



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Πειραματική μελέτη και παραμετρική διερεύνηση παλλόμενης
ροής σε βαλβίδα πύλης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΚΥΡΙΑΚΙΔΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑΣ

Επιβλέπων: Χρήστος Μανόπουλος
Δρ., Ε.Δι.Π., Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2019

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία «Πειραματική μελέτη και παραμετρική διερεύνηση παλλόμενης ροής σε βαλβίδα πύλης» εκπονήθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και στο Εργαστήριο Βιορευστομηχανικής & Βιοϊατρικής Τεχνολογίας του Τομέα Ρευστών.

Θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντά μου κύριο Χρήστο Μανόπουλο Δρ.-ΕΔΙΠ Α΄ ΕΜΠ για την πρόταση του θέματος της διπλωματικής εργασίας και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για τη διεκπεραίωση της, καθώς και την πρακτική του βοήθεια η οποία συνετέλεσε στην έγκαιρη και αποτελεσματική ολοκλήρωση της διπλωματικής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Δημήτριο Μαθιουλάκη, Καθηγητή ΕΜΠ για τις πολύτιμες συμβουλές του επί της πειραματικής διαδικασίας που προέρχονται από την μακρόχρονη εμπειρία του στο πεδίο της πειραματικής μηχανικής των ρευστών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την υλική και ηθική τους συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τους φίλους μου που με στήριξαν σε αυτή την προσπάθεια.

Πρόλογος

Το πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Βιορρευστομηχανικής & Βιοϊατρικής Τεχνολογίας του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Η εργασία αυτή αποτελεί συνέχεια της διπλωματικής εργασίας του Δημήτριου Πατρίκιου, η οποία μελέτησε πειραματικά με κάποια εκδοχή της ίδιας διάταξης, τη συμπεριφορά των αιμοδυναμικών χαρακτηριστικών *in vitro* αγγείων του κυκλοφορικού συστήματος του ανθρώπου. Στην ουσία μελετάται το φαινόμενο της άντλησης χωρίς βαλβίδες υπό την επίδραση της ρευστομηχανικής αντίστασης και της αδράνειας του ρευστού χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ενδοτικότητα του συστήματος. Αναλύθηκαν διεξοδικά διάφορες τιμές αντίστασης, πλατών διέγερσης και συχνότητας για μη-μόνιμη παλλόμενη ροή δια μέσου μιας βαλβίδας πύλης. Στην ίδια διάταξη μελετήθηκαν οι αντίστοιχες παράμετροι και για μόνιμη ροή.

Περίληψη

Πειραματική μελέτη και παραμετρική διερεύνηση παλλόμενης ροής σε βαλβίδα πύλης

Το φαινόμενο της άντλησης χωρίς βαλβίδες μελετάται πειραματικά μέσω μιας πρότυπης διάταξης ανοιχτού συστήματος, το οποίο αποτελείται από δύο δεξαμενές υπερχειλίσσης που συνδέονται μέσω ενός άκαμπτου σωλήνα. Με το σωλήνα αυτό συνδέεται ένας εμβολοφόρος μηχανισμός χωρίς βαλβίδες μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η παλλόμενη ροή εντός του συστήματος. Κατάντι του εμβολοφόρου μηχανισμού τοποθετείται σε σειρά μια βάννα πύλης μέσω της οποίας μελετάται βαθμιαία η επίδραση της αντίστασης στη ροή. Το όλο σύστημα είναι πληρωμένο με αποσταγμένο νερό. Η παροχή του συστήματος καταγράφεται χρονικά ζυγίζοντας τη δεξαμενή κατάθλιψης, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω σε μια δυναμοκυψέλη γι' αυτό το σκοπό. Για πολύ μικρό άνοιγμα του διακένου της βάννας πύλης η παροχή του ρευστού είναι μικρή και δεν επηρεάζεται σημαντικά από την συχνότητα και τον όγκο εμβολισμού. Όσο το διάκενο της βάννας πύλης αυξάνεται παρατηρείται αύξηση της παροχής του ρευστού, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης και του όγκου εμβολισμού. Συνεπώς, η παροχή εξαρτάται κυρίως από τη συχνότητα περιστροφής του άξονα της αντλίας και τον όγκο εμβολισμού πάντα σε συνάρτηση με την αντίσταση η οποία προκαλείται από τη βάννα πύλης.

Abstract

Experimental study and parametric investigation of pulsating flow through a gate valve

The phenomenon of valvate pumping is studied experimentally in a open system dedicated test rig. The experimental set-up consists of two rigid overflow vessels filled with distilled water, communicating via a silicone rigid tube. In order to evaluate the impact of the flow resistance a gate valve is placed in series with the whole test rig. Valveless pumping is achieved from one vessel to the other by a piston mechanism which is placed before the gate valve. The flow-rate is measured by weighing the fluid-receiver vessel, which is placed on a single point load-cell platform. When the barrier is slightly lifted and the gate of the valve is almost fully closed, the flow rate has a very low value and is not importantly affected by the frequency and the displacement volume. As the barrier is being lifted and the gate gradually opens the flow rate increases while the frequency and the displacement volume also increase. As a result the flow rate is strongly depended on the frequency, the displacement volume and the flow resistance that the gate valve applies to the system.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή..... | 9 |
| 1.1 Αντικείμενο διπλωματικής..... | 9 |
| 1.2 Οργάνωση κειμένου | 9 |
| Κεφάλαιο 2 Αντλητικά φαινόμενα στη φυσιολογία και στη Βιορευστομηχανικής..... | 10 |
| 2.1 Αντλητικά φαινόμενα στη φυσιολογία..... | 10 |
| 2.1.1 Καρδιακά αντλητικά όργανα ζωικών οργανισμών | 10 |
| 2.2 Αντλητικά φαινόμενα στη Βιορευστομηχανικής και βιοϊατρική τεχνολογία..... | 27 |
| 2.2.1 Η άντληση χωρίς βαλβίδες στην καρδιοαναπνευστική ανάνηψη (CPR)..... | 27 |
| 2.2.2 Μικροαντλίες χωρίς βαλβίδες (valveless micropumps) | 30 |
| Κεφάλαιο 3 Πειραματική και θεωρητική μελέτη του φαινομένου άντλησης χωρίς βαλβίδες | 33 |
| 3.1 Πειραματική μελέτη άντλησης χωρίς βαλβίδες | 33 |
| 3.2 Θεωρητικά και μαθηματικά μοντέλα περιγραφής του φαινομένου άντλησης χωρίς βαλβίδες..... | 39 |
| Κεφάλαιο 4 : Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης..... | 43 |
| 4.1 Πειραματική διάταξη | 43 |
| 4.1.1 Πρώτο δοχείο συγκέντρωσης νερού (Δοχείο τροφοδοσίας)..... | 43 |
| 4.1.2 Κινητήρας, στρόφαλος και έμβολο | 45 |
| 4.1.3 Δοχείο ενδοτικότητας | 49 |
| 4.1.4 Βάνα πύλης | 50 |
| 4.1.5 Δεύτερο δοχείο συγκέντρωσης νερού (Δοχείο κατάθλιψης)..... | 55 |
| 4.2 Μετρητικά όργανα..... | 57 |
| 4.2.1 Ζυγαριά ακριβείας (Δυναμοκυψέλη) | 57 |
| 4.2.2 Αισθητήρες πίεσης..... | 59 |
| 4.2.3 Θερμόμετρο | 60 |
| 4.2.4 Ταχύμετρο..... | 61 |
| Κεφάλαιο 5 Περιγραφή πειραματική διαδικασίας και ανάλυσης των μετρήσεων..... | 62 |
| 5.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας..... | 62 |
| 5.1.1 Μετρήσεις μόνιμης ροής (Steady Flow) : | 63 |
| 5.1.2 Μετρήσεις μη-μόνιμης ροής (Unsteady Flow) : | 63 |
| 5.2 Ανάλυση Μετρήσεων :..... | 65 |
| Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα..... | 72 |
| 6.1 : Διαγράμματα μόνιμης ροής (Steady Flow)..... | 74 |

| | |
|---|------------|
| 6.2 Μη μόνιμη ροή (Unsteady Flow) | 78 |
| 6.2.1 Διαγράμματα εμπέδησης της εγκατάστασης σε συνάρτηση με το χρόνο. | 78 |
| | 80 |
| 6.2.2 Διαγράμματα μη-μόνιμης ροής | 82 |
| 6.2.3 Νομογραφήματα για την μη-μόνιμη ροή | 103 |
| Κεφάλαιο 7 Συμπερασματική επισκόπηση | 110 |
| Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία | 111 |
| Παράρτημα-Α..... | 115 |
| | |
| Παράρτημα-Β | 117 |

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ανήκει στο επιστημονικό πεδίο των μη μόνιμων, παλλόμενων ροών, μέσα από αγωγούς με εύκαμπτα τοιχώματα. Πρόκειται για πεδίο με το οποίο ασχολείται η επιστήμη της Βιορευστομηχανικής, τόσο πειραματικά, όσο και υπολογιστικά με την ανάπτυξη μοντέλων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση των αντλητικών φαινομένων που παρουσιάζονται όταν πάλλεται το τοίχωμα αγωγών με εύκαμπτα τοιχώματα.

Η μελέτη αυτή γίνεται με απλή διέγερση ενός εύκαμπτου αγωγού, ο οποίος είναι μέρος ενός ανοιχτού κυκλώματος. Συνεπώς η άντληση που πραγματοποιείται δεν είναι αποτέλεσμα χρονισμού βαλβίδων που φράσσουν και αποφράσσουν κατάλληλα τον εύκαμπτο αγωγό στην είσοδο και έξοδο του διεγερμένου του τμήματος, αλλά πρόκειται για άντληση χωρίς βαλβίδες.

Η πειραματική μελέτη πραγματοποιείται σε διάταξη του εργαστηρίου Βιορευστομηχανικής και Βιοϊατρικής τεχνολογίας του τομέα Ρευστών του Ε.Μ.Π..

1.2 Οργάνωση κειμένου

Η διπλωματική εργασία αυτή χωρίζεται σε 8 κεφάλαια. Στο 1ο κεφάλαιο διατυπώνεται ο σκοπός της εργασίας και τα προβλήματα που καλείται να επιλύσει. Στο 2ο παρουσιάζονται αντλητικά φαινόμενα που παρατηρούνται, τόσο σε φυσιολογικό επίπεδο, όσο και στο τεχνολογικό πεδίο της Βιορευστομηχανικής. Στο 3ο κεφάλαιο παρατίθενται πειραματικές και μαθηματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της κατανόησης του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες. Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των μετρητικών οργάνων. Στο 5ο κεφάλαιο εξηγείται η μέθοδος λήψης μετρήσεων, άλλα και η μετέπειτα επεξεργασία τους. Στο 6ο κεφάλαιο παρατίθενται οι μετρήσεις σε μορφή διαγραμμάτων με ορισμένες παραμέτρους και μεταβλητές. Στο 7ο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων και εκτίμηση της συνεισφοράς της εργασίας. Τέλος στο 8ο κεφάλαιο παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 2 Αντλητικά φαινόμενα στη φυσιολογία και στη Βιορευστομηχανική

2.1 Αντλητικά φαινόμενα στη φυσιολογία

Στη φυσιολογία των ζωντανών οργανισμών η άντληση διαφόρων βιολογικών ρευστών είναι απολύτως αναγκαία και εξυπηρετεί, τόσο την οξυγόνωση και διατροφή των κυττάρων του οργανισμού, όσο και την απομάκρυνση των απόβλητων ουσιών που αυτά παράγουν.

Η άντληση πραγματοποιείται μέσα από κοίλες δομές (κυλινδρικοί αγωγοί, κόλποι, κοιλίες), οι οποίες έχουν εύκαμπτα τοιχώματα (μαλακοί ιστοί) και συνδέονται σχηματίζοντας αγγειακά δίκτυα μεταφοράς. Η άντληση επιτυγχάνεται λόγω της πάλμωσης που υφίστανται τα εύκαμπτα τοιχώματα με αυτοδιέγερση ή από κάποιο εξωτερικό αίτιο.

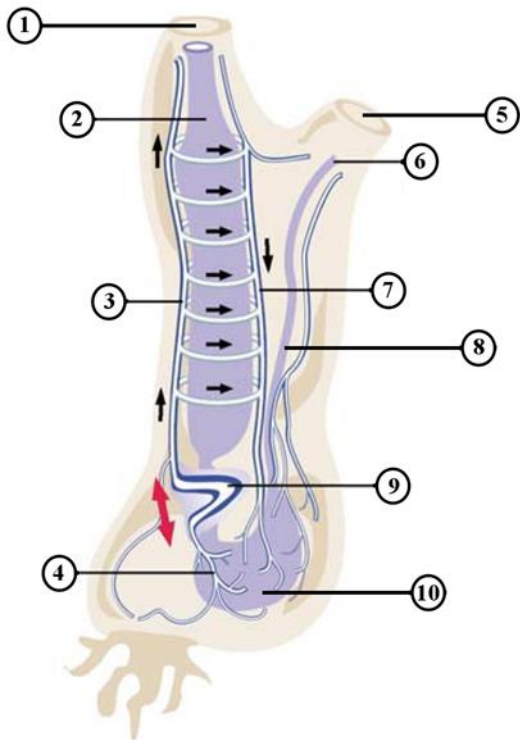
Διαπιστώνεται ότι σε φυσιολογικό επίπεδο η ύπαρξη των βαλβίδων δεν είναι απαραίτητη για την εμφάνιση αντλητικών φαινομένων, τουλάχιστον για κάποιους οργανισμούς. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη της άντλησης είναι η ρυθμική συστολή και χαλάρωση των τοιχωμάτων των διαφόρων κοίλων δομών (φυσιολογικών και τεχνητών) που αλληλοεπιδρούν με το περιεχόμενο ρευστό με σκοπό τη μετακίνηση-προώθησή του

2.1.1 Καρδιακά αντλητικά όργανα ζωικών οργανισμών

Είναι γνωστό ότι οι περισσότεροι βιολογικοί οργανισμοί αποτελούνται από μαλακούς ιστούς, οι οποίοι στο μεγαλύτερό τους ποσοστό συνίστανται από ρευστή ύλη με κυρίαρχο το νερό. Όλες οι ανάγκες ενός τέτοιου βιολογικού οργανισμού εκπληρώνονται κυρίως μέσω της μετακίνησης αυτών των βιολογικών ρευστών. Έτσι, για παράδειγμα η μετακίνηση των προϊόντων μεταβολισμού των κυττάρων, η μεταφορά συστατικών και ουσιών μεταξύ των οργάνων, η ρύθμιση της θερμοκρασίας των ιστών, γίνονται μέσω της ροής των διαφόρων βιολογικών ρευστών όπως του αίματος, των ούρων, της λέμφου, του αέρα κλπ. Για την επίτευξη της ροής αυτών των βιολογικών ρευστών οι οργανισμοί έχουν αναπτύξει διάφορους βιολογικούς μηχανισμούς άντλησης

2.1.1.1 Κυκλοφορικό σύστημα ουροχορδωτών (*urochordates*)

Η συνομοταξία των χορδωτών περιλαμβάνουν τις ομοταξίες: ουροχορδωτών (*urochordates*), κεφαλοχορδωτών (*cephalochordates*), ημιχορδωτών (*hemichordates*) και σπονδυλωτών (*vertebrates*). Τα ουροχορδωτά και τα κεφαλοχορδωτά, τουλάχιστον σε κάποιο στάδιο της ζωής τους, διαθέτουν ένα σχηματισμό που λέγεται νωτοχορδή και θεωρείται πρόδρομη της σπονδυλικής στήλης. Τα ουροχορδωτά είναι χιτωνοφόρα ζώα που ονομάζονται απλά ασκίδια, τα οποία στο προνυμφικό τους στάδιο μοιάζουν με μικρά ψάρια και τότε παρουσιάζουν συγγένεια με τα υπόλοιπα χορδωτά. Τα ώριμα ασκίδια όμως έχουν σφαιροειδές ή σωληνοειδές σχήμα, είναι ακινητοποιημένα σε στερεό υπόστρωμα και έχουν την τυπική μορφή που απεικονίζεται στο σχήμα 2-1.



(α)



(γ)



(β)

Σχήμα 2-1 (α) Τυπική μορφή ενηλικιωμένου βενθικού ασκιδίου (ascidian tunicate), της ομοταξίας ουροχορδωτών (subphylum urochordata) ή χιτωνοφόρων.

Διακρίνονται: (1) βραγχιακό σιφώνιο εισόδου του νερού (στόμα), (2) φάρυγγας που έχει βραγχιακές σχισμές (stigmata), (3) κοιλιακό αγγείο, (4) καρδιο-στομαχικό αγγείο, (5) σιφώνιο εξόδου του νερού (6) έδρα (7) νωτιαίο αγγείο, (8) έντερο, (9) παλλόμενο αγγείο χωρίς βαλβίδες (καρδιά), (10) στομάχι, [Brusca & Brusca, 2003] και [Kriebel, 1968]. (β) Ασκίδιο *polycarpa aurata*. (γ) Αποικία μπλε βασιλικών ασκιδίων (*royal blue tunicate-rhopalaea* sp.).

Πρόκειται για αρχέγονο θαλάσσιο ζώο (χιτωνόζωο) που ζει και σήμερα συνήθως σε αποικίες και μοιάζει σαν σάκος με δύο ανοίγματα (εξέχοντα σιφώνια), όπου από το ένα εισέρχεται το νερό, ενώ από το άλλο εξέρχεται. Μέσα στο ασκίδιο το νερό φιλτράρεται και παρακρατείται το απαραίτητο για τη διατροφή του ζώο/φυτοπλαγκτόν το οποίο οδηγείται στο στομάχι. Το φιλτράρισμα του νερού και η παγίδευση του πλαγκτόν γίνεται από το φάρυγγα, ο οποίος βρίσκεται εντός κόλπου (atrium), καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των σπλάχνων του ασκιδίου και έχει πολυάριθμες βραγχιακές σχισμές. Επίσης, ο φάρυγγας περιέχει ειδική διαμήκη βλεφαριδωτή αύλακα (endostyle) που εκκρίνει βλέννα για την κατακράτηση του πλαγκτόν και τη μεταβίβασή του στη πεπτική οδό.

Το κυκλοφορικό σύστημα ενός βενθικού ασκιδίου είναι ανοιχτό και αποτελείται από μία σωληνοειδή καρδιά που περιβάλλεται από περικαρδιακή κοιλότητα. Η στοιχειώδης αυτή αντλία (καρδιά) βρίσκεται στην κοιλιακή χώρα και συνίσταται από ένα μονό στρώμα καρδιακών μυϊκών κυττάρων τα οποία συνδέονται ηλεκτρικά. Αυτά τα καρδιακά μυϊκά κύτταρα συνήθως αποκαλούνται και μυοεπιθηλιακά [Randall & Davie, 1980] και [Moorman & Christoffels, 2003]. Η βενθική σωληνοειδής καρδιά κάμπτεται σε σχήμα V και διατηρεί εγγενή αυτονομία στο ρυθμό πάλμωσης. Όμως, το σημείο πάλμωσης βρίσκεται στο ένα άκρο του καρδιακού σωλήνα για 100 περίπου χτύπους, ύστερα σταματά η πάλμωση για μικρό χρονικό διάστημα και κατόπιν αρχίζει ξανά αλλά αυτή τη φορά στο άλλο άκρο του καρδιακού σωλήνα [Anderson, 1968]. Συνεπώς, διαμορφώνεται ασυμμετρία, λόγω της οποίας το αίμα ρέει για κάποιο χρονικό διάστημα προς τη μία κατεύθυνση, έπειτα σταματά η ροή του για λίγο και στη συνέχεια ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση από την προηγούμενη. Κατ' αυτόν τον τρόπο αντισταθμίζεται η ανεπάρκεια της ροής του αίματος λόγω άντλησης χωρίς βαλβίδες. Τα παραγόμενα κύματα, που προωθούν το αίμα και προς τις δύο κατευθύνσεις, διαδίδονται κατά μήκος των τοιχωμάτων του καρδιακού σωλήνα με ταχύτητες περίπου 0.5 cm/s [Kriebel, 1970]. Στο σχήμα 2-1(α) το βέλος διπλής κατεύθυνσης σημαίνει ότι η άντληση χωρίς βαλβίδες μπορεί να γίνεται προς τη μία ή την αντίθετη κατεύθυνση.

2.1.1.2 Κυκλοφορικό σύστημα κεφαλοχορδωτών (*cephalochordates*)

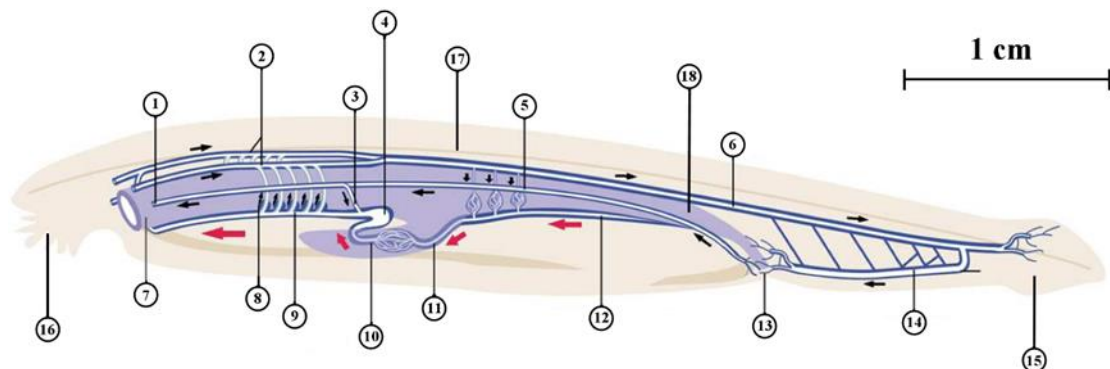
Τα κεφαλοχορδωτά είναι μικρά πρωτόγονα ζώα ιχθυοειδούς μορφής και απαντώνται συνήθως στην άμμο ρηχών θαλάσσιων νερών όπου επικρατεί εύκρατο ή τροπικό κλίμα. Το σώμα τους είναι μαλακό συνήθως μήκους 5-6 cm περίπου και παρουσιάζεται οξυμένο στις δύο άκρες. Εξαιτίας αυτού του χαρακτηριστικού τους δόθηκε η ονομασία αμφίοξοι και έχουν την τυπική μορφή που απεικονίζεται στο σχήμα 2-2. Η νωτοχορδή που διαθέτουν εκτείνεται κατά μήκος σχεδόν από το ένα άκρο στο άλλο και στο κεφάλι διογκώνεται σε στοιχειώδη εγκέφαλο, γι' αυτό και η ομοταξία έχει την ονομασία “κεφαλοχορδωτά”.



Σχήμα 2-2 Αμφίοξος *branchiostoma* [Moller & Philpott, 1973] και [Rahr, 1979].

Το αγγειακό σύστημα του αμφίοξου είναι βασικά πανομοιότυπο με αυτό των σπονδυλωτών [Moller & Philpott, 1973], με τη διαφορά ότι στερείται κάποιου κεντρικού αντλητικού οργάνου (καρδιά). Ωστόσο, τέσσερα παλλόμενα αγγεία αναλαμβάνουν αντλητικό ρόλο όπως: η υποεντερική φλέβα, η πυλαία προσαγωγός μαζί με την ηπατική απαγωγό φλέβα, και η κοιλιακή αρτηρία. Στη συμβολή των κυρίων φλεβών υπάρχει ο φλεβώδης κόλπος, ο οποίος φαινομενικά δεν πάλλεται [Farrell, 1997], [Kardong, 2002] και [Rahr, 1981]. Η παροχέτευση του φάρυγγα με αίμα γίνεται μέσω της κοιλιακής αρτηρίας, η οποία συμβάλλει ιδιαίτερα στην άντληση του αίματος στο κλειστό κυκλοφορικό σύστημα του αμφίοξου. Τα αγγεία περιβάλλονται από μυοεπιθηλιακά κύτταρα χωρίς

να επικαλύπτονται εσωτερικά από ενδοθήλιο. Το αίμα είναι άχρωμο και εξυπηρετεί τη διανομή των θρεπτικών συστατικών κυρίως, παρά τη μεταφορά και ανταλλαγή αερίων.



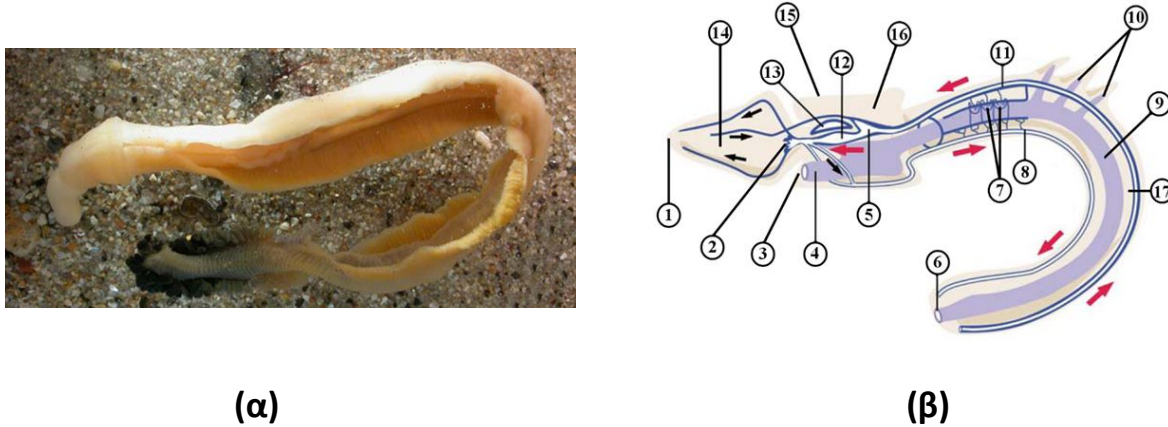
Σχήμα 2-3 Τυπική μορφή αμφίοξου *branchiostoma* (*amphioxus* ή lancelet), της ομοταξίας κεφαλοχορδωτών (*subphylum cephalochordata*) ή λογχοειδών. Διακρίνονται: (1) πρόσθια κύρια φλέβα, (2) νωτιαίες αρτηρίες, (3) αριστερός πόρος του Cuvier, (4) φλεβώδης κόλπος, (5) οπίσθια κύρια φλέβα, (6) ουραία αρτηρία, (7) φάρυγγας με βραγχιακές σχισμές, (8) βολβίσκοι (παλλόμενοι), (9) κοιλιακή αορτή (παλλόμενη), (10) ηπατική απαγωγός φλέβα (παλλόμενη), (11) πυλαία προσαγωγός φλέβα (παλλόμενη), (12) υποεντερική φλέβα (παλλόμενη), (13) έδρα, (14) ουραία φλέβα, (15) πτερυγωτή ουρά, (16) άνοιγμα στόματος με πλοκάμια, (17) νωτοχορδή, (18) διατροφική οδός, [Moller & Philrott, 1973] και [Rahr, 1979].

