

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική εργασία

Πειφαματικές δοκιμές πφότυπης πεφισταλτικής αντλίας δύο σταδίων έγχυσης για τον πφοσδιοφισμό της απόδοσής της

Κοντολάτης Ευστάθιος Αφ. Μητφώου: 02107001

Επιβλέπων Καθηγητής:Τσαγγάϱης Σωκϱάτης

Aθήνα 2014

Πϱόλογος

Η παρούσα διπλωματική έχει στόχο τον προσδιορισμό των καμπύλων έγχυσης πρότυπης περισταλτικής αντλίας δύο σταδίων έγχυσης καθώς και τη θεωρητική σύγκριση των μεγεθών έγχυσης και αναρρόφησης τριών περισταλτικών αντλιών μεταξύ τους, της προαναφερόμενης αντλίας, μιας κυματοειδούς περισταλτικής αντλίας και μιας ακόμα αντλίας δύο σταδίων έγχυσης με διαφορετικό σχεδιασμό από αυτόν της προηγούμενης. Αρχικά, γίνεται μια βιβλιογραφική μελέτη πάνω στις αρχές λειτουργίας αυτών των αντλιών, έπειτα συγκρίνονται θεωρητικά οι ποσότητες ρευστού που εγχύονται και αναρροφούνται σε κάθε μία από τις προαναφερόμενες αντλίες. Κατόπιν, προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα πειράματα συναρμολογείται η αντλία και διαμορφώνεται κατάλληλα η πειραματική διάταξη. Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων ώστε να εξαχθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη 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 στο μηχανουργείο της εταιρίας «ΕΟΝ κατασκευές».

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Θα ήθελα από αυτή τη θέση να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Σ. Τσαγγάρη για την ανάθεση της εργασίας καθώς και για τις γνώσεις που αποκόμισα από αυτόν, τόσο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, όσο και κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης των διαλέξεων μέσα στο αμφιθέατρο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Χρήστο Μανόπουλο για όλη την συμβολή του. Χωρίς αυτόν η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής θα ήταν αδύνατη. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ιωάννα Καναβέλη για την πολύτιμη βοήθειά της, καθώς επίσης τους φίλους μου και τον αδερφό μου Δημήτρη για την ανιδιοτελή προσφορά τους για την περάτωση αυτής της διπλωματικής.

Experimental testing of a two stage infusion prototype peristaltic pump for the determination of its efficiency

Abstract

This thesis aims to study experimentally a two-cycle prototype peristaltic pump and to compare it with the infusion of two other peristaltic pumps (a two-side pump and a wavy peristaltic pump). Firstly, there is a bibliographic study on the operational principles of these pumps and then a comparison of the theoretical quantity of the fluid injected and entered to each of them. A description of the experimental procedure follows together with a description of how the pump is assembled and the experiments carried out. Finally, in order to get all the necessary data we edited the measurements, created the characteristic curves of the pump and understood the function of the pump in a variety of frequencies. The experiments ran in the Laboratory of Biofluid understoy of Athens.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Π	EPIEX	OMENA	3
Π	EPIEX	OMENA EIKONΩN	4
1	KE	ΦΑΛΑΙΟ- ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ	8
	1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
	1.2	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	9
	1.3	ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	10
	1.3	1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ	10
	1.3	2 ЕМФРАЕН	10
	1.3	3 $\Pi APOXH MAZA\Sigma$	10
	1.4	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ	11
	1.5	ΔΙΧΡΟΝΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ	13
	1.6	ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ	20
	1.7	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ	26
	1.8	ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΑΛΙΑΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΟ	2N
	ΕΓΧΥ	ΣΗΣ	35
	1.8	1 ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΚΤΙΝΩΝ ΚΑΙ ΓΩΝΙΩΝ	35
	1.8	2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΜΒΑΔΟΥ ΚΑΙ ΓΩΝΙΩΝ	38
	1.8	3 ΣΧΕΣΕΙΣ ΟΓΚΟΥ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΓΩΝΙΩΝ	40
	1.8	4 ΣΧΕΣΕΙΣ ΟΓΚΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΓΩΝΙΩΝ	49
	1.9	ΕΓΧΎΣΗ ΚΑΙ ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ	55
	1.10	ΕΓΧΎΣΗ ΚΑΙ ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗΣ ΔΙΧΡΟΝΗΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ	ŦΣ
	ANT	ΜΑΣ	58
2	KE	ΦΑΛΑΙΟ– ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ	61
	2.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	61
	2.2	ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ	65
	2.3	ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ(CONTROLLE.	R),
	TAX	ΜΕΤΡΟ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΑ	66
	2.4	$\Delta \Upsilon NAMOK \Upsilon \Psi E \Lambda H (LOAD CELL), ANA \Lambda OI 1 KO- \Psi H \Phi I A KO$)Ľ
	META	ΑΤΡΟΠΕΑΣ(ADC) ΚΑΙ Η/Υ ΜΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	68
	2.5	ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ	71
	2.5	1 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ(FITTING) ΤΗΣ ΣΎΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΑΖΑΣ	71
	2.5	2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΟΡΙ ΑΝΩΝ(BIAS ERRORS)	72
	2.5	3 ΤΥΧΑΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ	76
	2.5	4 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕ $\overline{\Sigma}_{0}$	ЭН
~			0.4
3	KE	ΡΑΛΑΙΟ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	84
	3.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	84
л	3.2 VE	ΤΙΕΙΥΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΙ ΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	91 20
4	KE	ΨΑΛΑΙΟ - ΔΙΝΠΙΕΥΑΣΜΑΙΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΙ Σ20ΝΟΝΗ Ι ΚΕΦΑΛΑΙΟΣ, ΓΕΝΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ	20
	4.1	L I INUΨΠ ΚΕΨΑΛΑΙΟ I - I ΕΙΝΙΚΑ L λυλιΑ I	20
	4.Z	L 11 ΚΓ1 L Π ΔΙΑΡΟΙΝΠ L ΑΙΝΤΛΙΑΣ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΤΥΠΕΣ	21
_	4.3 DIF	$\Delta ICEP = I N \Pi \angle \Pi I \Pi \angle I PANINIIKH \angle \angle I NII IEPI \Psi O PA \angle I H \angle A N I A IA \angle \dots \square I$	22
Э	DIF	ΛΙŲΙ ΓΑΨΙΑΙ	20

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-2Γραμμική περισταλτική αντλία......11 Εικόνα 1-3 Προοπτική απεικόνιση του μηχανισμού άντλησης όπου απεικονίζεται ο συνδετικός μηχανισμός οδήγησης των εμβόλων της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας. Διακρίνονται κυρίως, ο εκκεντροφόρος άξονας (26), τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36) του εκκεντροφόρου άξονα, τα έμβολα-δάχτυλα (46), (48), (50) και (52) των έκκεντρων και ο εύκαμπτος αγωνός (16), [Hyman et al, 1993]......14 Εικόνα 1-4 Πλάγια όψη συνδετικού μηχανισμού οδήγησης εμβόλου της βαλβίδας εισόδου (πάνω) στην άνω ακραία θέση (αποσυμπίεση του εύκαμπτου αγωγού) και (κάτω) στην κάτω ακραία θέση (πλήρους έμφραξης του εύκαμπτου αγωγού). Διακρίνονται κυρίως, το έκκεντρο (30), ο σύνδεσμος οδήγησης (διωστήρας) (58) και το δάχτυλο-βαλβίδα (46), [Hyman et al, 1993]. Εικόνα 1-5(πάνω) Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας. (κάτω) Γραφική παράσταση των θέσεων των εμβόλων με το χρόνο λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας για δύο περιόδους. Διακρίνεται η κίνηση των εμβόλων (46), (48), (50) και (52) μέσω των καμπυλών (47), (49), (51) Εικόνα 1-6 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας μίας παραλλαγής της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας, όπου τα δάχτυλα (48) και (52) είναι του ιδίου μεγέθους, [Hyman & Moubayd, 1993]......20 Εικόνα 1-7Πλάγια όψη μηχανισμού άντλησης κυματοειδούς συμπίεσης γραμμικής περισταλτικής αντλίας, όπου διακρίνονται, τα έκκεντρα του εκκεντροφόρου άξονα (30), οι ακόλουθοι (11) των έκκεντρων με τα ρουλεμάν τους (10) και ο εύκαμπτος αγωγός (16)......21 Εικόνα 1-8 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)......22 Εικόνα 1-9Πλάγια όψη των ενδιάμεσων έκκεντρων. Διακρίνεται η μέγιστη ακτίνα R2 στο σημείο πλήρους εμβολισμού και η ελάχιστη R6 στο σημείο πλήρους αποσυμπίεσης......23 Εικόνα 1-10Πλάγια όψη του διορθωτικού έκκεντρου (30g) "wrap cycle". Διακρίνονται η μέγιστη ακτίνα καμπυλότητας Rmax στο σημείο πλήρους εμβολισμού και η ελάχιστη Rmin στο σημείο πλήρους απόφραξης......24 Εικόνα 1-12 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 Εικόνα 1-13(α) Αδιάστατη χρονική συνάρτηση κατακόρυφης μετατόπισης y/ymax μέχρι του σημείου που εφάπτεται με τον εύκαμπτο αγωγό. (β) Αδιάστατη χρονική συνάρτηση της εγκάρσιας διατομής A/Amax του εύκαμπτου αγωγού που η κατακόρυφη μετατόπιση Εικόνα 1-15 Μηχανισμός μετάδοσης κίνησης του έκκεντρου 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

Εικόνα 1-16Παραμόρφωση του εύκαμπτου αγωγού από το δάκτυλο
Εικόνα 1-17Συναρτήσεις rε(φ) των εκκέντρων της πρότυπης δίχρονης γραμμικής
πε ρισταλτικής αντλίας σε ένα κύκλο διέγερσης και αντίστοιχη γεωμετ ρία των εκκέντρων με
βάση τον προτεινόμενο σχεδιασμό
Εικόνα 1-18Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0
Εικόνα 1-19 Σχηματική παφάσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.01131431667T
Εικόνα 1-20Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.0807587611T
Εικόνα 1-21Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.3585365389T
Εικόνα 1-22Σχηματική παφάσταση του πφοφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χφονική στιγμή
t=0.4279809833T
Εικόνα 1-23 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.4392953T
Εικόνα 1-24Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.5113143167T
Εικόνα 1-25Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.9279809833T
Εικόνα 1-26Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=T
Εικόνα 1-27Σχηματική παράσταση της έγχυσης της δίχρονης αντλίας κατά τη διάρκεια μιας
περιόδου
Εικόνα 1-28Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.5505227186T
Εικόνα 1-29Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.59464765T
Εικόνα 1-30Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.6156757975T
Εικόνα 1-31Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.655643914T
Εικόνα 1-32Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.8236195025T
Εικόνα 1-33Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή
t=0.8887725814T
Εικόνα 1-34Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=T
Εικόνα 1-35Σχηματική παράσταση της εισόδου της δίχρονης αντλίας κατά τη διάρκεια μιας
περιόδου
Εικόνα 1-36Συναρτήσεις rε(φ) των εκκέντρων της κυματοειδούς γραμμικής περισταλτικής
αντλίας σε ένα κύκλο διέγερσης
Εικόνα 1-37Σχηματική παράσταση της έγχυσης της κυματοειδούς αντλίας κατά τη διάρκεια
μιας περιόδου
Εικόνα 1-38Σχηματική παράσταση της εισόδου της κυματοειδούς αντλίας κατά τη διάρκεια
μιας περιόδου
Εικόνα 1-39Συναρτήσεις rε(φ) των εκκέντρων της εξεταζόμενης δίχρονης γραμμικής
περισταλτικής αντλίας σε ένα κύκλο δι έγερσης58

Εικόνα 1-40Σχηματική παράσταση της έγχυσης της εξεταζόμενης δίχρονης αντλίας κατά τη
διάρκεια μιας περιόδου
Εικονα 1-41Σχηματικη παρασταση της εισοδου της εξεταζομενης διχρονης αντλιας κατά τη
Εικόνα 2-1 Πειξαματική σιαταζή
$\pi_{\text{SOLUTA}} = \pi_{\text{SOLUTA}} \pi_{\text{SOLUTA}} = \pi_{\text{SOLUTA}$
F_{i} κόνα 2-3 Μέου της πειοαματικής διάταξης: τορφοδοτική δεξαμενή και δεξαμενή
α γαρορόφησης (α), δεξαμενή κατάθλιψης (β), κινητήρας και controller (γ), περισταλτική
αντλία (δ)
Εικόνα 2-4(α) Ηλεκτροκινητήρες με μειωτήρα στροφών και ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης.
(β) Ηλεκτροκινητήρας χωρίς μειωτήρα στροφών και οπτικό ταχύμετρο
Εικόνα 2-5 Controller του κινητήξα67
Εικόνα 2-6 Ταχύμετρο
Εικόνα 2-7Δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης (μήκος πλατφόρμας:
2a = 200 mm, μήκος καμπτομένης δοκού: 2b = 130 mm)68
Εικόνα 2-8Αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (α) και τροφοδοτικό (β)70
Εικόνα 2-9 Καμπύλη βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης74
Εικόνα 2-10Μεταβολή της πυκνότητας του νεφού με τη θεφμοκφασία στο διάστημα από 17οC
μέχοι 31oC και για ατμοσφαιοική πίεση 101325Pa [Tanaka et al, 2001]82
Εικόνα 3-1Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας-χρόνου για διάφορες συχνότητες του κινητήρα
χαμηλών στροφών105
Εικόνα 3-2Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας-χρόνου για διάφορες συχνότητες του κινητήρα
μεσαίων στροφών
Εικόνα 3-3 Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας-χρόνου για διάφορες συχνότητες κάτω από 11 Hz
του κινητήρα υψηλών στροφών
Εικόνα 3-4Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας-χρόνου για διάφορες συχνότητες άνω των 11 Hz
του κινητηρα υψηλων στροφων
Εικονα 3-5 Διαγραμμα εγχυομενης μαζας-χρονου-συχνοτητας της πρωτης σειρας μετρησεων
Εικόνα 3-6Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για ολόκληρη
την πρώτη σειρά μετρήσεων από τα 0.003020 Hz έως 35.94Hz
Εικόνα 3-7Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον
κινητήρα χαμηλών στροφών από τα 0.003020 Hz έως 0.07887 Hz109
Εικόνα 3-8Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον
κινητήρα μεσαίων στροφών ως τα 1.213 Hz110
Εικόνα 3-9Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον
κινητήρα υψηλών στροφών, β' σειρά μετρήσεων, από τα 1.213 Hz έως 35.68 Hz110
Εικόνα 3-10Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον
κινητήρα υψηλών στροφών, γ' σειρά μετρήσεων, από τα 1.213 Hz έως 35.58 Hz111
Εικόνα 3-11Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της συχνότητας σε όλο το φάσμα
συχνοτήτων των τριών σειρών μέτρησης, πρώτο επίπεδο σφάλματος
Εικόνα 3-12Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της συχνότητας στον κινητήρα
χαμηλών στοοφών, πρώτο επίπεδο σφάλματος112
Εικόνα 3-13Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της συχνότητας στον κινητήρα
μεσαίων στροφών, πρώτο επίπεδο σφάλματος112
Εικόνα 3-14Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της παροχής μάζας σε όλο το
φάσμα συχνοτήτων των τριών σειρών μέτρησης, πρώτο επίπεδο σφάλματος113

Εικόνα 3-15 Διάγ ραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της παροχής μάζας στον κινητήρα
χαμηλών στροφών, πρώτο επίπεδο σφάλματος114
Εικόνα 3-16Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της παροχής μάζας στον κινητήρα
μεσαίων στροφών, πρώτο επίπεδο σφάλματος114
Εικόνα 3-17Διάγραμμα κατανομής μέσης τετραγωνικής απόκλισης RMS παροχής μάζας σε
όλο το φάσμα συχνοτήτων των τριών σειρών μέτρησης
Εικόνα 3-18Διάγραμμα 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 συχνότητα116
Εικόνα 3-19Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος παροχής όγκου α', β', γ' επιπέδου
σφάλματος για όλο το φάσμα συχνοτήτων117
Εικόνα 3-20Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος παροχής όγκου α' και β' επιπέδου
σφάλματος στον κινητήρα χαμηλών στροφών117
Εικόνα 3-21Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος παροχής όγκου α' και β' επιπέδου
σφάλματος στον κινητήρα μεσαίων στροφών
Εικόνα 3-22Το πολυώνυμο 10ου βαθμού (συνεχής γραμμή) που προσεγγίζει την πειραματική
καμπυλη
Εικονα 4-1 Συγκριση χαρακτηριστικης διχρονης αντλιας με αλλες που έχουν δοκιμαστεί στο
εργαστήριο
Εικόνα 4-2 Στιγμιότυπο της αντλίας στη συχνότητα 0.06669 Hz123
Εικόνα 4-3Σύγκριση περιόδων κυματοειδούς, παλιάς δίχρονης αντλία και της εξεταζόμενης
δίχοονης για τα 0.0631 Hz, 0.0610 Hz και 0.06669 αντίστοιχα124

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ- ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η κατασκευή προτύπου περισταλτικής αντλίας, δυο σταδίων έγχυσης, και συναρμολόγηση πειραματικής διάταξης για την διεξαγωγή πειραμάτων μέσω αυτής και την εύρεση των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας της αντλίας. 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 συμπιέζεται, «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 περίσταλση και χρησιμοποιείται σε πολλά βιολογικά συστήματα όπως ο γαστρεντερικός σωλήνας. Ανακαλύφθηκε από τον καρδιοχειρούργο 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 όπως προαναφέρθηκε, 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 4ης 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 Do του σωλήνα πριν τη διέγερση και το πλάτος διέγερσης Ab 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

παφοχή ως συνάφτηση της συχνότητας και του μήκους κύματος, οπότε υπολογίζονται οι χαφακτηφιστικές καμπύλες λειτουφγίας. Οι αφνητικές τιμές της παφοχής που εμφανίζονται στα αντίστοιχα διαγφάμματα δηλώνουν την οπισθοφφοή (back-flow) του φευστού που υπάφχει αντίθετα με την κατεύθυνση της ταχύτητας του κύματος μεταβολής της διατομής του σωλήνα. Η οπισθοφφοή οφείλεται στο ότι η συνάφτηση της διατομής δεν μποφεί να πάφει την τιμή μηδέν, επομένως δεν μποφεί να επιτευχθεί κατάσταση πλήφους έμφφαξης (deepocclusion) στο σωλήνα και συνεπώς εξάλειψη της οπισθοφφοής. Ο μηδενισμός της συνάφτησης διατομής είναι απαγοφευτικός στο μοντέλο λόγω της εμφάνισής της σε παφονομαστές μεταβλητών συντελεστών. Η οπισθοφφοή εξαλείφεται, βέβαια, καθώς αυξάνεται η συχνότητα, ενώ αυτό μποφεί να γίνει και για χαμηλές συχνότητες με την εισαγωγή συνιστώσας πφοσομοίωσης της συφφίκνωσης του σωλήνα ως τοπική απώλεια για τη φοή του φευστού. Πάντως ποσοτικά αυτή η ελάχιστη οπισθοφφοή δεν έχει πφακτικά επίδφαση 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:

- Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα διέγερσης, για ένα σταθερό μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση παροχή.
- 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.
- Όσο λιγότερες οι συρρικνώσεις μέσα στην περιοχή της διέγερσης, τόσο μεγαλύτερη η μέση παροχή.

1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι πεφισταλτικές αντλίες χφησιμοποιούνται συνηθέστεφα για την άντληση αποστειφωμένων φευστών επειδή το φευστό δεν έφχεται σε επαφή με μηχανικά μέφη της αντλίας ούτε είναι εκτεθειμένο στο πεφιβάλλον, συνεπώς δεν μποφεί να πφοκύψει μόλυνση του. Κάποιες εφαφμογές πεφιλαμβάνουν έγχυση φευστών ενδοφλεβίως, επιθετικές χημικές ουσίες, πολτοποιημένα στεφεά και άλλα υλικά στα οποία η απομόνωση του πφοϊόντος από το πεφιβάλλον και του πεφιβάλλοντος από το πφοϊόν είναι ζωτικής σημασίας. Επιπλέον χφησιμοποιείται σε καφδιοπνευμονικές μηχανές για την εξωσωματική κυκλοφοφία του αίματος κατά την διάφκεια ενός χειφουφγείου παφάκαμψης (bypass) αφού η αντλία δεν πφοκαλεί σημαντική αιμόλυση καθώς επίσης και κατά την άντληση της τφοφής για παφεντεφική σίτιση και τη δοσιμετφική χοφήγηση υγφών φαφμάκων σε πεφιπτώσεις αναισθησίας και ελέγχου του πόνου ενός ασθενή με βαφιά νοσήματα. Ακόμα παφαλλαγές των πεφισταλτικών αντλιών βφίσκουν εφαφμογή σε μηχανές αιμοκάθαφσης, καθαφισμό λυμάτων, σε πειφάματα χημείας, στην γεωφγία, στην παφασκευή των τφοφίμων, στις κατασκευές μέσω άντλησης τσιμέντου και στην παφαγωγή φαφμακευτικών πφοϊόντων.

1.3 ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

1.3.1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ

Το φευστό που αντλείται έφχεται σε επαφή μόνο με το εσωτεφικό του σωλήνα ελαττώνοντας έτσι τους φόβους για ασυμβατότητα του φευστού με τα έμβολα, τα φουλεμάν ή οποιοδήποτε άλλο κομμάτι. Επομένως μόνο η σύσταση του σωλήνα μας ενδιαφέφει από άποψη χημικής συμβατότητας με το φευστό.

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.

1.3.2 ЕМФРАЕН

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 όφος έμφφαξη (occlusion) χφησιμοποιείται για την μέτφηση της συμπίεσης. Άλλοτε εκφφάζεται ως ποσοστό % του διπλασιασμένου πάχους τοιχώματος, και άλλοτε ως απόλυτη τιμή του πάχους του τοίχου που συμπιέζεται. Επομένως για μια συγκεκφιμένη αντλία, η πιο σημαντική παφάμετφος του σωλήνα, γίνεται το πάχος του σωλήνα. Ενδιαφέφον παφουσιάζει το γεγονός πως η εσωτεφική διάμετφος του κινητήφα δεν αντιπφοσωπεύει μια σημαντική σχεδιαστική παφάμετφο για την καταλληλότητα του σωλήνα για την αντλία. Για αυτόν τον λόγο, είναι σύνηθες να χφησιμοποιούνται σωλήνες με διαφοφετικές εσωτεφικές διαμέτφους για την αντλία, εφόσον το πάχος του τοιχώματος παφαμένει σταθεφό. Αξίζει να αναφεφθεί ότι για δεδομένες rpm του κινητήφα, ένας σωλήνας με μεγαλύτεφη εσωτεφική διάμετφο δίνει μεγαλύτεφη παφοχή από ότι ένας με μικφότεφη διάμετφο. Η έμφφαξη είναι συνήθως κοντά στο 10-20% με μεγαλύτεφη έμφφαξη για έναν πιο μαλακό σωλήνα και μικφότεφη έμφφαξη για πιο σκληφό σωλήνα.

1.3.3 ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ

Η παφοχή μάζας αποτελεί το κυφιότεφο χαφακτηφιστικό της αντλίας. Η παφοχή μάζας σε μία πεφισταλτική αντλία εξαφτάται από τους εξής παφάγοντες:

- 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

1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ

Με την πάφοδο των χφόνων έχουν εξελιχθεί πολλές πεφισταλτικές αντλίες «μη διαβφεχόμενου» τύπου για έγχυση ιατφικών διαλυμάτων σε ασθενείς. Όμως, οι δυο επικφατέστεφες κατηγοφίες πεφισταλτικών αντλιών είναι οι στφεφόμενων έκκεντφων (εικόνα 1-1) και οι γφαμμικές (εικόνα 1-2).



Εικόνα 1-1 Τύποι περισταλτικών αντλιών, στρεφόμενων εκκέντρων (α) και (β)



Εικόνα 1-2Γραμμική περισταλτική αντλία

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 αλλά και περισσότερα ή και ένα μόνο), 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 φευστό έρχεται σε επαφή μόνο με την εσωτερική επιφάνεια της σωλήνωσης, οπότε δεν μολύνεται από το μηχανισμό της αντλίας. Αυτοί οι τύποι αντλιών απαντώνται συνήθως στις ιατρικές εφαρμογές όσο αφορά στη διανομή τροφής και φαρμάκων σε ασθενείς, στην εξωτερική κυκλοφορία του αίματος κατά τη διάρκεια εγχείρησης ανοιχτής καρδιάς και στην εξέλιξη των φαρμακευτικών προϊόντων.

Με σκοπό τη σωστή λειτουργία, η σωλήνωση σε μια περισταλτική αντλία στρεφόμενων έκκεντρων πρέπει να συμπιέζεται πλήρως για να εξασφαλίζει επαρκές κενό πίεσης στην πλευρά εισόδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων λόγω κάμψης των τοιχωμάτων της σωλήνωσης που διπλώνονται, με την εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος να βρίσκεται σε συμπίεση και την εξωτερική επιφάνεια να βρίσκεται σε εφελκυσμό. Αυτές οι τάσεις κατά μήκος του τοιχώματος της σωλήνωσης μπορούν τελικά να οδηγήσουν σε αστοχία του σωλήνα, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του σωλήνα, το βαθμό της συμπίεσης ή της έμφραξης του σωλήνα, την ταχύτητα του στροφέα και τα χαρακτηριστικά των υλικών. Έτσι, μετά από την πάροδο λειτουργίας κάποιου χρονικού διαστήματος, εμφανίζεται μόνιμη πλαστική παραμόρφωση στη διατομή του σωλήνα, με αποτέλεσμα το μετασχηματισμό της αρχικά κυκλικής διατομής σε ελλειπτική πράγμα το οποίο επιδρά στο ρυθμό έγχυσης του ρευστού. Επίσης οι περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων έχουν σχετικά μικρή απόδοση και επιβάλλουν εντατικό πεδίο υψηλών διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων στο σύστημα σωλήνωσης.

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

Επιπλέον, με σκοπό να εξομαλυνθεί η μεταβολή της παφοχής από έναν κύκλο στον επόμενο, μεφικές γφαμμικές πεφισταλτικές αντλίες έχουν αυτό που λέγεται "wrap cycle" διοφθωτικό έμβολο (δάκτυλο). Οι πεφισσότεφες γφαμμικές πεφισταλτικές αντλίες χφησιμοποιούν πολλά έμβολα για να μικφύνουν τον χφόνο λειτουφγίας του διοφθωτικού εμβόλου (δακτύλου). Όμως, πφοσπαθώντας να διατηφηθεί η κατάλληλη ευθυγφάμμιση και η σχετική κίνηση μεταξύ των πολλών εμβόλων, επιδεινώνεται η αξιοπιστία της λειτουφγίας της συσκευής και αυξάνεται το κατασκευαστικό κόστος.

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

Επιπλέον η παρουσία αέρα στο σύστημα κατά τη μετάγγιση του ρευστού φαρμάκου στη γραμμή του ασθενούς, όταν η περισταλτική αντλία εργάζεται συνεχώς χωρίς η ροή του ρευστού να σταματά, αποτελεί επίσης μειονέκτημα. Σε αυτή την περίπτωση είναι μόνιμα συνδεδεμένα σε σειρά με την γραμμή του ασθενούς ένα φίλτρο εξάλειψης αέρα και μια βαλβίδα αντεπιστροφής.

1.5 ΔΙΧΡΟΝΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ

Τα μέφη που συνθέτουν το μηχανισμό άντλησης μίας δίχφονης γφαμμικής πεφισταλτικής αντλίας απεικονίζονται στην εικόνα 1-3, όπου διακφίνεται ο φοφέας (22) ο οποίος φέφνει επίπεδη πλάκα (24) ως βάση για τον εύκαμπτο αγωγό. Η πλάκα (24) εξασφαλίζει την επιφάνεια πάνω στην οποία βφίσκεται το τμήμα (18) (φαίνεται με διακεκομμένη γφαμμή) του εύκαμπτου αγωγού (16) και έτσι μποφεί να συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται από τις βαλβίδες και τα δάχτυλα.

Στο φοφέα (22) είναι μονταφισμένος ένας πεφιστφεφόμενος άξονας (26), ο οποίος οδηγείται από κινητήφα (δεν απεικονίζεται στην εικόνα 1-3), που συμπλέκεται με το γφανάζι (28). Ο άξονας (26) πεφιλαμβάνει τα έκκεντφα (30), (32), (34) και (36), τα οποία συνεφγάζονται με τους αντίστοιχους συνδέσμους [στο σχήμα 1-3 φαίνεται μόνο ο σύνδεσμος (44) που συνδέεται με το έκκεντφο (36)]. Τα έκκεντφα μετατοπίζουν τους συνδέσμους και κατά συνέπεια μετατοπίζονται τα έμβολα-δάχτυλα (46), (48), (50) και (52) σε διεύθυνση κάθετη από αυτή των συνδέσμων, ενώ χφησιμοποιούνται κατάλληλοι μηχανισμοί οδήγησης για τα έμβολα (46), (48), (50) και (52).

Τα τέσσερα έμβολα (46), (48), (50) και (52) είναι παλινδρομικά και κατάλληλα μονταρισμένα στο φορέα (22) για να κινούνται προς και από τη πλάκα (24), αποσυμπιέζοντας και

συμπιέζοντας το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού (16). Με σκοπό να προστατεύεται το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού και να συγκρατούνται σκόνες και άλλα ανεπιθύμητα υλικά, παραγόμενα από τα κινούμενα εσωτερικά μέρη της περισταλτικής αντλίας, μία εύκαμπτη μεμβράνη (δεν απεικονίζεται στην εικόνα 1-3) μπορεί να τοποθετηθεί στο φορέα (22) μεταξύ των δάχτυλων (46), (48), (50), (52) και του συμπιεζόμενου τμήματος (18) του εύκαμπτου αγωγού. Κάθε δάχτυλο (46), (48), (50) και (52) μπορεί να κινηθεί μεταξύ ενός ανώτερου ορίου και ενός κατώτερου για να παραμορφώνει το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού κατά ένα καθορισμένο ποσοστό, όπως εξηγείται παρακάτω.

Συγκεκοιμένα τα δάχτυλα (46) και (50) είναι όμοιες βαλβίδες και χοησιμεύουν στην πλήρη έμφραξη του εύκαμπτου αγωγού. Μπορούν να μετακινηθούν μεταξύ μίας άνω ακραίας θέσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-4(α) και μίας κάτω ακραίας θέσης όπως φαίνεται στην εικόνα 1-4(α) και μίας κάτω ακραίας θέσης όπως φαίνεται στην εικόνα 1-4(α) και μίας κάτω ακραίας θέσης όπως φαίνεται στην εικόνα 1-4(β). Μελετώντας τη μία βαλβίδα, για παράδειγμα τη (46) (εικόνα 1-4), η περιστροφή του άξονα (26) προκαλεί αντίστοιχη περιστροφή του έκκεντρου (30). Το έκκεντρο (30) είναι τοποθετημένο στον άξονα (26) και μετατοπίζει την άρθρωση (56) ενός μηχανισμού διωστήρων, οι οποίοι είναι ο σύνδεσμος οδήγησης (58) και ο σύνδεσμος περιστροφής (60). Ο σύνδεσμος οδήγησης (58) είναι προσαρτημένος σε έναν αποστάτη οδηγό (62), ο οποίος είναι πακτωμένος στη βαλβίδα (46). Ομοίως, ο σύνδεσμος περιστροφής (60) είναι προσαρτημένος στον πείρο περιστροφής (64). Επιπλέον ο αποστάτης οδηγός (62) περιορίζεται σε ευθύγραμμη κίνηση εντός του χιτωνίου (63). Συνεπώς, η περιστροφική κίνηση του άξονα (26) μετασχηματίζεται από τη διάταξη του έκκεντρου-μηχανισμού συνδέσμων, που περιγράφηκε πιο πάνω, σε παλινδρομική κίνηση της βαλβίδας (46). Τα δάχτυλα (48) και (52) οδηγούνται από μηχανισμούς, όπως ο μηχανισμός της εικόνας 1-4, που περιγράφηκε πιο πάνω για την οδήγηση της βαλβίδας (46).



Εικόνα 1-3 Προοπτική απεικόνιση του μηχανισμού άντλησης όπου απεικονίζεται ο συνδετικός μηχανισμός οδήγησης των εμβόλων της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας. Διακρίνονται κυρίως, ο εκκεντροφόρος άξονας (26), τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36) του εκκεντροφόρου άξονα, τα έμβολα-δάχτυλα (46), (48), (50) και (52) των έκκεντρων και ο εύκαμπτος αγωγός (16), [Hyman et al, 1993].

