



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Κατασκευή πρότυπης περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς διέγερσης και
πειραματικός προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών της**

Όνοματεπώνυμο: Παραδάκης Ιωάννης

Αριθμός Μητρώου: 02105078

Επιβλέπων Καθηγητής: Τσαγγάρης Σωκράτης

Αθήνα, 2012

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών πρότυπης περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς μορφής, η οποία προορίζεται για χρήση κυρίως στον τομέα της ιατρικής. Αρχικά θα γίνει μία βιβλιογραφική μελέτη πάνω στις αρχές λειτουργίας αντλιών αυτού του τύπου, των χαρακτηριστικών τους και του τρόπου σχεδίασής τους. Κατόπιν, προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα πειράματα, συναρμολογείται η αντλία και διαμορφώνεται κατάλληλα η πειραματική διάταξη. Αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις, γίνεται επεξεργασία τους ώστε να προκύψουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την λειτουργία της αντλίας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Βιορευστομηχανικής και Βιοϊατρικής Τεχνολογίας του τομέα Ρευστών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Τα έκκεντρα της αντλίας και τα έμβολα της κατασκευάστηκαν από τα μηχανουργεία της εταιρίας «ΕΟΝ Κατασκευές ΑΒΕ».

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στην σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσαγγάρι για την ανάθεση της εργασίας καθώς και για τις γνώσεις του αποκόμισα τόσο στο εργαστήριο, όσο και κατά την παρακολούθηση των διαλέξεων στα αντίστοιχα ακαδημαϊκά έτη. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό Χρήστο Μανόπουλο για όλη την συμβολή του, χωρίς την βοήθεια και την καθοδήγηση του η αποπεράτωση της εργασίας αυτής θα ήταν δυσκολότερη.

Abstract

The object of the present thesis is the experimental study of a peristaltic wavy pump. Firstly, a study on literature has been done for this type of pumps. Then the experiment procedure is described, constituting by the pump assembly and the experiments that have been carried out. Finally, the measurements have been processed in order to get all the necessary data, creating the characteristic curves for the pump and understanding how this pump functions as the excitation frequencies vary. The experiments run at the Laboratory of Biofluidmechanics and Biomedical Engineering of the Fluids Section of the National Technical University of Athens.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος		1
Abstract		2
Περιεχόμενα		3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ		Σελ
1.1	Εισαγωγή	5
1.2	Κατηγορίες και χαρακτηριστικά περισταλτικών αντλιών	6
1.2.1	Περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων	6
1.2.2	Γραμμικές περισταλτικές αντλίες	7
1.3	Εφαρμογές	11
1.4	Σημαντικές παράμετροι σχεδίασης	12
1.5	Κυματοειδής γραμμική περισταλτική αντλία	13
1.6	Σωλήνας σιλικόνης	18
1.6.1	Ιδιότητες και εφαρμογές του σωλήνα σιλικόνης	18
1.6.2	Χημική δομή του σωλήνα σιλικόνης	20
1.6.3	Μορφοποίηση (processing) σωλήνων σιλικόνης	22
1.6.3.1	Χύτευση με έγχυση τήγματος (LIM - Liquid Injection Molding)	23
1.6.3.2	Χύτευση με συμπίεση	24
1.6.3.3	Χύτευση μεταφοράς (Transfer Molding)	25
1.6.3.4	Εκβολή (Extrusion)	25
1.6.3.5	Ελαττώματα κατά τη μορφοποίηση μέσω τήγματος	28
1.6.4	Οι σωλήνες σιλικόνης στις περισταλτικές αντλίες	28
1.7	Συμπεριφορά της διατομής του εύκαμπτου αγωγού	30
1.8	Σχεδιασμός υπόλοιπων στοιχείων της αντλίας	38
1.9	Έκκεντρα κυματοειδούς περισταλτικής αντλίας	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ		Σελ
2.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	40
2.2	Ηλεκτροκινητήρες	48
2.3	Ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης (controller)	49
2.4	Ταχύμετρο	52
2.4.1	Αρχή λειτουργίας ταχύμετρου	52
2.4.2	Φωτοεκπομπός δίοδος	53
2.5	Θερμόμετρα	56
2.6	Δυναμοκυψέλη (load-cell)	57
2.6.1	Αρχή λειτουργίας δυναμοκυψέλης	58
2.6.2	Δυναμοκυψέλη καμπτόμενης δοκού	60
2.7	Αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (ADC) και Υπολογιστής	62

2.8	Ακρίβεια πειραματικών μετρήσεων και υπολογισμός σφαλμάτων	63
2.8.1	Προσαρμογή (fitting) της συνάρτησης παροχής μάζας	63
2.8.2	Συστηματικά σφάλματα οργάνων (bias errors)	65
2.8.2.1	Βαθμονόμηση δυναμοκυψέλη και συστηματικά σφάλματα αυτής	65
2.8.2.2	Χρονόμετρο-Ταχύμετρο-Θερμόμετρο	67
2.8.3	Τυχαία σφάλματα	68
2.8.4	Συνολικά σφάλματα και διάδοσή τους σε παραγόμενα μεγέθη	70
2.8.5	Επίπεδα Σφάλματος	75
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	Σελ
3.1	Πειραματική εκτέλεση και διαδικασία	77
3.2	Πειραματικά αποτελέσματα και επεξεργασία μετρήσεων	82
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ	Σελ
4.1	Σύνοψη κεφαλαίου-γενικά σχόλια	109
4.2	Σύγκριση κυματοειδούς αντλίας με άλλες πρότυπες	111
4.3	Διερεύνηση γραμμικής συμπεριφοράς αντλίας	112
	Βιβλιογραφία	114
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	
I	Διαγράμματα παροχής μάζας για επιλεγμένες συχνότητες	116
II	Προγράμματα FORTRAN`	137

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η συναρμολόγηση πειραματικής διάταξης προτύπου περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς μορφής και η διεξαγωγή πειραμάτων μέσω αυτής για την εύρεση των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας της. Έπειτα γίνεται αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων ως προς την ακρίβεια και τη γραμμική έγχυση του ρευστού από την αντλία. Οι περισταλτικές αντλίες είναι αντλίες μικρής παροχής και ύψους, που λειτουργούν με την αρχή της περισταλτικής κίνησης του τοιχώματος ενός ανατάξιμου ελαστικού σωλήνα. Βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα ρευστών. Το ρευστό περιέχεται μέσα σε έναν ελαστικό σωλήνα που προσαρμόζεται είτε σε κυκλικό σχήμα είτε γραμμικά. Ένας δρομέας με δάκτυλα, προσκολλημένος στην εξωτερική περιφέρεια του ελαστικού σωλήνα, είναι υπεύθυνος για την συμπίεση του σωλήνα. Καθώς στρέφεται ο δρομέας, το κομμάτι του σωλήνα που συμπίεζεται, «κλείνει» (πλήρης έμφραξη) μεταβάλλοντας τη διατομή και την εσωτερική πίεση του σωλήνα με αποτέλεσμα την προώθηση του ρευστού που περιέχεται μέσα σε αυτόν. Επιπρόσθετα, όταν ο σωλήνας «ανοίγει» (πλήρης απόφραξη) και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση πληρώνεται με ρευστό. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται περίσταλη και χρησιμοποιείται σε πολλά βιολογικά συστήματα όπως ο γαστρεντερικός σωλήνας. Ανακαλύφθηκε από τον καρδιοχειρουργό Dr. Michael DeBakey, όσο ήταν φοιτητής ιατρικής το 1932.

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^{ης} 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 λ διέγερσης του σωλήνα, η συχνότητα διέγερσης f του σωλήνα, το κινηματικό ιξώδες ν 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:

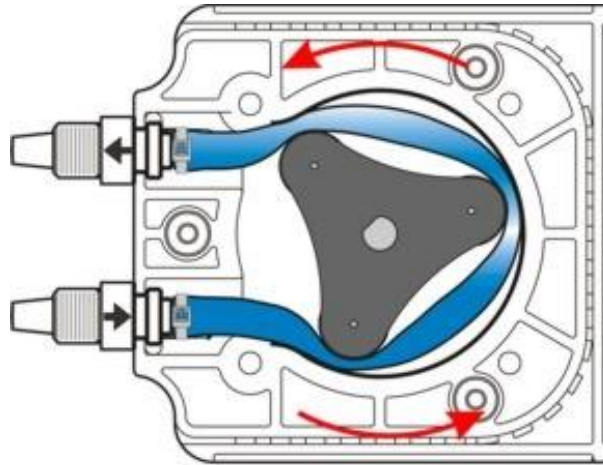
- 1) Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα διέγερσης, για ένα σταθερό μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση παροχή.
- 2) Όταν το μήκος κύματος της διέγερσης είναι τέτοιο που η διατομή στην είσοδο και στην έξοδο της περιοχής διέγερσης έχουν την ίδια ακριβώς τιμή, τότε η μέση τιμή της παροχής ελαχιστοποιείται, 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 λ , 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.

1.2.1 Περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων

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.

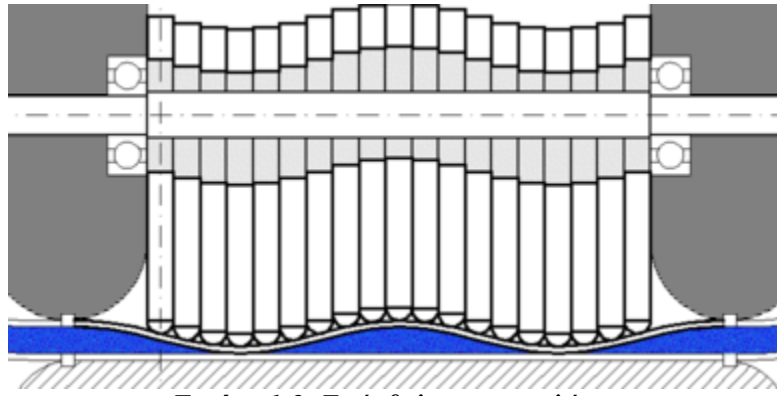


Εικόνα 1-1. Περισταλτική αντλία στρεφόμενων έκκεντρων

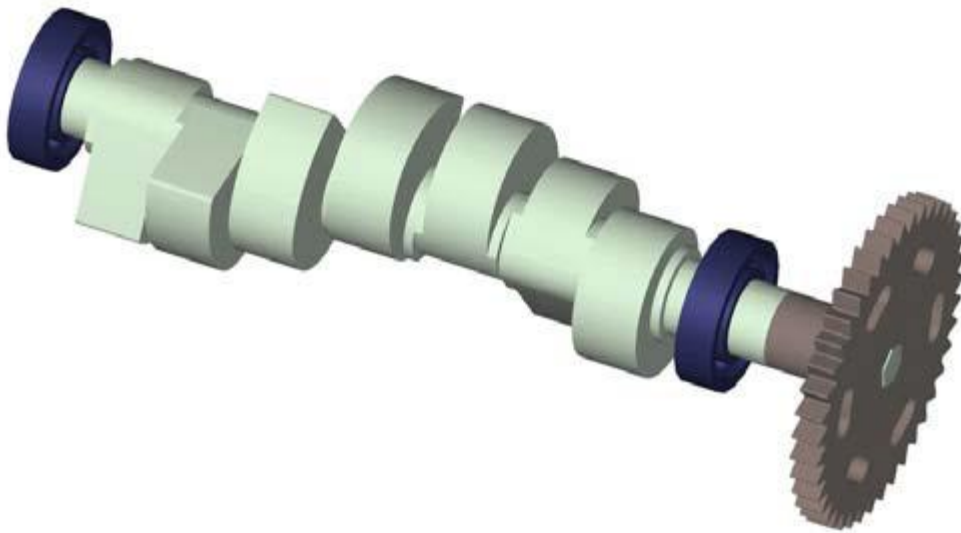
Με σκοπό τη σωστή λειτουργία, η σωλήνωση σε μια περισταλτική αντλία στρεφόμενων έκκεντρων πρέπει να συμπιέζεται πλήρως για να εξασφαλίζει επαρκές κενό πίεσης στην πλευρά εισόδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων λόγω κάμψης των τοιχωμάτων της σωλήνωσης που διπλώνονται, με την εσωτερική επιφάνεια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

1.2.2 Γραμμικές περισταλτικές αντλίες

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 (Εικόνα 1-2). Τέτοιες περισταλτικές αντλίες αποτελούνται από έναν αριθμό παλινδρομικών εμβόλων (δακτύλων) άντλησης, τα οποία διατάσσονται διαδοχικά, ώστε να συμπιέζουν γειτονικά τμήματα σωλήνα με κυματοειδή τρόπο, και από ίσο αριθμό έκκεντρων προσαρμοσμένων με συναρμογές σύσφιξης στον άξονα. Ο όλος μηχανισμός είναι παρόμοιος με τον εκκεντροφόρο άξονα του κινητήρα ενός οχήματος που ανοιγοκλείνει τις βαλβίδες. Κάθε έκκεντρο εφάπτεται με τον αντίστοιχο ακόλουθο μέσω ενός μικροσκοπικού ένσφαιρου τριβέα που φέρνει ο ακόλουθος. Οι ακόλουθοι (έμβολα) βρίσκονται τοποθετημένοι διαδοχικά σε αύλακα με χαλαρή συναρμογή μεταξύ τους ώστε να μπορούν να κινούνται. Όλοι οι ακόλουθοι συμμετέχουν στην πραγματοποίηση της περισταλτικής κίνησης, εκτός από τον τελευταίο που υπάρχει για να συνεχίζει την έγχυση του ρευστού με εμβολισμό ενός τμήματος του σωλήνα, όταν ο αμέσως προηγούμενος κλείνει εντελώς το σωλήνα και το τμήμα του σωλήνα που διεγείρεται γεμίζει με νέο εισερχόμενο ρευστό.



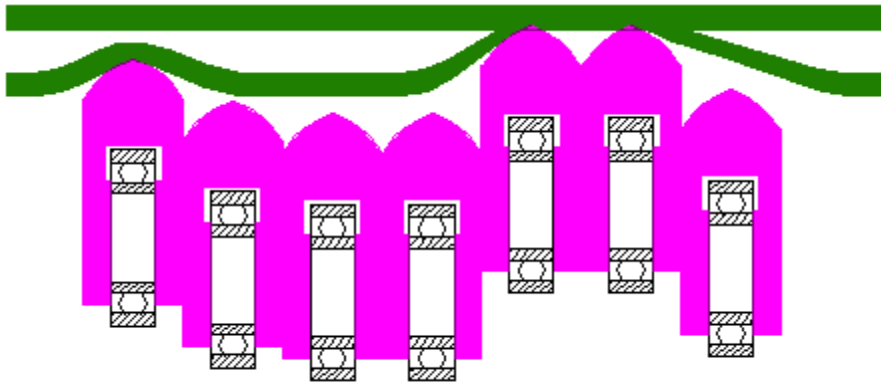
Εικόνα 1-2. Τα έμβολα και ο σωλήνας



Εικόνα 1-3. Ο εκκεντροφόρος άξονας μία γραμμικής κυματοειδούς περισταλτικής αντλίας

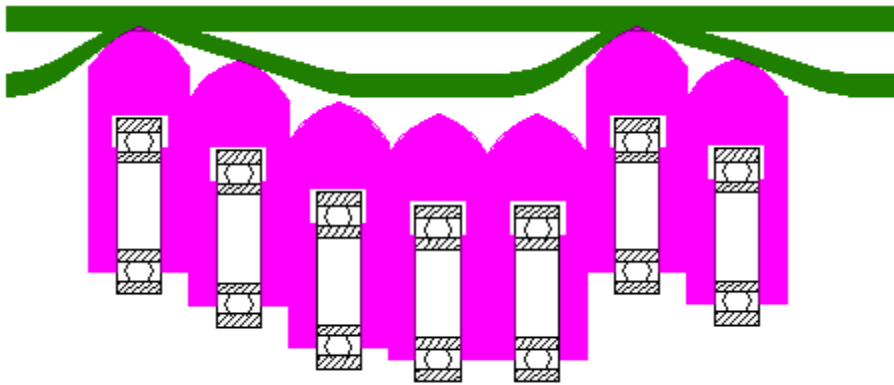
Με τον παραπάνω τρόπο, η ροή υφίσταται και όταν ο σωλήνας είναι κλειστός στο δεξιό του άκρο από το προτελευταίο έμβολο, περιμένοντας να γεμίσει για την εκτέλεση του επόμενου κύκλου. Έτσι πετυχαίνεται γραμμικοποίηση της ροής, ιδιαίτερα χρήσιμη στους χαμηλούς ρυθμούς έγχυσης. Όπως αναφέρθηκε, η περισταλτική ροή επιτυγχάνεται με προοδευτική κίνηση των ακολούθων, προωθώντας ρευστό προς τα δεξιά στην έξοδο του ελαστικού αγωγού, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-4(α-δ). Συγκεκριμένα, δημιουργείται ένα στόμιο εισόδου στον ελαστικό αγωγό όταν ο πρώτος αριστερά ακόλουθος είναι ανοιχτός, ενώ τότε ο προτελευταίος δεξιά είναι κλειστός. Στη συνέχεια κλείνει ο πρώτος αριστερά με τον προτελευταίο να παραμένει συνεχώς κλειστός. Τελικώς, ανοίγει ο προτελευταίος ακόλουθος και όλοι μαζί προωθούν το ρευστό προς την έξοδο, [micrel Rythmic™ - service manual, 1999].

Κατεύθυνση ροής →



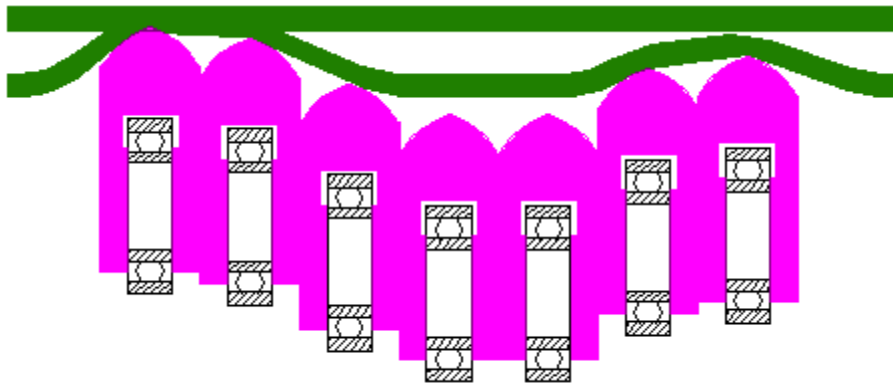
(α)

Κατεύθυνση ροής →



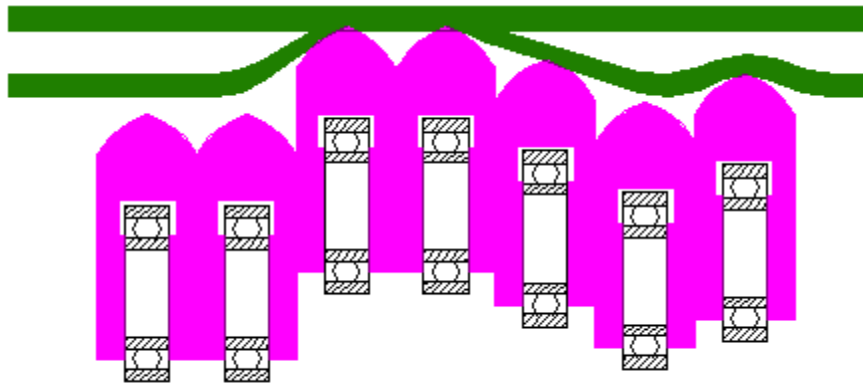
(β)

Κατεύθυνση ροής →



(γ)

Κατεύθυνση ροής →



(δ)

Εικόνα 1-4(α-δ). Κυματοειδής κίνηση των εμβόλων για την ανάπτυξη περισταλτικής ροής στον σωλήνα.

Ο λόγος χρησιμοποίησης του μικροσκοπικού ένσφαιρου τριβέα μεταξύ έκκεντρου και ακόλουθου είναι για τη μείωση της φθοράς και για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται ακρίβεια πάνω από 97% για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής της αντλίας. Πιο σημαντικό στοιχείο στην ακρίβεια της αντλίας αποτελεί το ακριβές σχήμα που πρέπει να έχει το έκκεντρο. Ένσφαιροι τριβείς χρησιμοποιούνται επίσης και στα δύο άκρα του εκκεντροφόρου άξονα, ορά εικόνα 1-3. Η διαφορά της εικόνας με τον εκκεντροφόρο άξονα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα είναι ότι ο οδοντωτός τροχός δεν βρίσκεται επί του άξονα αλλά μαζί με τον κινητήρα.

Παρά το γεγονός ότι εν γένει οι γραμμικές περισταλτικές αντλίες υπερέχουν μεν έναντι των περισταλτικών αντλιών στρεφόμενων έκκεντρων, έχουν 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 εκφυλίζεται 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 η οπισθοροή (back – flow). Όταν εμφανίζεται οπισθοροή 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. Για να προληφθεί κάτι τέτοιο υπάρχει αισθητήρας πίεσης που εφάπτεται στον σωλήνα σιλικόνης και μετρά συνεχώς την πίεση. Αν η πίεση μεταβληθεί εκτός των ορίων, τότε ενεργοποιείται ένδειξη προειδοποίησης κινδύνου (alarm) [16].

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.



Εικόνα 1-5. Γραμμική περισταλτική αντλία

1.3 Εφαρμογές

Οι περισταλτικές αντλίες χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της ιατρικής κυρίως για άντληση, κυκλοφορία και δοσιμετρική χορήγηση βιολογικών ρευστών και φαρμάκων. Χρησιμοποιούνται συνηθέστερα για την άντληση αποστειρωμένων ρευστών επειδή το ρευστό δεν έρχεται σε επαφή με μηχανικά μέρη της αντλίας ούτε είναι εκτεθειμένο στο περιβάλλον, συνεπώς δεν μπορεί να προκύψει μόλυνση του. Κάποιες εφαρμογές περιλαμβάνουν έγχυση ρευστών ενδοφλεβίως, επιθετικές χημικές ουσίες, πολτοποιημένα στερεά και άλλα υλικά στα οποία η απομόνωση του προϊόντος από το περιβάλλον και του περιβάλλοντος από το προϊόν είναι ζωτικής σημασίας. Επιπλέον χρησιμοποιείται σε καρδιοπνευμονικές μηχανές για την εξωσωματική κυκλοφορία του αίματος κατά την διάρκεια ενός χειρουργείου παράκαμψης (bypass) αφού η αντλία δεν προκαλεί σημαντική αιμόλυση καθώς επίσης και κατά 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. Τέτοιου είδους αντλίες χρησιμοποιούνται επίσης στις περιπτώσεις τεχνητού νεφρού. Ακόμα παραλλαγές των περισταλτικών αντλιών βρίσκουν εφαρμογή σε μηχανές αιμοκάθαρσης, καθαρισμό λυμάτων, σε πειράματα χημείας, στην γεωργία, στην παρασκευή των τροφίμων, στις κατασκευές μέσω άντλησης τσιμέντου και στην παραγωγή φαρμακευτικών προϊόντων. [13]

1.4 Σημαντικές παράμετροι σχεδίασης

Χημική συμβατότητα

Το ρευστό που αντλείται έρχεται σε επαφή μόνο με το εσωτερικό του σωλήνα ελαττώνοντας έτσι τους φόβους για ασυμβατότητα του ρευστού με τα έμβολα, τα ρουλεμάν ή οποιοδήποτε άλλο κομμάτι. Επομένως μόνο η σύσταση του σωλήνα μας ενδιαφέρει από άποψη χημικής συμβατότητας με το ρευστό.

Ο σωλήνας πρέπει να είναι ελαστικός έτσι ώστε να διατηρεί την δομή του σταθερή ακόμα και μετά από πολυάριθμες επαναλήψεις φόρτισης του. Για αυτόν τον λόγο αποκλείονται διάφορα μη ελαστικά πολυμερή που αντιδρούν με κάποια χημικά όπως PTFE, πολυολεφίνη, PVDF και άλλα για υλικά του σωλήνα. Δημοφιλή ελαστικά υλικά για σωλήνα είναι η σιλικόνη PVC, EPDM+πολυπροπυλένιο πολυουρεθάνη και Νεοπρένιο. Από τα παραπάνω το EPDM+πολυπροπυλένιο έχει την μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην καταπόνηση και είναι συμβατό με πολλά ρευστά. Ωστόσο η σιλικόνη είναι αποτελεσματικότερη με ρευστά που έχουν στην σύνθεση τους βάση το νερό, όπως δηλαδή στα βιορευστά, αλλά έχουν περιορισμένη συμβατότητα με ρευστά από άλλες βιομηχανίες.

Έμφραξη

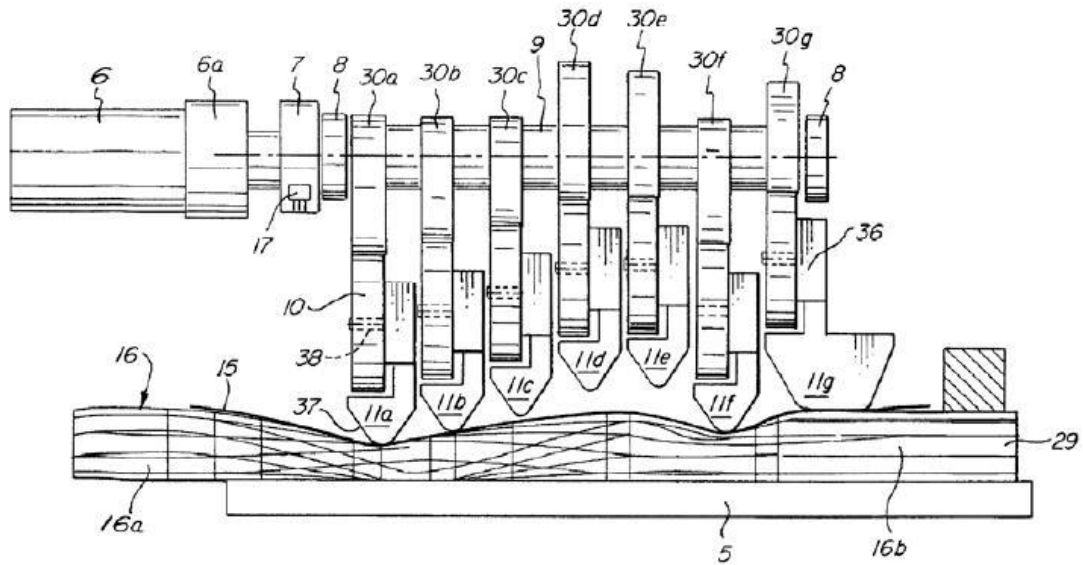
Το ελάχιστο κενό μεταξύ του δακτύλου και της αρχής του σωλήνα καθορίζουν την μέγιστη συμπίεση που εφαρμόζεται πάνω στον σωλήνα. Η τιμή της συμπίεσης που εφαρμόζεται επηρεάζει την αποδοτικότητα της αντλίας και τον χρόνο ζωής του σωλήνα (μεγαλύτερη συμπίεση της επιθυμητής μειώνει δραματικά τον χρόνο ζωής του σωλήνα, ενώ μικρότερη συμπίεση της επιθυμητής μειώνει την αποτελεσματικότητα της αντλίας, ειδικά στις αντλίες υψηλής πίεσης). Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν, ότι η τιμή της συμπίεσης διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό.

Ο όρος έμφραξη (occlusion) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της συμπίεσης. Άλλοτε εκφράζεται ως ποσοστό % του διπλασιασμένου πάχους τοιχώματος, και άλλοτε ως απόλυτη τιμή του πάχους του τοίχου που συμπιέζεται. Επομένως για μια συγκεκριμένη αντλία, η πιο σημαντική παράμετρος του σωλήνα, γίνεται το πάχος του σωλήνα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως η εσωτερική διάμετρος του κινητήρα δεν αντιπροσωπεύει μια σημαντική σχεδιαστική παράμετρο για την καταλληλότητα του σωλήνα για την αντλία. Για αυτόν τον λόγο, είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται σωλήνες με διαφορετικές εσωτερικές διαμέτρους για την αντλία, εφόσον το πάχος του τοιχώματος παραμένει σταθερό. Αξίζει να αναφερθεί ότι για δεδομένες rpm του κινητήρα, ένας σωλήνας με μεγαλύτερη εσωτερική διάμετρο δίνει μεγαλύτερη παροχή από ότι ένας με μικρότερη διάμετρο. Η έμφραξη είναι συνήθως κοντά στο 10-20% με μεγαλύτερη έμφραξη για έναν πιο μαλακό σωλήνα και μικρότερη έμφραξη για πιο σκληρό σωλήνα.

Παροχή μάζας

Η παροχή μάζας αποτελεί το κυριότερο χαρακτηριστικό της αντλίας. Η παροχή μάζας σε μία περισταλτική αντλία εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Την διάμετρο του σωλήνα-μεγαλύτερη παροχή με μεγαλύτερη διάμετρο
- Το μήκος του σωλήνα από το αρχικό σημείο που εισέρχεται το ρευστό μέχρι το σημείο εξόδου του - γενικά μεγαλύτερο μήκος μεγαλύτερη η παροχή
- Οι στροφές του κινητήρα - μεγαλύτερες rpm μεγαλύτερη παροχή.



Εικόνα 1-7. Πρόοψη μηχανισμού άντλησης κυματοειδούς συμπίεσης γραμμικής περισταλτικής αντλίας, όπου διακρίνονται ο εκκεντροφόρος άξονας (9), τα έκκεντρα (30) του εκκεντροφόρου άξονα, οι ακόλουθοι των έκκεντρων (11) με τα ρουλεμάν τους (10), ο κινητήρας περιστροφής (6) και ο εύκαμπτος αγωγός (16).

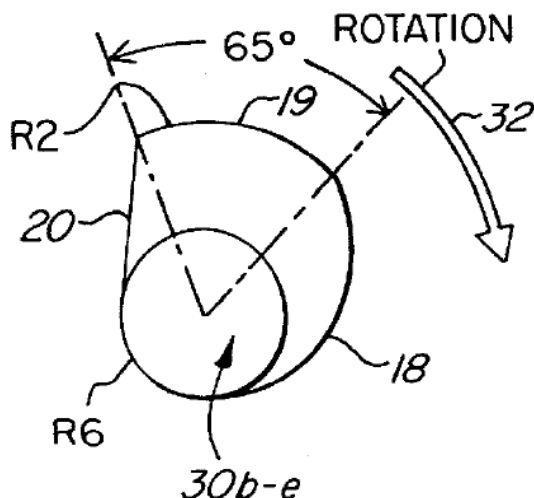
Από τις εικόνες 1-6 και 1-7 μπορεί να φανεί ότι το ακροδάχτυλο (37) του ακόλουθου (11a) του πρώτου έκκεντρου (30a) έχει πλήρως συμπίεσει τον εύκαμπτο αγωγό (16) στην κλειστή του θέση (με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται ο εύκαμπτος αγωγός (16') στην πλήρως ανοιχτή του θέση-εικόνα 1-6). Για την επίτευξη πλήρους έμφραξης (deep occlusion) του εύκαμπτου αγωγού (16), από τον πρώτο ως τον τελευταίο ακόλουθο (11a) έως (11f), τα αντίστοιχα έκκεντρά τους έχουν σχεδιασμό βαλβίδας. 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 1-7 η είσοδος (16a) του εύκαμπτου αγωγού (16) φαίνεται στην αριστερή πλευρά του σχεδίου, ενώ η έξοδος (16b) φαίνεται στην δεξιά πλευρά.

Ο εύκαμπτος αγωγός (16) είναι φτιαγμένος από ελαστικό υλικό κατά προτίμηση σιλικόνη. Για να στεγανοποιείται ο μηχανισμός οδήγησης από τυχόν διαρροή ρευστού από τον εύκαμπτο αγωγό (16), τοποθετείται προστατευτικό λεπτό στρώμα από πλαστικό υλικό (15) ανάμεσα στον εύκαμπτο αγωγό (16) και στα ακροδάχτυλα (37) των ακόλουθων (11a) έως (11g) (απεικονίζεται μόνο στην εικόνα 1-7 και όχι στην 1-6 χάριν ευκρίνειας).

Από την εικόνα 1-6 μπορεί να φανεί ότι μολονότι η διαδρομή των ακόλουθων (11) από τα έκκεντρα (30) είναι σχετικά σημαντική, το πλάτος του μηχανισμού (φαίνεται σε πλάγια τομή στην εικόνα 1-6) 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 εύκαμπτου αγωγού (16), ενώ η εγκάρσια οδήγηση των ακόλουθων (11) εντός του ακίνητου φορέα (26) εξασφαλίζεται, όπως αναφέρθηκε, με οδηγητικά αυλάκια (26a) που υπάρχουν στα πλαϊνά τοιχώματα. Οι ακόλουθοι (11) σπρώχνονται προς τα επάνω από την ελαστικότητα του εύκαμπτου αγωγού (16) με αποτέλεσμα να αποσυμπιέζεται. Αυτή η προς τα επάνω κίνηση είναι δυνατόν να υποστηριχθεί και με ελατήρια επαναφοράς.

Η συγκεκριμένη περισταλτική αντλία χαρακτηρίζεται από το ότι κάθε ένα έκκεντρο έχει τρία τμήματα με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας (εικόνα 1-8). Το πρώτο τμήμα (18) έχει συνεχώς αυξανόμενη ακτίνα για τη φάση της συμπίεσης, το δεύτερο τμήμα (19) έχει σταθερή ακτίνα ίση με την ακτίνα του τέλους του πρώτου τμήματος (18) για τη διατήρηση της έμφραξης (deep occlusion) του εύκαμπτου αγωγού (16) και στο τρίτο τμήμα (20)

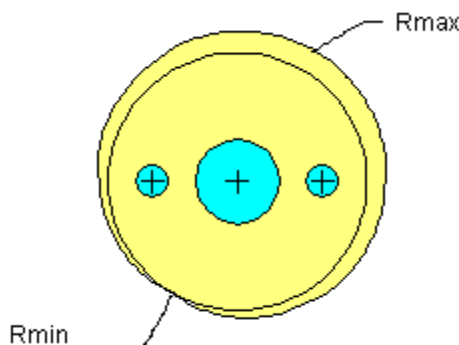
παρουσιάζεται απότομη μείωση της ακτίνας, καταλήγοντας σε μικρή ακτίνα, για γρήγορη επανάταξη του εύκαμπτου αγωγού (16).



Εικόνα 1-8. Πλάγια όψη των ενδιάμεσων έκκεντρων. Διακρίνεται η μέγιστη ακτίνα R2 στο σημείο πλήρους εμβολισμού και η ελάχιστη R6 στο σημείο πλήρους αποσυμπίεσης.

Στην περισταλτική αντλία που μελετάμε το πρώτο τμήμα καμπυλότητας έχει συνεχώς αυξανόμενη ακτίνα (υπολογισμένη καμπύλη) και στο συγκεκριμένο σχεδιασμό αυτό το τμήμα εκτείνεται για 180 μοίρες γωνία. Η ακτίνα αυτού του τμήματος αυξάνεται γραμμικά με την γωνία περιστροφής. Το επόμενο δεύτερο τμήμα έχει σταθερή ακτίνα R_{max} , η οποία είναι η μέγιστη του έκκεντρου. Στο συγκεκριμένο σχεδιασμό το δεύτερο μέρος διαρκεί 30 μοίρες. Στο τρίτο τμήμα λαμβάνει χώρα απότομη μείωση από την μέγιστη ακτίνα R_{max} στην ελάχιστη ακτίνα R_{min} , η οποία διαρκεί για γωνία περιστροφής περισσότερη από 42 μοίρες στο συγκεκριμένο σχεδιασμό. Η μέγιστη ακτίνα και το μήκος των ακόλουθων είναι τέτοιο, ώστε ο εύκαμπτος αγωγός να παραμένει εντελώς κλειστός για διάστημα 60 μοιρών. Αν και στην εικόνα 1-7 τα ακροδάχτυλα (37) μερικών ακόλουθων (11) φαίνονται να έχουν κάποια απόσταση από τον εύκαμπτο αγωγό (16), αυτή η απόσταση είναι ελάχιστη ή μηδαμινή στην πραγματικότητα, ώστε να επέρχεται ο μέγιστος δυνατός όγκος εμβολισμού κατά τη συμπίεση.

Με σκοπό να επιτευχθεί συνεχόμενη σταθερή ροή έγχυσης ρευστού από την αντλία, ένα πρόσθετο έκκεντρο γραμμικοποίησης του όγκου εμβολισμού παρέχεται στο τέλος του μηχανισμού έγχυσης. Στην εικόνα 1-9 απεικονίζεται αυτό το πρόσθετο έκκεντρο γραμμικοποίησης (30g), το οποίο τοποθετείται αμέσως μετά από τα έξι άλλα έκκεντρα (30a) έως (30f), όπως φαίνεται στην εικόνα 1-7, με σκοπό να εξομαλύνει τις μεταβολές της ροής του ρευστού στην έξοδο κατά τη διάρκεια της άντλησης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1-9, το πρόσθετο έκκεντρο (30g) έχει ένα πρώτο τμήμα καμπυλότητας (18g) κατά τη διάρκεια του οποίου η ακτίνα αυξάνεται από ελάχιστη τιμή R_{min} σε μέγιστη τιμή R_{max} . Από αυτή τη μέγιστη τιμή η ακτίνα μειώνεται κατά τη διάρκεια του δεύτερου τμήματος καμπυλότητας (20g) στην ελάχιστη ακτίνα ξανά. Η μέγιστη ακτίνα είναι μικρότερη από τις μέγιστες ακτίνες των έκκεντρων (30a) έως (30f) γιατί η διατομή του εύκαμπτου αγωγού (16) πρέπει να μειωθεί χωρίς να κλείσει. Κατά τη διάρκεια που ο ακόλουθος (δάχτυλο) εξόδου (11f) διατηρεί τον εύκαμπτο αγωγό κλειστό, το υγρό ωθείται από τον ακόλουθο (δάχτυλο γραμμικοποίησης) (11g), έτσι ώστε να συνεχίζεται η ροή στην έξοδο πετυχαίνοντας τη σταθερότητά της.

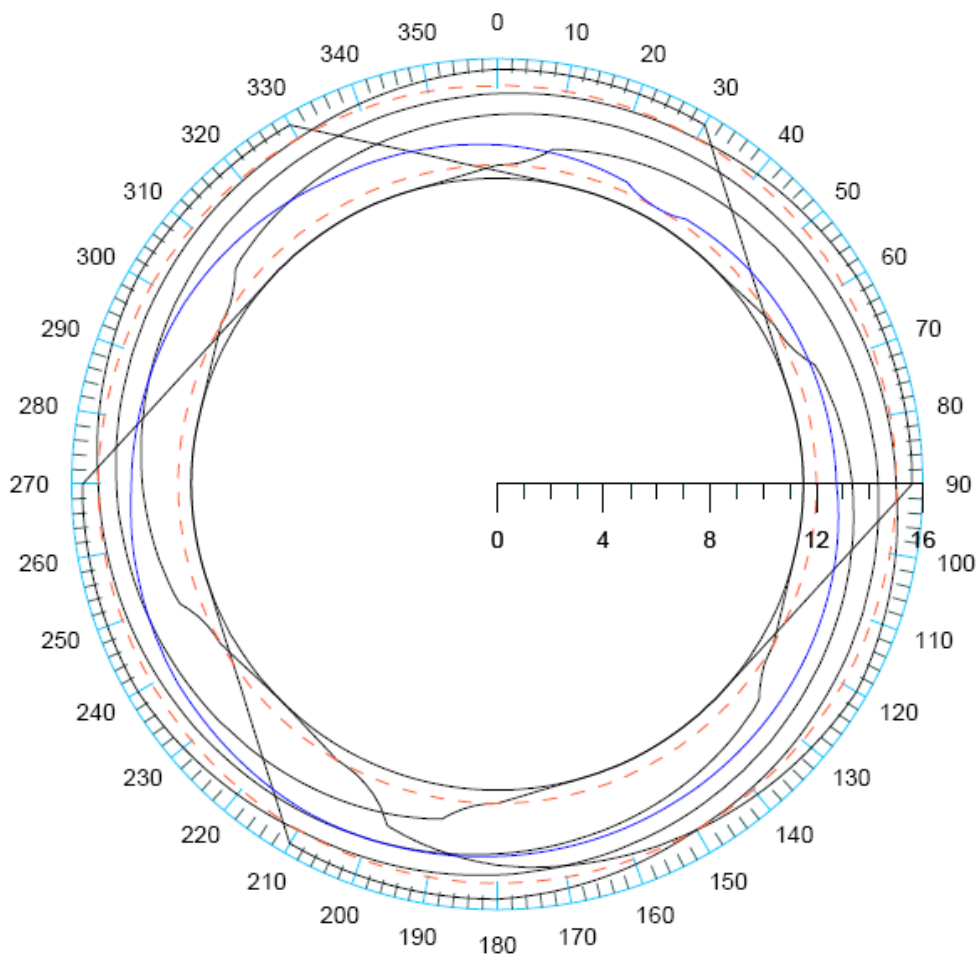


Εικόνα 1-9. Πλάγια όψη του διορθωτικού έκκεντρου (30g) “wrap cycle”. Διακρίνονται η μέγιστη ακτίνα καμπυλότητας R_{max} στο σημείο πλήρους εμβολισμού και η ελάχιστη R_{min} στο σημείο πλήρους απόφραξης.

Προκειμένου να επεκταθεί το εύρος της γραμμικότητας πρέπει το κάτω μέρος του ακόλουθου (ακροδάχτυλο) (11g) του έκκεντρου σταθερής ροής (30g), να έχει μεγαλύτερη διάσταση στην κατά μήκος κατεύθυνση του εύκαμπτου αγωγού (16) και κατά προτίμηση το διπλάσιο συγκριτικά με το μήκος των δάχτυλων των άλλων έκκεντρων. Δηλαδή, ενώ κανονικά τα μήκη των ακροδάχτυλων (37) των ακόλουθων (11a) έως (11g) θα μπορούσαν να είναι τα ίδια στην κατά μήκος διεύθυνση παράλληλη του εκκεντροφόρου άξονα (9) και του εύκαμπτου αγωγού (16), στην εικόνα 1-7 φαίνεται ότι το μήκος του ακροδάχτυλου του ακόλουθου (11g) είναι μεγαλύτερο (περίπου διπλάσιο) από το μήκος των άλλων ακόλουθων (11a) έως (11f). Σκοπός αυτού είναι να αυξήσει το χρόνο γραμμικής λειτουργίας, λαμβανομένου υπόψη του χρόνου που παραμένει κλειστός ο εύκαμπτος αγωγός (16) από τον τελευταίο ακόλουθο (11f).

Όταν το τελευταίο έκκεντρο (30f) κλείνει τον εύκαμπτο αγωγό (16), μέσω του ακόλουθου (11f), το έκκεντρο (30g) συνεχίζει να επιδρά αυξάνοντας την ακτίνα του από την ελάχιστη ακτίνα στην μέγιστη ακτίνα, έτσι ώστε το ρευστό που βρίσκεται ήδη στο τέλος του εύκαμπτου αγωγού (16) να αντλείται προς τα δεξιά (συνήθως προς τη γραμμή του ασθενούς). Ουσιαστικά, επιτυγχάνεται σταθερή παροχή όπως θα δούμε παρακάτω η οποία ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα της μεγαλύτερης θετικής τιμής της παροχής των ενδιάμεσων ακόλουθων (11b) έως (11f), συν τη μειούμενη τιμή παροχής (αρνητική) λόγω του ακόλουθου (11g) σταθεροποίησης της ροής.

Στην εικόνα 1-10 παρουσιάζονται σε παράθεση όλα τα έκκεντρα (30a) έως (30g), βάση του σχεδιασμού που αναλύεται παρακάτω, όπου φαίνονται, τόσο τα καμπύλα τμήματα μεταβλητής ακτίνας, όσο και τα κυκλικά με ακτίνες από R_{max} έως R_{min} . Η μέγιστη ακτίνα R_{max} , η οποία απαντάται στο πρώτο (30a) έως και το τελευταίο (30f) έκκεντρο συμπιέζει πλήρως τον εύκαμπτο αγωγό (16). Η μέγιστη ακτίνα του έκκεντρου (30g) δεν κλείνει εντελώς τον εύκαμπτο αγωγό (16). Η ελάχιστη ακτίνα των 6 εκκέντρων διατηρεί τον εύκαμπτο αγωγό (16) ανοιχτό και τον κρατά μακριά, ώστε να μην αγγίζει τα ακροδάχτυλα (37) πετυχαίνοντας πλήρη ανάταξη του εύκαμπτου αγωγού (16), ανεξάρτητα από τις κατασκευαστικές ανοχές. Η ελάχιστη ακτίνα του έκκεντρου σταθεροποίησης της ροής (30g) είναι η ελάχιστη ακτίνα η οποία διατηρεί τον εύκαμπτο αγωγό (16) ανοιχτό.



Εικόνα 1-10. Διάγραμμα έκκεντρων εμβόλων σε πολικές συντεταγμένες

Για να επιτευχθεί όπως περιγράφεται ο ανωτέρω κύκλος λειτουργίας πρέπει να υπάρχει κατάλληλος συγχρονισμός όλων των έκκεντρων και επιπλέον ο υπολογισμός τους για τα χρονικά διαστήματα συμπίεσης και αποσυμπίεσης να γίνει με βάση τη σχέση

$A_S - C_1\varphi_S = A_E - C_1\varphi_E \rightarrow A_S - A_E = C_1(\varphi_S - \varphi_E)$, όπου λαμβάνει υπόψη τη γραμμική μεταβολή του όγκου εμβολισμού ή αναρροφήσεως με το χρόνο. Για κάθε έκκεντρο εξάγεται η σχεδιαστική του καμπύλη $r_e(\varphi)$ για διάφορα χαρακτηριστικά διαστήματα γωνιών, στα οποία χωρίζεται ένας πλήρης κύκλος από 0 έως 360°. Λόγω της απαίτησης αποφυγής της οπισθοροής, πρέπει να μην υπάρχει χρονική στιγμή που να μένει ο εύκαμπτος αγωγός χωρίς πλήρη έμφραξη (deep occlusion) σε κάποιο από τα σημεία λειτουργίας των εμβόλων. Γι' αυτό το λόγο, τα έκκεντρα των εμβόλων σχεδιάζονται με τρόπο ώστε πριν ανοίξει το ένα έμβολο, το άλλο να έχει ήδη φράξει τον εύκαμπτο αγωγό. Ωστόσο, βασική επιδίωξη του μηχανισμού είναι η επίτευξη συνεχούς και σταθερής παροχής ρευστού. Επομένως, παρόλο που για αυτό το διάστημα των 60° δεν πραγματοποιείται καμία έγχυση ρευστού από την αντλία, για το υπόλοιπο διάστημα των 300° (83% ενός πλήρη κύκλου) πραγματοποιείται συνεχής και σταθερή έγχυση.

Η αρχική ελάχιστη ακτίνα του κάθε έκκεντρου r_{e0} , είναι ίση σε με 11.50 mm. Αυτή η σχετικά μεγάλη τάξη μεγέθους για τη διάσταση των έκκεντρων έχει εκλεχθεί, ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί το έκκεντρο με την αναγκαία μεγάλη σχετικά ακρίβεια (0.1 mm). Μεγαλύτερη διάσταση δίνει ευχέρεια για μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή, όμως αυξάνει την απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή του εκκεντροφόρου άξονα με αποτέλεσμα

τις υψηλότερες καταπονήσεις και τα αυξημένα ενεργειακά κόστη. Στο σχεδιασμό όχι πρωτοτύπων, όπως έχουμε εδώ, αλλά συσκευών βιοϊατρικών και τεχνολογικών εφαρμογών, τα έκκεντρα σχεδιάζονται πιο μικρά για αυτούς τους λόγους και για λόγους κομψότητας και φορητότητας των συσκευών. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο πρότυπο ενδιαφέρει η μελέτη της ακρίβειας της έγχυσης, οπότε επιλέγονται γενικά μεγαλύτερες σχετικά διαστάσεις.

Βασικά επιπλέον κριτήρια πέραν αυτού της σταθερής παροχής έγχυσης για τον υπολογισμό των έκκεντρων αποτελούν η ομαλή κατασκευαστική επιφάνεια των έκκεντρων στα σημεία αλλαγής του συναρτησιακού που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κινηματικής του εκάστοτε δάχτυλου και προφανώς, όπως έχει αναφερθεί ήδη, ο κατάλληλος χρονισμός των έκκεντρων για την επίτευξη της επιθυμητής κίνησης σε κάθε σημείο κατά μήκος του διεγχειρόμενου εύκαμπτου αγωγού.

Επιμέρους κριτήριο αποτελεί και η ταχύτητα της κίνησης των δάχτυλων-εμβόλων όταν αποσυμπιέζουν τον εύκαμπτο αγωγό ή κινούνται σε χρονικό διάστημα που δεν επιδρούν στην παραμόρφωσή του (νεκροί χρόνοι). Η ανάταξη του εύκαμπτου αγωγού πρέπει να γίνεται όσο το δυνατό γρηγορότερα όταν ο αγωγός πρέπει να τροφοδοτηθεί με ρευστό από την είσοδο της αντλίας. Είναι προφανές ότι γενικά οι κινήσεις των εμβόλων εξαρτώνται από την κίνηση των εκκέντρων και μάλιστα πρέπει να είναι όσο το δυνατό ταχύτερες. Πάντως, όσο και αν υπολογιστούν βέλτιστα τα έκκεντρα, ώστε να έχουν ταχύτητες τα δάχτυλα που να ανταποκρίνονται σε υψηλό βαθμό απόδοσης της αντλίας, αυξανόμενης της συχνότητας διέγερσης υπάρχει μία τιμή σχετικά υψηλή πέραν της οποίας η αναταξιμότητα του εύκαμπτου αγωγού δε διασφαλίζεται, λόγω αδράνειας στην κίνηση των τοιχωμάτων του, με αποτέλεσμα να μην προλαβαίνει ο εύκαμπτος αγωγός να πληρώνεται με την ίδια ποσότητα ρευστού και συνεπώς να αλλοιώνεται η ακρίβεια στην έγχυση του ρευστού.

1.6 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, όπως αναφέρεται παραπάνω, η σιλικόνη. Η ουσιαστική ύπαρξη της αντλητικής ικανότητας των περισταλτικών αντλιών οφείλεται στις ιδιότητες του σωλήνα σιλικόνης, οι οποίες αναπτύσσονται αναλυτικά παρακάτω.

1.6.1 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 κατεργασιμότητα έχουν επιφέρει τη χρήση τους σε 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 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, [18].

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 ευρύτερο πεδίο ακραίων θερμοκρασιών, συγκρινόμενα με όλα σχεδόν τα άλλα ελαστομερή, διατηρώντας σταθερότητα μεταξύ θερμοκρασιακών μεταβολών από -59°C μέχρι 260°C . Μπορούν να αποστειρώνονται μέσω του αερίου EtO (Ethylene Oxide), ακτινοβολίας γάμα (γ) ή δέσμης ηλεκτρονίων (E-beam), με υπέρθερμους 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 συμπυκνωμένα οξέα, τα αλκάλια και οι εν γένει διαλύτες δεν 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 αγωγιμες διατηρώντας τη διηλεκτρική τους αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες σε σχέση με εκείνες που συμβατικά μονωτικά υλικά μπορούν να λειτουργήσουν. [18].

Υπάρχουν πολυάριθμοι τύποι σιλικόνης, όπως υγρής μορφής, καθώς και σκληρυμένες με πλατίνα και υπεροξείδιο 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 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

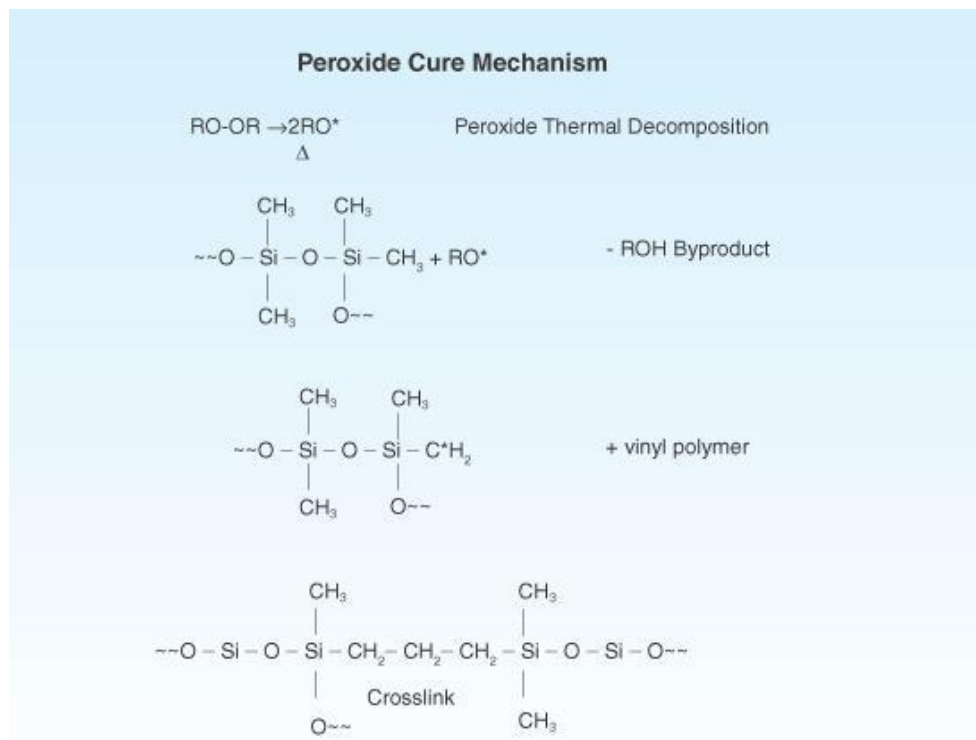
ευστάθεια της σιλικόνης σε υψηλές θερμοκρασίες την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν επαναλαμβανόμενη επίτευξη αποστείρωσης, όπου άλλα ελαστομερή έχουν περιορισμούς. Επιπρόσθετα, οι ιδιότητες καλής απόκρισης σε χαμηλή συμπίεση και υψηλής αναταξιμότητας έχουν συντελέσει, ώστε η σιλικόνη να 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 παρουσιάζονται 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.

1.6.2 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 σκληρυμένο υλικό της σιλικόνης.

Η αντίδραση σκλήρυνσης είναι μονόδρομη και πρόκειται για τη θερμική αποσύνθεση του υπεροξειδίου, σχηματίζοντας ελεύθερες ρίζες οι οποίες στη συνέχεια αφαιρούν άτομα υδρογόνου που υπάρχουν στα εξέχοντα μεθύλια της σιλικόνης ή/και 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 συμπαγή επιφανειακή σκλήρυνση χωρίς εγχοπές ή πορώδες και χαρακτηριστικό άρωμα κατά τη σκλήρυνση. Αυτό το ειδικό υπεροξείδιο έχει μία ώρα χρόνο ημίσειας ζωής στους 73°C και γι' αυτό είναι εξαιρετικά αποδοτικό στο σχηματισμό διασταυρώσεων (crosslinkings) στις τυπικές θερμοκρασίες (HAV) από 538°C έως 760°C, [20].

