



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΑΣΤΑΘΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΤΕΡΥΓΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΗ ΚΑΙ
ΤΥΡΒΩΔΗ ΡΟΗ**
υπό
ΤΟΛΗ ΗΛΙΑ

Επιβλέπων:

Σταπουντζής Ερρίκος,

Αναπλ. Καθηγητής Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Τίτλου Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Βόλος, 2009



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

Αριθ. Εισ.: 6883/1
Ημερ. Εισ.: 05-02-2009
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
620.106
ΤΟΛ

© 2009 Τόλης Ηλίας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Σταπουντζής Ερρίκος
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Τσιακάρης Παναγιώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τέταρτος Εξεταστής Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πέμπτος Εξεταστής Δρ. Πετρόπουλος Γεώργιος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Κατ' αρχήν θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Σταπουτζή Ερρίκο για την πολύτιμη βοήθεια και υπομονή που κατέβαλε για την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις υποψήφιες διδάκτορες Εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β. Καπσιανού Δήμητρα και Ζησιμάτου Αφροδίτη που βοήθησαν στην διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς και τον Βέργο Αθανάσιο, τεχνικό Τ.Ε του Τμήματός για την ουσιαστική βοήθεια του στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Τέλος, να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Ανδρίτσο Νικόλαο, Τσιακάρα Παναγιώτη, Σταμάτη Αναστάσιο και Πετρόπουλο Γεώργιο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επίσης δεν ξεχνώ να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου Αργυρίου Χάρη, Δημητρακόπουλο Νικόλα, Σαμαντά Θανάση, Δημητρίου Θέμη, Ζήση Γιώργο, Κατσαούνη Βαγγέλη.

Αφιερώνω την μεταπτυχιακή μου εργασία στους γονείς μου Θωμά και Ελένη καθώς και στην αδερφή μου Ευαγγελία που με στήριξαν και με στηρίζουν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και σε κάθε μου επιλογή τόσο υλικά όσο και ψυχολογικά.

**ΑΣΤΑΘΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΤΕΡΥΓΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΗ ΚΑΙ
ΤΥΡΒΩΔΗ ΡΟΗ**

ΤΟΛΗ ΗΛΙΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας 2009

Επιβλέπων:

Σταπουντζής Ερρίκος,

Αναπλ. Καθηγητής Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ασχολείται με το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης πτερυγίων με περιοδικά τυρβώδη απορεύματα, ένα πρόβλημα που συναντάται εκτός των άλλων και στις μοντέρνες ανεμογεννήτριες παραγωγής ισχύος.

Γενικά, αλληλεπιδράσεις σωμάτων με απορρεύματα απαντώνται σε πολλά επιστημονικά πεδία (ρευστομηχανική, δυναμική, θερμοδυναμική, μεταφορά θερμότητας, χημικές διεργασίες κ.α.) με ποικίλες τεχνολογικές εφαρμογές (πηητικές μηχανές, στροβιλοκινητήρες-jet, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες κ.α.). Ένα τέτοιο πρόβλημα είναι η αλληλεπίδραση δίνης-πτερυγίου (BVI...blade-vortex interaction) που παρουσιάζεται σε στροβιλομηχανές. Τα πτερύγια των ελικοπτέρων παραδείγματος χάριν κατά την λειτουργία σε ειδικές συνθήκες ή σεκατάσταση ελιγμών προσπίπτουν στις εκρεόμενες δίνες ακροπτερυγίου (tip trailing vortices)). Επίσης στην κατηγορία αυτή ανήκει και η αλληλεπίδραση στάτορα ρότορα (RSI...rotor-stator interaction) που εμφανίζεται π.χ. μεταξύ των διαδοχικών βαθμίδων στις αξονικές στροβιλομηχανές.

Για την μελέτη της αλληλεπίδρασης των πτερυγίων με τυρβώδη και περιοδικά απορεύματα κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη δημιουργίας ημιτονοειδούς ροής αέρα, αλλά και σύνθετης ροής με την προσθήκη στην ημιτονοειδή και τυρβώδους ροής. Η όλη κατασκευή τοποθετήθηκε σε αεροσήραγγα υποηχητικής ροής του εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β και διεξήχθησαν όλες οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη.

Στην μεταπτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε, εστιάζεται η προσοχή στην ρευστομηχανική συμπεριφορά απορεύματος ταλαντούμενων πτερυγίων που αλληλεπιδρά με πτερύγιο και επάγει σε αυτό δυναμικά μεταβαλλόμενα φορτία, όπως επίσης και ο συνδυασμός αυτών των φορτίων με τυρβώδη ροή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| Ευχαριστίες..... | iii |
| Περίληψη..... | v |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ..... | vi |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 1 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ | 6 |
| 2.1. Εισαγωγή..... | 6 |
| 2.2 Μια ταλαντούμενη διάταξη για την παραγωγή ημιτονοειδών ροών..... | 6 |
| 2.2.1 Περιγραφή εξισώσεων ημιτονοειδούς ροής..... | 8 |
| 2.2.2 Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικά αποτελέσματα..... | 10 |
| 2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την πίεση στην επιφάνεια πτερυγίου που δέχεται ημιτονοειδή ροή..... | 14 |
| 2.3.1 Επίδραση της γωνίας του δοκιμαζόμενου πτερυγίου στην πίεση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του..... | 15 |
| 2.3.2 Επίδραση της επιβαλλόμενης συχνότητας στην πίεση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του δοκιμαζόμενου πτερυγίου..... | 16 |
| 2.4 Επίδραση ημιτονοειδούς ροής σε κυλινδρικά παρεμβαλλόμενα στη ροή σώματα (Bluff bodies)..... | 17 |
| 2.4.1 Παρουσίαση των μετρήσεων..... | 19 |
| 2.5 Άλλες μέθοδοι δημιουργίας ημιτονοειδών ροών..... | 23 |
| 2.5.1 Παρεμβολή κυλίνδρου στη ροή για τη δημιουργία ημιτονοειδούς ροής..... | 23 |
| 2.5.2 Στρωτή εκροή δινών ($50 < Re < 140-194$)..... | 24 |
| 2.5.3 Μεταβατική περιοχή 3-Δ, τυρβώδους οδού von Karman ($194 < Re < 260$)..... | 25 |
| 2.5.4 Κρίσιμη περιοχή περιοχή ($2 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$)..... | 25 |
| 2.5.5 Υπερκρίσιμη περιοχή ($Re > 5 \cdot 10^5$)..... | 27 |
| 2.5.6 Αλληλεπίδραση πτερυγίου-απορεύματος..... | 27 |
| 2.5.7 Αλληλεπίδραση πτερυγίου-δίνης (BVI)..... | 31 |
| 2.5.8 Τυρβώδης ροή πίσω από σταθερό πλέγμα..... | 32 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ..... | 34 |
| 3.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης..... | 34 |
| 3.1.1. Αεροσήραγγα..... | 36 |
| 3.1.2 Συλλέκτης - Εισαγωγή αέρα..... | 38 |
| 3.1.3. Τμήμα δοκιμών..... | 38 |
| 3.1.4 Φυσητήρας..... | 40 |
| 3.1.5 Διαχύτης..... | 40 |
| 3.1.6 Παράθυρο και σύστημα ταλάντωσης..... | 41 |
| 3.1.7 Πλέγμα..... | 44 |
| 3.2. Μετρητικά Όργανα και συσκευές..... | 44 |
| 3.2.1 Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot - wire anemometer C.T.A.)..... | 45 |
| 3.2.2 Σύστημα λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων[Ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D (analog-digital)]...... | 49 |
| 3.2.3 Μανόμετρο και σωλήνας Pitot - Static..... | 50 |
| 3.2.4 Πάλμογράφος..... | 53 |
| 3.2.5 Ενισχυτής σήματος..... | 53 |

| | |
|--|------------|
| 3.2.6 Μετασχηματιστής ηλεκτρικού ρεύματος..... | 54 |
| 3.2.7 Ταχύμετρο μέτρησης συχνότητας της σέγας..... | 54 |
| 3.2.8 Μετατροπέας της συχνότητας του ρεύματος(0 -100 Hz)..... | 55 |
| (Inverter)..... | 55 |
| 3.3 Μέθοδος Μετρήσεων με το Hot-wire..... | 55 |
| 3.3.1 Μέτρηση αντίστασης C.T.A..... | 56 |
| 3.3.2 Βαθμονόμηση Hot-wire..... | 56 |
| 3.4 Τρόπος λήψεως των μετρήσεων..... | 61 |
| 3.5 Επεξεργασία των μετρήσεων..... | 63 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 67 |
| 4.1 Εισαγωγή..... | 67 |
| 4.2 Πρωτογενή δεδομένα..... | 68 |
| 4.3 Ανάλυση Πειραμάτων..... | 70 |
| 4.3.1 Διαγράμματα Ταχυτήτων..... | 71 |
| 4.3.2 Φάσματα Ταχυτήτων..... | 85 |
| 4.3.3 Διαγράμματα Δυνάμεων..... | 121 |
| 4.3.4 Φάσματα Δυνάμεων..... | 137 |
| 4.3.5 Διαγράμματα συντελεστή συνάρτησης αεροδυναμικής απόκρισης A [k]..... | 187 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 193 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 199 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ασχολείται με το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης πτερυγίων με περιοδικά τυρβώδη απορεύματα, ένα πρόβλημα που συναντάται εκτός των άλλων και στις μοντέρνες ανεμογεννήτριες παραγωγής ισχύος.

Ειδικότερα, κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια διέρχονται περιοδικά από μια περιοχή όπου η ροή είναι διαταραγμένη λόγω της παρεμβολής του πύργου στήριξης της μονάδας. Το περιοδικό αυτό φαινόμενο εκτιμάται ότι επιδρά δυσμενώς στην φόρτιση της πτερωτής, την παραγωγή ισχύος, την επαγωγή θορύβου κ.α. Η αλληλεπίδραση αυτή και οι ακριβείς επιπτώσεις της, συνθέτουν ένα πρόβλημα για το οποίο υπάρχει περιορισμένη γνώση και αναφορά στην διεθνή βιβλιογραφία και αποτελεί ενδιαφέρον αντικείμενο έρευνας στον Ευρωπαϊκό χώρο, ο οποίος κατέχει τα πρωτεία στον τομέα της αιολικής ενέργειας.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έχει βαθιές τις ρίζες της στο χρόνο. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όμως αναπτύχθηκε ουσιαστικά στα τέλη του 21-ου αιώνα λόγω της εξέλιξης της σχετικής τεχνολογίας, της ραγδαία αυξανόμενης τάσης για εκμετάλλευση των εναλλακτικών-ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και της ανάγκης πλέον να διαφυλαχθεί το οικοσύστημα. Το έτος 2004 μόνο, εγκαταστάθηκαν μονάδες ισχύος 8.321 MW ανεβάζοντας την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ στα 47.616 MW, ικανοποιώντας τις ηλεκτρικές ανάγκες 67 εκατ. ανθρώπων. Αφετηρία για αυτή την εξέλιξη θεωρείται η δεκαετία '80 με πρωτοπόρες τις ΗΠΑ. Την τελευταία δεκαετία όμως πρωτοστατεί η ευρωπαϊκή παρουσία στην επικράτεια της οποίας βρίσκεται το έτος 2004 το 73% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος (από 2000 σταθερά άνω του 70%). Οι σημαντικότερες χώρες-παραγωγοί είναι η Δανία (9 %), η Γερμανία (49 %) και η Ισπανία (24 %), ενώ η Ελλάδα παρά το ισχυρό αιολικό δυναμικό που έχει, υστερεί σημαντικά (1,4 %).

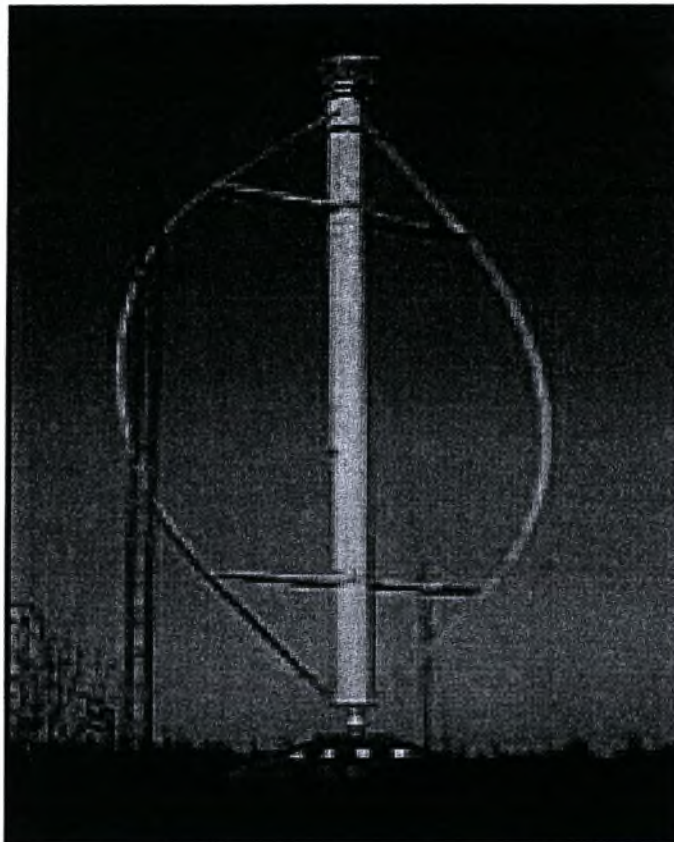
Οι αριθμοί αυτοί δείχνουν το ενδιαφέρον και την ανάγκη για βελτίωση και ανάπτυξη των αιολικών συστημάτων. Η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των συστημάτων αφορά ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Φωτογραφία 1) ενώ λίγες είναι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα που χρησιμοποιούνται πλέον (Darrieus type, Φωτογραφία2). Ο

χαρακτηρισμός οριζόντιος και κατακόρυφος αφορά τον άξονα περιστροφής της πτερωτής, δηλαδή τον κύριο φορέα του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας ω του ρότορα. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα φαίνονται στην Φωτογραφία 1.

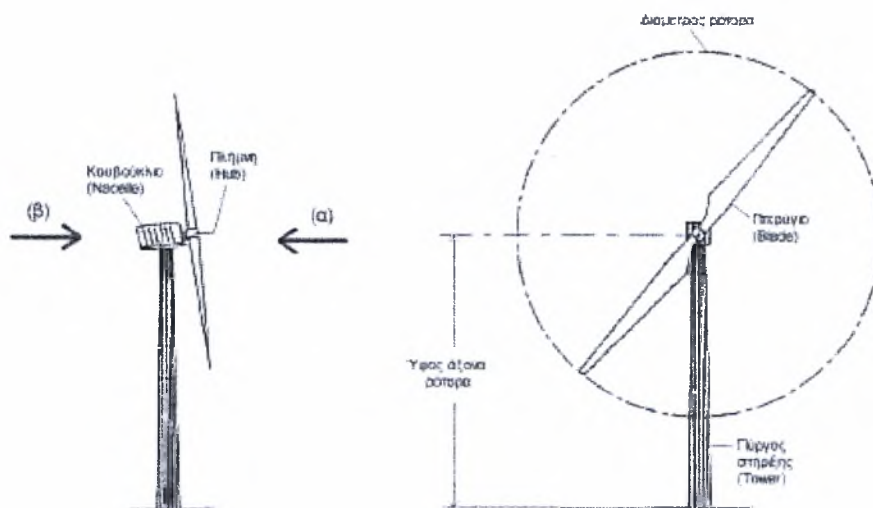


Φωτογραφία 1: Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα 120 kW από το αιολικό πάρκο στη περιοχή του Απολιθωμένου Δάσους στο Σίγρι της Λέσβου.

Μια ανεμογεννήτρια χαρακτηρίζεται από την ονομαστική της ισχύ P , τη διάμετρο του ρότορα D (rotor diameter), το ύψος του άξονα ή της πλήμνης H (hub height) και τον αριθμό των πτερυγίων z . Ακόμη ένα σημαντικό μέγεθος είναι ο λόγος ταχυτήτων λ_0 (tip speed ratio) που εκφράζει το λόγο της μέγιστης γραμμικής ταχύτητας περιστροφής του πτερυγίου προς την μέση ταχύτητα του ανέμου. Μια ανεμογεννήτρια αποδίδει την μέγιστη ισχύ της για λόγο $\lambda_0 \approx 7,5$ όπου $\lambda_0 = (\omega \cdot D/2)/U_\infty$.



Φωτογραφία 2: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα.



Σχήμα 1: Σκαρίφημα σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα δύο πτερυγίων.

Τα κυριότερα προβλήματα που παρουσιάζονται στην λειτουργία τέτοιων συστημάτων έγκεινται στο γεγονός ότι η ροή του ανέμου, σε γενικές γραμμές, δεν είναι σταθερή ούτε κατά διεύθυνσή ούτε κατά μέτρο. Συνεπεία αυτών, από μεν ηλεκτρολογικής-ενεργειακής σκοπιάς, δεν μπορούν οι ανεμογεννήτριες να υποστηρίξουν από μόνες τους αξιόπιστα σε μεγάλο βαθμό τις ανάγκες του δικτύου ηλεκτροδότησης. Ως φέρουσες δε μηχανολογικές κατασκευές καταπονούνται από δυναμικά φορτία ποικίλης μορφής και εύρους (σχετιζόμενα με τα στοχαστικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τα μετεωρολογικά φαινόμενα), τα οποία είναι ικανά να οδηγήσουν σε κόπωση και αστοχία των υλικών ακόμη και στην καταστροφή της ανεμογεννήτριας. Το πιο ευαίσθητο τμήμα της ανεμογεννήτριας από πλευράς μηχανικής φόρτισης και αντοχής είναι σαφώς ο ρότορας και συγκεκριμένα τα πτερύγιά του.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα είναι η τοποθέτηση της πτερωτής ως προς την ροή του ανέμου. Εάν ο άνεμος φυσάει κατά το βέλος (α) όπως φαίνεται στην Σχήμα 1, ώστε η πτερωτή να προηγείται του πύργου στήριξης ως προς τη ροή, τότε η ανεμογεννήτρια λέγεται ότι είναι τύπου ανάντι ή προσήνεμα τοποθετημένη (upwind), ενώ στην αντίθετη περίπτωση, (β), είναι τύπου κατάντι ή υπήνεμα τοποθετημένη (downwind). Βέβαια ο τύπος της ανεμογεννήτριας καθορίζεται κατά την σχεδίαση διότι και οι δύο αυτές περιπτώσεις έχουν διαφορετική φιλοσοφία κατασκευής και λειτουργίας. Ακόμη επειδή ο άνεμος δεν φυσάει από την ίδια κατεύθυνση πάντα, το κουβούκλιο μαζί με τον ρότορα έχουν την δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (yaw) με την χρήση πτερυγίου ή άλλου μηχανισμού, ο οποίος στρέφει την πτερωτή στην κατεύθυνση του ανέμου. Στις κατάντι τύπου μηχανές αυτό δεν είναι απαραίτητο καθώς είναι αυτοδιευθυνόμενες στην ροή σε αντίθεση με τις ανάντι. Τα πτερύγια όμως δέχονται μια διαταραγμένη ροή (απόρρευμα) που προέρχεται από τη βάση στήριξης και το κουβούκλιο, πράγμα πολύ δυσμενές για την πτερωτή. Μικρότερης έντασης, αλλά όχι σημασίας, είναι το φαινόμενο αυτό για τις ανάντι μηχανές όπου, η ύπαρξη του πύργου και το έλλειμμα ταχύτητας ανάντι από αυτόν, γίνονται ρευστομηχανικά αντιληπτά από τα πτερύγια. Το πρόβλημα αυτό αφορά και τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. Η αλληλεπίδραση των πτερυγίων με τον πύργο στήριξης, που βρίσκεται εντός του ροϊκού πεδίου, ήταν αρχικά το αντικείμενο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος JOULE III-ROTOW, 1998-2000.

Γενικά, αλληλεπιδράσεις σωμάτων με απορρεύματα απαντώνται σε πολλά επιστημονικά πεδία (ρευστομηχανική, δυναμική, θερμοδυναμική, μεταφορά θερμότητας, χημικές διεργασίες κ.α.) με ποικίλες τεχνολογικές εφαρμογές (πηητικές μηχανές, στροβιλοκινητήρες-jet, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες κ.α.). Ένα τέτοιο πρόβλημα είναι η αλληλεπίδραση δίνης-πτερυγίου (BVI...blade-vortex interaction) που παρουσιάζεται σε στροβιλομηχανές. Τα πτερύγια των ελικοπτέρων παραδείγματος χάριν κατά την λειτουργία σε ειδικές συνθήκες ή σεκατάσταση ελιγμών προσπίπτουν στις εκρέόμενες δίνες ακροπτερυγίου (tip trailing vortices)). Επίσης στην κατηγορία αυτή ανήκει και η αλληλεπίδραση στάτορα ρότορα (RSI...rotor-stator interaction) που εμφανίζεται π.χ. μεταξύ των διαδοχικών βαθμίδων στις αξονικές στροβιλομηχανές.

Στην μεταπτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε, εστιάζεται η προσοχή στην ρευστομηχανική συμπεριφορά απορεύματος ταλαντούμενων πτερυγίων που αλληλεπιδρά με πτερύγιο και επάγει σε αυτό δυναμικά μεταβαλλόμενα φορτία, όπως επίσης και ο συνδυασμός αυτών των φορτίων με τυρβώδη ροή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αναφέρονται συνοπτικά η θεωρία και οι μέχρι τώρα μελέτες που σχετίζονται με την δημιουργία ημιτονοειδών ροών από ταλαντούμενα πτερύγια που είναι τοποθετημένα μέσα σε σήραγγα ροής αέρα. Αρχικά καταστρώνονται οι εξισώσεις που περιγράφουν την ημιτονοειδή ροή που προσπίπτει πάνω σε πτέρυγα καθώς και η φυσική του προβλήματος. Στη συνέχεια περιγράφονται άλλες μέθοδοι δημιουργίας ημιτονοειδών ροών και τα αποτελέσματα των ερευνών στο συγκεκριμένο θέμα. Τέλος παρουσιάζονται οι θεωρητικές, οι υπολογιστικές και οι πειραματικές μελέτες πάνω στη δημιουργία ημιτονοειδών ροών από ταλαντούμενα πτερύγια.

2.2 Μια ταλαντούμενη διάταξη για την παραγωγή ημιτονοειδών ροών

Από τον H.Starountzi [1981] κατασκευάστηκε μια ταλαντούμενη διάταξη η οποία τοποθετήθηκε μέσα σε μια αεροσήραγγα και σαν σκοπό είχε τη δημιουργία ημιτονοειδών ροών που θα προσκρούουν πάνω σε πτέρυγα. Η δημοσίευση της εργασίας αυτής έγινε το 1981 Όπως βλέπουμε και στο σχήμα 2, η διάταξη αποτελείται από δύο " δισδιάστατες "αεροτομές που εσωκλείονται μεταξύ δύο κάθετων τοίχων που στην ουσία οδηγούν τον αέρα και είναι ικανές να παράγουν ανοδικά ή ημιτονοειδή ρεύματα αέρα. Αυτή η κατασκευή έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με προϋπάρχουσες αεροσήραγγες παραγωγής ασταθούς ροής. Η θεωρητική ταχύτητα ανοδικού ρεύματος που προβλέπεται από μαθηματικά μοντέλα για ρεύματα αέρα που παράγονται από ταλαντούμενες αεροτομές, έρχονται σε συμφωνία με αυτά που προκύπτουν από το συγκεκριμένο πείραμα.

ανάμεσα σε δύο μεγάλα ταλαντούμενα πτερύγια που βρίσκονταν στην έξοδο μιας ανοιχτής αεροσήραγγας. Μάλιστα στο εσωτερικό των πτερυγίων προσάρμοσαν ένα μηχανισμό δημιουργίας δινών ώστε η ταχύτητα μετάδοσης των δινών να είναι ίση με την ελεύθερη ταχύτητα της αεροσήραγγας. Τέλος οι Hakkinen και Richardson (1957) και ο Newton το (1973) χρησιμοποίησαν μια μόνο ταλαντούμενη πτέρυγα ενώ οι Maeda και Kobayakawa (1970) και ο Sawyer (1972) χρησιμοποίησαν πολλές ταλαντούμενες πτέρυγες. Αυτή η προσθήκη δημιούργησε πιο ισχυρές ριπές ανέμου, όμως έκανε το πρόβλημα πιο περίπλοκο.

2.2.1 Περιγραφή εξισώσεων ημιτονοειδούς ροής

Αρχικά πρέπει να πούμε ότι όπως φαίνεται και στο σχήμα 2 οι πτέρυγες έχουν χορδή c και η ταχύτητα της ελεύθερης ροής είναι U . Εξαιτίας της κίνησης των πτερυγίων πίσω τους δημιουργείται ένα ασταθές πεδίο ροής που οφείλεται σε κάποιες δίνες οι οποίες είναι χρονικά εξαρτημένες. Η τιμή αυτών των ασταθών ροών $\gamma_w(\xi,t)$ για μια μεμονωμένη ταλαντούμενη πτέρυγα μπορεί να υπολογιστεί από τη θεωρία λεπτών αεροτομών (thin airfoil theory) η οποία αναπτύχθηκε από τους Von Karman και Sears (1938) και οι αντίστοιχες ταχύτητες από τον νόμο των Biot-Savart. Για τους υπολογισμούς αυτούς πρέπει να κάνουμε κάποιες υποθέσεις :

- i. Οι αεροτομές είναι εξιδανικευμένες ως επίπεδα πιάτα εκτελώντας ημιτονοειδείς ταλαντώσεις μικρού εύρους.
- ii. Οι δίνες πίσω από την αεροτομή συγκεντρώνονται στην νοητή γραμμή της προέκτασης της χορδής της αεροτομής και μεταφέρονται με την ελεύθερη ταχύτητα της σήραγγας U .
- iii. Οι δίνες λίγο πιο πίσω από την αεροτομή δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στον υπολογισμό των ταχυτήτων.
- iv. Η συνθήκη Kutta-Joukowski τηρείται πάντα (Bisplinghoff et al 1958).
- v. Η επίδραση των τοιχών της αεροσήραγγας δεν λαμβάνεται υπ' όψιν προς το παρόν.

Η θέση κάθε σημείου πάνω στη χορδή της αεροτομής κατά της διάρκεια της ταλάντωσης δίνεται από το πραγματικό μέρος της παρακάτω εξίσωσης :

$$z_a(x,t) = \bar{z}_a(x)e^{i\omega t} \quad (1)$$

Όπου $i = \sqrt{-1}$ και $\omega = 2\pi n$ είναι η γωνιακή ταχύτητα της ταλάντωσης. Το κέντρο των αξόνων x, ξ και z είναι τοποθετημένο στο κέντρο της χορδής της αεροτομής που ταλαντώνεται, ενώ η δύναμη της άνωσης w και αυτή της οπισθέλκουσας u είναι έχουν ίδια φορά με τα θετικά των αξόνων z και x αντίστοιχα.

Η συνοριακή συνθήκη της μηδενικής ταχύτητας στην επιφάνεια της αεροτομής είναι:

$$w_a(x,t) = \frac{\partial z_a(x,t)}{\partial t} + \frac{U \partial z_a(x,t)}{\partial x} \quad (2)$$

Όπου w_a είναι η ταχύτητα στην επιφάνεια της αεροτομής στην κατεύθυνση z . Για μικρές ταλαντώσεις όλες οι ποσότητες που εξαρτώνται από το χρόνο υποθέτουμε ότι είναι ίσες με το $e^{i\omega t}$

$$\gamma_a(x,t) = \bar{\gamma}_a(x)e^{i\omega t} \quad (\text{Στροβιλότητα στο όριο της πτέρυγας}) \quad (3)$$

$$\gamma_a(\xi,t) = \bar{\gamma}_a(\xi)e^{i\omega t} \quad (\text{Στροβιλότητα στο απόρρευμα της πτέρυγας}) \quad (4)$$

$$\Gamma(t) = \bar{\Gamma} e^{i\omega t} \quad (\text{Κυκλοφορία δινών στην πτέρυγα}) \quad (5)$$

Χρησιμοποιώντας την θεωρία της λεπτής αεροτομής (Bisplinghoff et al 1958) το δίνες στο απόρρευμα για μια μεμονωμένη αεροτομή γίνεται:

$$\bar{\gamma}_w(k, \xi) = \frac{-4}{\pi(H_1^{(2)}(k) + iH_0^{(2)}(k))} \times \int_{-1}^1 \sqrt{\frac{1+x^*}{1-x^*}} \bar{w}_a(x^*) dx^* e^{-ik\xi^*} \quad (6)$$

Όπου $k=\omega c/2U$, $x^*=2x/c$, $\xi^*=2\xi/c$ και $H_1^{(2)}(k)$ $H_0^{(2)}(k)$ είναι οι συναρτήσεις Hankel δευτέρου βαθμού.

Για τον υπολογισμό των u και w για μια δίνη ο νόμος Biot-Savart δίνει:

$$u(x, z, t) = -\frac{z}{2\pi} \int_{c/2}^{\infty} \frac{\bar{\gamma}_w(\xi) e^{i\omega t}}{(x-\xi)^2 - z^2} d\xi \quad (7)$$

$$w(x, z, t) = -\frac{1}{2\pi} \int_{c/2}^{\infty} \frac{(x-\xi) \bar{\gamma}_w(\xi) e^{i\omega t}}{(x-\xi)^2 - z^2} d\xi \quad (8)$$

Τέλος στο σημείο B τα διανύσματα των ταχυτήτων μπορούν να δοθούν από τις παρακάτω σχέσεις :

$$W_B = w(x, z_1, t) + w(x, z_2, t) \quad (9)$$

$$u_B = u(x, z_1, t) + u(x, z_2, t) \quad (10)$$

2.2.2 Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικά αποτελέσματα

Δύο αεροτομές NACA 0015 με μήκος χορδής $c=0,203$ m (8 in) και άνοιγμα πτέρυγας 0,838 m (33 in) τοποθετήθηκαν σε μια αεροσήραγγα χαμηλών ταχυτήτων (Aeronautical Department ,Imperial College). Οι δύο αεροτομές συνδέονται με δύο δρομείς που βρίσκονται εκατέρωθεν τους και με ένα εκκεντρικά περιστρεφόμενο άξονα και έτσι αναγκάζονται σε κίνηση διαγράφοντας γωνία θ_0 γύρω από τον άξονα x όπως φαίνεται και στο σχήμα 2, δημιουργώντας ημιτονοειδή κίνηση του αέρα που διέρχεται εξ αυτών. Με αυτές τις αεροτομές μπορούμε να επιτύχουμε χωρίς προβλήματα ταλαντώσεων συχνότητες f άνω των 28 Hz και γωνία περιστροφής $\theta_0=3,2^\circ$.

Με αυτά τα δεδομένα έχουμε για τις αεροτομές τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\bar{z}_a(x,t) = (x-l)\theta_o e^{i\omega t} \quad (11)$$

Και για $\xi > c/2$

$$\bar{\gamma}_w(\xi) = F(k) e^{-i2k\xi/c} \quad (12)$$

Όπου
$$F(k) = -4U\theta_o \frac{[1 + (0,5 - 2l/c)ki]}{H_1^{(2)}(k) + H_0^{(2)}(k)} \quad (13)$$

Από τις σχέσεις (7),(8),(9),(10) και για $\chi \gg c/2$ έχουμε :

$$w_B = \frac{1}{2} iF(k) e^{i(\omega t - 2kx/c)} (e^{-2k|z_1|/c} + e^{-2k|z_2|/c}) \quad (14)$$

Για τις περιοχές I,II,III του σχήματος 1 ισχύει:

$$u_B = \frac{1}{2} F(k) e^{i(\omega t - 2kx/c)} (e^{-2k|z_1|/c} + e^{-2k|z_2|/c}) \quad (15a)$$

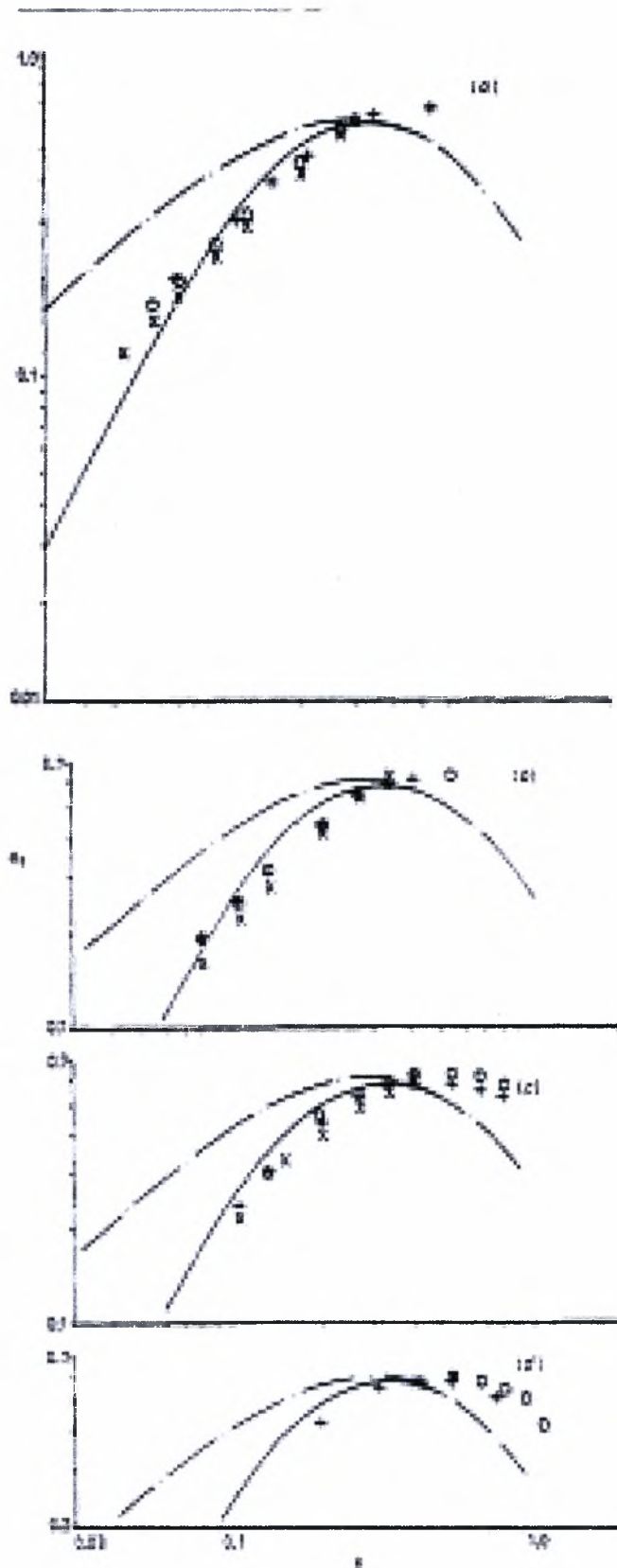
Για την περιοχή II ανάμεσα στις δύο αεροτομές ισχύει:

$$u_B = \pm \frac{1}{2} F(k) e^{i(\omega t - 2kx/c)} (e^{-2k|z_1|/c} + e^{-2k|z_2|/c}) \quad (15b)$$

Όπου τα αρνητικά είναι για την περιοχή II που είναι όμως κοντά την I και τα θετικά για την περιοχή II που είναι κοντά την III.

Στα διαγράμματα 2.1 (a-d) η ένταση των ριπών του ανέμου δίνεται από τη σχέση :

$$\alpha_g = (w_B^2)^{1/2} / (U \theta_o / \sqrt{2})$$



Σχήμα 2.1: Πειραματικές και υπολογιστικές αδιάστατες τιμές της έντασης των ριπών του ανέμου στην κεντρική γραμμή. Υπολογιστικές αδιάστατες τιμές: χωρίς επίδραση του τοίχου - - -: με επίδραση του τοίχου _____. Πειραματικές τιμές: X, $\theta_0=10,1^\circ$; O, $\theta_0=6,9^\circ$; + $\theta_0=3,6^\circ$. a) $Re=4 \times 10^5$, b) $Re=3 \times 10^5$, c) $Re=2,2 \times 10^5$, d) $Re=1,6 \times 10^5$.

Η a_g υπολογίστηκε με τη βοήθεια της σχέσεως (14) και συγκρίνεται με τις τιμές που μετρήθηκαν στο πείραμα που έγινε και ελήφθησαν πάνω στην νοητή κεντρική γραμμή που περνάει ανάμεσα τους και στο απόρευμα σε απόσταση ίση με $6c$. Η ανάλυση που έγινε έδειξε ότι το φάσμα της δύναμης στην βασική συχνότητα των ριπών ανέμου, η οποία είναι ίση με τη συχνότητα ταλάντωσης των αεροτομών, ήταν τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από ότι σε άλλες συχνότητες (οι οποίες π.χ δημιουργήθηκαν από υψηλότερες αρμονικές ή από μηχανικές δονήσεις του συστήματος). Επιπρόσθετα η πειραματική τιμή του a_g υπολογίστηκε με βάση τον υπολογισμό του εμβαδού της περιοχής που σχηματίστηκε κάτω από την ψηλότερη κορυφή της δύναμης και ύστερα υπολογίστηκε η τετραγωνική ρίζα αυτού. Ανάλογες πειραματικές μετρήσεις έγιναν και για το w_B^{-2} και βρέθηκαν να συμφωνούν με τις αντίστοιχες υπολογιστικές.

Οι υπολογιστικές και οι πειραματικές τιμές για τις εντάσεις των ριπών του ανέμου συμπίπτουν μόνο όταν λαμβάνουμε υπ' όψιν μας την επίδραση του τεχνητού τοίχου και ειδικά σε χαμηλές συχνότητες. Σε χαμηλούς αριθμούς k , σε αντίθεση με τη συνεχή διασπορά που υποθέσαμε, η κυματοειδής συμπεριφορά του αέρα είναι πιθανό να εμφανιστεί πιο σύντομα δημιουργώντας έτσι υψηλότερες αρμονικές στο ανοδικό ρεύμα (upwash) αέρα και στην οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας. Πράγματι οι μετρήσεις (Starountzis 1978) έδειξαν ότι ενώ η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας σε συχνότητα ίση με την συχνότητα των ριπών του ανέμου είναι κοντά στο μηδέν για $z_1 = z_2$, όπως περιμέναμε και από τη σχέση (15a), ενώ για συχνότητα διπλάσια της συχνότητας των ριπών του ανέμου είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την w_B .

Η ένταση των ριπών του ανέμου είναι ομοιόμορφη μέσα στο 6% πάνω από τις αποστάσεις της μιας χορδής και στην οριζόντια και στην y κατεύθυνση, η οποία στη κατεύθυνση z εξαρτάται μόνο από το k όπως φαίνεται από τη σχέση (14). Σε αποστάσεις $0,1 z_0$ πάνω και κάτω από την νοητή κεντρική γραμμή η ένταση των ριπών του ανέμου a_g περίπου 8% σε σχέση με την τιμή της όταν ήταν πάνω στην κεντρική γραμμή για $x=6c$, $k=0,8$. Η "μη περιστροφική" ροή επεκτάθηκε σε μια μεγάλη περιοχή μεταξύ των αεροτομών. Στην downstream συνιστώσα και σε απόσταση $10c$ η "μη περιστροφική" ροή μειώθηκε περίπου $0,35 z_0$ για $\theta_0 = 10,1^\circ$ και $k=0,55$. Ο συντελεστής συσχέτισης στην y κατεύθυνση σε συχνότητα ίση με την συχνότητα των ριπών του ανέμου είναι κοντά στο $0,99$ για $k=0,4$ και ο συντελεστής συσχέτισης στην y κατεύθυνση σε απόσταση $2c$ μειώνεται για μικρότερα k . Συγκρίνοντας την φάση της ημιτονοειδούς ταχύτητας σε διάφορες θέσεις στην οριζόντια κατεύθυνση, συμπεραίνουμε ότι η ένταση των ριπών του

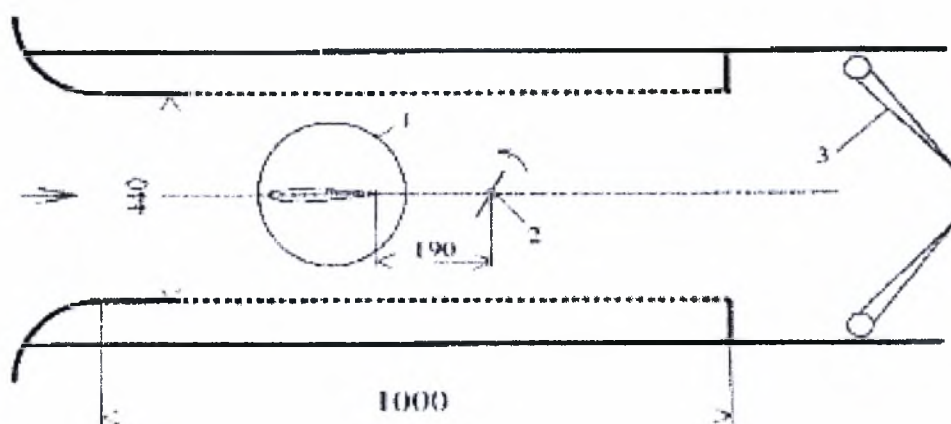
ανέμου μεταδίδεται στην κατάντι κατεύθυνση με την ίδια περίπου ταχύτητα με αυτή της ελεύθερης ροής.

Συμπερασματικά αναφέρεται ότι η διαστατή συνιστώσα στο ανοδικό ρεύμα της έντασης των ριπών του ανέμου δεν εξαρτάται από την γωνία κλίσης των αεροτομών ούτε από τον αριθμό Re στις περιοχές τουλάχιστον που μελετήθηκαν. Τέλος τα πλεονεκτήματα της κατασκευής που περιγράφηκε είναι

- i. Ότι μπορεί να καλύψει μεγάλη κλίμακα συχνοτήτων χωρίς να μεταβάλλεται η ταχύτητα της ελεύθερης ροής.
- ii. Μπορεί να δημιουργεί συνδυασμένες οριζόντιες-εγκάρσιες ριπές ανέμου που μεταφέρονται με την ελεύθερη ταχύτητα του αέρα που ρέει στην σήραγγα.
- iii. Έχει μια σχετικά ευρεία περιοχή "μη περιστροφικής" ροής που αντιτίθενται στα χαρακτηριστικά της αεροτομής.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την πίεση στην επιφάνεια πτερυγίου που δέχεται ημιτονοειδή ροή

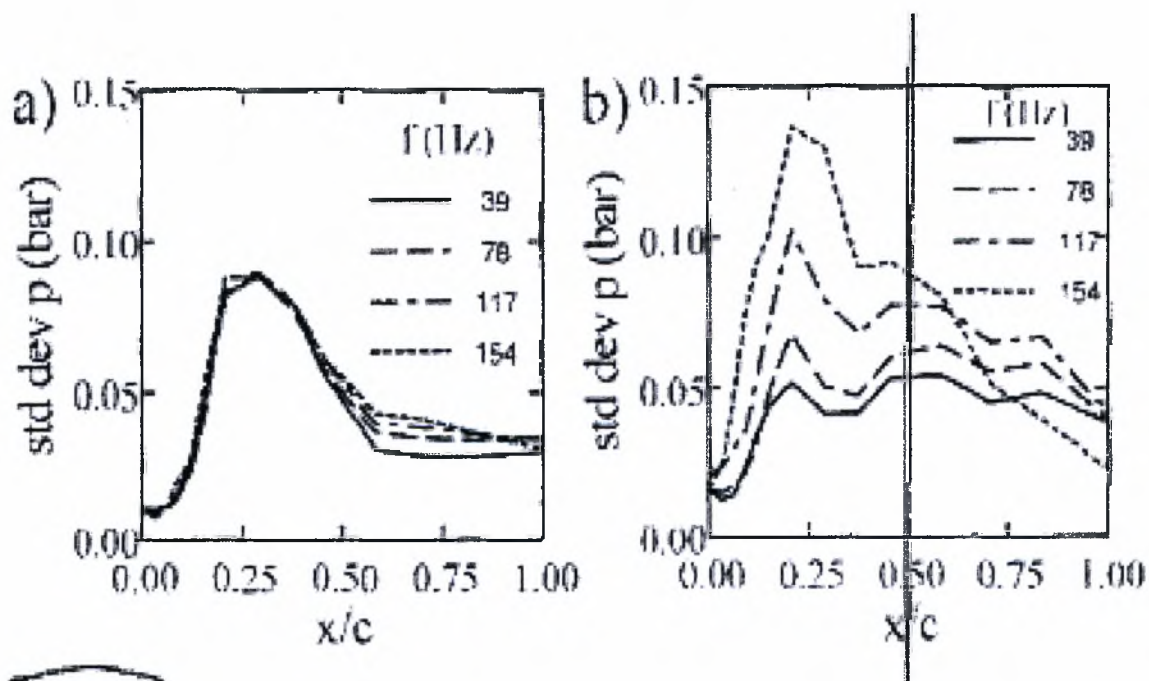
Η επίδραση των παραγόντων που επηρεάζουν την κατανομή πιέσεων πάνω στην δοκιμαζόμενη πτέρυγα, η οποία δέχεται ριπές αέρα που προκαλούνται με τεχνητό τρόπο μελετήθηκαν μεταξύ των άλλων από τους Selerowicz και Szumowski [2002]. Το πείραμα έγινε με πτέρυγα NACA 0012 και οι ταλαντώσεις δημιουργήθηκαν από ένα μηχανισμό που τοποθετήθηκε στο απόρρευμα του πτερυγίου και κινούμενος περιστροφικά προκαλούσε διαρκή επιτάχυνση και επιβράδυνση (σχήμα 2.2), του αέρα που έρρεε σε αεροσήραγγα στην οποία τοποθετήθηκε η δοκιμαζόμενη πτέρυγα. Πάνω στην πτέρυγα τοποθετήθηκαν 14 αισθητήρες που κατέγραφαν συνεχώς την πίεση στην επιφάνεια της πτέρυγας. Οι δοκιμές έγιναν για διάφορες συχνότητες ταλάντωσης και γωνίες του πτερυγίου.



Σχήμα 2.2: Πειραματική διάταξη σε σήραγγα πλάτους 100mm

2.3.1 Επίδραση της γωνίας του δοκιμαζόμενου πτερυγίου στην πίεση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του

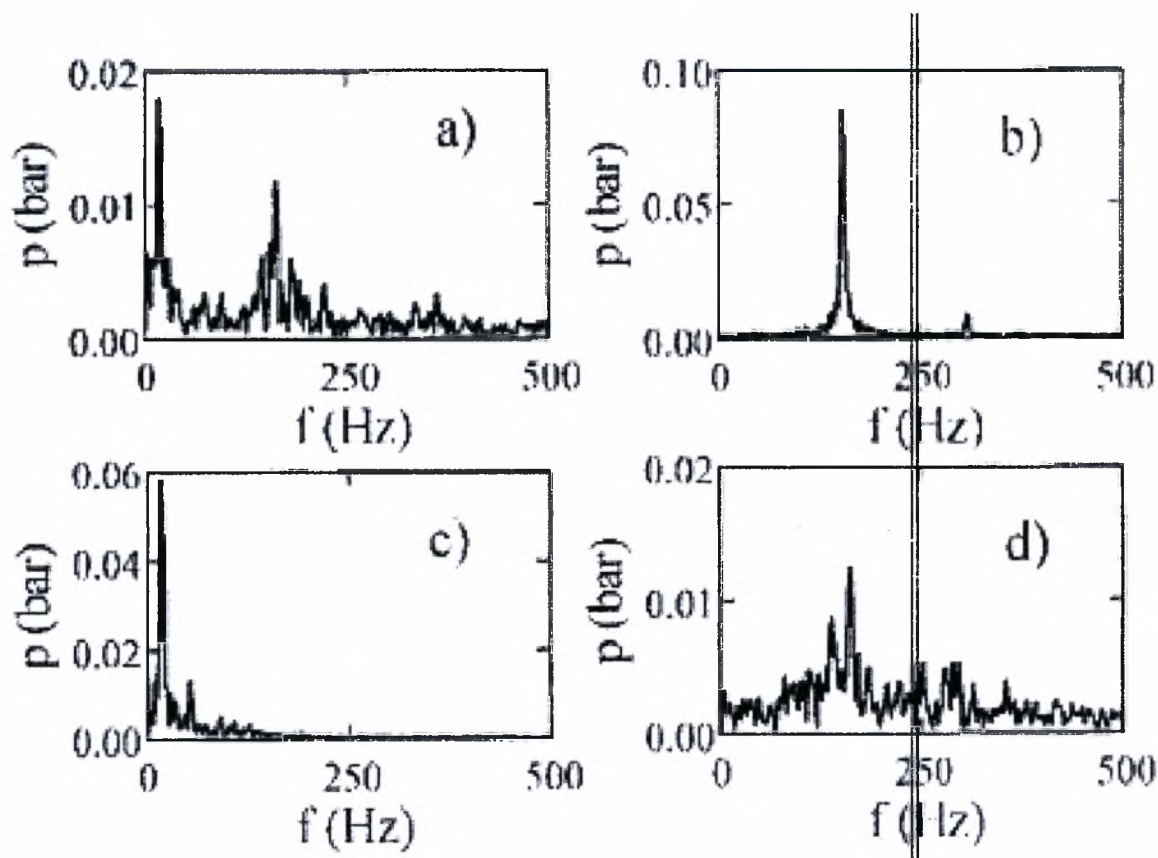
Όπως αναφέρεται στην προαναφερθείσα μελέτη υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν την πίεση στην επιφάνεια του πτερυγίου που δέχεται τις ριπές αέρα. Ένας από αυτούς είναι η γωνία που είναι τοποθετημένη η δοκιμαζόμενη πτέρυγα ως προς τον οριζόντιο άξονα x . Στα παρακάτω διαγράμματα 2.3 a,b φαίνεται η επίδραση αλλαγής της γωνίας του πτερυγίου στην τυπική απόκλιση της πίεσης ($std\ dev\ P$), που στην ουσία δείχνει την ένταση της. Στον άξονα x βλέπουμε τον όρο x/c , όπου x η απόσταση από την αρχή της πτέρυγας και c η χορδή της πτέρυγας. Στο σχήμα 2.3 a για γωνία πτερυγίου $\alpha=4^\circ$ βλέπουμε ότι δεν έχουμε κάποια αξιόλογη μεταβολή της $std\ dev\ P$ για όλες τις επιβαλλόμενες συχνότητες ($f=17,1-153,8$ Hz). Επίσης οι μεγαλύτερες ταλαντώσεις παρατηρούνται στο εύρος τιμών $0,15 < x/c < 0,4$. Αντίθετα όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.3 b στο οποίο η γωνία πτερυγίου είναι $\alpha=8,5^\circ$ το μέγεθος $std\ dev\ P$ είναι άμεσα εξαρτώμενο από την εκάστοτε επιβαλλόμενη συχνότητα και μάλιστα βλέπουμε ότι η τιμή του $std\ dev\ P$ μεγαλώνει καθώς αυξάνεται η συχνότητα της επιβαλλόμενης συχνότητας f .



Σχήμα 2.3: Τυπική απόκλιση της πίεσης (P) στην επιφάνεια πτέρυγας για διάφορες συχνότητες a) $\alpha=4^\circ$ b) $\alpha=8.5^\circ$

2.3.2 Επίδραση της επιβαλλόμενης συχνότητας στην πίεση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του δοκιμαζόμενου πτερυγίου

Η επίδραση της επιβαλλόμενης συχνότητας στην πίεση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του πτερυγίου είναι άλλο ένα θέμα που απασχόλησε τους Selerowicz και Szumowski στην εργασία τους. Στο σχήμα 2.4a-d βλέπουμε τα φάσματα των πιέσεων σε σχέση με την επιβαλλόμενη συχνότητα f . Οι τιμές της πίεσης αφορούν τον αισθητήρα που είναι τοποθετημένος στο κέντρο της πτέρυγας. Στο σχήμα 2.4a παρατηρούμε δύο κορυφές. Η πρώτη εμφανίζεται στην συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής ($f=17,1\text{Hz}$) και η δεύτερη στην φυσική ιδιοσυχνότητα του συστήματος, κάτι που πιστοποιείται και από το σχήμα 2.4d το οποίο έγινε για μηδενική συχνότητα ταλάντωσης ($f=0\text{ Hz}$). Όταν η επιβαλλόμενη συχνότητα είναι κοντά στη συχνότητα των ριπών του ανέμου ($f=158,7\text{ Hz}$), στο φάσμα εμφανίζεται μόνο μια ισχυρή κορυφή (σχήμα 2.4b). Για γωνία πτερυγίου $\alpha=4^\circ$ φαίνεται μόνο η μια κορυφή στο φάσμα, αυτή που αφορά την επιβαλλόμενη διαταραχή ($f=17,1\text{Hz}$), ενώ δεν διακρίνεται η κορυφή που δημιουργήθηκε στο σχήμα 2.4a ($\alpha=8^\circ$) και αφορά την φυσική ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

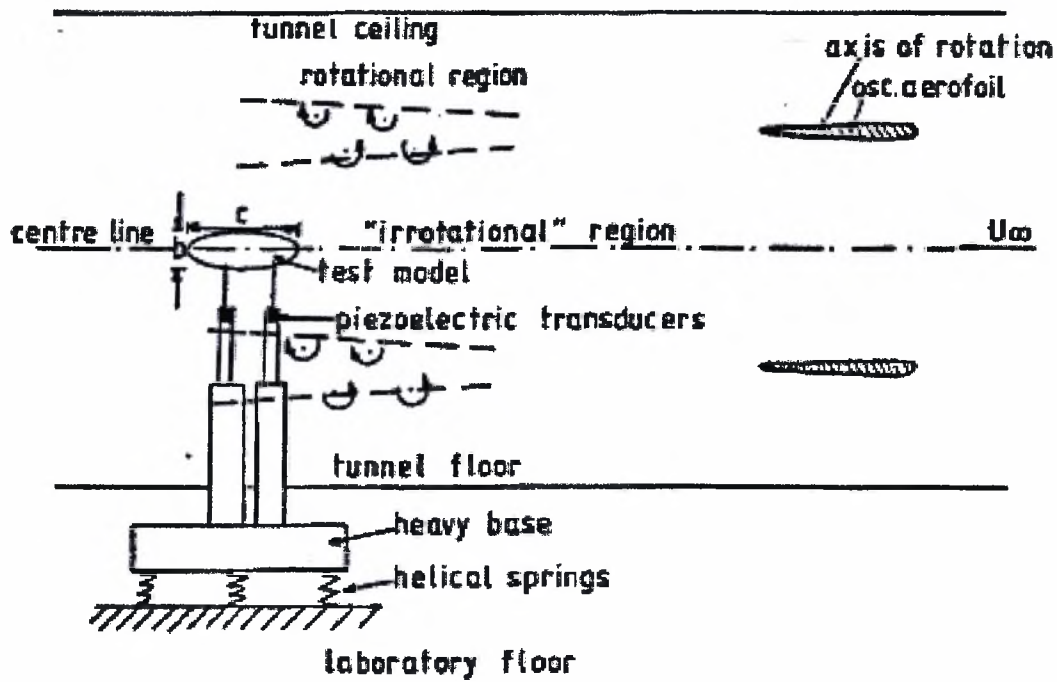


Σχήμα 2.4: Φάσματα δυνάμεων που ελήφθησαν για ένα σημείο στο κέντρο της πτέρυγας a) $f=17,1\text{ Hz}$ $\alpha=8,5^\circ$ b) $f=153,8\text{ Hz}$ $\alpha=8,5^\circ$ c) $f=17,1\text{ Hz}$ $\alpha=4^\circ$ d) $f=0\text{ Hz}$ $\alpha=8,5^\circ$

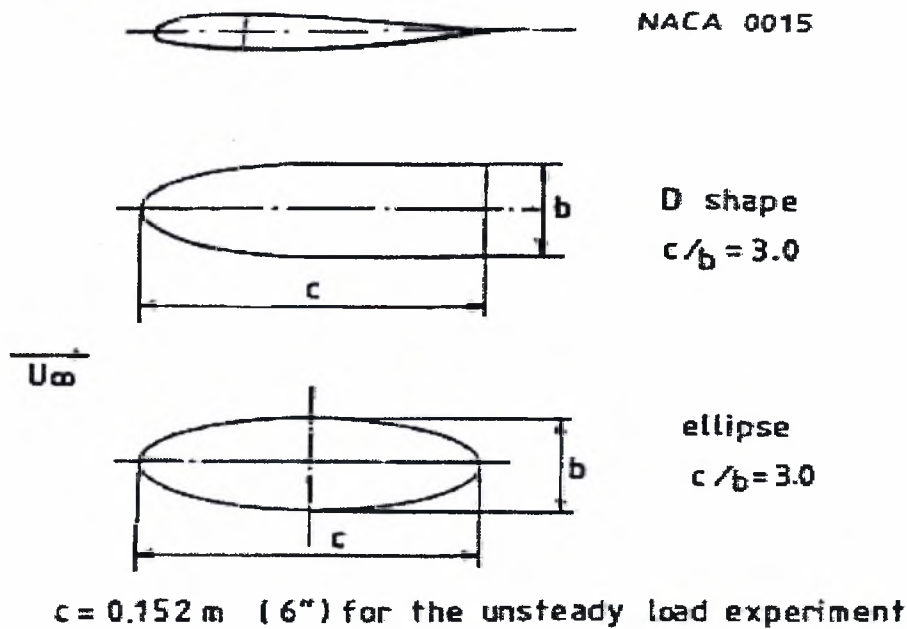
2.4 Επίδραση ημιτονοειδούς ροής σε κυλινδρικά παρεμβαλλόμενα στη ροή σώματα (Bluff bodies)

Σύμφωνα με τις μελέτες που αναφέραμε παραπάνω οι ερευνητές εξέτασαν την συμπεριφορά πτέρυγας που δέχεται ημιτονοειδή ροή, η οποία δημιουργείται με τεχνητό τρόπο σε σήραγγα ροής αέρα. Στην μελέτη των H.Starountzi και J.M.R Graham (1982) συγκρίθηκε η ασταθής άνωση που προκλήθηκε από ημιτονοειδή ροή και δέχτηκαν μια πτέρυγα NACA 0015, ένας κύλινδρος και ένα ελλειπτικό σχήμα. Η συχνότητες k που μελετήθηκαν ήταν μεταξύ 0,05 και 0,8 ενώ οι αριθμοί Reynolds ήταν από $1,2 \cdot 10^5$ μέχρι $3 \cdot 10^5$. Τα πειραματικά αποτελέσματα για την πτέρυγα και τον κύλινδρο ήταν σε απόλυτη συμφωνία με τα αντίστοιχα υπολογιστικά, ενώ δεν συνέβη το ίδιο με το ελλειπτικό σχήμα. Στην περίπτωση του ελλειπτικού σχήματος ο συντελεστής $A[k]$ βρέθηκε πειραματικά πιο χαμηλός από αυτόν που υπολογίστηκε θεωρητικά. Τέλος βρέθηκε ότι η κίνηση των δύο σημείων ελεύθερου διαχωρισμού στην συμπεριφορά της άνωσης του ελλειπτικού σχήματος.

Η ημιτονοειδής ροή παράχθηκε από το γνωστό σύστημα που περιγράφηκε και παραπάνω το οποίο αποτελείται από δύο ταλαντούμενα πτερύγια τα οποία προηγούνται του εκάστοτε δοκιμαζόμενου σώματος (σχήμα 2.5). Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά εύρη ταλάντωσης που σημαίνει τρεις διαφορετικές γωνίες θ_0 σε σχέση με την οριζόντιο που περνά από το κέντρο των πτερυγίων. Αυτές είναι $2\theta_0=20.2^\circ$ (large), $2\theta_0=13.7^\circ$ (medium), $2\theta_0=7.1^\circ$ (small). Επίσης οι συχνότητες ταλάντωσης των πτερυγίων ήταν μεταξύ 3 και 22 Hz ($0,05 < k < 0,8$). Τέλος όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6 χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι δοκιμαζόμενων σωμάτων.



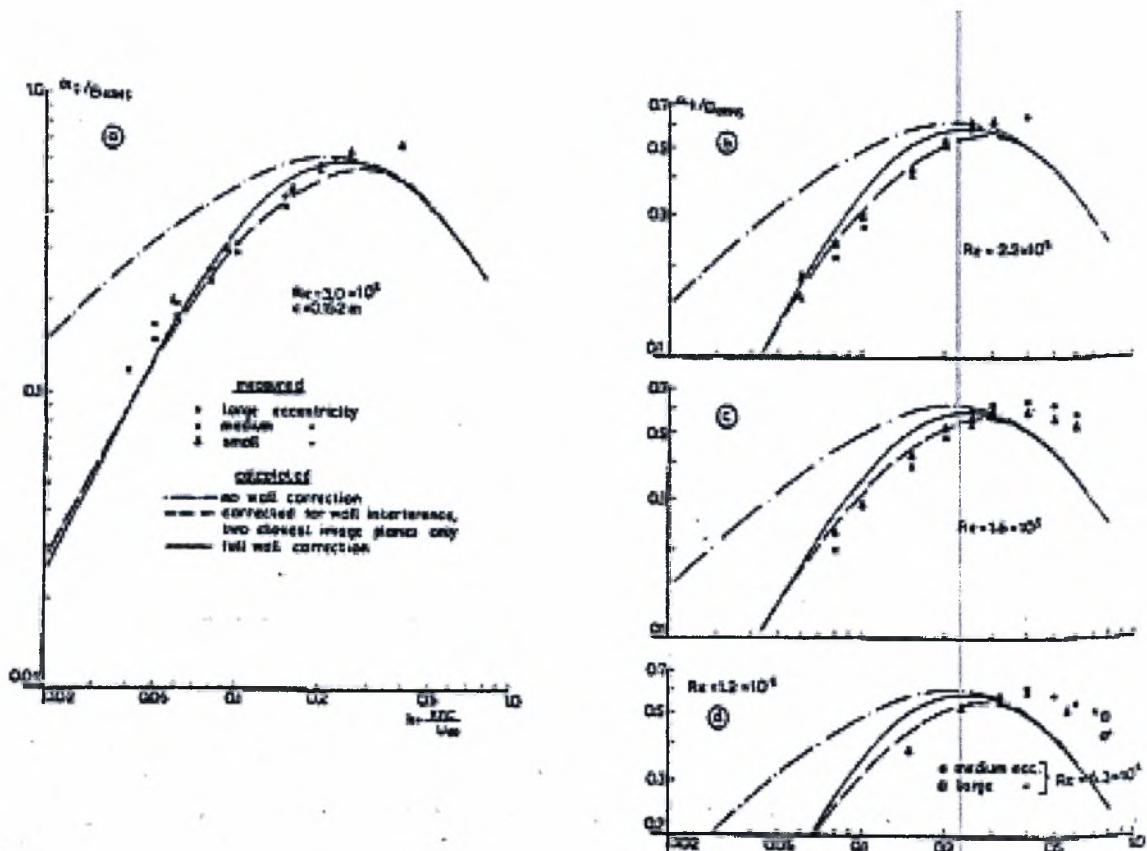
Σχήμα 2.5: Πειραματική διάταξη



Σχήμα 2.6: Διαφορετικοί τύποι δοκιμαζόμενων μοντέλων

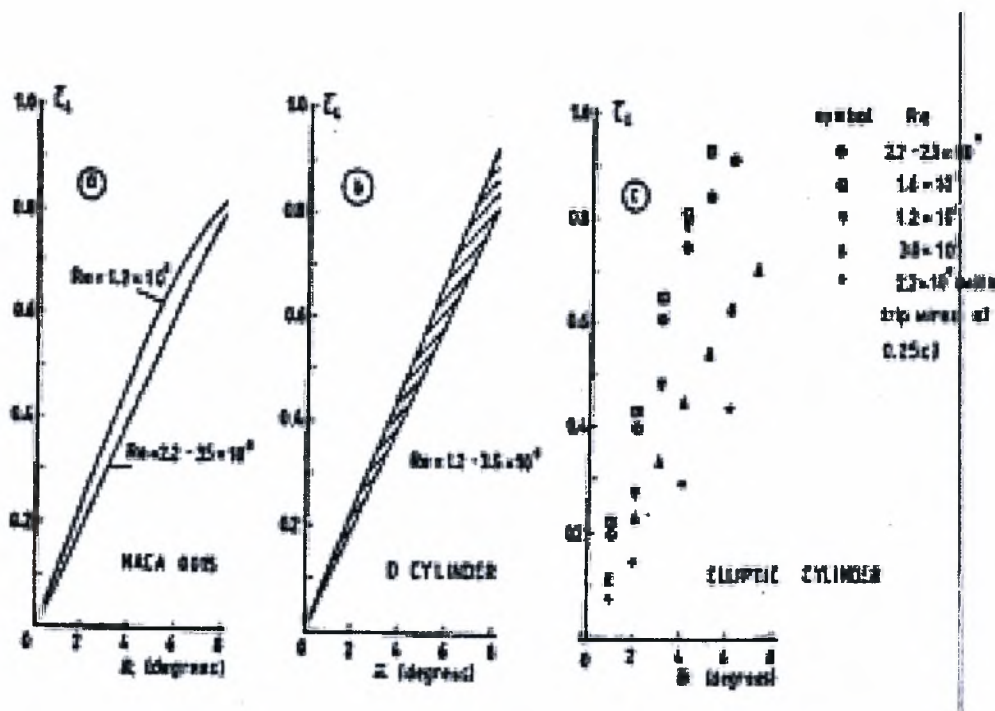
2.4.1 Παρουσίαση των μετρήσεων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πείραμα των H.Stapountzi και J.M.R Graham. Στο σχήμα 2.7 συγκρίνονται οι πειραματικές τιμές σε σχέση με τις θεωρητικές. Στον άξονα y παριστάνεται το μέγεθος a_g/θ_{oRms} , $a_g = \sqrt{w^2/U_\infty}$ και $\theta_{oRms} = \theta_o/\sqrt{2}$ που είναι αδιαστατοποιημένο και ουσιαστικά δείχνει την ένταση της δύναμης της οπισθέλκουσας (drag). Ενώ στον άξονα x αναπαρίσταται το $k = \pi n c / U_\infty$ που δείχνει την συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής. Παρατηρούμε λοιπόν ότι για όλους τους αριθμούς Re που χρησιμοποιήθηκαν και ανεξάρτητα του εύρους της γωνίας των πτερυγίων που δημιουργούν την ημιτονοειδή ροή, υπάρχει συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειραματικά μάλιστα προσεγγίζουν τα θεωρητικά πολύ καλά όταν μέσα στην αεροσήραγα τοποθετούνται οι δύο τοίχοι όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5 και περιορίζουν την ημιτονοειδή ροή ανάμεσά τους.



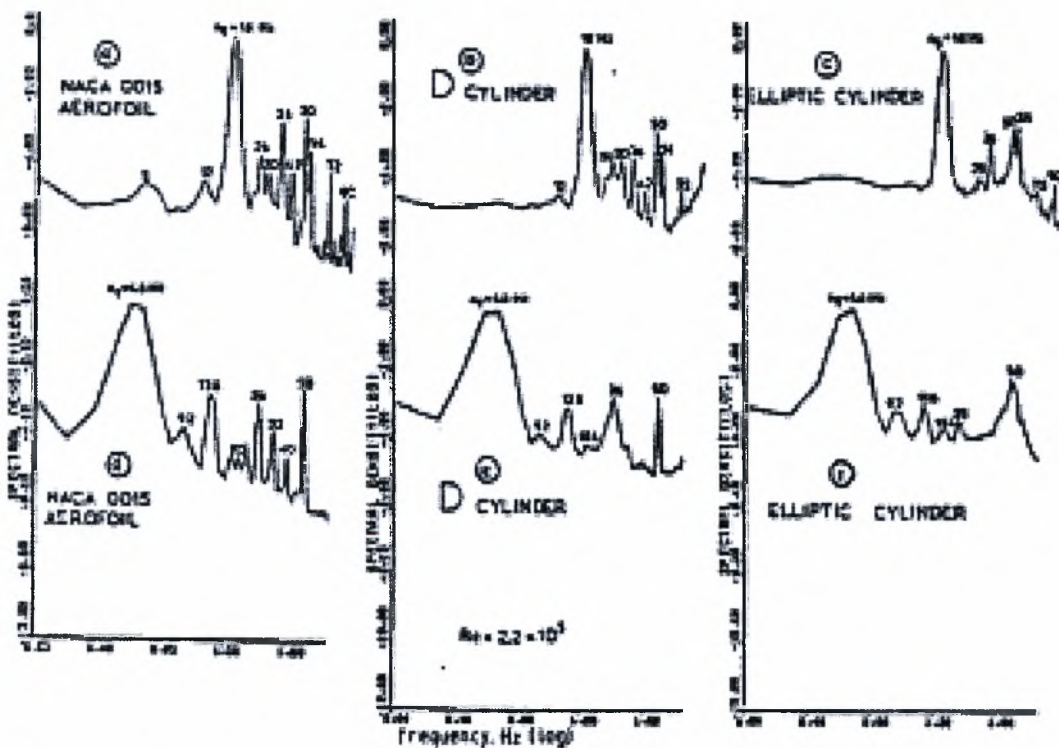
Σχήμα 2.7: Θεωρητικές και πειραματικές τιμές ένταση της δύναμης της οπισθέλκουσας (drag) στο κέντρα της αεροσήραγγας α) $Re=3 \times 10^5$ β) $Re=2.2 \times 10^5$ γ) $Re=1.6 \times 10^5$ δ) $Re=1.2 \times 10^5$

Ένα άλλο μέγεθος που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8 είναι ο συντελεστής άνωσης \bar{C}_L σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης $\alpha(^{\circ})$ που σχηματίζει το κυλινδρικό σώμα με τον άξονα x που περνάει από το κέντρο του. Στα σχήματα 2.8 a,b βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν για την πτέρυγα NACA 0015 και τον κύλινδρο σε όλους τους αριθμούς Re με εξαίρεση τον $Re = 1,2 \cdot 10^5$ που για την πτέρυγα καμπυλώνεται για $\bar{C}_L > 0,7$. Στην περίπτωση του ελλειπτικού σχήματος σχήμα 2.8 c παρατηρούμε ότι για όλους τους αριθμούς Re ο συντελεστής άνωσης \bar{C}_L αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης $\alpha(^{\circ})$.



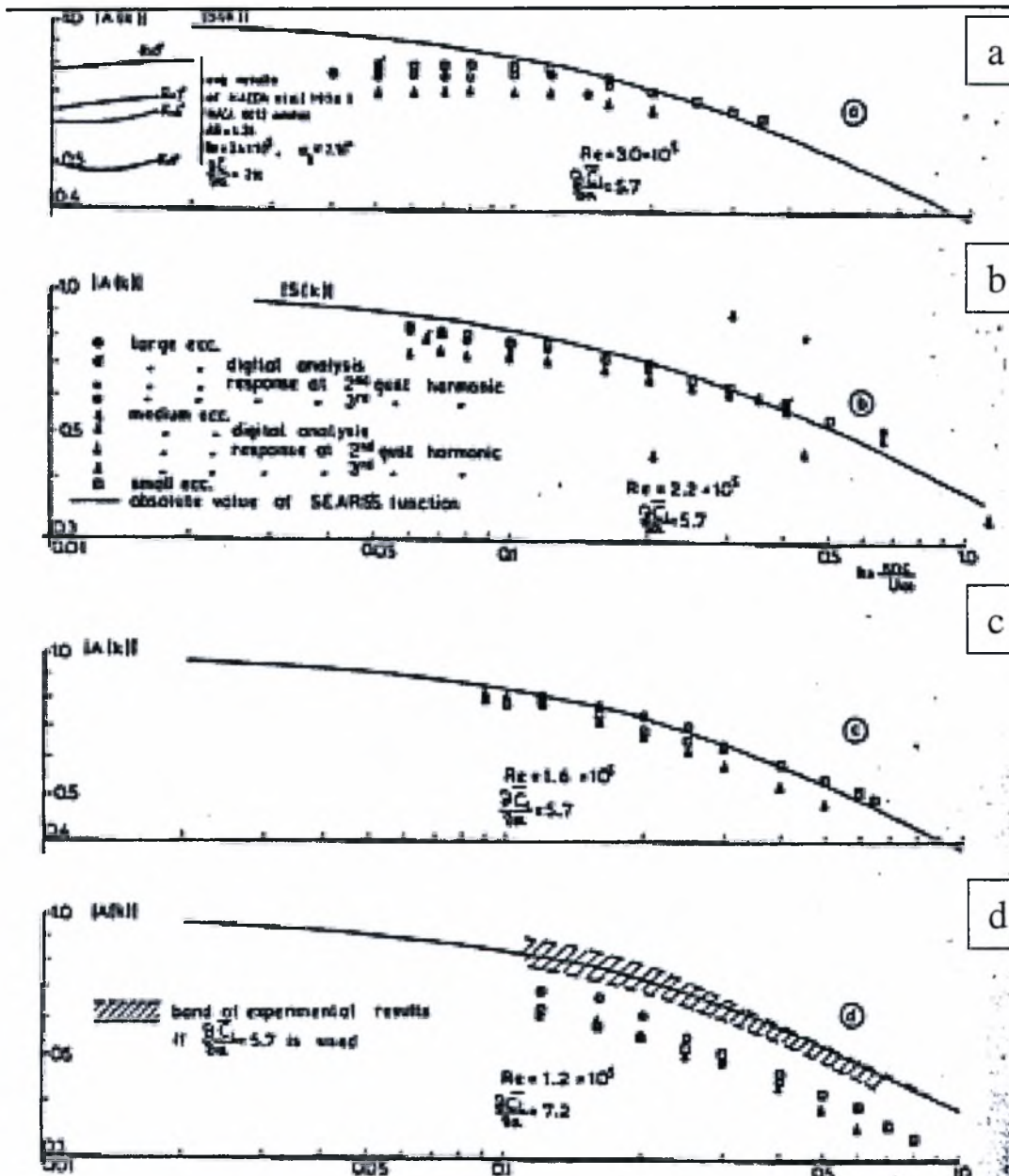
Σχήμα 2.8: Διάγραμμα του συντελεστή άνωσης \bar{C}_L σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης $\alpha(^{\circ})$ που σχηματίζει το κυλινδρικό σώμα με τον άξονα x που περνάει από το κέντρο *a)* πτέρυγα NACA 0015 *b)* κύλινδρος *c)* έλλειψη

Μετά την φασματική ανάλυση της δύναμης της άνωσης παίρνουμε το σχήμα 2.9 στο οποίο φαίνεται καθαρά η επιβαλλόμενη συχνότητα και για υψηλή συχνότητα $f=18$ Hz (σχήμα 2.9 a-c) αλλά και για χαμηλή $f=4,6$ Hz (σχήμα 2.9 d-f) για τα τρία δοκιμαζόμενα κυλινδρικά μοντέλα. Η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης των κυλινδρικών σωμάτων είναι περισσότερο από 290 Hz και δεν μπορεί να φανεί στα διαγράμματα μιας και αναπαρίσταται ένα εύρος συχνοτήτων ($0 < f < 22$ Hz). Οι υπόλοιπες χαμηλότερες κορυφές που φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα, αναπαριστούν κάποιο θόρυβο του περιβάλλοντος ή θόρυβο που προκαλείται από μηχανικά μέσα (π.χ μοτέρ αεροσήραγας), όπως επίσης και από αρμονικές χαμηλότερων συχνοτήτων. Να σημειώσουμε ότι στο παρακάτω διάγραμμα δεν συμπεριλαμβάνεται η συχνότητα της τύρβης. Τέλος το ελλειπτικό σχήμα δίνει την πιο μεγάλη σε εύρος κορυφή, κάτι που καταδεικνύει την ύπαρξη μη-γραμμικότητας στην απόκριση.



Σχήμα 2.9: Διαγράμματα φάσματος της δύναμης άνωσης (Lift) α)πτέρυγα NACA 0015 $f=18$ Hz
 b)κύλινδρος $f=18$ Hz c)έλλειψη $f=18$ Hz d)πτέρυγα NACA 0015 $f=4,6$ Hz e)κύλινδρος $f=4,6$ Hz f)έλλειψη
 $f=4,6$ Hz

Στην ίδια έρευνα έγιναν και διαγράμματα του συντελεστή της αεροδυναμικής συνάρτησης A [κ] σε σχέση με τον αριθμό k , που στην ουσία εκφράζει την συχνότητα ταλάντωσης. Ο συντελεστής A [κ] αφορά την δύναμη στην κάθετη διεύθυνση F_z (Lift) σε πτέρυγα NACA 0015. Τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν ακολουθούν στο σχήμα 2.10.



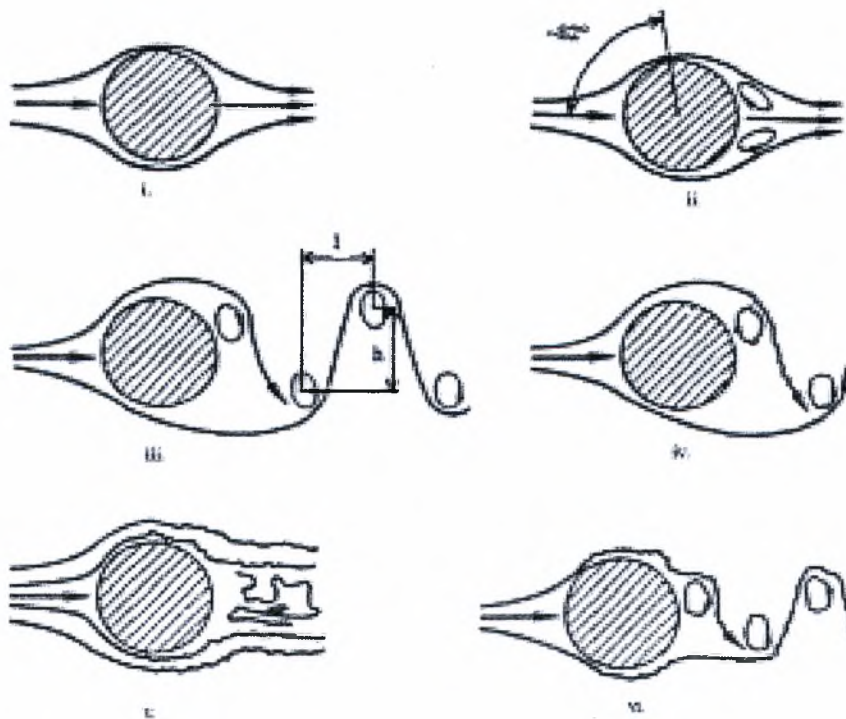
Σχήμα 2.10: Διαγράμματα του συντελεστή της αεροδυναμικής συνάρτησης A [κ] σε πτέρυγα NACA 0015 a) $Re=3 \times 10^5$ b) $Re=2.2 \times 10^5$ c) $Re=1.6 \times 10^5$ d) $Re=1.2 \times 10^5$

2.5 Άλλες μέθοδοι δημιουργίας ημιτονοειδών ροών

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το πρόβλημα των ημιτονοειδών που προσκρούουν πάνω σε πτέρυγα βρίσκει εφαρμογή σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (ανεμογεννήτριες, πτέρυγες αεροπλάνων και ελικοπτέρων κ.α) πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν με την μελέτη του φαινομένου. Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν και άλλες μέθοδοι δημιουργίας ημιτονοειδών ροών όπως η θεωρία των σωμάτων που παρεμβάλλονται στην ροή (bluff bodies) και δημιουργούν στο απόρευμα τους με τις κατάλληλες προϋποθέσεις ημιτονοειδή ροή. Παρακάτω παρατίθεται η μέθοδος της παρεμβολής ενός κυλίνδρου ώστε να δημιουργηθεί ημιτονοειδής ροή.

2.5.1 Παρεμβολή κυλίνδρου στη ροή για τη δημιουργία ημιτονοειδούς ροής

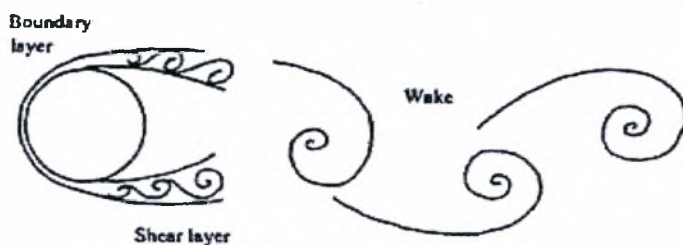
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανασκόπηση του Williamson (1996) αλλά και ευρύτερα, η όλη επιστημονική δραστηριότητα αυτού και των συνεργατών του γύρω από το αντικείμενο. Ακόμη οι κλασσικές εργασίες του Roshko (1954) έχουν σημαντικά συμβάλει στην κατανόηση των φαινομένων της ροής γύρω από κύλινδρο.



Σχήμα 2.11: Σχηματική αναπαράσταση της διαδιάστατης ροής γύρω από κύλινδρο, *i.* $Re < 5$, *ii.* $5 < Re < 50$, *iii.* $50 < Re < 194$, *iv.* $194 < Re < 3 \cdot 10^5$, *v.* $5 \cdot 10^5 < Re < 3,5 \cdot 10^6$ και *vi.* $3,5 \cdot 10^6 < Re$.

2.5.2 Στρωτή εκροή δινών ($50 < Re < 140-194$)

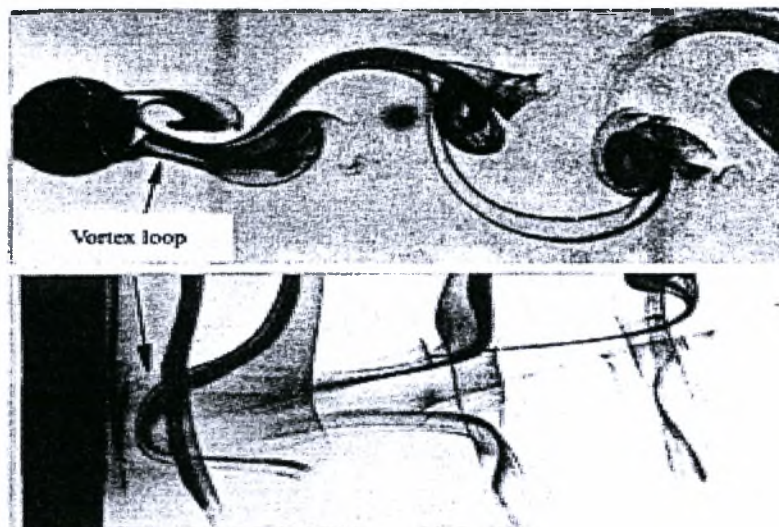
Στο σχήμα 2.11 φαίνεται η δημιουργία διάφορων ροών στο απόρευμα του κυλίνδρου ανάλογα με τον αριθμό Re . Συγκεκριμένα για την αριθμό $50 < Re < 194$ όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.11 iii) έχουμε τη δημιουργία κάποιων δινών. Η εκροή των δινών οδηγεί σε περιοδικά μεταβαλλόμενη φόρτιση του κυλίνδρου. Η περιοδικότητα της άνωσης συμπίπτει με την συχνότητα εκροής των δινών ενώ η συχνότητα μεταβολής της αντίστασης είναι διπλάσια [9]. Οι μεταβολές αυτές αποτελούν αιτία ταλάντωσης που σε περίπτωση συντονισμού μπορεί να οδηγήσουν στην καταστροφή. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί το «σφύριγμα» των ηλεκτρικών καλωδίων (Aeolian tones), για πολύ μεγαλύτερους αριθμούς Re φυσικά. Η διαταραχή που δημιουργεί ο κύλινδρος στην ροή (διατμητικά στρώματα ροής) διαχωρίζεται στην βιβλιογραφία σε τρία μέρη όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.12: α. στο οριακό στρώμα (boundary layer), β. στο απόρευμα που είναι η οδός των δινών von Karman (wake) και γ. τα ελεύθερα διατμητικά στρώματα που αποκολλώνται από τις δύο πλευρές του κυλίνδρου (shear layers) [10], [2]. Στην περιοχή που εξετάζεται και τα τρία μέρη παραμένουν στρωτά ενώ τα διατμητικά στρώματα σε αντίθεση με το απόρευμα είναι σταθερά (stable). Μέχρι εδώ η ροή πίσω από τον κύλινδρο και ιδίως το απόρευμα δεν παρουσιάζεται διαφοροποίηση στην κατά μήκος του κυλίνδρου διεύθυνση, δηλαδή είναι διδιάστατη (2-Δ).



Σχήμα 2.12: Επίδραση του κυλίνδρου στην ροή.

2.5.3 Μεταβατική περιοχή 3-D, τυρβώδους οδού von Karman ($194 < Re < 260$)

Σε αυτό το εύρος αριθμών Re η ροή των δινών von Karman μεταβάλλεται από στρωτή σε τυρβώδη και αποκτά 3-D οντότητα (Σχήμα 2.10.iv). Το όριο για τη μετάβαση δεν καθορίζεται αυστηρά στη σχετική βιβλιογραφία πρόσφατες ακριβείς μετρήσεις το τοποθετούν κοντά στην τιμή $Re=194$. Στη φωτογραφία 2 φαίνεται η οπτικοποίηση της συγκεκριμένης περιοχής.



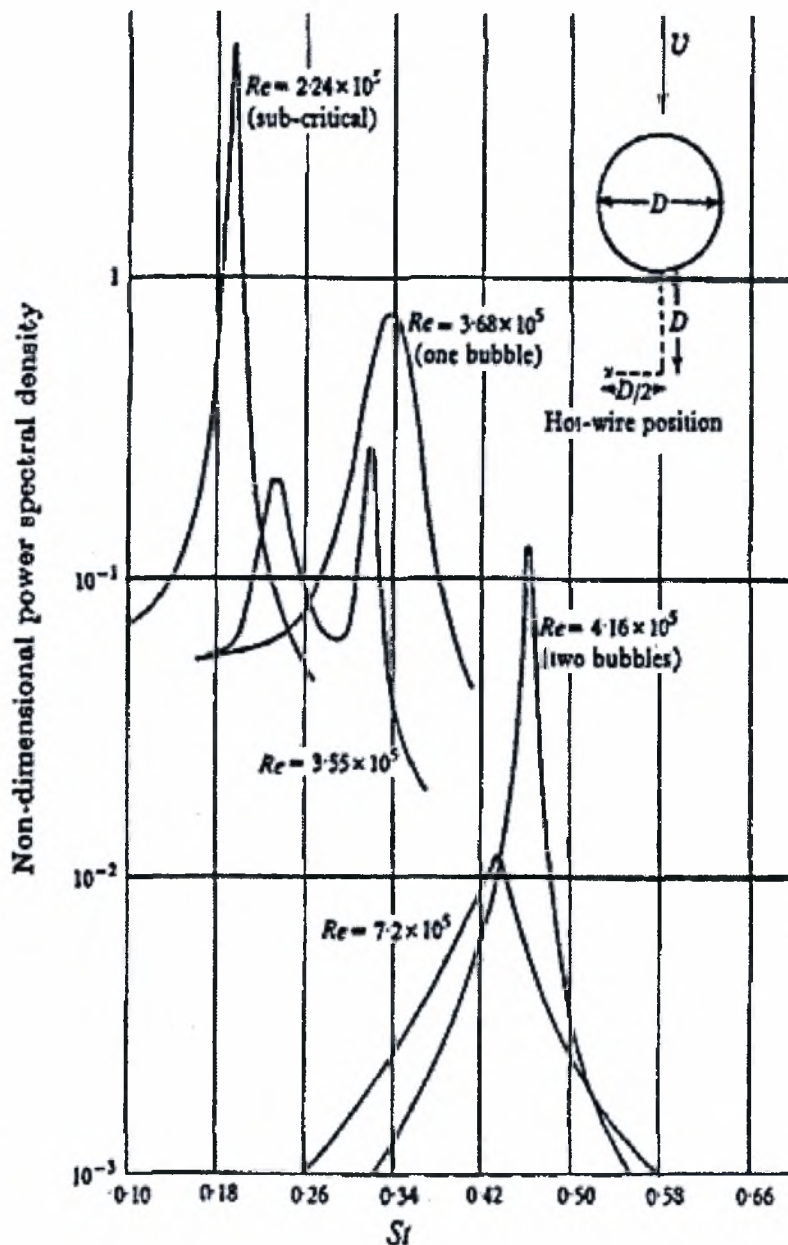
Φωτογραφία 2: Οπτικοποίηση απορρέυματος κυλίνδρου (ταυτόχρονη φωτογράφιση εγκάρσιας τομής και κάτοψης, όπου διακρίνεται η αστάθεια τύπου A

2.5.4 Κρίσιμη περιοχή περιοχή ($2 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$)

Η περιοχή αυτή της ροής αφορά το πρόβλημα της παρούσας εργασίας γιατί ο αριθμός Re της ροής που εξετάζεται είναι της τάξης $4,1 \cdot 10^5$. Έτσι θα ήταν χρήσιμη μια σύγκριση των χαρακτηριστικών της ροής που προκύπτει στο απόρρευμα κυλίνδρου ($Re=3 \cdot 10^5$) και στο απόρρευμα ταλαντούμενου παραθύρου παραγωγής ημιτονοειδούς ροής.

Εντός αυτού του εύρους αριθμών Re ($2 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$) λαμβάνει χώρα η τυρβώδης μετάβαση του οριακού στρώματος. Το απόρρευμα αποδιοργανώνεται δίνοντας ευρύ φάσμα συχνοτήτων εκροής και το πάχος του μειώνεται (Σχήμα 2.2.v.).

Η περιοχή της μετάβασης του οριακού στρώματος αναλύεται περαιτέρω από τον Zdravkonich και διαιρείται σύμφωνα με αυτόν σε 3 υπο-περιοχές στο εύρος $1 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^6$. Οι τρεις αυτές περιοχές παρουσιάζονται από τον Bearman (1969) όσον αφορά το φάσμα ισχύος έναντι του αριθμού St στο Σχήμα 2.12. Στο σχήμα αυτό είναι σαφής η εξασθένηση των δομών συναρτήσει του αριθμού Re.



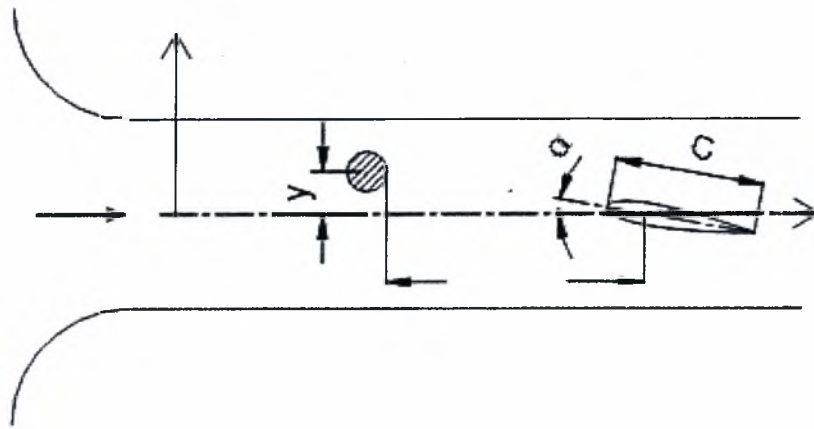
Σχήμα 2.13: Διάγραμμα φάσματος συχνοτήτων ταχύτητας, Re και St

2.5.5 Υπερκρίσιμη περιοχή ($Re > 5 \cdot 10^5$)

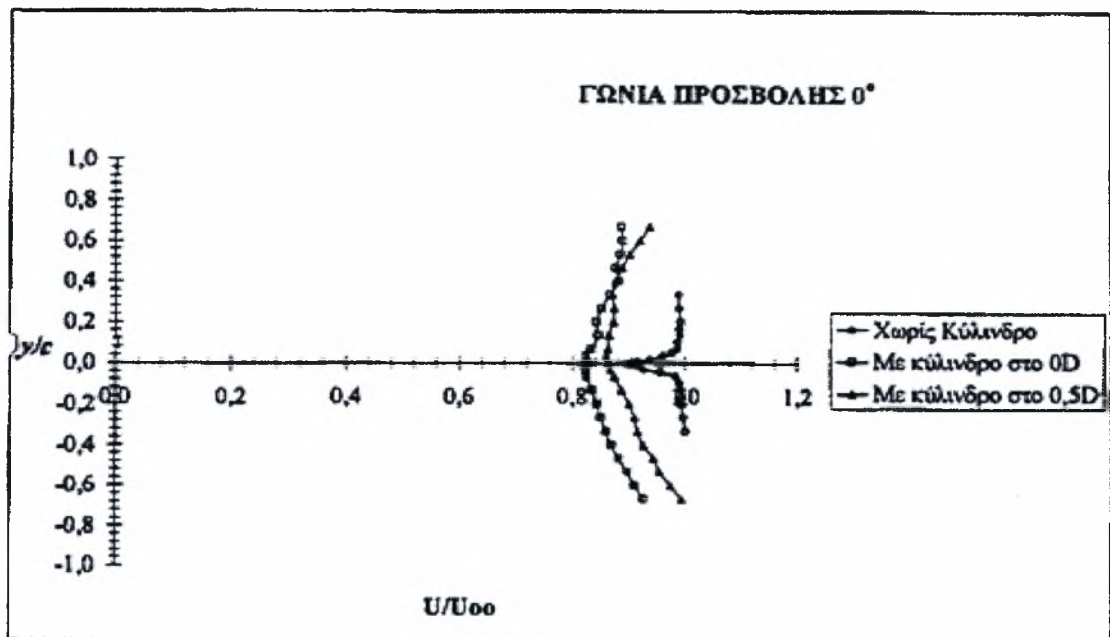
Σε αυτή την περιοχή η ροή έχει υποστεί την τυρβώδη μεταβολή και είναι συμμετρική έχοντας δύο φυσαλίδες αποκόλλησης-επανακόλλησης σε κάθε πλευρά του κυλίνδρου. Η θεωρία αυτή φάνηκε να μην ισχύει αφού ο Roshko (1961) έδειξε ότι παρουσιάζεται περιοδική εκροή δινών στην περιοχή αυτή (Σχήμα 2.10.vi.) με όλες τις συνέπειες που αυτό συνεπάγεται (ανάντι μετατόπιση σημείου αποκόλλησης, αύξηση CD και -CPB, πλάτυνση του απορρεύματος κτλ.). Ενδεικτικά, το όριο για την επανεμφάνιση των δινών τίθεται στην τιμή $Re = 3,5 \cdot 10^6$, και εξαρτάται (όπως και όλα τα όρια που αναφέρθηκαν) από όλους τους παράγοντες που εκτέθηκαν στην αρχή της ενότητας αυτής.

2.5.6 Αλληλεπίδραση πτερυγίου-απορεύματος

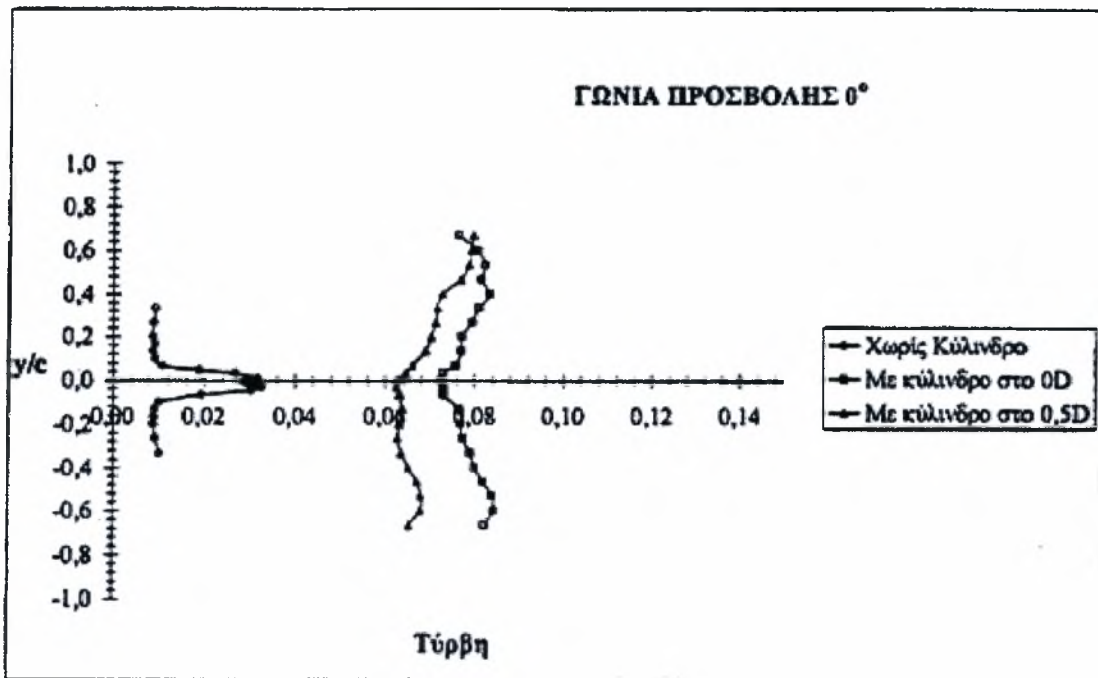
Συνέχεια και επέκταση του προβλήματος της διαχωριστικής πλάκας αποτελεί η διερεύνηση του φαινομένου όταν τη θέση της διαχωριστικής πλάκας λάβει ένα πτερύγιο. Οι Χαραλάμπους και Kallergis μελέτησαν το στατικό πρόβλημα σε αεροσήραγγας. Στο Σχήμα 2.13 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, όπου $c = 2,5D$. Για αριθμό $Re_{(D)} \approx 10^5$ και σε απόσταση $1,5c$ κατάντι της ακμής φυγής του πτερυγίου, παρατηρείται ότι η παρουσία του κυλίνδρου επικρατεί στην μορφή του απορρεύματος (Σχήματα 2.15 & 2.16) και η συνεισφορά του πτερυγίου για μικρές γωνίες προσβολής είναι πρακτικά αμελητέα.



Σχήμα 2.14: Σκαρίφημα στατικού προβλήματος αλληλεπίδρασης απορρευμάτων κυλίνδρου-πτέρυγας.

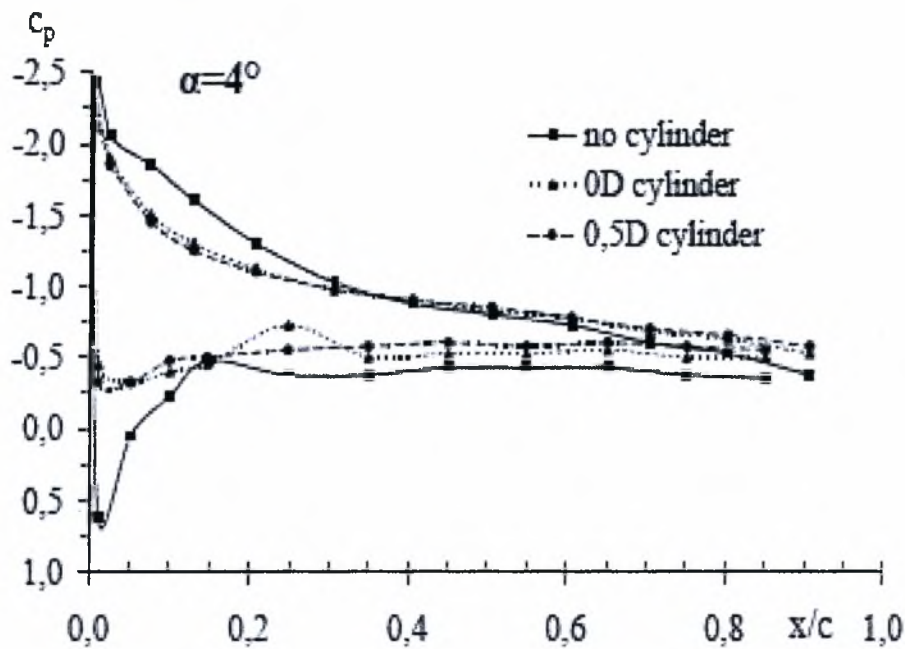


Σχήμα 2.15: Διανομή ταχύτητας σε απόσταση $1,5c$ από την ακμή φυγής του πτερυγίου

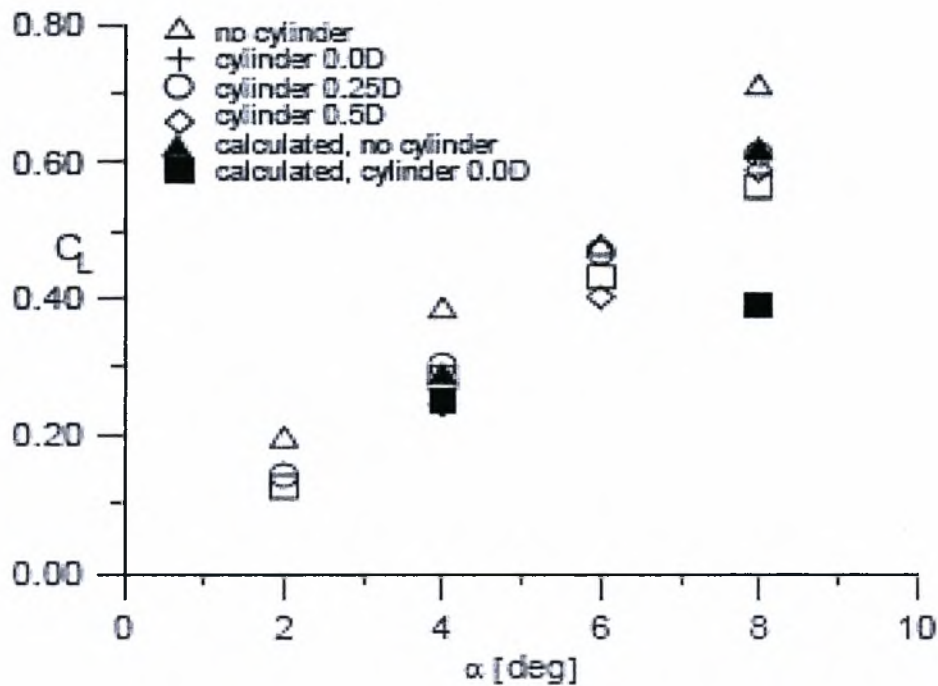


Σχήμα 2.16: Διανομή τύρβης (ανηγμένης στην μέση ταχύτητα) σε απόσταση $1,5c$ από την ακμή φυγής του πτερυγίου

Η δημιουργία δινών von Karman είναι αναμενόμενη, αφού η απόσταση κυλίνδρου-πτερυγας είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπεται η αλληλεπίδραση των διατμητικών στρωμάτων που οδηγεί στον σχηματισμό τους, λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις για το πρόβλημα της διαχωριστικής πλάκας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Βέβαια η ύπαρξη της πτερυγας είναι σημαντική και φαίνεται να συμβάλει στην εξασθένηση ή ακόμη και καταστροφή των δινών. Συστηματική ανάλυση των ευρημάτων των εργασιών αυτών, διεύρυνση του προβλήματος με συμπληρωματικές και νέες μετρήσεις καθώς και η υπολογιστική προσέγγιση οδήγησε, με τη συμμετοχή και του συγγραφέα, στην εργασία των Staporuntzis κ.α. Η παρουσία του κυλίνδρου γενικά ελαττώνει την κατανομή της πίεσης κοντά στην ακμή προσβολής, και ένα τυπικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και ο συντελεστής άνωσης C_L , Σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.17: Κατανομή πίεσης για $Re=10^5$ συναρτήσει της θέσης του κυλίνδρου ($y_0=0D$ και $0,5D$)

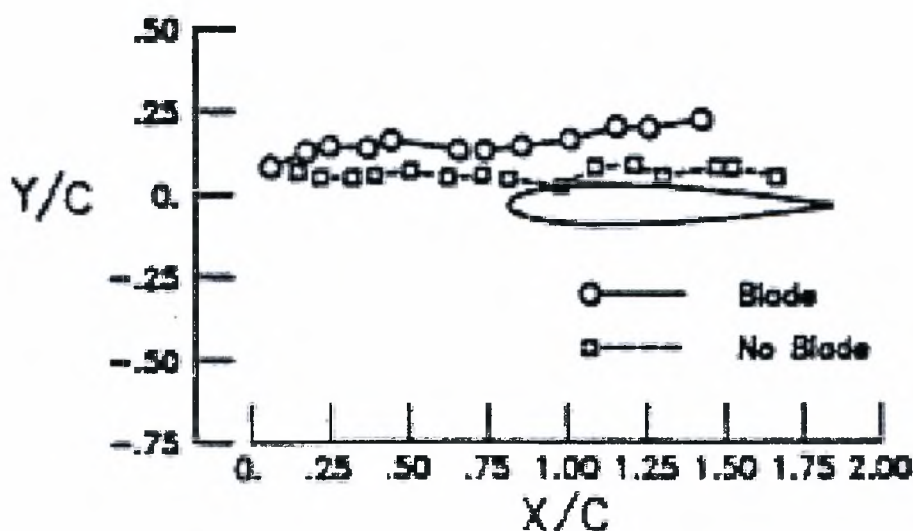


Σχήμα 2.18: Συντελεστής C_L βάσει μετρήσεων και υπολογισμών

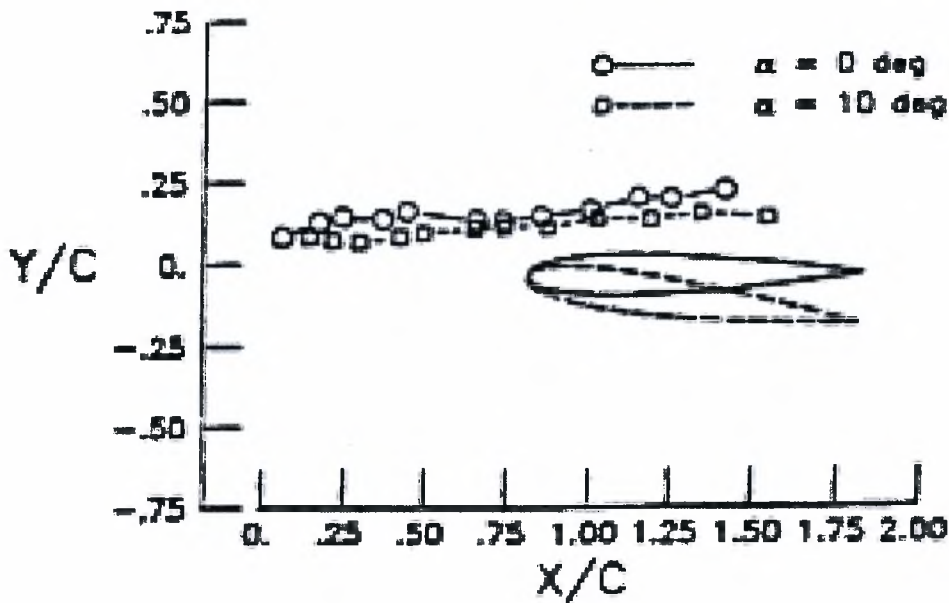
2.5.7 Αλληλεπίδραση πτερυγίου-δίνης (BVI)

Ένα άλλο ρευστομηχανικό φαινόμενο που είναι σχετικό με το πρόβλημα που εξετάζεται και γι' αυτό παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον είναι το σύστημα δίνης-πτερυγίου γνωστό με τον αγγλικό όρο blade-vortex interaction (BVI). Οι Horner κ.α. (1993) και Coton κ.α (2004) μελέτησαν πειραματικά το πρόβλημα παράγοντας σωλήνες δινών οι οποίοι αλληλεπιδρούν με το κατάντι τοποθετημένο πτερύγιο και ιδιαίτερα την δυναμική φόρτιση του πτερυγίου. Σε αντίστοιχη εργασία οι Booth και Yu (1986) μελετούν το ίδιο πρόβλημα με

στερεό σώμα ένα πτερύγιο NACA 0012 και αριθμό $Re(c)=8,3 \cdot 10^4$. Οι δίνες παράγονται με γεννήτρια-πτερύγιο που κινείται περιστροφικά με ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη γωνιακή ταχύτητα ώστε να παράγεται οδός αντίρροπων δινών με λόγο εγκάρσιας προς διαμήκη απόσταση ίσο με 0,2. Παρατηρήθηκε ότι καθώς οι δύο σειρές δινών κινούνται κατάντι όταν συναντούν το πτερύγιο αυξάνεται η μεταξύ τους εγκάρσια απόσταση λόγω του πάχους της αεροτομής όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.18. Όσο αυξάνει η αρχική εγκάρσια απόσταση της σειράς από το πτερύγιο (y_b) ελαττώνεται η απομάκρυνση και για $y_b=0,38c$ είναι σχεδόν αμελητέα. Η επίδραση της γωνίας προβολής του πτερυγίου στην συμπεριφορά των δινών είναι όπως θα αναμενόταν αν την θέση των δινών λάμβαναν σωματίδια. Δηλαδή, όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.19: Επίδραση της παρουσίας του πτερυγίου στην τροχιά της δίνης



Σχήμα 2.20: Επίδραση γωνίας τοποθέτησης του πτερυγίου στην τροχιά της δίνης

2.5.8 Τυρβώδης ροή πίσω από σταθερό πλέγμα

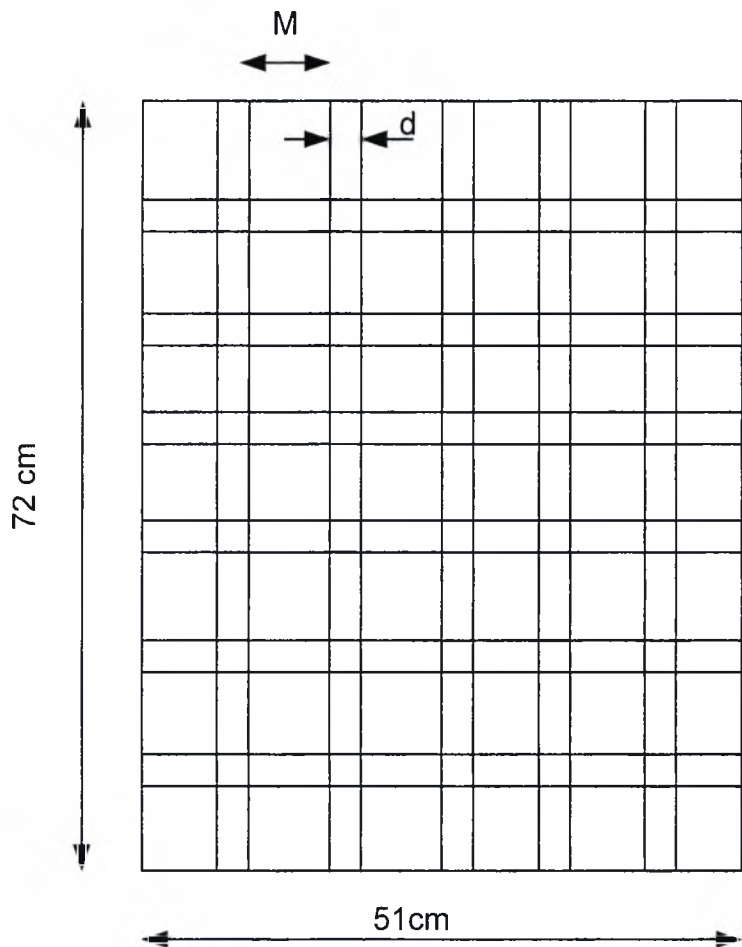
Η τυρβώδης ροή μπορεί να δημιουργηθεί με ποικίλους τρόπους. Στην περίπτωση μας δημιουργήθηκε από ένα ορθογωνικό πλέγμα. Το πλέγμα το οποίο αποτελείται από μπάρες πλάτους d τοποθετημένες παράλληλα και κάθετα της ροής (σχήμα 2.21), ώστε να δημιουργούν μικρά τετράγωνα πλάτους M . Όσο απομακρυνόμαστε από το πλέγμα τόσο μικραίνει η ένταση της τύρβης.