Ειδικότερα οι βαλβίδες (46) και (50) είναι τοποθετημένες, έτσι ώστε η μικρότερη δυνατή κίνησή τους να επαρκεί για να κλείνουν ή να ανοίγουν διαδοχικά το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού και να επιτρέπουν στο ρευστό να ρέει κάτω από αυτές. Με άλλα λόγια, όταν οι βαλβίδες (46), (50) είναι στην άνω ακραία θέση, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-4(α), ένα άνοιγμα εξασφαλίζεται στο τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού, το οποίο είναι αρκετό για σχετικά ανεμπόδιστη ροή του ρευστού κάτω από τις βαλβίδες (46) ή (50). Τυπικά, το εύρος κίνησης των βαλβίδων (46) και (50) είναι ρυθμισμένο σε όχι περισσότερο από μία έως τρεις φορές το πάχος του τοιχώματος του τμήματος (18) του εύκαμπτου αγωγού.

Η πρώτη βαλβίδα (46) και η δεύτεφη (50) αποτελούν ουσιαστικά έμβολα σημειακής έμφραξης και τοποθετούνται η μεν πρώτη ανάντι του δάχτυλου (48), έτσι ώστε να προκαλεί εμφράξεις εναλλάξ στον εύκαμπτο αγωγό (18) κατά τη διάρκεια της συμπίεσής του από το δάχτυλο (48), η δε δεύτεφη κατάντι του δάχτυλου (48), ώστε να φράσσει τον εύκαμπτο αγωγό (18) κατά τη διάρκεια της συμπίεσής του από το δάχτυλο (52). Με άλλα λόγια, όταν ο μηχανισμός οδήγησης κινεί το δάχτυλο (48) προς την κάτω ακραία θέση του κινεί ταυτόχρονα και το δάχτυλο (52) προς την άνω ακραία θέση του και αντιστρόφως. Τότε η πρώτη βαλβίδα (46) κλείνει τον εύκαμπτο αγωγό ανάντι του πρώτου δάχτυλου (48), καθώς αυτό κινείται προς την κάτω ακραία θέση του, ενώ η δεύτεφη βαλβίδα (50) κλείνει τον εύκαμπτο αγωγό μεταξύ του πρώτου (48) και δευτέρου δάχτυλου (52), καθώς το δεύτερο δάχτυλο (52) κινείται προς την κάτω ακραία θέση του.

Θεωρείται το δεύτερο έμβολο (48) και το τέταρτο (52), (εικόνα 1-5), ότι αποτελούν δάχτυλα άντλησης, τα οποία συμπιέζουν χωρίς να φράσσουν εντελώς το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού και προωθούν το ρευστό προς την έξοδό του. Δηλαδή, συμπιέζουν το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού από σχετικά μεγαλύτερο ποσοστό αρχικής διατομής σε σχετικά μικρότερο. Επιπρόσθετα, το πρώτο δάχτυλο (48) έχει ξεχωριστή διαμόρφωση και είναι σχεδιασμένο ως το «μεγάλο» δάχτυλο, το οποίο συμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό σε ένα πρώτο του τμήμα. Το δεύτερο δάχτυλο (52) έχει επίσης ξεχωριστή διαμόρφωση και είναι σχεδιασμένο ως το «μικρό» δάχτυλο και συμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό σε ένα δαύτερο του τμήμα.

Εστιάζοντας σε αυτό το σημείο της περιγραφής, οι προσδιορισμοί «μεγάλο» και «μικρό» περιγράφουν έμβολα άντλησης τα οποία είναι κατασκευασμένα, έτσι ώστε η ποσότητα του ρευστού που εκτοπίζεται καθώς το «μεγάλο» δάχτυλο (48) κινείται προς το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού, να είναι περίπου διπλάσια της ποσότητας του ρευστού που εκτοπίζεται από αντίστοιχη κίνηση του «μικρού» δάχτυλου (52). Αυτό συμβαίνει διότι το πρώτο δάχτυλο (48) είναι δυο φορές σε μήκος μεγαλύτερο από το δεύτερο δάχτυλο (52). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κίνηση των δάχτυλων (48) και (52) είναι όμοια και γενικά της ίδιας διαδρομής. Βέβαια σε άλλη παραλλαγή τα δάχτυλα (48) και (52) μπορεί να έχουν το ίδιο μήκος, όμως το πρώτο δάχτυλο (48) μπορεί να εκτοπίζει διπλάσια ποσότητα ρευστού διανύοντας απόσταση, η οποία είναι περίπου διπλάσια της απόστασης που διανύεται από το δεύτερο δάχτυλο (52).



Εικόνα Πλάγια όψη συνδετικού 1-4 μηχανισμού οδήγησης εμβόλου της βαλβίδας εισόδου (πάνω) στην άνω ακραία θέση (αποσυμπίεση του εύκαμπτου αγωγού) και (κάτω) στην κάτω ακραία θέση (πλήρους έμφραξης του εύκαμπτου αγωγού). Διακρίνονται κυρίως, το έκκεντρο (30), ο σύνδεσμος οδήγησης (διωστήρας) (58) και το δάχτυλο-βαλβίδα (46), [Hyman et al, 1993].

Η αρχή λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα παρατηρώντας την εικόνα 1-5, [Hyman & Moubayd, 1993]. Ειδικότερα, η εικόνα 1-5(α) αναπαριστά τη σχετική κίνηση των εμβόλων (46), (48), (50) και (52), ενώ στην 1-5(β) αναπαρίσταται η σχετική κίνηση των βαλβίδων (46) και (50) και των δάχτυλων (48) και (52), μέσω των καμπυλών (47), (51) και (49), (53) αντίστοιχα. Οι καμπύλες αυτές φαίνονται σε σχέση η μία με την άλλη για δύο περιόδους του χρόνου που περιλαμβάνει ενδεικτικά τις χρονικές στιγμές αναφοράς ti, t₂, t₃, t₄ και t₅ στον άξονα του χρόνου (66). Τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36) είναι εξ αρχής διατεταγμένα στον άξονα οδήγησης (26) με τέτοιο τρόπο, ώστε όταν περιστρέφονται με τον άξονα αυτόν, για να κινούν το σύστημα συνδέσμων που περιγράφηκε πιο πάνω, έτσι ώστε τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) να παλινδρομούν, εκτελώντας κίνηση σε δύο χρόνους, όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Ο πρώτος χρόνος είναι μεταξύ των χρονικών στιγμών αναφοράς ti και t₂ και ο δεύτερος χρόνος μεταξύ των t₂ και t₃.

Κατά τη χρονική στιγμή t₁ η βαλβίδα (46) βρίσκεται κλειστή στην κάτω ακραία θέση της (down), ενώ το δάχτυλο (48) και η βαλβίδα (50) στην άνω ακραία θέση τους (up), όπως φαίνεται στην εικόνα 1-5(β). Κατά το χρονικό διάστημα t₂-t₁, καθώς τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36) περιστρέφονται, οι βαλβίδες (46) και (50) παραμένουν στις σταθερά σε αυτές τις θέσεις, ενώ τα δάχτυλα (48) και (52) αρχίζουν να κινούνται. Συγκεκριμένα, το δάχτυλο (48) κινείται προς τα κάτω στην κατεύθυνση που δείχνει το βέλος (68), έχοντας ξεκινήσει από την άνω ακραία θέση (up) ή επίπεδο (b) και κινείται προς την κάτω ακραία θέση (down) ή επίπεδο (c). Στην εικόνα 1-5(β) διακρίνεται η κίνησή του μέσω της καμπύλης (49), όπου το δάχτυλο έχει φτάσει στην κάτω ακραία θέση του (down) χωρίς να έχει φράξει το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού. Στη χρονική στιγμή t₂, η βαλβίδα (46) είναι οριακά στην κάτω ακραία θέση της (up) και το δάχτυλο (48) έχει φθάσει στην κάτω ακραία θέση του (70). Στον ίδιο χρόνο το δάχτυλο (52), το

οποίο ξεκίνησε τη χρονική στιγμή tι από την κάτω ακραία θέση του (down) ή επίπεδο (c), έχει μετακινηθεί στην άνω ακραία θέση (74), όπως δείχνει το βέλος (72). Κατά αυτόν τον τρόπο, το δάχτυλο (48), έχοντας μετακινηθεί προς τα κάτω από την άνω ακραία θέση του (up) ή επίπεδο (b) προς την πλάκα (24), προωθεί το ρευστό προς τα δεξιά κατά την κατεύθυνση του βέλους (76). Ταυτόχρονα, το δάχτυλο (52) έχει ξεκινήσει να κινείται προς τα πάνω, ξεκινώντας από την κάτω ακραία θέση του (down), όπως φαίνεται από την καμπύλη κίνησής του (53), η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 1-5(β) μεταξύ των σημείων tι και t₂.

Η χρήση διαφορετικών μεγεθών των δάχτυλων, δηλαδή «μεγάλο» και «μικρό», έχει σαν αποτέλεσμα μία τελική παροχή ρευστού παρόμοια με αυτή που προκύπτει από τον εμβολισμό που συμβαίνει όταν το «μικρό» δάχτυλο δρα μόνο του. Με άλλα λόγια, επειδή το «μεγάλο» δάχτυλο (48) εκτοπίζει διπλάσιο όγκο από τη μονάδα όγκου του «μικρού» δάχτυλου (52), η προσδιδόμενη παροχή στον πρώτο χρόνο αντιστοιχεί σε μία μονάδα όγκου ρευστού προς την έξοδο του εύκαμπτου αγωγού (16), όπως δείχνει το βέλος (76).

Καθώς η ημιπερίοδος ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή t₂, το «μεγάλο» δάχτυλο (48) και το «μικρό» δάχτυλο (52) έχουν αλλάξει κατακόρυφες θέσεις. Επίσης τη χρονική στιγμή t₂ οι βαλβίδες (46) και (50) αλλάζουν θέσεις. Η βαλβίδα (46) ανέρχεται προς την άνω ακραία θέση της (up) ή επίπεδο (c) και η βαλβίδα (50) κατέρχεται προς την κάτω ακραία θέση της (down) ή επίπεδο (d). Επειδή η βαλβίδα (50) είναι τώρα κλειστή και η βαλβίδα (46) είναι ανοιχτή, το ρευστό αναρροφάται μέσα στο τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού (16) όπως δείχνει το βέλος εισόδου (78) στην εικόνα 1-5(α). Η παροχή ρευστού μέσα στην είσοδο του τμήματος (18) του εύκαμπτου αγωγού (16) έιναι διπλάσια της παροχής εξόδου, αφού το δάχτυλο (48) εμβολίζει δυο φορές περισσότερο ρευστό από ότι το δάχτυλο (52). Στη συνέχεια, ενώ το δάχτυλο (48) ανέρχεται προς την άνω ακραία θέση του μεταξύ των χρονικών στιγμών t₂ και t₃, το δάχτυλο (52) κατέρχεται από το επίπεδο (b) στο επίπεδο (c), όπως φαίνεται στην εικόνα 1-5(α). Η κίνηση αυτή επιφέρει μία καθαρή μονάδα όγκου ρευστού, εξόδου (76).

Αυτή η κίνηση συνεχίζεται μέχοι τη χρονική στιγμή t₃, στην οποία μία περίοδος έχει συμπληρωθεί. Τη χρονική στιγμή t₃ οι βαλβίδες (46) και (50) επιστρέφουν πάλι, έτσι ώστε η βαλβίδα (46) να είναι ξανά στην κάτω ακραία θέση της (down) και η βαλβίδα (50) να είναι ξανά στην άνω ακραία θέση της (up). Δηλαδή οι βαλβίδες (46) και (50) βρίσκονται ουσιαστικά στις θέσεις που ήταν τη χρονική στιγμή t₁, καθώς επίσης και ολόκληρο το σύστημα είναι στην ίδια κατάσταση που ήταν στη χρονική στιγμή t₁. Κατά το χρονικό διάστημα t₅-t₃ επαναλαμβάνεται ξανά ο κύκλος λειτουργίας σε μία δεύτερη περίοδο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ταχύτητα με την οποία τα δάχτυλα (48) και (52) κινούνται προς τον εύκαμπτο αγωγό κατά τη διάρκεια μίας περιόδου, δεν είναι σταθερή ακόμη και σε ιδανικές συνθήκες. Καθώς ο εύκαμπτος αγωγός αρχίζει να συμπιέζεται, ίσες μετατοπίσεις επιφέρουν εμβολισμό όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων ρευστού.



Εικόνα 1-5(πάνω) Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας. (κάτω) Γραφική παράσταση των θέσεων των εμβόλων με το χρόνο λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας για δύο περιόδους. Διακρίνεται η κίνηση των εμβόλων (46), (48), (50) και (52) μέσω των καμπυλών (47), (49), (51) και (53) αντίστοιχα, [Hyman & Moubayd, 1993].

Με άλλα λόγια, η γραμμική παλινδρομική κίνηση του δάχτυλου προς τον εύκαμπτο αγωγό, καθώς αυτός προοδευτικά συμπιέζεται περισσότερο, επιφέρει σταδιακά ροή ρευστού διαμέσου του παραμορφωμένου εύκαμπτου αγωγού με σχετικά μεγάλη ταχύτητα προς τα έξω. Για να διευκρινιστεί αυτό καλύτερα, ο ιδανικός σχεδιασμός των δάχτυλων (48) και (52) είναι τέτοιος ώστε η ταχύτητα κάθε δάχτυλου, όταν κινείται προς τον εύκαμπτο αγωγό, πρέπει σχετικά να αυξάνεται και καθώς προοδευτικά ο εύκαμπτος αγωγός παραμορφώνεται περισσότερο να ελαττώνεται. Το πλεονέκτημα μίας τέτοιας κίνησης είναι η επίτευξη, όσο το δυνατό, σταθερής παροχής ρευστού προκαλούμενη από τη συμπιεστική δράση των αντίστοιχων δάχτυλων.

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

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος σχεδιασμός της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας αποφεύγει απώλειες ενέργειας που παρατηρούνται σε άλλες συμβατικές γραμμικές και στρεφόμενων έκκεντρων περισταλτικές αντλίες. Αυτό συμβαίνει, σε τέτοιου τύπου αντλίες, επειδή το μεγαλύτερο ποσό της κινητικής ενέργειας καταναλώνεται ουσιαστικά για τη θέρμανση του εύκαμπτου αγωγού, που υφίσταται μέσω των θλιπτικών και διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται, αφού τα έμβολα δεν πρέπει μόνο να προκαλούν άντληση, αλλά επίσης και να φράσσουν τον εύκαμπτο αγωγό. Η συγκεκοιμένη αντλία ωστόσο, διαχωρίζει τις λειτουργίες της άντλησης και της έμφραξης με την ευρεία περιοχή κάτω από τα δάχτυλα (48) και (52) να μην καταπονείται σημαντικά, γιατί αυτά έχουν κατά μήκος ευρεία επιφάνεια πέλματος και δεν έχουν την ιδιότητα να φράσσουν πλήρως τον εύκαμπτο αγωγό.. Συνεπώς, η ανάγκη για τέτοια επαναλαμβανόμενη ισχυρή συμπίεση και παραμόρφωση του εύκαμπτου αγωγού έχει σχεδόν εξαλειφθεί, όσο αφορά στο κομμάτι της αντλητικής λειτουργίας των δάχτυλων και παραμένει στην περιοχή που βρίσκεται κάτω και εκατέρωθεν από τις βαλβίδες σημειακής εφαρμογής (46) και (50), όπου αυτές λειτουργούν, καταπονώντας περισσότερο μόνο για μικρό τμήμα τον εύκαμπτο αγωγό λόγω της πλήφους έμφραξής του. Σημειώνεται ότι οι βαλβίδες (46) και (50), για να προκαλούν πλήρη έμφραξη στον εύκαμπτο αγωγό διανύουν πιο κοντινή απόσταση σχετικά με την εσωτερική διάμετρο (e) του εύκαμπτου αγωγού. Επομένως, ο εύκαμπτος αγωγός και η παραμόρφωσή του δεν επηρεάζουν την ακρίβεια της συσκευής, τόσο λόγω της μη ισχυρής επαναλαμβανόμενης καταπόνησης που λαμβάνει χώρα σε μεγάλο μήκος του εύκαμπτου αγωγού (περιοχή δάχτυλων), όσο και του μικρού όγκου εμβολισμού που προκαλείται από τη συμπίεση του εύκαμπτου αγωγού από τις βαλβίδες με μετατόπισή τους που πραγματοποιείται μεταξύ των επιπέδων (b) της άνω ακραίας θέσης των δάχτυλων και (d) της πλάκας αντίστοιχα.

Τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) επανέρχονται στις αντίστοιχες άνω ακραίες θέσεις τους από τη δύναμη που ασκείται λόγω ανάταξης του γεμάτου με ρευστό ελαστικού αγωγού. Ανεπιθύμητες μειώσεις της παροχής, διαμέσου του εύκαμπτου αγωγού (16), μπορούν να προκληθούν, αν η δύναμη λόγω ανάταξης του εύκαμπτου αγωγού (16) δεν είναι αρκετή και αποτύχει να μετατοπίσει οποιοδήποτε από τα έμβολα (46), (48), (50) ή (52) στην αντίστοιχη άνω ακραία θέση του. Αυτό μπορεί να συμβεί για παράδειγμα, όταν το υλικό του τμήματος (18) του εύκαμπτου αγωγού υποστεί ουσιαστική κόπωση κατά τη διάρκεια παρατεταμένης

πεφιόδου χφήσης. Είναι απαφαίτητο, ωστόσο, τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) να ανέφχονται πλήφως στην άνω ακφαία θέση τους, ώστε να πληφώνεται το τμήμα του εύκαμπτου αγωγού κάτω από τα έμβολα (48) και (50) πάντα με την ίδια ποσότητα φευστού και κατά συνέπεια η συσκευή να μποφεί να διανέμει το φευστό με τον επιθυμητό φυθμό έγχυσης.



Εικόνα 1-6 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας μίας παραλλαγής της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας, όπου τα δάχτυλα (48) και (52) είναι του ιδίου μεγέθους, [Hyman & Moubayd, 1993].

Τελικά, στην εικόνα 1-6 απεικονίζεται σχηματικά παραλλαγή της συγκεκριμένης δίχρονης περισταλτικής αντλίας, στην οποία τα δάχτυλα (48) και (52) είναι του ιδίου μεγέθους. Οι συνδεόμενοι αποστάτες (62), (εικόνα 1-6), ωστόσο, είναι διατεταγμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε τα δάχτυλα (48) και (52), όντας του ίδιου μεγέθους, να κινούνται σε διαδρομές διαφορετικού μήκους. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-6, ενώ η κατακόρυφη διαδρομή της παλινδρομικής κίνησης του δάχτυλου (52) είναι μεταξύ των επιπέδων (b) και (c), η κατακόρυφη διαδρομή της παλινδρομικής κίνησης του δάχτυλου (48) είναι μεταξύ των επιπέδων (b) και (f). Η απόσταση μεταξύ (b) και (f) είναι μεγαλύτερη και συνεπώς το μήκος διαδρομής της είναι μεγαλύτερο. Εξασφαλίζοντας ότι αυτή η διαδρομή έχει ολοκληρωθεί κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού διαστήματος, το δάχτυλο (48) εκτοπίζει προφανώς περισσότερο ρευστό. Με κατάλληλη επιλογή του μήκους της κατακόρυφης διαδρομής και άρα της αντίστοιχης παραμόρφωσης του εύκαμπτου αγωγού, το μήκος της κατακόρυφης διαδρομής μπορεί να ρυθμιστεί, έτσι ώστε το δάχτυλο (48) να πιέζει τον εύκαμπτο αγωγό (18), εκτοπίζοντας διπλάσιο όγκο ρευστού σε σχέση με τον όγκο ρευστού που εκτοπίζεται από το δάχτυλο (52) και επομένως να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός σταθερός ουθμός έγχυσης.

1.6 ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ

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

Σε αντιστοιχία με κάθε ένα από τα έκκεντρα (30a) έως (30g) υπάρχουν οι ακόλουθοι (δάχτυλα) (11a) έως (11g). Κάθε ακόλουθος φέρνει ένα μικρό ρουλεμάν (10) του οποίου η εσωτερική στεφάνη (10a) στηρίζεται σε έναν πείρο (38) του ακόλουθου. Η εξωτερική στεφάνη (10b) από κάθε ρουλεμάν (10) ακουμπά την επιφάνεια του κάθε έκκεντρου (30a) έως (30g), έτσι ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυνατή τριβή μεταξύ των ακόλουθων (11a) έως (11g) των έκκεντρων και των έκκεντρων (30a) έως (30g). Τα ακροδάχτυλα (37) των ακόλουθων (11) αγγίζουν τον εύκαμπτο αγωγό (16), ο οποίος στηρίζεται στη βάση (5). Οι ακόλουθοι (11) κινούνται στην κατακόρυφη διεύθυνση, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-6, οδηγούμενοι από τις πλαϊνές τους επιφάνειες (36), μέσα σε οδηγητικά αυλάκια (26a) που υπάρχουν στα πλαϊνά τοιχώματα του ακίνητου φορέα (26). [17]



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

Από τις εικόνες 1-7 και 1-8 μποφεί να φανεί ότι το ακφοδάχτυλο (37) του ακόλουθου (11a) του πρώτου έκκεντφου (30a) έχει πλήφως συμπιέσει τον εύκαμπτο αγωγό (16) στην κλειστή του θέση (με διακεκομμένη γφαμμή φαίνεται ο εύκαμπτος αγωγός (16') στην πλήφως ανοιχτή του θέση-εικόνα 1-7). Για την επίτευξη πλήφους έμφφαξης (deep occlussion) του εύκαμπτου αγωγού (16), από τον πρώτο ως τον τελευταίο ακόλουθο (11a) έως (11f), τα αντίστοιχα έκκεντφά τους έχουν σχεδιασμό βαλβίδας. Έχουν ουσιαστικά το ίδιο σχήμα, αλλά διατάσσονται έτσι ώστε να διαφέφουν γωνιακά μεταξύ τους κατά 60 μοίφες. Αυτή η γωνιακή διαφοφά στη διάταξή τους εξασφαλίζει ουσιαστικά ομαλό φορτίο στρέψης στον κινητήφα (6).

Στην εικόνα 1-8 η είσοδος (16a) του εύκαμπτου αγωγού (16) φαίνεται στην αριστερή πλευρά του σχεδίου, ενώ η έξοδος (16b) φαίνεται στην δεξιά πλευρά.



Εικόνα 1-8 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).

Ο εύκαμπτος αγωγός (16) είναι φτιαγμένος από ελαστικό υλικό κατά ποοτίμηση σιλικόνη. Για να στεγανοποιείται ο μηχανισμός οδήγησης από τυχόν διαοροή ρευστού από τον εύκαμπτο αγωγό (16), τοποθετείται ποοστατευτικό λεπτό στοώμα από πλαστικό υλικό (15) ανάμεσα στον εύκαμπτο αγωγό (16) και στα ακοοδάχτυλα (37) των ακόλουθων (11a) έως (11g) (απεικονίζεται μόνο στην εικόνα 1-8 και όχι στην 1-7 χάριν ευκρίνειας).

Από την εικόνα 1-7 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 1-7) 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 συγκεκοιμένη πεοισταλτική αντλία χαρακτηρίζεται από το ότι κάθε ένα έκκεντοο έχει τρία τμήματα με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας (εικόνα 1-9). 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 occlussion) 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 1-9Πλάγια 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 Rmax, 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 Rmax στην ελάχιστη ακτίνα Rmin, η οποία διαρκεί για γωνία περιστροφής περισσότερο 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 1-8 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 σταθεφή φοή έγχυσης φευστού από την αντλία, ένα πφόσθετο έκκεντφο γφαμμικοποίησης του όγκου εμβολισμού παφέχεται στο τέλος του μηχανισμού έγχυσης. Στην εικόνα 1-10 απεικονίζεται αυτό το πφόσθετο έκκεντφο γφαμμικοποίησης (30g), το οποίο τοποθετείται αμέσως μετά από τα έξι άλλα έκκεντφα (30a) έως (30f), όπως φαίνεται στην εικόνα 1-8, με σκοπό να εξομαλύνει τις μεταβολές της φοής του φευστού στην έξοδο κατά τη διάφκεια της άντλησης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1-10, το πφόσθετο έκκεντφο (30g) έχει ένα πφώτο τμήμα καμπυλότητας (18g) κατά τη διάφκεια του οποίου η ακτίνα αυξάνεται από ελάχιστη τιμή Rmin σε μέγιστη τιμή Rmax. Από αυτή τη μέγιστη τιμή η ακτίνα μειώνεται κατά τη διάφκεια του δεύτεφου τμήματος καμπυλότητας (20g) στην ελάχιστη ακτίνα ξανά. Η μέγιστη ακτίνα είναι μικφότεφη από τις μέγιστες ακτίνες των έκκεντφων (30a) έως (30f) γιατί η διατομή του εύκαμπτου αγωγού (16) πφέπει να μειωθεί χωφίς να κλείσει. Κατά τη διάφκεια που ο ακόλουθος (δάχτυλο) εξόδου (11f) διατηφεί 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 1-10 Πλάγια όψη του διορθωτικού έκκεντρου (30g) "wrap cycle". Διακρίνονται η μέγιστη ακτίνα καμπυλότητας Rmax στο σημείο πλήρους εμβολισμού και η ελάχιστη Rmin στο σημείο πλήρους απόφραξης.

Ποοκειμένου να επεκταθεί το εύοος της γοαμμικότητας ποέπει το κάτω μέρος του ακόλουθου (ακοοδάχτυλο) (11g) του έκκεντοου σταθερής ορής (30g), να έχει μεγαλύτερη διάσταση στην κατά μήκος κατεύθυνση του εύκαμπτου αγωγού (16) και κατά ποοτίμηση το διπλάσιο συγκοιτικά με το μήκος των δάχτυλων των άλλων έκκεντοων. Δηλαδή, ενώ κανονικά τα μήκη των ακοοδάχτυλων (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 1-8 φαίνεται ότι το μήκος του ακοοδάχτυλου 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 έκκεντοο (30f) κλείνει τον εύκαμπτο αγωγό (16), μέσω του ακόλουθου (11f), το έκκεντοο (30g) συνεχίζει να επιδοά αυξάνοντας την ακτίνα του από την ελάχιστη ακτίνα στην μέγιστη ακτίνα, έτσι ώστε το οευστό που βοίσκεται ήδη στο τέλος του εύκαμπτου αγωγού (16) να αντλείται πος τα δεξιά (συνήθως πος τη γοαμμή του ασθενούς). Ουσιαστικά, επιτυγχάνεται σταθεοή παοοχή όπως θα δούμε παρακάτω η οποία ισούται με το αλγεβοικό άθοοισμα της μεγαλύτεοης θετικής τιμής της παοοχής των ενδιάμεσων ακόλουθων (11b) έως (11f), συν τη μειούμενη τιμή παοοχής (αονητική) λόγω του ακόλουθου (11g) σταθεοοποίησης της ορής.

Στην εικόνα 1-11 παφουσιάζονται σε παφάθεση όλα τα έκκεντφα (30a) έως (30g), βάση του σχεδιασμού που αναλύεται παφακάτω, όπου φαίνονται, τόσο τα καμπύλα τμήματα μεταβλητής ακτίνας, όσο και τα κυκλικά με ακτίνες από Rmax έως Rmin. Η μέγιστη ακτίνα Rmax, η οποία απαντάται στο πφώτο (30a) έως και το τελευταίο (30f) έκκεντφο συμπιέζει πλήφως τον εύκαμπτο αγωγό (16). Η μέγιστη ακτίνα των 6 εκκέντφων διατηφεί τον εύκαμπτο αγωγό (16). Η ελάχιστη ακτίνα των 6 εκκέντφων διατηφεί τον εύκαμπτο αγωγό (16). Α μην αγγίζει τα ακφοδάχτυλα (37) πετυχαίνοντας πλήφη ανάταξη του εύκαμπτου αγωγού (16), ανεξάφτητα 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 1-11Διάγραμμα έκκεντρων εμβόλων σε πολικές συντεταγμένες

Για να επιτευχθεί όπως πεφιγφάφεται ο ανωτέφω κύκλος λειτουφγίας πφέπει να υπάφχει κατάλληλος συγχφονισμός όλων των έκκεντφων και επιπλέον ο υπολογισμός τους για τα χφονικά διαστήματα συμπίεσης και αποσυμπίεσης να γίνει με βάση τη σχέση As - C1φs= Ae - C1φε \rightarrow As - Ae = C1(φs - φε), όπου λαμβάνει υπόψη τη γφαμμική μεταβολή του όγκου εμβολισμού ή αναφφοφήσεως με το χφόνο. Για κάθε έκκεντφο εξάγεται η σχεδιαστική του καμπύλη r_ε(φ) για διάφοφα χαφακτηφιστικά διαστήματα γωνιών, στα οποία χωφίζεται ένας πλήφης κύκλος από 0 έως 360°. Λόγω της απαίτησης αποφυγής της οπισθοφφοής, πφέπει να μην υπάφχει χρονική στιγμή που να μένει ο εύκαμπτος αγωγός χωφίς πλήφη έμφφαξη (deep occlusion) σε κάποιο από τα σημεία λειτουφγίας των εμβόλων. Γι' αυτό το λόγο, τα έκκεντφα των εμβόλων σχεδιάζονται με τφόπο ώστε πριν ανοίξει το ένα έμβολο, το άλλο να έχει ήδη φφάξει τον εύκαμπτο αγωγό. Ωστόσο, βασική επιδίωξη του μηχανισμού είναι η επίτευξη συνεχούς και σταθεφής παφοχής φευστού. Επομένως, παφόλο που για αυτό το διάστημα των 60° δεν πφαγματοποιείται καμία έγχυση φευστού από την αντλία, για το υπόλοιπο διάστημα των 300° (83% ενός πλήφη κύκλου) πραγματοποιείται συνεχής και σταθεφή έγχυση.

Η αρχική ελάχιστη ακτίνα του κάθε έκκεντρου r_{ε0}, 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 κοιτήρια 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 διεγειρόμενου 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 κινήση 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, αυξανομένης 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.

1.7 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

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 Α με την εκάστοτε επιβαλλόμενη κατακόρυφη μετατόπιση y (εικόνα 1-12). 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 1-12 Διαδοχικές θέσεις συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού, όπου η εγκάρσια διατομή του καταλαμβάνει διάφορα γεωμετρικά σχήματα όπως, (a) κύκλος, (β) έλλειψη, (γ) ορθογώνιο με δύο ημικυκλικούς δίσκους εκατέρωθεν, (δ) ωοειδής του Cassini, (ε) λημνίσκος του Bernoulli.

Επομένως, σύμφωνα με κατάλληλο πείραμα που διεξάχθηκε [6] συμπιέσθηκε 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 1-13(α) Αδιάστατη χρονική συνάρτηση κατακόρυφης μετατόπισης y/ymax μέχρι του σημείου που εφάπτεται με τον εύκαμπτο αγωγό. (β) Αδιάστατη χρονική συνάρτηση της εγκάρσιας διατομής Α/Amax 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, διεξήχθηκαν τα ακόλουθα συναρτησιακά:

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

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

όπου: $A_b = \frac{A_o - A_{min}}{A_o}$ το πλάτος συμπίεσης της διατομής

y₀ 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 Εικ 1-13 για λεπτομέρειες

 $y_b = y_o/D_o = (D_o - y_{min})/D_o$ όπου y_{min} να είναι η ελάχιστη κατακόδυφη απόσταση, άνω και κάτω, που μποδεί να συμβεί στη διάδκεια μίας πεδιόδου, δηλαδή είναι η κατακόδυφη 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

Τ η περίοδος διέγερσης του εύκαμπτου αγωγού.



Εικόνα 1-14 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/D₀ σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια διατομή Α/A₀ του εύκαμπτου αγωγού γίνεται:

$$\frac{y}{D_o} = 1 - \frac{y_b}{\sqrt{A_b}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_o}}$$

όπου: $A_0 = \frac{\pi D^2}{4}$

Σκοπός τώρα είναι να συσχετιστεί το εμβαδόν Α της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού με την αυξανόμενη ακτίνα του έκκεντρου συμπίεσης τε. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ακτίνα του έκκεντρου τε 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 διέγεοσης το πώς μεταβάλλεται η εγκάοσια διατομή του εύκαμπτου αγωγού δεν παίζει σχεδόν κανένα οόλο στην επίτευξη σταθεοής, συνεχούς και συγκεκοιμένης παοοχής οευστού. 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 D₀-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 φε επίσης μεταξύ των ακραίων τιμών της ακτίνας του έκαι το χρόνο του έκκεντρου εκκεντρου 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

(1.3)

έκκεντφου με το έμβολο-δάχτυλο. Θεωφείται ότι αυτό το σημείο επαφής μετατοπίζεται μόνο κατακόφυφα και ανήκει στην ευθεία που οφίζεται από το ακλόνητο κέντφο πεφιστφοφής του έκκεντφου και το κέντφο συμμετφίας της εγκάφσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού, το οποίο μετατοπίζεται επίσης μόνο κατακόφυφα. Δηλαδή, τα σημεία πεφιστφοφής του έκκεντφου, κέντφου συμμετφίας της εγκάφσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού και επαφής του έκκεντφου με το έμβολο-δάχτυλο είναι συνευθειακά. Αυτή η ευθεία υποτίθεται ότι παφαμένει συνεχώς κάθετη στο επίπεδο συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού (καπάκι αντλίας), κατά τη διάφκεια της παφαμόφφωσης.