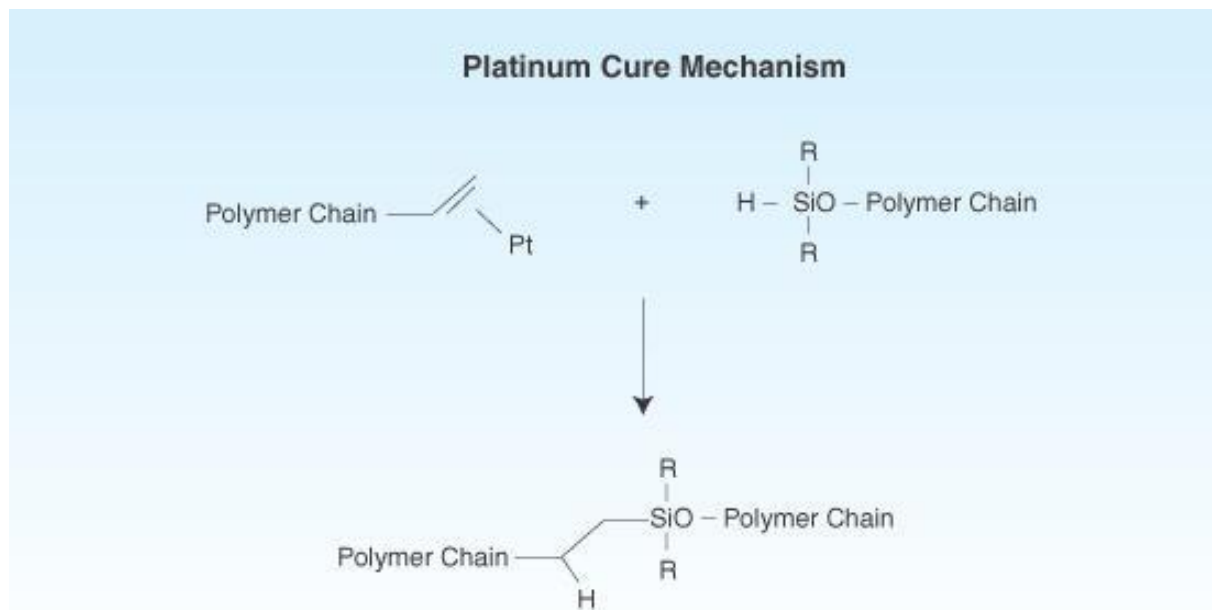
Η χρήση του υπεροξειδίου του 2,4 διχλωροβενζολίου έχει δυο δυνητικά μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι περιβαλλοντολογικό επειδή μικρά ποσά πολυχλωρινούχων διφαινυλίων παράγονται ως παραπροϊόν της αντίδρασης διασταύρωσης (crosslinking). Το δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι το πρωταρχικό προϊόν της αποσύνθεσης, το 2,4 διχλωροβενζοϊκό οξύ, αναδεικνύεται από μόνο του σαν λευκή κρυσταλλική πούδρα που τείνει να διαχέεται στην επιφάνεια του σωλήνα, προκαλώντας 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 1-11. Μηχανισμός σκλήρυνσης σιλικόνης με υπεροξείδιο.

Η σκλήρυνση με πλατίνα του ελαστικού από σιλικόνη προσφέρει 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 πολυλειτουργικό 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), [19].

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 πρόωρη 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 1-12. 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 αναμιγνύονται 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 μία 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.

1.6.3 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) [8]. 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

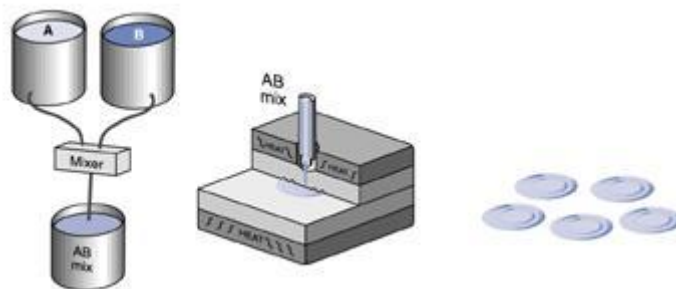
καλουπιών με πολλές κοιλότητες. Στη χύτευση μεταφοράς ένα υδραυλικό έμβολο εκτοπίζει το τήγμα ελαστικού διαμέσου των πυλών (οπών) και το εγχύει μέσα στις κοιλότητες του καλουπιού. Η μέθοδος της χύτευσης με συμπίεση διαφέρει στο ότι το ελαστικό τοποθετείται με φυσικό τρόπο μέσα στις κοιλότητες του καλουπιού 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.

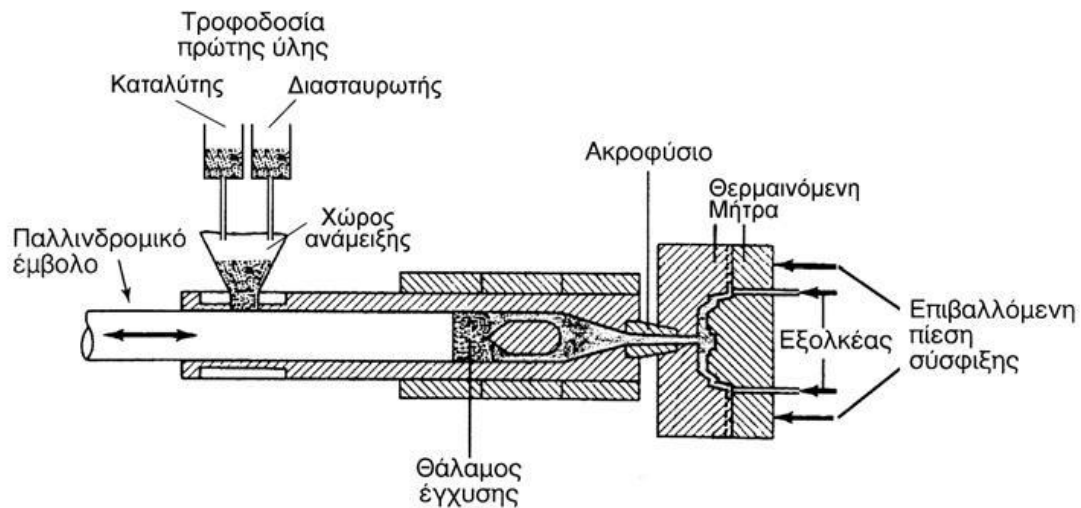
1.6.3.1 Χύτευση με έγχυση τήγματος (LIM – Liquid Injection Molding)

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 ανάμειξης (mixer) για ομογενοποίηση. Έπειτα η αναμεμιγμένη 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 1-13 και 1-14). 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.



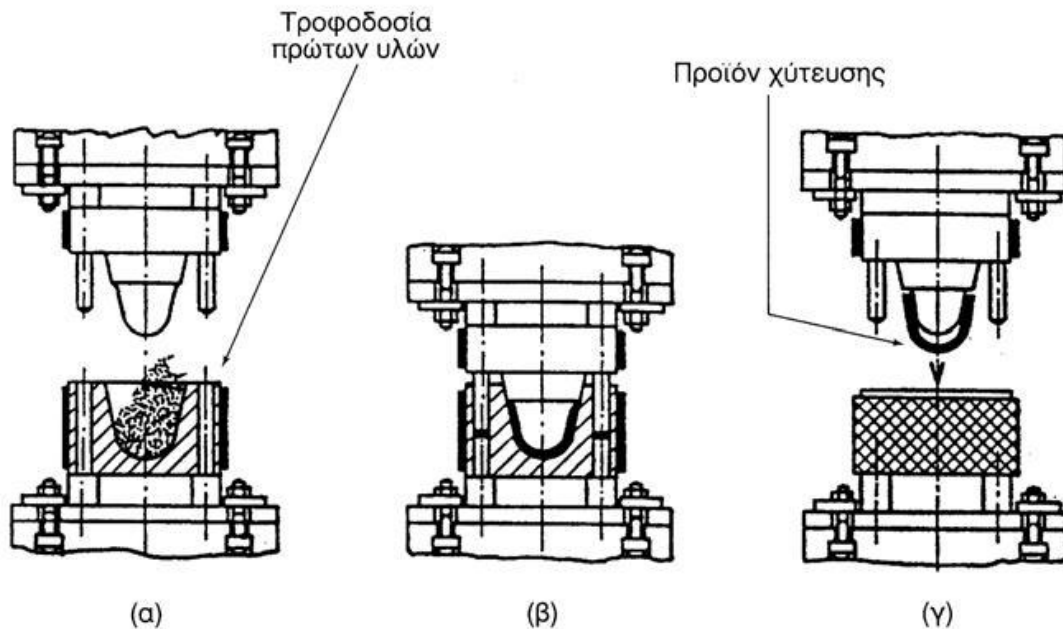
Εικόνα 1-13. Στάδια μεθόδου LIM: ανάμειξη για ομογενοποίηση, χύτευση σε καλούπι και παραγωγή κομματιών.



Εικόνα 1-14. LIM με χρήση παλινδρομικού εμβόλου.

1.6.3.2 Χύτευση με συμπίεση

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 1-15). 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).

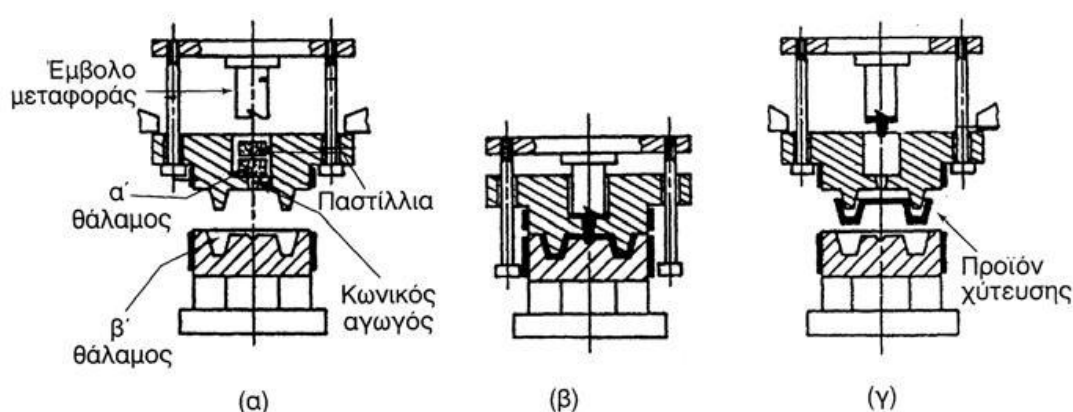


Εικόνα 1-15. Σχηματική παράσταση της διαδικασίας χύτευσης με συμπίεση: (α) τοποθέτηση της πρώτης ύλης, (β) συμπίεση με ταυτόχρονη θέρμανση και (γ) λήψη τελικού προϊόντος.

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

1.6.3.3 Χύτευση μεταφοράς (Transfer Molding)

Η μορφοποίηση με χύτευση μεταφοράς πραγματοποιείται σε διπλό θάλαμο (εικόνα 1-16). 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.

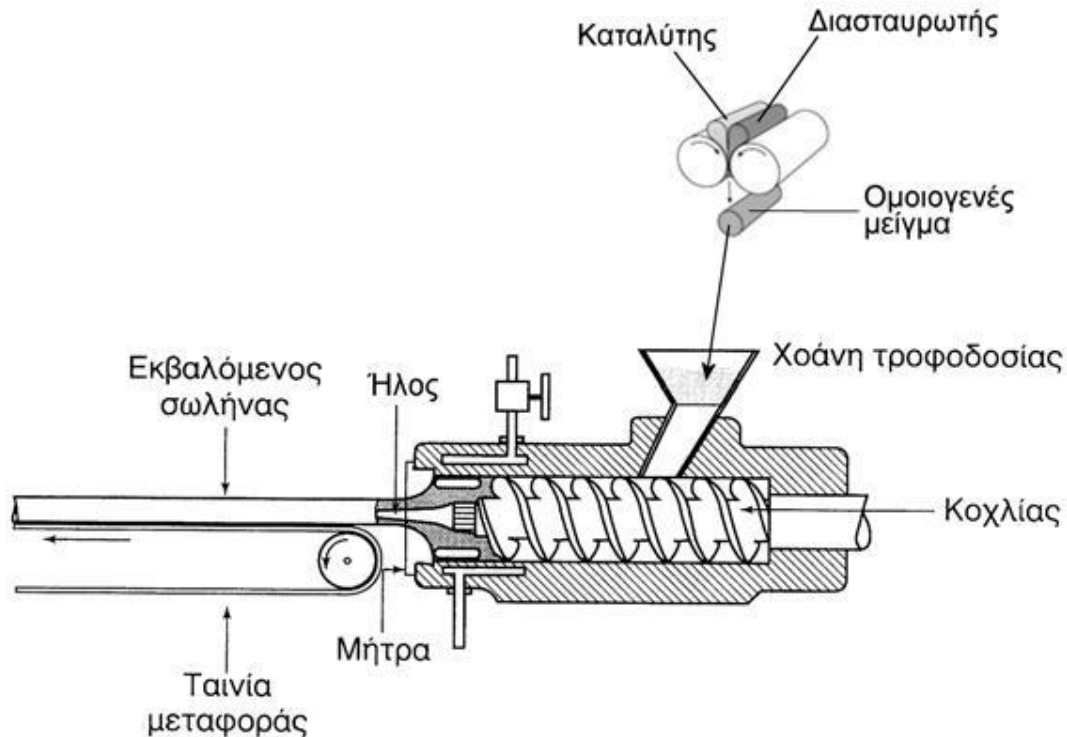


Εικόνα 1-16. Σχηματική παράσταση μορφοποίησης με χύτευση μεταφοράς: (α) τροφοδότηση της πρώτης ύλης στον πρώτο θάλαμο, (β) τήξη της πρώτης ύλης στον πρώτο θάλαμο και ψεκασμός του τήγματος στο δεύτερο θάλαμο, όπου και πολυμερίζεται και (γ) παραλαβή προϊόντος.

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.

1.6.3.4 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 1-17).

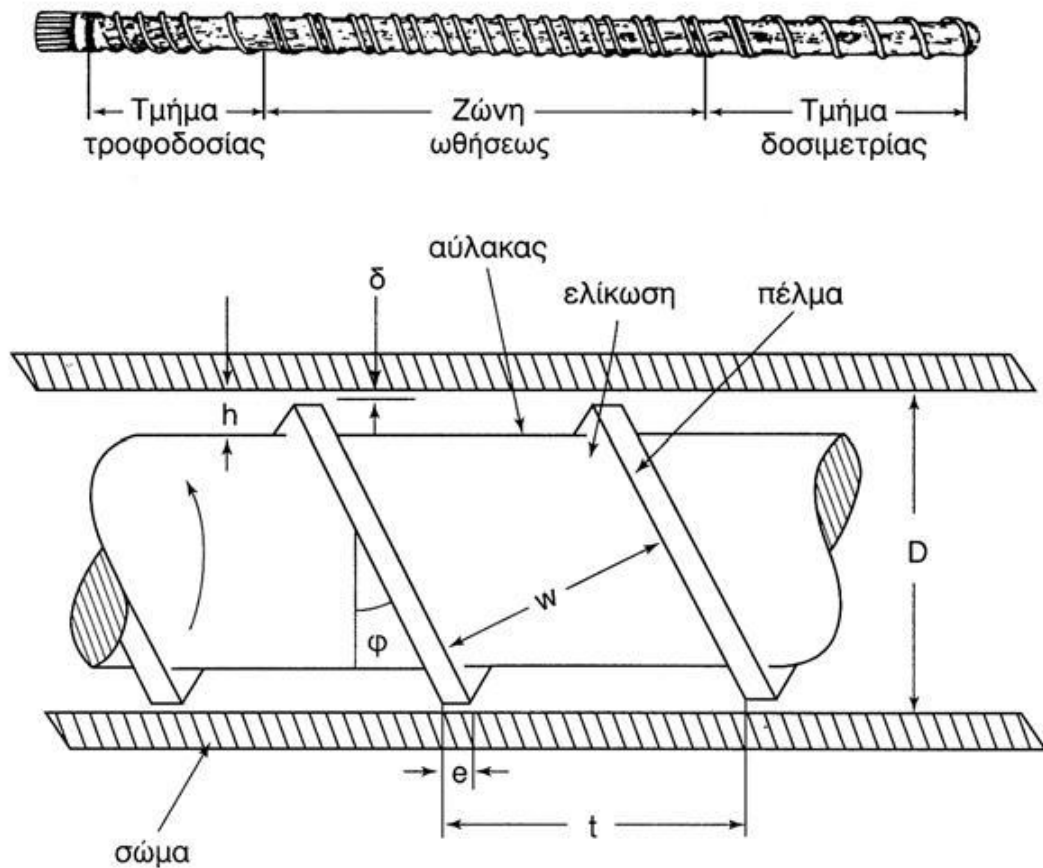


Εικόνα 1-17. Σχηματική παράσταση της εκβολής, με το μύλο ανάμειξης, την τροφοδοσία, την εξώθηση και τη μορφοποίηση του εκβαλλόμενου σωλήνα μέσω του ήλου και της μήτρας.

Ο δοσιμετρικός κοχλίας ενός συστήματος εκβολής είναι ένα εξάρτημα, του οποίου ο σχεδιασμός παίζει σπουδαίο ρόλο στην όλη διαδικασία. Τα βασικά τμήματα του κοχλίου είναι τρία: τμήμα τροφοδοσίας, ζώνη ώθησεως και τμήμα δοσιμετρίας (εικόνα 1-18).

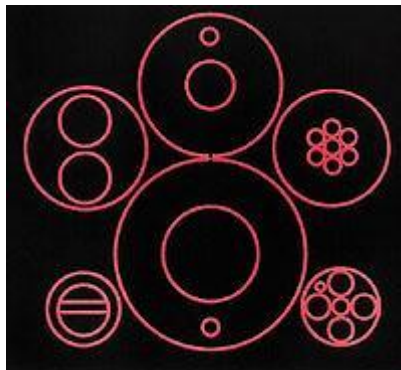
Η τροφοδοσία του ομοιογενούς μείγματος ρυθμίζεται μόνον από τις πρώτες ελικώσεις του κοχλίου. Μετά από κάποιο μήκος του κοχλίου, που αντιστοιχεί στο τμήμα τροφοδοσίας, αρχίζει η ώθηση του υλικού. Στην εικόνα 1-18 φαίνεται λεπτομέρεια του κοχλίου εκβολής. Η τριβή ανάμεσα στον κοχλία και στο μείγμα του ελαστομερούς βοηθά την ταχεία προώθησή τους, ο δε συντελεστής τριβής μπορεί να ρυθμιστεί από τη γωνία ελίκωσης (φ). Η βέλτιστη γωνία ελίκωσης κυμαίνεται από 15° έως 20° . Στο τμήμα της δοσιμετρίας, το βάθος της αύλακος του κοχλίου (δ) είναι το μικρότερο από κάθε άλλο τμήμα. Για το λόγο αυτό το τμήμα δοσιμετρίας καθορίζει τη συμπεριφορά ολόκληρου του κοχλίου 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 1-18. Κοχλίας εκβολής και χαρακτηριστικά μεγέθη τμήματος του κοχλίας εκβολής, D : διάμετρος, φ : γωνία ελίκωσης, t : βήμα ελίκωσης, δ : 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 1-19). 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 1-19. 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.

1.6.3.5 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».

1.6.4 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, νέα κατηγορία ελαστομερών σιλικόνης σκληρυμένης με πλατίνα έχει προταθεί που βελτιστοποιεί αυτές τις κρίσιμες ιδιότητες (πίνακας 1-1).

Χαρακτηριστική ιδιότητα	Κλασσική διεργασία σκλήρυνσης με πλατίνα	Νέα κατηγορία σκλήρυνσης με πλατίνα
Σκληρότητα , shore (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 22hrs σε177C°(%)	50	30
Αναταξιμότητα Bayshore(%)	48	61
Υστέρηση (%)	53	41
Ειδικό Βάρος	1,15	1,12

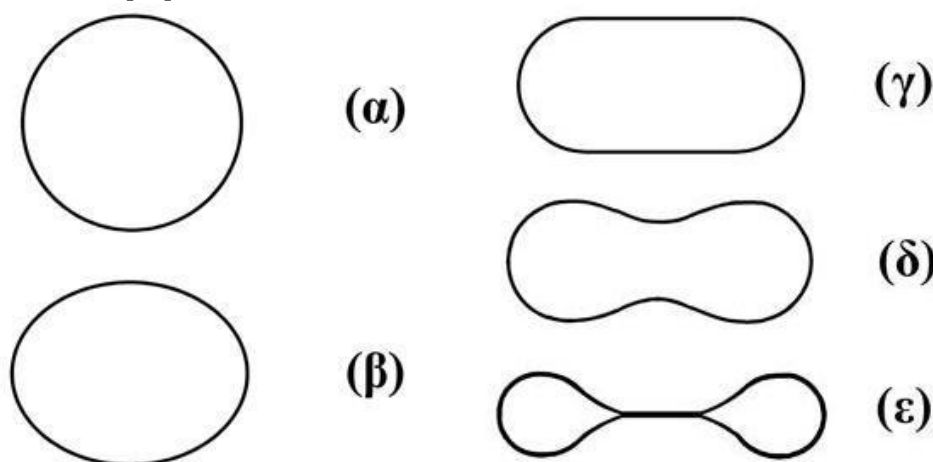
Πίνακας 1-1. Χαρακτηριστικές ιδιότητες ελαστομερών σιλικόνης σκληρυμένης με πλατίνα με κλασσική διεργασία και βελτιωμένη.

Ο παραγόμενος σωλήνας σιλικόνης μέσω χύτευσης με έγχυση τήγματος (LIM – Liquid Injection Molding) είναι 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 κατέχει διευρυμένο ρόλο σε πολλές μελλοντικές καινοτομικές εφαρμογές κατασκευής σωλήνων για τις ιατρικές συσκευές.

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 10 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 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.

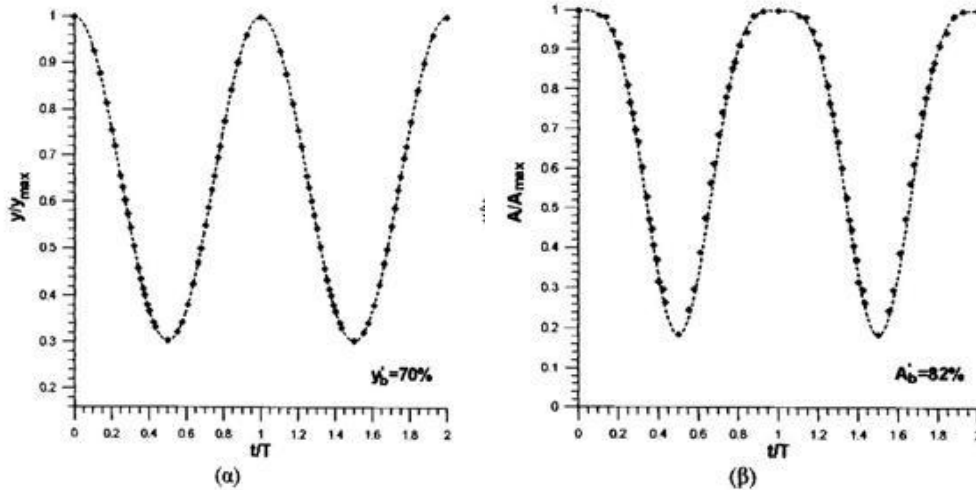
1.7 Συμπεριφορά της διατομής του εύκαμπτου αγωγού

Σκοπός αυτής της παραγράφου είναι να παρουσιάσει πως διαμορφώνεται η εγκάρσια διατομή του εύκαμπτου αγωγού, καθώς αυτός συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται στο σημείο διέγερσης. Δηλαδή, αναπτύσσεται η σχέση της μεταβαλλόμενης διατομής A με την εκάστοτε επιβαλλόμενη κατακόρυφη μετατόπιση y (εικόνα 1-21). Η εύρεση της διατομής του εύκαμπτου αγωγού στο σημείο που συμπιέζεται για το χρονικό διάστημα μίας περιόδου, μέσω αναλυτικής σχέσης, είναι πολύ δύσκολη. Αυτό συμβαίνει διότι η διατομή του εύκαμπτου αγωγού από κυκλική που είναι στην αρχή, καθώς συμπιέζεται προοδευτικά μετατρέπεται σε ελλειπτική, ενώ με παραπάνω συμπίεση συνίσταται από ένα ορθογώνιο και δύο ημικυκλικούς δίσκους, και προς το τέλος διαμορφώνεται η περίμετρός της αρχικά σε ωοειδή του Cassini, καταλήγοντας περαιτέρω σε ένα λημνίσκο του Bernoulli, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-20. [22]



Εικόνα 1-20. Διαδοχικές θέσεις συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού, όπου η εγκάρσια διατομή του καταλαμβάνει διάφορα γεωμετρικά σχήματα όπως, (α) κύκλος, (β) έλλειψη, (γ) ορθογώνιο με δύο ημικυκλικούς δίσκους εκατέρωθεν, (δ) ωοειδής του Cassini, (ε) λημνίσκος του Bernoulli.

Επομένως, σύμφωνα με κατάλληλο πείραμα που διεξήχθηκε [6] συμπιέστηκε πληρωμένος με διάλυμα NaCl εύκαμπτος αγωγός σε κάποια θέση όπου με χρήση βιντεοκάμερας και κατάλληλου λογισμικού μετατράπηκαν τα διάφορα φωτογραφικά στιγμιότυπα σε mm μέσω pixels. Από την προσεγγιστική προσαρμογή των πειραματικών σημείων προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα όπου αναπαριστούν γραφικά τις αδιαστατοποιημένες συναρτήσεις της κατακόρυφης μετατόπισης $y=y(t)$ και της εγκάρσιας διατομής $A=A(t)$



Εικόνα 1-21. (α) Αδιάστατη χρονική συνάρτηση κατακόρυφης μετατόπισης y/y_{max} μέχρι του σημείου που εφάπτεται με τον εύκαμπτο αγωγό. **(β)** Αδιάστατη χρονική συνάρτηση της εγκάρσιας διατομής A/A_{max} του εύκαμπτου αγωγού που η κατακόρυφη μετατόπιση προκαλεί συμπίεση – αποσυμπίεση.

Στις πραγματικές συνθήκες του πειράματος που διεξήχθηκε, τις στιγμές όπου ο εύκαμπτος αγωγός ήταν σε απαραμόρφωτη κατάσταση, η διατομή του θεωρήθηκε ότι έχει κυκλικό σχήμα εξαιτίας της αυξημένης εσωτερικής πίεσης στην οποία βρίσκεται το ρευστό εντός του σε σχέση με την εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση. Από τα διαγράμματα που προέκυψαν από την προσεγγιστική προσαρμογή των πειραματικών σημείων, διεξήχθησαν τα ακόλουθα συναρτησιακά:

$$\frac{y}{D_o} = 1 - \frac{y_o}{2D_o} \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right] = 1 - y_b \sin^2 \left(\pi \frac{t}{T} \right) \quad (1.1)$$

$$\frac{A}{A_o} = 1 - \frac{A_b}{4} \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right]^2 = 1 - A_b \sin^4 \left(\pi \frac{t}{T} \right) \quad (1.2)$$

Όπου:

$A_b = (A_o - A_{min}) / A_o$ το πλάτος συμπίεσης της διατομής

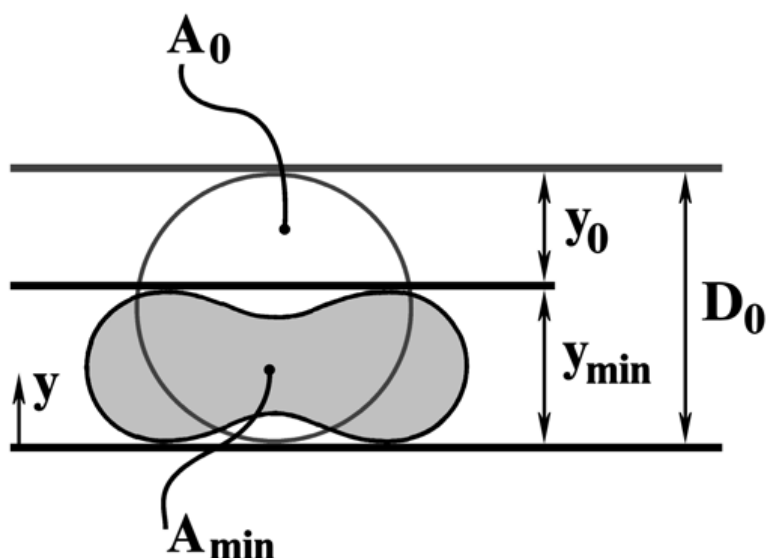
y_o η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της διαμέτρου του σωλήνα στην πλήρη αποσυμπίεση και του ανώτερου οριζόντιου επιπέδου του σωλήνα στην θέση μέγιστης συμπίεσης, βλέπε και την εικόνα 1-22 για λεπτομέρειες

$y_b = y_o / D_o = (D_o - y_{min}) / D_o$ όπου y_{min} να είναι η ελάχιστη κατακόρυφη απόσταση, άνω και κάτω, που μπορεί να συμβεί στη διάρκεια μίας περιόδου, δηλαδή είναι η κατακόρυφη απόσταση όταν συμπιέζεται ο εύκαμπτος αγωγός κατά το μέγιστο δυνατό

A_{max} η αρχική μέγιστη διατομή του εύκαμπτου αγωγού πριν υποστεί οποιαδήποτε συμπίεση

y η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση της εσωτερικής εγκάρσιας διατομής του παραμορφωμένου εύκαμπτου αγωγού για κάθε χρονική στιγμή

T η περίοδος διέγερσης του εύκαμπτου αγωγού.



Εικόνα 1-22. Τα παραπάνω μεγέθη σε σχήμα για καλύτερη κατανόηση

Απαλείφοντας το χρόνο ανάμεσα στις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η παρακάτω μη γραμμική σχέση μεταξύ της αδιάστατης κατακόρυφης μετατόπισης y/D_0 σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια διατομή A/A_0 του εύκαμπτου αγωγού γίνεται:

$$\frac{y}{D_0} = 1 - \frac{y_b}{\sqrt{A_b}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_0}} \quad (1.3)$$

όπου $A_0 = \pi D^2/4$

Σκοπός τώρα είναι να συσχετιστεί το εμβαδόν A της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού με την αυξανόμενη ακτίνα του έκκεντρου συμπίεσης r_e . Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ακτίνα του έκκεντρου r_e με τη γωνία περιστροφής φ καθορίζει πόσο απότομα ή όχι συμπιέζεται ο εύκαμπτος αγωγός και επομένως πως μεταβάλλεται η εγκάρσια διατομή του μέσα σε μία περίοδο διέγερσης. Ο ρυθμός έγχυσης του ρευστού σε μία περίοδο εξαρτάται από αυτή τη μεταβολή στο χρόνο της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού, για σταθερό μήκος επιβολής του εμβολισμού.

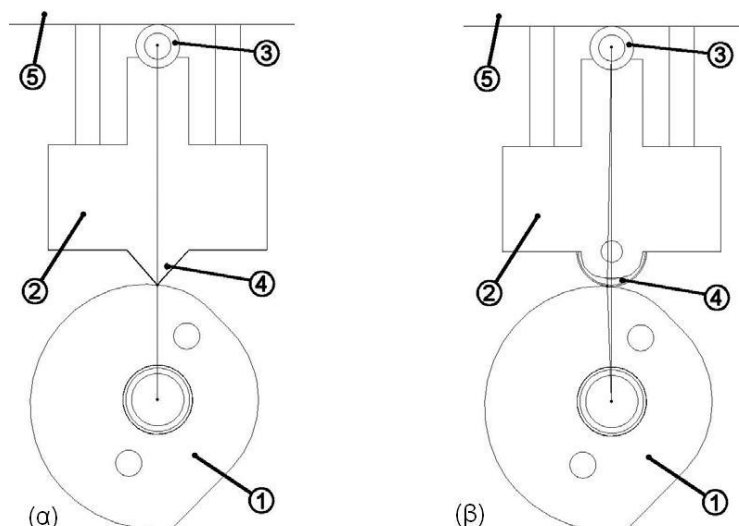
Σημειώνεται εδώ ότι για υψηλές συχνότητες διέγερσης το πώς μεταβάλλεται η εγκάρσια διατομή του εύκαμπτου αγωγού δεν παίζει σχεδόν κανένα ρόλο στην επίτευξη σταθερής, συνεχούς και συγκεκριμένης παροχής ρευστού. Αρκεί μόνο η μεταβολή της συχνότητας διέγερσης για την επίτευξη της επιθυμητής τιμής της παροχής έγχυσης από την αντλία. Ωστόσο, σε χαμηλές συχνότητες, όπως αυτές που απαιτούνται για την έγχυση φαρμάκων με πολύ χαμηλή παροχή σε ανθρώπινους οργανισμούς, η μία περίοδος εμβολισμού του εύκαμπτου αγωγού μπορεί να διαρκεί έως και μερικά λεπτά, οπότε πρέπει η εγχυόμενη ποσότητα του ρευστού να ισοκατανέμεται μέσα σε μία περίοδο. Ο υπολογισμός που γίνεται εδώ καλύπτει ουσιαστικά αυτήν την περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων διέγερσης.

Τα βασικά κριτήρια που οδηγούν στον υπολογισμό του έκκεντρου αναπτύσσονται παρακάτω. Η ελάχιστη ακτίνα του έκκεντρου διαγράφεται για τόσες μοίρες γωνίας περιστροφής, όσες απαιτείται ο εύκαμπτος αγωγός να μένει στην απαραμόρφωτη θέση. Στη συνέχεια, η ακτίνα αυξάνεται με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται γραμμική μείωση του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού με το χρόνο, η οποία οδηγεί σε γραμμική μεταβολή με το χρόνο του εγχυόμενου όγκου εμβολισμού του ρευστού και συνεπώς σε σταθερή παροχή εγχυόμενου ρευστού. Τέλος, η μέγιστη τιμή της ακτίνας του έκκεντρου αντιστοιχεί στη μέγιστη συμπίεση του εύκαμπτου αγωγού. Η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης ακτίνας του κάθε έκκεντρου πρέπει να ισούται με το μέγιστο βάθος συμπίεσης $D_0 - y_{\min}$ που επιβάλλεται στον εύκαμπτο αγωγό και προφανώς διαφέρει ανάλογα αν το έκκεντρο

χρησιμοποιείται για έμβολα ή βαλβίδες (στις αντλίες ενός ή δύο σταδίων). Η γωνία φ_e επίσης μεταξύ των ακραίων τιμών της ακτίνας του έκκεντρου εκλέγεται ανάλογα με τη χρήση (έμβολο ή βαλβίδα) και με βάση το χρονισμό.

Η παραδοχή που χρειάζεται για τον εύκολο συσχετισμό της κατακόρυφης εσωτερικής απόστασης y της εγκάρσιας διατομής του παραμορφωμένου εύκαμπτου αγωγού με την αυξανόμενη ακτίνα του έκκεντρου συμπίεσης r_e , χωρίς να προκαλείται ουσιαστικό σφάλμα στη γραμμική μεταβολή του όγκου εμβολισμού με το χρόνο, αφορά το σημείο επαφής του έκκεντρου με το έμβολο-δάχτυλο. Θεωρείται ότι αυτό το σημείο επαφής μετατοπίζεται μόνο κατακόρυφα και ανήκει στην ευθεία που ορίζεται από το ακλόνητο κέντρο περιστροφής του έκκεντρου και το κέντρο συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού, το οποίο μετατοπίζεται επίσης μόνο κατακόρυφα. Δηλαδή, τα σημεία περιστροφής του έκκεντρου, κέντρου συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού και επαφής του έκκεντρου με το έμβολο-δάχτυλο είναι συνευθειακά. Αυτή η ευθεία υποτίθεται ότι παραμένει συνεχώς κάθετη στο επίπεδο συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού (καπάκι αντλίας), κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης.

Στην πραγματικότητα σχηματίζεται μεταβαλλόμενη γωνία $\theta \neq \pi$ με κορυφή το σημείο επαφής του έκκεντρου και πλευρές τα τμήματα με άκρα το κέντρο περιστροφής του έκκεντρου και το κέντρο συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού αντίστοιχα, (εικόνα 1-23). Η γωνία αυτή εξαρτάται από το πόσο απότομη είναι η αύξηση της ακτίνας του έκκεντρου r_e με βάση την επιθυμητή συμπίεση και από την επιφάνεια του εμβόλου-δάχτυλου με την οποία έρχεται σε επαφή το έκκεντρο. Η αύξηση της ακτίνας του έκκεντρου είναι αυστηρά καθορισμένη με βάση την επίτευξη γραμμικής μεταβολής του όγκου εμβολισμού, και συνεπώς δε μπορεί να σχεδιαστεί για παράδειγμα πιο ομαλό για την προσέγγιση της γωνίας $\theta \approx \pi$. Ωστόσο, η επιφάνεια του εμβόλου-δάχτυλου, με την οποία έρχεται σε επαφή το έκκεντρο, μπορεί να επιλεγεί κατάλληλα, ώστε να ισχύει η προαναφερθείσα συνευθειακή συνθήκη. Αν η διαμόρφωση του εμβόλου-δάχτυλου είναι επίπεδη επιφάνεια με άπειρη ακτίνα καμπυλότητας, η οποία εφάπτεται με το έκκεντρο, τότε η γωνία θ απομακρύνεται από την τιμή π και η παραπάνω θεώρηση της συνευθειακής συνθήκης δεν είναι σωστή, ώστε να χρησιμοποιηθεί για το συσχετισμό των γεωμετρικών παραμέτρων y και r_e . Αντίθετα, αν η διαμόρφωση του εμβόλου-δάχτυλου είναι ακίδα με μηδενική ακτίνα καμπυλότητας, [εικόνα 1-23(α)], η οποία εφάπτεται με το άκρο της στο έκκεντρο σε ένα σημείο, τότε δεν υφίσταται κανένα σφάλμα με τη θεώρηση της παραπάνω συνευθειακής συνθήκης, διότι είναι προφανές ότι το σημείο αυτό ανήκει στην ευθεία που ορίζουν τα δύο κέντρα, περιστροφής του έκκεντρου και συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού αντίστοιχα.

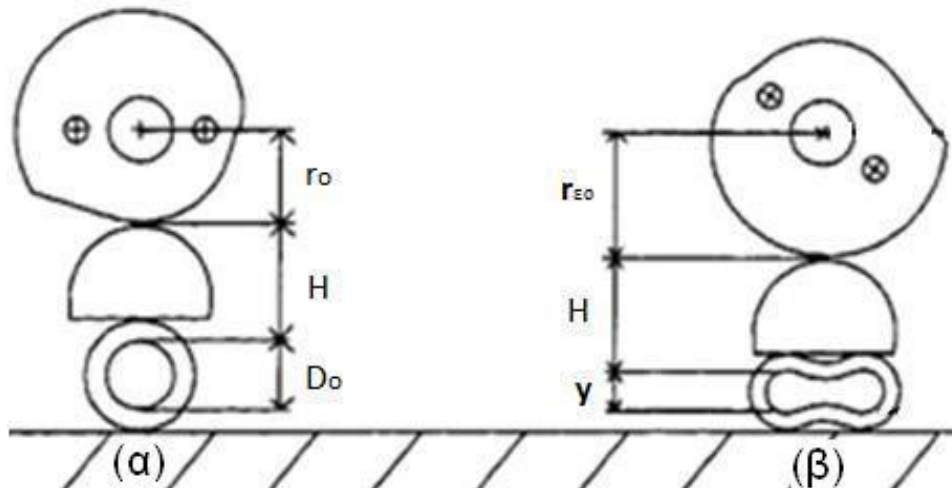


Εικόνα 1-23. Μηχανισμός μετάδοσης κίνησης του έκκεντρο στο δάχτυλο για τη συμπίεση του εύκαμπτου αγωγού. Διακρίνονται: (1) περιστρεφόμενο έκκεντρο, (2) έμβολο-δάχτυλο συμπίεσης, (3) εύκαμπτος αγωγός, (4) (α) αιχμηρή διαμόρφωση (ακίδα) εμβόλου-δάχτυλου ($\theta=\pi$), (β) ένσφαιρος τριβέας (ρουλεμάν) ($\theta\cong\pi$), (5) επίπεδη βάση συμπίεσης εύκαμπτου αγωγού (καπάκι αντλίας)

Η αιχμηρή αυτή διαμόρφωση δημιουργεί προβλήματα αντοχής των έκκεντρων, αφού εμφανίζεται έντονη συγκέντρωση τάσεων στο σημείο επαφής με αποτέλεσμα την ισχυρή φθορά του μηχανισμού, η οποία έχει επίπτωση και στην ακρίβεια έγχυσης. Εξάλλου, από ενεργειακής άποψης η λειτουργία του μηχανισμού είναι ασύμφορη λόγω μεγιστοποίησης της τριβής ολίσθησης στα σημεία επαφής των έκκεντρων με τα αιχμηρά δάχτυλα.. Επομένως, η πιο κατάλληλη επιλογή για τη διαμόρφωση του εμβόλου-δάχτυλου είναι να χρησιμοποιηθεί καμπύλη επιφάνεια, όσο το δυνατόν σχεδιαστικά γίνεται, με μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας. Η επιλογή αυτή μπορεί να είναι της μικροσκοπικός ένσφαιρος τριβέας (ρουλεμάν), της απεικονίζεται στην εικόνα 1-23(β). Με αυτήν την επιλογή η παραπάνω συνευθειακή συνθήκη είναι αποδεκτή με ελάχιστο σφάλμα και ικανοποιούνται οι κατασκευαστικές απαιτήσεις για αντοχή και ομαλή λειτουργία. Είναι προφανής η ελάχιστη απόκλιση του σημείου επαφής στην εικόνα 1-23(β), ($\theta\cong\pi$). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας ελαττώνεται, αφού υφίσταται μόνο τριβή κύλισης και όχι ολίσθησης μέσω του ένσφαιρου τριβέα (ρουλεμάν).

Στην εικόνα 1-24 απεικονίζονται χαρακτηριστικές γεωμετρικές διαστάσεις στη θέση, όπου ο εύκαμπτος αγωγός είναι απαραμόρφωτος και σε τυχαία θέση συμπίεσης. Στην απαραμόρφωτη κατάσταση αν θεωρήσουμε Y τη σταθερή απόσταση από το κέντρο περιστροφής του έκκεντρο μέχρι το κατώτερο σημείο της εσωτερικής εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού έχουμε τη σχέση:

$$Y = r_{\epsilon\sigma} + H + 2R_t \quad (1.4)$$



Εικόνα 1-24. Παραμόρφωση του εύκαμπτου αγωγού από το δάχτυλο

όπου r_{e0} είναι η αρχική ακτίνα του έκκεντρου με την οποία δεν υφίσταται οριακά καμία παραμόρφωση του εύκαμπτου αγωγού, [εικόνα 1-24(α)] και H η σταθερή απόσταση από το σημείο επαφής του έκκεντρου με το έμβολο-δάχτυλο μέχρι το ανώτερο σημείο της εσωτερικής εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού (δηλαδή το σταθερό άθροισμα του πάχους του τοιχώματος του εύκαμπτου αγωγού s με το σταθερό ύψος του εμβόλου-δάχτυλου).

Σημειώνεται εδώ ότι εκτός της περιμέτρου της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού άλλο στοιχείο, το οποίο θεωρείται ότι δε μεταβάλλεται και παραμένει σταθερό σε όλη τη διάρκεια της συμπίεσης, είναι το πάχος s του εύκαμπτου αγωγού, το οποίο παραμένει ίσο με το αρχικό (1mm). Αυτό ισχύει μόνο για τη προκαλούμενη συμπίεση από τα δάχτυλα, η οποία είναι κρίσιμη για τον εμβολισμό του ρευστού. Ωστόσο, κατά τη συμπίεση από τα δάχτυλα, όπου απαιτείται πλήρης έμφραξη (deep occlusion) του εύκαμπτου αγωγού για την αποφυγή της οπισθορροής, το πάχος του εύκαμπτου αγωγού ελαττώνεται μετά την πλήρη έμφραξη.

Σε τυχαία θέση συμπίεσης, (εικόνα 1-24), σύμφωνα με τις θεωρήσεις η απόσταση Y είναι σταθερή όμοια με αυτή της αρχικής και απαραμόρφωτης κατάστασης και δίνεται από τη σχέση:

$$Y = r_e + H + y \quad (1.5)$$

Από τις (1.4) και (1.5) προκύπτει

$$r_e = r_{e0} + D - y \quad (1.6)$$

Από τη μη γραμμική σχέση μεταξύ της αδιάστατης κατακόρυφης μετατόπισης y/D_0 σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια διατομή A/A_0 του εύκαμπτου αγωγού (1.3) είναι

$$y = D_0 - \frac{D_0 y_b}{\sqrt{A_b}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_0}}$$

Για $A = A_0$ προκύπτει ότι $y = D_0$ ενώ για $A = 0 \Rightarrow$

$$y = D_0 - \frac{D_0 y_0}{\sqrt{A_b}} \rightarrow y = 0$$

αφού $A_b = 1$, $y_b = 1$ επειδή θεωρούμε $y_{\min} = 0$ οπότε και $A_{\min} = 0$ διότι μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε πώς μεταβάλλεται η εγκάρσια διατομή με την κατακόρυφη μετατόπιση ως την πλήρη έμφραξη.

Άρα $0 \leq A \leq A_0$, $0 \leq y \leq D_0 = 2R_t$

Αντικαθιστώντας στη σχέση αυτή την κατακόρυφη εσωτερική απόσταση της εγκάρσιας διατομής του παραμορφωμένου εύκαμπτου αγωγού y από τη σχέση (1.6), συσχετίζεται τελικά η ακτίνα του έκκεντρου r_ε με το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής A ως εξής:

$$r_\varepsilon = r_{\varepsilon 0} + D_0 - D_0 + \frac{D_0 y_b}{\sqrt{A_b}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_0}}$$

$$r_\varepsilon = r_{\varepsilon 0} + \frac{D_0 y_b}{\sqrt{A_b}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_0}} \quad A_b = 1, y_b = 1$$

$$r_\varepsilon = r_{\varepsilon 0} + D_0 \sqrt{1 - \frac{A}{A_0}} \rightarrow r_\varepsilon = r_{\varepsilon 0} + 2R_t \sqrt{1 - \frac{A}{\pi R_t^2}}$$

$$r_\varepsilon = r_{\varepsilon 0} + 2 \sqrt{R_t^2 - \frac{A}{\pi}} \quad (1.7)$$

Για την επίτευξη σταθερής παροχής εγχυόμενου ρευστού πρέπει να επιτυγχάνεται γραμμική μεταβολή με το χρόνο του εγχυόμενου όγκου εμβολισμού του ρευστού. Αυτό είναι δυνατό μόνο όταν συμβαίνει γραμμική μείωση του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού με το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει η μεταβολή αυτού του εμβαδού A με τη γωνία περιστροφής του έκκεντρου φ να είναι γραμμική σύμφωνα με τη σχέση

$$A = C_1 \varphi + C_2 \quad (1.8)$$

όπου C_1 , C_2 προσδιοριζόμενοι συντελεστές ανάλογα με τις τιμές του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής για τιμές γωνίας περιστροφής του έκκεντρου $\varphi=0^\circ$ και $\varphi=\varphi_E$ στην αρχή και στο τέλος του διαστήματος συμπίεσης αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας την εγκάρσια διατομή από τη σχέση (1.8) στη σχέση (1.7) προκύπτει για το διάστημα συμπίεσης η εξίσωση διαμόρφωσης του έκκεντρου μετάβασης από μία αρχική ακτίνα r_0 σε μία μέγιστη τελική $r_{\varepsilon \max}$ συναρτήσει της γωνίας περιστροφής φ ως εξής:

$$r_\varepsilon = r_{\varepsilon 0} + 2 \sqrt{R_t^2 - \frac{C_1 \varphi + C_2}{\pi}} \quad (1.9)$$

Θεωρούμε λοιπόν μια μετάβαση (συμπίεσης ή αποσυμπίεσης) μεταξύ μιας αρχικής γωνιακής θέσης φ_S και μιας τελικής φ_E όπου ο εύκαμπτος αγωγός έχει μια αρχική διατομή A_S και μια τελική A_E αντίστοιχα. Τότε για $\varphi = \varphi_S$ έχουμε $\rightarrow r_E = r_S$ και $A = A_S$ οπότε $A_S = C_1 \varphi_S + C_2 \rightarrow$

$$C_2 = A_S - C_1 \varphi_S \quad (1.8a)$$

Αντικαθιστώντας στην (1.7) την (1.8a) και κάνοντας πράξεις προκύπτει:

$$C_2 = \pi R_t^2 - \pi \left(\frac{r_S - r_0}{2} \right)^2 \quad (1.8b)$$

Από (1.8a) και (1.8b) προκύπτει

$$A_S = \pi R_t^2 - \pi \left(\frac{r_s - r_o}{2} \right)^2 \quad (1.8\gamma)$$

Αντίστοιχα για $\varphi = \varphi_E \Rightarrow r_\varepsilon = r_E$ και $A = A_E$ οπότε $A_E = C_1 \varphi_E + C_2 \Rightarrow C_2 = A_E - C_1 \varphi_E$ (1.8δ)

Αντικαθιστώντας την εγκάρσια διατομή από τη σχέση (1.8δ) στη σχέση (1.7) προκύπτει:

$$r_E = r_{\varepsilon o} + 2 \sqrt{R_t^2 - \frac{C_1 \varphi_E + C_2}{\pi}}$$

$$\pi \left(\frac{r_E - r_o}{2} \right)^2 = \pi R_t^2 - C_1 \varphi_E - C_2 \Rightarrow C_2 = \pi R_t^2 - C_1 \varphi_E - \pi \left(\frac{r_E - r_o}{2} \right)^2 \quad (1.8\epsilon)$$

Από (1.8α) και (1.8β) προκύπτει:

$$A_E = \pi R_t^2 - \pi \left(\frac{r_s - r_o}{2} \right)^2 \quad (1.8\sigma\tau)$$

Η σταθερά C_1 προκύπτει συνδυάζοντας τις (1.8α) και (1.8στ) οπότε:

$$A_S - C_1 \varphi_S = A_E - C_1 \varphi_E \rightarrow A_S - A_E = C_1 (\varphi_S - \varphi_E) \quad (1.10)$$

Αντικαθιστώντας στην (1.10) τις (1.8γ) και (1.8ζ) έχουμε

$$\pi R_t^2 - \pi \left(\frac{r_s - r_o}{2} \right)^2 - \pi R_t^2 - \pi \left(\frac{r_s - r_o}{2} \right)^2 = C_1 (\varphi_S - \varphi_E)$$

$$C_1 = \frac{\pi}{4(\varphi_S - \varphi_E)} [(r_s - r_E)^2 - (r_E - r_o)^2] \quad (1.10\alpha)$$

Η C_2 προκύπτει συνδυάζοντας τις (1.8β) και (1.10α)

$$C_2 = \pi R_t^2 - \pi \left[\frac{r_s - r_o}{2} \right]^2 - \frac{\pi}{4(\varphi_S - \varphi_E)} [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \varphi_S$$

Κατόπιν πράξεων έχουμε:

$$C_2 = \pi R_t^2 - \frac{\pi}{4} \left[\frac{\varphi_S (r_E - r_o)^2 - \varphi_E (r_s - r_o)^2}{\varphi_S - \varphi_E} \right] \quad (1.10\beta)$$

Αντικαθιστώντας τις σταθερές C_1 , C_2 στην (1.9) και μετά από πράξεις βρίσκουμε μία γενικευμένη σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου με την περιστροφή, $r_\varepsilon(\varphi)$, από μία αρχική θέση (φ_s , r_s) σε μία τελική (φ_E , r_E) με ελάχιστη ακτίνα αναφοράς r_o , ώστε η μεταβολή της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού να είναι γραμμική, είτε πρόκειται για συμπίεση, είτε για αποσυμπίεση:

$$r_\varepsilon = r_o + \frac{\sqrt{\varphi_S (r_E - r_o)^2 - \varphi_E (r_s - r_o)^2 + \varphi [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]}}{\varphi_S - \varphi_E}$$

Για την πραγματοποίηση του σχεδιασμού μίας γραμμικής περισταλτικής αντλίας είναι απαραίτητη η μελέτη της αρχής λειτουργίας τους. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται διεξοδικά ο τρόπος λειτουργίας δύο τέτοιων γραμμικών περισταλτικών αντλιών από το αρχικό στάδιο του εννοιολογικού σχεδιασμού (concept design) μέχρι τις τεχνικά σχεδιαστικές

λεπτομέρειες. Η μία αντλία συμπίεζει τον εύκαμπτο αγωγό κατά κυματοειδή τρόπο σε μία περίοδο συμπίεσης, [15], ενώ η άλλη σε δύο διαδοχικά τμήματα και σε δύο διαφορετικά χρονικά στάδια στην περίοδο συμπίεσης. [1],[2].

1.8 Σχεδιασμός υπόλοιπων στοιχείων της αντλίας

Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας βασίζονται σχεδιαστικά στις διαστάσεις του συγκεκριμένου εύκαμπτου αγωγού που χρησιμοποιείται, 3x5mm (εσωτερική x εξωτερική διάμετρος, εικόνα 1-26 με σωλήνα), καθώς επίσης και στις διαστάσεις των έκκεντρων όπως προκύπτουν από τους υπολογισμούς. Σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή του μήκους του μεγάλου δάχτυλου, το οποίο επιλέγεται να είναι 60 mm και συνεπώς το μήκος του μικρού είναι το μισό, 30 mm. Η επιλογή αυτού του σχετικά μεγάλου μήκους δάχτυλων γίνεται ώστε να εμβολίζεται και συνεπώς να εγχύεται σημαντική σε μέγεθος ποσότητα ρευστού, η οποία είναι εύκολα μετρήσιμη.

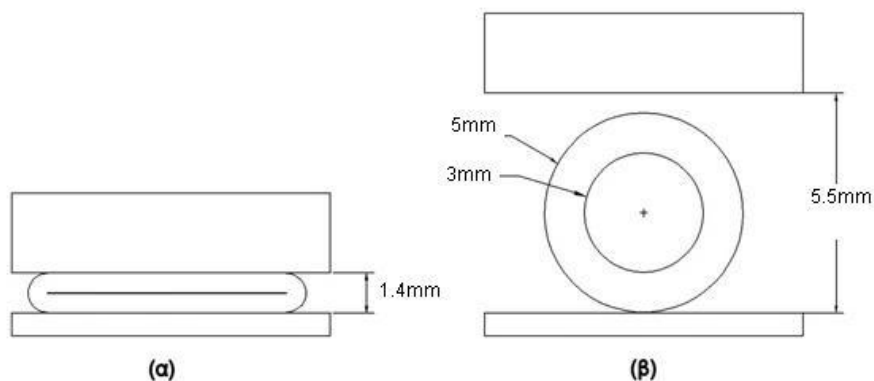
Σημαντική προσθήκη στην αντλία, αποτελούν τα ελατήρια γρήγορης επαναφοράς των εμβόλων-δάχτυλων. Πρόκειται για παλινδρομικούς μηχανισμούς κατακόρυφων αξονίσκων (πήρων), που μέσω ελατηρίων τείνουν να πιέζουν τα έμβολα να βρίσκονται σε συνεχή επαφή με τα έκκεντρα. Αποτέλεσμα είναι η πιστή διαδρομή των εμβόλων, όπως την καθορίζουν τα έκκεντρα, χωρίς να υπάρχει αλλοίωση στην κίνηση λόγω αδρανειακών δυνάμεων κατά την κίνηση. Επομένως, η δύναμη ανάταξης λόγω ελαστικότητας του εύκαμπτου αγωγού δεν είναι αυτή που μετακινεί τα έμβολα προς τα έκκεντρα, η οποία μάλιστα είναι ασθενική και σε αρκετές περιπτώσεις δε μπορεί να πραγματοποιήσει τη μετακίνηση, αλλά η δύναμη που ασκούν οι μηχανισμοί των ελατηρίων επαναφοράς είναι αυτή που αναλαμβάνει τη σίγουρη μετακίνηση των εμβόλων, όπως επιτάσσει η γεωμετρία των έκκεντρων, ακόμη και σε υψηλές συχνότητες λειτουργίας.