Η τυρβώδης ροή πίσω από πλέγμα χωρίζεται σε τρεις περιοχές:

1. Αρχική περιοχή για $20 \leq x_1 / M \leq 150 \Rightarrow \overline{u_1^2} \rightarrow x_1^{-1.2}$
2. Μεταβατική περιοχή για $150 \leq x_1 / M \leq 500 \Rightarrow$
3. Τελική περιοχή για $x_1 / M \geq 500 \Rightarrow \overline{u_1^2} \rightarrow x_1^{-2.5}$

Στην αρχική περιοχή για $20 \leq x_1 / M \leq 150$ και για ένα τυπικό πλέγμα σαν αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση μας με αναλογία $M / d = 5.33$ η μέση ταχύτητα δίνεται από την σχέση:

$$\frac{U_1}{u_1^2} \approx \frac{100}{C_p} * \frac{(x_1 - x_0)}{M}, \text{ όπου } C_p \approx 0.7 \text{ και η ταχύτητα ελεύθερης ροής } U_1 = 12 \text{ m/sec}$$



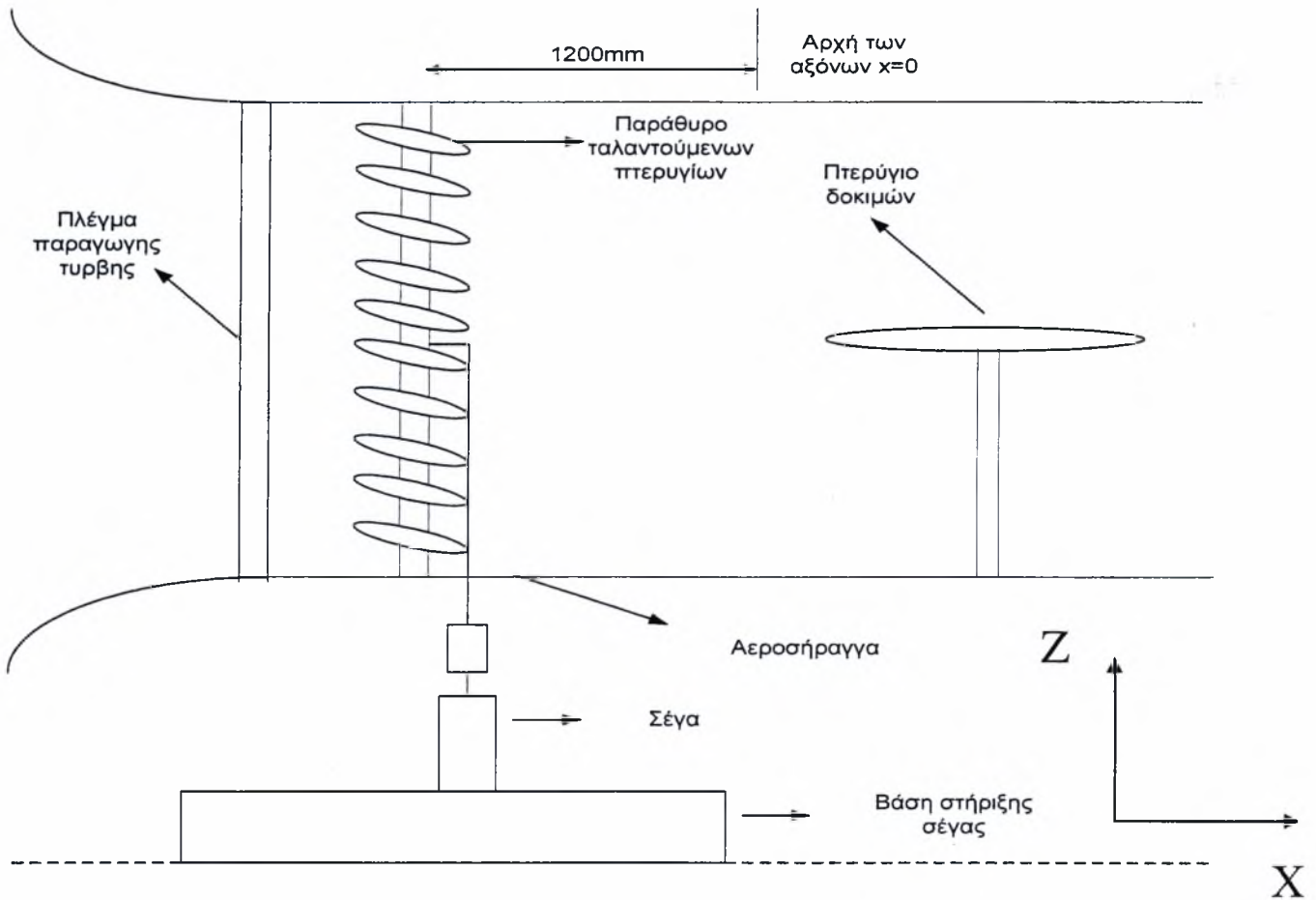
Σχήμα 2.21: Πλέγμα παραγωγής τυρβώδους ροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

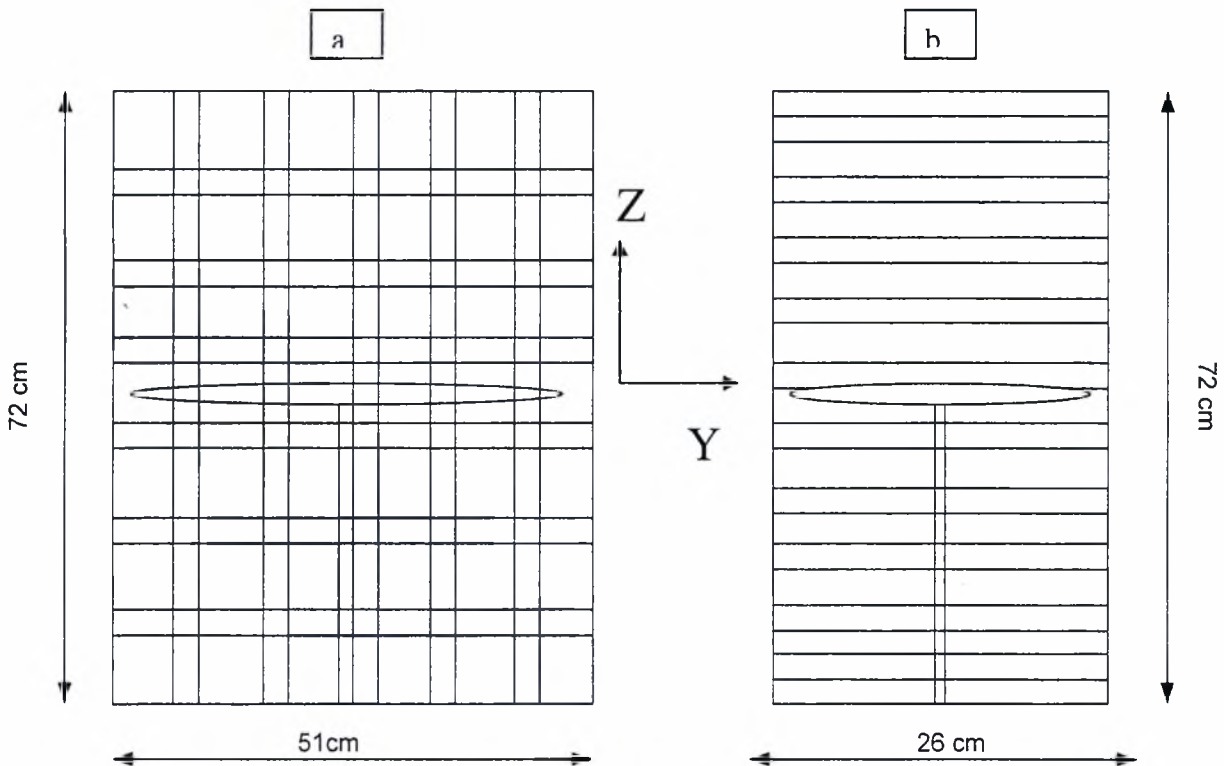
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε την μελέτη των ταχυτήτων στο απόρευμα ροής που δημιουργείται από μηχανισμό ταλαντούμενων πτερυγίων και των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε πτέρυγα που τοποθετείται στο απόρευμα της παραπάνω ροής. Αρχικά, περιγράφεται η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων και το σύστημα δημιουργίας των ταλαντούμενων πτερυγίων που κατασκευάστηκε. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μετρητικά συστήματα και όργανα που χρησιμοποιήθηκαν. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τις μεθόδους επεξεργασίας, και ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

3.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε στην αεροσήραγγα που υπάρχει στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β. Ειδικά για την μελέτη των χαρακτηριστικών της ημιτονοειδούς ροής κατασκευάστηκε ιδιοκατασκευή και μηχανισμός δημιουργίας αυτής της ροής. Στο σχήμα 3.0 φαίνεται το σκαρίφημα της διάταξης που πραγματοποιήθηκε το παραπάνω πείραμα. Το κομμάτι της κατασκευής που είναι το σημαντικότερο στην παραπάνω διάταξη είναι το παράθυρο με τα ταλαντούμενα πτερύγια το οποίο δημιουργεί την ημιτονοειδή ροή. Το παράθυρο αποτελείται από δέκα πτερύγια με χορδή $c=6\text{cm}$ και έκταση πτερυγίου 26 cm σχήμα 3.1 α. Ακόμη χρησιμοποιήθηκε ένα πλέγμα διατάσεων $51 \times 72\text{ cm}$ που φαίνεται στο σχήμα 3.1 b για να δημιουργηθεί τυρβώδης ροή στο απόρευμα του και να μελετηθεί η συμπεριφορά της πτέρυγας. Μελετήθηκε επίσης και η ροή που δημιουργήθηκε από τον συνδυασμό πλέγματος και ταλαντούμενων πτερυγίων καθώς και η συμπεριφορά της πτέρυγας σε αυτή. Η ταλάντωση των πτερυγίων δημιουργήθηκε με την κατασκευή ενός συστήματος το οποίο μετατρέπει την παλινδρομική κίνηση μιας σέγας σε ταλαντωτική κίνηση των πτερυγίων. Στο σχήμα 3.2 φαίνονται όλα τα επιμέρους τμήματα όχι μόνο της κατασκευής αλλά και των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν για να παρθούν οι μετρήσεις των ταχυτήτων που αναπτύσσονται στο απόρευμα της ημιτονοειδούς ροής (με και χωρίς τύρβη) και των δυνάμεων που αναπτύσσονται πάνω στην δοκιμαζόμενη πτέρυγα.



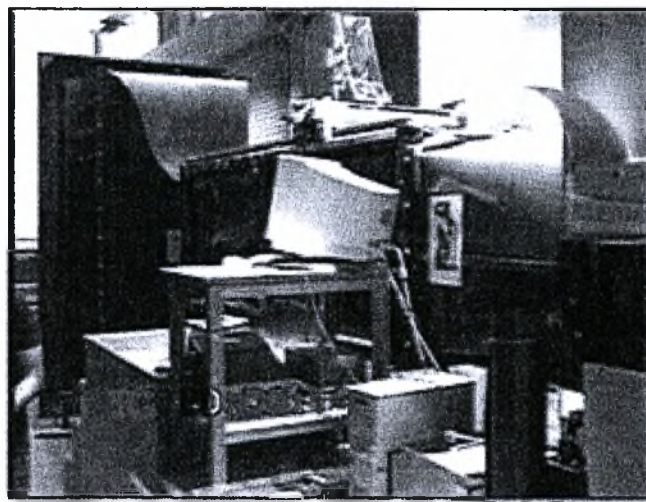
Σχήμα 3.0: Πειραματική Διάταξη



Σχήμα 3.1: Πλάγια όψη αεροσήραγγας α) Τοποθετημένο πλέγμα β) Τοποθετημένο παράθυρο

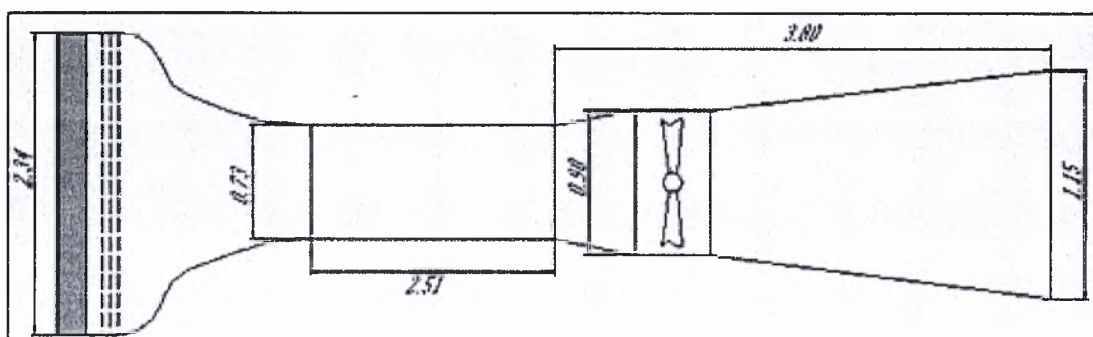
3.1.1. Αεροσήραγμα

Η αεροσήραγμα του Εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β, η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι ανοικτού κυκλώματος και λειτουργεί με αναρρόφηση. Αποτελείται από το συλλέκτη, το τμήμα δοκιμών, το τμήμα του ανεμιστήρα και το διαχύτη. Στην εικόνα 3 φαίνεται η αεροσήραγμα. Η μέγιστη επιτυγχανόμενη ταχύτητα είναι της τάξης των 20 m/s.



Εικόνα 3 : Η αεροσήραγμα του Εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών & Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β

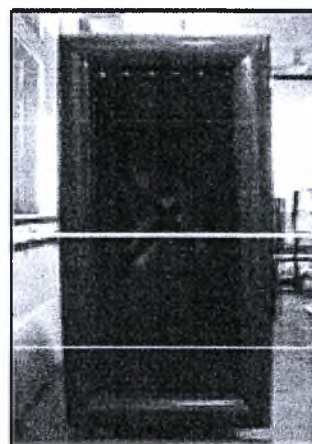
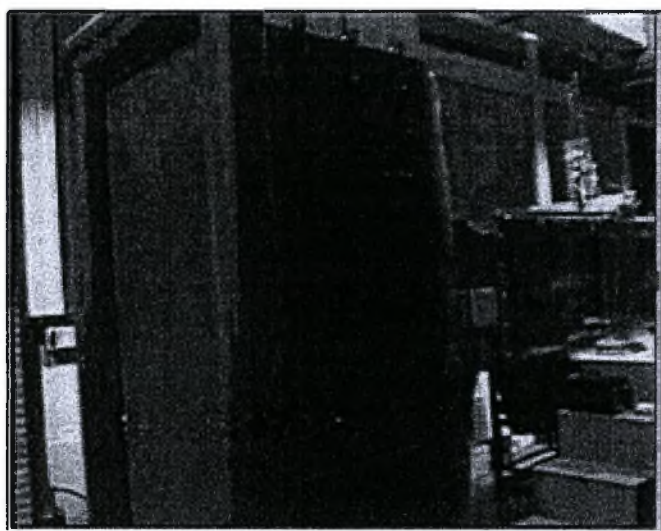
Οι κύριες διαστάσεις των τμημάτων της αεροσήραγgas απεικονίζονται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.2: Κύριες διαστάσεις της αεροσήραγgas

3.1.2 Συλλέκτης - Εισαγωγή αέρα

Ο συλλέκτης (Εικόνα 3.1) είναι μειούμενης ορθογωνικής διατομής (110cm x 234 cm) η οποία στο τέλος έχει τις διαστάσεις της διατομής του χώρου δοκιμών. Μπροστά στην εισαγωγή υπάρχει το φίλτρο εξομάλυνσης της ροής, που περιλαμβάνει περίπου 66000 κυψέλες διαστάσεων 8x70mm και είναι κατασκευασμένο από κράματος αλουμινίου. Μετά το φίλτρο εξομάλυνσης έχουν τοποθετηθεί τρεις σειρές πλεγμάτων με σκοπό την επίτευξη ομοιομορφίας της ροής και της μείωσης της τύρβης.



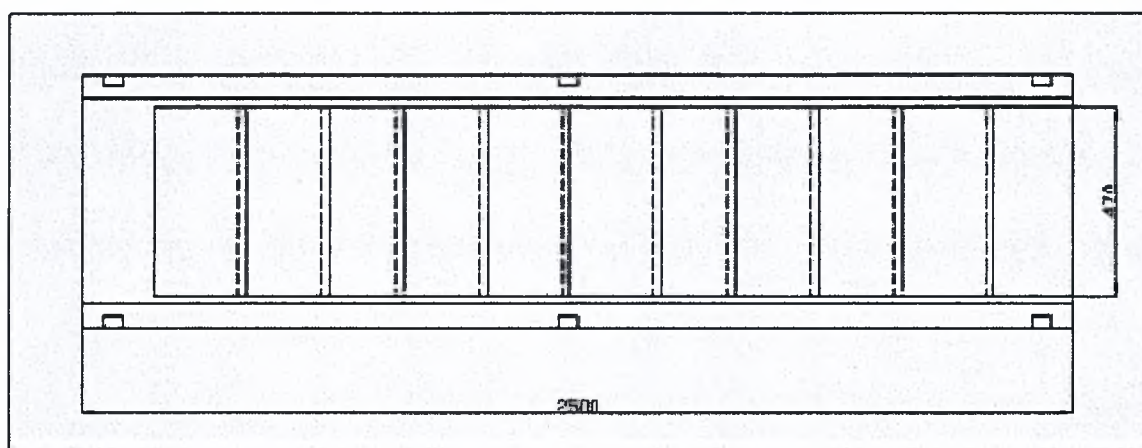
Εικόνα 3.1: Συλλέκτης - Εισαγωγή αέρα

3.1.3. Τμήμα δοκιμών

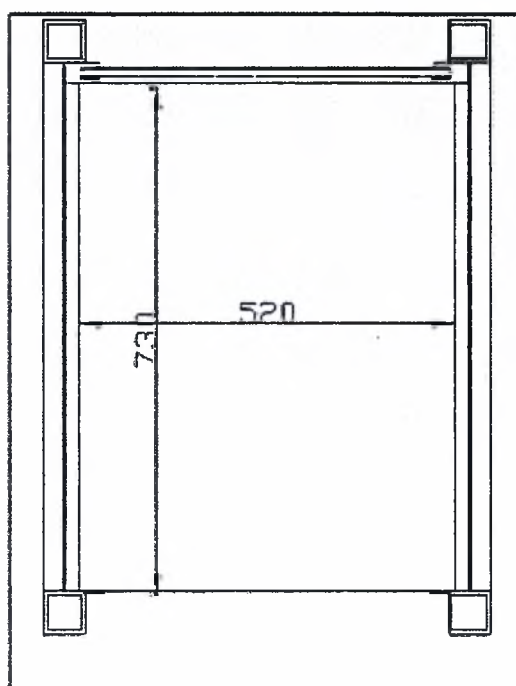
Το τμήμα δοκιμών είναι το κυρίως τμήμα της αεροσήραγγας μέσα στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις. Έχει διαστάσεις 2.51x0.52x0.73 m. Πάνω στο τμήμα μετρήσεων στηρίζεται το σύστημα μετακίνησης των αισθητήρων το οποίο δίνει τη δυνατότητα κίνησης και προς τις τρεις διευθύνσεις. Το τμήμα δοκιμών έχει κατασκευασθεί από μεταλλικούς φορείς μορφοσιδήρου. Τέσσερις δοκοί 60x60 mm σχηματοποιούν τον κύριο φορέα του θαλάμου δοκιμών συγκολλημένοι μεταξύ τους στις τρεις πλευρές από δοκούς 30x50 mm. Στην άνω πλευρά του φορέα και εκατέρωθεν αυτού έχουν συγκολληθεί δυο σιδηρές λάμες 30x50 mm που έχουν υποστεί την κατάλληλη κατεργασία για την διάνοιξη αύλακος. Στις τρεις πλευρές του μεταλλικού φορέα είναι τοποθετημένα τα τοιχώματα από plexiglass πάχους 20 mm. Αυτό επιτρέπει στον ερευνητή την οπτική

παρατήρηση των πειραμάτων και την οπτικοποίηση της ροής όποτε το επιθυμεί. Στην επάνω πλευρά το τοίχωμα αποτελείται από πλάκες MDF κατάλληλα διαμορφωμένες διαστάσεων 520x220 mm οι οποίες μπορούν να ολισθαίνουν στις δύο ειδικά διαμορφωμένες ράγες που βρίσκονται σε κάθε μια από τις πάνω διαμήκεις λάμες, και να αποσπώνται αφήνοντας ελεύθερο όλο τον χώρο του πλαισίου για πρόσβαση στον χώρο μετρήσεων. Στα δύο άκρα του θαλάμου υπάρχουν φλάντζες για την σύνδεση του με το ακροφύσιο και τον διαχύτη αντίστοιχα. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η κάτοψη (α) και η κάθετη τομή (β) του τμήματος δοκιμών.

(α)



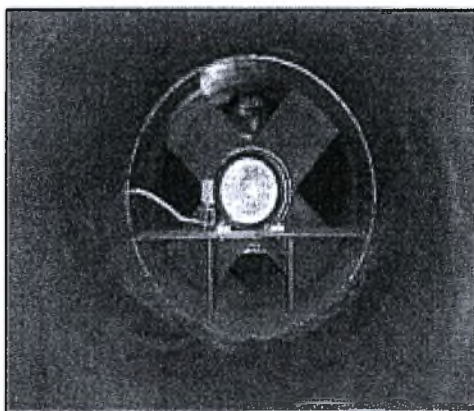
(β)



Σχήμα 3.3: (α) Κάτοψη & (β) Καθετη τομή του τμήματος δοκιμών

3.1.4 Φυσητήρας

Ανάμεσα στο τμήμα δοκιμών και το διαχύτη βρίσκεται ο φυσητήρας ο οποίος εδράζεται στον ηλεκτροκινητήρα και φέρει τέσσερα μεταλλικά πτερύγια στερεωμένα στον άξονα του ρότορα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι ασύγχρονος τριφασικός, ονομαστικής ισχύος 7.5 kW, τροφοδοτούμενος από τριφασικό ρεύμα 380 Volts μέσω του μετατροπέα της συχνότητας του ρεύματος (Inverter). Έτσι υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της παροχής και άρα της ταχύτητας της αεροσήραγγας μέσω μεταβολής του αριθμού στροφών του κινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι στερεωμένος στο εσωτερικό της αεροσήραγγας μέσω τριών μεταλλικών ορθογωνικών ελασμάτων σχήματος αεροτομής, που βρίσκονται πίσω από τον ανεμιστήρα. Στην εικόνα 3.2 φαίνεται ο ανεμιστήρας.



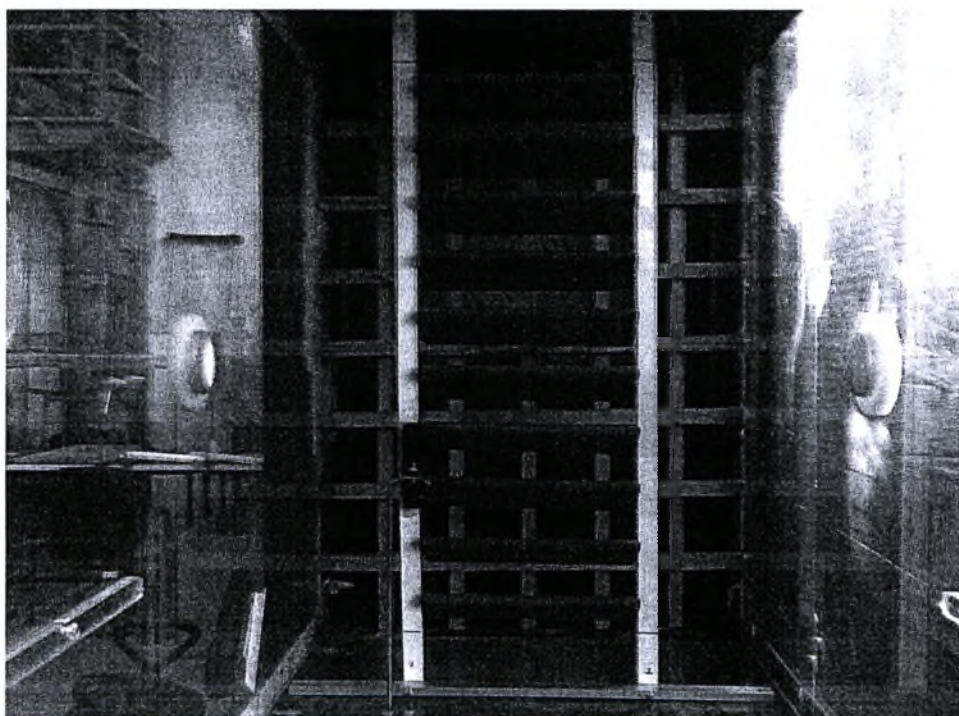
Εικόνα 3.2: Ο ανεμιστήρας της αεροσήραγγας

3.1.5 Διαχύτης

Τέλος υπάρχει ο διαχύτης οι διαστάσεις του οποίου φαίνονται στο σχήμα 3.1. Σκοπός του διαχύτη είναι η μείωση της ταχύτητας με αύξηση της διατομής ώστε να ελαττώνονται οι απώλειες τριβής, να γίνεται ομαλή ανάκτησης πίεσης μέχρι την ατμοσφαιρική και με κατάλληλη κλίση να αποτρέπεται η αποκόλληση του οριακού στρώματος.

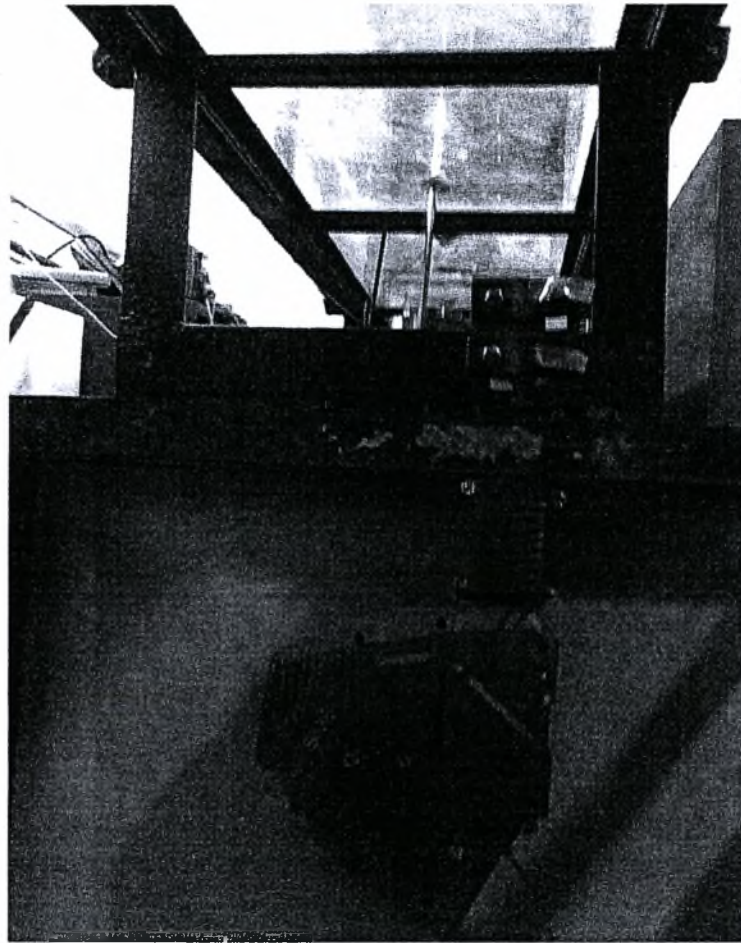
3.1.6 Παράθυρο και σύστημα ταλάντωσης

Για την δημιουργία της ημιτονοειδούς ροής χρειάστηκε η κατασκευή και προσαρμογή στην αεροσήραγγα δοκιμών ειδικού παραθύρου καθώς και η προσαρμογή σε αυτό συστήματος που θα κινεί τα πτερύγια του παραθύρου παράγοντας έτσι την επιθυμητή ροή. Το εν λόγω παράθυρο προυπήρχε στο εργαστήριο οπότε και χρειάστηκε μόνο η κατασκευή ενός πλαισίου για να στηριχτεί μέσα στην σήραγγα. Το πλαίσιο αυτό κατασκευάστηκε από προφίλ αλουμινίου στις διαστάσεις του παραθύρου 60x52 cm. Το παράθυρο αποτελείται από δέκα πτερύγια χορδής $c=6$ cm και έκτασης πτερυγίου 26 cm. Αφού κατασκευάστηκε το πλαίσιο τοποθετήθηκε στην αεροσήραγγα δοκιμών με βίδες ώστε να παραμένει ακλόνητο.



Εικόνα 3.3: Παράθυρο

Επίσης χρειάστηκε η προσαρμογή στο παράθυρο συστήματος που θα προσέδιδε κίνηση και μάλιστα ταλαντωτική στα πτερύγια του παραθύρου με σκοπό την παραγωγή ημιτονοειδούς ροής στο απόρευμά του. Το βασικό τμήμα του μηχανισμού αυτού το αποτελεί μια σέγα τύπου Parkside ισχύος 710W με εύρος στροφών $500-2600 \text{ m}^{-1}$. Η σέγα αυτή προσαρμόστηκε με μια ιδιοκατασκευή στον μηχανισμό που προυπήρχε στο παράθυρο εκ κατασκευής του ο οποίος με δύο ράγες που ολισθαίνουν πάνω σε δρομέα κινούσε τα πτερύγια (και τα δέκα ταυτόχρονα).



Εικόνα 3.4: Σέγα-ταλαντωτικός μηχανισμός

Βαθμονόμηση μηχανισμού δημιουργίας των ταλαντώσεων των πτερυγίων

Η βαθμονόμηση της σέγας αποτέλεσε σημαντικό κομμάτι πριν την έναρξη των πειραμάτων γιατί μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης που τελικά παράχθηκε μπορούσαμε ανά πάσα στιγμή να γνωρίζουμε για δεδομένη τάση ρεύματος που δίναμε στην σέγα ποια ακριβώς συχνότητα ταλάντωσης αυτή παρήγαγε. Η βαθμονόμηση έγινε με τρεις τρόπους για δούμε αν όντως παίρνουμε τα ίδια αποτελέσματα.

Η πρώτη μέθοδος ήταν με την μέτρηση της ταχύτητας του εμβόλου που συνένδεε την σέγα με τον ταλαντωτικό μηχανισμό. Αυτό έγινε με την βοήθεια ενός ταχύμετρου το οποίο μετρούσε την ταχύτητα του εμβόλου που συνένδεε την σέγα με τον ταλαντωτικό και μέσω της σχέσης $f=N/(2*60)$, όπου N =ταχύτητα εμβόλου (Rpm) να υπολογίζουμε την συχνότητα ταλάντωσης των πτερυγίων f (Hz). Βέβαια την δεδομένη στιγμή σημειώνουμε και την αντίστοιχη τιμή της τάσης (V) που μας δίνει ο μετατροπέας τάσης και τροφοδοτεί με ρεύμα την σέγα ώστε να προκύψει η καμπύλη βαθμονόμησης.

Η δεύτερη μέθοδος ήταν με την μέτρηση της συχνότητας των ταλαντώσεων που προέκυπταν στον αέρα του απορεύματος των πτερυγίων και καταγραφόταν από το hot

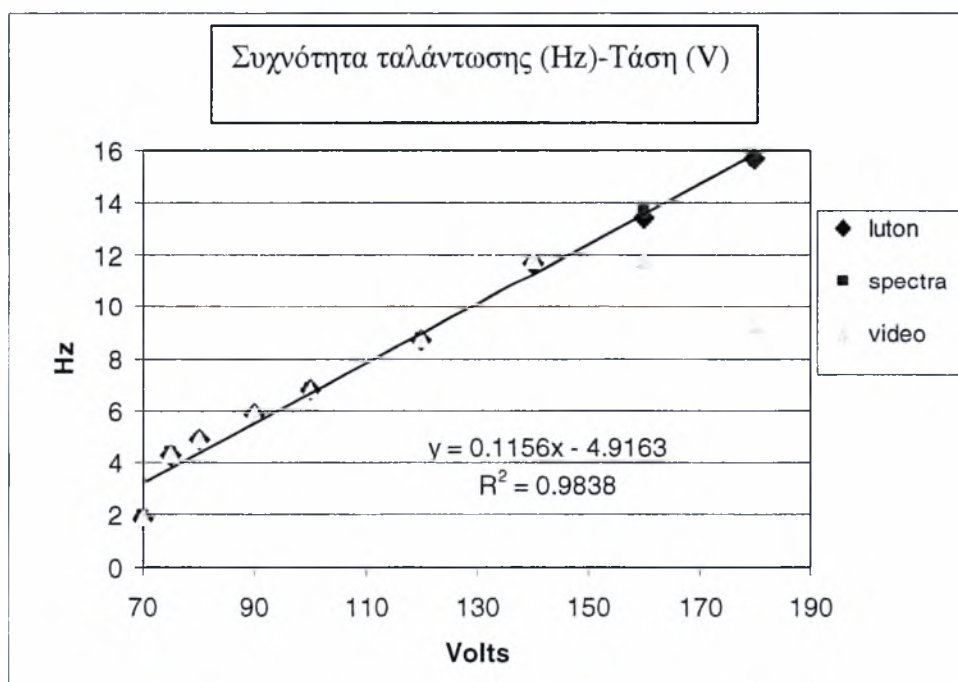
wire. Μέσω της καταγραφής της ροής από τον Η/Υ που ήταν συνδεδεμένος με το hot wire και της περαιτέρω επεξεργασίας (δημιουργίας φάσματος ταχυτήτων) που θα περιγραφεί παρακάτω, βρέθηκε η βασική συχνότητα ταλάντωσης για δεδομένες πάντα τιμές της τάσης.

Τέλος για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε μια τρίτη μέθοδος η οποία βασίστηκε στην καταγραφή απεικόνιση της κίνησης της σέγας με την βοήθεια βιντεοκάμερας. Έτσι λοιπόν ελήφθη βίντεο για δεδομένες τιμές της τάσης που τροφοδοτούσαν την σέγα και ύστερα από επεξεργασία με ειδικό πρόγραμμα που κατασκευάστηκε σε Labview από τον Γεώργιο Κωνσταντά (Labview Calculate-oscillator-velocity) βρέθηκε η αντίστοιχη συχνότητα της σέγας.

Στο παρακάτω διάγραμμα 3 φαίνεται η σύγκριση των τριών μεθόδων οι οποίες βρέθηκαν ίδιες με πολύ μικρές αποκλίσεις. Χάριν διευκόλυνσης της πειραματικής διαδικασίας αποφασίστηκε η μέτρηση της συχνότητας ταλάντωσης να γίνεται με μέτρηση της αντίστοιχης ταχύτητας του εμβόλου, η οποία γινόταν με την φορητή συσκευή του ταχύμετρου.

Παρακάτω φαίνεται η σχέση μετατροπής της τάσης V σε συχνότητα f.

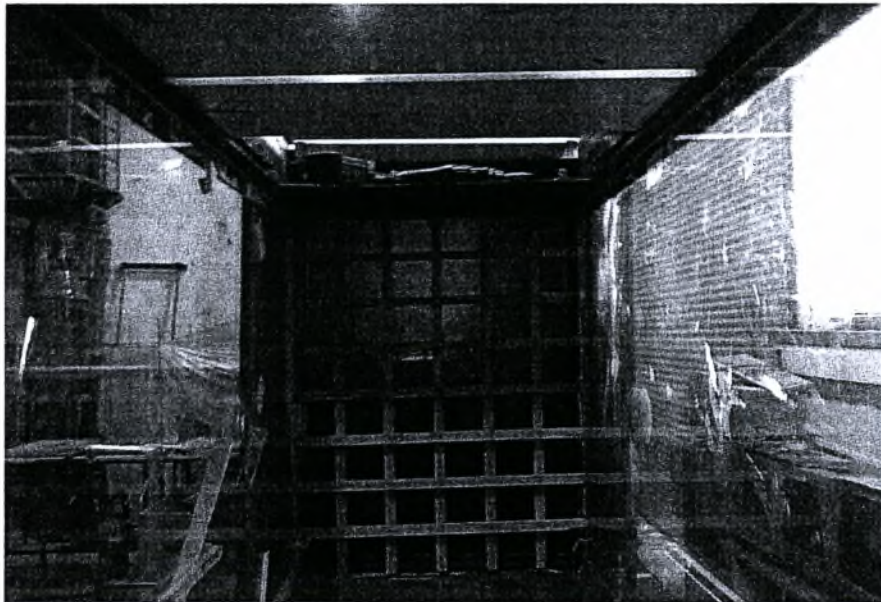
$$f = 0,1156 * V - 4,9163, \text{ όπου } f \text{ συχνότητα (Hz) και } V \text{ τάση (Volts)}$$



Διάγραμμα 3: Σύγκριση των μεθόδων βαθμονόμησης της σέγας και καμπύλη βαθμονόμησης

3.1.7 Πλέγμα

Πρόκειται στην ουσία για μία ξύλινη κατασκευή η οποία τοποθετείται στην πορεία της ροής ώστε στο απόρρευμά του πλέγματος να δημιουργείται έντονα τυρβώδης ροή. Το πλέγμα έχει τις διαστάσεις της σήραγγας δηλαδή 51x72 cm και αποτελείται από ξύλινες δοκούς καρφωμένες μεταξύ του όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5 . Το πλέγμα όπως και το παράθυρο τοποθετείται στην αεροσήραγγα με βίδες ώστε να παραμένει ακλόνητο.



Εικόνα 3.5 Πλέγμα

3.2. Μετρητικά Όργανα και συσκευές

- Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot - wire anemometet C.T.A.)
- Μανόμετρο και σωλήνας Pitot - Static
- Σύστημα λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων [Ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D (analog-digital)]
- Ταχύμετρο μέτρησης συχνότητας σέγας
- Παλμογράφος
- Ενισχυτής σήματος
- Μετασχηματιστής ηλεκτρικού ρεύματος
- Μετατροπέας της συχνότητας του ρεύματος (0 - 100 Hz) (Inverter)

3.2.1 Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (Hot - wire anemometer C.T.A.)

Το ανεμόμετρο (η ηλεκτρονική συσκευή που λαμβάνουμε το σήμα) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ταχύτητας του αέρα στην αεροσήραγγα. Οι μετρήσεις της ταχύτητας έγιναν χρησιμοποιώντας σύστημα ανεμομετρίας θερμού σύρματος ενός καναλιού της εταιρείας DANTEC. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα δειγματοληψίας και επεξεργασίας σημάτων, εικόνα 3.6, περιελάμβανε :

α) Ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένη κάρτα A/D National Instruments

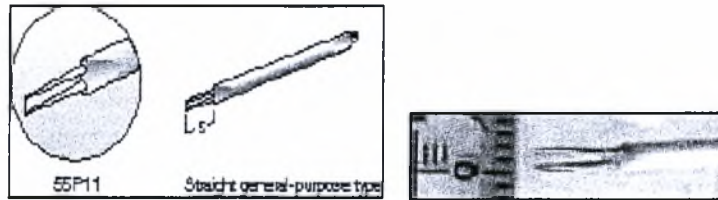
β) Σύστημα ανεμομετρίας θερμού σύρματος, StreamLine 90N10 frame, το οποίο περιλαμβάνει τη γέφυρα ανεμομετρίας σταθερής θερμοκρασίας 90C10 και μία μονάδα βαθμονόμησης 90H01 με ένα ακροφύσιο 90H02 και σύστημα Aalabs AN 1005.

Στην παραπάνω διάταξη συνδέονται και όργανα μετρήσεων και ελέγχου για την περιοδική επιβεβαίωση της καλής λειτουργίας του συστήματος.



Εικόνα 3.6: Σύστημα Θερμικού Ανεμομέτρου και σύστημα Aalabs AN - 1005

Η ψηφιοποίηση του σήματος γινόταν με τον αναλογικό/ ψηφιακό μετατροπέα National instrument. Ο αισθητήρας του ανεμομέτρου αποτελείται από δύο ευθύγραμμες μεταλλικές ακίδες σε σχήμα V. Αυτές οι ακίδες ξεκινούν μέσα από ένα λευκό μονωτικό περίβλημα. Στο τέλος (σχεδόν) των ακίδων και κάθετα σ' αυτές υπάρχει κολλημένο ένα πάρα πολύ λεπτό σύρμα, το 'θερμό σύρμα', που έχει διάμετρο 5 μm ($5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$) και είναι κατασκευασμένο από τανγκοτένιο. Για την συλλογή των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο μονός αισθητήρας 55P11 της Dantec MT (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Μονός αισθητήρας 55P11

Η αντίσταση του σύρματος εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση) και από την συγκόλληση. Η μεταβολή της αντίστασής του είναι περίπου 0.36%/ οC. Η θερμοκρασία λειτουργίας έχει οριστεί από τον κατασκευαστή μικρότερη από 300 οC (συνήθως είναι 180 - 200 οC). Στον πίνακα 3 που ακολουθεί δίνονται τα γενικά χαρακτηριστικά του σύρματος του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε.

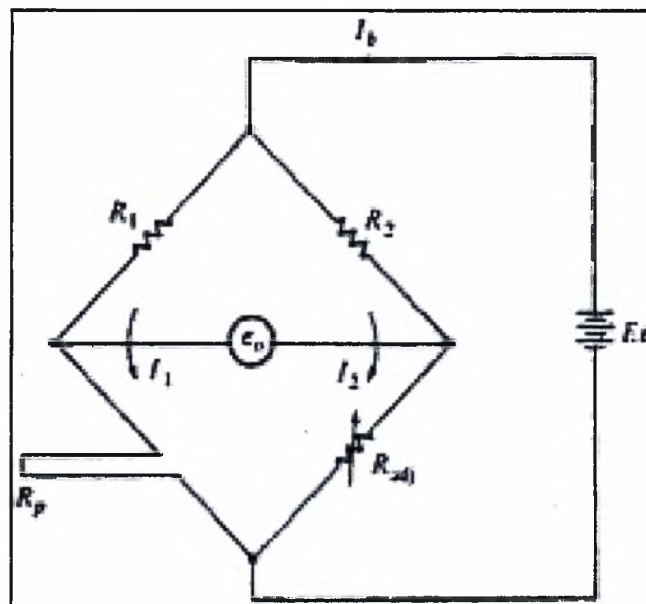
| | |
|---|------------------------------|
| Μέσο..... | : Αέρας |
| Διαστάσεις αισθητήρα..... | : ψ 5 [μm], l=1.25 [mm] |
| Υλικό αισθητήρα..... | : W επικαλυμμένο με Pt |
| Ηλ. αντίσταση στους 20 [οC], R20..... | : 3.5 [Ω] |
| Συντελεστής ηλ. αντίστασης (TCR) α20..... | : 0.36% [1/οC] |
| Μέγιστη θερμοκρασία αισθητήρα..... | : 300 [οC] |
| Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος..... | : 150 [οC] |
| Ελάχιστη ταχύτητα | : 0.05 [m/s] |
| Μέγιστη ταχύτητα..... | : 500 [m/s] |

Πίνακας 3: Γενικά χαρακτηριστικά του θερμού σύρματος του αισθητήρα 55P11, Dantec

Τα ανεμόμετρα θερμού σύρματος παρέχουν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για την βαθμονόμησή τους με τη μορφή γραφικών παραστάσεων, έτσι ώστε η ταχύτητα του αέρα να μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από τις μέσες τιμές τάσης ή ρεύματος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν μεγάλο εύρος ταχυτήτων, από πολύ μικρές (π.χ. 0.03 m/s) έως υπερηχητικές. Μπορεί να είναι σχετικά ακριβότερα από τους σωλήνες Pitot αλλά έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία και μπορούν να μετρούν ροές που είναι ασταθείς. Χάρη στην πολύ μεγάλη τους ευαισθησία μπορούν και ανιχνεύουν την συχνότητα των διακυμάνσεων της ροής.

Αρχή λειτουργίας του hot-wire:

Το ανεμόμετρο αποτελείται από ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone (C.T.A.) στην οποία το hot-wire είναι η μια αντίσταση από τις τέσσερις (Σχήμα 3.4). Η αρχή λειτουργίας στην οποία στηρίζεται είναι το ότι αν γύρω από ένα θερμό σώμα ρέει ένα αέριο, το θερμό σώμα θα ψυχθεί και επομένως ο ρυθμός ψύξης του σχετίζεται με την ταχύτητα του αερίου. Η συσκευή του ανεμομέτρου ρυθμίζει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στα άκρα της αντίστασης του σύρματος, έτσι ώστε να διατηρείται πάντα σταθερή η αντίσταση του θερμονήματος και η θερμοκρασία του. Για αυτό και ονομάζεται Ανεμόμετρο Σταθερής Θερμοκρασίας (Constant Temperature Anemometer).

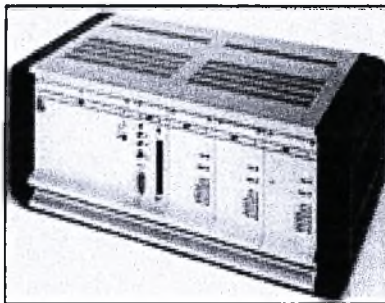
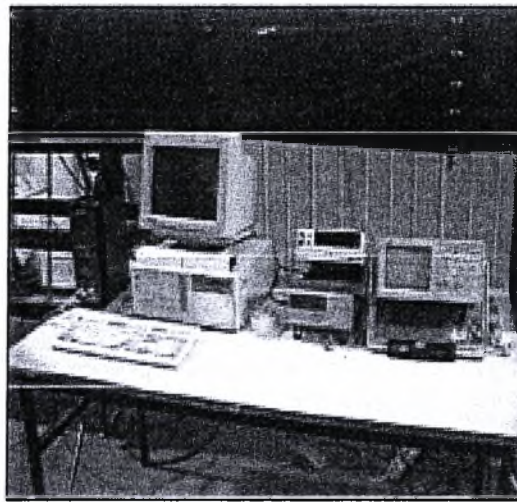


Σχήμα 3.5: Γέφυρα Wheatstone σε κύκλωμα θερμικής ανεμομετρίας

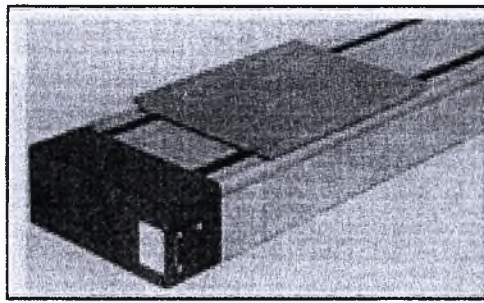
Συνεπώς όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα ροής τόσο πιο έντονη αποβολή θερμότητας πραγματοποιείται με συναγωγή, άρα τείνει η θερμοκρασία του σύρματος να ελαττωθεί λόγω της ψύξης. Επομένως θα προκληθεί αλλαγή της έντασης I , του ρεύματος, στα άκρα της αντίστασης του hot-wire, καθώς η γέφυρα Wheatstone τείνει να επαναφέρει το σύρμα στην θερμοκρασία λειτουργίας του (200 °C) (από τον τύπο: $P=I^2 \cdot R$ με $R=\text{const.}$). Έτσι υπάρχει μια συσχέτιση της έντασης του ρεύματος με την ταχύτητα του αέρα. Όταν η γέφυρα Wheatstone ηρεμεί, τότε το θερμό σύρμα έχει την αντίσταση που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή ως αντίσταση λειτουργίας (αντιστοιχεί συνήθως σε θερμοκρασία 180 - 200 °C). Από την μεταβολή της έντασης του ρεύματος παράγεται μια διαφορά δυναμικού η οποία διαβάζεται από τον Η/Υ και αντιστοιχείται στην ταχύτητα με ένα ειδικό λογισμικό στον Η/Υ της National Instruments, το οποίο στην δική μας περίπτωση υπολογίζει την μέση τιμή της ταχύτητας και της τύρβης από την λήψη των δεδομένων από το ανεμόμετρο, η οποία γινόταν με PC μέσω κάρτας Analog-Digital.

Σύστημα μετακίνησης hot-wire:

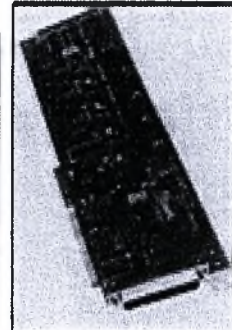
Το hot-wire μετακινούταν στις διάφορες θέσεις του με ένα σύστημα βερνιέρων κάθετων μεταξύ τους, οι οποίοι ήταν στερεωμένοι σε μια διάταξη που μπορεί να ολισθαίνει πάνω σε δυο παράλληλους προς τις πλάκες οδοντωτούς κανόνες. Έτσι ο αισθητήρας είχε την δυνατότητα να μετακινηθεί κατά τον εγκάρσιο, διαμήκη και κατακόρυφο άξονα. Το σύστημα διεύθυνσης του άξονα Y αποτελείται από φορέα μήκους 1390 mm, που διαθέτει servo μηχανισμό. Οι λειτουργίες του συστήματος αυτού ήταν πλήρως ελεγχόμενες και καθορίζονταν με κάρτα επικοινωνίας μεταξύ υπολογιστή και μηχανισμού. Στην εικόνα 3.7 φαίνεται το σύστημα διεύθυνσης. Η ακρίβεια των βερνιέρων είναι 1mm.



Servo-controller



Φορέας (Traversing)



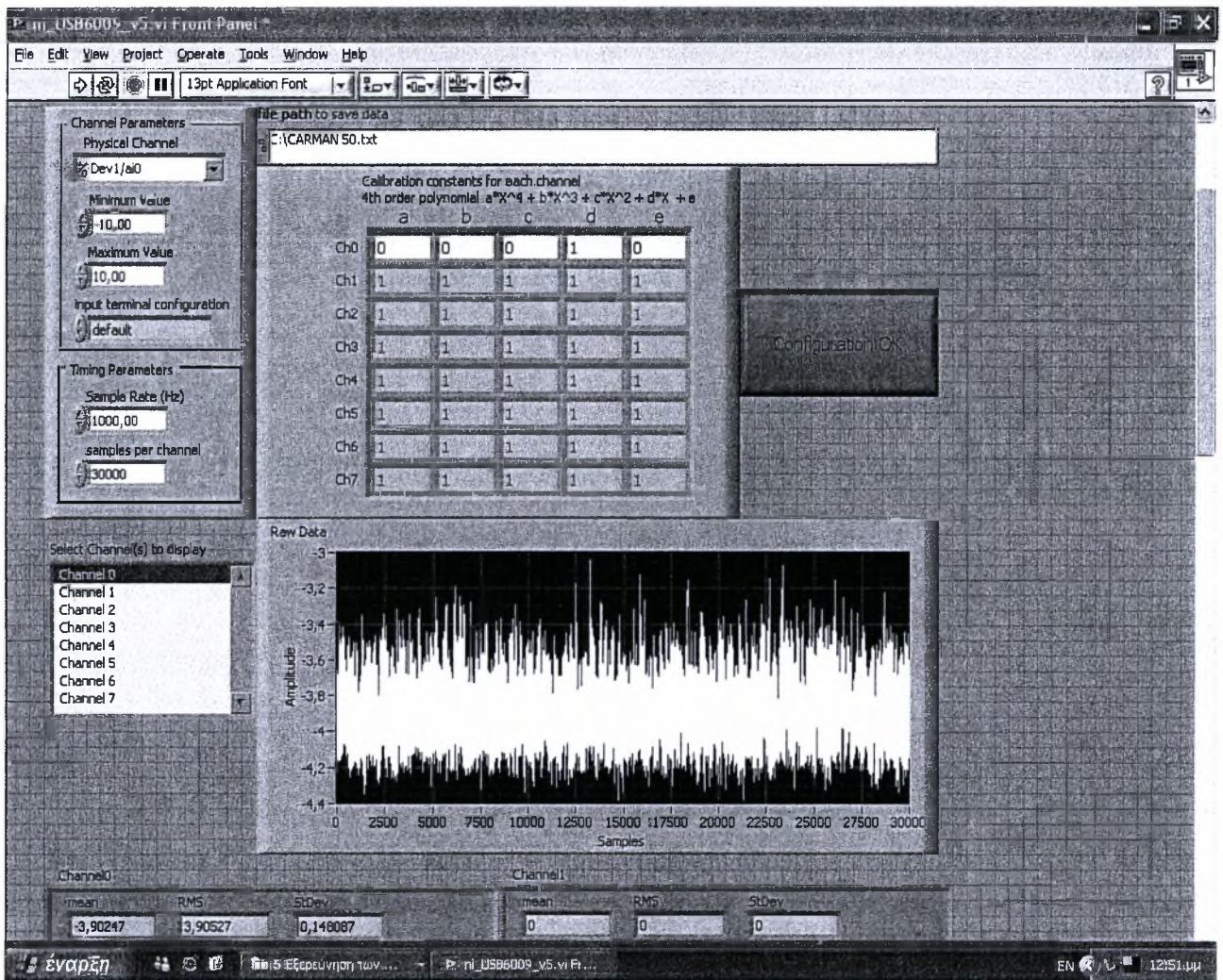
Κάρτα A/D

Εικόνα 3.7: Μονάδα συστήματος διεύθυνσης

3.2.2 Σύστημα λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων [Ηλεκτρονικός υπολογιστής και κάρτα A/D (analog-digital)]

Για τις μετρήσεις των ταχυτήτων με το Hot - wire και των δυνάμεων με τον αισθητήρα δύναμης η δειγματοληψία και αποθήκευση έγινε με την χρήση ειδικής ηλεκτρονικής κάρτας του οίκου National Instruments. Η κάρτα NI έχει δυνατότητα λήψης οκτώ (8) καναλιών ταυτόχρονα στο εύρος των ± 5 [V] η οποία μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό με ακρίβεια 0.00488 [V/bit] αφού συνδεθεί σε PC. Το λογισμικό επικοινωνίας αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Labview. Στην εικόνα 3.8 που ακολουθεί φαίνεται η επιφάνεια εργασίας του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των ταχυτήτων και των δυνάμεων. Το πρόγραμμα έγινε σε περιβάλλον LabView και μπορεί να μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε Urms και stdev, ενώ ταυτόχρονα απεικονίζει και τα φάσματα των ταχυτήτων σε πραγματικό χρόνο. Τέλος αποθηκεύει τα

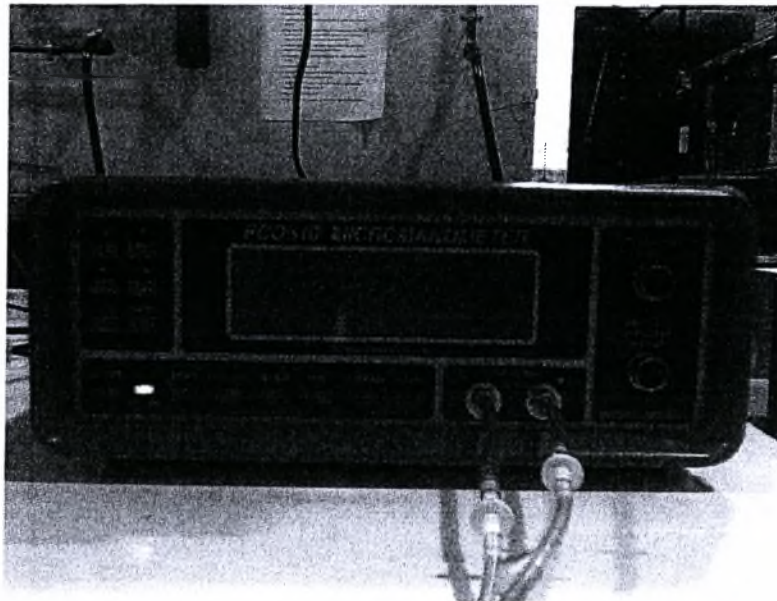
δεδομένα σε αρχεία έτοιμα για περαιτέρω επεξεργασία. Το μόνο που κάνει ο χρήστης είναι να θέτει τις παραμέτρους a,b,c,d,e που είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου μετατροπής από τάση σε ταχύτητα. Παράλληλα μπορεί να επιλέξει παραπάνω από ένα κανάλια λήψης δεδομένων με την δυνατότητα να μετράει δυο διαφορετικά μεγέθη ταυτόχρονα, ενώ μπορεί να επιλέξει την συχνότητα δειγματοληψίας και τον αριθμό δειγμάτων ανά κανάλι.



Εικόνα 3.8: Λογισμικό επικοινωνίας αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Labview για την μέτρηση των ταχυτήτων και των δυνάμεων

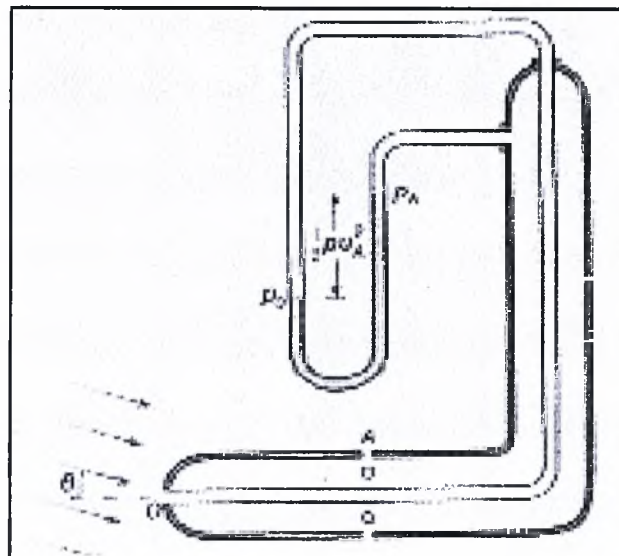
3.2.3 Μανόμετρο και σωλήνας Pitot - Static

Για τον αρχικό έλεγχο στο τμήμα δοκιμών της αεροσήραγγας χρησιμοποιήθηκε ένα κεκλιμένο μανόμετρο οιοπνεύματος. Ο σωλήνας Pitot-Static συνδέονταν με το μανόμετρο που μετρούσε την διαφορά στάθμης Δh . Στην εικόνα 3.9 φαίνεται το μανόμετρο.



Εικόνα 3.9: Το μανόμετρο οιονοπνεύματος

Ο σωλήνας Pitot-Static (Prandtl), αποτελεί συνδυασμό σωλήνων στατικής πίεσης και Pitot και χρησιμοποιείται ως όργανο μέτρησης της ταχύτητας. Μια τυπική μορφή σωλήνα Pitot-Static (Prandtl) εικονίζεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Σωλήνας Pitot-Static (Prandtl)

Παρατηρούμε ότι η μπροστινή οπή και οι πλευρικές οπές που υπάρχουν στο τοίχωμα του οριζοντίου στελέχους του σωλήνα οδηγούν, με χωριστούς εσωτερικούς αγωγούς, στις εισόδους ενός ανοιχτού μανομέτρου. Έτσι, η πίεση στο ένα σκέλος του μανομέτρου είναι η πίεση ηρεμίας, p_0 , και, στο άλλο σκέλος, η στατική πίεση, p . Αν εφαρμόσουμε την εξίσωση Bernoulli μεταξύ των σημείων O (στο στόμιο του σωλήνα) και A (στην είσοδο μιας πλευρικής οπής) και λάβουμε υπόψη ότι η ταχύτητα $U_0=0$ και η πίεση $p_A=p$, προκύπτει η σχέση:

$$p_0 - p = \rho g(z_A - z_0) + \rho \frac{u_A^2}{2} \quad (3.1)$$

Επειδή η διάμετρος του σωλήνα είναι πολύ μικρή, η υψομετρική διαφορά ($z_A - z_0$) είναι αμελητέα, οπότε η εξίσωση (3.1) γράφεται:

$$p_0 - p = \rho \frac{u^2}{2} \quad (3.2)$$

Η ταχύτητα του ρευστού στο σημείο A μπορεί να θεωρηθεί, χωρίς σημαντικό σφάλμα, ίση με την ταχύτητα ροής στο αδιατάραχτο ρεύμα ($U_A=U$), οπότε η εξίσωση (3.2) γράφεται:

$$p_0 - p = \rho \frac{u^2}{2} \quad (3.3)$$

Λύνοντας την εξίσωση αυτή ως προς την ταχύτητα u , προκύπτει:

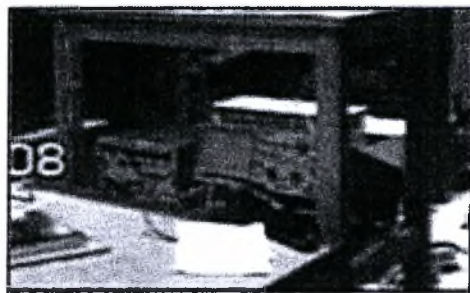
$$u = \sqrt{2 \left(\frac{p_0 - p}{\rho} \right)}$$

Η ακρίβεια των μετρήσεων με σωλήνα Pitot-Static (Prandtl) επηρεάζεται από:

- α) Την πύκνωση των ροϊκών γραμμών που προκαλείται από την παρουσία του οργάνου με αποτέλεσμα $u_A = u$.
- β) Οι θέσεις λήψης μέτρησης ανακοπής και στατικής πίεσης δεν συμπίπτουν.
- γ) Για μετρήσεις ακριβείας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η υψομετρική διαφορά $z_A - z_0$.
- δ) Μη ευθυγράμμιση του οριζοντίου στελέχους. Για γωνία $\theta = 10^\circ$ η μετρούμενη στατική πίεση είναι κατά 2% μεγαλύτερη και η πίεση ανακοπής κατά 3% μικρότερη από την πραγματική.

3.2.4 Παλμογράφος

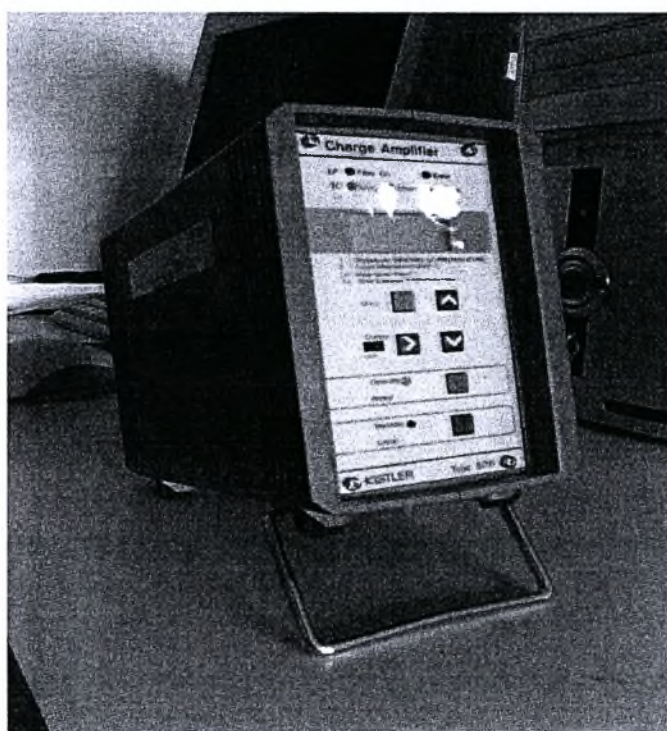
Για να έχουμε μια εποπτική εικόνα των σημάτων που προκύπτουν από διάφορους αισθητήρες σε κάθε σημείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος που φαίνεται στην εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10: Ο παλμογράφος

3.2.5 Ενισχυτής σήματος

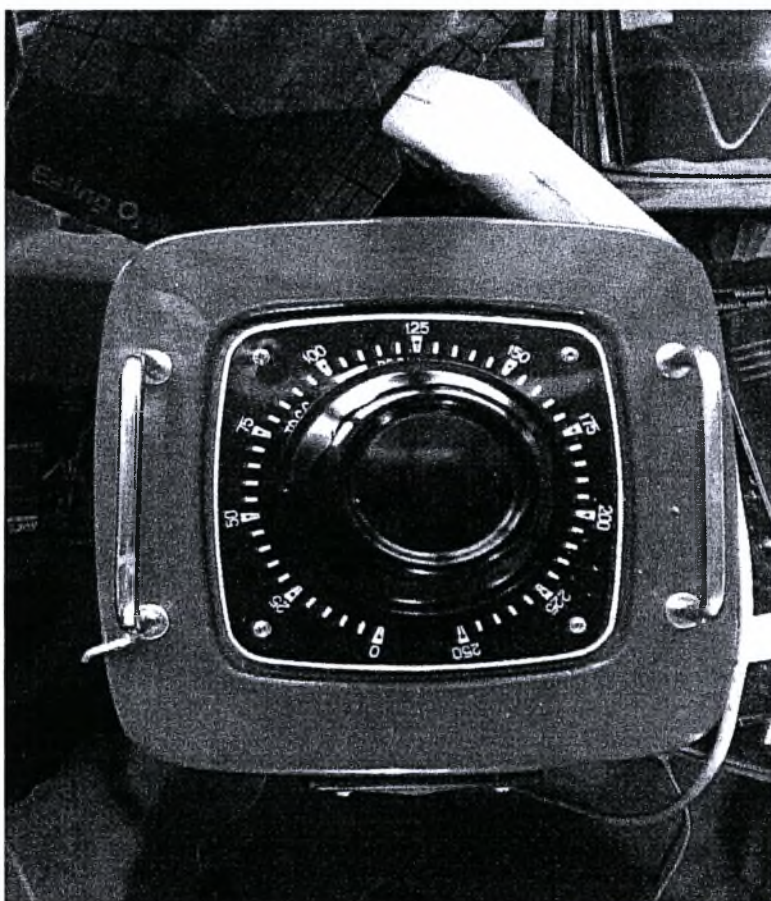
Αφού λαμβάναμε το σήμα από τον αισθητήρα σε Volts και πριν αυτό φτάσει στην κάρτα του υπολογιστή χρειαζόταν ενίσχυση. Και αυτό γιατί το σήμα είναι πολύ ασθενές και λόγω των απωλειών μέσα στο σύρμα θα έφτανε στην κάρτα πολύ αδύναμο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11 χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής τύπου Kirstler 5011 ισχύος 12VA με εύρος συχνοτήτων 48...62Hz.



Εικόνα 3.11: Ενισχυτής σήματος

3.2.6 Μετασχηματιστής ηλεκτρικού ρεύματος

Για να τροφοδοτηθεί η σέγα που στην ουσία παράγαγε την παλινδρομική κίνηση η οποία με τη σειρά της δημιουργούσε την ημιτονοειδή ροή, χρειάστηκε ένας μετασχηματιστής τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος (εικόνα 3.12). Με αυτό τον τρόπο μεταβάλλουμε την συχνότητα ταλάντωσης της σέγας και κατά συνέπεια των πτερυγίων. Όπως γνωρίζουμε το ρεύμα δικτύου έχει τάση 230 V. Με αυτή την τάση η συχνότητα της σέγας είναι συγκεκριμένη. Αλλάζοντας την τάση του ρεύματος λοιπόν μεταβάλλουμε την συχνότητα ταλάντωσης των πτερυγίων. Οι μετρήσεις έγιναν για συχνότητες ταλάντωσης στο εύρος 0-15 Hz.



Εικόνα 3.11: Μετασχηματιστής τάσης ηλεκτρικού ρεύματος

3.2.7 Ταχύμετρο μέτρησης συχνότητας της σέγας

Το ταχύμετρο πρόκειται ουσιαστικά για ένα όργανο μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας του εμβόλου που συνέδεε την σέγας τα πτερύγια κατά συνέπεια των ταλαντούμενων πτερυγίων που αυτή οδηγούσε. Η μέτρηση της γωνιακής αυτής ταχύτητας σε Rpm μας επέτρεπε μέσω της σχέσης $f=N/(2*60)$, όπου N=ταχύτητα εμβόλου (Rpm) να υπολογίζουμε την συχνότητα ταλάντωσης των πτερυγίων f (Hz). Για να επιτευχθεί αυτό χρειάστηκε βαθμονόμηση του οργάνου, που μόλις αυτή έγινε μας έδωσε την καμπύλη

βαθμονόμησης. Από εκεί και πέρα για κάθε συχνότητα ταλάντωσης έπρεπε να έχουμε ανάλογη ταχύτητα εμβόλου.



Εικόνα 3.12: Ταχύμετρο

3.2.8 Μετατροπέας της συχνότητας του ρεύματος (0 -100 Hz) (Inverter)

Αυτή η ηλεκτρονική διάταξη χρησιμεύει για να ελέγχουμε την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα. Είναι τύπου TOSHIBA Transistor Inverter TOSVERTVF-SXN (Εικόνα3.12). Τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα400V και έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την συχνότητά του από 0 έως 100Hz. Η ισχύς του είναι 7.5kW.Ανάλογα με την συχνότητα που επιλέγεται, αλλάζουν και οι στροφές (r.p.m.) του ηλεκτροκινητήρα που περιστρέφει τον ανεμιστήρα. Έτσι μπορούμε να προσομοιώσουμε ταχύτητες αέρα μέσα στην αεροσήραγγα από 0 m/sec => 0Hz μέχρι 18m/sec (=65km) => 60Hz.

3.3 Μέθοδος Μετρήσεων με το Hot-wire

Πριν από κάθε μέτρηση ταχύτητας με το hot-wire στην αεροσήραγγα, γινόταν μέτρηση της αντίστασης του C.T.A. (Constan Temperature Anemometer) και βαθμονόμηση (Calibration). Αυτά έχουν ως εξής:

3.3.1 Μέτρηση αντίστασης C.T.A.

Η αντίστασή του hot-wire υπολογίζεται με τον τύπο:

$$R_{\theta} = R_{20^{\circ}\text{C}} * [1 + a(\theta - 20^{\circ}\text{C})]$$

Όπου :

$R_{20^{\circ}\text{C}}$ = η αντίσταση του hot-wire στην θερμοκρασία 20 °C. R_{θ} = η αντίσταση του hot-wire στην θερμοκρασία θ .

a = συντελεστής θερμικής αντίστασης. Για ταγκστένιο $a=0.36\% / ^{\circ}\text{C}$.

Η ένδειξη που προκύπτει είναι η αντίσταση του hot-wire και του καλωδίου μαζί. Γνωρίζοντας το μήκος του καλωδίου, το οποίο στην περίπτωση μας είναι 5m, βρίσκουμε την αντίστασή του ($=1 \text{ Ohm}$). Η αντίσταση του hot-wire που προκύπτει είναι για θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για να την αναγάγουμε στους 200 οC χρησιμοποιούμε τη σχέση για το R_{θ} που γράψαμε προηγουμένως. Αν συμβολίσουμε με X την αντίσταση που προκύπτει αν αφαιρέσουμε το 1 Ohm του καλωδίου τότε έχουμε μετά από πράξεις: $R_{\theta} = X * 1.7$ ή $R_{\theta} = X * 1.645$. Αυτό γιατί υπάρχει κάποιο μικρό εύρος για τις τιμές του a . Τέλος αυτή την τιμή τοποθετείται ως ένδειξη στο ανεμόμετρο.

3.3.2 Βαθμονόμηση Hot-wire

Με την βαθμονόμηση επιτυγχάνεται μετατροπή των Volts, που έχουμε σαν έξοδο στο ανεμόμετρο, σε ταχύτητα αέρα. Από την θεωρία δυο είναι οι πιθανές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή αυτή:

α) Ο νόμος του KING (1914) : $E^2 = A + B * U^{0.45}$

β) Πολυώνυμο ηου βαθμού : $U = E_0 + E_1 * V + E_2 * V^2 + E_3 * V^3 + \dots + E_n * V^n$ Όπου :

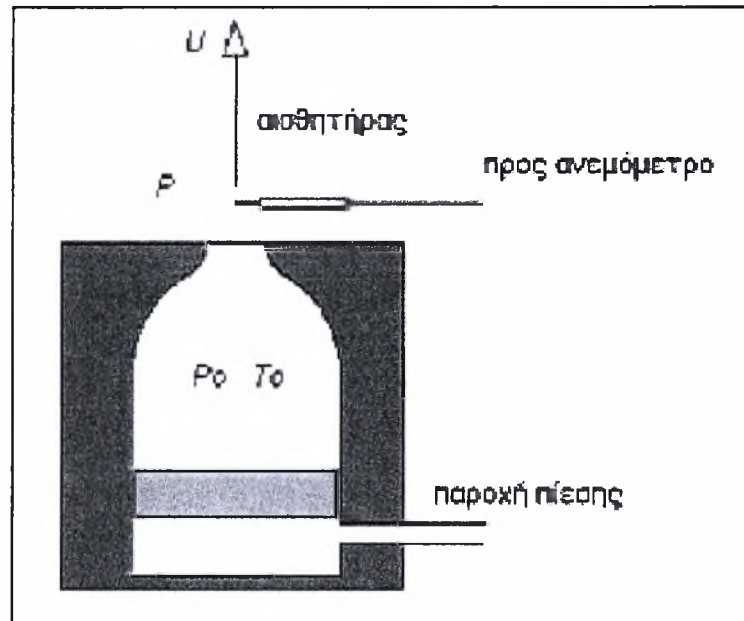
U = ταχύτητα ροής

E = τάση που έχει σαν έξοδο το ανεμόμετρο

$A, B, E_0, E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ = σταθερές παράμετροι που πρέπει να βρεθούν.

Στην αεροσήραγγα χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του αισθητήρα το πολυώνυμο ηου βαθμού. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα καθορίζει την σχέση που συνδέει την τάση της γέφυρας του αισθητήρα με το μέγεθος και την διεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται σε ροή που γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά της προκειμένου η καμπύλη που θα χαράξουμε μεταξύ ταχύτητας και διαφοράς δυναμικού να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη. Η βαθμονόμηση του

συστήματος μας πραγματοποιείται με την παραδοχή ότι έχουμε ροές χαμηλής τύρβης. Η καμπύλη που θα προκύψει από την βαθμονόμηση αποτελεί την βάση αναφοράς στον υπολογισμό μιας τυχαίας ροής. Η βαθμονόμηση σε αέρα πραγματοποιείται στην έξοδο ακροφυσίου κυκλικής διατομής (σχήμα 3.7) ή στο κέντρο του θαλάμου δοκιμών της αεροσήραγγας.



Σχήμα 3.7: Βαθμονόμηση αισθητήρα

Κατά την έξοδο του ρευστού από το ακροφύσιο θεωρούμε ότι έχουμε συμπιεστή ροή. Στην συμπιεστή ροή, ως ιδιότητες αναφοράς, χρησιμοποιούνται συνήθως οι ισεντροπικές ιδιότητες ηρεμίας, οι ιδιότητες δηλαδή που θα είχε το ρευστό σε ένα ορισμένο σημείο του πεδίου ροής, αν επιβραδυνόταν ισεντροπικά από τις τοπικές συνθήκες (p, T, u) στην αντίστοιχη κατάσταση ηρεμίας ($p, T, u = 0$).

Η βαθμονόμηση που βασίζεται στην ενεργό ταχύτητα ψύξης, συνίσταται στο να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου της γέφυρας του ανεμομέτρου και της ενεργού ταχύτητας ψύξης και των συντελεστών πρόνευσης (γ) και συστροφής (ρ), αντίστοιχα. Συνήθως, η βαθμονόμηση αισθητήρων μονού σύρματος πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, βαθμονόμηση ταχύτητας, ο αισθητήρας τοποθετείται σε μηδέν γωνίες πρόνευσης και συστροφής ως προς το διάνυσμα της ταχύτητας. Σε αυτή τη διεύθυνση $Q = U_0$ και επομένως η βαθμονόμηση του αισθητήρα συνίσταται σε μια σειρά μετρήσεων της ταχύτητας ροής και της τάσης του ανεμομέτρου E . Για ικανοποιητική ακρίβεια λαμβάνονται 20-25 μετρήσεις των (E, U_0) στο επιλεγμένο εύρος ταχυτήτων. Τότε τα δεδομένα της βαθμονόμησης προσαρμόζονται με μια κατάλληλη αναλυτική συνάρτηση. Οι Bruun et al. (1988) εξετάσαν συστηματικά την ακρίβεια και υπολογιστική ευκολία προσαρμογής στα δεδομένα για μια σειρά από αναλυτικές συναρτήσεις σε διαφορετικά εύρη μεταβολής της ταχύτητας.

Συμπεράναν ότι η ακόλουθη σχέση :

$$E^2 = A + BQ^n \quad (4.5)$$

το πολυώνυμο τέταρτης τάξης με ανεξάρτητη μεταβλητή το E ,

$$Q = f(E) = A_0 + A_1E + A_2E^2 + A_3E^3 + A_4E^4 \quad (4.6)$$

και το πολυώνυμο τρίτης τάξης με ανεξάρτητη μεταβλητή το E^2 , δίνουν εξίσου καλά αποτελέσματα.

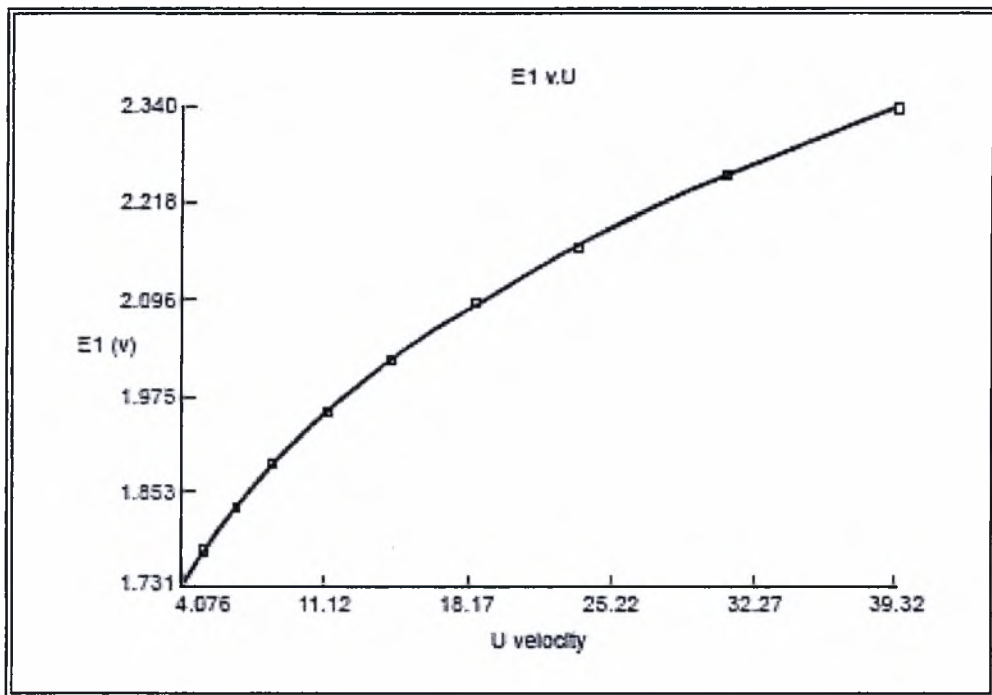
$$Q = f(E^2) = A_0 + A_1(E^2) + A_2(E^2)^2 + A_3(E^2)^3 \quad (4.7)$$

Το δεύτερο βήμα, γωνιακή βαθμονόμηση, περιλαμβάνει αλλαγές στην γωνία γ awa με τη γωνία pitch να παραμένει σταθερή $\theta=0$ ή θέτοντας $a=0$ ενώ αλλάζει το θ . Στο τεστ αυτό μετριέται η τάση εξόδου του ανεμο μέτρουσαν συνάρτηση της γωνίας κλίσης του αισθητήρα που με τη χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης της ταχύτητας υπολογίζεται η μεταβολή της ενεργού ταχύτητας ψύξης. Οι συντελεστές προνευσης και συστροφής εκτιμώνται από τις ακόλουθες σχέσεις αντίστοιχα.

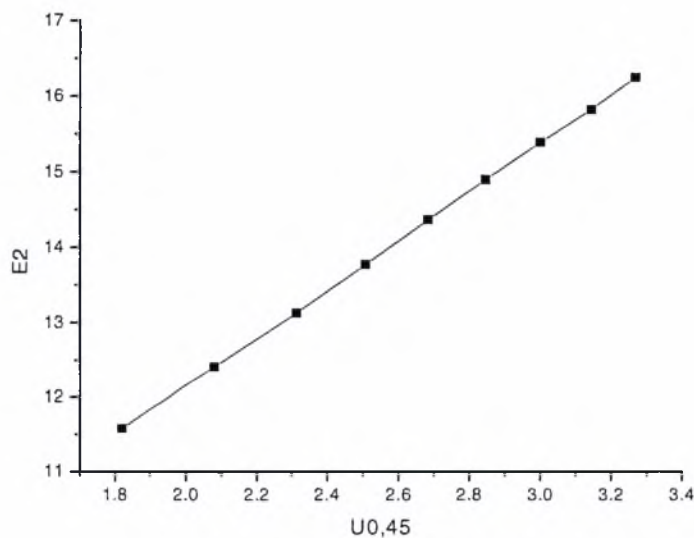
$$k = \frac{1}{\sin(a)} \left[\left(\frac{Q(a)}{Q(a=0)} \right)^2 - \cos^2(a) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

$$h = \frac{1}{\sin(\theta)} \left[\left(\frac{Q(\theta)}{Q(\theta=0)} \right)^2 - \cos^2(\theta) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

Στο σχήμα (4.4) που ακολουθεί φαίνεται μια καμπύλη βαθμονόμησης.



Διάγραμμα 3.1: Καμπύλη βαθμονόμησης μονού αισθητήρα



Διάγραμμα 3.2: Καμπύλη βαθμονόμησης νόμου του King

Κάθε φορά γινόταν βαθμονόμηση του αισθητήρα προέκυπταν οι σταθερές για το πολυώνυμο τετάρτης τάξης. Θέτοντας τις σταθερές αυτές στο πρόγραμμα παίρναμε την ταχύτητα στην αεροσήραγγα.

3.4 Τρόπος λήψεως των μετρήσεων

Η αντίσταση του ανεμομέτρου του Hot-wire ρυθμίστηκε μια φορά πριν αρχίσουν οι μετρήσεις. Κάθε φορά που επρόκειτο να γίνουν οι μετρήσεις, Σε πρώτη φάση μετρήθηκαν οι ταχύτητες και η ένταση της τύρβης στο απόρευμα τριών διαφορετικών ροών α) ροή πίσω από πλέγμα β) ροή πίσω από παράθυρο ταλαντούμενων πτερυγίων γ) συνδυασμός των προηγούμενων ροών. Αυτές οι μετρήσεις έγιναν με το σωλήνα Pitot και το μανόμετρο. Έπειτα τοποθετήθηκε στην αεροσήραγγα Hot-wire και η πτέρυγα δοκιμών με τον αισθητήρα δυνάμεων ώστε να μετρηθούν ταυτόχρονα η ταχύτητα και οι δυνάμεις F_x, F_y, F_z που αναπτύσσονται στην πτέρυγα. Και αυτές οι μετρήσεις έγιναν στις τρεις διαφορετικές ροές που περιγράφηκαν παραπάνω όπως επίσης έγιναν και μετρήσεις σε κενή σήραγγα (χωρίς την ύπαρξη παραθύρου ή πλέγματος).

Πρέπει να αναφέρουμε εδώ τις συνθήκες και τις παραμέτρους που έγινε η αναφερόμενη μελέτη. Καταρχάς δημιουργήθηκαν τριών ειδών ροές των οποίων το απόρευμα έγιναν οι μετρήσεις α) ροή πίσω από πλέγμα β) ροή πίσω από παράθυρο ταλαντούμενων πτερυγίων γ) συνδυασμός των προηγούμενων ροών. Η ταχύτητα αναφοράς της αεροσήραγγας U_0 ορίστηκε στα 12 m/s και η πίεση P_0 στην δεδομένη ταχύτητα μετρήθηκε στα 87 Pa. Αυτές οι συνθήκες διατηρήθηκαν σταθερές σε όλη την διάρκεια των μετρήσεων. Τα μετρητικά όργανα (Hot-wire, σωλήνα Pitot) τοποθετήθηκαν στην θέση $x=0$ που αναφέρεται σαν κέντρο της αεροσήραγγας και ισαπέχει από τα τοιχώματα της σήραγγας, ενώ απέχει 1200 mm από το παράθυρο και 1360 mm από το πλέγμα. Τα όργανα μετακινούνταν μέσω ενός ειδικού δρομέα και ελήφθησαν μετρήσεις στις θέσεις $x=0$, $x=125$, $x=250$, $x=375$, $x=500$. Οι θέσεις αυτές απέχουν από το παράθυρο $x=1200$ mm, $x=1075$ mm, $x=950$ mm, $x=825$ mm, $x=700$ mm αντίστοιχα, ενώ από το πλέγμα απέχουν $x=1360$ mm, $x=1235$ mm, $x=1110$ mm, $x=985$ mm, $x=860$ mm. Οι μετρήσεις των ταχυτήτων έγιναν για συχνότητες σέγας $f=0, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15$ Hz ενώ για τις δυνάμεις οι συχνότητες σέγας ήταν $f=0, 4, 6, 8, 10, 12$ Hz. Τέλος κατά την φάση που μετρηθήκαν οι δυνάμεις και τοποθετήθηκε το πτερύγιο, αυτό έλαβε τις αντίστοιχες γωνίες σε σχέση με την οριζόντιο που περνάει από το κέντρο της πτέρυγας $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ$.

Κατά την μέτρηση των ταχυτήτων (πρώτη φάση πειραμάτων) ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία: Αρχικά γινόταν η ρύθμιση της θέσης των μετρητικών οργάνων (Hot-wire, σωλήνα Pitot) στην κατάλληλη θέση πάντα στην κατεύθυνση x μέσω του σταθερού

συστήματος μετακίνησης που είναι προσαρμοσμένο στην αεροσήραγγα. Έπειτα γινόταν η ρύθμιση της ταχύτητας της ελεύθερης ροής στα 12 m/s (87 Pa) με την βοήθεια του σωλήνα Pitot και του μανομέτρου και της χρήσης του inverter της αεροσήραγγας. Ύστερα θέταμε σε λειτουργία την σέγα που κινούσε το σύστημα ταλάντωσης του παραθύρου (στην περίπτωση που οι μετρήσεις απαιτούσαν την χρήση του). Έπειτα γινόταν η ρύθμιση της αντίστοιχης συχνότητας ταλάντωσης με την βοήθεια του μετατροπέα τάσης και του ταχύμετρου. Παρατηρώντας τώρα το μανόμετρο βλέπαμε ότι υπήρχε πτώση πίεσης λόγω της λειτουργίας του ταλαντωτικού μηχανισμού που σήμαινε ότι έπρεπε να γίνουν οι ανάλογες διορθώσεις μέσω του του inverter της αεροσήραγγας έτσι ώστε η ταχύτητα της ελεύθερης ροής να είναι στα 12 m/s (87 Pa). Μόλις η πίεση στο μανόμετρο έδειχνε 87 Pa είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην ρύθμιση των παραμέτρων στο σύστημα λήψης των δεδομένων που απεικονιζόταν γραφικά στον Η/Υ σε περιβάλλον Labview. Εκεί γινόταν η ρύθμιση των συντελεστών της καμπύλης βαθμονόμησης ταχύτητας- πιέσεων που βρίσκαμε ύστερα από την εκάστοτε βαθμονόμηση α) ροή πίσω από πλέγμα β) ροή πίσω από παράθυρο ταλαντούμενων πτερυγίων γ) συνδυασμός των προηγούμενων ροών. Επίσης γινόταν και η ρύθμιση της δειγματοληψίας sample rate=500 και των δειγμάτων ανά κανάλι samples per channel=20000. Τέλος προχωρούσαμε στην καταγραφή της εκάστοτε δειγματοληψίας σε αρχεία που αποθηκεύονταν στον Η/Υ, ενώ καταγραφόταν χειρόγραφα η μέση ταχύτητα της ροής U_{mean} και η ένταση της τύρβης std_{dev} . Για να προχωρήσουμε στην επόμενη δειγματοληψία αλλάζαμε μόνο της συχνότητα της ταλάντωσης προσαρμόζοντας πάλι όμως την ταχύτητα ελεύθερης ροής στα 12 m/s (87 Pa).

Κατά την μέτρηση των δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) (δεύτερη φάση πειραμάτων) ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία μόνο που στην αεροσήραγγα προσαρμόστηκε σε ειδική ακλόνητη βάση στήριξης πτέρυγα χορδής $c=125$ mm και πάνω της ειδικός αισθητήρας μέτρησης των δυνάμεων. Η ρύθμιση της δειγματοληψίας έγινε ως εξής sample rate=1000 και των δειγμάτων ανά κανάλι samples per channel=30000 Όλες οι μετρήσεις έγιναν στην θέση $x=0$ και για 6 διαφορετικές γωνίες στην πτέρυγα δοκιμής $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ$. Έτσι μπορούσαμε τώρα στο Labview να λαμβάνουμε δύο σήματα, μετρώντας ταυτόχρονα ταχύτητα και αντίστοιχη δύναμη την ίδια στιγμή.

3.5 Επεξεργασία των μετρήσεων

Κατόπιν, έγινε η επεξεργασία των δεδομένων. Δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα των διανομών της ταχύτητας της διακύμανσης αυτής με τον αριθμό $k=\omega c/2U_0$ τα οποία αδιαστατοποιήθηκαν με βάση την ταχύτητα αναφοράς U_0 για την κάθε ομάδα μετρήσεων. Έτσι μειώνονταν τα τυχόν λάθη λόγω της αλλαγής χαρακτηριστικών του hot-wire. Επίσης δημιουργήθηκαν διαγράμματα της έντασης της τύρβης με τον αριθμό $k=\omega c/2U_0$. Έπειτα από περαιτέρω επεξεργασία με ειδικό πρόγραμμα ελήφθησαν τα φάσματα των ταχυτήτων και των δυνάμεων και έγινε η γραφική απεικόνισή τους με την συχνότητα. Για την δημιουργία των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Microsoft Excel, Golden Software Surfer 8, Origin 8. Παρακάτω ακολουθούν κάποιοι πίνακες των δεδομένων που ελήφθησαν, όπως και κάποια ενδεικτικά διαγράμματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Λεπτομερής παρουσίαση αυτών θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

Ημερομηνία 30 09 08

tunnel frequency (Hz) = Hz

ΔP (Hz) =87 Pa

U (m/sec) = 11,95 m/sec

Sample rate =500

Samples per channel =20000

θέση $y=y_0$

θέση $x=125\text{mm}$

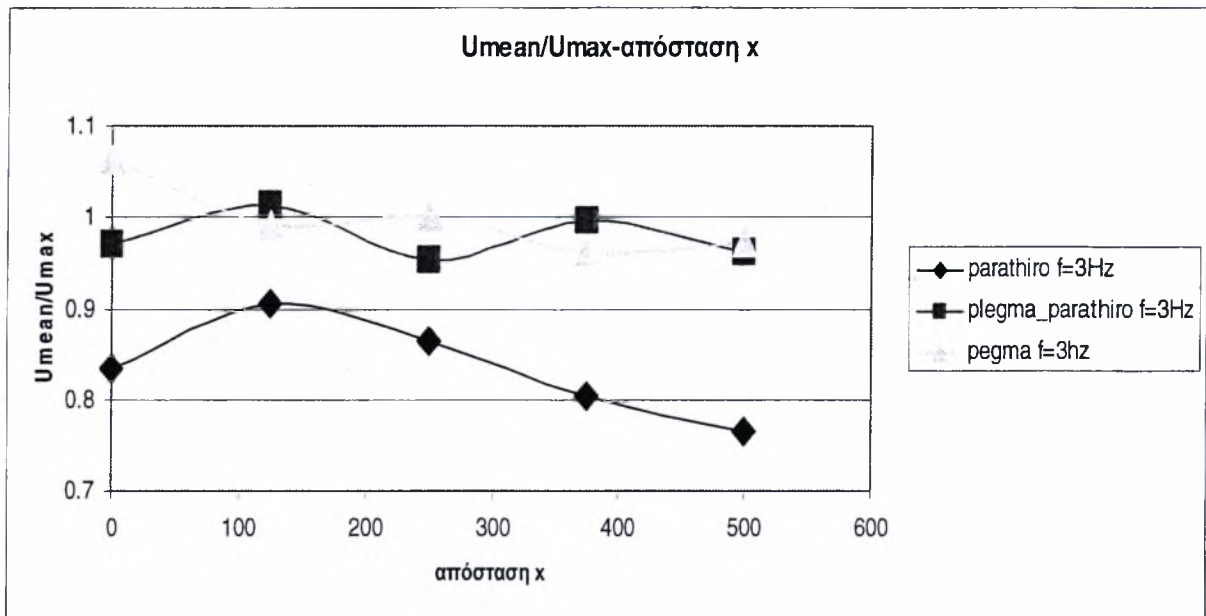
| α/α | filename | sega f (Hz) | tunnel f (Hz) | V metatro pea (volts) | luton (rpm) | U_{mean} (m/sec) | rms (m/sec) | std (m/sec) |
|-----------------|----------------------|-------------|---------------|-----------------------|-------------|---------------------------|-------------|-------------|
| 1 | | 2 | | 60 | 240 | | | |
| 2 | parathiro_yo_x125_3 | 3 | 45.7 | 68 | 360 | 10.37720 | 10.5957 | 2.14078 |
| 3 | parathiro_yo_x125_4 | 4 | 45.6 | 77 | 480 | 10.46370 | 10.6667 | 2.07126 |
| 4 | parathiro_yo_x125_5 | 5 | 45.4 | 86 | 600 | 10.41530 | 10.5918 | 1.92558 |
| 5 | parathiro_yo_x125_6 | 6 | 45.3 | 94 | 720 | 10.56300 | 10.7430 | 1.95864 |
| 6 | parathiro_yo_x125_7 | 7 | 45.3 | 103 | 839 | 10.49200 | 10.6926 | 2.06154 |
| 7 | parathiro_yo_x125_8 | 8 | 45.8 | 112 | 959 | 10.43950 | 10.6784 | 2.24605 |
| 8 | parathiro_yo_x125_9 | 9 | 46.5 | 120 | 1079 | 10.31830 | 10.5981 | 2.41924 |
| 9 | parathiro_yo_x125_10 | 10 | 47.7 | 129 | 1199 | 10.28410 | 10.6024 | 2.57878 |
| 10 | parathiro_yo_x125_11 | 11 | 48.2 | 138 | 1319 | 10.21210 | 10.5572 | 2.67716 |
| 11 | parathiro_yo_x125_12 | 12 | 49.9 | 146 | 1439 | 10.24390 | 10.6084 | 2.75718 |
| 12 | parathiro_yo_x125_13 | 13 | 51 | 155 | 1559 | 10.20750 | 10.5747 | 2.76273 |
| 13 | parathiro_yo_x125_14 | 14 | 53.3 | 164 | 1679 | 10.15070 | 10.5245 | 2.78038 |
| 14 | parathiro_yo_x125_15 | 15 | 54.3 | 172 | 1799 | 10.27480 | 10.6286 | 2.71958 |

Σχόλια : Μετακίνηση hot wire 125mm στον άξονα x (αριστερά του $x=0$)

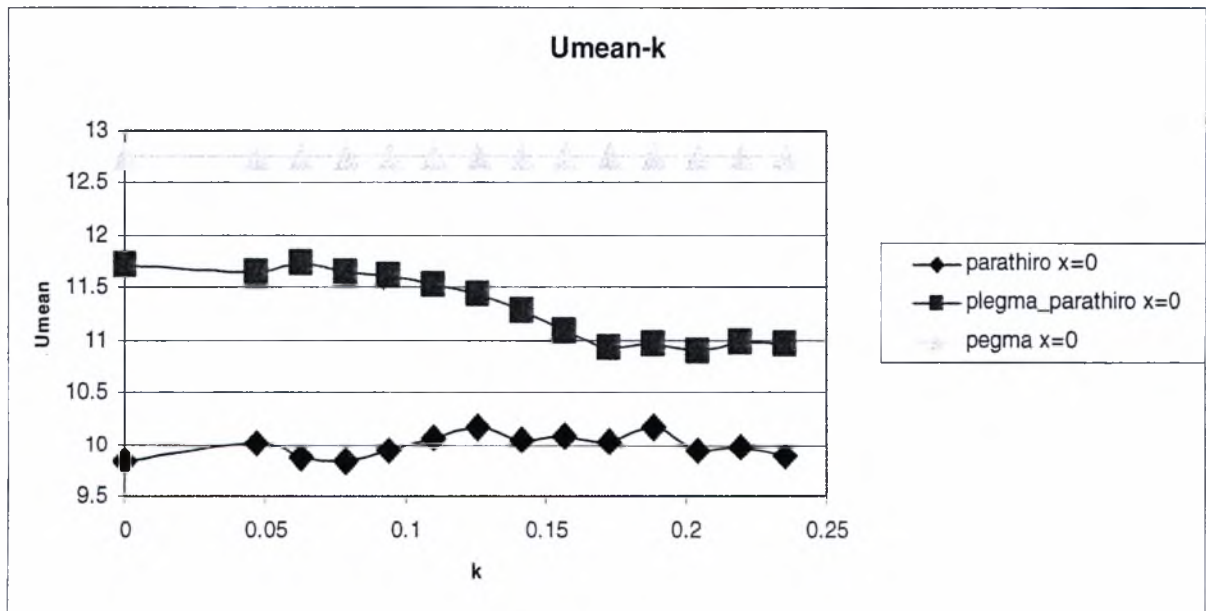
Πίνακας 3.1: Μετρήσεις των ταχυτήτων και της έντασης της τύρβης ($x=125\text{mm}$)

| a/a | filename | sega frequency (Hz) | tunnel frequency (Hz) | luton(rpm) | V metatr (Volt) | Umean (Volts) | Urms (Volts) | stdev (Volts) |
|-----|--------------------------|---------------------|-----------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | parathiro_plegmaF_a0_f0 | 0 | 59.8 | -- | -- | -4.094484 | 4.09522 | 0.077566 |
| 2 | parathiro_plegmaF_a0_f4 | 4 | 55.2 | 484 | 77 | -4.001514 | 4.00262 | 0.0941916 |
| 3 | parathiro_plegmaF_a0_f6 | 6 | 55.1 | 720 | 94 | -3.98423 | 3.98562 | 0.105305 |
| 4 | parathiro_plegmaF_a0_f8 | 8 | 56.3 | 963 | 112 | -3.9896 | 3.99098 | 0.105017 |
| 5 | parathiro_plegmaF_a0_f10 | 10 | 56.7 | 1202 | 129 | -3.99376 | 3.99503 | 0.100724 |
| 6 | parathiro_plegmaF_a0_f12 | 12 | 57.4 | 1443 | 147 | -3.99996 | 4.00106 | 0.0936713 |
| a/a | filename | sega frequency (Hz) | tunnel frequency (Hz) | luton(rpm) | V metatr (Volt) | Fx (Volts) mean | Fy (Volts) mean | Fz (Volts) mean |
| 1 | parathiro_plegmaF_a0_f0 | 0 | 59.8 | -- | -- | -0.00446317 | -0.00486044 | -0.00476986 |
| 2 | parathiro_plegmaF_a0_f4 | 4 | 55.2 | 484 | 77 | -0.00459655 | -0.00481836 | -0.00471047 |
| 3 | parathiro_plegmaF_a0_f6 | 6 | 55.1 | 720 | 94 | -0.00451506 | -0.0047005 | -0.0046159 |
| 4 | parathiro_plegmaF_a0_f8 | 8 | 56.3 | 963 | 112 | -0.00465137 | -0.00458149 | -0.00467903 |
| 5 | parathiro_plegmaF_a0_f10 | 10 | 56.7 | 1202 | 129 | -0.00464034 | -0.00483545 | -0.00462731 |
| 6 | parathiro_plegmaF_a0_f12 | 12 | 57.4 | 1443 | 147 | -0.0046226 | -0.00456054 | -0.00457594 |
| a/a | filename | sega frequency (Hz) | tunnel frequency (Hz) | luton(rpm) | V metatr (Volt) | Rms(x) | Rms(y) | Rms(z) |
| 1 | parathiro_plegmaF_a0_f0 | 0 | 59.8 | -- | -- | 0.255198 | 0.11063 | 0.03523358 |
| 2 | parathiro_plegmaF_a0_f4 | 4 | 55.2 | 484 | 77 | 0.224924 | 0.131055 | 0.0373773 |
| 3 | parathiro_plegmaF_a0_f6 | 6 | 55.1 | 720 | 94 | 0.224004 | 0.165015 | 0.039186 |
| 4 | parathiro_plegmaF_a0_f8 | 8 | 56.3 | 963 | 112 | 0.195169 | 0.167877 | 0.044583 |
| 5 | parathiro_plegmaF_a0_f10 | 10 | 56.7 | 1202 | 129 | 0.236575 | 0.21579 | 0.0492923 |
| 6 | parathiro_plegmaF_a0_f12 | 12 | 57.4 | 1443 | 147 | 0.198227 | 0.139405 | 0.03353338 |
| a/a | filename | sega frequency (Hz) | tunnel frequency (Hz) | luton(rpm) | V metatr (Volt) | stdev(x) | stdev(y) | stdev(z) |
| 1 | parathiro_plegmaF_a0_f0 | 0 | 59.8 | -- | -- | 0.255163 | 0.110525 | 0.0349121 |
| 2 | parathiro_plegmaF_a0_f4 | 4 | 55.2 | 484 | 77 | 0.224881 | 0.130969 | 0.0370799 |
| 3 | parathiro_plegmaF_a0_f6 | 6 | 55.1 | 720 | 94 | 0.223962 | 0.164951 | 0.0389138 |
| 4 | parathiro_plegmaF_a0_f8 | 8 | 56.3 | 963 | 112 | 0.195116 | 0.167817 | 0.0401875 |
| 5 | parathiro_plegmaF_a0_f10 | 10 | 56.7 | 1202 | 129 | 0.236575 | 0.215739 | 0.0490754 |
| 6 | parathiro_plegmaF_a0_f12 | 12 | 57.4 | 1443 | 147 | 0.198227 | 0.139333 | 0.0332207 |

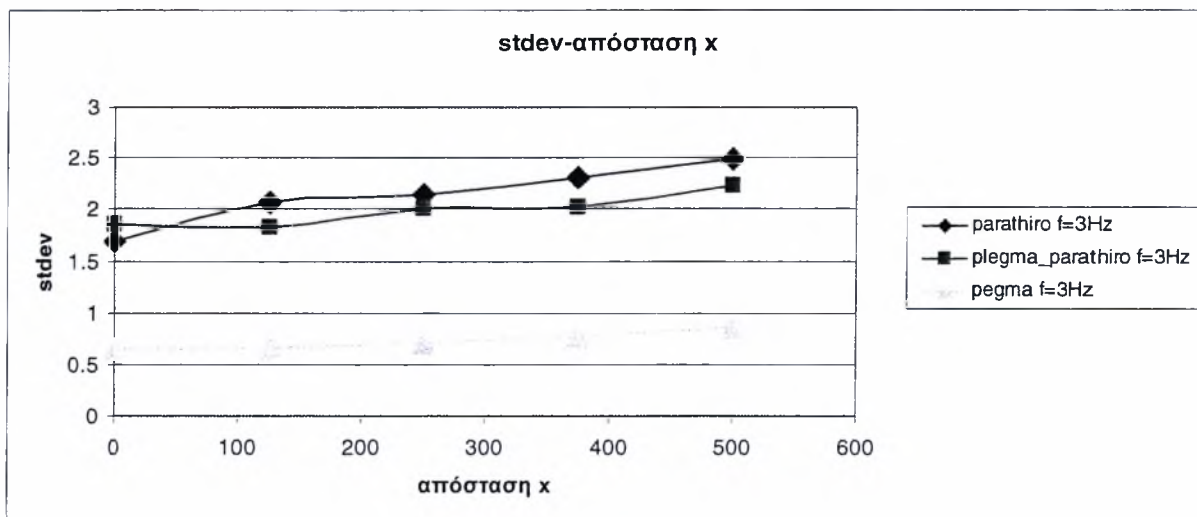
Πίνακας 3.2: Μετρήσεις των δυνάμεων Fx, Fy, Fz και της έντασης της τύρβης ($\alpha=0^\circ$)



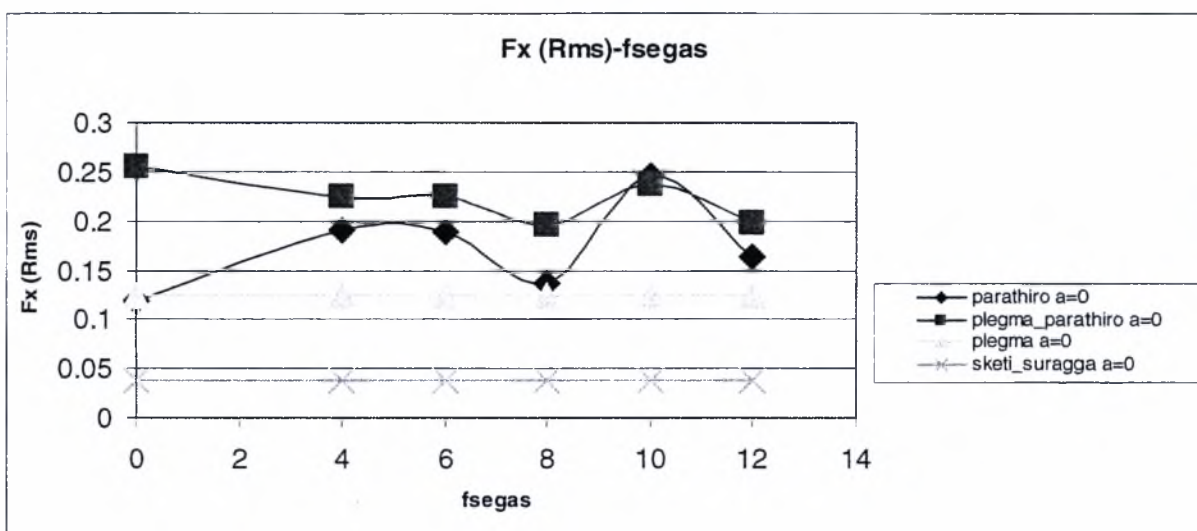
Διάγραμμα 3.3 : Απεικόνιση U_{mean}/U_{max} σε σχέση με την απόσταση x (mm) για τους τρεις τύπους ροής $f_{segas}=3$ Hz, $U_{max}=12$ m/s (ταχύτητα ελεύθερης ροής)



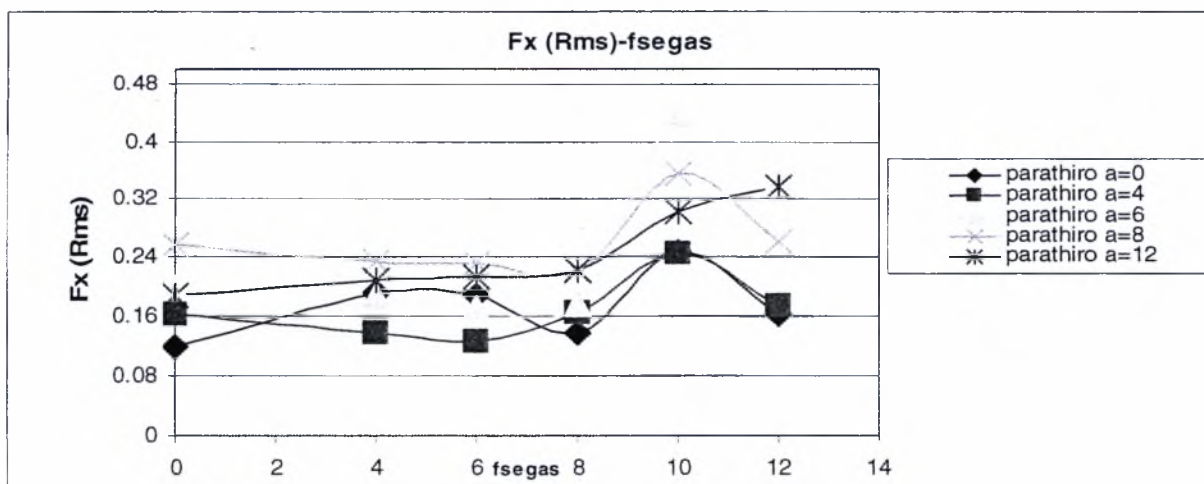
Διάγραμμα 3.4 : Απεικόνιση U_{mean} (m/s) σε σχέση με τον αριθμό k για τους τρεις τύπους ροής και για όλες τις f_{segas} ($k=\omega c/2U_0$).



Διάγραμμα 3.5 : Απεικόνιση της έντασης της τύρβης $stdev$ σε σχέση με την απόσταση x (mm) για τους τρεις τύπους ροής $f_{segas}=3$ Hz.

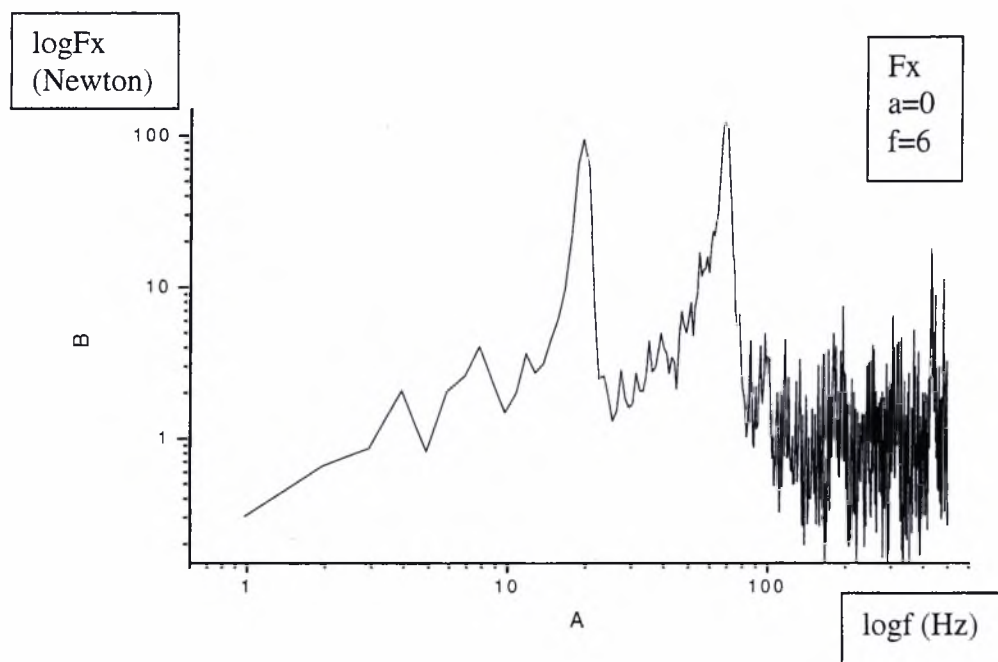


Διάγραμμα 3.6 : Απεικόνιση της δύναμης F_x (Drag) (Newton) σε σχέση με την απόσταση f_{segas} (Hz) για τους τρεις τύπους ροής και για σκέτη σήραγγα.

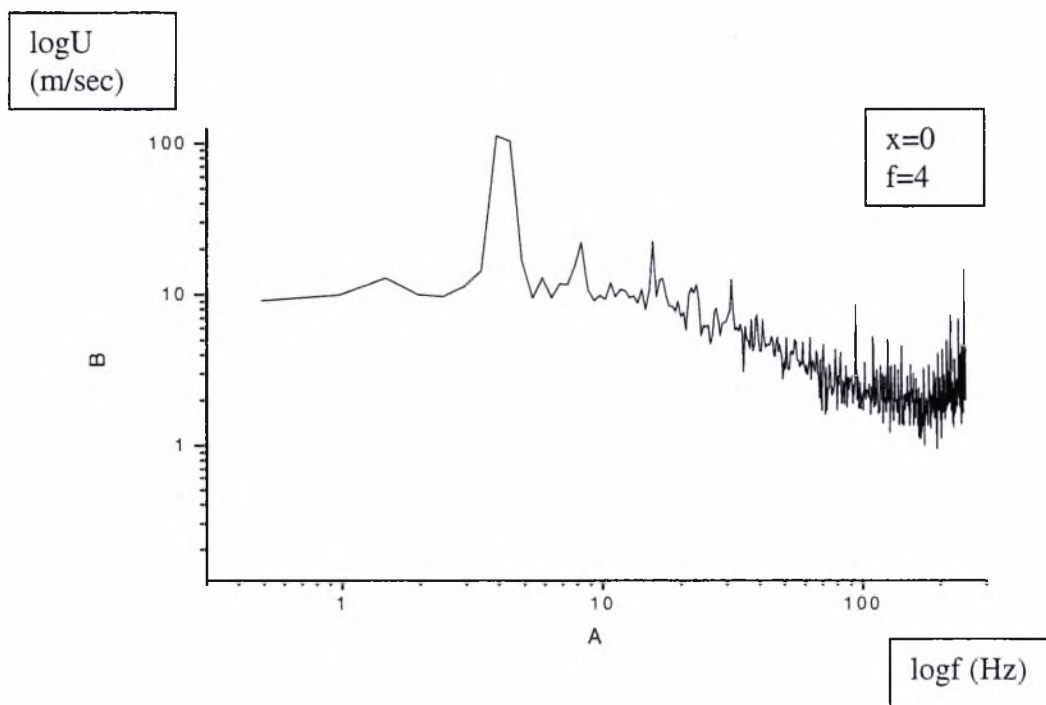


Διάγραμμα 3.7 : Απεικόνιση της δύναμης F_x (Drag) (Newton) σε σχέση με την απόσταση f_{segas} (Hz) για την ροή στο απόρρευμα του παραθύρου για όλες τις γωνίες της πτέρυγας





Διάγραμμα 3.8 : Απεικόνιση του φάσματος της δύναμης F_x (Drag) (Newton) σε σχέση με την συχνότητα(Hz) για την ροή στο απόρευμα του παραθύρου για γωνία της πτέρυγας $a=0$ και $f_{segas}=6\text{Hz}$.