Τα παλλόμενα αγγεία συστέλλονται διαδοχικά, όμως δεν επιτυγχάνεται και τόσο αποδοτικός συντονισμός και ούτε φαίνεται κάποια εκκίνηση της διέγερσης από κάποια συγκεκριμένη περιοχή [Randall & Davie, 1980]. Πολύ αργά συσταλτικά κύματα μακράς διάρκειας (περίπου 0.03 cm/s) διαδίδονται κατά μήκος των τοιχωμάτων των αγγείων χωρίς βαλβίδες, με αποτέλεσμα τη μετακίνηση του αίματος εντός τους. Αυτή η μετακίνηση δε συνιστά αποδοτική άντληση λόγω αντιστροφής της ροής και συνεπώς εξασθένησης των κυμάτων συστολής που συναντώνται μεταξύ τους [Moorman & Christoffels, 2003].

2.1.1.3 Κυκλοφορικό σύστημα ημιχορδωτών (*hemichordates*)

Στην ομοταξία των ημιχορδωτών και συγκεκριμένα στην κλάση *enteropneusta* ανήκει ο σκώληκας *balanoglossus*, ο οποίος αναφέρεται σε αυτό το σημείο. Πρόκειται για θαλάσσιο ζώο σκληροκοειδούς μορφής που ζει απομονωμένο κάτω από πέτρες και φωλιάζει στην άμμο, είτε σε ρηχά, είτε σε βαθιά νερά [σχήμα 2-3(α)]. Το όνομά του προέρχεται από το σχήμα της μυώδους κεφαλής του (βαλανοειδής προβοσκίδα-πρωτοσωμική κοιλότητα), με την οποία διαμορφώνει διόδους μέσα στην άμμο. Η λειτουργία της θρέψης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη μετακίνησή του, όπως ακριβώς συμβαίνει και με το γαιοσκώληκα. Κατά τη μετακίνησή του μέρος της άμμου εισέρχεται εντός του σώματος και τα περιέχοντα θρεπτικά συστατικά απορροφούνται στην εντερική οδό. Για τη λειτουργία αυτής της διατροφικής διεργασίας το στόμα του σκώληκα παραμένει μόνιμα ανοιχτό με τη βοήθεια ερειστικής δομής που υπάρχει στο μεσαίο τμήμα του σκώληκα (περίσφιξη-μεσοσωμική κοιλότητα). Τα αναπνευστικά όργανα συνίστανται από

πολυάριθμα ζεύγη βραγχιακών σχισμών στον κορμό του σκώληκα (μετασωμική κοιλότητα) και φέρνουν σε επικοινωνία τη διατροφική οδό με το εξωτερικό περιβάλλον κατά πλάτος του τοιχώματος του κορμού.



Σχήμα 2-4 Σκώληκας *Balanoglossus clavigerus*. (β) Τυπική μορφή σκώληκα *balanoglossus*, κλάσης *enteropneusta*, της ομοταξίας ημιχορδωτών (*subphylum hemichordata*). Διακρίνονται: (1) προβοσκίδα, (2) νεφρικό σπείραμα, (3) στόμα, (4) φάρυγγας, (5) φλεβώδης κόλπος, (6) έδρα, (7) βραγχιακές σχισμές, (8) κοιλιακό αγγείο, (9) έντερο, (10) ηπατικοί θύλακες, (11) νωτιαίο αγγείο, (12) κύριος κόλπος, (13) παλλόμενο κυστιδίο (περικάρδιο), (14) κεφαλή ή πρωτοσωμική κοιλότητα, (15) περίσφιξη, (16) μεσοσωμική κοιλότητα, (17) μετασωμική κοιλότητα, [Brusca & Brusca, 2003] και [Nubler-Jung & Arendt, 1996].

Το αγγειακό σύστημα του σκώληκα *balanoglossus* απαρτίζεται από φατνία-χάσματα και διαύλους, με χαμηλή σύσταση ενδοθηλιακού ιστού, τοποθετημένα στη βασική μεμβράνη του εξωτερικού τοιχώματος, του εντερικού τοιχώματος και του μεσεντερίου. Μέσω του νωτιαίου αγγείου το οποίο υπόκειται σε πάλμωση, το αίμα προωθείται προς τη κεφαλή και συλλέγεται στον κύριο κόλπο. Ο κύριος κόλπος βρίσκεται στη μεσοσωμική κοιλότητα και περιβάλλεται στις τρεις πλευρές του από κλειστό γειτονικό κυστιδίο (περικάρδιο) με παλλόμενα τοιχώματα. Η πάλμωση αυτού του κυστιδίου προκαλεί συμπίεση του κυρίου κόλπου με αποτέλεσμα το αίμα να οδηγείται στο νεφρικό σπείραμα. Στη συνέχεια το αίμα εξέρχεται από το νεφρικό σπείραμα και μέσω κόμβου διακλαδιζόμενων απαγωγών αγγείων μεταφέρεται στο κοιλιακό αγγείο του κορμού.

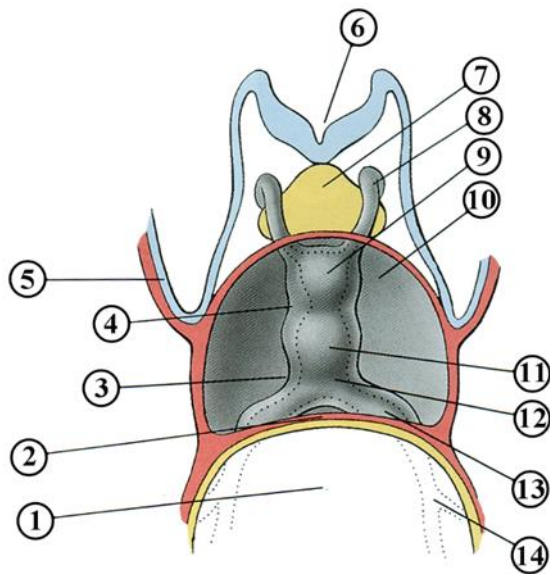
Στα χορδωτά τα νωτιαία αγγεία μεταφέρουν το αίμα οπισθίως και τα κοιλιακά προσθίως, όπως φαίνεται στα σχήματα 2-1 και 2-2. Στα ημιχορδωτά, όπως οι σκώληκες, η κατεύθυνση της ροής του αίματος είναι ανεστραμμένη [Brusca & Brusca, 2003] και [Nubler-Jung & Arendt, 1996], όπως φαίνεται στο σχήμα 2-3

2.1.1.4 Κυκλοφορικό σύστημα εμβρύου σπονδυλωτών σε αρχικό στάδιο κύησης

Είναι προφανές μέχρι στιγμής ότι στα κυκλοφορικά συστήματα των ουροχορδωτών, κεφαλοχορδωτών και ημιχορδωτών λαμβάνει χώρα αποκλειστικά η άντληση χωρίς βαλβίδες (*valveless pumping*). Αντιθέτως, στα σπονδυλωτά, η άντληση που πραγματοποιείται οφείλεται σε

βιολογικές αντλίες (καρδιές) με βαλβίδες και το αίμα ρέει συνεχώς προς μία μόνο κατεύθυνση. Όμως, σε εμβρυϊκή μορφή, όταν βρίσκονται σε αρχικό στάδιο κύησης όπου δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμη οι βαλβίδες, κυριαρχεί η άντληση χωρίς βαλβίδες (valveless pumping), [Forouhar et al, 2006].

Στο τέλος της 3ης εβδομάδας της κύησης το έμβρυο έχει κατά μέσο όρο μέγιστο μήκος περί τα 2.75mm και τότε σχηματίζεται ο αρχέγονος καρδιακός σωλήνας (σχήμα 2-5), ενώ από τη 18η ημέρα έχει ξεκινήσει η ανάπτυξη των αγγείων. Ο αρχέγονος καρδιακός σωλήνας μόλις σχηματιστεί αρχίζει να πάλλεται και να προωθεί το αίμα στο έμβρυο και τον πλακούντα μεταξύ της 21ης και 22ης ημέρας της κύησης. Συνεπώς, το καρδιαγγειακό σύστημα είναι το πρώτο σύστημα που λειτουργεί στο έμβρυο και μάλιστα από τη πρώτη στιγμή του σχηματισμού του, [Moore & Persaud, 1998] και [Larsen, 1997].



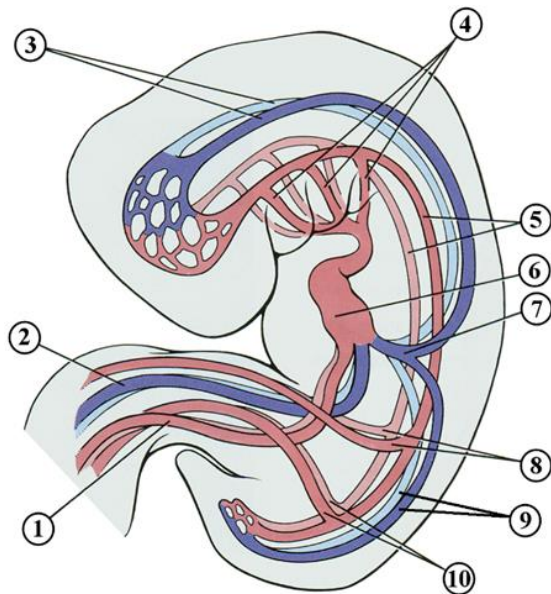
Σχήμα 2-5 Σχηματική αναπαράσταση του αρχέγονου καρδιακού σωλήνα την 21η ημέρα της κύησης. Διαιρείται από σειρά ορατών περισφίξεων και διευρύνσεων σε αρχέγονα τμήματα, που θα παραγάγουν τις κοιλότητες της οριστικής καρδιάς. Διακρίνονται: (1) λεκιθικός ασκός, (2) εγκάρσιο διάφραγμα, (3) κολποκοιλιακή αύλακα, (4) βολβοκοιλιακή αύλακα, (5) αμνίο, (6) νευρική αύλακα, (7) πρόσθιο έντερο, (8) πρώτο αορτικό τόξο, (9) καρδιακός βολβός, (10) περικαρδιακή κοιλότητα, (11) κοιλία (αρχικός βηματοδότης), (12) αρχέγονος κόλπος, (13) αριστερό κέρασ του φλεβώδους κόλπου, (14) λεκιθική φλέβα, [Larsen, 1997].

Η εισροή αίματος στον αρχέγονο καρδιακό σωλήνα εξασφαλίζεται αρχικώς από έξι αγγεία, τρία σε κάθε πλευρά (σχήμα 2-6). Το φλεβικό αίμα, το προερχόμενο από το σώμα του εμβρύου, εισέρχεται στην καρδιά διαμέσου ενός ζεύγους βραχειών φλεβών, των κοινών κυρίων φλεβών, οι οποίες σχηματίζονται από τη συνένωση του ζεύγους των οπισθίων κυρίων φλεβών, που αποχετεύουν το κορμό, και του ζεύγους των προσθίων κυρίως φλεβών που αποχετεύουν την περιοχή της κεφαλής (σχήμα 2-6). Ο λεκιθικός ασκός αποχετεύεται από ένα ζεύγος λεκιθικών φλεβών, ενώ το οξυγονωμένο αίμα από τον πλακούντα φθάνει στην καρδιά μέσω ενός ζεύγους ομφαλικών φλεβών [Larsen, 1997]

Ο καρδιακός σωλήνας και το αγγειακό σύστημα αρχικά είναι κατακόρυφα συμμετρικό σύστημα ελαστικών και συσταλτών σωλήνων και παραμένει έτσι μέχρι την 35η ημέρα της εμβρυακής ζωής. Για το λόγο αυτόν οι συσπάσεις των θαλάμων του αρχέγονου καρδιακού σωλήνα, ο οποίος την περίοδο αυτή βρίσκεται ανάμεσα στις φλέβες και τις αρτηρίες, πρέπει να συμβαίνουν κυρίως κατά την περιφερική κατεύθυνση. Η ασυμμετρία υφίσταται με την έννοια της κατεύθυνσης του αίματος από τις πιο διασταλτές φλέβες στις λιγότερο διασταλτές αρτηρίες. Αυτό είναι τόσο συνθήκη όσο και αποτέλεσμα της μονοκατευθυνόμενης άντλησης, που σε αυτό το πρώιμο στάδιο ανάπτυξης δημιουργείται χωρίς βαλβίδες [Liebau, 1957 και 1968]. Στη συνέχεια της ανάπτυξης ο

καρδιακός σωλήνας, διπλώνει και στρίβει με αρκετά πολύπλοκο τρόπο (πτύχωση). Το αρτητικό-αρτηριακό σύστημα εκροής διαιρείται, παρέχοντας τη ροή τόσο από την αορτή όσο και από την πνευμονική αρτηρία.

Πρόσθετα, η αορτή γίνεται ασύμμετρη επειδή από το προηγούμενο συμμετρικό διπλό τόξο μόνο το αριστερό διατηρείται εντελώς. Τελικά, ο αριστερός και ο δεξιός θάλαμος τοποθετούνται πλάι-πλάι. Οι αναπτυξιακές αυτές διαδικασίες ολοκληρώνονται πριν την 49η μέρα της εμβρυϊκής ζωής και οι δύο θάλαμοι της καρδιάς είναι τότε ικανοί να συστέλλονται τόσο περιφερειακά όσο και κατά μήκος [Liebau, 1957].



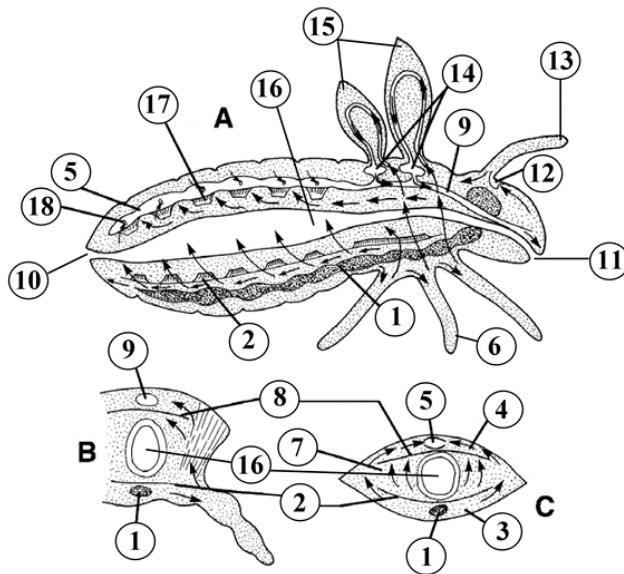
Σχήμα 2-6 Σχηματική απεικόνιση του αρχέγονου αγγειακού συστήματος στο μέσον της 4ης εβδομάδας κύησης του εμβρύου του ανθρώπου (*homo sapiens*), της οικογένειας των ανθρωποειδών (*hominids*), της τάξης των πρωτεύοντων (*primates*), της κλάσης των θηλαστικών (*mammalians*), της ομοταξίας των σπονδυλωτών (*vertebrates*). Διακρίνονται: (1) ομφαλική φλέβα, (2) λεκιθική φλέβα, (3) δεξιά και αριστερή πρόσθια κύρια φλέβα, (4) αριστερά αορτικά τόξα, (5) δεξιά και αριστερή ραχιαία αορτή, (6) αρχέγονος καρδιακός σωλήνας, (7) αριστερή κοινή κύρια φλέβα, (8) αντιπροσωπευτικές δεξιά και αριστερή λεκιθική αρτηρία, (9) δεξιά και αριστερή οπίσθια κύρια φλέβα, (10) δεξιά και αριστερή ομφαλική αρτηρία, [Larsen, 1997].

2.1.1.5 Κυκλοφορικό σύστημα αρθροπόδων (*arthropods*)

Η συνομοταξία των αρθροπόδων περιλαμβάνει πέντε ομοταξίες. Τα τριλοβιτόμορφα (*trilobitomorpha*) που είναι εξαφανισμένα είδη και γνωστά μόνο από απολιθώματα. Τα χηληκέρατα (*chelicerata*) τα οποία δεν έχουν κεραιές, ενώ έχουν οχτώ πόδια και απλά μάτια. Σε αυτή την ομοταξία ανήκουν τα αραχνοειδή όπως οι σκορπιοί και οι αράχνες. Τα μυριάποδα (*myriapoda*) τα οποία είναι χερσαία είδη με απλό ζευγάρι κεραιών και απλά μάτια. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι έχουν πολλά πόδια με εύρος λίγο λιγότερο από 10 μέχρι πάνω από 750 ανάλογα με το είδος. Τα εξάποδα (*hexapoda*) που περιλαμβάνουν 4 κλάσεις: των εντόμων (*insecta*), των κολλεμβόλων (*collembola*), των διπλουρών (*diplura*) και των πρωτουρών (*protura*). Τα εξάποδα έχουν 6 πόδια και αποτελούν το 80% περίπου όλου του ζωικού βασιλείου. Τέλος, τα οστρακόδερμα (*crustacea*) τα οποία έχουν 10 με 14 πόδια, 2 ζευγάρια κεραιές και αναπνέουν μέσω βραγχίων (π.χ. καβούρια και γαρίδες). Από τις ανωτέρω ομοταξίες περιγράφεται το κυκλοφορικό σύστημα των εξαπόδων και ιδιαίτερα των κλάσεων των εντόμων και των διπλουρών.

Το ανοιχτό κυκλοφορικό σύστημα των εξαπόδων [Gillot, 2005] αποτελείται κυρίως από ένα στενόμακρο μεσονωτιαίο αγγείο, το οποίο διατρέχει κατά μήκος όλο το σώμα από την κεφαλή έως το πίσω μέρος του (σχήματα 2-7 έως 2-9). Το οπίσθιο τμήμα του αγγείου στη κοιλιακή χώρα κατέχει

ρόλο καρδιάς και απαρτίζεται από μικρότερα διαμερίσματα, τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με ειδικά προσαρμοσμένα στόμια-βαλβίδες (ostia). Κάθε καρδιακό διαμέρισμα περιβάλλεται από ένα ζευγάρι πτερυγοειδών μυών. Διαδοχικές συστολές των μυών αυτών προωθούν προς τα εμπρός την αιμολέμφο από το ένα διαμέρισμα στο επόμενο με τελικό προορισμό την μεταφορά της, μέσω της αορτής, στην κεφαλική άκρη όπου και την αδειάζουν. Σε μερικά έντομα μπορεί να πάλλεται ολόκληρο το μεσονωτιαίο αγγείο, όμως συνήθως η προέκτασή του προσθίως προς το κεφαλοθωρακικό τμήμα λειτουργεί ως αορτή και παροχετεύει με αιμολέμφο τη κεφαλή [Gillot, 2005].

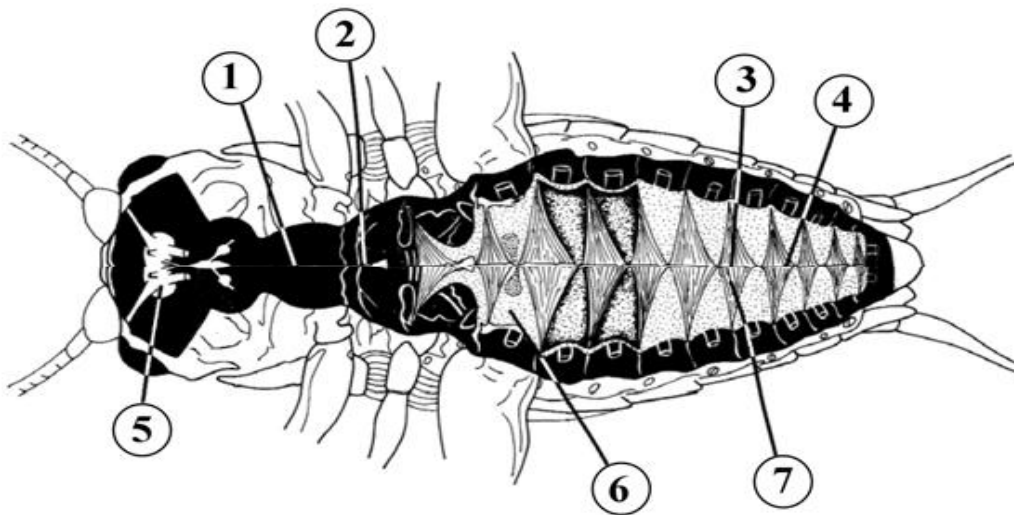


Σχήμα 2-7 Σχηματική αναπαράσταση εντόμου όπου απεικονίζεται η ροή της αιμολέμφου με βέλη. (A) Διαμήκης τομή. (B) Εγκάρσια τομή στην περιοχή του θώρακα. (C) Εγκάρσια τομή στην κοιλιακή χώρα. Κυκλοφορικό σύστημα του camptodea augens, του γένους camptodea, της κλάσης των διπλουρών (diplura), της ομοταξίας των εξαπόδων (hexapoda). Διακρίνονται: (1) νευρική χορδή, (2) κοιλιακό διάφραγμα, (3) περινευρική κοιλότητα, (4) περικαρδιακή κοιλότητα, (5) μεσονωτιαίο αγγείο, (6) πόδια, (7) σπλαχνική κοιλότητα, (8) νωτιαίο διάφραγμα, (9) αορτή, (10) έδρα, (11) στόμα, (12) παλλόμενο βοηθητικό όργανο ροής αιμολέμφου προς τη κεραία, (13) κεραία, (14) μεσοθωρακικό και μεταθωρακικό παλλόμενο όργανο, (15) πτέρυγες, (16) πεπτική οδός, (17) πτερυγοειδής μύες, (18) στόμια-βαλβίδες (ostia), [Wigglesworth, 1965].

Από εκεί υπάρχει διάχυση μέσα στο αιμόκοιλο (hemocoel), όπου η αιμολέμφο καταλαμβάνει ελεύθερα όλες τις κοιλότητες του σώματος και έρχεται σε άμεση επαφή με όλα τα εσωτερικά όργανα και ιστούς.

Γενικά η αιμολέμφο αντλείται γρήγορα μέσα στο νωτιαίο αγγείο ενώ κινείται αργά και ασυνεχώς στις κοιλότητες και τα διάφορα προσαρτήματα. Η κατεύθυνση ροής της αιμολέμφου στα περισσότερα έντομα απεικονίζεται στο σχήμα 1-6. Η αναπτυσσόμενη πίεση στην περιοχή της κεφαλής, λόγω της ροής της αιμολέμφου μέσω του προσθίου στομίου της αορτής, προωθεί την αιμολέμφο οπισθίως προς τη σπλαχνική και περινευρική κοιλότητα. Οι μυϊκές κινήσεις του εξαπόδου που λαμβάνουν χώρα κατά τη βάδιση μπορεί να διευκολύνουν τη μετακίνηση της αιμολέμφου στις σωματικές κοιλότητες και ιδιαίτερα οι παλμώσεις του κοιλιακού διαφράγματος βοηθούν τη ροή της αιμολέμφου οπισθίως. Κατά τη διάρκεια κάθε διαστολικής φάσεως (χαλάρωση), αυξάνεται ο όγκος (ostia) να ανοίγει και να επιτρέπει την εισροή της αιμολέμφου από την περικαρδιακή κοιλότητα ξανά στη καρδιά. Ο αριθμός των συστολοδιαστολών της καρδιάς ανά λεπτό ποικίλλει από είδος σε είδος (30–200/min) και εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

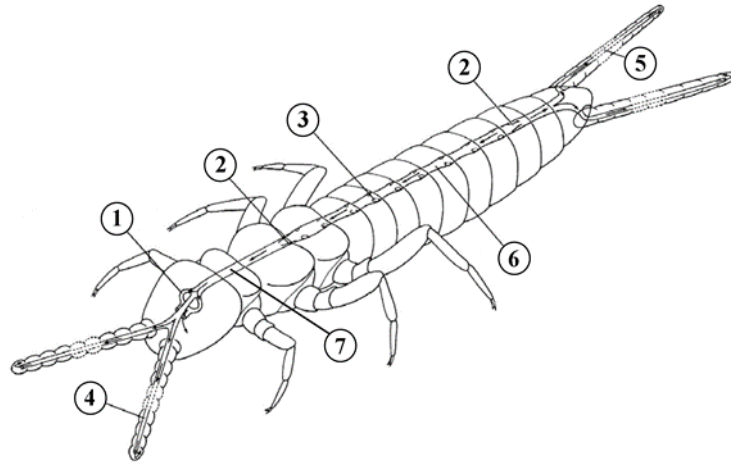
Τα στόμια-βαλβίδες (ostia) μπορεί να έχουν διάφορες μορφές, όπως απλής σχισμής ή να είναι κωνικά διαμορφωμένες κατά το πάχος του τοιχώματος, ή να έχουν διαμορφωμένα πτερώγια εσωτερικά. Η θέση και ο αριθμός τους ποικίλουν επίσης. Έτσι μπορεί να είναι πλευρικές, νωτιαίες ή κοιλιακές και να κυμαίνονται από 1 ζευγάρι (σε κάποιες λιβελούλες-dragonflies) μέχρι 12 ζευγάρια (στις κατσαρίδες-cockroaches). Αυτά τα στόμια (ostia) είναι συνήθως βαλβίδες αντεπιστροφής, που σημαίνει ότι επιτρέπουν την εισροή της αιμολέμφου προς το νωτιαίο αγγείο και κλείνουν όταν υπάρχει τάση οπισθορροής. Όμως, σε μερικά ορθόπτερα έντομα κάποια στόμια (ostia) μπορεί να λειτουργούν αντίστροφα με αποτέλεσμα την εκροή της αιμολέμφου προς την περικαρδιακή κοιλότητα (σχήμα 2-8).