Όλα τα στοιχεία σχεδιάζονται ώστε να είναι εύκολα στην κατασκευή και συναρμολόγηση, ενώ γίνεται προσπάθεια χρήσης όσο το δυνατόν περισσότερων στοιχείων και εξαρτημάτων από την τυποποίηση του εμπορίου, τα οποία δε χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία. Η ακρίβεια κατασκευής κάθε στοιχείου και εξαρτήματος είναι 0.1 mm, ενώ τόση είναι και η ανοχή στις χαλαρές συναρμογές που απαιτούνται μεταξύ των κινούμενων μερών της αντλίας για την επίτευξη της επιθυμητής και ορθής λειτουργίας. Η κατασκευή των εκκέντρων γίνεται σε φρέζα CNC και του άξονα σε τόρνο. Έχοντας πίνακες με αριθμητικές τιμές των συναρτήσεων $r_e(\varphi)$ ανά 2° περιστροφής των έκκεντρων της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας εισάγονται οι τιμές αυτές απευθείας στην αυτόματη εργαλειομηχανή, ώστε να πραγματοποιηθεί η ακριβής κοπή των έκκεντρων στο επιθυμητό γεωμετρικό σχήμα.

1.9 Έκκεντρα κυματοειδούς περισταλτικής αντλίας

Η κίνηση των εμβόλων στην περισταλτική αντλία κυματοειδούς συμπίεσης πρέπει να εναρμονίζεται μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχει οπισθορροή. Συνεπώς, το ένα έμβολο πρέπει να φράσσει τον εύκαμπτο αγωγό όταν το αμέσως προηγούμενο μόλις αποφράσσει, ενώ το αμέσως επόμενο να ξεκινά να συμπίεζει τον εύκαμπτο αγωγό κοκ. ώστε το ρευστό να εμβολίζεται μόνο προς την έξοδο της αντλίας, ενώ πρέπει να αποφράσσει τον εύκαμπτο αγωγό, αφήνοντάς τον ανοικτό, όταν τα πρώτα έμβολα αποσυμπίεζουν, αναρροφώντας ρευστό από την είσοδο της αντλίας.

Για το διάστημα των πρώτων 180° το κάθε έμβολο πρέπει να συμπίεζει, όπως αναφέρθηκε, τον εύκαμπτο αγωγό από την απαραμόρφωτη θέση εξωτερικής κυκλικής διαμέτρου $2R_r+2s=5\text{mm}$ στην μέγιστα συμπιεσμένη $y_{\min}+2s=1.4\text{mm}$, [εικόνα 1-26(β) & (α)]. όπου φράσσεται πλήρως (deep occlusion), και σε τέτοιο ισχυρό βαθμό, ώστε το υλικό του τοιχώματος του σωλήνα να συμπίεζεται κατά 160%.



Εικόνα 1-25. Ο σωλήνας σιλικόνης (α) πλήρως συμπιεσμένος, (β) πλήρως ασυμπιεστος. Διακρίνονται οι διαστάσεις του.

Επομένως, τα δύο πάχη του εύκαμπτου αγωγού $s+s=2s$ από 2 mm γίνονται $s=1.4\text{mm}$. Η ισχυρή αυτή συμπίεση συμβαίνει για να διασφαλιστεί η απουσία οπισθορροής, λόγω αύξησης της πίεσης ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας της αντλίας.

Από αυτό το διάστημα συμπίεσης των 180° , τις πρώτες 150° έχουμε εμβολισμό γιατί στο σημείο αυτό των 150° μόλις φράζει τον εύκαμπτο αγωγό και στις υπόλοιπες εξακολουθεί να συμπιέζει το τοίχωμα του αγωγού μέχρι να επιτευχθεί η παραπάνω φραγή που περιγράψαμε. Σε αυτή την κατώτατη θέση παραμένει για διάστημα 30° για κάθε έμβολο. Στη συνέχεια το κάθε έμβολο αποφράσσει τον εύκαμπτο αγωγό τάχιστα σε διάστημα 42.5082978° μέχρι της πλήρους αποσυμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού, αλλά και περαιτέρω μετατόπισης κατά 0.5 mm πλέον των 5 mm που απαιτούνται για να αποσυμπιεστεί πλήρως ο εύκαμπτος αγωγός, δίνοντάς του κατά αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη ευχέρεια στην ανάταξή του [εικόνα 1-26(β)].

Σε αυτή την ανώτερη θέση παραμένει για 90.8938601° , επιτρέποντας την είσοδο του ρευστού στο χώρο ανάταξης του εύκαμπτου αγωγού κάτω από το έμβολο-δάχτυλο. Στις επόμενες 16.5978421° το έμβολο κινείται αντίθετα με προηγουμένως μέχρι απαραμόρφωτη θέση εξωτερικής κυκλικής διαμέτρου του εύκαμπτου αγωγού. Κι έτσι συμπληρώνεται ένας κύκλος περιστροφής.

Τα παραπάνω ισχύουν για το πρώτο έκκεντρο, κάθε επόμενο προκύπτει με στροφή 60° . Το 6° και το 7° έκκεντρο έχουν διαφορετικό σχεδιασμό, το 6° για τον λόγο που είδαμε στην παράγραφο 1.5, για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρχει οπισθορροή από τα άλλα 5, και το 7° γιατί είναι εκείνο που εγγύει ρευστό στον «νεκρό» χρόνο της αντλίας. [22]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

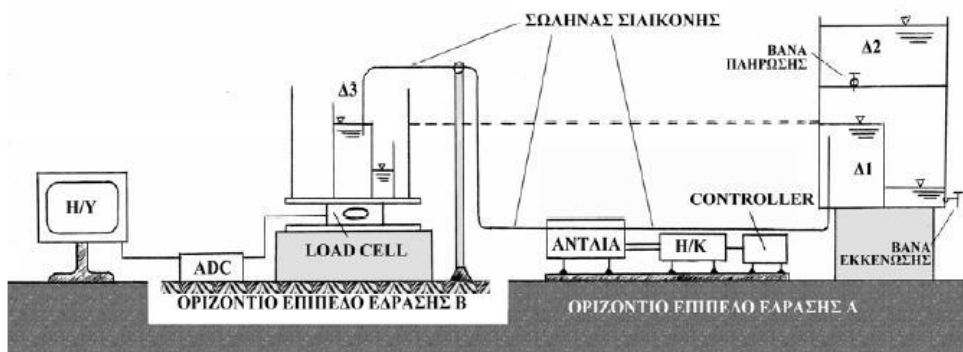
2.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη δοκιμής (εικόνα 2-1) της πρότυπης περισταλτικής αντλίας, όπως απεικονίζεται στο εικόνα 2-2, αποτελείται από μία δεξαμενή αναρρόφησης Δ1, μία τροφοδοτική δεξαμενή αυτής Δ2, μία δεξαμενή κατάθλιψης Δ3, μία δυναμοκυψέλη (Load Cell) έχοντας θέση ζυγού ακριβείας, έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC), έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y), μία γραμμική κυματοειδής περισταλτική αντλία με επτά (έξι και ένα διορθωτικό) έμβολα, ένα σωλήνα σιλικόνης, έναν αρθρωτό σύνδεσμο, έναν κινητήρα, ένα μειωτήρα στροφών και ένα ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης του κινητήρα (controller). Η στήριξη της αντλίας και του συστήματος controller-κινητήρα-μειωτήρα γίνεται πάνω σε μεταλλική βάση από σκληρό αλουμίνιο. Η στήριξη του σωλήνα σιλικόνης προς τη δεξαμενή κατάθλιψης Δ3 επιτυγχάνεται με μεταλλικό στέλεχος. Τέλος, χρησιμοποιούνται κατάλληλες ξύλινες βάσεις για τη στήριξη των δεξαμενών. Για τη μέτρηση των στροφών του κινητήρα χρησιμοποιείται ένα ταχύμετρο για ταχύτητες μεγαλύτερες των 12rpm ενώ χρησιμοποιείται χρονόμετρο για μικρότερες ταχύτητες, ενώ για τη μέτρηση, τόσο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα, όσο και της θερμοκρασίας του ρευστού χρησιμοποιούνται κατάλληλα θερμομέτρα.



Εικόνα 2-1. Η πειραματική διάταξη

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 και την λειτουργία του υπολογιστή, το σύστημα μέτρησης της δυναμοκυψέλης με τη δεξαμενή κατάθλιψης εδράζεται σε οριζόντιο επίπεδο απομονωμένο από εκείνο που εδράζονται τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης. Οπότε στο ένα οριζόντιο επίπεδο έδρασης Α υπάρχουν: η δεξαμενή αναρρόφησης που φέρνει την τροφοδοτική δεξαμενή, το σύστημα του ηλεκτροκινητήρα, η περισταλτική αντλία, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής καθώς και το στέλεχος που φέρνει το σωλήνα σιλικόνης και τον κατευθύνει προς τη δεξαμενή κατάθλιψης. Στο δε άλλο οριζόντιο επίπεδο έδρασης Β, τοποθετούμε τη δυναμοκυψέλη που φέρει τη δεξαμενή κατάθλιψης και τον αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC) που συνδέει τη δυναμοκυψέλη με τον H/Y (εικόνα 2-2). Επισημαίνεται εδώ ότι το σύστημα του H/Y και ο ADC πρέπει να βρίσκονται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους, ώστε να μην υπάρχει ηλεκτρομαγνητική επίδραση, λόγω εκπομπής θορύβου από τον H/Y στον ADC και συνεπώς να αποφεύγεται η αλλοίωση του μετρούμενου σήματος του ADC.



Εικόνα 2-2. Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης δοκιμής πρότυπης περισταλτικής αντλίας.

Όλες οι δεξαμενές του πειράματος, οι οποίες απεικονίζονται στην εικόνα 2-2, είναι από plexiglas πάχους 10 mm. Η δεξαμενή αναρρόφησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-3, έχει εξωτερικές διαστάσεις βάσης 250x220 mm και ύψος 170 mm, είναι ανοιχτή στο πάνω μέρος και στηρίζεται πάνω σε 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 άλλο 125x160 mm. Τα διαφράγματα αυτά ενώνονται έτσι ώστε να σχηματίζουν το χώρο αναρρόφησης με ύψος υπερχειλίσης 140 mm, ενώ στον υπόλοιπο χώρο συγκεντρώνεται το ρευστό που υπερχειλίζει από το χώρο αναρρόφησης. Εντός του χώρου αναρρόφησης τοποθετείται ειδικό θερμομότρο (εικόνα 2-4) για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ρευστού. Στον πυθμένα του χώρου αναρρόφησης είναι προσαρτημένος διαμετρής 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 αναρροφά το ρευστό υπό ατμοσφαιρική πίεση. Σε χαμηλό σημείο της δεξαμενής αναρρόφησης υπάρχει βάνα με την οποία μπορεί να αδειάζει το ρευστό, που συσσωρεύεται λόγω της υπερχειλίσης από το χώρο αναρρόφησης, η οποία διακρίνεται στην εικόνα 2-3.

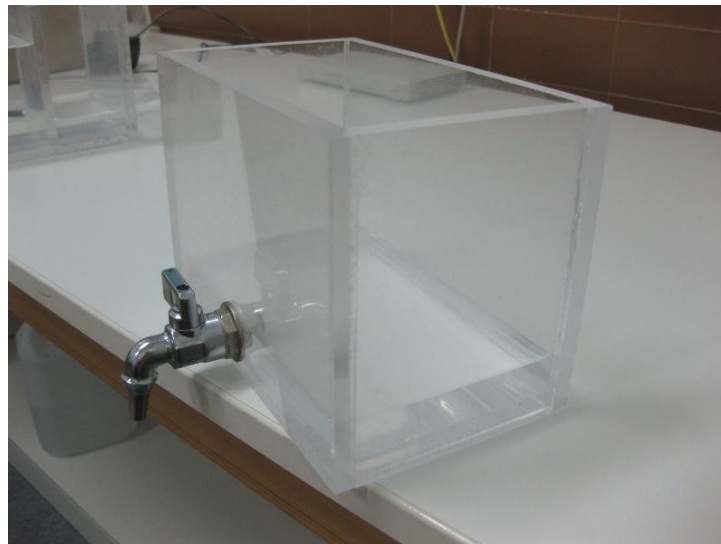


Εικόνα 2-3. Η δεξαμενή αναρρόφησης



Εικόνα 2-4. Θερμόμετρο μέτρησης θερμοκρασίας νερού.

Η τροφοδοτική δεξαμενή, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2-2 (Δ2), έχει εξωτερικές διαστάσεις βάσης 220x130 mm και ύψος 150 mm, είναι ανοιχτή επάνω και εδράζεται πάνω στη δεξαμενή αναρρόφησης. Στο κάτω μέρος της έχει βάνια μέσω της οποίας τροφοδοτεί το χώρο αναρρόφησης με ρευστό (εικόνα 2-5). Η τροφοδοσία του χώρου αναρρόφησης γίνεται με τέτοιο ρυθμό έγχυσης ρευστού (άνοιγμα βάνιας), 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 2-5. Η τροφοδοτική δεξαμενή

Για την έδραση του ηλεκτροκινητήρα και της περισταλτικής αντλίας χρησιμοποιείται μεταλλική βάση από σκληρό αλουμίνιο σχήματος ανεστραμμένου ταυ. Οι κινητήρες χαμηλών και μεσαίων στροφών (εικόνες 2-6α και 2-6β αντίστοιχα) εδράζονται οριζόντια με τέσσερις κοχλιωτές συνδέσεις στη μία τους πλάγια πλευρά έτσι ώστε να είναι πακτωμένοι και να παραμένουν ακλόνητοι κατά τη λειτουργία τους. Ο κινητήρας υψηλών στροφών (εικόνα 2-6γ), εδράζεται με το οριζόντιο τμήμα της μεταλλικής βάσης με 2 κοχλίες στο μπροστινό

του μέρος και 2 στο πίσω, ενώ αφαιρείται το κατακόρυφο τμήμα της μεταλλικής βάσης. Η δε περισταλτική αντλία ακουμπά πάνω στη μεταλλική πλάκα μέσω τεσσάρων κατάλληλων ρυθμιζόμενων αποστατών κυλινδρικού σχήματος (εικόνα 2-7). Αυτοί οι αποστάτες φέρουν πυκνό σπείρωμα ώστε να μπορούν να μετακινούνται κατακόρυφα πάνω στις αντίστοιχες τέσσερις ντίζες-οδηγούς που συναρμολογούν την περισταλτική αντλία. Στο κάτω μέρος τους έχουν δέρμα για να βελτιώνεται η επαφή τους με το αλουμίνιο της βάσης. 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 εκάστοτε κινητήρα και συνεπώς να μπορεί να συνδεθεί με αυτόν μέσω του αρθρωτού συνδέσμου (koppler) και να αποφευχθούν ανεπιθύμητες στρεπτικές ροπές. Οι αποστάτες αυτοί χρησιμοποιούνται όταν η αντλία είναι συζευγμένη με του κινητήρες χαμηλών και μεσαίων στροφών. Στον κινητήρα υψηλών στροφών, επειδή ο άξονας του κινητήρα βρίσκεται χαμηλότερα από τους άλλους δύο κινητήρες, αφαιρούνται οι αποστάτες και η αντλία στερεώνεται σε κατάλληλου μεγέθους οπές στην αλουμινένια βάση, αφού πρώτα τοποθετηθεί bluetack (εικόνα 2-8). Το Bluetack είναι ένα είδος αυτοκόλλητης πλαστελίνης που με κατάλληλη διαμόρφωση μπορεί να τοποθετηθεί στις οπές της βάσης (εικόνα 2-9). Στην τρίτη σειρά μετρήσεων του υψηλού κινητήρα για να επιτευχθεί περαιτέρω μείωση των κραδασμών τοποθετήθηκαν παξιμάδια στις ντίζες-οδηγούς της αντλίας (εικόνα 2-10).



(α)



(β)



(γ)

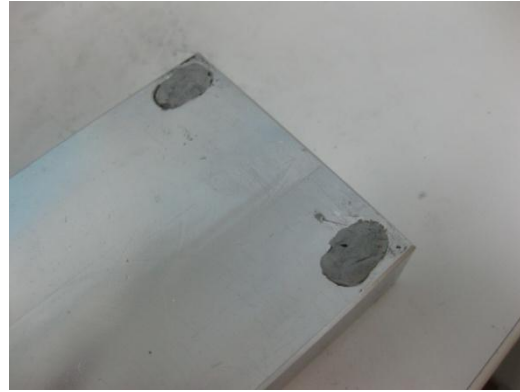
Εικόνα 2-6. Ηλεκτροκινητήρες α) χαμηλών στροφών, β) μεσαίων στροφών, γ) υψηλών στροφών.



Εικόνα 2-7. Αποστάτες



Εικόνα 2-8. Bluetack



Εικόνα 2-9. Οπές με bluetack στην βάση.



Εικόνα 2-10. Χρήση Bluetack και παξιμαδιών στις ντίζες για μείωση των κραδασμών.

Προκειμένου να ελέγξουμε την ζυγοστάθμιση της αντλίας χρησιμοποιήθηκε αλφάδι. Με το αλφάδι συγκρίνουμε την επιφάνεια στο καπάκι της αντλίας στις μεν χαμηλές και μεσαίες στροφές με την ευθυγράμμιση της αλουμινένιας βάσης, στις δε υψηλές με την ευθυγράμμιση του τραπεζιού. Έλεγχος της αντλίας με το αλφάδι γίνεται πριν από κάθε μέτρηση καθώς οι κραδασμοί αλλάζουν την ευθυγράμμιση της και κάτι τέτοιο είναι πιθανό να χαλάσει τον σύνδεσμο ή να τον στραβώσει με αποτέλεσμα να περιστραφεί η αντλία και να σπάσει. Επίσης, κακή ευθυγράμμιση της αντλίας οδηγεί σε διαφορά μεταξύ των στροφών που αποδίδει ο ηλεκτροκινητήρας και των στροφών που πραγματικά περιστρέφεται η αντλία. Εσφαλμένη ευθυγράμμιση επίσης αυξάνει τους κραδασμούς από τον κινητήρα και αλλοιώνει τις μετρήσεις. Αν διαπιστωθεί απόκλιση, στις μεν μετρήσεις όπου χρησιμοποιούνται οι αποστάτες «παπουτσάκια» ή τα παξιμάδια, εφαρμόζουμε κατάλληλη ρύθμιση βιδώνοντας ή ξεβιδώνοντας, στις δε μετρήσεις όπου χρησιμοποιείται μόνο bluetack ισιώνουμε την αντλία διαμορφώνοντας το κατάλληλα με το χέρι.

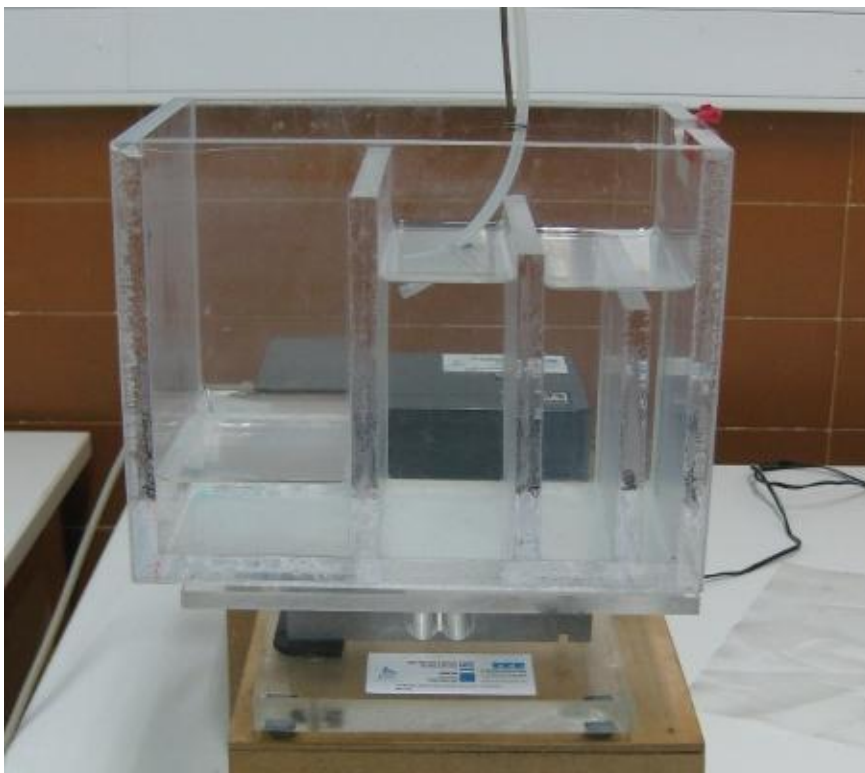


Εικόνα 2-11. Αλφάδι που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση του πειράματος.

Ο εκκεντροφόρος άξονας της αντλίας και ο άξονας του κινητήρα συνδέονται με αρθρωτό σύνδεσμο (koppler), 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 υπεροξειδίο σιλικόνη της εταιρίας Degania Silicone, ενώ τα στοιχεία διαμέτρου του σωλήνα είναι 3x5 mm (εσωτερική x εξωτερική διάμετρος), όπως ήδη έχει αναφερθεί. Στην δεύτερη και τρίτη σειρά μετρήσεων ο σωλήνας είναι από την εταιρία Electrochem, ίδιων χαρακτηριστικών με τον προηγούμενο. 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 (εικόνα 2-12). Το συνολικό μήκος της σωλήνωσης από το σημείο αναρρόφησης ως το σημείο της κατάθλιψης είναι 1720 mm. Ο σωλήνας σιλικόνης στο σημείο κατάθλιψης πρέπει να βυθίζεται 15 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 απόστασεως

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.



Εικόνα 2-12. Η δεξαμενή κατάθλιψης.

Η οδήγηση του σωλήνα σιλικόνης στη δεξαμενή κατάθλιψης, εξασφαλίζεται με λεπτό μεταλλικό στέλεχος, το οποίο είναι πακτωμένος σε δύο επίπεδα. Στις υψηλές στροφές και για συχνότητες $>3\text{Hz}$ τοποθετούνται βάρη ενός κιλού στον οδηγό για να μειώνονται οι κραδασμοί (εικόνα 2-13).

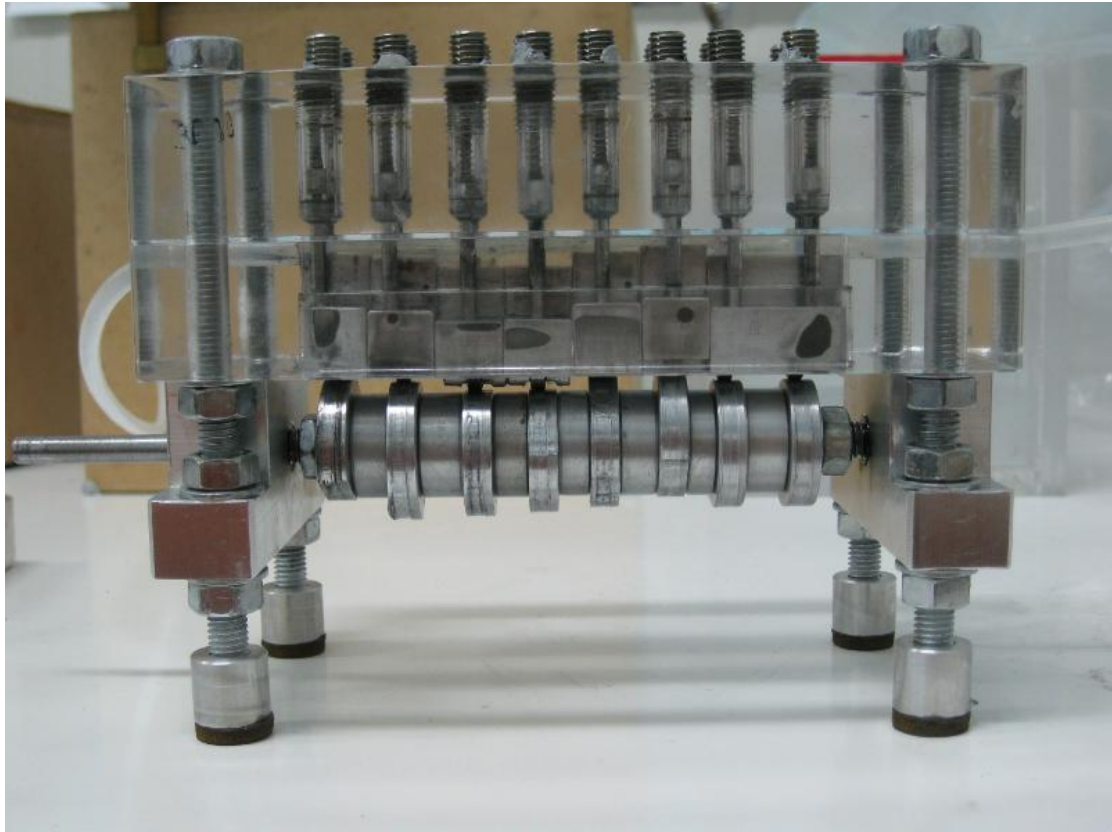
Η δεξαμενή κατάθλιψης, είναι ανοιχτή στο πάνω μέρος της, έχει εξωτερικές διαστάσεις βάσης $220 \times 140 \text{ mm}$ και ύψος 170 mm και εδράζεται στην πλατφόρμα της δυναμοκυψέλης, η οποία με τη σειρά της εδράζεται επάνω σε ξύλινη βάση 150 mm . Στο εσωτερικό της δεξαμενής κατάθλιψης υπάρχουν τρία διαφράγματα από plexiglas κοινού πλάτους (120 mm) 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 υπερχειλίσης 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.

Για να υπάρχει καλύτερη συνάφεια μεταξύ των επιφανειών της εξωτερικής βάσης της δεξαμενής κατάθλιψης και της πλατφόρμας της δυναμοκυψέλης, τοποθετείται ελαστικό κόμμα σε ένα σημείο της βάσης της δεξαμενής κατάθλιψης. Επίσης, για απορρόφηση τυχών κραδασμών τοποθετείται ελαστικό κόμμα 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.



Εικόνα 2-13. Βάρη στο οδηγό για μείωση των κραδασμών.

Το κύριο σώμα της αντλίας (εικόνα 2-14) είναι κατασκευασμένο από plexiglas και έχει σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις 160x90 mm και πάχος 24.86 mm. Στο εσωτερικό του υπάρχει κοιλότητα μέσα στην οποία είναι τοποθετημένα τα έμβολα από σκληρό αλουμίνιο, ώστε να μπορούν να κινούνται με χαλαρή συναρμογή μεταξύ τους, ενώ κατά μήκος της επιφάνειάς του υπάρχει 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 30.11 mm. Το καπάκι περιέχει κυλινδρικούς οδηγούς με σπείρωμα (σκουληκόβιδες), μέσα στους οποίους παλινδρομούν με τη βοήθεια ελατηρίων ειδικοί διαμορφωμένοι αξονίσκοι επαναφοράς των εμβόλων κατασκευασμένοι από αλουμίνιο. Οι αξονίσκοι επαναφοράς τείνουν να μετατοπίζουν τα έμβολα προς την κάτω ακραία θέση τους έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η σωστή επαφή έκκεντρο-έμβολου. 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 προς την άνω ακραία θέση τους, ώστε να συμπιέζουν το σωλήνα. Κάθε έμβολο φέρνει μικροσκοπικό ρουλεμάν, 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 [15].



Εικόνα 2-14. Η κυματοειδής γραμμική περισταλτική αντλία που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.

Τέλος, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού χρησιμοποιούνται ένα θερμομέτρο αλκοόλης με σφάλμα ανάγνωσης $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, που αντιστοιχεί σε μισή υποδιαίρεση της κλίμακας των θερμομέτρων (εικόνα 2-4). Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα χρησιμοποιείται ένα θερμομέτρο μέγιστου ελάχιστου με σφάλμα ανάγνωσης το ίδιο με το προηγούμενο θερμομέτρο (εικόνα 2-21).

Οι μετρητικές μέθοδοι που ακολουθούνται στοχεύουν στον ποσοτικό προσδιορισμό της εγχυόμενης μάζας ρευστού και κατ' επέκταση του ρυθμού ροής από κάθε 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 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 καθενός από τα προαναφερθέντα όργανα μέτρησης.

2.2 Ηλεκτροκινητήρες

Ο ηλεκτροκινητήρας χαμηλών στροφών που χρησιμοποιείται διακρίνεται στην εικόνα 2-6α πάνω και έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πίνακα 2-1. 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 ημίρρεστο γράσο χωρίς δυνατότητα διαρροής.

Σχέση μετάδοσης	450:1
Τάση τροφοδοσίας	180 Volts (DC)
Ένταση ρεύματος λειτουργίας	0.19 Amps
Ισχύς	1/40 HP
Ροπή στρέψης	40 lb·in
Στροφές	4 rpm
Form factor *	1.38
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας περιβάλλοντος	40 °C
Σύστημα μόνωσης συλλέκτη	F2 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.

Πίνακας 2-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα χαμηλών στροφών.

Ο ηλεκτροκινητήρας μεσαίων στροφών που χρησιμοποιείται διακρίνεται στην εικόνα 2-6β πάνω και έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πίνακα 2-2. Πρόκειται για ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) της εταιρίας LEESON, με άξονα από σκληρυμένο ασάλλι, με μόνιμο μαγνήτη και προσαρμοσμένο μειωτήρα στροφών. Ο τύπος του κινητήρα είναι ερμητικά κλειστός μη αεριζόμενος, χωρίς θερμική μόνωση. Διαθέτει κι αυτός μόνιμο σύστημα λίπανσης με ημίρρευστο γράσο χωρίς δυνατότητα διαρροής.

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

Πίνακας 2-2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα μεσαίων στροφών.

Ο ηλεκτροκινητήρας υψηλών στροφών που διακρίνεται στην εικόνα 2-6γ 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). Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του έχουν ως εξής:

2.3 Ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης (controller)

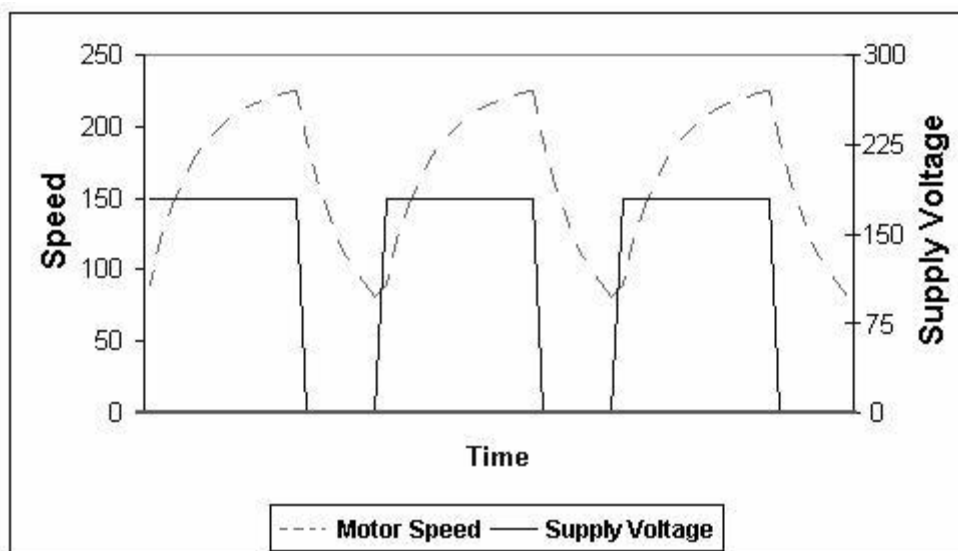
Ο σκοπός ενός ηλεκτρονικού συστήματος οδήγησης κινητήρα [38] είναι να λαμβάνει ένα σήμα που αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη ταχύτητα και να οδηγεί τον κινητήρα σε αυτή την ταχύτητα. Οι κινητήρες παρέχονται σε διάφορες μορφές και συνεπώς τα συστήματα οδήγησης που εξαρτώνται από αυτές θα ποικίλουν. Το σύστημα 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 ανοικτού 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 διακόπτεται 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 παραμείνει 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 2-15 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 παραμείνει 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 2-15. Γραφική παράσταση της ταχύτητας και της τάσης τροφοδοσίας

Στην κλασική μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) [39], 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 ανοικτό (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.

Το ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης (controller) διακρίνεται στην εικόνα 2-16. Είναι της εταιρίας DART CONTROLS (τύπου 15 SERIES-15DV-E) και έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα 2-3.

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 kohm
Ικανότητα υπερφόρτωσης για 1 min	200 %

Πίνακας 2-3. Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος οδήγησης (controller).



Εικόνα 2-16. Σύστημα οδήγησης (controller)

2.4 Ταχύμετρο

2.4.1 Αρχή λειτουργίας ταχύμετρου

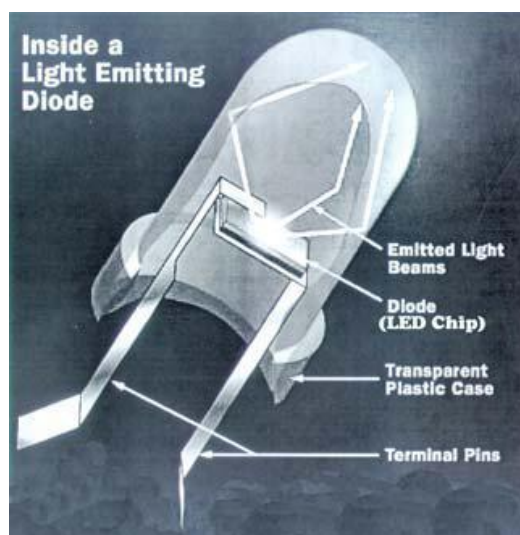
Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιείται ένα οπτικό ταχύμετρο κόκκινης φωτοεκπομπού διόδου LED (Light Emitting Diode) [37], προκειμένου να μετρηθεί η ταχύτητα περιστροφής του εκκεντροφόρου άξονα της περισταλτικής αντλίας, ο οποίος είναι συζευγμένος μέσω αρθρωτού συνδέσμου με τον άξονα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα. Σε ένα σημείο του περιστρεφόμενου άξονα της αντλίας τοποθετείται μια στενή ανακλαστική ταινία η οποία ανακλά 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 αντανάκλαστική 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.

2.4.2 Φωτοεκπομπός δίοδος (LED)

Η φωτοεκπομπός δίοδος LED 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 ημιαγωγίμο τσιπ (εικόνα 2-17).

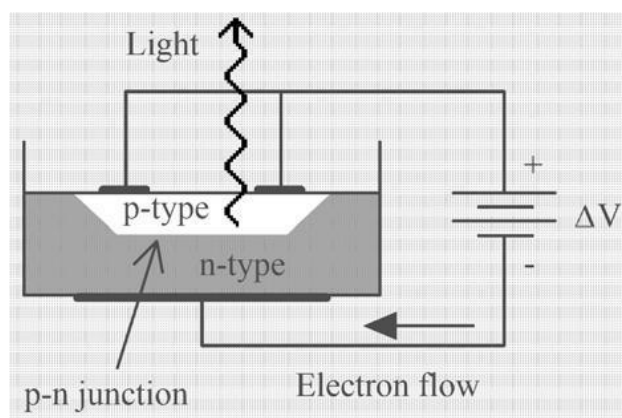


Εικόνα 2-17. Εσωτερική δομή LED

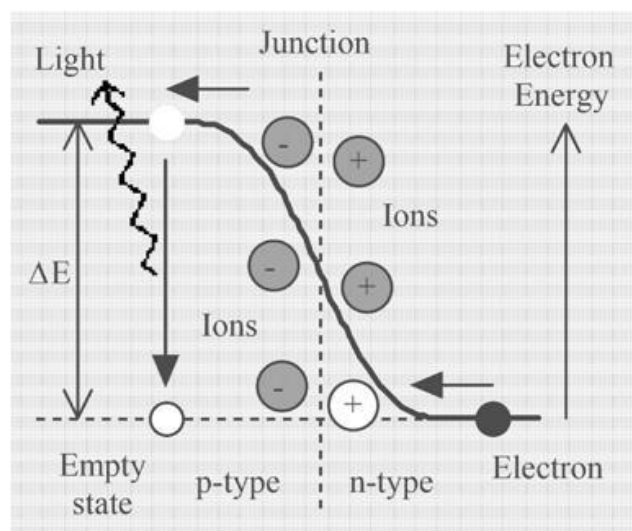
Τα δυο καλώδια (terminal pins) που εκτείνονται κάτω από την εποξική θήκη, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-17, υποδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο η LED θα πρέπει να συνδεθεί σε ένα κύκλωμα. Αυτό σημαίνει ότι οι LED ανάβουν μόνον όταν συνδεθούν με τη σωστή πολικότητα, και όχι ανάποδα, οπότε τότε παρέχεται 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 2-18). 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 διαρρέυσουν 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 2-19 δείχνει την ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων, τόσο στις δυο περιοχές p, n, όσο και στην περιοχή της ένωσης (junction).



Εικόνα 2-18. Αρχή λειτουργίας LED.



Εικόνα 2-19. Αρχή λειτουργίας ημιαγωγικού τσιπ LED.

Τα κινούμενα ηλεκτρόνια της περιοχής p στην ένωση έχουν ενέργεια κατά ΔΕ μεγαλύτερη από αυτή που είχαν όταν ήταν στην περιοχή n (ενέργεια αναφοράς). Όταν μια αρκετά μεγάλη εξωτερική διαφορά δυναμικού ΔV 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 ΔΕ. 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 ημιαγωγίου 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 ημιαγωγικών 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.

Το ταχύμετρο που χρησιμοποιείται στο πείραμα μας (εικόνα 2-20) είναι οπτικού τύπου χειρός, με φωτοεκπομπό δίοδο (LED) κόκκινου χρώματος. Είναι της εταιρίας ITECO trading (τύπου 8801.001) και έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα 2-4.

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 μίας πλήρους περιστροφής
Χρόνος μετρούμενης περιόδου από 60.0 ÷ 100000 rpm	1 s
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 ÷ 45 °C
Τάση τροφοδοσίας	6 Volts
Διαστάσεις	180 x 60 mm
Βάρος	0.4 kg

Πίνακας 2-4. Τεχνικά χαρακτηριστικά οπτικού ταχύμετρου.



Εικόνα 2-20. Ταχύμετρο.

2.5 Θερμόμετρα

Το θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα είναι τοποθετημένο στον τοίχο πίσω από την δεξαμενή αναρρόφησης. Πρόκειται για ένα θερμόμετρο μέγιστου-ελάχιστου (min-max), το οποίο μπορεί να μετρήσει την μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία μίας χρονικής περιόδου. Το θερμόμετρο αυτό αποτελείται από ένα λεπτό γυάλινο σωλήνα σχήματος U, ο οποίος έχει δύο κατάλληλα διαμορφωμένες πλατύνσεις στα άκρα του, η μία γεμάτη με οινόπνευμα, στην άλλη υπάρχει κενό. Ακόμη υπάρχουν δύο κλίμακες με διαφορετική φορά στις οποίες διαβάζεται η θερμοκρασία. Μέσα στον σωλήνα υπάρχει ένα κομμάτι υδράργυρου, το οποίο ανάλογα με την συστολή-διαστολή του οινόπνευματος μετακινείται και δείχνει την θερμοκρασία. Καθώς μετακινείται ο υδράργυρος, έρχεται σε επαφή με μία μεταλλική ένδειξη και την σπρώχνει. Υπάρχουν δύο τέτοιες μεταλλικές ενδείξεις, μία σε κάθε κλίμακα, και η μία μετράει το μέγιστο και η άλλη το ελάχιστο της θερμοκρασίας. Οι ενδείξεις αυτές όταν σταματήσουν να τις σπρώχνει ο υδράργυρος δεν μετακινούνται, παρά μόνο αν πατήσει κάποιος το κεντρικό κουμπί του θερμόμετρου, οπότε απομακρύνεται ο μαγνήτης που βρίσκεται πίσω τους και τις στερεώνει, και πέφτουν ώστε να συναντήσουν τον υδράργυρο.

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού χρησιμοποιείται ένα θερμόμετρο οινόπνευματος που βυθίζεται στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο της δεξαμενής αναρρόφησης όπου ρέει το ρευστό από την τροφοδοτική δεξαμενή [40],[41].



Εικόνα 2-21. Το θερμοόμετρο μέγιστου-ελάχιστου για την μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα.

2.6 Δυναμοκυψέλη (load-cell), αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (ADC) και ηλεκτρονικός υπολογιστής με λογισμικό

Η δυναμοκυψέλη [33] 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.

2.6.1 Αρχή λειτουργίας δυναμοκυψέλης

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναλυθεί η αρχή λειτουργίας του μηκυνσιομέτρου (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) [34], [35] 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.

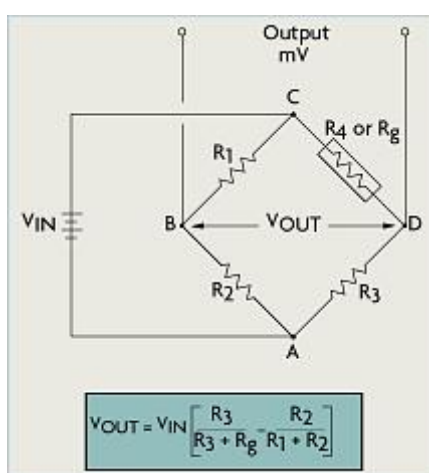
Η παραμόρφωση ενός σώματος γενικά προκαλείται από μια εσωτερική ή εξωτερική επίδραση. Δηλαδή, μπορεί να προκληθεί από δυνάμεις, πιέσεις, ροπές, θερμότητα, δομικές αλλαγές του υλικού και άλλα παρόμοια. Όταν κατάλληλες συνθήκες εκπληρώνονται, η τιμή της μεταβαλλόμενης ποσότητας μπορεί να προκύψει από τη 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 μηκυνσιομέτρων (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.

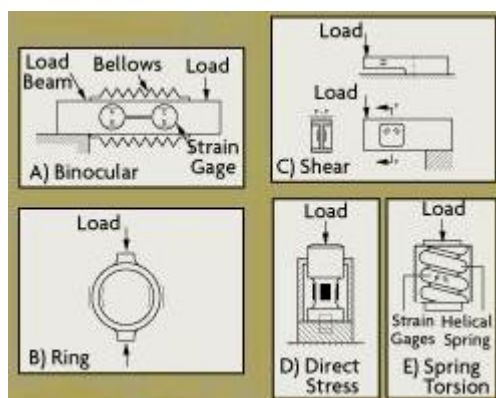
Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης με μια ενσωματωμένη αντίσταση μηκυνσιομέτρου (strain gauge), πρέπει η τελευταία να συνδέεται σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα κατάλληλο για μέτρηση των πολύ μικρών μεταβολών της ηλεκτρικής αντίστασης που αντιστοιχούν σε μεταβολές της παραμόρφωσης. Ένα τέτοιο κύκλωμα αποτελεί η γέφυρα Wheatstone, η οποία είναι ένα διαιρούμενο κύκλωμα γέφυρας που απαρτίζεται συνήθως από τέσσερις αντιστάσεις (εικόνα 2-22) 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 2-22. 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 2-23). Οι δυναμοκυψέλες που απαντώνται πιο συχνά σε

βιομηχανικές εφαρμογές ζυγίσεως 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 2-23. Διάφοροι τύποι δυναμοκυψελών.

2.6.2 Δυναμοκυψέλη καμπτόμενης δοκού

Η δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού [35], [36] 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 2-23 A, B). Τα μηχανοσκόπια (strain gauges) ενσωματώνονται άνωθεν και κάτωθεν της δοκού για τη μέτρηση δυνάμεων εφελκυσμού και θλίψης. Επειδή τα μηχανοσκόπια (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.

Η αρχή λειτουργίας αυτής της δυναμοκυψέλης στηρίζεται στις παραμορφώσεις λόγω κάμψης των μηχανοσκόπιων (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.

Στο πείραμα μας, η μέτρηση του εγχυόμενου βάρους ρευστού γίνεται με δυναμοκυψέλη καμπτόμενης δοκού ενός σημείου φόρτισης (εικόνα 2-24). 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 καμπτόμενη δοκός είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο και η πλατφόρμα από plexiglas. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της δυναμοκυψέλης παρουσιάζονται στον πίνακα 2-5.



Εικόνα 2-24. Η δυναμοκυψέλη που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.

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 (¹), (²)	για εύρος +20 °C ÷ +40 °C	%/10K	±0.0146
	για εύρος -10 °C ÷ +20 °C	%/10K	±0.0098
Επίδραση θερμοκρασίας σε ισορροπία μηδενισμού (²)	%/10K	±0.0389	
Σφάλμα υστέρησης (¹), (²)	%	±0.0097	
Σφάλμα μη γραμμικότητας (¹), (²)	%	±0.0097	
Σφάλμα εκκεντρότητας φορτίου κατά OIML R76 (²), (³)	%	±0.0194	
Παραμένον σφάλμα εξόδου αποφόρτισης DR (30min) κατά OIML R60 (²)	%	±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	

(¹) 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).

(²) Όλα τα σχετικά σφάλματα προσδιορίζονται αναφορικά με το ονομαστικό φορτίο εξόδου.

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

Πίνακας 2-5. Τεχνικά χαρακτηριστικά δυναμοκυψέλης PW2C3 NH-HBM.

Η δυναμοκυψέλη καμπτόμενης δοκού ενός σημείου φόρτισης συνδέεται με 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 Η/Υ, 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.

2.7 Αναλογικός-Ψηφιακός μετατροπέας (ADC) και Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

Ο αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (ADC) της πειραματικής διάταξης (εικόνα 2-25) είναι της εταιρίας HBM, με μοντέλο ηλεκτρονικής πλακέτας AD101B. Στον πίνακα 2-6 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ADC.



Εικόνα 2-25. Αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (ADC)



Εικόνα 2-26. Το τροφοδοτικό του (ADC)

Τύπος	Μονάδες μέτρησης	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) ¹	V	5 ÷ 10
Interface		RS-232
Baud rate, ρυθμιζόμενο	bit/s	1200 ÷ 38400
Τάση λειτουργίας (DC)	V	5 ÷ 10
Κατανάλωση ρεύματος (χωρίς τη δυναμοκυψέλη) ²	mA	≤ 80

¹ Διέγερση από την τάση λειτουργίας.

² Κατανάλωση ρεύματος $\leq 80 \text{ mA} + U_B/R_B$, όπου R_B η αντίσταση της γέφυρας.

Πίνακας 2-6. Τεχνικά χαρακτηριστικά του ADC.

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.

2.8 Ακρίβεια πειραματικών μετρήσεων και υπολογισμός σφαλμάτων

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, διαπιστώνεται ότι οι τιμές της εξόδου του οργάνου δεν είναι όλες ίδιες, αλλά κυμαίνονται γύρω από την αληθινή τιμή, η οποία είναι άγνωστη. Η διαφορά της μετρούμενης από την αληθινή τιμή αποτελεί ως γνωστόν το σφάλμα της μέτρησης, το οποίο είναι απαραίτητο για τη γνώση της ακρίβειας για το μέγεθος που μετράται κάθε φορά και αποτελείται εν μέρει από το συστηματικό (bias) και εν μέρει από το τυχαίο (random) σφάλμα.

2.8.1 Προσαρμογή (fitting) της 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 πρόσδοσης 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 σχεδόν συνεχής και αύξουσα. Ο προσδιορισμός αυτής της συνάρτησης μέσω των πειραματικών μετρήσεων γίνεται με την κατάλληλη προσαρμογή τους (fitting) και τότε η προκύπτουσα συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση αναδρομής. Επειδή ο όγκος εμβολισμού του νερού από την αντλία σε μία περίοδο είναι σταθερός και ίσος με τον όγκο του συμπιεζόμενου

τιμήματος του εύκαμπτου αγωγού, η ανωτέρω πρόσδοση 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:

$$\hat{m} = m_0 + \dot{m} t \quad (2.1)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η κλίση της (2.1), ως παροχή μάζας, να είναι:

$$\dot{m} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i m_i - n t_m m_m}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - n t_m^2} \quad (2.2)$$

και η τεταγμένη επί την αρχή:

$$m_0 = m_m - \dot{m} t_m \quad (2.3)$$

$$\text{όπου } t_m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \text{ και } m_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$$

Η μεταβλητότητα της αναδρομής ορίζεται από τη σχέση:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \hat{m}_i)^2}{n - 2}} \quad (2.4)$$

και αποτελεί εκτίμηση της αληθινής μεταβλητότητας σ 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 \dot{m} της ευθείας αναδρομής δίνεται από την:

$$se = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - t_m)^2}} = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 - n t_m^2}} \quad (2.5)$$

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:

$$RMS = 100 \times \sqrt{\frac{1}{n - 2} \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - \hat{m}_i)^2}{\hat{m}_i^2}} \quad (\%) \quad (2.6)$$

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 .

2.8.2 Συστηματικά σφάλματα οργάνων (bias errors)

Τα συστηματικά σφάλματα 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.

2.8.2.1 Βαθμονόμηση δυναμοκυψέλης (load-cell) και προκύπτοντα συστηματικά σφάλματα

Η δυναμοκυψέλη είναι 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 2-5 δίνονται από τον κατασκευαστή διάφορα συστηματικά σφάλματα για τη δυναμοκυψέλη. Αρκετά από αυτά εκμηδενίζονται λόγω κατάλληλων συνθηκών εκτέλεσης του πειράματος. Συνεπώς, επειδή οι μεταβολές της θερμοκρασίας δεν υπερβαίνουν τους 10°C και μάλιστα είναι κάτω από 1°C κατά τη διάρκεια μίας 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 2-5 ότι το σφάλμα μη γραμμικότητας (non-linearity) έχει τιμή $\pm 0.0097\%$ αναφορικά με το ονομαστικό φορτίο 7200g. Αυτό σημαίνει ότι το σφάλμα του non-linearity ανέρχεται στην τιμή των 0.6984g. Η κάθε σταγόνα, που εξέρχεται από το σωλήνα σιλικόνης εσωτερικής διαμέτρου 3mm με πολύ αργό ρυθμό, έχει βάρος 0.06g. Συνεπώς στις χαμηλές συχνότητες πρέπει να πέφτουν 12 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 g, 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 g,

καταγράφοντας τις αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρονικού σήματος σε mV/V από τον Η/Υ. Όταν το πρότυπο βάρος αποκτά την τιμή 5100 g και καταγράφεται το αντίστοιχο ηλεκτρονικό του σήμα, τότε αποθηκεύονται τα 32 ζεύγη τιμών πρότυπου βάρους (g)-ηλεκτρονικού σήματος (mV/V) και παριστάνονται γραφικά (εικόνα 2-27).

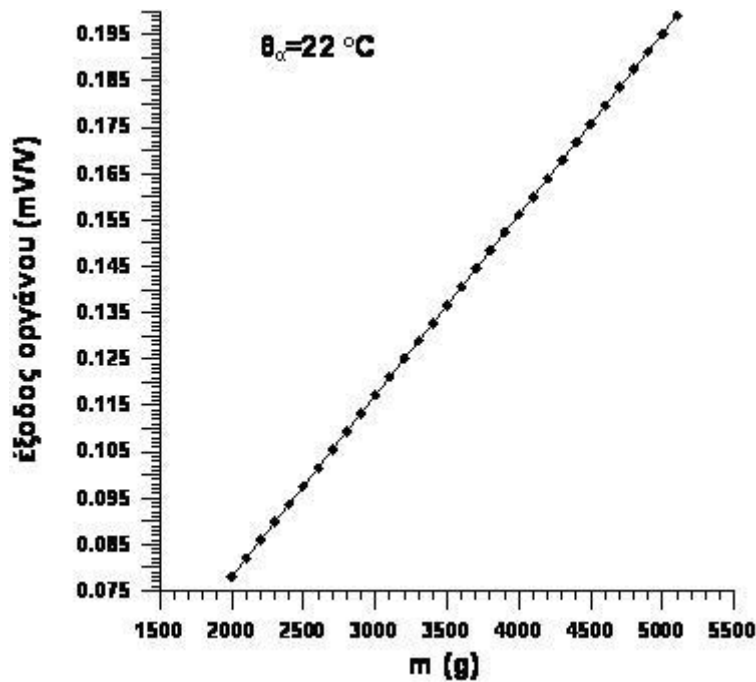
Κατόπιν για να ελεγχθεί αν η δυναμοκυψέλη παρέχει σωστές μετρήσεις και δεν έχει αλλοιωθεί η πιστότητά της λόγω φόρτισης, επαναλαμβάνεται ξανά η διαδικασία τοποθέτησης των πρότυπων βαρών με τιμές εντός του εύρους 2000 ÷ 5100 g και γίνεται επαλήθευση των τιμών που μετρήθηκαν προηγουμένως. Το γεγονός ότι 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 πρότυπο βάρος που είναι εντός της περιοχής των πειραματικών μετρήσεων.

Στον πίνακα 2-7 περιέχονται οι τιμές της μάζας των πρότυπων βαρών σε g με τις αντίστοιχες τιμές της αδιάστατης τάσης εξόδου του οργάνου σε mV/V του ψηφιακού σήματος του ADC. Επίσης στην εικόνα 2-21 παριστάνονται γραφικά οι τιμές του πίνακα 2-7, όπου δίνουν την καμπύλη βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης σε θερμοκρασία 22 °C.

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

Πίνακας 2-7. Τιμές των μεγεθών μάζας πρότυπου βάρους και ψηφιακού σήματος ADC.

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



Σχήμα 2-27. Καμπύλη βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης στους 22 °C.

Κατόπιν της ανωτέρω βαθμονόμησης το σφάλμα της μη γραμμικότητας εισάγεται κατά το ποσοστό $\pm 0.0097\%$ του πίνακα 2-6, το οποίο θεωρείται ότι τόσο είναι για ονομαστικό φορτίο 100g. Δηλαδή, το περιθώριο ανάπτυξης της μη γραμμικότητας περιορίζεται μόνο για διάστημα 100g και με την προϋπόθεση ότι το φορτίο λειτουργίας δεν εξέρχεται του διαστήματος [2000, 5100] g (υπόψη ότι η δεξαμενή κατάθλιψης κενή ζυγίζει 2200g περίπου ενώ πλήρως γεμάτη 5100g περίπου). Συνεπώς το συστηματικό σφάλμα λόγω της μη γραμμικότητας (non-linearity) ανέρχεται στην τιμή $s_{nl} = \pm 0.0097g$.

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 (Dead load output Return) δίνεται στον πίνακα 2-5 ίσο με $\pm 0.0167\%$ για συνολική χρονική διάρκεια 30 min και φορτίο ίσο με το ονομαστικό των 7200g. Επειδή το πείραμα εκτελείται για διαφορετικές συνολικές χρονικές διάρκειες t_i και για διαφορετικές αυξήσεις μάζας Δm_i , το παραπάνω σφάλμα αυξομειώνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$DR = 7200 (\pm 0.0167\%) k_t k_m = \pm 1.2024 k_t k_m [g]$$

όπου $k_t = t_i/1800$, (με τον t_i σε s) και $k_m = \Delta m_i/7200$, (με την Δm_i σε g).

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$DR = \pm 9.2778 \cdot 10^{-8} t_i \Delta m_i \tag{2.7}$$

2.8.2.2 Χρονόμετρο-Ταχύμετρο (Tachometer)-Θερμόμετρο

Για την εύρεση της συχνότητας περιστροφής της αντλίας στις πολύ χαμηλές στροφές μέχρι 4 rpm περίπου χρησιμοποιείται έμμεσα το χρονόμετρο του Η/Υ. Επειδή σε αυτές τις πολύ

χαμηλές στροφές η συχνότητα δειγματοληψίας όπως θα παρουσιαστεί πιο κάτω είναι 4.7 Μετρήσεις/sec, το συστηματικό σφάλμα του χρόνου που εισάγεται είναι $1/4.7 \approx 0.21 \text{sec/Μέτρηση}$. 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. Εδώ θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι η τιμή 0.21 δεν είναι η ακριβής τιμή του συστηματικού σφάλματος του χρόνου. Στις συχνότητες όπου προσδιορίζεται η συχνότητα με την μέθοδο peak-to-peak το ακριβές σφάλμα του χρόνου θα βρισκόταν αν στα αρχεία των μετρήσεων που επεξεργαστήκαμε υπολογίζαμε το σφάλμα για κάθε περίοδο ξεχωριστά. Αυτό όμως είναι επίπονο και εξαιρετικά χρονοβόρο οπότε αρκούμαστε στον προσδιορισμό του συστηματικού σφάλματος του χρόνου στις συχνότητες ως 4 rpm από το Catman. Έξάλλου και με τις δύο μεθόδους υπολογισμού του σφάλματος, η τάξη μεγέθους του είναι η ίδια.

