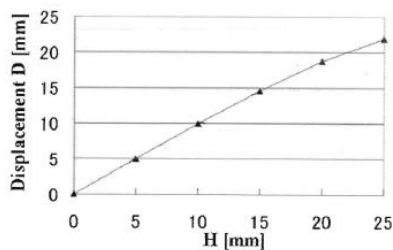


Fig. 2. Relationship between displacement of plate spring D and effective length of spring H . Total length of spring $L = 25$ mm. Thickness of spring $t = 0.5$ mm. Constant lateral load $Q = 1.96$ N.

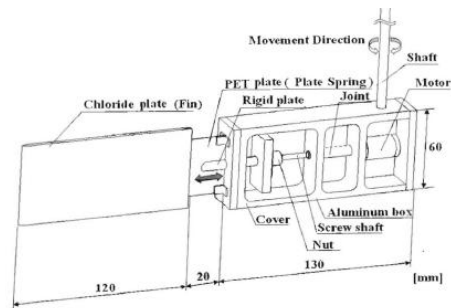


Fig. 3. Fin with variable-effective-length spring

3. Αποτελέσματα

3.1 Κατάσταση σταθερού ενεργού μήκους ελαστικής πλάκας

3.1.1 Σχέση μεταξύ ενεργού μήκους και ωστικής δύναμης

Η εικόνα 6 (fig 6) δείχνει την μεταβολή της ωστικής δύναμης κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Το ενεργό μήκος H της ελαστικής πλάκας ήταν σταθερό κατά την διάρκεια της κίνησης (στατική κατάσταση). Όταν $H=0$ δηλαδή στην κατάσταση με την μεγαλύτερη ακαμψία η διαφορά της $F_{x\max}$ με την $F_{x\min}$ αλλά και το εύρος της αρνητικής ωστικής δύναμης είναι μεγαλύτερα απ' όταν $H=L$. Η μέση ωστική δύναμη όταν $H=L$ ($F_{x\text{αν}}=0.334\text{N}$) είναι μεγαλύτερη απ' όταν $H=0$ ($F_{x\text{αν}}=0.332\text{N}$). Απ' αυτό συμπεραίνουμε ότι ένα ελαστικό πτερυγίο είναι προτιμότερο σε σχέση με την ενεργή ωστική δύναμη που παράγει. Στην κατάσταση που η μέση ωστική δύναμη γίνεται μέγιστη ($F_{x\text{αν}}=0.416$) το ενεργό μήκος είναι $H_{\text{opt}}=9L/20$ με περίοδο και μέγιστη γωνία περιστροφής $T=3\text{s}$, $\theta_{\max}=30\text{deg}$ αντίστοιχα. Η φάση των $F_{x\max}$ και $F_{x\min}$ όταν $H=L$ και $H_{\text{opt}}=9L/20$ καθυστερεί σε σχέση μ' αυτήν όταν $H=0$. Αυτό γιατί η φάση της γεωμετρίας του πτερυγίου που δημιουργεί μεγαλύτερη ώση καθυστερεί λόγω της ελαστικής κάμψης.

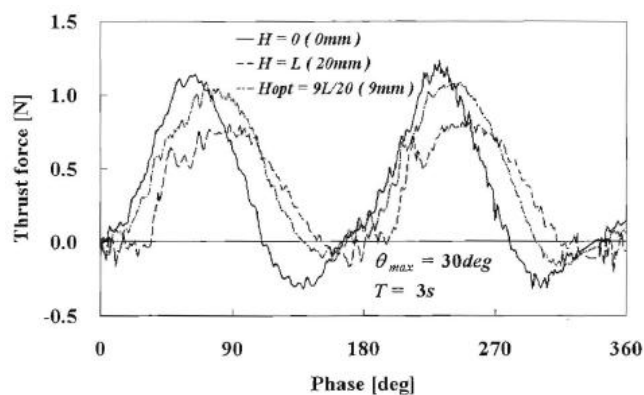


Fig. 6. Variation of x -directional thrust force in one movement cycle ($T = 3 \text{ s}$, $\theta_{\max} = 30 \text{ deg}$).

3.1.2 Το σχήμα του πτερυγίου και η ροή γύρω απ' αυτό

Οι εικόνες 7&8 (fig7 & fig8) δείχνουν την αλλαγή της γεωμετρίας του πτερυγίου και της ροής γύρω απ' αυτό κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Το ενεργό μήκος της πλάκας μένει σταθερό κατά την διάρκεια αυτής της κίνησης. Η αύξηση του ενεργού μήκους της πλάκας αυξάνει και την κάμψη, με παράλληλη μείωση της ακαμψίας του πτερυγίου.

$H=0$ (μηδενικό ενεργό μήκος, μέγιστη ακαμψία)

Όταν $H=0$ η κάμψη του πτερυγίου είναι μικρή αλλά όχι μηδενική κι' αυτό λόγω του μικρού κενού μεταξύ των άκαμπτων πλακών (rigid plates) και της μεταβλητού ενεργού μήκους πλάκας. Φάση 60deg : (η φάση της μέγιστης ωστικής δύναμης): Η περιοχή υψηλότερης ταχύτητας ροής στην αριστερή πλευρά του πτερυγίου είναι μεγαλύτερη απ' αυτήν στην δεξιά πλευρά. Έτσι η πίεση στην αριστερή μεριά είναι μικρότερη απ' αυτήν στην δεξιά, με αποτέλεσμα αυτή

η διαφορά πίεσης να παράγει μια θετική ωστική δύναμη με κατεύθυνση προς τα κάτω ως προς την εικόνα. Φάση 90 deg: Η ταχύτητα ροής στην αριστερή μεριά του πτερυγίου είναι ακόμα μεγαλύτερη αλλά με την ευθυγράμμιση του πτερυγίου με τον άξονα χ , η θετική ώση μειώνεται.. Φάση 150 deg: (η φάση της μικρότερης ωστικής δύναμης): Η ταχύτητα ροής στην αριστερή πλευρά είναι ακόμα μεγαλύτερη αλλά λόγω της θέσης του πτερυγίου η συνιστώσα της αρνητικής ώσης γίνεται μεγαλύτερη. Φάση 180 deg: Η ταχύτητα ροής μειώνεται αντίστοιχα και η συνιστώσα της αρνητικής ώσης.

H=L (μέγιστο ενεργό μήκος, ελαχιστη ακαμψία)

Φάση 60deg: Η ταχύτητα ροής στην αριστερή πλευρά του πτερυγίου είναι μικρότερη στην αντίστοιχη φάση όταν $H=0$. Καθώς το πτερύγιο κάμπτεται η θετική ωστική δύναμη είναι μικρότερη απ' αυτήν όταν $H=0$. Φάση 90deg: (φάση μέγιστης ωστικής δύναμης): Η θετική ωστική δύναμη είναι μέγιστη λόγω της κυρτωμένης θέσης του πτερυγίου. Αλλά η ταχύτητα ροής στην αριστερή πλευρά του πτερυγίου είναι μικρότερη απ' όταν $H=0$ στην ίδια φάση. Φάση 150 deg: Η θετική ωστική δύναμη μειώνεται λόγω της θέσης του πτερυγίου. Φάση 180 deg: (φάση της μικρότερης ωστικής δύναμης): Η αρνητική συνιστώσα της ώσης γίνεται μέγιστη λόγω της θέσης του πτερυγίου, αλλά εφόσον η ταχύτητα ροής είναι μικρότερη απ' όταν $H=0$, η αρνητική συνιστώσα είναι και μικρότερη απ' όταν $H=0$.

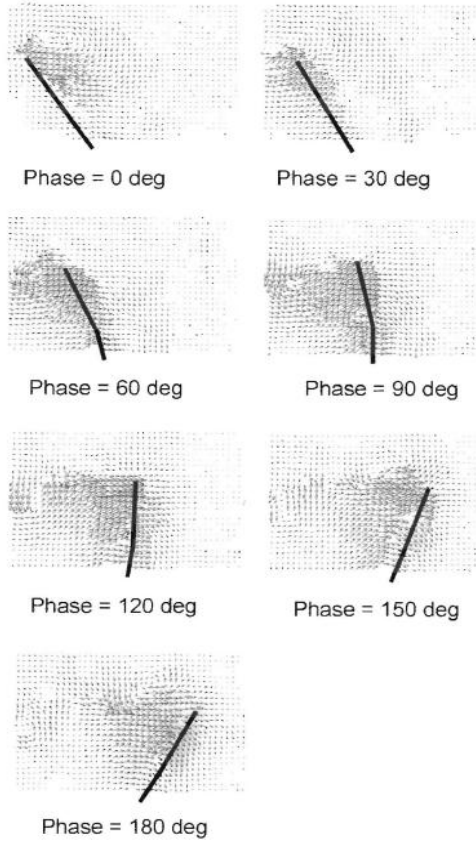


Fig.7. Change of fin shape and flow in one movement cycle ($H = 0$ (0mm) static condition, $T = 3$ s, $\theta_{max} = 30$ deg).

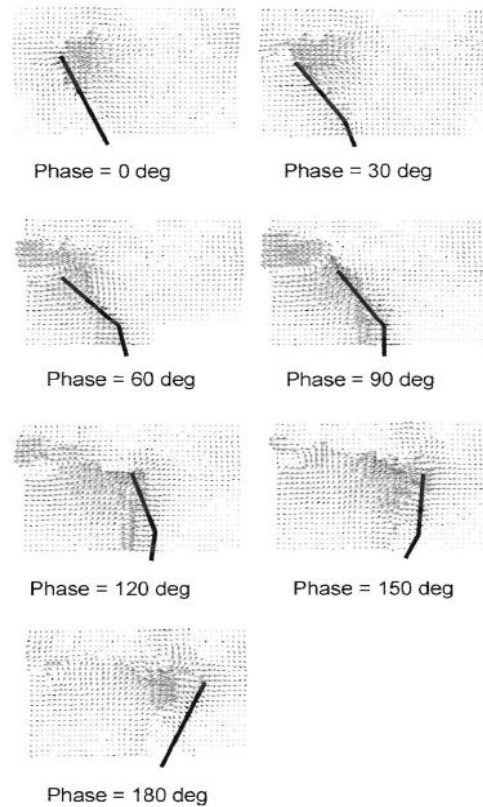


Fig. 8. Change of fin shape and flow in one movement cycle ($H = L$ (20 mm) static condition, $T = 3$ s, $\theta_{max} = 30$ deg).

3.2 Κατάσταση μεταβλητού ενεργού μήκους ελαστικής πλάκας

Σ' αυτήν την κατάσταση μεταβάλλαμε το ενεργό μήκος της ελαστικής πλάκας κατά την διάρκεια την κίνησης. Η εικόνα 9 (Figure 9) δείχνει την μεταβολή της ώσης σε σχέση με την μεταβολή του H κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Το H μεταβάλλεται έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουμε την ωστική δύναμη. Για τις φάσεις 0-90 deg και 180-270 deg, το H καθορίστηκε μηδενικό. Για τις φάσεις 90-180 deg και 270-360 deg, $H = 20$ χιλ, γιατί η ώση σ' αυτές τις φάσεις ήταν μεγαλύτερη με $H = 20$ χιλ στην στατική κατάσταση (βλέπε εικόνα 6). Στην εικόνα 9 φαίνεται ότι η ώση κατά την διάρκεια των φάσεων 0-90 και 180-270 είναι κοντά στις τιμές της ώσης όταν $H = 0$ χιλ (εικόνα 6), και οι τιμές της ώσης κατά την διάρκεια των φάσεων 90-180 και 270 έως 360 είναι κοντινές με τις αντίστοιχες των ίδιων φάσεων στην στατική

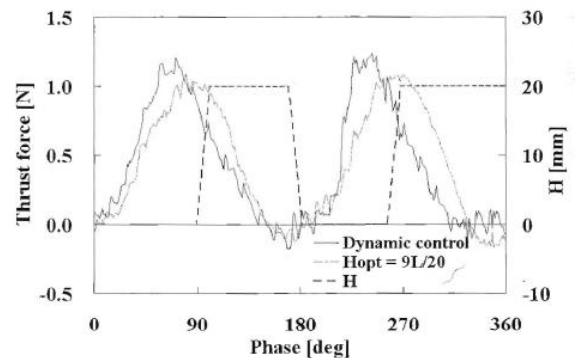


Fig. 9. Change of effective length of spring H and variation of x -directional thrust force in one movement cycle ($T = 3$ s, $\theta_{max} = 30$ deg). Thrust force for $H_{opt} = 9L/20$ (Static condition) is added for comparison.

κατάσταση όταν $H=20$ χιλ. Έτσι η μέση ωστική δύναμη στην κατάσταση μεταβλητού ενεργού μήκους H ($F_{xav}=0.424N$) είναι απ' αυτήν της στατικής κατάστασης με ενεργό μήκος H_{opt} ($F_{xav}=0.416N$).

3.2.2 Το σχήμα του πτερυγίου και η ροή γύρω απ' αυτό

Στην εικόνα 10 (Figure 10) φαίνεται η αλλαγή στο σχήμα του πτερυγίου και η ροή γύρω απ' αυτό κατά την διάρκεια μιας περιόδου, όπου το ενεργό μήκος της ελαστικής πλάκας μεταβάλλεται. Η παραμόρφωση του πτερυγίου και το πεδίο ροής στις φάσεις από 0-90deg και 90-180deg είναι παρόμοια με αυτά από 0-90 deg όταν $H=0$ και από 90-180 deg όταν $H=L$ αντίστοιχα.

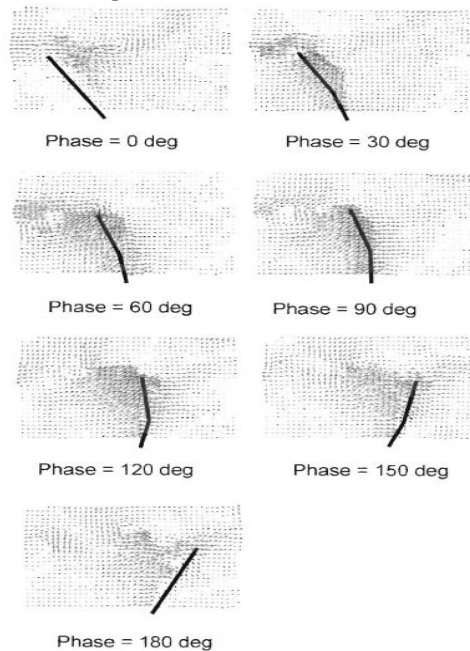


Fig. 10. Change of fin shape and flow in one movement cycle (H :dynamic condition (0-20 mm), $T = 3$ s, $\theta_{max} = 30$ deg).

4.Συμπεράσματα

- α) Η παραμόρφωση του πτερυγίου αυξάνεται με την αύξηση του ενεργού μήκους της ελαστικής πλάκας H
- β) Η διαφορά της ταχύτητας της ροής μεταξύ των δύο πλευρών του πτερυγίου επηρεάζει την ωστική δύναμη

1.2 A new system for analyzing swim fin propulsion based on human kinematic data

Guillaume Nicolas^a, Benoit Bideau^a, Nicolas Bideau^b, Briac Colobert^a, Gael de Guerroue^a, Paul Delamarche^a

^a Laboratoire M2S 'Physiologie et Biomechanique', Universite de Rennes 2

^b Institut de Recherche Mathematique de Rennes, Universite de Rennes 1

Περίληψη

Σ' αυτήν την εργασία παρουσιάζουμε έναν νέο μηχανισμό με το όνομα HERMES που καθιστά δυνατή την αξιολόγηση διαφορετικών πτερυγίων κολύμβησης κατά την διάρκεια κατάλληλα προσαρμοσμένης και επαναλαμβανόμενης κίνησης. Αυτός ο μηχανισμός αναπαράγει με ακρίβεια και αξιοπιστία τις κινήσεις των πτερυγίων προσαρμοσμένων στα ανθρώπινα πόδια και μας δίνει ως εκροή τις δυνάμεις μετρούμενες στην σύνδεση του αστραγάλου. Επτά πτερύγια με ποικίλα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά δοκιμάστηκαν. Για κάθε πτερύγιο μετρήθηκε η δύναμη στον αστράγαλο και η υδρομηχανική απόδοση (Ωφέλιμη εξαγωγήμη μηχανική ισχύς διαιρούμενη με την καταναλισκόμενη ισχύς στους κινητήρες). Οι αποδόσεις που μετρήθηκαν κατά τις δοκιμές ήταν υψηλές (κοντά στο 70% για ορισμένα πτερύγια) σε ένα μικρό εύρος του αριθμού Strouhal, με τις μέγιστες να εμφανίζονται σε $0.2 < St < 0.4$, όπως έχουν δείξει προηγούμενες μελέτες σε ιπτάμενα και υδρόβια ζώα. Ωστόσο μια ενδιαφέρουσα προοπτική γι' αυτήν την εργασία θα ήταν η ακριβής μελέτη της επίδρασης της κίνησης και των μηχανικών ιδιοτήτων του πτερυγίου στην απόδοση και στον ομόρροο αυτών.

Μέθοδος

Για να προσομοιωθεί η κίνηση του αστραγάλου, μελετήθηκε με την βοήθεια ψηφιακής κάμερας η φυσική κίνηση 10 δυτών πίνακας 1 (table1). Ο μηχανισμός αυτός είναι σε θέση να αναπτύσσει διαφορετικές ταχύτητες κατά την πάνω και κάτω κίνηση του πτερυγίου για την ακριβέστερη προσομοίωση διαφορετικών τεχνικών κολύμβησης. Ο μηχανισμός HERMES δίνει την δυνατότητα να ελεγχθούν τις εξής κινηματικές παραμέτρους:

- Η οριζόντια σταθερή ταχύτητα κολύμβησης μπορεί να μεταβληθεί από 0 έως 1m/s . (μέσος όρος των δυτών που μελετήθηκαν 0.88 m/s)
- Το κατακόρυφο πλάτος ταλάντωσης μπορεί να μεταβληθεί από 0-0.6 m (μέσος όρος 0,51 m)

- Οι περιστροφές του αστραγάλου ελέγχονται από μεταβλητής σκληρότητας ελατήρια (από 30 έως 85 Nmm⁻¹) ώστε να προσομοιωθούν οι κινήσεις που προέκυψαν απ' τα πειράματα

Οι δυνάμεις μετρήθηκαν στην σύνδεση του αστραγάλου με την βοήθεια τρισδιάστατου αισθητήρα.

Table 1
Kinematic parameters for scuba divers (S.D. means standard deviation).

	Age (years)	A (m)	f (Hz)	V (m s ⁻¹)	V _{down} /V _{up}	θ (rad)
Mean	26	0.51	0.63	0.88	1.09	0.02
S.D.	5	0.11	0.12	0.07	0.06	0.03
Min	20	0.41	0.58	0.81	1.02	-0.34
Max	33	0.74	0.89	0.98	1.15	0.36

Πτερύγια

Επτά διαφορετικά πτερύγια επιλέχτηκαν για δοκιμές με τα χαρακτηριστικά τους να φαίνονται στον πίνακα 2 (table 2). Η ακαμψία EI των πτερυγίων μετρήθηκε σύμφωνα με την απλή θεωρία της κάμψης ελαστικής δοκού του Euler (Zmparo et al. 2005a)

Table 2
Geometrical and mechanical characteristics for each swim fin. * means at the trailing edge.

Fin	Blade material	Vents	Ribs	Blade surface area (m ²)	Blade length (m)	Blade width* (m)	Fin mass (kg)	Flexural stiffness (N m ²)
1	Rubber/plastic	No	No	0.07	0.25	0.22	0.85	1.35
2	Rubber/plastic	Two holes	No	0.06	0.25	0.22	0.81	1.12
3	Rubber/plastic	No	No	0.10	0.40	0.22	1.03	3.56
4	Rubber/plastic	Two holes	Yes	0.09	0.40	0.22	0.98	2.87
5	Plastic	No	No	0.13	0.60	0.22	1.45	6.14
6	Fibreglass	Two holes	Yes	0.12	0.60	0.22	1.40	5.56
7	Carbon fibre	No	No	0.35	0.50	0.70	1.60	6.72

Μετρήσεις δυνάμεων και υπολογισμός υδρομηχανικού βαθμού απόδοσης

Όλα τα πτερύγια δοκιμάστηκαν σε βάθος 0.5m , με τις κινηματικές παραμέτρους να ανταποκρίνονται στις μέσες τιμές των πειραμάτων (table 1): εύρος ταλάντωσης A=0.5m, συχνότητα ταλάντωσης f=0.6Hz, οριζόντια ταχύτητα 'κόλυμησης' V=0.9m/s.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3 (figure 3) , το πτερύγιο εκτελεί μια κατακόρυφη κίνηση (heave) h(t) εύρους A, και μια γωνιακή κίνηση (pitch) θ(t) . Αν F_x(t) και F_y(t) είναι οι χρονικά μεταβαλλόμενες δυνάμεις στην οριζόντια κατεύθυνση (ώση) και στην κατακόρυφη κατεύθυνση (lift) αντίστοιχα, και M(t) η ροπή που δημιουργείται στο σύνδεσμο του αστραγάλου, τότε η μέση ωστική δύναμη υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{F}_x = \frac{1}{T} \int_0^T F_x(t) dt \quad (3)$$

Όπου T η διάρκεια της δειγματοληψίας ακεραίου αριθμού κύκλων. Έτσι ο υδρομηχανικός βαθμός απόδοσης μπορεί να υπολογιστεί ως η μέση ωφέλιμη ισχύς διαιρούμενη με την μέση μηχανική ισχύ που απορροφάται απ' τους κινητήρες. (Hover et al.,2004)

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \quad (4)$$

Όπου

$$P_{\text{output}} = \bar{F}_x \cdot U \quad (5)$$

Και

$$P_{\text{input}} = \frac{1}{T} \left(\int_0^T F_{y'}(t) \frac{dh}{dt} dt \right) + \frac{1}{T} \left(\int_0^T M(t) \frac{d\theta}{dt} dt \right) \quad (6)$$

Για να αξιολογήσουμε την απόδοση για διαφορετικές καταστάσεις κολύμβησης, δοκιμάστηκαν όλα τα πτερύγια για ποικίλους αριθμούς St. Όπου St ένας αδιάστατος αριθμός που σχετίζεται με τον σχηματισμό των δινών στον ομόρρο του σώματος και γι' αυτό μπορεί να έχει επίδραση στην απόδοση του πτερυγίου (Triantafyllou et al.2000; Taylor et al. 2003;Nicolas et al., 2007).

$$St = \frac{Af}{U} \quad (7)$$

Όπου f η συχνότητα των κύκλων, A ένα χαρακτηριστικό μήκος που σ' αυτήν την εργασία ορίστηκε ως η απόσταση που διανύει η ακμή εκφυγής κατά την διάρκεια μιας περιόδου, και U η οριζόντια ταχύτητα του φορείου (Triantafyllou et al.2000)

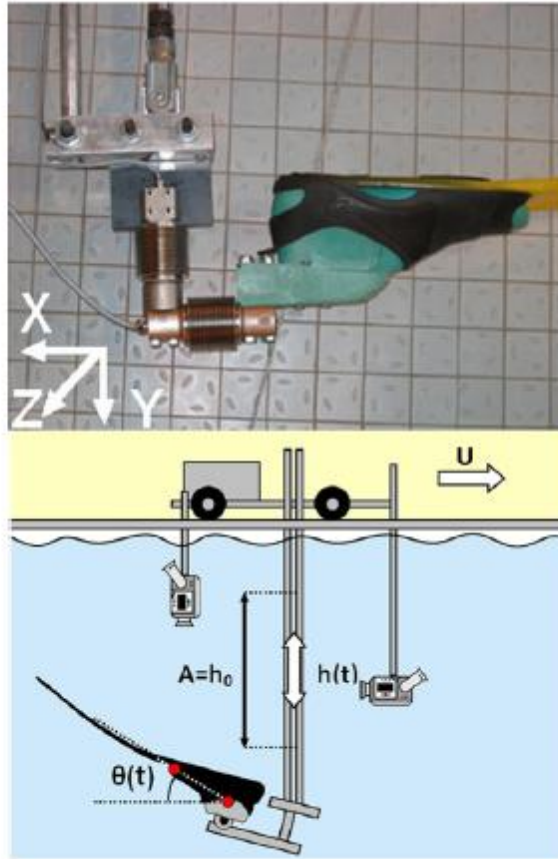


Fig. 3. Cameras placement and local frame placed on the foot for dynamic measurement.

Αποτελέσματα

Το πιο άκαμπτο πτερύγιο LF7 δημιουργεί την μεγαλύτερη δύναμη . Αντίθετα το SF2 ,με μια μεγάλη τρύπα κοντά στην ακμή εκφυγής δημιουργεί την μικρότερη δύναμη, 25% μικρότερη απ' αυτήν του LF7. Για να συγκριθούν οι διαφορετικές φάσεις του κύκλου , με τις δυναμικές μετρήσεις, τα δεδομένα των μετρήσεων συγχρονίστηκαν με την κίνηση του πτερυγίου εικόνα 6 (figure 6). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προς τα κάτω κίνηση του πτερυγίου ενεργοποιεί μεγαλύτερη μέγιστη δύναμη απ' αυτήν της προς τα πάνω κίνησης. Στην εικόνα 7 (figure 7) φαίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης όλων των πτερυγίων για διάφορους αριθμούς Strouhal. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέγιστη απόδοση παρουσιάζεται σε αριθμούς Strouhal από 0.3 έως 0.45. Ωστόσο, το εύρος αυτό φαίνεται να εξαρτάται απ' το σχήμα του πτερυγίου.

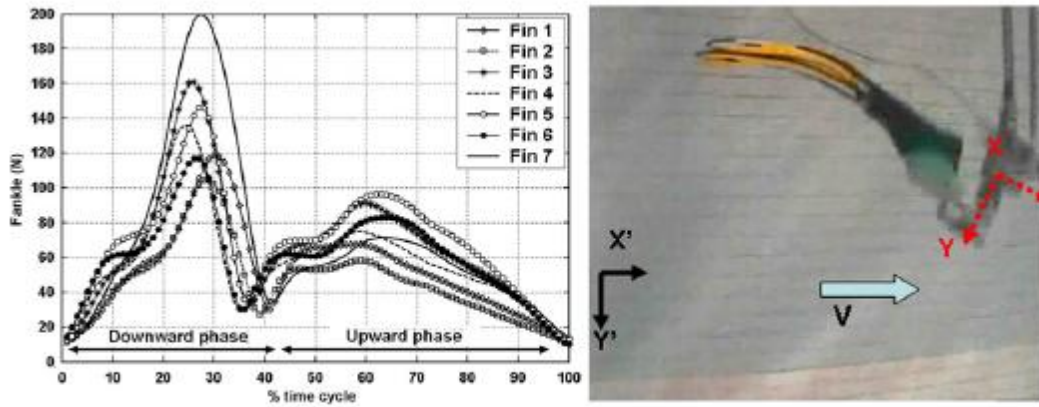


Fig. 6. Force intensity at ankle joint, for each swim fin.

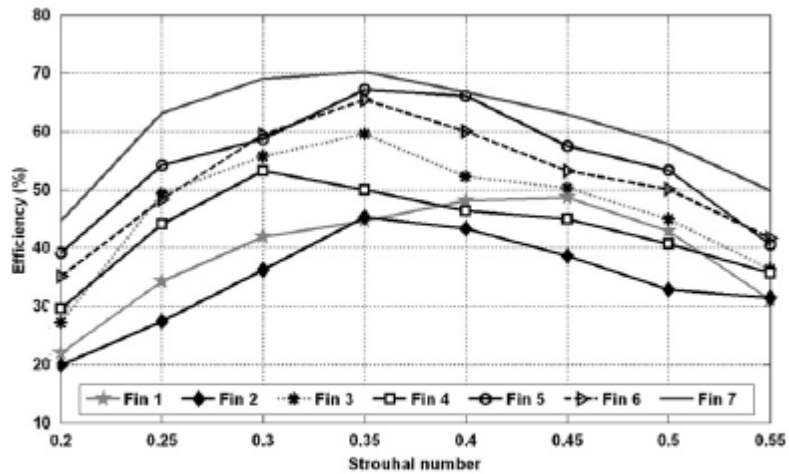


Fig. 7. Efficiency vs. Strouhal number for various swim fins.

1.3 Performance Evaluation of Swim Fins under Zero Translation Speed

Panagiotis Bardis and Demetri S. Mathioulakis
 School of Mechanical Engineering, Fluids Section
 National Technical University of Athens

Περίληψη

Σκοπός αυτής εργασίας είναι η αξιολόγηση της απόδοσης οκτώ πτερυγίων κολύμβησης (table 1) μέσω της μέτρησης της ωστικής και κάθετης δύναμης, με ταυτόχρονη βιντεοσκόπηση του σχήματος του πτερυγίου. Τα πτερύγια δοκιμάστηκαν σε δεξαμενή νερού υπό μηδενική ελεύθερη ροή και εκτελώντας κατακόρυφη και γωνιακή ταλάντωση με την βοήθεια μηχανισμού (figure 2). Στην μέση του μισού κύκλου, οι ωστικές δυνάμεις κυμάνθηκαν από 11.3N-27.8N και οι αντίστοιχες κάθετες δυνάμεις κυμάνθηκαν από 55.8N-84.8N. Πτερύγια με κοντή πλατιά λεπίδα και με στιβαρά παρατροπίδια στήριξης, αποδείχτηκαν πιο αποδοτικά απ' αυτά με μακριές στενές λεπίδες, μισού λόγου επιμήκους. Η απόδοση των πτερυγίων με μικρό λόγο επιμήκους σχετίζεται με το μέτρο ακαμψίας των παρατροπιδίων και της λεπίδας.

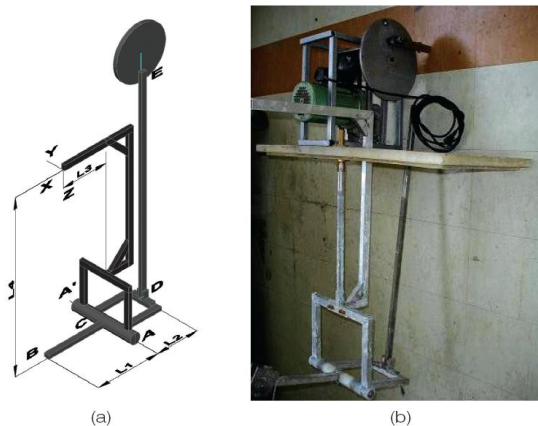


Figure 2. The Pitching and Plunging Mechanism, (a) A Schematic, (b) A Picture.

Table 1. Characteristics of Examined Swim Fins

Fin number	Length (m)	Width (m)	Aspect ratio	Blade Area (m ²)	Blade Stiffness	Blade Material	Stiffness of side rails	Blade-sole angle (deg)
1	0.60	0.18	0.32	0.10	stiff	Carbon fiber	weak	25
2	0.60	0.18	0.32	0.10	soft	Carbon fiber	weak	25
3	0.60	0.18	0.32	0.10	soft	Carbon fiber	rigid	25
4	0.62	0.225	0.39	0.13	stiff	Fiberglass	rigid	25
5	0.28	0.20	0.80	0.05	soft	Plastic	rigid	25
6	0.33	0.25	0.78	0.08	soft	Plastic	rigid	25
7	0.60	0.18	0.32	0.10	intermediate	Carbon fiber	weak	15
8	0.60	0.18	0.32	0.10	intermediate	Carbon fiber	weak	25

Μέθοδος

Οι δυνάμεις που ασκούνταν κατά την κίνηση του πτερυγίου, μετρήθηκαν μόνο στην μέση κάθε μισού κύκλου που παίρνουν και την μέγιστη τιμή τους. Ο συντελεστής απόδοσης η υπολογίστηκε όπως και στην εργασία των Minak et al.:

$$\eta = \frac{F_{xf}}{\sqrt{F_{xf}^2 + F_{zf}^2}} \quad (7)$$

Όπου F_{xf} η ωστική δύναμη και F_{zf} η αντίστοιχη πλάγια δύναμη.

Συμπεράσματα

Μια τυπική κυματομορφή της κάθετης δύναμης (κυματομορφή με το μεγαλύτερο πλάτος) και της αντίστοιχης ροπής (κυματομορφή με το μικρότερο πλάτος) , φαίνονται στο σχήμα 4 (figure 4). Χρησιμοποιώντας φωτοδίοδο εξακριβώθηκε ότι το μέγιστο της κάθετης δύναμης εμφανίζεται στην μέση κάθε μισού κύκλου. Οι θετικές τιμές του σήματος της δύναμης αντιστοιχούν στην πάνω κίνηση του πτερυγίου και οι αρνητικές στην κάτω κίνηση. Είναι προφανές ότι πρακτικά δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του θετικού και του αρνητικού μέγιστου της κάθετης δύναμης. Για να συσχετιστούν οι δυναμικές μετρήσεις με την παραμόρφωση του πτερυγίου , επιλέχτηκαν δέκα χρονικές στιγμές ανά κύκλο και οι αντίστοιχες εικόνες απ' το βίντεο, θεωρώντας ότι η χρονική στιγμή μηδέν είναι η αρχή της πάνω κίνησης και $T_a=1.6$ sec η περίοδος ταλάντωσης του πτερυγίου.

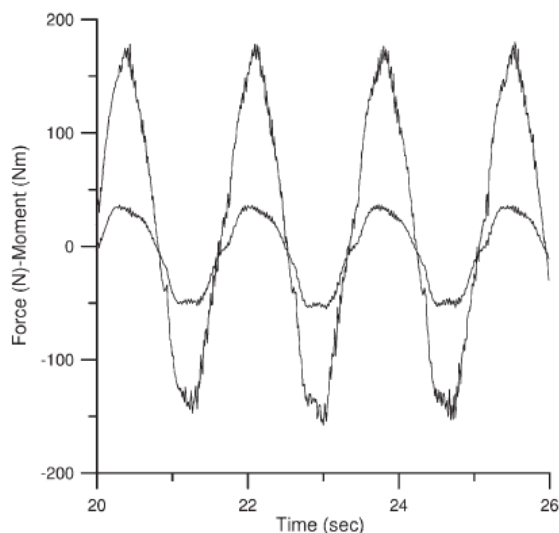


Figure 4. Vertical Force and Y-Moment Measured by the Balance

Η μετρούμενη ωστική δύναμη στην μέση κάθε μισού κύκλου πήρε τιμές από 11.3N μέχρι 27.8 N , και οι αντίστοιχες πλάγιες δυνάμεις από 55.8N έως 84.8N. Αυτές οι τιμές διαιρούμενες από την επιφάνεια του πτερυγίου κυμάνθηκαν από 113Pa μέχρι 348Pa για την ώση και από 558Pa μέχρι 1060Pa για την πλάγια δύναμη. Η απόδοση πήρε τιμές από 19.84% έως 35.21% , πίνακας 3 (Table 3)

Table 3. Forces and Efficiency Index of Examined Fins

Fin number	Thrust (N)	Thrust/Blade Area (Pa)	Vertical Force (N)	Vertical Force/Blade Area (Pa)	Total Force (N)	Efficiency index (%)
1	11.3	113	55.8	558	56.93	19.84
2	14.7	147	62.7	627	64.4	22.82
3	21.4	214	74.2	742	77.22	27.71
4	24.6	189	81.6	628	85.22	28.86
5	16.1	322	42.8	856	45.72	35.21
6	27.8	348	84.8	1060	89.24	31.15
7	20.0	200	72.0	720	74.72	26.76
8	16.8	168	69.4	694	71.40	23.52

Παρακάτω αναλύεται η απόδοση του κάθε πτερυγίου σε σχέση με την παραμόρφωσή του.

Υψηλής ακαμψίας λεπίδα στηριζόμενη από αδύναμα παρατροπίδια (πτερύγιο 1)

Η χαρακτηριστική συμπεριφορά αυτού του πτερυγίου είναι ότι η ακμή εκφυγής αυτού ακολουθεί την κίνηση του ποδιού με καθυστέρηση, σε σημείο που αυτή να μένει σχεδόν ακίνητη στο μεγαλύτερο μέρος της προς τα κάτω κίνησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 5 (figure 5). Απ' την άλλη μεριά στο πρώτο μισό της προς τα πάνω κίνησης του ποδιού, το 1/3 της λεπίδας συνεχίζει να κινείται προς τα κάτω. Η ώση αυτού του συγκεκριμένου πτερυγίου ήταν η χαμηλότερη 11.3 N καθώς επίσης και η κάθετη δύναμη 55.8N. Ο συντελεστής απόδοσης πήρε την τιμή 19.84%

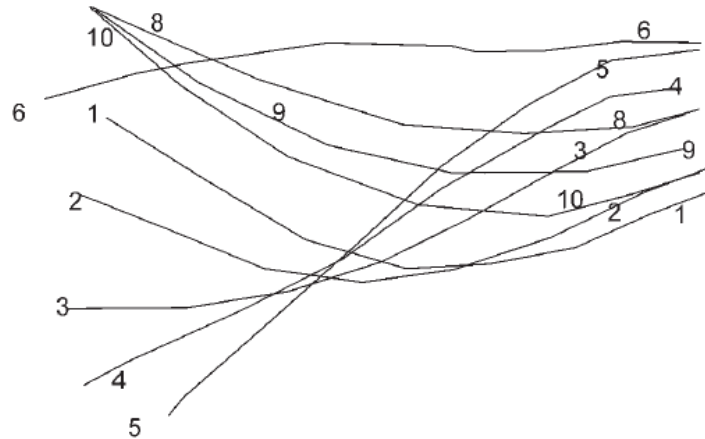


Figure 5. Fin 1 Deformation

Εύκαμπτη λεπίδα στηριζόμενη από αδύναμα παρατροπίδια (πτερύγιο 2)

Η στιβαρή λεπίδα της προηγούμενης περίπτωσης αντικαταστάθηκε από μια πιο εύκαμπτη με τις ίδιες διαστάσεις και σχήμα καθώς και τα ίδια παρατροπίδια στήριξης. Σ' αυτήν την περίπτωση η ώση αυξήθηκε σε 14.7 N , η κάθετη δύναμη σε 62.7 N , και η απόδοση σε 22.82%. Στην εικόνα 6 (figure 6) φαίνεται ότι παραμορφώνεται περισσότερο σε σύγκριση με την προηγούμενη λεπίδα λόγω της μειωμένης ακαμψίας. Σ' αυτό φαίνεται ότι οφείλεται η αύξηση της ώσης καθώς είναι γνωστό απ' την μηχανική των ρευστών ότι οι επίπεδες λεπίδες δέχονται μικρότερη αντίσταση απ' τις κυρτές σε γωνία πρόσπτωσης 90 deg. Ακόμα περισσότερο οι κυρτές υδροτομές παράγουν μεγαλύτερη ώση απ' τις επίπεδες. Επιπρόσθετα κατά το δεύτερο μισό της προς τα κάτω κίνησης η ακμή εκφυγής δεν παρέμενε ακίνητη πράγμα που επιδρά στην μάζα του νερού που ωθείτε απ' το πτερύγιο.

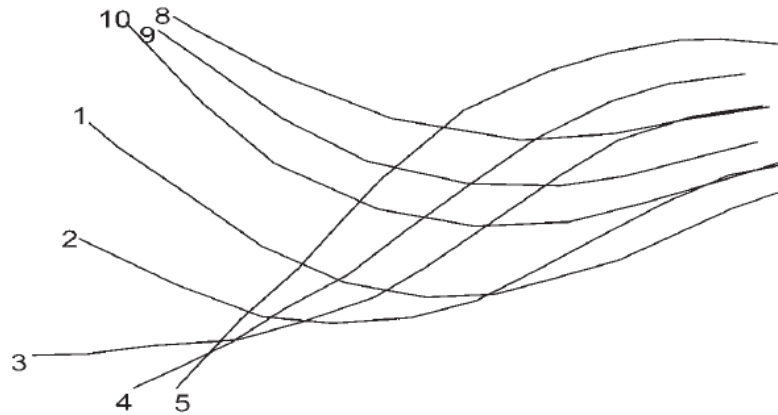


Figure 6. Fin 2 Deformation

Έτσι μπορούμε να συμπεραίνουμε ότι στην περίπτωση αδύναμων παρατροπιδίων στήριξης είναι προτιμότερη η χρήση εύκαμπτων λεπίδων ώστε να βελτιώσουμε την απόδοση.

Εύκαμπτη λεπίδα στηριζόμενη από άκαμπτα παρατροπίδια (πτερύγιο 3)

Χρησιμοποιώντας την ίδια εύκαμπτη λεπίδα με το πτερύγιο 2 αλλά πιο στιβαρά παρατροπίδια, παρατηρήθηκε αύξηση της ώσης (21.4 N), και της απόδοσης (27.71%), και αντίστοιχη πλάγια δύναμη 74.2 N. Η παραμόρφωση του πτερυγίου φαίνεται στο σχήμα 7 (figure 7)

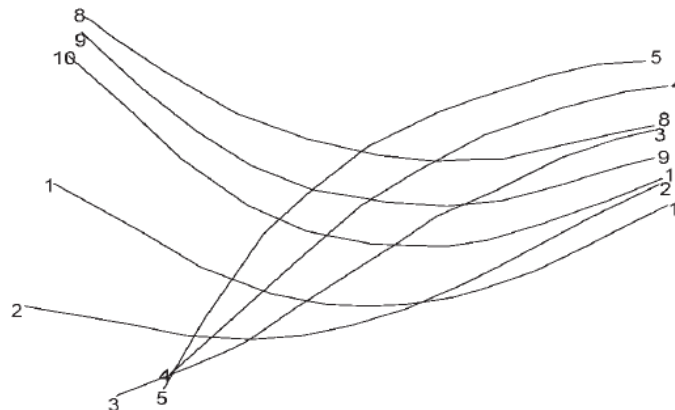


Figure 7. Fin 3 Deformation

Άκαμπτη λεπίδα στηριζόμενη από στιβαρά παρατροπίδια (πτερύγιο 4)

Ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό αυτού του πτερυγίου συγκρινόμενο με τα προηγούμενα είναι ότι η μέση περιοχή της λεπίδας μεταξύ των παρατροπιδίων ήταν εύκαμπτη, επιτρέποντας στην επιφάνειά του να παίρνει ένα σχήμα

κουτάλας κατά μήκος του πλάτους του. Σ' αυτήν την περίπτωση η ώση μετρήθηκε 24.6 N , και η πλάγια δύναμη 81.6N. Η παραμόρφωσή του κατά την διάρκεια της κίνησης φαίνεται στην εικόνα 8 (figure 8).

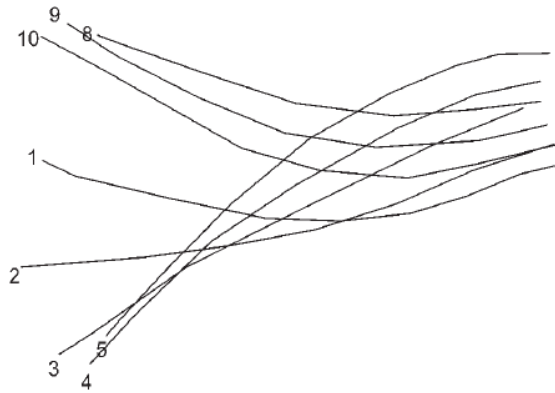


Figure 8. Fin 4 Deformation

Πτερύγια μεγαλύτερου λόγου aspect ratio =(πλάτους^2)/(επιφάνεια)

Ένα πλαστικό πτερύγιο (fin 5) μήκους 28 εκ και πλάτους 20 εκ. δοκιμάστηκε και βρέθηκε πιο αποδοτικό απ' τα προηγούμενα , με το συντελεστή απόδοσής του να είναι 35.21%. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πτερύγια η κατεύθυνση της λεπίδας αλλάζει με μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με την αλλαγή κατεύθυνσης του ποδιού, πράγμα που φαίνεται στην εικόνα 9 (figure 9).

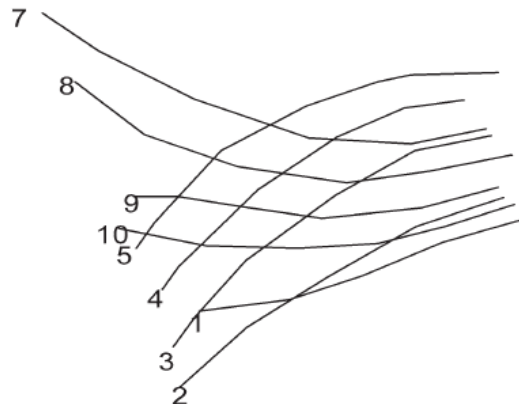


Figure 9. Fin 5 Deformation

Ένα αρνητικό σε αυτή την περίπτωση ήταν η αυξημένη αδιάστατη πλάγια δύναμη (856Pa) και ένα θετικό η αυξημένη αδιάστατη ώση 322Pa. Ωστόσο λόγω των μικρών διαστάσεων του πτερυγίου οι αντίστοιχες δυνάμεις μετρήθηκαν 42.8N και 16.1N.

Ένα εξίσου αποδοτικό πτερύγιο ήταν το πλαστικό πτερύγιο 7, με aspect ratio=0.78 και για το οποίο η απόδοση μετρήθηκε ίση με 31.15%. Η ώση του ήταν 27.8N και η πλάγια δύναμή του 84.8 N. Μια βασική διαφορά με το

προηγούμενο πτερύγιο ήταν ότι λόγω διαμόρφωσης έπαιρνε ένα σχήμα κουτάλας κατά μήκος του πλάτους του. Όπως φαίνεται στην εικόνα 10 (figure 10), στο τέλος της κάτω κίνησης η λεπίδα του πτερυγίου έχει ήδη επιστρέψει στο αρχικό του σχήμα.

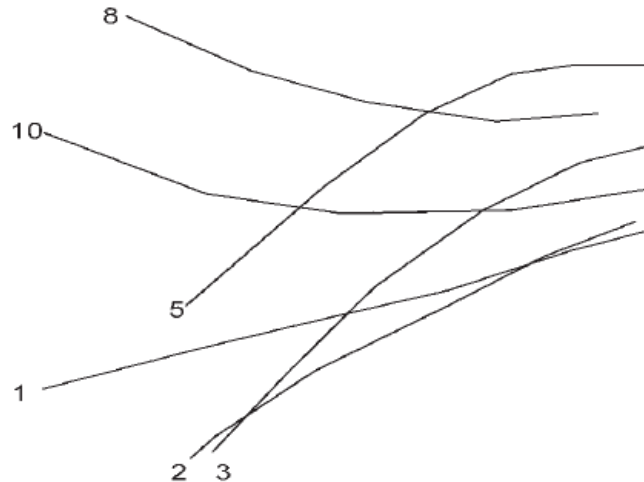


Figure 10. Fin 6 Deformation

Σύμφωνα με τον Freymouth η αύξηση του λόγου του πλάτους της κατακόρυφης ταλάντωσης ως προς το μήκος της χορδής του πτερυγίου, έχει ευνοϊκή επίδραση στην παραγόμενη ώση, πράγμα που μπορεί να εξηγήσει την καλύτερη απόδοση των πτερυγίων με μικρότερο μήκος, λαμβάνοντας υπόψιν ότι το πλάτος της κατακόρυφης (heave) ταλάντωσης παραμένει σταθερό.

Η γωνία μεταξύ της λεπίδας και της θήκης του πέλματος του ποδιού

Δύο πανομοιότυπα πτερύγια (πτερύγια 7&8) με τα μέτρα των εν λόγω γωνιών να είναι 15 και 25 deg αντίστοιχα, μετρήθηκαν. Βρέθηκε ότι το πτερύγιο με την μικρότερη γωνία ήταν πιο αποδοτικό, παρουσιάζοντας κατά 19% μεγαλύτερη ώση και κατά 3.7% μεγαλύτερη πλάγια δύναμη.

Η κίνηση της ακμής εκφυγής του πτερυγίου

Η ακμή εκφυγής παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή της ώσης, λόγω της δημιουργίας δινών στον ομόρρου. Στην εργασία των Saminy et al., χρησιμοποιώντας την θεωρία του Lighthill's, η ώση είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας της ακμής εκφυγής. Ακόμα περισσότερο στην εργασία των Heathcote et al., εξετάστηκε η παραγωγή ώσης από εύκαμπτη ταλαντευόμενη πλάκα σε μηδενική ελεύθερη ροή, βρέθηκε ότι το πλάτος και η

γωνία φάσης της κίνησης της ακμής εκφυγής επιδρά στην ενέργεια των δινών και άρα στην παραγόμενη ώση. Είναι προφανές ότι η ισχύς των δημιουργούμενων δινών είναι άξουσα συνάρτηση της ταχύτητας της ακμής εκφυγής, αφού είναι η λεπίδα αυτή που αναγκάζει το ρευστό να κινηθεί κατά μήκος της και έτσι να δημιουργήσει δίνες. Ωστόσο, μια απαραίτητη συνθήκη για δημιουργία μεγάλων ωστικών δυνάμεων είναι , η ακμή εκφυγής της λεπίδας να αλλάζει κατεύθυνση στο πρώτο μισό του κάθε μισού κύκλου, όπου και λαμβάνει χώρα η επιτάχυνση της λεπίδας του πτερυγίου.

Συμπερασματικά

Ανεξαρτήτως απ' το χρησιμοποιούμενο υλικό για την κατασκευή της λεπίδας, βρέθηκε ότι τα πιο αποδοτικά πτερύγια εμφάνιζαν μικρή διαφορά φάσης μεταξύ της ακμής εκφυγής και της κίνησης των δακτύλων του ποδιού. Αυτό παρατηρήθηκε σε κοντά πλατιά πτερύγια στηριζόμενα από στιβαρά παρατροπίδια. Εν αντιθέσει, η απόδοση των μακριών στενών λεπίδων ήταν μικρότερη και ποικίλει με την ελαστικότητα των παρατροπιδίων στήριξης.

1.4 Wave drag on human swimmers

Ross Vennell^a, Dave Pease^b, Barry Wilson^b

^aDepartment of Marine Science, University of Otago, New Zealand

^bSchool of physical education, University of Otago, New Zealand
journal of Biomechanics 39 (2006)

Περίληψη

Οι μετρήσεις αντίστασης σε ανθρώπινο ομοίωμα έδειξαν, ότι η συνολική αντίσταση στην επιφάνεια είναι πάνω από 2.4 φορές μεγαλύτερη απ' την αντίσταση πλήρους βύθισης. Αυτή η πρόσθετη αντίσταση οφείλεται στην δημιουργία κυματισμών στον ομόρροο πίσω απ' το ομοίωμα (αντίσταση κυματισμού). Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η αντίσταση κυματισμού είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα της αντίστασης, 50-60% της συνολικής σε ταχύτητα 1.7m/s. Μετρήσεις σε ανθρώπινες ταχύτητες κολύμβησης πάνω από ένα μέτρο έδειξαν ότι η αντίσταση κυματισμού είναι μικρότερη από 5% της συνολικής. Η αντίσταση κυματισμού αυξάνεται ραγδαία σε βάθη μικρότερα από 0.5-0.7 m , μέχρι ένα μέγιστο 60% της συνολική αντίστασης του ομοιώματος (100N) , όταν αυτό ρυμουλκείται στην επιφάνεια με ταχύτητα 1.7 m/s.

Εισαγωγή

Υπάρχουν τρία κύρια είδη αντίστασης στα σκάφη επιφανείας: η αντίσταση τριβής (λόγω συνεκτικότητας), η αντίσταση μορφής που συνδέεται με την κατανομή της πίεσης γύρω απ' την γάστρα και τον τυρβώδη ομόρροο, και η αντίσταση κυματισμού. Η αντίσταση κυματισμού οφείλεται στην ενέργεια που καταναλώνεται για τον σχηματισμό ενός συστήματος κυματισμού πίσω απ' το πλεούμενο. Η αντίσταση κυματισμού εξαρτάται απ' την ταχύτητα και πιο συγκεκριμένα απ' τον αριθμό Froude

$$Fr = V / (g \cdot L)^{0.5}$$

Όπου V η ταχύτητα του σκάφους, $g=9.81\text{m/s}^2$, L το μήκος του σκάφους. Μια τυπική καμπύλη αντίστασης κυματισμού φαίνεται στην εικόνα 1 (figure 1) . Σε τιμές αριθμού $Fr=0.42$, το μήκος του δημιουργούμενου κύματος είναι ίσο με το μήκος του σκάφους, και αντίστοιχη ταχύτητα είναι η μέγιστη που μπορεί να επιτευχθεί από σκάφος εκτοπίσματος.

Μετρήσεις

Οι μετρήσεις έγιναν σε δεξαμενή πλάτους 2.5μέτρα βάθους ,1.5 μ βάθους και ενεργού μήκους 10 μέτρων. Το ομοίωμα ρυμουλκήθηκε σε ταχύτητες από 0.4 m/s μέχρι 2.6 m/s με βήμα 0.2 m/s και σε βάθη 0, 0.1, 0.3, 0.6 , 1 m απ' την ελεύθερη επιφάνεια.

Αποτελέσματα

Καμπύλες αντίστασης

Η μεταβολή της συνολικής αντίστασης σε σχέση με την ταχύτητα και στα διάφορα βάθη , φαίνονται στο σχήμα 3 (figure 3).

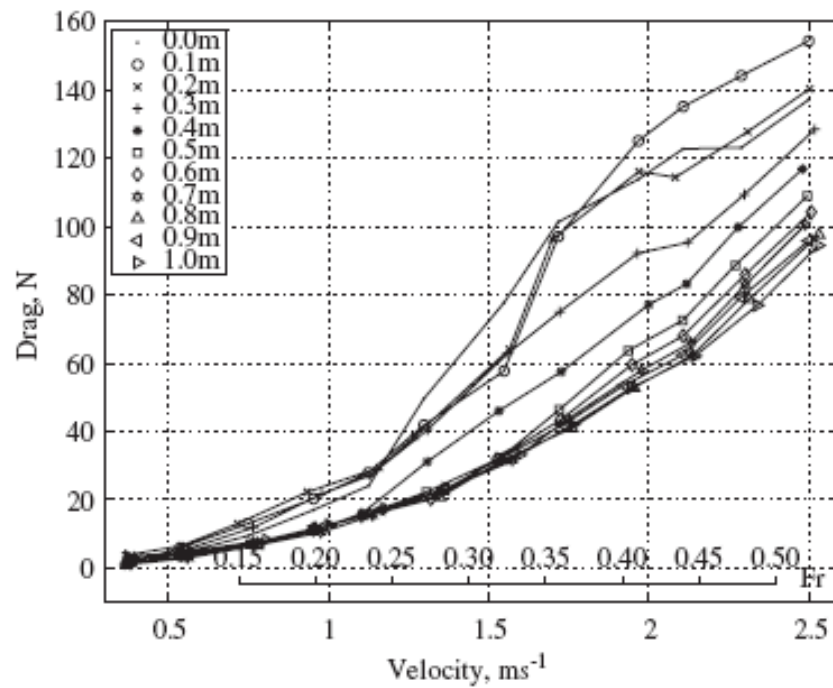


Fig. 3. Passive drag versus velocity for male mannequin at tow depths of 0.0–1.0m. The Froude number, Fr , axis is based on finger to toe length.

1.5 Evaluation of the performance of free diving fins

G. Minak

Mechanical Engineering Department DIEM, University of Bologna, Italy

Μέθοδος

Εστίασαμε στην μελέτη ενός πολύ διαδεδομένου περυγίου ελεύθερης κατάδυσης, κατασκευασμένο από τρία διαφορετικά θερμοπλαστικά υλικά. Τέσσερα επιμηκυνσιόμετρα κολλήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις στην λεπίδα, και προστατεύθηκαν με στρώμα σιλικόνης. Τα περύγια βαθμονομήθηκαν με ανάρτηση βαρών. Οι δοκιμές έγιναν σε πισίνα κολύμβησης όπως φαίνεται στην εικόνα 2 (figure 2), ώστε να εκτιμηθεί και η ώση που εφαρμοζόταν απ' τον δύτη στον τοίχο. Η ώση σχετίστηκε με την παραμόρφωση του περυγίου, ώστε σύμφωνα με την βαθμονόμηση να εκτιμηθεί η δύναμη που εφαρμόζει ο δύτης στα περύγια. Η ώση μετρήθηκε από δύο αδιάβροχα επιμηκυνσιόμετρα. Διαφορετικές τεχνικές και ρυθμοί κολύμβησης δοκιμάστηκαν, χρησιμοποιώντας έναν προπονητή έναν έμπειρο και έναν άπειρο δύτη, ίδιου βάρους και ύψους.

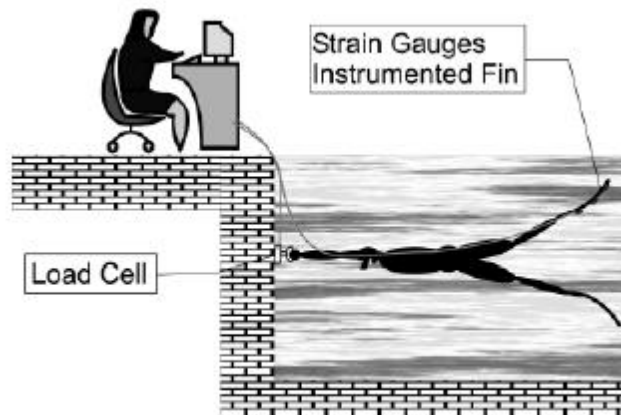


Figure 2 In pool experiment

Οι δύτες για διάστημα 30-45 δευτερολέπτων κολυμπούσαν μόνο με χρήση των ποδιών τους, σπρώχνοντας τα επιμηκυνσιόμετρα που ήταν αναρτημένα στον τοίχο της πισίνας σε βάθος 2.5-3 μέτρων. Οι εικόνες που πάρθηκαν απ' την καταγραφή των πειραμάτων σε βίντεο, συσχετίστηκαν με τις δυναμικές μετρήσεις, ώστε να συνδυαστούν με την τεχνική και τον ρυθμό κολύμβησης.

Αποτελέσματα

Στο σχήμα 4 (figure 4) φαίνονται οι δυνάμεις που καταγράφουν τα δύο επιμηκυνσιόμετρα που σπρώχνει ο δύτης. Η απλή άθροιση των δύο αυτών

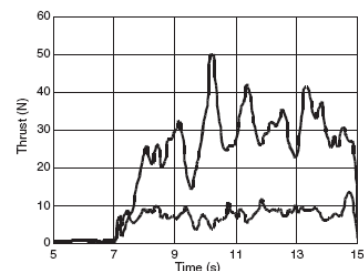


Figure 4 Load cell data

καναλιών μας δίνει την συνολική ώση. Στην εικόνα 5 (figure 5) φαίνονται πέντε κρίσιμα σημεία στο σήμα της ώσης που απομονώθηκαν και συσχετίστηκαν με τις εικόνες απ' τα βίντεο των πειραμάτων. Η μέγιστη τιμή της ώσης αντιστοιχεί στο μέγιστο άνοιγμα των ποδιών, ενώ η ελάχιστη όταν τα πόδια σχεδόν ευθυγραμμίζονται με το υπόλοιπο σώμα.

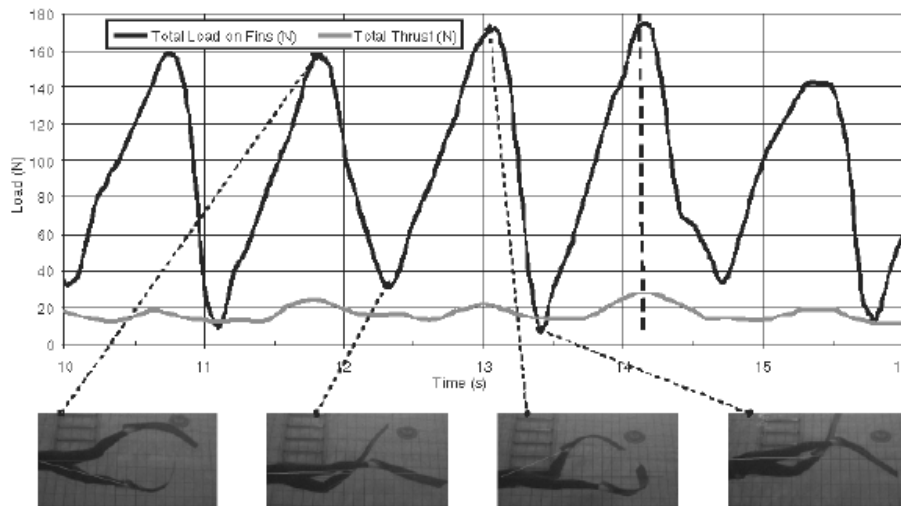


Figure 5 Kicking cycle analysis

Οι μέγιστες τιμές που καταγράφονται απ' τα επιμηκυσιόμετρα που βρίσκονται στο περύγιο είναι σε φάση με τις μέγιστες τιμές της ώσης. Στην εικόνα 6 (figure 6) συγκρίνονται τα σήματα απ' τους τρεις κολυμβητές (προπονητή, έμπειρο, & άπειρο). Στην πραγματικότητα μόνο ο προπονητής είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει σωστά τα περύγια, επιτυγχάνοντας με έναν συμμετρικό τρόπο την μέγιστη ώση. Ο άπειρος κολυμβητής κολυμπά με έναν πολύ ασύμμετρο τρόπο, προκαλώντας πολύ υψηλές δυνάμεις στα περύγια χωρίς να συμβαίνει το ίδιο με την παραγόμενη ώση, που πολλές φορές παίρνει και μηδενικές τιμές. Ο έμπειρος δύτες τοποθετείται μεταξύ των δύο προηγούμενων.

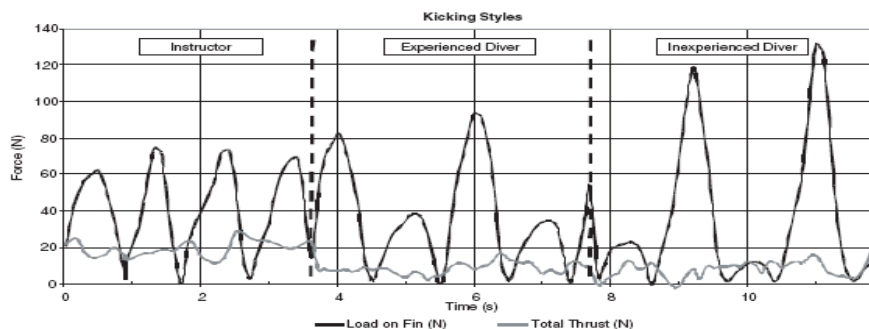


Figure 6 Comparison of three athletes

Στην εικόνα 7 (figure 7) φαίνονται δύο λάθη στην τεχνική κολύμβησης που προέκυψαν απ' των συσχετισμό των δυναμικών μετρήσεων με τις εικόνες. Στην πρώτη περίπτωση το περύγιο κάμπτεται σε κάθετο με το συνηθισμένο επίπεδο γιατί ο δύτες αποτυγχάνει να κρατήσει το πέλμα του ευθύγραμμο με το πόδι, κι

έτσι η ώση δεν αυξάνεται λόγω της μειωμένης απόδοσης του περυγίου. Στην δεύτερη περίπτωση, ο αθλητής λυγίζει το γόνατό του, μειώνοντας την δύναμη που εφαρμόζεται στο περύγιο, με αποτέλεσμα την μείωση της ώσης.

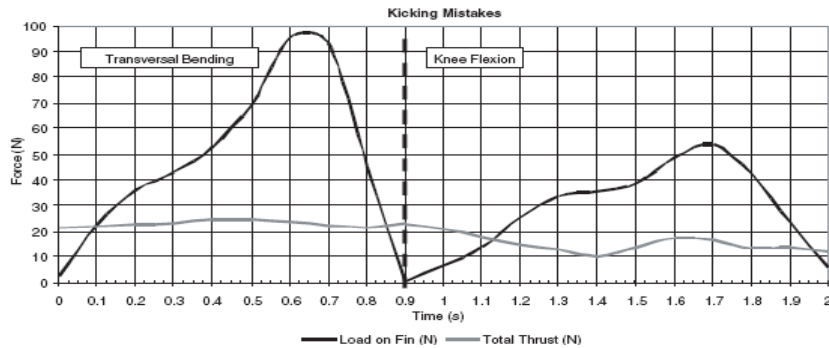


Figure 7 Kicking mistakes

Για την αξιολόγηση των περυγίων ορίζεται ο συντελεστής απόδοσης:

$$e = \frac{\langle F_l \rangle}{\langle F_f \rangle}$$

Όπου F_l η ώση και F_f η δύναμη που εφαρμόζεται απ' τον αθλητή στα περύγια. Η απόδοση διαφέρει από αθλητή σε αθλητή και για τον προπονητή είναι αύξουσα συνάρτηση της συχνότητας κολύμβησης.

Οι τιμές της απόδοσης ήταν 15% για τον άπειρο αθλητή, 21% για τον έμπειρο και 26% για τον προπονητή για ρυθμό κολύμβησης 1 Hz που είναι μια τυπική τιμή για ελεύθερη κολύμβηση.

Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό σημείωμα

Oscillating foils of high propulsive efficiency

J.M. ANDERSON, K. STREITLIEN, D.S. BARRET, M.S. TRIANTAFYLLOU
Department of ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology
Cambridge USA

Πολλά υδρόβια και άλλα ιπτάμενα ζώα χρησιμοποιούν τα ουραία πτερύγιά τους ως ωστικό και ελικτικό μηχανισμό. Οι ουρές κάποιων απ' τα πιο γρήγορα υδρόβια ζώα μπορούν να προσομοιωθούν ως πτερύγια μεγάλου λόγου επιμήκους. Λόγω της υψηλής τους απόδοσης ως ωστικοί μηχανισμοί τα ταλαντευόμενα πτερύγια μελετηθεί αρκετά με θεωρητικές, αριθμητικές (Lighthill 1975; Wu 1961; Longvinovich 1971; Cheng and Murillo 1984; Karpouzian, Spedding and Cheng 1990; McCune & Tavares 1993) και πειραματικές τεχνικές (Scherer 1968; De Laurier & Harris 1982; Lai, Bose & McGregor 1993).

Ένα πτερύγιο σε σταθερή εμπρόσθια κίνηση συνδυασμένη με μια αρμονική κατακόρυφη (heaving) και γωνιακή (pitching) κίνηση, παράγει ώση μέσω του σχηματισμού ροής, κινούμενης απ' την ακμή πρόσπτωσης (leading edge) στην ακμή εκφυγής (trailing edge), η οποία αν παρατηρηθεί πάνω από κάποια περίοδο ταλάντωσης έχει την μορφή πίδακα (jet flow). Αυτός ο πίδακας είναι ασταθής και λειτουργεί ως μικρού εύρους ενισχυτής των διαταραχών της ροής. Η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των ασταθών δινών δημιουργούμενων απ' το πτερύγιο και των εσωτερικών δυνάμεων του ασταθούς ομόρρου, έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλης κλίμακας δινών. Ο αριθμός των δινών που δημιουργούνται ανά μισό κύκλο, ποικίλουν με το εύρος και την συχνότητα της ταλάντωσης. Triantafyllou & Gopalkrishnan (1991) και με το σχήμα της κυματομορφής.

Βασικές παράμετροι ταλαντευόμενου πτερυγίου

Στην εικόνα 1 (figure 1), φαίνεται ένα πτερύγιο μεγάλου λόγου επιμήκους με μήκος χορδής c , κινούμενο οριζόντια με σταθερή ταχύτητα U και κάνοντας μια αρμονική κατακόρυφη κίνηση $h(t)$ (heaving) πλάτους h και συχνότητας ω , και μια αρμονική γωνιακή κίνηση (pitching) $\theta(t)$ πλάτους θ_0 και συχνότητας ω . Η γωνιακή κίνηση προηγείται κατά μια φάση ψ της κατακόρυφης κίνησης.

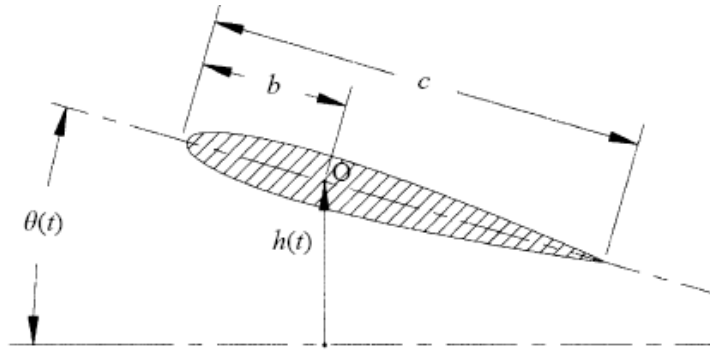


FIGURE 1. Definition of principal motion parameters, heave $h(t)$ and pitch $\theta(t)$ for an oscillating foil.

Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες, στο πτερύγιο ασκούνται οι χρονικά μεταβαλλόμενες δυνάμεις $X(t)$, $Y(t)$ στην διεύθυνση x (οριζόντια) και στην διεύθυνση y (κατακόρυφη), αντίστοιχα; και μια ροπή $Q(t)$. Θεωρείται ότι το πτερύγιο περιστρέφεται γύρω απ' το σημείο O που απέχει κατά b απ' την ακμή πρόσπτωσης. Αν T είναι η περίοδος της ταλάντωσης συμβολίζουμε με F την μέση τιμή της $X(t)$, και με P την μέση καταναλισκόμενη τιμή ανά κύκλο.

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt, \quad (2.1)$$

$$P = \frac{1}{T} \left(\int_0^T Y(t) \frac{dh}{dt}(t) dt + \int_0^T Q(t) \frac{d\theta}{dt}(t) dt \right). \quad (2.2)$$

Ορίζουμε ως συντελεστή ισχύος c_P :

$$c_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S_o U^3}, \quad (2.3)$$

Αδιαστατοποιούμε την ωστική δύναμη F για να προκύψει ο συντελεστής ώσης c_T :

$$c_T = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho S_o U^2}, \quad (2.4)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, και S_o η επιφάνεια της μιας πλευράς του πτερυγίου.

Ο συντελεστής πρόωσης, η_P , ορίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης προς την καταναλισκόμενη ισχύ

$$\eta_P = \frac{FU}{P} \quad (2.5)$$

Έτσι ώστε:

$$\eta_P = c_T / c_P$$

Υπάρχουν πέντε βασικές παράμετροι που επιδρούν στο πρόβλημα, πέρα απ' το σχήμα του προφίλ του πτερυγίου:

- Το πλάτος της κατακόρυφης κίνησης προς το μήκος της χορδής $h'=h_0/c$
- Το πλάτος της γωνιακής κίνησης θ_0
- Η φασική γωνία ψ μεταξύ της κατακόρυφης (heave) και γωνιακής (pitch) κίνησης. (η γωνιακή ταλάντωση προηγείται της κατακόρυφης ταλάντωσης)
- Η απόσταση b προς το μήκος της χορδής c $b'=b/c$
- Η αδιάστατη συχνότητα , αριθμός Strouhal.
Ο αριθμός Strouhal ορίζεται ως:

$$St = \frac{fA}{U}, \quad (2.6)$$

Όπου f η συχνότητα ταλάντωσης του πτερυγίου σε Hz, $f=\omega/(2\pi)$ και A ένα χαρακτηριστικό πλάτος του δημιουργούμενου ομόρρου (wake). Αφού αυτό το πλάτος είναι άγνωστο πριν τις μετρήσεις λαμβάνεται το διπλάσιο του πλάτους της κατακόρυφης κίνησης $A=2h_0$

Εναλλακτικά ο αριθμός Strouhal ορίζεται ως προς το συνολικό πλάτος ταλάντωσης της ακμής εκφυγής του πτερυγίου (A_{TE}) και τότε συμβολίζεται ως St αριθμός St_{TE} .

$$St_{TE} = \frac{fA_{TE}}{U}. \quad (2.7)$$

Μία άλλη σημαντική παράμετρος που επιδρά στην απόδοση του πτερυγίου είναι η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης (angle of attach). Αν η μεταβαλλόμενη σε σχέση με τον χρόνο γωνία πρόσπτωσης συμβολίζεται με $\alpha(t)$ (σχήμα 2, figure 2) τότε:

$$\tan [\alpha(t) + \theta(t)] = \frac{1}{U} \frac{dh}{dt}(t). \quad (2.8)$$

Η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης πρέπει να υπολογίζεται αριθμητικά και συμβολίζεται με α_{max} . Μια απλοποίηση της μέγιστης γωνίας πρόσπτωσης που συμβολίζεται ως α_o , και που ισχύει αυστηρά αν η διαφορά φάσης μεταξύ της κατακόρυφης και της γωνιακής ταλάντωσης είναι 90° , είναι:

$$\alpha_o = \arctan \left(\frac{\omega h_o}{U} \right) - \theta_o. \quad (2.9)$$

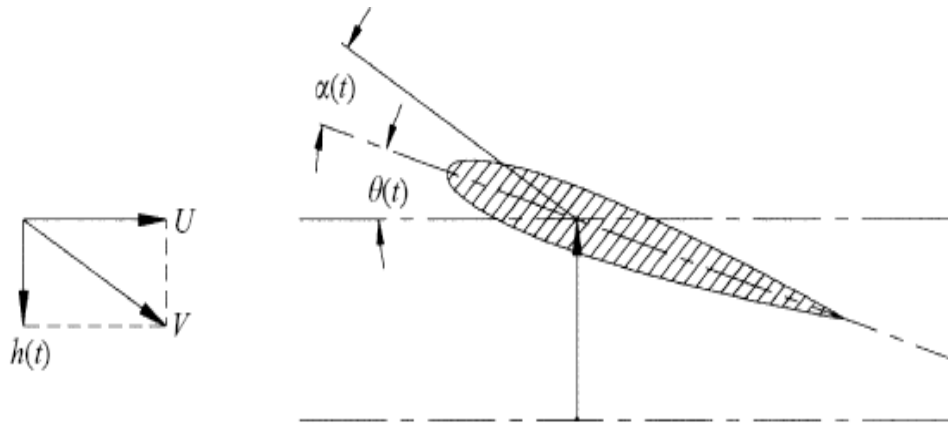


FIGURE 2. Definition of relative velocity V and nominal angle of attack $\alpha(t)$ for an oscillating foil.

Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

Η εικόνα 3 (figure 3) δείχνει την πειραματική διάταξη με την βοήθεια ης οποίας μελετήθηκε η απόδοση πτερυγίου NACA 0012 που κινείται με σταθερή ταχύτητα οριζοντίως , εκτελώντας αρμονική κατακόρυφη ταλάντωση κι αρμονική γωνιακή ταλάντωση.

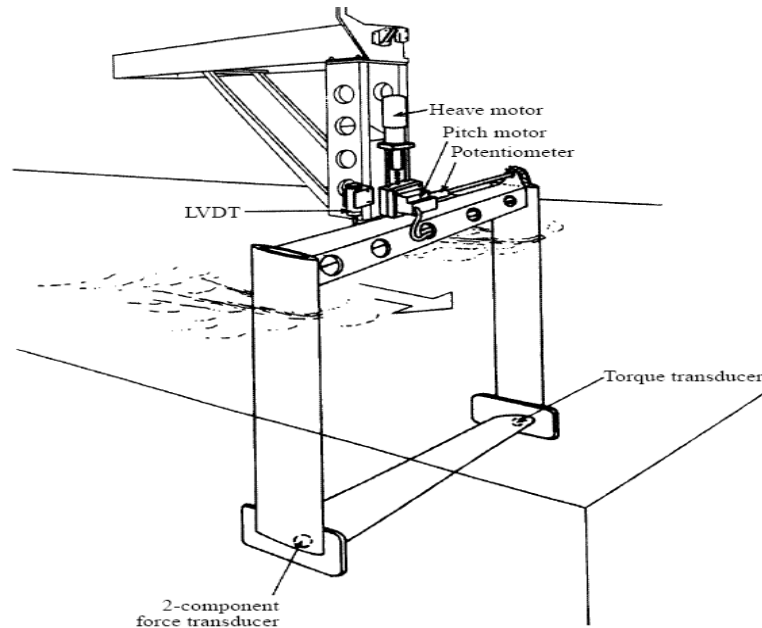


FIGURE 3. Apparatus used for conducting force measurement experiments.

Στην εικόνα 4 (figure 4) φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή ώσης c_T συναρτήσει του St_{TE} για διάφορες τιμές των παραμέτρων h_o/c & α_o , και για τρεις διαφορετικές τιμές της φασικής γωνίας ψ .

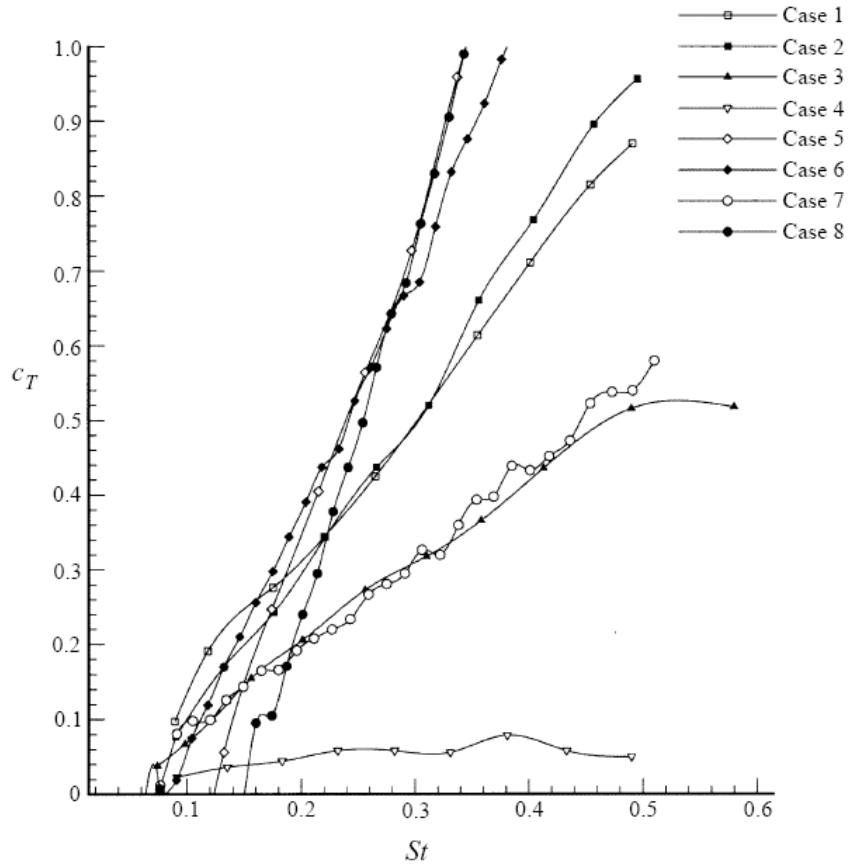


FIGURE 4. Experimentally measured thrust coefficient c_T as function of the Strouhal number St_{TE} . Curve 1: $h_o/c = 0.75$, $\alpha_{max} = 21^\circ$, $\psi = 75^\circ$; curve 2: $h_o/c = 0.75$, $\alpha_{max} = 17^\circ$, $\psi = 105^\circ$; curve 3: $h_o/c = 0.25$, $\alpha_o = 15^\circ$, $\psi = 90^\circ$; curve 4: $h_o/c = 0.75$, $\alpha_o = 5^\circ$, $\psi = 90^\circ$; curve 5: $h_o/c = 0.75$, $\alpha_o = 25^\circ$, $\psi = 90^\circ$; curve 6: $h_o/c = 0.75$, $\alpha_o = 20^\circ$, $\psi = 90^\circ$; curve 7: $h_o/c = 0.75$, $\alpha_o = 10^\circ$, $\psi = 90^\circ$; curve 8: $h_o/c = 0.75$, $\alpha_o = 30^\circ$, $\psi = 90^\circ$.

Στην εικόνα 5 (figure 5) φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή πρόωσης (απόδοση) η_P συναρτήσει του St_{TE} και για τις ίδιες παραμετρικές τιμές όπως και στην εικόνα 4.

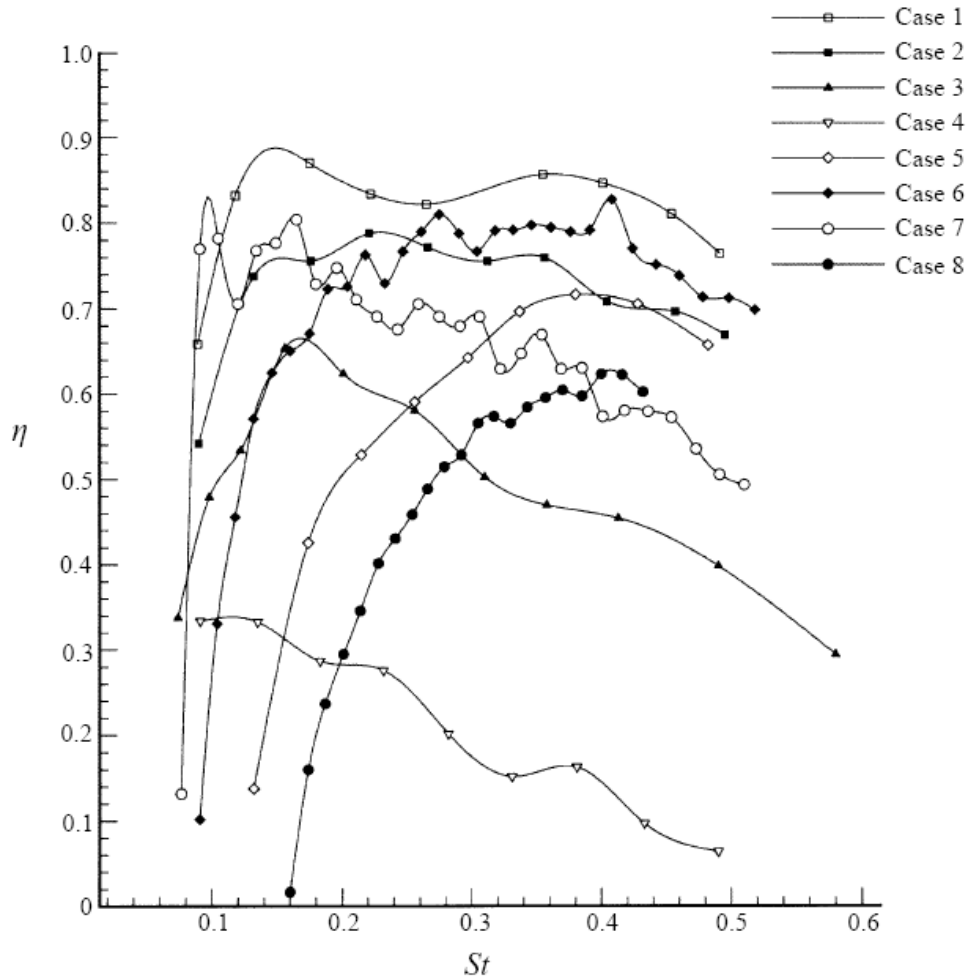


FIGURE 5. Experimentally measured efficiency as function of the Strouhal number St_{TE} . For curve identification see figure 4.

Τα βασικά αποτελέσματα των πειραμάτων είναι τα εξής:

α) Οι καμπύλες υψηλής αποδόσεις εμφανίζονται όταν η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης α_0 και ο λόγος h/c είναι σταθερά, και τυπικά εμφανίζονται δύο μέγιστα στην απόδοση: Ένα σε χαμηλές τιμές του $St_{TE} \sim 0.15$; και ένα στις υψηλές τιμές του αριθμού $St_{TE} \sim 0.3-0.4$. Το πρώτο μέγιστο δεν συνιστάται για εφαρμογές καθώς ο αντίστοιχος συντελεστής ώσης είναι πολύ μικρός, ωστόσο το δεύτερο σχετίζεται με υψηλό συντελεστή ώσης.

β) Σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης η απόδοση είναι φτωχή. Η υψηλότερη απόδοση εμφανίζεται σε υψηλότερες μέγιστες γωνίες πρόσπτωσης, σε ένα εύρος του α_0 μεταξύ 15 και 25 deg.

γ) Η υψηλότερη απόδοση καταγράφεται όταν οι προηγούμενες συνθήκες συμβαίνουν ταυτόχρονα. Όταν ο λόγος h/c βρίσκεται στην μεγαλύτερη

δοκιμαστική τιμή του $h/c=0.75$; η διαφορά φάσης μεταξύ κατακόρυφης και γωνιακής ταλάντωσης είναι περίπου 75 deg; Και η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης, α_{max} , είναι μεταξύ των 15 και 25 deg.

δ) Ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης σ' αυτά τα πειράματα, με αντίστοιχο υψηλό συντελεστή ώσης, είναι 87%, με τιμες παραμέτρων $h/c=0.75$, $\alpha_{max}=20.2$, διαφορά φάσης $\psi=75deg$ και $St_{TE}=0.36$ ή $St_{TE}=0.30$.

Η simple actuator disc theory εξηγεί γιατί οι κινήσεις μεγαλύτερου πλάτους βελτιώνουν την απόδοση. Ο συντελεστής ώσης c_{T1} ορίζεται ως εξής:

$$c_{T1} = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho S_1 U^2}, \quad (3.1)$$

Όπου S_1 η επιφάνεια που σαρώνεται απ' την κίνηση της ακμής εκφυγής, $S_1 = s A_{TE}$. Καθώς το A_{TE} αυξάνεται, ο c_{T1} μειώνεται, οδηγώντας σε μεγαλύτερη απόδοση η_i , που ορίζεται ως (Prandtl 1952):

$$\eta_i = \frac{2}{1 + (1 + c_{T1})^{1/2}}. \quad (3.2)$$

Για μια δεδομένη συχνότητα, τα ποιοτικά αποτελέσματα αυτής της θεωρίας ισχύουν πάνω από ένα οριακό πλάτος ταλάντωσης, πέρα απ' το οποίο, η ροή γύρω απ' το πτερύγιο χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό ισχυρών δινών ταυτόχρονα στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής.

Παλαιότερες πειραματικές δοκιμές ανέφεραν, κυρίως, χαμηλές αποδόσεις ταλαντευόμενων πτερυγίων, επειδή οι αριθμοί Strouhal που έλαβαν χώρα ήταν χαμηλοί, κάτω απ' την βέλτιστη τιμή, και οι γωνίες πρόσπτωσης μικρές, πιθανόν για να επιτύχουν γραμμικές συνθήκες στην ροή, αλλά τέτοιες συνθήκες τυπικά οδηγούν σε χαμηλές αποδόσεις.

Σχηματισμός δινών στην ακμή πρόσπτωσης και η μορφή του ομόρρου

Στο σχήμα 17 (figure 17), φαίνεται η επίδραση του αριθμού Strouhal στην μορφή του ομόρρου πίσω από ταλαντευόμενο πτερύγιο σύμφωνα με την θεωρία του Triantafyllou et al. (1991,1993).

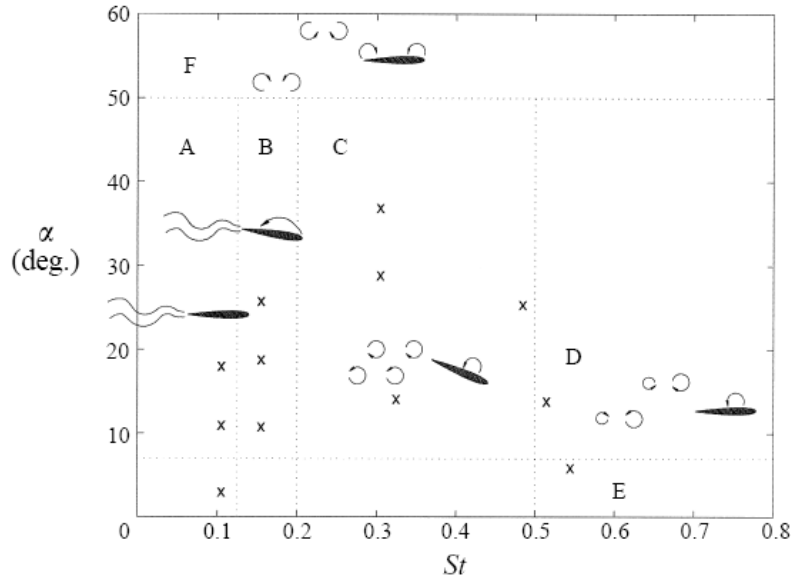


FIGURE 17. Wake patterns as function of the Strouhal number and angle of attack for $h_o/c = 1$. Points mark the location of experiments reported in table 1.

