



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και εύρεση χαρακτηριστικών πρότυπης  
περισταλτικής αντλίας δύο σταδίων έγχυσης**



**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΟΥΡΝΑΖΟΣ**

Επιβλέπων Καθηγητής  
**Τσαγγάρης Σωκράτης**  
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2007

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει σαν αντικείμενο την πειραματική μελέτη λειτουργίας πρότυπων περισταλτικών αντλιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως στον τομέα της ιατρικής. Αρχικά γίνεται μια βιβλιογραφική μελέτη πάνω σε διάφορες πατέντες σχετικά με την έως τώρα ανάπτυξη της τεχνολογίας των γραμμικών περισταλτικών αντλιών με εύκαμπτο σωλήνα. Συναρμολογείται πειραματική διάταξη βάσει της οποίας γίνονται μετρήσεις για την εύρεση χαρακτηριστικών καμπυλών πρωτότυπης περισταλτικής αντλίας, η οποία ήταν ήδη κατασκευασμένη στο Εργαστήριο. Στην εν λόγω αντλία μπορούν και ενσωματώνονται δύο εκκεντροφόροι άξονες κάθε φορά. Ο ένας λειτουργεί την αντλία με ένα έμβολο (δάκτυλο), ενώ ο άλλος είναι βελτιωμένος και λειτουργεί την αντλία με δύο έμβολα (δάκτυλα), με αποτέλεσμα η αντλία να εργάζεται σε δύο χρόνους. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται όσο το δυνατό γραμμική έγχυση του ρευστού από την αντλία. Ακολουθεί επεξεργασία και αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Βιορευστομηχανικής και Βιοϊατρικής Τεχνολογίας του Τομέα Ρευστών του Ε.Μ.Π. στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Σωκράτη Τσαγγάρη για την ανάθεση, επίβλεψη και καθοδήγηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις και εμπειρίες που απέκτησα, τόσο κατά την εργαστηριακή εξάσκηση στο ερευνητικό πεδίο της Βιορευστομηχανικής, όσο και κατά την παρακολούθηση των διαλέξεων στα αντίστοιχα ακαδημαϊκά έτη. Κλείνοντας, θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερα τις ολόθερμες ευχαριστίες μου στον Διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό και Υποψήφιο Διδάκτορα του Εργαστηρίου κ. Χρήστο Μανόπουλο για την ουσιαστική συμβολή του και τις χρήσιμες υποδείξεις του κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων αλλά και της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας.

Με τιμή,  
Δημήτριος Μπουρνάζος.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ</b>	
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά περισταλτικών αντλιών.....	2
1.3 Γραμμική περισταλτική αντλία της micrel Medical Devices.....	4
1.4 Δίχρονη περισταλτική αντλία της IMED Corporation (Alaris Medical Systems).....	10
1.5 Σωλήνας σιλικόνης.....	17
1.5.1 Ιδιότητες και εφαρμογές του σωλήνα σιλικόνης.....	18
1.5.2 Χημική δομή του σωλήνα σιλικόνης.....	19
1.5.3 Μορφοποίηση (processing) σωλήνων σιλικόνης.....	22
1.5.3.1 Χύτευση με έγχυση τήγματος (LIM – Liquid Injection Molding).....	22
1.5.3.2 Χύτευση με συμπίεση (Compression Molding).....	23
1.5.3.3 Χύτευση μεταφοράς (Transfer Molding).....	24
1.5.3.4 Εκβολή (Extrusion).....	25
1.5.4 Ελαττώματα κατά τη μορφοποίηση μέσω τήγματος.....	27
1.5.5 Οι σωλήνες σιλικόνης στις περισταλτικές αντλίες.....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ</b>	
2.1 Δυναμοκυψέλη (load cell).....	29
2.1.1 Η δυναμοκυψέλη σαν μέθοδος μέτρησης βάρους.....	29
2.1.2 Αρχή λειτουργίας δυναμοκυψέλης.....	30
2.1.3 Δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού.....	32
2.2 Ταχύμετρο.....	33
2.2.1 Αρχή λειτουργίας ταχύμετρου.....	33
2.2.2 Φωτοεκπομπός δίοδος (LED).....	34
2.3 Ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης κινητήρα (speed controller).....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b>	
3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	39
3.2 Μετρητικά όργανα.....	44
3.2.1 Ηλεκτροκινητήρες.....	44
3.2.2 Ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης (controller).....	45
3.2.3 Ταχύμετρο.....	46
3.2.4 Δυναμοκυψέλη (load – cell).....	46
3.2.5 Αναλογικός – ψηφιακός μετατροπέας (ADC).....	47
3.2.6 Ηλεκτρονικός Υπολογιστής – Λογισμικό.....	50
3.2.7 Θερμόμετρα.....	50
3.3 Σφάλματα μετρήσεων.....	50
3.3.1 Συστηματικά σφάλματα οργάνων.....	51
3.3.1.1 Δυναμοκυψέλη (load – cell).....	51
3.3.1.2 Χρονόμετρο – Ταχύμετρο (Tachometer).....	54
3.3.1.3 Θερμόμετρο.....	54
3.3.2 Προσαρμογή (fitting) συνάρτησης παροχής μάζας.....	54
3.3.3 Τυχαία σφάλματα.....	56
3.3.4 Συνολικά σφάλματα και διάδοσή τους.....	57
3.3.4.1 Επίπεδα σφάλματος.....	59

3.3.4.2 Υπολογισμός σφαλμάτων παραγόμενων μεγεθών.....	61
3.4 Πειραματική εκτέλεση.....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	
4.1 Εγχυόμενη παροχή μάζας συναρτήσει του χρόνου.....	69
4.2 Μελέτη αντλίας δύο εμβόλων.....	72
4.3 Μελέτη αντλίας ενός εμβόλου.....	107
4.4 Συμπεράσματα.....	149
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	151
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	
I. Διαγράμματα μάζας εγχυόμενου νερού με το χρόνο για την αντλία δύο εμβόλων.....	153
II. Διαγράμματα μάζας εγχυόμενου νερού με το χρόνο για την αντλία ενός εμβόλου.....	175
III. Προγράμματα FORTRAN.....	198
III.1 Πρόγραμμα προσαρμογής ευθείας αναδρομής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.	198
III.2 Πρόγραμμα εύρεσης τυχαίων σφαλμάτων συχνότητας και παραμέτρων της.....	201
III.3 Πρόγραμμα εύρεσης τυχαίων σφαλμάτων παροχής μάζας και όγκου δεύτερου και τρίτου επιπέδου.....	203

# Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 1

## ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ

### 1.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η συναρμολόγηση πειραματικής διάταξης προτύπου περισταλτικής αντλίας δυο σταδίων έγχυσης και η διεξαγωγή πειραμάτων μέσω αυτής για την εύρεση των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας. Στα πειράματα χρησιμοποιούνται δυο περισταλτικές αντλίες με διαφορετικό εκκεντροφόρο άξονα και γίνεται αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων ως προς την ακρίβεια και τη γραμμική έγχυση του ρευστού από κάθε αντλία. Οι περισταλτικές αντλίες είναι αντλίες μικρής παροχής και ύψους, που λειτουργούν με την αρχή της περισταλτικής κίνησης του τοιχώματος ενός ανατάξιμου ελαστικού σωλήνα. Η περισταλτική κίνηση επιτυγχάνεται με την επιβολή κάποιας μεταβαλλόμενης πίεσης εξωτερικά στον ανατάξιμο ελαστικό σωλήνα, η οποία μεταβάλλει τη διατομή και την εσωτερική πίεση του σωλήνα με αποτέλεσμα την προώθηση του ρευστού που περιέχεται μέσα σε αυτόν. Πρόκειται ουσιαστικά για «μη διαβρεχόμενου» τύπου αντλίες όπου το ρευστό που αντλείται δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το μηχανικό μέρος της αντλίας. Αυτές οι αντλίες χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της ιατρικής κυρίως για άντληση, κυκλοφορία και δοσιμετρική χορήγηση βιολογικών ρευστών και φαρμάκων. Μια συνηθισμένη εφαρμογή είναι η άντληση του αίματος στις περιπτώσεις τεχνητού νεφρού και στις εγχειρήσεις ανοιχτής καρδιάς όπου η εξωσωματική κυκλοφορία του αίματος είναι απαραίτητη. Άλλες εφαρμογές αφορούν την άντληση της τροφής για παρεντερική σίτιση και τη δοσιμετρική χορήγηση υγρών φαρμάκων σε περιπτώσεις αναισθησίας και ελέγχου του πόνου ενός ασθενή με βαριά νοσήματα. Επίσης χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές και τεχνολογικές εφαρμογές όπως για άντληση ευαίσθητων ή χημικά ενεργών ουσιών που δεν πρέπει να έλθουν σε άμεση επαφή με τον αντλητικό μηχανισμό [12].

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει προσπάθειες θεωρητικής προσομοίωσης της λειτουργίας των γραμμικών περισταλτικών αντλιών με σκοπό την εύρεση των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας. Ιδιαίτερα από το Εργαστήριο Βιορευστομηχανικής και Βιοϊατρικής Τεχνολογίας του Τομέα Ρευστών του Ε.Μ.Π. έχουν πραγματοποιηθεί οι εργασίες των Χ. Μανόπουλου κ.ά. [4] και των Χ. Μανόπουλου και Σ. Τσαγγάρη [5]. Σύμφωνα με τις εργασίες αυτές δομείται μοντέλο που αντιπροσωπεύει και αναπαριστά τον κυρίαρχο μηχανισμό μιας γραμμικής περισταλτικής αντλίας, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Navier – Stokes και διατήρησης της μάζας σε μια διάσταση για μη μόνιμη και ασυμπίεστη ροή με όρο απωλειών. Για την επίτευξη της άντλησης επιβάλλεται, σε ένα τμήμα του σωλήνα, κύμα μεταβολής της διατομής του στο χώρο και στο χρόνο, το οποίο προσομοιάζει τον τρόπο συρρίκνωσης και επανάταξης του εύκαμπτου αγωγού. Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης του μοντέλου – σωλήνα που προκύπτει γίνεται με αριθμητικό τρόπο με 4<sup>ης</sup> τάξης μέθοδο ακρίβειας Runge – Kutta και εξάγεται ο νόμος που διέπει την παροχή βάσει κυρίαρχων παραμέτρων, ώστε να αποκαλυφθεί για ποιες τιμές των παραμέτρων μια τέτοια αντλία είναι αποδοτική. Οι παράμετροι του μοντέλου της αντλίας είναι το μήκος διέγερσης  $L$  του εύκαμπτου σωλήνα, το μήκος κύματος  $\lambda$  διέγερσης του σωλήνα, η συχνότητα διέγερσης  $f$  του σωλήνα, το κινηματικό ιξώδες  $\nu$  του νερού στους 20 °C, η εσωτερική διάμετρος  $D_0$  του σωλήνα πριν τη διέγερση και το πλάτος διέγερσης  $A_b$  διατομής του σωλήνα. Οι χρονικές ακολουθίες της συνάρτησης παροχής παριστάνονται γραφικά για κάποιες αντιπροσωπευτικές συχνότητες και μήκη κύματος διέγερσης του σωλήνα. Επίσης παριστάνεται γραφικά η μέση

παροχή ως συνάρτηση της συχνότητας και του μήκους κύματος, οπότε υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.

Οι αρνητικές τιμές της παροχής που εμφανίζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα δηλώνουν την οπισθοροή (back-flow) του ρευστού που υπάρχει αντίθετα με την κατεύθυνση της ταχύτητας του κύματος μεταβολής της διατομής του σωλήνα. Η οπισθοροή οφείλεται στο ότι η συνάρτηση της διατομής δεν μπορεί να πάρει την τιμή μηδέν, επομένως δεν μπορεί να επιτευχθεί κατάσταση πλήρους έμφραξης (deep-occlusion) στο σωλήνα και συνεπώς εξάλειψη της οπισθοροής. Ο μηδενισμός της συνάρτησης διατομής είναι απαγορευτικός στο μοντέλο λόγω της εμφάνισής της σε παρονομαστές μεταβλητών συντελεστών. Η οπισθοροή εξαλείφεται, βέβαια, καθώς αυξάνεται η συχνότητα, ενώ αυτό μπορεί να γίνει και για χαμηλές συχνότητες με την εισαγωγή συνιστώσας προσομοίωσης της συρρίκνωσης του σωλήνα ως τοπική απώλεια για τη ροή του ρευστού. Πάντως ποσοτικά αυτή η ελάχιστη οπισθοροή δεν έχει πρακτικά επίδραση στον όγκο εμβολισμού του σωλήνα.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από το θεωρητικό μοντέλο συρρίκνωσης και επανάταξης σωλήνα περισταλτικής αντλίας των εργασιών [4], [5] συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα διέγερσης, για ένα σταθερό μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση παροχή.
- 2) Όταν το μήκος κύματος της διέγερσης είναι τέτοιο που η διατομή στην είσοδο και στην έξοδο της περιοχής διέγερσης έχουν την ίδια ακριβώς τιμή, τότε η μέση τιμή της παροχής ελαχιστοποιείται, ανεξαρτήτως της συχνότητας. Σε όλες τις υπόλοιπες τιμές του μήκους κύματος υπάρχει ασυμμετρία εισόδου – εξόδου στην περιοχή διέγερσης για τη διατομή. Η ασυμμετρία αυτή δρα προσθετικά και αυξάνει τη μέση παροχή με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται μέγιστες τιμές της για κάποιες συγκεκριμένες τιμές του  $\lambda$ , που εξαρτώνται από τη συχνότητα διέγερσης  $f$ .
- 3) Όσο λιγότερες οι συρρικνώσεις μέσα στην περιοχή της διέγερσης, τόσο μεγαλύτερη η μέση παροχή.

## 1.2 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά περισταλτικών αντλιών

Με την πάροδο των χρόνων έχουν εξελιχθεί πολλές περισταλτικές αντλίες «μη διαβρεχόμενου» τύπου για έγχυση ιατρικών διαλυμάτων σε ασθενείς. Όμως, οι δυο επικρατέστερες κατηγορίες περισταλτικών αντλιών είναι οι στρεφόμενων έκκεντρων και οι γραμμικές.

Οι περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων αποτελούνται από ένα συνεχόμενο μήκος εύκαμπτης σωλήνωσης που ανήκει σε ένα κυκλικό κανάλι ενός στέρεου προστατευτικού καλύμματος. Ένας μηχανικά κινούμενος στροφέας, που περιέχει πολλαπλούς κυλίνδρους (έκκεντρα – συνήθως δύο), συμπιέζει και απελευθερώνει εναλλακτικά την σωλήνωση επιδρώντας στην προώθηση ενός δεδομένου όγκου ρευστού που καθορίζεται, από την εσωτερική διάμετρο της σωλήνωσης, το κενό μεταξύ των κυλίνδρων και την ταχύτητα του στροφέα. Το άμεσο αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας είναι ότι το ρευστό έρχεται σε επαφή μόνο με την εσωτερική επιφάνεια της σωλήνωσης, οπότε δεν μολύνεται από το μηχανισμό της αντλίας. Αυτοί οι τύποι αντλιών απαντώνται συνήθως στις ιατρικές εφαρμογές όσο αφορά στη διανομή τροφής και φαρμάκων σε ασθενείς, στην εξωτερική κυκλοφορία του αίματος κατά τη διάρκεια εγχείρησης ανοιχτής καρδιάς και στην εξέλιξη των φαρμακευτικών προϊόντων.

Με σκοπό τη σωστή λειτουργία, η σωλήνωση σε μια περισταλτική αντλία στρεφόμενων έκκεντρων πρέπει να συμπιέζεται πλήρως για να εξασφαλίζει επαρκές κενό πίεσης στην πλευρά εισόδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων λόγω κάμψης

των τοιχωμάτων της σωλήνωσης που διπλώνονται, με την εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος να βρίσκεται σε συμπίεση και την εξωτερική επιφάνεια να βρίσκεται σε εφελκυσμό. Αυτές οι τάσεις κατά μήκος του τοιχώματος της σωλήνωσης μπορούν τελικά να οδηγήσουν σε αστοχία του σωλήνα, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του σωλήνα, το βαθμό της συμπίεσης ή της έμφραξης του σωλήνα, την ταχύτητα του στροφέα και τα χαρακτηριστικά των υλικών. Έτσι, μετά από την πάροδο λειτουργίας κάποιου χρονικού διαστήματος, εμφανίζεται μόνιμη πλαστική παραμόρφωση στη διατομή του σωλήνα, με αποτέλεσμα το μετασχηματισμό της αρχικά κυκλικής διατομής σε ελλειπτική πράγμα το οποίο επιδρά στο ρυθμό έγχυσης του ρευστού. Επίσης οι περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων έχουν σχετικά μικρή απόδοση και επιβάλλουν εντατικό πεδίο υψηλών διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων στο σύστημα σωλήνωσης.

Οι γραμμικές περισταλτικές αντλίες χρησιμοποιούν παλινδρομικά στοιχεία μηχανών για να εξασφαλίζουν περισταλτική κίνηση στα τοιχώματα εύκαμπτου σωλήνα, με σκοπό να προωθούν το περιεχόμενο ρευστό εντός του σωλήνα. Τέτοιες περισταλτικές αντλίες αποτελούνται από έναν αριθμό παλινδρομικών εμβόλων (δακτύλων) άντλησης, τα οποία διατάσσονται διαδοχικά, ώστε να συμπιέζουν γειτονικά τμήματα σωλήνα με κυματοειδή τρόπο. Παρά το γεγονός ότι εν γένει οι γραμμικές περισταλτικές αντλίες υπερέχουν μεν έναντι των περισταλτικών αντλιών στρεφόμενων έκκεντρων, έχουν δε μειονεκτήματα όπως το αξιοσημείωτο κόστος λόγω πολυπλοκότητας του μηχανισμού που απαιτείται για να συγχρονίζονται σωστά τα έμβολα (δάκτυλα) της άντλησης. Επειδή τα έμβολα (δάκτυλα) της άντλησης μετακινούνται ώστε να κλείνουν τα διαδοχικά γειτονικά τμήματα της σωλήνωσης, οι δυνάμεις σύνθλιψης που επιβάλλονται στη σωλήνωση και στα ρευστά είναι συγκρίσιμες με εκείνες που εμφανίζονται στις περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων. Όμως, υπάρχει λιγότερη φθορά στις γραμμικές περισταλτικές αντλίες παρά στις στρεφόμενων έκκεντρων, γιατί στις γραμμικές οι δυνάμεις έμφραξης περιορίζονται στην περιοχή κάτω από κάθε έμβολο (δάκτυλο), ενώ στις στρεφόμενων έκκεντρων εφαρμόζονται καθ' όλο το μήκος της σωλήνωσης. Παρόλα αυτά, ακόμα και στη γραμμική περισταλτική αντλία ο σωλήνας υφίσταται σε κάποιο βαθμό πλαστική παραμόρφωση. Συνεπώς, η αρχική διατομή του σωλήνα που προωθεί το ρευστό εκπίπτει και ο σωλήνας αποκτά ένα προοδευτικά περισσότερο οβάλ σχήμα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ογκομετρική παροχή του ρευστού που διανέμεται σε κάθε κύκλο άντλησης.

Επιπλέον, με σκοπό να εξομαλυνθεί η μεταβολή της παροχής από έναν κύκλο στον επόμενο, μερικές γραμμικές περισταλτικές αντλίες έχουν αυτό που λέγεται “wrap cycle” διορθωτικό έμβολο (δάκτυλο). Οι περισσότερες γραμμικές περισταλτικές αντλίες χρησιμοποιούν πολλά έμβολα για να μικρύνουν τον χρόνο λειτουργίας του διορθωτικού εμβόλου (δακτύλου). Όμως, προσπαθώντας να διατηρηθεί η κατάλληλη ευθυγράμμιση και η σχετική κίνηση μεταξύ των πολλών εμβόλων, επιδεινώνεται η αξιοπιστία της λειτουργίας της συσκευής και αυξάνεται το κατασκευαστικό κόστος.

Ένα άλλο μειονέκτημα μπορεί να είναι αυτό της οπισθοροής (back – flow), σύμφωνα με το οποίο ένα τμήμα από το εγχυόμενο ρευστό κατευθύνεται αντίθετα από την ταχύτητα διάδοσης του περισταλτικού κύματος, όταν η πίεση εξόδου (κατάθλιψης) είναι υψηλότερη από την εσωτερική πίεση της περισταλτικής αντλίας. Ειδικότερα σε περιπτώσεις δοσιμετρικής χορήγησης υγρών φαρμάκων σε ασθενείς, η οπισθοροή προκαλεί την ανάμειξη του εγχυόμενου ρευστού με το αίμα του ασθενούς, όταν η πίεση του αίματος είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική πίεση της περισταλτικής αντλίας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε θρόμβωση του αίματος.

Επιπλέον η παρουσία αέρα στο σύστημα κατά τη μετάγγιση του ρευστού φαρμάκου στη γραμμή του ασθενούς, όταν η περισταλτική αντλία εργάζεται συνεχώς χωρίς η ροή του ρευστού να σταματά, αποτελεί επίσης μειονέκτημα. Σε αυτή την περίπτωση είναι μόνιμα

συνδεδεμένα σε σειρά με την γραμμή του ασθενούς ένα φίλτρο εξάλειψης αέρα και μια βαλβίδα αντεπιστροφής.

Η αρχή λειτουργίας τέτοιων γραμμικών περισταλτικών αντλιών περιγράφεται διεξοδικά στην επόμενη ενότητα, όπου γίνεται εκτεταμένη αναφορά στον τρόπο λειτουργίας δυο πατέντων περισταλτικών αντλιών, της micrel Medical Devices [14], [15], [16] και της IMED Corporation (Alaris Medical Systems) [1], [2] αντίστοιχα.

### 1.3 Γραμμική περισταλτική αντλία της micrel Medical Devices

Η περισταλτική αντλία της micrel Medical Devices [14], [15], [16] χαρακτηρίζεται από το ότι κάθε ένα από τα ενδιάμεσα έκκεντρα έχει τρία τμήματα με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας. Το πρώτο τμήμα έχει συνεχώς αυξανόμενη ακτίνα για τη φάση της συμπίεσης, το δεύτερο τμήμα έχει σταθερή ακτίνα ίση με την ακτίνα του τέλους του πρώτου τμήματος για τη διατήρηση της έμφραξης του εύκαμπτου σωλήνα και το τρίτο τμήμα έχει απότομη μείωση της ακτίνας για γρήγορη επανάταξη του σωλήνα. Κατά προτίμηση, το τελευταίο έκκεντρο οδηγώντας τον τελευταίο ακόλουθο (δάκτυλο), έχει ένα εκτεταμένο τμήμα με μεγάλη ακτίνα για έμφραξη του σωλήνα, όταν η πίεση αναπτύσσεται από τους ενδιάμεσους ακόλουθους (δάκτυλα) που συμπιέζουν τον σωλήνα. Το ίδιο αυτό έκκεντρο έχει μικρότερη ακτίνα στο τέλος για ένα αρκετά μεγάλο τμήμα, έτσι που να κρατά σε οριακό επίπεδο το σωλήνα ανοιχτό ώστε το ρευστό μόλις να διέρχεται.

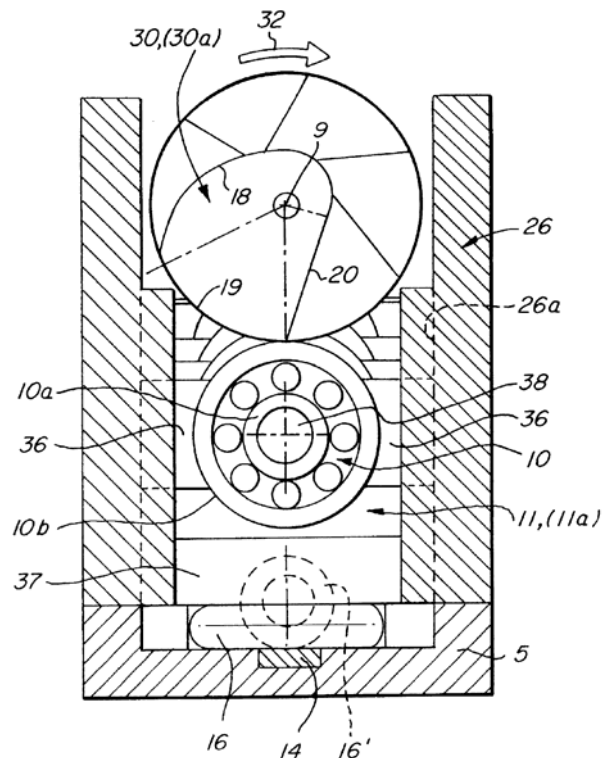
Με σκοπό να επιτευχθεί συνεχόμενη σταθερή ροή έγχυσης ρευστού από την αντλία, ένα πρόσθετο έκκεντρο γραμμικοποίησης της ροής παρέχεται στο τέλος του μηχανισμού έγχυσης. Αυτό το έκκεντρο έχει ένα τμήμα με αυξανόμενη ακτίνα η οποία αποκτά μια μέγιστη τιμή και το υπόλοιπο τμήμα με μειούμενη ακτίνα με ελάχιστη τιμή όση χρειάζεται ώστε ο ακόλουθος (δάκτυλο) του έκκεντρου μόλις να ακουμπά τον σωλήνα. Προκειμένου να επεκταθεί το εύρος της γραμμικότητας θα πρέπει το κάτω μέρος του ακόλουθου (ακροδάκτυλο) του έκκεντρου γραμμικής ροής, να έχει μεγαλύτερη διάσταση στην κατά μήκος κατεύθυνση του εύκαμπτου σωλήνα και κατά προτίμηση το διπλάσιο συγκριτικά με το μήκος των δακτύλων των άλλων έκκεντρων.

Ο μηχανισμός άντλησης της γραμμικής περισταλτικής αντλίας της micrel Medical Devices [14], [15], [16], απεικονίζεται στις εικόνες 1 και 2 σε πλάγια τομή και πρόοψη αντίστοιχα. Ο εκκεντροφόρος άξονας (9) φέροντας τα έκκεντρα από (30α) έως (30g), στηρίζεται σε δύο ρουλεμάν κύλισης (8), τα οποία εδράζονται εντός ακίνητου φορέα (26). Ο εκκεντροφόρος άξονας (9) οδηγείται από κινητήρα (6) χαμηλής ισχύος, φέροντας γριναζωτό μειωτήρα (6α). Ένας κωδικοποιητής περιστροφής (rotational position encoder) (7), μαζί με έναν αισθητήρα (17) συμπεριλαμβάνονται με σκοπό να καταγράφεται η ταχύτητα περιστροφής και η γωνιακή θέση του εκκεντροφόρου άξονα (9). Τα σήματα του αισθητήρα (17) λαμβάνονται από τα ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία ελέγχουν τη λειτουργία της περισταλτικής αντλίας.

Σε αντιστοιχία με κάθε ένα από τα έκκεντρα (30α) έως (30g) υπάρχουν οι ακόλουθοι (δάκτυλα) (11α) έως (11g). Κάθε ένας ακόλουθος φέρει ένα μικρό ρουλεμάν (10) του οποίου η εσωτερική στεφάνη (10α) στηρίζεται σε έναν πείρο (38) του ακόλουθου. Η εξωτερική στεφάνη (10b) από κάθε ρουλεμάν (10) ακουμπά την επιφάνεια του κάθε έκκεντρου (30α) έως (30g), έτσι ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυνατή τριβή μεταξύ των ακόλουθων (11α) έως (11g) των έκκεντρων και των έκκεντρων (30α) έως (30g).

Τα ακροδάκτυλα (37) των ακόλουθων (11) αγγίζουν τον εύκαμπτο σωλήνα (16), ο οποίος στηρίζεται στη βάση (5). Οι ακόλουθοι (11) κινούνται στην κατακόρυφη διεύθυνση, όπως φαίνεται στην εικόνα 1, οδηγούμενοι από τις πλαϊνές τους επιφάνειες (36), μέσα σε οδηγητικά αυλάκια (26α) που υπάρχουν στα πλαϊνά τοιχώματα του ακίνητου φορέα (26).





Εικόνα 1. Πλάγια τομή του μηχανισμού άντλησης, όπου διακρίνονται ο εκκεντροφόρος άξονας, οι ακόλουθοι των έκκεντρων με τα ρουλεμάν τους και ο εύκαμπτος σωλήνας.

Από τις εικόνες 1 και 2 μπορεί να φανεί ότι το ακροδάκτυλο (37) του ακόλουθου (11a) του πρώτου έκκεντρου (30a) έχει πλήρως συμπίεσει τον εύκαμπτο σωλήνα (16) στην κλειστή του θέση (με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται ο εύκαμπτος σωλήνας (16') στην πλήρως ανοιχτή του θέση – εικόνα 1). Τα ενδιάμεσα έκκεντρα (30b) έως (30e) έχουν ουσιαστικά το ίδιο σχήμα, αλλά διατάσσονται έτσι ώστε να διαφέρουν γωνιακά μεταξύ τους κατά 60 μοίρες. Αυτή η γωνιακή διαφορά στη διάταξή τους εξασφαλίζει ουσιαστικά ομαλό φορτίο στρέψης στον κινητήρα (6). Στην εικόνα 2 η είσοδος (16a) του εύκαμπτου σωλήνα (16) φαίνεται στην αριστερή πλευρά του σχεδίου, ενώ η έξοδος (16b) φαίνεται στην δεξιά πλευρά.

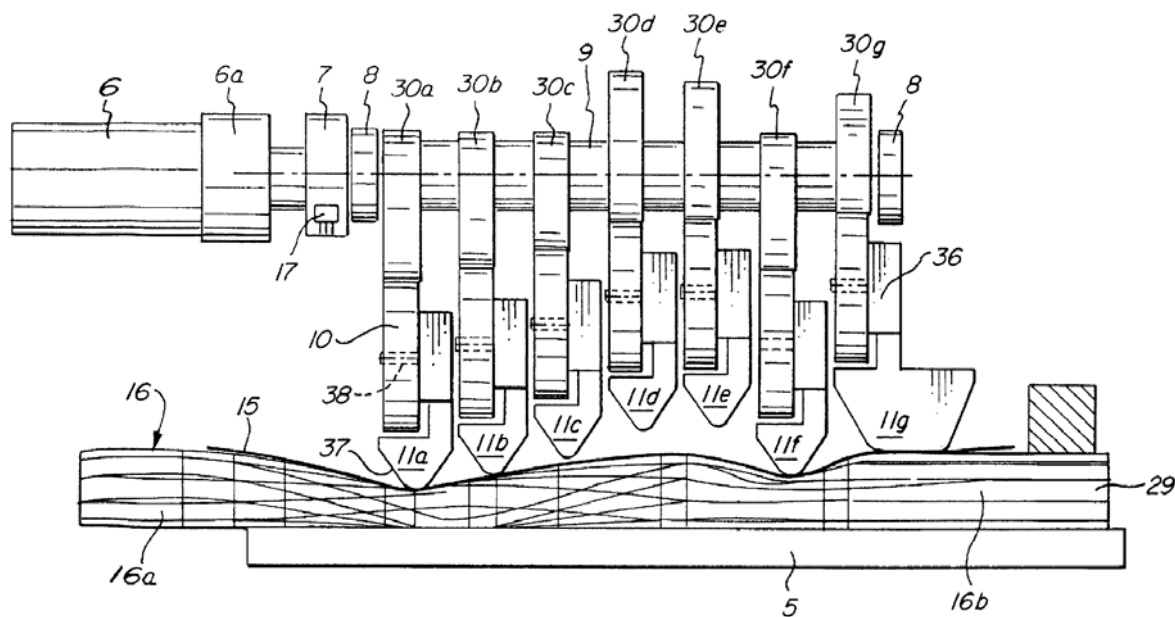
Ο εύκαμπτος σωλήνας (16) είναι φτιαγμένος από ελαστικό υλικό κατά προτίμηση σιλικόνη. Για να στεγανοποιείται ο μηχανισμός οδήγησης από τυχόν διαρροή ρευστού από τον εύκαμπτο σωλήνα (16), τοποθετείται ένα προστατευτικό λεπτό στρώμα από πλαστικό υλικό (15) ανάμεσα στο σωλήνα (16) και στα ακροδάκτυλα (37) των ακόλουθων (11a) έως (11g) (φαίνεται μόνο στην εικόνα 2 και όχι στην εικόνα 1 χάριν ευκρίνειας).

Τα ενδιάμεσα έκκεντρα (30b) έως (30e), όπως φαίνεται στις εικόνες 1, 2 και 3, έχουν τρία τμήματα με διαφορετικές καμπυλότητες. Το πρώτο τμήμα (18) έχει μια διαρκώς αυξανόμενη ακτίνα (υπολογισμένη καμπύλη) για τη φάση της συμπίεσης. Το δεύτερο τμήμα (19) έχει μια σταθερή ακτίνα R2 ίση με την ακτίνα του τέλους του πρώτου τμήματος (18) για να διατηρεί πλήρως κλειστό τον εύκαμπτο σωλήνα (16). Το τρίτο τμήμα (20) έχει μια απότομη μείωση της ακτίνας καταλήγοντας σε μια μικρή ακτίνα R6 για γρήγορη επανάταξη του σωλήνα (16).

Από την εικόνα 1 μπορεί να φανεί ότι μολονότι η διαδρομή των ακόλουθων (δακτύλων) (11) από τα έκκεντρα (30) είναι σχετικά σημαντική, το πλάτος του μηχανισμού (φαίνεται σε πλάγια τομή στην εικόνα 1) δεν χρειάζεται να είναι πολύ μεγαλύτερο από την

μέγιστη εξωτερική διάμετρο των έκκεντρων (30). Τα ρουλεμάν (10) τα οποία μπορεί να είναι μικρά σχετικά, τοποθετούνται με τη μεγαλύτερη διάστασή τους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση συμπίεσης του σωλήνα (16), ενώ η εγκάρσια οδήγηση των ακόλουθων (δακτύλων) (11) εντός του ακίνητου φορέα (26) εξασφαλίζεται με οδηγητικά αυλάκια (26α) που υπάρχουν στα πλαϊνά τοιχώματα.

Οι ακόλουθοι (δάκτυλα) (11) σπρώχνονται προς τα επάνω από την ελαστικότητα του σωλήνα (16) με αποτέλεσμα να αποσυμπιέζεται. Αυτή η προς τα επάνω κίνηση είναι δυνατόν να υποστηριχθεί και με ελατήρια επαναφοράς.

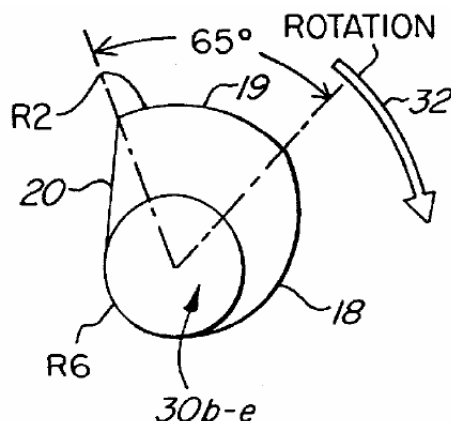


Εικόνα 2. Πρόωση μηχανισμού άντλησης, όπου διακρίνονται ο εκκεντροφόρος άξονας, οι ακόλουθοι των έκκεντρων με τα ρουλεμάν τους και ο εύκαμπτος σωλήνας.

Περισσότερες λεπτομέρειες για το σχήμα των ενδιάμεσων έκκεντρων (30b) έως (30e) θα δοθούν αναφορικά με την εικόνα 3. Όπως ήδη αναφέρθηκε κατά την περιγραφή των εικόνων 2 και 3 κάθε ένα από τα έκκεντρα (30b) έως (30e) έχει ένα πρώτο τμήμα καμπυλότητας (18) με συνεχώς αυξανόμενη ακτίνα (υπολογισμένη καμπύλη) και στο συγκεκριμένο σχεδιασμό αυτό το τμήμα εκτείνεται περισσότερο από 200 μοίρες γωνία. Η ακτίνα αυτού του τμήματος (18) κατά προτίμηση αυξάνεται γραμμικά με την γωνία περιστροφής. Το επόμενο δεύτερο τμήμα (19) έχει μια σταθερή ακτίνα R2, η οποία είναι η μέγιστη του έκκεντρου. Στο συγκεκριμένο σχεδιασμό το δεύτερο μέρος (19) διαρκεί 65 μοίρες. Στο τρίτο τμήμα (20) λαμβάνει χώρα μια απότομη μείωση από την μέγιστη ακτίνα R2 στην ελάχιστη ακτίνα R6, η οποία διαρκεί για γωνία περιστροφής 95 μοιρών στο συγκεκριμένο σχεδιασμό. Η μέγιστη ακτίνα R2 και το μήκος των ακόλουθων (δακτύλων) (11) είναι τέτοιο, ώστε ο εύκαμπτος σωλήνας (16) να παραμένει εντελώς κλειστός για το διάστημα των 65 μοιρών. Αν και στην εικόνα 2 τα ακροδάκτυλα (37) μερικών ακόλουθων (δακτύλων) (11) φαίνονται να έχουν κάποια απόσταση από τον εύκαμπτο σωλήνα (16), αυτή η απόσταση είναι ελάχιστη ή μηδαμινή στην πραγματικότητα.

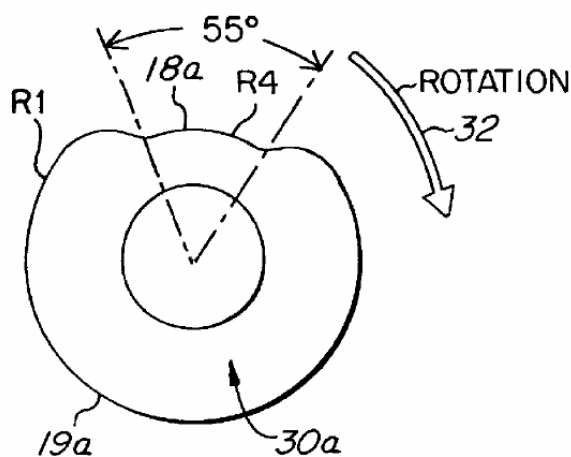
Στο συγκεκριμένο σχεδιασμό υπάρχουν τέσσερα ενδιάμεσα έκκεντρα (30b) έως (30e) με τους αντίστοιχους ακόλουθους (δάκτυλα) (11b) έως (11e). Αυτό εξασφαλίζει ομαλή ροή άντλησης. Είναι δυνατόν να έχουμε ακόμη περισσότερα ενδιάμεσα έκκεντρα με τους αντίστοιχους ακόλουθους (δάκτυλα). Πάντως, πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα ενδιάμεσο έκκεντρο πέραν αυτών της εισόδου (30a) και της εξόδου (30f). Σε αυτές τις περιπτώσεις η

διάρκεια των τριών τμημάτων καμπυλότητας (18), (19) και (20) των ενδιάμεσων έκκεντρων πρέπει να προσαρμόζεται.



Εικόνα 3. Πλάγια όψη των ενδιάμεσων έκκεντρων.

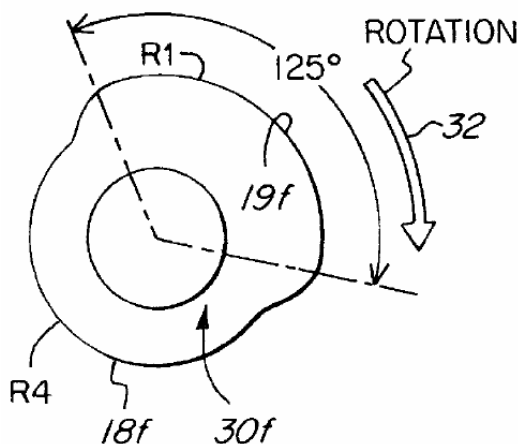
Στην εικόνα 4 απεικονίζεται το σχήμα του πρώτου έκκεντρου (30α) που ελέγχει τον πρώτο ακόλουθο (δάκτυλο) (11α). Σε αντίθεση με τα ενδιάμεσα έκκεντρα (30b), (30c), (30d) και (30e) το πρώτο έκκεντρο (30α) έχει δύο τμήματα καμπυλότητας. Ένα πρώτο τμήμα (19α) με μια μεγάλη ακτίνα R1 και ένα δεύτερο τμήμα (18α) που έχει μια μικρότερη ακτίνα R4. Το τμήμα (18α) που έχει μικρότερη ακτίνα R4 εκτείνεται σε εύρος μεγαλύτερο κατά προσέγγιση των 55 μοιρών, κατά τη διάρκεια του οποίου ο σωλήνας (16) είναι μόνο ανοιχτός τόσο, όσο χρειάζεται για τη διαδικασία πληρώσεως. Αντίθετα κατά τη διάρκεια επενέργειας του τμήματος (19α) ο σωλήνας (16) είναι εντελώς κλειστός.



Εικόνα 4. Πλάγια όψη του πρώτου έκκεντρου.

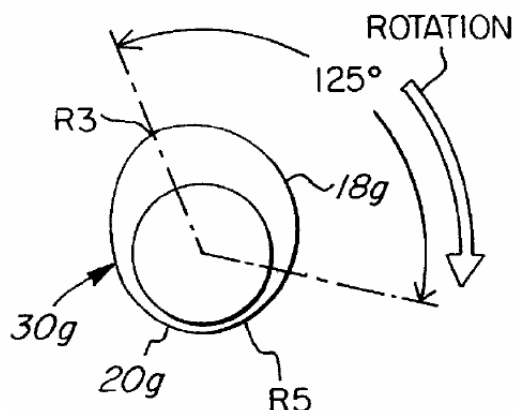
Το τελευταίο έκκεντρο (30f), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 5, επίσης διαφέρει από τα ενδιάμεσα έκκεντρα (30b), (30c), (30d) και (30e). Στην πραγματικότητα το δεύτερο τμήμα καμπυλότητας (19f) έχοντας μια μεγάλη ακτίνα R1 εκτείνεται σε ένα εύρος κατά προτίμηση 60 μοιρών. Συγκρινόμενο όμως με το τμήμα καμπυλότητας (19) των έκκεντρων (30b) έως (30e), μπορεί να επεκταθεί κατά 65 μοίρες και να αποκτήσει συνολικό εύρος κατά προτίμηση μεγαλύτερο από 125 μοίρες ( $=65^\circ+60^\circ=125^\circ$ ). Κατά τη διάρκεια αυτού του τμήματος (19f) ο εύκαμπτος σωλήνας (16) είναι εντελώς κλειστός. Στο υπόλοιπο τμήμα (18f) του τελευταίου

έκκεντρον (30f) η ακτίνα R4 του έκκεντρον είναι τέτοια, ώστε ο σωλήνας (16) να συμπιέζεται ελαφρώς, εξασφαλίζοντας τη ροή του ρευστού προς την έξοδο.



Εικόνα 5. Πλάγια όψη του τελευταίου έκκεντρον.

Η εικόνα 6 απεικονίζει ένα πρόσθετο έκκεντρο γραμμικοποίησης της ροής (30g) το οποίο τοποθετείται αμέσως μετά από τα έξι άλλα έκκεντρα (30α) έως (30f), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2, με σκοπό να εξομαλύνει τις μεταβολές της ροής του ρευστού στην έξοδο κατά τη διάρκεια της άντλησης. Όπως απεικονίζει η εικόνα 6, το πρόσθετο έκκεντρο (30g) έχει ένα πρώτο τμήμα καμπυλότητας (18g) κατά τη διάρκεια του οποίου η ακτίνα αυξάνεται από μια ελάχιστη τιμή R5 σε μια μέγιστη τιμή R3. Από αυτή τη μέγιστη τιμή R3 η ακτίνα μειώνεται κατά τη διάρκεια του δεύτερου τμήματος καμπυλότητας (20g) στην ελάχιστη ακτίνα R5 ξανά. Η μέγιστη ακτίνα R3 είναι μικρότερη από τις μέγιστες ακτίνες R1, R2 των έκκεντρον (30α) έως (30f) γιατί η διατομή του εύκαμπτου σωλήνα (16) πρέπει να μειωθεί χωρίς να κλείσει. Η γωνιακή διάρκεια του πρώτου τμήματος (18g) είναι περίπου 125 μοίρες, ενώ του τμήματος (20g) είναι περίπου 235 μοίρες. Κατά τη διάρκεια που ο ακόλουθος (δάκτυλο – βαλβίδα) εξόδου (11f) διατηρεί το σωλήνα κλειστό, το υγρό ωθείται από τον ακόλουθο (δάκτυλο γραμμικοποίησης) (11g) έτσι ώστε να συνεχίζεται η ροή στην έξοδο πετυχαίνοντας γραμμικοποίησή της.

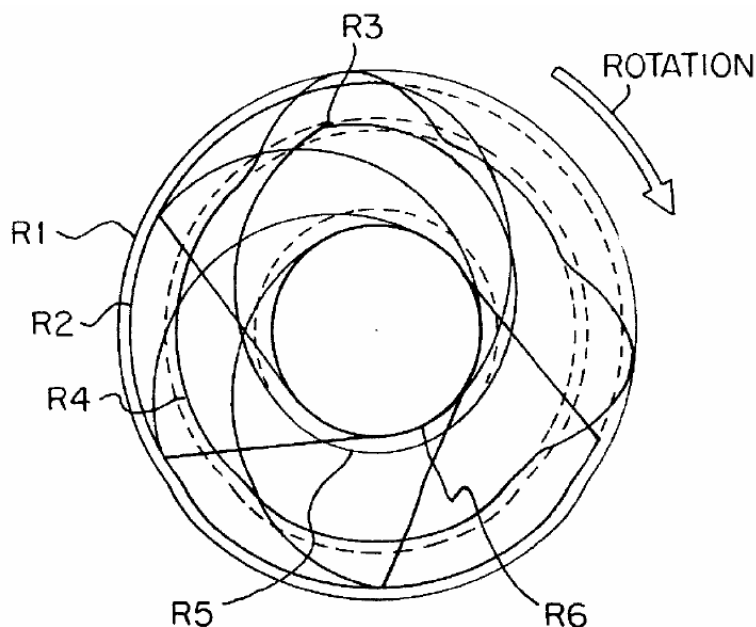


Εικόνα 6. Πλάγια όψη του πρόσθετου έκκεντρον γραμμικοποίησης της ροής.

Στη συνέχεια θα περιγραφεί η λειτουργία του έκκεντρον γραμμικοποίησης της ροής (30g) αναφορικά με τις εικόνες 5 και 6. Όταν το τελευταίο έκκεντρο (30f) κλείνει τον

εύκαμπτο σωλήνα (16), μέσω του ακόλουθου (δάκτυλο – βαλβίδα εξόδου) (11f), κατά τη διάρκεια του τμήματος (19f), το έκκεντρο (30g) συνεχίζει να επιδρά μέσω του τμήματος (18g) αυξάνοντας την ακτίνα του από την ελάχιστη ακτίνα R5 στην μέγιστη ακτίνα R3, έτσι ώστε το ρευστό που βρίσκεται ήδη στο τέλος του εύκαμπτου σωλήνα (16) να αντλείται προς τη γραμμή του ασθενούς. Κατά τη διάρκεια του σταδίου (18f) ανοίγματος του σωλήνα, όπου το ρευστό έχει περάσει τη βαλβίδα εξόδου (11f), η παροχή στην γραμμή του ασθενούς μειώνεται ελαφρώς από τη δράση του έκκεντρου γραμμικοποίησης της ροής (30g) το οποίο επιδρά διαμέσου του τμήματος (20g), όπου μειώνεται η ακτίνα του έκκεντρου (30g) από τη μέγιστη τιμή R3 στην ελάχιστη R5. Ουσιαστικά, επιτυγχάνεται σταθερή παροχή, η οποία ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα της μεγαλύτερης θετικής τιμής της παροχής των ενδιάμεσων ακόλουθων (δακτύλων) (11b) έως (11f), συν τη μειούμενη τιμή παροχής (αρνητική) λόγω του ακόλουθου (11g) γραμμικοποίησης της ροής.

Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται σε παράθεση όλα τα έκκεντρα (30a) έως (30g) όπου φαίνονται τόσο τα καμπύλα τμήματα μεταβλητής ακτίνας όσο και τα κυκλικά με ακτίνες από R1 έως R6. Η μέγιστη ακτίνα R1, η οποία απαντάται στο πρώτο (30a) και τελευταίο (30f) έκκεντρο συμπιέζει πλήρως τον εύκαμπτο σωλήνα (16) με πίεση 3 bar περίπου. Η λίγο μικρότερη ακτίνα R2, που απαντάται στα ενδιάμεσα έκκεντρα (30b) έως (30e) ασκεί μια πίεση 1 bar περίπου. Η R3 είναι η μέγιστη ακτίνα του έκκεντρου (30g) και κλείνει οριακά τον εύκαμπτο σωλήνα (16). Η R4 είναι η μικρότερη ακτίνα του πρώτου (30a) και του τελευταίου (30f) έκκεντρου και διατηρεί τον εύκαμπτο σωλήνα (16) σχετικά ανοιχτό. Η ακτίνα R5 του έκκεντρου γραμμικοποίησης της ροής (30g) είναι η ελάχιστη ακτίνα η οποία διατηρεί τον εύκαμπτο σωλήνα (16) πλήρως ανοιχτό. Τέλος, η ακτίνα R6 χρησιμοποιείται στα ενδιάμεσα έκκεντρα (30b) έως (30e) και κρατά τον εύκαμπτο σωλήνα (16) μακριά ώστε να μην αγγίζει τα ακροδάκτυλα (37) πετυχαίνοντας πλήρη ανάταξη του σωλήνα (16), ανεξάρτητα από τις κατασκευαστικές ανοχές.



Εικόνα 7. Πλάγια όψη με όλα τα έκκεντρα.

Ενώ κανονικά τα μήκη των ακροδακτύλων (37) των ακόλουθων (11a) έως (11g) θα μπορούσαν να είναι τα ίδια στην κατά μήκος διεύθυνση παράλληλη του εκκεντροφόρου άξονα (9) και του εύκαμπτου σωλήνα (16), η εικόνα 2 δείχνει ότι το μήκος του ακροδάκτυλου του ακόλουθου (11g) είναι μεγαλύτερο από το μήκος των άλλων ακόλουθων

(δακτύλων) (11α) έως (11f). Το μήκος του ακροδάκτυλου του ακόλουθου (11g) φαίνεται να είναι περίπου διπλάσιο από το μήκος των άλλων ακόλουθων (δακτύλων) (11α) έως (11f), με σκοπό να αυξήσει το χρόνο γραμμικής λειτουργίας, λαμβανομένου υπόψη του μεγάλου χρόνου των 125 μοιρών που παραμένει κλειστός ο εύκαμπτος σωλήνας (16) από τον τελευταίο ακόλουθο (11f). Το μήκος του ακροδάκτυλου του ακόλουθου (11g) μπορεί να είναι ακόμη και υπερδιπλάσιο από το μήκος των άλλων ακόλουθων (δακτύλων) (11α) έως (11f).

#### 1.4 Δίχρονη περισταλτική αντλία της IMED Corporation (Alaris Medical Systems)

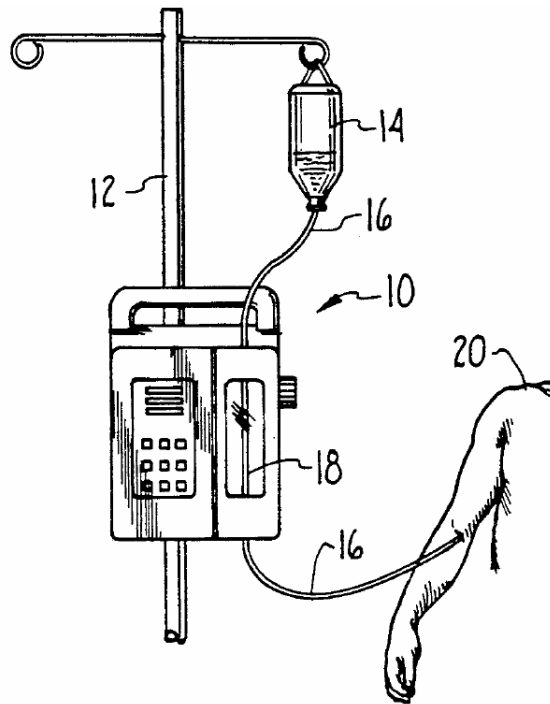
Η δίχρονη περισταλτική αντλία της IMED Corporation (Alaris Medical Systems) [1], [2] είναι μια συσκευή για άντληση ρευστού διαμέσου ενός ανατάξιμου σωλήνα έχοντας μια βάση όπου βρίσκεται ο σωλήνας και ένα μηχανισμό άντλησης για να συμπιέζει τον σωλήνα. Ο μηχανισμός άντλησης περιλαμβάνει ένα πρώτο δάκτυλο (έμβολο) άντλησης το οποίο συμπιέζει το σωλήνα σε ένα πρώτο του τμήμα και ένα δεύτερο δάκτυλο (έμβολο) άντλησης το οποίο συμπιέζει το σωλήνα σε ένα δεύτερο του τμήμα. Για τις αντίστοιχες εναλλάξ κινήσεις άντλησης το πρώτο δάκτυλο σχεδιάζεται να λειτουργεί εκτοπίζοντας περίπου διπλάσιο όγκο ρευστού από ότι το δεύτερο. Μια πρώτη βαλβίδα (έμβολο) μοντάρεται και τοποθετείται ανάντι των δύο δακτύλων έτσι ώστε να προκαλεί εμφράξεις εναλλάξ στο σωλήνα κατά τη διάρκεια της συμπίεσης του σωλήνα από το πρώτο δάκτυλο. Ενώ μια δεύτερη βαλβίδα (έμβολο) φράσσει το σωλήνα κατάντι του πρώτου δακτύλου κατά τη διάρκεια της συμπίεσης του σωλήνα από το δεύτερο δάκτυλο.

Με άλλα λόγια, οι δύο βαλβίδες και τα δύο δάκτυλα παλινδρομούν συμπιέζοντας το σωλήνα μεταξύ μιας άνω και κάτω ακραίας θέσης. Ένας μηχανισμός οδήγησης κινεί το πρώτο δάκτυλο προς την κάτω ακραία θέση του καθώς το δεύτερο δάκτυλο κινείται προς την άνω ακραία θέση του και αντιστρόφως. Η πρώτη βαλβίδα κλείνει το σωλήνα ανάντι του πρώτου δακτύλου καθώς αυτό κινείται προς την κάτω ακραία θέση του. Η δεύτερη βαλβίδα κλείνει το σωλήνα μεταξύ του πρώτου και δευτέρου δακτύλου καθώς το δεύτερο δάκτυλο κινείται προς την κάτω ακραία θέση του.

Όπως αναφέρθηκε το πρώτο δάκτυλο εκτοπίζει διπλάσια ποσότητα ρευστού από το δεύτερο δάκτυλο, γιατί το πρώτο δάκτυλο είναι δυο φορές μεγαλύτερο από το δεύτερο δάκτυλο. Σε μια άλλη παραλλαγή, το πρώτο δάκτυλο μπορεί να εκτοπίζει διπλάσια ποσότητα ρευστού διανύοντας μια απόσταση η οποία θα είναι περίπου διπλάσια της απόστασης που διανύεται από το δεύτερο δάκτυλο.

Στην εικόνα 8, απεικονίζεται μια συσκευή περισταλτικής αντλίας (10) προορισμένη να δουλεύει σε ιατρική εφαρμογή. Συγκεκριμένα, η συσκευή της περισταλτικής αντλίας (10) είναι προσαρτημένη σε ένα κοντάρι (12) στο οποίο στηρίζεται μια πηγή ρευστού φαρμάκου (14) για ενδοφλέβια χρήση. Η πηγή ρευστού φαρμάκου (14) συνδέεται με έναν κυλινδρικό εύκαμπτο σωλήνα (16), ο οποίος είναι ένας συμβατικός σωλήνας έγχυσης, όπου χρησιμοποιείται σε νοσοκομειακό ή ιατρικό περιβάλλον και είναι κατασκευασμένος από εύκαμπτο υλικό όπως PVC και σιλικόνη. Το τμήμα (18) του εύκαμπτου σωλήνα (16) μοντάρεται στη συσκευή άντλησης (10) για τη διακίνηση του ρευστού φαρμάκου διαμέσου του σωλήνα (16) μέσα στο χέρι ασθενούς (20).

Τα μέρη που συνθέτουν τη συσκευή της δίχρονης περισταλτικής αντλίας (10) μπορούν να κατανοηθούν καλύτερα περιγράφοντας την εικόνα 9, όπου διακρίνεται ότι η συσκευή (10) περιλαμβάνει ένα φορέα (22) ο οποίος φέρει μια επίπεδη πλάκα (βάση σωλήνα) (24). Η πλάκα (24) εξασφαλίζει την επιφάνεια πάνω στην οποία βρίσκεται το τμήμα (18) (φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή) του σωλήνα (16) και έτσι μπορεί να συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται από τις βαλβίδες – δάκτυλα.



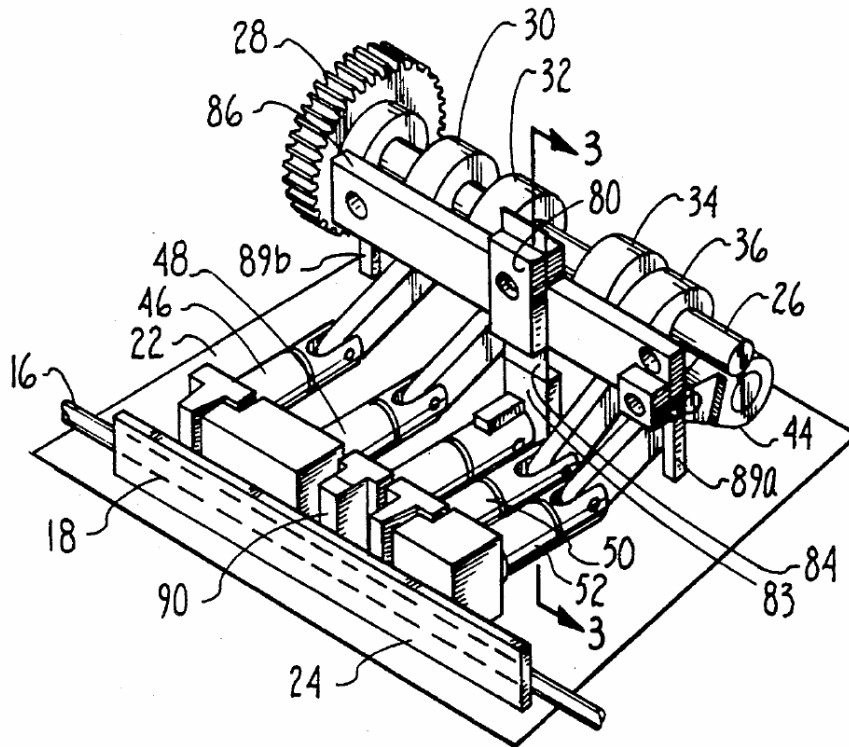
Εικόνα 8. Ιατρική εφαρμογή της δίχρονης περισταλτικής αντλίας.

Στο φορέα (22) είναι μονταρισμένος ένας περιστρεφόμενος άξονας (26) ο οποίος οδηγείται από έναν κινητήρα (δεν απεικονίζεται στην εικόνα 9 ) που συμπλέκεται με το γρανάτζι (28). Ο άξονας (26) περιλαμβάνει τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36). Τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36) συνεργάζονται με τους αντίστοιχους συνδέσμους {στην εικόνα 9 φαίνεται μόνο ο σύνδεσμος (44) που συνδέεται με το έκκεντρο (36)}, τους οποίους μετατοπίζουν και κατά συνέπεια μετατοπίζονται τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) σε διεύθυνση κάθετη από αυτή των συνδέσμων. Ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε κατάλληλος μηχανισμός οδήγησης για τα δάκτυλα (46), (48), (50) και (52), ο συγκεκριμένος μηχανισμός οδήγησης που απεικονίζεται στην εικόνα 9 παρέχει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα.

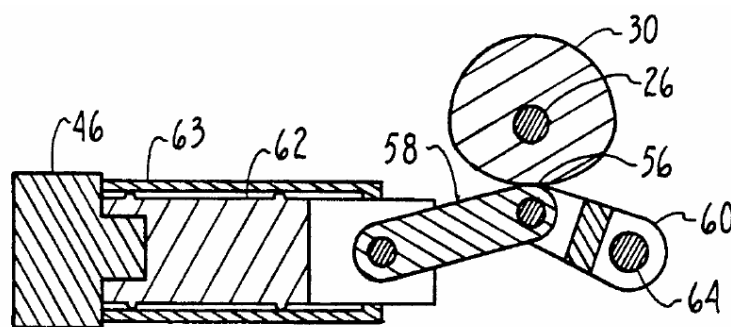
Όπως φάνηκε πιο πάνω, τα τέσσερα έμβολα (46), (48), (50) και (52) είναι παλινδρομικά και μονταρισμένα στο φορέα (22) για να συμπιέζουν το τμήμα (18) του σωλήνα (16). Με σκοπό να προστατεύεται το τμήμα (18) του σωλήνα και να συγκρατούνται σκόνες και άλλα ανεπιθύμητα υλικά, παραγόμενα από τα κινούμενα εσωτερικά μέρη της περισταλτικής αντλίας (10), μια εύκαμπτη μεμβράνη (δεν απεικονίζεται στην εικόνα 9) μπορεί να τοποθετηθεί στο φορέα (22) και πάνω ή ανάμεσα στα δάκτυλα (46), (48), (50), (52) και στο τμήμα (18) του σωλήνα. Κάθε έμβολο (46), (48), (50) και (52) είναι παλινδρομικό και μοντάρεται, ώστε να κινείται από και προς τη πλάκα (24). Κάθε δάκτυλο (46), (48), (50) και (52) μπορεί να κινηθεί μεταξύ μιας άνω ακραίας θέσης ή ενός ανώτερου ορίου και μιας κάτω ακραίας θέσης ή ενός κατώτερου ορίου για να παραμορφώνει το τμήμα (18) του σωλήνα κατά ένα καθορισμένο ποσοστό, όπως θα εξηγηθεί πιο κάτω.

Συγκεκριμένα οι βαλβίδες (46) και (50) είναι όμοιες και χρησιμεύουν στην πλήρη έμφραξη του σωλήνα. Μπορούν να μετακινηθούν μεταξύ μιας άνω ακραίας θέσης όπως φαίνεται στην εικόνα 10 και μιας κάτω ακραίας θέσης όπως φαίνεται στην εικόνα 11. Μελετώντας τη μια βαλβίδα, για παράδειγμα τη (46), (εικόνες 10 και 11), η περιστροφή του άξονα (26) προκαλεί αντίστοιχη περιστροφή του έκκεντρο (30). Το έκκεντρο (30) είναι τοποθετημένο στον άξονα (26) και μετατοπίζει την άρθρωση (56) ενός μηχανισμού διωστήρων, οι οποίοι είναι ο σύνδεσμος οδήγησης (58) και ο σύνδεσμος περιστροφής (60). Ο

σύνδεσμος οδήγησης (58) είναι προσαρτημένος σε έναν αποστάτη οδηγό (62), ο οποίος είναι πακτωμένος στη βαλβίδα (46). Ομοίως, ο σύνδεσμος περιστροφής (60) είναι προσαρτημένος στον πείρο περιστροφής (64). Επιπλέον ο αποστάτης οδηγός (62) περιορίζεται σε ευθύγραμμη κίνηση εντός του χιτωνίου (63). Συνεπώς, η περιστροφική κίνηση του άξονα (26) μετασχηματίζεται από τη διάταξη του έκκεντρου – μηχανισμού συνδέσμων, που περιγράφηκε πιο πάνω, σε παλινδρομική κίνηση της βαλβίδας (46).



Εικόνα 9. Προοπτική του μηχανισμού άντλησης όπου διακρίνεται ο συνδετικός μηχανισμός οδήγησης των εμβόλων της δίχρονης περισταλτικής αντλίας.

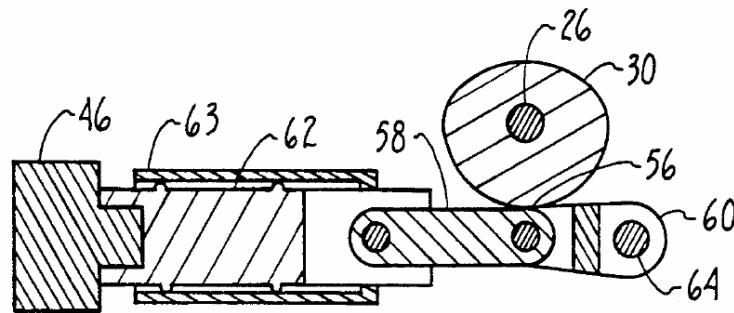


Εικόνα 10. Άνω ακραία θέση της βαλβίδας (46).

Καθένα από τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) ενεργοποιούνται από ένα μηχανισμό οδήγησης όπως αυτόν που μόλις περιγράφηκε. Αναφέροντας ξανά τη βαλβίδα (46) σαν παράδειγμα μπορούμε να πούμε ότι η παλινδρομική κίνησή της προκαλεί επαναλαμβανόμενη συμπίεση και αποσυμπίεση στο τμήμα (18) του σωλήνα, δηλαδή η βαλβίδα (46) μπορεί να φράσσει και να ανοίγει το τμήμα (18) του σωλήνα. Συγκεκριμένα, οι βαλβίδες (46) και (50)



είναι τοποθετημένες έτσι ώστε η μικρότερη δυνατή κίνησή τους να επαρκεί για να κλείνουν ή να ανοίγουν διαδοχικά το τμήμα (18) του σωλήνα και να επιτρέπουν στο ρευστό να ρέει κάτω από αυτές. Με άλλα λόγια, όταν οι βαλβίδες (46), (50) είναι στην άνω ακραία θέση, όπως φαίνεται στην εικόνα 10, ένα άνοιγμα εξασφαλίζεται στο τμήμα (18) του σωλήνα το οποίο είναι αρκετό για σχετικά ανεμπόδιστη ροή του ρευστού κάτω από τις βαλβίδες (46) ή (50). Τυπικά, το εύρος κίνησης των βαλβίδων (46) και (50) είναι ρυθμισμένο σε όχι περισσότερο από μια έως τρεις φορές το πάχος του τοιχώματος του τμήματος (18) του σωλήνα. Έτσι η πρώτη βαλβίδα (46) και η δεύτερη βαλβίδα (50) αποτελούν ουσιαστικά έμβολα σημειακής έμφραξης.



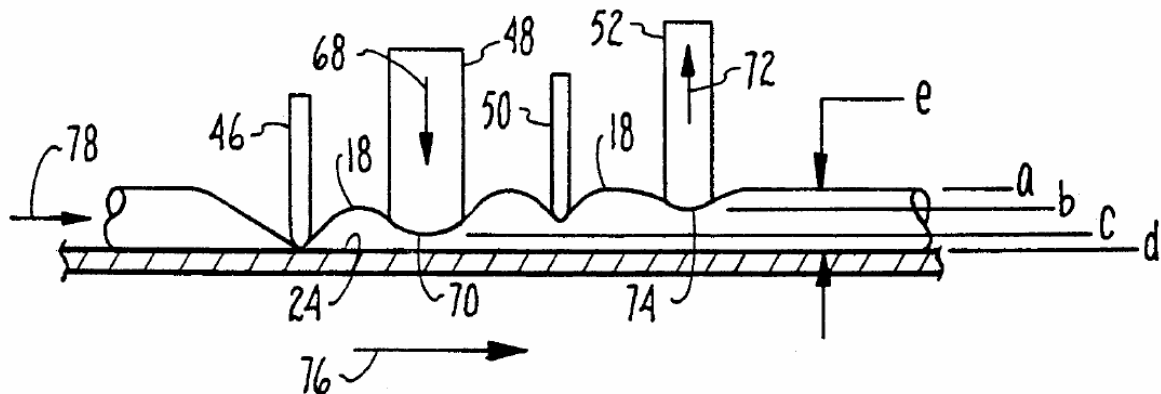
Εικόνα 11. Κάτω ακραία θέση της βαλβίδας (46).

Αναφορικά με την εικόνα 9 εκτιμάται ότι το δεύτερο έμβολο (48) και το τέταρτο έμβολο (52) αποτελούν δάκτυλα άντλησης, τα οποία συμπιέζουν χωρίς να φράσσουν εντελώς το τμήμα (18) του σωλήνα και προωθούν το ρευστό προς την έξοδο του σωλήνα. Επιπρόσθετα, το πρώτο δάκτυλο (48) έχει μια ξεχωριστή διαμόρφωση και είναι σχεδιασμένο ως το «μεγάλο» δάκτυλο. Το δεύτερο δάκτυλο (52) έχει επίσης μια ξεχωριστή διαμόρφωση και είναι σχεδιασμένο ως το «μικρό» δάκτυλο.

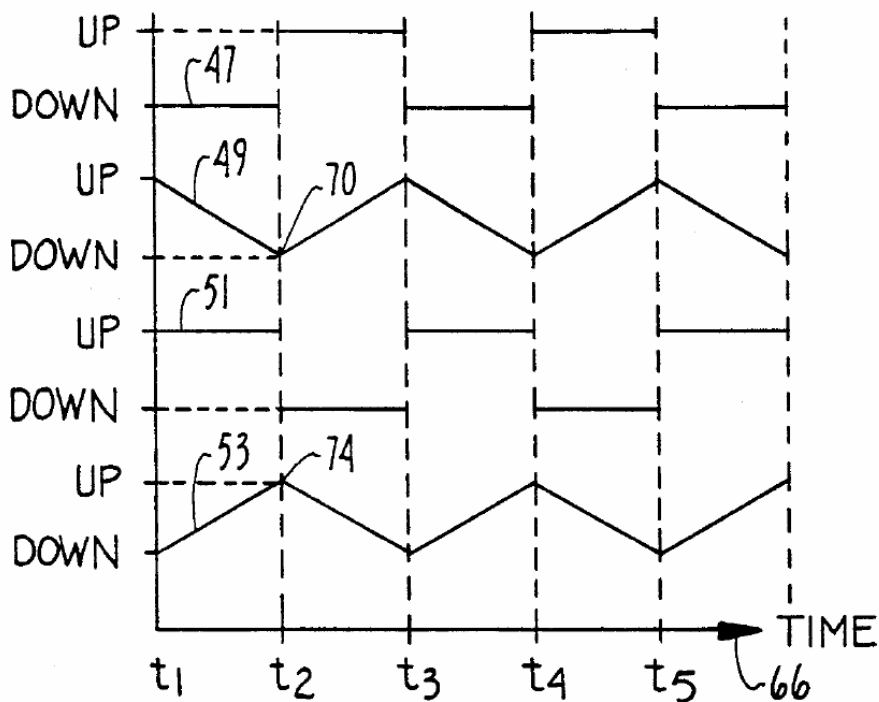
Εστιάζοντας σε αυτό το σημείο της περιγραφής, οι προσδιορισμοί «μεγάλο» και «μικρό» περιγράφουν έμβολα άντλησης τα οποία είναι κατασκευασμένα, έτσι ώστε η ποσότητα του ρευστού που εκτοπίζεται καθώς το «μεγάλο» δάκτυλο (48) κινείται προς το τμήμα (18) του σωλήνα, να είναι περίπου διπλάσια της ποσότητας του ρευστού που εκτοπίζεται από μια αντίστοιχη κίνηση του «μικρού» δακτύλου (52). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η όμοια κίνηση των δακτύλων (48) και (52) είναι γενικά ίδιας διαδρομής, αλλά στην κάτω ακραία θέση τα δάκτυλα (48) και (52) ποτέ δεν φράσσουν εντελώς το σωλήνα. Δηλαδή, συμπιέζουν το τμήμα (18) του εύκαμπτου σωλήνα από ένα σχετικά μεγαλύτερο ποσοστό αρχικής εξωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης, σε ένα σχετικά μικρότερο ποσοστό αρχικής εξωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης. Τα δάκτυλα (48) και (52) οδηγούνται από μηχανισμούς όπως ο μηχανισμός που περιγράφηκε πιο πάνω για την οδήγηση της βαλβίδας (46).

Η λειτουργία της δίχρονης περισταλτικής αντλίας της IMED Corporation (Alaris Medical Systems) [1], [2] μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα παρατηρώντας τις εικόνες 12 και 13. Ειδικότερα, η εικόνα 12 αναπαριστά τη σχετική κίνηση των εμβόλων (46), (48), (50) και (52). Στην εικόνα 13 αναπαρίσταται η σχετική κίνηση των βαλβίδων (46) και (50) και των δακτύλων (48) και (52), μέσω των καμπυλών (47), (51), (49) και (53) αντίστοιχα και φαίνονται σε σχέση η μία με την άλλη για μια περίοδο του χρόνου που περιλαμβάνει ενδεικτικά χρονικά σημεία αναφοράς t1, t2, t3, t4 και t5 στον άξονα του χρόνου (66). Τα έμβολα (30), (32), (34) και (36) είναι αρχικά διατεταγμένα στον άξονα οδήγησης (26) και συνεπώς περιστρέφονται με τον άξονα αυτόν, για να κινούν το σύστημα συνδέσμων που περιγράφηκε πιο πάνω έτσι ώστε τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) να παλινδρομούν

εκτελώντας μια κίνηση σε δύο χρόνους, όπως φαίνεται στις εικόνες 12 και 13. Ο πρώτος χρόνος είναι μεταξύ των σημείων αναφοράς  $t_1$  και  $t_2$  και ο δεύτερος χρόνος μεταξύ των σημείων αναφοράς  $t_2$  και  $t_3$ .



Εικόνα 12. Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της δίχρονης περισταλτικής αντλίας.



Εικόνα 13. Γραφική παράσταση των θέσεων των εμβόλων με το χρόνο λειτουργίας της δίχρονης περισταλτικής αντλίας για δύο περιόδους. Διακρίνεται η κίνηση των εμβόλων (46), (48), (50) και (52) μέσω των καμπυλών (47), (49), (51) και (53) αντίστοιχα.

Στην αρχή του πρώτου χρόνου η βαλβίδα (46) βρίσκεται κλειστή στην κάτω ακραία θέση της, ενώ το δάκτυλο (50) στην άνω ακραία θέση του, όπως φαίνεται στην εικόνα 12. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 13 με την καμπύλη κίνησης (47) στο αρχικό σημείο αναφοράς  $t_1$ . Στο σημείο αναφοράς  $t_2$ , η βαλβίδα (46) είναι οριακά στην κάτω ακραία θέση της και η βαλβίδα (50) είναι οριακά στην άνω ακραία θέση της, όπως φαίνεται στην εικόνα 12. Καθώς

τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36) περιστρέφονται, οι βαλβίδες (46) και (50) αρχικά παραμένουν στις σταθερές τους θέσεις, ενώ τα δάκτυλα (48) και (52) αρχίζουν να κινούνται.

Το δάκτυλο (48) κινείται προς τα κάτω στην κατεύθυνση που δείχνει το βέλος (68), έχοντας ξεκινήσει από την άνω ακραία θέση ή επίπεδο (b) και κινείται προς την κάτω ακραία θέση ή επίπεδο (c). Συνεπώς, στην εικόνα 12 το δάκτυλο (48) φαίνεται στην κάτω ακραία θέση του (70), ενώ στην εικόνα 13 διακρίνεται η κίνησή του μέσω της καμπύλης (49), όπου το δάκτυλο έχει φτάσει στην κάτω ακραία θέση του χωρίς να έχει φράξει το τμήμα (18) του σωλήνα. Λίγο πριν το σημείο αναφοράς  $t_2$ , η βαλβίδα (46) βρίσκεται ακόμη στην κάτω ακραία θέση της. Στον ίδιο χρόνο το δάκτυλο (52), το οποίο ξεκίνησε τη χρονική στιγμή  $t_1$  από την κάτω ακραία θέση του ή επίπεδο (c), έχει μετακινηθεί στην άνω ακραία θέση (74), όπως δείχνει το βέλος (72). Κατά αυτόν τον τρόπο, το δάκτυλο (48), έχοντας μετακινηθεί προς τα κάτω από την άνω ακραία θέση του ή επίπεδο (b) προς την πλάκα (24), προωθεί το ρευστό προς τον ασθενή (20) κατά την κατεύθυνση του βέλους (76). Ταυτόχρονα, το δάκτυλο (52) έχει ξεκινήσει να κινείται προς τα πάνω, ξεκινώντας από την κάτω ακραία θέση του, όπως φαίνεται από την καμπύλη κίνησής του (53) η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 13 μεταξύ των σημείων  $t_1$  και  $t_2$ . Η χρήση διαφορετικών δακτύλων κατά μέγεθος, δηλαδή «μεγάλο» με «μικρό», έχει σαν αποτέλεσμα μια τελική παροχή ρευστού παρόμοια με αυτή που προκύπτει από τον εμβολισμό που συμβαίνει όταν το «μικρό» δάκτυλο δρα μόνο του. Με άλλα λόγια επειδή το «μεγάλο» δάκτυλο (48) εκτοπίζει διπλάσιο όγκο από τη μονάδα όγκου του «μικρού» δακτύλου (52), η προσδιδόμενη παροχή στον πρώτο χρόνο θα αντιστοιχεί σε μια μονάδα όγκου ρευστού προς την έξοδο του σωλήνα (16), όπως δείχνει το βέλος (76).

Καθώς ο πρώτος κύκλος (χρόνος) ολοκληρώνεται στη χρονική στιγμή  $t_2$ , το «μεγάλο» δάκτυλο (48) και το «μικρό» δάκτυλο (52) έχουν αλλάξει κατακόρυφες θέσεις. Επίσης τη χρονική στιγμή  $t_2$  οι βαλβίδες (46) και (50) αλλάζουν θέσεις. Η βαλβίδα (46) ανέρχεται προς την άνω ακραία θέση της ή επίπεδο (c) και η βαλβίδα (50) κατέρχεται προς την κάτω ακραία θέση της ή επίπεδο (d). Επειδή η βαλβίδα (50) είναι τώρα κλειστή και η βαλβίδα (46) είναι ανοιχτή, το ρευστό αναρροφάται μέσα στο τμήμα (18) του σωλήνα (16) όπως δείχνει το βέλος εισόδου (78) στην εικόνα 12. Η παροχή ρευστού μέσα στην είσοδο του τμήματος (18) του σωλήνα είναι διπλάσια της παροχής εξόδου, αφού το δάκτυλο (48) εμβολίζει δυο φορές περισσότερο ρευστό από ότι το δάκτυλο (52). Στη συνέχεια, ενώ το δάκτυλο (48) ανέρχεται προς την άνω ακραία θέση του μεταξύ των χρονικών στιγμών  $t_2$  και  $t_3$ , το δάκτυλο (52) κατέρχεται από το επίπεδο (b) στο επίπεδο (c), όπως φαίνεται στην εικόνα 12. Η κίνηση αυτή επιφέρει μια καθαρή μονάδα όγκου ρευστού, εγγυόμενη προς την έξοδο του σωλήνα (16), κατά τη φορά του βέλους εξόδου (76).

Αυτή η κίνηση συνεχίζεται μέχρι τη χρονική στιγμή  $t_3$  στην οποία ο δεύτερος κύκλος (χρόνος) έχει συμπληρωθεί. Τη χρονική στιγμή  $t_3$  οι βαλβίδες (46) και (50) επιστρέφουν πάλι έτσι ώστε η βαλβίδα (46) να είναι ξανά στην κάτω ακραία θέση της και η βαλβίδα (50) να είναι ξανά στην άνω ακραία θέση της. Δηλαδή οι βαλβίδες (46) και (50) βρίσκονται ουσιαστικά στις θέσεις που ήταν τη χρονική στιγμή  $t_1$ . Το σύστημα στη χρονική στιγμή  $t_3$  είναι τότε στην ίδια κατάσταση που ήταν στη χρονική στιγμή  $t_1$ . Στις χρονικές στιγμές  $t_4$  και  $t_5$  επαναλαμβάνεται ξανά ο πρώτος κύκλος (χρόνος).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ταχύτητα με την οποία τα δάκτυλα (48) και (52) κινούνται προς το σωλήνα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου (χρόνου), δεν είναι σταθερή ακόμη και σε ιδανικές συνθήκες. Καθώς ο σωλήνας αρχίζει να συμπιέζεται, ίσες μετατοπίσεις επιφέρουν εμβολισμό όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων ρευστού. Με άλλα λόγια, η γραμμική παλινδρομική κίνηση του δακτύλου προς το σωλήνα, καθώς αυτός προοδευτικά συμπιέζεται περισσότερο, επιφέρει σταδιακά μια ροή ρευστού διαμέσου του παραμορφωμένου σωλήνα με σχετικά μεγάλη ταχύτητα προς τα έξω. Για να διευκρινιστεί αυτό καλύτερα, η ιδανική κίνηση των δακτύλων (48) και (52) είναι τέτοια ώστε, η ταχύτητα κάθε δακτύλου όταν

κινείται προς το σωλήνα πρέπει σχετικά να αυξάνεται και καθώς προοδευτικά ο σωλήνας παραμορφώνεται περισσότερο να ελαττώνεται. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας κίνησης είναι η επίτευξη όσο το δυνατό σταθερής παροχής ρευστού προκαλούμενη από τη συμπιεστική δράση των αντίστοιχων δακτύλων.

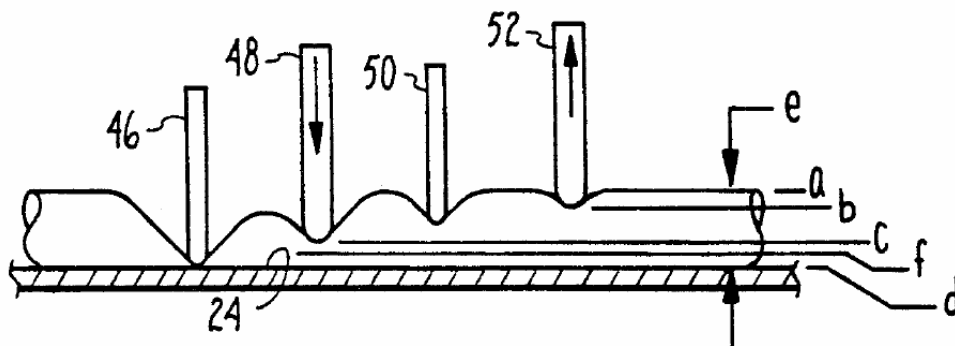
Από την περιγραφή ανωτέρω συνάγεται ότι ο μηχανισμός άντλησης δυο κύκλων (χρόνων), αποτελεί συσκευή υψηλής αποδοτικότητας επιφέροντας αποτελεσματική έγχυση ρευστού. Επίσης, παρέχει γραμμική μη παλλόμενη ροή ρευστού, η οποία απαιτείται σε συσκευές περισταλτικής άντλησης. Επιπλέον, ο προτεινόμενος σχεδιασμός απαιτεί τη χρήση πολύ μικρότερων κινητήρων από αυτούς που θα χρειαζόταν άλλες συνηθισμένες γραμμικές ή στρεφόμενων έκκεντρων περισταλτικές αντλίες. Γενικά χρησιμοποιούνται μεγέθη κινητήρων με βάση το μέγιστο φορτίο λειτουργίας και όχι το μέσο. Ο προτεινόμενος μηχανισμός, που αναφέρθηκε πιο πάνω, αναδιανέμει το φορτίο, έτσι ώστε ο κινητήρας να αντιμετωπίζει χαμηλότερο μέγιστο φορτίο. Επιπλέον, η απαιτούμενη έμφραξη προκαλείται από δυο μικρές βαλβίδες οι οποίες δεν εκτοπίζουν σημαντικά ποσά όγκου ρευστού, ούτε στρεβλώνουν το καταπονούμενο τμήμα (18) του σωλήνα. Από την άλλη μεριά, τα δάκτυλα (48) και (52), αντίθετα με τα συνηθισμένα δάκτυλα των περισταλτικών αντλιών, ποτέ δεν φράσσουν (συνθλίβουν) εντελώς τη σωλήνωση ώστε να παράγουν ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η δίχρονη περισταλτική αντλία της IMED Corporation (Alaris Medical Systems) [1], [2] αποφεύγει απώλειες ενέργειας που παρατηρούνται σε άλλες συμβατικές γραμμικές και στρεφόμενων έκκεντρων περισταλτικές αντλίες. Το μεγαλύτερο ποσό της κινητικής ενέργειας καταναλώνεται ουσιαστικά για τη θέρμανση του σωλήνα, που υφίσταται μέσω των θλιπτικών και διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται. Αυτό συμβαίνει επειδή τα έμβολα δεν πρέπει μόνο να προκαλούν άντληση, αλλά επίσης και να φράσσουν το σωλήνα. Η συγκεκριμένη αντλία ωστόσο, διαχωρίζει τις λειτουργίες της άντλησης και της έμφραξης. Συνεπώς, η ανάγκη για τέτοια επαναλαμβανόμενη συμπίεση και παραμόρφωση του σωλήνα έχει εξαλειφθεί, όσο αφορά στο κομμάτι της αντλητικής λειτουργίας των δακτύλων. Επομένως, ο σωλήνας και η παραμόρφωσή του δεν επηρεάζουν την ακρίβεια της συσκευής λόγω της επαναλαμβανόμενης καταπόνησης που λαμβάνει χώρα. Οποιοδήποτε τμήμα του σωλήνα στην περιοχή που βρίσκεται κάτω και εκατέρωθεν από τις βαλβίδες (46) και (50) υφίσταται περισσότερη καταπόνηση, διότι οι βαλβίδες είναι σημειακής εφαρμογής και διατηρούν την ιδιότητα της πλήρους έμφραξης του σωλήνα. Ωστόσο, η ευρεία περιοχή κάτω από τα δάκτυλα (48) και (52) δεν καταπονείται σημαντικά, γιατί τα δάκτυλα αυτά έχουν κατά μήκος ευρεία επιφάνεια πέλματος και δεν έχουν την ιδιότητα να φράσσουν πλήρως το σωλήνα. Με άλλα λόγια, τα δάκτυλα (48) και (52) έχουν ένα ανώτερο και ένα κατώτερο όριο κατακόρυφης μετατόπισης, που κυμαίνεται μεταξύ των επιπέδων (b) και (c) της εικόνας 12. Οι βαλβίδες (46) και (50), ωστόσο, για να προκαλούν πλήρη έμφραξη στο σωλήνα διανύουν μια πιο κοντινή απόσταση σχετικά με την εσωτερική διάμετρο (e) του σωλήνα. Η κίνηση αυτή πραγματοποιείται μεταξύ των επιπέδων (b) και (d) της άνω ακραίας θέσης των δακτύλων και της πλάκας αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) οδηγούνται στις αντίστοιχες κάτω ακραίες θέσεις τους, από τη μορφή των αντίστοιχων έκκεντρων (30), (32), (34) και (36), τα οποία με τη σειρά τους οδηγούνται διαμέσου του άξονα οδήγησης (26), ο οποίος περιστρέφεται από έναν κινητήρα (δε φαίνεται στην εικόνα 9). Από την άλλη μεριά, τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) επανέρχονται στις αντίστοιχες άνω ακραίες θέσεις τους από τη δύναμη που ασκείται λόγω ανάταξης του γεμάτου με ρευστό σωλήνα. Μερικές φορές, ωστόσο, συμβαίνει η δύναμη λόγω ανάταξης του σωλήνα να μην είναι αρκετή για να προκαλεί τη μετατόπιση ενός ή περισσοτέρων των εμβόλων (46), (48), (50) και (52) στις άνω ακραίες θέσεις τους. Αυτό μπορεί να συμβεί για παράδειγμα, όταν το υλικό του τμήματος (18) του σωλήνα υποστεί ουσιαστική κόπωση κατά τη διάρκεια παρατεταμένης

περιόδου χρήσης. Είναι απαραίτητο, ωστόσο, τα έμβολα (46), (48) και (50) να ανέρχονται πλήρως στην άνω ακραία θέση τους, ώστε να πληρώνεται το τμήμα του σωλήνα κάτω από το έμβολο (48) πάντα με την ίδια ποσότητα ρευστού και κατά συνέπεια η συσκευή (10) να μπορεί να διανέμει το ρευστό με τον επιθυμητό ρυθμό έγχυσης.

Ανεπιθύμητες μειώσεις της παροχής διαμέσου του σωλήνα (16), μπορούν να προκληθούν, αν η δύναμη λόγω ανάταξης του σωλήνα (16) αποτύχει να μετατοπίσει οποιοδήποτε από τα έμβολα (46), (48) ή (50) στην αντίστοιχη άνω ακραία θέση του. Αντιθέτως, δε θα προκληθεί καθόλου ουσιαστική μείωση στην παροχή, σε περίπτωση που το δεύτερο δάκτυλο (52) αποτύχει να ανέλθει πλήρως στην άνω ακραία θέση του. Αυτό συμβαίνει διότι το δεύτερο δάκτυλο (52) επιδρά μόνο στη διατήρηση της συνέχειας της ροής διαμέσου του σωλήνα (16) και όχι στη συνολική πρόσδοση παροχής. Ειδικότερα, ακόμη και στην κάτω ακραία θέση του, το δάκτυλο (52) δεν προκαλεί πλήρη έμφραξη του σωλήνα (16). Άρα, αρκεί η ορθή προσχεδιασμένη λειτουργία των εμβόλων (46), (48) και (50) για να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός έγχυσης του ρευστού από τη συσκευή (10).



Εικόνα 14. Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας μιας παραλλαγής της δίχρονης περισταλτικής αντλίας όπου τα δάκτυλα (48) και (52) είναι του ίδιου μεγέθους.

Τελικά, στην εικόνα 14 απεικονίζεται σχηματικά μια παραλλαγή της δίχρονης περισταλτικής αντλίας της IMED Corporation (Alaris Medical Systems) [1], [2], στην οποία τα δάκτυλα (48) και (52) είναι του ίδιου μεγέθους. Οι συνδεδεόμενοι αποστάτες (62), ωστόσο, είναι διατεταγμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε τα δάκτυλα (48) και (52), όντας του ίδιου μεγέθους, να κινούνται σε διαδρομές διαφορετικού μήκους. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην εικόνα 14, ενώ η κατακόρυφη διαδρομή της παλινδρομικής κίνησης του δακτύλου (52) είναι μεταξύ των επιπέδων (b) και (c), η κατακόρυφη διαδρομή της παλινδρομικής κίνησης του δακτύλου (48) είναι μεταξύ των επιπέδων (b) και (f). Η απόσταση μεταξύ (b) και (f) είναι μεγαλύτερη και συνεπώς το μήκος διαδρομής της είναι μεγαλύτερο. Εξασφαλίζοντας ότι αυτή η διαδρομή έχει ολοκληρωθεί κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού διαστήματος, το δάκτυλο (48) εκτοπίζει προφανώς περισσότερο ρευστό. Με κατάλληλη επιλογή του μήκους της κατακόρυφης διαδρομής και άρα της αντίστοιχης παραμόρφωσης του σωλήνα, το μήκος της κατακόρυφης διαδρομής μπορεί να ρυθμιστεί, έτσι ώστε το δάκτυλο (48) να πιέζει το σωλήνα (18), εκτοπίζοντας διπλάσιο όγκο ρευστού σε σχέση με τον όγκο ρευστού που εκτοπίζεται από το δάκτυλο (52).

## 1.5 Σωλήνας σιλικόνης

Τα επιθυμητά αποτελέσματα των περισταλτικών αντλιών δεν επιτυγχάνονται μόνο με τον κατάλληλο σχεδιασμό του μηχανισμού άντλησης, αλλά σημαντικό ρόλο παίζει και η

επιλογή του σωλήνα που μεταφέρει το ρευστό. Το υλικό κατασκευής του σωλήνα, το οποίο χρησιμοποιείται ευρύτατα στις περισταλτικές αντλίες και έχει γίνει το σημείο αναφοράς σε ιατρικές εφαρμογές τις τελευταίες δεκαετίες είναι η σιλικόνη. Η ουσιαστική ύπαρξη της αντλητικής ικανότητας των περισταλτικών αντλιών οφείλεται στις ιδιότητες του σωλήνα σιλικόνης [18], [19], στις οποίες θα αναφερθούμε αναλυτικά παρακάτω.

### 1.5.1 Ιδιότητες και εφαρμογές του σωλήνα σιλικόνης

Η συνεχής εξέλιξη των καινούργιων ιατρικών συσκευών που σχεδιάστηκαν για να ικανοποιούν τις αυξημένες ανάγκες του ηλικιωμένου πληθυσμού έχει αυξήσει τις απαιτήσεις για αξιόπιστα ελαστομερή υλικά. Αρκετές συσκευές έχουν σχεδιαστεί σήμερα όχι μόνο για νοσοκομειακή χρήση και μακροχρόνιες θεραπείες, αλλά και για οικιακή χρήση ή και ως φορητές. Η κατάλληλη χρήση των ιατρικών συσκευών σε συνδυασμό με το ανθρώπινο περιβάλλον έχει γίνει ιδιαίτερα σημαντική. Από τη δεκαετία του 1960, το ελαστικό από σιλικόνη είχε διαδεδομένη χρήση στην ιατρική, στην αεροδιαστημική, στον κατασκευαστικό τομέα και στις βιομηχανικές εφαρμογές. Οι διακριτικές ιδιότητες των ελαστομερών από σιλικόνη, όπως καθαρότητα, διαύγεια και αντοχή, συνδυασμένες με την εύκολη επεξεργασιμότητα έχουν επιφέρει τη χρήση τους σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών. Τέτοιες εφαρμογές σχετίζονται με την παραγωγή σωλήνων ιατρικής χρήσης όπως: για διανομή διαφόρων ρευστών και φαρμάκων, για παρεντερική διατροφή και για χρήση σε: περισταλτικές αντλίες, αποχέτευση τραυμάτων και αναισθητικά/αναπνευστικά κυκλώματα. Πέραν των σωλήνων, από το υλικό της σιλικόνης κατασκευάζονται καθετήρες, διαφράγματα μεμβρανών σε ιστούς, ηλεκτροχειρουργικά εργαλεία, ακουστικά βοηθήματα, βαλβίδες, θάλαμοι δοκιμών κ.ά.

Τα ελαστικά από σιλικόνη είναι συνθετικά πολυμερή με ασυνήθιστη μοριακή δομή, η οποία αποτελείται από μια γιγαντιαία αλυσίδα από εναλλασσόμενα άτομα πυριτίου και οξυγόνου. Η ισχυρή χημική δομή πυριτίου – οξυγόνου της σιλικόνης δίνει στο ελαστομερές τις μοναδικές του ιδιότητες, όπως τη βιοσυμβατότητα, την υψηλή θερμοκρασιακή και χημική αντίσταση, τις καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, τη φυσική διαύγεια και την ημιδιαφάνεια.

Σε εκτεταμένες δοκιμές τα ελαστικά σιλικόνης επέδειξαν άριστη συμβατότητα με τους ανθρώπινους ιστούς και τα ρευστά του σώματος, ενώ κατά την εμφύτευση παρουσίασαν εξαιρετικά χαμηλή αντίδραση με τους ιστούς έναντι άλλων ελαστομερών. Συνήθως διαμορφώνονται ώστε να συμμορφώνονται με τις οδηγίες των FDA (Food and Drug Administration's), ISO και της τριμερούς βιοσυμβατότητας (Tripartite Biocompatibility Guidance) για ιατρικά προϊόντα. Σύμφωνα με την τελευταία οι εφαρμογές των θεμελιωδών αρχών για την αποτίμηση της τοξικότητας των ιατρικών συσκευών βασίζονται στις παρακάτω παραμέτρους ανάλογα και με την ιατρική συσκευή, όπως: α) η φύση της επαφής της συσκευής με το σώμα (π.χ.: εξωτερική ή εσωτερική ή εξωτερικώς επικοινωνούσα), β) ο χρόνος της επαφής (π.χ.: μεταβατικός, μικρής ή μεγάλης διάρκειας), γ) το είδος των υλικών της συσκευής (π.χ.: πολυμερή).

Οι σιλικόνες είναι άοσμες και άγευστες, δεν ευνοούν την ανάπτυξη των βακτηριδίων και δεν επιμολύνουν ή οξειδώνουν άλλα υλικά. Επίσης έχουν την ικανότητα να αντέχουν σε ένα ευρύτερο πεδίο ακραίων θερμοκρασιών, συγκρινόμενα με όλα σχεδόν τα άλλα ελαστομερή, διατηρώντας σταθερότητα μεταξύ θερμοκρασιακών μεταβολών από  $-59\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Μπορούν να αποστειρώνονται μέσω του αερίου EtO (Ethylene Oxide), ακτινοβολίας γάμμα ( $\gamma$ ) ή δέσμης ηλεκτρονίων (E – beam), με υπέρθετους ατμούς άνω του σημείου βρασμού (autoclaving) και ποικίλες άλλες μεθόδους. Οι σιλικόνες δε διαλύονται στο νερό και παρουσιάζουν αντοχή σε πολλά χημικά συμπεριλαμβανομένων κάποιων οξέων,

οξειδωτικών χημικών, αμμωνίας και ισοπροπυλικής αλκοόλης. Αντίθετα τα συμπτυκνωμένα οξέα, τα αλκάλια και οι εν γένει διαλύτες δε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με τις σιλικόνες. Τα ελαστικά από σιλικόνη παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάτμηση (έως 250 ppi) και εφελκυσμό (έως 1500 psi), μεγάλη διάταση (έως 1250 %) και ευκαμψία, καλή απόκριση σε χαμηλή συμπίεση και εύρος σκληρότητας από 5 έως 80 Shore A. Ακόμη οι σιλικόνες εξέχουν σε μονωτικές ιδιότητες έναντι του ηλεκτρικού ρεύματος σε σχέση με άλλα συγκρινόμενα μονωτικά υλικά, καθώς και στην πολλαπλή χρησιμότητά τους σε ηλεκτρικές ιδιότητες. Επιπλέον είναι μη αγωγίμες διατηρώντας τη διηλεκτρική τους αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες σε σχέση με εκείνες που συμβατικά μονωτικά υλικά μπορούν να λειτουργήσουν.

Υπάρχουν πολυάριθμοι τύποι σιλικόνης, όπως υγρής μορφής, καθώς και σκληρυνόμενες με πλατίνα και υπεροξειδίο υψηλής συνοχής. Οι τύποι αυτοί έχουν δοκιμασθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της USP Class VI μεθόδου. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή εφαρμόζονται, τόσο οι οδηγίες της τριμερούς βιοσυμβατότητας (ενδομυϊκή εμφύτευση, υποδόρια και ενδοφλέβια ένεση), όσο και αυτές που ισχύουν κατά ISO 10993, όπου για διάρκεια επαφής 29 ημερών κατά μέγιστο, τα προϊόντα δοκιμάζονται εκτός από την τριμερή βιοσυμβατότητα και σε αιμόλυση με αίμα κουνελιού, σε δοκιμή μεγιστοποίησης κατά Kligman (μέθοδος για ταξινόμηση και αποτίμηση ευαισθησίας σε αλλεργιογόνα επαφής σε ανθρώπους), σε δοκιμή κατά Ames (μέθοδος για τον προσδιορισμό του βαθμού μετάλλαξης ενός παράγοντα), σε L929 MEM (mammalian cell culture media) Elution (κυτταροτοξική δοκιμή χρησιμοποιώντας καλλιέργεια θηλαστικών κυττάρων – MEM) και σε διάχυση Agar (καθορίζει την ευπάθεια ή αντοχή ενός γένους βακτηρίων σε ένα αντιβακτηριακό μέσο).

Οι σωλήνες σιλικόνης μπορούν να χρησιμοποιούνται σε διάφορα συστήματα σχεδιασμού ενός ή περισσοτέρων καναλιών και σε εφαρμογές δομών με ανάπτυξη υψηλών πιέσεων. Η ευστάθεια της σιλικόνης σε υψηλές θερμοκρασίες την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν επαναλαμβανόμενη επίτευξη αποστείρωσης, όπου άλλα ελαστομερή έχουν περιορισμούς. Επιπρόσθετα, οι ιδιότητες καλής απόκρισης σε χαμηλή συμπίεση και υψηλής αναταξιμότητας έχουν συντελέσει ώστε η σιλικόνη να κυριαρχεί σε εφαρμογές με περισταλτικές αντλίες υψηλής δυναμικότητας. Η ανυπαρξία αλλεργικών συστατικών σε συνδυασμό με την απουσία άλλων πλαστικών δομών, έχουν συντελέσει στη διεύρυνση της χρήσης των ελαστομερών από σιλικόνη σε περιοχές που παραδοσιακά επικρατούσαν φθηνότερα υλικά όπως το PVC και το latex. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι μηχανισμοί σκλήρυνσης των ελαστομερών από σιλικόνη τόσο με τη μέθοδο υπεροξειδίου όσο και με της πλατίνας. Η τελευταία προσφέρει το βέλτιστο συνδυασμό φυσικών χαρακτηριστικών και βιοσυμβατότητας.

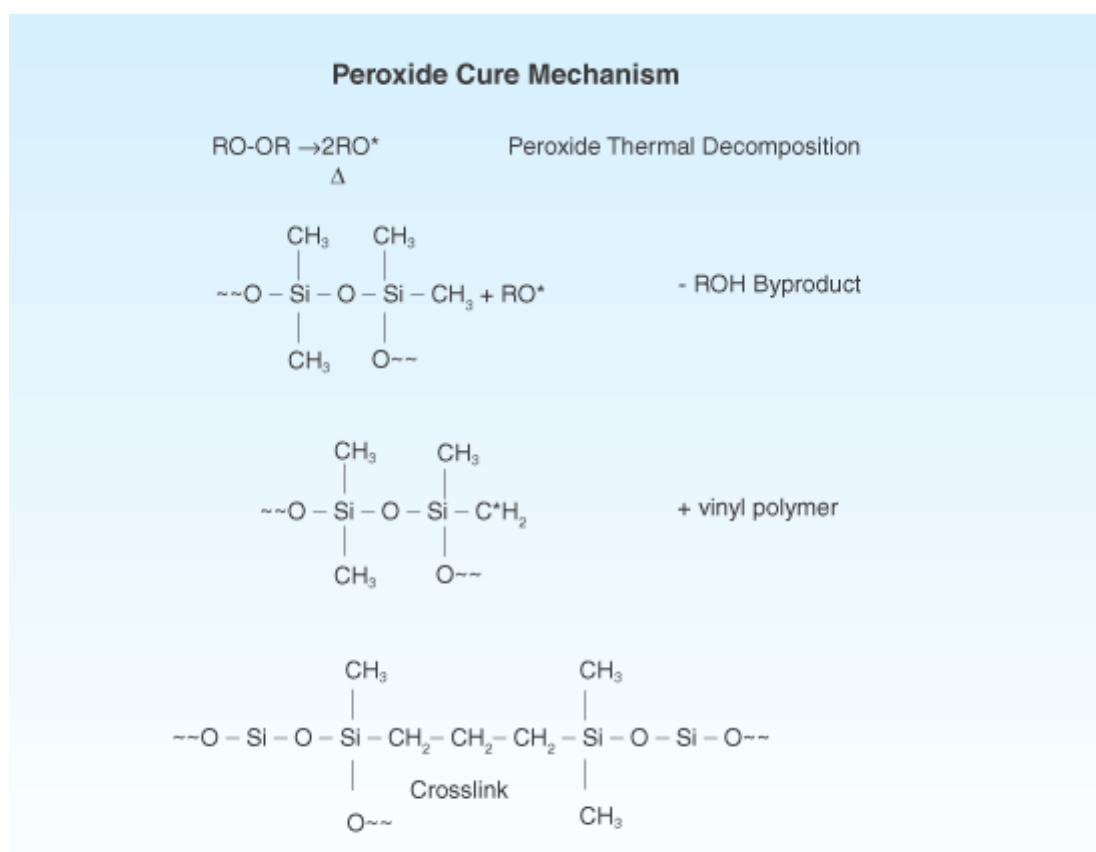
### 1.5.2 Χημική δομή του σωλήνα σιλικόνης

Τα μέσα σκλήρυνσης οργανικού υπεροξειδίου χρησιμοποιήθηκαν μέσω κλιβάνων βουλκανισμού καυτού αέρα (HAV – Hot Air Vulcanizing) για να βουλκανίζουν σωλήνες σιλικόνης πρώτης γενιάς. Αυτοί οι κλιβανοί μπορεί να είναι είτε οριζόντιες μονάδες πολλαπλών βαθμίδων, που χρησιμοποιούν ταινίες μεταφοράς, όπου φέρουν τον εξωθούμενο σωλήνα διαμέσου θερμαινόμενης σήραγγας, είτε κατακόρυφες μονάδες που δεν απαιτούν υποστηρικτικές ταινίες μεταφοράς και επομένως έχουν το πλεονέκτημα να μη χαράσσουν το μη σκληρυνόμενο υλικό της σιλικόνης.

Η αντίδραση σκλήρυνσης, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 15, είναι μονόδρομη και συνίσταται στη θερμική αποσύνθεση του υπεροξειδίου, σχηματίζοντας ελεύθερες ρίζες οι οποίες στη συνέχεια αφαιρούν άτομα υδρογόνου που υπάρχουν στα εξέχοντα μεθύλια της σιλικόνης και/ή σε ομάδες βινυλίου. Οι ρίζες που σχηματίζονται από την αφαίρεση του

ατόμου υδρογόνου από τα εξέχοντα μεθύλια της σιλικόνης και τα βινύλια συνδυάζονται κατόπιν, σχηματίζοντας διασταυρώσεις (crosslinkings) μεταξύ των αλυσίδων πολυμερών πυριτίου που συμμετέχουν. Αν και πολλά οργανικά υπεροξειδία θα βουλκάνιζαν το ελαστικό σιλικόνης, μόνο το υπεροξείδιο του 2,4 διχλωροβενζολίου προσφέρει μια συμπαγή επιφανειακή σκλήρυνση χωρίς εγκοπές ή πορώδες και χαρακτηριστικό άρωμα κατά τη σκλήρυνση. Αυτό το ειδικό υπεροξείδιο έχει μια ώρα χρόνο ημίσειας ζωής στους 73°C και γι' αυτό είναι εξαιρετικά αποδοτικό στο σχηματισμό διασταυρώσεων (crosslinkings) στις τυπικές θερμοκρασίες (HAV) από 538 έως 760 °C.

Η χρήση του υπεροξειδίου του 2,4 διχλωροβενζολίου έχει δυο δυνητικά μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι περιβαλλοντολογικό επειδή μικρά ποσά πολυχλωρινοχών διφαινυλίων παράγονται ως παραπροϊόν της αντίδρασης διασταύρωσης (crosslinking). Το δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι το πρωταρχικό προϊόν της αποσύνθεσης, το 2,4 διχλωροβενζοϊκό οξύ, αναδεικνύεται από μόνο του σαν μια λευκή κρυσταλλική πούδρα που τείνει να διαχέεται στην επιφάνεια του σωλήνα προκαλώντας μια λευκή μεμβράνη (film) γνωστή ως «χνούδι» (bloom). Για την αποφυγή μελλοντικής αχρησίας του ελαστικού και για την εκπλήρωση γενικών υγειονομικών απαιτήσεων, επιβάλλεται η εξάλειψη αυτής της λευκής μεμβράνης με επαναθέρμανση του σωλήνα σε κλιβάνους μεταγωγής εξαναγκασμένου καυτού αέρα για αρκετές ώρες σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο ακριβής χρονικός κύκλος αναθέρμανσης είναι συνάρτηση των διαστάσεων του σωλήνα, του αριθμού των τυλιγμάτων, της ροής του αέρα κλπ. Οι τυπικοί χρονικοί κύκλοι διαρκούν συνήθως από οκτώ μέχρι δώδεκα ώρες σε θερμοκρασίες από 177 °C έως 232 °C.