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 γίνεται επιταχυνόμενη για κάποιο επόμενο μικρό σχετικά χρονικό διάστημα, όταν υπερνικηθούν οι ροπές φορτίου και αναπτυχθούν οι 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 οφείλεται η εισαγωγή τυχαίου σφάλματος από περίοδο σε περίοδο.

Για την εύρεση της συχνότητας περιστροφής της αντλίας στις χαμηλές στροφές από 4 rpm μέχρι 12 rpm περίπου, χρησιμοποιείται ηλεκτρονικό χρονόμετρο το οποίο εισαγάγει συστηματικό σφάλμα $b_T = 0.1 \text{ sec}$. 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 b_N του ταχύμετρου είναι 0.1 rpm για το διάστημα από 12 έως 999.9 rpm και 1 rpm για στροφές μεγαλύτερες από 1000 rpm σύμφωνα με τον πίνακα που δίνεται από τον κατασκευαστή.

Το συστηματικό σφάλμα του θερμομέτρου θεωρείται το σφάλμα ανάγνωσής του, το οποίο εκφράζει την αβεβαιότητα με την οποία διαβάζεται η ένδειξή του. Το σφάλμα ανάγνωσης είναι ίσο με αυτό που αντιστοιχεί σε μισή υποδιαίρεση της κλίμακας του θερμομέτρου. Στο θερμοόμετρο υπάρχουν υποδιαίρεσεις 1°C , άρα το σφάλμα ανάγνωσης είναι $b_{\theta} = b_{\theta a} = \pm 0.5^\circ\text{C}$. 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, [11].

2.8.3 Τυχαία σφάλματα

Τα τυχαία σφάλματα οφείλουν την ύπαρξή τους σε τυχαίους παράγοντες που εμφανίζονται σε μία 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 [11]. 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 υπεισέρχονται συστηματικά σφάλματα που δεν ακολουθούν στατιστικές κατανομές [7]. Στο συγκεκριμένο πείραμα τα σφάλματα αυτά ως τυχαίο γεγονός έχει θεωρηθεί ότι ακολουθούν την κατανομή Gauss, όσο αφορά την πιθανότητα εμφάνισής τους.

Παρόλο που η ευαισθησία της δυναμοκυψέλης αποτελεί ισχυρό πλεονέκτημα επιτρέπει όμως και την εισαγωγή τυχαίων σφαλμάτων στις μετρήσεις. Τέτοια σφάλματα για παράδειγμα 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.

Επειδή η άκρη του σωλήνα είναι βυθισμένη 20mm κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής κατάθλιψης, όπως αναφέρθηκε, δημιουργείται μερική αναρρόφηση ενός μικρού ποσοστού του καταθλιβόμενου ρευστού από την οπισθοροή και συνεπώς προσθαιρείται 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 μίας 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 διαπιστώνεται από την κλίση που έχει η γραμμική προσαρμογή της συνάρτησης 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 B, όπως ήδη έχει αναφερθεί, από την υπόλοιπη πειραματική διάταξη, η οποία στηρίζεται στο οριζόντιο επίπεδο A.

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 μία καμπύλη Gauss που ως γνωστόν δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.8)$$

όπου x είναι οι τιμές των μετρήσεων, μ η μέση τιμή τους και σ 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 πεπερασμένο αριθμό μετρήσεων n ισχύουν οι σχέσεις:

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.9)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n-1}} \quad (2.10)$$

όπου s η τυπική απόκλιση της μίας μέτρησης x_i από τη μέση τιμή x_m .

Ιδανικά όταν $n \rightarrow \infty$ τότε $x_m \rightarrow \mu$ 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:

$$s_m = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n(n-1)}} \quad (2.11)$$

Κατά τις μετρήσεις του συγκεκριμένου πειράματος, θεωρώντας ότι η αληθινή τιμή είναι η μέση τιμή του μεγέθους ($\mu \equiv x_m$), ως διάστημα εμπιστοσύνης, που αποτελεί και το σφάλμα των μετρήσεων, έχει ληφθεί το $x_m \pm 1.96s_m$, 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 $[x_m - 1.96s_m, x_m + 1.96s_m]$ είναι 95%. Επομένως το τυχαίο σφάλμα ενός μεγέθους του πειράματος ορίζεται από την:

$$\varepsilon = \pm 1.96s_m \quad (2.12)$$

2.8.4 Συνολικά σφάλματα και διάδοσή τους σε παραγόμενα μεγέθη

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 e της μέτρησης του x πρέπει να συνδυαστεί κατάλληλα το τυχαίο σφάλμα της μέτρησης ε με το συστηματικό σφάλμα b . Αυτό γίνεται μέσω της σχέσης:

$$e = \sqrt{\varepsilon^2 + b^2} \quad (2.13)$$

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

$$e_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x} e_x\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z} e_z\right)^2} \quad (2.14)$$

ενώ η μέση τιμή του μεγέθους είναι:

$$y_m = y(x_m, z_m) \quad (2.15)$$

Όπου x_m, z_m οι μέσες τιμές των μεγεθών x, z αντίστοιχα.

Στο συγκεκριμένο πείραμα τα μετρούμενα μεγέθη είναι τέσσερα. Η μάζα m του νερού, η θερμοκρασία θ_v του νερού, ο χρόνος t διεξαγωγής της κάθε δοκιμής και οι στροφές N του συστήματος κινητήρα-αντλίας. Εκτός από αυτά τα μεγέθη για τη περιγραφή και μελέτη του

φαινομένου άντλησης είναι απαραίτητα τα παραγόμενα μεγέθη της συχνότητας περιστροφής του συστήματος κινητήρα-αντλίας f και του ρυθμού έγχυσης του ρευστού \dot{V} .

Η συχνότητα περιστροφής ορίζεται από τη σχέση:

$$f=1/T \quad (2.16)$$

όπου T η περίοδος μίας πλήρους περιστροφής του συστήματος κινητήρα-αντλίας.

Η σχέση (2.15) χρησιμοποιείται για τιμές συχνοτήτων διέγερσης μέχρι 0.18 Hz, για την εύρεση των οποίων υπολογίζεται η περίοδος T , είτε peak to peak από την πειραματική καμπύλη $m(t)$, είτε με χρήση χρονομέτρου. Ωστόσο, για τιμές συχνοτήτων διέγερσης μεγαλύτερες από 0.18 Hz χρησιμοποιείται η σχέση:

$$f=N/60 \text{ (σε Hz)} \quad (2.17)$$

όπου N οι στροφές του ταχύμετρου σε rev/min.

Επομένως, όταν γίνεται χρήση της εξίσωσης (2.16), εφαρμόζοντας την εξίσωση (2.14) το συνολικό σφάλμα μέτρησης της συχνότητας δίνεται από τη σχέση:

$$e_f=e_T/T^2 \quad (2.18)$$

όπου:

$$e_T = \sqrt{\varepsilon_T^2 + b_T^2} \quad (2.19)$$

είναι το συνολικό σφάλμα υπολογισμού της περιόδου T διέγερσης με $b_T=\pm 0.21$ ή ± 0.01 s να είναι το συστηματικό σφάλμα του χρονομέτρου αν χρησιμοποιείται η μέθοδος peak to peak ή το ηλεκτρονικό χρονόμετρο αντίστοιχα, ενώ ε_T είναι το τυχαίο σφάλμα κατά τη μέτρηση της περιόδου T υπολογισμένο σύμφωνα με τη σχέση (2.12).

Ωστόσο, όταν γίνεται χρήση της εξίσωσης (2.17), εφαρμόζοντας την εξίσωση (2.14) το συνολικό σφάλμα μέτρησης της συχνότητας δίνεται από τη σχέση:

$$e_f=e_N/60 \quad (2.20)$$

όπου:

$$e_N = \sqrt{\varepsilon_N^2 + b_N^2} \quad (2.21)$$

είναι το συνολικό σφάλμα υπολογισμού των στροφών περιστροφής με $b_N=\pm 0.1$ ή ± 1 rpm να είναι το συστηματικό σφάλμα του ταχύμετρου για $12 \leq N \leq 999.9$ rpm και $N \geq 1000$ rpm αντίστοιχα, ενώ ε_N είναι το τυχαίο σφάλμα κατά τη μέτρηση των στροφών N υπολογισμένο σύμφωνα με τη σχέση (2.12).

Ο ρυθμός έγχυσης του ρευστού από την αντλία ορίζεται από τη σχέση:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (2.22)$$

όπου \dot{m} η παροχή μάζας του ρευστού και ρ η πυκνότητα του νερού.

Για συγκεκριμένη συχνότητα διέγερσης f η παροχή μάζας \dot{m} που εξέρχεται από την αντλία αναμένεται να έχει σταθερή τιμή. Αυτό ισχύει σίγουρα για όλες τις συχνότητες εκτός από τις πολύ χαμηλές, στις οποίες η μεγάλη διάρκεια των νεκρών χρόνων αλλοιώνει το γραμμικό χαρακτήρα της συνάρτησης $m(t)$. Ακόμη όμως και για αυτές τις πολύ χαμηλές συχνότητες αν θεωρηθεί η μέση χρονικά παροχή μάζας $\bar{\dot{m}} \equiv \dot{m}$, τότε αυτή έχει γραμμικό χαρακτήρα και αν ληφθεί υπόψη και το σκεπτικό της παραγράφου 2.8.1. μπορεί να θεωρηθεί για κάθε συχνότητα ότι η μάζα συναρτηθεί του χρόνου μεταβάλλεται γραμμικά ως εξής:

$$m = \dot{m}t + m_0 \Rightarrow \dot{m} = \frac{m - m_0}{t} = \frac{m_m - m_0}{t_m} \quad (2.23)$$

Η πυκνότητα ρ του νερού μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία θ_v , όπως φαίνεται στο σχήμα 2-28, [12]. Από τη συγκεκριμένη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται το διάστημα θερμοκρασιών από 17°C μέχρι 31°C, διότι σε αυτό κυμαίνεται η θερμοκρασία του νερού κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Οι τιμές της πυκνότητας με τη θερμοκρασία φαίνονται στον πίνακα 2-8 και η ακρίβειά τους παρουσιάζεται με αβεβαιότητα $0.83 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$.

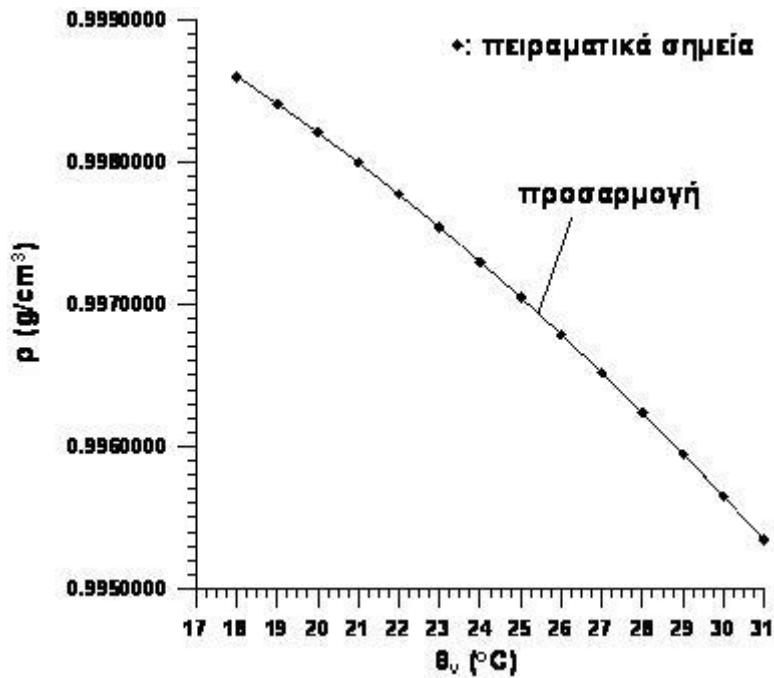
Στα πειραματικά σημεία του πίνακα 2-8 προσαρμόζεται η καμπύλη δευτέρου βαθμού που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση, η οποία αναπαρίσταται γραφικά στο σχήμα 2-6:

$$\rho = a_0 + a_1 \theta_v + a_2 \theta_v^2 \quad (2.24)$$

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

Θερμοκρασία θ_v (°C)	Πυκνότητα νερού ρ (g/cm ³)
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

Πίνακας 2-8. Ακριβείς τιμές πυκνότητας νερού με τη θερμοκρασία, [12].



Σχήμα 2-28. Μεταβολή της πυκνότητας του νερού με τη θερμοκρασία στο διάστημα από 17°C μέχρι 31°C και για ατμοσφαιρική πίεση 101325Pa [12].

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.23) και (2.24) της παροχής μάζας και της πυκνότητας αντίστοιχα στη σχέση (2.22) ο ρυθμός έγχυσης του ρευστού μπορεί να δοθεί ισοδύναμα και από τη σχέση:

$$\dot{V} = \frac{m - m_0}{t(a_0 + a_1 \theta_v + a_2 \theta_v^2)} \quad (2.25)$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση (2.14) για τον προσδιορισμό του σφάλματος του ρυθμού έγχυσης του ρευστού παραγωγίζεται μερικά ως προς το κάθε εξαρτώμενο μέγεθος, τόσο η σχέση (2.22), όσο και η (2.25), ανάλογα με ποιο μέγεθος είναι γνωστό από τις μετρήσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτει το συνολικό σφάλμα για το ρυθμό έγχυσης του ρευστού ως εξής:

$$e_{\dot{V}} = \dot{V} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{b_m}{t_m \dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{b_t}{t_m}\right)^2 + \left(\frac{e_\rho}{\rho}\right)^2} \quad (2.26)$$

Μέσω αυτής της σχέσης υπολογίζεται το ελάχιστο σφάλμα $(e_{\dot{V}})_0$ που πάντα υφίσταται σε κάθε μέτρηση, όσο ιδανικά και αν εκτελεστεί το πείραμα και ουσιαστικά προκύπτει λόγω της ύπαρξης των συστηματικών σφαλμάτων των οργάνων και του τρόπου με τον οποίο εξάγεται η παροχή μάζας του ρευστού. Όταν μέσω της σχέσης (2.26) υπολογίζεται αυτό το ελάχιστο σφάλμα $(e_{\dot{V}})_0$ κάθε μέτρησης η παροχή μάζας \dot{m} δίνεται από τη σχέση (2.1), η πυκνότητα ρ από την (2.24) με αντικατάσταση της θερμοκρασίας του νερού θ_v και συνεπώς, ο ρυθμός έγχυσης \dot{V} δίνεται από τη σχέση (2.22) με αντικατάσταση των δύο μεγεθών \dot{m} και ρ . Επίσης, το τυχαίο σφάλμα της παροχής μάζας $\varepsilon_{\dot{m}}$ υπολογίζεται από την (2.12), στην οποία αντί για την τυπική απόκλιση s_m χρησιμοποιείται το τυπικό σφάλμα se της κλίσης \dot{m} της ευθείας αναδρομής από τη σχέση (2.4). Ο μέσος χρόνος t_m είναι η μέση χρονική διάρκεια μίας μέτρησης για μία συχνότητα. Το συστηματικό σφάλμα του χρονομέτρου είναι $b_t = \pm 0.01$ s

ενώ το συστηματικό σφάλμα της μεθόδου peak to peak είναι $b_i = \pm 0.21$ s. Το συστηματικό σφάλμα της μάζας ορίζεται από τη σχέση:

$$b_m = \sqrt{DR^2 + s_{nl}^2} \quad (2.27)$$

όπου DR είναι το παραμένον σφάλμα εξόδου αποφόρτισης (Dead load output Return) της δυναμοκυψέλης, το οποίο δίνεται από τη σχέση (2.7) και s_{nl} είναι το σφάλμα λόγω της μη γραμμικότητας (non-linearity) του οργάνου της δυναμοκυψέλης.

Τέλος, το συνολικό σφάλμα υπολογισμού της πυκνότητας e_p είναι πάρα πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα και η παράλειψή του δεν επηρεάζει το συνολικό σφάλμα e_v του ρυθμού έγχυσης του ρευστού, ωστόσο εισάγεται εδώ για λόγους πληρότητας:

$$e_p = \sqrt{(a_1 + 2a_2 \theta_v)^2 b_{\theta_v}^2 + b_p^2} \quad (2.28)$$

όπου b_p είναι η αβεβαιότητα 0.83×10^{-6} g/cm³ με την οποία οι τιμές της πυκνότητας με τη θερμοκρασία προσδιορίζονται πειραματικά, [12] και b_{θ_v} είναι το σφάλμα ανάγνωσης του θερμομέτρου.

Όταν για την ίδια συχνότητα διέγερσης επαναλαμβάνονται $n_s > 1$ μετρήσεις, τότε το συνολικό σφάλμα για το ρυθμό έγχυσης του ρευστού υπολογίζεται ξανά από τη σχέση (2.26), όμως, τόσο η παροχή μάζας, όσο και η πυκνότητα δίνονται ως μέσες τιμές μέσω της σχέσης (2.9) με αντίστοιχη αντικατάσταση των μεγεθών και συνεπώς, η μέση τιμή του ρυθμού έγχυσης \dot{V}_m δίνεται ξανά από τη σχέση (2.22) με αντικατάσταση των δύο μέσων τιμών των μετρήσεων των μεγεθών της παροχής μάζας \dot{m}_m και της πυκνότητας ρ_m . Επίσης, το τυχαίο σφάλμα της παροχής μάζας e_m υπολογίζεται από την (2.12). Η μέση τιμή του χρόνου t_m είναι η μέση χρονική διάρκεια της μέτρησης με τη μικρότερη τιμή. Τα συστηματικά σφάλματα του χρόνου b_t και της μάζας b_m , καθώς και το συνολικό σφάλμα της πυκνότητας e_p είναι τα μεγαλύτερα μεταξύ των n_s μετρήσεων.

Όσο αφορά την τιμή της συχνότητας λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών των συχνοτήτων των n_s επαναλήψεων των μετρήσεων για την ίδια συχνότητα σύμφωνα με τη σχέση (2.9) και το συνολικό σφάλμα είναι το μέγιστο $(e_f)_{max}$, που παρουσιάζεται μεταξύ των n_s επαναλήψεων και προκύπτει από τις σχέσεις (2.18) ή (2.20).

Για καλύτερη κατανόηση της κατανομής του σφάλματος της έγχυσης της αντλίας στο πεδίο των συχνοτήτων διέγερσης χρησιμοποιείται το σχετικό σφάλμα του ρυθμού έγχυσης του ρευστού, το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$re_v = 100 \times \frac{e_v}{\dot{V}} (\%) \quad (2.29)$$

2.8.5 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 $e_{\bar{m}}$, πέραν του συστηματικού της δυναμοκυψέλης $b_{\bar{m}}$, για το λόγο του ότι η παροχή μάζας 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:

$$e_{\bar{m}} = \sqrt{se^2 + b_{\bar{m}}^2} = \sqrt{se^2 + DR^2 + s_{nl}^2} \quad (2.30)$$

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 $e_{\bar{m}}$ θα διαμορφώνεται κυρίως από το συστηματικό $b_{\bar{m}}$. 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 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:

$$e_{\bar{m}} = \sqrt{\varepsilon_{\bar{m}}^2 + \bar{b}_{\bar{m}}^2} \quad (2.31)$$

όπου $\varepsilon_{\bar{m}}$ το τυχαίο σφάλμα που δίνεται από τη σχέση (2.12) και

$$\bar{b}_{\bar{m}} = \sum_{i=1}^{n_2} (b_{\bar{m}})_i / n_3$$

το μέσο συστηματικό σφάλμα κάθε μέτρησης στην ίδια συχνότητα με

$$b_{\bar{m}} = \sqrt{DR^2 + s_{nl}^2} \quad (2.32)$$

Χρησιμοποιείται η μέση τιμή των συστηματικών σφαλμάτων $b_{\bar{m}}$ διότι υπάρχει εξάρτηση αυτού από τη συνολική μεταβολή Δm_i της μάζας και το συνολικό χρόνο t_i διεξαγωγής κάθε δοκιμής [σχέσεις (2.7) & (2.32)]. Δηλαδή, κάθε μέτρηση έχει τις δικές της τιμές Δm_i και t_i , οι οποίες προσδίδουν διαφορετικό συστηματικό σφάλμα $b_{\bar{m}}$ και λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τους τιμή είναι σαν η μέση τιμή της παροχής μάζας $\bar{\dot{m}}$ 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:

$$\delta e_{\bar{m}} = \sqrt{\delta e_{\bar{m}}^2 + \delta \bar{b}_{\bar{m}}^2} \quad (2.33)$$

όπου $\delta e_{\bar{m}}$ το τυχαίο σφάλμα που δίνεται από τη σχέση (2.12) και

$$\delta \bar{b}_{\bar{m}} = \sum_{i=1}^{n_3} (b_{\bar{m}})_i / n_3$$

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:

$$\bar{f}_2 = \sum_{i=1}^{n_2} f_i / n_2 \quad (2.34)$$

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:

$$\bar{f}_3 = \sum_{i=1}^{n_3} f_i / n_3 \quad (2.35)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Πειραματική εκτέλεση και διαδικασία

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται κατά την πειραματική εκτέλεση. Προηγουμένως όμως αναφέρονται ορισμένα στοιχεία που αφορούν τη δομή του πειράματος. Στα σημεία επαφής των έκκεντρων με τα έμβολα και των πλαϊνών τοιχωμάτων των εμβόλων με το κύριο σώμα της κάθε αντλίας εφαρμόζεται λεπτό στρώμα λιπαντικού καθώς επίσης και μεταξύ των αξονίσκων επαναφοράς και του plexiglass. 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.

Η αντλία συνδέεται πρώτα με τον ηλεκτροκινητήρα χαμηλών στροφών για να λειτουργήσει σε χαμηλές συχνότητες, μετά με τον ηλεκτροκινητήρα μεσαίων στροφών και τέλος με τον ηλεκτροκινητήρα χωρίς μειωτήρα για να λειτουργήσει σε υψηλές συχνότητες. Με τον τρόπο αυτό καταγράφονται οι ρυθμοί έγχυσης της αντλίας σε μία σειρά μετρήσεων από τις χαμηλές προς τις υψηλές συχνότητες για διάστημα συχνοτήτων από 0.00257 έως 35.07 Hz.

Επίσης, η αντλία συνδέεται με τον controller. Για να γίνει αυτό βγαίνει, πρώτα απ' όλα, το καλώδιο του controller από το ρεύμα και στην συνέχεια ξεβιδώνεται η βίδα που συγκρατεί το καπάκι του. Στην συνέχεια το κόκκινο καλώδιο του ηλεκτροκινητήρα πρέπει να τοποθετηθεί στην υποδοχή +ARM του controller, ενώ το μαύρο στην -ARM. Αφού συνδέσουμε και την γείωση, βιδώνουμε το καπάκι και συνδέουμε τον controller με την τροφοδοσία του.

Ο εύκαμπτος αγωγός από σιλικόνη αντικαθίσταται κάθε φορά που σε σημείο του παρουσιαστεί αστοχία ή μετά από άνοιγμα της αντλίας και έλεγχο του βρεθεί πολύ καταπονημένος.

Σε κάποιες συγκεκριμένες συχνότητες, και συγκεκριμένα σε εκείνες που ανήκουν στο τρίτο κινητήρα, γίνονται διαδοχικές επαναλήψεις των μετρήσεων οι οποίες συγκρίνονται τελικά μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται σύγκριση διαδοχικών μετρήσεων στην ίδια συχνότητα διέγερσης, με τον εύκαμπτο αγωγό να βρίσκεται στην ίδια κατάσταση όσο αφορά την καταπόνηση και μετατόπισή του (3^ο επίπεδο σφάλματος). Συνολικά στον κινητήρα υψηλών στροφών γίνονται τρεις σειρές μετρήσεων. Ειδικά για τις δύο τελευταίες σειρές μετρήσεων, οι αλλαγές του σωλήνα θα γίνουν στις συχνότητες όπου αλλάχθηκε ο σωλήνας στην πρώτη σειρά μετρήσεων, ανεξάρτητα αν αστόχησε ο σωλήνας ή όχι. Προφανώς αν σε έλεγχο μετά από κάποια μέτρηση βρεθεί τρύπα στον σωλήνα γίνεται αλλαγή του.

Σε κάθε πειραματική εκτέλεση μετρώνται, αφενός μεν οι στροφές του άξονα του κινητήρα-αντλίας με το ταχύμετρο ή το χρονόμετρο, 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 Pro 4.5/R.3/P.3, όπως έχει ήδη αναφερθεί και παριστάνονται γραφικά με τη βοήθεια του λογισμικού Grapher 5.04.21. Επίσης, σε κάθε μέτρηση γίνεται καταγραφή των θερμοκρασιών του αέρα και του νερού, τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της μέτρησης. Τέλος, οποιοδήποτε συμβάν σημειωθεί πριν, μετά ή κατά την διάρκεια της μέτρησης καταγράφεται ώστε αργότερα να διαπιστωθεί αν επηρεάζει την μέτρηση.

Αρχικά τίθεται σε λειτουργία το κλιματιστικό ώστε να επιτευχθεί σταθερή θερμοκρασία στην αίθουσα. Το κλιματιστικό τίθεται σε λειτουργία και μετά την κάθε μέτρηση, αν αυτό κριθεί

σκόπιμο, για να αποφευχθούν έντονες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας στον χώρο. Κατόπιν 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 μηκυσιόμετρο της δυναμοκυψέλης. Να προσθέσουμε ότι όταν εκκινούμε το ADC πρώτα τοποθετούμε πάνω του το τροφοδοτικό βύσμα και ύστερα τοποθετούμε τον μετασχηματιστή στην πρίζα. Το ανάποδο γίνεται όταν το αποσυνδέουμε από το ρεύμα. Μετά καταγράφεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα με τη βοήθεια του θερμομέτρου που είναι τοποθετημένο δίπλα στη δεξαμενή αναρρόφησης. Έπειτα τοποθετείται ένα βαρίδι 2kg πάνω στην δυναμοκυψέλη και διαβάζοντας την τιμή στο Catman και στο AED, το πρόγραμμα που ελέγχει το ADC, επαληθεύεται την σωστή λειτουργία των οργάνων. Κατόπιν συνδέεται μέσω αρθρωτού συνδέσμου ο άξονας του ηλεκτροκινητήρα με τον άξονα της περισταλτικής αντλίας και συσφίγγεται με τα κατάλληλα allen για να μην παρουσιάζεται ολίσθηση. Στη συνέχεια τοποθετείται αυτοκόλλητη αντανάκλαστική 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.

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 βάννα 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. Θα πρέπει να προσεχθεί στις χαμηλές συχνότητες κάθε κινητήρα να μην επιλεγούν συχνότητες στις οποίες εμφανίζεται σπινθηρισμός. Αυτό το καταλαβαίνουμε ακούγοντας τον ηλεκτροκινητήρα.

Ακολούθως ανοίγεται το πρόγραμμα AED και αφού επιλεγεί Bus scan, ρυθμίζεται η δειγματοληψία στις 600μ/s (πάντα) και το φίλτρο στην επιθυμητή εκάστοτε τιμή καθώς επίσης ορίζεται στην καρτέλα parameters το COF στο 0. Μόλις έχουν περάσει τα είκοσι λεπτά και η τιμή που δείχνει το AED είναι σταθερή επιλέγεται η εντολή TARE η οποία βαθμονομεί ένα σημείο αναφοράς, για το βάρος, ίσο με το μηδέν. Στην συνέχεια μέσω του λογισμικού Catman, ανοίγουμε το Catmodules → Measuring → data logger από το μενού στα αριστερά της οθόνης. Κάνουμε στην συνέχεια κλικ στο export options για να επιλέξουμε την εμφάνιση που θα έχουν τα αρχεία των μετρήσεων, θα κάνουμε κλικ στην επιλογή ASCII. Χωρίς να αλλάξουμε κάποια άλλη ρύθμιση κάνουμε κλικ στο Run. Έτσι οδηγούμαστε στην κεντρική οθόνη του προγράμματος. Από την γραμμή στο πάνω μέρος της οθόνης επιλέγουμε το “Configure Sample Rate and timing mode”, από εδώ θα καθοριστεί ο ρυθμός δειγματοληψίας. Ο ρυθμός δειγματοληψίας που θα επιλεγεί εξαρτάται από την συχνότητα του πειράματος, δηλαδή την συχνότητα με την οποία πέφτουν οι σταγόνες. Έχουμε υπολογίσει ότι σε μία περιστροφή, στον συγκεκριμένο τύπο αντλίας, εξέρχονται 5 σταγόνες ανά περιστροφή από τον σωλήνα. Ουσιαστικά αυτό το νούμερο μας οδηγεί στην σωστή επιλογή ρυθμού δειγματοληψίας αφού για να βρεθεί η συχνότητα του πειράματος (δηλαδή πόσες σταγόνες πέφτουν ανά δευτερόλεπτο) γίνεται ο πολλαπλασιασμός 5 σταγόνες/sec x (αριθμός περιστροφών αντλίας)/sec. Για να γίνει κατανοητό αυτό θα δώσουμε ένα παράδειγμα. Αν η αντλία περιστρέφεται με συχνότητα $f=0.8$ Hz ή στροφές το δευτερόλεπτο (ή $60 \times 0.8 = 48$ RPM) τότε η συχνότητα του πειράματος είναι $5 \times 0.8 = 4.0$ Hz ή σταγόνες/δευτερόλεπτο και αναλόγως θα εκλεγεί η συχνότητα δειγματοληψίας.

Τονίζεται ότι οι τιμές του ρυθμού δειγματοληψίας είναι συγκεκριμένες και καθορίζονται από το Catman. Οι δυνατές συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ 0.001 και 1200 Hz, δεν πρόκειται όμως να χρησιμοποιηθεί όλο αυτό το εύρος ρυθμών δειγματοληψίας στο πείραμα μας.

Να σημειωθεί εδώ, ότι παρατηρείται ασυμβατότητα μεταξύ του ρολογιού του H/Y και της συσκευής ADC. Ο χρόνος στο ρολόι του ADC είναι ο μισός από ότι στον H/Y. Αυτός είναι ο λόγος που στη συνέχεια τα αριθμητικά δεδομένα στη κάθε στήλη του χρόνου κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με το 2 για να εκφράζουν τον πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει, επίσης, ότι υπάρχει διαφορά ανάμεσα στον πραγματικό ρυθμό δειγματοληψίας, που σχετίζεται με τον πραγματικό χρόνο και το ADC, και στον ρυθμό δειγματοληψίας που ορίζεται από τον υπολογιστή (το πρόγραμμα). Συγκεκριμένα η πραγματική συχνότητα δειγματοληψίας είναι η μισή από τις τιμές που θα λαμβάνει το Sample Rate στο Catman. Οι τιμές δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκαν, τόσο οι πραγματικές όσο και του υπολογιστή βρίσκονται στον πίνακα 3-1.

Τιμές συχνότητας δειγματοληψίας στο Catman (Hz)	Πραγματικές συχνότητες δειγματοληψίας (Hz)
9.4	4.7
18.75	9.4
37.5	18.75
75	37.5
150	75
300	150

Πίνακας 3-1. Τιμές δειγματοληψίας, πραγματικές και οι αντίστοιχες του H/Y.

Η τιμή δειγματοληψίας κάθε μέτρησης θα πρέπει να είναι ασφαλώς μεγαλύτερη, οριακά σχετικά, από την συχνότητα του πειράματος. Ουσιαστικά, αρκεί η συχνότητα δειγματοληψίας στο Catman να είναι η διπλάσια της συχνότητας του πειράματος. Στο προηγούμενο παράδειγμα, λόγω χάρη, επιλέγουμε στο Catman την τιμή 9.4 Hz αφού το 4.8 είναι περίπου το διπλάσιο του 9.4Hz. Ιδανικά στις πολύ χαμηλές στροφές θα θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε χαμηλότερους ρυθμούς δειγματοληψίας από αυτούς που αναφέρονται στον πίνακα 3-1, κάτι τέτοιο όμως οδηγεί σε overflow του buffer του προγράμματος με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην διαρκούν πάνω από 2 λεπτά. Επίσης, πραγματικοί ρυθμοί δειγματοληψίας άνω των 150 Hz οδηγούν σε πολύ σύντομες μετρήσεις με διάρκεια περίπου ένα λεπτό. Θα πρέπει επίσης να γίνει σαφές ότι ο τύπος 5 σταγόνες/sec x (αριθμός περιστροφών αντλίας)/sec για την εύρεση του ρυθμού δειγματοληψίας δεν ισχύει στις πολύ υψηλές στροφές καθώς εκεί η ροή πλέον δεν είναι σε σταγόνες αλλά είναι συνεχής. Πριν γίνει συνεχής παρατηρείται μείωση του αριθμού σταγόνων ανά περιστροφή.

Αφού βάσει των ανωτέρω επιλέξω τον κατάλληλο ρυθμό δειγματοληψίας στο Catman, πατάω το κουμπί “Display all active channels in graph” για να ρυθμιστούν οι άξονες του προγράμματος και σε ποιον άξονα θα εμφανίζεται πιο μέγεθος. Τέλος κάνω κλικ στο Database Editor για να επιλέξω τον αριθμό δεκαδικών που θα έχουν τα αποτελέσματα. Στο πείραμα μας οι αριθμοί θα έχουν 9 δεκαδικά.

Στην συνέχεια και πριν εκκινήσει ο ηλεκτροκινητήρας θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί η αντλία με το αλφάδι για να αποφευχθούν κραδασμοί και να εξαλειφθεί η πιθανότητα να μαγκώσει το coupler και να περιστρέψει την αντλία και να την σπάσει. Για να γίνει αυτό συγκρίνουμε την επιφάνεια της αντλίας σε τέσσερα σημεία, ανάμεσα στις σκουληκόβιδες και κάθε παξιμάδι στο άνω καπάκι, με την βάση από αλουμίνιο στους κινητήρες χαμηλών και μεσαίων στροφών και με το τραπέζι στον κινητήρα υψηλών στροφών. Αν υπάρχει απόκλιση ρυθμίζουμε κατάλληλα τους αποστάτες. Επίσης, δεν ξεχνάμε να ελέγξουμε αν ο εκκεντροφόρος άξονας

της αντλίας με τον άξονα του κινητήρα είναι τοποθετημένοι με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι μηδενική η μεταξύ τους κατακόρυφη απόσταση.

Αφού πρώτα έχει αρχίσει να λειτουργεί η αντλία για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα και έχουν απομακρυνθεί οι φυσαλίδες, είτε σηκώνοντας λίγο την αντλία είτε χτυπώντας ελαφρώς τον σωλήνα με τα δάκτυλα., που περιέχονται μέσα στον σωλήνα σιλικόνης ξεκινάει η διαδικασία καταγραφής αποτελεσμάτων, πατώντας run. Μόλις καταχωρηθούν 32000 μετρήσεις η συγκεκριμένη έκδοση Catman αδυνατεί να αποθηκεύσει άλλες τιμές και σταματάει την καταχώρηση δεδομένων. Ακολούθως γίνεται export data από τον Database Editor και ύστερα διαλέγονται οι παράμετροι που θα αποθηκευτούν στο channels to be exported και ο χώρος αποθήκευσης τους. το αρχείο της μέτρησης αποθηκεύεται σε μορφή x-xxxxx.dat παραδείγματος χάριν το αρχείο που προέκυψε από την μέτρηση της συχνότητας 0.74081 Hz θα αποθηκευτεί σαν 0-74081.dat. Αργότερα, στην επεξεργασία των μετρήσεων θα καθοριστεί το ακριβές πλήθος δεκαδικών. Πριν κάθε νέα μέτρηση σβήνουμε τα δεδομένα κάνοντας κλικ στο X. Να επισημανθεί, τέλος, ότι όταν το Catman φτάσει στα 32000 Samples και αρχίσουμε νέα μέτρηση θα πρέπει να πατηθεί δύο φορές το Run καθώς την πρώτη το πρόγραμμα συνεχίζει από το σημείο που τελείωσε το προηγούμενο διάγραμμα.

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 αντανακλαστική ταινία σε απόσταση μεταξύ 10 και 100 mm. Κατόπιν, πατώντας και κρατώντας πατημένο το κουμπί εκπομπής της κόκκινης LED αναβοσβήνει η 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 μίας 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 (υπάρχει δυνατότητα καταχώρησης μέχρι 32000 τιμών από το συγκεκριμένο λογισμικό) και σώζεται το αρχείο των τιμών αυτών στον H/Y.

Ο σωλήνας θα πρέπει να βυθίζεται περίπου 2cm κάτω από την στάθμη της δεξαμενής κατάθλιψης ώστε να μην έχουμε εμφάνιση κραδασμών λόγω πτώσης σταγόνων από ψηλά. Στο τέλος της μέτρησης θα καταγραφεί η θερμοκρασία του αέρα και του νερού ξανά. Επίσης, το κέντρο βάρους του δοχείου θα πρέπει να είναι στο μέσον της δυναμοκυψέλης, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω.

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). Όσο διαρκεί η μέτρηση θα πρέπει να μην ακουμπήσει κανείς τα δύο τραπέζια γιατί θα προκαλέσει κραδασμούς και θα αλλοιώσει τις μετρήσεις. Αν δούμε νερά στα έκκεντρα ή λάδι ανάμεικτο με νερό να πέφτει στην αλουμινένια βάση κάτω από τον εκκεντροφόρο της αντλίας είναι πολύ πιθανό να έχει τρυπήσει ο σωλήνας. Το ADC, επίσης, εισάγει βυθίσματα στις μετρήσεις μας. Κάτι τέτοιο δεν πρέπει να μας τρομάζει αφού τα βυθίσματα αυτά θα αξιολογηθούν στην επεξεργασία των μετρήσεων και όπου χρειαστεί θα

αφαιρεθούν. Στις πολύ υψηλές συχνότητες παρατηρούμε ότι το ADC σε ορισμένες μετρήσεις δίνει λάθη από κάποιο σημείο της μέτρησης και μετά (εμφανίζεται για παράδειγμα αρνητικό βάρος ή αλλάζει ξαφνικά η κλίση της γραμμής στην οθόνη). Μία λύση γι' αυτό είναι να βγει το βύσμα τροφοδοσίας του ADC από αυτό για μισό λεπτό περίπου και να επανατοποθετηθεί.

Τα διαστήματα συχνοτήτων της αντλίας ανάλογα τον κινητήρα είναι τα ακόλουθα:

$$0.00257 \leq f_{\chi} \leq 0.0800 \text{ Hz}$$

$$0.0511 \leq f_{\mu} \leq 1.186 \text{ Hz}$$

$$0.995 \leq f_{\nu} \leq 34.84 \text{ Hz}$$

όπου f_{χ} , f_{μ} , f_{ν} οι συχνότητες των κινητήρων χαμηλών, μεσαίων και υψηλών στροφών αντίστοιχα. Τα παραπάνω είναι τα διαστήματα συχνοτήτων τα οποία καλύπτει κάθε κινητήρας. Υπάρχουν και διαστήματα συχνοτήτων στα οποία υπάρχουν συχνότητες από δύο κινητήρες. Αυτά είναι τα κάτωθι:

$$0.0511 \leq f_{\chi,\mu} \leq 0.0800 \text{ Hz}$$

$$0.995 \leq f_{\mu,\nu} \leq 1.186 \text{ Hz}$$

Στο πρώτο οι συχνότητες προέρχονται από τους κινητήρες χαμηλών και μεσαίων στροφών, στο δεύτερο διάστημα από τους κινητήρες μεσαίων και υψηλών στροφών.

Οι συχνότητες στις άλλες δύο σειρές μετρήσεων του τρίτου κινητήρα κυμαίνονται στα παρακάτω διαστήματα:

$$1.08 \leq f_{\nu 2} \leq 34.34 \text{ για την δεύτερη σειρά μετρήσεων και}$$

$$1.136 \leq f_{\nu 3} \leq 35.07 \text{ για την τρίτη σειρά.}$$

Αναλυτικά παρουσιάζονται στον πίνακα 3-2 διάφορες επιλεγμένες παράμετροι του πειράματος σε διάφορα πεδία συχνοτήτων, για τη κυματοειδής περισταλτική αντλία.

Κατά την διάρκεια του πειράματος λόγω των κραδασμών ξεσφίχτηκαν οι σκουληκόβιδες και αρκετές φορές έφυγαν από το άνω καπάκι, με αποτέλεσμα να πρέπει να διακοπεί η μέτρηση καθώς ο πείρος πιεζόταν κάτω για να επαναφέρει το έμβολο. Γι' αυτό τον λόγο σφίχτηκαν σταδιακά ολοένα και περισσότερο οι σκουληκόβιδες. Μεγαλύτερο σφίξιμο τους σημαίνει ότι φθίρεται παραπάνω το έκκεντρο λόγω της παραπάνω δύναμης που ασκείται από τα έμβολα. Στην πράξη βέβαια η επιπλέον φθορά είναι αμελητέα καθώς δεν διαπιστώθηκε εν τέλει σημαντική αλλοίωση της ακτίνας του έκκεντρο, καθώς η όποια μείωση είναι περίπου 0.3mm. Για να προλάβουμε την εκτίναξη των σκουληκόβιδων στις υψηλές στροφές, όταν έχει εξαντληθεί το περιθώριο σύσφιξης αυτών, προσθέτουμε bluetack σε αυτές. Παρά την προσθήκη του bluetack χρειάζεται και πάλι έλεγχος του ύψους των σκουληκόβιδων ώστε να είναι το ίδιο σε όλες, ωστόσο βελτιώνεται σημαντικά το πρόβλημα της εκτίναξης τους.

Να προσθέσουμε ότι στις υψηλές στροφές παρατηρείται αστοχία ρουλεμάν των εμβόλων (εικόνα 3-1), κυρίως στα έμβολα 1-5 τα οποία είναι υπεύθυνα για την πλήρη έμφραξη. Αυτό οφείλεται στις δυνάμεις που αναπτύσσονται από τα έκκεντρα στα ρουλεμάν. Όταν ένα ρουλεμάν αστοχεί συνήθως σπάει το εξωτερικό του κέλυφος. Μετά το πέρας κάθε μέτρησης για στροφές άνω των 1650-1700 RPM, ελέγχουμε τα ρουλεμάν περιστρέφοντας με το χέρι τον εκκεντροφόρο άξονα. Αν κάποιο ρουλεμάν δεν γυρίζει καθώς τα έκκεντρα περιστρέφονται τότε έχει σπάσει. Σε ορισμένες περιπτώσεις αστοχίας του ρουλεμάν, λόγω του ότι αλλοιώνεται η γεωμετρία του και μικραίνει το μήκος του που εξέρχει του εμβόλου, φθίρεται και το έμβολο καθώς έρχεται σε επαφή με τα ταχέως περιστρεφόμενα έκκεντρα. Ένας άλλος τρόπος να διαπιστωθεί ότι έχει χαλάσει ένα ρουλεμάν είναι να δούμε τα κομμάτια του (μπίλιες ή κομμάτια από το κέλυφος συνήθως) να πέφτουν πάνω στο τραπέζι

όπου βρίσκεται η αντλία. Σε μία τέτοια περίπτωση διακόπτουμε την μέτρηση κρατώντας όμως την μέτρηση μέχρι την στιγμή που αστόχησε του ρουλεμάν. Στην συνέχεια ανοίγουμε την αντλία, βγάζουμε το έμβολο στο οποίο εμφανίστηκε το πρόβλημα, αφαιρώντας τον πείρο που συγκρατεί το σπασμένο ρουλεμάν και το αντικαθιστούμε με ένα νέο. Στα έμβολα υπάρχει αρίθμηση με μαρκαδόρο για να αποφευχθεί λάθος τοποθέτηση τους. Αν χρειαστεί χρησιμοποιούμε λίμα για να διαμορφώσουμε κατάλληλα την κοιλότητα όπου βρίσκονται τα ρουλεμάν, καθώς όταν έρχεται σε άμεση επαφή το έκκεντρο με το έμβολο υπάρχει η τάση να κλείσει η κοιλότητα.

Σημειώνεται τέλος 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 0.25 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 μία περιστροφή.



Εικόνα 3-1. Ρουλεμάν που αστόχησαν.

3.2 Πειραματικά αποτελέσματα και επεξεργασία μετρήσεων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων. Ο τρόπος της επεξεργασίας αυτής περιγράφεται παρακάτω. Για κάθε επιλεγόμενη συχνότητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα λαμβάνεται

η αντίστοιχη καμπύλη της εγχυόμενης μάζας νερού συναρτήσει του χρόνου. Από την καμπύλη αυτή 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.

Πεδίο συχνοτήτων (Hz)	Στροφές κινητήρα N (rpm)	Περίοδος (s)	Πραγματική Συχνότητα δειγματοληψίας f_s (M/s)	Φίλτρο (low pass) (Hz)	Χρονική διάρκεια πειράματος (s)
0.00257 ÷ 0.0369	0.1542 ÷ 2.214	389.11 ÷ 27.10	4.7	0.25	6809
0.0402 ÷ 0.0825	2.412 ÷ 4.95	24.88 ÷ 12.12	4.7	0.5	6809
0.0829 ÷ 0.36	4.974 ÷ 21.6	12.06 ÷ 2.78	4.7	1	6809
0.403 ÷ 0.636	24.18 ÷ 38.16	2.48 ÷ 1.57	4.7	4	6808
0.684 ÷ 0.775	41.04 ÷ 46.50	1.46 ÷ 1.29	4.7	8	6808
0.789 ÷ 0.973	47.34 ÷ 58.38	1.27 ÷ 1.03	9.4	8	3420
1.001 1.014 1.007 1.020 1.020 1.021 1.032	60.06 60.84 60.42 61.20 61.20 61.26 61.92	0.999 0.986 0.993 0.980 0.980 0.979 0.969	18.75	8	1710
0.995 ÷ 1.893	59.7 ÷ 113.6	1.005 ÷ 0.528	18.75	4	1710
2.009 ÷ 4.675	120.5 ÷ 280.5	0.498 ÷ 0.214	37.5	4	856
4.915, 5.49	294.9, 329.4	0.203, 0.182	75	4	430
8.303	498.2	0.120	150	4	215
4.962 ÷ 15.97	297.7 ÷ 958.2	0.202 ÷ 0.063	75	4	240
16.52 ÷ 35.07	991.2 ÷ 2104.2	0.061 ÷ 0.029	150	8	215

Πίνακας 3-2. Ταξινόμηση μετρήσεων ανά συχνότητα σε κλάσεις για όλες τις σειρές μετρήσεων.

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 μία περιστροφή. Υπόψη ότι στις χαμηλές συχνότητες για μία πλήρη περιστροφή εγχύονται 5 σταγόνες, ενώ στις υψηλότερες ο όγκος εμβολισμού εγχύεται σχεδόν ομοιόμορφα. 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. Τα παραπάνω ισχύουν και για τις τρεις σειρές μετρήσεων.

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, από κάθε μέτρηση που έγινε προκύπτει ένα αρχείο .dat στο οποίο έχουν αποθηκευτεί όλες οι πληροφορίες για την μέτρηση. Στην συνέχεια απομακρύνονται οι ανωμαλίες, λόγω κινητήρα, ADC ή από οποιαδήποτε τυχαία διαταραχή, από το αρχείο. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν τροποποιημένα αρχεία, τα όρια των οποίων καθορίζονται ή με την μέθοδο peak-to-peak για τις χαμηλές στροφές ώστε να ταυτίζεται η μέτρηση με το χρονόμετρο με εκείνη που φαίνεται στο Grapher, ή με τα αποτελέσματα από την μέτρηση με το χρονόμετρο ή το ταχύμετρο. Τα δεδομένα που αντλούμε από τα αρχεία παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες. Διακρίνουμε τις μετρήσεις της πρώτης σειράς σε αυτές που μετρήθηκαν με χρονόμετρο και σε εκείνες που μετρήθηκαν με ταχύμετρο.

Η αστάθεια του κινητήρα λόγω των υψηλών ροπών φορτίου που αναπτύσσονται στις 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 ($b_T=0.21$ sec), όσο και του ηλεκτρονικού χρονομέτρου ($b_T=0.10$ sec) συμβάλλει ελάχιστα στη διαμόρφωση του συνολικού σφάλματος e_T .

Παρατηρούμε ότι ενώ παραπάνω αναφέρεται ότι ξεκινάμε να χρησιμοποιούμε το ταχύμετρο πάνω από τα 12 RPM, βλέπουμε ότι η πρώτη συχνότητα στην οποία χρησιμοποιήθηκε είναι τα 0.403 Hz ή 24.2 RPM. Αυτό συνέβη γιατί στα 0.214Hz (12.8 RPM) που δοκιμάσαμε να μετρήσουμε με το στροφόμετρο πρώτη φορά, εμφανιζόταν απόκλιση στις τιμές που καταγράφονταν και έτσι προτιμήθηκε το χρονόμετρο εφόσον ήταν ευδιάκριτος ο ήχος των έκκεντρων. Αργότερα όταν αυξήθηκαν οι στροφές, το στροφόμετρο μπορούσε να μετρήσει τα RPM ευκολότερα και με καλύτερη ακρίβεια.

Εν συνεχεία θα χαράξουμε το διάγραμμα μεταβολής μάζας νερού $m(t)$ για διάφορες συχνότητες για τον κάθε κινητήρα. Ορισμένες συχνότητες που προέκυψαν από κάθε κινητήρα θα απεικονιστούν στο δικό τους διάγραμμα εκτός από τον κινητήρα υψηλών στροφών, καθώς εκεί έχουμε ένα ενδιαφέρον φαινόμενο, το οποίο για να γίνει πιο ευδιάκριτο απαιτεί δεύτερο διάγραμμα.

Πριν από αυτό παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων όπως προέκυψαν από την επεξεργασία που έγινε.