Διάγραμμα 3.9 : Απεικόνιση του φάσματος της ταχύτητας U (m/sec) σε σχέση με την συχνότητα(Hz) για την ροή στο απόρευμα του παραθύρου στη θέση $x=0$ και $f_{segas}=4\text{Hz}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αφορά στη μελέτη των ταχυτήτων που αναπτύσσονται στο απόρευμα τόσο της ημιτονοειδούς ροής όσο και μιας συνδυασμένης ροής που προκύπτει με την προσθήκη τύρβης στην παραπάνω ροή. Επίσης έγινε η μέτρηση των δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) που αναπτύσσονται πάνω σε πτέρυγα χορδής $c=125$ mm η οποία τοποθετήθηκε στο απόρευμα τόσο της ημιτονοειδούς ροής όσο και μιας συνδυασμένης ροής που προκύπτει με την προσθήκη τύρβης στην παραπάνω ροή.

Όλες οι μετρήσεις έγιναν στην αεροσήραγγα που υπάρχει στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Τ.Μ.Μ.Β. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δυο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση μετρήθηκαν οι ταχύτητες και η ένταση της τύρβης στο απόρευμα τριών διαφορετικών ροών α) ροή πίσω από πλέγμα β) ροή πίσω από παράθυρο ταλαντούμενων πτερυγίων γ) συνδυασμός των προηγούμενων ροών. Αυτές οι μετρήσεις έγιναν με το σωλήνα Pitot και το μανόμετρο. Έπειτα τοποθετήθηκε στην αεροσήραγγα Hot-wire και η πτέρυγα δοκιμών με τον αισθητήρα δυνάμεων ώστε να μετρηθούν ταυτόχρονα η ταχύτητα και οι δυνάμεις F_x, F_y, F_z που αναπτύσσονται στην πτέρυγα. Και αυτές οι μετρήσεις έγιναν στις τρεις διαφορετικές ροές που περιγράφηκαν παραπάνω όπως επίσης έγιναν και μετρήσεις σε κενή σήραγγα (χωρίς την ύπαρξη παραθύρου ή πλέγματος).

Πρέπει να αναφέρουμε εδώ τις συνθήκες και τις παραμέτρους που έγινε η αναφερόμενη μελέτη. Καταρχάς δημιουργήθηκαν τριών ειδών ροές των οποίων το απόρευμα έγιναν οι μετρήσεις α) ροή πίσω από πλέγμα β) ροή πίσω από παράθυρο ταλαντούμενων πτερυγίων γ) συνδυασμός των προηγούμενων ροών. Η ταχύτητα αναφοράς της αεροσήραγγας U_0 ορίστηκε στα 12 m/s και η πίεση P_0 στην δεδομένη ταχύτητα μετρήθηκε στα 87 Pa. Αυτές οι συνθήκες διατηρήθηκαν σταθερές σε όλη την διάρκεια των μετρήσεων. Τα μετρητικά όργανα (Hot-wire, σωλήνα Pitot) τοποθετήθηκαν στην θέση $x=0$ που αναφέρεται σαν κέντρο της αεροσήραγγας και ισαπέχει από τα τοιχώματα της σήραγγας, ενώ απέχει 1200 mm από το παράθυρο και 1360 mm από το πλέγμα. Τα όργανα μετακινούνταν μέσω ενός ειδικού δρομέα και ελήφθησαν μετρήσεις στις θέσεις $x=0$, $x=125$, $x=250$, $x=375$, $x=500$. Οι θέσεις αυτές απέχουν από το

παράθυρο $x=1200$ mm, $x=1075$ mm, $x=950$ mm , $x=825$ mm , $x=700$ mm αντίστοιχα, ενώ από το πλέγμα απέχουν $x=1360$ mm, $x=1235$ mm, $x=1110$ mm , $x=985$ mm , $x=860$ mm. Οι μετρήσεις των ταχυτήτων έγιναν για συχνότητες σέγας $f=0, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15$ Hz ενώ για τις δυνάμεις οι συχνότητες σέγας ήταν $f=0, 4, 6, 8, 10, 12$ Hz. Τέλος κατά την φάση που μετρηθήκαν οι δυνάμεις και τοποθετήθηκε το πτερύγιο, αυτό έλαβε τις αντίστοιχες γωνίες σε σχέση με την οριζόντιο που περνάει από το κέντρο της πτέρυγας $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ$.

4.2 Πρωτογενή δεδομένα

Κατά την πρώτη φάση των πειραμάτων όπως προαναφέρθηκε μετρήθηκαν οι ταχύτητες όπως και η ένταση της τύρβης (stdev). Οι στιγμιαίες ταχύτητες καταγράφονταν ανάλογα με την συχνότητα δειγματοληψίας. Οι τιμές της δειγματοληψίας sample rate=500 και των δειγμάτων ανά κανάλι samples per channel=20000. Είχαμε λοιπόν 20000 τιμές της στιγμιαίας ταχύτητας (που προέκυπταν από την μετατροπή των αντίστοιχων πιέσεων), ενώ στον Η/Υ παίρναμε και την μέση τιμή της ταχύτητας (U_{mean}) όπως και η ένταση της τύρβης (stdev) οι οποίες και καταγράφονταν σε πίνακες όπως αυτός του Πίνακα 4.1 και τα δεδομένα ήταν διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία.

Ημερομηνία 30 09 08

tunnel frequency (Hz) = 27

ΔP (Hz) =87 Pa

U (m/sec) = 11,95 m/sec

Sample rate =500

Samples per channel =20000

θέση $y=y_0$

θέση $x=125$ mm

| α/α | filename | sega f (Hz) | tunnel f (Hz) | V metatro pea (volts) | luton (rpm) | U_{mean} (m/sec) | rms (m/sec) | std (m/sec) |
|-----------------|----------------------|-------------|---------------|-----------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|
| 1 | | 2 | | 60 | 240 | | | |
| 2 | parathiro_yo_x125_3 | 3 | 45.7 | 68 | 360 | 10.37720 | 10.5957 | 2.14078 |
| 3 | parathiro_yo_x125_4 | 4 | 45.6 | 77 | 480 | 10.46370 | 10.6667 | 2.07126 |
| 4 | parathiro_yo_x125_5 | 5 | 45.4 | 86 | 600 | 10.41530 | 10.5918 | 1.92558 |
| 5 | parathiro_yo_x125_6 | 6 | 45.3 | 94 | 720 | 10.56300 | 10.7430 | 1.95864 |
| 6 | parathiro_yo_x125_7 | 7 | 45.3 | 103 | 839 | 10.49200 | 10.6926 | 2.06154 |
| 7 | parathiro_yo_x125_8 | 8 | 45.8 | 112 | 959 | 10.43950 | 10.6784 | 2.24605 |
| 8 | parathiro_yo_x125_9 | 9 | 46.5 | 120 | 1079 | 10.31830 | 10.5981 | 2.41924 |
| 9 | parathiro_yo_x125_10 | 10 | 47.7 | 129 | 1199 | 10.28410 | 10.6024 | 2.57878 |
| 10 | parathiro_yo_x125_11 | 11 | 48.2 | 138 | 1319 | 10.21210 | 10.5572 | 2.67716 |
| 11 | parathiro_yo_x125_12 | 12 | 49.9 | 146 | 1439 | 10.24390 | 10.6084 | 2.75718 |
| 12 | parathiro_yo_x125_13 | 13 | 51 | 155 | 1559 | 10.20750 | 10.5747 | 2.76273 |
| 13 | parathiro_yo_x125_14 | 14 | 53.3 | 164 | 1679 | 10.15070 | 10.5245 | 2.78038 |
| 14 | parathiro_yo_x125_15 | 15 | 54.3 | 172 | 1799 | 10.27480 | 10.6286 | 2.71958 |

Σχόλια : Μετακίνηση hot wire 125mm στον άξονα x (αριστερά του $x=0$)

Πίνακας 4.1: Πρωτογενή δεδομένα μέσης ταχύτητας (U_{mean}) και έντασης της τύρβης (stdev).

Κατά την δεύτερη φάση των πειραμάτων όπως προαναφέρθηκε έγινε η μέτρηση των δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) που αναπτύσσονται πάνω σε πτέρυγα χορδής $c=125$ mm η οποία τοποθετήθηκε στο απόρευμα τόσο της ημιτονοειδούς ροής όσο και μιας συνδυασμένης ροής που προκύπτει με την προσθήκη τύρβης στην παραπάνω ροή. Τέλος μετρήθηκαν οι παραπάνω δυνάμεις μόνο με την επίδραση της τύρβης. Οι στιγμιαίες τιμές των δυνάμεων καταγράφονταν ανάλογα με την συχνότητα δειγματοληψίας. Οι τιμές της δειγματοληψίας $sample\ rate=1000$ και των δειγμάτων ανά κανάλι $samples\ per\ channel=30000$. Είχαμε λοιπόν 30000 στιγμιαίες τιμές των δυνάμεων, ενώ στον Η/Υ παίρναμε και την μέση τιμή της εκάστοτε δύναμης (Rms) όπως και η ένταση της τύρβης (stdev) οι οποίες και καταγράφονταν σε πίνακες όπως αυτός του Πίνακα 4.2 και τα δεδομένα ήταν διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ 23_10_08

P=87 Pa
U=11,95 m/sec

Sample rate=1000
Samples per channel=30000

Θέση $y=y_0$
Θέση $x=$
Γωνία πτερυγίου $\alpha=0$

| a/a | filename | sega frequency (Hz) | tunnel frequency (Hz) | luton(rpm) | V metatr (Volt) | Umean (Volts) | Urms (Volts) | stdev (Volts) |
|-----|--------------------------|---------------------|-----------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | parathiro_plegmaF_a0_f0 | 0 | 59.8 | -- | -- | -4.094484 | 4.09522 | 0.077566 |
| 2 | parathiro_plegmaF_a0_f4 | 4 | 55.2 | 484 | 77 | -4.001514 | 4.00262 | 0.0941916 |
| 3 | parathiro_plegmaF_a0_f6 | 6 | 55.1 | 720 | 94 | -3.98423 | 3.98562 | 0.105305 |
| 4 | parathiro_plegmaF_a0_f8 | 8 | 56.3 | 963 | 112 | -3.9896 | 3.99098 | 0.105017 |
| 5 | parathiro_plegmaF_a0_f10 | 10 | 56.7 | 1202 | 129 | -3.99376 | 3.99503 | 0.100724 |
| 6 | parathiro_plegmaF_a0_f12 | 12 | 57.4 | 1443 | 147 | -3.99996 | 4.00106 | 0.0936713 |
| a/a | filename | sega frequency (Hz) | tunnel frequency (Hz) | luton(rpm) | V metatr (Volt) | Fx (Volts) mean | Fy (Volts) mean | Fz (Volts) mean |
| 1 | parathiro_plegmaF_a0_f0 | 0 | 59.8 | -- | -- | -0.00446317 | -0.00486044 | -0.00476986 |
| 2 | parathiro_plegmaF_a0_f4 | 4 | 55.2 | 484 | 77 | -0.00459655 | -0.00481836 | -0.00471047 |
| 3 | parathiro_plegmaF_a0_f6 | 6 | 55.1 | 720 | 94 | -0.00451506 | -0.0047005 | -0.0046159 |
| 4 | parathiro_plegmaF_a0_f8 | 8 | 56.3 | 963 | 112 | -0.00465137 | -0.00458149 | -0.00467903 |
| 5 | parathiro_plegmaF_a0_f10 | 10 | 56.7 | 1202 | 129 | -0.00464034 | -0.00483545 | -0.00462731 |
| 6 | parathiro_plegmaF_a0_f12 | 12 | 57.4 | 1443 | 147 | -0.0046226 | -0.00456054 | -0.00457594 |
| a/a | filename | sega frequency (Hz) | tunnel frequency (Hz) | luton(rpm) | V metatr (Volt) | Rms(x) | Rms(y) | Rms(z) |
| 1 | parathiro_plegmaF_a0_f0 | 0 | 59.8 | -- | -- | 0.255198 | 0.11063 | 0.03523358 |
| 2 | parathiro_plegmaF_a0_f4 | 4 | 55.2 | 484 | 77 | 0.224924 | 0.131055 | 0.0373773 |
| 3 | parathiro_plegmaF_a0_f6 | 6 | 55.1 | 720 | 94 | 0.224004 | 0.165015 | 0.039186 |
| 4 | parathiro_plegmaF_a0_f8 | 8 | 56.3 | 963 | 112 | 0.195169 | 0.167877 | 0.044583 |
| 5 | parathiro_plegmaF_a0_f10 | 10 | 56.7 | 1202 | 129 | 0.236575 | 0.21579 | 0.0492923 |
| 6 | parathiro_plegmaF_a0_f12 | 12 | 57.4 | 1443 | 147 | 0.198227 | 0.139405 | 0.03353338 |
| a/a | filename | sega frequency (Hz) | tunnel frequency (Hz) | luton(rpm) | V metatr (Volt) | stdev(x) | stdev(y) | stdev(z) |
| 1 | parathiro_plegmaF_a0_f0 | 0 | 59.8 | -- | -- | 0.255163 | 0.110525 | 0.0349121 |
| 2 | parathiro_plegmaF_a0_f4 | 4 | 55.2 | 484 | 77 | 0.224881 | 0.130969 | 0.0370799 |
| 3 | parathiro_plegmaF_a0_f6 | 6 | 55.1 | 720 | 94 | 0.223962 | 0.164951 | 0.0389138 |
| 4 | parathiro_plegmaF_a0_f8 | 8 | 56.3 | 963 | 112 | 0.195116 | 0.167817 | 0.0401875 |
| 5 | parathiro_plegmaF_a0_f10 | 10 | 56.7 | 1202 | 129 | 0.236575 | 0.215739 | 0.0490754 |
| 6 | parathiro_plegmaF_a0_f12 | 12 | 57.4 | 1443 | 147 | 0.198227 | 0.139333 | 0.0332207 |

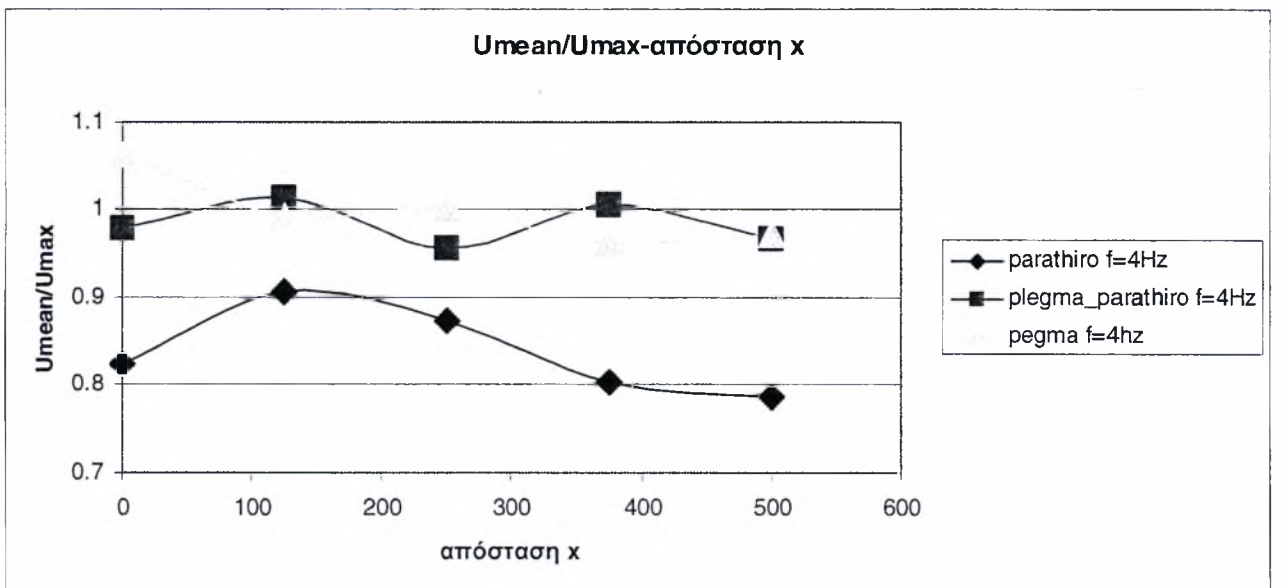
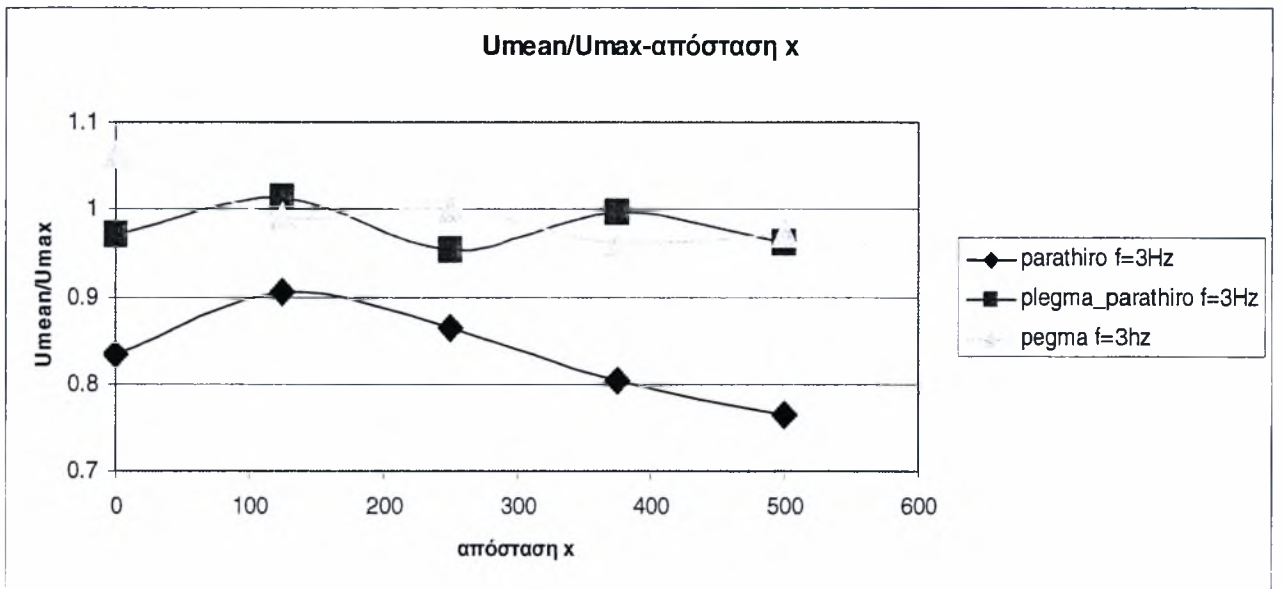
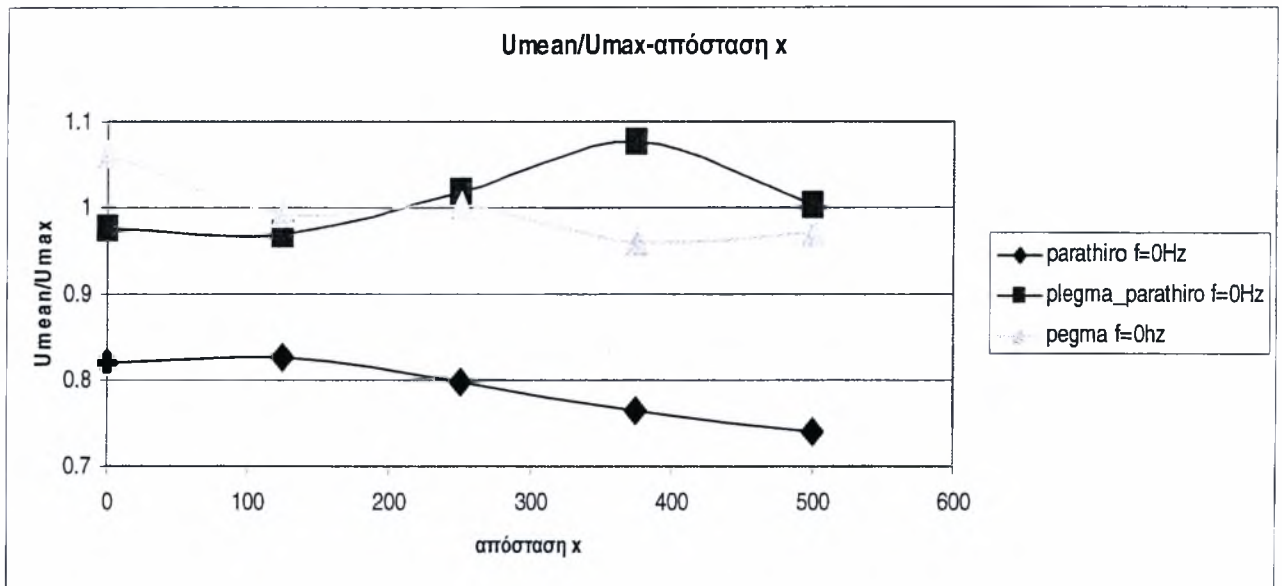
Πίνακας 4.2: Πρωτογενή δεδομένα δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) (Rms) και έντασης της τύρβης (stdev).

4.3 Ανάλυση Πειραμάτων

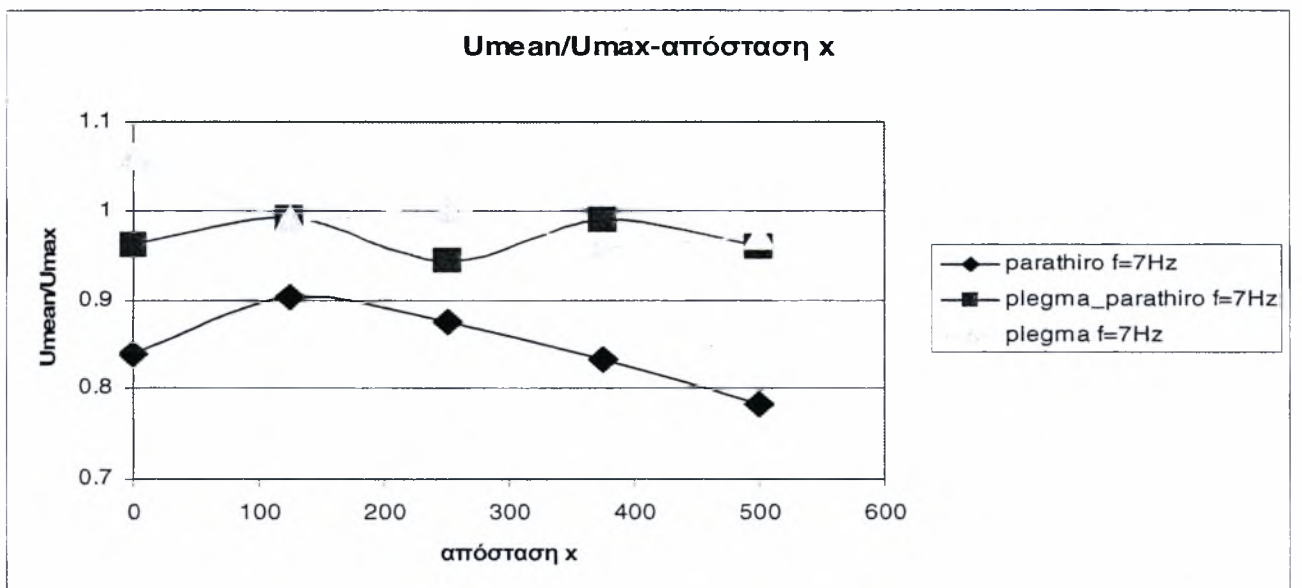
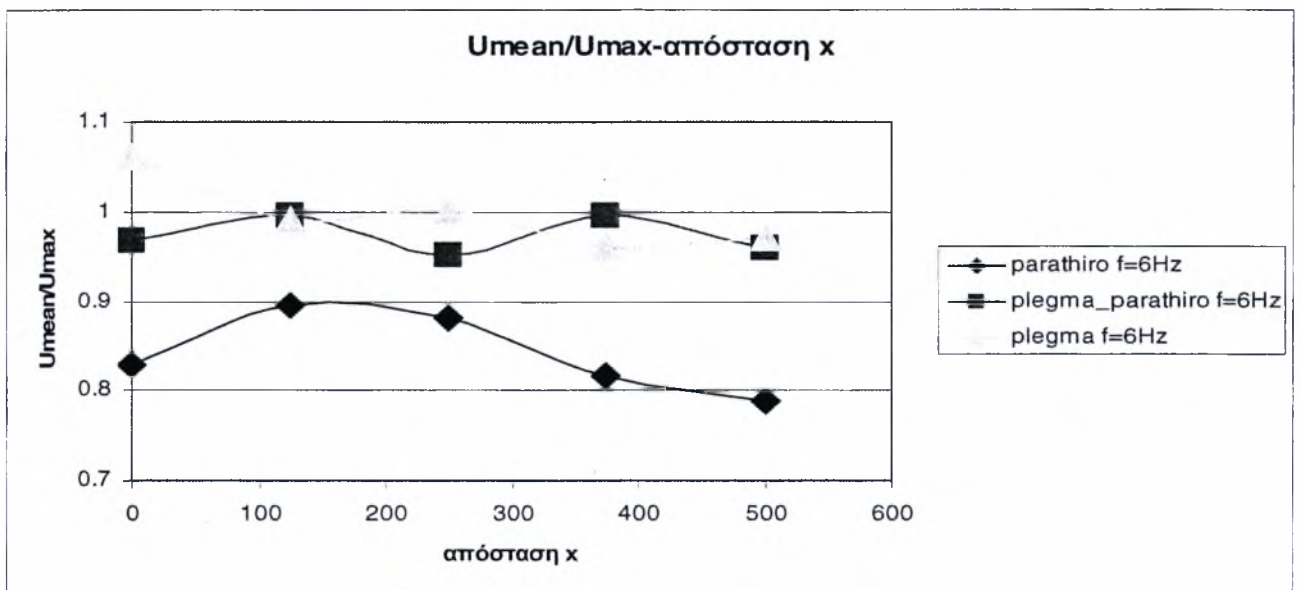
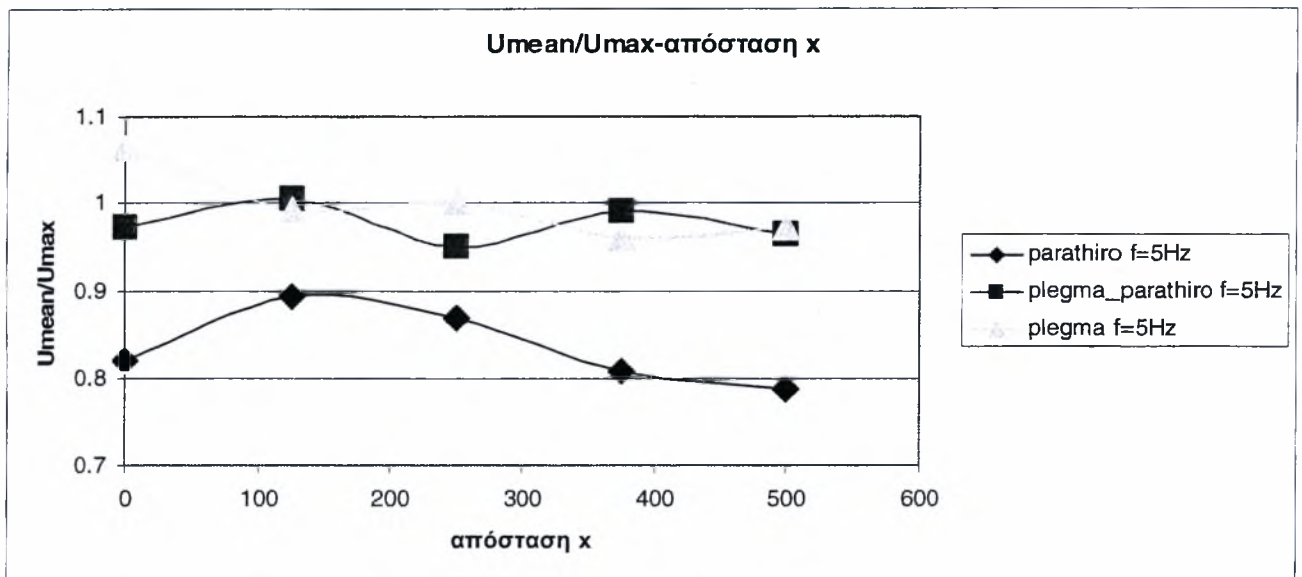
Σε αυτό το κομμάτι θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που προέκυψαν κατά την πρώτη φάση των πειραμάτων που όπως προαναφέρθηκε μετρήθηκαν οι ταχύτητες όπως και η ένταση της τύρβης (stdev). Όπως επίσης και των διαγραμμάτων που προέκυψαν κατά την δεύτερη φάση των πειραμάτων και έγινε η μέτρηση των δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) που αναπτύσσονται πάνω σε πτέρυγα χορδής $c=125$ mm. Επίσης θα παρουσιαστούν και τα διαγράμματα των φασμάτων των ταχυτήτων και των δυνάμεων που μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την ροή, όπως π.χ την συχνότητα ταλάντωσης.

4.3.1 Διαγράμματα Ταχυτήτων

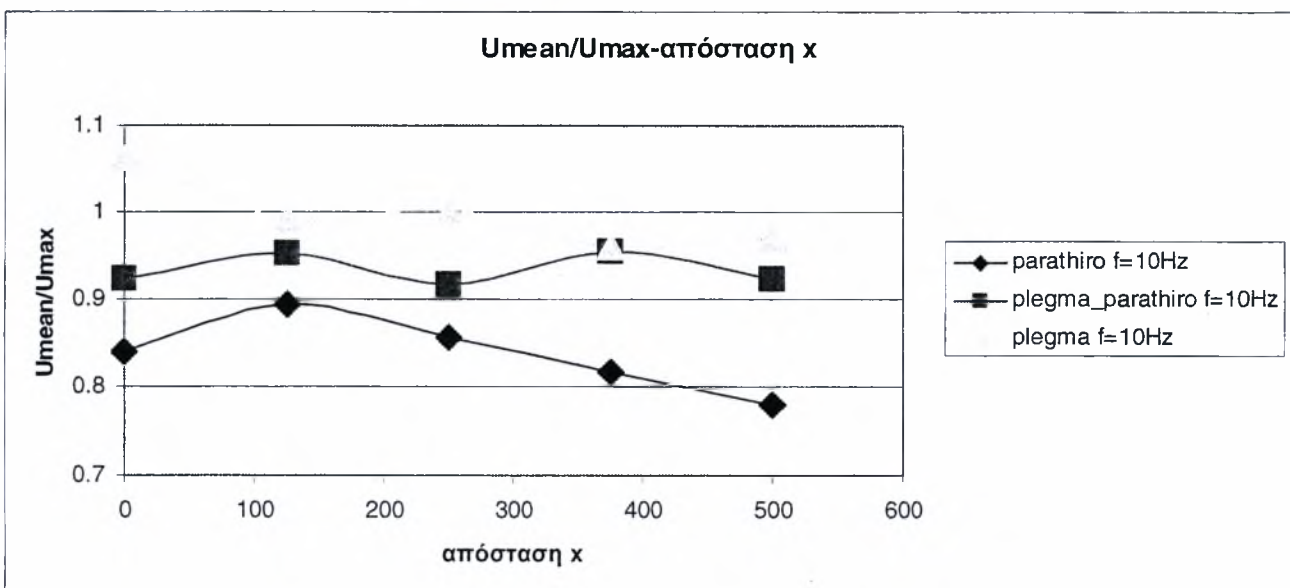
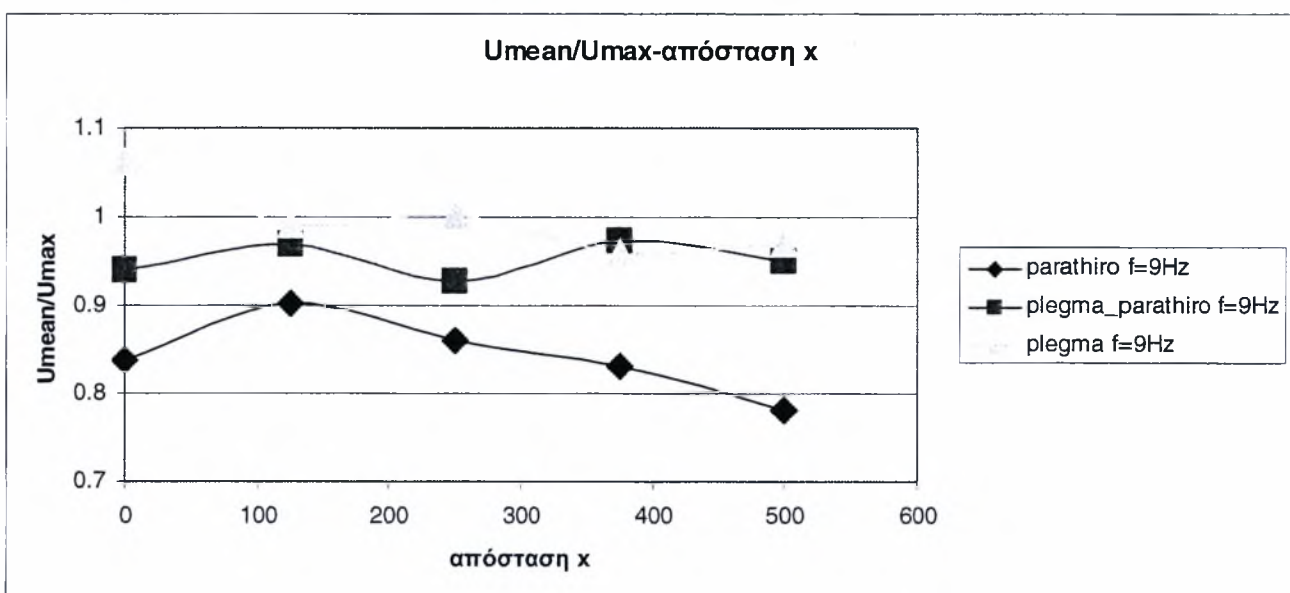
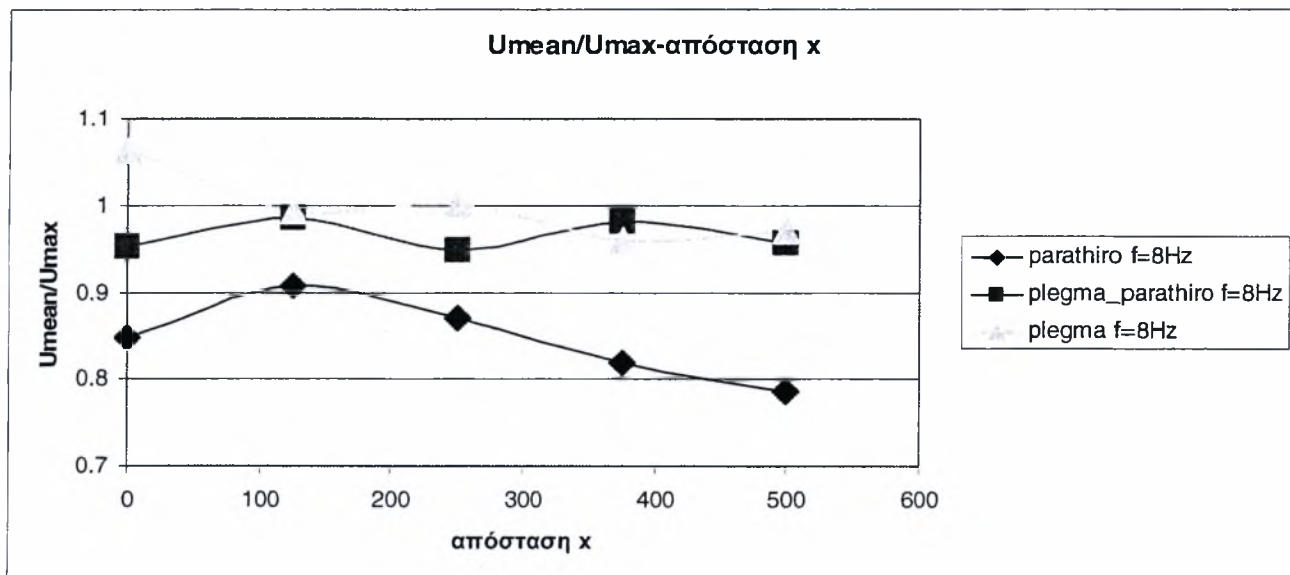
Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των μέσων ταχυτήτων (U_{mean}) τα οποία αδιαστοποιήθηκαν με την ταχύτητα ελεύθερης ροής $U_{max}=12$ m/s. Παρουσιάζεται αρχικά η εξάρτηση του αδιάστατου μεγέθους U_{mean}/U_{max} με την απόσταση x την οποία ορίσαμε ως $x=0$ το σημείο στο κέντρο της αεροσήραγγας ως προς τις διαστάσεις x,y και το οποίο απέχει απόσταση $x=1200$ mm από το παράθυρο και $x=1360$ mm από το πλέγμα. Έπειτα παρουσιάζεται η εξάρτηση της ταχύτητας U_{mean} με τον αριθμό $k=\omega c/2U_{max}$, όπου $\omega=2\pi f$ ταλάντωσης $C_{\text{πτερυγίου ταλάντωσης}}$. Ενώ στην συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν την εξάρτηση της έντασης της τύρβης (stdev) με την απόσταση x την οποία ορίσαμε ως $x=0$ το σημείο στο κέντρο της αεροσήραγγας ως προς τις διαστάσεις x,y και το οποίο απέχει απόσταση $x=1200$ mm από το παράθυρο και $x=1360$ mm από το πλέγμα. Τα διαγράμματα αφορούν τις τρεις καταστάσεις που έγιναν πειράματα και αυτές είναι: α) ροή πίσω από πλέγμα β) ροή πίσω από παράθυρο ταλαντούμενων πτερυγίων γ) συνδυασμός των προηγούμενων ροών.



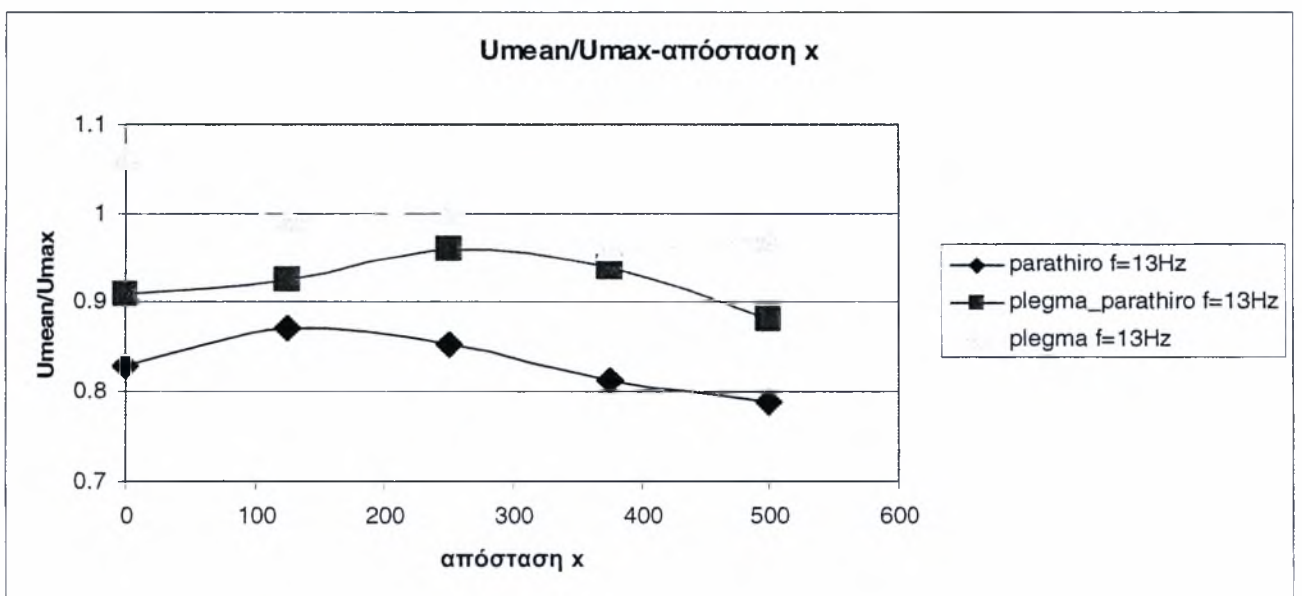
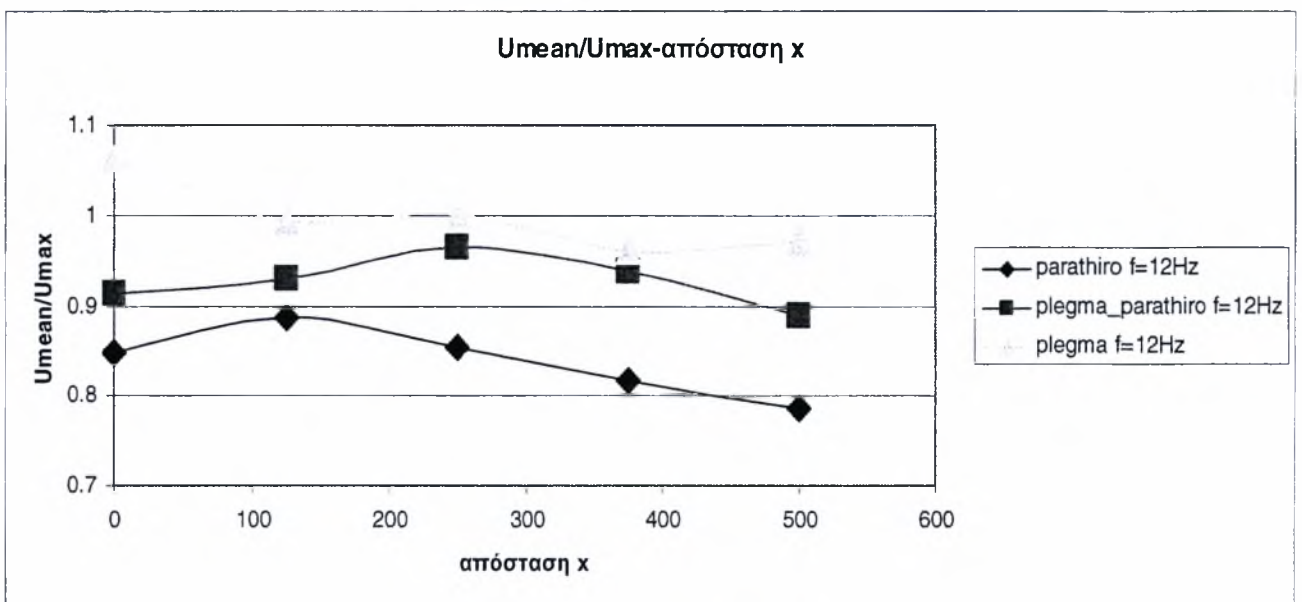
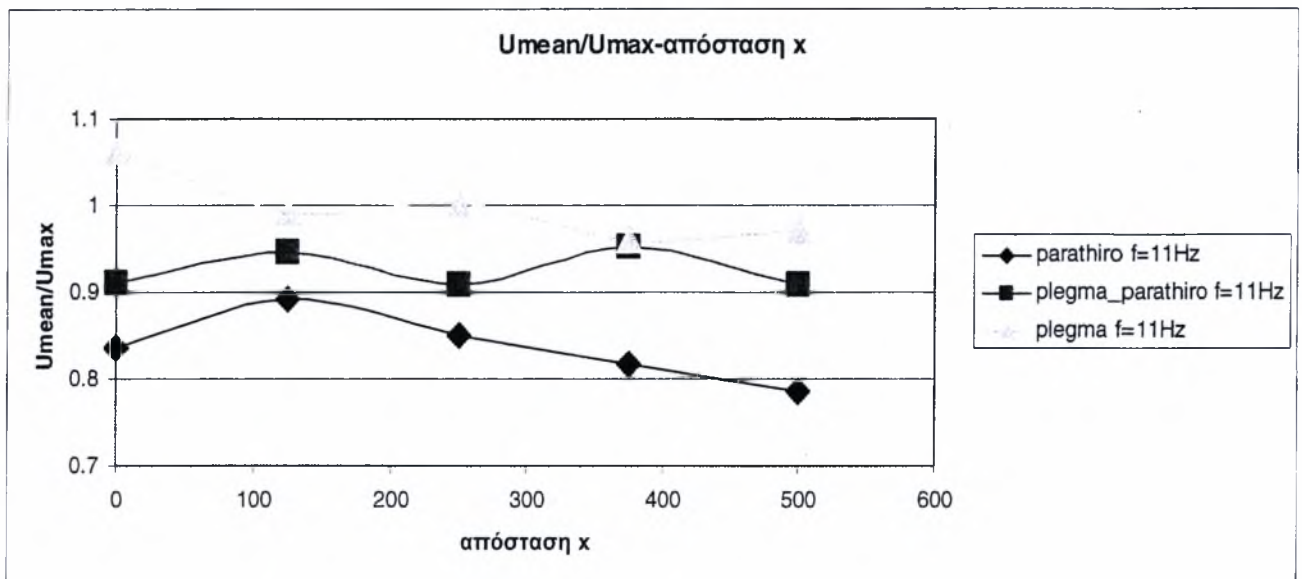
Διάγραμμα 4.1: Εξάρτηση αδιάστατης ταχύτητας U_{mean}/U_{max} με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=0,3,4$ Hz.



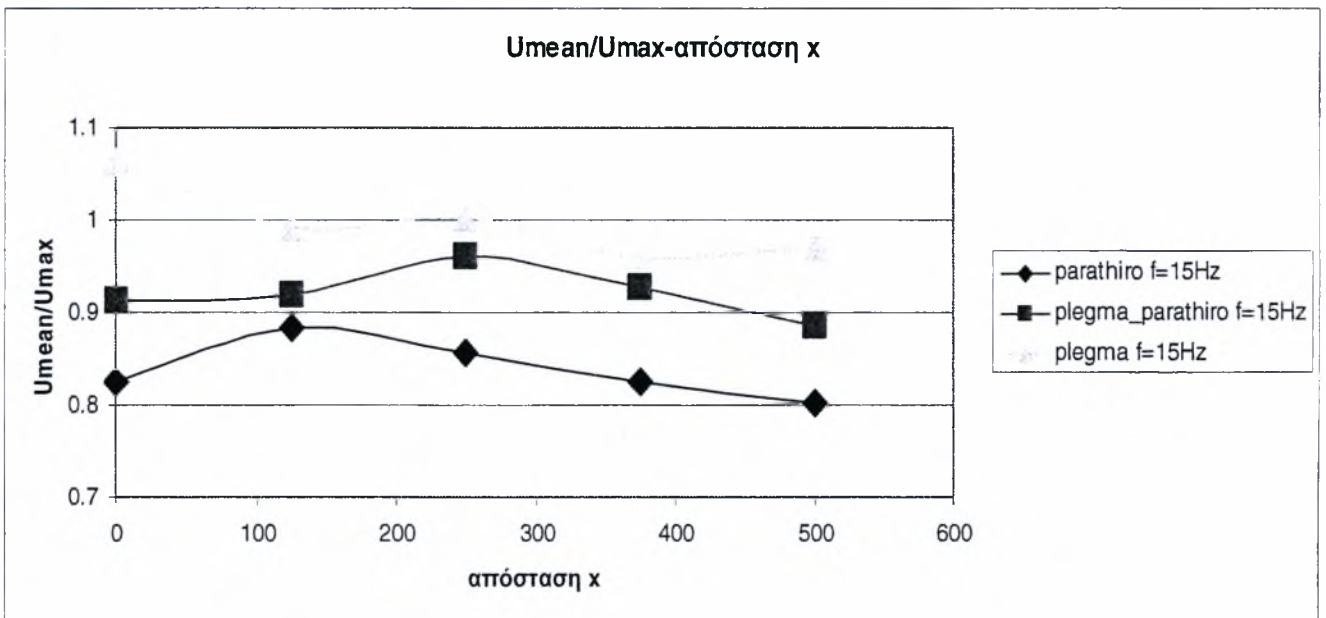
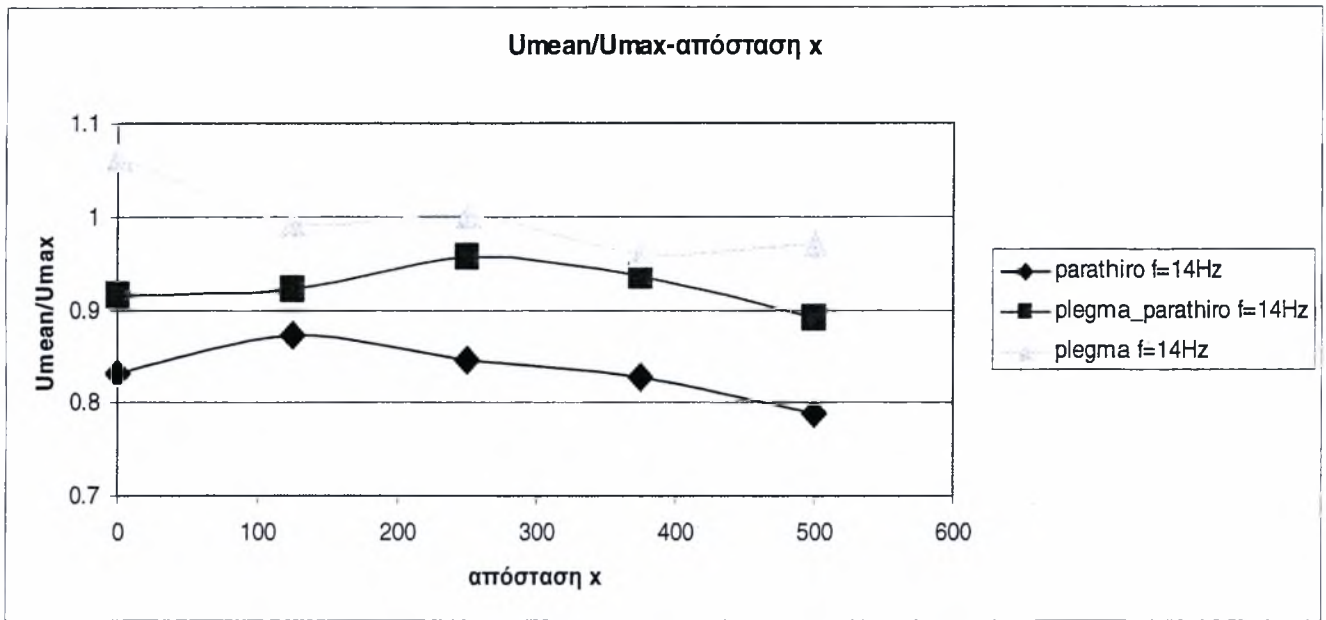
Διάγραμμα 4.2: Εξάρτηση αδιάστατης ταχύτητας U_{mean}/U_{max} με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=5,6,7$ Hz.



Διάγραμμα 4.3: Εξάρτηση αδιάστατης ταχύτητας U_{mean}/U_{max} με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=8,9,10$ Hz.



Διάγραμμα 4.4: Εξάρτηση αδιάστατης ταχύτητας U_{mean}/U_{max} με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=11, 12, 13$ Hz.

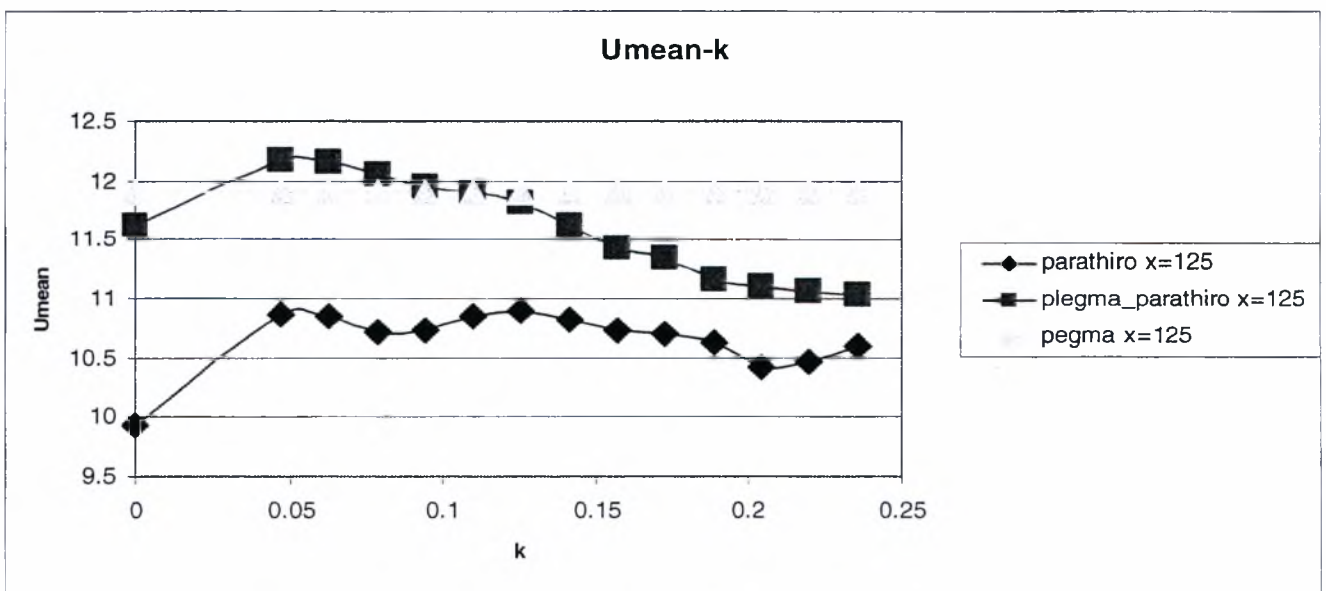
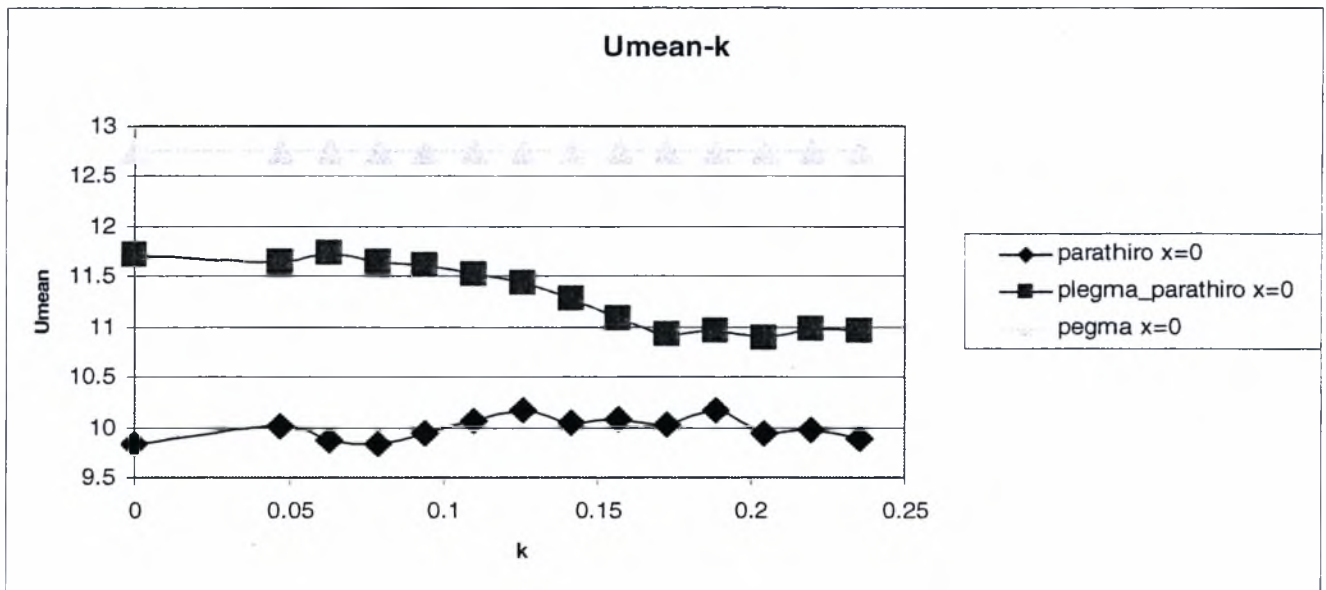


Διάγραμμα 4.5: Εξάρτηση αδιάστατης ταχύτητας U_{mean}/U_{max} με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=14, 15$ Hz.

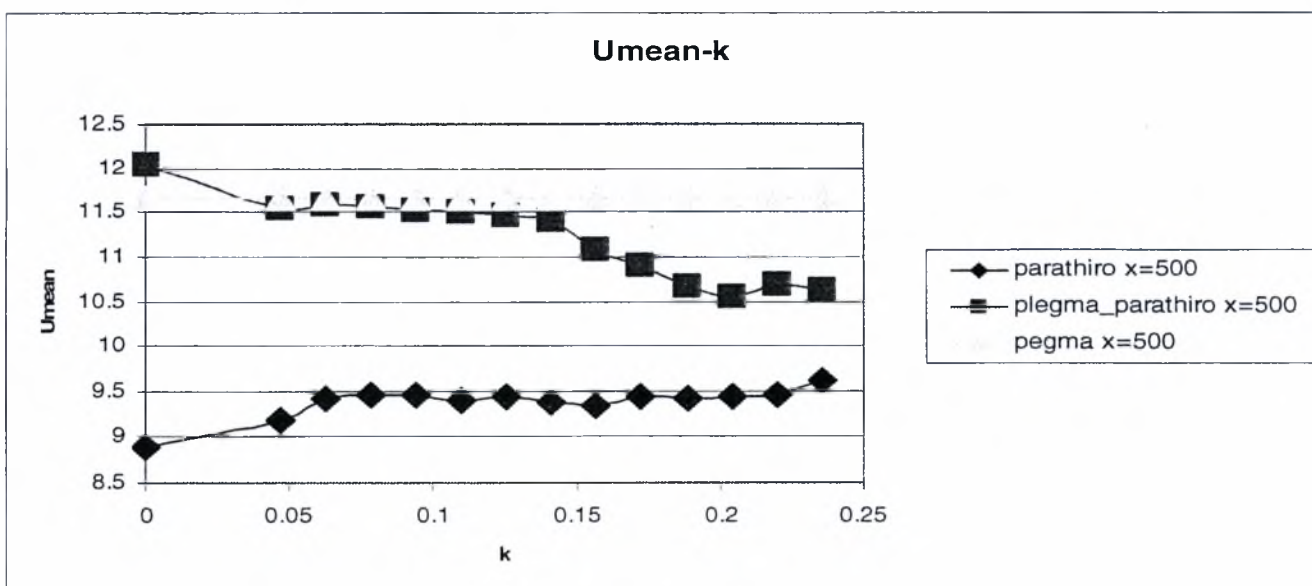
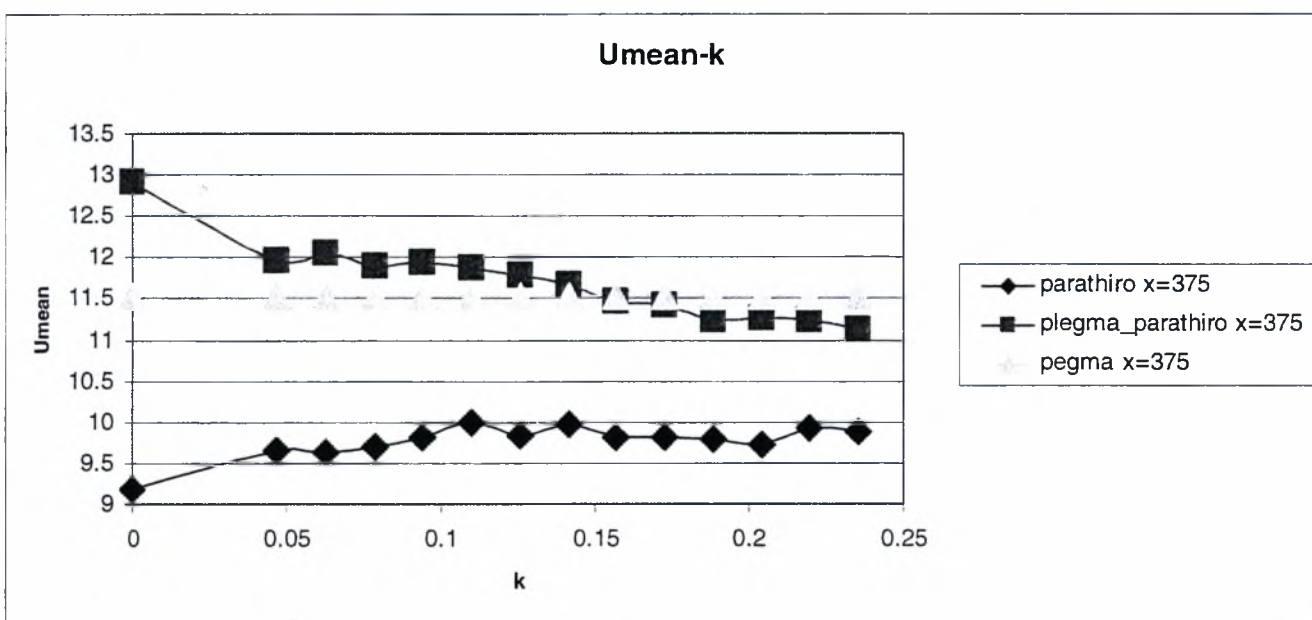
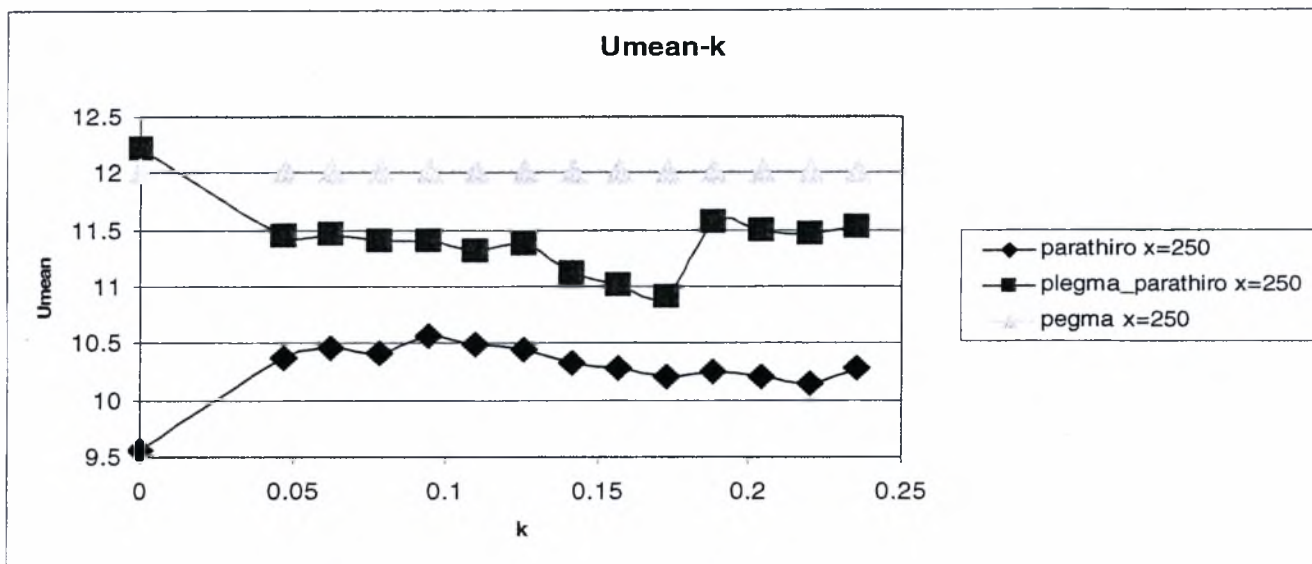
Αναλύοντας τα παραπάνω διαγράμματα 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 καταλήγουμε στα εξής: Αρχικά η ροή που σχηματίζεται πίσω από το πλέγμα εμφανίζει υψηλότερη αδιάστατη ταχύτητα σε σχέση με αυτή πίσω από το παράθυρο αλλά και της συνδυασμένης ροής που δημιουργείται πίσω από πλέγμα και παράθυρο για όλα τα σημεία που μετρήθηκε κατάντι της ροής. Αυτό σημαίνει ότι η τυρβώδης ροή που δημιουργείται στο απόρευμα του πλέγματος είναι ισχυρότερη από την ημιτονοειδή ροή. Αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με το γεγονός στις θέσεις $x=125, 375, 500$ mm από το κέντρο του άξονα $x=0$ (για $f=3-11$ Hz) οι τιμές της αδιάστατης ταχύτητας στο απόρευμα του πλέγματος και παραθύρου είναι ίδιες με αυτές πίσω από το πλέγμα. Κάτι που σημαίνει ότι σε αυτές τις θέσεις ο ρόλος του παραθύρου είναι αμελητέος ως προς την ταχύτητα της ροής. Αντίθετα για συχνότητες διαταραχής $f=12-15$ Hz η εξέλιξη της ταχύτητας αλλάζει όσο πλησιάζουμε κοντά στο παράθυρο. Έτσι στις θέσεις $x=0$ mm και $x=125$ mm ακολουθεί αύξουσα πορεία και βλέπουμε να εμφανίζει μέγιστο στο $x=375$ mm ενώ έπειτα πέφτει όσο πλησιάζει το παράθυρο (αρχή έναρξης ημιτονοειδούς ροής). Ακόμη για συχνότητες διαταραχής $f=3-11$ Hz όταν η ροή πίσω από το πλέγμα εμφανίζει μέγιστο, η ροή πίσω από το πλέγμα και παράθυρο εμφανίζει ελάχιστο και αντίστροφα για όλες τις αποστάσεις κατάντι της ροής. Τέλος παρατηρούμε ότι η τιμή της ταχύτητας για την ροή που αναπτύσσεται πίσω από το παράθυρο για όλες τις συχνότητες ταλάντωσης, εμφανίζει την μέγιστη τιμή της στην απόσταση $x=125$ mm από το κέντρο $x=0$ και έπειτα πέφτει όσο πλησιάζει κοντά στο παράθυρο. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή της ταχύτητας για την ροή που αναπτύσσεται πίσω από το παράθυρο είναι ανεξάρτητη της συχνότητας της σέγας, ειδικά όσο πλησιάζουμε στην αρχή έναρξης της ροής.

Παρόμοιες παρατηρήσεις κάνουμε και από την μελέτη των διαγραμμάτων 4.6, 4.7 των ταχυτήτων με τον αριθμό $k=\omega c/2U_{max}$ που ακολουθούν. Οι ταχύτητες στο απόρευμα του πλέγματος είναι ανεξάρτητες του αριθμού k και εμφανίζονται σταθερές για τα διαφορά k . Όμως όσο πλησιάζουμε στην αρχή έναρξης της τύρβης (πλέγμα) παρατηρούμε μείωση. Από αυτά τα διαγράμματα επιβεβαιώνουμε την προηγουμένη παρατήρηση ότι δηλαδή στο απόρευμα του παραθύρου η ταχύτητα είναι περίπου ίδια για όλους τους αριθμούς k με μικρές αποκλίσεις. Κατά τις μετρήσεις που έγιναν στο απόρευμα της συνδυασμένης ροής πλέγματος και παραθύρου παρατηρείται ότι καθώς μεγαλώνει το k η ταχύτητα ακολουθεί φθίνουσα πορεία για όλες τις θέσεις που έγιναν μετρήσεις. Στα ίδια διαγράμματα που αναφέρονται στην συνδυασμένη ροή βλέπουμε ότι για μικρούς αριθμούς k (μικρές συχνότητες f), η ταχύτητα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές, ενώ σε μεγαλύτερα k δείχνει να

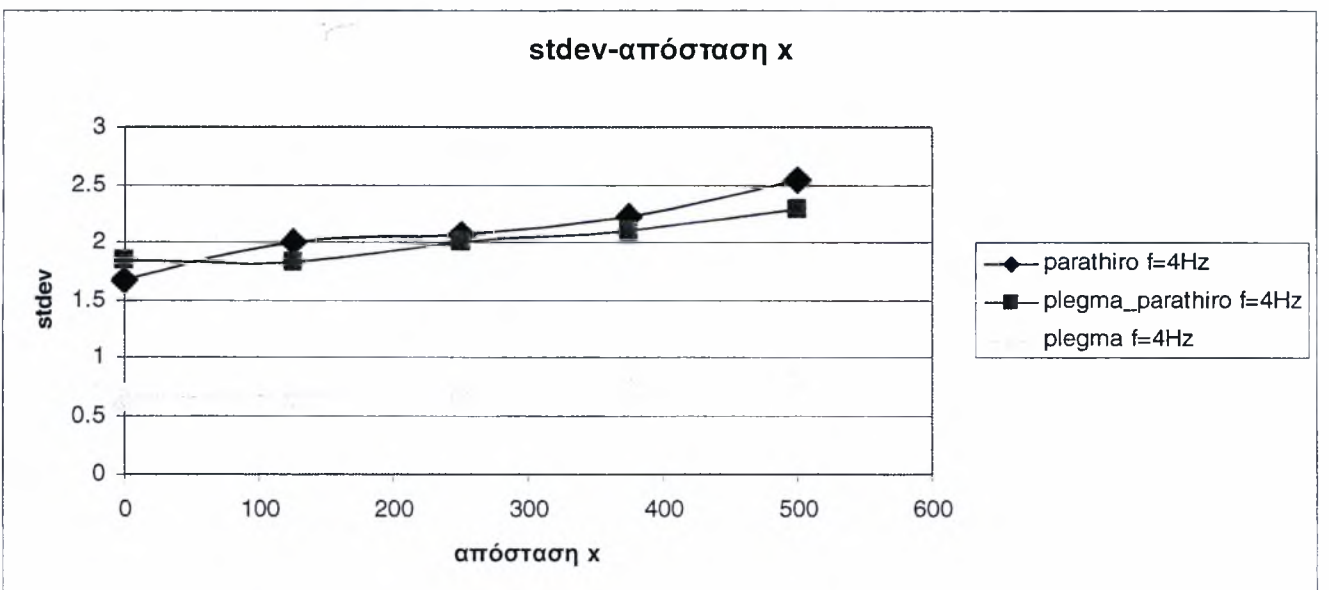
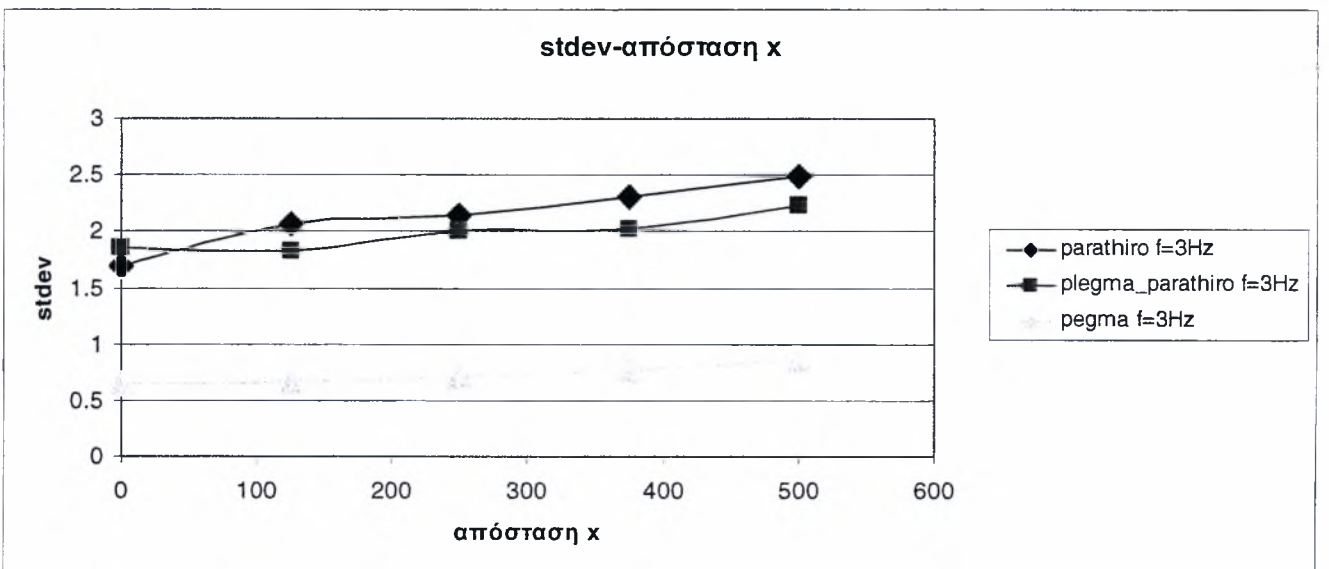
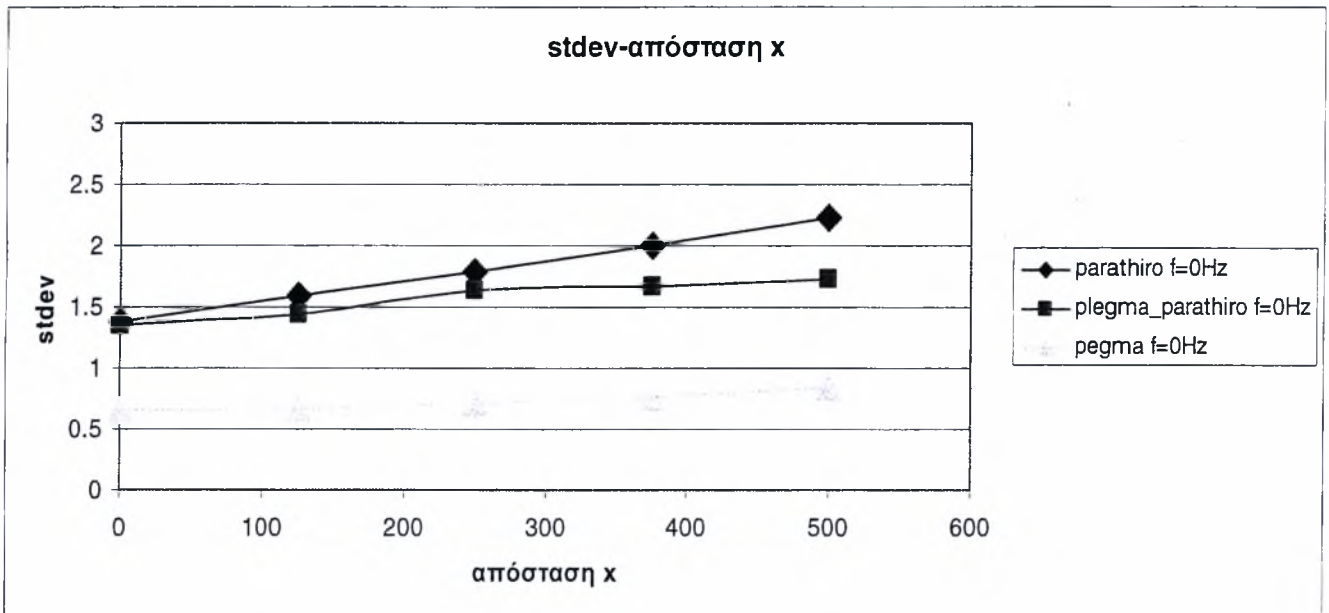
σταθεροποιείται γύρω από μια τιμή. Όπως ήταν φυσικό οι τιμές της ταχύτητας πίσω από την συνδυασμένη ροή είναι μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν στο απόρρευμα της αντίστοιχης με το παράθυρο μόνο, αφού η τύρβη προσθέτει ενέργεια. Οι μόνες εξαιρέσεις είναι στην θέση $x=125\text{mm}$ στην περιοχή $k=0,05-0,1$ και στην θέση $x=375\text{mm}$ στην περιοχή $k=0,05-0,14$.



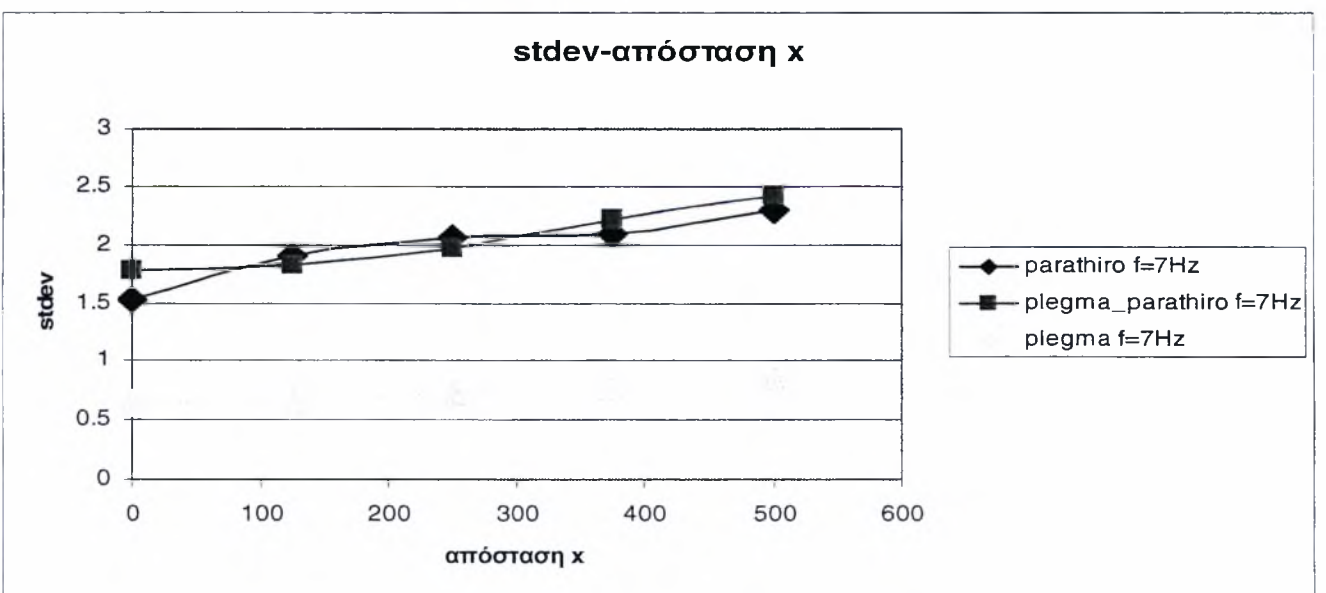
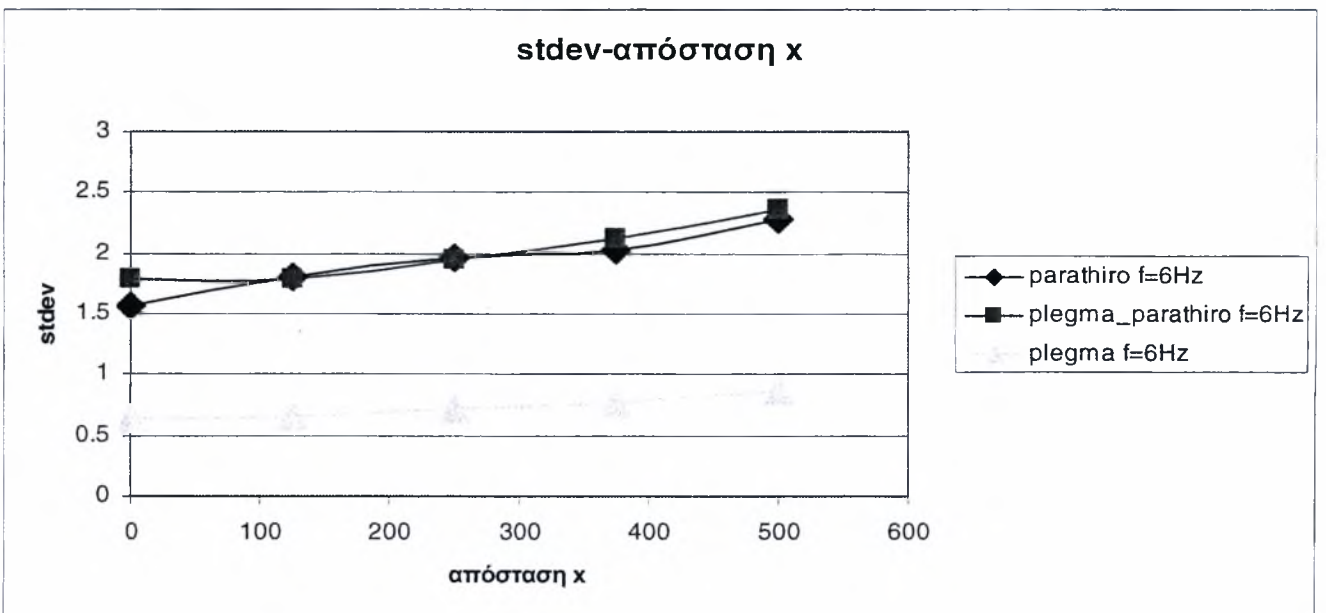
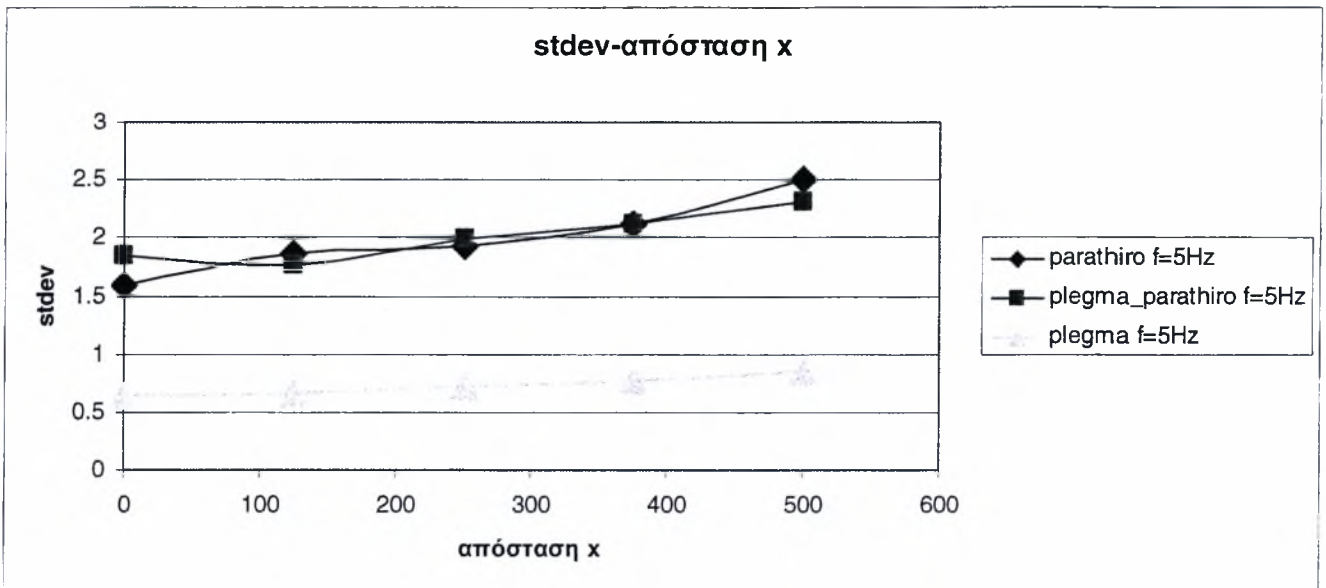
Διάγραμμα 4.6: Εξάρτηση της μέσης ταχύτητας U_{mean} με τον αριθμό $k=\omega c/2U_{max}$ για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz και για απόσταση $x=0,125$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x .



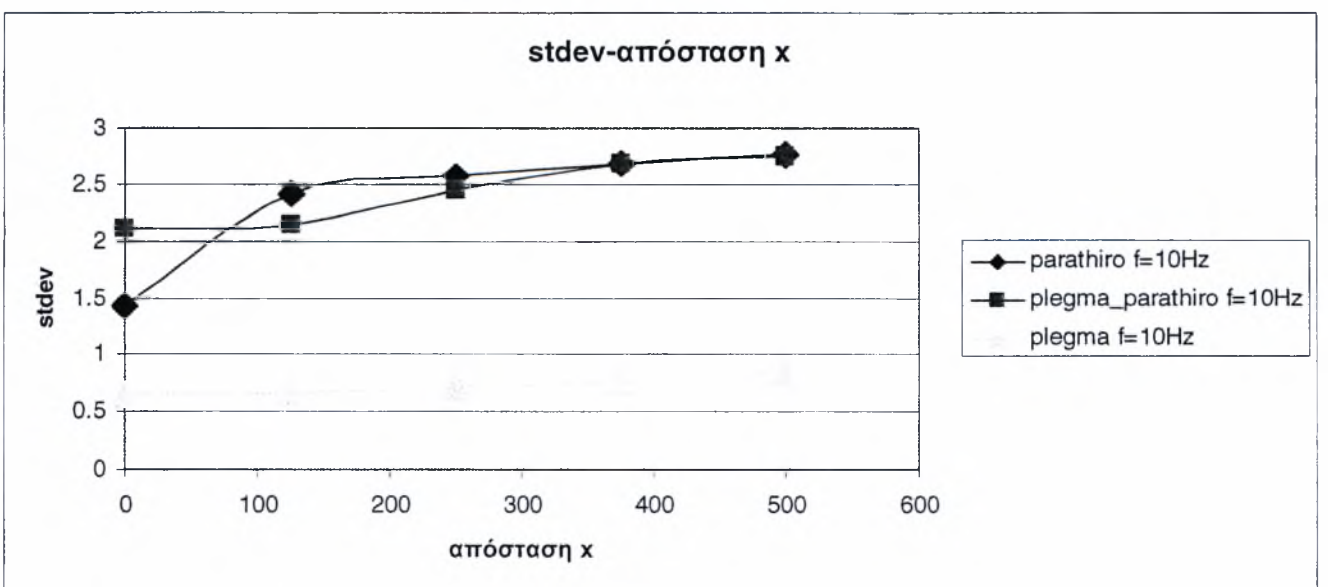
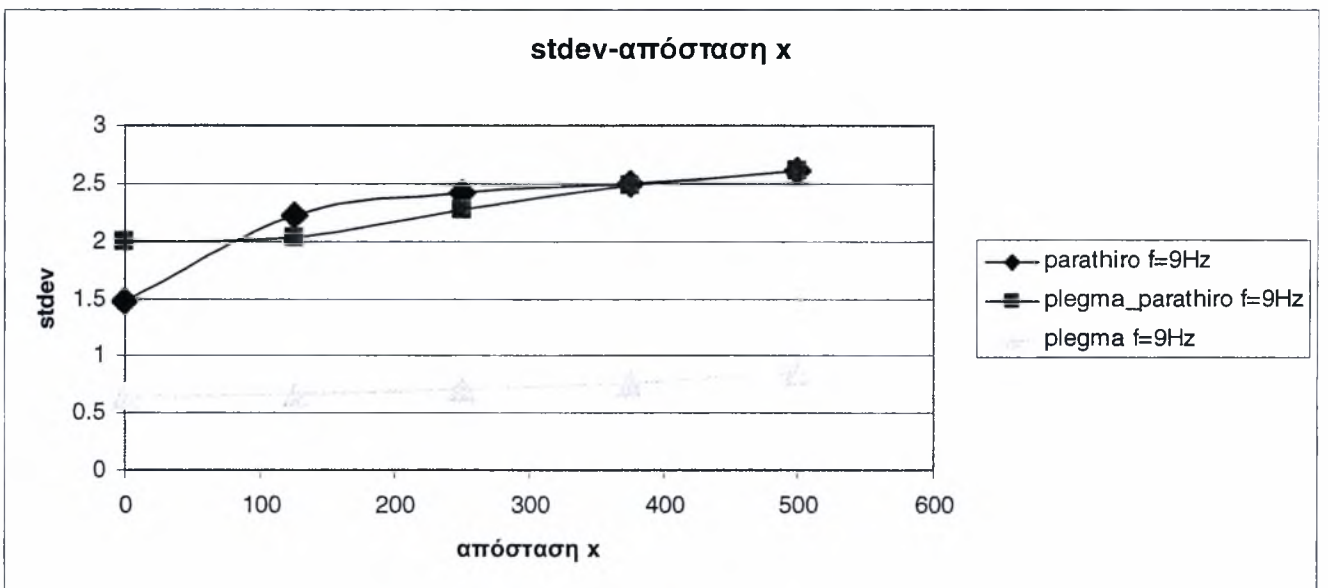
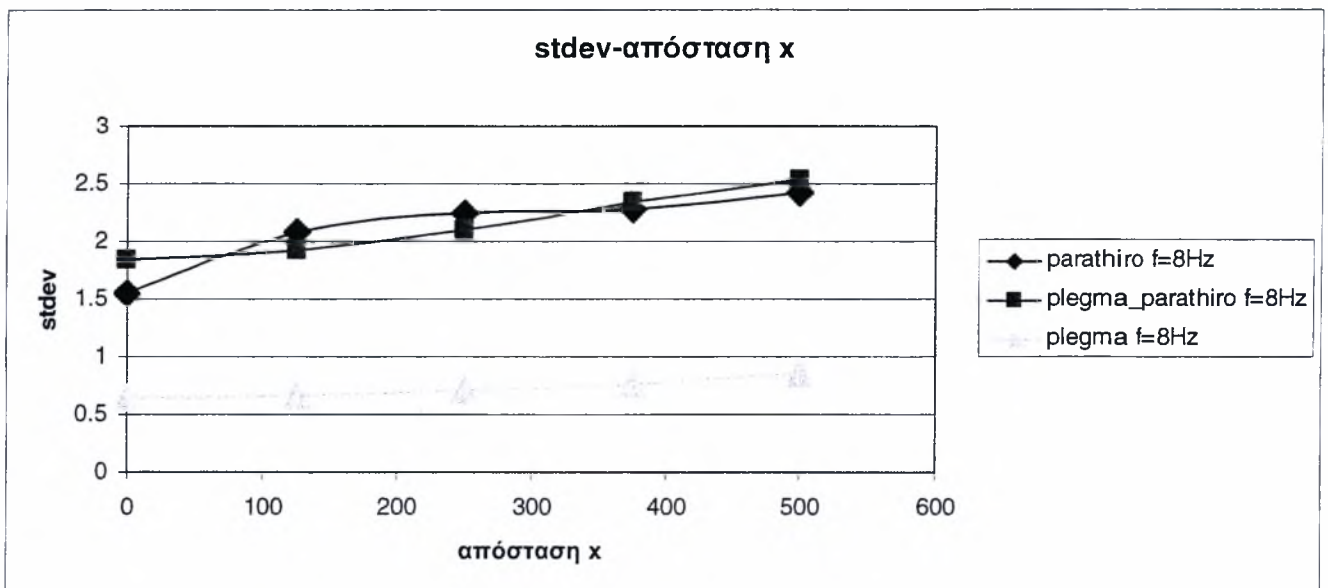
Διάγραμμα 4.7: Εξάρτηση της μέσης ταχύτητας U_{mean} με τον αριθμό $k = \omega c / 2U_{max}$ για συχνότητες ταλάντωσης $f = 0-12$ Hz και για απόσταση $x = 250, 375, 500$ mm από την αρχή $x = 0$ του άξονα x .



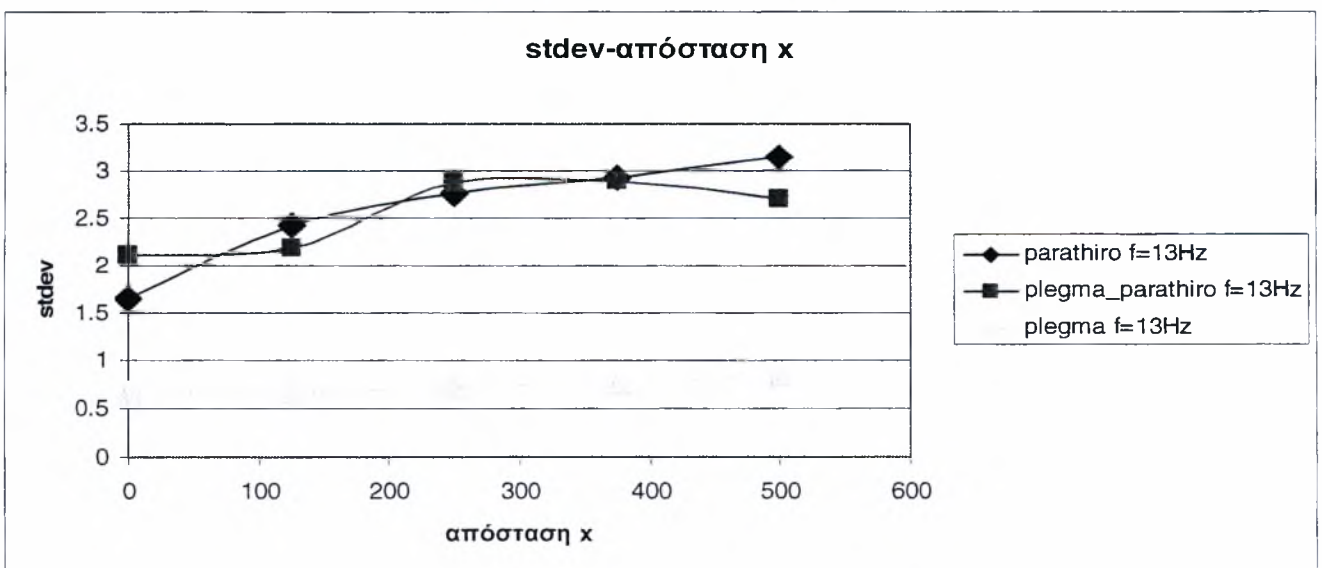
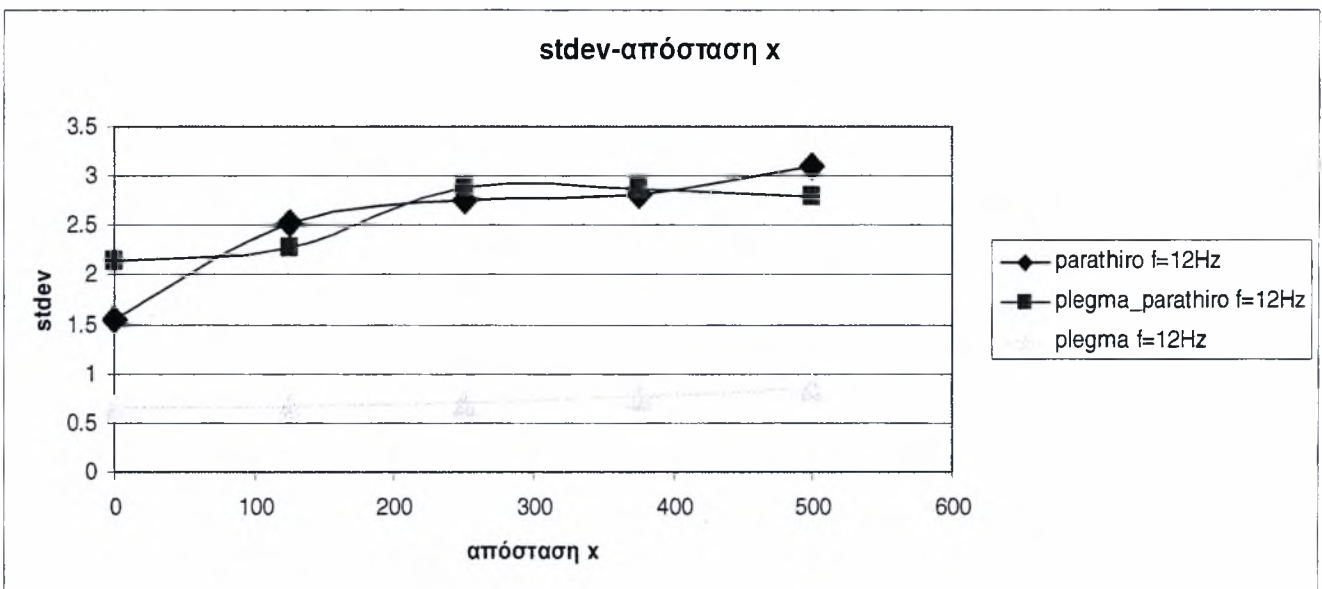
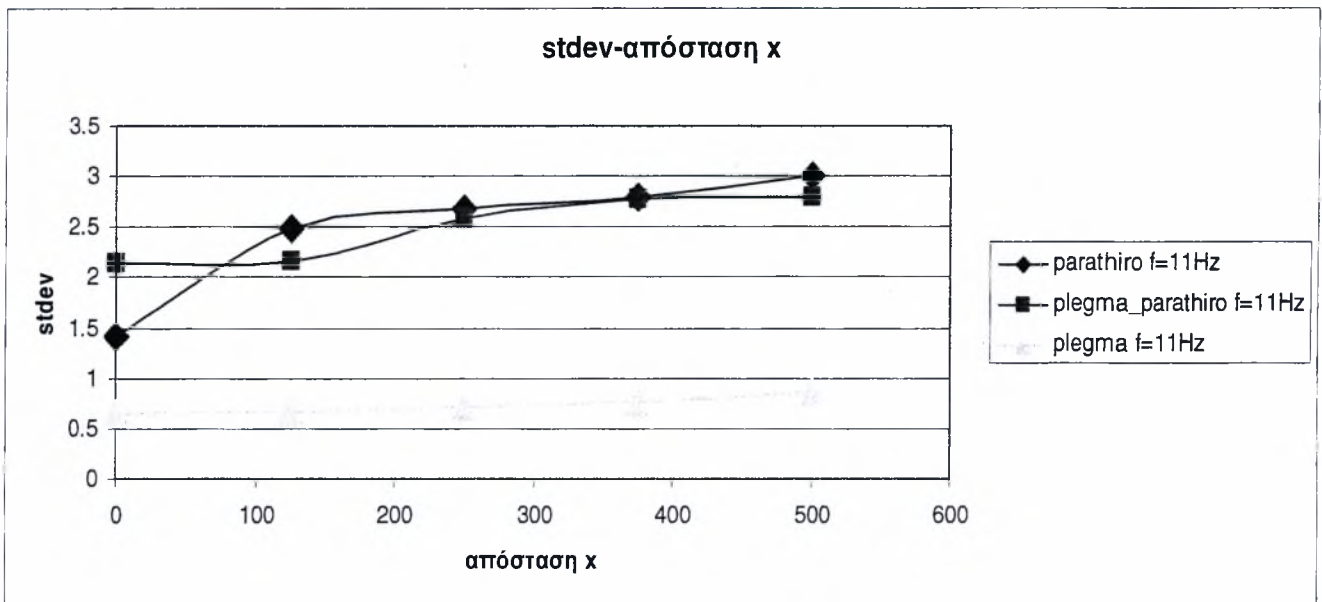
Διάγραμμα 4.8: Εξάρτηση της έντασης της τύρβης $stdev$ με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=0,3,4$ Hz.



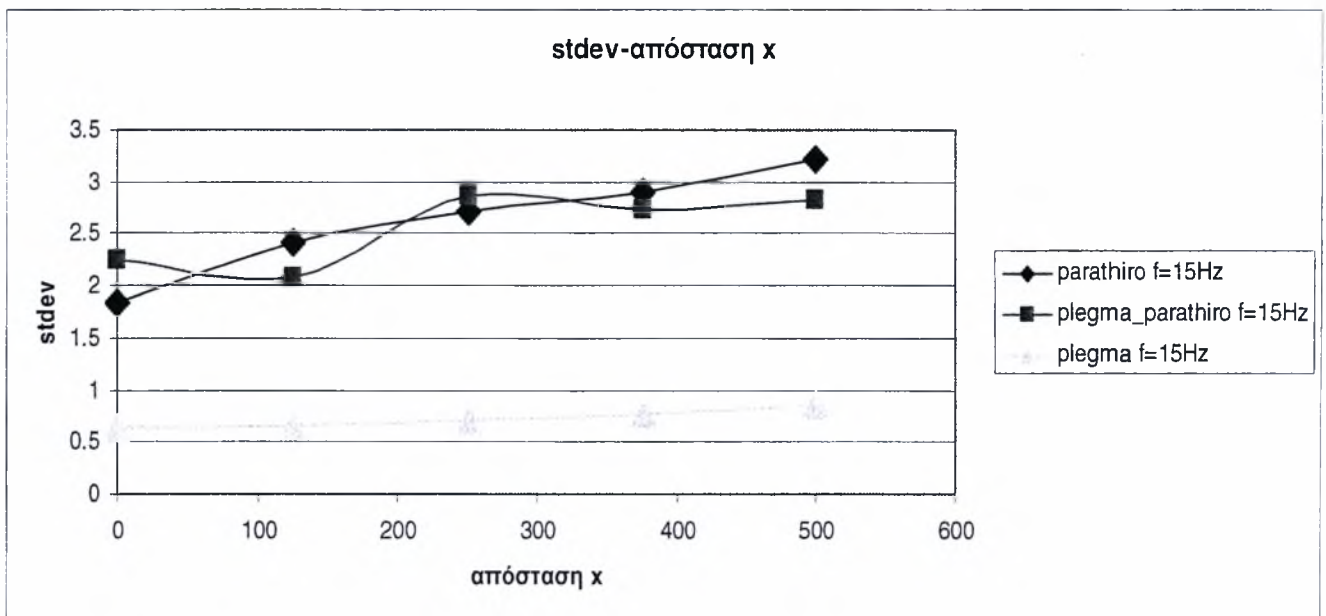
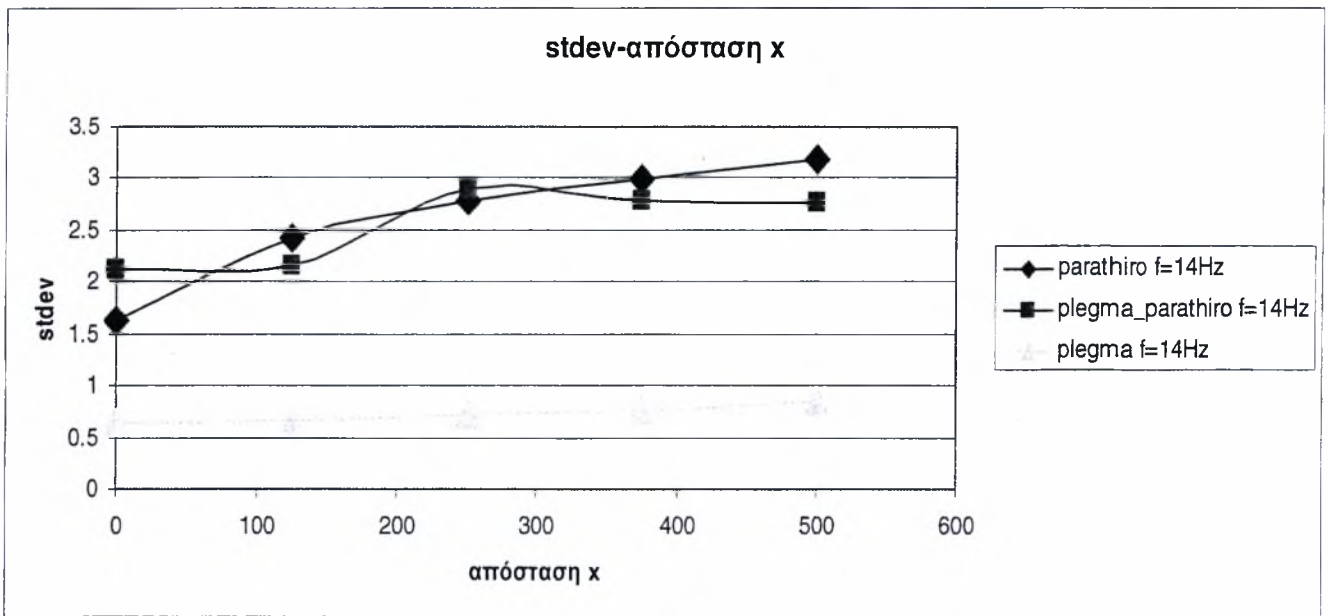
Διάγραμμα 4.9: Εξάρτηση της έντασης της τύρβης $stdev$ με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=5,6,7$ Hz.



Διάγραμμα 4.10: Εξάρτηση της έντασης της τύρβης $stdev$ με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=8,9,10$ Hz.



Διάγραμμα 4.11: Εξάρτηση της έντασης της τύρβης *stdev* με την απόσταση *x* από την αρχή $x=0$ του άξονα *x* για συχνότητες ταλάντωσης $f=11,12,13$ Hz.



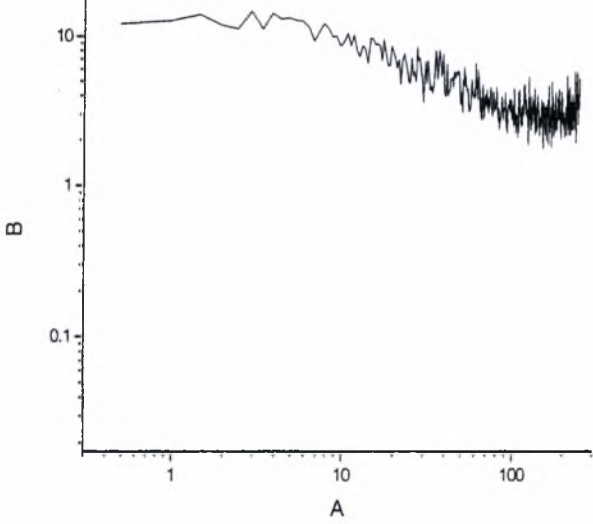
Διάγραμμα 4.12: Εξάρτηση της έντασης της τύρβης $stdev$ με την απόσταση x από την αρχή $x=0$ του άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=14,15$ Hz.

Από την μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 της έντασης της έντασης της τύρβης $stdev$ με την απόσταση x κατάντι της ροής διαπιστώνουμε ότι στο απόρευμα της ροής που δημιουργείται από το πλέγμα, η τιμή της $stdev$ παρουσιάζει μια μικρή άνοδο καθώς πλησιάζει στο πλέγμα. Ακόμη η τιμή της έντασης της τύρβης στο απόρευμα της συνδυασμένης ροής παραθύρου και πλέγματος εμφανίζεται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη όταν είναι τοποθετημένο στην αεροσήραγγα μόνο το παράθυρο για απόσταση $x=0\text{mm}$ από το κέντρο $x=0$ για όλες τις επιβαλλόμενες συχνότητες f καθώς. Το ίδιο όμως δεν συμβαίνει και στις υπόλοιπες θέσεις $x=125,250,375,500$ mm όπου η ένταση της τύρβης στο απόρευμα του παραθύρου και πλέγματος εμφανίζει περίπου ίδιες τιμές με αυτές που μετρούνται στο απόρευμα της ροής που προκύπτει μόνο από το παράθυρο. Τέλος η $stdev$ στο απόρευμα του παραθύρου και πλέγματος εμφανίζει ανοδική πορεία όσο πλησιάζουμε προς την αρχή της έναρξής της για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-11$ Hz, ενώ για συχνότητες ταλάντωσης $f=12-15$ Hz εμφανίζει μέγιστο στο σημείο $x=250$ mm και μετά πέφτει.

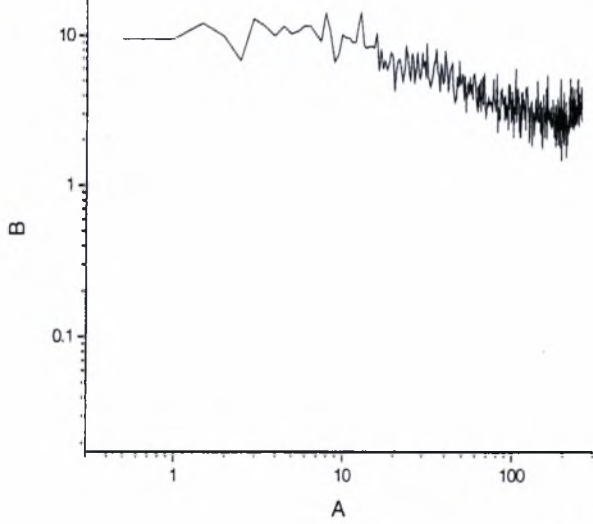
4.3.2 Φάσματα Ταχυτήτων

Για έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την μελέτη των τιμών των ταχυτήτων που μετρήθηκαν προχωρήσαμε σε περαιτέρω επεξεργασία των τιμών της ταχύτητας. Με την χρήση ενός προγράμματος που γράφτηκε σε κώδικα Fortran πήραμε τα φάσματα των ταχυτήτων. Η κλίμακα των διαγραμμάτων που έγιναν είναι λογαριθμική. Στον άξονα x βλέπουμε την συχνότητα της ταλάντωσης, ενώ στον άξονα y αναπαρίσταται η τιμή ταχύτητας. Έτσι μπορούμε να δούμε αν η μέγιστη τιμή της ταχύτητας εμφανίζεται στην συχνότητα της επιβαλλόμενης ταλάντωσης. Παρακάτω παραθέτουμε τα διαγράμματα των αντίστοιχων φασμάτων των ταχυτήτων για τρεις διαφορετικές καταστάσεις της ροής: α) ροή πίσω από πλέγμα β) ροή πίσω από παράθυρο ταλαντούμενων πτερυγίων γ) συνδυασμός των προηγούμενων ροών.