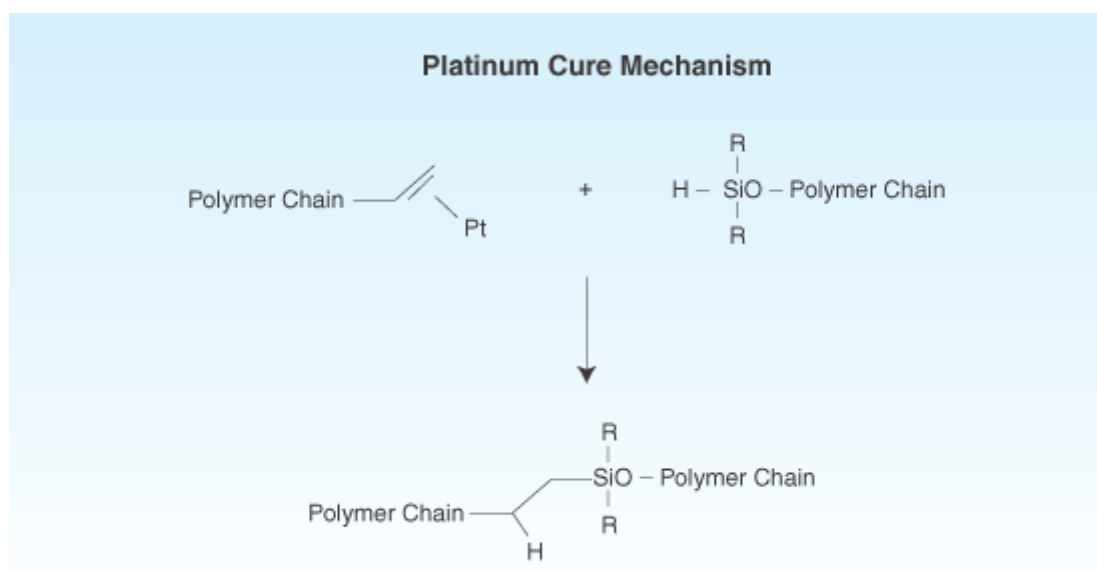


Εικόνα 15. Μηχανισμός σκλήρυνσης σιλικόνης με υπεροξείδιο.



Η σκλήρυνση με πλατίνα του ελαστικού από σιλικόνη, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 16, προσφέρει μια εναλλακτική προτεινόμενη σκλήρυνση έναντι αυτής με υπεροξείδιο, ειδικά για εφαρμογές στο χώρο της υγείας όπου απαιτείται καθαριότητα και μέγιστη καθαρότητα των υλικών. Η σκλήρυνση με πλατίνα προέρχεται από την αντίδραση βουλκανισμού σύμφωνα με την οποία ένα πολύ-λειτουργικό υδρίδιο του πυριτίου (διασταυρωτής) παρουσία ενός ειδικού μεταλλικού καταλύτη, όπως η πλατίνα, προσθέτει διαμέσου διπλού δεσμού την ομάδα του βινυλίου στην πολυμερισμένη αλυσίδα της οργανικής ένωσης του πυριτίου. Όταν ο διασταυρωτής περιέχει περισσότερες από μία ενώσεις υδριδίου, τότε μπορεί να αντιδράσει με πιο πολλές αλυσίδες και με αυτόν τον τρόπο να σχηματιστούν αντίστοιχα πολλαπλές διασταυρώσεις (crosslinkings).

Η αντίδραση διασταύρωσης (crosslinking) προχωρά αρκετά έντονα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε είναι απαραίτητο να ενσωματωθεί ένας αναστολέας στο σύστημα, ώστε να αδρανοποιεί τον καταλύτη από πλατίνα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, προλαμβάνοντας έτσι την πρόωγη σκλήρυνση. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, ο αναστολέας αποσύρεται επιτρέποντας στον καταλύτη να δράσει βοηθητικά στο σχηματισμό διασταύρωσης (crosslinking). Οι τυπικοί αναστολείς είναι υλικά τα οποία επιδρούν σχετικά πολύ εύκολα με την πλατίνα από ότι με τις οργανικές ομάδες πυριτίου με πολυμερισμένο βινύλιο και μπορούν να είναι υπεροξείδια, υπεροξείδια του υδρογόνου και παράγωγα του ακετυλενίου. Αυτοί οι τύποι των υλικών μαζί με μίγματα θείου και αμίνες μπορούν επίσης να δράσουν σαν μόνιμοι αναστολείς καταλυτών, αν δεν ελεγχθούν. Συνεπώς, είναι σημαντικό η ανάμιξη για τη σκλήρυνση της σιλικόνης να γίνεται σε καθαρό περιβάλλον και κατά προτίμηση σε χώρους που να στερούνται άλλων οργανικών υλικών.



Εικόνα 16. Μηχανισμός σκλήρυνσης σιλικόνης με πλατίνα.

Συνήθως, τα ελαστομερή σιλικόνης με σκλήρυνση πλατίνας εφοδιάζονται ως δυο συστατικά τα οποία αναμιγνύονται πριν την παραγωγή. Η διάρκεια ζωής αυτών των υλικών από τη στιγμή που θα αναμιχθούν είναι σχετικά μικρή, οπότε αυτά τα υλικά συνήθως εξωθούνται και σκληραίνονται εντός μερικών ωρών από τη στιγμή της ανάμιξης πριν χαθεί η επεξεργασιμότητά τους. Οι τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία με καταλύτη πλατίνας, ωστόσο, έχουν εισαγάγει μια καινούργια μέθοδο, ενός συστατικού, σκλήρυνσης των ελαστομερών σιλικόνης. Αυτά τα υλικά εφοδιάζονται στους κατασκευαστές σε έτοιμη μορφή προς χρήση, στην οποία ο καταλύτης και ο αναστολέας έχουν προαναμιχθεί στο μητρικό

υλικό του ελαστικού, εξαλείφοντας την ανάγκη για ανάμιξη πριν τη παραγωγή. Ο τυπικός χρόνος διάρκειας ζωής αυτών των υλικών είναι τρεις μήνες και προσφέρουν στον κατασκευαστή την ευκολία της απευθείας χρήσης και του χαμηλού κόστους που χαρακτηρίζει το υλικό ενός συστατικού.

### 1.5.3 Μορφοποίηση (processing) σωλήνων σιλικόνης

Τα ελαστομερή σιλικόνης συνήθως χυτεύονται με τρεις κύριες μεθόδους: χύτευση με έγχυση τήγματος (LIM – Liquid Injection Molding), χύτευση με συμπίεση (Compression Molding) και χύτευση μεταφοράς (Transfer Molding) [7], [18]. Η μέθοδος LIM συνήθως επιλέγεται σε εφαρμογές παραγωγής τεμαχίων με μεγάλο όγκο και χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες πιέσεις και υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους χύτευσης. Δηλαδή, η πίεση έγχυσης κυμαίνεται από 250 έως 2000 psi ενώ οι θερμοκρασίες από 118 °C έως 252 °C. Αντίθετα, οι μέθοδοι χύτευσης με συμπίεση (Compression Molding) και μεταφοράς (Transfer Molding) λειτουργούν σε πιέσεις από 2000 έως 8000 psi και θερμοκρασίες από 93 °C έως 188 °C.

Οι μέθοδοι της χύτευσης μεταφοράς και με συμπίεση της σιλικόνης είναι ευρύτατα αποδεκτές και χρησιμοποιούνται συχνά για ιατρικά προϊόντα. Αντίθετα με τη μέθοδο LIM, αυτές οι μέθοδοι έχουν σημαντική προεργασία και απαιτούν ξεχωριστή ανάμιξη του ελαστικού σε ένα μύλο έλασης δυο κυλίνδρων. Επίσης, επειδή αυτές οι διαδικασίες λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, οι επαναληπτικές διαδικασίες παραγωγής διαρκούν περισσότερο. Με δεδομένο τη μεγάλη διάρκεια σκλήρυνσης δεν είναι ασυνήθιστη η ύπαρξη μεγάλων καλουπιών με πολλές κοιλότητες. Στη χύτευση μεταφοράς ένα υδραυλικό έμβολο εκτοπίζει το τήγμα ελαστικού διαμέσου των πυλών (οπών) και το εγχύει μέσα στις κοιλότητες του καλουπιού. Η μέθοδος της χύτευσης με συμπίεση διαφέρει στο ότι το ελαστικό τοποθετείται με φυσικό τρόπο μέσα στις κοιλότητες του καλουπιού και η ολοκλήρωση της πλήρωσης γίνεται με το κλείσιμο του καλουπιού (πάτημα).

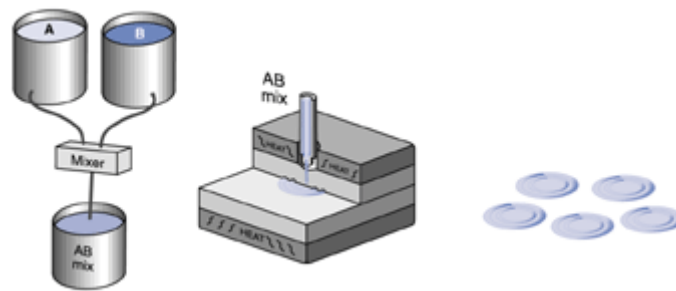
Κατά το σχεδιασμό μορφοποίησης με χύτευση, οι σχεδιαστές θα πρέπει να υπολογίζουν το ρυθμό συρρίκνωσης του υλικού που μπορεί να μεταβάλλεται από 2 έως 4 % εξαρτώμενος από τον τύπο της σιλικόνης. Επίσης, οι τρεις μεταβλητές που πρέπει να ελέγχονται είναι η θερμοκρασία, η πίεση και ο χρόνος. Η θερμοκρασία πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για να ελαχιστοποιεί τους χρόνους σκλήρυνσης, αλλά μέχρι ενός ορίου ώστε να εμποδίζει το κάψιμο του ελαστομερούς. Η πίεση που επιλέγεται πρέπει να επιτρέπει το πλήρες γέμισμα του καλουπιού, ταυτόχρονα με τη διαφυγή όλου του αέρα και πρέπει να είναι η βέλτιστη για να εμποδίζει τη δημιουργία κενών χώρων και στιγμιαίων αναφλέξεων. Όπως στις περισσότερες μεθόδους χύτευσης, ο ακριβής χρονισμός όλων των παραμέτρων είναι κρίσιμης σημασίας για διατηρούμενη υψηλή ποιότητα στην παραγωγή τελικών σκληρυμένων κομματιών.

#### 1.5.3.1 Χύτευση με έγχυση τήγματος (LIM – Liquid Injection Molding)

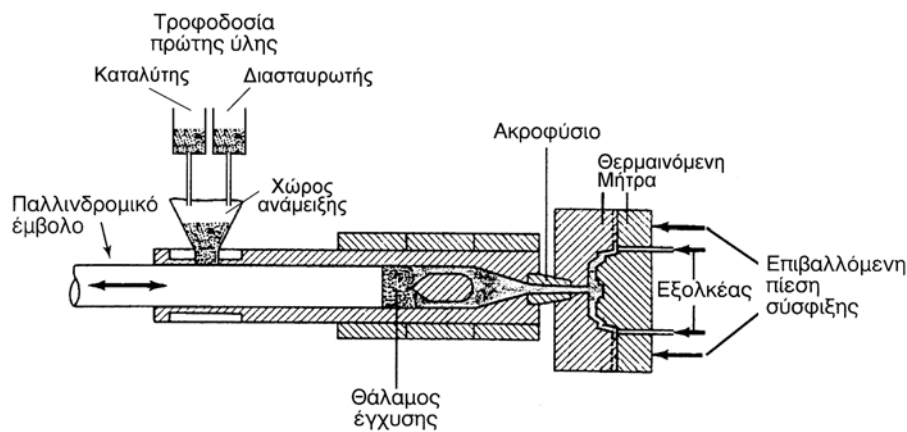
Η μέθοδος LIM προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στην παραγωγή του ελαστικού σιλικόνης συμπεριλαμβανομένης της καθαριότητας, της ταχύτητας και της διαστασιακής ακρίβειας. Κατά τη μορφοποίηση με τη μέθοδο LIM τα δύο συστατικά υγρής σιλικόνης (καταλύτης και διασταυρωτής) αρχικά αναμιγνύονται σε ένα χώρο ανάμιξης (mixer) για ομογενοποίηση. Έπειτα η αναμειγμένη υγρή σιλικόνη συμπιέζεται από ένα έμβολο (ram) και ψεκάζεται υπό πίεση (έγχυση) κατευθείαν μέσα στη θερμαινόμενη κοιλότητα του καλουπιού σε μια τελείως κλειστή διαδικασία (εικόνα 17 και 18). Η χύτευση και ο

βουλκανισμός (σκλήρυνση) λαμβάνουν χώρα ταχύτατα εντός της κοιλότητας του καλουπιού σε υψηλή θερμοκρασία. Σημειώνεται εδώ ότι βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ο σημαντικός χρόνος του κύκλου της κατεργασίας και το υψηλό κόστος των καλουπιών.

Γενικά, η έγχυση (injection) μπορεί να διαρκέσει πολύ λίγο από 3 έως 10 δευτερόλεπτα, ενώ η χύτευση (molding) και ο βουλκανισμός (vulcanization) διαρκούν από 10 έως 90 δευτερόλεπτα ή και περισσότερο, ανάλογα με το βάρος του εγχυόμενου τήγματος και το επικρατέστερο πάχος της κατατομής του κομματιού. Η μέθοδος LIM εξαλείφει τη μόλυνση λόγω του ότι συμβαίνει σε κλειστή διαδικασία. Επιπλέον, επειδή χαρακτηρίζεται από ένα και μόνο αυτοματοποιημένο βήμα, εξασφαλίζει διατηρούμενη ποιότητα κομματιών με μικρότερη πιθανότητα απόκλισης ή ανθρώπινου λάθους. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου LIM είναι η ελάχιστη προεργασία των υλικών, οι χαμηλές σχετικά πιέσεις έγχυσης, οι ταχύτεροι σχετικά ρυθμοί επαναλήψεων και η δυνατότητα ανάπτυξης πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων.



Εικόνα 17. Στάδια μεθόδου LIM: ανάμιξη για ομογενοποίηση, χύτευση σε καλούπι, και παραγωγή κομματιών.

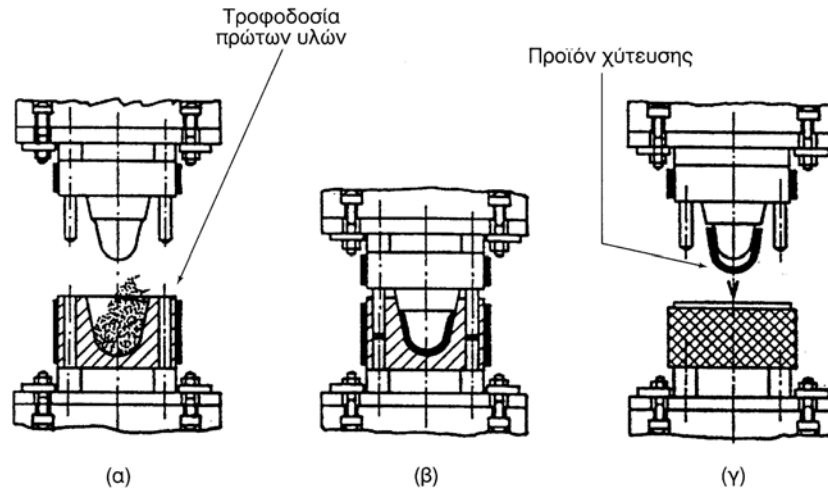


Εικόνα 18. LIM με χρήση παλινδρομικού εμβόλου.

### 1.5.3.2 Χύτευση με συμπίεση (Compression Molding)

Η μέθοδος χύτευσης με συμπίεση των πολυμερών είναι ανάλογη της σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας, που χρησιμοποιείται στις κατεργασίες μετάλλων. Η σιλικόνη δύο συστατικών, τοποθετείται σε θερμαινόμενη μήτρα, όπου με εφαρμογή υψηλής πίεσης προκαλείται τήξη και πλήρωση του καλουπιού με ταυτόχρονο πολυμερισμό και σκλήρυνση της σιλικόνης (εικόνα 19). Ο χρόνος πήξεως κυμαίνεται από 10 sec έως 10 min, ανάλογα με

το μέγεθος του τεμαχίου. Οι ασκούμενες πιέσεις (έως 70 MPa) είναι μικρότερες αυτών που αναπτύσσονται κατά τη χύτευση με έγχυση (LIM).

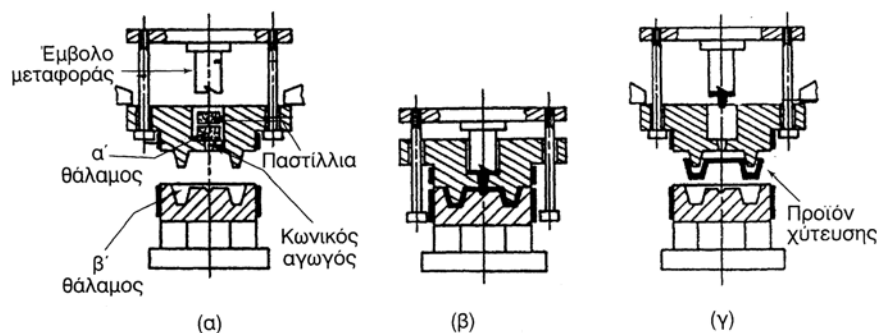


Εικόνα 19. Σχηματική παράσταση της διαδικασίας χύτευσης με συμπίεση: (α) τοποθέτηση της πρώτης ύλης, (β) συμπίεση με ταυτόχρονη θέρμανση και (γ) λήψη τελικού προϊόντος.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ελαχιστοποίηση της φθοράς του υλικού, κατά τη μορφοποίηση, και η ελαχιστοποίηση των παραμενουσών μηχανικών τάσεων στο τελικό προϊόν.

### 1.5.3.3 Χύτευση μεταφοράς (Transfer Molding)

Η μορφοποίηση με χύτευση μεταφοράς πραγματοποιείται σε διπλό θάλαμο (εικόνα 20). Στον πρώτο θάλαμο, τα δυο συστατικά του πολυμερούς (διασταυρωτής και καταλύτης) θερμαίνονται υπό πίεση και τήκονται. Εδώ, πραγματοποιείται η απαραίτητη θερμοκρασιακή ομογενοποίηση της πρώτης ύλης. Το τήγμα της πρώτης ύλης ψεκάζεται στο δεύτερο θάλαμο, όπου και γίνεται ο πολυμερισμός της. Η έγχυση γίνεται μέσω θερμαινόμενου κωνικού αγωγού, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η κατάλληλη μείωση του ιξώδους του τήγματος και να δύναται αυτό να πληρώνει επακριβώς τη μήτρα.

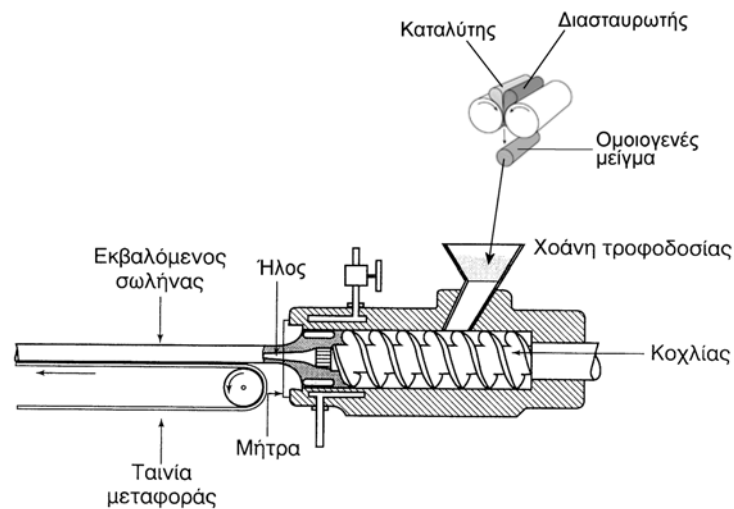


Εικόνα 20. Σχηματική παράσταση μορφοποίησης με χύτευση μεταφοράς: (α) τροφοδότηση της πρώτης ύλης στον πρώτο θάλαμο, (β) τήξη της πρώτης ύλης στον πρώτο θάλαμο και ψεκασμός του τήγματος στο δεύτερο θάλαμο, όπου και πολυμερίζεται και (γ) παραλαβή προϊόντος.

Η μέθοδος αυτή, συνεπώς, αποτελεί συνδυασμό των μεθόδων χύτευσης με συμπίεση και χύτευσης με έγχυση, αλλά οι πιέσεις που αναπτύσσονται εδώ είναι πολύ μεγαλύτερες της τάξεως των 300 MPa. Η μέθοδος ενδείκνυται για την κατασκευή εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας.

#### 1.5.3.4 Εκβολή (Extrusion)

Τα ελαστικά σιλικόνης υψηλής συνοχής μπορούν να υποστούν εκβολή (extrusion), αποφέροντας μια μεγάλη ποικιλία σωλήνων και φύλλων ποικίλων διατομών (προφίλ). Η εκβολή δεν είναι γενικά εφικτή με υγρή σιλικόνη. Η διαδικασία της εκβολής αρχίζει με την ανάμειξη ημίρρευστης σιλικόνης δυο συστατικών (καταλύτης και διασταυρωτής) σε ένα μύλο έλασης δυο κυλίνδρων. Η ανάμειξη αποφέρει ένα ομοιογενές μείγμα το οποίο μορφοποιείται σε λωρίδες και τροφοδοτείται στο σύστημα εκβολής (εξολκέας), όπου πραγματοποιείται ιξώδης ροή του μείγματος, το οποίο με χρήση δοσιμετρικού κοχλίας, βγαίνει από τη μήτρα πλήρως διαμορφωμένο. Ο κοχλίας αυτός τροφοδοσίας είναι μεταβλητής ταχύτητας και χρησιμοποιείται για να διατηρεί κατάλληλη πίεση στον ήλο (pin) και στη μήτρα (die), (εικόνα 21).

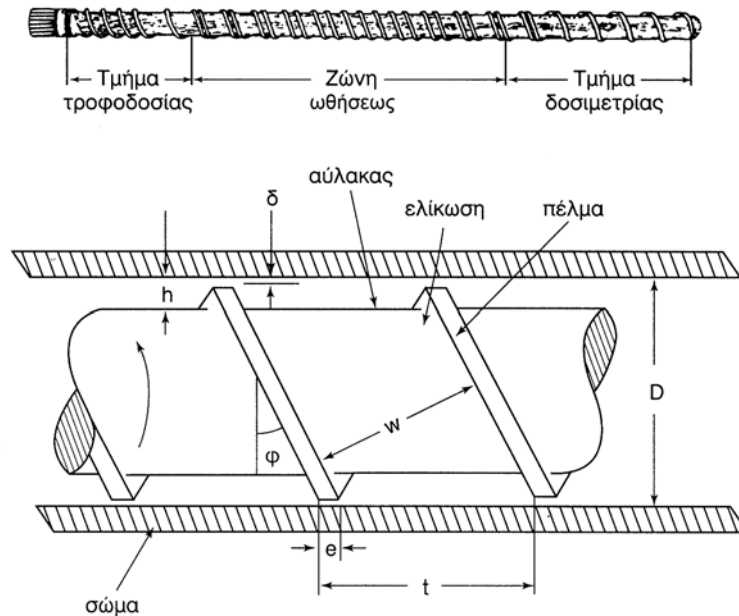


Εικόνα 21. Σχηματική παράσταση της εκβολής, με το μύλο ανάμειξης, την τροφοδοσία, την εξώθηση και τη μορφοποίηση του εκβαλλόμενου σωλήνα μέσω του ήλου και της μήτρας.

Ο δοσιμετρικός κοχλίας ενός συστήματος εκβολής είναι ένα εξάρτημα, του οποίου ο σχεδιασμός παίζει σπουδαίο ρόλο στην όλη διαδικασία. Τα βασικά τμήματα του κοχλίας είναι τρία: τμήμα τροφοδοσίας, ζώνη ώθησεως και τμήμα δοσιμετρίας (εικόνα 22).

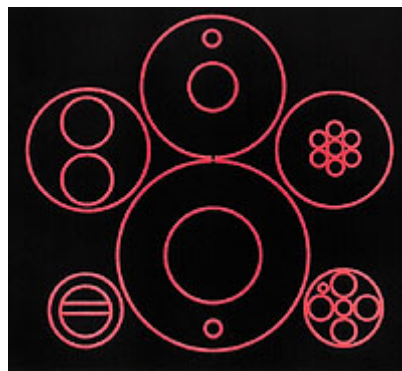
Η τροφοδοσία του ομοιογενούς μείγματος ρυθμίζεται μόνον από τις πρώτες ελικώσεις του κοχλίας. Μετά από κάποιο μήκος του κοχλίας, που αντιστοιχεί στο τμήμα τροφοδοσίας, αρχίζει η ώθηση του υλικού. Στην εικόνα 22 φαίνεται λεπτομέρεια του κοχλίας εκβολής. Η τριβή ανάμεσα στον κοχλία και στο μείγμα του ελαστομερούς βοηθά την ταχεία προώθησή τους, ο δε συντελεστής τριβής μπορεί να ρυθμιστεί από τη γωνία ελίκωσης ( $\varphi$ ). Η βέλτιστη γωνία ελίκωσης κυμαίνεται από  $15^\circ$  έως  $20^\circ$ . Στο τμήμα της δοσιμετρίας, το βάθος της αύλακος του κοχλίας ( $\delta$ ) είναι το μικρότερο από κάθε άλλο τμήμα. Για το λόγο αυτό το τμήμα δοσιμετρίας καθορίζει τη συμπεριφορά ολόκληρου του κοχλίας και ελέγχει το ρυθμό εξώθησης του υλικού.

Αφού εξωθηθεί ο σωλήνας διέρχεται διαμέσου κλιβάνων βουλκανισμού καυτού αέρα, όπου ο καυτός αέρας ή η ακτινοβολούμενη θερμότητα σκληραίνουν το προϊόν. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εξώθησης εκτελούνται μικρομετρικοί έλεγχοι με λέιζερ αρκετά συχνά, για να εξασφαλίζεται ο ορθός διαστασιολογικός έλεγχος.



Εικόνα 22. Κοχλίας εκβολής και χαρακτηριστικά μεγέθη τμήματος του κοχλίας εκβολής,  $D$ : διάμετρος,  $\varphi$ : γωνία ελίκωσης,  $t$ : βήμα ελίκωσης,  $\delta$ : βάθος αύλακος,  $e$ : πλάτος πέλματος,  $w$ : πλάτος αύλακος και  $h$ : διάκενο αύλακος-στρώματος.

Η μέθοδος της εκβολής εφαρμόζεται κυρίως για την κατασκευή κυλινδρικής γεωμετρίας και επιπέδων προϊόντων με ιδιαίτερα έντονο προσανατολισμό δομής, ενώ είναι ικανή να παράγει μια κοιλότητα (αυλάκωση) ή πολλαπλές και συν-εξωθήσεις σωλήνων σε μια ποικιλία διαμέτρων (εικόνα 23). Προφίλ και μη κυκλικές διατομές μπορούν επίσης να κατασκευαστούν από σιλικόνη για διάφορες εφαρμογές. Εξειδικευμένες ιδιότητες περιλαμβάνουν κατάλληλη ενίσχυση που εξασφαλίζει επιπρόσθετη αντοχή, ηλεκτρική αγωγιμότητα και αντοχή σε στρέβλωση και σε έκταση.



Εικόνα 23. Οι σωληνώσεις από σιλικόνη μπορούν να διαμορφωθούν σε μια ποικιλία από σχηματισμούς διατομών σύμφωνα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών.

Στα παραδείγματα προϊόντων από εξώθηση σιλικόνης συμπεριλαμβάνονται: καθετήρες, αγωγοί αποχέτευσης και διακίνησης ρευστών, παρεμβύσματα, ταινίες, επιστρώματα επικάλυψης, φούσκες πιεσόμετρων και συνεξωθούμενα ηλεκτρικά καλώδια.

#### 1.5.4 Ελαττώματα κατά τη μορφοποίηση μέσω τήγματος

Κατά τη μορφοποίηση ελαστομερών με τεχνικές όπως είναι η εκβολή (extrusion), και η χύτευση (molding), πολύ σημαντική παράμετρο για το σχεδιασμό της μήτρας, αποτελεί η ελαστική συμπεριφορά του τήγματος του υλικού κατά την κατεργασία.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη χύτευση, σε ορισμένες περιοχές του ρευστού, ο παράγοντας που επηρεάζει κυρίως τη ροή του τήγματος είναι η ελαστική συνιστώσα της τάσης. Για τους μεγάλους ρυθμούς παραγωγής σε βιομηχανική κλίμακα, η ελαστική συμπεριφορά του τήγματος επηρεάζει ακόμα πιο πολύ τις διαστάσεις του προϊόντος, με αποτέλεσμα την όλο και μεγαλύτερη απόκλιση του τελικού προϊόντος από το επιθυμητό σχήμα. Συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι η εμφάνιση διαφόρων ελαττωμάτων στο τελικό προϊόν.

Τα συνήθη ελαττώματα που παρουσιάζουν τα ελαστομερή που μορφοποιήθηκαν μέσω τήγματος, περιγράφονται παρακάτω:

- 1) Διόγκωση κατά την έξοδο από τη μήτρα (die swell). Αναφέρεται στη διόγκωση του ελαστομερούς κατά την έξοδό του από τη μήτρα. Αποτελεί το χαρακτηριστικότερο και συνηθέστερο ελάττωμα, κατά τη μορφοποίηση.
- 2) Αστοχία τήγματος (melt fracture). Πρόκειται για τη δημιουργία τοπικών ασυνεχειών μέσα στο τήγμα. Η ανομοιογένεια του τήγματος οδηγεί σε μη συμπαγές τελικό προϊόν.
- 3) «Δέρμα καρχαρία» (“shark – skin”). Η δημιουργία επιφανειακών ρωγμών στο ελαστομερές καθιστά τραχεία την επιφάνειά του, η υφή της οποίας είναι γνωστή με τον όρο «δέρμα καρχαρία».

#### 1.5.5 Οι σωλήνες σιλικόνης στις περισταλτικές αντλίες

Παραδοσιακά, το υψηλής αντοχής σε διάτμηση σκληρυμένο με υπεροξείδιο ελαστικό σιλικόνης, έχει γίνει το σημείο αναφοράς για τις εφαρμογές των περισταλτικών αντλιών, προσφέροντας μεγάλη διάρκεια ζωής της αντλίας και αυστηρό έλεγχο των διαστασιολογικών ανοχών. Η σκληρυμένη με υπεροξείδιο σιλικόνη, ωστόσο, απαιτεί επαναθέρμανση για να απομακρυνθούν τα όξινα παραπροϊόντα. Τα περισσότερα διαθέσιμα εμπορικά ελαστομερή σιλικόνης σκληρυμένα με πλατίνα, έχουν σχεδιαστεί για να μεγιστοποιούν την αντοχή σε εφελκυσμό και σε διάτμηση, δίνοντας λιγότερη έμφαση σε ιδιότητες όπως ελαστική μνήμη, απόκριση σε συμπίεση, αναταξιμότητα και υστέρηση. Αφού οι σωλήνες των περισταλτικών αντλιών μπορούν να υποστούν εκατομμύρια κύκλους συμπίεσης, αυτά τα τελευταία αναφερόμενα χαρακτηριστικά επιδρούν στην αντοχή του ελαστομερούς σε δυναμική καταπόνηση και συνεπώς επηρεάζουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής του σωλήνα (αστοχία λόγω κόπωσης). Αρκετά πρόσφατα, μια νέα κατηγορία ελαστομερών σιλικόνης σκληρυμένης με πλατίνα έχει προταθεί και βελτιστοποιεί αυτές τις κρίσιμες ιδιότητες (πίνακας 1).

Ο παραγόμενος σωλήνας σιλικόνης μέσω χύτευσης με έγχυση τήγματος (LIM) είναι ένα ελαστομερές δυο συστατικών από σιλικόνη ικανό να σκληρυνθεί με πλατίνα και να χρησιμοποιηθεί σε περισταλτικές αντλίες. Το ελαστομερές αυτό μπορεί να χυτευθεί σε καλούπι και να σκληρυνθεί σε υψηλές θερμοκρασίες, μέσω ειδικά σχεδιασμένων μηχανών έγχυσης τήγματος, διαμορφώνοντάς το άπαξ υπό σταθερή θερμοκρασία. Σε αντίθεση με τη

μέθοδο εκβολής (extrusion), η διαδικασία χύτευσης επιτυγχάνει σύνθετα γεωμετρικά σχήματα και ακρίβεια διαστάσεων. Η δυνατότητα αυτή επίτευξης της ακριβούς γεωμετρίας σωλήνων καθιστά δυνατή τη δημιουργία νέων σχεδιασμών φορητών περισταλτικών αντλιών με πολύ καλή ακρίβεια στην έγχυση του ρευστού. Πρόσφατα η παραπάνω μέθοδος LIM χρησιμοποιήθηκε για κατασκευή αναλωσίμων σωλήνων από ελαστικό σιλικόνης, υψηλής ποιότητας και χαμηλού κόστους για παρεντερική διατροφή. Συνεπώς, η μέθοδος LIM θα κατέχει ένα διευρυμένο ρόλο σε πολλές μελλοντικές καινοτομικές εφαρμογές κατασκευής σωλήνων για τις ιατρικές συσκευές.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικές ιδιότητες ελαστομερών σιλικόνης σκληρυμένης με πλατίνα με κλασσική διεργασία και βελτιωμένη.

<b>Χαρακτηριστική ιδιότητα</b>	<b>Κλασσική διεργασία σκλήρυνσης με πλατίνα</b>	<b>Νέα κατηγορία σκλήρυνσης με πλατίνα</b>
Σκληρότητα, Shore A (points)	50	50
Αντοχή εφελκυσμού (psi)	1300	1100
Διάταση θραύσης (%)	900	450
Διάτμηση B (ppi)	250	100
Μέτρο ελαστικότητας, 100% (psi)	190	200
Απόκριση σε συμπίεση, 22 hrs σε 177 °C (%)	50	30
Αναταξιμότητα Bayshore (%)	48	61
Υστέρηση (%)	53	41
Ειδικό βάρος	1.15	1.12

Συμπερασματικά, λοιπόν, το ελαστικό σιλικόνης σκληρυμένης με πλατίνα βρίσκει εφαρμογή σε πολλές φαρμακευτικές και σχετιζόμενες με την υγεία διαδικασίες και η πρόσφατη εισαγωγή υλικών ενός συστατικού διευκολύνει τη χρήση του τόσο σε εφαρμογές εξώθησης όσο και σε εφαρμογές χύτευσης. Τα ελαστομερή σιλικόνης σκληρυμένης με πλατίνα μπορούν να σχεδιασθούν για να εξασφαλίζουν την απόδοση των περισταλτικών αντλιών στον ίδιο βαθμό με τα έως τώρα υλικά σκληρυμένα με υπεροξειδίο. Αυτά τα νέα ελαστομερή από σιλικόνη πλεονεκτούν λόγω της απουσίας των παραπροϊόντων υπεροξειδίου και της λείας επιφάνειας που διαθέτουν. Επιπρόσθετα, παρουσιάζουν καλή ελαστική μνήμη, χαμηλή υστέρηση και καλή απόκριση σε χαμηλή συμπίεση, πετυχαίνοντας μεγάλη διάρκεια ζωής του σωλήνα της αντλίας και ακρίβεια στην παροχή. Η μέθοδος LIM του ελαστικού σιλικόνης προσδίδει μια νέα εναλλακτική δυνατότητα που συγχωνεύει τη νέα λειτουργικότητα και τη βελτιωμένη αξιοπιστία στις ιατρικές συσκευές. Με τη μακρά ιστορία της επιτυχούς χρήσης της σιλικόνης στη βιομηχανία και το μοναδικό συνδυασμό των ιδιοτήτων της, η σιλικόνη είναι σε πολύ καλή θέση να συναγωνιστεί τις πλέον όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις των υλικών που προκύπτουν από τους κατασκευαστές συσκευών.



## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 2

### ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μετρητικές μέθοδοι που ακολουθήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Οι μέθοδοι αυτές συνίστανται στον ποσοτικό προσδιορισμό της εγχυόμενης μάζας ρευστού και κατ' επέκταση του ρυθμού ροής από μια περισταλτική αντλία, που οδηγείται από έναν ηλεκτροκινητήρα. Ο ρυθμός ροής του ρευστού καθορίζεται έμμεσα από το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα, ενώ η συχνότητα περιστροφής της περισταλτικής αντλίας, η οποία καθορίζει το ρυθμό ροής του ρευστού, προσδιορίζεται με τη μέτρηση των στροφών του ηλεκτροκινητήρα με ένα ταχύμετρο. Η μέτρηση της μάζας του εγχυόμενου ρευστού πραγματοποιείται με μια δυναμοκυψέλη ηλεκτρικού σήματος. Συνεπώς, οι μετρητικές μέθοδοι συνδέονται άμεσα με τη λειτουργία της δυναμοκυψέλης, του ηλεκτρονικού συστήματος οδήγησης του ηλεκτροκινητήρα και του ταχυμέτρου. Για το λόγο αυτό, θεωρείται αναγκαία η περιγραφή της αρχής λειτουργίας καθενός από τα προαναφερθέντα όργανα μέτρησης.

#### 2.1 Δυναμοκυψέλη (load cell)

##### 2.1.1 Η δυναμοκυψέλη σαν μέθοδος μέτρησης βάρους

Η δυναμοκυψέλη [20] είναι μια διάταξη που μετατρέπει ένα φορτίο που εφαρμόζεται σε αυτήν σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα. Αυτή η μετατροπή επιτυγχάνεται με τη φυσική παραμόρφωση των μηκυνσιομέτρων (strain gauges), τα οποία είναι ενσωματωμένα στη δοκό της δυναμοκυψέλης και είναι καλωδιωμένα σε μια διάταξη γέφυρας Wheatstone. Οι κατηγορίες των δυναμοκυψελών γενικά χαρακτηρίζονται από τον τύπο του σήματος που παράγεται οπότε υπάρχουν ηλεκτρικές, υδραυλικές και πνευματικές.

Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι δυναμοκυψελών, αυτές που βασίζονται σε μηκυνσιόμετρα (strain gauges) είναι ο πιο κοινά χρησιμοποιούμενος τύπος. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν ευρύτατα οι μηχανικές ζυγαριές με μοχλό, οι οποίες μπορούσαν να μετρήσουν τα πάντα από χάπια μέχρι βαγόνια τρένου με ακρίβεια και αξιοπιστία αρκεί να ήταν ορθά βαθμονομημένες και σωστά συντηρημένες. Η αρχή της λειτουργίας τους μπορούσε να περιλαμβάνει είτε ένα μηχανισμό ισορροπίας βάρους ή την ανίχνευση μιας αναπτυσσόμενης δύναμης σχηματιζόμενης από μηχανικούς μοχλούς. Οι πρόδρομοι των αισθητήρων μέτρησης δύναμης συμπεριλάμβαναν υδραυλικές και πνευματικές διατάξεις. Το 1843, ο άγγλος φυσικός Sir Charles Wheatstone επινόησε ένα κύκλωμα γέφυρας που μπορούσε να μετρήσει ηλεκτρικές αντιστάσεις. Το κύκλωμα της γέφυρας Wheatstone είναι ιδανικό για τη μέτρηση των αλλαγών της αντίστασης που λαμβάνουν χώρα στα μηκυνσιόμετρα (strain gauges). Αν και η πρώτη ενσωματωμένη καλωδιακή αντίσταση μηκυνσιομέτρου εμφανίστηκε στη δεκαετία του 1940, δεν αναπτύχθηκε μέχρι που τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συμπορεύτηκαν με τη νέα τεχνολογία που έγινε τεχνικά και οικονομικά εφικτή. Από τότε τα μηκυνσιόμετρα (strain gauges) έχουν αναπτυχθεί ραγδαίως ως συστατικά στοιχεία τόσο των μηχανικών ζυγαριών όσο και των δυναμοκυψελών. Σήμερα, εκτός από ιδιαίτερα εργαστήρια όπου χρησιμοποιούν ακόμη μηχανικούς ζυγούς ακριβείας, οι δυναμοκυψέλες με μηκυνσιόμετρα (strain gauges) επικρατούν στη βιομηχανία ζυγαριών. Οι πνευματικές δυναμοκυψέλες μερικές φορές χρησιμοποιούνται εκεί όπου η ουσιαστική

ασφάλεια και η υγιεινή είναι επιθυμητές, ενώ οι υδραυλικές δυναμοκυψέλες απαντώνται σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις καθώς δεν απαιτούν παροχή ρεύματος. Οι δυναμοκυψέλες με μηκυνσιόμετρα (strain gauges) προσφέρουν ακρίβεια εντός της κλίμακας 0.03% έως 0.25% και είναι κατάλληλες για όλες σχεδόν τις βιομηχανικές εφαρμογές.

Σε εφαρμογές που δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, όπως η διαχείριση ακατέργαστων υλικών και το ζύγισμα φορτηγών, οι μηχανικές ζυγαριές με πλατφόρμες χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμη. Ωστόσο, και σε αυτές τις εφαρμογές οι δυνάμεις που μεταφέρονται από μηχανικούς μοχλούς συχνά ανιχνεύονται από δυναμοκυψέλες λόγω της έμφυτης συμβατότητάς τους με την ψηφιακή οργανολογία.

### 2.1.2 Αρχή λειτουργίας δυναμοκυψέλης

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναλυθεί η αρχή λειτουργίας του μηκυνσιόμετρου (strain gauge), ώστε να γίνει κατανοητός ο σπουδαίος ρόλος του σαν στοιχείο της λειτουργίας της δυναμοκυψέλης. Είναι γνωστό ότι όταν εξωτερικές δυνάμεις εφαρμόζονται σε ένα σταθερό αντικείμενο το αποτέλεσμα είναι η τάση και η παραμόρφωση. Η τάση ορίζεται ως η εσωτερική δύναμη αντίστασης ενός σώματος και η παραμόρφωση ως μετατόπιση που προκαλείται.

Το μηκυνσιόμετρο (strain gauge) [21], [22] είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέσα στις τεχνικές ηλεκτρικών μετρήσεων που εφαρμόζονται στη μέτρηση μηχανικών ιδιοτήτων. Όπως δηλώνει το όνομά του χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της μήκυνσης και άρα της παραμόρφωσης. Ως τεχνικός όρος η τάση διακρίνεται σε εφελκυστική και θλιπτική με θετικό ή αρνητικό πρόσημο αντίστοιχα. Έτσι, το μηκυνσιόμετρο (strain gauge) μπορεί να αποκριθεί και σε εφελκυσμό και σε θλίψη. Γενικά, το μηκυνσιόμετρο (strain gauge) είναι ένας αισθητήρας του οποίου η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται με την εφαρμοζόμενη δύναμη. Δηλαδή, μετατρέπει δύναμη, πίεση, τάση, βάρος κλπ. σε αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία μετά μπορεί να μετρηθεί μέσω της μεταβολής της έντασης του ρεύματος που τη διαρρέει. Η μεταβολή στην ένταση του ρεύματος μπορεί να μετρηθεί και εξαρτάται από το εκάστοτε φορτίο που εφαρμόζεται.

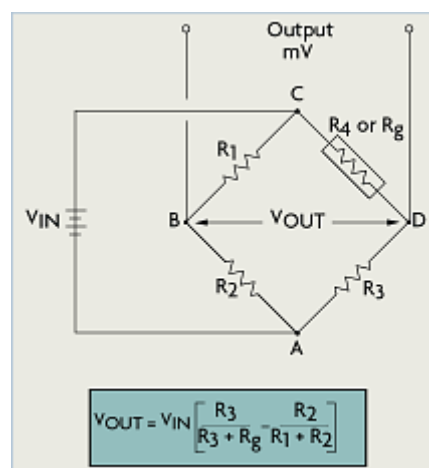
Η παραμόρφωση ενός σώματος γενικά προκαλείται από μια εσωτερική ή εξωτερική επίδραση. Δηλαδή, μπορεί να προκληθεί από δυνάμεις, πιέσεις, ροπές, θερμότητα, δομικές αλλαγές του υλικού και άλλα παρόμοια. Όταν κατάλληλες συνθήκες εκπληρώνονται, η τιμή της μεταβαλλόμενης ποσότητας μπορεί να προκύψει από τη μετρούμενη τιμή της παραμόρφωσης. Σε πειραματικές αναλύσεις εντατικών καταστάσεων αυτό ισχύει κατά κόρον. Στην ανάλυση εντατικών καταστάσεων σε πειράματα χρησιμοποιείται η τιμή παραμόρφωσης που μετράται στην επιφάνεια ενός δοκιμίου ή άλλου δομικού φορέα για τον προσδιορισμό, τόσο της αναπτυσσόμενης τάσης του υλικού όσο της ασφάλειας και της αντοχής του. Ειδικοί μετατροπείς μπορούν να σχεδιαστούν για τη μέτρηση δυνάμεων και άλλων παραγόμενων ποσοτήτων όπως ροπών, πιέσεων, επιταχύνσεων, μετατοπίσεων, ταλαντώσεων και άλλων. Ο μετατροπέας γενικά περιέχει ένα ευαίσθητο διάφραγμα πίεσης με ενσωματωμένα μηκυνσιόμετρα.

Το πρώτο μεταλλικό καλωδιακού τύπου μηκυνσιόμετρο αναπτύχθηκε το 1938. Ειδικότερα, το λεπτού ελάσματος μεταλλικό μηκυνσιόμετρο (strain gauge), που είναι ενσωματωμένο στη δυναμοκυψέλη, συνίσταται από ένα πλέγμα νηματοειδών καλωδίων (ηλεκτρική αντίσταση) πάχους 0.025mm περίπου. Αυτό το πλέγμα ενσωματώνεται απευθείας σε μια παραμορφώσιμη επιφάνεια μέσω ενός λεπτού στρώματος συγκολλητικής ρητίνης. Όταν εφαρμόζεται ένα φορτίο στην ανωτέρω επιφάνεια, η προκύπτουσα μεταβολή του μήκους της επιφάνειας σχετίζεται με την αντίσταση και η αντίστοιχη τάση μετράται υπό μορφή ηλεκτρικής αντίστασης του λεπτού ελάσματος καλωδίων, η οποία μεταβάλλεται

γραμμικά με την παραμόρφωση. Το διάφραγμα του λεπτού ελάσματος και το ενσωματωμένο συγκολλητικό μέσο πρέπει να συνεργάζονται για τη μεταβίβαση της παραμόρφωσης, ενώ το συγκολλητικό πρέπει επίσης να χρησιμεύει ως ηλεκτρικό μονωτικό μεταξύ του πλέγματος λεπτού ελάσματος και της επιφάνειας.

Όταν επιλέγεται ένα μηκυνσιόμετρο (strain gauge) θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσής του, αλλά επίσης η σταθερότητά του και η θερμοκρασιακή του ευαισθησία. Τα μηκυνσιόμετρα συνήθως κατασκευάζονται από υψηλής αντοχής κράματα χάλυβα (επιμεταλλωμένα με νικέλιο για προστασία), σκληρυμένους ανοξείδωτους χάλυβες, θερμικά επεξεργασμένα κράματα αλουμινίου ή κράματα βηρυλλίου χαλκού. Δυστυχώς, τα πιο επιθυμητά υλικά κατασκευής των μηκυνσιόμετρων (strain gauges) είναι ταυτόχρονα ευαίσθητα σε θερμοκρασιακές μεταβολές και τείνουν να αλλάζουν την αντίστασή τους καθώς παλαιώνουν. Για δοκιμές μικρής διάρκειας η παράμετρος της θερμοκρασίας δεν έχει σημαντική επιρροή, αλλά για συνεχείς βιομηχανικές μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία και η αντιστάθμιση drift.

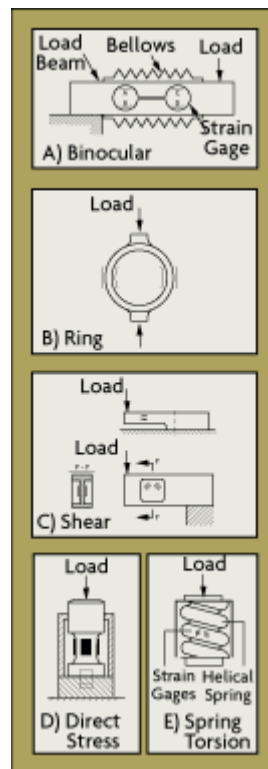
Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης με μια ενσωματωμένη αντίσταση μηκυνσιόμετρου (strain gauge), πρέπει η τελευταία να συνδέεται σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα κατάλληλο για μέτρηση των πολύ μικρών μεταβολών της ηλεκτρικής αντίστασης που αντιστοιχούν σε μεταβολές της παραμόρφωσης. Ένα τέτοιο κύκλωμα αποτελεί η γέφυρα Wheatstone, η οποία είναι ένα διαιρούμενο κύκλωμα γέφυρας που απαρτίζεται συνήθως από τέσσερις αντιστάσεις (εικόνα 24) και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση στατικών ή δυναμικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone εκφράζεται σε millivolts εξόδου ανά volt εισόδου (mV/V). Ο αριθμός των ενεργών strain gauges που θα πρέπει να είναι συνδεδεμένα με τη γέφυρα εξαρτάται από την εφαρμογή. Για παράδειγμα, θα είναι χρήσιμο να συνδεθούν μηκυνσιόμετρα (strain gauges) που να είναι σε απέναντι πλευρές της δοκού, η μία σε θλίψη και η άλλη σε εφελκυσμό, διότι τότε διπλασιάζεται η έξοδος της γέφυρας για ίδια παραμόρφωση. Η γέφυρα Wheatstone είναι κατάλληλη για θερμοκρασιακή αντιστάθμιση. Σε γέφυρες όπου όλοι οι κλάδοι συνδέονται σε μηκυνσιόμετρα (strain gauges), η θερμοκρασιακή αντιστάθμιση επιτυγχάνεται αυτόματα, καθώς η αλλαγή στην αντίσταση λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών θα είναι η ίδια για όλους τους κλάδους της γέφυρας.



Εικόνα 24. Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone.

Οι τύποι των δυναμοκυψελών διακρίνονται από τον τρόπο που ανιχνεύουν το βάρος, οπότε έχουμε καμπτομένης δοκού, δοκού διάτμησης, δοκού θλίψεως, δοκού εφελκυσμού, κολώνας, κάνιστρου, ελικοειδής κλπ. (εικόνα 25). Οι δυναμοκυψέλες που απαντώνται πιο συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές ζυγίσσεως είναι οι καμπτομένης δοκού και δοκού

διάτμησης. Στο πείραμα της παρούσας εργασίας ο τύπος της δυναμοκυψέλης που χρησιμοποιείται είναι καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης και ανήκει στην κατηγορία των ηλεκτρικών δυναμοκυψελών.



Εικόνα 25. Τύποι δυναμοκυψελών.

### 2.1.3 Δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού

Η δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού [22], [23] είναι η πιο συνηθισμένη σε εφαρμογές, λόγω της απλότητάς της και του σχετικά χαμηλού κόστους. Αποτελείται από μια ευθεία δοκό προσαρτημένη σε μια βάση στο ένα της άκρο ενώ το άλλο άκρο της μπορεί να φορτίζεται. Το σχήμα της μπορεί να είναι αυτό μιας προβόλου δοκού με εσωτερική διαμόρφωση «διόπτρας» ή ενός «δακτυλιδιού» (εικόνα 25 A, B). Τα μηκυνσιόμετρα (strain gauges) ενσωματώνονται άνωθεν και κάτωθεν της δοκού για τη μέτρηση δυνάμεων εφελκυσμού και θλίψης. Επειδή τα μηκυνσιόμετρα (strain gauges) είναι ευπαθή σε φθορές, είναι συνήθως καλυμμένα με ένα ελαστικό προστατευτικό στρώμα. Η δοκός συνήθως κατασκευάζεται από ένα τραχύ κράμα χάλυβα και προστατεύεται με επικάλυψη νικελίου (εικόνα 26).



Εικόνα 26. Δοκός κάμψεως δυναμοκυψέλης

Η αρχή λειτουργίας αυτής της δυναμοκυψέλης στηρίζεται στις παραμορφώσεις λόγω κάμψης των μηκυνσιομέτρων (strain gauges), τα οποία μεταβάλλουν τις ηλεκτρικές τους αντιστάσεις. Η κάμψη ως αρχή μετρήσεως παρέχει εξαιρετική γραμμικότητα. Οι καμπτομένες δοκοί παρέχουν υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης με μεγάλες εκτροπές για σχετικά μικρές δυνάμεις, συγκρινόμενες με παραμορφώσεις άλλων μετρητικών τεχνικών, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για μικρού όγκου δυναμοκυψέλες. Επιπλέον, στην περίπτωση μιας καμπτομένης δοκού με συμμετρική διατομή ως προς τον άξονα κάμψεως, υπάρχουν πάντοτε δυο επιφάνειες που υπόκεινται σε ίσες τάσεις με αντίθετο πρόσημο. Αυτή η δοκός αποτελεί ένα εύκολο μέσο για την ανάπτυξη ενός πλήρους κυκλώματος γέφυρας Wheatstone με strain gauges, αλλά και για την επίτευξη εύκολης θερμοκρασιακής αντιστάθμισης.

Στην ιατρική οργανολογία, ρομποτική ή σε παρόμοιες εφαρμογές χαμηλού φορτίου διατίθενται μικρότεροι αισθητήρες μικρής δοκού για μέτρηση φορτίων μέχρι 18 kg περίπου. Για φορτία μέχρι 230 gr η δοκός κατασκευάζεται από κράμα βηρυλλίου-χαλκού, ενώ για μεγαλύτερα φορτία χρησιμοποιείται ανοξείδωτο ατσάλι. Σε αυτές τις διαμορφώσεις τα strain gauges συνήθως προστατεύονται με ένα στρώμα επικάλυψης από ουρεθάνη.

## 2.2 Ταχύμετρο

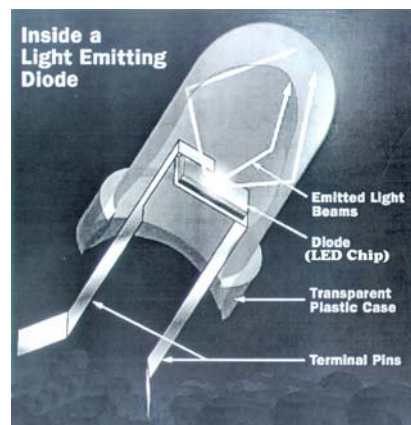
### 2.2.1 Αρχή λειτουργίας ταχύμετρου

Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιείται ένα οπτικό ταχύμετρο κόκκινης φωτοεκπομπού διόδου LED (Light Emitting Diode) [24], προκειμένου να μετρηθεί η ταχύτητα περιστροφής του εκκεντροφόρου άξονα της περισταλτικής αντλίας, ο οποίος είναι συζευγμένος μέσω αρθρωτού συνδέσμου με τον άξονα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα. Σε ένα σημείο του περιστρεφόμενου άξονα της αντλίας τοποθετείται μια στενή αντανακλαστική ταινία η οποία αντανακλά την εκπεμπόμενη δέσμη φωτός του ταχύμετρου, κάθε φορά που ο άξονας ολοκληρώνει μια πλήρη περιστροφή. Η ανακλώμενη δέσμη φωτός λαμβάνεται από ένα αισθητήριο του ταχύμετρου, το οποίο βρίσκεται στην κεφαλή του ακριβώς κάτω από το σημείο εκπομπής της δέσμης φωτός. Η λήψη της ανακλώμενης δέσμης φωτός δημιουργεί έναν τετραγωνικό παλμό στην τάση του εσωτερικού ηλεκτρονικού κυκλώματος του ταχύμετρου. Το εύρος του τετραγωνικού παλμού καθορίζεται από το χρόνο επιστροφής της εκπεμπόμενης δέσμης φωτός. Η χρονική περίοδος κάθε τετραγωνικού παλμού της τάσης αντιστοιχεί σε μια πλήρη περιστροφή του άξονα. Συνεπώς, το πλήθος των παραγόμενων τετραγωνικών παλμών της τάσης στη μονάδα του χρόνου αντιστοιχεί με το πλήθος των περιστροφών του άξονα στη μονάδα του χρόνου. Στην ένδειξη του ταχύμετρου λαμβάνεται ο αριθμός περιστροφών του άξονα ανά λεπτό.

Μια τυπική μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα της αντλίας γίνεται ως εξής. Προσεγγίζεται η οπτική κεφαλή του ταχύμετρου κοντά στον περιστρεφόμενο άξονα και απέναντι ακριβώς από την αντανακλαστική ταινία. Κατόπιν, πατώντας και κρατώντας πατημένο το κουμπί εκπομπής της κόκκινης LED αναβοσβήνει μια ένδειξη στην οθόνη του ταχύμετρου με ρυθμό ίδιο με τη συχνότητα περιστροφής του άξονα. Ουσιαστικά γίνεται εκπομπή της φωτοεκπομπού διόδου LED προς το σημείο του άξονα που υπάρχει ο ανακλαστήρας και όταν υποστεί ανάκλαση, επιστρέφει πίσω προς την κεφαλή του ταχύμετρου όπου ανιχνεύεται και κατ' επέκταση ενεργοποιείται η ένδειξη στην οθόνη του ταχύμετρου. Τότε εμφανίζεται και η ψηφιακή ένδειξη με τον αριθμό περιστροφών του άξονα ανά λεπτό.

## 2.2.2 Φωτοεκπομπός δίοδος (LED)

Η φωτοεκπομπός δίοδος LED [25] προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Light Emitting Diode και πρόκειται για μια ηλεκτρονική δίοδο που φωτοβολεί όταν συνδέεται σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα και ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται μέσα από αυτή. Η φωτεινή πηγή των LED είναι ένας ημιαγωγός που από ηλεκτρική άποψη συμπεριφέρεται σαν δίοδος, δηλαδή άγει ηλεκτρικό ρεύμα προς τη μία κατεύθυνση μόνο και όχι προς την άλλη. Η ιδιότητα της μονόδρομης αγωγής ρεύματος δεν είναι κάτι που επιδιώχτηκε για τις φωτεινές πηγές, απλώς προέκυψε σαν παραπροϊόν των φυσικών ιδιοτήτων αυτού του συγκεκριμένου υλικού παραγωγής φωτός. Σε αντίθεση με τις πηγές φωτός οικιακής χρήσης, οι LED λειτουργούν με χαμηλή τάση τροφοδοσίας, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και εκπέμπουν το φως μέσα από στερεό υλικό (αντίθετα από το αέριο των λυχνιών φθορισμού). Χρησιμοποιούνται συχνά σε ηλεκτρονικές εφαρμογές για να δηλώσουν πότε ένα κύκλωμα είναι κλειστό ή ανοιχτό. Μια διαυγής ή συνήθως χρωματιστή εποξική θήκη περικλείει το εσωτερικό της LED που είναι ένα ημιαγωγικό τσιπ (εικόνα 27).

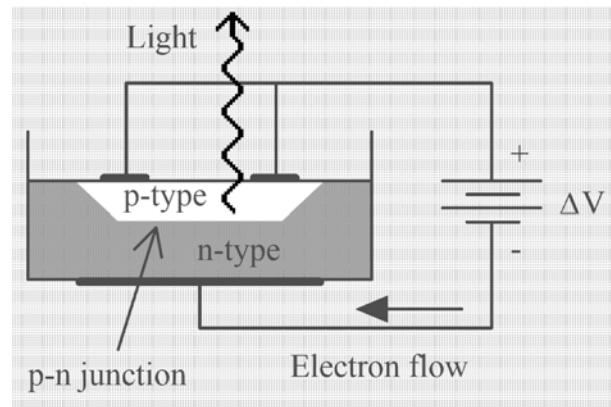


Εικόνα 27. Εσωτερική δομή LED.

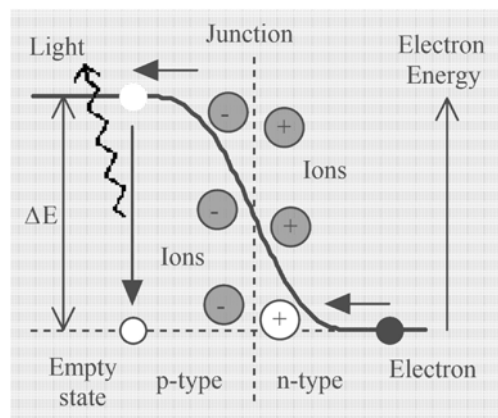
Τα δυο καλώδια (terminal pins) που εκτείνονται κάτω από την εποξική θήκη, όπως φαίνεται στην εικόνα 27, υποδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο η LED θα πρέπει να συνδεθεί σε ένα κύκλωμα. Αυτό σημαίνει ότι οι LED ανάβουν μόνον όταν συνδεθούν με τη σωστή πολικότητα, και όχι ανάποδα, οπότε τότε παρέχεται ενέργεια και η LED διαρρέεται από ρεύμα παράγοντας φως. Η πολικότητα μιας LED αναγνωρίζεται από το μήκος των ακροδεκτών της, όπου ο μακρύτερος ακροδέκτης πρέπει να είναι σε θετική τάση ως προς τον κοντύτερο. Ο αρνητικός ακροδέκτης μιας LED αναγνωρίζεται με δυο τρόπους. Ο πρώτος είναι η κατακόρυφη πλευρική τομή της εποξικής θήκης και ο δεύτερος είναι, όπως ειπώθηκε, το διαφορετικό μήκος των δύο ακροδεκτών της LED. Ο αρνητικός ακροδέκτης θα πρέπει να συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας. Η LED λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές τάσεις μεταξύ 1 και 4 Volts και καταναλώνει ρεύμα μεταξύ 10 και 40 mA περίπου. Τάσεις και ρεύματα αρκετά πάνω από αυτές τις τιμές μπορούν να λιώσουν το τσιπ της LED.

Αντίθετα με τις ηλεκτρικές λάμπες φωτισμού, η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε φωτεινή λαμβάνει χώρα σε μια κοινή επιφάνεια μεταξύ δύο διαφορετικών ημιαγωγικών υλικών που ονομάζεται ένωση (junction) p – n (εικόνα 28). Η ονομασία αυτή προέρχεται από τη δομή των δύο ημιαγωγικών υλικών, όπου ο τύπος n παρέχει περίσσεια κινούμενων ηλεκτρονίων, ενώ ο τύπος p έχει μια διαφορετική χημική σύνθεση που χαρακτηρίζεται από έλλειμμα κινούμενων ηλεκτρονίων. Η ένωση (junction) δρα ως ένα διαχωριστικό όριο στη ροή των ηλεκτρονίων μεταξύ των περιοχών p και n. Με την απουσία μεγάλης σχετικά

διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού (τάσης) στους ακροδέκτες της LED, η ένωση (junction) δεν επιτρέπει τη ροή των ηλεκτρονίων. Αν μερικά ηλεκτρόνια διαρρεύσουν διαμέσου της κοινής επιφάνειας από την n στην p περιοχή, τότε στην περιοχή p παρατηρείται μια μικρή περίσσεια αρνητικά φορτισμένων ιόντων, ενώ στην περιοχή n μια μικρή περίσσεια θετικά φορτισμένων ιόντων. Η καμπύλη της εικόνας 29 δείχνει την ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων, τόσο στις δυο περιοχές p, n, όσο και στην περιοχή της ένωσης (junction).



Εικόνα 28. Αρχή λειτουργίας LED.



Εικόνα 29. Αρχή λειτουργίας ημιαγωγικού τσιπ της LED.

Τα κινούμενα ηλεκτρόνια της περιοχής p στην ένωση έχουν ενέργεια κατά  $\Delta E$  μεγαλύτερη από αυτή που είχαν όταν ήταν στην περιοχή n (ενέργεια αναφοράς). Όταν μια αρκετά μεγάλη εξωτερική διαφορά δυναμικού  $\Delta V$  αναπτυχθεί στην ένωση με την κατάλληλη πολικότητα, κινούμενα ηλεκτρόνια από την περιοχή n πλησιάζουν εκείνο το ενεργειακό κατώφλι που τα αναγκάζει να οδηγηθούν μέσω της κοινής επιφάνειας στην p περιοχή. Μόλις τα ηλεκτρόνια φθάσουν στην περιοχή p αμέσως έλκονται από τα θετικά φορτία λόγω των αμοιβαίων ελκτικών δυνάμεων Coulomb μεταξύ αντίθετων ηλεκτρικών φορτίων. Όταν ένα ηλεκτρόνιο κινείται αρκετά κοντά σε ένα θετικό φορτίο στην περιοχή p, τα δυο φορτία αλληλοεξουδετερώνονται και εκλύεται ενέργεια ίση με  $\Delta E$ . Αυτή η ενέργεια τότε μετατρέπεται σε φωτεινή και εκπέμπεται υπό μορφή φωτονίων. Δηλαδή, κάθε φορά που ένα ηλεκτρόνιο αλληλοεξουδετερώνεται με ένα θετικό φορτίο, ενέργεια ηλεκτρικού δυναμικού μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Για κάθε αλληλοεξουδετέρωση ενός αρνητικού με ένα θετικό φορτίο, ένα κβάντο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας εκπέμπεται υπό μορφή

φωτονίου με χαρακτηριστική συχνότητα αυτή του ημιαγωγίμου υλικού. Απαραίτητες προϋποθέσεις γι' αυτή την εκπομπή είναι να μην απορροφηθεί το ποσό αυτό της ενέργειας ΔΕ από ανταγωνιστικές διαδικασίες που συμβαίνουν μέσα στη δομή του υλικού και προφανώς το πάχος της περιοχής p να είναι κατάλληλα λεπτό ώστε να μπορεί το φως να αποδράσει.

Αν εξωτερική τάση εφαρμοστεί στη LED με αντίθετη πολικότητα δε θα υπάρξει καμία ροή ηλεκτρονίων διότι τα ηλεκτρόνια από την περιοχή n θα οδηγηθούν μακριά από την περιοχή της ένωσης χωρίς να τη διασχίσουν. Αυτή η μονόδρομη ροή ηλεκτρονίων οδηγεί σε μια άλλη σημαντική χρήση των ημιαγωγών p – n ως ρυθμιστές μιας κατεύθυνσης του ηλεκτρικού ρεύματος, όπου τότε οι ημιαγωγοί αυτοί ονομάζονται απλά δίοδοι.

Ρυθμίζοντας το ποσό της ενέργειας ΔΕ μέσω κατάλληλης επιλογής των ημιαγωγίμων υλικών μπορεί να επιτευχθεί η εκπομπή φωτός διαφόρων χρωμάτων. Αυτό συμβαίνει επειδή το ύψος του ενεργειακού κατωφλίου ΔΕ εξαρτάται από το υλικό. Οι κόκκινες LED (όπως και τα κόκκινα laser) κατασκευάζονται από αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs) με πρόσμιξη μικρής περιεκτικότητας μη καθαρού φωσφόρου.

### 2.3 Ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης κινητήρα (speed controller)

Ο σκοπός ενός ηλεκτρονικού συστήματος οδήγησης κινητήρα [26] είναι να λαμβάνει ένα σήμα που αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη ταχύτητα και να οδηγεί τον κινητήρα σε αυτή την ταχύτητα. Οι κινητήρες παρέχονται σε διάφορες μορφές και συνεπώς τα συστήματα οδήγησης που εξαρτώνται από αυτές θα ποικίλουν. Το σύστημα οδήγησης μπορεί να μετρά ή να μη μετρά την ταχύτητα του κινητήρα. Αν μετρά την ταχύτητα του κινητήρα τότε ονομάζεται σύστημα οδήγησης με ανάδραση (Feedback Speed Controller) ή σύστημα οδήγησης κλειστού κυκλώματος (Closed Loop Speed Controller). Αν δε μετρά την ταχύτητα του κινητήρα τότε ονομάζεται σύστημα οδήγησης ανοικτού κυκλώματος (Open Loop Speed Controller). Το σύστημα οδήγησης του κινητήρα με ανάδραση είναι καλύτερο, αλλά πιο πολύπλοκο. Το ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης που χρησιμοποιείται στο πείραμα αυτής της εργασίας είναι ανοιχτού κυκλώματος.

Η ταχύτητα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι κατευθείαν ανάλογη με την τάση τροφοδοσίας, οπότε αν μειωθεί η τάση τροφοδοσίας για παράδειγμα από τα 180 Volts στα 90 Volts ο κινητήρας θα περιστρέφεται με τη μισή ταχύτητα. Το ερώτημα που προκύπτει είναι πώς αυτό μπορεί να επιτευχθεί όταν η τροφοδοσία είναι σταθεροποιημένη στα 180 Volts. Το σύστημα οδήγησης λειτουργεί μεταβάλλοντας τη μέση τάση που στέλνει στον κινητήρα. Αυτό θα μπορούσε να το πετύχει απλώς ρυθμίζοντας την τάση που στέλνει στον κινητήρα, αλλά αυτό θα προκαλούσε σημαντική απώλεια ισχύος στο κύκλωμα ελέγχου. Ένας καλύτερος τρόπος είναι να διακόπτει και να επαναφέρει πολύ γρήγορα την τροφοδοσία στον κινητήρα. Αν οι διακοπές είναι αρκετά γρήγορες ο κινητήρας δεν θα τις αντιλαμβάνεται αλλά θα αντιλαμβάνεται μόνο το μέσο όρο της επίδρασης της τάσης στα άκρα του.

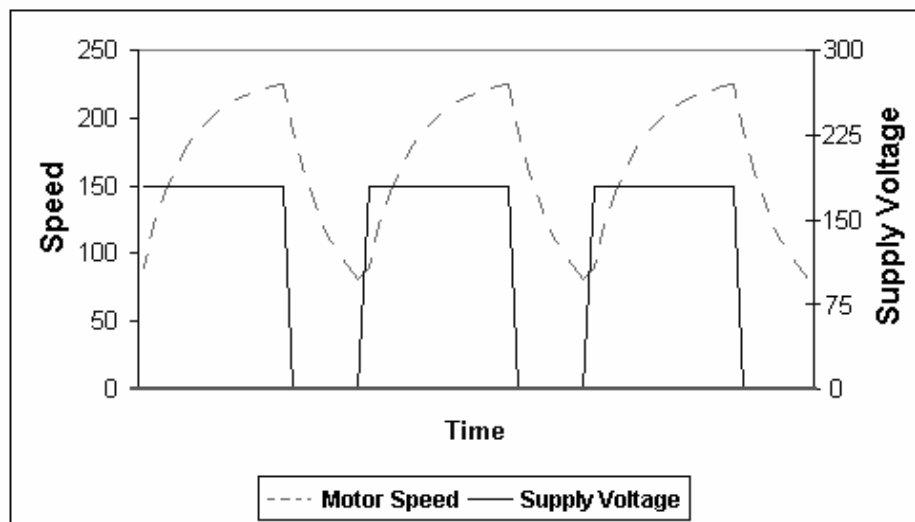
Ένα παράδειγμα που θα βοηθήσει στην κατανόηση αυτού του μηχανισμού είναι το εξής. Έστω μια λάμπα πυρακτώσεως με έναν διακόπτη να την ανοιγοκλείνει. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός η λάμπα ανάβει σε πλήρη ισχύ έστω 100 Watts. Όταν όμως είναι ανοιχτός αυτή σβήνει (0 Watts). Αν ο διακόπτης κλείσει μόνο για ένα κλάσμα του δευτερολέπτου και ανοίξει για την ίδια μικρή χρονική στιγμή, το νήμα πυρακτώσεως δε διαθέτει επαρκή χρόνο ούτε να σβήσει ούτε να ανάψει πλήρως και θα παραμένει πυρακτωμένο με μέση ισχύ 50 Watts. Αυτή είναι ουσιαστικά η αρχή λειτουργίας των dimmer των φώτων και σε αυτή την αρχή βασίζεται και η λειτουργία των συστημάτων οδήγησης κινητήρων. Αναφορικά με το παραπάνω παράδειγμα του κινητήρα από τα 180 Volts στα 90 Volts, όταν ο διακόπτης είναι κλειστός τότε ο κινητήρας αντιλαμβάνεται τάση 180 Volts ενώ



όταν είναι ανοιχτός αντιλαμβάνεται τάση 0 Volts. Αν ο διακόπτης τροφοδοσίας του κινητήρα παραμείνει για ένα χρονικό διάστημα κλειστός και μετά για το ίδιο χρονικό διάστημα ανοιχτός, ο κινητήρας θα αντιληφθεί μια μέση τιμή τάσης ίση με 90 Volts και θα κινηθεί συνεπώς με μικρότερη ταχύτητα. Όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα όπου η μέγιστη τάση εφαρμόζεται στον κινητήρα σε σχέση με το χρονικό διάστημα όπου εφαρμόζεται η μηδενική τάση, τόσο η μέση ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται.

Η ανωτέρω λειτουργία της διακοπής και επαναφοράς της τάσης πραγματοποιείται από τρανζίστορ ισχύος φαινομένου πεδίου από ημιαγωγό μεταλλικού οξειδίου (MOSFET: Metal – Oxide – Semiconductor Field Effect Transistor). Το MOSFET είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που μπορεί να ανοιγοκλείνει υψηλά ρεύματα μέσω ελέγχου σημάτων χαμηλής τάσης. Ο χρόνος που απαιτείται από έναν κινητήρα για να αυξομειώσει ταχύτητα με την παραπάνω μέθοδο εξαρτάται από την αδράνεια του ρότορα (ουσιαστικά από το βάρος του), την τριβή κατά την περιστροφή και από το φορτίο στρέψης που υπάρχει.

Το γράφημα της εικόνας 30 δείχνει την ταχύτητα ενός κινητήρα που ανοιγοκλείνεται αρκετά αργά μέσω συστήματος οδήγησης. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η μέση ταχύτητα του κινητήρα είναι περίπου 150, μολονότι μεταβάλλεται πολύ λίγο. Αν η τάση τροφοδοσίας ανοιγοκλείνει αρκετά γρήγορα, ο κινητήρας δεν θα προλαβαίνει να αλλάξει την ταχύτητά του πολύ, οπότε αυτή θα παραμένει αρκετά σταθερή. Αυτή είναι η αρχή της λειτουργίας του συστήματος οδήγησης με διακοπές στην τροφοδοσία. Η μέθοδος που ρυθμίζει την ταχύτητα του κινητήρα ονομάζεται διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM – Pulse Width Modulation) και αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 30. Γραφική παράσταση της ταχύτητας και της τάσης τροφοδοσίας ενός κινητήρα συναρτήσει του χρόνου.

Στην κλασική μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) [27], η ισχύς λειτουργίας παρέχεται και αποκόπτεται διαμορφώνοντας το ρεύμα που διέρχεται στον κινητήρα. Ο λόγος του χρονικού διαστήματος που το κύκλωμα είναι κλειστό (ο κινητήρας τροφοδοτείται με ισχύ) προς το χρονικό διάστημα που το κύκλωμα είναι ανοικτό (ο κινητήρας δεν τροφοδοτείται με ισχύ) καθορίζει τελικά την ταχύτητα του κινητήρα. Όταν γίνεται έλεγχος με PWM πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο κινητήρας είναι ουσιαστικά ένα πηνίο μεγάλης επαγωγής που λειτουργεί με ρεύματα χαμηλών συχνοτήτων. Δηλαδή όταν ο κινητήρας δέχεται ενέργεια υψηλής συχνότητας δε λειτουργεί σωστά. Συνεπώς απαιτούνται λογικά χαμηλές συχνότητες οπότε μπορεί η μέθοδος PWM να εφαρμοστεί. Οι χαμηλότερες

συχνότητες είναι γενικά προτιμότερες από τις υψηλότερες συχνότητες, αλλά η μέθοδος PWM σταματά να είναι αποτελεσματική σε πάρα πολύ χαμηλές συχνότητες. Η ιδέα ότι η μέθοδος χαμηλών συχνοτήτων PWM προτιμάται περισσότερο προκύπτει από το γεγονός ότι το χρονικό διάστημα που το κύκλωμα παραμένει κλειστό πρέπει να είναι αρκετά ευρύ, ώστε ο κινητήρας να προλάβει να τραβήξει το κατάλληλο ρεύμα (λαμβανομένης υπόψη της ύπαρξης ρεύματος αντίθετης φοράς λόγω επαγωγής του κινητήρα).

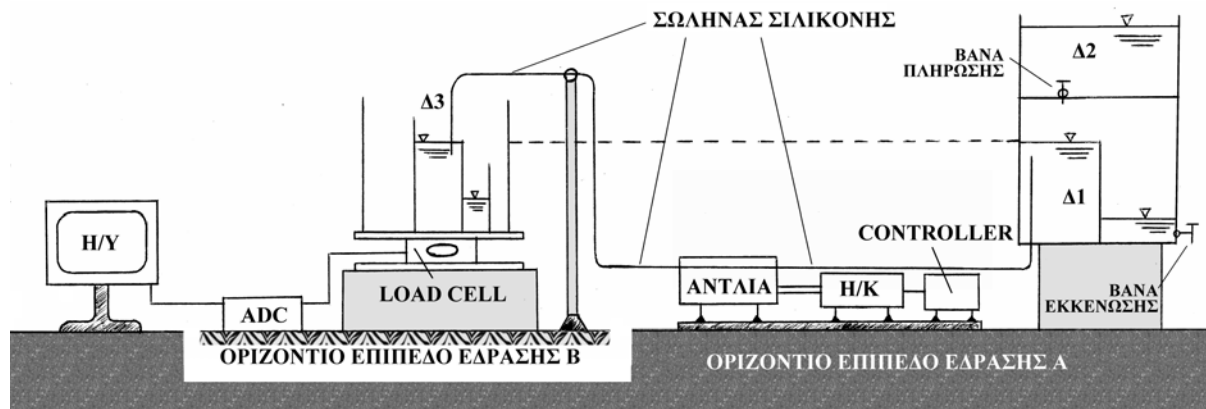
Η μέθοδος υψηλών συχνοτήτων PWM μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά αν ένας μεγάλος πυκνωτής συνδεθεί παράλληλα με τον κινητήρα ή βραχυκυκλωθεί ο κινητήρας όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό (π.χ. power/brake PWM). Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι οι στενοί παλμοί δεν θα επιτρέψουν τη διέλευση αρκετού ρεύματος πριν το άνοιγμα του κυκλώματος. Με το άνοιγμα του κυκλώματος επαγωγικό ρεύμα αναπτύσσεται, το οποίο μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω κατάλληλων διόδων fly – back. Ο πυκνωτής διατηρεί τον παλμό παρέχοντας ένα μεγαλύτερης διάρκειας ρεύμα, αλλά με χαμηλότερη ένταση διαμέσου του κινητήρα, όταν η οδήγηση έχει διακοπεί. Έτσι δεν αναπτύσσεται επαγωγικό ρεύμα εφόσον το ρεύμα του πυκνωτή παρέχεται. Γνωρίζοντας τη χαμηλή συχνότητα (roll – off) του κινητήρα μπορεί να καθοριστεί μια βέλτιστη συχνότητα για τη λειτουργία της PWM.

## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 3

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη δοκιμής της πρωτότυπης δίχρονης περισταλτικής αντλίας, όπως απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 31, αποτελείται από μια δεξαμενή αναρρόφησης Δ1, μια τροφοδοτική δεξαμενή αυτής Δ2, μια δεξαμενή κατάθλιψης Δ3, μία δυναμοκυψέλη (Load Cell) έχοντας θέση ζυγού ακριβείας, έναν αναλογικό – ψηφιακό μετατροπέα (ADC), έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y), μία γραμμική δίχρονη περισταλτική αντλία δύο εμβόλων και δύο βαλβίδων ή μία γραμμική περισταλτική αντλία ενός εμβόλου και δύο βαλβίδων, ένα σωλήνα σιλικόνης, έναν αρθρωτό σύνδεσμο, έναν κινητήρα, ένα μειωτήρα στροφών και ένα ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης του κινητήρα (controller). Η στήριξη της εκάστοτε αντλίας και του συστήματος controller – κινητήρα – μειωτήρα γίνεται πάνω σε μια μεταλλική βάση από σκληρό αλουμίνιο. Η στήριξη του σωλήνα σιλικόνης προς τη δεξαμενή κατάθλιψης Δ3 επιτυγχάνεται με ένα μεταλλικό στέλεχος ρυθμιζόμενου ύψους. Τέλος, χρησιμοποιούνται κατάλληλες ξύλινες βάσεις για τη στήριξη των δεξαμενών, με τις οποίες μπορεί να ρυθμίζεται το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού των δεξαμενών. Για τη μέτρηση των στροφών του κινητήρα χρησιμοποιείται ένα ταχύμετρο, ενώ για τη μέτρηση τόσο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα, όσο και της θερμοκρασίας του ρευστού χρησιμοποιούνται κατάλληλα θερμομέτρα.

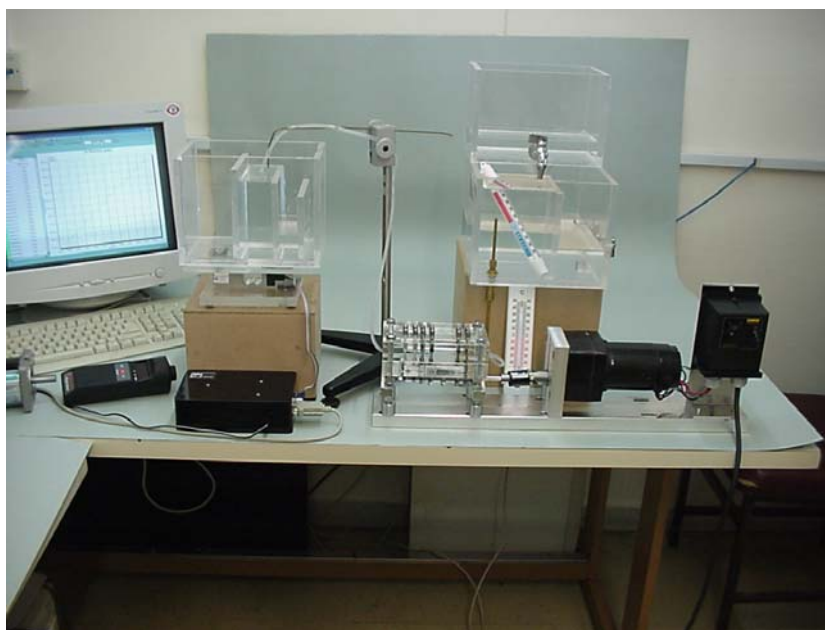


Εικόνα 31. Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης δοκιμής πρωτότυπης δίχρονης περισταλτικής αντλίας.

Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας του οργάνου της δυναμοκυψέλης σε πολύ μικρά φορτία δονήσεων, προερχόμενα τόσο από την περιστροφή του κινητήρα όσο και από τη λειτουργία της αντλίας, το σύστημα μέτρησης της δυναμοκυψέλης με τη δεξαμενή κατάθλιψης πρέπει να εδράζεται σε οριζόντιο επίπεδο απομονωμένο από εκείνο που εδράζονται τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης. Έτσι στο ένα οριζόντιο επίπεδο έδρασης Α θα πρέπει να υπάρχουν η δεξαμενή αναρρόφησης που φέρει την τροφοδοτική δεξαμενή, το σύστημα του ηλεκτροκινητήρα, η περισταλτική αντλία και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής. Στο δε άλλο οριζόντιο επίπεδο έδρασης Β, τοποθετούνται η δυναμοκυψέλη που φέρει τη δεξαμενή κατάθλιψης, ο αναλογικός – ψηφιακός μετατροπέας (ADC) που συνδέει τη δυναμοκυψέλη με τον Η/Υ, καθώς και το στέλεχος που φέρει το σωλήνα σιλικόνης και τον

κατευθύνει προς τη δεξαμενή κατάθλιψης (εικόνα 31). Επισημαίνεται εδώ ότι το σύστημα του Η/Υ και ο ADC θα πρέπει να βρίσκονται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους, ώστε να μην υπάρχει ηλεκτρομαγνητική επίδραση, λόγω εκπομπής θορύβου από τον Η/Υ στον ADC και συνεπώς να αποφεύγεται η αλλοίωση του μετρούμενου σήματος του ADC.

Όλες οι δεξαμενές του πειράματος, όπως απεικονίζονται στην εικόνα 32, είναι από plexiglas πάχους 10 mm. Η δεξαμενή αναρρόφησης, έχει εξωτερικές διαστάσεις βάσης 250x220 mm και ύψος 170 mm, είναι ανοιχτή στο πάνω μέρος και στηρίζεται πάνω σε μια ξύλινη βάση ύψους 200 mm. Η ξύλινη βάση ακουμπά πάνω στο οριζόντιο επίπεδο Α. Στο εσωτερικό της δεξαμενής αναρρόφησης υπάρχουν δύο χώροι σχηματιζόμενοι από δύο κατακόρυφα διαφράγματα από plexiglas πάχους 10 mm, όπου το ένα έχει διαστάσεις 110x140 mm και το δεύτερο 125x160 mm. Τα διαφράγματα αυτά ενώνονται έτσι ώστε να σχηματίζουν το χώρο αναρρόφησης με ύψος υπερχειλίσσης 140 mm, ενώ στον υπόλοιπο χώρο συγκεντρώνεται το ρευστό που υπερχειλίζει από το χώρο αναρρόφησης. Εντός του χώρου αναρρόφησης τοποθετείται ειδικό θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ρευστού. Στον πυθμένα του χώρου αναρρόφησης είναι προσαρτημένος διαμετρώς ένας ορειχάλκινος σωλήνας μήκους 210 mm, εσωτερικής διαμέτρου 3 mm και εξωτερικής 5 mm, με κατακόρυφο μήκος εντός του χώρου αναρρόφησης 135 mm. Το πάνω άκρο του σωλήνα βρίσκεται 5 mm κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού του χώρου αναρρόφησης ώστε να αναρροφά το ρευστό υπό ατμοσφαιρική πίεση. Σε ένα χαμηλό σημείο της δεξαμενής αναρρόφησης υπάρχει μια βάννα με την οποία μπορεί να αδειάζεται το ρευστό, που συσσωρεύεται λόγω της υπερχειλίσσης από το χώρο αναρρόφησης.



Εικόνα 32. Πειραματική διάταξη δοκιμής πρωτότυπης δίχρονης περισταλτικής αντλίας.

Η τροφοδοτική δεξαμενή, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 33, έχει εξωτερικές διαστάσεις βάσης 220x130 mm και ύψος 150 mm, είναι ανοιχτή επάνω και εδράζεται πάνω στη δεξαμενή αναρρόφησης. Στο κάτω μέρος της έχει μια βάννα μέσω της οποίας τροφοδοτεί το χώρο αναρρόφησης με ρευστό. Η τροφοδοσία του χώρου αναρρόφησης γίνεται με τέτοιο ρυθμό έγχυσης ρευστού (άνοιγμα βάννας), ώστε το ρευστό να υπερχειλίζει και να διατηρείται σταθερή η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού στο χώρο αναρρόφησης. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας το ρυθμό έγχυσης του ρευστού τροφοδοσίας στο χώρο αναρρόφησης να είναι λίγο μεγαλύτερος από το ρυθμό με τον οποίο αναρροφάται το ρευστό. Όταν η τροφοδοτική

δεξαμενή αδειάζει, πληρώνεται από κάποιο βοηθητικό δοχείο με ρευστό που προέρχεται από το χώρο υπερχειλίσης της δεξαμενής αναρρόφησης.



Εικόνα 33. Δεξαμενή αναρρόφησης και τροφοδοτική δεξαμενή.

Για την έδραση του ηλεκτροκινητήρα και της περισταλτικής αντλίας χρησιμοποιείται μια μεταλλική βάση από σκληρό αλουμίνιο σχήματος ανεστραμμένου ταυ, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 34. Ο μεν κινητήρας εδράζεται οριζόντια με τέσσερις κοχλιωτές συνδέσεις στη μία του πλάγια πλευρά έτσι ώστε να είναι πακτωμένος και να παραμένει ακλόνητος κατά τη λειτουργία του, η δε περισταλτική αντλία ακουμπά πάνω στη μεταλλική πλάκα μέσω τεσσάρων κατάλληλων ρυθμιζόμενων αποστατών κυλινδρικού σχήματος. Αυτοί οι αποστάτες φέρουν πυκνό σπείρωμα ώστε να μπορούν να μετακινούνται κατακόρυφα πάνω στις αντίστοιχες τέσσερις ντίζες – οδηγούς που συναρμολογούν την περισταλτική αντλία. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται στάθμιση του εκκεντροφόρου άξονα της αντλίας σε οριζόντια θέση, ώστε να βρίσκεται στην ίδια ευθεία με τον άξονα περιστροφής του κινητήρα και συνεπώς να μπορεί να συνδεθεί με αυτόν.



Εικόνα 34. Η μεταλλική βάση, ο ηλεκτροκινητήρας με το ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης, η περισταλτική αντλία και ο αρθρωτός σύνδεσμος.

Ο εκκεντροφόρος άξονας της αντλίας και ο άξονας του κινητήρα συνδέονται με έναν αρθρωτό σύνδεσμο, ο οποίος μπορεί να παραλαμβάνει τυχούσες γωνιακές αποκλίσεις του άξονα της αντλίας που δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν με την προηγούμενη ρύθμιση. Έτσι, ο αρθρωτός σύνδεσμος εκτός από το να μεταβιβάζει τη στρεπτική ροπή του κινητήρα στην αντλία, χρησιμοποιείται και για την αποφυγή κατακόρυφων ταλαντώσεων του περιστρεφόμενου άξονα της αντλίας. Στο μεταλλικό πλαίσιο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης του κινητήρα.

Ο σωλήνας της περισταλτικής αντλίας είναι από σκληρυμένη με υπεροξείδιο σιλικόνη της εταιρίας Degania Silicone, ενώ τα στοιχεία διαμέτρου του σωλήνα είναι 3x5 mm (εσωτερική x εξωτερική διάμετρος). Η μία άκρη του σωλήνα σιλικόνης προς την πλευρά εισόδου της αντλίας ενώνεται με το κάτω άκρο του ορειχάλκινου σωλήνα αναρρόφησης. Κατόπιν διέρχεται από το εσωτερικό της περισταλτικής αντλίας και καταλήγει στη δεξαμενή κατάθλιψης. Το συνολικό μήκος της σωλήνωσης από το σημείο αναρρόφησης ως το σημείο της κατάθλιψης είναι 1150 mm. Αναλυτικά έχουμε 210 mm το μήκος του ορειχάλκινου σωλήνα, 150 mm από το σημείο εξόδου του ορειχάλκινου σωλήνα αναρρόφησης μέχρι την είσοδο της περισταλτικής αντλίας, 160 mm από την είσοδο μέχρι την έξοδο της περισταλτικής αντλίας και 630 mm από την έξοδο της περισταλτικής αντλίας μέχρι το σημείο κατάθλιψης. Ο σωλήνας σιλικόνης στο σημείο κατάθλιψης πρέπει να βυθίζεται 5 mm κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού της δεξαμενής κατάθλιψης, ώστε να αποφεύγονται όσο το δυνατόν οι ταλαντώσεις της ελεύθερης επιφάνειας που θα προκαλούσε η εξ αποστάσεως έγχυση του ρευστού. Με αυτόν τον τρόπο δε γίνονται εσφαλμένες μετρήσεις που να προέρχονται από την αδρανειακή δύναμη ταλάντωσης του ρευστού της δεξαμενής κατάθλιψης, παρά μόνο μετράται η δύναμη βάρους της εγχυόμενης μάζας του ρευστού.

Η οδήγηση του σωλήνα σιλικόνης στη δεξαμενή κατάθλιψης, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 35, εξασφαλίζεται με ένα λεπτό οριζόντιο μεταλλικό ελατό βραχίονα, ο οποίος είναι πακτωμένος σε ένα φορέα, όπου μπορεί να κινείται με ένα σύστημα ατέρμονα – κορώνας κατακόρυφα σε ένα μεταλλικό στέλεχος ύψους 360 mm.



Εικόνα 35. Δεξαμενή κατάθλιψης.

Η δεξαμενή κατάθλιψης, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 35 είναι ανοιχτή στο πάνω μέρος της, έχει εξωτερικές διαστάσεις βάσης 220x140 mm και ύψος 170 mm και εδράζεται στην πλατφόρμα της δυναμοκυψέλης, η οποία με τη σειρά της εδράζεται επάνω σε μια ξύλινη βάση. Για τις ανάγκες του πειράματος διατίθενται τρεις τέτοιες ξύλινες βάσεις με αντίστοιχο ύψος 130 mm, 150 mm και 170 mm, ανάλογα με το ύψος υπερχειλίσης του

χώρου κατάθλιψης. Στο εσωτερικό της δεξαμενής κατάθλιψης υπάρχουν τρία διαφράγματα από plexiglas κοινού πλάτους (120mm) και πάχους (10 mm), με αντίστοιχα ύψη 140 mm, 120 mm και 100 mm. Αυτά τα διαφράγματα χωρίζουν τον εσωτερικό χώρο της δεξαμενής σε τέσσερις χώρους κατάθλιψης με τρία ύψη υπερχειίλισης 140 mm, 120 mm και 100 mm. Σε όλη τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων η ελεύθερη στάθμη της επιφάνειας του ρευστού του χώρου κατάθλιψης βρίσκεται στο ίδιο ύψος με την ελεύθερη στάθμη της επιφάνειας του ρευστού του χώρου αναρρόφησης, με επίπεδο αναφοράς τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας του τμήματος του σωλήνα σιλικόνης που βρίσκεται εντός της περισταλτικής αντλίας. Το ύψος αυτό καθορίζεται από τη δεξαμενή αναρρόφησης στα 240 mm και επιτυγχάνεται στη δεξαμενή κατάθλιψης χρησιμοποιώντας μια από τις τρεις ξύλινες βάσεις που αναφέρθηκαν πιο πριν ανάλογα με το ύψος της υπερχειίλισης.

Για να υπάρχει καλύτερη συνάφεια μεταξύ των επιφανειών της εξωτερικής βάσης της δεξαμενής κατάθλιψης και της πλατφόρμας της δυναμοκυψέλης, τοποθετείται ελαστικό κόμμι σε τέσσερα σημεία της βάσης της δεξαμενής κατάθλιψης. Επίσης, για απορρόφηση τυχών κραδασμών τοποθετείται ελαστικό κόμμι σε τέσσερα σημεία τόσο της βάσης της δυναμοκυψέλης όσο και της κάτω επιφάνειας της ξύλινης βάσης, η οποία έρχεται σε επαφή με το οριζόντιο επίπεδο Α.

Το θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα είναι τοποθετημένο πάνω στη συσκευή του ADC, για να προκύπτουν πιο άμεσες ενδείξεις των τοπικών θερμοκρασιακών μεταβολών, δεδομένου ότι αυτές επηρεάζουν τη λειτουργία του ADC. Έτσι γίνεται αντιληπτό τότε πρέπει να επαναλαμβάνεται η βαθμονόμηση της δυναμοκυψέλης.



Εικόνα 36. Δίχρονη περισταλτική αντλία δυο εμβόλων.

Οι περισταλτικές αντλίες που χρησιμοποιούνται είναι μη διαβρεχόμενου τύπου και έχουν τη μορφή που διακρίνεται στις εικόνες 36 και 37. Το κύριο σώμα της αντλίας είναι κατασκευασμένο από plexiglas και έχει σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις 160x90 mm και πάχος 25 mm. Στο εσωτερικό του υπάρχει μια κοιλότητα μέσα στην οποία είναι τοποθετημένα τα έμβολα και οι βαλβίδες από σκληρό αλουμίνιο, ώστε να μπορούν να κινούνται με χαλαρή συναρμογή μεταξύ τους, ενώ κατά μήκος της επιφάνειάς του υπάρχει ένα αυλάκι όπου τοποθετείται ο ανατάξιμος σωλήνας σιλικόνης. Πάνω στο κύριο σώμα της αντλίας προσαρμόζεται με τέσσερις κοχλιωτές συνδέσεις καπάκι, επίσης κατασκευασμένο από plexiglas, σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις 160x90 mm και πάχος 30 mm. Το καπάκι περιέχει κυλινδρικούς οδηγούς με σπείρωμα, μέσα στους οποίους παλινδρομούν με τη βοήθεια ελατηρίων ειδικά διαμορφωμένα αξονάκια επαναφοράς των εμβόλων κατασκευασμένα από αλουμίνιο. Τα αξονάκια επαναφοράς τείνουν να μετατοπίζουν τα έμβολα και τις βαλβίδες προς την κάτω ακραία θέση τους. Κάτω από το κύριο σώμα της αντλίας βρίσκεται ο εκκεντροφόρος άξονας κατασκευασμένος από σκληρό

αλουμίνιο, ο οποίος στηρίζεται στα άκρα του με έδρανα κύλισης. Κατά την περιστροφή του άξονα τα έκκεντρα μετατοπίζουν τα έμβολα και τις βαλβίδες προς την άνω ακραία θέση τους ώστε να συμπιέζουν το σωλήνα. Κάθε έμβολο ή βαλβίδα φέρει ένα μικροσκοπικό ρουλεμάν με το οποίο έρχεται σε επαφή με το αντίστοιχο έκκεντρο με αποτέλεσμα να μειώνεται η φθορά τους και να αυξάνεται η ακρίβεια του ρυθμού έγχυσης της αντλίας [12].



Εικόνα 37. Περισταλτική αντλία ενός εμβόλου.

Οι δυο περισταλτικές αντλίες που χρησιμοποιούνται στα πειράματα έχουν διαφορετικό εκκεντροφόρο άξονα. Η μια έχει δυο έμβολα με μήκη το ένα διπλάσιο του άλλου και εγχύει σε δύο χρόνους (δίχρονη), όπως φαίνεται στην εικόνα 36, ενώ η άλλη έχει ένα έμβολο με μήκος ίδιο με αυτό του μεγάλου εμβόλου της δίχρονης και είναι κλασσικής έγχυσης (push – pull), όπως φαίνεται στην εικόνα 37.

## 3.2 Μετρητικά όργανα

### 3.2.1 Ηλεκτροκινητήρες

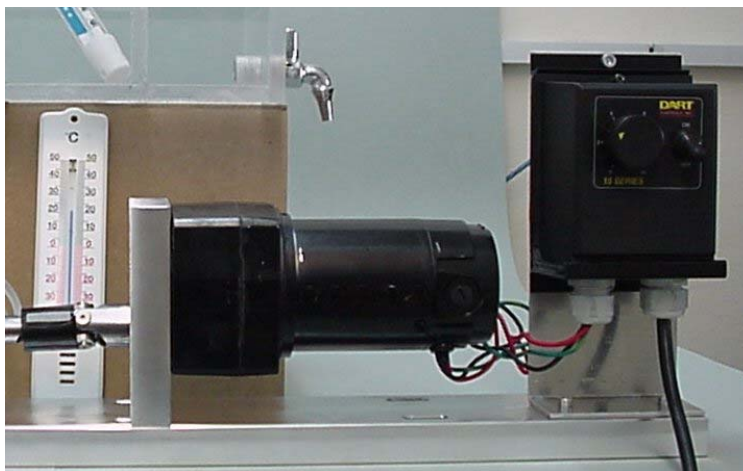
Ο ένας ηλεκτροκινητήρας που χρησιμοποιείται διακρίνεται στην εικόνα 38 και έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πίνακα 2. Πρόκειται για ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) της εταιρίας LEESON, με άξονα από σκληρυμένο ατσάλι, με μόνιμο μαγνήτη και προσαρμοσμένο μειωτήρα στροφών. Ο τύπος του κινητήρα είναι ερμητικά κλειστός μη αεριζόμενος, χωρίς θερμική μόνωση. Διαθέτει μόνιμο σύστημα λίπανσης με ημίρρευστο γράσο χωρίς δυνατότητα διαρροής.

Πίνακας 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα με μειωτήρα.

Σχέση μετάδοσης	30:1
Τάση τροφοδοσίας	180 Volts (DC)
Ένταση ρεύματος λειτουργίας	0.36 Amps
Ισχύς	1/17 HP
Ροπή στρέψης	56 lb·in
Στροφές	60 rpm
Form factor*	1.38
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας περιβάλλοντος	40 °C
Σύστημα μόνωσης συλλέκτη	F3 class

\* Ο form factor υποδεικνύει πόση από τη συνιστώσα του εναλλασσομένου ρεύματος διανέμεται στην έξοδο ως συνεχές από το σύστημα οδήγησης. Μαθηματικά αναπαρίσταται ως ο λόγος της ενεργούς τιμής του ρεύματος προς τη μέση τιμή του. Τιμή μεγαλύτερης της μονάδας σημαίνει ότι ποσοστό του ρεύματος παράγει θερμότητα αντί για ροπή.





Εικόνα 38. Ηλεκτροκινητήρας με μειωτήρα στροφών και ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης.

Ο δεύτερος ηλεκτροκινητήρας που διακρίνεται στην εικόνα 39 είναι όμοιος με τον πρώτο, με τη διαφορά ότι δεν έχει προσαρμοσμένο μειωτήρα στροφών. Γι' αυτό το λόγο έχει ένταση ρεύματος λειτουργίας 0.7 Amps με ισχύ 1/8 HP και φτάνει μέχρι 1750 στροφές (rpm).



Εικόνα 39. Ηλεκτροκινητήρας χωρίς μειωτήρα στροφών και οπτικό ταχύμετρο.

### 3.2.2 Ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης (controller)

Το ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης (controller) διακρίνεται στην εικόνα 38. Είναι της εταιρίας DART CONTROLS (τύπου 15 SERIES-15DV-E) και έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος οδήγησης (controller).

Ένταση συνεχούς ρεύματος εξόδου	3 Amps
Τροφοδοτική τάση εισόδου	120 Volts (AC) ή 240 Volts (AC)
Τάση εξόδου	0 – 90 Volts (DC) ή 0 – 180 Volts (DC)
Αντίσταση ποτενσιόμετρου ρύθμισης ταχύτητας	5 k ohm
Ικανότητα υπερφόρτωσης για 1 min	200 %

### 3.2.3 Ταχύμετρο

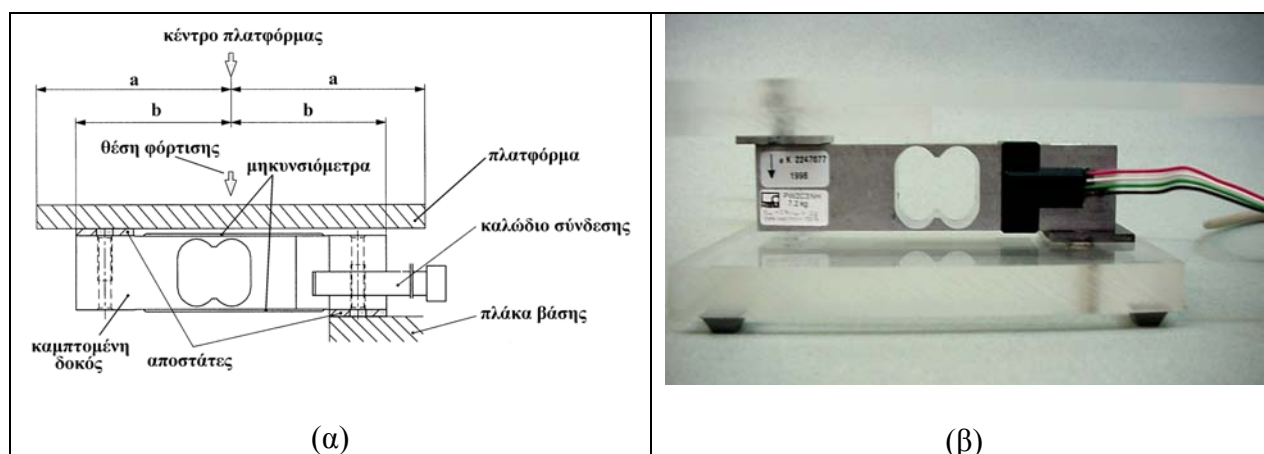
Το ταχύμετρο που χρησιμοποιείται είναι οπτικού τύπου χειρός, με φωτοεκπομπό δίοδο (LED) κόκκινου χρώματος (εικόνα 39). Είναι της εταιρίας ITECO trading (τύπου 8801.001) και έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4. Τεχνικά χαρακτηριστικά οπτικού ταχύμετρου.

Οθόνη ένδειξης	5 ψηφίων (ultrabright LED)
Εύρος μέτρησης	12.0 ÷ 100000 rpm
Ακρίβεια έως 999.9 rpm	± 0.1 rpm
Ακρίβεια από 1000 ÷ 20000 rpm	± 1 rpm
Ακρίβεια από 20000 ÷ 100000 rpm	± 0.005 %
Πεδίο αποστάσεων ανάκλασης	10 ÷ 300 mm
Χρόνος μετρούμενης περιόδου από 12.0 ÷ 60.0 rpm	χρόνος μιας πλήρους περιστροφής
Χρόνος μετρούμενης περιόδου από 60.0 ÷ 100000 rpm	1 sec
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 ÷ 45 °C
Τάση τροφοδοσίας	6 Volts
Διαστάσεις	180 x 60 mm
Βάρος	0.4 kg

### 3.2.4 Δυναμοκυψέλη (load – cell)

Η μέτρηση του εγχυόμενου βάρους ρευστού γίνεται με μια δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης (εικόνα 40). Είναι της εταιρίας HBM (μοντέλο PW2C3 NH – 1998). Έχει ανώτατο όριο φορτίου 7.2 Kg, με όριο ασφαλούς φορτίου 150 % και διαστάσεις πλατφόρμας 200x150mm. Η καμπτομένη δοκός είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο και η πλατφόρμα από plexiglas. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της δυναμοκυψέλης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.



Εικόνα 40. Δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης (μήκος πλατφόρμας:  $2a = 200$  mm, μήκος καμπτομένης δοκού:  $2b = 130$  mm).

Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά δυναμοκυψέλης PW2C3 NH – HBM.

Μεγέθη	Μονάδες μέτρησης	Τιμές	
Δυναμικότητα (φορτίο λειτουργίας)	kg	6	
Μέγιστο ονομαστικό φορτίο	kg	7.2	
Μέγιστο μέγεθος πλατφόρμας	mm	380 x 380	
Επίδραση θερμοκρασίας στην έξοδο <sup>(1), (2)</sup>	για εύρος +20 °C ÷ +40 °C	%/10K	±0.0146
	για εύρος -10 °C ÷ +20 °C	%/10K	±0.0098
Επίδραση θερμοκρασίας σε ισορροπία μηδενισμού <sup>(2)</sup>	%/10K	±0.0389	
Σφάλμα υστέρησης <sup>(1), (2)</sup>	%	±0.0097	
Σφάλμα μη γραμμικότητας <sup>(1), (2)</sup>	%	±0.0097	
Σφάλμα εκκεντρότητας φορτίου κατά OIML R76 <sup>(2), (3)</sup>	%	±0.0194	
Παραμένον σφάλμα εξόδου αποφόρτισης DR (30min) κατά OIML R60 <sup>(2)</sup>	%	±0.0167	
Αντίσταση εισόδου	Ω	350 ÷ 500	
Αντίσταση εξόδου	Ω	350 ÷ 500	
Τάση αναφοράς διέγερσης	V	5	
Προτεινόμενο εύρος τάσης διέγερσης	V	1 ÷ 15	
Αντίσταση μόνωσης	GΩ	>1	
Ονομαστικό εύρος θερμοκρασιών	°C	-10 ÷ +40	
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	°C	-10 ÷ +50	
Εύρος θερμοκρασιών αποθήκευσης	°C	-25 ÷ +70	
Μέγιστο μικτό φορτίο	% του ονομ. φορτίου	17	
Όριο ασφαλείας (για μέγιστη εκκεντρότητα 100 mm)	% του ονομ. φορτίου	150	
Όριο πλευρικής φόρτισης	% του ονομ. φορτίου	300	
Απόκλιση στο ονομαστικό φορτίο (±15%)	mm	0.20	
Ιδιοσυχνότητα στο ονομαστικό φορτίο, κατά προσέγγιση	Hz	35	
Ιδιοσυχνότητα για 0.5 kg μικτό φορτίο, κατά προσέγγιση	Hz	100	
Βάρος, κατά προσέγγιση	kg	0.25	

<sup>(1)</sup> Το μέγιστο σύνθετο σφάλμα λόγω της μη-γραμμικότητας, υστέρησης και θερμοκρασιακής επίδρασης στην έξοδο, ωστόσο δεν υπερβαίνει τα όρια σφάλματος κατά OIML-R60 (Organisation Internationale de Métrologie Légale – Réglementation 60).