Στην πραγματικότητα σχηματίζεται μεταβαλλόμενη γωνία θ≠π 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 1-15). Η γωνία αυτή εξαρτάται από το πόσο απότομη είναι η αύξηση της ακτίνας του έκκεντρου r 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 βάσει την επίτευξη γραμμικής μεταβολής του όγκου εμβολισμού, και συνεπώς δε μπορεί να σχεδιαστεί για παράδειγμα πιο ομαλό για την προσέγγιση της γωνίας θ≈π. Ωστόσο, η επιφάνεια του εμβόλου-δάχτυλου, με την οποία έρχεται σε επαφή το έκκεντρο, μπορεί να επιλεχθεί 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 απομακούνεται από την τιμή π και η παραπάνω θεώρηση της συνευθειακής συνθήκης δεν είναι σωστή, ώστε να χρησιμοποιηθεί για το συσχετισμό των γεωμετρικών παραμέτρων γ και re. Αντίθετα, αν η διαμόρφωση του εμβόλου-δάχτυλου είναι ακίδα με μηδενική ακτίνα καμπυλότητας, [εικόνα 1-15(α)], η οποία εφάπτεται με το άκοο 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 1-15 Μηχανισμός μετάδοσης κίνησης του έκκεντρου στο δάχτυλο για τη συμπίεση του εύκαμπτου αγωγού. Διακρίνονται: (1) περιστρεφόμενο έκκεντρο, (2) έμβολο-δάχτυλο συμπίεσης, (3) εύκαμπτος αγωγός,(4) (a) αιχμηρή διαμόρφωση (ακίδα) εμβόλου-δάχτυλου (θ=π), (β) ένσφαιρος τριβέας (ρουλεμάν) (θ≅π), (5) επίπεδη βάση συμπίεσης εύκαμπτου αγωγού (καπάκι αντλίας)

Η αιχμηφή αυτή διαμόφφωση δημιουφγεί πφοβλήματα αντοχής των έκκεντφων, αφού εμφανίζεται έντονη συγκέντφωση τάσεων στο σημείο επαφής με αποτέλεσμα την ισχυφή φθοφά του μηχανισμού, η οποία έχει επίπτωση και στην ακφίβεια έγχυσης. Εξάλλου, από ενεφγειακής άποψης η λειτουφγία του μηχανισμού είναι ασύμφοφη λόγω μεγιστοποίησης της τφιβής ολίσθησης στα σημεία επαφής των έκκεντφων με τα αιχμηφά δάχτυλα.. Επομένως, η πιο κατάλληλη επιλογή για τη διαμόφφωση του εμβόλου-δάχτυλου είναι να χφησιμοποιηθεί καμπύλη επιφάνεια, όσο το δυνατόν σχεδιαστικά γίνεται, με μικφότεφη ακτίνα καμπυλότητας. Η επιλογή αυτή μποφεί να είναι της μικφοσκοπικός ένσφαιφος τφιβέας (φουλεμάν), της απεικονίζεται στην εικόνα 1-15(β). Με αυτήν την επιλογή η παφαπάνω συνευθειακή συνθήκη είναι αποδεκτή με ελάχιστο σφάλμα και ικανοποιούνται οι κατασκευαστικές απαιτήσεις για αντοχή και ομαλή λειτουφγία. Είναι πφοφανής η ελάχιστη απόκλιση του σημείου επαφής στην εικόνα 1-15(β), (θ≅π). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέφγειας ελαττώνεται, αφού υφίσταται μόνο τφιβή κύλισης και όχι ολίσθησης μέσω του ένσφαιφου τουξιβά (φουλεμάν).

Στην εικόνα 1-16 απεικονίζονται χαρακτηριστικές γεωμετρικές διαστάσεις στη θέση, όπου ο εύκαμπτος αγωγός είναι απαραμόρφωτος και σε τυχαία θέση συμπίεσης. Στην

απαραμόρφωτη κατάσταση αν θεωρήσουμε Υ τη σταθερή απόσταση από το κέντρο περιστροφής του έκκεντρου μέχρι το κατώτερο σημείο της εσωτερικής εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού έχουμε τη σχέση:

$$Y = r_{\varepsilon o} + H + 2R_t \tag{1.4}$$



Εικόνα 1-16 Παραμόρφωση του εύκαμπτου αγωγού από το δάκτυλο

όπου r_{eo} είναι η αρχική ακτίνα του έκκεντρου με την οποία δεν υφίσταται οριακά καμία παραμόρφωση του εύκαμπτου αγωγού, [εικόνα 1-16(α)] και Η 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

διάφκεια της συμπίεσης, είναι το πάχος s του εύκαμπτου αγωγού, το οποίο παφαμένει ίσο με το αφχικό (1mm). Αυτό ισχύει μόνο για τη πφοκαλούμενη συμπίεση από τα δάχτυλα, η οποία είναι κφίσιμη για τον εμβολισμό του φευστού. Ωστόσο, κατά τη συμπίεση από τα δάκτυλα, όπου απαιτείται πλήφης έμφφαξη (deep occlusion) του εύκαμπτου αγωγού για την αποφυγή της οπισθοφφοής, το πάχος του εύκαμπτου αγωγού ελαττώνεται μετά την πλήφη έμφφαξη.

Σε τυχαία θέση συμπίεσης, (εικόνα 1-16), σύμφωνα με τις θεωρήσεις η απόσταση Υ είναι σταθερή όμοια με αυτή της αρχικής και απαραμόρφωτης κατάστασης και δίνεται από τη σχέση:

$$Y = r_{\varepsilon} + H + y \tag{1.5}$$

Από τις (1.4) και (1.5) ποοκύπτει r_ε = r_{ε0} + D – y

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

$$y = D_o - \frac{D_o y_b}{\sqrt{A_b}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_o}}$$

Για A=A₀ προκύπτει ότι y=D₀ ενώ για A=0 \Rightarrow y = D₀ $-\frac{D_0 y_b}{\sqrt{A_b}}$ \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.

 $Aq\alpha 0 \le A \le A_o, 0 \le y \le D_o = 2R_t$

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

$$r_{\varepsilon} = r_{\varepsilon o} + D_{o} - D_{o} + \frac{D_{o} y_{b}}{\sqrt{A_{b}}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_{o}}} \Rightarrow$$

$$r_{\varepsilon} = r_{\varepsilon o} + \frac{D_{o} y_{b}}{\sqrt{A_{b}}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_{o}}} \qquad A_{b} = 1, \ y_{b} = 1 \Rightarrow$$

$$r_{\varepsilon} = r_{\varepsilon o} + D_{o} \sqrt{1 - \frac{A}{A_{o}}} \Rightarrow r_{\varepsilon} = r_{\varepsilon o} + 2R \sqrt{1 - \frac{A}{\pi R_{t}^{2}}} \Rightarrow$$

(1.6)

$$r_{\varepsilon} = r_{\varepsilon o} + 2\sqrt{R_{t}^{2} - \frac{A}{\pi}}$$
(1.7)

Για την επίτευξη σταθεφής παφοχής εγχυόμενου φευστού πφέπει να επιτυγχάνεται γφαμμική μεταβολή με το χφόνο του εγχυόμενου όγκου εμβολισμού του φευστού. Αυτό είναι δυνατό μόνο όταν συμβαίνει γφαμμική μείωση του εμβαδού της εγκάφσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού με το χφόνο. Αυτό σημαίνει ότι πφέπει η μεταβολή αυτού του εμβαδού Α με τη γωνία πεφιστφοφής του έκκεντφου φ να είναι γφαμμική σύμφωνα με τη σχέση Α = Cιφ+C₂ (1.8) όπου C₁, C₂ πφοσδιοφιζόμενοι συντελεστές ανάλογα με τις τιμές του εμβαδού της εγκάφσιας διατομής και στο τέλος του διαστήματος συμπίεσης αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας την εγκάφσια διατομή από τη σχέση (1.8) στη σχέση (1.7) πφοκύπτει για το διάστημα συμπίεσης η εξίσωση διαμόφφωσης του έκκεντφου μετάβασης από μία αφχική ακτίνα το σε μία μέγιστη τελική r_{εmax} συναφτήσει της γωνίας πεφιστφοφής φ ως εξής:

$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \mathbf{r}_{\varepsilon o} + 2\sqrt{\mathbf{R}_{t}^{2} - \frac{\mathbf{C}_{t} \phi + \mathbf{C}_{2}}{\pi}}$$
(1.8)

Θεωφούμε λοιπόν μια μετάβαση (συμπίεσης ή αποσυμπίεσης) μεταξύ μιας αφχικής γωνιακής θέσης φs και μιας τελικής φε όπου ο εύκαμπτος αγωγός έχει μια αφχική διατομή As και μια τελική Ae αντίστοιχα. Τότε για φ= φs έχουμε => re= rs και A= As οπότε As = C1φs + C2 =>

$$C_2 = A_s - C_1 \varphi_s \tag{1.9a}$$

Αντικαθιστώντας στην (1.7) την (1.9α) και κάνοντας πράξεις προκύπτει:

$$C_{2} = \pi R_{t}^{2} - \pi \left(\frac{r_{s} - r_{o}}{2}\right)^{2} - C_{l}\phi_{s}$$
(1.9β)

Από (1.9α) και (1.9β) ποοκύπτει:

$$A_s = \pi R_t^2 - \pi \left(\frac{r_s - r_o}{2}\right)^2 \tag{1.9}$$

Aντίστοιχα για $\phi=\phi_E \Rightarrow r_e=r_E$ και $A=A_E$ οπότε $A_E=C_1\phi_E + C_2 \Rightarrow$

$$C_2 = A_E - C_1 \varphi_E \tag{1.98}$$

Αντικαθιστώντας την εγκάρσια διατομή από τη σχέση (1.9δ) στη σχέση (1.7) προκύπτει:

$$r_{\rm E} = r_{\rm eo} + 2\sqrt{R_{\rm t}^2 - \frac{C_1 \phi_{\rm E} + C_2}{\pi}}$$

$$\pi \left(\frac{\mathbf{r}_{\mathrm{E}} - \mathbf{r}_{\mathrm{o}}}{2}\right)^{2} = \pi \mathbf{R}_{\mathrm{t}}^{2} - \mathbf{C}_{\mathrm{I}} \boldsymbol{\phi}_{\mathrm{E}} - \mathbf{C}_{2} \Longrightarrow \mathbf{C}_{2} = \pi \mathbf{R}_{\mathrm{t}}^{2} - \pi \left(\frac{\mathbf{r}_{\mathrm{E}} - \mathbf{r}_{\mathrm{o}}}{2}\right) - \mathbf{C}_{\mathrm{I}} \boldsymbol{\phi}_{\mathrm{E}}$$
(1.9 ε)

Από (1.9*α*) και (1.9β) ποοκύπτει:

$$A_{E} = \pi R_{t}^{2} - \pi \left(\frac{r_{s} - r_{o}}{2}\right)^{2}$$
(1.907)

Η σταθερά C1 προκύπτει συνδυάζοντας τις (1.9α) και (1.9δ) οπότε:

$$A_{s} - C_{1}\varphi_{s} = A_{E} - C_{1}\varphi_{E} \Longrightarrow A_{s} - A_{E} = C_{1}(\varphi_{s} - \varphi_{E})$$

$$(1.10)$$

Αντικαθιστώντας στην (1.10) τις (1.9γ) και (1.9στ) έχουμε

$$\pi R_{t}^{2} - \pi \left(\frac{r_{s} - r_{o}}{2}\right)^{2} - \pi R_{t}^{2} - \pi \left(\frac{r_{s} - r_{o}}{2}\right)^{2} = C_{1}(\phi_{s} - \phi_{E})$$

$$C_{1} = -\frac{\pi}{4(\phi_{s} - \phi_{E})} \left[(r_{s} - r_{o})^{2} - (r_{E} - r_{o})^{2} \right]$$
(1.10a)

Η C₂ προκύπτει συνδυάζοντας τις (1.9β) και (1.10α)

$$C_{2} = \pi R_{t}^{2} - \pi \left(\frac{r_{s} - r_{o}}{2}\right)^{2} - \frac{\pi}{4(\varphi_{s} - \varphi_{E})} \left[\left(r_{s} - r_{o}\right)^{2} - \left(r_{E} - r_{o}\right)^{2} \right] \varphi_{s}$$

Κατόπιν πράξεων έχουμε:

$$C_{2} = \pi R_{t}^{2} - \frac{\pi}{4} \left[\frac{\phi_{s} (r_{E} - r_{o})^{2} - \phi_{E} (r_{s} - r_{o})^{2}}{\phi_{s} - \phi_{E}} \right]$$
(1.10β)

Αντικαθιστώντας τις σταθεφές C₁, C₂ στην (1.8) και μετά από πφάξεις βφίσκουμε μία γενικευμένη σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντφου με την πεφιστφοφή, r_ε(φ), από μία αφχική θέση (φ_s, r_s) σε μία τελική (φ_e, r_e) με ελάχιστη ακτίνα αναφοφάς r_o, ώστε η μεταβολή της εγκάφσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού να είναι γφαμμική, είτε πφόκειται για συμπίεση, είτε για αποσυμπίεση:

$$r_{\varepsilon} = r_{o} + \frac{\sqrt{\phi_{S}(r_{E} - r_{o})^{2} - \phi_{E}(r_{S} - r_{o})^{2} + \phi[(r_{S} - r_{o})^{2} - (r_{E} - r_{o})^{2}]}{\phi_{S} - \phi_{E}}$$

1.8 ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΑΛΙΑΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ ΕΓΧΥΣΗΣ

Όπως είναι φανερό και από τα προηγούμενα για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τα ποσά του ρευστού από την είσοδο και την έξοδο της αντλίας είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε σε κάθε χρονική στιγμή της περιόδου, τα μεγέθη των ακτίνων των εκκέντρων προκειμένου να υπολογίσουμε ακριβώς τον όγκο ρευστού που περικλείεται μέσα στο σωλήνα.

1.8.1 $\Sigma X E \Sigma E I \Sigma$ AKTINON KAI FONION

Για τις ακτίνες έχουμε ήδη τις εξής σχέσεις[6]:

Σε όλες τις σχέσεις ισχύει όπως και προηγουμένως πως φ_s και φε είναι η αρχική και η τελική γωνία στο εκάστοτε γωνιακό διάστημα ισχύος της r_e(φ). Οι τιμές των ακτίνων και εδώ εκφράζονται σε mm.

1. Για το μεγάλο έμβολο

Συμπίεση:

$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \mathbf{r}_{0} + (\mathbf{r}_{\varepsilon \max} - \mathbf{r}_{0}) \sqrt{\frac{\phi_{s} - \phi}{\phi_{s} - \phi_{E}}} \ \mu \varepsilon \ \mathbf{r}_{\varepsilon \max} = 14.9, \ \mathbf{r}_{0} = 12 \ \gamma \iota \alpha \ 0^{\circ} \le \phi \le 150^{\circ}$$

$$r_{e} = 14.9 \text{ gma } 150^{\circ} \le \phi \le 210^{\circ}$$

Αποσυμπίεση:

$$r_{\epsilon} = \frac{r_{\epsilon 0}}{\cos(\varphi_{\rm E} - \varphi)} \ \ \mu \epsilon \ r_{\epsilon 0} = 11.41 \ \gamma \iota \alpha \ \ 210^{\circ} \le \phi \le 250^{\circ}$$

$$r_{e} = 11.41 \text{ yia } 250^{\circ} \le \phi \le 342^{\circ}$$

Μετακίνηση ποιν την έναρξη της συμπίεσης:

$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \frac{\mathbf{r}_{e0}}{\cos(\phi - \phi_{s})} \ \mu\varepsilon \ \mathbf{r}_{\varepsilon 0} = 11.41 \ \gamma\iota\alpha \ 342^{\circ} \le \phi \le 360^{\circ}$$

2. Για το μικρό(διορθωτικό) έμβολο

Αποσυμπίεση:

$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \mathbf{r}_{0} + (\mathbf{r}_{\varepsilon \max} - \mathbf{r}_{0}) \sqrt{\frac{\phi_{\mathrm{E}} - \phi}{\phi_{\mathrm{E}} - \phi_{\mathrm{s}}}} \quad \mu\varepsilon \text{ r}_{0} = 12, \text{ } \mathbf{r}_{\varepsilon \max} = 14.9 \text{ } \gamma\iota\alpha \text{ } 0^{\circ} \leq \phi \leq 150^{\circ}$$
$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \frac{\mathbf{r}_{\varepsilon 0}}{\cos\left[\frac{\phi_{s} + \phi_{E}}{2} - \phi\right]} \ \mu \varepsilon \ \mathbf{r}_{\varepsilon 0} = 11.59 \ \gamma \iota \alpha \ 150^{\circ} \le \phi \le 180^{\circ}$$

Συμπίεση:

$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \mathbf{r}_{0} + (\mathbf{r}_{\varepsilon \max} - \mathbf{r}_{0}) \sqrt{\frac{\phi_{s} - \phi}{\phi_{s} - \phi_{E}}} \quad \mu\varepsilon \text{ r}_{0} = 12, \text{ } \mathbf{r}_{\varepsilon \max} = 14.9 \text{ } \gamma\iota\alpha \text{ } 180^{\circ} \leq \phi \leq 330^{\circ}$$

 $r_{e} = 14.9 \ \gamma \iota \alpha \ 330^{\circ} \le \phi \le 360^{\circ}$

3. Για τη βαλβίδα εισόδου:

Πλήǫης έμφǫαξη:

$$r_{\varepsilon} = 16 \gamma \iota \alpha \ 0^{\circ} \le \phi \le 190^{\circ}$$

Απόφοαξη:

$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \frac{\mathbf{r}_{\varepsilon 0}}{\cos(\phi_{\mathrm{E}} - \phi)} \ \mu \varepsilon \ \mathbf{r}_{\varepsilon 0} = 11.51 \ \mathrm{yia} \ 190^{\circ} \le \phi \le 234^{\circ}$$

$$r_{e} = 11.51 \text{ gra} 234^{\circ} \le \phi \le 276^{\circ}$$

Έμφραξη:

$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \frac{\mathbf{r}_{\varepsilon 0}}{\cos(\varphi - \varphi_{s})} \ \mu \varepsilon \ \mathbf{r}_{\varepsilon 0} = 11.51 \ \gamma \iota \alpha \ 276^{\circ} \le \phi \le 320^{\circ}$$

Πλήρης έμφραξη:

$$r_{\varepsilon} = 16 \gamma \iota \alpha \ 320^{\circ} \le \phi \le 360^{\circ}$$

4. Για τη βαλβίδα εξόδου:

Απόφραξη:

$$r_{\varepsilon} = \frac{r_{\varepsilon 0}}{\cos(\phi_{\rm E} - \phi)} \ \mu \varepsilon \ r_{\varepsilon 0} = 13.11 \ \gamma \iota \alpha \ 0^{\circ} \le \phi \le 25^{\circ}$$

$$r_{\varepsilon} = 13.11 \, \gamma \iota \alpha \, 25^{\circ} \leq \phi \leq 125^{\circ}$$

Έμφραξη:

$$r_{\varepsilon} = \frac{r_{\varepsilon 0}}{\cos(\varphi - \varphi_{s})} \ \mu \varepsilon \ r_{\varepsilon 0} = 13.11 \ \gamma \iota \alpha \ 125^{\circ} \le \phi \le 160^{\circ}$$

Πλήρης έμφραξη:

$$r_{e} = 16 \gamma \iota \alpha \ 160^{\circ} \leq \phi \leq 350^{\circ}$$

Απόφραξη:

$$r_{\varepsilon} = \frac{r_{\varepsilon 0}}{\cos(25^{\circ} - \varphi)} \ \mu \varepsilon \ r_{\varepsilon 0} = 13.11 \ \gamma \iota \alpha \ 350^{\circ} \le \phi \le 360^{\circ}$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα όπου δείχνει συγκεντρωτικά τις συναρτήσεις **r**_ε(φ) για την περισταλτική αντλία δύο σταδίων έγχυσης.



Εικόνα 1-17Συναρτήσεις Γε(φ) των εκκέντρων της πρότυπης δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας σε ένα κύκλο διέγερσης και αντίστοιχη γεωμετρία των εκκέντρων με βάση τον προτεινόμενο σχεδιασμό.

Όπως παφατηφούμε και από το διάγφαμμα υπάφχουν οφισμένοι χφόνοι που ενώ στα έμβολα υπάφχει αλλαγή στη διατομή του εκκέντφου ουσιαστικά δεν επηφεάζεται η διατομή του σωλήνα. Η διατομή του σωλήνα επηφεάζεται μόνο στο διάστημα $12 \le r_e \le 15$ και συνεπώς ουσιαστικά μόνο εκεί μας ενδιαφέφει η κίνηση των εκκέντφων για να μποφέσουμε να υπολογίσουμε τον όγκο εμβολισμού.

1.8.2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΜΒΑΔΟΥ ΚΑΙ ΓΩΝΙΩΝ

Με βάση τις παραπάνω ανάλυση έχουμε για το εμβαδό ότι θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (1.9.στ), που δίνει το εμβαδό σε mm² και άρα

1. Για τη βαλβίδα εισόδου

Μέχοι τις 190° ισχύει ότι A=0. Έπειτα ξεκινάει η απόφοαξη, η οποία επηρεάζει τη διατομή του σωλήνα από τη στιγμή που $r_{\epsilon}=15$ mm επομένως λύνουμε την $r_{\epsilon}=\frac{11.51}{\cos(234^{\circ}-\phi)}=15$ και βρίσκουμε ότι $\phi=194.1150247^{\circ}$. Επόμενως για

 $0^{\circ} \le \phi \le 194.1150247^{\circ}$ έχω A=0.

Η απόφραξη συνεχίζεται μέχρι τη στιγμή όπου r_ε=12mm όπου τότε ανοίγει πλήρως ο σωλήνας. Άρα λύνουμε την $r_{ε} = \frac{11.51}{\cos(234^{\circ} - \phi)} = 12$ ως προς φ και βρίσκουμε $\phi = 217.5701331^{\circ}$. Άρα για 194.1150247° $\leq \phi \leq 217.5701331^{\circ}$ το εμβαδόν διατομής του σωλήνα δίνεται, με αντικατάσταση στην (1.8.στ), από τη σχέση

A = 2.25
$$\pi - \frac{\pi}{4} \left[\frac{11.51}{\cos(234^\circ - \phi)} - 12 \right]^2$$

Έπειτα ο σωλήνας είναι πλήρως ανοικτός μέχρι τη στιγμή που στην διαδικασία έμφραξης έχουμε $r_{\epsilon}=12$ mm δηλαδή λύνουμε την $r_{\epsilon}=\frac{11.51}{\cos(\varphi-276^{\circ})}=12$ ως προς φ και βρίσκουμε $\varphi=292.4298669^{\circ}$ άρα για 217.5701331° $\leq \varphi \leq 292.4298669^{\circ}$ έχω $A = \pi R_{t}^{2} = 2.25\pi$ Κατά τη διάρκεια της έμφραξης του σωλήνα χρησιμοποιούμε πάλι την (1.8.στ) μέχρι τη στιγμή που όπως προηγούμενα θα πρέπει να ισχύει $r_{\epsilon}=15$ mm άρα λύνουμε την

$$\mathbf{r}_{\varepsilon} = \frac{11.51}{\cos(\varphi - 276^{\circ})} = 15 \qquad \text{kal} \qquad \acute{\varepsilon}\chi \\ \text{ouple} \qquad \mathbf{\phi} = 315.8849753^{\circ} \qquad \acute{\alpha} \\ \text{oa} \qquad \gamma \\ \text{ia} \qquad \mathbf{\phi} = 315.8849753^{\circ} \qquad \acute{\varepsilon}\chi \\ \text{obs} = 315.8849753^{\circ} \qquad \acute{\varepsilon}\chi$$

$$292.4298669^{\circ} \le \phi \le 315.8849753^{\circ} \quad \acute{\varepsilon}\chi\omega \quad A = 2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left[\frac{11.51}{\cos(\phi - 276^{\circ})} - 12 \right]^{2}$$

Τέλος για το διάστημα 315.8849753° ≤ φ ≤ 360° ο σωλήνας είναι πλήρως κλειστός άρα και πάλι Α=0.

2. Για το μεγάλο έμβολο

Για $0^{\circ} \le \phi \le 150^{\circ}$ έχω ότι ισχύει η (1.8.στ) και με $r_{e} = 12 + (14.9 - 12)\sqrt{\frac{0 - \phi}{0 - 150}}$ άφα με αντικατάσταση στην (1.8.στ) έχω ότι το εμβαδόν της διατομής δίνεται από τη σχέση

$$A = \pi R_t^2 - 2.1025\pi \frac{\phi}{150} \Longrightarrow A = 2.25\pi - 0.014016666667\pi \phi$$

Για $150^\circ \le \phi \le 210^\circ$ η ακτίνα του έκκεντρου παραμένει σταθερή και προφανώς η διατομή του σωλήνα παραμένει σταθερή και είναι $A = 2.25\pi - 2.1025\pi \Longrightarrow A = 0.1475\pi$ Έπειτα αρχίζει η αποσυμπίεση μέχρι τη χρονική στιγμή όπου έχουμε r_e=12mm και λύνουμε την $\mathbf{r}_{\varepsilon} = \frac{11.41}{\cos(250^{\circ} - \phi)} = 12$ ως προς φ οπότε προκύπτει $\phi = 231.9586649^{\circ}$ άρα για 210° $\leq \phi \leq 231.9586649^{\circ}$ έχω ότι $A = 2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left[\frac{11.41}{\cos(250^{\circ} - \phi)} - 12 \right]^{2}$. Τέλος για $231.9586649^\circ \le \phi \le 360^\circ$ ο σωλήνας είναι πλήρως ανοικτός δηλαδή $A = \pi R_{t}^{2} = 2.25\pi$. 3. Για τη βαλβίδα εξόδου Για $0^{\circ} \le \phi \le 25^{\circ}$ έχω αποφραξη και όλο το διάστημα αυτό επηρεάζει το σωλήνα άρα χρησιμοποιώντας την $\mathbf{r}_{\varepsilon} = \frac{13.11}{\cos(25^{\circ} - \phi)}$ έχω ότι $\mathbf{A} = 2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left| \frac{13.11}{\cos(25^{\circ} - \phi)} - 12 \right|^{2}$ που προκύπτει από αντικατάσταση της προήγουμενης σχέσης στην (1.8.στ) Στο διάστημα $25^{\circ} \le \phi \le 125^{\circ}$ έχω ότι η ακτίνα του έκκεντρου παραμένει σταθερή άρα και η διατομή παραμένει σταθερή που είναι $A = 2.25\pi - 0.308025\pi \Longrightarrow A = 1.941975\pi$ Στη συνέχεια έχουμε έμφραξη του σωλήνα άρα σύμφωνα και με την εικόνα 1.17 πρέπει ομοίως με πριν να λύσουμε την $r_{\epsilon} = \frac{13.11}{\cos(\phi - 125^{\circ})} = 15 \omega$ ς προς φ. Έτσι έχουμε

 $φ = 154.073154^{\circ} \text{ και άρα αντικαθιστώντας στην (1.8.στ) έχω ότι για}$ $125^{\circ} \le φ \le 154.073154^{\circ} είναι A = 2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left[\frac{13.11}{\cos(\phi - 125^{\circ})} - 12 \right]^{2}.$

Στη συνέχεια ο σωλήνας μένει πλήρως κλειστός μέχρι που ξεκινάει η απόφραξη όπου και πάλι πρέπει να υπολογίσουμε τη γωνία όπου συμβαίνει $r_{\epsilon} = \frac{13.11}{\cos(25^{\circ} - \phi)} = 15$. Προκύπτει $\phi = 355.926846^{\circ}$ άρα για $154.073154^{\circ} \le \phi \le 355.926846^{\circ}$ είναι A=0.

Τέλος, για την απόφραξη έχουμε ότι για 355.926846° ≤ φ ≤ 360° πρέπει να γίνει αντικατάσταση της $r_ε = \frac{13.11}{\cos(25^\circ - φ)}$ στην (1.8.στ) και έτσι προκύπτει ότι π[13.11]²

A =
$$2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left[\frac{13.11}{\cos(25^\circ - \phi)} - 12 \right]$$
.

4. Για το μικοό έμβολο

Για το διάστημα 0° ≤ φ ≤ 150° έχω αποσυμπίεση του σωλήνα οπότε με αντικατάσταση της $r_{\epsilon} = r_0 + (r_{\epsilon max} - r_0) \sqrt{\frac{\phi_E - \phi}{\phi_E - \phi_s}}$ με ro=12, $r_{\epsilon max}$ =14.9 στην (1.8.στ) έχουμε τελικά ότι προκύπτει $A = \pi R_t^2 - 2.1025\pi \frac{150 - \phi}{150} \Rightarrow A = 2.25\pi - 0.014016666667\pi(150 - \phi)$ Για το διάστημα $150^{\circ} \le \phi \le 180^{\circ}$ ο σωλήνας παραμένει πλήρως ανοικτός συνεπώς $A = \pi R_t^2 = 2.25\pi$ όπως και προηγουμένως.

Στο διάστημα 180° ≤ φ ≤ 330° έχω συμπίεση του σωλήνα οπότε με αντικατάσταση της $r_{\epsilon} = r_0 + (r_{\epsilon_{max}} - r_0) \sqrt{\frac{\phi_s - \phi}{\phi_s - \phi_E}}$ με ro=12, $r_{\epsilon_{max}}$ =14.9 στην (1.8.στ) έχουμε τελικά ότι ποκύπτει $A = \pi R_t^2 - 2.1025\pi \frac{\phi - 180}{150} \Rightarrow A = 2.25\pi - 0.01401666667\pi(\phi - 180)$.

Τέλος στο διάστημα $330^{\circ} \le \phi \le 360^{\circ}$ η συμπίεση του σωλήνα παραμένει σταθερή και με $r_{e} = 14.9$ mm και αντικατάσταση στην (1.9.στ) έχω ότι $A = 0.1475\pi$

1.8.3 ΣΧΕΣΕΙΣ ΟΓΚΟΥ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΓΩΝΙΩΝ

Από τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί σε μια πλήρη περίοδο ο όγκος του ρευστού που εγχύεται σε κάθε φάση του κύκλου. Θεωρώντας ως αρχή της περιόδου(t=0) τη στιγμή που η έξοδος είναι κλειστή και πάει μόλις να ανοίξει και τότε οι σχέσεις που θα πάρουμε για να είναι σωστές θα πρέπει να μετατοπίσουμε την αρχή των γωνιών(φ=0) τη στιγμή που πάει να ανοίξει βαλβίδα εξόδου. Δηλαδή θα πρέπει να μετατοπιστεί κατά η $φ = 360^{\circ} - 355.926846^{\circ} = 4.073154^{\circ}$. Ουσιαστικά θα εξετάσουμε την έγχυση που ποοκύπτει αφ'ενός από το άθροισμα των όγκων που δίνουν το μεγάλο έμβολο (L=60mm) και η βαλβίδα εξόδου(L=8mm) και αφετέρου από τον όγκο που δίνει το βοηθητικό έμβολο(L=30mm). Τη στιγμή λοιπόν t=0 η έξοδος είναι κλειστή και πάει μόλις να ανοίξει οπότε η διάταξη έχει όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-18.



Εικόνα 1-18Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0

Εδώ λοιπόν έχουμε ότι ισχύει $V_1 = \pi R_t^2 L = 135\pi \text{ mm}^3$. Χρησιμοποιώντας τον τύπο $\varphi = 2\pi \frac{t}{T} \Rightarrow t = 2\pi \frac{\varphi}{T}$ και τις σχέσεις από την παράγραφο 1.8.2 προκύπτει ότι σε χρόνικο διάστημα t=0.01131431667T η έξοδος έχει ανοίξει λίγο(έχουμε δηλαδή οπισθορροή) και το μεγάλο έμβολο αρχίζει να συμπιέζει οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-19.