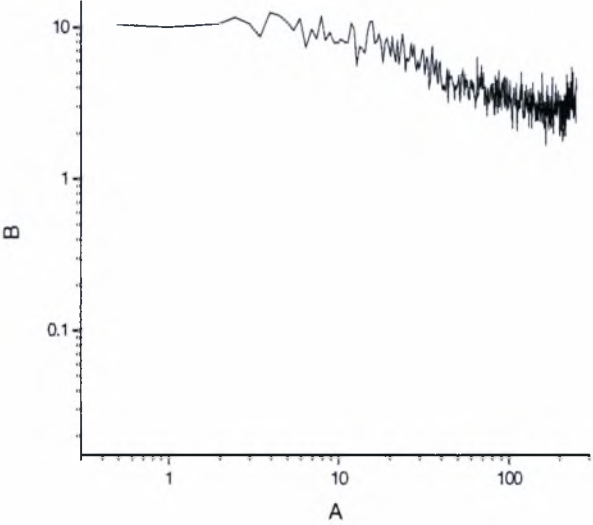
$x=0$



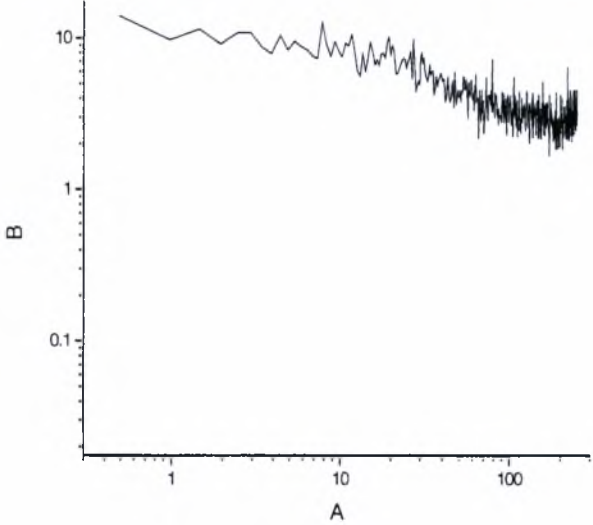
$x=125$



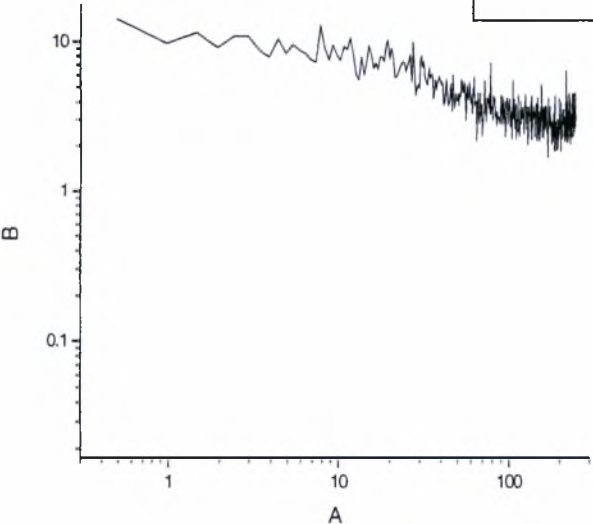
$x=250$



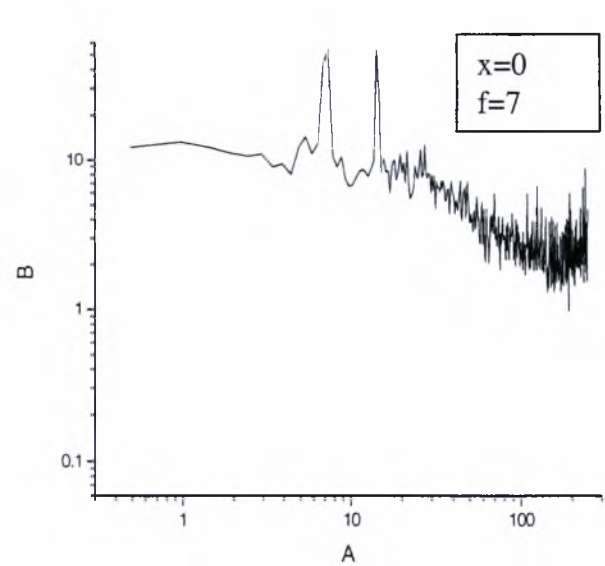
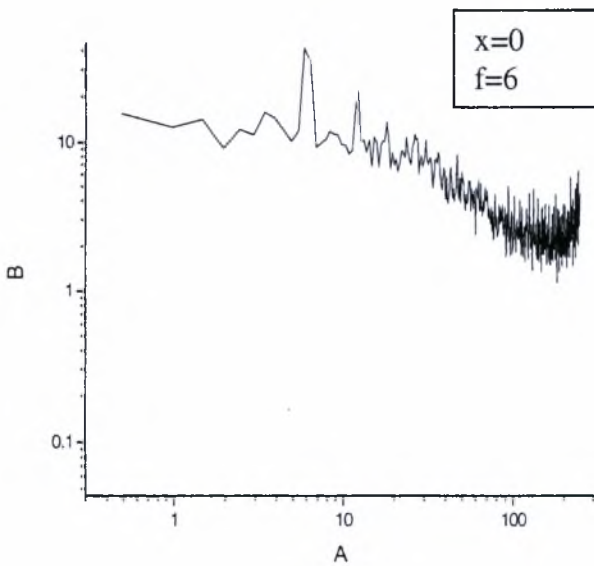
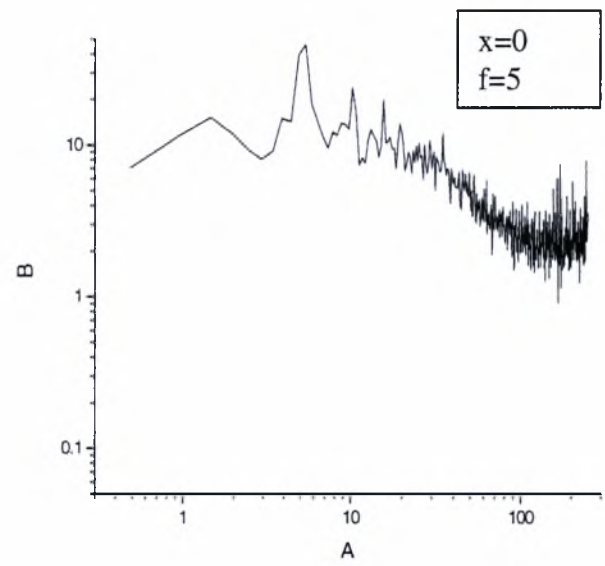
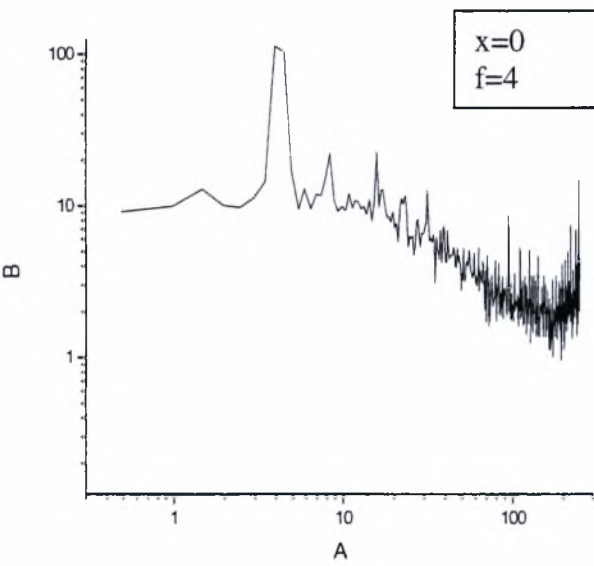
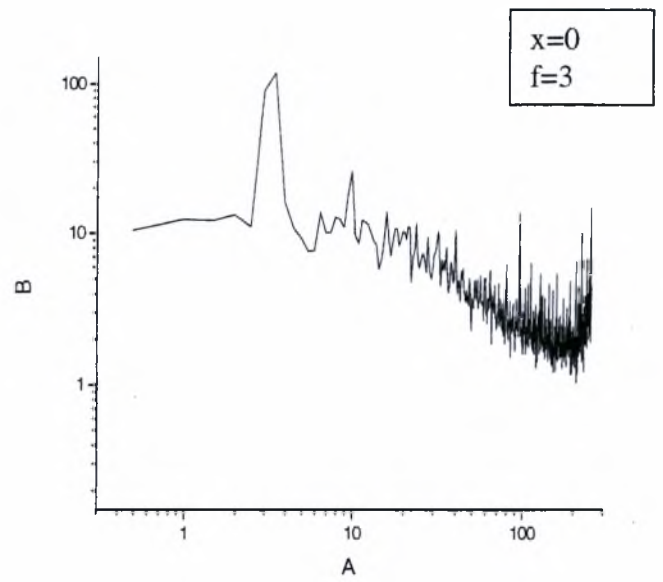
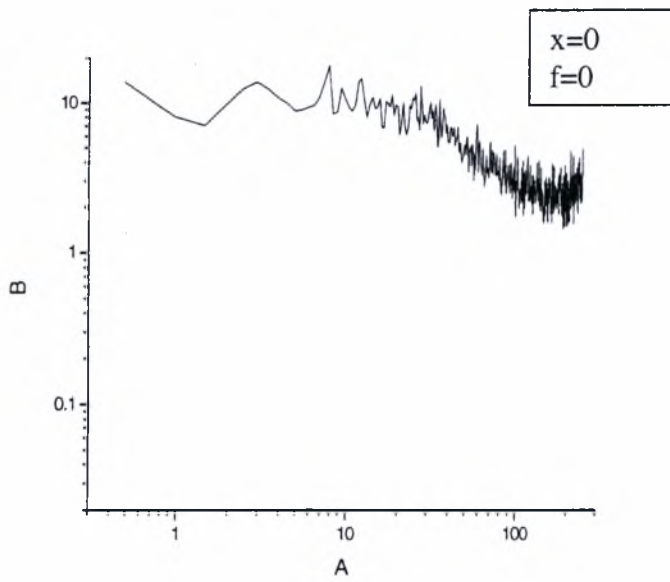
$x=375$



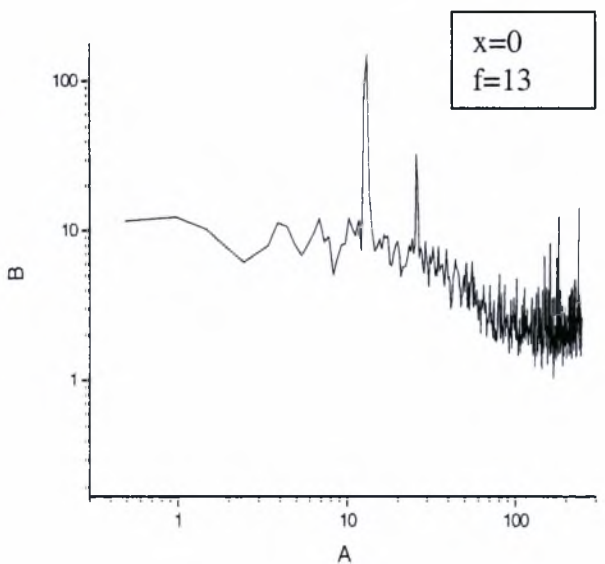
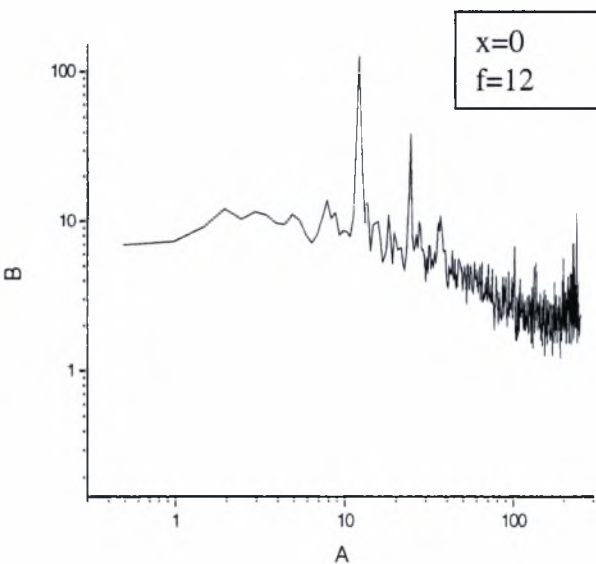
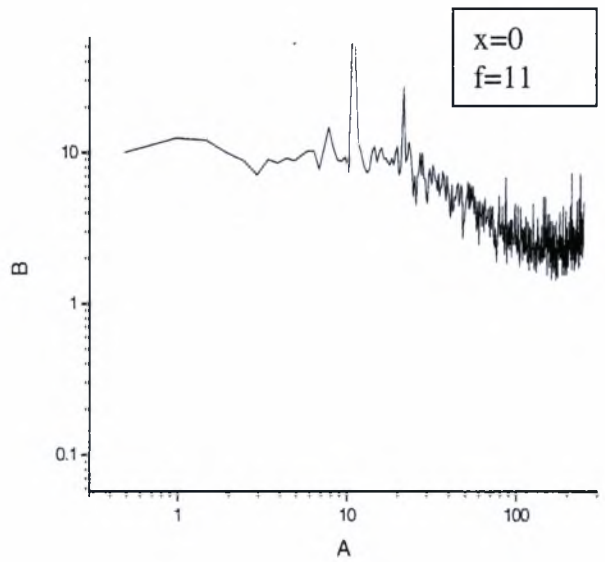
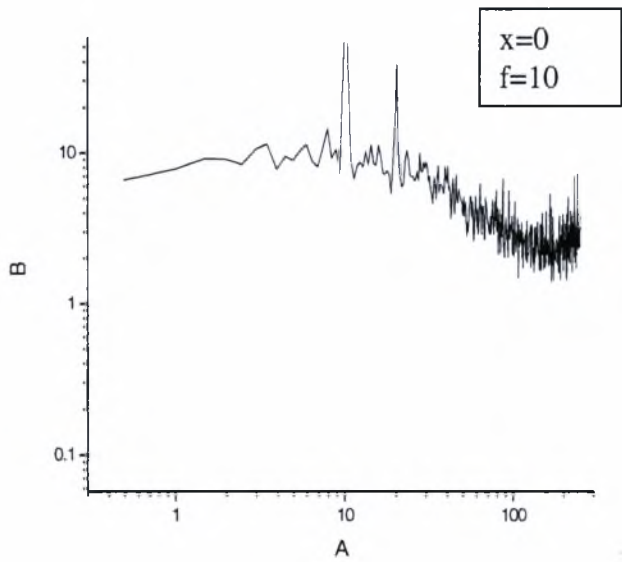
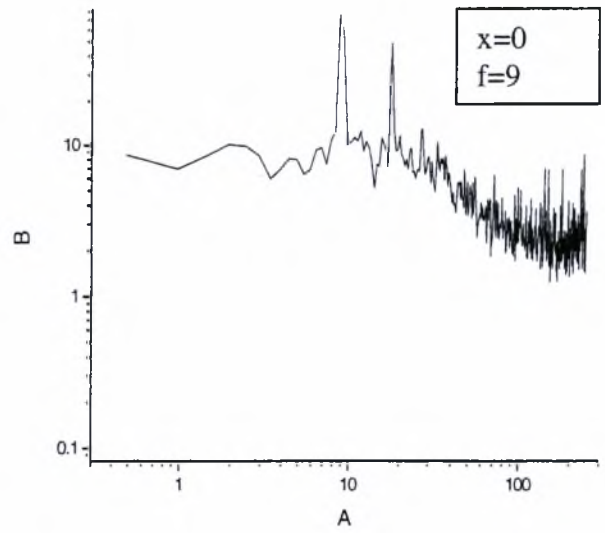
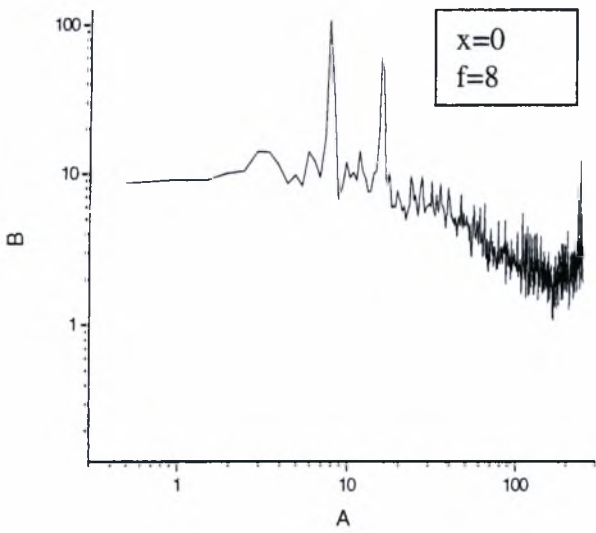
$x=500$



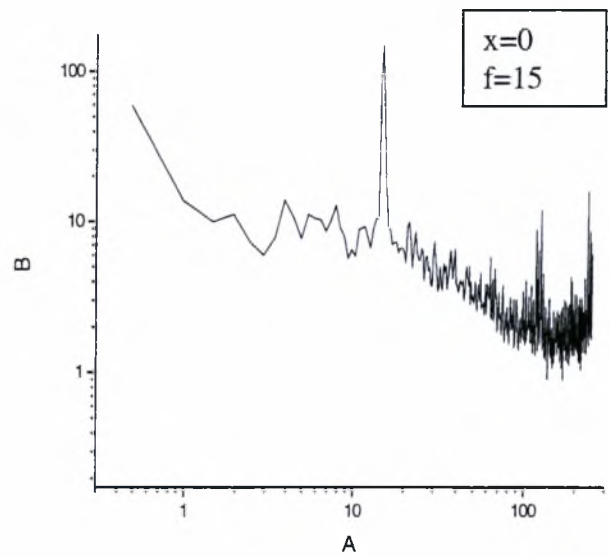
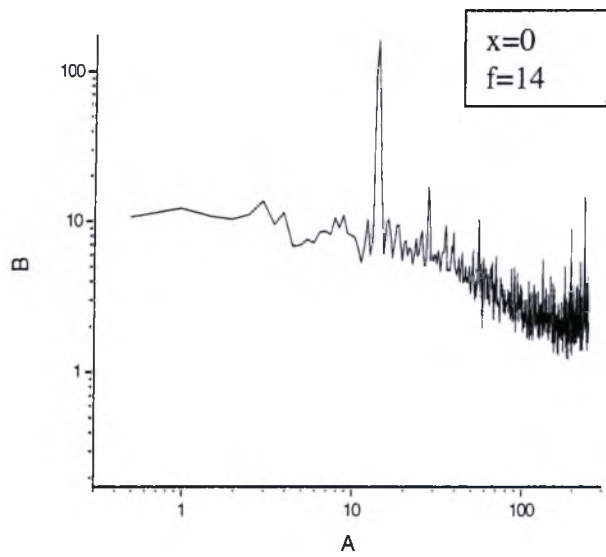
γραμμα 4.13: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από πλέγμα σε απόσταση $x=0,125,250,375,500$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x .



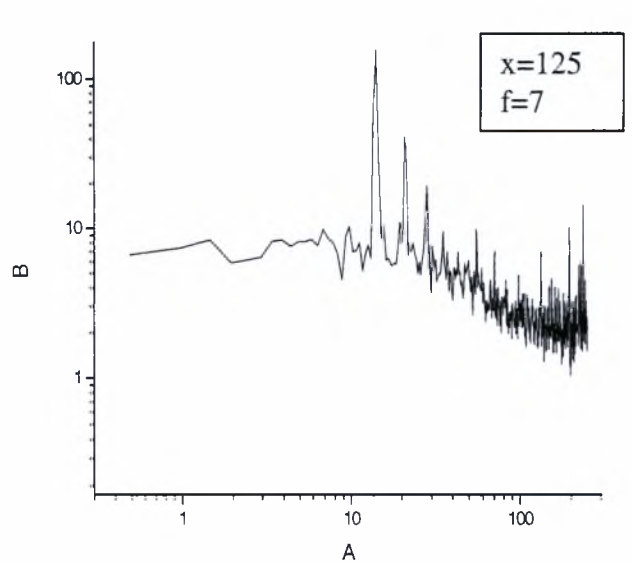
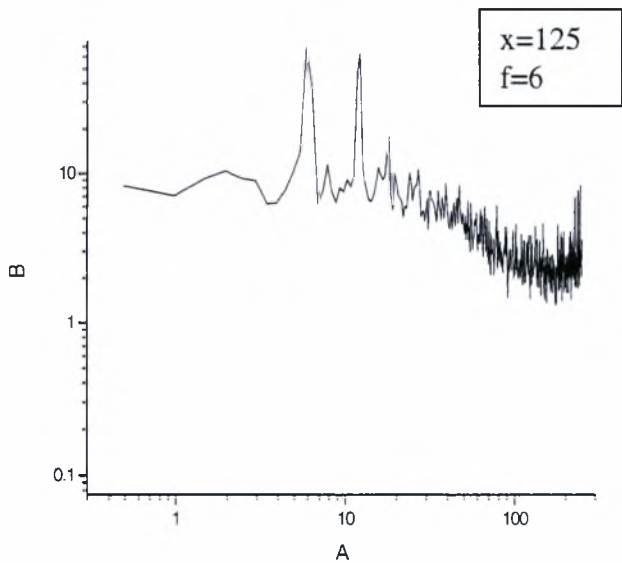
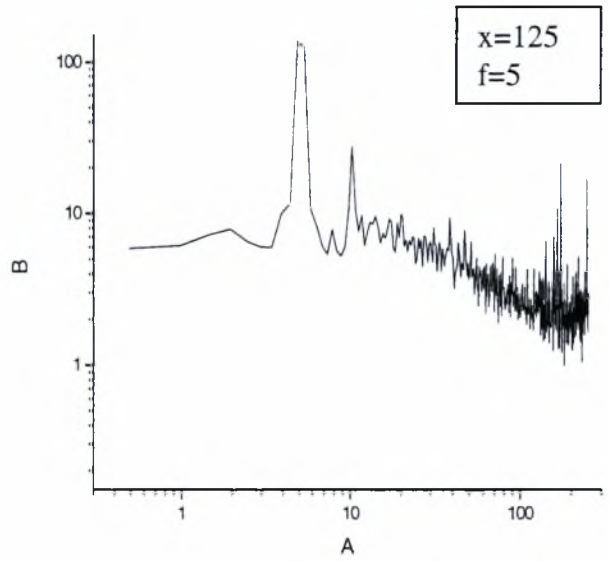
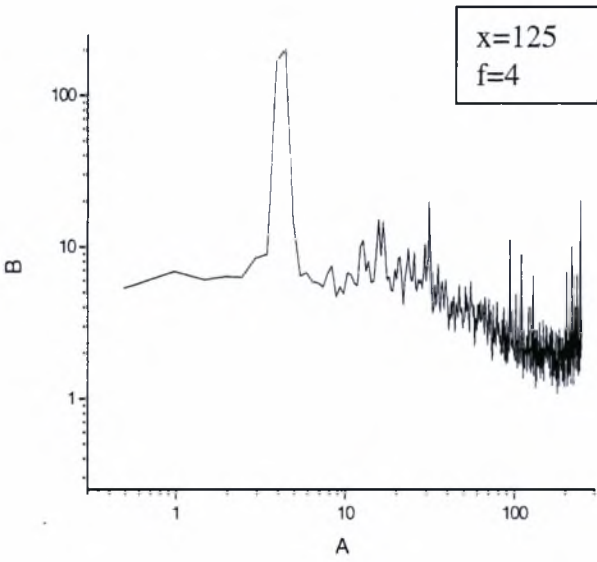
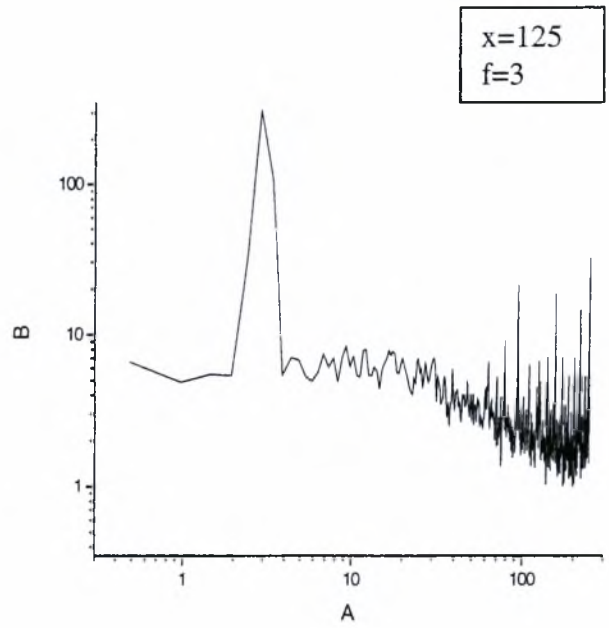
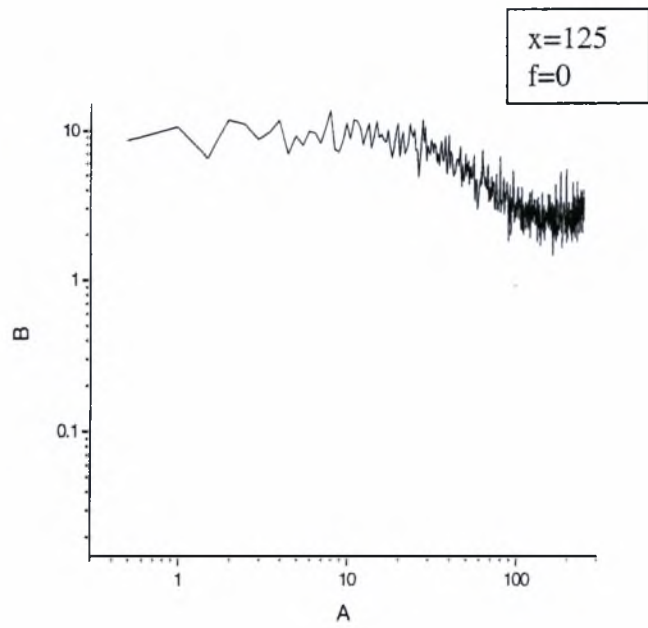
γραμμή 4.14: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=0$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x για νότιες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.



γράμμα 4.15: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=0$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x για νότιες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz.

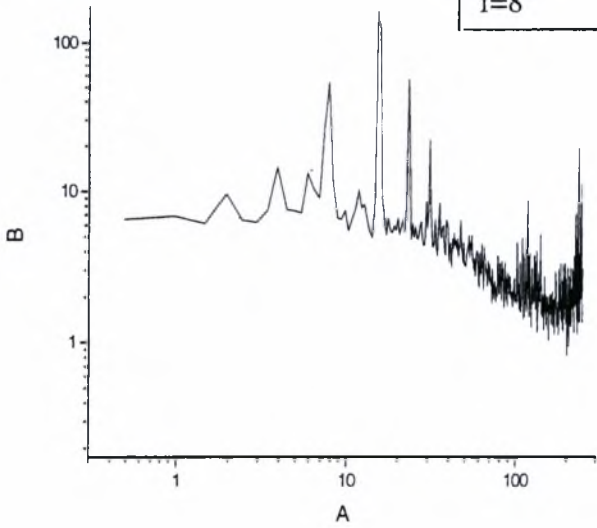


Ύγραμμο 4.16: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=0$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x για νότιες ταλάντωσης $f=14,15$ Hz.

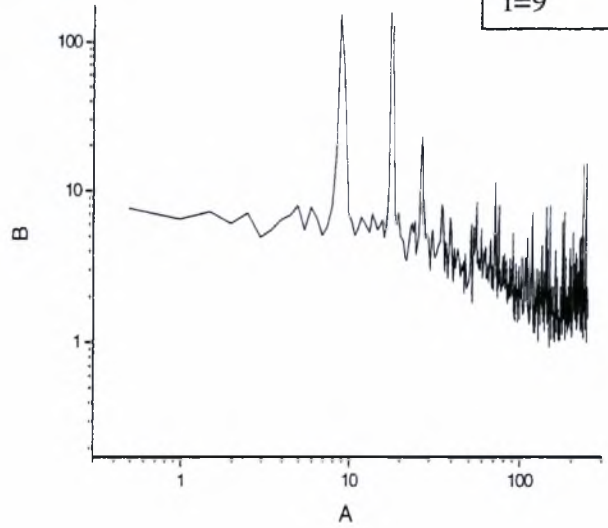


γραμμα 4.17: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=125$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.

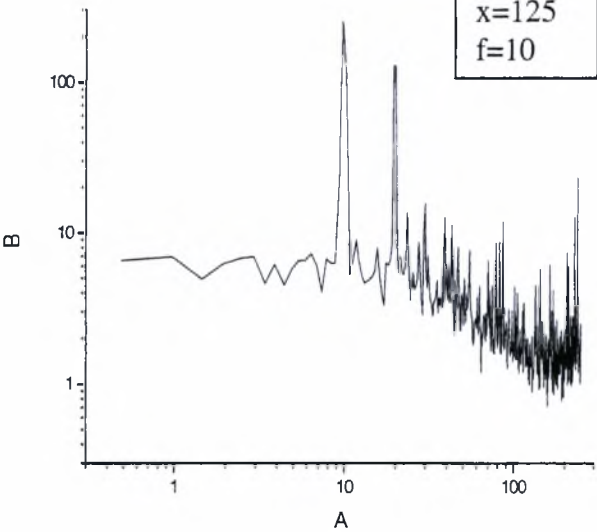
$x=125$
 $f=8$



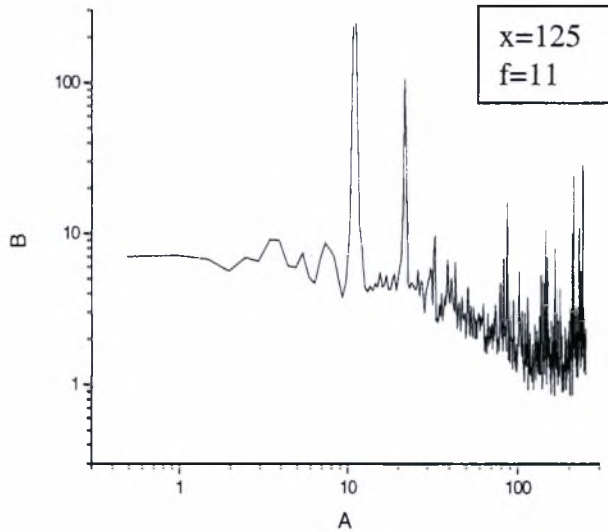
$x=125$
 $f=9$



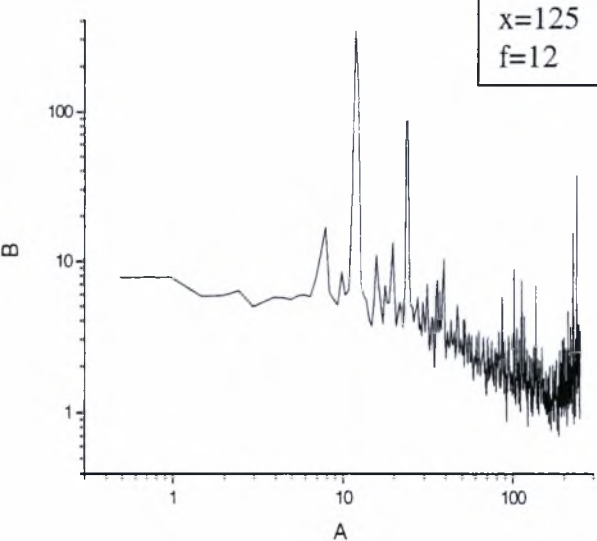
$x=125$
 $f=10$



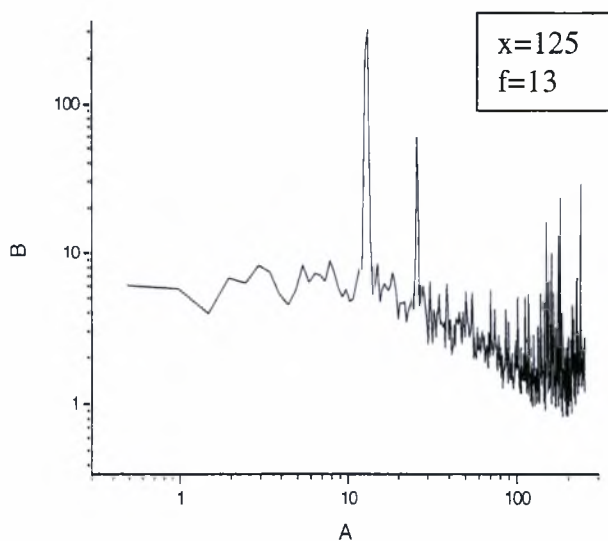
$x=125$
 $f=11$



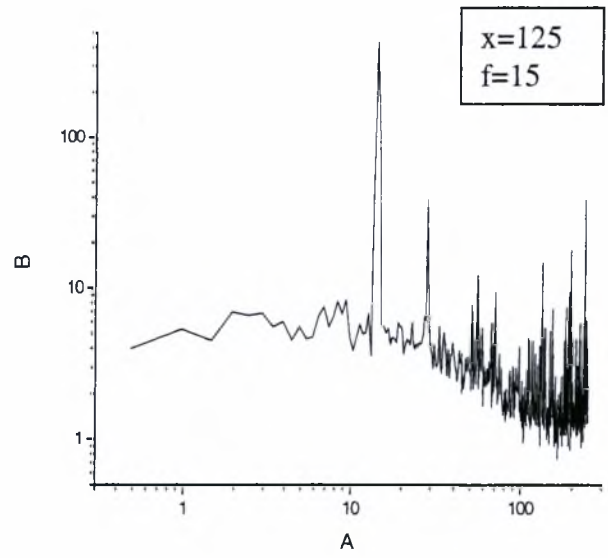
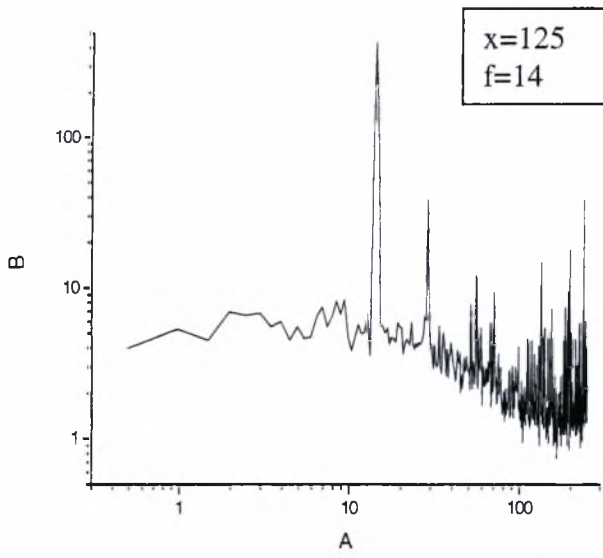
$x=125$
 $f=12$



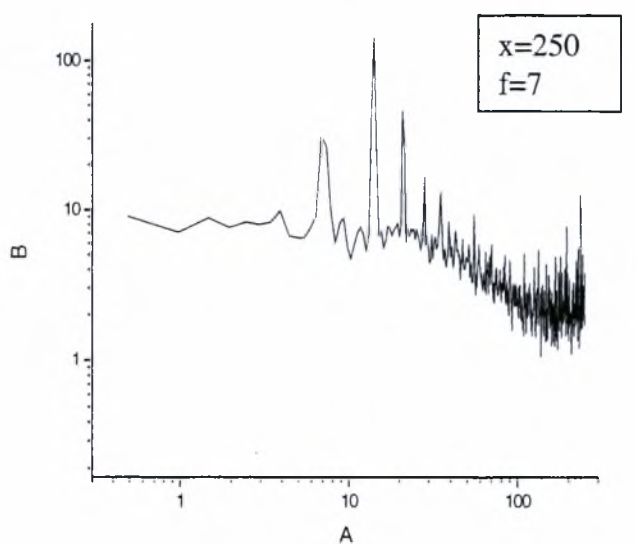
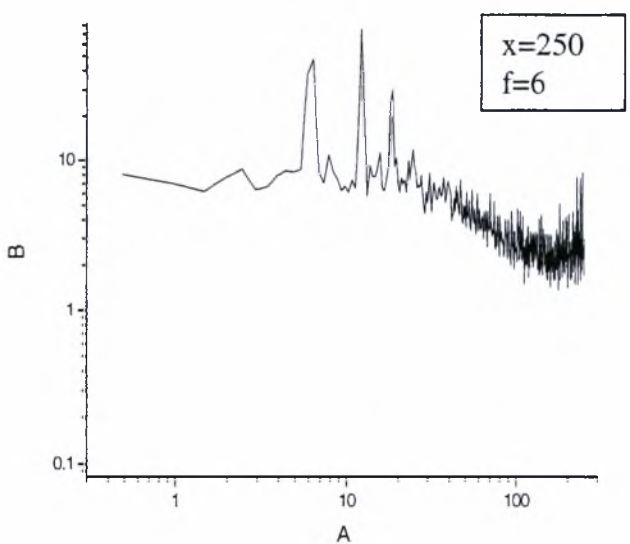
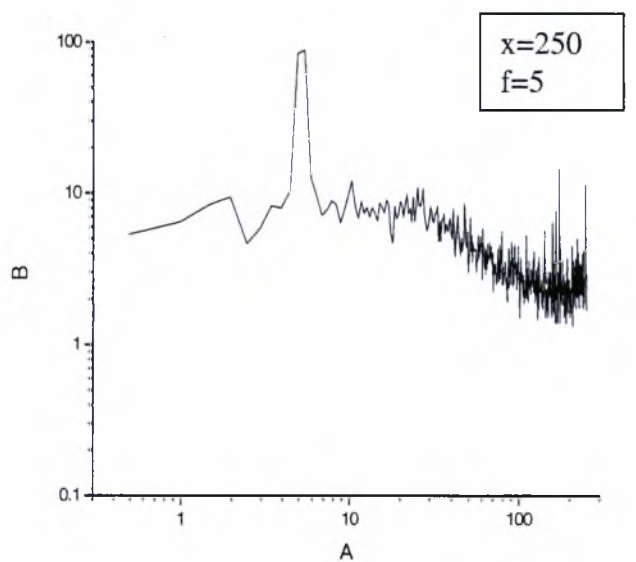
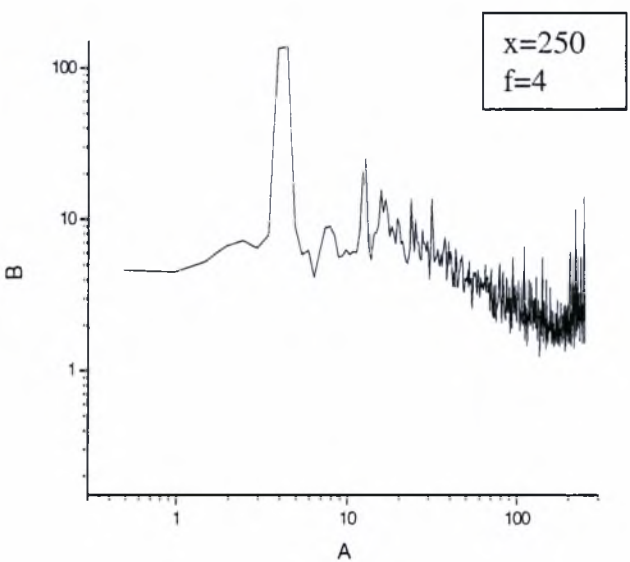
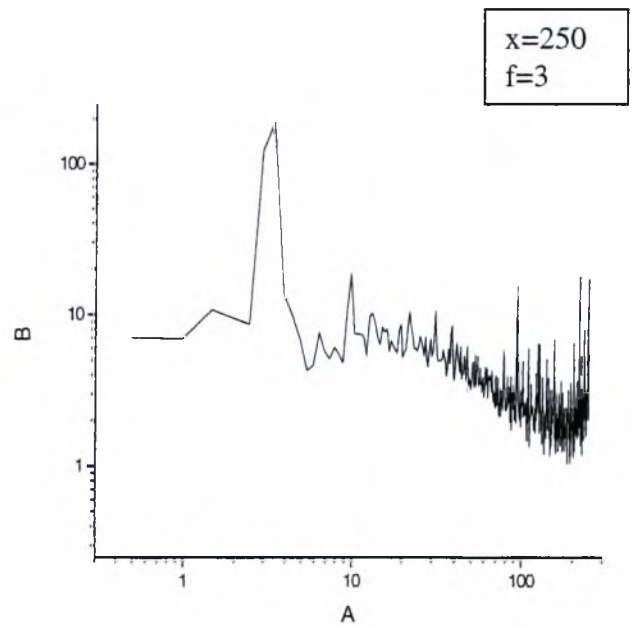
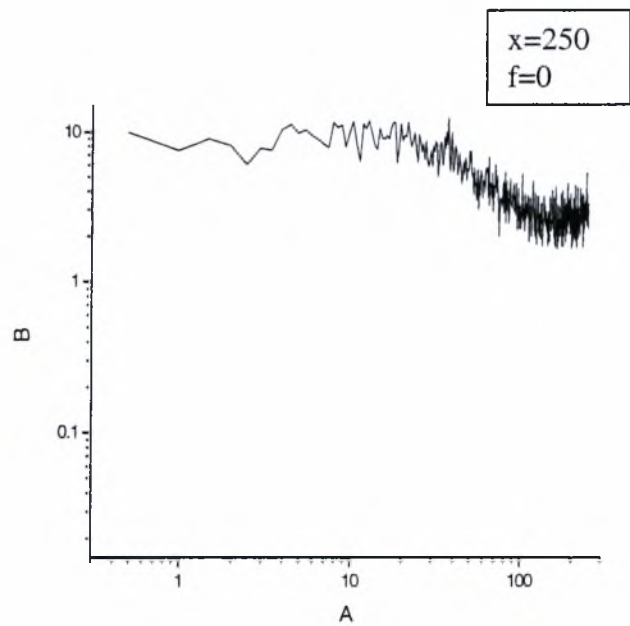
$x=125$
 $f=13$



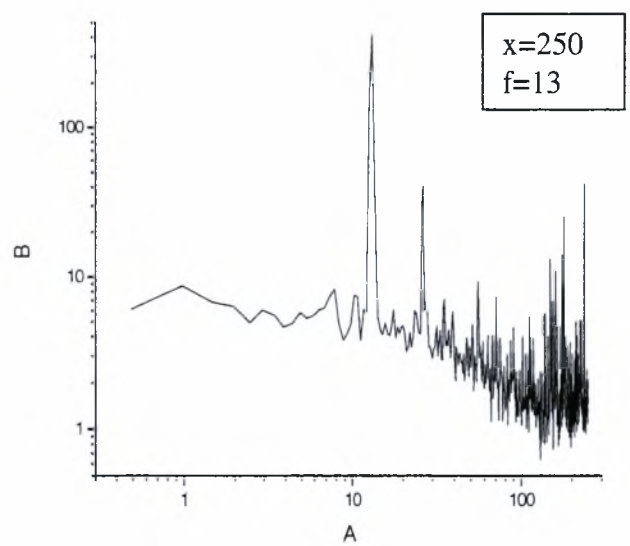
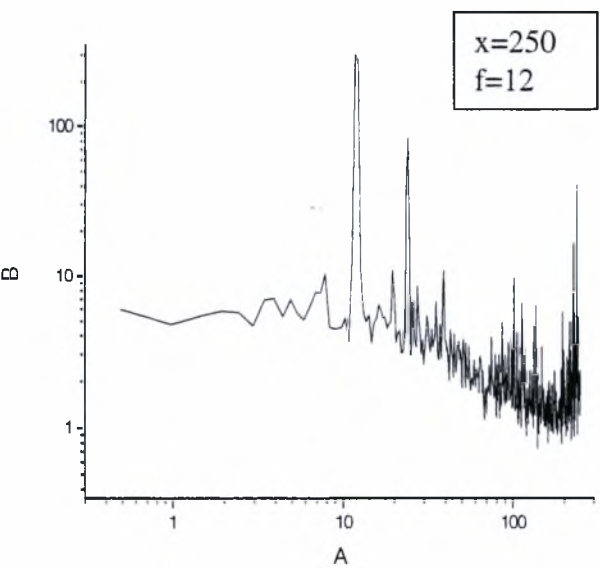
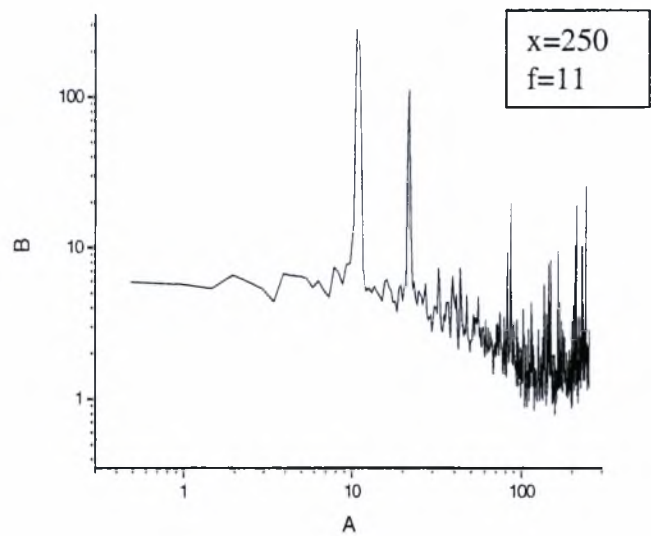
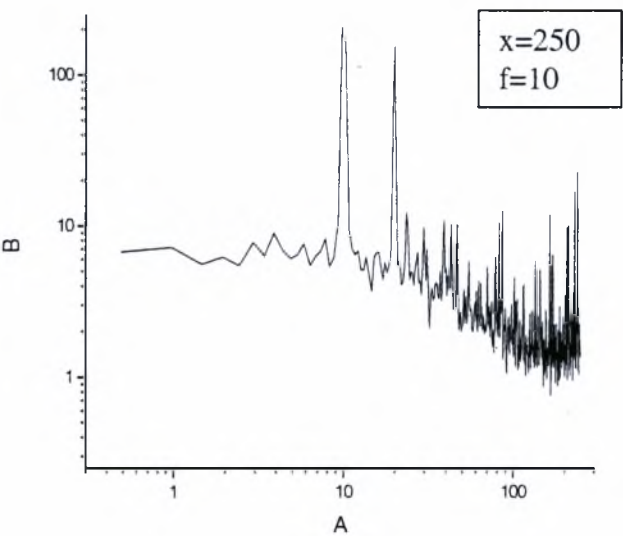
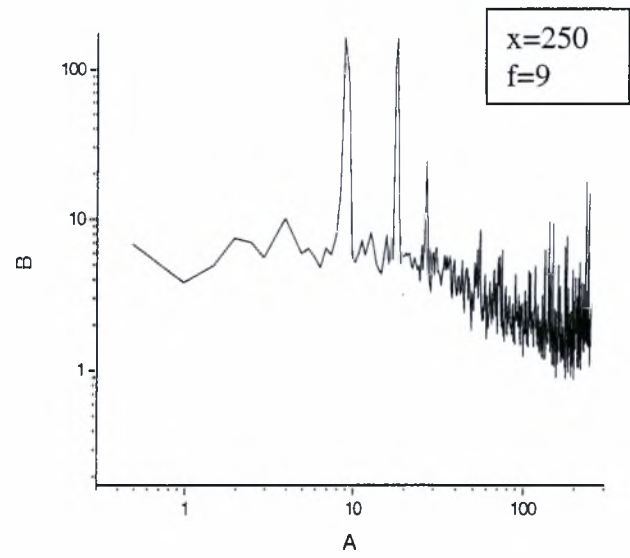
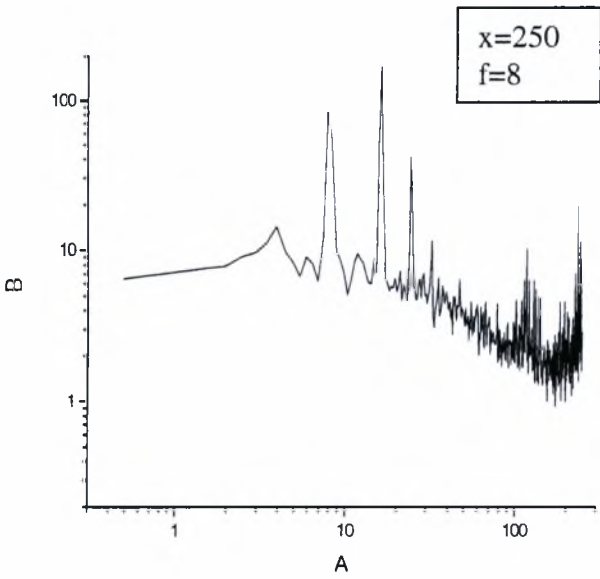
γραμμά 4.18: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=125$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz.



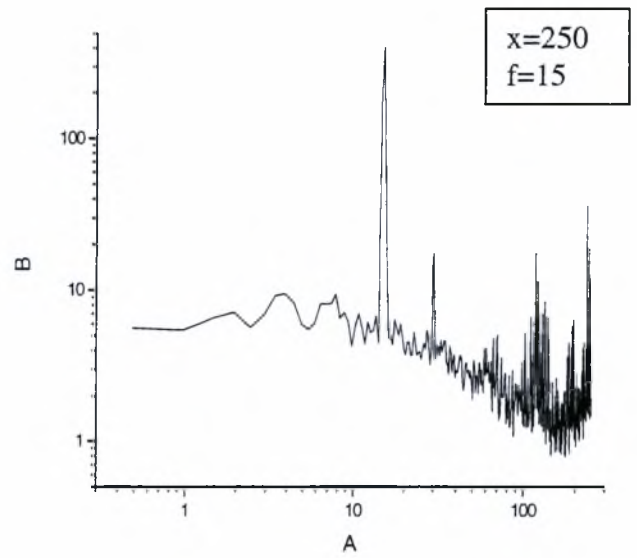
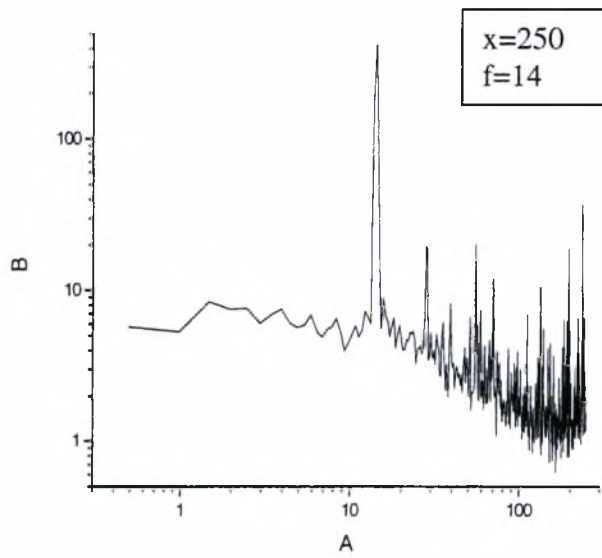
Ύγραμμο 4.19: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=125$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=14, 15$ Hz.



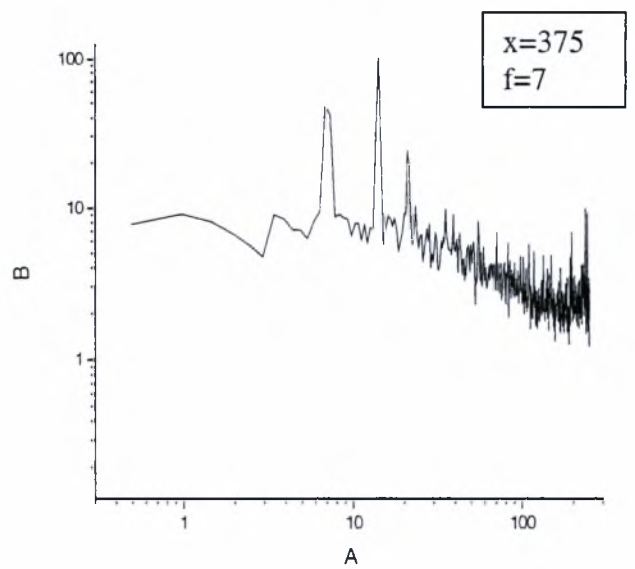
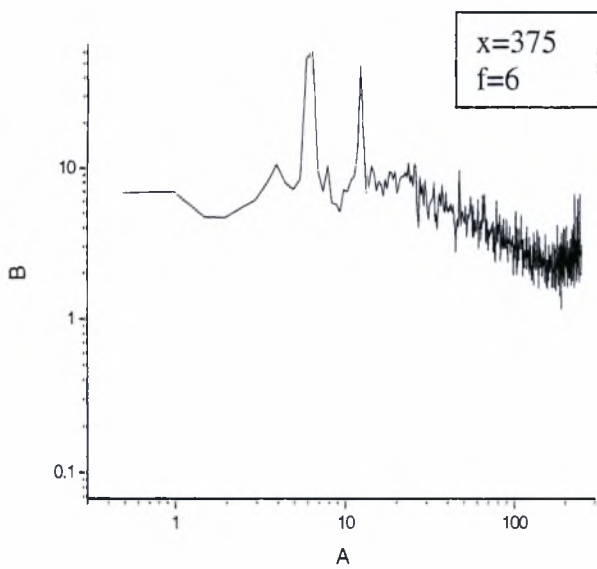
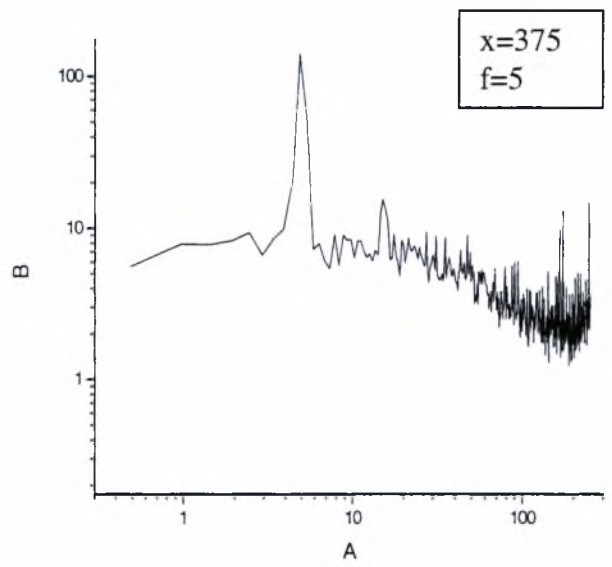
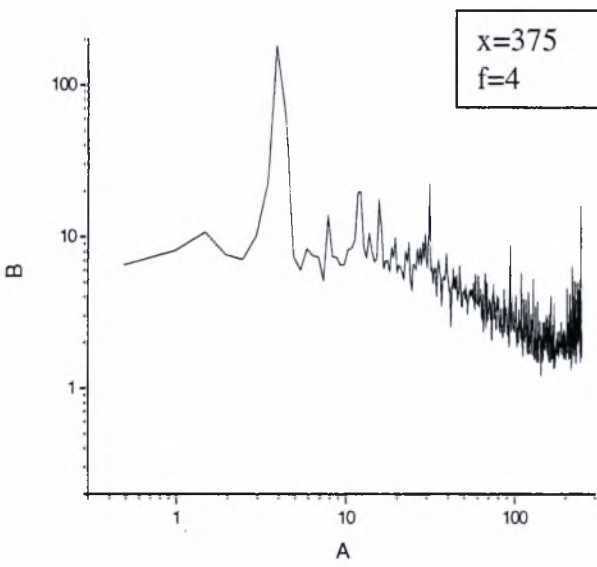
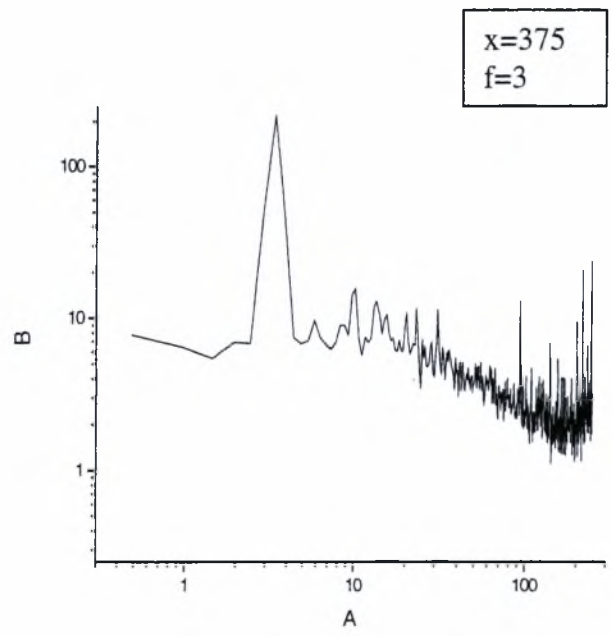
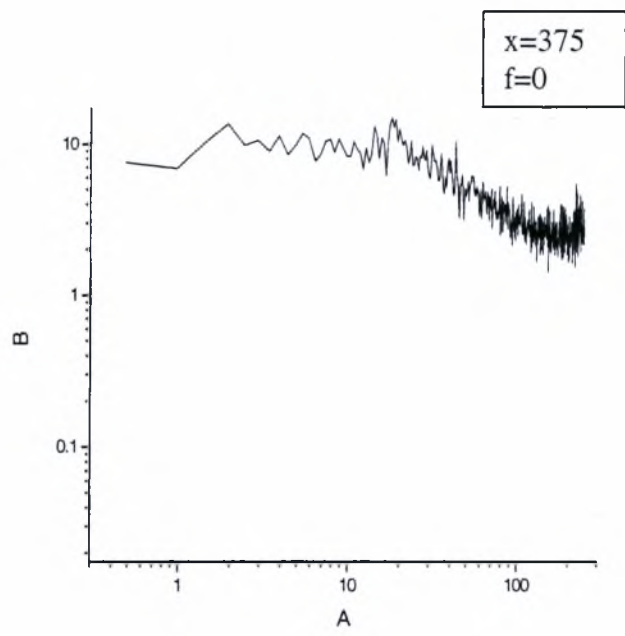
γραμμά 4.20: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=250$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.



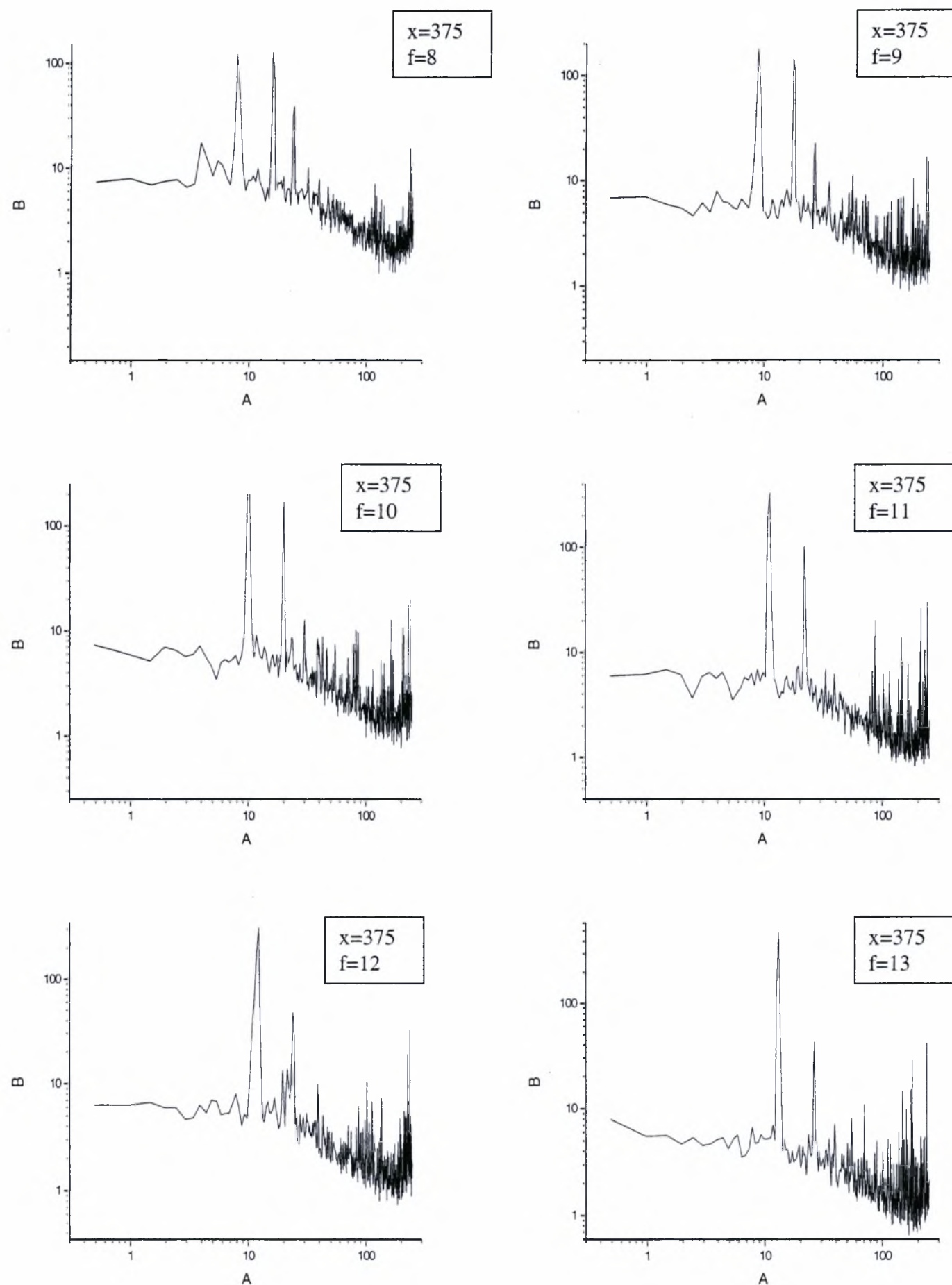
ΐγραμμα 4.21: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=250$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz.



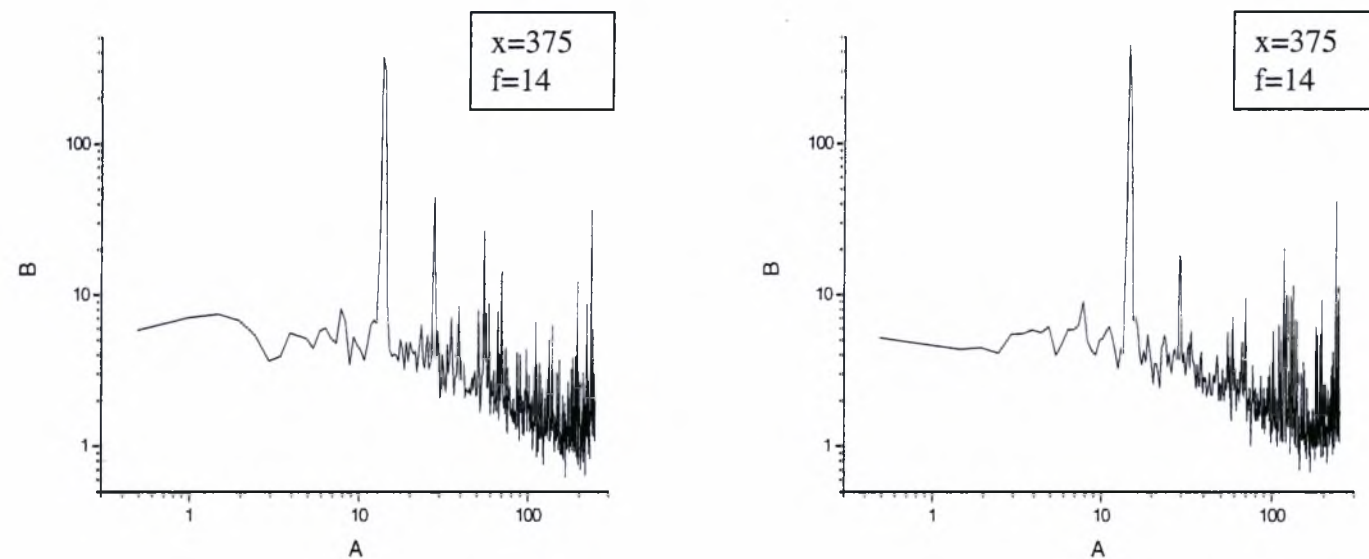
ΐγραμμα 4.22: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=250$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=14,15$ Hz.



Ύγραμμο 4.23: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=375$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.

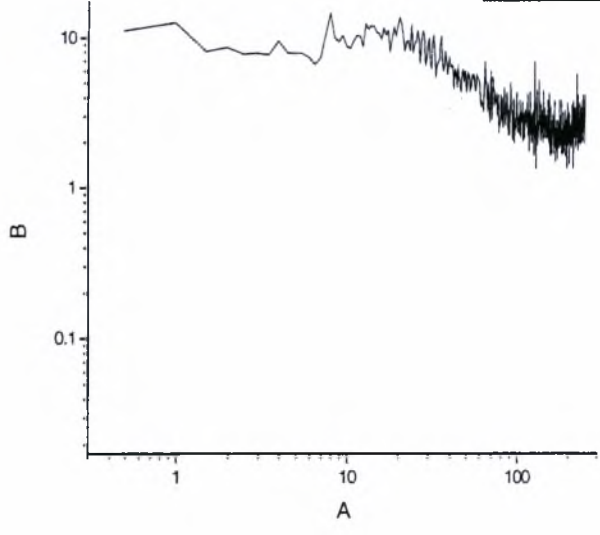


ήγραμμα 4.24: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=375$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz.

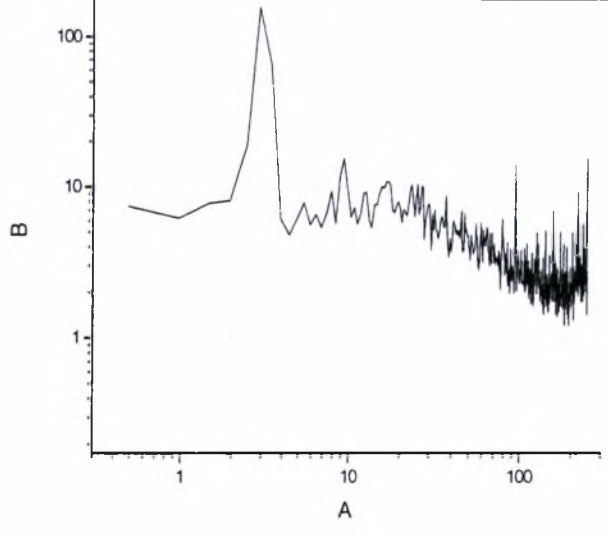


ήγραμμα 4.25: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=375$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=14,15$ Hz.

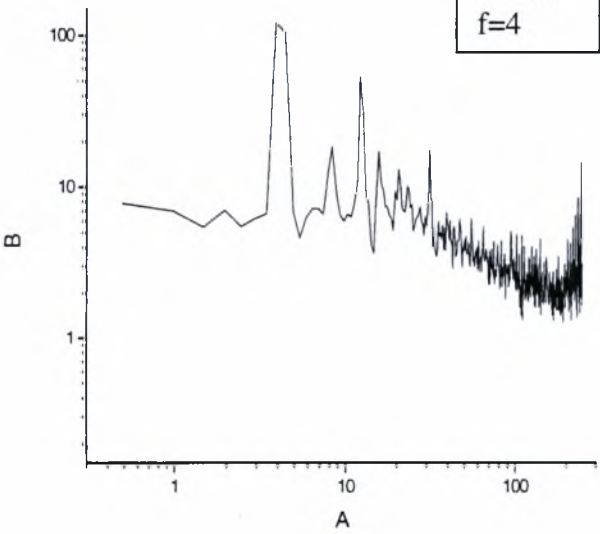
$x=500$
 $f=0$



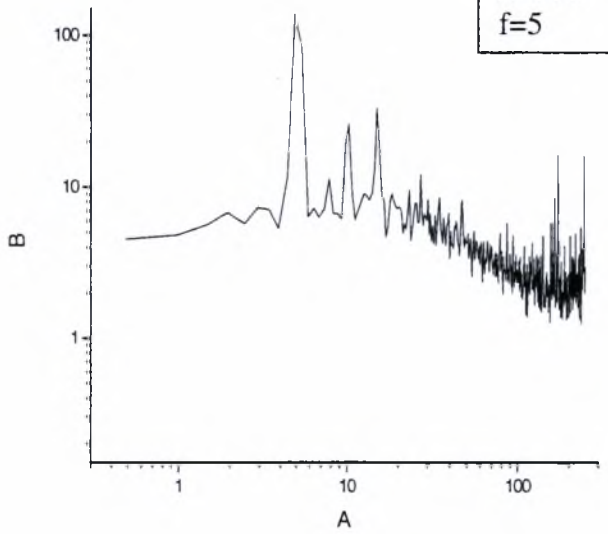
$x=500$
 $f=3$



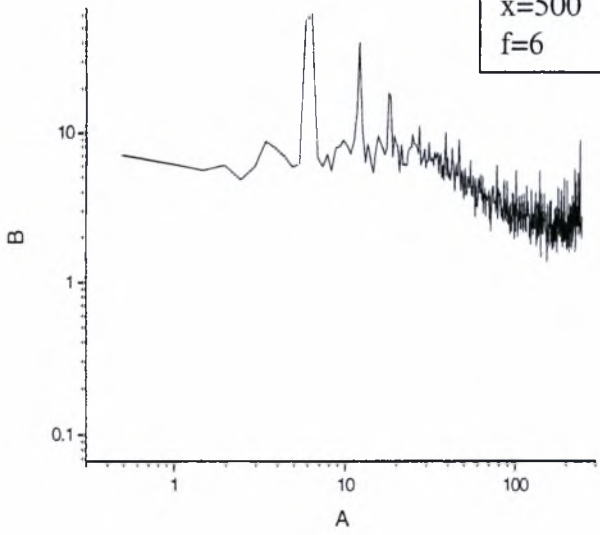
$x=500$
 $f=4$



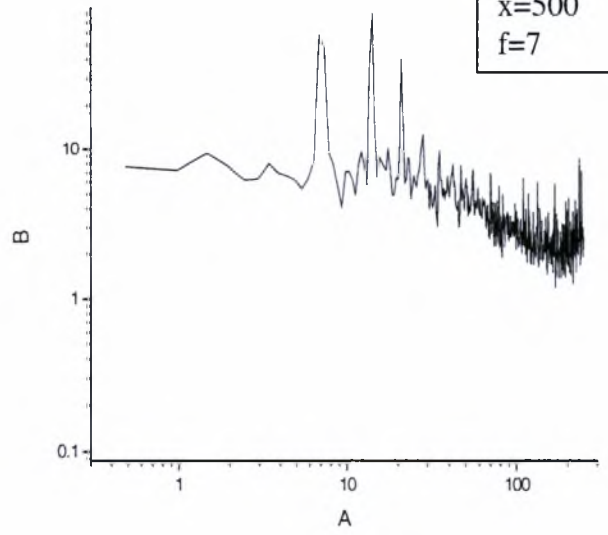
$x=500$
 $f=5$



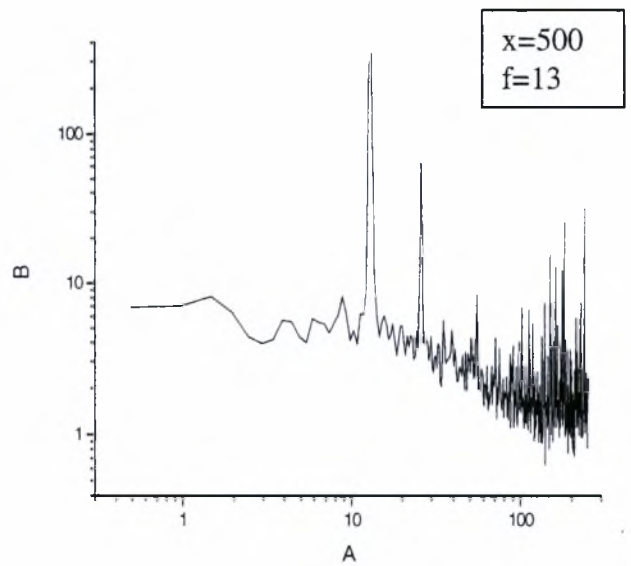
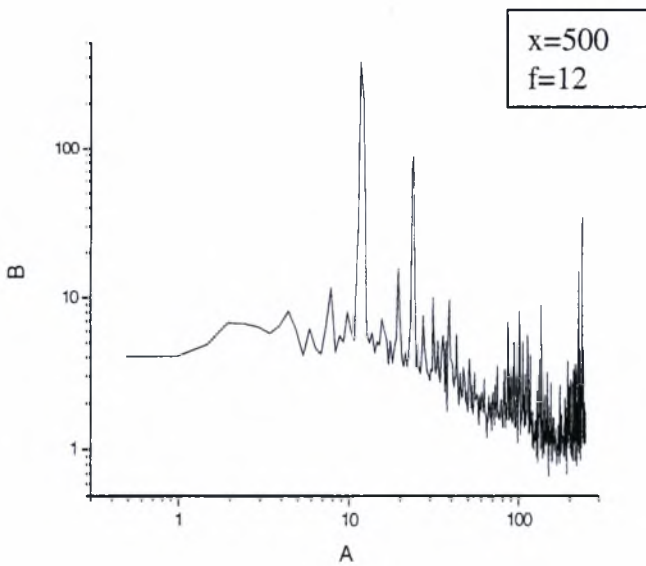
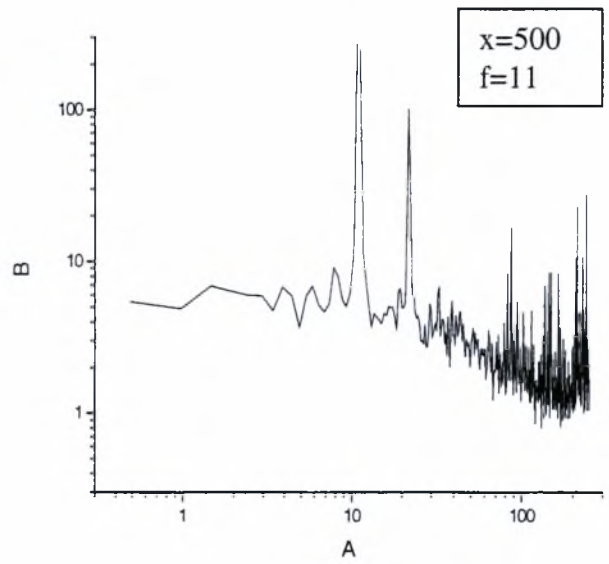
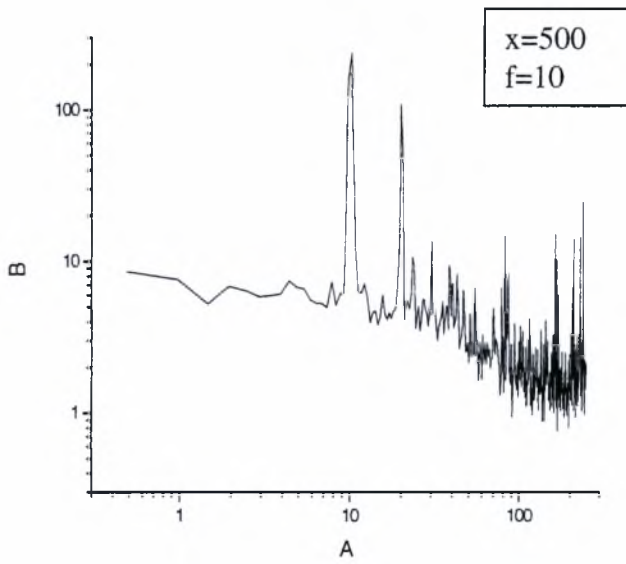
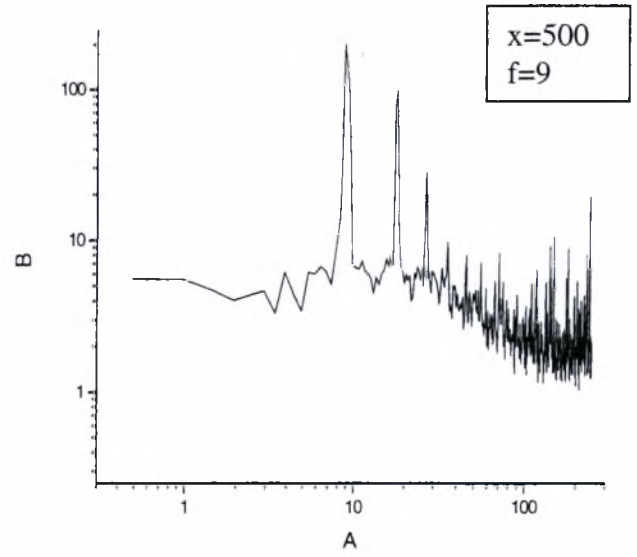
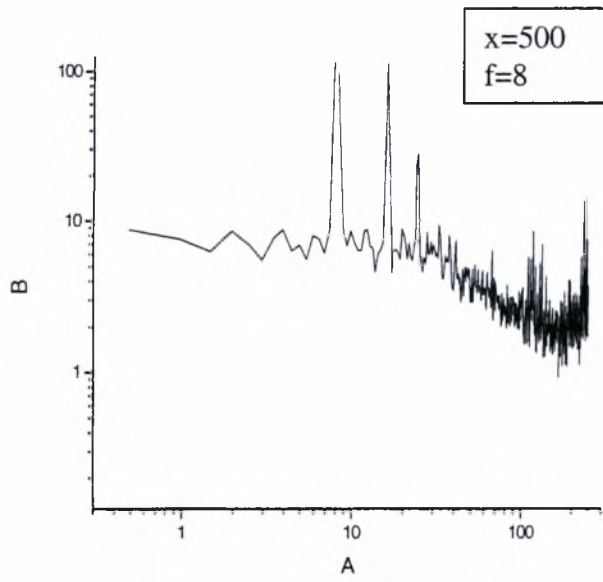
$x=500$
 $f=6$



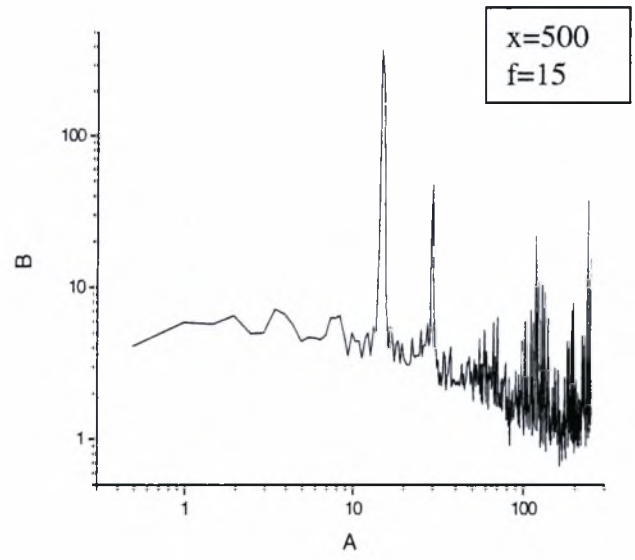
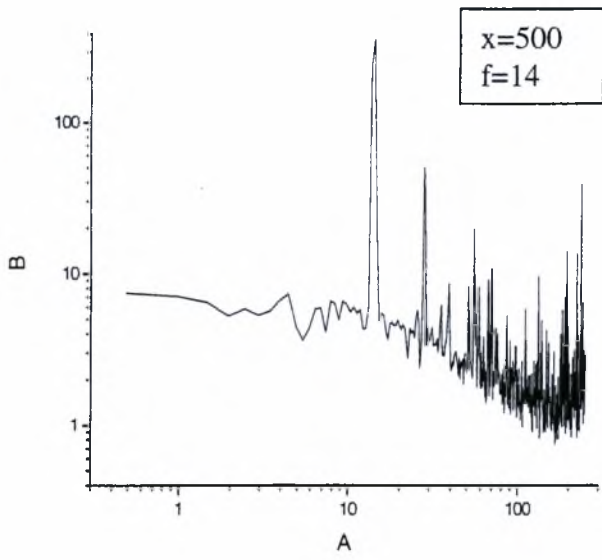
$x=500$
 $f=7$



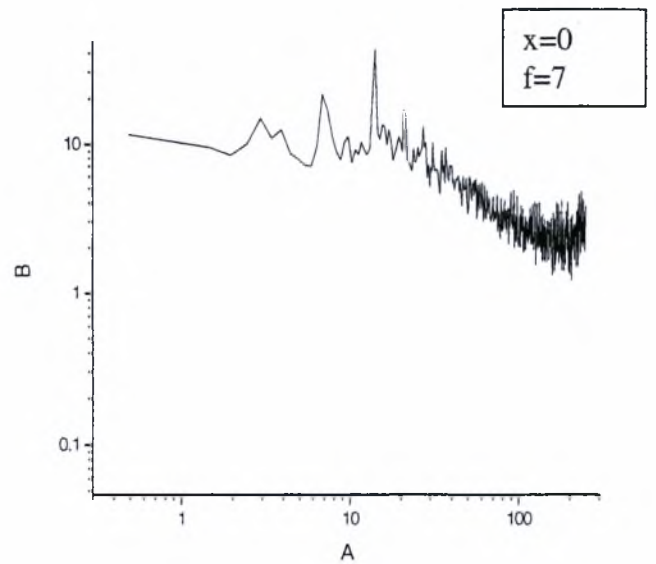
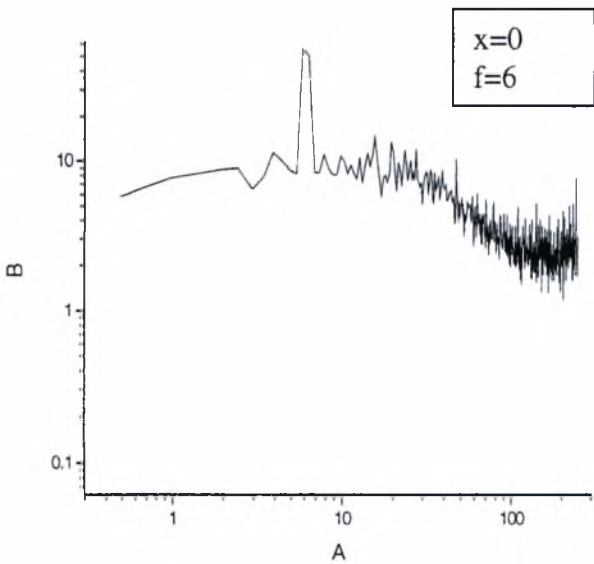
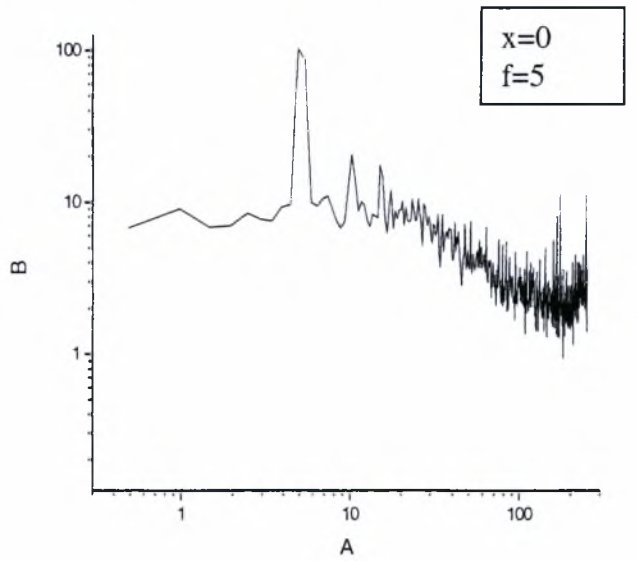
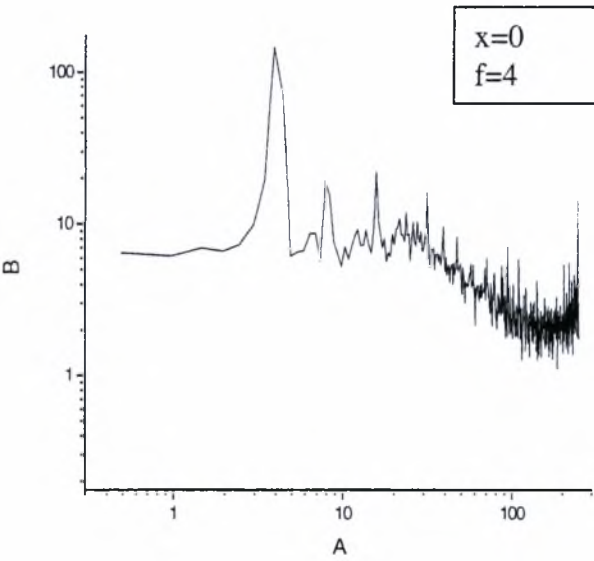
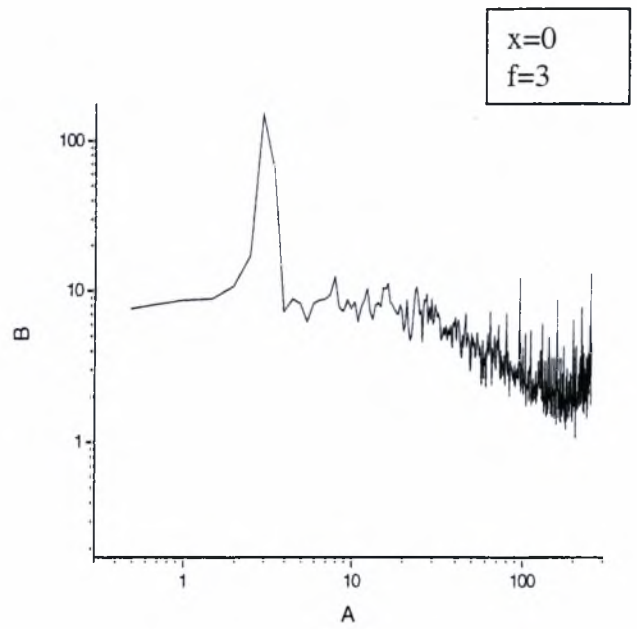
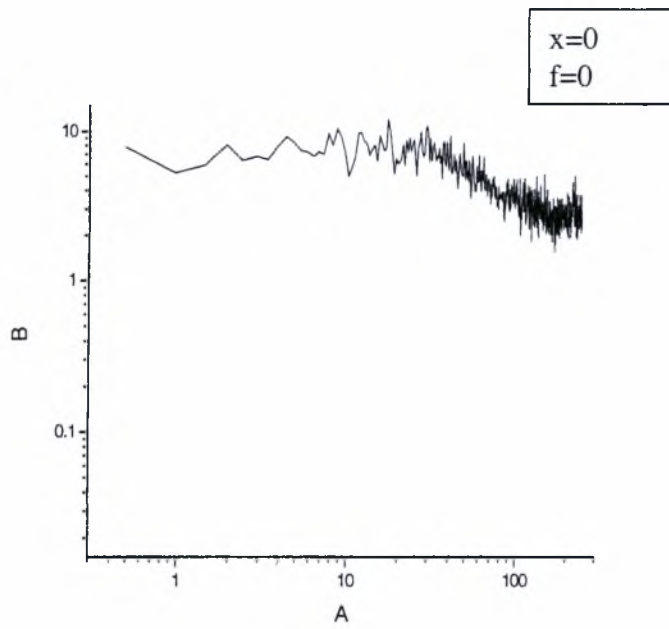
γραμμή 4.26: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=500$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.



ΐγραμμα 4.27: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=500$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz.

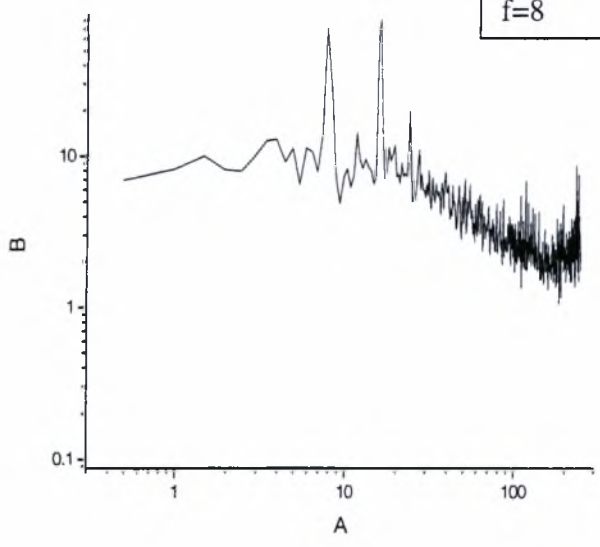


Ήγραμμα 4.28: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο σε απόσταση $x=500$ mm από την αρχή $x=0$ του άξονα x συχνότητες ταλάντωσης $f=14,15$ Hz.

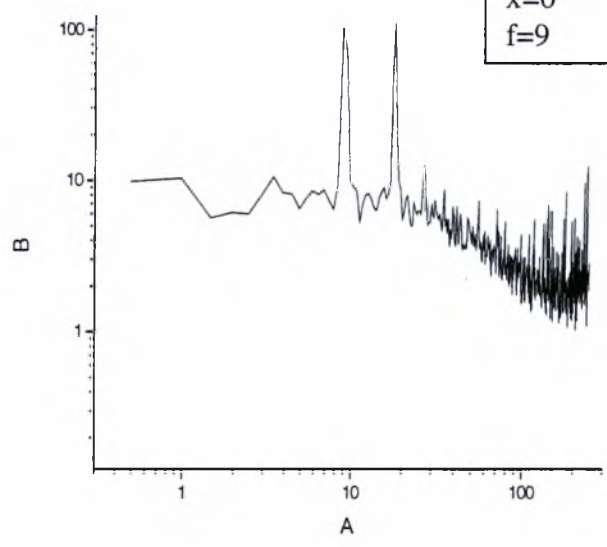


γραμμά 4.29: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=0$ mm από την αρχή $x=0$ του λ x για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.

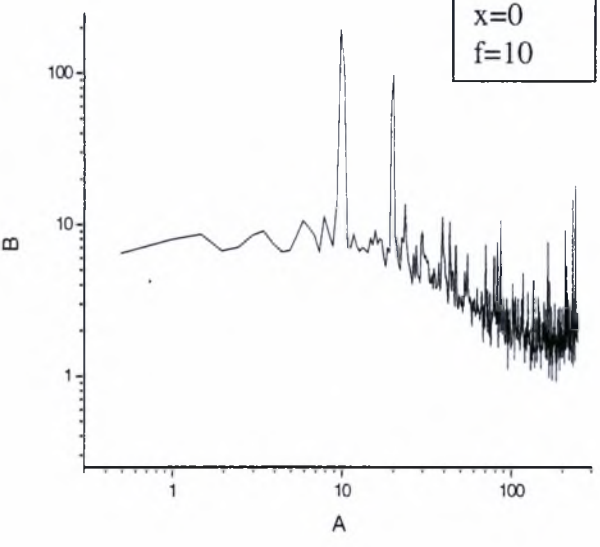
$x=0$
 $f=8$



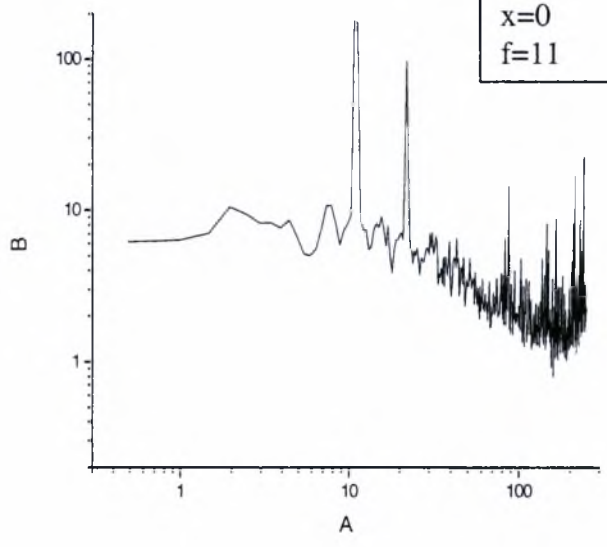
$x=0$
 $f=9$



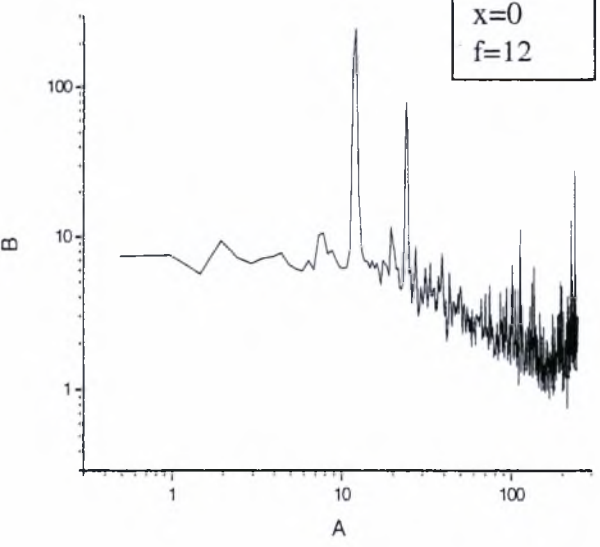
$x=0$
 $f=10$



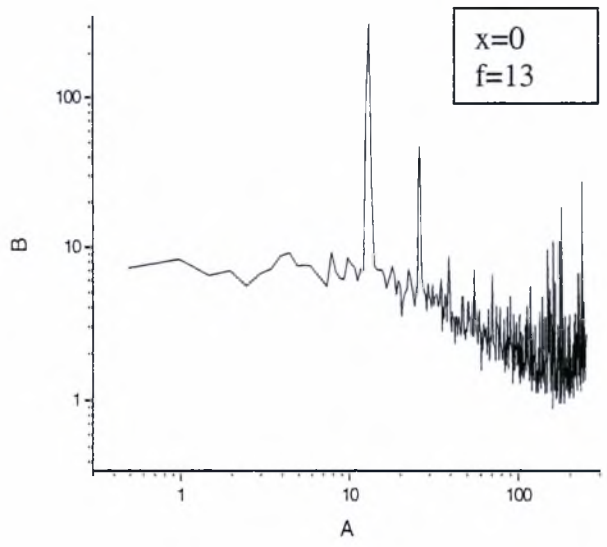
$x=0$
 $f=11$



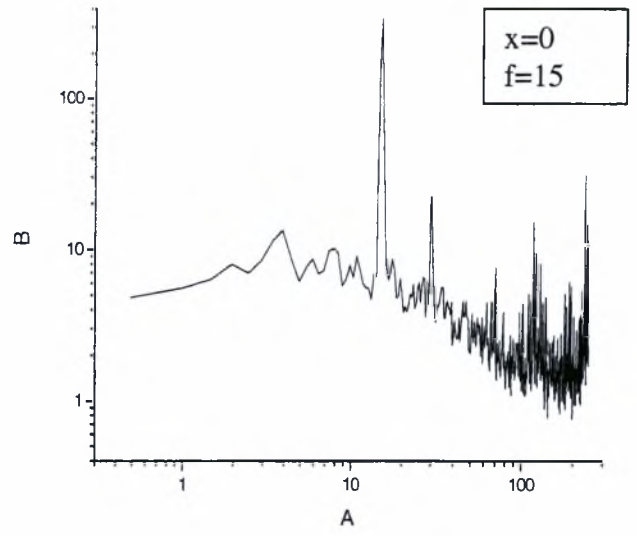
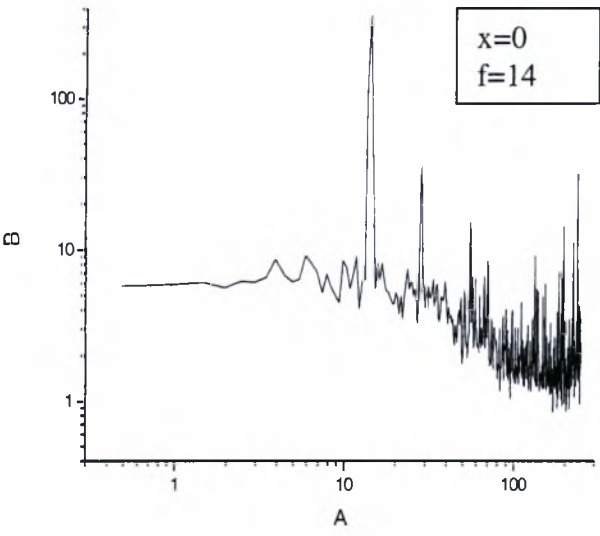
$x=0$
 $f=12$



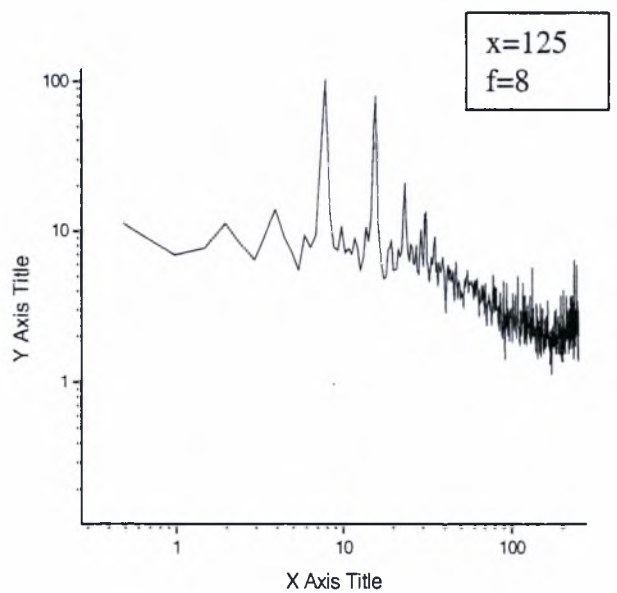
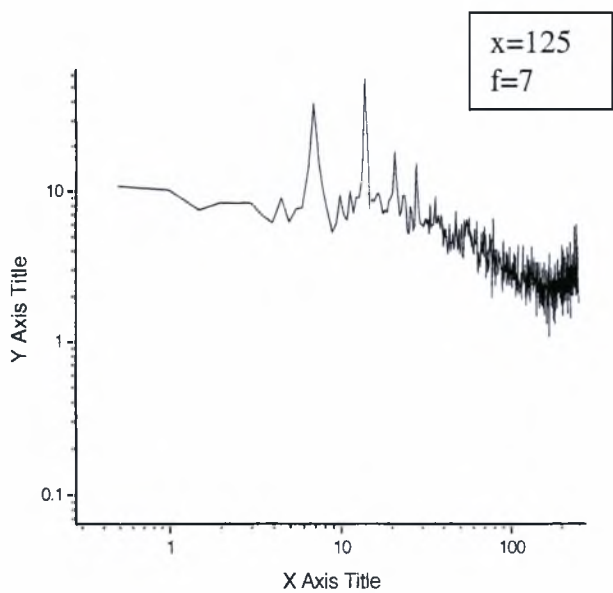
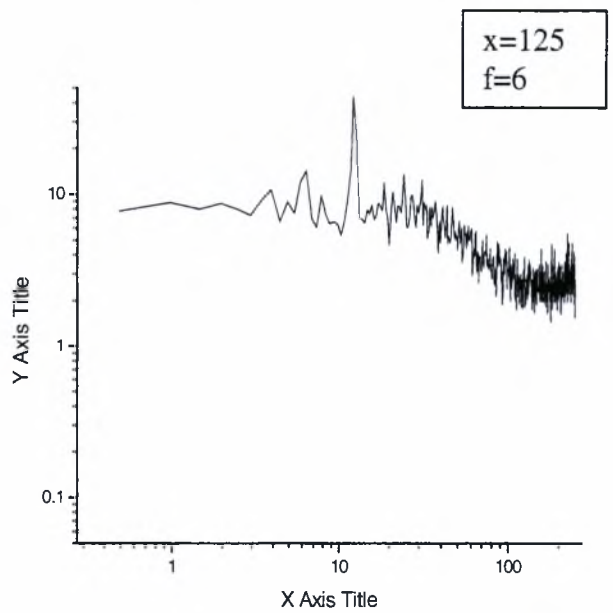
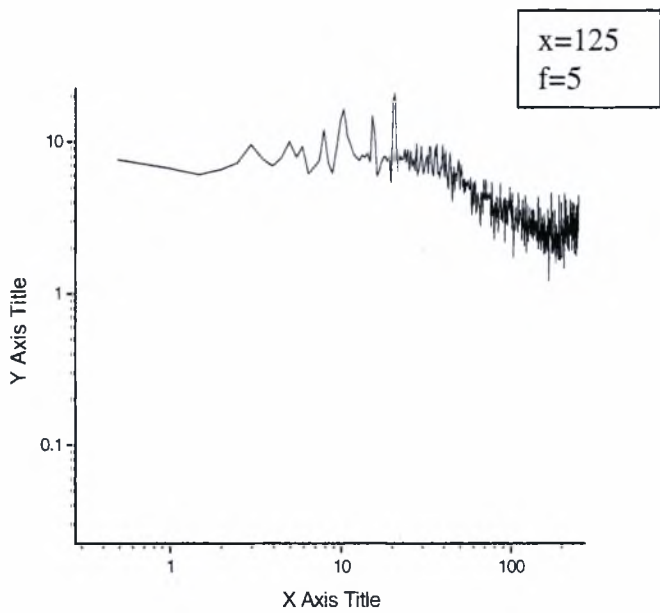
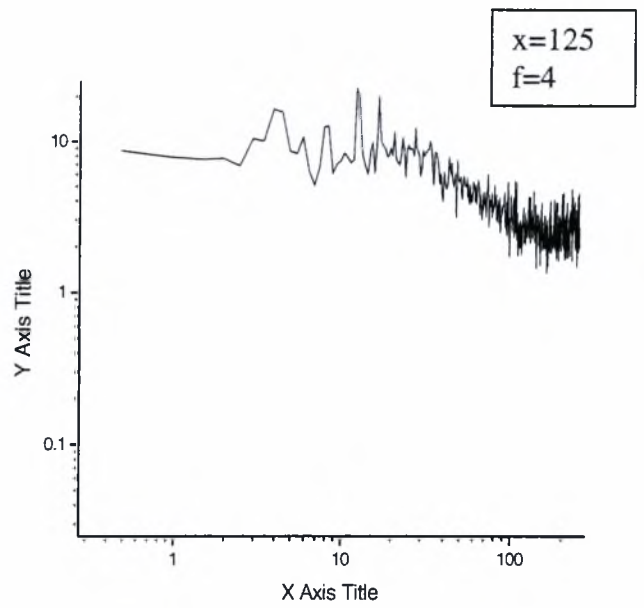
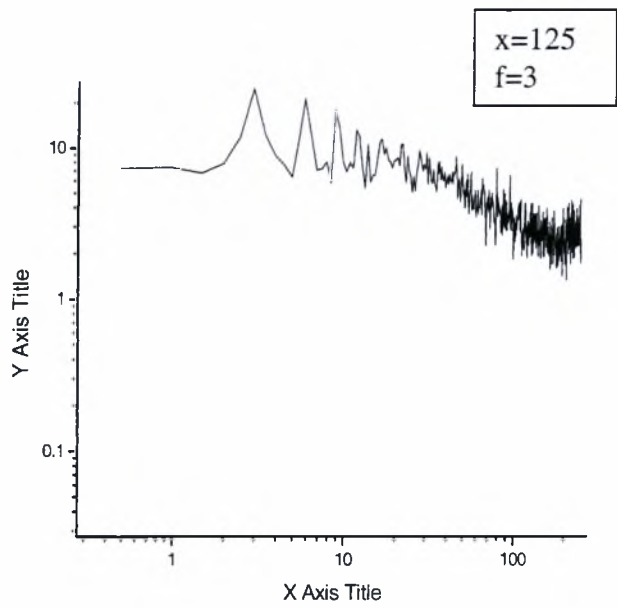
$x=0$
 $f=13$



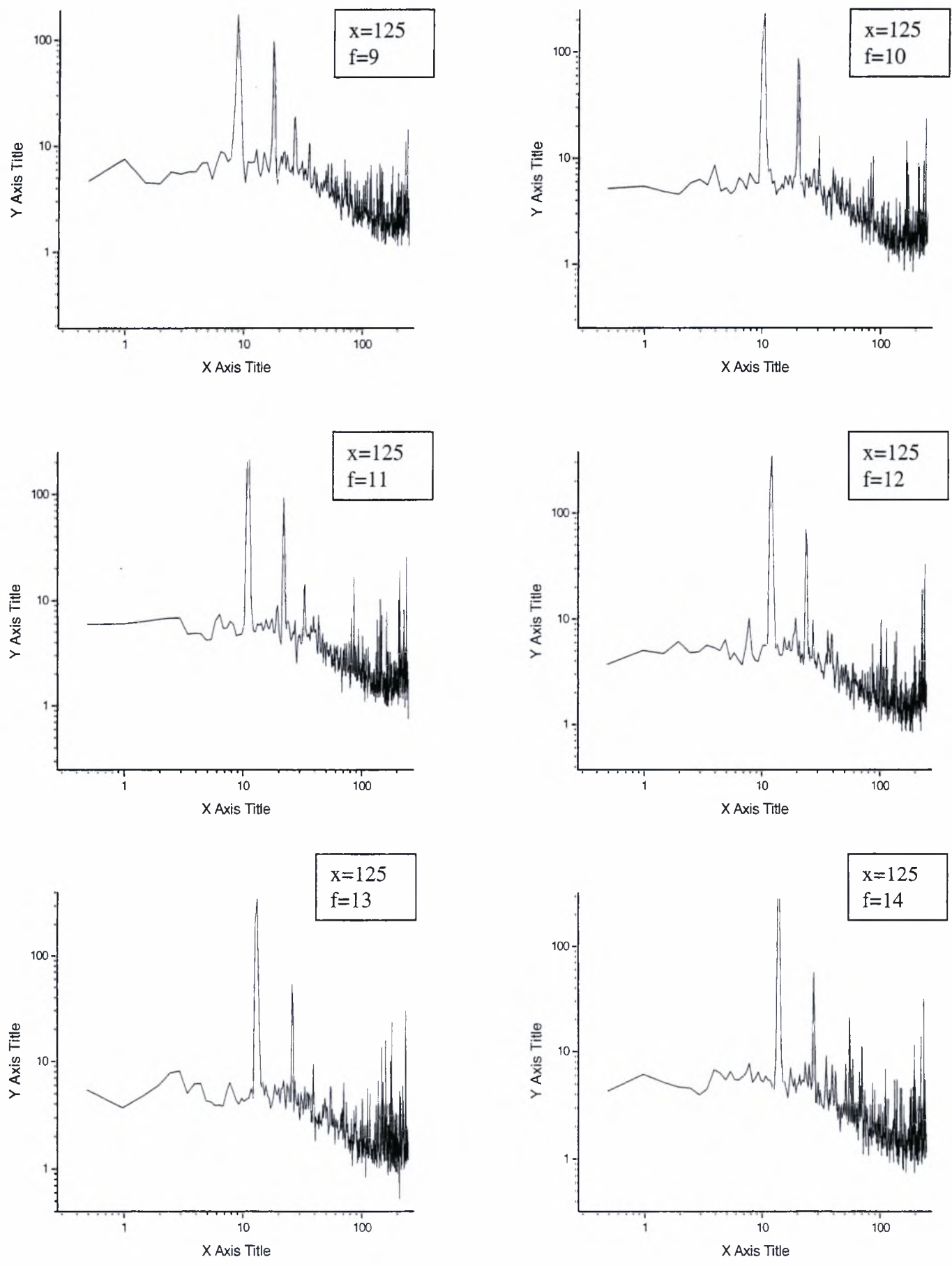
γραμμά 4.29: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=0$ mm από την αρχή $x=0$ του α για συχνότητες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz.



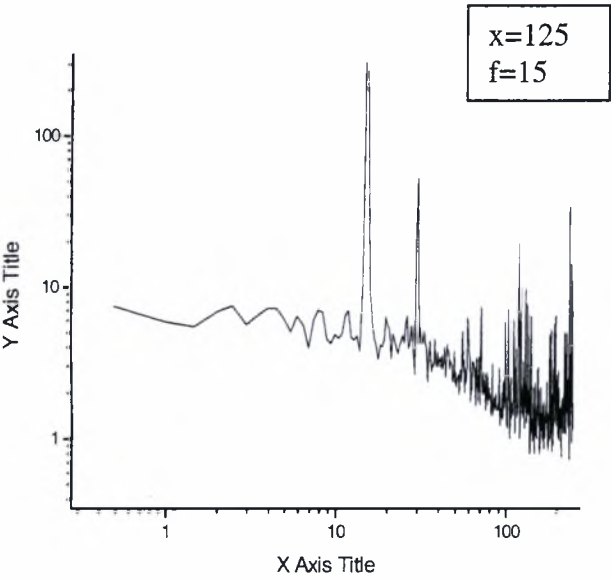
γραμμά 4.30: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=0$ mm από την αρχή $x=0$ του x για συχνότητες ταλάντωσης $f=14, 15$ Hz.



γραμμά 4.31: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=125$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=3-8$ Hz.

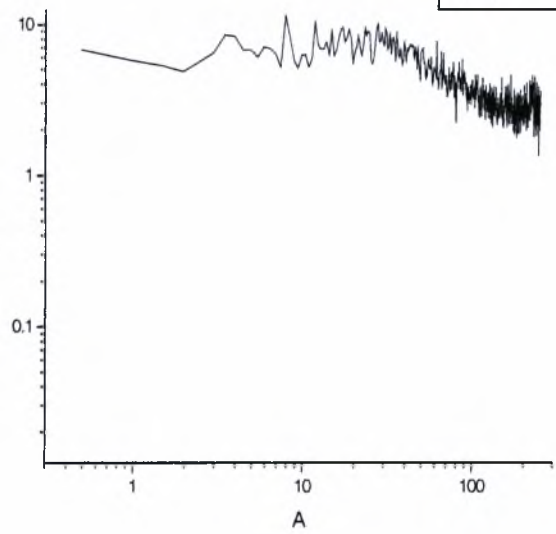


γραμμά 4.32: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=125\text{ mm}$ από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=3-14\text{ Hz}$.

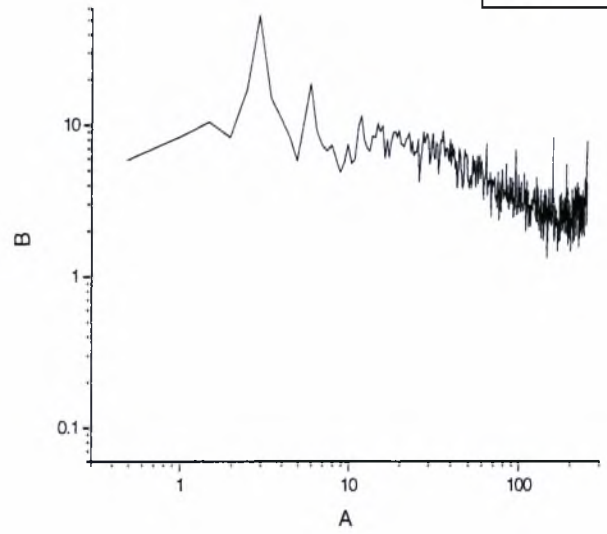


γραμμά 4.33: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=125\text{ mm}$ από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=15\text{ Hz}$.