Σχήμα 2-8 Νωτιαία ανατομή του γρύλου του αγρού *asceta assimilis*, της οικογένειας των γρύλων (*gryllidae*), της τάξης των ορθόπτερων (*orthoptera*), της κλάσης των εντόμων (*insecta*), της ομοταξίας των εξαπόδων (*hexapoda*). Διακρίνονται: (1) αορτή, (2) στόμιο-βαλβίδα εξαγωγής (*excurrent ostium*), (3) καρδιακό διαμέρισμα, (4) στόμιο-βαλβίδα εισαγωγής (*incurrent ostium*), (5) εγκέφαλος, (6) νωτιαίο διάφραγμα, (7) πτερυγοειδής μυς, [Nutting, 1951].

Στις διπλουρές η ροή της αιμολέμφου στο νωτιαίο αγγείο είναι δι-κατευθυντήρια, δηλαδή μπροστά από το όγδοο κοιλιακό άρθρο (ουρομερές) έχει κατεύθυνση προς την κεφαλή, ενώ πίσω από αυτό έχει κατεύθυνση προς την ουρά [Hertel & Pass, 2002]. Αυτός ο τρόπος ροής επιτυγχάνεται μέσω της ύπαρξης ενδοκαρδιακής βαλβίδας που εντοπίζεται πίσω από το τελευταίο ζευγάρι στομίων-βαλβίδων (*ostia*), (σχήμα 2-9).

Στις διπλουρές η ροή της αιμολέμφου στο νωτιαίο αγγείο είναι δι-κατευθυντήρια, δηλαδή μπροστά από το όγδοο κοιλιακό άρθρο (ουρομερές) έχει κατεύθυνση προς την κεφαλή, ενώ πίσω από αυτό έχει κατεύθυνση προς την ουρά [Hertel & Pass, 2002]. Αυτός ο τρόπος ροής επιτυγχάνεται μέσω της ύπαρξης ενδοκαρδιακής βαλβίδας που εντοπίζεται πίσω από το τελευταίο ζευγάρι στομίων-βαλβίδων (*ostia*), (σχήμα 2-9)



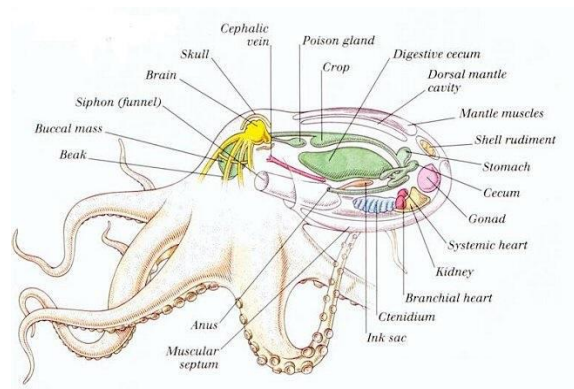
Σχήμα 2-9 Κυκλοφορικό σύστημα του *camprodeus augens*, της οικογένειας των *camprodeidae*, της κλάσης των διπλουρών (*diploura*), της ομοταξίας των εξαπόδων (*hexapoda*). Διακρίνονται: (1) περιμεσοφαγικό αγγείο, (2) ενδοκαρδιακή βαλβίδα ροής, (3) στόμια-βαλβίδες εισαγωγής (*incurrent ostia*), (4) αρτηρία κεραίας, (5) αρτηρία ουράς, (6) μεσονωτιαίο αγγείο, (7) αορτή, [Gillot, 2005].

2.1.1.6 Κυκλοφορικό σύστημα κεφαλόποδων

Τα κεφαλόποδα περιλαμβάνουν τα καλαμάρια, τα χταπόδια, τους ναυτίλους και τις σουπιές. Όλα είναι θαλάσσια ζώα και όλα είναι δραστήριοι θηρευτές. Απαντούν σε διάφορα βάθη. Τα χταπόδια βρίσκονται συχνά στην μεσοπαλιρροιακή ζώνη, να εδρεύουν κοντά σε βράχους και σχισμές, αλλά πολλές φορές συναντώνται και σε μεγαλύτερα βάθη. Το μέγεθος των κεφαλόποδων ποικίλλει. Το μικρότερο έχει μήκος 2 ως 3 cm. Το γιγάντιο καλαμάρι *Architeuthis* είναι το μεγαλύτερο γνωστό ασπόνδυλο. Η έντονη δραστηριότητα των κεφαλόποδων αντικατοπτρίζεται στην εσωτερική τους ανατομία και ιδιαίτερα στο αναπνευστικό και κυκλοφορικό τους σύστημα.

Το χταπόδι (*Octopoda*)

Το τροποποιημένο πόδι είναι συγκεντρωμένο στην κεφαλική περιοχή. Έχει την μορφή ενός χωνιού, για να εκτινάσσει νερό από την μανδουακή κοιλότητα, και το πρόσθιο άκρο του επιμηκύνεται και σχηματίζει μια στεφάνη στεμμάτων βραγχίων ή κεραίων.

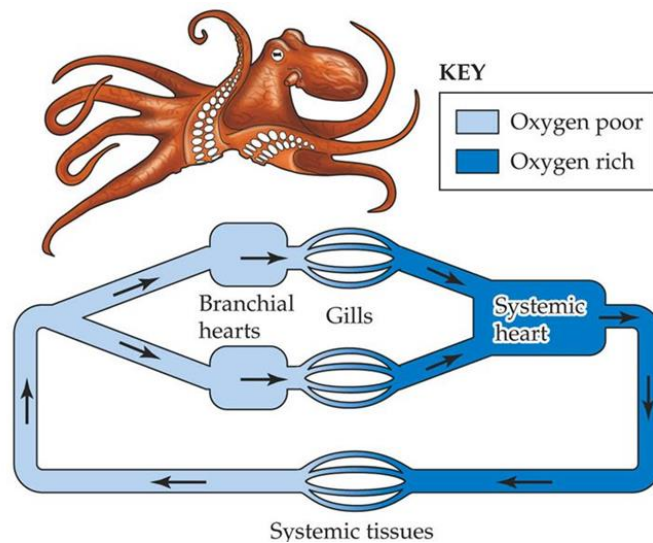
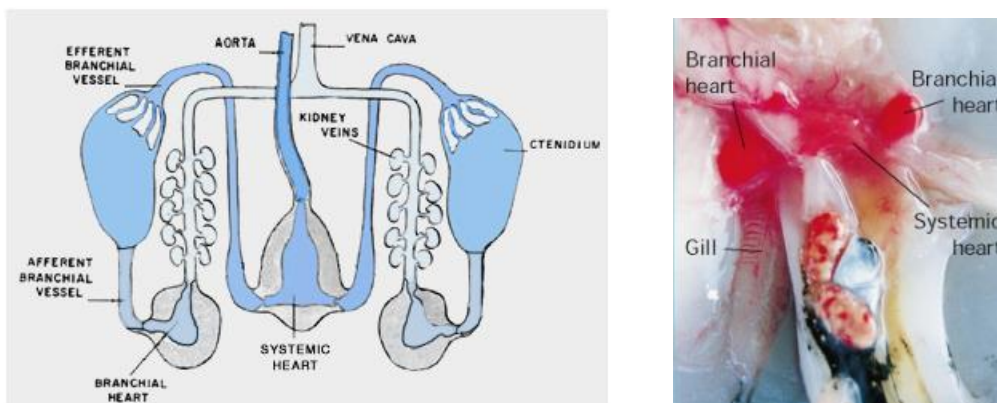


Σχήμα 2-10 Τυπική μορφή κεφαλόποδου, [Hickman et al.].

Τα κεφαλόποδα έχουν κλειστό κυκλοφορικό σύστημα με αρτηρίες , φλέβες και δίκτυα τριχοειδών αγγείων. Αυτό σχετίζεται με την υψηλή οργάνωση και δραστηριότητα των ζώων αυτών και τη σημασία του αίματος στην αναπνοή στα βράγχια , καθώς επίσης και την λειτουργία του νεφρού. Αμφότερα το χταπόδι και το καλαμάρι έχουν σχετικά υψηλή πίεση αίματος που κατά την ενεργητική τους φάση ξεπερνά τα 75 mm Hg .

Το αίμα του χταποδιού περιέχει την πλούσια σε χαλκό αιμοκυανίνη για τη μεταφορά οξυγόνου. Αυτό κάνει το αίμα πολύ ιξώδες γι αυτό και χρειάζεται μεγάλη πίεση για άντληση σε όλο το σώμα. Όπως στα σπονδυλόζωα , οι αρτηρίες έχουν ελαστικά τοιχώματα που διαστέλλονται κατά τη συστολή. Στα κεφαλόποδα το αίμα αποτελεί το 6 % του σωματικού βάρους και το μεσοκυττάριο υγρό περίπου το 15 % .

Τα χταπόδια έχουν τρεις καρδιές: μια συστηματική καρδιά που κυκλοφορεί το αίμα σε όλο το σώμα και δύο βραγχιακές καρδιές για άντληση σε κάθε ένα από τα δύο βράγχια. Η βραγχιακή καρδιά αντλεί το αποξυγονωμένο αίμα στα βράγχια όπου και οξυγονώνεται και στη συνέχεια μεταφέρεται στην συστηματική καρδιά.



Σχήμα 2-11 Σχηματική απεικόνιση του κυκλοφορικού συστήματος του χταποδιού, [Hickman et al.].

Κάθε μια από αυτές αποτελείται από έναν θάλαμο και είναι υπεύθυνη για το αντίστοιχο βράγχιο. Η συστηματική καρδιά αδρανοποιείται όταν το ζώο κολυμπά και όταν πολύ σύντομα κουράζεται προτιμά το σύριμο. Η συστηματική καρδιά έχει μυϊκά συσταλτικά τοιχώματα και αποτελείται από μία κοιλία και δύο κόλπους, μία για κάθε πλευρά του σώματος.

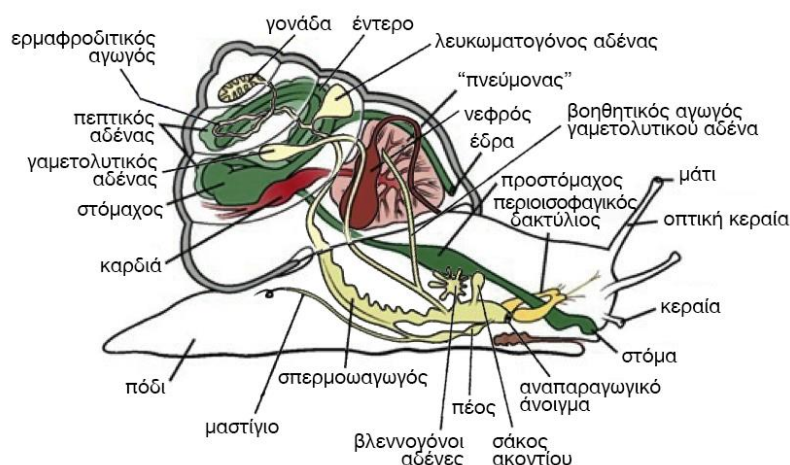
Τα αιμοφόρα αγγεία περιλαμβάνουν αρτηρίες, τριχοειδή αγγεία και φλέβες και είναι επενδεδυμένα με ένα κυτταρικό ενδοθήλιο που διαφέρει αρκετά από αυτό των περισσότερων άλλων ασπόνδυλων. Το αίμα κυκλοφορεί μέσω της αορτής και του τριχοειδούς συστήματος προς την κοίλη φλέβα, στη συνέχεια διέρχεται από τα βράγχια με τις βοηθητικές καρδιές και τελικά πίσω στην κύρια καρδιά. Πολλά από τα φλεβικά συστήματα είναι συστολικά, και βοηθούν στην κυκλοφορία του αίματος. [Hickman et al.]

2.1.1.7 Κυκλοφορικό σύστημα γαστερόποδων

Μεταξύ των μαλακίων, τα γαστερόποδα είναι η μεγαλύτερη και πιο πολυποίκιλη κλάση με περίπου 70,000 αρτιγόνα και περισσότερα από 15,000 απολιθωμένα είδη. Περιλαμβάνει χερσαία σαλιγκάρια, πεταλίδες, γυμνοσαλιγκάρια, θαλάσσια σαλιγκάρια και γυμνοσαλιγκάρια, θαλάσσιες πεταλούδες κ.α. Αυτές οι μορφές ποικίλλουν από θαλάσσια μαλάκια μέχρι χερσαία που αναπνέουν ατμοσφαιρικό αέρα.

Χερσαίο σαλιγκάρι :

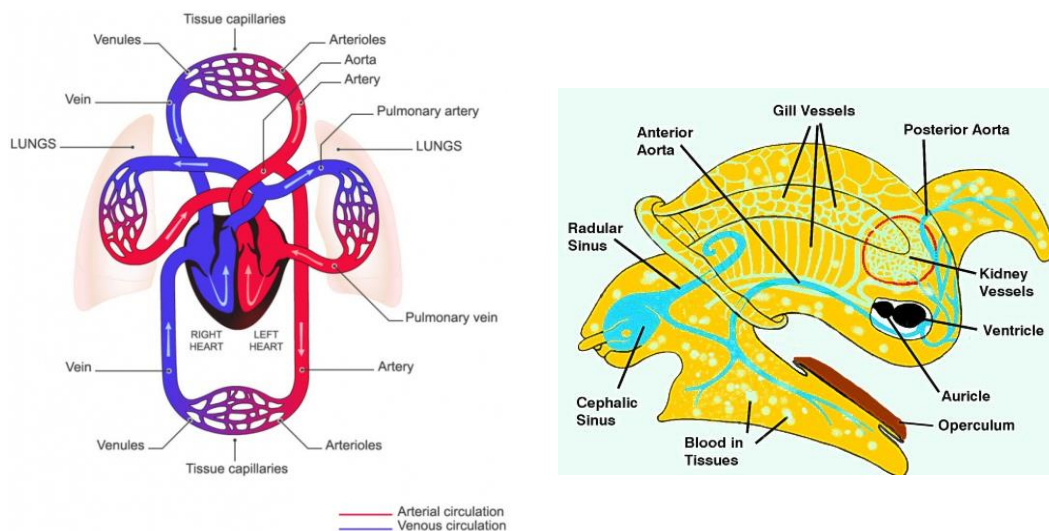
Το κυκλοφορικό σύστημα των χερσαίων σαλιγκαριών, όπως και των περισσότερων άλλων μαλακίων, είναι ανοικτό. Αυτό σημαίνει ότι το αίμα ρέει ελεύθερα στη σωματική κοιλότητα και περιλούει τα όργανα στα οποία μεταφέρει οξυγόνο. Στη σωματική κοιλότητα το αίμα αναμιγνύεται με λεμφικά υγρά και για το λόγο αυτό ονομάζεται αιμόλεμφος. Η αιμόλεμφος περιέχει, επίσης, διάφορα είδη κυττάρων, που αναφέρονται ως αμοιβαδοκύτταρα ή αιμοκύτταρα.



Σχήμα 2-1 Τυπική μορφή χερσαίου σαλιγκαριού, [Hickman et al.].

Η καρδιά βρίσκεται στο ραχιαίο τμήμα του μανδύα πίσω από την αναπνευστική (μανδουακή) κοιλότητα και περιβάλλεται από το περικάρδιο. Είναι δίχωρη και διαθέτει μία κοιλία και ένα κόλπο που συνδέονται μεταξύ τους με έναν αγωγό, ο οποίος λειτουργεί ως βαλβίδα, αποτρέποντας την αντίθετη ροή της αιμόλεμφο. Από την καρδιά η αιμόλεμφο διοχετεύεται σε μία κύρια αρτηρία, την αορτή. Η αορτή διακλαδίζεται σε πολλές μικρότερες αρτηρίες, που μεταφέρουν την αιμόλεμφο στα διάφορα τμήματα του σώματος, και οι αρτηρίες διακλαδίζονται σε μικρότερα ανοικτά τριχοειδή αγγεία, που διοχετεύουν την αιμόλεμφο στη σωματική κοιλότητα. Φλεβικά τριχοειδή αγγεία αναρροφούν την αιμόλεμφο από τη σωματική κοιλότητα και την μεταφέρουν στον «πνεύμονα» όπου θα οξυγονωθεί. Από τον «πνεύμονα» η πνευμονική φλέβα μεταφέρει την οξυγονωμένη αιμόλεμφο στην καρδιά. Η αιμόλεμφο, που ρέει από τη σωματική κοιλότητα προς τον πνεύμονα, περιέχει ελάχιστο οξυγόνο και είναι σχεδόν άχρωμη. Μετά την οξυγόνωσή της, το χρώμα της μετατρέπεται σε ανοικτό μπλε. Αυτό οφείλεται στη χρωστική αιμοκυανίνη η οποία, όπως και η αιμογλοβίνη, δημιουργεί σύμπλοκο με ένα μεταλλικό ιόν στο οποίο προσδέεται το μόριο του οξυγόνου. Το ιόν με το οποίο συνδέεται η αιμοκυανίνη είναι ο χαλκός, που έχει μπλε χρώμα στην οξειδωμένη του κατάσταση ενώ είναι άχρωμος όταν αναχθεί. [Σημειώσεις Ζωοφυσιολογίας Α.Α. Χαρίτος 1990]

Η συχνότητα των καρδιακών παλμών στα σαλιγκάρια εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος και από τη δραστηριότητά τους. Κυμαίνεται από 70-80 παλμούς ανά λεπτό σε ένα δραστήριο σαλιγκάρι και σε 5 παλμούς ανά λεπτό κατά τη διάρκεια της χειμερινής νάρκης. Η αιμόλεμφο δε συμμετέχει μόνο στη λειτουργία της αναπνοής. Χρησιμεύει, επίσης, ως 'υδροσκελετός' για να παρέχει σταθερότητα στο μαλακό σώμα των σαλιγκαριών. Επιπλέον, χρησιμεύει για την εφαρμογή υδραυλικής πίεσης σε τμήματα του σώματος, προκειμένου αυτά να εκταθούν. Ένα παράδειγμα αυτής της δράσης της αιμόλεμφο αποτελεί η έκταση των συσταλτών κεραιών στο κεφάλι. Η συστολή των κεραιών πραγματοποιείται με τη δράση ενός επισπαστήρα μυ. Στη συνέχεια η έκτασή τους πραγματοποιείται με την απότομη ροή αιμόλεμφο στο κοίλο εσωτερικό τους.

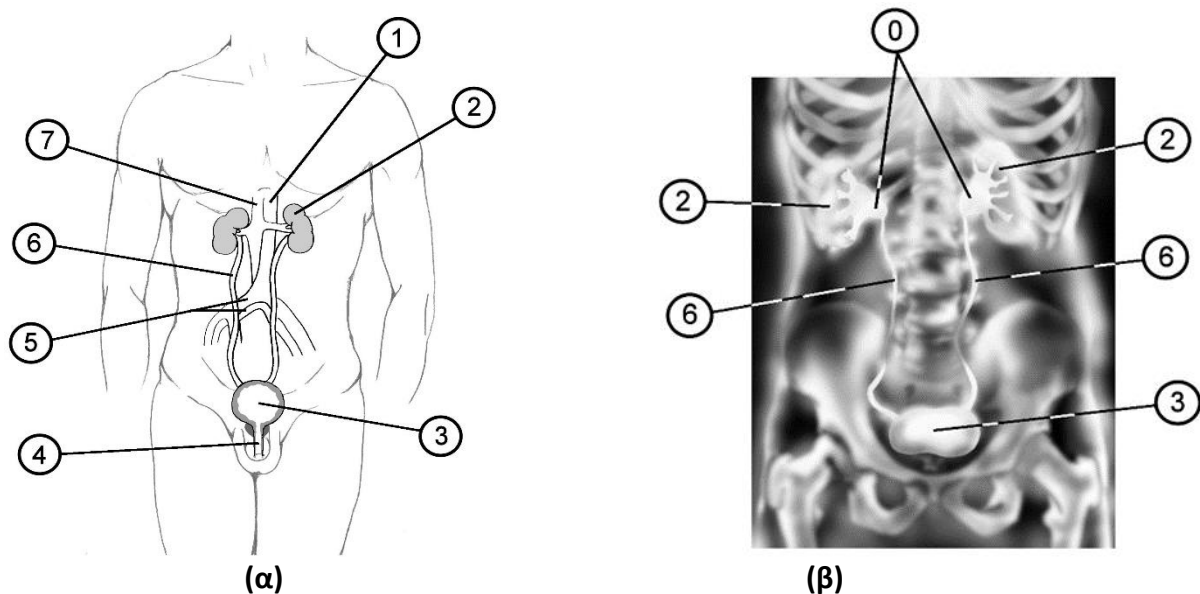


Σχήμα 2-2 Κυκλοφορικό σύστημα σαλιγκαριού, [Hickman et al.].

2.1.1.8 Αντλητική ικανότητα ανθρώπινου ουρητήρα (περισταλτική άντληση)

Οι ουρητήρες σε κάθε ανθρώπινο οργανισμό είναι δύο λεπτοί ινομυώδεις σωλήνες μήκους 25-30 cm [σχήμα 1-9(α)], οι οποίοι αρχίζουν από τη νεφρική πύελο, περνούν στη λεκάνη πίσω από το περιτόναιο (οπισθοπεριτοναϊκά) και εκβάλλουν σ' ένα κοίλο μυώδες όργανο την ουροδόχο κύστη στο πίσω μέρος [McMinn et al, 1995]. Είναι επιστρωμένοι με μεταβατικό επιθηλιακό ιστό και τα τοιχώματά τους, κατά βάση, αποτελούνται από κυκλικό στρώμα λείων μυϊκών ινών το οποίο περιβάλλεται εσωτερικά και εξωτερικά από ένα επιμήκη στρώμα (σχήμα 2-14).

Ο ουρητήρας μπορεί να διακριθεί από τα αιμοφόρα αγγεία στο ζωντανό σώμα ως λευκώδης περίπου δομή λώρου [σχήμα 2-13 (β)], που δεν πάλλεται (όπως μία αρτηρία), αλλά κινείται περισταλτικά με συστολές των λείων μυών, οι οποίες αρχίζουν στη νεφρική πύελο, από ορισμένα ειδικά μυϊκά κύτταρα [Constantinou, 1974] και μεταδίδονται στους μύες του ουρητηρικού τοιχώματος, προάγοντας τη ροή των ούρων προς την ουροδόχο κύστη. Αυτοί οι λείοι μύες ελέγχονται από το συμπαθητικό νευρικό σύστημα και μπορούν να βρίσκονται σε κατάσταση συστολής ή χαλάρωσης [Lang et al, 2002]. Η περιστάλση είναι η ρυθμική, ως κύμα, εγκάρσια συστολή των τοιχωμάτων διαφόρων κοίλων δομών με σκοπό τη μετακίνηση-προώθηση του περιεχομένου υλικού, [Μανόπουλος et al, 1998].



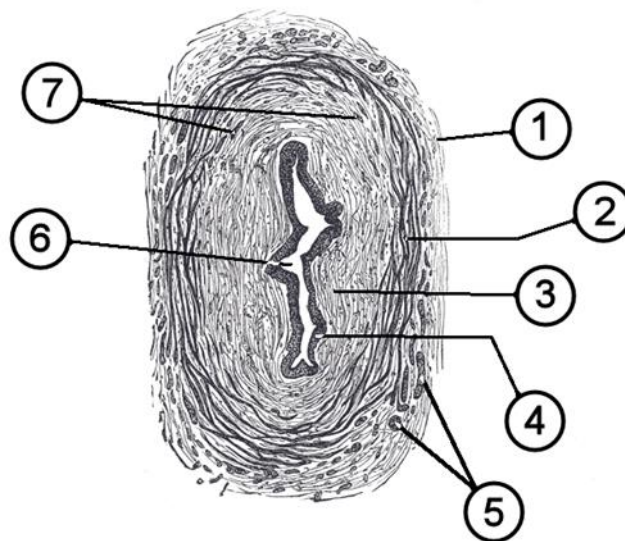
Σχήμα 2-3 (α) Σχηματική αναπαράσταση ουροποιητικού συστήματος. (β) Τριδιάστατη απεικόνιση του ουροποιητικού συστήματος με τη μέθοδο της υπολογιστικής αξονικής τομογραφίας (computerized tomography-CT). Διακρίνονται: (0) νεφρική πύελος, (1) αορτή, (2) νεφρός, (3) ουροδόχος κύστη, (4) ουρήθρα, (5) κοινά λαγόνια αγγεία, (6) ουρητήρας, (7) κάτω κοίλη φλέβα, [Image library of the National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases (NIDDK) of the National Institutes of Health (NIH), Bethesda, Maryland, USA].

δομή λώρου [σχήμα 2-13(β)], που δεν πάλλεται (όπως μία αρτηρία), αλλά κινείται περισταλτικά με συστολές των λείων μυών, οι οποίες αρχίζουν στη νεφρική πύελο, από ορισμένα ειδικά μυϊκά κύτταρα [Constantinou, 1974] και μεταδίδονται στους μύες του ουρητηρικού τοιχώματος, προάγοντας τη ροή των ούρων προς την ουροδόχο κύστη. Αυτοί οι λείοι μύες ελέγχονται από το συμπαθητικό νευρικό σύστημα και μπορούν να βρίσκονται σε κατάσταση συστολής ή χαλάρωσης

[Lang et al, 2002]. Η περίσταση είναι η ρυθμική, ως κύμα, εγκάρσια συστολή των τοιχωμάτων διαφόρων κοίλων δομών με σκοπό τη μετακίνηση-προώθηση του περιεχομένου υλικού, [Μανόπουλος et al, 1998].