<sup>(2)</sup> Όλα τα σχετικά σφάλματα προσδιορίζονται αναφορικά με το ονομαστικό φορτίο εξόδου.

<sup>(3)</sup> Φορτιζόμενη με το 30% της δυναμικότητας (φορτίο λειτουργίας) για εκκεντρότητα 142 mm.

Η δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης συνδέεται με έναν αναλογικό – ψηφιακό μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό σήμα της δυναμοκυψέλης σε ψηφιακό και το οδηγεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Οι μετρήσεις της δυναμοκυψέλης καταγράφονται μέσω λογισμικού ενός H/Y, με το οποίο ρυθμίζεται η συχνότητα δειγματοληψίας ανάλογα με το ρυθμό έγχυσης της αντλίας. Δηλαδή, για χαμηλούς ρυθμούς έγχυσης επιλέγεται χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας, ενώ για υψηλούς ρυθμούς έγχυσης επιλέγεται αντίστοιχα υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας, ώστε να καταγράφονται πλήρως όλες οι μετρήσεις στο χρόνο για οποιαδήποτε μεταβολή.

### 3.2.5 Αναλογικός – ψηφιακός μετατροπέας (ADC)

Ο αναλογικός – ψηφιακός μετατροπέας (Analog to Digital Converter, ADC) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των αναλογικών σημάτων που παρέχουν οι μεταλλάκτες

σε ψηφιακές πληροφορίες, καθώς και για την εν συνεχεία μετάδοσή τους προς τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Οι ADC που χρησιμοποιούνται ως μονάδες προσαρμογής των μεταλλακτών σε H/Y, συνήθως συνοδεύονται από επιλογέα ή πολυπλέκτη (multiplexer), ο οποίος δέχεται αναλογικά σήματα από περισσότερα του ενός καναλιού, ψηφιοποιώντας κάθε φορά το επιλεγόμενο από το πρόγραμμα του H/Y που ελέγχει τον μετατροπέα.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός αναλογικό – ψηφιακού μετατροπέα είναι η διακριτική ικανότητα, η περιοχή λειτουργίας και ο χρόνος δειγματοληψίας.

Η διακριτική ικανότητα ορίζεται ως το ελάχιστο σήμα εισόδου που προκαλεί μεταβολή στο σήμα εξόδου. Για έναν ADC σήμα εισόδου αποτελεί το αναλογικό σήμα εισόδου, ενώ σήμα εξόδου η ψηφιακή πληροφορία που παρέχει στην έξοδό του. Όταν ο ADC διαθέτει καταχωρητή δεδομένων με  $v$  το πλήθος δυαδικά ψηφία (bits), τότε το αναλογικό σήμα εισόδου ψηφιοποιείται το πολύ σε  $2^v$  τιμές, οπότε η διακριτική ικανότητα του ADC ισούται με:

$$\frac{1}{2^v}(V_{\max} - V_{\min}) \quad (1)$$

Έχει επικρατήσει, όμως, η διακριτική ικανότητα ενός ADC να δίνεται με βάση το πλήθος  $v$  των δυαδικών ψηφίων που διαθέτει ο καταχωρητής δεδομένων του.

Η περιοχή ή το εύρος λειτουργίας ορίζεται από τις τιμές  $V_{\min}$  της ελάχιστης και  $V_{\max}$  της μέγιστης τάσης σήματος εισόδου, μεταξύ των οποίων ο ADC λειτουργεί αναλογικά. Δηλαδή το ηλεκτρικό σήμα εξόδου του μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται το σήμα του μετρούμενου μεγέθους, λαμβάνοντας «συνεχείς» τιμές.

Ισχύει:

Τάση εισόδου		Ψηφιακή ένδειξη
$V_{\min}$		0
$V_s$	→	d
$V_{\max}$		$2^v-1$

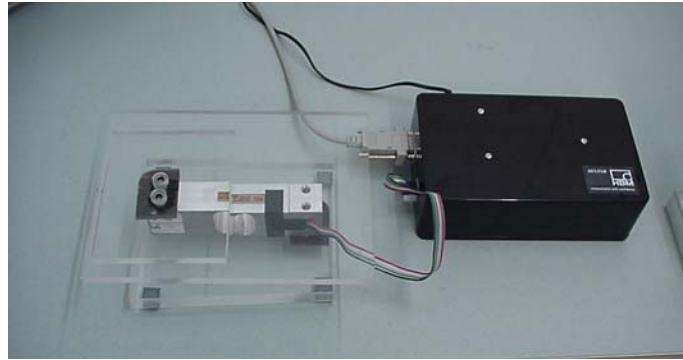
Έτσι, σε κάθε τάση  $V_s$  αντιστοιχεί ψηφιακή πληροφορία d, που καθορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{V_s - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} = \frac{d}{2^v - 1} \quad (2)$$

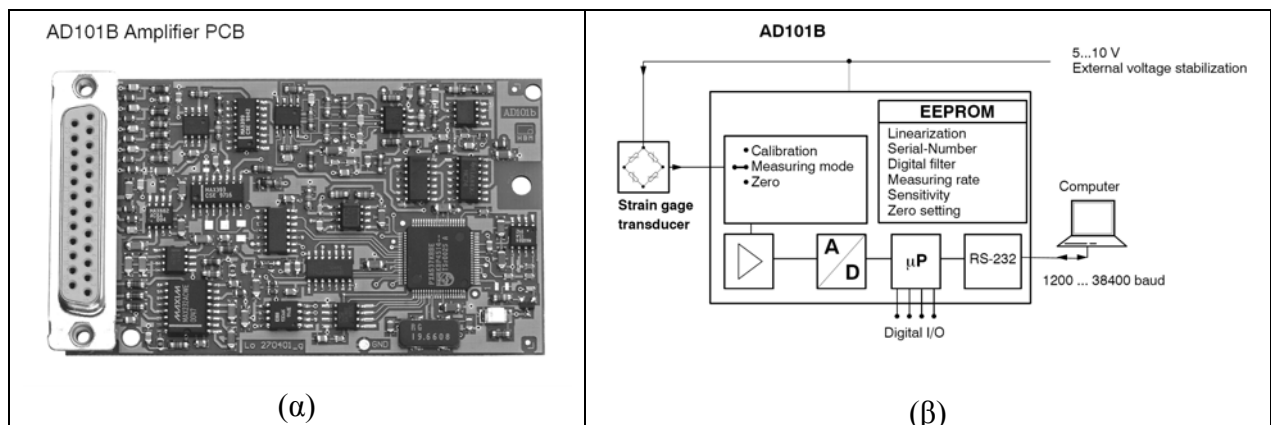
όπου  $V_s$  η τάση του αναλογικού σήματος εισόδου του ADC και d η αντίστοιχη ψηφιακή ένδειξη.

Ο χρόνος δειγματοληψίας ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που παρέρχεται από τη στιγμή που ο ADC αρχίζει μια ψηφιοποίηση, μέχρι να είναι και πάλι σε θέση να κάνει την επόμενη. Το αντίστροφο του χρόνου δειγματοληψίας ορίζεται ως μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας. Η συχνότητα αυτή εξαρτάται κυρίως από τη μέθοδο της αναλογοψηφιακής μετατροπής κάθε ADC.

Ο αναλογικός – ψηφιακός μετατροπέας (ADC) της πειραματικής διάταξης (εικόνα 41) είναι της εταιρίας HBM, με μοντέλο ηλεκτρονικής πλακέτας AD101B (εικόνα 42α). Στην εικόνα 42β φαίνεται το λογικό διάγραμμα διάταξης του κυκλώματος, ενώ στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ADC.



Εικόνα 41. Η δυναμοκυψέλη και ο ADC.



Εικόνα 42. (α) Η ηλεκτρονική πλακέτα AD101B του ADC. (β) Το λογικό διάγραμμα διάταξης του κυκλώματος του ADC με τον Η/Υ.

Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά του ADC.

Τύπος		AD101B
Εύρος μέτρησης	mV/V	±2.0
Εύρος σήματος εισόδου		±3.0
Διακριτική ικανότητα μετρούμενου σήματος, max.	Bit	20 (1 Hz)
Συχνότητα δειγματοληψίας (εξαρτάται από τη μορφή του σήματος εξόδου και το baud rate)	Hz	4.7 ÷ 300
Συχνότητα αποκοπής του ψηφιακού φίλτρου, ρυθμιζόμενη στα ±3 dB	Hz	0.25 ÷ 40
Τάση διέγερσης γέφυρας $U_B$ (DC) <sup>1</sup>	V	5 ÷ 10
Interface		RS – 232
Baud rate, ρυθμιζόμενο	bit/sec	1200 ÷ 38400
Τάση λειτουργίας (DC)	V	5 ÷ 10
Κατανάλωση ρεύματος (χωρίς τη δυναμοκυψέλη) <sup>2</sup>	mA	≤ 80

<sup>1</sup> Διέγερση από την τάση λειτουργίας.<sup>2</sup> Κατανάλωση ρεύματος ≤ 80 mA +  $U_B/R_B$ , όπου  $R_B$  η αντίσταση της γέφυρας.

### 3.2.6 Ηλεκτρονικός Υπολογιστής – Λογισμικό

Ο ADC συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος έχει επεξεργαστή PENTIUM II με 256MB μνήμη RAM και λειτουργεί υπό περιβάλλον Windows '98. Για το χειρισμό του ADC χρησιμοποιείται το λογισμικό AED – Panel32 version 1.1.3, το οποίο παρέχει η εταιρία κατασκευής του HBM. Μέσω του λογισμικού αυτού ρυθμίζεται η συχνότητα δειγματοληψίας, η συχνότητα του φίλτρου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων (low pass filter), γίνεται η βαθμονόμηση της δυναμοκυψέλης και οποιοσδήποτε μηδενισμός ισορροπίας απαιτείται. Για την καταγραφή, επεξεργασία και αποθήκευση των ψηφιακών δεδομένων χρησιμοποιείται το λογισμικό CATMAN Professional v.4.5, R.3, P.3. Μέσω αυτού είναι επίσης δυνατόν να παρακολουθείται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο η μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών με τη μορφή καμπυλών (real time) (παρατηρείται διαφορά φάσης εξαιτίας του χρόνου απόκρισης του ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος είναι συνήθως μεγάλος σε σχέση με τη συχνότητα του καταγραφόμενου φαινομένου).

### 3.2.7 Θερμόμετρα

Τέλος, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα και του νερού χρησιμοποιούνται δυο θερμόμετρα αλκοόλης με σφάλμα ανάγνωσης  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , που αντιστοιχεί σε μισή υποδιαίρεση της κλίμακας των θερμομέτρων.

## 3.3 Σφάλματα μετρήσεων

Στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη για τη μέτρηση των μεγεθών χρησιμοποιούνται τα όργανα που προαναφέρθηκαν. Αν μετρηθεί αρκετές φορές με το κατάλληλο όργανο το μέγεθος ενδιαφέροντος, το οποίο για τις ίδιες επαναλαμβανόμενες συνθήκες αναμένεται αμετάβλητο, θα διαπιστωθεί ότι οι τιμές της εξόδου του οργάνου δεν θα είναι όλες ίδιες, αλλά θα κυμαίνονται γύρω από την αληθινή τιμή, η οποία είναι άγνωστη. Η διαφορά της μετρούμενης από την αληθινή τιμή ονομάζεται σφάλμα της μέτρησης. Τα σφάλματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα συστηματικά (bias) και τα τυχαία (random).

Τα συστηματικά έχουν ως αποτέλεσμα, επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους κάτω από τις ίδιες συνθήκες, να απέχουν όλες σταθερά από την αληθινή τους τιμή κατά το ίδιο ποσοστό. Οφείλονται στη μέθοδο ή το όργανο που χρησιμοποιείται. Συνήθως οι κατασκευαστές οργάνων αναφέρουν το συστηματικό σφάλμα είτε ως ποσοστό της μέγιστης τιμής του φυσικού μεγέθους που μπορεί να μετρήσει το όργανο, είτε ως ποσοστό της μετρούμενης τιμής [3]. Τα συστηματικά σφάλματα είναι δυνατόν να μειωθούν με κατάλληλες ρυθμίσεις των συνθηκών του πειράματος και των συνθηκών λειτουργίας των οργάνων μέτρησης.

Τα τυχαία σφάλματα οφείλουν την ύπαρξή τους σε τυχαίους παράγοντες που εμφανίζονται σε μια μέτρηση και συνήθως ακολουθούν στατιστικές κατανομές. Η βασική ιδιότητα των τυχαίων σφαλμάτων είναι να έχουν ίσες πιθανότητες να είναι θετικά ή αρνητικά. Επίσης είναι πιο πιθανό να έχουν μικρές αποκλίσεις από την αληθινή τιμή παρά μεγάλες. Οι δύο αυτές ιδιότητες κάνουν δυνατό τον περιορισμό της αβεβαιότητας στον προσδιορισμό ενός μεγέθους με την επανάληψη της μέτρησης πολλές φορές, ώστε κατά μέσον όρο τα τυχαία σφάλματα να αλληλοαναιρούνται σε κάποιο βαθμό [10], [17]. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πράξη δεν γίνεται να πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός μετρήσεων του ίδιου φυσικού μεγέθους, χωρίς να έχουν μεταβληθεί στο διάστημα που μεσολαβεί οι

συνθήκες μέτρησης ή η αρχή στην οποία βασίζεται η μέτρηση, οπότε θα υπαισέλθουν συστηματικά σφάλματα που δεν ακολουθούν στατιστικές κατανομές [6]. Στο παρόν πείραμα τα σφάλματα αυτά ως τυχαίο γεγονός έχει θεωρηθεί ότι ακολουθούν την κατανομή Gauss, όσο αφορά την πιθανότητα εμφάνισής τους.

### 3.3.1 Συστηματικά σφάλματα οργάνων

#### 3.3.1.1 Δυναμοκυψέλη (load-cell)

Η δυναμοκυψέλη είναι μια μετρητική συσκευή ακρίβειας, της οποίας ο ρόλος είναι καθοριστικός για τη σωστή καταγραφή του βάρους του εγχυόμενου ρευστού με το χρόνο, έχοντας ευαισθησία ακόμη και σε πολύ μικρές εξωτερικές δονήσεις ή ταλαντώσεις. Στον πίνακα 5 δίνονται από τον κατασκευαστή διάφορα συστηματικά σφάλματα για τη δυναμοκυψέλη. Αρκετά από αυτά εκμηδενίζονται λόγω κατάλληλων συνθηκών εκτέλεσης του πειράματος. Έτσι, επειδή οι μεταβολές της θερμοκρασίας δεν υπερβαίνουν τους 10 °C και μάλιστα είναι κάτω από 1 °C κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης, το συστηματικό σφάλμα λόγω επίδρασης της θερμοκρασίας είναι αμελητέο. Εξαιτίας της συνεχούς αύξησης του βάρους της δεξαμενής κατάθλιψης δεν παρατηρούνται αυξομειώσεις φορτίου στη δυναμοκυψέλη ώστε να εμφανίζεται φαινόμενο βρόχου υστέρησης και συνεπώς το σφάλμα υστέρησης είναι μηδενικό.

Παρατηρείται από τον πίνακα 5 ότι το σφάλμα μη γραμμικότητας (non – linearity) έχει τιμή  $\pm 0.0097\%$  αναφορικά με το ονομαστικό φορτίο 7200gr. Αυτό σημαίνει ότι το σφάλμα του non – linearity ανέρχεται στην τιμή των 0.6984gr. Μια σταγόνα, που εξέρχεται από το σωλήνα σιλικόνης εσωτερικής διαμέτρου 3mm με πολύ αργό ρυθμό, έχει βάρος 0.07gr. Συνεπώς στις χαμηλές συχνότητες θα πρέπει να πέφτουν 10 σταγόνες τουλάχιστον ώστε το μετρητικό σύστημα της δυναμοκυψέλης να αντιλαμβάνεται το βάρος έγχυσης της αντλίας. Για το λόγο αυτό πριν αρχίσουν τα πειράματα πραγματοποιείται διαδικασία βαθμονόμησης πολλαπλών σημείων, η οποία επιτυγχάνει μείωση του συστηματικού σφάλματος της μη γραμμικότητας της δυναμοκυψέλης.

Αφού συνδεθεί η δυναμοκυψέλη με τον ADC και αυτός με τον H/Y, πρέπει να μεσολαβήσει χρονικό διάστημα περίπου είκοσι λεπτών λειτουργίας, προκειμένου να αποκατασταθεί θερμική ισορροπία στην αντίσταση της δυναμοκυψέλης και στο κύκλωμα του ADC. Με αυτόν τον τρόπο το όλο ηλεκτρονικό σύστημα γίνεται πιο ευσταθές και είναι έτοιμο για την ορθή καταγραφή των μετρήσεων. Αρχικά καταγράφεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και κατόπιν τοποθετείται πάνω στην πλατφόρμα της δυναμοκυψέλης το πρότυπο βάρος 2000 gr, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζεται στην οθόνη του H/Y η αντίστοιχη τιμή εξόδου του ηλεκτρονικού σήματος του ADC μετρημένο σε mV/V. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία αυξάνοντας το εκάστοτε εφαρμοζόμενο στη δυναμοκυψέλη βάρος κατά 100 gr και καταγράφοντας τις αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρονικού σήματος σε mV/V από τον H/Y. Όταν το πρότυπο βάρος αποκτά την τιμή 5100 gr και καταγράφεται το αντίστοιχο ηλεκτρονικό του σήμα, τότε αποθηκεύονται τα 32 ζεύγη τιμών πρότυπου βάρους (gr) – ηλεκτρονικού σήματος (mV/V) και παριστάνονται γραφικά (εικόνα 43).

Κατόπιν για να ελεγχθεί αν η δυναμοκυψέλη παρέχει σωστές μετρήσεις και δεν έχει αλλοιωθεί η πιστότητά της λόγω φόρτισης, επαναλαμβάνεται ξανά η διαδικασία τοποθέτησης των πρότυπων βαρών με τιμές εντός του εύρους 2000 ÷ 5100 gr και γίνεται επαλήθευση των τιμών που μετρήθηκαν προηγουμένως. Το γεγονός ότι επιλέγονται αυτές οι τιμές πρότυπων βαρών προκειμένου να γίνει η βαθμονόμηση δεν είναι τυχαίο, αφού η δυναμοκυψέλη μετρά σε αυτό το πεδίο τιμών για το συγκεκριμένο πείραμα. Στο τέλος της

πειραματικής εκτέλεσης για κάθε συχνότητα διέγερσης πρέπει να ελέγχεται αν η δυναμοκυψέλη μετρά σωστά, εφαρμόζοντας ένα πρότυπο βάρος που είναι εντός της περιοχής των πειραματικών μετρήσεων.

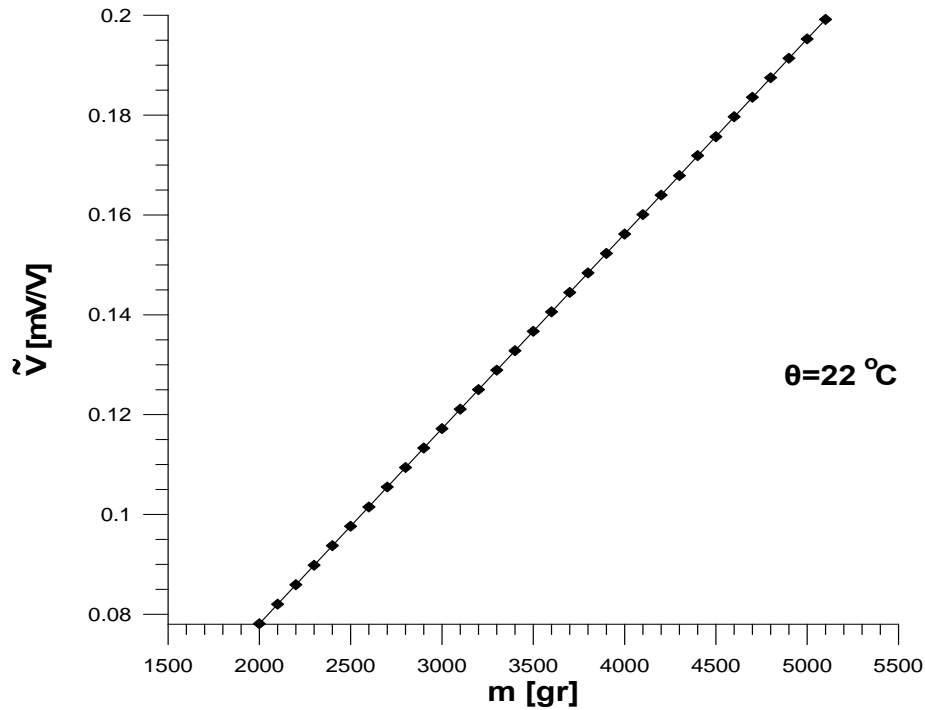
Στον πίνακα 6 περιέχονται οι τιμές της μάζας των πρότυπων βαρών σε gr με τις αντίστοιχες τιμές της αδιάστατης τάσης εξόδου σε mV/V του ψηφιακού σήματος του ADC. Επίσης στην εικόνα 43 παριστάνονται γραφικά οι τιμές του πίνακα 6 όπου δίνουν την καμπύλη βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης για θερμοκρασία 22 °C.

Πίνακας 6. Τιμές των μεγεθών μάζας πρότυπου βάρους – ψηφιακού σήματος ADC.

Μάζα πρότυπου βάρους (gr)	Ψηφιακό σήμα ADC (mV/V)
2000	0.0781
2100	0.0820
2200	0.0859
2300	0.0898
2400	0.0937
2500	0.0976
2600	0.1015
2700	0.1055
2800	0.1094
2900	0.1133
3000	0.1172
3100	0.1211
3200	0.1250
3300	0.1289
3400	0.1328
3500	0.1367
3600	0.1406
3700	0.1445
3800	0.1484
3900	0.1523
4000	0.1562
4100	0.1601
4200	0.1640
4300	0.1679
4400	0.1719
4500	0.1757
4600	0.1797
4700	0.1836
4800	0.1875
4900	0.1914
5000	0.1953
5100	0.1992

Κατά την εκτέλεση του πειράματος δεν παρατηρήθηκαν έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές του περιβάλλοντος αέρα. Δηλαδή, η μέγιστη θερμοκρασιακή μεταβολή του περιβάλλοντος μεταξύ δυο διαδοχικών σετ μετρήσεων (συχνοτήτων) ήταν κάτω του 1 °C και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ελεγχόταν η διαδικασία βαθμονόμησης στην αρχή κάθε σετ μετρήσεων εξασφαλίστηκε η ορθή λειτουργία του συστήματος ADC και δυναμοκυψέλης.





Εικόνα 43. Καμπύλη βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης στους 22 °C.

Κατόπιν της ανωτέρω βαθμονόμησης το σφάλμα της μη γραμμικότητας θεωρείται ότι ανάγεται κατά το ίδιο ποσοστό  $\pm 0.0097\%$  σε ονομαστικό φορτίο 100gr. Δηλαδή το περιθώριο ανάπτυξης της μη γραμμικότητας περιορίζεται μόνο για διάστημα 100gr και με την προϋπόθεση ότι το φορτίο λειτουργίας δεν εξέρχεται του διαστήματος [2000, 5100] gr (υπόψη ότι η δεξαμενή κατάθλιψης κενή ζυγίζει 2100gr περίπου ενώ πλήρως γεμάτη 5100gr περίπου). Συνεπώς το συστηματικό σφάλμα λόγω της μη γραμμικότητας ανέρχεται στην τιμή  $s_{nl} = \pm 0.0097\text{gr}$ .

Η δεξαμενή κατάθλιψης τοποθετείται συμμετρικά πάνω στην πλατφόρμα της δυναμοκυψέλης, ενώ προνοείται το καταθλιβόμενο ρευστό να εγχύεται σε τέτοιο σημείο το οποίο να ευθυγραμμίζεται κατακόρυφα με το κέντρο της πλατφόρμας της δυναμοκυψέλης. Κατ' αυτόν τον τρόπο το συστηματικό σφάλμα λόγω εκκεντρότητας του φορτίου εκμηδενίζεται.

Τέλος το παραμένον σφάλμα εξόδου αποφόρτισης δίνεται στον πίνακα 5 ίσο με  $\pm 0.0167\%$  για συνολική χρονική διάρκεια 30 min και φορτίο ίσο με το ονομαστικό των 7200gr. Επειδή το πείραμα εκτελείται για διαφορετικές συνολικές χρονικές διάρκειες  $t_t$  και για διαφορετικές αυξήσεις μάζας  $\Delta m_t$ , το παραπάνω σφάλμα αυξομειώνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$DR = 7200 (\pm 0.0167\%) k_t k_m = \pm 1.2024 k_t k_m [\text{gr}] \quad (3)$$

όπου  $k_t = t_t/1800$  ( $t_t$  σε sec) και  
 $k_m = \Delta m_t/7200$  ( $\Delta m_t$  σε gr).

Αντικαθιστώντας στην (3) προκύπτει:

$$DR = \pm 9.2778 \cdot 10^{-8} t_t \Delta m_t \quad (4)$$

### 3.3.1.2 Χρονόμετρο – Ταχύμετρο (Tachometer)

Για την εύρεση της συχνότητας περιστροφής της αντλίας στις πολύ χαμηλές στροφές μέχρι 2 rpm περίπου χρησιμοποιείται έμμεσα το χρονόμετρο του H/Y. Επειδή σε αυτές τις πολύ χαμηλές στροφές η συχνότητα δειγματοληψίας όπως θα παρουσιαστεί πιο κάτω είναι 9.4 Μετρήσεις/sec, το συστηματικό σφάλμα που εισάγεται για τον υπολογισμό της συχνότητας είναι  $1/9.4 \approx 0.11 \text{ sec/Μέτρηση}$ . Η περίοδος περιστροφής και ακολούθως η συχνότητα σε αυτό το πολύ χαμηλό πεδίο συχνοτήτων προκύπτουν παρατηρώντας τις καμπύλες παροχής μάζας με το χρόνο και διακρίνοντας σε αυτά τα πεπερασμένα χρονικά διαστήματα peak to peak των οποίων ο μέσος όρος ορίζει την περίοδο διέγερσης της αντλίας.

Εξαιτίας των υψηλών ροπών φορτίου που αναπτύσσονται σε αυτές τις πολύ χαμηλές στροφές περιστροφής της αντλίας, ο κινητήρας αναπτύσσει υψηλή ροπή με αποτέλεσμα για κάποιο μικρό σχετικά χρονικό διάστημα να παρουσιάζεται επιβραδυνόμενη περιστροφή. Εκ των υστέρων η περιστροφή θα γίνει επιταχυνόμενη για κάποιο επόμενο μικρό σχετικά χρονικό διάστημα, όταν υπερνικηθούν οι ροπές φορτίου και αναπτυχθούν αδρανειακές δυνάμεις περιστροφής που συνεισφέρουν. Στη συνέχεια ο κινητήρας μειώνει τις ροπές του επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις έχουν αναλάβει με αποτέλεσμα την επιβραδυνόμενη περιστροφή ξανά. Έτσι δημιουργούνται μικρές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις κατά την περιστροφή συνήθως διαδοχικά άνισες που έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της περιόδου. Σε αυτή τη μεταβολή της περιόδου συνίσταται η εισαγωγή τυχαίου σφάλματος από περίοδο σε περίοδο.

Για την εύρεση της συχνότητας περιστροφής της αντλίας στις χαμηλές στροφές από 2 rpm μέχρι 12 rpm περίπου, χρησιμοποιείται ηλεκτρονικό χρονόμετρο το οποίο εισαγάγει συστηματικό σφάλμα  $b_T = 0.01 \text{ sec}$ . Σημειώνεται εδώ ότι η διάκριση των τοπικών μεγίστων (peaks) γίνεται δύσκολη καθώς αυξάνονται οι στροφές και για αυτό επιβάλλεται η χρήση του ηλεκτρονικού χρονομέτρου.

Καθώς οι στροφές αυξάνονται περαιτέρω, η μέτρηση με το χρονόμετρο καθίσταται δύσκολη και συνεπώς χρησιμοποιείται το ταχύμετρο. Το συστηματικό σφάλμα του ταχύμετρου είναι 0.1 rpm για το διάστημα από 12 έως 999.9 rpm και 1rpm για στροφές μεγαλύτερες από 1000 rpm σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

### 3.3.1.3 Θερμόμετρο

Το συστηματικό σφάλμα του θερμομέτρου θεωρείται το σφάλμα ανάγνωσής του, το οποίο εκφράζει την αβεβαιότητα με την οποία διαβάζουμε την ένδειξή του. Το σφάλμα ανάγνωσης είναι ίσο με αυτό που αντιστοιχεί σε μισή υποδιαίρεση της κλίμακας του θερμομέτρου. Στο θερμοόμετρο έχουμε υποδιαίρεσεις  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , άρα το σφάλμα ανάγνωσης είναι  $b_{\theta_v} = \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Σημειώνεται εδώ ότι το σφάλμα ανάγνωσης πρέπει να θεωρείται ως το κατώτατο όριο στο σφάλμα μέτρησης ενός μεγέθους. Επανάληψη της μέτρησης πολλές φορές δεν οδηγεί σε γνώση του μεγέθους με σφάλμα μικρότερο του σφάλματος ανάγνωσης [17].

### 3.3.2 Προσαρμογή (fitting) συνάρτησης παροχής μάζας

Το ζητούμενο ουσιαστικά από την παρούσα πειραματική διάταξη και διαδικασία είναι ο προσδιορισμός της παρεχόμενης μάζας της κάθε αντλίας στη μονάδα του χρόνου. Εξαιτίας της συνεχούς πρόσδωσης νερού από την αντλία προς τη δεξαμενή κατάθλιψης που

ζυγίζεται από τη δυναμοκυψέλη, αναμένεται η συνάρτηση της παρεχόμενης μάζας νερού με το χρόνο να είναι συνεχής και αύξουσα. Η διαδικασία προσδιορισμού αυτής της συνάρτησης λέγεται προσαρμογή (fitting) η δε συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση αναδρομής. Επειδή ο όγκος εμβολισμού του νερού από την αντλία θεωρείται να είναι σταθερός και ίσος με τον όγκο του συμπιεζόμενου τμήματος σωλήνα, η ανωτέρω πρόσδωση χαρακτηρίζεται από ίσες ποσότητες νερού και συνεπώς η συνάρτηση αναδρομής αναμένεται γραμμική.

Έστω τα ζεύγη τιμών χρόνου – μάζας  $(t_1, m_1) \dots (t_n, m_n)$  με  $n$  τον αριθμό των μετρήσεων (ζευγών) και ότι η εκτίμηση της ευθείας προσαρμογής είναι:

$$\hat{m} = m_0 + \hat{m} t \quad (5)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η κλίση της (5) ως παροχή μάζας να είναι:

$$\hat{m} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i m_i - n \bar{t} \bar{m}}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - n \bar{t}^2} \quad (6)$$

και η τεταγμένη επί την αρχή:

$$m_0 = \bar{m} - \hat{m} \bar{t} \quad (7)$$

$$\text{όπου } \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \text{ και } \bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} .$$

Η μεταβλητότητα της αναδρομής ορίζεται από τη σχέση:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \hat{m}_i)^2}{n - 2}} \quad (8)$$

και αποτελεί εκτίμηση της αληθινής μεταβλητότητας  $\sigma$  εφόσον η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων δίνει την καλύτερη εκτίμηση της ευθείας αναδρομής. Η τιμή της επηρεάζει άμεσα και καθοριστικά τα σφάλματα των παραμέτρων της αναδρομής.

Το εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα της κλίσης  $\hat{m}$  της ευθείας αναδρομής δίνεται από την:

$$se = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 - n \bar{t}^2}} \quad (9)$$

Ο δείκτης που ποσοτικά δείχνει το πόσο καλά προσαρμόζεται η ευθεία αναδρομής στα πειραματικά σημεία, είναι η μέση τετραγωνική απόκλιση της αναδρομής, που ορίζεται ως:

$$\text{RMS} = 100 \times \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - \hat{m}_i)^2}{\hat{m}_i^2}} \quad (\%) \quad (10)$$

και κυμαίνεται από 0-100%, τείνει δε προς την τιμή 0% (ταυτίζεται με αυτήν όταν όλα τα πειραματικά σημεία κείνται ντετερμινιστικά επί της αναδρομής) όσο πιο καλή είναι η προσαρμογή. Πρακτικά, τιμές άνω του 25-30% δεν θεωρούνται παρά οριακά αποδεκτές. Το RMS ορίζεται και προσδιορίζεται από τα  $n$  το πλήθος πρωτογενή δεδομένα  $m_i$  και τις αντίστοιχες εκτιμήσεις της αναδρομής  $\hat{m}_i$ .

### 3.3.3 Τυχαία σφάλματα

Παρόλο που η ευαισθησία της δυναμοκυψέλης αποτελεί ισχυρό πλεονέκτημα επιτρέπει όμως και την εισαγωγή σφαλμάτων στις μετρήσεις. Τέτοια σφάλματα μπορεί να οφείλονται σε αδρανειακές δυνάμεις που δημιουργεί η έγχυση του ρευστού στις υψηλές στροφές της αντλίας, λόγω αναπόφευκτων ταλαντώσεων της μάζας ρευστού της ελεύθερης επιφάνειας της δεξαμενής κατάθλιψης.

Λόγω σχεδιαστικών ατελειών στο χρονισμό των έκκεντρων παρατηρείται οπισθοροή (back – flow). Η άκρη του σωλήνα είναι βυθισμένη 5mm κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής κατάθλιψης, όπως αναφέρθηκε, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μερική αναρρόφηση ενός μικρού ποσοστού του καταθλιβόμενου ρευστού από την οπισθοροή και συνεπώς να προσθαφαιρείται ίση ποσότητα μάζας ρευστού στη δεξαμενή. Αυτή η ποσότητα εισάγει μικρό σφάλμα στις μετρήσεις της μάζας του ρευστού που ζυγίζεται με το χρόνο, αλλά δεν επηρεάζει το ρυθμό έγχυσης της αντλίας για δύο λόγους. Πρώτον, όση ποσότητα ρευστού αφαιρείται λόγω οπισθοροής προστίθεται στη διάρκεια μιας περιόδου με αποτέλεσμα η εγχυόμενη μάζα εμβολισμού ανά περίοδο να είναι η προβλεπόμενη. Δεύτερον, ο ρυθμός έγχυσης της αντλίας είναι σταθερός με το χρόνο και προκύπτει από την κλίση που έχει η γραμμική συνάρτηση της παροχής με το χρόνο, η οποία δεν μεταβάλλεται λόγω οπισθοροής.

Για να αποφεύγεται η εισαγωγή πολλών τυχαίων σφαλμάτων στις μετρήσεις εξαιτίας των δονήσεων που προκαλεί ο κινητήρας και η περιστροφή του εκκεντροφόρου άξονα της αντλίας, απομονώνεται το σύστημα δυναμοκυψέλης – ADC σε ξεχωριστό οριζόντιο επίπεδο Β (όπως ήδη έχει αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου) από την υπόλοιπη πειραματική διάταξη η οποία στηρίζεται στο οριζόντιο επίπεδο Α (εικόνα 31).

Έχει αποδειχθεί στην πράξη ότι ο νόμος του Gauss εκφράζει με πολύ καλή προσέγγιση το νόμο των πιθανοτήτων όλων των τυχαίων γεγονότων, σύμφωνα με τον οποίο η πιο πιθανή τιμή ενός μετρούμενου μεγέθους είναι η μέση τιμή ενός αριθμού αξιόπιστων μετρήσεων. Έτσι η πιθανότητα εμφάνισης των μετρήσεων  $f(x)$  ακολουθεί μια καμπύλη Gauss που ως γνωστόν δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

όπου  $x$  είναι οι τιμές των μετρήσεων,  $\mu$  η μέση τιμή τους και  $\sigma$  η τυπική τους απόκλιση.

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνει η τυπική απόκλιση, τόσο αυξάνει και το εύρος των τιμών τις οποίες δείχνει το όργανο για την ίδια πάντα τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Δηλαδή τόσο αυξάνει η διασπορά των τιμών της εξόδου του οργάνου. Ασφαλώς η ακρίβεια των μετρήσεων επιβάλλει περιορισμό αυτού του εύρους που

σημαίνει μείωση κατά το δυνατόν της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων. Ως σφάλμα στην περίπτωση αυτή νοείται η διαφορά της εξόδου του οργάνου από τη μέση τιμή των μετρήσεων. Για ένα πεπερασμένο αριθμό μετρήσεων  $n$  ισχύουν οι σχέσεις:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (12)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (13)$$

όπου  $s$  η τυπική απόκλιση της μιας μέτρησης  $x_i$  από τη μέση τιμή  $\bar{x}$ .

Ιδανικά όταν  $n \rightarrow \infty$  τότε  $\bar{x} \rightarrow \mu$  και  $s \rightarrow \sigma$ . Κατά τον ίδιο τρόπο η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση ενός πεπερασμένου αριθμού μετρήσεων  $n$  ακολουθούν επίσης την κατανομή Gauss και μάλιστα η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής είναι:

$$s_m = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (14)$$

Κατά τις μετρήσεις του παρόντος πειράματος, θεωρώντας ότι η αληθινή τιμή είναι η μέση τιμή του μεγέθους ( $\mu \equiv \bar{x}$ ), ως διάστημα εμπιστοσύνης, που αποτελεί και το σφάλμα των μετρήσεων, έχει ληφθεί το  $\bar{x} \pm 1.96s_m$ , το οποίο αντιστοιχεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Δηλαδή, αν επαναληφθεί το πείραμα πολλές φορές υπό τις ίδιες συνθήκες, η πιθανότητα η μέση τιμή του μετρούμενου μεγέθους να βρίσκεται στο διάστημα  $[\bar{x} - 1.96s_m, \bar{x} + 1.96s_m]$  είναι 95%. Επομένως το τυχαίο σφάλμα ενός μεγέθους του πειράματος ορίζεται από την:

$$\varepsilon = \pm 1.96s_m \quad (15)$$

### 3.3.4 Συνολικά σφάλματα και διάδοσή τους

Από την ανάπτυξη που προηγήθηκε έχει καταστεί φανερό ότι στην περίπτωση ενός μεγέθους  $x$  απ' ευθείας μετρούμενου υπεισέρχεται τόσο τυχαίο όσο και συστηματικό σφάλμα. Προκειμένου να αποδοθεί το συνολικό σφάλμα της μέτρησης του  $x$  πρέπει να συνδυαστεί κατάλληλα το τυχαίο σφάλμα της μέτρησης  $\varepsilon$  με το συστηματικό σφάλμα  $b$ . Συνεπώς το συνολικό σφάλμα δίνεται από τη σχέση:

$$e = \sqrt{\varepsilon^2 + b^2} \quad (16)$$

Στο συγκεκριμένο πείραμα τα μετρούμενα μεγέθη είναι τρία. Η μάζα  $m$  του νερού, η θερμοκρασία  $\theta_v$  του νερού, η περίοδος  $T$  μιας πλήρους περιστροφής του συστήματος κινητήρα – αντλίας και οι στροφές  $N$  του συστήματος κινητήρα – αντλίας. Εκτός από αυτά τα μεγέθη για τη περιγραφή και μελέτη του φαινομένου άντλησης είναι απαραίτητα και διάφορα παραγόμενα μεγέθη. Αυτά είναι η συχνότητα περιστροφής που ορίζεται από τη σχέση:

$$f=1/T \quad (17)$$

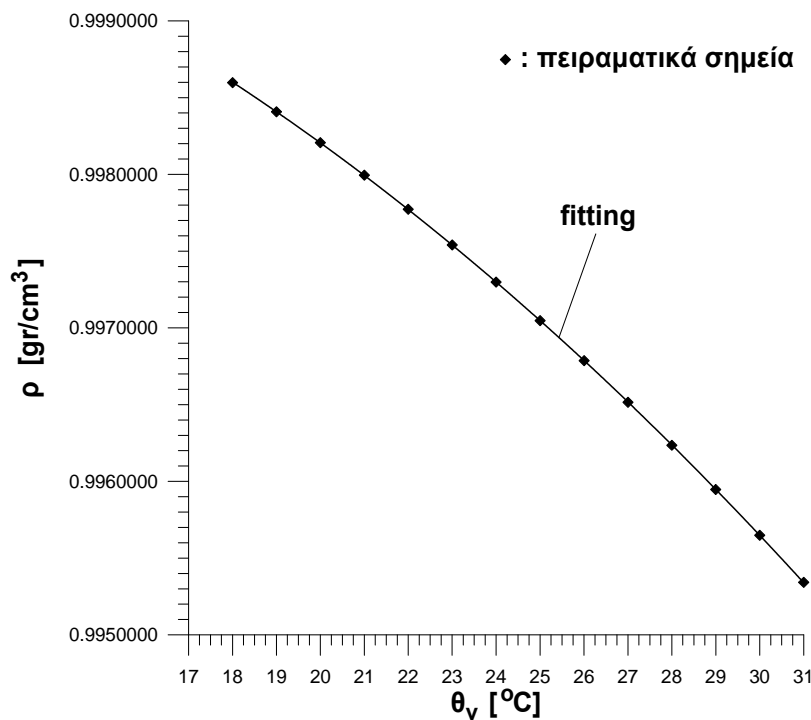
όταν υπολογίζεται η περίοδος  $T$  peak to peak ή με το χρονόμετρο, ενώ όταν υπολογίζεται μέσω των στροφών  $N$  του ταχύμετρου η συχνότητα ορίζεται από τη σχέση:

$$f=N/60 \quad [\text{Hz}] \quad (18)$$

Άλλο παραγόμενο μέγεθος αποτελεί η παροχή όγκου της κάθε αντλίας που ορίζεται από τη σχέση:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (19)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του νερού η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στην εικόνα 44, σύμφωνα με πρόσφατη πειραματική αναφορά [11]. Από αυτή την αναφορά έχει χρησιμοποιηθεί το διάστημα θερμοκρασιών από  $17^\circ\text{C}$  μέχρι  $31^\circ\text{C}$ , διότι σε αυτό κυμαίνεται η θερμοκρασία του νερού κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Οι τιμές της πυκνότητας με τη θερμοκρασία φαίνονται στον πίνακα 7 και η ακρίβειά τους παρουσιάζεται με μια αβεβαιότητα  $0.83 \times 10^{-6} \text{ gr/cm}^3$ .



Εικόνα 44. Μεταβολή της πυκνότητας του νερού με τη θερμοκρασία στο διάστημα από  $17^\circ\text{C}$  μέχρι  $31^\circ\text{C}$  και για πίεση  $101325\text{Pa}$  [11].

Στα πειραματικά σημεία του πίνακα 7 προσαρμόζεται η καμπύλη δευτέρου βαθμού:

$$\rho = a_0 + a_1 \theta_v + a_2 \theta_v^2 \quad (20)$$

όπου  $a_0 = 1.00043$ ,  $a_1 = -1.46279 \cdot 10^{-5}$ ,  $a_2 = -4.82119 \cdot 10^{-6}$ .

Πίνακας 7. Ακριβείς τιμές πυκνότητας νερού με τη θερμοκρασία

Θερμοκρασία [°C]	Πυκνότητα νερού [gr/cm <sup>3</sup> ]
18	0.9985984
19	0.9984079
20	0.9982067
21	0.9979950
22	0.9977730
23	0.9975408
24	0.9972988
25	0.9970470
26	0.9967857
27	0.9965151
28	0.9962353
29	0.9959465

Για τον προσδιορισμό του σφάλματος  $e_y$  ενός παραγόμενου μεγέθους  $y=y(x,z)$  ισχύει η σχέση:

$$e_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x} e_x\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z} e_z\right)^2} \quad (21)$$

ενώ η μέση τιμή του μεγέθους θα είναι:

$$\bar{y} = y(\bar{x}, \bar{z}) \quad (22)$$

όπου  $\bar{x}$ ,  $\bar{z}$  οι μέσες τιμές των μεγεθών  $x$ ,  $z$  αντίστοιχα.

### 3.3.4.1 Επίπεδα σφάλματος

Ειδικά εδώ στο συγκεκριμένο πείραμα για την παροχή μάζας διακρίνονται τρία επίπεδα σφάλματος. Το πρώτο επίπεδο απαντάται όταν εκτελεστεί μια άντληση και μετρηθεί η παρεχόμενη μάζα  $m$  με το χρόνο  $t$  μια φορά. Στη περίπτωση αυτή προκύπτει σφάλμα  $e_m$ , πέραν του συστηματικού της δυναμοκυψέλης  $b_m$ , για το λόγο του ότι η παροχή μάζας  $\dot{m}$  προκύπτει έμμεσα από τη μέτρηση της παρεχόμενης μάζας  $m$  με το χρόνο  $t$ , κατόπιν γραμμικής προσαρμογής που εισάγει το σφάλμα  $se$  της κλίσης, το οποίο θεωρούμε ως τυχαίο. Αυτό το πρώτο επίπεδο σφάλματος δίνεται από τη σχέση:

$$e_m = \sqrt{se^2 + b_m^2} = \sqrt{se^2 + DR^2 + s_m^2} \quad (23)$$

Λόγω της χρήσης της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων επιτυγχάνεται η καλύτερη εκτίμηση που μπορεί να γίνει για την ευθεία αναδρομής. Αυτό σημαίνει ότι το σφάλμα  $se$  θα είναι σχετικά πολύ μικρό και συνεπώς το ολικό σφάλμα  $e_m$  θα διαμορφώνεται κυρίως από το συστηματικό  $b_m$ . Ουσιαστικά το πρώτο επίπεδο σφάλματος φανερώνει τη μέγιστη ακρίβεια με την οποία μπορούμε να προσεγγίσουμε την παροχή μάζας  $\dot{m}$  με την υπάρχουσα δυναμοκυψέλη.

Το δεύτερο επίπεδο σφάλματος προκύπτει κλασσικά από τις  $n_2$  επαναλήψεις των μετρήσεων για την ίδια συχνότητα και τις ίδιες κατά το δυνατόν αμετάβλητες συνθήκες. Δηλαδή, η μια μέτρηση για την εύρεση της παροχής μάζας  $\dot{m}$  διαδέχεται αμέσως την επόμενη στην ίδια συχνότητα διέγερσης, χωρίς να συμβαίνει κάποια συστηματική διαφορετική λειτουργία λόγω συγκεκριμένης κατάστασης της δομής του πρωτοτύπου της αντλίας. Στην περίπτωση αυτή προκύπτει συνολικό σφάλμα  $e_{\bar{m}}$  που δίνεται από τη σχέση:

$$e_{\bar{m}} = \sqrt{\varepsilon_{\bar{m}}^2 + \bar{b}_{\bar{m}}^2} \quad (24)$$

όπου  $\varepsilon_{\bar{m}}$  το τυχαίο σφάλμα που δίνεται από τη σχέση (15) και

$$\bar{b}_{\bar{m}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} (b_{\bar{m}})_i}{n_2} \quad \text{το μέσο συστηματικό σφάλμα κάθε μέτρησης στην ίδια συχνότητα με}$$

$$b_{\bar{m}} = \sqrt{DR^2 + s_{n1}^2} \quad (25)$$

Χρησιμοποιείται η μέση τιμή των συστηματικών σφαλμάτων  $b_{\bar{m}}$  διότι υπάρχει εξάρτηση αυτού από τη συνολική μεταβολή  $\Delta m_t$  της μάζας και το συνολικό χρόνο  $t_t$  διεξαγωγής κάθε δοκιμής [σχέσεις (4) & (25)]. Δηλαδή, κάθε μέτρηση έχει τις δικές της τιμές  $\Delta m_t$  και  $t_t$ , οι οποίες προσδίδουν διαφορετικό συστηματικό σφάλμα  $b_{\bar{m}}$  και λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τους τιμή είναι σαν η μέση τιμή της παροχής μάζας  $\bar{m}$  να έχει προκύψει από εκτέλεση του πειράματος με διάρκεια  $\bar{t}_t$  και να συνέβη συνολική μεταβολή της μάζας  $\Delta \bar{m}_t$ .

Το τρίτο επίπεδο σφάλματος παρατηρείται όταν επαναληφθεί μια πλήρης ανεξάρτητη σειρά μετρήσεων αφού πρώτα έχει ολοκληρωθεί η προηγούμενη για κάθε συχνότητα. Οφείλεται αποκλειστικά στο κατασκευάσμα της αντλίας και πιθανώς στο πως αυτό συμπεριφέρεται όταν καλείται να επαναλειτουργήσει για την ίδια συχνότητα αφού ενδιάμεσα έχει προηγηθεί λειτουργία σε κάποια ή κάποιες άλλες διαφορετικές συχνότητες. Οι ανεξάρτητες αυτές σειρές ( $n_3$  στο πλήθος) των μετρήσεων, που πραγματοποιούνται για όλο το εύρος συχνοτήτων χωριστά, αποκλίνουν μεταξύ τους ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες γι' αυτό εισαγάγουν το συγκεκριμένο επίπεδο σφάλματος. Σημειώνεται ότι η απόκλιση αυτή παρουσιάζει σχετικά κάποια συστηματικότητα που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Στην περίπτωση αυτή προκύπτει συνολικό σφάλμα  $\delta e_{\bar{m}}$  που δίνεται από τη σχέση:

$$\delta e_{\bar{m}} = \sqrt{\delta \varepsilon_{\bar{m}}^2 + \delta \bar{b}_{\bar{m}}^2} \quad (26)$$

όπου  $\delta \varepsilon_{\bar{m}}$  το τυχαίο σφάλμα που δίνεται από τη σχέση (15) και

$$\delta \bar{b}_{\bar{m}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} (b_{\bar{m}})_i}{n_3} \quad \text{το μέσο συστηματικό σφάλμα κάθε μέτρησης στην ίδια συχνότητα.}$$

Όσο αφορά τη συχνότητα  $\bar{f}_2$  που αντιστοιχεί στο δεύτερο επίπεδο σφάλματος, λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών των συχνοτήτων των  $n_2$  επαναλήψεων των μετρήσεων για την ίδια συχνότητα σύμφωνα με τη σχέση:



$$\bar{f}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} f_i}{n_2} \quad (27)$$

Ως συνολικό σφάλμα της  $\bar{f}_2$  λαμβάνεται το μέγιστο σφάλμα  $(e_f)_{\max}$  που έχει προκύψει μέσω των σχέσεων του πίνακα 8 για τις επιμέρους μετρήσεις συχνοτήτων που αναφέρονται γύρω από την ίδια τιμή.

Η δε συχνότητα  $\bar{f}_3$ , που αντιστοιχεί στο τρίτο επίπεδο σφάλματος, λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των τιμών των συχνοτήτων των  $n_3$  επαναλήψεων, προερχόμενων από διαφορετικές σειρές μετρήσεων για την ίδια συχνότητα και δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{f}_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} f_i}{n_3} \quad (28)$$

Όπως και για την  $\bar{f}_2$ , ως συνολικό σφάλμα της  $\bar{f}_3$  λαμβάνεται το μέγιστο σφάλμα  $(e_f)_{\max}$  που έχει προκύψει μέσω των σχέσεων του πίνακα 8 για τις επιμέρους ανεξάρτητες σειρές μετρήσεων συχνοτήτων που αναφέρονται γύρω από την ίδια τιμή.

### 3.3.4.2 Υπολογισμός σφαλμάτων παραγόμενων μεγεθών

Συνδυάζοντας κατάλληλα τις ανωτέρω σχέσεις (15) έως (23) προκύπτουν οι συγκεκριμένες σχέσεις του πίνακα 8 που αφορούν τα σφάλματα των παραγόμενων μεγεθών του συγκεκριμένου πειράματος.

Πίνακας 8. Σχέσεις σφαλμάτων παραγόμενων μεγεθών λαμβάνοντας υπόψη τη διάδοση σφαλμάτων από τα μετρούμενα μεγέθη.

Μετρούμενα μεγέθη	Μονάδες	Παραγόμενο μέγεθος	Μονάδες	Συνολικό σφάλμα
περίοδος T	sec	συχνότητα f	Hz	$e_f = e_T / T^2$
στροφές N	rev/min	συχνότητα f	Hz	$e_f = e_N / 60$
θερμοκρασία $\theta_v$	$^{\circ}\text{C}$	πυκνότητα $\rho$	gr/cm <sup>3</sup>	$e_\rho = \sqrt{e_\theta^2 + b_\rho^2}$
παροχή μάζας $\dot{m}$	gr/sec	παροχή όγκου $\dot{V}$	ml/min	$e_{\dot{V}} = 60 \dot{V} \sqrt{\left(\frac{e_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{e_\rho}{\rho}\right)^2}$
πυκνότητα $\rho$	gr/cm <sup>3</sup>			

όπου:

$$e_T = \sqrt{e_T^2 + b_T^2} \quad (29)$$

με  $b_T = \pm 0.11$  ή  $\pm 0.01$  sec το συστηματικό σφάλμα του χρονομέτρου αν χρησιμοποιείται η μέθοδος peak to peak ή το ηλεκτρονικό χρονόμετρο αντίστοιχα και  $e_T$  το τυχαίο σφάλμα κατά τη μέτρηση της περιόδου T [σχέση (15)].

$$e_N = \sqrt{\varepsilon_N^2 + b_N^2} \quad (30)$$

με  $b_N = \pm 0.1 \text{rpm}$  για  $12 \leq N \leq 999.9 \text{rpm}$  και  $b_N = \pm 1 \text{rpm}$  για  $N \geq 1000 \text{rpm}$  το συστηματικό σφάλμα του ταχυμέτρου, ενώ  $\varepsilon_N$  το τυχαίο σφάλμα κατά τη μέτρηση των στροφών  $N$  [σχέση (15)].

$$\varepsilon_\rho = \pm (a_1 + 2a_2 \theta_v) b_{\theta_v} \quad (31)$$

με  $b_{\theta_v} = \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  το σφάλμα ανάγνωσης του θερμομέτρου και  $b_\rho = 0.83 \times 10^{-6} \text{ gr/cm}^3$  το θεωρούμενο συστηματικό σφάλμα της πυκνότητας [11].

Η μέση παροχή όγκου  $\bar{V}$  που αντιστοιχεί στο δεύτερο και τρίτο επίπεδο σφάλματος δίνεται από τη σχέση (19) αρκεί να χρησιμοποιηθούν τα μέσα μεγέθη:

$$\bar{V} = \frac{\bar{m}}{\bar{\rho}} \quad (32)$$

όπου  $\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} \rho_i}{n_2}$  και  $\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} \dot{m}_i}{n_2}$  για το δεύτερο επίπεδο σφάλματος ενώ  $\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} \rho_i}{n_3}$  και

$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} \dot{m}_i}{n_3}$  για το τρίτο αντίστοιχα.

Όσο αφορά το σφάλμα της μέσης παροχής όγκου  $\bar{V}$  για το δεύτερο επίπεδο σφάλματος θα δίνεται από τη σχέση:

$$e_{\bar{V}} = 60 \bar{V} \sqrt{\left(\frac{e_{\bar{m}}}{\bar{m}}\right)^2 + \left(\frac{e_{\bar{\rho}}}{\bar{\rho}}\right)^2} \quad (33)$$

όπου  $e_{\bar{\rho}} = \sqrt{\varepsilon_{\bar{\rho}}^2 + b_{\bar{\rho}}^2}$  είναι το συνολικό σφάλμα που αντιστοιχεί στη μέση πυκνότητα  $\bar{\rho}$  του νερού.

Επιλύοντας την εξίσωση (20) ως προς  $\theta_v$  για  $\rho = \bar{\rho}$ , προκύπτει ως αποδεκτή ρίζα η θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση:

$$\theta_v = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - \bar{\rho})}}{2a_2} \quad (34)$$

Είναι σαν η μέση τιμή της πυκνότητας  $\bar{\rho}$  να έχει προκύψει από εκτέλεση του πειράματος με θερμοκρασία  $\theta_v$  που δίνεται από τη σχέση (34). Συνεπώς αντικαθιστώντας την σχέση (34) στην (31) προκύπτει το τυχαίο σφάλμα για τη μέση πυκνότητα:

$$\varepsilon_{\bar{\rho}} = \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - \bar{\rho})} b_{\theta_v} \quad (35)$$

Η σχέση (33) ισχύει και για το τρίτο επίπεδο σφάλματος  $\delta e_{\bar{v}}$  μόνο που αντικαθίσταται το  $e_{\bar{m}}$  με το αντίστοιχο  $\delta e_{\bar{m}}$ .

Ένα άλλο σφάλμα που αναδεικνύει την πιστότητα έγχυσης της κάθε αντλίας είναι το σχετικό σφάλμα του όγκου το οποίο για το πρώτο επίπεδο σφάλματος ορίζεται από τη σχέση:

$$re_{\bar{v}} = 100x \frac{e_{\bar{v}}}{\bar{V}} (\%) \quad (36)$$

Αντίστοιχα για το δεύτερο και τρίτο επίπεδο σφάλματος ισχύουν οι σχέσεις:

$$re_{\bar{v}} = 100x \frac{e_{\bar{v}}}{\bar{V}} (\%) \quad (37)$$

$$\delta rec_{\bar{v}} = 100x \frac{\delta e_{\bar{v}}}{\bar{V}} (\%) \quad (38)$$

### 3.4 Πειραματική εκτέλεση

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται κατά την πειραματική εκτέλεση. Προηγουμένως όμως θα αναφερθούν ορισμένα στοιχεία που αφορούν τη δομή του πειράματος. Οι περισταλτικές αντλίες που χρησιμοποιούνται στο πείραμα είναι δυο, εκ των οποίων η μία έχει δυο έμβολα (εικόνα 36), ενώ η άλλη έχει ένα έμβολο (εικόνα 37). Στα σημεία επαφής των έκκεντρων με τα έμβολα και των εμβόλων με το κύριο σώμα της κάθε αντλίας εφαρμόζεται ένα λεπτό στρώμα ημίρρευστου λιπαντικού. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι τριβές στα σημεία επαφής και συναρμογής και επιτυγχάνεται η ομαλή και αθόρυβη λειτουργία της αντλίας. Το ρευστό που χρησιμοποιείται είναι αποσταγμένο νερό. Κάθε μια αντλία συνδέεται πρώτα με τον ηλεκτροκινητήρα που φέρει το μειωτήρα στροφών για να λειτουργήσει σε χαμηλές συχνότητες και μετά με τον ηλεκτροκινητήρα χωρίς μειωτήρα για να λειτουργήσει σε υψηλές συχνότητες. Με τον τρόπο αυτό καταγράφονται οι ρυθμοί έγχυσης των δύο αντλιών από τις χαμηλές προς τις υψηλές συχνότητες. Σε κάθε πειραματική εκτέλεση μετρώνται, αφενός μεν οι στροφές του άξονα του κινητήρα – αντλίας με το ταχύμετρο, αφετέρου δε η μάζα του εγχυόμενου νερού με τη δυναμοκυψέλη. Οι τιμές της συνάρτησης της μάζας του εγχυόμενου νερού με το χρόνο καταγράφονται αυτόματα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του λογισμικού CATMAN και παριστάνονται γραφικά με τη βοήθεια του λογισμικού GRAPHER.

Αρχικά συνδέεται η δυναμοκυψέλη με τον αναλογικό – ψηφιακό μετατροπέα και αυτός με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αφού συνδεθεί ο ADC με την τροφοδοτική ισχύ μεσολαβεί χρονικό διάστημα περίπου είκοσι λεπτών προκειμένου να αποκατασταθεί θερμική ισορροπία στον ADC και στο μηκυνσιόμετρο της δυναμοκυψέλης. Μετά καταγράφεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα με τη βοήθεια του θερμομέτρου που είναι τοποθετημένο πάνω στη συσκευή του ADC και ακολουθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης με τα πρότυπα βάρη. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης γίνεται επαλήθευση των μετρήσεων της δυναμοκυψέλης. Κατόπιν συνδέεται ο άξονας του ηλεκτροκινητήρα που φέρει το μειωτήρα στροφών με τον άξονα της περισταλτικής αντλίας δυο εμβόλων μέσω αρθρωτού συνδέσμου. Στη συνέχεια τοποθετείται μια αυτοκόλλητη αντανακλαστική ταινία στον κοινό άξονα περιστροφής κινητήρα – αντλίας, η οποία χρησιμεύει στη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα με το ταχύμετρο.

Στη συνέχεια πληρώνεται με νερό η τροφοδοτική δεξαμενή, ο χώρος αναρρόφησης και ο χώρος κατάθλιψης μέχρι το ύψος υπερχειλίσης. Επιλέγεται η ξύλινη βάση με το κατάλληλο ύψος για την τοποθέτηση της δυναμοκυψέλης που φέρει τη δεξαμενή κατάθλιψης, ώστε η ελεύθερη επιφάνεια του νερού του χώρου κατάθλιψης να βρίσκεται στο ίδιο ύψος με την ελεύθερη επιφάνεια του νερού του χώρου αναρρόφησης. Το ύψος αυτό υπολογίζεται από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας του τμήματος του σωλήνα σιλικόνης που βρίσκεται εντός της περισταλτικής αντλίας.

Για την εκτέλεση του πειράματος επιλέγεται με το ποτενσιόμετρο του ηλεκτρονικού συστήματος οδήγησης η επιθυμητή τιμή της ταχύτητας περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα (συχνότητα διέγερσης). Το σύστημα λειτουργεί για κάποιο χρονικό διάστημα, ώστε αφενός ο ηλεκτροκινητήρας να αποκτήσει σταθερές στροφές, και αφετέρου η διέγερση του σωλήνα να σταθεροποιηθεί από την αντλία. Ταυτόχρονα ρυθμίζεται η βάνα της τροφοδοτικής δεξαμενής, ώστε ο ρυθμός έγχυσης του νερού από αυτή να είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό αναρρόφησης του νερού από την αντλία και έτσι ο χώρος αναρρόφησης να βρίσκεται πάντοτε σε κατάσταση υπερχειλίσης. Ακολούθως ρυθμίζεται κατάλληλα, μέσω του λογισμικού CATMAN, η συχνότητα δειγματοληψίας (μετρήσεις ανά sec). Αφού καταγραφεί ξανά η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα και η θερμοκρασία του νερού, ενεργοποιείται η καταγραφή μέσω του H/Y των τιμών της εγχυόμενης μάζας νερού με το χρόνο. Η ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα μετράται με το ταχύμετρο όταν η πειραματική διαδικασία είναι σε εξέλιξη. Προσεγγίζεται η οπτική κεφαλή του ταχύμετρου κοντά στον περιστρεφόμενο άξονα και απέναντι ακριβώς από την αντανάκλαστική ταινία σε απόσταση μεταξύ 10 και 100 mm. Κατόπιν, πατώντας και κρατώντας πατημένο το κουμπί εκπομπής της κόκκινης LED αναβοσβήνει μια ένδειξη στην οθόνη του ταχύμετρου με ρυθμό ίδιο με τη συχνότητα περιστροφής του άξονα. Ουσιαστικά γίνεται εκπομπή της φωτοεκπομπού διόδου LED προς το σημείο του άξονα που υπάρχει ο ανακλαστήρας και όταν υποστεί ανάκλαση, επιστρέφει πίσω προς την κεφαλή του ταχύμετρου όπου ανιχνεύεται και κατ' επέκταση ενεργοποιείται η ένδειξη στην οθόνη του ταχύμετρου. Τότε εμφανίζεται και η ψηφιακή ένδειξη με τον αριθμό περιστροφών του άξονα ανά λεπτό. Επειδή όμως αρχικά η ταχύτητα περιστροφής του άξονα είναι μικρότερη από το κατώτερο όριο μέτρησης του ταχύμετρου (12 rpm), αντί του ταχύμετρου χρησιμοποιείται ένα χρονόμετρο με το οποίο μετράται πολλαπλές φορές ο απαιτούμενος χρόνος μιας πλήρους περιστροφής του άξονα του κινητήρα. Από τη μέση τιμή αυτών των πολλαπλών χρονομετρήσεων υπολογίζεται η συχνότητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα για τιμές μικρότερες του 12 rpm. Μετά την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος διακόπτεται η καταγραφή των τιμών μέτρησης των μεγεθών εγχυόμενης μάζας νερού και χρόνου και σώζεται το αρχείο των τιμών αυτών στον H/Y.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος ελέγχεται συνεχώς αν η τροφοδοτική δεξαμενή έχει αρκετή ποσότητα νερού για να καλύψει τις ανάγκες του χώρου αναρρόφησης. Αν η ποσότητα του νερού δεν είναι αρκετή, προστίθεται νερό στην τροφοδοτική δεξαμενή. Στο τέλος κάθε μέτρησης ελέγχεται αν ο χώρος κατάθλιψης του νερού είναι επαρκής για να δεχθεί την ποσότητα του νερού της επόμενης μέτρησης. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται για κάθε επιθυμητή τιμή της ταχύτητας περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα (συχνότητα διέγερσης). Σημειώνεται εδώ, ότι και οι δύο αντλίες περιστρέφονται χρησιμοποιώντας τον ηλεκτροκινητήρα που φέρει μειωτήρα στροφών μέχρι τις 70 rpm περίπου.

Αναλυτικά παρουσιάζονται στους πίνακες 9 και 10 διάφορες επιλεγμένες παράμετροι του πειράματος σε διάφορα πεδία συχνοτήτων, για τη δίχρονη περισταλτική αντλία δύο εμβόλων και την κλασική περισταλτική αντλία ενός εμβόλου αντίστοιχα.

Πίνακας 9α. Παράμετροι δοκιμής σε διάφορα πεδία συχνοτήτων για τη δίχρονη περισταλτική αντλία δύο εμβόλων της α σειράς μετρήσεων.

Πεδίο συχνοτήτων (Hz)	Συχνότητα δειγματοληψίας (M/sec)	Φίλτρο (low pass) (Hz)	Συνήθης χρονική διάρκεια πειράματος κατά προσέγγιση (sec)	Ύψος ξύλινης βάσης (mm)
0.0132 ÷ 0.0770	9.4	0.25	840	170
0.1067 ÷ 0.221	9.4	0.5	840	170
0.255 ÷ 0.562	18.75	1	600	150
0.605 ÷ 1.175	18.75	1	360	150
1.200	37.5	2	400	130
1.336 ÷ 4.991	37.5	1	400	130
5.873 ÷ 21.72	37.5	1	280	130

Πίνακας 9β. Παράμετροι δοκιμής σε διάφορα πεδία συχνοτήτων για τη δίχρονη περισταλτική αντλία δύο εμβόλων της β σειράς μετρήσεων.

Πεδίο συχνοτήτων (Hz)	Συχνότητα δειγματοληψίας (M/sec)	Φίλτρο (low pass) (Hz)	Συνήθης χρονική διάρκεια πειράματος κατά προσέγγιση (sec)	Ύψος ξύλινης βάσης (mm)
1.191 ÷ 4.990	37.5	1	400	130
5.880 ÷ 21.66	37.5	1	280	130

Πίνακας 9γ. Παράμετροι δοκιμής σε διάφορα πεδία συχνοτήτων για τη δίχρονη περισταλτική αντλία δύο εμβόλων της γ σειράς μετρήσεων.

Πεδίο συχνοτήτων (Hz)	Συχνότητα δειγματοληψίας (M/sec)	Φίλτρο (low pass) (Hz)	Συνήθης χρονική διάρκεια πειράματος κατά προσέγγιση (sec)	Ύψος ξύλινης βάσης (mm)
0.0099 ÷ 0.0387	9.4	0.25	840	170
0.0458 ÷ 0.0787	9.4	0.5	840	170
0.1026 ÷ 0.221	9.4	1	840	170
0.255 ÷ 0.997	18.75	1	600	150
1.035 ÷ 1.201	18.75	2	360	150
1.256 ÷ 5.867	37.5	2	400	130
6.664 ÷ 6.674	37.5	1	280	130
6.674	75	4	280	130
6.677 ÷ 6.683	37.5	1	280	130
7.515	75	4	280	130
8.345	37.5	1	280	130
8.346	75	4	280	130
8.347	37.5	1	280	130
8.352 ÷ 9.184	75	4	280	130

9.387	37.5	1	280	130
9.402 ÷ 10.208	75	4	280	130
10.230	37.5	1	280	130
10.424 ÷ 12.508	75	4	280	130
13.349 ÷ 14.992	150	8	210	130
15.003	37.5	1	280	130
15.432 ÷ 15.861	150	8	210	130
15.89	37.5	1	280	130
16.68 ÷ 21.70	150	8	210	130

Σημειώνεται εδώ ότι η επιλογή, τόσο της συχνότητας δειγματοληψίας, όσο και της συχνότητας του φίλτρου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων (low pass filter), έχει γίνει για το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων μέχρι 0.2 Hz περίπου, λαμβάνοντας υπόψη ότι πρέπει να γίνεται σίγουρα αντιληπτή η μεταβολή από σταγόνα σε σταγόνα. Για τις υψηλότερες συχνότητες η επιλογή βασίζεται ώστε να γίνεται σίγουρα αντιληπτός κάθε φορά ο όγκος εμβολισμού σε μια περιστροφή. Υπόψη ότι στις χαμηλές συχνότητες για μία πλήρη περιστροφή εγχύονται έξι σταγόνες, ενώ στις υψηλότερες ο όγκος εμβολισμού εγχύεται σε δύο δόσεις ανά περιστροφή. Βέβαια, λόγω γραμμικής αύξησης της εγχυόμενης μάζας με το χρόνο και επειδή ενδιαφέρει μόνο η κλίση αυτής της ευθείας ως παροχή μάζας, η απώλεια τιμών λόγω μη κατάλληλης επιλογής συχνότητας δειγματοληψίας και φίλτρου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων (low pass filter) είναι αδιάφορη. Το τελευταίο διαπιστώθηκε και πειραματικά όπως φαίνεται από τον πίνακα 9 όπου παρουσιάζονται μεταβολές στις παραπάνω παραμέτρους με το ίδιο όμως αποτέλεσμα παροχής μάζας όπως θα αναδειχθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Για τους ίδιους λόγους τα προαναφερθέντα ισχύουν αντίστοιχα και για τον πίνακα 10 της αντλίας ενός εμβόλου.

Πίνακας 10α. Παράμετροι δοκιμής σε διάφορα πεδία συχνοτήτων για την κλασσική περισταλτική αντλία ενός εμβόλου της α σειράς μετρήσεων.

Πεδίο συχνοτήτων (Hz)	Συχνότητα δειγματοληψίας (M/sec)	Φίλτρο (low pass) (Hz)	Συνήθης χρονική διάρκεια πειράματος κατά προσέγγιση (sec)	Ύψος ξύλινης βάσης (mm)
0.0076 ÷ 0.0862	9.4	0.25	800	170
0.1133 ÷ 0.223	9.4	0.5	800	170
0.253 ÷ 0.591	18.75	1	600	150
0.633 ÷ 1.183	18.75	1	360	150
1.239 ÷ 5.057	37.5	1	400	130
5.417 ÷ 6.697	37.5	1	280	130
7.087	75	4	280	130
7.546 ÷ 10.865	37.5	1	280	130
11.28	75	4	280	130
11.672 ÷ 21.77	37.5	1	280	130

Πίνακας 10β. Παράμετροι δοκιμής σε διάφορα πεδία συχνοτήτων για την κλασσική περισταλτική αντλία ενός εμβόλου της β σειράς μετρήσεων.

Πεδίο συχνοτήτων (Hz)	Συχνότητα δειγματοληψίας (M/sec)	Φίλτρο (low pass) (Hz)	Συνήθης χρονική διάρκεια πειράματος κατά προσέγγιση (sec)	Ύψος ξύλινης βάσης (mm)
1.196 ÷ 4.577	37.5	1	400	130
5.019 ÷ 21.69	37.5	1	280	130

Πίνακας 10γ. Παράμετροι δοκιμής σε διάφορα πεδία συχνοτήτων για την κλασσική περισταλτική αντλία ενός εμβόλου της γ σειράς μετρήσεων.

Πεδίο συχνοτήτων (Hz)	Συχνότητα δειγματοληψίας (M/sec)	Φίλτρο (low pass) (Hz)	Συνήθης χρονική διάρκεια πειράματος κατά προσέγγιση (sec)	Ύψος ξύλινης βάσης (mm)
0.0084 ÷ 0.0511	9.4	0.25	800	170
0.0521 ÷ 0.221	9.4	0.5	800	170
0.253 ÷ 0.592	18.75	1	600	150
0.629 ÷ 0.960	18.75	1	360	150
1.006 ÷ 1.188	18.75	2	360	150
1.193 ÷ 1.274	37.5	2	400	130
1.368 ÷ 1.395	37.5	1	400	130
1.396	37.5	2	400	130
1.401 ÷ 1.438	37.5	1	400	130
1.513 ÷ 6.264	37.5	2	400	130
6.694 ÷ 7.085	75	4	280	130
7.097	37.5	1	280	130
7.510 ÷ 7.523	37.5	1	280	130
8.354 ÷ 13.372	75	4	280	130
13.39	150	8	210	130
14.21	75	4	280	130
14.213 ÷ 21.68	150	8	210	130

Πίνακας 10δ. Παράμετροι δοκιμής σε διάφορα πεδία συχνοτήτων για την κλασσική περισταλτική αντλία ενός εμβόλου της δ σειράς μετρήσεων.

Πεδίο συχνοτήτων (Hz)	Συχνότητα δειγματοληψίας (M/sec)	Φίλτρο (low pass) (Hz)	Συνήθης χρονική διάρκεια πειράματος κατά προσέγγιση (sec)	Ύψος ξύλινης βάσης (mm)
1.180 ÷ 1.264	37.5	2	400	130
1.370	37.5	1	280	130
1.375 ÷ 3.352	37.5	2	400	130
3.746	37.5	1	400	130

3.758 ÷ 4.170	37.5	2	400	130
4.183	37.5	1	400	130
4.583 ÷ 6.253	37.5	2	400	130
6.668 ÷ 12.484	75	4	280	130
13.359 ÷ 21.68	150	8	210	130

Όταν ολοκληρώνονται οι δοκιμές με τη δίχρονη περισταλτική αντλία, συνδέεται η περισταλτική αντλία ενός εμφύλου στην πειραματική διάταξη και χρησιμοποιείται νέο κομμάτι όμοιου σωλήνα σιλκόνης. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η συνεχής καταπόνηση στο ίδιο κομμάτι σωλήνα και από τις δύο αντλίες και εξαλείφεται η πιθανότητα αστοχίας λόγω υπερβολικής κόπωσης του σωλήνα στα σημεία καταπόνησης των βαλβίδων.



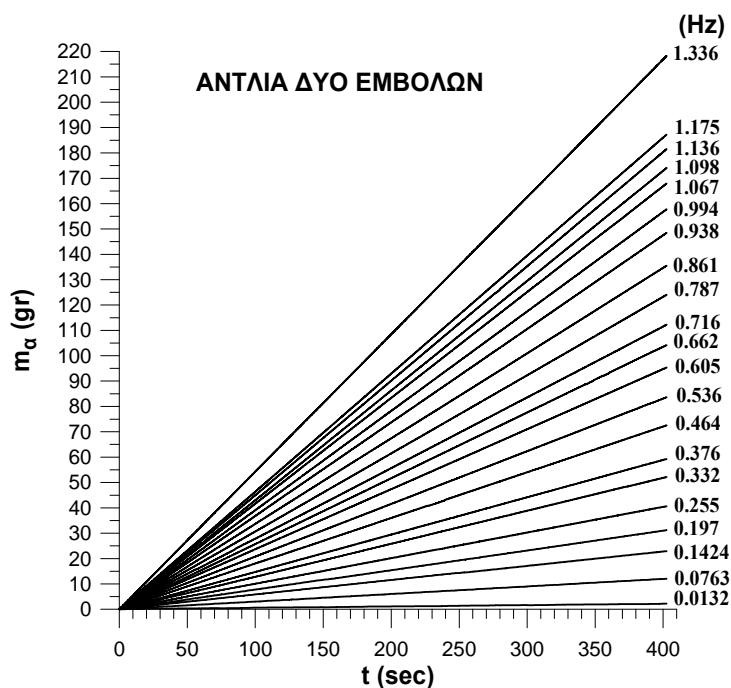
## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 4

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

#### 4.1 Εγχυόμενη παροχή μάζας συναρτήσει του χρόνου

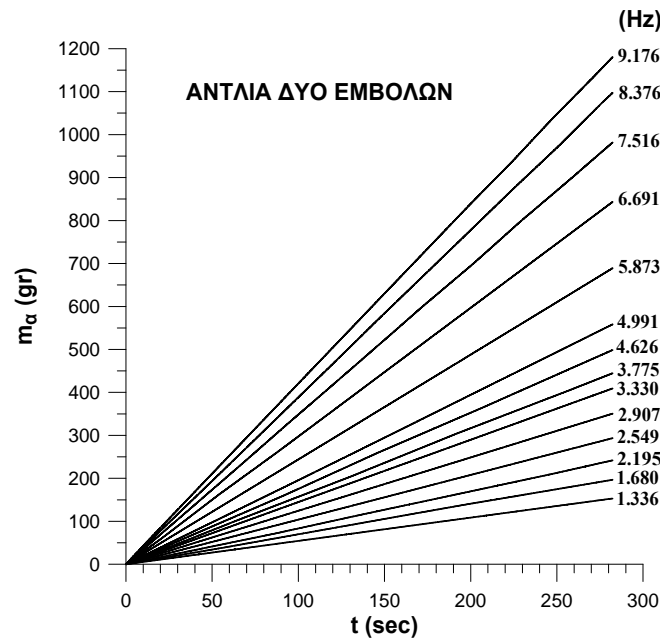
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων. Ο τρόπος της επεξεργασίας αυτής περιγράφεται παρακάτω. Για κάθε επιλεγόμενη συχνότητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα λαμβάνεται το αντίστοιχο γράφημα της εγχυόμενης μάζας νερού συναρτήσει του χρόνου. Τα διαγράμματα της εγχυόμενης μάζας νερού με το χρόνο για όλες τις συχνότητες περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα και για κάθε αντλία βρίσκονται στο τέλος της εργασίας υπό μορφή παραρτήματος. Από τα διαγράμματα αυτά συνάγεται η γραμμικότητα της εγχυόμενης μάζας του νερού με το χρόνο. Η μορφή της γραφικής παράστασης της εγχυόμενης μάζας με το χρόνο είναι σχεδόν ευθεία με θετική κλίση, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα. Κάθε πειραματική καμπύλη μπορεί να προσομοιωθεί με μια βέλτιστη ευθεία εφαρμόζοντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, η κλίση της οποίας ισοδυναμεί με την παροχή μάζας του νερού  $\dot{m}$ .

Για την καλύτερη μελέτη της λειτουργίας της κάθε αντλίας γίνεται κατάταξη των διαγραμμάτων της εγχυόμενης μάζας του νερού με το χρόνο σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες διέγερσης του σωλήνα, που συνεπάγονται αντίστοιχα χαμηλούς και υψηλούς ρυθμούς έγχυσης της αντλίας. Έτσι για κάθε αντλία και για μια σειρά μετρήσεων ( $\alpha$ ) απεικονίζεται η διάταξη των πειραματικών ευθειών με αύξουσα κλίση χωριστά για χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Το διάγραμμα της εικόνας 45, απεικονίζει τις καμπύλες παροχής μάζας του νερού της αντλίας δυο εμβόλων της σειράς μετρήσεων ( $\alpha$ ) στο διάστημα χαμηλών συχνοτήτων διέγερσης [0.0132, 1.336] Hz.



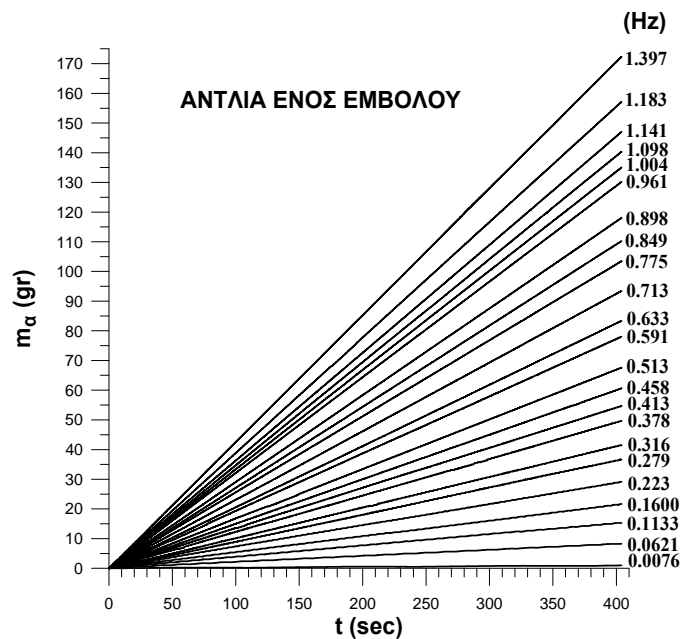
Εικόνα 45. Διάγραμμα παροχής μάζας με το χρόνο, του νερού της αντλίας δυο εμβόλων για χαμηλές συχνότητες διέγερσης ( $\alpha$  σειρά μετρήσεων).

Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα της εικόνας 46, που περιλαμβάνει τις καμπύλες της παροχής μάζας του νερού της αντλίας δυο εμβόλων της σειράς μετρήσεων (α) στο διάστημα υψηλών συχνοτήτων διέγερσης [1.336, 9.176] Hz.

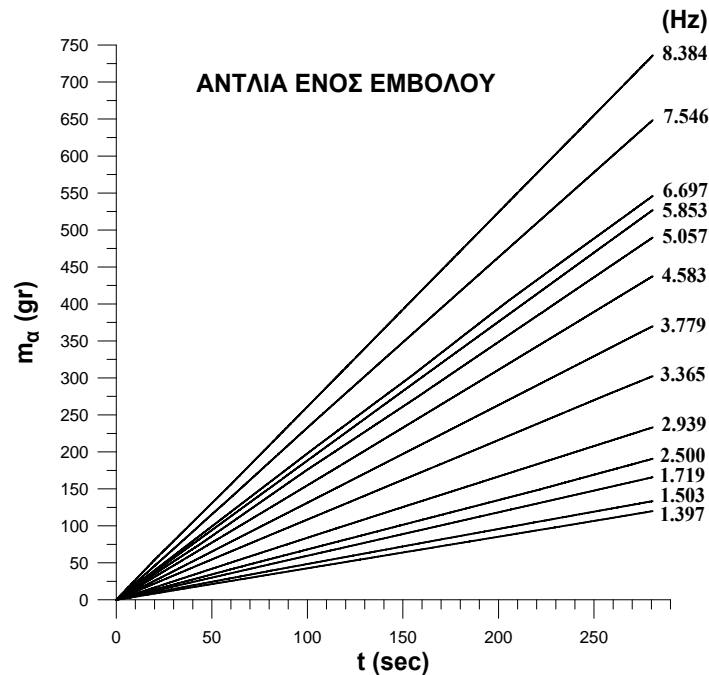


Εικόνα 46. Διάγραμμα παροχής μάζας με το χρόνο, του νερού της αντλίας δυο εμβόλων για υψηλές συχνότητες διέγερσης (α σειρά μετρήσεων).

Τα διαγράμματα των εικόνων 47 και 48 που ακολουθούν, απεικονίζουν τις καμπύλες παροχής μάζας του νερού της αντλίας ενός εμβόλου στο διάστημα χαμηλών [0.0076, 1.397] Hz και αντίστοιχα υψηλών [1.397, 8.384] Hz συχνοτήτων διέγερσης για τη σειρά μετρήσεων (α).



Εικόνα 47. Διάγραμμα παροχής μάζας με το χρόνο, του νερού της αντλίας ενός εμβόλου για χαμηλές συχνότητες διέγερσης (α σειρά μετρήσεων).



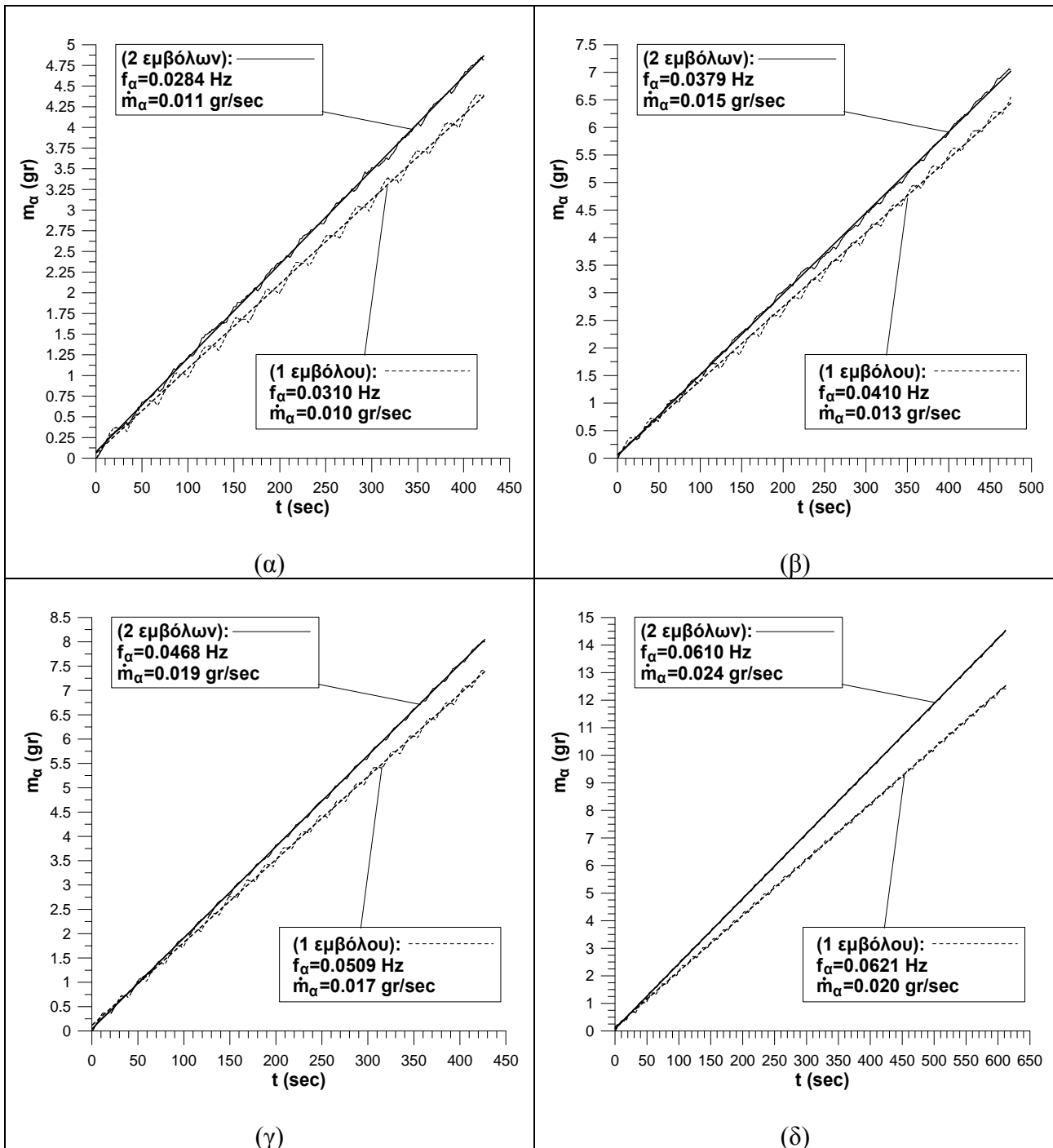
Εικόνα 48. Διάγραμμα παροχής μάζας με το χρόνο, του νερού της αντλίας ενός εμβόλου για υψηλές συχνότητες διέγερσης ( $\alpha$  σειρά μετρήσεων).

Από τα παραπάνω διαγράμματα των εικόνων 45 έως 48, παρατηρείται ότι τόσο στις χαμηλές όσο και στις υψηλές συχνότητες διέγερσης, η έγχυση του νερού της αντλίας είναι γραμμική με το χρόνο. Επίσης παρατηρείται ότι για την ίδια συχνότητα περιστροφής η παροχή μάζας του νερού παραμένει σταθερή, ενώ αυξανόμενης της συχνότητας περιστροφής η παροχή μάζας του νερού αυξάνεται. Αξίζει να αναφερθεί ότι για συχνότητες διέγερσης μεγαλύτερες της τιμής 8.5 Hz περίπου, η παροχή μάζας του νερού παύει να αυξάνεται συνεχώς, αλλά υπόκειται σε αυξομειώσεις. Η συμπεριφορά αυτή θα αναλυθεί αργότερα.

Προκειμένου να περιγραφεί η συμπεριφορά των δύο αντλιών σε χαμηλούς ρυθμούς έγχυσης οι οποίοι απαντώνται σε ιατρικές εφαρμογές, συγκρίνεται η παροχή μάζας με το χρόνο του νερού της κάθε αντλίας για σχεδόν κοινές συχνότητες διέγερσης (εικόνα 49). Οι συνεχείς καμπύλες αυτών των διαγραμμάτων αντιστοιχούν στην παροχή μάζας της αντλίας δυο εμβόλων, ενώ οι διακεκομμένες αντιστοιχούν στην αντλία ενός εμβόλου.

Παρατηρείται σε αυτές τις χαμηλές συχνότητες το φαινόμενο της οπισθοροής (back-flow), που οφείλεται, όπως ήδη έχει αναφερθεί, σε σχεδιαστικές ατέλειες στο χρονοισμό των έκκεντρων. Βέβαια η αντλία δυο εμβόλων εμφανίζει λιγότερη οπισθοροή, ενώ η αντλία ενός εμβόλου εμφανίζει έντονη οπισθοροή. Συνεπώς, η αντλία των δύο εμβόλων εξομαλύνει την έντονη πάλμωση της ροής που εμφανίζει η αντλία του ενός εμβόλου, εξασφαλίζοντας σταθερό ρυθμό έγχυσης στο χρόνο. Δηλαδή, με την αντλία δύο εμβόλων επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της έγχυσης με την έννοια ότι αυτή γίνεται γραμμική στο χρόνο.

Μια άλλη παρατήρηση είναι ότι για σχεδόν ίδιες συχνότητες η αντλία δυο εμβόλων προσδίδει μεγαλύτερη παροχή μάζας από την αντλία ενός εμβόλου, παρόλο που οι συχνότητες διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων τυγχάνει να είναι ελαφρώς μικρότερες από αυτές της αντλίας του ενός εμβόλου.



Εικόνα 49. Διαγράμματα παροχής μάζας με το χρόνο, του νερού από τις αντλίες ενός και δυο εμβόλων για σχεδόν κοινές χαμηλές συχνότητες διέγερσης.

#### 4.2 Μελέτη αντλίας δύο εμβόλων

Όπως αναφέρθηκε διεξοδικά στο κεφάλαιο 3 για την εύρεση της συχνότητας περιστροφής της αντλίας στις πολύ χαμηλές στροφές μέχρι 2 rpm περίπου, η περίοδος περιστροφής και ακολούθως η συχνότητα προκύπτουν παρατηρώντας τις καμπύλες παροχής μάζας με το χρόνο και διακρίνοντας τα πεπερασμένα χρονικά διαστήματα peak to peak. Ο

μέσος όρος αυτών των διαστημάτων ορίζει την περίοδο διέγερσης της αντλίας. Για την εύρεση της συχνότητας περιστροφής της αντλίας στις χαμηλές στροφές από 2 rpm μέχρι 12 rpm περίπου χρησιμοποιείται ηλεκτρονικό χρονόμετρο. Για αυτό το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων οι μετρήσεις της περιόδου και συνεπώς της συχνότητας με τα σφάλματά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 11 για συγκεκριμένους αριθμούς δειγμάτων  $n_{IT}$ .

Πίνακας 11. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι της συχνότητας διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων με χρήση χρονομέτρων.

Αριθμός δειγμάτων $n_{IT}$	Περίοδος διέγερσης T [sec]	Τυχαίο σφάλμα $e_T$ [sec]	Συνολικό σφάλμα $e_T$ [sec]	Συχνότητα διέγερσης f [Hz]	Συνολικό σφάλμα $e_f$ [Hz]
8	101	2.38	2.4	0.0099	0.00023
7	76	1.34	1.3	0.0131	0.00023
6	76	1.55	1.6	0.0132	0.00027
12	61.1	0.88	0.88	0.0164	0.00024
11	59.2	0.87	0.87	0.0169	0.00025
14	55	1.26	1.3	0.0182	0.00042
12	55	1.28	1.3	0.0184	0.00043
19	41.8	0.53	0.53	0.0239	0.00030
20	39.8	0.91	0.91	0.0251	0.00057
12	35.2	0.83	0.83	0.0284	0.00067
23	34.1	0.35	0.35	0.0293	0.00030
18	26.4	0.53	0.53	0.0379	0.00076
38	25.8	0.23	0.23	0.0387	0.00035
56	21.9	0.23	0.23	0.0458	0.00047
50	21.4	0.13	0.13	0.0468	0.00051
44	17.3	0.14	0.14	0.0578	0.00046
40	16.4	0.12	0.12	0.0610	0.00043
60	13.0	0.11	0.11	0.0770	0.00062
62	12.7	0.11	0.11	0.0787	0.00071
32	9.74	0.048	0.049	0.1026	0.00052
32	9.37	0.035	0.036	0.1067	0.00046
35	8.16	0.027	0.028	0.1225	0.00038
40	8.13	0.022	0.024	0.1230	0.00037
38	7.22	0.0080	0.013	0.1386	0.00025
36	7.02	0.0090	0.014	0.1424	0.00026
41	5.55	0.038	0.040	0.180	0.0014
40	5.51	0.037	0.039	0.181	0.0013

Όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3, η αστάθεια του κινητήρα λόγω των υψηλών ροπών φορτίου που αναπτύσσονται σε αυτές τις χαμηλές στροφές περιστροφής της αντλίας, δημιουργεί μικρές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις κατά την περιστροφή συνήθως διαδοχικά άνισες που έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της περιόδου. Σε αυτή τη μεταβολή της περιόδου συνίσταται η εισαγωγή σχετικά υψηλού τυχαίου σφάλματος από περίοδο σε περίοδο  $e_T$ . Έτσι το συστηματικό σφάλμα τόσο του χρονομέτρου του H/Y ( $b_T=0.11$  sec), όσο και του ηλεκτρονικού χρονομέτρου ( $b_T=0.01$  sec) συμβάλλει ελάχιστα στη διαμόρφωση του συνολικού σφάλματος  $e_T$ , γι' αυτό το τυχαίο σφάλμα  $e_T$  της περιόδου διέγερσης ταυτίζεται με το συνολικό  $e_T$  για συχνότητες διέγερσης έως 0.18 Hz περίπου της αντλίας δύο εμβόλων.

Οι τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων, όταν η συχνότητα περιστροφής της αντλίας προκύπτει από τη μέτρηση των στροφών με το ταχύμετρο (για 12 rpm και άνω), παρουσιάζονται στον πίνακα 12 για συγκεκριμένους αριθμούς δειγμάτων  $n_{IN}$ .

Πίνακας 12. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι της συχνότητας διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων με χρήση ταχυμέτρου.

Αριθμός δειγμάτων $n_{IN}$	Αριθμός στροφών N [rpm]	Τυχαίο σφάλμα $e_N$ [rpm]	Συνολικό σφάλμα $e_N$ [rpm]	Συχνότητα διέγερσης f [Hz]	Συνολικό σφάλμα $e_f$ [Hz]
9	11.8	0.036	0.11	0.197	0.0018
9	12.1	0.033	0.11	0.201	0.0018
9	13.3	0.033	0.11	0.221	0.0018
9	13.3	0.029	0.10	0.221	0.0017
7	15.3	0.033	0.11	0.255	0.0018
7	15.3	0.060	0.12	0.255	0.0019
7	16.7	0.036	0.11	0.278	0.0018
7	16.8	0.051	0.12	0.280	0.0019
7	19.9	0.036	0.11	0.332	0.0018
7	19.9	0.040	0.11	0.332	0.0018
7	21.0	0.036	0.11	0.351	0.0018
7	21.1	0.060	0.12	0.352	0.0019
7	22.6	0.036	0.11	0.376	0.0018
7	22.6	0.040	0.11	0.376	0.0018
7	23.5	0.051	0.12	0.391	0.0019
7	23.6	0.110	0.15	0.393	0.0025
7	25.0	0.049	0.11	0.417	0.0019
7	25.0	0.036	0.11	0.417	0.0018
7	27.7	0.046	0.11	0.462	0.0018
7	27.8	0.049	0.11	0.464	0.0019
7	29.1	0.037	0.11	0.485	0.0018
7	29.2	0.036	0.11	0.486	0.0018
7	32.1	0.093	0.14	0.536	0.0023
7	32.1	0.064	0.12	0.536	0.0020
7	33.7	0.049	0.11	0.562	0.0019
7	33.8	0.076	0.13	0.564	0.0021
7	36.2	0.064	0.12	0.603	0.0020
7	36.3	0.056	0.12	0.605	0.0019
7	38.1	0.040	0.11	0.634	0.0018
7	38.1	0	0.10	0.635	0.0017
7	38.1	0.036	0.11	0.635	0.0018
7	38.1	0.056	0.11	0.635	0.0019
7	38.1	0.072	0.12	0.636	0.0021
7	38.2	0.056	0.11	0.636	0.0019
7	38.2	0.067	0.12	0.637	0.0020
7	38.2	0.079	0.13	0.637	0.0021
7	38.2	0.058	0.12	0.637	0.0019
7	38.3	0.067	0.12	0.638	0.0020
7	38.3	0.060	0.12	0.638	0.0019

7	39.7	0.040	0.11	0.662	0.0018
7	39.8	0.051	0.11	0.663	0.0019
7	42.9	0.060	0.12	0.715	0.0019
7	42.9	0.067	0.12	0.716	0.0020
7	44.9	0.056	0.11	0.748	0.0019
7	44.9	0.051	0.11	0.749	0.0019
7	47.2	0.056	0.11	0.786	0.0019
7	47.2	0.040	0.11	0.787	0.0018
7	49.8	0.056	0.11	0.830	0.0019
7	49.9	0.082	0.13	0.832	0.0022
7	51.5	0.040	0.11	0.859	0.0018
7	51.6	0.056	0.11	0.861	0.0019
7	53.5	0.056	0.11	0.892	0.0019
7	53.5	0.060	0.12	0.892	0.0019
7	56.3	0.067	0.12	0.938	0.0020
7	56.3	0.094	0.14	0.939	0.0023
7	59.6	0.079	0.13	0.994	0.0021
7	59.8	0.10	0.14	0.997	0.0024
7	61.9	0.12	0.15	1.031	0.0026
10	62.1	0.21	0.23	1.034	0.0038
10	63.9	0.13	0.17	1.065	0.0028
10	64.0	0.10	0.14	1.067	0.0024
10	65.7	0.14	0.17	1.096	0.0029
10	65.9	0.13	0.16	1.098	0.0027
19	68.1	0.056	0.11	1.136	0.0019
19	68.2	0.069	0.12	1.136	0.0020
19	69.4	0.042	0.11	1.157	0.0018
19	69.5	0.059	0.12	1.158	0.0019
19	70.5	0.077	0.13	1.175	0.0021
19	70.6	0.065	0.12	1.177	0.0020
19	71.5	0.19	0.21	1.191	0.0036
19	72.0	0.16	0.19	1.200	0.0032
19	72.1	0.057	0.11	1.201	0.0019
21	72.3	0.39	0.40	1.206	0.0067
20	75.4	0.46	0.47	1.256	0.0078
21	78.9	0.29	0.31	1.316	0.0051
20	79.5	0.18	0.21	1.325	0.0034
20	80.2	0.17	0.20	1.336	0.0033
21	90.0	0.18	0.21	1.501	0.0035
21	91.2	0.16	0.19	1.520	0.0032
21	92.2	0.15	0.18	1.536	0.0030
21	98.8	0.31	0.32	1.646	0.0054
21	99.4	0.17	0.20	1.656	0.0033
21	100.8	0.18	0.20	1.680	0.0034
21	119.0	0.25	0.27	1.983	0.0045
21	119.4	0.16	0.18	1.991	0.0031
21	119.7	0.14	0.17	1.995	0.0029
21	129.1	0.24	0.26	2.152	0.0043

20	130.7	0.090	0.13	2.178	0.0022
21	131.7	0.081	0.13	2.195	0.0021
21	150.8	0.21	0.24	2.514	0.0039
21	151.6	0.064	0.12	2.526	0.0020
21	152.9	0.086	0.13	2.549	0.0022
21	174.1	0.39	0.40	2.902	0.0067
21	174.4	0.27	0.29	2.907	0.0048
20	174.8	0.23	0.25	2.913	0.0042
21	198.2	0.56	0.57	3.303	0.0095
21	199.4	0.086	0.13	3.323	0.0022
21	199.8	0.18	0.20	3.330	0.0034
21	225.1	0.16	0.18	3.751	0.0031
21	226.5	0.17	0.19	3.775	0.0032
20	226.7	0.27	0.29	3.778	0.0048
21	249.4	0.15	0.18	4.157	0.0030
21	249.8	0.081	0.13	4.163	0.0021
21	250.3	0.17	0.20	4.171	0.0033
21	250.7	0.16	0.18	4.179	0.0031
21	276.4	0.1	0.14	4.607	0.0024
21	277.4	0.070	0.12	4.623	0.0020
21	277.6	0.095	0.14	4.626	0.0023
21	299.4	0.084	0.13	4.990	0.0022
21	299.4	0.081	0.13	4.991	0.0021
21	300.2	0.15	0.18	5.003	0.0030
21	352.0	0.18	0.20	5.867	0.0034
21	352.4	0.17	0.19	5.873	0.0032
15	352.8	0.38	0.40	5.880	0.0066
16	399.6	0.14	0.17	6.660	0.0029
15	399.8	0.050	0.11	6.664	0.0019
15	399.9	0.056	0.11	6.665	0.0019
15	400.0	0.049	0.11	6.666	0.0019
15	400.0	0.10	0.14	6.667	0.0024
15	400.3	0.26	0.28	6.672	0.0047
15	400.4	0.23	0.25	6.673	0.0042
15	400.4	0.17	0.20	6.674	0.0033
15	400.5	0.26	0.28	6.674	0.0046
15	400.6	0.36	0.38	6.677	0.0063
15	400.7	0.23	0.25	6.678	0.0042
15	401.0	0.32	0.33	6.683	0.0055
15	401.4	0.13	0.16	6.691	0.0027
15	449.4	0.12	0.16	7.490	0.0026
14	450.9	0.27	0.29	7.515	0.0048
15	451.0	0.19	0.21	7.516	0.0036
15	500.7	0.49	0.50	8.345	0.0083
15	500.8	0.23	0.25	8.346	0.0042
15	500.8	0.48	0.49	8.347	0.0082
12	501.1	0.095	0.14	8.352	0.0023
15	501.4	0.17	0.19	8.356	0.0032

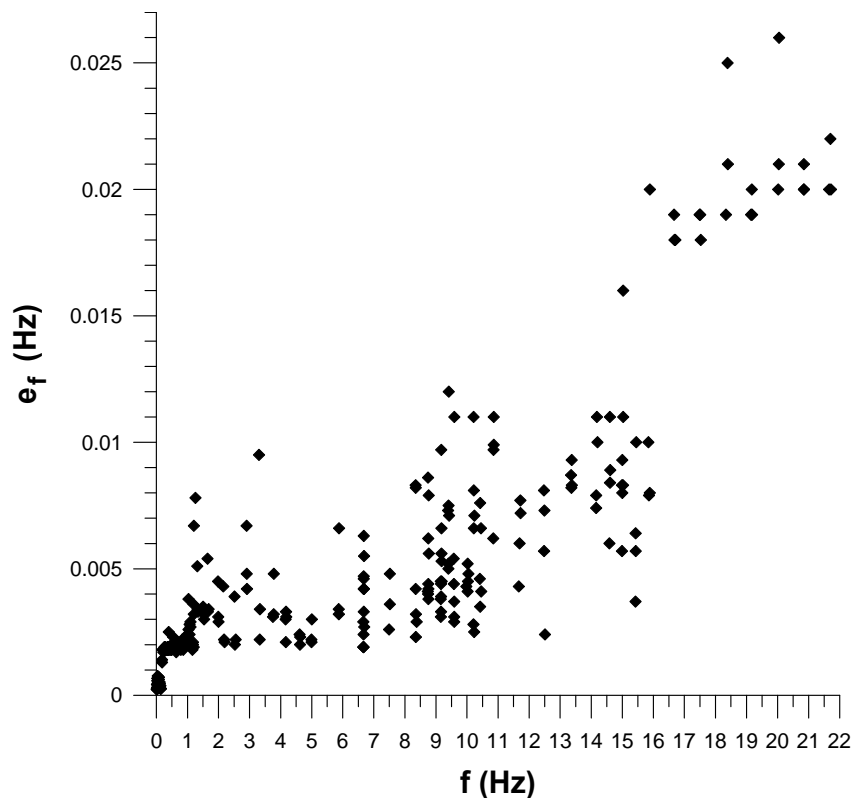


15	502.5	0.14	0.17	8.376	0.0029
15	524.2	0.23	0.25	8.737	0.0041
15	524.6	0.22	0.24	8.744	0.0040
15	524.7	0.50	0.51	8.745	0.0086
16	525.0	0.25	0.26	8.749	0.0044
14	525.0	0.36	0.37	8.751	0.0062
15	525.3	0.20	0.23	8.755	0.0038
15	525.3	0.23	0.25	8.756	0.0042
15	525.8	0.46	0.47	8.764	0.0079
15	526.1	0.32	0.34	8.769	0.0056
15	549.2	0.25	0.27	9.153	0.0045
15	549.2	0.20	0.23	9.153	0.0038
15	549.3	0.16	0.19	9.156	0.0031
15	549.7	0.25	0.26	9.161	0.0044
14	549.7	0.17	0.20	9.162	0.0033
15	550.0	0.21	0.23	9.166	0.0039
15	550.1	0.58	0.58	9.169	0.0097
15	550.5	0.39	0.40	9.175	0.0066
15	550.6	0.32	0.34	9.176	0.0056
15	550.7	0.30	0.32	9.178	0.0053
15	551.0	0.25	0.27	9.184	0.0045
15	563.2	0.43	0.44	9.387	0.0073
15	563.9	0.29	0.31	9.399	0.0052
15	564.0	0.28	0.30	9.401	0.0050
16	564.6	0.74	0.74	9.41	0.012
15	564.1	0.44	0.45	9.402	0.0075
15	565.2	0.42	0.43	9.421	0.0071
15	574.3	0.31	0.33	9.572	0.0054
15	574.5	0.25	0.26	9.576	0.0044
15	575.2	0.20	0.22	9.587	0.0037
15	575.3	0.16	0.19	9.588	0.0031
15	575.3	0.14	0.17	9.588	0.0029
15	575.7	0.64	0.65	9.59	0.011
15	598.7	0.24	0.26	9.978	0.0043
15	601.1	0.22	0.25	10.018	0.0041
15	601.1	0.30	0.31	10.019	0.0052
15	601.8	0.25	0.27	10.029	0.0045
15	602.7	0.27	0.29	10.044	0.0048
15	612.3	0.67	0.68	10.21	0.011
15	612.5	0.13	0.17	10.208	0.0028
15	613.0	0.48	0.49	10.216	0.0081
15	613.1	0.39	0.40	10.219	0.0066
15	613.8	0.11	0.15	10.230	0.0025
15	614.0	0.41	0.43	10.234	0.0071
15	624.6	0.26	0.28	10.410	0.0046
15	625.3	0.45	0.46	10.421	0.0076
15	625.5	0.18	0.21	10.424	0.0035
15	626.9	0.38	0.39	10.448	0.0066

15	627.2	0.22	0.25	10.454	0.0041
15	650.7	0.36	0.37	10.845	0.0062
15	651.1	0.58	0.58	10.851	0.0097
15	651.5	0.63	0.64	10.86	0.011
15	651.6	0.59	0.59	10.860	0.0099
15	699.9	0.24	0.26	11.665	0.0043
15	701.6	0.34	0.36	11.693	0.0060
15	703.0	0.45	0.46	11.717	0.0077
15	703.6	0.42	0.43	11.726	0.0072
15	748.6	0.48	0.49	12.477	0.0081
15	749.5	0.42	0.44	12.492	0.0073
15	748.8	0.33	0.34	12.481	0.0057
15	750.4	0.10	0.14	12.508	0.0024
11	801.0	0.51	0.52	13.349	0.0087
15	801.6	0.48	0.49	13.359	0.0082
15	802.3	0.55	0.56	13.372	0.0093
15	802.6	0.49	0.50	13.376	0.0083
15	849.3	0.43	0.44	14.156	0.0074
15	849.6	0.46	0.47	14.160	0.0079
13	850.7	0.64	0.65	14.18	0.011
11	851.9	0.60	0.61	14.20	0.010
15	875.1	0.34	0.36	14.586	0.0060
15	875.8	0.66	0.67	14.60	0.011
15	876.1	0.49	0.50	14.602	0.0084
11	876.6	0.52	0.53	14.610	0.0089
12	899.4	0.49	0.50	14.990	0.0083
12	899.5	0.33	0.34	14.992	0.0057
15	900.1	0.55	0.56	15.001	0.0093
15	900.2	0.47	0.48	15.003	0.0080
15	901.4	0.49	0.50	15.023	0.0083
15	901.5	0.68	0.69	15.03	0.011
15	902.0	0.94	0.95	15.03	0.016
15	925.6	0.20	0.22	15.427	0.0037
12	925.9	0.37	0.38	15.432	0.0064
15	926.0	0.33	0.34	15.434	0.0057
15	926.8	0.62	0.63	15.45	0.010
15	950.5	0.60	0.61	15.84	0.010
12	951.7	0.46	0.47	15.861	0.0079
15	953.1	0.47	0.48	15.884	0.0080
15	953	1.17	1.2	15.89	0.020
15	1000	0.53	1.1	16.67	0.019
12	1001	0.45	1.1	16.68	0.018
15	1002	0.43	1.1	16.71	0.018
15	1050	0.57	1.2	17.49	0.019
12	1051	0.53	1.1	17.51	0.019
15	1052	0.44	1.1	17.53	0.018
14	1100	0.50	1.1	18.34	0.019
12	1103	1.15	1.5	18.39	0.025

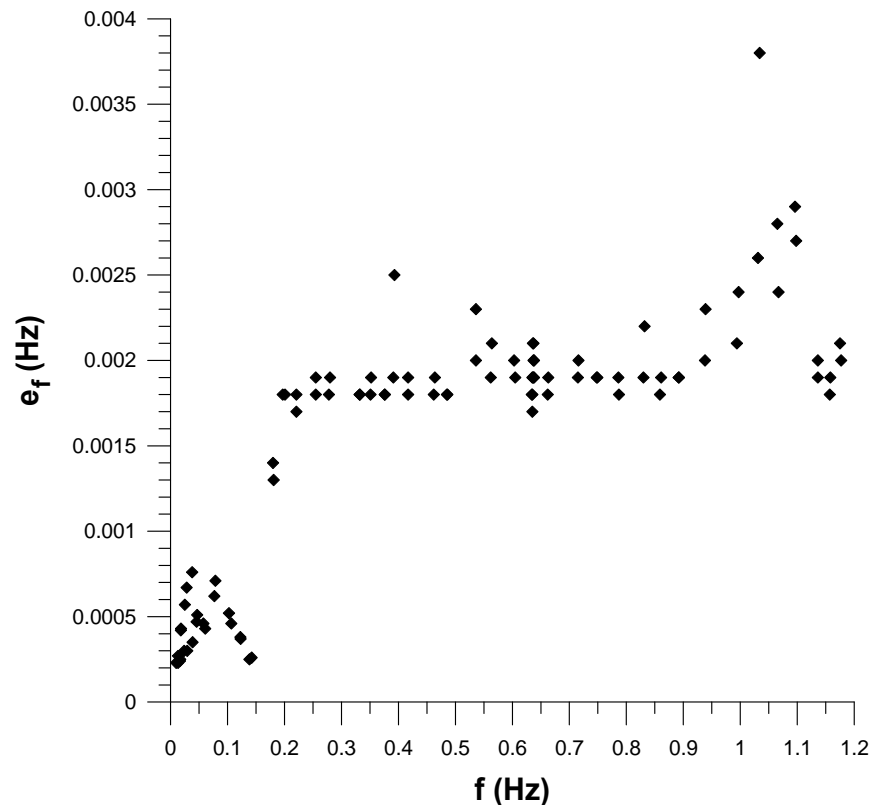
15	1104	0.76	1.3	18.40	0.021
15	1149	0.52	1.1	19.15	0.019
15	1150	0.61	1.2	19.17	0.020
12	1151	0.49	1.1	19.18	0.019
12	1201	0.66	1.2	20.02	0.020
15	1202	0.75	1.3	20.04	0.021
15	1203	1.22	1.6	20.05	0.026
15	1251	0.65	1.2	20.85	0.020
12	1251	0.66	1.2	20.85	0.020
15	1251	0.79	1.3	20.85	0.021
15	1300	0.69	1.2	21.66	0.020
12	1302	0.83	1.3	21.70	0.022
15	1303	0.71	1.2	21.72	0.020

Στην εικόνα 50 παρουσιάζεται η κατανομή συνολικού σφάλματος  $e_f$  της συχνότητας για την αντλία δύο εμβόλων σε όλο το πεδίο συχνοτήτων.