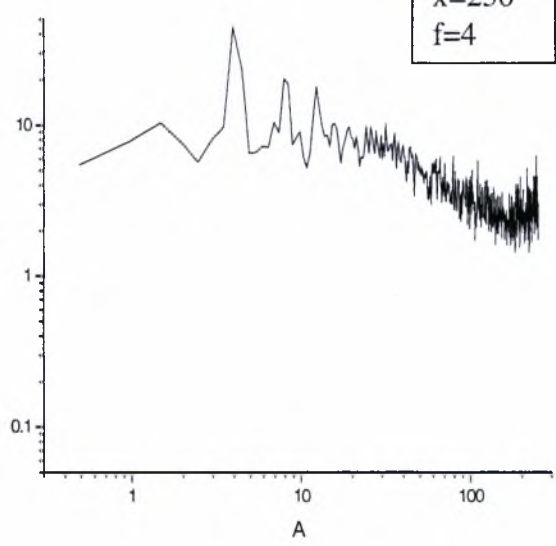
x=250
f=0



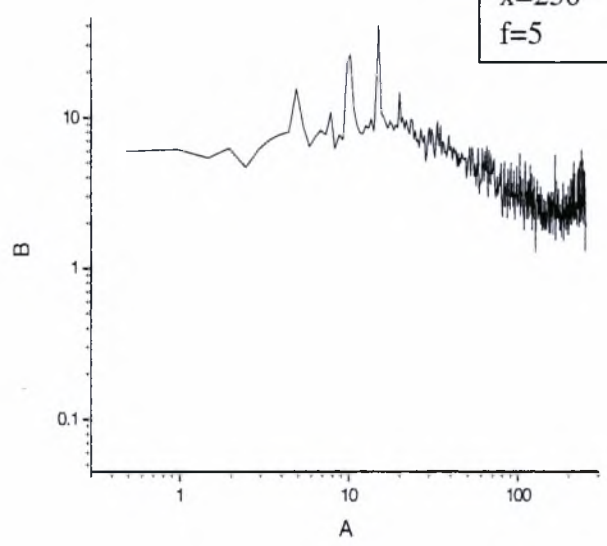
x=250
f=3



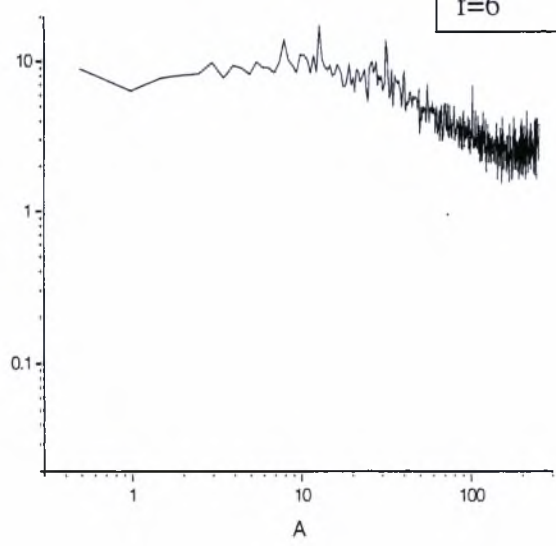
x=250
f=4



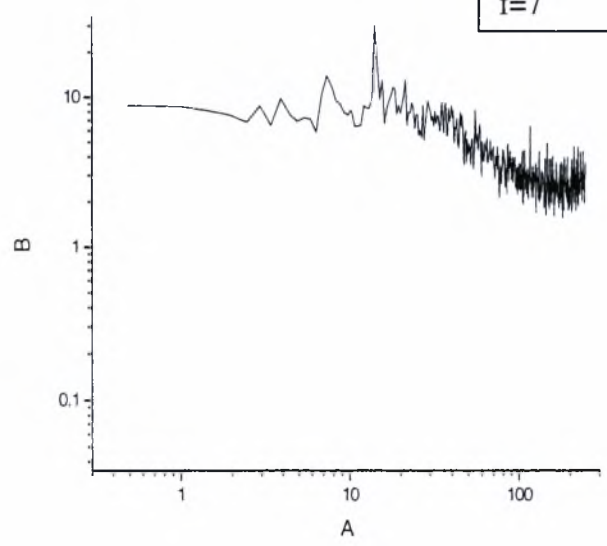
x=250
f=5



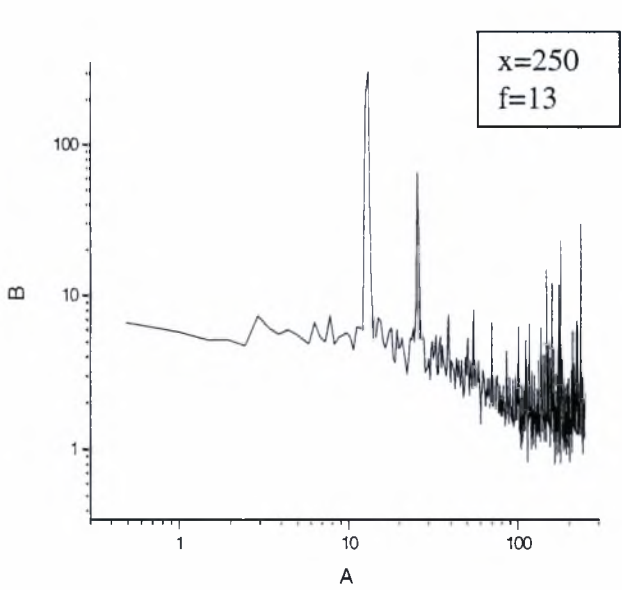
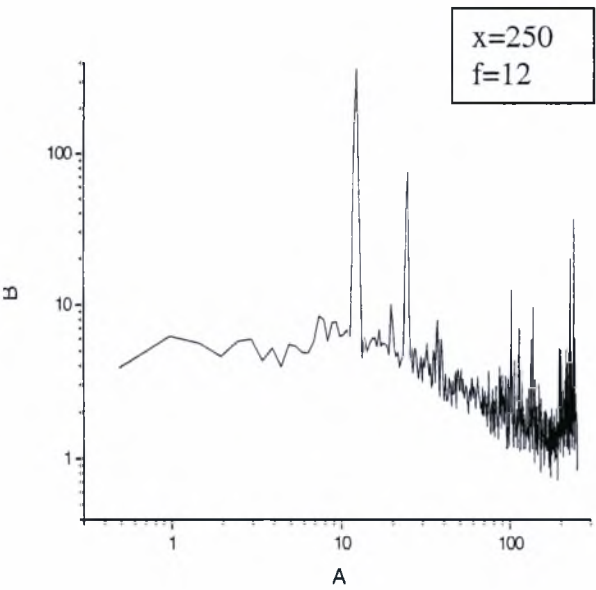
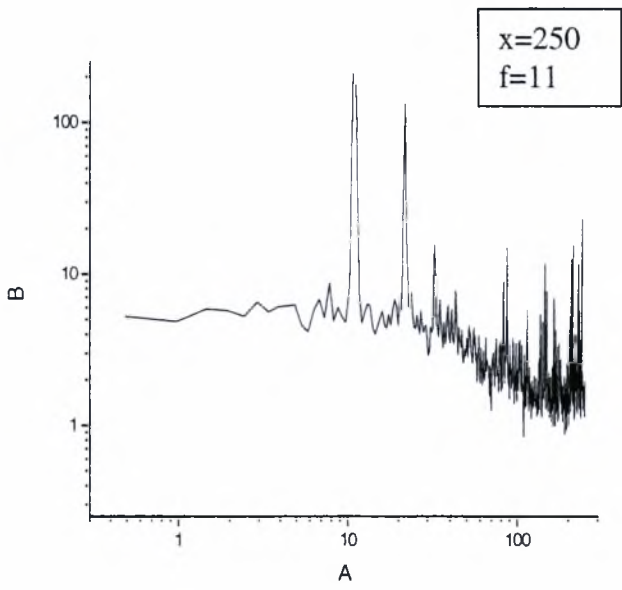
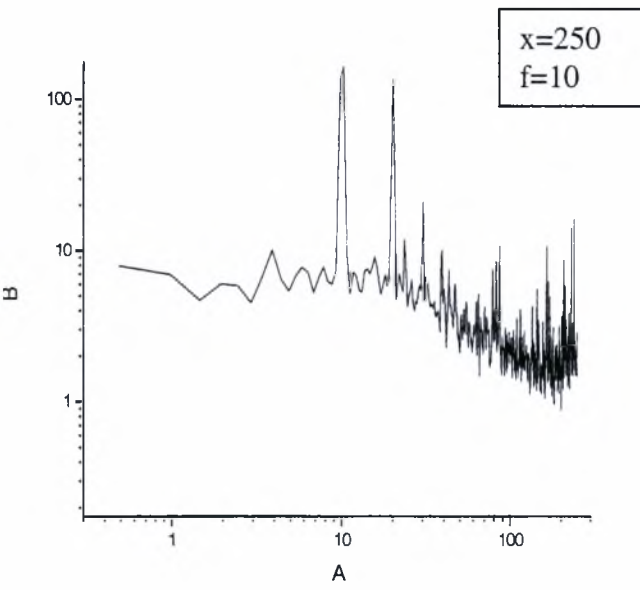
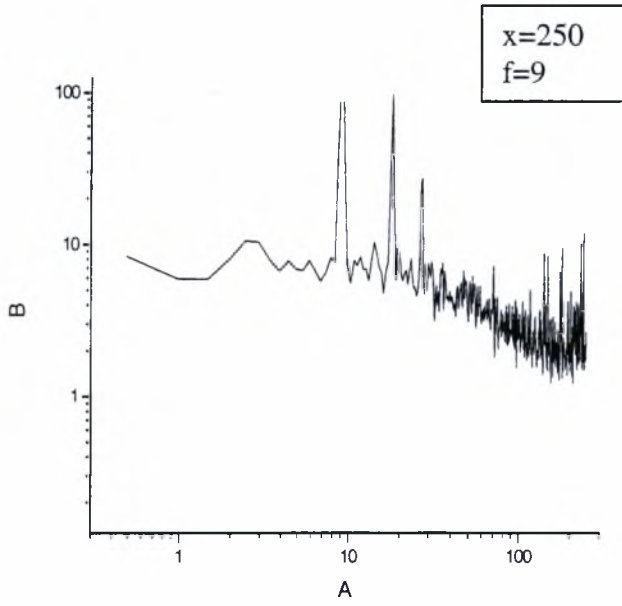
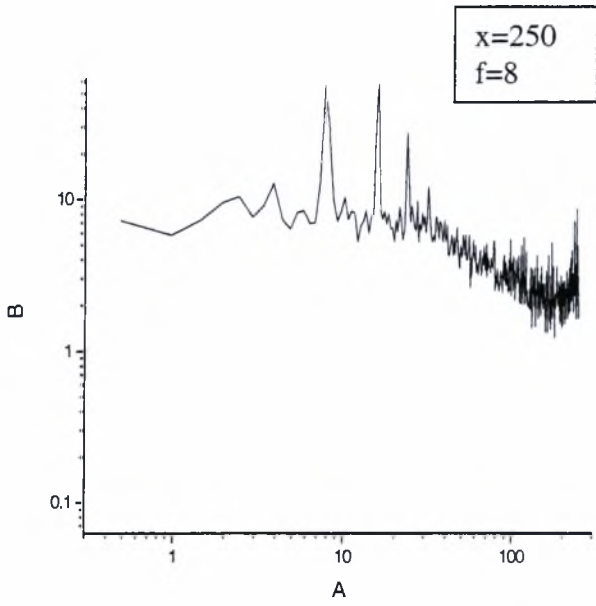
x=250
f=6



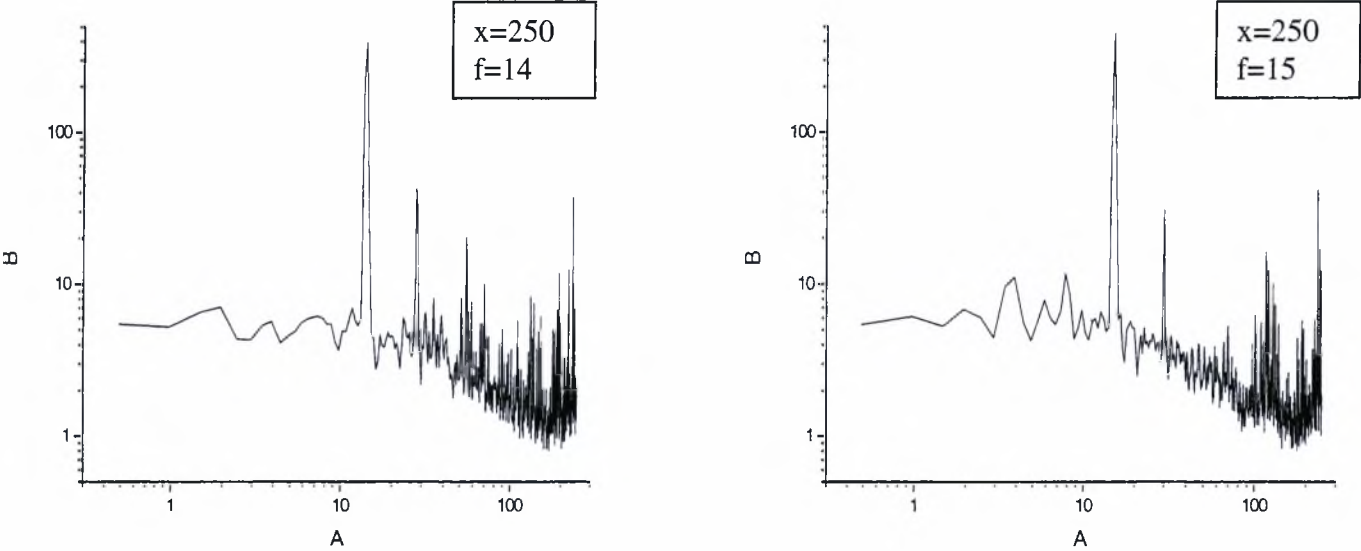
x=250
f=7



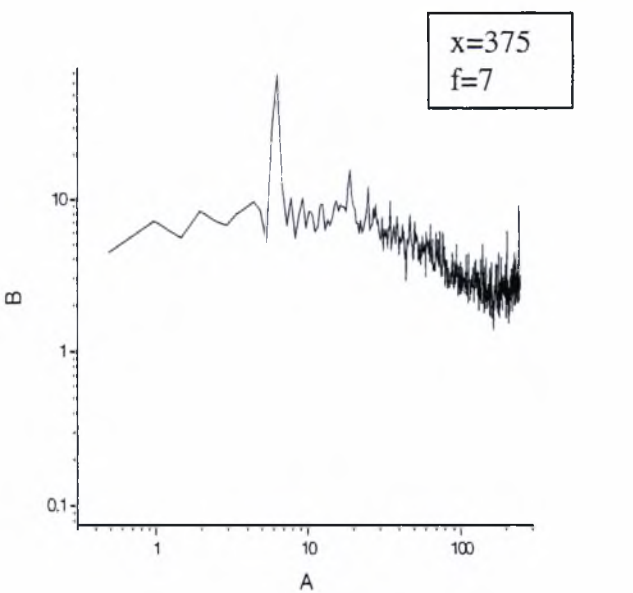
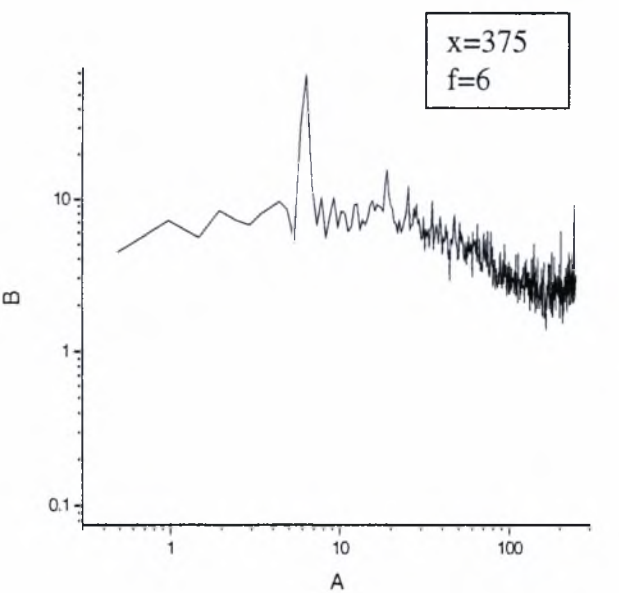
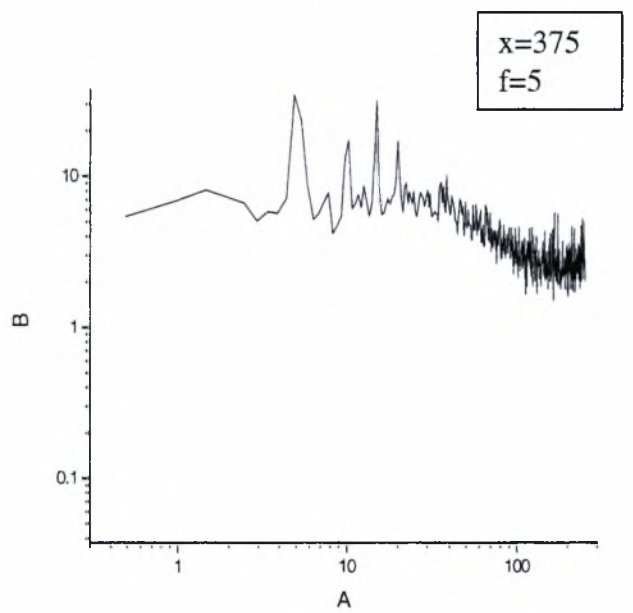
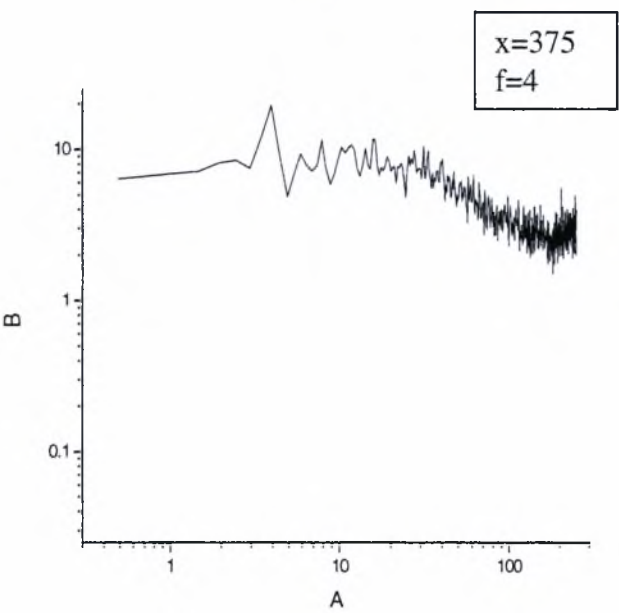
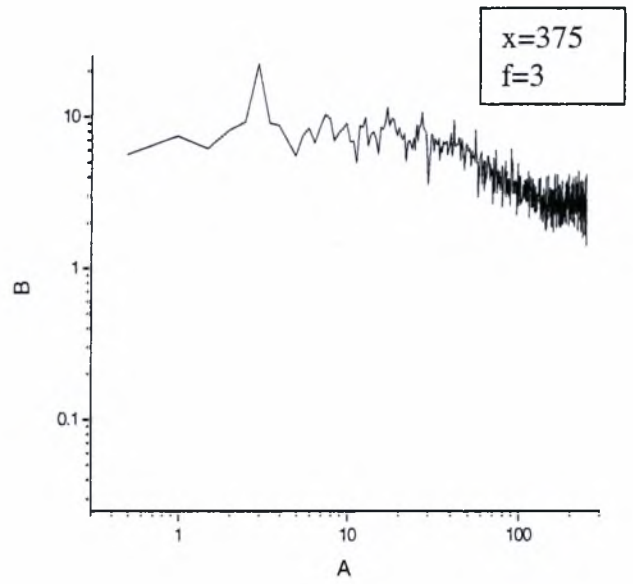
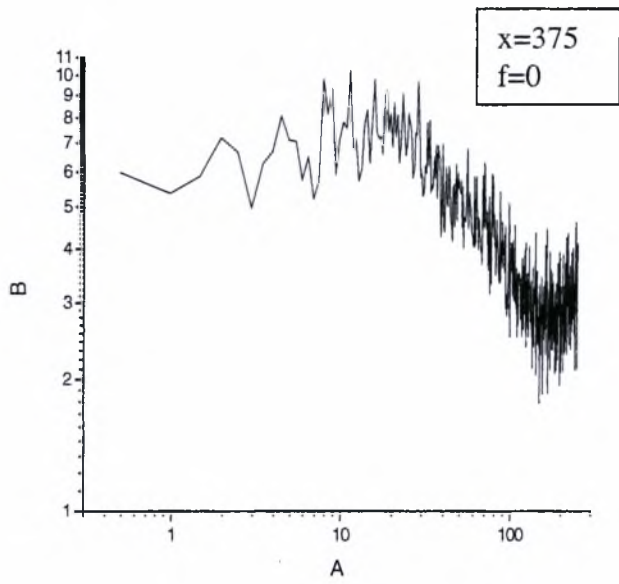
γραμμά 4.34: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=250$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.



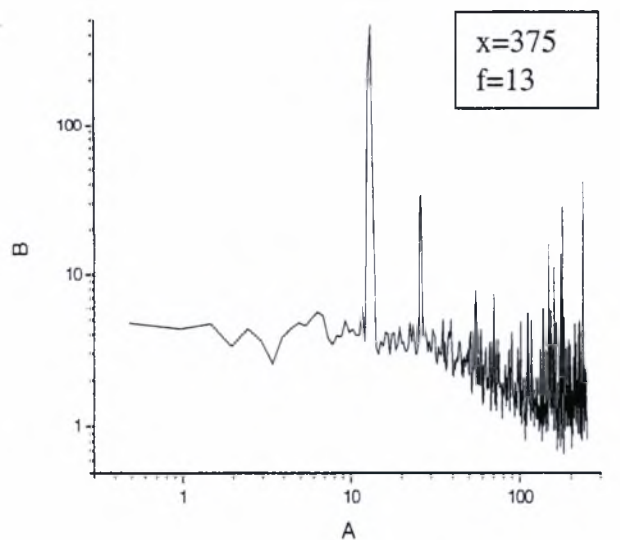
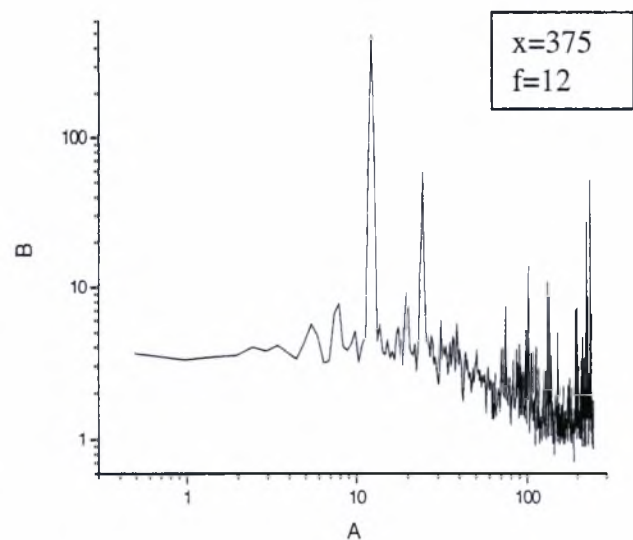
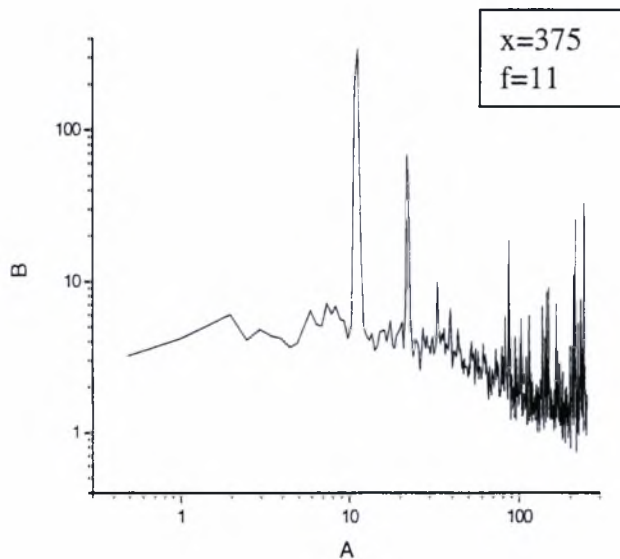
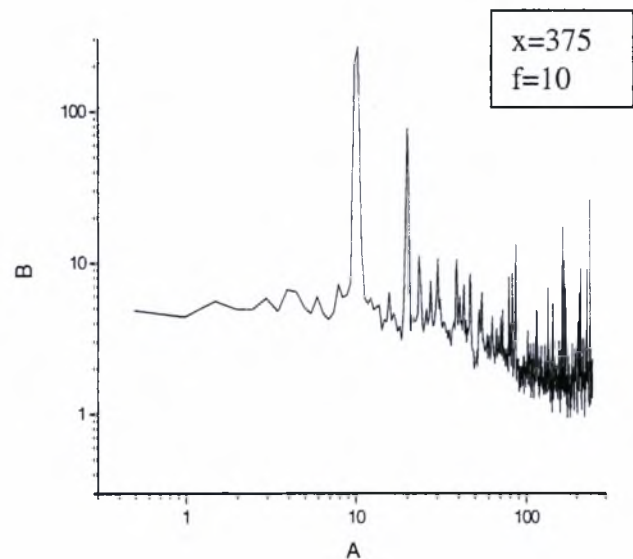
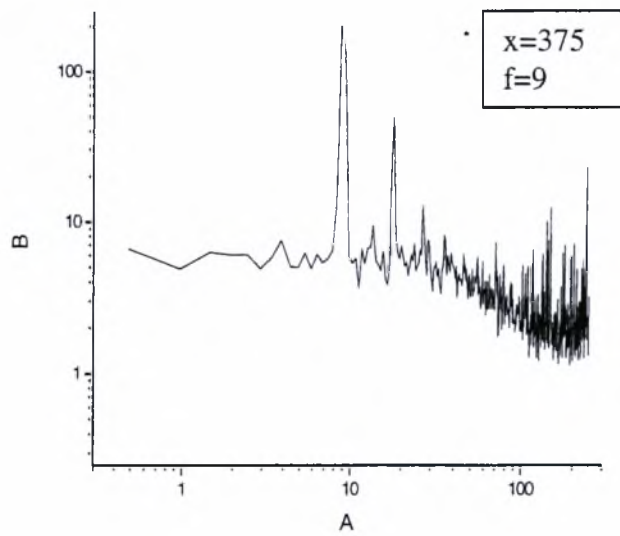
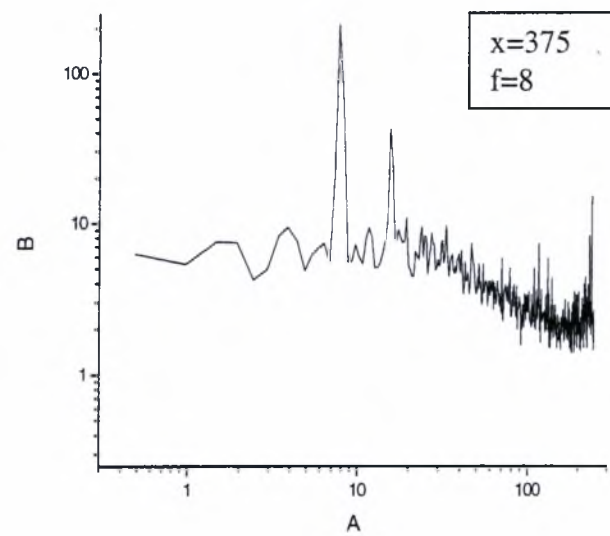
γραμμά 4.35: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=250$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz.



γραμμά 4.36: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=250$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=14,15$ Hz.

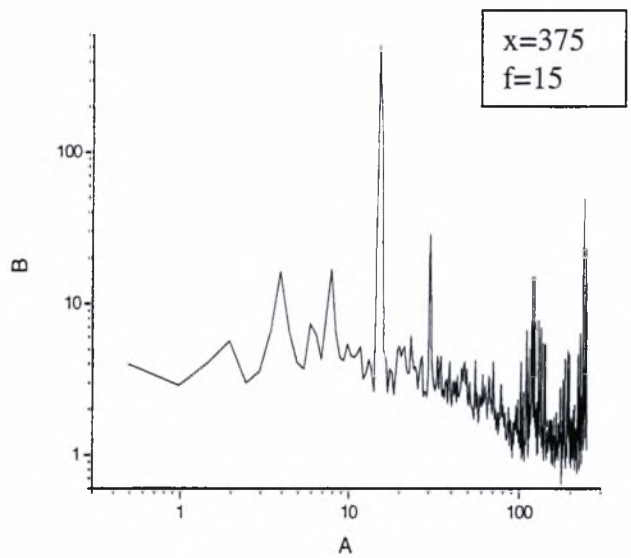
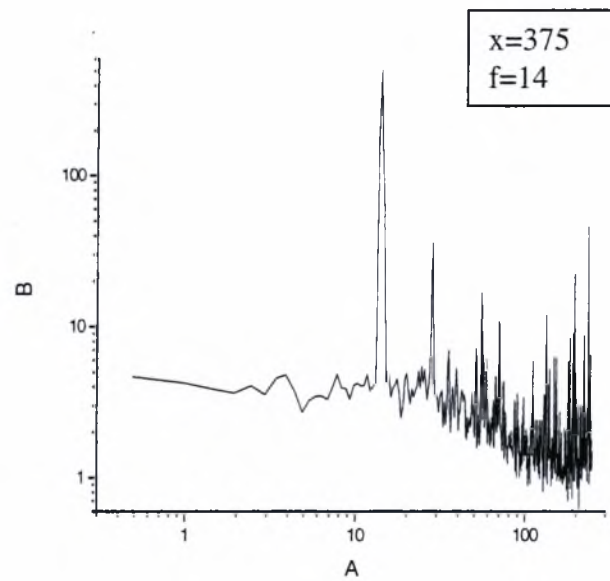


γρaμμα 4.37: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=375$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.



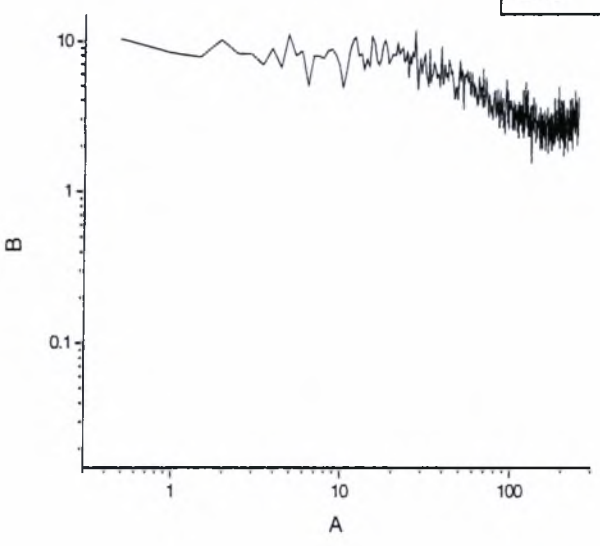
γραμμά 4.38: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=375$ mm από την αρχή $x=0$

άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz

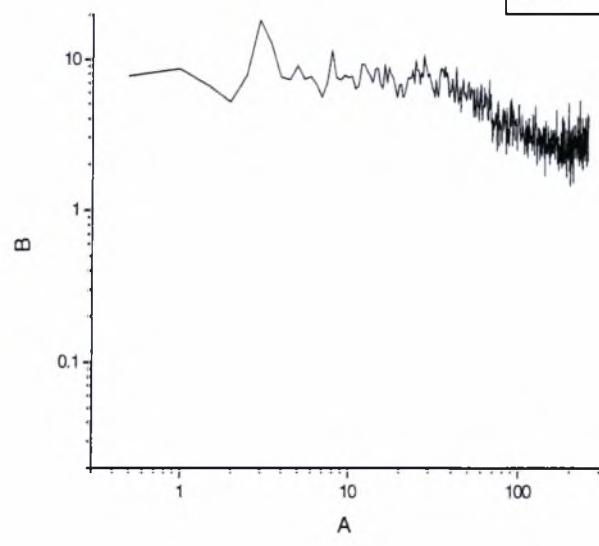


γραμμά 4.39: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=375$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=14,15$ Hz.

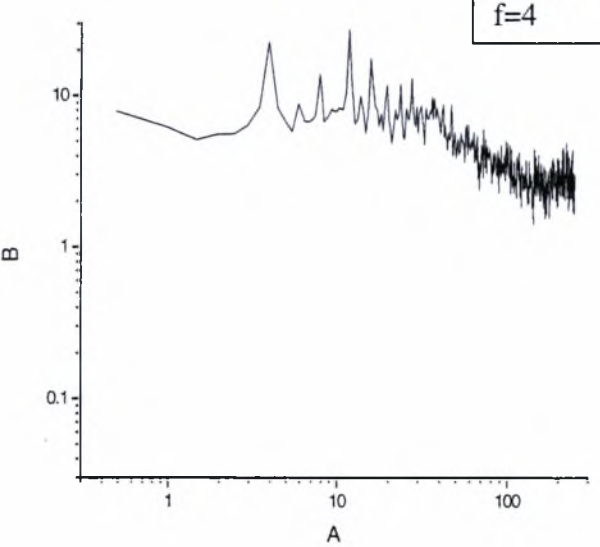
$x=500$
 $f=0$



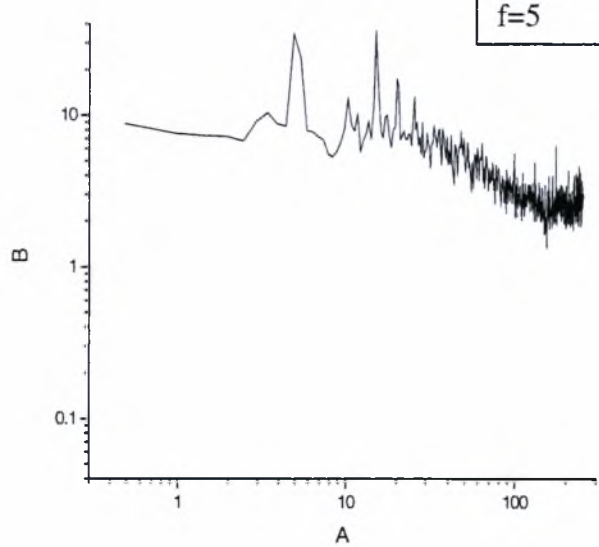
$x=500$
 $f=3$



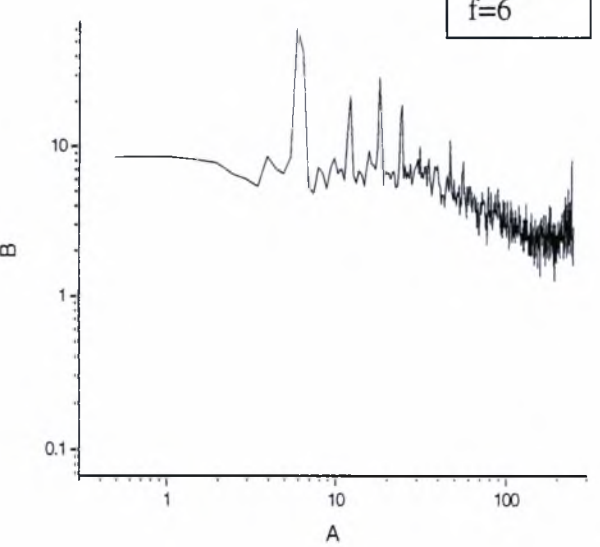
$x=500$
 $f=4$



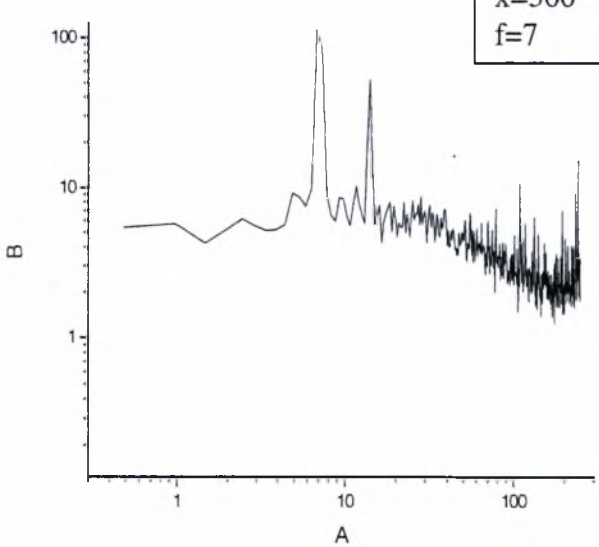
$x=500$
 $f=5$



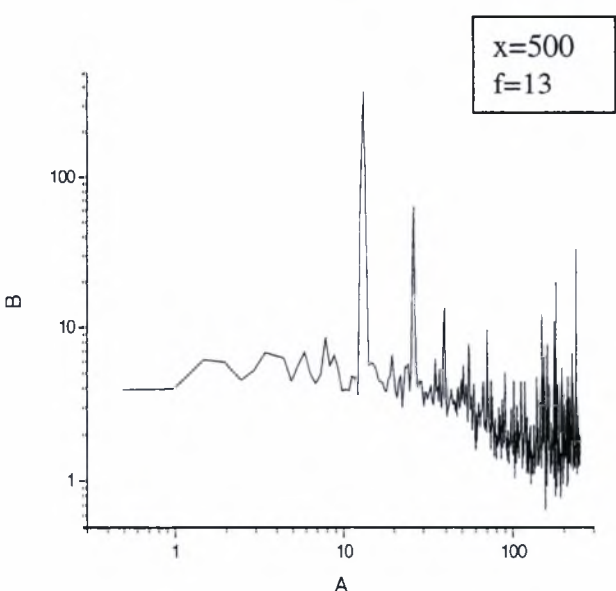
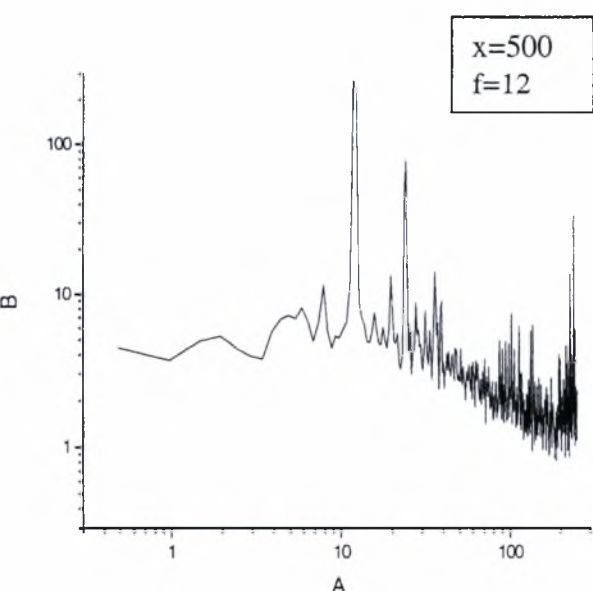
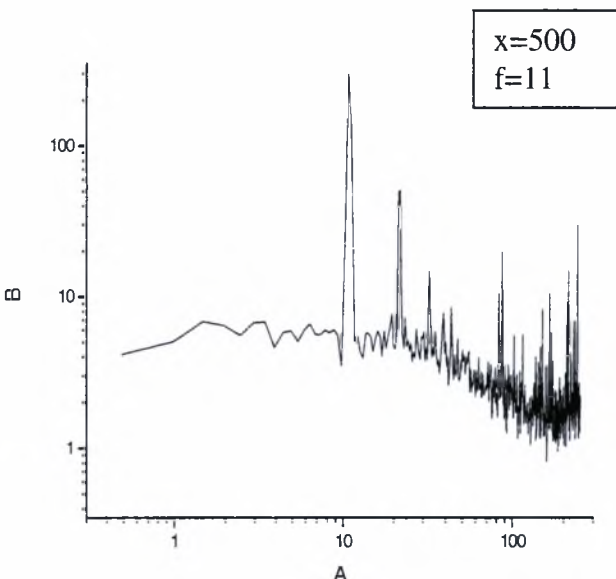
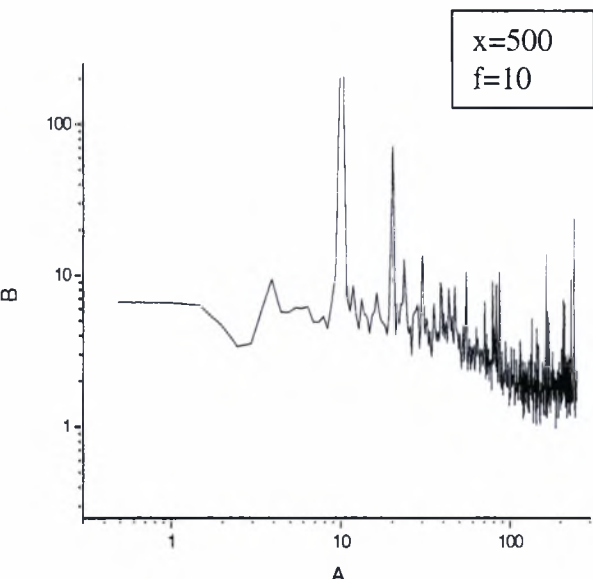
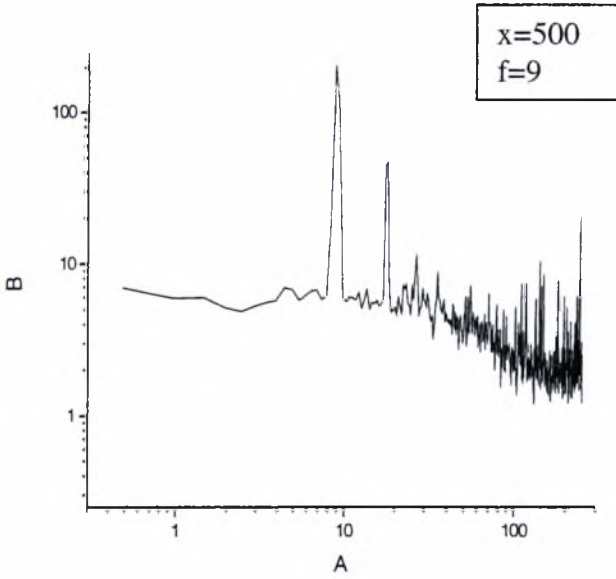
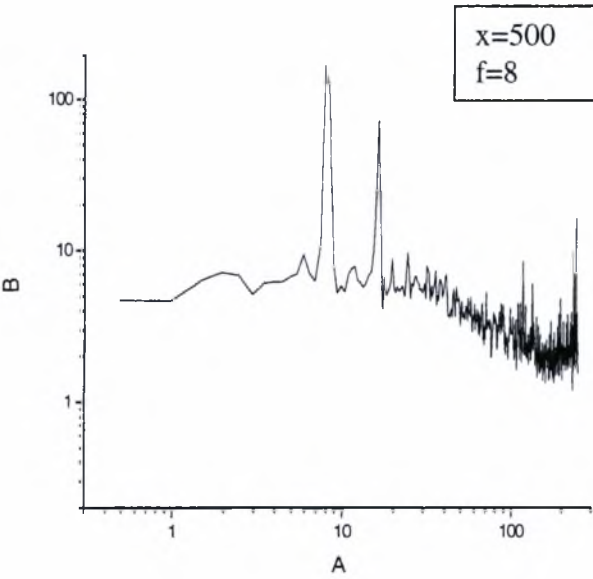
$x=500$
 $f=6$



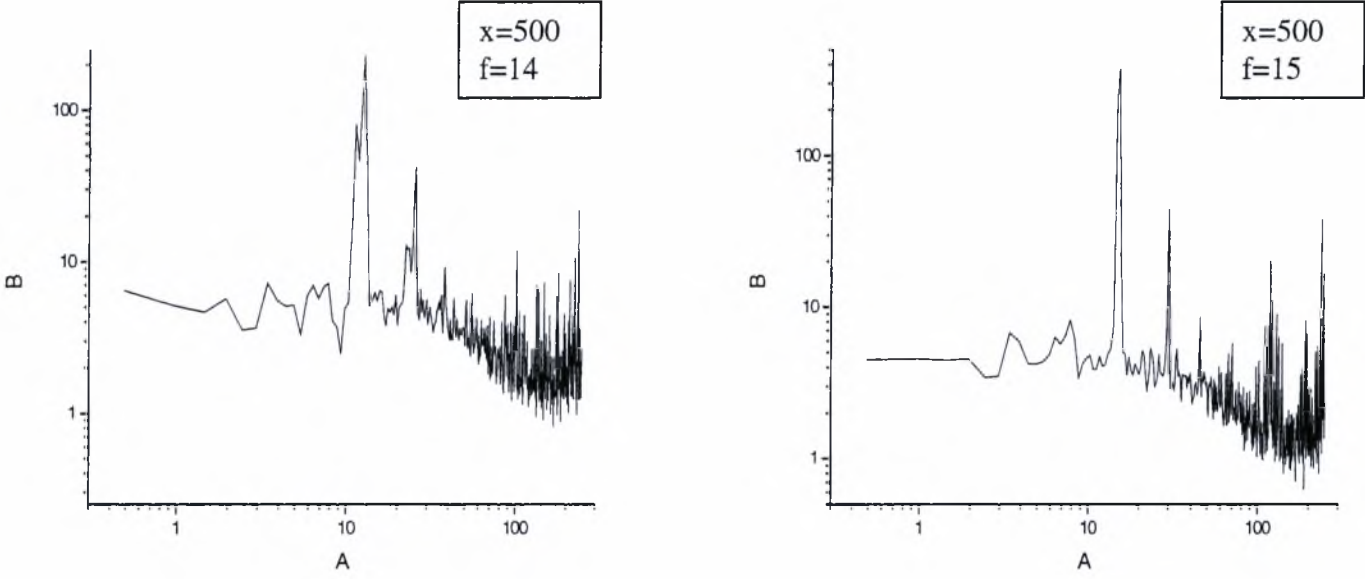
$x=500$
 $f=7$



γραμμά 4.40: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=500$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-7$ Hz.



γραμμά 4.41: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=500$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=8-13$ Hz.



γραμμά 4.42: Φάσματα ταχυτήτων για ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα σε απόσταση $x=500$ mm από την αρχή $x=0$ άξονα x για συχνότητες ταλάντωσης $f=14,15$ Hz.

Πριν προχωρήσουμε στην μελέτη και σχολιασμό των διαγραμμάτων φασμάτων των ταχυτήτων να θυμίσουμε ότι η μεγαλύτερη τιμή του φάσματος της ταχύτητας εμφανίζεται στην συχνότητα f της επιβαλλόμενης ταλάντωσης. Αυτή η ψηλότερη κορυφή λέγεται 1^η αρμονική. Πολλές φορές την 1^η αρμονική ακολουθεί η 2^η που έχει την διπλάσια συχνότητα της πρώτης συνήθως όμως μικρότερη τιμή. Από την μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων μπορούμε να κάνουμε χρήσιμες παρατηρήσεις.

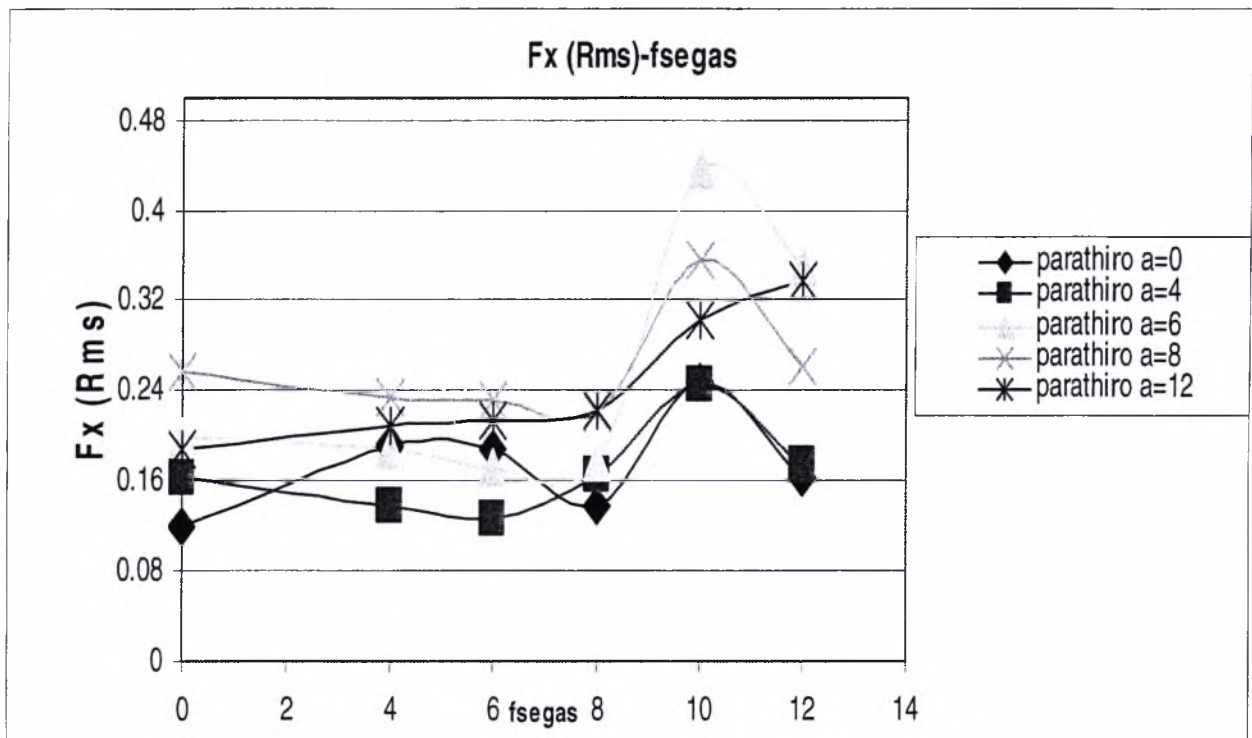
Καταρχάς για τα φάσματα των ταχυτήτων που μετρήθηκαν **στο απόρρευμα του πλέγματος** δεν μπορούμε να κάνουμε κάποιο σχόλιο καθότι δεν υπάρχει συχνότητα ταλάντωσης εδώ. Παρόλα αυτά παρατηρούμε μια ελαφρώς πιο ψηλή κορυφή από τις άλλες στην συχνότητα $f=7$ Hz για όλες τις αποστάσεις x κατάντι της ροής κάτι που ίσως δείχνει μια ιδιοσυχνότητα της τύρβης εκεί. Έπειτα στα φάσματα των ταχυτήτων που προκύπτουν **στο απόρρευμα της ροής του παραθύρου** παρατηρούμε ότι, στη **θέση $x=0$ mm** η 1^η αρμονική εμφανίζεται κανονικά σε όλες τις συχνότητες, ενώ κάνει την εμφάνισή της και η 2^η αρμονική στην $f=6$ Hz. Για $f=7$ Hz η 2^η είναι ίση με την 1^η. Για $f=8-13$ Hz η 2^η αρμονική μειώνεται συνεχώς, ενώ μετά την $f=14$ Hz δεν υπάρχει. **Στη θέση $x=125$ mm** η 2^η αρμονική εμφανίζεται πιο γρήγορα στην $f=5$ Hz. Για $f=6$ Hz η 2^η είναι ίση με την 1^η, ενώ για $f=10-15$ Hz μειώνεται συνεχώς χωρίς να εξαφανίζεται. **Στη θέση $x=250$ mm** η 2^η αρμονική εμφανίζεται στην $f=6$ Hz, ενώ μάλιστα είναι και μεγαλύτερη της πρώτης μέχρι και την συχνότητα $f=8$ Hz. Για $f=9$ και 10 Hz η 1^η και η 2^η είναι ίσες και τέλος για τις $f=11-15$ Hz η 2^η μειώνεται συνεχώς. **Στη θέση $x=375$ mm** η 2^η αρμονική εμφανίζεται στην ίδια f με την θέση $x=250$ mm ενώ παραμένει ίση με την 1^η μέχρι την $f=10$ Hz. Για τις $f=11-15$ Hz η 2^η μειώνεται συνεχώς. **Στη θέση $x=500$ mm** η 2^η αρμονική εμφανίζεται στην $f=6$ Hz. Το σημαντικό σε αυτή τη θέση είναι ότι στις συχνότητες $f=4-9$ Hz εμφανίζεται και μια τρίτη ισχυρή κορυφή με συχνότητα 3πλάσια της σέγας, όμως αυτή σβήνει στο εύρος συχνοτήτων $f=10-15$ Hz.

Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται τα φάσματα των ταχυτήτων που ελήφθησαν στο απόρρευμα **της συνδυασμένης ροής παραθύρου και πλέγματος** παρατηρούμε ότι, στη **θέση $x=0$ mm** η 2^η αρμονική κάνει την εμφάνισή της στην $f=4$ Hz. Για $f=8$ και 9 Hz η 2^η είναι ίση με την 1^η. Για $f=10-15$ Hz η 2^η αρμονική μειώνεται συνεχώς. **Στη θέση $x=125$ mm** η 2^η αρμονική εμφανίζεται πιο αργά στην $f=6$ Hz. Για $f=7$ Hz η 2^η είναι μεγαλύτερη από την 1^η, ενώ για $f=8-15$ Hz μειώνεται συνεχώς. **Στη θέση $x=250$ mm** η 2^η αρμονική εμφανίζεται στην $f=3$ Hz. Για $f=5-7$ Hz η 2^η είναι μεγαλύτερη από την 1^η, ενώ για $f=8-9$ Hz είναι ίσες. Τέλος για τις $f=10-15$ Hz η 2^η μειώνεται συνεχώς. **Στη θέση**

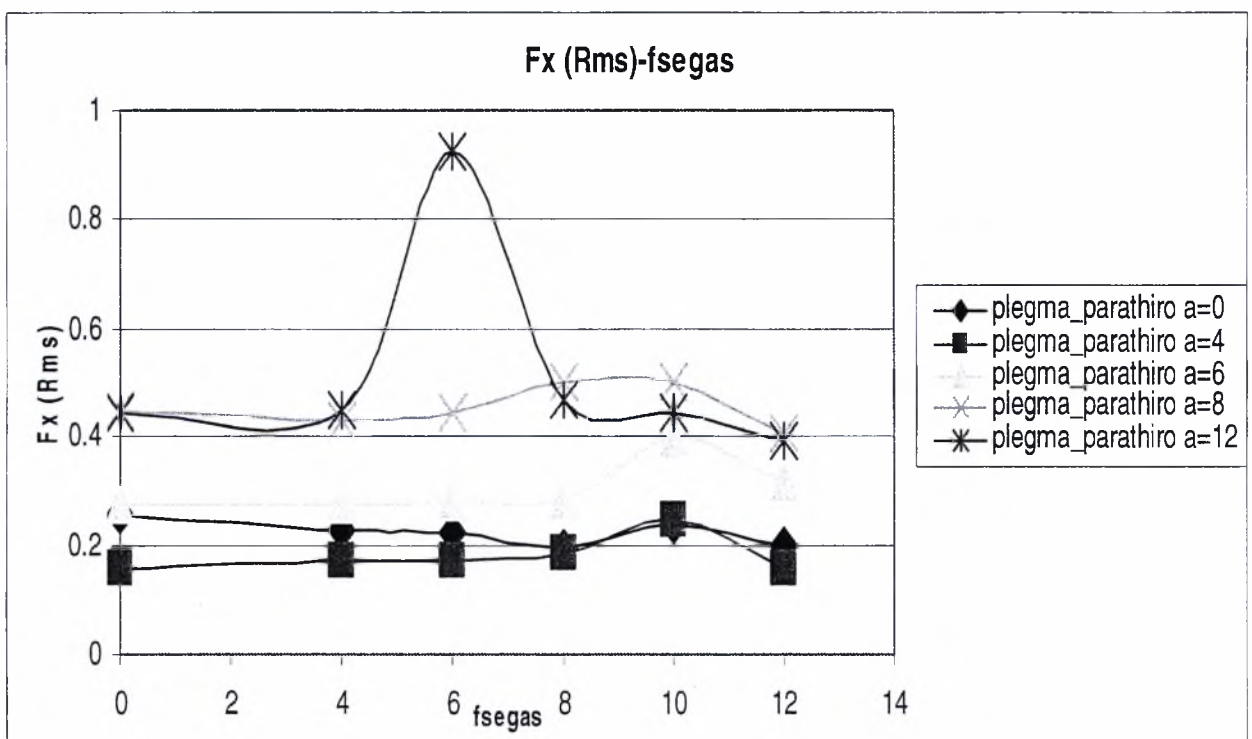
$x=375$ mm η 2^η αρμονική εμφανίζεται καθαρά στην $f=8$ Hz. Για τις $f=5-7$, πριν ακόμη εμφανιστεί η 2^η αρμονική παρατηρούμε και μια ακόμη ισχυρή κορυφή της οποίας η συχνότητα είναι περίπου 20 Hz. Εξαιτίας όμως της συχνότητας της είναι δύσκολο να είναι η 2^η αρμονική. Τέλος η 2^η από την εμφάνισή της μέχρι την $f=8$ Hz μειώνεται συνεχώς. **Στη θέση $x=500$ mm** η 2^η αρμονική εμφανίζεται στην $f=4$ Hz και είναι μεγαλύτερη της πρώτης μέχρι την $f=5$ Hz. Τέλος σε αυτή τη θέση στις συχνότητες $f=7-15$ Hz η 2^η αρμονική έχει σχεδόν σταθερή.

4.3.3 Διαγράμματα Δυνάμεων

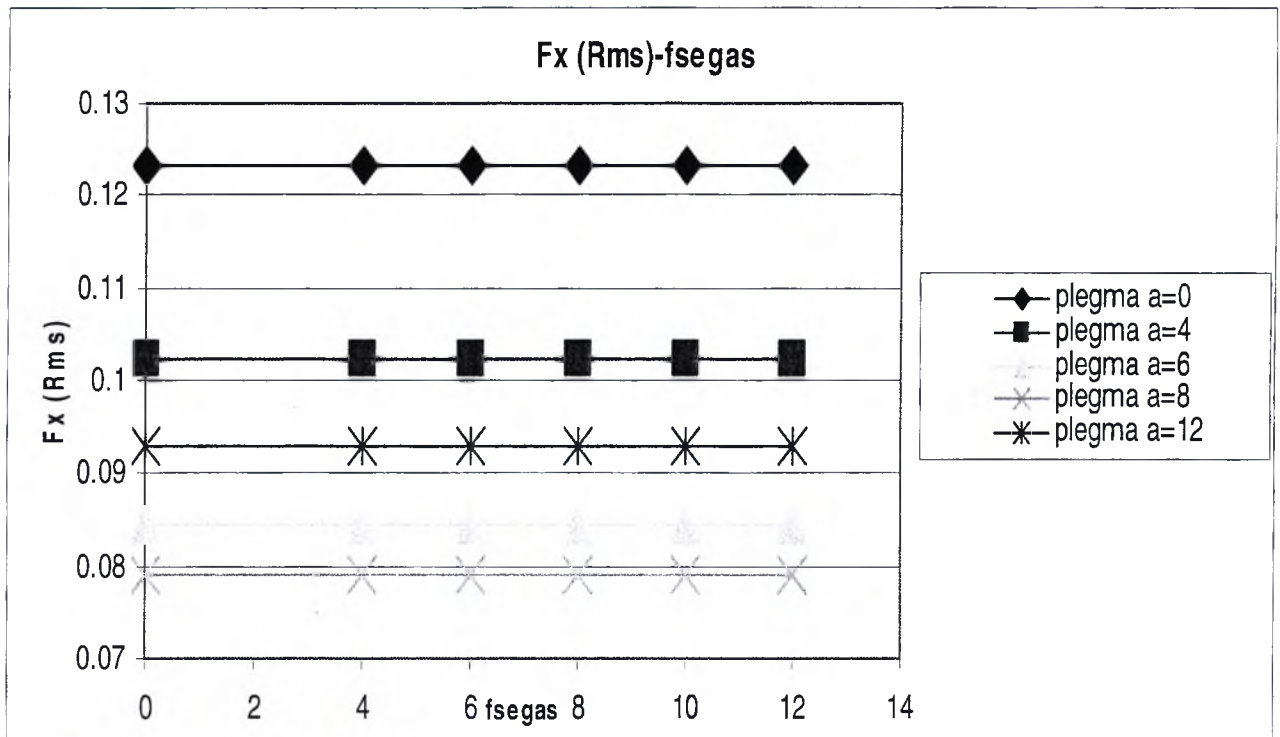
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) που αναπτύσσονται πάνω σε πτέρυγα χορδής $c=125$ mm και μετρήθηκαν κατά την δεύτερη φάση των πειραμάτων. Όπως προαναφέρθηκε έγινε η μέτρηση των δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) που αναπτύσσονται πάνω σε πτέρυγα χορδής $c=125$ mm η οποία τοποθετήθηκε στο απόρευμα τόσο της ημιτονοειδούς ροής όσο και μιας συνδυασμένης ροής που προκύπτει με την προσθήκη τύρβης στην παραπάνω ροή. Επίσης μετρήθηκαν οι παραπάνω δυνάμεις μόνο με την επίδραση της τύρβης. Τέλος μετρήθηκαν οι παραπάνω δυνάμεις με την κενή σήραγγα, δηλαδή χωρίς να υπάρχει σε αυτή το παράθυρο και το πλέγμα για να έχουμε ένα σημείο αναφοράς. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η εξάρτηση των δυνάμεων από την συχνότητα διαταραχής (συχνότητα σέγας), τόσο ως προς το είδος της ροής στο απόρευμα της οποίας λαμβάνονται οι μετρήσεις, όσο και ως προς την γωνία του πτερυγίου ως προς τον οριζόντιο άξονα x .



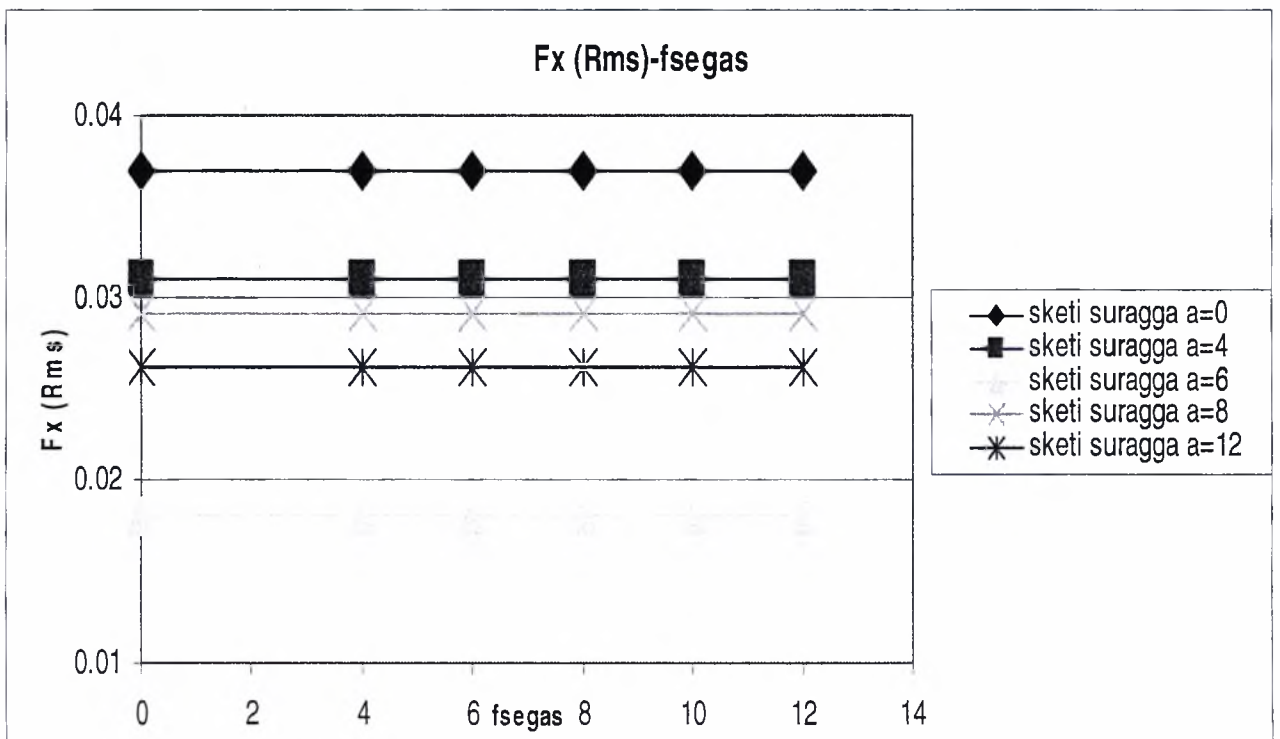
Διάγραμμα 4.42: Εξάρτηση της δύναμης F_x (Drag)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρευμα ροής πίσω από παράθυρο για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).



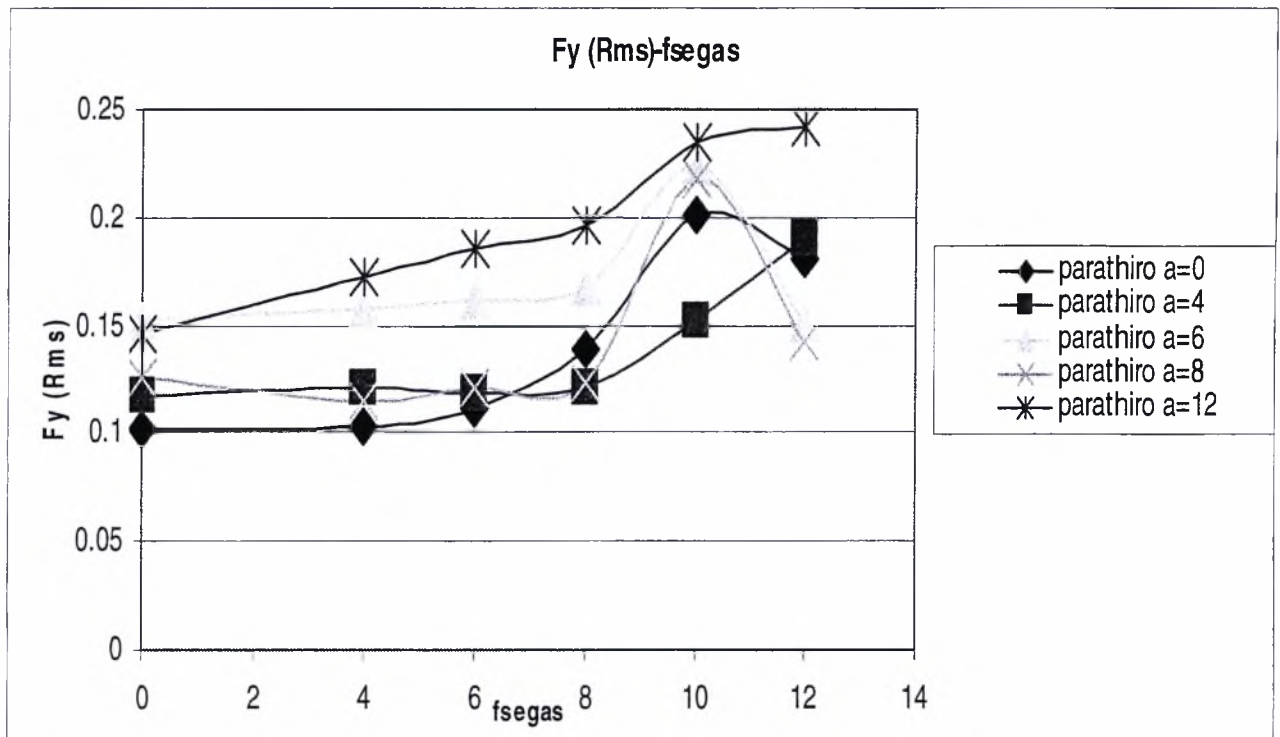
Διάγραμμα 4.43: Εξάρτηση της δύναμης F_x (Drag)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρευμα συνδιασμένης ροής παράθυρο και πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).



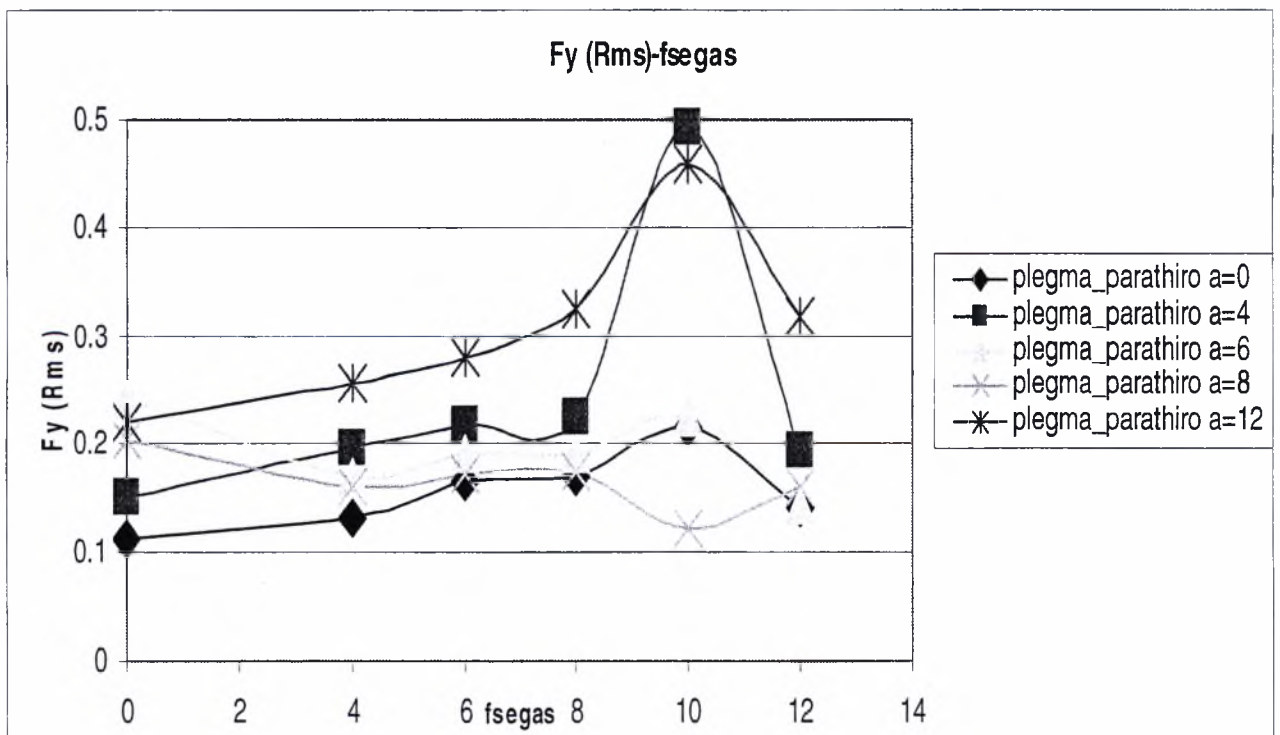
Διάγραμμα 4.44: Εξάρτηση της δύναμης F_x (Drag)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα ροής πίσω από πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $a=0, 4, 6, 8, 12$ (ο).



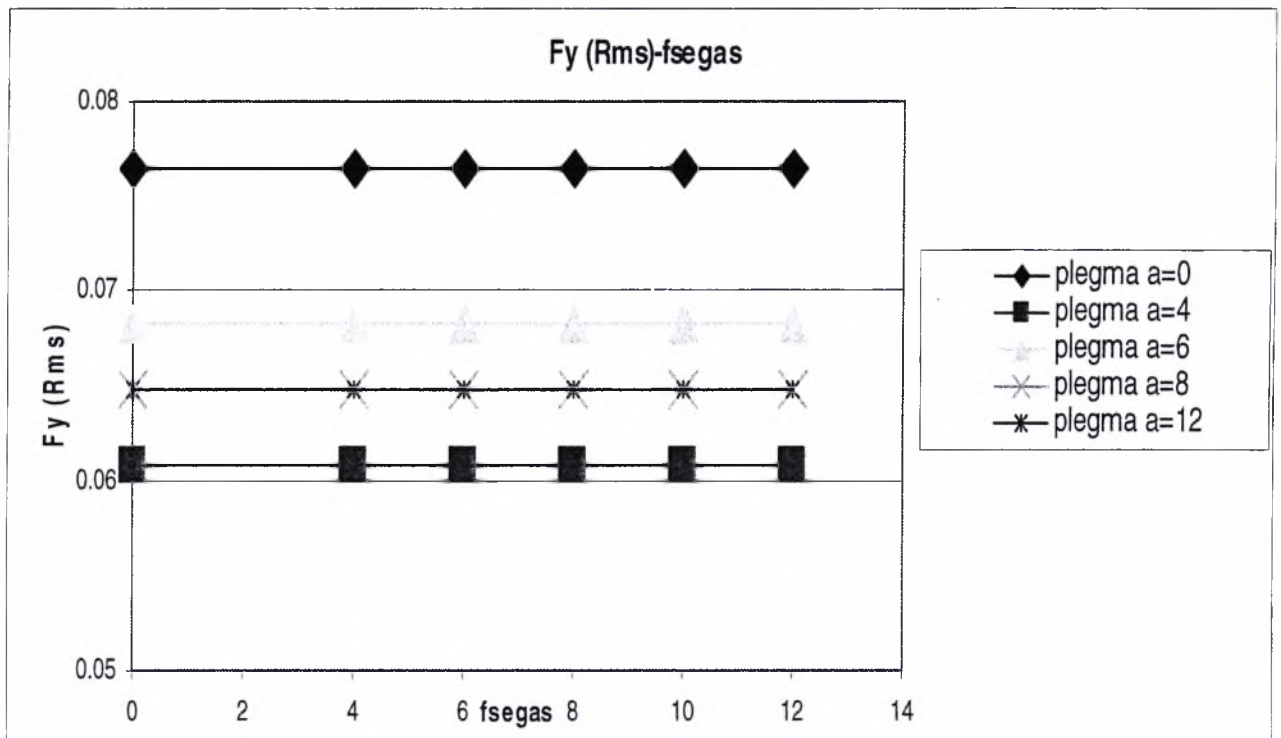
Διάγραμμα 4.45: Εξάρτηση της δύναμης F_x (Drag)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) σε κενή σήραγγα για γωνίες πτερυγίου $a=0, 4, 6, 8, 12$ (ο).



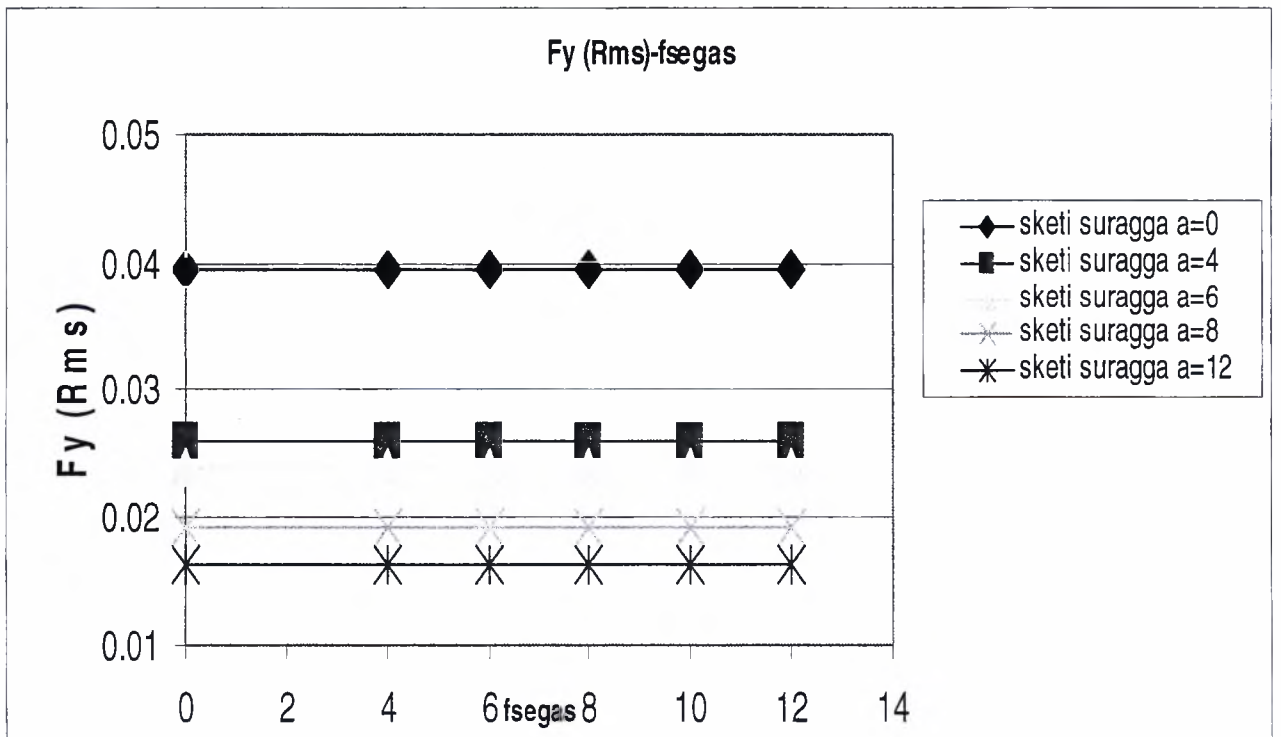
Διάγραμμα 4.46: Εξάρτηση της δύναμης F_y (Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα ροής πίσω από παράθυρο για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6,8,12$ (ο).



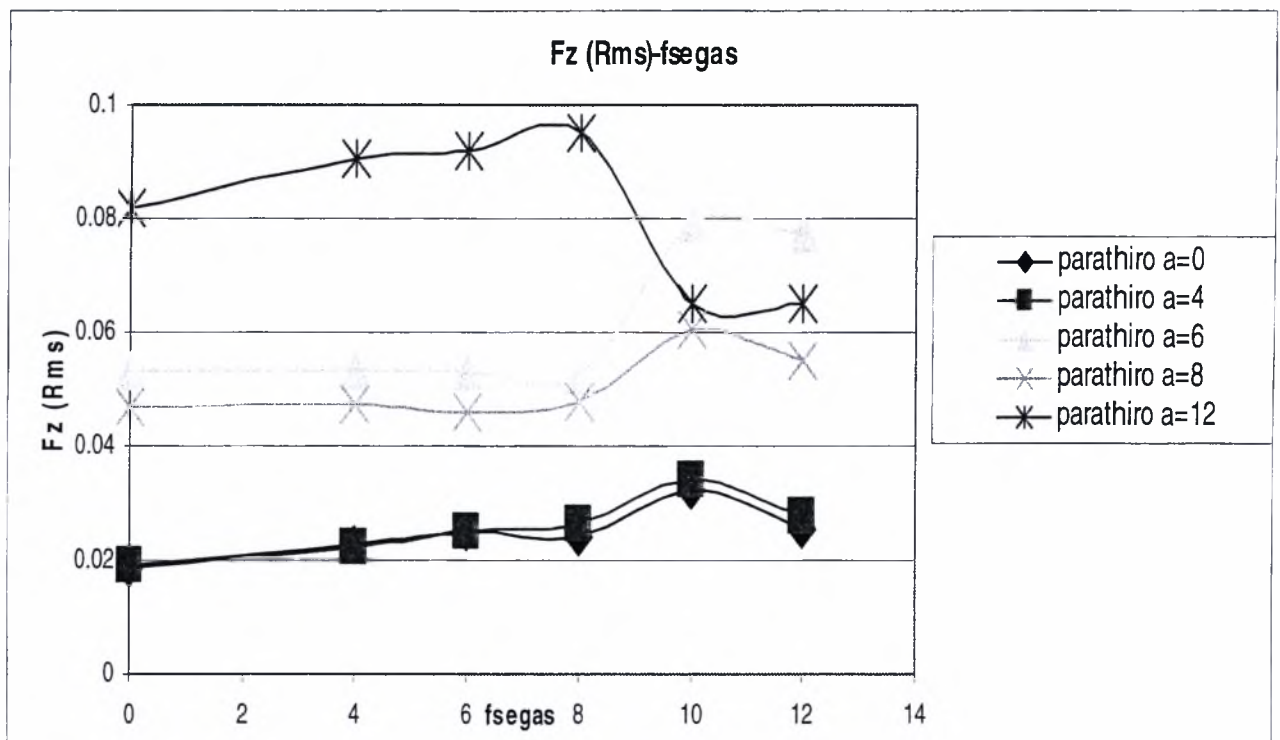
Διάγραμμα 4.47: Εξάρτηση της δύναμης F_y (Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα συνδιααμμένης ροής παράθυρο και πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6,8,12$ (ο).



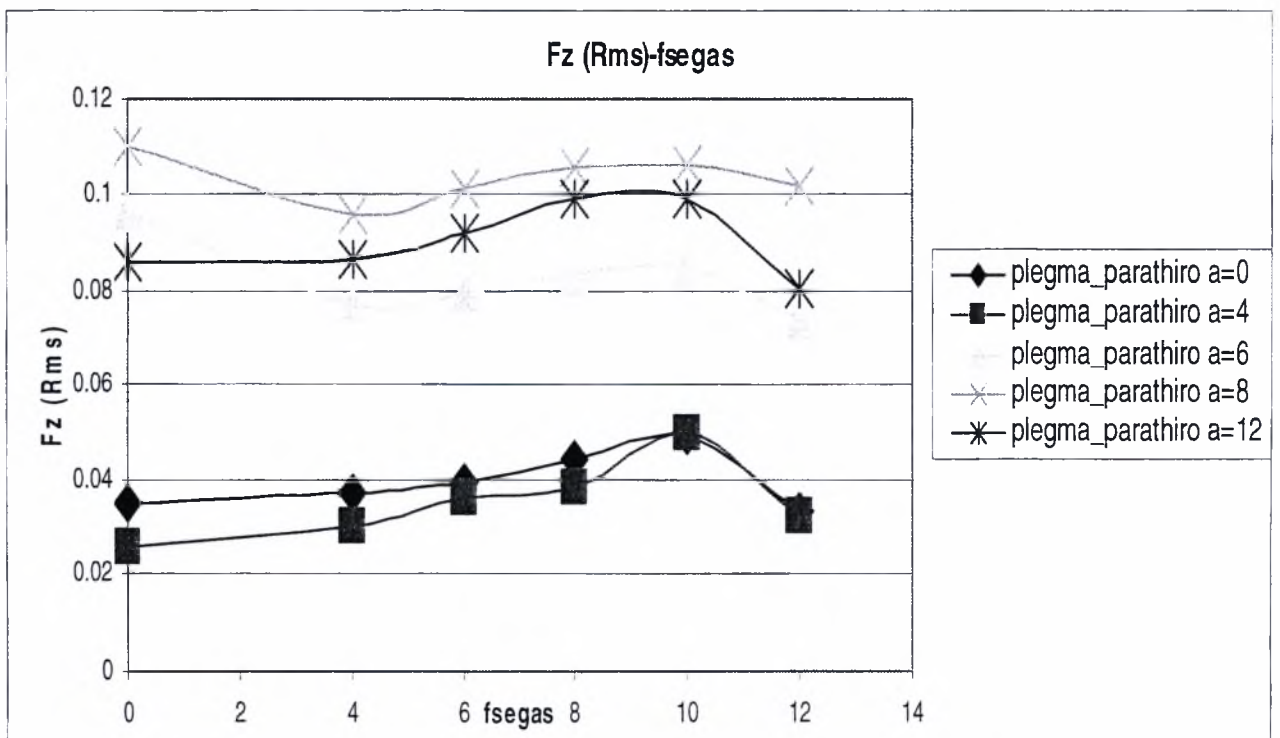
Διάγραμμα 4.48: Εξάρτηση της δύναμης F_y (Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα ροής πίσω από πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).



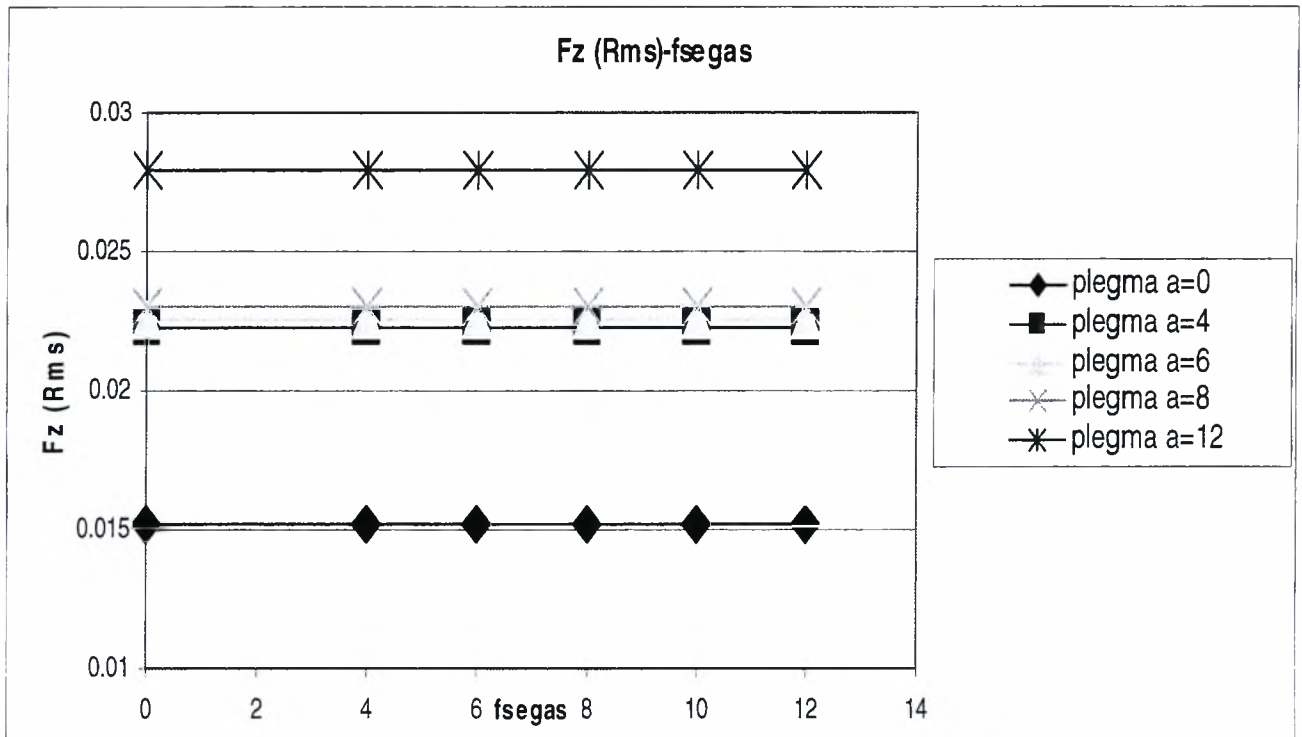
Διάγραμμα 4.49: Εξάρτηση της δύναμης F_y (Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) σε κενή σήραγγα για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).



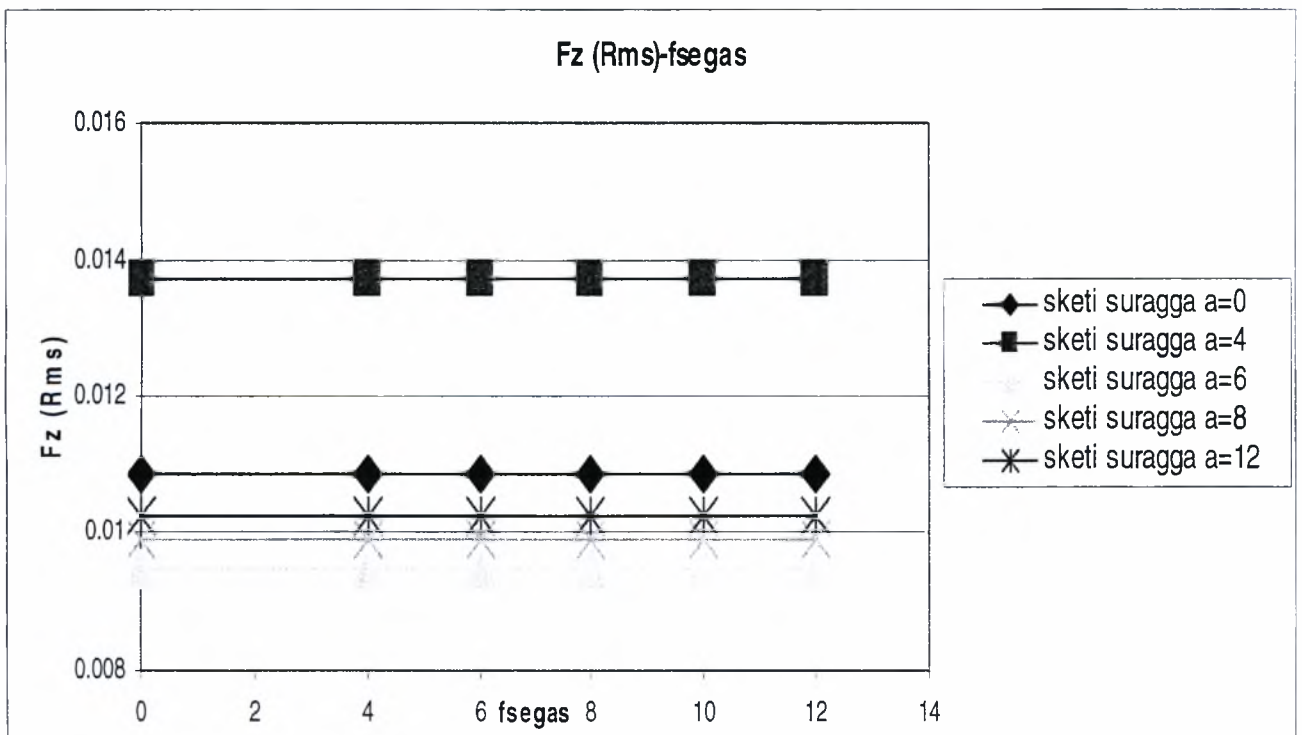
Διάγραμμα 4.50: Εξάρτηση της δύναμης F_z (Lift)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα ροής πίσω από παράθυρο για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).



Διάγραμμα 4.51: Εξάρτηση της δύναμης F_z (Lift)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα συνδιασαμμένης ροής παράθυρο και πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).



Διάγραμμα 4.52: Εξάρτηση της δύναμης F_z (Lift)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα ροής πίσω από πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6,8,12$ (ο).



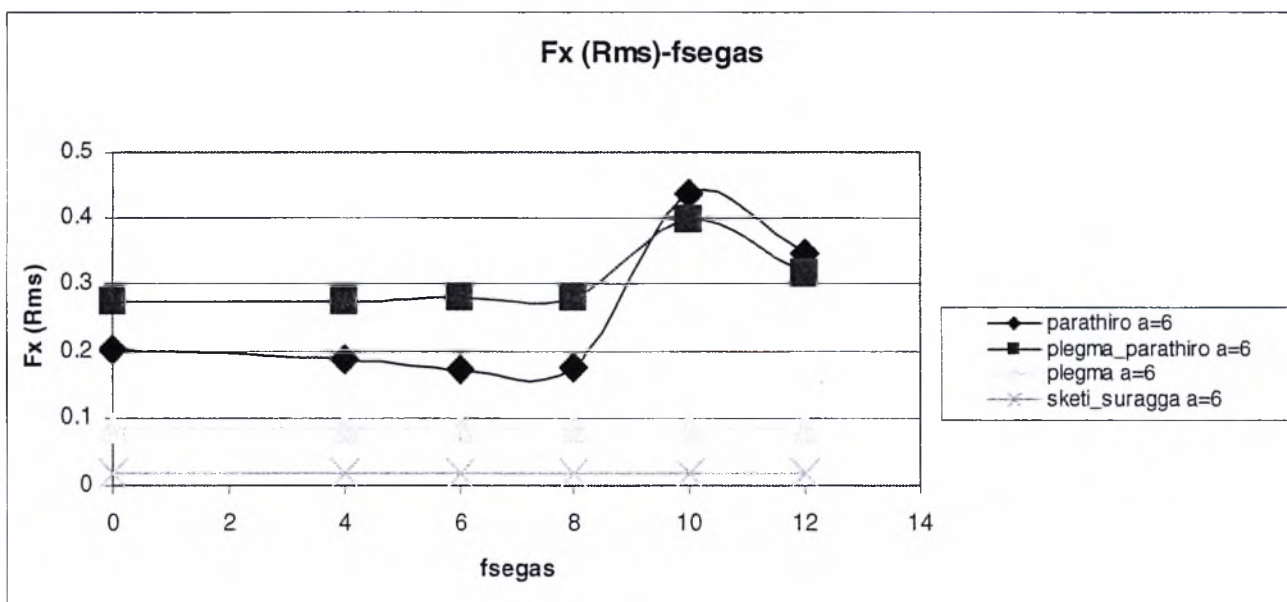
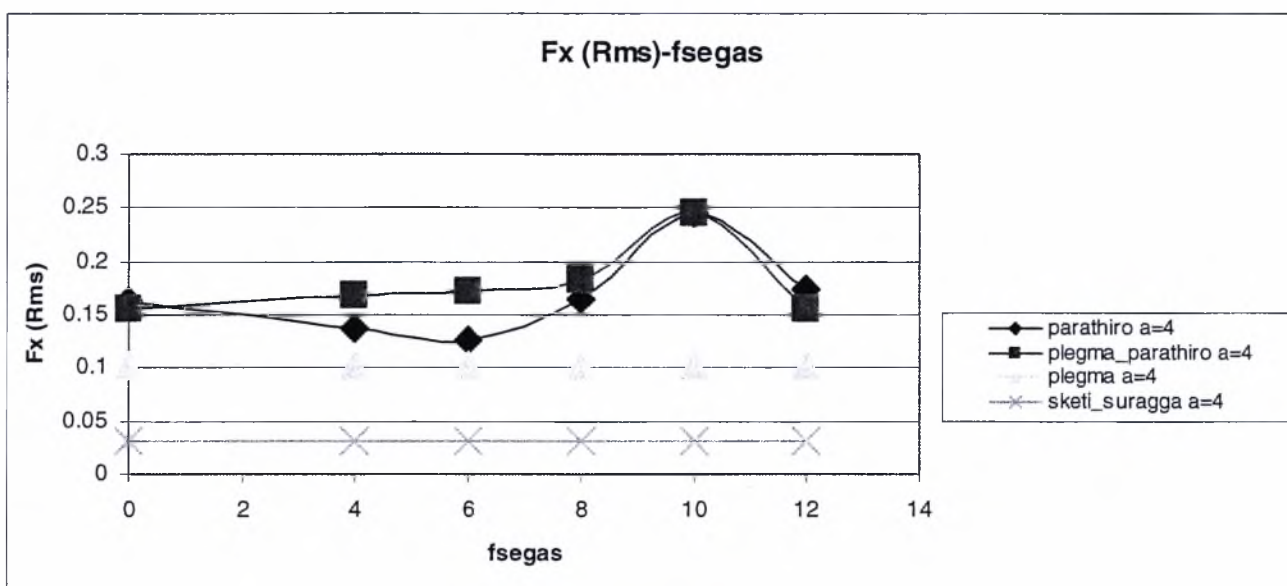
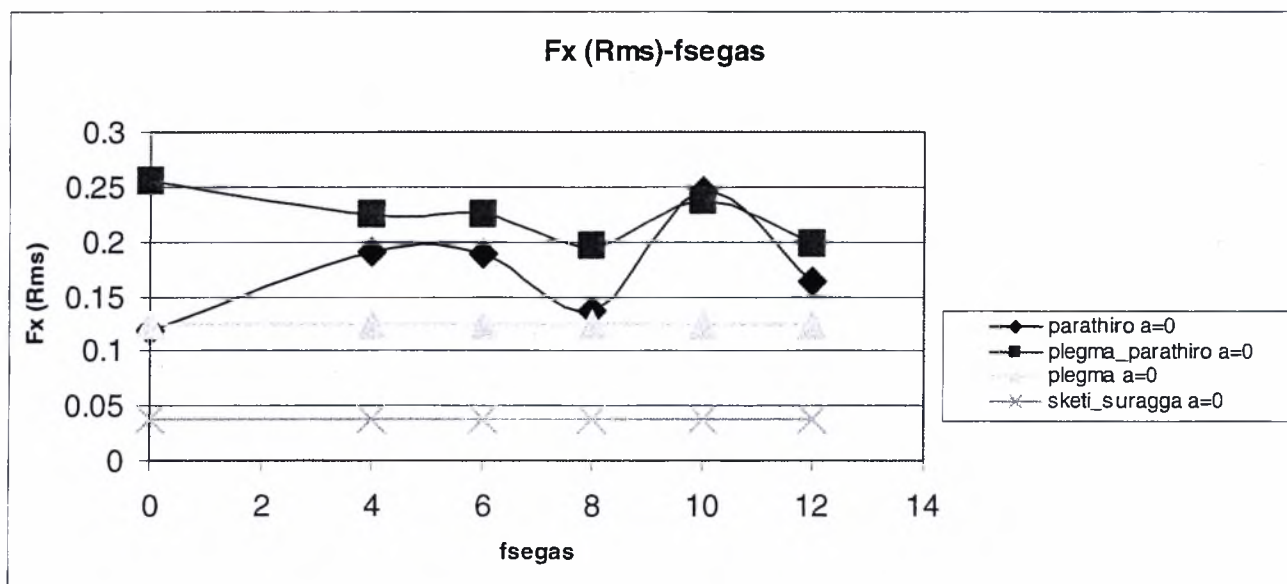
Διάγραμμα 4.53: Εξάρτηση της δύναμης F_z (Lift)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) σε κενή σήραγγα για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6,8,12$ (ο).

Από την μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων καταλήγουμε στα εξής: Στο διάγραμμα 4.42 βλέπουμε ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε **μόνο το παράθυρο**, όσο αυξάνεται η γωνία του πτερυγίου τόσο αυξάνεται και η τιμή της **δύναμης F_x (Drag)**. Επίσης παρατηρούμε ότι η τιμή της F_x εμφανίζει ελαφρώς αυξητική τάση για όλες τις συχνότητες της σέγας, ενώ υπάρχει μια μεγάλη αύξηση για $f=10$ Hz που ίσως οφείλεται σε κάποιο συντονισμό. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε **το παράθυρο σε συνδυασμό με το πλέγμα** (διάγραμμα 4.43) παίρνουμε παρόμοιες τιμές για όλες τις συχνότητες με εξαίρεση πάλι την $f=10$ Hz. Επίσης στο ίδιο διάγραμμα για $f=6$ Hz και για γωνία $\alpha=12^\circ$ εμφανίζεται μια ασυνήθης μεγάλη κορυφή. Στο διάγραμμα 4.44 βλέπουμε αυτό που περιμέναμε, δηλαδή σταθερές τιμές της F_x για όλες τις συχνότητες μιας και το **πλέγμα** είναι ανεξάρτητο από την συχνότητα της σέγας. Παρόλα αυτά για αυτή την περίπτωση η F_x έχει μεγάλη γωνία $\alpha=0^\circ$ τιμή ενώ για τις γωνίες $\alpha=4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ η τιμή της F_x μειώνεται. Τέλος για γωνία $\alpha=12^\circ$ αυξάνεται πάλι. Στην περίπτωση τώρα που ελήφθησαν οι τιμές της F_x χωρίς να τοποθετήσουμε **τίποτα μέσα στην σήραγγα** (διάγραμμα 4.45) είδαμε ότι καθώς αυξάνει η γωνία πτερυγίου, η τιμή της F_x μειώνεται με εξαίρεση την γωνία $\alpha=6^\circ$, όπου η F_x εμφανίζει την μικρότερη τιμή της σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες που έγιναν μετρήσεις.

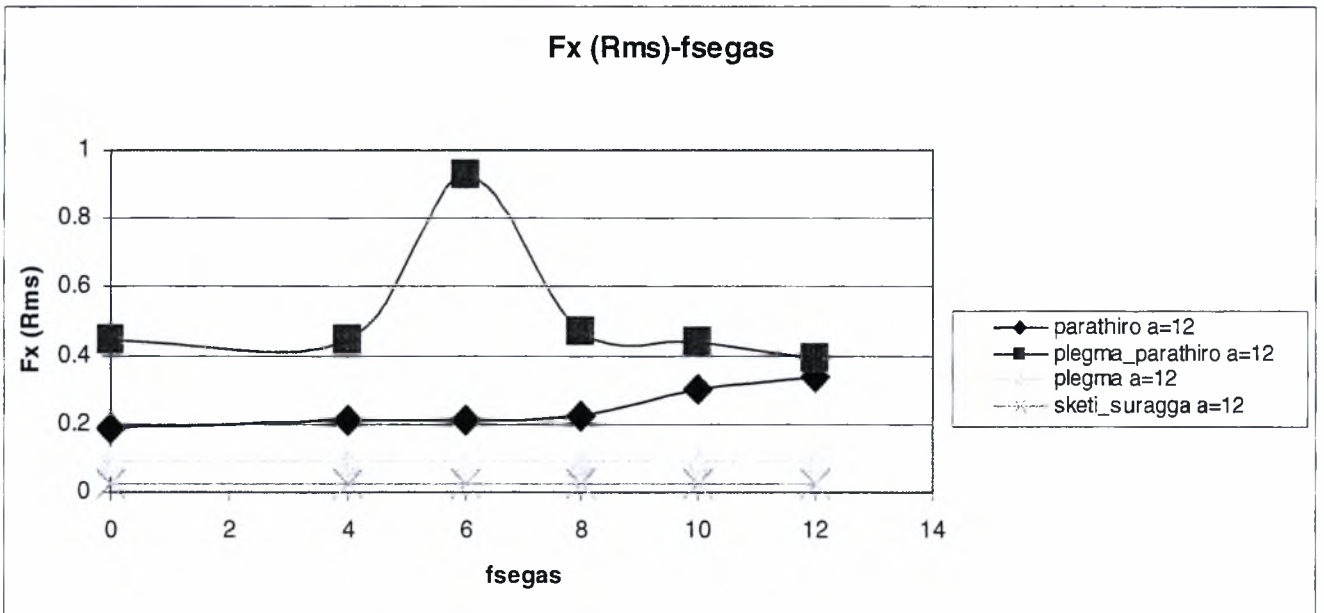
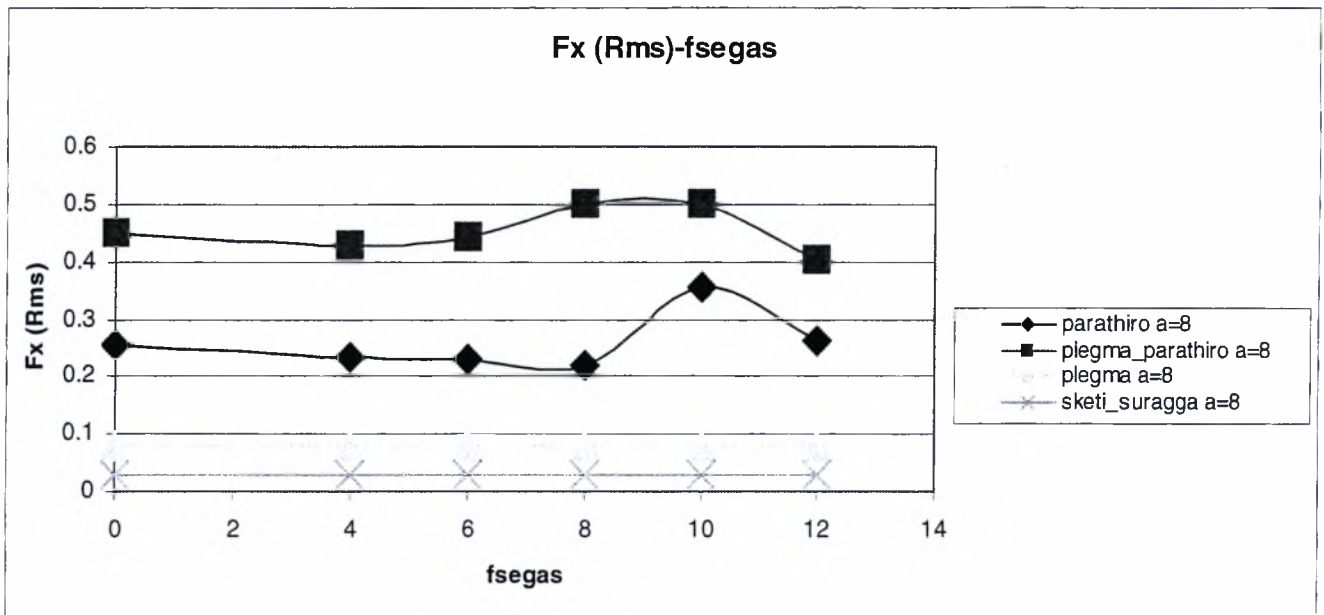
Προχωρώντας τώρα στο διάγραμμα 4.46 όπου απεικονίζεται η τιμή της **δύναμη F_y** που μετρήσαμε στο απόρευμα του **παραθύρου** παρατηρούμε ότι για όλες τις γωνίες και για τις συχνότητες $f=6-10$ Hz η τιμή της F_y αυξάνεται διαρκώς, εμφανίζοντας μέγιστο στην $f=10$ Hz και έπειτα μειώνεται ξανά. Ακόμη για γωνία $\alpha=4^\circ$ στις συχνότητες $f=8-12$ Hz υπάρχει διαρκής αύξηση της F_y με την μέγιστη τιμή της να εμφανίζεται στην $f=12$ Hz. Στο διάγραμμα 4.47 όπου απεικονίζεται η τιμή της F_y που μετράμε στο απόρευμα της συνδυασμένης **ροής παραθύρου και πλέγματος**, βλέπουμε για όλες τις γωνίες να αυξάνεται η F_y με την αύξηση της συχνότητας, εμφανίζοντας μέγιστο στην $f=10$ Hz πέφτοντας πάλι στην $f=12$ Hz. Ακόμη για γωνία $\alpha=8^\circ$ με την αύξηση της συχνότητας αποκτά μια σταθερή τιμή, ενώ για $f=10$ Hz αντί να εμφανίζει την μέγιστη της τιμή, εμφανίζει την ελάχιστη. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το **πλέγμα** (διάγραμμα 4.48) η τιμή της F_y μειώνεται με την αύξηση της γωνίας. Μάλιστα για τις γωνίες $\alpha=8^\circ, 12^\circ$ η F_y εμφανίζει ίδιες τιμές. Τέλος στην περίπτωση που έχουμε **σκέτη την αεροσήραγγα** (διάγραμμα 4.49), η τιμή της F_y μειώνεται με την αύξηση της γωνίας.

Συνεχίζοντας τώρα στο διάγραμμα 4.50 όπου αναπαρίσταται η δύναμη **F_z (Lift)** στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε **μόνο το παράθυρο**, παρατηρούμε ότι για όλες τις

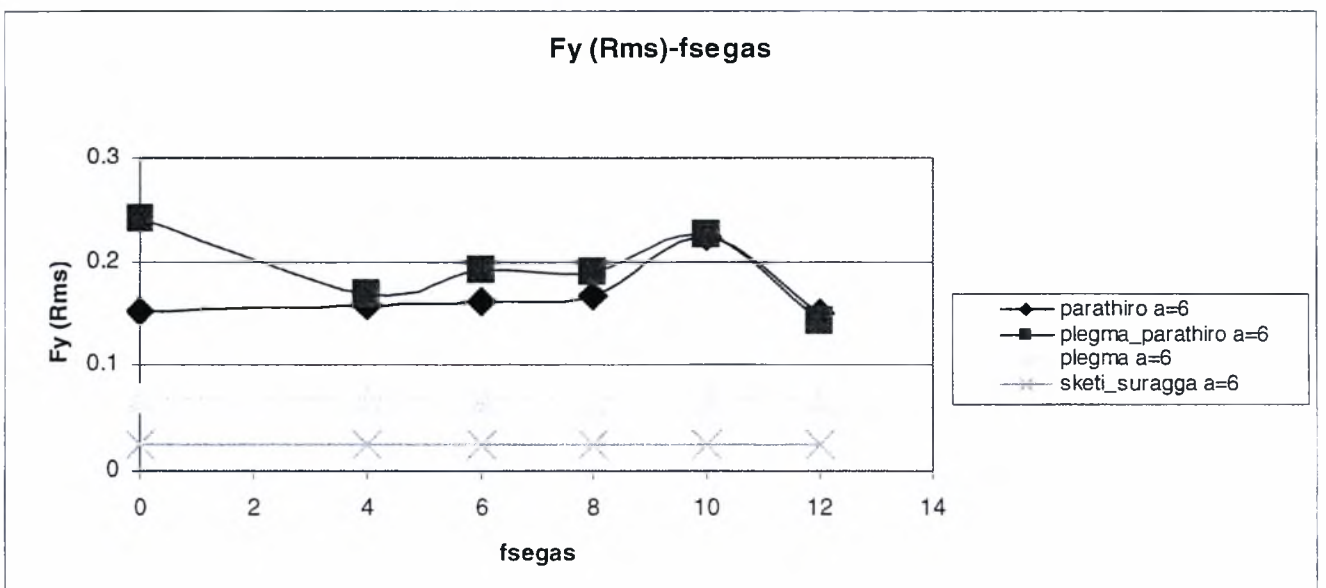
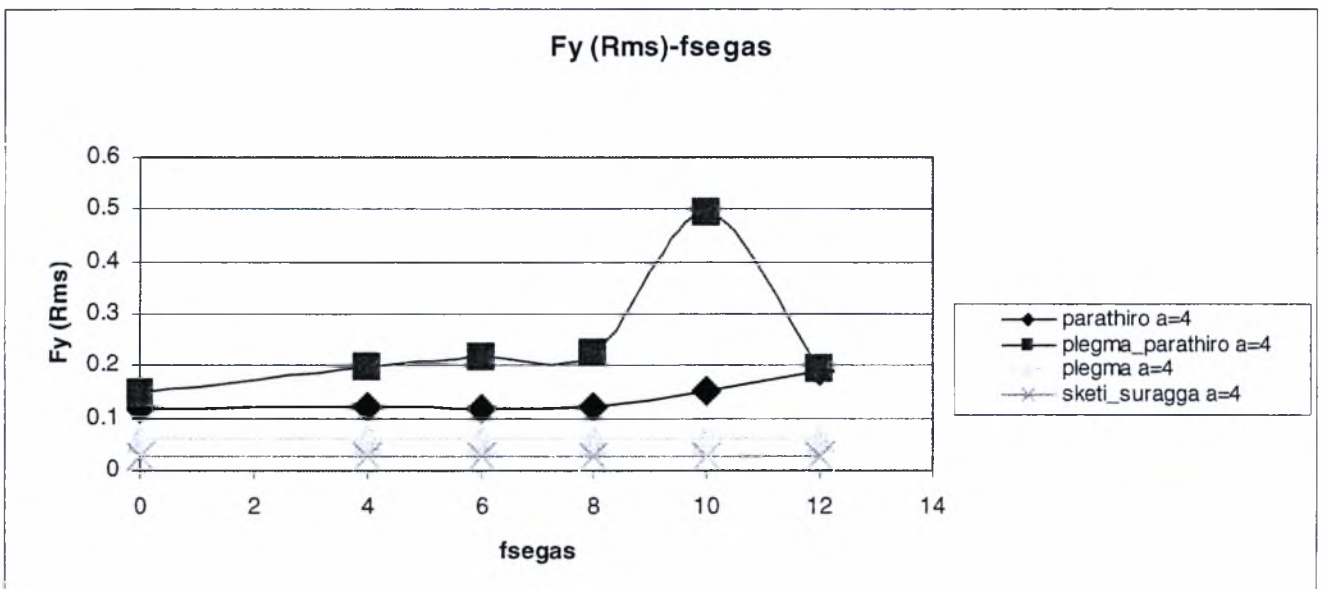
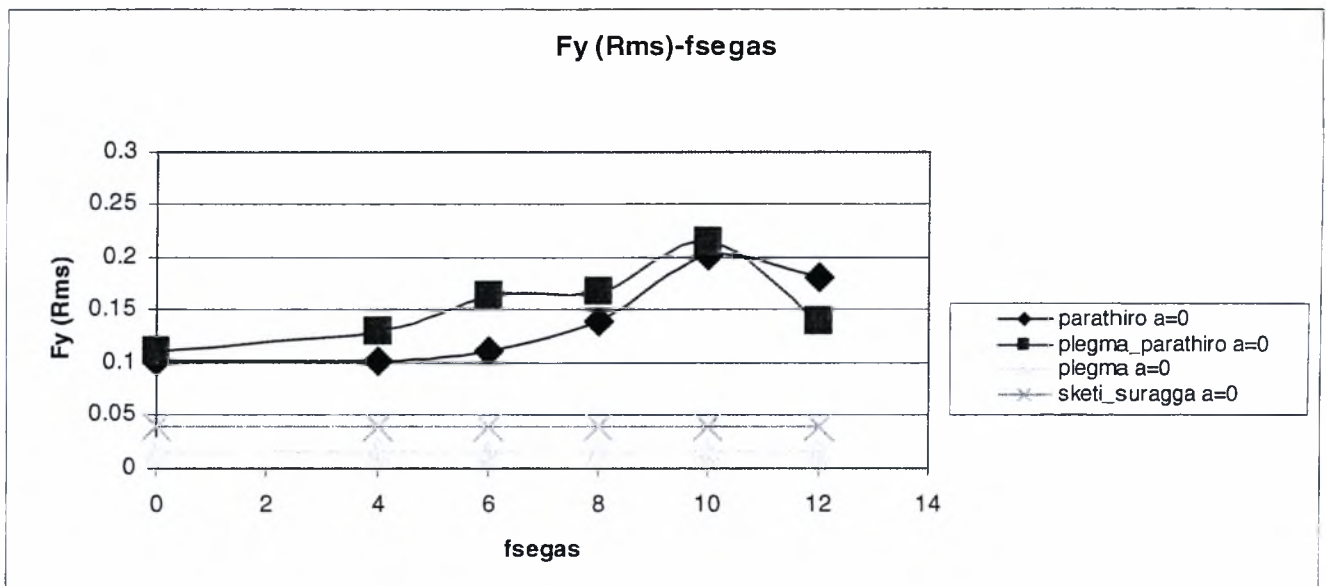
γωνίες, όσο αυξάνεται η συχνότητα, αυξάνεται ελαφρώς η F_z και στη συχνότητα $f=10$ Hz εμφανίζει την μέγιστη τιμή της. Για γωνία $\alpha=12^\circ$ στις συχνότητες $f=0-8$ Hz η F_z εμφανίζει ανοδική πορεία, ενώ στις συχνότητες $f=10-12$ Hz η F_z πέφτει απότομα και σταθεροποιείται. Στο διάγραμμα 4.51 όπου απεικονίζεται η τιμή της F_z που μετράμε στο απόρευμα της **συνδυασμένης ροής παραθύρου και πλέγματος**, βλέπουμε δυο διαφορετικές περιοχές. Στην πρώτη περιοχή $\alpha=0^\circ, 4^\circ$ η τιμή της F_z αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας και στην $f=10$ Hz εμφανίζει την μέγιστη τιμή της. Στην δεύτερη περιοχή $\alpha=6^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ η F_z υπερδιπλασιάζεται σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στις μικρότερες γωνίες για όλες τις συχνότητες. Η τάση για συνεχή άνοδο της F_z με την αύξηση της συχνότητας και εμφάνιση της μέγιστης τιμής της στην $f=10$ Hz συνεχίζεται και εδώ. Ακόμη παρατηρούμε ότι με την προσθήκη του πλέγματος στην ροή του παραθύρου παίρνουμε υπερδιπλασιασμένες τιμές σε σχέση με αυτές που παίρναμε με την χρήση μόνο του παραθύρου. Στο διάγραμμα 4.52 βλέπουμε την απεικόνιση της F_z με την **χρήση μόνο πλέγματος**. Σε αντίθεση με τις δυνάμεις F_x, F_y εδώ με την αύξηση της γωνίας του πτερυγίου, αυξάνεται και η δύναμη F_z . Επίσης για τις γωνίες $\alpha=4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ η F_z πιάνει μια σταθερή τιμή, ενώ για $\alpha=12^\circ$ αυξάνεται πάλι. Στο διάγραμμα 4.53 όπου απεικονίζεται η F_z που μετράμε σε **σκέτη σήραγγα**, για $\alpha=4^\circ$ η F_z εμφανίζει την μέγιστη τιμή της, ενώ για $\alpha=6^\circ$ πιάνει την ελάχιστη τιμή της. Για μεγαλύτερες γωνίες $\alpha=8^\circ$ και 12° η τιμή της F_z αυξάνεται πάλι χωρίς όμως να ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή για $\alpha=0^\circ$.