Η γωνία πρόσπτωσης έχει σημαντική επίδραση στην δημιουργία δινών στην ακμή πρόσπτωσης. Στην περιοχή C η δημιουργία αναστροφου δρόμου δινών (reverse Karman street) με την ταυτόχρονη παρουσία ισχυρών δινών στην ακμή πρόσπτωσης συμβάλλουν στην δημιουργία μεγάλων ωστικών δυνάμεων. Η περιοχή C , $0.2 < St < 0.5$, είναι η περιοχή βέλτιστης απόδοσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προηγούμενου πειράματος. Στην περιοχή D , $St > 0.5$, αναπτύσσονται μεγάλες ωστικές δυνάμεις συνοδευόμενες με την δημιουργία δύο δινών ανά μισό κύκλο αντίστροφής φοράς, και γενικώς διαφορετικής έντασης. Στις περιοχές A και B, παρουσιάζονται χαμηλές ή και αρνητικές ωστικές δυνάμεις και ένας κυματοειδής ομόρρους χωρίς ξεκάθαρη παρουσία δινών ενώ η περιδίνηση στην ακμή πρόσπτωσης είναι πού αδύναμη. Στην περιοχή E, για πολύ μικρές γωνίες πρόσπτωσης, αναπτύσσονται πολύ μικρές έως αρνητικές ωστικές δυνάμεις.

Συμπεράσματα

Οι συνθήκες βέλτιστης παραγωγής ώσης αρμονικά ταλαντευόμενου πτερυγίου είναι:

- Λειτουργία σε αριθμούς Strouhal μεταξύ 0.25 και 0.4
- Μεγάλος λόγος h/c
- Μεγάλη μέγιστη γωνία πρόσπτωσης μεταξύ 15 και 25 deg

- Διαφορά φάσης μεταξύ της κατακόρυφης και γωνιακής ταλάντωσης περίπου 75 deg , όταν το σημείο αναφοράς για την κατακόρυφη κίνηση βρίσκεται στο 1/3 του μήκους της χορδής απ' την ακμή πρόσπτωσης

Υψηλή απόδοση συνοδευόμενη από υψηλό συντελεστή ώσης εμφανίζεται σε μεγάλους αριθμούς St_{TE} μεταξύ 0.3 και 0.4. Η μέγιστη μετρούμενη απόδοση στις παρούσες δοκιμές ήταν 87%

Η οπτικοποίηση των δοκιμών έδειξε ότι η εμφάνιση υψηλής απόδοσης σε συνδυασμό με υψηλή ώση, σχετίζεται με τον σχηματισμό ισχυρών δινών στην ακμή πρόσπτωσης που σε συνδυασμό με την περιδίνηση της ροής στην ακμή εκφυγής δημιουργούν ανάστροφο δρόμο δινών Κάρμαν . Η διαφορά φάσης μεταξύ κατακόρυφης και οριζόντιας ταλάντωσης είναι βαρύνουσας σημασίας , επειδή καθορίζει τον χρόνο εμφάνισης των δινών στην ακμή πρόσπτωσης. Η βέλτιστη τιμή για $b=1/3$ είναι 75 deg.

Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διαδικασία

3.1 Ορισμός κινηματικών παραμέτρων

Οι τέσσερις βασικοί παράμετροι που μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια την κίνηση των κάτω άκρων δύτε ο οποίος κινείται με την βοήθεια πτερυγίων είναι:

- Το **πλάτος $A(m)$** της κατακόρυφης ταλάντωσης, μετρούμενο από άκρη σε άκρη στα πέλματα του δύτε
- Η **συχνότητα $f(Hz)$** της επαναλαμβανόμενης κίνησης των ποδιών του δύτε γύρω απ' τη άρθρωση του γοφού
- Η **γωνία $\theta(deg)$** λόγω της αρθρωτής σύνδεσης του αστραγάλου, δηλαδή μεταξύ της ευθείας που ορίζεται κατά μήκος του ποδιού και ευθείας παράλληλης στο πέλμα του δύτε
- Η **ταχύτητα $V(m/s)$** της μεταφορικής κίνησης του δύτε

Στην εργασία των Nicolas et al.(2010) οι κινηματικές παράμετροι επιλέχθηκαν μετά από μετρήσεις σε δέκα δύτες (scuba divers). Δοκιμάστηκαν στην φυσική τους ταχύτητα, και καταγράφηκαν οι κινήσεις τους από ψηφιακή βιντεοκάμερα τοποθετημένη στο πλάι τους. Έπειτα, τα καρέ που πάρθηκαν απ' το βίντεο ψηφιοποιήθηκαν με βάση τα σημάδια που είχαν τοποθετηθεί σε όλα τα σημεία του σώματος του κάθε δύτε. Με δισδιάστατο γραμμικό μετασχηματισμό (2D-DLT, Abdel-Aziz and Karara, 1971) εξήχθησαν οι βασικές παράμετροι. Κάθε παράμετρος υπολογίστηκε ως η μέση τιμή τριών κύκλων. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι στατικές μεταβλητές που υπολογίστηκαν σ' αυτό το πείραμα.

Kinematic parameters for scuba divers (S.D. means standard deviation).

	Age (years)	A (m)	f (Hz)	V ($m\ s^{-1}$)	V_{down}/V_{up}	θ (rad)
Mean	26	0.51	0.63	0.88	1.09	0.02
S.D.	5	0.11	0.12	0.07	0.06	0.03
Min	20	0.41	0.58	0.81	1.02	-0.34
Max	33	0.74	0.89	0.98	1.15	0.36

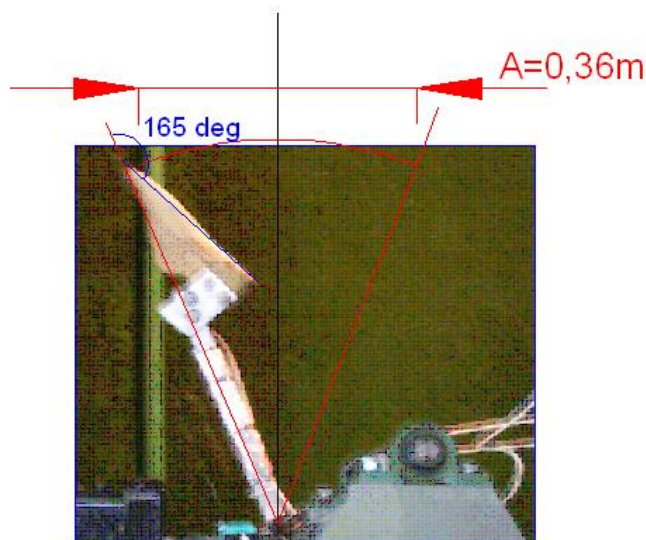
Πίνακας 1

Στην παρούσα εργασία, απ' τις τρεις κύριες παραμέτρους (A, f, V) που περιγράφουν με ακρίβεια τις κινήσεις των ποδιών του δύτε, επιλέχθηκαν ως

μεταβλητές η συχνότητα (f) και η ταχύτητα πρόωσης (V), ενώ παρέμεινε σταθερό το πλάτος ταλάντωσης των άκρων του δύτε (A). Μ' αυτόν τον τρόπο, ήταν δυνατό να εκτιμηθεί η σχέση μεταξύ συχνότητας και ταχύτητας και η επίδρασή τους στις δυναμικές μετρήσεις. Απ' την άλλη, το πλάτος (A), πέρα απ' το γεγονός ότι μπορεί να μεταβληθεί εντός συγκεκριμένων ορίων λόγω των φυσικών περιορισμών, δεν αποτελεί το καθ' αυτό χαρακτηριστικό μήκος που μπορεί να περιγράψει τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής γύρω απ' το πτερύγιο. Στις περισσότερες εργασίες που σχετίζονται με την μελέτη της ροής γύρω από ταλαντούμενα πτερύγια, ως χαρακτηριστικό πλάτος επιλέγεται το πλάτος της κίνησης της ακμής εκφυγής (**trailing edge, Ate**), μήκος το οποίο δεν παραμένει σταθερό και δεν εξαρτάται μόνο απ' το πλάτος της ταλάντωσης(A) στην πηγή (πέλματα) ,αλλά και απ' τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ελαστικών πτερυγίων και σίγουρα απ' τις συνθήκες ροής γύρω απ' αυτά.

Έτσι, το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης ρυθμίστηκε στα **A=0,36 m** (Mathioulakis&Bardis,2011), αποτελώντας έναν συντηρητικό μέσο όρο της κίνησης των πελμάτων έμπειρου δύτε.

Κατά την κολύμβηση με πτερύγια το πέλμα βρίσκεται συνεχώς σε έκταση εκτελώντας μια μικρού εύρους γωνιακή ταλάντωση γύρω απ' τον αστράγαλο, που εξαρτάται απ' την τεχνική και την φυσική κατάσταση των μυών που κινούν το πέλμα. Εδώ, αυτή η μικρού εύρους κίνηση αμελήθηκε και η γωνία μεταξύ της μεταλλικής δοκού και του ξύλινου πέλματος ορίστηκε στις **$\theta=165\text{deg}$** , ώστε ανταποκρίνεται στην πραγματική μέγιστη γωνία που μπορεί να στραφεί ο αστράγαλος (εικόνα 1).



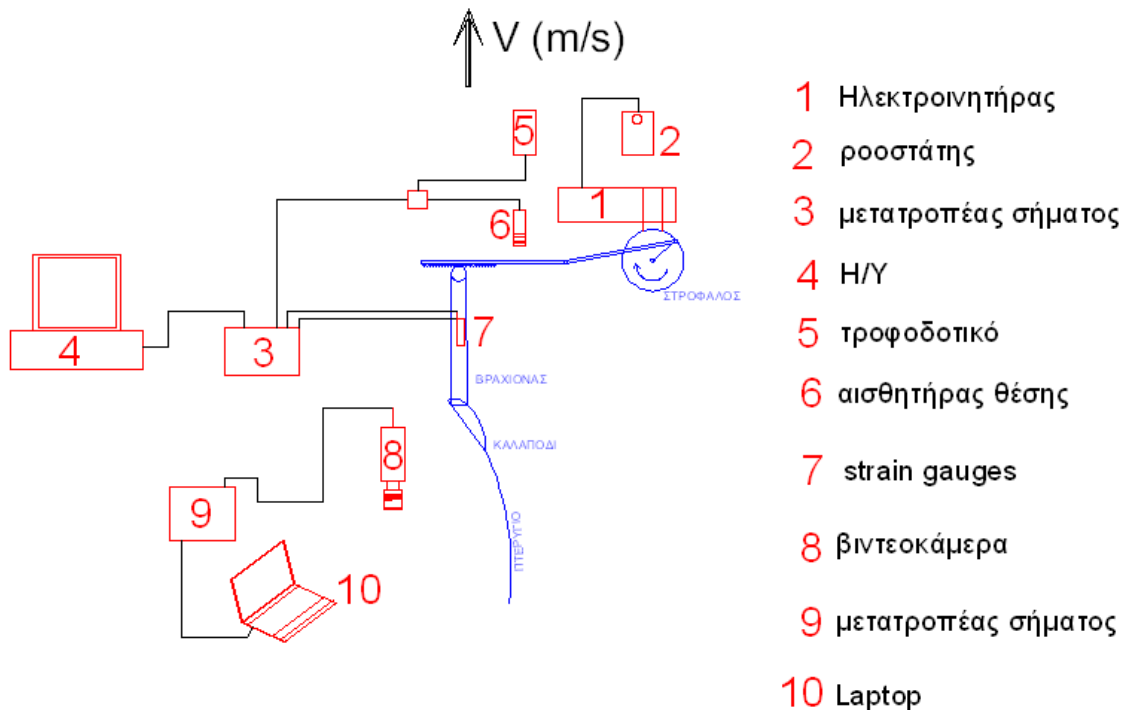
εικόνα 1

Μια συνηθισμένη συχνότητα κίνησης των ποδιών, στους αθλητές της ελεύθερης κατάδυσης, είναι 32-35 'πεδιλιές' στα 50 second. Έτσι, επιλέχθηκε η **$f=0.625\text{Hz}$** (**$T=1.6\text{sec}$**) ως συχνότητα αναφοράς για τα πειράματά μας , καθώς ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες κολύμβησης (Nicolas et al,2010), ενώ αυτή κυμάνθηκε από **0.52Hz** (**$T=1.92\text{sec}$**) έως **0.83Hz** (**$T=1.2\text{sec}$**) ώστε να εκτιμηθεί η επίδρασή της στην απόδοση του πτερυγίου .

Η ταχύτητα της μεταφορικής κίνησης πήρε τιμές από **$V=0.8\text{m/s}$** έως **1.2m/s** , εύρος το οποίο περιλαμβάνει τις φυσικές ταχύτητες κίνησης των δυτών.

3.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Εξετάστηκαν οκτώ πτερύγια με διαφορετικές διαστάσεις, υλικό και ακαμψία τα οποία τοποθετήθηκαν σε μηχανισμό ο οποίος με τη βοήθεια κινητήρα και εκκέντρου προκαλούσε περιστροφική ταλάντωση με ελεγχόμενη περίοδο και πλάτος ταλάντωσης. Ο μηχανισμός τοποθετήθηκε στο φορείο της δεξαμενής του Τμήματος Ναυπηγών του ΕΜΠ έτσι ώστε το πτερύγιο να είναι βυθισμένο σε βάθος 0.5 m (για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της ελεύθερης επιφάνειας) και να κινείται με ελεγχόμενη ταχύτητα U . Κοίλος δοκός από αλουμίνιο συνέδεε το πτερό με τον άξονα περιστροφικής ταλάντωσης και επ' αυτού ήταν τοποθετημένα επιμηκυνσιόμετρα για την μέτρηση της δύναμης κάθετα και παράλληλα προς την κίνηση του πτερυγίου



Συνδεσμολογία συσκευών πειραματικής διάταξης

3.2.1 Έλεγχος κύριων κινηματικών παραμέτρων

Στόχος ήταν η ανάπτυξη κατάλληλης διάταξης που να μας επιτρέπει τον έλεγχο των τριών βασικών κινηματικών παραμέτρων (A,f,V), όπως ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

- **Ο έλεγχος του πλάτους A** της ημιπεριστροφικής ταλάντωσης του πτερυγίου, επιτεύχθηκε μέσω της μεταβολής της θέσης του εκκέντρου κατά μήκος της ακτίνας του στροφάλου. Ο στρόφαλος περιστρεφόμενος από ηλεκτροκινητήρα μετέβαλλε, αναλόγως την ρύθμιση, το εύρος της παλινδρομικής κίνησης διωστήρα , ο οποίος μετέβαλε αναλόγως το πλάτος περιστροφής του κεντρικού άξονα του πεδίου.
- **Ο έλεγχος της συχνότητας ταλάντωσης f** του πτερυγίου επιτεύχθηκε μέσω ροοστάτη, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ της κεντρικής παροχής ρεύματος και του ηλεκτροκινητήρα. Μ' αυτόν τον τρόπο έγινε εφικτή η ρύθμιση των στροφών του ηλεκτροκινητήρα και συνεπώς η συχνότητα ταλάντωσης του πτερυγίου
- **Ο έλεγχος της ταχύτητας V** της μεταφορικής κίνησης έγινε ως εξής: Ακέραια η πειραματική διάταξη προσαρμόστηκε στο φορείο δοκιμών της πειραματικής δεξαμενής του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του ΕΜΠ. Το φορείο δύναται να κινείται πάνω σε ράγες κατά μήκος της δεξαμενής σε ταχύτητες από 0.8 m/s έως 1.2 m/s στα πλαίσια των απαιτήσεων του παρόντος πειράματος. Έτσι έγινε εφικτός ο έλεγχος της ταχύτητας της ελεύθερης ροής του ρευστού γύρω απ' τα πτερύγια των δοκιμών.

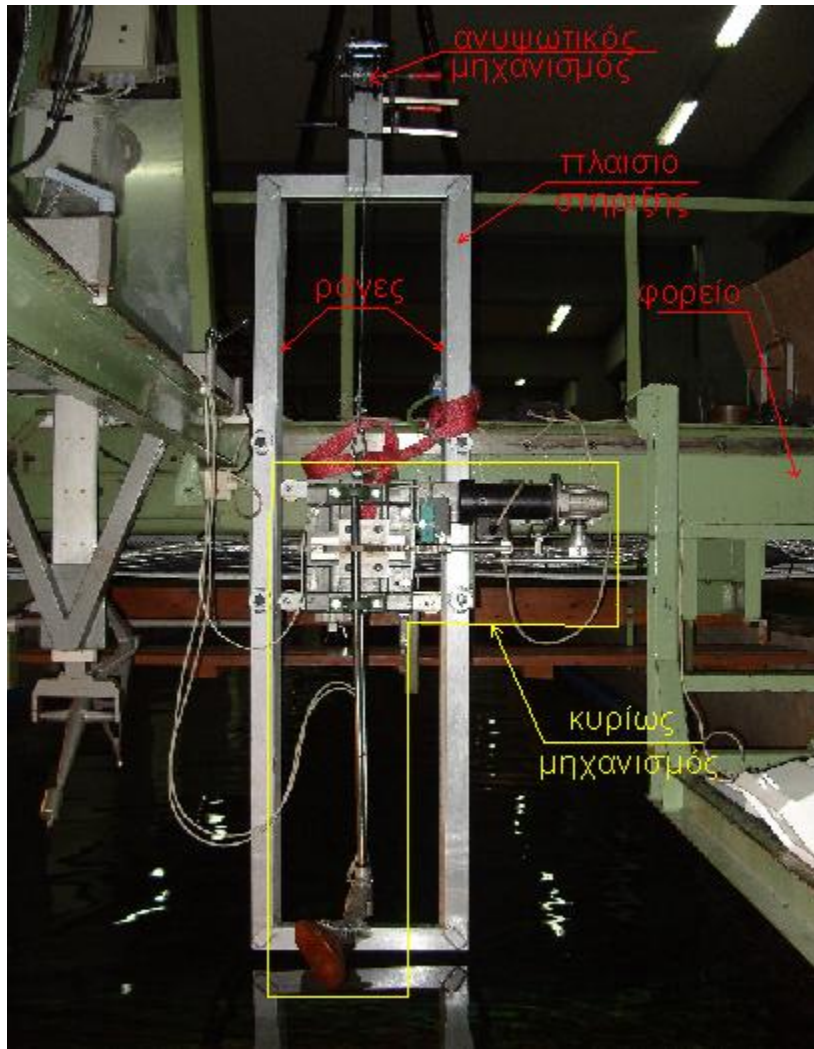
3.2.2 Περιγραφή μηχανικών στοιχείων της πειραματικής διάταξης

Ορθογώνιο **πλαίσιο στήριξης** κατασκευασμένο από κοίλους δοκούς, πλάτους 0.4 m και μήκους 2 m , τοποθετήθηκε με κοχλίες στο **φορείο δοκιμών** της πειραματικής δεξαμενής του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του ΕΜΠ. Κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασής του, έφερε **ράγες** τοποθετημένες παράλληλα στα δύο άκρα του. Στο επάνω μέρος του έφερε χειροκίνητο **ανυψωτικό μηχανισμό**.

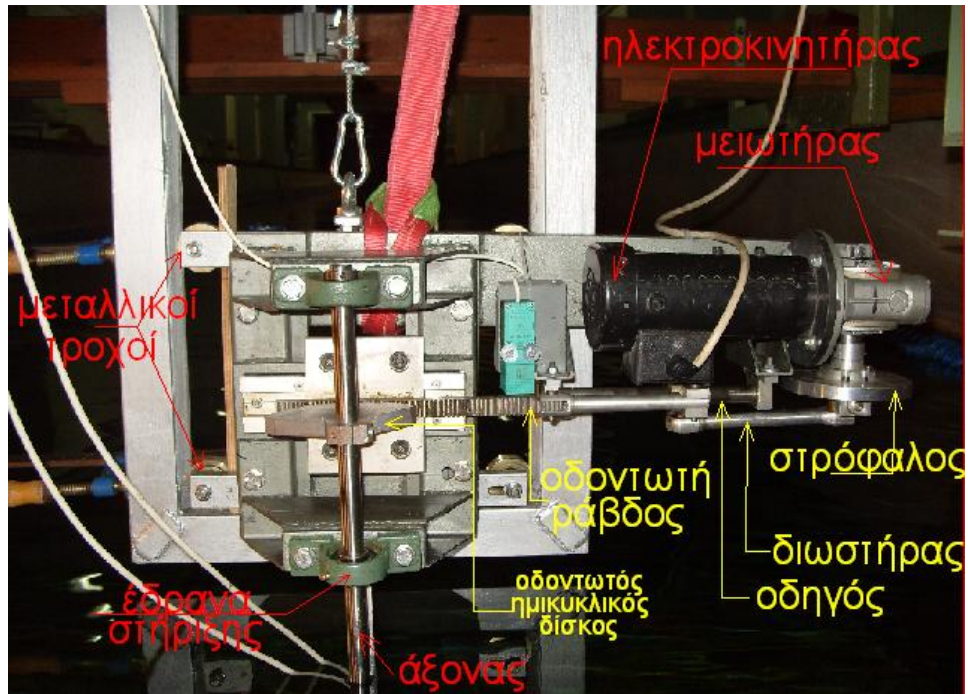
Πάνω στις ράγες του πλαισίου τοποθετήθηκε με την βοήθεια μεταλλικών τροχών ο κυρίως μηχανισμός της διάταξης, με τρόπο τέτοιο, ώστε να ολισθαίνει μόνο κατά το μήκος τους, με την βοήθεια του ανυψωτικού μηχανισμού. Έτσι έγινε δυνατή η σταθεροποίησή του προς όλες τις διευθύνσεις, εκτός της κατακόρυφης, γεγονός που μας επέτρεπε την ρύθμιση της βύθισης του πτερυγίου απ' την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής (0.6 m), ενώ κατά την ανύψωσή του ήταν δυνατή η εύκολη αλλαγή των πτερυγίων που δοκιμάστηκαν.

Ο **κυρίως μηχανισμός της πειραματικής διάταξης** αποτελείται από **ηλεκτροκινητήρα** (LEESON 0,25 PS), ο οποίος τροφοδοτείται μέσω **ροοστάτη** (DART [input:120/240VAC;output:0-90VAC]) ώστε να ρυθμίζεται η συχνότητα περιστροφής του. Ο άξονας ισχύος του ηλεκτροκινητήρα είναι συνδεδεμένος με **μειωτήρα** στροφών, λόγου μείωσης 1/28. Η έξοδος του μειωτήρα φέρει **κυκλικό δίσκο (στροφάλο)** διαμέτρου 0.14 m, όπου κατά μήκος της ακτίνας του βρίσκεται πακτωμένος **σπειροειδής άξονας** που αποτελεί την βάση **διωστήρα** μήκους 0.18 m και λειτουργεί ως έκκεντρο . Μέσω του διωστήρα η περιστροφική κίνηση του κυκλικού δίσκου (στροφάλου) μετατρέπεται σε παλινδρομική κατά μήκος **κυλινδρικού οδηγού** μήκους 0.24 m. Με την περιστροφή του σπειροειδή άξονα μεταβάλλεται η απόσταση της βάσης του διωστήρα απ' το κέντρο του κυκλικού δίσκου (στροφάλου) , με συνεπακόλουθο την μεταβολή του πλάτους της παλινδρομικής κίνησης. Στο άλλο άκρο του διωστήρα, που κινείται παλινδρομικά κατά μήκος του κυλινδρικού οδηγού, τοποθετείται ράβδος ορθογώνιας διατομής που στο επάνω μέρος της φέρει οδοντώσεις. Η **οδοντωτή ράβδος** ακολουθεί την παλινδρομική κίνηση του διωστήρα, που μέσω **οδοντωτού ημικυκλικού τροχού** εξαναγκάζει άξονα ανοξειδωτου χάλυβα, διαμέτρου 0.02m και μήκους 1 m, σε ημιπεριστροφική ταλάντωση, με τον εξής τρόπο: Το κέντρο του ημικυκλικού οδοντωτού τροχού τοποθετείται με κοχλία σύσφιξης πάνω στον άξονα ο οποίος περιστρέφεται γύρω απ' τα δυο **έδρανα στήριξης** του. Το κάτω άκρο του **άξονα περιστροφής** φέρει κάθετα προς αυτόν, πακτωμένο, **κοίλο δοκό (βραχίονα)** μήκους 0.40 m , ο οποίος εξαναγκάζεται σε ημιπεριστροφική ταλάντωση. Στο ελεύθερο άκρο του κοίλου δοκού (βραχίονα) τοποθετείται υπό γωνία 165 deg , ξύλινο ομοίωμα πέλματος (**καλαπόδι**) μήκους 0.28 m, πάνω στο οποίο τοποθετούνται τα πέδιλα κατάδυσης που δοκιμάστηκαν.

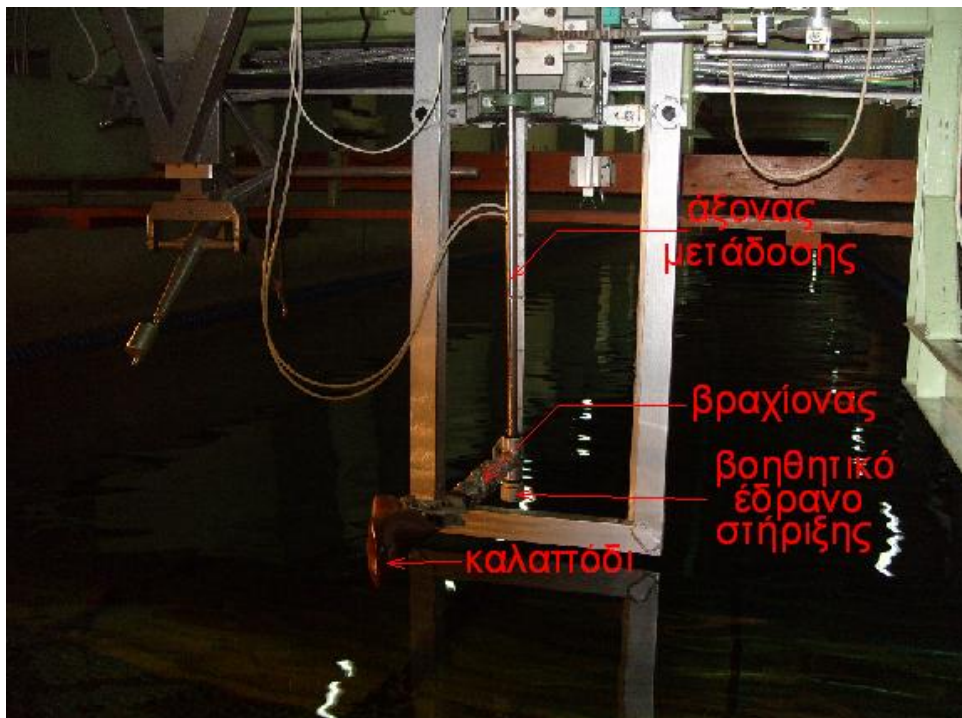
Στις **εικόνες (1α,1β,1γ)** που ακολουθούν φαίνεται η πειραματική διάταξη και τα επιμέρους μηχανικά στοιχεία που ορίστηκαν παραπάνω



Εικόνα 1α: Η πειραματική διάταξη τοποθετημένη στο φορείο δοκιμών της δεξαμενής



Εικόνα 1β: Το επάνω μέρος του κυρίως μηχανισμού της πειραματικής διάταξης

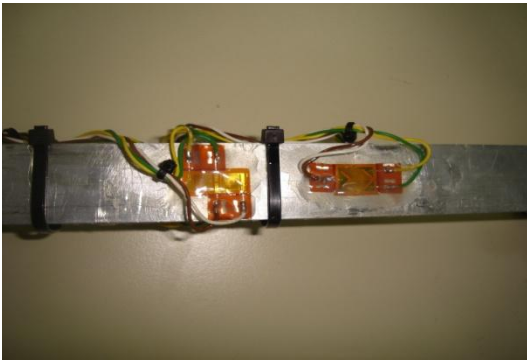


Εικόνα 1γ: Το κάτω μέρος του κυρίως μηχανισμού της πειραματικής διάταξης

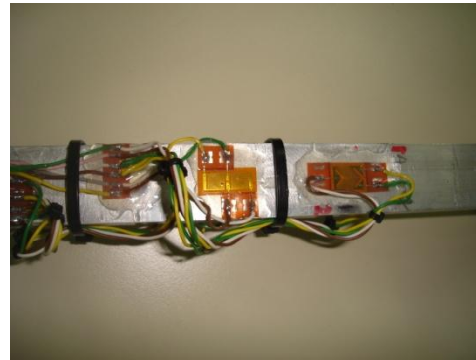
3.2.3 Περιγραφή μετρητικών διατάξεων και λοιπών οργάνων της πειραματικής διάταξης

Επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges)

Τέσσερα επιμηκυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν στον αλουμινένιο κοίλο δοκό (βραχίονα), ώστε να συσχετιστούν οι παραμορφώσεις του, στην ελαστική περιοχή, με τις επαγόμενες απ' το πέδιλο δυνάμεις. Η αρχή λειτουργίας τους, βασίζεται στην αλλαγή του σχήματος μιας συστοιχίας λεπτών μεταλλικών διόδων, με αποτέλεσμα την μεταβολή της ηλεκτρικής τους αντίστασης και συνεπώς, του μέτρου του σήματος της τάσης (mV). Τα επιμηκυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν κατά ζεύγη (ένα για μέτρηση ορθών και ένα διατμητικών δυνάμεων) στις δύο, μεγαλύτερου πλάτους, πλευρές του κοίλου δοκού. Έτσι σε κάθε πλευρά υπολογίζονται οι παραμορφώσεις σε διεύθυνση παράλληλη κατά το μήκος του δοκού (λόγω των 'ωστικών' ορθών τάσεων), και σε διεύθυνση κάθετη στην προηγούμενη (λόγω των 'πλάγιων' διατμητικών τάσεων). Οι συνδέσεις καλύφθηκαν με ειδικό στεγνωτικό ελαστικό υλικό.



Εικόνα 2α: Τα επιμηκυνσιόμετρα τοποθετημένα στην πάνω πλευρά του βραχίονα



Εικόνα 2β: Τα επιμηκυνσιόμετρα τοποθετημένα στην κάτω πλευρά του βραχίονα

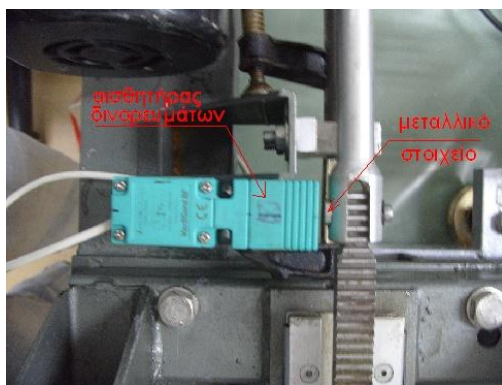
Οι έξοδοί τους συνδέθηκαν σε δυο διαφορετικά κανάλια συσκευής (HBM, Spider8), μετατροπής του αναλογικού σήματος της μετρούμενης τάσης (mV), σε ψηφιακές τιμές, με συχνότητα δειγματοληψίας 200 Hz. Η διαχείριση και η λήψη των τιμών έγινε από ηλεκτρονικό υπολογιστή με χρήση του λογισμικού CATMAN 5.0. (εικόνα 2γ)



Εικόνα 2γ: συσκευή μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακές τιμές (HBM spider8)

Αισθητήρας δινορευμάτων

Ο χρονικός προσδιορισμός της θέσης του περυγίου έγινε με τοποθέτηση ενός αισθητήρα δινορευμάτων (Varikont M ,24VDC). Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε κάθετα στην διεύθυνση της παλινδρομικής κίνησης της οδοντωτής ράβδου (εικόνα 3α), με τέτοιο τρόπο, ώστε μεταλλικό στοιχείο που φέρει η ράβδος, να παρεμβάλλεται στο εύρος ευαισθησίας του αισθητήρα όταν αυτή βρίσκεται σε μια απ' τις δύο ακρότατες θέσεις της κίνησής της, που συμπίπτουν με αυτές της κίνησης του περυγίου. Ο αισθητήρας συνδέθηκε με τροφοδοτικό ισχύος (SATRON,0-32VDC/0-6,4 A) (εικόνα 3β), ενώ η έξοδός του (αναλογικού σήματος mV) συνδέθηκε σε κανάλι της συσκευής μετατροπής σήματος (εικόνα 2γ)



Εικόνα 3α: αισθητήρας δινορευμάτων



Εικόνα 3β: τροφοδοτικό ισχύος (Satron, 0-32VDC/0-6,4 A)

Βιντεοκάμερα

Το σχήμα του παραμορφούμενου πεδίου, κατά την διάρκεια της περιστροφικής του ταλάντωσης, καταγράφηκε από βιντεοκάμερα (SONY). Η βιντεοκάμερα τοποθετήθηκε σταθερά πάνω στο φορείο ακολουθώντας την μεταφορική κίνηση της πειραματικής διάταξης (εικόνα 4α). Μέσω της χρήσης ευρυγώνιου φακού (cannon 1:50) έγινε δυνατή η παρακολούθηση όλου του εύρους της κίνησης του πτερυγίου. Για την καλύτερη καταγραφή της παραμόρφωσης του πεδίου τοποθετήθηκαν κατά μήκος του προφίλ του σημάδια από αδιάβροχη αυτοκόλλητη ταινία έντονου πορτοκαλί χρώματος. Η έξοδος της βιντεοκάμερας συνδέθηκε σε συσκευή μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, και μέσω αυτής σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (εικόνα 4β). Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή και την επεξεργασία των εικόνων ήταν το Pinnacle Studio 12.



Εικόνα 4α: βιντεοκάμερα με ευρυγωνιο φακό



Εικόνα 4β: μετατροπέας σήματος σε σύνδεση με φορητό Η/Υ



Εικόνα 4γ: Εικόνα που λήφθηκε απ' την βιντεοκάμερα κατά την διάρκεια κίνησης πτερυγίου

Πειραματική δεξαμενή

Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Ναυτικής & Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Έγινε χρήση της πειραματικής δεξαμενής του εργαστηρίου, μήκους 100 μέτρων , πλάτος 4.6 μέτρων και μέγιστο βάθος 3 μέτρων (εικόνα 5α). Η δεξαμενή είναι εξοπλισμένη με φορείο (εικόνα 5β), που η κίνησή του ρυθμίζεται μέσω Η/Υ (εικόνα 5γ), ενώ η μέγιστη ταχύτητά που μπορεί να αναπτύξει είναι 5.3 m/s. Η πειραματική διάταξη προσαρμόστηκε στο φορείο (εικόνα 5δ), ώστε να γίνει δυνατός ο έλεγχος της μεταφορικής κίνησης του πτερυγίου. Αν ληφθεί υπόψιν η απόσταση που χρειάζεται το φορείο ώστε να επιταχύνει και να επιβραδύνει, το 'καθαρό μήκος' κατά το οποίο λήφθηκαν και οι μετρήσεις είναι 70 μέτρα.



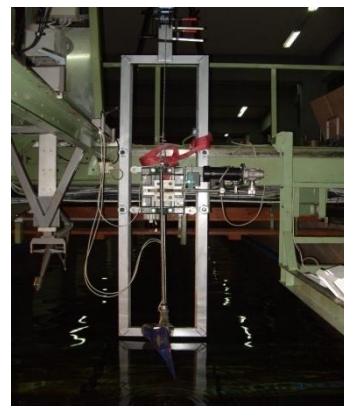
Εικόνα 5α: η πειραματική δεξαμενή του ΕΝΘΥ του ΕΜΠ



Εικόνα 5β: Το φορείο της δεξαμενής



Εικόνα 5γ: Ο Η/Υ που ρυθμίζει την ταχύτητα του φορείου

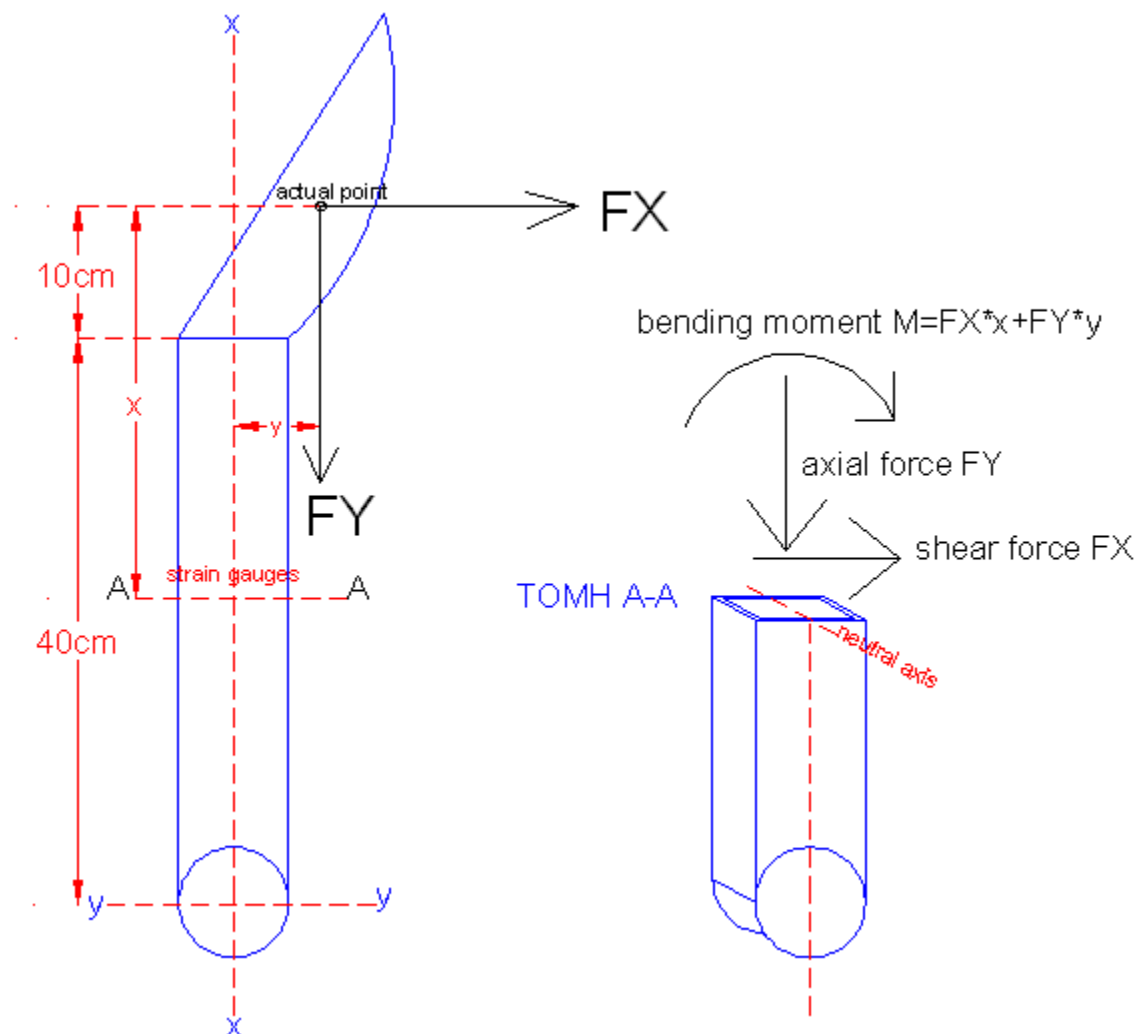


Εικόνα 5δ: Η πειραματική διάταξη προσαρμοσμένη στο φορείο

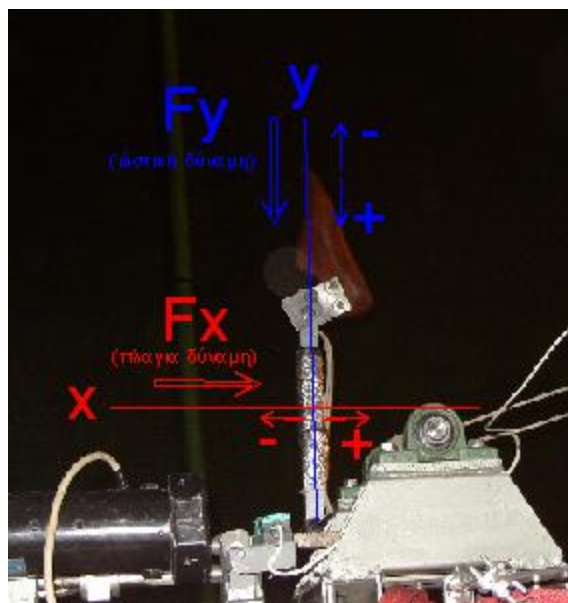
3.3 Βαθμονόμηση πειραματικής διάταξης και επιλογή των πεδίων δοκιμών

3.3.1 Βαθμονόμηση επιμηκυνσιομέτρων (strain gauges) βραχίονα

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο (3.2.3), τοποθετήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα στον βραχίονα κίνησης του πτερυγίου, ώστε να καταγραφούν οι δυνάμεις σε διεύθυνση παράλληλη με τον βραχίονα (ωστικές δυνάμεις F_y) και σε διεύθυνση κάθετη προς αυτόν (πλάγιες δυνάμεις F_x) (εικόνα 6α,6β). Η μεταβολή των δυνάμεων ,στις δύο αυτές κατευθύνσεις , καταγράφεται σε Η/Υ μέσω μετατροπέα ως μεταβολή του σήματος της τάσης μετρούμενη σε mV/V. Για να βρεθεί η αντιστοιχία μεταξύ της μεταβολής της τάσης και του μέτρου της δύναμης που επιφέρει αυτήν την μεταβολή, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:



Εικόνα 6α: Καταπόνηση της διατομής του βραχίονα στην οποία έχουν τοποθετηθεί τα επιμηκυνσιόμετρα



Εικόνα 6β: Άξονες εφαρμογής των δυνάμεων και σύμβαση προσήμων

Βαθμονόμηση ως προς άξονα παράλληλο κατά μήκος του βραχίονα (ωστικές δυνάμεις F_y)

Ο βραχίονας τοποθετήθηκε κάθετα ως προς το έδαφος ενώ τα καλώδια των εξόδων των επιμηκυνσιομέτρων συνδέθηκαν μέσω του μετατροπέα σήματος (εικόνα 2γ) σε Η/Υ. Ύστερα αναρτήθηκαν 7 διαφορετικά βάρη (gr) με χρήση διαφανούς πετονιάς (εικόνα 7). Οι τιμές του σήματος της τάσης (mV), λόγω της δράσης του κάθε αναρτημένου βάρους, καταγράφηκαν (πίνακας 1) ώστε να εξαχθεί η καμπύλη βαθμονόμησης της αξονικής δύναμης (ωστικής F_y) (διάγραμμα 1). Πριν την λήψη της κάθε μέτρησης πάρθηκε η τιμή αναφοράς την τάσης που αντιστοιχεί σε μηδενικό αναρτημένο βάρος. Τα βάρη μετρήθηκαν σε ζυγαριά ακριβείας. Σημειώνεται ότι η αλλαγή του μέτρου του σήματος της τάσης οφείλεται στα επιμηκυνσιόμετρα που υπολογίζουν τις παραμορφώσεις που οφείλονται στην δράση αξονικών εφελκυστικών ή θλιπτικών ορθών τάσεων, λόγω των αναρτημένων βαρών.

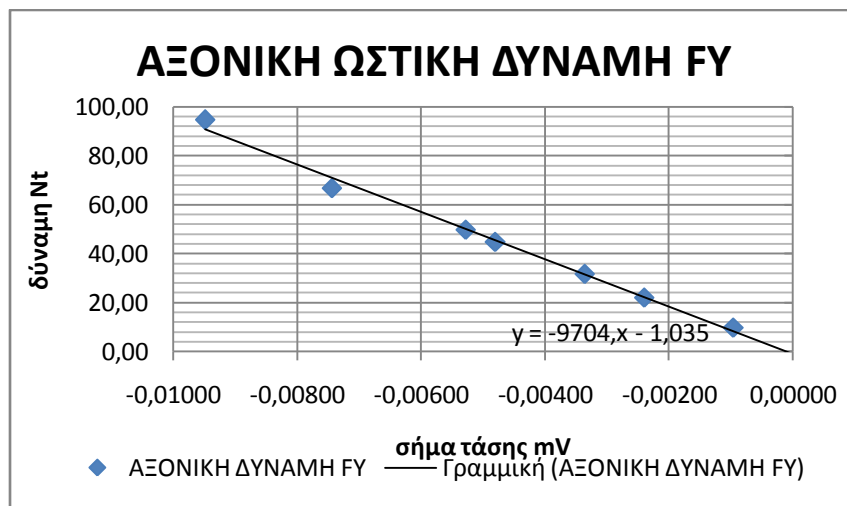


Εικόνα 7: Ανάρτηση βαρών ως προς άξονα γ-γ παράλληλο κατά μήκος του βραχίονα

ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ F_Y (ΩΣΗ)

APPLIED WEIGHT gr	FORCE Nt	MEASURED VALUE F _Y mV/V	MEASURED VALUE F _X mV/V
1000,00	9,81	-0,00096	-0,000120
2250,00	22,07	-0,00240	-0,000120
3250,00	31,88	-0,00336	-0,000120
4570,00	44,83	-0,00480	-0,000120
5080,00	49,83	-0,00528	-0,000120
6820,00	66,90	-0,00744	-0,000600
9650,00	94,67	-0,00948	-0,001080

Πίνακας 1: Μεταβολή του σήματος της τάσης ως προς το μέτρο της ασκούμενης δύναμης



Διάγραμμα 1: Καμπύλη βαθμονόμησης της αξονικής ωστικής δύναμης F_Y

Βαθμονόμηση ως προς άξονα κάθετο στον βραχίονα (πλάγιες δυνάμεις F_x)

Με την χρήση τροχαλίας, έγινε δυνατή η αλλαγή του άξονα δράσης των αναρτημένων βαρών απ' τον κατακόρυφο στον οριζόντιο (εικόνα 8). Οι τιμές του σήματος της τάσης (mV), λόγω της δράσης του κάθε αναρτημένου βάρους, καταγράφηκαν (πίνακας 2) ώστε να εξαχθεί η καμπύλη βαθμονόμησης της πλάγιας δύναμης (ωστικής F_x). Πριν την λήψη της κάθε μέτρησης πάρθηκε η τιμη αναφοράς την τάσης που αντιστοιχεί σε μηδενικό αναρτημένο βάρος. Σημειώνεται ότι τα επιμηκυσσιόμετρα που κατέγραψαν μεταβολές στο σήμα λόγω της δράσης της κάθετης δύναμης, μετρούσαν την παραμόρφωση των ηλεκτρικών τους στοιχείων λόγω των επαγόμενων διατμητικών τάσεων. Λόγω του τρόπου στήριξης του βραχίονα (πάκτωση στο ένα άκρο του), οι διατμητικές αυτές δυνάμεις που οφείλονται στην δράση της κάθετης δύναμης F_x , έχουν το ίδιο μέτρο και φορά με την δύναμη F_x σε κάθε στοιχειώδη διατομή του κοίλου δοκού (βραχίονα). Συνεπώς, θεωρικά, δεν παίζει ρόλο το σημείο εφαρμογής της κάθετης δύναμης F_x αλλά το μέτρο της.



Εικόνα 8: Ανάρτηση βαρών με την βοήθεια τροχαλίας ώστε ο άξονας δράσης τους να είναι κάθετος στον βραχίονα κίνησης

Παραδόξως διαπιστώθηκε, ότι αλλαγή του σημείου εφαρμογής της δύναμης στον βραχίονα είχε ως συνέπεια την αλλαγή του καταγραφόμενου σήματος, με αποτέλεσμα για το ίδιο αναρτημένο βάρος να αντιστοιχούν τόσες τιμές τάσης (mV) όσα και τα σημεία εφαρμογής της πάνω στον βραχίονα. Αυτό μαρτυρεί ότι τα επιμηκυσσιόμετρα διάτμησης δεν τοποθετήθηκαν πάνω στον ουδέτερο άξονα της διατομής όπου οι ορθές τάσεις λόγω της κάμψης μηδενίζονται.

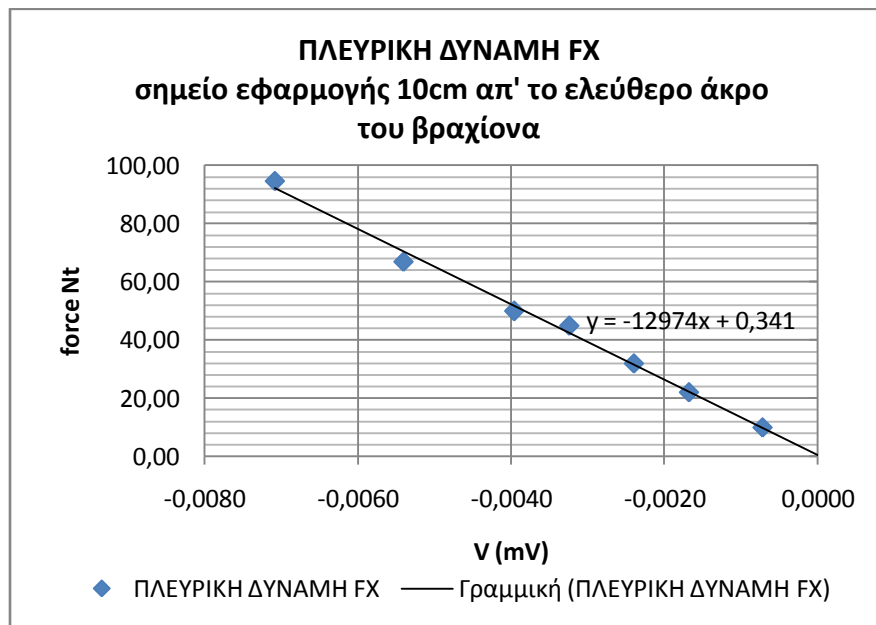
Έτσι λοιπόν , θεωρήθηκε αρχικά ως σημείο εφαρμογής της πλάγιας δύναμης το σημείο του καλαποδιού που απέχει 10cm απ' την ελεύθερη άκρη του βραχίονα, και που στη φυσική του διάσταση αντιστοιχεί στο κουτουπιέ του ποδιού του δύτη. Η βαθμονόμηση έγινε ως προς αυτό το σημείο (σημείο βαθμονόμησης) με την αντίστοιχη καμπύλη να φαίνεται στο διάγραμμα 2.

ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ FX

σημείο εφαρμογής 10cm απ' το ελεύθερο άκρο του βραχίονα

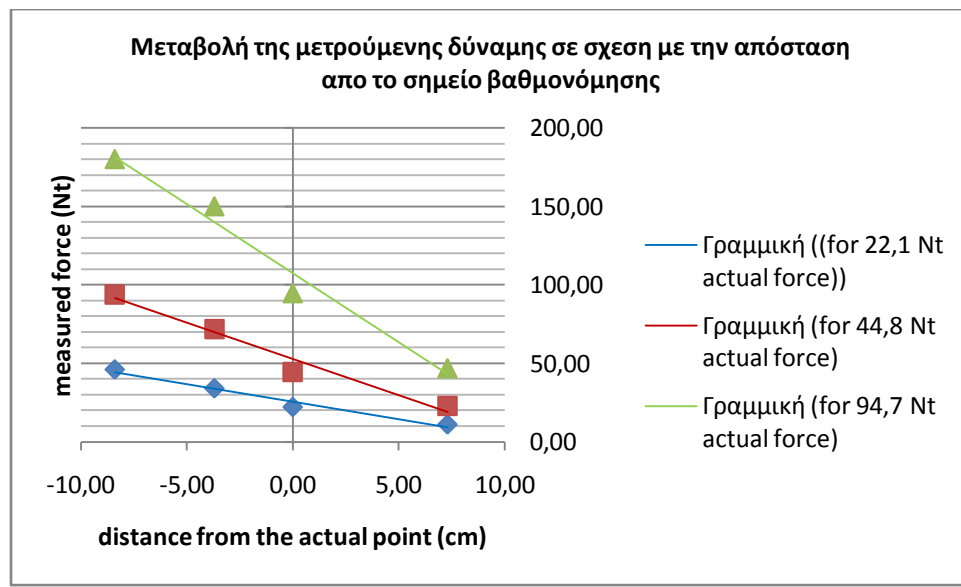
APPLIED WEIGHT gr	FORCE Nt	MEASURED VALUE FX mV/V	MEASURED VALUE FY mV/V
1000,00	9,81	-0,00072	-0,000120
2250,00	22,07	-0,00168	-0,000120
3250,00	31,88	-0,00240	-0,000120
4570,00	44,83	-0,00324	-0,000120
5080,00	49,83	-0,00396	-0,000120
6820,00	66,90	-0,00540	-0,000600
9650,00	94,67	-0,00708	-0,001080

Πίνακας 2: Μεταβολή του σήματος της τάσης ως προς το μέτρο της ασκούμενης δύναμης



Διάγραμμα 2: Καμπύλη βαθμονόμησης της πλάγιας δύναμης FX, με σημείο εφαρμογής 10cm απ' το ελεύθερο άκρο του βραχίονα

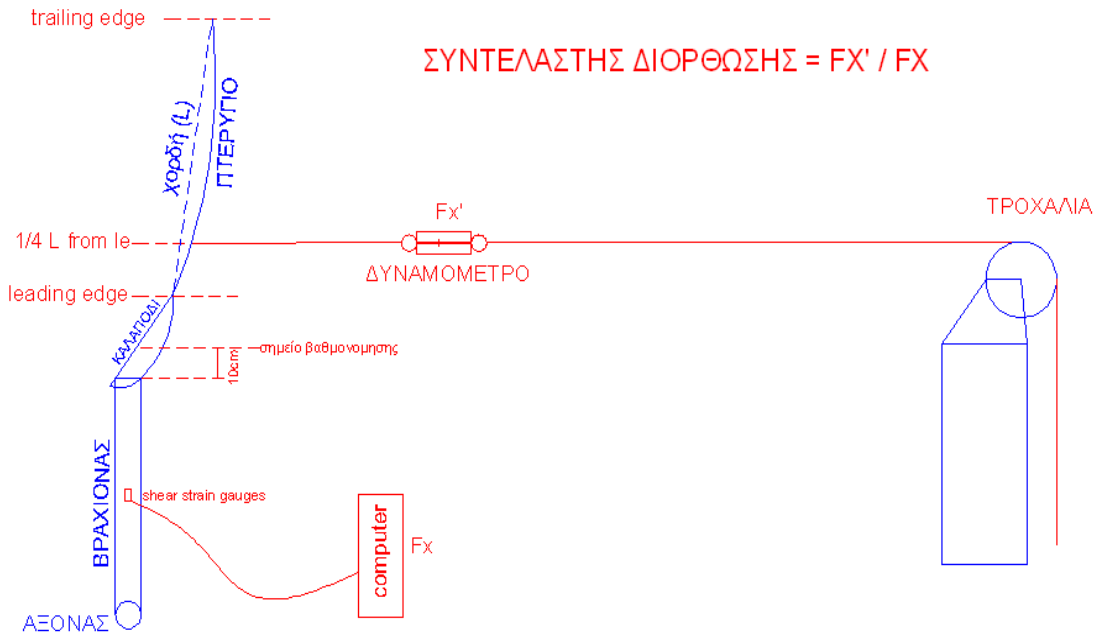
Αναρτήθηκαν τρία διαφορετικά βάρη που αντιστοιχούν σε πλάγια δύναμη 22.1N, 44.8N & 94.7N. Το σημείο εφαρμογής τους μετατοπίστηκε κατά - 8,40 cm , -3.7 cm , +7.3cm απ' το σημείο βαθμονόμησης (actual point) και καταγράφηκαν οι αντίστοιχες τιμές της μετρούμενης δύναμης απ' τον Η/Υ , ώστε να εκτιμηθεί το η απόκλιση της μετρούμενης απ' την πραγματική δύναμη. Έτσι διαπιστώθηκε ότι ακόμα και μικρές μεταβολές του σημείου εφαρμογής αντιστοιχούν σε μεγάλες μεταβολές της μετρούμενης δύναμης (διάγραμμα 3), γεγονός που μπορεί να μας οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των πλάγιων δυνάμεων F_x κατά την διάρκεια των πειραμάτων πράγμα που διαπιστώθηκε. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων καταγράφηκαν πλάγιες δυνάμεις από 300 N έως 600N για τα διάφορα πέδιλα δοκιμών. Οι τιμές αυτές σύμφωνα με την βιβλιογραφία και λογική είναι εξωπραγματικές, πράγμα που οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το σημείο εφαρμογής της δύναμης δεν βρίσκεται κοντά στο κουτουπιέ του δύτε αλλά κάπου στην λεπίδα του πτερυγίου.



Διάγραμμα 3: Μεταβολή της μετρούμενης δύναμης, λόγω της ανάρτησης 3 βαρών, σε σχέση με την απόσταση του σημείου εφαρμογής του βάρους απ' το σημείο βαθμονόμησης

Λόγω της συνεχούς αλλαγής του σχήματος του πτερυγίου δεν έγινε δυνατός ο ακριβής υπολογισμός της θέσης εφαρμογής της δύναμης πάνω στο πτερύγιο. Απ' την βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι σε επίπεδες αεροτομές (επίπεδη πλάκα) το σημείο εφαρμογής της άνωσης (lift) βρίσκεται πάντα στο L/4 της χορδής της απ' την ακμή πρόσπτωσης, κάτι που μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση μας με αρκετή ακρίβεια. Έτσι λοιπόν ,και μετά το τέλος των πειραμάτων εφαρμόστηκε με την βοήθεια τροχαλίας χειροκίνητα δύναμη στο κάθε πτερύγιο (τοποθετημένο στον βραχίονα) μέχρι να εμφανιστεί στον Η/Υ η μεγίστη τιμή που

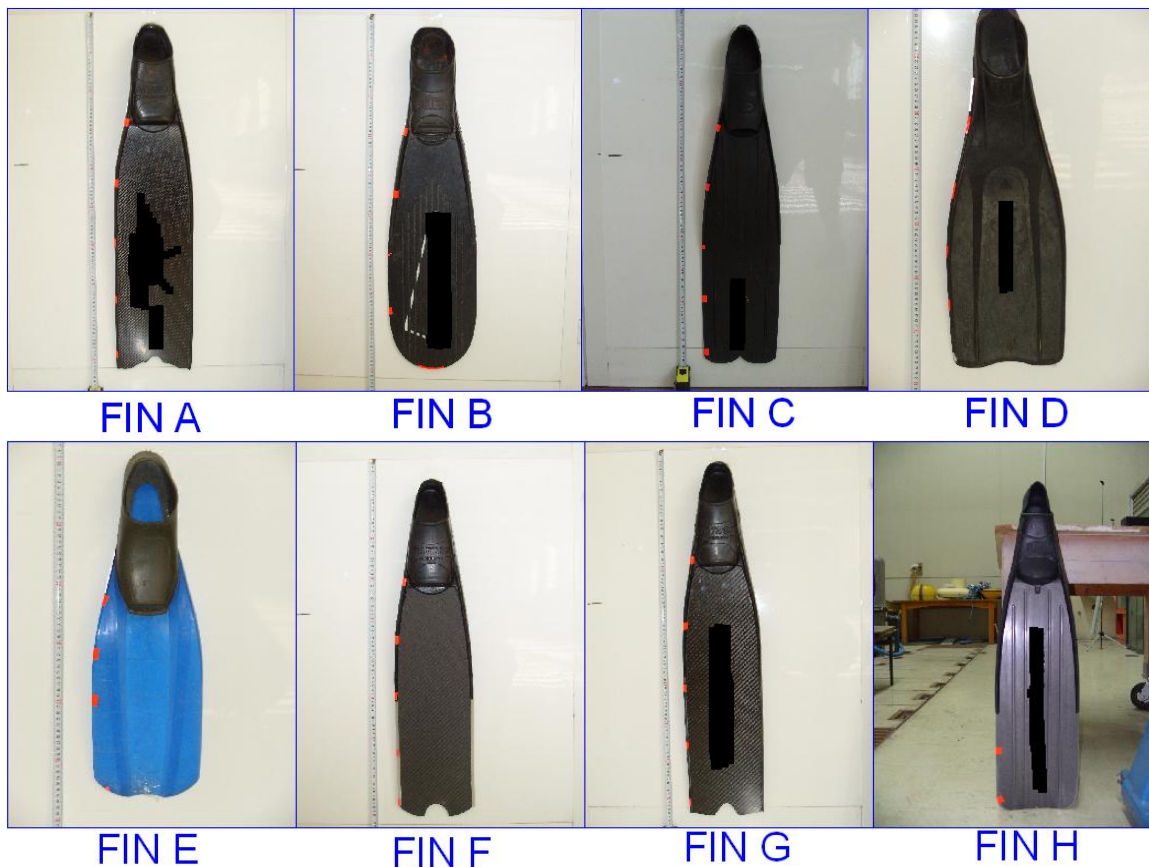
καταγράφηκε κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Μεταξύ του σημείου εφαρμογής της δύναμης (1/4 από την ακμή πρόσπτωσης) και της τροχαλίας τοποθετήθηκε δυναμόμετρο που κατέγραφε την πραγματική τιμή της δύναμης που εφαρμόστηκε χειροκίνητα. Έτσι συγκρίνοντας της πραγματική τιμή (δυναμόμετρο) και τιμή που καταγραφόταν κάθε φορά απ' τον Η/Υ, υπολογίστηκε για κάθε πέδιλο ένας συντελεστής διόρθωσης που κυμάνθηκε από 0.17 έως 0.22.(εικόνα 9)



Εικόνα 9: Εξαγωγή του συντελεστή διόρθωσης για σημείο εφαρμογής της δύναμης σε L/4 απ' την ακμή πρόσπτωσης

3.3.2 Επιλογή πτερυγίων δοκιμών, και καθορισμός των χαρακτηριστικών τους μεγεθών

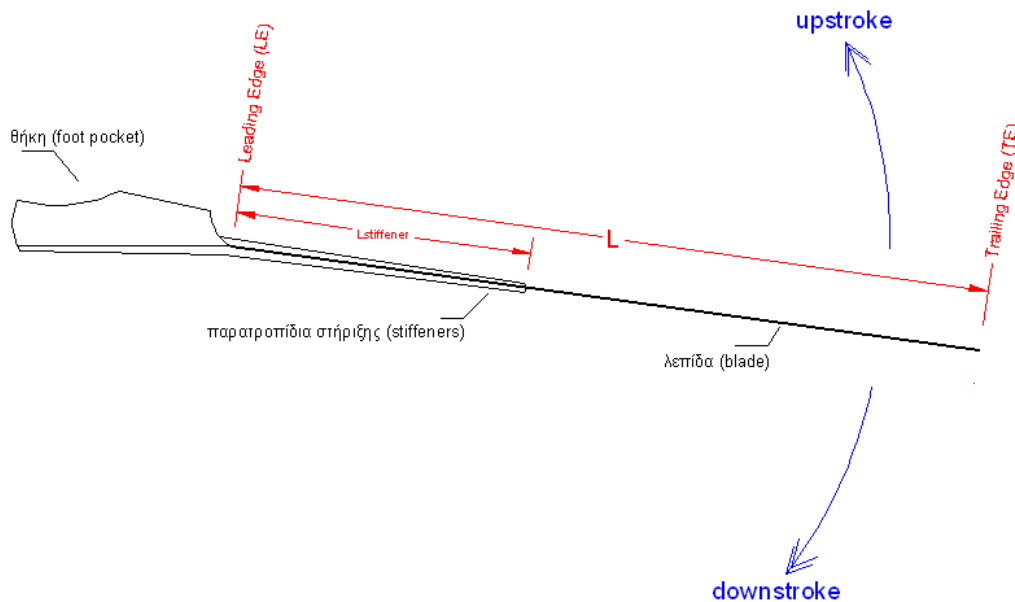
Οκτώ πτερύγια επιλέχθηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν όλο το φάσμα των πτερυγίων κατάδυσης, και κωδικοποιήθηκαν με τα πρώτα οκτώ γράμματα της λατινικής αλφαβήτου (εικόνα 10). Πέντε απ' αυτά ήταν σχετικά μεγάλου μήκους καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα τιμών ακαμψίας και αρκετά δημοφιλή του δύτες ελεύθερης κατάδυσης. Δύο απ' αυτά ήταν σχετικά μικρού μήκους, ενώ δοκιμάστηκε και ένα μεσαίου μήκους με την λεπίδα του να έχει κατασκευαστεί στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας στο ΕΜΠ. Τα υλικά κατασκευής τους ποικίλουν από λάστιχο, πλαστικό και ανθρακόνημα. Τα πέδιλα ταξινομήθηκαν με βάση τις βασικές γεωμετρικές και μηχανικές τους ιδιότητες (Πίνακας 3). Ως γνωστόν αποτελούνται από δύο μέρη, την **θήκη** (παπούτσι) (**foot pocket**), ώστε να προσαρμόζεται στο ανθρώπινο πόδι, η οποία φέρει ενσωματωμένα τα παρατροπίδια στήριξης (της λεπίδας) και την **λεπίδα** (**blade**) που η κίνησή της μέσα στο νερό δημιουργεί τις επιθυμητές ωστικές δυνάμεις.



Εικόνα 10: Τα πέδιλα δοκιμών

Υπολογισμός γεωμετρικών ιδιοτήτων των πτερυγίων

Ως **χαρακτηριστικό μήκος L** του πτερυγίου ορίστηκε η απόσταση από το σημείο αμέσως εμπρός της θήκης (**ακμή πρόσπτωσης**);(**leading edge LE**), μέχρι το τέλος της λεπίδας του πτερυγίου (**ακμή εκφυγής**);(**trailing edge TE**). Τα **πλάτη W_{le}** , **W_{te}** υπολογίστηκαν στην ακμή πρόσπτωσης και εκφυγής αντίστοιχα. Το **εμβαδόν της επιφάνειας της λεπίδας SA** , υπολογίστηκε απ' το περίγραμμα της λεπίδας μέσω ψηφιακών φωτογραφιών. Το **βάρος (MASS)** του κάθε πέλδου βρέθηκε με χρήση ζυγαριάς ακριβείας. Το μήκος **Lstiffener** αντιστοιχεί στο μήκος των παρατροπίδων στήριξης της λεπίδας μετρούμενα απ' την ακμή πρόσπτωσης. Τα υλικά κατασκευής των λεπίδων διαφέρουν και μεταξύ αυτών ήταν το **λάστιχο (rubber)** , το **πλαστικό (plastic)** , και οι **ίνες άνθρακα (carbon)**. Στην **εικόνα 11** φαίνονται όλα τα μεγέθη που ορίστηκαν πριν, ενώ κατά σύμβαση θεωρούμε την **προς τα πάνω κίνηση** του πτερυγίου (**upstroke**), αυτήν που η προσπίπτουσα επιφάνεια με το νερό είναι η πάνω επιφάνεια της λεπίδας .Αντίστροφα, θεωρούμε την **προς τα κάτω κίνηση** του πτερυγίου (**downstroke**), αυτήν που η προσπίπτουσα επιφάνεια με το νερό είναι η κάτω επιφάνεια της λεπίδας



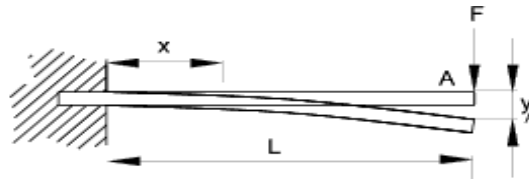
Εικόνα 11: Ορισμός των βασικών χαρακτηριστικών πέλδου κατάδυσης

FIN CHARACTERISTICS										
FIN CODE	MATERIAL	Lstiffener (fromLE) m	L m	Wle m	Wte m	SA m ²	MASS gr	EI	EI	(Eiup-Eidown) /Eidown %
								UPSTROKE N*m ²	DOWNSTROKE N*m ²	
A	carbon	0,27	0,60	0,15	0,20	0,122	620	2,26	1,53	47,80
B	plastic	0,3	0,60	0,14	0,23	0,116	1070	3,36	2,79	20,23
C	plastic	0,31	0,62	0,14	0,21	0,131	1120	3,64	3,34	8,87
D	plastic/rubber	0,18	0,42	0,14	0,21	0,089	700	0,96	0,59	61,54
E	plastic	no	0,32	0,15	0,19	0,058	315	0,45	0,46	-4,09
F	carbon	0,28	0,55	0,15	0,20	0,100	615	1,82	1,57	16,16
G	carbon	0,28	0,61	0,14	0,20	0,124	630	3,91	2,03	92,96
H	plastic	0,36	0,60	0,16	0,23	0,125	1100	-	-	-

Πίνακας 3: Βασικά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων δοκιμών

Υπολογισμός μηχανικών ιδιοτήτων των πτερυγίων

Η βασική μηχανική ιδιότητα που χαρακτηρίζει τα πτερύγια κατάδυσης είναι η **ακαμψία (stiffness)**. Η ακαμψία υπολογίστηκε με χρήση της απλής θεωρίας κάμψης ελαστικής δοκού (Euler simple elastic beam theory). Η διαδικασία υπολογισμού έγινε με παρόμοιο τρόπο όπως στην εργασία των Pendergast et al (2003).



$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -F (L-x) \quad \text{Integrating}$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -F \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right) + C_1 \quad \dots (C_1 = 0 \text{ because } dy/dx = 0 \text{ at } x = 0)$$

Integrating again

$$EI y = -F \left(\frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + C_2 \quad \dots (C_2 = 0 \text{ because } y = 0 \text{ at } x = 0)$$

Euler simple elastic beam theory

Η ακαμψία μετρήθηκε και για τις δύο πλευρές του πτερυγίου (upstroke, downstroke). Και στις δύο περιπτώσεις τα πέδιλα στηρίχθηκαν στο ύψος της ακμής πρόσπτωσης, ώστε η θήκη να παραμένει σταθερή ενώ η λεπίδα να αιωρείται. Στην ακμή εκφυγής (trailing edge) αναρτήθηκαν τρία διαφορετικά βάρη που αντιστοιχούσαν σε δύναμη $W = 3.8\text{N}, 5.2\text{N} \ \& \ 9.95\text{N}$. Εν συνεχεία μετρήθηκε η μετατόπιση δ του περιγράμματος της λεπίδας σε σχέση με την αρχική της θέση (χωρίς ανάρτηση βάρους), σε απόσταση $x = L/4, 2L/4, 3L/4, L$ απ' την ακμή πρόσπτωσης. Με χρήση του τύπου της ελαστικής θεωρίας της κάμψης, υπολογίστηκε η ακαμψία EI για τις δύο πλευρές του πτερυγίου (Eiupstroke, EIdownstroke), ενώ η τελική τιμή της ακαμψίας για κάθε πλευρά λογίστηκε ως ο μέσος όρος των τιμών για τις τέσσερις τιμές της απόστασης x .

$$EI(x) = \frac{\left[W * \left(\frac{L * x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) \right]}{\delta} \quad [N * m^2]$$

Οι μετατοπίσεις (δ) του περιγράμματος των πτερυγίων μετρήθηκαν με σύγκριση ψηφιακών φωτογραφιών στην 'άφορτη' κατάσταση με αυτών υπό φορτίο, κάνοντας χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος Autocad 2012 (εικόνες 12α, 12β)

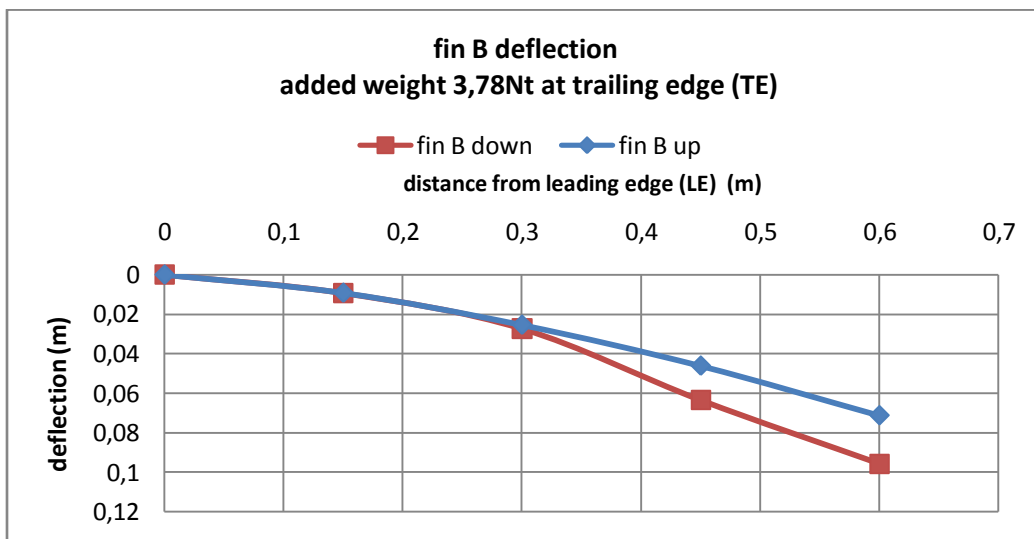
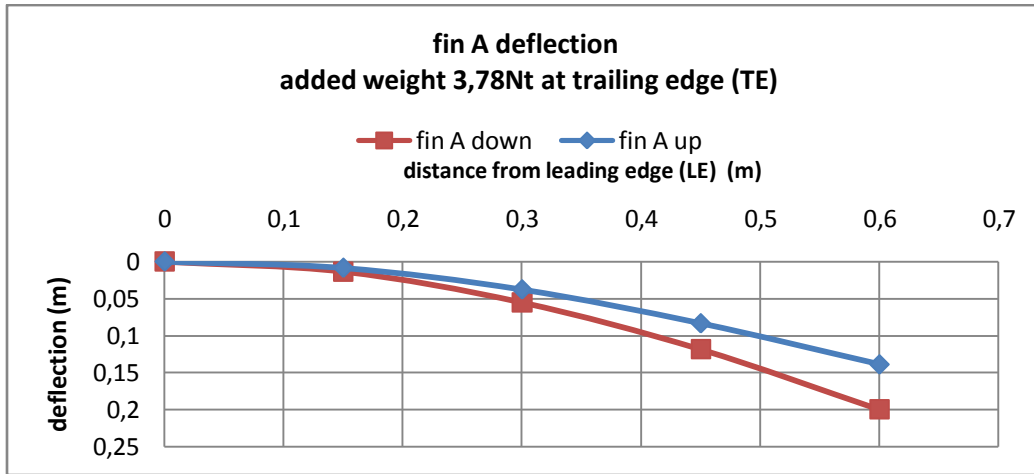


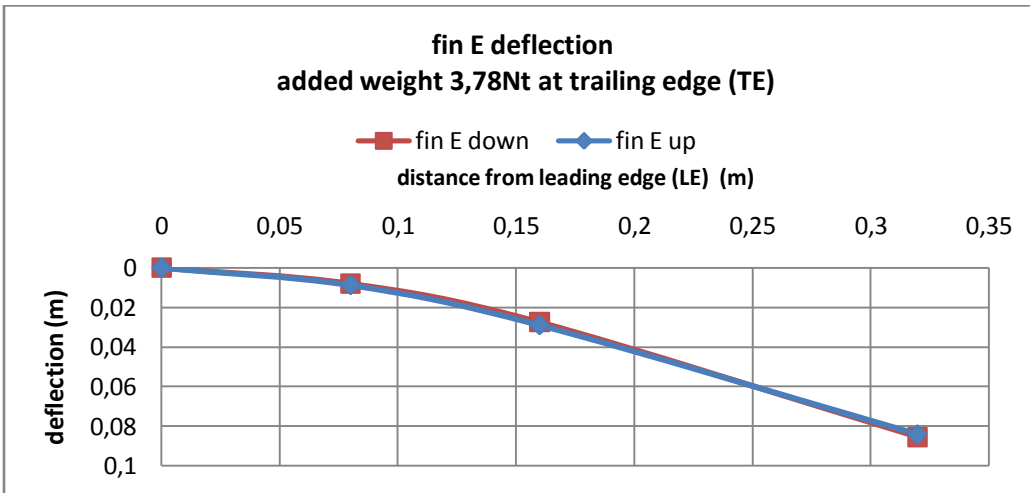
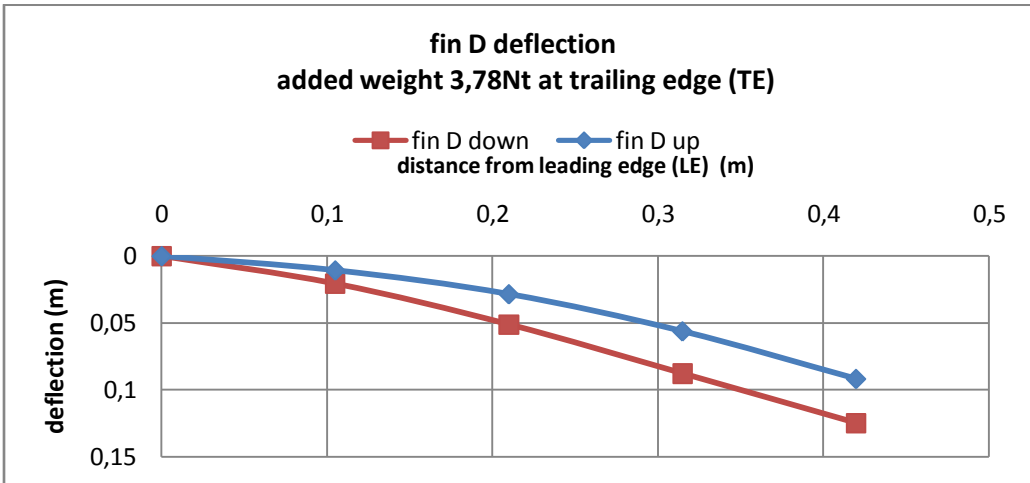
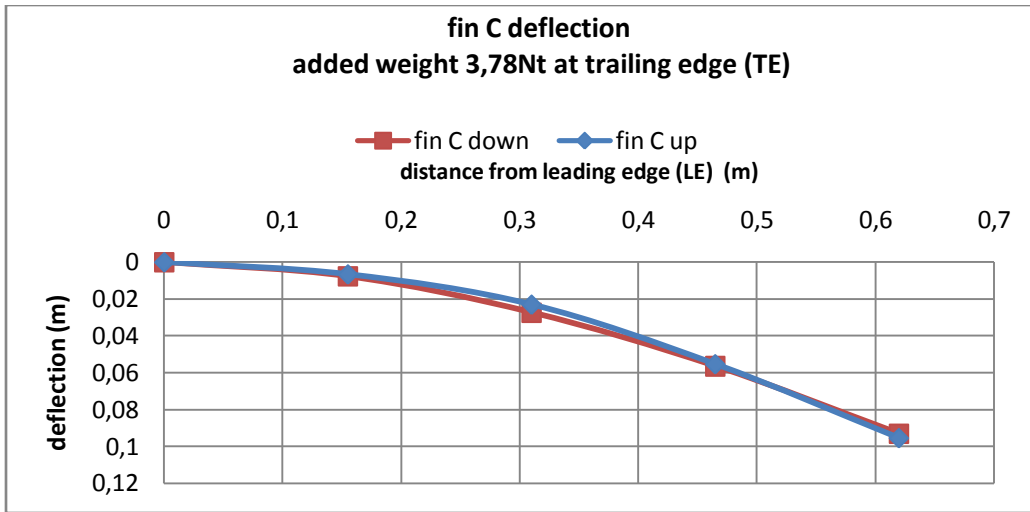
Εικόνα 12α: Φωτογραφίες προφίλ πτερυγίου σε άφορτη και υπο φορτίο κατάσταση, για τον υπολογισμό της ακαμψίας Eiupstroke

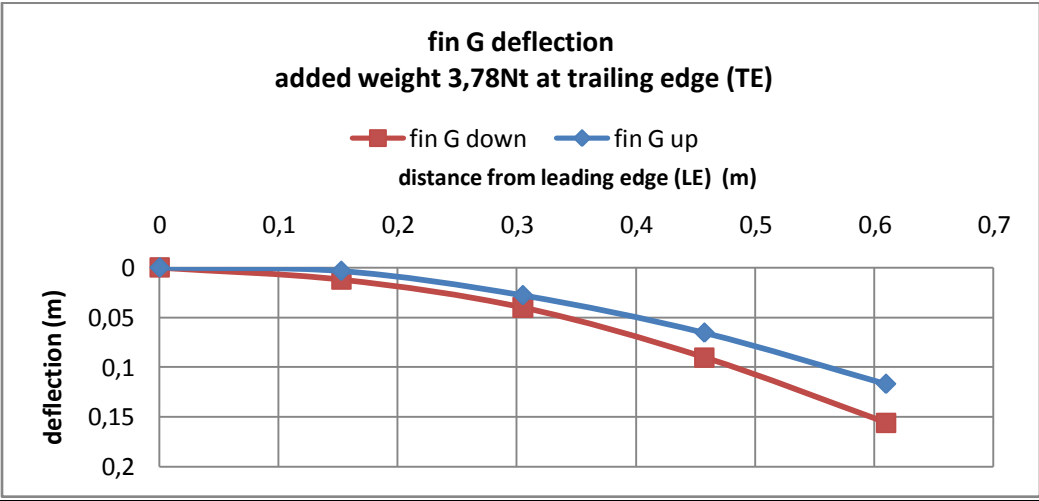
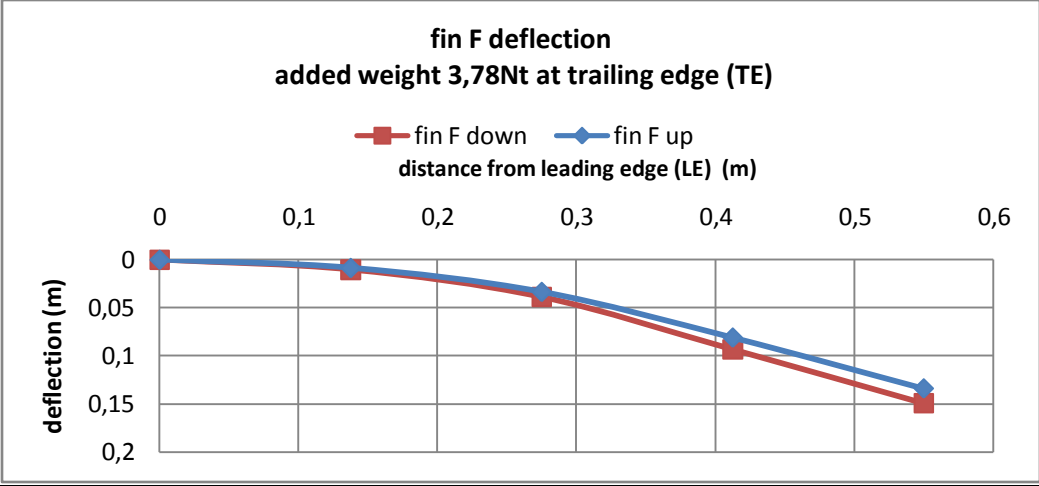


Εικόνα 12β: Φωτογραφίες προφίλ πτερυγίου σε άφορτη και υπο φορτίο κατάσταση, για τον υπολογισμό της ακαμψίας EIdownstroke

Στα παρακάτω διαγράμματα (fin deflection A,B,C,D,E,F,G,H) φαίνονται οι παραμορφώσεις και των δύο πλευρών (upstroke,downstroke) του κάθε πτερυγίου, για ανάρτηση βάρους 3,8N



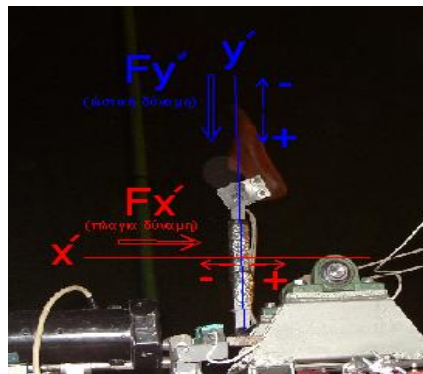




3.4 Εκτέλεση πειράματος

Οκτώ πτερύγια τοποθετήθηκαν στον βραχίονα της πειραματικής διάταξης. Όπως τεκμηριώθηκε στην παράγραφο (3.1) , κατά την διάρκεια των πειραμάτων ,το πλάτος της περιστροφικής ταλάντωσης, μετρούμενο στην άκρη του καλαποδιού (ακμή πρόσπτωσης των πτερυγίων), παρέμεινε σταθερό και ίσο με $A_{le}=0.3m \pm 0.05m$, ενώ η τιμή του ελεγχόταν πριν από κάθε δοκιμή. Η περίοδος της ταλάντωσης $T(s)$ και η ταχύτητα της μεταφορικής κίνησης $V(m/s)$ (ταχύτητα του φορείου) μεταβλήθηκαν σε κάθε δόκιμη σύμφωνα με τον **πίνακα 4**. Έτσι αρχικά, πάρθηκε μέτρηση των δυνάμεων για περίοδο ταλάντωσης $T=1.6s$ και ταχύτητα $V=0m/s$, στατική κατάσταση. Στην συνέχεια για την ταχύτητα $V=0.8m/s$ έγιναν δύο δοκιμές για περιόδους $T=1.6s$ και $T=1.92s$. Για την ταχύτητα $V=0.9m/s$ αντίστοιχα για $T=1.6s$ και $T=1.76s$. Για την ταχύτητα $V=1m/s$ αντίστοιχα για $T=1.6s$ και $T=1.92s$. Για την ταχύτητα $V=1.1m/s$ αντίστοιχα για $T=1.6s$ και $T=1.45s$. Τέλος για την ταχύτητα $V=1.2m/s$ αντίστοιχα για $T=1.6s$ και $T=1.2s$. Σημειώνουμε ότι η ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα ρυθμιζόταν χειροκίνητα μέσω του ροοστάτη και από το αντίστοιχο γράφημα (**εικόνα 13β**) του αισθητήρα θέσης στην οθόνη του υπολογιστή ,ελεγχόταν η περίοδος ταλάντωσης (T). Το σφάλμα στην ρύθμιση της περιόδου ήταν $\pm 0.06sec$

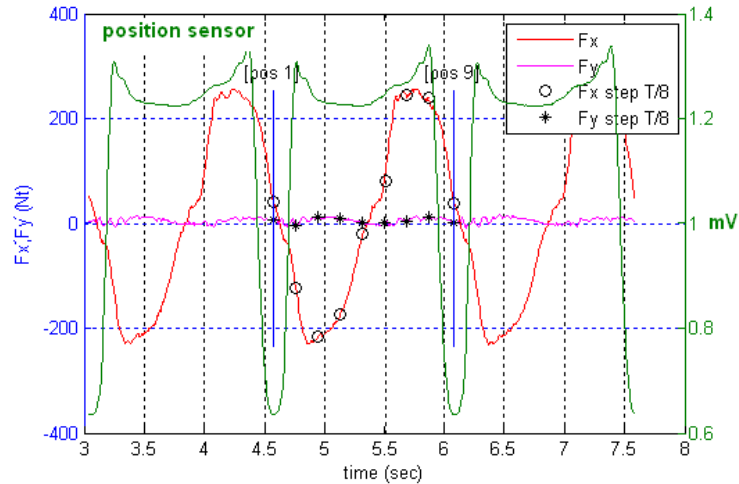
Πριν από κάθε δοκιμή και με τον βραχίονα σε ακίνητη κατάσταση, πάρθηκαν οι μετρήσεις αναφοράς , που αντιστοιχούσαν στις μηδενικές τιμές των δυνάμεων. Σε κάθε δοκιμή, πήραμε τις μετρήσεις όταν η ταχύτητα του φορείου είχε σταθεροποιηθεί μέχρι την στιγμή που το φορείο άρχισε να επιβραδύνει. Ο χρόνος που αντιστοιχούσε σε αυτό το διάστημα ήταν από 30s έως 50s ανάλογα με την ταχύτητα του φορείου. Σε κάθε δοκιμή η κίνηση των πτερυγίων βιντεοσκοπήθηκε, ενώ τα δεδομένα που αφορούσαν τον χρόνο (s) , τις τιμές των δύο μετρούμενων, στον βραχίονα, δυνάμεων (Nt) και τις τιμές του αισθητήρα θέσης (mV), αποθηκεύθηκαν σε αρχεία ASCII. Συνολικά δημιουργήθηκαν 85 αρχεία ASCII και 85 αρχεία βίντεο (.AVI), ισάριθμα με τις δοκιμές (trials) που έγιναν στην δεξαμενή.