Εικόνα 50. Κατανομή συνολικού σφάλματος  $e_f$  της συχνότητας για την αντλία δύο εμβόλων σε όλο το πεδίο συχνοτήτων.

Για λόγους ευκρίνειας μεγεθύνεται η εικόνα 50 στις χαμηλές συχνότητες, οπότε προκύπτει η εικόνα 51 όπου παρουσιάζεται η κατανομή του συνολικού σφάλματος  $e_f$  της συχνότητας για την αντλία δύο εμβόλων που αφορά το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης.



Εικόνα 51. Κατανομή συνολικού σφάλματος  $e_f$  της συχνότητας για την αντλία δύο εμβόλων στο χαμηλό πεδίο συχνοτήτων.

Η υπολογισμένη παροχή μάζας του νερού  $\dot{m}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του πρώτου επιπέδου σφάλματος  $e_m$  της αντλίας δύο εμβόλων παρουσιάζονται στον πίνακα 13 καθώς αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης  $f$ .

Πίνακας 13. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι πρώτου επιπέδου σφάλματος της παροχής μάζας για κάθε συχνότητα διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Συχνότητα διέγερσης $f$ [Hz]	Διάρκεια μέτρησης $t_i$ [sec]	Αριθμός δειγμάτων $n$	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Σφάλμα κλίσης $se \times 10^{-5}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $b_m$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_m$ [gr/sec]	Μέση τετραγωνική απόκλιση αναδρομής RMS %
0.0099	808.0	7576	0.004	0.079	0.0097	0.0097	0.00065
0.0131	534.9	5016	0.005	0.15	0.0097	0.0097	0.00068
0.0132	454.9	4266	0.005	0.31	0.0097	0.0097	0.0011
0.0164	732.9	6872	0.006	0.10	0.0097	0.0097	0.0007
0.0169	650.7	6101	0.007	0.17	0.0097	0.0097	0.001
0.0182	768.2	7203	0.006	0.12	0.0097	0.0097	0.00086
0.0184	651.0	6104	0.007	0.17	0.0097	0.0097	0.001
0.0239	794.0	7445	0.009	0.19	0.0097	0.0097	0.0015
0.0251	796.0	7464	0.009	0.13	0.0097	0.0097	0.00098
0.0284	422.0	3957	0.011	0.39	0.0097	0.0097	0.0012
0.0293	784.0	7351	0.010	0.12	0.0097	0.0097	0.00088
0.0379	475.0	4454	0.015	0.46	0.0097	0.0097	0.0016

0.0387	822.0	7707	0.013	0.18	0.0097	0.0097	0.0014
0.0458	641.0	6010	0.016	0.15	0.0097	0.0097	0.00084
0.0468	427.1	4005	0.019	0.31	0.0097	0.0097	0.00092
0.0578	837.0	7848	0.020	0.10	0.0098	0.0098	0.00087
0.0610	656.0	6151	0.024	0.16	0.0097	0.0097	0.00093
0.0770	866.6	8125	0.030	0.12	0.0099	0.0099	0.001
0.0787	829.0	7773	0.028	0.097	0.0099	0.0099	0.0008
0.1026	850.0	7970	0.04	0.11	0.010	0.010	0.00098
0.1067	811.0	7604	0.04	0.40	0.010	0.010	0.0032
0.1225	906.6	8500	0.05	0.26	0.010	0.010	0.0024
0.1230	853.8	8005	0.04	0.18	0.010	0.010	0.0015
0.1386	852.2	7990	0.05	0.23	0.010	0.010	0.002
0.1424	851.6	7985	0.06	0.67	0.010	0.010	0.004
0.180	846.8	7940	0.07	0.31	0.011	0.011	0.0026
0.181	846.8	7940	0.06	0.18	0.011	0.011	0.0015
0.197	850.6	7975	0.08	0.44	0.011	0.011	0.0039
0.201	846.3	7935	0.07	0.52	0.011	0.011	0.0045
0.221	843.6	7910	0.09	0.78	0.011	0.011	0.0065
0.221	852.2	7990	0.08	0.65	0.011	0.011	0.0055
0.255	648.0	12150	0.10	0.16	0.010	0.010	0.0011
0.255	606.9	11380	0.09	0.23	0.010	0.010	0.0015
0.278	605.8	11360	0.09	0.29	0.010	0.010	0.0019
0.280	654.4	12270	0.11	0.33	0.011	0.011	0.0023
0.332	653.8	12260	0.13	0.22	0.011	0.011	0.0016
0.332	604.8	11340	0.11	0.24	0.010	0.010	0.0015
0.351	655.41	12290	0.14	0.20	0.011	0.011	0.0014
0.352	607.4	11390	0.12	0.18	0.011	0.011	0.0011
0.376	651.7	12220	0.15	0.18	0.011	0.011	0.0012
0.376	610.1	11440	0.13	0.16	0.011	0.011	0.00092
0.391	673.0	12620	0.15	0.19	0.012	0.012	0.0014
0.393	604.2	11330	0.13	0.58	0.011	0.011	0.0037
0.417	605.8	11360	0.14	0.20	0.011	0.011	0.0012
0.417	646.4	12120	0.16	0.25	0.012	0.012	0.0017
0.462	604.2	11330	0.16	0.16	0.011	0.011	0.00096
0.464	643.2	12060	0.18	0.24	0.012	0.012	0.0015
0.485	603.7	11320	0.16	0.50	0.011	0.011	0.0028
0.486	645.3	12100	0.19	0.29	0.012	0.012	0.0018
0.536	616.5	11560	0.18	0.39	0.012	0.012	0.0025
0.536	601.6	11280	0.21	0.29	0.012	0.012	0.0018
0.562	632.0	11850	0.22	0.26	0.013	0.013	0.0017
0.564	605.3	11350	0.19	0.28	0.012	0.012	0.0017
0.603	443.2	8310	0.20	0.79	0.010	0.010	0.0028
0.605	430.4	8070	0.24	0.26	0.011	0.011	0.00092
0.634	378.6	7100	0.21	0.45	0.010	0.010	0.0012
0.635	365.8	6860	0.21	0.58	0.010	0.010	0.0018
0.635	363.2	6810	0.21	0.45	0.010	0.010	0.0012
0.635	375.4	7040	0.21	0.49	0.010	0.010	0.0013
0.636	365.3	6850	0.21	0.50	0.010	0.010	0.0013

0.636	366.4	6870	0.21	0.43	0.010	0.010	0.0012
0.637	365.8	6860	0.22	0.49	0.010	0.010	0.0014
0.637	370.1	6940	0.22	0.41	0.010	0.010	0.0012
0.637	365.3	6850	0.22	0.57	0.010	0.010	0.0014
0.638	407.4	7640	0.25	0.41	0.010	0.010	0.0013
0.638	363.7	6820	0.22	0.22	0.010	0.010	0.00065
0.662	409.0	7670	0.26	0.37	0.010	0.010	0.0013
0.663	363.7	6820	0.22	0.34	0.010	0.010	0.00096
0.715	374.4	7020	0.24	0.31	0.010	0.010	0.00088
0.716	438.9	8230	0.28	0.53	0.011	0.011	0.002
0.748	372.8	6990	0.25	0.30	0.010	0.010	0.0008
0.749	405.3	7600	0.29	0.43	0.011	0.011	0.0015
0.786	365.3	6850	0.27	0.26	0.010	0.010	0.00067
0.787	404.8	7590	0.31	0.60	0.011	0.011	0.002
0.830	440.5	8260	0.33	0.37	0.011	0.011	0.0013
0.832	366.4	6870	0.28	0.57	0.010	0.010	0.0014
0.859	365.3	6850	0.29	0.47	0.010	0.010	0.0014
0.861	455.4	8540	0.34	0.50	0.012	0.012	0.0018
0.892	417.6	7830	0.35	0.51	0.011	0.011	0.0016
0.892	363.7	6820	0.30	0.41	0.010	0.010	0.0012
0.938	403.2	7560	0.37	0.34	0.011	0.011	0.0012
0.939	376.5	7060	0.32	0.58	0.011	0.011	0.0017
0.994	405.3	7600	0.39	0.39	0.011	0.011	0.0013
0.997	375.4	7040	0.34	0.51	0.011	0.011	0.0014
1.031	403.2	7560	0.40	0.25	0.011	0.011	0.00078
1.034	363.7	6820	0.36	1.0	0.011	0.011	0.0029
1.065	368.0	6900	0.37	0.83	0.011	0.011	0.0023
1.067	406.4	7620	0.42	0.31	0.011	0.011	0.00091
1.096	367.4	6890	0.38	1.1	0.011	0.011	0.003
1.098	402.6	7550	0.43	0.81	0.012	0.012	0.0028
1.136	363.2	6810	0.40	0.68	0.011	0.011	0.0017
1.136	403.2	7560	0.45	0.28	0.012	0.012	0.00092
1.157	363.7	6820	0.41	0.48	0.011	0.011	0.0014
1.158	402.6	7550	0.46	0.40	0.012	0.012	0.0012
1.175	436.2	8180	0.47	0.31	0.013	0.013	0.0012
1.177	362.6	6800	0.41	0.42	0.011	0.011	0.0012
1.191	402.4	15090	0.44	1.1	0.012	0.012	0.0043
1.200	366.0	13726	0.47	0.56	0.011	0.011	0.0017
1.201	363.7	6820	0.42	0.48	0.011	0.011	0.0013
1.206	402.0	15075	0.44	2.5	0.012	0.012	0.01
1.256	402.0	15075	0.47	3.1	0.012	0.012	0.012
1.316	401.2	15045	0.49	1.6	0.012	0.012	0.0061
1.325	402.0	15075	0.50	0.85	0.012	0.012	0.0032
1.336	407.2	15270	0.54	0.30	0.013	0.013	0.0012
1.501	402.0	15075	0.56	0.56	0.013	0.013	0.002
1.520	403.2	15120	0.55	0.55	0.013	0.013	0.0019
1.536	432.4	16215	0.63	0.63	0.015	0.015	0.0023
1.646	401.2	15045	0.59	4.1	0.013	0.013	0.013

1.656	400.8	15030	0.60	4.0	0.013	0.013	0.013
1.680	402.4	15090	0.69	6.1	0.014	0.014	0.019
1.983	400.0	15000	0.78	1.4	0.015	0.015	0.0052
1.991	402.0	15075	0.80	0.54	0.015	0.015	0.0019
1.995	400.4	15015	0.78	0.32	0.015	0.015	0.0011
2.152	400.8	15030	0.81	0.28	0.015	0.015	0.0011
2.178	401.2	15045	0.81	0.12	0.015	0.015	0.00043
2.195	403.6	15135	0.87	9.0	0.016	0.016	0.03
2.514	400.4	15015	0.93	1.6	0.017	0.017	0.006
2.526	401.2	15045	0.92	5.1	0.017	0.017	0.017
2.549	408.8	15330	1.04	0.69	0.019	0.019	0.0021
2.902	401.2	15045	1.21	4.8	0.021	0.021	0.018
2.907	408.4	15315	1.24	1.2	0.021	0.021	0.0045
2.913	403.2	15120	1.22	4.5	0.021	0.021	0.015
3.303	401.6	15060	1.41	1.0	0.023	0.023	0.003
3.323	401.6	15060	1.44	4.4	0.024	0.024	0.014
3.330	406.8	15255	1.45	1.1	0.024	0.024	0.004
3.751	401.2	15045	1.51	0.39	0.024	0.024	0.0015
3.775	401.6	15060	1.58	4.3	0.026	0.026	0.014
3.778	401.2	15045	1.48	1.3	0.024	0.024	0.0046
4.157	401.2	15045	1.46	4.4	0.024	0.024	0.014
4.163	401.6	15060	1.48	4.2	0.024	0.024	0.014
4.171	400.4	15015	1.46	0.66	0.024	0.024	0.0026
4.179	401.6	15060	1.68	0.96	0.027	0.027	0.0036
4.607	401.6	15060	1.62	0.57	0.026	0.026	0.002
4.623	400.8	15030	1.61	4.2	0.026	0.026	0.013
4.626	405.6	15210	1.77	4.2	0.029	0.029	0.013
4.990	401.6	15060	1.83	4.0	0.029	0.029	0.013
4.991	413.2	15495	1.98	4.5	0.033	0.033	0.018
5.003	400.4	15015	1.88	0.73	0.030	0.030	0.0028
5.867	400.8	15030	2.42	3.7	0.037	0.037	0.012
5.873	282.8	10605	2.44	1.3	0.021	0.021	0.0028
5.880	283.6	10635	2.41	4.7	0.020	0.020	0.01
6.660	281.6	10560	3.13	7.4	0.025	0.025	0.013
6.664	282.0	10575	3.04	5.5	0.024	0.024	0.011
6.665	282.0	10575	3.04	5.4	0.024	0.024	0.01
6.666	282.0	10575	3.05	5.9	0.024	0.024	0.011
6.667	282.0	10575	3.04	5.5	0.024	0.024	0.011
6.672	282.0	10575	3.05	6.1	0.024	0.024	0.012
6.673	282.4	10590	3.05	5.6	0.025	0.025	0.011
6.674	281.6	10560	3.04	5.8	0.024	0.024	0.011
6.674	281.2	21090	3.08	5.5	0.025	0.025	0.015
6.677	283.2	10620	3.05	6.2	0.025	0.025	0.012
6.678	282.4	10590	3.02	5.3	0.024	0.024	0.01
6.683	282.4	10590	3.03	8.1	0.024	0.024	0.016
6.691	282.8	10605	2.99	6.4	0.024	0.024	0.018
7.490	281.6	10560	3.62	6.4	0.028	0.028	0.012
7.515	281.6	21120	3.54	6.9	0.028	0.028	0.02

7.516	296.8	11130	3.48	6.0	0.030	0.030	0.012
8.345	280.8	10530	4.02	5.4	0.031	0.031	0.01
8.346	280.8	21060	3.97	4.7	0.031	0.031	0.013
8.347	280.4	10515	4.03	6.1	0.031	0.031	0.011
8.352	228.8	17160	3.98	4.6	0.022	0.022	0.0078
8.356	280.8	10530	4.11	6.2	0.032	0.032	0.012
8.376	282.4	10590	3.89	7.4	0.030	0.030	0.015
8.737	280.0	10500	3.97	19	0.030	0.030	0.038
8.744	280.8	10530	3.92	15	0.030	0.030	0.03
8.745	282.0	10575	3.98	37	0.031	0.031	0.079
8.749	280.4	10515	3.88	11	0.030	0.030	0.021
8.751	280.8	10530	3.89	15	0.030	0.030	0.029
8.755	280.2	10509	3.98	37	0.031	0.031	0.078
8.756	281.2	21090	3.78	5.8	0.029	0.029	0.016
8.764	281.6	21120	3.75	6.9	0.029	0.029	0.019
8.769	280.4	10515	3.87	11	0.030	0.030	0.021
9.153	280.4	10515	3.86	5.9	0.030	0.030	0.011
9.153	281.2	10545	3.86	5.8	0.030	0.030	0.011
9.156	280.4	10515	3.87	6.4	0.030	0.030	0.013
9.161	280.8	21060	3.77	6.1	0.029	0.029	0.017
9.162	284.4	10665	3.87	7.3	0.031	0.031	0.015
9.166	280.4	10515	3.96	6.9	0.030	0.030	0.013
9.169	282.4	10590	3.88	5.6	0.030	0.030	0.011
9.175	281.6	21120	3.77	6.1	0.029	0.029	0.018
9.176	302.4	11340	4.18	9.5	0.037	0.037	0.021
9.178	282.4	10590	3.92	11	0.031	0.031	0.023
9.184	280.8	21060	3.80	6.6	0.029	0.029	0.018
9.387	282.0	10575	3.84	7.5	0.030	0.030	0.015
9.399	281.2	10545	3.90	6.4	0.030	0.030	0.012
9.401	280.8	10530	3.90	6.9	0.030	0.030	0.013
9.41	280.0	10500	3.99	10	0.031	0.031	0.018
9.402	281.6	21120	3.76	6.4	0.029	0.029	0.018
9.421	280.8	21060	3.78	6.1	0.029	0.029	0.018
9.572	281.6	10560	3.98	5.9	0.031	0.031	0.012
9.576	282.4	10590	3.58	6.6	0.028	0.028	0.013
9.587	280.4	10515	3.97	6.6	0.031	0.031	0.013
9.588	280.0	10502	3.97	6.7	0.030	0.030	0.013
9.588	282.0	21150	3.82	7.3	0.030	0.030	0.021
9.59	280.4	10515	4.08	5.8	0.031	0.031	0.011
9.978	281.2	10545	4.17	7.9	0.032	0.032	0.016
10.018	281.6	21120	4.05	7.5	0.031	0.031	0.021
10.019	280.0	10500	4.18	7.2	0.032	0.032	0.014
10.029	282.8	10605	3.63	5.6	0.029	0.029	0.011
10.044	281.6	10560	3.80	9.4	0.030	0.030	0.019
10.21	280.4	10515	4.25	6.2	0.032	0.032	0.012
10.208	280.8	21060	4.18	7.5	0.032	0.032	0.021
10.216	280.0	10500	4.24	6.3	0.032	0.032	0.012
10.219	280.2	10509	3.82	21	0.029	0.029	0.045



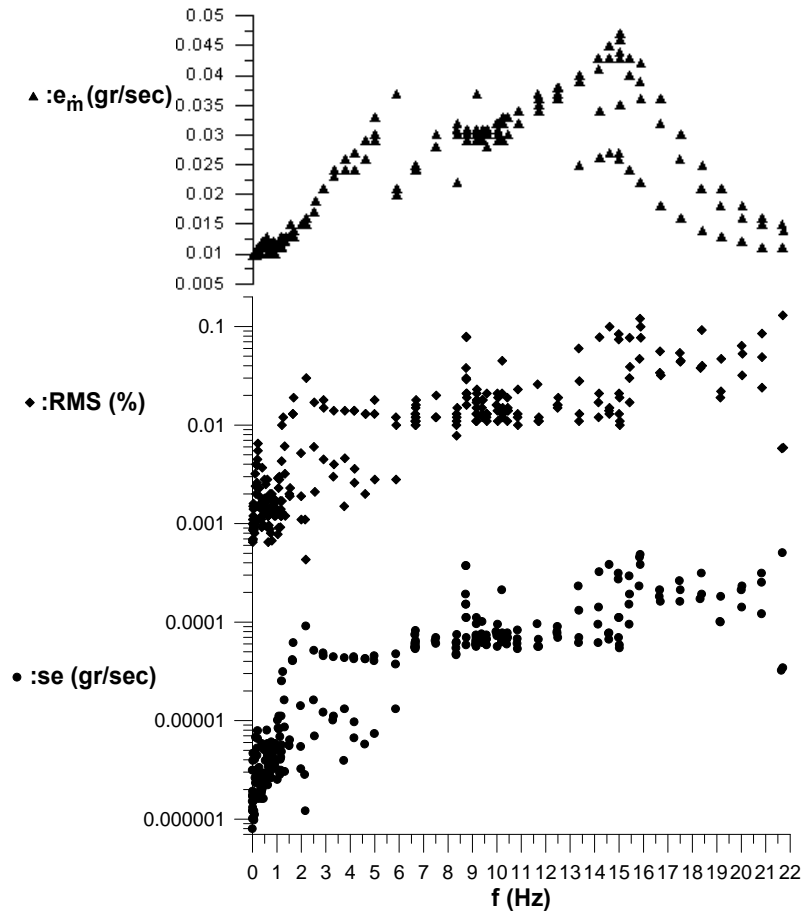
10.230	282.0	10575	4.10	6.9	0.032	0.032	0.013
10.234	281.2	10545	4.27	7.7	0.033	0.033	0.015
10.410	280.4	10515	4.34	7.1	0.033	0.033	0.014
10.421	280.8	10530	4.34	5.9	0.033	0.033	0.011
10.424	281.6	21120	4.29	6.6	0.033	0.033	0.019
10.448	280.4	10515	4.29	7.7	0.033	0.033	0.015
10.454	281.6	10560	3.92	6.9	0.030	0.030	0.014
10.845	280.8	10530	4.49	6.0	0.034	0.034	0.012
10.851	282.0	10575	4.40	6.7	0.034	0.034	0.013
10.86	281.6	21120	4.48	8.2	0.034	0.034	0.023
10.860	282.4	10590	4.12	5.3	0.032	0.032	0.01
11.665	282.0	21150	4.79	9.5	0.037	0.037	0.026
11.693	280.8	10530	4.69	5.6	0.036	0.036	0.011
11.717	281.2	10545	4.64	6.6	0.035	0.035	0.012
11.726	281.2	10545	4.43	5.6	0.034	0.034	0.011
12.477	281.2	10545	4.90	7.9	0.037	0.037	0.016
12.492	281.2	10545	4.74	7.6	0.036	0.036	0.015
12.481	280.8	10530	4.96	8.9	0.038	0.038	0.016
12.508	281.6	21120	5.06	6.9	0.038	0.038	0.019
13.349	213.3	32000	5.41	23	0.025	0.025	0.06
13.359	280.8	10530	5.33	6.1	0.040	0.040	0.011
13.372	281.6	10560	5.29	6.9	0.040	0.040	0.013
13.376	281.6	10560	5.18	13	0.039	0.039	0.028
14.156	281.6	10560	5.68	9.4	0.043	0.043	0.017
14.160	281.6	10560	5.47	6.1	0.041	0.041	0.012
14.18	245.6	9210	5.79	14	0.034	0.034	0.021
14.20	213.3	32000	5.77	32	0.026	0.026	0.078
14.586	280.8	10530	5.98	7.6	0.045	0.045	0.014
14.60	280.8	10530	5.95	6.6	0.045	0.045	0.013
14.602	281.2	10545	5.77	7.7	0.043	0.043	0.015
14.610	213.3	32000	5.92	38	0.027	0.027	0.1
14.990	213.3	32000	5.84	31	0.027	0.027	0.084
14.992	213.3	32000	5.83	27	0.026	0.026	0.074
15.001	281.2	10545	5.79	6.9	0.043	0.043	0.013
15.003	280.8	10530	5.93	11	0.044	0.044	0.021
15.023	250.0	9375	5.78	11	0.035	0.035	0.019
15.03	281.6	10560	6.19	5.4	0.047	0.047	0.01
15.03	280.8	10530	6.19	5.8	0.046	0.046	0.011
15.427	280.8	10530	5.31	15	0.040	0.040	0.03
15.432	213.3	32000	5.21	29	0.024	0.024	0.077
15.434	280.2	10509	5.68	9.4	0.043	0.043	0.017
15.45	281.2	10545	5.33	19	0.040	0.040	0.039
15.84	281.2	10545	5.17	23	0.039	0.039	0.047
15.861	213.3	32000	4.65	45	0.022	0.022	0.12
15.884	281.2	10545	5.54	48	0.042	0.042	0.1
15.89	281.2	10545	4.75	38	0.036	0.036	0.077
16.67	280.8	10530	4.16	18	0.032	0.032	0.034
16.68	213.3	32000	3.73	21	0.018	0.018	0.056

16.71	281.2	10545	4.70	16	0.036	0.036	0.032
17.49	280.8	10530	3.29	26	0.026	0.026	0.054
17.51	213.3	32000	3.00	16	0.016	0.016	0.044
17.53	281.6	10560	3.82	21	0.030	0.030	0.045
18.34	281.2	10545	2.57	17	0.021	0.021	0.038
18.39	213.3	32000	2.33	31	0.014	0.014	0.092
18.40	284.8	10680	3.00	19	0.025	0.025	0.04
19.15	280.8	10530	2.04	10	0.018	0.018	0.019
19.17	281.6	10560	2.50	9.9	0.021	0.021	0.022
19.18	213.3	32000	1.93	18	0.013	0.013	0.047
20.02	213.3	32000	1.61	21	0.012	0.012	0.064
20.04	283.2	10620	2.07	14	0.018	0.018	0.032
20.05	280.8	10530	1.69	23	0.016	0.016	0.053
20.85	281.6	10560	1.72	12	0.016	0.016	0.024
20.85	213.3	32000	1.40	31	0.011	0.011	0.085
20.85	280.8	10530	1.49	25	0.015	0.015	0.049
21.66	280.8	10530	1.59	3.2	0.015	0.015	0.0058
21.70	213.3	32000	1.31	50	0.011	0.011	0.13
21.72	282.8	10605	1.44	3.4	0.014	0.014	0.0059

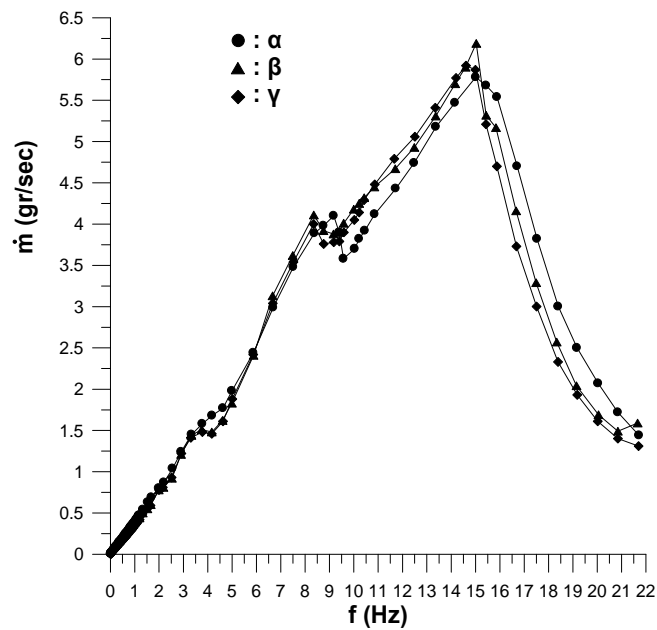
Είναι προφανές ότι το συνολικό σφάλμα της παροχής μάζας του πρώτου επιπέδου  $e_m$  ταυτίζεται με το συστηματικό σφάλμα  $b_m$  με τάξη μεγέθους από  $10^{-3}$  έως  $10^{-2}$  και αυτό διότι το εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα  $se$  (σφάλμα κλίσης) είναι χαμηλότερης τάξης ( $10^{-7}$ ÷ $10^{-4}$ ). Έτσι για συχνότητες από 0.0099 έως 0.0787 Hz η ακρίβεια στην παροχή μάζας είναι της τάξης μεγέθους  $10^{-3}$ , ενώ για τις μεγαλύτερες συχνότητες η τάξη μεγέθους αυξάνεται. Όλες οι ευθείες αναδρομής έχουν μέση τετραγωνική απόκλιση RMS πολύ κοντά στο μηδέν (<0.13%), συνεπώς τιμές πολύ κάτω του 25÷30%, πράγμα που φανερώνει τον πολύ καλό βαθμό προσαρμογής των ευθειών στα πειραματικά δεδομένα. Ο αριθμός των δειγμάτων  $n$  προκύπτει αν πολλαπλασιαστεί η διάρκεια της μέτρησης  $t_i$  με τη συχνότητα δειγματοληψίας των πινάκων 9 και 10 του κεφαλαίου 3.

Στην εικόνα 52 παρουσιάζεται η κατανομή συνολικού σφάλματος  $e_m$  του πρώτου επιπέδου για την παροχή μάζας  $\dot{m}$  της αντλίας δύο εμβόλων σε όλο το πεδίο συχνοτήτων. Στην ίδια εικόνα απεικονίζονται το εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα  $se$  της κλίσης  $\dot{m}$  μαζί με τη μέση τετραγωνική απόκλιση RMS της ευθείας αναδρομής της συναρτήσεως της συχνότητας  $f$ . Για λόγους ευκρίνειας μεγεθύνεται η εικόνα 52 στις χαμηλές συχνότητες, οπότε προκύπτει η εικόνα 54 όπου παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για την αντλία δύο εμβόλων που αφορούν το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης.

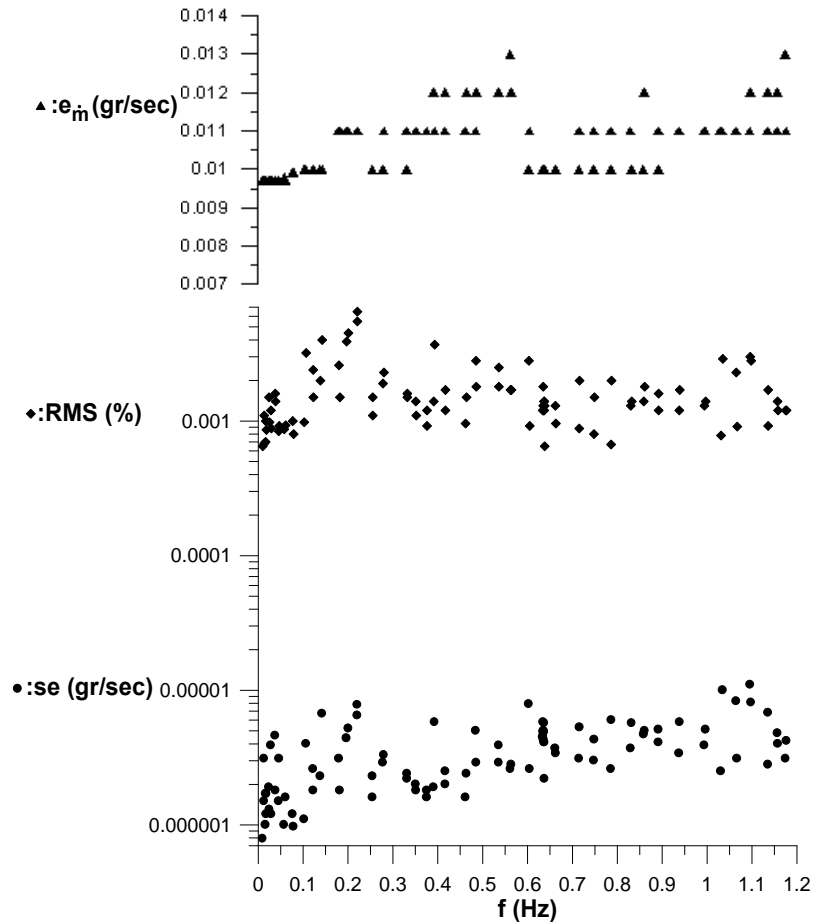
Στην εικόνα 53 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές της παροχής μάζας του νερού  $\dot{m}$  με τη συχνότητα διέγερσης  $f$ . Διακρίνονται τρεις καμπύλες στις οποίες αντιστοιχεί από μία σειρά ανεξάρτητων μετρήσεων ( $\alpha$ ), ( $\beta$ ), ( $\gamma$ ). Για λόγους καλύτερης απεικόνισης στο χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης από 0 έως 1.2 Hz μεγεθύνεται ο οριζόντιος άξονας της συχνότητας διέγερσης, οπότε οι πειραματικές τιμές για αυτές τις χαμηλές συχνότητες φαίνονται ευκρινώς στην εικόνα 55. Λόγω χαμηλής τάξης μεγέθους εν γένει των σφαλμάτων στις χαμηλές συχνότητες οι καμπύλες δύο σειρών μετρήσεων ( $\alpha$ ) και ( $\gamma$ ) είναι αρκετές για τον ακριβή προσδιορισμό της παροχής μάζας. Οι ρυθμοί έγχυσης σε αυτό το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές.



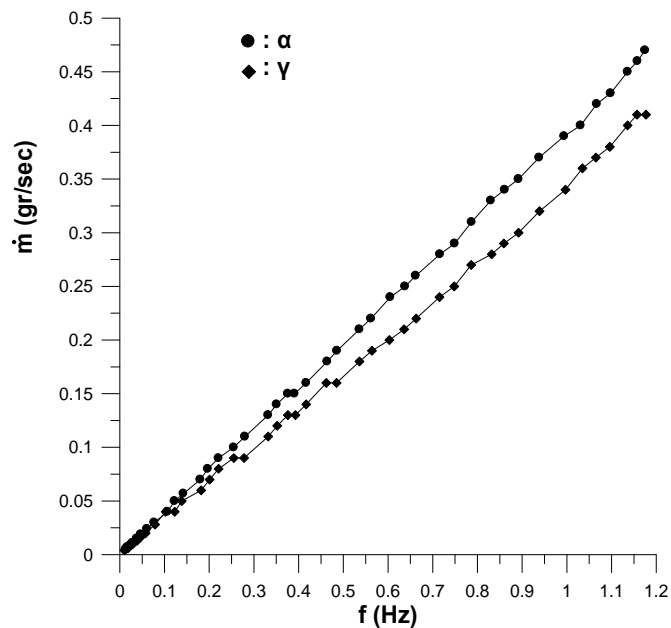
Εικόνα 52. Κατανομή του συνολικού σφάλματος  $e_m$  πρώτου επιπέδου της παροχής μάζας  $\dot{m}$  για την αντλία δύο εμβόλων σε όλο το πεδίο συχνοτήτων με παράλληλη αναπαράσταση του εκτιμούμενου τυπικού σφάλματος  $se$  και της μέσης τετραγωνικής απόκλισης RMS.



Εικόνα 53. Διαγράμματα ανεξάρτητων σειρών μετρήσεων παροχής μάζας του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων.



Εικόνα 54. Κατανομή του συνολικού σφάλματος  $\dot{e}_m$  πρώτου επιπέδου της παροχής μάζας  $\dot{m}$  για την αντλία δύο εμβόλων στο χαμηλό πεδίο συχνοτήτων με παράλληλη αναπαράσταση του εκτιμούμενου τυπικού σφάλματος se και της μέσης τετραγωνικής απόκλισης RMS.



Εικόνα 55. Διαγράμματα ανεξάρτητων σειρών μετρήσεων παροχής μάζας του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων (χαμηλό πεδίο συχνοτήτων).

Η υπολογισμένη μέση παροχή μάζας του νερού  $\bar{m}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του δεύτερου επιπέδου σφάλματος  $e_{\bar{m}}$  της αντλίας δύο εμβόλων παρουσιάζονται στον πίνακα 14 ενδεικτικά για κάποιες τιμές της μέσης συχνότητας διέγερσης  $\bar{f}_2$ .

Πίνακας 14(α). Πειραματικά αποτελέσματα (α) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Αριθμός δειγμάτων $n_2$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\varepsilon_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\bar{b}_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{m}}$ [gr/sec]
2	9.171	0.0056	4.1	0.21	0.034	0.22
2	10.037	0.0048	3.7	0.16	0.030	0.16
2	15.012	0.0093	5.78	0.0067	0.040	0.040

Πίνακας 14(β). Πειραματικά αποτελέσματα (β) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Αριθμός δειγμάτων $n_2$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\varepsilon_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\bar{b}_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{m}}$ [gr/sec]
2	1.198	0.0067	0.44	0.0076	0.012	0.014
6	8.749	0.0086	3.92	0.036	0.030	0.047
6	9.162	0.0097	3.88	0.018	0.030	0.035
2	9.40	0.012	3.9	0.095	0.030	0.10
3	9.58	0.011	4.01	0.070	0.031	0.077
2	9.998	0.0052	4.18	0.0071	0.032	0.033
3	10.22	0.011	4.25	0.014	0.032	0.035
3	10.426	0.0076	4.32	0.029	0.033	0.044
2	10.848	0.0097	4.45	0.084	0.034	0.090
2	11.705	0.0077	4.67	0.050	0.036	0.062
2	12.485	0.0081	4.93	0.061	0.038	0.071
2	13.366	0.0093	5.31	0.037	0.040	0.054
2	14.17	0.011	5.7	0.11	0.038	0.12
3	14.59	0.011	5.9	0.13	0.044	0.14
2	15.03	0.016	6.19	0.0034	0.046	0.047
2	15.44	0.010	5.32	0.019	0.040	0.044

Πίνακας 14(γ). Πειραματικά αποτελέσματα (γ) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Αριθμός δειγμάτων $n_2$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\epsilon_m$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\bar{b}_m$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_m$ [gr/sec]
10	0.636	0.0021	0.21	0.00036	0.010	0.010
2	4.164	0.0033	1.46	0.0060	0.024	0.025
11	6.672	0.0063	3.04	0.0090	0.024	0.026
4	8.347	0.0083	4.00	0.028	0.029	0.040
2	8.760	0.0079	3.76	0.030	0.029	0.042
3	9.173	0.0066	3.78	0.023	0.029	0.037
3	9.403	0.0075	3.79	0.051	0.029	0.058
2	9.588	0.0031	3.9	0.15	0.003	0.16
2	10.219	0.0028	4.14	0.082	0.032	0.088
3	14.995	0.0083	5.87	0.063	0.032	0.071
2	15.88	0.020	4.7	0.10	0.029	0.11

Η υπολογισμένη μέση παροχή μάζας του νερού  $\bar{m}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του τρίτου επιπέδου σφάλματος  $\delta e_m$  της αντλίας δύο εμβόλων παρουσιάζονται στον πίνακα 15 για όλο το πεδίο συχνοτήτων διέγερσης  $\bar{f}_3$ .

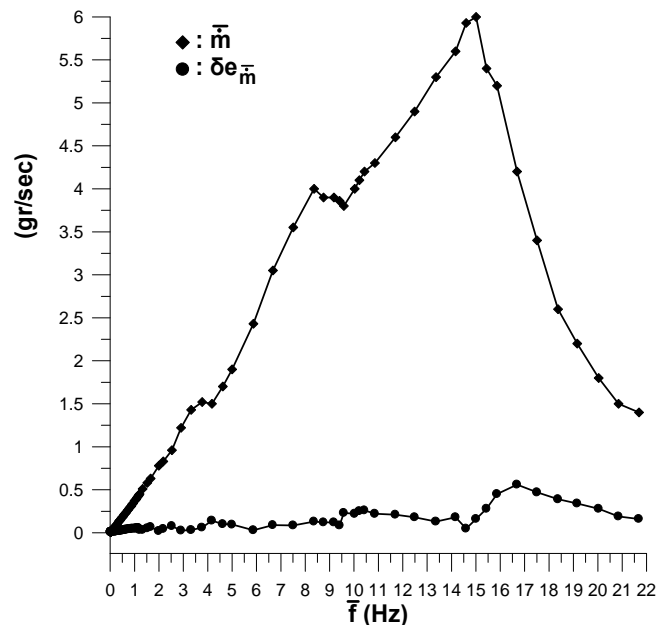
Πίνακας 15. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι τρίτου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για κάθε συχνότητα διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Αριθμός δειγμάτων $n_3$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_3$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\delta e_m$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\delta \bar{b}_m$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $\delta e_m$ [gr/sec]
2	0.0132	0.00027	0.005	0.00065	0.0097	0.0097
2	0.0166	0.00025	0.006	0.00085	0.0097	0.0097
2	0.0183	0.00043	0.007	0.00081	0.0097	0.0097
2	0.0245	0.00057	0.009	0.00082	0.0097	0.0097
2	0.0288	0.00067	0.011	0.0013	0.0097	0.0098
2	0.0383	0.00076	0.014	0.0016	0.0097	0.0098
2	0.0463	0.00051	0.02	0.0031	0.0097	0.010
2	0.0594	0.00046	0.02	0.0035	0.0098	0.010
2	0.0778	0.00071	0.03	0.0023	0.0099	0.010
2	0.1046	0.00052	0.04	0.0070	0.010	0.012
2	0.1228	0.00038	0.05	0.0064	0.010	0.012
2	0.1405	0.00026	0.05	0.0097	0.0099	0.014
2	0.181	0.0014	0.07	0.0096	0.010	0.014
2	0.199	0.0018	0.07	0.0065	0.011	0.013
2	0.221	0.0018	0.08	0.0075	0.011	0.013
2	0.255	0.0019	0.09	0.015	0.010	0.018
2	0.279	0.0019	0.10	0.016	0.010	0.019

2	0.332	0.0018	0.12	0.017	0.010	0.020
2	0.351	0.0019	0.13	0.018	0.011	0.021
2	0.376	0.0018	0.14	0.020	0.011	0.023
2	0.392	0.0025	0.14	0.019	0.012	0.022
2	0.417	0.0019	0.15	0.021	0.012	0.024
2	0.463	0.0019	0.17	0.023	0.012	0.026
2	0.486	0.0018	0.18	0.024	0.012	0.027
2	0.536	0.0023	0.19	0.027	0.012	0.029
2	0.563	0.0021	0.21	0.029	0.012	0.031
2	0.604	0.0020	0.22	0.033	0.010	0.034
2	0.637	0.0021	0.23	0.034	0.010	0.035
2	0.663	0.0019	0.24	0.035	0.010	0.036
2	0.715	0.0020	0.26	0.036	0.010	0.038
2	0.748	0.0019	0.27	0.040	0.010	0.042
2	0.786	0.0019	0.29	0.041	0.010	0.042
2	0.831	0.0022	0.30	0.042	0.010	0.044
2	0.860	0.0019	0.31	0.044	0.011	0.046
2	0.892	0.0019	0.33	0.046	0.010	0.047
2	0.938	0.0023	0.34	0.047	0.011	0.048
2	0.995	0.0024	0.37	0.048	0.011	0.049
2	1.032	0.0038	0.38	0.047	0.011	0.048
2	1.066	0.0028	0.39	0.050	0.012	0.052
2	1.097	0.0029	0.41	0.053	0.012	0.054
2	1.136	0.0020	0.42	0.053	0.012	0.054
2	1.157	0.0019	0.43	0.052	0.012	0.053
2	1.176	0.0021	0.44	0.051	0.012	0.052
3	1.202	0.0067	0.45	0.030	0.011	0.032
3	1.326	0.0051	0.51	0.030	0.012	0.032
3	1.519	0.0035	0.58	0.050	0.014	0.052
3	1.661	0.0054	0.63	0.064	0.013	0.066
3	1.99	0.0045	0.78	0.013	0.015	0.020
3	2.175	0.0043	0.83	0.042	0.015	0.044
3	2.53	0.0039	0.96	0.076	0.018	0.078
3	2.907	0.0067	1.22	0.016	0.021	0.026
3	3.319	0.0095	1.43	0.021	0.024	0.031
3	3.768	0.0048	1.52	0.055	0.025	0.060
3	4.171	0.0033	1.5	0.14	0.025	0.14
3	4.619	0.0024	1.7	0.10	0.027	0.10
3	4.995	0.0030	1.90	0.090	0.031	0.095
3	5.873	0.0066	2.43	0.015	0.026	0.030
3	6.673	0.0029	3.05	0.084	0.024	0.088
3	7.507	0.0048	3.55	0.080	0.029	0.085
3	8.359	0.0083	4.0	0.13	0.031	0.13
3	8.751	0.0042	3.9	0.12	0.030	0.12
6	9.171	0.0097	3.9	0.12	0.031	0.12
3	9.407	0.0071	3.86	0.080	0.030	0.085
3	9.579	0.0054	3.8	0.23	0.030	0.23
3	10.027	0.0052	4.0	0.22	0.031	0.22

3	10.22	0.011	4.1	0.24	0.031	0.25
3	10.429	0.0046	4.2	0.26	0.032	0.26
3	10.86	0.011	4.3	0.22	0.033	0.22
3	11.703	0.0077	4.6	0.21	0.035	0.21
3	12.489	0.0081	4.9	0.18	0.037	0.18
3	13.366	0.0093	5.3	0.13	0.035	0.13
3	14.17	0.010	5.6	0.17	0.037	0.18
3	14.60	0.011	5.93	0.031	0.036	0.048
6	15.01	0.016	6.0	0.15	0.043	0.16
3	15.44	0.010	5.4	0.28	0.036	0.28
3	15.87	0.020	5.2	0.44	0.039	0.45
3	16.69	0.019	4.2	0.55	0.029	0.56
3	17.51	0.019	3.4	0.47	0.024	0.47
3	18.37	0.025	2.6	0.38	0.020	0.39
3	19.16	0.020	2.2	0.34	0.017	0.34
3	20.04	0.026	1.8	0.27	0.015	0.28
3	20.85	0.021	1.5	0.19	0.014	0.19
3	21.69	0.022	1.4	0.16	0.013	0.16

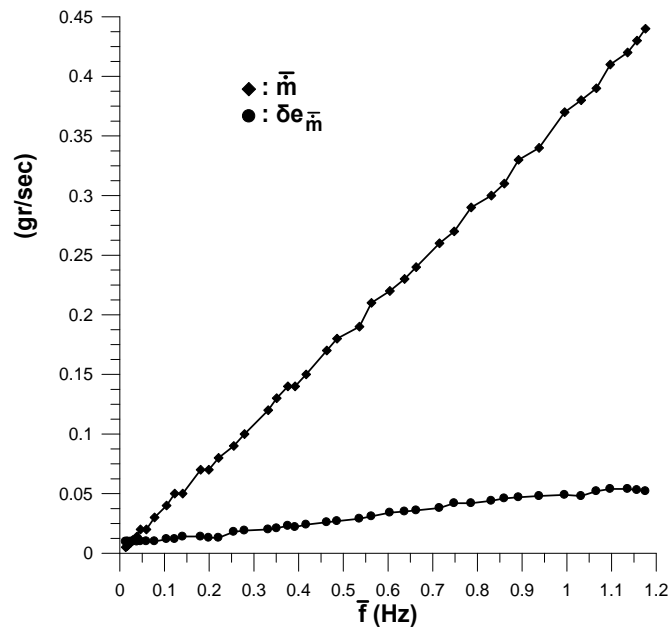
Η μέση καμπύλη της παροχής μάζας του νερού συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων απεικονίζεται στην εικόνα 56 παράλληλα με το σφάλμα τρίτου επιπέδου  $\delta e_{\bar{m}}$ .



Εικόνα 56. Διαγράμματα παροχής μάζας του νερού και τρίτου επιπέδου σφάλματος με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων.

Για λόγους ευκρίνειας μεγεθύνεται η εικόνα 56 στις χαμηλές συχνότητες, οπότε προκύπτει η εικόνα 57 όπου παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για την αντλία δύο εμβόλων που αφορούν το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης.





Εικόνα 57. Διαγράμματα παροχής μάζας του νερού και τρίτου επιπέδου σφάλματος με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων (χαμηλό πεδίο συχνοτήτων).

Η παροχή μάζας του ασυμπίεστου νερού μπορεί να μετατραπεί σε παροχή όγκου μέσω της πυκνότητας  $\rho$  του νερού, η οποία λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία [11] ανάλογα με τη θερμοκρασία  $\theta_v$ . Η υπολογισμένη παροχή όγκου του νερού  $\dot{V}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του πρώτου επιπέδου σφάλματος  $e_v$  της αντλίας δύο εμβόλων παρουσιάζονται στον πίνακα 16 καθώς αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης  $f$ .

Πίνακας 16. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι πρώτου επιπέδου σφάλματος της παροχής όγκου για κάθε συχνότητα διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Συχνότητα διέγερσης $f$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_m$ [gr/sec]	Θερμοκρασία $\theta_v$ [ $^{\circ}$ C] ( $\epsilon_{\theta_v} = \pm 0.5$ $^{\circ}$ C)	Πυκνότητα νερού $\rho$ [gr/cm $^3$ ]	Συνολικό σφάλμα πυκνότητας νερού $e_\rho \times 10^{-4}$ [gr/cm $^3$ ]	Παροχή όγκου $\dot{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_v$ [ml/min]
0.0099	0.004	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.2	0.58
0.0131	0.005	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.3	0.58
0.0132	0.005	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.3	0.58
0.0164	0.006	0.0097	20.5	0.9981	1.1	0.3	0.58
0.0169	0.007	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.4	0.58
0.0182	0.006	0.0097	19.0	0.99841	0.99	0.4	0.58
0.0184	0.007	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.4	0.58
0.0239	0.009	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.6	0.58
0.0251	0.009	0.0097	19.5	0.9983	1.0	0.5	0.58
0.0284	0.011	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.7	0.58
0.0293	0.010	0.0097	19.5	0.9983	1.0	0.6	0.58
0.0379	0.015	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.9	0.58
0.0387	0.013	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.8	0.58

0.0458	0.016	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.9	0.58
0.0468	0.019	0.0097	20.0	0.9982	1.0	1.1	0.58
0.0578	0.020	0.0098	20.0	0.9982	1.0	1.2	0.59
0.0610	0.024	0.0097	20.0	0.9982	1.0	1.4	0.59
0.0770	0.030	0.0099	20.0	0.9982	1.0	1.8	0.60
0.0787	0.028	0.0099	20.0	0.9982	1.0	1.7	0.59
0.1026	0.04	0.010	20.0	0.9982	1.0	2.1	0.60
0.1067	0.04	0.010	20.0	0.9982	1.0	2.6	0.60
0.1225	0.05	0.010	20.0	0.9982	1.0	2.9	0.62
0.1230	0.04	0.010	20.5	0.9981	1.1	2.6	0.61
0.1386	0.05	0.010	20.5	0.9981	1.1	2.8	0.61
0.1424	0.06	0.010	19.0	0.99841	0.99	3.4	0.63
0.180	0.07	0.011	19.0	0.99841	0.99	4.3	0.65
0.181	0.06	0.011	20.5	0.9981	1.1	3.7	0.63
0.197	0.08	0.011	19.0	0.99841	0.99	4.7	0.66
0.201	0.07	0.011	20.5	0.9981	1.1	4.3	0.65
0.221	0.09	0.011	19.0	0.99841	0.99	5.2	0.68
0.221	0.08	0.011	20.5	0.9981	1.1	4.7	0.66
0.255	0.10	0.010	19.0	0.99841	0.99	6.1	0.63
0.255	0.09	0.010	21.0	0.9980	1.1	5.2	0.61
0.278	0.09	0.010	21.0	0.998	1.1	5.6	0.61
0.280	0.11	0.011	19.0	0.99841	0.99	6.6	0.64
0.332	0.13	0.011	19.0	0.99841	0.99	7.8	0.66
0.332	0.11	0.010	21.0	0.9980	1.1	6.7	0.63
0.351	0.14	0.011	19.0	0.99841	0.99	8.3	0.67
0.352	0.12	0.011	21.0	0.9980	1.1	7.1	0.63
0.376	0.15	0.011	19.0	0.99841	0.99	8.9	0.68
0.376	0.13	0.011	21.0	0.9980	1.1	7.6	0.64
0.391	0.15	0.012	20.0	0.9982	1.0	9.2	0.70
0.393	0.13	0.011	18.5	0.99851	0.96	8.0	0.64
0.417	0.14	0.011	18.5	0.99851	0.96	8.5	0.65
0.417	0.16	0.012	20.0	0.9982	1.0	9.8	0.69
0.462	0.16	0.011	18.5	0.99851	0.96	9.4	0.66
0.464	0.18	0.012	20.0	0.9982	1.0	10.8	0.72
0.485	0.16	0.011	18.5	0.99851	0.96	9.9	0.67
0.486	0.19	0.012	20.0	0.9982	1.0	11.4	0.73
0.536	0.18	0.012	19.0	0.99841	0.99	10.9	0.70
0.536	0.21	0.012	20.0	0.9982	1.0	12.5	0.72
0.562	0.22	0.013	21.0	0.9980	1.1	13.2	0.76
0.564	0.19	0.012	19.0	0.99841	0.99	11.5	0.70
0.603	0.20	0.010	19.0	0.99841	0.99	12.2	0.62
0.605	0.24	0.011	21.0	0.9980	1.1	14.2	0.63
0.634	0.21	0.010	19.5	0.9983	1.0	12.9	0.61
0.635	0.21	0.010	19.5	0.9983	1.0	12.9	0.60
0.635	0.21	0.010	19.0	0.99841	0.99	12.9	0.60
0.635	0.21	0.010	19.0	0.99841	0.99	12.9	0.61
0.636	0.21	0.010	19.0	0.99841	0.99	12.9	0.60
0.636	0.21	0.010	19.0	0.99841	0.99	12.9	0.60

0.637	0.22	0.010	19.0	0.99841	0.99	12.9	0.60
0.637	0.22	0.010	19.0	0.99841	0.99	12.9	0.61
0.637	0.22	0.010	19.5	0.9983	1.0	12.9	0.60
0.638	0.25	0.010	21.0	0.9980	1.1	15.0	0.63
0.638	0.22	0.010	19.5	0.9983	1.0	13.0	0.60
0.662	0.26	0.010	21.0	0.9980	1.1	15.6	0.63
0.663	0.22	0.010	19.5	0.9983	1.0	13.4	0.61
0.715	0.24	0.010	19.5	0.9983	1.0	14.5	0.61
0.716	0.28	0.011	21.0	0.9980	1.1	16.8	0.66
0.748	0.25	0.010	19.5	0.9983	1.0	15.2	0.61
0.749	0.29	0.011	21.0	0.9980	1.1	17.7	0.64
0.786	0.27	0.010	19.5	0.9983	1.0	16.0	0.62
0.787	0.31	0.011	21.0	0.9980	1.1	18.5	0.65
0.830	0.33	0.011	21.0	0.9980	1.1	19.6	0.68
0.832	0.28	0.010	19.5	0.9983	1.0	17.0	0.62
0.859	0.29	0.010	19.5	0.9983	1.0	17.5	0.62
0.861	0.34	0.012	21.0	0.9980	1.1	20.2	0.70
0.892	0.35	0.011	21.0	0.9980	1.1	21.0	0.67
0.892	0.30	0.010	20.0	0.9982	1.0	18.2	0.62
0.938	0.37	0.011	21.0	0.9980	1.1	22.2	0.67
0.939	0.32	0.011	20.0	0.9982	1.0	19.3	0.64
0.994	0.39	0.011	21.0	0.9980	1.1	23.6	0.68
0.997	0.34	0.011	20.0	0.9982	1.0	20.6	0.64
1.031	0.40	0.011	21.0	0.9980	1.1	24.2	0.69
1.034	0.36	0.011	20.0	0.9982	1.0	21.4	0.64
1.065	0.37	0.011	20.0	0.9982	1.0	22.0	0.65
1.067	0.42	0.011	21.0	0.9980	1.1	25.1	0.70
1.096	0.38	0.011	20.0	0.9982	1.0	22.8	0.65
1.098	0.43	0.012	21.0	0.9980	1.1	26.0	0.70
1.136	0.40	0.011	20.0	0.9982	1.0	23.9	0.65
1.136	0.45	0.012	21.0	0.9980	1.1	27.1	0.71
1.157	0.41	0.011	20.0	0.9982	1.0	24.4	0.66
1.158	0.46	0.012	21.0	0.9980	1.1	27.6	0.71
1.175	0.47	0.013	21.0	0.9980	1.1	28.0	0.76
1.177	0.41	0.011	20.0	0.9982	1.0	24.9	0.66
1.191	0.44	0.012	26.5	0.9967	1.3	26.2	0.70
1.200	0.47	0.011	22.0	0.9978	1.1	28.5	0.68
1.201	0.42	0.011	20.0	0.9982	1.0	25.3	0.66
1.206	0.44	0.012	26.0	0.9968	1.3	26.7	0.71
1.256	0.47	0.012	24.0	0.9973	1.2	28.2	0.72
1.316	0.49	0.012	24.0	0.9973	1.2	29.6	0.73
1.325	0.50	0.012	26.5	0.9967	1.3	30.1	0.74
1.336	0.54	0.013	22.0	0.9978	1.1	32.6	0.77
1.501	0.56	0.013	24.0	0.9973	1.2	33.4	0.77
1.520	0.55	0.013	26.5	0.9967	1.3	33.2	0.77
1.536	0.63	0.015	22.0	0.9978	1.1	37.9	0.88
1.646	0.59	0.013	24.0	0.9973	1.2	35.8	0.79
1.656	0.60	0.013	26.5	0.9967	1.3	35.8	0.79

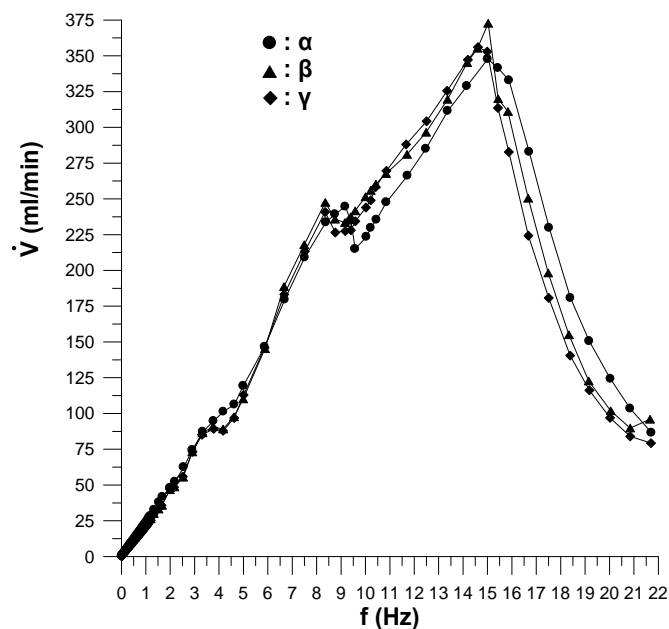
1.680	0.69	0.014	22.0	0.9978	1.1	41.7	0.86
1.983	0.78	0.015	26.5	0.9967	1.3	46.7	0.91
1.991	0.80	0.015	22.0	0.9978	1.1	47.9	0.92
1.995	0.78	0.015	24.5	0.9972	1.3	47.0	0.91
2.152	0.81	0.015	24.5	0.9972	1.3	48.5	0.93
2.178	0.81	0.015	26.5	0.9967	1.3	48.6	0.93
2.195	0.87	0.016	22.0	0.9978	1.1	52.3	0.98
2.514	0.93	0.017	24.5	0.9972	1.3	56	1.0
2.526	0.92	0.017	26.5	0.9967	1.3	55	1.0
2.549	1.04	0.019	22.0	0.9978	1.1	63	1.1
2.902	1.21	0.021	26.5	0.9967	1.3	73	1.2
2.907	1.24	0.021	22.0	0.9978	1.1	75	1.3
2.913	1.22	0.021	24.5	0.9972	1.3	73	1.3
3.303	1.41	0.023	24.5	0.9972	1.3	85	1.4
3.323	1.44	0.024	26.5	0.9967	1.3	87	1.4
3.330	1.45	0.024	21.0	0.9980	1.1	87	1.5
3.751	1.51	0.024	26.5	0.9967	1.3	91	1.5
3.775	1.58	0.026	21.0	0.9980	1.1	95	1.5
3.778	1.48	0.024	25.0	0.9970	1.3	89	1.5
4.157	1.46	0.024	24.5	0.9972	1.3	88	1.4
4.163	1.48	0.024	26.5	0.9967	1.3	89	1.5
4.171	1.46	0.024	24.5	0.9972	1.3	88	1.4
4.179	1.68	0.027	21.0	0.9980	1.1	101	1.6
4.607	1.62	0.026	26.5	0.9967	1.3	98	1.6
4.623	1.61	0.026	24.5	0.9972	1.3	97	1.6
4.626	1.77	0.029	21.0	0.9980	1.1	106	1.7
4.990	1.83	0.029	26.5	0.9967	1.3	110	1.8
4.991	1.98	0.033	21.0	0.9980	1.1	119	2.0
5.003	1.88	0.030	24.5	0.9972	1.3	113	1.8
5.867	2.42	0.037	25.0	0.9970	1.3	146	2.3
5.873	2.44	0.021	21.0	0.9980	1.1	147	1.2
5.880	2.41	0.020	27.0	0.9965	1.4	145	1.2
6.660	3.13	0.025	27.0	0.9965	1.4	189	1.5
6.664	3.04	0.024	25.0	0.9970	1.3	183	1.5
6.665	3.04	0.024	25.5	0.9969	1.3	183	1.5
6.666	3.05	0.024	25.0	0.9970	1.3	183	1.5
6.667	3.04	0.024	25.0	0.9970	1.3	183	1.5
6.672	3.05	0.024	25.0	0.9970	1.3	183	1.5
6.673	3.05	0.025	25.0	0.9970	1.3	184	1.5
6.674	3.04	0.024	25.0	0.9970	1.3	183	1.5
6.674	3.08	0.025	25.0	0.9970	1.3	185	1.5
6.677	3.05	0.025	25.5	0.9969	1.3	184	1.5
6.678	3.02	0.024	25.0	0.9970	1.3	182	1.5
6.683	3.03	0.024	25.0	0.9970	1.3	182	1.5
6.691	2.99	0.024	21.0	0.9980	1.1	180	1.5
7.490	3.62	0.028	27.0	0.9965	1.4	218	1.7
7.515	3.54	0.028	24.5	0.9972	1.3	213	1.7
7.516	3.48	0.030	21.0	0.9980	1.1	209	1.8

8.345	4.02	0.031	24.5	0.9972	1.3	242	1.9
8.346	3.97	0.031	25.0	0.9970	1.3	239	1.8
8.347	4.03	0.031	25.0	0.9970	1.3	243	1.9
8.352	3.98	0.022	25.0	0.9970	1.3	240	1.3
8.356	4.11	0.032	27.0	0.9965	1.4	248	1.9
8.376	3.89	0.030	21.0	0.9980	1.1	234	1.8
8.737	3.97	0.030	26.5	0.9967	1.3	239	1.8
8.744	3.92	0.030	25.5	0.9969	1.3	236	1.8
8.745	3.98	0.031	27.0	0.9965	1.4	240	1.9
8.749	3.88	0.030	26.5	0.9967	1.3	234	1.8
8.751	3.89	0.030	25.5	0.9969	1.3	234	1.8
8.755	3.98	0.031	21.0	0.9980	1.1	239	1.8
8.756	3.78	0.029	24.5	0.9972	1.3	227	1.8
8.764	3.75	0.029	24.0	0.9973	1.2	226	1.8
8.769	3.87	0.030	26.5	0.9967	1.3	233	1.8
9.153	3.86	0.030	26.0	0.9968	1.3	232	1.8
9.153	3.86	0.030	26.0	0.9968	1.3	233	1.8
9.156	3.87	0.030	26.0	0.9968	1.3	233	1.8
9.161	3.77	0.029	24.0	0.9973	1.2	227	1.8
9.162	3.87	0.031	26.0	0.9968	1.3	233	1.8
9.166	3.96	0.030	21.0	0.9980	1.1	238	1.8
9.169	3.88	0.030	27.0	0.9965	1.4	234	1.8
9.175	3.77	0.029	24.0	0.9973	1.2	227	1.8
9.176	4.18	0.037	21.0	0.9980	1.1	251	2.2
9.178	3.92	0.031	29.0	0.9959	1.5	236	1.8
9.184	3.80	0.029	25.0	0.9970	1.3	229	1.8
9.387	3.84	0.030	24.0	0.9973	1.2	231	1.8
9.399	3.90	0.030	27.0	0.9965	1.4	235	1.8
9.401	3.90	0.030	21.0	0.9980	1.1	235	1.8
9.41	3.99	0.031	27.0	0.9965	1.4	240	1.8
9.402	3.76	0.029	24.0	0.9973	1.2	226	1.8
9.421	3.78	0.029	24.0	0.9973	1.2	227	1.8
9.572	3.98	0.031	27.0	0.9965	1.4	240	1.9
9.576	3.58	0.028	21.0	0.9980	1.1	215	1.7
9.587	3.97	0.031	27.0	0.9965	1.4	239	1.8
9.588	3.97	0.030	24.0	0.9973	1.2	239	1.8
9.588	3.82	0.030	24.0	0.9973	1.2	230	1.8
9.59	4.08	0.031	26.0	0.9968	1.3	246	1.9
9.978	4.17	0.032	27.0	0.9965	1.4	251	1.9
10.018	4.05	0.031	24.0	0.9973	1.2	244	1.9
10.019	4.18	0.032	26.0	0.9968	1.3	252	1.9
10.029	3.63	0.029	22.0	0.9978	1.1	219	1.7
10.044	3.80	0.030	22.0	0.9978	1.1	228	1.8
10.21	4.25	0.032	25.5	0.9969	1.3	256	2.0
10.208	4.18	0.032	24.0	0.9973	1.2	252	1.9
10.216	4.24	0.032	26.0	0.9968	1.3	256	2.0
10.219	3.82	0.029	22.0	0.9978	1.1	230	1.8
10.230	4.10	0.032	24.0	0.9973	1.2	247	1.9

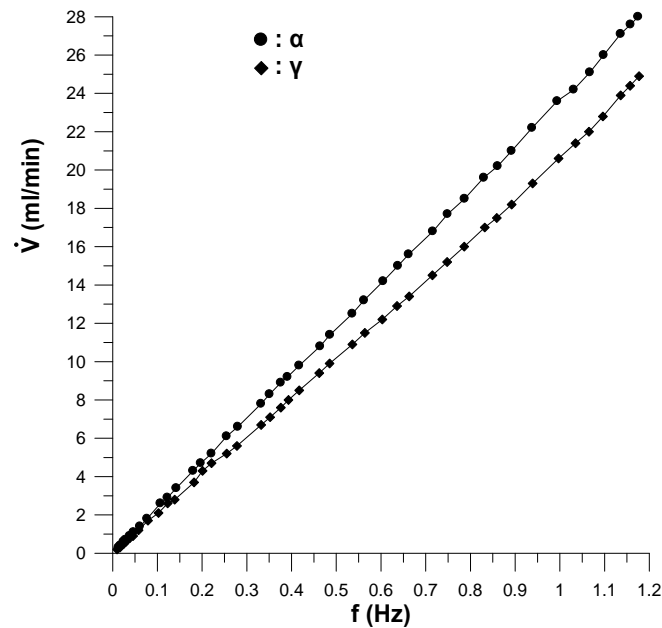
10.234	4.27	0.033	26.0	0.9968	1.3	257	2.0
10.410	4.34	0.033	26.0	0.9968	1.3	261	2.0
10.421	4.34	0.033	25.5	0.9969	1.3	261	2.0
10.424	4.29	0.033	24.0	0.9973	1.2	258	2.0
10.448	4.29	0.033	25.5	0.9977	1.2	258	2.0
10.454	3.92	0.030	22.5	0.9977	1.2	236	1.8
10.845	4.49	0.034	26.0	0.9968	1.3	270	2.1
10.851	4.40	0.034	26.0	0.9968	1.3	265	2.0
10.86	4.48	0.034	24.0	0.9973	1.2	270	2.1
10.860	4.12	0.032	22.0	0.9978	1.1	248	1.9
11.665	4.79	0.037	24.0	0.9973	1.2	288	2.2
11.693	4.69	0.036	26.0	0.9968	1.3	283	2.2
11.717	4.64	0.035	26.0	0.9968	1.3	280	2.1
11.726	4.43	0.034	22.0	0.9978	1.1	266	2.0
12.477	4.90	0.037	26.0	0.9968	1.3	295	2.2
12.492	4.74	0.036	21.5	0.9979	1.1	285	2.2
12.481	4.96	0.038	26.5	0.9967	1.3	298	2.3
12.508	5.06	0.038	24.0	0.9973	1.2	304	2.3
13.349	5.41	0.025	24.5	0.9972	1.3	326	1.5
13.359	5.33	0.040	26.5	0.9967	1.3	321	2.4
13.372	5.29	0.040	26.0	0.9968	1.3	319	2.4
13.376	5.18	0.039	21.5	0.9979	1.1	312	2.4
14.156	5.68	0.043	26.0	0.9968	1.3	342	2.6
14.160	5.47	0.041	21.5	0.9979	1.1	329	2.5
14.18	5.79	0.034	26.5	0.9967	1.3	349	2.0
14.20	5.77	0.026	24.5	0.9972	1.3	347	1.6
14.586	5.98	0.045	26.0	0.9968	1.3	360	2.7
14.60	5.95	0.045	26.5	0.9967	1.3	358	2.7
14.602	5.77	0.043	30.0	0.9956	1.5	348	2.6
14.610	5.92	0.027	24.5	0.9972	1.3	356	1.6
14.990	5.84	0.027	24.5	0.9972	1.3	351	1.6
14.992	5.83	0.026	24.5	0.9972	1.3	351	1.6
15.001	5.79	0.043	21.5	0.9979	1.1	348	2.6
15.003	5.93	0.044	24.5	0.9972	1.3	357	2.7
15.023	5.78	0.035	21.5	0.9979	1.1	348	2.1
15.03	6.19	0.047	26.5	0.9967	1.3	373	2.8
15.03	6.19	0.046	27.0	0.9965	1.4	373	2.8
15.427	5.31	0.040	27.0	0.9965	1.4	320	2.4
15.432	5.21	0.024	24.5	0.9972	1.3	314	1.5
15.434	5.68	0.043	22.0	0.9978	1.1	342	2.6
15.45	5.33	0.040	26.5	0.9967	1.3	321	2.4
15.84	5.17	0.039	27.0	0.9965	1.4	311	2.4
15.861	4.65	0.022	24.5	0.9972	1.3	280	1.3
15.884	5.54	0.042	22.0	0.9978	1.1	333	2.5
15.89	4.75	0.036	24.5	0.9972	1.3	286	2.2
16.67	4.16	0.032	26.5	0.9967	1.3	251	1.9
16.68	3.73	0.018	24.5	0.9972	1.3	224	1.1
16.71	4.70	0.036	22.0	0.9978	1.1	283	2.2

17.49	3.29	0.026	26.5	0.9967	1.3	198	1.6
17.51	3.00	0.016	24.5	0.9972	1.3	180.7	0.96
17.53	3.82	0.030	22.5	0.9977	1.2	230	1.8
18.34	2.57	0.021	27.0	0.9965	1.4	155	1.3
18.39	2.33	0.014	25.0	0.9970	1.3	140.4	0.83
18.40	3.00	0.025	22.5	0.9977	1.2	181	1.5
19.15	2.04	0.018	27.0	0.9965	1.4	123	1.1
19.17	2.50	0.021	22.5	0.9977	1.2	151	1.3
19.18	1.93	0.013	24.5	0.9972	1.3	116.2	0.76
20.02	1.61	0.012	24.5	0.9972	1.3	96.9	0.71
20.04	2.07	0.018	22.5	0.9977	1.2	124	1.1
20.05	1.69	0.016	27.0	0.9965	1.4	101.9	0.95
20.85	1.72	0.016	22.5	0.9977	1.2	103.4	0.96
20.85	1.40	0.011	24.5	0.9972	1.3	84.0	0.68
20.85	1.49	0.015	27.0	0.9965	1.4	89.8	0.88
21.66	1.59	0.015	27.0	0.9965	1.4	95.9	0.91
21.70	1.31	0.011	25.0	0.9970	1.3	79.2	0.67
21.72	1.44	0.014	22.5	0.9977	1.2	86.6	0.87

Στην εικόνα 58 παρουσιάζονται οι τιμές της παροχής όγκου του νερού  $\dot{V}$  με τη συχνότητα διέγερσης  $f$ . Διακρίνονται τρεις καμπύλες στις οποίες αντιστοιχεί από μία σειρά ανεξάρτητων μετρήσεων ( $\alpha$ ), ( $\beta$ ), ( $\gamma$ ). Για λόγους καλύτερης απεικόνισης στο χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης από 0 έως 1.2 Hz μεγεθύνεται ο οριζόντιος άξονας της συχνότητας διέγερσης, οπότε οι πειραματικές τιμές για αυτές τις χαμηλές συχνότητες φαίνονται ευκρινώς στην εικόνα 59.



Εικόνα 58. Διαγράμματα ανεξάρτητων σειρών μετρήσεων παροχής όγκου του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων.



Εικόνα 59. Διαγράμματα ανεξάρτητων σειρών μετρήσεων παροχής όγκου του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων (χαμηλό πεδίο συχνοτήτων).

Η υπολογισμένη μέση παροχή όγκου του νερού  $\bar{V}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του δεύτερου επιπέδου σφάλματος  $e_{\bar{V}}$  της αντλίας δύο εμβόλων παρουσιάζονται στον πίνακα 17 ενδεικτικά για κάποιες τιμές της μέσης συχνότητας διέγερσης  $\bar{f}_2$ .

Πίνακας 17(α). Πειραματικά αποτελέσματα (α) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής όγκου για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\bar{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{V}}$ [ml/min]
9.171	4.1	0.22	0.9980	1.1	240	13
10.037	3.7	0.16	0.9978	1.1	224	9.8
15.012	5.78	0.040	0.9979	1.1	348	2.4



Πίνακας 17(β). Πειραματικά αποτελέσματα (β) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής όγκου για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\dot{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{V}}$ [ml/min]
1.198	0.44	0.014	0.9967	1.3	26.4	0.86
8.749	3.92	0.047	0.9967	1.3	236	2.8
9.162	3.88	0.035	0.9966	1.4	233	2.1
9.40	3.9	0.10	0.9965	1.4	238	6.0
9.58	4.01	0.077	0.9966	1.4	242	4.6
9.998	4.18	0.033	0.9966	1.4	252	2.0
10.22	4.25	0.035	0.9968	1.3	256	2.1
10.426	4.32	0.044	0.9969	1.3	260	2.6
10.848	4.45	0.090	0.9968	1.3	268	5.4
11.705	4.67	0.062	0.9968	1.3	281	3.7
12.485	4.93	0.071	0.9967	1.3	297	4.3
13.366	5.31	0.054	0.9967	1.3	320	3.3
14.17	5.7	0.12	0.9967	1.3	345	7.1
14.59	5.9	0.14	0.9964	1.4	355	8.2
15.03	6.19	0.047	0.9966	1.4	373	2.8
15.44	5.32	0.044	0.9966	1.4	320	2.7

Πίνακας 17(γ). Πειραματικά αποτελέσματα (γ) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής όγκου για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\dot{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{V}}$ [ml/min]
0.636	0.21	0.010	0.9984	1.0	12.9	0.60
4.164	1.46	0.025	0.9972	1.3	88	1.5
6.672	3.04	0.026	0.9970	1.3	183	1.6
8.347	4.00	0.040	0.9971	1.3	241	2.4
8.760	3.76	0.042	0.9972	1.2	227	2.5
9.173	3.78	0.037	0.9972	1.2	228	2.2
9.403	3.79	0.058	0.9973	1.2	228	3.5
9.588	3.9	0.16	0.9973	1.2	234	9.4
10.219	4.14	0.088	0.9973	1.2	249	5.3
14.995	5.87	0.071	0.9972	1.3	353	4.3
15.88	4.7	0.11	0.9972	1.3	283	6.5

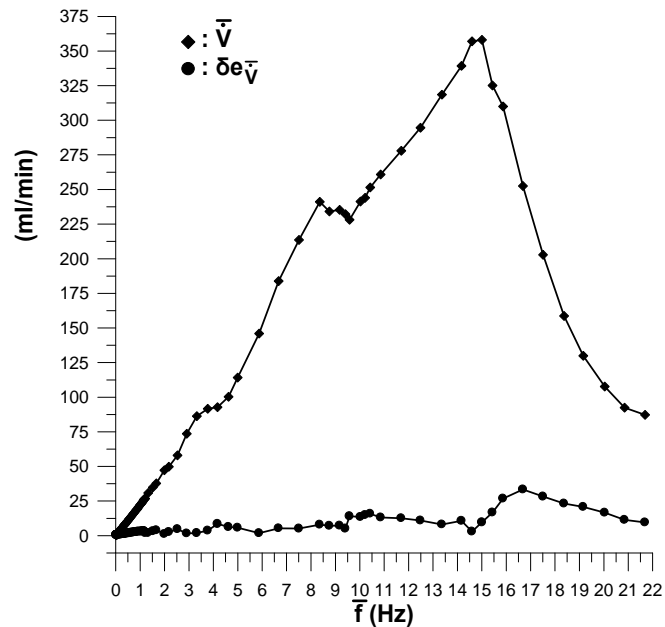
Η υπολογισμένη μέση παροχή όγκου του νερού  $\bar{V}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του τρίτου επιπέδου σφάλματος  $de_{\bar{V}}$  της αντλίας δύο εμβόλων παρουσιάζονται στον πίνακα 18 για όλο το πεδίο συχνοτήτων διέγερσης  $\bar{f}_3$ .

Πίνακας 18. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι τρίτου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για κάθε συχνότητα διέγερσης της αντλίας δύο εμβόλων.

Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_3$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\bar{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $de_{\bar{V}}$ [ml/min]
0.0132	0.005	0.0097	0.9982	1.0	0.3	0.58
0.0166	0.006	0.0097	0.9982	1.0	0.4	0.59
0.0183	0.007	0.0097	0.9983	1.0	0.4	0.58
0.0245	0.009	0.0097	0.9983	1.0	0.5	0.58
0.0288	0.011	0.0098	0.9983	1.0	0.6	0.59
0.0383	0.014	0.0098	0.9982	1.0	0.8	0.59
0.0463	0.02	0.010	0.9982	1.0	1.0	0.61
0.0594	0.02	0.010	0.9982	1.0	1.3	0.62
0.0778	0.03	0.010	0.9982	1.0	1.7	0.61
0.1046	0.04	0.012	0.9982	1.0	2.3	0.73
0.1228	0.05	0.012	0.9982	1.0	2.8	0.71
0.1405	0.05	0.014	0.9982	1.0	3.1	0.83
0.181	0.07	0.014	0.9983	1.0	4.0	0.85
0.199	0.07	0.013	0.9983	1.0	4.5	0.77
0.221	0.08	0.013	0.9983	1.0	5.0	0.80
0.255	0.09	0.018	0.9982	1.0	6	1.1
0.279	0.10	0.019	0.9982	1.0	6	1.1
0.332	0.12	0.020	0.9982	1.0	7	1.2
0.351	0.13	0.021	0.9982	1.0	8	1.3
0.376	0.14	0.023	0.9982	1.0	8	1.4
0.392	0.14	0.022	0.9984	1.0	9	1.3
0.417	0.15	0.024	0.9984	1.0	9	1.4
0.463	0.17	0.026	0.9984	1.0	10	1.6
0.486	0.18	0.027	0.9984	1.0	11	1.6
0.536	0.19	0.029	0.9983	1.0	12	1.8
0.563	0.21	0.031	0.9982	1.0	12	1.9
0.604	0.22	0.034	0.9982	1.0	13	2.1
0.637	0.23	0.035	0.9982	1.0	14	2.1
0.663	0.24	0.036	0.9982	1.0	15	2.2
0.715	0.26	0.038	0.9982	1.0	16	2.3
0.748	0.27	0.042	0.9982	1.0	16	2.5
0.786	0.29	0.042	0.9982	1.0	17	2.6
0.831	0.30	0.044	0.9982	1.0	18	2.6
0.860	0.31	0.046	0.9982	1.0	19	2.7
0.892	0.33	0.047	0.9981	1.1	20	2.8

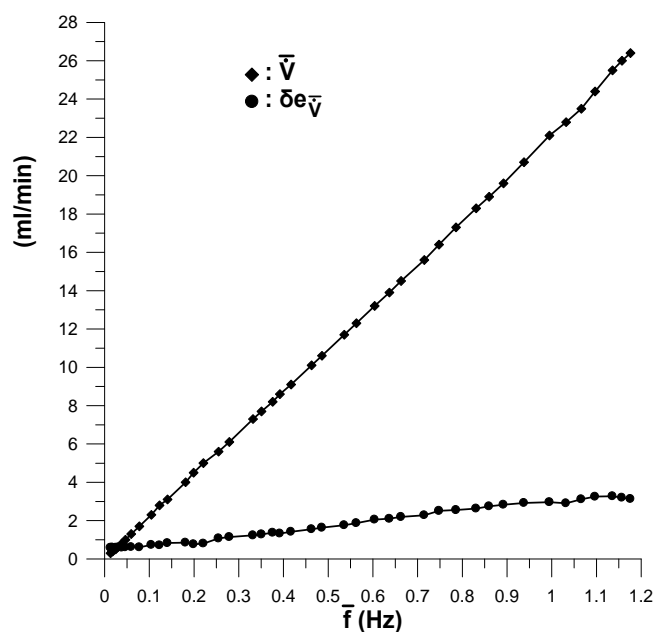
0.938	0.34	0.048	0.9981	1.1	21	2.9
0.995	0.37	0.049	0.9981	1.1	22	3.0
1.032	0.38	0.048	0.9981	1.1	23	2.9
1.066	0.39	0.052	0.9981	1.1	24	3.1
1.097	0.41	0.054	0.9981	1.1	24	3.3
1.136	0.42	0.054	0.9981	1.1	26	3.3
1.157	0.43	0.053	0.9981	1.1	26	3.2
1.176	0.44	0.052	0.9981	1.1	26	3.1
1.202	0.45	0.032	0.9975	1.2	27	1.9
1.326	0.51	0.032	0.9972	1.2	31	2.0
1.519	0.58	0.052	0.9972	1.2	35	3.1
1.661	0.63	0.066	0.9972	1.2	38	4.0
1.99	0.78	0.020	0.9972	1.2	47	1.2
2.175	0.83	0.044	0.9972	1.2	50	2.7
2.53	0.96	0.078	0.9972	1.2	58	4.7
2.907	1.22	0.026	0.9972	1.2	74	1.6
3.319	1.43	0.031	0.9972	1.2	86	1.9
3.768	1.52	0.060	0.9972	1.2	92	3.6
4.171	1.5	0.14	0.9973	1.2	93	8.5
4.619	1.7	0.10	0.9973	1.2	100	6.3
4.995	1.90	0.095	0.9973	1.2	114	5.7
5.873	2.43	0.030	0.9972	1.3	146	1.8
6.673	3.05	0.088	0.9972	1.3	184	5.3
7.507	3.55	0.085	0.9972	1.2	214	5.1
8.359	4.0	0.13	0.9972	1.2	241	8.0
8.751	3.9	0.12	0.9974	1.2	234	7.2
9.171	3.9	0.12	0.9973	1.2	235	7.3
9.407	3.86	0.085	0.9973	1.2	232	5.1
9.579	3.8	0.23	0.9973	1.2	230	14
10.027	4.0	0.22	0.9973	1.2	240	13
10.22	4.1	0.25	0.9973	1.2	240	15
10.429	4.2	0.26	0.9972	1.2	250	16
10.86	4.3	0.22	0.9973	1.2	260	13
11.703	4.6	0.21	0.9973	1.2	280	13
12.489	4.9	0.18	0.9973	1.2	290	11
13.366	5.3	0.13	0.9973	1.2	319	8.1
14.17	5.6	0.18	0.9973	1.2	340	11
14.60	5.93	0.048	0.9969	1.3	357	2.9
15.01	6.0	0.16	0.9972	1.2	358	9.6
15.44	5.4	0.28	0.9972	1.2	330	17
15.87	5.2	0.45	0.9972	1.3	310	27
16.69	4.2	0.56	0.9972	1.2	250	33
17.51	3.4	0.47	0.9972	1.3	200	28
18.37	2.6	0.39	0.9971	1.3	160	23
19.16	2.2	0.34	0.9971	1.3	130	21
20.04	1.8	0.28	0.9971	1.3	110	17
20.85	1.5	0.19	0.9971	1.3	90	11
21.69	1.4	0.16	0.9971	1.3	87	9.6

Η μέση καμπύλη της παροχής όγκου του νερού συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων απεικονίζεται στην εικόνα 60 παράλληλα με το σφάλμα τρίτου επιπέδου  $\delta e_{\bar{v}}$ . Η καμπύλη αυτή αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της αντλίας δύο εμβόλων.



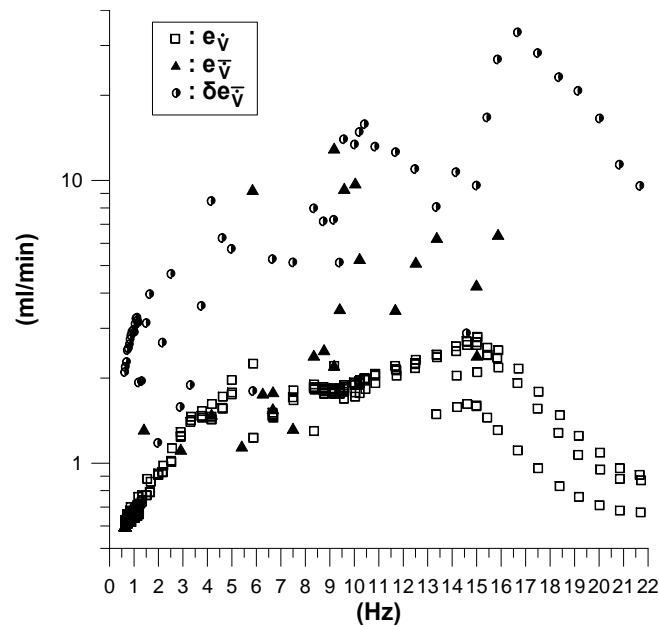
Εικόνα 60. Διαγράμματα παροχής όγκου του νερού και τρίτου επιπέδου σφάλματος με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων (χαρακτηριστική καμπύλη).

Για λόγους ευκρίνειας μεγεθύνεται η εικόνα 60 στις χαμηλές συχνότητες, οπότε προκύπτει η εικόνα 61 όπου παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για την αντλία δύο εμβόλων που αφορούν το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης.



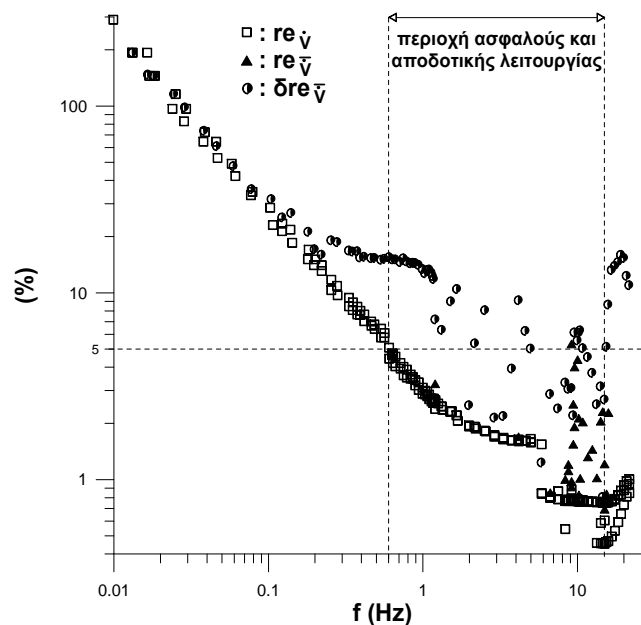
Εικόνα 61. Διαγράμματα παροχής όγκου του νερού και τρίτου επιπέδου σφάλματος με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων (χαμηλό πεδίο συχνοτήτων).

Αν παρασταθούν γραφικά από τους πίνακες (16), (17) και (18) τα σφάλματα παροχής όγκου του πρώτου, δευτέρου και τρίτου επιπέδου αντίστοιχα για την αντλία δύο εμβόλων προκύπτει η κατανομή σφαλμάτων με τη συχνότητα διέγερσης της εικόνας 62.



Εικόνα 62. Διαγράμματα κατανομής όλων των επιπέδων σφαλμάτων παροχής όγκου με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων.

Παρατηρούνται διακριτές περιοχές κατανομής του κάθε επιπέδου σφάλματος με το πρώτο να είναι το πιο χαμηλό και το τρίτο να είναι το υψηλότερο όπως είναι αναμενόμενο. Αντίστοιχα στην εικόνα 63 παρουσιάζεται συναρτήσεως της συχνότητας διέγερσης το σχετικό σφάλμα έγχυσης επί τις % κάθε επιπέδου σφάλματος.



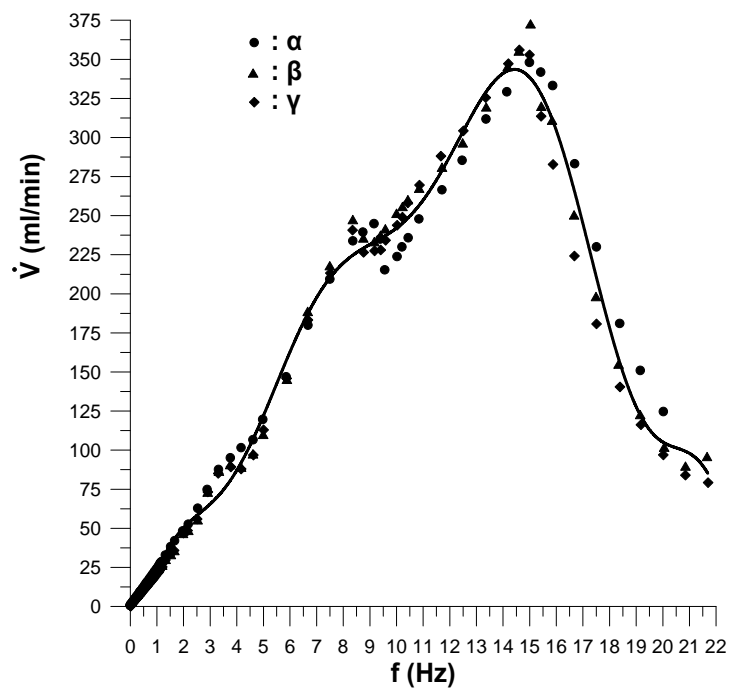
Εικόνα 63. Διαγράμματα κατανομής σχετικού σφάλματος έγχυσης με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία δύο εμβόλων.

Παρατηρείται ότι για συχνότητα μικρότερη του 0.2 Hz τα επίπεδα σφάλματος τείνουν να ταυτιστούν αλλά το σχετικό σφάλμα αυξάνεται καθώς η έγχυση πραγματοποιείται με σχετικό σφάλμα μεγαλύτερο του 15% περίπου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανικανότητα σταθερής διέγερσης από τον κινητήρα στις χαμηλές στροφές αλλά και σε κατασκευαστικές ατέλειες του πρωτοτύπου.

Πέραν της μέσης χαρακτηριστικής καμπύλης της εικόνας 60 θα μπορούσαν να γίνουν και άλλες προσαρμογές επί των πειραματικών σημείων στην προσπάθεια εξαγωγής κάποιου γενικού νόμου που να διέπει τη λειτουργία της αντλίας δύο εμβόλων. Γίνεται για παράδειγμα μια πολυωνυμική προσαρμογή  $10^{00}$  βαθμού επί των πειραματικών σημείων, η καμπύλη της οποίας φαίνεται στην εικόνα 64, η δε εξίσωσή της έχει τη μορφή:

$$\dot{V} = b_0 + b_1 f + b_2 f^2 + \dots + b_{10} f^{10} \quad (39)$$

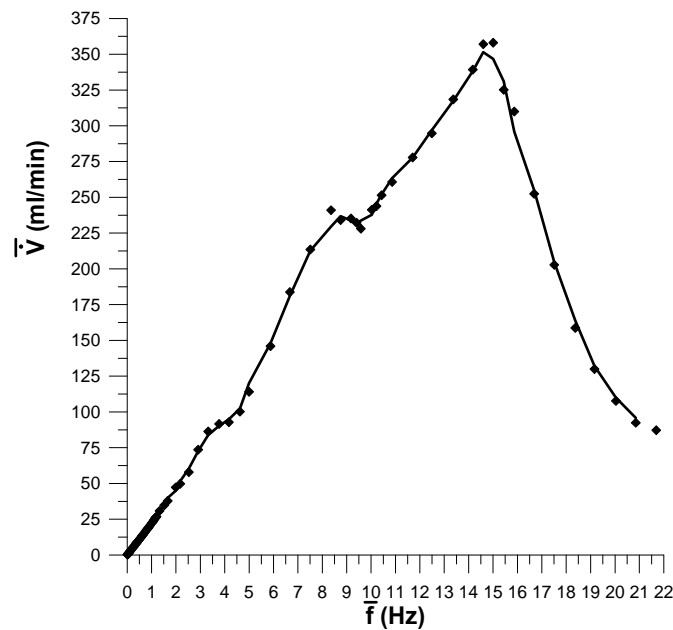
όπου:	$b_0 = +3.90738$	$b_6 = +0.327178$
	$b_1 = -19.9491$	$b_7 = -0.0211322$
	$b_2 = +77.8327$	$b_8 = +0.000811522$
	$b_3 = -52.2322$	$b_9 = -1.7037 \cdot 10^{-5}$
	$b_4 = +17.0342$	$b_{10} = +1.50519 \cdot 10^{-7}$
	$b_5 = -3.06933$	



Εικόνα 64. Πολυωνυμική προσαρμογή πειραματικών σημείων για την εύρεση της χαρακτηριστικής καμπύλης  $\dot{V}(f)$  της αντλίας δύο εμβόλων.

Μια άλλη προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης της εικόνας 60 μπορεί να γίνει με τη μέθοδο του κινούμενου μέσου (moving average), όπου κάθε σημείο αντικαθίσταται από το μέσο όρο των γειτονικών του σημείων (εικόνα 65). Δηλαδή προκύπτει η ακολουθία των σημείων:

$$\bar{V} = \frac{1}{3}(\bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_3, \bar{V}_2 + \bar{V}_3 + \bar{V}_4, \dots, \bar{V}_{n-2} + \bar{V}_{n-1} + \bar{V}_n) \quad (40)$$



Εικόνα 65. Προσαρμογή πειραματικών σημείων με τη μέθοδο του κινούμενου μέσου (moving average) για την εύρεση της χαρακτηριστικής καμπύλης  $\bar{V}(\bar{f})$  της αντλίας δύο εμβόλων.

#### 4.3 Μελέτη αντλίας ενός εμβόλου

Για το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων οι μετρήσεις της περιόδου και συνεπώς της συχνότητας με τα σφάλματά τους για την αντλία ενός εμβόλου παρουσιάζονται στον πίνακα 19 για συγκεκριμένους αριθμούς δειγμάτων  $n_{1T}$ .

Πίνακας 19. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι της συχνότητας διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου με χρήση χρονομέτρων.

Αριθμός δειγμάτων $n_{1T}$	Περίοδος διέγερσης T [sec]	Τυχαίο σφάλμα $e_T$ [sec]	Συνολικό σφάλμα $e_T$ [sec]	Συχνότητα διέγερσης f [Hz]	Συνολικό σφάλμα $e_f$ [Hz]
6	131	1.8	1.8	0.0076	0.00010
7	123	2.0	2.0	0.0081	0.00013
6	119	12	12	0.0084	0.00086
5	114	2.8	2.8	0.0088	0.00022
6	112	12	12	0.0089	0.00095
7	103	1.7	1.7	0.0097	0.00016
8	90	1.7	1.7	0.0111	0.00020
7	77	1.2	1.2	0.0130	0.00021
11	73	0.8	0.8	0.0137	0.00015
7	67	4.7	4.7	0.015	0.0010
10	59	5.5	5.5	0.017	0.0016
16	50.6	0.64	0.65	0.0198	0.00025

14	50	1.5	1.5	0.0199	0.00059
16	45	1.4	1.4	0.0224	0.00070
12	40.8	0.35	0.36	0.0245	0.00021
26	32.3	0.29	0.29	0.0310	0.00024
25	30.5	0.26	0.26	0.0328	0.00028
31	25.3	0.16	0.16	0.0396	0.00025
30	24.4	0.16	0.16	0.0410	0.00023
40	19.7	0.15	0.15	0.0509	0.00038
41	19.6	0.15	0.15	0.0511	0.00040
39	19.2	0.13	0.13	0.0521	0.00035
48	16.1	0.14	0.14	0.0621	0.00045
50	15.7	0.13	0.13	0.0636	0.00051
60	11.60	0.041	0.060	0.0862	0.00028
61	11.55	0.039	0.040	0.0866	0.00030
37	8.92	0.035	0.037	0.1121	0.00046
35	8.83	0.031	0.033	0.1133	0.00043
40	7.41	0.036	0.038	0.1350	0.00068
41	7.26	0.037	0.039	0.1377	0.00073
42	6.35	0.033	0.034	0.1575	0.00085
41	6.25	0.033	0.035	0.1600	0.00078

Όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3, η αστάθεια του κινητήρα λόγω των υψηλών ροπών φορτίου που αναπτύσσονται σε αυτές τις χαμηλές στροφές περιστροφής της αντλίας, δημιουργεί μικρές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις κατά την περιστροφή συνήθως διαδοχικά άνισες που έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της περιόδου. Σε αυτή τη μεταβολή της περιόδου συνίσταται η εισαγωγή σχετικά υψηλού τυχαίου σφάλματος από περίοδο σε περίοδο  $e_T$ . Έτσι το συστηματικό σφάλμα τόσο του χρονομέτρου του H/Y ( $b_T=0.11$  sec), όσο και του ηλεκτρονικού χρονομέτρου ( $b_T=0.01$  sec) συμβάλλει ελάχιστα στη διαμόρφωση του συνολικού σφάλματος  $e_T$ , γι' αυτό το τυχαίο σφάλμα  $e_T$  της περιόδου διέγερσης ταυτίζεται με το συνολικό  $e_T$  για συχνότητες διέγερσης έως 0.18 Hz περίπου της αντλίας ενός εμβόλου.

Οι τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων, όταν η συχνότητα περιστροφής της αντλίας προκύπτει από τη μέτρηση των στροφών με το ταχύμετρο (για 12 rpm και άνω), παρουσιάζονται στον πίνακα 20 για συγκεκριμένους αριθμούς δειγμάτων  $n_{IN}$ .

Πίνακας 20. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι της συχνότητας διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου με χρήση ταχυμέτρου.