Αρχικά από το νεφρό γίνεται η έκκριση των ούρων ενώ η ουροφόρος οδός (ουρητήρες, ουροδόχος κύστη, ουρήθρα) τα προωθεί και τα κατευθύνει έξω από το σώμα μέσω περιοδικών ρυθμικών κινήσεων. Τα ούρα που εισάγονται στον ουρητήρα προωθούνται προς την κύστη υπό μορφή bolus. Bolus είναι η περιεχόμενη ύλη ρευστής ουσίας εντός σωληνοειδούς μορφής σπλάχνου, η οποία έχει εγκλωβιστεί μεταξύ δύο εμφράξεων και κινείται σύμφωνα με την ταχύτητα κίνησης των εμφράξεων. Για χαμηλές παροχές ούρων κάθε 3 με 5 λεπτά από το ένα άκρο στο άλλο του κάθε ουρητήρα διαδίδεται ένα βραχύ bolus (περισταλτικό κύμα). Για υψηλότερες παροχές τα bolus επιμηκύνονται, η ταχύτητά τους όμως παραμένει σταθερή. Όταν η παροχή αυξηθεί πάρα πολύ το μήκος των bolus συνεχίζει να αυξάνεται, μέχρι που ο ουρητήρας πληρωθεί με ρευστό από το ένα άκρο μέχρι το άλλο (χαλάρωση μυών καθ' όλο το μήκος του ουρητήρα). Το στόμιο κάθε ουρητήρα στο σημείο εκβολής είναι κλειστό μ' ένα είδος πτυχωτής βαλβίδας του βλεννογόνου υμένα. Αυτές οι βαλβίδες και το λοξό επιστόμιο των ουρητήρων διαμέσου του μυώδους κυστικού τοιχώματος, εμποδίζουν τον ανάρρου των ούρων κατά τη διάρκεια κυστικής συστολής.

Τα κύματα που αναπτύσσονται στην ουροδόχο κύστη είναι μη περιοδικά, καθότι η ουροδόχος κύστη είναι κοίλο όργανο, κατέχοντας ρόλο δεξαμενής, όπου τα κύματα των ουρητήρων υφίστανται απόσβεση. Η χωρητικότητα της ουροδόχου κύστης είναι δύναμι 2-3 l. Πάντως πολύ μικρότερες ποσότητες μέχρι 300 ml ούρων, προκαλούν την επιθυμία για ούρηση.



Σχήμα 2-4 Εγκάρσια διατομή ουρητήρα. Διακρίνονται: (1) χαλαρός συνδετικός ιστός, (2) στρώμα κυκλικών μυϊκών ινών, (3) βασική μεμβράνη, (4) βλενώδης μεμβράνη από μεταβατικό επιθήλιο, (5) εξωτερική στρώση επιμηκών λείων μυϊκών ινών, (6) διατομή αυλού, (7) εσωτερική στρώση επιμηκών λείων μυϊκών ινών, [Lewis, 1918].

Από την ανατομία μπορούμε να εξαγάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη τάξη μεγέθους της φυσιολογικής παροχής του ουρητήρα. Αν σκεφτεί κανείς ότι ο ανθρώπινος οργανισμός ουρεί κατά μέσο όρο 4 φορές ημερησίως (δηλαδή ανά εξάωρο) περί τα 300 ml, τότε η φυσιολογική παροχή και των δύο ουρητήρων, είναι της τάξης των 50 ml/h, δηλαδή ο καθένας 25

ml/h. Αυτή η τάξη μεγέθους μπορεί να επαληθευτεί και από τη βιβλιογραφία [Φειδάς, 1996], όπου αναφέρεται ότι η φυσιολογική παραγωγή ούρων το 24ωρο είναι 1-3 l. Αναφερόμενοι σε μέση παραγωγή ούρων το 24ωρο από τα νεφρά, μπορούμε να εξάγουμε τη συνολική μέση παροχή που προσδίδουν οι δύο ουρητήρες 42 - 125 (ml/h). Για κάθε ένα ουρητήρα το ποσό αυτό είναι το μισό, θεωρώντας ότι μοιράζεται εξίσου στους δύο ουρητήρες του ανθρωπίνου σώματος, δηλαδή 21 - 62.5 (ml/h).

Η μορφή της περισταλτικής άντλησης παρατηρείται και σε άλλα κοίλα όργανα σωληνοειδούς μορφής στον οργανισμό, όπως στον οισοφάγο για την κατάποση της τροφής, στο λεπτό έντερο για την προώθηση του χυλού κλπ. Σύμφωνα με τα είδη άντλησης που αναφέρθηκαν αρχικά, η περισταλτική άντληση μπορεί να καταταχθεί στην κλασική άντληση με βαλβίδες, μόνο όταν σε κάθε στιγμή υπάρχει τουλάχιστον μία πλήρης έμφραξη κατά μήκος του σωληνοειδούς οργάνου. Σε αυτή τη περίπτωση η κινούμενη πλήρης έμφραξη των τοιχωμάτων παίζει ρόλο κινούμενης κλειστής βαλβίδας για τη ροή του ρευστού, του οποίου δεν επιτρέπει την οπισθοροή (πλήρης εμβολισμός). Ειδικά σε αυτή τη περίπτωση η ταχύτητα μετακίνησης της έμφραξης ταυτίζεται με την ταχύτητα του περιεχόμενου ρευστού τοπικά. Όταν όμως, έστω και για μία στιγμή, το σωληνοειδές όργανο δεν υπόκειται σε πλήρη έμφραξη σε κανένα σημείο του, τότε παρατηρείται οπισθοροή και αυτού του είδους η περισταλτική άντληση κατατάσσεται στην άντληση χωρίς βαλβίδες (valveless pumping).

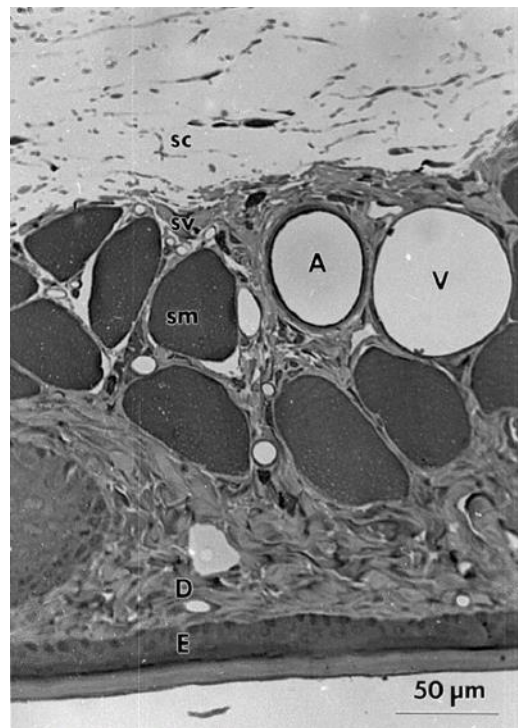
2.1.1.9 Βοηθητικός μηχανισμός άντλησης φλεβιδίων

Είναι γνωστό από την ανατομία ότι τα αρτηρίδια και τα φλεβίδια στα θηλαστικά προσεγγίζονται κατά μήκος μεταξύ τους (arteriovenular pairing, σχήμα 1-11), σχηματίζοντας αρκετές φορές δεσμίδες παράλληλων αγγείων. Αυτή η κατά μήκος γειτνίαση των αρτηριδίων με τα φλεβίδια εξυπηρετεί, τόσο σε μηχανισμούς διάχυσης διαφόρων ουσιών μεταξύ των αγγείων [Hester, 1990], όσο και στην ανάπτυξη τοπικών αντλητικών μηχανισμών στα φλεβίδια. Πρώτη φορά ο Ozanam υποθέτει ότι η πάλμωση των αρτηριδίων μπορεί να βοηθά στην προώθηση του αίματος στα γειτονικά φλεβίδια (σχήμα 1-12). Επιπλέον υποθέτει ότι η μετακίνηση αυτή «εξ επιδράσεως» του αίματος είναι ανεξάρτητη από την παρουσία βαλβίδων (πλήρους έμφραξης), [Ozanam, 1881].

Η ιδέα του Ozanam με τον εξ αποστάσεως βοηθητικό μηχανισμό άντλησης, όπου ένα παλλόμενο αρτηρίδιο συμπιέζει τα γειτονικά του φλεβίδια, μελετάται από το Liebau, από τον οποίο εισάγεται ουσιαστικά πρώτη φορά η έννοια της άντλησης χωρίς βαλβίδες, [Liebau, (*ZfdGEM*), 1954] και [Liebau, (*M*), 1954]. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ο τρόπος επιστροφής του αίματος από τα τριχοειδή αγγεία στην καρδιά μέσω του φλεβικού συστήματος και αποδεικνύεται ότι η πίεση των τριχοειδών αγγείων δεν επηρεάζεται από τη υδροστατική πίεση των αρτηριδίων και των φλεβιδίων. Για την εξήγηση της παροχής ενέργειας που απαιτείται για την υπερνίκηση της υδροστατικής πίεσης των φλεβών από το αίμα προτείνεται η διάταξη άντλησης του σχήματος 1-13, που λειτουργεί με πρόσδοση πλευρικής ενέργειας σε ελαστικό αγωγό.

Στη διάταξη αυτή παρατηρείται να αντλείται νερό όταν ανοιγοκλείνεται η βάννα με κάποια συχνότητα. Θεωρείται ότι αυτό συμβαίνει διότι προσδίδεται πλευρικά ενέργεια στον ελαστικό αγωγό που κατέχει θέση φλεβιδίου από τον ελαστικό αγωγό που κατέχει θέση αρτηριδίου. Το φλεβικό σύστημα παραδόξως εδώ προσομοιάζεται με πολύ στενό σωλήνα υψηλής αντίστασης,

αλλά με αυτό το τρόπο συνυπολογίζεται η ύπαρξη βαλβίδων στις φλέβες που εισαγάγουν τοπικές απώλειες στο φλεβικό σύστημα, [Liebau, (ZfK), 1963]. Βάσει κλινικών ενδείξεων αναφέρεται από το Liebau η πιθανότητα όμοιων συνθηκών με τη διάταξη, όσο αφορά την ικανότητα ροής του φλεβικού αίματος στο επίπεδο των αρτηριδίων και φλεβιδίων. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες μία κατευθυνόμενη ροή στο φλεβίδιο είναι δυνατή, η οποία βοηθάει στην επιστροφή του αίματος στην καρδιά, [Liebau, (ZfdGEM), 1954]



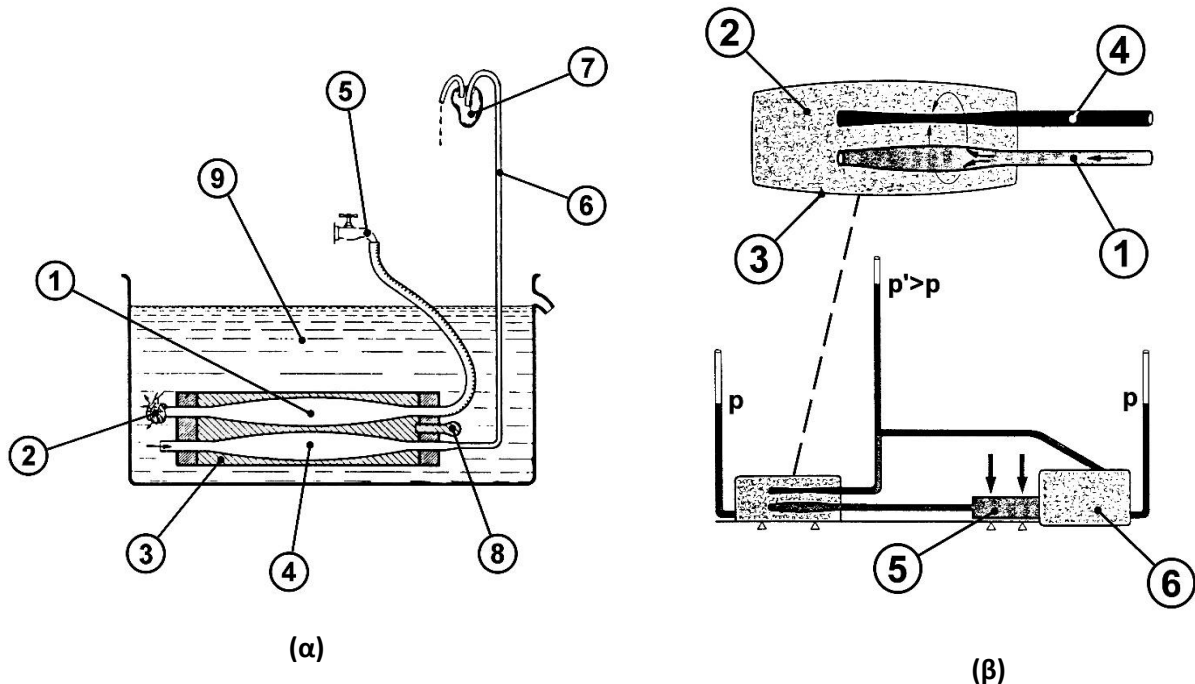
Σχήμα 2-16 Μικροφωτογραφία τομής παρειαικού θύλακος τρωκτικού (syrian hamster-mesocricetus auratus), όπου η αγγειακή στοιβάδα βρίσκεται μεταξύ του υποδόριου ιστού και της μυϊκής στοιβάδας. Είναι καταφανής η γειτνίαση του αρτηριδίου με το φλεβίδιο (arteriovenular pairing). Διακρίνονται: (A) αρτηρίδιο (52µm σε διάμετρο), (V) φλεβίδιο, (E) επιδερμίδα, (D) χόριο, (sm) μυϊκή στοιβάδα, (sc) υποδόριος ιστός, [Guilford, 1993].

Το φαινόμενο της μεταφοράς ενέργειας από τα αρτηρίδια στα φλεβίδια εξετάζεται από το Liebau, όπου τεκμηριώνεται με την αυξημένη, αλλά μη αιτιολογημένη, πτώση της πίεσης στην περιοχή των αρτηριδίων. Επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα με μελέτη της σχετικής ροής στο βολβό του ματιού, καθώς και σε άλλα όργανα του σώματος [Liebau, 1958]. Η ίδια συλλογιστική μπορεί να επεκταθεί εν γένει για την ερμηνεία της προώθησης χωρίς βαλβίδες του αίματος σε κάθε ιστό που αιματώνεται από τριχοειδή αγγεία, [Liebau, (VdDGfK), 1963].

2.2 Αντλητικά φαινόμενα στη Βιορευστομηχανικής και βιοϊατρική τεχνολογία

2.2.1 Η άντληση χωρίς βαλβίδες στην καρδιοαναπνευστική ανάνηψη (CPR)

Πέραν της φυσιολογίας, ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα τεχνητής άντλησης του αίματος στον άνθρωπο απαντάται δυνάμει στις παθολογικές καταστάσεις του εμφράγματος του μυοκαρδίου, της καρδιακής ανεπάρκειας και της στεφανιαίας νόσου, όπου μπορεί να συμβεί καρδιακή ανακοπή (cardiac arrest) και χρειάζεται η εφαρμογή καρδιοαναπνευστικής ανάνηψης (cardiopulmonary resuscitation-CPR).

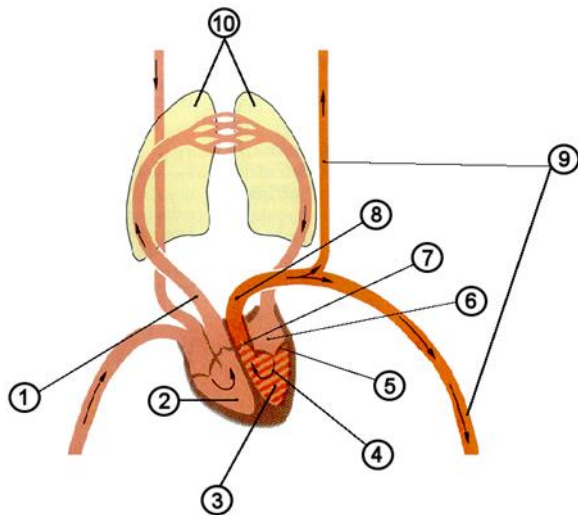


Σχήμα 2-5 Σχηματική αναπαράσταση διάταξης Liebau για τη μελέτη του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες στο επίπεδο των αρτηριδίων-φλεβιδίων. (α) Διακρίνονται: (1) πολύ ελαστικός σωλήνας: αρτηρίδιο, (2) πορώδες ύφασμα: αντίσταση τριχοειδών, (3) γυάλινος κύλινδρος πληρωμένος με νερό: συνδετικός ιστός, (4) πολύ ελαστικός σωλήνας: φλεβίδιο, (5) βάνα: αορτική βαλβίδα, (6) στενός σωλήνας: φλεβικό σύστημα, (7) μεμβράνη καουτσούκ: απόσβεση από τα ελαστικά τοιχώματα των φλεβών, (8) μεμβράνη καουτσούκ: απόσβεση από το περίβλημα των ιστών, (9) δεξαμενή νερού: περιοχή τριχοειδών αγγείων, [Liebau, (ZfdGEM), 1954]. (β) Διακρίνονται: (1) αρτηρίδιο, (2) περιοχή τριχοειδών αγγείων, (3) συνδετικός ιστός, (4) φλεβίδιο, (5) κοιλότητα προώθησης (καρδιά), (6) πνεύμονας, [Liebau, 1970].

Σύμφωνα με αυτή υποκαθίσταται η κυκλοφορία του αίματος που έχει διακοπεί με εξωτερικές θωρακικές πιέσεις στην περιοχή του στέρνου χαμηλά [Kouwenhoven et al, 1960], εξασφαλίζοντας την παροχή αίματος στα ζωτικά όργανα (καρδιά, εγκέφαλος, πνεύμονες, νεφρά). Η πίεση που ασκείται πρέπει να είναι βάθους 2.5 - 3.5cm στους ενήλικες, ενώ η διάρκεια της πίεσης πρέπει να είναι το μισό του κύκλου μάλαξης για να εξασφαλίζεται χρόνος για την επαναφορά του αίματος. Συνήθως ο ρυθμός μαλάξεων ή εξωτερικών θωρακικών πιέσεων πρέπει να είναι 100/min.

Η καρδιακή ανακοπή μπορεί να συνοδεύεται και από αναπνευστική ανακοπή, οπότε σε αυτή τη περίπτωση χρειάζεται ο ασθενής να υποβληθεί και σε τεχνητή αναπνοή. Ο ανανήπτης παίρνει μία βαθιά αναπνοή και στη συνέχεια, κλείνοντας τους ρώθωνες της μύτης καλύπτει με το

στόμα του το στόμα του ασθενούς (φιλί της ζωής) και εκπνέει μαλακά μέχρι να σηκωθεί ο θώρακας. Η αναλογία αναπνοών - μαλάξεων είναι συνήθως 1 : 5 (1 αναπνοή και στη συνέχεια 5 μαλάξεις). Εάν υπάρχει σφυγμός αλλά όχι αναπνοή, γίνονται μόνο 20 αναπνοές/min (περίπου 1 κάθε 3 δευτερόλεπτα). Εάν διαπιστωθεί αραιός ή βραδύς ή άρρυθμος σφυγμός συνεχίζονται και πάλι εντατικά οι αναπνοές, επειδή είναι γνωστό ότι η οφειλόμενη στην έλλειψη οξυγόνου βραδυκαρδία μπορεί να υποχωρήσει με την επαρκή οξυγόνωση του αίματος που λαμβάνει χώρα κατά τις τεχνητές αναπνοές.



Σχήμα 2-6 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας καρδιάς-πνεύμονα. Διακρίνονται: (1) πνευμονική αρτηρία, (2) δεξιά κοιλία, (3) αριστερή κοιλία, (4) ορθόδρομη ροή αίματος (antegrade), (5) μιτροειδής βαλβίδα, (6) αριστερός κόλπος, (7) αορτική βαλβίδα, (8) αορτή, (9) περιφέρεια, (10) πνεύμονες, [Desporoulos & Silbernagl, 1991].

Η ροή του αίματος κατά την CPR έχει εξηγηθεί από δύο θεωρίες, τους μηχανισμούς καρδιακής συμπίεσης και της θωρακικής αντλίας. Σύμφωνα με την πρώτη, η προώθηση του αίματος κατά τις εξωτερικές συμπίεσεις του στέρνου συμβαίνει ως αποτέλεσμα συμπίεσης των κοιλιών της καρδιάς μεταξύ του στέρνου και της σπονδυλικής στήλης με ταυτόχρονη φυσιολογική λειτουργία των καρδιακών βαλβίδων (σχήμα 2-14). Μάλιστα, σε μελέτες που γίνονται σε σκύλους που υποβάλλονται σε χειροκίνητη CPR [Feneley et al, 1987], αλλά και σε μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων [Noordergraaf et al, 2005], παρατηρείται ότι κυρίαρχος μηχανισμός προώθησης του αίματος είναι η απευθείας καρδιακή συμπίεση. Η αριστερή κοιλία υφίσταται παραμόρφωση συμπίεσης με άνοιγμα της αορτικής βαλβίδας και φυσιολογικό κλείσιμο της μιτροειδούς βαλβίδας, που δεν επιτρέπει την ορθόδρομη (antegrade) ροή του αίματος από τον αριστερό κόλπο στην αριστερή κοιλία. Με βάση αυτή τη θεωρία η άντληση κατά την CPR εντάσσεται στην κλασική κατηγορία άντλησης με βαλβίδες. Όμως, η κυρίαρχη θεωρία, που είναι της θωρακικής αντλίας, εντάσσεται στην κατηγορία άντλησης χωρίς βαλβίδες. Σύμφωνα λοιπόν με αυτή η καρδιά δε συμπιέζεται επιλεκτικά κατ' ανάγκη και θεωρείται ότι δρα ως παθητικός διάυλος για τη ροή του αίματος μαζί με τις υπόλοιπες ενδοθωρακικές αγγειακές δομές. Δηλαδή, ο όγκος του αίματος από την πνευμονική αγγειακή χωρητικότητα προωθείται στη περιφέρεια αφού πρώτα αδειάσει στις αριστερές κοιλότητες της καρδιάς [Beattie et al, 1991] και [Criley et al, 1981]. Σε μελέτη κίνησης των καρδιακών βαλβίδων, κατά τη θωρακική συμπίεση σε ασθενείς που έχουν υποβληθεί σε CPR, αποδεικνύεται ότι η μιτροειδής βαλβίδα παραμένει ανοιχτή σε όλο τον κύκλο συμπίεσης και αποσυμπίεσης του θώρακα, ενώ η αορτική βαλβίδα είναι ανοιχτή μόνο κατά την φάση της συμπίεσης [Werner et al, 1981]. Συνεπώς, το κλείσιμο της μιτροειδούς βαλβίδας δεν είναι απαραίτητο για την προώθηση του αίματος κατά την CPR και επομένως η αιτία της ροής ανάγεται στη γενικότερη αυξητική μεταβολή της ενδοθωρακικής πίεσης (σχήμα 2-15) και όχι στην απ'

ευθείας συμπίεση του καρδιακού οργάνου. Παρατηρείται, μερικοί ασθενείς με καρδιακή ανακοπή να έχουν ανανήψει επιτυχώς μέσω εξωτερικών θωρακικών πιέσεων (CPR), παρόλη τη δυσλειτουργία των βαλβίδων της καρδιάς, [Rudikoff et al, 1980].

Η θεωρία της θωρακικής αντλίας μπορεί να τεκμηριωθεί και με την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου που επαληθεύεται πειραματικά από εφαρμογή χειροκίνητης CPR σε σκύλους και αναδεικνύει το σημαντικό ρόλο της ενδοθωρακικής πίεσης [Halperin et al, 1987]. Ερμηνεία της θεωρίας της θωρακικής αντλίας παρατίθεται, χρησιμοποιώντας βασικές αρχές της φυσιολογίας. Στο σχήμα 1-16 η αριστερή κοιλία (θάλαμος Β) και η πνευμονική αγγείωση (θάλαμος Α) θεωρούνται ως δύο δοχεία με εύκαμπτα τοιχώματα που ενώνονται με μία βαλβίδα (μιτροειδής) και είναι πληρωμένα με υγρό. Επειδή οι κυψελίδες του πνεύμονα περιβάλλονται από τριχοειδή, η πνευμονική αγγείωση θεωρείται ότι περιέχει τον κυψελιδικό αέρα. Αυτό αναπαρίσταται ως υποθάλαμος αέρα μέσα στο θάλαμο Α, του οποίου το όριο είναι από εύκαμπτη μεμβράνη και αντιπροσωπεύει τα κοινά κυψελιδικά και τριχοειδή τοιχώματα. Οι θάλαμοι είναι τοποθετημένοι εντός κυλίνδρου συμπίεσης και περιβάλλονται με υγρό που βρίσκεται σε πίεση p_0 . Αυτή η πίεση μπορεί να αυξάνεται μέσω συμπίεσης από το κινούμενο έμβολο του κυλίνδρου, .Ο όγκος του εύκαμπτου συστήματος των θαλάμων Α και Β εκφράζεται μέσω της επαλληλίας, του μέγιστου δυνατού όγκου που καταλαμβάνεται όταν η διατοιχωματική πίεση είναι μηδέν (μηδενική εντατική κατάσταση στο τοίχωμα) και του όγκου που εξαρτάται από την ανάπτυξη μη μηδενικής διατοιχωματικής πίεσης μεταξύ του χώρου του κυλίνδρου και αυτού του συστήματος των θαλάμων.