Εικόνα 13α : Τα πρόσημα των μετρούμενων δυνάμεων υποδηλώνουν φορά που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα

		STATIC	DYNAMIC				
		ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΟΡΕΙΟΥ V (m/s)					
		0	0,8	0,9	1	1,1	1,2
FINS	A	A0	A08	A09	A10	A11	A12
		T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s
		T=	T=1.92s	T=1.76s	T=	T=1.45	T=1.2s
	B	B0	B08	B09	B10	B11	B12
		T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s
		T=	T=1.92s	T=1.76s	T=	T=1.45	T=1.2s
	C	C0	C08	C09	C10	C11	C12
		T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s
		T=	T=1.92s	T=1.76s	T=1.92s	T=1.45	T=1.2s
	D	D0	D08	D09	D10	D11	D12
		T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s
		T=	T=1.92s	T=1.76s	T=1.92s	T=1.45	T=1.2s
	E	E0	E08	E09	E10	E11	E12
		T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s
		T=	T=1.92s	T=1.76s	T=1.92s	T=1.45	T=1.2s
	F	F0	F08	F09	F10	F11	F12
T=1,6s		T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	
	T=	T=1.92s	T=1.76s	T=1.92s	T=1.45	T=1.2s	
G	G0	G08	G09	G10	G11	G12	
	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	
	T=	T=1.92s	T=1.76s	T=1.92s	T=1.45	T=1.2s	
H	H0	H08	H09	H10	H11	H12	
	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	T=1,6s	
	T=	T=1.92s	T=1.76s	T=	T=1.45	T=1.2s	

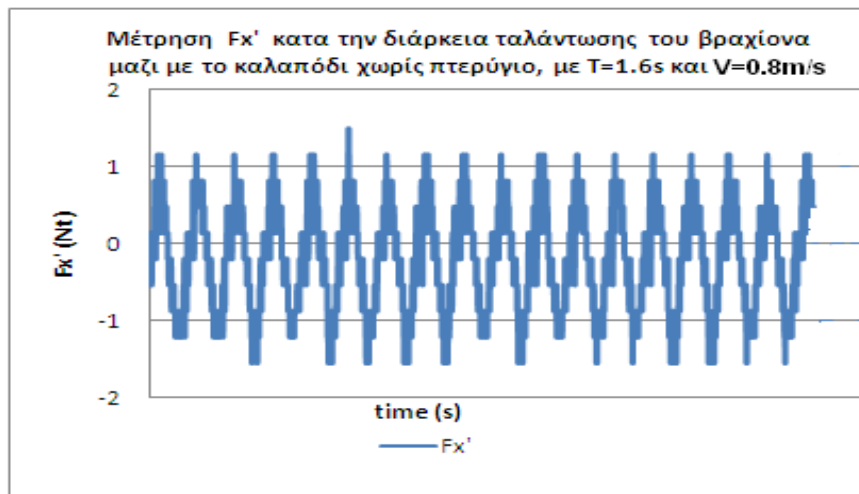
Πίνακας 4 : Οι δοκιμές (trials) που έγιναν στην δεξαμενή



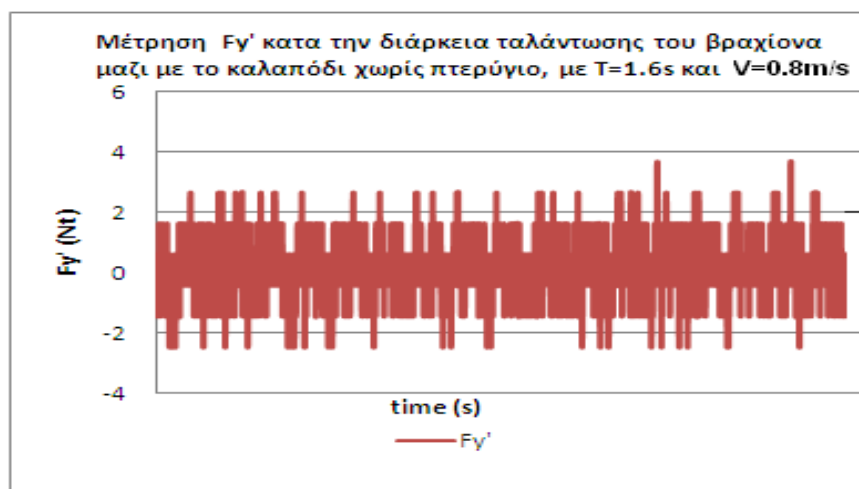
Εικόνα 13β : Γράφημα ως προς τον χρόνο, των μετρούμενων δυνάμεων $F_x'(t)$, $F_y'(t)$ και του αισθητήρα θέσης, έτσι όπως εμφανίστηκε στην οθόνη του Η/Υ κατά την διάρκεια των πειραμάτων

3.4.1 Εκτίμηση της επίδρασης του βραχίονα και του καλαποδιού στις μετρήσεις των δυνάμεων

Η προσέγγιση της επίδρασης του βραχίονα στο πεδίο ροής του περυγίου αποτελεί μια πολύ πιο σύνθετη διαδικασία από έναν απλό αλγεβρικό υπολογισμό. Θεωρήθηκε αναγκαία η ποιοτική εκτίμηση της αντίστασης του βραχίονα, μέσω της εκτέλεσης δοκιμής σε μια τυπική περίοδο $T=1.6s$ και ταχύτητα μεταφορικής κίνησης $V=0.8m/s$, χωρίς την παρουσία περυγίου. Οι δυνάμεις που καταγράφηκαν κυμαίνονται από $-1,5$ έως $1,2$ N για την πλάγια δύναμη F_x' (διάγραμμα 4α) και από $-1,8$ έως 1.8 N για την αξονική δύναμη παράλληλη κάθε φορά στον βραχίονα F_y' (διάγραμμα 14β). Δηλαδή τιμές που κινούνται στα όρια του σφάλματος των μετρικής διάταξης.

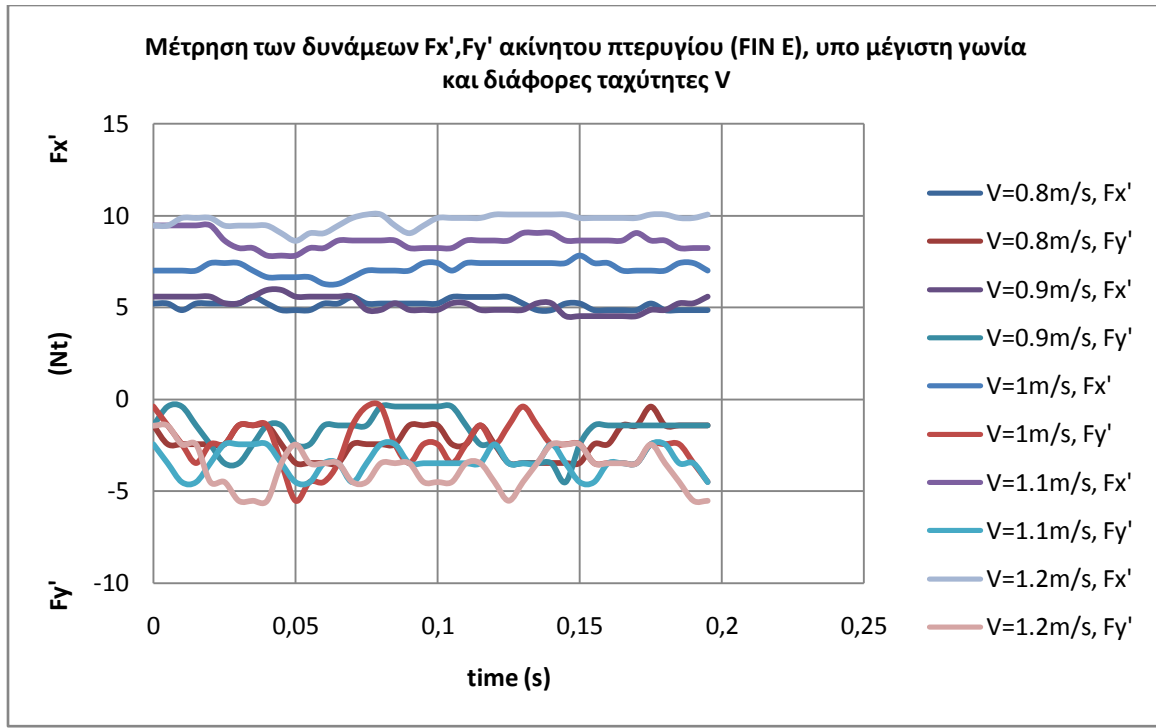


Διάγραμμα 4α



Διάγραμμα 4β

Στο διάγραμμα 4γ φαίνονται οι τιμές των δυνάμεων F_x' και F_y' ακίνητου πτερυγίου (FIN E) υπο μέγιστη γωνία στροφής απ' τον άξονα της μεταφορικής κίνησης για τις ταχύτητες 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2 m/s



Διάγραμμα 4γ

3.5 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα που πάρθηκαν κατά την διάρκεια των δοκιμών αποθηκεύτηκαν σε αρχεία τύπου ASCII (πίνακας 1), υπό την μορφή τεσσάρων στηλών. Στη πρώτη στήλη καταγράφηκαν οι χρονικές στιγμές (sec) κατά τις οποίες έγινε η λήψη (200Hz) των δεδομένων. Στην δεύτερη στήλη καταγράφηκαν οι τιμές της πλάγιας δύναμης F_x' (Nt) στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές, ενώ στην τρίτη στήλη αποθηκεύτηκαν οι τιμές της ωστικής δύναμης F_y' (Nt). Η τέταρτη στήλη περιείχε την τιμές που λήφθηκαν απ' τον αισθητήρα θέσης (mV). Σημειώνουμε οι ελάχιστες τιμές τάσης του αισθητήρα θέσης αντιστοιχούν στην ακραία αριστερή θέση του βραχίονα η οποία αποτελεί και την αρχή της κίνησης downstroke, όπως αυτή ορίστηκε στην παράγραφο (3.3.2).

			position
t(s)	F_x' (Nt)	F_y' (Nt)	sensor (mV)
0	233.5	10.83	1.098
0.005	227.5	10.83	1.068
0.01	225.5	10.83	1.037
0.015	219.6	11.85	1.006
0.02	217.6	11.85	0.976
0.025	211.7	11.85	0.9472
0.03	207.7	11.85	0.9184
0.035	203.7	12.88	0.8908
0.04	199.8	13.9	0.8644
0.045	195.8	12.88	0.84
0.05	189.9	11.85	0.8168
0.055	183.9	10.83	0.7948
0.06	178	10.83	0.7744
0.065	172	10.83	0.7556
0.07	164.1	9.81	0.738
0.075	156.1	7.766	0.7216
0.08	148.2	6.744	0.7064
0.085	140.3	8.788	0.6928
*	*	*	*
*	*	*	*

Πίνακας 1: Μέρος αρχείου δεδομένων τύπο ASCII, με συχνότητα δειγματοληψίας 200Hz

3.5.1 Υπολογισμός της περιόδου (T) της ημιπεριστροφικής ταλάντωσης του πτερυγίου

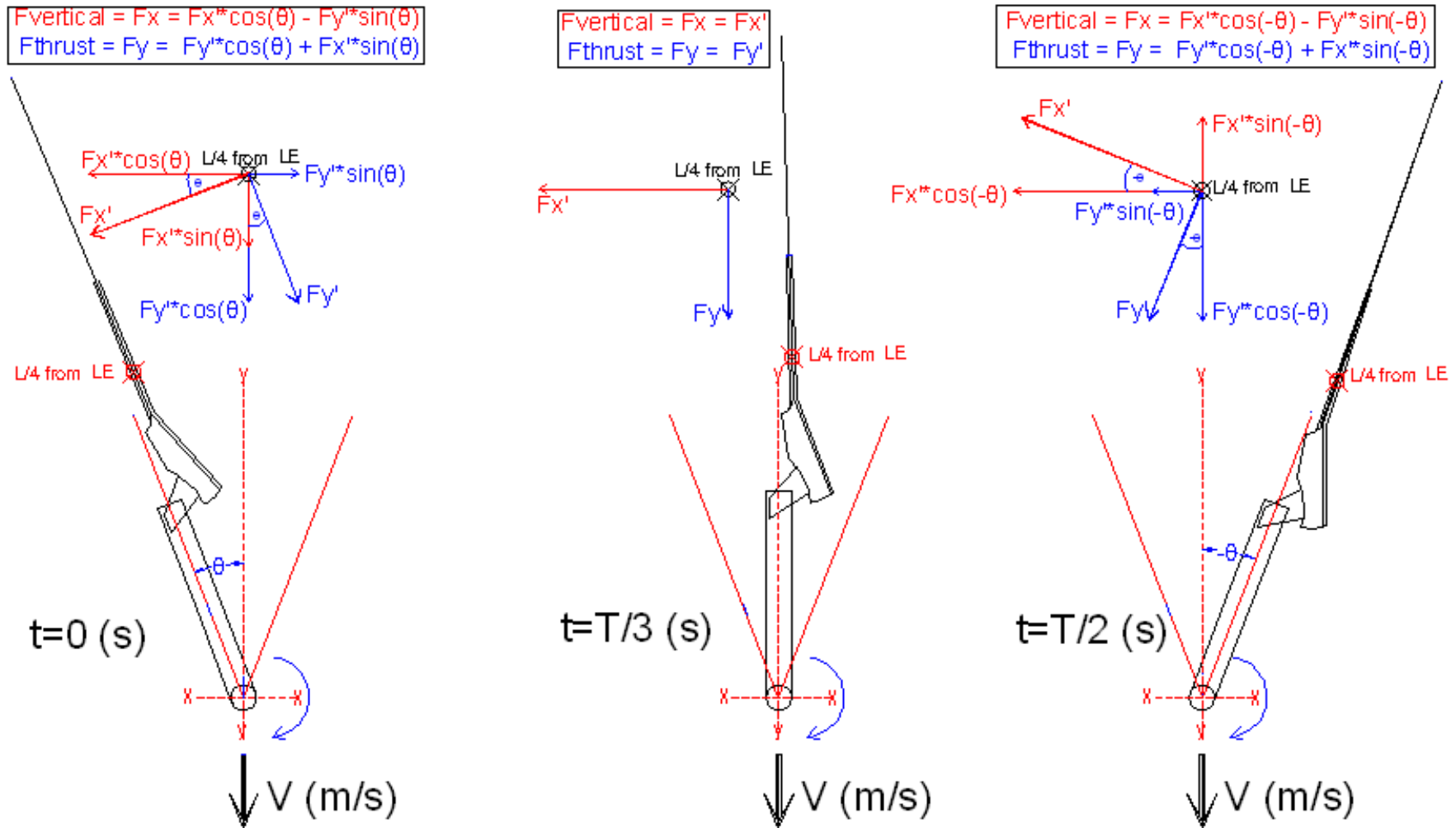
Τα δεδομένα των αρχείων επεξεργάστηκαν με δημιουργία κώδικα στο πρόγραμμα MATLAB. Κάθε στήλη του αρχείου δεδομένων αντιστοιχήθηκε σε ισάριθμους μονοδιάστατους πίνακες. Με την εύρεση των ελάχιστων τιμών του αισθητήρα και με την αντιστοίχιση τους στις τιμές του χρόνου, έγινε δυνατή η εύρεση των χρονικών στιγμών που αντιστοιχούν στην αρχή ενός κύκλου ημιπεριστροφικής ταλάντωσης. Η χρονική διαφορά μεταξύ δυο συνεχών ελαχίστων του αισθητήρα θέσης, αντιστοιχεί στην περίοδο $T(s)$ ενός κύκλου ημιπεριστροφικής ταλάντωσης του πτερυγίου. Η τελική τιμή της περιόδου υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος όλων των κύκλων.

3.5.2 Εξαγωγή μέσου κύκλου ταλάντωσης και ανάλυση των μετρούμενων δυνάμεων ως προς το σύστημα XY (άξονας Y παράλληλος στην διεύθυνση της μεταφορικής κίνησης)

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε ένας αντιπροσωπευτικός κύκλος, του οποίου οι τιμές των δυνάμεων F_x' και F_y' κάθε χρονική στιγμή, υπολογίστηκαν ως ο μέσος όρος των τιμών των δυνάμεων, όλων των κύκλων, στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Σημειώνουμε, ότι οι μετρήσεις που πάρθηκαν είναι ως προς σωματοπαγές σύστημα αξόνων $x'y'$ το οποίο κινείται μαζί με τον βραχίονα (άξονας y' παράλληλος κατά μήκος του βραχίονα). Συνεπώς κρίθηκε απαραίτητη η ανάλυση των δυνάμεων ως προς σύστημα xy , με τον άξονα Y παράλληλο στην διεύθυνση της μεταφορικής κίνησης V , καθώς σ' αυτήν την διεύθυνση δρα η ωστική δύναμη στην οποία οφείλεται η μετακίνηση του δύτη.

Η ανάλυση των μετρούμενων δυνάμεων στους άξονες XY , προϋποθέτει την γνώση την θέσης και της κατεύθυνσης του πτερυγίου κάθε χρονική στιγμή κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Στα **εικόνες 1,2** χωρίστηκε η κίνηση του πτερυγίου κατά την διάρκεια μιας περιόδου σε έξι αντιπροσωπευτικές καταστάσεις ($0, T/3, T/2, 2T/3, T$), στις οποίες οι δυνάμεις $F_x'(t)$ & $F_y'(t)$ που μετρήθηκαν απ' τα επιμηκυσιόμετρα αναλύονται στο σύστημα αξόνων XY στις δυνάμεις $F_x(t)$ και $F_y(t)$ αντίστοιχα. Οι τρεις πρώτες καταστάσεις αντιπροσωπεύουν την δεξιόστροφη κίνηση του πτερυγίου (downstroke) κατά την οποία η επιφάνεια πρόσπτωσης με το ρευστό είναι η 'κάτω' επιφάνεια της λεπίδας, ενώ οι τρεις τελευταίες καταστάσεις αντιπροσωπεύουν την αριστερόστροφη κίνηση του πτερυγίου (upstroke) με επιφάνεια πρόσπτωσης να είναι η 'πάνω' επιφάνεια της λεπίδας. **Ο υπολογισμός της πλάγιας δύναμης $F_x(t)$ ($F_{vertical}$) και της ωστικής δύναμης $F_y(t)$ (F_{thrust}), δίνεται στους τύπους που αναγράφονται στις εικόνες 1&2**

downstroke rotation ↻

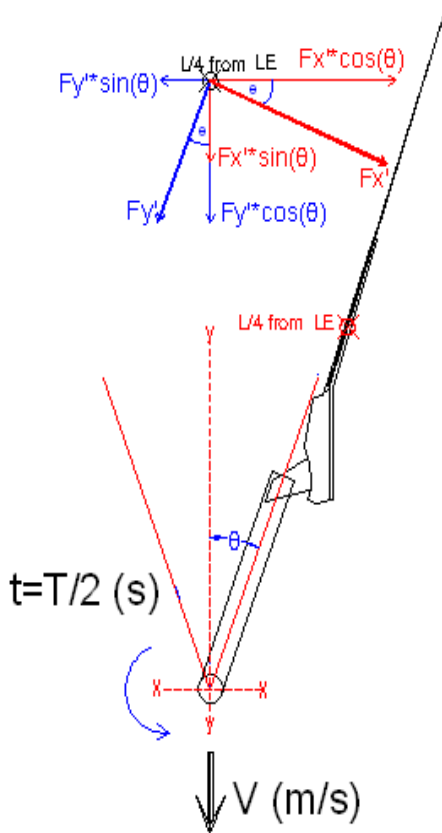


Εικόνα 1: Ανάλυση των μετρούμενων δυνάμεων $F_x'(t)$, $F_y'(t)$ στο σύστημα αξόνων xy ($F_x(t)$, $F_y(t)$) κατά την διάρκεια της δεξιόστροφης κίνησης του πτερυγίου (downstroke)

upstroke rotation ↻

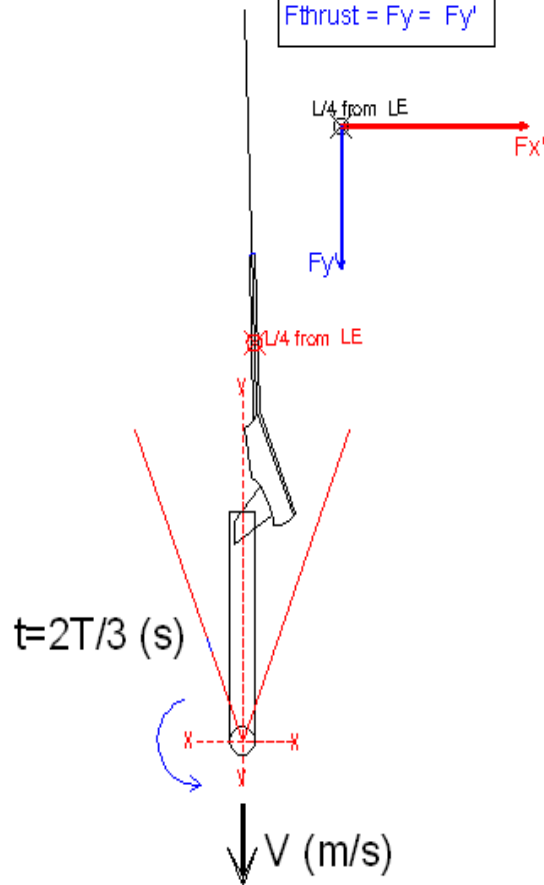
$$F_{\text{vertical}} = F_x = F_x' \cos(\theta) - F_y' \sin(\theta)$$

$$F_{\text{thrust}} = F_y = F_y' \cos(\theta) + F_x' \sin(\theta)$$



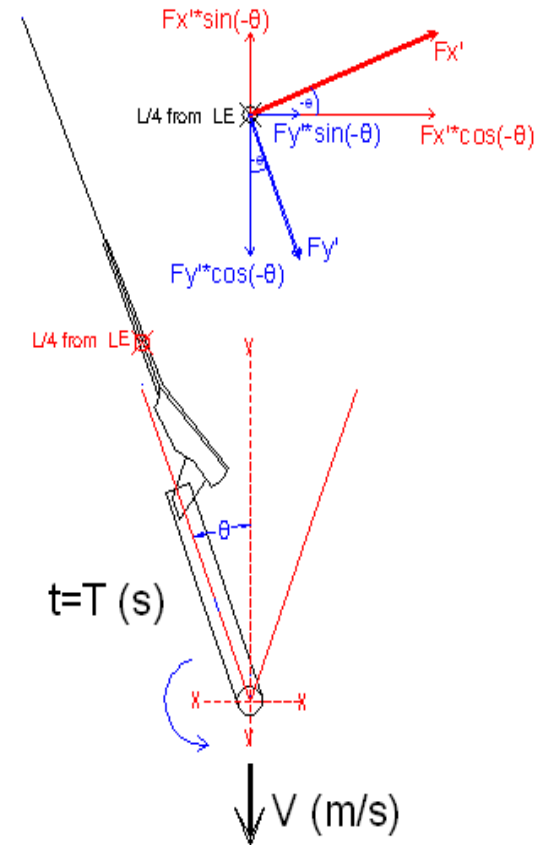
$$F_{\text{vertical}} = F_x = F_x'$$

$$F_{\text{thrust}} = F_y = F_y'$$



$$F_{\text{vertical}} = F_x = F_x' \cos(-\theta) - F_y' \sin(-\theta)$$

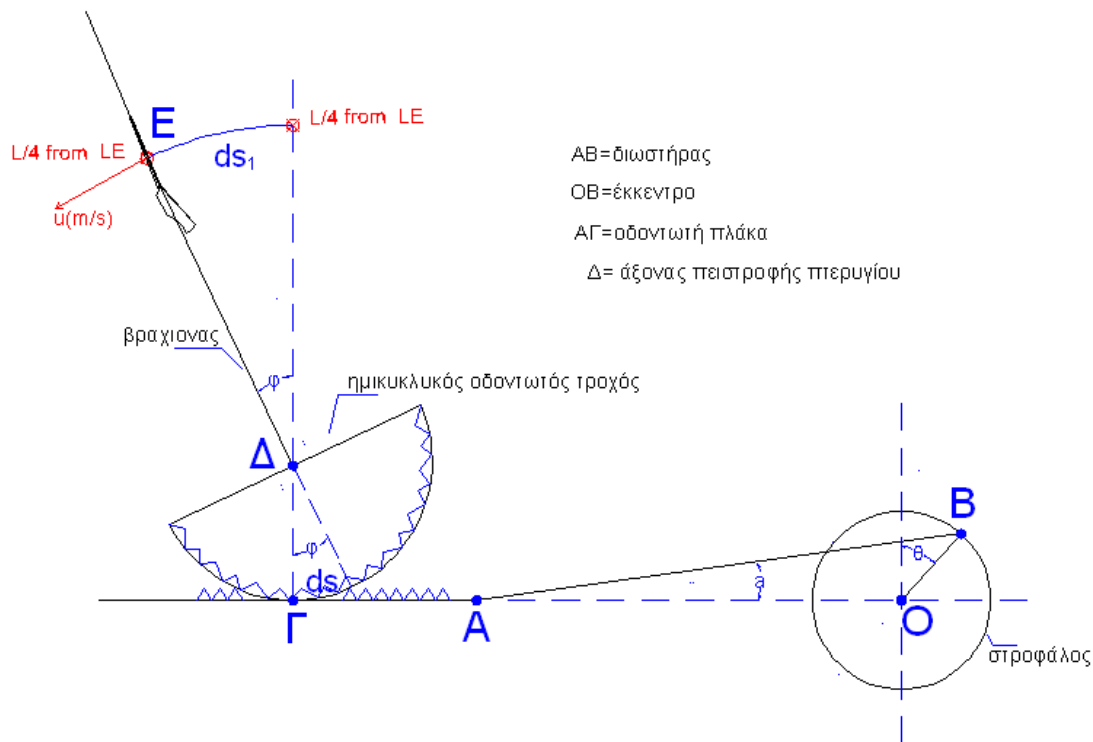
$$F_{\text{thrust}} = F_y = F_y' \cos(-\theta) + F_x' \sin(-\theta)$$



Εικόνα 2: Ανάλυση των μετρούμενων δυνάμεων $F_x'(t)$, $F_y'(t)$ στο σύστημα αξόνων xy ($F_x(t)$, $F_y(t)$) κατά την διάρκεια της αριστερόστροφης κίνησης του πτερυγίου (upstroke)

3.5.3 Υπολογισμός της εφαπτομενικής ταχύτητας $u(m/s)$ του πτερυγίου κατά την διάρκεια μιας περιόδου στην θέση $L/4$ από την ακμή πρόσπτωσης

Στην συνέχεια υπολογίστηκε η γωνιακή ταχύτητα του πτερυγίου στο σημείο που ασκούνται οι δημιουργούμενες δυνάμεις απ' την αλληλεπίδραση την κίνησης του πτερυγίου με το ρευστό. Όπως τεκμηριώθηκε στην παράγραφο (3.3.1) το σημείο αυτό απέχει $L/4$ απ' την ακμή πρόσπτωσης του πτερυγίου (σημείο πίεσης επίπεδης πλάκας). Η ταχύτητα αυτή προέκυψε απ' την κινηματική ανάλυση των μηχανικών στοιχείων που θέτουν σε κίνηση το πτερύγιο. Στην **εικόνα 3** φαίνεται το σχεδιάγραμμα των μηχανικών στοιχείων που συμμετέχουν στην κίνηση του πτερυγίου. Παρακάτω εξηγείται το σχεδιάγραμμα και ο τρόπος υπολογισμού της εφαπτομενικής ταχύτητας u .



Εικόνα 3: κινηματική ανάλυση των μηχανικών στοιχείων κίνησης του πτερυγίου

AB= διωστήρας= 0.18m

OB= έκκεντρο

ΓΔ= ακτίνα ημικυκλικού οδοντωτού τροχού

ΔΕ= απόσταση άξονα περιστροφής από το σημείο του πτερυγίου που υπολογίζεται η εφαπτομενική ταχύτητα =0.77m

Η γωνία μεταξύ του έκκεντρου και της ακτίνας του στροφάλου υπολογίζεται ως εξής

$$\theta(t) = \omega * t = \frac{2 * p}{T} * t$$

$$(AO)^2 = (AB)^2 + (OB)^2 - 2(AB) * (OB) * \cos(\theta - \alpha)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{OB * \sin(\theta)}{AB}$$

αντικαθιστώντας

$$AO = \sqrt{AB^2 + OB^2 - 2 * AB * OB * \cos(\theta - \alpha)}$$

Ισχύει ότι

$$ds = OB * d\varphi$$

ολοκληρώνοντας

$$AO = OB * \varphi$$

$$\varphi = \frac{\sqrt{AB^2 + OB^2 - 2 * AB * OB * \cos(\theta - \alpha)}}{OB}$$

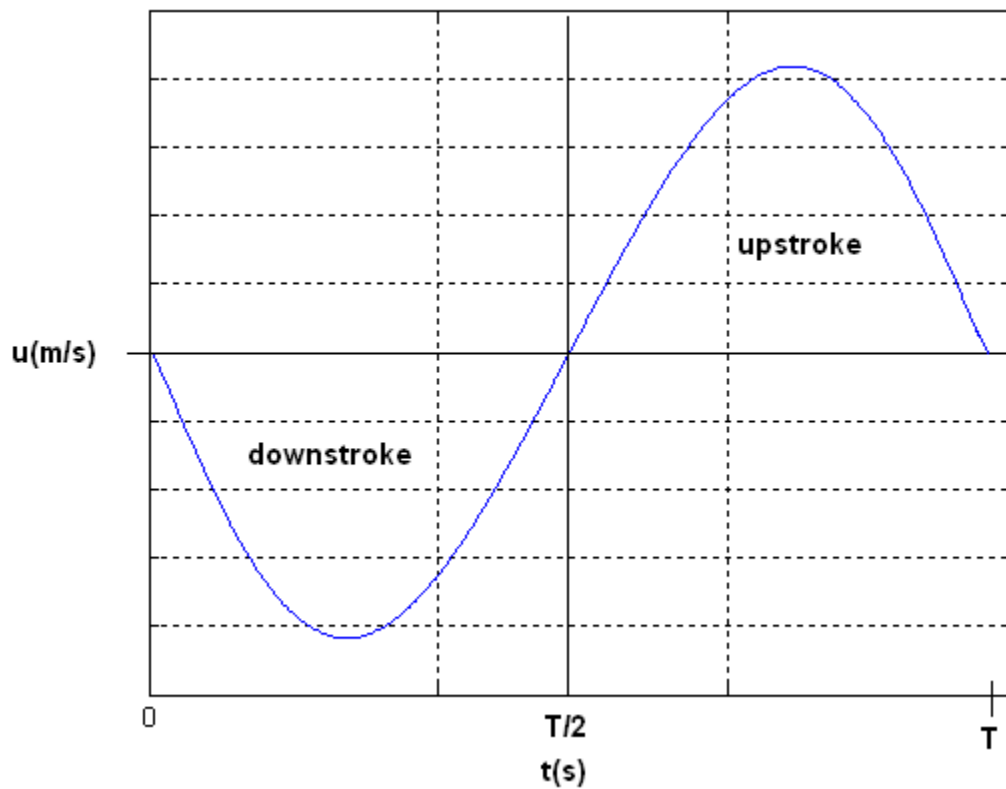
Επίσης ισχύει

$$ds1 = \Delta E * d\varphi$$

παραγωγίζουμε ως προς τον χρόνο t

$$u(t) = \frac{\Delta E * d\phi}{dt} \quad [m/s]$$

Ο παραπάνω τύπος υπολογίζει την εφαπτομενική ταχύτητα σε απόσταση $L/4$ από την ακμή πρόσπτωσης του πτερυγίου την χρονική στιγμή t . (διάγραμμα 1)



Διάγραμμα 1: Μεταβολή εφαπτομενικής ταχύτητας κατά την διάρκεια μιας περιόδου

3.5.4 Υπολογισμός καταναλισκόμενης, ωφέλιμης ισχύος & υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης

Η καταναλισκόμενη ενέργεια για την κίνηση του πτερυγίου προσδιορίστηκε ως εξής:

$$P_{input} = \int_0^T M(t) * \frac{d\phi}{dt}(t) * dt \quad [Watt]$$

Όπου **M(t) (N*m)** η ροπή που εφαρμόζεται για την κίνηση του πτερυγίου, **φ (deg)** η γωνία μεταξύ του βραχίονα και άξονα παράλληλου στην μεταφορική κίνηση του πτερυγίου.

$$P_{input} = \int_0^T Fx'(t) * \Delta E * \frac{d\phi}{dt}(t) * dt \quad [Watt]$$

Όμως, όπως αποδείχτηκε πριν

$$u(t) = \frac{\Delta E * d\phi}{dt} \quad [m/s]$$

Αντικαθιστώντας έχουμε:

$$P_{input} = \int_0^T Fx'(t) * u(t) * dt \quad [Watt]$$

Όπου **Fx'(t) (Nt)** η πλάγια δύναμη που ασκείται κάθετα στον βραχίονα κίνησης του πτερυγίου, **u(t) (m/s)** η εφαπτομενική ταχύτητα σε απόσταση L/4 από την ακμή πρόσπτωσης του πτερυγίου, **ΔE=0.77m** η απόσταση άξονα περιστροφής από το σημείο του πτερυγίου που υπολογίζεται η εφαπτομενική ταχύτητα

Η ωφέλιμη ενέργεια υπολογίστηκε ως εξής:

$$P_{output} = \int_0^T Fy(t) * V * dt \quad [Watt]$$

Όπου **Fy(t) (Nt)** η ωστική δύναμη ως προς άξονα παράλληλο στην μεταφορική κίνηση του πτερυγίου, **V (m/s)** η ταχύτητα της μεταφορικής κίνησης

Συνεπώς ο υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως (Triantafyllou et al. 1999):

$$EC = \frac{P_{output}}{P_{input}}$$

Αντίστοιχα, υπολογίστηκαν οι υδροδυναμικοί βαθμοί απόδοσης ξεχωριστά για την δεξιόστροφη κίνηση του πτερυγίου (*downstroke*) και για την αριστερόστροφη (*upstroke*) κίνηση κατά τη διάρκεια μιας περιόδου.

Για την κίνηση *downstroke* ,0 έως T/2:

$$P_{input}(downstroke) = \int_0^{T/2} Fx'(t) * u(t) * dt \quad [Watt]$$

$$P_{output}(downstroke) = \int_0^{T/2} Fy(t) * V * dt \quad [Watt]$$

$$EC_{downstroke} = \frac{P_{output}(downstroke)}{P_{input}(downstroke)}$$

Για την κίνηση *upstroke* ,T/2 έως T:

$$P_{input}(upstroke) = \int_{T/2}^T Fx'(t) * u(t) * dt \quad [Watt]$$

$$P_{output}(upstroke) = \int_{T/2}^T Fy(t) * V * dt \quad [Watt]$$

$$EC_{upstroke} = \frac{P_{output}(upstroke)}{P_{input}(upstroke)}$$

3.5.5 Υπολογισμός απόδοσης στην στατική κατάσταση (μηδενική ροή ελεύθερου ρεύματος $V=0$)

Υπο μηδενική ελεύθερη ροή δεν ήταν δυνατό να υπολογιστεί η ωφέλιμη ωστική ισχύς και συνεπώς ο υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης του πτερυγίου, αφού $V=0$ m/s

Έτσι προσεγγίστηκε με βάση τις μέγιστες ωστικές και πλάγιες δυνάμεις Fy_{max} & Fx_{max} αντίστοιχα, ως εξής (Mathioulakis et Bardis, 2010):

$$EC_{static} = \frac{Fy_{max}^2}{\sqrt{Fy_{max}^2 + Fx_{max}^2}}$$

3.5.6 Υπολογισμός αριθμού Strouhal και συντελεστών πλάγιας και ωστικής δύναμης

Ο αριθμός Strouhal ορίζεται ως προς το συνολικό πλάτος ταλάντωσης της ακμής εκφυγής του πτερυγίου (A_{TE})

$$St = \frac{f * A_{te}}{V}$$

Όπου **f (Hz)** η συχνότητα ταλάντωσης του πτερυγίου σε Hz, $f=\omega/(2\pi)$, **Ate (m)** ένα χαρακτηριστικό πλάτος του δημιουργούμενου ομόρρου (wake), εδώ θεωρείται το πλάτος ταλάντωσης της ακμής εκφυγής (trailing edge) του πτερυγίου και **V(m/s)** η ταχύτητα της μεταφορικής κίνησης του πτερυγίου.

Η μέση χρονικά ώση (F_y ή F_{thrust}) αδιαστατοποιημένη με το γινόμενο της δυναμικής πίεσης του ελεύθερου ρεύματος του ρευστού επί το εμβαδόν του πτερυγίου, ορίζει τον συντελεστή ώσης C_T :

$$C_{Thrust} = CF_y = \frac{F_y}{0,5 * \rho * SA * V^2}$$

Όπου $F_y = F_{thrust}$ (N) η ωστική δύναμη κατά μήκος άξονα παράλληλο στην μεταφορική κίνηση (παράγραφος 3.5.2), ρ η πυκνότητα του ρευστού (γλυκό νερό), SA (m^2) το εμβαδόν της επιφάνειας μιας πλευράς του πτερυγίου, V (m/s) η ταχύτητα της μεταφορικής κίνησης

Αντίστοιχα, ο συντελεστής της πλάγιας δύναμης $F_x = F_{vertical}$ (N) υπολογίζεται ως εξής:

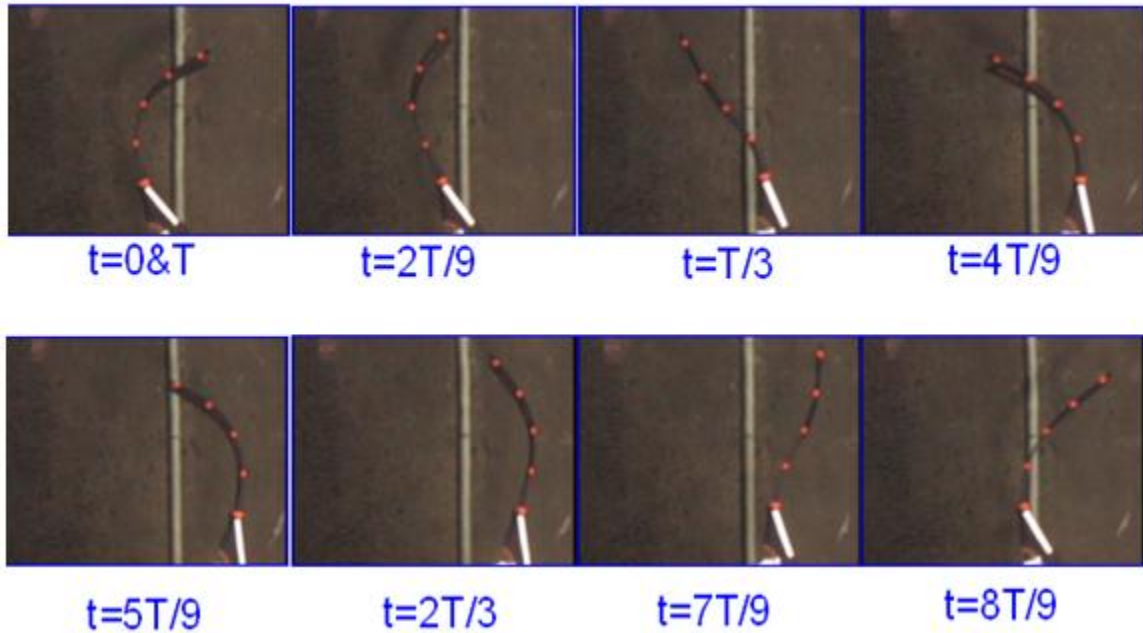
$$C_{vertical} = CF_x = \frac{F_x}{0,5 * \rho * SA * V^2}$$

Όπου $F_x = F_{vertical}$ (N) η πλάγια δύναμη που ασκείται κάθετα στον άξονα της μεταφορικής κίνησης (παράγραφος *****), ρ η πυκνότητα του ρευστού (γλυκό νερό), SA (m^2) το εμβαδόν της επιφάνειας μιας πλευράς του πτερυγίου, V (m/s) η ταχύτητα της μεταφορικής κίνησης

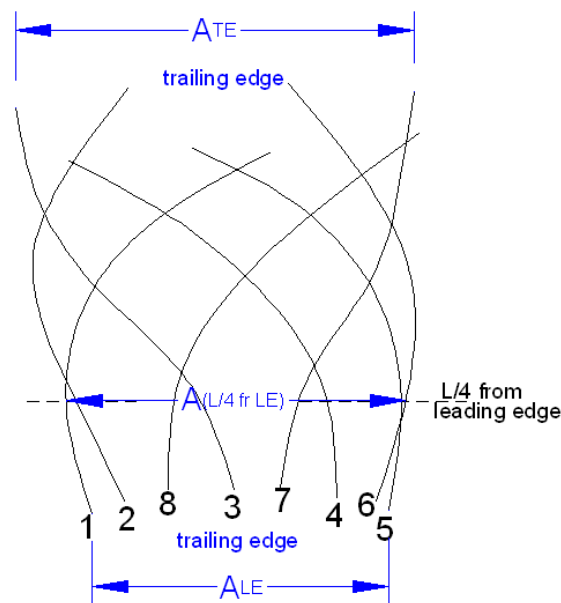
3.5.7 Υπολογισμός A_{LE} , A_{TE} , $A(L/4 \text{ from } LE)$ και προσδιορισμός του σχήματος του πτερυγίου κατά την διάρκεια της κίνησής του

Τα βίντεο που κατέγραψαν το σχήμα της λεπίδας των πτερυγίων κατά την διάρκεια του πειράματος, αναλύθηκαν με την βοήθεια λογισμικού **Pinnacle Studio 12**. Από βίντεο διάρκειας μιας περιόδου πάρθηκαν 9 εικόνες αντιπροσωπεύοντας τις χρονικές στιγμές 0, 2T/9, T/3, 4T/9, 5T/9, 2T/3, 7T/9, 8T/9, T. Οι καταγεγραμμένες εικόνες των πεδίων επεξεργάστηκαν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα **AutoCad 2012**. Μεγεθύνθηκαν σε κλίμακα 1:1 και σχεδιάστηκαν σημεία, πάνω στα έντονου χρώματος σημάδια που είχαν τοποθετηθεί στο περίγραμμα των πτερυγίων ανά L/4 από την ακμή πρόσπτωσης μέχρι την ακμή εκφυγής. Με παρεμβολή καμπύλης B-Spline στα

προαναφερθέντα σημεία, προσεγγίστηκε με ακρίβεια το σχήμα του κάθε πτερυγίου για κάθε χρονική στιγμή. Έτσι μετρώντας το εύρος ταλάντωσης στο ύψος την ακμής πρόσπτωσης (leading edge), στην ακμή εκφυγής (trailing edge), και στο θεωρούμενο ως σημείο πίεσης του πτερυγίου ($L/4$ από την ακμή πρόσπτωσης), υπολογίστηκαν τα πλάτη **ALE**, **ATE**, **A(L/4 from LE)**.



Εικόνα 4: Στιγμιότυπα από 9 χρονίες στιγμές κατά την διάρκεια μιας περιόδου (FIN A, $T=1.6s$, $V=0m/s$)



Εικόνα 5: Το σχήμα του πτερυγίου στις οκτώ χρονικές στιγμές της εικόνας 4, ύστερα από επεξεργασία στο Autocad 2012

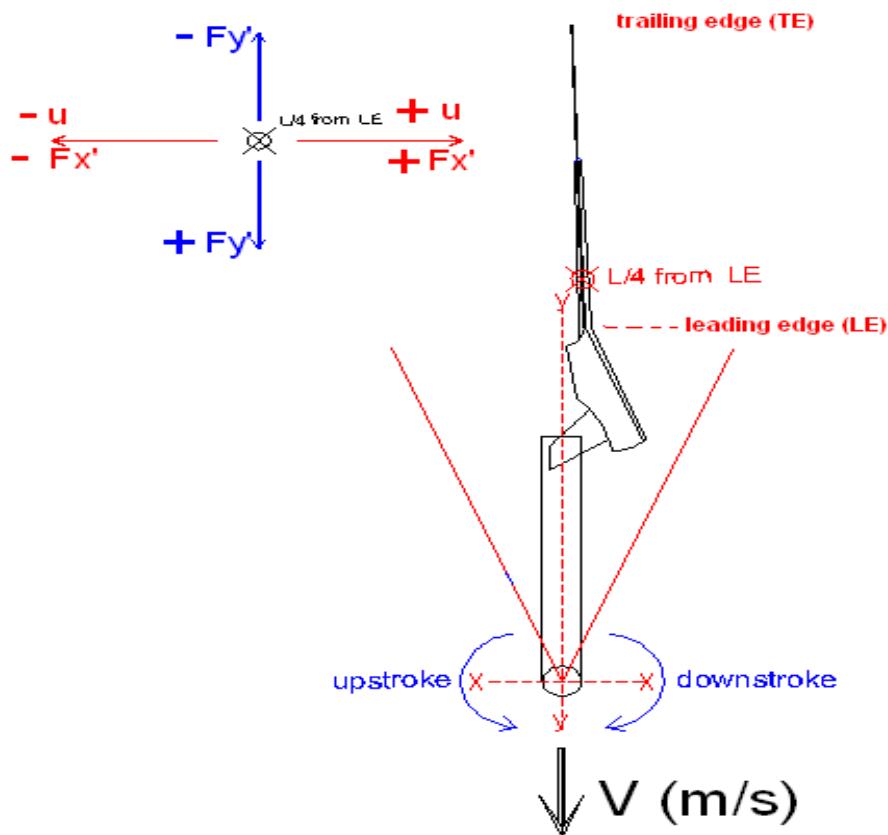
Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων

4.1 Παρουσίαση και σύγκριση αποτελεσμάτων

Υπενθυμίζουμε ότι η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και ο υπολογισμός των μεγεθών που ορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε μέσω της δημιουργίας κώδικα στο περιβάλλον της **MATLAB**, ο οποίος παρουσιάζεται **εκτενώς στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α** της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στα πλαίσια του πειράματος έγινε εκτενής ανάλυση των δυναμικών και κινηματικών χαρακτηριστικών ποικίλων πεδίων κατάδυσης με βάση τα οποία αξιολογήθηκαν. Τέλος επιχειρήθηκε η συσχέτιση παραμόρφωσης των πτερυγίων με την δυναμική τους απόκριση, και όλα αυτά υπο διάφορες τιμές της περιόδου T και της μεταφορικής ταχύτητας V .

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων που παρατίθενται παρακάτω, υπενθυμίζουμε τους κατά σύμβαση συμβολισμούς, που ορίζονται στην **εικόνα1**:

[πρόσημα(+/-) δυνάμεων(F_x, F_y) και εφαπτομενικής ταχύτητας (u), ονομασία κινήσεων (upstroke, downstroke)] Το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων και υπολογισμού της εφαπτομενικής ταχύτητας απέχει $L/4$ από την ακμή πρόσπτωσης (leading edge LE) (σημείο πίεσης επίπεδης πλάκας)



Εικόνα 1

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες με τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών για κάθε πτερύγιο (A,B,C,D,E,F,G,H) έτσι όπως υπολογίστηκαν απ' τον κώδικα. Στον **πίνακα 1** παρατίθεται η εξήγηση των μεγεθών που υπολογίστηκαν

V [m/s]	Ταχύτητα φορείου δεξαμενής
T(s)	Περίοδος ταλάντωσης πεδίου
Strouhal	αριθμός Strouhal
Ate [m]	Πλάτος ταλάντωσης στην ακμή εκφυγής
Ale [m]	Πλάτος ταλάντωσης στην ακμή πρόσπτωσης
A(L/4frLE) [m]	Πλάτος ταλάντωσης στο σημείο εφαρμογής των δυνάμεων
Fx_max (Nt)	Μέγιστη πλάγια δύναμη ως προς το σύστημα αξόνων XY
Fx_average (Nt)	Μέση πλάγια δύναμη ως προς το σύστημα αξόνων XY
Fxav_upstroke (Nt)	Μέση πλάγια δύναμη κατά την αριστερόστροφη κίνηση (upstroke)
Fxav_downstroke (Nt)	Μέση πλάγια δύναμη κατά την δεξιόστροφη κίνηση (downstroke)
Fy_max (Nt)	Μέγιστη ωστική δύναμη ως προς το σύστημα αξόνων XY
Fy_average (Nt)	Μέση ωστική δύναμη ως προς το σύστημα αξόνων XY
Fyav_upstroke (Nt)	Μέση ωστική δύναμη κατά την αριστερόστροφη κίνηση (upstroke)
Fyav_downstroke (Nt)	Μέση ωστική δύναμη κατά την δεξιόστροφη κίνηση (downstroke)
Pfx_average [Watt]	Μέση ισχύς της πλάγιας δύναμης FX
Pfxav_upstroke [Watt]	Μέση ισχύς της πλάγιας δύναμης FX κατά την αριστερόστροφη κίνηση (upstroke)
Pfxav_downstroke [Watt]	Μέση ισχύς της πλάγιας δύναμης FX κατά την δεξιόστροφη κίνηση (downstroke)
Pfy_average [Watt]	Μέση ισχύς της ωστικής δύναμης FY
Pfyav_upstroke [Watt]	Μέση ισχύς της ωστικής δύναμης FY κατά την αριστερόστροφη κίνηση (upstroke)
Pfyav_downstroke [Watt]	Μέση ισχύς της ωστικής δύναμης FY κατά την δεξιόστροφη κίνηση (downstroke)
EC	Υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης
ECupstroke	Υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης κατά την αριστερόστροφη κίνηση (upstroke)
ECdownstroke	Υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης κατά την δεξιόστροφη κίνηση (downstroke)
(Fx_average/SA) (Pa)	Μέση πλάγια δύναμη ανα m ² της λεπίδας του πτερυγίου
(Fy_average/SA) (Pa)	Μέση ωστική δύναμη ανα m ² της λεπίδας του πτερυγίου
Cfx	Συντελεστής πλάγιας δύναμης
Cfy	Συντελεστής ώσης
EC=Fy / (Fy²+Fx²)^{0.5}	Υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης στην στατική κατάσταση (V=0m/s)
Cf_total	Συντελεστής ολικής συνισταμένης δύναμης

Πίνακας 1

		FIN A									
		V=0m/s	V=0,8m/s		V=0,9m/s		V=1m/s	V=1,1m/s		V=1,2m/s	
	V	0,000	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1,1	1,1	1,2	1,2
	T(s)	1,673	1,512	1,891	1,484	1,646	1,443	1,433	1,387	1,439	1,178
	Strouhal	####	0,446	0,311	0,419	0,358	0,388	0,343	0,321	0,301	0,340
A (m)	Ate	0,530	0,540	0,470	0,560	0,530	0,560	0,540	0,490	0,520	0,480
	Ale	0,370	0,350	0,360	0,340	0,360	0,370	0,335	0,310	0,320	0,330
	A(L/4frLE)	0,430	0,400	0,410	0,410	0,430	0,450	0,400	0,380	0,380	0,390
F (Nt)	Fx_max (Nt)	56,598	43,810	33,765	44,735	40,132	47,256	46,348	48,263	44,608	57,114
	Fx_average (Nt)	30,799	26,119	18,708	26,149	22,439	26,288	25,802	26,865	25,081	31,696
	Fxav_upstroke	33,386	28,333	20,141	28,470	24,492	28,818	28,288	29,396	27,322	34,517
	Fxav_downstroke	-27,819	-23,175	-16,730	-22,942	-19,752	-22,792	-22,390	-23,278	-21,839	-26,837
	Fy_max (Nt)	25,617	14,739	6,735	13,840	9,846	14,340	11,378	12,663	10,137	19,718
	Fy_average (Nt)	10,898	3,249	0,518	2,247	1,070	1,755	0,817	1,303	0,036	2,420
	Fyav_upstroke	9,798	2,318	-0,089	1,363	0,321	0,926	-0,011	0,468	-0,693	1,269
Fyav_downstroke	11,999	4,181	1,126	3,130	1,823	2,585	1,645	2,144	0,770	3,581	
P (Watt)	Pfx_average (Watt)	20,188	17,015	9,973	17,703	14,447	20,046	17,572	17,937	16,125	25,290
	Pfxav_upstroke	21,981	18,422	10,789	19,396	15,821	22,229	19,492	19,854	17,760	28,241
	Pfxav_downstroke	18,396	15,608	9,157	16,010	13,064	17,864	15,653	16,006	14,478	22,314
	Pfy_average	0,000	2,599	0,415	2,022	0,963	1,755	0,899	1,433	0,043	2,904
	Pfyav_upstroke	0,000	1,854	-0,071	1,227	0,289	0,926	-0,012	0,515	-0,831	1,522
	Pfyav_downstroke	0,000	3,345	0,900	2,817	1,641	2,585	1,809	2,358	0,923	4,297
EC%	EC	####	15,278	4,157	11,422	6,664	8,757	5,114	7,992	0,267	11,483
	ECupstroke	#####	10,065	-0,660	6,324	1,826	4,166	-0,061	2,595	-4,680	5,391
	ECdownstroke	####	21,430	9,834	17,597	12,560	14,470	11,558	14,735	6,378	19,259
	(Fx_average/SA) (Pa)	252,243	213,915	153,218	214,160	183,772	215,299	211,320	220,025	205,416	259,589
	(Fy_average/SA) (Pa)	89,258	26,612	4,245	18,400	8,761	14,377	6,691	10,673	0,294	19,820
	Cfx	####	1,122	0,865	0,905	0,812	0,775	0,628	0,654	0,508	0,650
	Cfy	#####	0,377	0,172	0,280	0,199	0,235	0,154	0,172	0,115	0,224
	EC=Fy / (Fy^2+Fx^2)^0.5	41,234	31,886	19,562	29,556	23,828	29,038	23,840	25,378	22,159	32,634
	Cf_total	#ΔIAIP/0!	1,184	0,882	0,948	0,836	0,809	0,646	0,676	0,521	0,688

		FIN B									
		V=0m/s	V=0,8m/s		V=0,9m/s		V=1m/s	V=1,1m/s		V=1,2m/s	
	V	0,000	0,800	0,800	0,900	0,900	1,000	1,100	1,100	1,200	1,200
	T(s)	1,682	1,621	1,884	1,614	1,732	1,539	1,539	1,377	1,168	1,550
	Strouhal	#####	0,301	0,272	0,275	0,257	0,260	0,235	0,258	0,278	0,210
A (m)	Ate	0,435	0,390	0,410	0,400	0,400	0,400	0,397	0,390	0,390	0,390
	Ale	0,350	0,320	0,320	0,330	0,320	0,330	0,300	0,300	0,300	0,300
	A(L/4frLE)	0,350	0,340	0,380	0,370	0,370	0,370	0,350	0,340	0,350	0,350
F (Nt)	Fx_max	65,896	58,630	53,372	57,284	55,511	57,167	56,290	60,273	63,178	56,552
	Fx_average	27,498	24,043	22,179	24,285	22,750	23,670	23,117	25,394	27,923	23,698
	Fxav_upstroke	32,030	32,740	31,309	32,216	32,150	32,771	32,532	34,163	35,740	33,108
	Fxav_downstroke	-14,589	-10,787	-8,262	-12,134	-8,737	-10,699	-9,830	-12,959	-17,841	-10,491
	Fy_max	15,393	8,000	5,933	7,637	5,726	6,179	5,010	6,835	6,586	4,969
	Fy_average	7,598	1,916	0,561	0,932	0,155	-0,143	-0,917	-0,403	-0,737	-1,383
	Fyav_upstroke	7,552	3,041	1,537	2,129	1,274	1,164	0,314	0,747	0,534	-0,130
Fyav_downstroke	7,643	0,791	-0,415	-0,264	-0,964	-1,459	-2,156	-1,562	-2,020	-2,637	
P (Watt)	Pfx_average	11,582	11,063	9,653	12,356	10,561	12,752	11,750	14,205	19,936	11,911
	Pfxav_upstroke	15,565	16,082	14,634	17,417	15,945	18,510	17,323	19,826	25,783	17,369
	Pfxav_downstroke	7,598	6,045	4,672	7,295	5,178	6,956	6,139	8,542	14,038	6,453
	Pfy_average	0,000	1,533	0,449	0,839	0,139	-0,143	-1,009	-0,444	-0,885	-1,660
	Pfyav_upstroke	0,000	2,432	1,230	1,916	1,146	1,164	0,345	0,822	0,641	-0,156
	Pfyav_downstroke	0,000	0,633	-0,332	-0,237	-0,868	-1,459	-2,372	-1,719	-2,424	-3,164
EC%	EC	####	13,853	4,648	6,792	1,318	-1,124	-8,586	-3,123	-4,439	-13,938
	ECupstroke	#####	15,126	8,402	11,000	7,190	6,288	1,992	4,146	2,487	-0,900
	ECdownstroke	####	10,467	-7,112	-3,255	-16,763	-20,978	-38,629	-20,119	-17,270	-49,027
	(Fx_average/SA) (Pa)	237,049	207,267	191,198	209,357	196,124	204,052	199,282	218,916	240,715	204,295
	(Fy_average/SA) (Pa)	65,496	16,515	4,834	8,039	1,334	-1,236	-7,906	-3,477	-6,357	-11,926
	Cfx	####	1,581	1,439	1,220	1,182	0,986	0,803	0,859	0,757	0,678
	Cfy	#####	0,216	0,160	0,163	0,122	0,107	0,071	0,097	0,079	0,060
	$EC = Fy^2 / (Fy^2 + Fx^2)^{0.5}$	22,748	13,519	11,049	13,215	10,261	10,746	8,866	11,268	10,368	8,754
	Cf_total	#####	1,595	1,448	1,231	1,189	0,992	0,806	0,865	0,761	0,680

		FIN C										
		V=0m/s	V=0,8m/s		V=0,9m/s		V=1m/s		V=1,1m/s		V=1,2m/s	
m/s	V	0,000	0,800	0,800	0,900	0,900	1,000	1,000	1,100	1,100	1,200	1,200
sec	T(s)	1,639	1,539	1,846	1,581	1,712	1,576	1,845	1,530	1,370	1,610	1,169
	Strouhal	####	0,366	0,314	0,309	0,253	0,279	0,228	0,232	0,259	0,228	0,214
A (m)	Ate	0,530	0,450	0,464	0,440	0,390	0,440	0,420	0,390	0,390	0,440	0,300
	Ale	0,310	0,292	0,310	0,290	0,280	0,280	0,270	0,260	0,260	0,290	0,210
	A(L/4frLE)	0,367	0,347	0,360	0,340	0,330	0,350	0,350	0,320	0,320	0,350	0,260
F (Nt)	Fx_max	69,810	66,586	48,913	55,722	49,574	53,643	46,657	61,885	68,329	54,296	77,426
	Fx_average	38,355	30,592	26,092	30,269	27,010	29,678	24,824	27,905	30,293	21,042	33,364
	Fxav_upstroke	41,996	35,341	29,751	32,557	29,126	30,803	28,192	32,475	35,312	27,245	38,851
	Fxav_downstroke	-32,050	-20,834	-18,401	-24,170	-21,585	-25,052	-18,022	-19,758	-20,810	-12,190	-22,923
	Fy_max	20,118	12,708	7,402	11,562	8,044	11,662	6,028	10,512	10,827	4,349	12,097
	Fy_average	10,573	4,000	1,682	2,082	1,533	1,413	0,261	1,381	1,604	-0,535	1,361
	Fyav_upstroke	10,262	1,897	1,110	1,021	0,653	0,395	-0,304	-0,708	-0,663	-1,901	-1,152
	Fyav_downstroke	10,885	6,118	2,258	3,143	2,413	2,438	0,829	3,470	3,888	0,832	3,873
P (Watt)	Pfx_average	20,654	15,314	11,556	15,035	12,042	15,365	10,779	13,088	15,776	9,959	16,296
	Pfxav_upstroke	23,386	18,865	13,987	17,093	13,720	16,889	12,901	16,011	19,438	13,493	19,996
	Pfxav_downstroke	17,922	11,741	9,111	12,977	10,364	13,831	8,646	10,165	12,087	6,424	12,597
	Pfy_average	0,000	3,200	1,346	1,874	1,380	1,413	0,261	1,519	1,765	-0,641	1,633
	Pfyav_upstroke	0,000	1,517	0,888	0,919	0,588	0,395	-0,304	-0,779	-0,729	-2,281	-1,382
	Pfyav_downstroke	0,000	4,894	1,806	2,829	2,172	2,438	0,829	3,817	4,277	0,998	4,648
EC%	EC	####	20,897	11,647	12,463	11,459	9,197	2,419	11,607	11,187	-6,441	10,019
	ECupstroke	#####	8,044	6,348	5,374	4,287	2,338	-2,358	-4,866	-3,752	-16,906	-6,913
	ECdownstroke	####	41,685	19,826	21,801	20,953	17,625	9,587	37,552	35,387	15,537	36,895
	(Fx_average/SA) (Pa)	292,565	233,350	199,026	230,884	206,024	226,377	189,353	212,853	231,067	160,504	254,491
	(Fy_average/SA) (Pa)	80,652	30,514	12,833	15,881	11,695	10,779	1,989	10,534	12,238	-4,077	10,378
	Cfx	####	1,588	1,167	1,050	0,934	0,819	0,712	0,781	0,862	0,576	0,821
	Cfy	#####	0,303	0,177	0,218	0,152	0,178	0,092	0,133	0,137	0,046	0,128
	$EC = Fy^2 / (Fy^2 + Fx^2)^{0.5}$	27,69106	18,746	14,963	20,317	16,018	21,243	12,813	16,746	15,651	7,985	15,437
	Cf_total	#ΔIAIP/0!	1,617	1,180	1,073	0,947	0,838	0,718	0,792	0,873	0,577	0,831

		FIN D										
		V=0m/s	V=0,8m/s		V=0,9m/s		V=1m/s		V=1,1m/s		V=1,2m/s	
m/s	V	0,000	0,800	0,800	0,900	0,900	1,000	1,000	1,100	1,100	1,200	1,200
sec	T(s)	1,539	1,583	1,837	1,545	1,706	1,621	1,918	1,581	1,356	1,606	1,145
	Strouhal	####	0,348	0,299	0,324	0,287	0,296	0,214	0,241	0,268	0,197	0,313
A (m)	Ate	0,450	0,440	0,440	0,450	0,440	0,480	0,410	0,420	0,400	0,380	0,430
	Ale	0,320	0,320	0,320	0,310	0,300	0,300	0,280	0,270	0,260	0,280	0,320
	A(L/4frLE)	0,356	0,360	0,360	0,360	0,350	0,367	0,330	0,320	0,304	0,330	0,360
F (N)	Fx_max	68,122	53,981	48,894	57,435	52,451	54,204	45,624	54,123	61,081	52,280	72,283
	Fx_average	34,738	27,001	25,927	29,750	27,132	28,013	23,721	27,914	32,236	27,426	38,499
	Fxav_upstroke	36,616	30,500	28,754	34,370	31,654	33,303	27,816	33,114	37,393	31,971	45,180
	Fxav_downstroke	-31,404	-21,452	-21,213	-23,105	-20,498	-20,718	-17,517	-20,699	-25,234	-20,586	-29,784
	Fy_max	33,841	14,842	12,691	14,794	12,263	11,741	8,626	11,068	13,762	9,978	18,297
	Fy_average	12,164	2,704	2,031	2,293	1,612	0,861	0,058	0,448	1,476	-0,388	1,547
	Fyav_upstroke	7,615	-0,425	-1,025	-1,268	-1,580	-2,439	-2,666	-2,870	-2,685	-3,717	-3,784
Fyav_downstroke	16,713	5,833	5,103	5,877	4,823	4,162	2,797	3,767	5,668	2,962	6,925	
P (W att)	Pfx_average	19,649	14,639	12,071	16,538	13,173	15,040	9,570	13,389	17,338	13,240	29,246
	Pfxav_upstroke	21,716	17,280	13,942	19,737	15,878	18,397	11,616	16,322	20,557	15,948	34,757
	Pfxav_downstroke	17,583	11,998	10,189	13,319	10,451	11,682	7,513	10,456	14,094	10,516	23,685
	Pfy_average	0,000	2,163	1,625	2,064	1,451	0,861	0,058	0,493	1,624	-0,465	1,857
	Pfyav_upstroke	0,000	-0,340	-0,820	-1,141	-1,422	-2,439	-2,666	-3,157	-2,953	-4,460	-4,540
	Pfyav_downstroke	0,000	4,666	4,083	5,289	4,341	4,162	2,797	4,144	6,235	3,555	8,310
EC%	EC	####	14,777	13,459	12,478	11,017	5,726	0,609	3,684	9,367	-3,514	6,349
	ECupstroke	#####	-1,967	-5,883	-5,783	-8,953	-13,259	-22,951	-19,345	-14,365	-27,968	-13,063
	ECdownstroke	####	38,890	40,071	39,713	41,535	35,623	37,229	39,632	44,238	33,802	35,085
	(Fx_average/SA) (Pa)	389,004	302,364	290,341	333,150	303,831	313,701	265,638	312,585	360,985	307,119	431,125
	(Fy_average/SA) (Pa)	136,213	30,280	22,740	25,677	18,057	9,643	0,653	5,022	16,533	-4,342	17,327
	Cfx	####	1,890	1,712	1,589	1,451	1,215	1,022	1,002	1,131	0,814	1,125
	Cfy	#####	0,520	0,444	0,409	0,339	0,263	0,193	0,205	0,255	0,155	0,285
	EC=Fy^2 / (Fy^2+Fx^2)^0.5	44,489	26,512	25,124	24,944	22,766	21,171	18,578	20,035	21,981	18,748	24,539
	Cf_total	#ΔIAIP/0!	1,960	1,769	1,641	1,490	1,243	1,041	1,023	1,160	0,828	1,160

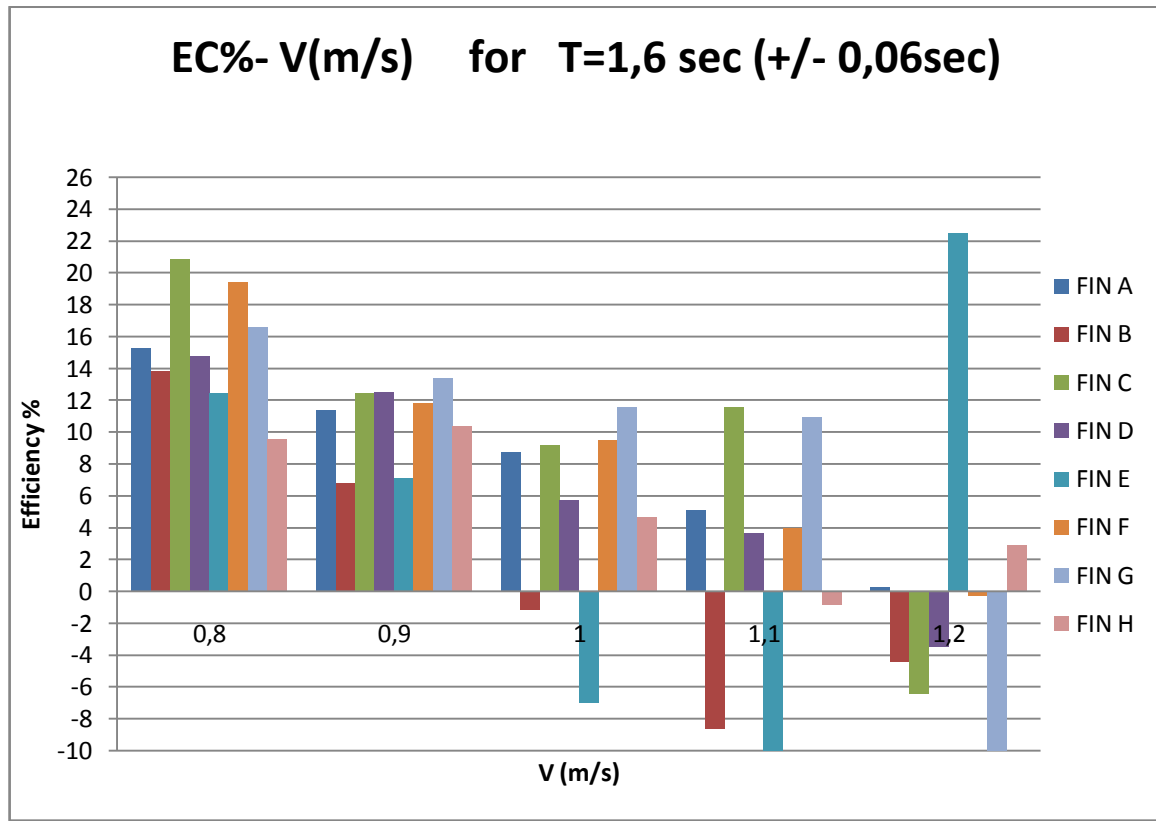
		FINE										
		V=0m/s	V=0,8m/s		V=0,9m/s		V=1m/s		V=1,1m/s		V=1,2m/s	
m/s	V	0,000	0,800	0,800	0,900	0,900	1,000	1,000	1,100	1,100	1,200	1,200
sec	T(s)	1,622	1,593	1,854	1,599	1,711	1,578	1,850	1,603	1,424	1,621	1,189
	Strouhal	####	0,345	0,249	0,243	0,208	0,196	0,189	0,187	0,198	0,144	0,182
A (m)	Ate	0,440	0,440	0,370	0,350	0,320	0,310	0,350	0,330	0,310	0,280	0,260
	Ale	0,290	0,330	0,260	0,280	0,250	0,250	0,260	0,230	0,240	0,230	0,210
	A(L/4frLE)	0,310	0,350	0,290	0,310	0,290	0,275	0,280	0,260	0,250	0,250	0,240
F (Nt)	Fx_max	43,527	33,756	28,261	32,844	29,426	32,528	27,608	32,775	37,022	32,625	45,614
	Fx_average	19,990	15,972	14,362	15,749	14,621	14,610	13,926	14,547	16,947	15,346	20,188
	Fxav_upstroke	20,356	16,640	14,384	15,882	14,966	15,017	14,386	16,043	19,216	16,725	23,454
	Fxav_downstroke	-18,802	-14,444	-13,675	-14,712	-13,895	-13,572	-12,895	-12,322	-14,332	-12,758	-16,563
	Fy_max	25,596	9,026	5,628	7,327	-0,633	6,276	-0,731	4,839	-0,492	7,655	2,732
	Fy_average	8,487	1,307	-1,267	0,573	-7,118	-0,419	-6,448	-1,114	-9,334	1,043	-10,385
	Fyav_upstroke	6,118	-1,099	-3,372	-1,898	-9,298	-2,588	-8,540	-3,207	-11,971	-1,299	-13,687
Fyav_downstroke	10,856	3,714	0,839	3,060	-4,939	1,764	-4,356	0,979	-6,698	3,384	-7,055	
P (Watt)	Pfx_average	9,343	8,396	5,359	7,251	5,963	6,001	5,008	5,484	7,244	5,557	10,047
	Pfxav_upstroke	9,958	9,029	5,500	7,566	6,178	6,308	5,249	6,125	8,218	6,221	11,641
	Pfxav_downstroke	8,728	7,764	5,218	6,934	5,748	5,691	4,767	4,843	6,271	4,893	8,439
	Pfy_average	0,000	1,046	-1,013	0,516	-6,407	-0,419	-6,448	-1,226	-10,268	1,251	-12,462
	Pfyav_upstroke	0,000	-0,879	-2,698	-1,708	-8,368	-2,588	-8,540	-3,528	-13,168	-1,559	-16,425
	Pfyav_downstroke	0,000	2,971	0,671	2,754	-4,445	1,764	-4,356	1,076	-7,367	4,061	-8,467
EC%	EC	0,000	12,456	-18,909	7,118	-107,436	-6,987	-128,753	-22,351	-141,737	22,516	-124,045
	ECupstroke	0,000	-9,740	-49,049	-22,573	-135,446	-41,030	-162,696	-57,595	-160,240	-25,058	-141,091
	ECdownstroke	0,000	38,266	12,861	39,721	-77,331	30,988	-91,377	22,227	-117,490	83,004	-100,331
	(Fx_average/SA) (Pa)	345,845	276,335	248,477	272,470	252,959	252,773	240,937	251,682	293,206	265,509	349,279
	(Fy_average/SA) (Pa)	146,830	22,617	-21,915	9,922	-123,157	-7,254	-111,550	-19,278	-161,496	18,040	-179,678
	Cfx	####	1,826	1,529	1,404	1,258	1,126	0,956	0,938	1,059	0,784	1,097
	Cfy	#####	0,488	0,304	0,313	-0,027	0,217	-0,025	0,138	-0,014	0,184	0,066
	$EC = Fy^2 / (Fy^2 + Fx^2)^{0.5}$	50,690	25,831	19,532	21,774	-2,151	18,944	-2,645	14,606	-1,330	22,843	5,979
	Cf_total	#ΔIAIP/0!	1,890	1,559	1,438	1,258	1,147	0,956	0,948	1,060	0,806	1,099

		FIN F										
		V=0m/s	V=0,8m/s		V=0,9m/s		V=1m/s		V=1,1m/s		V=1,2m/s	
m/s	V	0,000	0,800	0,800	0,900	0,900	1,000	1,000	1,100	1,100	1,200	1,200
sec	T(s)	1,617	1,585	1,769	1,565	1,680	1,544	1,826	1,567	1,393	1,547	1,123
	Strouhal	####	0,410	0,382	0,383	0,370	0,363	0,296	0,317	0,339	0,261	0,356
A (m)	Ate	0,520	0,520	0,540	0,540	0,560	0,560	0,540	0,546	0,520	0,485	0,480
	Ale	0,400	0,360	0,360	0,360	0,370	0,350	0,334	0,330	0,330	0,323	0,348
	A(L/4frLE)	0,457	0,410	0,410	0,440	0,440	0,420	0,400	0,400	0,400	0,366	0,395
F (Nt)	Fx_max	59,014	46,351	40,112	45,652	41,188	44,892	36,744	43,717	51,683	43,245	64,292
	Fx_average	32,748	25,962	21,685	25,435	23,144	25,310	20,033	24,409	28,555	24,278	35,532
	Fxav_upstroke	36,658	30,920	26,006	30,653	27,839	30,728	24,382	29,868	34,803	29,732	43,299
	Fxav_downstroke	-28,237	-20,138	-16,586	-19,333	-17,578	-18,981	-14,853	-18,043	-21,282	-17,699	-25,778
	Fy_max	27,647	19,288	10,791	17,474	13,042	16,788	8,009	13,380	20,713	15,492	16,331
	Fy_average	11,582	3,965	1,834	2,285	1,594	1,590	0,101	0,546	2,111	-0,034	3,798
	Fyav_upstroke	9,754	3,282	1,406	1,763	1,173	1,117	-0,238	0,178	1,647	-0,398	2,863
Fyav_downstroke	13,421	4,653	2,265	2,810	2,017	2,063	0,442	0,916	2,574	0,333	4,733	
P (Watt)	Pfx_average	23,061	16,324	12,217	17,377	14,723	16,707	10,575	15,072	19,858	13,804	29,868
	Pfxav_upstroke	25,740	19,084	14,391	20,505	17,355	19,854	12,595	18,052	23,756	16,577	36,251
	Pfxav_downstroke	20,365	13,547	10,030	14,229	12,074	13,559	8,545	12,073	15,960	11,013	23,484
	Pfy_average	0,000	3,172	1,467	2,056	1,435	1,590	0,101	0,600	2,322	-0,040	4,557
	Pfyav_upstroke	0,000	2,626	1,125	1,587	1,056	1,117	-0,238	0,196	1,812	-0,478	3,435
	Pfyav_downstroke	0,000	3,722	1,812	2,529	1,816	2,063	0,442	1,007	2,832	0,400	5,680
EC%	EC	0,000	19,433	12,011	11,834	9,744	9,517	0,954	3,981	11,691	-0,292	15,259
	ECupstroke	0,000	13,758	7,815	7,739	6,083	5,624	-1,893	1,083	7,626	-2,882	9,476
	ECdownstroke	0,000	27,477	18,066	17,772	15,038	15,218	5,172	8,342	17,741	3,632	24,185
	(Fx_average/SA) (Pa)	327,151	259,357	216,630	254,094	231,207	252,844	200,132	243,842	285,264	242,540	354,965
	(Fy_average/SA) (Pa)	115,705	39,614	18,324	22,825	15,924	15,884	1,007	5,450	21,085	-0,336	37,940
	Cfx	####	1,448	1,253	1,127	1,017	0,898	0,735	0,722	0,854	0,600	0,893
	Cfy	#####	0,603	0,337	0,431	0,322	0,336	0,160	0,221	0,342	0,215	0,227
	EC=Fy^2 / (Fy^2+Fx^2)^0.5	42,423	38,420	25,978	35,747	30,188	35,028	21,296	29,267	37,200	33,725	24,619
	Cf_total	#ΔIAIP/0!	1,568	1,298	1,207	1,066	0,958	0,752	0,755	0,920	0,638	0,921

		FIN G										
		V=0m/s	V=0,8m/s		V=0,9m/s		V=1m/s		V=1,1m/s		V=1,2m/s	
m/s	V	0,000	0,800	0,800	0,900	0,900	1	1	1,100	1,100	1,200	1,200
sec	T(s)	1,620	1,570	1,821	1,541	1,669	1,544	1,839	1,569	1,362	1,505	1,115
	Strouhal	#####	0,390	0,336	0,375	0,373	0,350	0,288	0,296	0,314	0,266	0,314
A (m)	Ate	0,540	0,490	0,490	0,520	0,560	0,540	0,530	0,510	0,470	0,480	0,420
	Ale	0,350	0,340	0,320	0,340	0,340	0,340	0,320	0,300	0,290	0,280	0,250
	A(L/4frLE)	0,430	0,390	0,380	0,430	0,430	0,430	0,390	0,384	0,380	0,350	0,310
F (Nt)	Fx_max	70,428	53,414	43,936	53,120	46,971	51,777	41,277	49,131	58,253	50,893	52,788
	Fx_average	41,134	32,276	26,669	32,527	29,471	31,999	25,586	30,659	35,828	25,709	23,937
	Fxav_upstroke	44,374	33,470	27,693	33,497	29,960	33,096	25,711	31,324	36,983	25,583	22,408
	Fxav_downstroke	-37,141	-29,250	-24,280	-29,597	-27,034	-29,090	-23,689	-28,071	-32,260	-24,492	-22,680
	Fy_max	24,807	13,802	9,092	13,930	12,342	13,307	7,033	11,738	14,529	3,412	5,555
	Fy_average	12,525	3,986	3,033	3,233	2,585	2,480	1,400	1,781	2,610	-2,809	-0,741
	Fyav_upstroke	14,242	5,167	4,105	4,280	3,635	3,561	2,343	2,814	3,495	-2,440	-0,237
	Fyav_downstroke	10,807	2,805	1,960	2,185	1,529	1,398	0,451	0,741	1,726	-3,181	-1,248
P (W att)	Pfx_average	27,112	19,208	13,305	21,687	18,085	21,366	12,851	17,918	23,762	14,038	13,993
	Pfxav_upstroke	29,539	20,411	14,149	22,941	18,944	22,602	13,348	18,774	25,235	14,304	13,735
	Pfxav_downstroke	24,686	18,005	12,461	20,433	17,220	20,131	12,351	17,055	22,289	13,771	14,252
	Pfy_average	0,000	3,189	2,426	2,909	2,327	2,480	1,400	1,959	2,871	-3,371	-0,889
	Pfyav_upstroke	0,000	4,134	3,284	3,852	3,272	3,561	2,343	3,095	3,844	-2,928	-0,285
		Pfyav_downstroke	0,000	2,244	1,568	1,967	1,376	1,398	0,451	0,816	1,898	-3,817
EC%	EC	0,000	16,602	18,234	13,416	12,865	11,606	10,891	10,933	12,083	-24,013	-6,351
	ECupstroke	0,000	20,253	23,211	16,792	17,271	15,758	17,552	16,486	15,233	-20,473	-2,073
	ECdownstroke	0,000	12,464	12,582	9,625	7,989	6,945	3,652	4,782	8,516	-27,715	-10,510
	(Fx_average/SA) (Pa)	331,195	259,873	214,728	261,895	237,290	257,640	206,003	246,852	288,474	206,999	192,727
	(Fy_average/SA) (Pa)	100,842	32,095	24,417	26,028	20,815	19,966	11,269	14,339	21,016	-22,618	-5,962
	Cfx	#####	1,345	1,106	1,057	0,934	0,834	0,665	0,654	0,776	0,570	0,591
	Cfy	#####	0,348	0,229	0,277	0,246	0,214	0,113	0,156	0,193	0,038	0,062
	EC=Fy^2 / (Fy^2+Fx^2)^0.5	33,222	25,018	20,265	25,365	25,414	24,891	16,797	23,237	24,200	6,690	10,465
	Cf_total	#ΔIAIP/0!	1,389	1,130	1,092	0,966	0,861	0,675	0,673	0,800	0,571	0,594

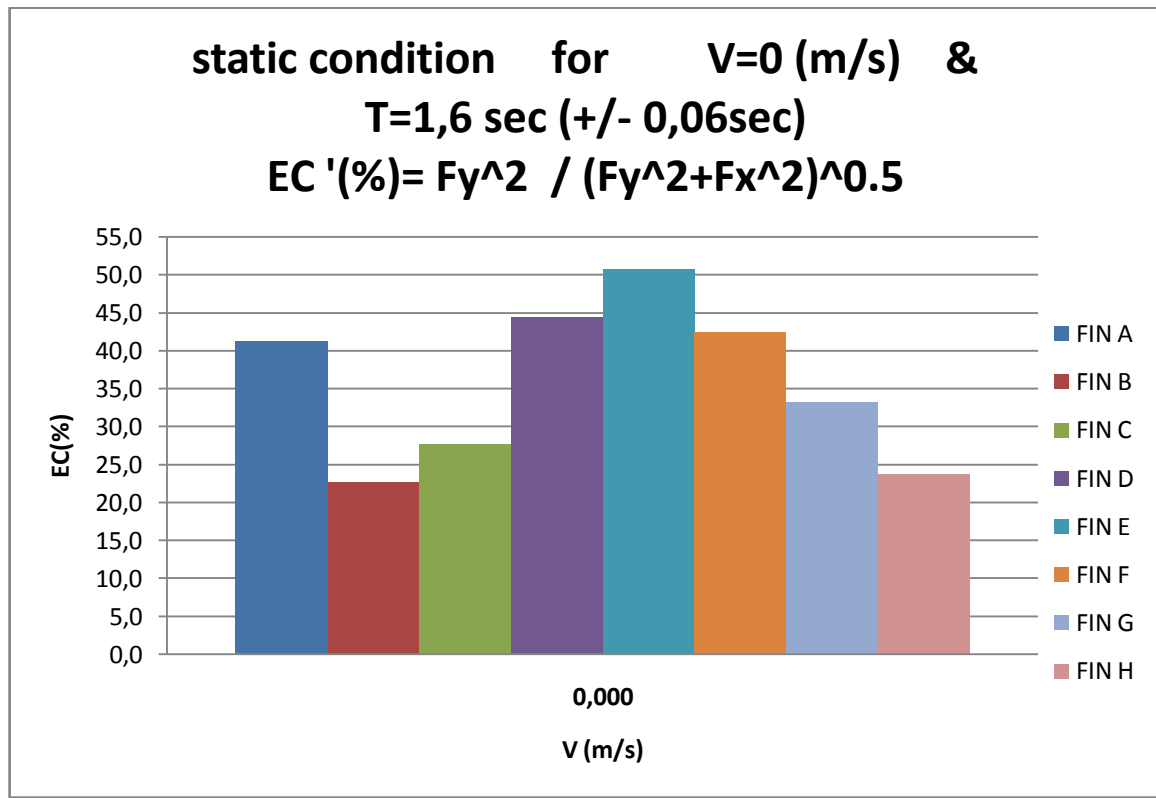
		FIN H									
		V=0m/s	V=0,8m/s		V=0,9m/s		V=1m/s	V=1,1m/s		V=1,2m/s	
		V	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1,1	1,1	1,2	1,2
	T(s)	1,550	1,503	1,832069	1,50803	1,701094	1,5298	1,534815	1,381667	1,530833	1,126406
	Strouhal	#####	0,333	0,297	0,291	0,274	0,286	0,255	0,270	0,289	0,354
A (m)	Ate	0,460	0,400	0,435	0,395	0,420	0,437	0,430	0,410	0,530	0,478
	Ale	0,300	0,274	0,290	0,275	0,273	0,300	0,250	0,260	0,360	0,330
	A(L/4frLE)	0,330	0,320	0,340	0,310	0,315	0,360	0,325	0,320	0,406	0,375
F (Nt)	Fx_max (Nt)	104,589	80,834	80,057	84,795	71,345	83,841	80,915	87,715	93,886	123,172
	Fx_average (Nt)	50,935	38,141	40,893	42,000	34,717	42,067	39,111	42,229	49,013	64,281
	Fxav_upstroke	48,944	41,559	45,680	47,543	38,861	50,306	47,009	50,143	57,427	75,373
	Fxav_downstroke	-32,966	-22,598	-25,469	-25,080	-20,676	-21,789	-20,284	-21,762	-28,510	-35,197
	Fy_max (Nt)	25,583	8,116	9,680	9,238	6,569	9,206	7,274	6,846	9,706	21,421
	Fy_average (Nt)	12,046	1,998	2,469	2,124	0,439	0,990	-0,127	0,500	0,682	3,134
	Fyav_upstroke	10,994	2,111	2,524	2,309	0,562	1,054	0,040	0,605	0,766	2,991
	Fyav_downstroke	13,099	1,884	2,414	1,938	0,317	0,926	-0,294	0,395	0,598	3,278
P (Watt)	Pfx_average (Watt)	21,159	16,735	16,121	18,416	13,455	20,998	17,547	20,526	27,836	45,355
	Pfxav_upstroke	24,989	20,957	20,031	23,101	16,966	27,719	23,319	27,132	35,306	57,995
	Pfxav_downstroke	17,329	12,513	12,211	13,699	9,945	14,233	11,776	13,921	20,366	32,602
	Pfy_average	0,000	1,598	1,975	1,912	0,396	0,990	-0,139	0,550	0,818	3,760
	Pfyav_upstroke	0,000	1,689	2,019	2,078	0,506	1,054	0,045	0,666	0,919	3,589
	Pfyav_downstroke	0,000	1,507	1,931	1,744	0,285	0,926	-0,323	0,435	0,718	3,934
EC%	EC	0,000	9,549	12,253	10,382	2,940	4,716	-0,793	2,680	2,939	8,291
	ECupstroke	0,000	8,060	10,081	8,997	2,981	3,802	0,191	2,453	2,602	6,188
	ECdownstroke	0,000	12,044	15,815	12,734	2,869	6,506	-2,743	3,121	3,523	12,065
	(Fx_average/SA) (Pa)	410,106	307,094	329,248	338,164	279,522	338,702	314,904	340,009	394,633	517,564
	(Fy_average/SA) (Pa)	96,992	16,084	19,880	17,104	3,539	7,973	-1,019	4,026	5,490	25,231
	Cfx	#####	2,035	2,016	1,687	1,419	1,351	1,078	1,168	1,051	1,378
	Cfy	#####	0,204	0,244	0,184	0,131	0,148	0,097	0,091	0,109	0,240
	EC=Fy^2 / (Fy^2+Fx^2)^0.5	23,760	9,990	12,004	10,830	9,169	10,914	8,954	7,781	10,283	17,134
	Cf_total	#####	2,045	2,030	1,697	1,425	1,359	1,082	1,172	1,056	1,399

4.1.1 Σύγκριση υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης EC για περίοδο $T=1.6\text{sec}$ ($\pm 0.06\text{sec}$) και μεταβλητή τιμή μεταφορικής ταχύτητας $V(\text{m/s})$



Ραβδόγραμμα 1

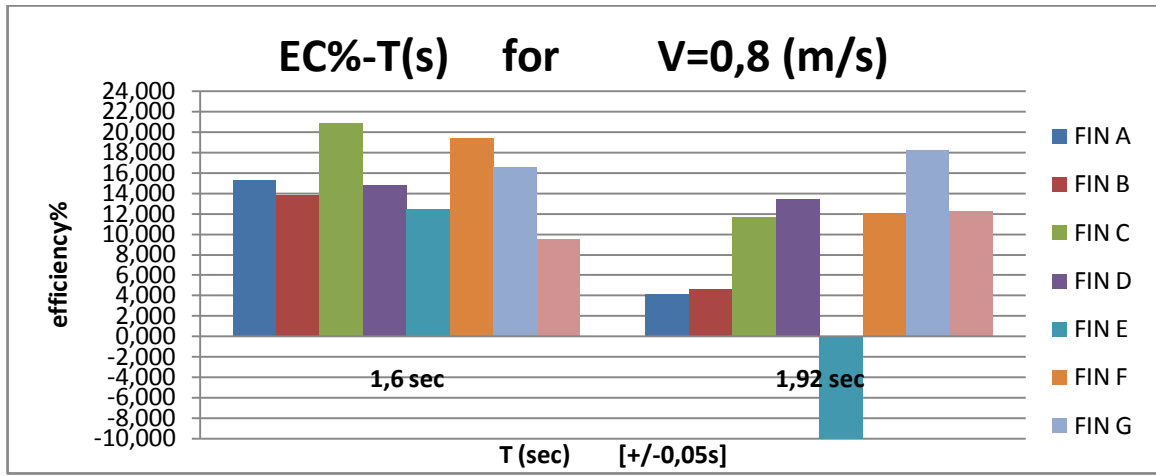
Παρουσιάζεται με την μορφή του **ραβδογράμματος 1** η μεταβολή του υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης EC(%) για σταθερή περίοδο $T=1.6\text{sec}$, σε σχέση με την μεταβολή της μεταφορικής ταχύτητας $V(\text{m/s})=(0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2)$. Ο βαθμός απόδοσης των πεδίων, δηλαδή ο λόγος της ισχύος της πρόωσης (συνιστώσα παράλληλη προς την U) προς την ισχύ της κάθετης δύναμης, παρουσίασε μέγιστη τιμή 22% ,ενώ στις μεγάλες τιμές της U έλαβε για κάποια πέδιλα αρνητικές τιμές τα οποία υπό τις συνθήκες αυτές δεν παρήγαγαν ώση. Η γενική τάση είναι η μείωση του βαθμού απόδοσης με την αύξηση της ταχύτητας



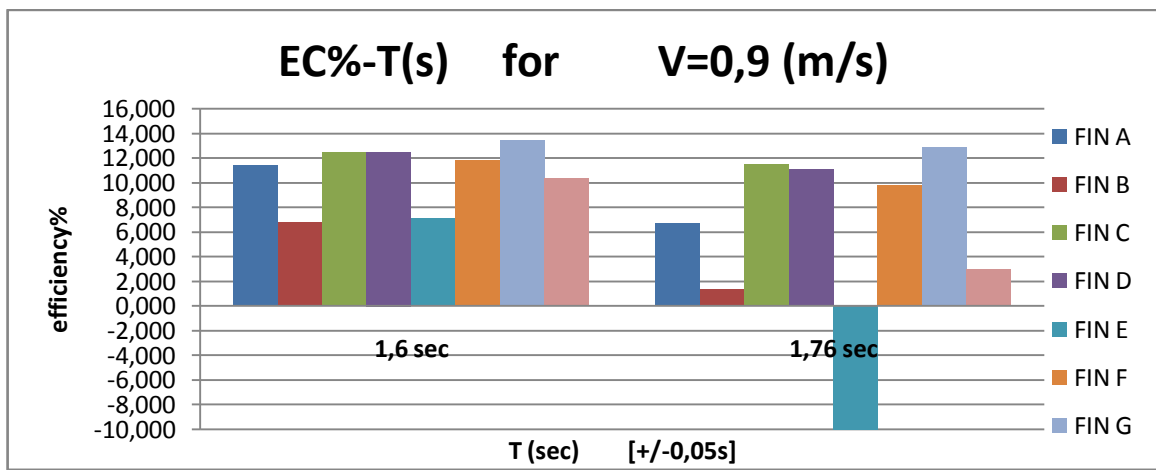
Ραβδόγραμμα 2

Στο **ραβδόγραμμα 2** παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης του κάθε πτερυγίου υπο μηδενική ελεύθερη ροή ($V=0$ m/s). Οι τιμές της απόδοσης κυμαίνονται από 22% έως 50% και είναι σαφώς μεγαλύτερες (διπλάσιες) απ' όταν $V \neq 0$. Εδώ φαίνεται να υπερσχύουν τα πέδιλα μικρού μήκους FIN E & FIN D σε αντίθεση με τις καταστάσεις μη μηδενικής ταχύτητας. Αντίστροφα τα πέδιλα που εμφανίζουν τους μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης όταν $V \neq 0$, στην στατική κατάσταση φαίνεται να υποτιμούνται. Συνεπώς μπορούμε να συμπεράνουμε η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος V αποτελεί καθοριστική παράμετρο για την αξιόπιστη αξιολόγηση των πτερυγίων.