Αριθμός δειγμάτων $n_{IN}$	Αριθμός στροφών N [rpm]	Τυχαίο σφάλμα $e_N$ [rpm]	Συνολικό σφάλμα $e_N$ [rpm]	Συχνότητα διέγερσης f [Hz]	Συνολικό σφάλμα $e_f$ [Hz]
6	11.9	0	0.10	0.198	0.0017
7	12.0	0.036	0.10	0.200	0.0018
9	13.2	0.040	0.11	0.221	0.0018
9	13.4	0.040	0.11	0.223	0.0018
7	15.2	0.040	0.11	0.253	0.0018
7	15.2	0.040	0.11	0.253	0.0018
7	16.7	0	0.10	0.278	0.0017



7	16.7	0.040	0.11	0.279	0.0018
7	18.9	0.050	0.11	0.316	0.0019
7	19.0	0.067	0.12	0.316	0.0020
7	21.0	0.040	0.11	0.349	0.0018
7	21.0	0.067	0.12	0.350	0.0020
7	22.6	0.040	0.11	0.376	0.0018
7	22.7	0.040	0.11	0.378	0.0018
7	24.8	0.050	0.11	0.413	0.0019
7	24.9	0.040	0.11	0.414	0.0018
7	26.1	0.040	0.11	0.436	0.0018
7	26.2	0.040	0.11	0.436	0.0018
7	27.5	0.050	0.11	0.458	0.0019
7	27.5	0.040	0.11	0.458	0.0018
7	29.5	0.040	0.11	0.492	0.0018
7	29.7	0.040	0.11	0.494	0.0018
7	30.7	0.043	0.11	0.512	0.0018
7	30.8	0.050	0.11	0.513	0.0019
7	33.0	0.040	0.11	0.549	0.0018
7	33.0	0.040	0.11	0.549	0.0018
7	35.4	0.056	0.11	0.591	0.0019
7	35.5	0.043	0.11	0.592	0.0018
7	37.7	0.036	0.11	0.629	0.0018
7	37.8	0.060	0.12	0.630	0.0019
7	37.8	0.056	0.11	0.630	0.0019
7	37.8	0.040	0.11	0.631	0.0018
7	37.9	0.058	0.12	0.631	0.0019
7	37.9	0.060	0.12	0.632	0.0019
7	37.9	0.072	0.12	0.632	0.0021
7	38.0	0.067	0.12	0.633	0.0020
7	38.0	0.082	0.13	0.633	0.0022
7	38.0	0.090	0.13	0.633	0.0022
7	38.2	0.072	0.12	0.636	0.0021
7	40.3	0.036	0.11	0.672	0.0018
7	40.4	0.056	0.11	0.673	0.0019
7	42.8	0.072	0.12	0.713	0.0021
7	42.9	0.10	0.14	0.715	0.0024
7	44.9	0.082	0.12	0.749	0.0022
7	45.0	0.10	0.14	0.750	0.0024
7	46.5	0.051	0.11	0.775	0.0019
7	46.5	0.067	0.12	0.775	0.0020
7	48.5	0.051	0.11	0.808	0.0019
7	48.6	0.072	0.12	0.809	0.0021
7	50.9	0.094	0.14	0.849	0.0023
7	51.2	0.13	0.16	0.853	0.0027
7	53.8	0.14	0.17	0.897	0.0028
7	53.9	0.072	0.12	0.898	0.0021
7	57.6	0.12	0.15	0.960	0.0026
7	57.7	0.082	0.12	0.961	0.0022

7	60.3	0.056	0.11	1.004	0.0019
19	60.4	0.084	0.13	1.006	0.0022
19	63.3	0.072	0.12	1.056	0.0021
19	63.5	0.070	0.12	1.058	0.0020
19	65.6	0.069	0.12	1.094	0.0020
19	65.9	0.060	0.12	1.098	0.0019
19	68.4	0.059	0.12	1.140	0.0019
19	68.4	0.067	0.12	1.141	0.0020
19	70.2	0.082	0.13	1.169	0.0022
19	70.3	0.091	0.14	1.172	0.0023
21	70.7	0.20	0.22	1.178	0.0037
21	70.8	0.29	0.31	1.180	0.0052
19	71.0	0.13	0.17	1.183	0.0028
19	71.3	0.077	0.13	1.188	0.0021
21	71.6	0.21	0.23	1.193	0.0039
21	71.7	0.17	0.20	1.196	0.0033
21	74.4	0.10	0.15	1.239	0.0024
21	75.0	0.085	0.13	1.250	0.0022
21	75.9	0.13	0.17	1.264	0.0028
21	76.5	0.50	0.52	1.274	0.0086
21	77.2	0.14	0.17	1.286	0.0029
21	82.1	0.36	0.37	1.368	0.0062
21	82.3	0.19	0.22	1.370	0.0038
16	82.5	0.18	0.21	1.375	0.0034
21	82.7	0.19	0.21	1.378	0.0036
20	83.6	0.10	0.14	1.394	0.0024
21	83.7	0.16	0.19	1.395	0.0032
20	83.8	0.10	0.14	1.396	0.0024
20	83.8	0.10	0.14	1.397	0.0025
20	84.1	0.26	0.28	1.401	0.0047
21	84.2	0.13	0.16	1.403	0.0027
21	84.6	0.24	0.26	1.410	0.0043
21	84.7	0.28	0.30	1.411	0.0050
21	85.0	0.32	0.34	1.417	0.0057
21	86.3	0.19	0.22	1.438	0.0036
21	90.2	0.13	0.16	1.503	0.0028
21	90.4	0.23	0.25	1.507	0.0042
21	90.6	0.14	0.17	1.510	0.0029
21	90.8	0.16	0.19	1.513	0.0032
21	99.1	0.22	0.24	1.651	0.0041
20	99.7	0.12	0.16	1.662	0.0026
21	103.2	0.059	0.11	1.719	0.0019
23	103.5	0.061	0.12	1.725	0.0020
21	110.6	0.16	0.19	1.844	0.0032
22	112.5	0.18	0.20	1.875	0.0034
20	113.9	0.24	0.26	1.898	0.0043
21	119.1	0.22	0.24	1.985	0.0039
21	119.4	0.24	0.26	1.990	0.0043

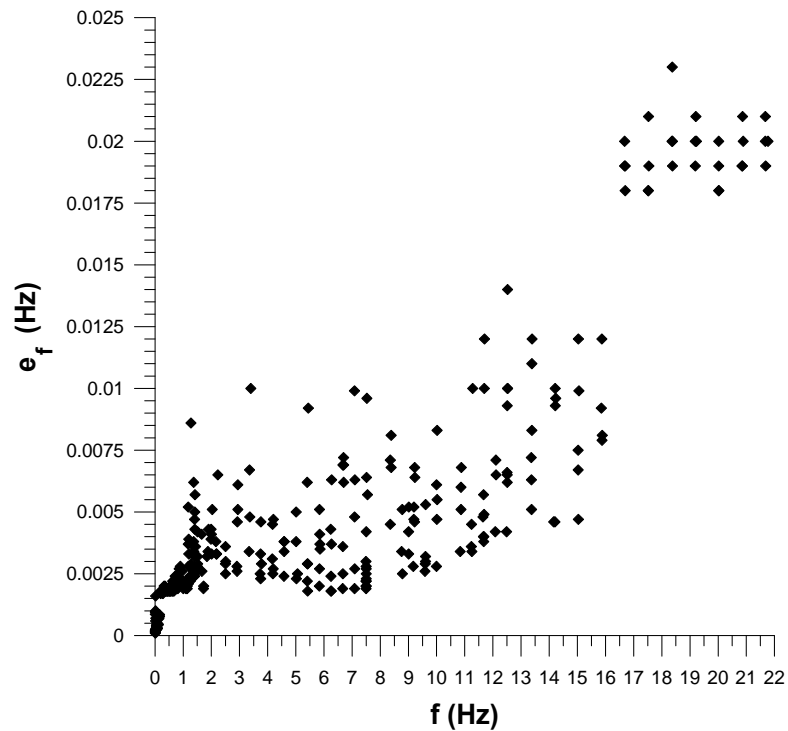
21	120.1	0.23	0.25	2.002	0.0041
21	120.4	0.17	0.20	2.007	0.0033
21	121.7	0.29	0.31	2.028	0.0051
21	129.5	0.21	0.23	2.159	0.0038
21	130.8	0.17	0.20	2.180	0.0033
21	130.9	0.17	0.20	2.182	0.0033
21	133.6	0.37	0.39	2.227	0.0065
21	150.0	0.14	0.17	2.500	0.0029
21	150.1	0.11	0.15	2.502	0.0025
21	150.2	0.19	0.21	2.503	0.0036
21	150.3	0.15	0.18	2.505	0.0030
21	174.3	0.14	0.17	2.905	0.0028
21	174.6	0.12	0.16	2.911	0.0026
21	175.3	0.26	0.27	2.921	0.0046
21	176.3	0.28	0.30	2.939	0.0051
21	176.3	0.35	0.36	2.939	0.0061
21	200.3	0.18	0.21	3.338	0.0034
21	201.1	0.39	0.40	3.352	0.0067
21	201.9	0.27	0.29	3.365	0.0048
21	204.2	0.59	0.60	3.40	0.010
19	223.8	0.11	0.15	3.730	0.0025
21	224.8	0.17	0.20	3.746	0.0033
21	225.0	0.099	0.14	3.750	0.0023
20	225.5	0.26	0.28	3.758	0.0046
21	226.7	0.14	0.17	3.779	0.0029
21	249.9	0.16	0.19	4.165	0.0031
21	250.2	0.25	0.27	4.170	0.0045
21	251.0	0.11	0.15	4.183	0.0025
21	251.8	0.13	0.16	4.197	0.0027
21	252.1	0.26	0.28	4.201	0.0047
21	274.6	0.11	0.15	4.577	0.0024
21	274.9	0.21	0.23	4.582	0.0038
21	275.0	0.18	0.21	4.583	0.0034
21	275.1	0.21	0.23	4.585	0.0038
21	300.4	0.20	0.23	5.007	0.0038
21	300.7	0.28	0.30	5.012	0.0050
16	301.2	0.093	0.14	5.019	0.0023
21	303.4	0.11	0.15	5.057	0.0025
15	324.2	0.36	0.37	5.403	0.0062
15	324.3	0.090	0.13	5.405	0.0022
21	324.6	0.14	0.18	5.410	0.0029
21	325.0	0.040	0.11	5.417	0.0018
21	325.1	0.14	0.17	5.418	0.0029
21	326.5	0.54	0.55	5.442	0.0092
15	349.9	0.069	0.12	5.831	0.0020
21	350.3	0.29	0.30	5.839	0.0051
15	350.5	0.13	0.16	5.841	0.0027
20	350.9	0.22	0.24	5.848	0.0041

20	351.2	0.20	0.22	5.853	0.0037
15	351.4	0.19	0.21	5.857	0.0035
21	374.3	0.24	0.26	6.238	0.0043
15	374.8	0.11	0.15	6.247	0.0024
15	375.1	0.036	0.11	6.251	0.0018
20	375.2	0.046	0.11	6.253	0.0018
21	375.9	0.20	0.22	6.264	0.0037
15	376.2	0.36	0.38	6.270	0.0063
15	399.8	0.051	0.11	6.663	0.0019
16	400.1	0.19	0.22	6.668	0.0036
15	400.2	0.40	0.41	6.670	0.0069
15	400.2	0.11	0.15	6.670	0.0025
15	401.5	0.42	0.43	6.692	0.0072
16	401.6	0.40	0.41	6.694	0.0069
15	401.8	0.36	0.37	6.697	0.0062
15	424.8	0.59	0.59	7.081	0.0099
15	425.1	0.059	0.12	7.085	0.0019
15	425.2	0.27	0.29	7.087	0.0048
15	425.3	0.13	0.16	7.088	0.0027
15	425.8	0.36	0.38	7.097	0.0063
15	449.5	0.087	0.13	7.491	0.0022
15	449.5	0.15	0.18	7.491	0.0030
15	449.6	0.067	0.12	7.493	0.0020
15	449.7	0.049	0.11	7.494	0.0019
15	449.7	0.14	0.17	7.495	0.0028
15	449.8	0.068	0.12	7.497	0.0020
15	450.0	0.11	0.15	7.499	0.0025
15	450.0	0.23	0.25	7.500	0.0042
15	450.0	0.090	0.13	7.500	0.0022
15	450.1	0.13	0.16	7.501	0.0027
15	450.1	0.099	0.14	7.502	0.0023
15	450.6	0.37	0.39	7.510	0.0064
15	451.4	0.57	0.58	7.523	0.0096
15	452.8	0.33	0.34	7.546	0.0057
15	501.2	0.25	0.27	8.354	0.0045
15	501.4	0.42	0.43	8.356	0.0071
15	503.0	0.40	0.41	8.384	0.0068
15	503.0	0.47	0.48	8.384	0.0081
15	525.3	0.18	0.20	8.755	0.0034
15	526.5	0.29	0.31	8.775	0.0051
15	527.1	0.11	0.15	8.785	0.0025
15	540.2	0.23	0.25	9.004	0.0042
15	540.5	0.17	0.20	9.008	0.0033
15	540.6	0.30	0.31	9.010	0.0052
15	550.2	0.14	0.17	9.170	0.0028
15	551.5	0.27	0.28	9.191	0.0047
15	551.7	0.30	0.31	9.196	0.0052
15	553.0	0.25	0.27	9.217	0.0046

15	553.3	0.40	0.41	9.221	0.0068
15	553.6	0.37	0.39	9.227	0.0064
15	575.2	0.12	0.15	9.587	0.0026
15	575.6	0.14	0.17	9.593	0.0029
15	576.2	0.15	0.18	9.604	0.0030
15	576.4	0.16	0.19	9.606	0.0032
15	576.6	0.30	0.32	9.610	0.0053
15	599.5	0.13	0.17	9.992	0.0028
15	599.8	0.36	0.37	9.997	0.0061
15	600.5	0.26	0.28	10.009	0.0047
15	600.9	0.49	0.50	10.016	0.0083
15	601.0	0.31	0.33	10.016	0.0055
15	650.1	0.18	0.20	10.836	0.0034
15	651.9	0.29	0.31	10.865	0.0051
15	652.0	0.35	0.36	10.867	0.0060
15	652.6	0.40	0.41	10.877	0.0068
15	674.0	0.19	0.21	11.233	0.0036
15	674.4	0.25	0.27	11.240	0.0045
15	675.0	0.18	0.20	11.250	0.0034
15	676.7	0.62	0.63	11.28	0.010
15	698.6	0.27	0.29	11.643	0.0048
15	699.6	0.22	0.24	11.661	0.0040
15	700.0	0.33	0.34	11.667	0.0057
15	700.3	0.21	0.23	11.672	0.0038
15	700.6	0.22	0.24	11.676	0.0040
15	701.1	0.28	0.29	11.684	0.0049
15	701.2	0.62	0.63	11.69	0.010
15	702.0	0.72	0.73	11.70	0.012
15	725.1	0.23	0.25	12.085	0.0042
15	726.4	0.41	0.42	12.106	0.0071
15	726.5	0.37	0.39	12.108	0.0065
15	749.0	0.23	0.25	12.484	0.0042
15	750.0	0.38	0.39	12.500	0.0066
15	750.5	0.37	0.39	12.509	0.0065
15	750.5	0.36	0.37	12.509	0.0062
15	750.6	0.55	0.56	12.510	0.0093
15	750.9	0.81	0.82	12.52	0.014
15	751.0	0.59	0.60	12.52	0.010
15	751.2	0.59	0.60	12.52	0.010
12	801.5	0.42	0.43	13.359	0.0072
15	802.0	0.36	0.38	13.367	0.0063
15	802.3	0.29	0.31	13.372	0.0051
15	802.5	0.68	0.68	13.38	0.011
15	802.7	0.49	0.50	13.380	0.0083
13	803.3	0.70	0.71	13.39	0.012
12	849.5	0.26	0.27	14.159	0.0046
15	852.2	0.25	0.27	14.203	0.0046
15	852.5	0.60	0.61	14.21	0.010

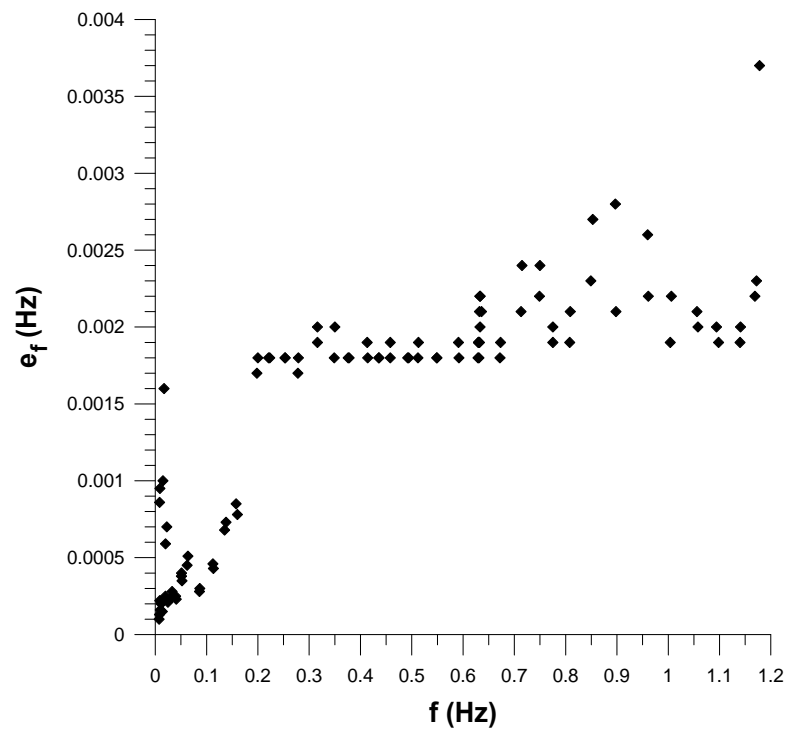
12	852.8	0.55	0.56	14.213	0.0093
15	853.7	0.57	0.58	14.228	0.0096
12	901.7	0.44	0.45	15.028	0.0075
12	901.9	0.39	0.40	15.031	0.0067
15	902.3	0.26	0.28	15.038	0.0047
13	902.3	0.71	0.72	15.04	0.012
15	903.4	0.59	0.59	15.056	0.0099
12	951.2	0.54	0.55	15.854	0.0092
12	952.2	0.69	0.69	15.87	0.012
15	952.8	0.46	0.47	15.880	0.0079
15	953.2	0.47	0.48	15.887	0.0081
12	1001	0.61	1.2	16.68	0.020
13	1001	0.61	1.2	16.68	0.019
15	1002	0.61	1.2	16.70	0.019
15	1002	0.44	1.1	16.70	0.018
15	1051	0.43	1.1	17.52	0.018
13	1051	0.33	1.1	17.52	0.018
12	1052	0.76	1.3	17.53	0.021
15	1052	0.61	1.2	17.54	0.019
13	1102	0.65	1.2	18.36	0.020
12	1102	0.98	1.4	18.37	0.023
15	1103	0.65	1.2	18.38	0.020
15	1103	0.53	1.1	18.38	0.019
15	1152	0.71	1.2	19.19	0.020
12	1152	0.61	1.2	19.19	0.019
13	1152	0.75	1.3	19.21	0.021
15	1154	0.61	1.2	19.23	0.020
12	1201	0.55	1.1	20.02	0.019
15	1201	0.45	1.1	20.02	0.018
13	1201	0.61	1.2	20.02	0.020
15	1202	0.43	1.1	20.03	0.018
15	1251	0.50	1.1	20.85	0.019
12	1252	0.51	1.1	20.86	0.019
13	1252	0.75	1.2	20.87	0.021
15	1254	0.65	1.2	20.89	0.020
12	1301	0.80	1.3	21.68	0.021
13	1301	0.71	1.2	21.68	0.020
15	1301	0.54	1.1	21.69	0.019
15	1306	0.65	1.2	21.77	0.020

Στην εικόνα 66 παρουσιάζεται η κατανομή συνολικού σφάλματος  $e_f$  της συχνότητας για την αντλία ενός εμβόλου σε όλο το πεδίο συχνοτήτων.



Εικόνα 66. Κατανομή συνολικού σφάλματος  $e_f$  της συχνότητας για την αντλία ενός εμβόλου σε όλο το πεδίο συχνοτήτων.

Για λόγους ευκρίνειας μεγεθύνεται η εικόνα 66 στις χαμηλές συχνότητες, οπότε προκύπτει η εικόνα 67 όπου παρουσιάζεται η κατανομή του συνολικού σφάλματος  $e_f$  της συχνότητας για την αντλία ενός εμβόλου που αφορά το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης.



Εικόνα 67. Κατανομή συνολικού σφάλματος  $e_f$  της συχνότητας για την αντλία ενός εμβόλου στο χαμηλό πεδίο συχνοτήτων.

Η υπολογισμένη παροχή μάζας του νερού  $\dot{m}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του πρώτου επιπέδου σφάλματος  $e_m$  της αντλίας ενός εμβόλου παρουσιάζονται στον πίνακα 21 καθώς αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης  $f$ .

Πίνακας 21. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι πρώτου επιπέδου σφάλματος της παροχής μάζας για κάθε συχνότητα διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Συχνότητα διέγερσης $f$ [Hz]	Διάρκεια μέτρησης $t_t$ [sec]	Αριθμός δειγμάτων $n$	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Σφάλμα κλίσης $se \times 10^{-5}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $b_m$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_m$ [gr/sec]	Μέση τετραγωνική απόκλιση αναδρομής RMS %
0.0076	790.0	7407	0.002	0.27	0.0097	0.0097	0.0021
0.0081	864.9	8109	0.003	0.20	0.0097	0.0097	0.0018
0.0084	716.0	6713	0.002	0.35	0.0097	0.0097	0.0023
0.0088	570.0	5345	0.003	0.45	0.0097	0.0097	0.0021
0.0089	670.1	6283	0.002	0.36	0.0097	0.0097	0.0022
0.0097	723.0	6779	0.003	0.31	0.0097	0.0097	0.0021
0.0111	724.0	6789	0.003	0.26	0.0097	0.0097	0.0018
0.0130	538.0	5045	0.004	0.48	0.0097	0.0097	0.0021
0.0137	803.1	7530	0.004	0.27	0.0097	0.0097	0.0021
0.015	471.0	4417	0.004	0.65	0.0097	0.0097	0.0023
0.017	593.0	5560	0.004	0.59	0.0097	0.0097	0.0030
0.0198	811.0	7604	0.006	0.34	0.0097	0.0097	0.0028
0.0199	703.0	6592	0.005	0.33	0.0097	0.0097	0.0021
0.0224	713.1	6686	0.006	0.33	0.0097	0.0097	0.0021
0.0245	489.0	4585	0.008	0.58	0.0097	0.0097	0.0022
0.0310	840.0	7876	0.010	0.28	0.0097	0.0097	0.0023
0.0328	640.0	6001	0.008	0.39	0.0097	0.0097	0.0022
0.0396	760.0	7126	0.009	0.32	0.0097	0.0097	0.0023
0.0410	536.0	5026	0.013	0.63	0.0097	0.0097	0.0027
0.0509	648.0	6076	0.017	0.47	0.0097	0.0097	0.0026
0.0511	688.0	6451	0.011	0.36	0.0097	0.0097	0.0023
0.0521	764.1	7164	0.011	0.33	0.0097	0.0097	0.0024
0.0621	612.1	5739	0.020	0.40	0.0097	0.0097	0.0020
0.0636	774.9	7266	0.014	0.30	0.0097	0.0097	0.0022
0.0862	835.1	7830	0.029	0.24	0.0099	0.0099	0.0020
0.0866	784.0	7351	0.020	0.37	0.0098	0.0098	0.0029
0.1121	755.0	7079	0.027	0.33	0.0098	0.0098	0.0024
0.1133	790.0	7407	0.038	0.35	0.0099	0.0099	0.0027
0.1350	712.0	6676	0.045	0.39	0.0099	0.0099	0.0025
0.1377	544.0	5101	0.033	0.52	0.0097	0.0097	0.0023
0.1575	809.0	7585	0.04	0.33	0.010	0.010	0.0026
0.1600	893.2	8375	0.05	0.50	0.010	0.010	0.0047
0.198	513.0	4810	0.048	0.59	0.0098	0.0098	0.0023
0.200	775.0	7267	0.07	0.37	0.010	0.010	0.0028
0.221	817.0	7660	0.05	0.29	0.010	0.010	0.0022
0.223	846.3	7935	0.07	0.32	0.011	0.011	0.0026



0.253	560.0	10501	0.067	0.32	0.0099	0.0099	0.0018
0.253	693.3	13000	0.08	0.32	0.010	0.010	0.0025
0.278	598.0	11214	0.07	0.27	0.010	0.010	0.0017
0.279	657.6	12330	0.09	0.34	0.010	0.010	0.0024
0.316	643.2	12060	0.10	0.27	0.010	0.010	0.0018
0.316	604.8	11340	0.09	0.32	0.010	0.010	0.0020
0.349	652.8	12240	0.11	0.30	0.011	0.011	0.0020
0.350	609.0	11420	0.10	0.27	0.010	0.010	0.0017
0.376	608.0	11400	0.10	0.29	0.010	0.010	0.0017
0.378	651.2	12210	0.12	0.51	0.011	0.011	0.0036
0.413	649.0	12170	0.14	0.28	0.011	0.011	0.0019
0.414	604.8	11340	0.12	0.28	0.010	0.010	0.0016
0.436	648.0	12150	0.14	0.37	0.011	0.011	0.0024
0.436	604.2	11330	0.12	0.25	0.011	0.011	0.0014
0.458	643.7	12070	0.15	0.25	0.011	0.011	0.0015
0.458	604.2	11330	0.13	0.33	0.011	0.011	0.0018
0.492	611.7	11470	0.14	0.30	0.011	0.011	0.0020
0.494	646.9	12130	0.16	0.29	0.012	0.012	0.0017
0.512	605.8	11360	0.15	0.21	0.011	0.011	0.0013
0.513	642.6	12050	0.17	0.36	0.012	0.012	0.0025
0.549	643.2	12060	0.18	0.24	0.012	0.012	0.0016
0.549	605.3	11350	0.16	0.23	0.011	0.011	0.0014
0.591	642.6	12050	0.19	0.32	0.012	0.012	0.0021
0.592	603.7	11320	0.17	0.32	0.011	0.011	0.0018
0.629	366.9	6880	0.18	0.41	0.010	0.010	0.0012
0.630	386.6	7250	0.18	0.48	0.010	0.010	0.0016
0.630	367.4	6890	0.18	0.46	0.010	0.010	0.0013
0.631	364.8	6840	0.19	0.47	0.010	0.010	0.0012
0.631	364.2	6830	0.18	0.44	0.010	0.010	0.0012
0.632	366.9	6880	0.18	0.61	0.010	0.010	0.0018
0.632	362.6	6800	0.19	0.42	0.010	0.010	0.0012
0.633	406.9	7630	0.21	0.56	0.010	0.010	0.0018
0.633	363.2	6810	0.18	0.44	0.010	0.010	0.0013
0.633	366.4	6870	0.19	0.49	0.010	0.010	0.0015
0.636	363.2	6810	0.19	0.46	0.010	0.010	0.0012
0.672	365.3	6850	0.20	0.47	0.010	0.010	0.0014
0.673	421.3	7900	0.22	0.48	0.010	0.010	0.0015
0.713	429.3	8050	0.23	0.51	0.010	0.010	0.0019
0.715	364.2	6830	0.21	0.47	0.010	0.010	0.0013
0.749	406.4	7620	0.24	0.49	0.010	0.010	0.0017
0.750	364.2	6830	0.22	0.48	0.010	0.010	0.0013
0.775	365.3	6850	0.23	0.42	0.010	0.010	0.0011
0.775	404.2	7580	0.26	0.44	0.010	0.010	0.0014
0.808	420.8	7890	0.26	0.44	0.011	0.011	0.0015
0.809	363.7	6820	0.24	0.57	0.010	0.010	0.0015
0.849	437.3	8200	0.27	0.59	0.011	0.011	0.0021
0.853	368.0	6900	0.26	0.39	0.010	0.010	0.0012
0.897	366.9	6880	0.27	0.45	0.010	0.010	0.0013

0.898	435.2	8160	0.29	0.43	0.011	0.011	0.0014
0.960	365.3	6850	0.30	0.56	0.010	0.010	0.0016
0.961	405.8	7610	0.32	0.39	0.011	0.011	0.0013
1.004	411.2	7710	0.33	0.35	0.011	0.011	0.0012
1.006	369.6	6930	0.31	0.68	0.010	0.010	0.0020
1.056	405.3	7600	0.34	0.38	0.011	0.011	0.0012
1.058	363.2	6810	0.33	0.53	0.011	0.011	0.0015
1.094	369.0	6920	0.35	0.51	0.011	0.011	0.0014
1.098	406.9	7630	0.35	0.42	0.011	0.011	0.0012
1.140	363.2	6810	0.36	0.39	0.011	0.011	0.00099
1.141	404.8	7590	0.36	0.72	0.011	0.011	0.0025
1.169	405.8	7610	0.38	0.40	0.011	0.011	0.0013
1.172	363.7	6820	0.37	0.63	0.011	0.011	0.0019
1.178	402.0	15075	0.36	1.3	0.011	0.011	0.0051
1.180	402.8	15105	0.38	0.98	0.011	0.011	0.0039
1.183	411.7	7720	0.39	0.50	0.011	0.011	0.0016
1.188	368.0	6900	0.38	0.61	0.011	0.011	0.0017
1.193	401.6	15060	0.37	0.74	0.011	0.011	0.0027
1.196	403.6	15135	0.40	0.88	0.011	0.011	0.0035
1.239	400.2	15009	0.40	0.88	0.011	0.011	0.0034
1.250	401.6	15060	0.38	0.47	0.011	0.011	0.0016
1.264	402.4	15090	0.40	0.43	0.011	0.011	0.0016
1.274	408.8	15330	0.38	2.0	0.011	0.011	0.0082
1.286	420.0	15751	0.43	0.35	0.012	0.012	0.0014
1.368	403.6	15135	0.36	1.4	0.011	0.011	0.0046
1.370	298.0	11175	0.41	2.0	0.010	0.010	0.0050
1.375	402.0	15075	0.42	0.33	0.012	0.012	0.0012
1.378	402.0	15075	0.36	0.54	0.011	0.011	0.0020
1.394	403.2	15120	0.51	1.1	0.012	0.012	0.0040
1.395	402.8	15105	0.37	0.54	0.011	0.011	0.0019
1.396	401.2	15045	0.39	0.66	0.011	0.011	0.0025
1.397	453.2	16995	0.43	0.34	0.013	0.013	0.0015
1.401	402.4	15090	0.37	0.82	0.011	0.011	0.0032
1.403	401.6	15060	0.37	2.1	0.011	0.011	0.0069
1.410	402.0	15075	0.36	0.51	0.011	0.011	0.0021
1.411	402.0	15075	0.53	1.9	0.013	0.013	0.0077
1.417	401.6	15060	0.45	1.7	0.012	0.012	0.0066
1.438	402.0	15075	0.38	0.77	0.011	0.011	0.0023
1.503	403.2	15120	0.47	2.5	0.012	0.012	0.0089
1.507	402.4	15090	0.50	4.2	0.012	0.012	0.015
1.510	402.4	15090	0.45	5.0	0.012	0.012	0.016
1.513	401.6	15060	0.41	0.68	0.011	0.011	0.0024
1.651	404.0	15150	0.50	0.86	0.012	0.012	0.0027
1.662	402.0	15075	0.47	0.48	0.012	0.012	0.0017
1.719	403.2	15120	0.59	0.87	0.013	0.013	0.0036
1.725	402.0	15075	0.60	5.5	0.013	0.013	0.019
1.844	403.2	15120	0.61	0.78	0.013	0.013	0.0031
1.875	402.0	15075	0.58	0.80	0.013	0.013	0.0032

1.898	402.4	15090	0.61	4.6	0.013	0.013	0.015
1.985	304.0	11400	0.65	0.33	0.011	0.011	0.0008
1.990	401.2	15045	0.56	1.3	0.013	0.013	0.0051
2.002	404.4	15165	0.69	1.3	0.014	0.014	0.0048
2.007	402.4	15090	0.63	2.5	0.014	0.014	0.0086
2.028	402.0	15075	0.65	1.5	0.014	0.014	0.0057
2.159	401.6	15060	0.69	2.4	0.014	0.014	0.0098
2.180	305.2	11445	0.65	0.41	0.011	0.011	0.00094
2.182	402.0	15075	0.67	0.45	0.014	0.014	0.0016
2.227	403.2	15120	0.63	0.76	0.014	0.014	0.0023
2.500	325.2	12195	0.68	5.7	0.012	0.012	0.013
2.502	402.4	15090	0.73	0.57	0.015	0.015	0.0021
2.503	402.4	15090	0.71	0.75	0.014	0.014	0.0027
2.505	402.4	15090	0.66	2.7	0.014	0.014	0.0089
2.905	404.4	15165	0.91	1.8	0.018	0.018	0.0054
2.911	402.8	15105	0.92	0.49	0.017	0.017	0.0020
2.921	402.4	15090	0.82	2.2	0.016	0.016	0.0072
2.939	402.0	15075	0.83	2.6	0.016	0.016	0.0098
2.939	401.6	15060	0.73	3.0	0.015	0.015	0.0091
3.338	401.6	15060	0.88	0.99	0.016	0.016	0.0038
3.352	402.0	15075	0.92	2.0	0.017	0.017	0.0074
3.365	402.4	15090	1.07	3.3	0.019	0.019	0.011
3.40	401.6	15060	1.23	5.7	0.021	0.021	0.021
3.730	402.0	15075	1.43	4.6	0.024	0.024	0.015
3.746	401.2	15045	1.00	0.92	0.018	0.018	0.0037
3.750	401.6	15060	1.12	1.1	0.019	0.019	0.0038
3.758	402.4	15090	1.10	6.0	0.019	0.019	0.017
3.779	402.0	15075	1.32	0.97	0.022	0.022	0.0030
4.165	402.0	15075	1.32	3.6	0.022	0.022	0.011
4.170	402.4	15090	1.30	1.5	0.022	0.022	0.0056
4.183	402.0	15075	1.12	0.67	0.019	0.019	0.0026
4.197	401.2	15045	1.59	2.2	0.026	0.026	0.0080
4.201	405.2	15195	1.76	4.3	0.029	0.029	0.016
4.577	400.8	15030	2.04	1.1	0.032	0.032	0.0037
4.582	402.0	15075	1.45	4.5	0.024	0.024	0.014
4.583	403.6	15135	1.56	3.6	0.026	0.026	0.013
4.585	401.6	15060	1.57	1.5	0.025	0.025	0.0057
5.007	401.6	15060	1.76	1.7	0.028	0.028	0.0058
5.012	402.4	15090	1.65	5.9	0.027	0.027	0.019
5.019	302.4	11340	2.30	1.9	0.022	0.022	0.0036
5.057	402.8	15105	1.75	3.5	0.028	0.028	0.011
5.403	282.4	10590	2.23	2.0	0.019	0.019	0.0045
5.405	279.6	10485	2.30	0.54	0.019	0.019	0.0012
5.410	402.4	15090	1.84	5.3	0.029	0.029	0.017
5.417	308.8	11580	1.75	0.56	0.018	0.018	0.0014
5.418	402.0	15075	1.83	1.4	0.029	0.029	0.0040
5.442	402.0	15075	1.86	1.3	0.030	0.030	0.0049
5.831	283.6	10635	2.43	7.0	0.021	0.021	0.013

5.839	402.8	15105	1.92	1.6	0.030	0.030	0.0056
5.841	288.0	10800	2.66	6.7	0.023	0.023	0.013
5.848	402.0	15075	1.88	2.6	0.030	0.030	0.0095
5.853	299.2	11220	1.88	2.5	0.018	0.018	0.0062
5.857	282.4	10590	2.67	3.6	0.022	0.022	0.0072
6.238	401.6	15060	2.09	0.96	0.033	0.033	0.0035
6.247	282.0	10575	1.91	3.5	0.017	0.017	0.0079
6.251	284.0	10650	2.60	5.8	0.022	0.022	0.011
6.253	395.6	14835	2.11	2.4	0.032	0.032	0.0070
6.264	401.6	15060	2.03	2.7	0.032	0.032	0.0083
6.270	282.4	10590	2.58	3.0	0.021	0.021	0.0060
6.663	282.4	10590	2.59	0.37	0.021	0.021	0.00081
6.668	282.0	21150	2.13	2.7	0.018	0.018	0.0084
6.670	282.0	21150	2.16	2.9	0.019	0.019	0.0089
6.670	281.2	10545	2.01	8.5	0.018	0.018	0.016
6.692	280.8	10530	2.57	7.9	0.021	0.021	0.015
6.694	282.8	21210	2.16	3.3	0.019	0.019	0.010
6.697	286.8	10755	1.95	15	0.018	0.018	0.028
7.081	282.0	10575	2.30	4.7	0.020	0.020	0.0091
7.085	286.0	21450	2.08	7.6	0.018	0.018	0.020
7.087	282.0	21150	2.13	7.3	0.018	0.018	0.023
7.088	282.0	21150	2.17	6.1	0.019	0.019	0.016
7.097	283.6	10635	2.14	5.1	0.019	0.019	0.0010
7.491	282.0	10575	2.56	1.0	0.021	0.021	0.0023
7.491	282.0	21150	2.40	3.1	0.020	0.020	0.0095
7.493	281.2	10545	2.55	0.79	0.021	0.021	0.0017
7.494	281.6	10560	2.55	0.58	0.021	0.021	0.0012
7.495	281.6	10560	2.53	6.0	0.021	0.021	0.012
7.497	281.2	10545	2.55	0.55	0.021	0.021	0.0012
7.499	281.2	10545	2.56	0.57	0.021	0.021	0.0012
7.500	280.8	10530	2.54	0.73	0.021	0.021	0.0016
7.500	282.4	10590	2.54	3.3	0.021	0.021	0.0065
7.501	282.0	10575	2.57	2.3	0.021	0.021	0.0055
7.502	281.6	10560	2.53	0.52	0.021	0.021	0.0011
7.510	282.4	10590	2.43	2.1	0.020	0.020	0.0044
7.523	280.8	10530	2.44	7.0	0.020	0.020	0.013
7.546	305.0	11439	2.31	7.8	0.022	0.022	0.019
8.354	282.0	21150	2.53	15	0.021	0.021	0.038
8.356	282.0	21150	2.75	7.6	0.022	0.022	0.021
8.384	280.8	10530	2.62	7.6	0.021	0.021	0.014
8.384	281.2	10545	2.84	4.0	0.023	0.023	0.0083
8.755	281.6	21120	2.90	9.7	0.023	0.023	0.029
8.775	281.6	21120	2.65	7.0	0.022	0.022	0.021
8.785	292.4	10965	2.69	4.3	0.023	0.023	0.0090
9.004	282.0	21150	2.98	19	0.024	0.024	0.048
9.008	280.8	10530	2.46	18	0.020	0.020	0.037
9.010	282.0	21150	2.70	7.7	0.022	0.022	0.020
9.170	284.8	21360	2.90	15	0.024	0.024	0.045

9.191	282.0	21150	2.69	5.4	0.022	0.022	0.017
9.196	283.2	21240	2.65	7.1	0.022	0.022	0.018
9.217	281.2	21090	2.68	7.1	0.022	0.022	0.021
9.221	282.4	10590	2.03	12	0.018	0.018	0.024
9.227	281.6	10560	2.12	6.4	0.018	0.018	0.013
9.587	282.0	21150	2.46	8.9	0.021	0.021	0.022
9.593	281.6	21120	2.49	8.7	0.021	0.021	0.022
9.604	280.2	10509	1.74	3.0	0.016	0.016	0.0064
9.606	280.8	10530	1.97	3.1	0.017	0.017	0.0070
9.610	282.0	21150	2.49	9.4	0.021	0.021	0.025
9.992	281.6	21120	2.24	14	0.019	0.019	0.035
9.997	280.8	10530	1.89	2.5	0.017	0.017	0.0054
10.009	281.6	21120	2.10	11	0.018	0.018	0.033
10.016	282.4	21180	2.14	12	0.019	0.019	0.035
10.016	281.6	10560	1.45	1.8	0.014	0.014	0.0042
10.836	282.8	21210	1.70	16	0.016	0.016	0.042
10.865	270.0	10125	1.29	1.4	0.013	0.013	0.0027
10.867	283.2	10620	2.30	28	0.020	0.020	0.055
10.877	281.6	21120	1.42	16	0.014	0.014	0.042
11.233	281.6	21120	1.26	12	0.013	0.013	0.040
11.240	282.0	10575	2.60	16	0.021	0.021	0.034
11.250	281.2	21090	1.60	8.8	0.015	0.015	0.028
11.28	282.0	21150	1.31	11.0	0.014	0.014	0.032
11.643	282.4	21180	1.21	9.9	0.013	0.013	0.029
11.661	282.0	21150	1.17	13	0.013	0.013	0.038
11.667	282.8	10605	2.78	23	0.023	0.023	0.049
11.672	262.0	9825	1.63	11	0.014	0.014	0.018
11.676	283.6	10635	2.88	5.1	0.024	0.024	0.011
11.684	281.6	10560	2.82	4.7	0.023	0.023	0.010
11.69	283.6	21270	1.80	12	0.017	0.017	0.040
11.70	282.0	21150	1.20	9.7	0.013	0.013	0.031
12.085	280.8	10530	3.09	15	0.025	0.025	0.031
12.106	281.6	21120	2.16	34	0.019	0.019	0.093
12.108	281.2	21090	1.18	11	0.013	0.013	0.030
12.484	282.0	21150	2.61	18	0.022	0.022	0.056
12.500	282.0	10575	3.40	13	0.027	0.027	0.026
12.509	285.2	10695	3.51	31	0.028	0.028	0.063
12.509	201.6	7560	2.12	3.1	0.013	0.013	0.0041
12.510	282.0	21150	1.32	8.0	0.014	0.014	0.026
12.52	281.2	21090	1.29	8.7	0.014	0.014	0.023
12.52	282.8	10605	3.38	6.0	0.027	0.027	0.012
12.52	280.8	21060	1.30	7.0	0.014	0.014	0.023
13.359	213.3	32000	3.07	14	0.016	0.016	0.040
13.367	284.4	10665	3.78	9.1	0.030	0.030	0.019
13.372	281.6	21120	1.54	9.9	0.015	0.015	0.026
13.38	280.8	10530	3.88	5.8	0.030	0.030	0.011
13.380	201.2	7545	2.49	31	0.013	0.013	0.035
13.39	213.3	32000	1.59	21	0.012	0.012	0.064

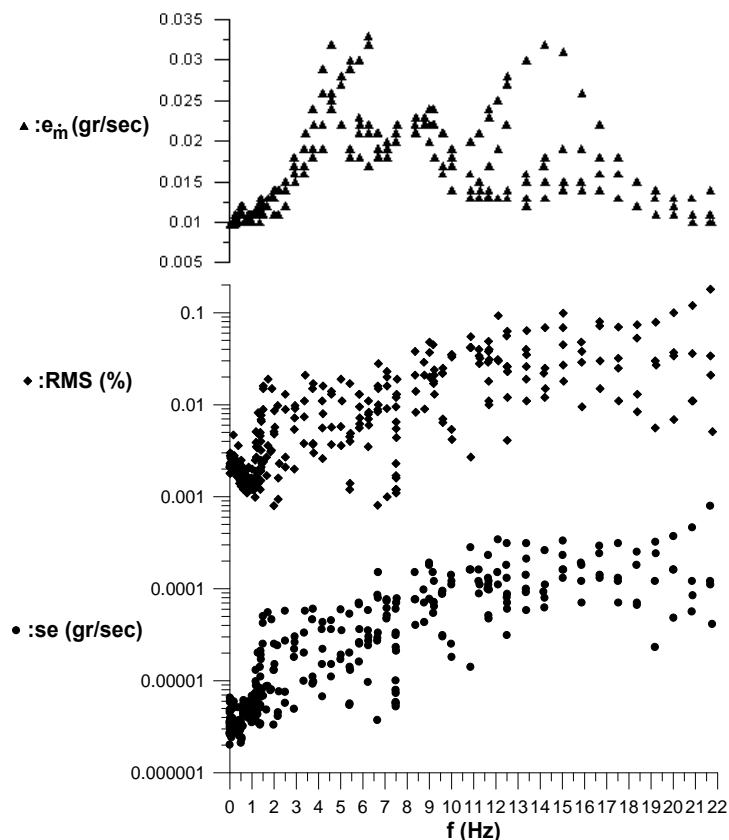
14.159	213.3	32000	3.34	9.2	0.017	0.017	0.022
14.203	281.6	10560	4.16	6.2	0.032	0.032	0.012
14.21	284.0	21300	1.98	7.9	0.018	0.018	0.025
14.213	213.3	32000	1.97	26	0.013	0.013	0.069
14.228	202.0	7575	2.86	11	0.015	0.015	0.015
15.028	213.3	32000	2.47	23	0.014	0.014	0.069
15.031	213.3	32000	3.75	16	0.019	0.019	0.045
15.038	283.2	10620	3.94	13	0.031	0.031	0.027
15.04	213.3	32000	2.50	33	0.014	0.014	0.099
15.056	201.6	7560	2.95	16	0.015	0.015	0.018
15.854	213.3	32000	2.75	19	0.015	0.015	0.048
15.87	213.3	32000	3.97	12	0.019	0.019	0.029
15.880	281.6	10560	3.32	18	0.026	0.026	0.038
15.887	201.6	7560	2.84	7.0	0.014	0.014	0.0095
16.68	213.3	32000	3.64	29	0.018	0.018	0.080
16.68	213.3	32000	3.02	24	0.016	0.016	0.072
16.70	202.8	7605	2.56	13	0.014	0.014	0.015
16.70	284.4	10665	2.58	14	0.022	0.022	0.030
17.52	281.2	10545	2.08	12	0.018	0.018	0.025
17.52	213.3	32000	2.97	13	0.016	0.016	0.032
17.53	213.3	32000	3.13	31	0.016	0.016	0.070
17.54	213.2	7995	2.15	7.0	0.013	0.013	0.011
18.36	213.3	32000	2.72	18	0.015	0.015	0.053
18.37	213.3	32000	2.59	25	0.015	0.015	0.074
18.38	204.8	7680	1.72	6.6	0.012	0.012	0.0084
18.38	282.4	10590	1.58	7.0	0.015	0.015	0.013
19.19	281.2	10545	1.25	2.3	0.013	0.013	0.0056
19.19	213.3	32000	1.97	12	0.013	0.013	0.030
19.21	213.3	32000	2.31	32	0.014	0.014	0.079
19.23	204.0	7650	1.35	24	0.011	0.011	0.027
20.02	213.3	32000	1.49	16	0.012	0.012	0.037
20.02	282.4	10590	1.15	16	0.013	0.013	0.034
20.02	213.3	32000	1.91	37	0.013	0.013	0.10
20.03	201.6	7560	1.07	4.8	0.011	0.011	0.0069
20.85	281.6	10560	1.16	5.6	0.013	0.013	0.011
20.86	213.3	32000	1.14	12	0.011	0.011	0.036
20.87	213.3	32000	1.49	46	0.011	0.011	0.12
20.89	202.0	7576	0.81	8.4	0.010	0.010	0.011
21.68	213.3	32000	0.94	12	0.010	0.010	0.034
21.68	213.3	32000	1.16	79	0.011	0.011	0.18
21.69	282.0	10575	1.47	11	0.014	0.014	0.021
21.77	202.0	7575	0.73	4.1	0.010	0.010	0.0051

Είναι προφανές ότι το συνολικό σφάλμα της παροχής μάζας του πρώτου επιπέδου  $e_m$  ταυτίζεται με το συστηματικό σφάλμα  $b_m$  με τάξη μεγέθους από  $10^{-3}$  έως  $10^{-2}$  και αυτό διότι το εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα  $se$  (σφάλμα κλίσης) είναι χαμηλότερης τάξης ( $10^{-6}$ ÷ $10^{-4}$ ). Έτσι για συχνότητες από 0.0076 έως 0.0396 Hz η ακρίβεια στην παροχή μάζας είναι της τάξης μεγέθους  $10^{-3}$ , ενώ για τις μεγαλύτερες συχνότητες η τάξη μεγέθους αυξάνεται. Όλες

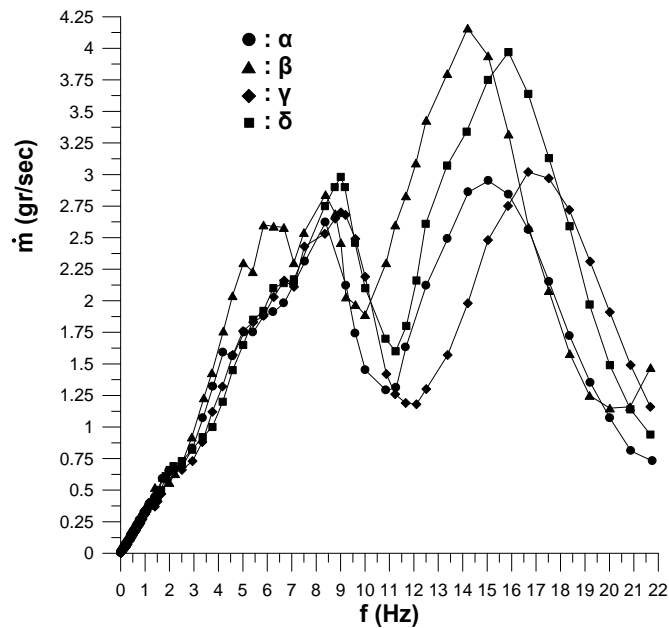
οι ευθείες αναδρομής έχουν μέση τετραγωνική απόκλιση RMS πολύ κοντά στο μηδέν (<0.18%), συνεπώς τιμές πολύ κάτω του 25÷30%, πράγμα που φανερώνει τον πολύ καλό βαθμό προσαρμογής των ευθειών στα πειραματικά δεδομένα. Ο αριθμός των δειγμάτων  $n$  προκύπτει αν πολλαπλασιαστεί η διάρκεια της μέτρησης  $t_i$  με τη συχνότητα δειγματοληψίας των πινάκων 9 και 10 του κεφαλαίου 3.

Στην εικόνα 68 παρουσιάζεται η κατανομή συνολικού σφάλματος  $e_m$  του πρώτου επιπέδου για την παροχή μάζας  $\dot{m}$  της αντλίας ενός εμβόλου σε όλο το πεδίο συχνοτήτων. Στην ίδια εικόνα απεικονίζονται το εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα  $se$  της κλίσης  $\dot{m}$  μαζί με τη μέση τετραγωνική απόκλιση RMS της ευθείας αναδρομής της συναρτήσεως της συχνότητας  $f$ . Για λόγους ευκρίνειας μεγεθύνεται η εικόνα 68 στις χαμηλές συχνότητες, οπότε προκύπτει η εικόνα 70 όπου παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για την αντλία ενός εμβόλου που αφορούν το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης.

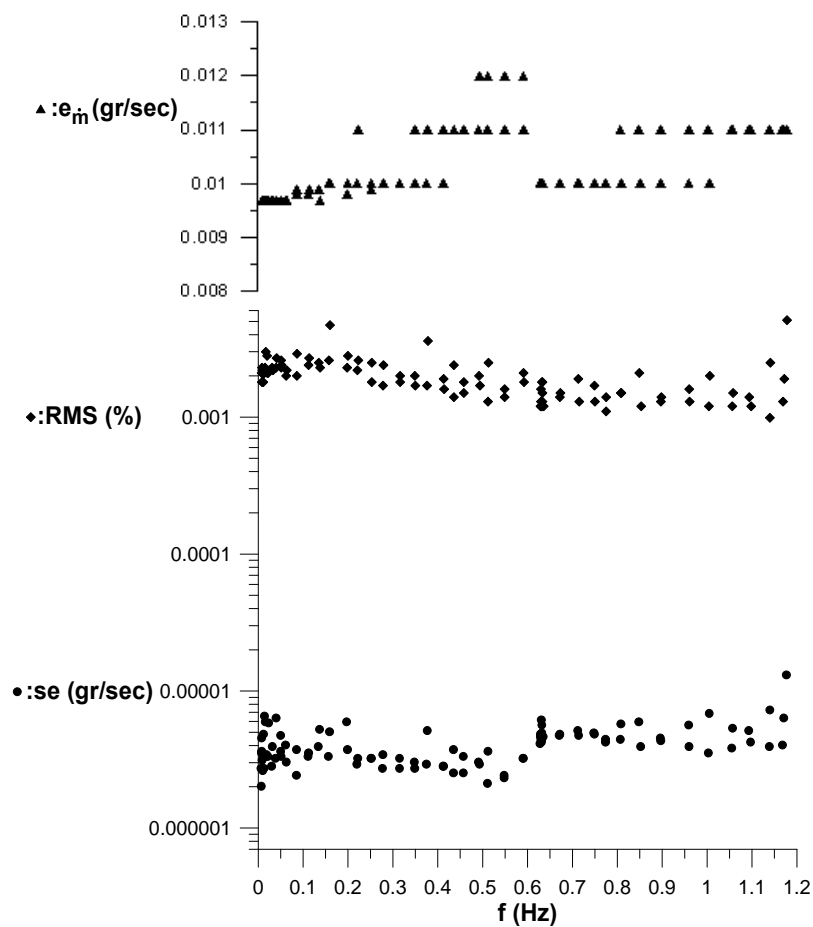
Στην εικόνα 69 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές της παροχής μάζας του νερού  $\dot{m}$  με τη συχνότητα διέγερσης  $f$ . Διακρίνονται τέσσερις καμπύλες στις οποίες αντιστοιχεί από μία σειρά ανεξάρτητων μετρήσεων (α), (β), (γ), (δ). Για λόγους καλύτερης απεικόνισης στο χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης από 0 έως 1.2 Hz μεγεθύνεται ο οριζόντιος άξονας της συχνότητας διέγερσης, οπότε οι πειραματικές τιμές για αυτές τις χαμηλές συχνότητες φαίνονται ευκρινώς στην εικόνα 71. Λόγω χαμηλής τάξης μεγέθους εν γένει των σφαλμάτων στις χαμηλές συχνότητες οι καμπύλες δύο σειρών μετρήσεων (α) και (γ) είναι αρκετές για τον ακριβή προσδιορισμό της παροχής μάζας. Οι ρυθμοί έγχυσης σε αυτό το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές.



Εικόνα 68. Κατανομή του συνολικού σφάλματος  $e_m$  πρώτου επιπέδου της παροχής μάζας  $\dot{m}$  για την αντλία ενός εμβόλου σε όλο το πεδίο συχνοτήτων με παράλληλη αναπαράσταση του εκτιμώμενου τυπικού σφάλματος  $se$  και της μέσης τετραγωνικής απόκλισης RMS.

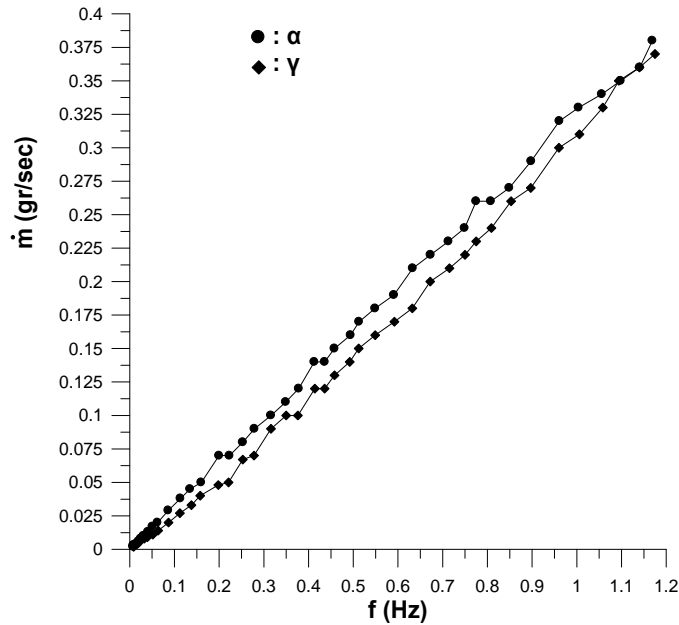


Εικόνα 69. Διαγράμματα ανεξάρτητων σειρών μετρήσεων παροχής μάζας του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου.



Εικόνα 70. Κατανομή του συνολικού σφάλματος  $e_m$  πρώτου επιπέδου της παροχής μάζας  $\dot{m}$  για την αντλία ενός εμβόλου στο χαμηλό πεδίο συχνοτήτων με παράλληλη αναπαράσταση του εκτιμούμενου τυπικού σφάλματος  $se$  και της μέσης τετραγωνικής απόκλισης RMS.





Εικόνα 71. Διαγράμματα ανεξάρτητων σειρών μετρήσεων παροχής μάζας του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου (χαμηλό πεδίο συχνοτήτων).

Η υπολογισμένη μέση παροχή μάζας του νερού  $\bar{m}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του δεύτερου επιπέδου σφάλματος  $e_{\bar{m}}$  της αντλίας ενός εμβόλου παρουσιάζονται στον πίνακα 22 ενδεικτικά για κάποιες τιμές της μέσης συχνότητας διέγερσης  $\bar{f}_2$ .

Πίνακας 22(α). Πειραματικά αποτελέσματα (α) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Αριθμός δειγμάτων $n_2$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\epsilon_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\bar{b}_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{m}}$ [gr/sec]
2	0.0134	0.00021	0.004	0.00014	0.0097	0.0097
2	1.407	0.0057	0.44	0.026	0.012	0.029
2	6.684	0.0062	1.98	0.063	0.018	0.066

Πίνακας 22(β). Πειραματικά αποτελέσματα (β) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Αριθμός δειγμάτων $n_2$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\epsilon_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\bar{b}_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{m}}$ [gr/sec]
2	1.403	0.0050	0.52	0.018	0.012	0.022
2	2.908	0.0028	0.92	0.0074	0.017	0.019
2	5.404	0.0062	2.23	0.0020	0.019	0.019

3	5.843	0.0035	2.6	0.15	0.022	0.15
2	6.261	0.0063	2.59	0.020	0.022	0.029
2	6.677	0.0072	2.58	0.021	0.021	0.030
10	7.497	0.0042	2.55	0.0066	0.021	0.022
3	11.676	0.0057	2.83	0.053	0.023	0.058
3	12.51	0.010	3.43	0.081	0.027	0.085
2	13.37	0.011	3.8	0.10	0.030	0.10

Πίνακας 22(γ). Πειραματικά αποτελέσματα (γ) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Αριθμός δειγμάτων $n_2$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\varepsilon_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\bar{b}_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{m}}$ [gr/sec]
2	0.0516	0.00040	0.011	0.00026	0.0097	0.0097
10	0.632	0.0022	0.18	0.00088	0.010	0.010
2	1.175	0.0037	0.37	0.0091	0.011	0.014
2	1.191	0.0039	0.37	0.010	0.011	0.015
2	1.262	0.0086	0.38	0.0029	0.011	0.011
8	1.399	0.0062	0.37	0.0082	0.011	0.014
2	7.091	0.0063	2.11	0.063	0.018	0.065
2	7.516	0.0096	2.43	0.016	0.020	0.025
3	9.201	0.0052	2.68	0.023	0.022	0.032
2	9.602	0.0053	2.49	0.00082	0.021	0.021
2	10.004	0.0083	2.19	0.092	0.019	0.094
3	11.67	0.012	1.19	0.020	0.013	0.024
3	12.51	0.014	1.30	0.020	0.014	0.024
2	13.38	0.012	1.57	0.052	0.014	0.053
2	14.21	0.010	1.98	0.0078	0.016	0.017
2	15.03	0.012	2.48	0.023	0.014	0.027

Πίνακας 22(δ). Πειραματικά αποτελέσματα (δ) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Αριθμός δειγμάτων $n_2$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\varepsilon_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\bar{b}_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{m}}$ [gr/sec]
2	1.373	0.0038	0.42	0.0037	0.011	0.012
2	2.005	0.0041	0.66	0.053	0.014	0.055
2	3.752	0.0046	1.0	0.10	0.018	0.10
2	4.177	0.0045	1.2	0.18	0.020	0.18
2	5.426	0.0092	1.85	0.021	0.030	0.036
2	6.245	0.0043	2.10	0.024	0.032	0.040
2	6.669	0.0069	2.14	0.031	0.018	0.036

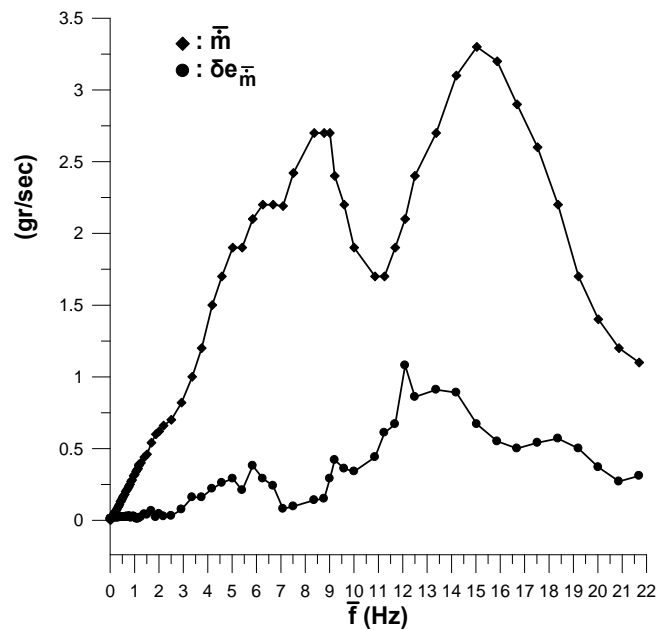
Η υπολογισμένη μέση παροχή μάζας του νερού  $\bar{m}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του τρίτου επιπέδου σφάλματος  $\delta e_{\bar{m}}$  της αντλίας ενός εμβόλου παρουσιάζονται στον πίνακα 23 για όλο το πεδίο συχνοτήτων διέγερσης  $\bar{f}_3$ .

Πίνακας 23. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι τρίτου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για κάθε συχνότητα διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Αριθμός δειγμάτων $n_3$	Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_3$ [Hz]	Μέγιστο συνολικό σφάλμα $(e_f)_{\max}$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Τυχαίο σφάλμα $\delta e_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συστηματικό σφάλμα $\delta \bar{b}_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $\delta e_{\bar{m}}$ [gr/sec]
2	0.0083	0.00086	0.002	0.00045	0.0097	0.0097
2	0.0088	0.00095	0.003	0.00033	0.0097	0.0097
2	0.0198	0.00059	0.006	0.0013	0.0097	0.0098
2	0.0234	0.00070	0.01	0.0025	0.0097	0.010
2	0.0319	0.00028	0.009	0.0022	0.0097	0.0099
2	0.0403	0.00025	0.01	0.0047	0.0097	0.011
2	0.0510	0.00040	0.01	0.0054	0.0097	0.011
2	0.0628	0.00051	0.02	0.0064	0.0097	0.012
2	0.0864	0.00030	0.02	0.0088	0.0098	0.013
2	0.1127	0.00046	0.03	0.011	0.0098	0.015
2	0.1364	0.00073	0.04	0.011	0.0098	0.015
2	0.1588	0.00085	0.05	0.016	0.010	0.018
2	0.199	0.0018	0.06	0.019	0.0099	0.022
2	0.222	0.0018	0.06	0.018	0.010	0.021
2	0.253	0.0018	0.07	0.016	0.010	0.019
2	0.279	0.0018	0.08	0.016	0.010	0.019
2	0.316	0.0020	0.09	0.017	0.010	0.019
2	0.350	0.0020	0.10	0.017	0.010	0.020
2	0.377	0.0018	0.11	0.018	0.010	0.021
2	0.414	0.0019	0.13	0.018	0.010	0.021
2	0.436	0.0018	0.13	0.019	0.011	0.022
2	0.458	0.0019	0.14	0.020	0.011	0.023
2	0.493	0.0018	0.15	0.020	0.012	0.023
2	0.512	0.0019	0.16	0.019	0.012	0.022
2	0.549	0.0018	0.17	0.019	0.012	0.022
2	0.591	0.0019	0.18	0.019	0.012	0.022
2	0.633	0.0022	0.20	0.021	0.010	0.024
2	0.672	0.0019	0.21	0.024	0.010	0.026
2	0.714	0.0024	0.22	0.021	0.010	0.023
2	0.750	0.0024	0.23	0.023	0.010	0.026
2	0.775	0.0020	0.24	0.026	0.010	0.028
2	0.808	0.0021	0.25	0.025	0.010	0.027
2	0.851	0.0027	0.27	0.013	0.010	0.017
2	0.898	0.0028	0.28	0.019	0.010	0.021
2	0.960	0.0026	0.31	0.026	0.010	0.028
2	1.005	0.0022	0.32	0.019	0.010	0.022
2	1.057	0.0021	0.34	0.0050	0.011	0.012

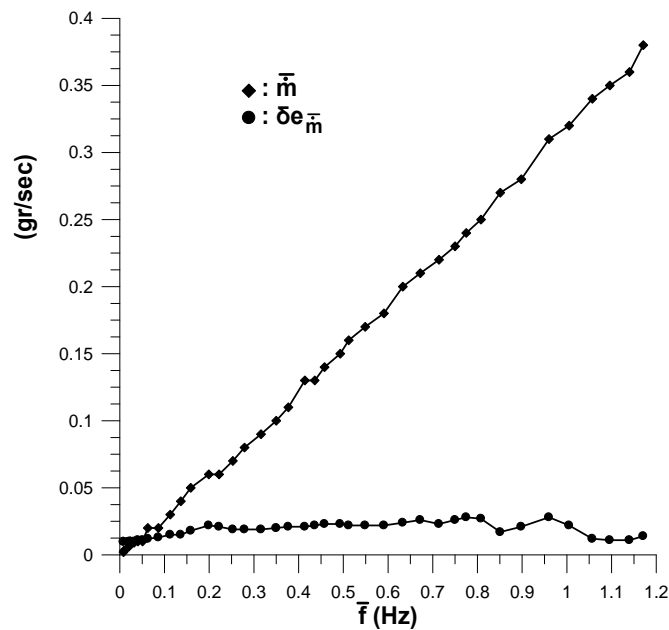
2	1.096	0.0020	0.35	0.036	0.011	0.011
2	1.140	0.0020	0.36	0.0019	0.011	0.011
2	1.171	0.0023	0.38	0.0092	0.011	0.014
4	1.187	0.0052	0.39	0.011	0.011	0.015
4	1.260	0.0029	0.40	0.018	0.011	0.021
8	1.400	0.0057	0.44	0.040	0.012	0.042
4	1.508	0.0042	0.46	0.037	0.012	0.039
4	1.689	0.0041	0.54	0.063	0.012	0.065
3	1.872	0.0043	0.60	0.018	0.013	0.022
4	2.003	0.0051	0.62	0.042	0.013	0.044
4	2.187	0.0065	0.66	0.025	0.013	0.028
4	2.503	0.0030	0.70	0.028	0.014	0.031
4	2.926	0.0061	0.82	0.074	0.016	0.076
4	3.36	0.010	1.0	0.15	0.018	0.16
4	3.754	0.0046	1.2	0.16	0.021	0.16
4	4.183	0.0047	1.5	0.22	0.025	0.22
4	4.582	0.0038	1.7	0.26	0.026	0.26
4	5.024	0.0050	1.9	0.29	0.026	0.29
4	5.413	0.0029	1.9	0.21	0.024	0.21
4	5.845	0.0051	2.1	0.38	0.025	0.38
4	6.258	0.0063	2.2	0.29	0.026	0.29
4	6.682	0.0072	2.2	0.24	0.019	0.24
4	7.088	0.0099	2.19	0.078	0.019	0.080
4	7.510	0.0064	2.42	0.094	0.021	0.097
4	8.370	0.0081	2.7	0.14	0.022	0.14
3	8.771	0.0051	2.7	0.15	0.023	0.15
3	9.007	0.0052	2.7	0.29	0.022	0.29
4	9.209	0.0068	2.4	0.42	0.020	0.42
4	9.598	0.0032	2.2	0.36	0.019	0.36
4	10.004	0.0061	1.9	0.34	0.017	0.34
4	10.861	0.0068	1.7	0.44	0.016	0.44
4	11.25	0.010	1.7	0.61	0.016	0.61
4	11.69	0.012	1.9	0.67	0.017	0.67
3	12.100	0.0071	2	1.1	0.019	1.1
4	12.503	0.0066	2.4	0.86	0.019	0.86
4	13.37	0.012	2.7	0.90	0.018	0.91
4	14.20	0.010	3.1	0.89	0.020	0.89
4	15.04	0.012	3.3	0.66	0.020	0.67
4	15.873	0.0092	3.2	0.55	0.018	0.55
4	16.69	0.020	2.9	0.50	0.018	0.50
4	17.53	0.021	2.6	0.54	0.016	0.54
4	18.37	0.023	2.2	0.57	0.014	0.57
4	19.21	0.021	1.7	0.50	0.013	0.50
4	20.02	0.020	1.4	0.37	0.012	0.37
4	20.87	0.021	1.2	0.27	0.011	0.27
4	21.70	0.021	1.1	0.31	0.012	0.31

Η μέση καμπύλη της παροχής μάζας του νερού συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου απεικονίζεται στην εικόνα 72 παράλληλα με το σφάλμα τρίτου επιπέδου  $\delta e_{\bar{m}}$ .



Εικόνα 72. Διαγράμματα παροχής μάζας του νερού και τρίτου επιπέδου σφάλματος με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου.

Για λόγους ευκρίνειας μεγεθύνεται η εικόνα 72 στις χαμηλές συχνότητες, οπότε προκύπτει η εικόνα 73 όπου παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για την αντλία ενός εμβόλου που αφορούν το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης.



Εικόνα 73. Διαγράμματα παροχής μάζας του νερού και τρίτου επιπέδου σφάλματος με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου (χαμηλό πεδίο συχνοτήτων).

Η παροχή μάζας του ασυμπίεστου νερού μπορεί να μετατραπεί σε παροχή όγκου μέσω της πυκνότητας  $\rho$  του νερού, η οποία λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία [11] ανάλογα με τη θερμοκρασία  $\theta_v$ . Η υπολογισμένη παροχή όγκου του νερού  $\dot{V}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του πρώτου επιπέδου σφάλματος  $e_v$  της αντλίας ενός εμβόλου παρουσιάζονται στον πίνακα 24 καθώς αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης  $f$ .

Πίνακας 24. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι πρώτου επιπέδου σφάλματος της παροχής όγκου για κάθε συχνότητα διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Συχνότητα διέγερσης $f$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_m$ [gr/sec]	Θερμοκρασία $\theta_v$ [ $^{\circ}$ C] ( $\epsilon_{\theta_v} = \pm 0.5$ $^{\circ}$ C)	Πυκνότητα νερού $\rho$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Συνολικό σφάλμα πυκνότητας νερού $e_p \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\dot{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_v$ [ml/min]
0.0076	0.002	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.1	0.58
0.0081	0.003	0.0097	20.5	0.9981	1.1	0.2	0.58
0.0084	0.002	0.0097	19.0	0.99841	0.99	0.1	0.58
0.0088	0.003	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.2	0.58
0.0089	0.002	0.0097	19.0	0.99841	0.99	0.1	0.58
0.0097	0.003	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.2	0.58
0.0111	0.003	0.0097	18.5	0.99851	0.96	0.2	0.58
0.0130	0.004	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.3	0.58
0.0137	0.004	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.3	0.58
0.015	0.004	0.0097	19.5	0.9983	1.0	0.2	0.58
0.017	0.004	0.0097	19.0	0.99841	0.99	0.3	0.58
0.0198	0.006	0.0097	20.5	0.9981	1.1	0.4	0.58
0.0199	0.005	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.3	0.58
0.0224	0.006	0.0097	20.0	0.9982	1.0	0.3	0.58
0.0245	0.008	0.0097	20.5	0.9981	1.1	0.5	0.58
0.0310	0.010	0.0097	21.0	0.9980	1.1	0.6	0.58
0.0328	0.008	0.0097	19.0	0.99841	0.99	0.5	0.58
0.0396	0.009	0.0097	19.5	0.9983	1.0	0.5	0.58
0.0410	0.013	0.0097	21.0	0.9980	1.1	0.8	0.58
0.0509	0.017	0.0097	21.0	0.9980	1.1	1.0	0.58
0.0511	0.011	0.0097	19.5	0.9983	1.0	0.7	0.58
0.0521	0.011	0.0097	19.5	0.9983	1.0	0.7	0.58
0.0621	0.020	0.0097	21.0	0.9980	1.1	1.2	0.58
0.0636	0.014	0.0097	19.5	0.9983	1.0	0.8	0.59
0.0862	0.029	0.0099	21.0	0.9980	1.1	1.7	0.59
0.0866	0.020	0.0098	20.0	0.9982	1.0	1.2	0.59
0.1121	0.027	0.0098	20.0	0.9982	1.0	1.6	0.59
0.1133	0.038	0.0099	21.0	0.9980	1.1	2.3	0.60
0.1350	0.045	0.0099	21.0	0.9980	1.1	2.7	0.60
0.1377	0.033	0.0097	20.0	0.9982	1.0	2.0	0.59
0.1575	0.04	0.010	20.0	0.9982	1.0	2.3	0.60
0.1600	0.05	0.010	21.0	0.9980	1.1	3.2	0.63
0.198	0.048	0.0098	20.0	0.9982	1.0	2.9	0.59

0.200	0.07	0.010	21.0	0.9980	1.1	4.0	0.63
0.221	0.05	0.010	20.0	0.9982	1.0	3.2	0.62
0.223	0.07	0.011	21.0	0.9980	1.1	4.3	0.65
0.253	0.067	0.0099	20.5	0.9981	1.1	4.0	0.59
0.253	0.08	0.010	20.0	0.9982	1.0	5.0	0.62
0.278	0.07	0.010	20.5	0.9981	1.1	4.5	0.60
0.279	0.09	0.010	20.0	0.9982	1.0	5.5	0.62
0.316	0.10	0.010	20.0	0.9982	1.0	6.2	0.63
0.316	0.09	0.010	20.5	0.9981	1.1	5.2	0.61
0.349	0.11	0.011	20.0	0.9982	1.0	6.9	0.64
0.350	0.10	0.010	20.5	0.9981	1.1	5.8	0.61
0.376	0.10	0.010	20.5	0.9981	1.1	6.3	0.62
0.378	0.12	0.011	20.5	0.9981	1.1	7.4	0.65
0.413	0.14	0.011	20.5	0.9981	1.1	8.1	0.66
0.414	0.12	0.010	20.5	0.9981	1.1	7.0	0.63
0.436	0.14	0.011	20.5	0.9981	1.1	8.6	0.67
0.436	0.12	0.011	20.5	0.9981	1.1	7.4	0.63
0.458	0.15	0.011	20.5	0.9981	1.1	9.0	0.68
0.458	0.13	0.011	20.5	0.9981	1.1	7.8	0.64
0.492	0.14	0.011	20.5	0.9981	1.1	8.5	0.65
0.494	0.16	0.012	20.5	0.9981	1.1	9.7	0.69
0.512	0.15	0.011	20.5	0.9981	1.1	8.9	0.66
0.513	0.17	0.012	20.5	0.9981	1.1	10.1	0.70
0.549	0.18	0.012	20.5	0.9981	1.1	10.8	0.71
0.549	0.16	0.011	20.5	0.9981	1.1	9.6	0.67
0.591	0.19	0.012	20.5	0.9981	1.1	11.6	0.73
0.592	0.17	0.011	20.5	0.9981	1.1	10.4	0.68
0.629	0.18	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.0	0.60
0.630	0.18	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.0	0.60
0.630	0.18	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.0	0.60
0.631	0.19	0.010	20.5	0.9981	1.1	11.2	0.60
0.631	0.18	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.0	0.60
0.632	0.18	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.0	0.60
0.632	0.19	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.1	0.60
0.633	0.21	0.010	21.0	0.9980	1.1	12.4	0.61
0.633	0.18	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.1	0.60
0.633	0.19	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.2	0.60
0.636	0.19	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.3	0.60
0.672	0.20	0.010	19.0	0.99841	0.99	11.8	0.60
0.673	0.22	0.010	21.0	0.9980	1.1	13.3	0.62
0.713	0.23	0.010	21.0	0.9980	1.1	13.9	0.63
0.715	0.21	0.010	19.0	0.99841	0.99	12.6	0.60
0.749	0.24	0.010	21.0	0.9980	1.1	14.7	0.62
0.750	0.22	0.010	19.0	0.99841	0.99	13.3	0.61
0.775	0.23	0.010	19.0	0.99841	0.99	13.8	0.61
0.775	0.26	0.010	21.0	0.9980	1.1	15.4	0.63
0.808	0.26	0.011	19.0	0.99841	0.99	15.9	0.64
0.809	0.24	0.010	19.0	0.99841	0.99	14.4	0.61

0.849	0.27	0.011	19.0	0.99841	0.99	16.4	0.65
0.853	0.26	0.010	20.0	0.9982	1.0	15.6	0.62
0.897	0.27	0.010	20.0	0.9982	1.0	16.4	0.62
0.898	0.29	0.011	19.0	0.99841	0.99	17.6	0.66
0.960	0.30	0.010	20.0	0.9982	1.0	17.8	0.62
0.961	0.32	0.011	19.0	0.99841	0.99	19.4	0.65
1.004	0.33	0.011	19.0	0.99841	0.99	20.1	0.66
1.006	0.31	0.010	20.0	0.9982	1.0	18.9	0.63
1.056	0.34	0.011	19.0	0.99841	0.99	20.4	0.66
1.058	0.33	0.011	20.0	0.9982	1.0	20.1	0.63
1.094	0.35	0.011	20.0	0.9982	1.0	20.8	0.64
1.098	0.35	0.011	19.0	0.99841	0.99	20.9	0.67
1.140	0.36	0.011	20.0	0.9982	1.0	21.7	0.64
1.141	0.36	0.011	20.0	0.9982	1.0	21.8	0.67
1.169	0.38	0.011	20.0	0.9982	1.0	22.8	0.68
1.172	0.37	0.011	20.0	0.9982	1.0	22.3	0.64
1.178	0.36	0.011	21.0	0.9980	1.1	21.7	0.67
1.180	0.38	0.011	20.0	0.9982	1.0	22.9	0.68
1.183	0.39	0.011	20.0	0.9982	1.0	23.4	0.69
1.188	0.38	0.011	20.0	0.9982	1.0	22.6	0.65
1.193	0.37	0.011	21.5	0.9979	1.1	22.0	0.67
1.196	0.40	0.011	29.0	0.9959	1.5	24.2	0.69
1.239	0.40	0.011	20.0	0.9982	1.0	24.1	0.68
1.250	0.38	0.011	21.5	0.9979	1.1	23.0	0.68
1.264	0.40	0.011	20.0	0.9982	1.0	24.1	0.69
1.274	0.38	0.011	21.0	0.9980	1.1	22.8	0.68
1.286	0.43	0.012	29.0	0.9959	1.5	25.7	0.72
1.368	0.36	0.011	21.5	0.9979	1.1	21.9	0.67
1.370	0.41	0.010	20.0	0.9982	1.0	24.9	0.62
1.375	0.42	0.012	20.0	0.9982	1.0	25.1	0.69
1.378	0.36	0.011	21.5	0.9979	1.1	21.7	0.67
1.394	0.51	0.012	29.5	0.9958	1.5	30.7	0.75
1.395	0.37	0.011	21.5	0.9979	1.1	22.0	0.67
1.396	0.39	0.011	21.0	0.9980	1.1	23.7	0.68
1.397	0.43	0.013	21.0	0.9980	1.1	25.7	0.76
1.401	0.37	0.011	21.5	0.9979	1.1	22.1	0.67
1.403	0.37	0.011	21.5	0.9979	1.1	22.0	0.67
1.410	0.36	0.011	21.0	0.9980	1.1	21.4	0.67
1.411	0.53	0.013	29.5	0.9958	1.5	31.9	0.75
1.417	0.45	0.012	21.0	0.9980	1.1	27.3	0.71
1.438	0.38	0.011	21.5	0.9979	1.1	22.7	0.68
1.503	0.47	0.012	21.0	0.9980	1.1	28.4	0.72
1.507	0.50	0.012	29.5	0.9958	1.5	30.2	0.74
1.510	0.45	0.012	19.5	0.9983	1.0	26.9	0.71
1.513	0.41	0.011	21.0	0.9980	1.1	24.8	0.69
1.651	0.50	0.012	19.5	0.9983	1.0	29.8	0.74
1.662	0.47	0.012	21.0	0.9980	1.1	28.5	0.72
1.719	0.59	0.013	21.0	0.9980	1.1	35.4	0.79



1.725	0.60	0.013	29.5	0.9958	1.5	36.3	0.80
1.844	0.61	0.013	21.0	0.9980	1.1	36.5	0.80
1.875	0.58	0.013	21.0	0.9980	1.1	34.9	0.78
1.898	0.61	0.013	29.5	0.9958	1.5	36.7	0.80
1.985	0.65	0.011	21.0	0.9980	1.1	39.3	0.67
1.990	0.56	0.013	29.0	0.9959	1.5	33.7	0.77
2.002	0.69	0.014	21.0	0.9980	1.1	41.4	0.86
2.007	0.63	0.014	20.0	0.9982	1.0	38.1	0.82
2.028	0.65	0.014	21.0	0.9980	1.1	38.9	0.82
2.159	0.69	0.014	19.5	0.9983	1.0	41.4	0.85
2.180	0.65	0.011	21.0	0.9980	1.1	39.2	0.67
2.182	0.67	0.014	21.5	0.9979	1.1	40.3	0.84
2.227	0.63	0.014	29.5	0.9958	1.5	38.0	0.82
2.500	0.68	0.012	21.5	0.9979	1.1	40.7	0.71
2.502	0.73	0.015	20.0	0.9982	1.0	43.6	0.88
2.503	0.71	0.014	30.0	0.9956	1.5	42.9	0.87
2.505	0.66	0.014	21.5	0.9979	1.1	39.9	0.84
2.905	0.91	0.018	30.0	0.9956	1.5	55	1.0
2.911	0.92	0.017	30.0	0.9956	1.5	55	1.0
2.921	0.82	0.016	21.5	0.9979	1.1	49.1	0.94
2.939	0.83	0.016	20.5	0.9981	1.1	49.7	0.95
2.939	0.73	0.015	22.0	0.9978	1.1	43.7	0.88
3.338	0.88	0.016	22.0	0.9978	1.1	53.1	0.99
3.352	0.92	0.017	21.0	0.9980	1.1	55	1.0
3.365	1.07	0.019	21.0	0.9980	1.1	65	1.1
3.40	1.23	0.021	30.0	0.9956	1.5	74	1.3
3.730	1.43	0.024	30.0	0.9956	1.5	86	1.4
3.746	1.00	0.018	21.5	0.9979	1.1	60	1.1
3.750	1.12	0.019	22.0	0.9978	1.1	68	1.2
3.758	1.10	0.019	21.5	0.9979	1.1	66	1.2
3.779	1.32	0.022	21.0	0.9980	1.1	79	1.3
4.165	1.32	0.022	22.0	0.9978	1.1	79	1.3
4.170	1.30	0.022	21.5	0.9979	1.1	78	1.3
4.183	1.12	0.019	21.5	0.9979	1.1	67	1.2
4.197	1.59	0.026	21.0	0.9980	1.1	96	1.6
4.201	1.76	0.029	30.0	0.9956	1.5	106	1.7
4.577	2.04	0.032	30.0	0.9956	1.5	123	1.9
4.582	1.45	0.024	21.5	0.9979	1.1	88	1.4
4.583	1.56	0.026	21.0	0.9980	1.1	94	1.5
4.585	1.57	0.025	22.0	0.9978	1.1	94	1.5
5.007	1.76	0.028	22.0	0.9978	1.1	106	1.7
5.012	1.65	0.027	21.0	0.9980	1.1	100	1.6
5.019	2.30	0.022	30.0	0.9956	1.5	138	1.3
5.057	1.75	0.028	21.0	0.9980	1.1	105	1.7
5.403	2.23	0.019	30.0	0.9956	1.5	134	1.2
5.405	2.30	0.019	30.0	0.9956	1.5	134	1.1
5.410	1.84	0.029	21.5	0.9979	1.1	111	1.8
5.417	1.75	0.018	21.0	0.9980	1.1	105	1.1

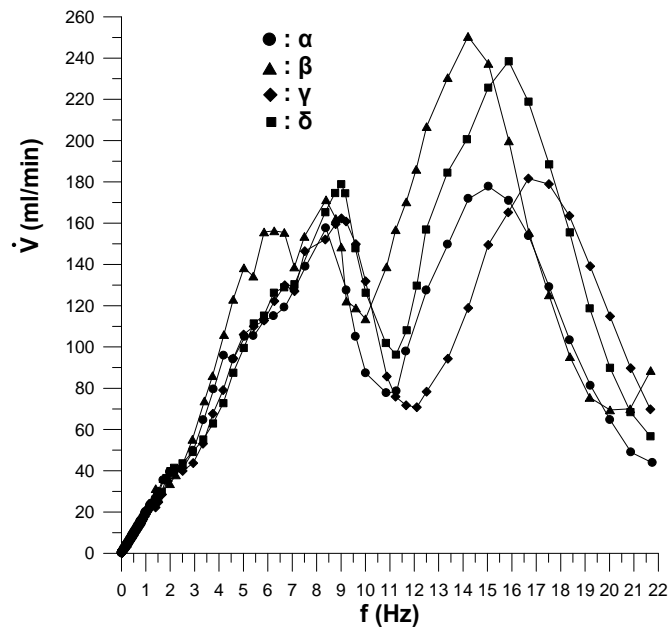
5.418	1.83	0.029	22.0	0.9978	1.1	110	1.8
5.442	1.86	0.030	21.5	0.9979	1.1	112	1.8
5.831	2.43	0.021	30.0	0.9956	1.5	146	1.2
5.839	1.92	0.030	21.5	0.9979	1.1	115	1.8
5.841	2.66	0.023	29.5	0.9958	1.5	160	1.4
5.848	1.88	0.030	22.0	0.9978	1.1	113	1.8
5.853	1.88	0.018	21.0	0.9980	1.1	113	1.1
5.857	2.67	0.022	29.5	0.9958	1.5	161	1.3
6.238	2.09	0.033	21.5	0.9979	1.1	126	2.0
6.247	1.91	0.017	21.0	0.9980	1.1	115	1.0
6.251	2.60	0.022	30.0	0.9956	1.5	157	1.3
6.253	2.11	0.032	21.5	0.9979	1.1	127	1.9
6.264	2.03	0.032	22.0	0.9978	1.1	122	1.9
6.270	2.58	0.021	29.5	0.9958	1.5	156	1.3
6.663	2.59	0.021	29.5	0.9958	1.5	156	1.3
6.668	2.13	0.018	22.0	0.9978	1.1	128	1.1
6.670	2.16	0.019	20.0	0.9982	1.0	130	1.1
6.670	2.01	0.018	21.0	0.9980	1.1	121	1.1
6.692	2.57	0.021	29.5	0.9958	1.5	155	1.3
6.694	2.16	0.019	21.5	0.9979	1.1	130	1.1
6.697	1.95	0.018	21.0	0.9980	1.1	117	1.1
7.081	2.30	0.020	29.5	0.9958	1.5	139	1.2
7.085	2.08	0.018	21.0	0.9980	1.1	125	1.1
7.087	2.13	0.018	21.0	0.9980	1.1	128	1.1
7.088	2.17	0.019	22.0	0.9978	1.1	130	1.1
7.097	2.14	0.019	21.5	0.9979	1.1	129	1.1
7.491	2.56	0.021	29.5	0.9958	1.5	154	1.3
7.491	2.40	0.020	22.0	0.9978	1.1	145	1.2
7.493	2.55	0.021	29.0	0.9959	1.5	153	1.3
7.494	2.55	0.021	29.5	0.9958	1.5	154	1.3
7.495	2.53	0.021	29.5	0.9958	1.5	153	1.3
7.497	2.55	0.021	29.5	0.9958	1.5	154	1.3
7.499	2.56	0.021	29.5	0.9958	1.5	154	1.3
7.500	2.54	0.021	29.5	0.9958	1.5	153	1.3
7.500	2.54	0.021	29.0	0.9959	1.5	153	1.3
7.501	2.57	0.021	29.5	0.9958	1.5	155	1.3
7.502	2.53	0.021	29.5	0.9958	1.5	153	1.3
7.510	2.43	0.020	21.0	0.9980	1.1	146	1.2
7.523	2.44	0.020	21.0	0.9980	1.1	147	1.2
7.546	2.31	0.022	21.0	0.9980	1.1	139	1.3
8.354	2.53	0.021	21.0	0.9980	1.1	152	1.3
8.356	2.75	0.022	20.0	0.9982	1.0	165	1.4
8.384	2.62	0.021	21.0	0.9980	1.1	158	1.3
8.384	2.84	0.023	29.0	0.9959	1.5	171	1.4
8.755	2.90	0.023	20.0	0.9982	1.0	175	1.4
8.775	2.65	0.022	21.0	0.9980	1.1	160	1.3
8.785	2.69	0.023	28.0	0.9962	1.4	162	1.4
9.004	2.98	0.024	20.5	0.9981	1.1	179	1.4

9.008	2.46	0.020	28.0	0.9962	1.4	148	1.2
9.010	2.70	0.022	21.0	0.9980	1.1	162	1.3
9.170	2.90	0.024	20.0	0.9982	1	175	1.4
9.191	2.69	0.022	21.5	0.9979	1.1	162	1.3
9.196	2.65	0.022	21.5	0.9979	1.1	160	1.3
9.217	2.68	0.022	21.0	0.9980	1.1	161	1.3
9.221	2.03	0.018	29.0	0.9959	1.5	122	1.1
9.227	2.12	0.018	21.0	0.9980	1.1	127	1.1
9.587	2.46	0.021	20.0	0.9982	1.0	148	1.2
9.593	2.49	0.021	21.0	0.9980	1.1	150	1.2
9.604	1.74	0.016	21.0	0.9980	1.1	104.9	0.96
9.606	1.97	0.017	28.0	0.9962	1.4	119	1.1
9.610	2.49	0.021	19.0	0.99841	0.99	150	1.3
9.992	2.24	0.019	21.5	0.9979	1.1	135	1.2
9.997	1.89	0.017	28.0	0.9962	1.4	114	1.0
10.009	2.10	0.018	20.5	0.9981	1.1	126	1.1
10.016	2.14	0.019	22.0	0.9978	1.1	129	1.1
10.016	1.45	0.014	22.0	0.9978	1.1	87.2	0.87
10.836	1.70	0.016	20.5	0.9981	1.1	101.9	0.95
10.865	1.29	0.013	22.0	0.9978	1.1	77.6	0.78
10.867	2.30	0.020	29.5	0.9958	1.5	139	1.2
10.877	1.42	0.014	22.0	0.9978	1.1	85.7	0.87
11.233	1.26	0.013	22.0	0.9978	1.1	75.9	0.81
11.240	2.60	0.021	28.0	0.9962	1.4	157	1.3
11.250	1.60	0.015	20.5	0.9981	1.1	96.3	0.91
11.28	1.31	0.014	22.0	0.9978	1.1	78.5	0.82
11.643	1.21	0.013	21.0	0.9980	1.1	72.4	0.79
11.661	1.17	0.013	22.0	0.9978	1.1	70.5	0.78
11.667	2.78	0.023	29.0	0.9959	1.5	168	1.4
11.672	1.63	0.014	22.0	0.9978	1.1	97.8	0.85
11.676	2.88	0.024	28.0	0.9962	1.4	173	1.4
11.684	2.82	0.023	28.0	0.9962	1.4	170	1.4
11.69	1.80	0.017	20.5	0.9981	1.1	108	1.0
11.70	1.20	0.013	21.0	0.9980	1.1	72.2	0.79
12.085	3.09	0.025	28.0	0.9962	1.4	186	1.5
12.106	2.16	0.019	21.0	0.9980	1.1	130	1.1
12.108	1.18	0.013	22.0	0.9978	1.1	70.8	0.78
12.484	2.61	0.022	21.0	0.9980	1.1	157	1.3
12.500	3.40	0.027	28.0	0.9962	1.4	205	1.6
12.509	3.51	0.028	29.5	0.9958	1.5	212	1.7
12.509	2.12	0.013	22.0	0.9978	1.1	127.4	0.76
12.510	1.32	0.014	22.0	0.9978	1.1	79.5	0.83
12.52	1.29	0.014	21.0	0.9980	1.1	77.4	0.81
12.52	3.38	0.027	29.5	0.9958	1.5	204	1.6
12.52	1.30	0.014	21.0	0.9980	1.1	78.2	0.82
13.359	3.07	0.016	21.0	0.9980	1.1	184.5	0.97
13.367	3.78	0.030	29.5	0.9958	1.5	228	1.8
13.372	1.54	0.015	22.5	0.9977	1.2	92.7	0.90

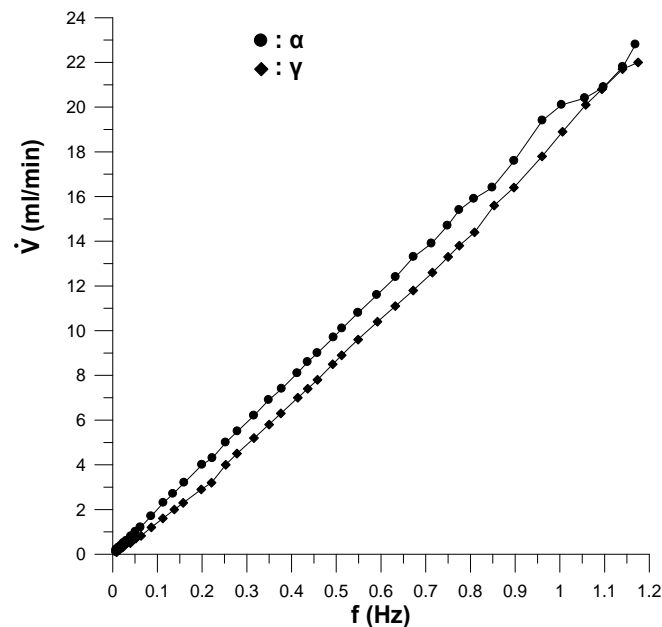
13.38	3.88	0.030	28.0	0.9962	1.4	234	1.8
13.380	2.49	0.013	22.0	0.9978	1.1	149.6	0.81
13.39	1.59	0.012	22.5	0.9977	1.2	95.9	0.71
14.159	3.34	0.017	21.0	0.9980	1.1	201	1.0
14.203	4.16	0.032	29.0	0.9959	1.5	251	1.9
14.21	1.98	0.018	22.5	0.9977	1.2	119	1.1
14.213	1.97	0.013	23.0	0.9975	1.2	118.7	0.77
14.228	2.86	0.015	22.0	0.9978	1.1	171.8	0.87
15.028	2.47	0.014	23.0	0.9975	1.2	148.7	0.86
15.031	3.75	0.019	21.0	0.9980	1.1	226	1.1
15.038	3.94	0.031	29.0	0.9959	1.5	237	1.9
15.04	2.50	0.014	22.0	0.9978	1.1	150.1	0.86
15.056	2.95	0.015	22.0	0.9978	1.1	177.7	0.89
15.854	2.75	0.015	23.0	0.9975	1.2	165.2	0.91
15.87	3.97	0.019	21.0	0.9980	1.1	239	1.2
15.880	3.32	0.026	29.0	0.9959	1.5	200	1.6
15.887	2.84	0.014	22.0	0.9978	1.1	170.8	0.87
16.68	3.64	0.018	21.0	0.9980	1.1	219	1.1
16.68	3.02	0.016	23.0	0.9975	1.2	181.6	0.97
16.70	2.56	0.014	22.0	0.9978	1.1	153.7	0.83
16.70	2.58	0.022	29.0	0.9959	1.5	156	1.3
17.52	2.08	0.018	29.0	0.9959	1.5	125	1.1
17.52	2.97	0.016	23.0	0.9975	1.2	178.9	0.95
17.53	3.13	0.016	21.5	0.9979	1.1	188.5	0.98
17.54	2.15	0.013	22.0	0.9978	1.1	129.0	0.80
18.36	2.72	0.015	23.0	0.9975	1.2	163.5	0.90
18.37	2.59	0.015	21.5	0.9979	1.1	155.5	0.88
18.38	1.72	0.012	22.0	0.9978	1.1	103.2	0.71
18.38	1.58	0.015	29.0	0.9959	1.5	95.3	0.92
19.19	1.25	0.013	29.0	0.9959	1.5	75.5	0.81
19.19	1.97	0.013	21.5	0.9979	1.1	118.7	0.77
19.21	2.31	0.014	23.0	0.9975	1.2	139.1	0.83
19.23	1.35	0.011	22.0	0.9978	1.1	81.2	0.66
20.02	1.49	0.012	21.5	0.9979	1.1	89.9	0.70
20.02	1.15	0.013	29.0	0.9959	1.5	69.5	0.78
20.02	1.91	0.013	23.0	0.9975	1.2	114.8	0.77
20.03	1.07	0.011	22.0	0.9978	1.1	64.6	0.63
20.85	1.16	0.013	29.0	0.9959	1.5	70.0	0.78
20.86	1.14	0.011	21.5	0.9979	1.1	68.4	0.65
20.87	1.49	0.011	23.0	0.9975	1.2	89.7	0.69
20.89	0.81	0.010	22.0	0.9978	1.1	48.9	0.61
21.68	0.94	0.010	21.5	0.9979	1.1	56.7	0.63
21.68	1.16	0.011	23.0	0.9975	1.2	69.8	0.66
21.69	1.47	0.014	29.0	0.9959	1.5	88.5	0.88
21.77	0.73	0.010	22.0	0.9978	1.1	43.8	0.61

Στην εικόνα 74 παρουσιάζονται οι τιμές της παροχής όγκου του νερού  $\dot{V}$  με τη συχνότητα διέγερσης  $f$ . Διακρίνονται τέσσερις καμπύλες στις οποίες αντιστοιχεί από μία

σειρά ανεξάρτητων μετρήσεων ( $\alpha$ ), ( $\beta$ ), ( $\gamma$ ), ( $\delta$ ). Για λόγους καλύτερης απεικόνισης στο χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης από 0 έως 1.2 Hz μεγεθύνεται ο οριζόντιος άξονας της συχνότητας διέγερσης, οπότε οι πειραματικές τιμές για αυτές τις χαμηλές συχνότητες φαίνονται ευκρινώς στην εικόνα 75.



Εικόνα 74. Διαγράμματα ανεξάρτητων σειρών μετρήσεων παροχής όγκου του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου.



Εικόνα 75. Διαγράμματα ανεξάρτητων σειρών μετρήσεων παροχής όγκου του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου (χαμηλό πεδίο συχνοτήτων).

Η υπολογισμένη μέση παροχή όγκου του νερού  $\bar{V}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του δεύτερου επιπέδου σφάλματος  $e_{\bar{V}}$  της αντλίας ενός εμβόλου

παρουσιάζονται στον πίνακα 25 ενδεικτικά για κάποιες τιμές της μέσης συχνότητας διέγερσης  $\bar{f}_2$ .

Πίνακας 25(α). Πειραματικά αποτελέσματα (α) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής όγκου για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\bar{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{V}}$ [ml/min]
0.0134	0.004	0.0097	0.9982	1.0	0.3	0.58
1.407	0.44	0.029	0.9980	1.1	27	1.7
6.684	1.98	0.066	0.9980	1.1	119	3.9

Πίνακας 25(β). Πειραματικά αποτελέσματα (β) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής όγκου για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\bar{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{V}}$ [ml/min]
1.403	0.52	0.022	0.9958	1.5	31	1.3
2.908	0.92	0.019	0.9956	1.5	55	1.1
5.404	2.23	0.019	0.9956	1.5	134	1.2
5.843	2.6	0.15	0.9958	1.5	156	9.3
6.261	2.59	0.029	0.9957	1.5	156	1.8
6.677	2.58	0.030	0.9958	1.5	156	1.8
7.497	2.55	0.022	0.9958	1.5	154	1.3
11.676	2.83	0.058	0.9961	1.4	170	3.5
12.51	3.43	0.085	0.9959	1.5	207	5.1
13.37	3.8	0.10	0.9960	1.5	231	6.3

Πίνακας 25(γ). Πειραματικά αποτελέσματα (γ) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής όγκου για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Παροχή μάζας $\dot{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\bar{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{V}}$ [ml/min]
0.0516	0.011	0.0097	0.9983	1.0	0.7	0.58
0.632	0.18	0.010	0.9984	1.0	11.1	0.60
1.175	0.37	0.014	0.9981	1.1	22.0	0.86

1.191	0.37	0.015	0.9980	1.1	22.3	0.91
1.262	0.38	0.011	0.9979	1.1	22.9	0.68
1.399	0.37	0.014	0.9979	1.1	22.2	0.83
7.091	2.11	0.065	0.9979	1.1	127	3.9
7.516	2.43	0.025	0.9980	1.1	146	1.5
9.201	2.68	0.032	0.9979	1.1	161	1.9
9.602	2.49	0.021	0.9982	1.0	150	1.3
10.004	2.19	0.094	0.9978	1.1	132	5.6
11.67	1.19	0.024	0.9979	1.1	72	1.5
12.51	1.30	0.024	0.9979	1.1	78	1.5
13.38	1.57	0.053	0.9977	1.2	94	3.2
14.21	1.98	0.017	0.9976	1.2	119	1.0
15.03	2.48	0.027	0.9977	1.2	149	1.6

Πίνακας 25(δ). Πειραματικά αποτελέσματα (δ) σειράς μετρήσεων και παράμετροι δεύτερου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής όγκου για ενδεικτικές συχνότητες διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_2$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\bar{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{V}}$ [ml/min]
1.373	0.42	0.012	0.9981	1.1	25.0	0.70
2.005	0.66	0.055	0.9981	1.1	40	3.3
3.752	1.0	0.10	0.9979	1.1	63	6.1
4.177	1.2	0.18	0.9979	1.1	73	11
5.426	1.85	0.036	0.9979	1.1	111	2.2
6.245	2.10	0.040	0.9979	1.1	126	2.4
6.669	2.14	0.036	0.9980	1.1	129	2.2

Η υπολογισμένη μέση παροχή όγκου του νερού  $\bar{V}$  με διάφορες σχετικές παραμέτρους του τρίτου επιπέδου σφάλματος  $e_{\bar{V}}$  της αντλίας ενός εμβόλου παρουσιάζονται στον πίνακα 26 για όλο το πεδίο συχνοτήτων διέγερσης  $\bar{f}_3$ .

Πίνακας 26. Πειραματικά αποτελέσματα και παράμετροι τρίτου επιπέδου σφάλματος της μέσης παροχής μάζας για κάθε συχνότητα διέγερσης της αντλίας ενός εμβόλου.

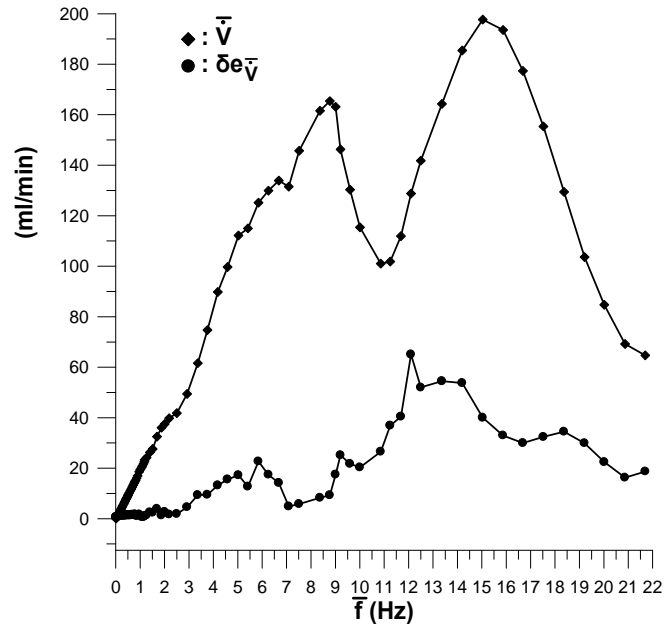
Συχνότητα διέγερσης $\bar{f}_3$ [Hz]	Παροχή μάζας $\bar{m}$ [gr/sec]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{m}}$ [gr/sec]	Πυκνότητα νερού $\bar{\rho}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Σφάλμα πυκνότητας νερού $e_{\bar{\rho}} \times 10^{-4}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	Παροχή όγκου $\bar{V}$ [ml/min]	Συνολικό σφάλμα $e_{\bar{V}}$ [ml/min]
0.0083	0.002	0.0097	0.9983	1.0	0.1	0.58
0.0088	0.003	0.0097	0.9983	1.0	0.2	0.58
0.0198	0.006	0.0098	0.9982	1.0	0.3	0.59
0.0234	0.01	0.010	0.9982	1.0	0.4	0.60

0.0319	0.009	0.0099	0.9982	1.0	0.6	0.60
0.0403	0.01	0.011	0.9982	1.0	0.7	0.65
0.0510	0.01	0.011	0.9982	1.0	0.8	0.67
0.0628	0.02	0.012	0.9982	1.0	1.0	0.70
0.0864	0.02	0.013	0.9981	1.1	1.4	0.79
0.1127	0.03	0.015	0.9981	1.1	1.9	0.88
0.1364	0.04	0.015	0.9981	1.1	2.3	0.89
0.1588	0.05	0.018	0.9981	1.1	3	1.1
0.199	0.06	0.022	0.9981	1.1	4	1.3
0.222	0.06	0.021	0.9981	1.1	4	1.2
0.253	0.07	0.019	0.9982	1.0	5	1.1
0.279	0.08	0.019	0.9982	1.0	5	1.2
0.316	0.09	0.019	0.9982	1.0	6	1.2
0.350	0.10	0.020	0.9982	1.0	6	1.2
0.377	0.11	0.021	0.9981	1.1	7	1.3
0.414	0.13	0.021	0.9981	1.1	8	1.2
0.436	0.13	0.022	0.9981	1.1	8	1.3
0.458	0.14	0.023	0.9981	1.1	8	1.4
0.493	0.15	0.023	0.9981	1.1	9	1.4
0.512	0.16	0.022	0.9981	1.1	10	1.3
0.549	0.17	0.022	0.9981	1.1	10	1.3
0.591	0.18	0.022	0.9981	1.1	11	1.3
0.633	0.20	0.024	0.9982	1.0	12	1.4
0.672	0.21	0.026	0.9982	1.0	13	1.6
0.714	0.22	0.023	0.9982	1.0	13	1.4
0.750	0.23	0.026	0.9982	1.0	14	1.5
0.775	0.24	0.028	0.9982	1.0	15	1.7
0.808	0.25	0.027	0.99841	0.99	15	1.6
0.851	0.27	0.017	0.9983	1.0	16	1.0
0.898	0.28	0.021	0.9983	1.0	17	1.3
0.960	0.31	0.028	0.9983	1.0	19	1.7
1.005	0.32	0.022	0.9983	1.0	20	1.3
1.057	0.34	0.012	0.9983	1.0	20.3	0.73
1.096	0.35	0.011	0.9983	1.0	20.9	0.66
1.140	0.36	0.011	0.9982	1.0	21.8	0.67
1.171	0.38	0.014	0.9982	1.0	22.6	0.86
1.187	0.39	0.015	0.9976	1.2	23.3	0.93
1.260	0.40	0.021	0.9976	1.2	24	1.3
1.400	0.44	0.042	0.9975	1.2	26	2.5
1.508	0.46	0.039	0.9975	1.2	28	2.3
1.689	0.54	0.065	0.9975	1.2	33	3.9
1.872	0.60	0.022	0.9973	1.2	36	1.3
2.003	0.62	0.044	0.9975	1.2	38	2.7
2.187	0.66	0.028	0.9975	1.2	40	1.7
2.503	0.70	0.031	0.9974	1.2	42	1.9
2.926	0.82	0.076	0.9974	1.2	49	4.6
3.36	1.0	0.16	0.9974	1.2	62	9.3
3.754	1.2	0.16	0.9973	1.2	75	9.5



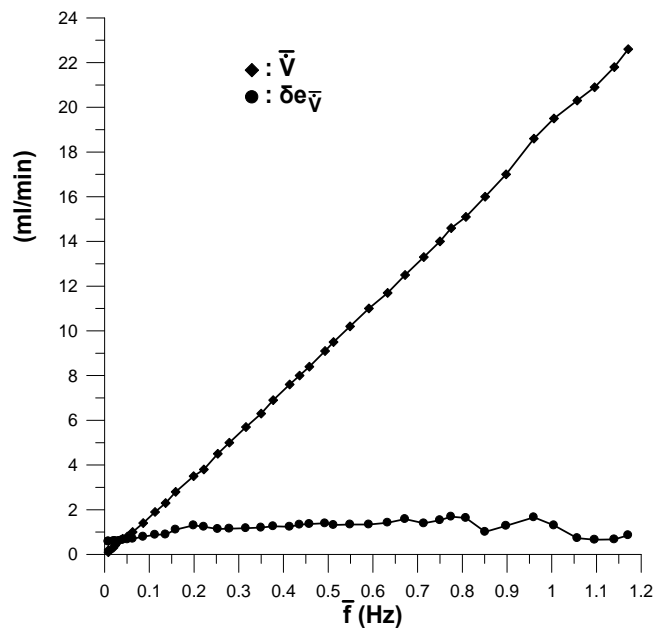
4.183	1.5	0.22	0.9973	1.2	90	13
4.582	1.7	0.26	0.9973	1.2	100	16
5.024	1.9	0.29	0.9974	1.2	110	17
5.413	1.9	0.21	0.9973	1.2	120	13
5.845	2.1	0.38	0.9974	1.2	130	23
6.258	2.2	0.29	0.9974	1.2	130	17
6.682	2.2	0.24	0.9975	1.2	130	14
7.088	2.19	0.080	0.9974	1.2	132	4.8
7.510	2.42	0.097	0.9974	1.2	146	5.8
8.370	2.7	0.14	0.9975	1.2	162	8.3
8.771	2.7	0.15	0.9975	1.2	165	9.3
9.007	2.7	0.29	0.9974	1.2	160	18
9.209	2.4	0.42	0.9975	1.2	150	25
9.598	2.2	0.36	0.9976	1.2	130	22
10.004	1.9	0.34	0.9975	1.2	120	20
10.861	1.7	0.44	0.9974	1.2	100	27
11.25	1.7	0.61	0.9975	1.2	100	37
11.69	1.9	0.67	0.9975	1.2	110	40
12.100	2	1.1	0.9973	1.2	130	65
12.503	2.4	0.86	0.9975	1.2	140	52
13.37	2.7	0.91	0.9973	1.2	160	54
14.20	3.1	0.89	0.9973	1.2	190	54
15.04	3.3	0.67	0.9974	1.2	200	40
15.873	3.2	0.55	0.9973	1.2	190	33
16.69	2.9	0.50	0.9973	1.2	180	30
17.53	2.6	0.54	0.9973	1.2	160	32
18.37	2.2	0.57	0.9973	1.2	130	34
19.21	1.7	0.50	0.9973	1.2	100	30
20.02	1.4	0.37	0.9973	1.2	80	22
20.87	1.2	0.27	0.9973	1.2	70	16
21.70	1.1	0.31	0.9973	1.2	60	19

Η μέση καμπύλη της παροχής όγκου του νερού συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου απεικονίζεται στην εικόνα 76 παράλληλα με το σφάλμα τρίτου επιπέδου  $de_{\bar{v}}$ . Η καμπύλη αυτή αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της αντλίας ενός εμβόλου.