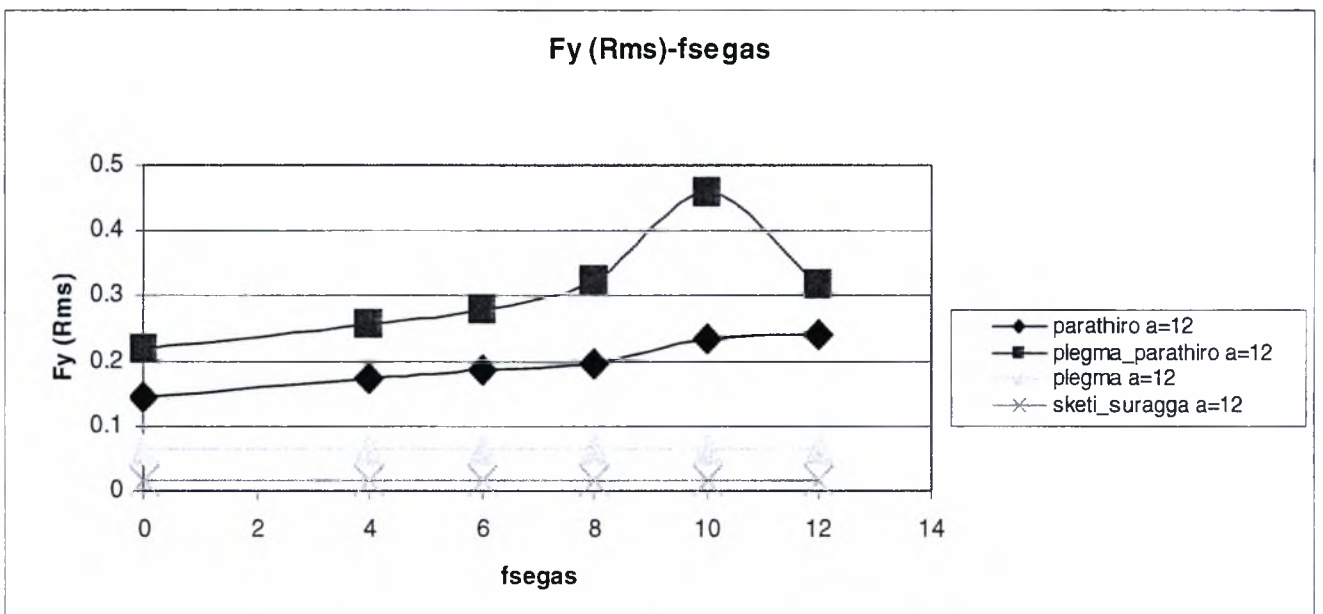
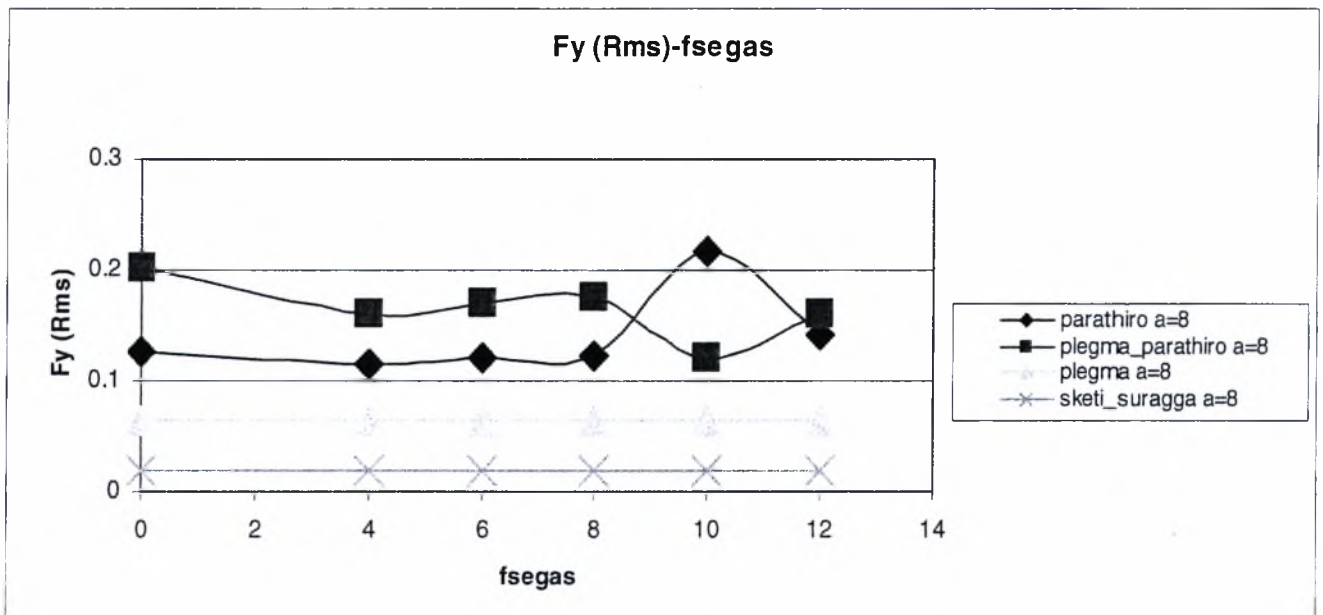
Διάγραμμα 4.54: Εξάρτηση της δύναμης F_x (Drag)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρευμα όλων των ροών για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6$ (ο)



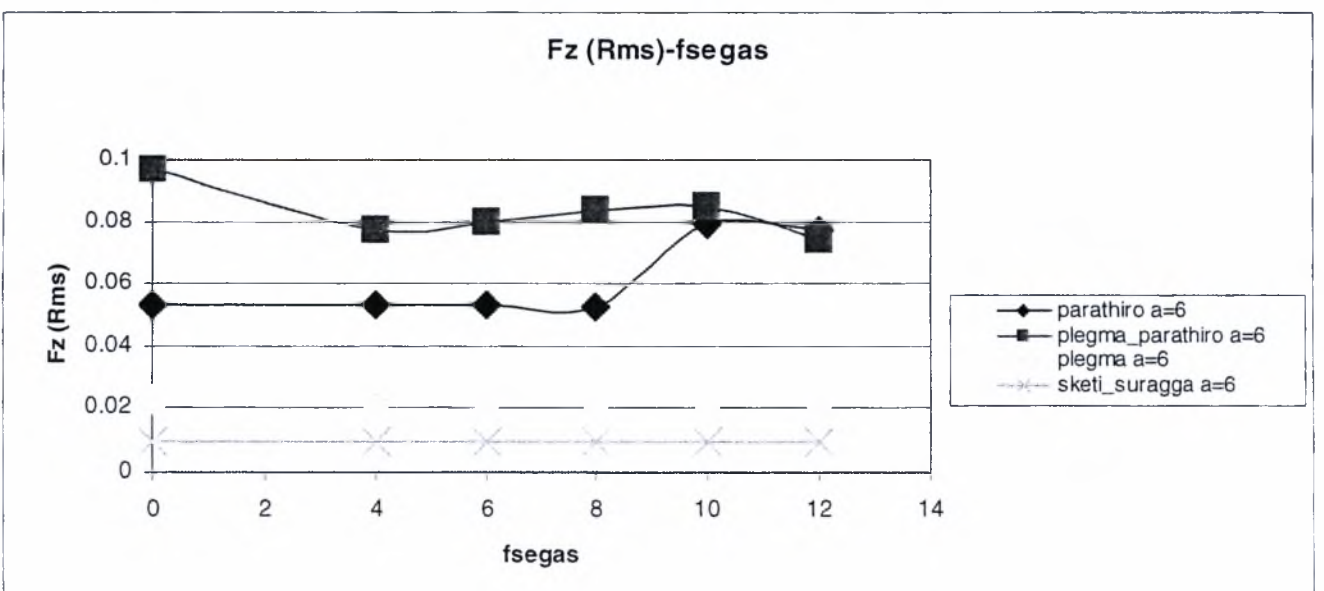
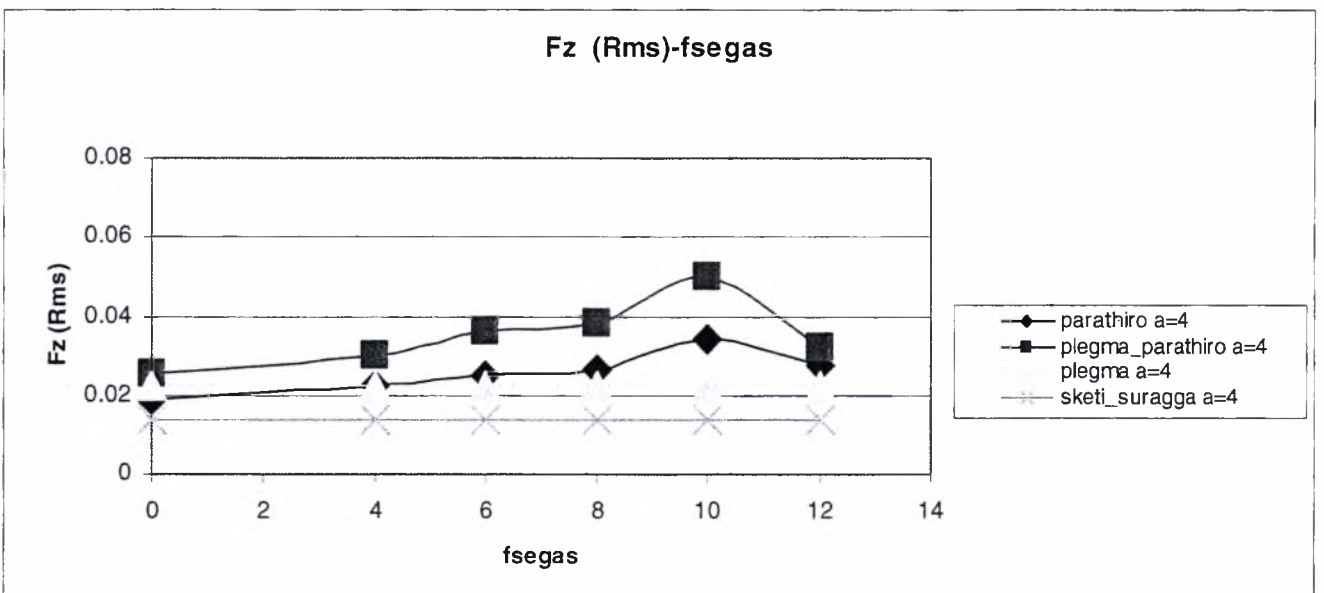
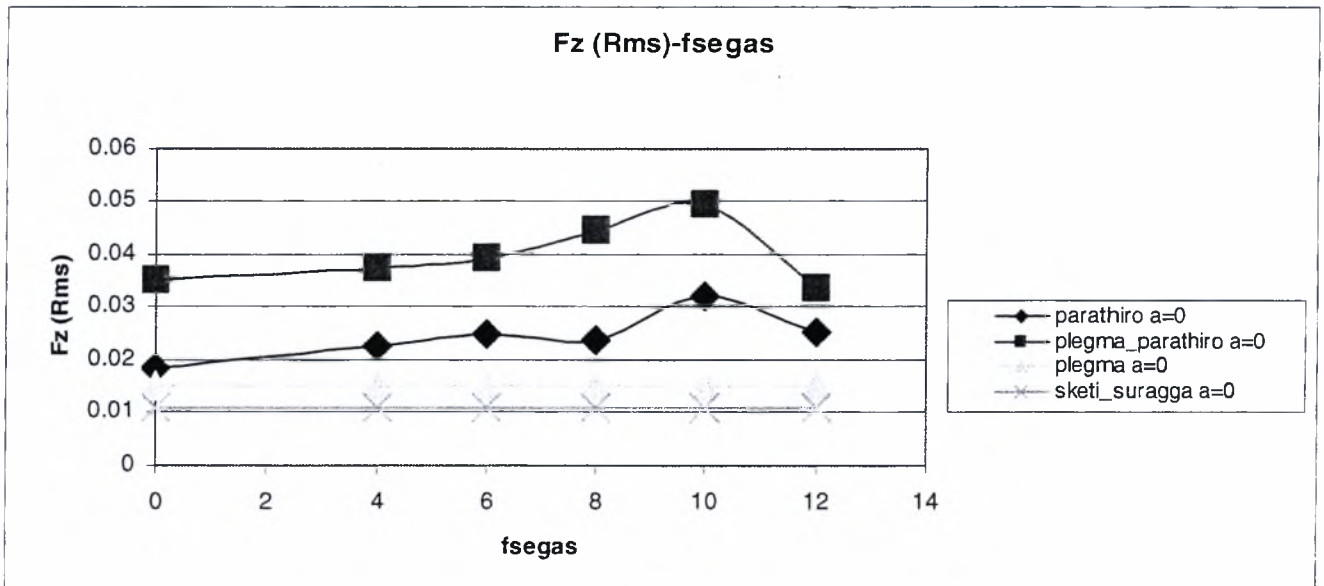
Διάγραμμα 4.55: Εξάρτηση της δύναμης F_x (Drag)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρευμα όλων των ροών για γωνίες πτερυγίου $\alpha=8,12$ (ο)



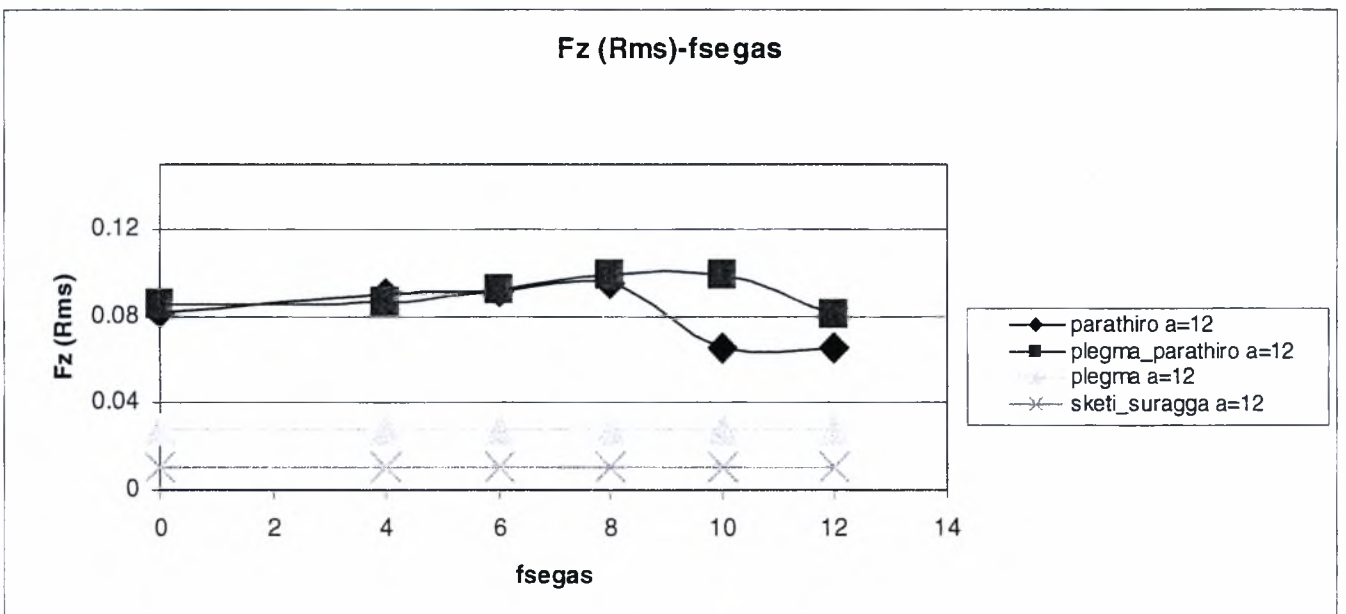
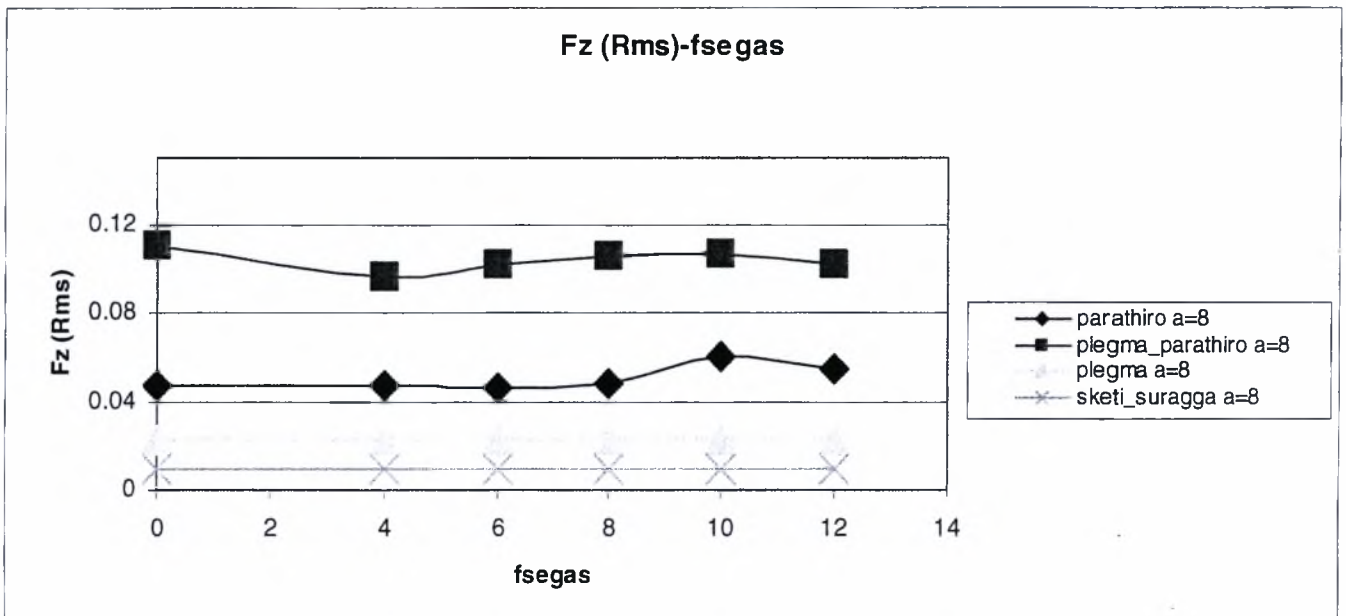
Διάγραμμα 4.56: Εξάρτηση της δύναμης F_y (Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα όλων των ροών για γωνίες περυγίου $\alpha=0,4,6$ (ο)



Διάγραμμα 4.57: Εξάρτηση της δύναμης F_y (Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρευμα όλων των ρωών για γωνίες πτερυγίου $\alpha=8,12$ (ο)



Διάγραμμα 4.58: Εξάρτηση της δύναμης F_z (Lift)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρευμα όλων των ροών για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6$ (ο)



Διάγραμμα 4.59: Εξάρτηση της δύναμης F_z (Lift)(Newton) από την συχνότητα ταλάντωσης (Hz) στο απόρρευμα όλων των ροών για γωνίες πτερυγίου $\alpha=8,12$ (ο)

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζονται οι τιμές των δυνάμεων F_x , F_y , F_z σε σχέση με το είδος της ροής που αναπτύσσεται κάθε φορά που τις μετράμε. Καταρχάς στο διάγραμμα 4.54 βλέπουμε ότι η ελάχιστη τιμή της F_x εμφανίζεται στην περίπτωση που έχουμε σκέτη σήραγγα. Έπειτα με την προσθήκη του πλέγματος στην σήραγγα η F_x αυξάνεται. Στο ίδιο διάγραμμα και για μικρές γωνίες $\alpha=0^\circ$ και 4° η δύναμη που μετράμε στη ροή που δημιουργείται από το πλέγμα και από την συνδυασμένη (πλέγμα και παράθυρο), εμφανίζουν πολύ κοντινές τιμές, με τις τιμές της F_x στο πλέγμα και παράθυρο να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες και η μέγιστη να εμφανίζεται στην $f=10$ Hz. Στο ίδιο διάγραμμα για γωνία $\alpha=6^\circ$ στην περιοχή $f=0-8$ Hz η F_x πίσω από την συνδυασμένη ροή (πλέγμα και παράθυρο) εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές της F_z από ότι στην περίπτωση που υπάρχει μόνο το παράθυρο. Ενώ για $f=10-12$ Hz για την F_z συμβαίνει το αντίθετο. Έπειτα για γωνία $\alpha=8^\circ$ οι τιμές της F_x πίσω από το πλέγμα και παράθυρο διπλασιάζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου, ενώ εμφανίζουν μέγιστο στην $f=10$ Hz. Τέλος πάντα στο ίδιο διάγραμμα για γωνία $\alpha=12^\circ$ πίσω από το πλέγμα και παράθυρο οι τιμές της F_x διπλασιάζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου, με εξαίρεση τις συχνότητες $f=10-12$ Hz που οι τιμές είναι σχεδόν ίσες. Ένα τεράστιο μέγιστο που εμφανίζεται στο πλέγμα παράθυρο για $f=6$ Hz οφείλεται μάλλον σε πειραματικό σφάλμα.

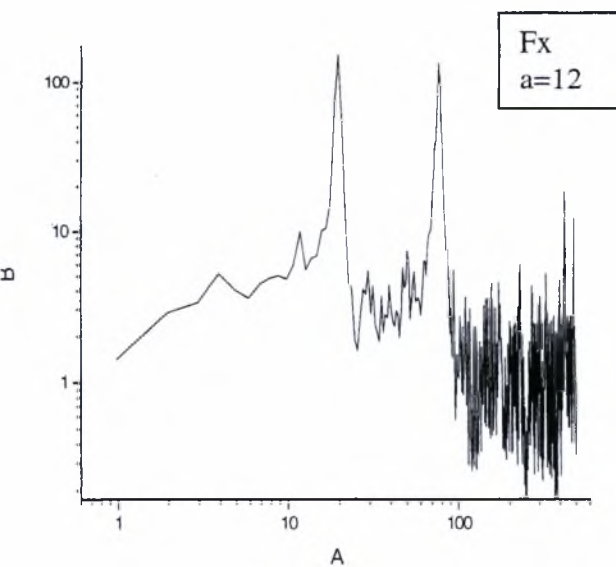
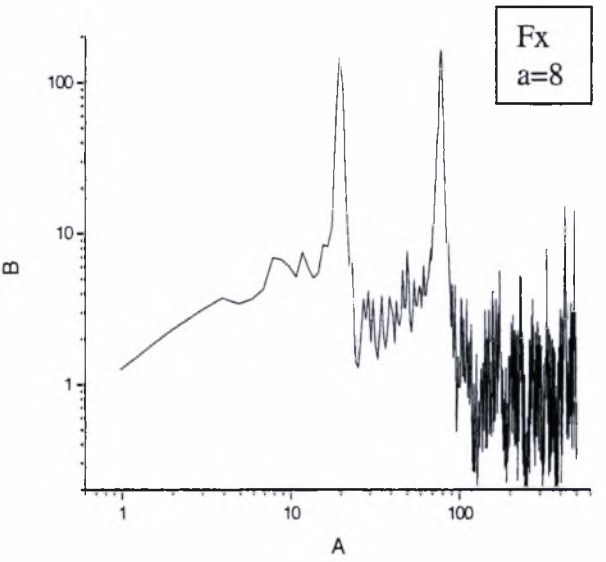
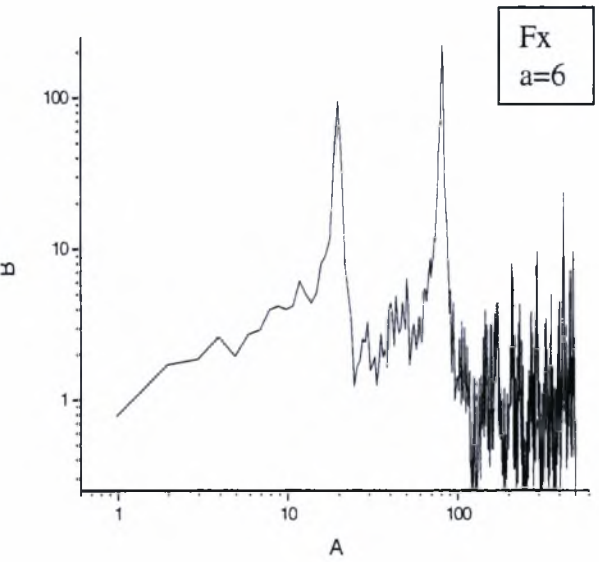
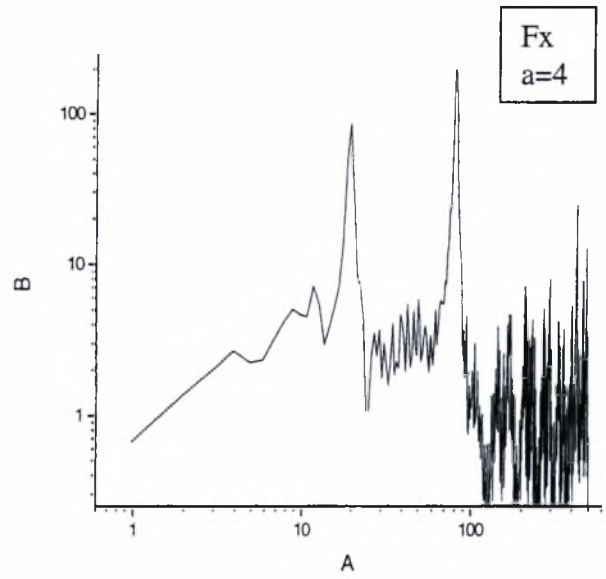
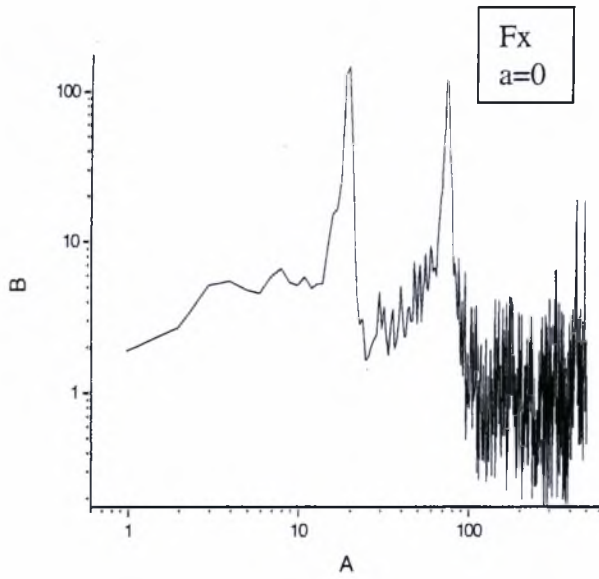
Στο διάγραμμα 4.56 που απεικονίζεται η τιμή της F_y για μικρές γωνίες $\alpha=4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ υπάρχουν μικρές αποκλίσεις των τιμών των F_y στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το παράθυρο μόνο του και στην περίπτωση που τοποθετούμε και το πλέγμα σε σειρά με το παράθυρο. Οι τιμές στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το πλέγμα σε σειρά με το παράθυρο είναι πάντα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που χρησιμοποιούμε μόνο το παράθυρο, ενώ το μέγιστο εμφανίζεται και για τις δυο περιπτώσεις στην συχνότητα $f=10$ Hz. Αυξάνοντας τώρα την γωνία του πτερυγίου ($\alpha=8^\circ, 12^\circ$), οι τιμές της F_y που μετράμε πίσω από το πλέγμα και παράθυρο σχεδόν διπλασιάζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου. Μόνη εξαίρεση η τιμή της F_y για συχνότητα $f=10$ Hz που μετράμε πίσω από το πλέγμα και παράθυρο, η οποία είναι μισή σε σχέση με την αντίστοιχη που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου.

Κατά την απεικόνιση της δύναμης F_z στο διάγραμμα 4.58 παρατηρούμε τα εξής: Για γωνία $\alpha=0^\circ$ οι τιμές της F_z που μετράμε πίσω από το πλέγμα και παράθυρο διπλασιάζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου με το μέγιστο να εμφανίζεται στην συχνότητα $f=10$ Hz. Στο ίδιο διάγραμμα για γωνία $\alpha=4^\circ$ οι

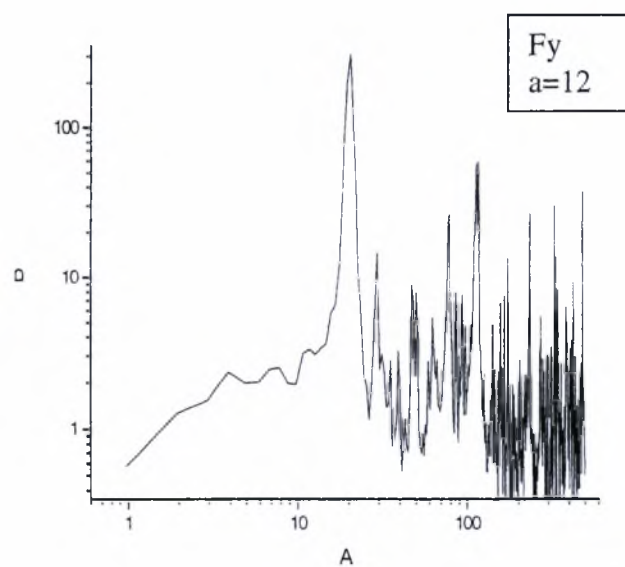
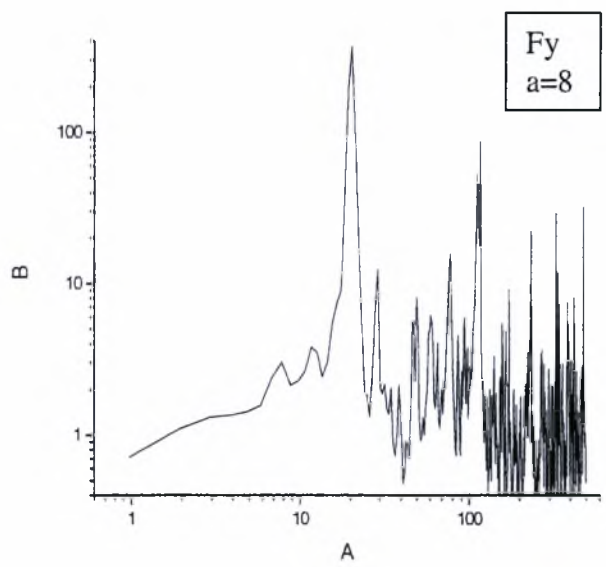
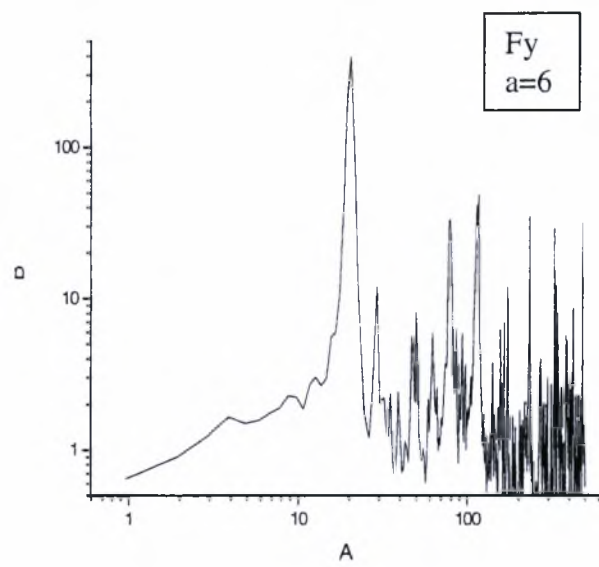
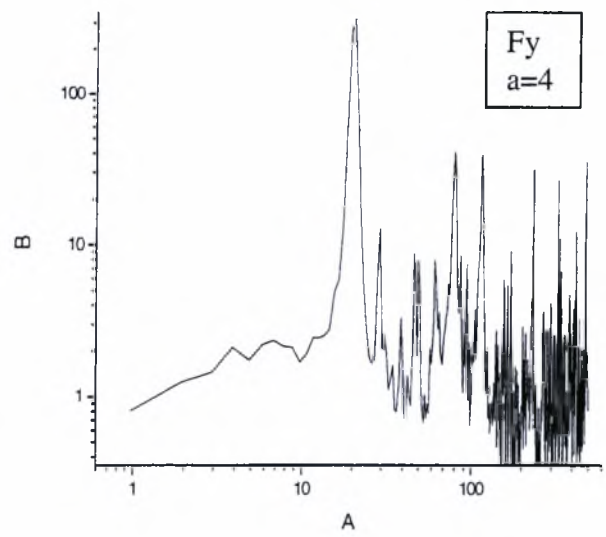
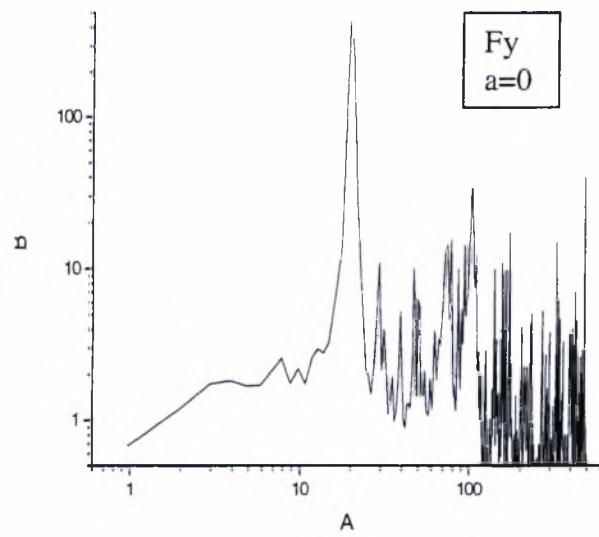
τιμές της F_z που μετράμε πίσω από το πλέγμα, είναι σε όλες τις συχνότητες εκτός από την $f=10$ Hz σχεδόν ίσες με αυτές που μετράμε στο παράθυρο μόνο του. Επίσης στη συνδυασμένη ροή πλέγματος και παραθύρου οι τιμές της F_z εξακολουθούν να είναι διπλάσιες από αυτές που μετράμε στο παράθυρο μόνο του. Για $\alpha=6^\circ$ οι τιμές της F_z για συχνότητες $f=0-8$ Hz που μετράμε πίσω από το πλέγμα και παράθυρο διπλασιάζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου, ενώ για συχνότητες $f=10-12$ Hz οι τιμές της F_z είναι ίσες για τις δυο παραπάνω περιπτώσεις. Συνεχίζοντας την αύξηση της γωνίας του πτερυγίου και για $\alpha=8^\circ$ οι τιμές της F_z που μετράμε πίσω από το παράθυρο, είναι σε όλες τις συχνότητες διπλάσιες από αυτές που μετράμε πίσω από το πλέγμα μόνο του, ενώ οι αντίστοιχες τιμές του παραθύρου και πλέγματος είναι 3πλάσιες από αυτές του παραθύρου. Τέλος για $\alpha=12^\circ$ οι τιμές της F_z για συχνότητες $f=0-8$ Hz που μετράμε πίσω από το πλέγμα και παράθυρο συμπίπτουν με αυτές που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου. Για συχνότητα $f=10$ Hz η τιμή της F_z εμφανίζει ελάχιστο στην περίπτωση που τοποθετούμε το παράθυρο μόνο του σε αντίθεση με το μέγιστο που εμφανίζεται στην ίδια συχνότητα μετά την τοποθέτηση πλέγματος και παραθύρου.

4.3.4 Φάσματα Δυνάμεων

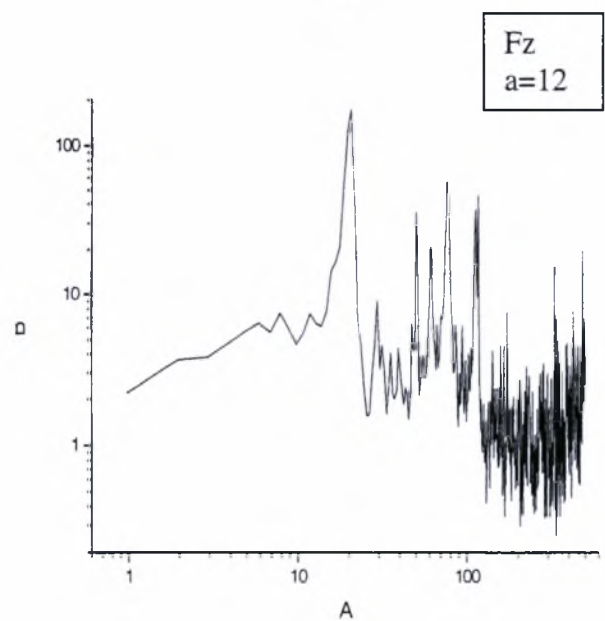
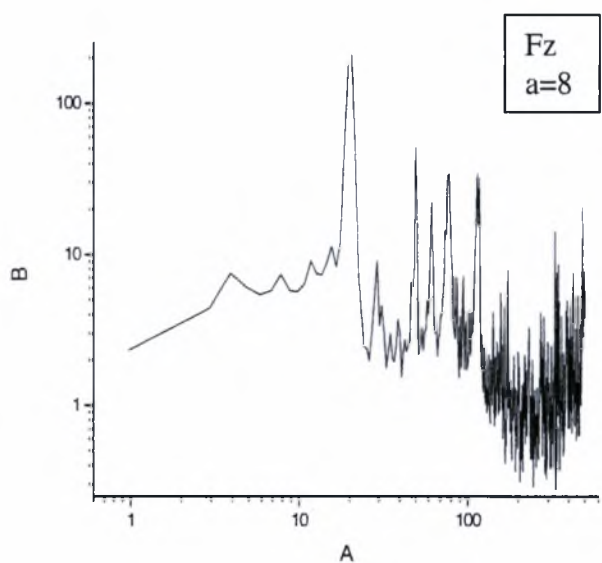
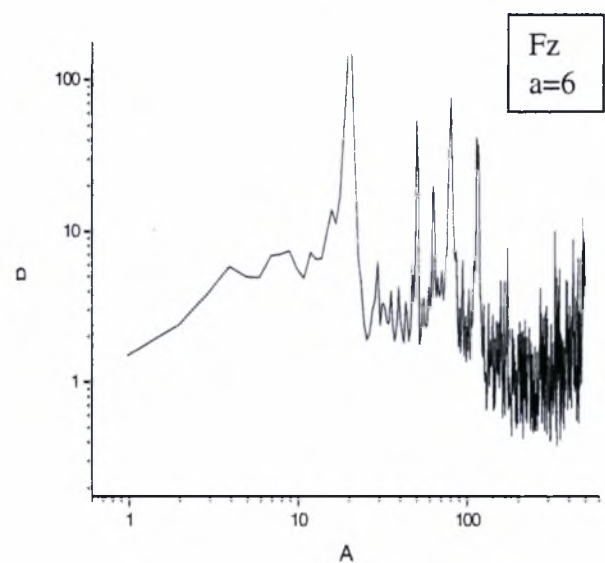
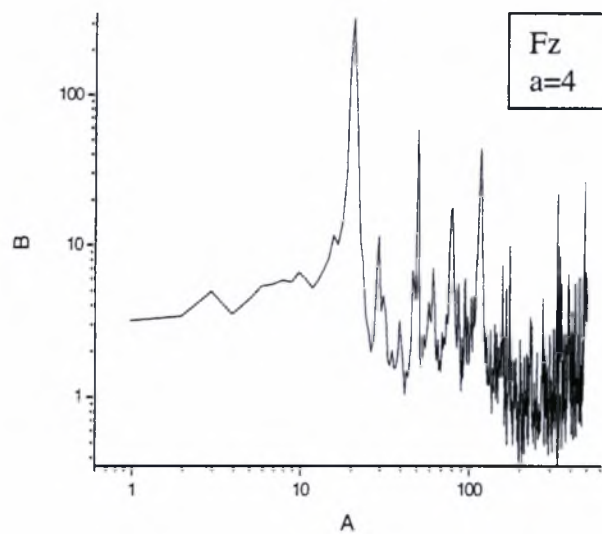
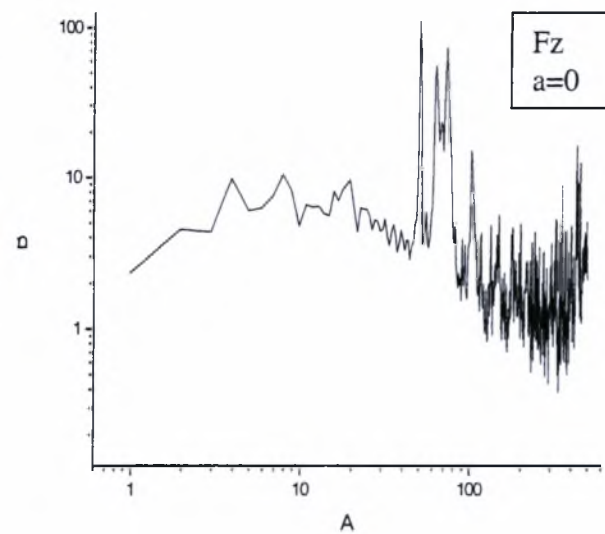
Όπως για τις ταχύτητες, έτσι και για τις δυνάμεις για έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα προχωρήσαμε σε περαιτέρω επεξεργασία των τιμών των δυνάμεων F_x, F_y, F_z . Με την χρήση ενός προγράμματος που γράφτηκε σε κώδικα Fortran πήραμε τα φάσματα των δυνάμεων. Η κλίμακα των διαγραμμάτων που έγιναν είναι λογαριθμική. Στον άξονα x βλέπουμε την συχνότητα της ταλάντωσης, ενώ στον άξονα y αναπαρίσταται η τιμή της δύναμης. Έτσι μπορούμε να δούμε αν η μέγιστη τιμή της δύναμης εμφανίζεται στην συχνότητα της επιβαλλόμενης ταλάντωσης. Παρακάτω παραθέτουμε τα διαγράμματα των αντίστοιχων φασμάτων των δυνάμεων για τρεις διαφορετικές καταστάσεις της ροής: α) ροή πίσω από πλέγμα β) ροή πίσω από παράθυρο ταλαντούμενων πτερυγίων γ) συνδυασμός των προηγούμενων ροών.



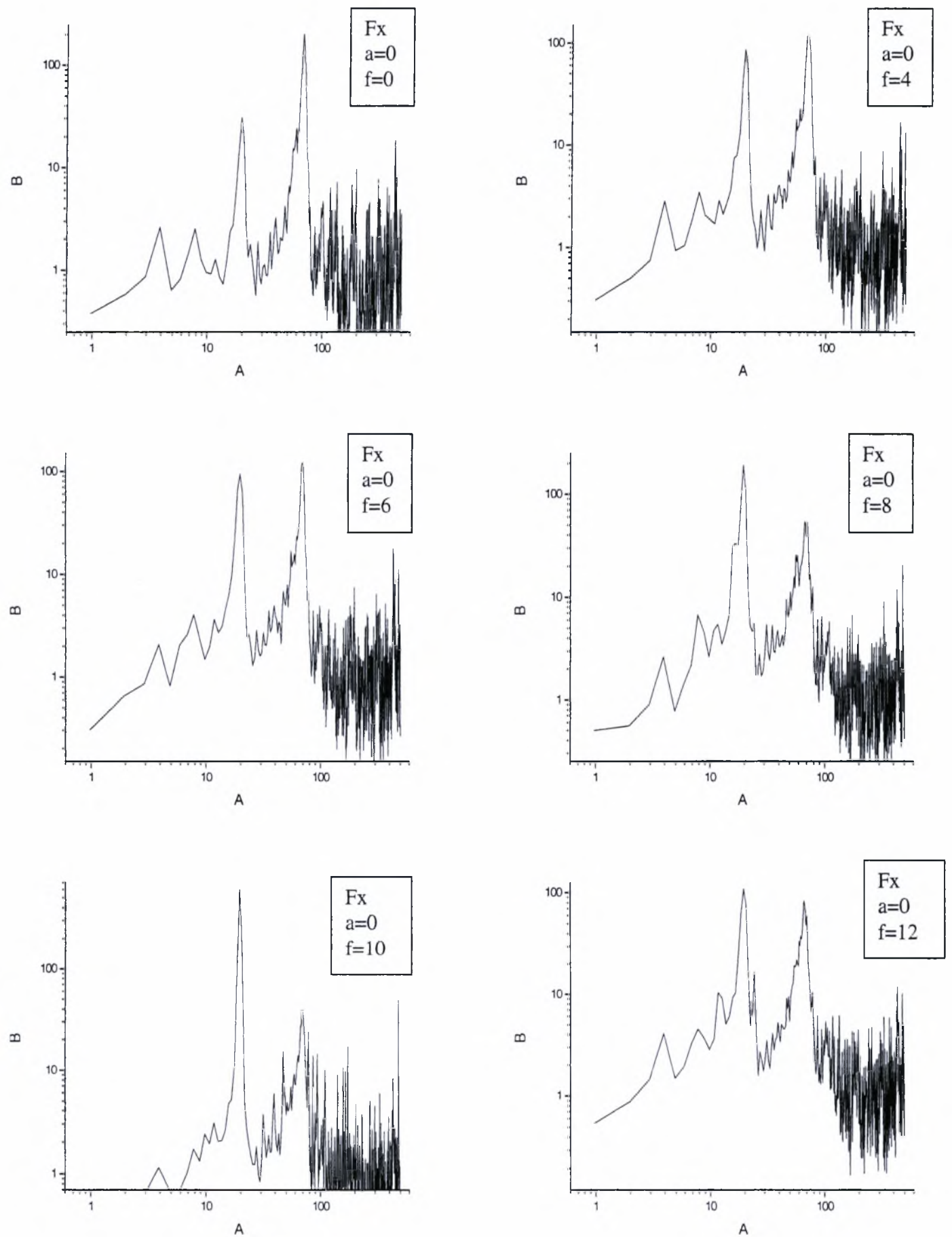
Γραμμα 4.60: Φάσματα δύναμης F_x (Drag) (Newton) για ροή πίσω από πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6,8,12$ (ο).



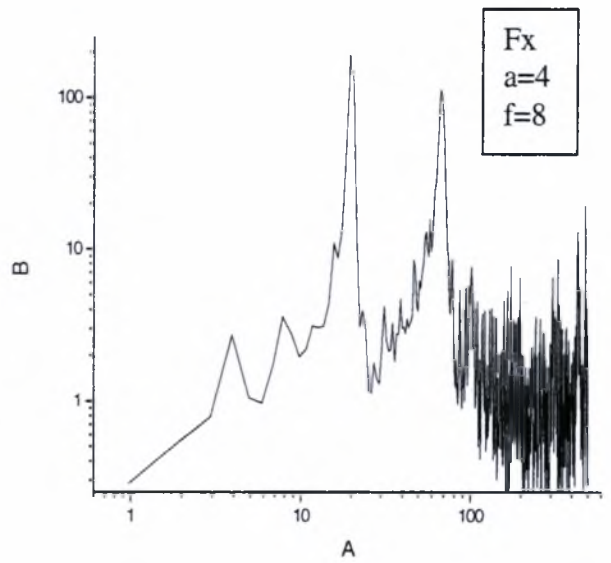
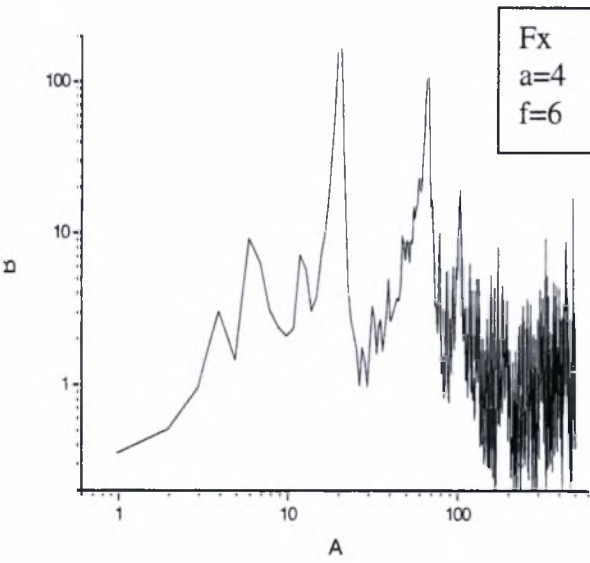
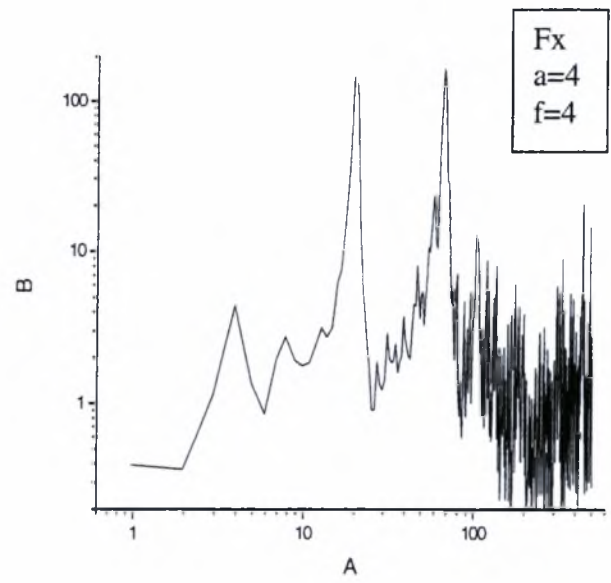
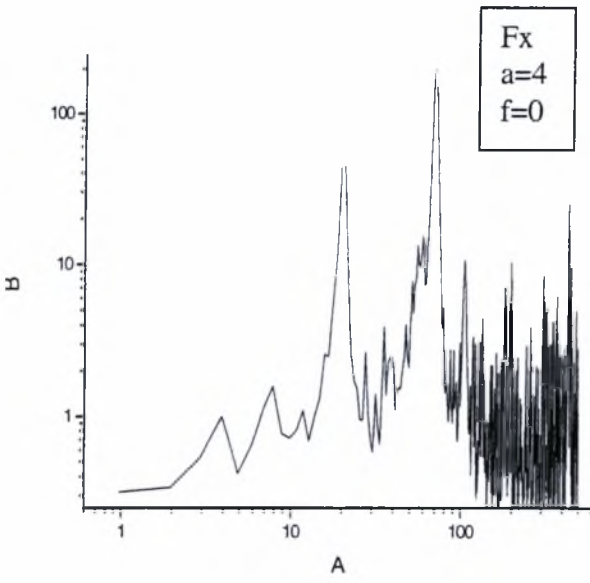
Ραμμα 4.61: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για ροή πίσω από πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).
 Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
 17/05/2024 12:34:32 EEST - 3.17.175.83

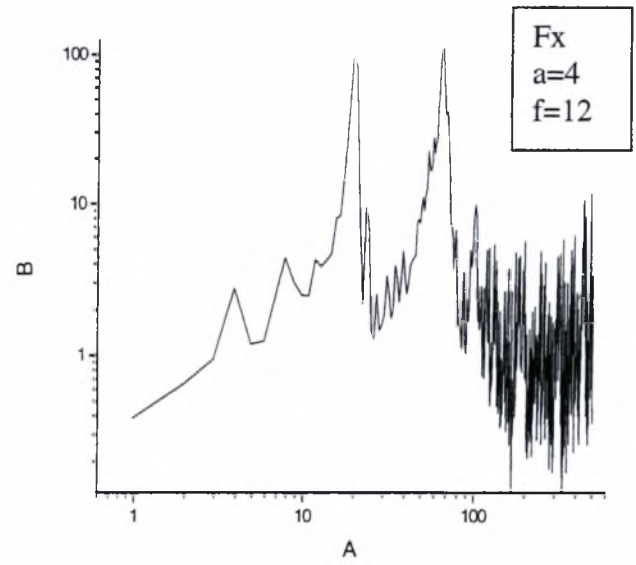
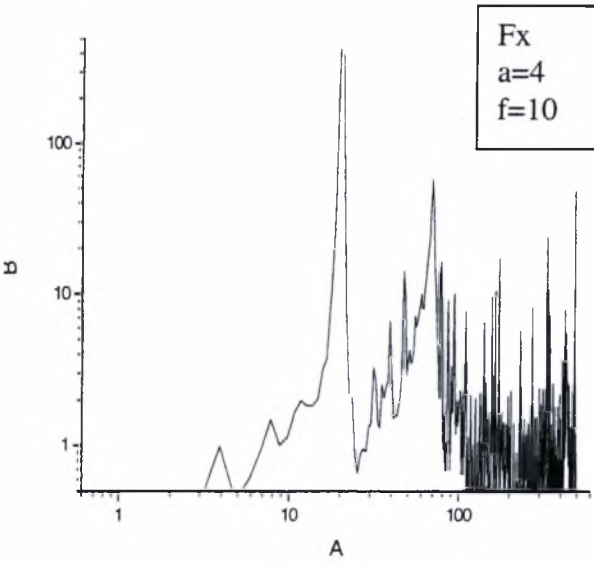


Γράμμα 4.62: Φάσματα δύναμης F_z (Lift)(Newton) για ροή πίσω από πλέγμα για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).

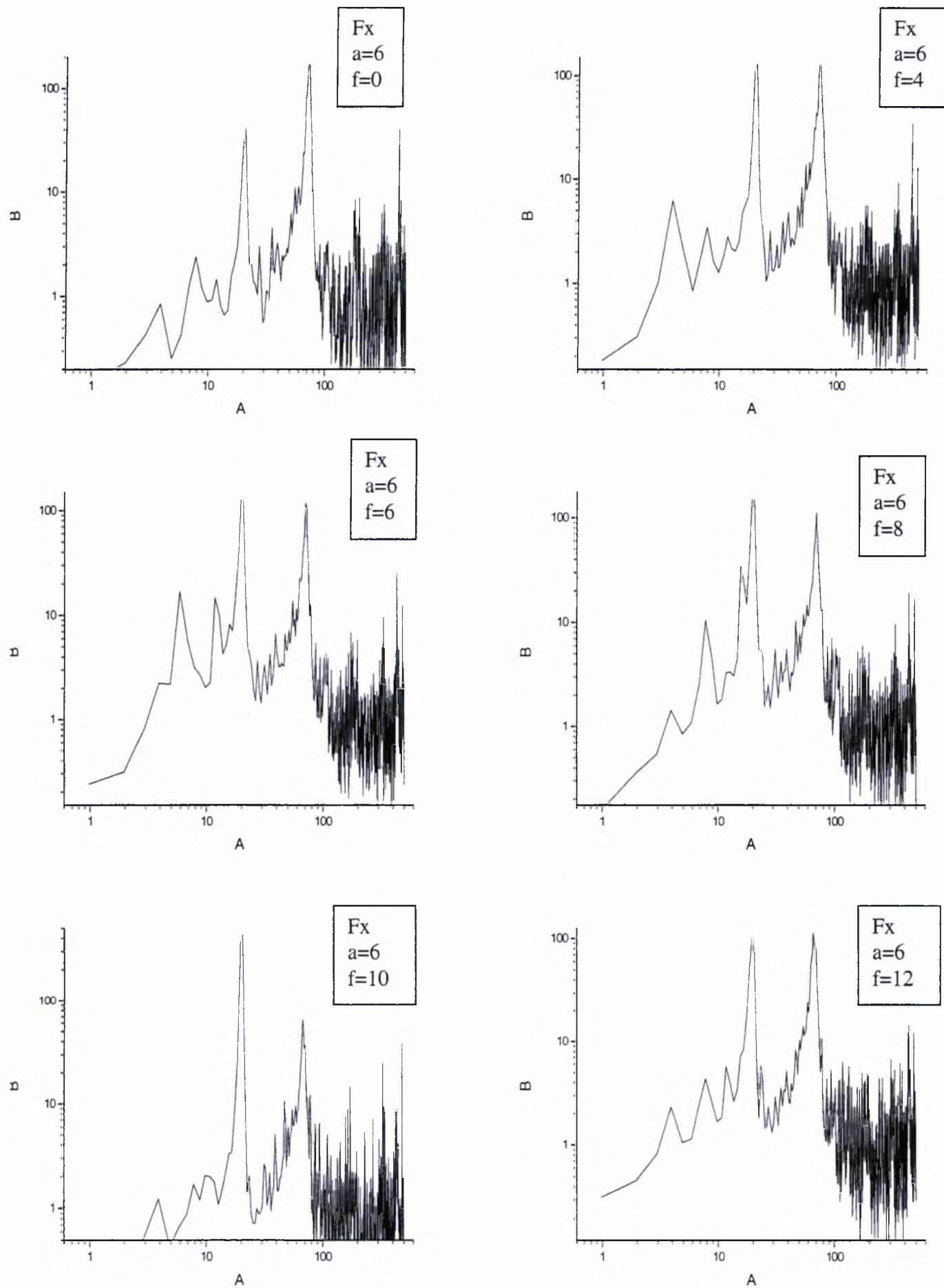


γραμμά 4.63: Φάσματα δύναμης F_x (Drag)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $a=0$ (ο) και για ρότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.

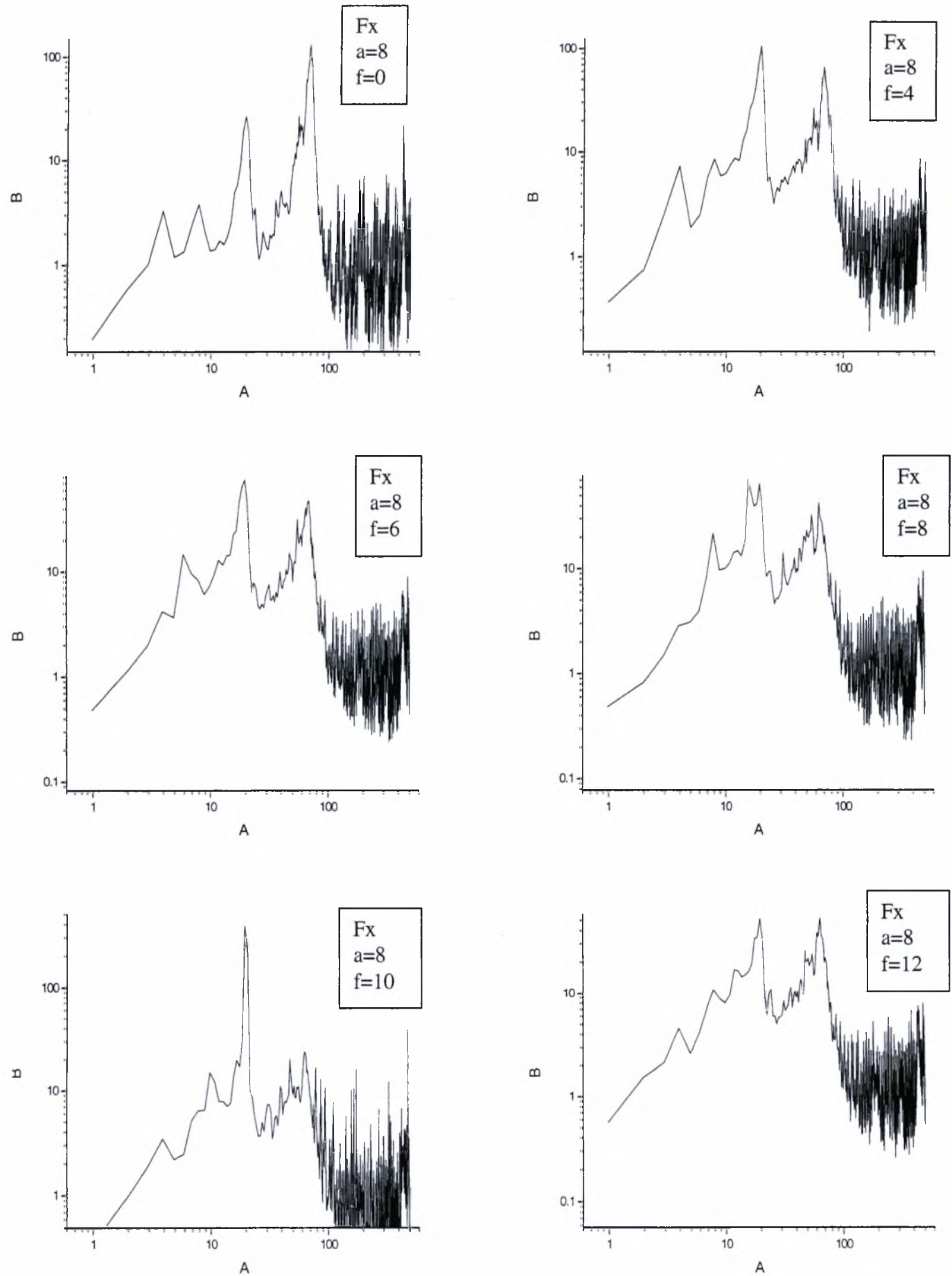




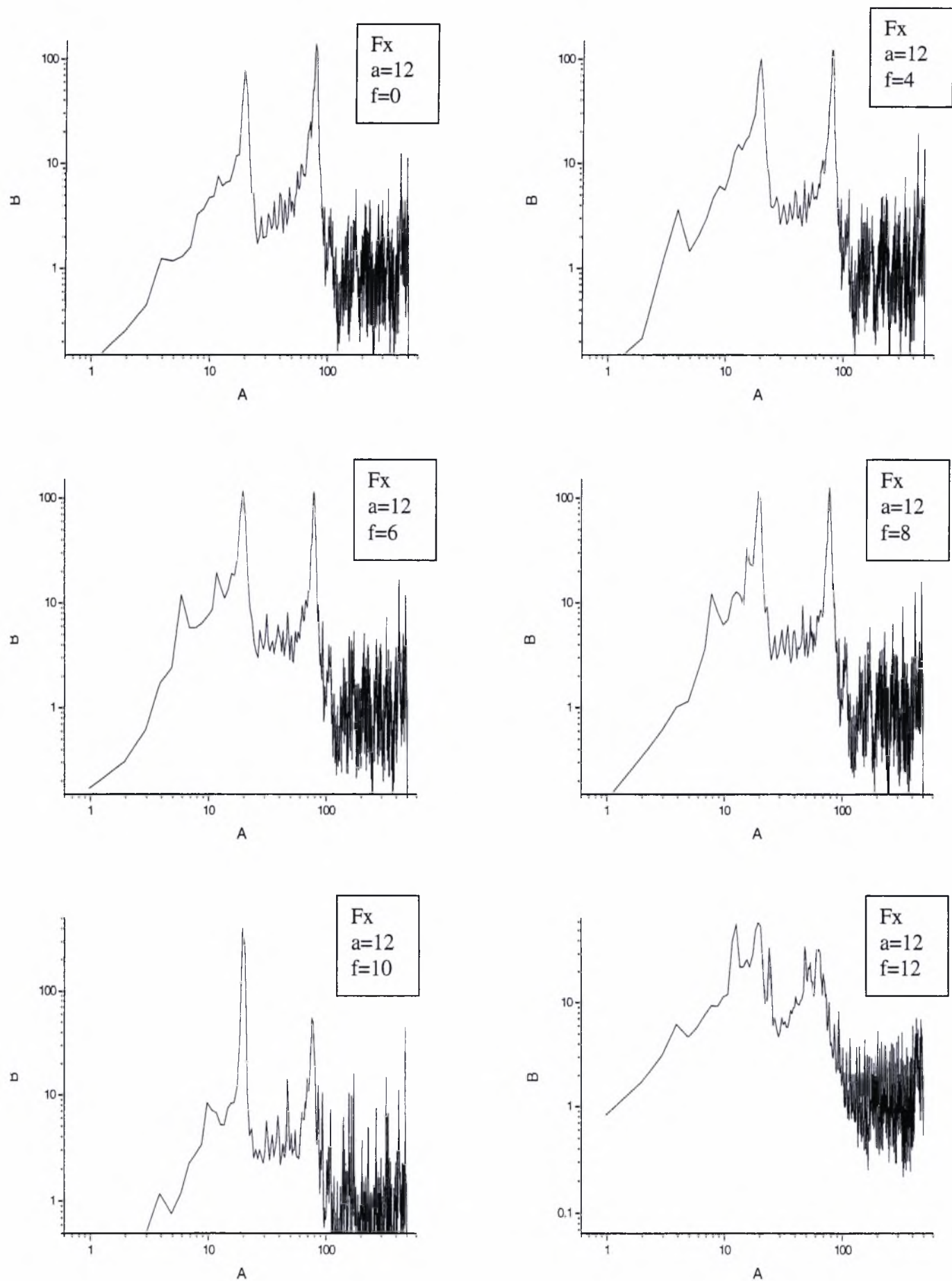
Γραμμα 4.64: Φάσματα δύναμης F_x (Drag)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=4$ (ο) και για όμοιες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



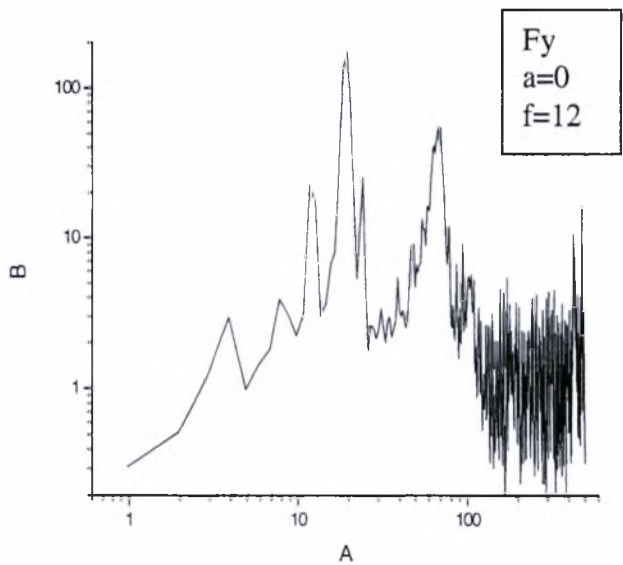
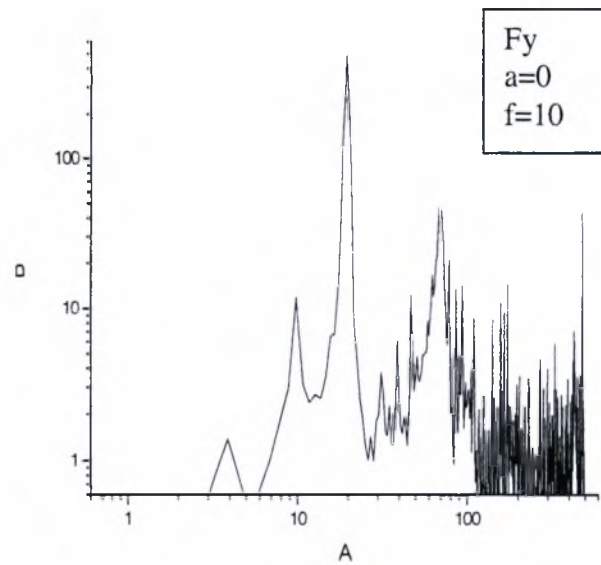
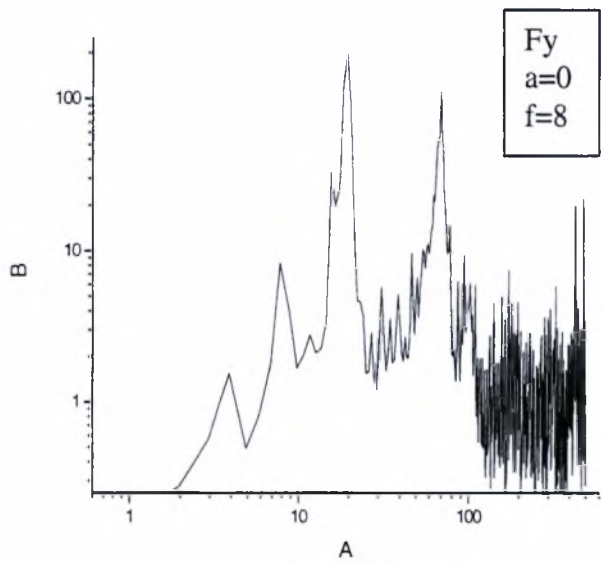
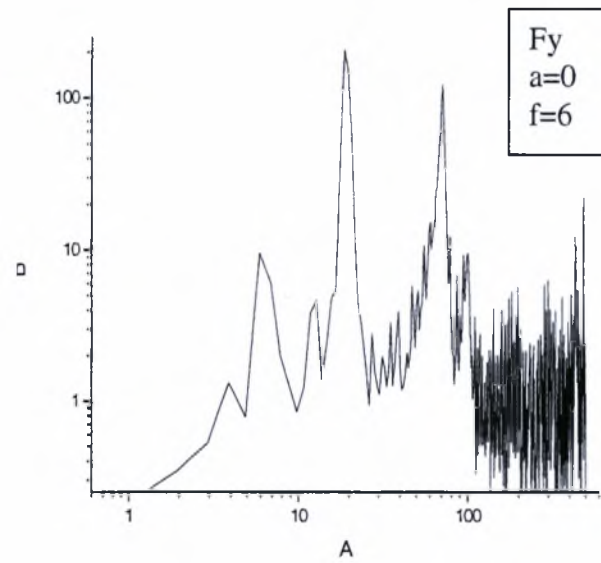
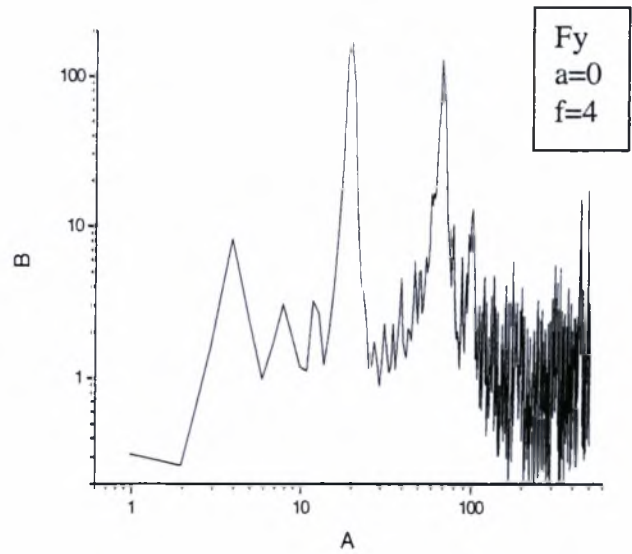
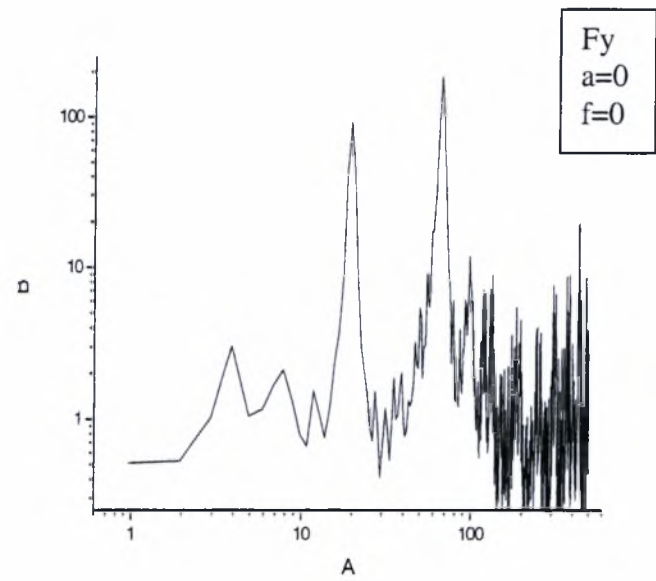
Γραμμα 4.65: Φάσματα δύναμης F_x (Drag)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=6$ (ο) και για όπτητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



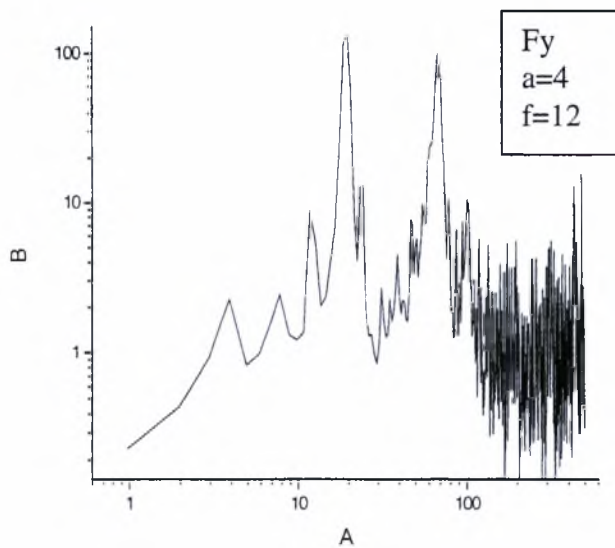
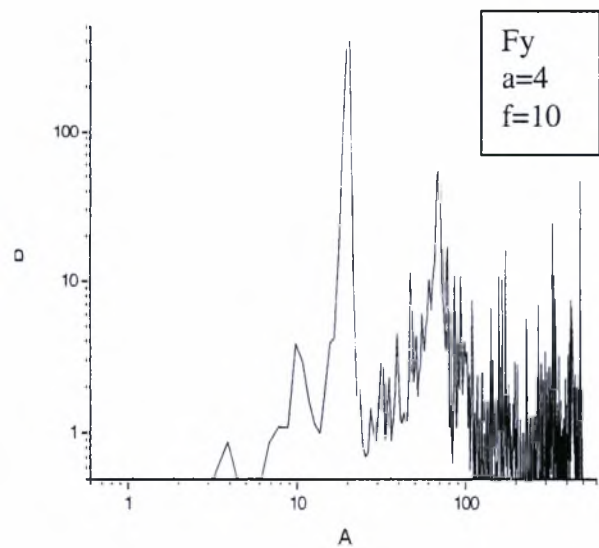
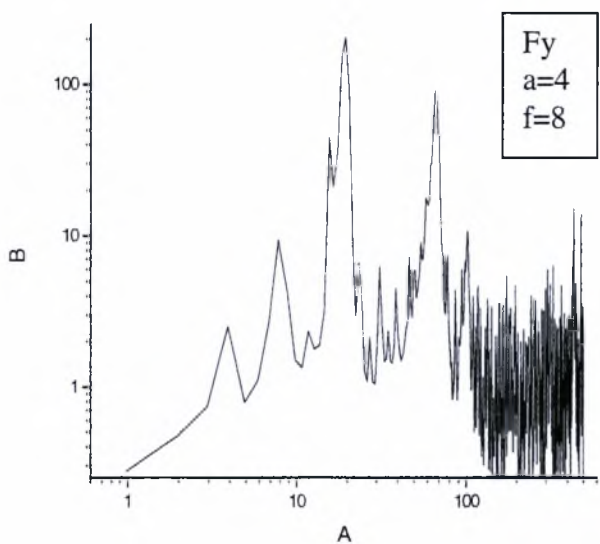
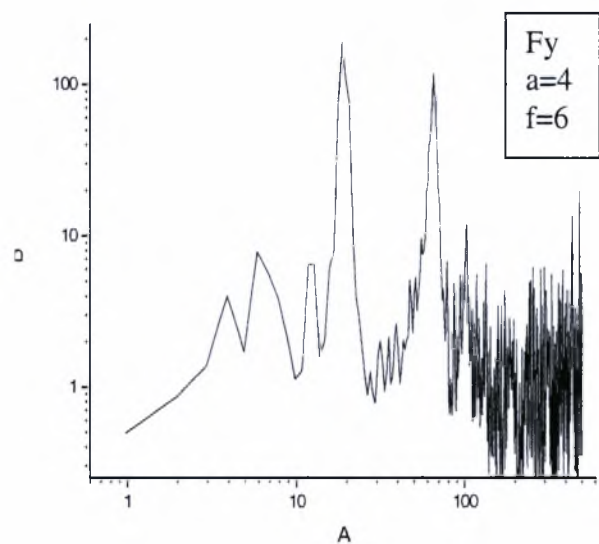
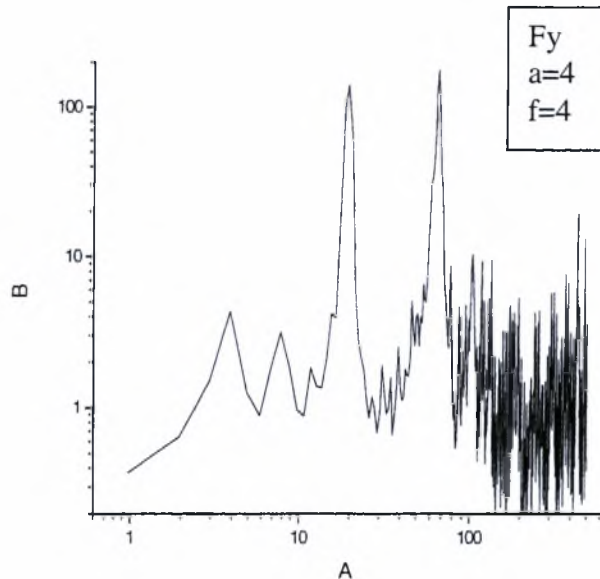
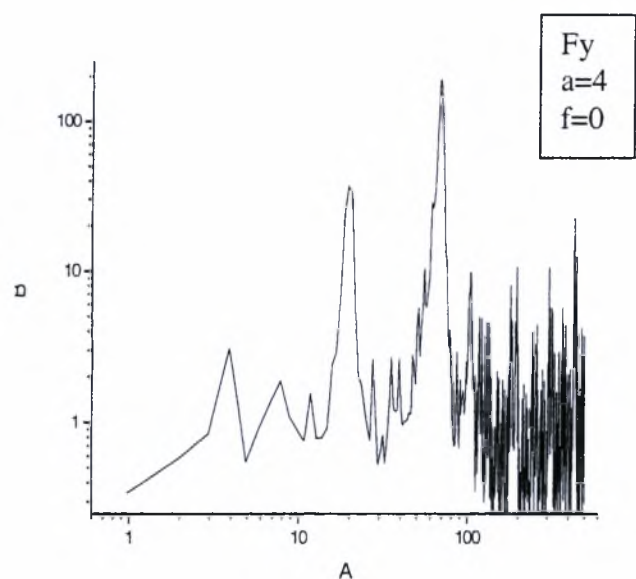
Γραμμα 4.66: Φάσματα δύναμης F_x (Drag)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=8$ (ο) και για λ ότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



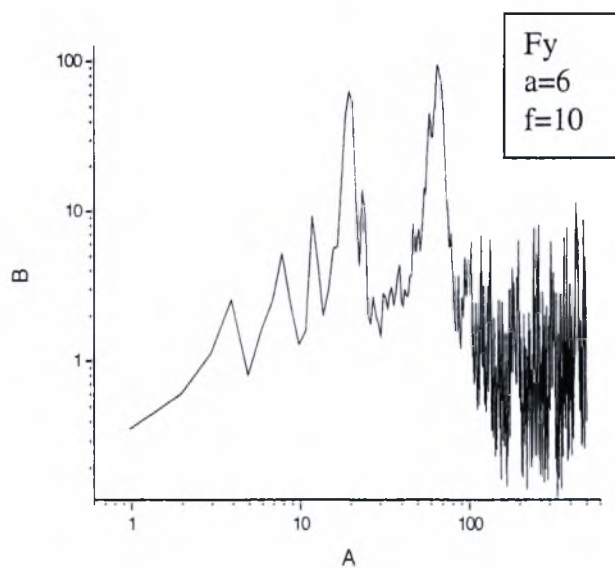
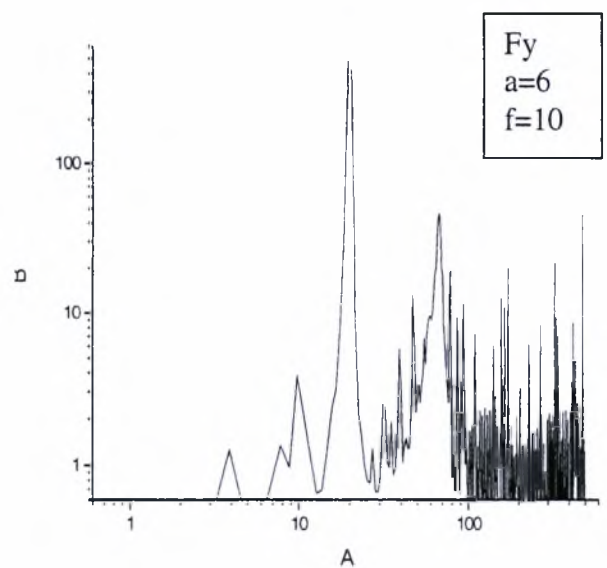
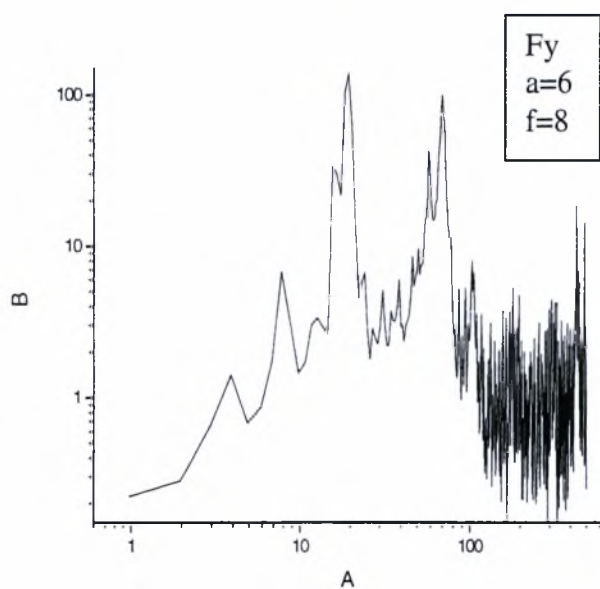
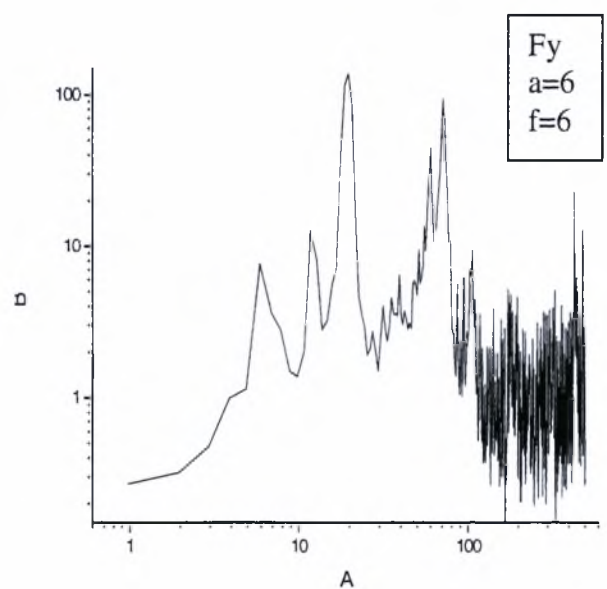
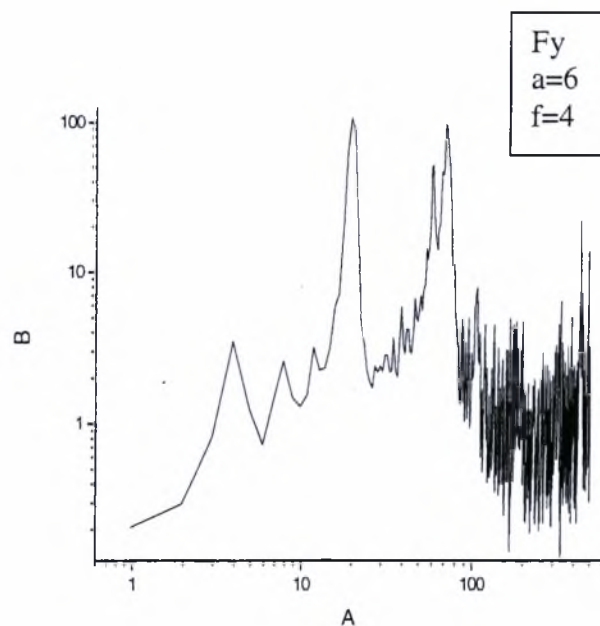
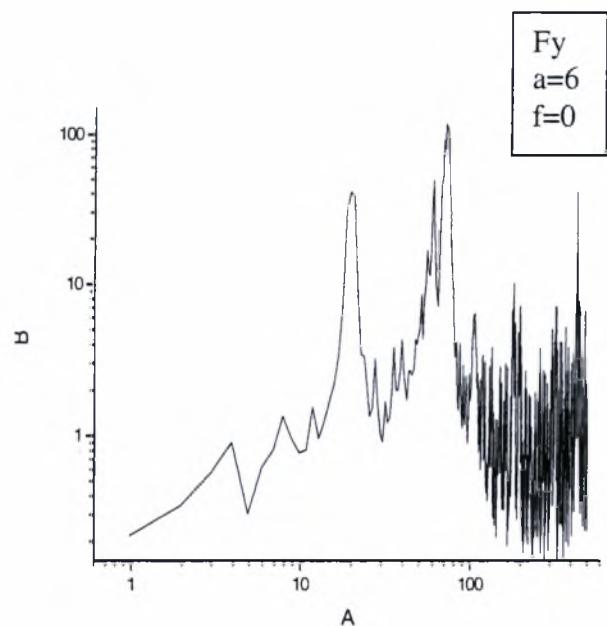
Γραμμά 4.67: Φάσματα δύναμης F_x (Drag)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=12$ (ο) και για ότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



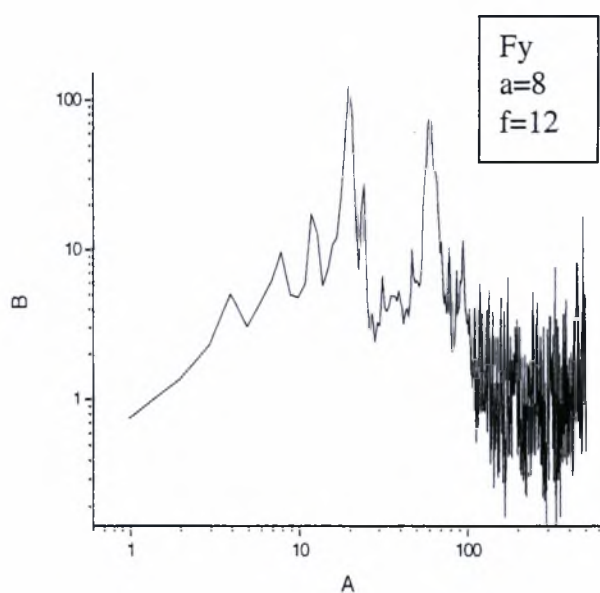
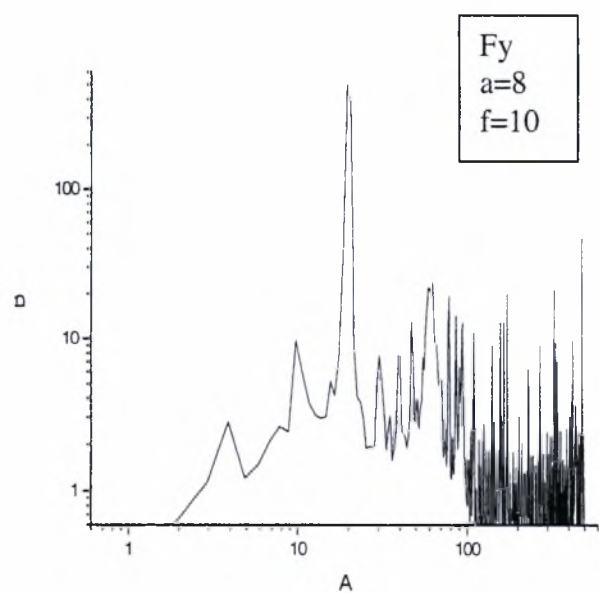
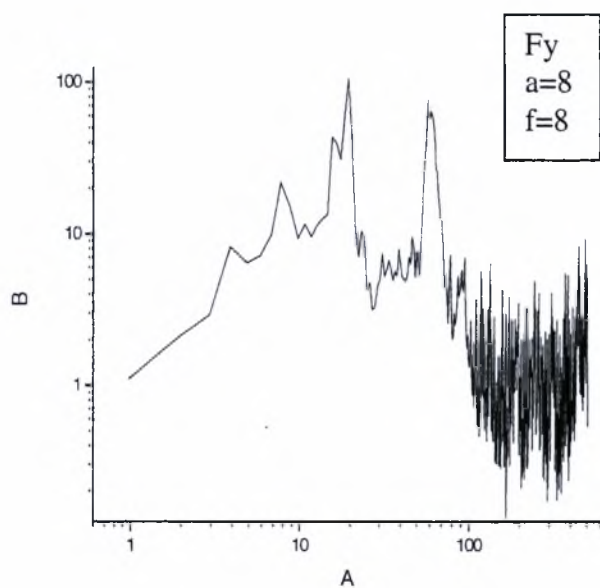
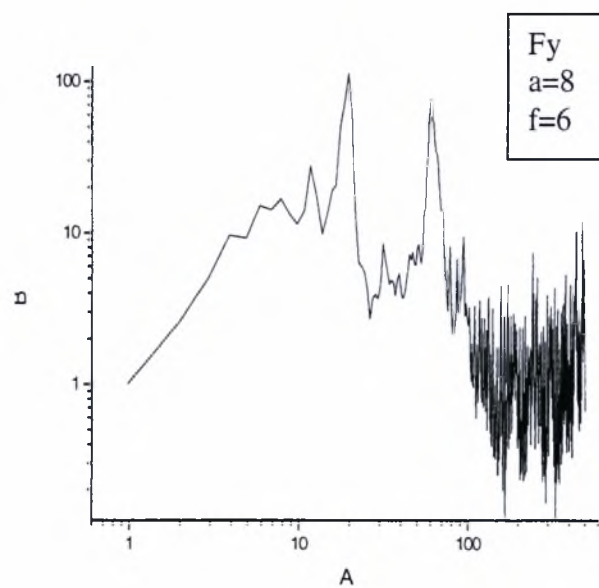
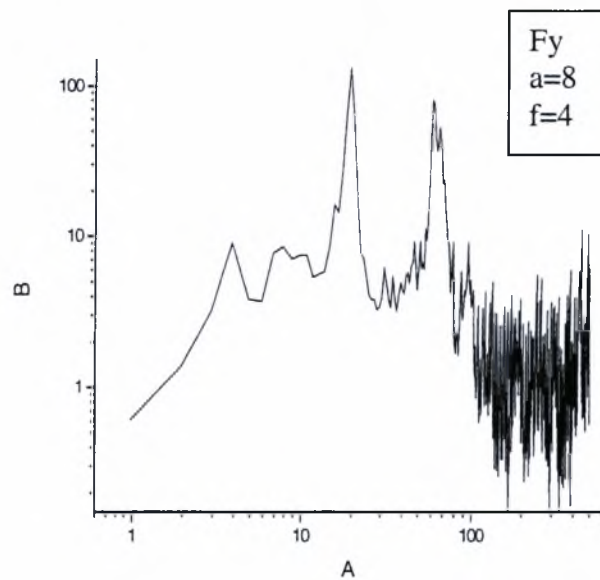
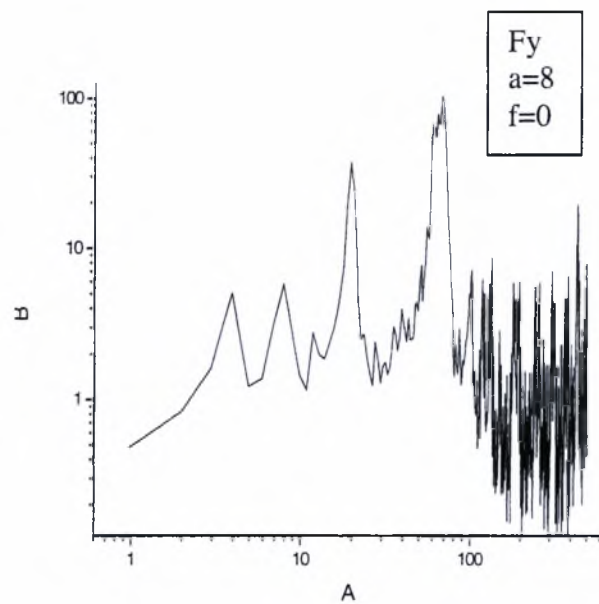
γραμμά 4.68: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $a=0$ (ο) και για ότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



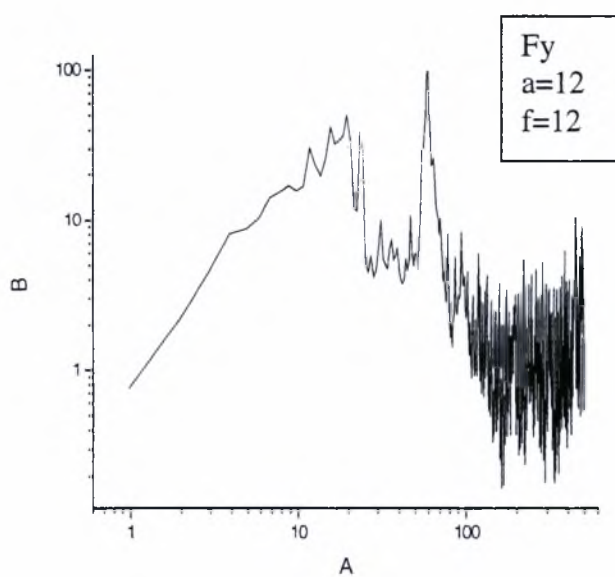
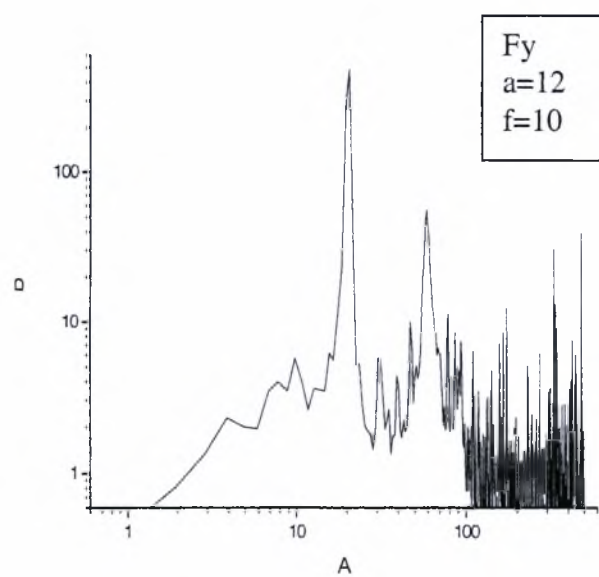
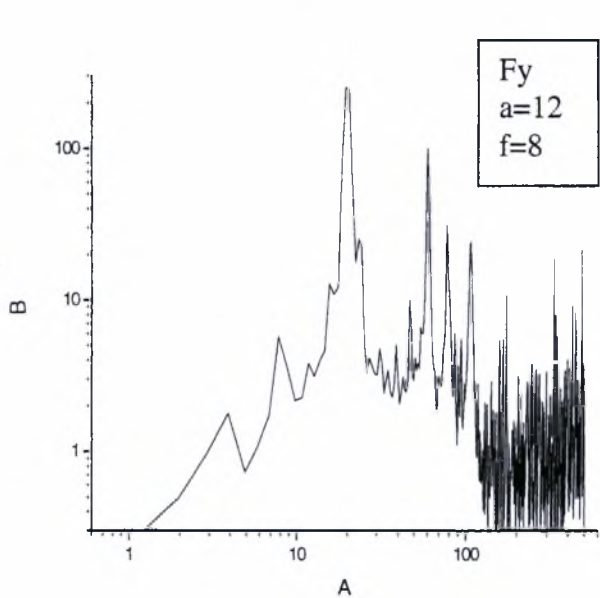
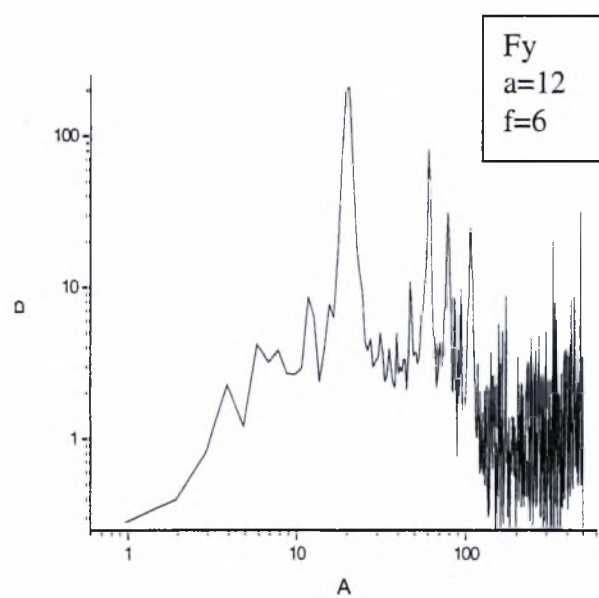
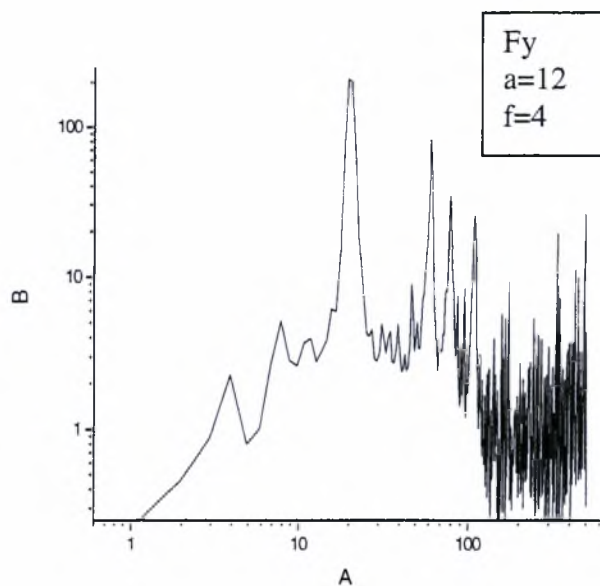
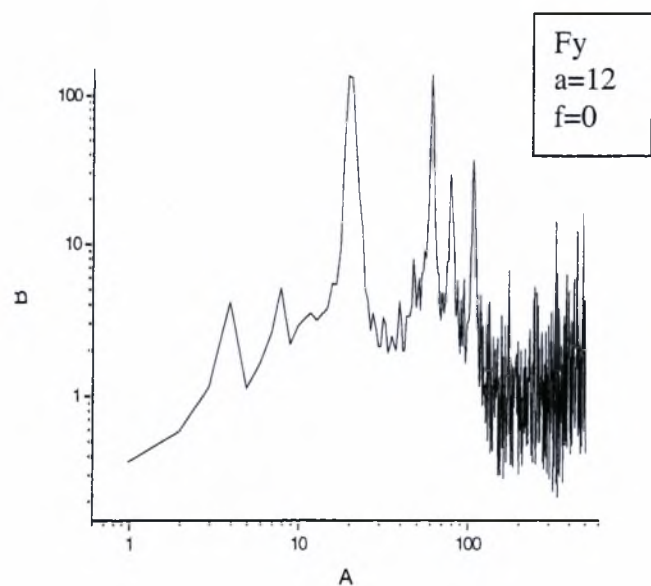
Γραμμά 4.69: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=4$ (ο) και για όπτες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



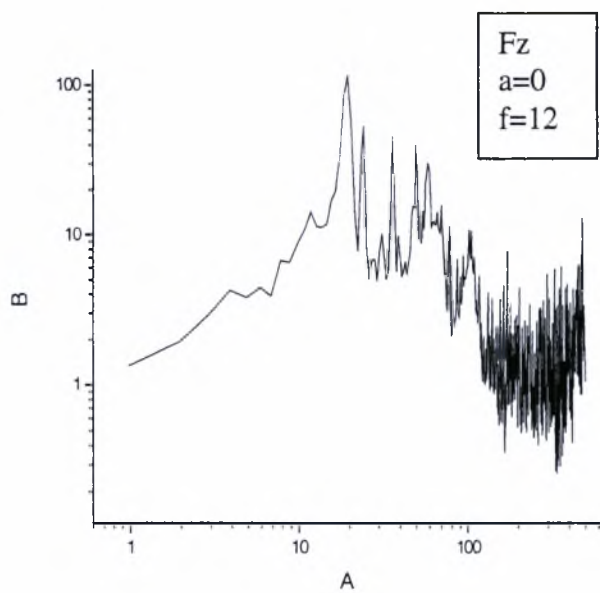
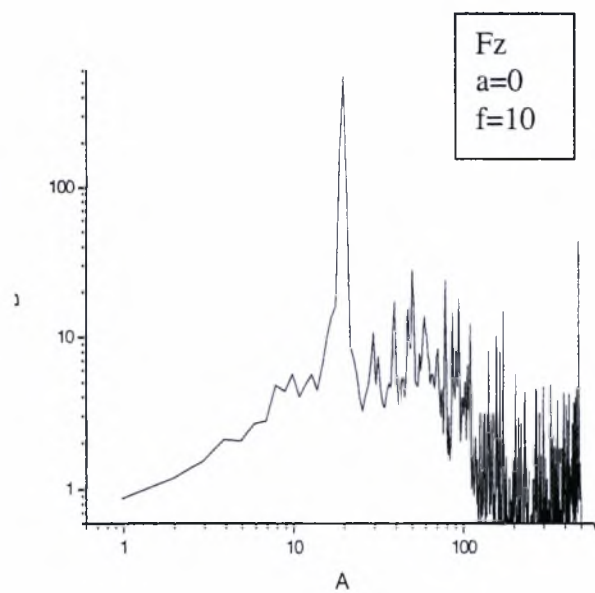
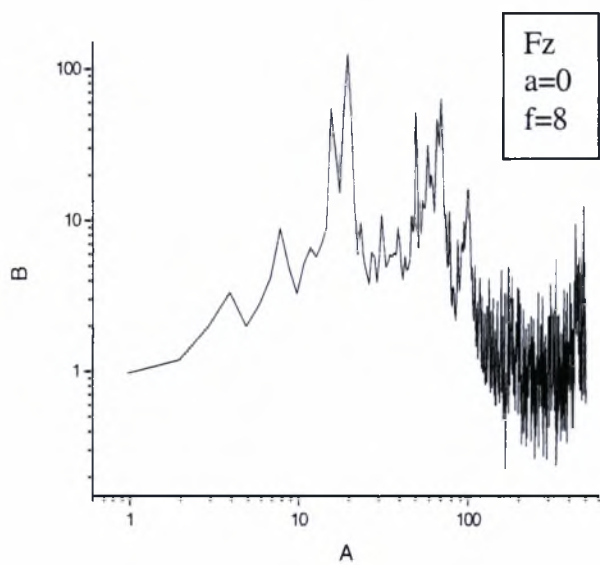
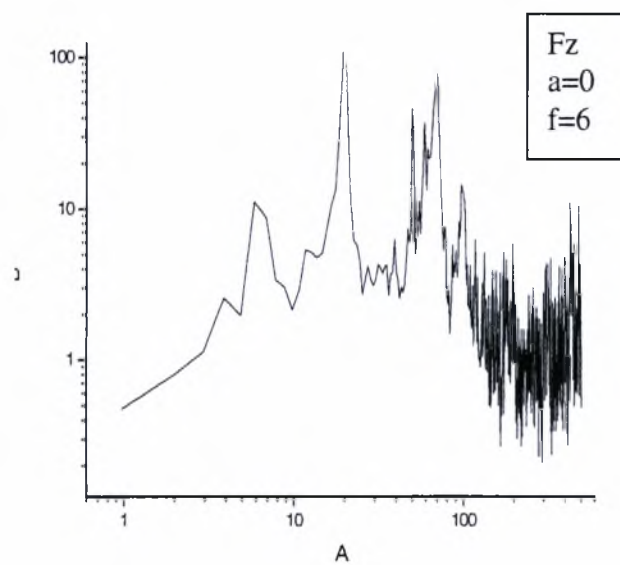
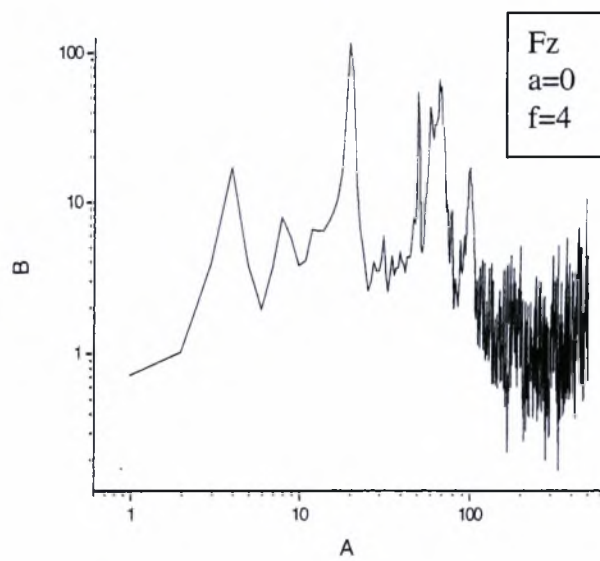
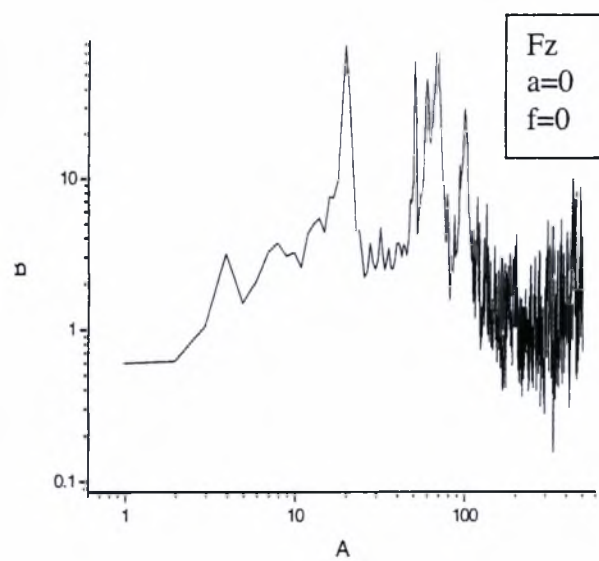
γραμμά 4.70: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=6$ (ο) και για όπτητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



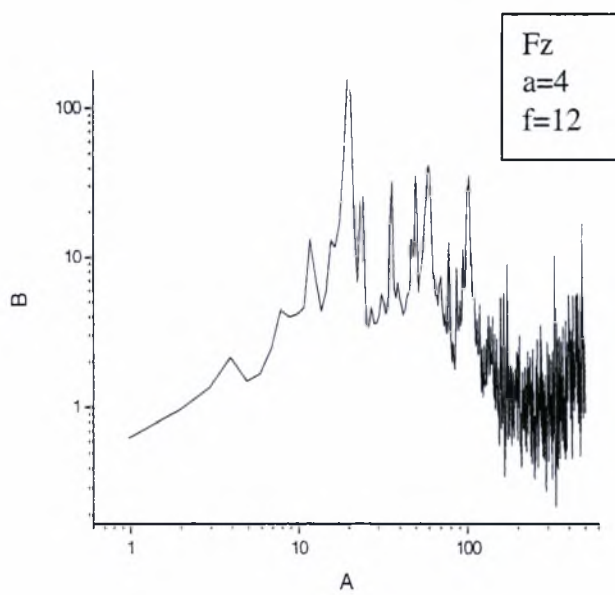
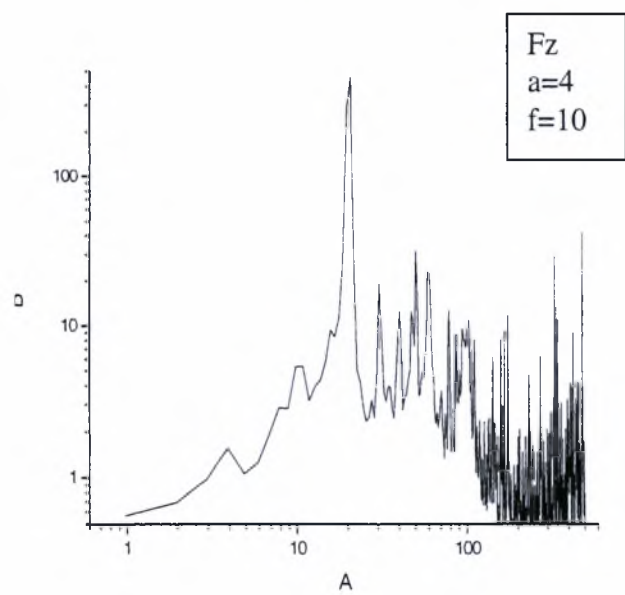
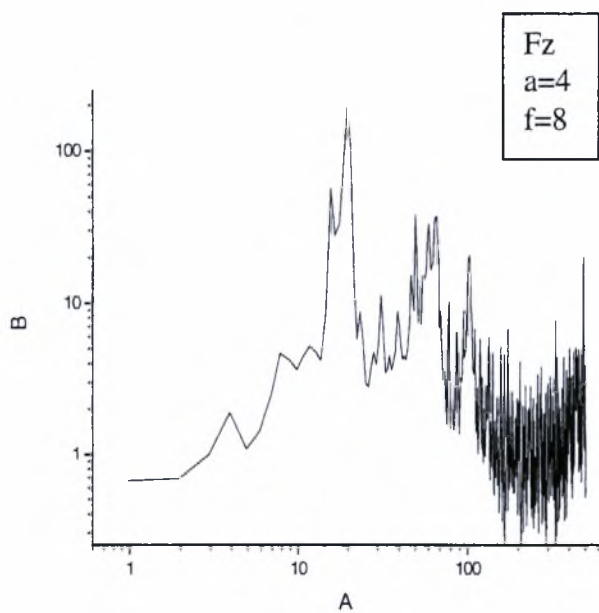
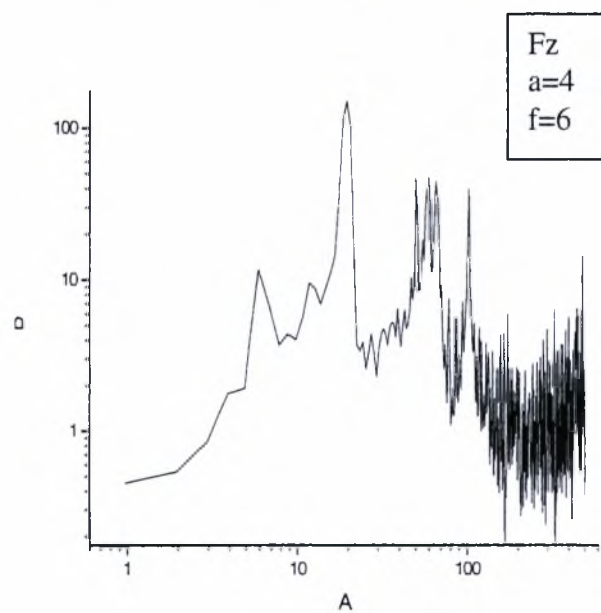
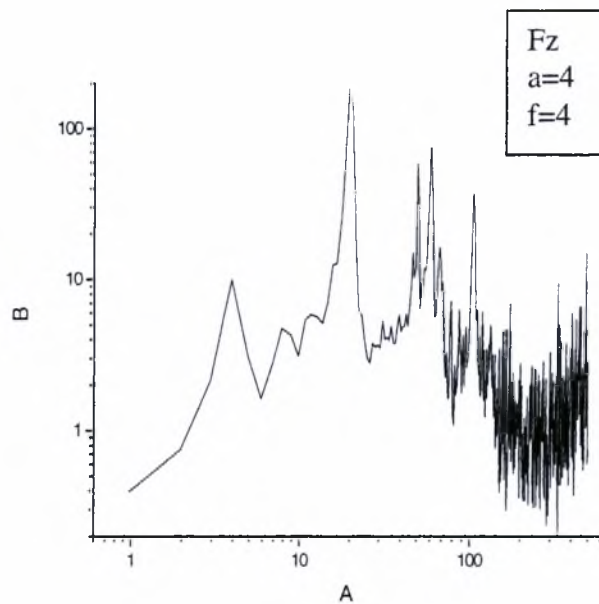
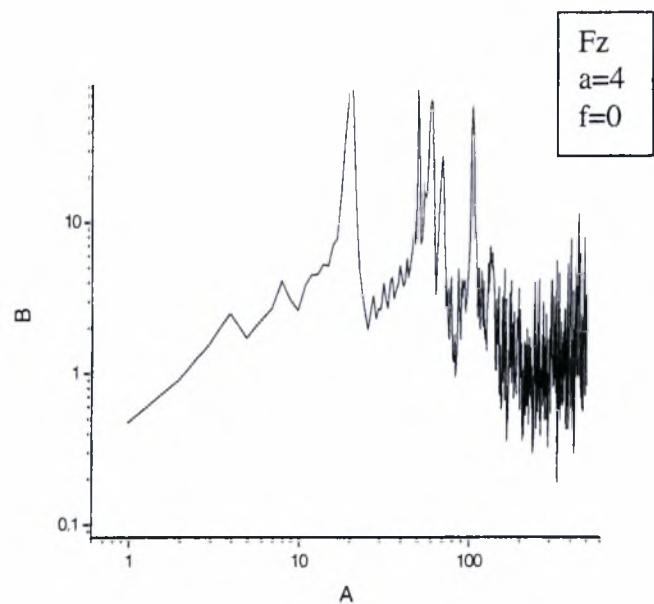
Γράμμα 4.71: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $a=8$ (ο) και για ότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