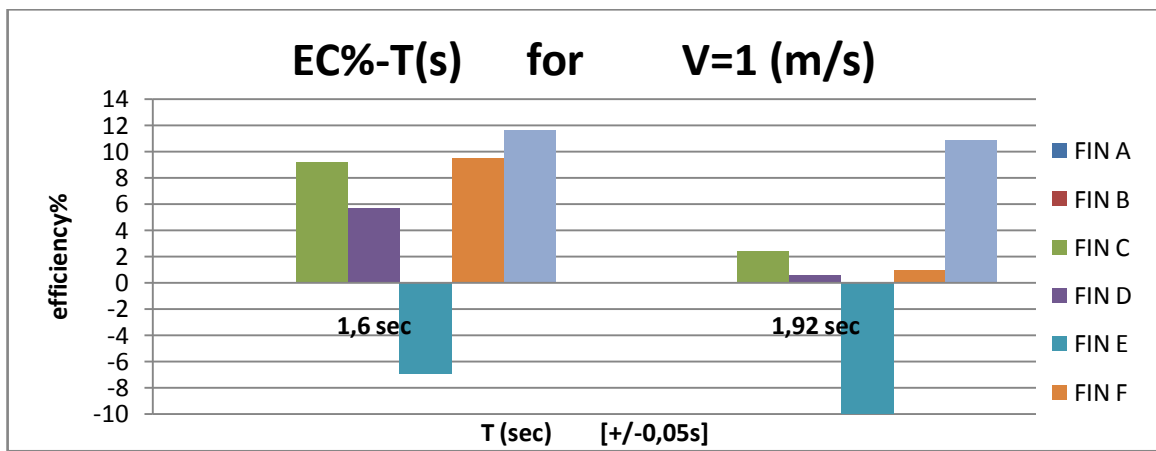
4.1.2 Σύγκριση υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης EC για κάθε τιμή της μεταφορικής ταχύτητας (V), στις δύο περιόδους δοκιμών.



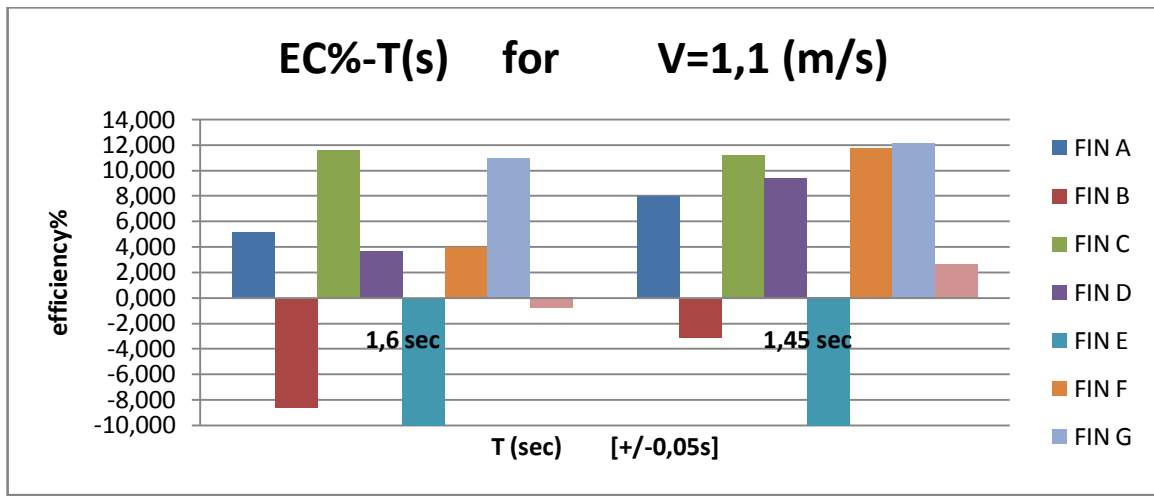
Ραβδόγραμμα 3



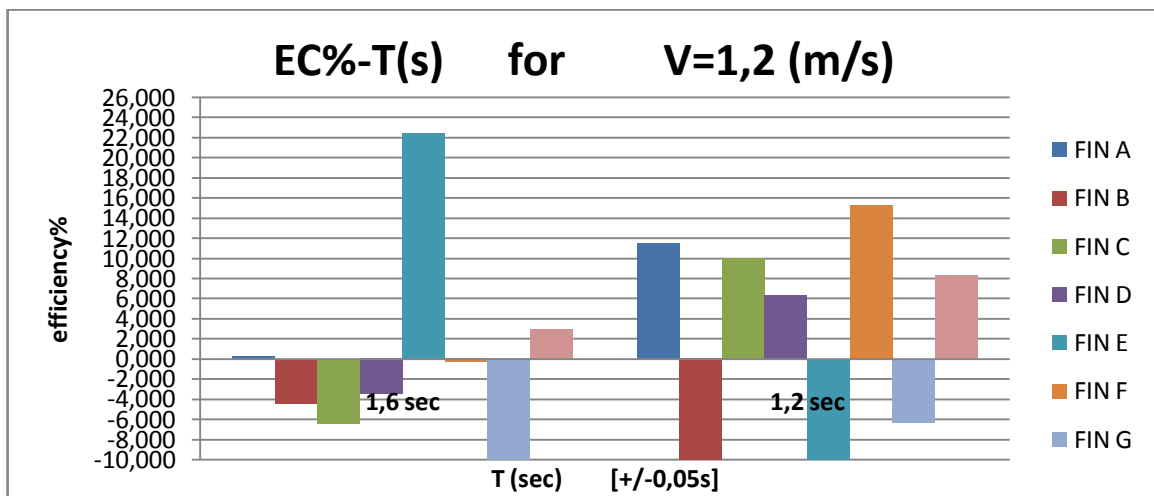
Ραβδόγραμμα 4



Ραβδόγραμμα 5



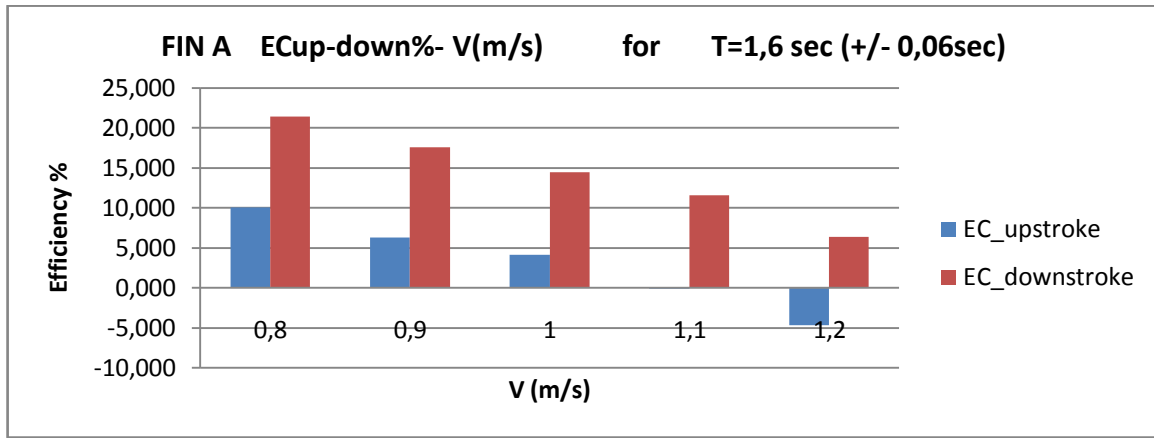
Ραβδόγραμμα 6



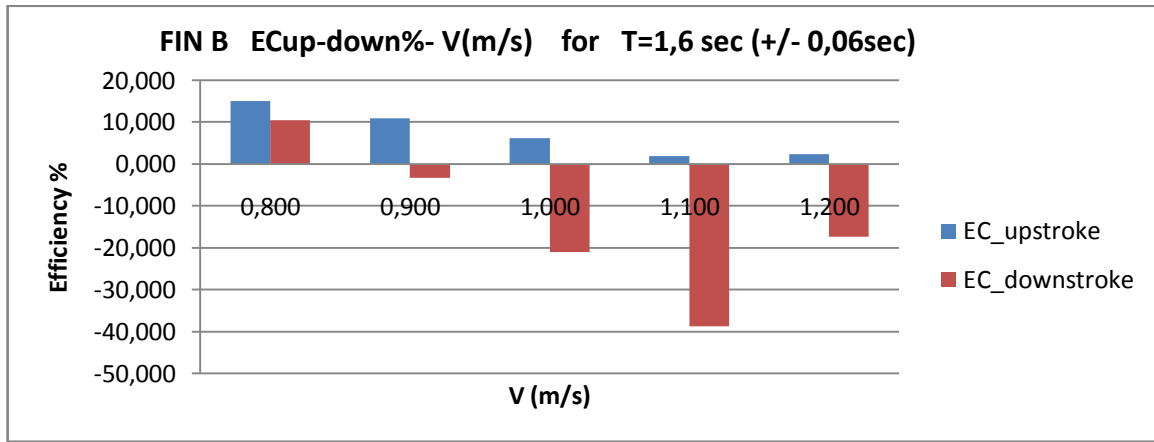
Ραβδόγραμμα 7

Στα **ραβδογράμματα 3,4,5,6,7** φαίνεται η μεταβολή της απόδοσης EC των πτερυγίων για σταθερή μεταφορική ταχύτητα κάθε φορά, καθώς η περίοδος ταλάντωσης μεταβάλλεται μεταξύ των δύο τιμών που επιλέχθηκαν για την κάθε ταχύτητα. Η γενική τάση είναι η αύξηση της απόδοσης με την αύξηση της της συχνότητας ταλάντωσης (μείωση της περιόδου). Στην υψηλότερη ταχύτητα ($V=1.2\text{m/s}$) για περίοδο 1,6 sec η πλειοψηφία των πτερυγίων δεν παρήγαγε ώση, καθώς φαίνεται ότι υπό αυτήν την συχνότητα αδυνατούσαν να ακολουθήσουν την κίνηση του φορείου, κάτι που βελτιώνεται αισθητά με την μείωση της περιόδου (αύξηση της συχνότητας).

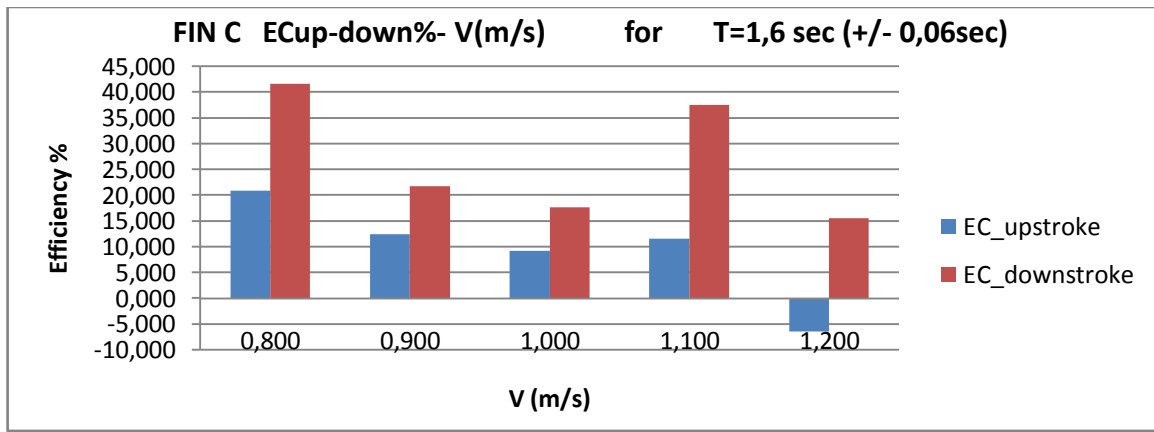
4.1.3 Σύγκριση υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης της δεξιόστροφης (ECdownstroke) και της αριστερόστροφης (ECupstroke) κίνηση του κάθε πτερυγίου, για περίοδο ταλάντωσης $T_a=1,6\text{sec}$ ($\pm 0,06\text{s}$) και όλες τις ταχύτητες δοκιμών.



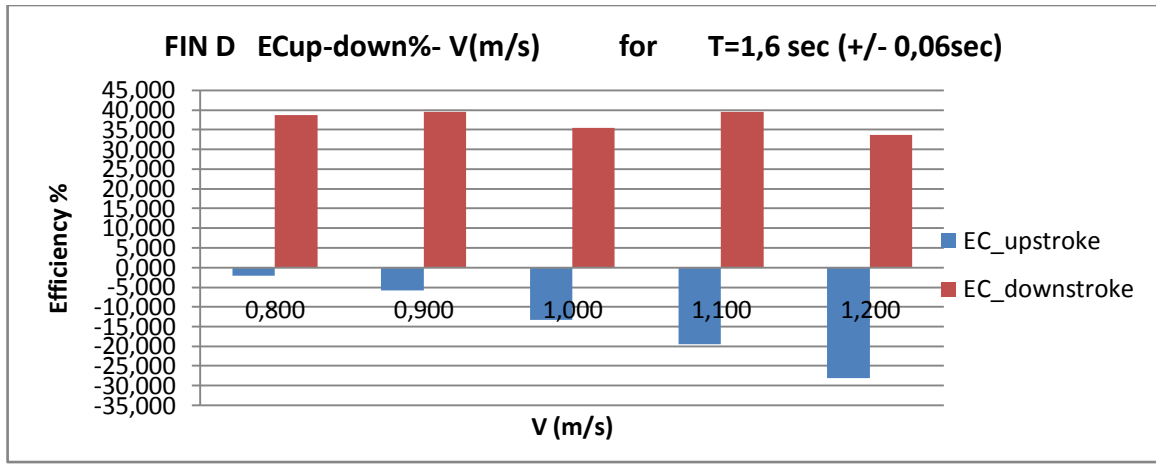
Ραβδόγραμμα 8



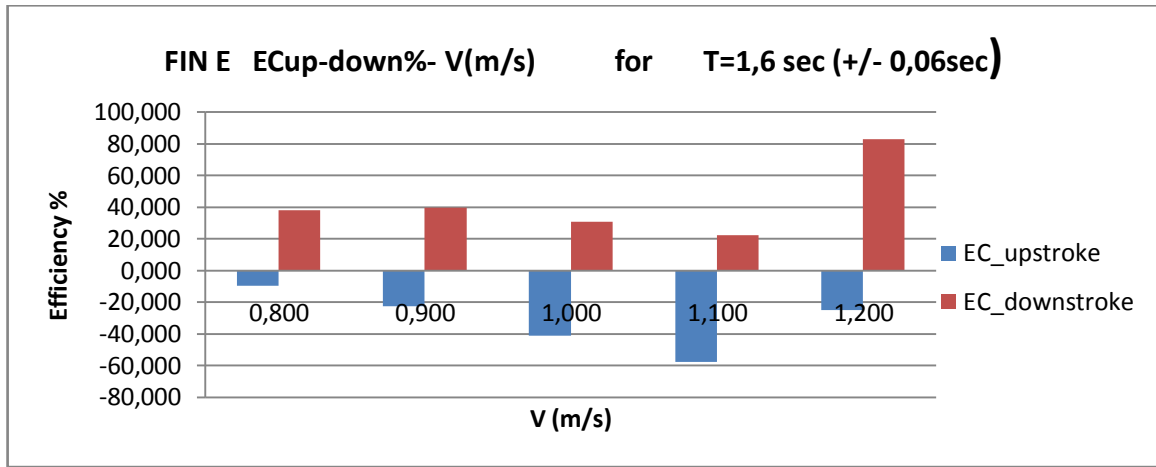
Ραβδόγραμμα 9



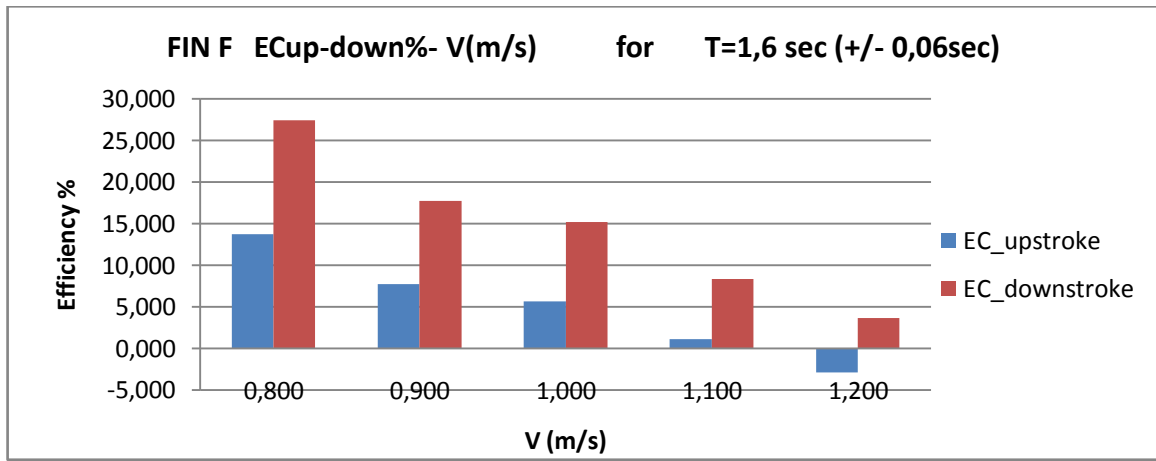
Ραβδόγραμμα 10



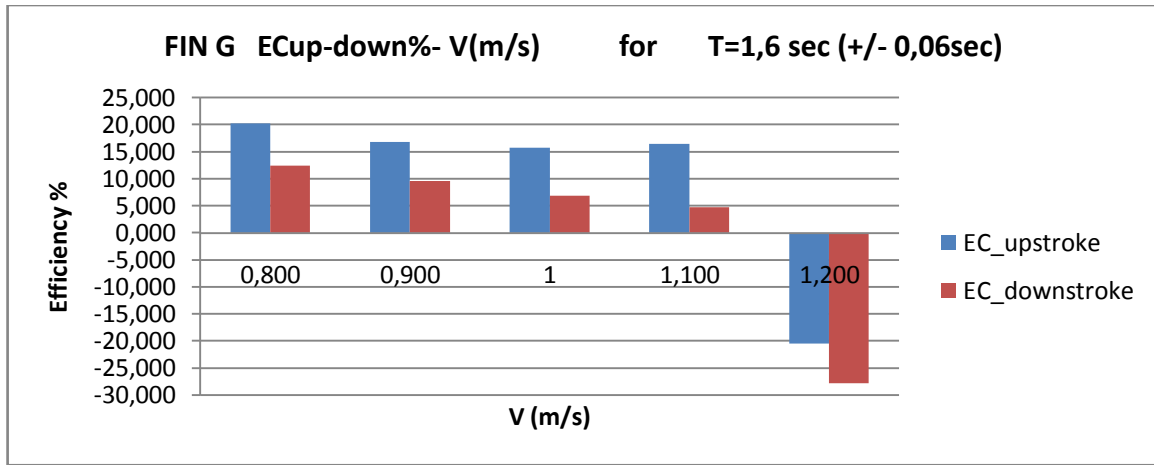
Ραβδόγραμμα 11



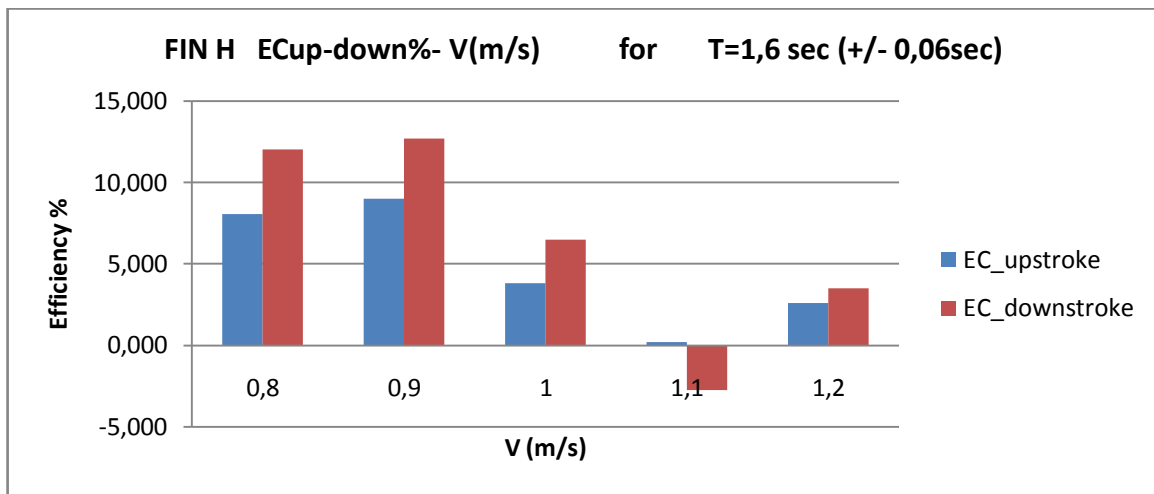
Ραβδόγραμμα 12



Ραβδόγραμμα 13



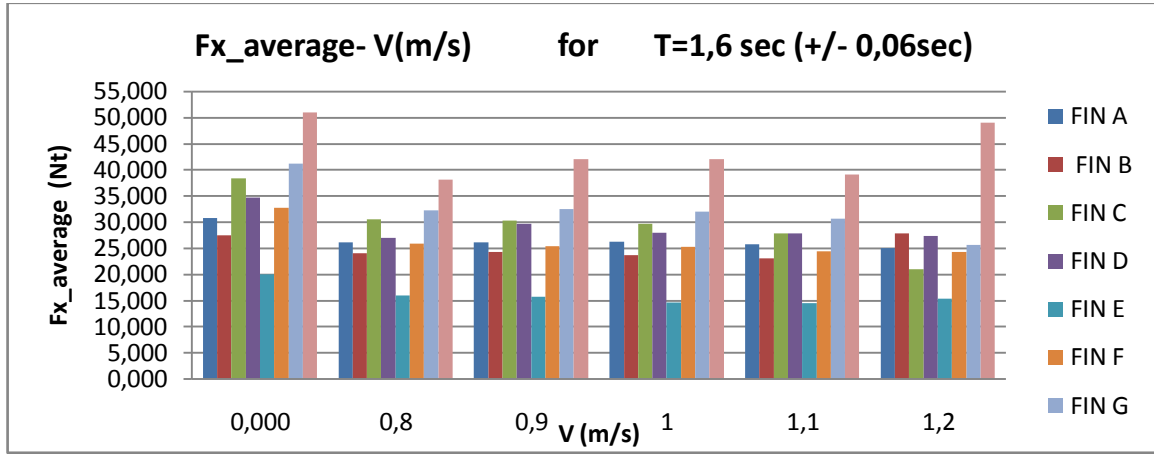
Ραβδόγραμμα 14



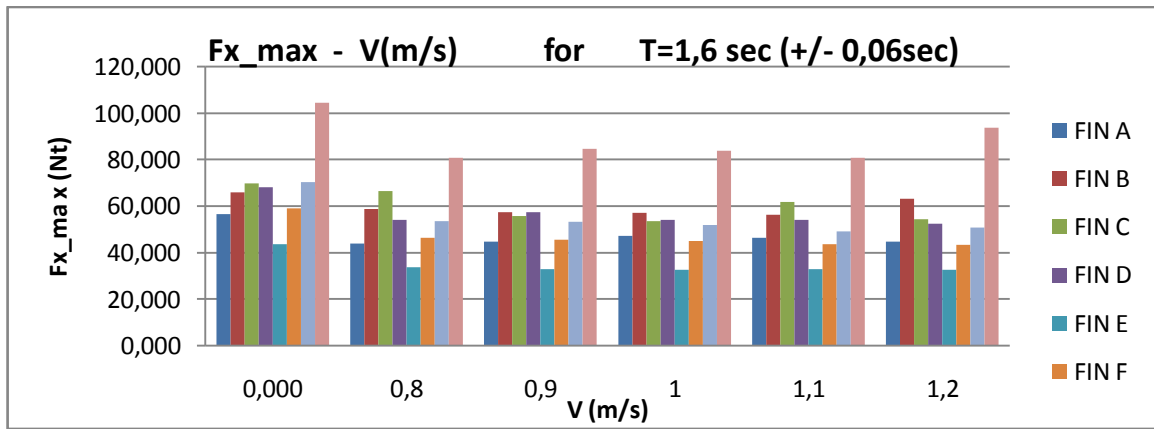
Ραβδόγραμμα 15

Στα **ραβδογράμματα 8-15**, παρουσιάζονται για κάθε περύγιο A-H η σύγκριση του υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης κατά την δεξιόστροφη (downstroke) και την αριστερόστροφη (upstroke) κίνηση του περυγίου κατά την διάρκεια μιας περιόδου $T=1,6\text{sec}$. Κατά πλειοψηφία εκτός δύο περιπτώσεων (FINB, FING), η ώση παράγεται αποδοτικότερα κατά την δεξιόστροφη κίνηση (downstroke) όπου η προσπίπτουσα επιφάνεια είναι η 'κάτω' επιφάνεια της λεπίδας, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις (FIN E, FIN D) κατά την αριστερόστροφη κίνηση δεν παράγεται ώση (αρνητικός βαθμός απόδοσης).

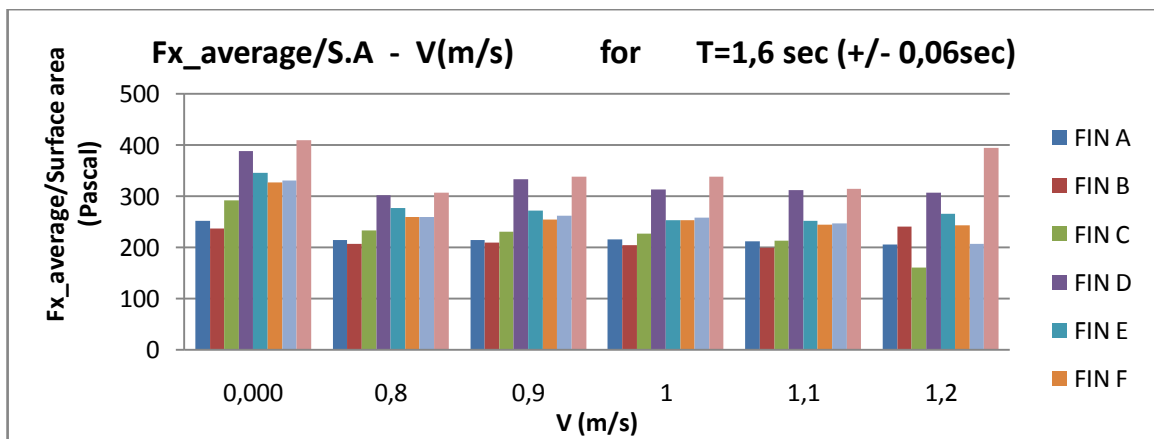
4.1.4 Σύγκριση της πλάγιας δύναμης F_x ($F_{vertical}$) για περίοδο $T=1.6sec$ ($\pm 0.06sec$) και μεταβλητή τιμή μεταφορικής ταχύτητας $V(m/s)$



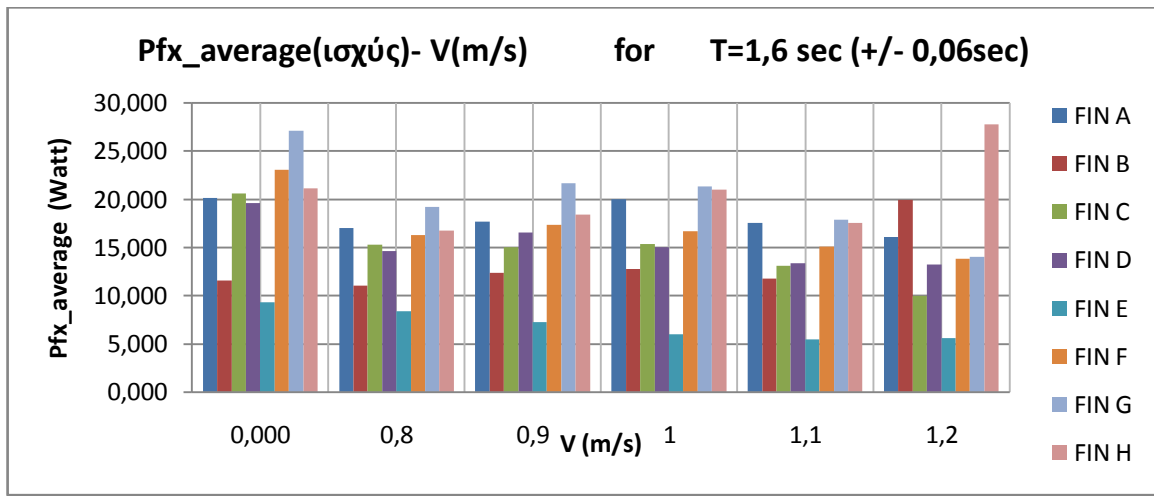
Ραβδόγραμμα 16



Ραβδόγραμμα 17



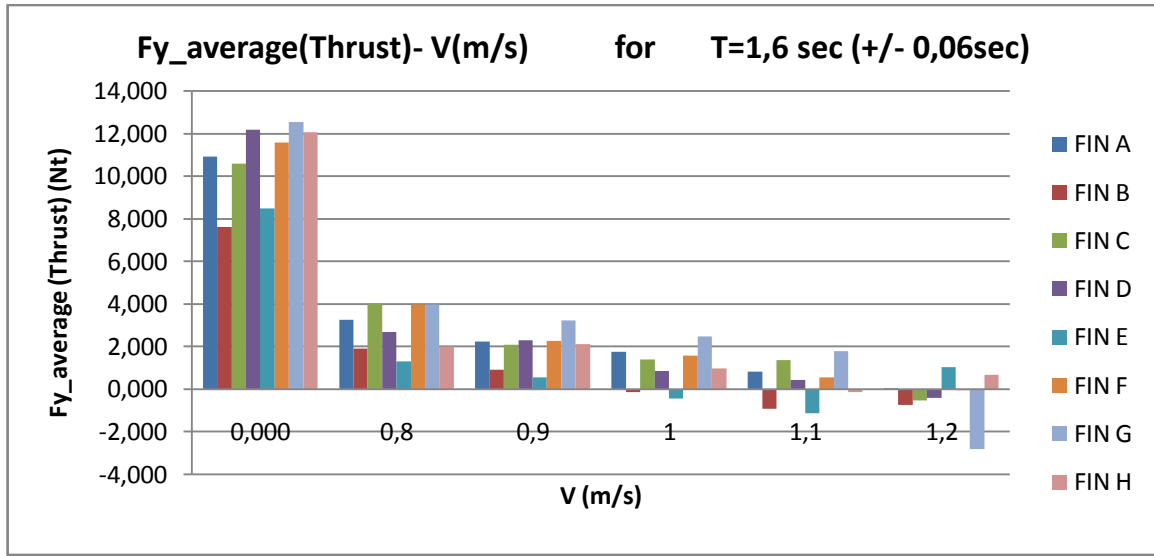
Ραβδόγραμμα 18



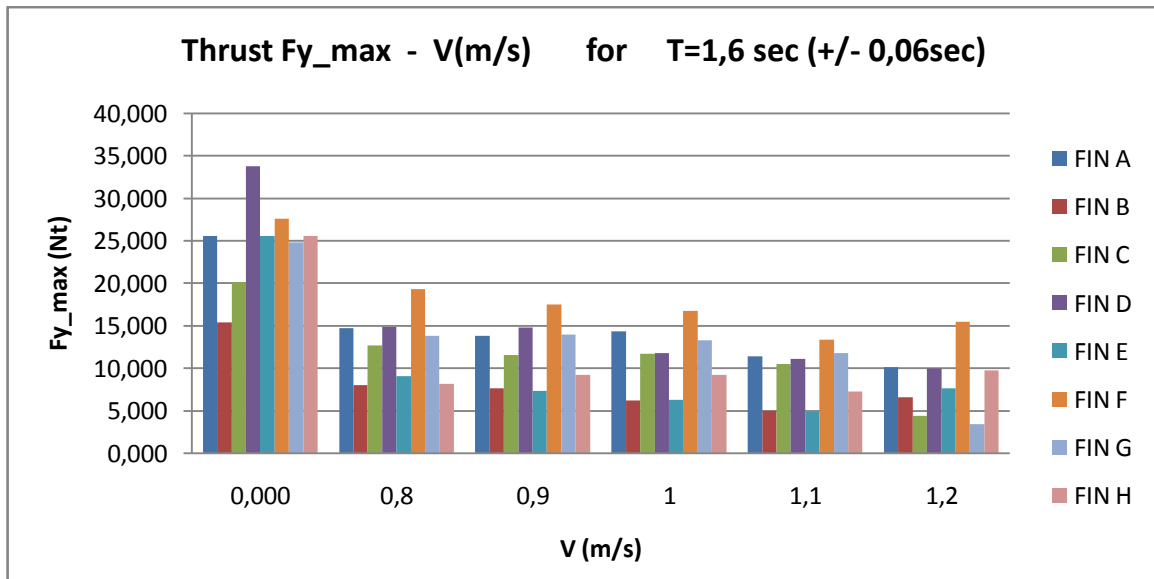
Ραβδόγραμμα 19

Στα **ραβδογράμματα 16,17,18,19** φαίνεται η μεταβολή της μέσης πλάγιας δύναμης ($F_{x_average}$), της μέγιστης τιμής της πλάγιας δύναμης (F_{x_max}), της μέσης πλάγιας δύναμης ανα μονάδα (m^2) επιφάνειας της λεπίδας (F_{x_aver}/SA) και της μέσης ισχύος της πλάγιας δύναμης ($P_{F_{x_average}}$) κατά την διάρκεια ενός κύκλου, αντίστοιχα. Τα μεγέθη αυτά αφορούν περίοδο $T=1,6sec (+/-0,06s)$ και όλες τις ταχύτητες V δοκιμών. Η πλάγια δύναμη που ασκείται κάθετα στην διεύθυνση της μεταφορικής ταχύτητας (V) δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές ανα πέδιλο με την αύξηση της ταχύτητας. Η μέγιστη πλάγια δύναμη κυμαίνεται από 30 έως 100 Nt εξαρτώμενη απ τον τύπο του πτερυγίου (επιφάνεια λεπίδας SA , ακαμψία), ενώ οι τιμές της είναι αισθητά αυξημένες στην στατική κατάσταση $V=0 m/s$.

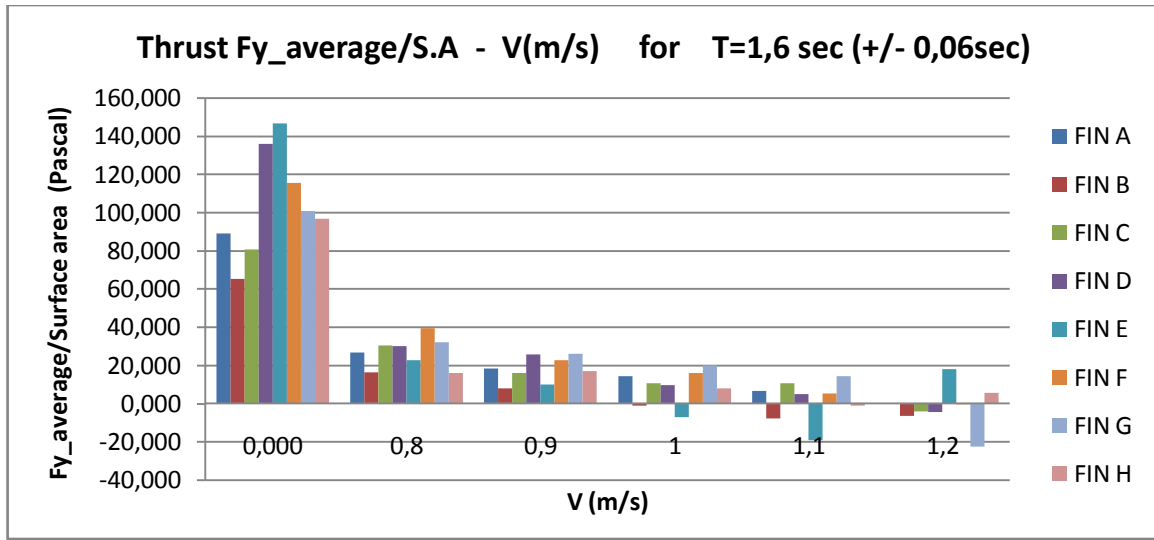
4.1.5 Σύγκριση της παραγόμενης ωστικής δύναμης F_y (thrust) των πεδύλων για περίοδο $T=1.6\text{sec}$ ($\pm 0.06\text{sec}$) και μεταβλητή τιμή μεταφορικής ταχύτητας $V(\text{m/s})$



Ραβδόγραμμα 20



Ραβδόγραμμα 21



Ραβδόγραμμα 22

Στα **ραβδογράμματα 20,21,22** φαίνεται η μεταβολή της μέσης ωστικής δύναμης ($F_{y_average}$), της μέγιστης τιμής της ωστικής δύναμης (F_{y_max}) και της μέσης ώσης ανα μονάδα (m^2) επιφάνειας της λεπίδας (F_{y_aver}/SA) κατά την διάρκεια ενός κύκλου, αντίστοιχα. Τα μεγέθη αυτά αφορούν περίοδο $T=1,6\text{sec}$ ($+/-0,06\text{s}$) και όλες τις ταχύτητες V δοκιμών. Η ωστική δύναμη που υπολογίζεται σε διεύθυνση παράλληλη στην μεταφορική κίνηση (V) παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές (με τάση μείωσης) ανά πέδιλο με την αύξηση της ταχύτητας. Η μέγιστη ωστική δύναμη κυμαίνεται από 3 έως 18 Nt υπό μη μηδενική μεταφορική ταχύτητα, εξαρτώμενη απ τον τύπο του πτερυγίου (επιφάνεια λεπίδας SA, ακαμψία), ενώ οι τιμές της είναι αισθητά αυξημένες στην στατική κατάσταση $V=0 \text{ m/s}$. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι τα πέδιλα μικρού μήκους (L) και επιφάνειας λεπίδας (SA), ($FIN D, FIN E, FIN F$) παρουσιάζουν μεγαλύτερες έως και συγκρίσιμες τιμές μέγιστης ώσης (F_{y_max}) σε σχέση με τα υπόλοιπα πέδιλα μεγάλου μήκους και επιφάνειας, υστερώντας βέβαια στις μεγάλες ταχύτητες.

4.1.6 Διαγράμματα μεταβολής της ωστικής $F_y(F_{thrust})$ και πλάγιας $F_x(F_{vertical})$ δύναμης κατά την διάρκεια μιας τυπικής περιόδου και η αντίστοιχη μορφή των πτερυγίων σε οχτώ χρονικές στιγμές ενός κύκλου.

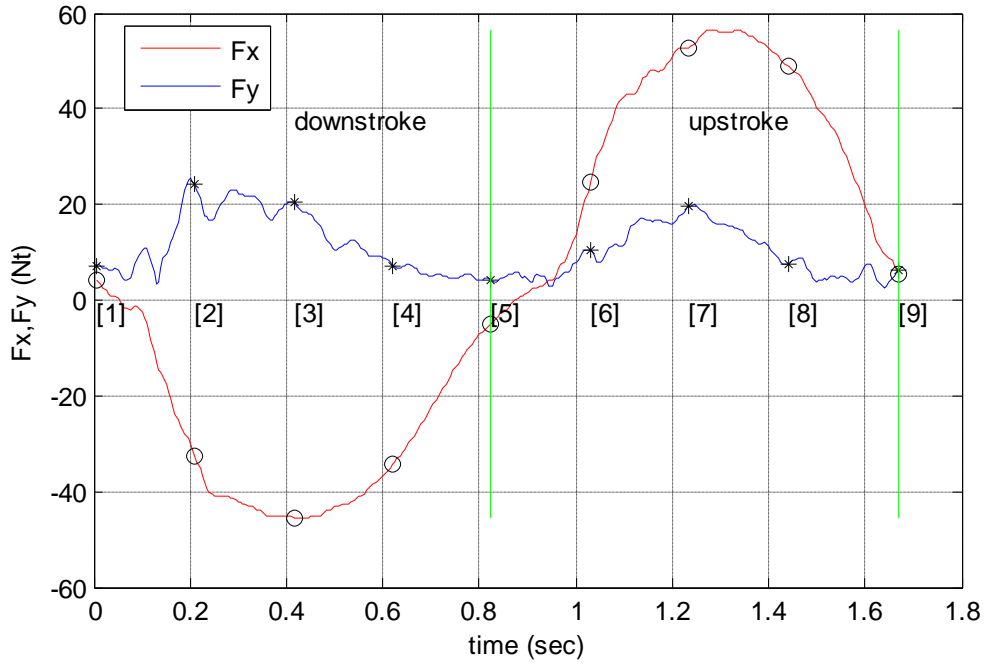
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής της ώσης και της κάθετης σ' αυτήν πλάγιας δύναμης κατά την διάρκεια της μέσης περιόδου. Η ωστική δύναμη F_y λογίζεται παράλληλα στην διεύθυνση της μεταφορικής κίνησης (V) και η πλάγια δύναμη F_x κάθετη σ' αυτήν, έτσι όπως αυτές υπολογίστηκαν στην παράγραφο (3.5.2). Για κάθε πτερύγιο και κάθε δοκιμή, αντιστοιχεί ένα ζεύγος τιμών ταχύτητας και περιόδου (V,T) και τα βασικά μεγέθη υπολογισμού (A_{le} , A_{te} , F_{x_max} , F_{y_max} , EC, ECupstroke, ECdownstroke, Strouhal) , τα οποία αναγράφονται στον τίτλο του κάθε διαγράμματος.

Για κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται γραφικά η παραμόρφωση του προφίλ του πτερυγίου για **εννιά χρονικές στιγμές (1,2,3,4,5,6,7,8,1)** κατά την διάρκεια μιας περιόδου, με την ένατη χρονική στιγμή να είναι σε ταύτιση με την πρώτη. Οι αντίστοιχες τιμές του χρόνου (time [s]), της πλάγιας δύναμης (F_x [Nt]), της ώσης (F_y [Nt]) και της εφαπτομενικής ταχύτητας (u [m/s]) στο σημείο πίεσης του πτερυγίου (L/4 απ' την ακμή πρόσπτωσης), παρουσιάζονται με την μορφή πίνακα ,ώστε να συσχετιστεί η παραμόρφωση του πτερυγίου με τα δυναμικά του χαρακτηριστικά.

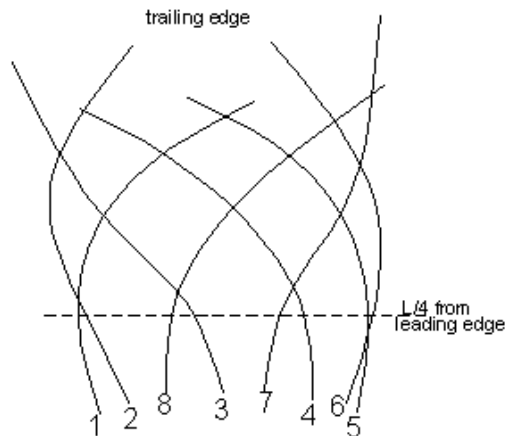
Με **κόκκινο χρώμα** αποτυπώνεται η μεταβολή της πλάγιας δύναμης και με **μπλε** αυτή της ώσης, ενώ η **κάθετη πράσινη γραμμή** στο μέσον της περιόδου οριοθετεί την κίνηση του βραχίονα και συνεπώς του πτερυγίου, σε **δεξιόστροφη (downstroke)** και **αριστερόστροφη (upstroke)**. Σημειώνουμε ότι το πτερύγιο, ιδιαίτερα η ακμή εκφυγής του (trailing edge), καθυστερεί να ακολουθήσει τον βραχίονα κατά την αλλαγή φοράς της κίνησής του, λόγω της ελαστικότητας και των αδρανειακών δυνάμεών του. Τέλος πάνω στις καμπύλες των δυνάμεων, επισημαίνονται τα σημεία που στο σύνολό τους αποτελούν τις 9 χρονικές στιγμές κατά τις οποίες αποτυπώθηκε η μορφή του πτερυγίου.

FIN A

V=0 m/s T=1.6733 s Ale=0.37 m Ate=0.53 m
 Fx max=56.5978 N Fy max=25.6169 N %EC=0
 %ECupstroke=0 %ECdownstroke=0 St=Inf
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

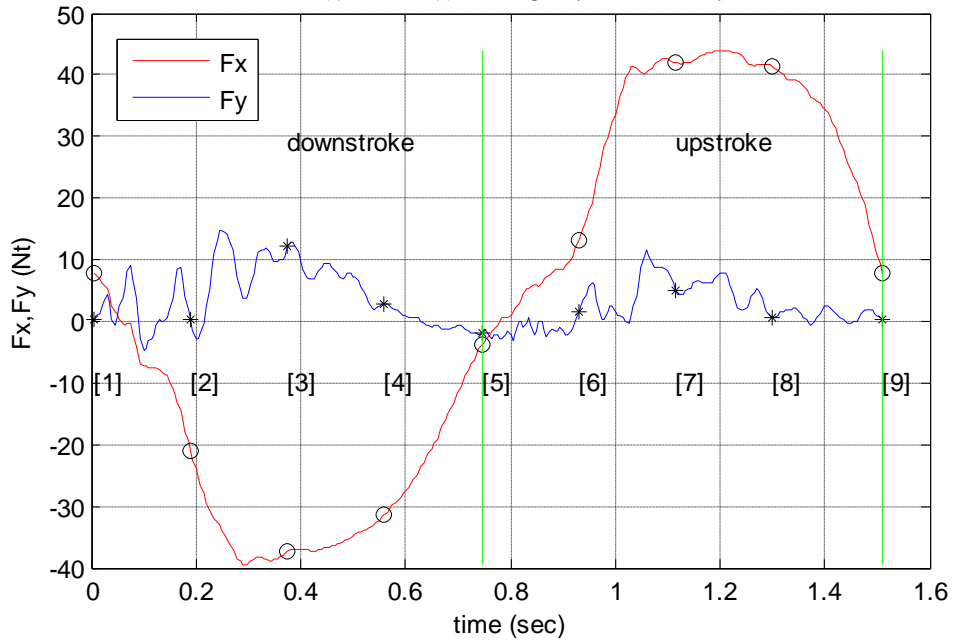


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	4,170	7,103	0,000
2	0,210	-32,465	24,051	-0,609
3	0,415	-45,374	20,289	-0,811
4	0,620	-34,428	7,064	-0,550
5	0,825	-4,830	4,315	-0,050
6	1,030	24,657	10,371	0,467
7	1,235	52,850	19,657	0,792
8	1,440	48,939	7,605	0,686
9	1,670	5,316	6,189	0,037

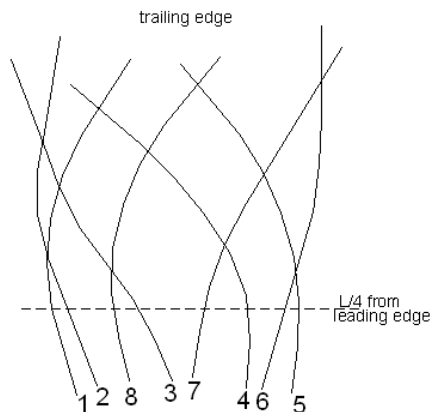


FIN A

V=0.8 m/s T=1.5124 s Ale=0.35 m Ate=0.54 m
 Fx max=43.8098 N Fy max=14.7388 N %EC=15.2776
 %ECupstroke=10.0648 %ECdownstroke=21.4302 St=0.44631
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

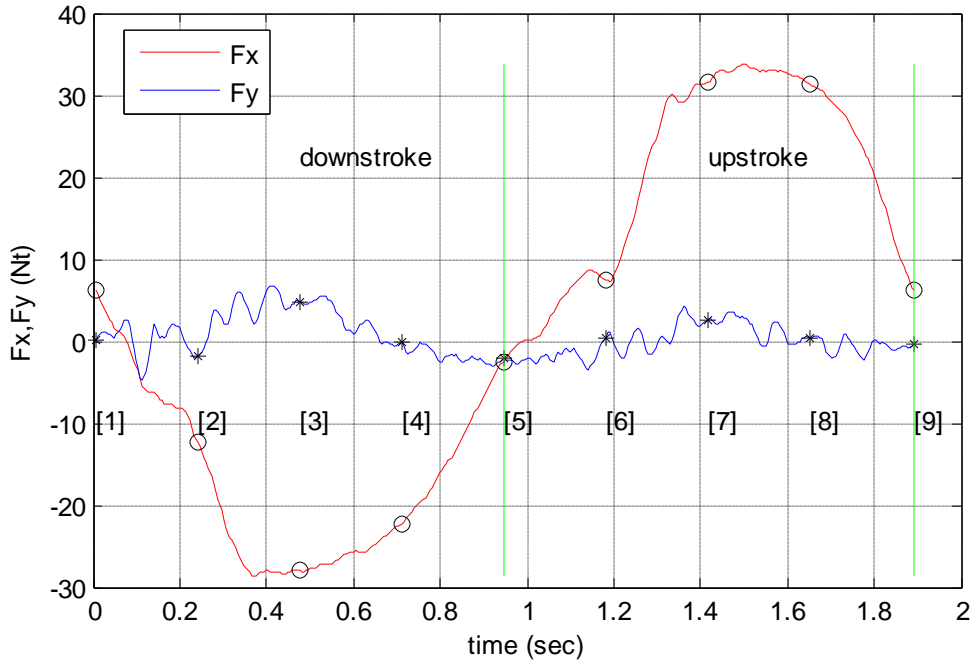


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	7,937	0,405	0,000
2	0,190	-21,025	0,207	-0,622
3	0,375	-37,378	12,097	-0,835
4	0,560	-31,405	2,821	-0,572
5	0,745	-3,841	-1,753	-0,057
6	0,930	13,035	1,443	0,480
7	1,115	41,878	5,044	0,815
8	1,300	41,414	0,471	0,707
9	1,510	7,947	0,413	0,038

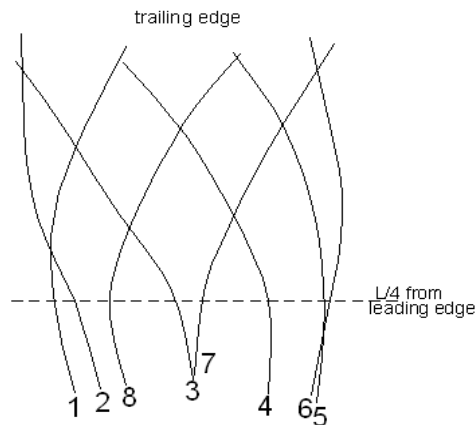


FIN A

V=0.8 m/s T=1.8909 s Ale=0.36 m Ate=0.47 m
 Fx max=33.7649 N Fy max=6.7352 N %EC=4.1574
 %ECupstroke=-0.66019 %ECdownstroke=9.8337 St=0.31069
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

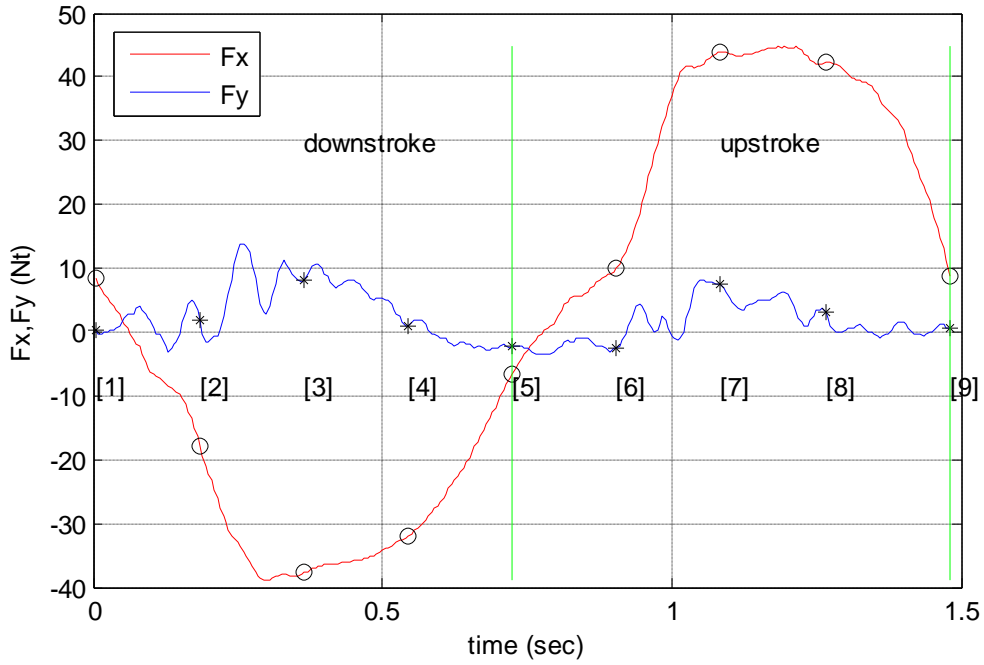


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	6,315	0,169	0,000
2	0,240	-12,236	-1,792	-0,518
3	0,475	-28,015	4,695	-0,683
4	0,710	-22,226	-0,170	-0,450
5	0,945	-2,508	-2,167	-0,016
6	1,180	7,519	0,474	0,424
7	1,415	31,485	2,445	0,678
8	1,650	31,328	0,315	0,543
9	1,890	6,098	-0,258	0,021

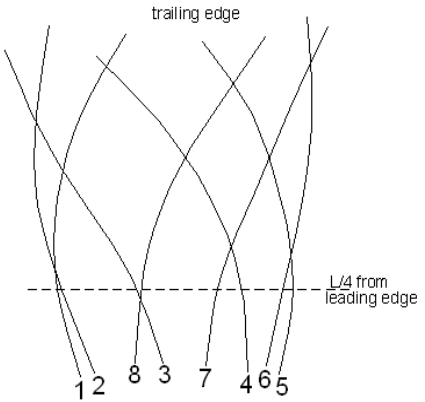


FIN A

V=0.9 m/s T=1.4835 s Ale=0.34 m Ate=0.56 m
 Fx max=44.735 N Fy max=13.8402 N %EC=11.4217
 %ECupstroke=6.3243 %ECdownstroke=17.5972 St=0.41942
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

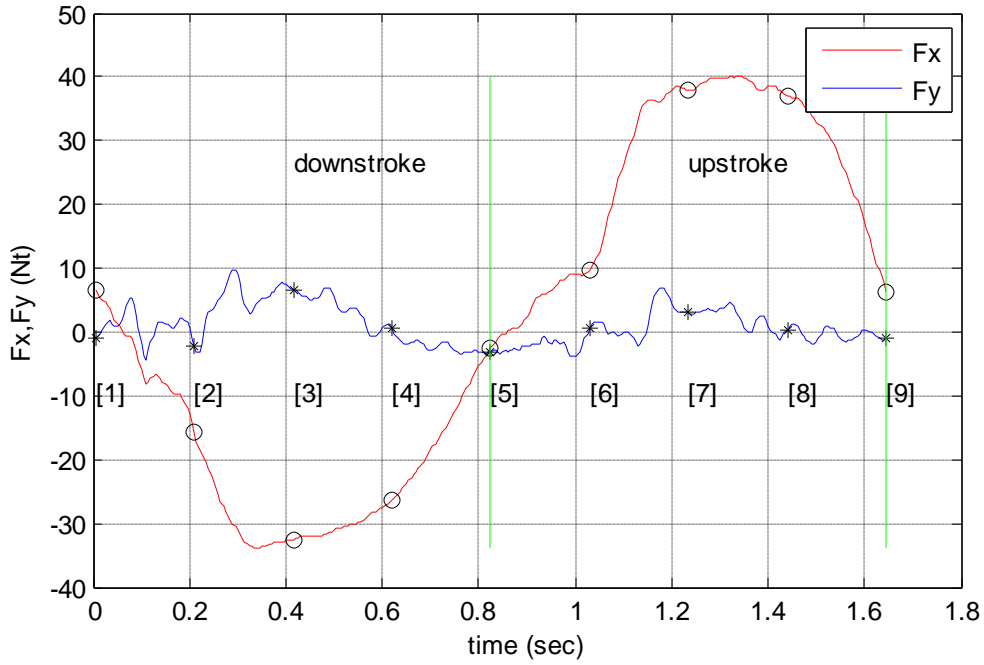


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	8,359	0,200	0,000
2	0,185	-18,005	1,715	-0,647
3	0,365	-37,688	8,235	-0,873
4	0,545	-31,878	1,006	-0,608
5	0,725	-6,557	-2,319	-0,078
6	0,905	10,007	-2,427	0,480
7	1,085	43,861	7,380	0,843
8	1,265	42,407	3,017	0,761
9	1,480	8,713	0,459	0,046

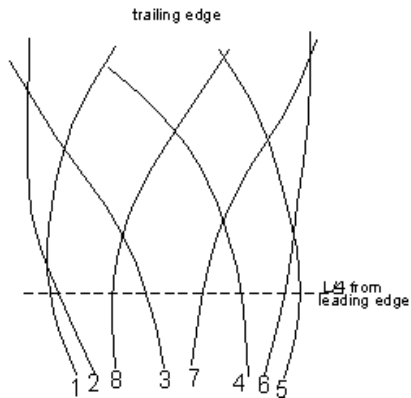


FIN A

V=0.9 m/s T=1.6457 s Ale=0.36 m Ate=0.53 m
 Fx max=40.1322 N Fy max=9.8464 N %EC=6.6642
 %ECupstroke=1.8255 %ECdownstroke=12.5597 St=0.35784
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

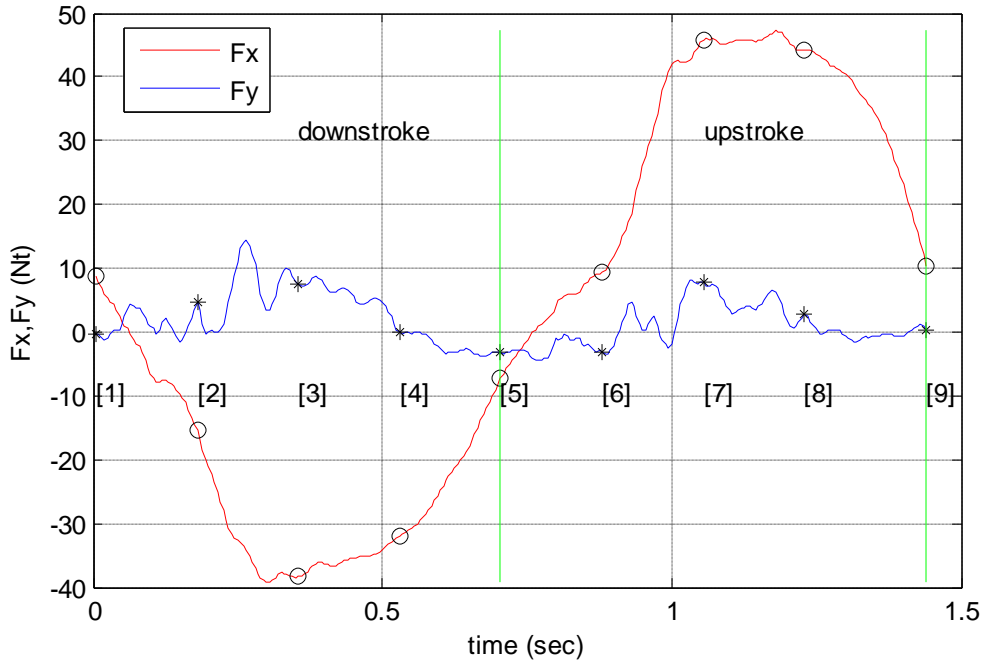


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	6,679	-0,994	0,000
2	0,210	-15,822	-2,287	-0,627
3	0,415	-32,490	6,716	-0,822
4	0,620	-26,391	0,587	-0,537
5	0,825	-2,493	-3,231	-0,015
6	1,030	9,697	0,625	0,514
7	1,235	37,955	2,968	0,818
8	1,440	36,983	0,258	0,650
9	1,645	6,156	-0,828	0,029

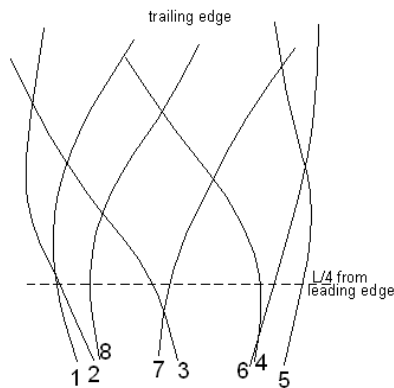


FIN A

V=1 m/s T=1.4429 s Ale=0.37 m Ate=0.56 m
 Fx max=47.2564 N Fy max=14.3403 N %EC=8.757
 %ECupstroke=4.1661 %ECdownstroke=14.47 St=0.38812
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

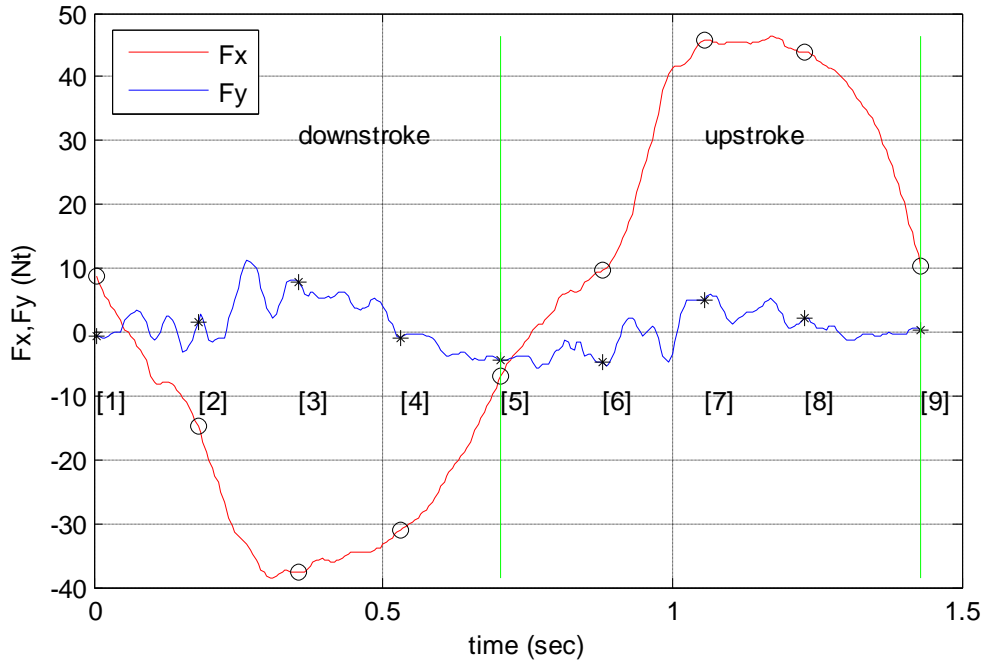


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	8,687	-0,448	0,000
2	0,180	-15,460	4,539	-0,735
3	0,355	-38,383	7,551	-0,986
4	0,530	-31,953	0,039	-0,681
5	0,705	-7,348	-3,158	-0,088
6	0,880	9,351	-3,127	0,535
7	1,055	45,705	7,747	0,949
8	1,230	44,335	2,852	0,865
9	1,440	10,276	0,198	0,050

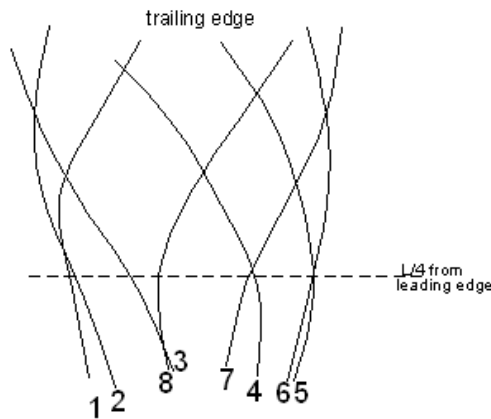


FIN A

V=1.1 m/s T=1.4331 s Ale=0.335 m Ate=0.54 m
 Fx max=46.348 N Fy max=11.3776 N %EC=5.114
 %ECupstroke=-0.060908 %ECdownstroke=11.5582 St=0.34254
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

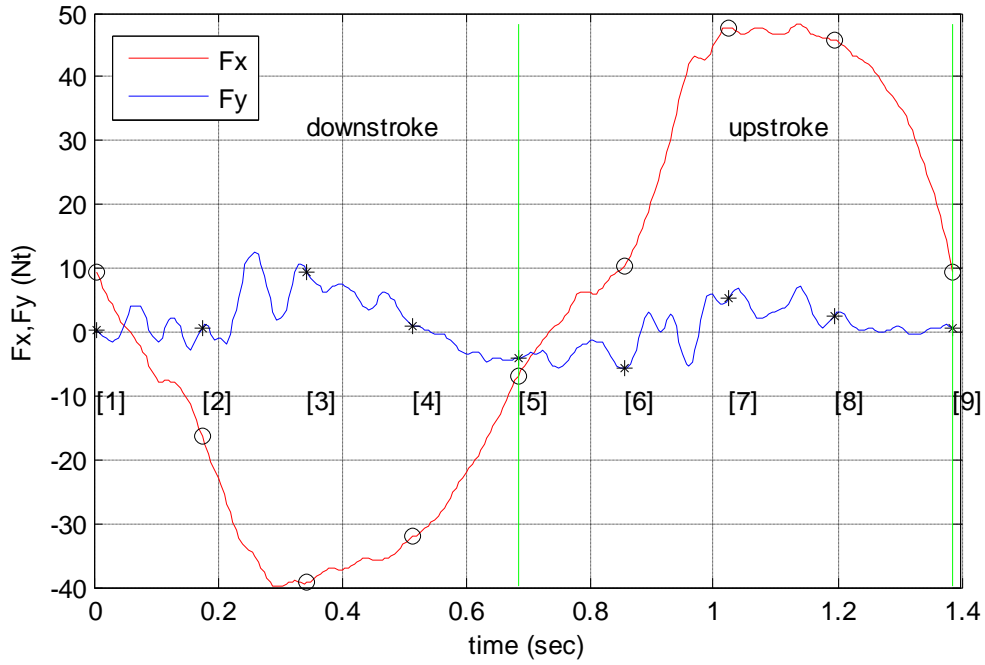


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	8,678	-0,575	0,000
2	0,180	-14,823	1,644	-0,655
3	0,355	-37,657	7,970	-0,881
4	0,530	-31,071	-0,974	-0,607
5	0,705	-6,765	-4,328	-0,064
6	0,880	9,654	-4,792	0,502
7	1,055	45,800	5,106	0,858
8	1,230	43,993	2,142	0,751
9	1,430	10,371	0,326	0,046

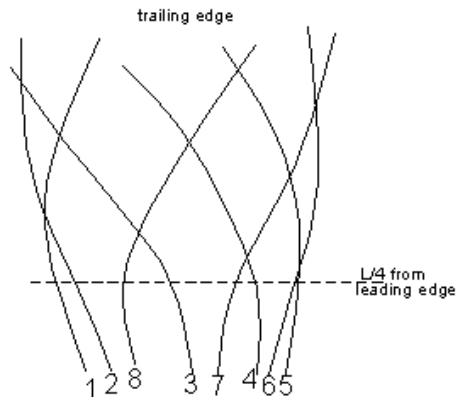


FIN A

V=1.1 m/s T=1.3867 s Ale=0.31 m Ate=0.49 m
 Fx max=48.2635 N Fy max=12.6626 N %EC=7.9916
 %ECupstroke=2.5947 %ECdownstroke=14.7347 St=0.32123
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

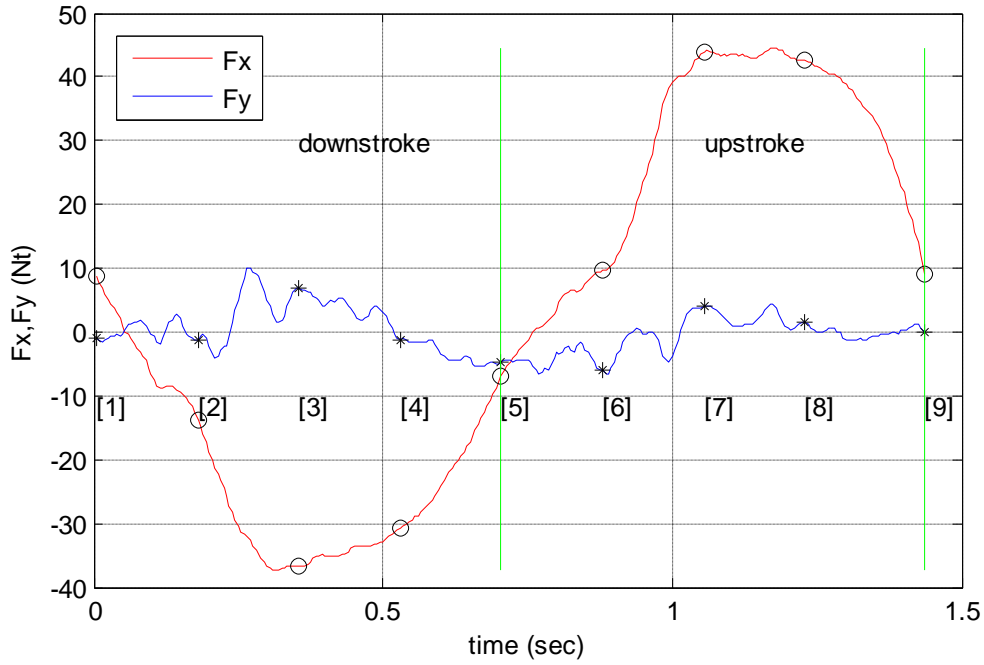


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	9,301	0,317	0,000
2	0,175	-16,229	0,728	-0,642
3	0,345	-39,350	9,529	-0,864
4	0,515	-32,138	0,998	-0,593
5	0,685	-6,794	-4,113	-0,055
6	0,855	10,295	-5,783	0,505
7	1,025	47,767	5,442	0,846
8	1,195	45,772	2,574	0,724
9	1,385	9,412	0,614	0,040

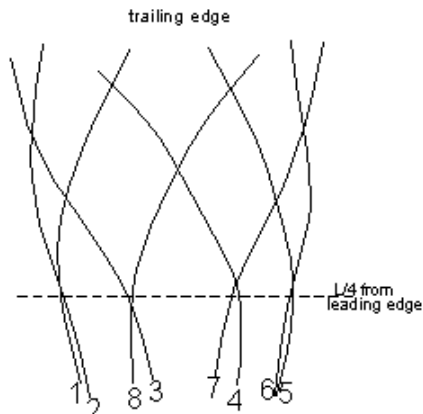


FIN A

V=1.2 m/s T=1.4388 s Ale=0.32 m Ate=0.52 m
 Fx max=44.6083 N Fy max=10.1365 N %EC=0.26695
 %ECupstroke=-4.6804 %ECdownstroke=6.3782 St=0.30118
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

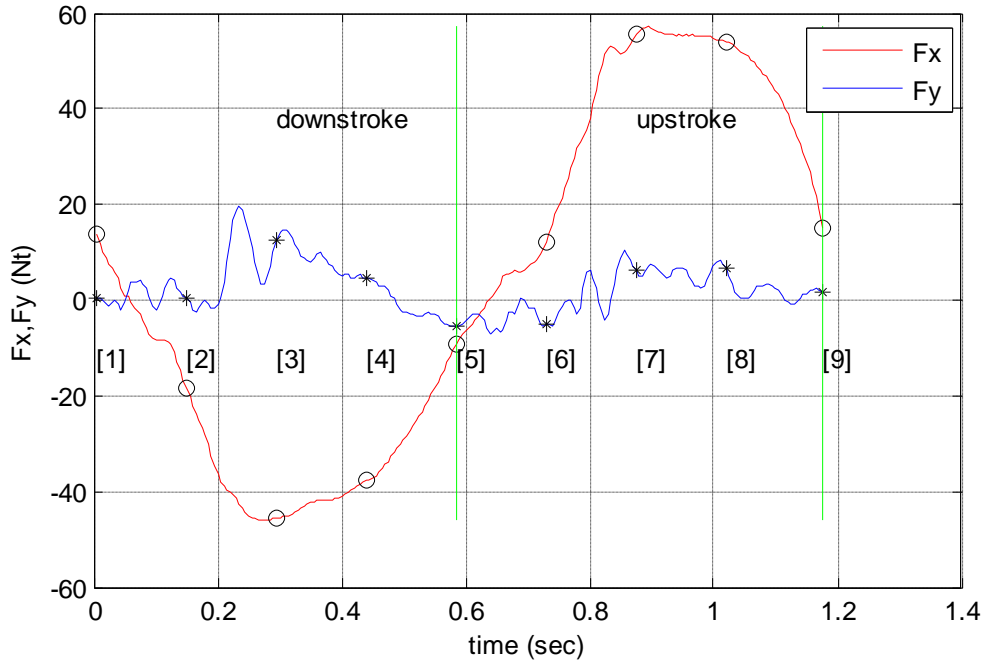


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	8,817	-1,082	0,000
2	0,180	-13,881	-1,277	-0,615
3	0,355	-36,759	6,846	-0,834
4	0,530	-30,621	-1,399	-0,582
5	0,705	-6,905	-4,680	-0,070
6	0,880	9,620	-5,847	0,468
7	1,055	43,996	4,014	0,809
8	1,230	42,694	1,455	0,718
9	1,435	9,042	0,128	0,046

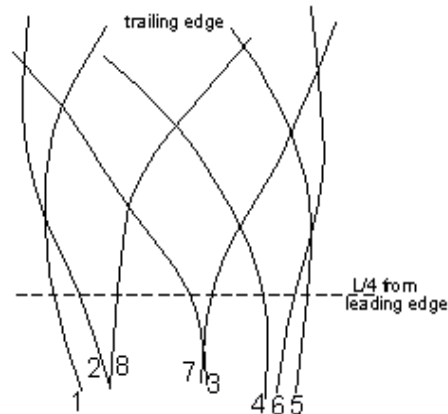


FIN A

V=1.2 m/s T=1.1777 s Ale=0.33 m Ate=0.48 m
 Fx max=57.1142 N Fy max=19.7181 N %EC=11.4828
 %ECupstroke=5.3908 %ECdownstroke=19.2588 St=0.33964
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

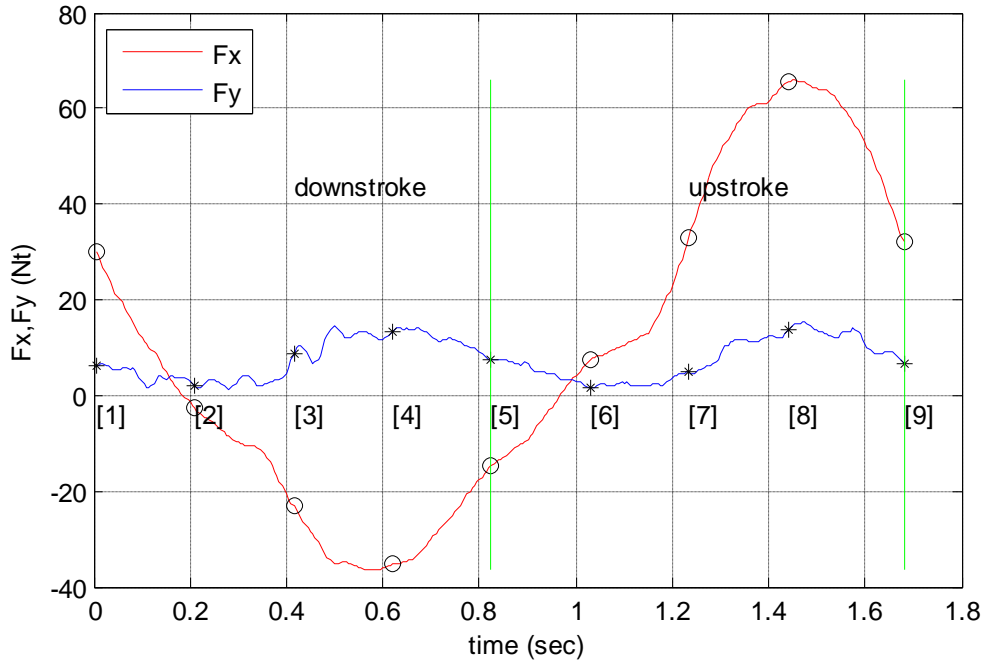


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	13,915	0,488	0,000
2	0,150	-18,295	0,532	-0,778
3	0,295	-45,581	12,402	-1,044
4	0,440	-37,635	4,447	-0,709
5	0,585	-9,356	-5,477	-0,056
6	0,730	12,049	-4,898	0,620
7	0,875	55,433	6,087	1,026
8	1,020	54,088	6,510	0,863
9	1,175	15,208	1,577	0,063

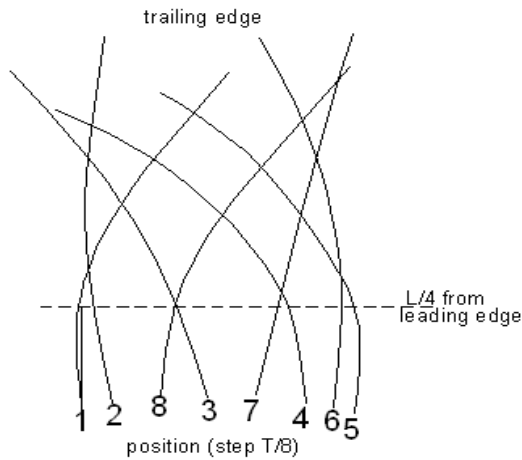


FIN B

V=0 m/s T=1.6822 s Ale=0.35 m Ate=0.435 m
 Fx max=65.896 N Fy max=15.3934 N %EC=0
 %ECupstroke=0 %ECdownstroke=0 St=Inf
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

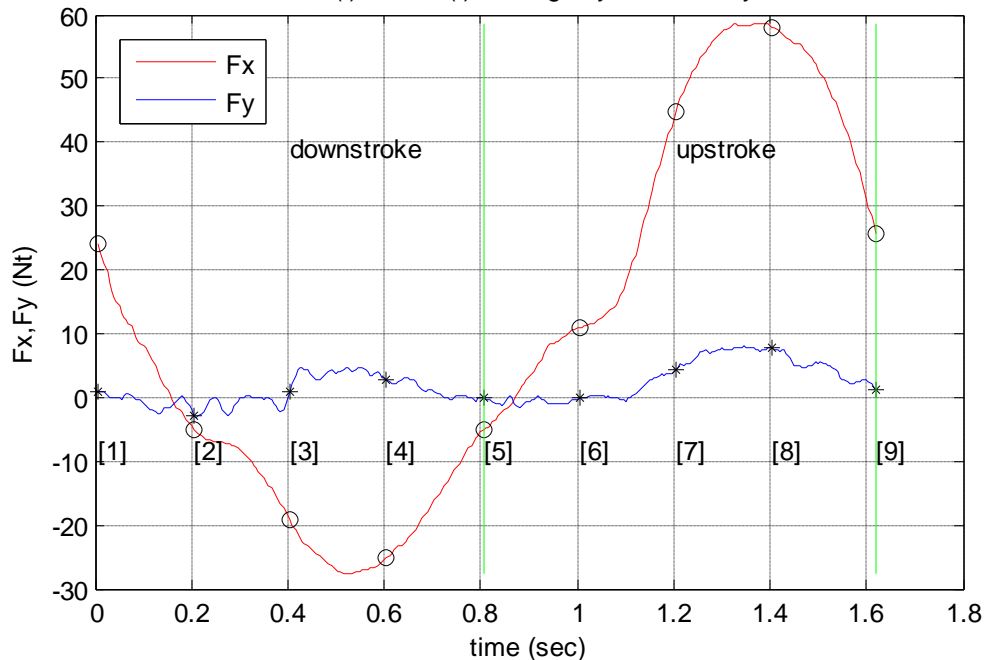


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	30,065	6,220	0,000
2	0,210	-2,663	1,954	-0,483
3	0,415	-23,210	8,593	-0,656
4	0,620	-35,367	13,275	-0,458
5	0,825	-14,783	7,391	-0,051
6	1,030	7,480	1,646	0,376
7	1,235	33,030	4,739	0,640
8	1,440	65,552	13,736	0,558
9	1,680	31,947	6,748	0,026



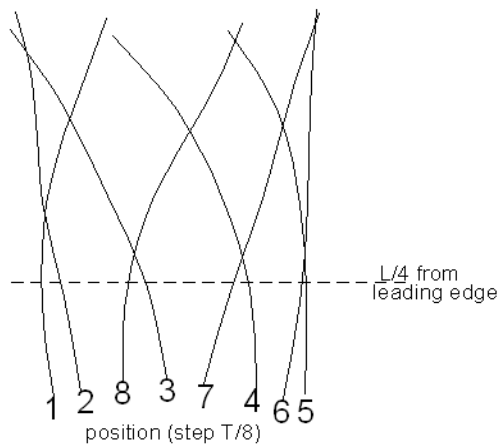
FIN B

V=0.8 m/s T=1.6213 s Ale=0.32 m Ate=0.39 m
 Fx max=58.6299 N Fy max=7.9997 N %EC=13.8527
 %ECupstroke=15.1256 %ECdownstroke=10.4666 St=0.30068
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



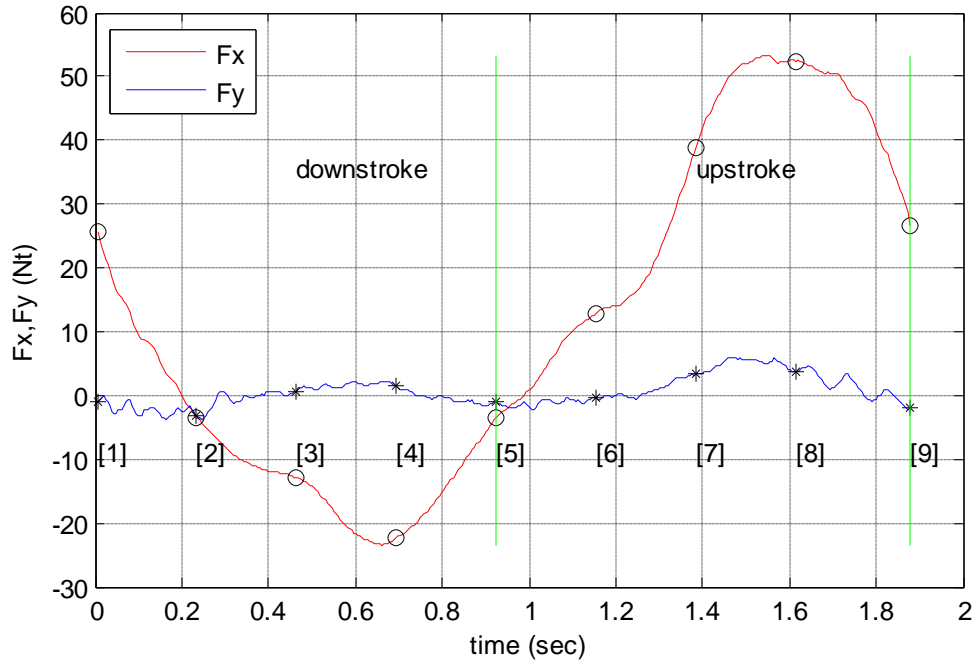
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	23,986	0,831	0,000
2	0,205	-5,011	-2,766	-0,490
3	0,405	-19,298	0,837	-0,661
4	0,605	-25,105	2,679	-0,451
5	0,805	-5,060	-0,121	-0,030
6	1,005	10,893	-0,152	0,403
7	1,205	44,757	4,202	0,652
8	1,405	58,086	7,710	0,536
9	1,620	25,600	1,066	0,025

trailing edge

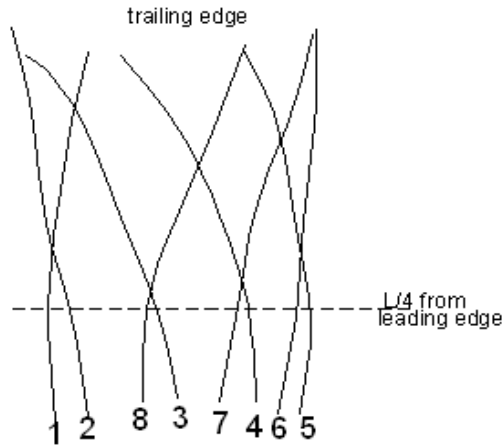


FIN B

V=0.8 m/s T=1.8836 s Ale=0.32 m Ate=0.41 m
 Fx max=53.3715 N Fy max=5.9333 N %EC=4.6476
 %ECupstroke=8.402 %ECdownstroke=-7.1122 St=0.27208
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