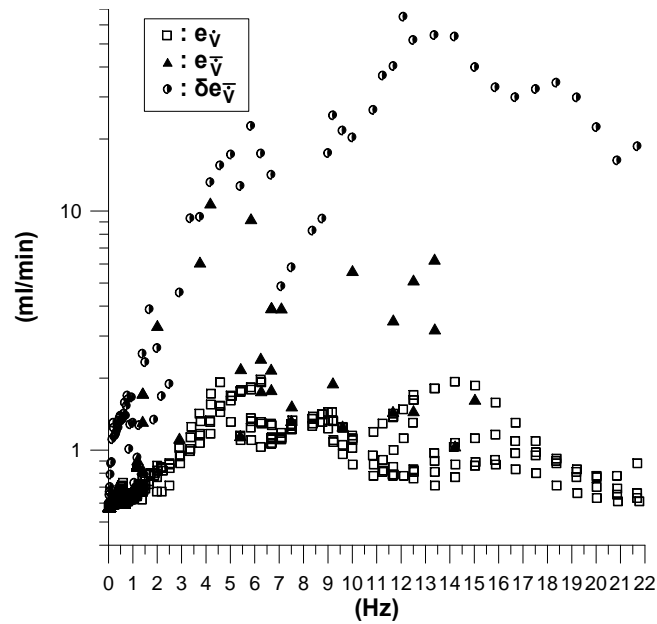
Εικόνα 76. Διαγράμματα παροχής όγκου του νερού και τρίτου επιπέδου σφάλματος με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου (χαρακτηριστική καμπύλη).

Για λόγους ευκρίνειας μεγεθύνεται η εικόνα 76 στις χαμηλές συχνότητες, οπότε προκύπτει η εικόνα 77 όπου παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για την αντλία ενός εμβόλου που αφορούν το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων διέγερσης.



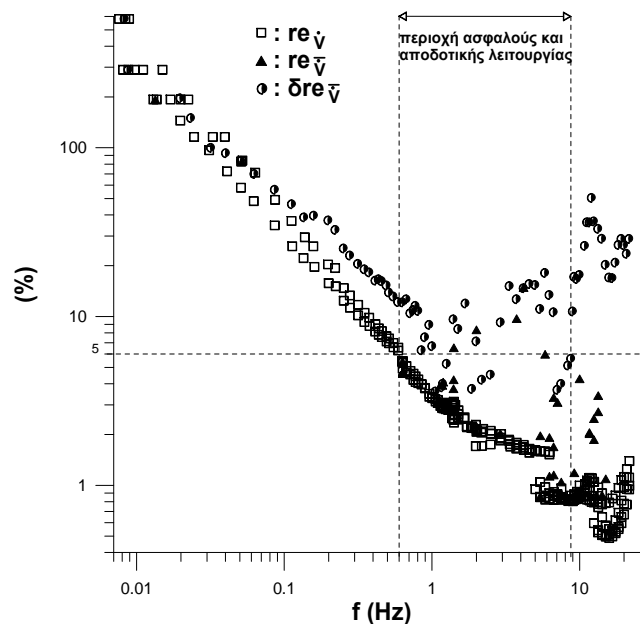
Εικόνα 77. Διαγράμματα παροχής όγκου του νερού και τρίτου επιπέδου σφάλματος με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου (χαμηλό πεδίο συχνοτήτων).

Αν παρασταθούν γραφικά από τους πίνακες (24), (25) και (26) τα σφάλματα παροχής όγκου του πρώτου, δευτέρου και τρίτου επιπέδου αντίστοιχα για την αντλία ενός εμβόλου προκύπτει η κατανομή σφαλμάτων με τη συχνότητα διέγερσης της εικόνας 78.



Εικόνα 78. Διαγράμματα κατανομής όλων των επιπέδων σφάλματος παροχής όγκου με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου.

Παρατηρούνται διακριτές περιοχές κατανομής του κάθε επιπέδου σφάλματος με το πρώτο να είναι το πιο χαμηλό και το τρίτο να είναι το υψηλότερο όπως είναι αναμενόμενο. Αντίστοιχα στην εικόνα 79 παρουσιάζεται συναρτήσεως της συχνότητας διέγερσης το σχετικό σφάλμα έγχυσης επί τις % κάθε επιπέδου σφάλματος.



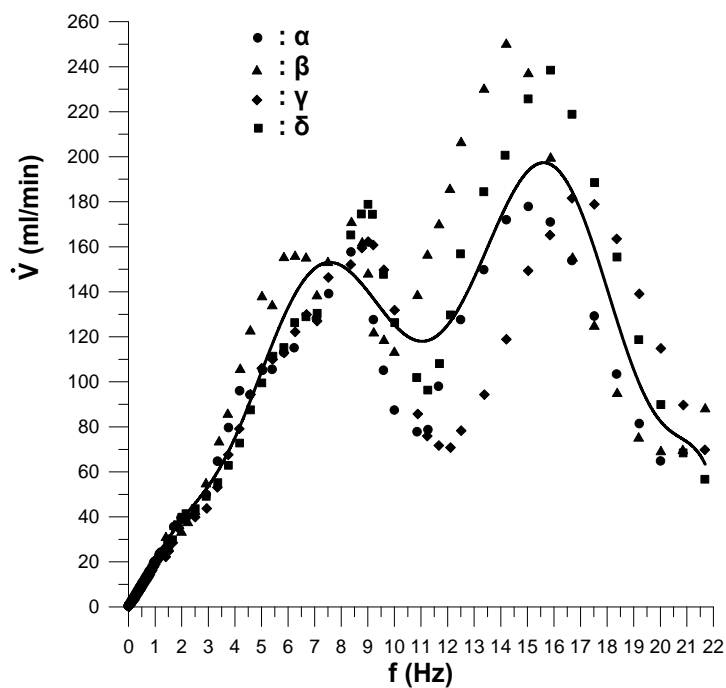
Εικόνα 79. Διαγράμματα κατανομής ακρίβειας έγχυσης παροχής όγκου με τη συχνότητα διέγερσης για την αντλία ενός εμβόλου.

Παρατηρείται ότι για συχνότητα μικρότερη του 0.15 Hz τα επίπεδα σφάλματος τείνουν να ταυτιστούν αλλά το σχετικό σφάλμα αυξάνεται καθώς η έγχυση πραγματοποιείται με σχετικό σφάλμα μεγαλύτερο του 35% περίπου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανικανότητα

σταθερής διέγερσης από τον κινητήρα στις χαμηλές στροφές αλλά και σε κατασκευαστικές ατέλειες του πρωτοτύπου.

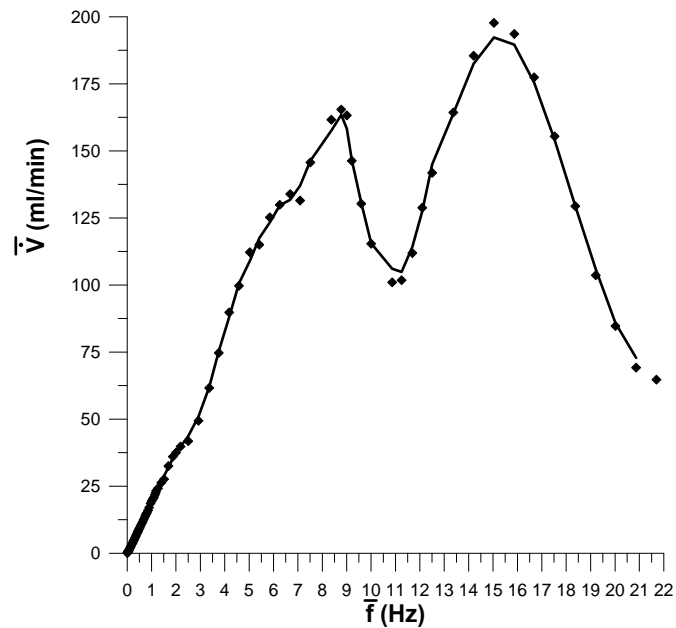
Πέραν της μέσης χαρακτηριστικής καμπύλης της εικόνας 76 θα μπορούσαν να γίνουν και άλλες προσαρμογές επί των πειραματικών σημείων στην προσπάθεια εξαγωγής κάποιου γενικού νόμου που να διέπει τη λειτουργία της αντλίας ενός εμβόλου. Γίνεται για παράδειγμα μια πολυωνυμική προσαρμογή  $10^{00}$  βαθμού επί των πειραματικών σημείων, η καμπύλη της οποίας φαίνεται στην εικόνα 80, η δε εξίσωσή της έχει τη μορφή της (39) με συντελεστές όπως παρακάτω:

$b_0$	$=+1.80592$	$b_6$	$=+0.198093$
$b_1$	$=-2.0705$	$b_7$	$=-0.0126355$
$b_2$	$=+40.6285$	$b_8$	$=+0.00047407$
$b_3$	$=-29.2039$	$b_9$	$=-9.65359 \cdot 10^{-6}$
$b_4$	$=+10.0151$	$b_{10}$	$=+8.23035 \cdot 10^{-8}$
$b_5$	$=-1.85181$		

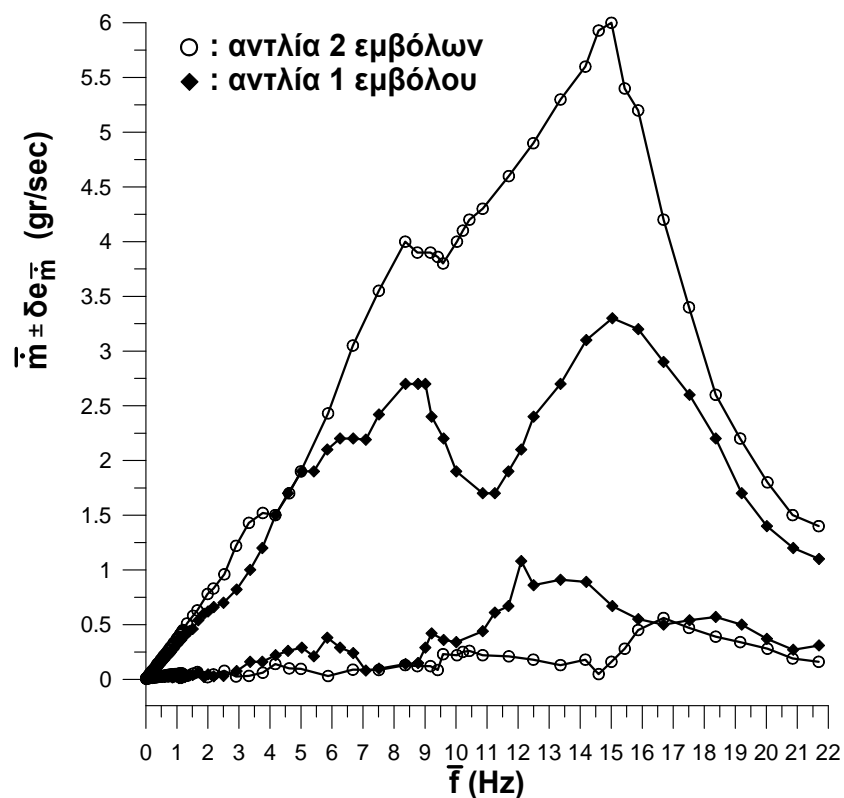


Εικόνα 80. Πολυωνυμική προσαρμογή πειραματικών σημείων για την εύρεση της χαρακτηριστικής καμπύλης  $\dot{V}(f)$  της αντλίας ενός εμβόλου.

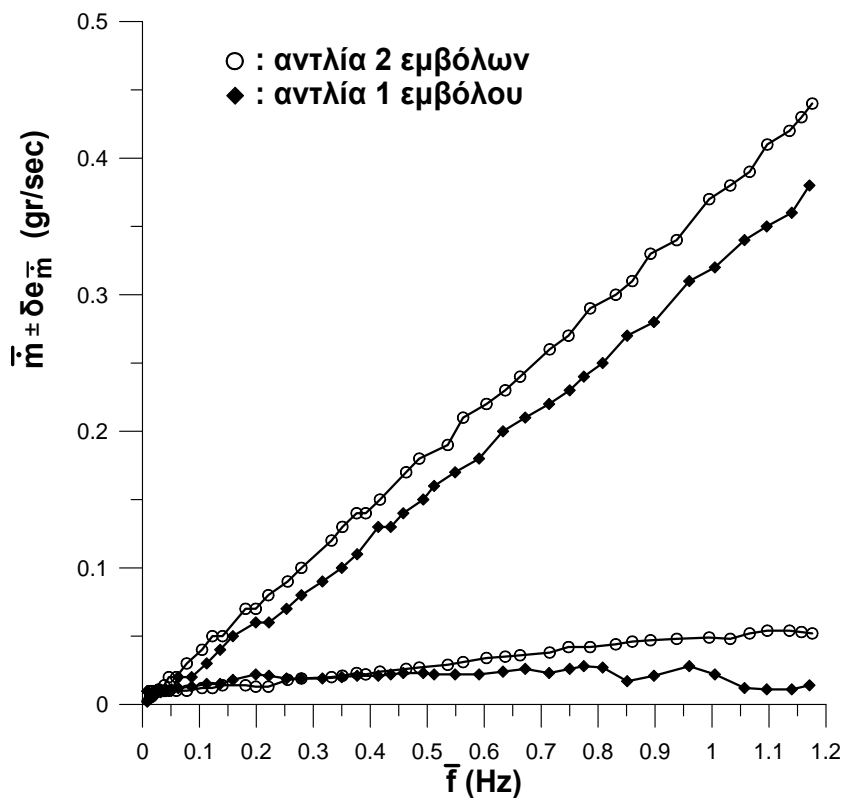
Μια άλλη προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης της εικόνας 76 μπορεί να γίνει με τη μέθοδο του κινούμενου μέσου (moving average), όπου κάθε σημείο αντικαθίσταται από το μέσο όρο των γειτονικών του σημείων (εικόνα 81).



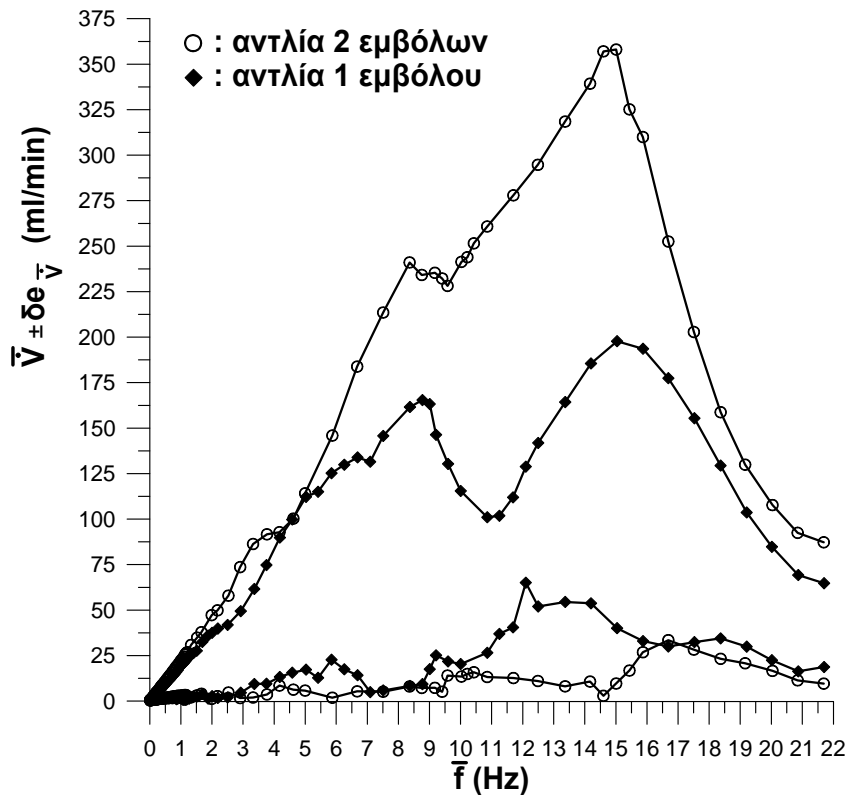
Εικόνα 81. Προσαρμογή πειραματικών σημείων με τη μέθοδο του κινούμενου μέσου (moving average) για την εύρεση της χαρακτηριστικής καμπύλης  $\bar{V}(\bar{f})$  της αντλίας ενός εμβόλου.



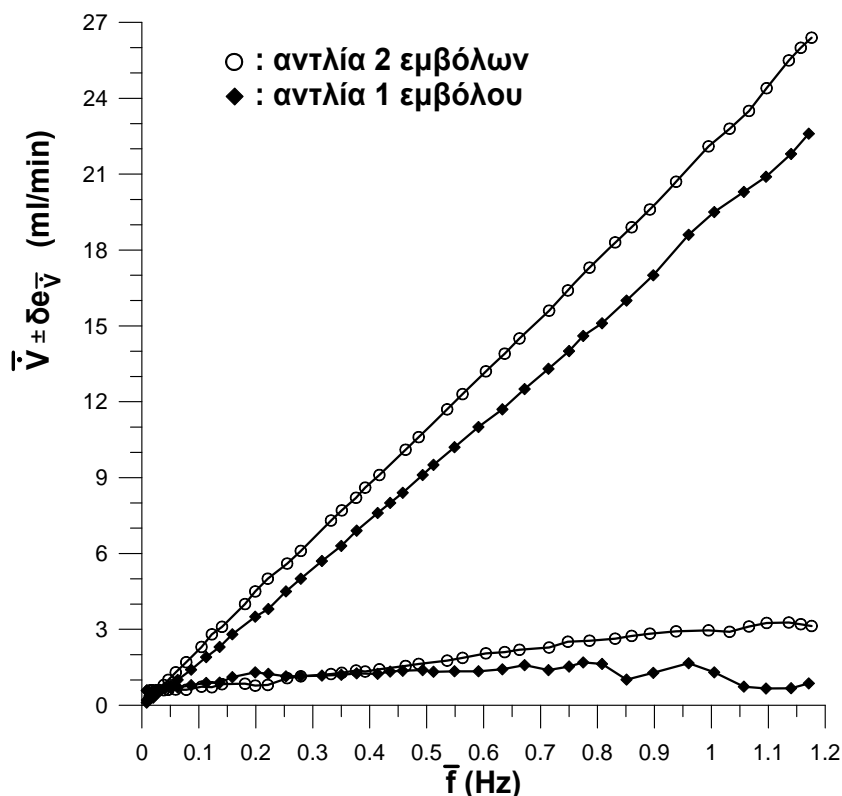
Εικόνα 82. Διάγραμμα παροχής μάζας του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για τις δυο αντλίες.



Εικόνα 83. Διάγραμμα παροχής μάζας του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για τις δυο αντλίες στο πεδίο χαμηλών συχνοτήτων [0, 1.2] Hz.



Εικόνα 84. Χαρακτηριστικές καμπύλες παροχής όγκου του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για τις δυο αντλίες.



Εικόνα 85. Χαρακτηριστικές καμπύλες παροχής όγκου του νερού με τη συχνότητα διέγερσης για τις δυο αντλίες στο πεδίο χαμηλών συχνοτήτων [0, 1.2] Hz.

Από τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της αντλίας με τα δυο έμβολα (εικόνα 60) παρατηρείται ότι μέχρι τη συχνότητα 2 Hz περίπου η παροχή όγκου του νερού αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα διέγερσης (εικόνα 61). Στο διάστημα συχνοτήτων από 2 έως 8.4 Hz περίπου, η παροχή όγκου του νερού αυξάνεται αλλά όχι γραμμικά μέχρι την τιμή 240 ml/min περίπου, που αποτελεί τοπικό μέγιστο και σημειώνεται για τη συχνότητα διέγερσης 8.4 Hz περίπου. Κατόπιν, για ένα μικρό διάστημα συχνοτήτων από 8.4 έως 9.6 Hz περίπου η παροχή όγκου του νερού διατηρείται σχεδόν σταθερή και στη συνέχεια για το διάστημα από 9.6 έως 15 Hz περίπου η παροχή όγκου του νερού αυξάνεται συνεχώς μη γραμμικά μέχρι την τιμή 360 ml/min περίπου που αποτελεί το ολικό μέγιστο και σημειώνεται για συχνότητα διέγερσης 15 Hz. Τέλος, στο διάστημα από 15 έως 21.7 Hz περίπου η παροχή όγκου του νερού μειώνεται συνεχώς μη γραμμικά.

Από τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της αντλίας με το ένα έμβολο (εικόνα 76) παρατηρείται ότι μέχρι τη συχνότητα 1.2 Hz περίπου, η παροχή όγκου του νερού αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα διέγερσης (εικόνα 77). Στο διάστημα από 1.2 έως 8.8 Hz περίπου, η παροχή όγκου του νερού αυξάνεται μη γραμμικά μέχρι την τιμή 165 ml/min περίπου, που αποτελεί τοπικό μέγιστο και σημειώνεται για συχνότητα διέγερσης 8.8 Hz περίπου. Σε αυτό το διάστημα εξαίρεση αποτελεί μια ελαφρά σταθερότητα της παροχής όγκου του νερού στο πολύ μικρό διάστημα συχνοτήτων διέγερσης από 6.7 έως 7.1 Hz περίπου. Στη συνέχεια για διάστημα συχνοτήτων από 8.8 έως 10.9 Hz περίπου, η παροχή όγκου του νερού μειώνεται μη γραμμικά μέχρι την τιμή 100 ml/min περίπου, ενώ στο διάστημα από 10.9 έως 15 Hz περίπου η παροχή όγκου αυξάνεται συνεχώς μη γραμμικά μέχρι την τιμή 200 ml/min περίπου που αποτελεί το ολικό μέγιστο και σημειώνεται για συχνότητα διέγερσης 15 Hz περίπου. Τέλος, στο διάστημα από 15 έως 21.7 Hz η παροχή όγκου του νερού μειώνεται συνεχώς μη γραμμικά.

Σημειώνεται εδώ ότι λόγω της έντονης διασποράς που παρατηρείται από τις τρεις ανεξάρτητες σειρές μετρήσεων (α), (β) και (γ) για την παροχή της αντλίας ενός εμβόλου, πραγματοποιείται και μια επιπλέον σειρά μέτρησης (δ) για την ποσοτική εξακρίβωση και καθορισμό της έγχυσης της αντλίας ενός εμβόλου για υψηλές συχνότητες. Παρόλη την πραγματοποίηση αυτής της επιπλέον σειράς μέτρησης στο υψηλό πεδίο συχνοτήτων η διασπορά που παρουσιάζει η αντλία ενός εμβόλου παραμένει μεγάλη για σχετικά υψηλές συχνότητες πράγμα που δε συμβαίνει με την αντλία δύο εμβόλων. Αυτό σημαίνει ότι η αντλία ενός εμβόλου παρουσιάζει πιο στοχαστική συμπεριφορά σε σχετικά υψηλές συχνότητες από ότι η αντλία με τα δύο έμβολα. Προφανώς σταθεροποιείται καλύτερα το αντλητικό μέσο (σωλήνας) με την αύξηση του αριθμού των εμβόλων. Συνεπώς αν τα στάδια έγχυσης αυξηθούν θα μειώνεται η διασπορά για όλο και μεγαλύτερες συχνότητες.

Όσο αφορά τον καθορισμό του δευτέρου επιπέδου σφάλματος πραγματοποιήθηκαν επαναληπτικές δοκιμές, γύρω από τις συχνότητες όπου παρουσιάζονται απότομες ή μη αναμενόμενες μεταβολές της παροχής έγχυσης του νερού, ώστε να διασαφηνισθεί η ορθή ακρίβεια έγχυσης τη κάθε αντλίας. Λόγω εξέτασης για αυτό το δεύτερο επίπεδο σφάλματος σε συχνότητες διέγερσης των δυσμενέστερων σημείων είναι φυσικό επακόλουθο ότι για τις υπόλοιπες συχνότητες να παρουσιάζεται σφάλμα μικρότερο από αυτό που φαίνεται στους πίνακες (14), (17) για την αντλία δύο εμβόλων και (22), (25) για την αντλία ενός εμβόλου.

Τα ολικά μέγιστα της παροχής του νερού παρουσιάζονται στις χαρακτηριστικές καμπύλες για την ίδια συχνότητα των 15 Hz περίπου και για τις δύο αντλίες. Πιθανώς αυτό σχετίζεται με την ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης του ελαστικού σωλήνα. Η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης του σωλήνα εξαρτάται από το υλικό (μέτρο Young και λόγος Poisson) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του (διάμετρος, πάχος τοιχώματος σωλήνα, ολικό μήκος και θέσεις πλήρους έμφραξης επί του συνολικού μήκους του σωλήνα). Στις συγκεκριμένες δοκιμές με τις δύο αντλίες αυτοί οι παράμετροι είναι οι ίδιοι, αφενός μεν επειδή χρησιμοποιείται ο ίδιος σωλήνας με το ίδιο μήκος και αφετέρου διότι οι βαλβίδες εμφράσσουν στα ίδια σημεία το συγκεκριμένο ολικό μήκος του σωλήνα και στις δύο δοκιμές. Το φαινόμενο του συντονισμού μπορεί να συμβεί και σε υποπολλαπλάσια της συχνότητας συντονισμού για δομές που εκτίθενται σε παλλόμενες ροές, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με την έκθεση ενός κυλίνδρου σε παλλόμενη ροή με μηδενική μέση τιμή. Αυτή πιθανώς μπορεί να είναι η εξήγηση για την εμφάνιση των τοπικών μεγίστων της παροχής του νερού για συγκεκριμένες συχνότητες όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η σταθερότητα της παροχής του νερού για το διάστημα συχνοτήτων από 8.4 έως 9.6 Hz περίπου για την αντλία δυο εμβόλων και από 6.7 έως 7.1 Hz περίπου για την αντλία ενός εμβόλου, καθώς και η μείωση της παροχής για το διάστημα συχνοτήτων από 8.8 έως 10.9 Hz περίπου, συνδέονται με αδρανειακά φαινόμενα σε αυτές τις σχετικά υψηλές τιμές της συχνότητας διέγερσης, τόσο του υλικού του σωλήνα όσο και του ρευστού που περιέχει. Δηλαδή, ο σωλήνας λόγω αδράνειας δεν ανατάσσεται πλήρως μετά τη συμπίεσή του, οπότε δεν επιτρέπει την εισαγωγή μεγάλης ποσότητας νερού εντός του, με αποτέλεσμα να μειώνεται η παροχή του νερού. Η μετέπειτα παρατηρούμενη αύξηση της παροχής του νερού για συχνότητες μεγαλύτερες από τις παραπάνω σχετίζεται πιθανώς, όπως αναφέρθηκε, με το φαινόμενο του συντονισμού γύρω από την ιδιοσυχνότητα των 15 Hz, όπου ο σωλήνας ταλαντούμενος ανατάσσεται πλήρως (μέγιστο πλάτος ιδιοταλάντωσης), περιέχοντας προς εμβολισμό τη μέγιστη δυνατή ποσότητα νερού. Στοιχείο καλύτερης αποδόσεως της αντλίας δύο εμβόλων σε σχέση με αυτή του ενός αποτελεί η μη ελάττωση της παροχής πριν τη συχνότητα συντονισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση του διαστήματος αποδοτικότητας της αντλίας δύο εμβόλων σε σχέση με αυτό του ενός (εικόνες 63 και 79).



#### 4.4 Συμπεράσματα

Μελετώντας τα αποτελέσματα που αφορούν τις δύο αντλίες διαπιστώνεται ότι στις αρκετά χαμηλές συχνότητες διέγερσης, υφίσταται το φαινόμενο της οπισθοροής (back-flow) που οφείλεται, όπως ήδη έχει αναφερθεί, σε σχεδιαστικές ατέλειες στο χρονοισμό των έκκεντρων. Η αντλία δυο εμβόλων εμφανίζει λιγότερη οπισθοροή, ενώ η αντλία ενός εμβόλου εμφανίζει έντονη οπισθοροή. Συνεπώς, η αντλία των δύο εμβόλων εξομαλύνει την έντονη πάλμωση της ροής που εμφανίζει η αντλία του ενός εμβόλου, εξασφαλίζοντας σταθερό ρυθμό έγχυσης στο χρόνο. Δηλαδή, με την αντλία δύο εμβόλων επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της έγχυσης με την έννοια ότι αυτή γίνεται γραμμική στο χρόνο. Σε αυτό το πεδίο χαμηλών συχνοτήτων παρατηρείται ότι για κοινή συχνότητα η αντλία δυο εμβόλων προσδίδει μεγαλύτερη παροχή (εικόνα 85). Παρόλο που η τάξη μεγέθους της παροχής έγχυσης των πρότυπων αντλιών είναι όμοια με αυτή που αποδίδουν ανάλογες περισταλτικές αντλίες του εμπορίου που χρησιμοποιούν την ίδια γεωμετρία σωλήνα σιλικόνης, θα πρέπει να μελετηθεί και σχεδιαστεί εκ νέου κατάλληλος εκκεντροφόρος άξονας που να εξαλείφει πλήρως το ανεπιθύμητο φαινόμενο της οπισθοροής (back-flow).

Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των δύο αντλιών παρατηρείται ότι μέχρι τη συχνότητα 1 Hz περίπου η παροχή έγχυσης του νερού αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα διέγερσης. Πάνω από αυτή τη συχνότητα και μέχρι τα 9 Hz περίπου η παροχή έγχυσης του νερού αυξάνεται αλλά όχι γραμμικά. Για τις επόμενες υψηλές συχνότητες ακολουθεί μια μη γραμμική συμπεριφορά της παροχής έγχυσης, η οποία μειώνεται στην αντλία ενός εμβόλου λόγω αδρανειακών φαινομένων τόσο του υλικού του σωλήνα όσο και του ρευστού που περιέχει. Καθώς όμως προσεγγίζεται η συχνότητα των 15 Hz η παροχή έγχυσης αρχίζει να αυξάνει ξανά μέχρι τη συχνότητα συντονισμού (πιθανώς ιδιοσυχνότητα συστήματος, 15 Hz) και ακολούθως να μειώνεται ξανά για τους ίδιους λόγους.

Χρησιμοποιώντας την αντλία δυο εμβόλων, πεδίο συχνοτήτων όπου συμβαίνει μείωση της παροχής έγχυσης πριν το συντονισμό, δεν υφίσταται. Επιπλέον, παρόλο που η μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας των δυο αντλιών είναι παρόμοια για κάθε συχνότητα διέγερσης, η αντλία δυο εμβόλων επιτυγχάνει μεγαλύτερη παροχή έγχυσης από την αντλία με το ένα έμβολο. Αυτό φανερώνει ότι η αντλία δύο εμβόλων είναι σχεδιαστικά πιο βέλτιστη και πιο αποδοτική. Αυτό επιβεβαιώνεται ιδιαίτερα για το υψηλό πεδίο συχνοτήτων όπου η διασπορά που παρουσιάζει η αντλία ενός εμβόλου παραμένει μεγάλη για σχετικά υψηλές συχνότητες πράγμα που δε συμβαίνει με την αντλία δύο εμβόλων. Αυτό σημαίνει ότι η αντλία ενός εμβόλου παρουσιάζει πιο στοχαστική συμπεριφορά σε σχετικά υψηλές συχνότητες από ότι η αντλία με τα δύο έμβολα. Προφανώς σταθεροποιείται καλύτερα το αντλητικό μέσο (σωλήνας) με την αύξηση του αριθμού των εμβόλων. Συνεπώς συμπεραίνεται ότι αν τα στάδια έγχυσης αυξηθούν θα μειώνεται η διασπορά για όλο και μεγαλύτερες συχνότητες.

Γενικά αυτού του τύπου οι αντλίες που χρησιμοποιούν διαφορετικό μέσο εμβολισμού του ρευστού (έμβολα) και έμφραξης του σωλήνα (βαλβίδες), καταπονούν μόνο στα τοπικά σημεία των βαλβίδων το σωλήνα και όχι καθ' όλο το μήκος του. Έτσι στα μεγάλου μήκους τμήματα συμπίεσης των εμβόλων επιβάλλονται στο σωλήνα σχετικά μικρές πιέσεις (δυνάμεις συνάφειας), αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του.

Τελικά, διαπιστώνεται ότι η αντλία με τα δύο έμβολα είναι προτιμότερη από την αντλία με το ένα έμβολο, διότι παρουσιάζει μικρότερη οπισθοροή στους χαμηλούς ρυθμούς έγχυσης, χωρίς φαινόμενα πάλμωσης της ροής (εικόνα 49), ενώ έχει μεγαλύτερη απόδοση. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την απλότητα του αντλητικού της μηχανισμού και την ικανότητα μεγάλης προώθησης του ρευστού, θα μπορούσαν να συνθέσουν μια περισταλτική αντλία ανταγωνιστική και κατάλληλη για χρήση σε τεχνολογικές εφαρμογές.

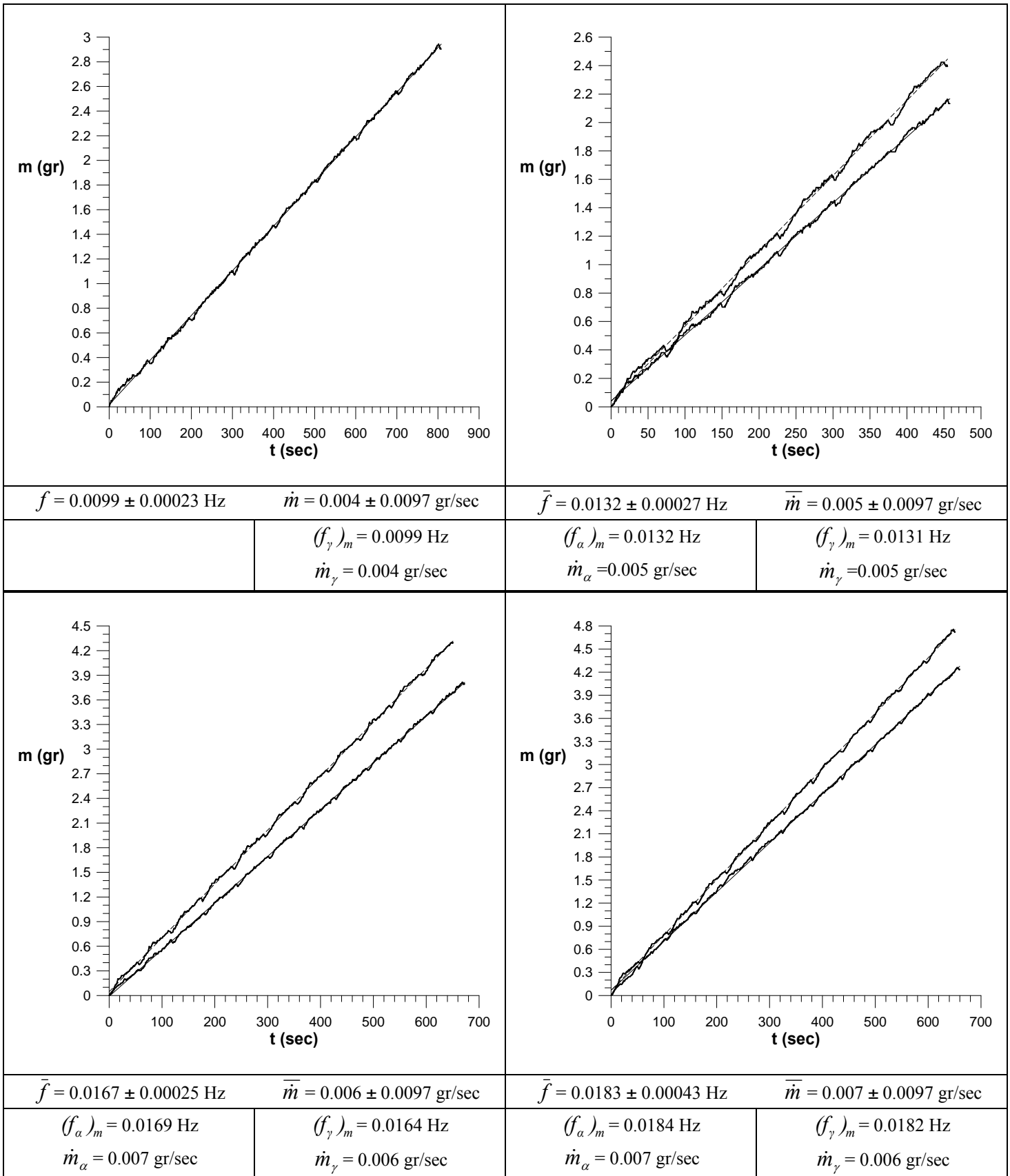
Όσο αφορά το πεδίο ιατρικών εφαρμογών, οι παραπάνω αντλίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τις ανάγκες έγχυσης βιολογικών ρευστών με ρυθμούς άνω του 0.6 Hz, διότι πάνω από αυτή τη συχνότητα επιτυγχάνεται μείωση του σχετικού σφάλματος κάτω του 5% που προδιαγράφεται σε αυτές τις περιπτώσεις (εικόνες 63, 79). Έτσι μπορεί να γίνει χρήση για παράδειγμα σε παρεντερική διατροφή και άντληση βιολογικών ρευστών σε μονάδες χειρουργείων, αλλά δεν μπορεί να γίνει χρήση σε έγχυση φαρμάκων σε ασθενείς επειδή σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται πολλοί χαμηλοί ρυθμοί έγχυσης που οι συγκεκριμένες αντλίες δεν μπορούν να επιτύχουν στα όρια του προδιαγραφόμενου σφάλματος (<5%). Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε διαμόρφωση πειραματικής διάταξης με βηματικό κινητήρα απόλυτα ελεγχόμενου με σύστημα ανάδρασης που να καθορίζει με μεγάλη ακρίβεια τις περιστροφές ανεξαρτήτως φορτίου.

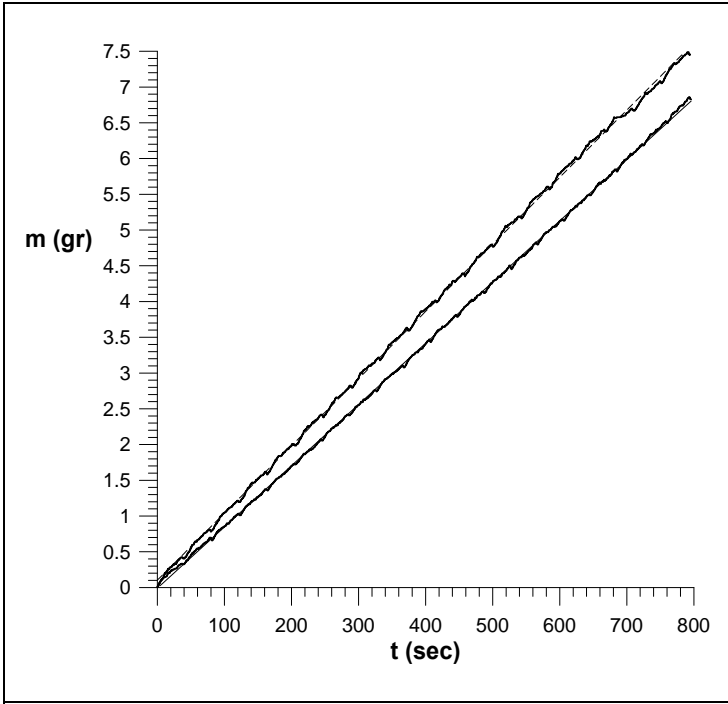
## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Hyman O. E., Moubayd A. M., Wilson L. L., Two-cycle Peristaltic Pump with Occlusion Detector, United States Patent Office, 1993, Nr. 5217355, p. 12.
- 2) Hyman O. E., Moubayd A. M., Two-cycle Peristaltic Pump with Occlusion Detector, European Patent Office, 1993, Nr. 526962/A1/B1, p. 18.
- 3) Μαθιουλάκης Δ. Σ., Τεχνικές μετρήσεις ρευστομηχανικών μεγεθών, ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
- 4) Μανόπουλος Χ. Γ., Πάππου Θ., Τσαγγάρης Σ., Θεωρητική προσομοίωση για τον υπολογισμό χαρακτηριστικής περισταλτικής αντλίας με αναλυτική και υπολογιστική μέθοδο, 1998, Πρακτικά περιλήψεων 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, (Μηχανική Βιολογικών Ρευστών), σελ.:20, Κτίριο Διοίκησης Ε.Μ.Π., Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα.
- 5) Μανόπουλος Χ. Γ., Τσαγγάρης Σ., Εύρεση χαρακτηριστικών, γραμμικών περισταλτικών αντλιών για βιοϊατρική χρήση, Δελτίο Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων, 2005, τεύχος 380, σελ. 60-65. (1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Διπλ. Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων, Ενότητα Γ' Τηλεπικοινωνίες - Καινοτομία σελ.: 7-C92, Ledra Marriott, Αθήνα).
- 6) Μπεργελές Γ., Παπαντώνης Δ., Τσαγγάρης Σ., Τεχνικές μετρήσεις ρευστομηχανικών μεγεθών, Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα 1998.
- 7) Παντελής Δ. Ι., Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
- 8) Περσίδης Σ.Κ., FORTRAN, Γ' έκδοση, Εκδόσεις ΙΔΕΑ, 1989 Αθήνα.
- 9) Shelley John, Essentials of FORTRAN 77, Chichester, Wiley, 2nd ed., 1989.
- 10) Σιμόπουλος Σ.Ε., Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών, Β' έκδοση, ΕΜΠ, Αθήνα 1989.
- 11) Tanaka M., Girard G. Davis R., Peuto A. & Bignell N., Recommended table for the density of water between 0°C and 40°C based on recent experimental reports, Metrologia, 38, 301 – 309, 2001.
- 12) Τσαγγάρης Σ., Βιοϊατρική τεχνολογία, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2001.

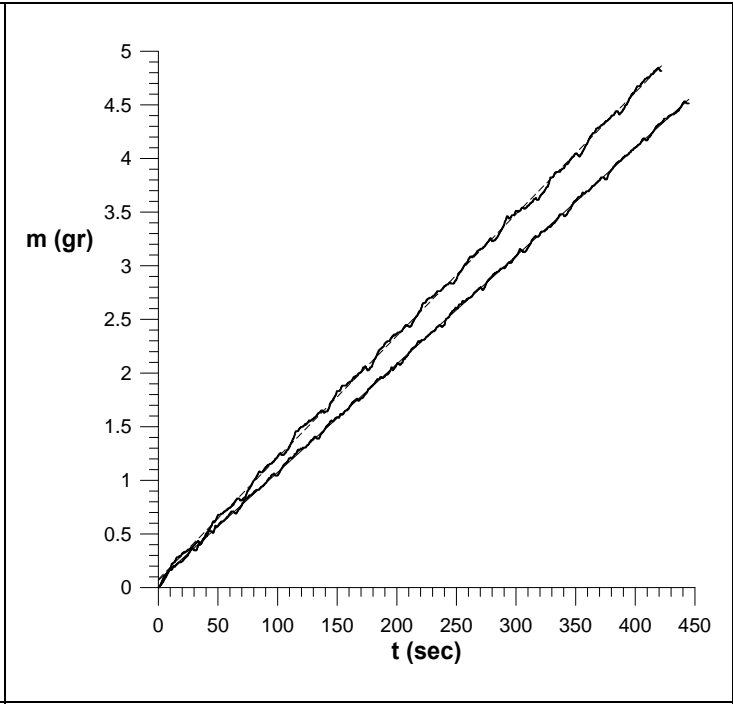
- 13) Τσαγγάρης Σ., Μηχανική των ρευστών, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα 1995.
- 14) Tsoukalis A., Linear Peristaltic Pump, European Patent Office, 1993, Nr. 0560270/A2/A3/B1, p. 13.
- 15) Tsoukalis A., Linear Peristaltic Pump, European Patent Office, 1998, Nr. 0858812/A2/A3, p. 13.
- 16) Tsoukalis A., Linear Peristaltic Pump, United States Patent Office, 1999, Nr. 5980490, p. 13.
- 17) Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι, ΕΜΠ – Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999.
- 18) <http://www.devicelink.com/mddi/archive/99/11/003.html>
- 19) <http://www.reedlink.com/SingleArticle~ContentId~59939~pub~MD.html>
- 20) <http://www.omega.com/prodinfo/loadcells.html>
- 21) <http://www.omega.com/prodinfo/StrainGages.html>
- 22) [http://www.aeroconsystems.com/electronics/load\\_cell\\_primer.pdf](http://www.aeroconsystems.com/electronics/load_cell_primer.pdf)
- 23) <http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/load.html>
- 24) <http://www.euclidres.com/motionSensors/motionSensors.html>
- 25) <http://accept.la.asu.edu/courses/phs110/expmts/exp13a.html>
- 26) <http://homepages.which.net/~paul.hills/SpeedControl/SpeedControllersBody.html>
- 27) <http://www.pc-control.co.uk/dc-motors.htm>

I. Διαγράμματα μάζας εγχυόμενου νερού με το χρόνο για την αντλία δύο εμβόλων

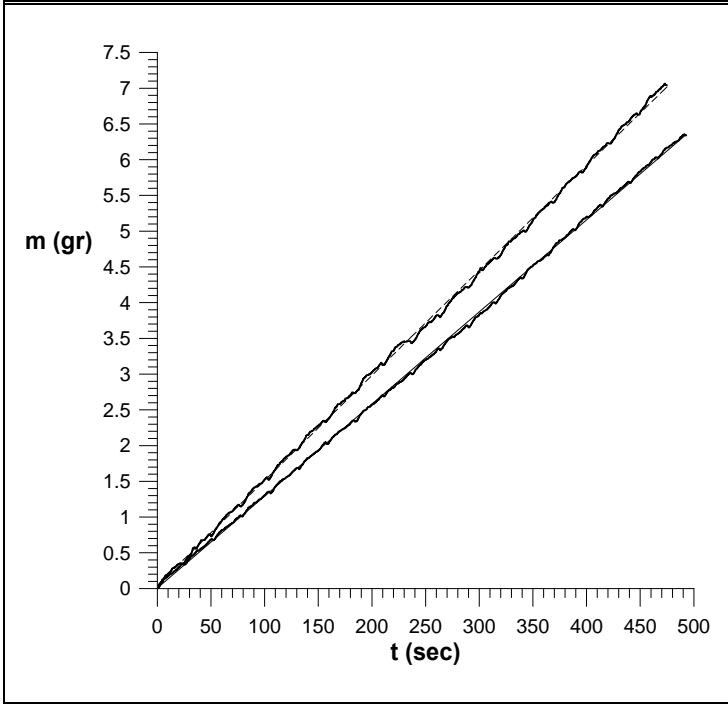




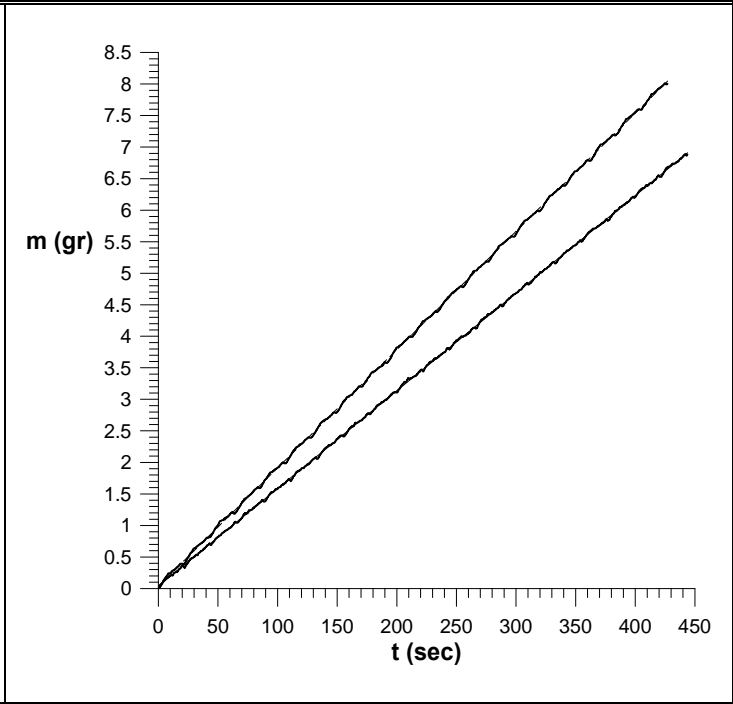
$\bar{f} = 0.0245 \pm 0.00057 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.009 \pm 0.0097 \text{ gr/sec}$	
$(f_\alpha)_m = 0.0239 \text{ Hz}$	$(f_\gamma)_m = 0.0251 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.009 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.009 \text{ gr/sec}$		



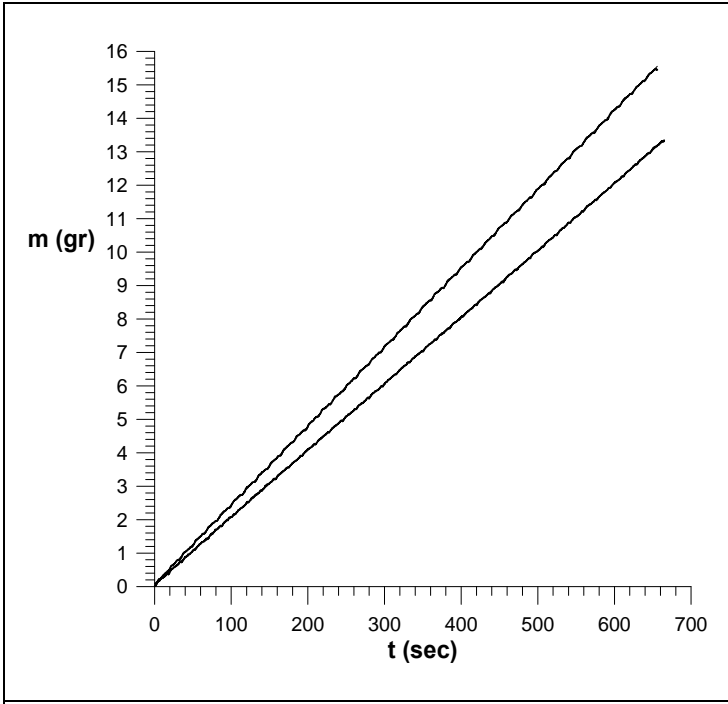
$\bar{f} = 0.0288 \pm 0.00067 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.011 \pm 0.0098 \text{ gr/sec}$	
$(f_\alpha)_m = 0.0284 \text{ Hz}$	$(f_\gamma)_m = 0.0293 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.011 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.010 \text{ gr/sec}$		



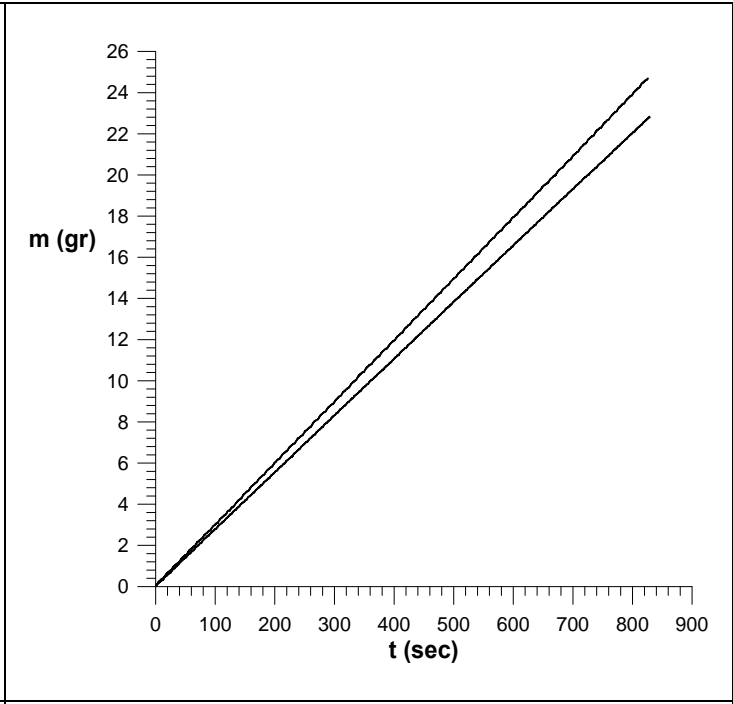
$\bar{f} = 0.0383 \pm 0.00076 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.014 \pm 0.0098 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.0379 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.0387 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.015 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.013 \text{ gr/sec}$		



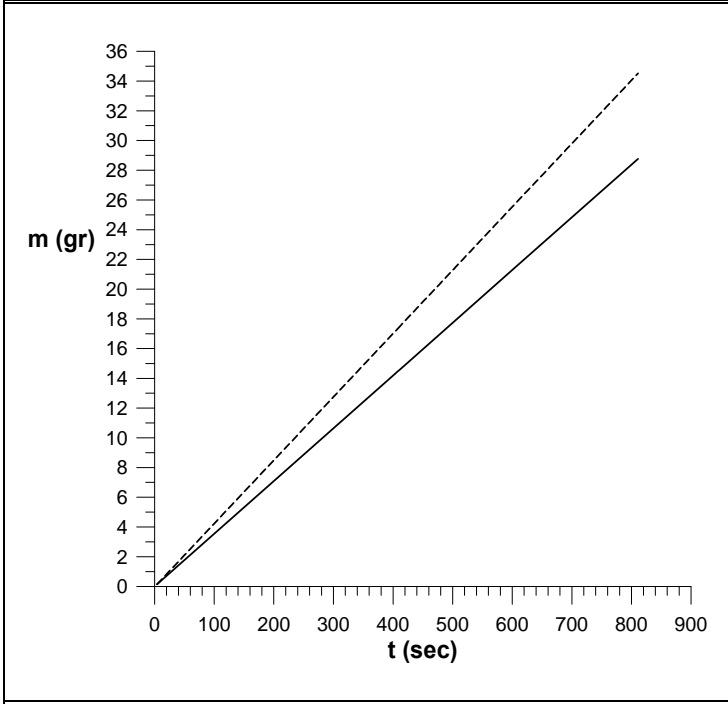
$\bar{f} = 0.0463 \pm 0.00051 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.02 \pm 0.010 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.0468 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.0458 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.019 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.016 \text{ gr/sec}$		



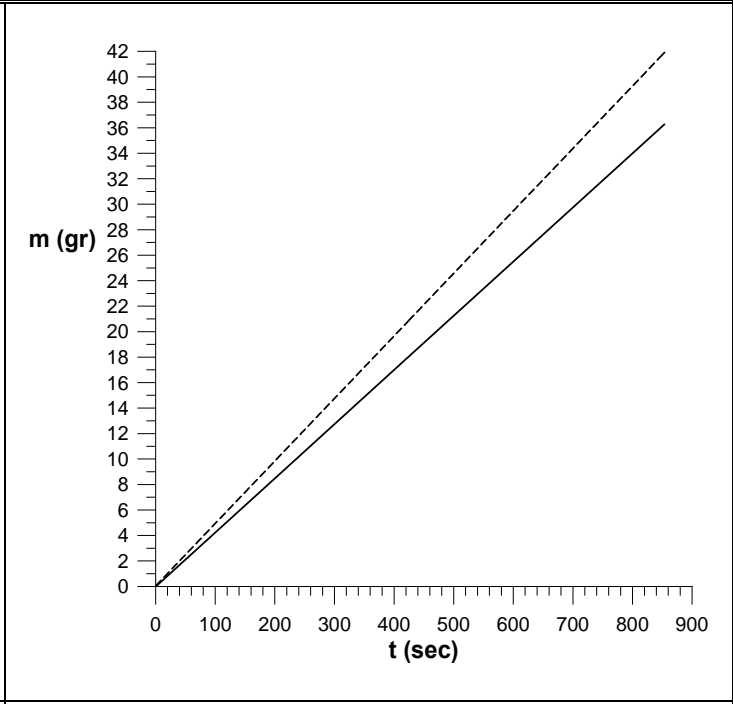
$\bar{f} = 0.0594 \pm 0.00046 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.02 \pm 0.010 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.0610 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.0578 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.024 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.020 \text{ gr/sec}$		



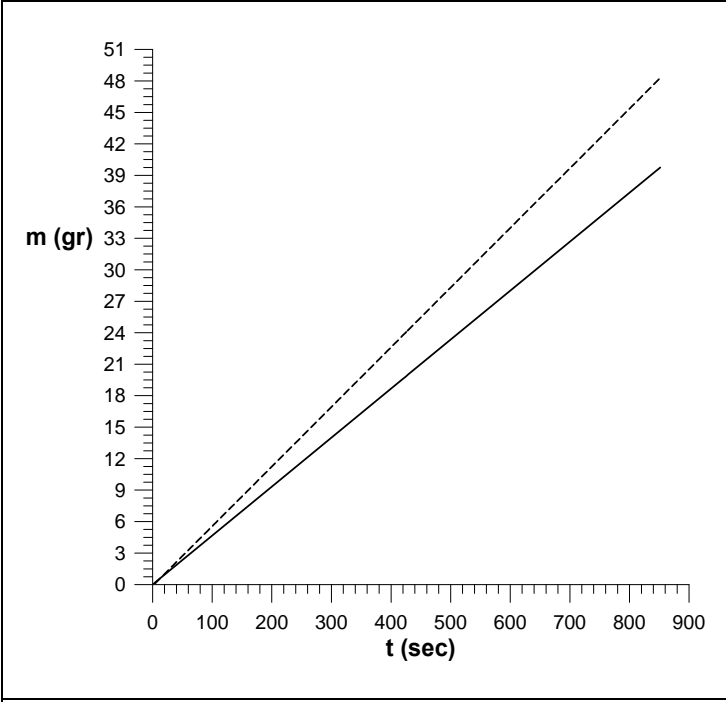
$\bar{f} = 0.0778 \pm 0.00071 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.03 \pm 0.010 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.0770 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.0787 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.030 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.028 \text{ gr/sec}$		



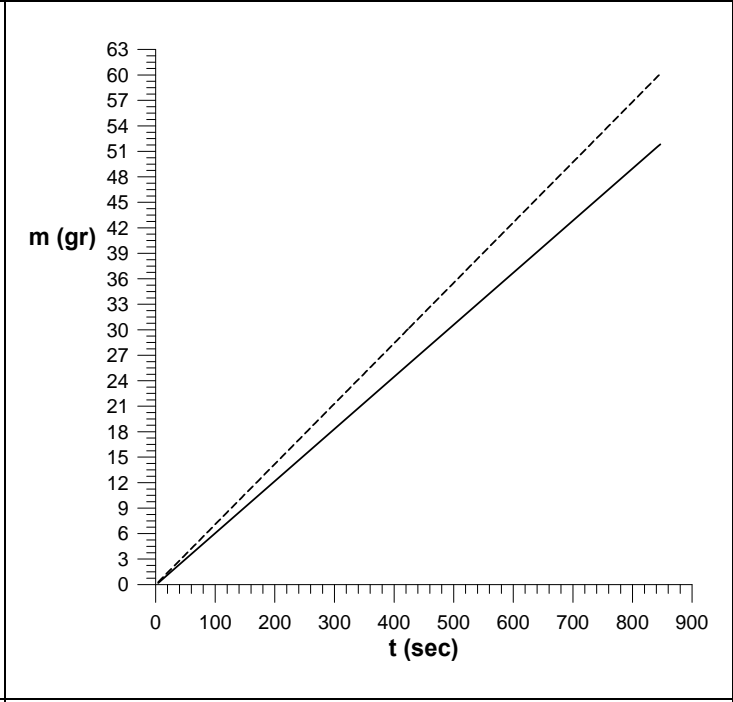
$\bar{f} = 0.1047 \pm 0.00052 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.04 \pm 0.012 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.1067 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.1026 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.04 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.04 \text{ gr/sec}$		



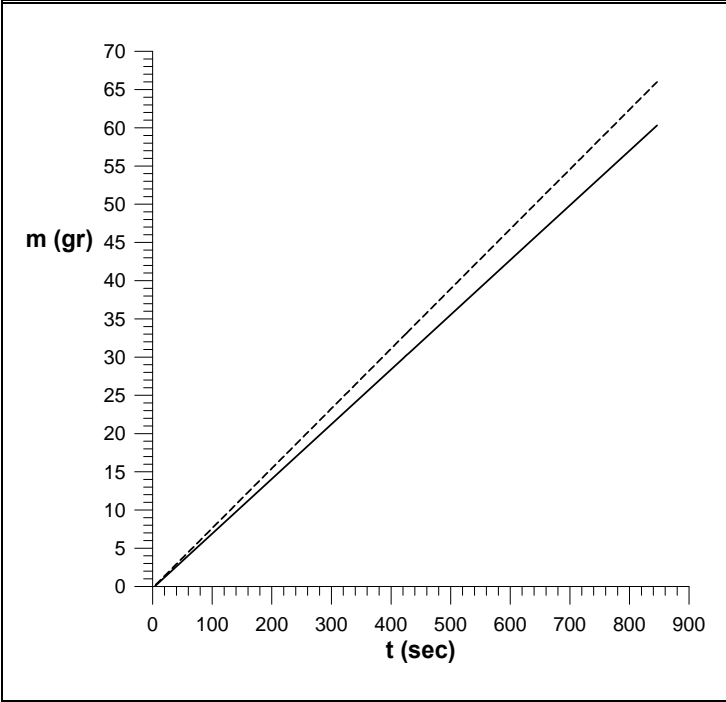
$\bar{f} = 0.1228 \pm 0.00038 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.05 \pm 0.012 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.1225 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.1230 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.05 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.04 \text{ gr/sec}$		



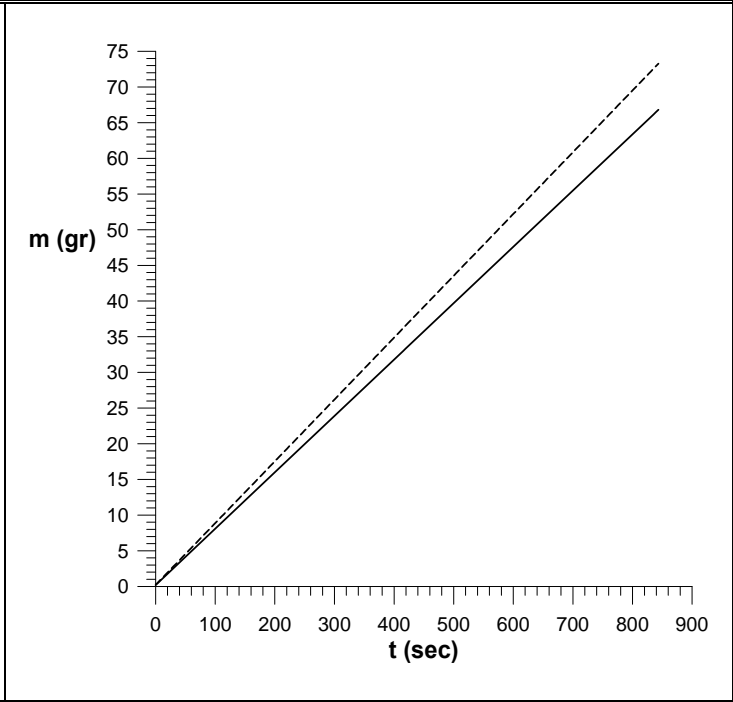
$\bar{f} = 0.1405 \pm 0.00026 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.05 \pm 0.014 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.1424 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.1386 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.057 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.05 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 0.181 \pm 0.0014 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.07 \pm 0.014 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.180 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.182 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.07 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.06 \text{ gr/sec}$

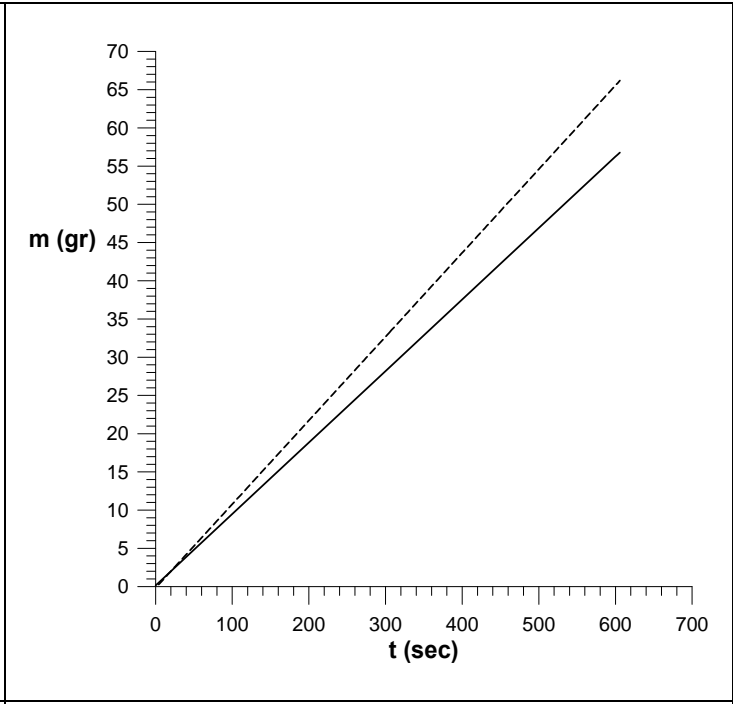
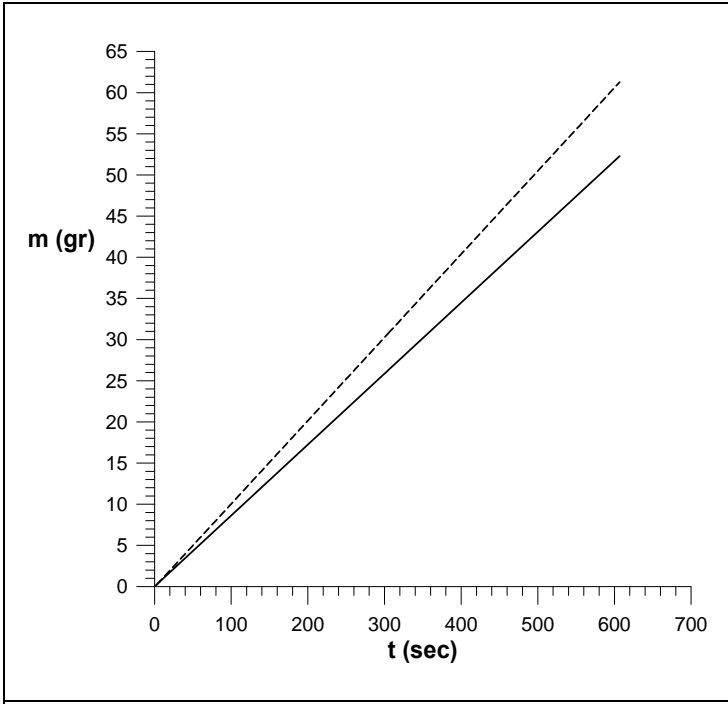


$\bar{f} = 0.199 \pm 0.0018 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.07 \pm 0.013 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.197 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.201 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.08 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.07 \text{ gr/sec}$



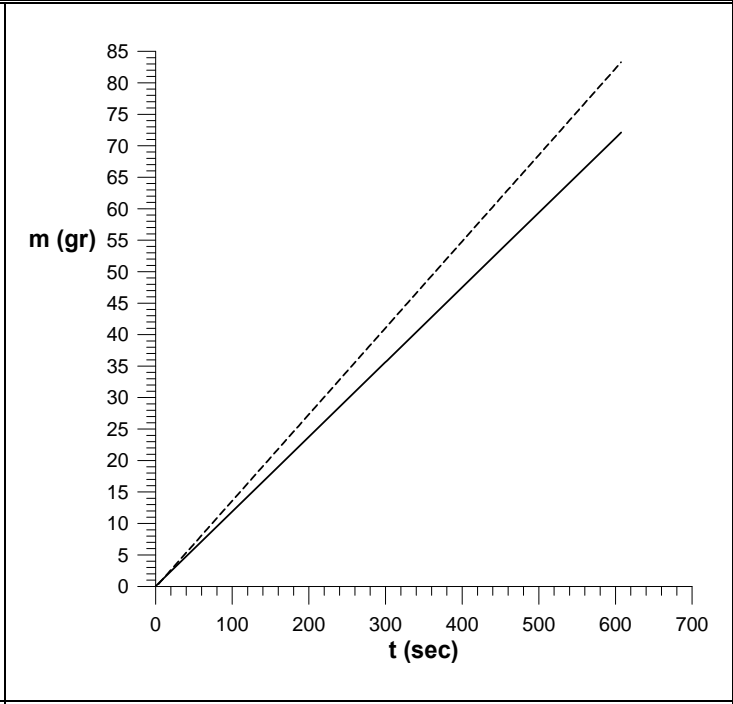
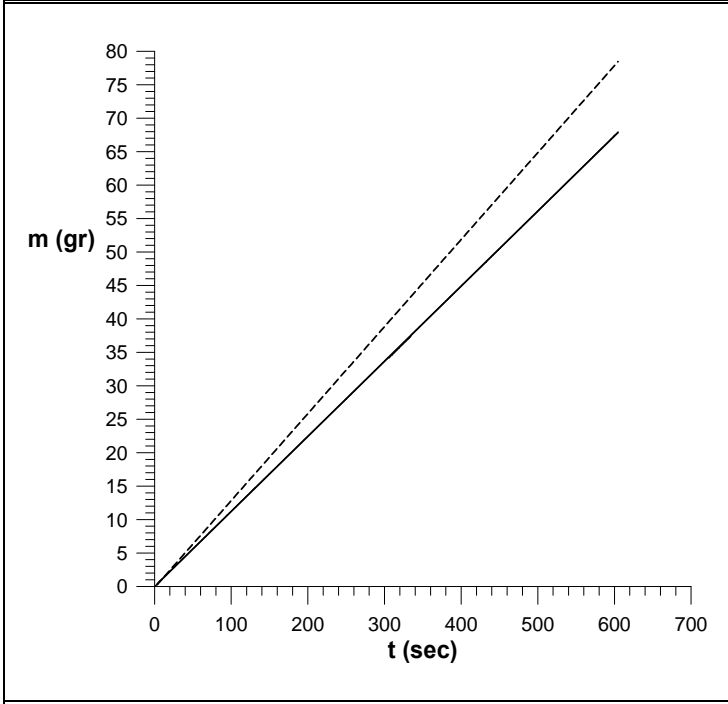
$\bar{f} = 0.221 \pm 0.0018 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.08 \pm 0.013 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.221 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.221 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.09 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.08 \text{ gr/sec}$





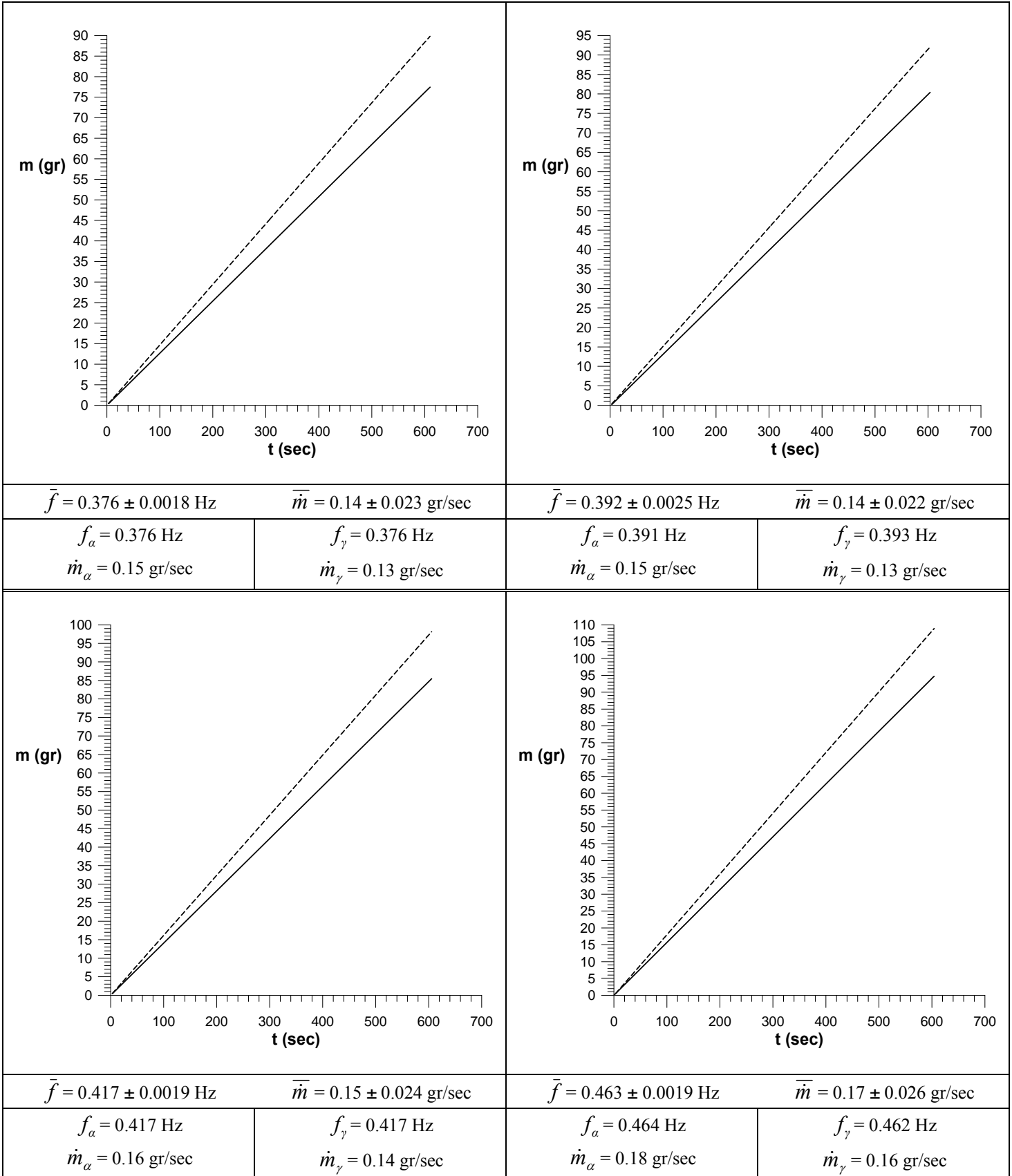
$\bar{f} = 0.255 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.09 \pm 0.018 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.255 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.225 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.10 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.09 \text{ gr/sec}$

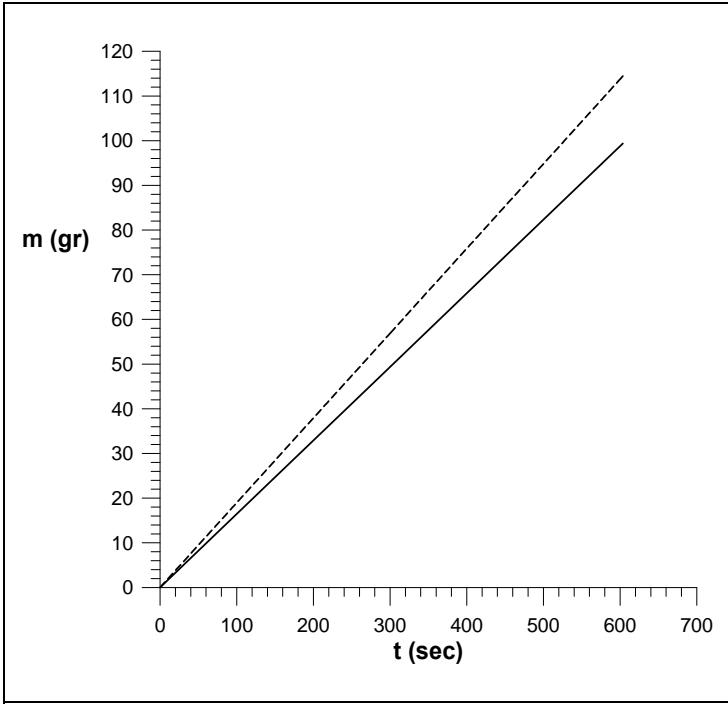
$\bar{f} = 0.279 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.10 \pm 0.019 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.280 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.278 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.11 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.09 \text{ gr/sec}$



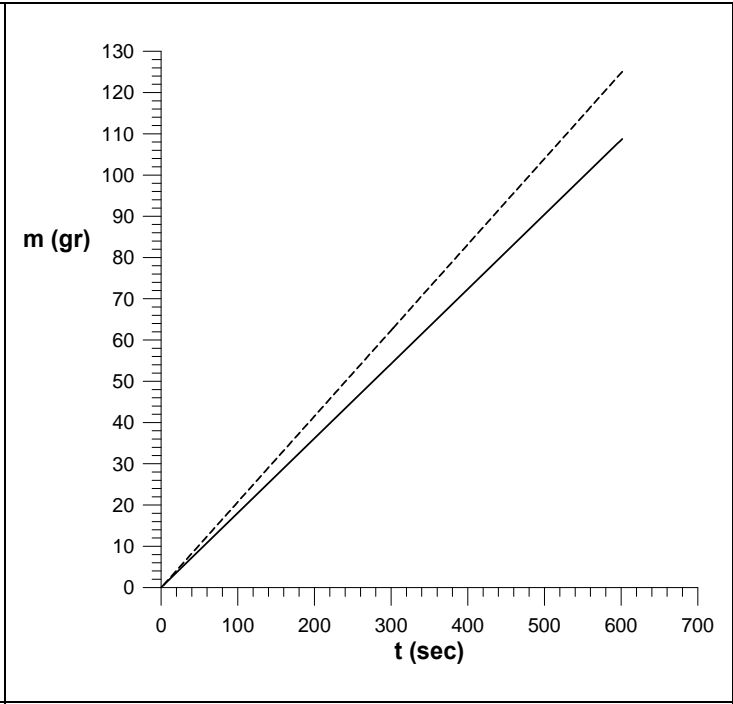
$\bar{f} = 0.332 \pm 0.0018 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.12 \pm 0.020 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.332 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.332 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.13 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.11 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 0.351 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.13 \pm 0.021 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.351 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.352 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.14 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.12 \text{ gr/sec}$

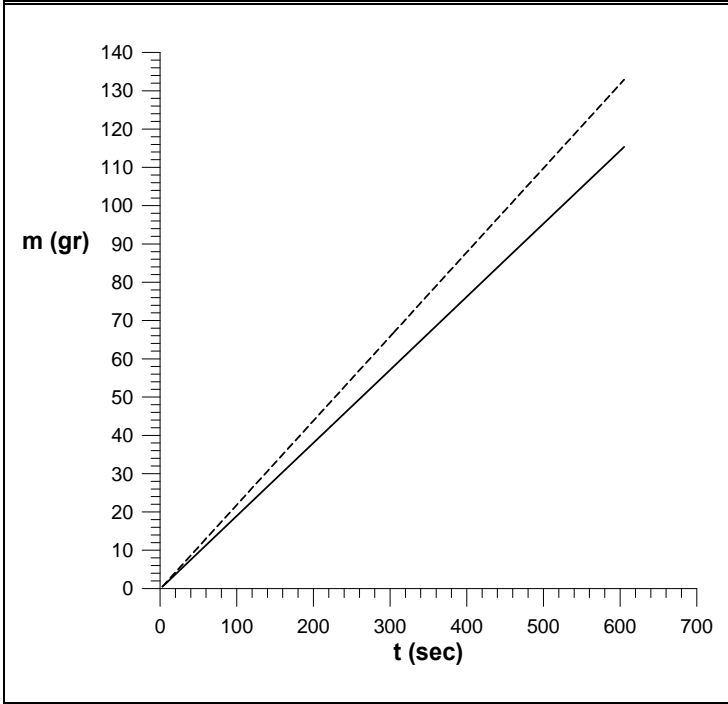




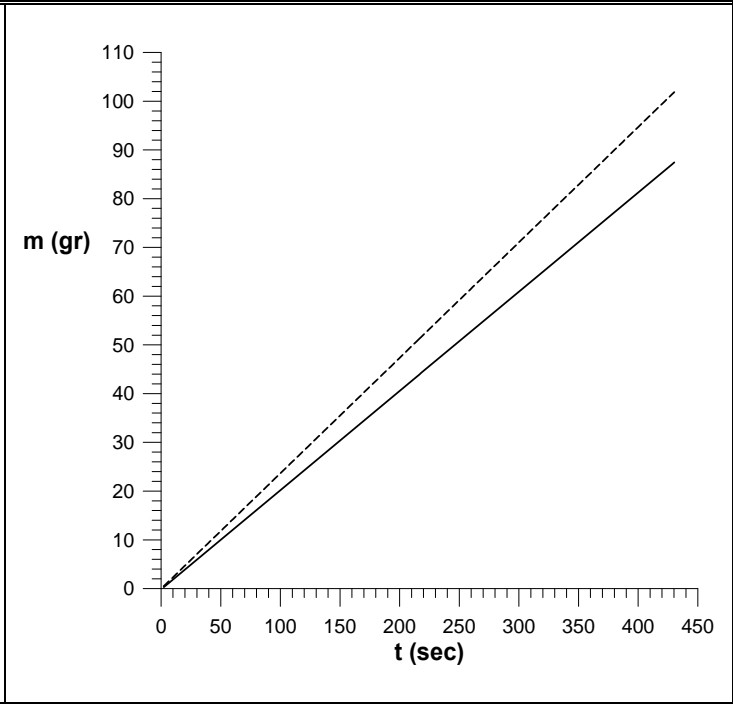
$\bar{f} = 0.486 \pm 0.0018 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.18 \pm 0.027 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.486 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.485 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.19 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.16 \text{ gr/sec}$



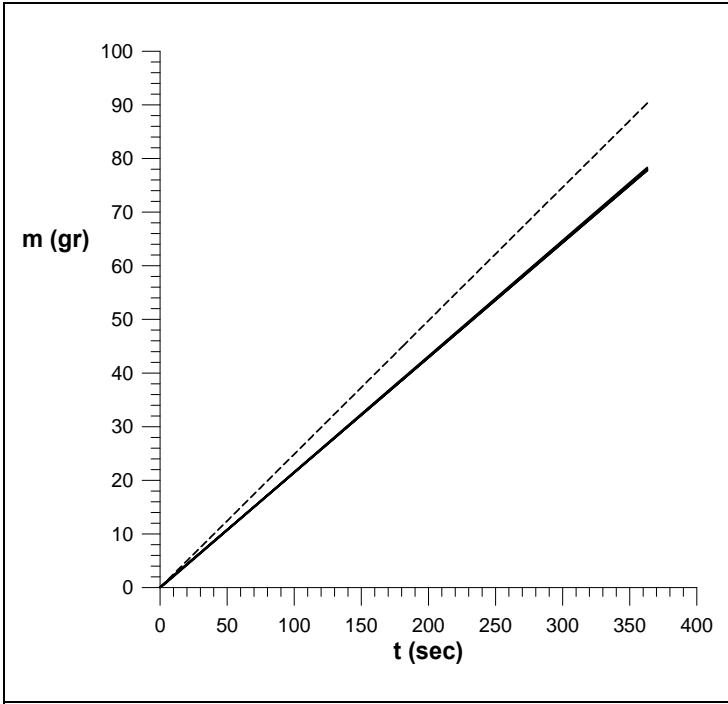
$\bar{f} = 0.536 \pm 0.0023 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.19 \pm 0.029 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.536 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.536 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.21 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.18 \text{ gr/sec}$



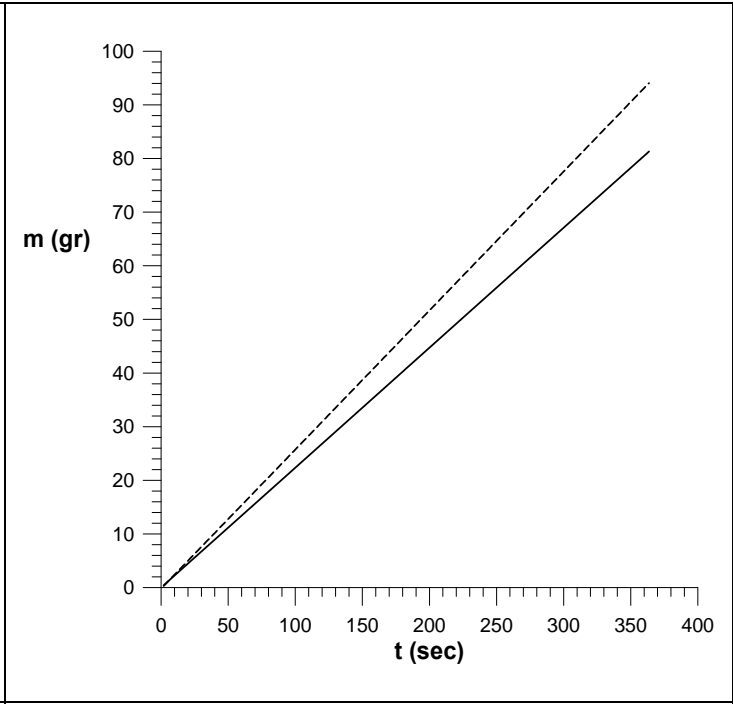
$\bar{f} = 0.563 \pm 0.0021 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.21 \pm 0.031 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.562 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.564 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.22 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.19 \text{ gr/sec}$



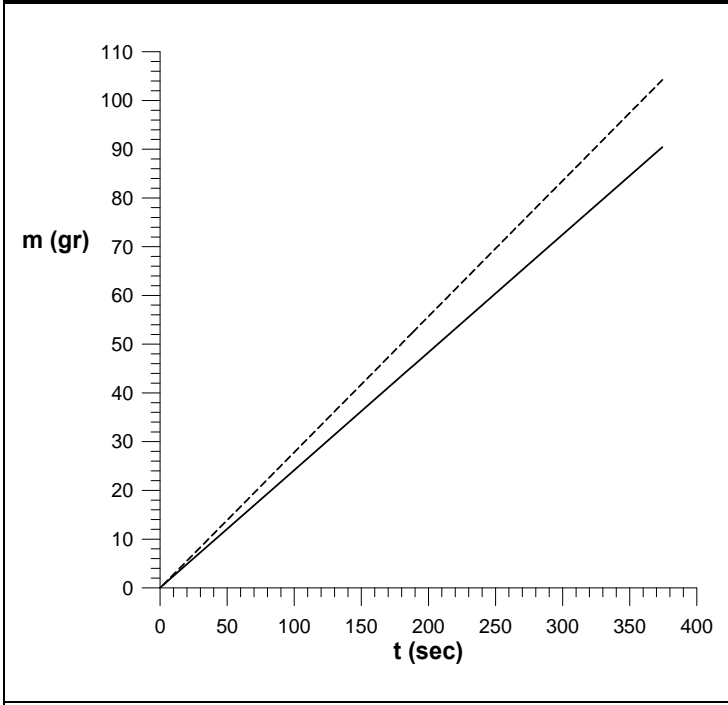
$\bar{f} = 0.604 \pm 0.0020 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.22 \pm 0.034 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.605 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.603 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.24 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.20 \text{ gr/sec}$



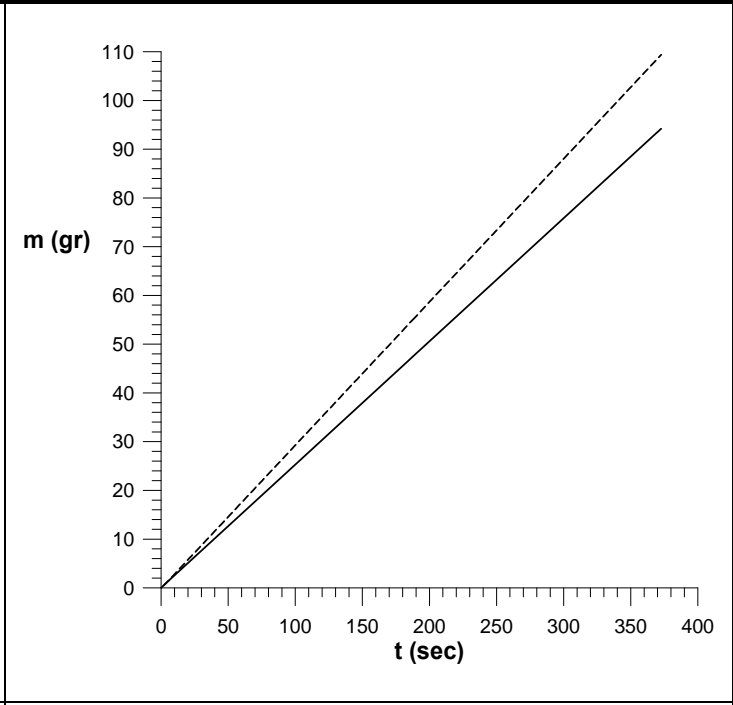
$\bar{f} = 0.637 \pm 0.0021 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.23 \pm 0.035 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.638 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.636 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.25 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.21 \text{ gr/sec}$		



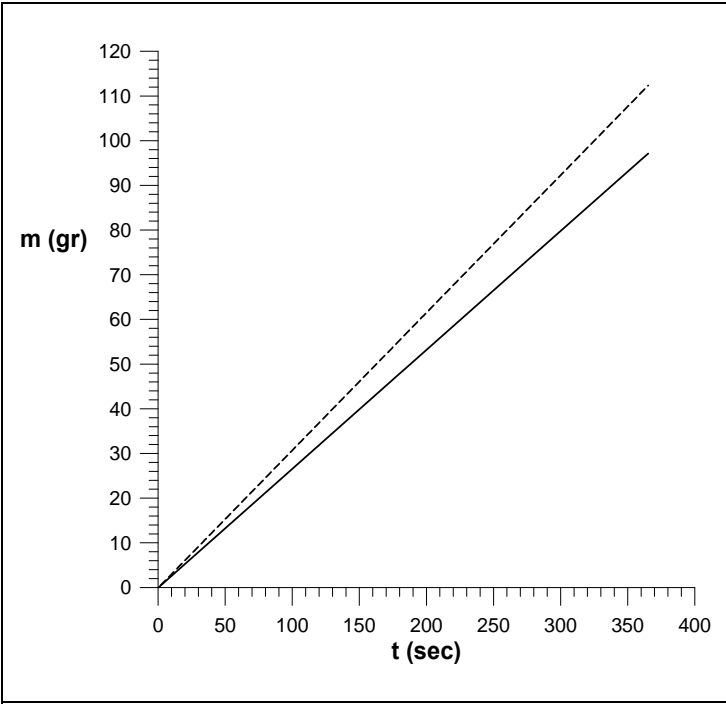
$\bar{f} = 0.663 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.24 \pm 0.036 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.662 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.663 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.26 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.22 \text{ gr/sec}$		



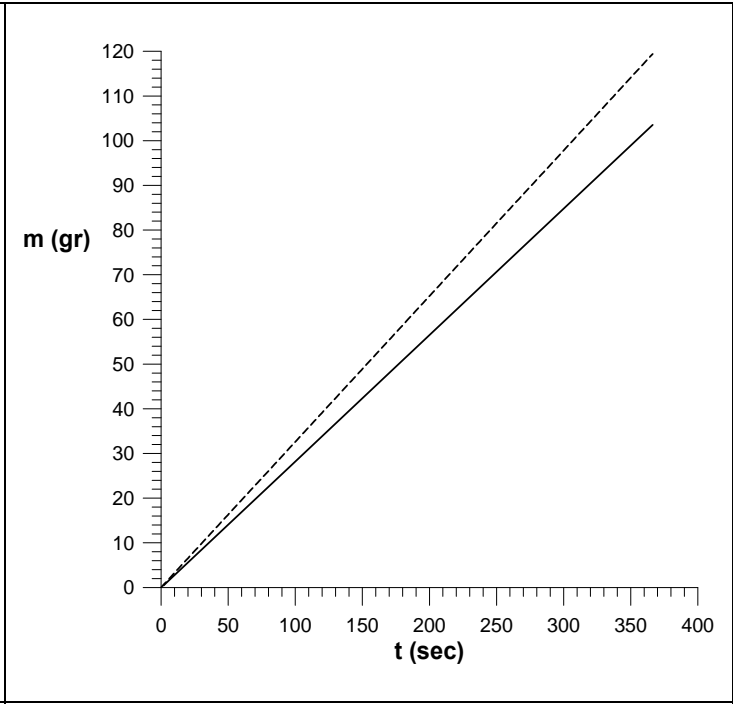
$\bar{f} = 0.715 \pm 0.0020 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.26 \pm 0.038 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.716 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.715 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.28 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.24 \text{ gr/sec}$		



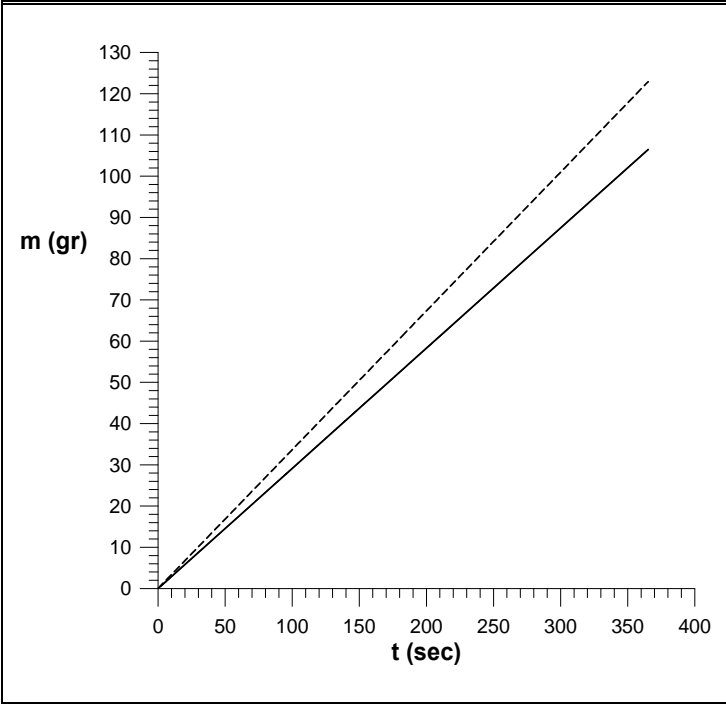
$\bar{f} = 0.748 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.27 \pm 0.042 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.749 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.748 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.29 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.25 \text{ gr/sec}$		



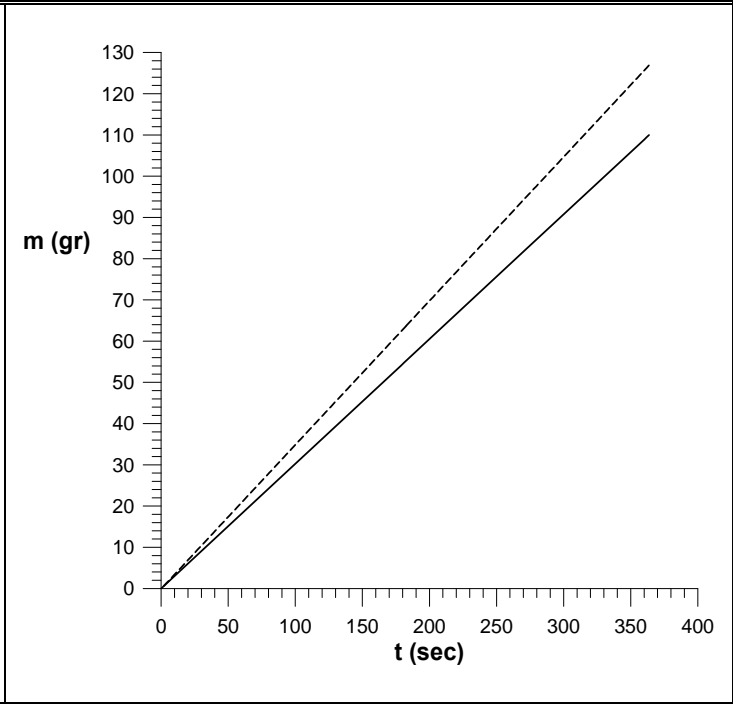
$\bar{f} = 0.786 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.29 \pm 0.042 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.787 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.786 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.31 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.27 \text{ gr/sec}$



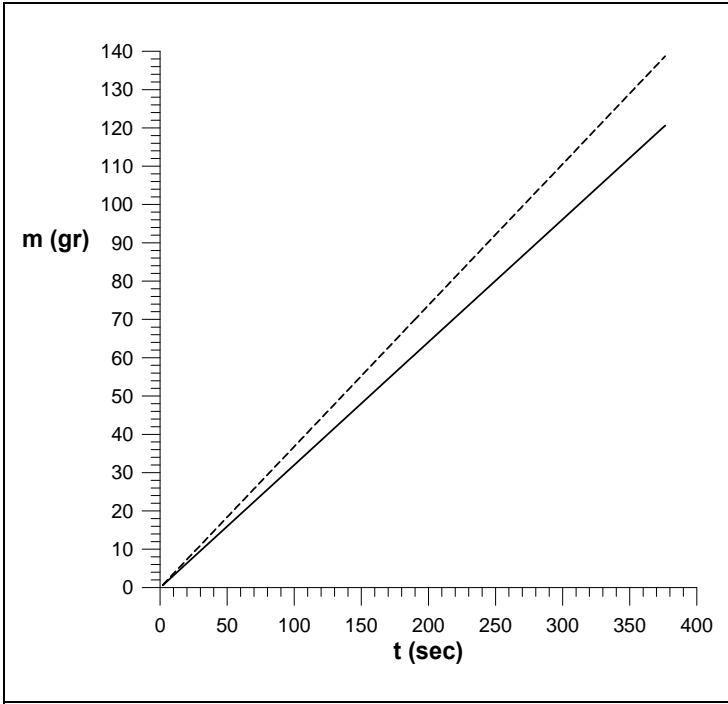
$\bar{f} = 0.831 \pm 0.0022 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.30 \pm 0.044 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.830 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.832 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.33 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.28 \text{ gr/sec}$



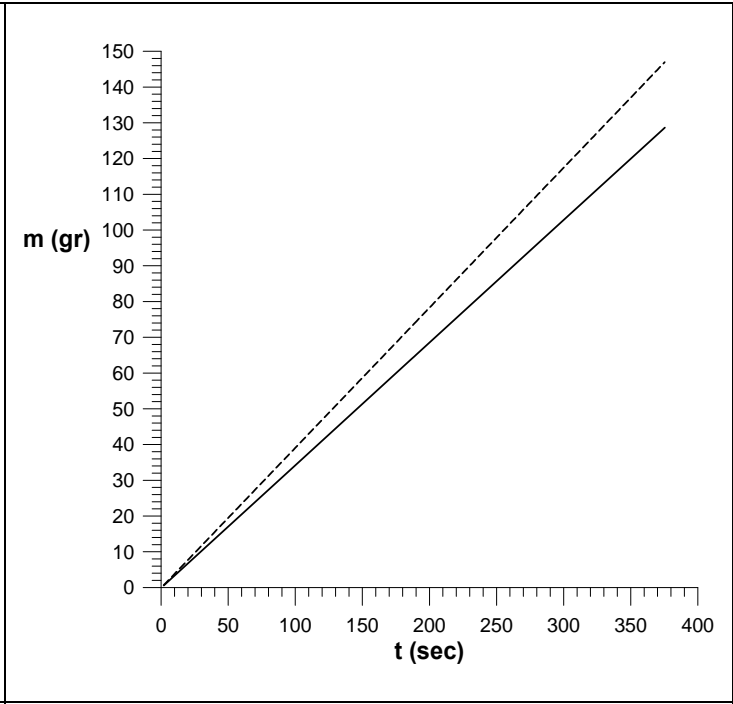
$\bar{f} = 0.860 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.31 \pm 0.046 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.861 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.859 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.34 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.29 \text{ gr/sec}$



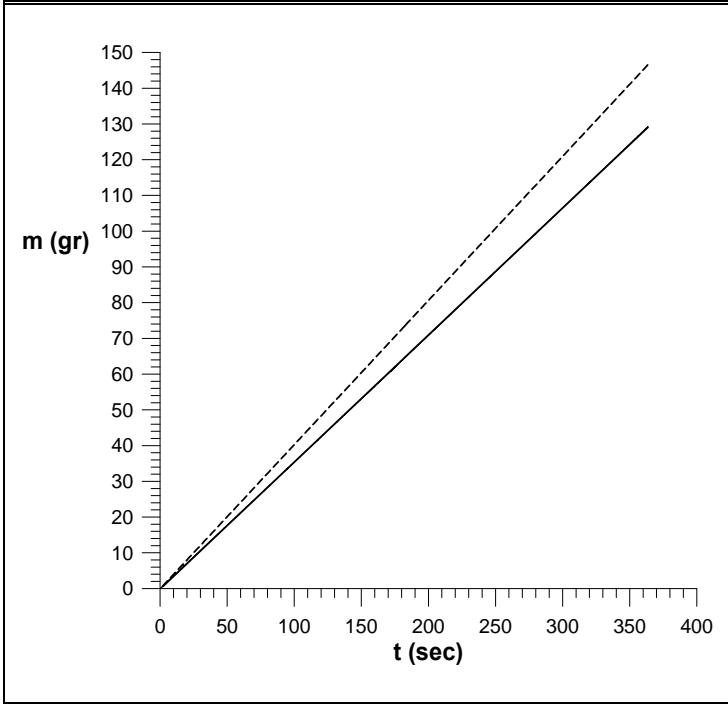
$\bar{f} = 0.892 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.33 \pm 0.047 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.892 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.892 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.35 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.30 \text{ gr/sec}$



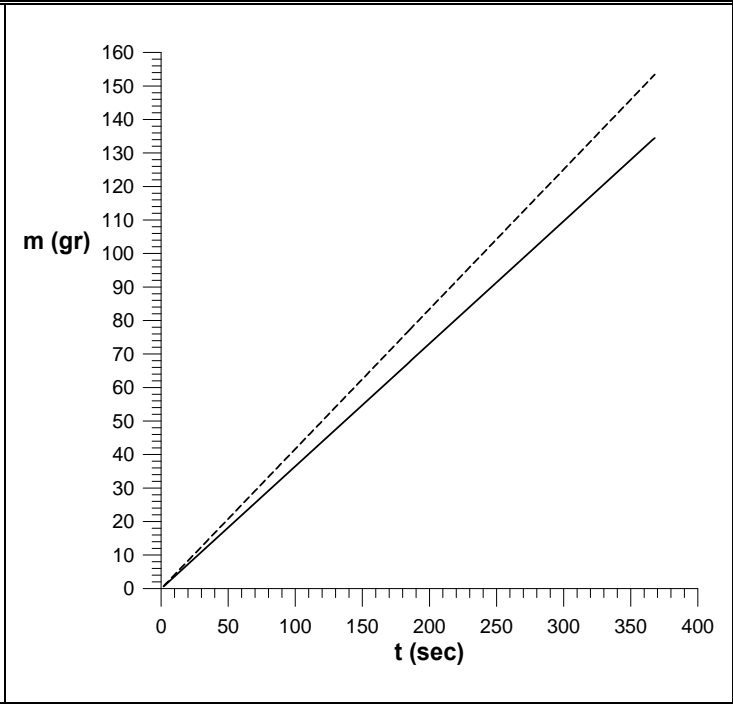
$\bar{f} = 0.938 \pm 0.0023 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.34 \pm 0.048 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.938 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.939 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.37 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.32 \text{ gr/sec}$



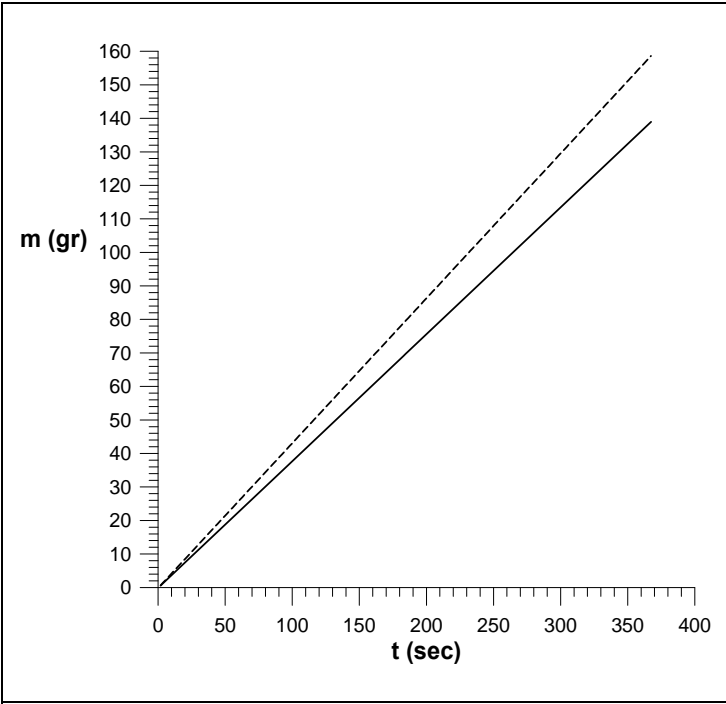
$\bar{f} = 0.995 \pm 0.0024 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.37 \pm 0.049 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.994 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.997 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.39 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.34 \text{ gr/sec}$



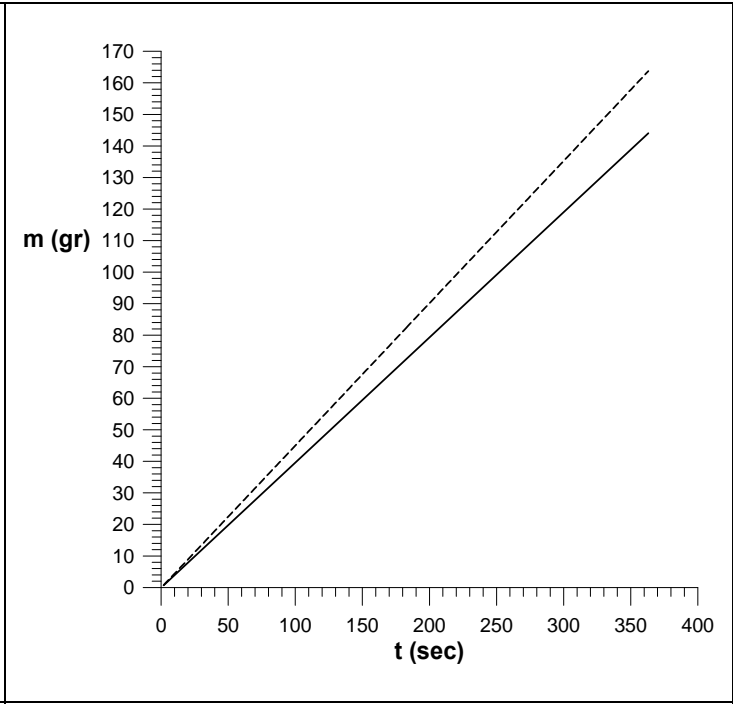
$\bar{f} = 1.032 \pm 0.0038 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.38 \pm 0.048 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 1.030 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 1.034 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.40 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.36 \text{ gr/sec}$