Εικόνα 1-19Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.01131431667T

Εδώ επηρεάζει μόνο η βαλβίδα εξόδου και εφ'όσον έχω οπισθορροή θα έχω

$$V_{\beta 2} = -8A = -8\left[2.25\pi - \frac{\pi}{4}\left(\frac{13.11}{\cos(-2\pi\frac{t}{T} - 5.775763046)} - 12\right)^2\right]$$

Σε χρόνικο διάστημα t=0.0807587611Τ η βαλβίδα εξόδου σταθεροποιείται και το μεγάλο έμβολο συμπιέζει ενώ το μικρό αναρροφά οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-20.

Εδώ από το μεγάλο έμβολο έχουμε έγχυση

$$V_1 = 135\pi - 60 * \left[2.25\pi - 2.523 \left(2\pi \frac{t}{T} - 0.07108994824 \right) \right],$$



Εικόνα 1-20Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.0807587611T

ενώ από τη βαλβίδα εξόδου εγχύουμε:

$$V_{\beta 2} = -8A = -8\left[2.25\pi - \frac{\pi}{4}\left(\frac{13.11}{\cos(-2\pi\frac{t}{T} - 5.775763046)} - 12\right)^2\right]$$

Για το διορθωτικό έμβολο ποοκύπτει $V_2 = -75.69\pi * \left(2\frac{t}{T} - 0.0226286333\right)$ μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή.

Σε χρόνικο διάστημα t=0.3585365389Τ η βαλβίδα εξόδου αρχίζει να συμπιέζει ενώ το μικρό έμβολο συνεχίζει να αποσυμπιέζει οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-21.

Εδώ από το μεγάλο έμβολο έχουμε έγχυση:

$$V_1 = 135\pi - 60* \left[2.25\pi - 2.523 \left(2\pi \frac{t}{T} - 0.07108994824 \right) \right],$$

ενώ από τη βαλβίδα εξόδου δεν έχω έγχυση άφα $V_{\beta 2} = 0$. Για το διοφθωτικό έμβολο ποοκύπτει $V_2 = -75.69\pi * \left(2\frac{t}{T} - 0.0226286333\right)$ μέχοι εκείνη τη χρονική στιγμή.



Εικόνα 1-21 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.3585365389T

Σε χρόνικο διάστημα t=0.4279809833T το μικρό έμβολο έχει αποσυμπιέσει πλήρως ενώ το μεγάλο φτάνει στο κατώτατο σημείο του οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-22.

Εδώ από το μεγάλο έμβολο έχουμε έγχυση:

$$V_1 = 135\pi - 60* \left[2.25\pi - 2.523 \left(2\pi \frac{t}{T} - 0.07108994824 \right) \right],$$

ενώ από τη βαλβίδα εξόδου έχω έγχυση:

$$V_{\beta 2} = -8A = -8\left[2.25\pi - \frac{\pi}{4}\left(\frac{13.11}{\cos(2\pi\frac{t}{T} - 2.252751513)} - 12\right)^2\right].$$

Για το διορθωτικό έμβολο ποοκύπτει $V_2 = -75.69\pi * \left(2\frac{t}{T} - 0.0226286333\right)$ μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή.



Εικόνα 1-22 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.4279809833T

Σε χρόνικο διάστημα t=0.4392953T η βαλβίδα εξόδου κλείνει πλήρως οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-23.



Εικόνα 1-23 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.4392953T

Εδώ από το μεγάλο έμβολο δεν έχουμε έγχυση άρα $V_1 = 126.15\pi$ ενώ από τη βαλβίδα εξόδου έχω έγχυση:

$$V_{\beta 2} = -8A = -8\left[2.25\pi - \frac{\pi}{4}\left(\frac{13.11}{\cos(2\pi\frac{t}{T} - 2.252751513)} - 12\right)^2\right].$$

Για το διορθωτικό έμβολο προκύπτει $V_2 = -63.075\pi$ σταθερό διότι μέχρι την χρονική στιγμή t=0.5113143167T το διορθωτικό έμβολο μένει ακίνητο.

Σε χρόνικο διάστημα t=0.5113143167T το διορθωτικό έμβολο αρχίζει να συμπιέζει οπότε η διάταξη παραμένει όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-24.



Εικόνα 1-24Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.5113143167T

Εδώ από το μεγάλο έμβολο δεν έχουμε έγχυση άρα $V_1 = 126.15\pi$ ενώ από τη βαλβίδα εξόδου δεν έχω έγχυση άρα $V_{\beta 2} = 0$. Για το διορθωτικό έμβολο προκύπτει $V_2 = -63.075\pi$ σταθερό διότι μέχρι την χρονική στιγμή t=0.5113143167T το διορθωτικό έμβολο μένει ακίνητο. Επομένως σε αυτό το διάστημα η έγχυση παραμένει σταθερή.

Από εδώ και πέρα όπως φαίνεται και από την Εικ. 1-17 οι μεταβολές στη διατομή του μεγάλου εμβόλου δεν επηρεάζουν την έξοδο γιατί η βαλβίδα εξόδου παραμένει όλο αυτό το διάστημα κλειστή. Παρ'όλα αυτά και επειδή θα μας χρησιμεύσει αργότερα για να χαράξουμε την είσοδο της αντλίας θα συνεχίσουμε να παρακολουθούμε την πορεία του άσχετα με το αν επηρεάζει την έγχυση ή όχι.

Σε χρόνικο διάστημα t=0.9279809833T το διορθωτικό έμβολο σταματάει να συμπιέζει οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-25.



Εικόνα 1-25 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.9279809833T

Εδώ από το μεγάλο έμβολο δεν έχουμε έγχυση άρα $V_1 = 126.15\pi$ και από τη βαλβίδα εξόδου δεν έχω έγχυση άρα $V_{\beta 2} = 0$. Για το διορθωτικό έμβολο προκύπτει

$$V_2 = -151.38\pi \frac{t}{T} - 140.4777613\pi \,.$$

Τέλος σε χρόνο t=T η βαλβίδα εξόδου ξαναανοίγει για να ξεκινήσει καινούρια περίοδος. Τότε η διάταξη δεν έχει αλλάξει μορφή οπότε η διάταξη παραμένει όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-26.



Εικόνα 1-26Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=T

Εδώ από το μεγάλο έμβολο δεν έχουμε έγχυση άφα $V_1 = 126.15\pi$ και από τη βαλβίδα εξόδου δεν έχω έγχυση άφα $V_{\beta 2} = 0$. Για το διοφθωτικό έμβολο δεν πφοκύπτει επίσης έγχυση άφα $V_2 = 0$.

Έχοντας υπόψην όλα τα παραπάνω κατασκευάζουμε διάγραμμα που δείχνει την έγχυση του ρευστού κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Με μπλε χρώμα παριστάνεται η έγχυση που οφείλεται στο άθροισμα της έγχυσης του μεγάλου εμβόλου και της βαλβίδας εξόδου ενώ με κόκκινο αυτή του μικρού εμβόλου. Με πράσινο χρώμα φαίνεται η έγχυση που δίνεται συνολικά από την αντλία 2 σταδίων.

Όπως μποφούμε να παφατηφήσουμε από το διάγφαμμα φαίνονται δύο διαστήματα στα οποία δεν υπάφχει έγχυση και μένουν σταθεφά και ένα διάστημα στο οποίο υπάφχει οπισθοφφοή. Όπως φαίνεται και από τους παφαπάνω υπολογισμούς το μεγάλο και το μικφό έμβολο έχουν γφαμμικές συναφτήσεις παφοχής-χφόνου. Επομένως η μη γφαμμικότητα της συνολικής έγχυσης οφείλεται στην επίδφαση της λειτουφγίας της βαλβίδας εξόδου, η οποία δεν είναι γφαμμική.

Πιο συγκεκοιμένα η βαλβίδα εξόδου στο διάστημα $0 \le t \le 0.08075876111T$ αποσυμπιέζει δηλαδή αναρροφά όγκο ίσο με $V = 15.538 \pi mm^3$. Στο διάστημα $0.3585365389T \le t \le 0.4392953T$ η βαλβίδα εγχύει την ίδια ποσότητα ρευστού προς την έξοδο. Επομένως σε όγκο η βαλβίδα ό,τι παίρνει το αποδίδει.



Εικόνα 1-27 Σχηματική παράσταση της έγχυσης της δίχρονης αντλίας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Είναι γεγονός επίσης πως στην πρώτη περίπτωση απορροφά αυτόν τον όγκο σε χρόνο 0.08075876111T και στην δεύτερη περίπτωση τον αποδίδει σε χρόνο t = 0.4392953T - 0.3585365389T = 0.08075876111T δηλαδή έχουμε την ίδια ποσότητα όγκου στον ίδιο χρόνο(κοινή μέση παροχή). Επομένως θα μπορούσαμε να πούμε πως ενώ σε χρόνο ίσο με μία περίοδο έχουμε διάστημα που υπάρχει οπισθορροή, αναρροφώντας ρευστό από την έξοδο, ωστόσο αυτή κατά έναν τρόπο «εξισσόροπείται» από την απόδοση του ίδιου όγκου στον ίδιο χρόνο αργότερα μέσα στην περίοδο προς την έξοδο. Συνεπώς ο όγκος ρευστού που εγχύεται προς την έξοδο είναι μόνο αυτός που αποδίδει η γραμμική έγχυση των δύο εμβόλων.

Τέλος επειδή το ποσοστό της μη γραμμικής έγχυσης της βαλβίδας λαμβάνει χώρα μόνο σε ένα 8% της περιόδου κάθε φορά ενώ στο υπόλοιπο πολύ μεγαλύτερο ποσοστό της περιόδου είναι γραμμική, συνολικά η έγχυση μπορεί να θεωρηθεί γραμμική σε όλη την περίοδο. Εξάλλου καθώς αυξάνεται η συχνότητα η περίοδος μικραίνει και σε απόλυτη τιμή χρόνου το ποσό της μη-γραμμικής έγχυσης γίνεται σε ένα πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Τα διαστήματα όπου η αντλία δεν εγχύει καθόλου αμελούνται και μάλιστα εξαλείφονται όσο αυξάνει η συχνότητα.

1.8.4 ΣΧΕΣΕΙΣ ΟΓΚΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΓΩΝΙΩΝ

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για την είσοδο της παλιάς αντλίας θα χαράξουμε το διάγραμμα του όγκου εισόδου σε μια περίοδο. Παρατηρούμε ότι όσο η βαλβίδα εισόδου είναι κλειστή δεν έχω καθόλου όγκο εισόδου στο χώρο της αντλίας. Η βαλβίδα εισόδου παραμένει κλειστή μέχρι τη χρονική στιγμή t=0.5505227186T και εκεί αρχίζει η αναρρόφηση. Εκείνη τη στιγμή η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-28.



Εικόνα 1-28 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.5505227186T

Έως εκείνη τη στιγμή δεν έχω είσοδο νέου φευστού στο σωλήνα οπότε ούτε από τη βαλβίδα εισόδου άφα $V_{\rm B1} = 0$ ούτε από το μεγάλο έμβολο άφα $V_{\rm I} = 0$.

Τη χρονική στιγμή t=0.59464765T ανοίγει και το μεγάλο έμβολο και ξεκινάει και από αυτό η αναρρόφηση οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-29.

Μέχρι αυτή τη χρονική στιγμή έχω είσοδο από τη βαλβίδα εισόδου:

$$V_{\beta 1} = 8A = 8 \left[2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left(\frac{11.51}{\cos(-2\pi \frac{t}{T} - 2.128024909)} - 12 \right)^2 \right],$$

enώ apó to megálo émbolo akóma den upáqcei eísodos áqa $\,V_{\rm l}=0$.



Εικόνα 1-29Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.59464765T

Τη χρονική στιγμή t=0.6156757975Τ η βαλβίδα εισόδου έχει ανοίξει πλήρως οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-30.

Μέχρι αυτή τη χρονική στιγμή έχω είσοδο από τη βαλβίδα εισόδου:

$$V_{\beta 1} = 8A = 8\left[2.25\pi - \frac{\pi}{4}\left(\frac{11.51}{\cos(-2\pi\frac{t}{T} - 2.128024909)} - 12\right)^2\right],$$

ενώ από το μεγάλο έμβολο έχω είσοδο:

$$V_{1} = 60A = 60 \left[2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left(\frac{11.41}{\cos(-2\pi \frac{t}{T} + 4.434413078)} - 12 \right)^{2} - 0.1467500636\pi \right].$$



Εικόνα 1-30Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.6156757975T

Τη χρονική στιγμή t=0.655643914T ανοίγει και το μεγάλο έμβολο πλήρως οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-31.



Εικόνα 1-31 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.655643914T

Μέχοι αυτή τη χρονική στιγμή έχω είσοδο από τη βαλβίδα εισόδου $V_{\beta 1} = 18\pi$ σταθερά διότι η βαλβίδα από το προηγούμενο χρονικό διάστημα παραμένει ανοιχτή ενώ από το μεγάλο έμβολο έχω είσοδο

$$V_{1} = 60A = 60 \left[2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left(\frac{11.41}{\cos(-2\pi \frac{t}{T} + 4.434413078)} - 12 \right)^{2} - 0.1467500636\pi \right].$$

Τη χρονική στιγμή t=0.8236195025Τ η βαλβίδα εισόδου αρχίζει να συμπιέζει οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-32.



Εικόνα 1-32 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.8236195025T

Μέχρι αυτή τη χρονική στιγμή έχω είσοδο από τη βαλβίδα εισόδου $V_{\beta 1} = 18\pi$ σταθερά διότι η βαλβίδα από το προηγούμενο χρονικό διάστημα παραμένει ανοιχτή ενώ από το μεγάλο έμβολο έχω είσοδο $V_1 = 135\pi$ επίσης σταθερά διότι και το μεγάλο έμβολο από το προηγούμενο διάστημα παραμένει ανοιχτό.

Τη χρονική στιγμή t=0.8887725814Τ η βαλβίδα εισόδου έχει κλείσει πλήρως οπότε η διάταξη γίνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-33.



Εικόνα 1-33 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=0.8887725814T

Μέχοι αυτή τη χρονική στιγμή έχω είσοδο από τη βαλβίδα εισόδου:

$$V_{\beta 1} = 8A = 8 \left[2.25\pi - \frac{\pi}{4} \left(\frac{11.51}{\cos(2\pi \frac{t}{T} - 4.888198684)} - 12 \right)^2 \right],$$

ενώ από το μεγάλο έμβολο έχω είσοδο $V_1 = 135\pi$ σταθερά διότι και το μεγάλο έμβολο από το προηγούμενο διάστημα παραμένει ανοιχτό.

Τέλος τη χρονική στιγμή t=T δεν υπάρχει καμία αλλαγή στα έμβολα που συμμετέχουν στην είσοδο οπότε η διάταξη παραμένει όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1-34.

Μέχοι αυτή τη χρονική στιγμή έχω είσοδο από τη βαλβίδα εισόδου $V_{\beta l} = 0$ ενώ από το μεγάλο έμβολο έχω είσοδο $V_l = 126.15\pi$ σταθερά διότι και το μεγάλο έμβολο από το προηγούμενο διάστημα παραμένει ανοιχτό.



Εικόνα 1-34 Σχηματική παράσταση του προφίλ του σωλήνα της αντλίας τη χρονική στιγμή t=T.

Έχοντας υπόψην όλα τα παφαπάνω κατασκευάζουμε διάγφαμμα που δείχνει τον όγκο εισόδου του φευστού κατά τη διάφκεια μιας πεφιόδου. Με ποφτοκαλί χφώμα παφιστάνεται η είσοδος που οφείλεται στη βαλβίδα εισόδου ενώ με καφέ αυτή του μεγάλου εμβόλου. Με μωβ χφώμα φαίνεται η είσοδος που δίνεται συνολικά από την αντλία 2 σταδίων.



Εικόνα 1-35Σχηματική παράσταση της εισόδου της δίχρονης αντλίας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Παφατηφείται ενώ η είσοδος είναι διακεκομένη και όχι γφαμμική, η έξοδος είναι σχεδόν γφαμμικήτο οποίο επιτυγχάνεται με το συγκεκφιμένο σχεδιασμό του μηχανισμού της αντλίας. Επίσης είναι θετικό και αναμενόμενο το γεγονός ότι η συνολική είσοδος (126.15π) ισούται με τη συνολική έγχυση της αντλίας πφάγμα που δείχνει ότι οι υπολογισμοί μας ήταν σωστοί. Διευκφινίζεται ότι ενώ στο πφώτο διάγφαμμα της συνολικής έγχυσης ως θετικός λαμβάνεται ο όγκος που εξέφχεται από την αντλία, στο δεύτεφο διάγφαμμα ως θετικός

1.9 ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

Θα υπολογίσουμε με τον ίδιο τρόπο σκέψης τα ποσά του ρευστού από την είσοδο και την έξοδο της κυματοειδούς αντλίας. Σε προηγούμενη διπλωματική [22] έχει γίνει θεωρητική μελέτη για τις ακτίνες των εκκέντρων και την έξοδο της αντλίας. Η μελέτη αυτή κατέληξε στις ακτίνες καθ'ενός από τα 6 κύρια έκκεντρα και του ενός βοηθητικού έτσι ώστε να μπορεί να δίνεται γραμμική έγχυση κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της αντλίας χωρίς να υπάρχει οπισθορροή. Το διάγραμμα των ακτίνων, αντίστοιχο της Εικ.1-17 φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 1-36Συναρτήσεις Γε(φ) των εκκέντρων της κυματοειδούς γραμμικής περισταλτικής αντλίας σε ένα κύκλο διέγερσης

Με μπλε χρώμα φαίνεται το 1° έμβολο, με καφέ το 2° κοκ φτάνοντας μέχρι το 5° που είναι με σκούρο καφέ χρώμα. Το 6° έμβολο που ακολουθεί όταν κλείνει πλήρως δεν μένει σταθερό σε μια θέση όπως τα υπόλοιπα ενώ τέλος με κόκκινο χρώμα φαίνεται το 7° βοηθητικό έμβολο που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της γραμμικής έγχυσης κατά τη διάρκεια της εισόδου.

Όπως φαίνεται τα 5 πρώτα έμβολα έχουν κοινό διάγραμμα που διαφέρει κατά 60° το ένα με το άλλο. Η μελέτη καταλήγει στο διάγραμμα εξόδου της κυματοειδούς αντλίας που φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 1-37Σχηματική παράσταση της έγχυσης της κυματοειδούς αντλίας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Εδώ με κόκκινο χοώμα παρίσταται η έγχυση της αντλίας που οφείλεται στα έμβολα 1-6 ενώ με μπλε χρώμα η έγχυση που οφείλεται στο 7° διορθωτικό έμβολο. Με πράσινο χρώμα

φαίνεται το σύνολο της έγχυσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι θεωρητικά η έγχυση προκύπτει απόλυτα γραμμική πράγμα που σε ένα βαθμό αποδεικνύεται και στην πειραματική μελέτη της αντλίας[24].

Έχοντας υπόψην τα παφαπάνω και έχοντας στη διάθεσή μας από πφοηγούμενες μελέτες που πφοαναφέφαμε όλα τα δεδομένα σκεφτόμενοι με τον ίδιο ακφιβώς τφόπο καταλήγουμε και στο διάγφαμμα που αφοφά την είσοδο της πφότυπης πεφισταλτικής αντλίας κυματοειδούς διέγεφσης.



Εικόνα 1-38Σχηματική παράσταση της εισόδου της κυματοειδούς αντλίας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα η είσοδος δεν ακολουθεί την ίδια γραμμική συμπεριφορά, πράγμα που άλλωστε δεν μας ενδιαφέρει τόσο. Επίσης για τον υπολογισμό της εισόδου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μόνο από τα 5 πρώτα έμβολα διότι όπως φαίνεται και στην Εικ. 1-36 μόλις ανοίγει το 6° έμβολο το 1° κλείνει άρα δεν έχω είσοδο για το διάστημα στο οποίο είναι κλειστό. Επίσης είναι θετικό και αναμενόμενο το γεγονός ότι η συνολική είσοδος (93.6π) ισούται με τη συνολική έγχυση της αντλίας πράγμα που δείχνει ότι οι υπολογισμοί μας ήταν σωστοί. Διευκρινίζεται ότι ενώ στο πρώτο διάγραμμα της συνολικής έγχυσης ως θετικός λαμβάνεται ο όγκος που εξέρχεται από την αντλία, στο δεύτερο διάγραμμα ως θετικός λαμβάνεται ο όγκος που εισέρχεται σε αυτήν.

1.10 ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗΣ ΔΙΧΡΟΝΗΣ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

Θα υπολογίσουμε με τον ίδιο τρόπο σκέψης τα ποσά του ρευστού από την είσοδο και την έξοδο της εξεταζόμενης δίχρονης αντλίας. Σε προηγούμενη διπλωματική [22] έχει γίνει θεωρητική μελέτη για τις ακτίνες των εκκέντρων και την έξοδο της αντλίας. Η μελέτη αυτή κατέληξε στις ακτίνες καθ'ενός από τα έκκεντρα (του μεγάλου και του μικρού καθώς και των βαλβίδων εισόδου και εξόδου) έτσι ώστε να μπορεί να δίνεται γραμμική έγχυση κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της αντλίας χωρίς να υπάρχει οπισθορροή. Το διάγραμμα των ακτίνων, αντίστοιχο της Εικ.1-17 φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 1-39Συναρτήσεις re(φ) των εκκέντρων της εξεταζόμενης δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας σε ένα κύκλο διέγερσης

Με μπλε χοώμα φαίνεται το μεγάλο έμβολο, με ποάσινο η βαλβίδα εισόδου, με κόκκινο η βαλβίδα εισόδου και με μαύοο το μικοό έμβολο. Και εδώ η μελέτη καταλήγει στο διάγοαμμα εξόδου της κυματοειδούς αντλίας που φαίνεται παοακάτω:



Εικόνα 1-40 Σχηματική παράσταση της έγχυσης της εξεταζόμενης δίχρονης αντλίας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Εδώ με κόκκινο χοώμα παοίσταται η είσοδος της αντλίας που οφείλεται στο μεγάλο έμβολο και στη βαλβίδα εξόδου ενώ με μπλε χοώμα η έγχυση που οφείλεται στο διορθωτικό έμβολο. Με ποάσινο χοώμα φαίνεται το σύνολο της έγχυσης. Είναι χαοακτηριστικό ότι θεωρητικά η έγχυση πορκύπτει απόλυτα γοαμμική ποάγμα που θα ποσπαθήσουμε να αποδείξουμε και πειοαματικά σε αυτή τη διπλωματική.

Έχοντας υπόψην τα παφαπάνω και έχοντας στη διάθεσή μας από πφοηγούμενες μελέτες που πφοαναφέφαμε όλα τα δεδομένα σκεφτόμενοι με τον ίδιο ακφιβώς τφόπο καταλήγουμε και στο διάγφαμμα που αφοφά την είσοδο της πφότυπης πεφισταλτικής αντλίας 2 σταδίων έγχυσης που θα εξετάσουμε σε αυτή τη διπλωματική.



Εικόνα 1-41 Σχηματική παράσταση της εισόδου της εξεταζόμενης δίχρονης αντλίας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Όπως φαίνεται και στο διάγφαμμα η είσοδος δεν ακολουθεί την ίδια γφαμμική συμπεφιφοφά, πφάγμα που άλλωστε δεν μας ενδιαφέφει τόσο. Επίσης για τον υπολογισμό της εισόδου χφησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μόνο από το μεγάλο έμβολο και τη βαλβίδα εισόδου διότι όπως φαίνεται και στην Εικ. 1-39 στο διάστημα στο οποίο έχω είσοδο της αντλίας η βαλβίδα εξόδου είναι κλειστή άφα ούτε αυτή ούτε το διοφθωτικό έμβολο συμμετέχει. Είναι επίσης γεγονός πως η τελευταία τιμή της συνολικής εισόδου δηλ. για t=T βφέθηκε 109.35π που είναι ακφιβώς η τιμή της συνολικής έγχυσης σε μια πεφίοδο πφάγμα που επιβεβαιώνει ότι οι υπολογισμοί μας ήταν σωστοί. Διευκφινίζεται ότι ενώ στο πφώτο διάγφαμμα της συνολικής έγχυσης ως θετικός λαμβάνεται ο όγκος που εισέρχεται από την αντλία, στο δεύτεφο διάγφαμμα ως θετικός λαμβάνεται ο όγκος που εισέρχεται σε αυτήν.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ– ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πειοαματική διάταξη δοκιμής (εικόνα 2-1) της ποότυπης πεοισταλτικής αντλίας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2-2, αποτελείται από μία δεξαμενή αναορόφησης Δ1, μία τορφοδοτική δεξαμενή αυτής Δ2, μία δεξαμενή κατάθλιψης Δ3, μία δυναμοκυψέλη (Load Cell) έχοντας θέση ζυγού ακοιβείας, έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατορπέα (ADC), έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y), μία γραμμική δίχρονη περισταλτική αντλία δύο εμβόλων και δύο βαλβίδων, ένα σωλήνα σιλικόνης, έναν αρθρωτό σύνδεσμο, έναν κινητήρα, ένα μειωτήρα στορφών και ένα ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης του κινητήρα (controller). Η στήριξη της αντλίας και του συστήματος controller-κινητήρας-μειωτήρας 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 χοροίμετρο για μικρότερες ταχύτητες , ενώ για τη μέτρηση, τόσο της θεομοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα, όσο και της θεομοκρασίας του ρευστού χρησιμοποιούνται κατάλληλα θερμόμετρα.



Εικόνα 2-1 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 οφιζόντιο επίπεδο έδφασης B, τοποθετούμε η δυναμοκυψέλη που φέφνει τη δεξαμενή κατάθλιψης και τον αναλογικό-ψηφιακό μετατφοπέα (ADC) που συνδέει τη δυναμοκυψέλη με τον H/Y (εικόνα 2-2). Επισημαίνεται εδώ ότι το σύστημα του H/Y και ο ADC πφέπει να βφίσκονται σε αφκετή απόσταση μεταξύ τους, ώστε να μην υπάφχει ηλεκτφομαγνητική επίδφαση, λόγω εκπομπής θοφύβου από τον H/Y στον ADC και συνεπώς να αποφεύγεται η αλλοίωση του μετφούμενου σήματος του ADC.



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

Όλες οι δεξαμενές του πειράματος, όπως απεικονίζονται στην εικόνα 2-2, είναι από plexiglas πάχους 10 mm. Η δεξαμενή αναρρόφησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-3 (α), 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 υπερχείλισης 140 mm, ενώ στον υπόλοιπο χώρο συγκεντρώνεται το ρευστό που υπερχειλίζει από το χώρο αναρρόφησης. Εντός του χώρου αναρρόφησης τοποθετείται ειδικό θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ρευστού. Στον πυθμένα του χώρου αναρρόφησης είναι προσαρτημένος διαμπερός ορειχάλκινος σωλήνας μήκους 210 mm, εσωτερικής διαμέτρου 3 mm και εξωτερικής 5 mm, με κατακόρυφο μήκος εντός του χώρου αναρρόφησης 135 mm. Το πάνω άκοο του σωλήνα αναρροφά το ρευστό υπό ατμοσφαιρική πίεση. Σε χαμηλό σημείο της δεξαμενής αναρρόφησης υπάρχει βάνα με την οποία μπορεί να αδειάζεται το ρευστό, που συσσωρεύεται λόγω της υπερχείλισης από το χώρο αναρρόφησης.

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 βάνα μέσω της οποίας τροφοδοτεί το χώρο αναρρόφησης με ρευστό. Η τροφοδοσία του χώρου αναρρόφησης γίνεται με τέτοιο ρυθμό έγχυσης ρευστού (άνοιγμα βάνας), 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 υπερχείλισης της δεξαμενής αναρρόφησης.

Για την έδραση του ηλεκτροκινητήρα και της περισταλτικής αντλίας χρησιμοποιείται μεταλλική βάση από σκληρό αλουμίνιο σχήματος ανεστραμμένου ταυ. Οι κινητήρες χαμηλών και μεσαίων στροφών 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 2-3 (γ)), 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 ουθμιζόμενων αποστατών κυλινδοικού σχήματος. Αυτοί οι αποστάτες φέρουν πυκνό σπείρωμα ώστε να μπορούν να μετακινούνται κατακόρυφα πάνω στις αντίστοιχες τέσσερις ντίζες-οδηγούς που συναρμολογούν την περισταλτική αντλία. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται στάθμιση του εκκεντροφόρου άξονα της αντλίας σε οριζόντια θέση, ώστε να βρίσκεται στην ίδια ευθεία με τον άξονα περιστροφής του εκάστοτε κινητήρα και συνεπώς να μπορεί να συνδεθεί με αυτόν μέσω του αρθρωτού συνδέσμου (koppler) και να αποφευχθούν ανεπιθύμητες στρεπτικές οοπές.



Εικόνα 2-3 Μέρη της πειραματικής διάταξης: τροφοδοτική δεξαμενή και δεξαμενή αναρρόφησης (α), δεξαμενή κατάθλιψης (β), κινητήρας και controller (γ), περισταλτική αντλία (δ)

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 πεφισταλτικής αντλίας είναι από σκληφυμένη με υπεφοξείδιο σιλικόνη της εταιφίας Degania Silicone, ενώ τα στοιχεία διαμέτφου του σωλήνα είναι 3x5 mm (εσωτεφική x εξωτεφική διάμετφος), όπως ήδη έχει αναφεφθεί. Η μία άκφη του σωλήνα σιλικόνης πφος την πλευφά εισόδου της αντλίας ενώνεται με το κάτω άκφο του οφειχάλκινου σωλήνα αναφφόφησης. Κατόπιν διέφχεται από το εσωτεφικό της πεφισταλτικής αντλίας και καταλήγει στη δεξαμενή κατάθλιψης (εικόνα 2-3(β)). Το συνολικό μήκος της σωλήνωσης από το σημείο αναφφόφησης ως το σημείο της κατάθλιψης είναι 1720 mm. Ο σωλήνας σιλικόνης στο σημείο κατάθλιψης πφέπει να βυθίζεται 15 mm κάτω από την ελεύθεφη επιφάνεια του φευστού της δεξαμενής κατάθλιψης, ώστε να αποφεύγονται όσο το δυνατόν οι ταλαντώσεις της ελεύθεφης επιφάνειας που θα πφοκαλούσε η εξ αποστάσεως έγχυση του φευστού. Με αυτόν τον τφόπο δε γίνονται εσφαλμένες μετφήσεις που να πφοέρχονται από την αδφανειακή δύναμη βάφους της εγχυόμενης μάζας του φευστού.

Η οδήγηση του σωλήνα σιλικόνης στη δεξαμενή κατάθλιψης, εξασφαλίζεται με λεπτό μεταλλικό στέλεχος, ο οποίος είναι πακτωμένος σε δύο επίπεδα.

Η δεξαμενή κατάθλιψης, είναι ανοιχτή στο πάνω μέφος της, έχει εξωτεφικές διαστάσεις βάσης 220x140 mm και ύψος 170 mm και εδφάζεται στην πλατφόφμα της δυναμοκυψέλης, η οποία με τη σειφά της εδφάζεται επάνω σε ξύλινη βάση 150 mm. Στο εσωτεφικό της δεξαμενής κατάθλιψης υπάφχουν τφία διαφφάγματα από plexiglas κοινού πλάτους (120mm) και πάχους (10 mm), με αντίστοιχα ύψη 140 mm, 120 mm και 100 mm. Αυτά τα διαφφάγματα χωφίζουν τον εσωτεφικό χώφο της δεξαμενής σε τέσσεφις χώφους κατάθλιψης με τφία ύψη υπεφχείλισης 140 mm, 120 mm και 100 mm. Σε όλη τη διάφκεια των πειφαματικών μετφήσεων η ελεύθεφη στάθμη της επιφάνειας του φευστού του χώφου κατάθλιψης βφίσκεται στο ίδιο ύψος με την ελεύθεφη στάθμη της επιφάνειας του φευστού του χώφου αναφφόφησης, με επίπεδο αναφοφάς τον οφιζόντιο άξονα συμμετφίας του τμήματος του σωλήνα σιλικόνης που βφίσκεται εντός της πεφισταλτικής αντλίας.

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

δυναμοκυψέλης όσο και της κάτω επιφάνειας της ξύλινης βάσης, η οποία έρχεται σε επαφή με το οριζόντιο επίπεδο Α.

Το θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα είναι τοποθετημένο δίπλα στη συσκευή του ADC, για να προκύπτουν πιο άμεσες ενδείξεις των τοπικών θερμοκρασιακών μεταβολών, δεδομένου ότι αυτές επηρεάζουν τη λειτουργία του ADC.