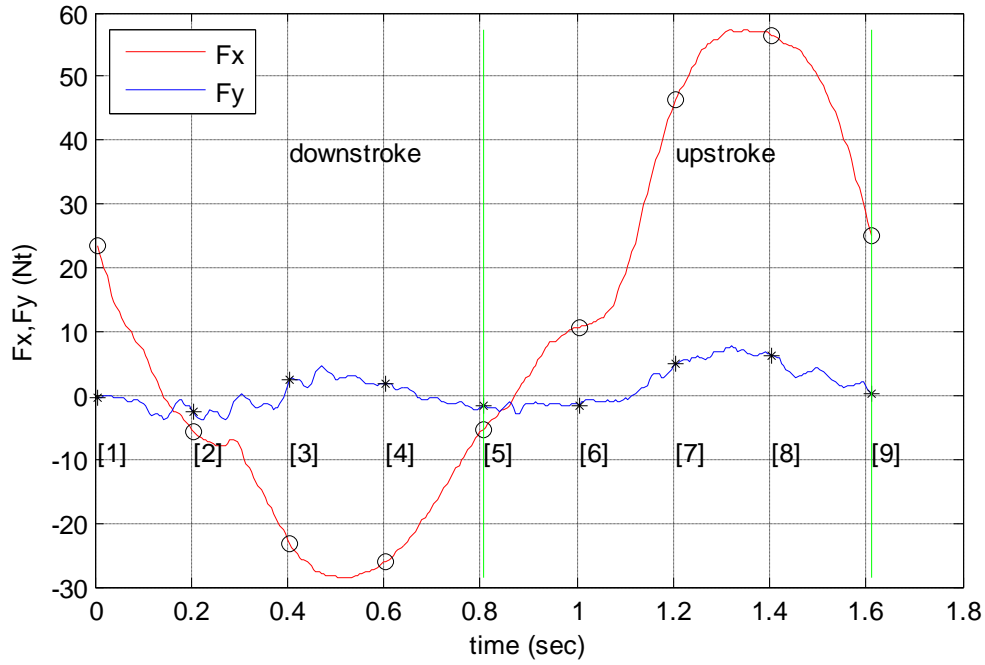


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	25,593	-1,023	0,000
2	0,235	-3,458	-3,156	-0,472
3	0,465	-12,891	0,692	-0,636
4	0,695	-22,365	1,502	-0,439
5	0,925	-3,540	-1,118	-0,045
6	1,155	12,814	-0,361	0,366
7	1,385	38,823	3,333	0,621
8	1,615	52,451	3,571	0,540
9	1,880	26,449	-1,790	0,026

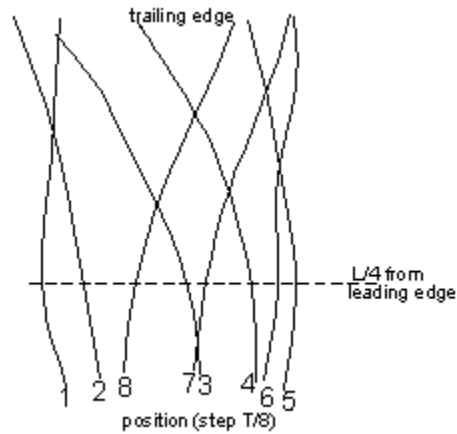


FIN B

V=0.9 m/s T=1.6139 s Ale=0.33 m Ate=0.4 m
 Fx max=57.2838 N Fy max=7.6371 N %EC=6.792
 %ECupstroke=11.0005 %ECdownstroke=-3.2555 St=0.27539
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

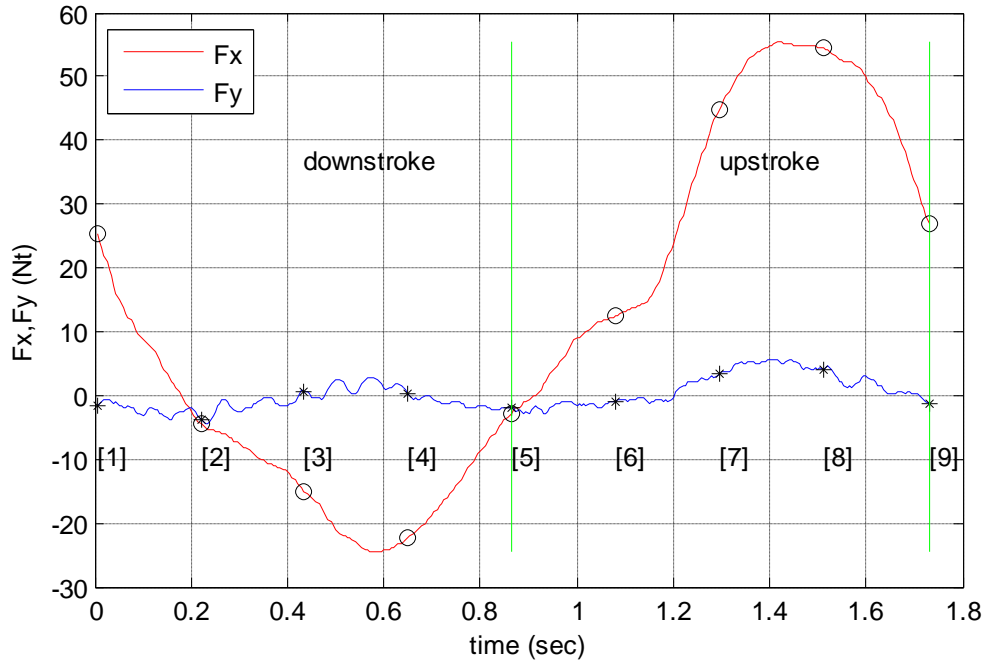


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	23,502	-0,215	0,000
2	0,205	-5,609	-2,650	-0,541
3	0,405	-23,263	2,414	-0,722
4	0,605	-25,986	1,876	-0,484
5	0,805	-5,311	-1,760	-0,024
6	1,005	10,736	-1,530	0,446
7	1,205	46,277	4,811	0,715
8	1,405	56,519	6,281	0,578
9	1,610	24,993	0,376	0,035

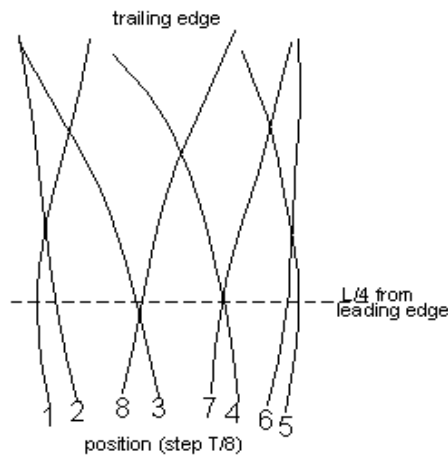


FIN B

V=0.9 m/s T=1.7321 s Ale=0.32 m Ate=0.4 m
 Fx max=55.5113 N Fy max=5.7262 N %EC=1.3183
 %ECupstroke=7.1896 %ECdownstroke=-16.7634 St=0.2566
 Fvertical(t), Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

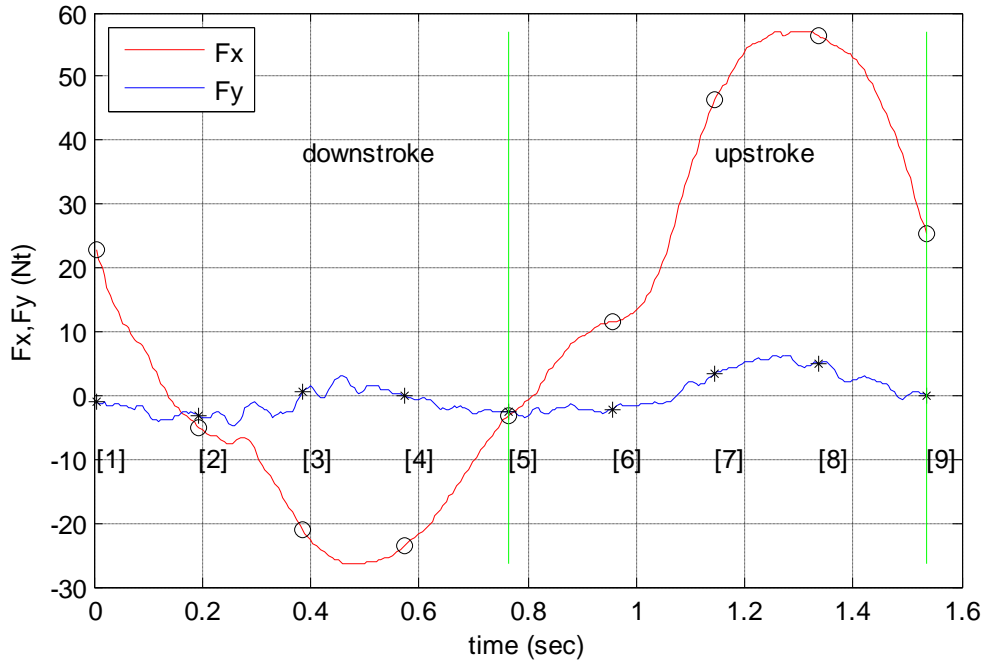


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	25,228	-1,485	0,000
2	0,220	-4,438	-3,738	-0,505
3	0,435	-14,966	0,516	-0,672
4	0,650	-22,222	0,358	-0,449
5	0,865	-2,739	-1,854	-0,018
6	1,080	12,422	-1,085	0,419
7	1,295	44,862	3,242	0,667
8	1,510	54,369	4,092	0,534
9	1,730	26,838	-1,440	0,026

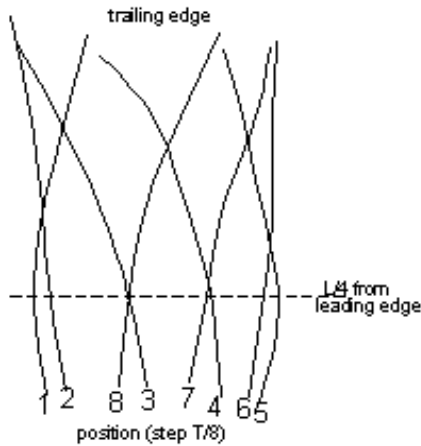


FIN B

V=1 m/s T=1.5394 s Ale=0.33 m Ate=0.4 m
 Fx max=57.1666 N Fy max=6.179 N %EC=-1.1242
 %ECupstroke=6.2885 %ECdownstroke=-20.9781 St=0.25983
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

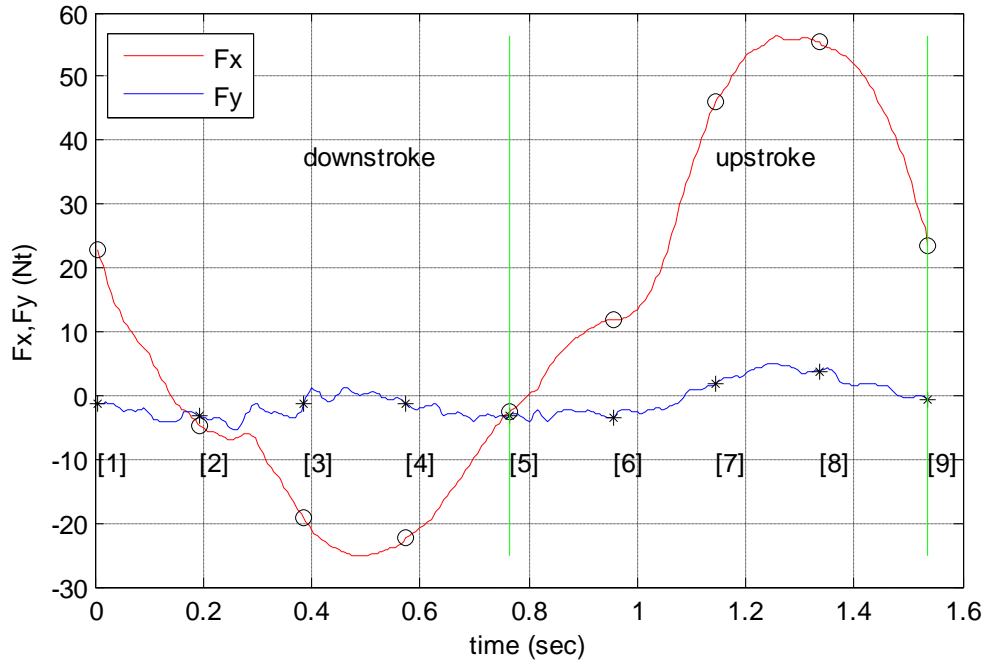


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	22,728	-0,883	0,000
2	0,195	-5,058	-3,086	-0,565
3	0,385	-21,035	0,609	-0,757
4	0,575	-23,458	-0,030	-0,513
5	0,765	-3,053	-2,454	-0,033
6	0,955	11,463	-2,138	0,459
7	1,145	46,335	3,324	0,747
8	1,335	56,429	5,047	0,616
9	1,535	25,304	-0,028	0,041

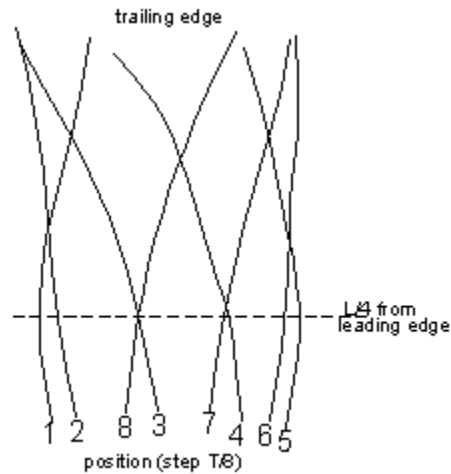


FIN B

V=1.1 m/s T=1.5387 s Ale=0.3 m Ate=0.397 m
 Fx max=56.2898 N Fy max=5.0102 N %EC=-8.586
 %ECupstroke=1.9922 %ECdownstroke=-38.6286 St=0.23455
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

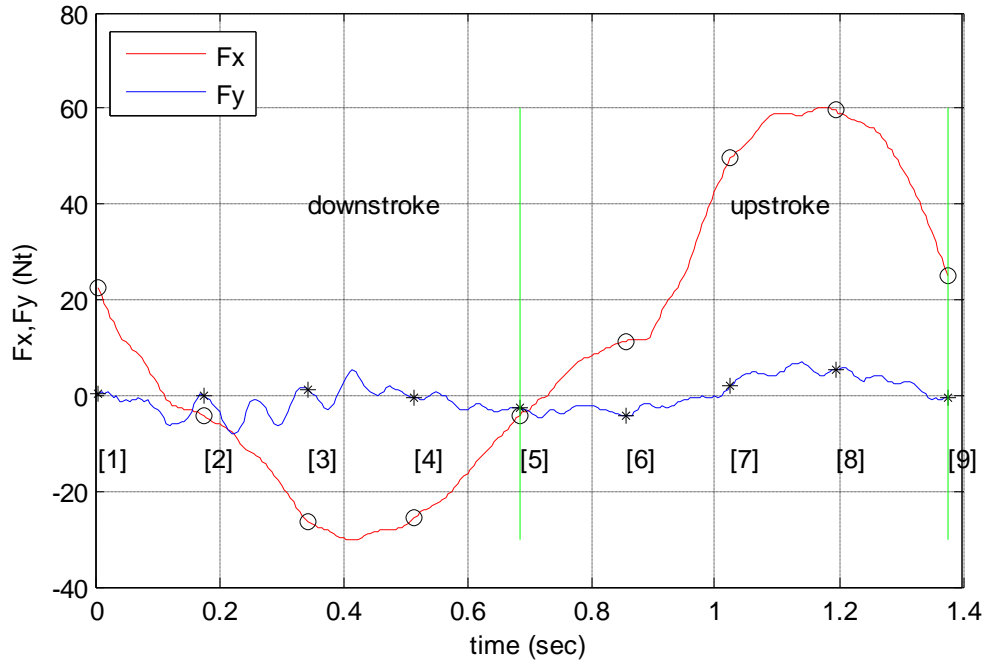


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	22,704	-1,241	0,000
2	0,195	-4,837	-3,315	-0,533
3	0,385	-19,142	-1,414	-0,717
4	0,575	-22,467	-1,263	-0,487
5	0,765	-2,461	-3,163	-0,031
6	0,955	11,801	-3,387	0,438
7	1,145	45,957	1,927	0,708
8	1,335	55,303	3,836	0,580
9	1,535	23,412	-0,554	0,036



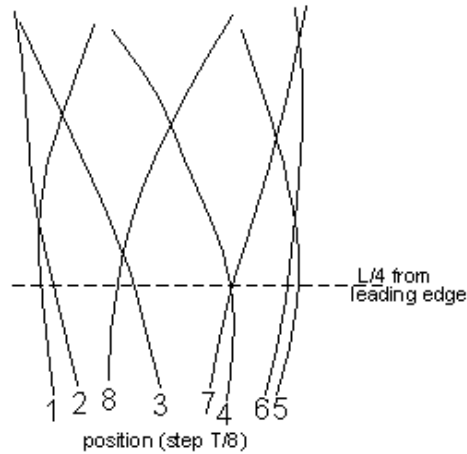
FIN B

V=1.1 m/s T=1.3768 s Ale=0.3 m Ate=0.39 m
 Fx max=60.2726 N Fy max=6.8352 N %EC=-3.1232
 %ECupstroke=4.1463 %ECdownstroke=-20.119 St=0.25752
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



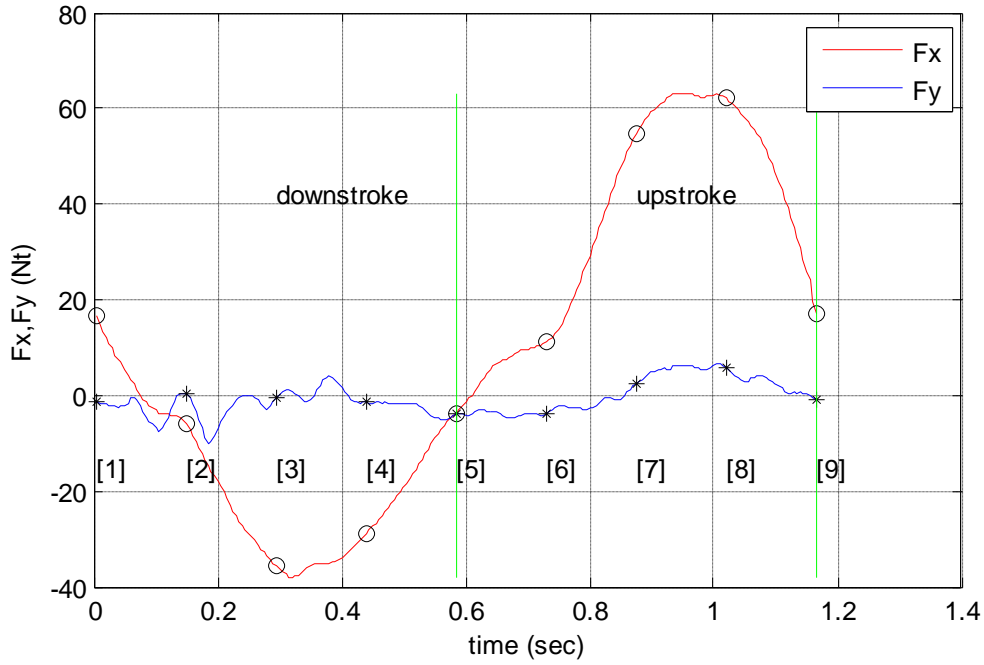
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	22,445	0,305	0,000
2	0,175	-4,303	0,040	-0,577
3	0,345	-26,612	1,068	-0,778
4	0,515	-25,676	-0,525	-0,530
5	0,685	-4,079	-2,717	-0,035
6	0,855	11,293	-4,274	0,476
7	1,025	49,495	1,967	0,768
8	1,195	59,557	5,386	0,629
9	1,375	24,931	-0,399	0,036

trailing edge

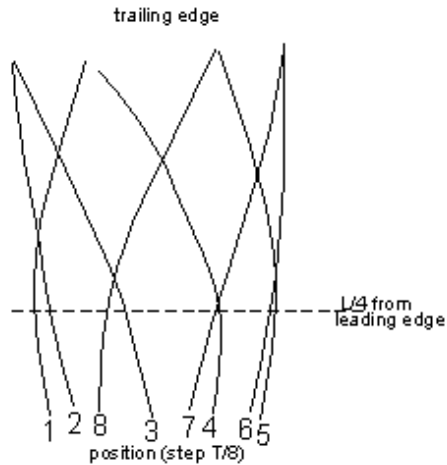


FIN B

V=1.2 m/s T=1.1677 s Ale=0.3 m Ate=0.39 m
 Fx max=63.1781 N Fy max=6.5857 N %EC=-4.439
 %ECupstroke=2.4873 %ECdownstroke=-17.27 St=0.27831
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

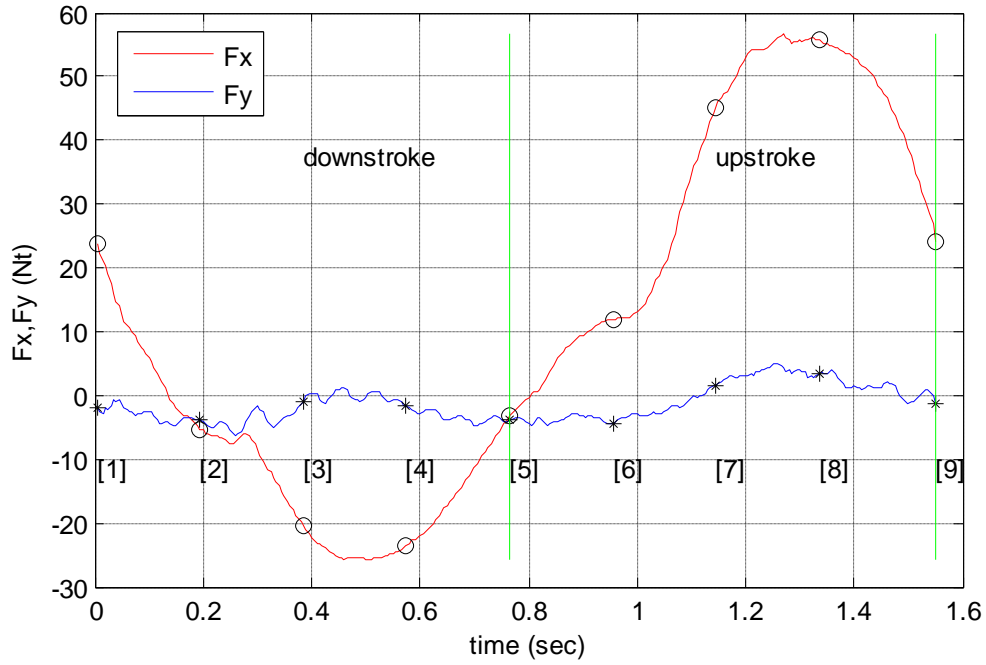


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	16,521	-1,465	0,000
2	0,150	-5,982	0,218	-0,703
3	0,295	-35,685	-0,471	-0,944
4	0,440	-28,778	-1,427	-0,635
5	0,585	-3,724	-3,852	-0,029
6	0,730	11,066	-3,858	0,589
7	0,875	54,726	2,439	0,936
8	1,020	62,060	5,795	0,748
9	1,165	17,098	-1,019	0,057

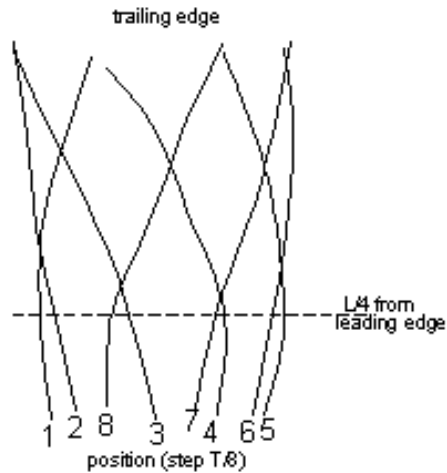


FIN B

V=1.2 m/s T=1.5498 s Ale=0.3 m Ate=0.39 m
 Fx max=56.5518 N Fy max=4.9694 N %EC=-13.9376
 %ECupstroke=-0.90009 %ECdownstroke=-49.0272 St=0.20971
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

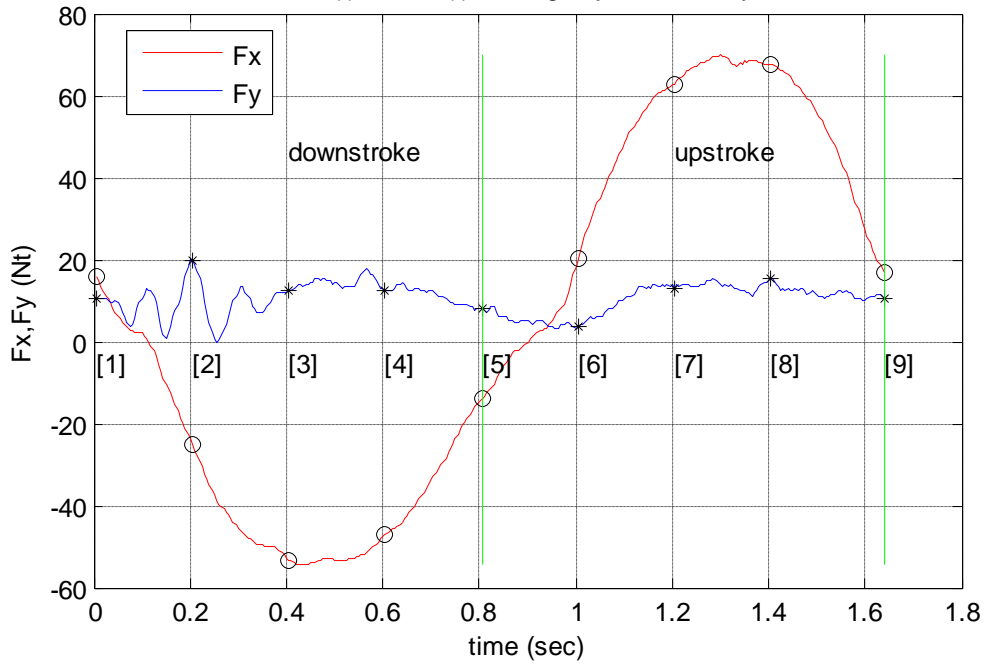


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	23,651	-1,999	0,000
2	0,195	-5,229	-3,923	-0,526
3	0,385	-20,359	-0,846	-0,712
4	0,575	-23,453	-1,747	-0,491
5	0,765	-3,295	-3,888	-0,045
6	0,955	11,976	-4,466	0,420
7	1,145	45,255	1,563	0,698
8	1,335	55,670	3,375	0,593
9	1,550	24,207	-1,364	0,023



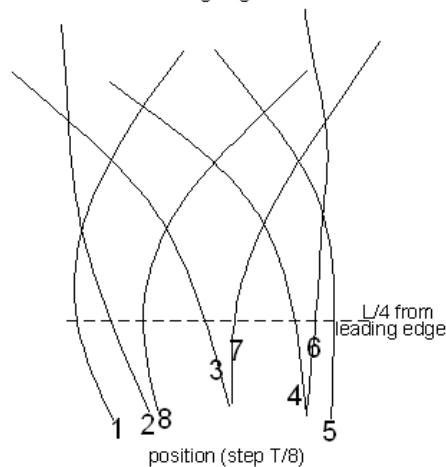
FIN C

V=0 m/s T=1.639 s Ale=0.31 m Ate=0.53 m
 Fx max=69.81 N Fy max=20.1178 N %EC=0
 %ECupstroke=0 %ECdownstroke=0 St=Inf
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



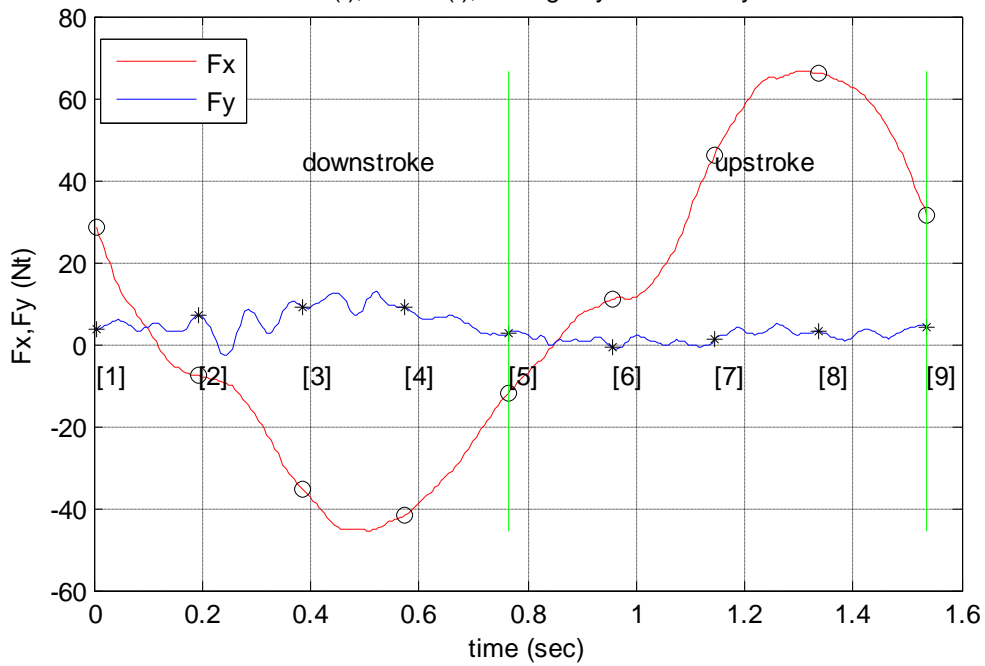
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	16,028	10,621	0,000
2	0,205	-25,001	19,806	-0,522
3	0,405	-53,259	12,481	-0,706
4	0,605	-47,174	12,542	-0,490
5	0,805	-14,099	7,941	-0,053
6	1,005	20,167	3,493	0,405
7	1,205	62,880	13,006	0,689
8	1,405	67,416	15,482	0,600
9	1,640	16,981	10,391	0,019

trailing edge

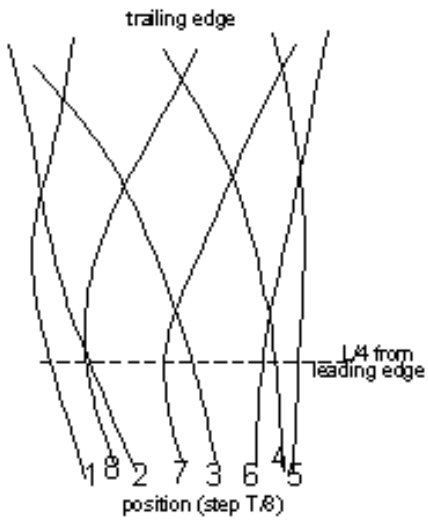


FIN C

V=0.8 m/s T=1.5386 s Ale=0.292 m Ate=0.45 m
 Fx max=66.5863 N Fy max=12.7076 N %EC=20.8973
 %ECupstroke=8.044 %ECdownstroke=41.6846 St=0.36559
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

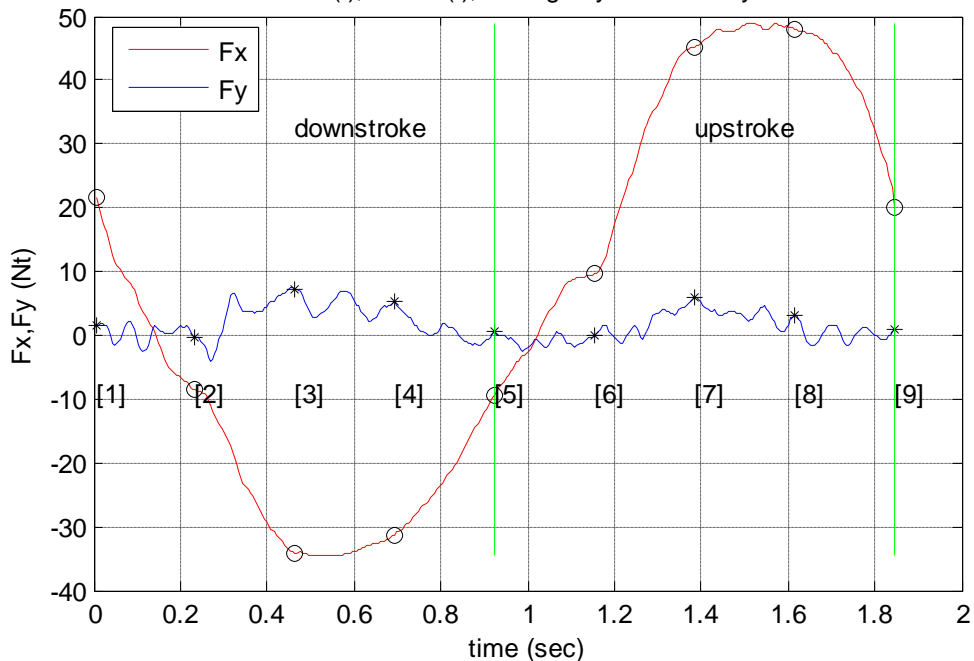


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	28,306	3,511	0,000
2	0,195	-7,790	7,008	-0,528
3	0,385	-35,489	9,002	-0,710
4	0,575	-41,567	8,846	-0,483
5	0,765	-11,723	2,925	-0,031
6	0,955	10,839	-0,642	0,434
7	1,145	46,304	1,125	0,702
8	1,335	66,222	3,050	0,575
9	1,535	31,655	4,125	0,035

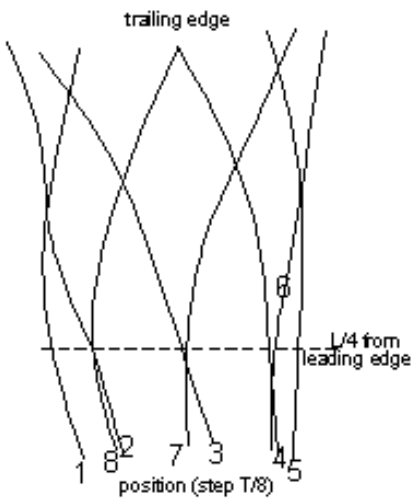


FIN C

$V=0.8$ m/s $T=1.8455$ s $A_{le}=0.31$ m $A_{te}=0.464$ m
 $F_x \text{ max}=48.9129$ N $F_y \text{ max}=7.4024$ N $\%EC=11.6471$
 $\%EC_{\text{upstroke}}=6.3483$ $\%EC_{\text{downstroke}}=19.8256$ $St=0.31428$
 $F_{\text{vertical}}(t), F_{\text{thrust}}(t)$, average cycle for X-Ysystem

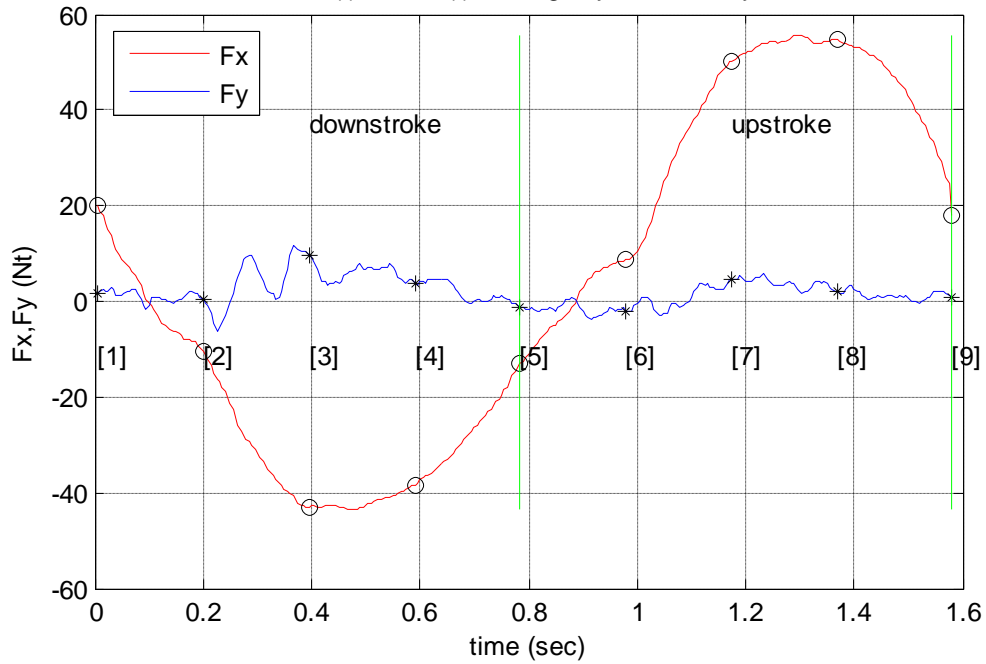


position	time (sec)	F _x (Nt)	Thrust F _y (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	21,490	1,396	0,000
2	0,235	-8,615	-0,177	-0,462
3	0,465	-34,055	7,233	-0,614
4	0,695	-31,227	5,172	-0,407
5	0,925	-9,406	0,597	-0,010
6	1,155	9,570	0,075	0,391
7	1,385	45,262	5,909	0,611
8	1,615	47,888	3,162	0,477
9	1,845	20,045	0,782	0,019

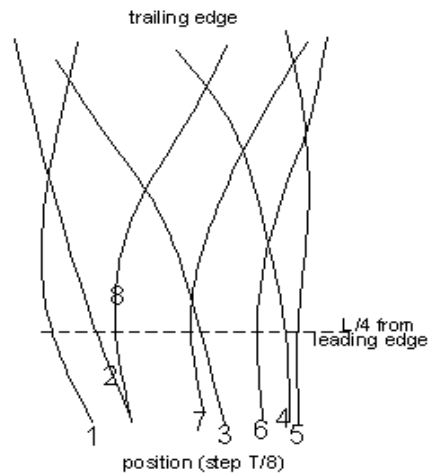


FIN C

V=0.9 m/s T=1.5812 s Ale=0.29 m Ate=0.44 m
 Fx max=55.7222 N Fy max=11.5623 N %EC=12.4632
 %ECupstroke=5.3737 %ECdownstroke=21.801 St=0.30918
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

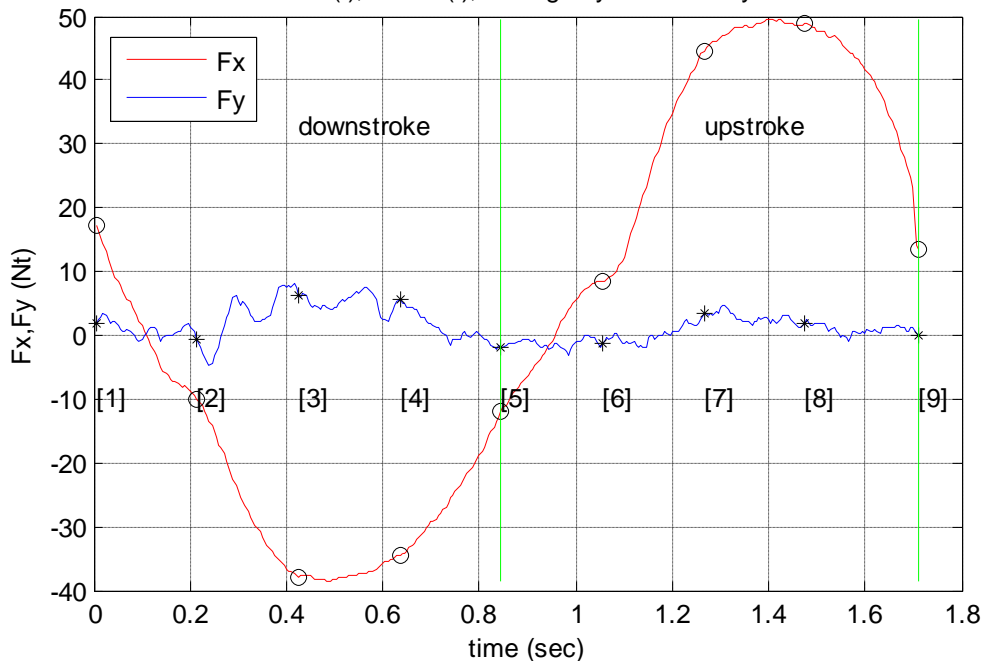


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	20,197	1,856	0,000
2	0,200	-10,451	0,448	-0,502
3	0,395	-42,918	9,710	-0,677
4	0,590	-38,329	3,972	-0,462
5	0,785	-13,092	-1,258	-0,032
6	0,980	8,768	-2,005	0,412
7	1,175	50,357	4,402	0,669
8	1,370	54,617	2,269	0,550
9	1,580	17,936	0,638	0,026

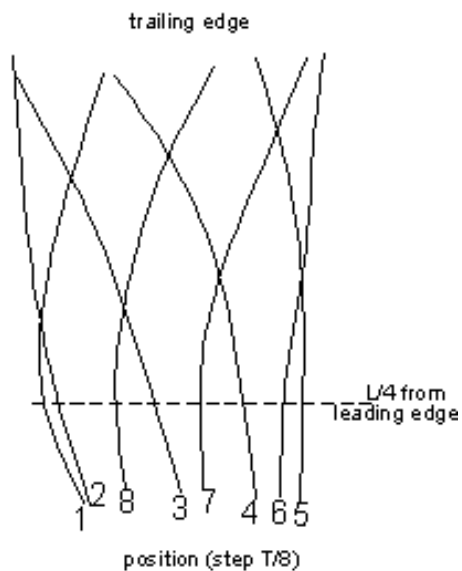


FIN C

V=0.9 m/s T=1.712 s Ale=0.28 m Ate=0.39 m
 Fx max=49.5737 N Fy max=8.0444 N %EC=11.4587
 %ECupstroke=4.2865 %ECdownstroke=20.9534 St=0.25312
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

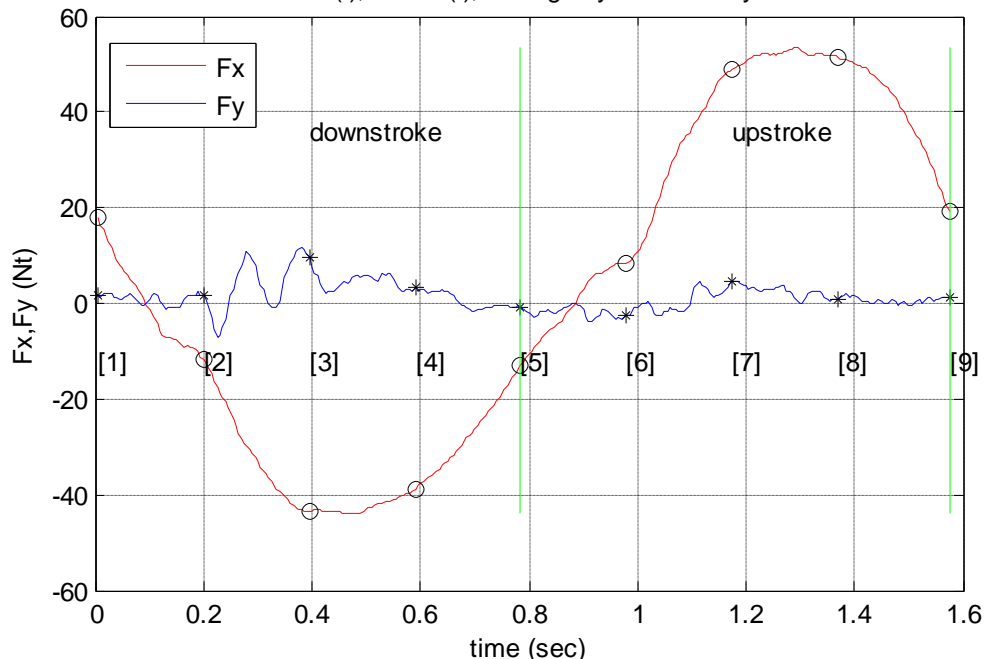


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	17,330	1,876	0,000
2	0,215	-9,909	-0,555	-0,448
3	0,425	-37,887	6,114	-0,607
4	0,635	-34,385	5,625	-0,420
5	0,845	-12,043	-1,987	-0,037
6	1,055	8,417	-1,259	0,362
7	1,265	44,655	3,327	0,597
8	1,475	48,828	1,871	0,503
9	1,710	13,337	-0,014	0,023

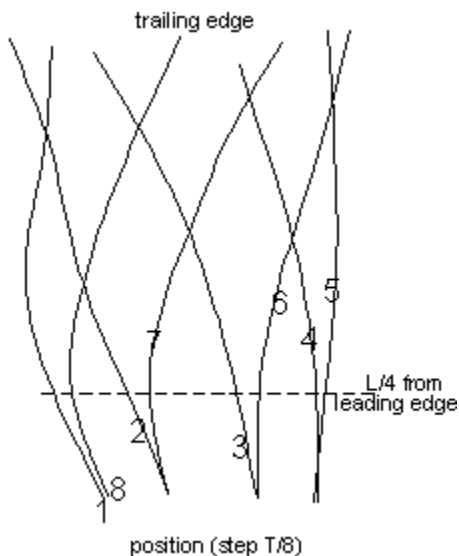


FIN C

V=1 m/s T=1.576 s Ale=0.28 m Ate=0.44 m
 Fx max=53.643 N Fy max=11.6617 N %EC=9.197
 %ECupstroke=2.3381 %ECdownstroke=17.6255 St=0.27919
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

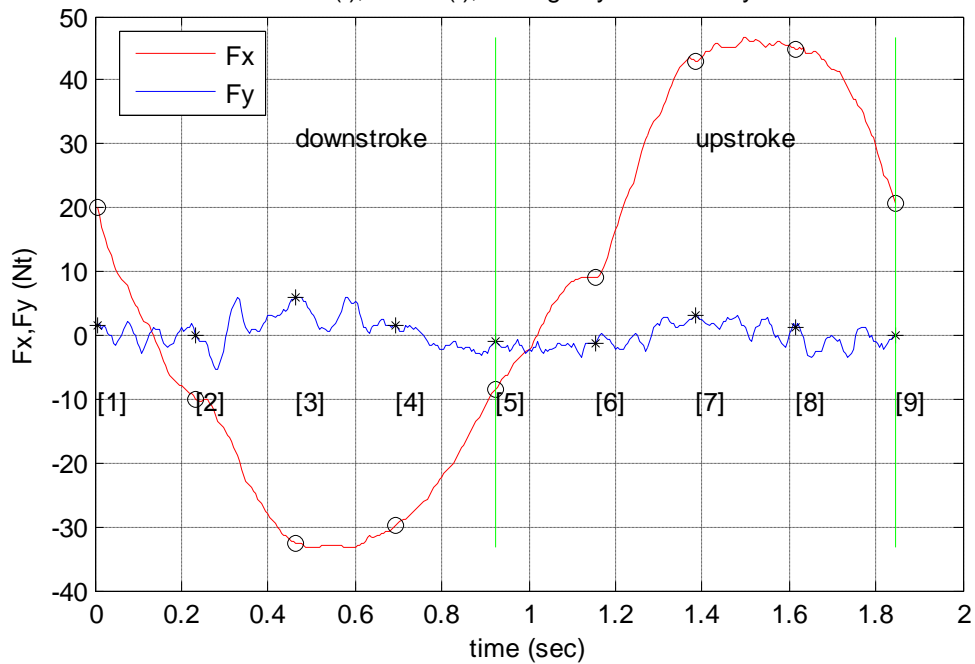


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	18,039	1,702	0,000
2	0,200	-11,851	1,491	-0,521
3	0,395	-43,485	9,436	-0,699
4	0,590	-38,751	3,266	-0,473
5	0,785	-12,979	-0,900	-0,026
6	0,980	8,530	-2,641	0,431
7	1,175	48,954	4,606	0,692
8	1,370	51,635	0,707	0,561
9	1,575	19,311	1,410	0,026

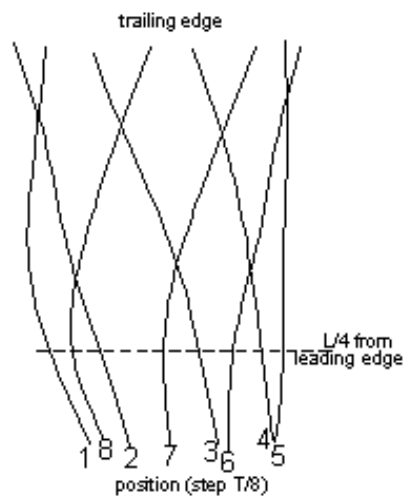


FIN C

$V=1$ m/s $T=1.845$ s $A_{le}=0.27$ m $A_{te}=0.42$ m
 $F_x \text{ max}=46.657$ N $F_y \text{ max}=6.0276$ N $\%EC=2.4194$
 $\%EC_{\text{upstroke}}=-2.3581$ $\%EC_{\text{downstroke}}=9.5872$ $St=0.22764$
 $F_{\text{vertical}}(t), F_{\text{thrust}}(t)$, average cycle for X-Ysystem

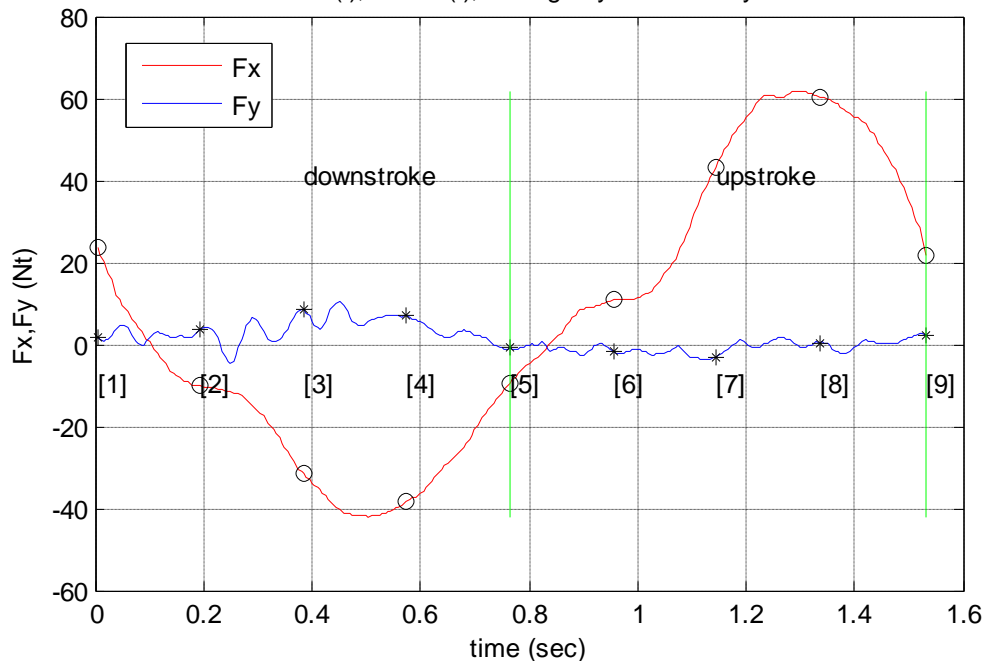


position	time (sec)	F _x (Nt)	Thrust F _y (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	19,995	1,512	0,000
2	0,235	-10,093	-0,100	-0,448
3	0,465	-32,508	6,000	-0,597
4	0,695	-29,721	1,682	-0,396
5	0,925	-8,352	-1,040	-0,009
6	1,155	9,026	-1,192	0,382
7	1,385	43,054	3,208	0,594
8	1,615	44,872	1,367	0,463
9	1,845	20,736	0,031	0,017



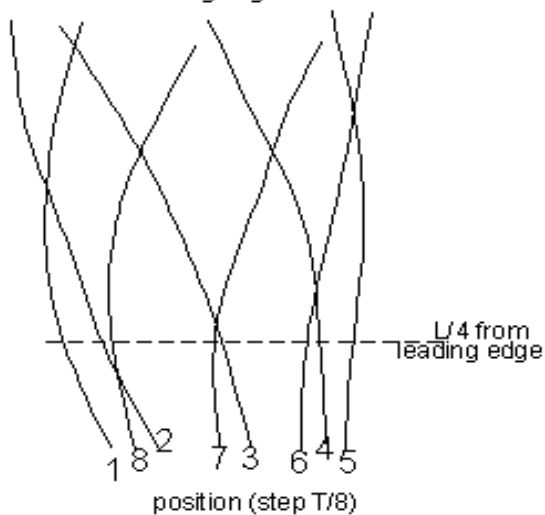
FIN C

V=1.1 m/s T=1.5302 s Ale=0.26 m Ate=0.39 m
 Fx max=61.8853 N Fy max=10.5119 N %EC=11.6071
 %ECupstroke=-4.8656 %ECdownstroke=37.552 St=0.2317
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



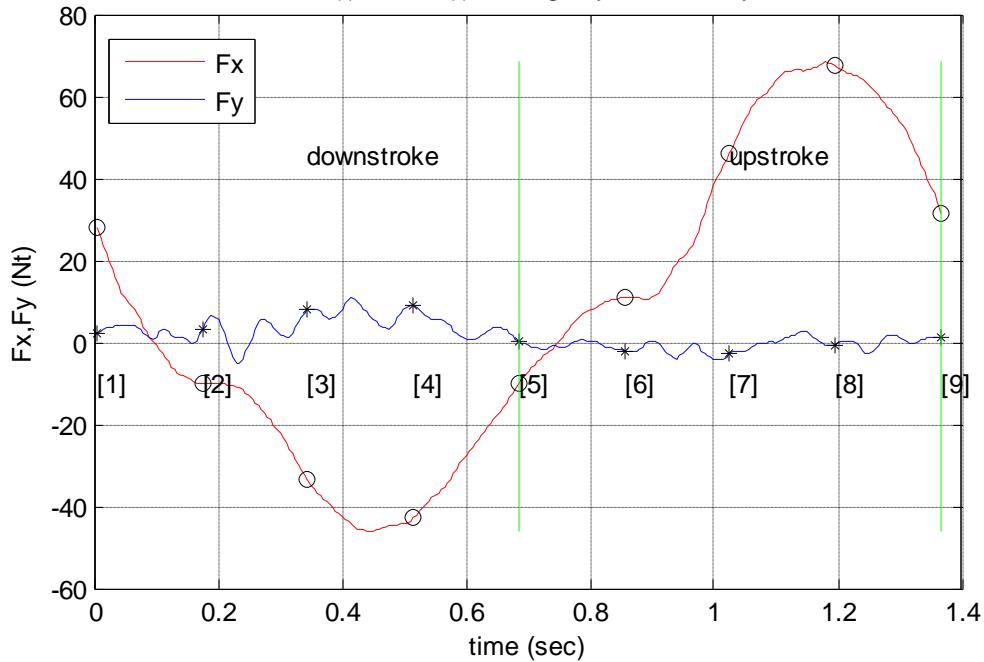
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	23,620	1,871	0,000
2	0,195	-10,233	3,569	-0,489
3	0,385	-31,697	8,387	-0,658
4	0,575	-38,359	6,846	-0,445
5	0,765	-9,514	-0,918	-0,019
6	0,955	10,901	-1,656	0,416
7	1,145	43,293	-2,985	0,654
8	1,335	60,426	0,467	0,517
9	1,530	21,659	2,020	0,023

trailing edge

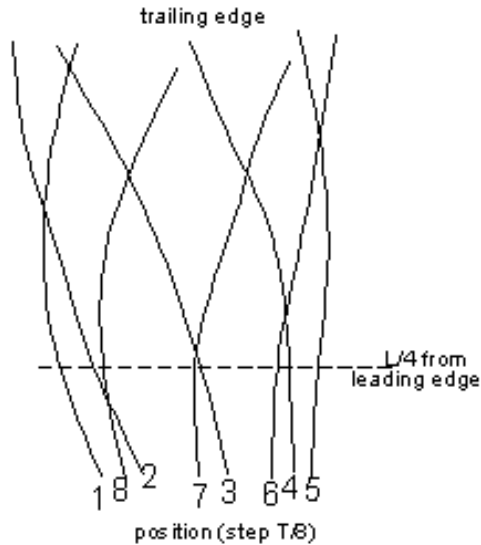


FIN C

V=1.1 m/s T=1.3698 s Ale=0.26 m Ate=0.39 m
 Fx max=68.3293 N Fy max=10.8274 N %EC=11.1868
 %ECupstroke=-3.7518 %ECdownstroke=35.3869 St=0.25883
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

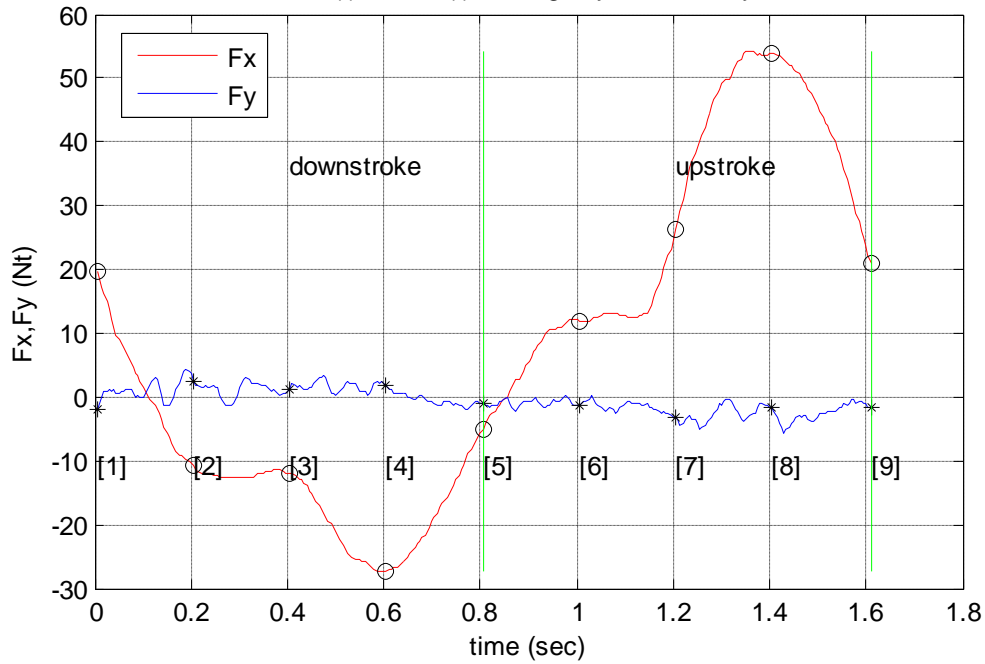


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	27,997	2,116	0,000
2	0,175	-9,977	3,202	-0,545
3	0,345	-33,561	7,941	-0,735
4	0,515	-42,786	9,127	-0,498
5	0,685	-10,184	0,368	-0,023
6	0,855	10,865	-1,981	0,463
7	1,025	45,884	-2,919	0,730
8	1,195	67,708	-0,568	0,580
9	1,365	31,313	1,360	0,045

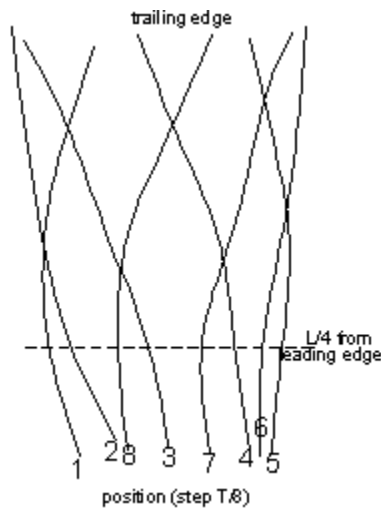


FIN C

V=1.2 m/s T=1.61 s Ale=0.29 m Ate=0.44 m
 Fx max=54.296 N Fy max=4.3493 N %EC=-6.4413
 %ECupstroke=-16.9058 %ECdownstroke=15.5368 St=0.22774
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

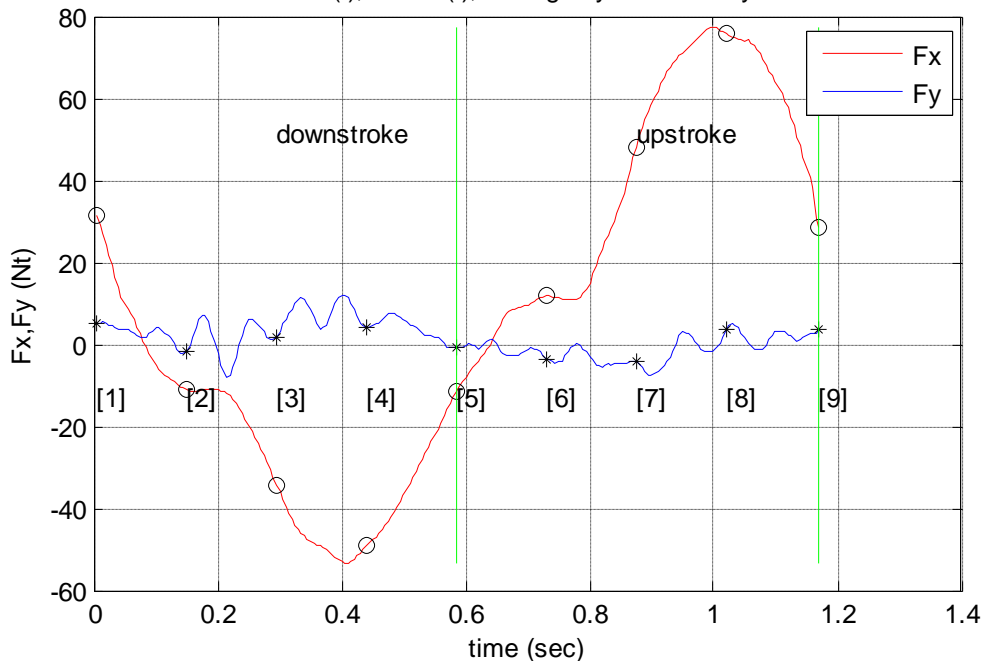


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	19,657	-2,028	0,000
2	0,205	-10,859	2,567	-0,512
3	0,405	-12,045	1,161	-0,684
4	0,605	-27,228	1,982	-0,458
5	0,805	-4,928	-1,139	-0,018
6	1,005	11,971	-1,227	0,430
7	1,205	26,171	-3,077	0,680
8	1,405	53,833	-1,679	0,540
9	1,610	20,996	-1,496	0,022



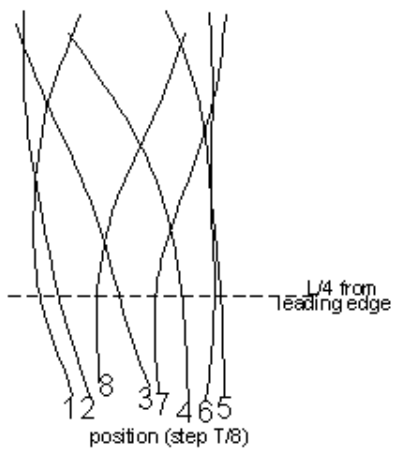
FIN C

V=1.2 m/s T=1.1692 s Ale=0.21 m Ate=0.3 m
 Fx max=77.4258 N Fy max=12.0972 N %EC=10.0188
 %ECupstroke=-6.9134 %ECdownstroke=36.8955 St=0.21383
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



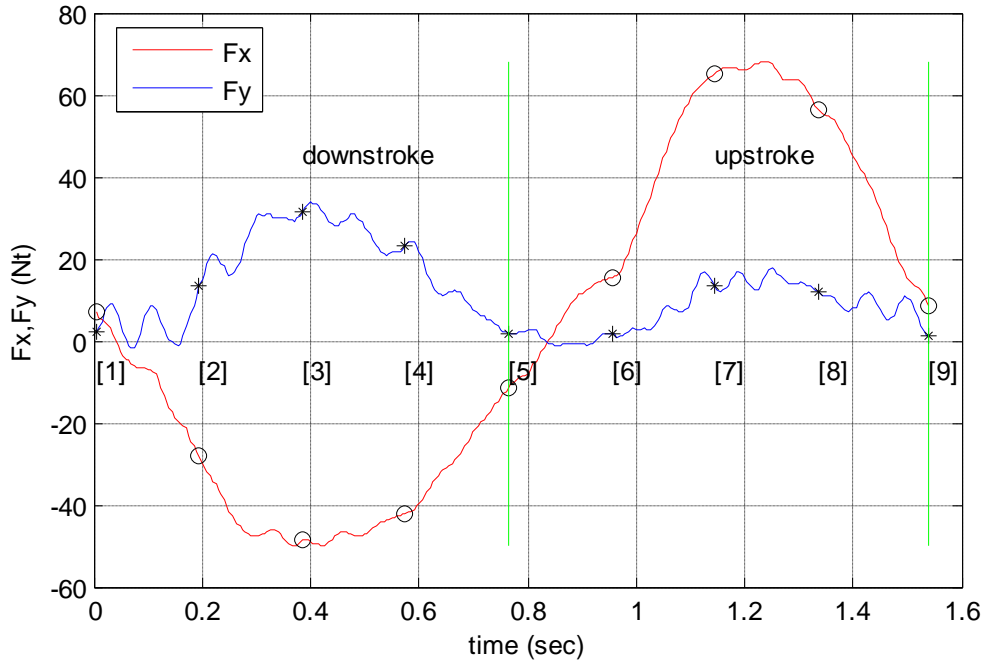
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	31,563	4,916	0,000
2	0,150	-11,198	-1,805	-0,512
3	0,295	-34,210	1,805	-0,700
4	0,440	-49,168	4,247	-0,482
5	0,585	-11,587	-0,660	-0,025
6	0,730	11,862	-3,511	0,444
7	0,875	48,092	-4,345	0,695
8	1,020	75,807	3,435	0,548
9	1,170	28,615	3,419	0,027

trailing edge

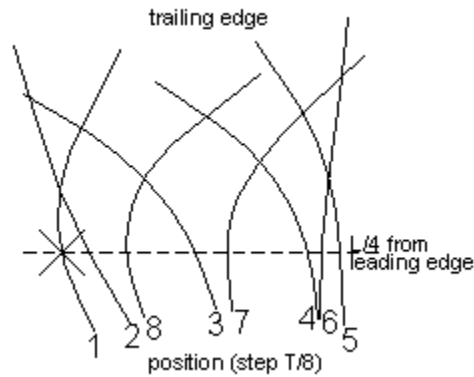


FIN D

V=0 m/s T=1.539 s Ale=0.32 m Ate=0.45 m
 Fx max=68.1221 N Fy max=33.8406 N %EC=0
 %ECupstroke=0 %ECdownstroke=0 St=Inf
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

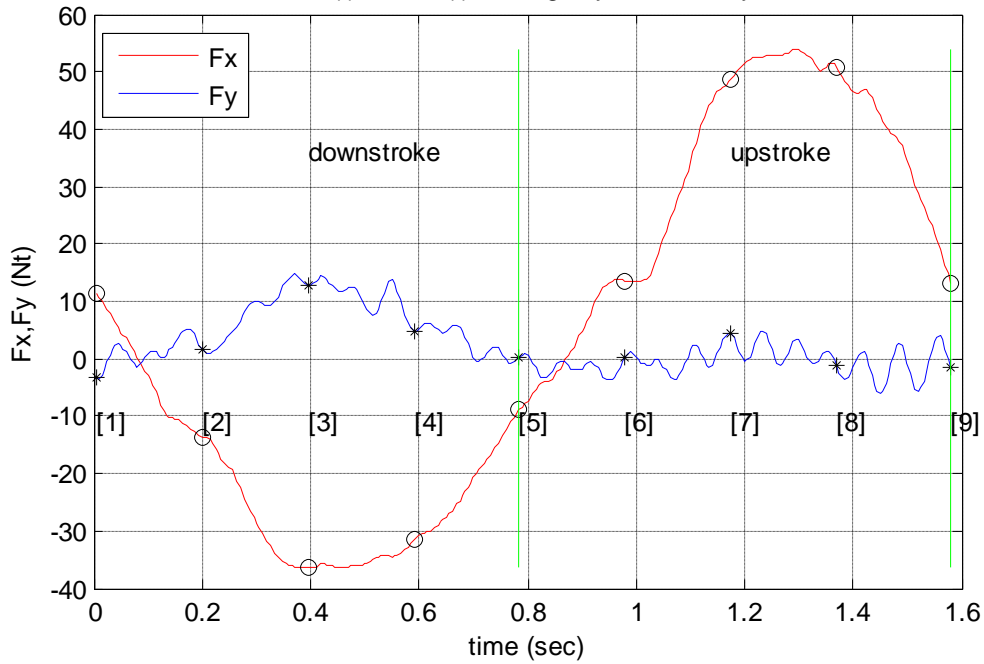


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	7,251	1,976	0,000
2	0,195	-28,246	13,209	-0,545
3	0,385	-48,548	31,637	-0,729
4	0,575	-42,025	23,050	-0,492
5	0,765	-11,441	1,773	-0,032
6	0,955	15,528	1,756	0,442
7	1,145	65,240	13,412	0,719
8	1,335	56,444	11,965	0,593
9	1,540	8,399	1,268	0,021

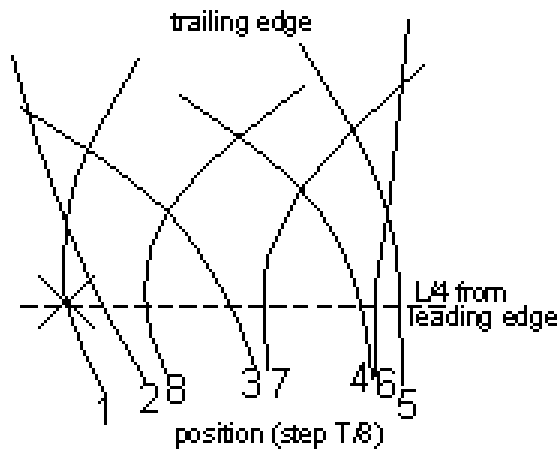


FIN D

V=0.8 m/s T=1.5827 s Ale=0.32 m Ate=0.44 m
 Fx max=53.9809 N Fy max=14.8423 N %EC=14.7769
 %ECupstroke=-1.9665 %ECdownstroke=38.8904 St=0.34751
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

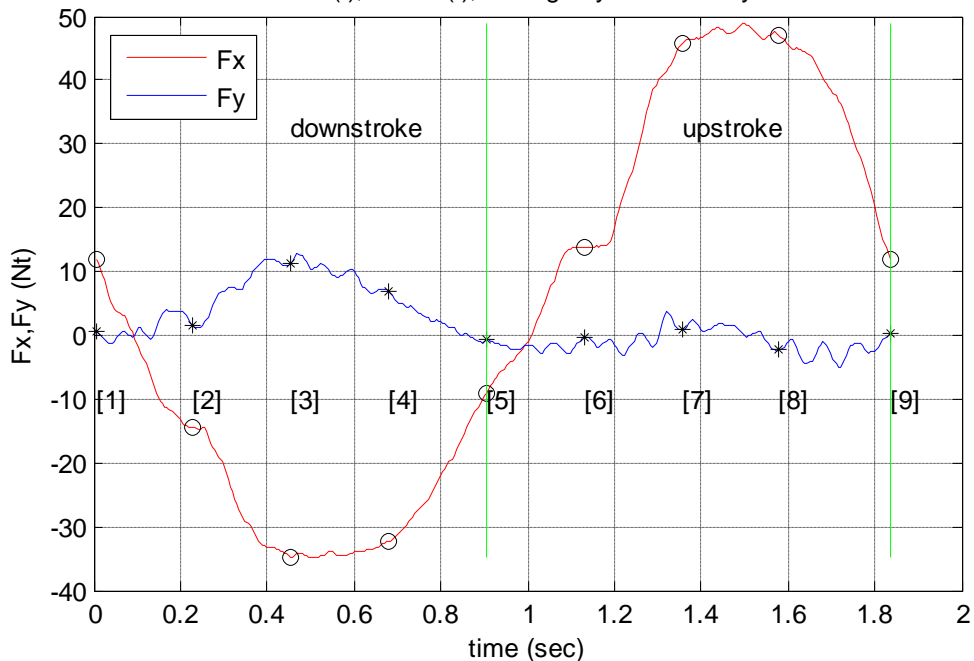


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	11,381	-3,118	0,000
2	0,200	-13,640	1,614	-0,536
3	0,395	-36,362	12,919	-0,717
4	0,590	-31,529	4,681	-0,486
5	0,785	-8,939	0,366	-0,035
6	0,980	13,653	0,077	0,430
7	1,175	48,761	4,479	0,706
8	1,370	50,813	-1,210	0,589
9	1,580	13,290	-1,604	0,032

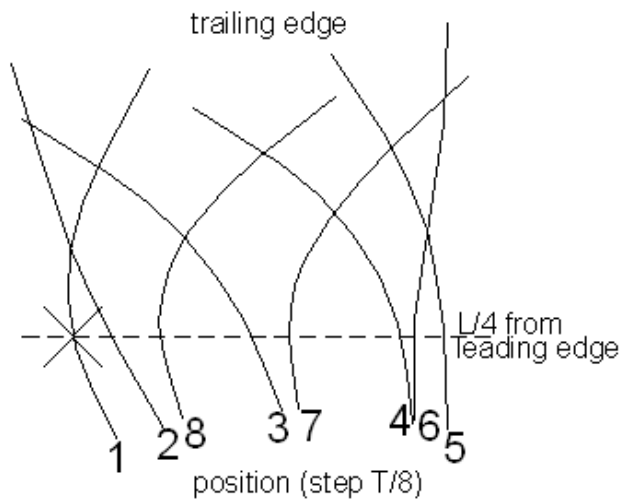


FIN D

V=0.8 m/s T=1.8368 s Ale=0.32 m Ate=0.44 m
 Fx max=48.8943 N Fy max=12.6911 N %EC=13.4588
 %ECupstroke=-5.8828 %ECdownstroke=40.071 St=0.29944
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

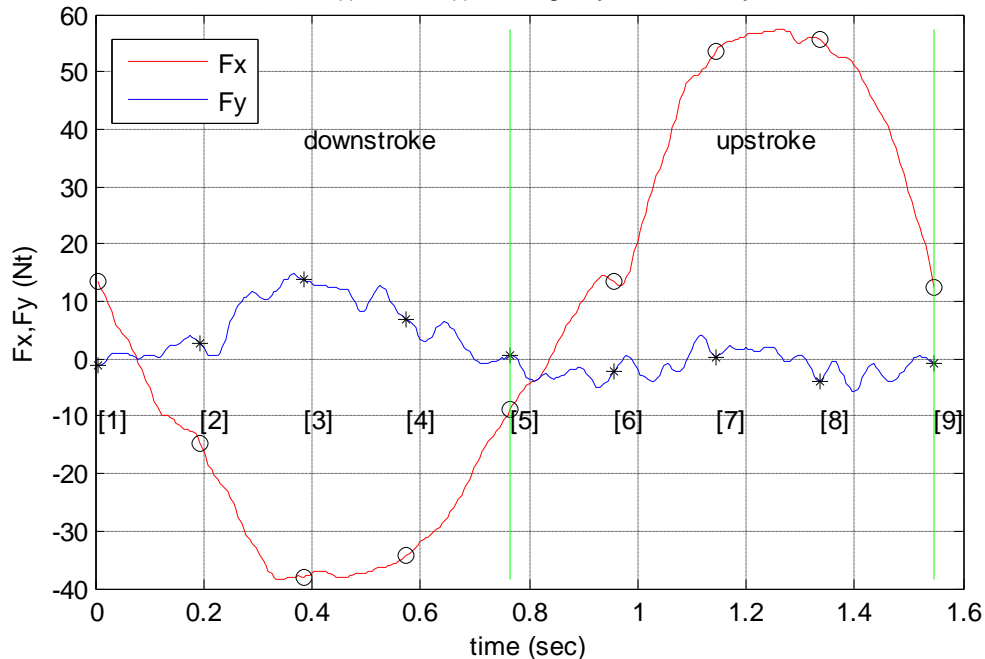


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	11,911	0,588	0,000
2	0,230	-14,577	1,451	-0,460
3	0,455	-34,681	11,371	-0,618
4	0,680	-32,279	6,830	-0,424
5	0,905	-9,015	-0,781	-0,039
6	1,130	13,820	-0,223	0,361
7	1,355	45,638	0,838	0,605
8	1,580	47,141	-2,333	0,519
9	1,835	11,856	0,144	0,022

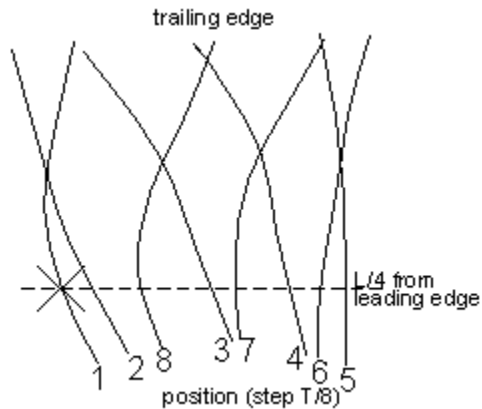


FIN D

V=0.9 m/s T=1.5455 s Ale=0.31 m Ate=0.45 m
 Fx max=57.4354 N Fy max=14.7941 N %EC=12.4779
 %ECupstroke=-5.7828 %ECdownstroke=39.7132 St=0.32352
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

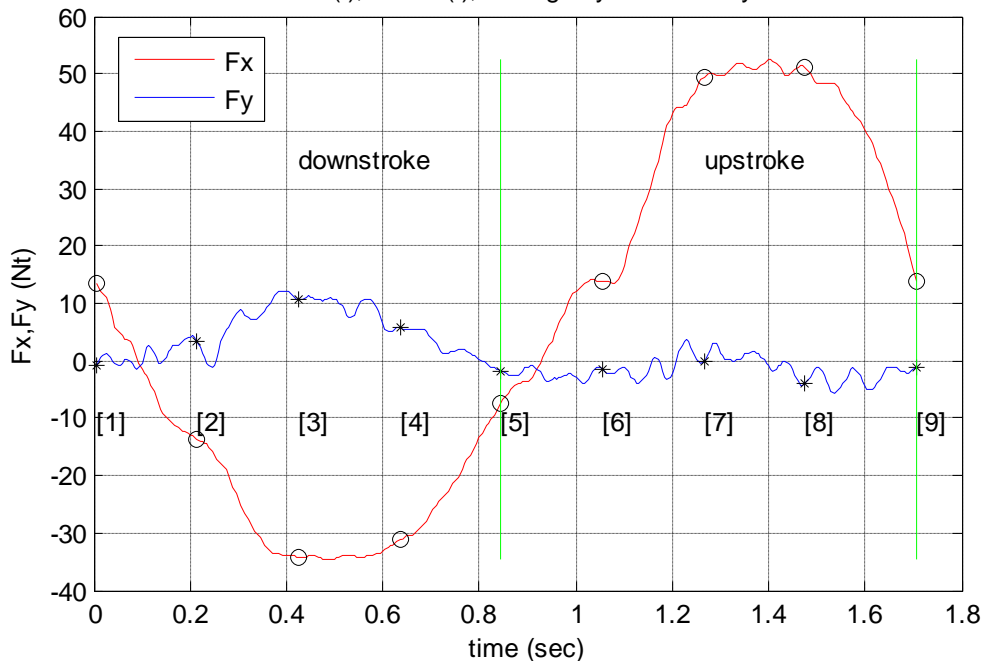


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	13,392	-1,232	0,000
2	0,195	-14,705	2,547	-0,548
3	0,385	-37,928	13,955	-0,734
4	0,575	-34,262	6,820	-0,500
5	0,765	-8,960	0,746	-0,040
6	0,955	13,577	-2,228	0,435
7	1,145	53,606	0,331	0,722
8	1,335	55,754	-3,902	0,608
9	1,545	12,394	-0,862	0,026



FIN D

V=0.9 m/s T=1.706 s Ale=0.3 m Ate=0.44 m
 Fx max=52.4509 N Fy max=12.2628 N %EC=11.017
 %ECupstroke=-8.9533 %ECdownstroke=41.5353 St=0.28657
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

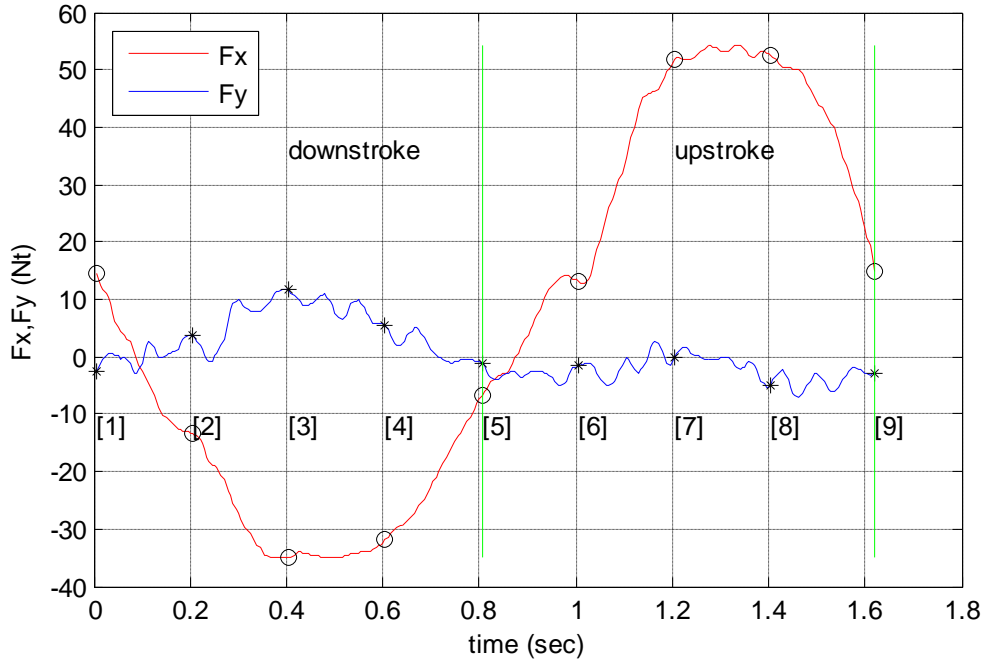


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	13,610	-0,909	0,000
2	0,215	-13,592	3,362	-0,482
3	0,425	-34,218	10,676	-0,647
4	0,635	-31,220	5,670	-0,440
5	0,845	-7,374	-1,686	-0,033
6	1,055	13,709	-1,538	0,387
7	1,265	49,539	-0,182	0,637
8	1,475	51,156	-3,841	0,532
9	1,705	13,983	-1,134	0,022

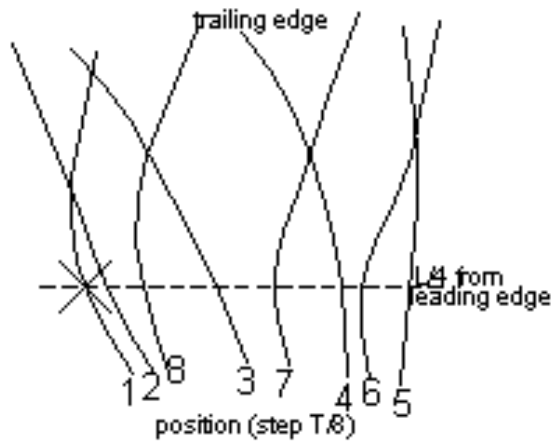


FIN D

V=1 m/s T=1.6205 s Ale=0.3 m Ate=0.48 m
 Fx max=54.2035 N Fy max=11.7414 N %EC=5.7257
 %ECupstroke=-13.2587 %ECdownstroke=35.623 St=0.2962
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

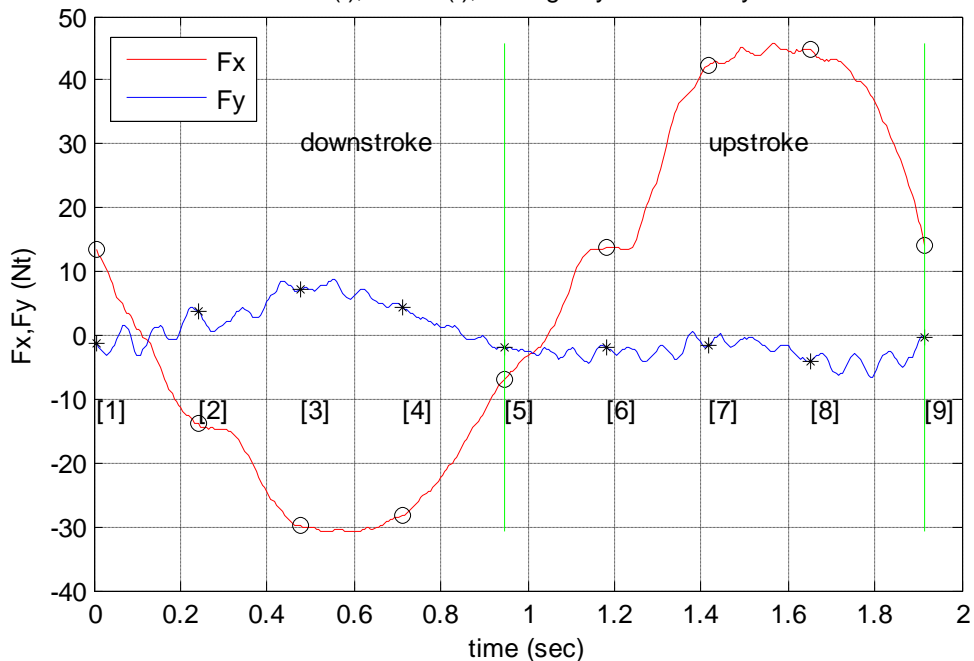


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	14,526	-2,596	0,000
2	0,205	-13,392	3,687	-0,535
3	0,405	-34,938	11,680	-0,714
4	0,605	-31,861	5,417	-0,481
5	0,805	-6,737	-1,069	-0,031
6	1,005	13,164	-1,544	0,431
7	1,205	51,676	0,001	0,704
8	1,405	52,641	-4,909	0,583
9	1,620	14,973	-2,867	0,025

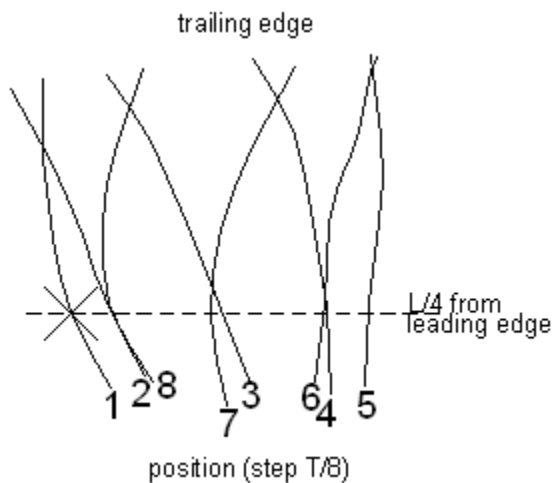


FIN D

V=1 m/s T=1.918 s Ale=0.28 m Ate=0.41 m
 Fx max=45.6237 N Fy max=8.6261 N %EC=0.60921
 %ECupstroke=-22.951 %ECdownstroke=37.2294 St=0.21376
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