Στο σχήμα 2-16 διακρίνονται τρεις καταστάσεις. Στην κατάσταση (I) η βαλβίδα σύνδεσης των δύο θαλάμων είναι ανοιχτή και ο χώρος του εύκαμπτου συστήματος έχει πληρωθεί με υγρό ώστε η κοινή επικρατούσα πίεση και στους δύο θαλάμους να είναι p_0 => (αναπτυγμένη μη μηδενική διατοιχωματική πίεση). Στην κατάσταση (II) η βαλβίδα σύνδεσης των δύο θαλάμων είναι κλειστή και ξαφνικά μετατοπίζεται το κινούμενο έμβολο, οπότε συμβαίνει απότομη αύξηση της πίεσης p_0 στον κύλινδρο. Επειδή το υγρό είναι ασυμπίεστο η πίεση p_B στο θάλαμο Β αυξάνεται όσο και η πίεση του κυλίνδρου έξω από το σύστημα των δύο θαλάμων. Επομένως, η διατοιχωματική πίεση του θαλάμου Β και συνεπώς ο όγκος του παραμένουν τα ίδια με την κατάσταση (I). Η επίδραση στο θάλαμο Α είναι διαφορετική. Καθώς η πίεση στο θάλαμο Α (p_A) αρχίζει να αυξάνεται εξαιτίας της αύξησης της p_0 , ο αέρας στο θάλαμο Α μειώνει τον όγκο του σύμφωνα με το νόμο του Boyle ($p_A V_A = \text{σταθ.}$, όπου p_A και V_A είναι η απόλυτη πίεση και ο όγκος αντίστοιχα του υποθαλάμου με τον αέρα). Επειδή ο όγκος του υποθαλάμου με τον αέρα μειώνεται ο συνολικός όγκος του θαλάμου Α επίσης μειώνεται κατά το ίδιο ποσό, ίσο με τον όγκο εμβολισμού του κυλίνδρου ΔV . Εξαιτίας της μείωσης του όγκου στο θάλαμο Α η διατοιχωματική πίεση στο θάλαμο Α έχει μειωθεί συγκρινόμενη με την τιμή που είχε στην κατάσταση (I). Δηλαδή, $p_A < p_0$. Για αυτό το λόγο, παρόλο που με τη συμπίεση η πίεση αυξάνεται στο θάλαμο Α, αυξάνεται λιγότερο από την αύξηση της πίεσης στον κύλινδρο. Συνεπώς, $p_A < p_0$. Επιπλέον, ο αέρας που διαφεύγει από τον υποθάλαμο (εκροή κυψελιδικού αέρα λόγω συμπίεσης του στήθους) επιφέρει περαιτέρω ελάττωση της πίεσης στο θάλαμο Α. Στην κατάσταση (III), η ενδιάμεση βαλβίδα ανοίγεται και υγρό ρέει από το θάλαμο Β στο θάλαμο Α μέχρι να δημιουργηθεί νέα κατάσταση ισορροπίας.

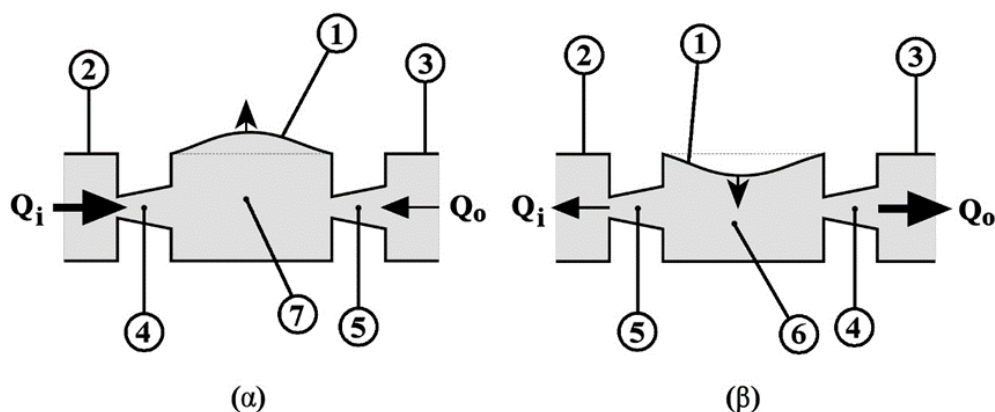
Θεωρώντας ότι η παραπάνω διαδικασία ισχύει για την περίπτωση της CPR, ο θάλαμος Β που αναπαριστά την αριστερή κοιλία πρέπει να συνδεθεί μέσω ενός εύκαμπτου αγωγού (αορτή) με τον εξωτερικό χώρο του κυλίνδρου (περιφέρεια). Επίσης και ο υποθάλαμος πρέπει να συνδεθεί μέσω αγωγού (τραχεία) με εξωτερικό χώρο του κυλίνδρου (ατμόσφαιρα). Καθώς το σύστημα

βρίσκεται σε θέση συμπίεσης, υγρό προωθείται από το θάλαμο Β μέσω της αορτής στη περιφέρεια. Κατ' επέκταση υγρό ρέει από το θάλαμο Α στο θάλαμο Β λόγω της ελάττωσης της πίεσης στο θάλαμο Β. Επιπρόσθετα, η αύξηση του όγκου αέρα του υποθαλάμου (παροχή αέρα στον πνεύμονα), αυξάνει τη πίεση στο θάλαμο Α και προκαλεί ροή του υγρού διαμέσου της βαλβίδας στο θάλαμο Β από όπου τελικά διοχετεύεται μέσω της αορτής στην περιφέρεια.

Φυσικά είναι δυνατόν να ισχύουν και οι δύο ανωτέρω θεωρίες κατά την εφαρμογή της CPR, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Δηλαδή, μπορεί τόσο η θωρακική αντλία όσο και ο μηχανισμός της καρδιακής συμπίεσης να λειτουργούν ταυτόχρονα για βέλτιστο αποτέλεσμα. Αν τελικά το μέγεθος της ροής εξαρτάται από τη συχνότητα συμπίεσης, τότε ενδιαφέρει να είναι γνωστό υπό ποια συχνότητα συμπίεσης του θώρακα η CPR είναι πιο αποτελεσματική. Εκτός από την εφαρμογή της άντλησης χωρίς βαλβίδες στη μελέτη παθολογικών καταστάσεων, μπορεί να είναι πολύ σημαντική και στη μελέτη της μηχανικής καρδιοαναπνευστικής αλληλεπίδρασης για τη βελτιστοποίηση αθλητικών επιδόσεων.

2.2.2 Μικροαντλίες χωρίς βαλβίδες (valveless micropumps)

Σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές της βιολογίας, της ιατρικής, στην ψύξη μικροηλεκτρονικών συστημάτων, καθώς και στην τεχνολογία του διαστήματος, απαιτείται η άντληση και διαχείριση όγκων ρευστού της τάξης του 1 ml και κάτω. Για παράδειγμα, υγρά βιολογικά δείγματα χρειάζεται πολλές φορές να μετακινούνται διαμέσου μικροσκοπικών χημικών αναλυτών, ενώ μετακίνηση ψυκτικών υγρών απαιτείται διαμέσου μικροσκοπικών εναλλακτών θερμότητας. Επίσης η διανομή θεραπευτικών ουσιών στο σώμα αποτελεί από τις βασικές ανάγκες σχεδιασμού εμφυτεύσιμων μικροαντλιών.



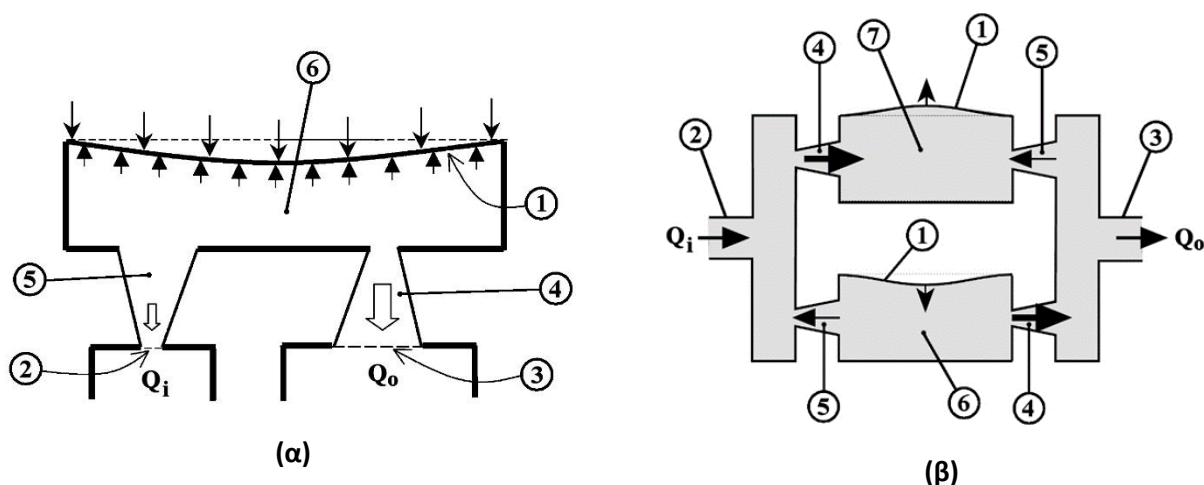
Σχήμα 2-7 Αρχή λειτουργίας (συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου) μικροαντλίας ενός θαλάμου μεμβράνης. (α) Κατάσταση τροφοδοσίας θαλάμου με αύξηση του εσωτερικού όγκου ($|Q_i| > |Q_o|$). (β) Κατάσταση άντλησης με μείωση του εσωτερικού όγκου ($|Q_i| < |Q_o|$). Διακρίνονται: (1) εύκαμπτη μεμβράνη, (2) είσοδος ρευστού, (3) έξοδος ρευστού, (4) δράση ακροφυσίου ως αποκλίνον, (5) δράση ακροφυσίου ως συγκλίνον, (6) μείωση όγκου θαλάμου, (7) αύξηση όγκου θαλάμου, [Olsson et al, 1999].

Οι πρώτες μικροαντλίες που αναπτύχθηκαν προοριζόταν για χρήση ελέγχου της διανομής ινσουλίνης σε διαβητικούς, διατηρώντας το επιθυμητό επίπεδο σακχάρου στο αίμα χωρίς τη συχνή χρήση ενέσεων, [Smits, 1990]. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εισαγωγή κατάλληλων βιοτεχνολογικών μακρομορίων, τόσο σε καρκινικούς ιστούς, [Coll et al, 1999], όσο και στη ροή του

αίματος, [Dash & Cudworth, 1998]. Από τις εμφυτεύσιμες μικροαντλίες δεν απαιτείται τόσο η απόδοση υψηλών παροχών, όσο απαιτείται ακρίβεια στην εγχυόμενη ποσότητα. Για παράδειγμα η ποσότητα ινσουλίνης που χρειάζεται ένας διαβητικός είναι λιγότερο από 1ml ανά ημέρα, όμως αυτή η ελάχιστη ποσότητα πρέπει να καταναμηθεί κατάλληλα μέσα στο χρόνο μίας ημέρας.

Τυπική μορφή μικροαντλίας χωρίς βαλβίδες απεικονίζεται στο σχήμα 1-17. Πρόκειται ουσιαστικά για πολύ μικρής κλίμακας διάταξη, η οποία απαρτίζεται από δύο ακροφύσια (διαχύτες), ενώ ανάμεσά τους παρεμβάλλεται αντλητικός θάλαμος με εύκαμπτη παλλόμενη μεμβράνη (πιεζοηλεκτρικό διάφραγμα). Η αντλητική ικανότητα της μικροαντλίας οφείλεται στη διαφορετική αντίσταση που παρουσιάζεται στην είσοδο και την έξοδο της, λόγω των διαφορετικών ροϊκών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα εκατέρωθεν του αντλητικού θαλάμου. Δηλαδή, κατά την πάλμωση της μεμβράνης σε μία ημιπερίοδο το ένα ακροφύσιο λειτουργεί ως αποκλίνον, ενώ για το ίδιο χρονικό διάστημα το άλλο λειτουργεί ως συγκλίνον. Αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη διαφορετικών υδραυλικών αντιστάσεων που διαμορφώνουν διαφορά πίεσης στα άκρα της μικροαντλίας, η οποία κατευθύνει το ρευστό από τη μία πλευρά στην άλλη.

Συνήθως, τα συγκεκριμένα ακροφύσια γι' αυτές τις μικροαντλίες σχεδιάζονται με μικρή γωνία ανοίγματος περί των 5ο, [Stemme & Stemme, 1993]. Αυτό γίνεται για να αποφεύγεται αποκόλληση της ροής λόγω της ανάστροφης κλίσης της πίεσης, η οποία επιφέρει αυξημένες απώλειες μηχανικής ενέργειας. Συνεπώς, οι απώλειες στο αποκλίνον ακροφύσιο ελαχιστοποιούνται, [Olsson et al, 1999] και οι απώλειες στο συγκλίνον είναι μεγαλύτερες για κοινή μικρή γωνία ανοίγματος, [Yang et al, 2004]. Όταν διογκώνεται η μεμβράνη δημιουργείται υποπίεση στον αντλητικό θάλαμο, ο οποίος αυξάνει τον όγκο του με εισροή ρευστού. Η εισροή αυτή του ρευστού είναι μεγαλύτερη από την πλευρά της εισόδου αφού οι απώλειες του διαχύτη εκεί είναι μικρότερες, [Gerlach & Wurmus, 1995], ενώ μικρότερη ποσότητα εισέρχεται από την πλευρά της εξόδου λόγω μεγαλύτερων αντιστάσεων που συναντά η ροή λόγω ύπαρξης του συγκλίνοντος ακροφυσίου. Κατά τη συρρίκνωση της μεμβράνης αυξάνεται η πίεση στον αντλητικό θάλαμο, ο οποίος μειώνει τον όγκο του με εκροή ρευστού.



Σχήμα 2-8 (α) Κατάσταση άντλησης μικροαντλίας ενός θαλάμου μεμβράνης με αντιπαράλληλα ακροφύσια, [Pan et al, 2001]. (β) Αρχή λειτουργίας (συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου) μικροαντλίας δύο θαλάμων μεμβράνης σε παράλληλη διάταξη. Η διαφορά φάσης της διέγερσης κάθε μεμβράνης του αντίστοιχου θαλάμου είναι 180ο, [Olsson et al, 1999]. Διακρίνονται: (1) εύκαμπτη μεμβράνη, (2) είσοδος ρευστού, (3) έξοδος ρευστού, (4) δράση ακροφυσίου ως αποκλίνον, (5) δράση ακροφυσίου ως συγκλίνον, (6) μείωση όγκου θαλάμου, (7) αύξηση όγκου θαλάμου.

Αντίστοιχα, η εκροή αυτή του ρευστού είναι μεγαλύτερη από την πλευρά της εξόδου, [Olsson et al, 1999], διότι, εξαιτίας της κατεύθυνσής του, η έξοδος λειτουργεί ως αποκλίνον ακροφύσιο με τις μικρότερες απώλειες, (σχήμα 1-17). Το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται είναι η μη μηδενική μέση χρονικά παροχή που αποδίδεται από την πλευρά εισόδου προς την πλευρά εξόδου της αντλίας σε κάθε κύκλο διέγερσης και οφείλεται αποκλειστικά, τόσο στη γεωμετρία, όσο και στη διεύθυνση τοποθέτησης των ακροφυσίων της μικροαντλίας. Στο σχήμα 1-18(α) απεικονίζεται παραλλαγή της μικροαντλίας ενός θαλάμου μεμβράνης με αντιπαράλληλα ακροφύσια, για την οποία ισχύουν οι ίδιες αρχές με προηγουμένως.

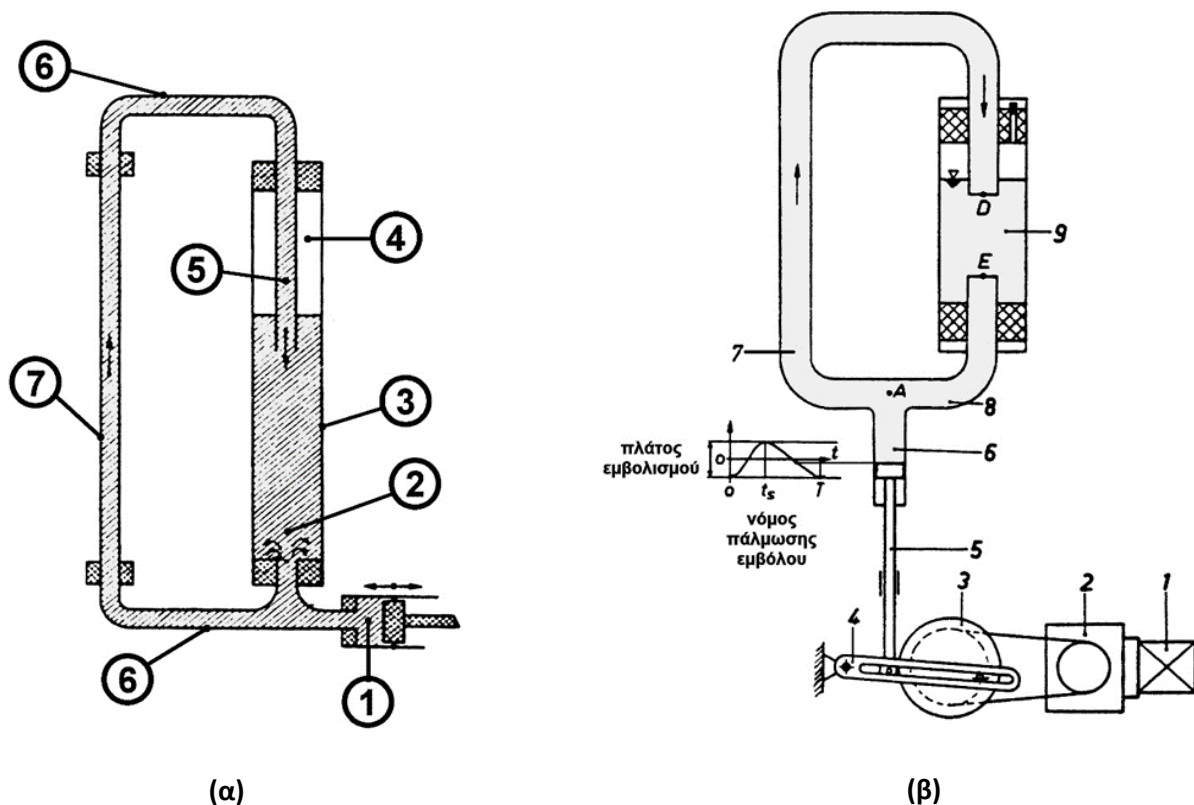
Οι μικροαντλίες ακροφυσίων χωρίς βαλβίδες προσδίδουν παλλόμενη περιοδική ροή, όπως όλες οι αντλίες θετικής μετατόπισης. Για τη μείωση της πάλμωσης αυτής, ώστε να επιτυγχάνεται πιο σταθερή ροή στο χρόνο οι μικροαντλίες συνήθως αποτελούνται από δύο παράλληλους θαλάμους, των οποίων τα διαφράγματα λειτουργούν με διαφορά φάσης 180ο, [σχήμα 1-18(β)]. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η διάταξη αυτή μειώνει σημαντικά τη πάλμωση της ροής και αυξάνει την απόδοση της μικροαντλίας, [Olsson, 1995]. Για τις ίδιες διαστάσεις και την ίδια εφαρμοζόμενη διέγερση σε κάθε θάλαμο ο αντλούμενος όγκος ρευστού είναι σχεδόν διπλάσιος από αυτόν που αντλείται με τη με τη μικροαντλία ενός θαλάμου.

Εκτός των μικροαντλιών θαλάμων με ακροφύσια έχουν αναπτυχθεί και αντίστοιχες που βασίζονται στην ασύμμετρη διέγερση ενός λεπτότοιχου εύκαμπτου αγωγού μικρής διαμέτρου (από 250 μm έως 2 mm), ο οποίος διεγείρεται ηλεκτρομαγνητικά. Μέσω σωρευτικών επιδράσεων των κυμάτων διάδοσης και ανάκλασης που ξεκινούν από την ασύμμετρη διέγερση αναπτύσσεται διαφορά πίεσης, η οποία προκαλεί κατευθυνόμενη ροή. Η ροή αυτή μπορεί να κατευθύνεται ανάλογα με τη συχνότητα και το πλάτος διέγερσης. Η τάξη μεγέθους των παροχών που αναπτύσσονται κυμαίνονται από 17 μl/min στον αγωγό διαμέτρου 250 μm, μέχρι 191 μl/min στον αντίστοιχο διαμέτρου 2 mm, [Rinderknecht et al, 2005].

Κεφάλαιο 3 Πειραματική και θεωρητική μελέτη του φαινομένου άντλησης χωρίς βαλβίδες

3.1 Πειραματική μελέτη άντλησης χωρίς βαλβίδες

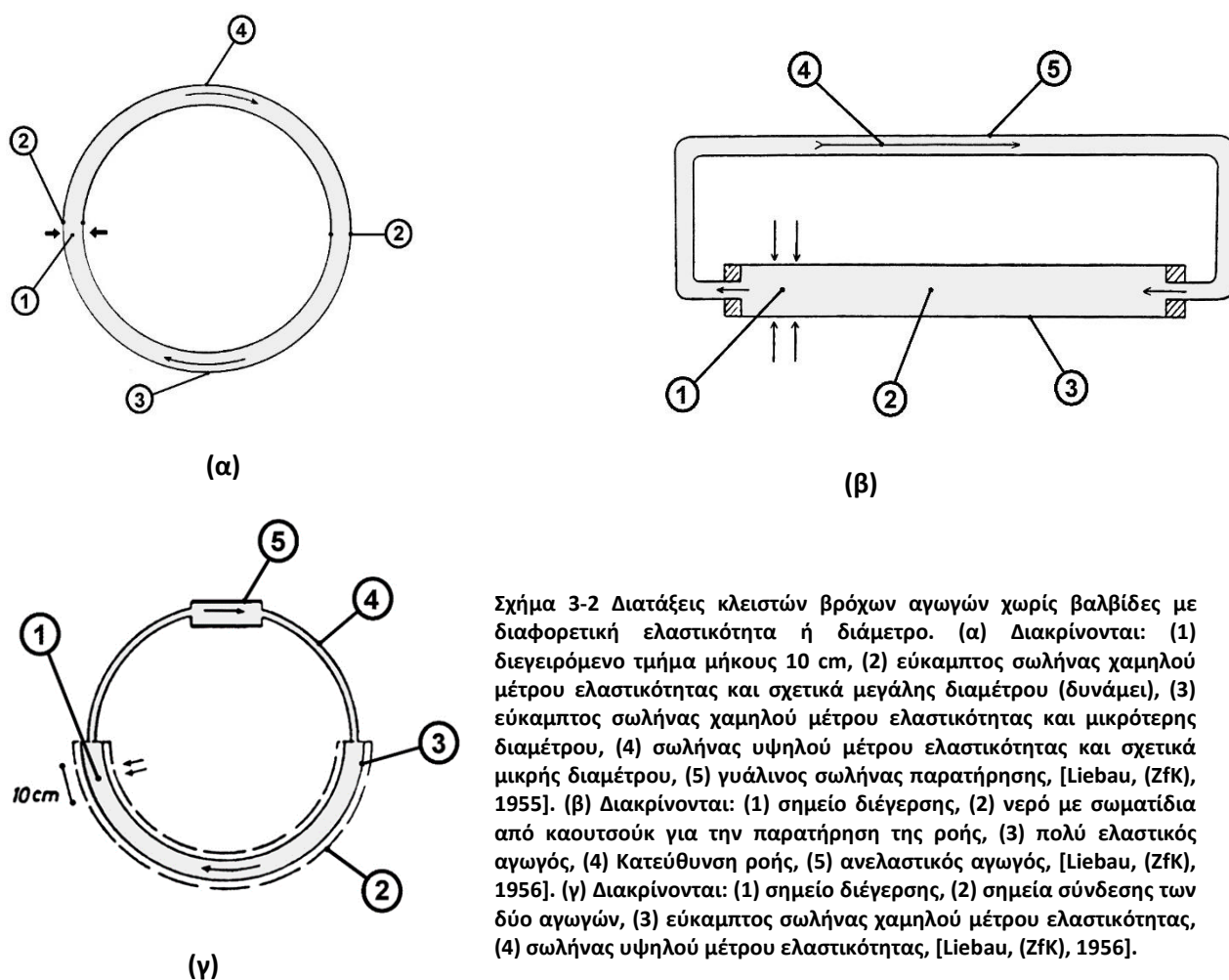
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική μελέτη του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες, μέσω πειραματικής διάταξης κλειστού βρόχου αγωγών. Παρόμοιες διατάξεις προτείνονται για πρώτη φορά από το Liebau, όπως αυτό του σχήματος 3-1(α), το οποίο αποτελείται από στενό σωλήνα μήκους 45 cm και διαμέτρου 1.5 cm, που συνδέεται με κυλινδρικό δοχείο ίδιου μήκους αλλά με ευρύτερη διατομή 8 cm. Στην ελεύθερη επιφάνεια του κλειστού μεγαλύτερου κυλινδρικού δοχείου υπάρχει στρώμα αέρα, ώστε να γίνεται προσομοίωση του φαινομένου της ελαστικότητας.



Σχήμα 3-1α) Σχηματική αναπαράσταση διάταξης αντλίας κλειστού βρόχου χωρίς βαλβίδες εμπνευσμένο από την ανθρώπινη αιματική κυκλοφορία. Διακρίνονται: (1) έμβολο με όγκο εμβολισμού 100 cm³, (2) νερό με σωματίδια από καουτσούκ για την παρατήρηση της ροής, (3) γυάλινο κυλινδρικό δοχείο μήκους 45 cm και διαμέτρου 8 cm, (4) στρώμα εγκλωβισμένου αέρα, (5) γυάλινος σωλήνας διαμέτρου 1.5 cm για την κατάθλιψη του νερού στο κυλινδρικό δοχείο, (6) γυάλινοι αγωγοί σύνδεσης μεταξύ του στενού σωλήνα και του μεγαλύτερου κυλινδρικού δοχείου, (7) γυάλινος σωλήνας μήκους 45 cm και διαμέτρου 1.5 cm, [Liebau, (N), 1955]. (β) Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης αντλίας κλειστού βρόχου χωρίς βαλβίδες. Διακρίνονται: (1) κινητήρας, (2) μειωτήρας στροφών, (3) στρόφαλος με χρονική περίοδο πλήρους περιστροφής T, (4) ζύγωθρο, (5) διωστήρας με έμβολο χρόνου συμπίεσης $t_s < T - t_s$, (6) κύλινδρος, (7) μακρύς σωλήνας AD, (8) βραχύς σωλήνας AE, (9) κλειστό δοχείο νερού, [Mahrenholtz, (Fil), 1963].