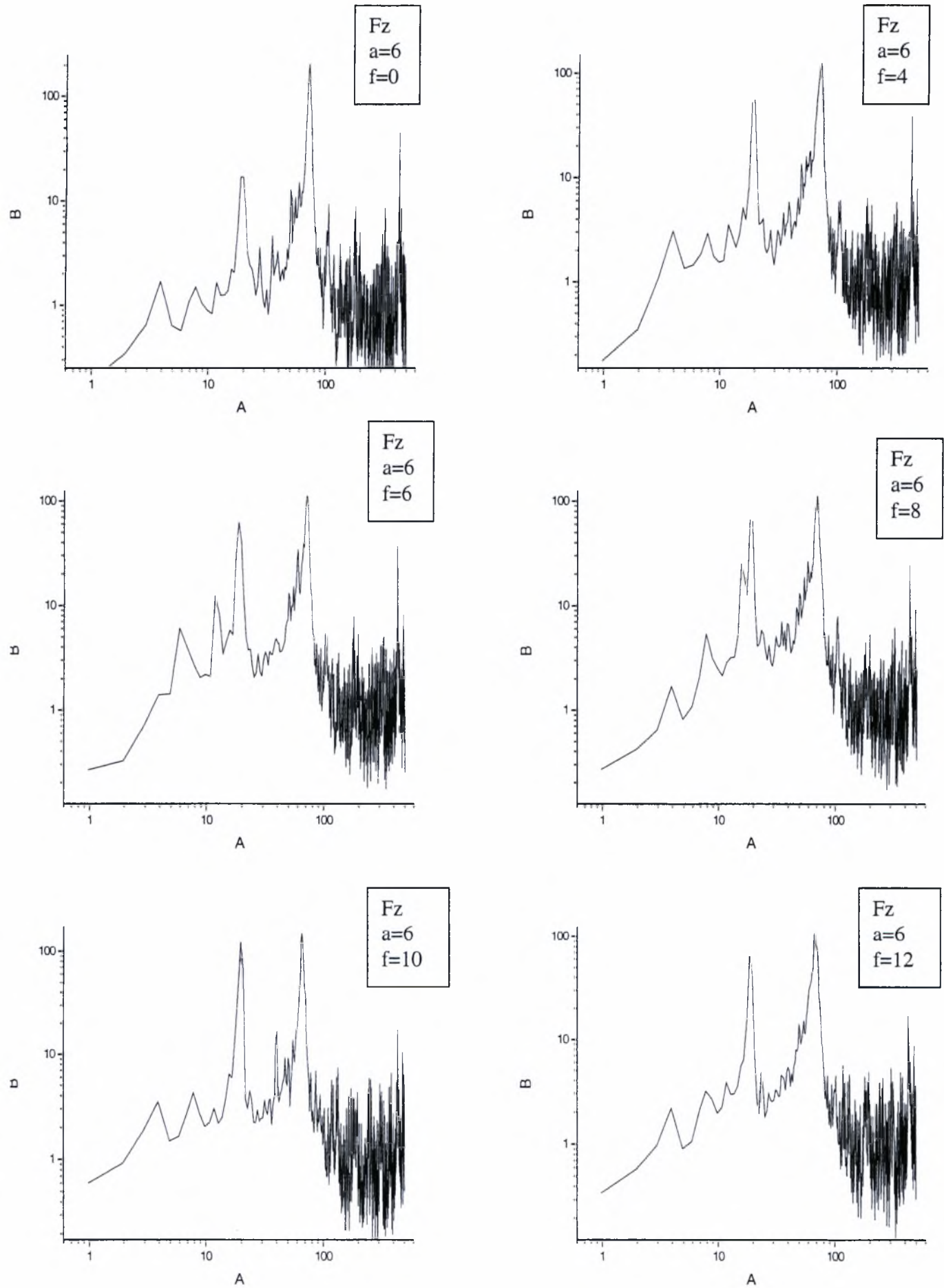
Διάγραμμα 4.72: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=12$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



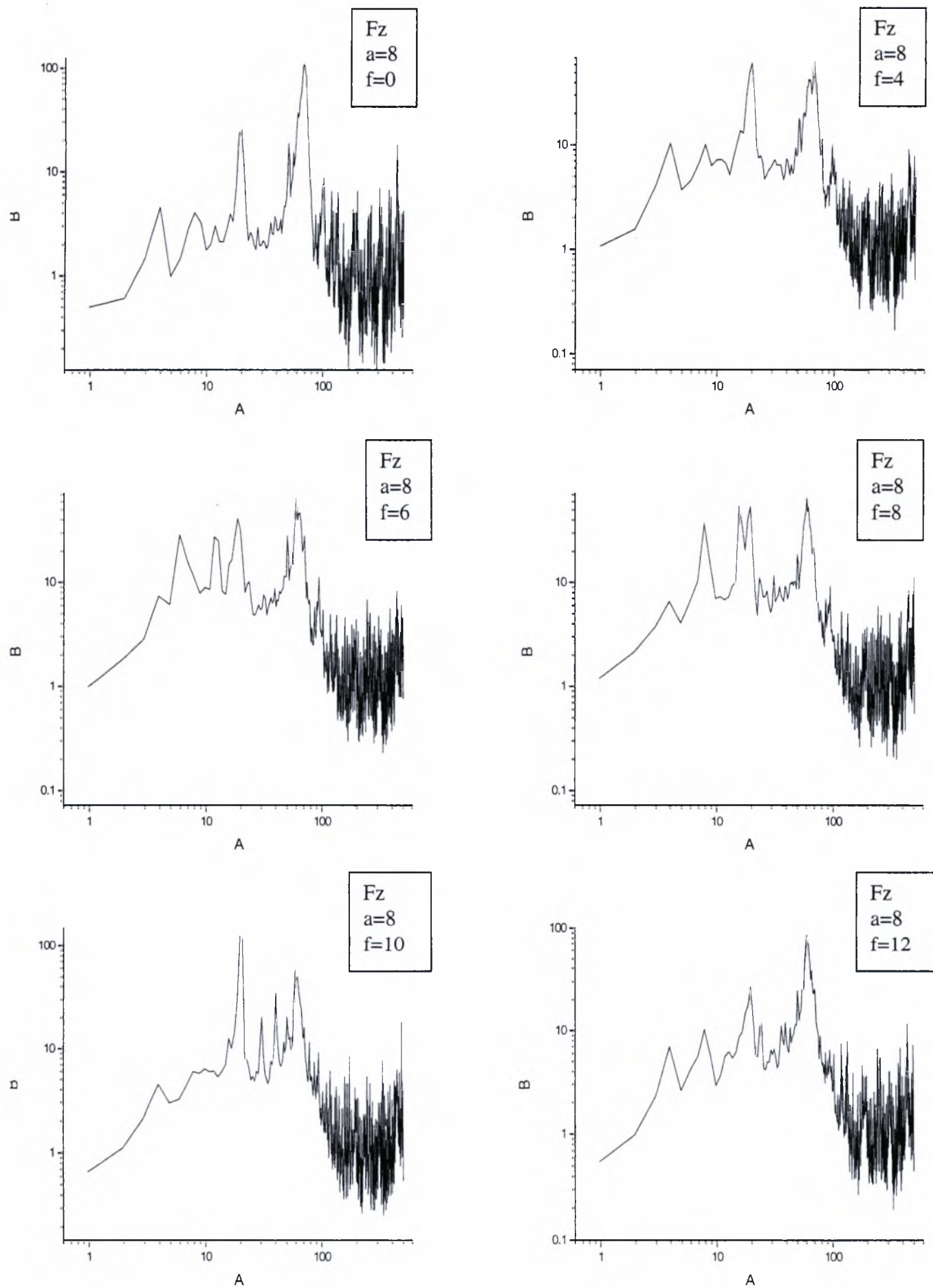
Διάγραμμα 4.73: Φάσματα δύναμης F_z (Lift)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=0$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



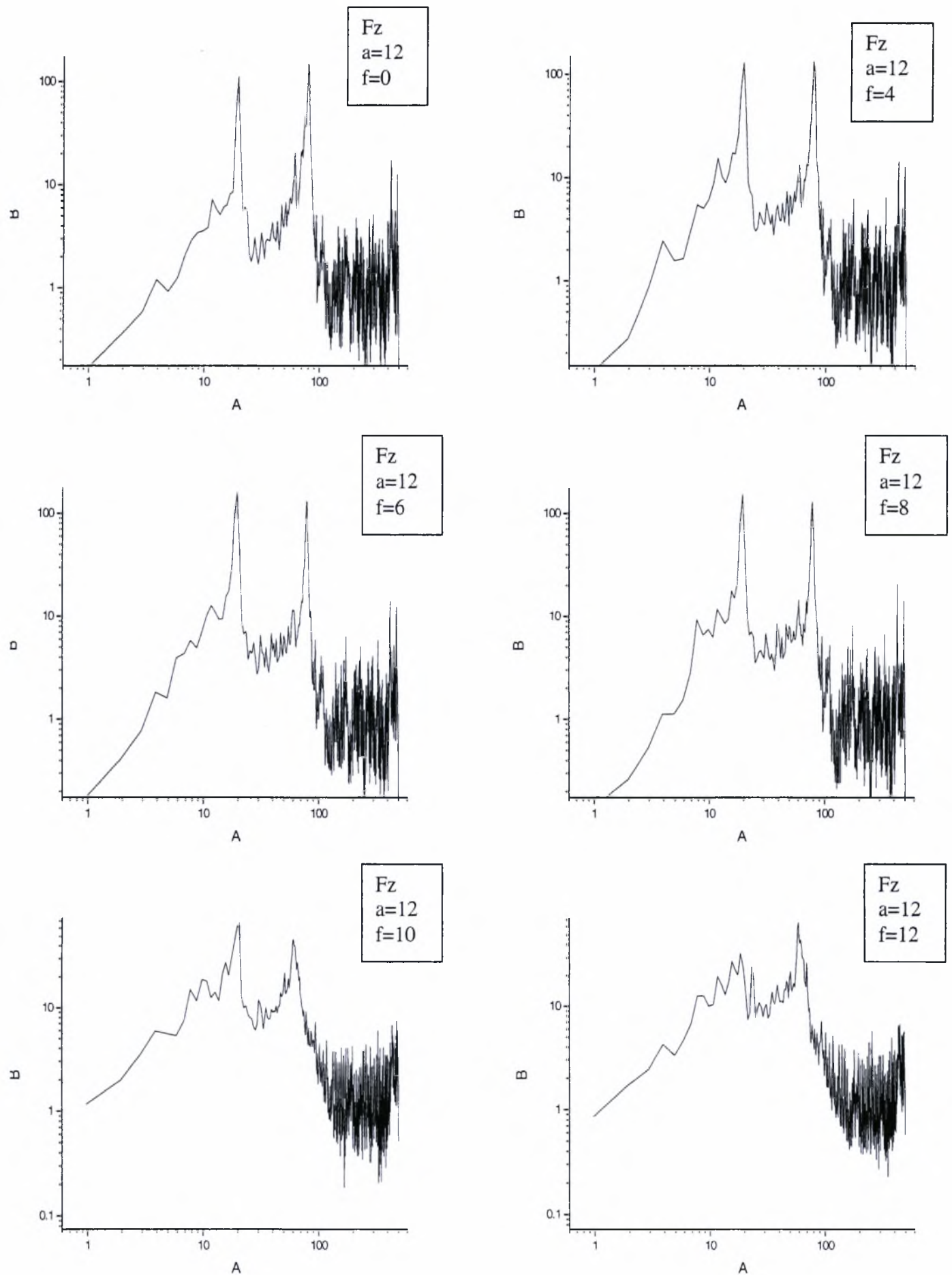
Διάγραμμα 4.74: Φάσματα δύναμης F_z (Lift)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=4$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



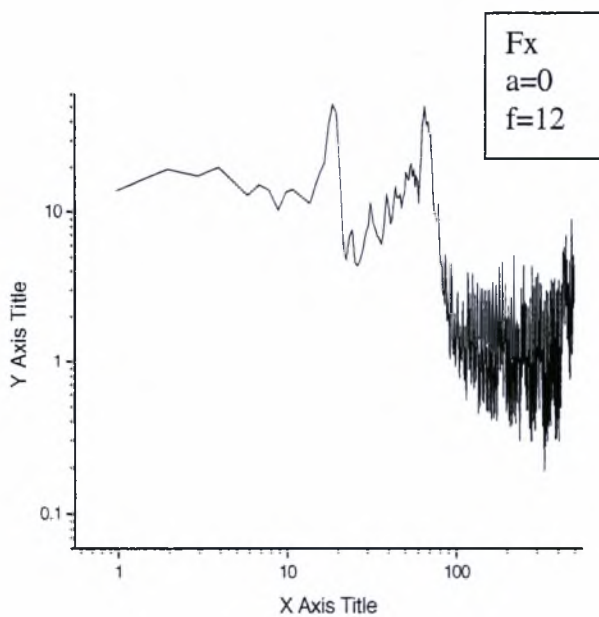
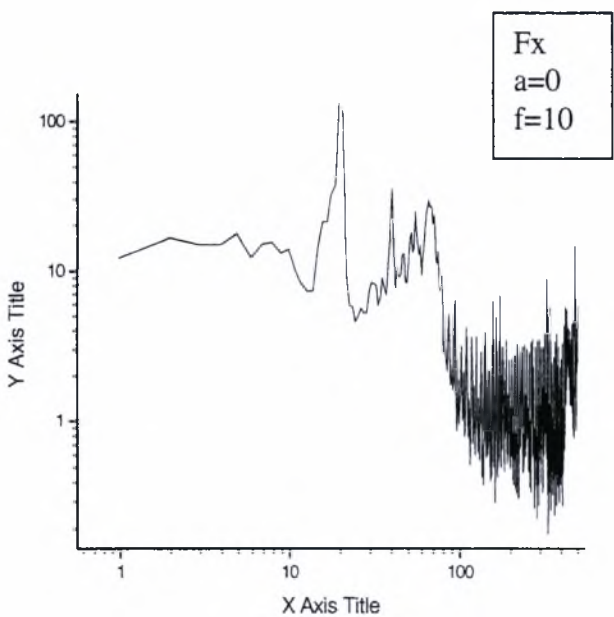
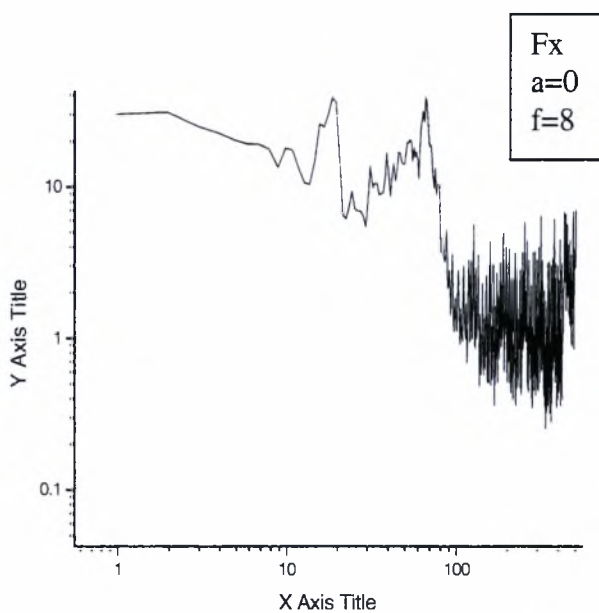
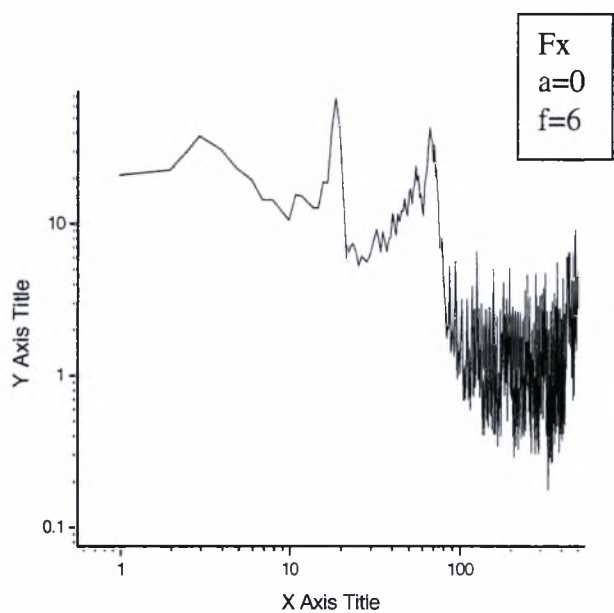
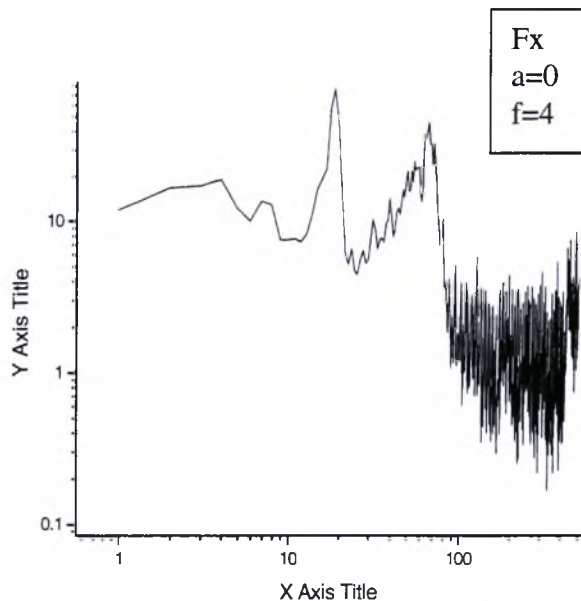
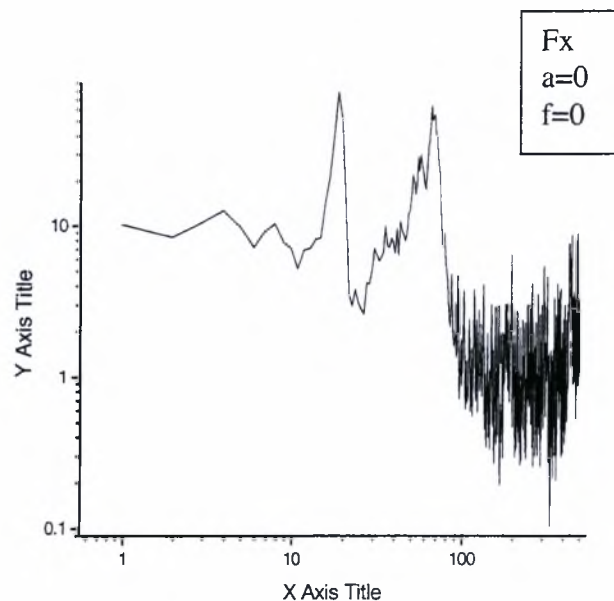
Διάγραμμα 4.75: Φάσματα δύναμης F_z (Lift)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=6$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



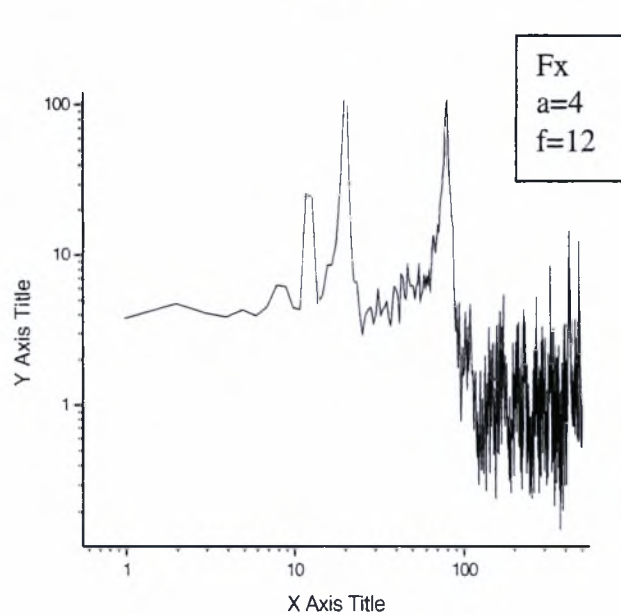
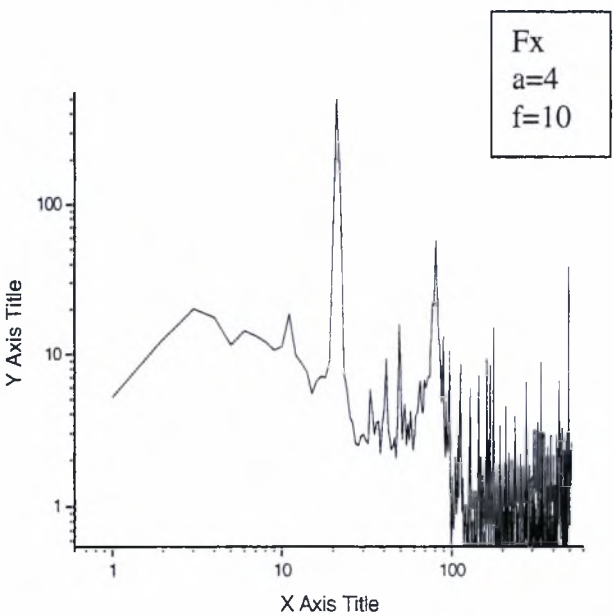
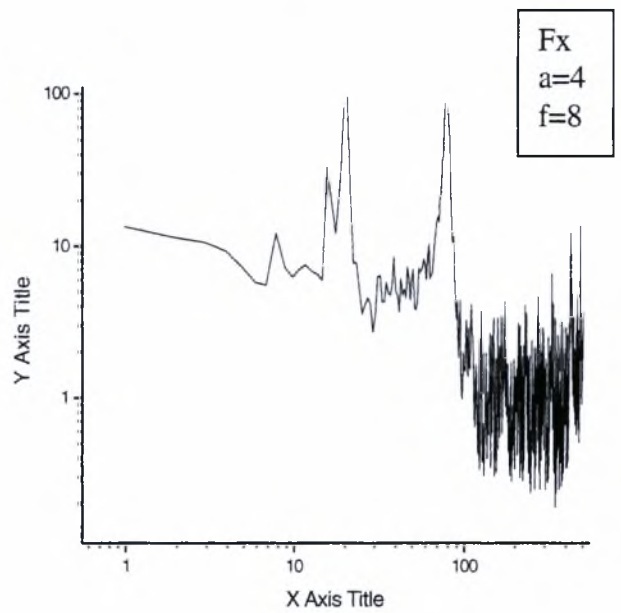
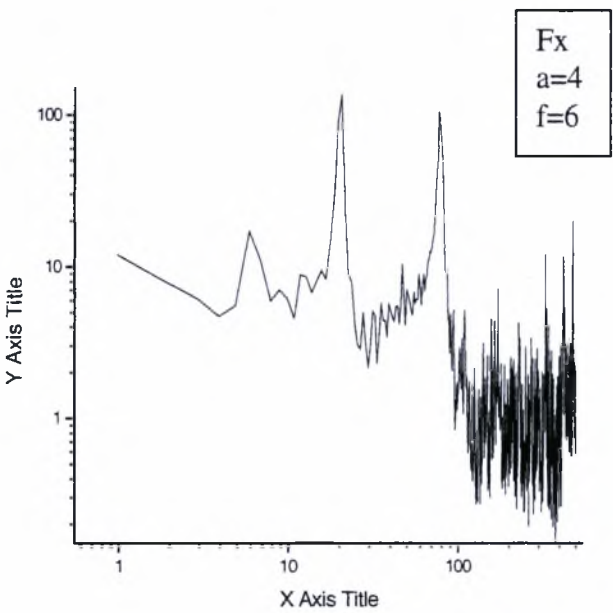
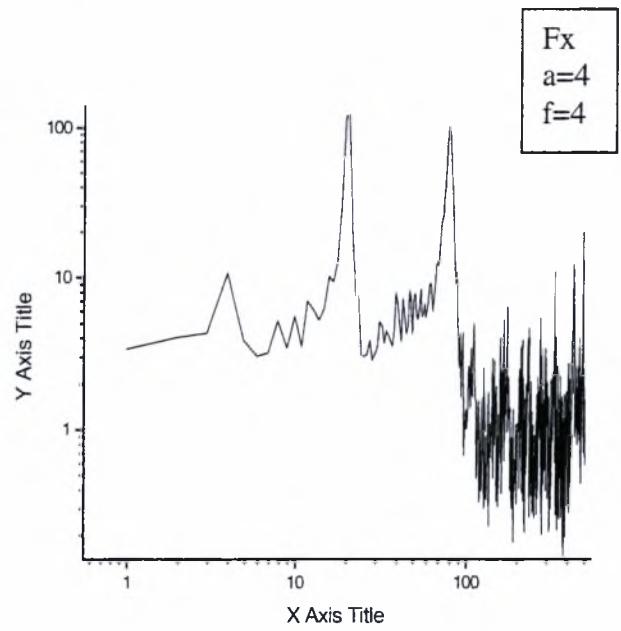
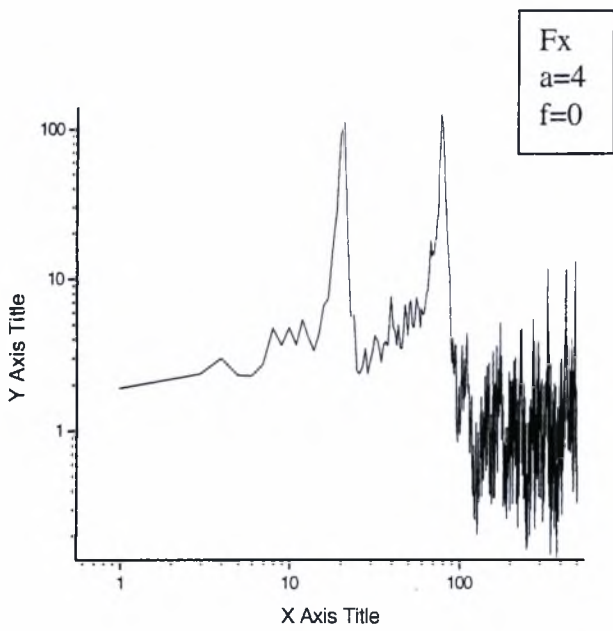
Διάγραμμα 4.76: Φάσματα δύναμης F_z (Lift)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=8$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



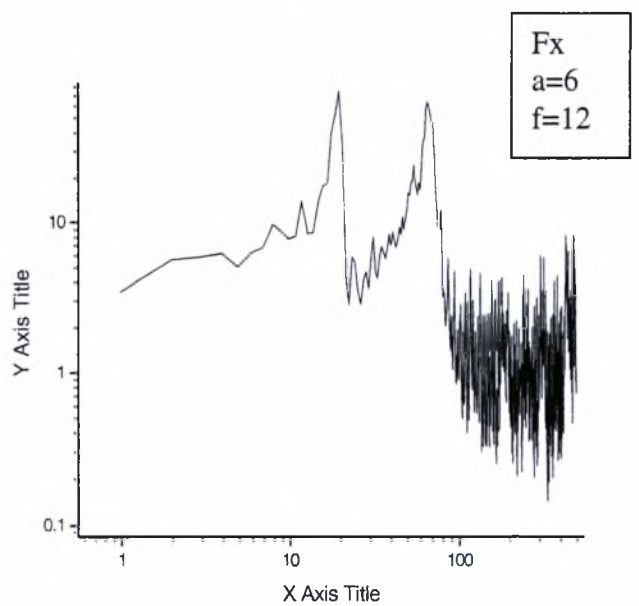
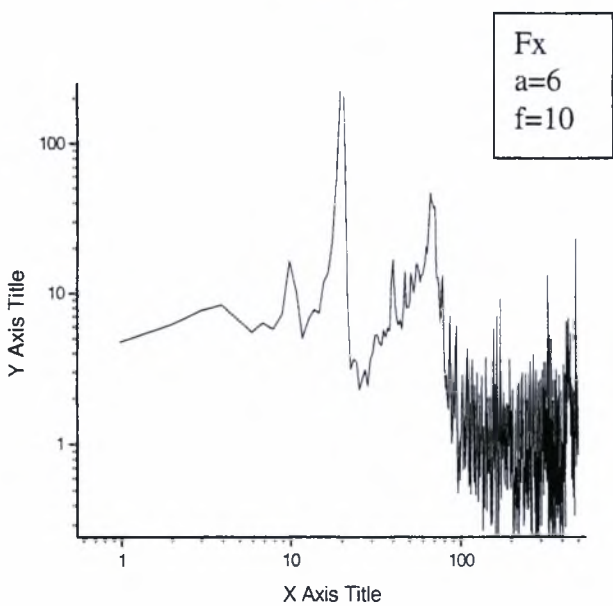
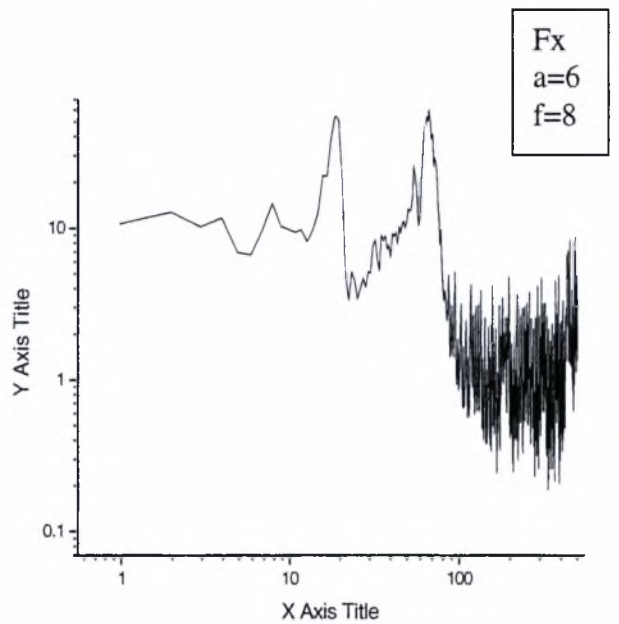
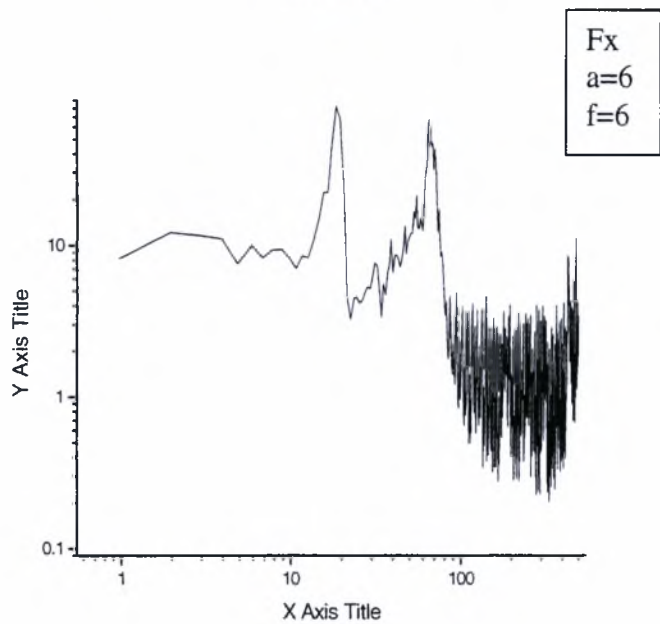
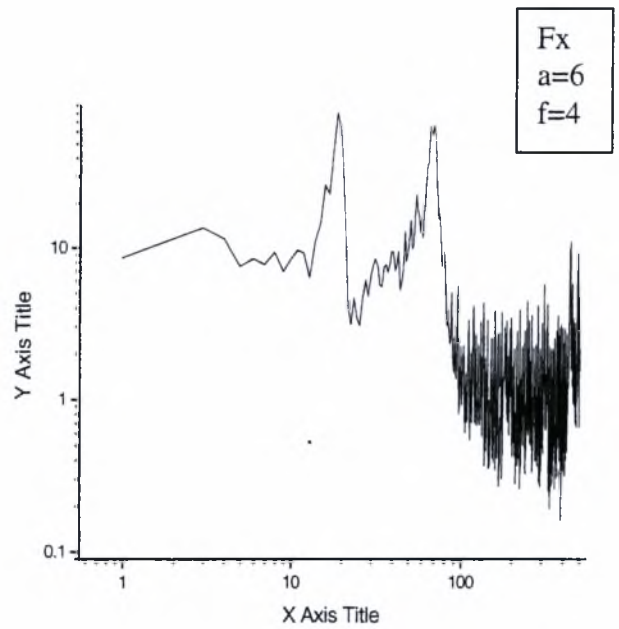
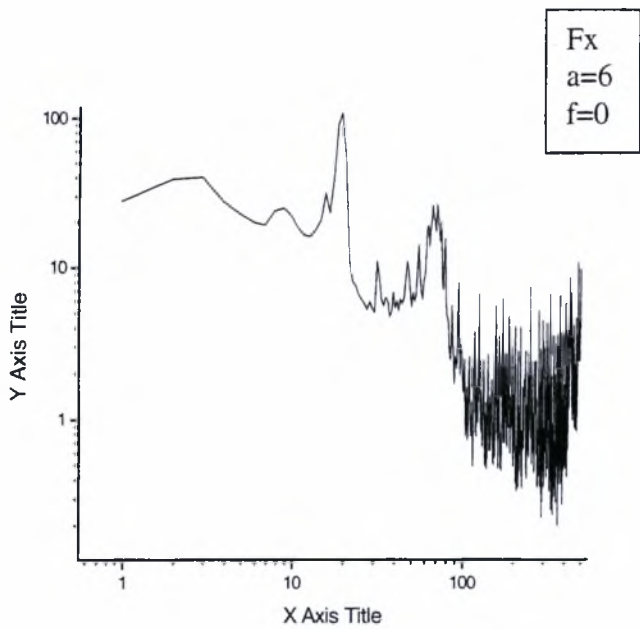
Διάγραμμα 4.77: Φάσματα δύναμης F_z (Lift)(Newton) για ροή πίσω από παράθυρο για γωνία πτερυγίου $\alpha=12$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



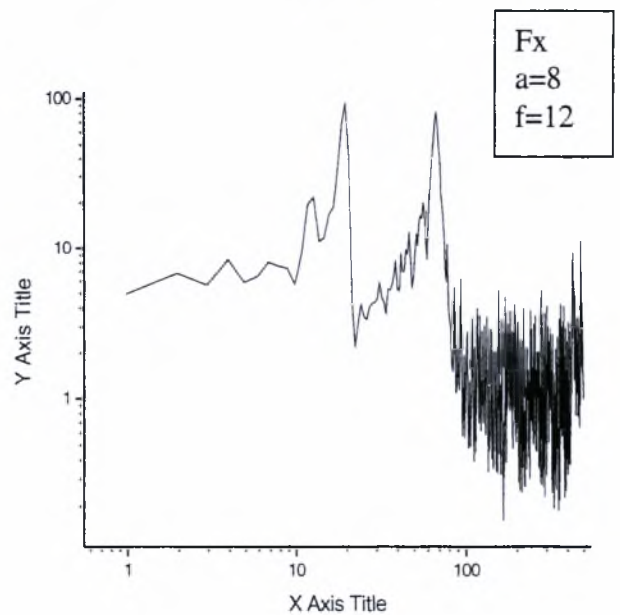
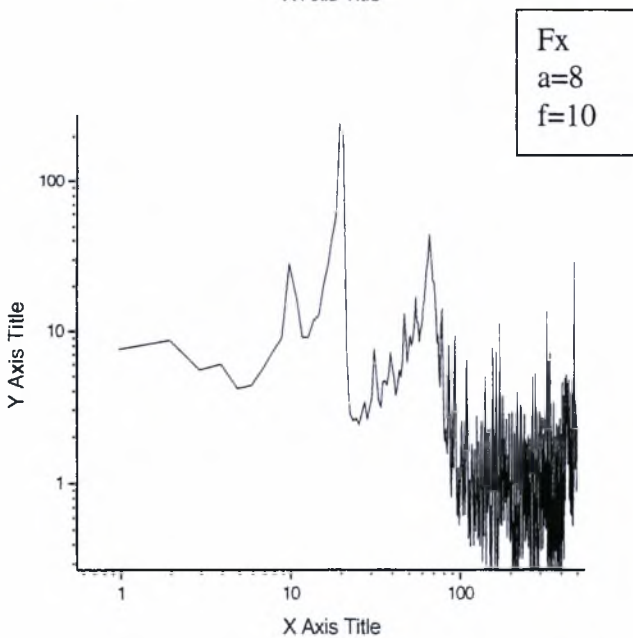
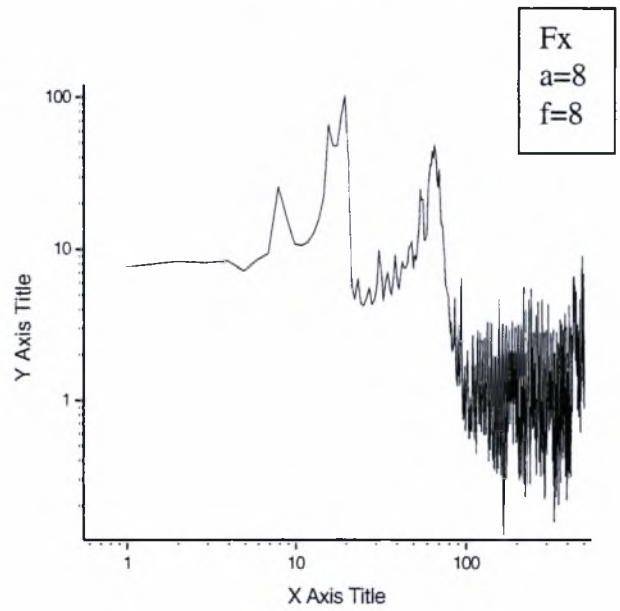
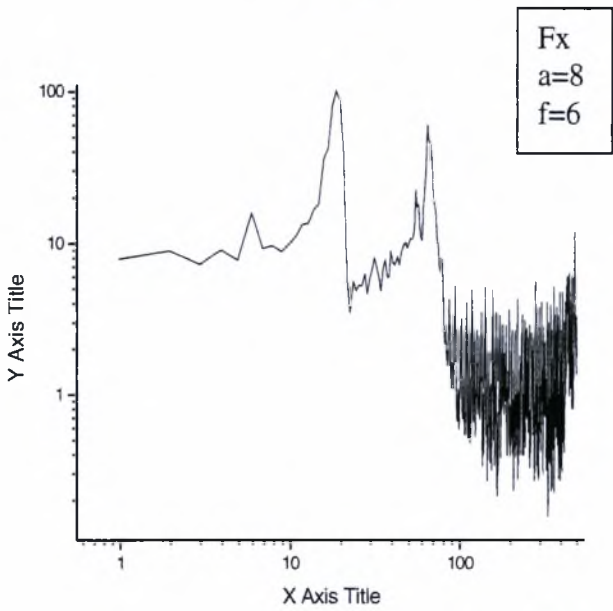
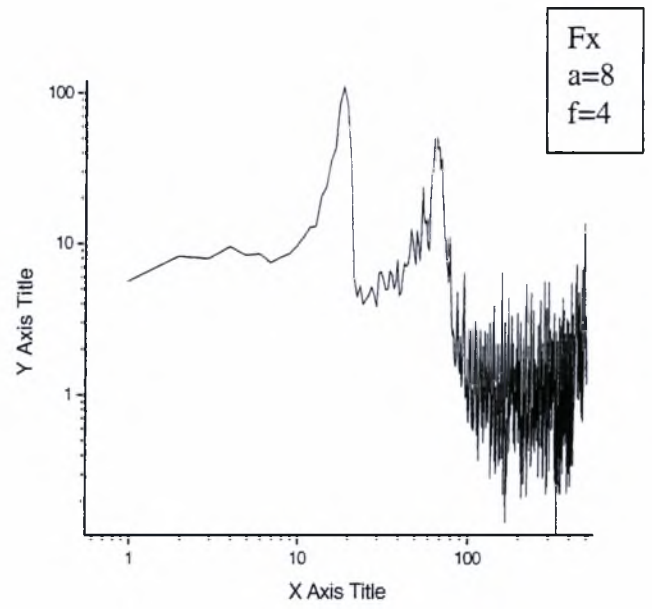
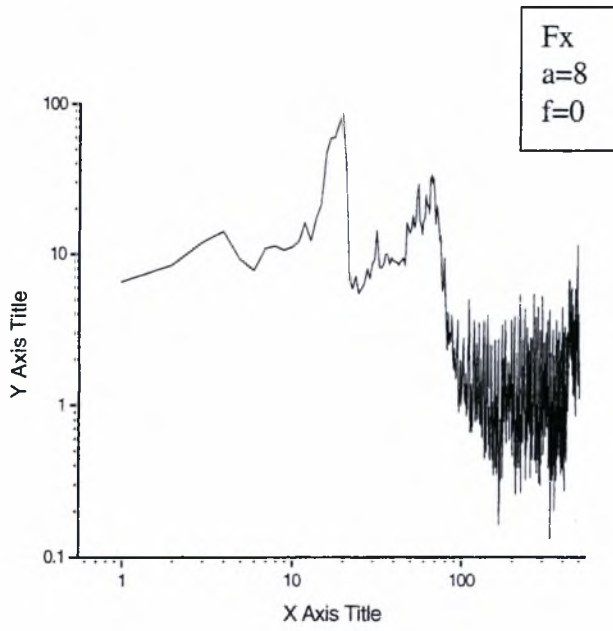
Διάγραμμα 4.78: Φάσματα δύναμης F_x (Drag) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $a=0$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



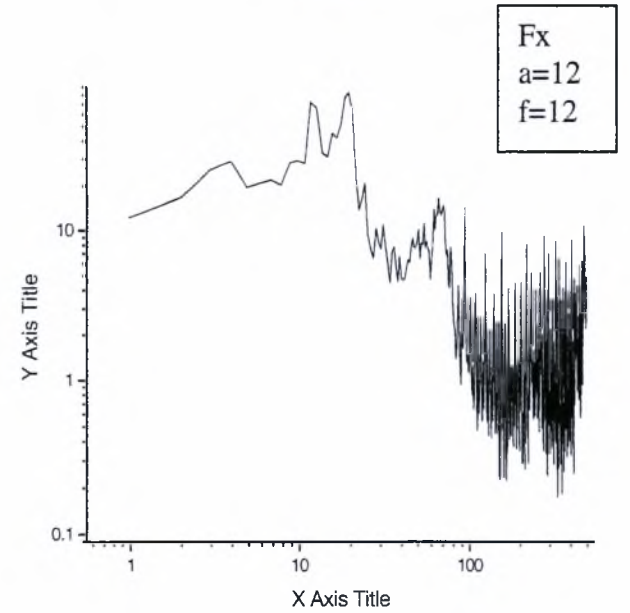
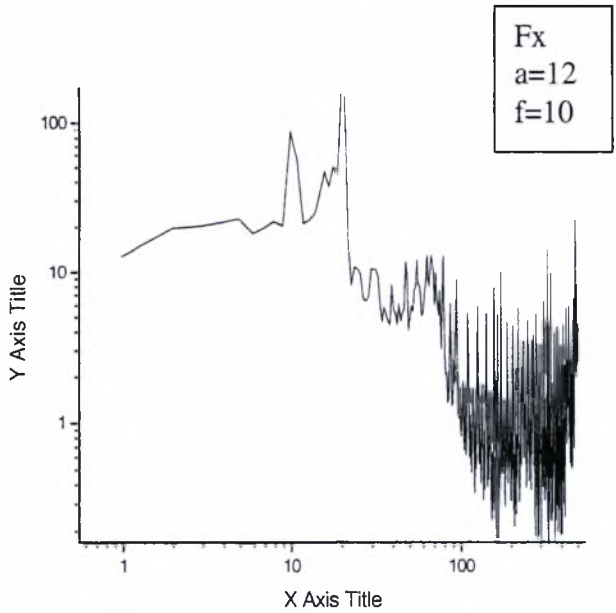
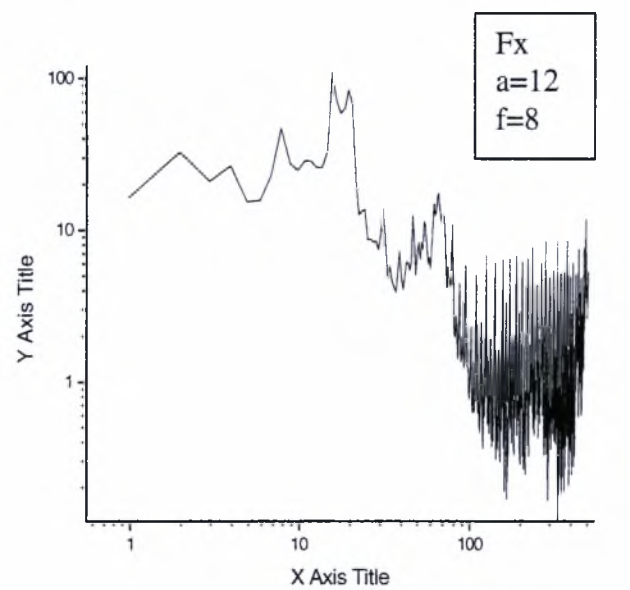
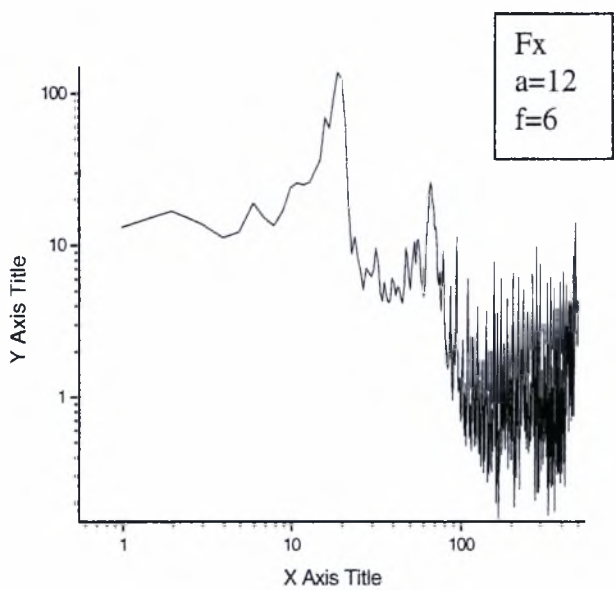
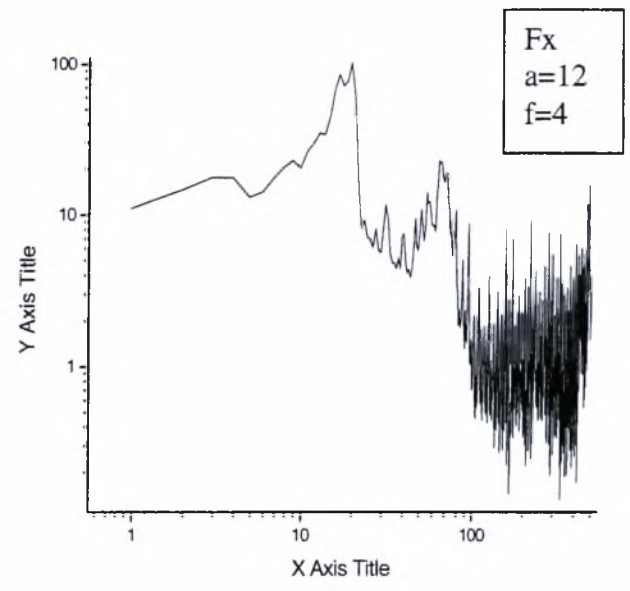
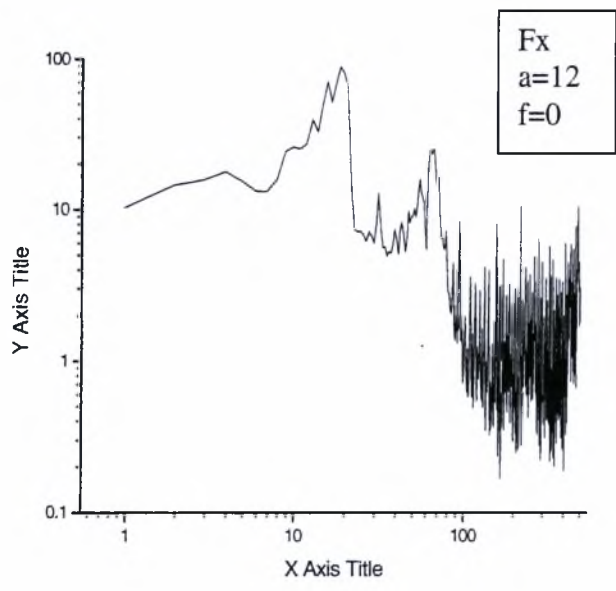
Διάγραμμα 4.79: Φάσματα δύναμης F_x (Drag) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $a=4$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



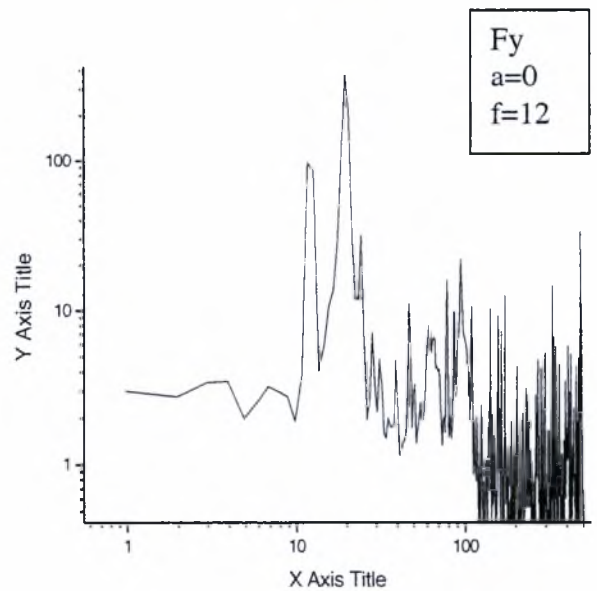
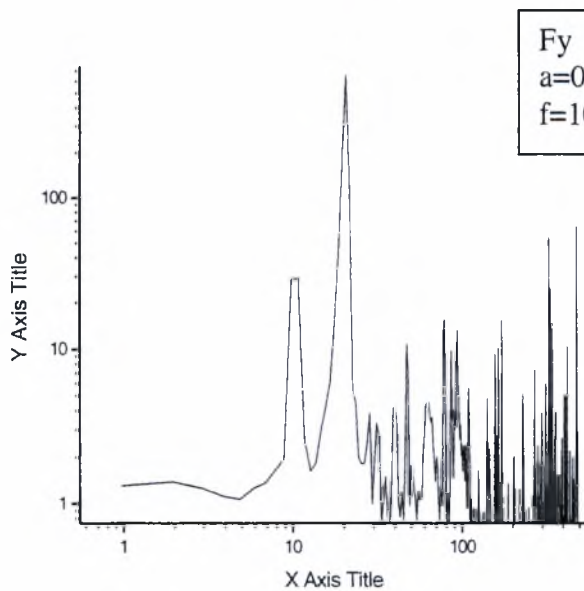
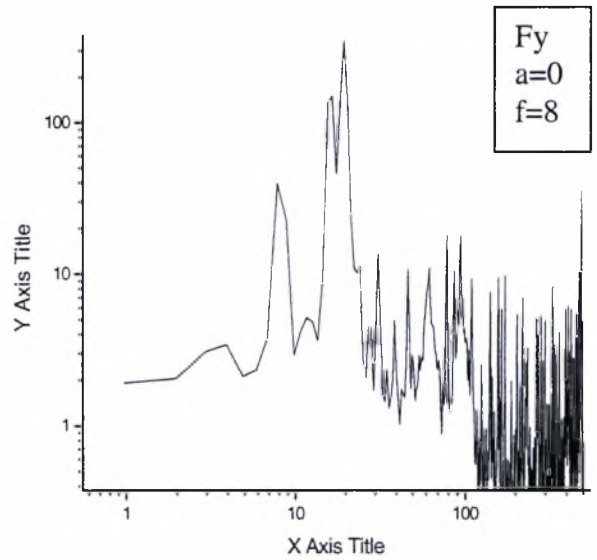
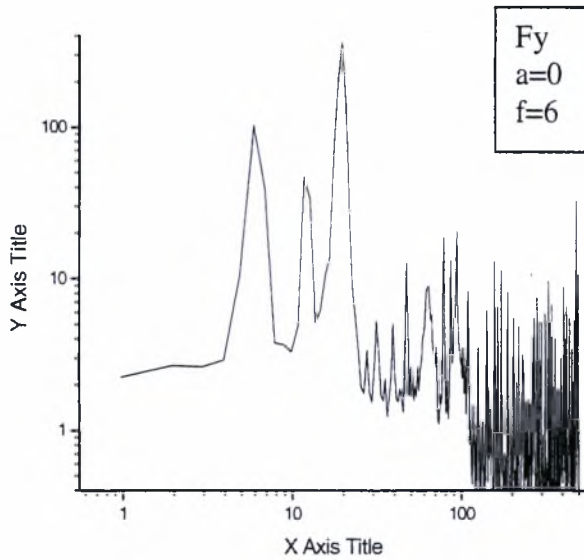
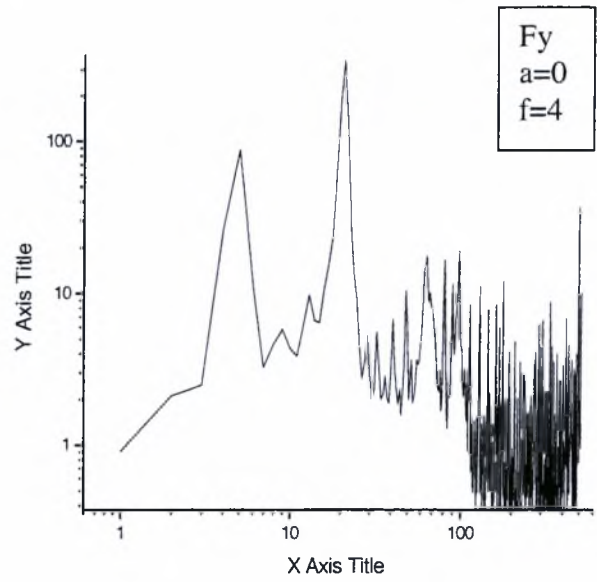
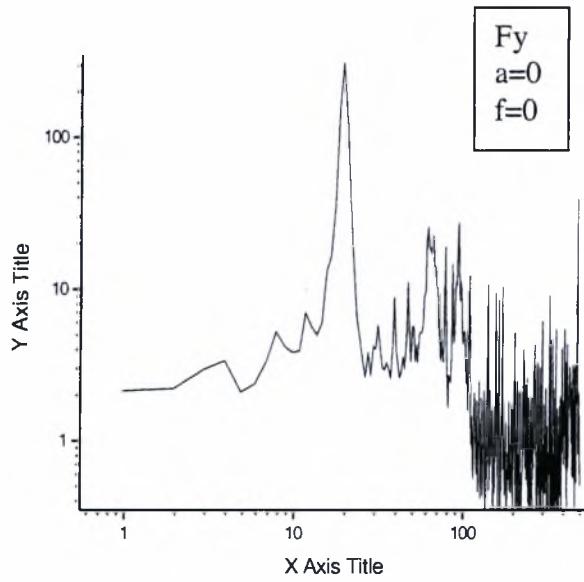
Διάγραμμα 4.80: Φάσματα δύναμης F_x (Drag) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $a=6$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



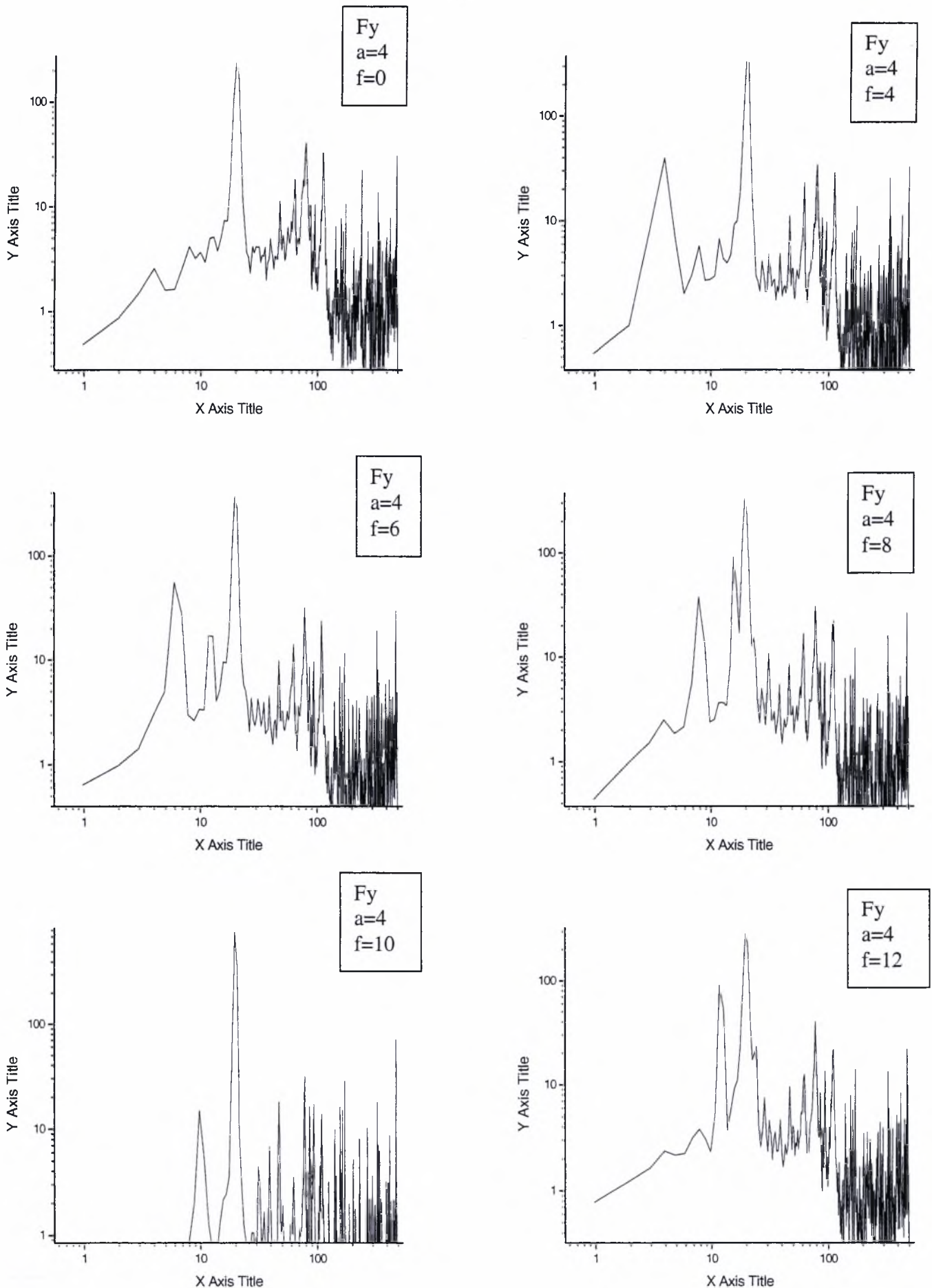
Διάγραμμα 4.81: Φάσματα δύναμης F_x (Drag) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία περυσίου $a=8$ (α) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



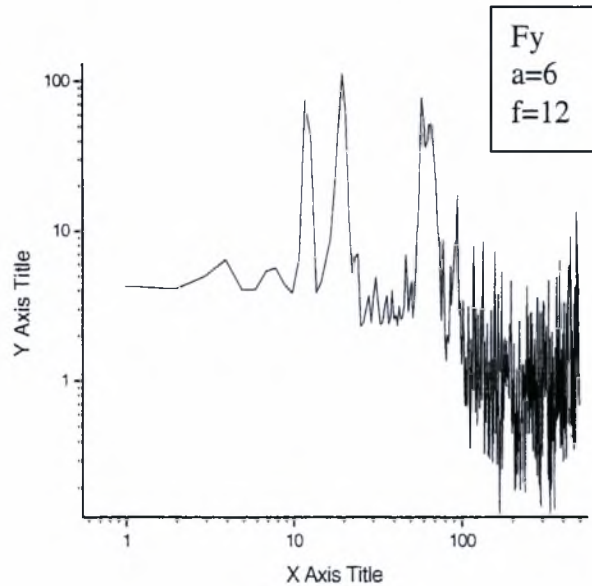
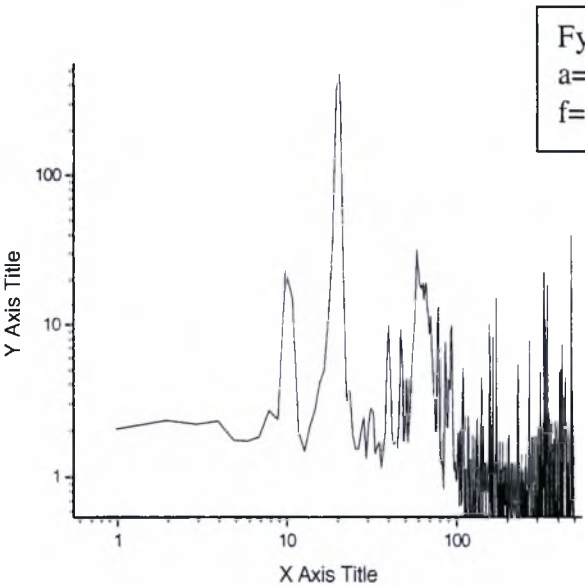
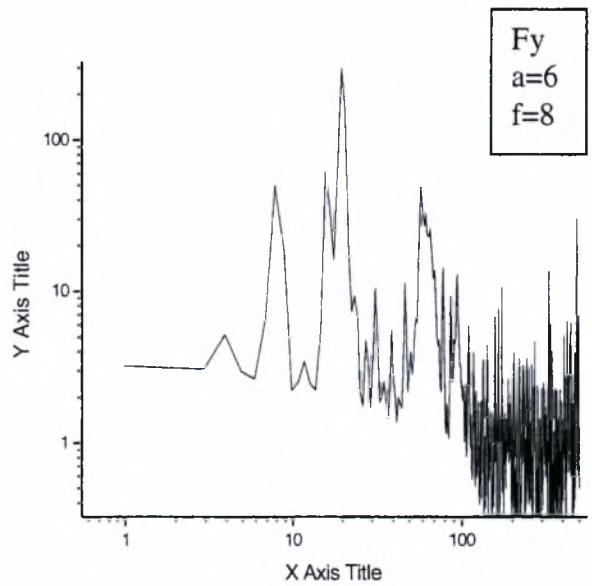
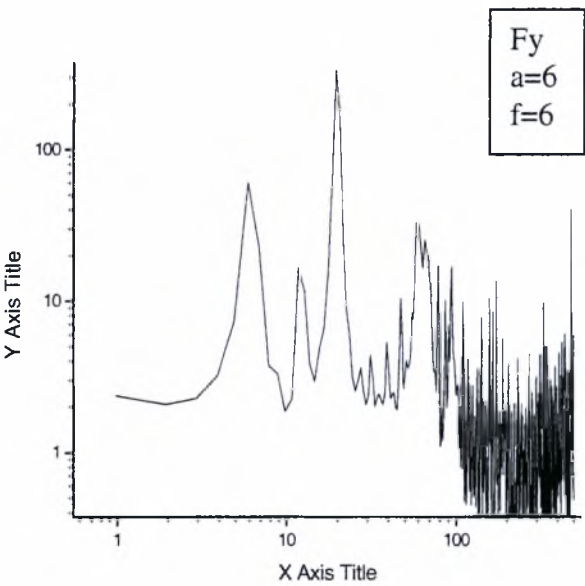
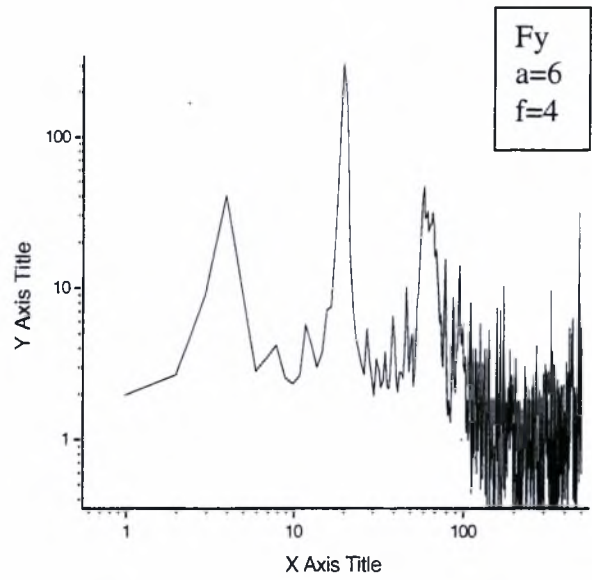
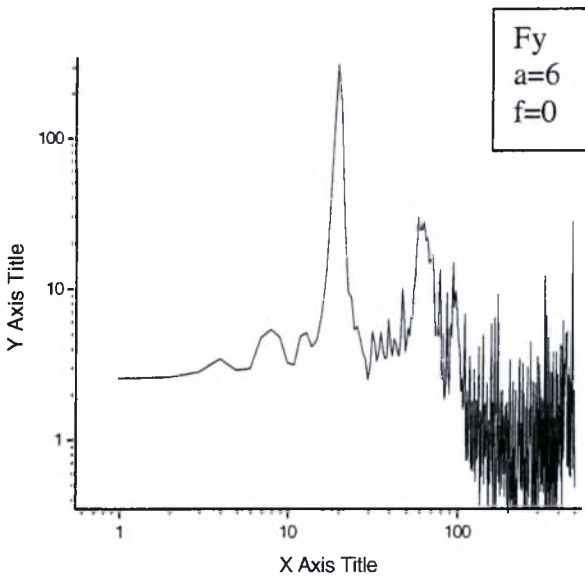
Διάγραμμα 4.82: Φάσματα δύναμης F_x (Drag) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $\alpha=12$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



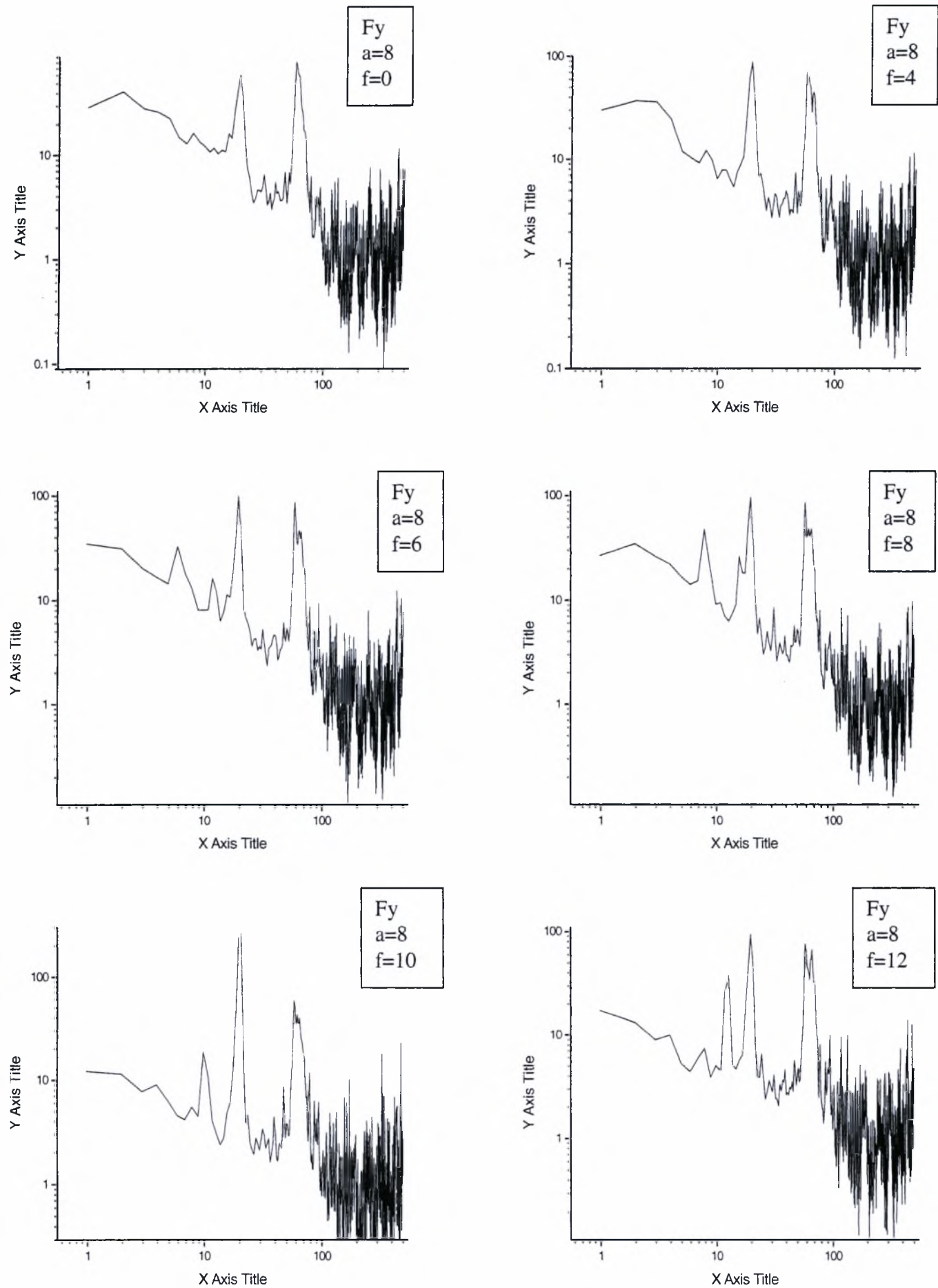
Διάγραμμα 4.83: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία περυγίου $\alpha=0$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



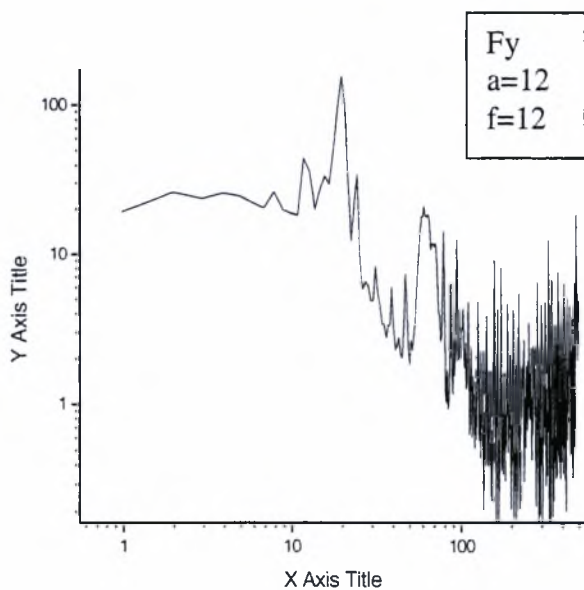
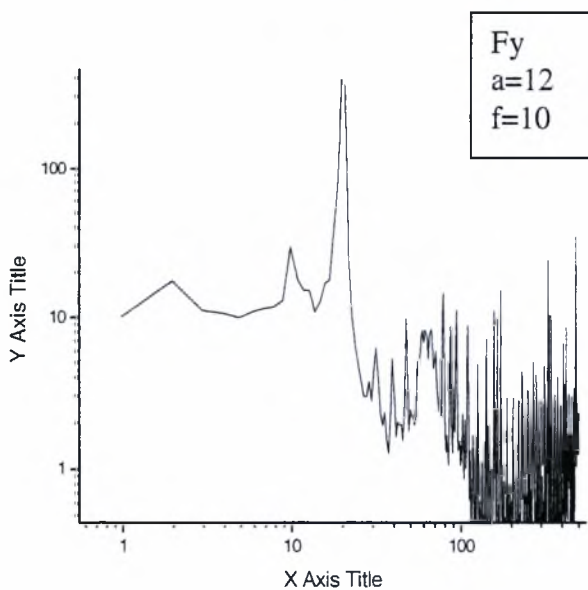
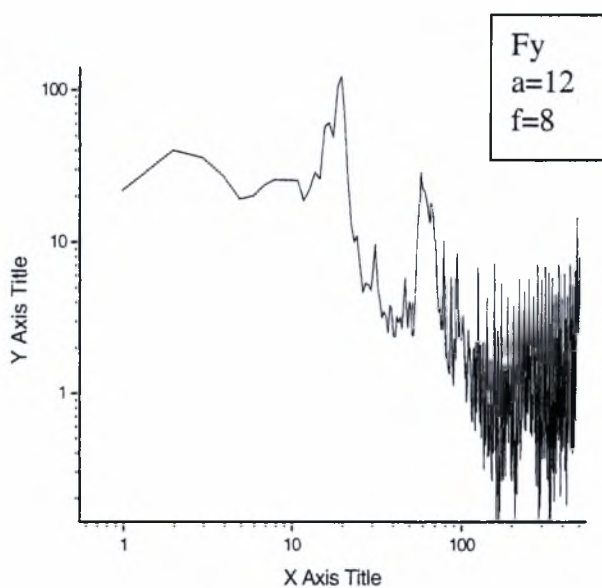
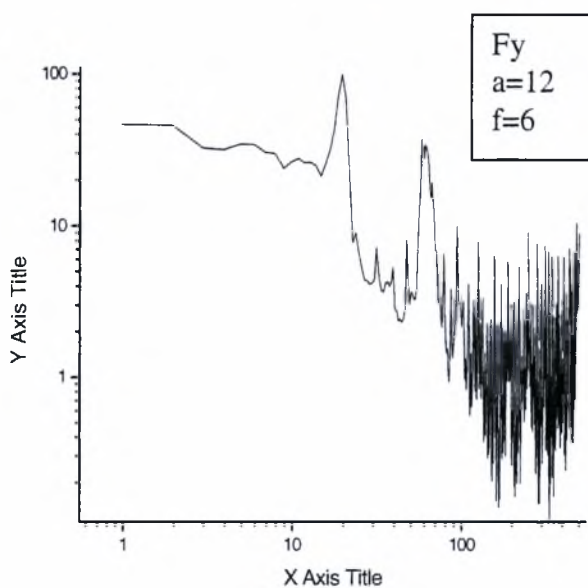
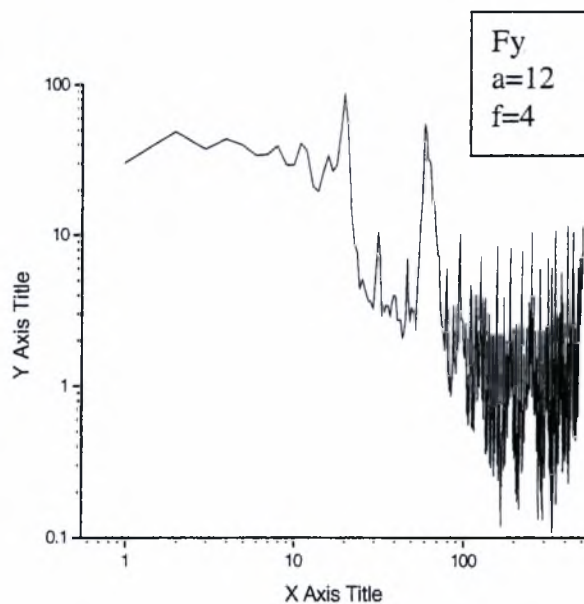
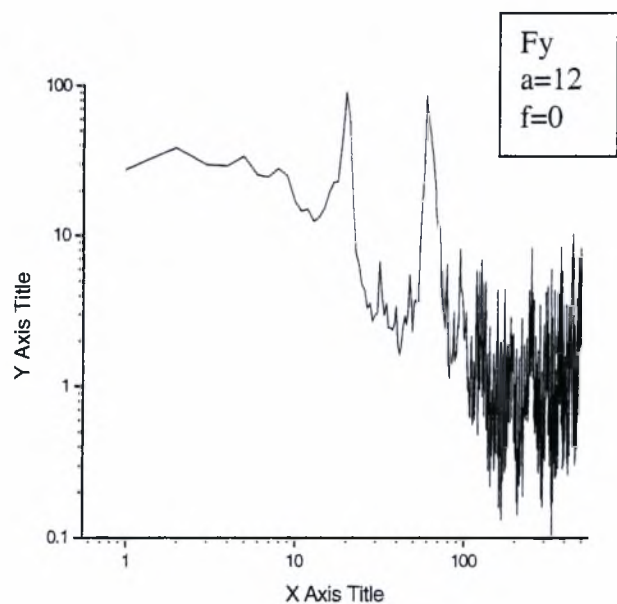
Διάγραμμα 4.84: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $\alpha=4$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



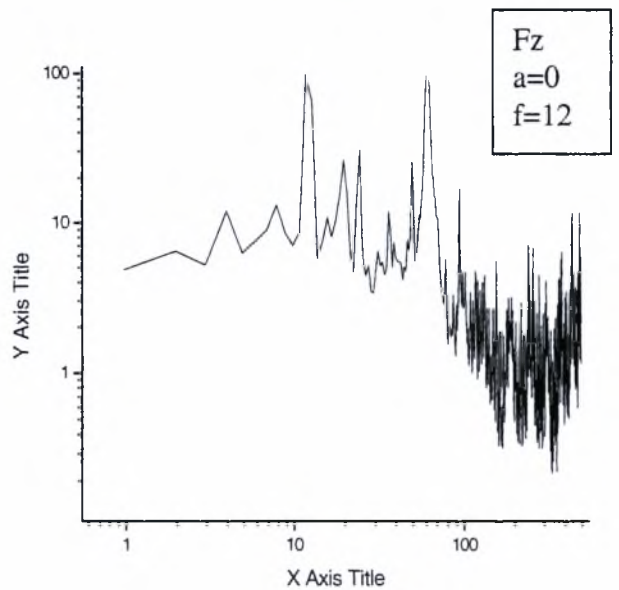
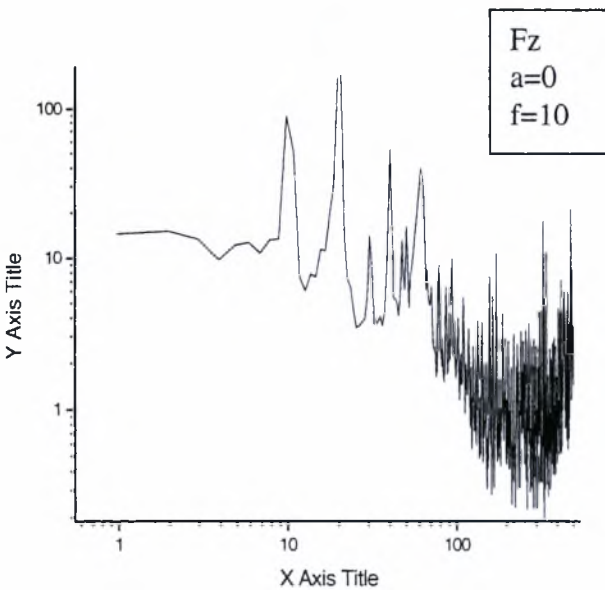
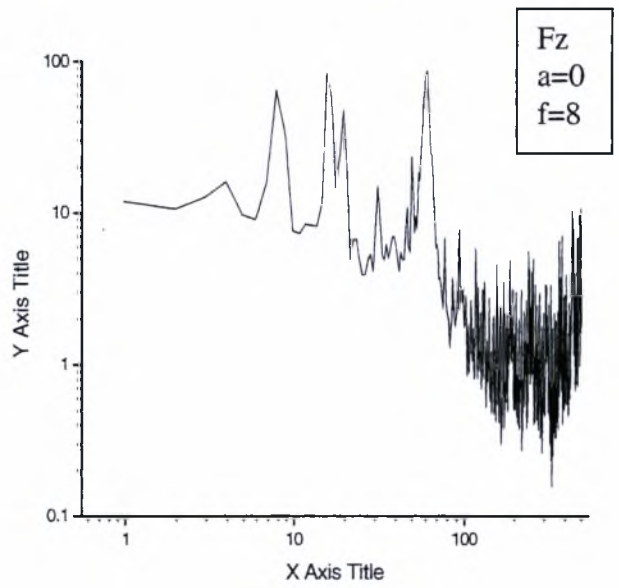
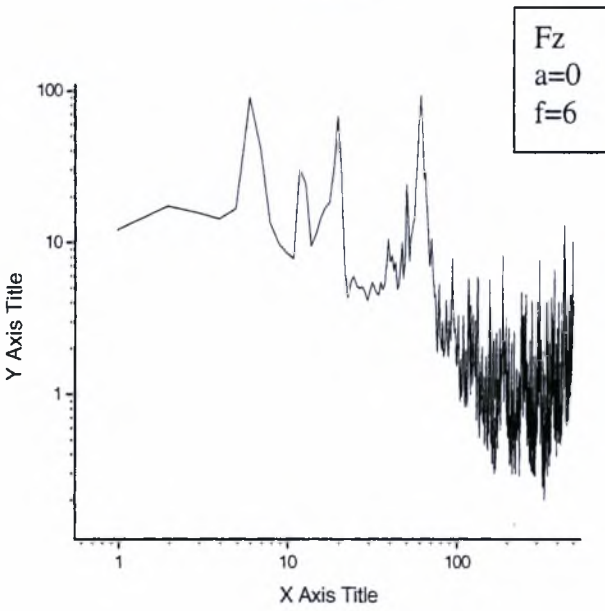
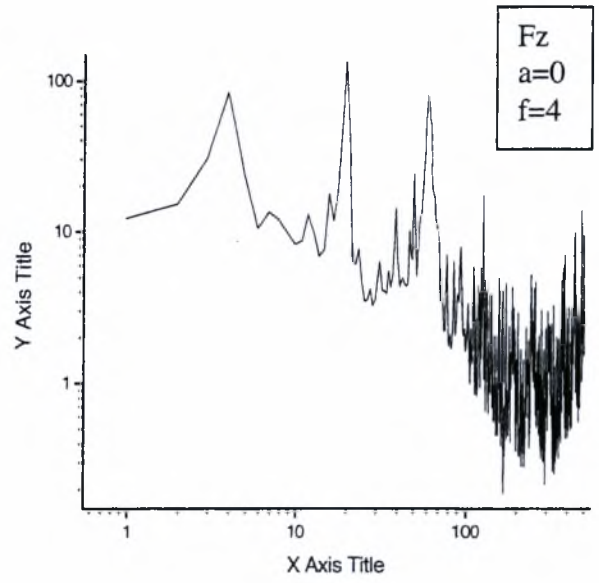
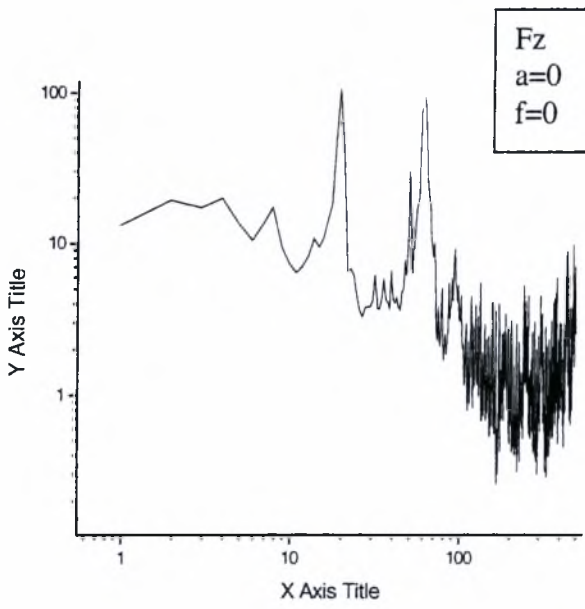
Διάγραμμα 4.85: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $\alpha=6$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



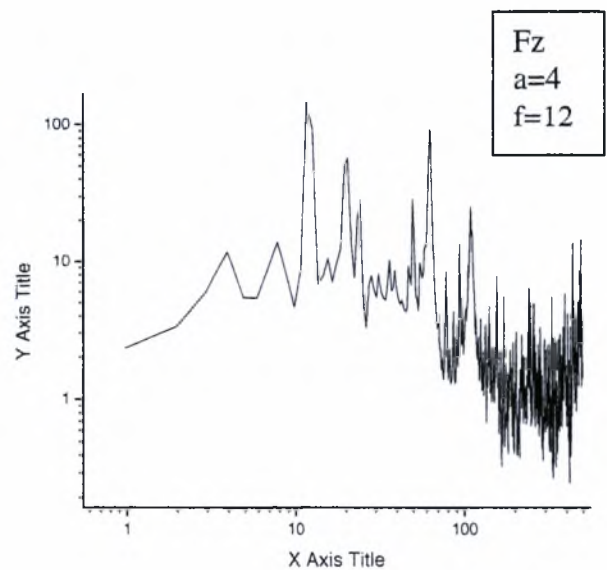
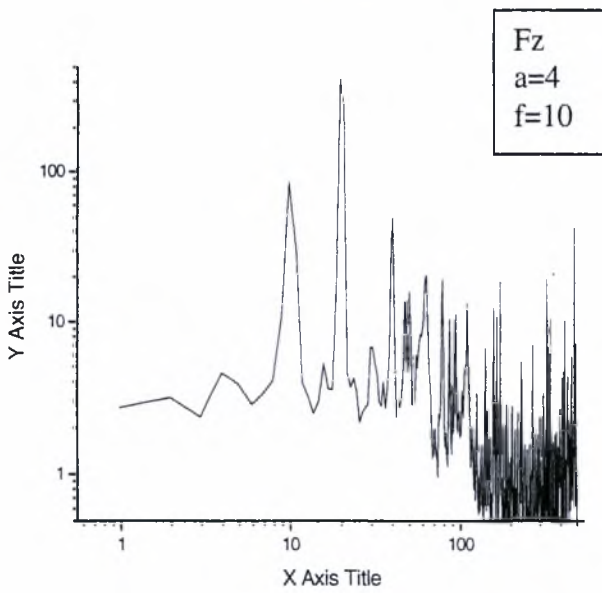
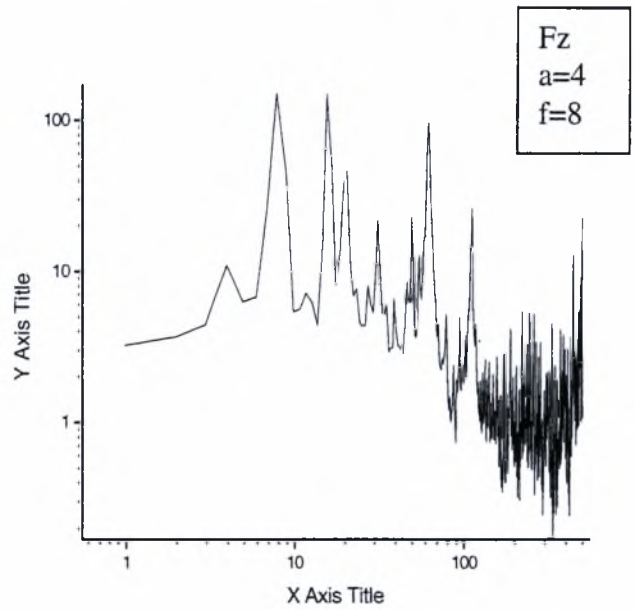
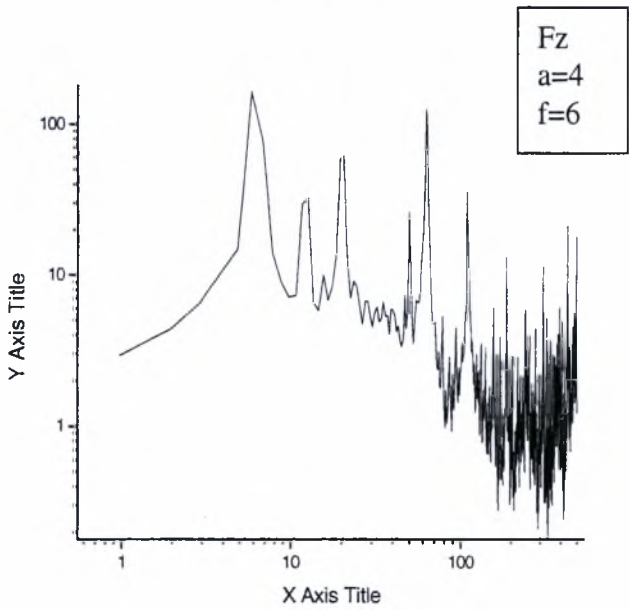
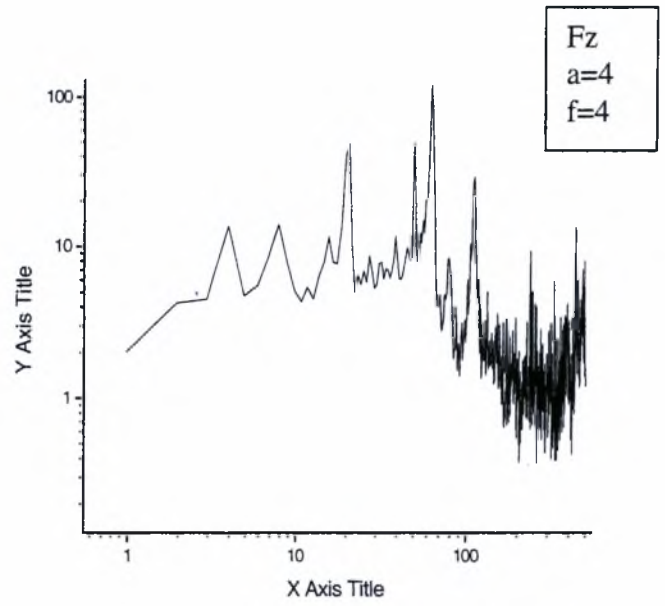
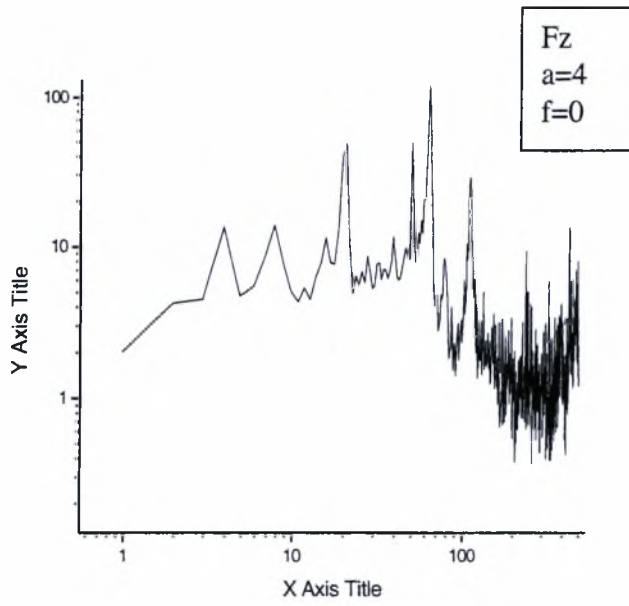
Διάγραμμα 4.86: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $a=0$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



Διάγραμμα 4.87: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $\alpha=12$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.

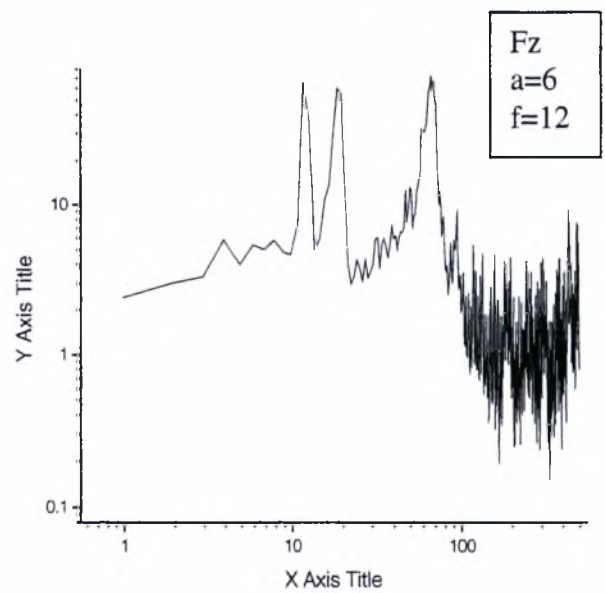
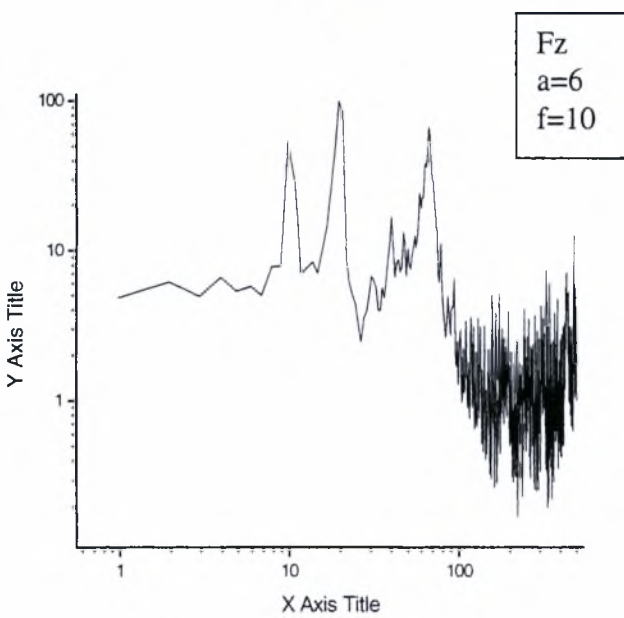
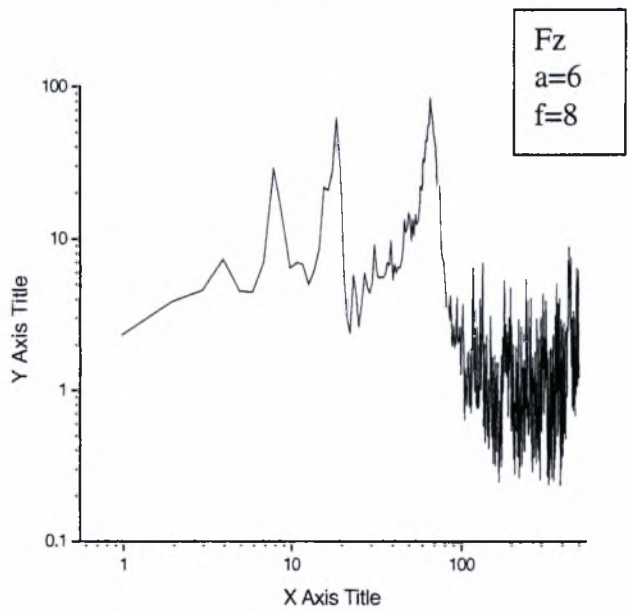
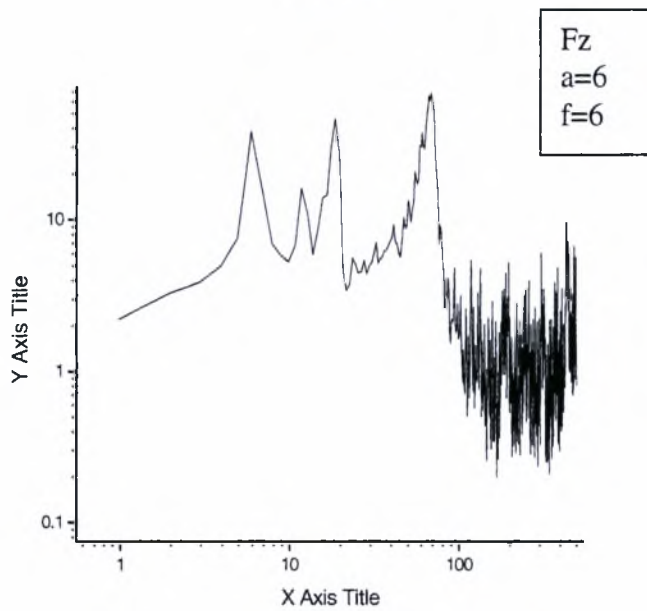
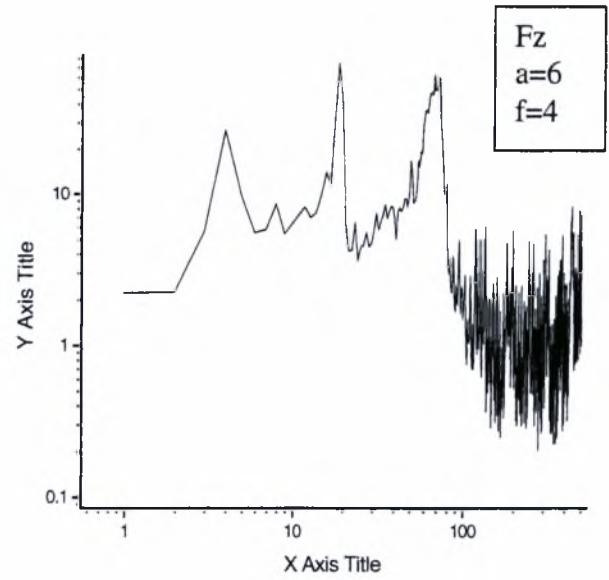
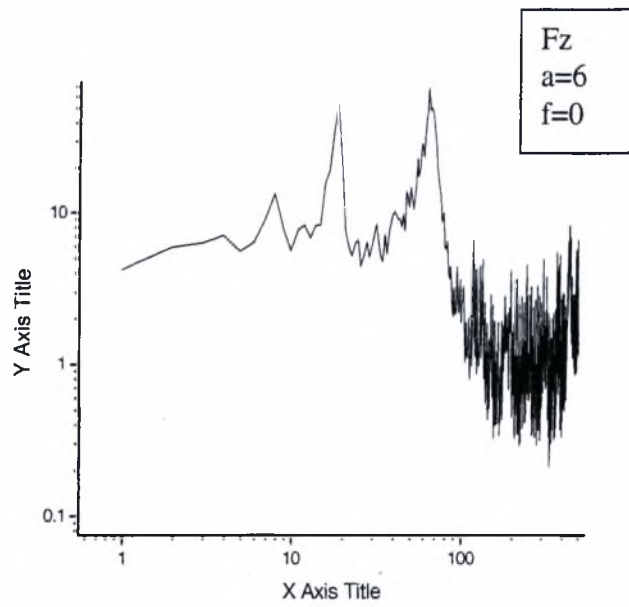


Διάγραμμα 4.88: Φάσματα δύναμης F_z (Lift) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερνίου $\alpha=0$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz

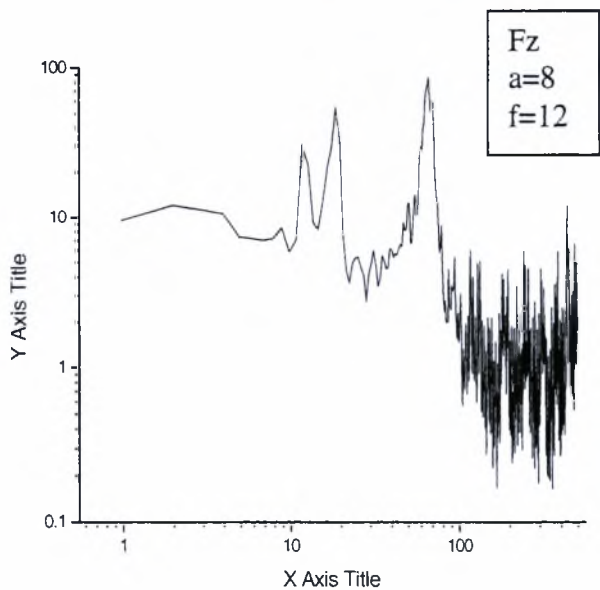
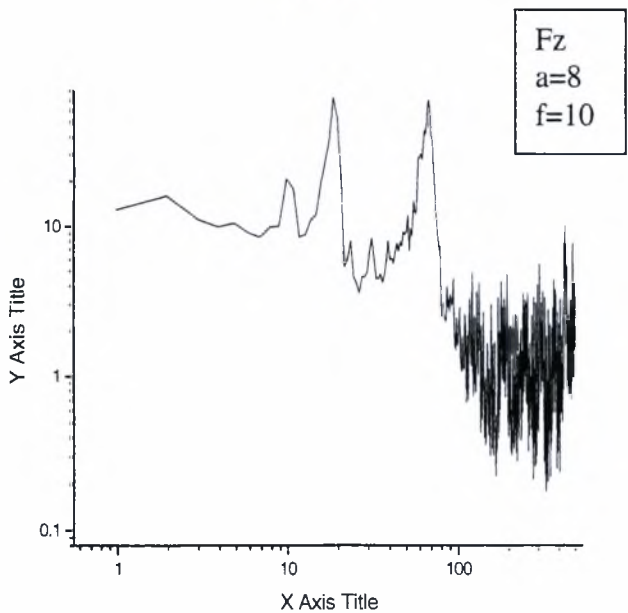
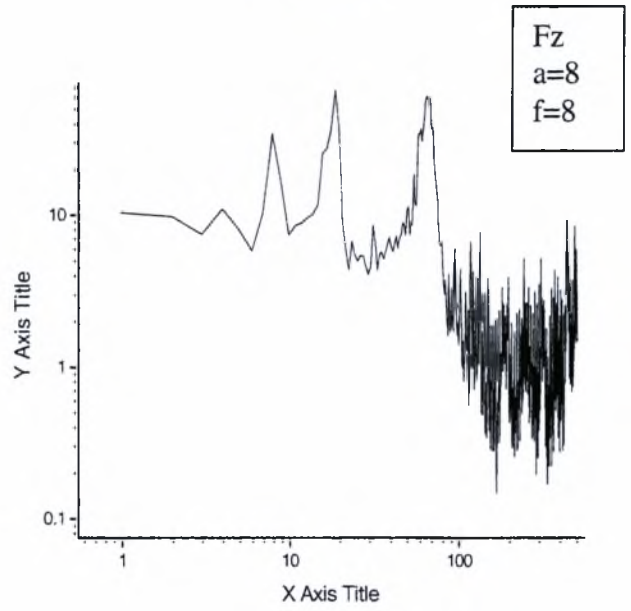
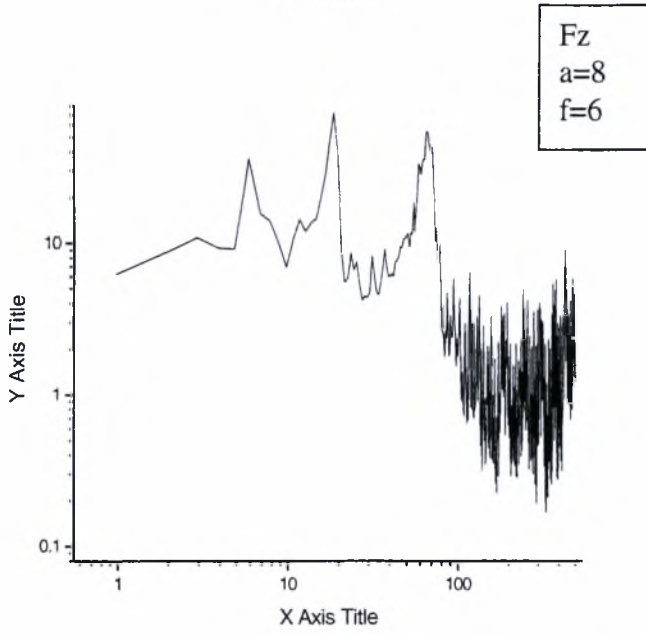
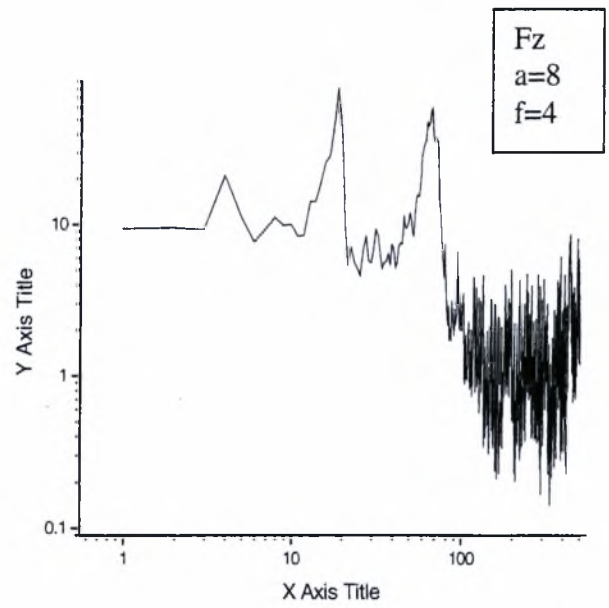
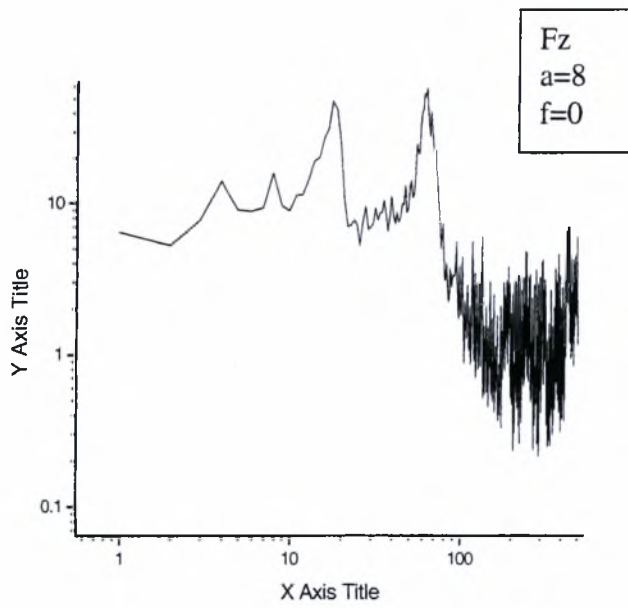


Διάγραμμα 4.89: Φάσματα δύναμης F_z (Lift) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για

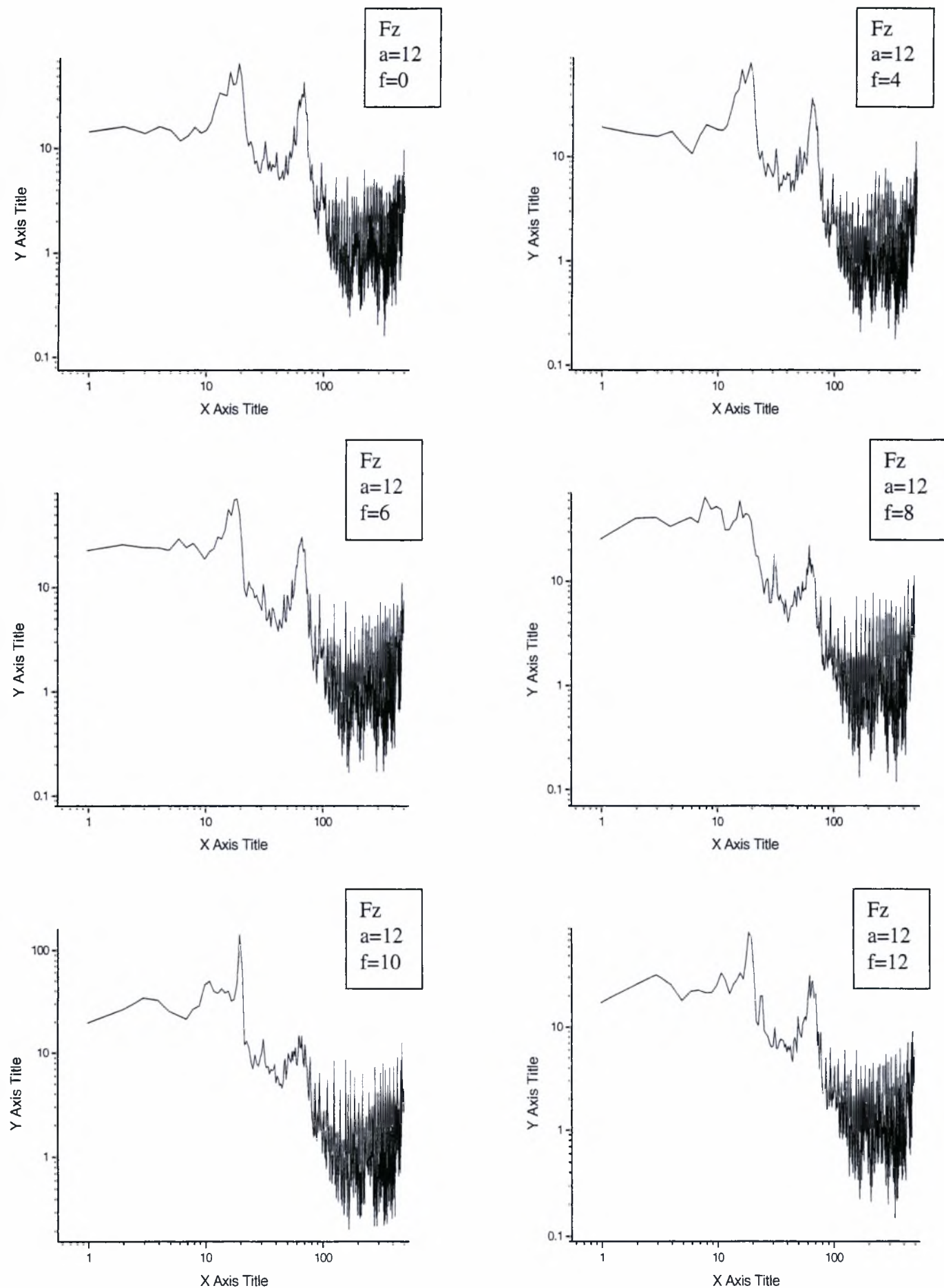
γωνία πτερυγίου $\alpha=4$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



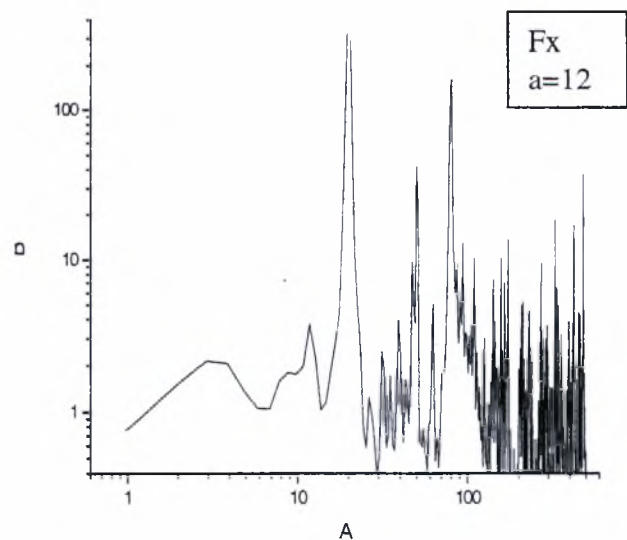
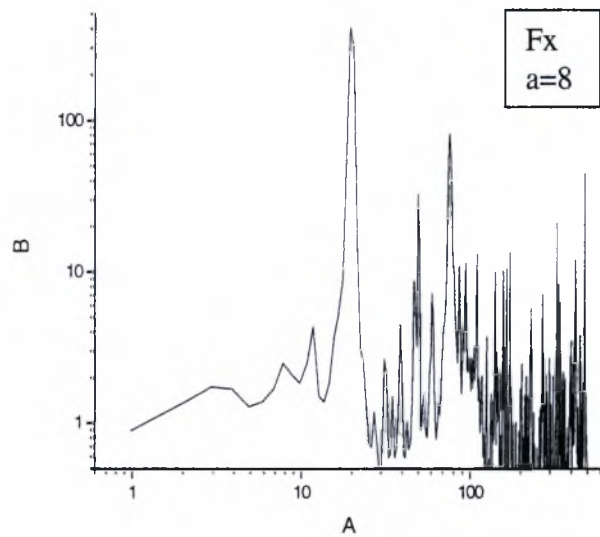
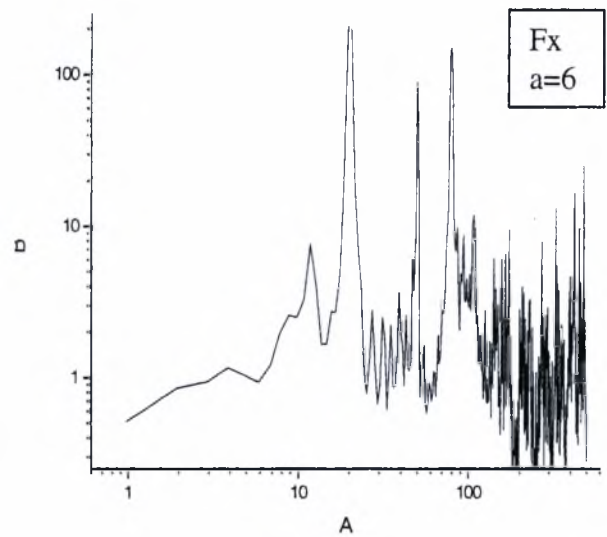
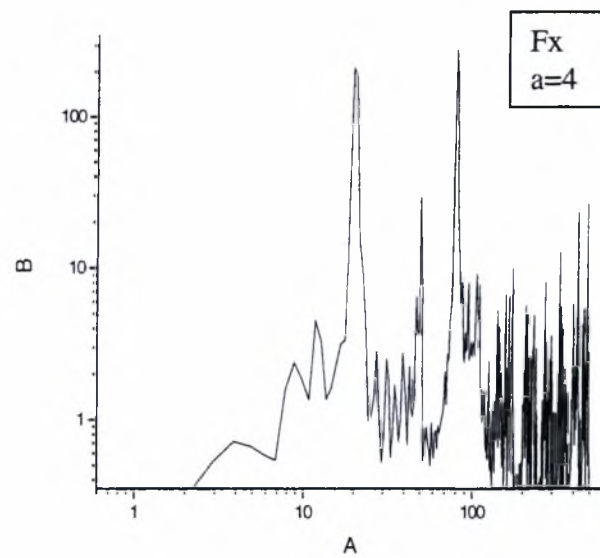
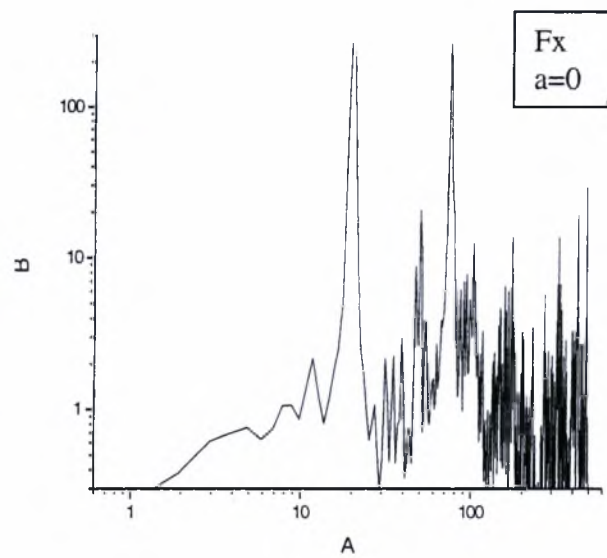
Διάγραμμα 4.90: Φάσματα δύναμης F_z (Lift) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $a=6$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



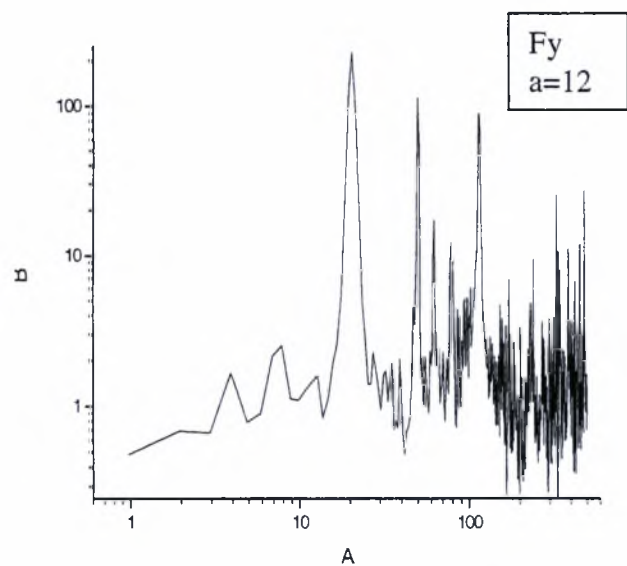
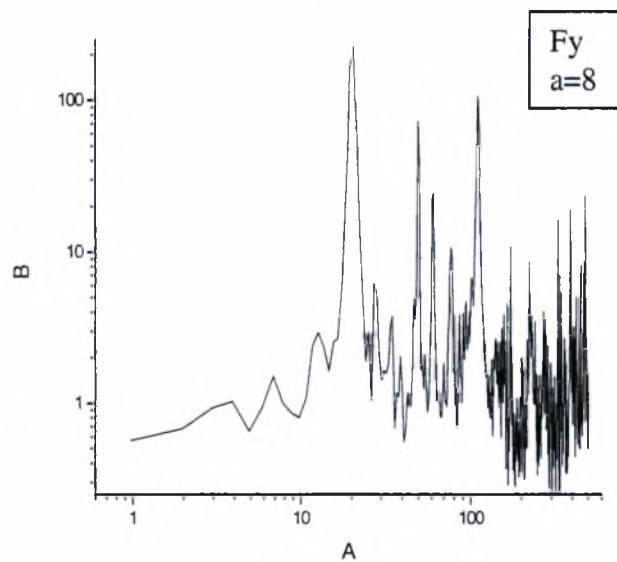
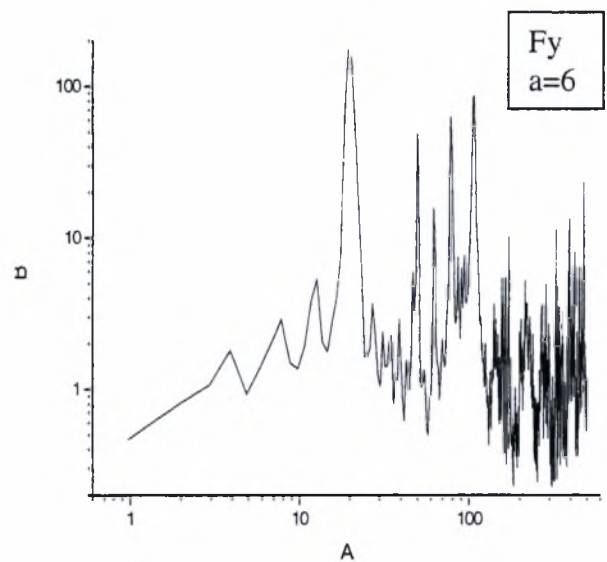
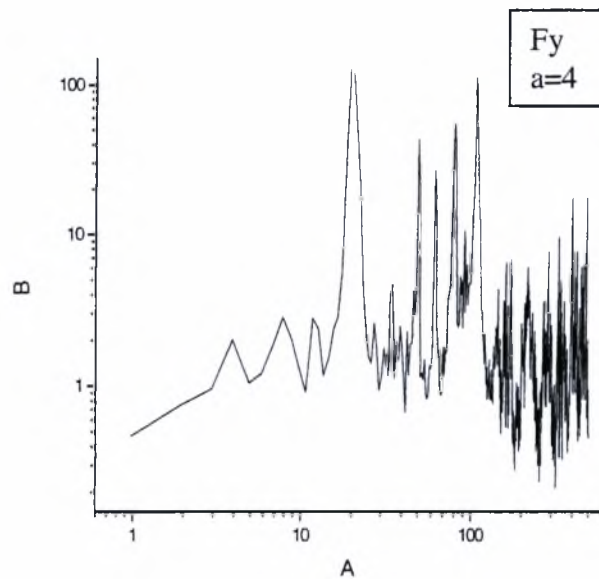
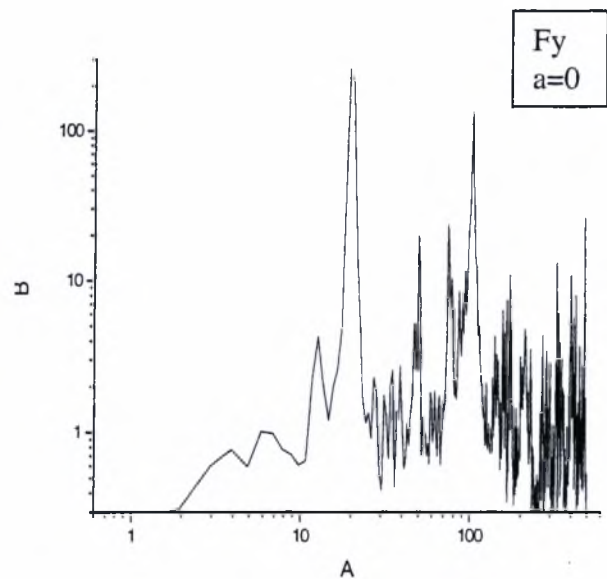
Διάγραμμα 4.91: Φάσματα δύναμης F_z (Lift) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία περυγίου $\alpha=8$ (ο) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



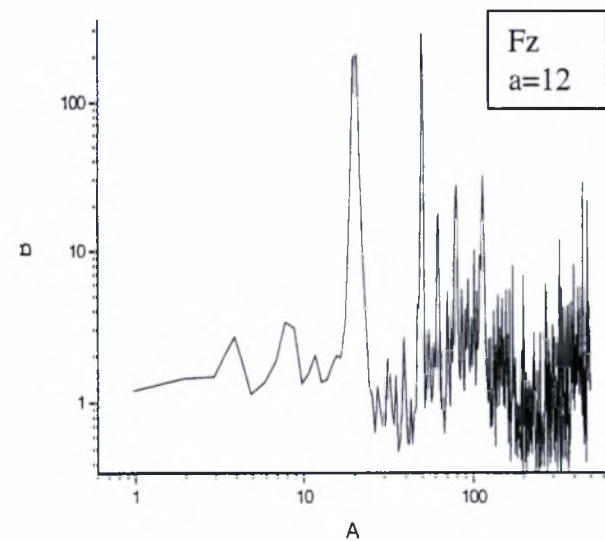
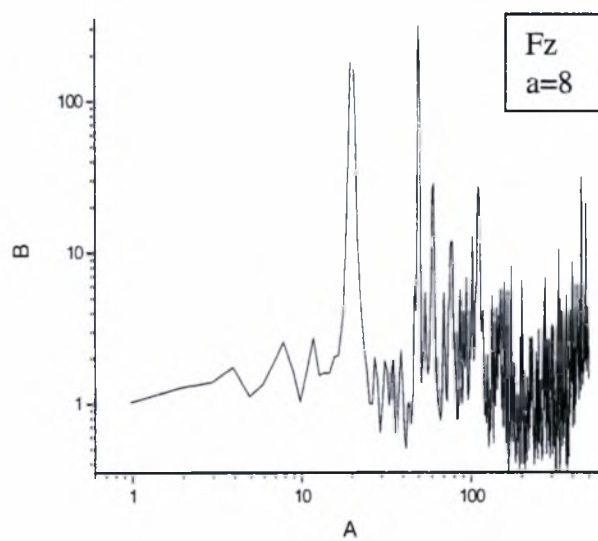
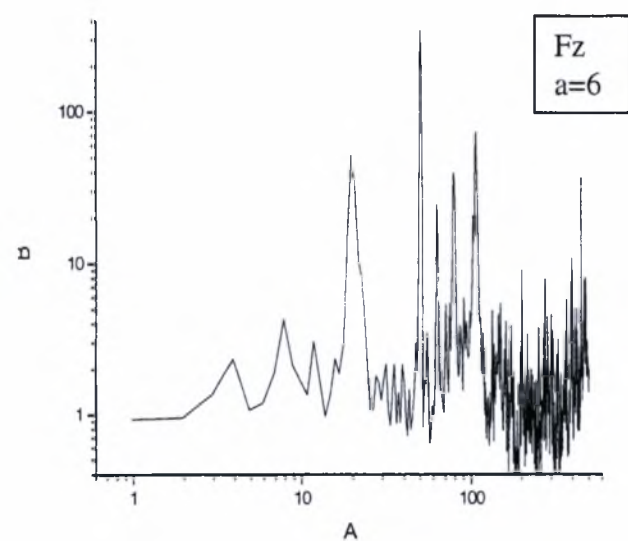
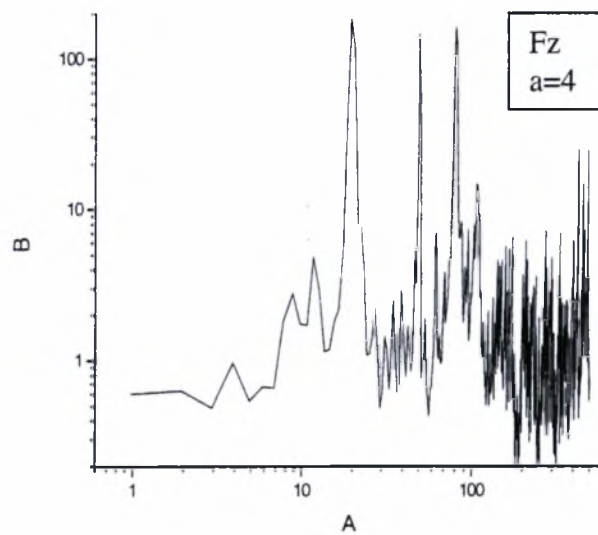
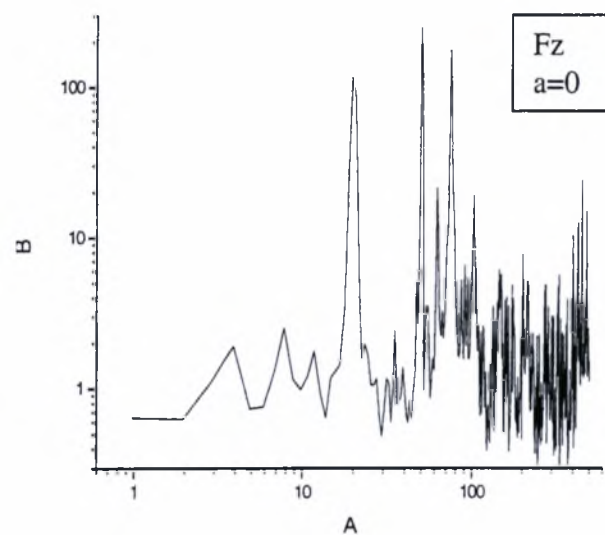
Διάγραμμα 4.92: Φάσματα δύναμης F_z (Lift) (Newton) για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα για γωνία πτερυγίου $\alpha=12$ (α) και για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-12$ Hz.