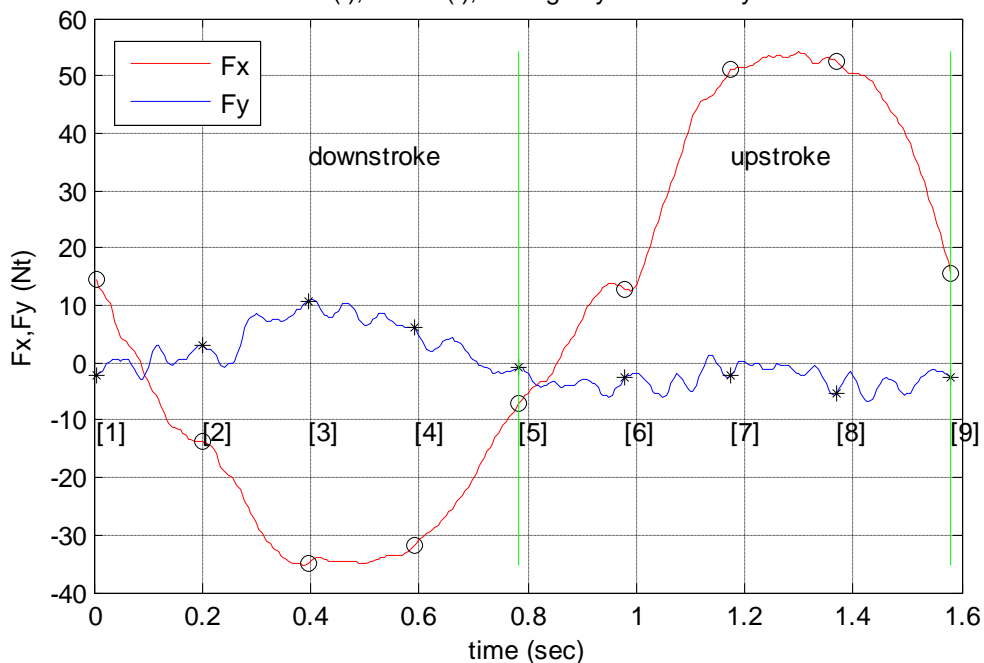


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	13,560	-1,234	0,000
2	0,240	-13,938	3,865	-0,402
3	0,475	-29,945	7,151	-0,542
4	0,710	-28,301	4,500	-0,374
5	0,945	-6,969	-1,938	-0,034
6	1,180	13,707	-1,803	0,320
7	1,415	42,325	-1,609	0,532
8	1,650	44,793	-4,124	0,452
9	1,915	13,945	-0,236	0,021

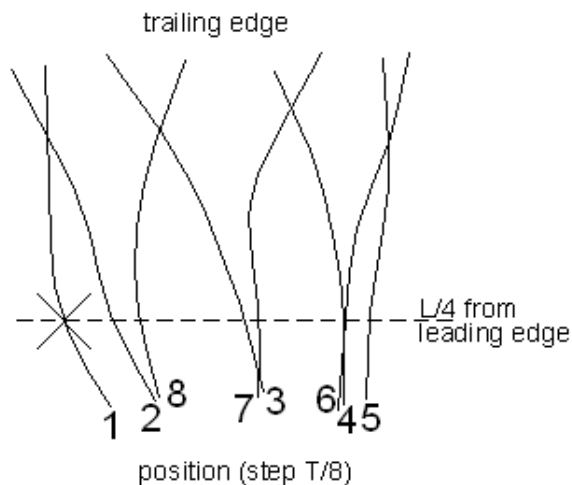


FIN D

V=1.1 m/s T=1.5813 s Ale=0.27 m Ate=0.42 m
 Fx max=54.1229 N Fy max=11.068 N %EC=3.6843
 %ECupstroke=-19.3445 %ECdownstroke=39.6321 St=0.24147
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

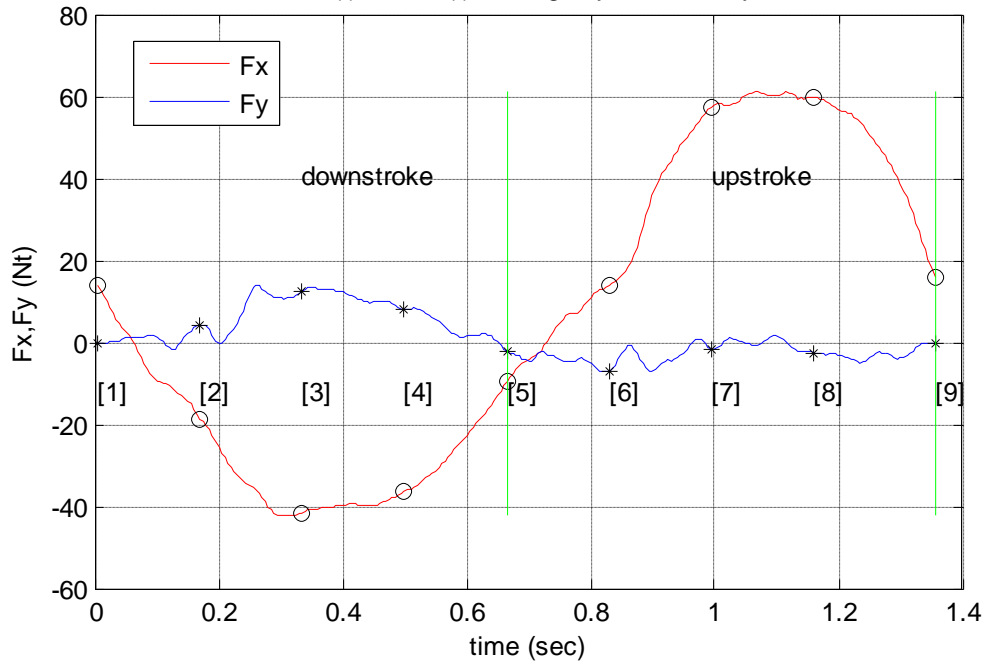


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	14,423	-2,302	0,000
2	0,200	-13,784	3,168	-0,473
3	0,395	-34,978	10,708	-0,637
4	0,590	-31,905	6,048	-0,435
5	0,785	-7,024	-0,858	-0,030
6	0,980	12,945	-2,664	0,388
7	1,175	50,990	-2,353	0,629
8	1,370	52,463	-5,170	0,518
9	1,580	15,499	-2,392	0,024



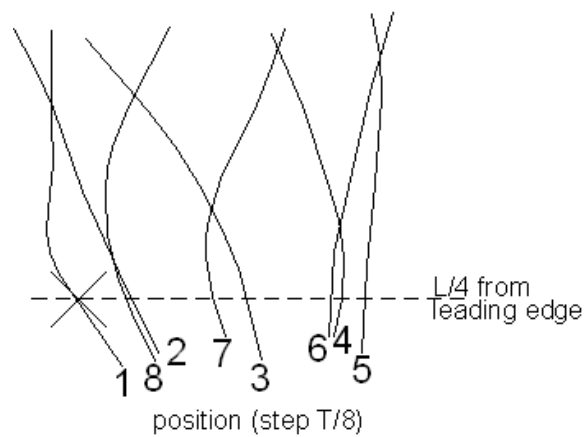
FIN D

V=1.1 m/s T=1.3561 s Ale=0.26 m Ate=0.4 m
 Fx max=61.0808 N Fy max=13.7625 N %EC=9.3669
 %ECupstroke=-14.3655 %ECdownstroke=44.238 St=0.26815
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



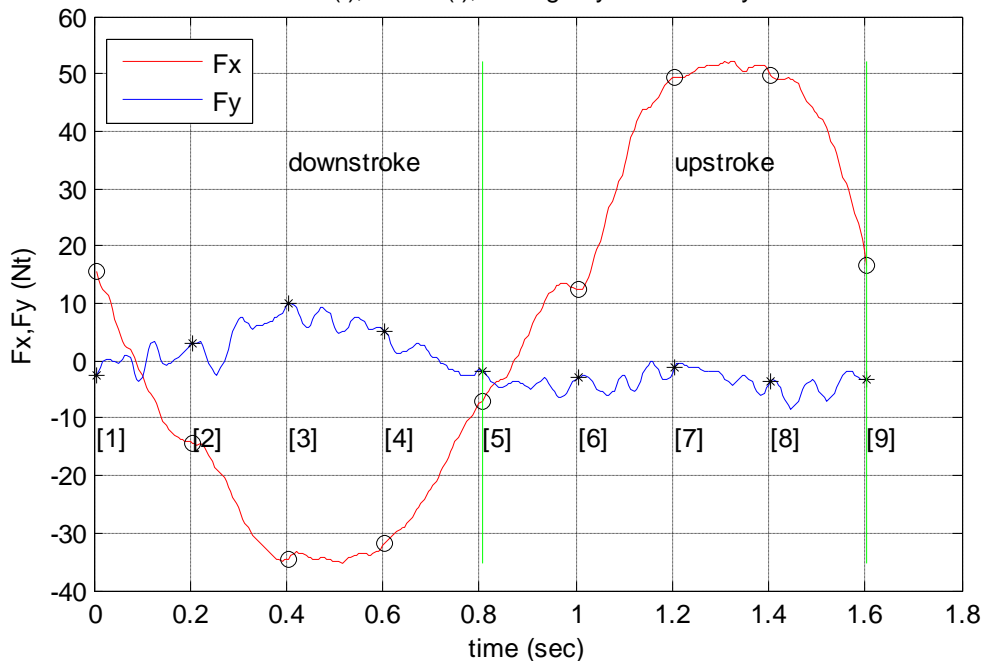
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	13,937	-0,174	0,000
2	0,170	-18,578	4,276	-0,516
3	0,335	-41,752	12,396	-0,707
4	0,500	-36,353	7,920	-0,500
5	0,665	-9,591	-2,262	-0,060
6	0,830	13,749	-6,984	0,404
7	0,995	57,351	-1,533	0,688
8	1,160	59,759	-2,506	0,603
9	1,355	15,674	-0,116	0,031

trailing edge



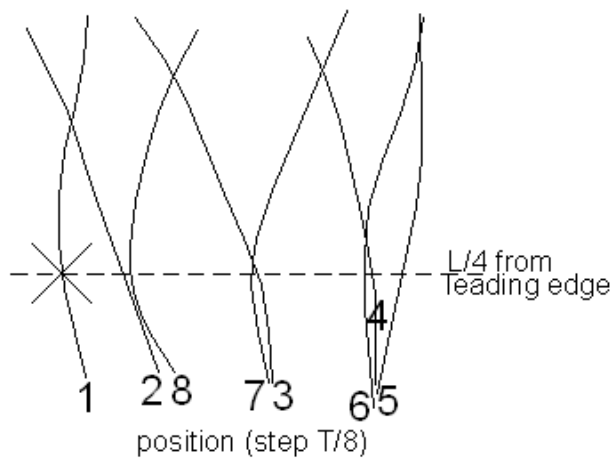
FIN D

V=1.2 m/s T=1.6064 s Ale=0.28 m Ate=0.38 m
 Fx max=52.2805 N Fy max=9.9783 N %EC=-3.5145
 %ECupstroke=-27.9676 %ECdownstroke=33.8019 St=0.19713
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



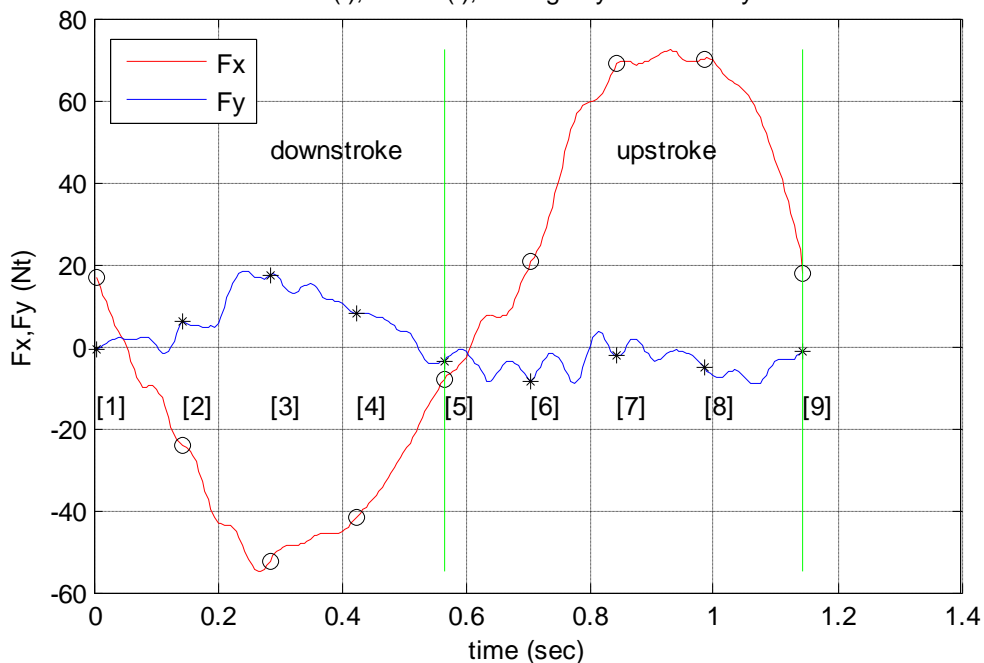
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	15,531	-2,590	0,000
2	0,205	-14,268	3,030	-0,485
3	0,405	-34,434	9,964	-0,646
4	0,605	-31,785	5,265	-0,431
5	0,805	-6,907	-1,809	-0,013
6	1,005	12,364	-3,038	0,410
7	1,205	49,287	-1,231	0,643
8	1,405	49,735	-3,516	0,505
9	1,605	16,772	-3,152	0,025

trailing edge



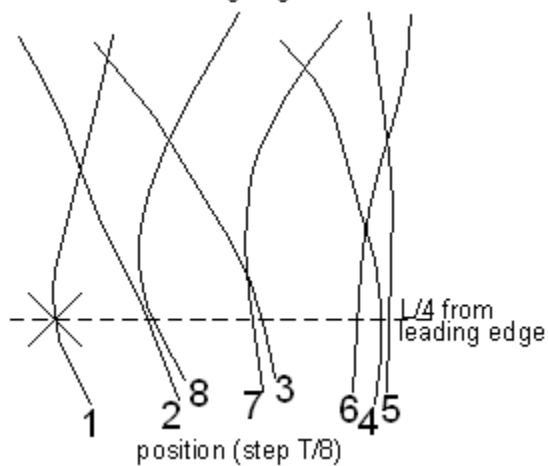
FIN D

V=1.2 m/s T=1.1455 s Ale=0.32 m Ate=0.43 m
 Fx max=72.2831 N Fy max=18.2971 N %EC=6.349
 %ECupstroke=-13.0632 %ECdownstroke=35.0853 St=0.31283
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



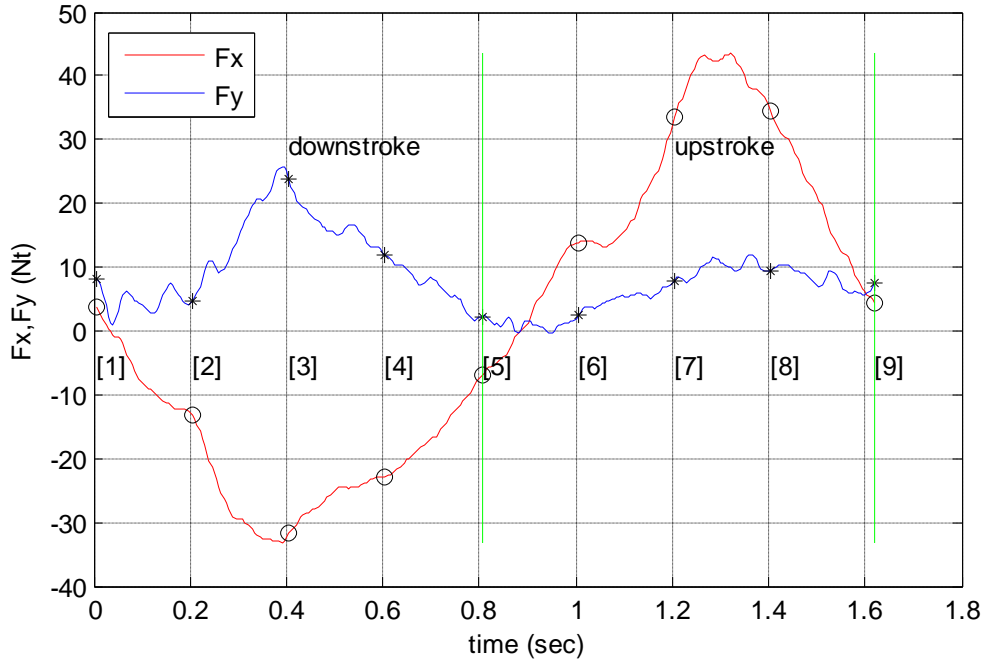
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	16,793	-0,560	0,000
2	0,145	-24,113	6,258	-0,733
3	0,285	-52,322	17,247	-0,992
4	0,425	-41,480	8,075	-0,686
5	0,565	-7,912	-3,473	-0,073
6	0,705	20,501	-8,418	0,568
7	0,845	68,787	-2,410	0,967
8	0,985	69,906	-5,341	0,841
9	1,145	17,832	-1,083	0,048

trailing edge

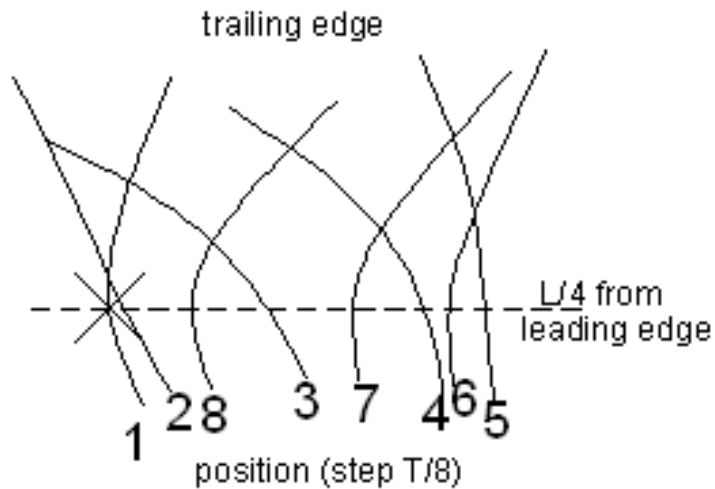


FIN E

V=0 m/s T=1.6218 s Ale=0.29 m Ate=0.44 m
 Fx max=43.5269 N Fy max=25.5956 N %EC=0
 %ECupstroke=0 %ECdownstroke=0 St=Inf
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

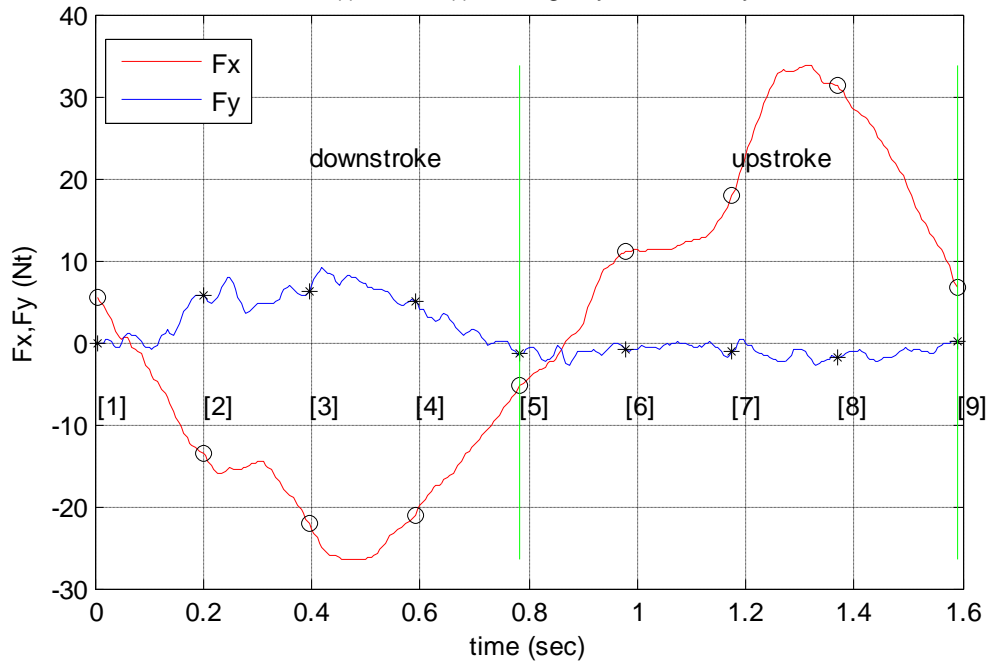


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	3,771	8,098	0,000
2	0,205	-13,200	4,580	-0,447
3	0,405	-31,739	23,871	-0,602
4	0,605	-22,819	12,028	-0,411
5	0,805	-6,940	2,273	-0,028
6	1,005	13,875	2,365	0,367
7	1,205	33,569	7,919	0,594
8	1,405	34,499	9,475	0,489
9	1,620	4,438	7,455	0,024

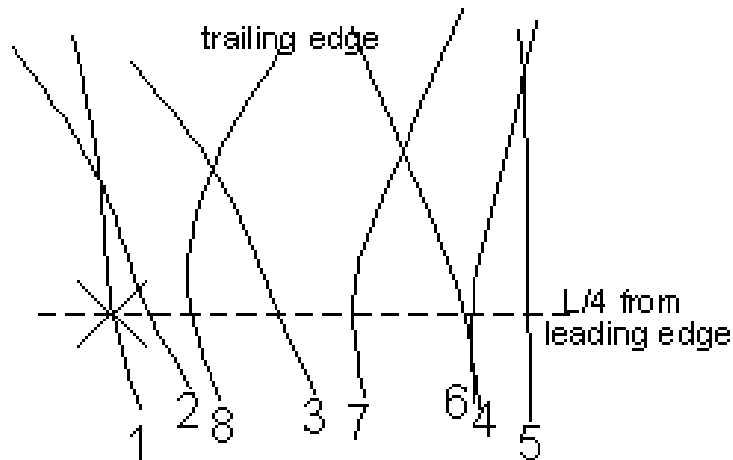


FIN E

V=0.8 m/s T=1.5932 s Ale=0.33 m Ate=0.44 m
 Fx max=33.7561 N Fy max=9.0259 N %EC=12.4556
 %ECupstroke=-9.7398 %ECdownstroke=38.2663 St=0.34521
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

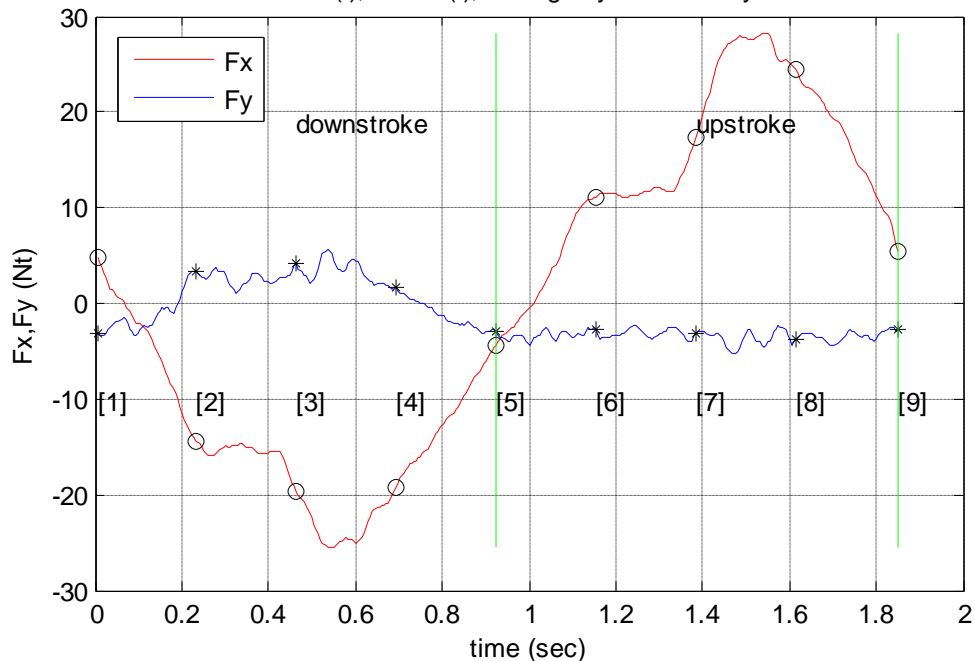


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	5,420	-0,241	0,000
2	0,200	-13,466	5,700	-0,515
3	0,395	-22,187	6,284	-0,693
4	0,590	-20,980	5,031	-0,476
5	0,785	-5,249	-1,452	-0,046
6	0,980	11,097	-0,965	0,402
7	1,175	17,925	-1,144	0,677
8	1,370	31,271	-1,833	0,584
9	1,590	6,633	0,030	0,033

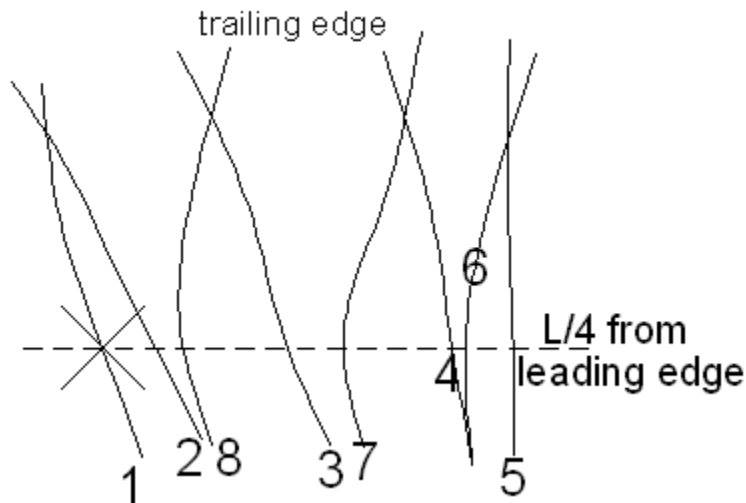


FIN E

V=0.8 m/s T=1.8541 s Ale=0.26 m Ate=0.37 m
 Fx max=28.2607 N Fy max=5.6282 N %EC=-18.9088
 %ECupstroke=-49.0489 %ECdownstroke=12.8609 St=0.24944
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

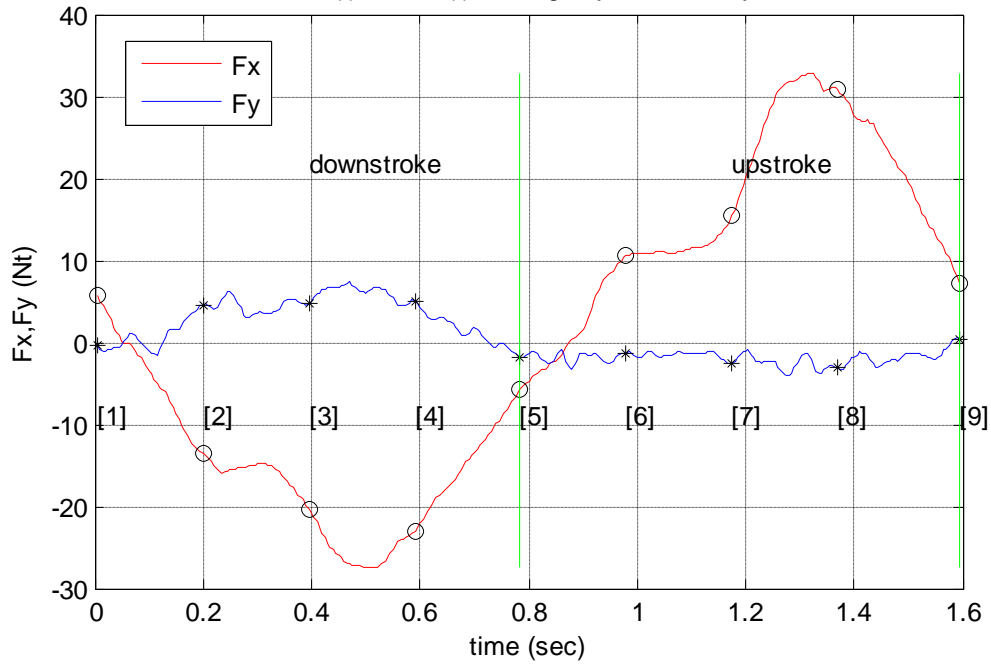


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	4,854	-3,238	0,000
2	0,235	-14,344	3,284	-0,366
3	0,465	-19,638	4,129	-0,492
4	0,695	-19,235	1,590	-0,333
5	0,925	-4,363	-2,955	-0,014
6	1,155	11,155	-2,673	0,310
7	1,385	17,284	-3,080	0,489
8	1,615	24,399	-3,832	0,388
9	1,850	5,535	-2,811	0,021

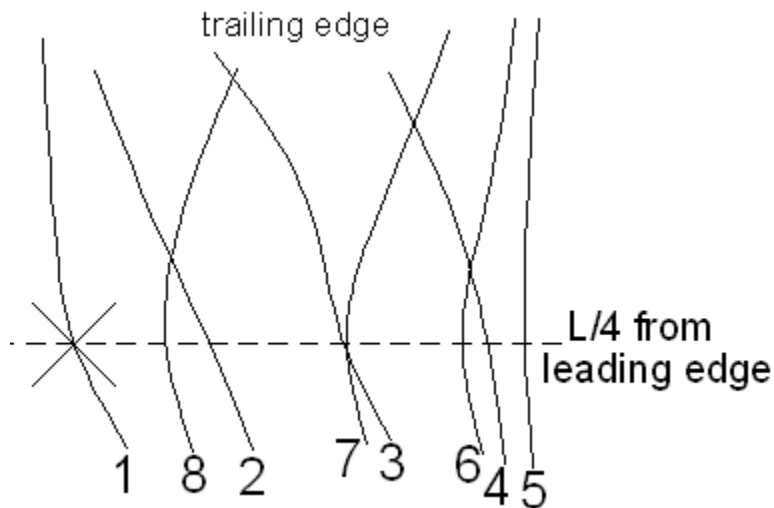


FIN E

V=0.9 m/s T=1.5986 s Ale=0.28 m Ate=0.35 m
 Fx max=32.8435 N Fy max=7.3273 N %EC=7.1181
 %ECupstroke=-22.5728 %ECdownstroke=39.7211 St=0.24327
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

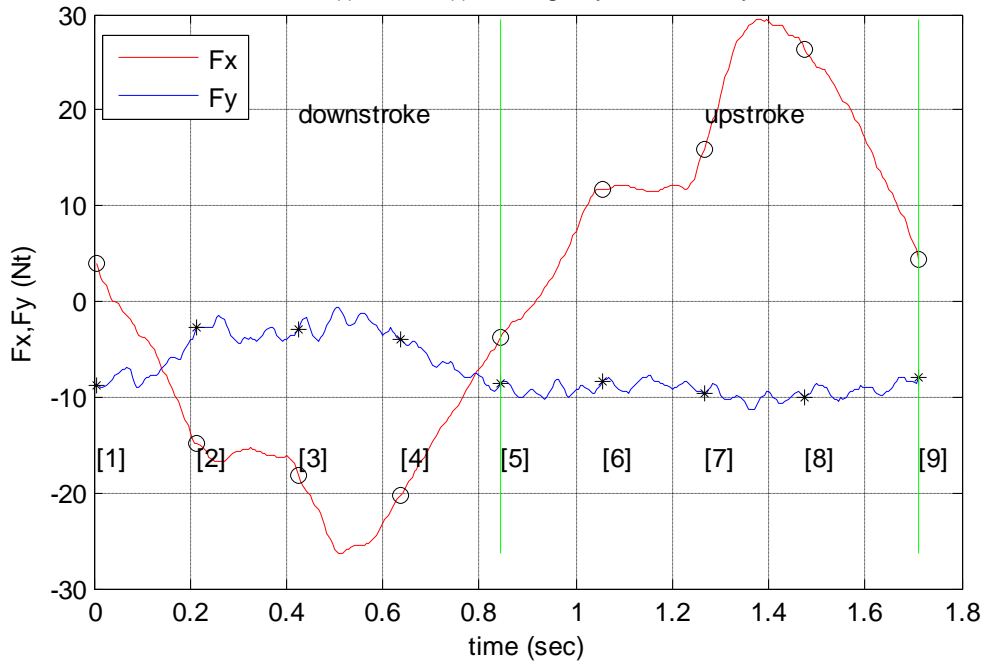


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	5,680	-0,257	0,000
2	0,200	-13,459	4,565	-0,450
3	0,395	-20,324	4,664	-0,612
4	0,590	-22,992	4,879	-0,427
5	0,785	-5,739	-1,771	-0,047
6	0,980	10,625	-1,298	0,353
7	1,175	15,437	-2,660	0,597
8	1,370	30,801	-3,085	0,518
9	1,595	7,119	0,467	0,029

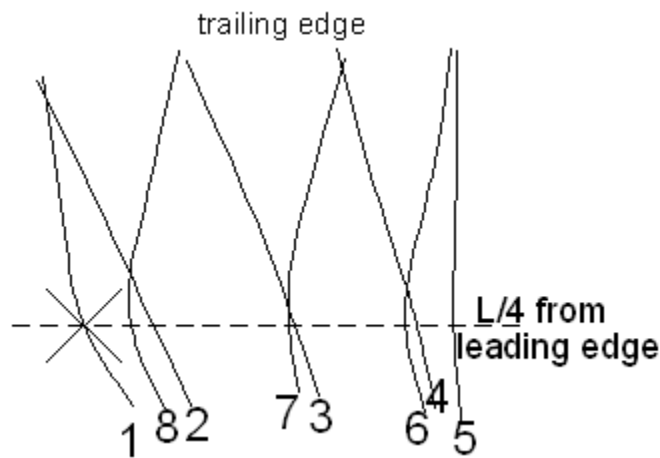


FIN E

V=0.9 m/s T=1.7107 s Ale=0.25 m Ate=0.32 m
 Fx max=29.4255 N Fy max=-0.6332 N %EC=-107.4358
 %ECupstroke=-135.4463 %ECdownstroke=-77.3308 St=0.20784
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

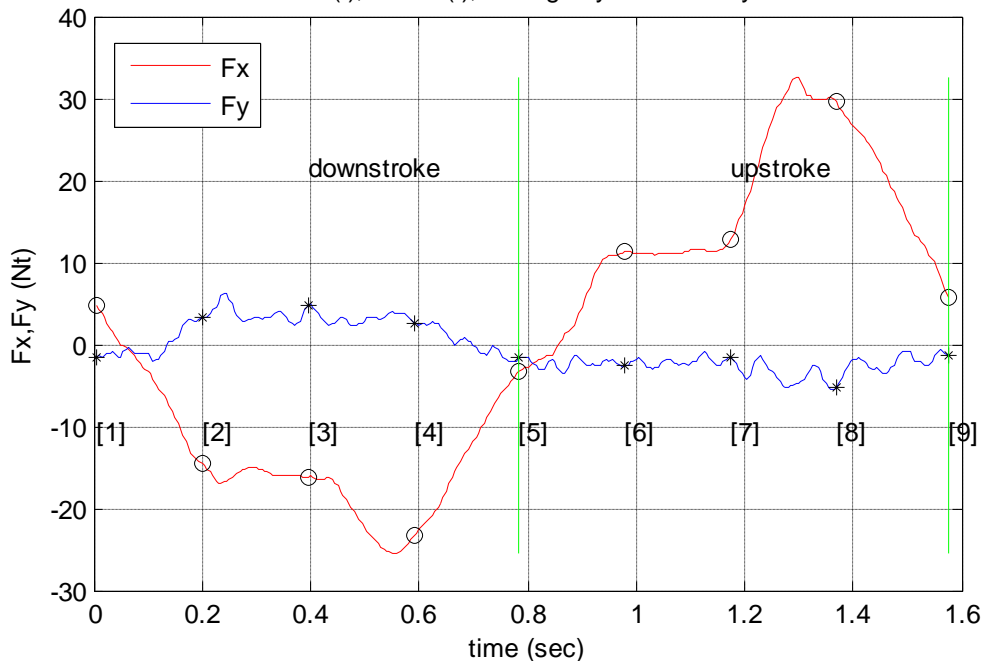


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	3,987	-8,826	0,000
2	0,215	-14,861	-2,795	-0,393
3	0,425	-18,098	-2,860	-0,534
4	0,635	-20,331	-3,966	-0,370
5	0,845	-3,755	-8,551	-0,032
6	1,055	11,642	-8,451	0,320
7	1,265	15,863	-9,556	0,525
8	1,475	26,422	-10,020	0,440
9	1,710	4,486	-7,968	0,018



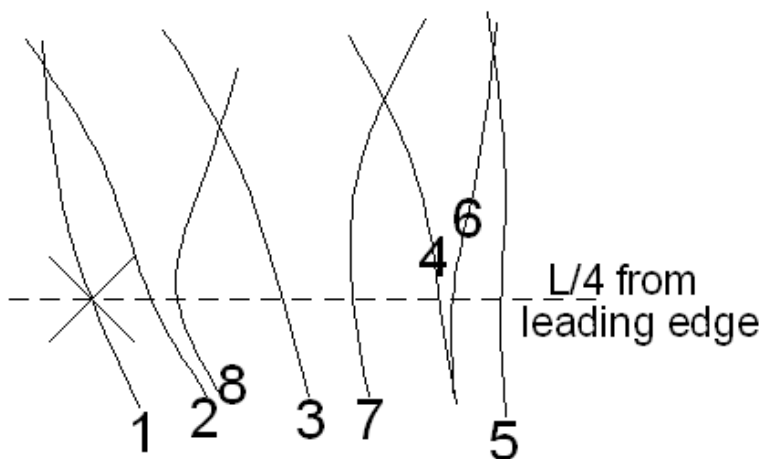
FIN E

V=1 m/s T=1.5778 s Ale=0.25 m Ate=0.31 m
 Fx max=32.528 N Fy max=6.2757 N %EC=-6.9868
 %ECupstroke=-41.03 %ECdownstroke=30.9882 St=0.19647
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



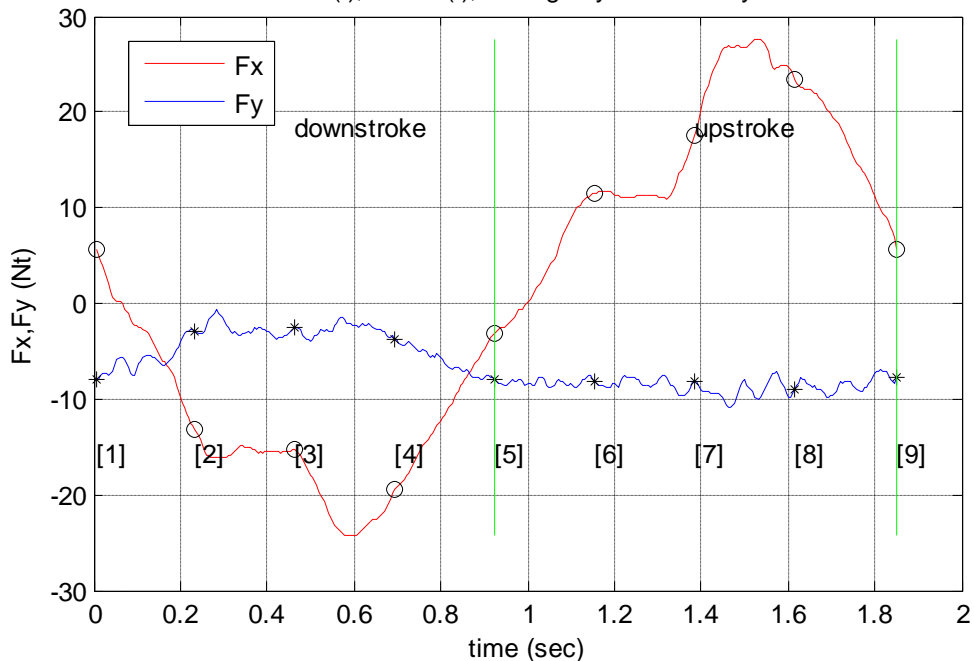
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	4,679	-1,591	0,000
2	0,200	-14,530	3,402	-0,405
3	0,395	-16,115	4,777	-0,549
4	0,590	-23,397	2,615	-0,376
5	0,785	-3,241	-1,686	-0,023
6	0,980	11,223	-2,665	0,341
7	1,175	12,913	-1,609	0,543
8	1,370	29,519	-5,300	0,439
9	1,575	5,781	-1,427	0,025

trailing edge

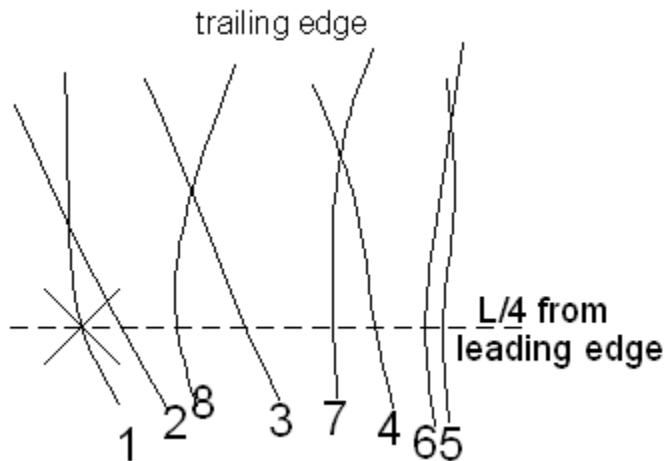


FIN E

V=1 m/s T=1.85 s Ale=0.26 m Ate=0.35 m
 Fx max=27.6081 N Fy max=-0.73058 N %EC=-128.7535
 %ECupstroke=-162.6959 %ECdownstroke=-91.3774 St=0.18919
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

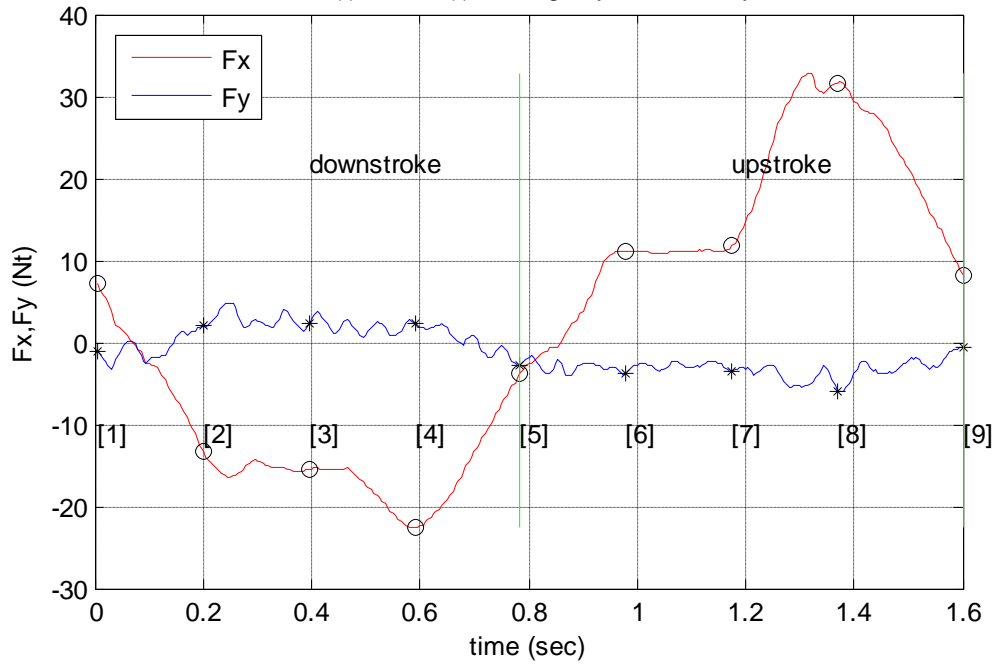


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	5,616	-7,985	0,000
2	0,235	-13,246	-2,933	-0,354
3	0,465	-15,325	-2,517	-0,476
4	0,695	-19,501	-3,719	-0,321
5	0,925	-3,034	-7,983	-0,011
6	1,155	11,496	-8,054	0,304
7	1,385	17,628	-8,060	0,474
8	1,615	23,483	-8,926	0,371
9	1,850	5,730	-7,712	0,013



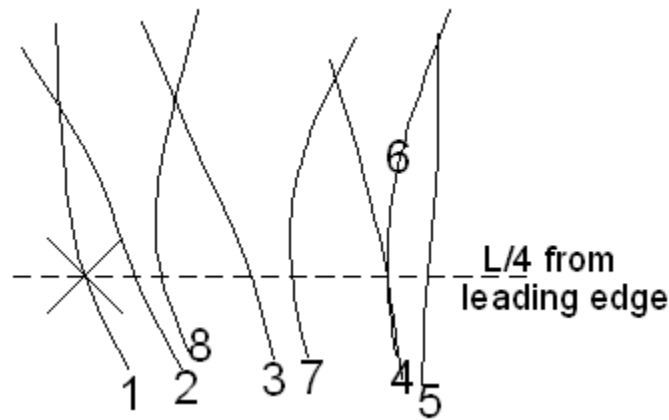
FIN E

V=1.1 m/s T=1.603 s Ale=0.23 m Ate=0.33 m
 Fx max=32.7749 N Fy max=4.8389 N %EC=-22.3506
 %ECupstroke=-57.5952 %ECdownstroke=22.2268 St=0.18714
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



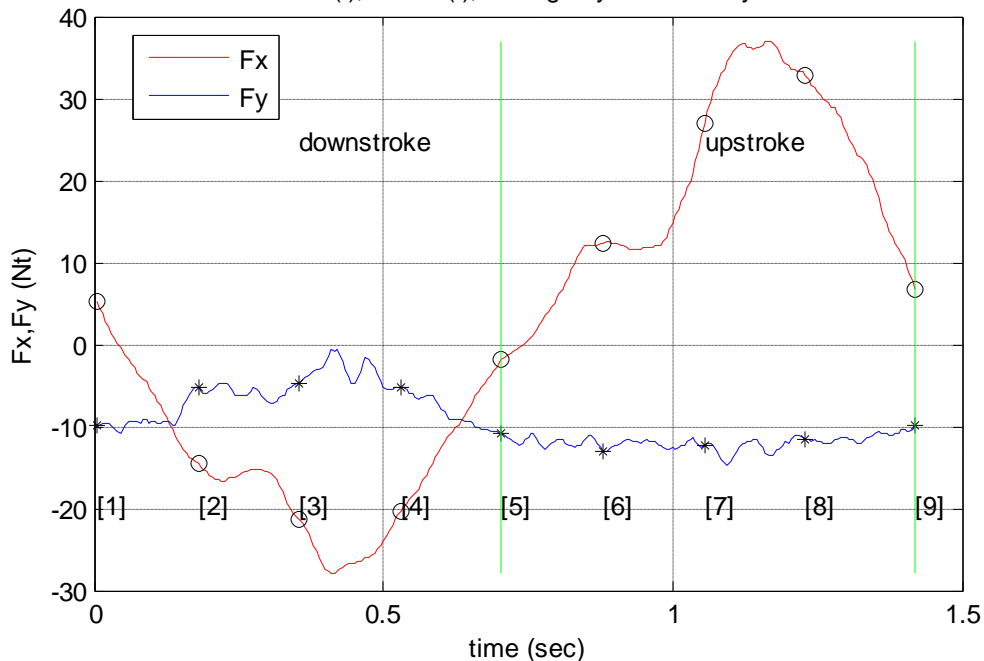
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	7,136	-1,214	0,000
2	0,200	-13,359	1,955	-0,371
3	0,395	-15,501	2,266	-0,511
4	0,590	-22,523	2,273	-0,364
5	0,785	-3,797	-2,889	-0,044
6	0,980	11,200	-3,847	0,295
7	1,175	11,724	-3,646	0,499
8	1,370	31,679	-5,854	0,433
9	1,600	8,257	-0,655	0,023

trailing edge

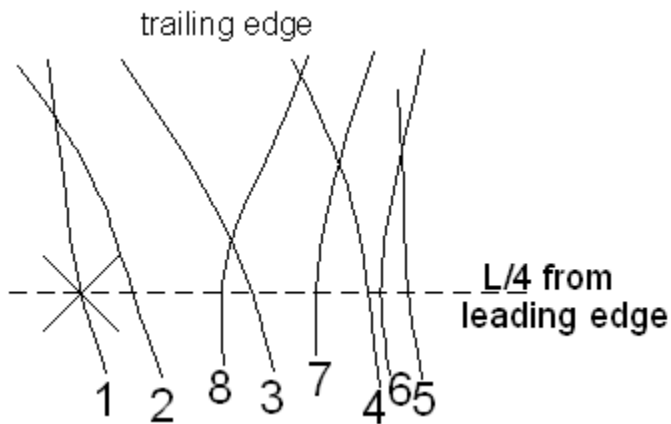


FIN E

V=1.1 m/s T=1.4238 s Ale=0.24 m Ate=0.31 m
 Fx max=37.0222 N Fy max=-0.49242 N %EC=-141.7374
 %ECupstroke=-160.2395 %ECdownstroke=-117.4899 St=0.19794
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

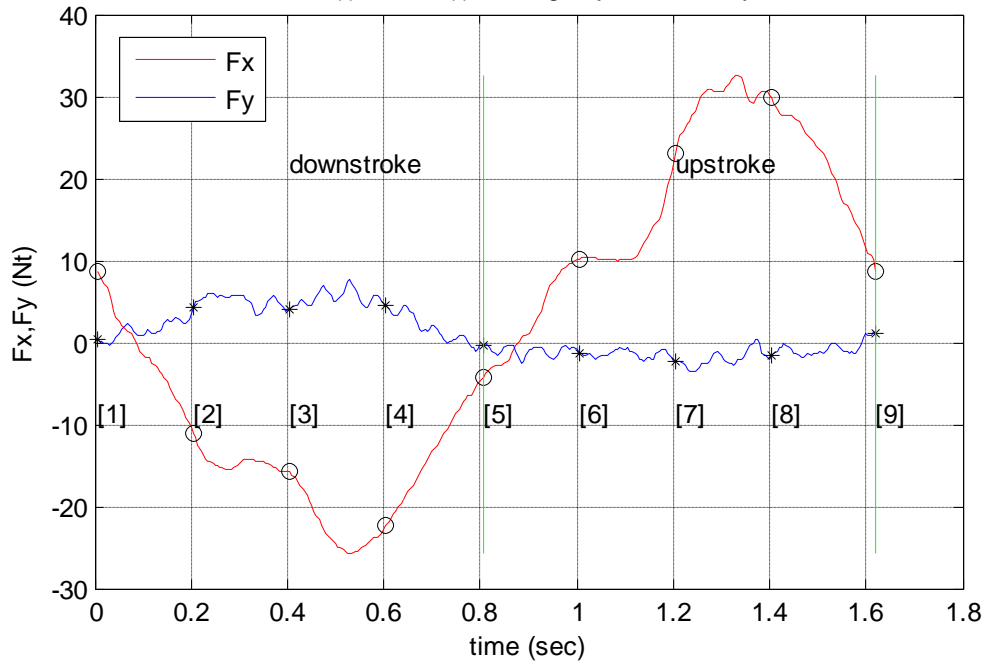


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	5,233	-9,883	0,000
2	0,180	-14,569	-5,332	-0,403
3	0,355	-21,440	-4,641	-0,553
4	0,530	-20,348	-5,190	-0,386
5	0,705	-1,896	-10,751	-0,032
6	0,880	12,382	-12,990	0,336
7	1,055	26,891	-12,424	0,545
8	1,230	32,759	-11,584	0,450
9	1,420	6,686	-9,824	0,030

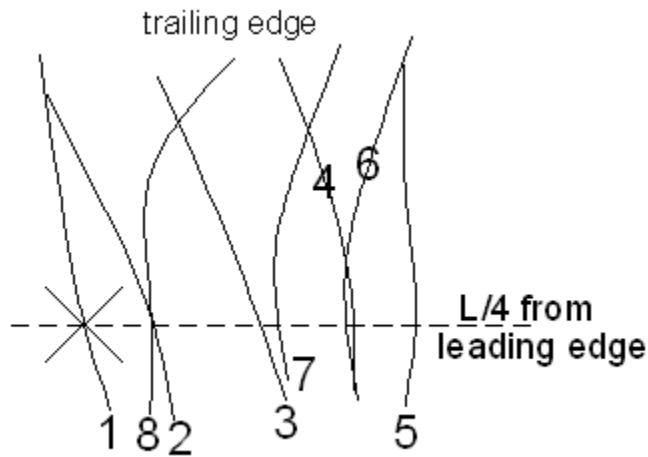


FIN E

V=1.2 m/s T=1.6205 s Ale=0.23 m Ate=0.28 m
 Fx max=32.6255 N Fy max=7.6549 N %EC=22.5158
 %ECupstroke=-25.0583 %ECdownstroke=83.0039 St=0.14399
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

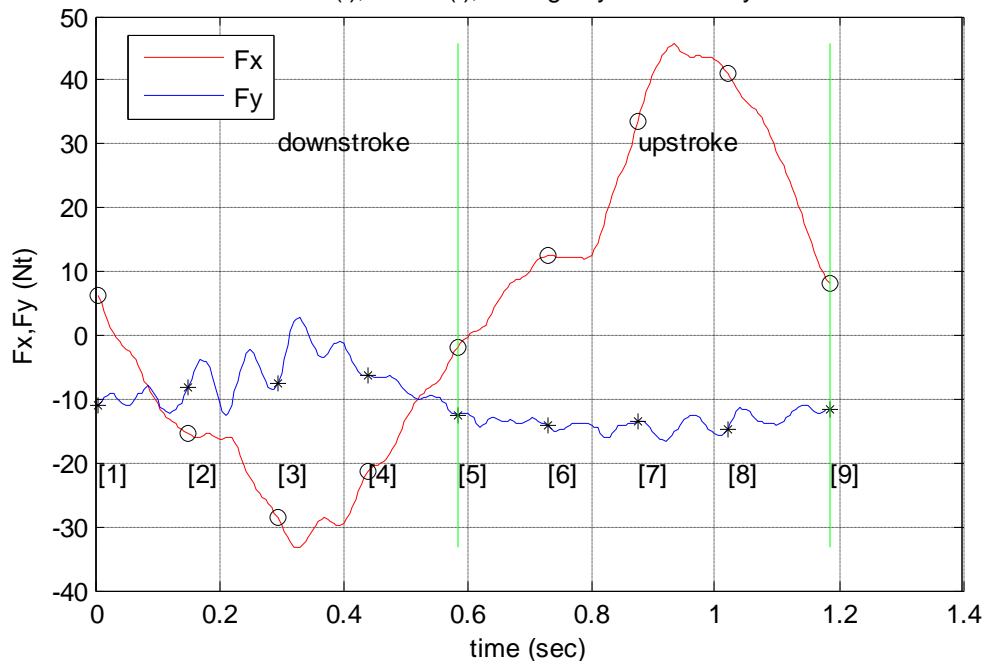


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	8,738	0,448	0,000
2	0,205	-11,007	4,335	-0,356
3	0,405	-15,851	3,979	-0,486
4	0,605	-22,332	4,528	-0,336
5	0,805	-4,313	-0,310	-0,022
6	1,005	10,154	-1,222	0,302
7	1,205	23,152	-2,315	0,481
8	1,405	29,770	-1,650	0,389
9	1,620	8,732	1,218	0,016



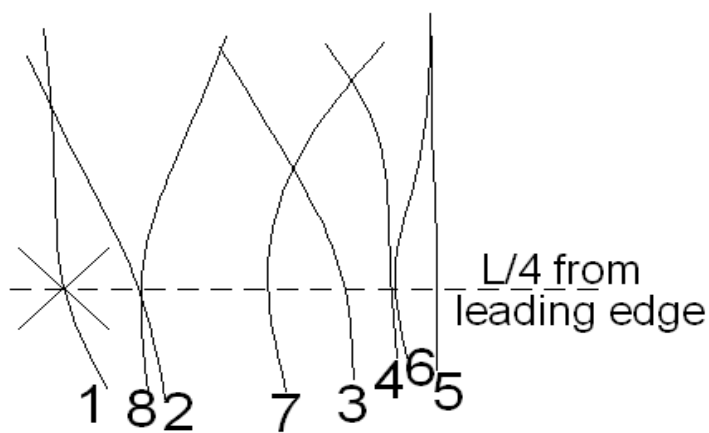
FIN E

V=1.2 m/s T=1.1887 s Ale=0.21 m Ate=0.26 m
 Fx max=45.6135 N Fy max=2.7319 N %EC=-124.0453
 %ECupstroke=-141.0907 %ECdownstroke=-100.3312 St=0.18227
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



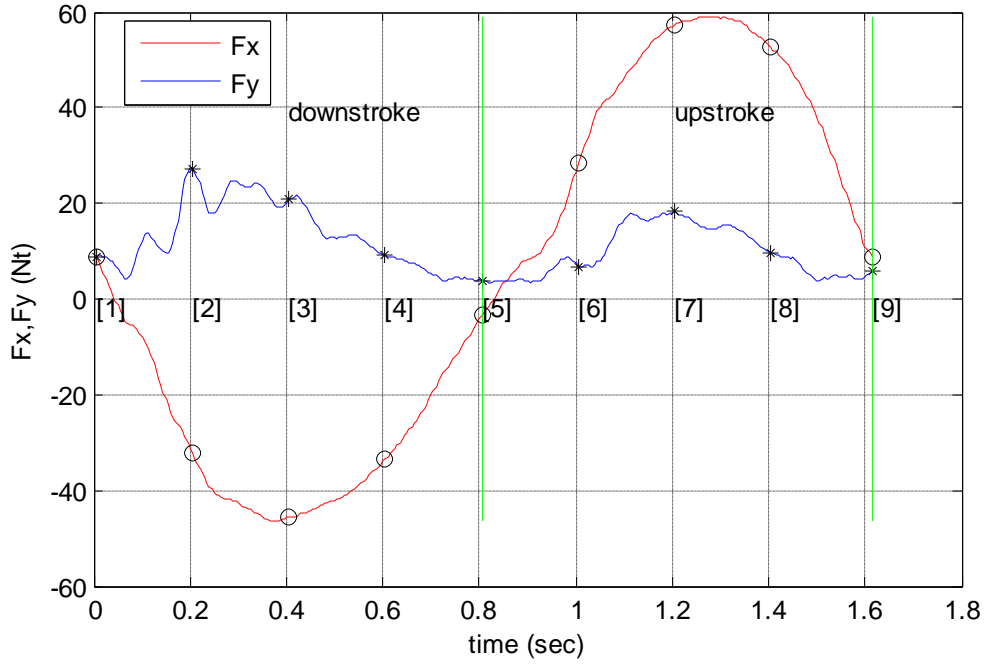
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	6,115	-10,874	0,000
2	0,150	-15,515	-8,021	-0,459
3	0,295	-28,667	-7,410	-0,636
4	0,440	-21,462	-6,336	-0,454
5	0,585	-1,756	-12,458	-0,052
6	0,730	12,413	-14,273	0,373
7	0,875	33,473	-13,639	0,623
8	1,020	40,967	-14,698	0,533
9	1,185	8,055	-11,644	0,041

trailing edge

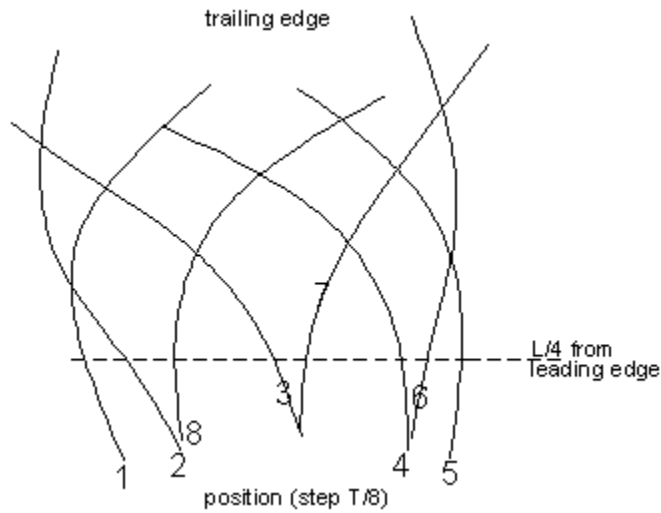


FIN F

V=0 m/s T=1.6173 s Ale=0.4 m Ate=0.52 m
 Fx max=59.0143 N Fy max=27.647 N %EC=0
 %ECupstroke=0 %ECdownstroke=0 St=Inf
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

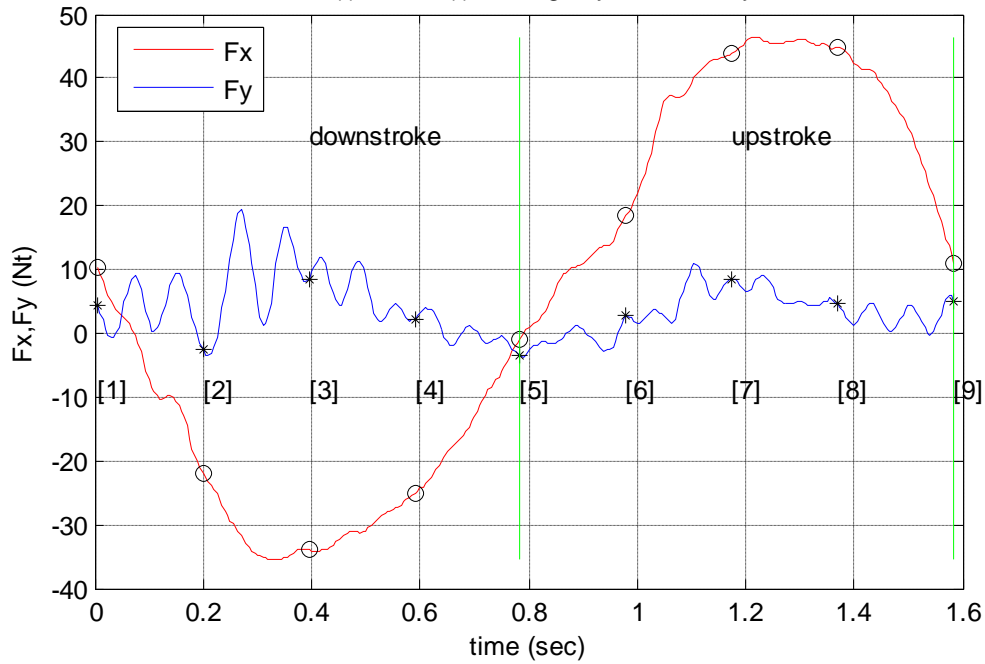


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	8,840	8,719	0,000
2	0,205	-32,302	27,381	-0,679
3	0,405	-45,520	20,867	-0,891
4	0,605	-33,524	9,118	-0,587
5	0,805	-3,269	3,825	-0,033
6	1,005	28,361	6,773	0,532
7	1,205	57,394	18,247	0,879
8	1,405	52,522	9,771	0,731
9	1,615	8,637	5,901	0,039



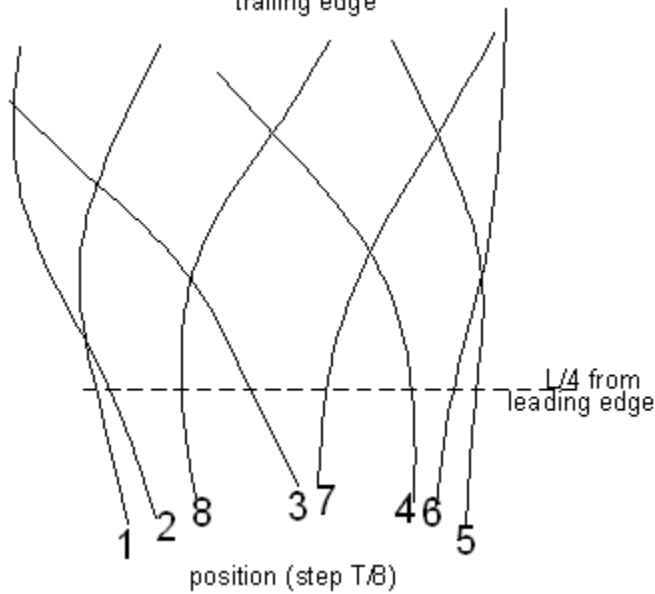
FIN F

V=0.8 m/s T=1.5853 s Ale=0.36 m Ate=0.52 m
 Fx max=46.3509 N Fy max=19.2881 N %EC=19.4328
 %ECupstroke=13.7584 %ECdownstroke=27.4767 St=0.41001
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



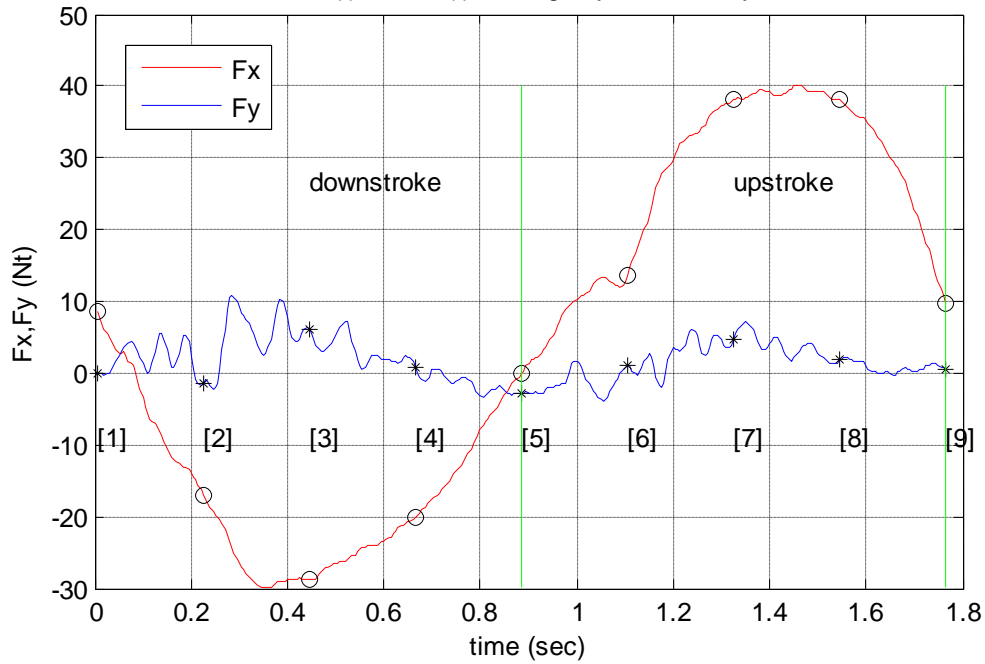
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	10,429	4,415	0,000
2	0,200	-21,907	-2,629	-0,613
3	0,395	-33,902	8,556	-0,816
4	0,590	-24,964	2,282	-0,550
5	0,785	-0,852	-3,601	-0,043
6	0,980	18,416	2,694	0,481
7	1,175	43,739	8,576	0,801
8	1,370	44,804	4,571	0,678
9	1,585	11,093	5,033	0,028

trailing edge

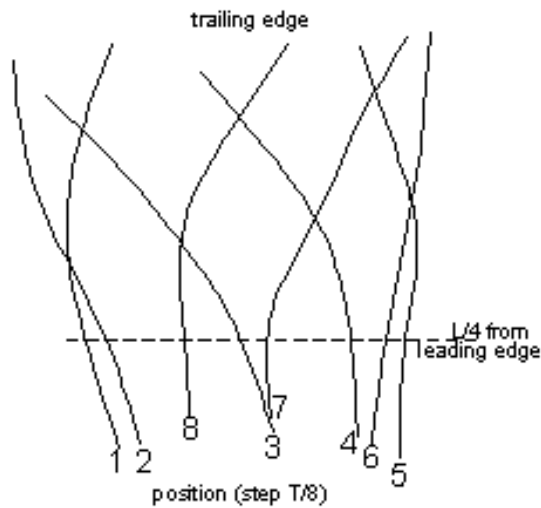


FIN F

V=0.8 m/s T=1.7688 s Ale=0.36 m Ate=0.54 m
 Fx max=40.1117 N Fy max=10.7909 N %EC=12.0112
 %ECupstroke=7.815 %ECdownstroke=18.0663 St=0.38161
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

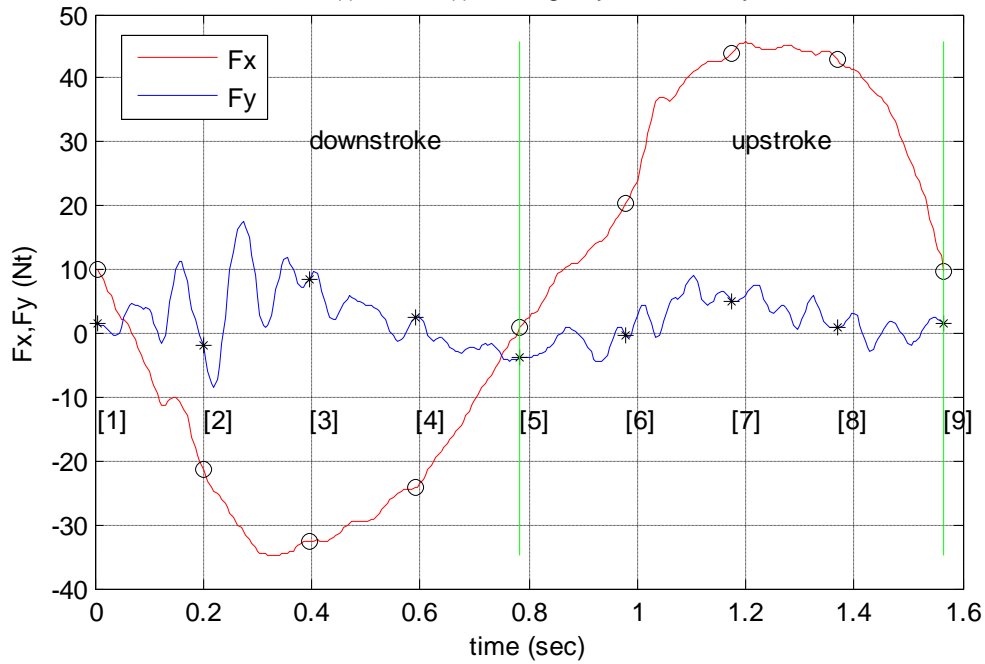


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	8,680	-0,002	0,000
2	0,225	-16,949	-1,297	-0,554
3	0,445	-28,855	6,111	-0,730
4	0,665	-20,116	0,897	-0,480
5	0,885	-0,075	-2,743	-0,016
6	1,105	13,577	1,062	0,454
7	1,325	38,125	4,715	0,725
8	1,545	38,173	1,825	0,579
9	1,765	9,689	0,476	0,033

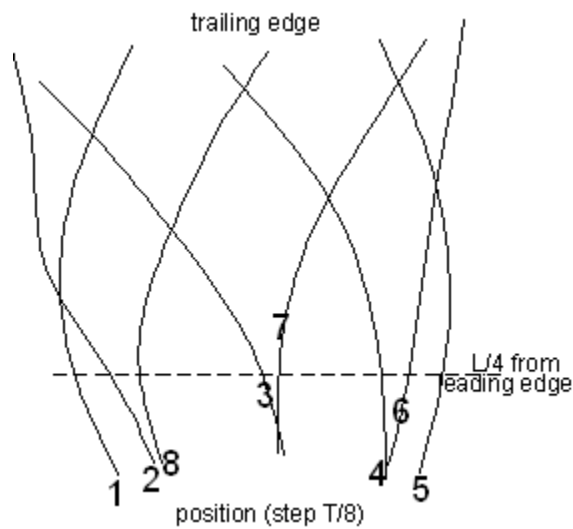


FIN F

V=0.9 m/s T=1.5652 s Ale=0.36 m Ate=0.54 m
 Fx max=45.652 N Fy max=17.474 N %EC=11.8336
 %ECupstroke=7.7389 %ECdownstroke=17.7724 St=0.38334
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

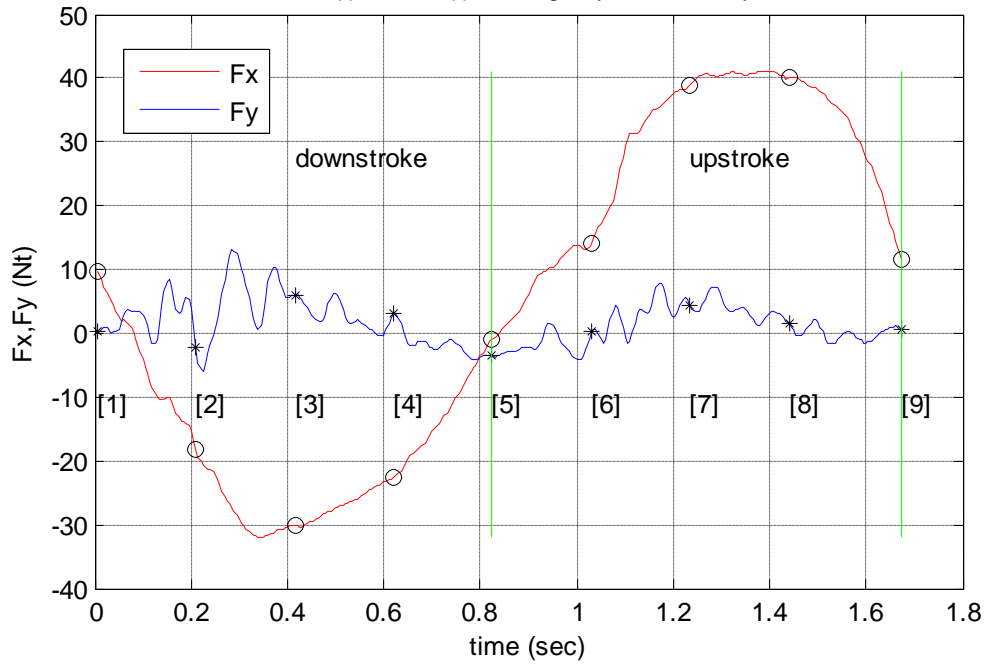


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	10,109	1,582	0,000
2	0,200	-21,229	-2,025	-0,676
3	0,395	-32,531	8,423	-0,885
4	0,590	-24,300	2,505	-0,576
5	0,785	0,829	-3,797	-0,016
6	0,980	20,461	-0,274	0,550
7	1,175	44,007	4,886	0,880
8	1,370	42,873	0,841	0,702
9	1,565	9,635	1,519	0,031

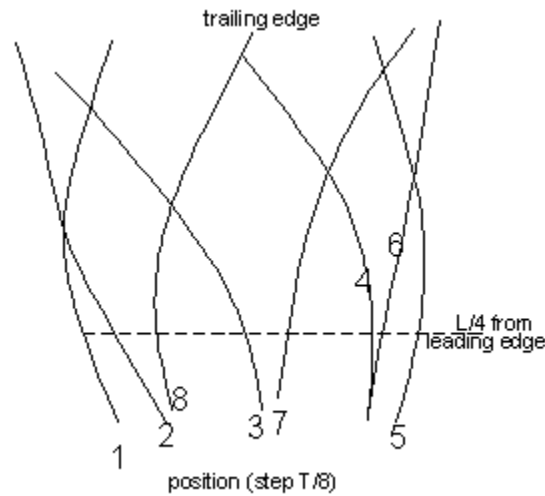


FIN F

V=0.9 m/s T=1.6797 s Ale=0.37 m Ate=0.56 m
 Fx max=41.1875 N Fy max=13.0423 N %EC=9.7443
 %ECupstroke=6.0834 %ECdownstroke=15.038 St=0.37044
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

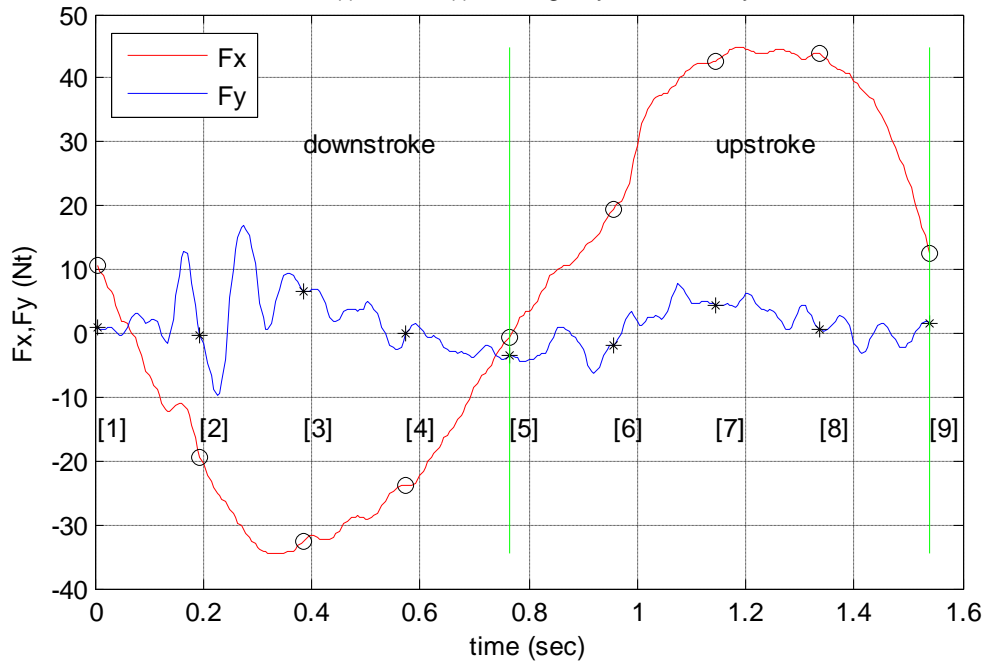


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	9,704	0,288	0,000
2	0,210	-18,253	-2,270	-0,621
3	0,415	-30,168	6,080	-0,827
4	0,620	-22,748	3,128	-0,563
5	0,825	-0,810	-3,522	-0,059
6	1,030	14,135	0,173	0,465
7	1,235	38,762	4,433	0,804
8	1,440	40,080	1,460	0,711
9	1,675	11,492	0,686	0,043

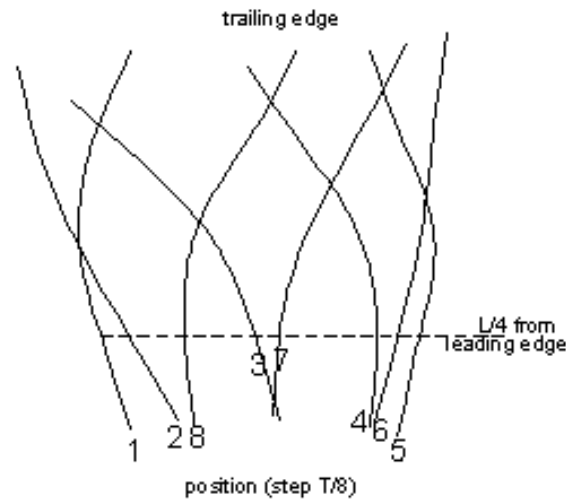


FIN F

V=1 m/s T=1.5442 s Ale=0.35 m Ate=0.56 m
 Fx max=44.8915 N Fy max=16.7883 N %EC=9.5171
 %ECupstroke=5.6239 %ECdownstroke=15.2178 St=0.36264
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

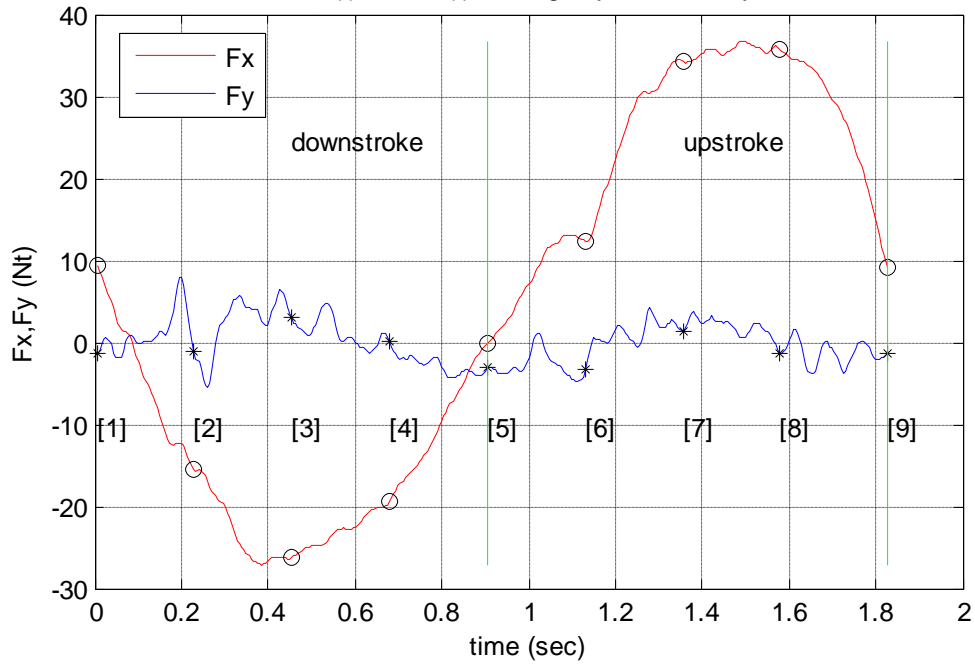


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	10,549	1,030	0,000
2	0,195	-19,422	-0,290	-0,646
3	0,385	-32,520	6,449	-0,858
4	0,575	-23,927	-0,079	-0,577
5	0,765	-0,571	-3,569	-0,044
6	0,955	19,383	-1,749	0,505
7	1,145	42,780	4,529	0,842
8	1,335	43,801	0,735	0,714
9	1,540	12,599	1,595	0,046

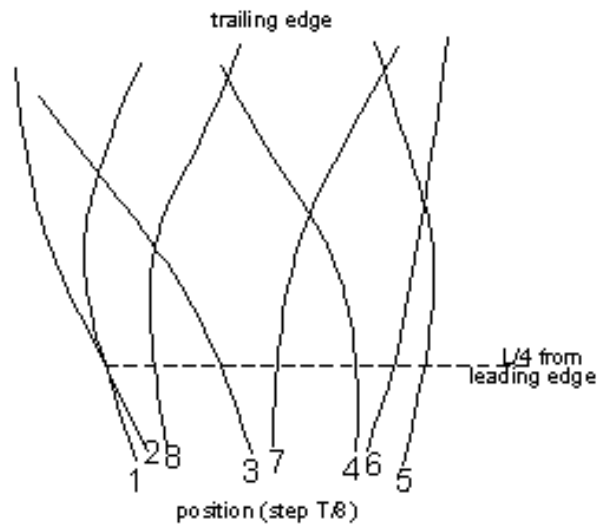


FIN F

V=1 m/s T=1.8257 s Ale=0.334 m Ate=0.54 m
 Fx max=36.7444 N Fy max=8.0089 N %EC=0.95361
 %ECupstroke=-1.8926 %ECdownstroke=5.172 St=0.29578
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

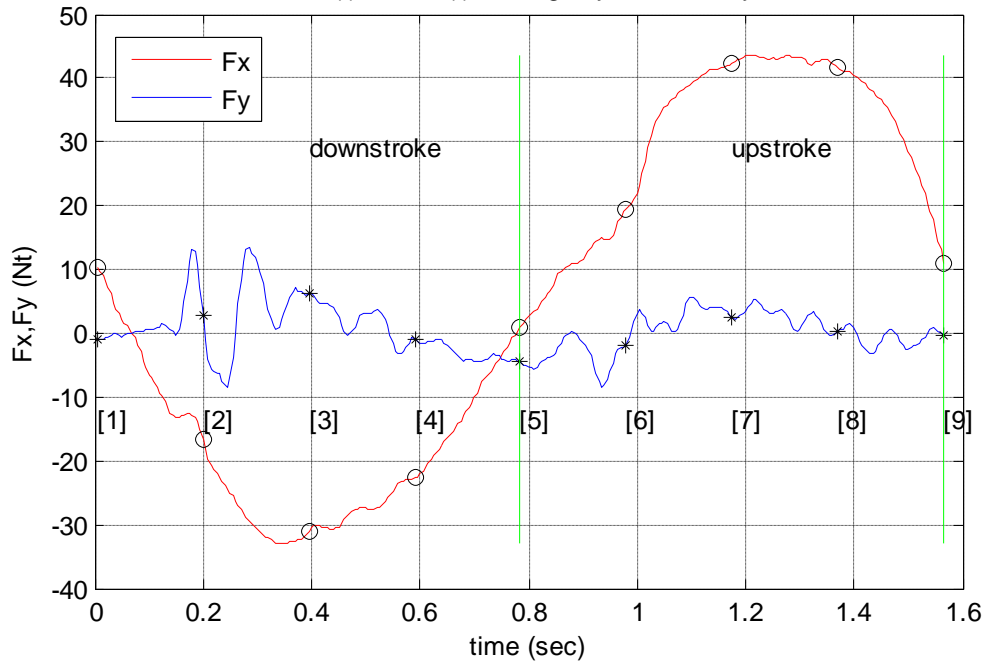


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	9,383	-1,255	0,000
2	0,230	-15,554	-1,135	-0,519
3	0,455	-26,206	2,948	-0,691
4	0,680	-19,325	0,155	-0,464
5	0,905	-0,086	-3,162	-0,032
6	1,130	12,415	-3,220	0,413
7	1,355	34,243	1,382	0,680
8	1,580	35,814	-1,238	0,568
9	1,825	9,139	-1,317	0,022



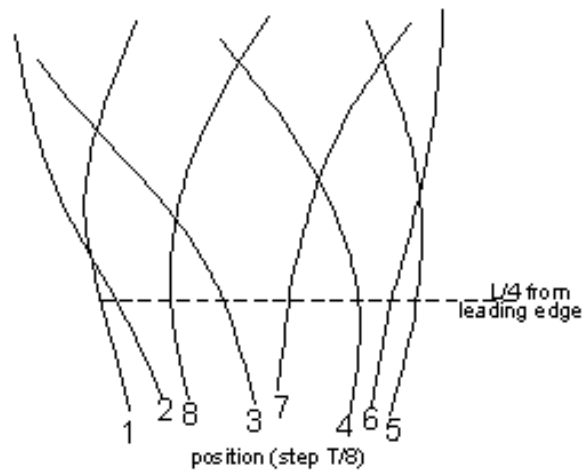
FIN F

V=1.1 m/s T=1.5673 s Ale=0.33 m Ate=0.546 m
 Fx max=43.7167 N Fy max=13.3803 N %EC=3.9813
 %ECupstroke=1.0834 %ECdownstroke=8.3424 St=0.3167
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



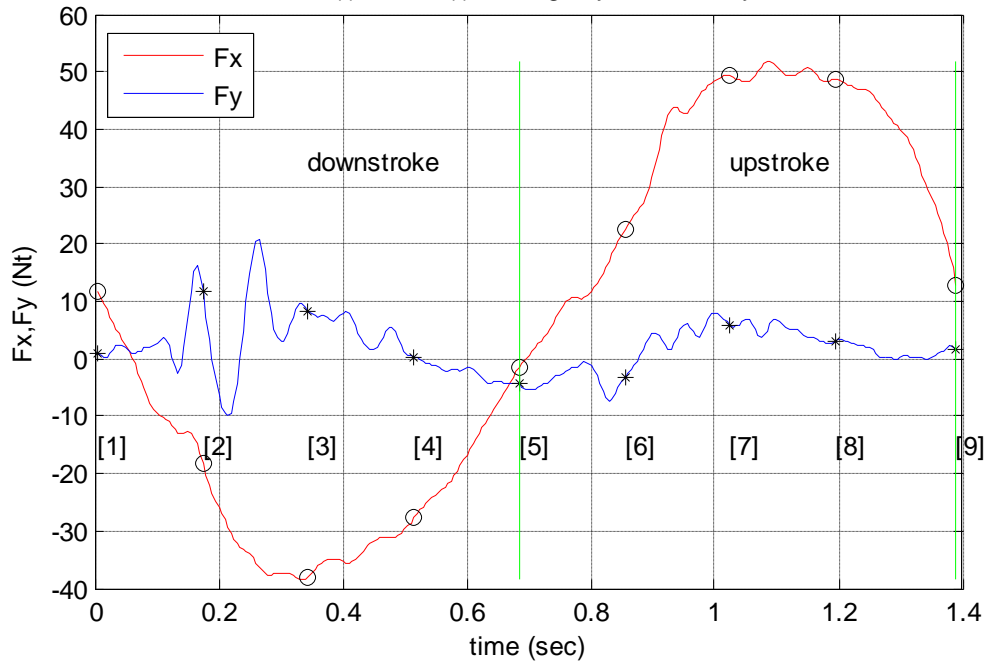
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	10,377	-0,933	0,000
2	0,200	-16,683	2,805	-0,608
3	0,395	-30,976	6,209	-0,803
4	0,590	-22,737	-0,915	-0,529
5	0,785	0,776	-4,492	-0,017
6	0,980	19,558	-1,779	0,501
7	1,175	42,299	2,569	0,798
8	1,370	41,826	0,215	0,636
9	1,565	11,044	-0,459	0,035

trailing edge



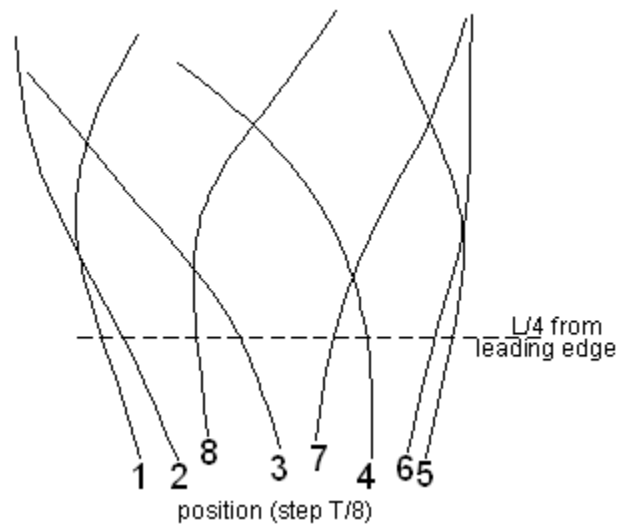
FIN F

V=1.1 m/s T=1.3929 s Ale=0.33 m Ate=0.52 m
 Fx max=51.6834 N Fy max=20.713 N %EC=11.691
 %ECupstroke=7.6262 %ECdownstroke=17.7413 St=0.33939
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