Το κύριο σώμα της αντλίας (εικόνα 2-3 (δ)) είναι κατασκευασμένο $\alpha \pi \dot{\alpha}$ plexiglas και έχει σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου με διαστάσεις 160x90 mm και πάχος 25 mm. Στο εσωτερικό του υπάρχει κοιλότητα μέσα στην οποία είναι τοποθετημένα τα έμβολα και οι βαλβίδες από σκληρό αλουμίνιο, ώστε να μπορούν να κινούνται με χαλαρή συναρμογή μεταξύ τους, ενώ κατά μήκος της επιφάνειάς του υπάρχει 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 παραλληλεπιπέδου με διαστάσεις 160x90 mm και πάχος 30 mm. Το καπάκι περιέχει κυλινδρικούς οδηγούς με σπείρωμα, 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 και τις βαλβίδες προς την κάτω ακραία θέση τους. Κάτω από το κύριο σώμα της αντλίας βρίσκεται ο εκκεντροφόρος άξονας κατασκευασμένος από σκληρό αλουμίνιο, ο οποίος στηρίζεται στα άκρα του με έδρανα κύλισης. Κατά την περιστροφή του άξονα τα έκκεντρα μετατοπίζουν τα έμβολα και τις βαλβίδες προς την άνω ακραία θέση τους, ώστε να συμπιέζουν το σωλήνα. Κάθε έμβολο ή βαλβίδα 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 [Tsoukalis, 1993].

2.2 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

Οι μετφητικές 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 ηλεκτροκινό 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.

2.3 ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ (CONTROLLER), ΤΑΧΥΜΕΤΡΟ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΑ

Ο ηλεκτφοκινητήφας μεσαίων στφοφών που χφησιμοποιείται διακφίνεται στην εικόνα 2-4 (α) πάνω και έχει τα τεχνικά χαφακτηφιστικά του πίνακα 2-1. Πφόκειται για ηλεκτφοκινητήφα συνεχούς φεύματος (DC) της εταιφίας LEESON, με άξονα από σκληφυμένο ατσάλι, με μόνιμο μαγνήτη και πφοσαφμοσμένο μειωτήφα στφοφών. Ο τύπος του κινητήφα είναι εφμητικά κλειστός μη αεφιζόμενος, χωφίς θεφμική μόνωση. Διαθέτει μόνιμο σύστημα λίπανσης με ημίφφευστο γφάσο χωφίς δυνατότητα διαφφοής.

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

* Ο form factor υποδεικνύει πόση από τη συνιστώσα του εναλλασσομένου φεύματος διανέμεται στην έξοδο ως συνεχές από το σύστημα οδήγησης. Μαθηματικά αναπαφίσταται ως ο λόγος της ενεφγούς τιμής του φεύματος πφος τη μέση τιμή του. Τιμή μεγαλύτεφης της μονάδας σημαίνει ότι ποσοστό του φεύματος παφάγει θεφμότητα αντί για φοπή.

Πίνακας 2-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα με μειωτήρα.

Ο ηλεκτφοκινητήφας υψηλών στφοφών που διακφίνεται στην εικόνα 2-4 (β) είναι όμοιος με τον πφώτο, με τη διαφοφά ότι δεν έχει πφοσαφμοσμένο μειωτήφα στφοφών. Γι' αυτό το λόγο έχει ένταση φεύματος λειτουφγίας 0.7 Amps με ισχύ 1/8 HP και φτάνει μέχφι 1750 στφοφές (rpm).



Εικόνα 2-4(α) Ηλεκτροκινητήρες με μειωτήρα στροφών και ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης. (β) Ηλεκτροκινητήρας χωρίς μειωτήρα στροφών και οπτικό ταχύμετρο.

Το ηλεκτφονικό σύστημα οδήγησης (controller) διακφίνεται στην εικόνα 2-5. Είναι της εταιφίας DART CONTROLS (τύπου 15 SERIES-15DV-E) και έχει τα τεχνικά χαφακτηφιστικά που φαίνονται στον πίνακα 2-2.

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

Πίνακας 2-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος οδήγησης (controller)



Εικόνα 2-5 Controller του κινητήρα

Το ταχύμετοο που χοησιμοποιείται (εικόνα 2-6) 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 2-3.

Οθόνη ένδειξης	5 ψηφίων (ultrabright LED)
Εύφος μέτφησης	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 2-3 Τεχνικά χαρακτηριστικά οπτικού ταχύμετρου



Εικόνα 2-6 Ταχύμετρο

Τέλος, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα και του νερού χρησιμοποιούνται δυο θερμόμετρα αλκοόλης με σφάλμα ανάγνωσης ±0.5°C, που αντιστοιχεί σε μισή υποδιαίρεση της κλίμακας των θερμομέτρων.

2.4 ΔΥΝΑΜΟΚΥΨΕΛΗ(LOAD CELL), ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ-ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ(ADC) ΚΑΙ Η/Υ ΜΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Η μέτρηση του εγχυόμενου βάρους ρευστού γίνεται με δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης (εικόνα 2-7). Είναι της εταιρίας HBM (μοντέλο PW2C3 NH-1998). Έχει ανώτατο όριο φορτίου 7.2 Kg, με όριο ασφαλούς φορτίου 150 % και διαστάσεις πλατφόρμας 200x150mm. Η καμπτομένη δοκός είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο και η πλατφόρμα από plexiglas. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της δυναμοκυψέλης παρουσιάζονται στον πίνακα 2-4.



Εικόνα 2-7Δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης (μήκος πλατφόρμας: 2a = 200 mm, μήκος καμπτομένης δοκού: 2b = 130 mm).

Η δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης συνδέεται με αναλογικόψηφιακό 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.

Μεγέθη		Μονάδες μέτ οηση ς	Τιμές
Δυναμικότητα (φορτίο λειτουργίας)		Kg	6
Μέγιστο ονομαστικό φορτίο		Kg	7.2
Μέγιστο μέγεθο	ς πλατφόφμας	Mm	380 x 380
Επίδραση θερμοκρασίας στην	για εύϱος +20 °C ÷ +40 °C	%/10K	±0.0146
έξοδο ^{(1), (2)}	για εύϱος -10 ℃ ÷ +20 ℃	%/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 φο	οτίου κατά OIML R76 ^{(2), (3)}	%	±0.0194
Παραμένον σφάλμα εξόδου αποφόρτισης DR (30min) κατά OIML R60 ⁽²⁾		%	±0.0167
Αντίσταση	εισόδου	Ω	350 ÷ 500
Αντίστασι	η εξόδου	Ω	350 ÷ 500
Τάση αναφοράς διέγερσης		V	5
Ποοτεινόμενο εύοος τάσης διέγεοσης		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. φοςτίου	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 προσδιο
ρίζονται αναφορικά με το ονομαστικό φορτίο εξόδου.

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

Πίνακας 2-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά δυναμοκυψέλης PW2C3 NH-HBM.

Ο αναλογικός-ψηφιακός μετατοοπέας (ADC) της πειραματικής διάταξης (Εικόνα 2-8) είναι της εταιρίας HBM, με μοντέλο ηλεκτρονικής πλακέτας AD101B. Στον πίνακα 2-5 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ADC.



(α)

(B)

Εικόνα 2-8Αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (α) και τροφοδοτικό (β)

Τύπος		AD101B
Εύρος μέτρησης		±2.0
	mV/V	
Εύρος σήματος εισόδου		±3.0
Διακριτική ικανότητα	Bit	20 (1 Hz)
μετοούμενου σήματος, max.		
Συχνότητα δειγματοληψίας		
(εξαφτάται από τη μοφφή του σήματος	Hz	47.200
εξόδου και το baud rate)		4.7 = 500
Συχνότητα αποκοπής του ψηφιακού	Hz	$0.25 \div 40$
φίλτوου, ουθμιζόμενη στα ±3 dB		
Τάση διέγεوσης γέφυوας UB (DC)1	V	5 ÷ 10
Interface		RS-232
Baud rate, ουθμιζόμενο	bit/s	1200 ÷ 38400
Τάση λειτουργίας (DC)	V	5 ÷ 10
Κατανάλωση φεύματος (χωφίς τη	mA	≤ 80
δυναμοκυψέλη)²		

 1 Διέγε
ρση από την τάση λειτου
ργίας.

 2 Κατανάλωση
 ςεύματος ≤ 80 mA + Ub/Rb, όπου Rb η αντίσταση της γέφυ
ρας.

Πίνακας 2-5 Τεχνικά χαρακτηριστικά του ADC.

Ο ADC συνδέεται με ηλεκτφονικό υπολογιστή, ο οποίος έχει επεξεφγαστή PENTIUM II με 256MB μνήμη RAM και λειτουφγεί υπό πεφιβάλλον Windows '98. Για το χειφισμό του ADC χφησιμοποιείται το λογισμικό AED-Panel32 version 1.1.3, το οποίο παφέχει η εταιφία κατασκευής του HBM. Μέσω του λογισμικού αυτού φυθμίζεται η συχνότητα δειγματοληψίας, η συχνότητα του φίλτφου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων (low pass filter), γίνεται η βαθμονόμηση της δυναμοκυψέλης και οποιοσδήποτε μηδενισμός ισοφοσπίας απαιτείται. Για την καταγφαφή, επεξεφγασία και αποθήκευση των ψηφιακών δεδομένων χφησιμοποιείται το λογισμικό va παφακολουθείται σχεδόν σε πφαγματικό χφόνο η μεταβολή των μετφούμενων μεγεθών με τη

μοφφή καμπυλών (παφατηφείται διαφοφά φάσης 3s εξαιτίας του χφόνου απόκφισης του ηλεκτφονικού υπολογιστή).

2.5 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Στη συγκεκοιμένη 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.

2.5.1 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ(FITTING) ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΑΖΑΣ

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 τμήματος του εύκαμπτου αγωγού, η ανωτέρω πρόσδοση χαρακτηρίζεται από ίσες ποσότητες νερού και συνεπώς η συνάρτηση αναδρομής αναμένεται γραμμική.

Έστω τα ζεύγη τιμών χρόνου-μάζας (t1, m1)... (tn, mn) με n τον αριθμό των μετρήσεων (ζευγών) και ότι η εκτίμηση της ευθείας προσαρμογής είναι:

$$\hat{\mathbf{m}} = \mathbf{m}_0 + \dot{\mathbf{m}} \mathbf{t} \tag{2-1}$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η κλίση της (2-1), ως παροχή μάζας, να είναι:

$$\dot{\mathbf{m}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{i} \mathbf{m}_{i} - \mathbf{n} t_{m} \mathbf{m}_{m}}{\sum_{i=1}^{n} t_{i}^{2} - \mathbf{n} t_{m}^{2}}$$
(2-2)

και η τεταγμένη επί την αοχή:

$$\mathbf{m}_0 = \mathbf{m}_{\mathrm{m}} - \dot{\mathbf{m}} \mathbf{t}_{\mathrm{m}} \tag{2-3}$$

71
όπου
$$t_m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$
 και $m_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$

Η μεταβλητότητα της αναδοομής ορίζεται από τη σχέση:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (m_i - \hat{m}_i)^2}{n-2}}$$
(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 εκτιμούμενο τυπικό σφάλμα της κλίσης m της ευθείας αναδοομής δίνεται από την:

$$se = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (t_i - t_m)^2}} = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} t_i^2 - nt_m^2}}$$
(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 =
$$100x \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n} \frac{(m_i - \hat{m}_i)^2}{\hat{m}_i^2}}$$
 (%) (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 mi και τις αντίστοιχες εκτιμήσεις της αναδρομής m̂i.

2.5.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΟΡΓΑΝΩΝ(BIAS ERRORS)

Τα συστηματικά σφάλματα έχουν ως αποτέλεσμα, επαναλαμβανόμενες μετοήσεις του ιδίου μεγέθους κάτω από τις ίδιες συνθήκες, να απέχουν όλες σταθεοά 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 μετοήσει το όργανο, είτε ως ποσοστό της μετρούμενης τιμής [Μαθιουλάκης, 2005]. Τα συστηματικά σφάλματα είναι δυνατόν να μειωθούν με κατάλληλες ρυθμίσεις των συνθηκών του πειράματος και των συνθηκών λειτουργίας των οργάνων μέτρησης.

2.5.2.1 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΟΚΥΨΕΛΗΣ(LOAD CELL) ΚΑΙ ΠΡΟΚΥΠΤΟΝΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Η δυναμοκυψέλη είναι μετοητική συσκευή ακοίβειας, της οποίας ο οόλος 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 2-6 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 διάφκεια 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.

Παφατηφείται από τον πίνακα 2-4 ότι το σφάλμα μη γφαμμικότητας (non-linearity) έχει τιμή ±0.0097% αναφοφικά με το ονομαστικό φοφτίο 7200g. Αυτό σημαίνει ότι το σφάλμα του nonlinearity ανέφχεται στην τιμή των 0.6984g. Η κάθε σταγόνα, που εξέφχεται από το σωλήνα σιλικόνης εσωτεφικής διαμέτφου 3mm με πολύ αφγό φυθμό, έχει βάφος 0.06g. Συνεπώς στις χαμηλές συχνότητες πφέπει να πέφτουν 10 σταγόνες τουλάχιστον, ώστε το μετφητικό σύστημα της δυναμοκυψέλης να αντιλαμβάνεται το βάφος έγχυσης της αντλίας. Για το λόγο αυτό πφιν αφχίσουν τα πειφάματα πφαγματοποιείται διαδικασία βαθμονόμησης πολλαπλών σημείων, η οποία επιτυγχάνει μείωση του συστηματικού σφάλματος της μη γφαμμικότητας της δυναμοκυψέλης.

Αφού συνδεθεί η δυναμοκυψέλη με τον ADC και αυτός με τον Η/Υ, 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 Η/Υ 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 σήματος (mV/V) και παριστάνονται γραφικά (εικόνα 2-4).

Κατόπιν για να ελεγχθεί αν η δυναμοκυψέλη παφέχει σωστές μετφήσεις και δεν έχει αλλοιωθεί η πιστότητά της λόγω φόφτισης, επαναλαμβάνεται ξανά η διαδικασία τοποθέτησης των πφότυπων βαφών με τιμές εντός του εύφους 2000 ÷ 5100 g και γίνεται επαλήθευση των τιμών που μετφήθηκαν πφοηγουμένως. Το γεγονός ότι επιλέγονται αυτές οι τιμές πφότυπων βαφών πφοκειμένου 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. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε και τις 54 μέρες του πειράματος και από αυτές τις μετρήσεις εξήχθη το διάγραμμα των μετρήσεων για τις 54 αυτές μέρες.

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.



Εικόνα 2-9 Καμπύλη βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης

Κατόπιν της ανωτέφω βαθμονόμησης το σφάλμα της μη γραμμικότητας εισάγεται κατά το ποσοστό ±0.0097% του πίνακα 2-4, 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 snl = ±0.0097g.

Η δεξαμενή κατάθλιψης τοποθετείται συμμετοικά πάνω στην πλατφόομα της δυναμοκυψέλης, ενώ ποονοείται 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 2-4 ίσο με ±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 και για διαφορετικές αυξήσεις μάζας Δmt, το παραπάνω σφάλμα αυξομειώνεται σύμφωνα με τη σχέση:

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

Αντικαθιστώντας ποοκύπτει: DR = ±9.2778 10⁻⁸ t_t Δmt

(2-7)

2.5.2.2 ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟ-ΤΑΧΥΜΕΤΡΟ-ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ

Για την εύφεση της συχνότητας πεφιστφοφής της αντλίας στις χαμηλές στφοφές μέχοι 12 rpm πεφίπου χφησιμοποιείται το λογισμικό FreeStopwatch 2.7 της Comfort Software Group. Το συστηματικό σφάλμα που εισάγεται για τον υπολογισμό του χφόνου και συνεπώς της συχνότητας είναι b=0.01s για το το χφονόμετφο του H/Υ .

Εξαιτίας των υψηλών φοπών φοφτίου που αναπτύσσονται σε αυτές τις πολύ χαμηλές στφοφές πεφιστφοφής της αντλίας, ο κινητήφας αναπτύσσει υψηλή φοπή με αποτέλεσμα για κάποιο μικφό σχετικά χφονικό διάστημα να παφουσιάζεται επιβφαδυνόμενη πεφιστφοφή. Εκ των υστέφων η πεφιστφοφή γίνεται επιταχυνόμενη για κάποιο επόμενο μικφό σχετικά χφονικό διάστημα να παφουσιάζεται επιβφαδυνόμενη πεφιστφοφή. Εκ των υστέφων η πεφιστφοφή γίνεται επιταχυνόμενη για κάποιο επόμενο μικφό σχετικά χφονικό διάστημα, όταν υπεφνικηθούν οι φοπές φοφτίου και αναπτυχθούν οι αδφανειακές δυνάμεις πεφιστφοφής που συνεισφέφουν. Στη συνέχεια ο κινητήφας μειώνει τις φοπές του επειδή οι αδφανειακές δυνάμεις έχουν αναλάβει με αποτέλεσμα την επιβφαδυνόμενη πεφιστφοφή πεφιστφοφή δυνήμεις έχουν αναλάβει με αποτέλεσμα την επιβφαδύνσεις κατά την πεφιστφοφή συνήθως διαδοχικά άνισες που έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της πεφιόδου.

Σε αυτή τη μεταβολή της περιόδου οφείλεται η εισαγωγή τυχαίου σφάλματος από περίοδο σε περίοδο.

Καθώς οι στοοφές 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 1rpm για στροφές μεγαλύτερες από 1000 rpm σύμφωνα με τον πίνακα που δίνεται από τον κατασκευαστή.

Το συστηματικό σφάλμα του θεομομέτοου 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 θεομομέτρου. Στο θεομόμετρο υπάρχουν υποδιαιρέσεις 1 °C, άρα το σφάλμα ανάγνωσης είναι b₀=b₀=±0.5 °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, [Σιμόπουλος, 1989].

2.5.3 ΤΥΧΑΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

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 [Σιμόπουλος, 1989]. 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 [Τσαγγάρης et al, 1998]. 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.

Λόγω του προτεινόμενου σχεδιασμού στο χρονισμό της βαλβίδας εξόδου, η οποία ανοίγει νωρίτερα από την έναρξη του εμβολισμού του δάχτυλου που προηγείται, παρατηρείται οπισθορροή. Επιπλέον, επειδή η άκρη του σωλήνα είναι βυθισμένη 5mm κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής κατάθλιψης, όπως αναφέρθηκε, δημιουργείται μερική αναρρόφηση ενός μικρού ποσοστού του καταθλιβόμενου ρευστού από την οπισθορροή και συνεπώς προσθαφαιρείται ίση ποσότητα μάζας ρευστού στη δεξαμενή. Αυτή η ποσότητα εισάγει μικοό σφάλμα στις μετοήσεις της μάζας του φευστού που ζυγίζεται με το χοόνο, αλλά δεν επηφεάζει το φυθμό έγχυσης της αντλίας για δύο λόγους. Πρώτον, όση ποσότητα φευστού αφαιφείται λόγω οπισθοφορής προστίθεται στη διάφκεια μίας πεφιόδου με αποτέλεσμα η εγχυόμενη μάζα εμβολισμού ανά πεφίοδο να είναι η προβλεπόμενη. Δεύτεφον, ο φυθμός έγχυσης της αντλίας είναι σταθεφός με το χρόνο και διαπιστώνεται από την κλίση που έχει η γφαμμική προσαφμογή της συνάφτησης παφοχής με το χρόνο, η οποία δεν μεταβάλλεται λόγω οπισθοφοής.

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:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$
(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 εύφος των τιμών τις οποίες δείχνει το όφγανο για την ίδια πάντα τιμή του μετφούμενου μεγέθους. Δηλαδή, τόσο αυξάνει η διασποφά των τιμών της εξόδου του οφγάνου. Ασφαλώς η ακφίβεια των μετφήσεων επιβάλλει πεφιοφισμό αυτού του εύφους που σημαίνει μείωση κατά το δυνατόν της τυπικής απόκλισης των μετφήσεων. Ως σφάλμα στην πεφίπτωση αυτή νοείται η διαφοφά της εξόδου του οφγάνου από τη μέση τιμή των μετφήσεων. Για πεπεφασμένο αφιθμό μετφήσεων n ισχύουν οι σχέσεις:

$$x_{m} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i}}{n}$$
(2-9)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_m)^2}{n - 1}}$$
(2-10)

όπου s η τυπική απόκλιση της μίας μέτρησης xi από τη μέση τιμή xm.

Ιδανικά όταν n ∞ τότε xm μ και s σ. 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:

$$s_{m} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - x_{m})^{2}}{n(n-1)}}$$
(2-11)

Κατά τις μετρήσεις του συγκεκριμένου πειράματος, θεωρώντας ότι η αληθινή τιμή είναι η μέση τιμή του μεγέθους (μ≡xm), ως διάστημα εμπιστοσύνης, που αποτελεί και το σφάλμα των μετρήσεων, έχει ληφθεί το xm±1.96sm, 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 [xm−1.96sm, xm+1.96sm] είναι 95%. Επομένως το τυχαίο σφάλμα ενός μεγέθους του πειράματος ορίζεται από την:

$$\varepsilon = \pm 1.96s_{\rm m} \tag{2-12}$$

Για τον προδιορισμό του τυχαίου σφάλματος βαθμονόμησης που δίνουν οι μετρήσεις των 54 ημερών ακολουθούμε την ίδια διαδικασία. Κατά τις μετρήσεις της βαθμονόμησης, θεωρώντας ότι η αληθινή τιμή είναι η μέση τιμή της τάσης (μ=xm), ως διάστημα εμπιστοσύνης, που αποτελεί και το σφάλμα των μετρήσεων, έχει ληφθεί το xm±1.96sm, το οποίο αντιστοιχεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Δηλαδή, αν επαναληφθεί η βαθμονόμηση πολλές φορές υπό τις ίδιες συνθήκες, η πιθανότητα η μέση τιμή της τάσης να βρίσκεται στο διάστημα [xm-1.96sm, xm+1.96sm] είναι 95%. Επομένως το τυχαίο σφάλμα της τάσης της βαθμονόμηση σολλές ανιστοιχεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Σηλαδή το xm±2.576sm και δίνεται από την Εξ.(2-12) ενώ με την ίδια σκέψη μπορούμε να βρούμε και το σφάλμα που αντιστοιχεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99% δηλαδή το xm±2.576sm και δίνεται από την:

$$\varepsilon = \pm 2.576 s_{\rm m} \tag{2-13}$$

Από την 2-12 προκύπτει ότι για εύφος 3100gr ότι το σφάλμα της τάσης κατά τη βαθμονόμηση είναι ίσο με 0.000000044 mV/V οπότε το σφάλμα της μάζας προκύπτει 29.0gr δηλαδή 0.93%. Αυτό σημαίνει ότι αν επαναλάβουμε τη βαθμονόμηση η πιθανότητα η γραμμή που θα δημιουργηθεί να απέχει 0.93% από αυτή που ήδη έχουμε υπολογίσει ως μέση τιμή (είναι η y = 0.00003884191049x - 0.00008577726266) είναι 95%. Αντίστοιχα από την (2-13) προκύπτει για το ίδιο εύρος το σφάλμα της μάζας να είναι 38.0gr δηλαδή 1.22%. Αυτό σημαίνει ότι αν επαναλάβουμε η πιθανότητα η γραμμή που θα δημιουργηθεί να απέχει 0.93% από αυτή που ήδη έχουμε υπολογίσει ως μέση τιμή (είναι η y = 0.00003884191049x - 0.00008577726266) είναι 95%. Αντίστοιχα από την (2-13) προκύπτει για το ίδιο εύρος το σφάλμα της μάζας να είναι 38.0gr δηλαδή 1.22%. Αυτό σημαίνει ότι αν επαναλάβουμε την βαθμονόμηση η πιθανότητα η γραμμή που θα δημιουργηθεί να απέχει 1.22% από αυτή που έχουμε ήδη υπολογίσει ως μέση τιμή είναι 99%. Διευκρινίζεται ότι αυτά τα μεγέθη αφορούν το μέγιστο εύρος των 3100gr, δηλαδή ισχύει για τις ημέρες όπου χρησιμοποιούσαμε τον κινητήρα υψηλών στροφών και μάλιστα στις μεγάλες συχνότητες ύπου σε κάθε μέτρηση το το γέμισμα της δεξαμενής γινόταν με τέτοιες ποσότητες. Για τις υπόλοιπες ημέρες που αποτελούν και την πλειοψηφία των μετρήσεων τα σφάλματα θα είναι

μικρότερ. Παρ'όλα τα παραπάνω, το σφάλμα είναι πολύ μικρότερο διότι κάθε μέρα γινόταν και ξεχωριστή βαθμονόμηση και τα σφάλματα έχουν κυμανθεί όπως παρουσιάζονται στα αποτελέσματα.

2.6 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

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:

$$e = \sqrt{\varepsilon^2 + b^2} \tag{2-14}$$

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

$$\mathbf{e}_{y} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x}\mathbf{e}_{x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial y}{\partial z}\mathbf{e}_{z}\right)^{2}} \tag{2-15}$$

ενώ η μέση τιμή του μεγέθους είναι:

$$y_{\rm m} = y(x_{\rm m}, z_{\rm m}) \tag{2-16}$$

Όπου xm, zm οι μέσες τιμές των μεγεθών x, z αντίστοιχα.

Στο συγκεκοιμένο 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:

όπου Τ η πε
ρίοδος 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 Τ, 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	(σε Hz)	(2-18)
1 14/00	(00112)	(- 10)

όπου Ν οι στοοφές του ταχύμετοου 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:

όπου:

$$\mathbf{e}_{\mathrm{T}} = \sqrt{\varepsilon_{\mathrm{T}}^2 + \mathbf{b}_{\mathrm{t}}^2} \tag{2-20}$$

είναι το συνολικό σφάλμα υπολογισμού της περιόδου Τ διέγερσης με b=±0.11 ή ±0.01 s να είναι το συστηματικό σφάλμα του χρονομέτρου αν χρησιμοποιείται η μέθοδος peak to peak ή το ηλεκτρονικό χρονόμετρο αντίστοιχα, ενώ ετ είναι το τυχαίο σφάλμα κατά τη μέτρηση της περιόδου Τ 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==en/60 (2-21)

όπου:

$$\mathbf{e}_{\mathrm{N}} = \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{N}}^2 + \mathbf{b}_{\mathrm{N}}^2} \tag{2-22}$$

είναι το συνολικό σφάλμα υπολογισμού των στροφών περιστροφής με b_N=±0.1 ή ±1rpm να είναι το συστηματικό σφάλμα του ταχυμέτρου για 12≤N≤999.9 rpm και N≥1000 rpm αντίστοιχα, ενώ ε_N είναι το τυχαίο σφάλμα κατά τη μέτρηση των στροφών N υπολογισμένο σύμφωνα με τη σχέση (2-12).

Ο ουθμός έγχυσης του φευστού από την αντλία ορίζεται από τη σχέση:

$$\dot{\mathbf{V}} = \frac{\dot{\mathbf{m}}}{\rho} \tag{2-23}$$

όπου
 ή η παροχή μάζας του ρευστού και
ρ η πυκνότητα του νερού.

Για συγκεκοιμένη συχνότητα διέγεοσης f η παροχή μάζας 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 $m \equiv m$, τότε αυτή έχει γραμμικό χαρακτήρα και αν

ληφθεί υπόψη και το σκεπτικό της παραγράφου 5.8.1. μπορεί να θεωρηθεί για κάθε συχνότητα ότι η μάζα συναρτήσει του χρόνου μεταβάλλεται γραμμικά ως εξής:

$$m = \dot{m}t + m_0 \Longrightarrow \dot{m} = \frac{m - m_0}{t} = \frac{m_m - m_0}{t_m}$$
(2-24)

Η πυκνότητα ǫ του νεǫού μεταβάλλεται με τη θεǫμοκǫασία θ_v, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-10, [Tanaka et al, 2001]. Από τη συγκεκǫιμένη βιβλιογǫαφία χǫησιμοποιείται το διάστημα θεǫμοκǫασιών από 17°C μέχǫι 31°C, διότι σε αυτό κυμαίνεται η θεǫμοκǫασία του νεǫού κατά την εκτέλεση των πειǫαμάτων. Οι τιμές της πυκνότητας με τη θεǫμοκǫασία φαίνονται στον πίνακα 2-7 και η ακǫίβειά τους παǫουσιάζεται με αβεβαιότητα 0.83x10⁻⁶ g/cm³.

Στα πειραματικά σημεία του πίνακα 2-7 προσαρμόζεται η καμπύλη δευτέρου βαθμού που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση, η οποία αναπαρίσταται γραφικά στην εικόνα 2-10:

$$\rho = a_0 + a_1 \theta_v + a_2 \theta_v^2 \tag{2-25}$$

óπου a₀=1.00043, a₁=-1.46279 10⁻⁵, a₂=-4.82119 10⁻⁶.

Θεομοκοασία	Πυκνότητα νερού
θ _ν (°C)	ϱ (g/cm³)
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 2-6 Ακριβείς τιμές πυκνότητας νερού με τη θερμοκρασία, [Tanaka et al, 2001].

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2-23) και (2-24) της παφοχής μάζας και της πυκνότητας αντίστοιχα στη σχέση (2-22) ο φυθμός έγχυσης του φευστού μποφεί να δοθεί ισοδύναμα και από τη σχέση:

$$\dot{\mathbf{V}} = \frac{\mathbf{m} - \mathbf{m}_0}{\mathbf{t} \left(\mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \,\theta_v + \mathbf{a}_2 \,\theta_v^2 \right)} \tag{2-26}$$



Εικόνα 2-10Μεταβολή της πυκνότητας του νερού με τη θερμοκρασία στο διάστημα από 17οC μέχρι 31οC και για ατμοσφαιρική πίεση 101325Pa [Tanaka et al, 2001].

Εφαφμόζοντας 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:

$$\mathbf{e}_{\dot{\mathbf{V}}} = \dot{\mathbf{V}} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\dot{\mathbf{m}}}}{\dot{\mathbf{m}}}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{b}_{\mathbf{m}}}{\mathbf{t}_{\mathbf{m}}}\dot{\mathbf{m}}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{b}_{\mathbf{t}}}{\mathbf{t}_{\mathbf{m}}}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{e}_{\rho}}{\rho}\right)^2}$$
(2-27)

Μέσω αυτής της σχέσης υπολογίζεται το ελάχιστο σφάλμα (e_v)⁰ που πάντα υφίσταται σε κάθε μέτǫηση, όσο ιδανικά και αν εκτελεστεί το πείǫαμα και ουσιαστικά πǫοκύπτει λόγω της ύπαǫξης των συστηματικών σφαλμάτων των οǫγάνων και του τǫόπου με τον οποίο εξάγεται η παǫοχή μάζας του ǫευστού. Όταν μέσω της σχέσης (2-26) υπολογίζεται αυτό το ελάχιστο σφάλμα (e_v)⁰ κάθε μέτǫησης η παǫοχή μάζας m δίνεται από τη σχέση (2-1), η πυκνότητα ǫ από την (2-24) με αντικατάσταση της θεǫμοκǫασίας του νεǫού θ_v και συνεπώς, ο ǫυθμός έγχυσης V δίνεται από τη σχέση (2-22) με αντικατάσταση της θεǫμοκǫασίας του νεǫού θ_v και συνεπώς, ο ǫυθμός έγχυσης V δίνεται από τη σχέση (2-22) με αντικατάσταση των δύο μεγεθών m και ǫ. Επίσης, το τυχαίο σφάλμα της παǫοχής μάζας e_m υπολογίζεται από την (2-12), στην οποία αντί για την τυπική απόκλιση s_m χǫησιμοποιείται το τυπικό σφάλμα του χǫονομέτǫου είναι $b_i=\pm0.11$ ή ±0.01 s αν χǫησιμοποιείται η μέθοδος peak to peak ή το ηλεκτǫονικό χǫονόμετǫο αντίστοιχα. Το συστηματικό σφάλμα τος χǫονομετǫο αντίστοιχα.

$$\mathbf{b}_{\mathrm{m}} = \sqrt{\mathbf{DR}^2 + \mathbf{s}_{\mathrm{nl}}^2} \tag{2-28}$$

όπου DR είναι το παραμένον σφάλμα εξόδου αποφόρτισης (Dead load output Return) της δυναμοκυψέλης, το οποίο δίνεται από τη σχέση (2-7) και sn είναι το σφάλμα λόγω της μη γραμμικότητας (non-linearity) του οργάνου της δυναμοκυψέλης. Τέλος, το συνολικό σφάλμα υπολογισμού της πυκνότητας e_0 είναι πάρα πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα και η παράλειψή του δεν επηρεάζει το συνολικό σφάλμα $e_{\dot{v}}$ του ρυθμού έγχυσης του ρευστού, ωστόσο εισάγεται εδώ για λόγους πληρότητας με

$$e_{\rho} = \sqrt{\left(a_{1} + 2a_{2}\theta_{\nu}\right)^{2}b_{\theta\nu}^{2} + b_{\rho}^{2}}$$
(2-29)

όπου b_{ϱ} είναι η αβεβαιότητα 0.83x10⁻⁶ g/cm³ με την οποία οι τιμές της πυκνότητας με τη θερμοκρασία προσδιορίζονται πειραματικά, [Tanaka et al, 2001] και $b_{\theta_{\nu}}$ 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 m_m και της πυκνότητας ρm. Επίσης, το τυχαίο σφάλμα της παροχής μάζας ε_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 (ef)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:

$$re_{\dot{V}} = 100x \frac{e_{\dot{V}}}{\dot{V}} (\%)$$
 (2-30)

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ– ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην παφάγφαφο αυτή παφουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται κατά την πειφαματική εκτέλεση. Πφοηγουμένως όμως αναφέφονται οφισμένα στοιχεία που αφοφούν τη δομή του πειφάματος. Στα σημεία επαφής των έκκεντφων με τα έμβολα και των πλαϊνών τοιχωμάτων των εμβόλων με το κύφιο σώμα της κάθε αντλίας εφαφμόζεται λεπτό στφώμα λιπαντικού καθώς επίσης και μεταξύ των αξονίσκων επαναφοφάς και του plexiglas. Με αυτόν τον τφόπο μειώνονται οι τφιβές στα σημεία επαφής και συναφμογής και επιτυγχάνεται η ομαλή και αθόφυβη λειτουφγία της αντλίας. Το φευστό που χφησιμοποιείται είναι αποσταγμένο νεφό.