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
0,00257	0,039	0,0030	7,71	0,00065	0,000050	0,000048	0,00034	0,023
0,00259	0,040	0,0030	7,53	0,00067	0,000051	0,000048	0,00042	0,029
0,00263	0,039	0,0015	3,99	0,00064	0,000026	0,000048	0,00046	0,012
0,00266	0,038	0,0016	4,10	0,00063	0,000026	0,000048	0,00043	0,011
0,00269	0,038	0,0016	4,17	0,00063	0,000026	0,000048	0,00044	0,011
0,00367	0,051	0,0011	2,09	0,00086	0,000018	0,000048	0,00050	0,0073
0,00369	0,050	0,0011	2,17	0,00083	0,000018	0,000048	0,00049	0,0072

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
0,00371	0,0504	0,00087	1,73	0,00084	0,000014	0,000048	0,00055	0,0059
0,00374	0,047	0,0022	4,68	0,00078	0,000036	0,000048	0,00046	0,020
0,00470	0,0669	0,00079	1,18	0,00111	0,000013	0,000048	0,00065	0,0060
0,00474	0,0677	0,00069	1,02	0,00113	0,000012	0,000048	0,00066	0,0050
0,00475	0,0688	0,00080	1,16	0,00114	0,000013	0,000048	0,00068	0,0064
0,00552	0,084	0,0013	1,54	0,00139	0,000021	0,000048	0,00050	0,0097
0,00557	0,0823	0,00073	0,88	0,00137	0,000012	0,000048	0,00065	0,0053
0,00557	0,0833	0,00082	0,98	0,00139	0,000014	0,000048	0,00063	0,0061
0,00560	0,0818	0,00094	1,15	0,00136	0,000016	0,000048	0,00061	0,0073
0,00625	0,079	0,0024	3,08	0,00132	0,000041	0,000048	0,00046	0,023
0,00630	0,086	0,0025	2,87	0,00143	0,000041	0,000048	0,00043	0,022
0,00636	0,093	0,0019	2,01	0,00154	0,000031	0,000048	0,00044	0,015
0,00637	0,096	0,0019	1,94	0,00160	0,000031	0,000048	0,00045	0,015
0,00639	0,094	0,0075	8,02	0,0016	0,00013	0,000048	0,00034	0,091
0,00641	0,100	0,0019	1,88	0,00166	0,000031	0,000048	0,00041	0,014
0,00778	0,121	0,0011	0,94	0,00201	0,000019	0,000048	0,00043	0,0069
0,00783	0,120	0,0010	0,85	0,00199	0,000017	0,000048	0,00053	0,0072
0,00788	0,119	0,0012	0,97	0,00199	0,000019	0,000048	0,00046	0,0075
0,00789	0,118	0,0031	2,62	0,00196	0,000051	0,000048	0,00039	0,028
0,00896	0,137	0,0012	0,86	0,00227	0,000019	0,000048	0,00055	0,0092
0,00896	0,1381	0,00075	0,54	0,00230	0,000012	0,000048	0,00063	0,0054
0,00909	0,1355	0,00062	0,46	0,00225	0,000010	0,000048	0,00061	0,0040
0,00909	0,142	0,0027	1,88	0,00237	0,000045	0,000048	0,00052	0,030
0,0103	0,160	0,0012	0,76	0,00266	0,000020	0,000048	0,00066	0,012
0,0103	0,161	0,0062	3,82	0,0027	0,00010	0,000048	0,00049	0,095
0,0104	0,1561	0,00056	0,36	0,002595	0,0000093	0,000048	0,00075	0,0041
0,0104	0,164	0,0014	0,83	0,00272	0,000023	0,000048	0,00060	0,012
0,0105	0,1532	0,00082	0,53	0,00255	0,000014	0,000048	0,00063	0,0061
0,0119	0,179	0,0016	0,87	0,00298	0,000026	0,000048	0,00051	0,013
0,0121	0,178	0,0047	2,67	0,00296	0,000079	0,000048	0,00044	0,059
0,0121	0,182	0,0013	0,71	0,00302	0,000021	0,000048	0,00046	0,0089
0,0122	0,186	0,0010	0,55	0,00309	0,000017	0,000048	0,00046	0,0062
0,0122	0,1892	0,00096	0,51	0,00315	0,000016	0,000048	0,00047	0,0058
0,0153	0,247	0,0015	0,61	0,00411	0,000025	0,000048	0,00044	0,011
0,0154	0,246	0,0030	1,23	0,00409	0,000050	0,000048	0,00043	0,030
0,0155	0,2407	0,00096	0,40	0,00400	0,000016	0,000048	0,00051	0,0063
0,0155	0,2410	0,00068	0,28	0,00401	0,000011	0,000048	0,00052	0,0038
0,0156	0,230	0,0037	1,61	0,00383	0,000062	0,000048	0,00064	0,059
0,0156	0,245	0,0017	0,68	0,00407	0,000028	0,000048	0,00051	0,015
0,0185	0,284	0,0022	0,77	0,00472	0,000037	0,000048	0,00066	0,027
0,0185	0,287	0,0055	1,92	0,00477	0,000092	0,000048	0,00050	0,083
0,0185	0,293	0,0015	0,50	0,00487	0,000024	0,000048	0,00049	0,011
0,0185	0,297	0,0017	0,56	0,00494	0,000028	0,000048	0,00047	0,013

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
0,0185	0,299	0,0016	0,52	0,00497	0,000026	0,000048	0,00050	0,013
0,0186	0,2924	0,0009	0,31	0,00486	0,000015	0,000048	0,00049	0,0055
0,0186	0,295	0,0012	0,41	0,00491	0,000020	0,000048	0,00052	0,0090
0,0204	0,327	0,00049	0,15	0,005434	0,0000081	0,000048	0,00065	0,0026
0,0205	0,3236	0,00046	0,14	0,005381	0,0000076	0,000048	0,00101	0,0035
0,0206	0,3170	0,0017	0,55	0,00527	0,000029	0,000048	0,00063	0,018
0,0238	0,3836	0,0020	0,53	0,00638	0,000033	0,000048	0,00052	0,019
0,0238	0,385	0,0014	0,37	0,00640	0,000023	0,000048	0,00048	0,010
0,0239	0,371	0,0019	0,51	0,00617	0,000031	0,000048	0,00050	0,017
0,0240	0,382	0,0012	0,32	0,00636	0,000021	0,000048	0,00052	0,0093
0,0241	0,380	0,00061	0,16	0,00633	0,000010	0,000048	0,00067	0,0040
0,0241	0,385	0,0026	0,67	0,00640	0,000043	0,000048	0,00048	0,026
0,02730	0,452	0,0033	0,72	0,00752	0,000054	0,000096	0,00049	0,036
0,0279	0,4627	0,00098	0,21	0,00770	0,000016	0,00013	0,00056	0,0068
0,0280	0,463	0,0013	0,29	0,00771	0,000022	0,00010	0,00049	0,0097
0,0281	0,469	0,0024	0,51	0,00780	0,000040	0,00012	0,00056	0,026
0,0282	0,4658	0,00076	0,16	0,00775	0,000013	0,00010	0,00059	0,0048
0,0282	0,477	0,0085	1,78	0,0079	0,00014	0,00020	0,00045	0,14
0,0303	0,504	0,0017	0,34	0,00838	0,000029	0,00018	0,00045	0,013
0,0307	0,508	0,0017	0,34	0,00844	0,000029	0,00012	0,00049	0,014
0,0307	0,510	0,0020	0,40	0,00848	0,000034	0,00020	0,00058	0,021
0,0308	0,5053	0,00084	0,17	0,00840	0,000014	0,00011	0,00050	0,0048
0,0309	0,504	0,0011	0,21	0,00837	0,000018	0,00012	0,00049	0,0067
0,0311	0,504	0,0029	0,57	0,00839	0,000048	0,00012	0,00046	0,028
0,0333	0,556	0,0022	0,40	0,00924	0,000037	0,00019	0,00062	0,025
0,0335	0,552	0,0011	0,20	0,00918	0,000019	0,00013	0,00052	0,0075
0,0338	0,547	0,0016	0,30	0,00910	0,000027	0,00012	0,00048	0,012
0,0339	0,5461	0,00097	0,18	0,00908	0,000016	0,00014	0,00055	0,0066
0,0339	0,551	0,0037	0,67	0,00916	0,000062	0,00016	0,00049	0,044
0,0339	0,5518	0,00066	0,12	0,00918	0,000011	0,00012	0,00063	0,0039
0,0368	0,602	0,0012	0,20	0,01001	0,000020	0,00015	0,00066	0,011
0,0369	0,592	0,0028	0,47	0,00985	0,000046	0,00017	0,00048	0,028
0,0369	0,608	0,0023	0,38	0,01011	0,000039	0,00016	0,00050	0,022
0,0369	0,608	0,0025	0,41	0,01012	0,000041	0,00015	0,00066	0,031
0,0370	0,600	0,0016	0,26	0,00998	0,000026	0,00031	0,00050	0,012
0,0370	0,6061	0,00078	0,13	0,01008	0,000013	0,00015	0,00070	0,0057
0,0371	0,6024	0,00075	0,12	0,01002	0,000012	0,00016	0,00078	0,0059
0,0402	0,669	0,0070	1,05	0,0111	0,00012	0,00035	0,00055	0,12
0,0403	0,666	0,0017	0,26	0,01107	0,000029	0,00018	0,00049	0,014
0,0406	0,6621	0,00094	0,14	0,01102	0,000016	0,00018	0,00058	0,0064
0,0407	0,657	0,0021	0,31	0,01093	0,000034	0,00025	0,00073	0,027
0,0409	0,671	0,0019	0,28	0,01116	0,000032	0,00029	0,00044	0,015
0,0410	0,671	0,0033	0,49	0,01116	0,000055	0,00070	0,00050	0,038
0,0410	0,6742	0,00082	0,12	0,01122	0,000014	0,00023	0,00052	0,0047
0,0439	0,734	0,0045	0,61	0,01221	0,000074	0,00032	0,00047	0,054
0,0441	0,720	0,0032	0,44	0,01197	0,000053	0,00023	0,00066	0,047

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
0,0441	0,7272	0,00059	0,08	0,01209	0,000010	0,00032	0,00077	0,0032
0,0442	0,738	0,0011	0,15	0,01228	0,000018	0,00021	0,00049	0,0068
0,0442	0,745	0,0015	0,20	0,01238	0,000024	0,00024	0,00049	0,011
0,0443	0,735	0,0019	0,25	0,01222	0,000031	0,00022	0,00053	0,017
0,0480	0,833	0,0025	0,29	0,01386	0,000041	0,00023	0,00047	0,022
0,0481	0,8212	0,0074	0,90	0,0137	0,00012	0,00023	0,00044	0,11
0,0481	0,826	0,0039	0,48	0,01374	0,000066	0,00035	0,00049	0,046
0,0482	0,823	0,0018	0,22	0,01370	0,000031	0,00025	0,00052	0,016
0,0484	0,825	0,0013	0,15	0,01372	0,000021	0,00027	0,00072	0,013
0,0485	0,823	0,0011	0,14	0,01369	0,000018	0,00029	0,00052	0,0075
0,0485	0,829	0,0013	0,16	0,01379	0,000022	0,00028	0,00056	0,010
0,0511	0,810	0,0033	0,40	0,01348	0,000055	0,00052	0,00023	0,018
0,0512	0,8090	0,00083	0,10	0,01346	0,000014	0,00053	0,00041	0,0038
0,0516	0,812	0,0012	0,15	0,01351	0,000021	0,00033	0,00034	0,0061
0,0518	0,821	0,0035	0,43	0,01366	0,000059	0,00040	0,00034	0,030
0,0519	0,812	0,0011	0,13	0,01351	0,000018	0,00051	0,00079	0,012
0,0519	0,920	0,0026	0,28	0,01530	0,000043	0,00034	0,00037	0,020
0,0520	0,817	0,0010	0,12	0,01359	0,000017	0,00052	0,00039	0,0050
0,0520	0,928	0,0018	0,19	0,01543	0,000030	0,00030	0,00034	0,011
0,0521	0,9236	0,00094	0,10	0,01536	0,000016	0,00028	0,00037	0,0042
0,0523	0,904	0,0050	0,55	0,01503	0,000083	0,00031	0,00043	0,062
0,0523	0,915	0,0017	0,19	0,01521	0,000028	0,00036	0,00032	0,0094
0,0523	0,927	0,0013	0,14	0,01542	0,000022	0,00036	0,00035	0,0066
0,0525	0,828	0,0029	0,35	0,01378	0,000049	0,00067	0,00033	0,022
0,0526	0,928	0,0059	0,64	0,01543	0,000099	0,00027	0,00033	0,061
0,0530	0,9134	0,00082	0,09	0,01519	0,000014	0,00030	0,00034	0,0031
0,0603	1,0820	0,00084	0,08	0,01800	0,000014	0,00040	0,00358	0,0086
0,0609	1,0982	0,00095	0,09	0,01827	0,000016	0,00040	0,00038	0,0041
0,0610	1,098	0,0012	0,11	0,01827	0,000019	0,00043	0,00034	0,0053
0,0615	0,951	0,0059	0,62	0,01582	0,000098	0,00046	0,00027	0,050
0,0617	0,953	0,0026	0,27	0,01585	0,000042	0,00049	0,00032	0,017
0,0618	0,9542	0,00068	0,07	0,01587	0,000011	0,00046	0,00070	0,0036
0,0621	0,9564	0,00070	0,07	0,01591	0,000012	0,00045	0,00105	0,0032
0,0727	1,158	0,0026	0,22	0,01927	0,000043	0,00059	0,00089	0,046
0,0741	1,1440	0,00085	0,07	0,01904	0,000014	0,00064	0,00127	0,0033
0,075	1,155	0,0020	0,18	0,01922	0,000034	0,0013	0,00025	0,0087
0,075	1,179	0,0018	0,15	0,01962	0,000030	0,0011	0,00030	0,0086
0,0755	1,1667	0,00075	0,06	0,01941	0,000012	0,00059	0,00070	0,0035
0,0755	1,166	0,0010	0,09	0,01939	0,000017	0,00060	0,00179	0,0033
0,0755	1,177	0,0088	0,74	0,0196	0,00015	0,00080	0,00023	0,073
0,0757	1,170	0,0018	0,16	0,01946	0,000030	0,00073	0,00036	0,011
0,0759	1,185	0,0011	0,09	0,01971	0,000017	0,00068	0,00152	0,0028
0,076	1,153	0,0070	0,61	0,0192	0,00012	0,0013	0,00020	0,047
0,076	1,189	0,0034	0,28	0,01978	0,000056	0,0018	0,00024	0,019
0,076	1,188	0,0077	0,65	0,0198	0,00013	0,0017	0,00029	0,076
0,0760	1,1895	0,00077	0,06	0,01978	0,000013	0,00073	0,00065	0,0036

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
0,0766	1,1661	0,00082	0,07	0,01940	0,000014	0,00061	0,00052	0,0015
0,0769	1,162	0,0083	0,72	0,0193	0,00014	0,00059	0,00024	0,069
0,0769	1,173	0,0064	0,55	0,0195	0,00011	0,00089	0,00023	0,048
0,0769	1,176	0,0022	0,19	0,01955	0,000037	0,00070	0,00025	0,011
0,077	1,170	0,0015	0,13	0,01946	0,000024	0,0011	0,00053	0,011
0,077	1,151	0,0012	0,10	0,01915	0,000020	0,0012	0,00072	0,011
0,0770	1,1714	0,00075	0,06	0,01948	0,000012	0,00062	0,00075	0,0037
0,0775	1,164	0,0051	0,44	0,01938	0,000085	0,00060	0,00023	0,033
0,0776	1,191	0,0016	0,14	0,01981	0,000027	0,00088	0,00023	0,0060
0,0777	1,218	0,0029	0,24	0,02026	0,000048	0,00067	0,00027	0,016
0,0779	1,2039	0,00076	0,06	0,02003	0,000013	0,00067	0,00049	0,0022
0,0779	1,207	0,0023	0,19	0,02009	0,000039	0,00069	0,00025	0,011
0,078	1,186	0,0030	0,25	0,01974	0,000050	0,0011	0,00032	0,021
0,078	1,177	0,0014	0,12	0,01959	0,000023	0,0012	0,00043	0,0083
0,078	1,212	0,0047	0,39	0,02017	0,000078	0,0019	0,00051	0,063
0,0781	1,1930	0,00077	0,06	0,01985	0,000013	0,00066	0,00069	0,0040
0,0781	1,212	0,0026	0,21	0,02018	0,000043	0,00078	0,00025	0,013
0,0782	1,2149	0,00077	0,06	0,02021	0,000013	0,00079	0,00070	0,0035
0,0782	1,195	0,0027	0,22	0,01987	0,000045	0,00066	0,00027	0,014
0,0783	1,1994	0,00080	0,07	0,01995	0,000013	0,00063	0,00054	0,0019
0,0783	1,201	0,0030	0,25	0,01998	0,000050	0,00084	0,00031	0,020
0,0783	1,230	0,0012	0,10	0,02047	0,000020	0,00071	0,00031	0,0047
0,0783	1,218	0,0022	0,18	0,02027	0,000036	0,00073	0,00032	0,013
0,0784	1,19	0,012	1,02	0,0198	0,00020	0,00086	0,00021	0,11
0,0785	1,2013	0,00077	0,06	0,01999	0,000013	0,00071	0,00145	0,0080
0,0785	1,1816	0,00080	0,07	0,01965	0,000013	0,00064	0,00226	0,014
0,0785	1,206	0,0049	0,40	0,02006	0,000081	0,00074	0,00033	0,043
0,0786	1,227	0,0014	0,12	0,02041	0,000023	0,00066	0,00525	0,0063
0,0786	1,211	0,0011	0,09	0,02016	0,000018	0,00069	0,00028	0,0036
0,0787	1,2282	0,00095	0,08	0,02044	0,000016	0,00068	0,00027	0,0028
0,0787	1,200	0,0033	0,28	0,01997	0,000055	0,00062	0,00028	0,021
0,0788	1,2198	0,00077	0,06	0,02030	0,000013	0,00066	0,00055	0,0029
0,0788	1,2278	0,00096	0,08	0,02043	0,000016	0,00071	0,00034	0,0035
0,0789	1,2213	0,00086	0,07	0,02032	0,000014	0,00064	0,00066	0,0056
0,0789	1,211	0,0011	0,09	0,02015	0,000018	0,00076	0,00043	0,0054
0,0789	1,215	0,0016	0,13	0,02020	0,000027	0,00081	0,00029	0,0073
0,0789	1,2262	0,00092	0,07	0,02040	0,000015	0,00085	0,00027	0,0025
0,0789	1,211	0,0022	0,18	0,02014	0,000036	0,00067	0,00025	0,0094
0,079	1,231	0,0025	0,21	0,02049	0,000042	0,0011	0,00025	0,013
0,079	1,223	0,0046	0,38	0,02035	0,000077	0,0010	0,00025	0,031
0,079	1,218	0,0034	0,28	0,02026	0,000056	0,0031	0,00024	0,018
0,0790	1,2272	0,00084	0,07	0,02042	0,000014	0,00072	0,00072	0,0022
0,0790	1,2230	0,00078	0,06	0,02035	0,000013	0,00073	0,00066	0,0035
0,0791	1,173	0,0098	0,83	0,0195	0,00016	0,00087	0,00025	0,091
0,0791	1,2307	0,00097	0,08	0,02047	0,000016	0,00080	0,00028	0,0029
0,0791	1,2293	0,00080	0,06	0,02045	0,000013	0,00074	0,00025	0,00096
0,0792	1,2320	0,00078	0,06	0,02050	0,000013	0,00069	0,00031	0,0018

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
0,0792	1,2286	0,00082	0,07	0,02044	0,000013	0,00072	0,00038	0,0027
0,0792	1,2383	0,00078	0,06	0,02060	0,000013	0,00081	0,00160	0,0082
0,0792	1,2321	0,00079	0,06	0,02049	0,000013	0,00072	0,00034	0,0020
0,0792	1,221	0,0011	0,09	0,02031	0,000018	0,00082	0,00026	0,0035
0,0792	1,228	0,0017	0,13	0,02043	0,000027	0,00081	0,00024	0,0062
0,0793	1,211	0,0015	0,12	0,02013	0,000025	0,00083	0,00062	0,014
0,0793	1,2296	0,00080	0,06	0,02045	0,000013	0,00080	0,00047	0,0030
0,0793	1,2522	0,00080	0,06	0,02083	0,000013	0,00069	0,00100	0,0062
0,0793	1,2231	0,00097	0,08	0,02034	0,000016	0,00065	0,00040	0,00088
0,0794	1,215	0,0022	0,18	0,02020	0,000036	0,00063	0,00031	0,012
0,0794	1,215	0,0045	0,37	0,02021	0,000075	0,00095	0,00038	0,044
0,0794	1,261	0,0034	0,27	0,02097	0,000056	0,00063	0,00043	0,032
0,0794	1,2321	0,00088	0,07	0,02050	0,000014	0,00072	0,00035	0,0031
0,0797	1,2159	0,00078	0,06	0,02022	0,000013	0,00066	0,00135	0,0067
0,0797	1,226	0,0052	0,42	0,02039	0,000086	0,00089	0,00024	0,035
0,0797	1,227	0,0017	0,14	0,02040	0,000028	0,00074	0,00027	0,0073
0,0798	1,240	0,0050	0,40	0,02063	0,000083	0,00076	0,00027	0,037
0,080	1,214	0,0079	0,65	0,0202	0,00013	0,0044	0,00022	0,060
0,0800	1,23	0,014	1,18	0,0204	0,00024	0,00064	0,00018	0,12
0,0802	1,2381	0,00084	0,07	0,02060	0,000014	0,00078	0,00154	0,0048
0,0825	1,2797	0,00095	0,07	0,02130	0,000016	0,00080	0,00470	0,012
0,0829	1,3009	0,00097	0,07	0,02163	0,000016	0,00097	0,00040	0,0041
0,0839	1,317	0,0026	0,19	0,02191	0,000042	0,00096	0,00024	0,012
0,084	1,312	0,0045	0,34	0,02182	0,000074	0,0021	0,00028	0,033
0,084	1,315	0,0050	0,38	0,02188	0,000083	0,0021	0,00025	0,034
0,084	1,322	0,0026	0,20	0,02199	0,000044	0,0018	0,00026	0,013
0,0840	1,32	0,012	0,88	0,0219	0,00019	0,00071	0,00023	0,11
0,0842	1,3168	0,00082	0,06	0,02190	0,000013	0,00077	0,00100	0,0059
0,0842	1,3064	0,00096	0,07	0,02173	0,000016	0,00077	0,00106	0,011
0,111	1,733	0,0021	0,12	0,02884	0,000034	0,0013	0,00708	0,0077
0,111	1,746	0,0035	0,20	0,02905	0,000058	0,0014	0,00030	0,022
0,141	2,261	0,0012	0,05	0,03761	0,000019	0,0022	0,00100	0,0075
0,141	2,281	0,0021	0,09	0,03794	0,000035	0,0021	0,00640	0,011
0,143	2,26	0,017	0,75	0,03768	0,00028	0,0031	0,00026	0,18
0,179	2,841	0,0039	0,14	0,04726	0,000064	0,0032	0,00031	0,019
0,179	2,843	0,0015	0,05	0,04730	0,000025	0,0033	0,00065	0,0029
0,179	2,845	0,0018	0,06	0,04733	0,000030	0,0034	0,00034	0,0063
0,179	2,843	0,0014	0,05	0,04729	0,000023	0,0037	0,00080	0,0080
0,179	2,849	0,0015	0,05	0,04739	0,000025	0,0038	0,00043	0,0058
0,212	3,375	0,0019	0,06	0,05612	0,000032	0,0069	0,00041	0,0068
0,213	3,362	0,0064	0,19	0,0559	0,00011	0,0068	0,00028	0,031
0,214	3,382	0,0017	0,05	0,05625	0,000028	0,0048	0,00088	0,0042
0,214	3,413	0,0021	0,06	0,05675	0,000035	0,0055	0,00051	0,011
0,215	3,397	0,0016	0,05	0,05649	0,000026	0,0051	0,00145	0,0091
0,241	3,814	0,0018	0,05	0,06345	0,000029	0,0060	0,00327	0,022
0,244	3,884	0,0022	0,06	0,06461	0,000036	0,0062	0,00177	0,0068

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
0,246	3,904	0,0018	0,05	0,06494	0,000030	0,0076	0,00092	0,0059
0,266	4,253	0,0022	0,05	0,07075	0,000035	0,0077	0,00041	0,0060
0,268	4,253	0,0033	0,08	0,07075	0,000055	0,0086	0,00039	0,012
0,268	4,252	0,0065	0,15	0,07073	0,00011	0,0080	0,00030	0,028
0,270	4,255	0,0037	0,09	0,07079	0,000060	0,0074	0,00057	0,0011
0,31	4,89	0,015	0,31	0,0814	0,00025	0,013	0,00032	0,089
0,31	4,887	0,0022	0,04	0,08129	0,000035	0,014	0,00116	0,0079
0,310	4,930	0,0044	0,09	0,08200	0,000073	0,0099	0,00121	0,0022
0,34	5,424	0,0069	0,13	0,0902	0,00011	0,012	0,00294	0,0030
0,36	5,763	0,0073	0,13	0,0958	0,00012	0,013	0,00759	0,0076
0,403	6,438	0,0082	0,13	0,1071	0,00014	0,0022	0,01569	0,016
0,434	6,922	0,0088	0,13	0,1151	0,00015	0,0021	0,00804	0,0084
0,467	7,480	0,0095	0,13	0,1244	0,00016	0,0019	0,00813	0,0082
0,487	7,788	0,0099	0,13	0,1295	0,00016	0,0020	0,00315	0,0032
0,521	8,34	0,011	0,13	0,1386	0,00018	0,0022	0,01039	0,011
0,592	9,49	0,012	0,13	0,1580	0,00020	0,0025	0,03137	0,031
0,636	10,23	0,013	0,13	0,1703	0,00022	0,0022	0,01843	0,020
0,684	10,91	0,014	0,13	0,1816	0,00023	0,0024	0,02138	0,023
0,741	11,96	0,015	0,13	0,1990	0,00025	0,0021	0,01790	0,020
0,775	12,49	0,016	0,13	0,2077	0,00026	0,0023	0,01168	0,014
0,789	12,726	0,0082	0,06	0,2117	0,00013	0,0024	0,01875	0,039
0,837	13,536	0,0088	0,06	0,2252	0,00014	0,0025	0,03939	0,081
0,875	14,207	0,0092	0,06	0,2363	0,00015	0,0025	0,02779	0,057
0,905	14,731	0,0095	0,06	0,2450	0,00016	0,0026	0,02746	0,055
0,941	15,254	0,0099	0,06	0,2537	0,00016	0,0026	0,01836	0,038
0,973	15,67	0,010	0,06	0,2606	0,00017	0,0028	0,01979	0,041
0,995	15,240	0,0053	0,03	0,25346	0,000083	0,0063	0,01192	0,051
1,001	16,143	0,0049	0,03	0,26856	0,000076	0,0039	0,00196	0,050
1,007	16,171	0,0056	0,03	0,26904	0,000088	0,0035	0,01492	0,061
1,010	16,640	0,0059	0,04	0,27680	0,000093	0,0037	0,03112	0,13
1,014	16,720	0,0043	0,03	0,27808	0,000065	0,0037	0,00530	0,079
1,015	16,893	0,0060	0,04	0,28093	0,000094	0,0035	0,02902	0,12
1,020	16,364	0,0056	0,03	0,27218	0,000089	0,0031	0,01366	0,055
1,020	16,948	0,0059	0,03	0,28190	0,000093	0,0032	0,02033	0,081
1,021	16,440	0,0044	0,03	0,27349	0,000068	0,0028	0,00714	0,050
1,027	17,128	0,0061	0,04	0,28477	0,000095	0,0032	0,02767	0,11
1,030	17,154	0,0060	0,03	0,28520	0,000094	0,0032	0,02447	0,10
1,032	17,091	0,0043	0,03	0,28424	0,000064	0,0024	0,00512	0,048
1,033	17,224	0,0061	0,04	0,28637	0,000095	0,0028	0,02482	0,10
1,05	16,212	0,0061	0,04	0,26967	0,000097	0,012	0,04957	0,21
1,049	16,091	0,0057	0,04	0,26759	0,000089	0,0060	0,02420	0,10
1,056	17,598	0,0063	0,04	0,29269	0,000099	0,0036	0,03631	0,15
1,065	17,767	0,0062	0,04	0,29550	0,000098	0,0034	0,02741	0,11
1,083	17,029	0,0061	0,04	0,28308	0,000095	0,0039	0,02578	0,11
1,100	18,392	0,0064	0,03	0,3059	0,00010	0,0028	0,01901	0,077
1,140	17,788	0,0062	0,03	0,29571	0,000096	0,0039	0,00816	0,037
1,150	19,459	0,0068	0,03	0,3237	0,00011	0,0038	0,02650	0,11

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
1,170	18,410	0,0065	0,04	0,3060	0,00010	0,0042	0,02131	0,092
1,186	19,972	0,0069	0,03	0,3322	0,00011	0,0023	0,01150	0,048
1,412	21,446	0,0075	0,03	0,3566	0,00012	0,0079	0,02973	0,13
1,439	22,187	0,0077	0,03	0,3689	0,00012	0,0052	0,01116	0,048
1,503	23,393	0,0081	0,03	0,3889	0,00013	0,0048	0,01036	0,044
1,708	26,449	0,0092	0,03	0,4397	0,00014	0,0052	0,02691	0,12
1,84	28,347	0,0074	0,03	0,4713	0,00011	0,011	0,00478	0,12
1,891	28,525	0,0076	0,03	0,4743	0,00011	0,0094	0,01312	0,099
2,141	33,406	0,0072	0,02	0,5553	0,00010	0,0066	0,01894	0,18
2,57	45,53	0,010	0,02	0,7568	0,00014	0,013	0,02439	0,22
2,878	52,76	0,010	0,02	0,8771	0,00013	0,0069	0,00479	0,10
2,892	53,03	0,018	0,03	0,8816	0,00028	0,0053	0,00275	0,23
3,670	64,49	0,013	0,02	1,0719	0,00017	0,0068	0,01542	0,30
4,110	72,81	0,014	0,02	1,2102	0,00018	0,0048	0,00586	0,12
4,547	82,07	0,016	0,02	1,3642	0,00020	0,0065	0,00589	0,12
4,915	89,77	0,015	0,02	1,4919	0,00016	0,0067	0,00668	0,12
5,49	98,68	0,016	0,02	1,6401	0,00017	0,011	0,00857	0,16
5,80	107,31	0,019	0,02	1,7844	0,00023	0,017	0,00830	0,28
5,82	109,03	0,019	0,02	1,8129	0,00023	0,016	0,00461	0,15
5,83	108,11	0,020	0,02	1,7965	0,00023	0,011	0,00539	0,19
5,83	108,70	0,019	0,02	1,8074	0,00023	0,025	0,00541	0,19
5,83	109,88	0,019	0,02	1,8271	0,00024	0,013	0,00542	0,19
5,83	110,59	0,019	0,02	1,8388	0,00024	0,013	0,00576	0,19
5,83	108,61	0,020	0,02	1,8047	0,00023	0,015	0,00548	0,18
5,84	110,12	0,019	0,02	1,8310	0,00024	0,017	0,00719	0,26
5,84	109,75	0,019	0,02	1,8248	0,00024	0,018	0,00555	0,18
5,85	111,27	0,019	0,02	1,8501	0,00024	0,019	0,00813	0,27
6,14	113,55	0,020	0,02	1,8872	0,00024	0,011	0,00619	0,24
6,560	124,97	0,022	0,02	2,0769	0,00026	0,0037	0,00602	0,24
6,91	132,41	0,024	0,02	2,2004	0,00028	0,021	0,00701	0,28
7,39	142,02	0,027	0,02	2,3612	0,00034	0,056	0,02075	0,89
7,883	149,05	0,026	0,02	2,4781	0,00031	0,0086	0,00528	0,21
8,28	154,27	0,027	0,02	2,5645	0,00032	0,019	0,00641	0,28
8,303	153,94	0,022	0,01	2,5596	0,00021	0,0080	0,00571	0,20
8,74	163,65	0,028	0,02	2,7205	0,00034	0,013	0,00585	0,24
9,169	170,56	0,030	0,02	2,8354	0,00035	0,0095	0,00545	0,22
9,53	175,37	0,030	0,02	2,9154	0,00036	0,018	0,00514	0,22
9,99	185,55	0,033	0,02	3,0842	0,00038	0,030	0,01019	0,43
10,43	196,51	0,035	0,02	3,2663	0,00041	0,048	0,00999	0,46
10,81	206,05	0,036	0,02	3,4249	0,00042	0,012	0,00829	0,36
11,23	218,24	0,039	0,02	3,6275	0,00046	0,026	0,01472	0,68
11,67	236,99	0,042	0,02	3,9392	0,00049	0,025	0,01191	0,53
12,47	270,54	0,048	0,02	4,4968	0,00057	0,022	0,01688	0,79
12,49	272,40	0,048	0,02	4,5272	0,00057	0,014	0,01688	0,78
13,30	266,56	0,048	0,02	4,4301	0,00057	0,031	0,02232	1,0
13,38	266,95	0,056	0,02	4,4360	0,00074	0,025	0,03453	2,1
13,460	273,7	0,22	0,08	4,547	0,0036	0,0037	0,00622	5,7
14,299	272,51	0,048	0,02	4,5285	0,00055	0,0097	0,01742	0,62

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
15,00	265,31	0,046	0,02	4,4109	0,00055	0,026	0,01924	0,71
15,97	260,70	0,044	0,02	4,3344	0,00053	0,035	0,00929	0,37
16,64	259,03	0,037	0,01	4,3065	0,00033	0,030	0,00674	0,21
17,53	267,03	0,038	0,01	4,4390	0,00034	0,038	0,00857	0,27
18,29	280,53	0,040	0,01	4,6634	0,00036	0,034	0,01004	0,32
19,18	290,37	0,042	0,01	4,8270	0,00038	0,020	0,01289	0,42
20,08	301,22	0,042	0,01	5,0092	0,00039	0,022	0,01417	0,48
20,93	309,83	0,044	0,01	5,1518	0,00042	0,022	0,02175	0,71
21,69	312,33	0,045	0,01	5,1934	0,00045	0,019	0,03213	1,1
23,41	335,08	0,048	0,01	5,5709	0,00046	0,030	0,02739	0,94
24,89	352,85	0,053	0,01	5,8664	0,00053	0,059	0,04534	1,5
25,11	336,78	0,051	0,02	5,5992	0,00053	0,021	0,04965	1,7
26,45	333,80	0,055	0,02	5,5491	0,00062	0,019	0,06686	2,3
26,50	349,09	0,057	0,02	5,8039	0,00065	0,037	0,07109	2,5
27,81	342,72	0,056	0,02	5,6980	0,00064	0,027	0,07296	2,4
27,84	334,0	0,19	0,06	5,551	0,0030	0,040	0,08531	14
28,03	323,70	0,081	0,03	5,380	0,0012	0,023	0,17638	5,6
29,23	351,9	0,20	0,06	5,851	0,0032	0,019	0,14296	16
29,30	357,97	0,055	0,02	5,9514	0,00057	0,022	0,05412	1,8
29,58	349,25	0,051	0,01	5,8058	0,00048	0,029	0,03059	1,0
30,87	335,47	0,050	0,01	5,5767	0,00048	0,019	0,03705	1,2
30,92	347,11	0,068	0,02	5,7709	0,00089	0,031	0,13128	4,0
32,42	399,04	0,068	0,02	6,6343	0,00081	0,027	0,03138	2,0
32,69	436,61	0,074	0,02	7,2581	0,00086	0,036	0,10018	3,4
32,78	447,27	0,077	0,02	7,4353	0,00092	0,051	0,11559	3,7
34,27	497,7	0,14	0,03	8,273	0,0021	0,027	0,00997	2,2
34,41	453,68	0,066	0,01	7,5419	0,00060	0,031	0,02955	1,0
34,42	483,95	0,079	0,02	8,0451	0,00088	0,021	0,02253	1,4
34,74	487,5	0,11	0,02	8,104	0,0016	0,019	0,04224	4,9
34,84	506,9	0,13	0,03	8,426	0,0020	0,027	0,01076	2,1

Πίνακας 3-3. Αποτελέσματα από την α' σειρά μετρήσεων.

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
1,08	19,489	0,0080	0,04	0,3238	0,00013	0,012	0,08814	0,36
1,149	20,651	0,0076	0,04	0,3432	0,00012	0,0068	0,04950	0,21
1,172	20,973	0,0076	0,04	0,3486	0,00012	0,0065	0,04221	0,17
1,29	22,955	0,0081	0,04	0,3815	0,00013	0,012	0,03183	0,13
1,390	24,452	0,0087	0,04	0,4064	0,00014	0,0071	0,04346	0,18
1,409	24,781	0,0088	0,04	0,4119	0,00014	0,0053	0,03946	0,17
1,656	30,10	0,011	0,04	0,5003	0,00017	0,0071	0,04954	0,21

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
1,735	31,28	0,011	0,03	0,5199	0,00017	0,0041	0,02819	0,12
1,893	34,20	0,012	0,03	0,5685	0,00019	0,0060	0,04183	0,18
2,009	36,703	0,0081	0,02	0,6101	0,00011	0,0045	0,02411	0,20
2,592	49,04	0,010	0,02	0,8153	0,00014	0,0053	0,01288	0,11
3,072	56,96	0,012	0,02	0,9468	0,00016	0,0026	0,01129	0,098
3,32	62,12	0,014	0,02	1,0321	0,00020	0,012	0,05310	0,46
3,777	69,78	0,015	0,02	1,1595	0,00020	0,0095	0,02244	0,20
4,073	75,09	0,016	0,02	1,2479	0,00022	0,0065	0,01552	0,15
4,556	85,18	0,018	0,02	1,4157	0,00024	0,0054	0,02080	0,19
5,089	98,22	0,018	0,02	1,6322	0,00021	0,0038	0,00469	0,18
5,575	109,35	0,020	0,02	1,8174	0,00024	0,0027	0,00764	0,35
5,931	118,88	0,021	0,02	1,9758	0,00025	0,0031	0,00678	0,28
6,437	129,12	0,023	0,02	2,1459	0,00027	0,0061	0,00486	0,21
6,902	132,70	0,024	0,02	2,2048	0,00028	0,0032	0,00615	0,26
7,422	140,23	0,026	0,02	2,3306	0,00031	0,0034	0,01460	0,56
8,030	149,48	0,026	0,02	2,4842	0,00031	0,0025	0,00421	0,17
8,45	151,22	0,027	0,02	2,5132	0,00032	0,019	0,00873	0,34
8,887	160,54	0,028	0,02	2,6681	0,00033	0,0039	0,00754	0,29
9,482	174,35	0,031	0,02	2,8980	0,00037	0,0043	0,01488	0,59
9,956	186,15	0,072	0,04	3,094	0,0011	0,0019	0,00476	1,0
10,354	197,59	0,035	0,02	3,2835	0,00040	0,0069	0,00592	0,24
10,391	198,20	0,035	0,02	3,2935	0,00041	0,0089	0,01168	0,49
10,420	199,31	0,046	0,02	3,3116	0,00062	0,0098	0,00400	0,33
10,785	210,23	0,037	0,02	3,4937	0,00043	0,0023	0,00608	0,25
10,807	210,22	0,056	0,03	3,4933	0,00081	0,0017	0,00467	0,54
11,152	223,73	0,040	0,02	3,7183	0,00046	0,0063	0,01133	0,50
11,741	244,91	0,071	0,03	4,070	0,0011	0,0019	0,02425	2,9
11,757	236,40	0,042	0,02	3,9289	0,00049	0,0055	0,01117	0,50
12,431	242,36	0,089	0,04	4,028	0,0014	0,0019	0,00993	2,0
12,447	245,18	0,043	0,02	4,0747	0,00050	0,0026	0,01126	0,50
12,501	243,91	0,076	0,03	4,054	0,0012	0,0050	0,00690	1,1
13,209	237,57	0,067	0,03	3,9483	0,00099	0,0086	0,00914	1,2
13,282	240,96	0,042	0,02	4,0052	0,00049	0,0029	0,00689	0,32
13,483	276,42	0,057	0,02	4,5934	0,00074	0,0058	0,06045	2,5
14,201	298,45	0,054	0,02	4,9594	0,00063	0,0030	0,02233	0,98
14,87	293,05	0,052	0,02	4,8698	0,00061	0,022	0,01655	0,73
15,94	281,50	0,054	0,02	4,6778	0,00067	0,011	0,04338	1,9
16,52	278,31	0,048	0,02	4,6247	0,00053	0,015	0,06550	2,0
17,47	274,10	0,041	0,01	4,5549	0,00036	0,020	0,01624	0,50
18,55	277,99	0,043	0,02	4,6196	0,00040	0,017	0,01990	0,67
19,27	283,07	0,043	0,02	4,7039	0,00038	0,018	0,02050	0,65
19,84	285,93	0,043	0,01	4,7514	0,00037	0,023	0,01485	0,44
20,82	293,63	0,051	0,02	4,8794	0,00056	0,020	0,01488	0,91
21,56	292,71	0,082	0,03	4,864	0,0012	0,021	0,01287	2,4
21,66	299,55	0,064	0,02	4,9777	0,00085	0,019	0,00974	1,1
21,67	292,88	0,062	0,02	4,8662	0,00080	0,020	0,01692	1,6
23,18	295,59	0,045	0,01	4,9120	0,00039	0,019	0,01690	0,53

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
24,97	282,86	0,059	0,02	4,7003	0,00077	0,022	0,02153	2,0
25,01	283,97	0,046	0,02	4,7189	0,00048	0,019	0,05028	1,6
26,39	274,20	0,055	0,02	4,5563	0,00071	0,028	0,06998	3,0
26,66	289,36	0,084	0,03	4,808	0,0013	0,019	0,03316	4,5
27,97	270,40	0,056	0,02	4,4933	0,00074	0,023	0,10402	3,3
28,16	254,1	0,12	0,05	4,222	0,0019	0,019	0,03578	8,5
29,75	300,63	0,053	0,02	4,9957	0,00061	0,033	0,07644	2,4
30,84	296,67	0,049	0,02	4,9299	0,00052	0,026	0,06225	1,8
32,78	296,59	0,048	0,02	4,9299	0,00052	0,030	0,06225	1,8
34,18	393,2	0,15	0,04	6,536	0,0023	0,017	0,01339	4,4
34,34	383,37	0,058	0,02	6,3722	0,00056	0,034	0,04822	1,5

Πίνακας 3-4. Αποτελέσματα για την β' σειρά μετρήσεων.

Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
1,136	19,781	0,0073	0,04	0,3288	0,00011	0,0067	0,04996	0,22
1,215	21,015	0,0074	0,04	0,3493	0,00012	0,0047	0,02979	0,12
1,293	22,504	0,0091	0,04	0,3738	0,00014	0,0048	0,09088	0,38
1,361	23,765	0,0087	0,04	0,3948	0,00013	0,0055	0,04927	0,21
1,395	24,420	0,0086	0,04	0,4058	0,00013	0,0032	0,02648	0,12
1,496	26,824	0,0097	0,04	0,4458	0,00015	0,0057	0,05552	0,24
1,535	27,919	0,0099	0,04	0,4640	0,00015	0,0044	0,04137	0,18
1,627	30,10	0,011	0,04	0,5003	0,00016	0,0033	0,04057	0,17
1,740	32,58	0,011	0,03	0,5415	0,00018	0,0043	0,02794	0,12
1,836	34,78	0,012	0,03	0,5780	0,00019	0,0028	0,01353	0,064
2,023	39,199	0,0092	0,02	0,6512	0,00013	0,0054	0,03432	0,29
2,501	44,057	0,0097	0,02	0,7320	0,00013	0,0057	0,01555	0,13
2,929	53,41	0,012	0,02	0,8875	0,00016	0,0025	0,01966	0,17
3,527	63,81	0,014	0,02	1,0604	0,00019	0,0048	0,03623	0,31
4,106	75,48	0,017	0,02	1,2544	0,00023	0,0057	0,05156	0,45
4,675	84,72	0,018	0,02	1,4081	0,00024	0,0035	0,01373	0,13
4,962	89,28	0,017	0,02	1,4840	0,00021	0,0048	0,00957	0,37
5,314	96,60	0,018	0,02	1,6054	0,00021	0,0077	0,00466	0,18
5,608	104,76	0,019	0,02	1,7413	0,00023	0,0030	0,00774	0,30
6,120	115,98	0,021	0,02	1,9277	0,00025	0,0027	0,00568	0,22
6,610	125,90	0,022	0,02	2,0927	0,00027	0,0032	0,00611	0,24
7,296	139,19	0,025	0,02	2,3136	0,00030	0,0039	0,00973	0,39
7,857	149,73	0,027	0,02	2,4888	0,00032	0,0025	0,00906	0,36
8,316	157,83	0,028	0,02	2,6234	0,00033	0,0068	0,00930	0,38
8,925	161,46	0,028	0,02	2,6838	0,00033	0,0043	0,00715	0,28

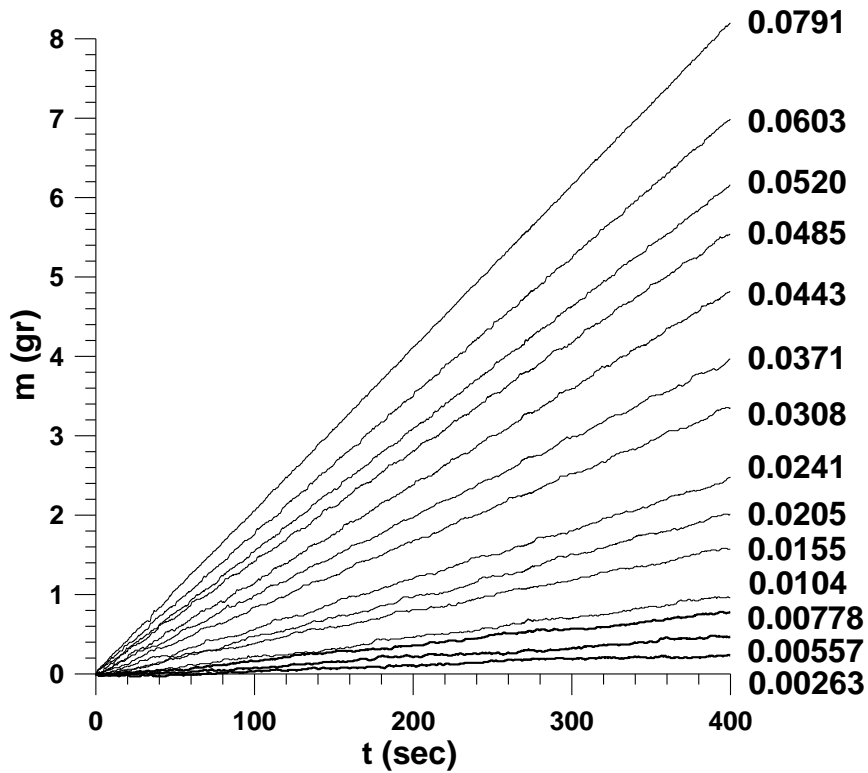
Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου \dot{V} [ml/min]	Ολικό σφάλμα παροχής όγκου $e_{\dot{V}}$ [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου $re_{\dot{V}}$ (%)	Παροχή μάζας \dot{m} [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παροχής μάζας $e_{\dot{m}}$ [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας e_f [Hz]	Μέση τετραγωνική απόκλιση παροχής μάζας RMS	Σφάλμα κλίσης se $\cdot 10^{-4}$ [gr/sec]
9,524	172,27	0,030	0,02	2,8633	0,00036	0,0073	0,01282	0,52
9,971	183,78	0,032	0,02	3,0548	0,00038	0,0025	0,01113	0,45
10,360	194,64	0,035	0,02	3,2352	0,00043	0,0037	0,02075	0,85
10,899	212,36	0,037	0,02	3,5298	0,00043	0,0062	0,00922	0,40
11,278	225,91	0,039	0,02	3,7550	0,00046	0,0050	0,01195	0,52
11,624	242,01	0,042	0,02	4,0226	0,00050	0,0022	0,01465	0,62
12,539	259,50	0,046	0,02	4,3134	0,00054	0,0079	0,01731	0,76
13,367	258,15	0,045	0,02	4,2909	0,00053	0,0041	0,01252	0,56
14,33	270,77	0,048	0,02	4,5007	0,00058	0,021	0,02289	1,0
15,077	270,35	0,047	0,02	4,4937	0,00056	0,0041	0,01426	0,65
15,834	268,72	0,049	0,02	4,4666	0,00061	0,0056	0,03451	1,4
16,66	274,13	0,041	0,01	4,5559	0,00035	0,019	0,01069	0,33
16,72	269,77	0,043	0,02	4,4817	0,00041	0,022	0,03713	1,1
17,44	267,47	0,041	0,02	4,4436	0,00035	0,017	0,01667	0,49
18,26	272,74	0,041	0,02	4,5316	0,00035	0,017	0,01100	0,32
19,34	283,64	0,043	0,02	4,7127	0,00037	0,017	0,01475	0,45
19,97	291,08	0,044	0,01	4,8369	0,00038	0,018	0,01111	0,35
20,80	307,20	0,046	0,01	5,1050	0,00040	0,018	0,01436	0,45
21,69	311,63	0,047	0,01	5,1785	0,00040	0,017	0,01224	0,41
23,37	311,67	0,048	0,02	5,1792	0,00045	0,017	0,03413	1,1
23,37	329,50	0,074	0,02	5,476	0,0010	0,022	0,07952	4,4
24,97	325,47	0,050	0,02	5,4098	0,00049	0,021	0,03971	1,4
26,66	323,51	0,049	0,01	5,3766	0,00045	0,019	0,02726	0,91
28,33	325,03	0,064	0,02	5,4025	0,00084	0,034	0,11587	3,7
28,39	316,2	0,13	0,04	5,255	0,0021	0,025	0,12660	10
29,97	336,73	0,055	0,02	5,5970	0,00060	0,028	0,06479	2,1
31,68	352,77	0,053	0,01	5,8637	0,00051	0,027	0,04108	1,3
33,26	356,4	0,10	0,03	5,925	0,0015	0,023	0,03500	5,1
33,55	368,4	0,78	0,21	6,12	0,013	0,017	0,01691	49
35,07	396,80	0,064	0,02	6,5964	0,00071	0,029	0,02222	1,4

Πίνακας 3-5. Αποτελέσματα για την γ' σειρά μετρήσεων.

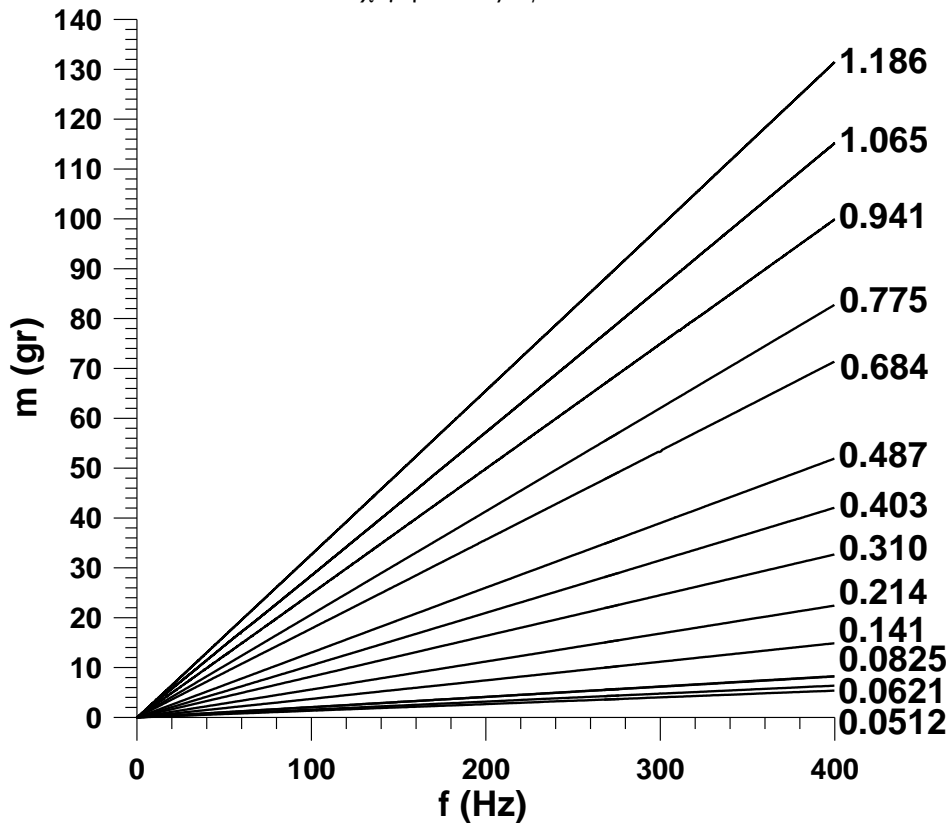
Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται από τα αρχεία res και ref μετά την εκτέλεση των προγραμμάτων least και random αντίστοιχα.

Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων και για να είναι ευκολότερη η εξαγωγή συμπερασμάτων σχεδιάζουμε διαγράμματα στα οποία φαίνεται η σχέση μεταξύ των διάφορων μεγεθών (εγχυόμενη μάζα, συχνότητα, παροχή όγκου, χρόνος, σφάλματα). Για να γίνει σαφής η λειτουργία της αντλίας, τα δεδομένα που αφορούν τον χαμηλό και τον μεσαίο κινητήρα απεικονίζονται σε χωριστά διαγράμματα.

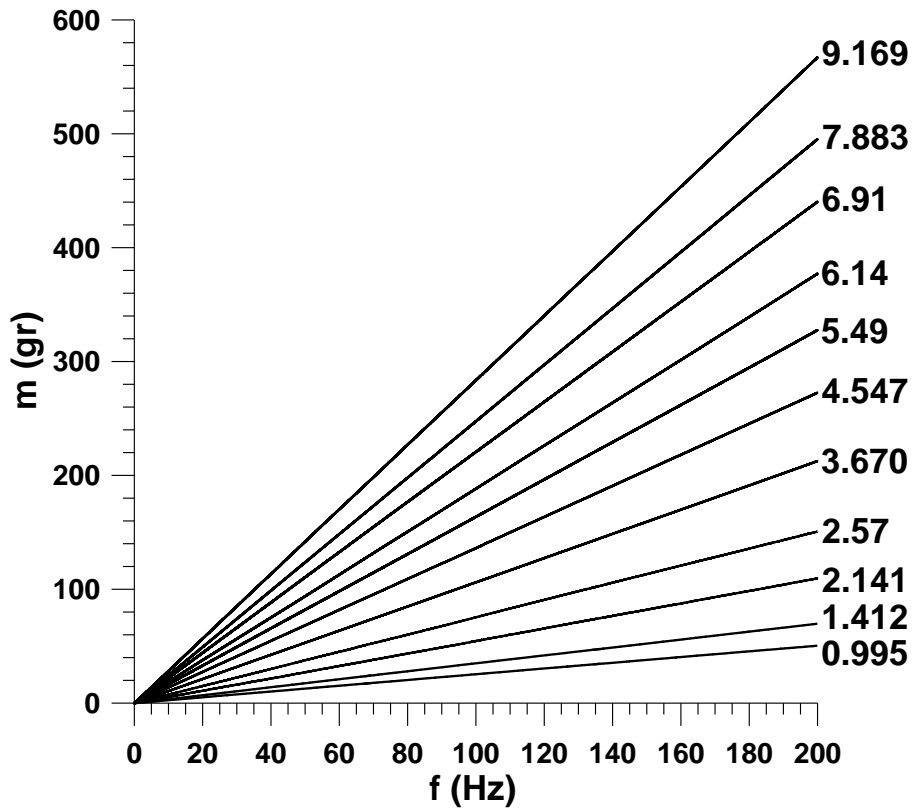
Τα διαγράμματα σχεδιάζονται με το πρόγραμμα Grapher. Παρατίθενται πρώτα τα διαγράμματα εγχυόμενης μάζας νερού – χρόνου.



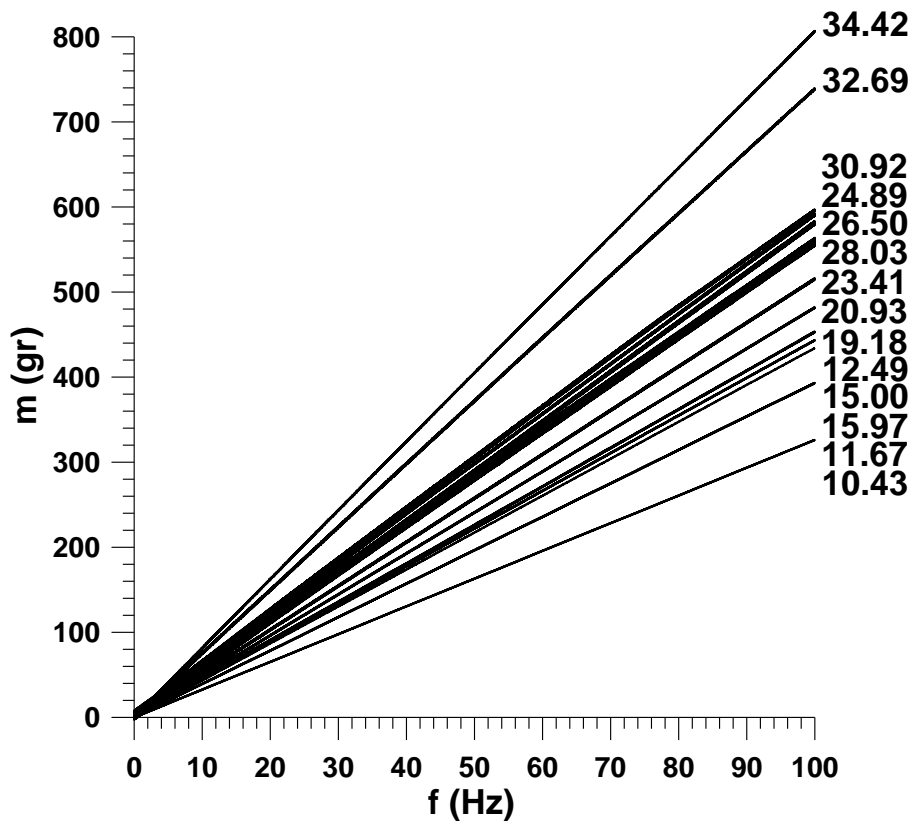
Εικόνα 3-2. Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας - χρόνου για διάφορες συχνότητες του κινητήρα χαμηλών στροφών.



Εικόνα 3-3. Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας - χρόνου για διάφορες συχνότητες του κινητήρα μεσαίων στροφών.



Εικόνα 3-4. Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας - χρόνου για διάφορες συχνότητες κάτω από 10 Hz του κινητήρα υψηλών στροφών.



Εικόνα 3-5. Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας - χρόνου για διάφορες συχνότητες άνω των 10 Hz του κινητήρα υψηλών στροφών.

Παρόμοια συμπεριφορά έχουν και τα διαγράμματα μάζας – χρόνου των άλλων δύο σειρών μέτρησης του κινητήρα υψηλών στροφών.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η σχέση μεταξύ εγχυόμενης μάζας ρευστού και χρόνου είναι γραμμική, ή σχεδόν γραμμική όταν αναφερόμαστε στον κινητήρα χαμηλών στροφών. Όσο αυξάνεται η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο αυξάνεται και η κλίση της συνάρτησης $m(t)$, δηλαδή η παροχή μάζας. Επίσης για ίδιες συχνότητες η παροχή μένει ίδια.

Ένας από τους λόγους που κατασκευάστηκε η κυματοειδής αντλία ήταν η αποφυγή οπισθοροής. Από τις μετρήσεις φαίνεται ότι αυτό επιτυγχάνεται. Αν είχαμε οπισθοροή θα έπρεπε η μάζα του ρευστού να μειωνόταν και αυτό θα φαινόταν αφού σε μία τέτοια περίπτωση η καμπύλη του διαγράμματος $m-t$ θα είχε αρνητική κλίση σε κάποια τυχαία τμήματα των διαγραμμάτων, κάτι που όμως δεν συμβαίνει.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα παροχής όγκου – συχνότητας για κάθε κινητήρα και σειρά μέτρησης. Στα ίδια διαγράμματα έχει χαραχθεί και η καμπύλη σχεδιασμού έτσι ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και θεωρητικών υπολογισμών.

Η θεωρητική παροχή, που στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται ως καμπύλη σχεδιασμού προκύπτει ως εξής.