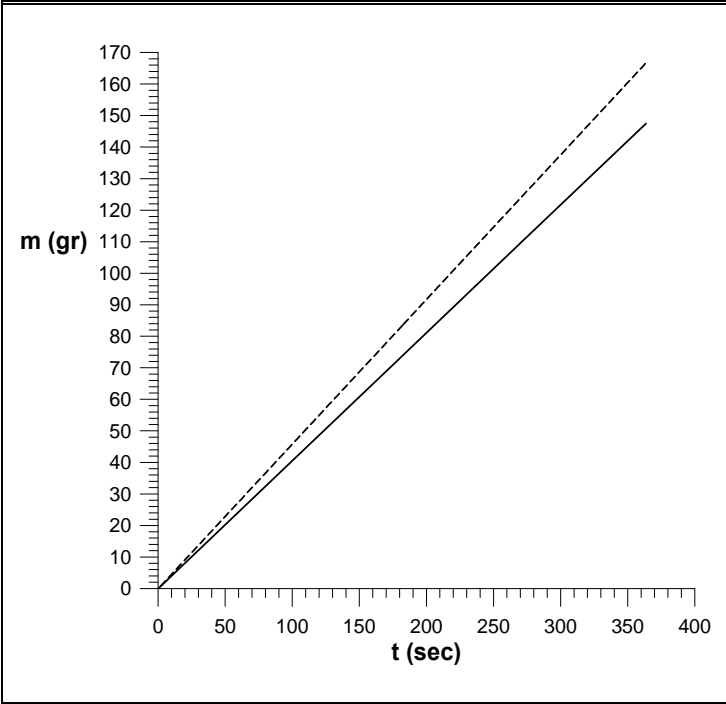
$\bar{f} = 1.066 \pm 0.0028 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.39 \pm 0.052 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 1.067 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 1.065 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.42 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.37 \text{ gr/sec}$



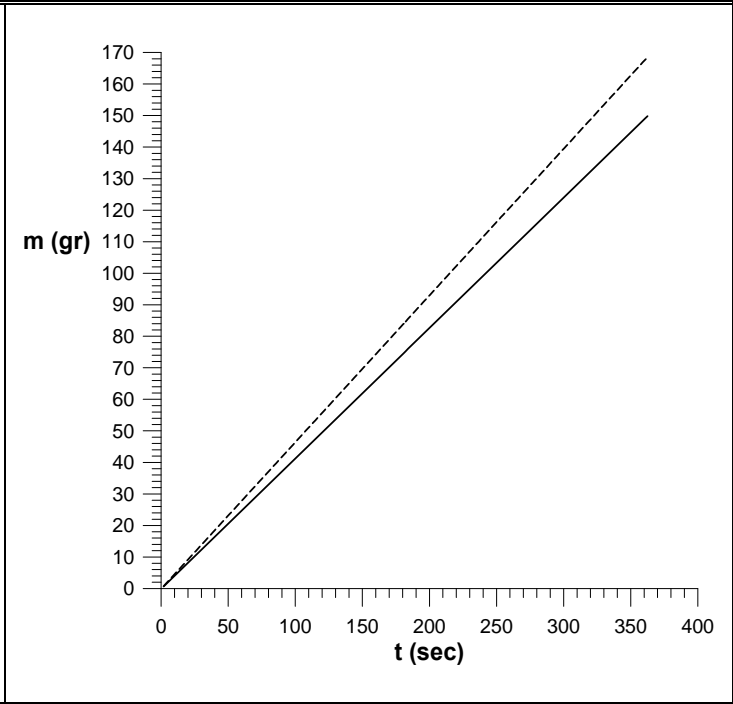
$\bar{f} = 1.097 \pm 0.0029 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.41 \pm 0.054 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 1.098 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 1.096 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.42 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.38 \text{ gr/sec}$



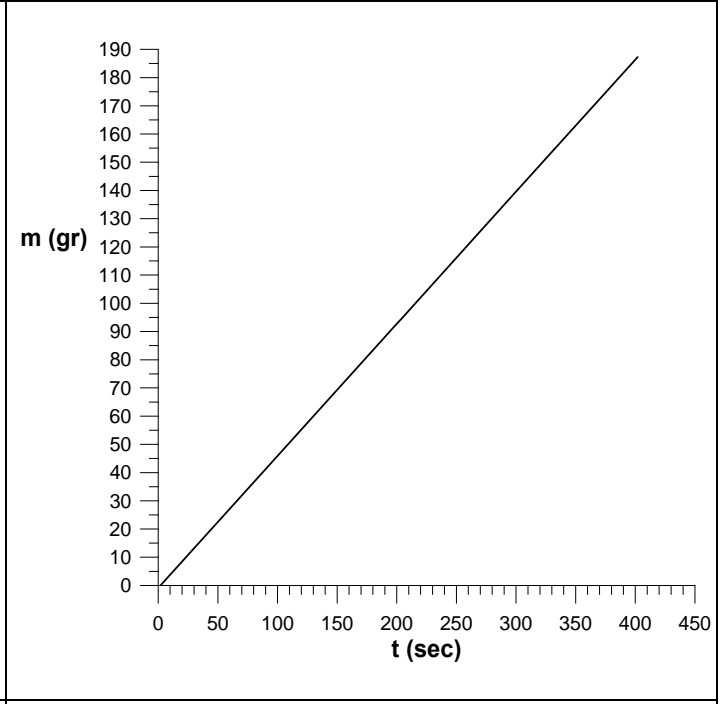
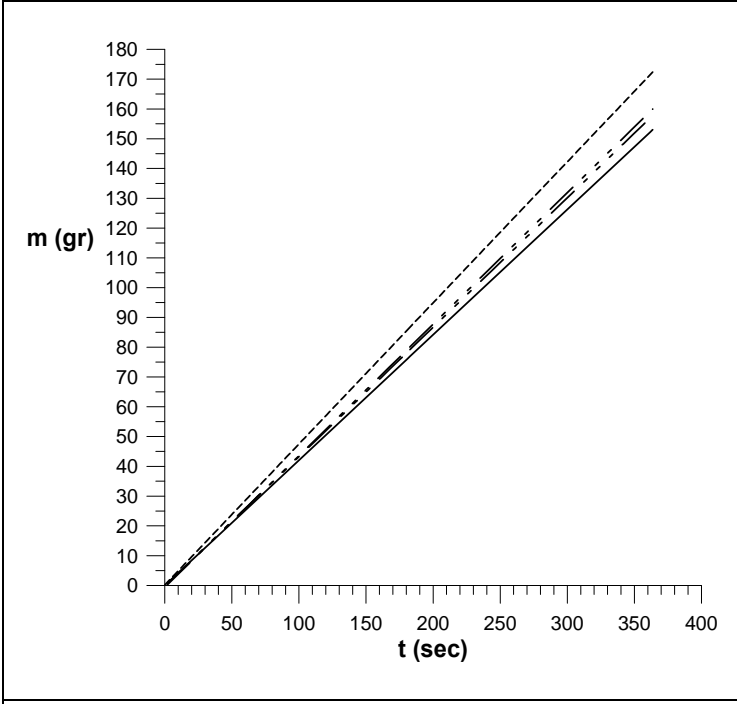
$\bar{f} = 1.136 \pm 0.0020 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.42 \pm 0.054 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 1.136 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 1.136 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.45 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.40 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 1.157 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.43 \pm 0.053 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 1.158 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 1.157 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.46 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.41 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 1.176 \pm 0.0021 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.44 \pm 0.052 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 1.175 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 1.177 \text{ Hz}$	$\dot{m}_\alpha = 0.47 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.41 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 1.202 \pm 0.0067 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.45 \pm 0.032 \text{ gr/sec}$

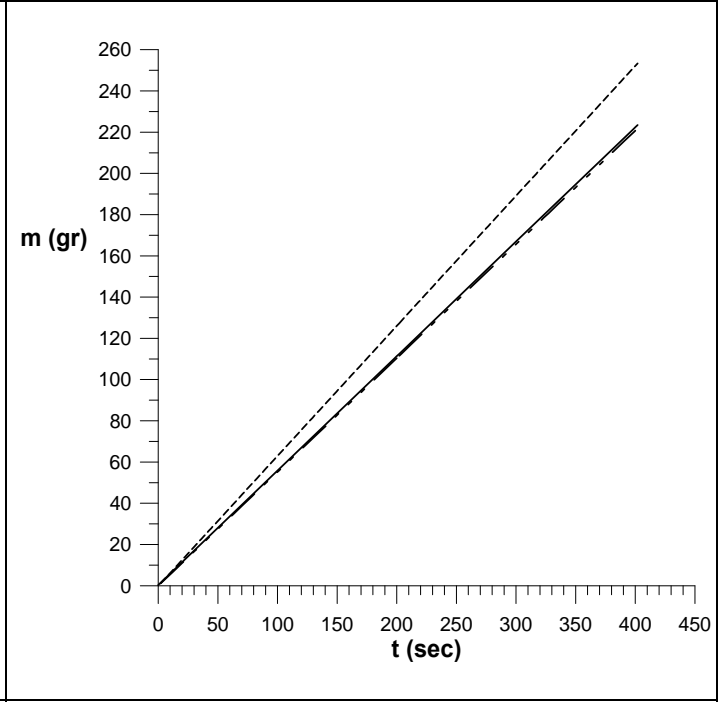
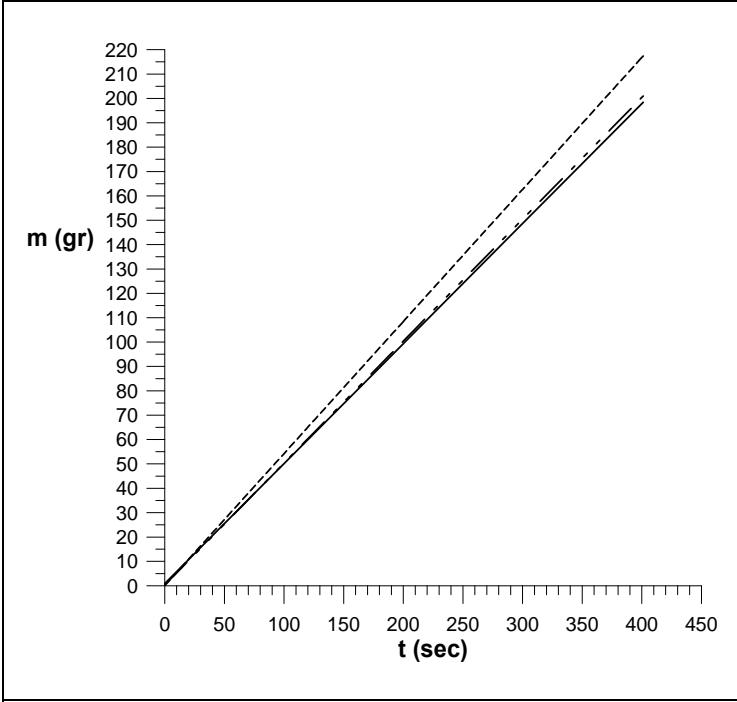
$f = 1.256 \pm 0.0078 \text{ Hz}$        $\dot{m} = 0.47 \pm 0.012 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 1.120 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.47 \text{ gr/sec}$

$\bar{f}_\beta = 1.198 \text{ Hz}$   
 $\bar{\dot{m}}_\beta = 0.44 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 1.201 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.42 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 1.256 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.47 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 1.326 \pm 0.0051 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.51 \pm 0.032 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 1.519 \pm 0.0035 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.58 \pm 0.052 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 1.336 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.54 \text{ gr/sec}$

$f_\beta = 1.325 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 0.50 \text{ gr/sec}$

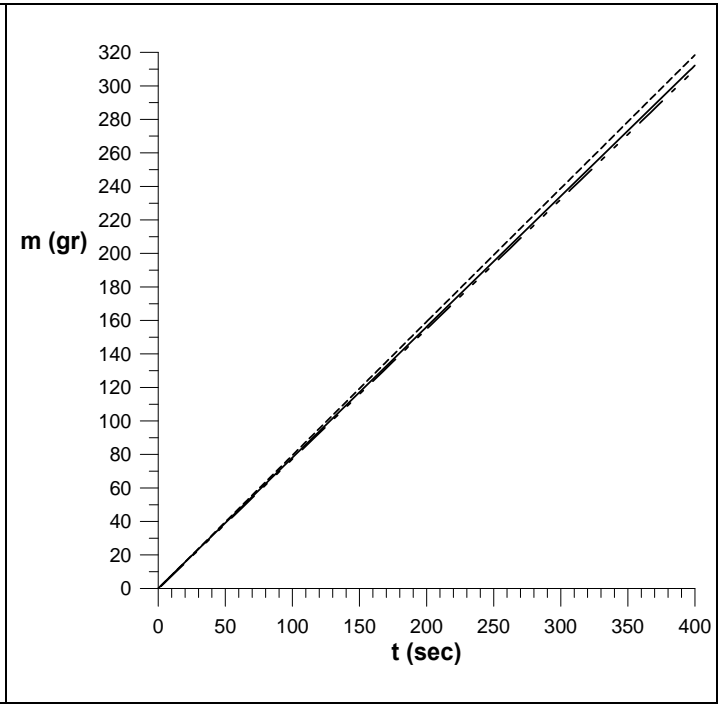
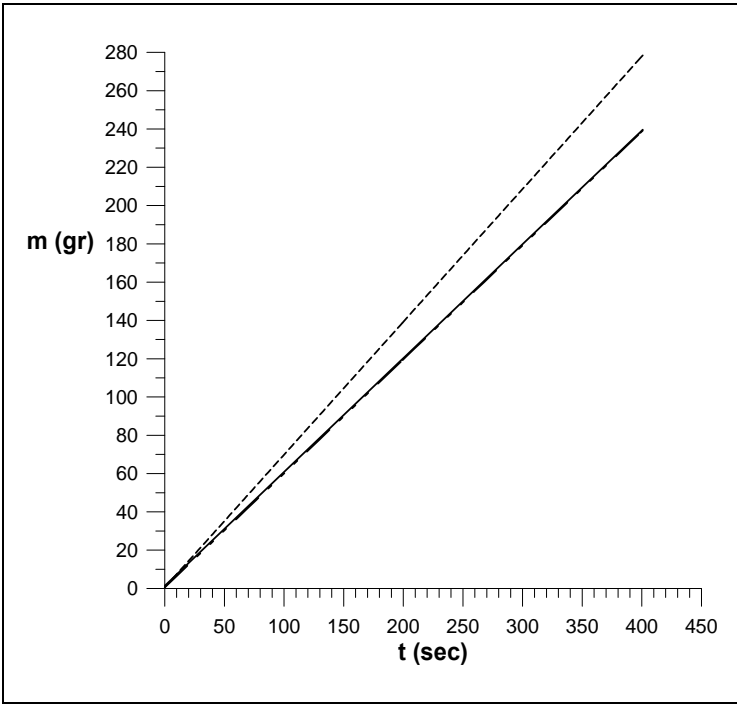
$f_\gamma = 1.316 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.49 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 1.536 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.63 \text{ gr/sec}$

$f_\beta = 1.520 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 0.55 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 1.501 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.56 \text{ gr/sec}$





$\bar{f} = 1.661 \pm 0.0054 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 0.63 \pm 0.066 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 1.990 \pm 0.0045 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 0.78 \pm 0.020 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 1.681 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.69 \text{ gr/sec}$

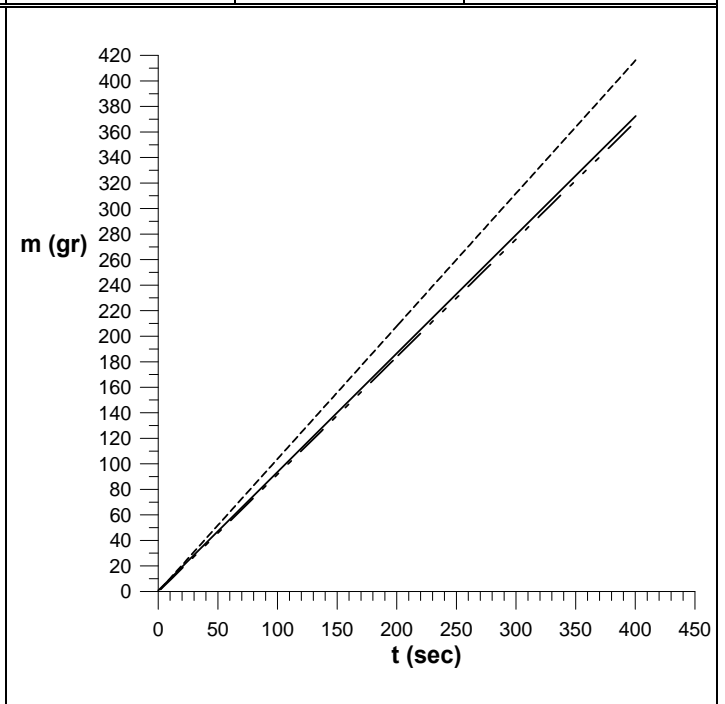
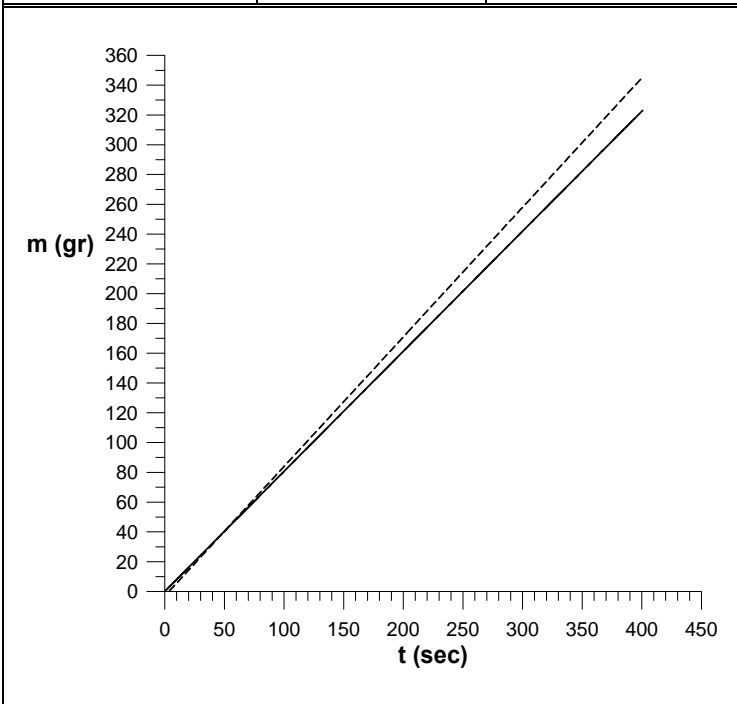
$f_\beta = 1.656 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 0.60 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 1.646 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.59 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 1.991 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.80 \text{ gr/sec}$

$f_\beta = 1.983 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 0.78 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 1.995 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.78 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 2.175 \pm 0.0043 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 0.83 \pm 0.044 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 2.530 \pm 0.0039 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 0.96 \pm 0.078 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 2.195 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.87 \text{ gr/sec}$

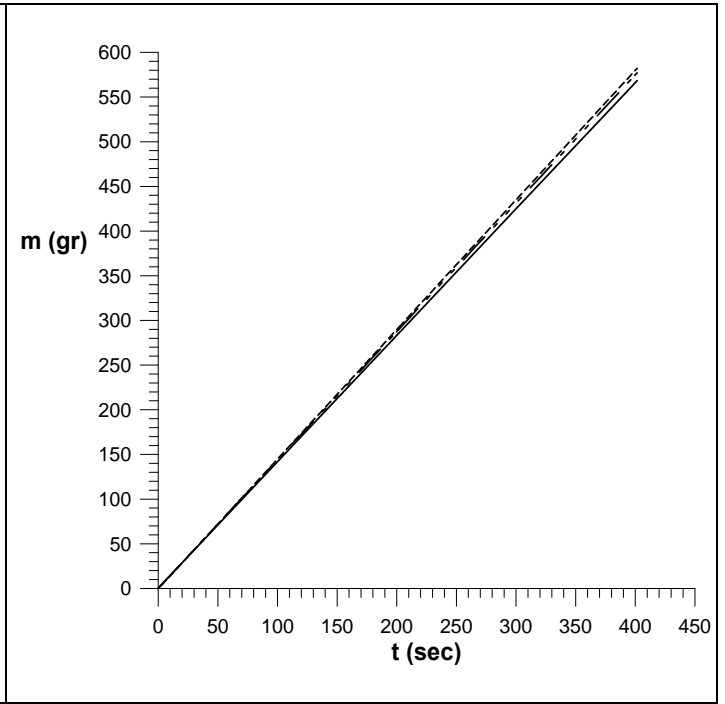
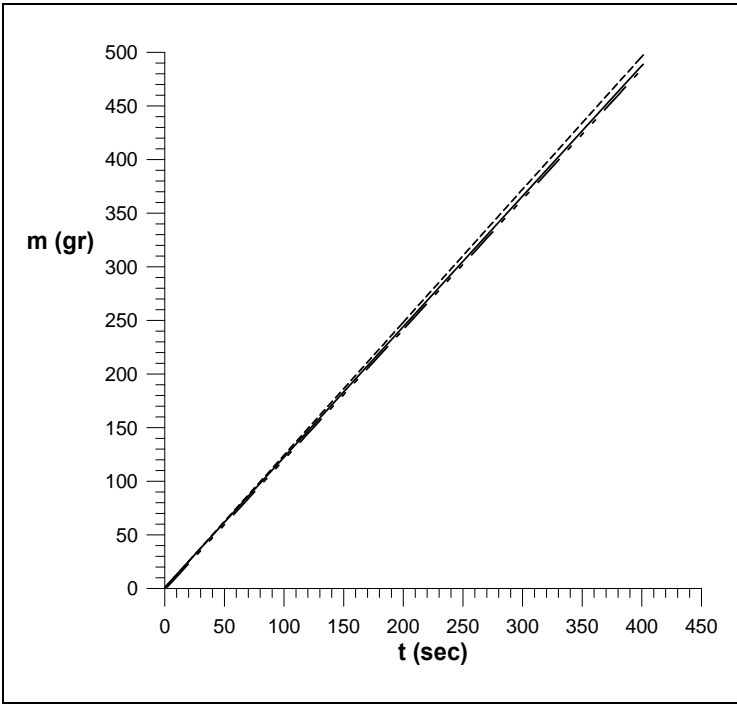
$f_\beta = 2.178 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 0.81 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 2.152 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.81 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 2.549 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 1.04 \text{ gr/sec}$

$f_\beta = 2.526 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 0.92 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 2.514 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.93 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 2.907 \pm 0.0067 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 1.22 \pm 0.026 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 3.319 \pm 0.0095 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 1.43 \pm 0.031 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 2.907 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 1.24 \text{ gr/sec}$

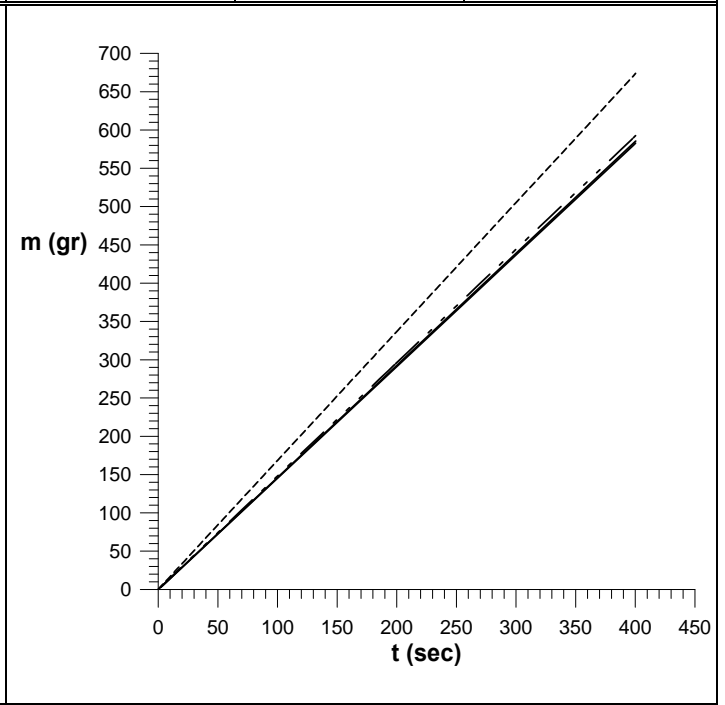
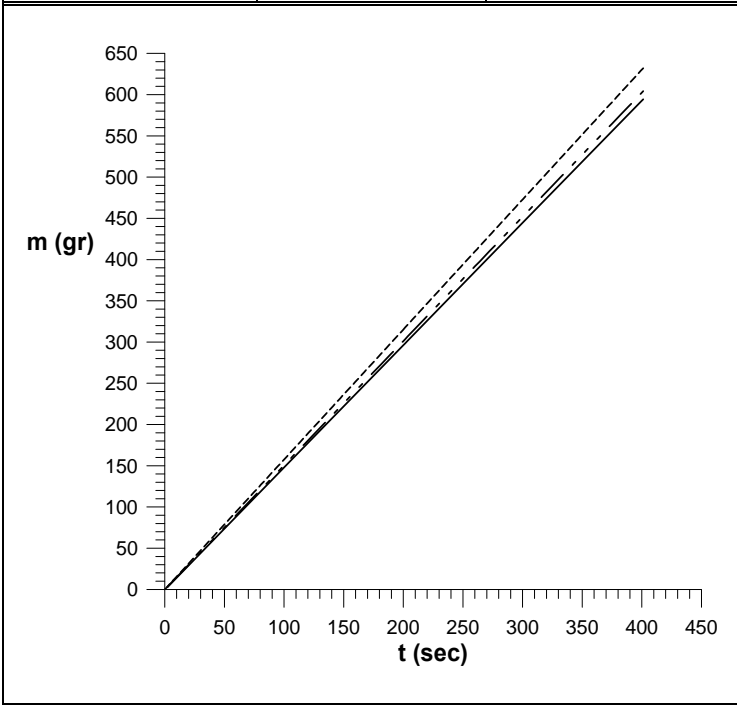
$f_\beta = 2.902 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 1.21 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 2.913 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 1.22 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 3.330 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 1.45 \text{ gr/sec}$

$f_\beta = 3.324 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 1.44 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 3.303 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 1.41 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 3.768 \pm 0.0048 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 1.52 \pm 0.060 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 4.171 \pm 0.0033 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 1.5 \pm 0.14 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 3.775 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 1.58 \text{ gr/sec}$

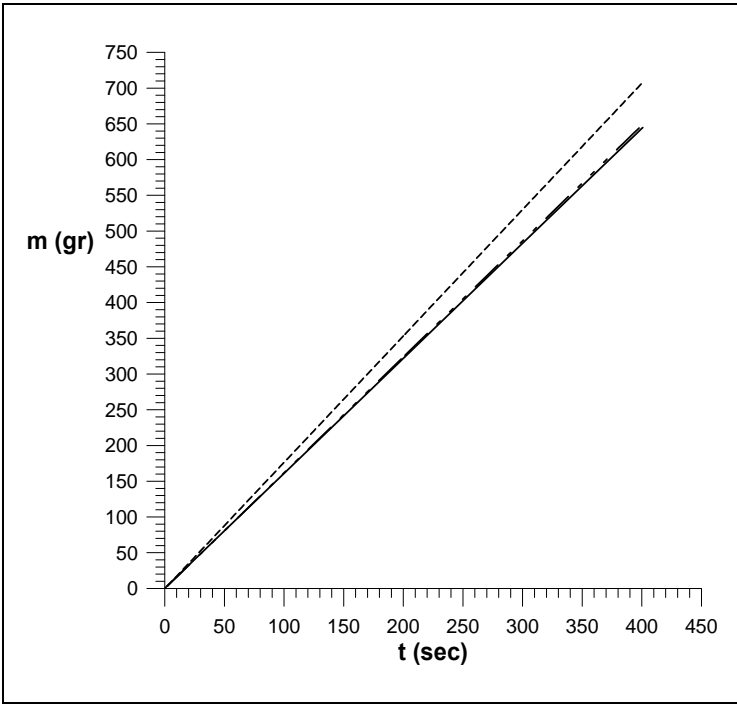
$f_\beta = 3.751 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 1.51 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 3.778 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 1.48 \text{ gr/sec}$

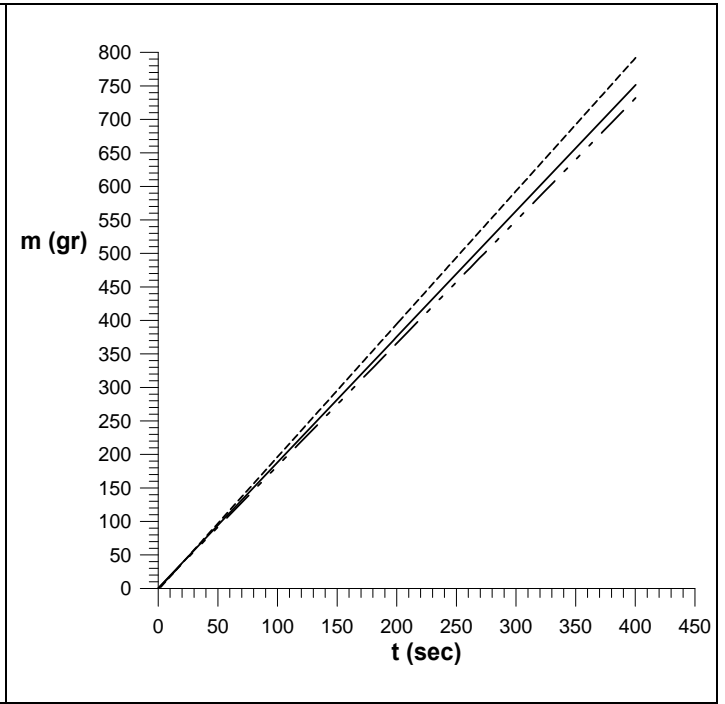
$f_\alpha = 4.179 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 1.68 \text{ gr/sec}$

$f_\beta = 4.163 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 1.48 \text{ gr/sec}$

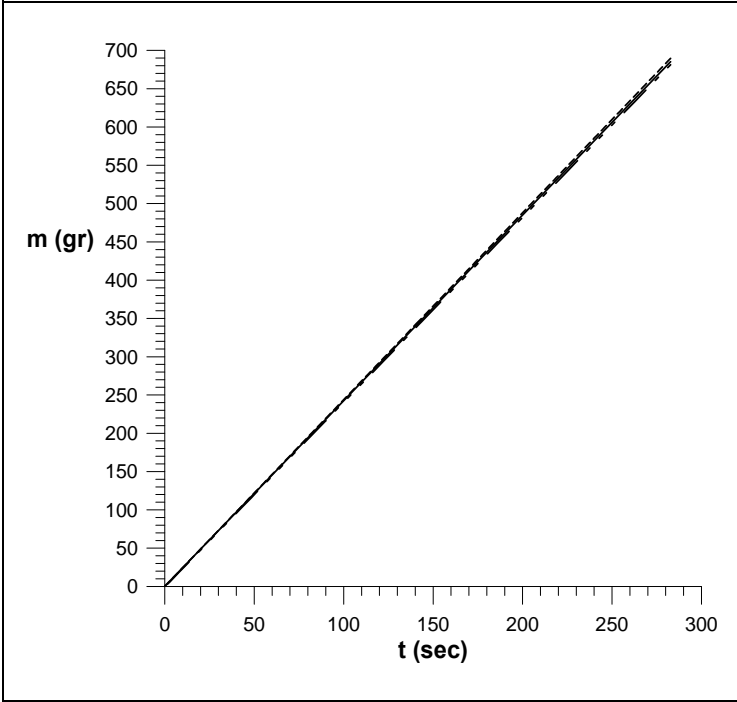
$\bar{f}_\gamma = 4.164 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_\gamma = 1.46 \text{ gr/sec}$



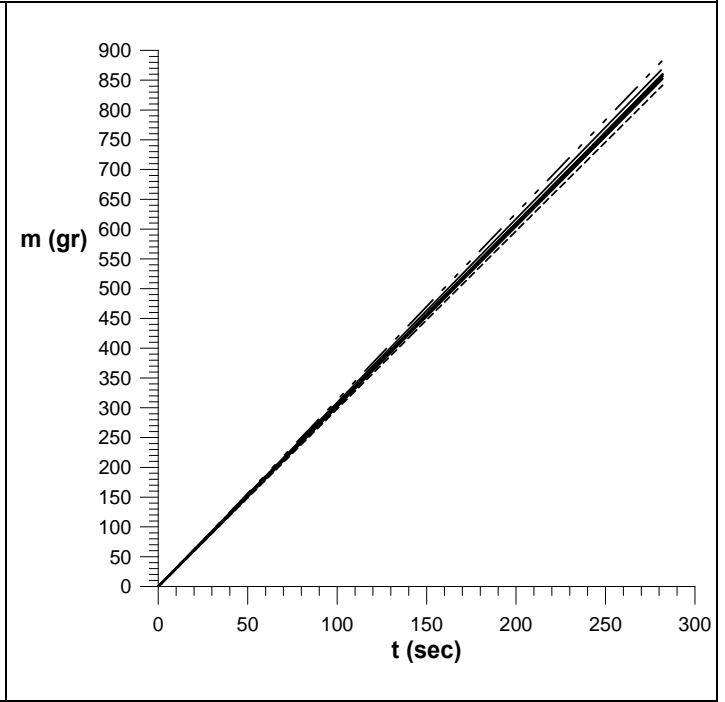
$\bar{f} = 4.619 \pm 0.0024 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 1.7 \pm 0.10 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 4.626 \text{ Hz}$	$f_\beta = 4.607 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 4.623 \text{ Hz}$	
$\dot{m}_\alpha = 1.77 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 1.62 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 1.61 \text{ gr/sec}$	



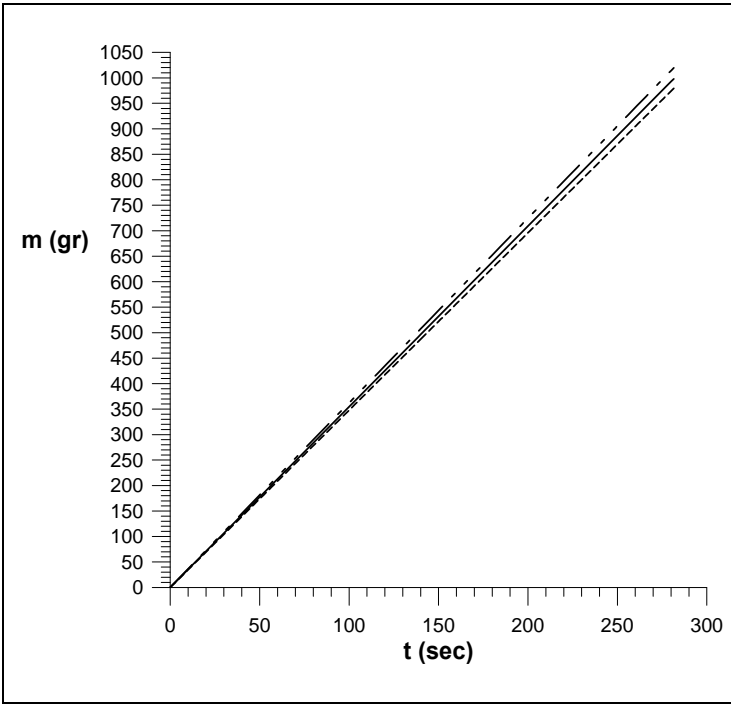
$\bar{f} = 4.995 \pm 0.0030 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 1.90 \pm 0.095 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 4.991 \text{ Hz}$	$f_\beta = 4.990 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 5.003 \text{ Hz}$	
$\dot{m}_\alpha = 1.98 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 1.83 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 1.88 \text{ gr/sec}$	



$\bar{f} = 5.873 \pm 0.0066 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 2.43 \pm 0.030 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 5.873 \text{ Hz}$	$f_\beta = 5.880 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 5.867 \text{ Hz}$	
$\dot{m}_\alpha = 2.44 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 2.41 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 2.42 \text{ gr/sec}$	

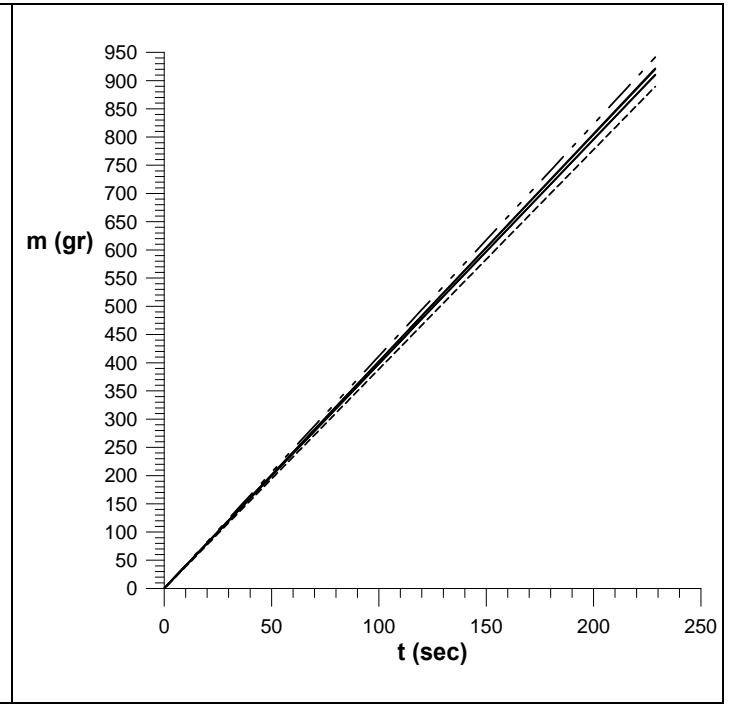


$\bar{f} = 6.673 \pm 0.0029 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 3.05 \pm 0.088 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 6.691 \text{ Hz}$	$f_\beta = 6.660 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 6.672 \text{ Hz}$	
$\dot{m}_\alpha = 2.99 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 3.13 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 3.04 \text{ gr/sec}$	



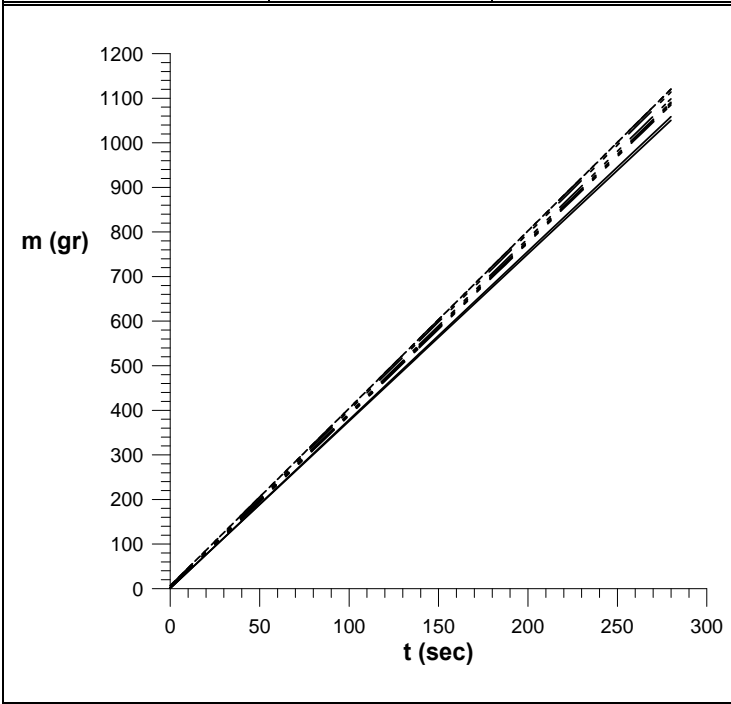
$\bar{f} = 7.507 \pm 0.0048 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 3.55 \pm 0.085 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 7.516 \text{ Hz}$	$f_\beta = 7.490 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 7.515 \text{ Hz}$
$\dot{m}_\alpha = 3.48 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 3.62 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 3.54 \text{ gr/sec}$



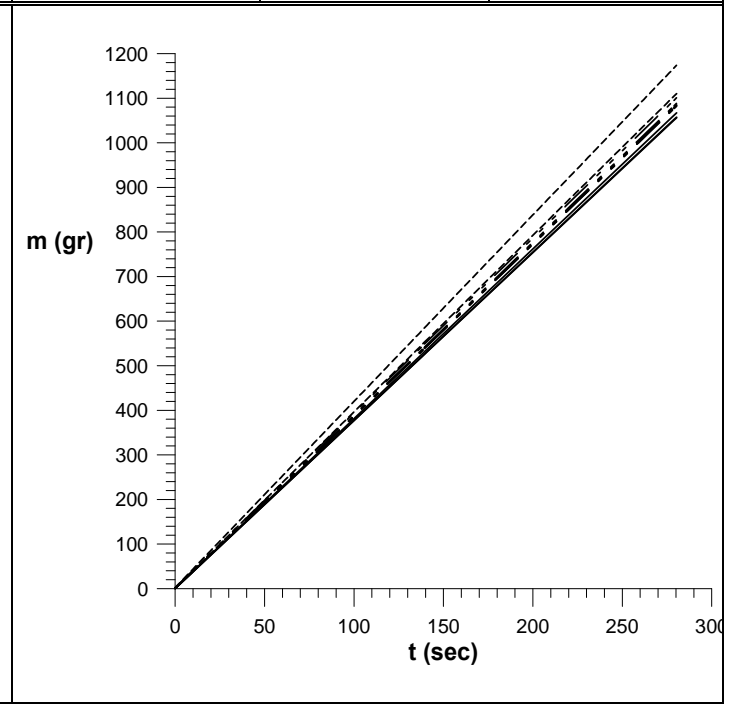
$\bar{f} = 8.359 \pm 0.0083 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 4.0 \pm 0.13 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 8.376 \text{ Hz}$	$f_\beta = 8.356 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 8.347 \text{ Hz}$
$\dot{m}_\alpha = 3.89 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 4.11 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 4.00 \text{ gr/sec}$



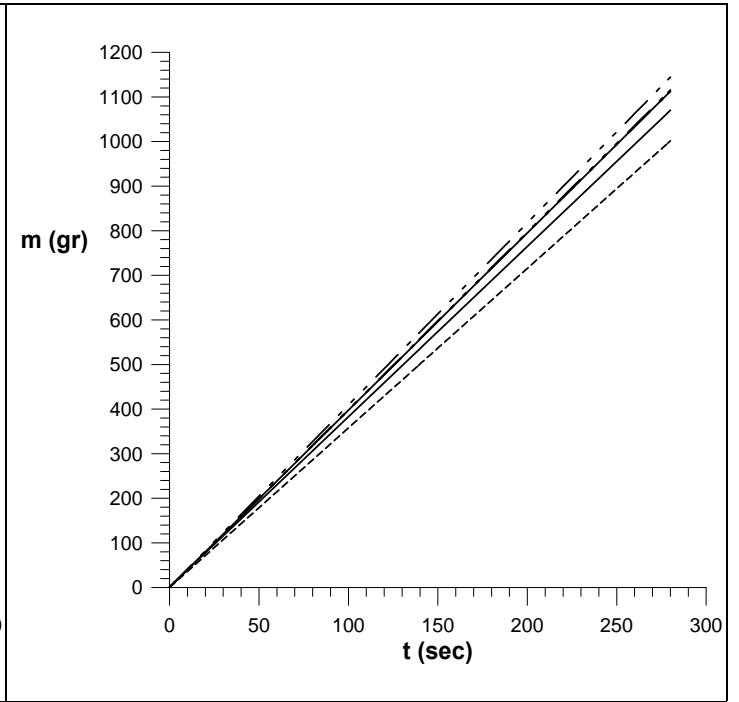
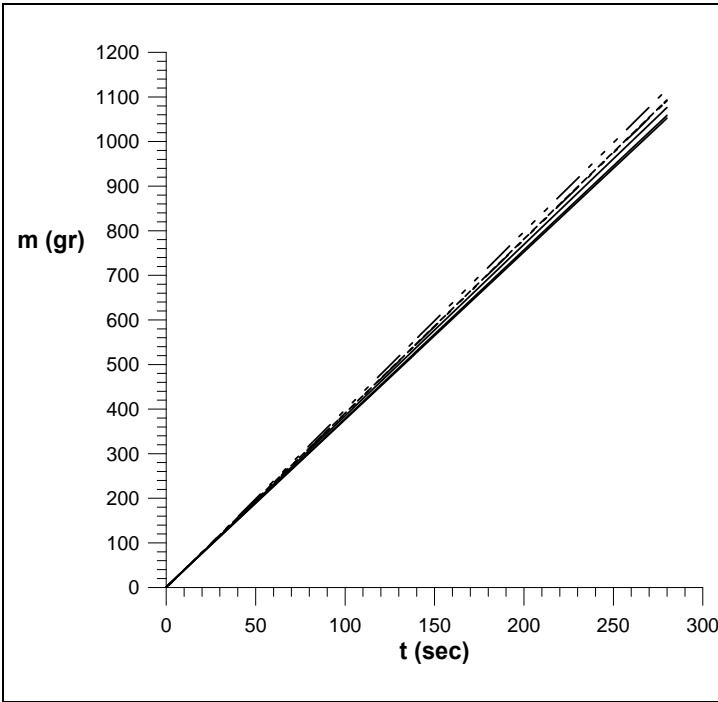
$\bar{f} = 8.751 \pm 0.0042 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 3.9 \pm 0.12 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 8.754 \text{ Hz}$	$f_\beta = 8.749 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 8.760 \text{ Hz}$
$\dot{m}_\alpha = 3.98 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 3.92 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 3.76 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 9.171 \pm 0.0097 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 3.9 \pm 0.12 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 9.171 \text{ Hz}$	$f_\beta = 9.162 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 9.173 \text{ Hz}$
$\dot{m}_\alpha = 4.1 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 3.88 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 3.78 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 9.407 \pm 0.0071 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 3.86 \pm 0.085 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 9.579 \pm 0.0054 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 3.8 \pm 0.23 \text{ gr/sec}$

$f_{\alpha} = 9.401 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_{\alpha} = 3.90 \text{ gr/sec}$

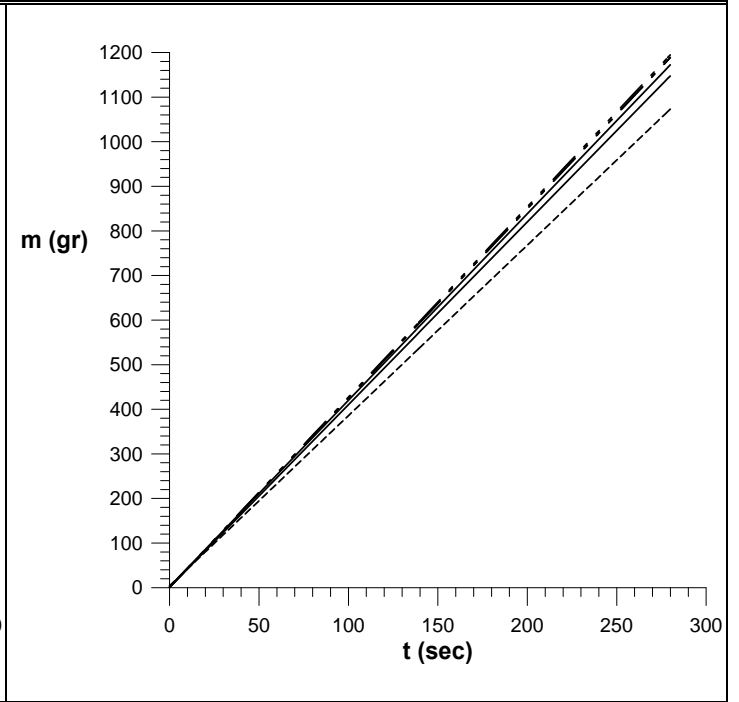
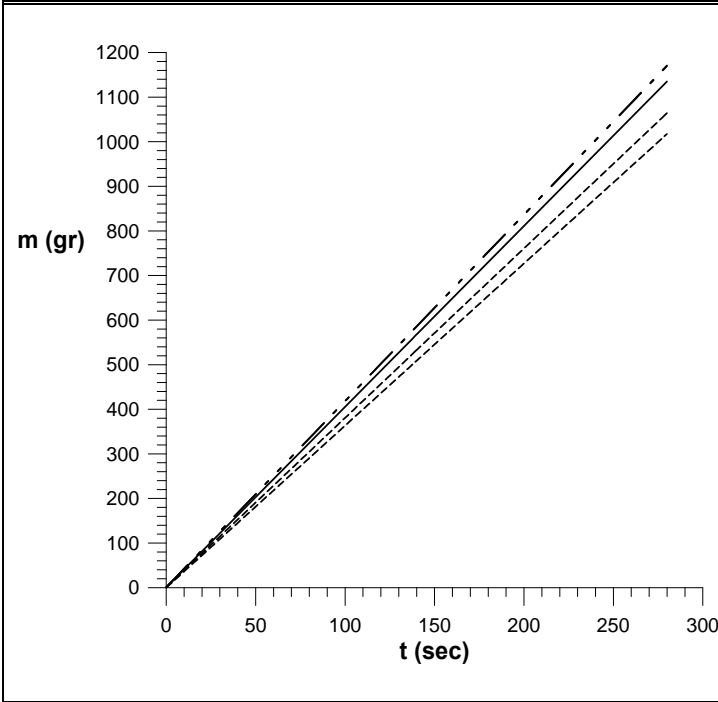
$f_{\beta} = 9.40 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_{\beta} = 3.9 \text{ gr/sec}$

$f_{\gamma} = 9.403 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_{\gamma} = 3.79 \text{ gr/sec}$

$f_{\alpha} = 9.576 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_{\alpha} = 3.58 \text{ gr/sec}$

$f_{\beta} = 9.58 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_{\beta} = 4.01 \text{ gr/sec}$

$f_{\gamma} = 9.588 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_{\gamma} = 3.9 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 10.027 \pm 0.0052 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 4.0 \pm 0.22 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 10.22 \pm 0.011 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 4.1 \pm 0.25 \text{ gr/sec}$

$\bar{f}_{\alpha} = 10.037 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_{\alpha} = 3.7 \text{ gr/sec}$

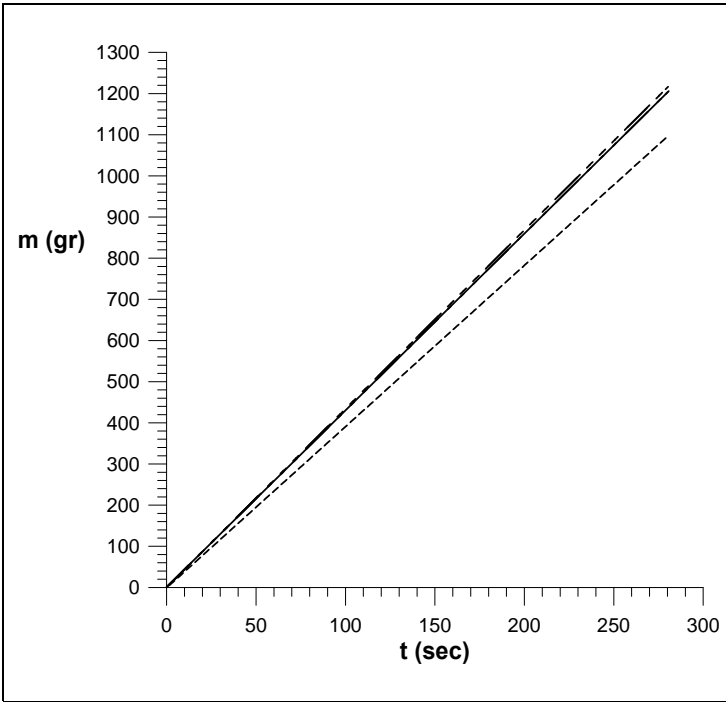
$\bar{f}_{\beta} = 9.998 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_{\beta} = 4.18 \text{ gr/sec}$

$f_{\gamma} = 10.018 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_{\gamma} = 4.05 \text{ gr/sec}$

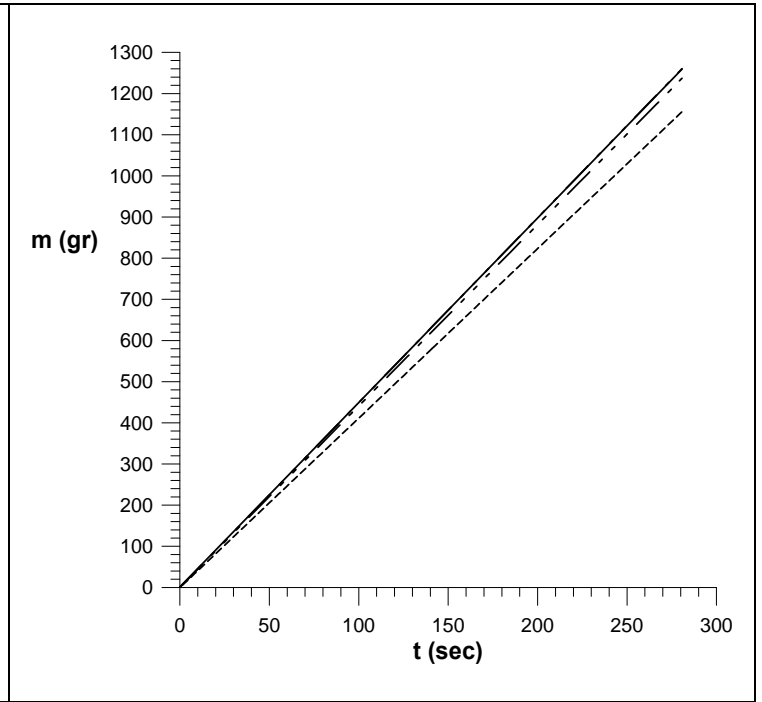
$f_{\alpha} = 10.219 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_{\alpha} = 3.82 \text{ gr/sec}$

$\bar{f}_{\beta} = 10.22 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_{\beta} = 4.25 \text{ gr/sec}$

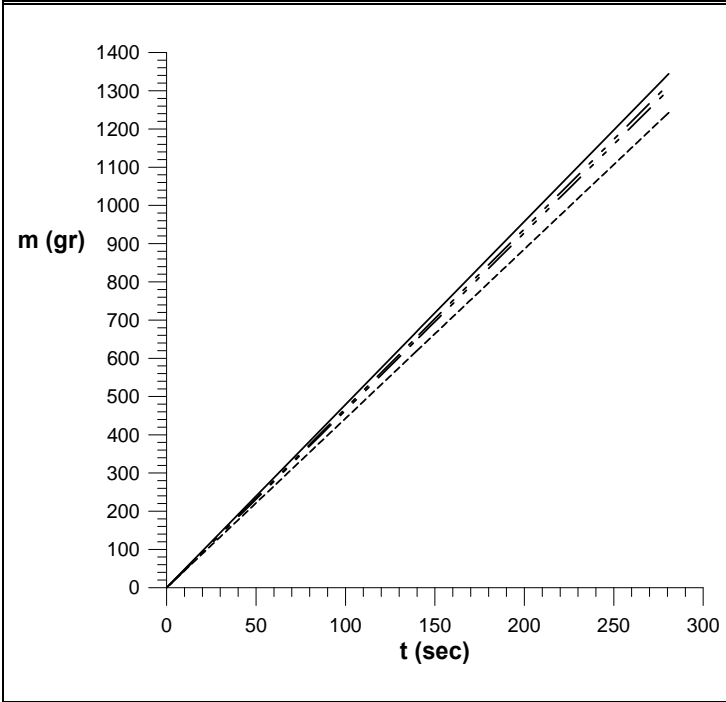
$\bar{f}_{\gamma} = 10.219 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_{\gamma} = 4.14 \text{ gr/sec}$



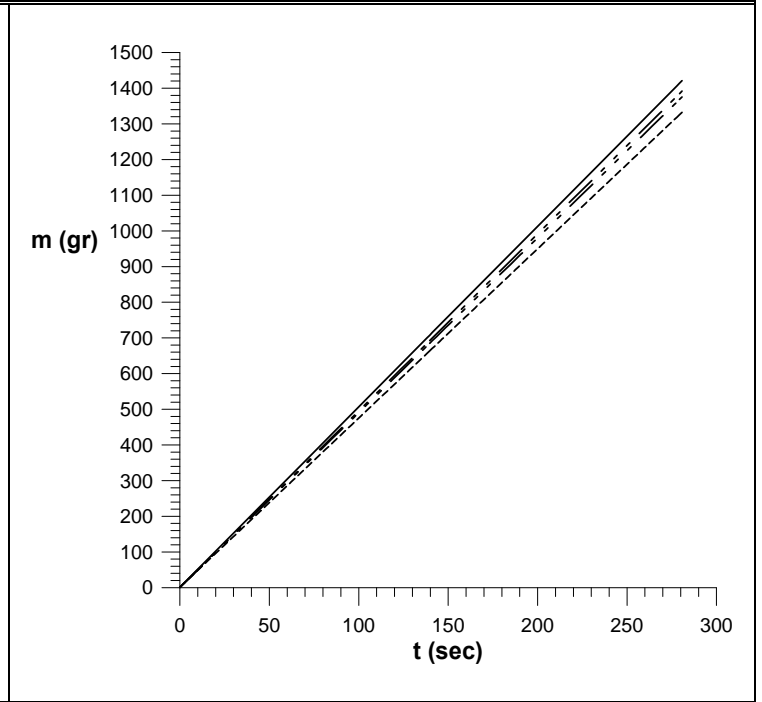
$\bar{f} = 10.429 \pm 0.0046 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 4.2 \pm 0.26 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 10.454 \text{ Hz}$	$f_\beta = 10.426 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 10.424 \text{ Hz}$	
$\dot{m}_\alpha = 3.92 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 4.32 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 4.29 \text{ gr/sec}$	



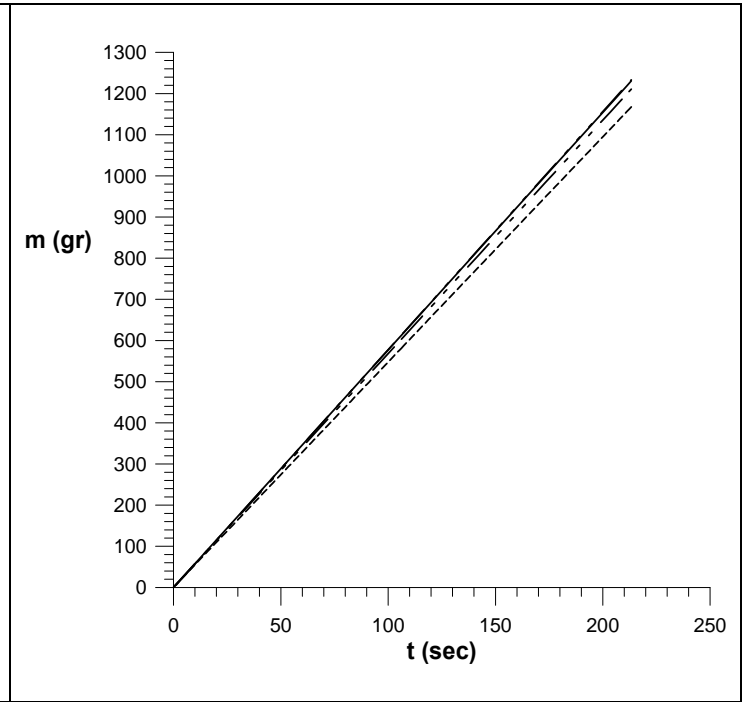
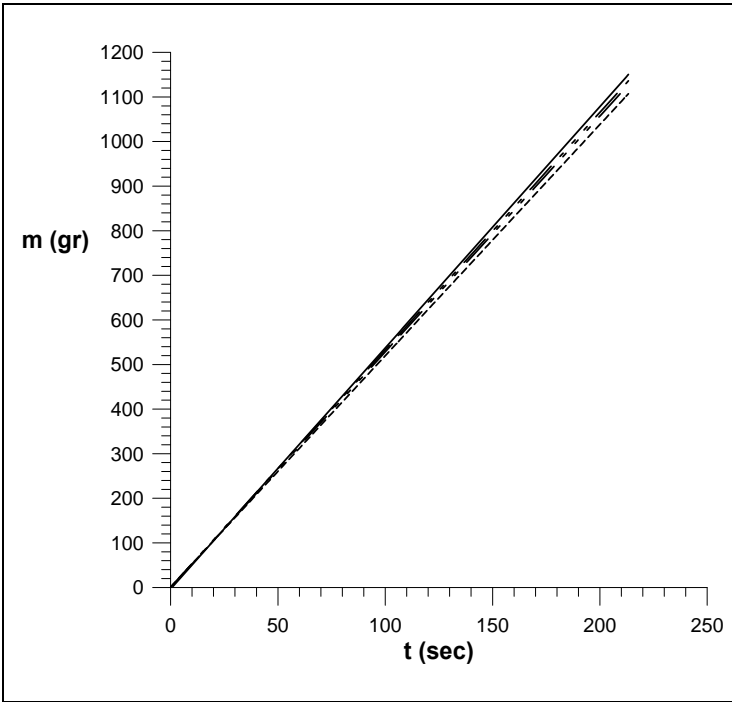
$\bar{f} = 10.86 \pm 0.011 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 4.3 \pm 0.22 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 10.860 \text{ Hz}$	$f_\beta = 10.848 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 10.859 \text{ Hz}$	
$\dot{m}_\alpha = 4.12 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 4.45 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 4.48 \text{ gr/sec}$	



$\bar{f} = 11.703 \pm 0.0077 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 4.6 \pm 0.21 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 11.726 \text{ Hz}$	$f_\beta = 11.705 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 11.665 \text{ Hz}$	
$\dot{m}_\alpha = 4.43 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 4.67 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 4.79 \text{ gr/sec}$	



$\bar{f} = 12.489 \pm 0.0081 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 4.9 \pm 0.18 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 12.481 \text{ Hz}$	$f_\beta = 12.485 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 12.508 \text{ Hz}$	
$\dot{m}_\alpha = 4.74 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 4.93 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 5.06 \text{ gr/sec}$	



$\bar{f} = 13.366 \pm 0.0093 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 5.3 \pm 0.13 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 14.17 \pm 0.010 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 5.6 \pm 0.18 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 13.376 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 5.18 \text{ gr/sec}$

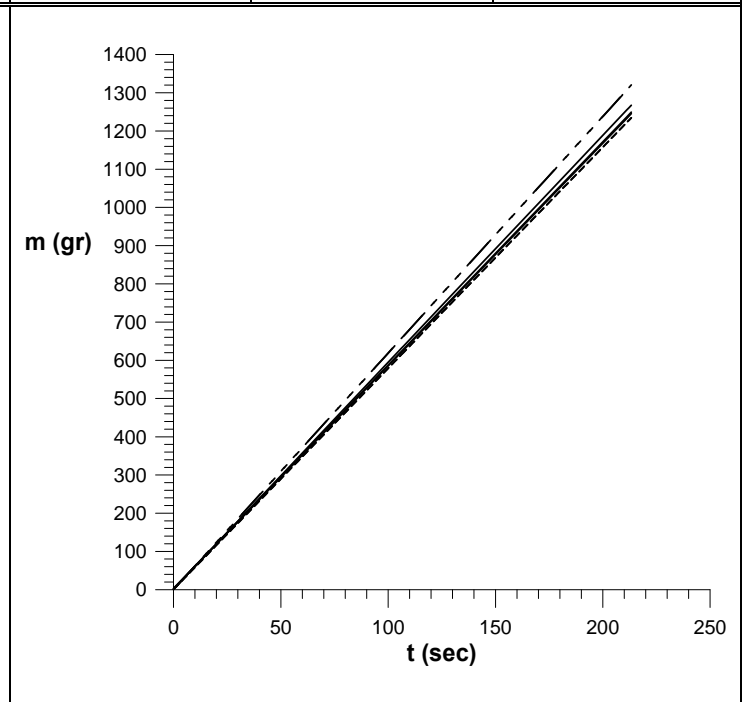
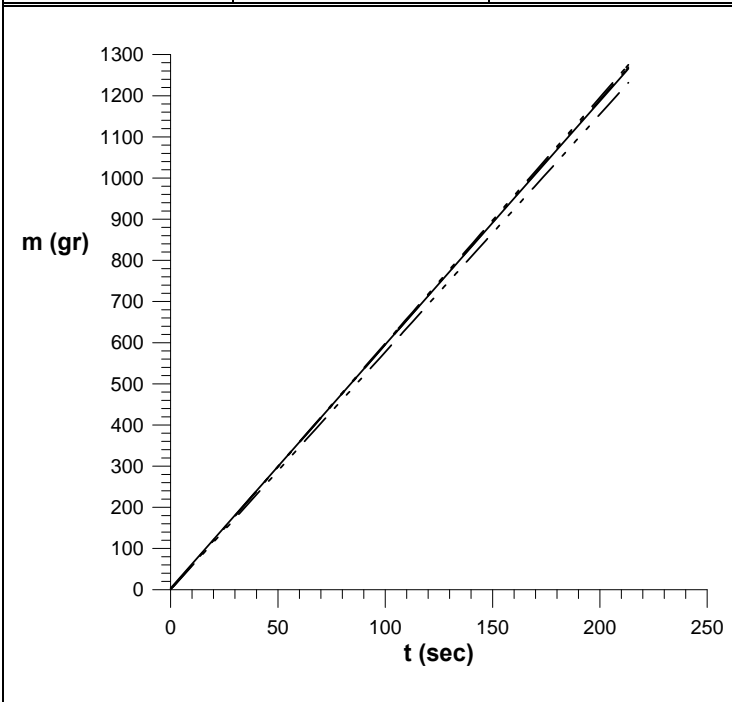
$\bar{f}_\beta = 13.366 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_\beta = 5.31 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 13.349 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 5.41 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 14.160 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 5.47 \text{ gr/sec}$

$\bar{f}_\beta = 14.17 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_\beta = 5.7 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 14.198 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 5.77 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 14.60 \pm 0.011 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 5.93 \pm 0.048 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 15.01 \pm 0.016 \text{ Hz}$        $\bar{m} = 6.0 \pm 0.16 \text{ gr/sec}$

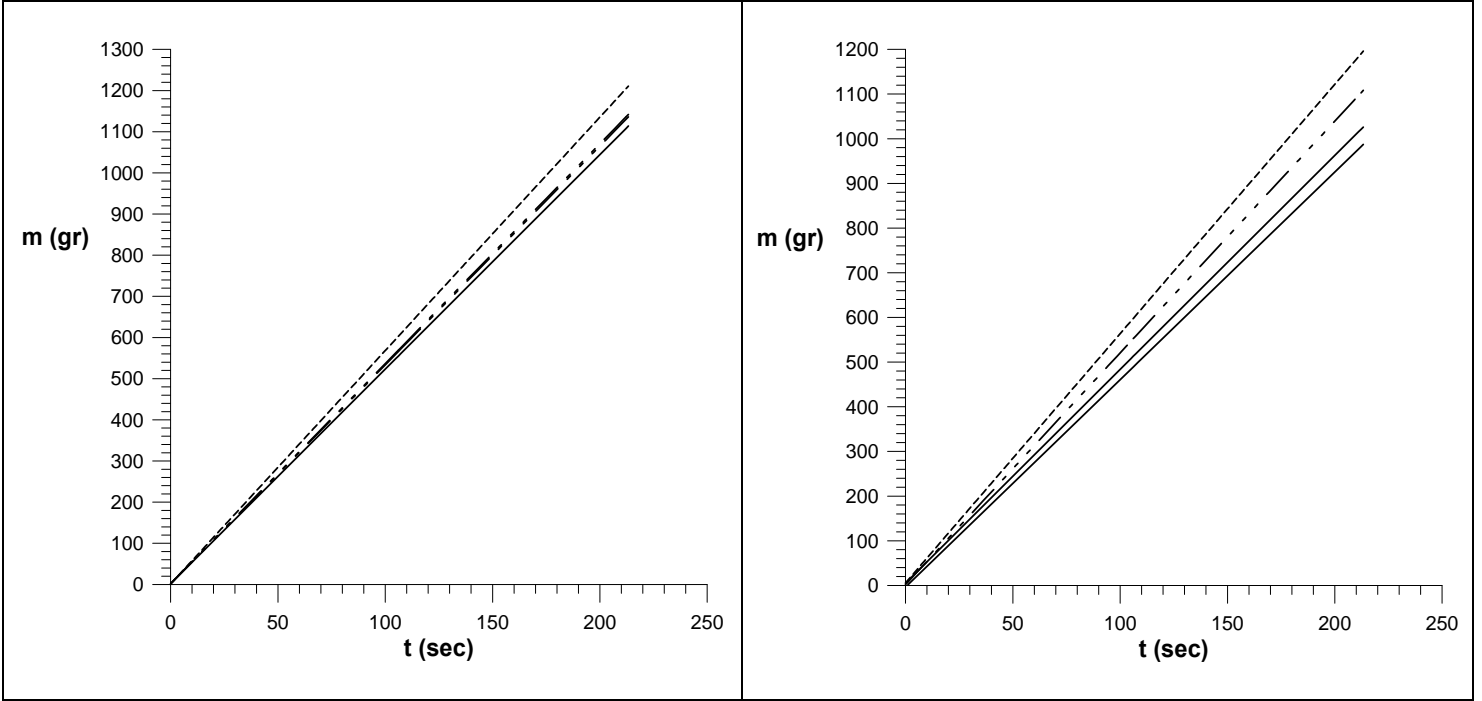
$\bar{f}_\beta = 14.59 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_\beta = 5.9 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 14.610 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 5.92 \text{ gr/sec}$

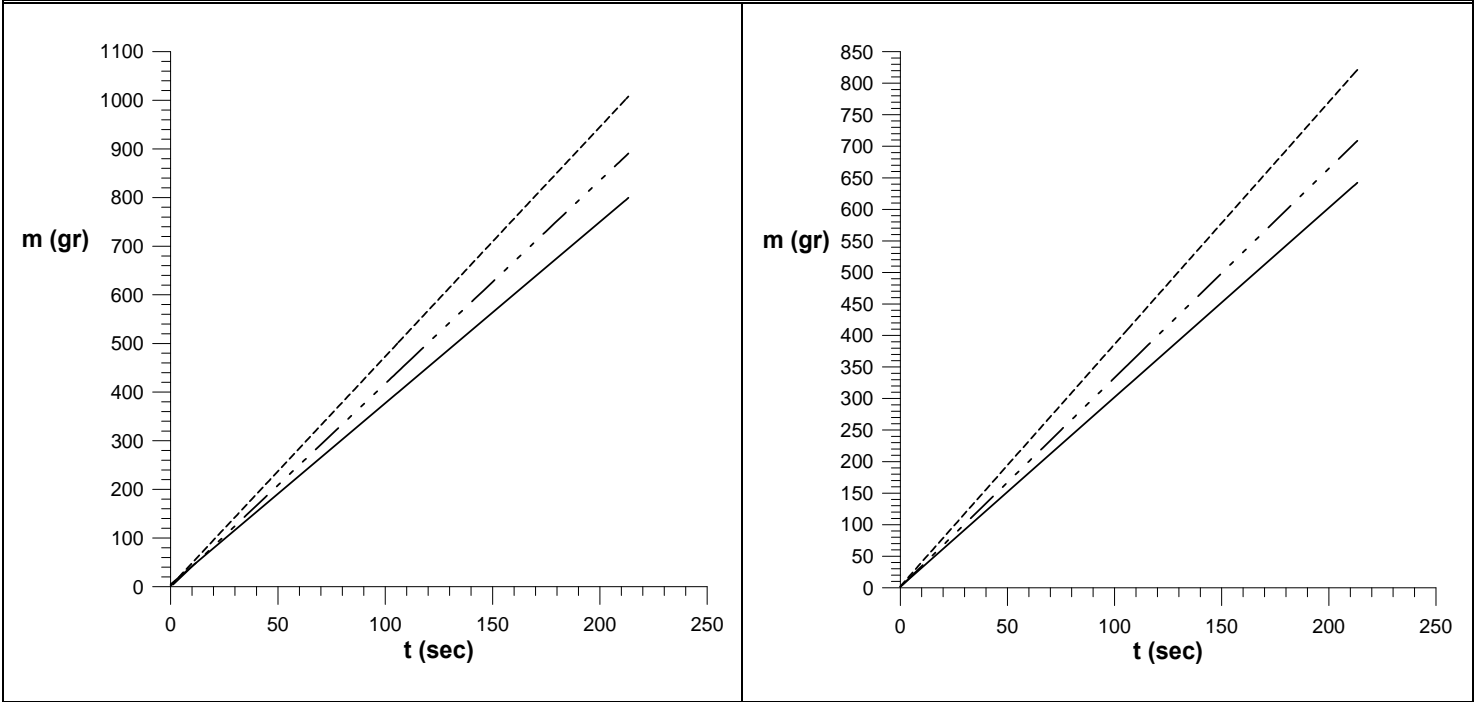
$\bar{f}_\alpha = 15.012 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_\alpha = 5.78 \text{ gr/sec}$

$\bar{f}_\beta = 15.03 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_\beta = 6.19 \text{ gr/sec}$

$\bar{f}_\gamma = 14.994 \text{ Hz}$   
 $\bar{m}_\gamma = 5.87 \text{ gr/sec}$

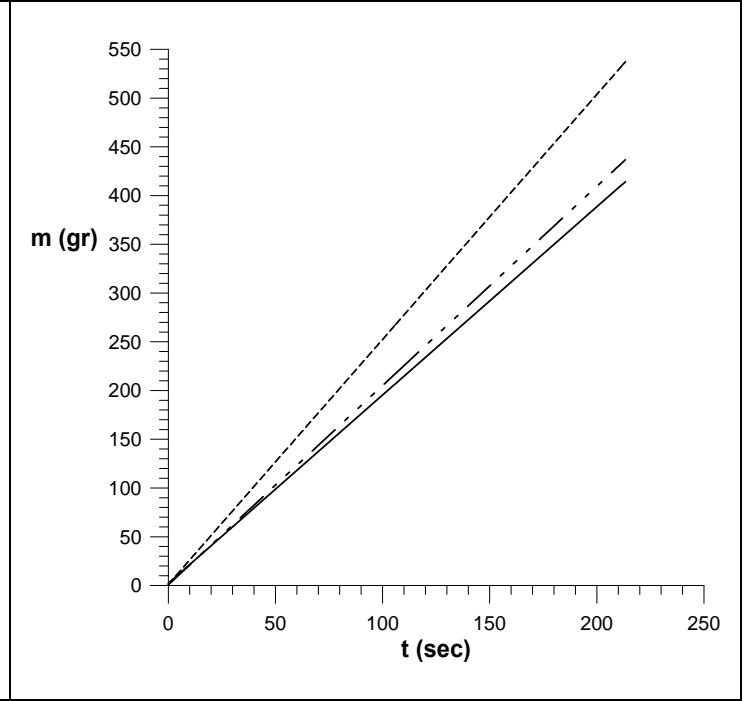
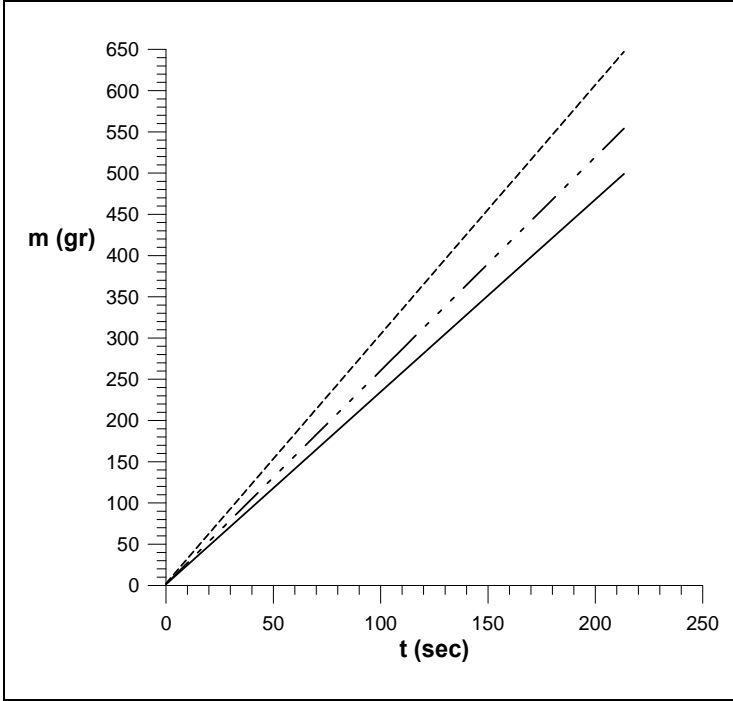


$\bar{f} = 15.44 \pm 0.010 \text{ Hz}$			$\bar{m} = 5.4 \pm 0.28 \text{ gr/sec}$		
$f_\alpha = 15.434 \text{ Hz}$	$f_\beta = 15.44 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 15.432 \text{ Hz}$	$f_\alpha = 15.884 \text{ Hz}$	$f_\beta = 15.84 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 15.88 \text{ Hz}$
$\dot{m}_\alpha = 5.68 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 5.32 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 5.21 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\alpha = 5.54 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 5.17 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 4.7 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 16.69 \pm 0.019 \text{ Hz}$			$\bar{m} = 4.2 \pm 0.56 \text{ gr/sec}$		
$f_\alpha = 16.71 \text{ Hz}$	$f_\beta = 16.67 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 16.68 \text{ Hz}$	$f_\alpha = 17.52 \text{ Hz}$	$f_\beta = 17.49 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 17.51 \text{ Hz}$
$\dot{m}_\alpha = 4.70 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 3.73 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 4.16 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\alpha = 3.82 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\beta = 3.29 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 3.00 \text{ gr/sec}$





$\bar{f} = 18.37 \pm 0.025 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 2.6 \pm 0.39 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 19.16 \pm 0.020 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 2.2 \pm 0.34 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 18.40 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 3.00 \text{ gr/sec}$

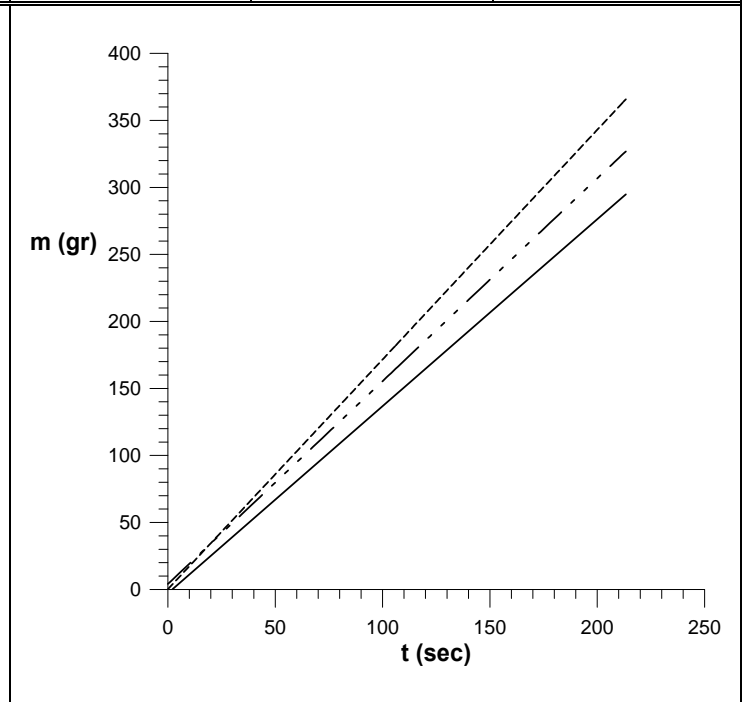
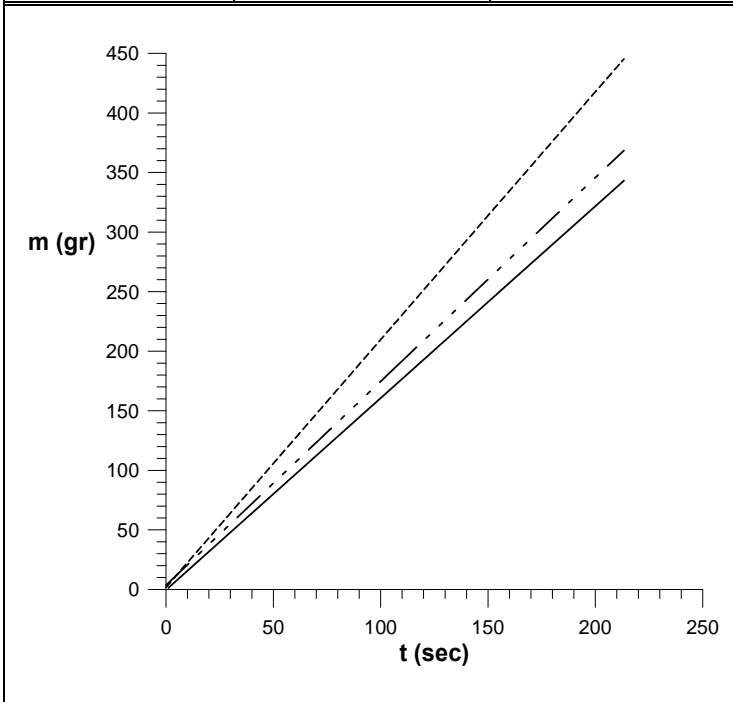
$f_\beta = 18.34 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 2.57 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 18.39 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 2.33 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 19.17 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 2.50 \text{ gr/sec}$

$f_\beta = 19.15 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 2.04 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 19.18 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 1.93 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 20.04 \pm 0.026 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 1.8 \pm 0.28 \text{ gr/sec}$

$\bar{f} = 20.85 \pm 0.021 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 1.5 \pm 0.19 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 20.04 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 2.07 \text{ gr/sec}$

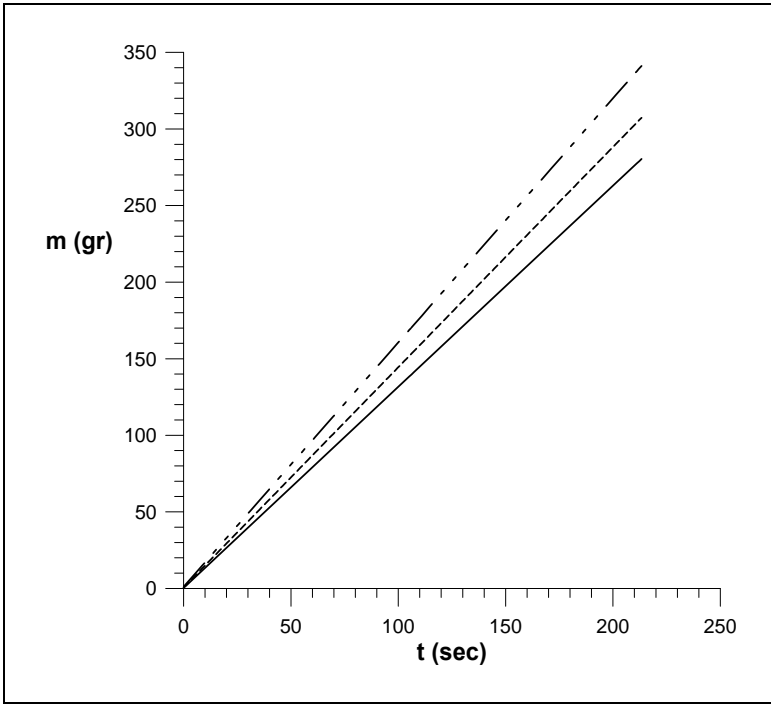
$f_\beta = 20.05 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 1.69 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 20.02 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 1.61 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 20.85 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 1.72 \text{ gr/sec}$

$f_\beta = 20.85 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\beta = 1.49 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 20.85 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 1.40 \text{ gr/sec}$



$$\bar{f} = 21.69 \pm 0.022 \text{ Hz}$$

$$\bar{\dot{m}} = 1.4 \pm 0.16 \text{ gr/sec}$$

$$f_{\alpha} = 21.72 \text{ Hz}$$

$$f_{\beta} = 21.66 \text{ Hz}$$

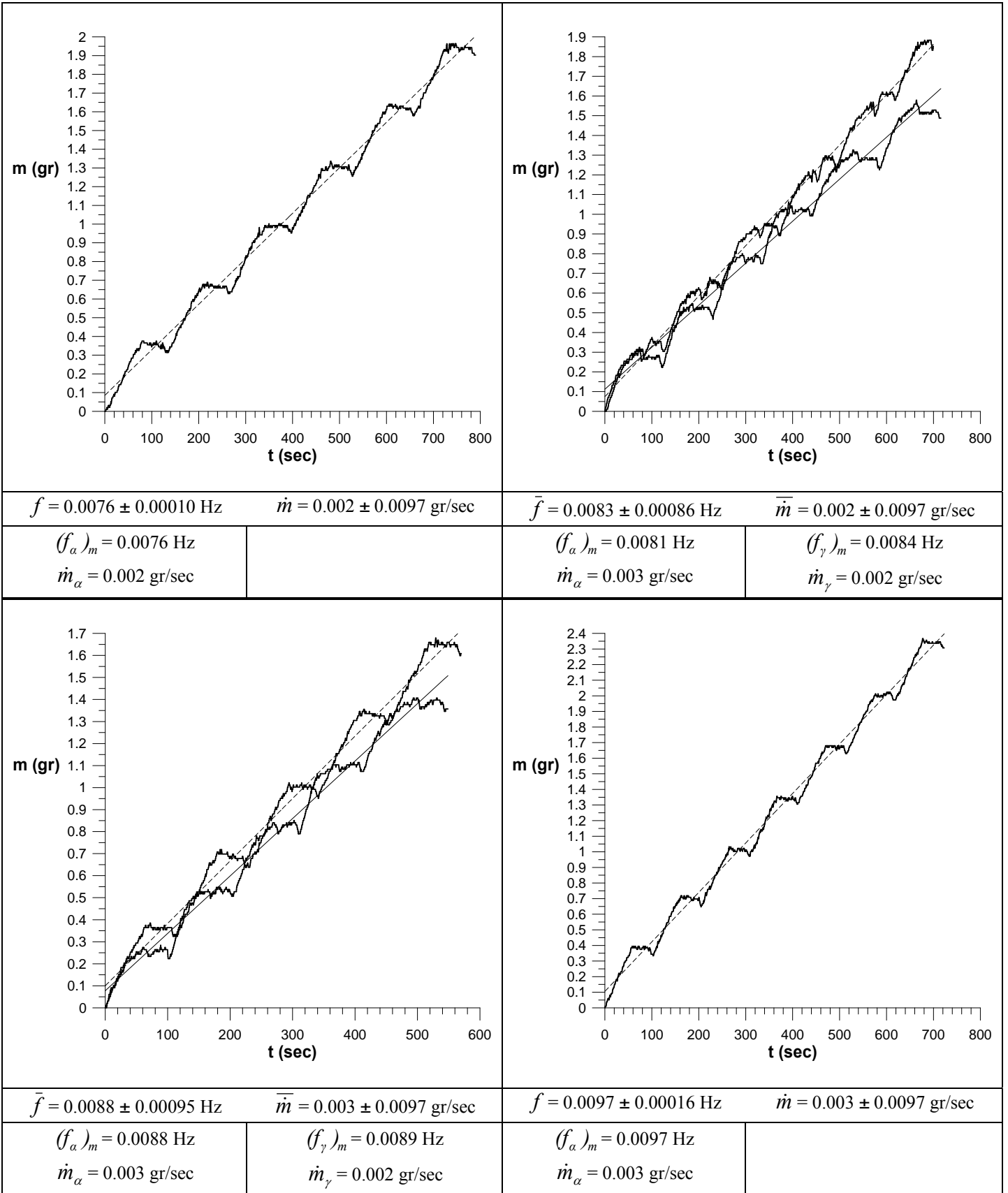
$$f_{\gamma} = 21.70 \text{ Hz}$$

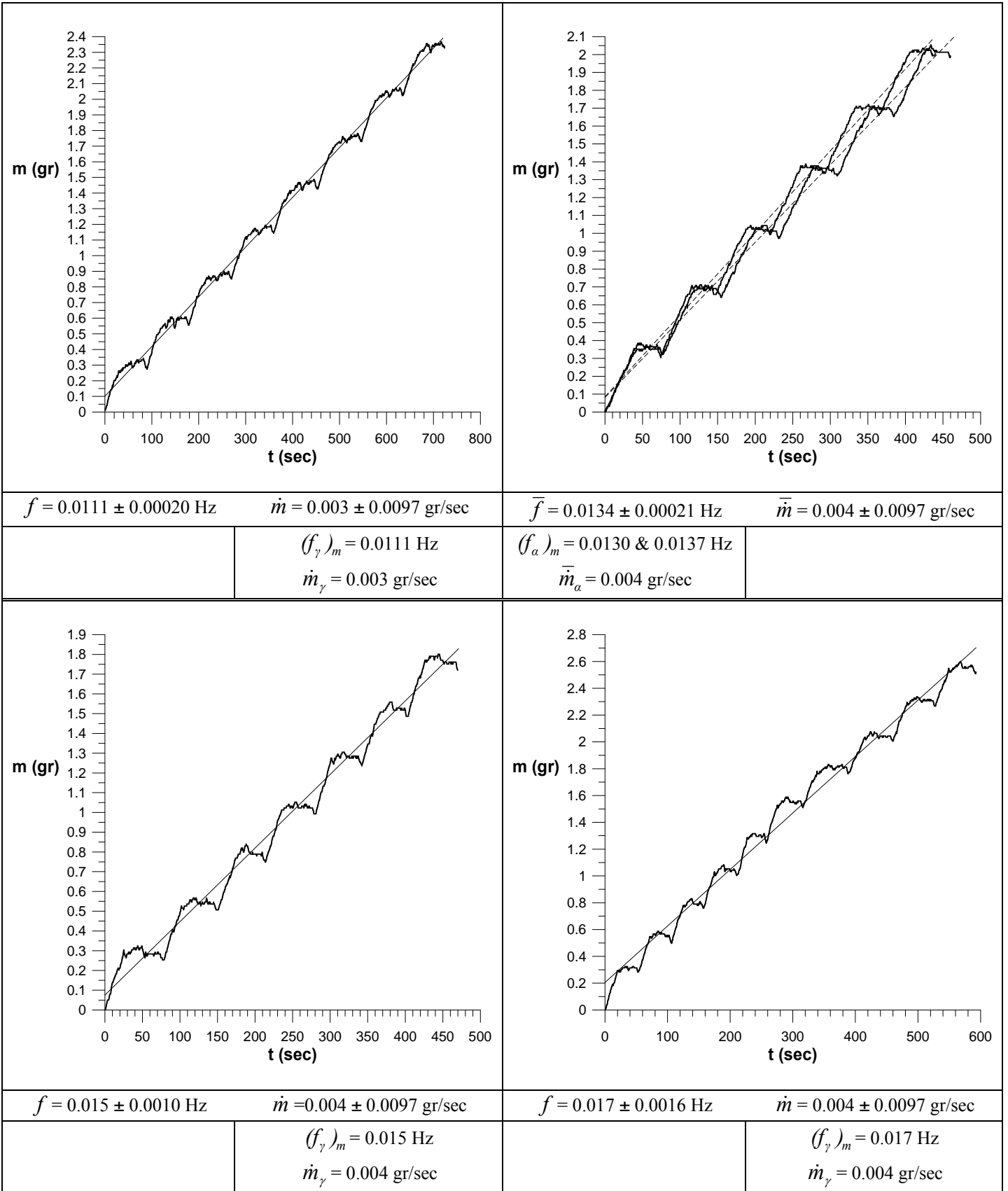
$$\dot{m}_{\alpha} = 1.44 \text{ gr/sec}$$

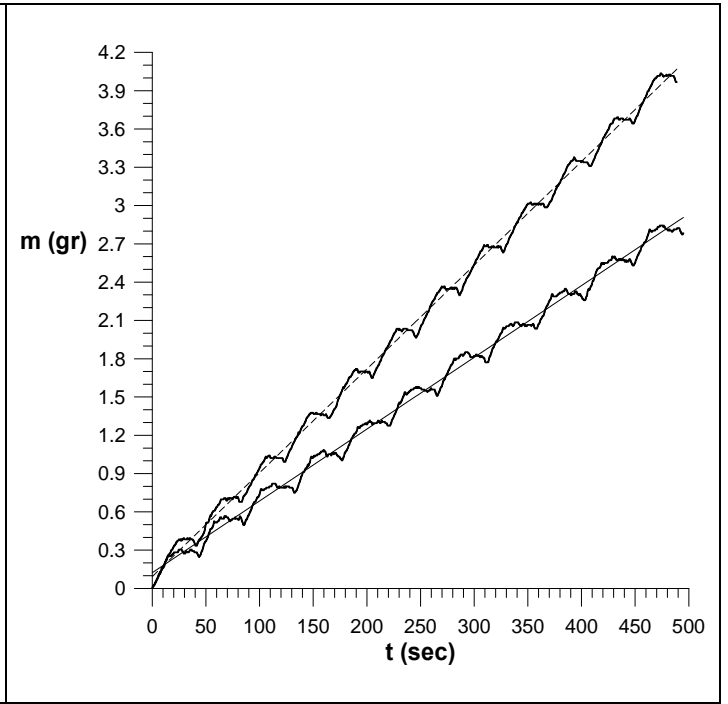
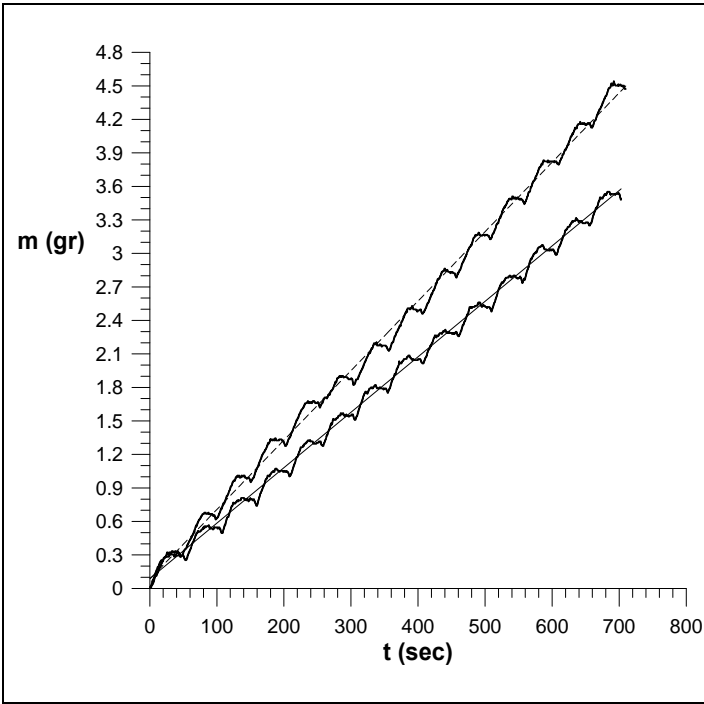
$$\dot{m}_{\beta} = 1.59 \text{ gr/sec}$$

$$\dot{m}_{\gamma} = 1.31 \text{ gr/sec}$$

II. Διαγράμματα μάζας εγχυόμενου νερού με το χρόνο για την αντλία ενός εμβόλου

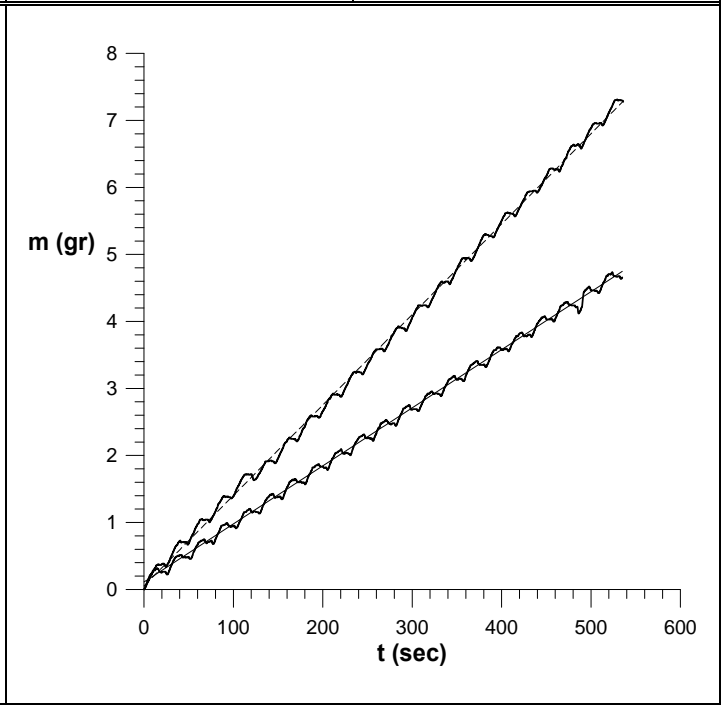
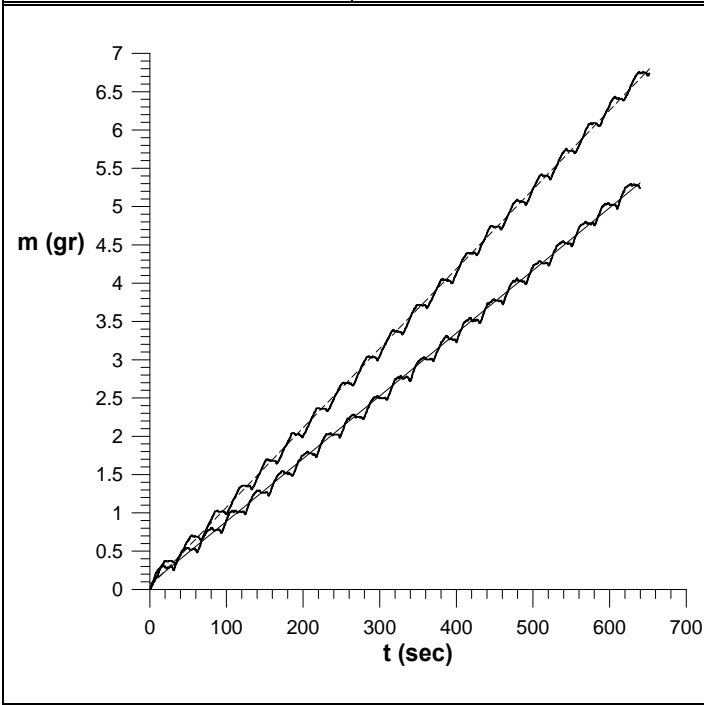






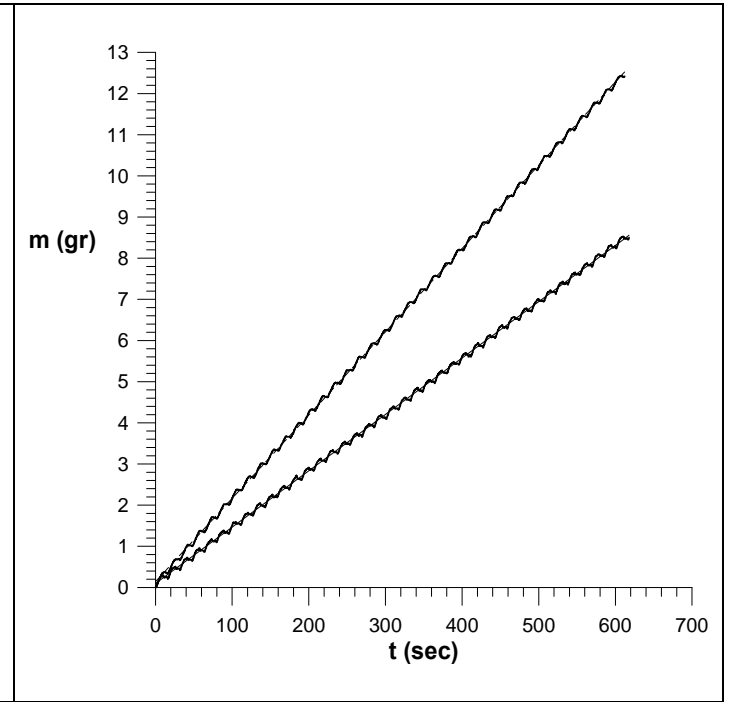
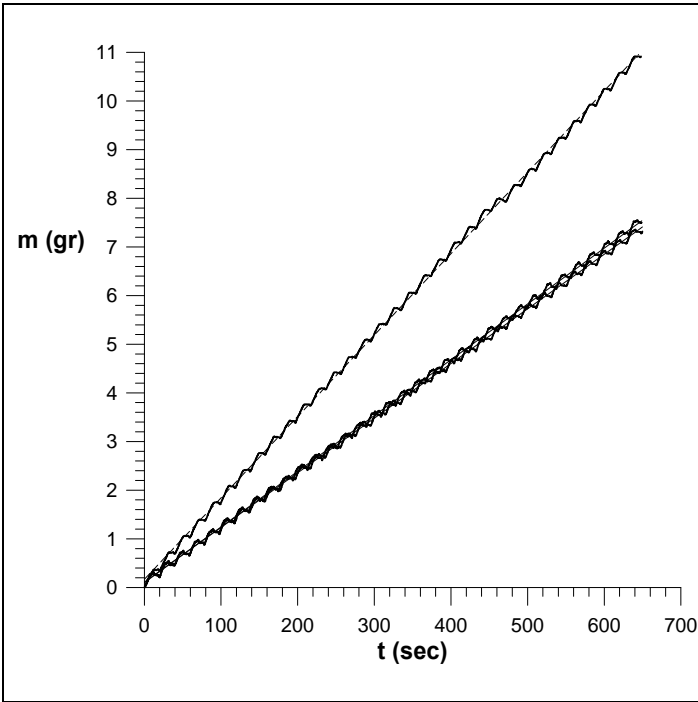
$\bar{f} = 0.0198 \pm 0.00059 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.006 \pm 0.0098 \text{ gr/sec}$	
$(f_\alpha)_m = 0.0198 \text{ Hz}$	$(f_\gamma)_m = 0.0199 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.006 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.005 \text{ gr/sec}$		

$\bar{f} = 0.0235 \pm 0.00070 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.01 \pm 0.010 \text{ gr/sec}$	
$(f_\alpha)_m = 0.0245 \text{ Hz}$	$(f_\gamma)_m = 0.0224 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.008 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.006 \text{ gr/sec}$		



$\bar{f} = 0.0319 \pm 0.00028 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.009 \pm 0.0099 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.0310 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.0328 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.010 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.008 \text{ gr/sec}$		

$\bar{f} = 0.0403 \pm 0.00025 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.01 \pm 0.011 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.0410 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.0396 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.013 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.009 \text{ gr/sec}$		



$\bar{f} = 0.0510 \pm 0.00040$  Hz       $\bar{\dot{m}} = 0.01 \pm 0.011$  gr/sec

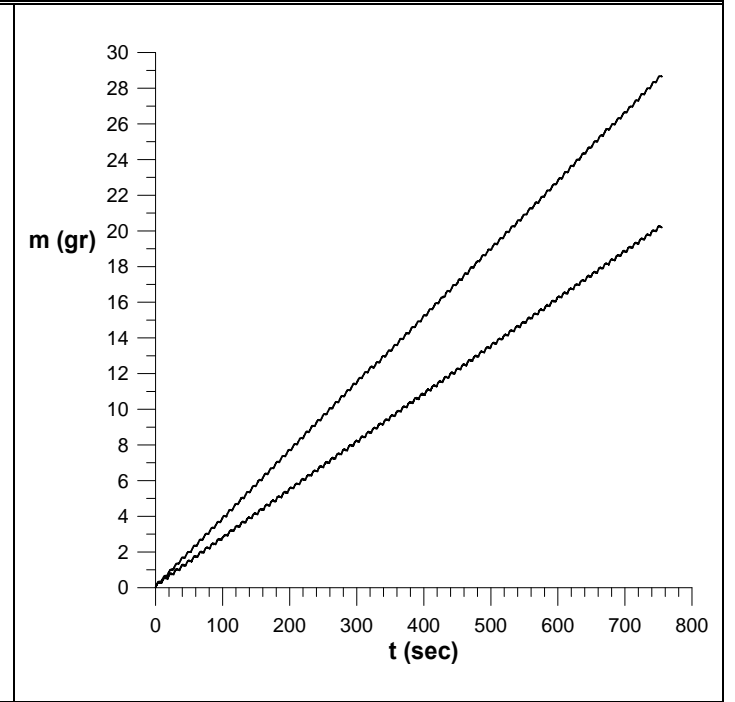
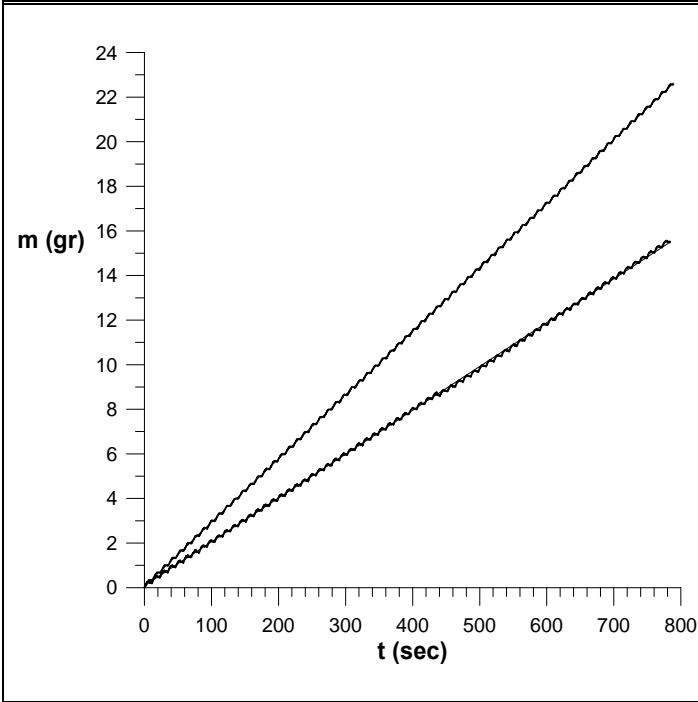
$\bar{f} = 0.0629 \pm 0.00051$  Hz       $\bar{\dot{m}} = 0.02 \pm 0.012$  gr/sec

$f_\alpha = 0.0509$  Hz  
 $\dot{m}_\alpha = 0.017$  gr/sec

$f_\gamma = 0.0516$  Hz  
 $\dot{m}_\gamma = 0.011$  gr/sec

$f_\alpha = 0.0621$  Hz  
 $\dot{m}_\alpha = 0.020$  gr/sec

$f_\gamma = 0.0636$  Hz  
 $\dot{m}_\gamma = 0.014$  gr/sec



$\bar{f} = 0.0864 \pm 0.00030$  Hz       $\bar{\dot{m}} = 0.02 \pm 0.013$  gr/sec

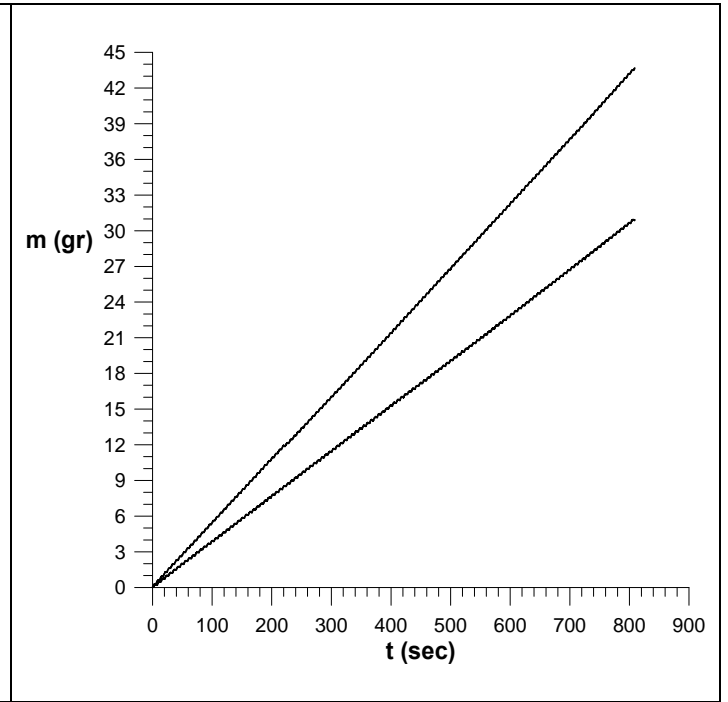
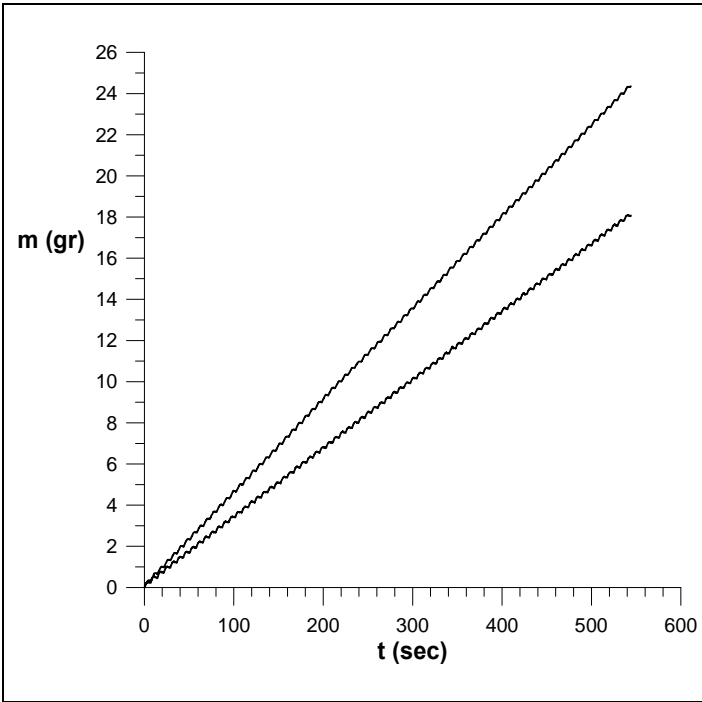
$\bar{f} = 0.1127 \pm 0.00046$  Hz       $\bar{\dot{m}} = 0.03 \pm 0.015$  gr/sec