Η πάλμωση του ρευστού στο κύκλωμα επιτυγχάνεται με έμβολο εργαζόμενο περιοδικά, όμως η φάση της συμπίεσης είναι σύντομη και η φάση της οπισθοχώρησης αργή, ώστε να προσομοιάζεται όσο το δυνατόν ο ρυθμός λειτουργίας της ανθρώπινης αιματικής κυκλοφορίας, [Liebau, (N),1955].

Για την ποσοτική καταγραφή των αποτελεσμάτων της διάταξης του σχήματος 3-1(α) που εμπνεύστηκε ο Liebau, ο Mahrenholtz προτείνει την πειραματική διάταξη του σχήματος 3-1(β) και εκτελώντας σειρά πειραμάτων αποδεικνύει ποσοτικά την αντλητική ικανότητα του κλειστού κυκλώματος, [Mahrenholtz, (VdDGfK), 1963]. Ουσιαστικά ο Mahrenholtz είναι ο πρώτος που παρουσιάζει κάποια ποσοτικά πειραματικά αποτελέσματα για κλειστό βρόχο αγωγών με συμπαγή τοιχώματα, λαμβάνοντας όμως υπόψη την ενδοτικότητα μέσω εγκλωβισμού ποσότητας αέρα στο κύκλωμα. Παρόλη την καταγραφή κάποιων αποτελεσμάτων η μελέτη χαρακτηρίζεται ποιοτική τελικά, αφού διερευνήθηκε μόνο μία περίπτωση διέγερσης, καταγράφοντας την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού στο κλειστό δοχείο και τη μέση διαδρομή των σωματιδίων που περιέχει το ρευστό του κυκλώματος χωρίς να εξεταστούν διεξοδικά οι διάφορες παράμετροι επιρροής του φαινομένου.

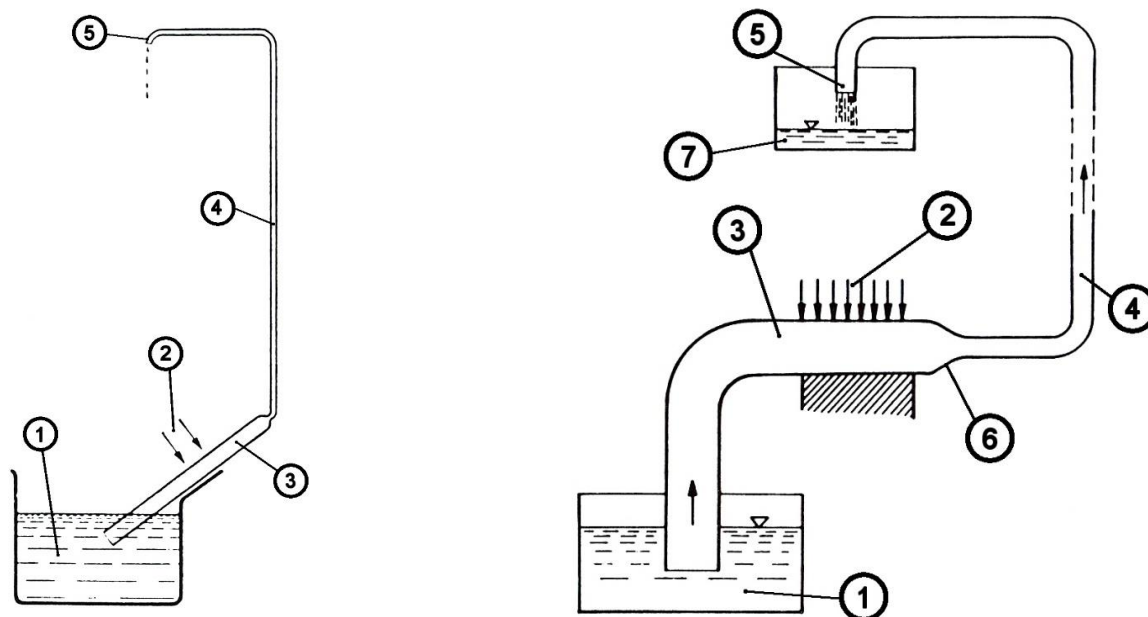


Εκτός από την παραπάνω διάταξη ο κλειστός βρόχος μπορεί να σχηματίζεται από τη σύνδεση των άκρων δύο αγωγών που έχουν, είτε διαφορετική ελαστικότητα, είτε διαφορετική

διάμετρο (σχήμα 3-2). Όταν το κύκλωμα γεμίζεται με νερό και συμπιέζεται περιοδικά σε τμήμα του πιο εύκαμπτου αγωγού κατευθυνόμενη ροή αναπτύσσεται υπό προϋποθέσεις. Τα βασικά στοιχεία κατά το Liebau που είναι απαραίτητα για τη σημαντική αντλητική ικανότητα του συστήματος είναι η ύπαρξη ασυμμετριών και η εφαρμογή της παλμικής διέγερσης να γίνεται με απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Η ασυμμετρία μπορεί να υφίσταται, τόσο στη γεωμετρία και την ελαστικότητα των δύο αγωγών, όσο και στη θέση εφαρμογής της διέγερσης του ελαστικού αγωγού, η οποία πρέπει να είναι απομακρυσμένη από το κέντρο του διεγερόμενου πιο ελαστικού αγωγού, [Liebau, (Zfk), 1955] και [Liebau, (Zfk), 1956].

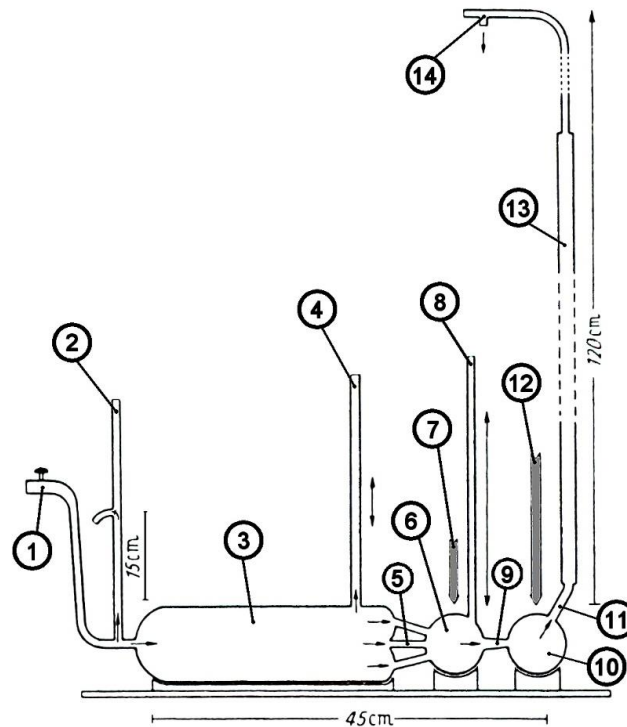
Εκτός από τις πειραματικές διατάξεις κλειστού βρόχου αγωγών ο Liebau υποδεικνύει και διατάξεις ανοικτού συστήματος αγωγών για την περιγραφή του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες. Αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα 3-3 και απαρτίζονται από μία δεξαμενή, έναν ελαστικόσωλήνα ο οποίος είναι βυθισμένος στη δεξαμενή και έναν κατακόρυφο αγωγό μικρότερης διαμέτρου. Η περιοδική συμπίεση και αποσυμπίεση του μεγαλύτερης διαμέτρου εύκαμπτου αγωγού προκαλεί σταδιακά αναρρόφηση ρευστού από τη δεξαμενή που είναι βυθισμένος με αποτέλεσμα το ρευστό να ανέρχεται μέχρι την έξοδό του από το ανοιχτό άκρο του αγωγού μικρότερης διαμέτρου, [Liebau, (ZfdGEM), 1954] και [Liebau, (N), 1954].

Επιπλέον ο Liebau παρατηρεί κλινικά ότι υπάρχουν ηλικιωμένοι άνθρωποι που επιβιώνουν με έντονα σκληρυμένες καρδιακές βαλβίδες, οι οποίες παραμένουν σχεδόν ακίνητες και δεν λειτουργούν σωστά. Έτσι υποθέτει ότι η φυσιολογική κατάσταση της κυκλοφορίας διατηρείται, τόσο εξαιτίας των διαφορετικών ελαστικών ιδιοτήτων των διαφόρων τμημάτων της καρδιάς, όσο και των διαφορετικών γεωμετριών των αγγείων του κυκλοφορικού συστήματος. Υπό αυτό το σκεπτικό και έχοντας αποδείξει πειραματικά την ισχύ του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες παρουσιάζει την πειραματική διάταξη του σχήματος 3-4, στην οποία προσομοιάζεται το αριστερό τμήμα της καρδιάς με την πνευμονική και αρτηριακή πλευρά [Liebau, (ZfdGEM), 1955].



Σχήμα 3-3 Πειραματικές διατάξεις ανοικτού συστήματος αγωγών για την περιγραφή του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες. Διακρίνονται: (1) δεξαμενή ρευστού αναρρόφησης, (2) θέση συμπίεσης-αποσυμπίεσης εύκαμπτου αγωγού, (3) εύκαμπτος ελαστικός αγωγός μήκους 400 mm και διαμέτρου 10mm, (4) ελαστικός αγωγός (α) μήκους 1000mm και διαμέτρου 2mm και (β) μήκους 1600mm και διαμέτρου 2.5mm, (5) εκροή ρευστού, (6) κωνικό συνδετικό τμήμα, (7) δεξαμενή ρευστού κατάθλιψης, (α) [Liebau, (ZfdGEM), 1954] και (β) [Liebau, (N), 1954].

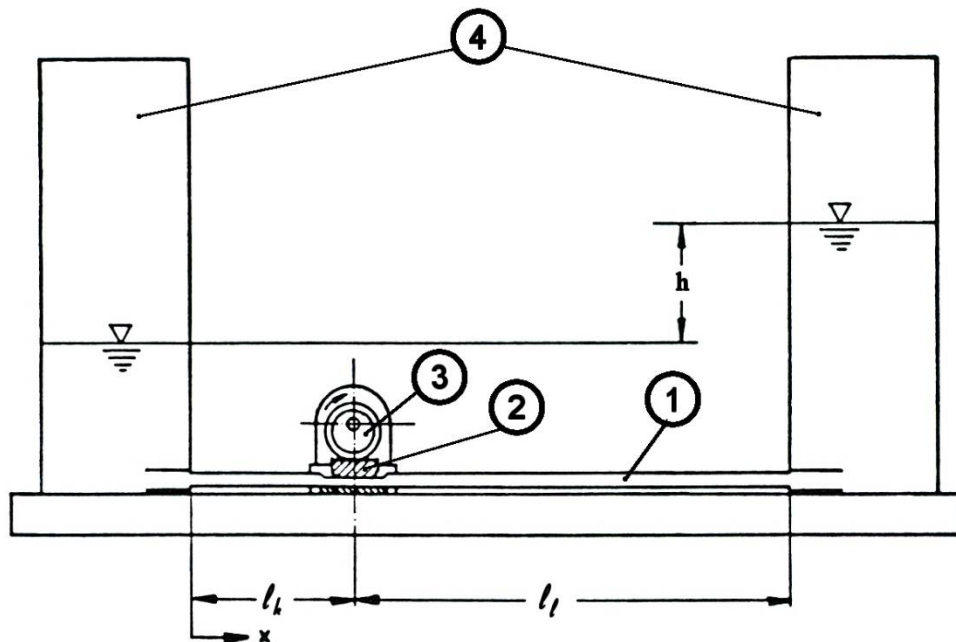
Η πρώτη ουσιαστικά ποσοτική καταγραφή του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες μέσω εύκαμπτων αγωγών γίνεται μέσω των πειραματικών μελετών του Bredow για ανοιχτό όμως σύστημα αγωγών, [Bredow, 1968]. Διευρύνοντας τις προτάσεις Liebau χρησιμοποιεί τη διάταξη του σχήματος 3-5 για να καταγράψει το φαινόμενο για εύκαμπτο αγωγό τα άκρα του οποίου συνδέονται με δύο όμοια δοχεία και μπορεί να διεγείρεται σε διάφορες θέσεις.



Σχήμα 3-4 Πειραματική διάταξη ανοιχτού συστήματος αγωγών χωρίς βαλβίδες για την προσομοίωση της κυκλοφορίας του αίματος στην αριστερή πλευρά της καρδιάς. Διακρίνονται: (1) εισροή ρευστού μέσω κάνουλας (πνευμονικές αρτηρίες), (2) πίεση εισόδου πειραματικής διάταξης στα 15cmH₂O, (3) δοχείο (όγκος αγγειακού συστήματος πνευμόνων), (4) μέτρηση πίεσης (πνευμονικών φλεβών), (5) τρεις σωλήνες διαμέτρου 0.8cm (πνευμονικές φλέβες), (6) ελαστικός θάλαμος (αριστερός κόλπος), (7) επιβολή πίεσης επί του ελαστικού θαλάμου (αριστερού κόλπου), (8) μέτρηση πίεσης (αριστερού κόλπου), (9) συνδετικό τμήμα αγωγού μήκους 0.5cm και διαμέτρου 1.2cm (μυτροειδής βαλβίδα), (10) ελαστικός θάλαμος (αριστερή κοιλία), (11) συνδετικό τμήμα αγωγού διαμέτρου 0.8cm (αορτική βαλβίδα), (12) επιβολή πίεσης επί του ελαστικού θαλάμου (αριστερής κοιλίας), (13) κατακόρυφος αγωγός (αρτηριακή πλευρά), (14) εκροή ρευστού, [Liebau, (ZfdGEM), 1955].

Οι παράμετροι επιρροής του φαινομένου που εξετάζονται είναι η συχνότητα διέγερσης του εύκαμπτου αγωγού, η χρονική ασυμμετρία της συμπίεσης-αποσυμπίεσης, το μήκος του πέλματος διέγερσης, η θέση της διέγερσης επί του εύκαμπτου αγωγού, το υλικό του ελαστικού σωλήνα, η διαμήκης αλλά και η περιφερειακή προένταση του εύκαμπτου αγωγού, το συνολικό μήκος του εύκαμπτου αγωγού, το ύψος του ρευστού στα δοχεία που καθορίζει την υδροστατική πίεση στα άκρα του εύκαμπτου αγωγού, το πλάτος διέγερσης, τα χαρακτηριστικά του ρευστού (νευτώνειο και μη) και οι συμμετρικές αντιστάσεις (μέσω στενώσεων) στα άκρα του εύκαμπτου αγωγού. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων προκύπτει ότι, όσο ασύμμετρη είναι η διέγερση, τόσο μεγαλύτερη είναι η υψομετρική διαφορά του ρευστού στα δοχεία, ενώ σε όλες τις περιπτώσεις η κατεύθυνση της ροής αντιστρέφεται περίπου στις ίδιες συχνότητες. Η αξονική προένταση του εύκαμπτου αγωγού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Για μικρότερα μήκη εύκαμπτου αγωγού οι καμπύλες του

ανοιγμένου ύψους της διαφοράς στάθμης των δοχείων συναρτήσει της συχνότητας μετατοπίζονται προς μεγαλύτερες συχνότητες, ενώ αυξάνει η μέγιστη τιμή τους. Με αύξηση της αρχικής υδροστατικής πίεσης οι καμπύλες μετατοπίζονται προς μεγαλύτερες συχνότητες, ενώ η μέγιστη τιμή τους αρχικά αυξάνει και στη συνέχεια ελαττώνεται. Αύξηση του μήκους του πέλματος διέγερσης οδηγεί σε εμφάνιση του μέγιστου σε μικρότερη συχνότητα. Μικρότερα βάθη συμπίεσης οδηγούν σε μικρότερες μέγιστες τιμές και μετακίνηση των καμπυλών σε μεγαλύτερες συχνότητες.



Σχήμα 3-5 Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης ανοικτού συστήματος εύκαμπτου αγωγού για την καταγραφή του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες. Διακρίνονται: (1) εύκαμπτος αγωγός, (2) πέλμα συμπίεσης-αποσυμπίεσης εύκαμπτου αγωγού, (3) έκκεντρο κινούμενο επί του πέλματος από ηλεκτροκινητήρα, (4) συγκοινωνούντα δοχεία μέσω του εύκαμπτου αγωγού, [Bredow, 1968].

Επιπλέον, η μεταβολή της χρονικής συνάρτησης της διατομής του εύκαμπτου αγωγού στη διέγερση προκαλεί μεταβολή και στις καμπύλες ανοιγμένου ύψους-συχνότητας, ενώ η χρήση μεθυλοσελουλόζης (methylcellulose), ρευστού με ρεολογικά χαρακτηριστικά ανάλογα του αίματος αντί για νερό, δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, [Bredow, (VdDGfK), 1968].

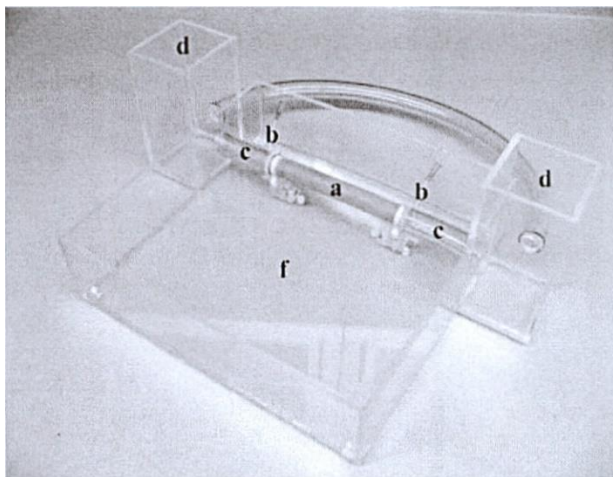
Στη διάταξη του πειράματος Bredow καλύτερη αντλητική ικανότητα μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας κατάλληλα συγχρονισμένα δύο περιοδικές διεγέρσεις εν σειρά στον ίδιο εύκαμπτο αγωγό, εκ των οποίων η μία να φράσσει μερικώς τον εύκαμπτο αγωγό και η άλλη πλήρως (deep occlusion), [Mahrenholtz & Bredow, 1970].

Για σχεδόν 35 χρόνια το φαινόμενο της άντλησης χωρίς βαλβίδες μέσα από διεγείρομενους εύκαμπτους αγωγούς δεν μελετάται πειραματικά παρά μόνο θεωρητικά, όπως αναδεικνύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Έτσι οι πρόσφατες πειραματικές μελέτες ξεκινούν το 2004 με μία πειραματική διάταξη κλειστού βρόχου αγωγών [Bovard et al, 2004], όπως του σχήματος 3-2(α) που αρχικά εμφανίζεται από τον Liebau. Πρόκειται για την πρώτη πειραματική μελέτη η οποία ποσοτικοποιεί το μέγεθος της μέσης χρονικά παροχής για κλειστό βρόχο αγωγών για δύο μόνο παραμέτρους του συστήματος, τη συχνότητα και τη θέση εφαρμογής της διέγερσης. Παρόλο που το πείραμα δεν είναι

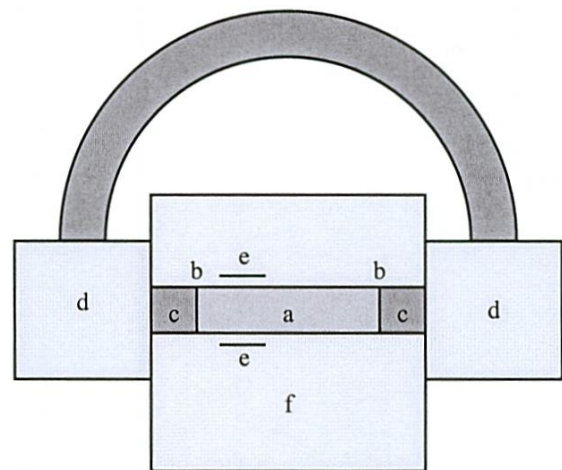
εκτενές ως προς τις παραμέτρους, όπως αυτό του Bredow για ανοικτό σύστημα, αναδεικνύεται η αντλητική ικανότητα του συστήματος μέσα σε κάποια όρια σφάλματος, λόγω του ότι η μέση χρονικά παροχή υπολογίζεται μέσω στιγμιότυπων εικόνων της κίνησης ελαφρών σωματιών, τα οποία βρίσκονται εντός του βρόχου για το σκοπό αυτό.

Την επόμενη χρονιά (2005) προτείνεται η πειραματική διάταξη του σχήματος 3-6, η οποία είναι παρόμοια με αυτή του Bredow (σχήμα 3-5), με τη διαφορά ότι τα δύο δοχεία που συνδέει ο εύκαμπτος αγωγός συνδέονται και με άλλο άκαμπτο αγωγό σε κάποιο ύψος, [Hickerson et al, 2005].

Κατά αυτόν τον τρόπο η τυχούσα επιπλέον παρεχόμενη ποσότητα ρευστού του ενός δοχείου μεταβιβάζεται στο άλλο μέσω αυτού του άκαμπτου αγωγού και πετυχαίνεται όμοια και σταθερή υδροστατική πίεση στα δύο άκρα του εύκαμπτου αγωγού αντίστοιχα. Παρόλο που κλείνει ο βρόχος των αγωγών η διάταξη δε θεωρείται κλειστός βρόχος, αλλά σύστημα αγωγών ανοικτού τύπου, αφού τα δύο δοχεία εδώ μειώνουν την ορμή του ρευστού που εξέρχεται από τον εύκαμπτο αγωγό. Έτσι η παροχή εξαρτάται τελικά κυρίως από την αναπτυσσόμενη πίεση κατά μήκος και στα άκρα του εύκαμπτου αγωγού και όχι από τα έντονα αδρανειακά φαινόμενα του κλειστού βρόχου.



(α)



(β)

Σχήμα 3-6 (α) Πειραματική διάταξη ανοικτού συστήματος εύκαμπτου αγωγού για την καταγραφή του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες και (β) σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης σε κάτοψη. Διακρίνονται: (α) εύκαμπτος αγωγός από latex μήκους 6 in, εσωτερικής διαμέτρου $\frac{3}{8}$ in και πάχους $\frac{1}{32}$ in, (b) σημεία μέτρησης πίεσης, (c) άκαμπτοι σωλήνες μήκους 3 in, εσωτερικής διαμέτρου $\frac{3}{8}$ in και πάχους $\frac{1}{8}$ in (θέσεις μέτρησης παροχής), (d) συγκοινωνούντα δοχεία μέσω του εύκαμπτου, αλλά και άκαμπτου καμπύλου αγωγού μήκους 6 in, διαμέτρου $\frac{3}{8}$ in και πάχους 0.002 in, (e) θέση διέγερσης, (f) δευτερεύον δοχείο πληρωμένο με ρευστό, ώστε να επιτυγχάνεται η απεικόνιση της αξονικής και ακτινικής μετατόπισης του τοιχώματος με υπέρηχους, [Hickerson, 2005].

Οι παράμετροι επιρροής του φαινομένου που εξετάζονται στην πειραματική μελέτη της Hickerson είναι η συχνότητα διέγερσης του εύκαμπτου αγωγού, η μικρή χρονική ασυμμετρία της συμπίεσης-αποσυμπίεσης, το μήκος του πέλματος διέγερσης, η θέση της διέγερσης επί του εύκαμπτου αγωγού, το υλικό του ελαστικού σωλήνα, το ύψος του ρευστού στα δοχεία που καθορίζει την υδροστατική πίεση στα άκρα του εύκαμπτου αγωγού, τα χαρακτηριστικά του ρευστού (διαλύματα γλυκερόλης με διαφορετικές τιμές ιξώδους) και η αντίσταση (μέσω στενώσεων).

Από τη διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων προκύπτει ότι, η μικρή χρονική ασυμμετρία επιδρά στο μέγεθος μόνο της μέσης χρονικά παροχής και όχι στην κατεύθυνσή της, αφού η ροή αντιστρέφεται περίπου στις ίδιες συχνότητες. Με αύξηση της αρχικής υδροστατικής πίεσης οι καμπύλες της μέσης χρονικά παροχής με τη συχνότητα μετατοπίζονται προς μεγαλύτερες συχνότητες, ενώ η μέγιστη τιμή τους ελαττώνεται. Αύξηση του μήκους του πέλματος διέγερσης δεν οδηγεί σε κάποια εμφανή τάση για το πώς επηρεάζεται η μέση χρονικά παροχή με τη συχνότητα. Καθώς η θέση διέγερσης μετατοπίζεται προς το κέντρο οι καμπύλες μετατοπίζονται προς μεγαλύτερες συχνότητες, ενώ η μέγιστη τιμή τους ελαττώνεται. Με την αύξηση της αντίστασης στο σύστημα αυξάνεται η πίεση και μειώνεται η παροχή, αλλά διατηρούνται τα μέγιστα στις ίδιες τιμές συχνότητων. Με τη μεταβολή του ιξώδους του ρευστού δεν παρατηρείται σημαντική επιρροή στις καμπύλες της μέσης παροχής με την συχνότητα, [Hickerson,2005].