Σε μία πλήρη περιστροφή 360° του άξονα η έγχυση θα είναι:

$$V=93.6\pi\varphi/360 \text{ [mm}^3\text{]} \text{ όπου } 0\leq\varphi\leq 360^\circ \quad (1), [22]$$

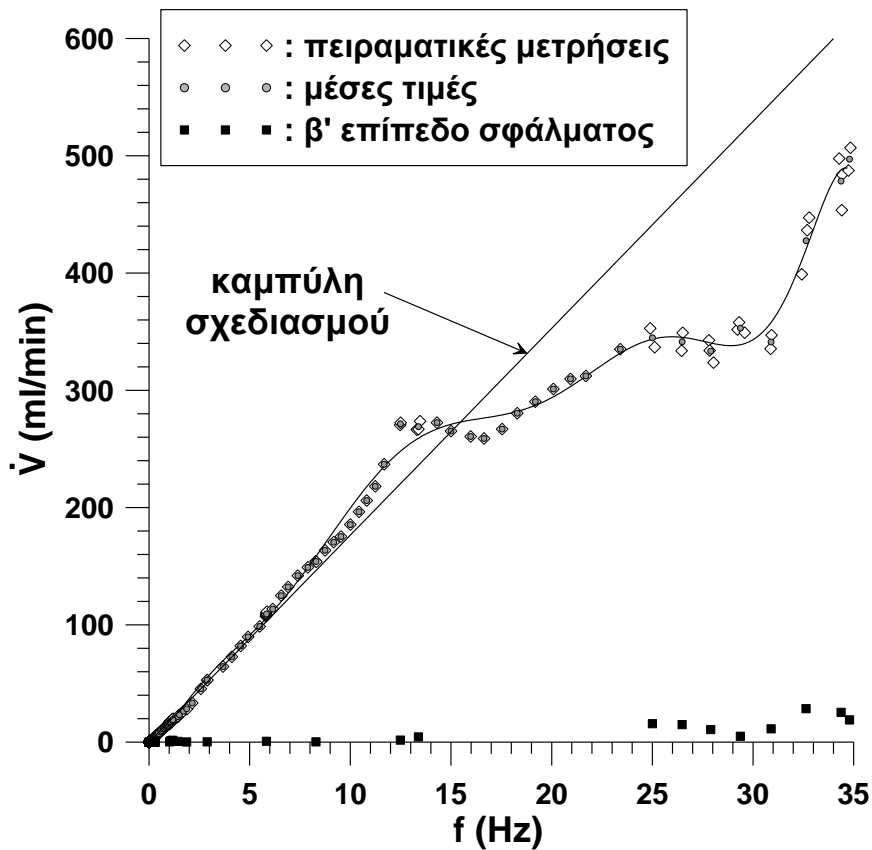
Για να εισαχθεί ο χρόνος στην εξίσωση έχουμε: Σε μία περίοδο T ο άξονας περιστρέφεται κατά 360° . Συνεπώς αν σε φ μοίρες η περιστροφή γίνεται σε χρόνο t , η σχέση που συνδέει την γωνία φ και τον χρόνο είναι η $\varphi=360t/T$

Για να μεταβούμε σε ml από την σχέση (1) έχουμε $V=93.6\pi 0.001t/T$.

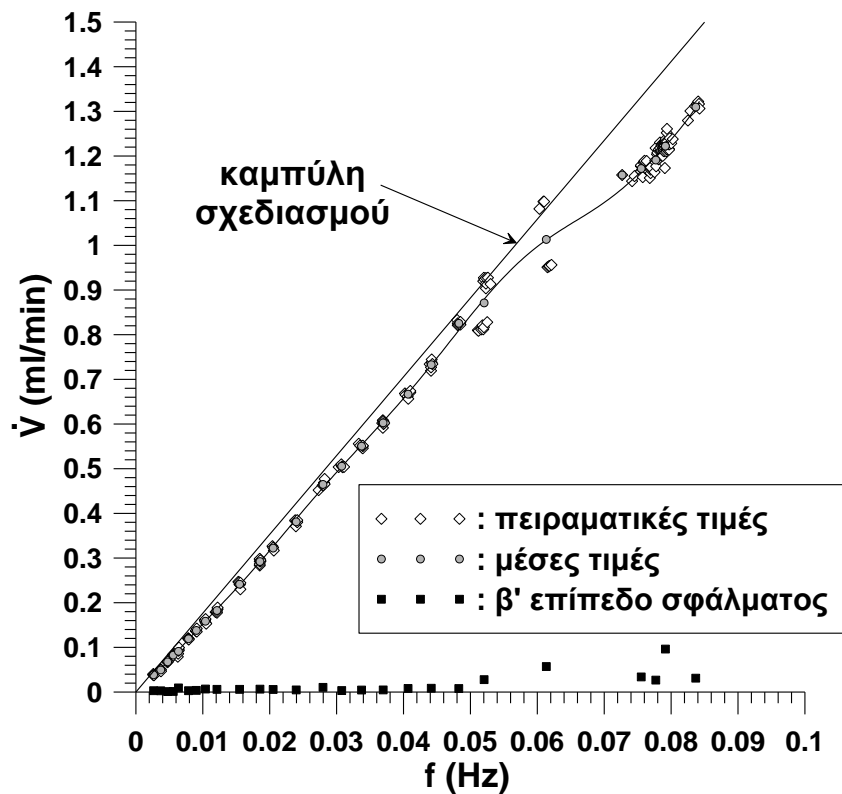
$$f=1/T \text{ οπότε } V=0.0936\pi t f \text{ [ml]}$$

Παραγωγίζοντας ως προς t έχουμε την τελική σχέση $dV/dt=0.0936\pi f$ [ml/sec] ή

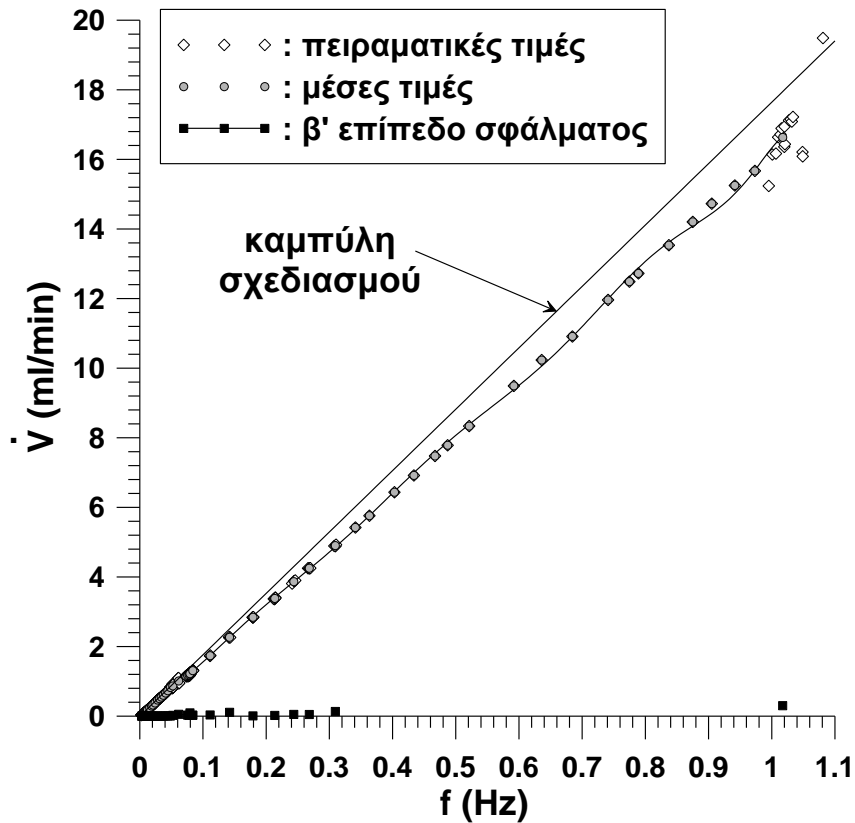
$$dV/dt=0.0936\pi f 60 \text{ [ml/min]}$$



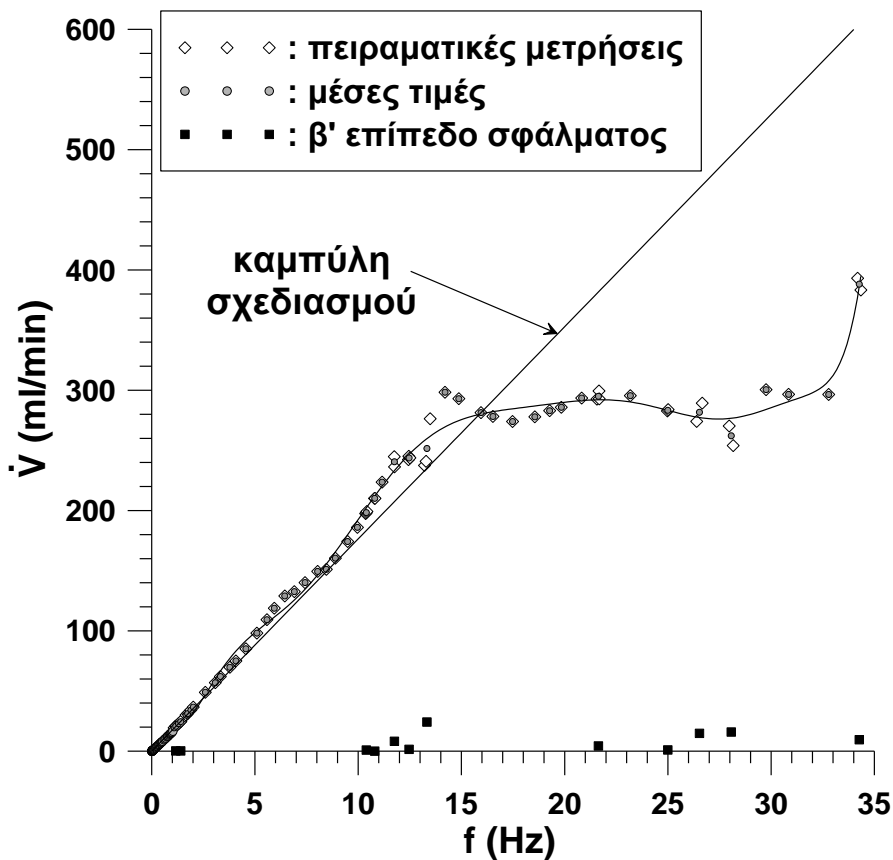
Εικόνα 3-6. Διάγραμμα παροχής όγκου – συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για ολόκληρη την πρώτη σειρά μετρήσεων από τα 0.00257 Hz ως τα 34.84 Hz.



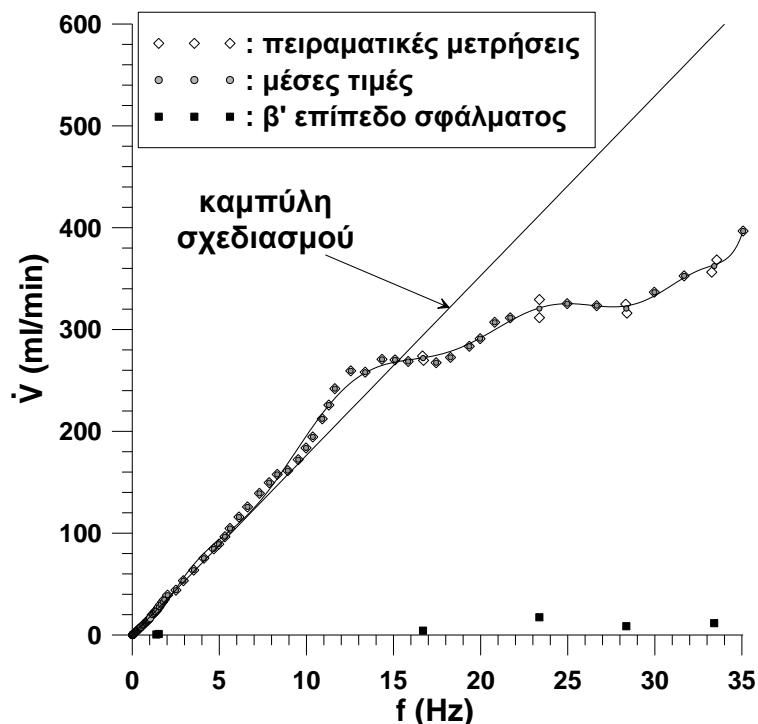
Εικόνα 3-7. Διάγραμμα παροχής όγκου – συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον κινητήρα χαμηλών στροφών από τα 0.00257 Hz ως τα 0.0842 Hz.



Εικόνα 3-8. Διάγραμμα παροχής όγκου – συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον κινητήρα μεσαίων στροφών ως τα 1.08 Hz.



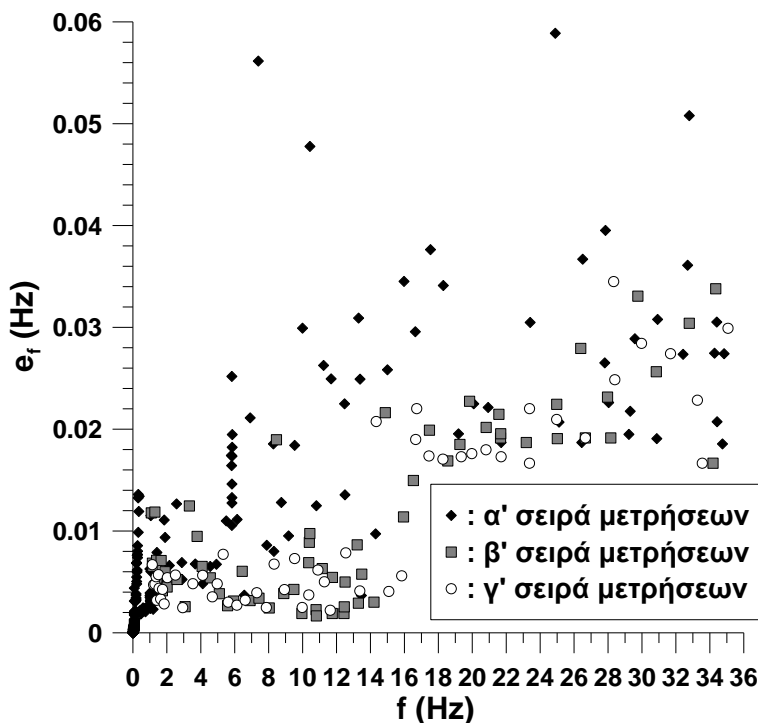
Εικόνα 3-9. Διάγραμμα παροχής όγκου – συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον κινητήρα υψηλών στροφών, β' σειρά μετρήσεων από τα 1.08 Hz ως τα 34.34 Hz.



Εικόνα 3-10. Διάγραμμα παροχής όγκου – συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον κινητήρα υψηλών στροφών, γ' σειρά μετρήσεων από τα 1.136 Hz ως τα 35.07 Hz.

Να σημειωθεί ότι στα διαγράμματα των εικόνων 3-6 ως και 3-10, έχουν προσαρμοστεί πολώνυμα 10^{00} βαθμού στις μέσες τιμές.

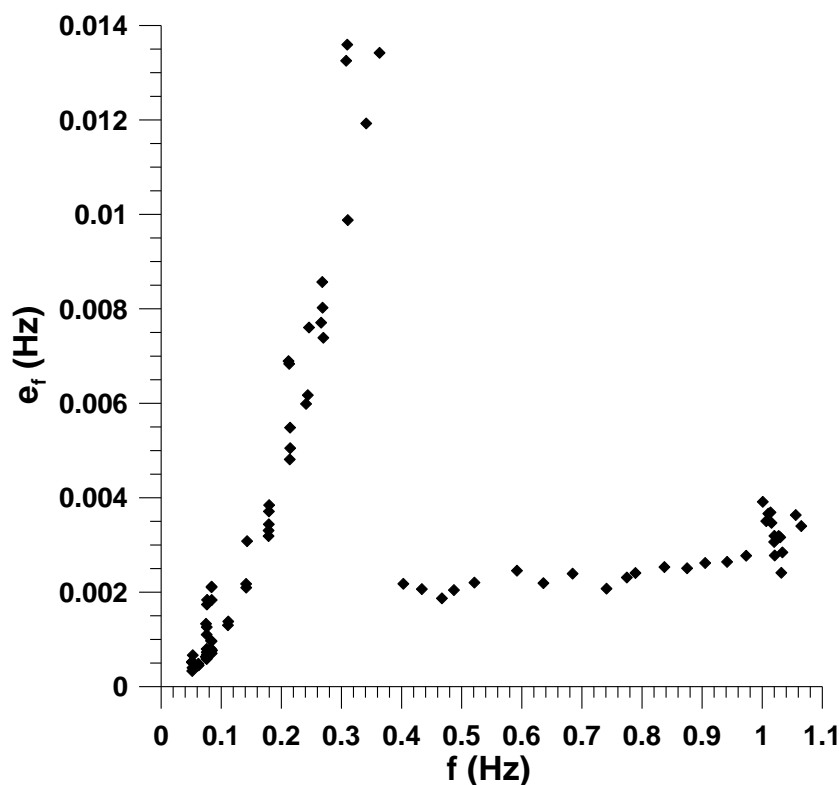
Στην εικόνα 3-11 παρουσιάζεται η κατανομή συνολικού σφάλματος της συχνότητας σε όλο το φάσμα συχνοτήτων των τριών σειρών μέτρησης.



Εικόνα 3-11. Κατανομή σφάλματος e_f σε όλο το φάσμα συχνοτήτων των τριών σειρών μετρήσεων, πρώτο επίπεδο σφάλματος.

Για λόγους ευκρίνειας θα παρουσιαστούν τα σφάλματα e_f του κινητήρα μεσαίων στροφών σε ξεχωριστό διάγραμμα. Προηγουμένως όμως θα εξηγήσουμε τον λόγο που δεν υπάρχει τέτοιο διάγραμμα στον κινητήρα χαμηλών στροφών.

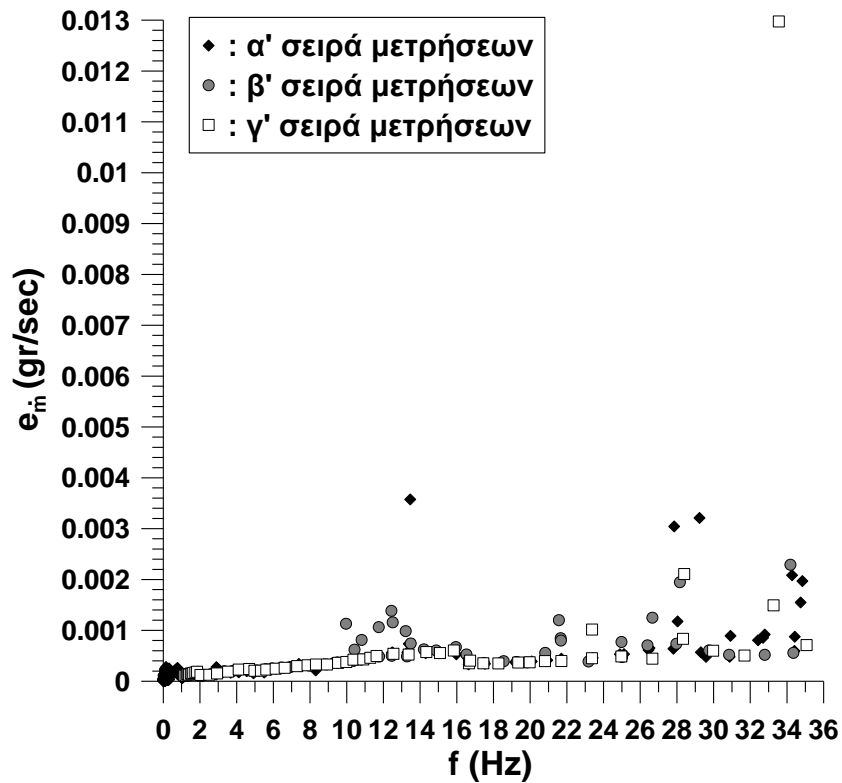
Ειδικά στις χαμηλές συχνότητες, όπου ο υπολογισμός της συχνότητας γίνεται με την μέθοδο peak-to-peak, πρέπει να διευκρινιστούν τα εξής για το ολικό σφάλμα συχνότητας. Για όλες τις μετρήσεις εκτός από αυτές που η συχνότητα τους υπολογίζεται με την μέθοδο peak-to-peak, το ολικό σφάλμα της συχνότητας προκύπτει από το πρόγραμμα random. Για τις μετρήσεις όπου η συχνότητα υπολογίζεται με την μέθοδο peak-to-peak το ολικό σφάλμα της συχνότητας είναι της τάξης των $5 \cdot 10^{-5}$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο πρόγραμμα random απ' όπου υπολογίζεται το e_f εισάγονται οι μετρήσεις που έγιναν με το χρονόμετρο. Ο υπολογισμός της συχνότητας ωστόσο είναι ακριβέστερος με τον υπολογισμό peak-to-peak καθώς έτσι υπολογίζονται οι περιόδους χωρίς το σφάλμα που εισάγει το χρονόμετρο. Στην διπλωματική αυτή ο υπολογισμός της e_f γίνεται με την μέθοδο peak-to-peak ως τα 0.0621Hz, μετά η διάκριση περιόδων είναι αδύνατη. Ο αριθμός $5 \cdot 10^{-5}$ είναι το μέγιστο ολικό σφάλμα συχνότητας όπως υπολογίστηκε για την μέτρηση 0.00257Hz. Το σφάλμα υπολογίστηκε γι' αυτή την συχνότητα επειδή αυτή έχει το μεγαλύτερο τέτοιο σφάλμα καθώς στην διάρκεια της η περίοδος μεταβάλλεται πολύ έντονα, λόγω της χαμηλής ροπής του κινητήρα. Για την εύρεση του αριθμού χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Grapher μεγεθύνοντας κατάλληλα το αρχείο και υπολογίζοντας το ολικό σφάλμα συχνότητας για κάθε περίοδο χωριστά και στην συνέχεια διαλέγοντας το μέγιστο αυτών.



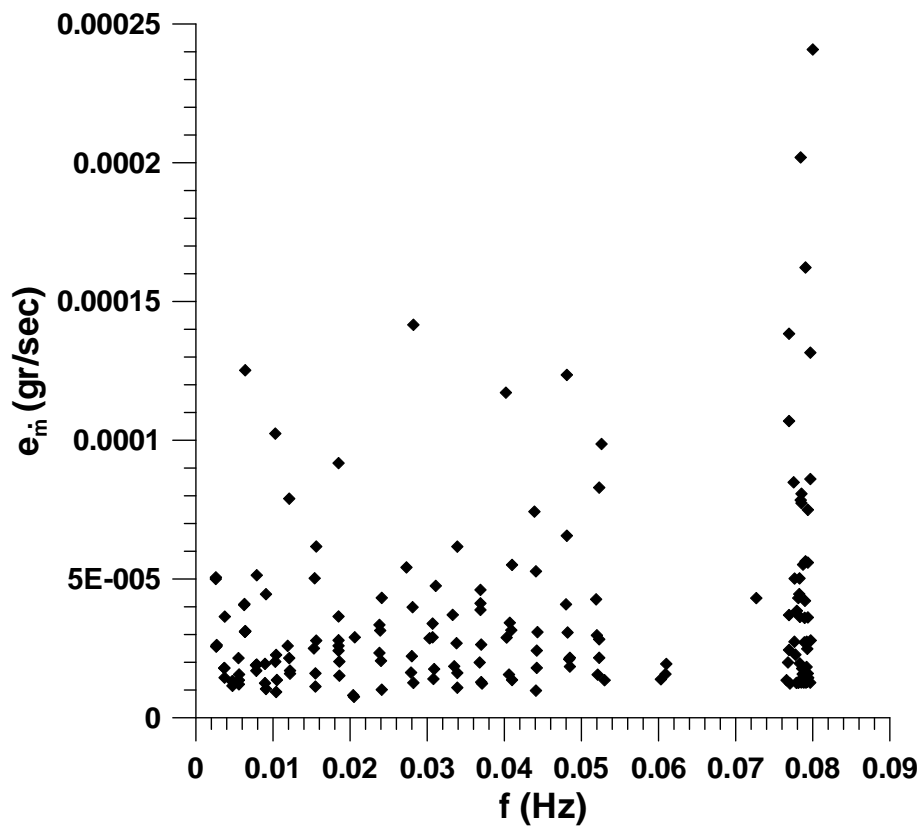
Εικόνα 3-12. Κατανομή σφάλματος πρώτου επιπέδου e_f στον κινητήρα μεσαίων στροφών.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι μειώνεται απότομα το ολικό σφάλμα της συχνότητας στα 0.403 Hz. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή οργάνου μέτρησης των στροφών του εκκεντροφόρου της αντλίας, από την συγκεκριμένη συχνότητα και μετά χρησιμοποιούμε το στροφόμετρο, το οποίο μετρά με καλύτερη ακρίβεια, συνεπώς ελαττώνεται το e_f .

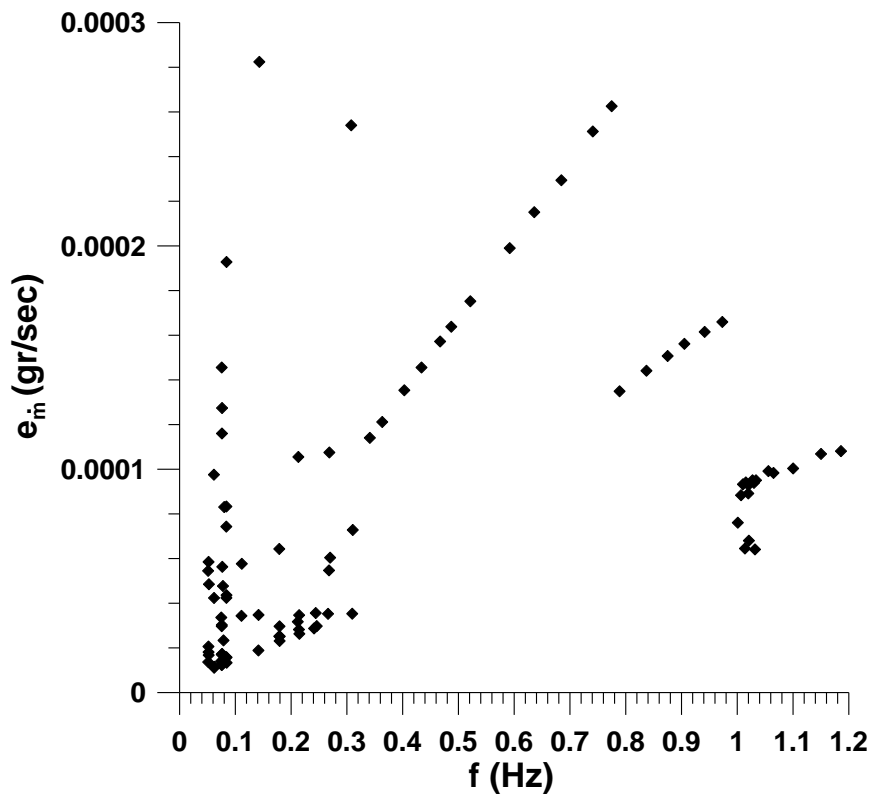
Ακολουθούν τα διαγράμματα για το ολικό σφάλμα παροχής μάζας πρώτου επιπέδου, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα least.



Εικόνα 3-13. Κατανομή του συνολικού σφάλματος e_m πρώτου επιπέδου της παροχής μάζας σε όλο το πεδίο συχνοτήτων για όλες τις σειρές μετρήσεων.



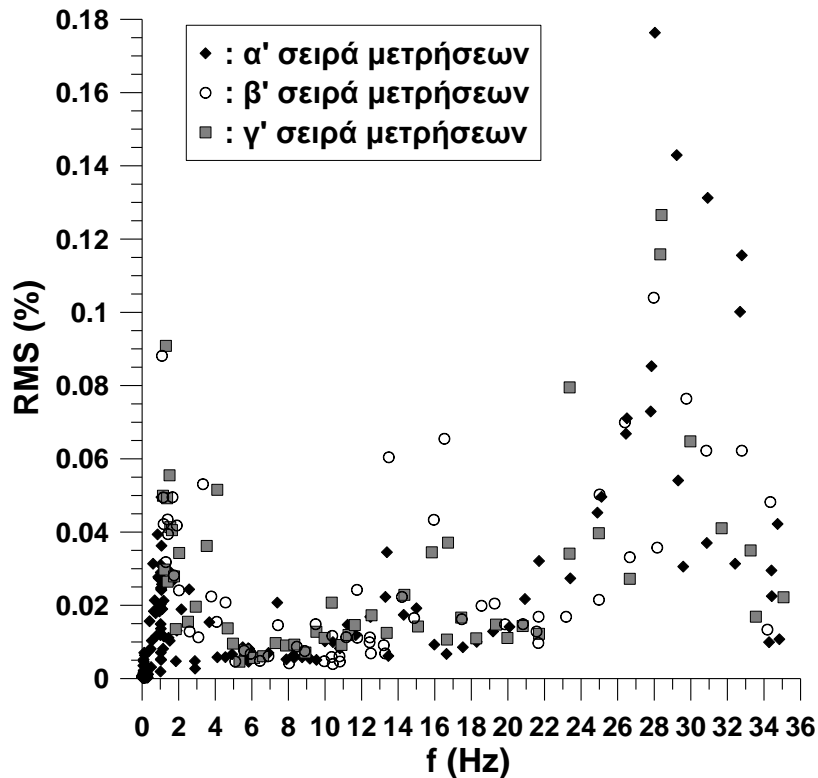
Εικόνα 3-14. Κατανομή του συνολικού σφάλματος e_m πρώτου επιπέδου της παροχής μάζας στον κινητήρα χαμηλών στροφών.



Εικόνα 3-15. Κατανομή του συνολικού σφάλματος e_{in} πρώτου επιπέδου της παροχής μάζας στις συχνότητες του μεσαίου κινητήρα.

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι στα 0.789 Hz και στα 0.995 Hz υπάρχει μείωση του ολικού σφάλματος παροχής μάζας. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή της συχνότητας δειγματοληψίας στις συχνότητες αυτές (βλέπε πίνακα 3-2). Αυξάνοντας την συχνότητα δειγματοληψίας λαμβάνουμε περισσότερες μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο οπότε μειώνεται το σφάλμα παροχής μάζας.

Ακολουθεί το διάγραμμα RMS παροχής μάζας – συχνότητας και για τις τρεις σειρές μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι η μέση τετραγωνική απόκλιση διαδρομής RMS σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνά το 0.2% πράγμα που φανερώνει τον πολύ καλό βαθμό προσαρμογής των ευθειών στα πειραματικά αποτελέσματα, μιας και απέχει πολύ από το όριο 25%.

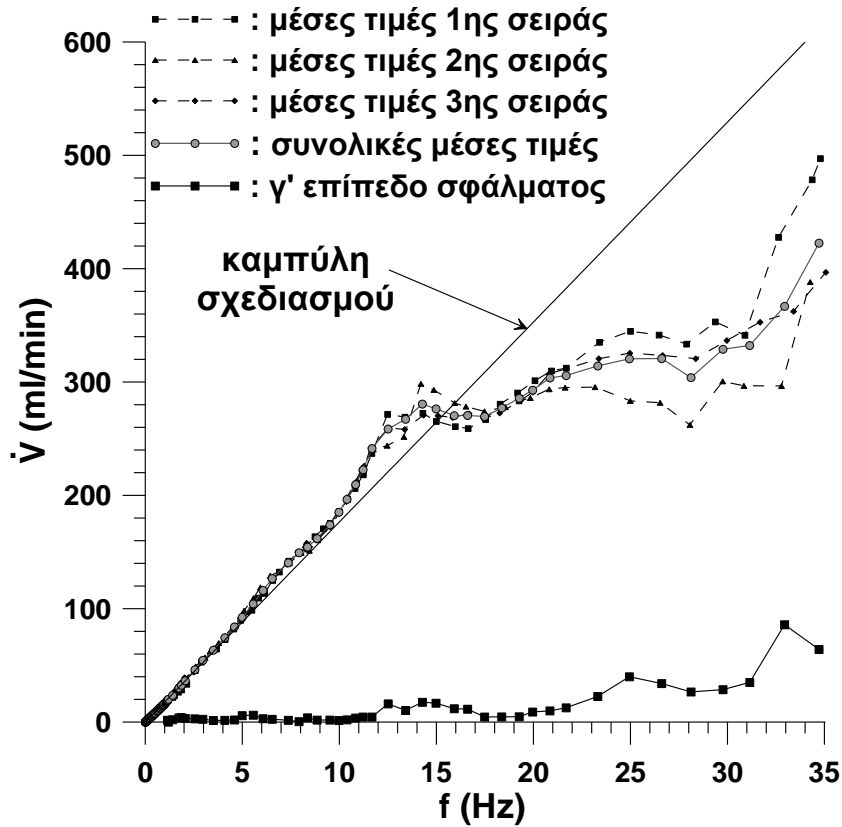


Εικόνα 3-16. Κατανομή της μέσης τετραγωνικής απόκλισης RMS παροχής μάζας για όλες τις σειρές μετρήσεων.

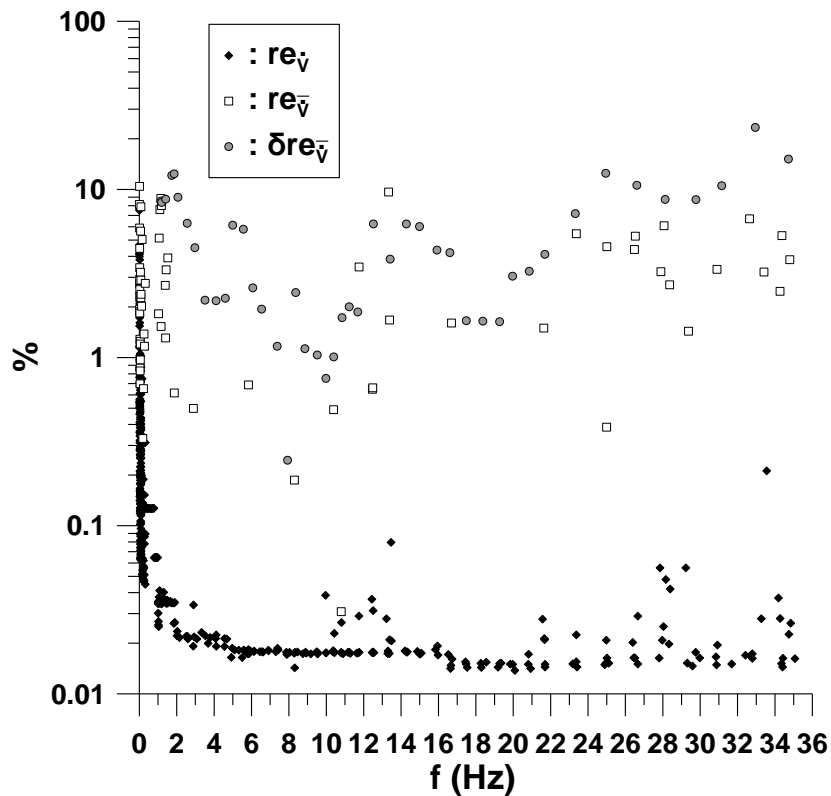
Από την παροχή μάζας μπορούμε να μεταβούμε στην παροχή όγκου, εφόσον γνωρίζουμε την πυκνότητα του νερού. Η πυκνότητα μπορεί να βρεθεί αφού γνωρίζουμε την θερμοκρασία του νερού, με την διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.

Παραπάνω έχουμε χαραγμένα τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Για να χαραχθεί όμως η χαρακτηριστική καμπύλη, το οποίο είναι και ο στόχος της παρούσας διπλωματικής, πρέπει να ομαδοποιήσουμε κατάλληλα της μετρήσεις. Μέσα από τις διαδοχικές επαναλήψεις της μέτρησης της παροχής κάθε συχνότητας μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την συμπεριφορά της καμπύλης σε κάθε συχνότητα. Για την ομαδοποίηση των μετρήσεων, τόσο σε δεύτερο όσο και σε τρίτο επίπεδο χρησιμοποιείται το πρόγραμμα grouping.

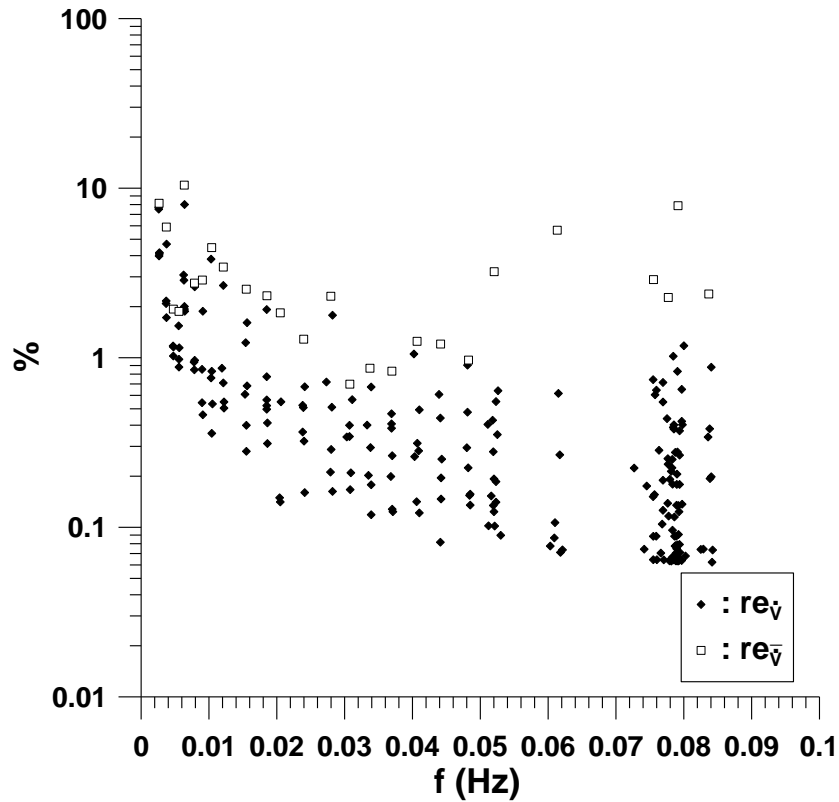
Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων για το τρίτο επίπεδο σφάλματος απεικονίζονται στα παρακάτω γραφήματα. Στο διάγραμμα 3-17 εικονίζονται οι ομαδοποιήσεις β' επιπέδου και των τριών σειρών μετρήσεων για όλο το εύρος συχνοτήτων τους μαζί με την ομαδοποίηση και το σφάλμα γ' επιπέδου. Στο σχήμα 3-18 φαίνεται το σχετικό σφάλμα κάθε επιπέδου μέτρησης, ενώ στο σχήμα 3-19 φαίνεται ένα πολυώνυμο που προσεγγίζει την καμπύλη ομαδοποίησης γ' επιπέδου.



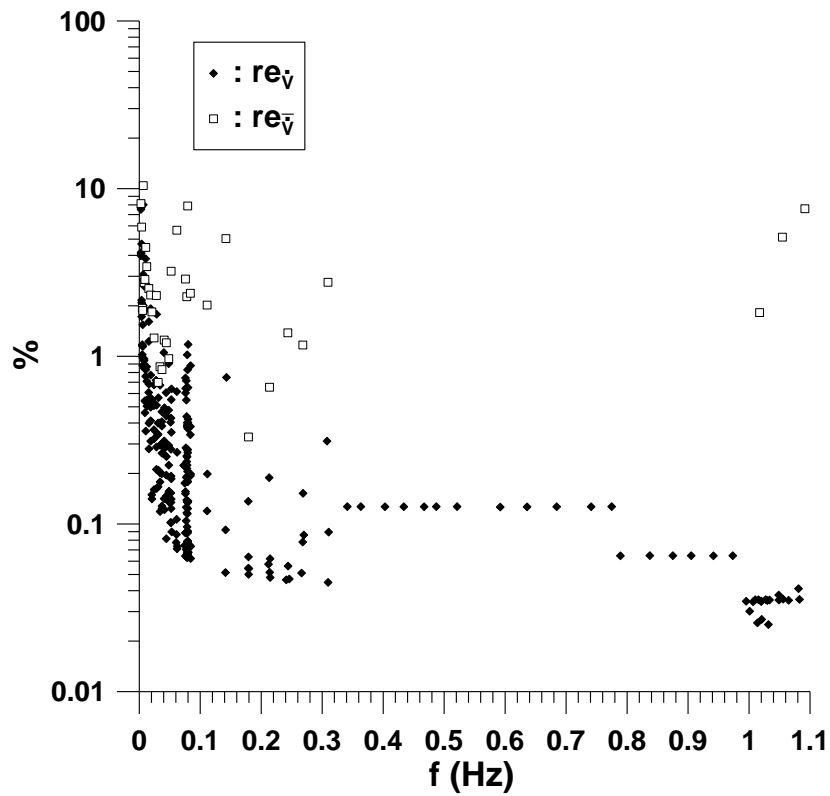
Εικόνα 3-17. Διάγραμμα παροχής όγκου – συχνότητας και σφάλμα γ' επιπέδου. Διακρίνονται οι μέσες τιμές της κάθε σειράς μέτρησης χωριστά και οι μέσες τιμές των τριών σειρών μετρήσεων στην ίδια συχνότητα.



Εικόνα 3-18. Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου α' , β' και γ' επιπέδου σφάλματος, για όλο το φάσμα συχνοτήτων.

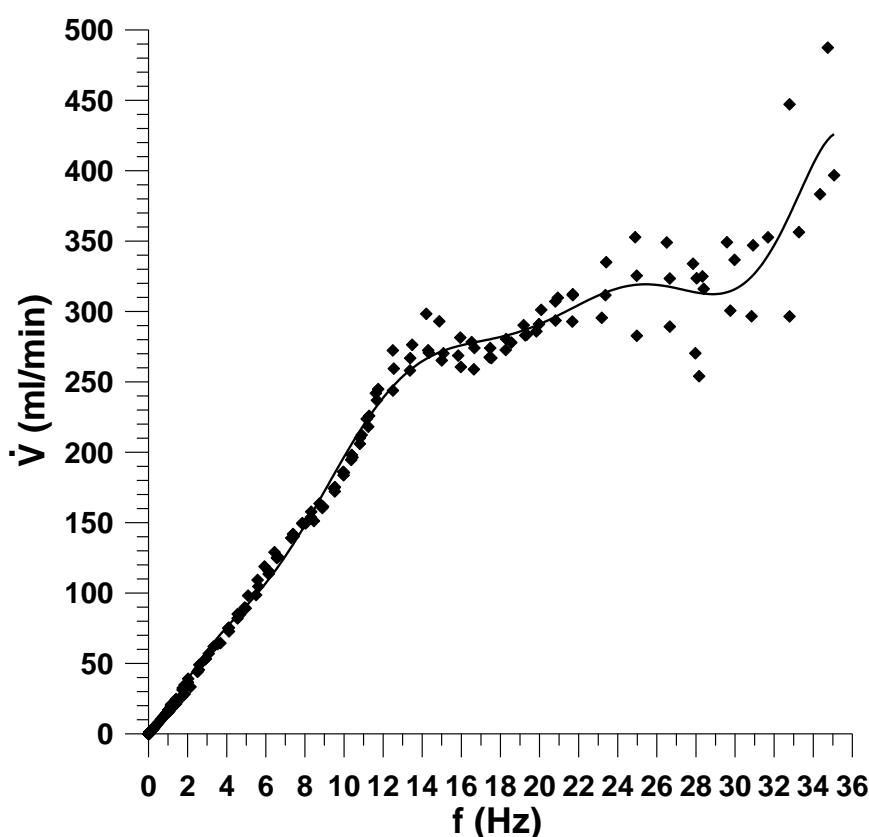


Εικόνα 3-19. Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου α' και β' επιπέδου σφάλματος, για τον κινητήρα χαμηλών συχνοτήτων.



Εικόνα 3-20. Σχετικό σφάλμα παροχής όγκου α' και β' επιπέδου σφάλματος, για τον κινητήρα μεσαίων συχνοτήτων.

Βλέπουμε από τα παραπάνω τρία διαγράμματα ότι το πρώτο επίπεδο σφάλματος είναι το χαμηλότερο όλων. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού το δεύτερο και το τρίτο επίπεδο σφάλματος προκύπτουν από ομαδοποίηση πολλών μετρήσεων, ενώ το πρώτο επίπεδο σφάλματος προκύπτει από την στατιστική επεξεργασία της κάθε μέτρησης ξεχωριστά. Το τρίτο επίπεδο σφάλματος είναι λίγο μεγαλύτερο από το δεύτερο γιατί προκύπτει από ομαδοποίηση μετρήσεων που ανήκουν σε ανεξάρτητες σειρές μετρήσεων. Το δεύτερο επίπεδο σφάλματος προκύπτει από μετρήσεις που έχουν ληφθεί στην ίδια σειρά μετρήσεων με όσο το δυνατόν σταθερότερες συνθήκες.



Εικόνα 3-21. Το πολυώνυμο 10^{ου} βαθμού (συνεχής γραμμή) που προσεγγίζει την πειραματική καμπύλη.

Τέλος προκειμένου να βρεθεί η χαρακτηριστική καμπύλη της κυματοειδούς αντλίας προσεγγίζουμε με πολυώνυμο τα σημεία των πειραματικών μετρήσεων. Το πολυώνυμο είναι 10^{ου} βαθμού, έχει την μορφή $\dot{V} = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3 + \dots + \alpha_{10} x^{10}$ και οι συντελεστές του είναι οι:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0.807753766 \\ \alpha_1 &= 2.565330321 \\ \alpha_2 &= 17.70859689 \\ \alpha_3 &= -6.944851036 \\ \alpha_4 &= 1.312924688 \\ \alpha_5 &= -0.1367816219 \\ \alpha_6 &= 0.008410697571 \\ \alpha_7 &= -0.0003130435232 \\ \alpha_8 &= 6.920796275 \cdot 10^{-6} \\ \alpha_9 &= -8.346283531 \cdot 10^{-8} \\ \alpha_{10} &= 4.217914617 \cdot 10^{-10} \end{aligned}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

4.1 Σύνοψη κεφαλαίου - γενικά σχόλια

Από τα παραπάνω αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν στο εργαστήριο μπορούμε να κάνουμε αρκετές διαπιστώσεις και να βγάλουμε διάφορα συμπεράσματα για την αντλία, την συμπεριφορά της και εν συνεχεία να την συγκρίνουμε με τις άλλες πρότυπες αντλίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο.

Παρατηρούμε ότι η παροχή και η συχνότητα περιστροφής μεταβάλλονται γραμμικά, σε γενικές γραμμές, στους πρώτους δύο κινητήρες, δηλαδή στον κινητήρα χαμηλών και τον κινητήρα μεσαίων στροφών.

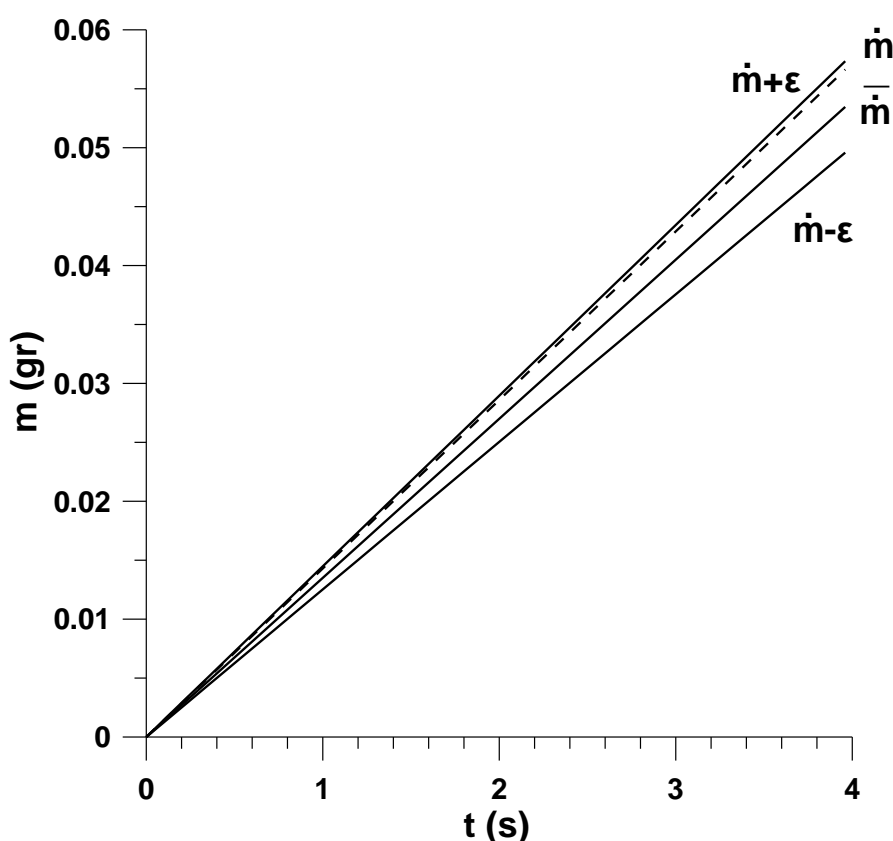
Όσον αφορά τον κινητήρα υψηλών στροφών, πρέπει να αναφερθεί ότι εδώ έγιναν τρεις σειρές μετρήσεων για να εξαχθούν πιο αξιόπιστα συμπεράσματα από τις μετρήσεις (εικόνα 3-21). Από το διάγραμμα παροχής όγκου – συχνότητας κάθε σειράς βλέπουμε ότι μέχρι τα 10 Hz η παροχή αυξάνεται γραμμικά με την συχνότητα. Από εκεί και μετά παρατηρείται μία αύξηση στον ρυθμό παροχής ως τα 14 Hz, Αυτό οφείλεται σε αδρανειακά φαινόμενα και στον συντονισμό της αντλίας, συνεπώς εκεί η παροχή αυξάνεται περισσότερο από το προβλεπόμενο. Στο συγκεκριμένο διάστημα συχνοτήτων υπάρχει υψηλή καταπόνηση του σωλήνα, άρα και υψηλή πιθανότητα αστοχίας του. Από εκεί και ως τα 31 Hz αυξάνεται ελάχιστα η παροχή με την συχνότητα. Τέλος από τα 31 Hz και πάνω καταγράφεται μία απότομη αύξηση της παροχής. Στα 35 Hz περίπου σταματά το εύρος λειτουργίας του κινητήρα υψηλών στροφών και δεν μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την συμπεριφορά της κυματοειδούς αντλίας για μεγαλύτερες συχνότητες. Ο ρυθμός αύξησης της παροχής στο διάστημα αυτό είναι περίπου ίδιος με του διαστήματος 0-10 Hz όμως εδώ υπάρχει υψηλή κατανάλωση ενέργειας προκειμένου να έχουμε την παροχή αυτή και υψηλή καταπόνηση του σωλήνα και της αντλίας.

Ένα πολύ σπουδαίο χαρακτηριστικό της κυματοειδούς αντλίας όπως προκύπτει από τις μετρήσεις είναι η απουσία οπισθοροής. Αυτό ήταν αναμενόμενο, επαληθεύεται όμως και πειραματικά. Η απουσία οπισθοροής είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού η οπισθοροή μπορεί να προκαλέσει θρόμβωση στους ασθενείς, όταν η αντλία χρησιμοποιείται σε ιατρικές εφαρμογές. Οπισθοροή θα εμφανιζόταν αν στα διαγράμματα μάζας – χρόνου παρουσιαζόταν μείωση της παροχής σε κάθε περίοδο, δεν διαπιστώνεται ωστόσο κάτι τέτοιο. Αν και υπάρχουν διαστήματα όπου φαίνεται να μειώνεται η παροχή, αυτό εμφανίζεται μόνο στον κινητήρα χαμηλών στροφών και στο γεγονός ότι στις χαμηλές στροφές του η ροπή που δίνει στην αντλία είναι ασταθής.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν 13 σωλήνες. Γινόταν περιοδικός έλεγχος για την αστοχία τους και κάθε φορά που βρισκόταν αστοχία γινόταν αντικατάσταση του σωλήνα. Υπήρξαν περιπτώσεις όπου ο σωλήνας αλλάχθηκε χωρίς να έχει αστοχήσει μεν, βρέθηκε καταπονημένος δε. Παρατηρήθηκε ότι όντως το σχήμα του σωλήνα σιλικόνης γίνεται οβάλ μετά από κάποιο αριθμό πειραμάτων. Ιδιαίτερα ισχυρή καταπόνηση υφίστατο ο σωλήνας στις υψηλές στροφές. Από τις 1600 RPM και πάνω αστοχούσαν συνεχώς τα ρουλεμάν που βρίσκονταν στα έμβολα και πιέζονταν από τα έκκεντρα. Η φθορά στα έκκεντρα ήταν ελάχιστη και δεν μας αλλοίωσε τα αποτελέσματα αφού η πλήρης έκφραξη του σωλήνα εξασφαλίστηκε. Η χρήση λαδιού και η μικρή σχετικά διάρκεια των μετρήσεων βοήθησε στην αποφυγή εμφάνισης αυλακιών στα έκκεντρα που θα χαμήλωναν το ύψος των εμβόλων και δεν θα επέτρεπαν την πλήρη έκφραξη του σωλήνα.

Μετά τα 0.0485 Hz αλλάξαμε εκκεντροφόρο άξονα. Θα πρέπει να γίνει εκτίμηση της επιρροής αυτής της αλλαγής στην παροχή της αντλίας και αν το σφάλμα που προκύπτει από την καταπόνηση των έκκεντρων είναι σημαντικό. Υπολογίζουμε την διάρκεια των μετρήσεων ως εκείνη την στιγμή και την βρίσκουμε ίση με 38 ώρες και 14 λεπτά. Υπολογίζουμε την διαφορά:

$\Delta\dot{m}_i = \dot{m}_{\text{μέτρηση μετά την αλλαγή εκκέντρων}} - \dot{m}_{\text{μέτρηση μετά την αλλαγή}} = 0.0143 - 0.0135 = 0.0008$ gr/sec. Το επιπρόσθετο σφάλμα που προκύπτει από την φθορά των έκκεντρων δίνεται από τον τύπο (επιπρόσθετο σφάλμα λόγω φθοράς) $= |\varepsilon - \Delta\dot{m}_i| = 0.00018$ gr/sec. Το σφάλμα αυτό δηλαδή έχει τιμή 0.0135 ± 0.00018 gr/sec, δηλαδή κυμαίνεται μεταξύ [0.01368, 0.01332]. Υπάρχει όμως περιθώριο $\varepsilon = \pm 1.96s_{\dot{m}_{0,0483}} = 0.00098$ μέσα στο οποίο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σφάλμα που προκύπτει εξαιτίας της φθοράς του εκκεντροφόρου είναι τυχαίο και επομένως δεν επηρεάζει το πείραμα μας. Το εύρος τιμών δηλαδή είναι [0.01448, 0.01252] gr/sec. Πράγματι, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4-1 η παροχή που προκύπτει μπορεί να θεωρηθεί τυχαίο σφάλμα καθώς βρίσκεται εντός του παραπάνω ορίου.



Εικόνα 4-1. Σφάλμα λόγω αλλαγής εκκεντροφόρου και απόδειξη ότι δεν επηρεάζεται η λειτουργία της αντλίας από αυτό.

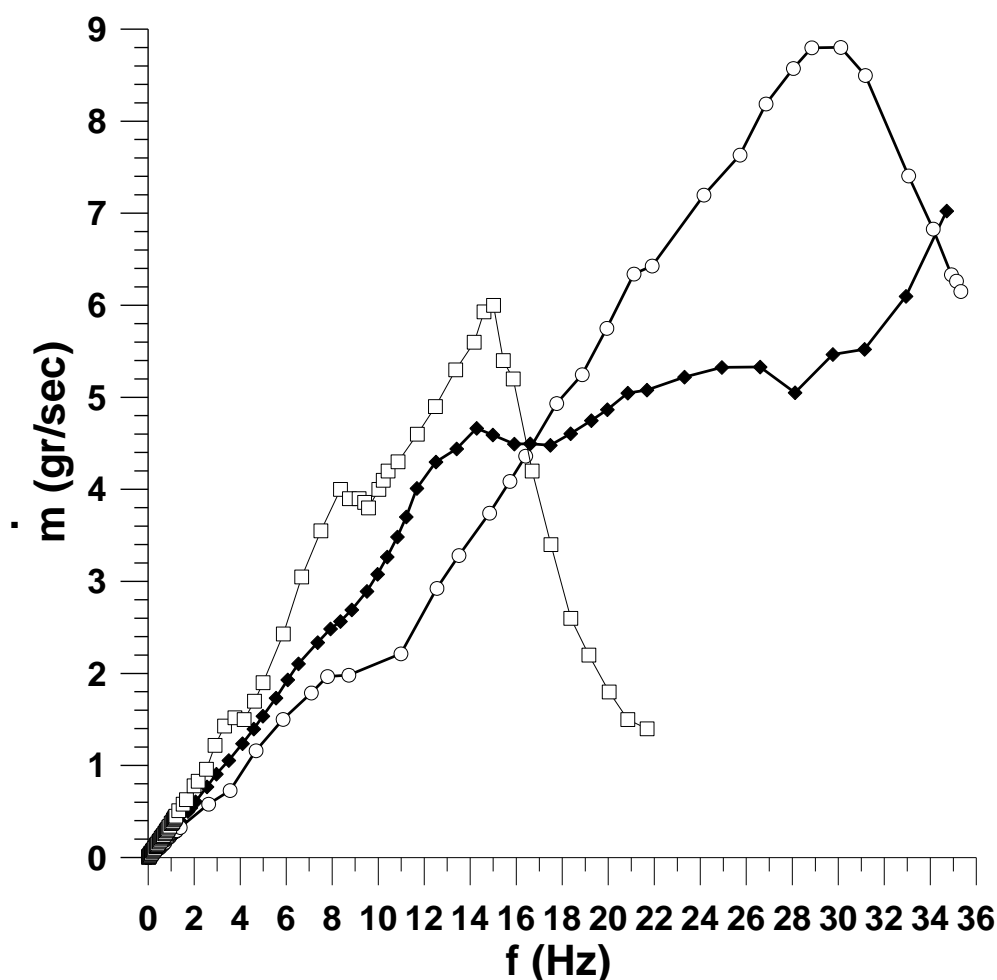
Να σημειωθεί ότι η αντλία είναι πρωτότυπη και τα μοντέλα παραγωγής θα είναι καλύτερα κατασκευασμένα καθώς θα έχουν διορθωθεί οι όποιες ατέλειες εντοπίστηκαν.