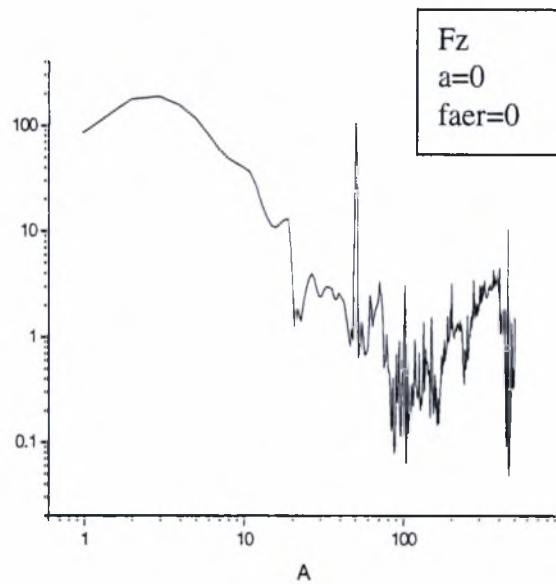
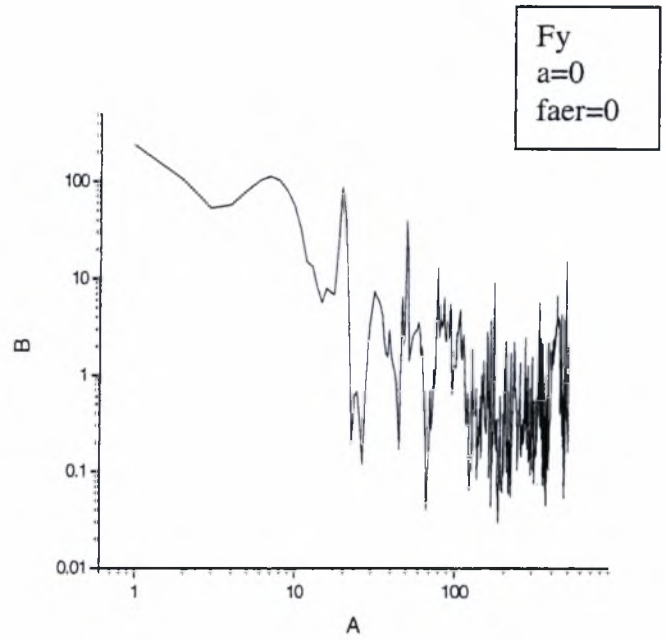
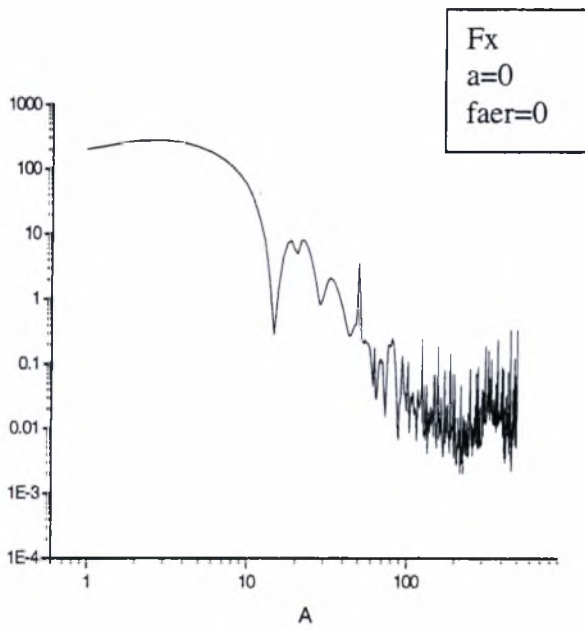
Διάγραμμα 4.93: Φάσματα δύναμης F_x (Drag) (Newton) για ροή σε σκέτη σήραγγα για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0, 4, 6, 8, 12$ (ο).



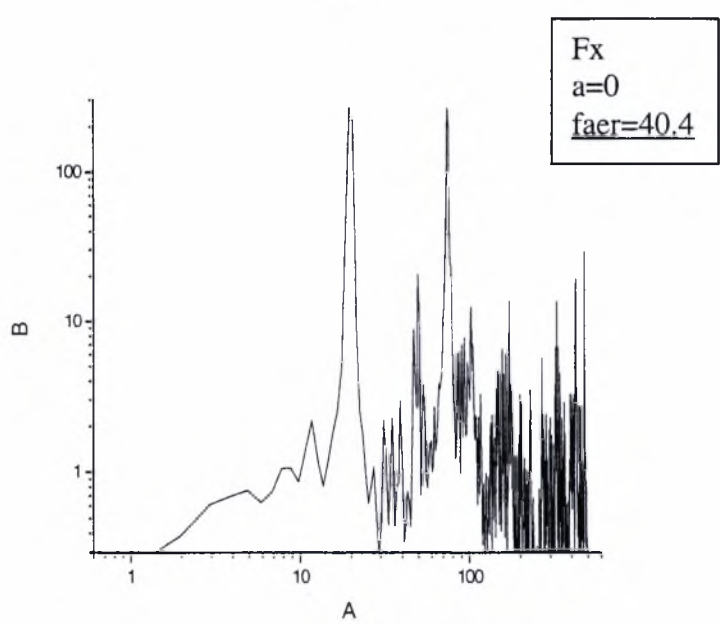
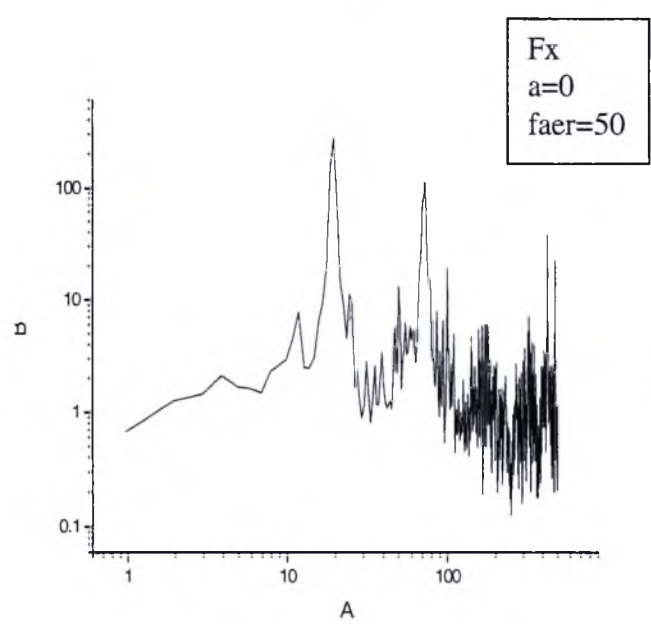
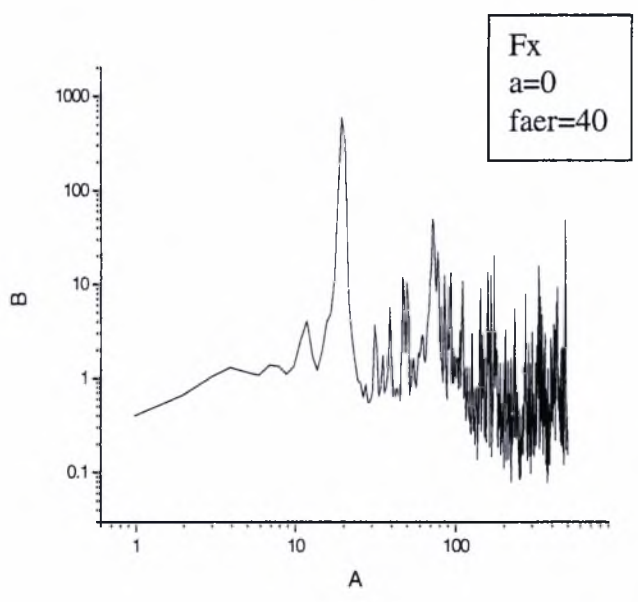
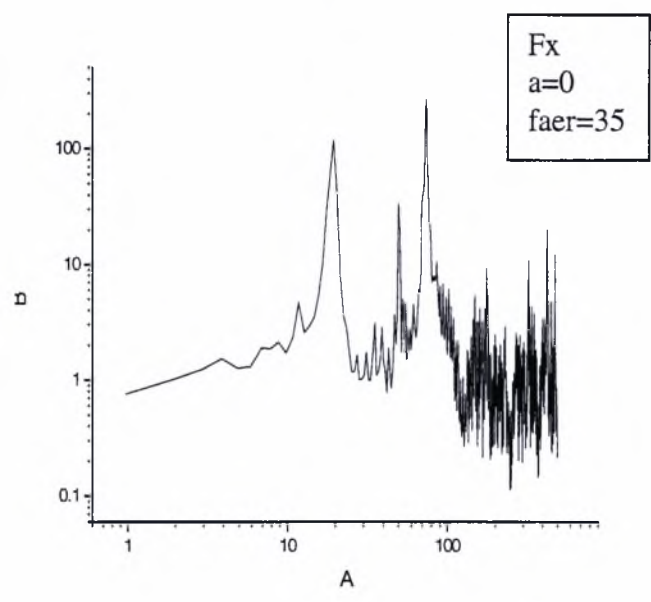
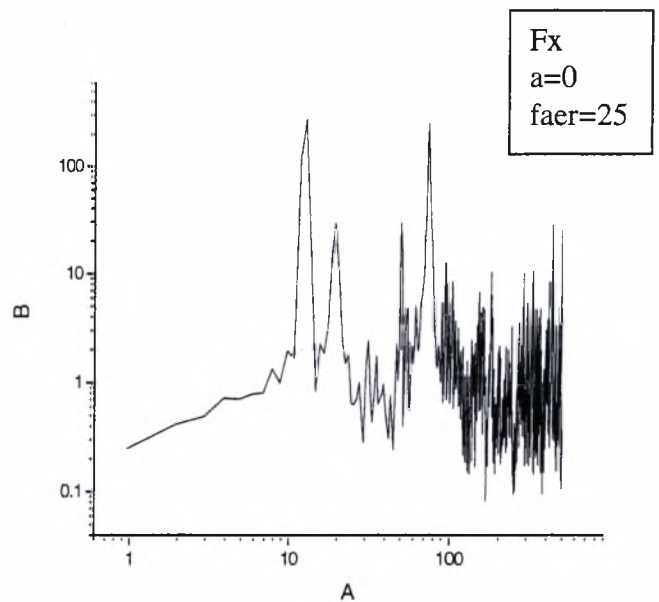
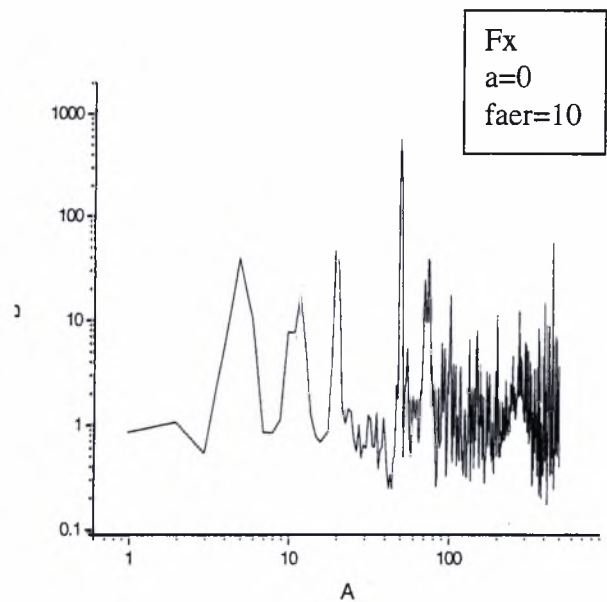
Διάγραμμα 4.94: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για ροή σε σκέτη σήραγγα για γωνίες πτερυγίου $a=0,4,6,8,12$ (ο).



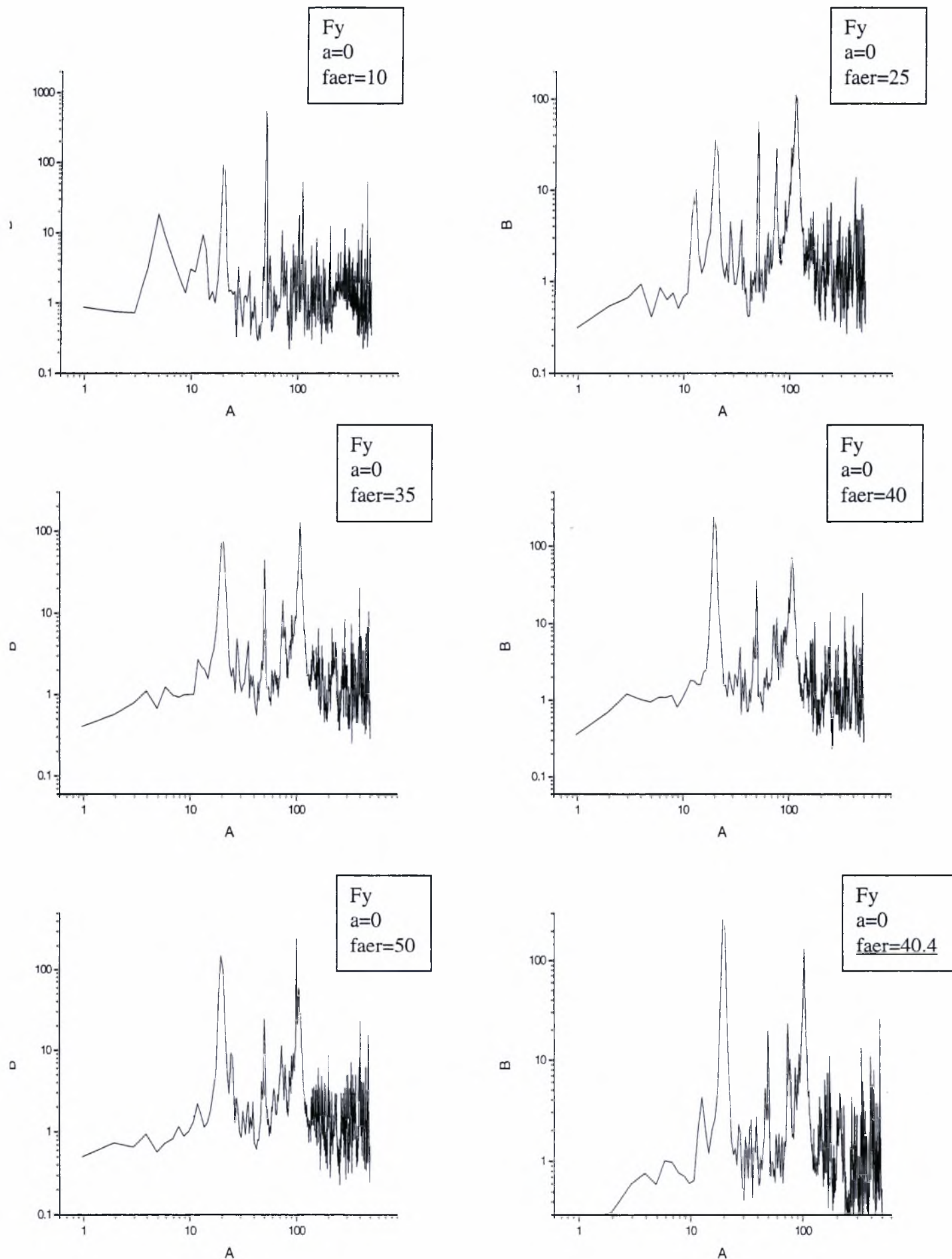
Διάγραμμα 4.95: Φάσματα δύναμης F_z (Lift) (Newton) για ροή σε σκέτη σήραγγα για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6,8,12$



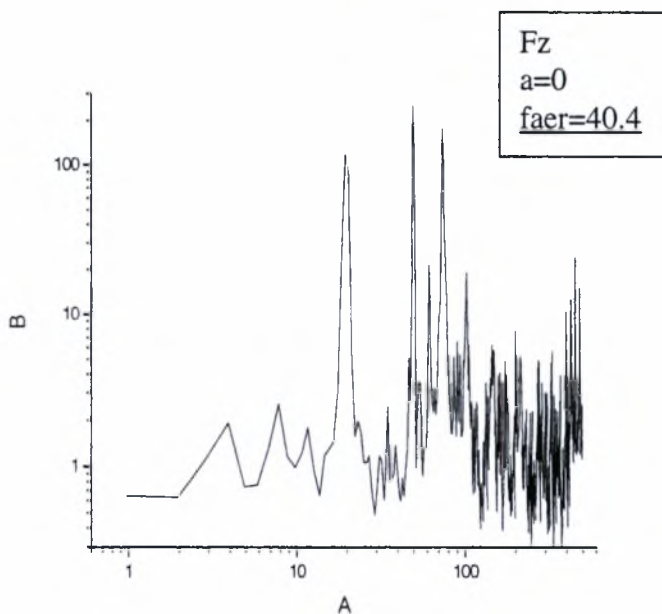
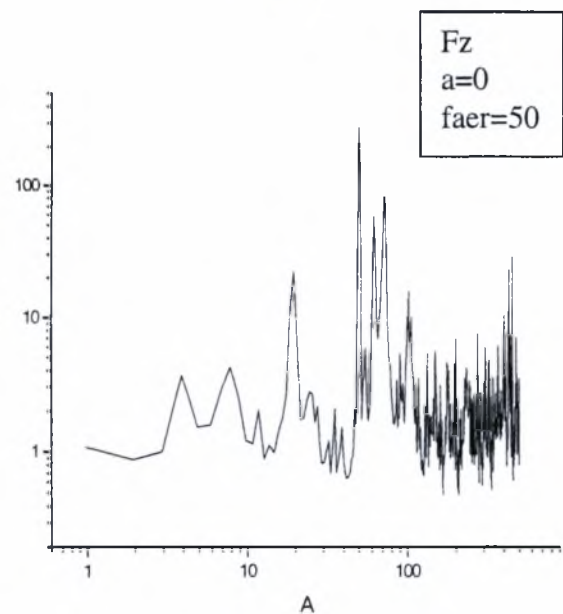
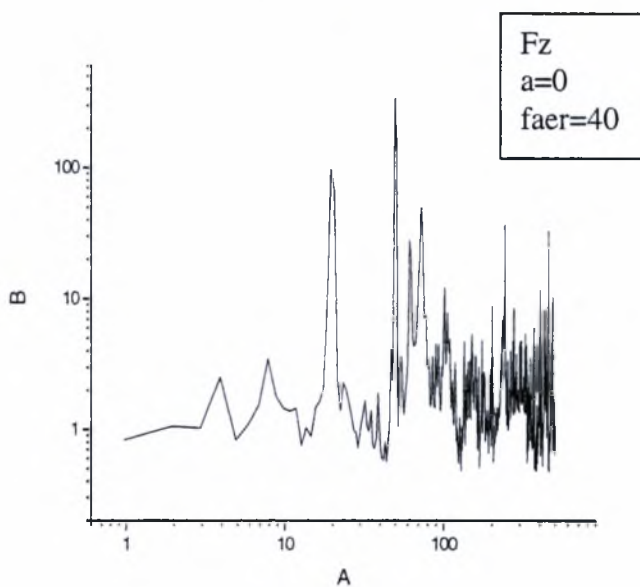
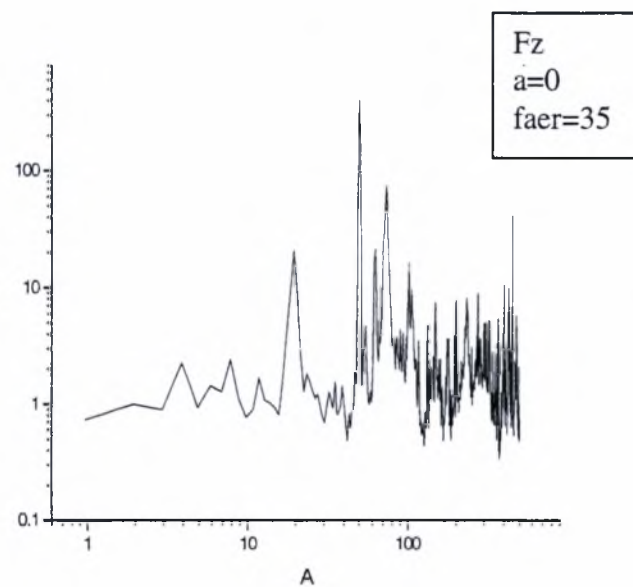
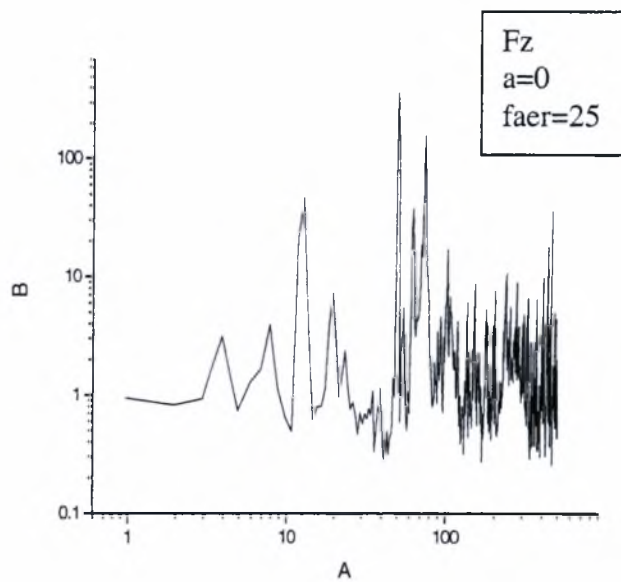
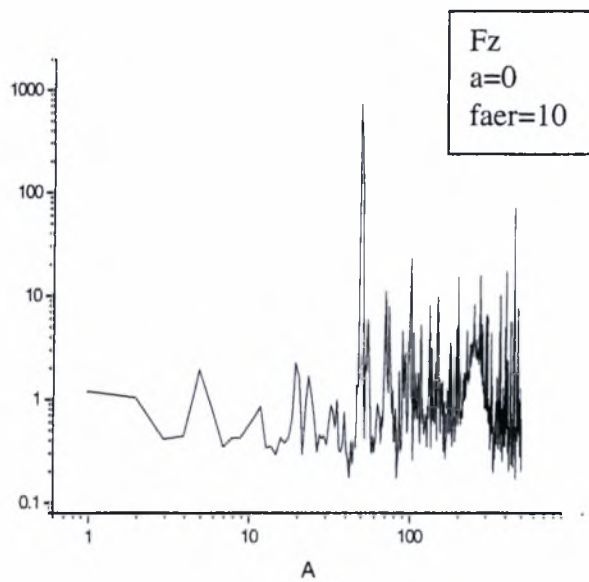
Διάγραμμα 4.96: Φάσματα δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) (Newton) για ροή σε σκέτη σήραγγα χωρίς ροή αέρα ($faer=0Hz$) για γωνία πτερυγίου $a=0$ (ο) μετά την επιβολή τυχαίας εξωτερικής δύναμης F .



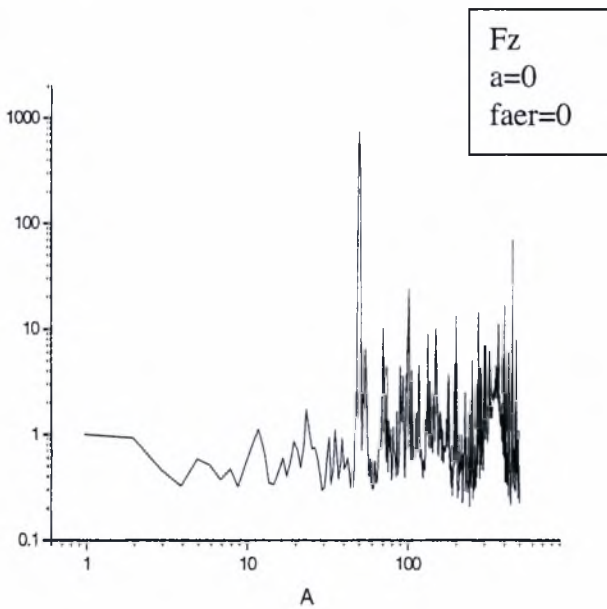
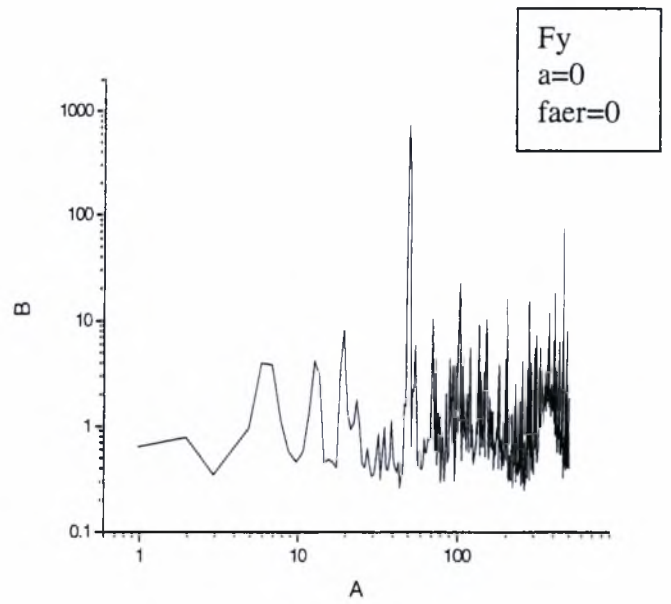
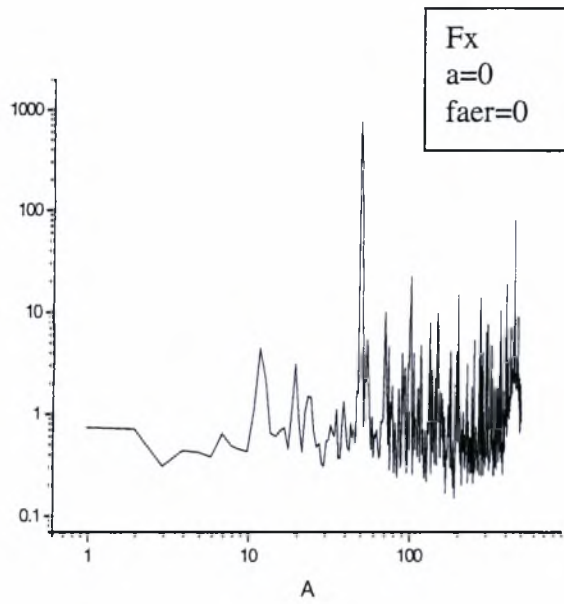
Διάγραμμα 4.97: Φάσματα δύναμης F_x (Drag) (Newton) για ροή σε σκέτη σήραγγα με ροή αέρα σε συχνότητες αεροσήραγγας $faer=10,25,35,40.50,40.4$ για γωνία πτερυγίου $a=0$ (ο).



Διάγραμμα 4.98: Φάσματα δύναμης F_y (Newton) για ροή σε σκέτη σήραγγα με ροή αέρα σε συχνότητες αεροσήραγγας $faer=10,25,35,40.50,40.4$ για γωνία πτερυγίου $a=0$ (ο).



Διάγραμμα 4.99: Φάσματα δύναμης F_z (Lift) (Newton) για ροή σε σκέτη σήραγγα με ροή αέρα σε συχνότητες αεροσήραγγας $faer=10, 25, 35, 40, 50, 40.4$ για γωνία πτερυγίου $\alpha=0$ (α).



Διάγραμμα 4.100: Φάσματα δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) (Newton) για ροή σε σκέτη σήραγγα χωρίς ροή αέρα ($faer=0Hz$) για γωνία πτερυγίου $a=0$ (ο) και χωρίς την επιβολή καμίας εξωτερικής δύναμης F .

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζονται τα φάσματα των δυνάμεων F_x , F_y , F_z από την μελέτη των οποίων προκύπτουν τα εξής: Στο διάγραμμα 4.60 απεικονίζονται τα φάσματα της F_x (Drag) σε **ροή πίσω από πλέγμα**. Εκεί παρατηρούμε ότι για όλες τις γωνίες του πτερυγίου εμφανίζονται δύο υψηλές κορυφές η πρώτη συχνότητας 19 Hz και η δεύτερη 80 Hz. Στο διάγραμμα 4.61 κατά την απεικόνιση της F_y σε ροή πίσω από πλέγμα βλέπουμε ότι για όλες τις γωνίες εμφανίζεται μια ισχυρή κορυφή συχνότητας 20 Hz και μια χαμηλότερη ελαφρώς μεγαλύτερη από τις γειτονικές της συχνότητας 100 Hz. Τέλος στο διάγραμμα 4.62 που απεικονίζει την F_y (Lift) σε ροή πίσω από πλέγμα παρατηρούμε ότι για γωνία πτερυγίου $\alpha=0^\circ$ η ισχυρότερη κορυφή έχει συχνότητα 50 Hz, ενώ για τις υπόλοιπες γωνίες η ισχυρότερη κορυφή έχει συχνότητα 20 Hz.

Τοποθετώντας τώρα στην αεροσήραγγα το **παράθυρο** μόνο του παρατηρούμε τα εξής: Σε όλα τα διαγράμματα αυτής της σειράς πειραμάτων εμφανίζονται δύο υψηλές κορυφές ανεξάρτητες της εκάστοτε επιβαλλόμενης συχνότητας ταλάντωσης, η πρώτη συχνότητας 19 Hz και η δεύτερη περίπου 70 Hz. Αρχικά στα διάγραμμα 4.63 όπου απεικονίζεται η **F_x (Drag)** βλέπουμε ότι για γωνία πτερυγίου $\alpha=0^\circ$ εμφανίζονται δυο κορυφές η πρώτη συχνότητας 19 Hz και η δεύτερη 70 Hz. Στις συχνότητες $f=0,4,6$ Hz η πρώτη κορυφή είναι μικρότερη της δεύτερης, ενώ για τις $f=8,10,12$ Hz, συμβαίνει το αντίθετο. Στην $f=10$ Hz παρατηρούμε πολύ μεγάλη αύξηση της κορυφής που εμφανίζεται στην συχνότητα 19 Hz σε σχέση με τις αντίστοιχες που εμφανίζονται στις υπόλοιπες επιβαλλόμενες συχνότητες, ενώ η δεύτερη κορυφή μειώνεται αρκετά και είναι λιγότερο εμφανής. Για $\alpha=4^\circ$ (διάγραμμα 4.64) τώρα για συχνότητα σέγας $f=0$ Hz η πρώτη κορυφή είναι μικρότερη της δεύτερης. Έπειτα για $f=4$ Hz είναι ίσες, ενώ για $f=6,8$ Hz η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης. Στην $f=10$ Hz παρατηρούμε πάλι πολύ μεγάλη αύξηση της κορυφής που εμφανίζεται στην συχνότητα 19 Hz, η οποία μάλιστα είναι 3πλάσια σε σχέση με τις αντίστοιχες που εμφανίζονται στις υπόλοιπες επιβαλλόμενες συχνότητες. Τέλος στην $f=12$ Hz οι δύο κορυφές φαίνονται να είναι ίσες. Για $\alpha=6^\circ$ (διάγραμμα 4.65) η πρώτη κορυφή είναι ίση με την δεύτερη για τις $f=0,4,6,8,12$ Hz, ενώ στην $f=0$ Hz η πρώτη είναι μικρότερη της δεύτερης. Για $\alpha=8^\circ$ (διάγραμμα 4.66) η πρώτη κορυφή είναι ίση με την δεύτερη για όλες τις επιβαλλόμενες συχνότητες, εκτός της $f=10$ Hz στην οποία η πρώτη κορυφή είναι 3πλάσια σε σχέση με τις αντίστοιχες που εμφανίζονται στις υπόλοιπες επιβαλλόμενες συχνότητες και η δεύτερη σχεδόν εξαφανίζεται στις γειτονικές της κορυφές. Για $\alpha=12^\circ$ (διάγραμμα 4.67) η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης για τις $f=0,4$ Hz, ενώ για $f=6,8$ Hz η πρώτη κορυφή είναι ίση με την δεύτερη. Στην $f=10$ Hz εξακολουθούμε να

βλέπουμε την πρώτη κορυφή (19 Hz) να είναι 3πλάσια σε σχέση με τις αντίστοιχες που εμφανίζονται στις υπόλοιπες επιβαλλόμενες συχνότητες. Τέλος για $f=12$ Hz δίπλα από τις ήδη υπάρχουσες κορυφές παρατηρούμε άλλες δύο ίσες με αυτές.

Στα διαγράμματα 4.68-4.72 βλέπουμε την απεικόνιση της **F_y** στην περίπτωση που στην αεροσήραγγα έχει τοποθετηθεί μόνο το **παράθυρο**. Για $\alpha=0^\circ$ (διάγραμμα 4.68), Για $\alpha=4^\circ$ (διάγραμμα 4.69), Για $\alpha=6^\circ$ (διάγραμμα 4.70), Για $\alpha=8^\circ$ (διάγραμμα 4.71), Για $\alpha=12^\circ$ (διάγραμμα 4.72) παρατηρούμε πάλι δύο ισχυρές κορυφές συχνότητας 19 Hz και 70 Hz που είναι εμφανώς μεγαλύτερες από κάθε άλλη κορυφή σε όλες τις επιβαλλόμενες συχνότητες ταλάντωσης. Όπως και στα διαγράμματα της F_x έτσι και για την F_y βλέπουμε ότι στην συχνότητα 10 Hz της επιβαλλόμενης ταλάντωσης για κάθε γωνία πτερυγίου η κορυφή συχνότητας 19 Hz, είναι 2πλάσια και πολλές φορές 3πλάσια των αντίστοιχων κορυφών που εμφανίζονται στις υπόλοιπες συχνότητες ταλάντωσης.

Στα διαγράμματα 4.73-4.77 βλέπουμε την απεικόνιση της **F_z (Lift)** στην περίπτωση που στην αεροσήραγγα έχει τοποθετηθεί μόνο το **παράθυρο**. Για $\alpha=0^\circ$ (διάγραμμα 4.73) σε όλες τις f η πρώτη κορυφή (19 Hz) είναι εμφανής και μεγαλύτερη της δεύτερης (60 Hz), ενώ η τελευταία δεν είναι ιδιαίτερα εμφανής μιας και κοντά της υπάρχει μια κορυφή ίσου ύψους συχνότητας 50 Hz. Τέλος για την συχνότητα 10 Hz της επιβαλλόμενης ταλάντωσης η κορυφή συχνότητας 19 Hz είναι 4πλάσια των αντίστοιχων κορυφών που εμφανίζονται στις υπόλοιπες συχνότητες ταλάντωσης. Για $\alpha=4^\circ$ (διάγραμμα 4.74), τα φάσματα ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με την $\alpha=0^\circ$. Για $\alpha=6^\circ$ (διάγραμμα 4.75) για όλες τις f η πρώτη κορυφή είναι μικρότερη της δεύτερης. Το ίδιο ισχύει και για την $f=10$ Hz κάτι που βλέπουμε για πρώτη φορά. Για $\alpha=8^\circ$ (διάγραμμα 4.76) και για $\alpha=12^\circ$ (διάγραμμα 4.77) παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά των δύο κορυφών με μοναδικό σημείο αναφοράς την συχνότητα των 10 Hz, όπου στην πρώτη περίπτωση η πρώτη κορυφή είναι μεγαλύτερη της δεύτερης και στην δεύτερη το αντίθετο.

Στα διαγράμματα 4.78-4.82 βλέπουμε την απεικόνιση της **F_x (Drag)** στην περίπτωση που στην αεροσήραγγα έχει τοποθετηθεί το **παράθυρο και το πλέγμα**. Για $\alpha=0^\circ$ (διάγραμμα 4.78) στις $f=0,4,6$ Hz η πρώτη κορυφή (19 Hz) είναι μεγαλύτερη της δεύτερης (60 Hz), ενώ για $f=8,12$ Hz είναι ίσες. Για $f=10$ Hz η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης, η δεύτερη όμως καλύπτεται από μια μεγαλύτερη συχνότητας 40 Hz. Για $\alpha=4^\circ$ (διάγραμμα 4.79) για $f=0,4,8,12$ η πρώτη και η δεύτερη είναι ίσες ενώ για την συχνότητα 10 Hz της επιβαλλόμενης ταλάντωσης η κορυφή συχνότητας 19 Hz είναι 4πλάσια των αντίστοιχων κορυφών που εμφανίζονται στις υπόλοιπες συχνότητες ταλάντωσης. Για $\alpha=6^\circ$

(διάγραμμα 4.80) παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά των δύο κορυφών, αυτό όμως που προκαλεί εντύπωση είναι ότι οι τιμές των κορυφών είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές των προηγούμενων γωνιών. Για $\alpha=8^\circ$ (διάγραμμα 4.81) η πρώτη κορυφή είναι μεγαλύτερη της δεύτερης για τις όλες τις f , ενώ για την συχνότητα 10 Hz της επιβαλλόμενης ταλάντωσης η κορυφή συχνότητας 19 Hz είναι 2πλάσια των αντίστοιχων κορυφών που εμφανίζονται στις υπόλοιπες συχνότητες ταλάντωσης. Για $\alpha=12^\circ$ (διάγραμμα 4.82) στις $f=0,4,6$ Hz η πρώτη κορυφή (19 Hz) είναι μεγαλύτερη της δεύτερης (60 Hz) είναι εμφανής και μεγαλύτερη της δεύτερης (60 Hz). Έπειτα για τις $f=8,10,12$ Hz η πρώτη κορυφή (19 Hz) εξακολουθεί να υπάρχει, όμως αυτή των 70 Hz εξαφανίζεται και εμφανίζεται μια άλλη κορυφή συχνότητας 10 Hz με ύψος χαμηλότερο της πρώτης αλλά πολύ υψηλότερη της δεύτερης.

Στα διαγράμματα 4.83-4.87 βλέπουμε την απεικόνιση της F_y στην περίπτωση που στην αεροσήραγγα έχει τοποθετηθεί το **παράθυρο και το πλέγμα**. Για $\alpha=0^\circ$ (διάγραμμα 4.83), Για $\alpha=4^\circ$ (διάγραμμα 4.84), Για $\alpha=6^\circ$ (διάγραμμα 4.85), Για $\alpha=8^\circ$ (διάγραμμα 4.86), Για $\alpha=12^\circ$ (διάγραμμα 4.87) παρατηρούμε πάλι δύο ισχυρές κορυφές συχνότητας 19 Hz και 60 Hz που είναι εμφανώς μεγαλύτερες από κάθε άλλη κορυφή σε όλες τις επιβαλλόμενες συχνότητες ταλάντωσης. Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα βλέπουμε ότι στην συχνότητα 10 Hz της επιβαλλόμενης ταλάντωσης για κάθε γωνία πτερυγίου η κορυφή συχνότητας 19 Hz, είναι 2πλάσια και πολλές φορές 3πλάσια των αντίστοιχων κορυφών που εμφανίζονται στις υπόλοιπες συχνότητες ταλάντωσης. Ακόμη σε αυτά τα διαγράμματα είναι πολύ εμφανής και η ύπαρξη κορυφών συχνότητας ίδιας με την συχνότητα της εκάστοτε επιβαλλόμενης ταλάντωσης, οι οποίες είναι πάντα μικρότερες των δύο ισχυρών κορυφών 19 και 60 Hz. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση που το πτερύγιο έχει γωνία $\alpha=12^\circ$ (διάγραμμα 4.87) και για τις συχνότητες 10 και 12 Hz, όπου οι κορυφές με συχνότητες ίσες με τις αντίστοιχες επιβαλλόμενες εμφανίζονται μεγαλύτερες από την κορυφή των 60 Hz.

Στα διαγράμματα 4.88-4.92 βλέπουμε την απεικόνιση της F_z (**Lift**) στην περίπτωση που στην αεροσήραγγα έχει τοποθετηθεί το **παράθυρο και το πλέγμα**. Σε όλα τα διαγράμματα αυτής της κατηγορίας εμφανίζονται πέρα από τις δυο ισχυρές κορυφές που αναφέρθηκαν παραπάνω και εμφανής κορυφές με συχνότητες ίδιες με αυτές τις εκάστοτε ταλάντωσης. Η κορυφή συχνότητας 19 Hz εμφανίζεται ίση η μεγαλύτερη με αυτή των 60 Hz σε όλες τις γωνίες πτερυγίου και για όλες τις συχνότητες. Οι κορυφές που εμφανίζονται με συχνότητες ίσες της εκάστοτε επιβαλλόμενης ταλάντωσης, είναι μικρότερες των δύο

που προαναφέραμε, ενώ είναι μεγαλύτερες μόνο για $\alpha=4^\circ$ (διάγραμμα 4.89) και στις $f=6,8,12$ Hz και για $\alpha=0^\circ$ (διάγραμμα 4.88) και στις $f=10$ Hz. Επίσης οι κορυφές με συχνότητες ίσες της εκάστοτε επιβαλλόμενης ταλάντωσης εξασθενούν για $\alpha=12^\circ$ (διάγραμμα 4.92). Τέλος στην συχνότητα 10 Hz της επιβαλλόμενης ταλάντωσης η κορυφή των 19 Hz δεν είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες κορυφές που εμφανίζονται στις υπόλοιπες συχνότητες ταλάντωσης και σε καμία περίπτωση δεν είναι διπλάσια των άλλων.

Στα διαγράμματα 4.93-4.95 βλέπουμε την απεικόνιση των δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) στην περίπτωση που στην αεροσήραγγα δεν έχει τοποθετηθεί τίποτα και υπάρχει ελεύθερη ροή σε **σκέτη σήραγγα** ($U_{air}=12\text{m/s}, f_{tunnel}=40,4$ Hz). Στο διάγραμμα 4.93 βλέπουμε την απεικόνιση της F_x (Drag) και παρατηρούμε ότι εμφανίζονται και εδώ οι κορυφές των 19 Hz και 60 Hz που εμφανίζονται σε όλα τα διαγράμματα που παρατείνονται παραπάνω ανεξαρτήτως του είδους της ροής που στο απόρρευμα της οποίας γίνονται οι μετρήσεις. Στο διάγραμμα 4.94 βλέπουμε την απεικόνιση της F_y και ομοίως βλέπουμε τις δυο προαναφερθείσες κορυφές καθώς και την ύπαρξη μιας τρίτης πιο ισχυρής από αυτή των 60 Hz με συχνότητα 100 Hz. Στο διάγραμμα 4.95 βλέπουμε την απεικόνιση της F_z (Lift) στο οποίο πάλι βλέπουμε τις δύο κορυφές. Είναι πολύ πιθανό λοιπόν οι κορυφές αυτές να οφείλονται στην λειτουργία της αεροσήραγγας και να μην προκαλούνται από την ροή του αέρα.

Έπειτα κρίθηκε σκόπιμη η επιβολή μιας **τυχαίας δύναμης F** και η μέτρησή της στις τρεις διευθύνσεις x,y,z . Οι μετρήσεις που έγιναν σε **σκέτη σήραγγα** ($U_{air}=12\text{m/s}, f_{tunnel}=40,4$ Hz) και φαίνονται στο διάγραμμα 4.96 έδειξαν ότι υπάρχουν δύο ισχυρές κορυφές 19 και 50 Hz και στις τρεις κατευθύνσεις, κάτι που σημαίνει ότι μάλλον αυτές είναι ιδιοσυχνότητες της δοκιμαζόμενης πτέρυγας.

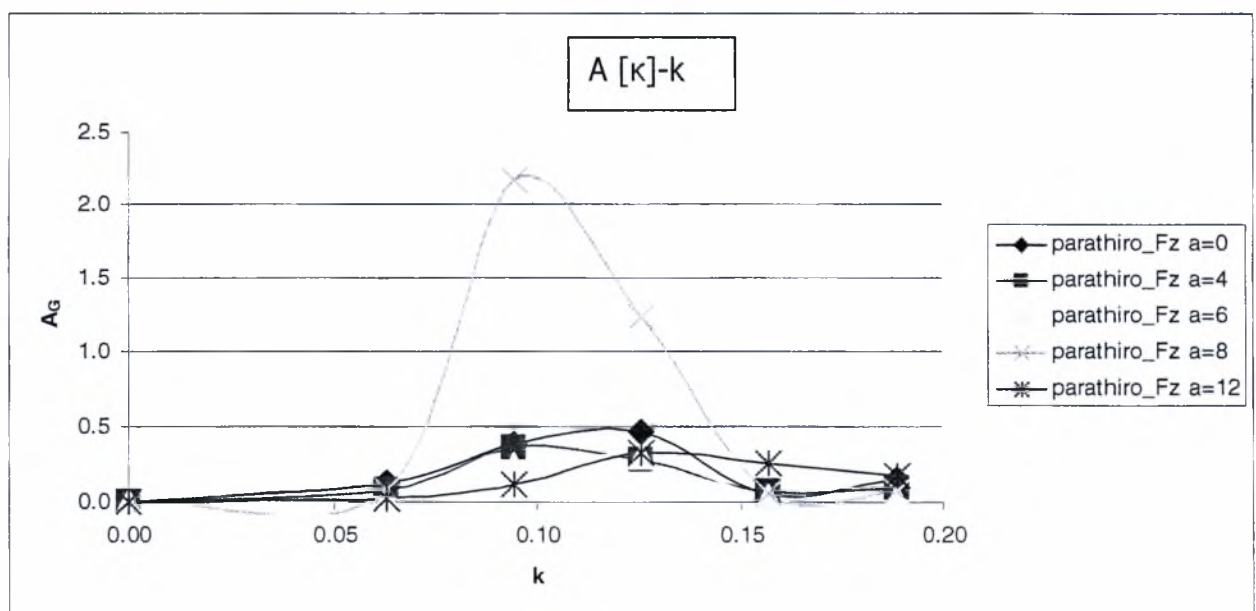
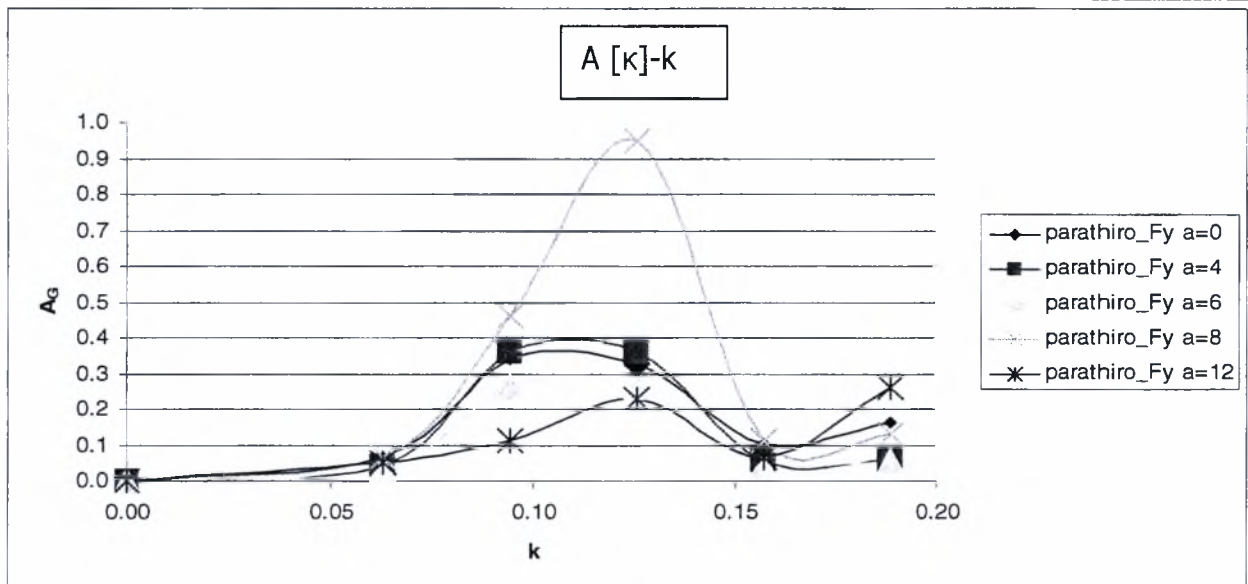
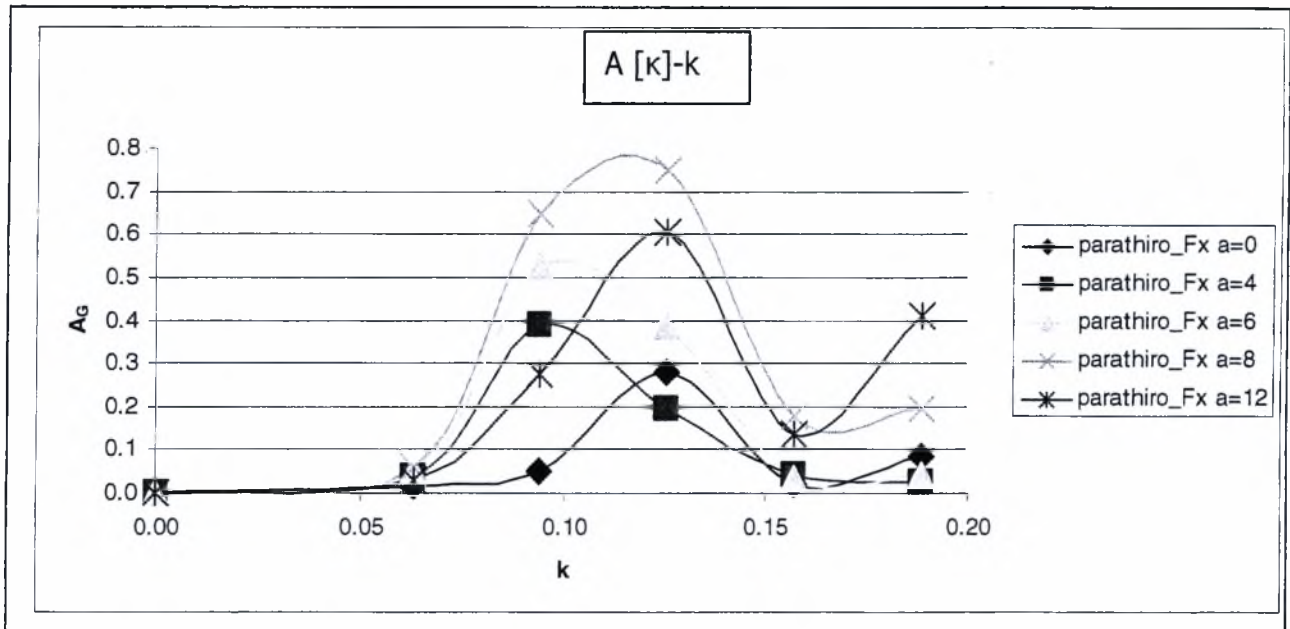
Στην συνέχεια έγιναν δοκιμές σε **σκέτη σήραγγα με διαφορετικές ταχύτητες αέρα** διαφορετικές της ταχύτητας δοκιμών η οποία ήταν $U_{air}=12\text{m/s}$. Για να γίνει αυτό επιλέγαμε διαφορετικές συχνότητες στο inverter της αεροσήραγγας στο εύρος τιμών $f_{tunnel}=10-50$ Hz. Στο διάγραμμα 4.97 βλέπουμε την απεικόνιση της F_x (Drag) και παρατηρούμε ότι εμφανίζονται και εδώ οι κορυφές των 19 Hz και 70 Hz που εμφανίζονται σε όλα τα διαγράμματα, οι οποίες μάλιστα για $f_{tunnel}=40,4$ Hz (συχνότητα δοκιμών αεροσήραγγας) είναι και ίσες. Στο διάγραμμα 4.98 βλέπουμε την απεικόνιση της F_y και ομοίως βλέπουμε τις δυο κορυφές 20 και 50 Hz καθώς και την ύπαρξη μιας τρίτης ισχυρής κορυφής με συχνότητα 100 Hz, η οποία μάλιστα εμφανίζεται ισχυρή και στην $f_{tunnel}=40,4$ Hz (συχνότητα δοκιμών αεροσήραγγας). Στο διάγραμμα 4.99 βλέπουμε την απεικόνιση της

Fz (Lift) στο οποίο πάλι βλέπουμε τις δύο κορυφές 20 και 50 Hz, ωστόσο παρατηρούμε την ύπαρξη μιας τρίτης ισχυρής κορυφής με συχνότητα 70 Hz που εμφανίζεται τόσο στην $f_{\text{tunnel}}=40,4$ Hz (συχνότητα δοκιμών αεροσήραγγας), όσο και στην περιοχή $f_{\text{tunnel}}=25-50$ Hz.

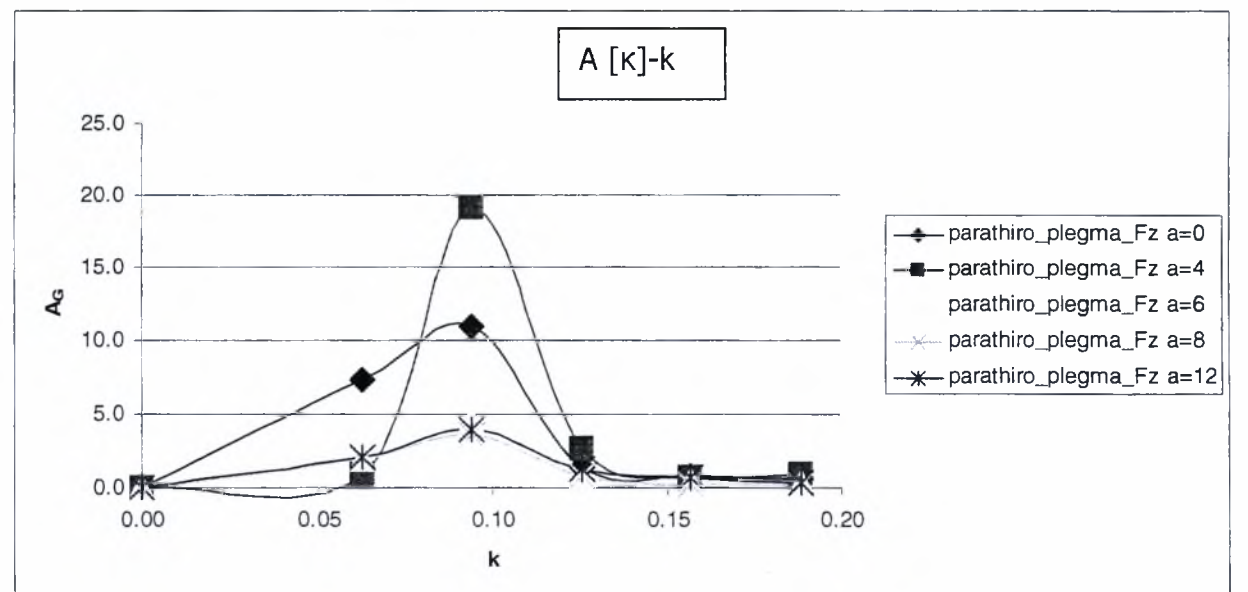
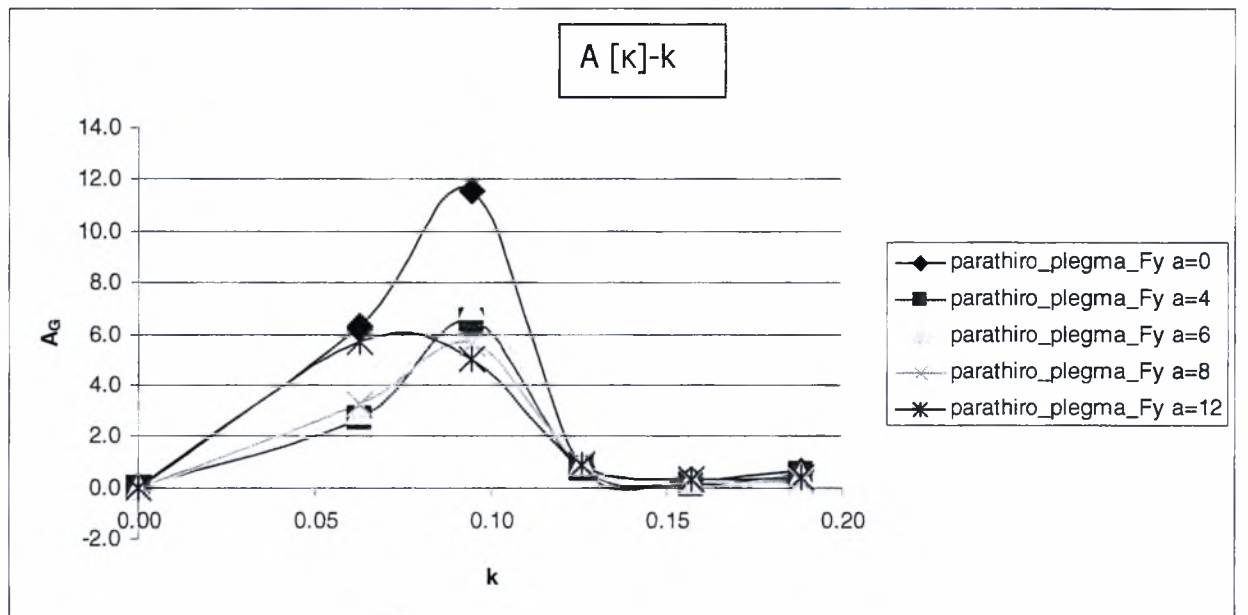
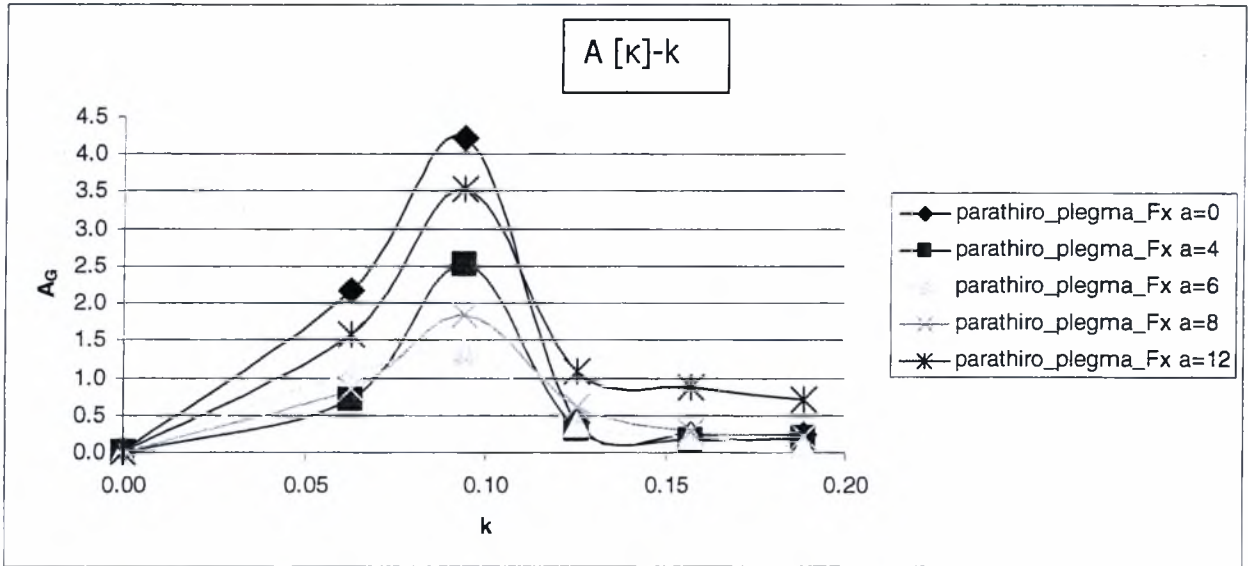
Τέλος για να διαπιστώσουμε τι προκάλεσε αυτές τις διαταραχές στις συχνότητες $f=19,50,70$ Hz πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση των δυνάμεων F_x, F_y, F_z **σε σήραγγα χωρίς αέρα και χωρίς την επιβολή εξωτερικής δύναμης**. Διαπιστώθηκε λοιπόν, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.100, η ύπαρξη μιας ισχυρής κορυφής συχνότητας 50 Hz και ακόμη μια πολύ χαμηλότερη συχνότητας 19 Hz. Μάλιστα η κορυφή συχνότητας 50 Hz εμφανίζει τιμή 10πλάσια σε σχέση με τις αντίστοιχες κορυφές των 50 Hz που μετρήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Έτσι καταλήγουμε στο γεγονός ότι οι κορυφές που φαίνονται σε όλα τα διαγράμματα οφείλονται μάλλον σε κάποιο φυσικό θόρυβο που υπήρχε στο εργαστήριο, η κάποιο ηλεκτρονικό θόρυβο που προκαλούν είτε οι μετρητικές συσκευές, είτε τα καλώδια μεταφοράς των σημάτων.

4.3.5 Διαγράμματα συντελεστή συνάρτησης αεροδυναμικής απόκρισης A [k]

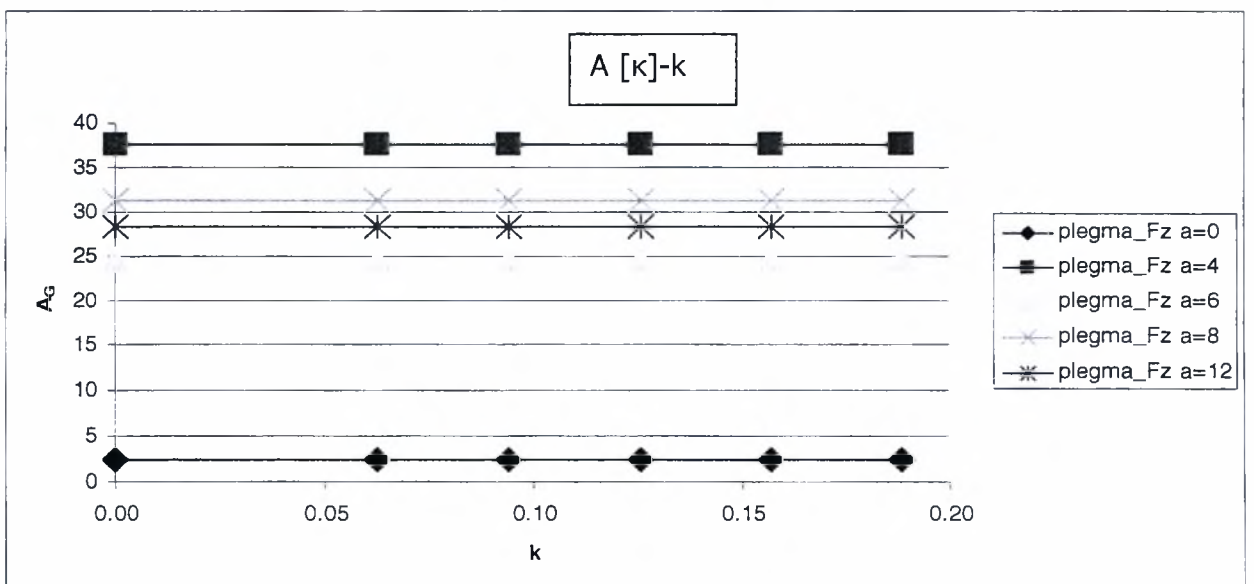
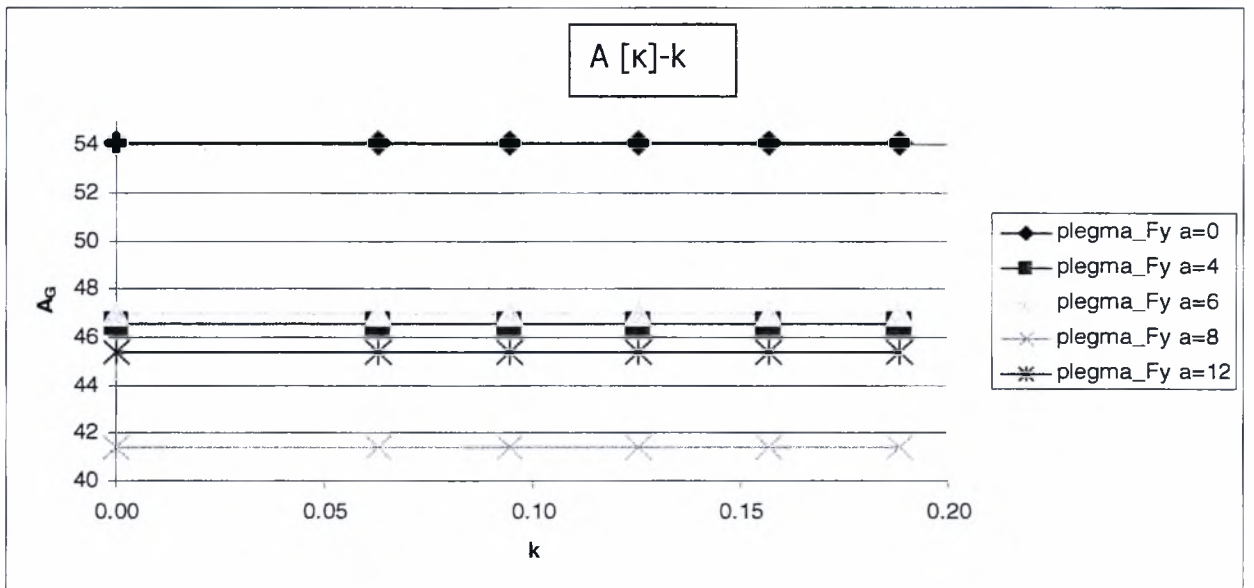
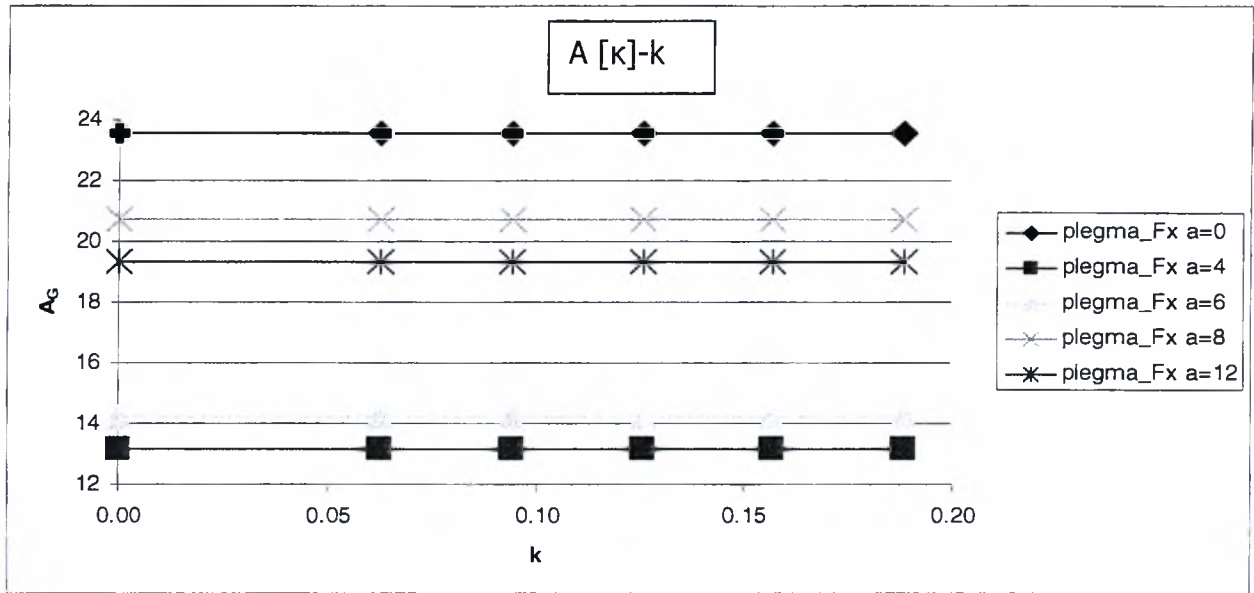
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα του συντελεστή A_G με τον αριθμό $k=\omega c/2U_{\text{max}}$. Ο συντελεστής A_G προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού των δυνάμεων με το εμβαδό των ταχυτήτων. Τα εμβαδά αυτό υπολογίζονται από τα φάσματα δυνάμεων και ταχυτήτων αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζουμε το εμβαδό που προκύπτει κάτω από την υψηλότερη κορυφή των φασμάτων δυνάμεων και ταχυτήτων, η οποία προκύπτει στην συχνότητα της ταλάντωσης που δημιουργήθηκε από τα ταλαντούμενα πτερύγια. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται από με την βοήθεια του προγράμματος Origin 8. Τα διαγράμματα παρατείνονται παρακάτω.



Διάγραμμα 4.101: Εξάρτηση του συντελεστή $A[k]$ (Εμβαδό F / Εμβαδό U) με τον αριθμό $k=\omega c/2U_{max}$ για ροή πίσω από παράθυρο για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-15$ Hz και για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6,8,12$ (ο).



Διάγραμμα 4.102: Εξάρτηση του συντελεστή $A[k]$ (Εμβαδό F/ Εμβαδό U) με τον αριθμό $k=\omega c/2U_{max}$ για συνδυασμένη ροή πίσω από παράθυρο και πλέγμα συχνότητες ταλάντωσης $f=0-15$ Hz και για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0,4,6,8,12$ (ο).



Διάγραμμα 4.103: Εξάρτηση του συντελεστή $A[k]$ (Εμβαδό F / Εμβαδό U) με τον αριθμό $k=\omega c/2U_{\max}$ για ροή πίσω από πλέγμα για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-15$ Hz και για γωνίες πτερυγίου $\alpha=0, 4, 6, 8, 12$ (ο).

Στο διάγραμμα 4.101 λοιπόν παρουσιάζεται ο όρος A [k] σε σχέση με τον αριθμό k για ροή πίσω από **παράθυρο**. Στην περίπτωση που ο όρος A [k] προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **F_x (Drag)** με το εμβαδό των ταχυτήτων έχουμε: Για τις γωνίες $\alpha=0^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ ο όρος A_G παρουσιάζει μέγιστο στον αριθμό $k=0,13$ ($f=8\text{Hz}$) έπειτα πέφτει και στο $k=0,19$ ($f=12\text{Hz}$) ανεβαίνει πάλι. Για $\alpha=4^\circ, 6^\circ$ οι καμπύλες εμφανίζουν μέγιστο στο $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$). Επίσης βλέπουμε τον όρο A_G να αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας, με εξαίρεση τις δυο μεγαλύτερες γωνίες που για $\alpha=8^\circ$ η καμπύλη είναι πιο ψηλή από αυτή για $\alpha=12^\circ$. Αυτό δείχνει ότι για όσο αυξάνεται η γωνία η επίδραση της δύναμης γίνεται πιο ισχυρή από αυτή της ταχύτητας. Στο ίδιο διάγραμμα και για την περίπτωση που ο όρος A [k] προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **F_y** με το εμβαδό των ταχυτήτων παρατηρούμε ότι για όλες τις γωνίες οι καμπύλες εμφανίζουν μέγιστο στο $k=0,13$ ($f=8\text{Hz}$). Επίσης για όλες τις γωνίες οι καμπύλες κινούνται σε κοντινές τιμές για όλα τα k με εξαίρεση την γωνία $\alpha=8^\circ$, όπου στο $k=0,13$ ($f=8\text{Hz}$) παίρνουμε πολύ μεγάλη τιμή. Σε εκείνο το σημείο η επίδραση της δύναμης γίνεται πιο ισχυρή από αυτή της ταχύτητας. Στο ίδιο διάγραμμα και για την περίπτωση που ο όρος A [k] προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **F_z (Lift)** με το εμβαδό των ταχυτήτων παρατηρούμε ότι για όλες τις γωνίες παίρνουμε παρόμοιες καμπύλες, ενώ οι καμπύλες εμφανίζουν μέγιστο στο $k=0,13$ ($f=8\text{Hz}$). Για την γωνία $\alpha=8^\circ$, παρατηρούμε διαφορετική συμπεριφορά στα $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$) και $k=0,13$ ($f=8\text{Hz}$), όπου εκεί ο όρος A_G είναι πολύ μεγάλος σε σχέση με τα άλλα k με την μέγιστη τιμή στο $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$).

Στο διάγραμμα 4.102 λοιπόν παρουσιάζεται ο όρος A [k] σε σχέση με τον αριθμό k για ροή πίσω από **παράθυρο και πλέγμα**. Στην περίπτωση που ο όρος A [k] προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **F_x (Drag)** με το εμβαδό των ταχυτήτων έχουμε: Παρατηρούμε ότι για όλες τις γωνίες οι καμπύλες εμφανίζουν μέγιστο στο $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$) που σημαίνει ότι η επίδραση της δύναμης γίνεται πιο ισχυρή από αυτή της ταχύτητας. Επίσης βλέπουμε ότι σε μικρά k ο όρος A [k] εμφανίζει μέγιστο για γωνία $\alpha=0^\circ$ ενώ για σε $k>0,13$ (8 Hz) ο όρος A [k] εμφανίζει μέγιστο για γωνία $\alpha=12^\circ$. Στην ίδια περιοχή (σε $k>0,13$) οι καμπύλες των υπολοίπων γωνιών είναι παρόμοιες κάτι που δείχνει ότι η επίδραση της δύναμης γίνεται πιο ισχυρή από αυτή της ταχύτητας. Στο ίδιο διάγραμμα και για την περίπτωση που ο όρος A [k] προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **F_y** με το εμβαδό των ταχυτήτων παρατηρούμε ότι τις γωνίες $\alpha=4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ οι καμπύλες είναι ίδιες για όλα τα k και οι καμπύλες εμφανίζουν μέγιστο στο

$k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$). Βλέπουμε ότι για γωνία $\alpha=0^\circ$ οι καμπύλες αποκλίνουν για τις τιμές $k=0,06$ ($f=4\text{Hz}$) και $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$), ενώ για γωνία $\alpha=12^\circ$ οι καμπύλες αποκλίνουν για $k=0,06$ ($f=4\text{Hz}$). Στα μεγάλα k δεν υπάρχουν αποκλίσεις. Στο ίδιο διάγραμμα και για την περίπτωση που ο όρος A [k] προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **Fz (Lift)** με το εμβαδό των ταχυτήτων παρατηρούμε ότι για όλες τις γωνίες οι καμπύλες είναι ίδιες για όλα τα k και οι καμπύλες εμφανίζουν μέγιστο στο $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$). Επίσης βλέπουμε ότι για γωνία $\alpha=0^\circ$ και για $k=0,06$ ($f=4\text{Hz}$) και $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$) η επίδραση της δύναμης γίνεται πιο ισχυρή από αυτή της ταχύτητας, ενώ αυτό ισχύει και για γωνία $\alpha=4^\circ$ στο $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$). Τέλος σε όλα τα k για τις γωνίες $\alpha=6^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ όλες η καμπύλες είναι ίσες κάτι που σημαίνει ότι οι δυνάμεις που ασκούνται και η ταχύτητα επηρεάζουν εξίσου τις μετρήσεις.

Στο διάγραμμα 4.103 λοιπόν παρουσιάζεται ο όρος A [k] σε σχέση με τον αριθμό k για ροή πίσω από **πλέγμα**. Σε αυτό το διάγραμμα μιας και δεν υπάρχει ταλάντωση βλέπουμε σταθερές τιμές του όρου A_G σε σχέση με τον αριθμό k . Στην περίπτωση που ο όρος A_G προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **Fx (Drag)** με το εμβαδό των ταχυτήτων παρατηρούμε ότι για γωνία $\alpha=0^\circ$ ο όρος A_G εμφανίζει την μέγιστη του τιμή σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες. Επίσης για τις γωνίες $\alpha=4^\circ, 6^\circ$ πέφτει σχεδόν στο μισό, ενώ για τις γωνίες $\alpha=8^\circ, 12^\circ$ ανεβαίνει ξανά αποκτώντας όμως χαμηλότερη τιμή σε σχέση με την μέγιστη του ($\alpha=0^\circ$). Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι η επίδραση της δύναμης γίνεται πιο ισχυρή από αυτή της ταχύτητας στις γωνίες $\alpha=0^\circ, 8^\circ, 12^\circ$, ενώ για τις γωνίες $\alpha=4^\circ, 6^\circ$ η επίδραση της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη. Στο ίδιο διάγραμμα και για την περίπτωση που ο όρος A [k] προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **Fy** με το εμβαδό των ταχυτήτων παρατηρούμε ότι για γωνία $\alpha=0^\circ$ ο όρος A_G εμφανίζει την μέγιστη του τιμή, ενώ για γωνία $\alpha=8^\circ$ ο όρος A [k] εμφανίζει την ελάχιστη. για τις γωνίες $\alpha=4^\circ, 6^\circ, 12^\circ$ όλες η καμπύλες είναι ίσες κάτι που σημαίνει ότι οι δυνάμεις που ασκούνται και η ταχύτητα επηρεάζουν εξίσου τις μετρήσεις. Στο ίδιο διάγραμμα και για την περίπτωση που ο όρος A [k] προκύπτει από την διαίρεση των τιμών του εμβαδού της δύναμης **Fz (Lift)** με το εμβαδό των ταχυτήτων παρατηρούμε ότι για γωνία $\alpha=4^\circ$ ο όρος A [k] εμφανίζει την μέγιστη του τιμή, ενώ για γωνία $\alpha=0^\circ$ ο όρος A [k] εμφανίζει την ελάχιστη. Στις υπόλοιπες γωνίες οι τιμές του A [k] είναι πολύ κοντά και πολύ μεγαλύτερες από αυτές για γωνία $\alpha=0^\circ$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ταχύτητες

Από τα διαγράμματα **U_{mean} / U_{max} με την απόσταση x** συμπεραίνουμε τα εξής: Αρχικά η ροή που σχηματίζεται πίσω από το πλέγμα εμφανίζει υψηλότερη αδιάστατη ταχύτητα σε σχέση με αυτή πίσω από το παράθυρο αλλά και της συνδυασμένης ροής που δημιουργείται πίσω από πλέγμα και παράθυρο για όλα τα σημεία που μετρήθηκε κατάντι της ροής. Αυτό σημαίνει ότι η τυρβώδης ροή που δημιουργείται στο απόρευμα του πλέγματος είναι ισχυρότερη από την ημιτονοειδή ροή. Αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με το γεγονός στις θέσεις $x=125, 375, 500$ mm από το κέντρο του άξονα $x=0$ (για $f=3-11$ Hz) οι τιμές της αδιάστατης ταχύτητας στο απόρευμα του πλέγματος και παραθύρου είναι ίδιες με αυτές πίσω από το πλέγμα. Κάτι που σημαίνει ότι σε αυτές τις θέσεις ο ρόλος του παραθύρου είναι αμελητέος ως προς την ταχύτητα της ροής. Αντίθετα για συχνότητες διαταραχής $f=12-15$ Hz η εξέλιξη της ταχύτητας αλλάζει όσο πλησιάζουμε κοντά στο παράθυρο. Ακόμη για συχνότητες διαταραχής $f=3-11$ Hz όταν η ροή πίσω από το πλέγμα εμφανίζει μέγιστο, η ροή πίσω από το πλέγμα και παράθυρο εμφανίζει ελάχιστο και αντίστροφα για όλες τις αποστάσεις κατάντι της ροής. Τέλος παρατηρούμε ότι η τιμή της ταχύτητας για την ροή που αναπτύσσεται πίσω από το παράθυρο για όλες τις συχνότητες ταλάντωσης, εμφανίζει την μέγιστη τιμή της στην απόσταση $x=125$ mm από το κέντρο $x=0$ και έπειτα πέφτει όσο πλησιάζει κοντά στο παράθυρο. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή της ταχύτητας για την ροή που αναπτύσσεται πίσω από το παράθυρο είναι ανεξάρτητη της συχνότητας της σέγας, ειδικά όσο πλησιάζουμε στην αρχή έναρξης της ροής.

Από τα διαγράμματα **της ταχύτητας U_{mean} με τον αριθμό $k=\omega c/2U_{max}$** συμπεραίνουμε τα εξής: Οι ταχύτητες στο απόρευμα του πλέγματος είναι ανεξάρτητες του αριθμού k και εμφανίζονται σταθερές για τα διαφορά k . Όμως όσο πλησιάζουμε στην αρχή έναρξης της τύρβης (πλέγμα) παρατηρούμε μείωση. Από αυτά τα διαγράμματα επιβεβαιώνουμε την προηγουμένη παρατήρηση ότι δηλαδή στο απόρευμα του παραθύρου η ταχύτητα είναι περίπου ίδια για όλους τους αριθμούς k με μικρές αποκλίσεις. Κατά τις μετρήσεις που έγιναν στο απόρευμα της συνδυασμένης ροής πλέγματος και παραθύρου παρατηρείται ότι καθώς μεγαλώνει το k η ταχύτητα ακολουθεί φθίνουσα πορεία για όλες τις θέσεις που έγιναν μετρήσεις. Στα ίδια διαγράμματα που αναφέρονται στην συνδυασμένη ροή βλέπουμε ότι για μικρούς αριθμούς k (μικρές συχνότητες f), η ταχύτητα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές, ενώ σε μεγαλύτερα k δείχνει να σταθεροποιείται γύρω από

μια τιμή. Όπως ήταν φυσικό οι τιμές της ταχύτητας πίσω από την συνδυασμένη ροή είναι μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν στο απόρευμα της αντίστοιχης με το παράθυρο μόνο, αφού η τύρβη προσθέτει ενέργεια.

Ένταση της τύρβης

Από τα διαγράμματα **της έντασης της τύρβης (stdev) με την απόσταση x** συμπεραίνουμε τα εξής: Κατάντι της ροής διαπιστώνουμε ότι στο απόρευμα της ροής που δημιουργείται από το πλέγμα, η τιμή της stdev παρουσιάζει μια μικρή άνοδο καθώς πλησιάζει στο πλέγμα. Ακόμη η τιμή της έντασης της τύρβης στο απόρευμα της συνδυασμένης ροής παραθύρου και πλέγματος εμφανίζεται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη όταν είναι τοποθετημένο στην αεροσήραγγα μόνο το παράθυρο για απόσταση $x=0\text{mm}$ από το κέντρο $x=0$ για όλες τις επιβαλλόμενες συχνότητες f καθώς. Το ίδιο όμως δεν συμβαίνει και στις υπόλοιπες θέσεις $x=125,250,375,500\text{ mm}$ όπου η ένταση της τύρβης στο απόρευμα του παραθύρου και πλέγματος εμφανίζει περίπου ίδιες τιμές με αυτές που μετρούνται στο απόρευμα της ροής που προκύπτει μόνο από το παράθυρο. Τέλος η stdev στο απόρευμα του παραθύρου και πλέγματος εμφανίζει ανοδική πορεία όσο πλησιάζουμε προς την αρχή της έναρξής της για συχνότητες ταλάντωσης $f=0-11\text{ Hz}$, ενώ για συχνότητες ταλάντωσης $f=12-15\text{ Hz}$ εμφανίζει μέγιστο στο σημείο $x=250\text{ mm}$ και μετά πέφτει.

Φάσματα ταχυτήτων

Πριν προχωρήσουμε στην μελέτη και σχολιασμό **των διαγραμμάτων φασμάτων των ταχυτήτων** να θυμίσουμε ότι η μεγαλύτερη τιμή του φάσματος της ταχύτητας εμφανίζεται στην συχνότητα f της επιβαλλόμενης ταλάντωσης. Αυτή η ψηλότερη κορυφή λέγεται 1^η αρμονική. Πολλές φορές την 1^η αρμονική ακολουθεί η 2^η που έχει την διπλάσια συχνότητα της πρώτης συνήθως όμως μικρότερη τιμή. Από την μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων μπορούμε να κάνουμε χρήσιμες παρατηρήσεις. Καταρχάς για τα φάσματα των ταχυτήτων που μετρήθηκαν **στο απόρευμα του πλέγματος** δεν μπορούμε να κάνουμε κάποιο σχόλιο καθότι δεν υπάρχει συχνότητα ταλάντωσης εδώ. Παρόλα αυτά παρατηρούμε μια ελαφρώς πιο ψηλή κορυφή από τις άλλες στην συχνότητα $f=7\text{ Hz}$ για όλες τις αποστάσεις x κατάντι της ροής κάτι που ίσως δείχνει μια ιδιοσυχνότητα της τύρβης εκεί. **στο απόρευμα της ροής του παραθύρου** η 1^η αρμονική φαίνεται να εμφανίζεται κανονικά στην συχνότητα της επιβαλλόμενης ταλάντωσης, σε όλες τις συχνότητες για όλες

τις θέσεις που ελήφθησαν μετρήσεις. Για μεγάλες συχνότητες ταλάντωσης ($f=11-15$) Hz τώρα παρατηρούμε η 2^η αρμονική να σβήνει. Επίσης στις μετρήσεις που έγιναν πολύ κοντά στην αρχή έναρξης της ροής στις συχνότητες $f=4-9$ Hz εμφανίζεται και μια τρίτη ισχυρή κορυφή με συχνότητα 3πλάσια της σέγας, όμως αυτή σβήνει στο εύρος συχνοτήτων $f=10-15$ Hz. **της συνδυασμένης ροής παραθύρου και πλέγματος** η 1^η αρμονική φαίνεται να εμφανίζεται κανονικά στην συχνότητα της επιβαλλόμενης ταλάντωσης, σε όλες τις συχνότητες για όλες τις θέσεις που ελήφθησαν μετρήσεις κάτι που σημαίνει ότι η προσθήκη του πλέγματος δεν προκάλεσε καμία μεταβολή στην συχνότητα της επιβαλλόμενης ταλάντωσης. Αντίθετα μετά την προσθήκη του πλέγματος σε σειρά με το παράθυρο, η 2^η αρμονική εμφανίζεται σε κάποιες περιπτώσεις σε μικρότερη συχνότητα, ενώ στις υπόλοιπες εμφανίζεται σε συχνότητες ίδιες με αυτές που εμφανίστηκε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου.

Δυνάμεις

Από την μελέτη των διαγραμμάτων **των δυνάμεων ως προς την γωνία του πτερυγίου** συμπεραίνουμε ότι: Για **ροή στο απόρευμα του παραθύρου και της συνδυασμένης ροής παραθύρου και πλέγματος** οι δυνάμεις **F_x (Drag), F_y** αυξάνονται με την αύξηση της γωνίας α . Επίσης αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης f και εμφανίζουν μέγιστο στην $f=10$ Hz. Αντίθετα για **ροή στο απόρευμα του πλέγματος και σκέτης αεροσήραγγας** οι δυνάμεις **F_x (Drag), F_y** μειώνονται με την αύξηση της γωνίας α . Η δύναμη **F_z (Lift)** τώρα εμφανίζει λίγο διαφορετική συμπεριφορά από τις άλλες δύο. Για **ροή στο απόρευμα του παραθύρου** εμφανίζει μέγιστο στην $f=10$ Hz για όλες τις γωνίες εκτός της $\alpha=12^\circ$ που στην συχνότητα $f=10$ Hz πέφτει. **Στο απόρευμα της συνδυασμένης ροής παραθύρου και πλέγματος** η δύναμη **F_z (Lift)** για $\alpha>6^\circ$ υπερδιπλασιάζεται σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες. Για **ροή στο απόρευμα του πλέγματος**, σε αντίθεση με τις δυνάμεις **F_x (Drag) και F_y** η δύναμη **F_z (Lift)** αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας πτερυγίου α . Τέλος η F_z που μετρήθηκε σε **στο απόρευμα ροής σκέτης αεροσήραγγας εμφάνιζε μέγιστο για $\alpha=4^\circ$.**

Από την μελέτη των διαγραμμάτων **των δυνάμεων ως τον τύπο της ροής** συμπεραίνουμε ότι: Για μικρές γωνίες $\alpha=0^\circ$ και 4° η δύναμη που μετράμε στη ροή που δημιουργείται από το πλέγμα και από την συνδυασμένη ροή (πλέγμα και παράθυρο), εμφανίζουν πολύ κοντινές τιμές, με τις τιμές της F_x στο πλέγμα και παράθυρο να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες και η μέγιστη να εμφανίζεται στην $f=10$ Hz. Έπειτα για γωνία $\alpha>4^\circ$

οι τιμές της F_x πίσω από το πλέγμα και παράθυρο διπλασιάζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου, ενώ εμφανίζουν μέγιστο στην $f=10$ Hz. Επίσης οι τιμές της F_y για μικρές γωνίες $\alpha=4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το παράθυρο μόνο του και στην περίπτωση που τοποθετούμε και το πλέγμα σε σειρά με το παράθυρο. Οι τιμές στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το πλέγμα σε σειρά με το παράθυρο είναι πάντα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που χρησιμοποιούμε μόνο το παράθυρο, ενώ το μέγιστο εμφανίζεται και για τις δυο περιπτώσεις στην συχνότητα $f=10$ Hz. Αυξάνοντας τώρα την γωνία του πτερυγίου ($\alpha=8^\circ, 12^\circ$), οι τιμές της F_y που μετράμε πίσω από το πλέγμα και παράθυρο σχεδόν διπλασιάζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου. Μόνη εξαίρεση η τιμή της F_y για συχνότητα $f=10$ Hz που μετράμε πίσω από το πλέγμα και παράθυρο, η οποία είναι μισή σε σχέση με την αντίστοιχη που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου. Για όλες τις γωνίες πτερυγίου και τις επιβαλλόμενες συχνότητες οι τιμές της F_z που μετράμε πίσω από το πλέγμα και παράθυρο διπλασιάζονται και μάλιστα για $\alpha=8^\circ$ τριπλασιάζονται σε σχέση με τις αντίστοιχες που παίρνουμε με την ύπαρξη μόνο του παραθύρου με το μέγιστο να εμφανίζεται στην συχνότητα $f=10$ Hz.

Φάσματα δυνάμεων

Από την μελέτη των διαγραμμάτων **φασμάτων των δυνάμεων** συμπεραίνουμε ότι: Για όλους τους τύπους των ροών (ροή στο απόρευμα του παραθύρου, ροή στο απόρευμα του πλέγματος και της συνδυασμένης ροής παραθύρου και πλέγματος) και σε όλα τα φάσματα των τριών δυνάμεων F_x (Drag), F_y , F_z (Lift) πέρα από τις κορυφές που εμφανίζονται στην συχνότητα της επιβαλλόμενης ταλάντωσης, εμφανίζονται και δύο υψηλές κορυφές ανεξάρτητες της εκάστοτε επιβαλλόμενης συχνότητας ταλάντωσης, η πρώτη συχνότητας 19 Hz και η δεύτερη περίπου 70 Hz. Αυτές στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πιο ισχυρές της εκάστοτε επιβαλλόμενης συχνότητας ταλάντωσης. Έτσι κρίθηκε επιβεβλημένη η περαιτέρω μελέτη αυτών των παρασιτικών συχνοτήτων προκειμένου να διαπιστώσουμε τι της προκάλεσε.

Για αυτό το λόγο έγιναν μετρήσεις στο απόρευμα ελεύθερη ροή σε **σκέτη σήραγγα** ($U_{air}=12\text{m/s}, f_{tunnel}=40,4$ Hz) και παρατηρούμε ότι εμφανίζονται και εδώ οι κορυφές των 19 Hz και 60 Hz. Έπειτα κρίθηκε σκόπιμη η επιβολή μιας **τυχαίας δύναμης F** και η μέτρησή της στις τρεις διευθύνσεις x, y, z . Οι μετρήσεις που έγιναν σε **σκέτη**

σήραγγα ($U_{air}=12\text{m/s}, f_{tunnel}=40,4\text{ Hz}$) έδειξαν ότι υπάρχουν δύο ισχυρές κορυφές 19 και 50 Hz και στις τρεις κατευθύνσεις. Στην συνέχεια έγιναν δοκιμές σε **σκέτη σήραγγα με διαφορετικές ταχύτητες αέρα** διαφορετικές της ταχύτητας δοκιμών η οποία ήταν $U_{air}=12\text{m/s}$. Για να γίνει αυτό επιλέγαμε διαφορετικές συχνότητες στο inverter της αεροσήραγγας στο εύρος τιμών $f_{tunnel}=10-50\text{ Hz}$. Και εδώ παρατηρούμε ότι εμφανίζονται και εδώ οι κορυφές των 19 Hz και 70 Hz που εμφανίζονται σε όλα τα διαγράμματα, οι οποίες μάλιστα για $f_{tunnel}=40,4\text{ Hz}$ (συχνότητα δοκιμών αεροσήραγγας) είναι και ίσες. Τέλος για να διαπιστώσουμε τι προκάλεσε αυτές τις διαταραχές στις συχνότητες $f=19,50,70\text{ Hz}$ πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση των δυνάμεων F_x, F_y, F_z **σε σήραγγα χωρίς αέρα και χωρίς την επιβολή εξωτερικής δύναμης**. Διαπιστώθηκε λοιπόν, όπως η ύπαρξη μιας ισχυρής κορυφής συχνότητας 50 Hz και ακόμη μια πολύ χαμηλότερη συχνότητας 19 Hz. Μάλιστα η κορυφή συχνότητας 50 Hz εμφανίζει τιμή 10πλάσια σε σχέση με τις αντίστοιχες κορυφές των 50 Hz που μετρήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Έτσι καταλήγουμε στο γεγονός ότι οι κορυφές που φαίνονται σε όλα τα διαγράμματα οφείλονται μάλλον σε κάποιο φυσικό θόρυβο που υπήρχε στο εργαστήριο, η κάποιο ηλεκτρονικό θόρυβο που προκαλούν είτε οι μετρητικές συσκευές, είτε τα καλώδια μεταφοράς των σημάτων. Τέλος από ότι φαίνεται η κορυφή των 19 Hz ενισχύεται από την λειτουργία της αεροσήραγγας.

Αλληλεπίδραση ταχύτητας - δύναμης

Τέλος από την μελέτη των διαγραμμάτων παρουσιάζεται ο όρος A_G σε σχέση με τον αριθμό k συμπεραίνουμε ότι: Για ροή πίσω από **παράθυρο και πλέγμα** για όλες τις γωνίες και για τις τρεις δυνάμεις ο όρος A_G παρουσιάζει μέγιστο στον αριθμό $k=0,13$ ($f=8\text{Hz}$) ενώ για ροή πίσω από **παράθυρο** εμφανίζουν μέγιστο για κάποιες γωνίες στο $k=0,09$ ($f=6\text{Hz}$) και για κάποιες στο $k=0,13$ ($f=8\text{Hz}$). Βλέπουμε λοιπόν ότι με την προσθήκη του πλέγματος η ροή έγινε πιο ομοιογενής και εμφανίζει μέγιστο σε χαμηλότερη συχνότητα. Στο k που εμφανίζεται το μέγιστο των καμπύλων εκεί η επίδραση της δύναμης είναι μεγαλύτερη από εκείνη της ταχύτητας. Επίσης βλέπουμε τον όρο A_G να αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας, με εξαίρεση τις δυο μεγαλύτερες γωνίες που για $\alpha=8^\circ$ η καμπύλη είναι πιο ψηλή από αυτή για $\alpha=12^\circ$. Αυτό δείχνει ότι για όσο αυξάνεται η γωνία η επίδραση της δύναμης γίνεται πιο ισχυρή από αυτή της ταχύτητας. Επίσης παρατηρούμε ότι η κάθετη δύναμη F_z (Lift) στις περισσότερες γωνίες πτερυγίου επηρεάζει εξίσου με την οριζόντια ταχύτητα είτε χρησιμοποιούμε παράθυρο μόνο είτε παράθυρο σε συνδυασμό με πλέγμα.

Σύνκριση αεροδυναμικής συνάρτησης $A[k]$ με άλλες ερνασίες

Ακόμη θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι έγινε μια προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων της συνάρτησης απόκρισης $A[k]$ που βρέθηκε στα πειράματα των Starountzi και Graham και δημοσιεύτηκαν το 1982, σε σχέση με τα αποτελέσματα που βρέθηκαν στην παρούσα εργασία. Τα πειράματα των Starountzi και Graham αφορούν πτέρυγα NACA 0015 και τα διαγράμματα της $A[k]$ αφορούν την κατακόρυφη διεύθυνση z και άρα την δύναμη $F_z(\text{Lift})$. Στην περίπτωση τους ο μηχανισμός ταλάντωσης που δημιουργούσε την ημιτονοειδή ταλάντωση είχε δύο πτερύγια που απείχαν πολύ μεταξύ τους, ενώ υπήρχαν και δυο τοίχοι πάνω από το άνω και κάτω από το κάτω πτερύγιο οι οποίοι περιόριζαν την ροή ανάμεσα σε αυτούς. Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκαν τοίχοι οι οποίοι στην ουσία κατευθύνουν την ροή και τα πτερύγια του ταλαντωτικού μηχανισμού ήταν 10 τον αριθμό τοποθετημένα πολύ κοντά μεταξύ τους. Από την σύγκριση των δύο εργασιών προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτα στην εργασία των Starountzi και Graham βλέπουμε τον αριθμό $A[k]$ να εμφανίζει την μέγιστη τιμή του σε πολύ μικρή συχνότητα $k=0,02$ και έπειτα με την αύξηση της συχνότητας να πέφτει. Στην περίπτωση μας σε μικρή συχνότητα έχουμε πολύ μικρή τιμή της αεροδυναμικής συνάρτησης, ενώ το μέγιστο εμφανίζεται για $k=0,12$. Ταυτόχρονα δεν βλέπουμε μια σταθερή τάση της τιμής του $A[k]$. Βλέπουμε να ακολουθεί μια ημιτονοειδή καμπύλη τη στιγμή που στην εργασία των Starountzi και Graham έχουμε εμφανή πτώση με την αύξηση του k . Αυτές οι διαφορές ανάμεσα στις δυο εργασίες μπορεί να οφείλονται αρχικά στην ύπαρξη των τοιχών πάνω και κάτω από τα πτερύγια που υπάρχουν στην εργασία των Starountzi και Graham, ενώ στην παρούσα δεν υπάρχουν. Ένας πιο σημαντικός παράγοντας όμως είναι η ύπαρξη 10 πτερυγίων στο σύστημα δημιουργίας της ημιτονοειδούς ροής της παρούσας εργασίας, τα οποία σίγουρα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και παράγουν μια ροή περισσότερο σύνθετη από αυτή που παράγει η ύπαρξη μόνο δύο πτερυγίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **H. Stapountzis, J.M.R Graham** 1982 *The unsteady lift of Bluff cylindrical bodies in unsteady flow*. Department of Aeronautics, Imperial College of Science and technology, London.
- [2] **W.C Selerowicz, A.P Szumowski** 2002 *Airfoil flow instabilities induced by background flow oscillations*, Experiments in Fluids 32 (2002), Springer verlag 2002, DOI 10.1007/S00348-001-0377-4
- [3] **H.Stapountzis** 1982 *An oscillating rig for the generation of sinusoidal flows*. Psys. E:Instrum, Vol 15, Imperial College of Science Technology, London SW7 2BY, UK
- [4] **Σταπουντζής Ε.**, "Σημειώσεις Μηχανικής Ρευστών ΙΙ", ΠΘ, ΤΜΜΒ, 2000
- [5] **Καμπάνης Π. Βασίλης** 2005 "Αλληλεπίδραση πτερυγίων απορευμάτων με εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- [6] **Αλυγιζάκης Κ. Εμμανουήλ** 2005 " Έρευνα φαινομένων ανάμειξης μέσω μεγάλων ροικών δομών και τύρβης σε διεπιφάνειες υγρού-αερίου", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [7] **Basu B C and Hancock G J** 1977 *The unsteady motion of a two-dimensional aerofoil in incompressible inviscid flow* University of London Queen Mary College Report
- [8] **Edwards P E** 1972 *The aerodynamic loading on a yawed wing in a sinusoidal gust* MSc Thesis University of London, Imperial College
- [9] **Hakkinen R J and Richardson A S** 1957 *Theoretical and experimental investigation of random gust loads part I* National Advisory Committee for Aeronautics Report TN 3878

[10] **Holmes D W** 1970 *Experimental pressure distributions on aerofoils in transverse and streamwise gusts* University of Cambridge Engineering Department Report

[10] **von Karman T and Sears W R** 1938 *Airfoil theory for non-uniform motion* J. Aeron. Sci. 5 379-90

[11] **Lamson P** 1957 *Measurements of lift fluctuations due to turbulence* National Advisory Committee for Aeronautics Report TN 3880

[12] **Liepmann H W** 1952 *On the application of statistical concepts to the buffeting problem* J. Aeron. Sci. 19 793-800

[13] **Horner M. B., Saliveros E. και Galdraith R. A.** "An Examination of Vortex Convection Effects during Blade-Vortex Interaction", *Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung (ZFW)*, Τόμ. 17, σελ. 189-195, 1993.

[14] **Coton F.N, Marshall J.S., Galdraith R.A.McD. και Green R.B.**, "Helicopter tail rotor orthogonal blade vortex interaction", *Progress in Aerospace Sciences*, Τόμ. 40, σελ. 453-486, 2004.

[15] **Booth E. R. Jr. και J. C. Yu**, "Two-dimensional Blade-Vortex Flow Visualization Investigation", *AIAA Journal*, Τόμ. 24, τεύχ. 9, σελ.1468-1473, 1986.

[16] **Bearman P. W.**, "On vortex shedding from a circular cylinder in the critical Reynolds number régime", *Journal of Fluid Mechanics*, Τόμ. 37, Μέρος 3, σελ. 577-585, 1969.

[17] **Σταπουντζής Ε.**, "Σημειώσεις για το μάθημα Φαινόμενα Τύρβης", ΠΘ, ΤΜΜΒ, 2004



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000097511