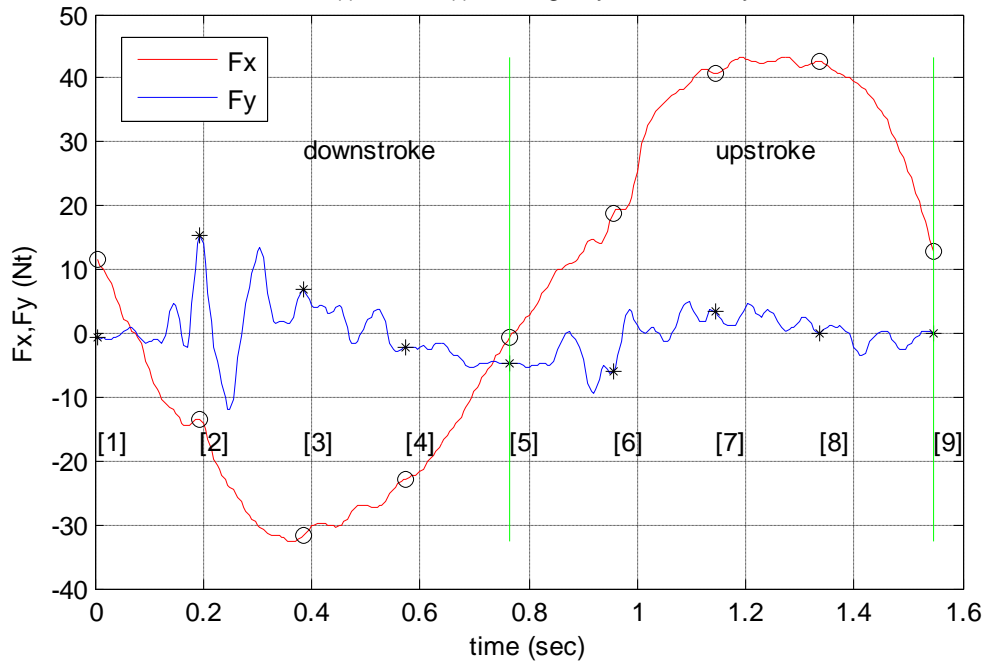
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	11,718	0,873	0,000
2	0,175	-18,389	11,598	-0,674
3	0,345	-37,958	8,185	-0,907
4	0,515	-27,779	0,293	-0,624
5	0,685	-1,467	-4,332	-0,068
6	0,855	22,459	-3,069	0,514
7	1,025	49,286	5,906	0,882
8	1,195	48,503	2,944	0,775
9	1,390	12,912	1,560	0,047

trailing edge



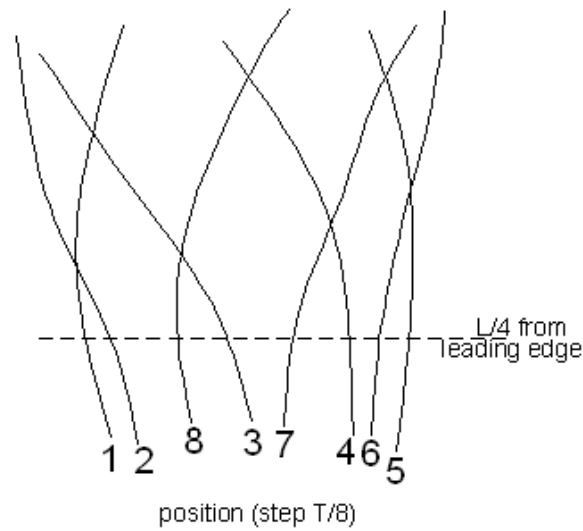
FIN F

V=1.2 m/s T=1.5468 s Ale=0.323 m Ate=0.485 m
 Fx max=43.2448 N Fy max=15.492 N %EC=-0.29213
 %ECupstroke=-2.8823 %ECdownstroke=3.6319 St=0.26129
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



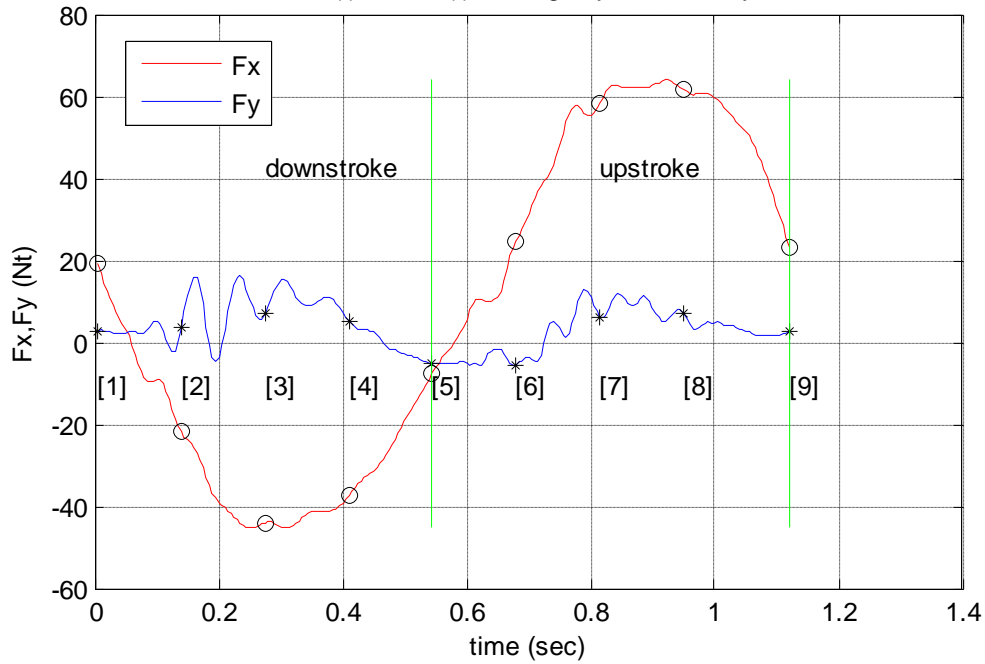
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	11,682	-0,570	0,000
2	0,195	-13,535	15,492	-0,555
3	0,385	-31,829	6,863	-0,746
4	0,575	-22,847	-2,254	-0,510
5	0,765	-0,572	-4,579	-0,043
6	0,955	18,858	-6,004	0,442
7	1,145	40,746	3,413	0,733
8	1,335	42,489	-0,092	0,619
9	1,545	12,773	0,091	0,031

trailing edge

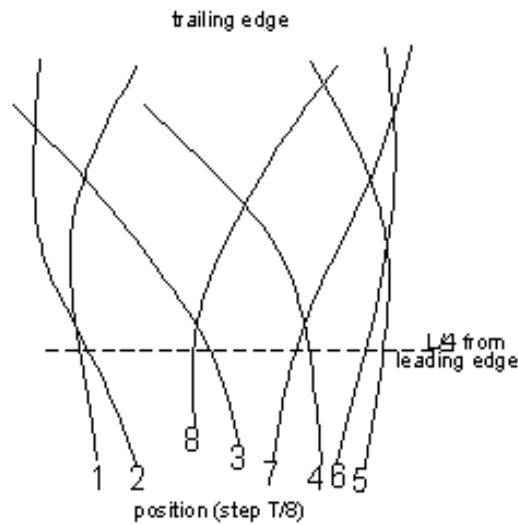


FIN F

V=1.2 m/s T=1.1233 s Ale=0.348 m Ate=0.48 m
 Fx max=64.2925 N Fy max=16.331 N %EC=15.2585
 %ECupstroke=9.4757 %ECdownstroke=24.1848 St=0.35608
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

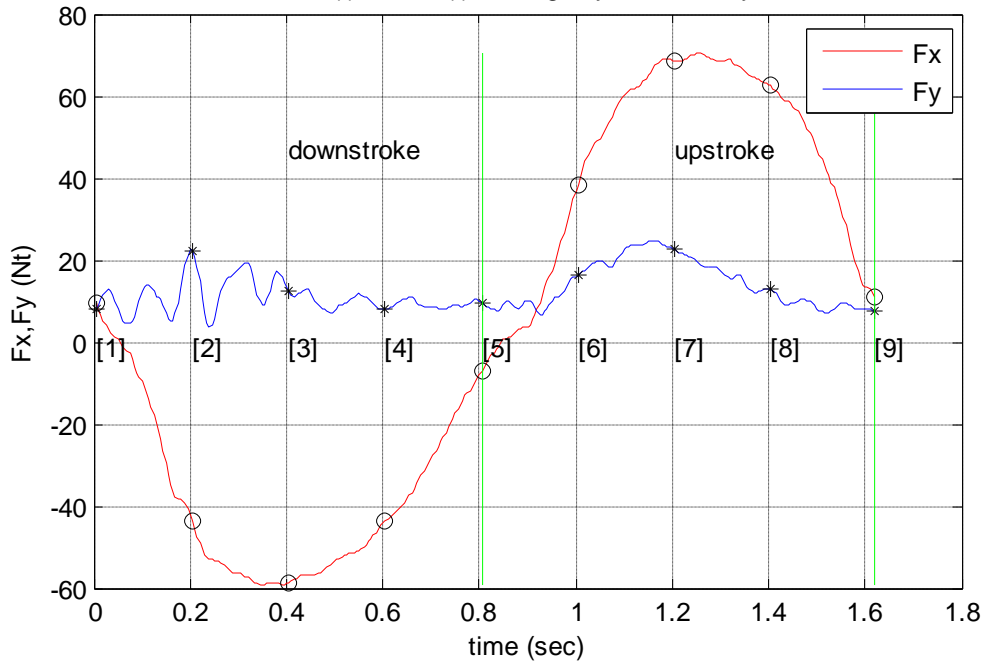


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	19,118	2,903	0,000
2	0,140	-21,711	3,590	-0,813
3	0,275	-43,913	6,912	-1,112
4	0,410	-37,391	5,191	-0,793
5	0,545	-7,496	-5,181	-0,131
6	0,680	24,803	-5,444	0,578
7	0,815	58,506	6,071	1,058
8	0,950	61,588	7,103	0,997
9	1,120	23,257	2,633	0,075

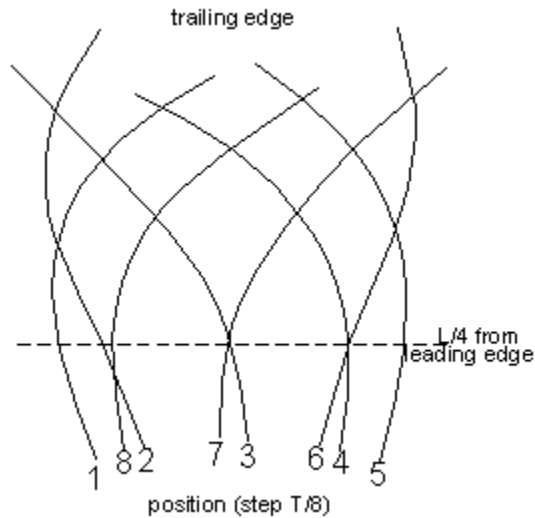


FIN G

$V=0$ m/s $T=1.62$ s $A_{le}=0.35$ m $A_{te}=0.54$ m
 $F_x \text{ max}=70.4284$ N $F_y \text{ max}=24.8071$ N $\%EC=0$
 $\%EC_{upstroke}=0$ $\%EC_{downstroke}=0$ $St=Inf$
 $F_{vertical}(t), F_{thrust}(t)$, average cycle for X-Ysystem

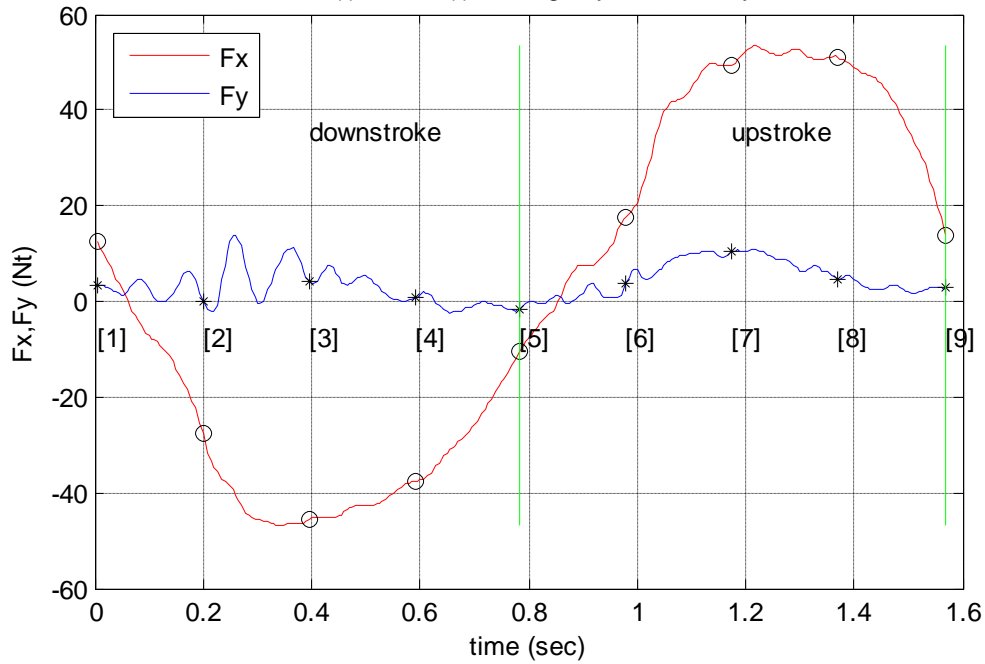


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	9,703	8,005	0,000
2	0,205	-43,775	22,220	-0,632
3	0,405	-58,618	12,249	-0,837
4	0,605	-43,681	7,882	-0,558
5	0,805	-7,029	9,630	-0,035
6	1,005	38,443	16,308	0,500
7	1,205	68,678	22,579	0,825
8	1,405	62,527	13,074	0,687
9	1,620	11,056	7,619	0,027

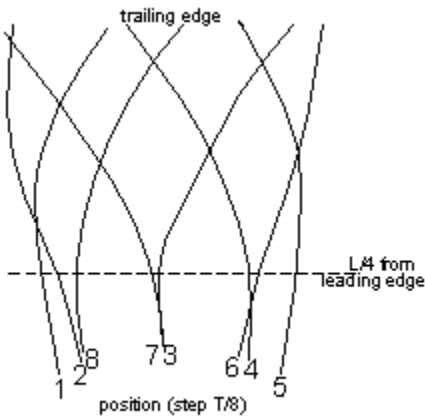


FIN G

$V=0.8 \text{ m/s}$ $T=1.5702 \text{ s}$ $A_{le}=0.34 \text{ m}$ $A_{te}=0.49 \text{ m}$
 $F_x \text{ max}=53.414 \text{ N}$ $F_y \text{ max}=13.8023 \text{ N}$ $\%EC=16.6024$
 $\%EC_{upstroke}=20.2531$ $\%EC_{downstroke}=12.464$ $St=0.39009$
 $F_{vertical}(t), F_{thrust}(t)$, average cycle for X-Y system

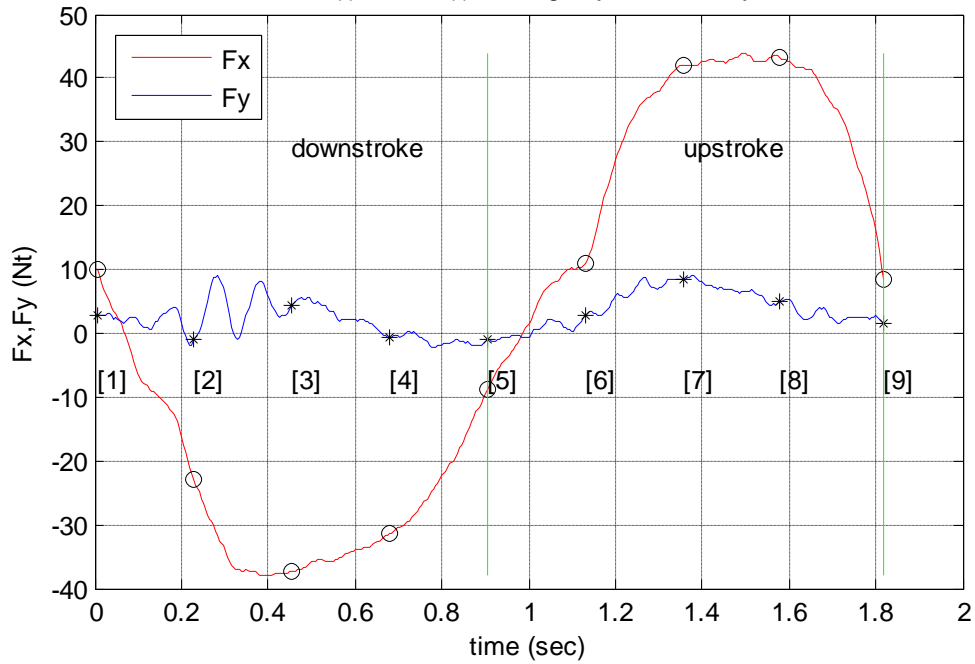


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	12,596	3,163	0,000
2	0,200	-27,657	0,206	-0,589
3	0,395	-45,656	4,212	-0,782
4	0,590	-37,701	0,631	-0,520
5	0,785	-10,314	-1,490	-0,021
6	0,980	17,700	3,561	0,486
7	1,175	49,440	10,281	0,776
8	1,370	51,075	4,707	0,622
9	1,570	13,868	2,913	0,027

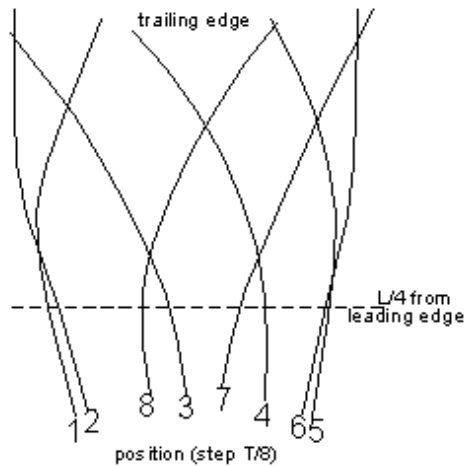


FIN G

V=0.8 m/s T=1.8211 s Ale=0.32 m Ate=0.49 m
 Fx max=43.936 N Fy max=9.0925 N %EC=18.2337
 %ECupstroke=23.2115 %ECdownstroke=12.5815 St=0.33634
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

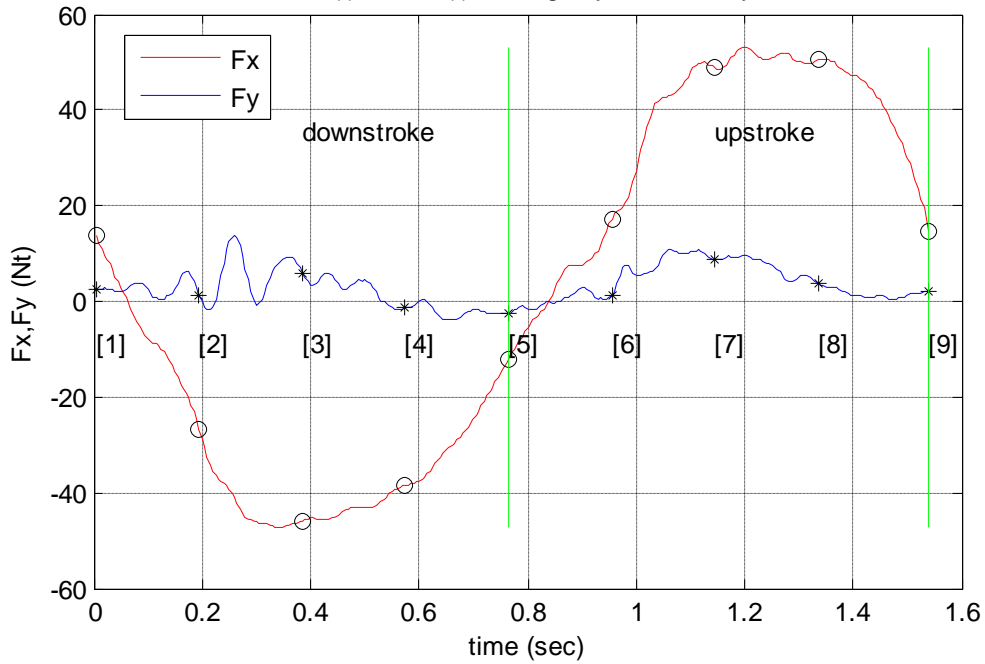


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	9,996	2,758	0,000
2	0,230	-22,755	-1,090	-0,493
3	0,455	-37,303	4,274	-0,657
4	0,680	-31,338	-0,614	-0,442
5	0,905	-8,891	-1,111	-0,026
6	1,130	10,956	2,875	0,400
7	1,355	41,866	8,493	0,649
8	1,580	43,154	4,848	0,533
9	1,820	8,547	1,629	0,022

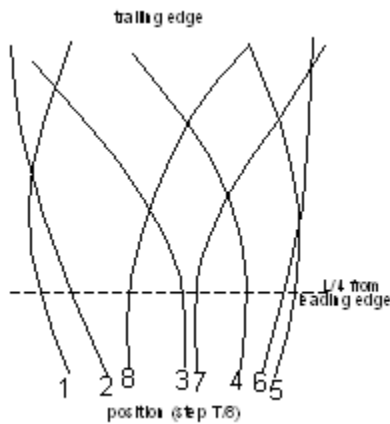


FIN G

V=0.9 m/s T=1.5411 s Ale=0.34 m Ate=0.52 m
 Fx max=53.1198 N Fy max=13.9296 N %EC=13.4155
 %ECupstroke=16.7916 %ECdownstroke=9.6251 St=0.37492
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

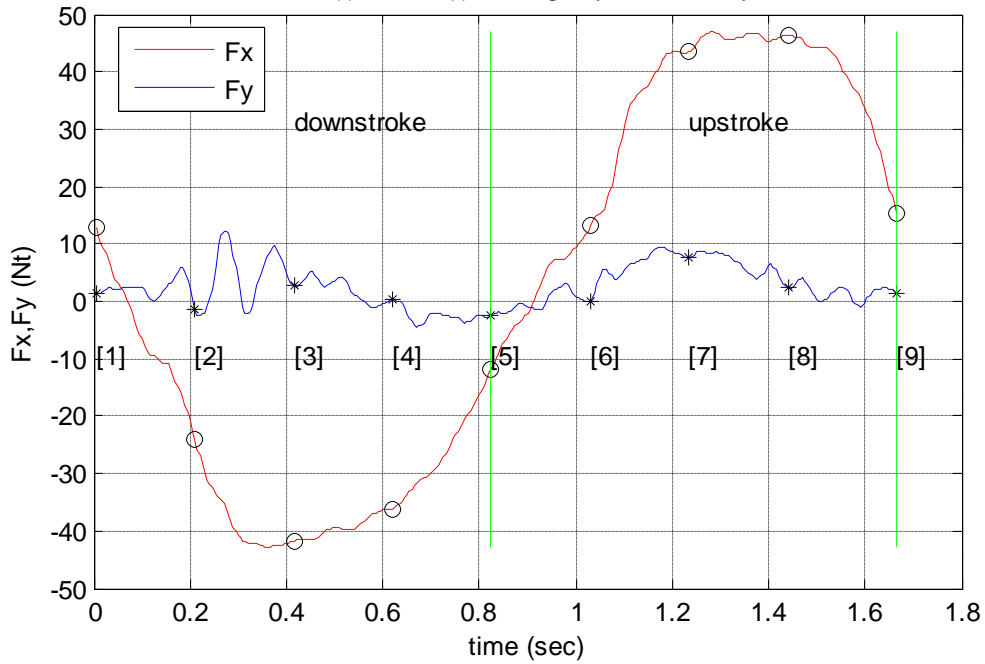


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	13,606	2,439	0,000
2	0,195	-26,828	1,409	-0,664
3	0,385	-46,001	5,827	-0,880
4	0,575	-38,499	-1,463	-0,589
5	0,765	-12,028	-2,450	-0,041
6	0,955	17,301	1,182	0,522
7	1,145	48,853	8,660	0,866
8	1,335	50,403	3,870	0,727
9	1,540	14,599	2,035	0,035

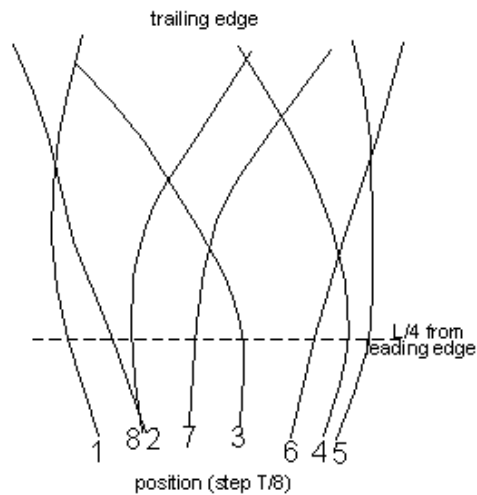


FIN G

$V=0.9 \text{ m/s}$ $T=1.6685 \text{ s}$ $A_{le}=0.34 \text{ m}$ $A_{te}=0.56 \text{ m}$
 $F_x \text{ max}=46.971 \text{ N}$ $F_y \text{ max}=12.3424 \text{ N}$ $\%EC=12.8655$
 $\%EC_{\text{upstroke}}=17.2712$ $\%EC_{\text{downstroke}}=7.9895$ $St=0.37292$
 $F_{\text{vertical}}(t), F_{\text{thrust}}(t)$, average cycle for X-Ysystem

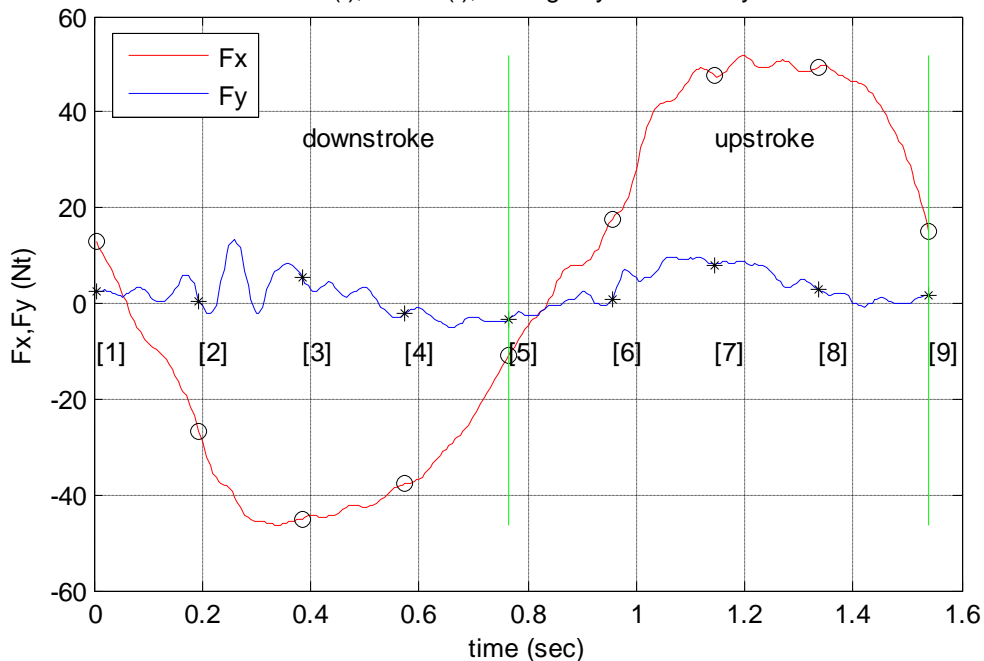


position	time (sec)	F_x (Nt)	Thrust F_y (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	12,721	1,337	0,000
2	0,210	-24,159	-1,308	-0,612
3	0,415	-41,673	2,791	-0,813
4	0,620	-36,101	0,181	-0,548
5	0,825	-11,727	-2,404	-0,044
6	1,030	13,125	0,096	0,475
7	1,235	43,411	7,766	0,797
8	1,440	46,369	2,283	0,680
9	1,665	15,266	1,467	0,038

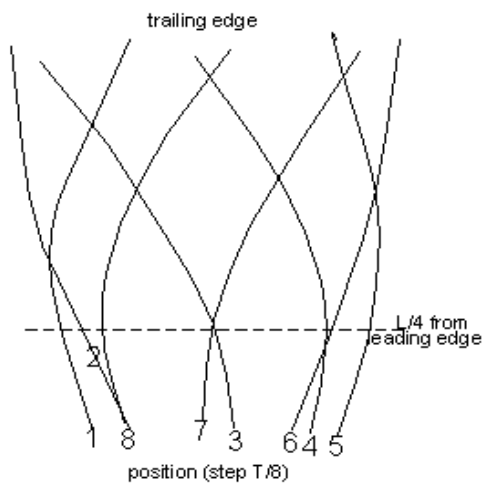


FIN G

V=1 m/s T=1.5438 s Ale=0.34 m Ate=0.54 m
 Fx max=51.7771 N Fy max=13.3066 N %EC=11.6061
 %ECupstroke=15.7575 %ECdownstroke=6.9452 St=0.3498
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

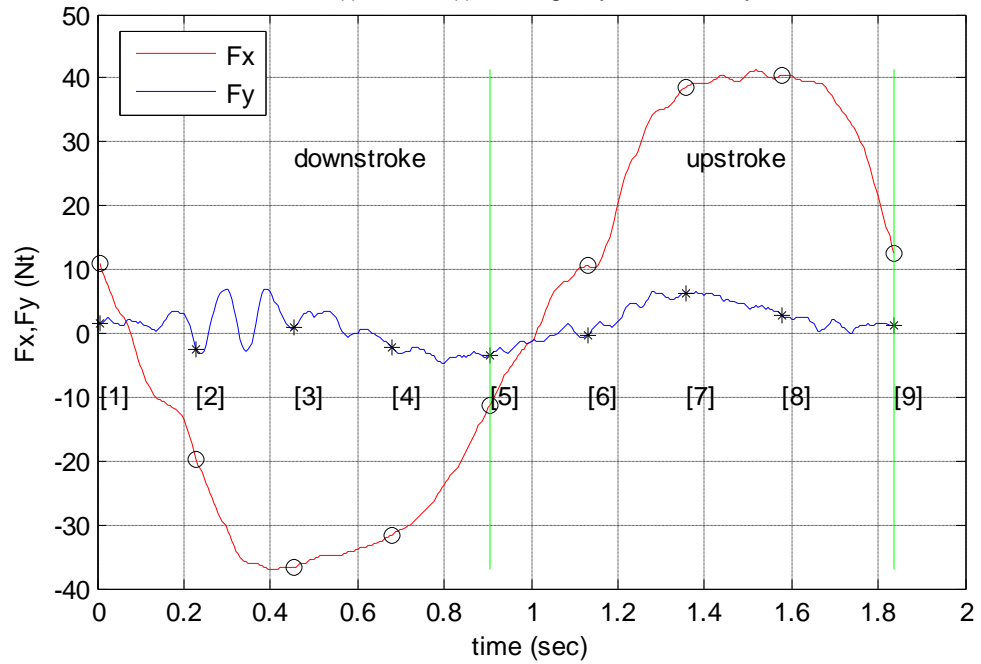


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	12,824	2,353	0,000
2	0,195	-26,881	0,583	-0,662
3	0,385	-44,981	5,244	-0,878
4	0,575	-37,691	-2,063	-0,590
5	0,765	-10,848	-3,150	-0,045
6	0,955	17,753	0,750	0,517
7	1,145	47,608	8,106	0,863
8	1,335	49,416	2,870	0,731
9	1,540	14,959	1,776	0,045

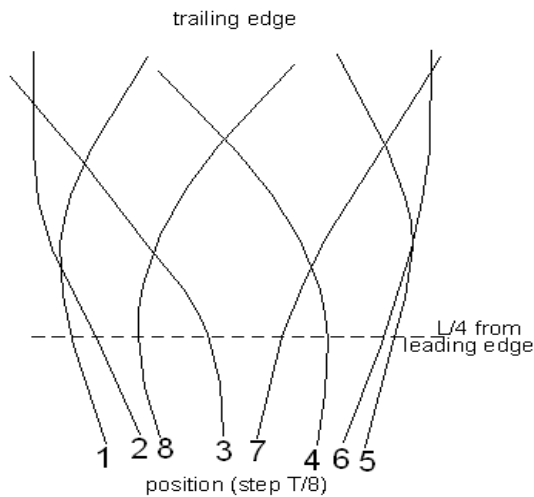


FIN G

$V=1$ m/s $T=1.8389$ s $A_{le}=0.32$ m $A_{te}=0.53$ m
 $F_x \text{ max}=41.2774$ N $F_y \text{ max}=7.0335$ N $\%EC=10.8909$
 $\%EC_{\text{upstroke}}=17.5522$ $\%EC_{\text{downstroke}}=3.6524$ $St=0.28822$
 $F_{\text{vertical}}(t), F_{\text{thrust}}(t)$, average cycle for X-Ysystem

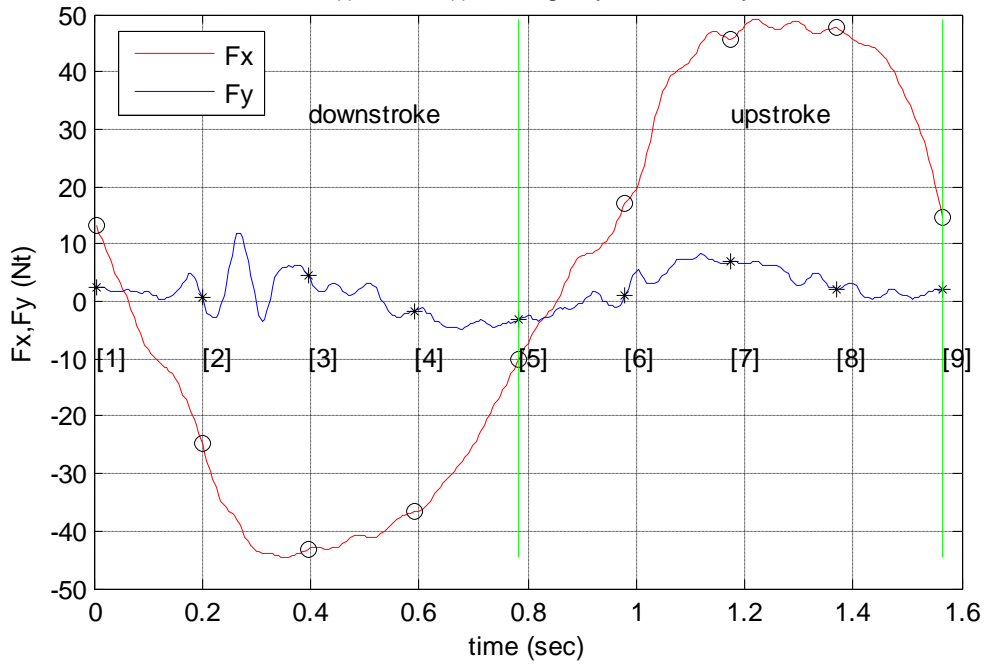


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	10,821	1,576	0,000
2	0,230	-19,844	-2,461	-0,498
3	0,455	-36,648	0,904	-0,669
4	0,680	-31,540	-2,318	-0,459
5	0,905	-11,220	-3,365	-0,044
6	1,130	10,517	-0,256	0,387
7	1,355	38,584	6,128	0,654
8	1,580	40,360	2,683	0,564
9	1,835	12,417	1,328	0,029

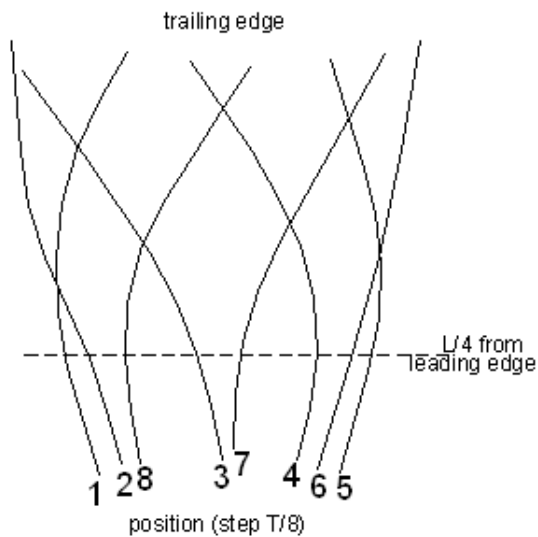


FIN G

V=1.1 m/s T=1.5688 s Ale=0.3 m Ate=0.51 m
 Fx max=49.131 N Fy max=11.738 N %EC=10.9333
 %ECupstroke=16.4859 %ECdownstroke=4.7819 St=0.29553
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

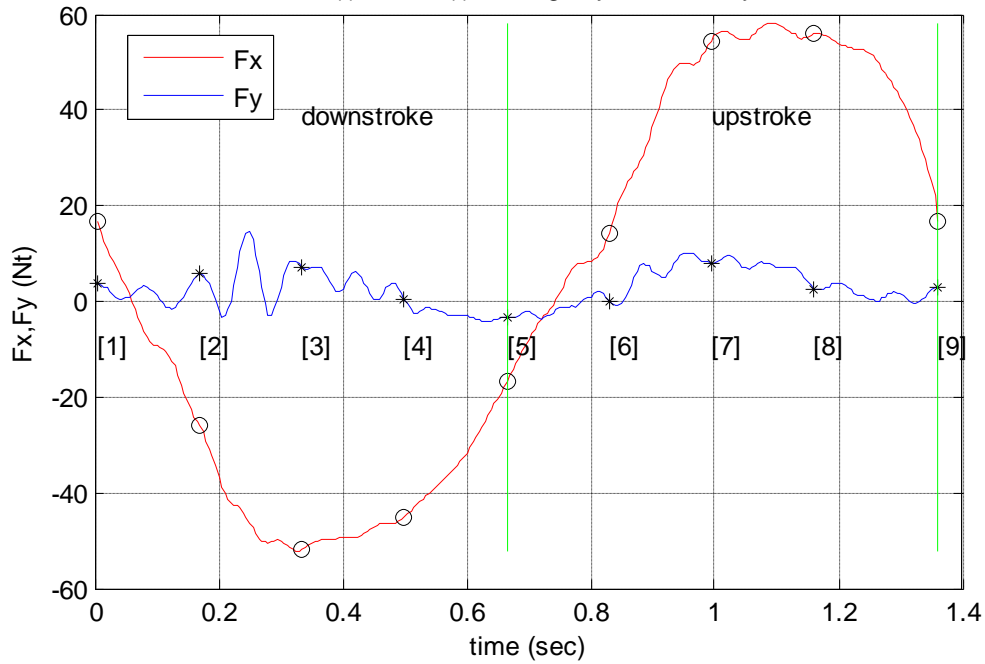


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	13,161	2,392	0,000
2	0,200	-24,648	0,597	-0,580
3	0,395	-43,196	4,463	-0,770
4	0,590	-36,672	-1,585	-0,512
5	0,785	-9,977	-2,962	-0,019
6	0,980	17,059	0,904	0,481
7	1,175	45,729	6,829	0,765
8	1,370	47,618	2,204	0,610
9	1,565	14,522	1,975	0,039

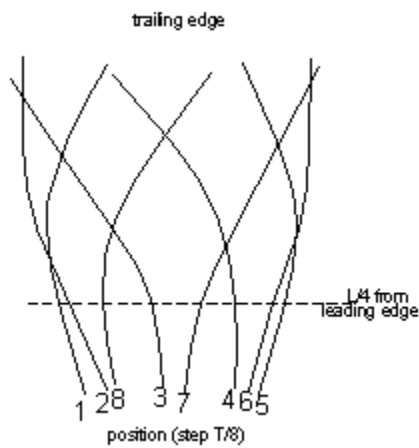


FIN G

V=1.1 m/s T=1.3623 s Ale=0.29 m Ate=0.47 m
 Fx max=58.253 N Fy max=14.5291 N %EC=12.083
 %ECupstroke=15.2331 %ECdownstroke=8.5165 St=0.31364
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

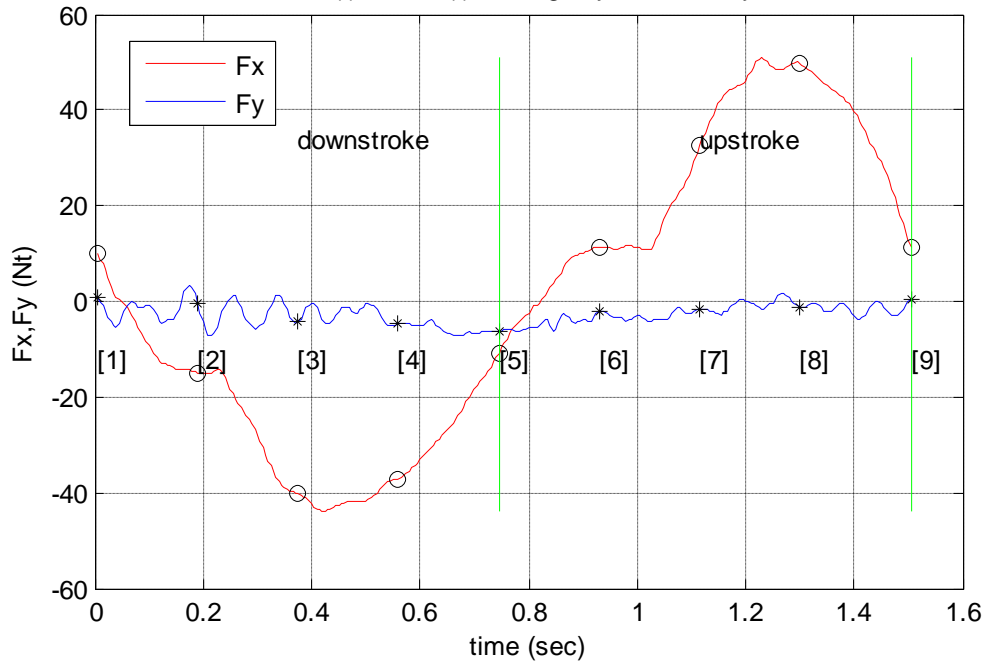


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	16,631	3,820	0,000
2	0,170	-25,849	6,021	-0,647
3	0,335	-51,885	7,126	-0,881
4	0,500	-45,139	0,419	-0,620
5	0,665	-16,809	-3,169	-0,085
6	0,830	14,047	0,184	0,483
7	0,995	54,503	7,999	0,850
8	1,160	56,072	2,635	0,769
9	1,360	16,611	2,751	0,044



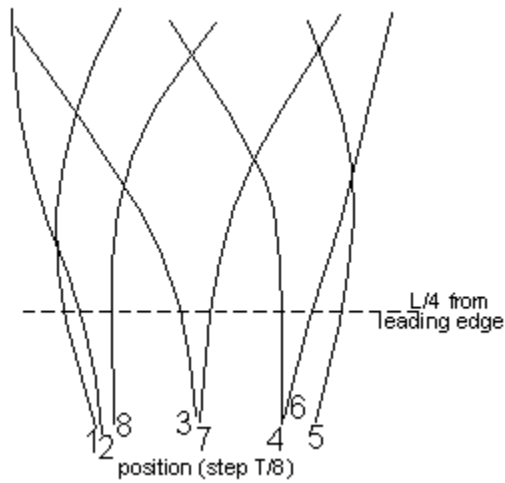
FIN G

V=1.2 m/s T=1.5052 s Ale=0.28 m Ate=0.48 m
 Fx max=50.8935 N Fy max=3.4124 N %EC=-24.0129
 %ECupstroke=-20.4726 %ECdownstroke=-27.7146 St=0.26574
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



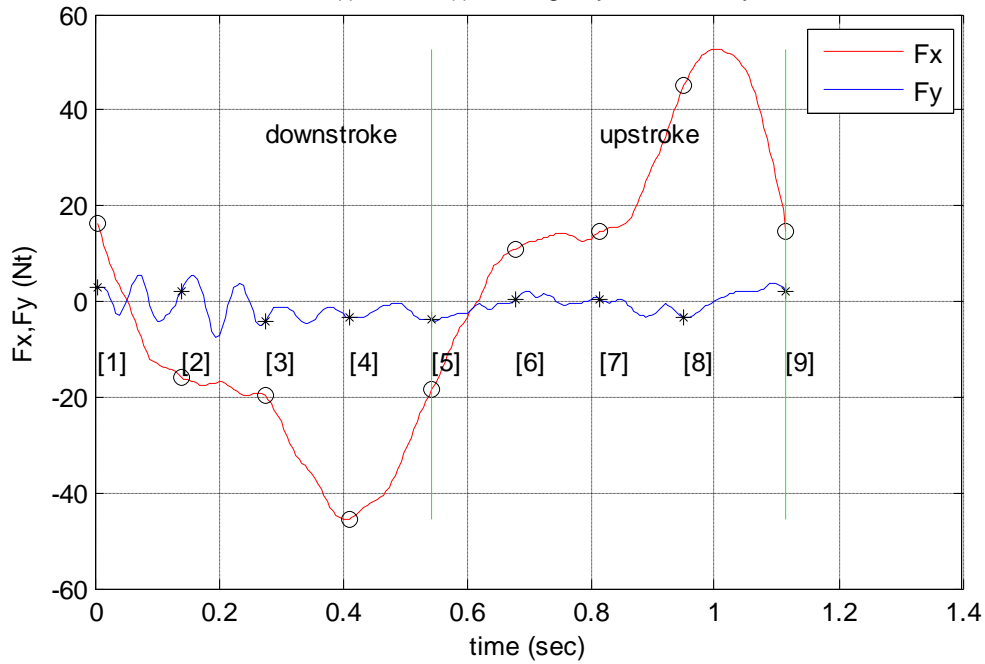
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	10,187	0,634	0,000
2	0,190	-14,884	-0,386	-0,543
3	0,375	-40,240	-4,344	-0,733
4	0,560	-37,051	-4,590	-0,503
5	0,745	-10,726	-6,250	-0,041
6	0,930	11,152	-2,033	0,437
7	1,115	32,569	-1,535	0,721
8	1,300	49,858	-1,219	0,605
9	1,505	11,495	0,490	0,026

trailing edge



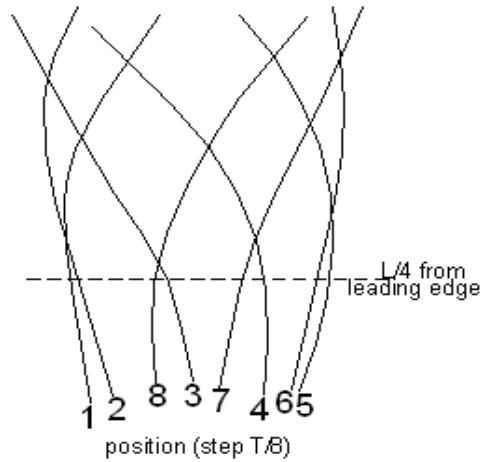
FIN G

$V=1.2 \text{ m/s}$ $T=1.115 \text{ s}$ $Ale=0.25 \text{ m}$ $Ate=0.42 \text{ m}$
 $F_x \text{ max}=52.7884 \text{ N}$ $F_y \text{ max}=5.5549 \text{ N}$ $\%EC=-6.3508$
 $\%EC_{\text{upstroke}}=-2.0732$ $\%EC_{\text{downstroke}}=-10.5103$ $St=0.3139$
 $F_{\text{vertical}}(t), F_{\text{thrust}}(t)$, average cycle for X-Ysystem



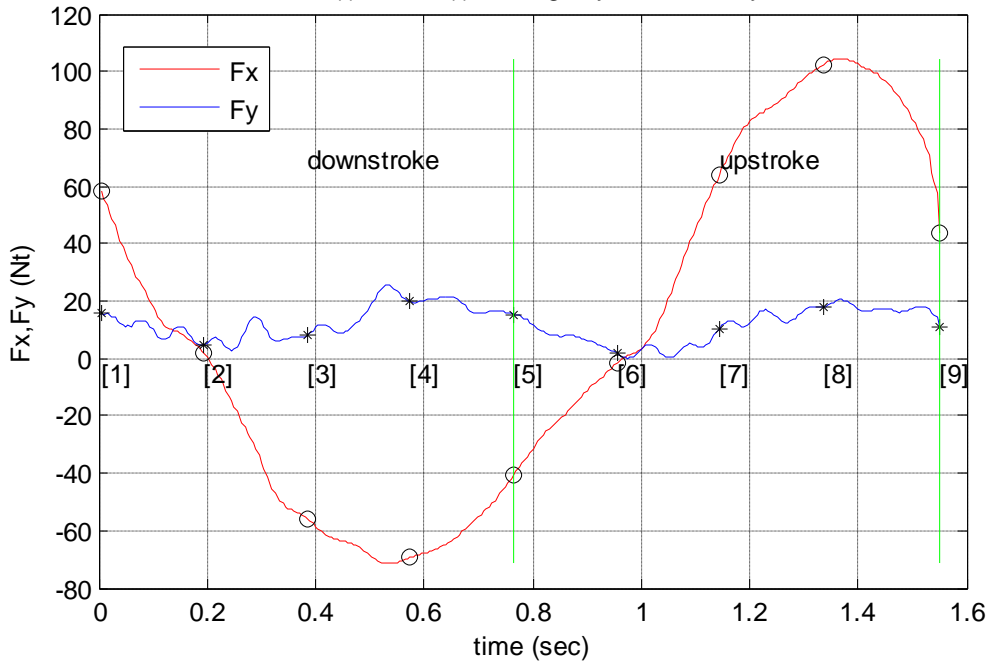
position	time (sec)	F_x (Nt)	Thrust F_y (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	16,139	2,985	0,000
2	0,140	-15,700	2,186	-0,634
3	0,275	-19,634	-4,342	-0,877
4	0,410	-45,591	-3,475	-0,629
5	0,545	-18,452	-3,852	-0,089
6	0,680	10,960	0,612	0,488
7	0,815	14,562	0,532	0,849
8	0,950	44,952	-3,212	0,760
9	1,115	14,721	2,213	0,040

trailing edge

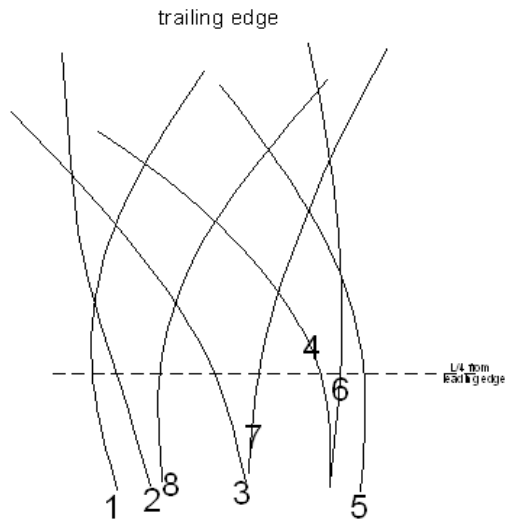


FIN H

V=0 m/s T=1.5501 s Ale=0.3 m Ate=0.46 m
 Fx max=104.5888 N Fy max=25.5831 N %EC=0
 %ECupstroke=0 %ECdownstroke=0 St=Inf
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system

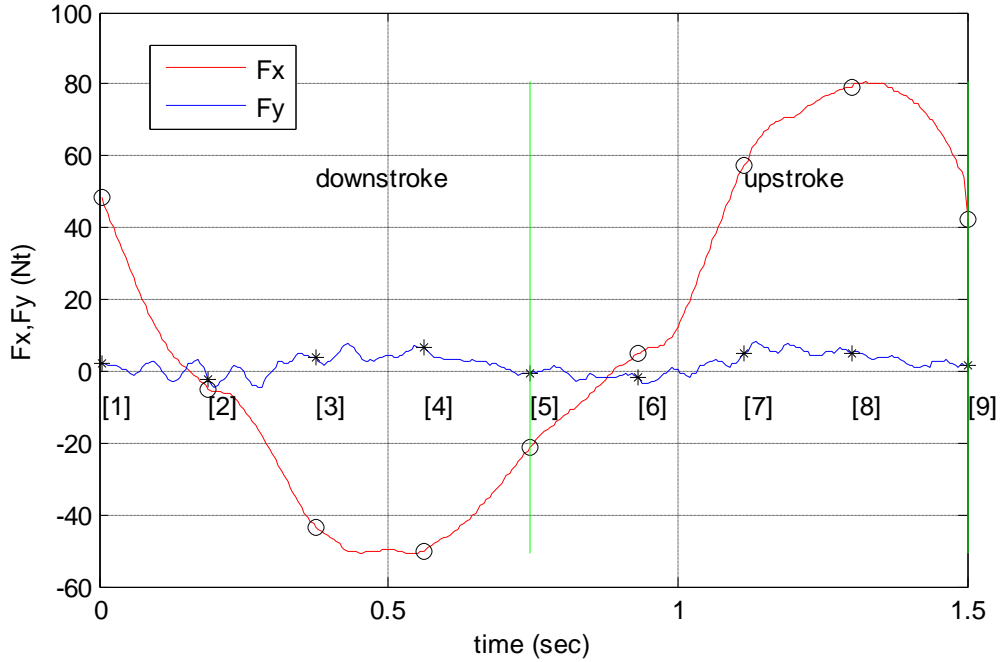


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	58,659	16,029	0,000
2	0,195	1,702	4,811	-0,494
3	0,385	-55,971	8,373	-0,671
4	0,575	-69,208	19,663	-0,465
5	0,765	-40,526	15,392	-0,043
6	0,955	-1,690	1,931	0,398
7	1,145	64,220	10,562	0,659
8	1,335	102,345	18,029	0,557
9	1,550	43,681	10,887	0,023



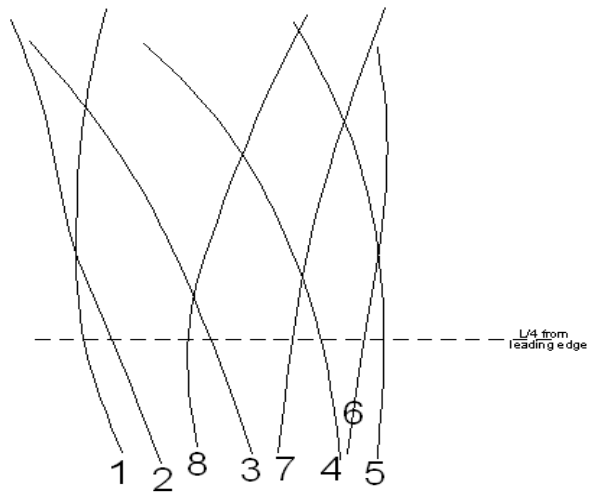
FIN H

V=0.8 m/s T=1.503 s Ale=0.274 m Ate=0.4 m
 Fx max=80.8344 N Fy max=8.116 N %EC=9.5493
 %ECupstroke=8.0597 %ECdownstroke=12.044 St=0.33267
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system



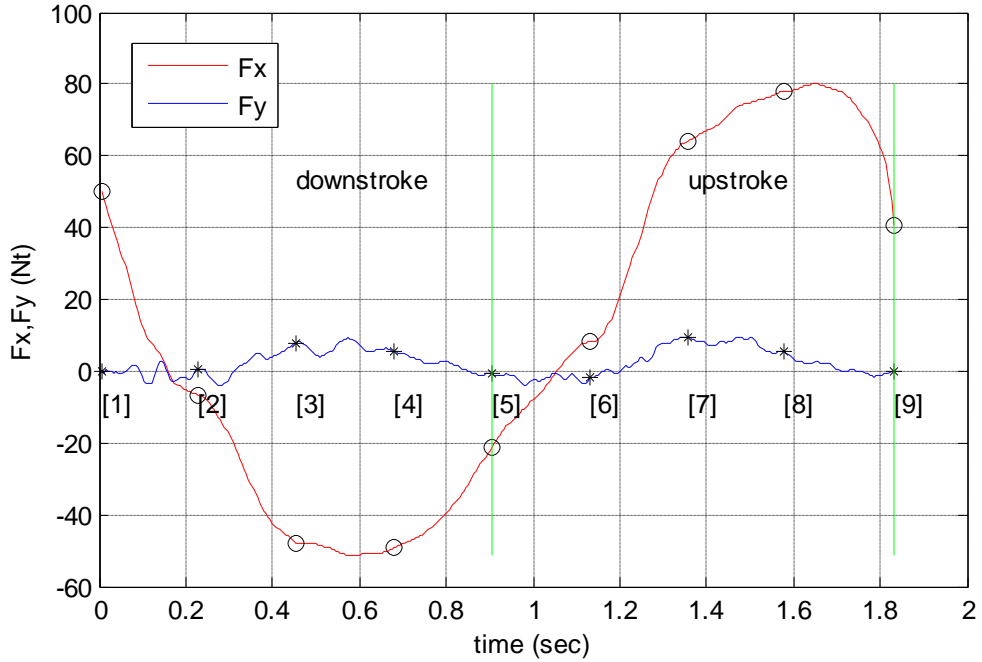
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	48,318	2,137	0,000
2	0,190	-5,015	-2,563	-0,495
3	0,375	-43,363	3,647	-0,671
4	0,560	-50,055	6,373	-0,462
5	0,745	-21,145	-0,481	-0,035
6	0,930	4,736	-1,916	0,406
7	1,115	57,170	4,939	0,661
8	1,300	79,371	5,084	0,547
9	1,500	42,539	1,780	0,032

trailing edge



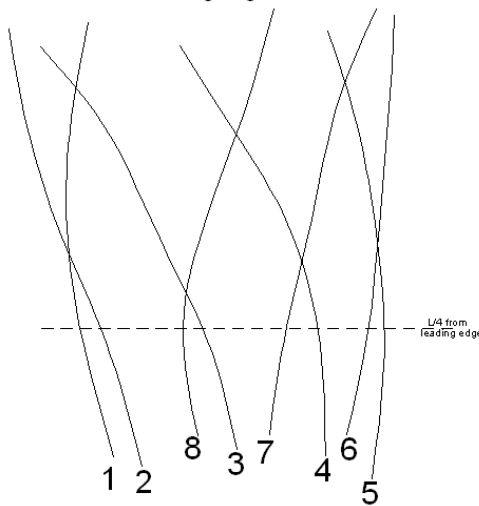
FIN H

V=0.8 m/s T=1.8321 s Ale=0.29 m Ate=0.435 m
 Fx max=80.0575 N Fy max=9.6799 N %EC=12.2526
 %ECupstroke=10.0806 %ECdownstroke=15.8154 St=0.2968
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system



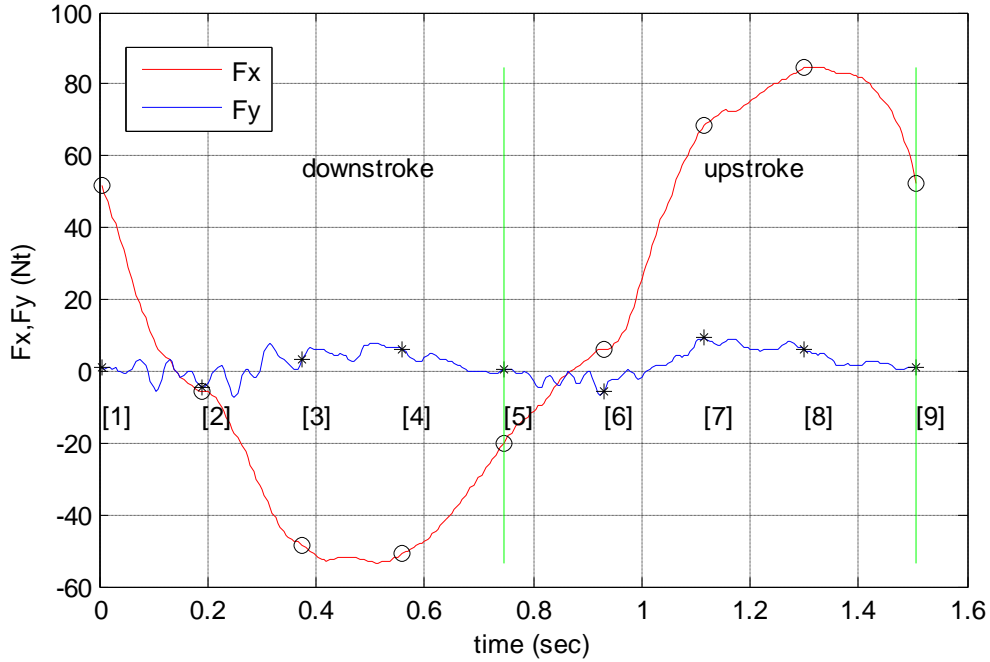
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	50,118	-0,037	0,000
2	0,230	-6,707	0,460	-0,433
3	0,455	-47,739	7,765	-0,585
4	0,680	-49,316	5,526	-0,402
5	0,905	-21,212	-0,799	-0,033
6	1,130	8,155	-1,740	0,350
7	1,355	63,980	9,680	0,575
8	1,580	77,998	5,481	0,482
9	1,830	40,766	-0,289	0,021

trailing edge

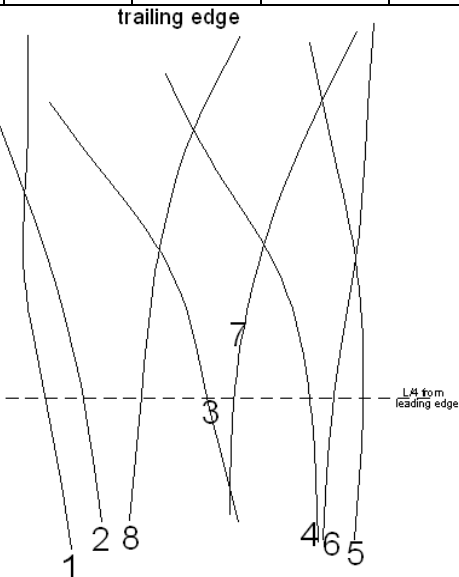


FIN H

V=0.9 m/s T=1.508 s Ale=0.275 m Ate=0.395 m
 Fx max=84.7948 N Fy max=9.2375 N %EC=10.3822
 %ECupstroke=8.9967 %ECdownstroke=12.7341 St=0.29103
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system

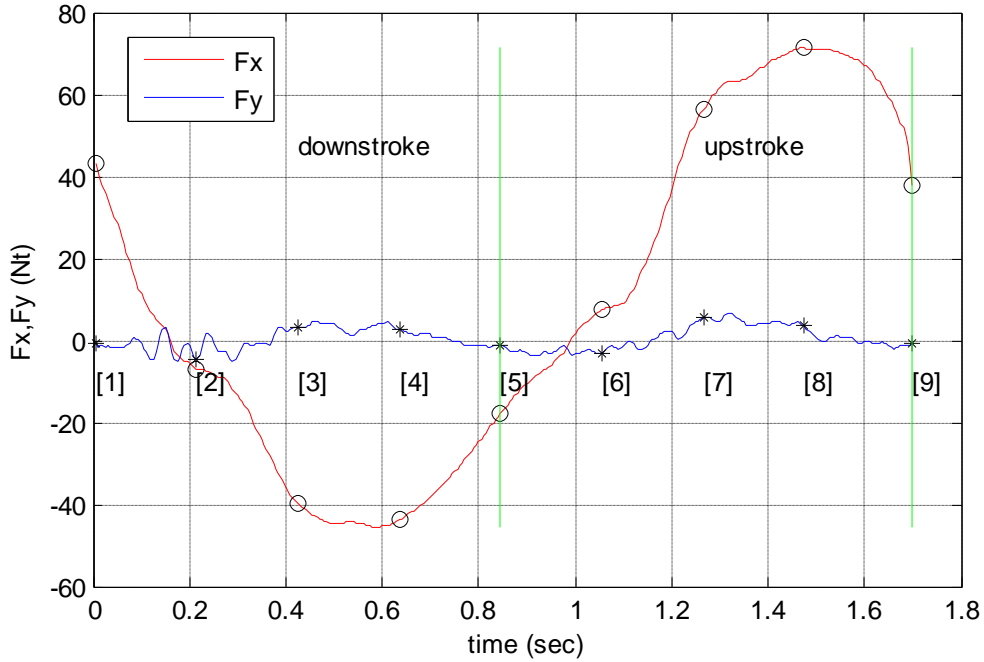


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	51,937	0,774	0,000
2	0,190	-5,493	-4,753	-0,475
3	0,375	-48,371	3,183	-0,648
4	0,560	-50,937	6,197	-0,451
5	0,745	-19,951	0,484	-0,040
6	0,930	6,273	-5,901	0,387
7	1,115	68,429	9,238	0,637
8	1,300	84,405	6,101	0,535
9	1,505	52,495	0,883	0,031

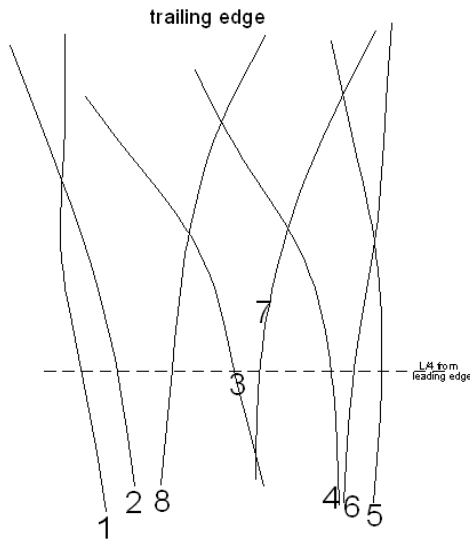


FIN H

V=0.9 m/s T=1.7011 s Ale=0.273 m Ate=0.42 m
 Fx max=71.3452 N Fy max=6.569 N %EC=2.9397
 %ECupstroke=2.9814 %ECdownstroke=2.8687 St=0.27433
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system

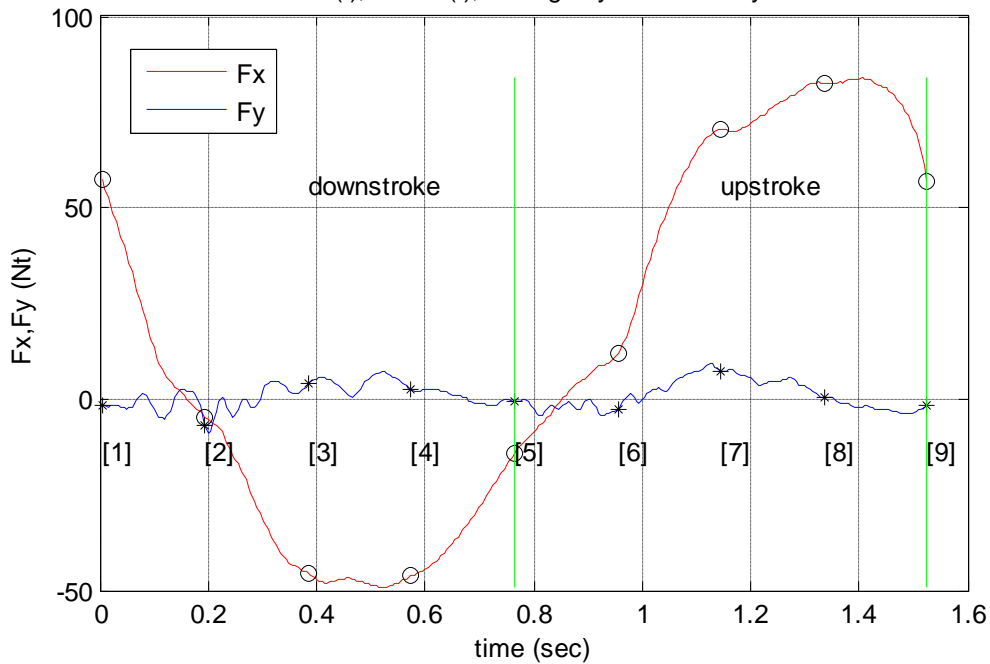


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	43,123	-0,818	0,000
2	0,215	-6,930	-4,538	-0,431
3	0,425	-39,834	3,377	-0,583
4	0,635	-43,827	2,862	-0,399
5	0,845	-17,776	-1,197	-0,025
6	1,055	7,487	-3,003	0,359
7	1,265	56,180	5,583	0,577
8	1,475	71,278	3,511	0,469
9	1,700	37,833	-0,714	0,020

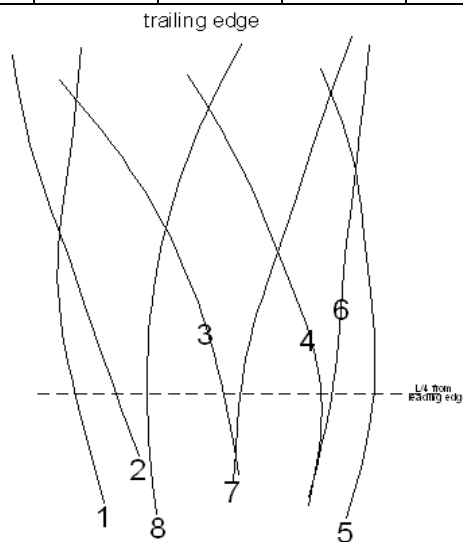


FIN H

V=1 m/s T=1.5298 s Ale=0.3 m Ate=0.437 m
 Fx max=83.8415 N Fy max=9.2058 N %EC=4.7157
 %ECupstroke=3.8023 %ECdownstroke=6.5065 St=0.28566
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system

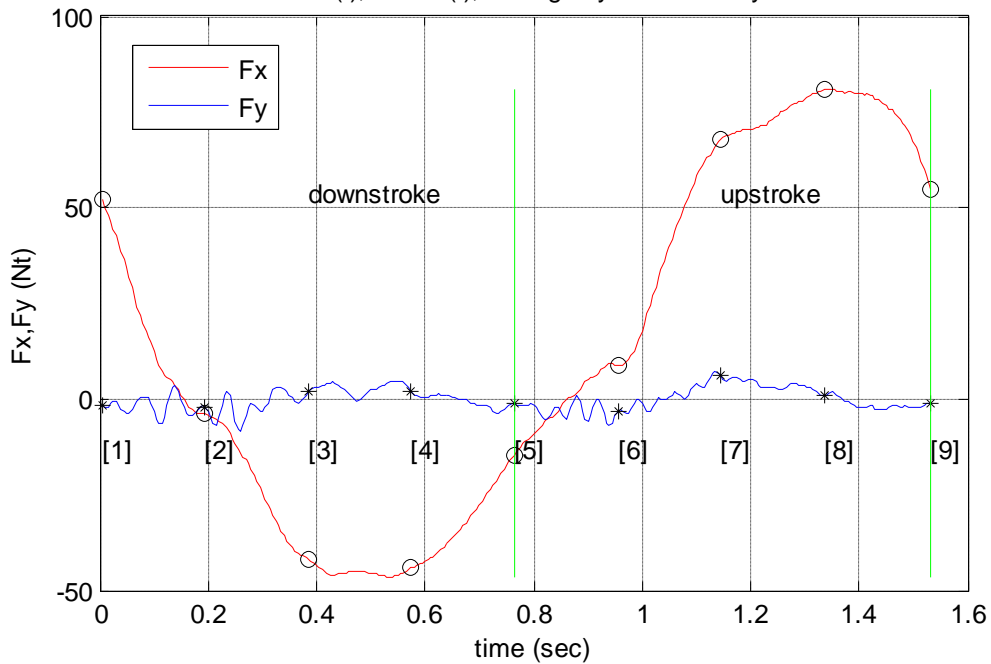


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	57,161	-1,676	0,000
2	0,195	-4,689	-6,975	-0,555
3	0,385	-45,719	3,913	-0,741
4	0,575	-46,335	2,341	-0,496
5	0,765	-13,981	-0,681	-0,020
6	0,955	11,847	-2,642	0,464
7	1,145	70,614	7,361	0,735
8	1,335	82,724	0,563	0,586
9	1,525	57,044	-1,895	0,041

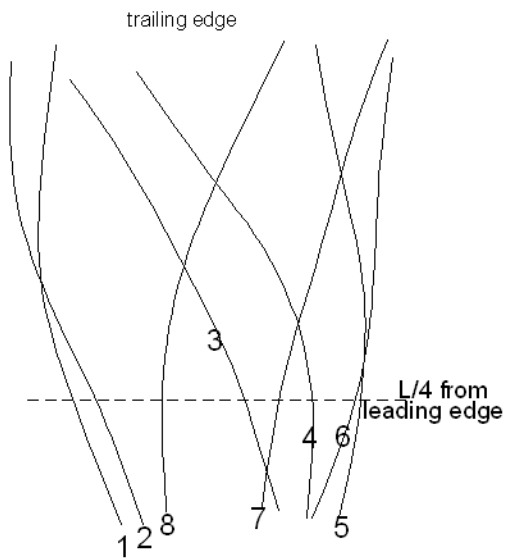


FIN H

V=1.1 m/s T=1.5348 s Ale=0.25 m Ate=0.43 m
 Fx max=80.9153 N Fy max=7.2743 N %EC=-0.7934
 %ECupstroke=0.19092 %ECdownstroke=-2.7427 St=0.25469
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system

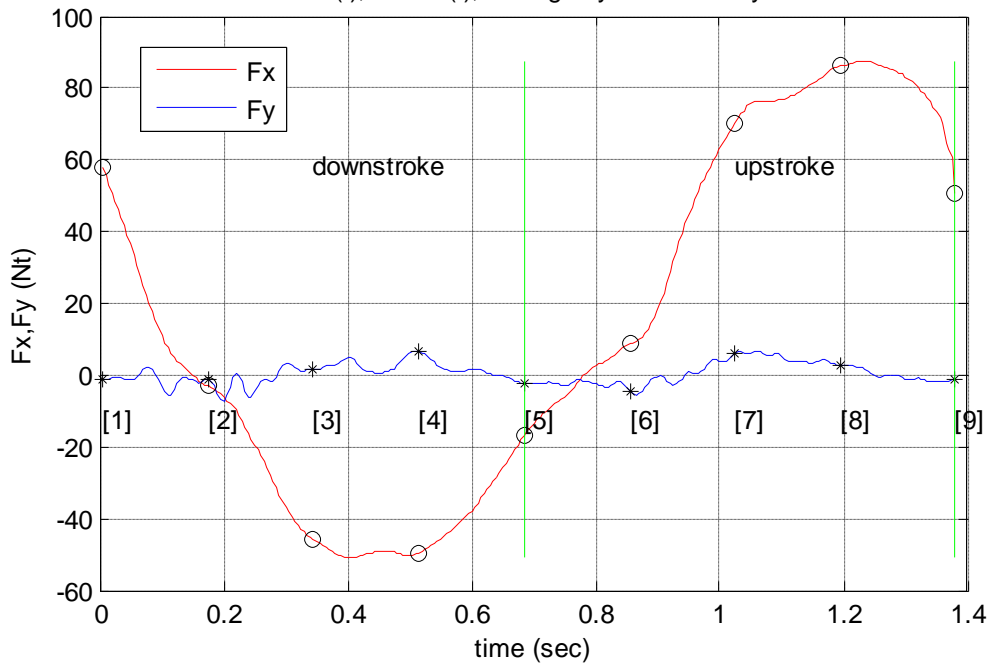


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	52,366	-1,841	0,000
2	0,195	-3,904	-2,011	-0,495
3	0,385	-41,903	2,006	-0,667
4	0,575	-44,242	2,007	-0,453
5	0,765	-14,591	-1,373	-0,024
6	0,955	8,717	-3,283	0,415
7	1,145	67,832	6,035	0,661
8	1,335	80,742	1,081	0,532
9	1,530	54,697	-1,150	0,037

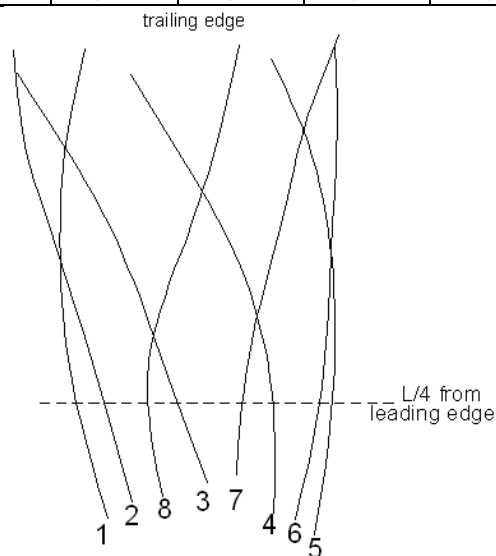


FIN H

$V=1.1 \text{ m/s}$ $T=1.3817 \text{ s}$ $A_{le}=0.26 \text{ m}$ $A_{te}=0.41 \text{ m}$
 $F_x \text{ max}=87.7145 \text{ N}$ $F_y \text{ max}=6.8461 \text{ N}$ $\%EC=2.6798$
 $\%EC_{upstroke}=2.4532$ $\%EC_{downstroke}=3.1214$ $St=0.26977$
 $F_{vertical}(t), F_{thrust}(t)$, average cycle for X-Y system

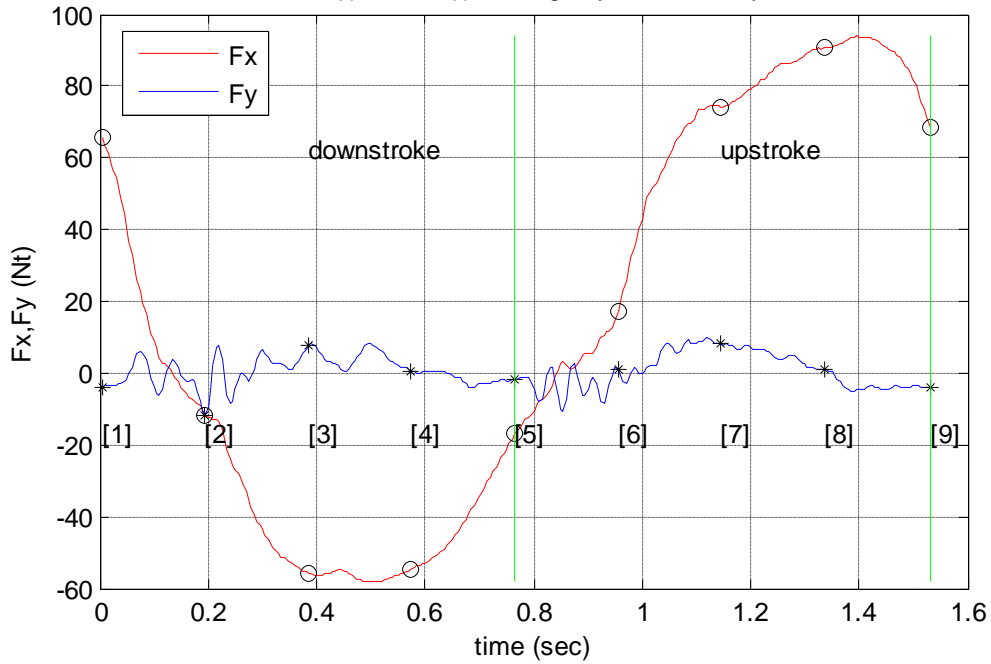


position	time (sec)	F _x (Nt)	Thrust F _y (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	57,965	-1,151	0,000
2	0,175	-3,082	-1,146	-0,537
3	0,345	-45,917	1,501	-0,730
4	0,515	-49,554	6,568	-0,504
5	0,685	-16,938	-2,177	-0,040
6	0,855	8,623	-4,489	0,441
7	1,025	70,296	6,156	0,719
8	1,195	86,261	2,942	0,597
9	1,380	50,851	-1,337	0,033



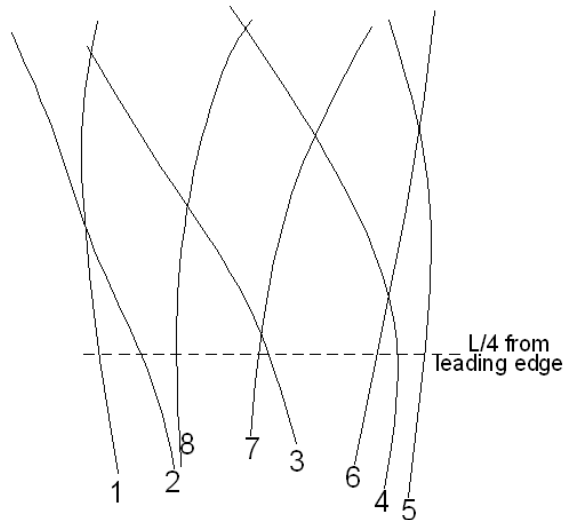
FIN H

V=1.2 m/s T=1.5308 s Ale=0.36 m Ate=0.53 m
 Fx max=93.8857 N Fy max=9.7059 N %EC=2.9392
 %ECupstroke=2.6024 %ECdownstroke=3.5231 St=0.28851
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system



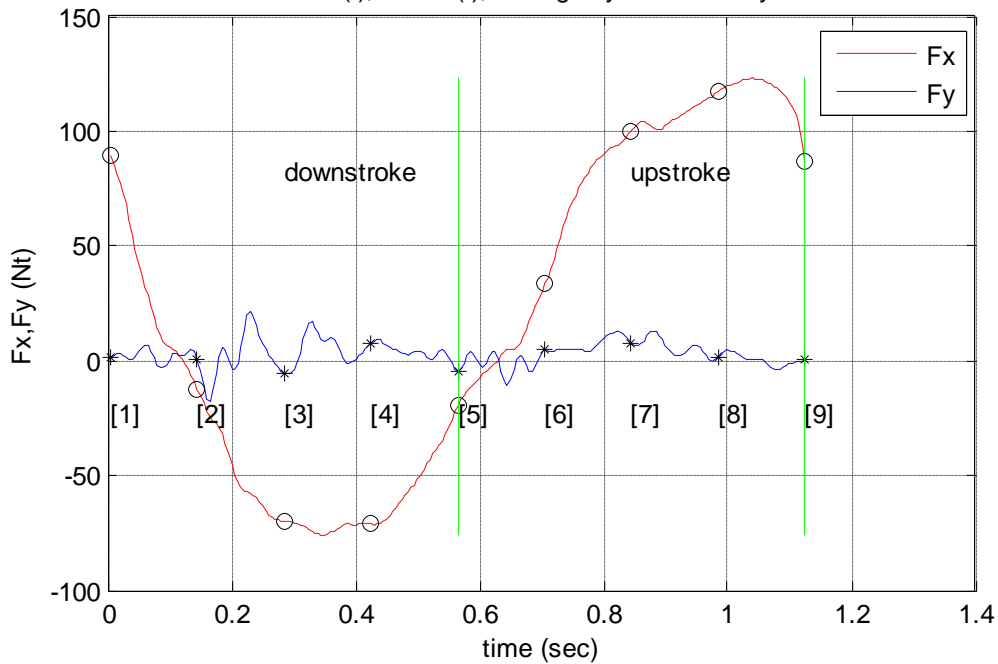
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	65,831	-4,077	0,000
2	0,195	-11,538	-11,960	-0,631
3	0,385	-55,849	7,554	-0,835
4	0,575	-54,492	0,713	-0,554
5	0,765	-17,000	-1,892	-0,024
6	0,955	17,210	0,855	0,515
7	1,145	74,296	8,032	0,828
8	1,335	90,691	1,081	0,668
9	1,530	68,620	-4,228	0,032

trailing edge



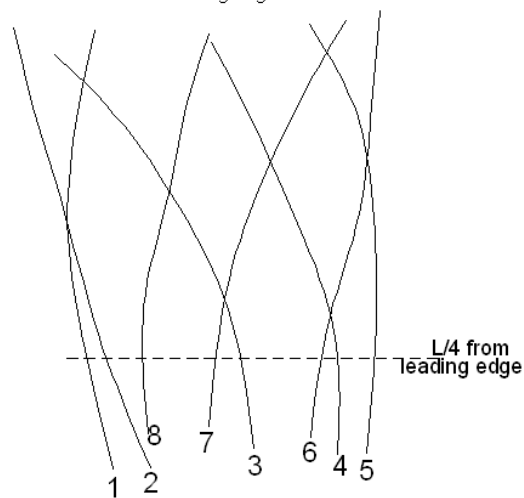
FIN H

V=1.2 m/s T=1.1264 s Ale=0.33 m Ate=0.478 m
 Fx max=123.1723 N Fy max=21.4213 N %EC=8.2911
 %ECupstroke=6.1881 %ECdownstroke=12.0653 St=0.35363
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Y system



position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	89,660	1,890	0,000
2	0,145	-12,093	0,898	-0,785
3	0,285	-70,135	-5,349	-1,048
4	0,425	-71,203	7,742	-0,700
5	0,565	-19,252	-4,677	-0,030
6	0,705	33,391	4,944	0,653
7	0,845	100,113	7,868	1,040
8	0,985	117,117	1,344	0,831
9	1,125	87,131	0,479	0,058

trailing edge

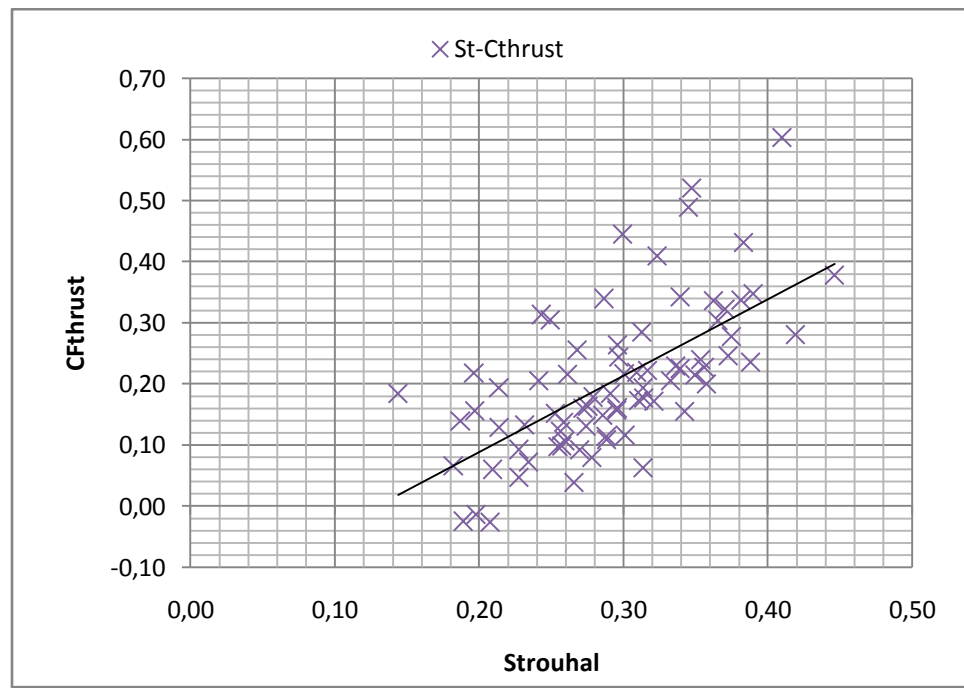


4.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων

4.2.1 Επίδραση του αριθμού Strouhal στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης και στα δυναμικά χαρακτηριστικά των πεδίων

Η προσπάθεια συσχέτισης των δυναμικών αποκρίσεων (F_x , F_y) του κάθε πεδίου με τις βασικές παραμέτρους της κίνησής τους (πλάτος, περίοδος, μεταφορική ταχύτητα) έγινε με χρήση αδιάστατων μεγεθών ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση όλων των παραμέτρων.