4.2 Σύγκριση κυματοειδούς αντλίας με άλλες πρότυπες

Ενδιαφέρον έχει η σύγκριση της κυματοειδούς αντλίας με τις άλλες πρότυπες αντλίες που έχουν δοκιμαστεί στο εργαστήριο. Στο εργαστήριο έχουν δοκιμαστεί δύο τύποι αντλιών δύο σταδίων έγχυσης, οι οποίοι διαφέρουν στην μορφή των έκκεντρων. Από το διάγραμμα 4-2 φαίνονται οι διαφορές της κυματοειδούς αντλίας τις δύο άλλες.

Παρατηρούμε ότι όλες ως τα 7 Hz έχουν γενικά γραμμική συμπεριφορά όσον αφορά την σχέση παροχής – συχνότητας. Στην παλιά αντλία σταδίων η παροχή αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τη συχνότητα ως τα 7 περίπου Hz, στο διάστημα 7 - 10 περίπου Hz υπάρχει μία υπέρβαση της καμπύλης σχεδιασμού λόγω συντονισμού και αδρανειακών φαινομένων ενώ στα 14 Hz όπου έχουμε ολικό μέγιστο της παροχής. Στην συνέχεια η παροχή μειώνεται. Στο κεφάλαιο 4.1 έχει γίνει περιγραφή των αντίστοιχων τμημάτων για την κυματοειδή αντλία.

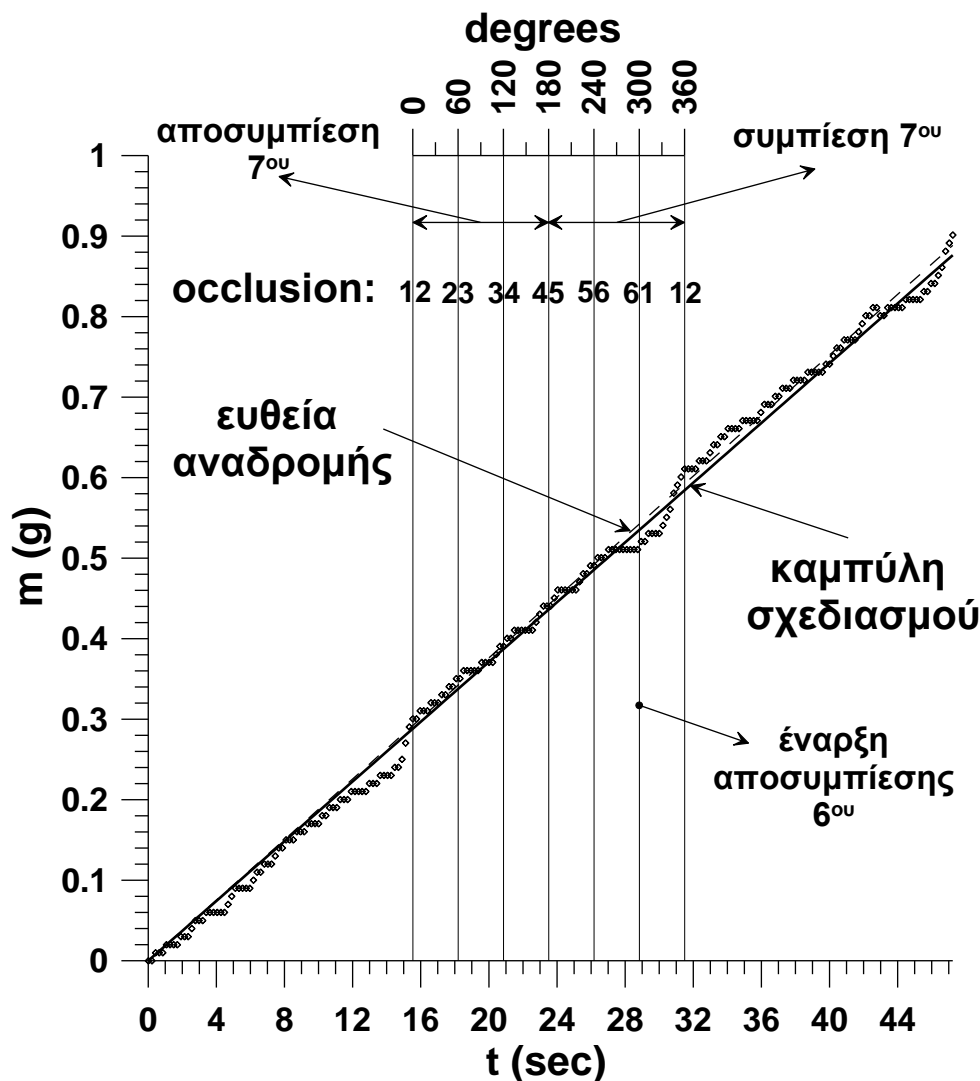
Η νέα αντλία δυο σταδίων έγχυσης είχε κάποιο κατασκευαστικό σφάλμα και η καμπύλη της συμπεριλαμβάνεται στο διάγραμμα για λόγους πληρότητας. Σε μελλοντική διπλωματική εργασία θα επαναληφθεί η μέτρηση της.



Εικόνα 4-2. Σύγκριση χαρακτηριστικής κυματοειδούς αντλίας με άλλες που έχουν δοκιμαστεί στο εργαστήριο.

4.3 Διερεύνηση της γραμμικής συμπεριφοράς της αντλίας

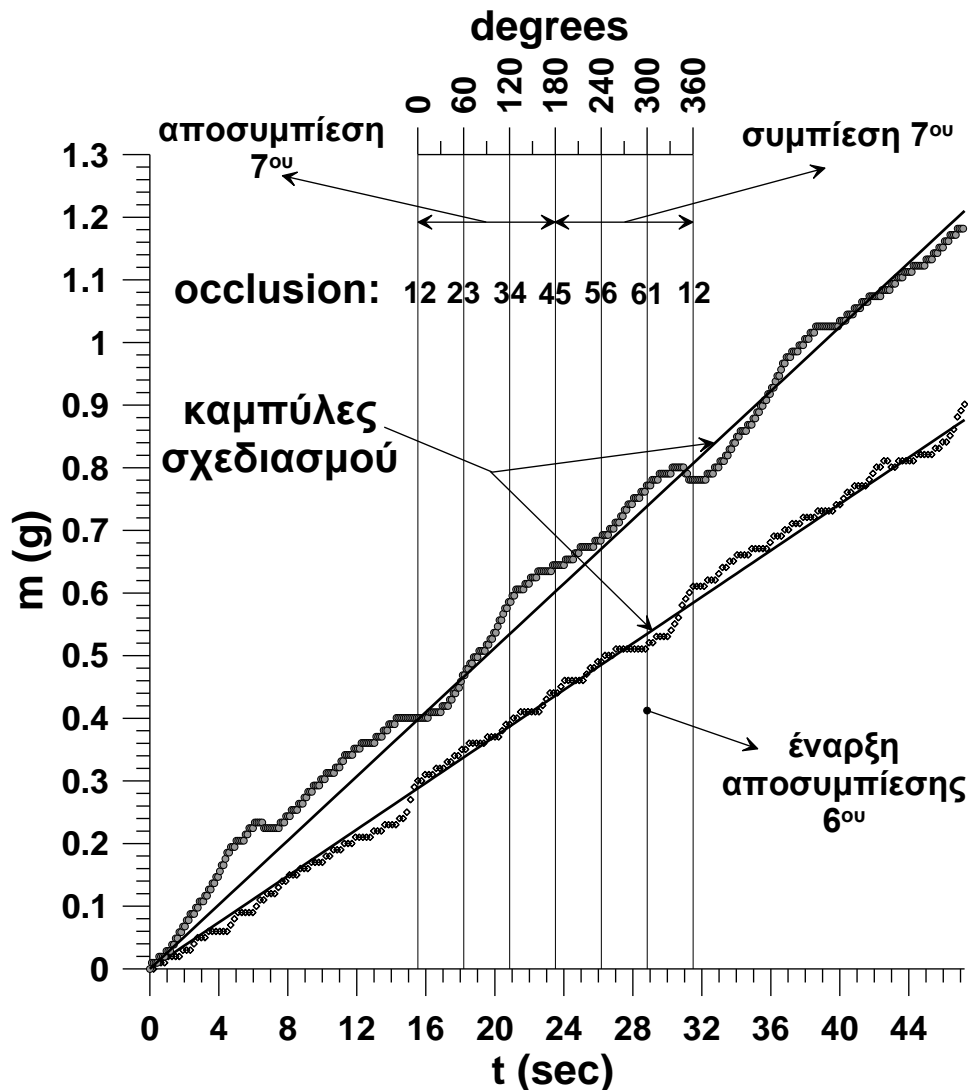
Έχουμε παρατηρήσει κατά την διάρκεια των μετρήσεων ότι σε συγκεκριμένα σημεία του διαγράμματος εγχυόμενης μάζας – χρόνου αντιστοιχεί συγκεκριμένη θέση κάθε εμβόλου. Είναι δεδομένο ότι η πλήρης έμφραξη πραγματοποιείται από τα 6 πρώτα δάκτυλα και σε αυτήν συμμετέχουν δύο δάκτυλα κάθε χρονική στιγμή εκτός του έβδομου που είναι διορθωτικό. Είναι επίσης γνωστό ότι τα έκκεντρα είναι τοποθετημένα με τρόπο τέτοιο ώστε το κάθε επόμενο έκκεντρο να σχηματίζει γωνία με το διπλανό του 60° . Γνωρίζοντας αυτά και έχοντας κάνει τις παρατηρήσεις μας χαράσσουμε το παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4-3. Οι θέσεις των έκκεντρων σε μία περίοδο της αντλίας.

Εδώ βλέπουμε ότι η καμπύλη σχεδιασμού, η οποία είναι η καμπύλη με βάση την οποία έχει σχεδιαστεί θεωρητικά η αντλία, είναι πολύ κοντά στην ευθεία αναδρομής, η οποία είναι η ευθεία που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις. Αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον καθώς μας δείχνει ότι οι πειραματικές μετρήσεις μας είναι πολύ κοντά στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Η έγχυση της αντλίας είναι σχεδόν απόλυτα γραμμική, υπάρχει όμως ένα σημείο μετά την πλήρη έμφραξη από το 6° έμβολο όπου υπάρχει βύθισμα της εγχυόμενης μάζας ρευστού, δηλαδή η παροχή μειώνεται. Αυτό οφείλεται σε παραμόρφωση του σωλήνα μεταξύ $6^{\text{ου}}$ και $7^{\text{ου}}$ δακτύλου. Υπενθυμίζεται ότι το 7° δάκτυλο δεν εμφράσσει πλήρως τον σωλήνα, ενώ το 6° τον αποφράσσει πλήρως. Λόγω της διαφοράς έμφραξης στο σημείο αυτό ο σωλήνας παραμορφώνεται μόνιμα μετά από κάποιες καταπονήσεις και δημιουργείται ένα

κοίλωμα. Το κοίλωμα αυτό όμως αλλοιώνει την θεωρητικά υπολογισμένη εγχυόμενη μάζα του ρευστού και συγκεκριμένα την μειώνει καθώς μειώνεται η μάζα του ρευστού που παραμένει στον χώρο πάνω από το 7^ο έμβολο και εγχύεται όταν τα άλλα έμβολα δεν εγχύουν ρευστό. Με κατάλληλο σχεδιασμό των δακτύλων και αφού υπολογιστεί ο όγκος που αφαιρείται από την θεωρητικά υπολογισμένη παροχή μπορεί να διορθωθεί η ανωμαλία αυτή. Να σημειωθεί ότι όταν το 6^ο έμβολο σταματήσει να φράσει πλήρως τον σωλήνα εμφανίζεται απότομη αύξηση της παροχής, όπως φαίνεται στα άκρα της επιλεγμένης περιόδου. Αυτό οφείλεται στην πίεση που έχει αναπτυχθεί κατάντι του 6^{ου} εμβόλου από το ρευστό που έχει συσσωρευτεί.



Εικόνα 4-4. Σύγκριση περιόδων κυματοειδούς και παλιάς δίχρονης αντλίας για τα 0.0631 Hz και 0.0610 Hz αντίστοιχα.

Στην εικόνα 4-4 βλέπουμε την εικόνα 4-3 μόνο που στο ίδιο διάγραμμα έχουμε προσθέσει μία μέτρηση από μία παρόμοια συχνότητα της παλιάς αντλίας 2 σταδίων έγχυσης. Συγκεκριμένα η μέτρηση της κυματοειδούς αντλίας έχει ληφθεί για τα 0.0631 Hz ενώ της παλιάς δύο σταδίων από τα 0.0610 Hz. Βλέπουμε επίσης την καμπύλη σχεδιασμού κάθε αντλία. Βλέπουμε ότι οι πειραματικές μετρήσεις της κυματοειδούς αντλίας είναι πολύ κοντά στην καμπύλη σχεδιασμού αντίθετα με την αντλία δύο σταδίων έγχυσης όπου υπάρχει σαφής απόκλιση. Η έγχυση της κυματοειδούς αντλίας είναι πολύ πιο γραμμική από την δίχρονη, ενώ στην δίχρονη αντλία παρουσιάζεται και οπισθορροή όταν στην κυματοειδής δεν υπάρχει αυτό το φαινόμενο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

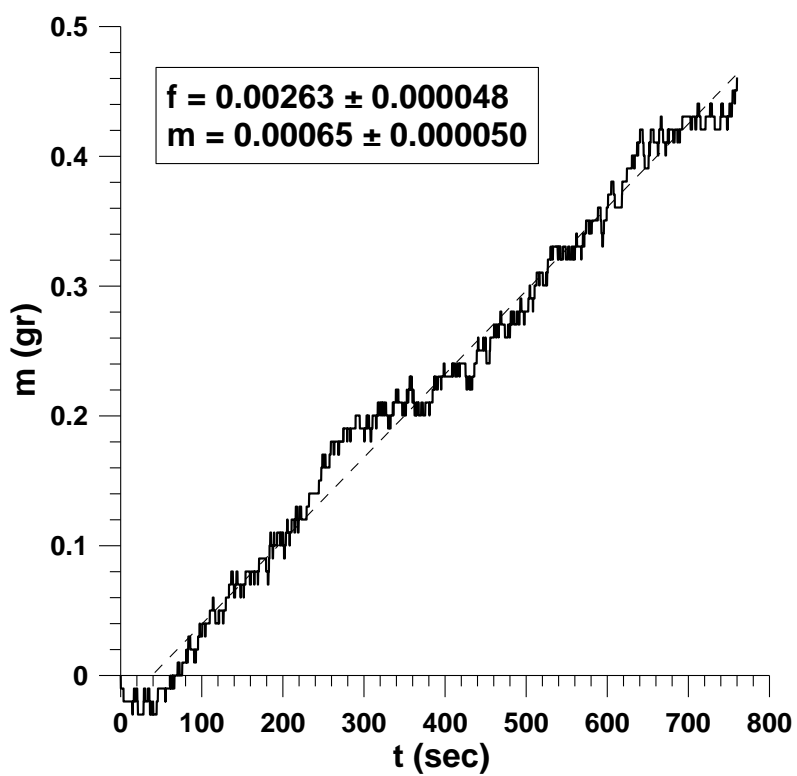
- 1) Hyman O. E., Moubayd A. M., Wilson L. L., Two-cycle Peristaltic Pump with Occlusion Detector, United States Patent Office, 1993, Nr. 5217355, p. 12.
- 2) Hyman O. E., Moubayd A. M., Two-cycle Peristaltic Pump with Occlusion Detector, European Patent Office, 1993, Nr. 526962/A1/B1, p. 18.
- 3) Μαθιουλάκης 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) Μανόπουλος Χ. Γ., Μελέτη αντλητικών φαινομένων σε ιατροβιολογικές εφαρμογές, μέσω αλληλεπίδρασης ροής ρευστού και κίνησης σώματος, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2009
- 7) Μπεργελές Γ., Παπαντώνης Δ., Τσαγγάρης Σ., Τεχνικές μετρήσεις ρευστομηχανικών μεγεθών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1998.
- 8) Παντελής Δ. Ι., Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
- 9) Περσίδης Σ.Κ., FORTRAN, Γ' έκδοση, Εκδόσεις ΙΔΕΑ, 1989 Αθήνα.
- 10) Shelley John, Essentials of FORTRAN 77, Chichester, Wiley, 2nd ed., 1989.
- 11) Σιμόπουλος Σ.Ε., Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών, Β' έκδοση, ΕΜΠ, Αθήνα 1989.
- 12) Tanaka M., Girard G. Davis R., Peuto A. & Bignell N., Recommended table for the density of water between 0oC and 40oC based on recent experimental reports, Metrologia, 38, 301 – 309, 2001.
- 13) Τσαγγάρης Σ., Βιοϊατρική τεχνολογία, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2001. 152
- 14) Τσαγγάρης Σ., Μηχανική των ρευστών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1995.
- 15) Tsoukalis A., Linear Peristaltic Pump, European Patent Office, 1993, Nr. 0560270/A2/A3/B1, p. 13.
- 16) Tsoukalis A., Linear Peristaltic Pump, European Patent Office, 1998, Nr. 0858812/A2/A3, p. 13.
- 17) Tsoukalis A., Linear Peristaltic Pump, United States Patent Office, 1999, Nr. 5980490, p. 13.
- 18) Heide C., “Silicone rubber for medical device applications”, Medical Device & Diagnostic Industry Magazine, **11**, 38-44, (1999)
- 19) Crowther B., “The handbook of rubber bonding”, Rapra Technology Limited, United Kingdom, pp. 384, (2003)

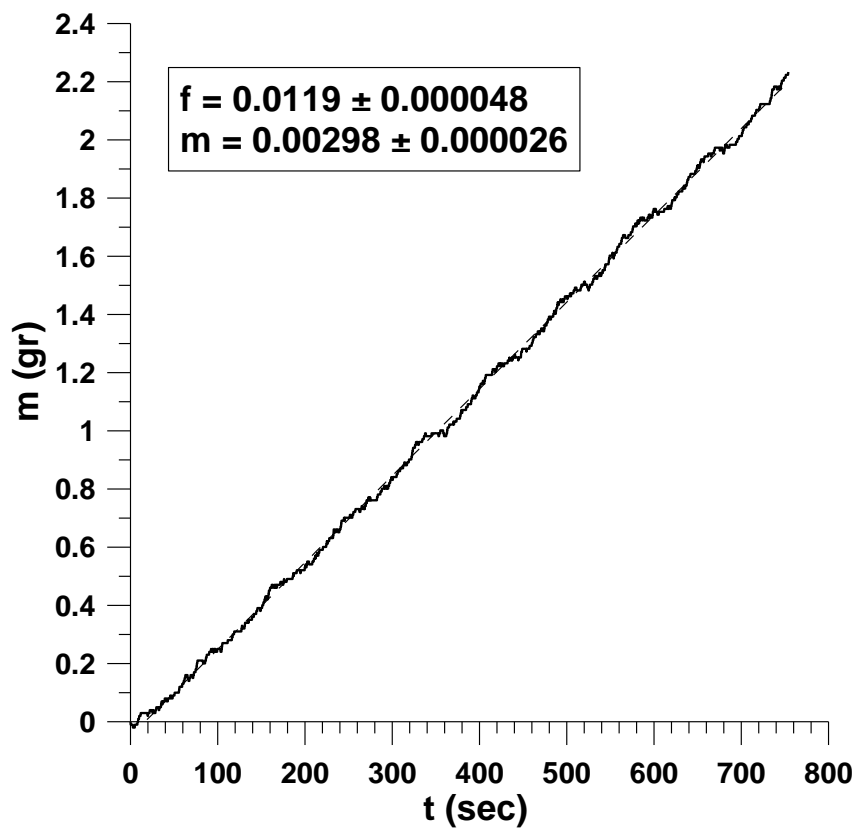
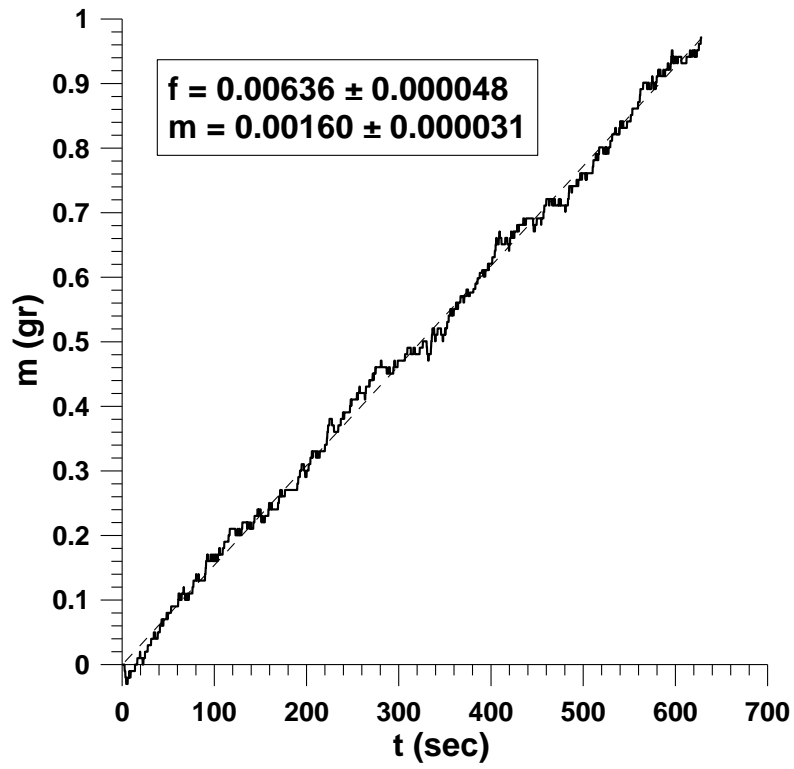
- 20) Lynch W., “Handbook of silicone rubber publication”, Van Nostrand Reinhold Company (VNR), London, pp. 258, (1978).
- 21) Μπουρνάζος Δ., Μελέτη και εύρεση χαρακτηριστικών πρότυπης περισταλτικής αντλίας δύο σταδίων έγχυσης, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2007
- 22) Μέγκουλα Θ.Π., Μελέτη και σχεδιασμός περισταλτικής αντλίας γραμμικής έγχυσης, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2011
- 23) Σουρμελής Β., Κατασκευή και προσδιορισμός χαρακτηριστικών πρότυπης περισταλτικής αντλίας, ΕΜΠ, Αθήνα 2011
- 24) Παπαδόπουλος Ε.Γ., Ηλεκτρομηχανικά συστήματα μετατροπής ενέργειας, Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα 2010
- 25) Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι, ΕΜΠ – Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999.
- 26) http://www.brentas.gr/brentas/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=88&Itemid=79&lang=el
- 27) http://en.wikipedia.org/wiki/Peristaltic_pump
- 28) http://en.wikipedia.org/wiki/LED_circuit
- 29) <http://www.leeson.com/TechnicalInformation/techrefguide.html>
- 30) <http://www.hbm.com/en/menu/applications/test-measurement/catmanr-knowledge-and-practical-examples/>
- 31) <http://www.dowcorning.com/content/publishedlit/52-1067-01.pdf>
- 32) <http://www.millipore.com/catalogue/module/c419#1>
- 33) <http://www.omega.com/prodinfo/loadcells.html>
- 34) <http://www.omega.com/prodinfo/StrainGages.html>
- 35) http://www.aeroconsystems.com/electronics/load_cell_primer.pdf
- 36) <http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/load.html>
- 37) <http://www.euclidres.com/motionSensors/motionSensors.html>
- 38) <http://homepages.which.net/~paul.hills/SpeedControl/SpeedControllersBody.html>
- 39) <http://www.pc-control.co.uk/dc-motors.htm>
- 40) http://en.wikipedia.org/wiki/Six%27s_thermometer
- 41) <http://www.frostproof.com/catalog/t041.html>

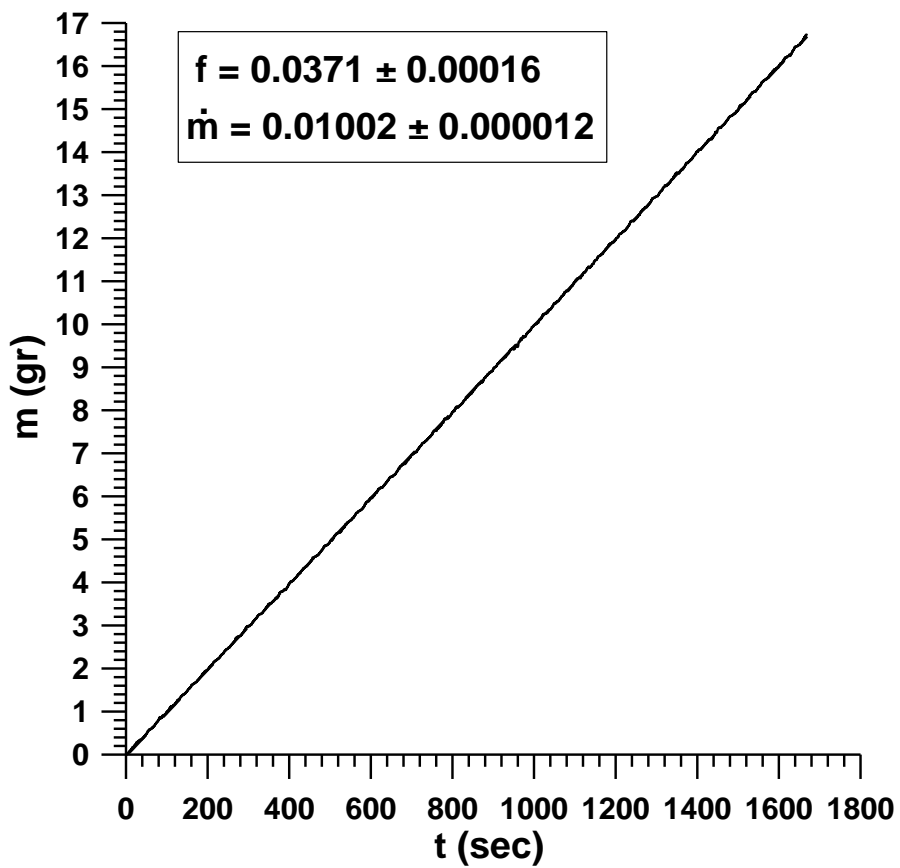
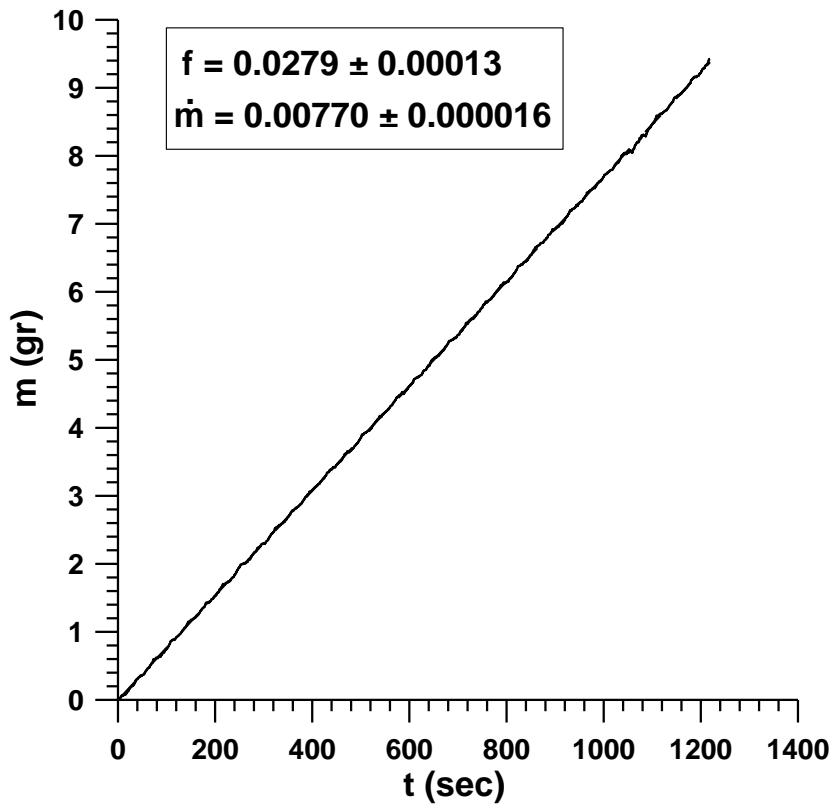
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

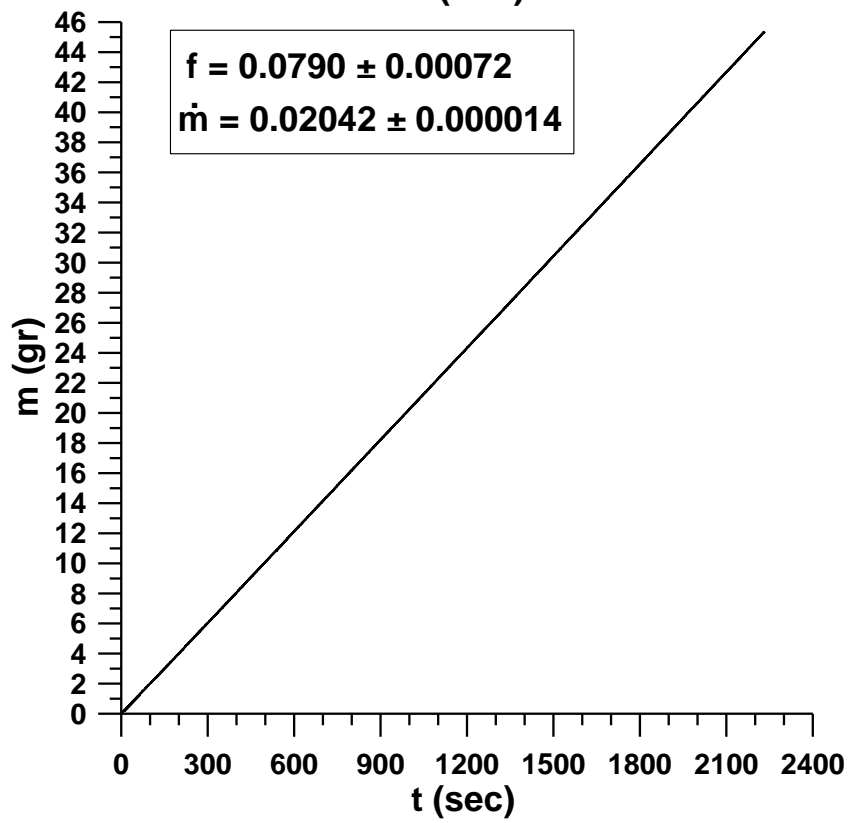
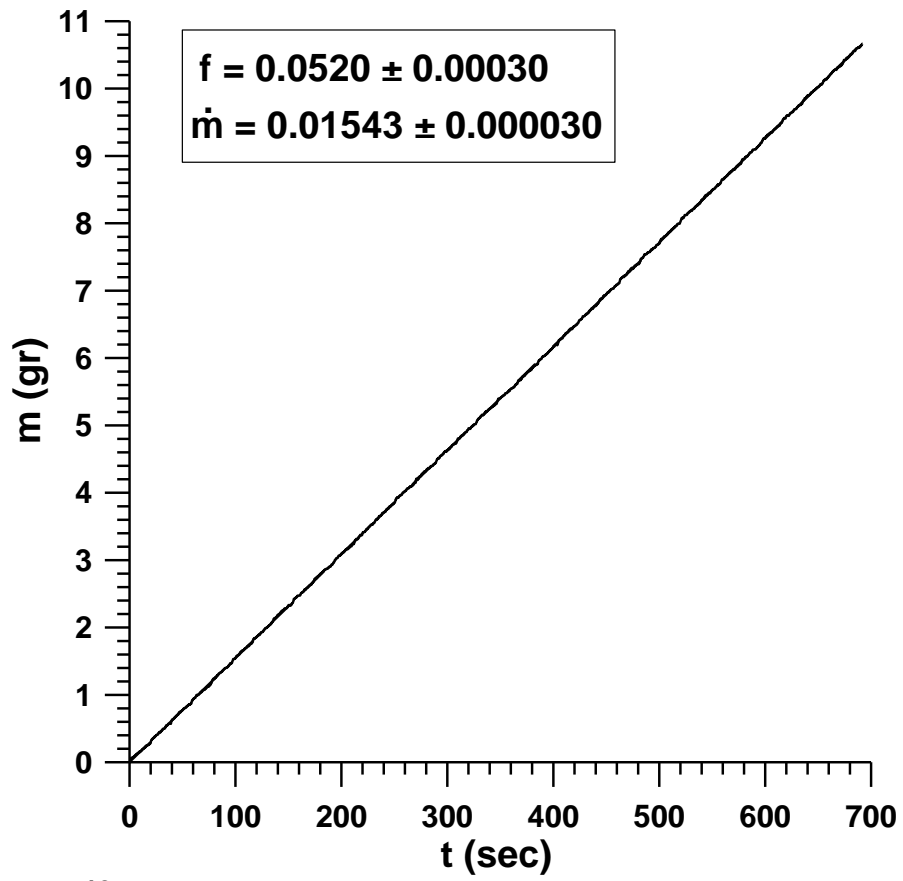
I. Διαγράμματα επιλεγμένων συχνοτήτων

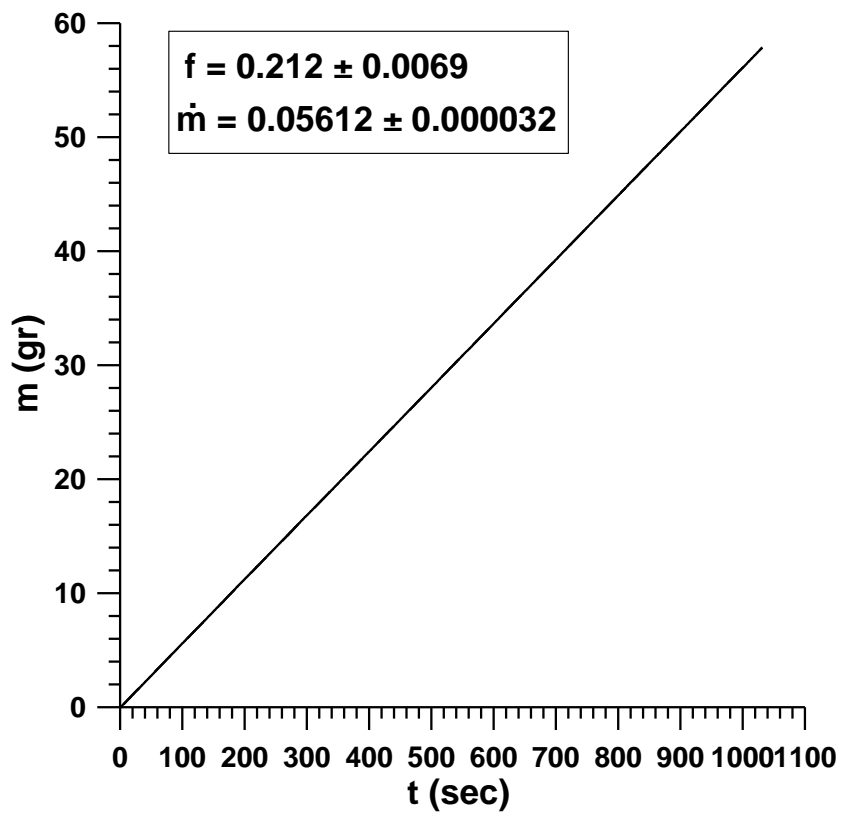
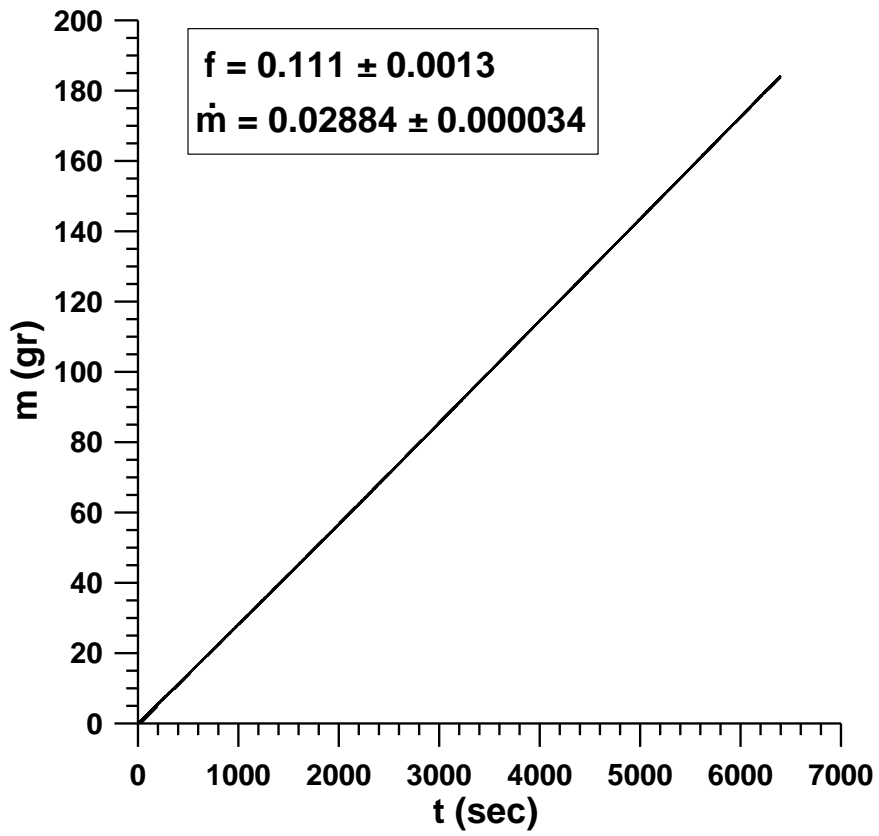
Ορισμένα διαγράμματα συχνότητας διέγερσης της αντλίας – εγχυόμενης μάζας μαζί με την αντίστοιχη παροχή μάζας.

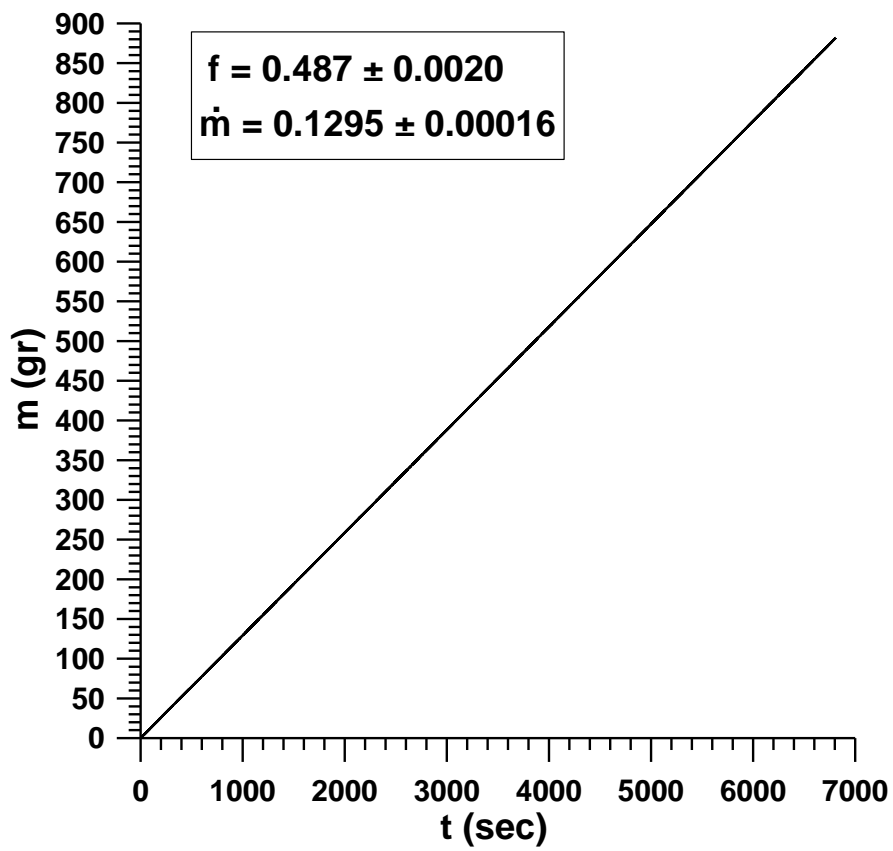
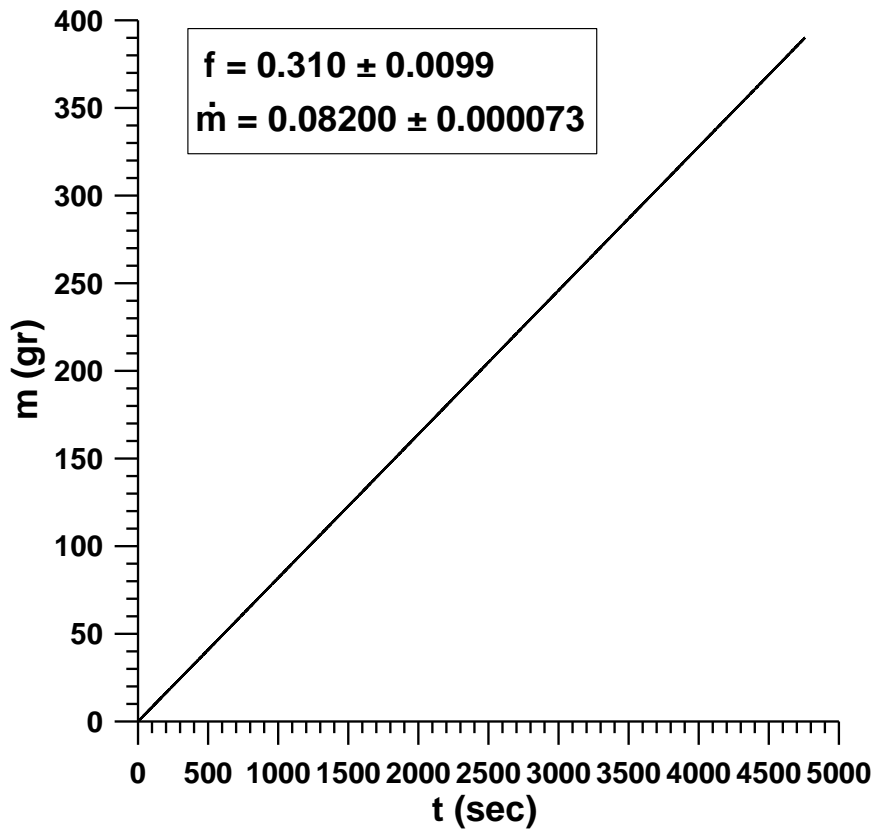


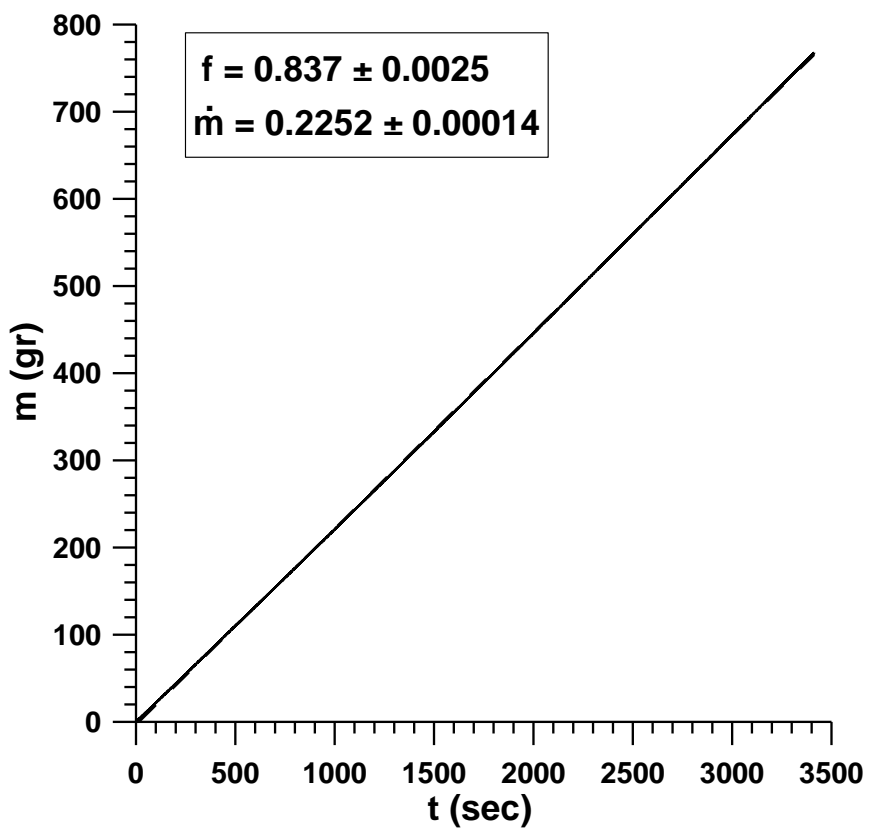
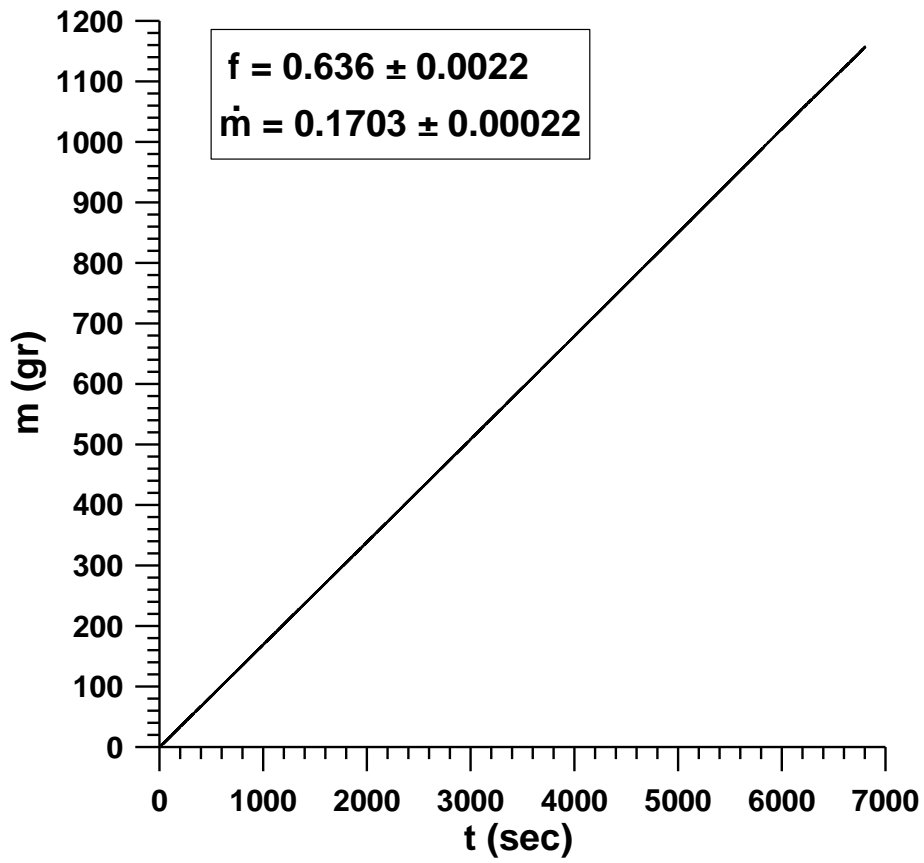


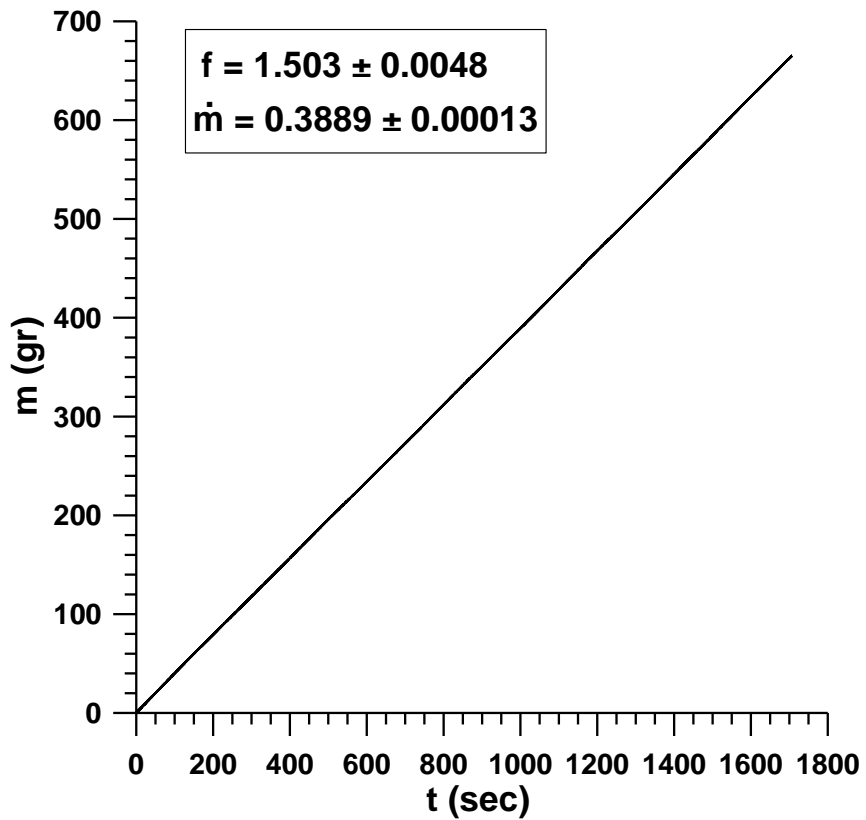
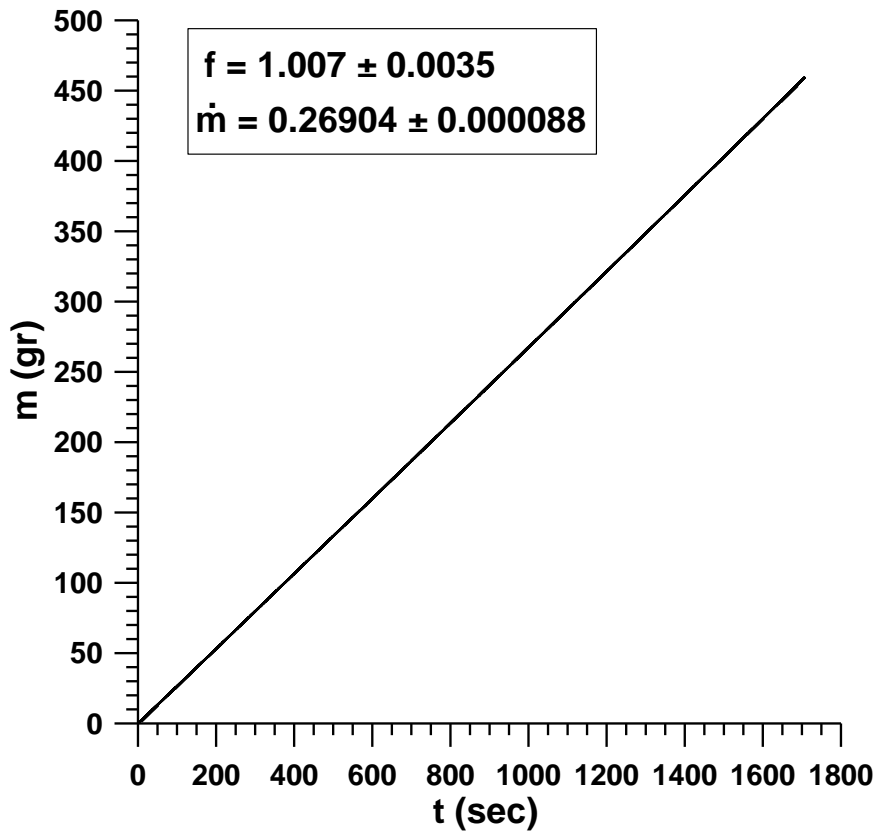


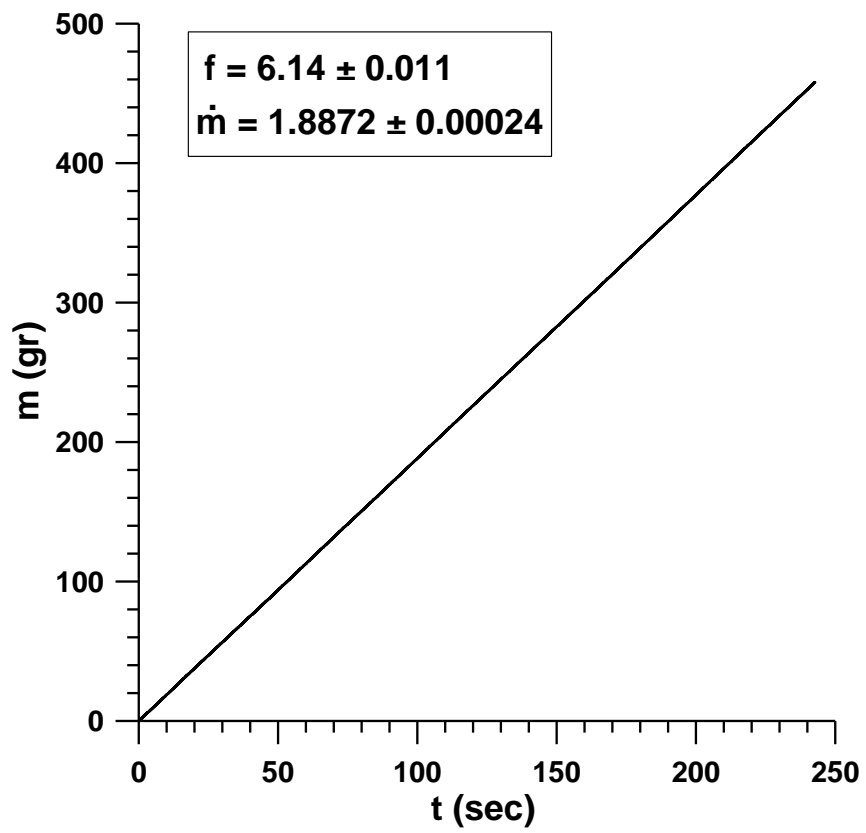
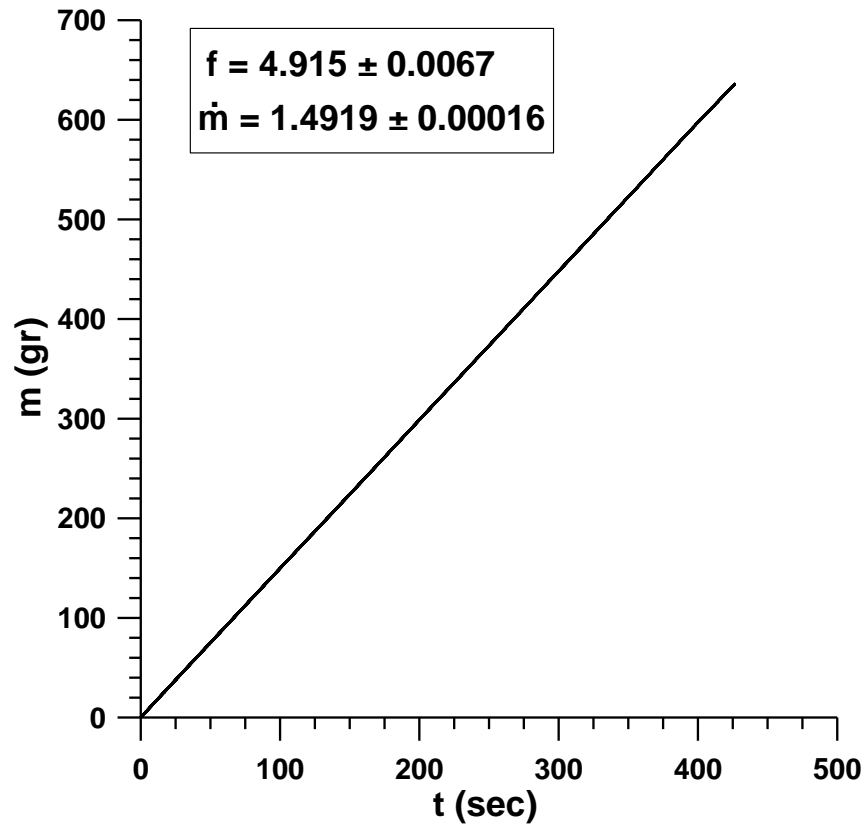