$f_\alpha = 0.0862$  Hz  
 $\dot{m}_\alpha = 0.029$  gr/sec

$f_\gamma = 0.0866$  Hz  
 $\dot{m}_\gamma = 0.020$  gr/sec

$f_\alpha = 0.1133$  Hz  
 $\dot{m}_\alpha = 0.038$  gr/sec

$f_\gamma = 0.1121$  Hz  
 $\dot{m}_\gamma = 0.027$  gr/sec



$\bar{f} = 0.1364 \pm 0.00073 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.04 \pm 0.015 \text{ gr/sec}$

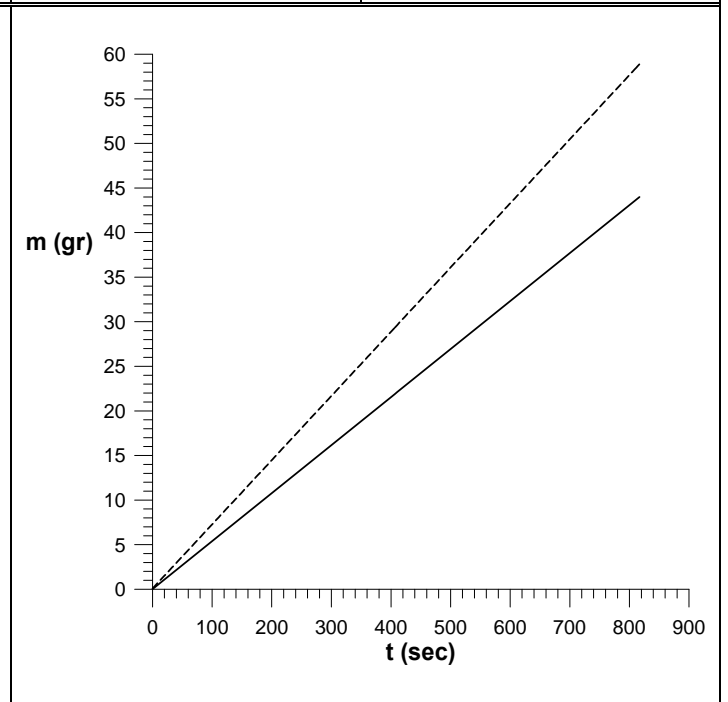
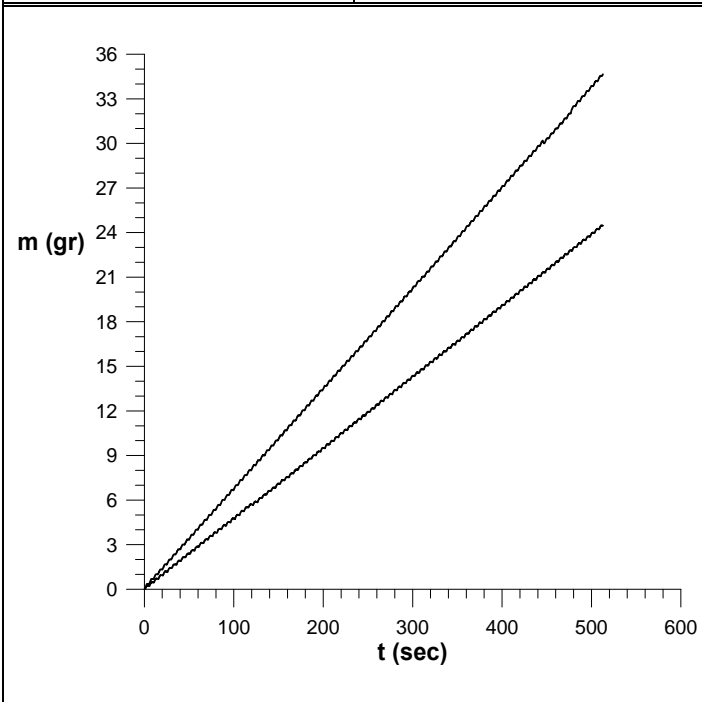
$\bar{f} = 0.1588 \pm 0.00085 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.05 \pm 0.018 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.1350 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.045 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.1377 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.033 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.1600 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.05 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.1575 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.04 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 0.199 \pm 0.0018 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.06 \pm 0.022 \text{ gr/sec}$

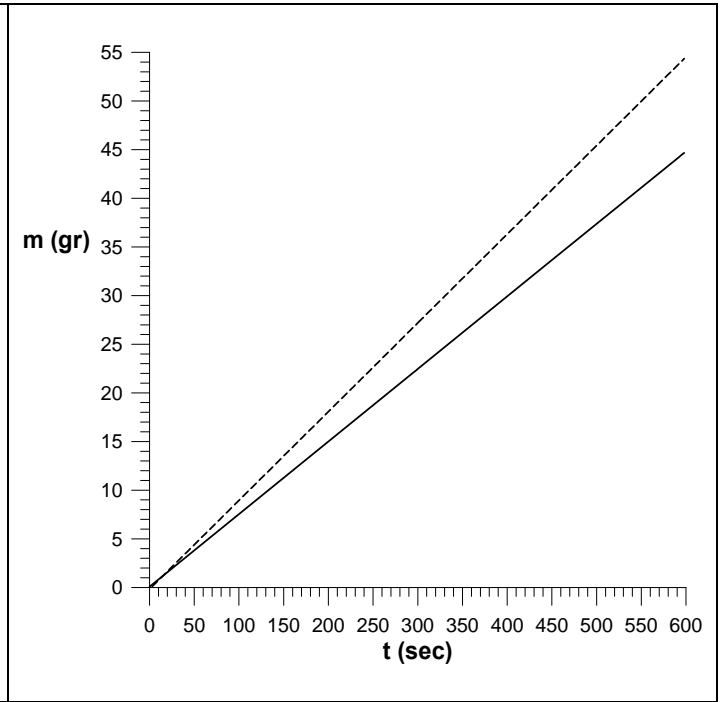
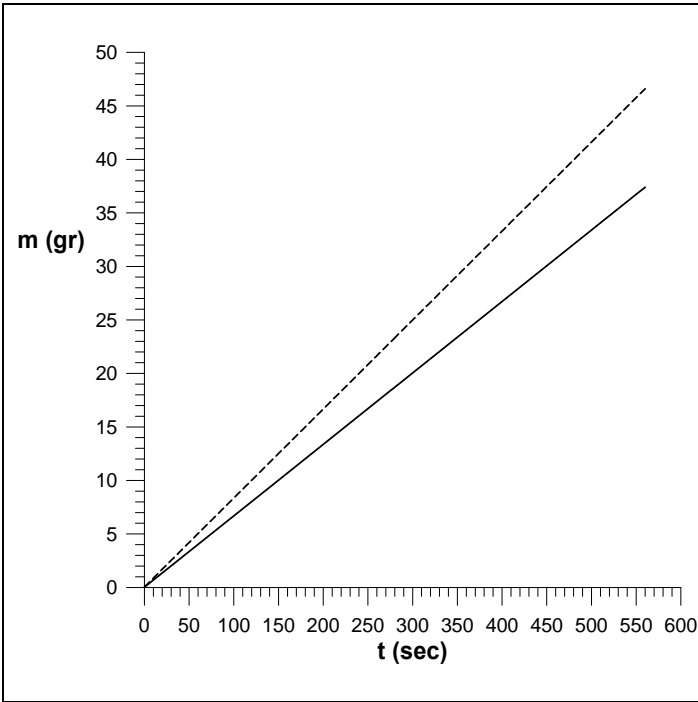
$\bar{f} = 0.222 \pm 0.0018 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.06 \pm 0.021 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.200 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.07 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.198 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.048 \text{ gr/sec}$

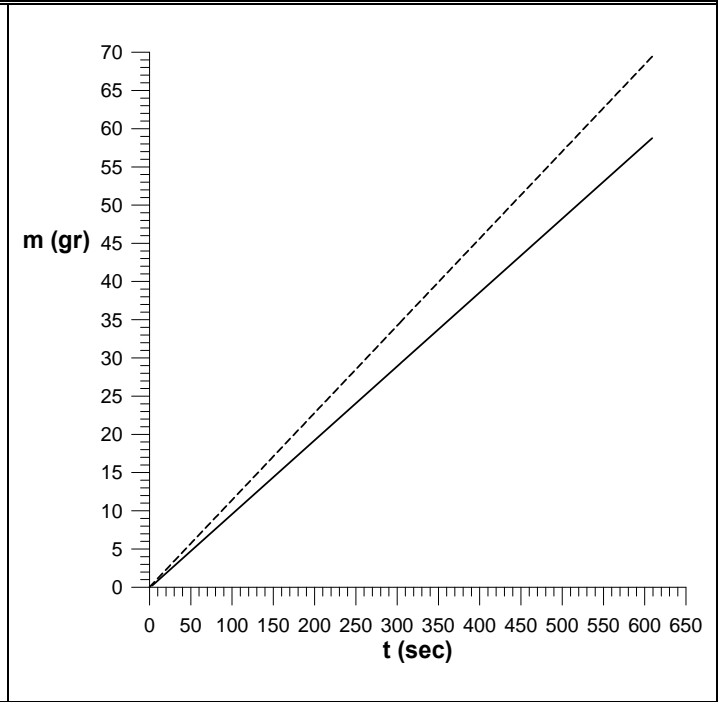
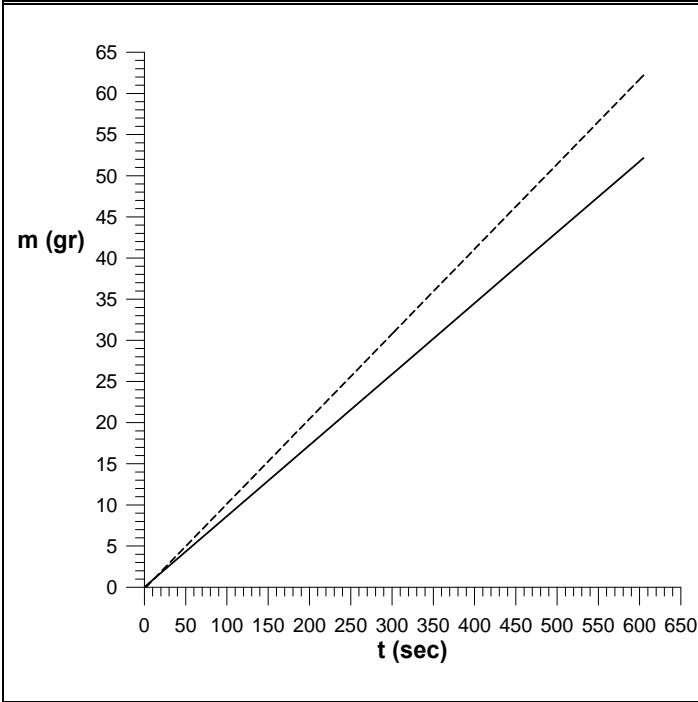
$f_\alpha = 0.223 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.08 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.221 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.05 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 0.253 \pm 0.0018 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.07 \pm 0.019 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.253 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.253 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.08 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.067 \text{ gr/sec}$		

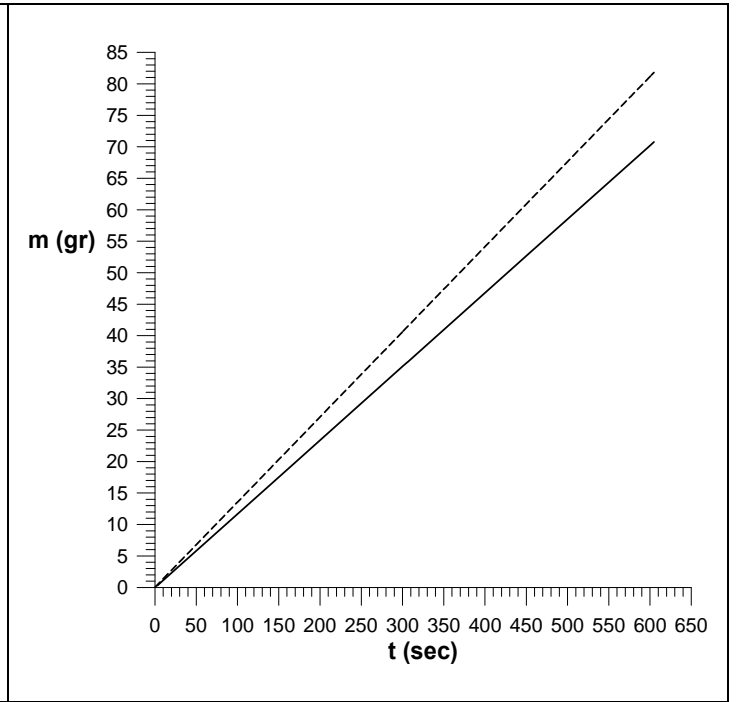
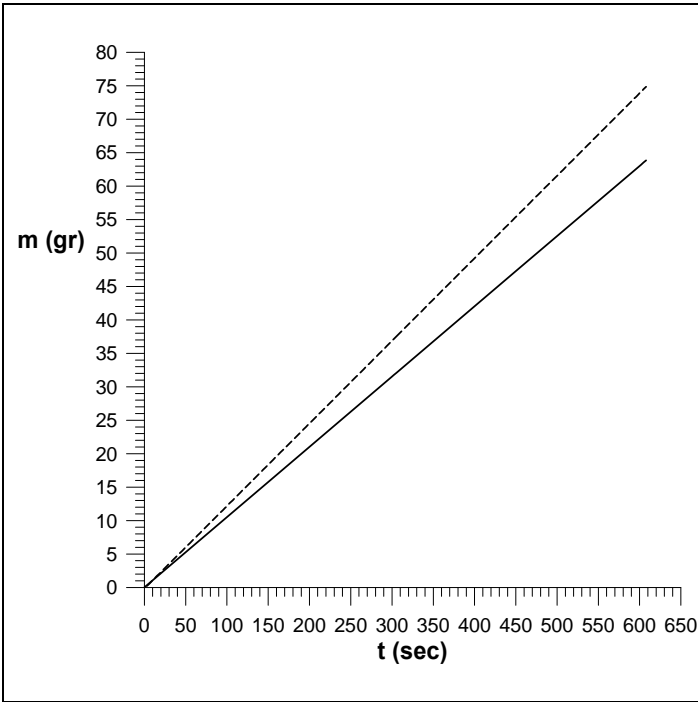
$\bar{f} = 0.279 \pm 0.0018 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.08 \pm 0.019 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.279 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.278 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.09 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.07 \text{ gr/sec}$		



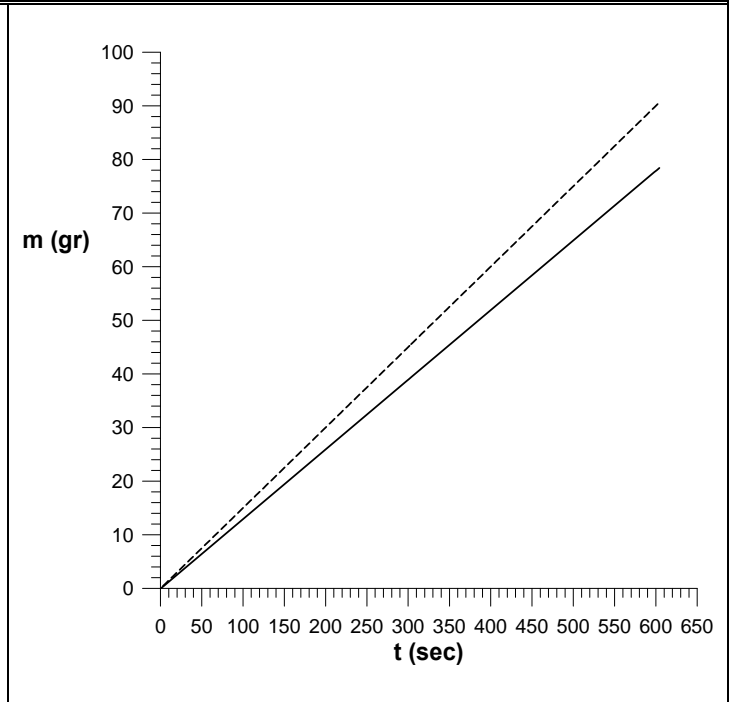
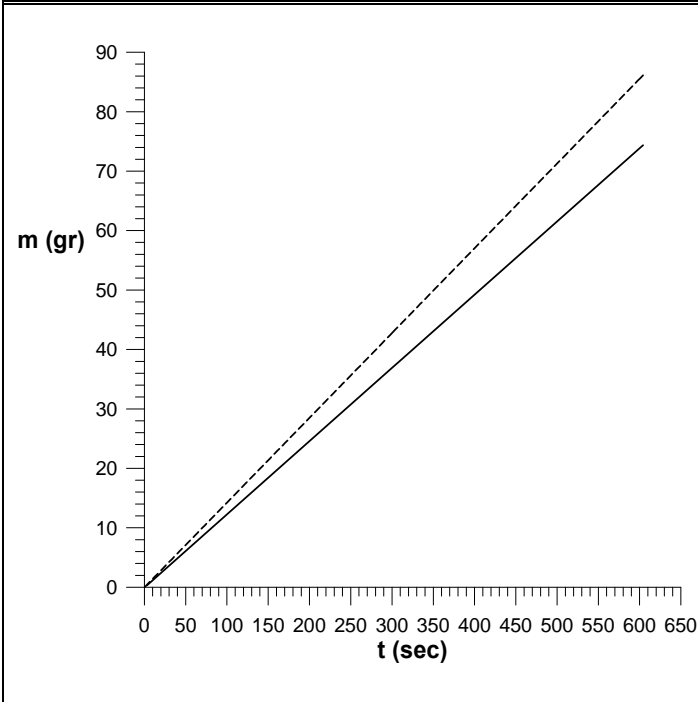
$\bar{f} = 0.316 \pm 0.0020 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.09 \pm 0.019 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.316 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.316 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.10 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.09 \text{ gr/sec}$		

$\bar{f} = 0.350 \pm 0.0020 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.11 \pm 0.020 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.350 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.350 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.11 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.10 \text{ gr/sec}$		

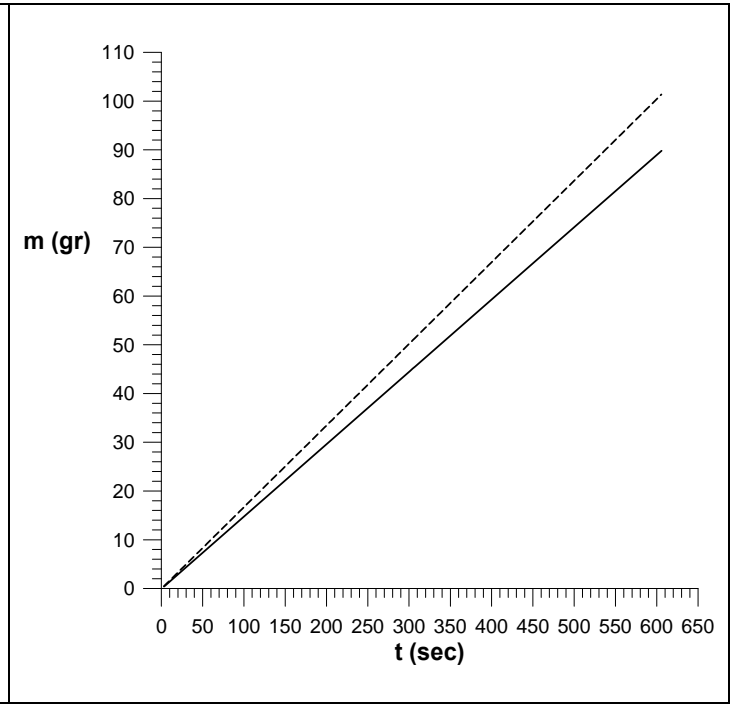
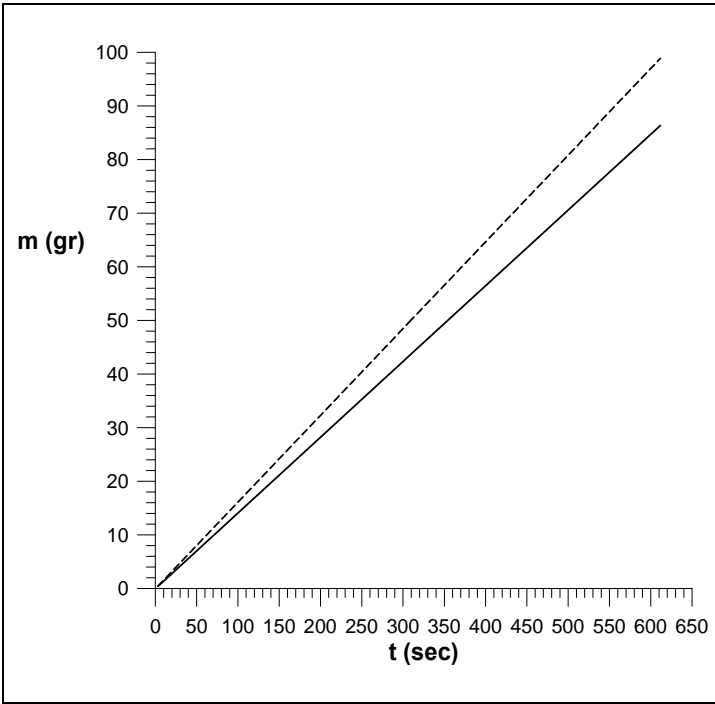




$\bar{f} = 0.377 \pm 0.0018 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.11 \pm 0.021 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.378 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.376 \text{ Hz}$	$f_\alpha = 0.413 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.414 \text{ Hz}$
$\dot{m}_\alpha = 0.12 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.10 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\alpha = 0.14 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.12 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 0.436 \pm 0.0018 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 0.13 \pm 0.022 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.436 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.436 \text{ Hz}$	$f_\alpha = 0.458 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.458 \text{ Hz}$
$\dot{m}_\alpha = 0.14 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.12 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\alpha = 0.15 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.13 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 0.493 \pm 0.0018 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.15 \pm 0.023 \text{ gr/sec}$

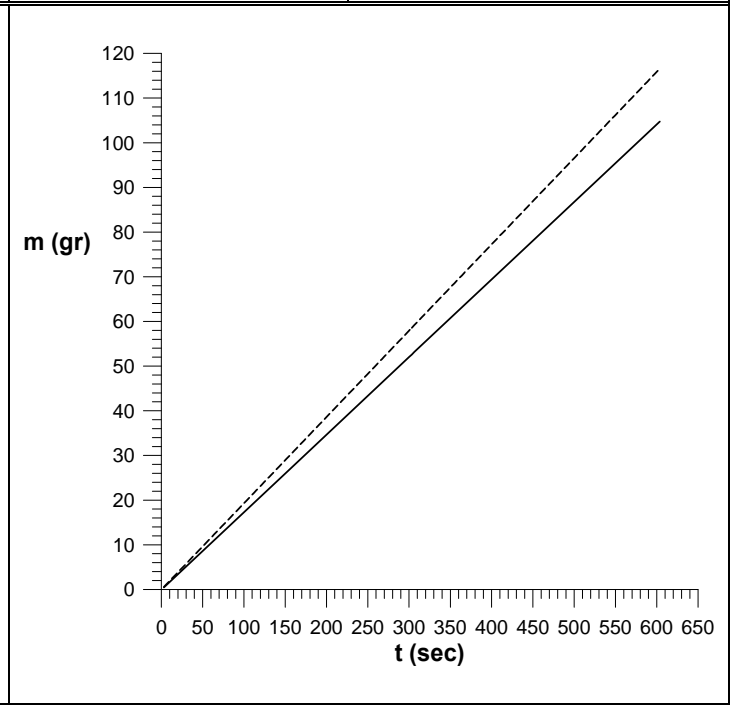
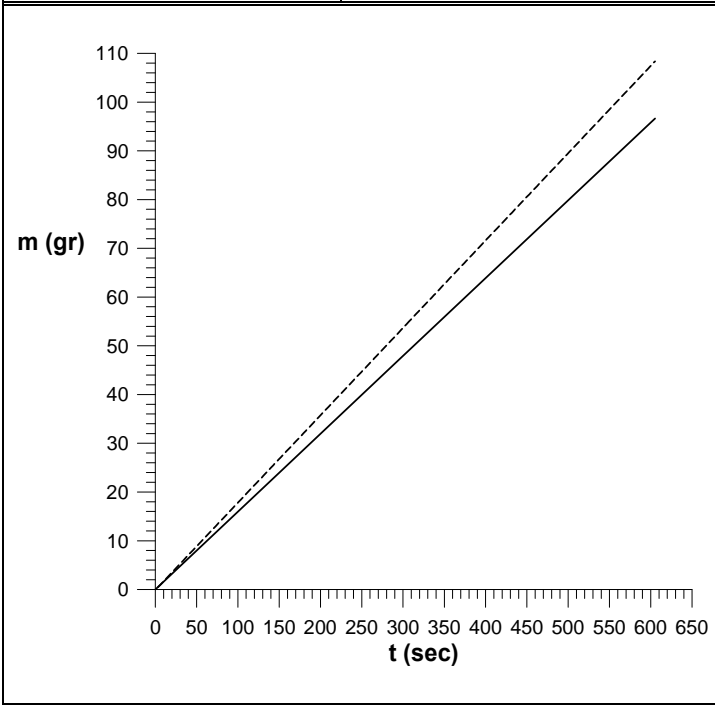
$\bar{f} = 0.512 \pm 0.0019 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.16 \pm 0.022 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.494 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.16 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.492 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.14 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.513 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.17 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.512 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.15 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 0.549 \pm 0.0018 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.17 \pm 0.022 \text{ gr/sec}$

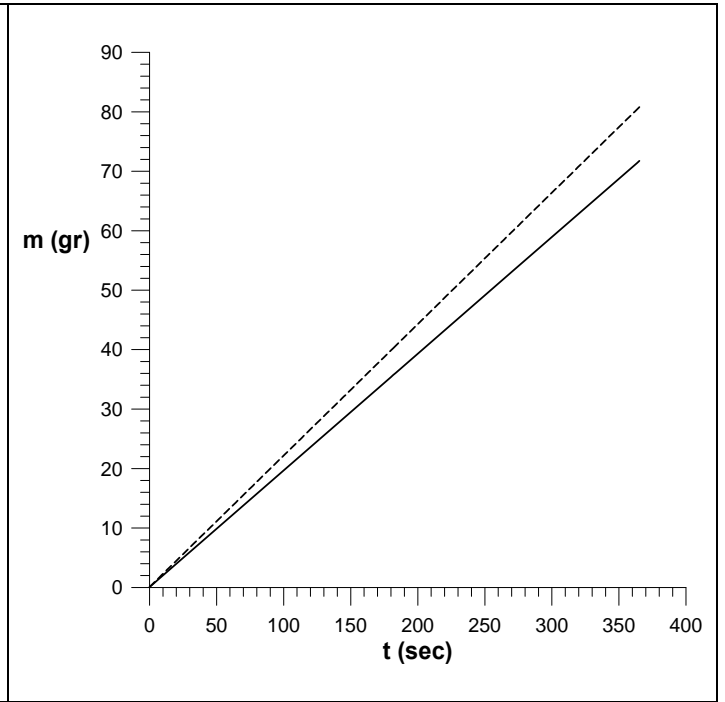
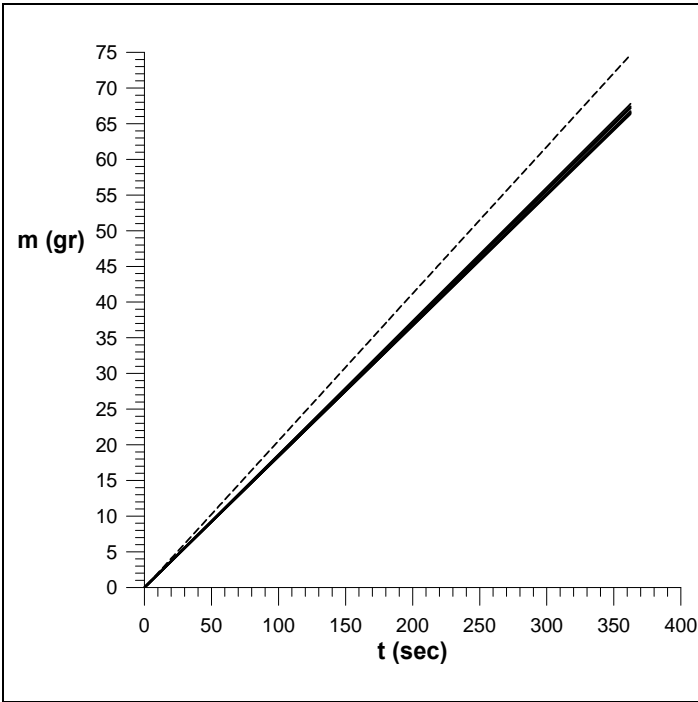
$\bar{f} = 0.591 \pm 0.0019 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.18 \pm 0.022 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.549 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.18 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.549 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.16 \text{ gr/sec}$

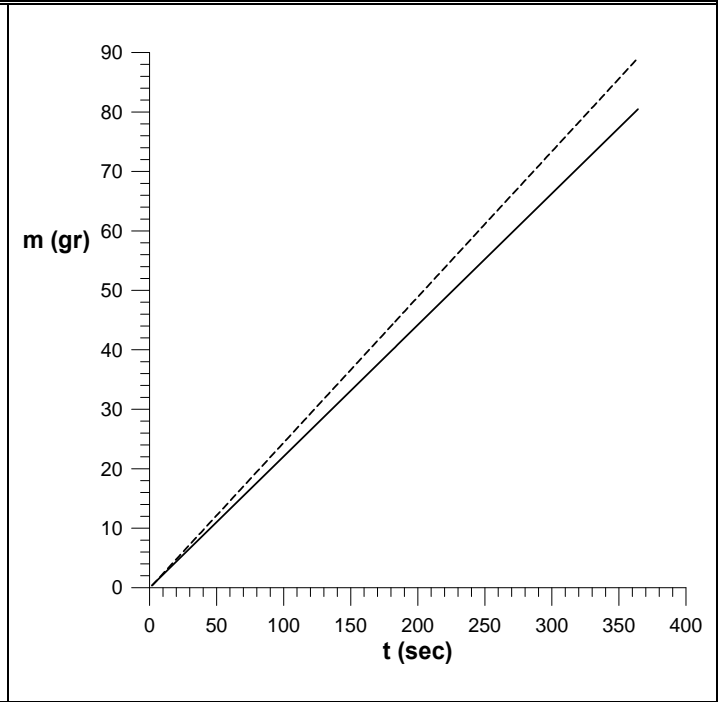
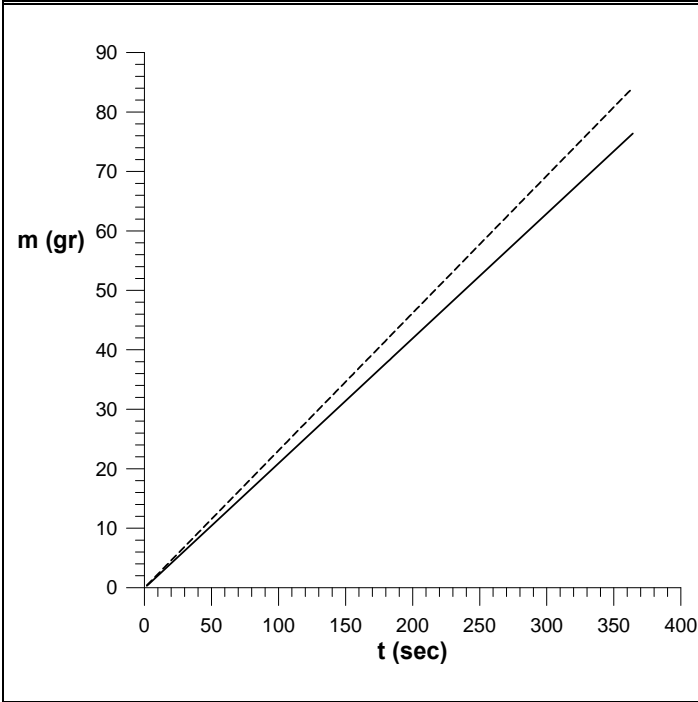
$f_\alpha = 0.591 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.19 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.592 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.17 \text{ gr/sec}$



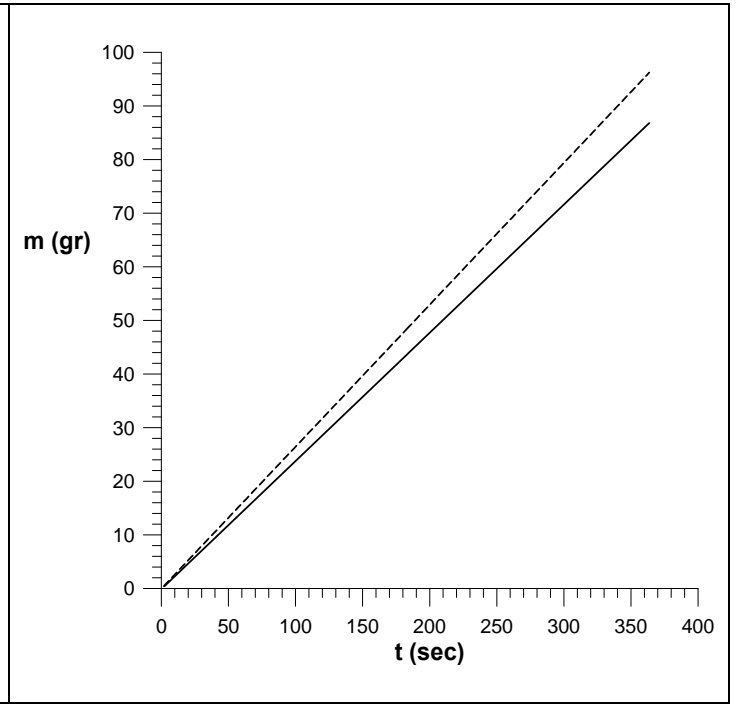
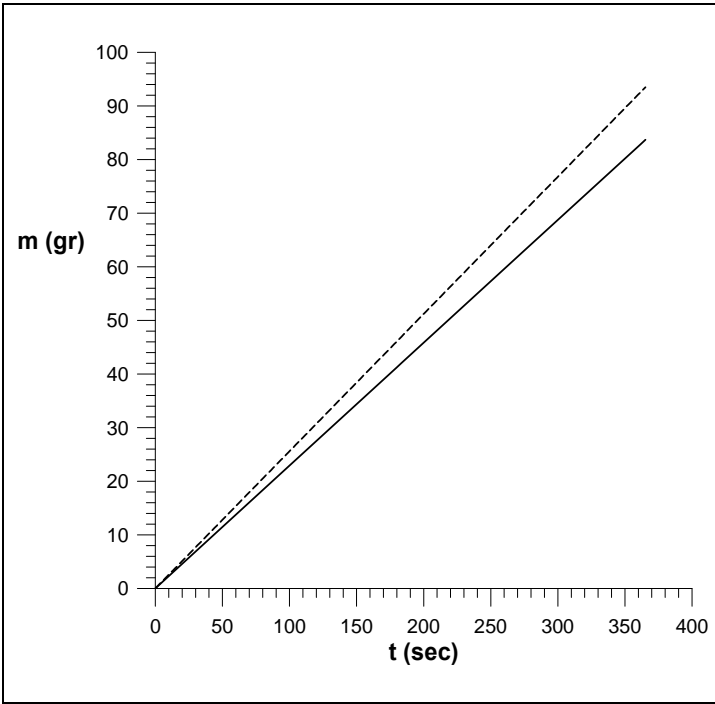
$\bar{f} = 0.633 \pm 0.0022 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.20 \pm 0.024 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.633 \text{ Hz}$	$\bar{f}_\gamma = 0.632 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.21 \text{ gr/sec}$	$\bar{\dot{m}}_\gamma = 0.18 \text{ gr/sec}$		

$\bar{f} = 0.672 \pm 0.0019 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.21 \pm 0.026 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.673 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.672 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.22 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.20 \text{ gr/sec}$		



$\bar{f} = 0.714 \pm 0.0024 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.22 \pm 0.023 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.713 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.715 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.23 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.21 \text{ gr/sec}$		

$\bar{f} = 0.750 \pm 0.0024 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 0.23 \pm 0.026 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 0.749 \text{ Hz}$	$f_\gamma = 0.750 \text{ Hz}$		
$\dot{m}_\alpha = 0.25 \text{ gr/sec}$	$\dot{m}_\gamma = 0.22 \text{ gr/sec}$		



$\bar{f} = 0.775 \pm 0.0020 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.24 \pm 0.028 \text{ gr/sec}$

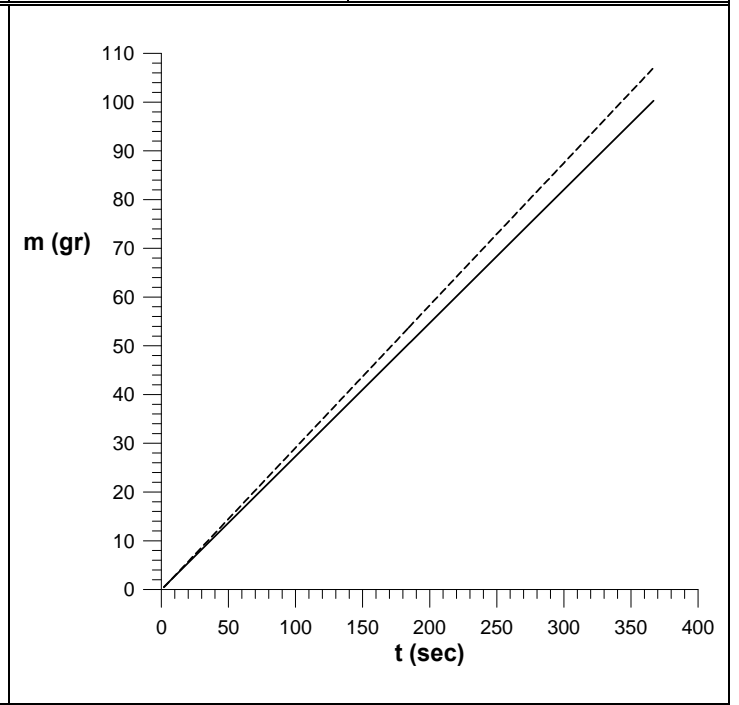
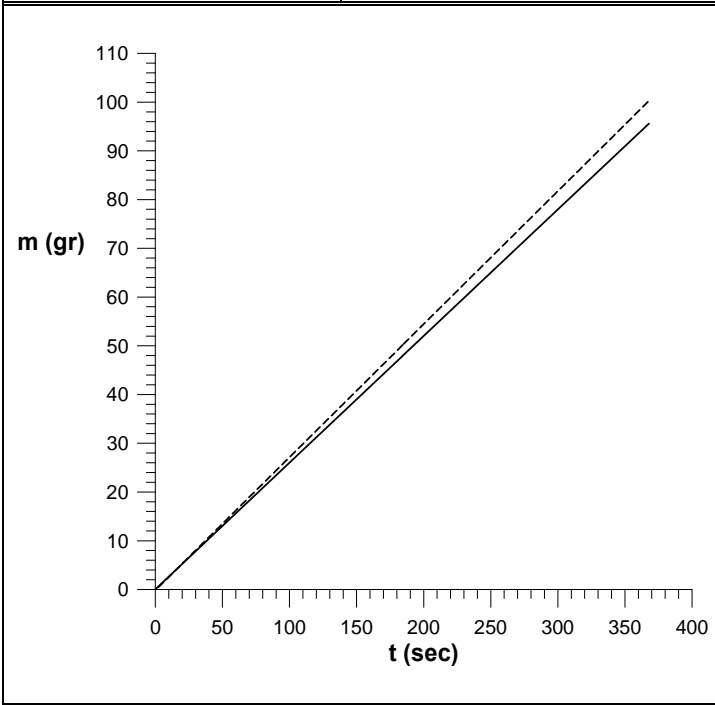
$\bar{f} = 0.808 \pm 0.0021 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.25 \pm 0.027 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.775 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.26 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.775 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.23 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.808 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.26 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.809 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.24 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 0.851 \pm 0.0027 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.27 \pm 0.017 \text{ gr/sec}$

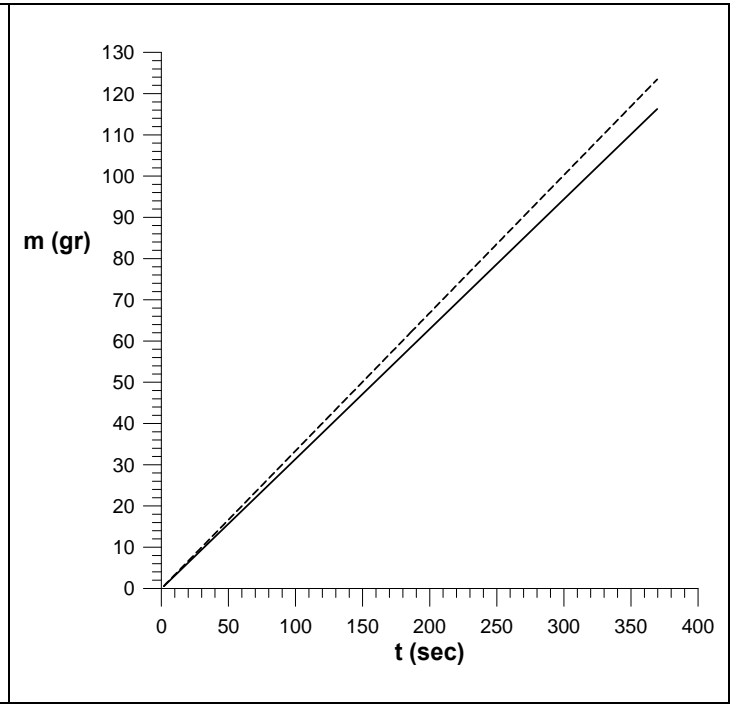
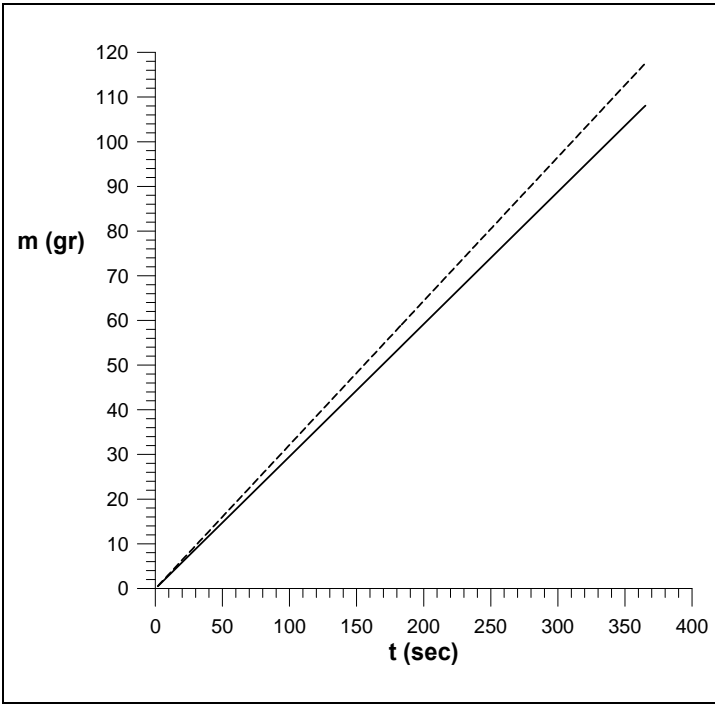
$\bar{f} = 0.898 \pm 0.0028 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.28 \pm 0.021 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.849 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.27 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.853 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.26 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.898 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.29 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.897 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.27 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 0.960 \pm 0.0026 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.31 \pm 0.028 \text{ gr/sec}$

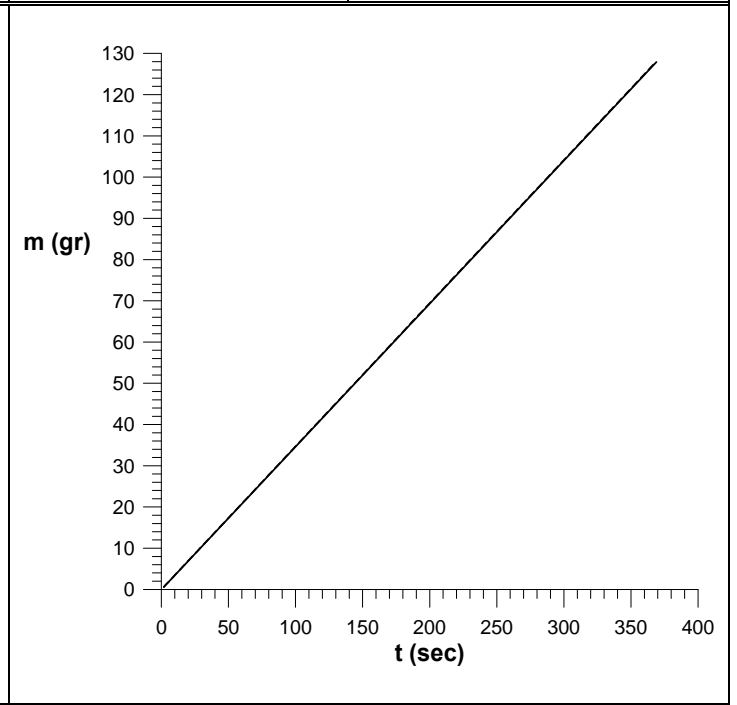
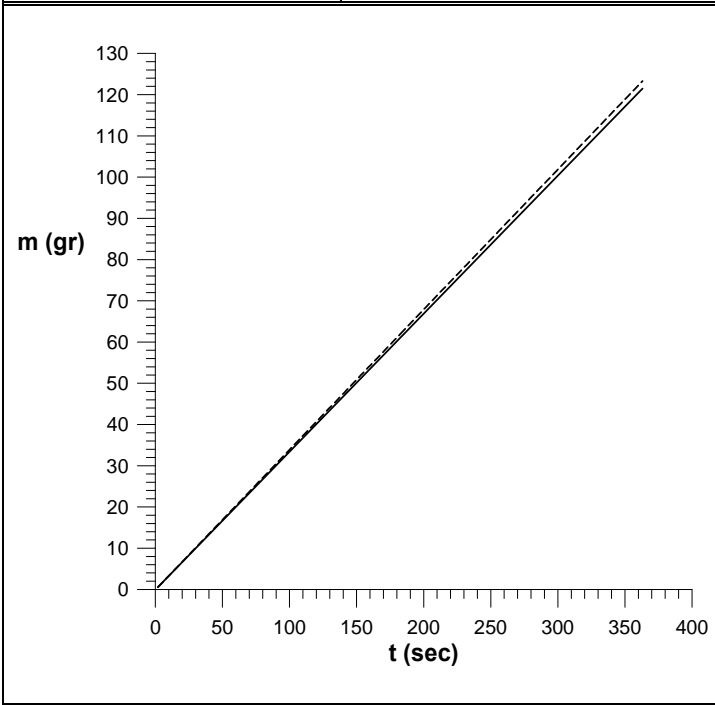
$\bar{f} = 1.005 \pm 0.0022 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.32 \pm 0.022 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 0.961 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.32 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 0.960 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.30 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 1.004 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.33 \text{ gr/sec}$

$f_\gamma = 1.006 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.31 \text{ gr/sec}$



$\bar{f} = 1.057 \pm 0.0021 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.34 \pm 0.012 \text{ gr/sec}$

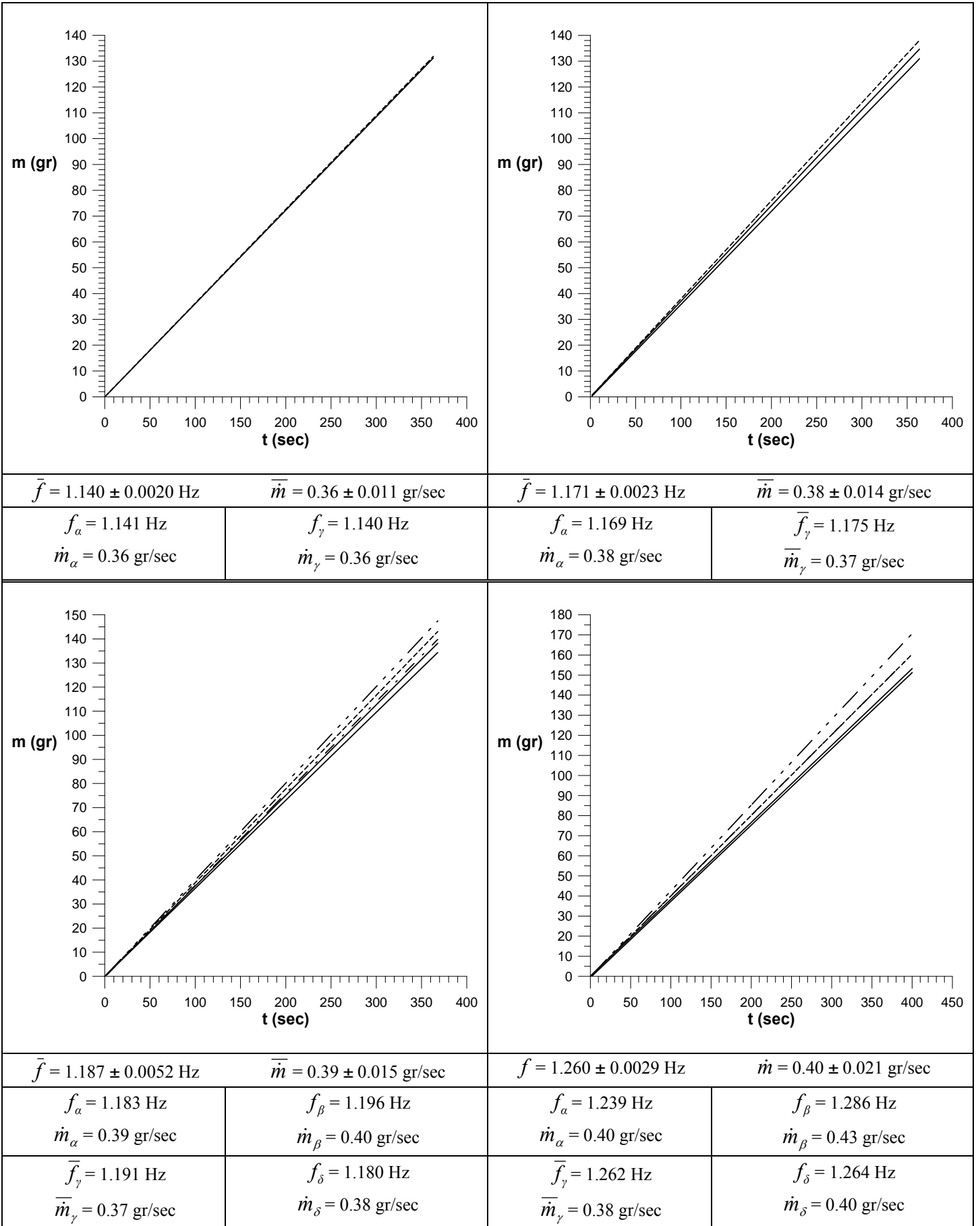
$\bar{f} = 1.096 \pm 0.0020 \text{ Hz}$        $\bar{\dot{m}} = 0.35 \pm 0.011 \text{ gr/sec}$

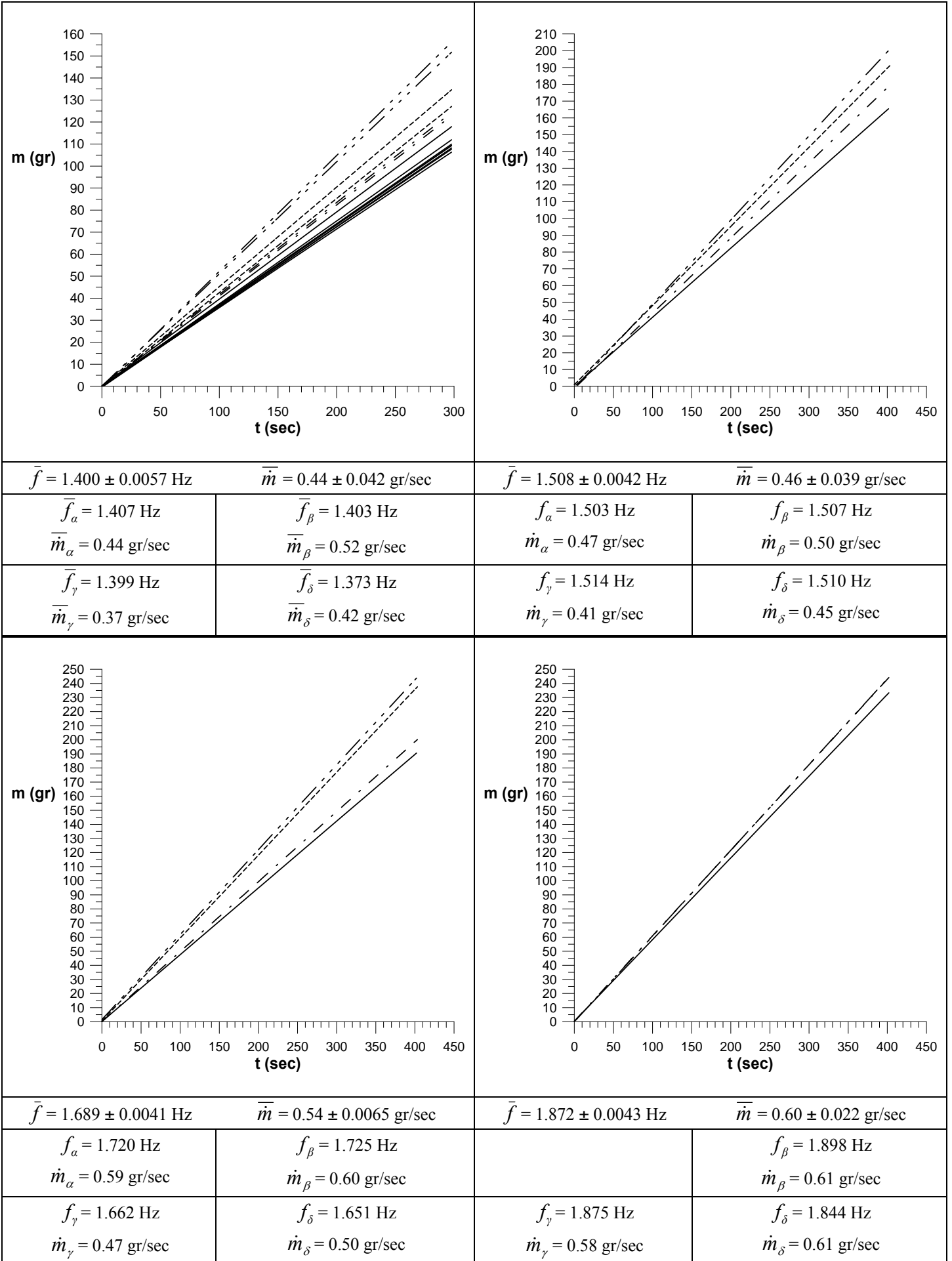
$f_\alpha = 1.056 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.34 \text{ gr/sec}$

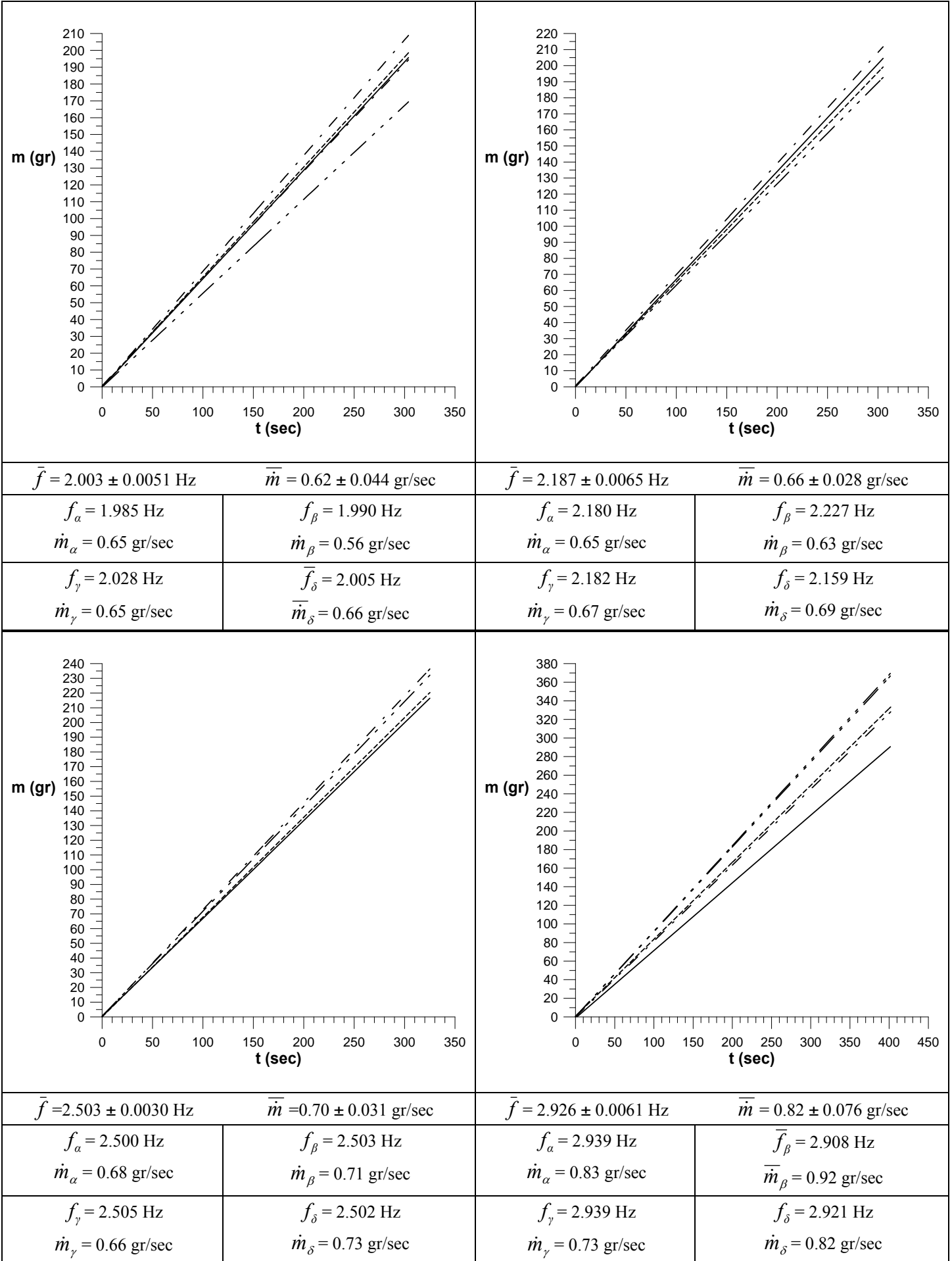
$f_\gamma = 1.058 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.33 \text{ gr/sec}$

$f_\alpha = 1.098 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\alpha = 0.35 \text{ gr/sec}$

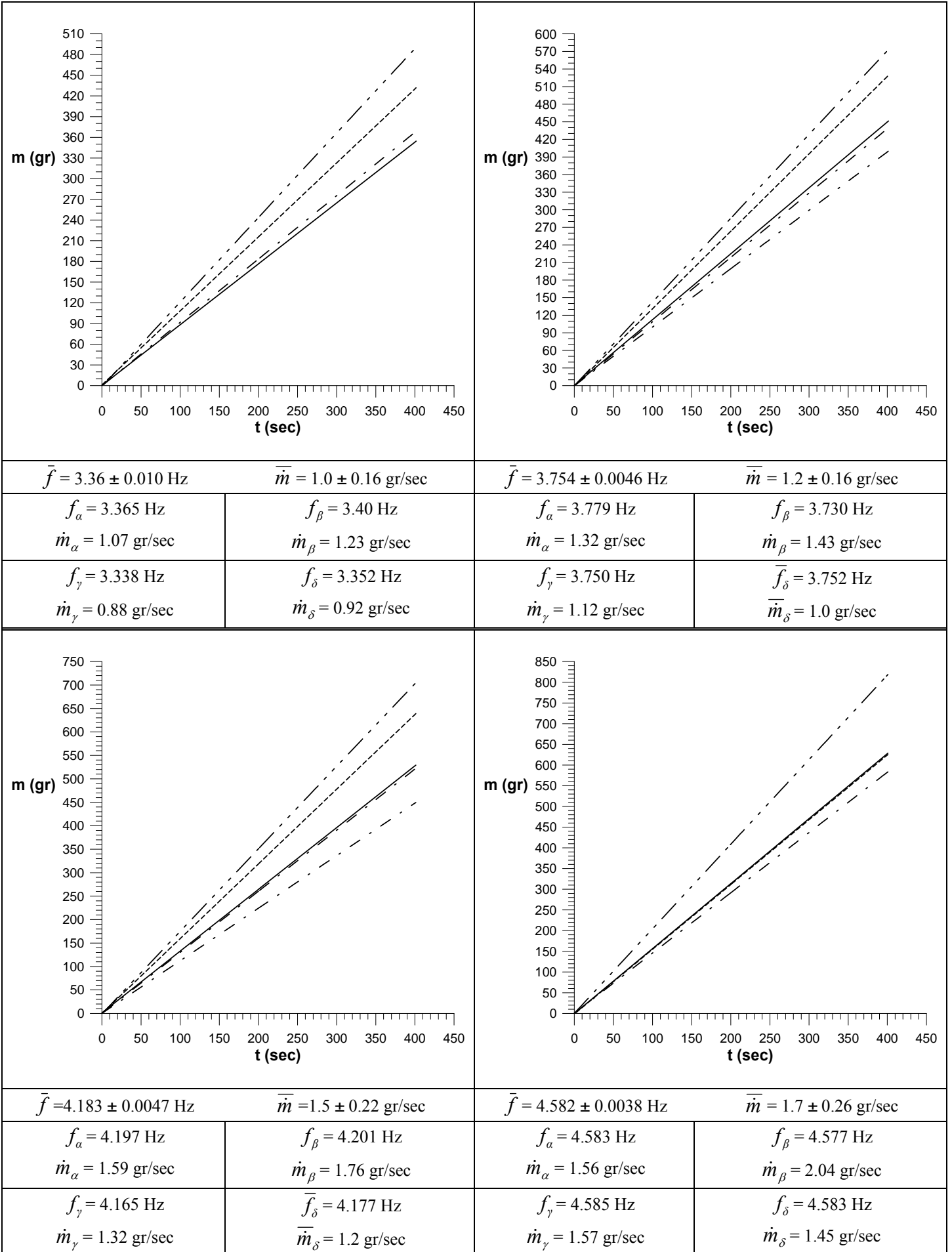
$f_\gamma = 1.094 \text{ Hz}$   
 $\dot{m}_\gamma = 0.35 \text{ gr/sec}$

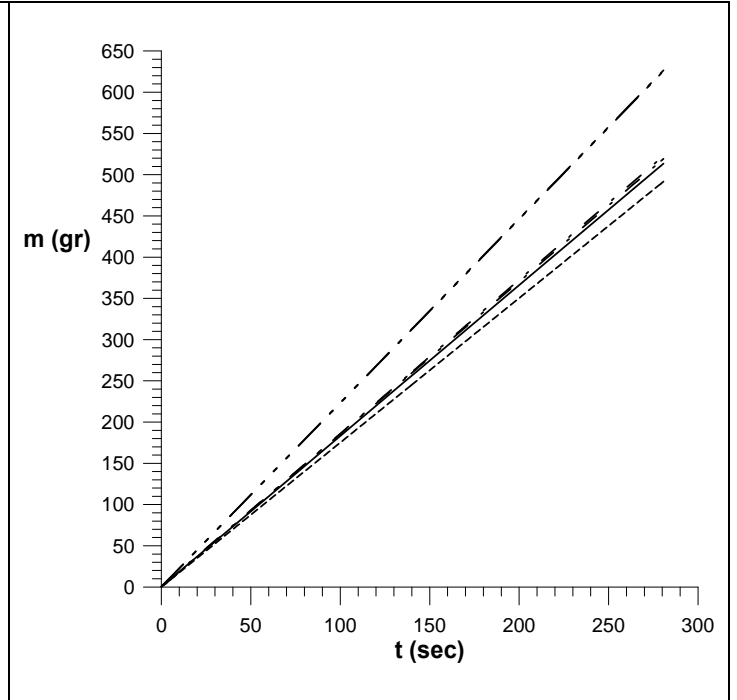
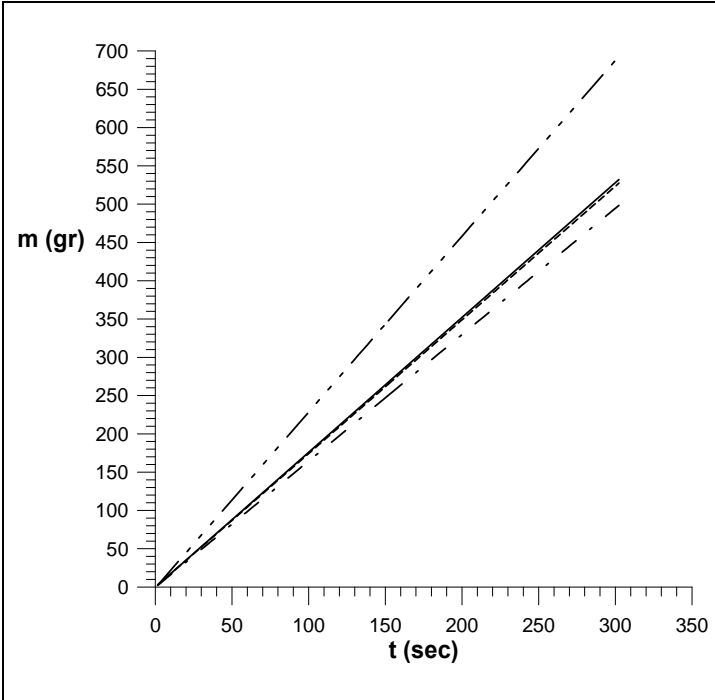






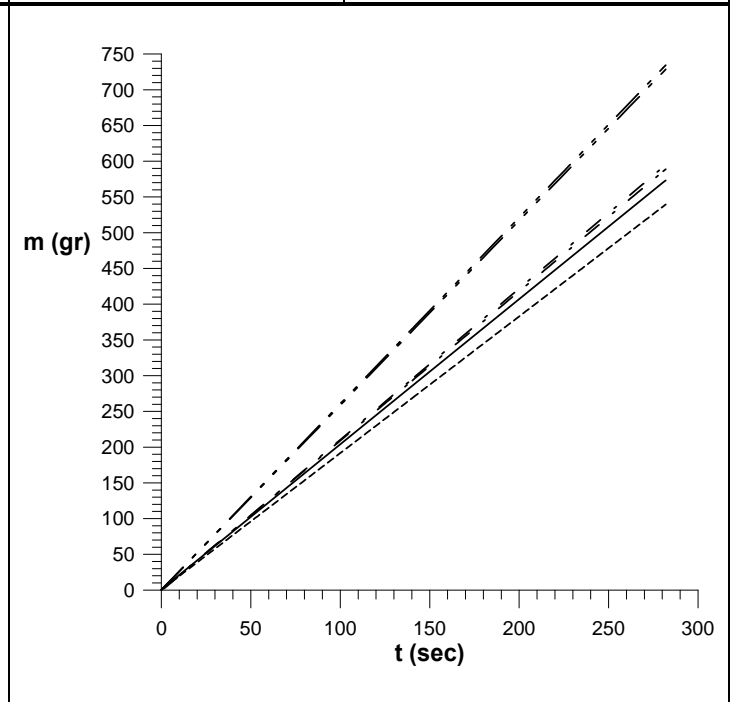
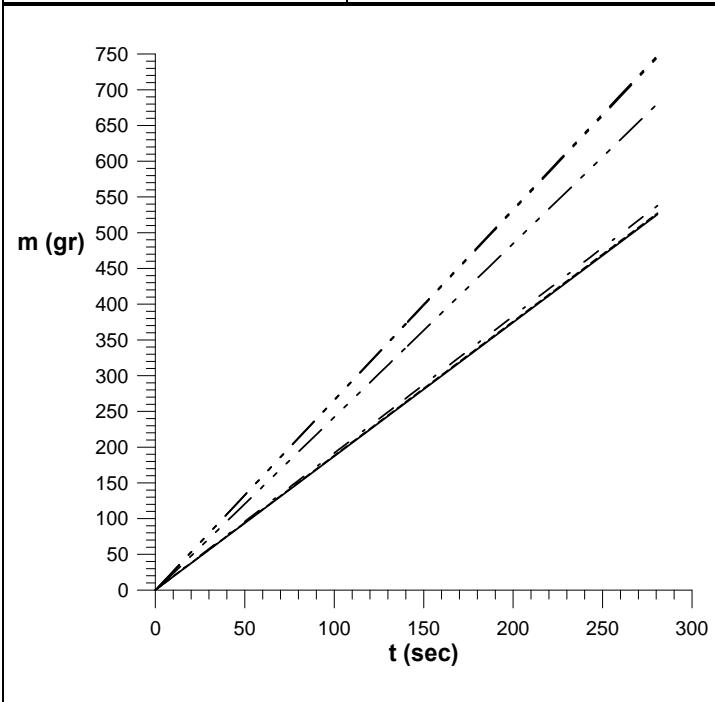






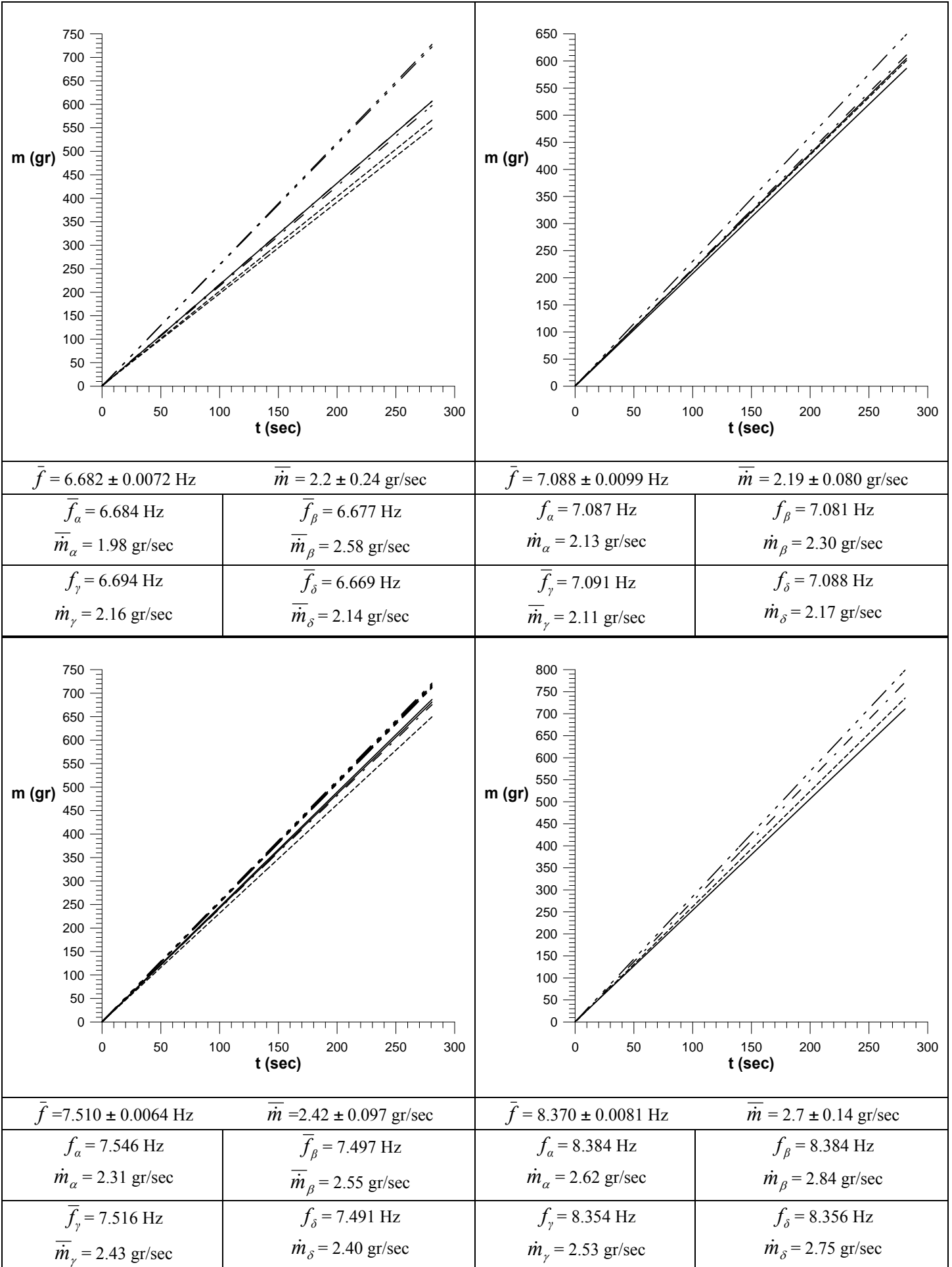
$\bar{f} = 5.024 \pm 0.0050 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 1.9 \pm 0.29 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 5.057 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\alpha = 1.75 \text{ gr/sec}$	$f_\beta = 5.019 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\beta = 2.30 \text{ gr/sec}$		
$f_\gamma = 5.007 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\gamma = 1.76 \text{ gr/sec}$	$f_\delta = 5.012 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\delta = 1.65 \text{ gr/sec}$		

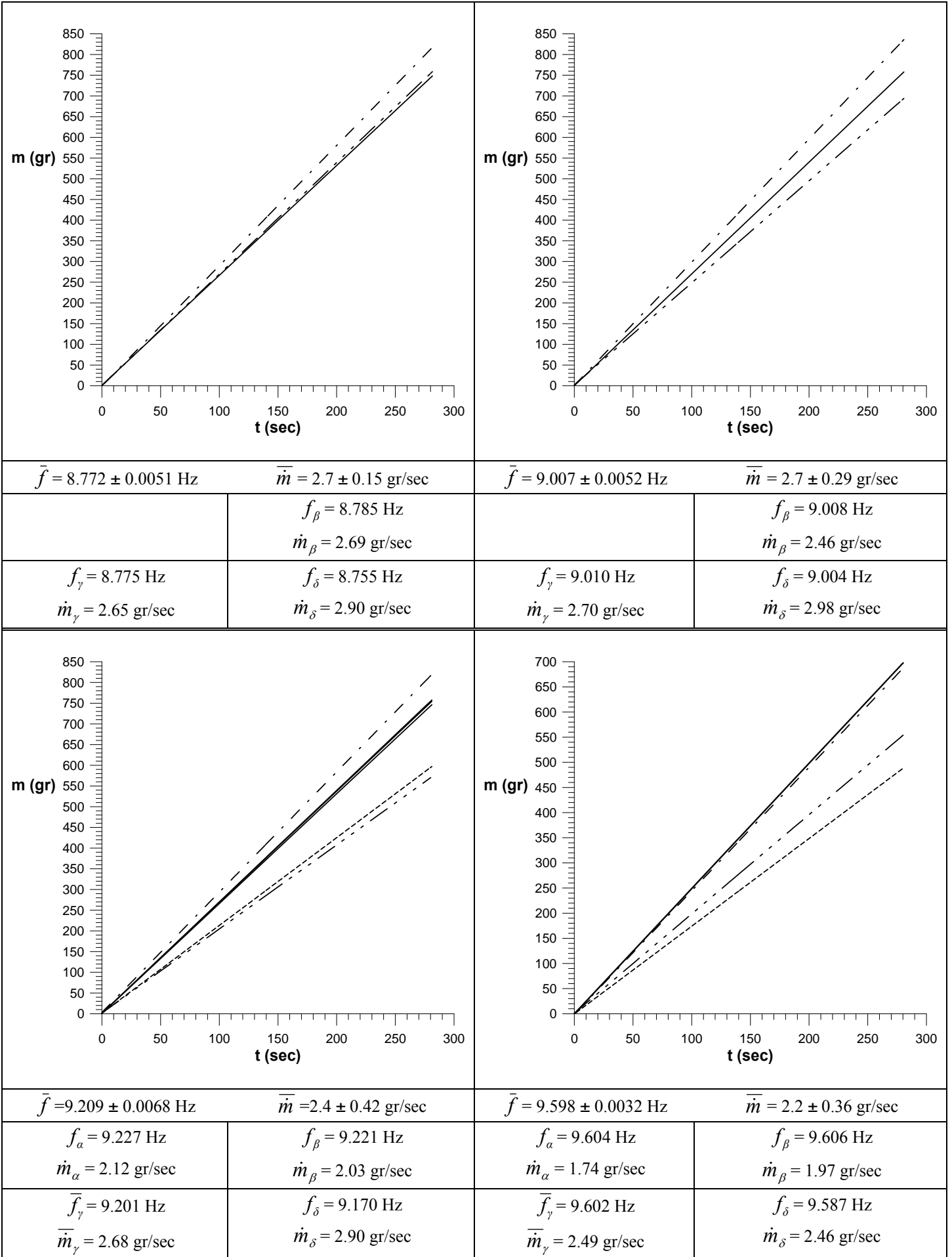
$\bar{f} = 5.413 \pm 0.0029 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 1.9 \pm 0.21 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 5.417 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\alpha = 1.75 \text{ gr/sec}$	$f_\beta = 5.404 \text{ Hz}$ $\bar{m}_\beta = 2.23 \text{ gr/sec}$		
$f_\gamma = 5.419 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\gamma = 1.83 \text{ gr/sec}$	$f_\delta = 5.426 \text{ Hz}$ $\bar{m}_\delta = 1.85 \text{ gr/sec}$		

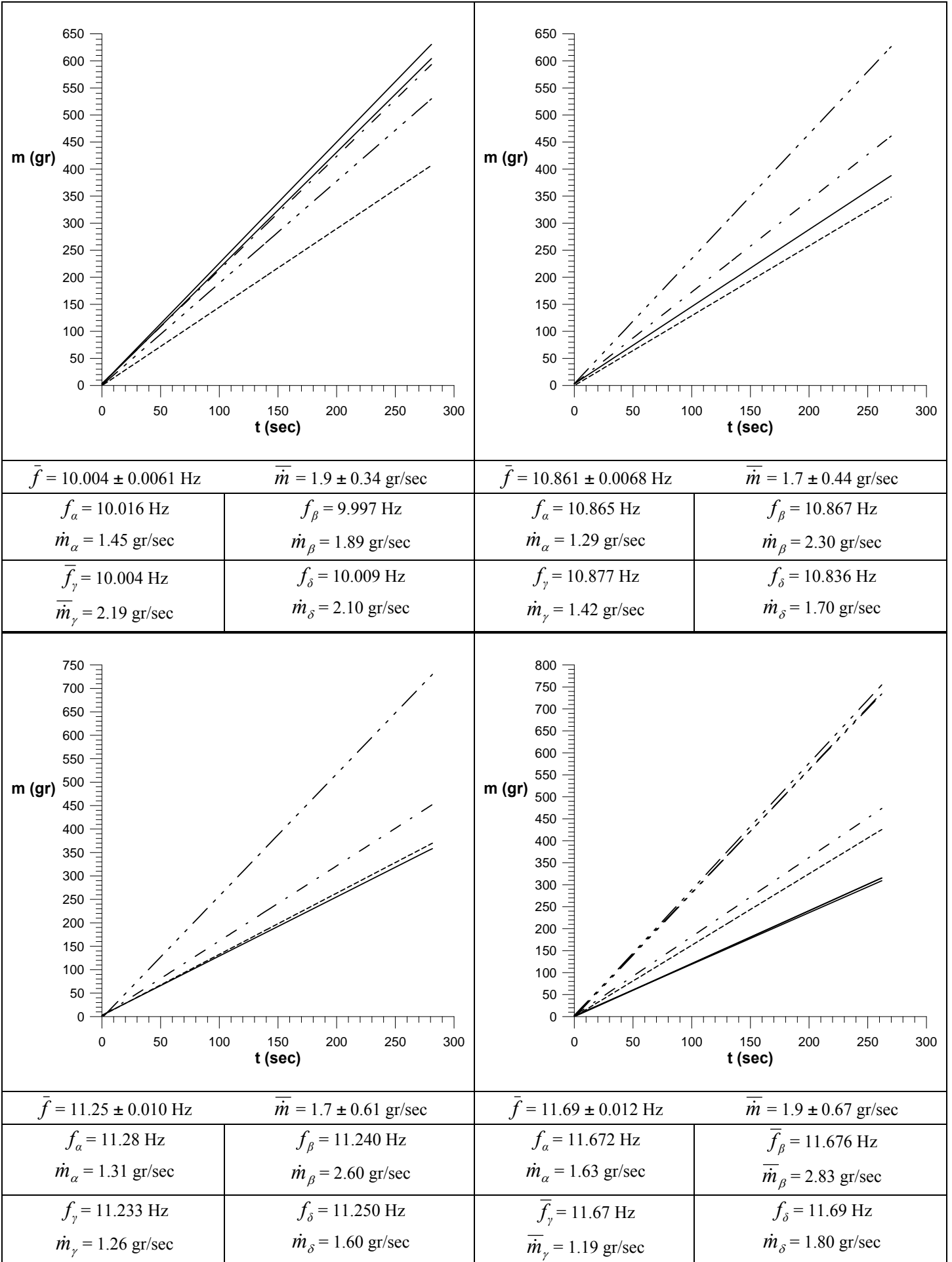


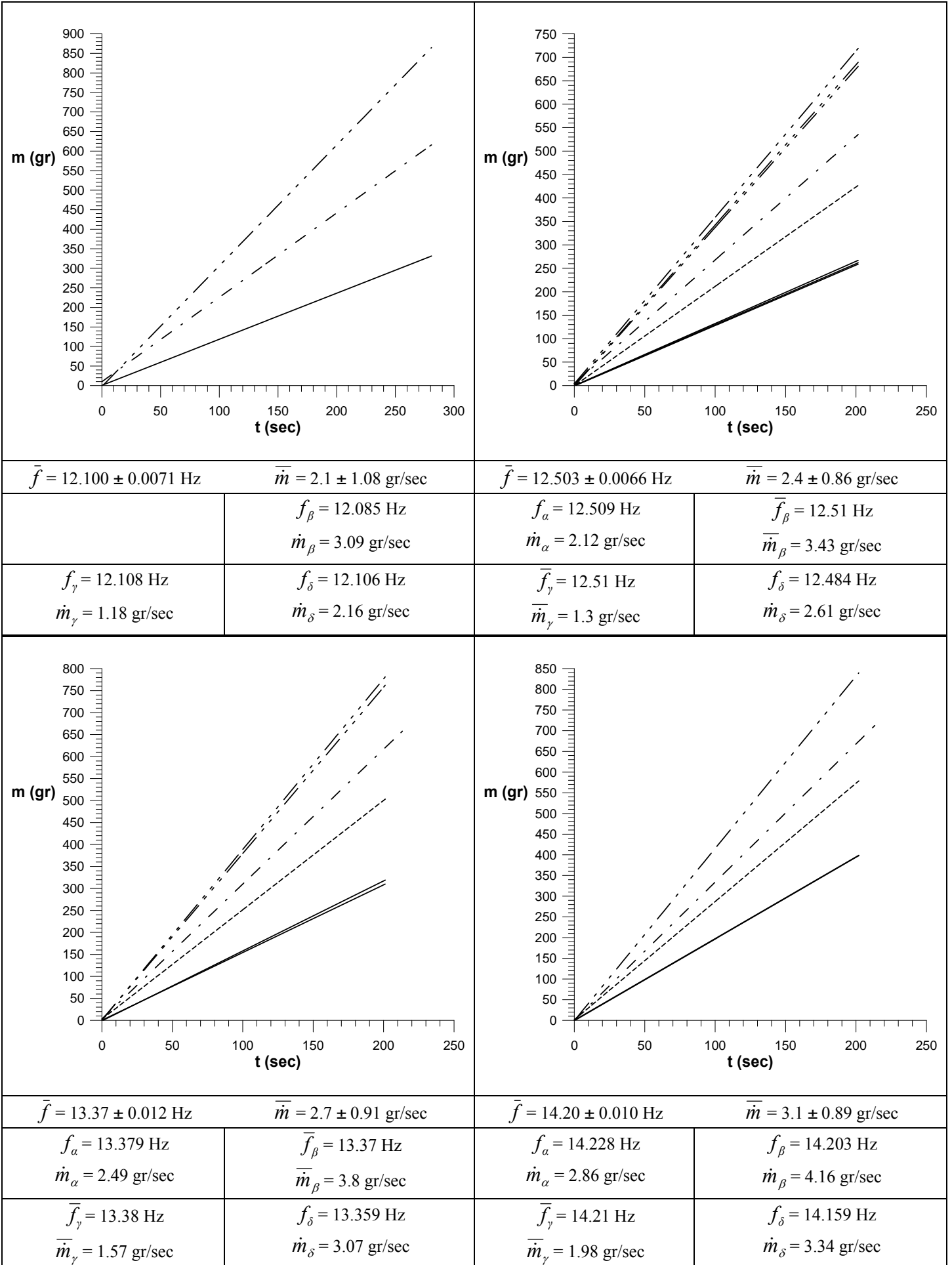
$\bar{f} = 5.845 \pm 0.0051 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 2.1 \pm 0.38 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 5.853 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\alpha = 1.88 \text{ gr/sec}$	$f_\beta = 5.843 \text{ Hz}$ $\bar{m}_\beta = 2.6 \text{ gr/sec}$		
$f_\gamma = 5.848 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\gamma = 1.88 \text{ gr/sec}$	$f_\delta = 5.839 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\delta = 1.92 \text{ gr/sec}$		

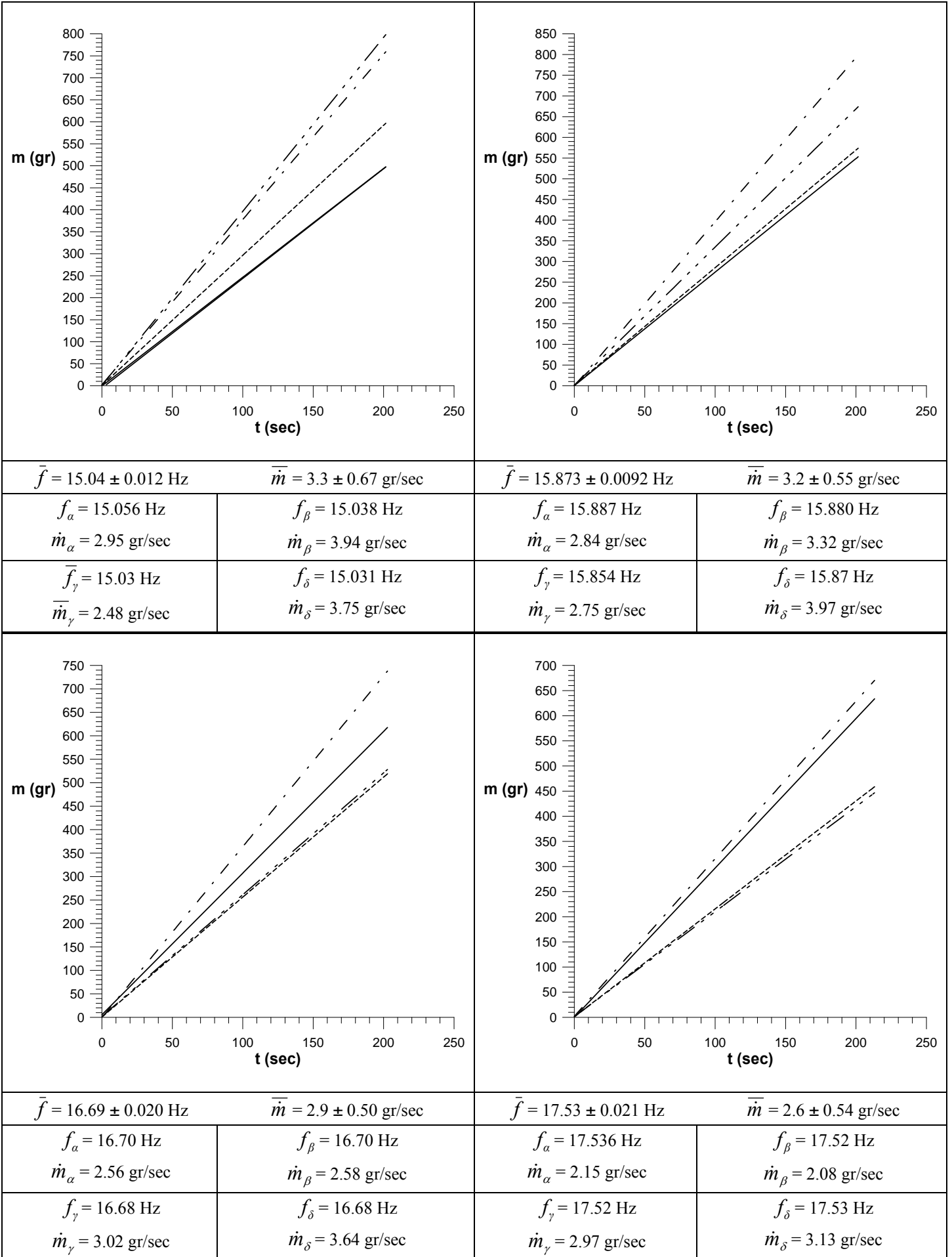
$\bar{f} = 6.258 \pm 0.0063 \text{ Hz}$		$\bar{m} = 2.2 \pm 0.29 \text{ gr/sec}$	
$f_\alpha = 6.247 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\alpha = 1.91 \text{ gr/sec}$	$f_\beta = 6.261 \text{ Hz}$ $\bar{m}_\beta = 2.59 \text{ gr/sec}$		
$f_\gamma = 6.264 \text{ Hz}$ $\dot{m}_\gamma = 2.03 \text{ gr/sec}$	$f_\delta = 6.245 \text{ Hz}$ $\bar{m}_\delta = 2.10 \text{ gr/sec}$		

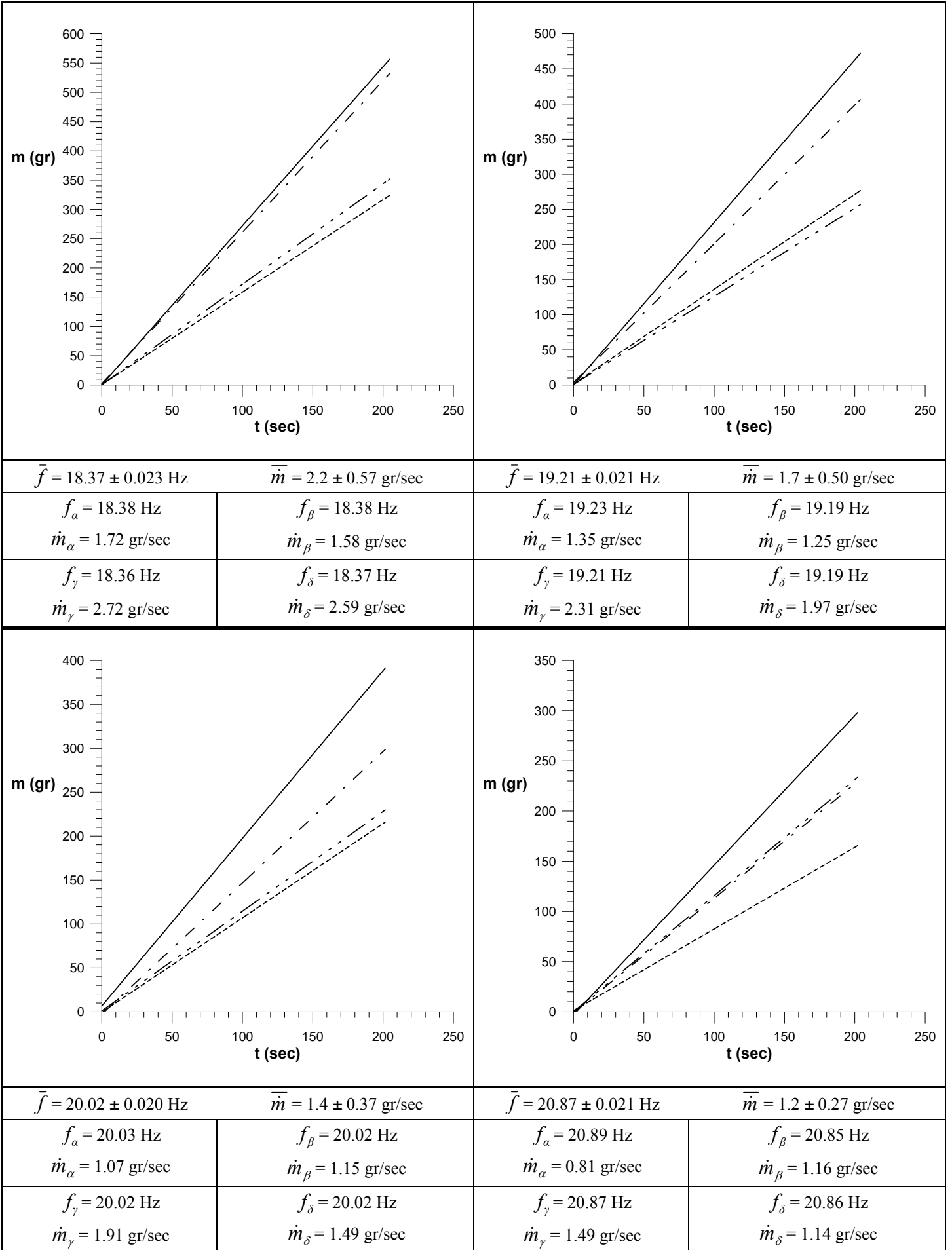




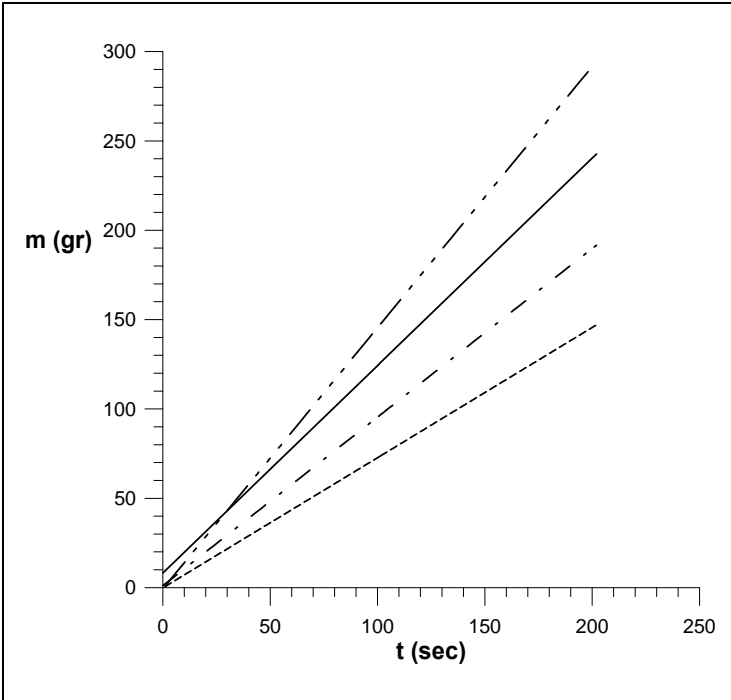












$\bar{f} = 21.70 \pm 0.021 \text{ Hz}$		$\bar{\dot{m}} = 1.1 \pm 0.31 \text{ gr/sec}$	
$f_{\alpha} = 21.77 \text{ Hz}$	$\dot{m}_{\alpha} = 0.73 \text{ gr/sec}$	$f_{\beta} = 21.69 \text{ Hz}$	$\dot{m}_{\beta} = 1.47 \text{ gr/sec}$
$f_{\gamma} = 21.68 \text{ Hz}$	$\dot{m}_{\gamma} = 1.16 \text{ gr/sec}$	$f_{\delta} = 21.68 \text{ Hz}$	$\dot{m}_{\delta} = 0.94 \text{ gr/sec}$

### III. Προγράμματα FORTRAN

#### III.1 Πρόγραμμα προσαρμογής ευθείας αναδρομής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

```

PROGRAM LEAST
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H),
.DOUBLE PRECISION (O-Z)

WRITE(*,*) 'number of measurements: n= ?'
READ(*,*) NT
WRITE(*,*) '-----'

OPEN(1,FILE='2-9047-test.dat')

WRITE(*,*) 'water temperature [19 - 30 oC]: ?'
READ(*,*) THN
WRITE(*,*) '-----'
OPEN(2,FILE='temp.dat')

DO I=1,14

READ(2,*) TH,DENS

IF(TH.EQ.THN) THEN
DENS=DENS
GOTO 1
ELSE
DENS=1.00043D+0-1.46279D-5*THN-4.82119D-6*THN*THN
END IF
ENDDO
1 CONTINUE

DDENS=1.00043D+0-1.46279D-5*(THN-0.25D+0)-4.82119D-6*
.(THN-0.25D+0)*(THN-0.25D+0)-1.00043D+0+1.46279D-5*(THN+0.25D+0)+
.4.82119D-6*(THN+0.25D+0)*(THN+0.25D+0)

SNL=0.0097D+0

DO I=1,NT

READ(1,*) X1,AM,X2,T

IF(I.EQ.1) THEN
AM1=AM
ELSE
END IF

IF(I.EQ.NT) THEN
BT=AM-AM1
TT=T
ELSE
END IF

```

```

SUMT=SUMT+T
SUMT2=SUMT2+T*T
SUMAM=SUMAM+AM
SUMTAM=SUMTAM+T*AM

ENDDO

TMED=SUMT/NT
AMMED=SUMAM/NT

A1=(SUMTAM-DFLOAT(NT)*TMED*AMMED)/(SUMT2-DFLOAT(NT)*TMED*TMED)
A0=AMMED-A1*TMED

WRITE(*,*) 'slope=',A1
WRITE(*,*) 'm-intercept=',A0
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'Number of data points used=',NT
WRITE(*,*) 'Average t=',TMED
WRITE(*,*) 'Average m=',AMMED

REWIND(1)

DO I=1,NT

READ(1,*) X1,AM,X2,T

AMH=A0+A1*T

SUMAMH=SUMAMH+(AM-AMH)*(AM-AMH)
SUMAMHM=SUMAMHM+(AMH-AMMED)*(AMH-AMMED)
SUMAMMM=SUMAMMM+(AM-AMMED)*(AM-AMMED)
SUMAMMD=SUMAMMD+(AM-AMH)*(AM-AMH)/(AMH*AMH)

ENDDO

S2=SUMAMH/DFLOAT(NT-2)
SE=DSQRT(S2/(SUMT2-DFLOAT(NT)*TMED*TMED))
R2=SUMAMHM/SUMAMMM
RMS=100.D+0*DSQRT(SUMAMMD/DFLOAT(NT-2))
DR=1.2024D+0*TT*BT/(1800D+0*7200D+0)
SB=DSQRT(SNL*SNL+DR*DR)
STOT=DSQRT(SE*SE+SNL*SNL+DR*DR)
VMED=A1/DENSM
ERV=VMED*DSQRT(STOT*STOT/(A1*A1)+DDENS*DDENS/(DENSM*DENSM))

WRITE(*,*) 'Regression sum of squares=',SUMAMHM
WRITE(*,*) 'Residual sum of squares=',SUMAMH
WRITE(*,*) 'Coef. of determination, R-squared=',R2
WRITE(*,*) 'sigma-hat-squared=',S2
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'RMS=',RMS,' %'

```

```
WRITE(*,*) 'Slope reflection error: se=',SE
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'total time duration t=',TT
WRITE(*,*) 'total weight Btot=',BT
WRITE(*,*) 'bias error bm= + -',SB
WRITE(*,*) 'total error em= + -',STOT
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'density=',DENS
WRITE(*,*) 'error density=',DDENS
WRITE(*,*) 'flow-rate=',VMED*60.D+0
WRITE(*,*) 'flow-rate error eV=',ERV*60.D+0
WRITE(*,*) '-----'
```

```
STOP
END
```

### III.2 Πρόγραμμα εύρεσης τυχαίων σφαλμάτων συχνότητας και παραμέτρων της

```

PROGRAM RANDOM
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H),
.DOUBLE PRECISION (O-Z)

DIMENSION A(50)

1  WRITE(*,*) 'enter [0] for time in sec or [1] for revolutions
   in rpm ?'
  READ(*,*) L
  IF(L.NE.0.AND.L.NE.1) THEN
    WRITE(*,*) 'values must be only [0] or [1]'
    WRITE(*,*) '-----'
    GOTO 1
  ENDIF

  WRITE(*,*) '-----'
  WRITE(*,*) 'number of measurements: n= ?'
  READ(*,*) NT
  WRITE(*,*) '-----'
  WRITE(*,*) 'bias error: b= ?'
  READ(*,*) B
  WRITE(*,*) '-----'
  WRITE(*,*) 'enter the values of each measurement:'

  DO I=1,NT

    WRITE(*,*) I, '='
    READ(*,*) AM

    A(I)=AM
    SUMAM=SUMAM+A(I)

  ENDDO

  AMMED=SUMAM/NT

  DO I=1,NT

    SUMAM2=SUMAM2+(A(I)-AMMED)*(A(I)-AMMED)

  ENDDO

  S=DSQRT(SUMAM2/DFLOAT(NT-1))
  SM=S/DSQRT(DFLOAT(NT))
  DX=1.96*SM
  SREL=DX/AMMED
  SREL100=100.D+0*SREL
  DXTOT=DSQRT(DX*DX+B*B)

  IF(L.EQ.0) THEN

```

```

A(I)=AM
  ELSE
END IF

WRITE(*,*) 'm=',AMMED
  WRITE(*,*) 's=',S
  WRITE(*,*) 'sigma=',SM
  WRITE(*,*) '1.96 x sigma(95%)=',DX
  WRITE(*,*) 's-relative=',SREL,'=',SREL100,'% for 95%'

  WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'random error=',DX
WRITE(*,*) 'bias error=',B
WRITE(*,*) 'm=',AMMED,'+ -',DXTOT,'total error'
  WRITE(*,*) '-----'

  ERF=DXTOT/(AMMED*AMMED)

IF(L.EQ.0) THEN
WRITE(*,*) 'f=',1.D+0/AMMED,'+ -',ERF,'total error'
  ELSE
WRITE(*,*) 'f=',AMMED/60.D+0,'+ -',DXTOT/60.D+0,'total error'
END IF

  WRITE(*,*) '-----'

  STOP
END

```

### III.3 Πρόγραμμα εύρεσης τυχαίων σφαλμάτων παροχής μάζας και όγκου δεύτερου και τρίτου επιπέδου

```

PROGRAM GROUPING
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H),
.DOUBLE PRECISION (O-Z)

DIMENSION A(100)

      AA0=1.00043D+0
      AA1=-1.46279D-5
      AA2=-4.82119D-6

WRITE(*,*) 'number of measurements: n= ?'
READ(*,*) NT

C *****
C                MASS-FLOW
C *****

      WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'enter the values of mass-flow:'

      DO I=1,NT

      WRITE(*,*) I, '='
READ(*,*) AM

A(I)=AM
SUMAM=SUMAM+A(I)

      ENDDO

AMMED=SUMAM/NT

DO I=1,NT

SUMAM2=SUMAM2+(A(I)-AMMED)*(A(I)-AMMED)

      ENDDO

S=DSQRT(SUMAM2/DFLOAT(NT-1))
SM=S/DSQRT(DFLOAT(NT))
DX=1.96*SM
SREL=DX/AMMED
SREL100=100.D+0*SREL

      WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'enter the bias-error for each mass-flow:'

      DO I=1,NT

```

```

WRITE(*,*) I, '='
READ(*,*) EM

SUMEM=SUMEM+EM

ENDDO

B=SUMEM/NT
DXTOT=DSQRT(DX*DX+B*B)

C *****
C          FREQUENCY
C *****

WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'enter the values of frequency:'

DO I=1,NT

WRITE(*,*) I, '='
READ(*,*) FR

SUMFR=SUMFR+FR

ENDDO

FRMED=SUMFR/NT

WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'enter the maximum total-error among each frequency:'
READ(*,*) TEF

C *****
C          DENSITY
C *****

WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'enter the values of density:'

DO I=1,NT

WRITE(*,*) I, '='
READ(*,*) DE

SUMDE=SUMDE+DE

ENDDO

DEMED=SUMDE/NT

DER=DSQRT(AA1*AA1-4.D+0*AA2*(AA0-DEMED))*0.5D+0
THN=(-AA1-DER/0.5D+0)/(2.D+0*AA2)

```



```

DDENS=DSQRT(DER*DER+0.83D-6*0.83D-6)
C *****
C RESULTS
C *****

VMED=AMMED/DEMED
ERV=VMED*DSQRT(DXTOT*DXTOT/(AMMED*AMMED)+
.DDENS*DDENS/(DEMED*DEMED))

WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'total values n2N=',NT
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'frequency f=',FRMED
WRITE(*,*) 'total frequency error ef=',TEF
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'mass-flow m=',AMMED
WRITE(*,*) 'random error em=',DX
WRITE(*,*) 'bias error bm=',B
WRITE(*,*) 'total error etm=',DXTOT
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'mean density dens=',DEMED
WRITE(*,*) 'corresponding temperature thn=',THN
WRITE(*,*) ' density error edens=',DER
WRITE(*,*) 'total density error edens=',DDENS
WRITE(*,*) '-----'
WRITE(*,*) 'flow-rate V=',VMED*60.D+0
WRITE(*,*) 'flow-rate error eV=',ERV*60.D+0
WRITE(*,*) '-----'

WRITE(*,*) 'frequency f=',FRMED,'+ -',TEF,'toter'

WRITE(*,*) 'flow-rate V=',VMED*60.D+0,'+ -',(ERV*60.D+0),'toter'

WRITE(*,*) 'mass-flow m=',AMMED,'+ -',DXTOT,'toter'

WRITE(*,*) '-----'

STOP
END

```