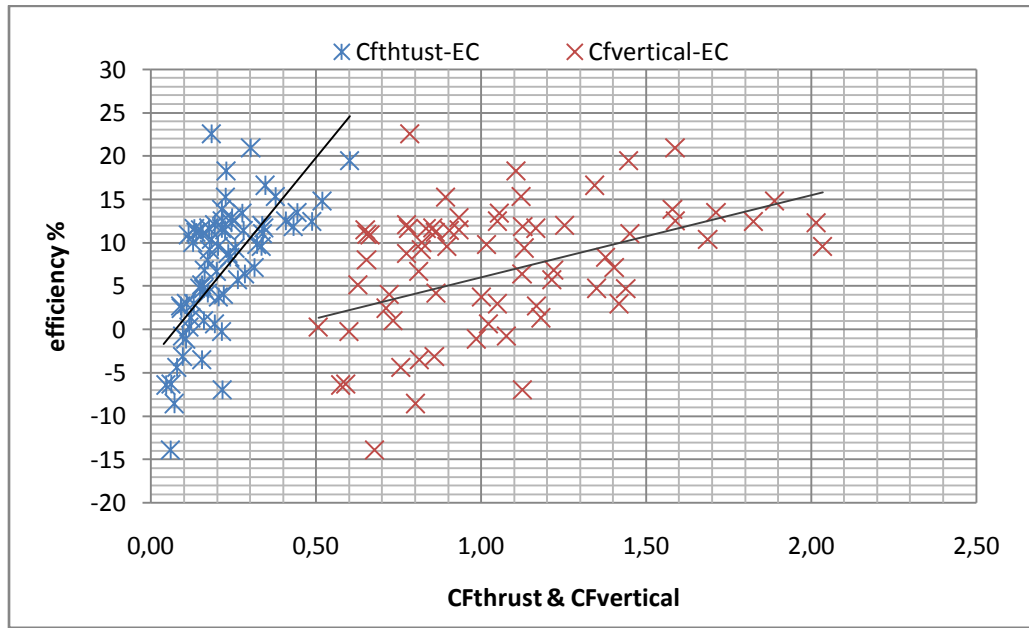
Η μέση χρονικά ώση ($F_{y_average}$) αδιαστατοποιημένη με το γινόμενο της δυναμικής πίεσης ($0,5 \cdot \rho \cdot u^2$) του ελεύθερου ρεύματος του ρευστού, επί το εμβαδόν του περυγίου (SA) δείχνεται στο **σχήμα 1** συναρτήσει του αριθμού $St = A \cdot t \cdot f / V$, παρουσιάζοντας μια αύξουσα τάση.



Σχήμα 1: Μεταβολή συντελεστή ώσης συναρτήσει του Strouhal

Στο **σχήμα 2** φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή ώσης CF_{thrust} και του συντελεστή της πλάγιας δύναμης $CF_{vertical}$ συναρτήσει του υδροδυναμικού

βαθμού απόδοσης EC . Παρατηρείται ότι με την αύξηση και των δύο αυτών συντελεστών αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης , με την διαφορά ότι ο ρυθμός μεταβολής της απόδοσης συναρτήσει του συντελεστή ώσης είναι πολύ μεγαλύτερος απ’ αυτόν, συναρτήσει, του συντελεστή της πλάγιας δύναμης. Συνεπώς η ώση επιδρά αποφασιστικά στην απόδοση του πεδίου.

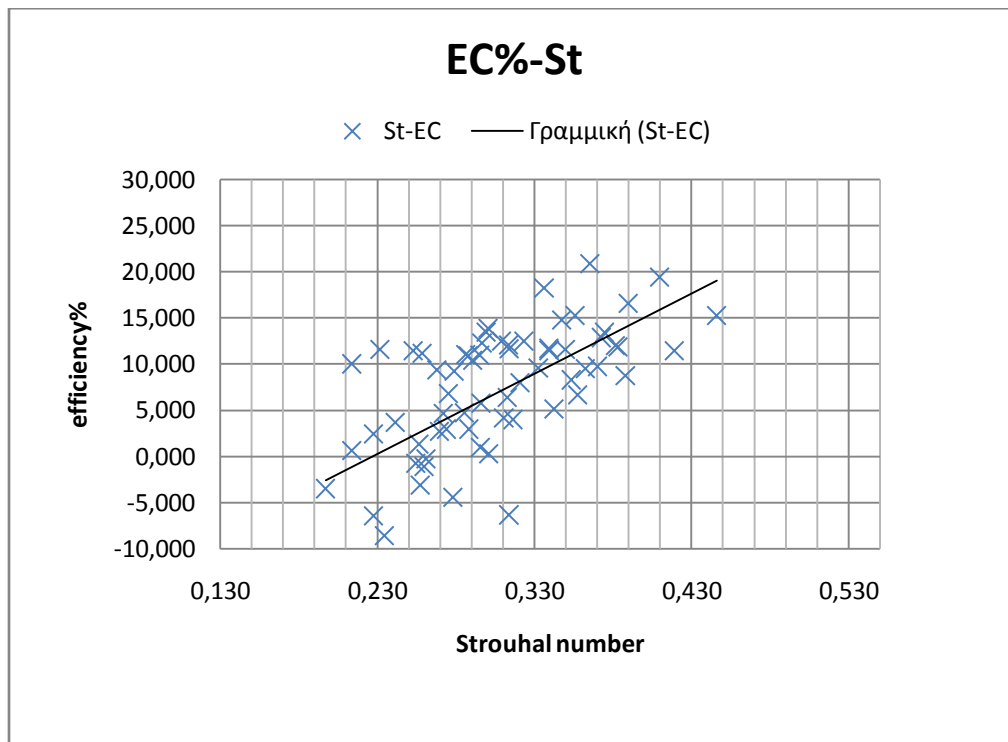


Σχήμα 2 : Επίδραση του συντελεστή ώσης και του συντελεστή πλάγιας δύναμης στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης

Στις μελέτες των ταλαντευόμενων πτερυγίων, ο αριθμός Strouhal χαρακτηρίζεται ως καθοριστικός παράγοντας για την απόδοση του συστήματος. Πειραματικές μελέτες σε πτερύγια που εκτελούν κατακόρυφη και ημιπεριστροφική ταλάντωση (βλέπε Triantafyllou et al.,2000) έδειξαν ότι η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται σε ένα περιορισμένο εύρος αριθμών St μεταξύ 0.2 και 0.5. Άλλες μελέτες (Fish and Rohr,1999; Nicolas et al.,2007) έχουν δείξει ότι το παραπάνω επιβεβαιώνεται στα περισσότερα ψάρια, στα δελφίνια και στους έμπειρους κολυμβητές με μονοπέδιλα σε ένα εύρος του αριθμού St μεταξύ 0.25 και 0.4.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι δοκιμές των πτερυγίων καλύπτουν ένα εύρος αριθμών Strouhal που κυμαίνεται από 0,18 έως 0,45. Η επίδραση του αριθμού Strouhal στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης φαίνεται στο **σχήμα 3**.

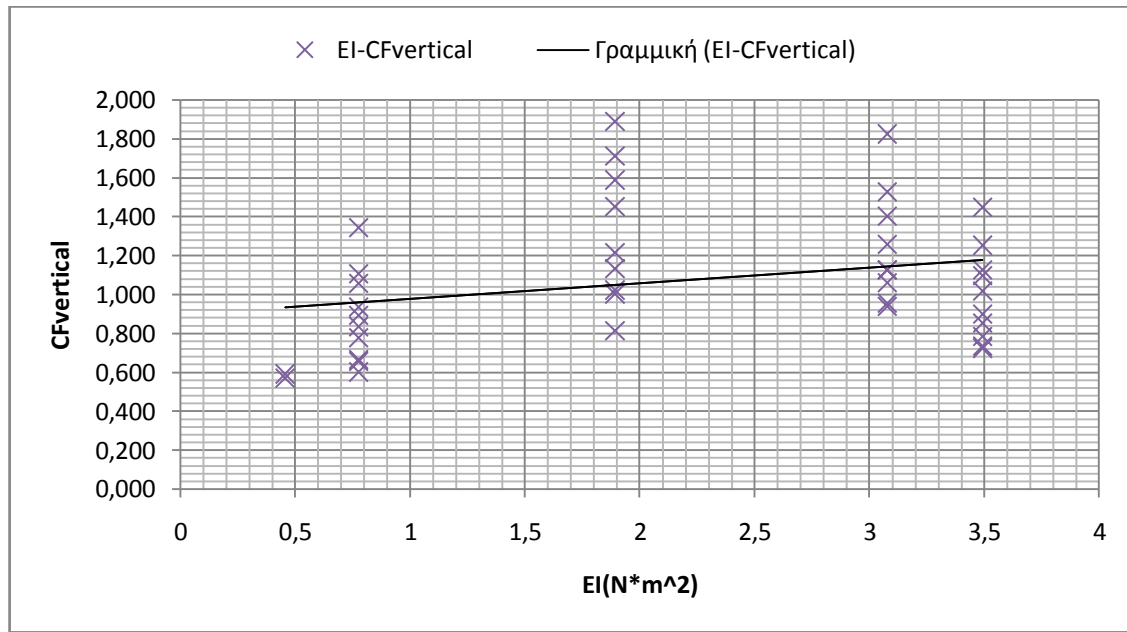
Σ' αυτό το διάστημα η αύξηση του St έχει θετική επίδραση στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης, γεγονός που επιβεβαιώνει τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές.



Σχήμα 3: Υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει του Strouhal

4.2.2 Επίδραση της ακαμψίας στις παραγόμενες δυνάμεις

Στο **σχήμα 4** φαίνεται η επίδραση της ακαμψίας EI ($N \cdot m^2$) στον συντελεστή της πλάγιας δύναμης $CF_{vertical}$. Η ακαμψία λογίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών ακαμψίας κατά τις δύο πλευρές κάμψης του κάθε πτερυγίου ($EI_{upstroke} + EI_{downstroke} / 2$), έτσι όπως αυτές υπολογίστηκαν στην παράγραφο (3.3.2). Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του βαθμού της ακαμψίας αυξάνεται και η ασκούμενη στο πτερύγιο πλάγια δύναμη.



Σχήμα 4: Επίδραση της ακαμψίας στον συντελεστή πλάγιας δύναμης

Στην παρούσα εργασία δεν προέκυψε ευθεία συσχέτιση της παραγόμενης ώσης με την ακαμψία του κάθε πεδίου, παρά μόνο με το πλάτος ταλάντωσης της ακμής εκφυγής του πτερυγίου μέσω του αριθμού Strouhal.

4.2.3 Συσχέτιση της παραμόρφωσης των πτερυγίων με τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά

Στην παράγραφο (4.1.6) παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής των δυνάμεων κατά την διάρκεια μιας περιόδου , το σχήμα της λεπίδας των πτερυγίων σε εννιά χρονικές στιγμές και οι αντίστοιχες τιμές των δυνάμεων και της εφαπτομενικής ταχύτητας στο σημείο πίεσης ($L/4$ from leading edge) γι' αυτές τις χρονικές στιγμές.

Δύο τυπικές περιπτώσεις που αφορούν τα πέδιλα A & C με περίοδο ταλάντωσης $T=1,6$ s ($\pm 0,06$ s) και υπό μεταφορική ταχύτητα $V=0,8$ m/s, φαίνονται παρακάτω προς σύγκριση (**σχήματα 6α, 6β**)

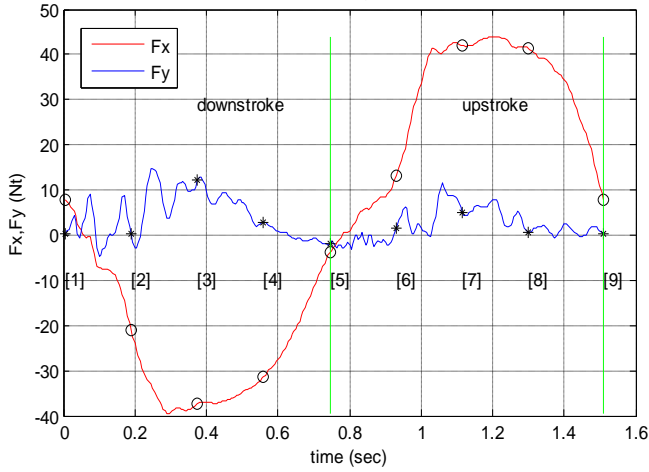
Τυπικό χαρακτηριστικό όλων των κυματομορφών της πλάγιας δύναμης F_x , είναι ότι παρουσιάζουν την μέγιστη τιμή τους κατά την αριστερόστροφη κίνηση (upstroke), γεγονός που τεκμηριώνεται απ' το ότι όλα τα πέδιλα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακαμψία κατά αυτόν τον τρόπο παραμόρφωσής σε σύγκριση μ' αυτόν κατά την δεξιόστροφη κίνησή τους ($E_{\text{upstroke}} > E_{\text{downstroke}}$) (βλέπε πίνακα3 παράγραφος 3.3.2). Για όλα τα πτερύγια εκτός των B & G η δεξιόστροφη (downstroke) κίνηση αποτελεί την φάση κατά την οποία επιτυγχάνονται υψηλές ωστικές δυνάμεις με αντίστοιχη εμφάνιση μικρότερων πλάγιων δυνάμεων (σε σχέση με την upstroke), συμβάλλοντας καθοριστικά στην τιμή του υδροδυναμικού βαθμού απόδοσης.

Απ' την μελέτη των τιμών των δυνάμεων και της εφαπτομενικής ταχύτητας των πτερυγίων στο σημείο πίεσης τους, στις 9 χρονικές στιγμές κατά την διάρκεια ενός κύκλου, προκύπτει ότι υπάρχει χρονική ταύτιση στην εμφάνιση των μέγιστων τιμών της πλάγιας (F_x) και της ωστικής (F_y) δύναμης, με την μεγιστοποίηση της εφαπτομενικής ταχύτητας. Οι θέσεις (position) κατά τις οποίες συμβαίνει αυτό είναι οι 3&4 κατά την δεξιόστροφη κίνηση (downstroke) και οι θέσεις 7&8 κατά την αριστερόστροφη κίνηση (upstroke) (βλέπε παρακάτω πίνακα 1)

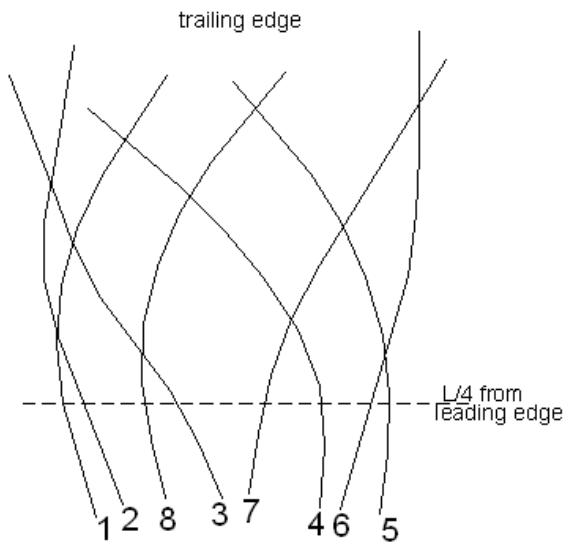
Η μέγιστη εφαπτομενική ταχύτητα εμφανίζεται δύο φορές κατά την διάρκεια μιας περιόδου, όταν το θεωρούμενο ως σημείο πίεσης του πτερυγίου ($L/4$ από την ακμή πρόσπτωσης LE) περνάει απ' τον άξονα της μεταφορικής κίνησης (άξονας Y), έτσι όπως προέκυψε απ' την κινηματική ανάλυση του βραχίονα της πειραματικής διάταξης (παράγραφος 3.5.3). Οι τιμές της εφαπτομενικής ταχύτητας κυμαίνονται από 0 έως 0.87 m/s στις μέγιστες συχνότητες ταλάντωσης.

FIN A

V=0.8 m/s T=1.5124 s Ale=0.35 m Ate=0.54 m
 Fx max=43.8098 N Fy max=14.7388 N %EC=15.2776
 %ECupstroke=10.0648 %ECdownstroke=21.4302 St=0.44631
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem



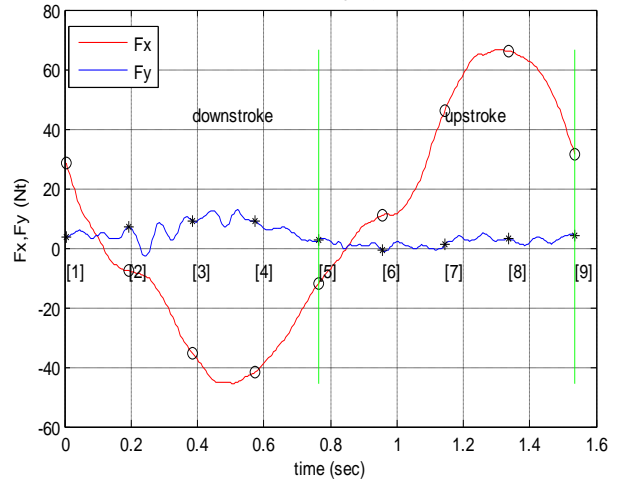
position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	7,937	0,405	0,000
2	0,190	-21,025	0,207	-0,622
3	0,375	-37,378	12,097	-0,835
4	0,560	-31,405	2,821	-0,572
5	0,745	-3,841	-1,753	-0,057
6	0,930	13,035	1,443	0,480
7	1,115	41,878	5,044	0,815
8	1,300	41,414	0,471	0,707
9	1,510	7,947	0,413	0,038



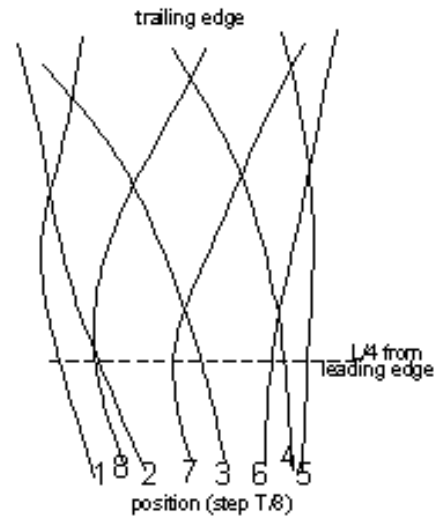
Σχήμα 6α: FIN A, V=0.8m/s, T=1.52s

FIN C

V=0.8 m/s T=1.5386 s Ale=0.292 m Ate=0.45 m
 Fx max=66.5863 N Fy max=12.7076 N %EC=20.8973
 %ECupstroke=8.044 %ECdownstroke=41.6846 St=0.36559
 Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-Ysystem

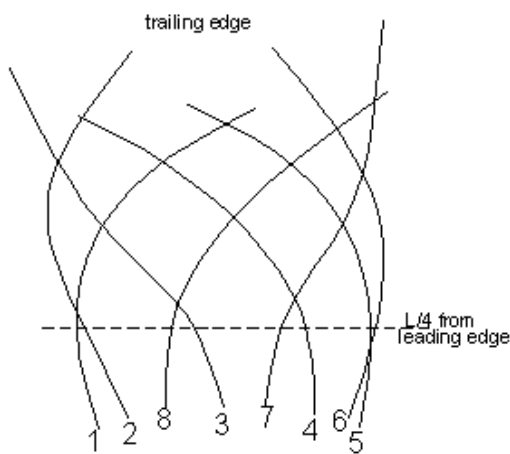


position	time (sec)	Fx (Nt)	Thrust Fy (Nt)	v (m/s) L/4fromLE
1	0,005	28,306	3,511	0,000
2	0,195	-7,790	7,008	-0,528
3	0,385	-35,489	9,002	-0,710
4	0,575	-41,567	8,846	-0,483
5	0,765	-11,723	2,925	-0,031
6	0,955	10,839	-0,642	0,434
7	1,145	46,304	1,125	0,702
8	1,335	66,222	3,050	0,575
9	1,535	31,655	4,125	0,035

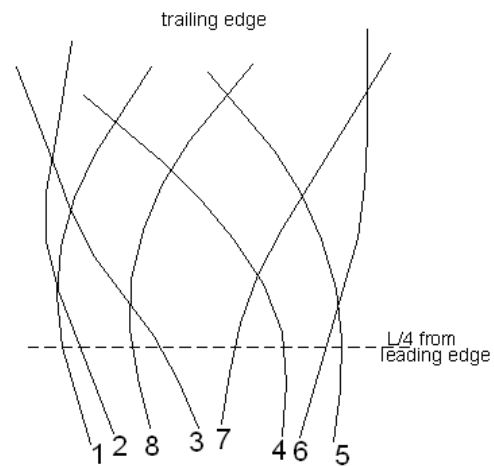


Σχήμα 6β: FIN C, V=0.8m/s, T=1.54s

Η οπτική παρατήρηση της μορφής των πτερυγίων δεν προσφέρει ουσιαστικά συμπεράσματα, ως προς την σύνδεση σχήματος και δυναμικής απόκρισης, πράγμα που απαιτεί γνώση των συνθηκών ροής γύρω από αυτά. Παραταύτα είναι φανερό πως η ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος έχει άμεση επίδραση στον βαθμό παραμόρφωσης των πτερυγίων, καθώς αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη υπό μηδενική μεταφορική ταχύτητα, σε σχέση με την παραμόρφωση υπό μεταφορική ταχύτητα (**σχήματα 7α,7β**). Το παραπάνω τεκμηριώνεται και από την παρουσία μεγαλύτερων ασκούμενων πλάγιων δυνάμεων F_x στα πτερύγια υπό μηδενική ταχύτητα ($V=0\text{m/s}$).



Σχήμα 7α: παραμόρφωση πτερυγίου
FIN A, $V=0\text{ m/s}$, $T=1.67\text{ s}$



Σχήμα 7β: παραμόρφωση πτερυγίου
FIN A, $V=0.8\text{ m/s}$, $T=1.52\text{ s}$

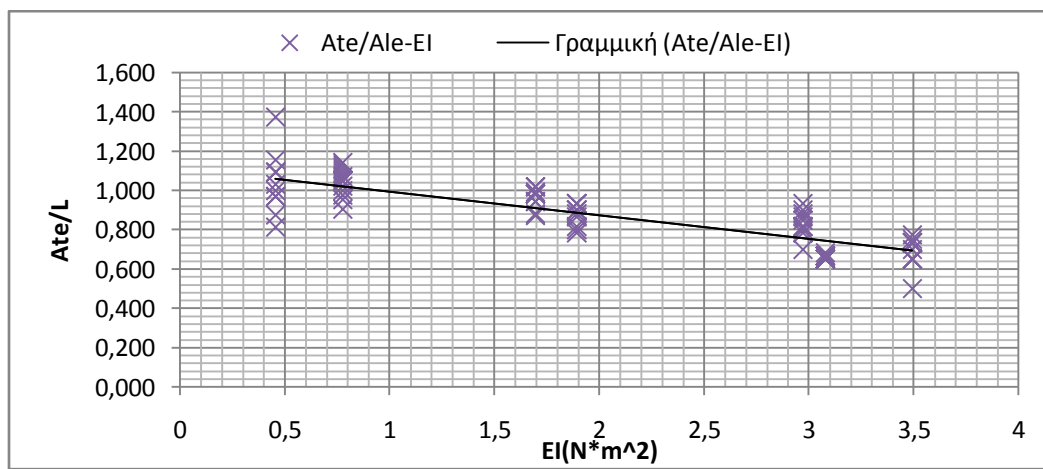
Η διαφορά του μέτρου της ακαμψίας μεταξύ των πτερυγίων αποτυπώνεται και στην παραμόρφωσή τους, καθώς σε γενικές γραμμές τα πιο άκαμπτα πτερύγια B, C, H (βλέπε **εικόνα 6β**) παραμορφώνονται λιγότερο απ' αυτά μικρότερης ακαμψίας A, D, E, F (βλέπε **εικόνα 6α**). Ως προς το κάθε πέδιλο, η διαφορά της ακαμψίας μεταξύ των δύο πλευρών του (Eiupstroke, Eldownstroke), δεν φαίνεται να έχει άμεση επίδραση στον βαθμό παραμόρφωσης. Όμως, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων, δηλαδή η τοποθέτηση της λεπίδας υπό γωνία ως προς την θήκη, φαίνεται να επηρεάζουν το σχήμα των πτερυγίων στο μέτωπο πρόσπτωσης. Έτσι κατά την δεξιόστροφη κίνηση (downstroke) η περιοχή απ' την ακμή πρόσπτωσης έως το $\frac{1}{4}$ του μήκους του απ' αυτήν, ευθυγραμμίζεται ως προς άξονα παράλληλο στον βραχίονα.

4.2.4 Η κίνηση της ακμής εκφυγής (trailing edge) των πτερυγίων

Μια άλλη σημαντική παράμετρος στην μελέτη της μορφής των πτερυγίων αποτελεί η κίνηση την ακμής εκφυγής (trailing edge). Λόγω της ελαστικότητας, η ακμή εκφυγής ακολουθεί με χρονική καθυστέρηση την φορά κίνησης της ακμής πρόσπτωσης κατά την μετάβαση από την αριστερόστροφη στην δεξιόστροφη φάση και αντίστροφα. Η μέτρηση αυτής της χρονικής καθυστέρησης έγινε για τις ταχύτητες $V=0\text{m/s}$ & $V=0.8\text{m/s}$, απ' τα βίντεο των δοκιμών.

Η ακμή εκφυγής παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή της ώσης, λόγω της δημιουργίας δινών στον ομόρρου. Στην εργασία των Saminy et al., χρησιμοποιώντας την θεωρία του Lighthill's, βρίσκεται ότι η ώση είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας της ακμής εκφυγής. Ακόμα περισσότερο στην εργασία των Heathcote et al., εξετάστηκε η παραγωγή ώσης από εύκαμπτη ταλαντευόμενη πλάκα σε μηδενική ελεύθερη ροή, βρέθηκε ότι το πλάτος και η γωνία φάσης της κίνησης της ακμής εκφυγής επιδρά στην ενέργεια των δινών και άρα στην παραγόμενη ώση. Στην εργασία των Mathioulakis & Bardis (2011) η δημιουργία μεγάλων ωστικών δυνάμεων σχετίζεται με την αλλαγή κατεύθυνσης της ακμής εκφυγής της λεπίδας στο πρώτο μισό του κάθε μισού κύκλου, όπου και λαμβάνει χώρα η επιτάχυνση της λεπίδας του πτερυγίου. Είναι προφανές ότι η ισχύς των δημιουργούμενων δινών είναι αύξουσα συνάρτηση της ταχύτητας της ακμής εκφυγής, αφού είναι η λεπίδα αυτή που αναγκάζει το ρευστό να κινηθεί κατά μήκος της και έτσι να δημιουργήσει δίνες.

Στο **σχήμα 8** φαίνεται ότι με την αύξηση της ακαμψίας μειώνεται το πλάτος ταλάντωσης της ακμής εκφυγής του κάθε πτερυγίου (A_{te}), που λογίζεται ως ποσοστό του μήκους του πτερυγίου κάθε φορά (A_{te}/L).



Σχήμα 8: Επίδραση της ακαμψίας στο αδιάστατο πλάτος ταλάντωσης της ακμής εκφυγής

Στην τρίτη στήλη των **πινάκων 1&2** φαίνονται για όλα τα πτερύγια και για ταχύτητες $V=0\text{m/s}$ & $V=0.8\text{m/s}$ αντίστοιχα, οι τιμές της χρονικής καθυστέρησης της ακμής εκφυγής κατά την μετάβαση απ' την κίνηση upstroke στην downstroke και αντίστροφα. Ο χρόνος 'καθυστέρησης' ποικίλει χωρίς να παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, παρουσιάζοντας τάσεις μείωσης για κάθε πτερύγιο με την μετάβαση από μηδενική μεταφορική ταχύτητα σε κανονικές ταχύτητες, ενώ η τιμή της ταχύτητας και της συχνότητας φαίνεται να παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Απ' τις τιμές του πίνακα φαίνεται ότι το μήκος των πτερυγίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον χρόνο υστέρησης, με τα μικρού μήκους πτερύγια (FIN D, FIN E) να εμφανίζουν χρόνους επαναφοράς της ακμής εκφυγής, πολύ μικρότερους (τάξεως 0,24 s) σε σχέση με τα μεγαλύτερου μήκους (τάξεως 0,32s). Η ακαμψία φαίνεται να επιδρά ελαφρώς μειωτικά στις τιμές του χρόνου καθυστέρησης.

			position Fxmax	position Fymax	χρόνος επαναφοαρ άς της TE dt(s)	Αρχικές τιμές FX κατά το ξεκίνημα των δυο φάσεων (up&down)	Χρονικό διάστημα μέχρι να μηδενιστούν οι αρχικές τιμές Fx(t=0), Fx(t=T/2)
FIN A	V=0m/s	up-down stroke (0-T/2)	2	2	0,4	7,40%	0,05
		down-up stroke (T/2-T)	7	7	0,44	8,50%	0,04
FIN B	V=0m/s	up-down stroke (0-T/2)	4	4	0,4	45,50%	0,19
		down-up stroke (T/2-T)	8	8	0,48	22%	0,15
FIN C	V=0m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	4	0,4	22,90%	0,11
		down-up stroke (T/2-T)	8	8	0,48	20%	0,09
FIN D	V=0m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	3	0,24	10,60%	0,04
		down-up stroke (T/2-T)	7	7	0,28	16,70%	0,07
FIN E	V=0m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	3	0,24	8,60%	0,04
		down-up stroke (T/2-T)	8	8	0,24	15,80%	0,07
FIN F	V=0m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	2	0,32	14,90%	0,04
		down-up stroke (T/2-T)	7	7	0,4	6%	0,03
FIN G	V=0m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	2	0,36	13,70%	0,06
		down-up stroke (T/2-T)	7	7	0,36	9,90%	0,03
FIN H	V=0m/s	up-down stroke (0-T/2)	4	4	0,32	56%	0,2
		down-up stroke (T/2-T)	8	8	0,36	38,70%	0,15

Πίνακας 1: Για $V=0\text{m/s}$, Θέσεις εμφάνισης των μέγιστων δυνάμεων, χρόνος (dt) καθυστέρησης την TE να ακολουθήσει την LE, βαθμός απόδοσης και οι τιμές των δυνάμεων κατά την μετάβαση απ' την upstroke στην downstroke και αντίστροφα καθώς και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι τον μηδενισμό τους

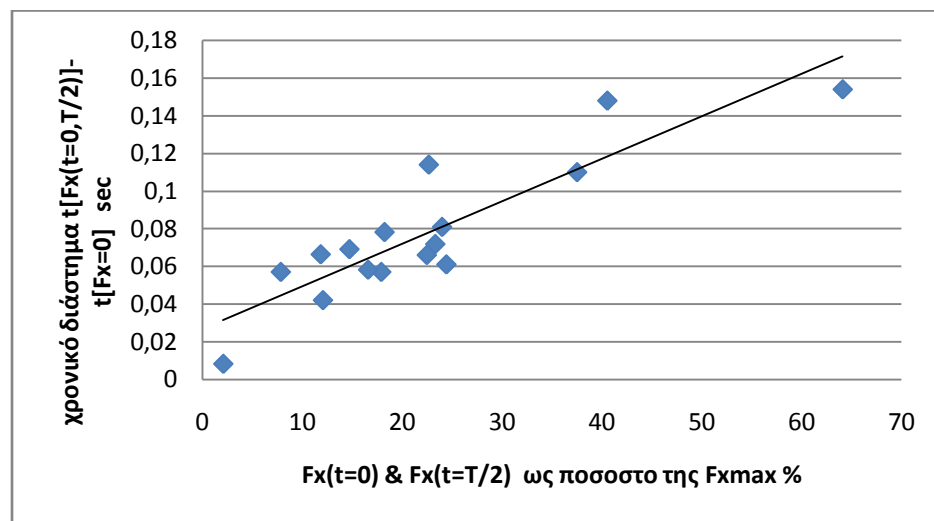
			position Fxmax	position Fymax	χρόνος επαναφοράς της TE dt(s)	Αρχικές τιμές FX κατά το ξεκίνημα των δυο φάσεων (up&down)	Χρονικό διάστημα μέχρι να μηδενιστούν οι αρχικές τιμές Fx(t=0), Fx(t=T/2)
FIN A	V=0,8m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	3	0,36	18%	0,05
		down-up stroke (T/2-T)	7	7	0,36	8,60%	0,03
FIN B	V=0,8m/s	up-down stroke (0-T/2)	4	4	0,36	40,70%	0,16
		down-up stroke (T/2-T)	8	8	0,36	8,50%	0,07
FIN C	V=0,8m/s	up-down stroke (0-T/2)	4	3	0,32	42,50%	0,12
		down-up stroke (T/2-T)	8	8	0,32	17,50%	0,09
FIN D	V=0,8m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	3	0,24	21%	0,08
		down-up stroke (T/2-T)	7	7	0,28	16,50%	0,08
FIN E	V=0,8m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	3	0,24	16%	0,06
		down-up stroke (T/2-T)	8	-	0,24	15,40%	0,08
FIN F	V=0,8m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	3	0,32	22,40%	0,08
		down-up stroke (T/2-T)	7	7	0,32	1,70%	0,02
FIN G	V=0,8m/s	up-down stroke (0-T/2)	3	3	0,36	23,60%	0,06
		down-up stroke (T/2-T)	7	7	0,36	19%	0,03
FIN H	V=0,8m/s	up-down stroke (0-T/2)	4	4	0,28	59,70%	0,16
		down-up stroke (T/2-T)	8	8	0,32	26%	0,14

Πίνακας 2: Για $V=0.8m/s$, Θέσεις εμφάνισης των μέγιστων δυνάμεων, χρόνος (dt) καθυστέρησης την TE να ακολουθήσει την LE, βαθμός απόδοσης και οι τιμές των δυνάμεων κατά την μετάβαση απ' την upstroke στην downstroke και αντίστροφα καθώς και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι τον μηδενισμό τους

Η επίδραση της υστέρησης κάθε περιοχής του πτερυγίου να συγχρονιστεί με την φορά της κίνησης της ακμής πρόσπτωσης, αποτυπώνεται και στα διαγράμματα μεταβολής των δυνάμεων κατά την διάρκεια μιας περιόδου. Συγκεκριμένα η μελέτη της κυματομορφής της πλάγιας δύναμης στα σημεία μετάβασης απ' την αριστερόστροφη (upstroke) στην δεξιόστροφη (downstroke) κίνηση και αντίστροφα, δηλαδή τις χρονικές στιγμές $t=0s$ και $t=T/2s$ αντίστοιχα, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τον βαθμό επαναφοράς της περιοχής εκφυγής των πτερυγίων κάθε φορά. Οι τιμές της πλάγιας δύναμης αυτές τις χρονικές στιγμές $[F_x(0), F_x(T/2)]$ φέρουν αντίθετα πρόσημα σε σχέση το πρόσημο κίνησης της ακμής πρόσπτωσης, ενώ τις χρονικές στιγμές που η πλάγια δύναμη μηδενίζεται, οι αντίρροπες δυνάμεις που ασκούνται στο πτερύγιο ισορροπούν. Κινηματικά αυτό σημαίνει ότι ένα μέρος του πτερυγίου τείνει να κινείται με την φορά κίνησης την ακμής πρόσπτωσης, ενώ ένα άλλο συνεχίζει να κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση. Η επαναφορά της ακμής εκφυγής (trailing edge) σε κατεύθυνση ομόρροπη με την ακμή πρόσπτωσης (leading edge) συμβαίνει αργότερα κατά το μέσο κάθε μισού κύκλου, όπως φαίνεται στις τιμές του **πίνακα 1** για $V=0.8m/s$.

Συνεπώς το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την αρχή ή την μέση ενός κύκλου, όπου η πλάγια δύναμη παίρνει τιμές $F_x(0)$, $F_x(T/2)$ αντίστοιχα, μέχρι τις στιγμές που αυτές μηδενίζονται, δείχνει την ταχύτητα με την οποία το πτερύγιο ανταποκρίνεται στις αλλαγές φοράς της κίνησής του, ενώ σηματοδοτεί την στιγμή που αρχίζει η πλάγια δύναμη να παράγει θετικό έργο συντελώντας στην δημιουργία ωστικών δυνάμεων. Οι τιμές αυτές φαίνονται στην πέμπτη στήλη των **πινάκων 1&2** και κυμαίνονται από 0,02s έως 0,15s και σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες των πτερυγίων.

Στο **σχήμα 9** φαίνεται ότι η μεταβολή των αρχικών τιμών της πλάγιας δύναμης [$F_x(0)$, $F_x(T/2)$] είναι αύξουσα συνάρτηση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μέχρι τον μηδενισμό τους.

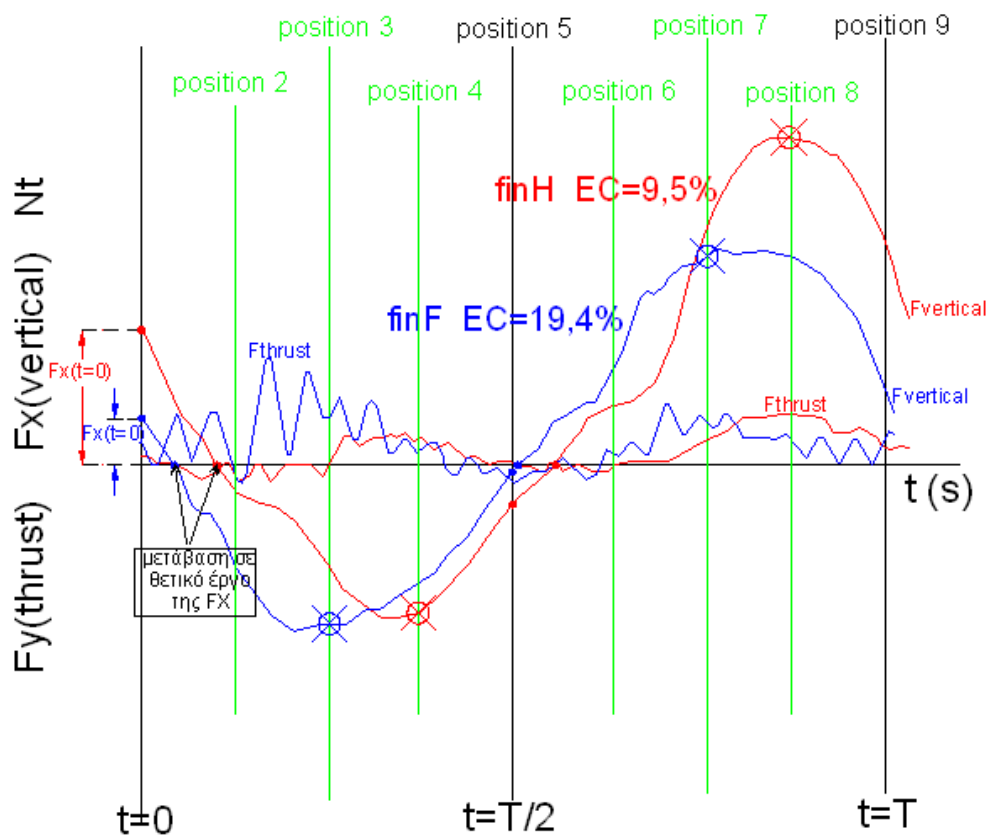


Σχήμα 9

Το μέτρο των τιμών της πλάγιας δύναμης τις στιγμές της μετάβασης [$F_x(0)$, $F_x(T/2)$] εκφράζονται ως ποσοστό της μέγιστης πλάγιας δύναμης (F_{xmax}) για κάθε πτερύγιο και για τις ταχύτητες $V=0m/s$ & $V=0.8m/s$ φαίνονται στην τέταρτη στήλη των **πινάκων 1&2**. Οι τιμές αυτές είναι αντιπροσωπευτικές για την συμπεριφορά του κάθε πτερυγίου σε όλες τις καταστάσεις δοκιμών, ενώ το μέτρο τους ως ποσοστό της μέγιστης πλάγιας δύναμης αποτελεί ένδειξη για τον βαθμό επαναφοράς του πτερυγίου σε συνθήκες θετικού έργου της πλάγιας δύναμης F_x . Η τιμή για την $F_x(t=0)$ κυμαίνεται από 16% έως 60% της F_{xmax} με τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται στα μικρού μήκους εύκαμπτα ($0.5 < EI < 1 N \cdot m^2$) πέδιλα (FIN D, FIN E), τις μεσαίες τιμές (20-25%) να εμφανίζονται στα μεγάλου μήκους μεσαίας ακαμψίας ($1,5 < EI < 2 N \cdot m^2$) πέδιλα (FIN A, F) και τις τιμές άνω του 40% να τις παίρνουν τα πιο άκαμπτα ($3 < EI < 3,5 N \cdot m^2$) πτερύγια

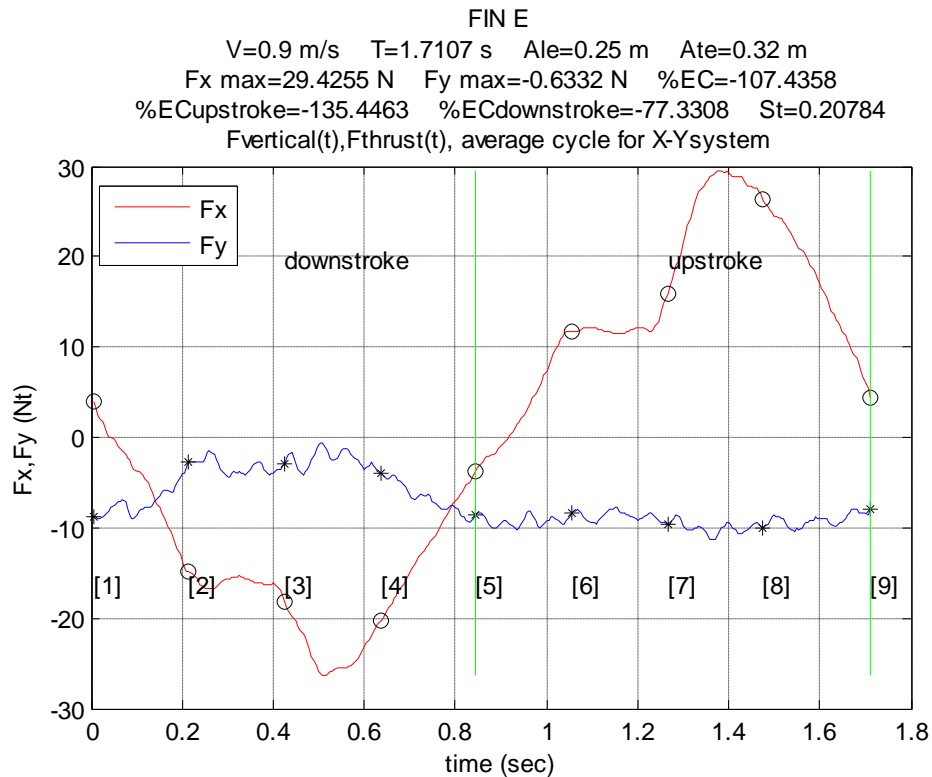
(FIN B,C,H). Παρόμοια είναι και τα συμπεράσματα για την $F_x(t=T/2)$ κατά την μετάβαση από την downstroke στην upstroke με την διαφορά ότι το εύρος των τιμών να είναι σαφώς μικρότερο μεταξύ 8% έως 26% της F_{xmax} .

Παρατηρείται ότι η καθυστέρηση στην επαναφορά του πτερυγίου σε κατάσταση θετικού έργου πλάγιας δύναμης (ίδια πρόσημα δύναμης F_x και εφαπτομενικής ταχύτητας $u(L/4$ from leading edge)) μετατοπίζει την φάση κατά την οποία εμφανίζεται μέγιστη ωστική δύναμη προς το δεύτερο μισό του κάθε μισού κύκλου, θέσεις (position) 4 & 8 (βλέπε δεύτερη στήλη των **πινάκων 1&2**), γεγονός που μειώνει το εύρος παραγωγής θετικής ωστικής δύναμης F_y . Η έντονη εμφάνιση αυτής της συμπεριφοράς έχει αρνητική επίδραση στον βαθμό απόδοσης των πτερυγίων (βλέπε πτερύγια B & H). Στο **σχήμα 10** φαίνονται σε αντιπαραβολή, δυο αντιπροσωπευτικές κυματομορφές των δυνάμεων για τα πτερύγια F & B που τεκμηριώνουν τα παραπάνω.



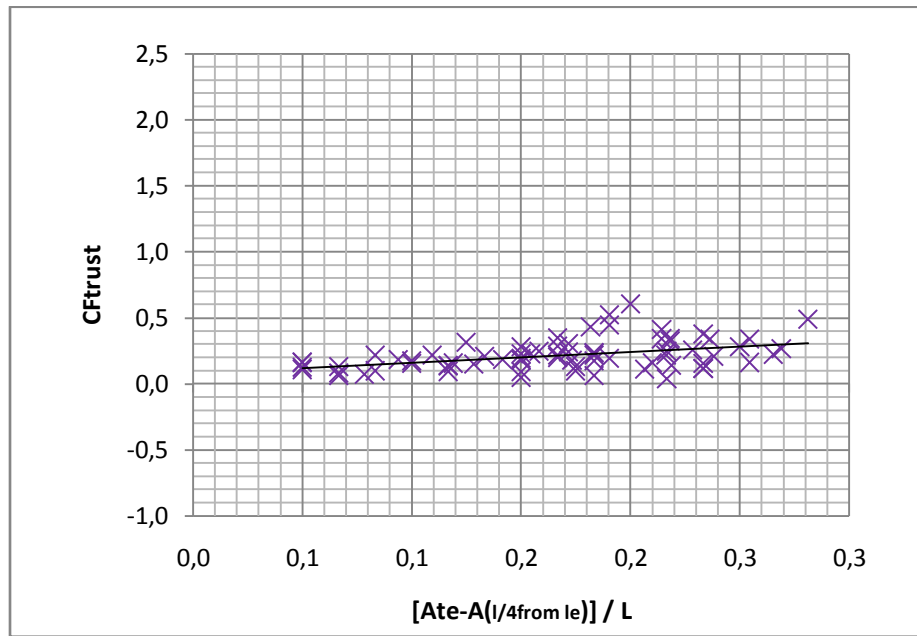
Σχήμα 9: αντιπαραβολή, δυο αντιπροσωπευτικών κυματομορφών των δυνάμεων για τα πτερύγια F & B

Στις καταστάσεις που τα πτερύγια δεν παράγουν ώση, το μεταβατικό στάδιο κατά το οποίο συντελείται σταδιακή αλλαγή φοράς όλων των περιοχών του πτερυγίου, αποτυπώνεται έντονα στην κυματομορφή της πλάγιας δύναμης, με την εμφάνιση έντονου 'σκαλοπατιού' κατά την αύξηση την πλάγιας δύναμης (βλέπε **σχήμα 10**). Η ύπαρξη σκαλοπατιού υποδηλώνει ότι η περιοχή κοντά στην ακμή εκφυγής μένει για κάποιο διάστημα ακίνητη μέχρι να αναγκαστεί σε κίνηση απ' την ακμή εκφυγής.

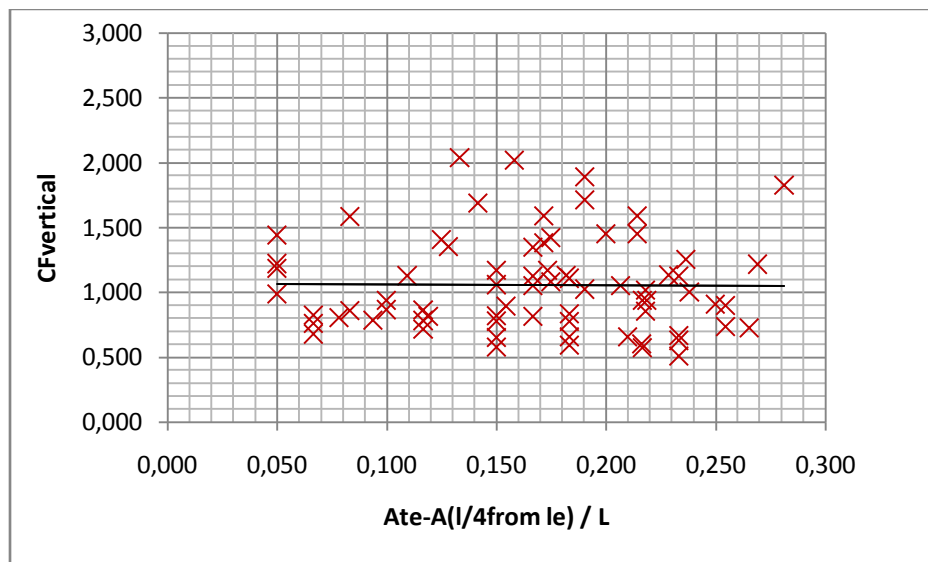


Σχήμα 10: Χαρακτηριστική κυματομορφή σε κατάσταση αρνητικής

Τέλος στο **σχήμα 11** φαίνεται η επίδραση στον συντελεστή ώσης, της αδιάστατης διαφοράς του πλάτους ταλάντωσης, μεταξύ της ακμής διαφυγής του πτερυγίου (trailing edge) και του θεωρούμενου ως σημείο πίεσης σε απόσταση L/4 απ' την ακμή πρόπτωσης. Διαπιστώνεται ότι μεγαλύτερο πλάτος στην ακμή πρόπτωσης σε σχέση με το πλάτος στην L/4 του πτερυγίου έχει θετική επίδραση στον συντελεστή ώσης ενώ ο συντελεστής πλάγιας δύναμης παραμένει σταθερός (**σχήμα 12**), με αποτέλεσμα να επιδρά θετικά στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 11: Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή ώσης σε σχέση με την αδιάστατη διαφορά μεταξύ του πλάτους ταλάντωσης της ακμής εκφυγής και του σημείου σε απόσταση $L/4$ απ' την ακμή πρόσπτωσης



Σχήμα 12: Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή πλάγιας δύναμης σε σχέση με την αδιάστατη διαφορά μεταξύ του πλάτους ταλάντωσης της ακμής εκφυγής και του σημείου σε απόσταση $L/4$ απ' την ακμή πρόσπτωσης

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνήθηκε η απόδοση οκτώ πεδίων κατάδυσης μετρώντας με τη βοήθεια επιμηκυνσιομέτρων τις δυνάμεις (δυο συνιστώσες F_x, F_y) που αυτά δέχονται, βυθισμένα σε βάθος 0.5 m από την ελεύθερη επιφάνεια νερού. Τα πέδιλα εκτελούσαν συγχρόνως, μεταφορική κίνηση κατά μήκος υδροδυναμικής σήραγγας και περιστροφική ταλάντωση με τη βοήθεια κινητήρα μεταβλητών στροφών, ενώ ήταν κατασκευασμένα από πλαστικό υλικό ή ανθρακονήματα με διάφορες διαστάσεις και συντελεστές ακαμψίας.

Η ταχύτητα της μεταφορικής τους κίνησης V κυμαινόταν στο διάστημα 0.8 έως 1.2 m/s και η περίοδος T της περιστροφικής ταλάντωσης από 1.2 έως 1.9 sec. Υπό τις ανωτέρω συνθήκες του πειράματος η μέγιστη ώση ήταν 25N ενώ η κάθετη s' αυτήν συνιστώσα 120N. Παρουσιάστηκε **χρονική ταύτιση**, κατά την διάρκεια ενός κύκλου, στην εμφάνιση των μέγιστων τιμών της πλάγιας (**F_x**) και της ωστικής (**F_y**) δύναμης, με την μεγιστοποίηση της εφαπτομενικής ταχύτητας u στην τροχιά κίνησης του σημείου πίεσης των πτερυγίων ($L/4$ απ' την ακμήπρόσπτωσης). Η ταύτιση αυτή εμφανίζεται στην μέση κάθε μισού κύκλου. Ο **βαθμός απόδοσης** των πεδίων δηλαδή ο λόγος της ισχύος της πρόωσης (συνιστώσα παράλληλη προς την V) προς την ισχύ της κάθετης δύναμης παρουσίασε μέγιστη τιμή 22% ενώ στις μεγάλες τιμές της U , έλαβε για κάποια πέδιλα αρνητικές τιμές τα οποία υπό τις συνθήκες αυτές δεν παρήγαγαν ώση.

Οι αυξημένες παραγόμενες δυνάμεις, η εντονότερη παραμόρφωση και οι σχετικά μεγάλες αποκλίσεις στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης των πτερυγίων υπό συνθήκες στατικών δοκιμών ($V=0\text{m/s}$), σε σχέση μ' αυτές υπό μεταφορική ταχύτητα, αναδεικνύει την **ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος (V)** ως καθοριστικής σημασίας παράμετρο για την αξιολόγησή τους.

Τα πτερύγια σχετικά μεγάλου **μήκους** βρέθηκαν να έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε ένα μεγάλο φάσμα μεταφορικών ταχυτήτων και συχνοτήτων ταλάντωσης σε σχέση με τα μικρού μήκους πτερύγια που υστερούσαν στις μεγάλες ταχύτητες

Ο **αριθμός Strouhal** τεκμηριώθηκε ως καθοριστικός παράγοντας για τον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης των πεδίων. Η απόδοση βρέθηκε ότι αποτελεί αύξουσα συνάρτηση του St στο διάστημα 0.15 έως 0.45, λόγω της

δραστικότερης επίδρασής του στην αύξηση του **αδιάστατου συντελεστή ώσης** σε σχέση με τον **αδιάστατο συντελεστή της πλάγιας δύναμης**.

Η **ακαμψία EI** ($N \cdot m^2$), ως η κύρια μηχανική ιδιότητα των πτερυγίων, έχει άμεση επίδραση στην αύξηση του αδιάστατου συντελεστή της πλάγιας δύναμης και στην μείωση του **πλάτους ταλάντωσης της ακμής εκφυγής** (trailing edge) των πτερυγίων.

Η **ακμή εκφυγής** ακολουθεί με **χρονική καθυστέρηση** την φορά κίνησης της ακμής πρόσπτωσης κατά την μετάβαση από την αριστερόστροφη (upstroke) στην δεξιόστροφη (downstroke) φάση και αντίστροφα. Ο χρόνος 'καθυστέρησης' ποικίλει χωρίς να παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, παρουσιάζοντας τάσεις μείωσης για κάθε πτερύγιο με την μετάβαση από μηδενική μεταφορική ταχύτητα σε κανονικές ταχύτητες, ενώ η τιμή της ταχύτητας και της συχνότητας φαίνεται να παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Η ακαμψία φαίνεται να επιδρά ελαφρώς μειωτικά στις τιμές του χρόνου καθυστέρησης. Απ' την άλλη το μήκος των πτερυγίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον χρόνο υστέρησης, με τα μικρού μήκους πτερύγια να εμφανίζουν χρόνους επαναφοράς της ακμής εκφυγής, πολύ μικρότερους (τάξεως 0,24 s) σε σχέση με τα μεγαλύτερου μήκους (τάξεως 0,32s).

Η αύξηση της ακαμψίας σχετίζεται με τη αύξηση του μέτρου της πλάγιας δύναμης τις στιγμές αλλαγής φοράς κίνησης κατά την διάρκεια ενός κύκλου [$F_x(0)$, $F_x(T/2)$]. **Οι τιμές αυτές αποτελούν ένδειξη για τον χρόνο επαναφοράς του πτερυγίου σε συνθήκες θετικού έργου της πλάγιας δύναμης F_x** , δηλαδή όταν η φορά της πλάγιας δύναμης και της εφαπτομενικής ταχύτητας u κίνησης της ακμής πρόσπτωσης του πτερυγίου γίνονται αντίθετες. Παρατηρείται ότι η καθυστέρηση στην επαναφορά του πτερυγίου σε κατάσταση θετικού έργου πλάγιας δύναμης, μετατοπίζει την φάση κατά την οποία εμφανίζεται μέγιστη ωστική δύναμη προς το δεύτερο μισό του κάθε μισού κύκλου, γεγονός που μειώνει το εύρος παραγωγής θετικής ωστικής δύναμης F_y . Η έντονη εμφάνιση αυτής της συμπεριφοράς έχει αρνητική επίδραση στον βαθμό απόδοσης των πτερυγίων

Τέλος η αύξηση της αδιάστατης, ως προς το μήκος, **διαφοράς πλατών ταλάντωσης μεταξύ της ακμής εκφυγής και του σημείο πίεσης ($L/4$ από την ακμή πρόσπτωσης)** των πτερυγίων, έχει θετική επίδραση στον συντελεστή ώσης, ενώ δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τον συντελεστή της πλάγιας δύναμης και συνεπώς ευνοεί τον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσης.

Καταληκτικά, μπορούμε να πούμε ότι η ακαμψία δεν επιδρά μονοδιάστατα στην απόδοση, καθώς επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο την παραμόρφωση και την συμπεριφορά κάθε περιοχής του πτερυγίου. Η επίτευξη μεγαλύτερης ακαμψίας στην περιοχή κοντά στην ακμή πρόσπτωσης σε συνδυασμό με μια πιο εύκαμπτη περιοχή κοντά στο χείλος εκφυγής, ίσως αποτελεί έναν γενικό κανόνα για την κατασκευή πιο αποδοτικών πεδίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Προτάσεις προς μελλοντική βελτίωση της πειραματικής διάταξης

Η μελέτη των πτερυγίων ελεύθερης κατάδυσης, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κατέληξε σε κάποια σημαντικά συμπεράσματα που μπορούν να αποτελέσουν την βάση για τη περαιτέρω επεξεργασία σε συνδυασμό με την βελτίωση της πειραματικής διάταξης. Τα τρία βασικά σημεία που συνθέτουν την πειραματική διερεύνηση είναι η επιλογή των κινηματικών παραμέτρων που αναπαριστούν την κίνηση του δύτε, η αξιόπιστη μέτρηση των παραγόμενων δυνάμεων και η συσχέτιση αυτών με το σχήμα του πτερυγίου.

Όσον αφορά το πρώτο σημείο, η ακριβής αναπαράσταση των κινήσεων των ποδιών ενός δύτε, χαρακτηρίζεται από υποκειμενικότητα λόγω τις ποικιλίας των τεχνικών κολύμβησης. Παραταύτα, οι βασικές κινηματικές παράμετροι που εκλέχθηκαν στην παρούσα εργασία $A(m)$, $f(Hz)$, $\theta(deg)$, $V(m/s)$ ανταποκρίνονται με ικανοποιητική ακρίβεια στην πραγματικότητα, παρά το γεγονός ότι η γωνία τοποθέτησης του πεδίου στον βραχίονα ($\theta(deg)$) θεωρήθηκε σταθερή, ενώ στη πραγματικότητα εκτελεί μια μικρού εύρους ταλάντωση. Η εκτέλεση μόνο περιστροφικής ταλάντωσης, λόγω της ύπαρξης του βραχίονα, αναγκάζει το πτερύγιο σε συνδυασμένη κατακόρυφη (heave) και περιστροφική (pitch) ταλάντωση με την διαφορά, ότι κατά την κατακόρυφη ταλάντωση οι γωνίες πρόσπτωσης του πτερυγίου είναι μεγαλύτερες απ' την πραγματικότητα, γεγονός που μάλλον έχει μικρή επίδραση στον βαθμό απόδοσης. Είναι γνωστό από πειραματικές μελέτες σε πτερύγια που εκτελούν συνδυασμένη κατακόρυφη και περιστροφική ταλάντωση, ότι μεγάλοι βαθμοί απόδοσης επιτυγχάνονται υπό συνθήκες διαφοράς φάσης μεταξύ των δυο ταλαντώσεων της τάξης των 70deg (Triantafyllou et al,1999), πράγμα που είναι αδύνατον να συμβεί στα συμβατικά πέδιλα κατάδυσης κινούμενα απ' τον άνθρωπο. Ίσως, η πιο σημαντική ανακρίβεια στην αναπαράσταση των κινήσεων του δύτε να αφορά την ίση κατανομή του πλάτους ταλάντωσης του πεδίου δεξιά και αριστερά του άξονα της μεταφορικής κίνησης, γεγονός που υποτιμά την παραγωγή ώσης κατά την αριστερόστροφη κίνηση (upstroke) (η πάνω επιφάνεια της λεπίδας αποτελεί και την επιφάνεια πρόσπτωσης). Στην πραγματικότητα, το μεγαλύτερο μέρος της ταλάντωσης λαμβάνει χώρα στο δεξί μέρος ως προς τον άξονα της μεταφορικής κίνησης (οι κατευθύνσεις ορίζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας), ενώ ένα μικρό μέρος αυτής λαμβάνει χώρα στο αριστερά του άξονα της μεταφορικής

κίνησης. Συνεπώς στο μέλλον πρέπει να διερευνηθεί η ορθότητα της μετατόπισης τους εύρους ταλάντωσης.

Η ρύθμιση της συχνότητας και του πλάτους ταλάντωσης πρέπει να διατηρείται σταθερή κατά την διάρκεια των δοκιμών. Αφενός είναι προτιμότερη η ρύθμιση της συχνότητας μέσω της γνώσης των στροφών του κινητήρα και όχι γραφικά όπως έγινε στην παρούσα εργασία και αφετέρου το μεταβλητό έκκεντρο που ρυθμίζει το πλάτος ταλάντωσης να σταθεροποιηθεί επαρκώς με χρήση κοχλίων δεξιά και αριστερά αυτού.

Όσον αφορά την μέτρηση των δυνάμεων, πρέπει να προσεχτεί η σωστή τοποθέτηση των επιμηκυνσιόμετρων (στον ουδέτερο άξονα της διατομής του βραχίονα), ιδιαίτερα αυτών που μετράνε διατμητικές δυνάμεις (πλάγια δύναμη), , ώστε η μέτρηση της πλάγιας δύναμης να μην επηρεάζεται απ' το σημείο εφαρμογής της. Επιπλέον, είναι δυνατός ο υπολογισμός του σημείου εφαρμογής της πλάγια δύναμης κατά μήκος του πτερυγίου μέσω της τοποθέτησης επιμηκυνσιόμετρου που να μετρά την καμπτική ροπή που εφαρμόζεται στην διατομή. Έτσι με γνώση της διατμητικής δύναμης μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση που αυτή εφαρμόζεται απ' το επιμηκυνσιόμετρο ώστε να επιφέρει την αντίστοιχη μετρούμενη καμπτική ροπή. Η γνώση του ακριβούς σημείου πίεσης κάθε χρονική στιγμή μπορεί να συσχετιστεί με το σχήμα του πτερυγίου την αντίστοιχη χρονική στιγμή και να διερευνηθεί η προσέγγιση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πτερυγίου με βάση την θεωρία για την ροή γύρω από υδροτομές.

Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, συστήνεται ο συγχρονισμός της λήψης των δεδομένων απ' τα επιμηκυνσιόμετρα με την λήψη της εικόνας απ' την κάμερα ώστε να απλοποιηθεί κατά πολύ η συσχέτιση της δυναμικής απόκρισης των πτερυγίων με την θέση και το σχήμα τους κάθε χρονική στιγμή. Τέλος η λήψη καθαρότερων εικόνων μπορεί να γίνει με την υδροδυναμική διαμόρφωση του στηρίγματος του άξονα στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού, ώστε να περιοριστούν οι διαταραχές της ροής στον ομόρρου.

Παράρτημα Α: Κώδικας ανάλυσης δεδομένων

Παρακάτω παρουσιάζεται και εξηγείται ο κώδικας (σε γλώσσα MATLAB) που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την ανάλυση των δεδομένων απ' την διεξαγωγή του πειράματος. Τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα που προέκυψαν απ' την ανάλυση των δεδομένων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4

```
                %ΔΕΔΟΜΕΝΑ%
%input data :file.dat , velocity V(m/s), amplitude trailing edge Ate(m),
amplitude leading edge Ale(m),
%amplitude L/4 from leading edge Av(m), sample_rate(Hz),ρ συντελεστής
%βαθμονομησης για την Fx

for nm=1:10
    if (nm==1)
        data=load('A0(1.6).dat');
        dat='FIN A'
        V=0
        Ate=0.53;
        Ale=0.37;
        Av=0.43;
        sample_rate=200;
        row='A';
    elseif (nm==2)
        data=load('A08(1.6).dat');
        dat='FIN A'
        V=0.8
        Ate=0.54;
        Ale=0.35;
        Av=0.40;
        sample_rate=200;
        row='B';
    elseif (nm==3)
        data=load('A08(1.92).dat');
        dat='FIN A'
        V=0.8
        Ate=0.47;
        Ale=0.36;
        Av=0.41;
        sample_rate=200;
        row='C';
    elseif (nm==4)
        data=load('A09(1.6).dat');
        dat='FIN A'
        V=0.9
        Ate=0.56;
        Ale=0.34;
        Av=0.41;
        sample_rate=200;
        row='D';
```

```

elseif (nm==5)
    data=load('A09(1.76).dat');
    dat='FIN A'
    V=0.9
    Ate=0.53;
    Ale=0.36;
    Av=0.43;
    sample_rate=200;
    row='E';

elseif (nm==6)
    data=load('A1(1.6).dat');
    dat='FIN A'
    V=1
    Ate=0.56;
    Ale=0.37;
    Av=0.45;
    sample_rate=200;
    row='F';
elseif (nm==7)
    data=load('A11(1.6).dat');
    dat='FIN A'
    V=1.1
    Ate=0.54;
    Ale=0.335;
    Av=0.40;
    sample_rate=200;
    row='G';
elseif (nm==8)
    data=load('A11(1.45).dat');
    dat='FIN A'
    V=1.1
    Ate=0.49;
    Ale=0.31;
    Av=0.38;
    sample_rate=200;
    row='H';
elseif (nm==9)
    data=load('A12(1.6).dat');
    dat='FIN A'
    V=1.2
    Ate=0.52;
    Ale=0.32;
    Av=0.38;
    sample_rate=200;
    row='I';
else
    data=load('A12(1.2).dat');
    dat='FIN A'
    V=1.2
    Ate=0.48;
    Ale=0.33;
    Av=0.39;
    sample_rate=200;
    row='J';
end
%SA is the surface blade area ,p συντελεστής

```

```

%βαθμονομησης για την Fx
SA=0.1221;
p=0.172;
R3=0.77;%απόσταση άξονα απο το (L/4 from LE)

```

```

%ΚΥΡΙΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ%

```

```

SL=0.183;%μηκος διωστήρα
R2=0.085;%ακτινα ημικυκλικου γραναζιου του άξονα μεταδοσης
R1=R2*(Av/R3)/2;%ακτινα στροφάλου που συνδέεται με τον ηλεκτροκινητηρα
%δημιουργουμε απ' τις 4 στήλες του πίνακα data τους πίνακες time_d,
Fx_d,
%Fy_d, pos_d που περιέχουν τα αντίστοιχα δεδομένα που περιγράφει το
%όνομά τους
Av/R3
time_d=data(:,1);
Fy_d=data(:,3);
Fx_d=p*data(:,2);
pos_d=data(:,4);
i=0;
j=0;
h=0;
k=0;
c1=0;
c2=0;
l_data=length(pos_d);
% βρίσκει τις ελάχιστες τιμές του πίνακα pos_d (mV) (που αντιστοιχούν
στις ακραίες θέσεις του βραχίονα) και την αντίστοιχη θέση τους
% έτσι ώστε να ξεχωρίσουμε τα δεδομένα σε ακέραιο αριθμό κύκλων.
% Τις πέντε πρώτες 'θέσεις των ελάχιστων τιμών του pos_d τις καταχωρεί
στις μεταβλητές
% k,c1,c2,c3,c4 και όλες τις 'θέσεις' στον πίνακα position. Έτσι
μπορούμε να ξεχωρίσουμε στα δεδομένα μας 4
% διαφορετικούς κύκλους που θα μας βοηθήσουν στην κατασκευή των
γραφημάτων
for i=2:1:(l_data-1);
    if (pos_d(i)<pos_d(i-1)) && (pos_d(i)<=pos_d(i+1)) && (pos_d(i)<0.8)
    && (abs(i-h)>sample_rate)
        h=i;
        j=j+1;
        if (j==1)
            k=h;
        elseif (j==2)
            c1=h;
        elseif (j==3)
            c2=h;
        elseif (j==4)
            c3=h;
        elseif (j==5)
            c4=h;
        else
        end
        time_limit(j)=time_d(h);
        Fy_limit(j)=Fy_d(h);
        Fx_limit(j)=Fx_d(h);
        pos_limit(j)=pos_d(h);
    end
end

```

```

        position(j)=h;
    end
end

l_lim=length(time_limit);
%Υπολογίζει την περίοδο T(s), και την γωνιακή ταχύτητα w(rad/s) (1/4L
from
%leading edge)
T=(time_limit(l_lim)-time_limit(1))/(l_lim-1)
w=2*pi/T;

i=0;
j=0;
%Οι πίνακες time,Fy,Fx,pos περιέχουν τα δεδομένα του πειράματος για
ακαίρεο
%αριθμό κύκλων
for i=k:1:h;
    j=j+1;
    time(j)=time_d(i);
    Fy(j)=Fy_d(i);
    Fx(j)=Fx_d(i);
    pos(j)=pos_d(i);
end

%κατασκευάσουμε πίνακα που περιέχει τις μέσες τιμες των δυναμεων όλων
των
%κύκλων Fxav_1cycle,Fyav_1cycle, και ο time_av τις αντιστοιχες τιμες
του
%χρόνου για ένα κύκλο (μια περίοδο T)
%κάθε στήλη των πινάκων με δείκτη _dev περιέχει τις τιμες των δυνάμεων
για κάθε κύκλο
%με αύξουσα σειρά
i=0;
j=0;
jj=0;
ii=0;
for i=1:(length(position)-1);
    jj=0;
    ii=ii+1;
    for j=position(i):position(i+1);
        jj=jj+1;
        Fx_dev(jj,ii)=Fx_d(j);
        Fy_dev(jj,ii)=Fy_d(j);
    end
end

l1=fix((position(length(position))-position(1)+1)/(length(position)-1));

i=0;
j=0;
for i=1:l1;

```

```

    Fxav_1cycle(i)=mean(Fx_dev(i,:));
    Fyav_1cycle(i)=mean(Fy_dev(i,:));
    time_av(i)=i*0.005;

end

% ο πίνακας v υπολογίζει τις αντίστοιχες γωνιακές
%ταχύτητες του πτερυγίου σε απόσταση L/4 from leading edge
i=0;
jj=0;
for i=1:l1;
AO(i)=(SL^2+R1^2-2*SL*R1*cos((w*jj*(1/sample_rate)+pi)-
asin((R1/SL)*sin((w*jj*(1/sample_rate)+pi))))^0.5;
v2(i)=(w*Av)*cos(w*jj*T/(1/sample_rate)+pi/2);
jj=jj+1;
end

j=0;
jj=1;
for i=1:(l1-1);
    jj=jj+1;
    deg(1)=0;
    deg(jj)=(AO(i+1)-AO(i))/R2;
    v(jj)=deg(jj)*R3/(1/sample_rate);

end

%plot(time_av,v)
%grid
%figure

%thita η γωνία του βραχίονα απο άκρο σε άκρο για T/2
thita= sum(abs(deg))/2

%Οι πίνακες με δείκτες 'upstroke' και 'downstroke' περιέχουν τις τιμές
για την
%πάνω και κάτω κίνηση του πτερυγίου αντίστοιχα που μαζί συνθέτουν μια
%περίοδο
%Οι πίνακες με δείκτη X&Y αναφέρονται σε σύστημα αναφορά που ακολουθεί
την
%κίνηση του βραχίονα(ο Y παραλληλος στην διεύθυνση του βραχίονα
%Οι πίνακες με δείκτη XX&YY αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες ως προς
% σύστημα αναφοράς που ο άξονας YY είναι παράλληλος στην κίνηση του
% φορείου V
i=0;
a=0;
for i=1:fix(length(Fxav_1cycle)/2);

    Fxdownstroke(i)=Fxav_1cycle(i);
    Fydownstroke(i)=Fyav_1cycle(i);

```

```

Pfxdownstroke(i)=Fxdownstroke(i)*v(i);
Pfydownstroke(i)=Fydownstroke(i)*V;
time_down(i)=time_av(i);

Fxxav_down(i)=Fxav_1cycle(i)*cos(thita/2-
a)+Fyav_1cycle(i)*sin(thita/2-a);
Fyyav_down(i)=Fyav_1cycle(i)*cos(thita/2-a)-
Fxav_1cycle(i)*sin(thita/2-a);
Pfxav_down(i)=Fxxav_down(i)*v(i);
Pfyav_down(i)=Fyyav_down(i)*V;

a=a+abs(deg(i));
end

%οπου ο δείκτης Pf υποδηλώνει ισχύ(Watt)
m=i;
i=0;
jj=0;
a=0;
for i=(m+1):length(Fxav_1cycle);

    jj=jj+1;
    Fxupstroke(jj)=Fxav_1cycle(i);
    Fyupstroke(jj)=Fyav_1cycle(i);
    Pfxupstroke(jj)=Fxupstroke(jj)*v(i);
    Pfyupstroke(jj)=Fyupstroke(jj)*V;
    time_up(jj)=time_av(i);

    Fxxav_up(jj)=Fxav_1cycle(i)*cos(thita/2-a)-
Fyav_1cycle(i)*sin(thita/2-a);
    Fyyav_up(jj)=Fyav_1cycle(i)*cos(thita/2-
a)+Fxav_1cycle(i)*sin(thita/2-a);
    Pfxav_up(jj)=Fxxav_up(jj)*v(i);
    Pfyav_up(jj)=Fyyav_up(jj)*V;

    a=a+abs(deg(i));
end

%Οι πίνακες Fxxav_1cycle, Fyyav_1cycle περιέχουν τις μέσες τιμές ενός
κύκλου ως προς το σύστημα
%αναφοράς XX-YY
Fxxav_1cycle=[Fxxav_down Fxxav_up];
Fyyav_1cycle=[Fyyav_down Fyyav_up];
Pfxav_1cycle=[Pfxav_down Pfxav_up];
Pfyav_1cycle=[Pfyav_down Pfyav_up];

%values for 1 cycle with step (T/8) (πίνακες με δείκτη '_finpos') for
average

```

```

%values Fxxav, Fyyav, ως προς το σύστημα αναφοράς XX-YY
%average values Fxav, Fyav, ως προς το σύστημα αναφοράς X-Y
i=0;
j=0;
for i=0:8;
    j=j+1;
    if i==8
        v_finpos(j)=v(length(Fxxav_1cycle));
        time_avfinpos(j)=time_av(length(Fxav_1cycle));

        Fyav_finpos(j)=Fyav_1cycle(length(Fxav_1cycle));
        Fxav_finpos(j)=Fxav_1cycle(length(Fxav_1cycle));

        Fyyav_finpos(j)=Fyyav_1cycle(length(Fxxav_1cycle));
        Fxxav_finpos(j)=Fxxav_1cycle(length(Fxxav_1cycle));

    else
        v_finpos(j)=v(1+i*fix((length(Fxxav_1cycle)-1)/8));
        time_avfinpos(j)=time_av(1+i*fix((length(Fxav_1cycle)-1)/8));

        Fyav_finpos(j)=Fyav_1cycle(1+i*fix((length(Fxav_1cycle)-1)/8));
        Fxav_finpos(j)=Fxav_1cycle(1+i*fix((length(Fxav_1cycle)-1)/8));

        Fyyav_finpos(j)=Fyyav_1cycle(1+i*fix((length(Fxxav_1cycle)-1)/8));
        Fxxav_finpos(j)=Fxxav_1cycle(1+i*fix((length(Fxxav_1cycle)-1)/8));

    end
end

%ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ%
%X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-Y/X-
Y/

%calculate Power (Watt),Pfxav_1cycle,Pfyav_1cycle
i=0;
for i=1:length(Fxav_1cycle);
    Pfxav_1cycle(i)=Fxav_1cycle(i)*v(i);
    Pfyav_1cycle(i)=Fyav_1cycle(i)*V;
end

%calculate average F values (Nt)
Fxmax=max(Fxav_1cycle);
Fxav=mean(abs(Fxav_1cycle));
Fxav_upstroke=mean(Fxupstroke);
Fxav_downstroke=mean(Fxdownstroke);
Fymax=max(Fyav_1cycle);
Fyav=mean(Fyav_1cycle);
Fyav_upstroke=mean(Fyupstroke);
Fyav_downstroke=mean(Fydownstroke);

```



```

%Υπολογίζουμε την μέση ισχύ για τις δύο δυνάμεις (average power) (Watt)
Pfxav=mean(Pfxav_1cycle);
Pfxav_upstroke=mean(Pfxupstroke);
Pfxav_downstroke=mean(Pfxdownstroke);
Pfyav=mean(Pfyav_1cycle);
Pfyav_upstroke=mean(Pfyupstroke);
Pfyav_downstroke=mean(Pfydownstroke);

%calculate efficiency coefficients (EC)
EC=100*Pfyav/Pfxav;
ECupstroke=(Pfyav_upstroke/Pfxav_upstroke)*100;
ECdownstroke=(Pfyav_downstroke/Pfxav_downstroke)*100;
EC2=100*Fymax/((Fxmax^2+Fymax^2)^0.5);

%calculate strouhal number 'A=amplitude calculated from trailing edge'
St=(Ate*(1/T))/V;
%calculate F/SA
Sfx=Fxav/SA;
Sfy=Fyav/SA;
%Υπολογισμός αδιάστατου συντελεστή ώσης Cthrust & συντελεστή πλάγιας
%δύναμης Cfx
Cfxmax=Fxmax/((101.8696*9.81/2)*(V^2)*SA)
Cfymax=Fymax/((101.8696*9.81/2)*(V^2)*SA);

%EXPORTED DATA
Z=[V;T;St;Ate;Ale;Av;Fxmax;Ftav;Ftav_upstroke;Ftav_downstroke;Fymax;Fyav;
;Fyav_upstroke;Fyav_downstroke;Pfxav;Pfxav_upstroke;Pfxav_downstroke;Pfyav;
;Pfyav_upstroke;Pfyav_downstroke;EC;ECupstroke;ECdownstroke;Sfx;Sfy;Cfx;
;Cfxmax;Cfyav;Cfyavmax;EC2]

format compact
i=0;
j=0;
%Ο πίνακας values 5X9 περιέχει τις τιμές για την θέση (1-9), χρόνο(time)
%την Ftav_finpos, την Fyav_finpos και την γωνιακή ταχύτητα v (στο L/4
from leading edge LE) για έναν κύκλο με βήμα T/8
for j=1:5;
    for i=1:9;
        if (j==1)
            values(i,j)=i;
        elseif (j==2)
            values(i,j)=time_avfinpos(i);
        elseif (j==3)
            values(i,j)=Ftav_finpos(i);
        elseif (j==4)
            values(i,j)=Fyav_finpos(i);
        else
            values(i,j)=v_finpos(i);
        end
    end
end

end
disp(' position      time(s)      Fx(Nt)      Fy(Nt)      v(m/s) ')

```

```

disp(values)
xlswrite('c:\dataexp.xls',Z,['sheet' num2str(1)],row)
xlswrite('c:\dataexp.xls',values,['sheet' num2str(nm)],'C35')

%plot(time_av,Fxav_1cycle,'r',time_av,Fyav_1cycle,'b',time_avfinpos,Fxav
_finpos,'ko',time_avfinpos,Fyav_finpos,'k*', 'LineWidth',1.1)
%title({'[dat];['      V=',num2str(V),' m/s','      T=',num2str(T),' s','
Ale=',num2str(Ale),' m','      Ate=',num2str(Ate),' m'];['
Fxav=',num2str(Fxav),' N','      Fyav=',num2str(Fyav),' N','
%EC=',num2str(EC)];['      %ECupstroke=',num2str(ECupstroke),'
%ECdownstroke=',num2str(ECdownstroke),'
St=',num2str(St)];['Fx(t),Fy(t),average values for X-Ysystem']})
%legend('Fx','Fy')
%xlabel('time (sec)')
%ylabel('Fx,Fy (Nt)')
%text(time_avfinpos(1),min(Fyav_1cycle)-5,'[1]')
%text(time_avfinpos(2),min(Fyav_1cycle)-5,'[2]')
%text(time_avfinpos(3),min(Fyav_1cycle)-5,'[3]')
%text(time_avfinpos(4),min(Fyav_1cycle)-5,'[4]')
%text(time_avfinpos(5),min(Fyav_1cycle)-5,'[5]')
%text(time_avfinpos(6),min(Fyav_1cycle)-5,'[6]')
%text(time_avfinpos(7),min(Fyav_1cycle)-5,'[7]')
%text(time_avfinpos(8),min(Fyav_1cycle)-5,'[8]')
%text(time_avfinpos(9),min(Fyav_1cycle)-5,'[9]')
%text(time_avfinpos(3),max(Fxav_1cycle)/1.5,'downstroke')
%text(time_avfinpos(7),max(Fxav_1cycle)/1.5,'upstroke')
%orio1=[time_avfinpos(5) time_avfinpos(5) time_avfinpos(5)];
%orio2=[time_avfinpos(9) time_avfinpos(9) time_avfinpos(9)];
%orio3=[min(Fxav_1cycle) 0 max(Fxav_1cycle)];
%hold on
%plot(orio1,orio3,'k',orio2,orio3,'k')
%grid
%hold off
%figure

                                %ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ%
%XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-YY/XX-
YY/XX-YY/

%calculate average F values (Nt)
Fxxmax=max(Fxxav_1cycle);
Fxxav=mean(abs(Fxxav_1cycle));
Fxxav_upstroke=mean(Fxxav_up);
Fxxav_downstroke=mean(Fxxav_down);
Fyymax=max(Fyyav_1cycle);
Fyyav=mean(Fyyav_1cycle);
Fyyav_upstroke=mean(Fyyav_up);
Fyyav_downstroke=mean(Fyyav_down);

%Υπολογίζουμε την μέση ισχύ για τις δύο δυνάμεις (average power) (Watt)
Pfxav=mean(Pfxav_1cycle);
Pfxav_upstroke=mean(Pfxav_upstroke);
Pfxav_downstroke=mean(Pfxav_downstroke);
Pfyav=mean(Pfyav_1cycle);
Pfyav_upstroke=mean(Pfyav_upstroke);

```

```

Pfyav_downstroke=mean(Pfyav_down);

%calculate efficiency coefficients (EC)
ECxx=100*Pfyav/Pfxxav;
ECxxupstroke=(Pfyav_upstroke/Pfxxav_upstroke)*100;
ECxxdownstroke=(Pfyav_downstroke/Pfxxav_downstroke)*100;
EC2xx=100*Fyymax/((Fxxmax^2+Fyymax^2)^0.5);

%calculate strouhal number 'A=amplitude calculated from trailing edge'
St=(Ate*(1/T))/V;
%calculate F/SA
Sfxx=Fxxav/SA;
Sfyy=Fyyav/SA;
%Υπολογισμός αδιάστατου συντελεστή ώσης Cthrust & συντελεστή πλάγιας
%δύναμης Cfx
Cfxxmax=Fxxmax/((101.8696*9.81/2)*(V^2)*SA);
Cfyymax=Fyymax/((101.8696*9.81/2)*(V^2)*SA);

%EXPORTED DATA
Zxx=[V;T;St;Ate;Ale;Av;Fxxmax;Fxxav;Fxxav_upstroke;Fxxav_downstroke;Fyym
ax;Fyyav;Fyyav_upstroke;Fyyav_downstroke;Pfxxav;Pfxxav_upstroke;Pfxxav_d
ownstroke;Pfyav;Pfyav_upstroke;Pfyav_downstroke;ECxx;ECxxupstroke;ECx
xdownstroke;Sfxx;Sfyy;Cfxxmax;Cfyymax;EC2xx]

format compact
i=0;
j=0;
%Ο πίνακας values 5X9 περιέχει τις τιμές για την θέση (1-9), χρόνο(time)
%την Fxxav_finpos, την Fyyav_finpos και την γωνιακή ταχύτητα v (στο L/4
from leading edge LE) για έναν κύκλο με βήμα T/8
for j=1:5;
    for i=1:9;
        if (j==1)
            valuesxx(i,j)=i;
        elseif (j==2)
            valuesxx(i,j)=time_avfinpos(i);
        elseif (j==3)
            valuesxx(i,j)=Fxxav_finpos(i);
        elseif (j==4)
            valuesxx(i,j)=Fyyav_finpos(i);
        else
            valuesxx(i,j)=v_finpos(i);
        end
    end

end

disp(' position      time(s)      Fxx(Nt)      Fyy(Nt)      v(m/s) ')
disp(valuesxx)
xlswrite('c:\dataexpXX.xls',Zxx,['sheet' num2str(1)],row)
xlswrite('c:\dataexpXX.xls',valuesxx,['sheet' num2str(nm)],'C35')

```

```

plot(time_av,Fxxav_1cycle,'r',time_av,Fyyav_1cycle,'b',time_avfinpos,Fxx
av_finpos,'ko',time_avfinpos,Fyyav_finpos,'k*','LineWidth',1.1)
title([dat];['      V=',num2str(V),' m/s','      T=',num2str(T),' s','
Ale=',num2str(Ale),' m','      Ate=',num2str(Ate),' m'];['  Fx
max=',num2str(Fxxmax),' N','      Fy max=',num2str(Fyymax),' N','
%EC=',num2str(ECxx)];['      %ECupstroke=',num2str(ECxxupstroke),'
%ECdownstroke=',num2str(ECxxdownstroke),'
St=',num2str(St)];['Fvertical(t),Fthrust(t), average cycle for X-
Ysystem']})
legend('Fx','Fy')
xlabel('time (sec)')
ylabel('Fx,Fy (Nt)')
text(time_avfinpos(1),min(Fyyav_1cycle)-5,'[1]')
text(time_avfinpos(2),min(Fyyav_1cycle)-5,'[2]')
text(time_avfinpos(3),min(Fyyav_1cycle)-5,'[3]')
text(time_avfinpos(4),min(Fyyav_1cycle)-5,'[4]')
text(time_avfinpos(5),min(Fyyav_1cycle)-5,'[5]')
text(time_avfinpos(6),min(Fyyav_1cycle)-5,'[6]')
text(time_avfinpos(7),min(Fyyav_1cycle)-5,'[7]')
text(time_avfinpos(8),min(Fyyav_1cycle)-5,'[8]')
text(time_avfinpos(9),min(Fyyav_1cycle)-5,'[9]')
text(time_avfinpos(3),max(Fxxav_1cycle)/1.5,'downstroke')
text(time_avfinpos(7),max(Fxxav_1cycle)/1.5,'upstroke')
orio1=[time_avfinpos(5) time_avfinpos(5) time_avfinpos(5)];
orio2=[time_avfinpos(9) time_avfinpos(9) time_avfinpos(9)];
orio3=[min(Fxxav_1cycle) 0 max(Fxxav_1cycle)];
hold on
plot(orio1,orio3,'g',orio2,orio3,'g')
grid
hold off

figure
clear all

end

```

Βιβλιογραφία

1. J.M. Anderson, K. Streitlien, D.S. Barrett and M.S. Triantafyllou, Oscillating foils of high propulsive efficiency, *J. Fluid Mech.* (1998) vol. 360, pp. 41-72, ©Cambridge University Press
2. G. Nicolas, B. Bideau, N. Bideau, B. Colobert, G. Guerroue, P. Delamarche, A new system for analyzing swim fin propulsion based on human kinematic data, *Journal of Biomechanics* 43 (2010)
3. Xi-yun Lu, Xie-zheng Yin, Ji-ming Yang, Bing-gang Tong, Studies of hydrodynamics in fishlike swimming propulsion, *Journal of Hydrodynamics* 2010
4. G. Nicolas, B. Bideau, A kinematic and dynamic comparison of surface and underwater displacement in high level monofin swimming, *Human Movement Science* 28 (2009) 480-493
5. P. Zamparo, D.R. Pendergast, A. Termin, A.E. Minetti, Economy and efficiency of swimming at the surface with fins of different size and stiffness, ©Springer-Verlag 2005
6. D.S. Mathioulakis, P. Bardis, Performance evaluation of swim fins under zero translation speed, *Journal of Sports Science & Coaching* vol.6 (2010)
7. R. Vennell, D. Pease, B. Wilson, Wave drag on human swimmers, *Journal of Biomechanics* 39 (2006)
8. G. Minak, Evaluation of the performances of free diving fins, *Sports Engineering* vol.7 2004
9. S. Kobayashi, M. Nakabayashi, R. Kobayashi, Ji Jie, H. Morikawa, Thrust force Characteristics of Propulsion Mechanism in fluid using fin with dynamic Variable-Effective-Length Spring, *Biomechanism of swimming and flying*, Springer 2009
10. Ross Vennell, Dave Pease, Barry Wilson, Wave drag on human swimmers, *Journal of Biomechanics* 39 (2006)