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 0.00302 έως 35.94 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 τα κοσάκια του ηλεκτροκινητήρα στερεώνονται ως εξής: το κόκκινο καλώδιο του κινητήρα 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 συγκεκοιμένες συχνότητες, και συγκεκοιμένα σε εκείνες που ανήκουν στο τοίτο κινητήρα, γίνονται διαδοχικές επαναλήψεις των μετοήσεων οι οποίες συγκοίνονται τελικά μεταξύ τους. Με αυτόν τον τοόπο γίνεται σύγκοιση διαδοχικών μετοήσεων στην ίδια συχνότητα διέγερσης, με τον εύκαμπτο αγωγό να βρίσκεται στην ίδια κατάσταση όσο αφορά την καταπόνηση και μετατόπισή του (2° επίπεδο σφάλματος). Συνολικά στον κινητήρα υψηλών στροφών γίνονται τρεις σειρές μετοήσεων. Ειδικά για τις δύο τελευταίες σειρές μετοήσεων, 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 μέτοηση βρεθεί τρύπα στον σωλήνα γίνεται αλλαγή του. Σε κάθε πειραματική εκτέλεση μετρώνται, αφενός μεν οι στροφές του άξονα του κινητήρααντλίας 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 8.04.21. 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 μηκυνσιόμετρο 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 φεύμα. Μετά καταγφάφεται η θεφμοκφασία του πεφιβάλλοντος αέφα με τη βοήθεια του θερμομέτρου που είναι τοποθετημένο δίπλα στη δεξαμενή αναρρόφησης. Έπειτα τοποθετώντας βαρίδια βάρους από 2 Kg έως 5.1 Kg πάνω στην δυναμοκυψέλη και διαβάζοντας την τιμή στο Catman και στο AED, το πρόγραμμα που ελέγχει το ADC, επαληθεύεται η σωστή λειτουργία των οργάνων. Ξεκινώντας δηλαδή από τα 2 Kg και ανεβαίνοντας κατά 0.1 Kg κάνουμε βαθμονόμηση της δυναμοκυψέλης κάθε μέρα πριν να ξεκινήσουμε τις μετρήσεις. 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 αντανακλαστική ταινία στον κοινό άξονα περιστροφής κινητήρα-αντλίας, η οποία χρησιμεύει στη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα με το ταχύμετρο.

Στη συνέχεια πληρώνεται με νερό η τροφοδοτική δεξαμενή, ο χώρος αναρρόφησης και ο χώρος κατάθλιψης μέχρι το ύψος υπερχείλισης.

Για την εκτέλεση του πειφάματος επιλέγεται με το ποτενσιόμετφο του ηλεκτφονικού συστήματος οδήγησης η επιθυμητή τιμή της ταχύτητας πεφιστφοφής του ηλεκτφοκινητήφα (συχνότητα διέγεφσης). Το σύστημα λειτουφγεί για κάποιο χφονικό διάστημα, ώστε αφενός ο ηλεκτφοκινητήφας να αποκτήσει σταθεφές στφοφές, και αφετέφου η διέγεφση του σωλήνα να σταθεφοποιηθεί από την αντλία. Ταυτόχφονα φυθμίζεται η βάνα της τφοφοδοτικής δεξαμενής, ώστε ο φυθμός έγχυσης του νεφού από αυτή να είναι μεγαλύτεφος από το φυθμό αναφφόφησης του νεφού από την αντλία και έτσι ο χώφος αναφφόφησης να βρίσκεται πάντοτε σε κατάσταση υπεφχείλισης. Θα πφέπει 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 επιλεχθεί 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 \rightarrow Measuring \rightarrow 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 ούθμιση 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", $\alpha \pi \delta$ εδώ θα καθοριστεί ο ρυθμός δειγματοληψίας. Ο ουθμός δειγματοληψίας που θα επιλεγεί εξαοτάται 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 7 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 7 σταγόνες/sec x (αριθμός περιστροφών αντλίας)/sec. Για να γίνει κατανοητό αυτό θα δώσουμε ένα παράδειγμα. Αν η αντλία περιστρέφεται με συχνότητα f=0.7 Hz ή στροφές το δευτερόλεπτο (ή 60x0.7 = 42RPM) τότε η συχνότητα του πειράματος είναι 7x0.7=4.9 Hz ή σταγόνες/δευτερόλεπτο και αναλόγως θα εκλεγεί η συχνότητα δειγματοληψίας.

Τονίζεται ότι οι τιμές του ουθμού δειγματοληψίας είναι συγκεκοιμένες και καθοοίζονται από το Catman. Οι δυνατές συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ 0.001 και 1200 Hz, δεν ποόκειται όμως να χρησιμοποιηθεί όλο αυτό το εύρος ουθμών δειγματοληψίας στο πείραμα μας.

Να σημειωθεί εδώ, ότι παφατηφείται ασυμβατότητα μεταξύ του φολογιού του Η/Υ και της συσκευής ADC. Ο χφόνος στο φολόι του ADC είναι ο μισός από ότι στον Η/Υ. Αυτός είναι ο λόγος που στη συνέχεια τα αφιθμητικά δεδομένα στη κάθε στήλη του χφόνου κατά την επεξεφγασία των αποτελεσμάτων θα πφέπει να πολλαπλασιαστούν με το 2 για να εκφφάζουν τον πφαγματικό χφόνο. Αυτό σημαίνει, επίσης, ότι υπάφχει διαφοφά ανάμεσα στον πφαγματικό φυθμό δειγματοληψίας, που σχετίζεται με τον πφαγματικό χφόνο και το ADC, και στον φυθμό δειγματοληψίας που οφίζεται από τον υπολογιστή (το πφόγφαμμα). Συγκεκφιμένα η πφαγματική συχνότητα δειγματοληψίας, τόσο οι πφαγματικές όσο και το υπολογιστή βρίσκονταί στον πίνακα 3-1.

Τιμές συχνότητας δειγματοληψίας στο Catman (Hz)	Ποαγματικές 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 Η/Υ

Η τιμή δειγματοληψίας κάθε μέτοησης θα ποέπει να είναι ασφαλώς μεγαλύτεοη, οοιακά σχετικά, από την συχνότητα του πειοάματος. Ουσιαστικά, αοκεί η συχνότητα δειγματοληψίας στο Catman να είναι η διπλάσια της συχνότητας του πειοάματος. Στο ποοηγούμενο παράδειγμα, λόγου χάοη, επιλέγουμε στο Catman την τιμή 9.4 Hz αφού το 4.9 είναι περίπου το μισό του 9.4Hz. Ιδανικά στις πολύ χαμηλές στοοφές θα θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε χαμηλότεοους ουθμούς δειγματοληψίας από αυτούς που αναφέρονται στον πίνακα 3-1, κάτι τέτοιο όμως οδηγεί σε overflow του buffer του ποογράμματος με αποτέλεσμα οι μετοήσεις να μην διαρκούν πάνω από 2 λεπτά. Επίσης, ποργματικοί ουθμοί δειγματοληψίας άνω των 150 Hz οδηγούν σε πολύ σύντομες μετοήσεις με διάρκεια περίπου ένα λεπτό. Θα ποξεπει επίσης να γίνει σαφές ότι ο τύπος 7 σταγόνες/sec x (αριθμός περιστροφών αντλίας)/sec για την εύρεση του ουθμού δειγματοληψίας δεν ισχύει στις πολύ υψηλές στοοφές καθώς εκεί η οη 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 στοCatman, πατάω το κουμπί "Display all active channels in graph" για να ρυθμιστουν 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 ποιν εκκινήσει ο ηλεκτοοκινητήρας 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 αποθηκεύτεται σε μορφή χ-χχχχ.dat παραδείγματος χάριν το αρχείο που προέκυψε από την μέτρηση της συχνότητας 0.74081 Ηz 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 Χ. 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 προύγραμμα 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 ταχύμετοου με ουθμό 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/Υ .

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 οτν εκκεντοοφόρο της αντλίας είναι πιθανό να έχει τουπήσει 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:

 $0,00302 \le f_x \le 0,07887 \text{ Hz}$ $0,07008 \le f_\mu \le 1,213 \text{ Hz}$ $1,841 \le f_\nu \le 35,94 \text{ Hz}$

όπου f_x, 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. Υπάρχει και ένα διάστημα συχνοτήτων στο οποίο υπάρχουν συχνότητες από δύο κινητήρες. Αυτό είναι:

 $0,07008 \le f_{\chi,\mu} \le 0,07887 Hz$

Στο διάστημα αυτό οι συχνότητες πορέρχονται από τους κινητήρες χαμηλών και μεσαίων στροφών. Παρατηρείται ένα κενό ανάμεσα στις συχνότητες του κινητήρα μεσαίων και του κινητήρα υψηλών στροφών πράγμα που πιθανώς οφείλεται στο ότι ο κινητήρας υψηλών στροφών δεν μπορεί να ξεπεράσει το φορτίο που έχει σε χαμηλές γι'αυτόν συχνότητες(κάτω από 1.8Hz).

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

 $1,95 \le f_{\nu 2} \le 35,64$ για την δεύτε
ρη σειρά μετρήσεων και

 $1,89 \le f_{\nu 3} \le 35,57$ 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 διάφκεια του πειφάματος λόγω των κφαδασμών ξεσφίχτηκαν οι σκουληκόβιδες και αφκετές φοφές έφυγαν από το άνω καπάκι, με αποτέλεσμα να πφέπει να διακοπεί η μέτφηση καθώς ο πείφος πιεζόταν κάτω για να επαναφέφει το έμβολο. Γι' αυτό τον λόγο σφίχτηκαν σταδιακά ολοένα και πεφισσότεφο οι σκουληκόβιδες. Μεγαλύτεφο σφίξιμο τους σημαίνει ότι φθείφεται παφαπάνω το έκκεντφο λόγω της παφαπάνω δύναμης που ασκείται από τα έμβολα. Στην πφάξη βέβαια η επιπλέον φθοφά είναι αμελητέα καθώς δεν διαπιστώθηκε εν τέλει σημαντική αλλοίωση της ακτίνας του έκκεντφου, καθώς η όποια μείωση είναι πεφίπου 0.3mm. Για να πφολάβουμε την εκτίναξη των σκουληκόβιδων στις υψηλές στφοφές, όταν έχει εξαντληθεί το πεφιθώφιο σύσφιξης αυτών, πφοσθέτουμε bluetack σε αυτές. Παφά την πφοσθήκη του bluetack χφειάζεται και πάλι έλεγχος του ύψους των σκουληκόβιδων ώστε να είναι το ίδιο σε όλες, ωστόσο βελτιώνεται σημαντικά το πφόβλημα της εκτίναξης τους.

Να προσθέσουμε ότι στις υψηλές στροφές παρατηρείται αστοχία ρουλεμάν των εμβόλων (Εικ 3-1), κυρίως στα έμβολα του μεγάλου και του μικρού δαχτύλου τα οποία είναι υπεύθυνα για την πλήρη έμφραξη. Αυτό οφείλεται στις δυνάμεις που αναπτύσσονται από τα έκκεντρα στα οουλεμάν. Όταν ένα οουλεμάν 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 οουλεμάν, λόγω του ότι αλλοιώνεται η γεωμετρία του και μικραίνει το μήκος του που εξέχει του εμβόλου, φθείρεται και το εμβόλο καθώς έρχεται σε επαφή με τα ταχέως περιστρεφόμενα έκκεντρα. Ένας άλλος τρόπος να διαπιστωθεί ότι έχει χαλάσει ένα ουλεμάν 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, αφαιρούμε 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 φίλτοου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων (low pass filter), έχει γίνει για το χαμηλό πεδίο συχνοτήτων μέχοι 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.

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

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.

			Πραγματική		Χϱονική
Πεδίο	Στροφές		Συχνότητα	Φίλτοο	διάρκεια
συχνοτήτων	κινητήρα Ν	Περίοδος	δειγματοληψία	(low pass)	πειράματος
(Hz)	(rpm)	(s)	ς	(Hz)	(s)
			$f_s(M/s)$		
0.00302÷ 0.047	0.1542 ÷ 2.7	389.11 ÷ 22.22	4.7	0.25	6809
0.047 ÷ 0.08222	2.7 ÷ 4.92	12.2 ÷ 22.22	4.7	0.5	6809
0.08222 ÷ 0.402	4.92 ÷ 24	2.5 ÷ 12.2	4.7	1	6809
$0.402 \div 0.777$	24 ÷ 46.8	1.28 ÷ 2.5	4.7	4	6808
0.777 ÷ 1	46.8 ÷ 60	1 ÷ 1.28	9.4	8	3420
1.009	60.39	0.994			
1.015	60.90	0.985			
1.020	61.18	0.981	18.75	8	1710
1.020	61.20	0.980			
1.024	61.47	0.976			
1 ÷ 2	60 ÷ 120	1 ÷ 0.5	18.75	4	1710
2 ÷ 4.8	120 ÷ 288	0.5 ÷ 0.21	37.5	4	856
4.8 ÷ 16	288 ÷ 960	0.21 ÷ 0.062	75	4	240
16 ÷ 35.94	960 ÷ 2138.4	0.062 ÷ 0.028	150	8	215

Πίνακας 3-2 Ταξινόμηση μετρήσεων ανά συχνότητα σε κλάσεις.

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 Ηz περίπου, λαμβάνοντας υπόψη ότι πρέπει να γίνεται

σίγουφα αντιληπτή η μεταβολή από σταγόνα σε σταγόνα. Για τις υψηλότεφες συχνότητες η επιλογή βασίζεται, ώστε να γίνεται σίγουφα αντιληπτός κάθε φοφά ο όγκος εμβολισμού σε μία πεφιστφοφή. Υπόψη ότι στις χαμηλές συχνότητες για μία πλήφη πεφιστφοφή εγχύονται 5 σταγόνες, ενώ στις υψηλότεφες ο όγκος εμβολισμού εγχύεται σχεδόν ομοιόμοφφα. Βέβαια, λόγω γφαμμικής αύξησης της εγχυόμενης μάζας με το χφόνο και επειδή ενδιαφέφει μόνο η κλίση αυτής της ευθείας ως παφοχή μάζας, η απώλεια τιμών λόγω μη κατάλληλης επιλογής συχνότητας δειγματοληψίας και φίλτφου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων (low pass filter) είναι αδιάφοφη. Το τελευταίο διαπιστώθηκε και πειφαματικά. Τα παφαπάνω ισχύουν και για τις τφεις σειφές μετφήσεων.

Όπως έχουμε αναφέφει παφαπάνω, από κάθε μέτφηση που έγινε πφοκύπτει ένα αφχείο .dat στο οποίο έχουν αποθηκευτεί όλες οι πληφοφοφίες για την μέτφηση. Στην συνέχεια απομακφύνονται οι ανωμαλίες, λόγω κινητήφα, ADC ή από οποιαδήποτε τυχαία διαταφαχή, από το αφχείο. Με αυτό τον τφόπο πφοκύπτουν τφοποποιημένα αφχεία, τα όφια των οποίων καθοφίζονται ή με την μέθοδο peak-to-peak για τις χαμηλές στφοφές ώστε να ταυτίζεται η μέτφηση με το χφονόμετφο με εκείνη που φαίνεται στο Grapher, ή με τα αποτελέσματα από την μέτφηση με το χφονόμετφο ή το ταχύμετφο. Τα δεδομένα που αντλούμε από τα αφχεία παφατίθενται στους παφακάτω πίνακες. Διακφίνουμε τις μετφήσεις της πφώτης σειφάς σε αυτές που μετφήθηκαν με χφονόμετφο και σε εκείνες που μετφήθηκαν με ταχύμετφο.

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 ετ. Έτσι το συστηματικό σφάλμα τόσο του χρονομέτρου του Η/Υ (br=0.21 sec), όσο και του ηλεκτρονικού χρονομέτρου (br=0.010 sec) συμβάλλει ελάχιστα στη διαμόρφωση του συνολικού σφάλματος et, γι' αυτό το τυχαίο σφάλμα ετ της περιόδου διέγερσης ταυτίζεται με το συνολικό et για συχνότητες διέγερσης έως 0.006468 Hz.

Παφατηφούμε ότι ενώ παφαπάνω αναφέφεται ότι ξεκινάμε να χφησιμοποιούμε το ταχύμετφο πάνω από τα 12 RPM, βλέπουμε ότι η πφώτη συχνότητα στην οποία χφησιμοποιήθηκε είναι τα 0,262 Hz ή 15.72 RPM. Αυτό συνέβη γιατί στα 0,213Hz (12,8 RPM) που δοκιμάσαμε να μετφήσουμε με το στφοφόμετφο πφώτη φοφά, εμφανιζόταν απόκλιση στις τιμές που καταγφάφονταν και έτσι πφοτιμήθηκε το χφονόμετφο εφόσον ήταν ευδιάκφιτος ο ήχος των έκκεντφων. Το πφόβλημα λύθηκε με αλλαγή των μπαταφιών του ταχύμετφου.

Εν συνεχεία θα χαφάξουμε το διάγφαμμα μεταβολής μάζας νεφού m(t) για διάφοφες συχνότητες. Πφιν από αυτό παφατίθενται στον παφακάτω πίνακα τα αποτελέσματα όλων των μετφήσεων όπως πφοέκυψαν από την επεξεφγασία που έγινε.

	Πίνακας 3-3 Αποτελέσματα από την α΄ σειρά μετρήσειων.									
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Olurá	Μέση			
S	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα		τετραγωνική	Σφάλμα		
Δυχνοτητά	όγκου	παροχής	παροχής	μάζας	παϱοχής	οφαλμα	απόκλιση	κλίσης se		
I [HZ]	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	ουχνοτητάς	διαδρομής	[gr/sec]		
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]	[ELZ]	RMS			
0.00302	0.056	0.0017	3.11381	0.00093	0.000029	0.0000069	0.00098	0.0000031		
0.003445	0.068	0.0029	4.22456	0.00112	0.000047	0.0000041	0.00066	0.0000042		
0.0034502	0.060	0.0035	5.87345	0.00100	0.000059	0.0000038	0.00066	0.0000057		
0.003455	0.062	0.0018	2.89566	0.00102	0.000030	0.0000027	0.00057	0.0000018		
0.003458	0.068	0.0016	2.37315	0.00113	0.000027	0.0000050	0.00074	0.0000020		
0.003462	0.073	0.0037	5.09605	0.00122	0.000062	0.0000053	0.00066	0.0000062		
0.003468	0.05603	0.000062	3.48695	0.00093	0.000032	0.0000021	0.00064	0.0000023		
0.00381	0.061	0.0010	1.70519	0.00102	0.000017	0.000032	0.00082	0.0000012		
0.00386	0.072	0.0032	4.39369	0.00120	0.000053	0.000010	0.00065	0.0000049		
0.003863	0.080	0.0034	4.27375	0.00133	0.000057	0.0000048	0.00072	0.0000060		
0.004149	0.070	0.0015	2.10492	0.00116	0.000024	0.0000060	0.00083	0.0000020		
0.004168	0.086	0.0034	3.95952	0.00142	0.000056	0.0000015	0.00073	0.0000061		
0.004193	0.084	0.0040	3.81890	0.00139	0.000027	0.0000077	0.00104	0.0000029		
0.004673	0.1053	0.00073	0.88169	0.00175	0.000067	0.0000075	0.00050	0.0000054		
0.004687	0.098	0.0045	4.55243	0.00163	0.000074	0.0000042	0.00067	0.0000083		
0.0047	0.090	0.0032	3.55385	0.00149	0.000053	0.0000039	0.00060	0.0000045		
0.00496	0.089	0.0020	2.30103	0.00147	0.000034	0.0000073	0.00143	0.0000052		
0.004976	0.111	0.0038	3.40007	0.00185	0.000063	0.0000059	0.00070	0.0000067		
0.004987	0.107	0.0029	2.68697	0.00178	0.000048	0.0000038	0.00072	0.0000047		
0.005012	0.095	0.0025	2.66849	0.00158	0.000042	0.0000050	0.00105	0.0000054		
0.00502	0.086	0.0036	4.19833	0.00143	0.000060	0.000011	0.00055	0.0000050		
0.005028	0.102	0.0025	2.42814	0.00170	0.000041	0.0000058	0.00064	0.0000033		
0.005482	0.112	0.0043	3.82075	0.00185	0.000071	0.0000079	0.00071	0.0000081		
0.005497	0.107	0.0034	3.20719	0.00179	0.000057	0.0000032	0.00069	0.0000058		
0.005532	0.119	0.0030	2.56826	0.00197	0.000051	0.0000051	0.00074	0.0000052		
0.00597	0.120	0.0026	2.20143	0.00200	0.000044	0.0000039	0.00068	0.0000039		
0.005973	0.108	0.0019	1.77904	0.00179	0.000032	0.0000053	0.00100	0.0000035		
0.005973	0.115	0.0031	2.72083	0.00191	0.000052	0.0000023	0.00084	0.0000061		
0.005984	0.123	0.0023	1.86314	0.00204	0.000038	0.0000016	0.00069	0.0000032		
0.006442	0.123	0.0022	1.78505	0.00205	0.000037	0.0000042	0.00080	0.0000035		
0.006453	0.130	0.0025	1.93671	0.00216	0.000042	0.0000025	0.00076	0.0000040		
0.006468	0.119	0.0042	3.49985	0.00198	0.000069	0.0000045	0.00058	0.0000066		
0.006814	0.124	0.0024	1.94145	0.00207	0.000040	0.0000030	0.00059	0.0000030		
0.006859	0.1206	0.00059	0.49240	0.002005	0.0000099	0.0000040	0.00096	0.0000006		
0.00804	0.1338	0.00024	0.18120	0.002225	0.0000040	0.000012	0.00208	0.0000002		
0.008864	0.1634	0.00027	0.16674	0.002717	0.0000045	0.0000071	0.00378	0.0000004		
0.009801	0.1676	0.00028	0.16436	0.002787	0.0000046	0.0000091	0.00209	0.0000002		
0.01043	0.1816	0.00029	0.15897	0.003019	0.0000048	0.000020	0.00229	0.0000002		
0.01187	0.1972	0.00031	0.15476	0.003279	0.0000051	0.0000100	0.00369	0.0000004		

	Πίνακας 3-3Αποτελέσματα από την α΄ σειρά μετρήσειων.										
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Olurá	Μέση				
S	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα		τετραγωνική	Σφάλμα			
Δυχνοτητά	όγκου	παροχής	παροχής	μάζας	παϱοχής	οφαλμα	απόκλιση	κλίσης se			
I [HZ]	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	ουχνοτητας	διαδρομής	[gr/sec]			
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]	[ELZ]	RMS				
0.0137	0.2418	0.00035	0.14561	0.004020	0.0000058	0.000018	0.00243	0.0000002			
0.015283	0.2705	0.00038	0.14200	0.004498	0.0000064	0.0000049	0.00192	0.0000002			
0.01854	0.3236	0.00045	0.13755	0.005380	0.0000074	0.000015	0.00193	0.0000002			
0.02074	0.3626	0.00049	0.13569	0.006030	0.0000082	0.000017	0.00324	0.0000003			
0.02303	0.4122	0.00055	0.13340	0.006853	0.0000091	0.000015	0.00201	0.0000002			
0.02515	0.4531	0.00060	0.13240	0.007533	0.0000099	0.000013	0.00190	0.0000002			
0.02785	0.5060	0.00066	0.13112	0.00841	0.000011	0.000018	0.00253	0.0000002			
0.03081	0.5564	0.00072	0.13023	0.00925	0.000012	0.000025	0.00230	0.0000002			
0.03331	0.6095	0.00079	0.13004	0.01013	0.000013	0.000021	0.00156	0.0000002			
0.03521	0.6379	0.00083	0.12991	0.01061	0.000014	0.000022	0.00212	0.0000002			
0.03762	0.6933	0.00089	0.12908	0.01152	0.000015	0.000029	0.00312	0.0000003			
0.03935	0.7252	0.00094	0.12931	0.01206	0.000016	0.000030	0.00378	0.0000004			
0.04277	0.781	0.0010	0.12878	0.01298	0.000017	0.000030	0.00159	0.0000002			
0.04449	0.822	0.0011	0.12825	0.01366	0.000017	0.000038	0.00500	0.0000005			
0.04717	0.862	0.0011	0.12903	0.01434	0.000018	0.000037	0.00403	0.0000004			
0.04943	0.898	0.0012	0.12828	0.01493	0.000019	0.000044	0.00181	0.0000002			
0.05182	0.944	0.0012	0.12820	0.01569	0.000020	0.000037	0.00190	0.0000002			
0.05446	0.992	0.0013	0.12790	0.01650	0.000021	0.000045	0.00236	0.0000002			
0.05724	1.041	0.0013	0.12795	0.01731	0.000022	0.000051	0.00189	0.0000002			
0.05799	1.095	0.0014	0.12803	0.01821	0.000023	0.000053	0.00261	0.0000003			
0.05885	1.083	0.0014	0.12789	0.01800	0.000023	0.000058	0.00236	0.0000002			
0.06035	1.144	0.0015	0.12768	0.01902	0.000024	0.000088	0.00350	0.0000003			
0.06253	1.141	0.0015	0.12785	0.01897	0.000024	0.000053	0.00450	0.0000005			
0.06437	1.169	0.0015	0.12803	0.01943	0.000025	0.000052	0.00724	0.0000008			
0.06478	1.229	0.0016	0.12742	0.02044	0.000026	0.000086	0.00594	0.0000006			
0.06588	1.214	0.0020	0.16649	0.02017	0.000033	0.000085	0.00112	0.0000038			
0.06669	1.230	0.0013	0.10483	0.02045	0.000021	0.000054	0.00105	0.0000018			
0.0682	1.331	0.0017	0.12797	0.02212	0.000028	0.00012	0.00415	0.0000004			
0.06867	1.250	0.0016	0.12770	0.02079	0.000026	0.000058	0.00158	0.0000002			
0.07008	1.317	0.0017	0.12769	0.02190	0.000028	0.000059	0.00208	0.0000002			
0.07204	1.354	0.0017	0.12744	0.02250	0.000029	0.000074	0.00336	0.0000003			
0.07426	1.429	0.0018	0.12768	0.02376	0.000030	0.000079	0.00395	0.0000004			
0.07627	1.456	0.0019	0.12729	0.02419	0.000031	0.000090	0.00332	0.0000003			
0.07654	1.468	0.0019	0.12725	0.02441	0.000031	0.000062	0.00168	0.0000002			
0.07669	1.485	0.0019	0.12744	0.02468	0.000031	0.000080	0.00213	0.0000002			
0.07689	1.482	0.0019	0.12740	0.02464	0.000031	0.000088	0.00302	0.0000003			
0.07767	1.490	0.0019	0.12746	0.02478	0.000031	0.000063	0.00184	0.0000002			
0.07769	1.485	0.0019	0.12756	0.02468	0.000031	0.000063	0.00388	0.0000004			
0.07774	1.486	0.0018	0.12247	0.02470	0.000030	0.000063	0.00186	0.0000002			

	Πίνακας 3-3Αποτελέσματα από την α΄ σειρά μετρήσειων.									
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Oluré	Μέση			
S	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα		τετραγωνική	Σφάλμα		
	όγκου	παροχής	παροχής	μάζας	παϱοχής	οφαλμά	απόκλιση	κλίσης se		
тцпхј	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	συχνοτητάς	διαδρομής	[gr/sec]		
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]	[LIZ]	RMS			
0.078	1.487	0.0019	0.12761	0.02473	0.000031	0.000063	0.00181	0.0000002		
0.07819	1.490	0.0019	0.12759	0.02477	0.000031	0.000063	0.00203	0.0000002		
0.0784	1.500	0.0019	0.12761	0.02493	0.000032	0.000065	0.00368	0.0000004		
0.07841	1.490	0.0019	0.12744	0.02478	0.000031	0.000063	0.00217	0.0000003		
0.07887	1.494	0.0019	0.12763	0.02485	0.000032	0.000076	0.00197	0.0000002		
0.08222	1.561	0.0020	0.12745	0.02596	0.000033	0.000091	0.00179	0.0000002		
0.0851	1.615	0.0021	0.12735	0.02686	0.000034	0.00011	0.00782	0.0000008		
0.09273	1.752	0.0022	0.12717	0.02913	0.000037	0.000090	0.00192	0.0000002		
0.101	1.930	0.0025	0.12738	0.03208	0.000041	0.00011	0.00199	0.0000002		
0.1138	2.195	0.0027	0.12115	0.03648	0.000044	0.00018	0.00585	0.0000006		
0.1229	2.396	0.0031	0.12729	0.03983	0.000050	0.00019	0.00446	0.0000005		
0.1377	2.641	0.0034	0.12708	0.04390	0.000056	0.00019	0.00306	0.0000003		
0.1587	3.039	0.0039	0.12706	0.05052	0.000064	0.00027	0.00635	0.0000007		
0.1875	3.619	0.0046	0.12700	0.06013	0.000076	0.00038	0.00799	0.0000008		
0.2128	4.076	0.0052	0.12713	0.06776	0.000086	0.00047	0.00000	0.0000038		
0.2379	4.649	0.0059	0.12701	0.07725	0.000098	0.00060	0.00540	0.0000005		
0.262	5.059	0.0064	0.12710	0.0841	0.00011	0.0017	0.00238	0.0000003		
0.299	5.783	0.0073	0.12686	0.0962	0.00012	0.0017	0.00704	0.0000007		
0.321	6.248	0.0079	0.12686	0.1039	0.00013	0.0018	0.01710	0.0000017		
0.352	6.837	0.0087	0.12708	0.1136	0.00014	0.0018	0.01270	0.0000014		
0.38	7.312	0.0093	0.12702	0.1215	0.00015	0.0017	0.00505	0.0000005		
0.402	7.737	0.0098	0.12711	0.1286	0.00016	0.0017	0.00856	0.0000009		
0.437	8.50	0.011	0.12706	0.1412	0.00018	0.0018	0.00797	0.0000008		
0.464	8.96	0.011	0.12700	0.1490	0.00019	0.0017	0.00704	0.0000007		
0.486	9.40	0.012	0.12690	0.1563	0.00020	0.0017	0.00629	0.0000007		
0.518	10.01	0.013	0.12702	0.1664	0.00021	0.0017	0.00428	0.0000005		
0.594	11.52	0.015	0.12697	0.1916	0.00024	0.0018	0.01381	0.0000016		
0.637	12.46	0.016	0.12700	0.2071	0.00026	0.0019	0.03227	0.0000037		
0.677	13.14	0.017	0.12701	0.2185	0.00028	0.0018	0.01957	0.0000022		
0.745	14.45	0.018	0.12694	0.2402	0.00030	0.0018	0.02206	0.0000025		
0.777	15.34	0.019	0.12699	0.2550	0.00032	0.0020	0.06199	0.0000071		
0.802	15.51	0.010	0.06495	0.2577	0.00016	0.0020	0.02348	0.0000050		
0.815	15.92	0.010	0.06502	0.2645	0.00017	0.0023	0.02539	0.0000054		
0.84	16.35	0.011	0.06482	0.2717	0.00017	0.0020	0.01374	0.0000029		
0.859	16.60	0.011	0.06477	0.2760	0.00018	0.0018	0.01158	0.0000025		
0.877	16.88	0.011	0.06476	0.2807	0.00018	0.0019	0.01417	0.0000030		
0.895	17.37	0.011	0.06497	0.2886	0.00018	0.0019	0.01566	0.0000034		
0.903	17.47	0.011	0.06484	0.2904	0.00018	0.0018	0.00430	0.0000009		
0.917	17.79	0.012	0.06482	0.2958	0.00019	0.0017	0.01015	0.0000023		