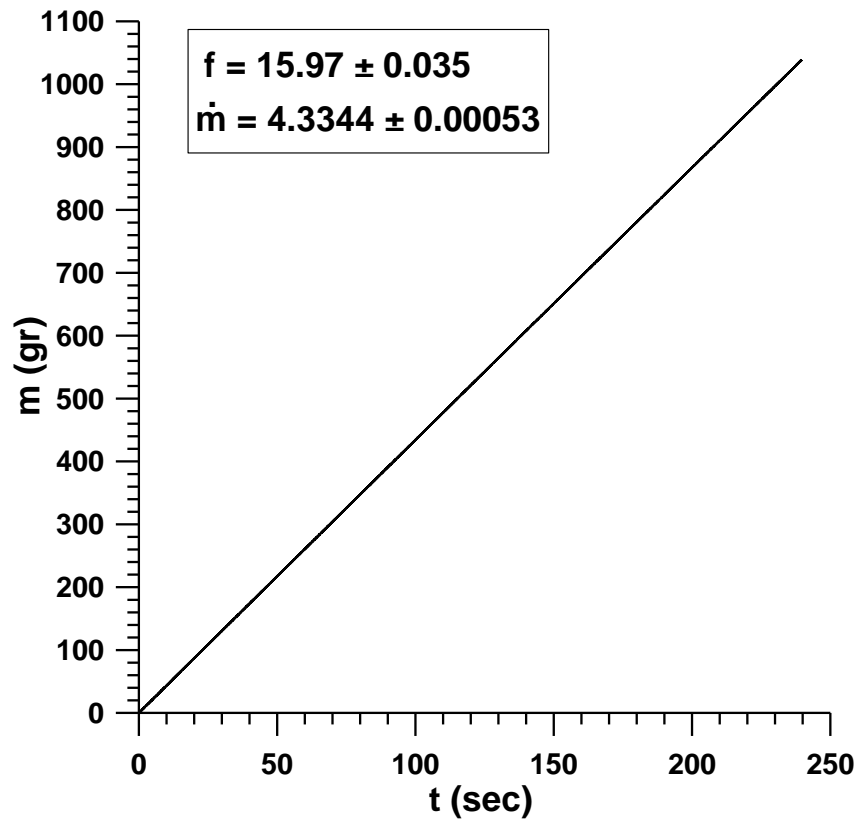
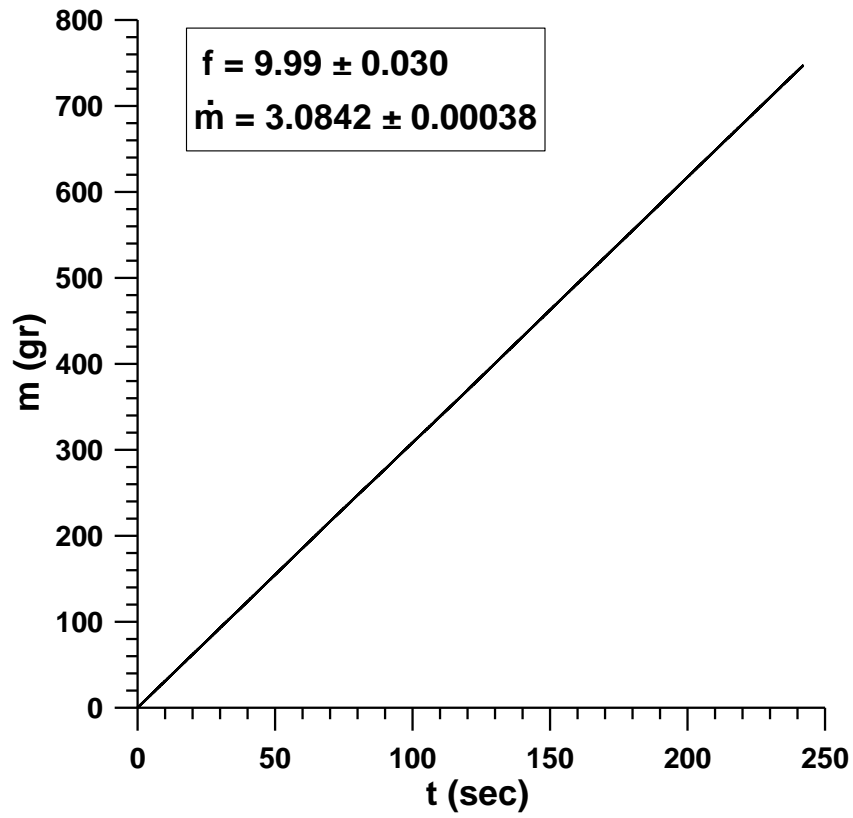


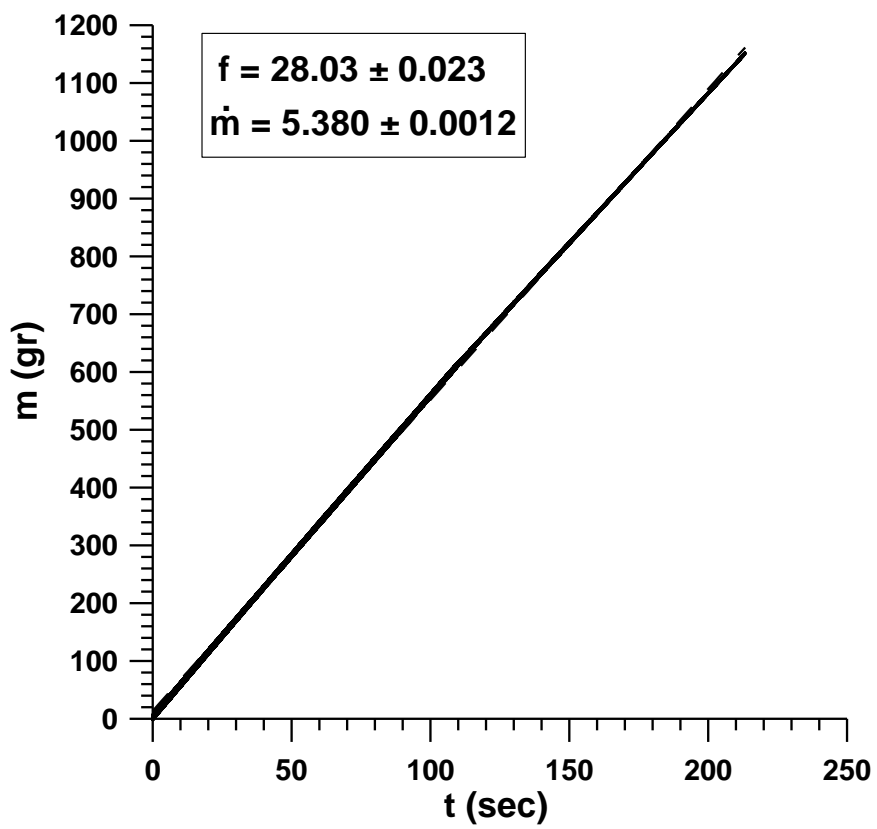
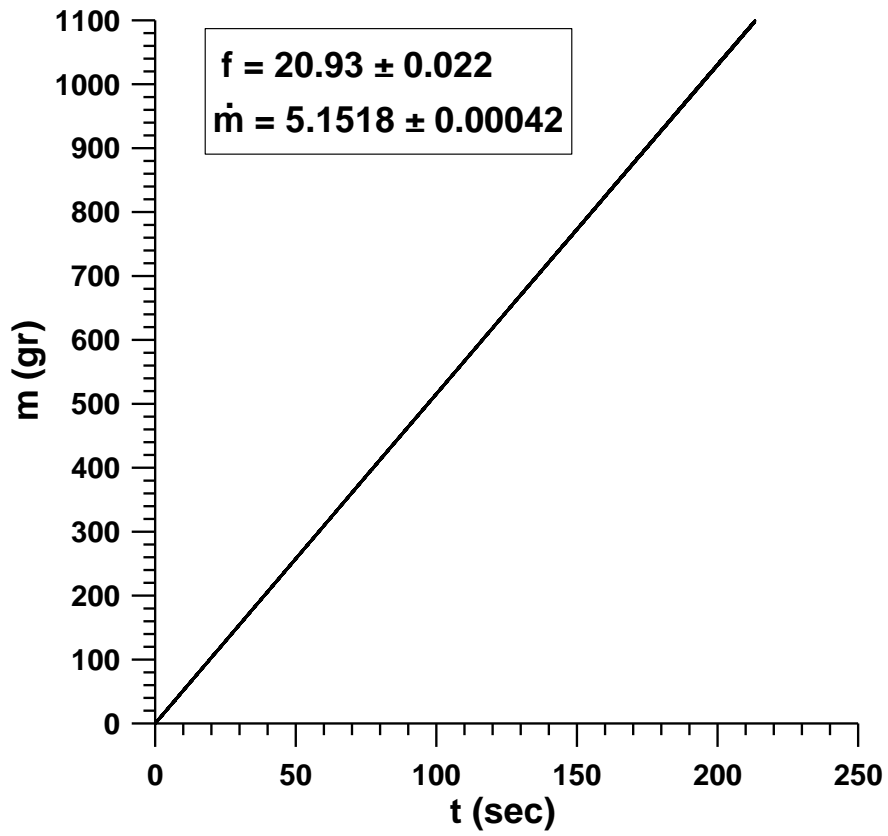


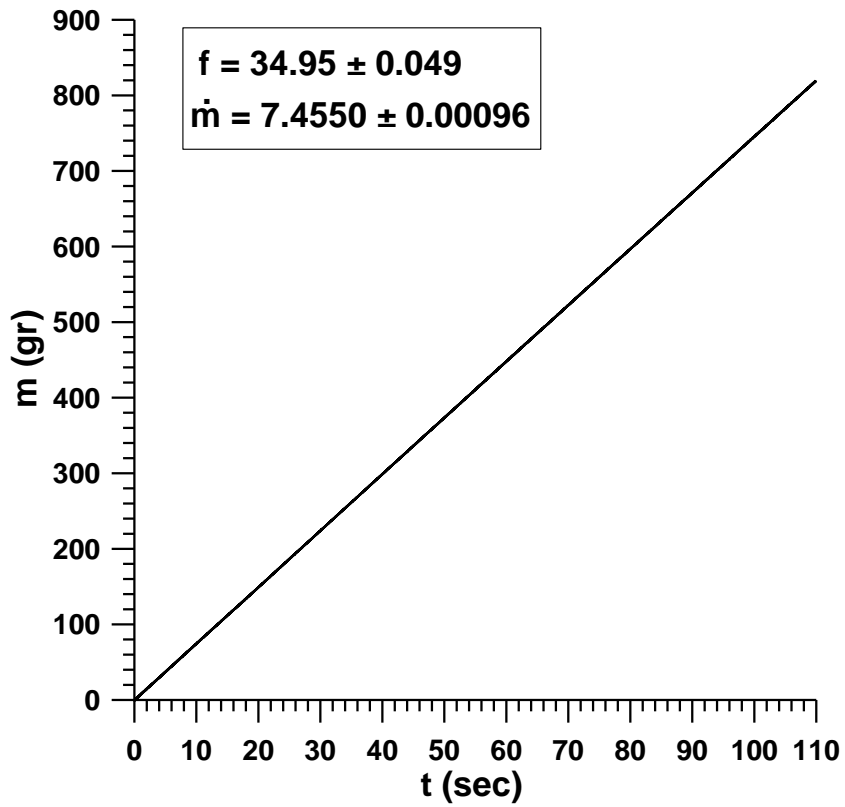




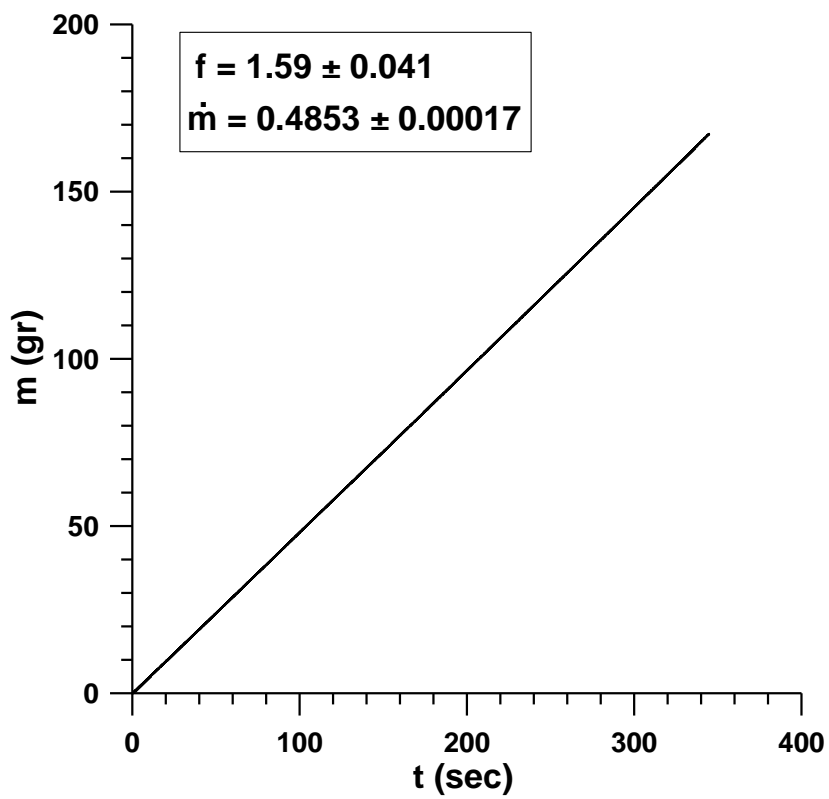


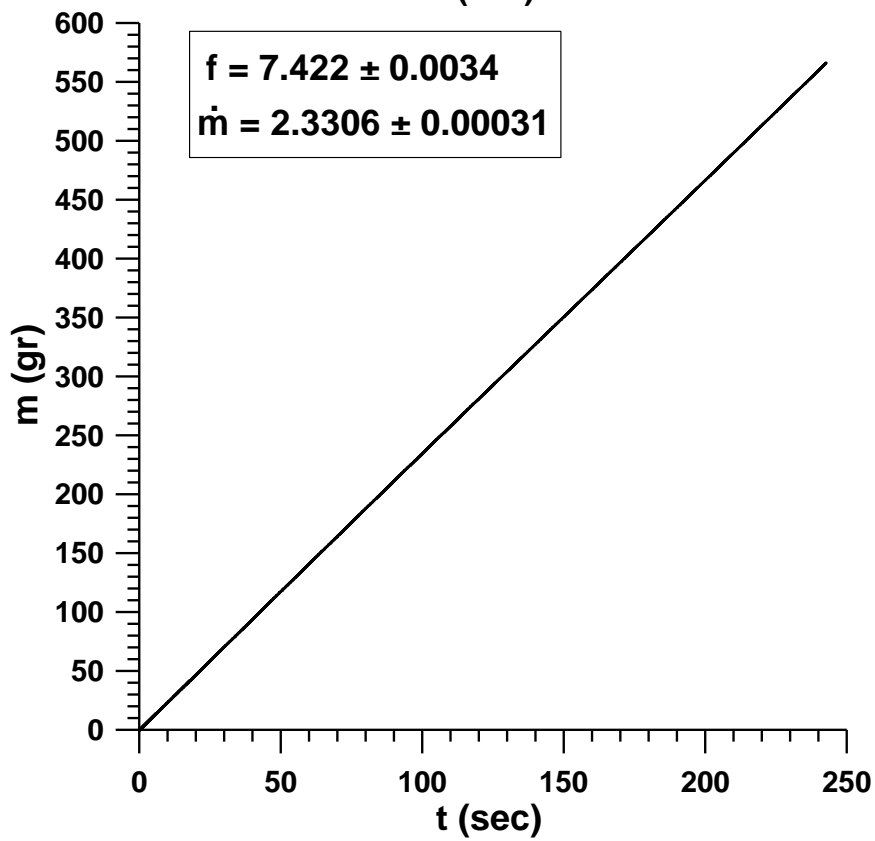
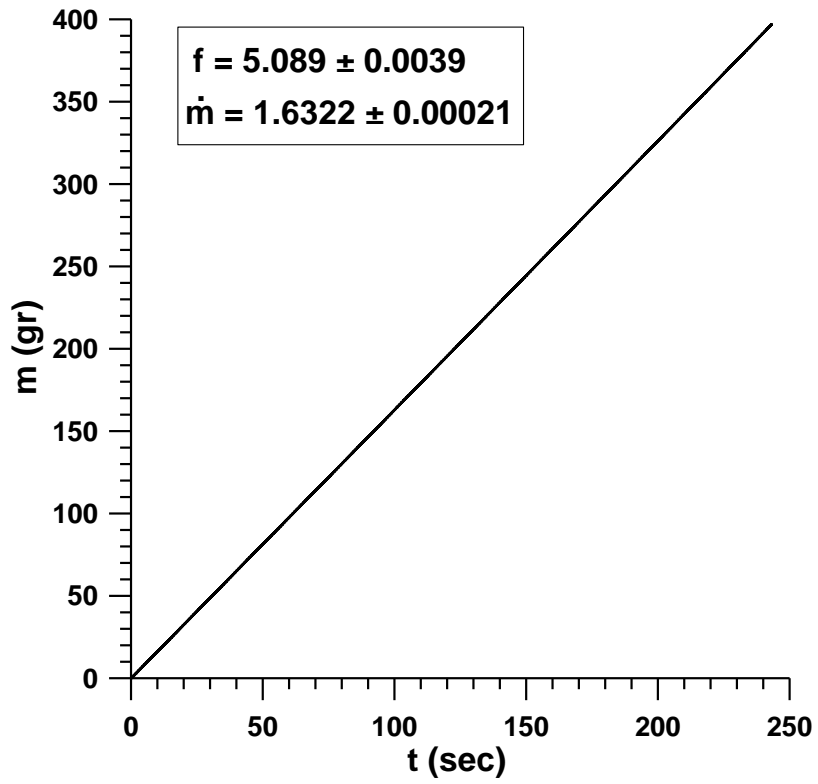


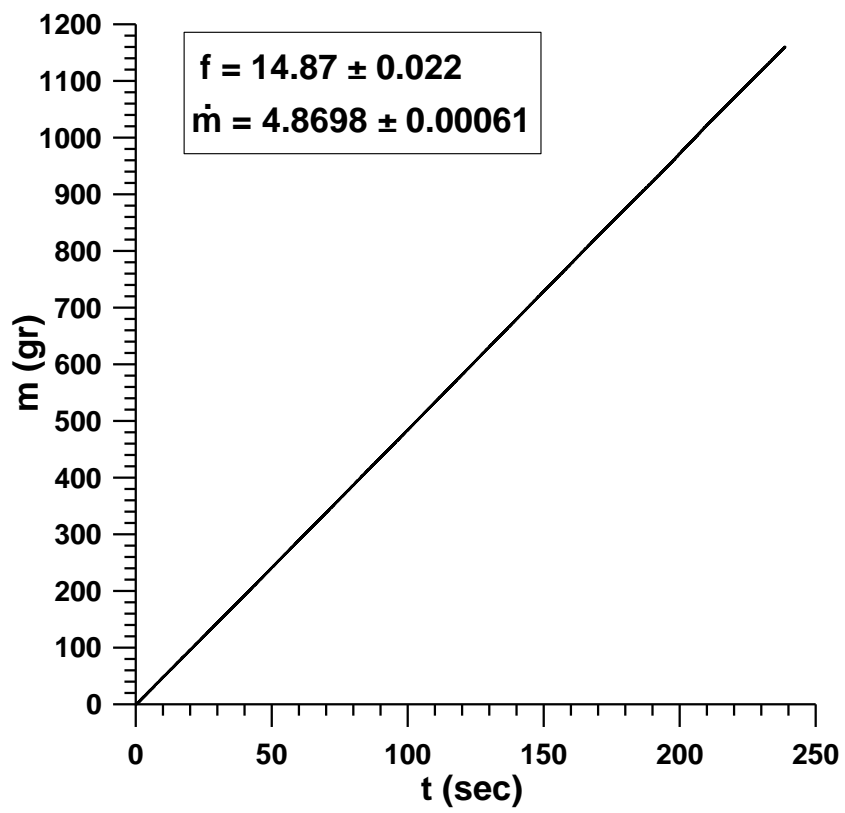
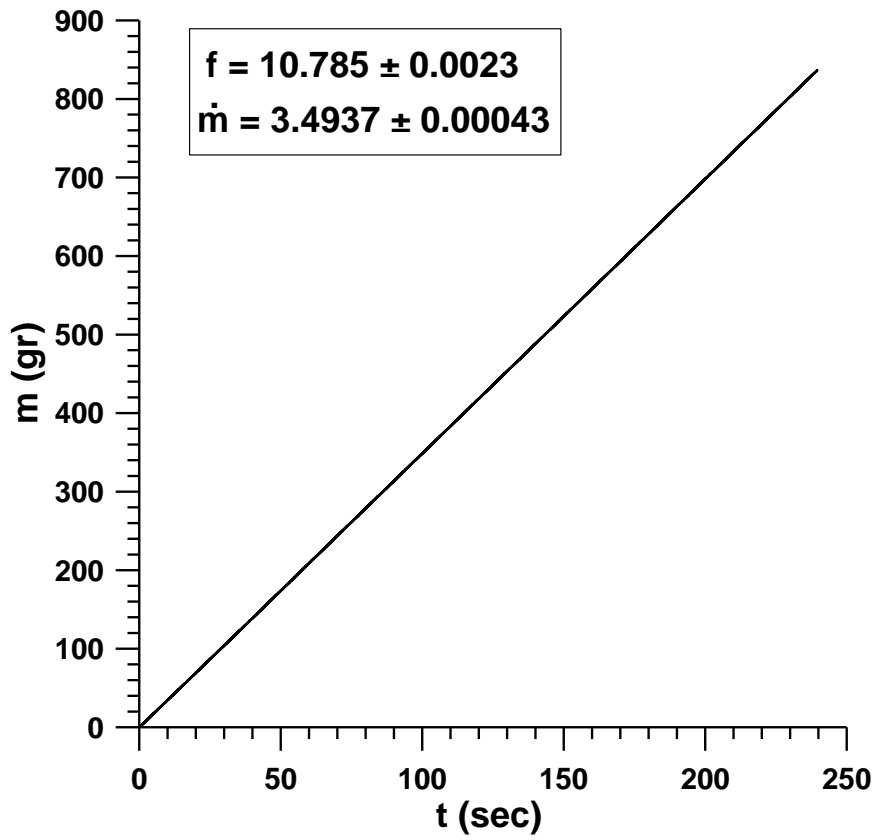


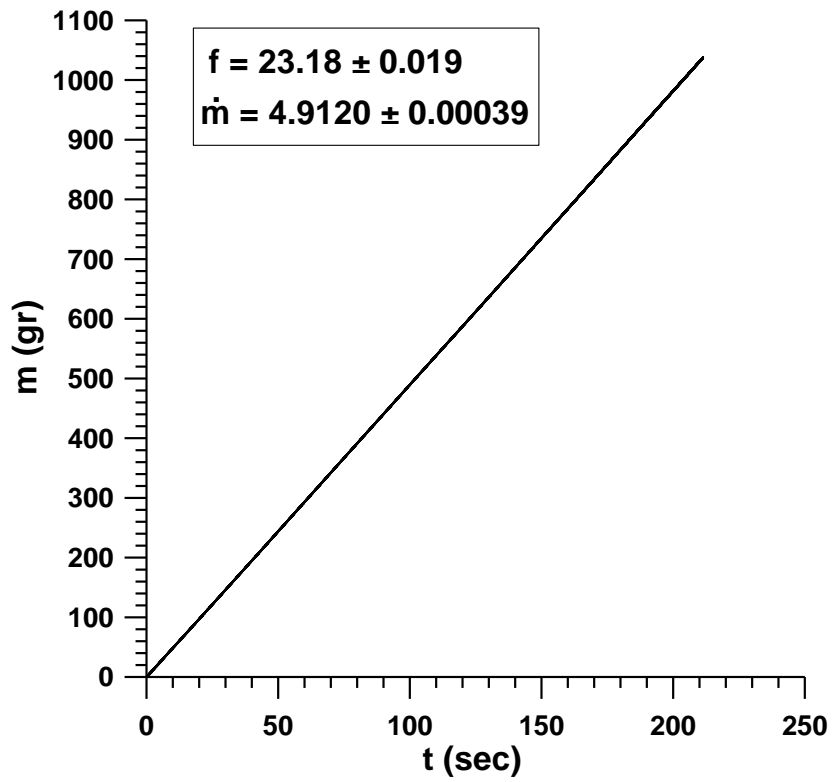
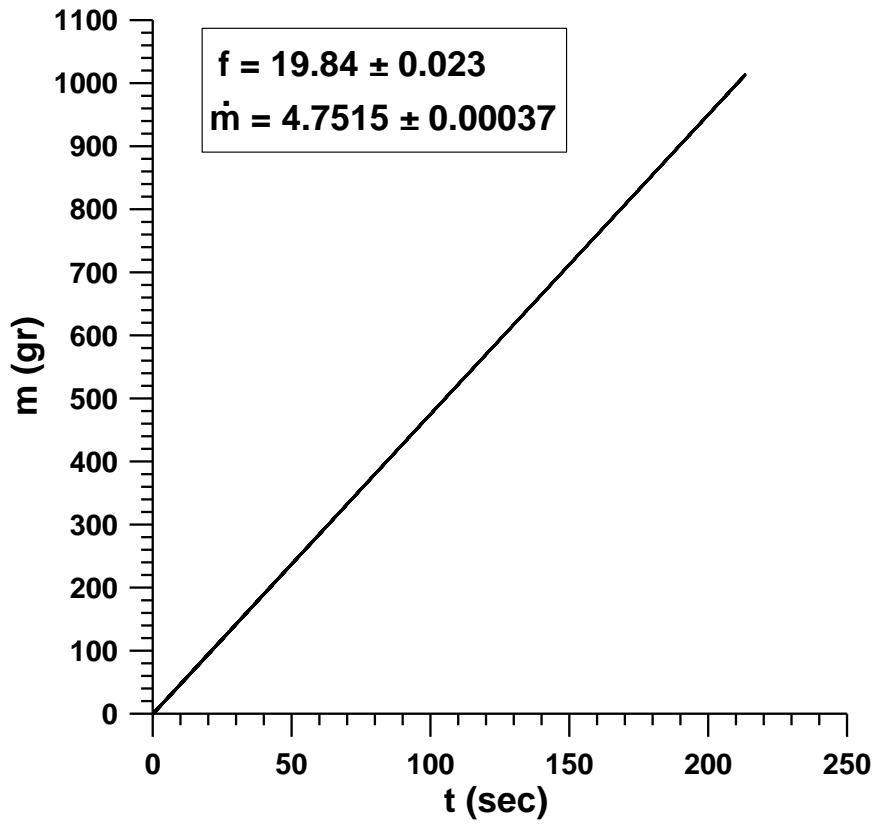


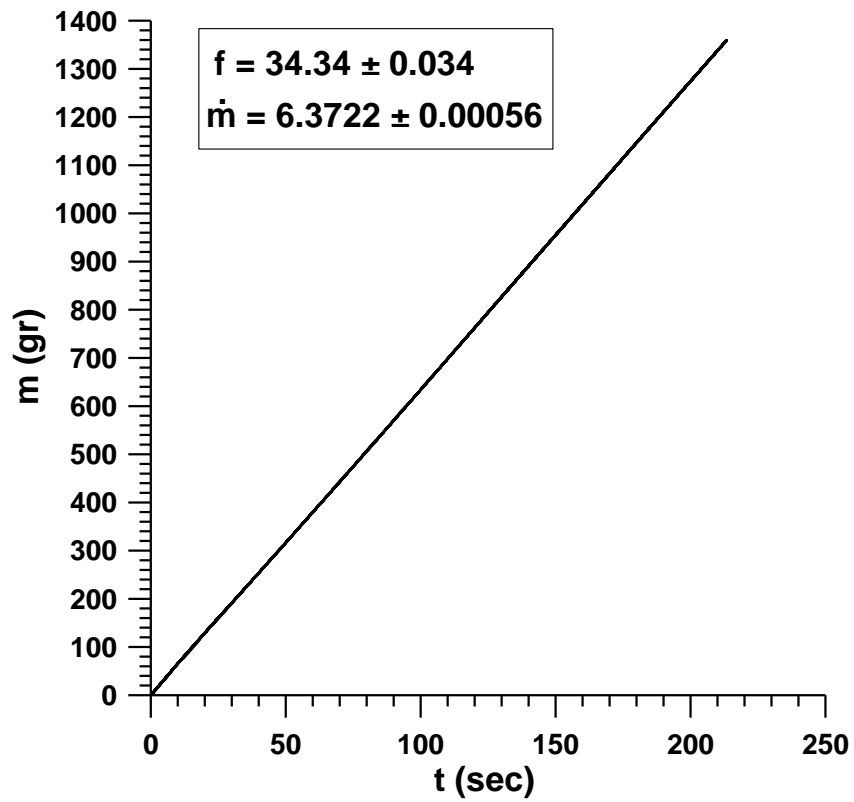
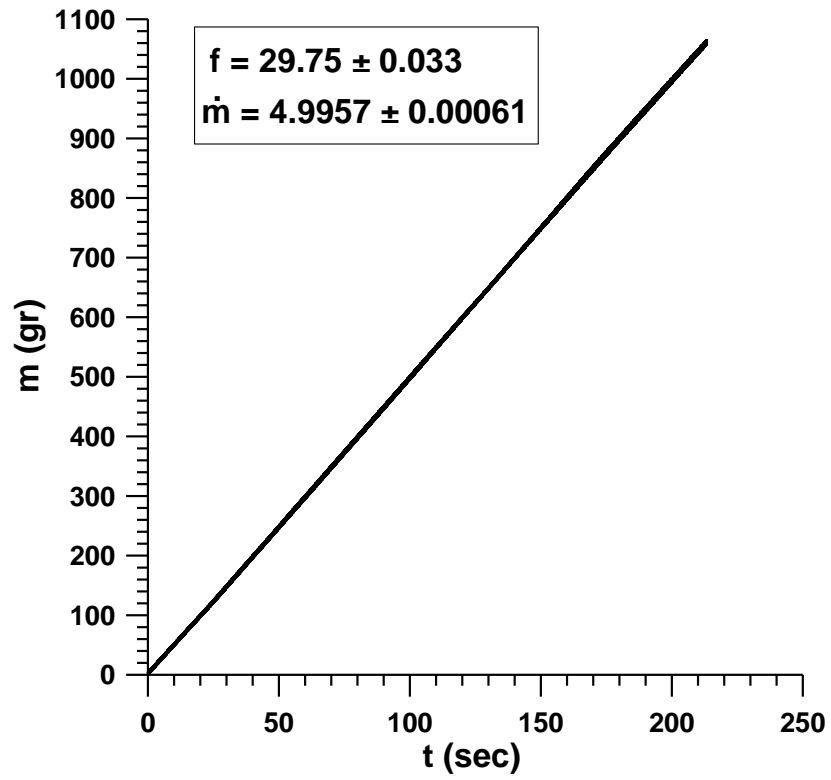
Διαγράμματα α' σειράς μετρήσεων



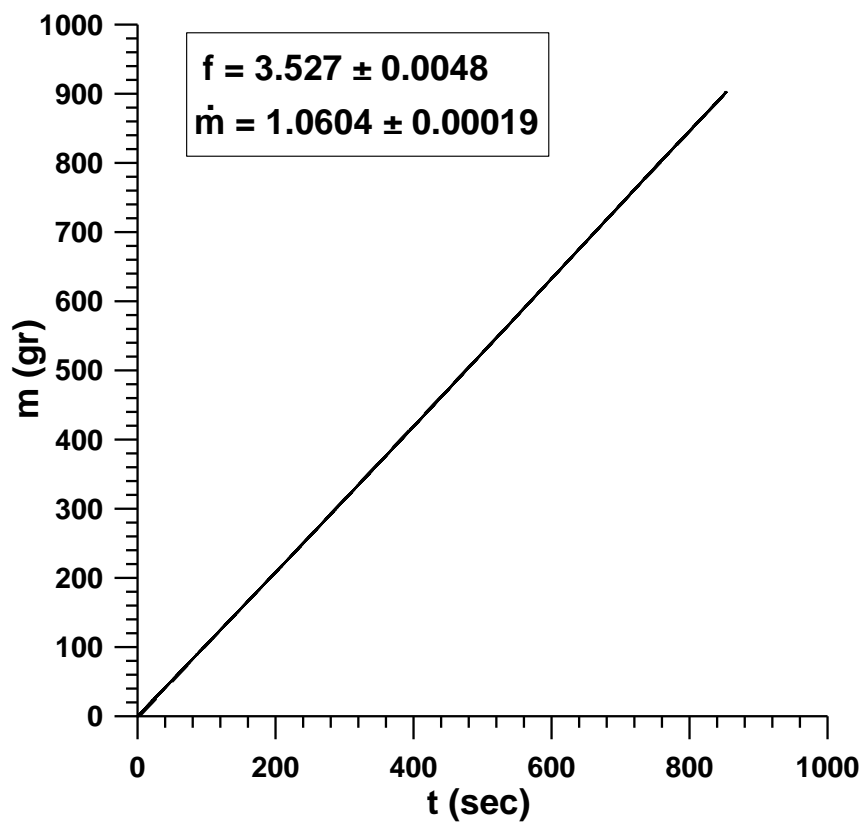
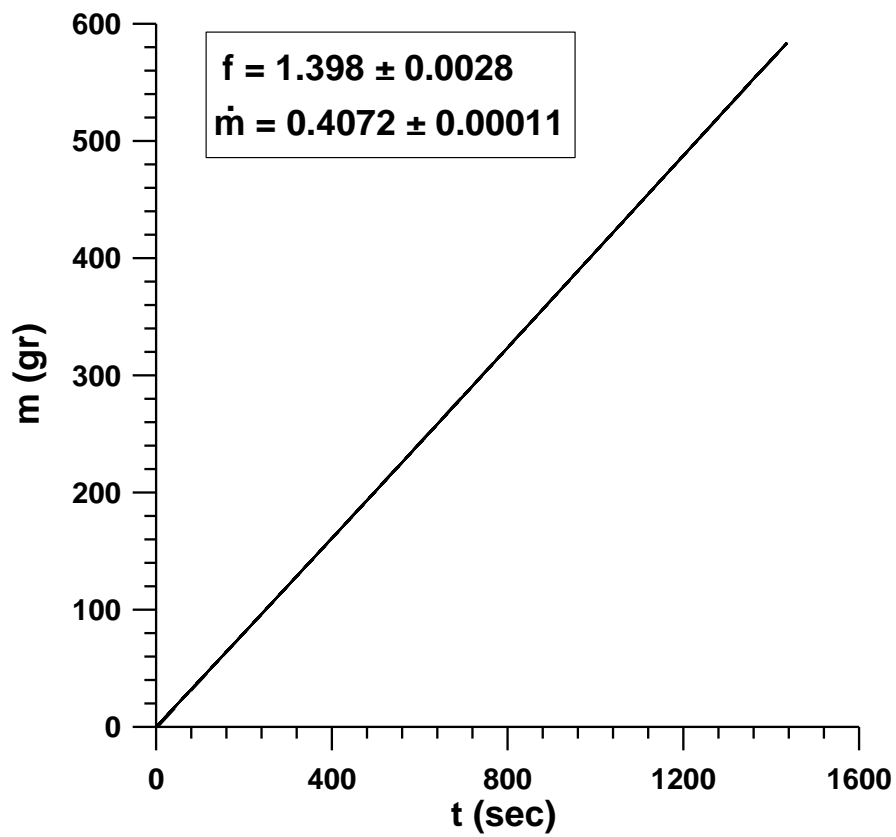


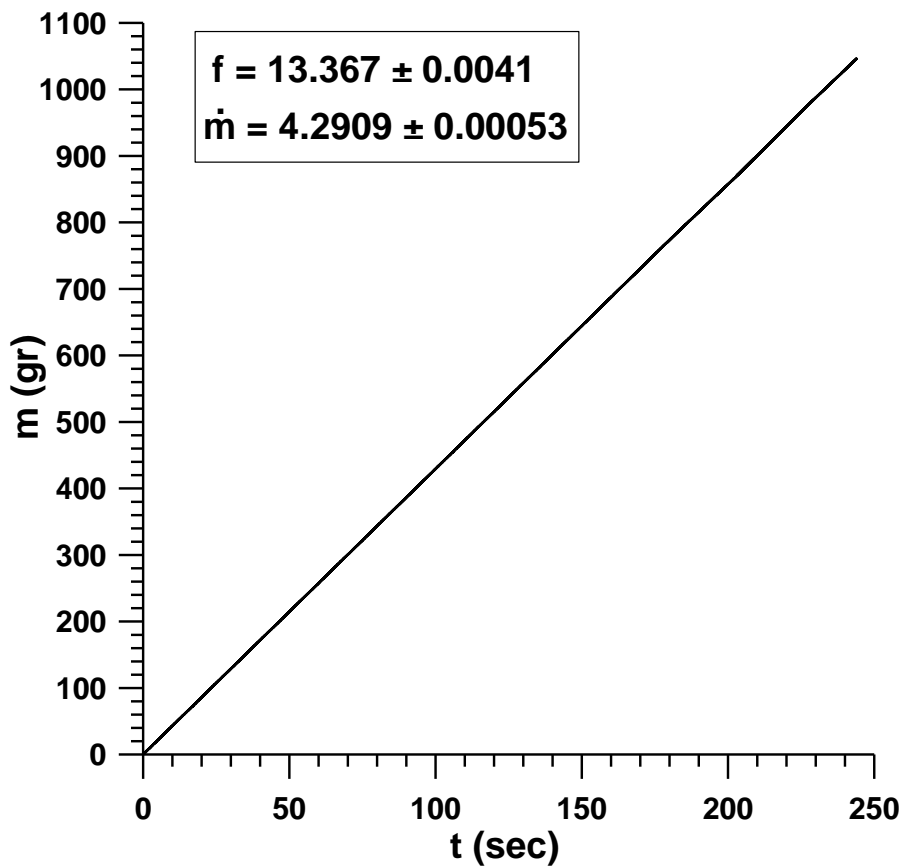
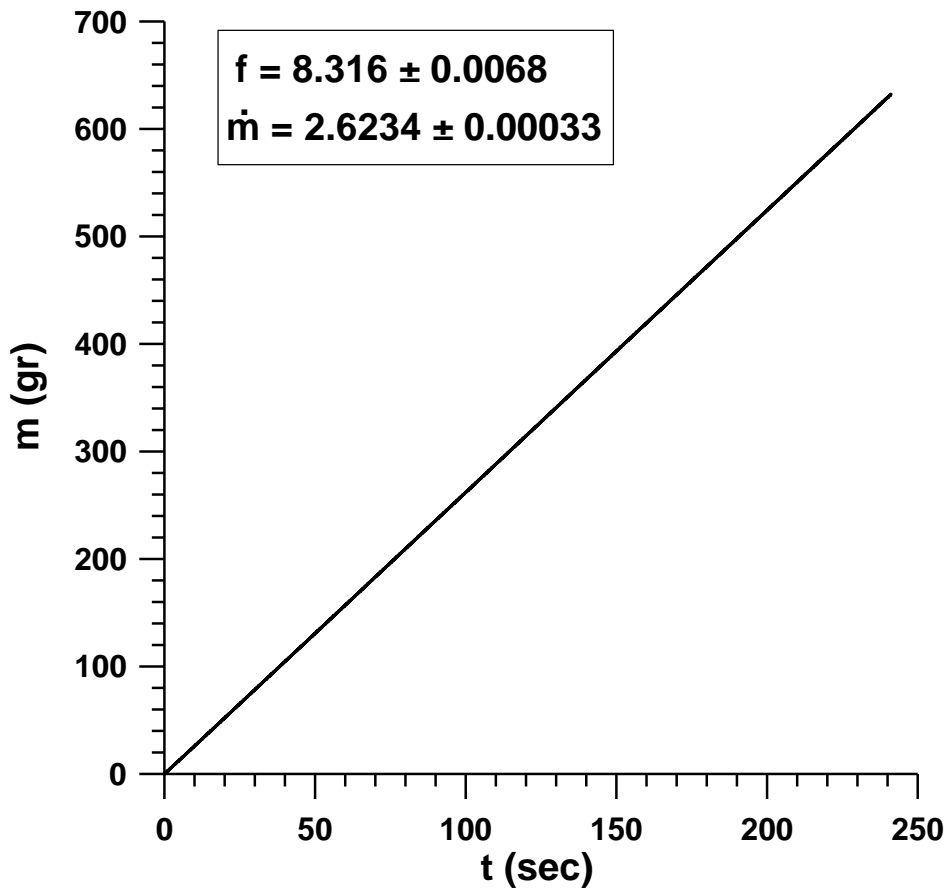


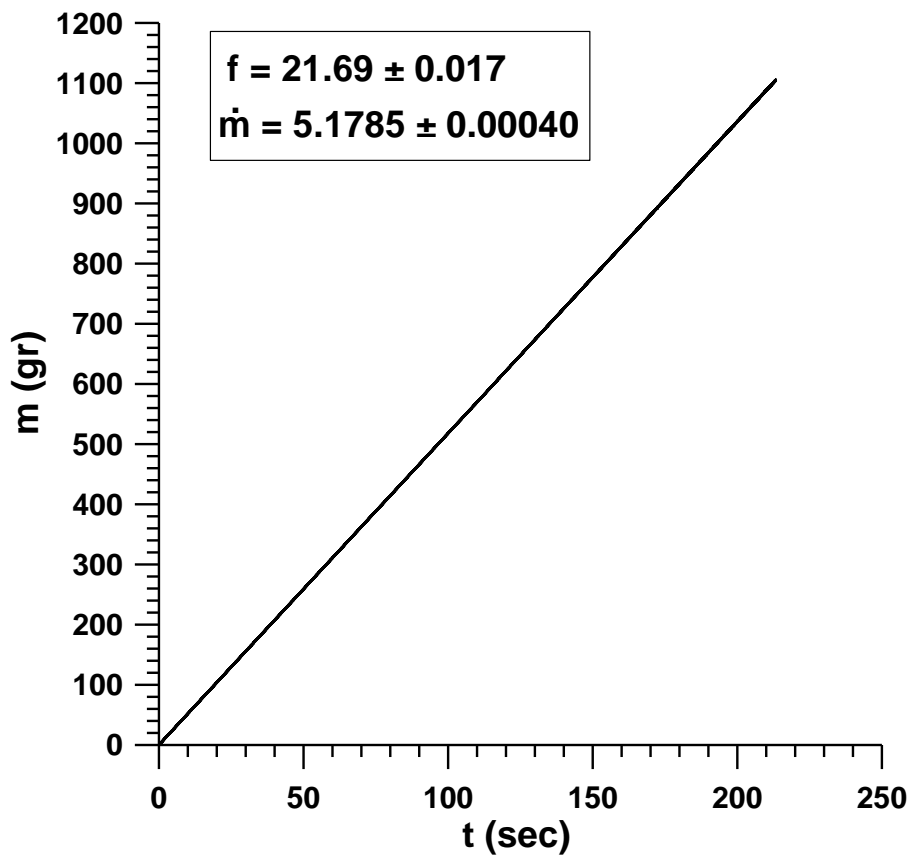
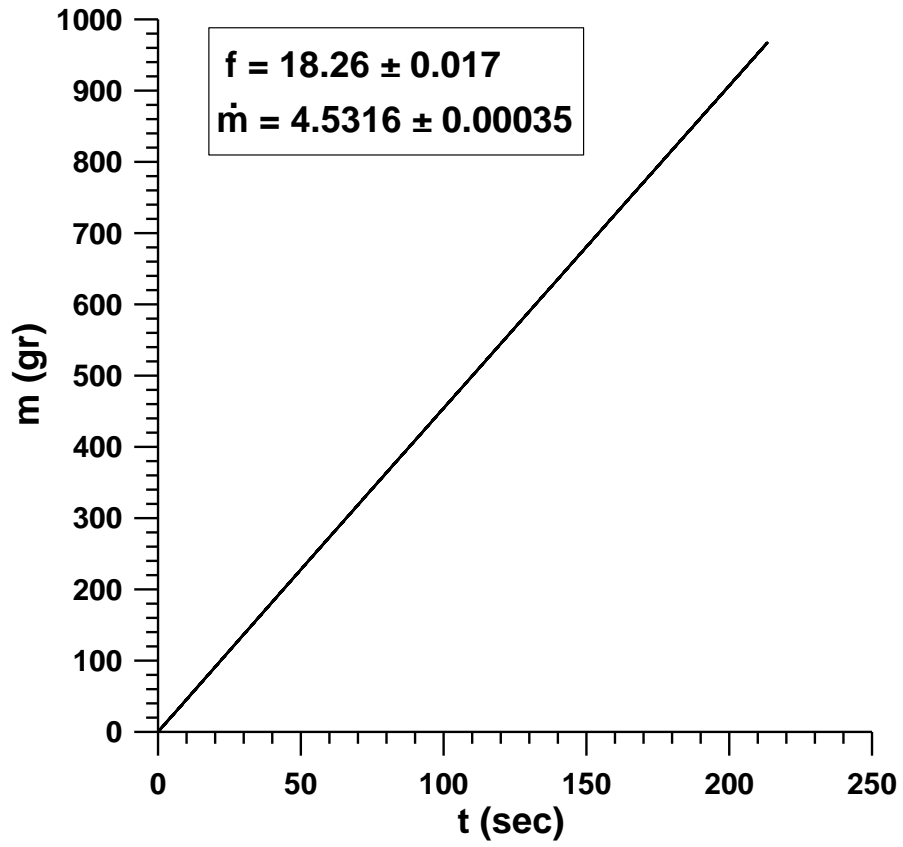


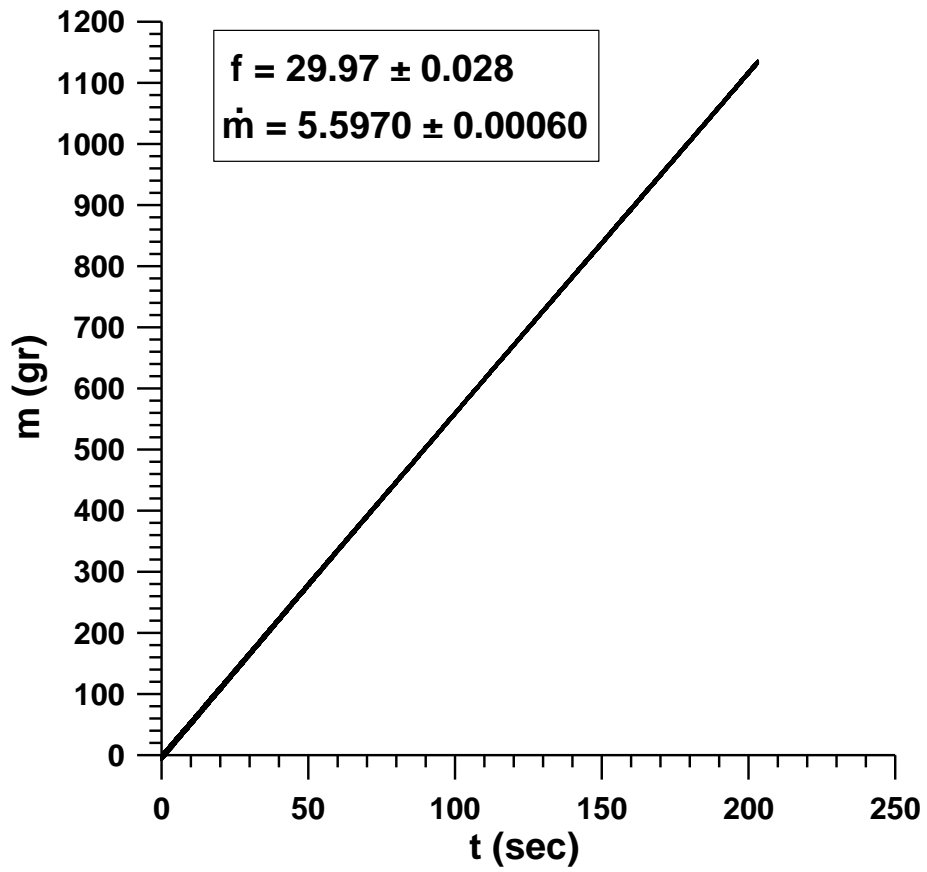
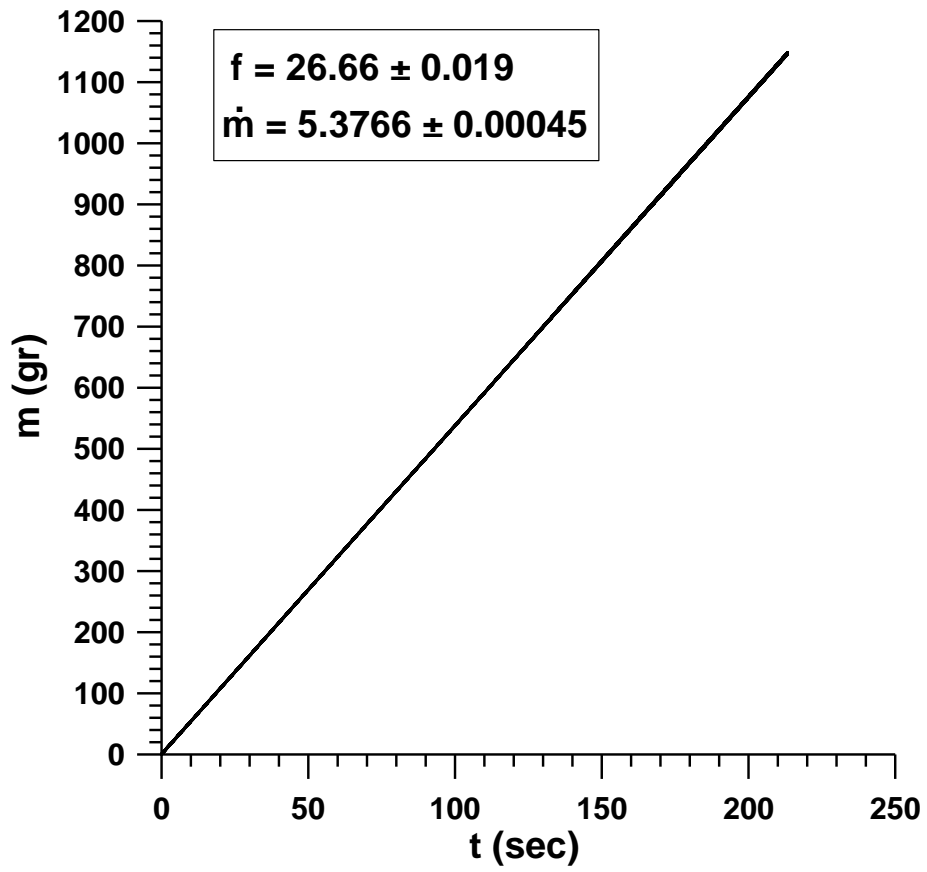


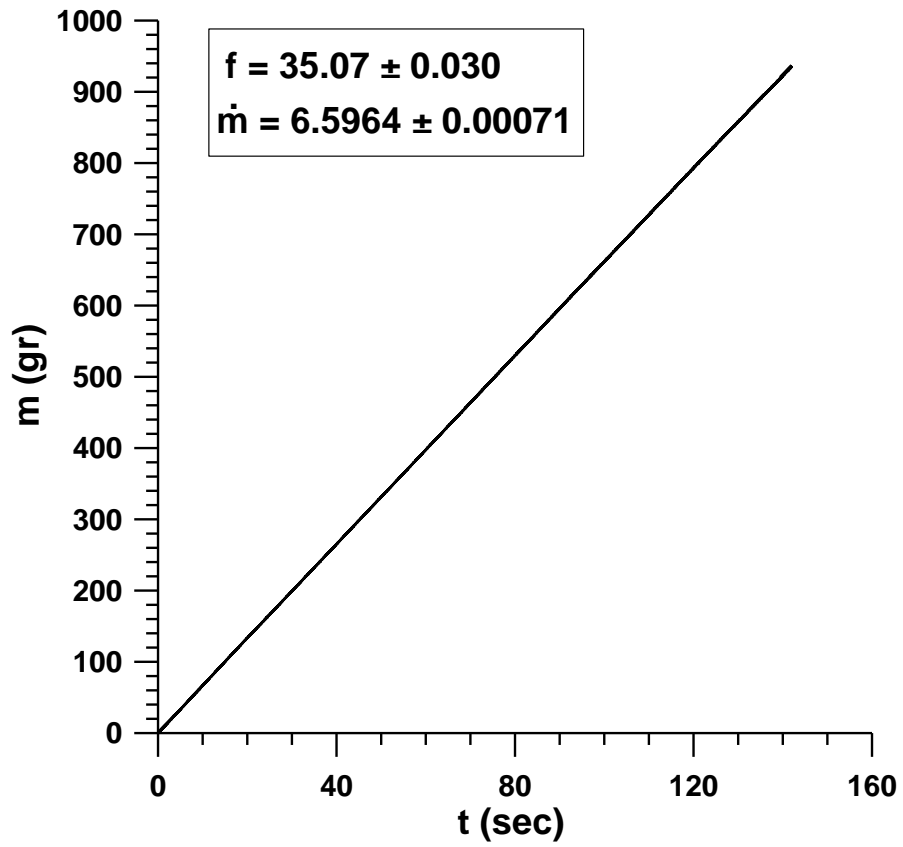
Διαγράμματα β' σειράς μετρήσεων











Διαγράμματα γ' σειράς μετρήσεων

II. Προγράμματα FORTRAN

II.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)
SUMAMM=SUMAMM+(AM-AMMED)*(AM-AMMED)
SUMAMD=SUMAMD+(AM-AMH)*(AM-AMH)/(AMH*AMH)
ENDDO
S2=SUMAMH/DFLOAT(NT-2)
SE=DSQRT(S2/(SUMT2-DFLOAT(NT)*TMED*TMED))
R2=SUMAMHM/SUMAMM
RMS=100.D+0*DSQRT(SUMAMD/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=',DENSM
WRITE(*,*) 'error density=',DDENS
WRITE(*,*) 'flow-rate=',VMED*60.D+0
WRITE(*,*) 'flow-rate error eV=',ERV*60.D+0
WRITE(*,*) '-----'
STOP
END

```

II.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
```

Π.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

```