Η έλλειψη πειραματικών μελετών σε σχέση με τις θεωρητικές που αναδεικνύεται στο επόμενο κεφάλαιο φανερώνει τη δυσκολία του εγχειρήματος για την κατασκευή και εκτέλεση ενός τέτοιου πειράματος. Σε όλη τη βιβλιογραφία ως τώρα οι πιο εκτενείς και αξιόπιστες πειραματικές μελέτες είναι κυρίως του Bredow (1968) και κατόπιν της Hickerson (2005), που αναφέρονται σε ανοικτά συστήματα αγωγών. Για κλειστούς βρόχους αγωγών το πείραμα Bonard (2004) δεν παρουσιάζει εκτενή περιγραφή και μελέτη των πολλών παραμέτρων επιρροής του φαινομένου, ενώ τα λιγοστά αποτελέσματα που παρουσιάζονται περιέχουν υψηλό σφάλμα. Εισαγωγή σημαντικών σφαλμάτων στις μετρήσεις παρουσιάζει ακόμη μία πειραματική μελέτη ανοικτού συστήματος αγωγών, η οποία μοιάζει με αυτή του πειράματος Hickerson (σχήμα 3-6) και εκπονήθηκε στα πλαίσια πρακτικής εξάσκησης φοιτητή [Schuit, 2007]. Η μεγαλύτερη δυσκολία που συναντάται σε ένα τέτοιο πείραμα, η οποία εισαγάγει απαγορευτικά σφάλματα, είναι η επίτευξη συμμετρικής χωρικά συμπίεσης-αποσυμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού από το πέλμα συμπίεσης σε κάθε σημείο του διεγερόμενου τμήματος του αγωγού. Αν δεν επιτευχθεί η χωρικά συμμετρική διέγερση, υπαγορεύεται εξ αρχής μία κατευθυνόμενη ροή του ρευστού προκαλούμενη από την ίδια τη διέγερση. Η κατεύθυνση αυτή της ροής μπορεί να αλλάξει με το χρόνο και να δίνει διαφορετικά αποτελέσματα αν ο μηχανισμός διέγερσης δεν είναι ακριβής και ευθυγραμμισμένος. Επίσης, οι ανεπιθύμητες με τυχαίο τρόπο ταλαντώσεις του κλειστού κυκλώματος στις υψηλές συχνότητες προκαλούν δευτερεύουσες ροές του ρευστού αλλά και του τοιχώματος του σωλήνα με αποτέλεσμα την εισαγωγή σημαντικών σφαλμάτων.

3.2 Θεωρητικά και μαθηματικά μοντέλα περιγραφής του φαινομένου άντλησης χωρίς βαλβίδες

Όλες οι προσπάθειες μετά τις μελέτες του ιατρού Liebau για την ανάλυση του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες, επικεντρώνονται στον προσδιορισμό και τη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την εξέλιξη του φαινομένου και τελικά οδηγούν στη θεωρητική και μαθηματική θεμελίωσή του. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν αρκετά θεωρητικά-μαθηματικά μοντέλα, εκτός των πειραματικών διατάξεων οι οποίες αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Τα θεωρητικά-μαθηματικά μοντέλα δεν έτυχαν μεγάλης προσοχής, επειδή πιθανόν δεν υπήρχε τεχνολογική ανάγκη για αντλίες χωρίς βαλβίδες, οι οποίες γενικά είναι λιγότερο αποδοτικές από τις συμβατικές αντλίες με βαλβίδες. Αξίζει ωστόσο να γίνει αναφορά σε αυτά δείχνοντας την εξέλιξη του φαινομένου από θεωρητικής πλευράς.

Οι προσεγγίσεις που έχουν γίνει μέχρι σήμερα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων, διατυπώνοντας μία αναλογία, για παράδειγμα ηλεκτρική, καθορίζοντας μακροσκοπικά την απόκριση του φυσικού φαινομένου του συστήματος. Η δεύτερη περιλαμβάνει υπολογιστικά μοντέλα μέσω των οποίων εφαρμόζονται οι

φυσικοί νόμοι των ρευστών και των στερεών σε πεπερασμένα τμήματα του χώρου, καθορίζοντας σε μικρά υπολογιστικά βήματα την απόκριση στο χώρο και το χρόνο του φυσικού φαινομένου του συστήματος. Τα αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων είναι πιο λεπτομερή σε σχέση με αυτά των συγκεντρωμένων παραμέτρων που εκτιμούν περισσότερο το κυρίαρχο φαινόμενο που υφίσταται για το δεδομένο σύστημα.

Πριν την ανάπτυξη των υπολογιστών τα μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων διαμορφώνονται μέσω ηλεκτρικών κυκλωμάτων που αποκρίνονται όπως το ρευστομηχανικό σύστημα. Το πρώτο μοντέλο αυτού του τύπου για το φαινόμενο της άντλησης χωρίς βαλβίδες προτείνεται από τον Mahrenholtz για να προσομοιάσει την πειραματική διάταξη του σχήματος 3-1(β), αποδεικνύοντας και θεωρητικά κατά μία έννοια την αντλητική ικανότητα του κλειστού κυκλώματος, [Mahrenholtz, (*Fil*), 1963]. Ακριβώς το ίδιο κάνει και ο Bredow με ένα ηλεκτρικό ανάλογο για να προσομοιάσει τη δική του πειραματική διάταξη (σχήμα 3-5) και να οδηγηθεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα ποιοτικής σύγκρισης με τα πειραματικά, [Bredow, 1968]. Τόσο ο Mahrenholtz, όσο και ο Bredow διατυπώνουν και τις κυρίαρχες ρευστομηχανικές εξισώσεις του φαινομένου σε μία διάσταση, τις οποίες γραμμικοποιούν για να επιτύχουν απλοποιημένες λύσεις.

Ιδιαίτερα ο Mahrenholtz τονίζει τη σημασία της κατάρρευσης (collapsing) των τοιχωμάτων του εύκαμπτου αγωγού, υποθέτοντας ότι το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί ως ταλαντούμενο σύστημα πολλών βαθμών ελευθερίας, [Mahrenholtz, 1974]. Με αφορμή την πτώση πίεσης στη συστηματική κυκλοφορία, που προκαλείται από τους ιστούς και την επακόλουθη φλεβική ροή που δημιουργείται, ο Mahrenholtz προτείνει δύο μοντέλα πτώσης πίεσης, του Krämer και των Pestel & Ranft, θεωρώντας ότι ένα διακλαδιζόμενο σύστημα Poiseuille μπορεί να καλύψει το φυσιολογικό πεδίο πίεσης, και καταλήγει ότι για μέση παροχή αίματος 5 l/min, η πτώση πίεσης από τα αρτηρίδια στα φλεβίδια ανήκει στο διάστημα μεταξύ 25 και 130 Torr. Η μεγάλη αυτή διαφορά πίεσης επιβεβαίωσε την ιδέα ενός βοηθητικού αντλητικού μηχανισμού κατά τον οποίο ένα αρτηρίδιο συμπιέζει ένα γειτονικό φλεβίδιο και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες είναι δυνατόν να δημιουργηθεί κατευθυνόμενη ροή. Επιπλέον, περιγράφοντας ρευστομηχανικά με μαθηματικά σε μία διάσταση τη ροή στη πειραματική διάταξη του Bredow, συμπεραίνει ότι μόνο η μη γραμμική περιγραφή του συστήματος των εξισώσεων ροής μπορεί να οδηγήσει σε ικανοποιητική αντλητική ικανότητα, [Mahrenholtz, (*I-A*), 1974].

Δύο χρόνια μετά ο Rath καταστρώνει μονοδιάστατο ρευστομηχανικό μοντέλο του πειράματος Bredow και είναι ο πρώτος που καταφέρνει να το επιλύσει αριθμητικά μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι οποίοι έχουν εξελιχθεί ικανοποιητικά ώστε να ανταποκρίνονται στην αριθμητική επίλυση τέτοιων μοντέλων, [Rath, 1976]. Η μαθηματική διατύπωση του Rath περιγράφει την εγκάρσια διατομή του εύκαμπτου αγωγού ως συνάρτηση της εσωτερικής του πίεσης που αναπτύσσεται λόγω της ροής του ρευστού. Η επίλυση των εξισώσεων συνέχειας και ορμής για μη μόνιμη ροή, όταν συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται ο εύκαμπτος αγωγός, γίνεται μέσω κατάλληλων αριθμητικών σχημάτων πεπερασμένων διαφορών. Η λύση φανερώνει, τόσο την επίδραση των ελαστικών τοιχωμάτων του εύκαμπτου αγωγού στη μέση χρονικά παροχή, όσο και την έντονη επιρροή των μη γραμμικών όρων των εξισώσεων του μοντέλου, [Rath, 1977] και [Rath & Teipel, 1978].

Ο Thomann είναι ο πρώτος ερευνητής που επιλύει αριθμητικά τον κλειστό βρόχο αγωγών, όπως περιγράφεται από τον Liebau [σχήμα 3-2(γ)]. Επιλέγει τορροειδές σχήμα για τον κλειστό βρόχο των αγωγών που απαρτίζεται από έναν εύκαμπτο και έναν άκαμπτο τμήμα. Η ροή δημιουργείται μέσω περιοδικής συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού κοντά στην ένωση των δύο τμημάτων. Επιλύονται οι μονοδιάστατες εξισώσεις με τη μέθοδο των χαρακτηριστικών για μη συνεκτική ροή ρευστού εντός του βρόχου. Διαπιστώνεται ότι ο χρόνος συμπίεσης, στον οποίο μικραίνει η διατομή του αγωγού, καθορίζει το εύρος των ταλαντώσεων του ρευστού. Εφόσον ο χρόνος αυτός είναι μικρός, η τελική ταχύτητα που αναπτύσσεται στο ρευστό εξαρτάται από τον χρόνο αποσυμπίεσης, [Thomann, 1978]. Η λύση αυτή είναι σχετικά απλή και βασίζεται σε πολλές παραδοχές, με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν το πρόβλημα.

Για μία εικοσαετία μετά το 1978 το φαινόμενο παύει να μελετάται και θεωρητικώς, με εξαίρεση μία εργασία που προτείνει ακόμη ένα μονοδιάστατο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων για ροή ρευστού εντός εύκαμπτου αγωγού που υπόκειται σε εξωτερική διέγερση μικρού πλάτους, [Kireyeva & Regier, 1984]. Σε αυτή την εργασία επισημαίνεται ο κυρίαρχος ρόλος που παίζουν τα αναπτυσσόμενα ενεργητικά και παθητικά κύματα διάδοσης της κίνησης στον εύκαμπτο αγωγό. Ωστόσο, την τελευταία δεκαετία το ενδιαφέρον για την άντληση χωρίς βαλβίδες ανανεώθηκε, εξαιτίας νέων παρατηρήσεων σχετικά με την ύπαρξη μηχανισμών που εκμεταλλεύονται το φαινόμενο αυτό, τόσο στον ανθρώπινο οργανισμό, όσο και σε άλλους οργανισμούς. Επίσης, άρχισαν να διαφαίνονται και τεχνολογικές εφαρμογές του φαινομένου Liebau, [Chang, 2006] και [Chang, 2007], οπότε χρειάζεται να αποσαφηνιστεί περαιτέρω ποι οι παράγοντες και πως επηρεάζουν το μηχανισμό του.

Έτσι το 1998 επανέρχεται στο προσκήνιο το πρόβλημα της άντλησης χωρίς βαλβίδες με ένα γραμμικό ηλεκτρικό ανάλογο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων, στο οποίο εισάγεται επιπλέον μία βαλβίδα, που είναι κρίσιμη για την αντλητική ικανότητα ανάλογα με το που τοποθετείται στο κλειστό κύκλωμα, [Mosser et al, 1998]. Εκτός αυτού του μοντέλου κατασκευάζεται επιπλέον και διάταξη κλειστού κυκλώματος δύο αγωγών εύκαμπτου και άκαμπτου κατά το σχήμα 3-2(γ), η οποία πληρώνεται με νερό και συμπιέζεται με τα δάχτυλα σε τρία διαφορετικά σημεία του εύκαμπτου τμήματος, ώστε να δειχθεί η σημασία της ασυμμετρίας για τη δημιουργία ομοιοκατευθυνόμενης ροής.

Το 2001 γίνεται η πρώτη απόπειρα μοντελοποίησης του φαινομένου σε δύο διαστάσεις με τη Μέθοδο Απορρόφησης Συνόρου (Immersed Boundary Method), [Jung & Peskin, 2001]. Επιλύονται οι εξισώσεις Euler σε δύο διαστάσεις για ροή ρευστού σε κλειστό σύστημα εύκαμπτου και άκαμπτου σωλήνα, εφαρμόζοντας την παραπάνω αριθμητική μεθοδολογία, η οποία είναι όμως πρώτης τάξης ακριβείας, με οριακές συνθήκες περιοδικά μεταβαλλόμενες. Από τους αριθμητικούς υπολογισμούς προκύπτει ότι υπάρχει μη μηδενική μέση χρονικά παροχή, κρίσιμος παράγοντας για το μέγεθος και την κατεύθυνσή της οποίας είναι η συχνότητα της διέγερσης.

Σε αντίθεση με τα συμπεράσματα, τόσο του Mahrenholtz, όσο και του Rath, οι Borzi και Propst αποδεικνύουν ότι η μη γραμμικότητα δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση στις εξισώσεις του μονοδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης του πειράματος Bredow, ώστε να εκδηλωθεί σημαντικά η αντλητική ικανότητα του συστήματος, [Borzi & Propst, 2003].

Το 2004 παρουσιάζονται άλλα δύο μοντέλα περιγραφής του φαινομένου, ένα ηλεκτρικό ανάλογο και ένα μαθηματικό, [Kenner, 2004]. Τα μοντέλα επιχειρούν να προσομοιάσουν το πείραμα Bredow και αναδεικνύουν τη συμμετοχή τριών παραγόντων επιρροής, της αδράνειας του ρευστού, της αντίστασης του ρευστού είτε μέσω του ιξώδους είτε μέσω μίας βαλβίδας και της ενδοτικότητας του εύκαμπτου σωλήνα. Το πώς συνεργάζονται αυτοί οι τρεις παράγοντες για την απόδοση δεδομένης κατεύθυνσης στη ροή είναι άγνωστο.

Για το κλειστό κύκλωμα αγωγών του σχήματος 3-2(γ) παρουσιάζεται μία ακόμη αριθμητική επίλυση του μη γραμμικού μονοδιάστατου ρευστοδυναμικού μοντέλου [Ottesen, 2003]. Όμως τα αποτελέσματά του δεν παρουσιάζουν κάποια συστηματικότητα και η μεταβολή της μέσης χρονικά παροχής με τη συχνότητα είναι χαοτική. Αυτό οφείλεται τόσο στη λανθασμένη επιλογή αριθμητικής μεθοδολογίας για την επίλυση του μοντέλου, αλλά κυρίως στην ελλιπή μοντελοποίηση των ιξωδών όρων της μονοδιάστατης εξίσωσης Navier-Stokes. Από το αντίστοιχο πείραμα που εκτελέστηκε στην ίδια εργασία σε κλειστό κύκλωμα αγωγών παρουσιάζονται μόνο δύο μετρήσεις της μέσης χρονικά παροχής με τη συχνότητα προφανώς για λόγους μεγάλης απόκλισης της προσομοίωσης του πειράματος από το μοντέλο.

Τον επόμενο χρόνο γίνεται προσπάθεια εύρεσης αναλυτικής λύσης για έναν ευθύγραμμο εύκαμπτο αγωγό που διεγείρεται ασύμμετρα, αλλά τα αποκρινόμενα τμήματά του εκατέρωθεν της διέγερσης θεωρούνται άκαμπτα. Το διεγερόμενο εύκαμπτο τμήμα είναι σχετικά μικρό και δε βρίσκεται, ούτε σε κάποιο από τα άκρα, ούτε στο μέσο του σωλήνα. Γίνεται χρήση της εξίσωσης συνέχειας και της μονοδιάστατης εξίσωσης Euler χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ιξώδεις όροι, [Auerbach et al, 2004]. Με κατάλληλες οριακές συνθήκες η αναλυτική λύση που προκύπτει

αποδίδει κάποια πεπερασμένη μη μηδενική παροχή για το σύστημα, αλλά είναι πολύ μικρή σε σχέση με σχετικά γνωστά πειράματα μέσω άκαμπτων αγωγών, [Takagi & Saijo, 1983] και [Takagi & Takahashi, 1985]. Προφανώς η απόκλιση οφείλεται στις περιοριστικές υποθέσεις που έχουν γίνει στο μοντέλο για την εξαγωγή αναλυτικής λύσης.

Στα πλαίσια της προσομοίωσης του πειράματος Hickerson έχει προταθεί ένα ακόμη μοντέλο, το οποίο δεν ανήκει, ούτε στην κατηγορία των ηλεκτρικών αναλόγων συγκεντρωμένων παραμέτρων, ούτε σε αυτή των υπολογιστικών που εφαρμόζουν ρευστομηχανικούς νόμους. Το μοντέλο αυτό προσομοιάζει ουσιαστικά τις κυματικές ιδιότητες που απορρέουν από τέτοιου είδους άντληση χωρίς βαλβίδες. Χρησιμοποιεί τις τυπικές διαδόσεις και ανακλάσεις των κυμάτων οι οποίες μπορεί να αποτελούν το μηχανισμό που αναπτύσσει διαφορά πίεσης κατά μήκος του εύκαμπτου αγωγού. Τα αποτελέσματά αυτού του μοντέλου διατηρούν τα περισσότερα χαρακτηριστικά του φαινομένου που παρουσιάζονται στο πείραμα, όμως υποεκτιμούν τα μετρούμενα μεγέθη, [Hickerson & Gharib, 2006].

Όπως διαπιστώνεται όλα τα μοντέλα που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα για την προσομοίωση του φαινομένου είναι μονοδιάστατα με εξαίρεση ενός, που αναφέρεται σε δύο διαστάσεις, [Jung & Peskin, 2001] και εκτός του ότι είναι χαμηλής τάξης ακρίβειας (πρώτης), δεν είναι και ρεαλιστικό ως προς τη γεωμετρία και τις παραμέτρους μεταβολής σε σύγκριση με κάποιο γνωστό πείραμα. Παρόμοιο μοντέλο δύο διαστάσεων για την περιγραφή του φαινομένου έχει γίνει, [Μανόπουλος et al, 2004], μόνο που το τοίχωμα του εύκαμπτου αγωγού δεν περιγράφεται από κάποιο νόμο ελαστικότητας, όπως στο μοντέλο Jung, αλλά είναι κινούμενο όριο με βάσει κάποιο γνωστό κινηματικό νόμο. Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Navier-Stokes σε 2 διαστάσεις κυλινδρικών συντεταγμένων, οι οποίες επιλύονται αριθμητικά με τη μέθοδο Διαχωρισμού Συναγωγικών Μητρώων (Flux Vector Splitting). Η δυσκολία της ανάπτυξης μοντέλων σε δύο ή ακόμη και τρεις διαστάσεις έγκειται κυρίως στη συρρίκνωση που πρέπει να υποστεί το υπολογιστικό πλέγμα στο σημείο της διέγερσης και στα σημεία τα οποία μπορεί ο αγωγός να καταρρεύσει (collapsing).

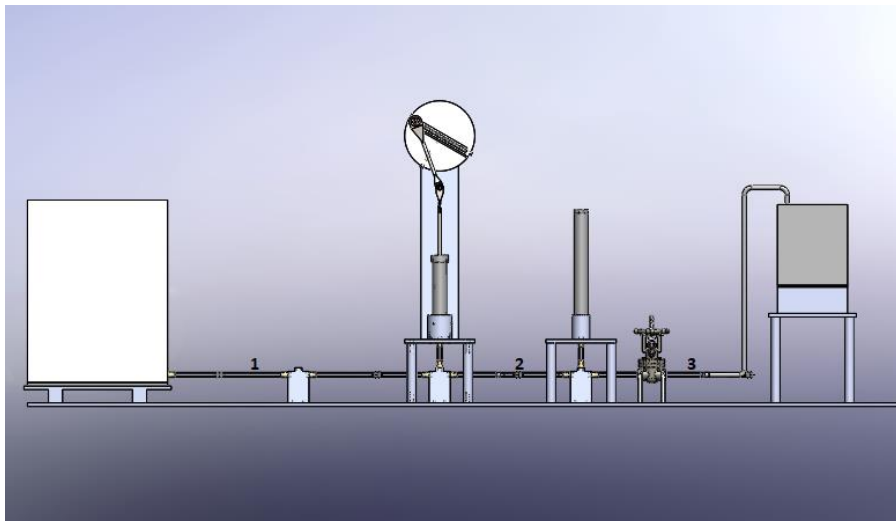
Τα έως τώρα μονοδιάστατα μοντέλα που έχουν προταθεί, είτε είναι επίσης μη ρεαλιστικά, είτε απλώς περιγράφουν κάποια κυρίαρχα χαρακτηριστικά του φαινομένου, χωρίς να καταφέρνουν να εκτιμούν σωστά τα μετρούμενα μεγέθη από τα πειράματα. Αυτό συμβαίνει αφενός λόγω της περιορισμένης ανάπτυξης του εκάστοτε μοντέλου σε μία διάσταση και αφετέρου κυρίως λόγω των περιοριστικών παραδοχών που γίνονται για να καταστούν επιλύσιμες αριθμητικά οι εξισώσεις του εκάστοτε μοντέλου. Τα κύρια μεγέθη που αποτελούν συνήθως τη λύση των εξισώσεων των μοντέλων με αγωγούς είναι οι κατανομές στο χώρο και το χρόνο της πίεσης και της παροχής. Όταν ο λόγος της εγκάρσιας διάστασης του εκάστοτε αγωγού (ακτίνα ή διάμετρος) προς το συνολικό μήκος του είναι κάτω του 10%, τότε η ανάπτυξη ενός μοντέλου εύκαμπτου αγωγού σε δύο και τρεις διαστάσεις δεν προσφέρει σημαντικά στην επίτευξη πιο ρεαλιστικής λύσης. Δηλαδή, όταν τα μοντέλα απαρτίζονται από μακρόστενους αγωγούς, τότε τα αξονικά μεγέθη ταχύτητας και πίεσης είναι κυρίαρχα στη ροή και η μονοδιάστατη θεώρηση είναι αρκετή για την περιγραφή του φαινομένου. Συνεπώς, η ελλιπή εκτίμηση των μεγεθών του φαινομένου της άντλησης χωρίς βαλβίδες με τα μέχρι τώρα μοντέλα γίνεται κυρίως λόγω θεωρήσεων και παραδοχών για την απλοποίηση των εξισώσεων επίλυσης.

Κεφάλαιο 4 : Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης.

Η πειραματική διάταξη αποτελεί έναν μηχανισμό προσομοίωσης του καρδιαγγειακού συστήματος, ικανό να παραλλάσει διάφορες παραμέτρους, ώστε να επιτυγχάνεται προσομοίωση διάφορων καταστάσεων, παθήσεων και προβλημάτων της καρδιαγγειακής λειτουργίας. Η πλήρης διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. και ακολουθεί περιγραφή των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, όπως φαίνονται από τα αριστερά προς τα δεξιά του σχήματος.

4.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελεί έναν μηχανισμό προσομοίωσης του καρδιαγγειακού συστήματος, ικανό να παραλλάσει διάφορες παραμέτρους, ώστε να επιτυγχάνεται προσομοίωση διάφορων καταστάσεων, παθήσεων και προβλημάτων της καρδιαγγειακής λειτουργίας. Η πλήρης διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-1. και ακολουθεί περιγραφή των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, όπως φαίνονται από τα αριστερά προς τα δεξιά του σχήματος.



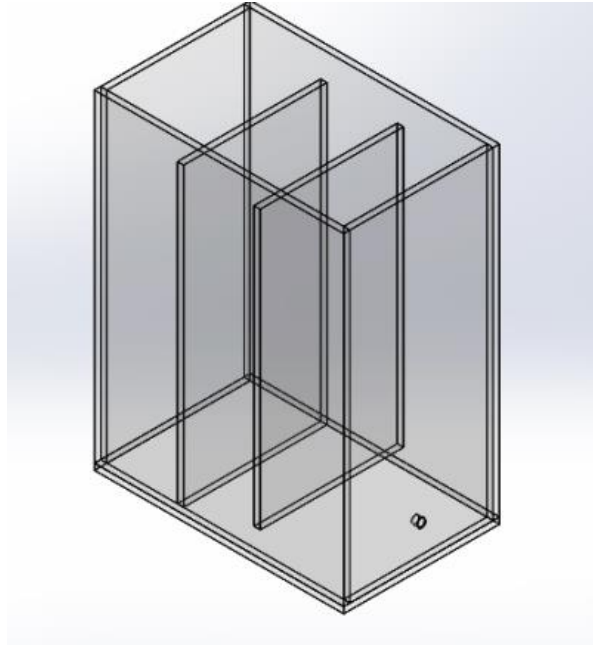
Σχήμα 4-1 Πλήρης απεικόνιση της πειραματικής διάταξης όπου διακρίνονται οι τρεις θέσεις μέτρησης της πίεσης.

4.1.1 Πρώτο δοχείο συγκέντρωσης νερού (Δοχείο τροφοδοσίας).

Σκοπός του δοχείου αυτού είναι η επαρκής τροφοδοσία της διάταξης με νερό και η διατήρηση μίας σταθερής στάθμης λειτουργίας. Το δοχείο αυτό βρίσκεται αριστερά της διάταξης του σχήματος 4-1, ανάντι της θέσης 1, είναι το μεγαλύτερο της διάταξης κατασκευασμένο από Plexiglas και χωρίζεται σε τρεις ίσους μικρότερους χώρους (Χώροι A,B,C), οι διαστάσεις των οποίων είναι οι ακόλουθες:

| | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Εξωτερικές διαστάσεις δοχείου | 400 X 250 X 530 mm ³ |
| Εσωτερικές διαστάσεις δοχείου | 360 X 230 X 520 mm ³ |
| Εσωτερικές διαστάσεις χώρων A,B,C | 120 X 230 X 475 mm ³ |

Οι χώροι Β,С επικοινωνούν μεταξύ τους και με την υπόλοιπη διάταξη ενώ ο χώρος Α είναι αποκομμένος και υπερχειλίζει στο υπόλοιπο δοχείο. Ο χώρος Α τροφοδοτείται συνεχώς με μία σταθερή παροχή, ώστε να υπάρχει συνεχής παροχή στους χώρους Β,С και στη συνέχεια στην υπόλοιπη διάταξη. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση αντλίας της εταιρείας TMC των παρακάτω χαρακτηριστικών.



Σχήμα 4-2 Δοχείο συγκεντρωσης νερού.