	Πίνακας 3-3 Αποτελέσματα από την α΄ σειρά μετρήσειων.									
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Oluré	Μέση			
Συμμάστασα	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα	σφάλωσ	τετραγωνική	Σφάλμα		
	όγκου	παϱοχής	παϱοχής	μάζας	παϱοχής	οφαλμά	απόκλιση	κλίσης se		
I[IIZ]	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	συχνοτητάς	διαδρομής	[gr/sec]		
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]	[112]	RMS			
0.931	18.13	0.012	0.06478	0.3015	0.00019	0.0017	0.01358	0.0000029		
0.951	18.59	0.012	0.06477	0.3091	0.00020	0.0018	0.01668	0.0000036		
0.967	18.86	0.012	0.06476	0.3136	0.00020	0.0017	0.00602	0.0000014		
0.995	19.37	0.013	0.06478	0.3220	0.00021	0.0023	0.02229	0.0000048		
1.009	19.474	0.0067	0.03448	0.3238	0.00011	0.0017	0.00313	0.0000013		
1.016	19.611	0.0068	0.03447	0.3261	0.00011	0.0021	0.01036	0.0000042		
1.019	19.699	0.0068	0.03442	0.3276	0.00011	0.0019	0.00605	0.0000026		
1.02	19.698	0.0068	0.03443	0.3276	0.00011	0.0018	0.00669	0.0000028		
1.022	19.632	0.0068	0.03443	0.3265	0.00011	0.0019	0.00649	0.0000027		
1.023	19.737	0.0068	0.03442	0.3282	0.00011	0.0019	0.00753	0.0000031		
1.024	19.637	0.0068	0.03443	0.3265	0.00011	0.0019	0.00586	0.0000025		
1.025	19.621	0.0068	0.03443	0.3263	0.00011	0.0018	0.00536	0.0000023		
1.034	19.832	0.0068	0.03439	0.3298	0.00011	0.0017	0.00150	0.0000006		
1.035	19.854	0.0068	0.03439	0.3302	0.00011	0.0017	0.00194	0.0000008		
1.044	20.796	0.0072	0.03457	0.3456	0.00011	0.0018	0.02985	0.0000130		
1.045	20.086	0.0069	0.03441	0.3340	0.00011	0.0018	0.00442	0.0000018		
1.061	20.919	0.0073	0.03509	0.3476	0.00011	0.0021	0.01308	0.0000054		
1.082	21.081	0.0073	0.03485	0.3506	0.00012	0.0027	0.02533	0.0000106		
1.101	21.885	0.0076	0.03491	0.3638	0.00012	0.0021	0.01788	0.0000075		
1.123	22.325	0.0077	0.03462	0.3711	0.00012	0.0020	0.00726	0.0000030		
1.143	22.655	0.0078	0.03450	0.3767	0.00012	0.0018	0.00379	0.0000015		
1.158	22.852	0.0079	0.03450	0.3799	0.00012	0.0018	0.00205	0.0000009		
1.181	23.079	0.0080	0.03453	0.3837	0.00012	0.0027	0.00653	0.0000028		
1.186	22.854	0.0057	0.02513	0.37996	0.000084	0.0020	0.00278	0.0000049		
1.188	23.370	0.0089	0.03797	0.3884	0.00014	0.0020	0.00549	0.0000230		
1.196	23.568	0.0061	0.02579	0.39165	0.000088	0.0018	0.00180	0.0000017		
1.197	22.827	0.0059	0.02585	0.37951	0.000087	0.0020	0.00709	0.0000063		
1.203	23.446	0.0089	0.03809	0.3897	0.00014	0.0018	0.00537	0.0000229		
1.204	23.589	0.0060	0.02558	0.39208	0.000088	0.0017	0.00119	0.0000011		
1.207	23.568	0.0081	0.03456	0.3918	0.00013	0.0017	0.00750	0.0000031		
1.207	23.574	0.0082	0.03459	0.3919	0.00013	0.0017	0.00147	0.0000006		
1.209	23.472	0.0081	0.03449	0.3902	0.00013	0.0017	0.00515	0.0000021		
1.210	22.923	0.0081	0.03552	0.3812	0.00013	0.0017	0.03920	0.0000171		
1.211	23.398	0.0081	0.03446	0.3891	0.00013	0.0017	0.01019	0.0000042		
1.213	23.480	0.0081	0.03441	0.3904	0.00013	0.0017	0.00593	0.0000024		
1.841	35.17	0.015	0.04238	0.5846	0.00024	0.0093	0.00189	0.0000114		
1.886	35.332	0.0098	0.02761	0.5874	0.00015	0.0073	0.00256	0.0000019		
2.012	36.70	0.013	0.03518	0.6104	0.00020	0.0064	0.06048	0.0000259		
2.014	36.193	0.0085	0.02356	0.6019	0.00012	0.0063	0.03975	0.0000337		

	Πίνακας 3-3 Αποτελέσματα από την α΄ σειρά μετρήσειων.									
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Oluré	Μέση			
S	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα		τετραγωνική	Σφάλμα		
Δυχνοτητά	όγκου	παροχής	παροχής	μάζας	παϱοχής	οφαλμά	απόκλιση	κλίσης se		
I[IIZ]	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	ουχνοτητας	διαδρομής	[gr/sec]		
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]	[LIZ]	RMS			
2.122	38.004	0.0091	0.02398	0.6320	0.00013	0.0047	0.04525	0.0000385		
2.256	42.550	0.0090	0.02121	0.7076	0.00013	0.0050	0.01965	0.0000166		
2.430	48.27	0.012	0.02493	0.8021	0.00017	0.0093	0.05996	0.0000508		
2.498	50.58	0.011	0.02199	0.8405	0.00015	0.0055	0.02434	0.0000206		
2.623	54.36	0.012	0.02123	0.9036	0.00016	0.0043	0.00995	0.0000082		
2.675	55.48	0.012	0.02131	0.9221	0.00016	0.0045	0.01368	0.0000117		
2.808	57.62	0.012	0.02107	0.9580	0.00017	0.0064	0.01673	0.0000143		
2.923	60.32	0.012	0.02072	1.0032	0.00017	0.0072	0.01346	0.0000118		
2.991	60.70	0.013	0.02061	1.0094	0.00017	0.0049	0.00511	0.0000046		
3.138	62.10	0.013	0.02066	1.0327	0.00018	0.0045	0.01095	0.0000094		
3.284	62.76	0.013	0.02085	1.0436	0.00018	0.0090	0.01966	0.0000178		
3.462	63.57	0.013	0.02059	1.0571	0.00018	0.0082	0.00480	0.0000042		
3.545	63.94	0.013	0.02046	1.0634	0.00018	0.0063	0.00574	0.0000050		
3.637	65.06	0.013	0.02034	1.0822	0.00019	0.0039	0.00690	0.0000062		
3.779	66.78	0.014	0.02037	1.1108	0.00019	0.0040	0.01008	0.0000092		
3.912	68.28	0.014	0.02034	1.1358	0.00020	0.0043	0.00913	0.0000081		
4.097	71.53	0.016	0.02179	1.1886	0.00021	0.0067	0.02124	0.0000194		
4.187	73.83	0.016	0.02169	1.2269	0.00021	0.0056	0.02490	0.0000224		
4.374	80.00	0.017	0.02176	1.3295	0.00024	0.0056	0.03562	0.0000324		
4.568	86.51	0.019	0.02169	1.4381	0.00026	0.0070	0.04582	0.0000417		
4.684	91.25	0.019	0.02122	1.5171	0.00027	0.0057	0.03625	0.0000328		
4.895	98.97	0.016	0.01582	1.6454	0.00017	0.0028	0.00326	0.0000058		
5.017	102.34	0.016	0.01574	1.7016	0.00018	0.0072	0.00980	0.0000174		
5.269	107.86	0.017	0.01548	1.7937	0.00019	0.0059	0.00731	0.0000134		
5.346	110.02	0.017	0.01542	1.8296	0.00019	0.0037	0.00426	0.0000078		
5.711	120.94	0.019	0.01551	2.0112	0.00021	0.0081	0.01179	0.0000219		
6.167	137.47	0.021	0.01522	2.2864	0.00024	0.0044	0.00945	0.0000172		
6.59	152.81	0.023	0.01520	2.5415	0.00026	0.011	0.01094	0.0000199		
7.024	156.97	0.023	0.01496	2.6109	0.00027	0.0063	0.00630	0.0000117		
7.426	163.88	0.025	0.01497	2.7259	0.00028	0.0088	0.00957	0.0000158		
7.821	171.59	0.026	0.01502	2.8541	0.00030	0.0076	0.01576	0.0000250		
8.233	177.95	0.027	0.01494	2.9599	0.00030	0.0046	0.00829	0.0000135		
8.689	188.92	0.028	0.01493	3.1423	0.00032	0.0060	0.00878	0.0000148		
9.082	197.15	0.029	0.01494	3.2792	0.00034	0.0061	0.01072	0.0000182		
9.538	209.08	0.031	0.01492	3.4777	0.00036	0.0040	0.00918	0.0000155		
9.97	217.26	0.034	0.01564	3.6120	0.00037	0.011	0.01040	0.0000179		
10.454	226.86	0.035	0.01563	3.7717	0.00038	0.0065	0.01077	0.0000179		
10.838	232.83	0.036	0.01562	3.8710	0.00039	0.0061	0.00781	0.0000135		
11.279	224.01	0.036	0.01619	3.7243	0.00041	0.0092	0.04970	0.0000816		

	Πίνακας 3-3Αποτελέσματα από την α΄ σειρά μετρήσειων.									
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Oluté	Μέση			
S	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα		τετραγωνική	Σφάλμα		
Δυχνοτητά	όγκου	παροχής	παροχής	μάζας	παϱοχής	οφαλμά	απόκλιση	κλίσης se		
I[IIZ]	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	συχνοτητας	διαδρομής	[gr/sec]		
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]	[EIZ]	RMS			
11.69	201.89	0.034	0.01683	3.3565	0.00040	0.015	0.06586	0.0001075		
12.16	158.28	0.025	0.01562	2.6318	0.00028	0.011	0.01711	0.0000275		
12.493	151.14	0.024	0.01604	2.5133	0.00028	0.0058	0.03685	0.0000612		
13.00	133.74	0.023	0.01745	2.2218	0.00025	0.015	0.03444	0.0000526		
13.36	123.61	0.022	0.01795	2.0536	0.00025	0.011	0.04316	0.0000650		
13.76	111.37	0.019	0.01718	1.8505	0.00021	0.013	0.02563	0.0000386		
14.17	101.01	0.017	0.01687	1.6785	0.00018	0.017	0.01969	0.0000284		
14.55	95.50	0.016	0.01651	1.5871	0.00017	0.013	0.01174	0.0000170		
15.07	91.46	0.016	0.01793	1.5202	0.00020	0.015	0.04074	0.0000595		
15.43	91.07	0.017	0.01872	1.5137	0.00021	0.0090	0.05004	0.0000725		
15.80	98.05	0.017	0.01734	1.6298	0.00020	0.012	0.03573	0.0000520		
16.254	106.25	0.016	0.01540	1.7660	0.00016	0.0040	0.00622	0.0000175		
16.67	111.01	0.017	0.01522	1.8453	0.00017	0.017	0.00837	0.0000241		
17.59	129.24	0.020	0.01516	2.1487	0.00020	0.017	0.01586	0.0000449		
18.43	149.77	0.022	0.01469	2.4901	0.00022	0.017	0.01184	0.0000345		
19.27	171.82	0.030	0.01733	2.8566	0.00036	0.018	0.04842	0.0001421		
19.98	200.03	0.039	0.01935	3.3256	0.00051	0.018	0.07476	0.0002224		
20.90	242.99	0.034	0.01418	4.0398	0.00031	0.018	0.00602	0.0000174		
21.84	269.52	0.041	0.01506	4.4809	0.00042	0.020	0.03929	0.0001197		
22.55	307.41	0.044	0.01429	5.1110	0.00041	0.019	0.02046	0.0000638		
23.45	328.96	0.048	0.01462	5.4692	0.00047	0.020	0.03410	0.0001106		
24.24	341.06	0.050	0.01464	5.6711	0.00051	0.019	0.04407	0.0001368		
25.11	349.04	0.048	0.01380	5.8043	0.00045	0.021	0.02098	0.0000610		
25.91	357.55	0.050	0.01395	5.9459	0.00048	0.022	0.03106	0.0000890		
26.83	358.51	0.051	0.01416	5.9612	0.00048	0.019	0.03144	0.0000894		
27.71	356.18	0.070	0.01957	5.9217	0.00092	0.027	0.03206	0.0002443		
28.49	356.33	0.066	0.01845	5.9241	0.00084	0.019	0.02980	0.0002078		
29.18	378.5	0.19	0.05012	6.293	0.0031	0.021	0.01378	0.0006325		
30.11	342.29	0.070	0.02048	5.6921	0.0010	0.020	0.01940	0.0001953		
30.80	308.77	0.050	0.01611	5.1347	0.00059	0.024	0.01519	0.0000835		
30.81	306.06	0.093	0.03046	5.090	0.0014	0.025	0.00720	0.0001944		
31.59	305.75	0.046	0.01509	5.0845	0.00051	0.037	0.06055	0.0001656		
32.69	313.77	0.061	0.01960	5.2178	0.00083	0.038	0.03161	0.0002336		
33.65	291.02	0.041	0.01401	4.8396	0.00040	0.044	0.02629	0.0000737		
34.31	315.33	0.053	0.01669	5.2413	0.00059	0.029	0.05560	0.0002007		
34.40	318.98	0.081	0.02548	5.305	0.0012	0.020	0.02009	0.0002985		
34.41	310.6	0.14	0.04444	5.165	0.0022	0.033	0.00518	0.0002650		
34.43	291.59	0.073	0.02520	4.847	0.0011	0.033	0.19391	0.0005094		
34.48	242.12	0.057	0.02345	4.0263	0.00083	0.034	0.01773	0.0002377		

	Πίνακας 3-3Αποτελέσματα από την α΄ σειρά μετρήσειων.										
Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου [ml/min]	Ολικό σφάλμα παϱοχής όγκου [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παϱοχής όγκου (%)	Παοοχή μάζας [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παϱοχής μάζας [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας [Hz]	Μέση τετφαγωνική απόκλιση διαδφομής RMS	Σφάλμα κλίσης se [gr/sec]			
34.92	205.63	0.040	0.01931	3.4195	0.00053	0.027	0.04566	0.0002031			
34.98	223.51	0.064	0.02876	3.7168	0.00098	0.027	0.01637	0.0002787			
35.06	271.74	0.041	0.01508	4.5178	0.00042	0.029	0.04368	0.0001224			
35.19	318.70	0.068	0.02131	5.2986	0.00094	0.034	0.02441	0.0002320			
35.94	206.67	0.030	0.01453	3.4367	0.00031	0.028	0.03076	0.0000788			

	Πίνακας 3-4 Αποτελέσματα από την β΄ σειρά μετρήσειων.									
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Ολικό	Μέση			
Συννότητα	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	τετραγωνική	Σφάλμα		
f [Hz]	όγκου	παϱοχής	παϱοχής	μάζας	παροχής	συγνότητας	απόκλιση	κλίσης se		
1 [1 12]	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	[H ₇]	διαδρομής	[gr/sec]		
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]		RMS			
1.95	41.85	0.015	0.03514	0.6951	0.00023	0.013	0.02452	0.0000089		
1.989	41.17	0.014	0.03487	0.6841	0.00022	0.0050	0.02342	0.0000074		
2.094	41.458	0.0088	0.02131	0.6891	0.00012	0.0083	0.00759	0.0000046		
2.128	41.404	0.0088	0.02117	0.6883	0.00012	0.0020	0.00545	0.0000035		
2.220	42.863	0.0090	0.02109	0.7126	0.00012	0.0038	0.01156	0.0000073		
2.383	47.99	0.010	0.02167	0.7979	0.00014	0.0042	0.03573	0.0000226		
2.499	53.02	0.011	0.02078	0.8816	0.00015	0.0020	0.00522	0.0000034		
2.574	56.39	0.012	0.02106	0.9377	0.00017	0.0037	0.03116	0.0000205		
2.630	59.98	0.013	0.02099	0.9975	0.00018	0.0057	0.02827	0.0000198		
2.772	64.69	0.013	0.02066	1.0757	0.00019	0.0034	0.01581	0.0000104		
2.915	68.50	0.014	0.02085	1.1391	0.00020	0.0071	0.03002	0.0000200		
2.944	69.97	0.014	0.02057	1.1635	0.00020	0.0028	0.00456	0.0000030		
2.991	70.92	0.015	0.02084	1.1791	0.00020	0.0061	0.00633	0.0000043		
3.10	72.04	0.015	0.02087	1.1978	0.00021	0.011	0.01205	0.0000079		
3.261	72.40	0.015	0.02084	1.2038	0.00021	0.0088	0.01000	0.0000062		
3.439	72.46	0.015	0.02084	1.2046	0.00021	0.0041	0.00578	0.0000038		
3.532	72.36	0.015	0.02089	1.2030	0.00021	0.0037	0.01540	0.0000101		
3.622	72.35	0.015	0.02084	1.2029	0.00021	0.0041	0.00869	0.0000059		
3.770	73.57	0.015	0.02083	1.2232	0.00021	0.0066	0.00793	0.0000052		
3.909	72.63	0.015	0.02070	1.2077	0.00021	0.0078	0.00638	0.0000042		
4.089	74.43	0.015	0.02074	1.2378	0.00021	0.0067	0.02573	0.0000174		
4.19	77.15	0.017	0.02183	1.2820	0.00023	0.010	0.04101	0.0000283		
4.380	82.34	0.018	0.02216	1.3684	0.00025	0.0079	0.06337	0.0000443		
4.498	84.71	0.018	0.02124	1.4081	0.00024	0.0045	0.02636	0.0000167		
4.703	93.61	0.022	0.02349	1.5562	0.00031	0.0086	0.11750	0.0000843		
4.919	106.63	0.017	0.01582	1.7727	0.00019	0.0036	0.00855	0.0000111		
5.026	110.03	0.017	0.01577	1.8294	0.00019	0.0023	0.00503	0.0000067		
5.225	116.76	0.019	0.01632	1.9411	0.00022	0.0054	0.03317	0.0000428		
5.323	120.50	0.019	0.01582	2.0034	0.00021	0.0027	0.01280	0.0000180		
5.704	135.08	0.023	0.01700	2.2459	0.00027	0.0032	0.05602	0.0000750		
6.169	150.81	0.024	0.01587	2.5073	0.00026	0.0065	0.02250	0.0000320		
6.553	166.78	0.026	0.01587	2.7728	0.00029	0.0026	0.02472	0.0000371		
7.038	186.49	0.030	0.01582	3.1005	0.00032	0.0094	0.02673	0.0000387		
7.423	188.87	0.030	0.01585	3.1401	0.00033	0.0041	0.02703	0.0000414		
7.85	193.39	0.030	0.01530	3.2160	0.00033	0.011	0.01219	0.0000181		
8.192	199.84	0.031	0.01533	3.3232	0.00034	0.0067	0.01765	0.0000258		
8.708	213.70	0.033	0.01553	3.5537	0.00038	0.0038	0.03526	0.0000530		

Πίνακας 3-4 Αποτελέσματα από την β΄ σειρά μετρήσειων.								
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Ολικό	Μέση	
Συχνότητα f [Hz]	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα	σφάλωσ	τετραγωνική	Σφάλμα
	όγκου	παροχής	παϱοχής	μάζας	παϱοχής	σφαλμα	απόκλιση	κλίσης se
	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	συχνοτητας	διαδρομής	[gr/sec]
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]	[HZ]	RMS	
9.545	234.85	0.036	0.01527	3.9054	0.00040	0.0036	0.01167	0.0000189
9.894	243.93	0.037	0.01526	4.0564	0.00041	0.0042	0.01217	0.0000191
10.463	256.34	0.039	0.01525	4.2627	0.00043	0.0049	0.00896	0.0000143
10.827	259.84	0.040	0.01524	4.3210	0.00044	0.0086	0.00893	0.0000142
11.30	265.81	0.041	0.01525	4.4203	0.00045	0.013	0.01310	0.0000201
11.720	244.97	0.038	0.01566	4.0738	0.00044	0.0042	0.05272	0.0000756
12.134	216.12	0.034	0.01571	3.5941	0.00039	0.0068	0.04960	0.0000693
12.499	198.22	0.031	0.01568	3.2963	0.00036	0.0022	0.04636	0.0000617
12.984	173.58	0.027	0.01568	2.8866	0.00031	0.0084	0.03682	0.0000520
13.365	157.07	0.025	0.01608	2.6119	0.00030	0.0067	0.04809	0.0000664
13.721	143.88	0.024	0.01637	2.3927	0.00028	0.0024	0.04972	0.0000710
14.147	133.18	0.023	0.01698	2.2148	0.00028	0.0036	0.05941	0.0000827
14.521	120.45	0.020	0.01687	2.0029	0.00025	0.0053	0.05453	0.0000708
15.029	110.16	0.017	0.02134	1.8320	0.00022	0.0062	0.04736	0.0000602
15.421	103.23	0.017	0.01610	1.7167	0.00020	0.0038	0.03231	0.0000408
15.797	108.34	0.030	0.02763	1.8017	0.00045	0.0046	0.16579	0.0002109
16.31	102.02	0.026	0.02577	1.6954	0.00038	0.014	0.07240	0.0001764
16.69	98.39	0.021	0.02093	1.6351	0.00027	0.018	0.04653	0.0001144
17.55	99.89	0.023	0.02283	1.6601	0.00032	0.017	0.05735	0.0001412
18.44	114.62	0.028	0.02402	1.9051	0.00039	0.018	0.07224	0.0001812
19.14	123.94	0.036	0.02880	2.0600	0.00054	0.021	0.10203	0.0002580
20.02	155.46	0.045	0.02913	2.5844	0.00068	0.019	0.11450	0.0003323
20.91	190.85	0.029	0.01539	3.1730	0.00031	0.018	0.03212	0.0000934
21.68	223.01	0.035	0.01562	3.7077	0.00038	0.021	0.04190	0.0001237
22.61	253.98	0.039	0.01521	4.2227	0.00040	0.018	0.04021	0.0001212
23.44	276.58	0.042	0.01501	4.5983	0.00042	0.019	0.03818	0.0001201
24.19	283.32	0.044	0.01559	4.7103	0.00048	0.020	0.05043	0.0001597
25.13	308.28	0.047	0.01509	5.1254	0.00048	0.018	0.05094	0.0001415
25.97	313.93	0.053	0.01703	5.2194	0.00064	0.020	0.08893	0.0002551
26.73	317.38	0.050	0.01570	5.2766	0.00054	0.025	0.06085	0.0001869
27.71	363.58	0.052	0.01421	6.0448	0.00047	0.021	0.02311	0.0000663
28.42	344.03	0.069	0.02018	5.7183	0.00091	0.028	0.13427	0.0004100
28.49	344.26	0.056	0.01616	5.7235	0.00063	0.021	0.02403	0.0001223
28.54	355.7	0.29	0.08088	5.914	0.0047	0.043	0.01086	0.0012633
29.25	337.85	0.069	0.02031	5.6156	0.00091	0.025	0.13999	0.0004085
30.11	322.28	0.047	0.01461	5.3593	0.00049	0.026	0.03424	0.0001166
30.96	301.17	0.067	0.02228	5.0071	0.00094	0.033	0.16568	0.0004407
31.73	302.23	0.056	0.01867	5.0247	0.00072	0.020	0.11874	0.0003139
32.73	296.54	0.041	0.01373	4.9314	0.00038	0.029	0.01041	0.0000285

Πίνακας 3-4Αποτελέσματα από την β΄ σειρά μετρήσειων.									
Συχνότητα f [Hz]	Παροχή όγκου [ml/min]	Ολικό σφάλμα παϱοχής όγκου [ml/min]	Σχετικό σφάλμα παϱοχής όγκου (%)	Παοοχή μάζας [gr/sec]	Ολικό σφάλμα παϱοχής μάζας [gr/sec]	Ολικό σφάλμα συχνότητας [Hz]	Μέση τετφαγωνική απόκλιση διαδφομής RMS	Σφάλμα κλίσης se [gr/sec]	
34.18	301.00	0.052	0.01714	5.0043	0.00062	0.020	0.05100	0.0002125	
34.20	327.2	0.14	0.04238	5.439	0.0022	0.017	0.02495	0.0007870	
35.03	313.68	0.090	0.02865	5.215	0.0014	0.034	0.06056	0.0005597	
35.60	304.9	0.12	0.03963	5.070	0.0019	0.024	0.03804	0.0007240	
35.68	292.8	0.16	0.05312	4.868	0.0025	0.037	0.02227	0.0009246	

Πίνακας 3-5Αποτελέσματα από την γ΄ σειρά μετρήσειων.									
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Ολικό	Μέση		
Συνινόστησα	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	τετραγωνική	Σφάλμα	
f [H-1	όγκου	παϱοχής	παϱοχής	μάζας	παϱοχής	συννότητας	απόκλιση	κλίσης se	
1 [112]	[ml/min]	όγκου	όγκου	[gr/sec]	μάζας	[H ₇]	διαδρομής	[gr/sec]	
		[ml/min]	(%)		[gr/sec]		RMS		
1.89	40.75	0.014	0.03484	0.6771	0.00022	0.012	0.01253	0.0000058	
2.000	40.85	0.046	0.11328	0.6790	0.00076	0.0019	0.09592	0.0000754	
2.106	41.319	0.0088	0.02134	0.6868	0.00012	0.0088	0.22016	0.0000057	
2.284	43.26	0.010	0.02314	0.7191	0.00014	0.0097	0.04051	0.0000347	
2.362	45.32	0.010	0.02231	0.7534	0.00014	0.0061	0.03534	0.0000294	
2.513	51.82	0.012	0.02381	0.8615	0.00018	0.0061	0.05784	0.0000498	
2.66	58.48	0.015	0.02537	0.9718	0.00021	0.011	0.07607	0.0000673	
2.677	59.61	0.013	0.02203	0.9908	0.00018	0.0030	0.03187	0.0000283	
2.801	63.82	0.014	0.02123	1.0609	0.00018	0.0039	0.01183	0.0000107	
2.951	67.69	0.014	0.02123	1.1252	0.00019	0.0046	0.01338	0.0000121	
3.082	69.87	0.015	0.02113	1.1613	0.00020	0.0031	0.00417	0.0000022	
3.238	71.42	0.015	0.02112	1.1871	0.00020	0.0046	0.00437	0.0000128	
3.437	71.54	0.015	0.02097	1.1892	0.00020	0.0044	0.00242	0.0000169	
3.499	71.36	0.015	0.02084	1.1864	0.00020	0.0026	0.00379	0.0000033	
3.687	72.00	0.015	0.02083	1.1970	0.00021	0.0057	0.00241	0.0000021	
3.784	72.39	0.015	0.02084	1.2036	0.00021	0.0065	0.00579	0.0000051	
3.922	72.82	0.015	0.02084	1.2107	0.00021	0.0040	0.00509	0.0000046	
4.132	74.79	0.016	0.02091	1.2434	0.00021	0.0073	0.01331	0.0000120	
4.205	75.44	0.016	0.02083	1.2542	0.00021	0.0029	0.00474	0.0000043	
4.425	79.04	0.016	0.02085	1.3141	0.00023	0.0028	0.00902	0.0000084	
4.541	81.78	0.017	0.02096	1.3596	0.00024	0.0042	0.01862	0.0000171	
4.71	87.09	0.020	0.02275	1.4480	0.00028	0.010	0.07568	0.0000684	
4.872	93.16	0.015	0.01610	1.5489	0.00017	0.0039	0.01277	0.0000229	
4.982	100.43	0.016	0.01611	1.6697	0.00018	0.0034	0.01610	0.0000267	
5.299	113.58	0.018	0.01590	1.8884	0.00020	0.0043	0.01151	0.0000208	
5.353	115.05	0.018	0.01600	1.9128	0.00021	0.0048	0.01579	0.0000281	
5.674	125.12	0.020	0.01577	2.0803	0.00022	0.0025	0.00797	0.0000142	
6.186	140.88	0.022	0.01571	2.3422	0.00024	0.0026	0.00628	0.0000115	
6.633	159.84	0.025	0.01575	2.6574	0.00028	0.0026	0.01322	0.0000238	
7.05	176.69	0.030	0.01714	2.9361	0.00033	0.015	0.04004	0.0000752	
7.366	181.32	0.030	0.01639	3.0134	0.00032	0.0082	0.02442	0.0000389	
7.831	179.02	0.031	0.01754	2.9756	0.00037	0.0051	0.06486	0.0001091	
8.27	193.11	0.031	0.01612	3.2098	0.00033	0.014	0.02108	0.0000327	
8.80	201.29	0.034	0.01686	3.3441	0.00035	0.013	0.01957	0.0000316	
9.103	208.21	0.035	0.01659	3.4595	0.00035	0.0067	0.00995	0.0000169	
9.579	219.97	0.036	0.01638	3.6554	0.00037	0.0046	0.00865	0.0000151	
9.987	233.38	0.038	0.01639	3.8786	0.00041	0.0037	0.03117	0.0000533	
10.458	247.87	0.040	0.01599	4.1201	0.00042	0.0099	0.00782	0.0000141	

Πίνακας 3-5Αποτελέσματα από την γ΄ σειρά μετρήσειων.								
		Ολικό	Σχετικό		Ολικό	Ολικό	Μέση	
Συχνότητα f [Hz]	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα	Παροχή	σφάλμα	σφάλμα συχνότητας [Hz]	τετραγωνική	Σφάλμα
	όγκου	παροχής	παροχής	μάζας	παϱοχής		απόκλιση	κλίσης se
	[ml/min]	όγκου [ml/min]	όγκου (%)	[gr/sec]	μάζας		διαδρομής	[gr/sec]
					[gr/sec]		RMS	
11.264	242.33	0.039	0.01603	4.0279	0.00041	0.0066	0.01718	0.0000285
11.68	246.47	0.040	0.01604	4.0967	0.00042	0.011	0.01906	0.0000298
12.124	248.02	0.040	0.01601	4.1225	0.00042	0.0055	0.01415	0.0000229
12.492	233.00	0.041	0.01748	3.8733	0.00049	0.0055	0.09504	0.0001474
13.02	218.39	0.034	0.01577	3.6308	0.00038	0.012	0.02595	0.0000424
13.333	188.52	0.037	0.01936	3.1343	0.00048	0.0075	0.11489	0.0001825
13.777	168.62	0.028	0.01682	2.8034	0.00033	0.0058	0.05469	0.0000882
14.197	168.72	0.034	0.01987	2.8051	0.00045	0.0054	0.11331	0.0001755
14.579	154.94	0.031	0.01975	2.5760	0.00041	0.0097	0.10362	0.0001583
15.03	146.20	0.023	0.01606	2.4306	0.00026	0.011	0.02932	0.0000437
15.44	134.88	0.023	0.01691	2.2425	0.00027	0.011	0.04731	0.0000718
15.899	120.82	0.019	0.01590	2.0087	0.00021	0.0095	0.01633	0.0000241
16.35	113.75	0.035	0.03064	1.8914	0.00054	0.015	0.08985	0.0002600
16.73	118.11	0.021	0.01795	1.9641	0.00027	0.018	0.03858	0.0001084
17.62	112.70	0.018	0.01588	1.8739	0.00020	0.018	0.02148	0.0000597
18.42	120.68	0.018	0.01521	2.0063	0.00019	0.022	0.01437	0.0000406
19.21	165.03	0.037	0.02247	2.7431	0.00052	0.023	0.08043	0.0002374
20.08	166.31	0.025	0.01481	2.7650	0.00025	0.018	0.01783	0.0000514
20.882	203.38	0.030	0.01458	3.3812	0.00029	0.0062	0.01861	0.0000549
21.73	227.63	0.033	0.01461	3.7845	0.00032	0.012	0.02270	0.0000685
22.61	267.48	0.039	0.01442	4.4470	0.00037	0.020	0.02097	0.0000661
23.32	315.6	0.59	0.18795	5.246	0.0098	0.021	0.00520	0.0019441
24.25	315.77	0.053	0.01692	5.2499	0.00063	0.025	0.02406	0.0001561
24.26	311.33	0.048	0.01530	5.1735	0.00043	0.021	0.03245	0.0000908
25.23	438.72	0.065	0.01492	7.2922	0.00061	0.037	0.04118	0.0001390
25.91	441.80	0.068	0.01550	7.3435	0.00069	0.025	0.07116	0.0002113
26.77	452.70	0.070	0.01536	7.5245	0.00069	0.019	0.06633	0.0002028
27.68	444.28	0.071	0.01599	7.3847	0.00075	0.018	0.08274	0.0002592
28.38	452.21	0.071	0.01571	7.5165	0.00073	0.020	0.07933	0.0002378
28.45	440.87	0.072	0.01638	7.3280	0.00079	0.021	0.09145	0.0002899
29.29	453.35	0.069	0.01515	7.5363	0.00069	0.021	0.06991	0.0002007
30.17	432.39	0.072	0.01675	7.1887	0.00085	0.032	0.11769	0.0003359
30.97	405.50	0.068	0.01670	6.7418	0.00079	0.025	0.11200	0.0003111
31.67	389.75	0.060	0.01552	6.4798	0.00065	0.026	0.07698	0.0002180
32.57	384.37	0.061	0.01596	6.3903	0.00068	0.026	0.09118	0.0002475
33.38	387.80	0.056	0.01436	6.4475	0.00052	0.030	0.03212	0.0001000
34.28	394.54	0.058	0.01469	6.5596	0.00057	0.022	0.05710	0.0001451
35.58	358.23	0.071	0.01983	5.9528	0.00090	0.035	0.05214	0.0003281

Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται από τα αρχεία res μετά την εκτέλεση του προγράμματος least.

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.

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

Από τα παφακάτω διαγφάμματα παφατηφούμε ότι η σχέση μεταξύ εγχυόμενης μάζας φευστού και χφόνου είναι γφαμμική, ή σχεδόν γφαμμική όταν αναφεφόμαστε στον κινητήφα χαμηλών στφοφών. Όσο αυξάνεται η συχνότητα πεφιστφοφής του κινητήφα, τόσο αυξάνεται και η κλίση της συνάφτησης m(t), δηλαδή η παφοχή μάζας. Το τελευταίο δε φαίνεται να ισχύει στον κινητήφα υψηλών στφοφών. Λόγω του ότι όταν δίνονται ξεχωφιστά τα διαγφάμματα είναι δύσκολο να φανούν οι αυξομειώσεις της παφοχής μάζας με τη συχνότητα δημιουφγούμε διάγφαμμα 3 διαστάσεων. Στη μία διάσταση μπαίνει ο χφόνος t κάθε μέτφησης σε s, στη δεύτεφη οι μετφήσεις της μάζας m σε gr και στην τφίτη η συχνότητα f του κινητήφα σε Hz οπότε έχουμε το διάγφαμμα της εικόνας 3-5.



Εικόνα 3-1 Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας-χρόνου για διάφορες συχνότητες του κινητήρα χαμηλών στροφών.



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



Εικόνα 3-3 Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας-χρόνου για διάφορες συχνότητες κάτω από 11 Ηz του κινητήρα υψηλών στροφών.



Εικόνα 3-4Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας-χρόνου για διάφορες συχνότητες άνω των 11 Ηz του κινητήρα υψηλών στροφών.



Εικόνα 3-5Διάγραμμα εγχυόμενης μάζας-χρόνου-συχνότητας της πρώτης σειράς μετρήσεων

Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με τον κινητήρα υψηλών στροφών αύξηση της συχνότητας δε συνεπάγεται απαραίτητα και αύξηση της παροχής, πράγμα που θα φανεί και στα επόμενα διαγράμματα. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι περίπου στα 10-11 Ηz παρατηρείτε τοπικό μέγιστο της παροχής, έπειτα από το οποίο η παροχή μειώνεται μέχρι περίπου τα 16 Hz όπου παρατηρούμε τοπικό ελάχιστο. Ύστερα η παροχή αρχίζει πάλι να αυξάνεται με αύξηση της συχνότητας μέχρι τα 27.71 Hz όπου πάλι έχουμε τοπικό μέγιστο.
Στη συνέχεια η διαδορμή της παροχής είναι πτωτική μέχρι τα 36 Hz περίπου. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται σε γενικές γραμμές και στις άλλες 2 σειρές μετρήσεων.

Βασικός στόχος κατασκευής της δίχρονης περισταλτικής αντλίας ήταν η αποφυγή οπισθορροής. Από τις μετρήσεις φαίνεται ότι αυτό επιτυγχάνεται σε γενικές γραμμές. Αν είχαμε οπισθορροή θα έπρεπε το βάρος 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 μάζας – συχνότητας για κάθε κινητήρα και σειρά μέτρησης. Στα ίδια διαγράμματα έχει χαραχθεί και η καμπύλη σχεδιασμού ώστε να γίνει η σύγκριση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και θεωρητικών υπολογισμών. Η θεωρητική παροχή που στα διαγράμματα καλείται καμπύλη σχεδιασμού προκύπτει ως εξής:

$$\Sigma ε μια πλήρη περιστροφή 360° του άξονα η έγχυση θα είναι:$$

$$V = 106.35 πφ/360 \text{ [mm³] } όπου \ 0 \le φ \le 360°$$
(3.1)

Για να εισαχθεί ο χρόνος στην εξίσωση έχουμε: Σε μια περίοδο Τ ο άξονας έχει περιστραφεί κατά 360°.

Συνεπώς σε χρόνο t η περιστροφή θα είναι φ μοίρες και η σχέση που τους συνδέει είναι: φ=360t/Τ. Για να μετατρέψουμε τη σχέση 3.1 σε ml έχουμε $V = 106.35\pi * 0.001t / T$ και επειδή f=1/T τελικά έχουμε:

 $V = 0.10635\pi tf [ml]$

Παραγωγίζοντας ως προς t έχουμε την τελική σχέση dV/dt=0.10935πf [ml/sec] ή

$$dV/dt=0.10935\pi f60 [ml/min]$$
(3.2)

Να σημειωθεί ότι στα διαγράμματα 3-6 ως 3-10 έχουν προσαρμοστεί πολυώνυμα 10^{ου} βαθμού στις μέσες τιμές.



Εικόνα 3-6Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για ολόκληρη την πρώτη σειρά μετρήσεων από τα 0.003020 Hz έως 35.94Hz



Εικόνα 3-7Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον κινητήρα χαμηλών στροφών από τα 0.003020 Ηz έως 0.07887 Ηz



Εικόνα 3-8Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον κινητήρα μεσαίων στροφών ως τα 1.213 Hz



Εικόνα 3-9Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον κινητήρα υψηλών στροφών, β΄ σειρά μετρήσεων, από τα 1.213 Hz έως 35.68 Hz



Εικόνα 3-10 Διάγραμμα παροχής όγκου -συχνότητας και σφάλμα β' επιπέδου για τον κινητήρα υψηλών στροφών, γ΄ σειρά μετρήσεων, από τα 1.213 Ηz έως 35.58 Hz

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



Εικόνα 3-11Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της συχνότητας σε όλο το φάσμα συχνοτήτων των τριών σειρών μέτρησης, πρώτο επίπεδο σφάλματος

Για λόγους ευκρίνειας θα δώσουμε και τα διαγράμματα του σφάλματος της συχνότητας και στον κινητήρα μεσαίων στροφών και στον κινητήρα χαμηλών στροφών.



Εικόνα 3-12Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της συχνότητας στον κινητήρα χαμηλών στροφών, πρώτο επίπεδο σφάλματος



Εικόνα 3-13 Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της συχνότητας στον κινητήρα μεσαίων στροφών, πρώτο επίπεδο σφάλματος

Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα αυξάνεται και το σφάλμα της με εξαίρεση τις συχνότητες πριν τα 0.0804 Hz όπου λόγω της δυσκολίας του κινητήρα να υπερνικήσει το φορτίο και να λειτουργεί σε σχετικά σταθερές στροφές, υπάρχει κομμάτι της περιόδου στο οποίο επιβραδύνει και κομμάτι της περιόδου στο οποίο επιταχύνει. Το αποτέλεσμα αυτής της δυσλειτουργίας είναι η περίοδος να μειώνεται σε κάθε πλήρη περιστροφή του κινητήρα, δηλαδή σε γενικές γραμμές να αυξάνει η συχνότητα, μέσα στην ίδια μέτρηση. Αυτό όμως αυξάνει την διασπορά των μετρήσεων γύρω από τη μέση τιμή επομένως αυξάνεται και το σφάλμα.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι αυξάνεται απότομα το ολικό σφάλμα της συχνότητας στα 0.262 Hz. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή του οργάνου μέτρησης των στροφών του εκκεντροφόρου της αντλίας, από τη συγκεκριμένη συχνότητα και μετά, χρησιμοποιούμε το στροφόμετρο, το οποίο μετρά με μικρότερη ακρίβεια, συνεπώς αυξάνεται το ε_f.

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



Εικόνα 3-14Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της παροχής μάζας σε όλο το φάσμα συχνοτήτων των τριών σειρών μέτρησης, πρώτο επίπεδο σφάλματος



Εικόνα 3-15Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της παροχής μάζας στον κινητήρα χαμηλών στροφών, πρώτο επίπεδο σφάλματος



Εικόνα 3-16Διάγραμμα κατανομής συνολικού σφάλματος της παροχής μάζας στον κινητήρα μεσαίων στροφών, πρώτο επίπεδο σφάλματος

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι στα 0.802 Hz και στα 1.009 Hz υπάρχει μείωση του ολικού σφάλματος παροχής μάζας. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή της συχνότητας

δειγματοληψίας στις συχνότητες αυτές(βλ. Πιν3-2). 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 0.22 % πράγμα που φανερώνει τον πολύ καλό βαθμό προσαρμογής των ευθειών στα πειραματικά αποτελέσματα, μιας και απέχει πολύ από το όριο των 25%.



Εικόνα 3-17Διάγραμμα κατανομής μέσης τετραγωνικής απόκλισης RMS παροχής μάζας σε όλο το φάσμα συχνοτήτων των τριών σειρών μέτρησης

Από την παφοχή μάζας, μποφούμε να μεταβούμε στην παφοχή όγκου εφ'όσον γνωφίζουμε την πυκνότητα του νεφού. Η πυκνότητα μποφεί να βφεθεί εφ'όσον γνωφίζουμε την θεφμοκφασία του νεφού με τη διαδικασία που πεφιγφάφηκε στο Κεφ. 2.

Παραπάνω έχουμε χαραγμένα τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Για να χαραχθεί όμως η χαρακτηριστική καμπύλη, πράγμα που είναι στόχος αυτής της διπλωματικής, πρέπει να ομοαδοποιήσουμε κατάλληλα τις μετρήσεις. Μέσα από διαδοχικές επαναλήψεις της μέτρησης της παροχής κάθε συχνότητας μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τη 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 3-18 απεικονίζονται 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 διάγραμμα 3-19 φαίνεται το σχετικό σφάλμα κάθε επιπέδου μέτρησης, ενώ στο διάγραμμα 3-22 φαίνεται ένα πολυώνυμο που προσεγγίζει την καμπύλη ομαδοποίησης γ' επιπέδου.



Εικόνα 3-18Διάγραμμα 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 3-19Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος παροχής όγκου α', β', γ' επιπέδου σφάλματος για όλο το φάσμα συχνοτήτων



Εικόνα 3-20 Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος παροχής όγκου α' και β' επιπέδου σφάλματος στον κινητήρα χαμηλών στροφών



Εικόνα 3-21 Διάγραμμα κατανομής σχετικού σφάλματος παροχής όγκου α' και β' επιπέδου σφάλματος στον κινητήρα μεσαίων στροφών

Βλέπουμε από τα παραπάνω 3 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 προκύπτει από την στατιστική επεξεργασία της κάθε μέτρησης χωριστά. 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 που έχουν ληφθεί στην ίδια σειρά μετρήσεων με όσο το δυνατόν σταθερότερες συνθήκες.

Τέλος ποοκειμένου να βρεθεί η χαρακτηριστική καμπύλη της δίχρονης περισταλτικής αντλίας προσεγγίζουμε με πολυώνυμο τα σημεία των πειραματικών μετρήσεων. Το πολυώνυμο είναι 10° βαθμού, έχει τη μορφή $\dot{V} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + ... + a_{10} x^{10}$ και οι συντελεστές του είναι οι:

$\alpha_0 = -1.643102044$	$\alpha_6 = 0.008543750725$
<i>α</i> ₁ = 31.06398863	α_7 = -0.0004064322365
<i>α</i> ₂ = -7.059884491	αs= 1.072952696×10 ⁻⁵
<i>α</i> ₃ = 0.4014577466	α_9 = -1.490303751×10 ⁻⁷
$\alpha_4 = 0.4274035631$	α_{10} = 8.514665403×10 ⁻¹⁰
<i>α</i> ₅ = -0.09465163941	



Εικόνα 3-22 Το πολυώνυμο 10ου βαθμού (συνεχής γραμμή) που προσεγγίζει την πειραματική καμπύλη

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ -ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

4.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ- ΓΕΝΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

Από τα παφαπάνω αποτελέσματα που πφοέκυψαν από τις μετφήσεις που διεξήχθησαν στο εφγαστήφιο μποφούμε να κάνουμε αφκετές διαπιστώσεις και να βγάλουμε διάφοφα συμπεφάσματα για την αντλία, την συμπεφιφοφά της και εν συνεχεία να την συγκφίνουμε με τις άλλες πφότυπες αντλίες που έχουν χφησιμοποιηθεί στο εφγαστήφιο.

Παφατηφείται από την Εικ.3-18 ότι στις χαμηλές και στις πολύ χαμηλές συχνότητες(μέχοι τα 2.5 Ηz περίπου) η μεταβολή του ουθμού έγχυσης της δίχρονης αντλίας με το χρόνο είναι γραμμική και δεν αποκλίνει από τη θεωρητική μεταβολή που έχει υποτεθεί από τη γραμμική σχέση (3.2). Για μεγαλύτερες συχνότητες αρχίζει η μη-γραμμική συμπεριφορά του ουθμού έγχυσης με τη συχνότητα. Ο μέγιστος ρυθμός έγχυσης που αποδίδεται , ενώ η μεταβολή είναι περίπου 50ml/min και αντιστοιχεί σε συχνότητα 2.5Ηz. Από τη συχνότητα των 2.5Ηz έως 4.9Hz ,η μεταβολή γίνεται μη γραμμική έχει όμως μικρή διακύμανση γύρω από τη θεωρητική ευθεία καμπύλη μεταβολής και ο ουθμός έγχυσης για συχνότητα 4.9Hz λαμβάνει την τιμή 100ml/min περίπου. Από εκείνο το σημείο και μέχρι περίπου τα 10.8Hz αποδίδεται ουθμός έγχυσης με τη συχνότητας ένα τοπικό μέγιστο για συχνότητα 10.8Hz με τιμή 243ml/min ενώ έπειτα ο ουθμός έγχυσης πία συχνότητα, με τη συχνότητα, μέχρι τα 16Hz περίπου, όπου λαμβάνει την τιμή 107ml/min περίπου. Εκεί παρουσιάζεται τοπικό ελάχιστο και ύστερα το διάγραμμα ακολουθεί ανοδική πορεία μέχρι τα 29.2Hz όπου λαμβάνει τη τιμή του δηλαδή 390ml/min. Έπειτα από αυτό το σημείο ακολουθεί και πάλι καθοδική πορεία.

Είναι αξιοσημείωτο ότι στο διάστημα των συχνοτήτων διέγερσης (4.9Hz,10.8Hz) ο ουθμός έγχυσης γίνεται μεγαλύτερος από τον θεωρητικό της σχέσης (3-2), ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος ουθμός που μπορεί να επιτευχθεί από τη δίχρονη αντλία με βάση την εμβολιζόμενη ποσότητα ρευστού από τα δάχτυλα. Πιθανός λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι ότι, πέρα της εμβολιζόμενης ποσότητας ρευστού από τα δάχτυλα, προστίθεται και αυτή από τη δράση των βαλβίδων, η οποία λόγω συγκεκριμένων συχνοτήτων διέγερσης δεν εξισορροπείται σε μια περίοδο. Δηλαδή η μικρή ποσότητα που εμβολίζεται από τις βαλβίδες δεν αναρροφάται με τον ίδιο τρόπο στο διάστημα μιας περιόδου. Η ερμηνεία εδώ είναι δύσκολη και περίπλοκη αλλά μάλλον έχει τη βάση της στο ότι ο εύκαμπτος αγωγός που διεγείφεται σε αυτό το διάστημα συχνοτήτων από το συγκεκφιμένο μηχανισμό της αντλίας ιδιοταλαντεύεται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα αδρανειακά φαινόμενα, λόγω της μετακίνησης της μάζας του θευστού, αλλά και της μάζας του σωλήνα επηθεάζονται κατάλληλα από τη δυναμική καταπόνηση που εφαρμόζεται στις συγκεκριμένες συχνότητες και σε συνδυασμό με τη δοσμένη γεωμετρία και ενδοτικότητα του σωλήνα είναι υπεύθυνα για το συγκεκριμένο αποτέλεσμα, το οποίο μοιάζει ως ένα είδος υποαρμονικού συντονισμού (sub harmonic resonance).

Ένα πολύ σπουδαίο χαφακτηφιστικό της δίχφονης αντλίας όπως πφοκύπτει από της μετφήσεις είναι η απουσία οπισθοφοής. Αυτό ήταν αναμενόμενο, επαληθεύεται όμως και πειφαματικά. Η απουσία οπισθοφοής είναι ιδιαίτεφα σημαντική αφού η οπισθοφοή μποφεί να πφοκαλέσει θφόμβωση στους ασθενείς, όταν η αντλία χφησιμοποιείται σε ιατφικές εφαφμογές. Οπισθοφοή θα εμφανιζόταν αν στα διαγφάμματα μάζας – χφόνου παφουσιαζόταν μείωση της παφοχής σε κάθε πεφίοδο, δεν διαπιστώνεται ωστόσο κάτι τέτοιο. Αν και υπάφχουν διαστήματα όπου φαίνεται να μειώνεται η παφοχή, αυτό εμφανίζεται μόνο στον κινητήφα χαμηλών στφοφών και στο γεγονός ότι στις χαμηλές στφοφές του η φοπή που δίνει στην αντλία είναι ασταθής. Φαίνεται πως σε κάθε πεφίοδο υπάφχει ένα κομμάτι που η παφοχή αυξάνεται με μεγαλύτεφο φυθμό και ένα κομμάτι που η παφοχή αυξάνεται με μικφότεφο φυθμό.

Κατά την διάφκεια των μετφήσεων χφησιμοποιήθηκαν 5 σωλήνες. Γινόταν πεφιοδικός έλεγχος για την αστοχία τους και κάθε φοφά που βφισκόταν αστοχία γινόταν αντικατάσταση του σωλήνα. Υπήφξαν πεφιπτώσεις όπου ο σωλήνας αλλάχθηκε χωφίς να έχει αστοχήσει μεν, βφέθηκε καταπονημένος δε. Παφατηφήθηκε ότι όντως το σχήμα του σωλήνα σιλικόνης γίνεται οβάλ μετά από κάποιο αφιθμό πειφαμάτων. Ιδιαίτεφα ισχυφή καταπόνηση υφίστατο ο σωλήνας στις υψηλές στφοφές. Από τις 1600 RPM και πάνω αστοχούσαν συνεχώς τα φουλεμάν που βφίσκονταν στα έμβολα και πιέζονταν από τα έκκεντφα. Η φθοφά στα έκκεντφα ήταν ελάχιστη και δεν μας αλλοίωσε τα αποτελέσματα αφού η πλήφης έμφφαξη του σωλήνα εξασφαλίστηκε. Η χφήση λαδιού και η μικφή σχετικά διάφκεια των μετφήσεων βοήθησε στην αποφυγή εμφάνισης αυλακιών στα έκκεντφα που θα χαμήλωναν το ύψος των εμβόλων και δεν θα επέτφεπαν την πλήφη έμφφαξη του σωλήνα.

4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΧΡΟΝΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΤΥΠΕΣ

Ενδιαφέφον έχει η σύγκφιση της δίχφονης αντλίας με τις άλλες πφότυπες αντλίες που έχουν δοκιμαστεί στο εφγαστήφιο. Στο εφγαστήφιο έχουν δοκιμαστεί δύο τύποι αντλιών μία κυματοειδής και μία δύο σταδίων έγχυσης, οι οποίοι διαφέφουν στην μοφφή των έκκεντφων. Από το διάγφαμμα 4-1 φαίνονται οι διαφοφές της δίχφονης αντλίας στην οποία έγιναν τα πειφάματα από τις δύο άλλες.

Παρατηρούμε ότι όλες ως τα 7 Ηz 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 Ηz, στο διάστημα 7 - 10 περίπου Ηz υπάρχει μία υπέρβαση της καμπύλης σχεδιασμού λόγω συντονισμού και αδρανειακών φαινομένων ενώ στα 14 Ηz όπου έχουμε ολικό μέγιστο της παροχής. Στην συνέχεια η παροχή μειώνεται.

Όσο αφορά την κυματοειδή αντλία 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. Από το

διάγφαμμα παφοχής όγκου – συχνότητας κάθε σειφάς βλέπουμε ότι μέχρι τα 10 Hz η παφοχή αυξάνεται γφαμμικά με την συχνότητα. Από εκεί και μετά παφατηφείται μία αύξηση στον φυθμό παφοχής ως τα 14 Hz. Αυτό οφείλεται σε αδφανειακά φαινόμενα και στον συντονισμό της αντλίας, συνεπώς εκεί η παφοχή αυξάνεται πεφισσότεφο από το πφοβλεπόμενο. Στο συγκεκφιμένο διάστημα συχνοτήτων υπάφχει υψηλή καταπόνηση του σωλήνα, άφα και υψηλή πιθανότητα αστοχίας του. Από εκεί και ως τα 31 Hz αυξάνεται ελάχιστα η παφοχή με την συχνότητα. Στο συγκεκφιμένο διάστημα συχνοτήτων υπάφχει υψηλή καταπόνηση του σωλήνα, άφα και υψηλή πιθανότητα αστοχίας του. Από εκεί και ως τα 31 Hz αυξάνεται ελάχιστα η παφοχή με την συχνότητα. Τέλος από τα 31 Hz και πάνω καταγφάφεται μία απότομη αύξηση της παφοχής. Στα 35 Hz πεφίπου σταματά το εύφος λειτουφγίας του κινητήφα υψηλών στφοφών και δεν μποφούμε να εξάγουμε συμπεφάσματα για την συμπεφιφοφά της κυματοειδούς αντλίας για μεγαλύτεφες συχνότητες. Ο φυθμός αύξησης της παφοχής στο διάστημα αυτό είναι πεφίπου ίδιος με του διαστήματος 0-10 Hz όμως εδώ υπάφχει υψηλή καταπόνηση του σωλήνα και της αντλίας.



Εικόνα 4-1 Σύγκριση χαρακτηριστικής δίχρονης αντλίας με άλλες που έχουν δοκιμαστεί στο εργαστήριο.

4.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

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 το μεγάλο δάχτυλο με τη βοήθεια και του διορθωτικού δαχτύλου.





Εδώ βλέπουμε ότι ο συντελεστής διεύθυνσης της καμπύλης σχεδιασμού (είναι 0.3426055484 gr στην περίοδο), η οποία είναι η καμπύλη με βάση την οποία έχει σχεδιαστεί θεωρητικά η αντλία, είναι πολύ κοντά σε αυτόν της ευθείας αναδοομής (είναι 0.3416830485 gr στην περίοδο), 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. Επίσης ούτε η κλίση που προκύπτει αν κάνουμε αναδρομή σε όλη την καμπύλη (είναι 0.3176246049 gr στην περίοδο) απέχει πολύ από της θεωρητικής και της αναδρομής των 3 περιόδων. Η έγχυση της αντλίας μπορεί να θεωρηθεί γενικά ως γραμμική. Ωστόσο, διακρίνονται σε κάθε περίοδο δύο τμήματα ένα που εγχύει περισσότερο οπότε η παροχή μάζας είναι μεγαλύτερη και ένα διάστημα που εγχύει λιγότερο οπότε η παροχή μάζας είναι μικρότερη. Αυτή η μεγαλύτερη έγχυση με τη μεγαλύτερη παροχή μάζας λαμβάνει χώρα όταν συμπιέζει το μεγάλο έμβολο. Στην έναρξη αυτής της συμπίεσης παρόλο που η βαλβίδα εξόδου είναι σχεδιασμένη να ανοίγει ταυτόχρονα με την έναρξη της συμπίεσης του μεγάλου εμβόλου αυτό δεν μπορεί να συμβεί ακαριαία. Αποτέλεσμα αυτού είναι να δημιουργείται κατάντι του μεγάλου εμβόλου προσωρινά μια συστολή του σωλήνα λόγω της προοδευτικής ανάταξής του από τη βαλβίδα εξόδου, η οποία

αυξάνει την ταχύτητα του φευστού που εμβολίζεται από το χώφο κάτωθι του μεγάλου εμβόλου και συνεπώς και την παφοχή. Επίσης, επειδή κατασκευαστικά ο απόλυτος συγχφονισμός έναφξης της συμπίεσης του μεγάλου εμβόλου και έναφξης της απόφφαξης της βαλβίδας εξόδου είναι δύσκολο να επιτευχθεί, στην πεφίπτωση για παφάδειγμα που η βαλβίδα εξόδου οφιακά δεν έχει ανοίξει ακόμη, ενώ έχει ξεκινήσει η συμπίεση του μεγάλου εμβόλου, ενδεχομένως να αναπτύσσεται ελαφφώς μια υπεφπίεση στο χώφο κάτω από το μεγάλο έμβολο που οδηγεί αμέσως μετά σε μεγαλύτεφη παφοχή σε σχέση με το σχεδιασμό. Συνεπώς, η ύπαφξη των βαλβίδων δημιουφγεί ελαφφώς μια διατάφαξη στη γφαμμικότητα της φοής γεγονός που όπως φαίνεται και από το διάγφαμμα της εικόνας 4-3 δεν εμφανίζεται στην αντλία κυματοειδούς έγχυσης αφού δεν έχει βαλβίδες.



Εικόνα 4-3Σύγκριση περιόδων κυματοειδούς, παλιάς δίχρονης αντλία και της εξεταζόμενης δίχρονης για τα 0.0631 Ηz, 0.0610 Ηz και 0.06669 αντίστοιχα.

Στην εικόνα 4-3 απεικονίζονται τα διαγράμματα της εικόνας 4-2 μόνο που στο ίδιο διάγραμμα έχουμε προσθέσει μία μέτρηση από μία πολύ κοντινή συχνότητα της παλιάς αντλίας 2 σταδίων έγχυσης και ακόμα μία από μια επίσης πολύ κοντινή συχνότητα της κυματοειδούς. Συγκεκριμένα η μέτρηση της κυματοειδούς αντλίας έχει ληφθεί για 0.0631 Hz

ενώ της παλιάς δύο σταδίων για 0.0610 Hz. Βλέπουμε επίσης την καμπύλη σχεδιασμού κάθε αντλίας. Είναι χαφακτηφιστικό ότι και στην κυματοειδή αντλία, η κλίση της ευθείας που πφοκύπτει από αναδφομή στις 3 πεφιόδους που φαίνονται στο διάγφαμμα (είναι 0.3031227062 gr στην πεφίοδο) δεν απέχει και πάλι πολύ από την κλίση της καμπύλης σχεδιασμού της κυματοειδούς (είναι 0.2934955478 gr στην πεφίοδο). Επιπλέον, δεν υπάφχει ουσιαστική διαφοφά και στην κλίση της ευθείας αναδφομής ολόκληφου του διαγφάμματος της κυματοειδούς (είναι 0.3001765438 gr στην πεφίοδο). Παφόμοια ισχύουν και για την παλιά δίχφονη αντλία. Δηλαδή, η κλίση της καμπύλης σχεδιασμού (είναι η 0.3956012071 gr στην πεφίοδο) και η κλίση της ευθείας αναδφομής των 3 πεφιόδων (είναι η 0.4036331494 gr στην πεφίοδο) δεν απέχουν πολύ και αυτό συμβαίνει και για την κλίση της ευθείας αναδφομής του συνολικού διαγφάμματος της παλιάς δίχφονης αντλίας (είναι η 0.3865651963 gr στην πεφίοδο). Για όλες τις αντλίες η απόκλιση της παφοχής έγχυσης σε σχέση με τις αντίστοιχες των καμπυλών σχεδιασμού κυμαίνεται πεφίπου στο 2%.

Βλέπουμε ότι οι πειφαματικές μετφήσεις της κυματοειδούς αντλίας είναι πολύ κοντά στην καμπύλη σχεδιασμού αντίθετα με την αντλία δύο σταδίων έγχυσης όπου υπάφχει μεγαλύτεφη διασποφά. Η έγχυση της κυματοειδούς αντλίας είναι πιο γφαμμική από τις δίχφονες, ενώ επιπλέον στην παλιά δίχφονη αντλία παφουσιάζεται οπισθοφφοή η οποία οπισθοφοή αλλοιώνει ακόμη πιο πολύ τη γφαμμικότητα της έγχυσης. Επιπλέον, για να γίνει σύγκφιση με την παφούσα δίχφονη αντλία ο χφόνος έχει αδιαστατοποιηθεί, οπότε οι αντλίες εξετάζονται για κοινό διάστημα αδιάστατου χφόνου σε 3 πεφιόδους. Κατά συνέπεια στο παφαπάνω διάγφαμμα έχει εξαληφθεί η επίδφαση της συχνότητας στην απόδοση της παφοχής. Ωστόσο, λόγω ότι η έγχυση πέφαν της συχνότητας εξαφτάται και από τον όγκο εμβολισμού της εκάστοτε αντλίας σε μια πεφίοδο, παφατηφείται η διαφοφοποίηση στην παφοχή. Δηλαδή, για κοινή συχνότητα η κυματοειδής αντλία που έχει το μικφότεφο όγκο εμβολισμού (109.35π mm³) με λίγο μεγαλύτεφη παφοχή από χωρηγουμένως, ενώ η παλιά δίχφονη αντλία έχοντας το μεγαλύτεφο όγκο εμβολισμού (126.15π mm³) αποδίδει την μεγαλύτεφη παφοχή.

5 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.
- 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., Τσαγγάφης Σ., Εύφεση χαφακτηφιστικών, γφαμμικών πεφισταλτικών αντλιών για βιοϊατφική χφήση, Δελτίο Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων Ηλεκτφολόγων, 2005, τεύχος 380, σελ. 60-65. (1ο Πανελλήνιο Συνέδφιο Διπλ. Μηχανολόγων Ηλεκτφολόγων, 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
- 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) Τσαγγάφης 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.

- 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).
- 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) Σουομελής Β., Κατασκευή και προσδιορισμός χαρακτηριστικών πρότυπης περισταλτικής αντλίας, ΕΜΠ, Αθήνα 2011
- 24) Ψαραδάκης Ι., Κατασκευή πρότυπης περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς διέγερσης και πειραματικός προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών της, ΕΜΠ, Αθήνα 2012
- 25) Παπαδόπουλος Ε.Γ., Ηλεκτρομηχανικά συστήματα μετατροπής ενέργειας, Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα 2010
- 26) Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι, ΕΜΠ Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999.
- 27) <u>http://www.brentas.gr/brentas/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id</u> =88&Itemid=79&lang=el
- 28) http://en.wikipedia.org/wiki/Peristaltic_pump
- 29) http://en.wikipedia.org/wiki/LED_circuit
- 30) http://www.leeson.com/TechnicalInformation/techrefguide.html
- 31) <u>http://www.hbm.com/en/menu/applications/test-measurement/catmanr-knowledge-and-practical-examples/</u>
- 32) http://www.dowcorning.com/content/publishedlit/52-1067-01.pdf
- 33) http://www.millipore.com/catalogue/module/c419#1
- 34) http://www.omega.com/prodinfo/loadcells.html
- 35) http://www.omega.com/prodinfo/StrainGages.html
- 36) http://www.aeroconsystems.com/electronics/load_cell_primer.pdf

- 37) http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/load.html
- 38) http://www.euclidres.com/motionSensors/motionSensors.html
- 39) http://homepages.which.net/~paul.hills/SpeedControl/SpeedControllersBody.html
- 40) <u>http://www.pc-control.co.uk/dc-motors.htm</u>
- 41) http://en.wikipedia.org/wiki/Six%27s_thermometer
- 42) http://www.frostproof.com/catalog/t041.html