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά της αντλίας και του τροφοδοτικού σύμφωνα με τους κατασκευαστές

Αντλία (Κατασκευή TMC)

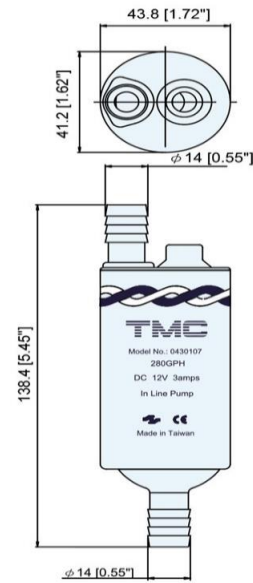
| | |
|-----------|--------------------|
| Motor | 12 V/24V |
| Capacity | 280 GPH |
| AMP DRAW | 3A(132 V)/1.A(24V) |
| FUSE SIZE | 5A(12V)/2A(24V) |
| TYPE | TMC-0430107 |

Τροφοδοτικό (Κατασκευή Statron)

| Type | Input | Output |
|--------|---------|-------------------|
| 3231.1 | 230V AC | 0-32 V DC 0-6,4 A |



(α)



(β)

Σχήμα 4-3 (α) Αντλία σε σύνδεση με τη διάταξη (β) Σχέδιο αντλίας με διαστάσεις από κατασκευαστή.

4.1.2 Κινητήρας, στρόφαλος και έμβολο

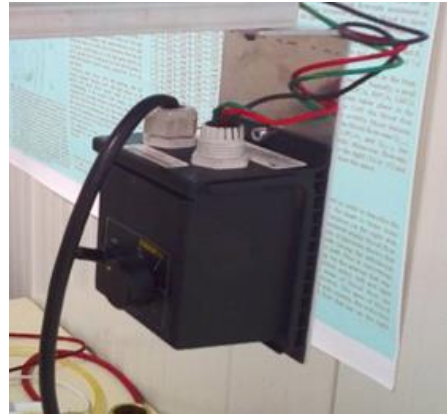
Για την άντληση και την κυκλοφορία του νερού στη διάταξη, την προσομοίωση δηλαδή της καρδιακής λειτουργίας, χρησιμοποιείται αντλία πιστονιού. Η αντλία αυτή αποτελείται από έμβολο συνδεδεμένο με στρόφαλο κινούμενο από ηλεκτροκινητήρα. Η διάταξη έχει την δυνατότητα για ρύθμιση των στροφών του κινητήρα (μέσω Controller) αλλά και ρύθμιση του όγκου εμβολισμού με μεταβολή του μήκους διαδρομής και πλάτους ταλάντωσης του εμβόλου με ατέρμονα κοχλία.

Οι δύο κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι μοντέλα της εταιρείας LEESON τύπου Permanent magnet DC Gearmotors. Ο πρώτος, κινητήρας 1, φέρει κιβώτιο αλλαγής στροφών και έχει δυνατότητα περιστροφής μέχρι 60 RPM. Ο δεύτερος, κινητήρας 2, συνδέεται απευθείας μέσω copler με τον άξονα του στροφάλου και χρησιμοποιήθηκε για στροφές ανω των 60 RPM. Για την ρύθμιση των στροφών του συνδέεται με ένα Controller της Εταιρείας DART. Ο κινητήρας και το Controller σε σύνδεση φαίνονται στην **Φωτογραφία 4.1-4**

Ο στρόφαλος ή αλλιώς τύμπανο είναι ο μηχανισμός εκείνος που ουσιαστικά μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε γραμμική παλινδρομική ούτως ώστε να γίνεται η άντληση από την αντλία πιστονιού. Τα χαρακτηριστικά του στροφάλου είναι αυτά που καθορίζουν το μήκος της διαδρομής της παλινδρομικής κίνησης ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του με τα λοιπά μέρη μετάδοσης της ισχύος διωστήρες, έμβολο κλπ. Το μήκος της διαδρομής στην συνέχεια καθορίζει όπως θα δούμε τον όγκο εμβολισμού VE ανά έναν πλήρη εμβολισμό, στο σύστημα, μέγεθος που αντιπροσωπεύει βιολογικά ανάλογα παροχής ανά παλμό του αντίστοιχου κυκλοφορικού που προσομοιώνεται



(α)



(β)

Φωτογραφία 4.1-1 (α) Κινητήρας και (β) Controller

Κινητήρας 1 :

| | | | | | |
|--------------|-----------|--------------|-------------|-------------|----------|
| RPM | 60 | Volts | 180 | Volts | |
| HPKW | 1/17 | F.L. Amps | 0.36 | F.L. Amps | |
| Frame | 30 | S. F Amps | | S. F Amps | |
| Max Amb | 40 | Hertz | | Phase | |
| Insul Class | F3 | Duty | CONT | TYPE | DN |
| Model # | 985.634 E | Serv. Factor | 1.0 | PF | |
| Eff 100% | | Eff 75% | | Enclosure | TENV |
| Protection | NOT | Therm.Prot. | | Bearing OPE | |
| Design | | Code | | Bearing PE | |
| UL | Yes | CSA | Yes | CE | Yes |
| Torque lb-In | 56 | Nameplate | M1125036.00 | Lubrication | |
| Series | PZ | Overhung Ld. | 171 | Shaft Type | PARALLEL |

Κινητήρας 2 :

| | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|----------|
| RPM | 1750 | Volts | 180 | Volts | |
| HPKW | 1/8 | F.L. Amps | 0.7 | F.L. Amps | |
| Frame | 31 | S. F Amps | | S. F Amps | |
| Max Amb | 40 | Hertz | | Phase | |
| Insul Class | F3 | Duty | CONT | TYPE | DN |
| Model # | CM31D17N211C | Serv. Factor | 1.0 | PF | |
| Eff 100% | | Eff 75% | | Enclosure | TENV |
| Protection | NOT | Therm.Prot. | | Bearing OPE | |
| Design | | Code | | Bearing PE | |
| UL | Yes | CSA | Yes | CE | Yes |
| Torque lb-In | 56 | Nameplate | M1120045.00 | Lubrication | |
| Series | PZ | Overhung Ld. | 17.1 | Shaft Type | PARALLEL |

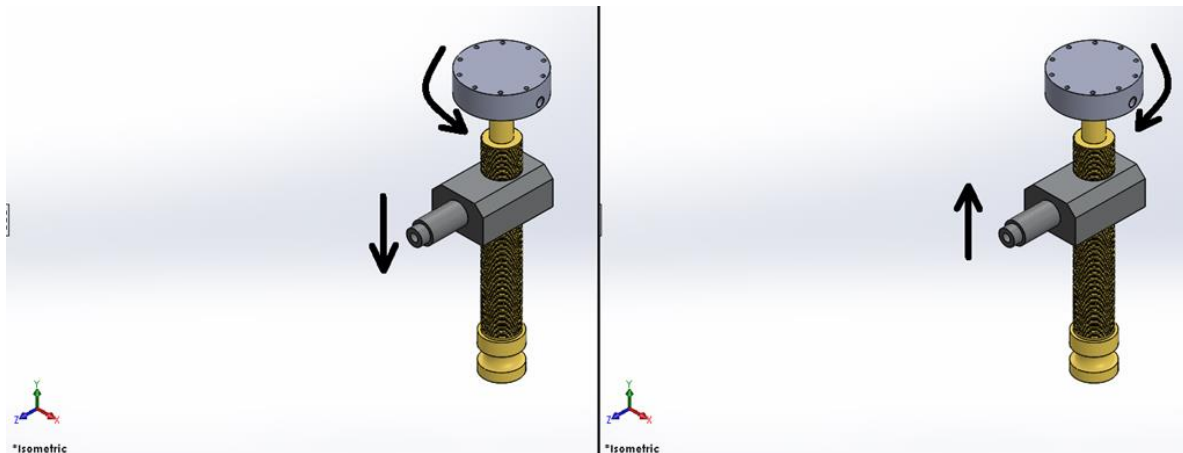
Controller

| Model | DC Output Current | Input | Output |
|-------|-------------------|-------------|--------------|
| 15DVE | 3 Amps | 120/240 VAC | 0-90/180 VDC |

Για την δημιουργία δυνατότητας αναπαράστασης διάφορων κυκλοφορικών συστημάτων, με διάφορες τιμές όγκων εμβολισμού, ο στρόφαλος έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μπορεί να μεταβάλλει το μήκος διαδρομής του εμβόλου, μέσω ενός μηχανισμού, μεταβάλλοντας το σημείο άρθρωσης του πρώτου διωστήρα με τον στρόφαλο.

Αυτό το επιτυγχάνει μέσω μιας βίδας δρομέα (ατέρμων κοχλίας) όπου κατά την περιστροφή του μεταβάλλει την θέση της κορώνας ατέρμονος κοχλία στην οποία βρίσκεται το σημείο άρθρωσης του διωστήρα με τον στρόφαλο. Ο ατέρμων κοχλίας και η κορώνα ατέρμονος κοχλία ακολουθούν τον μηχανισμό του κοχλία Σχήμα 4-4. Ο ατέρμων κοχλίας είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε με μια πλήρη περιστροφή του να μεταβάλλει το σημείο άρθρωσης του διωστήρα με τον στρόφαλο κατά 1 mm.

Η ακρίβεια στην περιστροφή του ατέρμονος κοχλία επιτυγχάνεται μέσω του μετρητή βήματος ο οποίος έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να δίνει 10 υποδιαίρεσεις του βήματος του ατέρμονος κοχλία. Ακόμα, η θέση του σημείου άρθρωσης είναι συνεχώς ορατή μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης επάνω στο στρόφαλο. Η σταθεροποίηση και πάκτωση της θέσης της κορώνας ατέρμονος κοχλία επιτυγχάνεται μέσω του σφικτήρα έτσι ώστε κατά την λειτουργία να αποφεύγονται οι αθέμιτες μετατοπίσεις και οι κραδασμοί από την ελλiptή πρόσδεση



Σχήμα 4-4 Μηχανισμός μεταβολής του μήκους διαδρομής

Οι διωστήρες ενός στροφάλου είναι υπεύθυνοι για την μεταφορά της δύναμης που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή του στροφάλου μέσω του κινητήρα. Λόγω των διαστάσεων του δοχείου εμβολισμού και της διαδρομής του εμβόλου, στον παρόντα μηχανισμό χρησιμοποιούνται δυο διωστήρες, ένας σταθερός σε πάκτωση με το έμβολο, όπου εκτελεί ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση (χρησιμοποιείται δηλαδή ως προέκταση του εμβόλου), και ένας διωστήρας όπου εκτελεί αιώρηση, το άνω άκρο του σε άρθρωση με τον στρόφαλο εκτελεί περιστροφική κίνηση ενώ το κάτω άκρο του σε άρθρωση με τον πρώτο διωστήρα εκτελεί ευθύγραμμη (παλινδρομική) κίνηση.

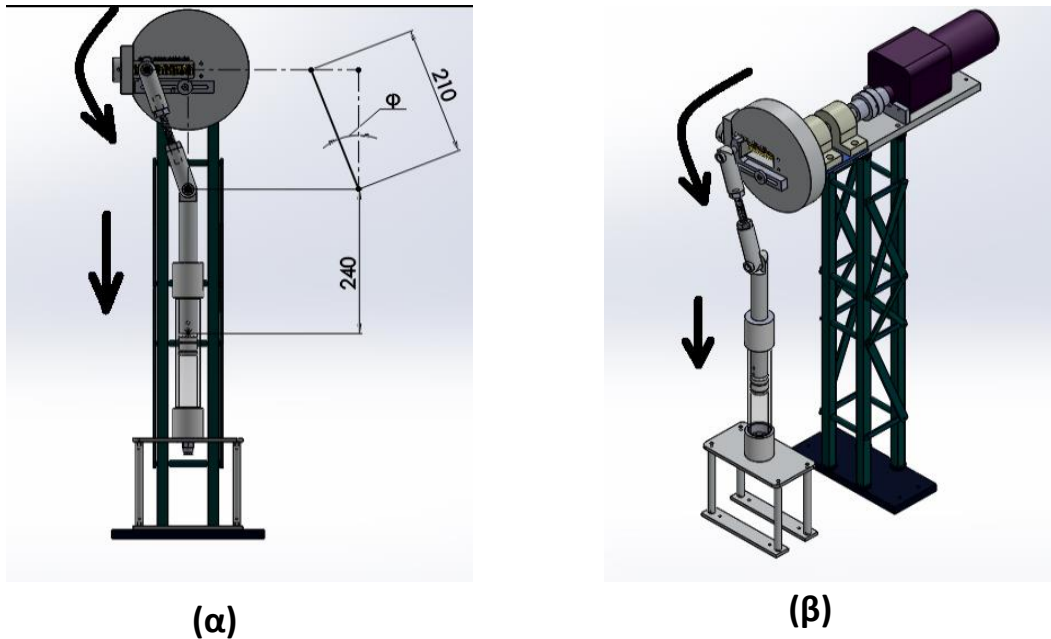
Ο πρώτος διωστήρας λόγω των διαστάσεων του δοχείου εμβολισμού έχει ενεργό μήκος (δηλαδή το μήκος από την άρθρωση έως την πάκτωση με το έμβολο) 240 mm.

Ο δεύτερος διωστήρας σχεδιάστηκε να έχει ενεργό μήκος (δηλαδή το μήκος από άρθρωση σε άρθρωση) 210 mm με δυνατότητα αυξομείωσης. Το μήκος αυτό υπολογίστηκε στην λογική της μείωσης της μέγιστης γωνίας ϕ που σχηματίζεται στην θέση του στροφάλου 90° από το Α.Ν.Σ., για την αποφυγή μεγάλων τιμών των δυνάμεων οριζόντιας συνιστώσας, και κατά συνέπεια την καλύτερη μεταφορά της ισχύος από τους διωστήρες **Σχήμα 4-5 (α) ,(β)**

Το έμβολο είναι κατασκευασμένο από σκληρό πλαστικό ασετάλ. Για το ζήτημα της στεγανότητας χρησιμοποιούνται δυο φλάντζες δακτύλιοι από καουτσούκ. Το έμβολο προσδέεται στον πρώτο διωστήρα με δύο πείρους σύσφιξης.

Το δοχείο εμβόλου είναι ο χώρος όπου εκτελείται ο εμβολισμός του νερού στο σύστημα. Το μέγεθός του προσαρμόζεται έτσι ώστε να εξυπηρετεί το επιθυμητό μέγιστο μέγεθος διαδρομής του

εμβόλου. Η κατάληξη του δοχείου, στο Κ.Ν.Σ. , έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε εσωτερικά να δημιουργεί κωνική μείωση (προοδευτικού διαχύτη) από την διατομή του δοχείου στη διατομή της σωλήνωσης και επομένως να επιτυγχάνεται ομαλότερα η επιτάχυνση ή επιβράδυνση του ρευστού. Τα καπάκια του δοχείου προσδένονται βιδωτά στον κύλινδρο και για την στεγανοποίηση χρησιμοποιείται τεφλόν στις συνδέσεις. Το υλικό κατασκευής του κυλίνδρου επιλέχθηκε να είναι διαφανές Plexiglas ώστε να γίνεται ορατή η ύπαρξη αέρα κατά τον εμβολισμό μέσα στο σύστημα.



Σχήμα 4-5 (α) Γωνία διωστήρων (β) Αναπαράσταση κίνησης διωστήρων

Το δοχείο εμβόλου πριν από την λειτουργία του συστήματος εμπεριέχει εγκλωβισμένο αέρα ο οποίος απαιτείται να αφαιρεθεί. Για αυτό τον σκοπό τοποθετείται μια βάνα αέρος διατομής $\varnothing 3$ στο μέγιστο δυνατό άνω νεκρό σημείο του εμβολισμού.

4.1.3 Δοχείο ενδοτικότητας

Η ενδοτικότητα των αγγείων μπορεί να εκφραστεί μηχανικά στα πρότυπα Windkessel με την βοήθεια ενός δοχείου το οποίο είναι κλειστό και περιέχει ποσότητα αέρα.

Οι διαστάσεις του δοχείου και η ποσότητα του αέρα που περιέχεται στο δοχείο καθορίζουν την αντίστοιχη τιμή της ενδοτικότητας που αναπαρίσταται και κατά συνέπεια το εύρος των αγγείων που προσομοιώνονται.

Στην περίπτωση αυτού του πειράματος, το δοχείο ενδοτικότητας βρίσκεται ανάμεσα στο μηχανισμό διέγερσης και τη βάνα πύλης (Σχήμα 4-1) και έχει κατασκευασθεί με γνώμονα την αναλογία του ύψους με το πλάτος του να είναι τέτοια ώστε να γίνεται ορατή η μεταβολή της στάθμης του νερού μέσα στο δοχείο κατά την λειτουργία του συστήματος.

Το δοχείο έχει γενικές εξωτερικές διαστάσεις 50 X 262 mm και εσωτερικές αξιοποιήσιμες για την ενδοτικότητα 30 X 220 mm. Αποτελείται από τρία μέρη:

Άνω καπάκι, υλικό κατασκευής ασετάλ
Κύλινδρος δοχείου, υλικό κατασκευής Plexiglas .

Κάτω καπάκι, υλικό κατασκευής αλουμίνιο .

Στο άνω καπάκι δημιουργείται υποδοχή για μια ειδική σφαιροειδής βαλβίδα από το εμπόριο, με σκοπό την προσθαφαίρεση αέρα. Το δοχείο τοποθετείται στο ίδιο ύψος με την στάθμη νερού στο δοχείο τροφοδοσίας ούτως ώστε η ρύθμιση της στάθμης νερού στο δοχείο ενδοτικότητας να δίνει ακόμη και την δυνατότητα της πλήρωσης του δοχείου ενδοτικότητας με νερό, κατάσταση που αντιστοιχεί σε ενδεχόμενο μηδενικής ενδοτικότητας.

Ο κύλινδρος δοχείου κατασκευάζεται από διαφανές Plexiglas ώστε να επιτρέπει την εύκολη και άμεση μέτρηση στάθμης του νερού. Αυτή επιτυγχάνεται με κόλληση μετρητικής ταινίας επάνω στον κύλινδρο.

Αντίστοιχα η βάση του δοχείου ενδοτικότητας δε διαφέρει σε αρχιτεκτονική από το τραπέζι στήριξης του δοχείου εμβόλου. Το μέγεθος του είναι υπολογισμένο ώστε να φέρνει στο ίδιο ύψος το δοχείο ενδοτικότητας με την μέγιστη δυνατή στάθμη νερού του δοχείου τροφοδοσίας, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε το δοχείο ενδοτικότητας και γι' αυτό το λόγο ήταν πλήρωμένο πάντα με νερό.

4.1.4 Βάνα πύλης

Για την προσομοίωση των αντιστάσεων των περιφερειακών αγγείων του αρτηριακού συστήματος, έχει επιλεγεί βάνα πύλης (gate valve).

Ο λόγος αυτής της επιλογής είναι η όσο γίνεται μεγαλύτερη αποφυγή των αναταράξεων που μπορεί να προκαλέσει η γεωμετρία της βάνας κατά την λειτουργία τους στη ροή του ρευστού, δεδομένου του ότι η ροή είναι μη μόνιμη και παλινδρομική.

Έτσι, μεταβάλλοντας τη διατομή της σωλήνωσης πετυχαίνουμε κατά βούληση διαφορετικές τιμές αντίστασης στο σύστημα.

B GATE VALVES- WELDED BONNET- FULL & STANDARD PORT
BONNEY FORGE

800 LB.

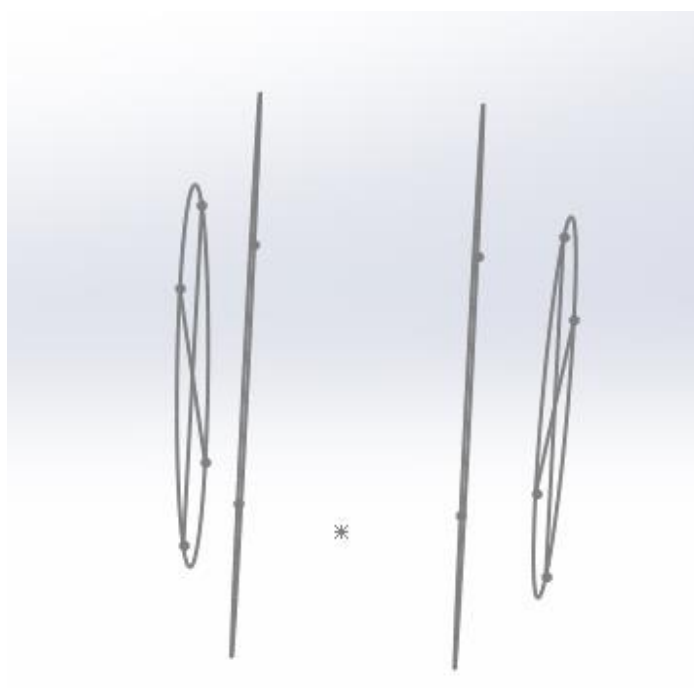
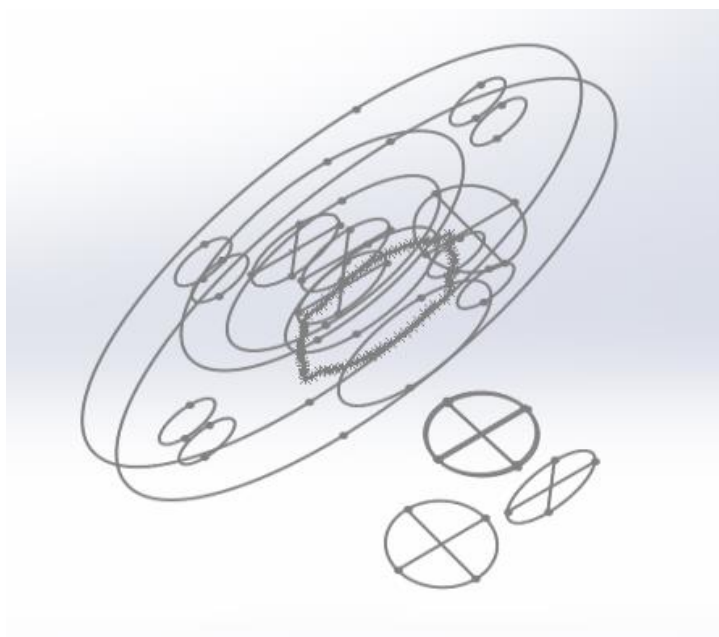
Design construction:
API 602 - ASME B16.34 - BS 5352
Testing according to API 598
Marking MSS SP25
Outside Screw and Yoke (OS&Y)
Self-aligning two piece packing gland
Integral backseat
Body Bonnet Weld to ASME IX
Socket Weld Ends to ASME B16.11
Screwed Ends (NPT) to ASME B1.20.1
Butt Welding Ends to ASME B16.25
Ratings:
- carbon steel class 800 1975 psig @ 100°F
138 bar + 38°C
- carbon steel class 1500 3705 psig @ 100°F
255 bar + 38°C

800 LB. 1/4" F

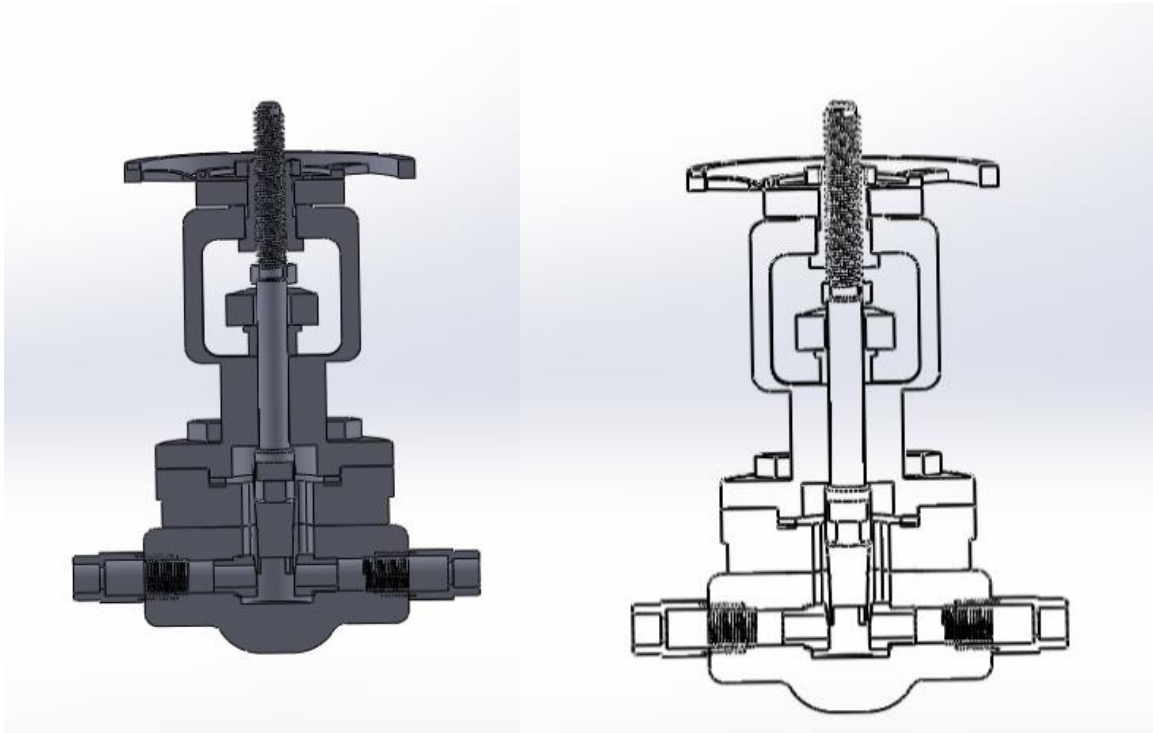
| FULL PORT - FIG. W 10 | | | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|-----|------|--------|---------|
| | A inch | B open | C inch | F | G | Weight | PACKING |
| SIZE | inch | mm | mm | mm | mm | lb | |
| | 3.15 | 5.98 | 3.46 | .31 | 1.26 | 3.25 | BH2 |
| | 80 | 152 | 88 | 8 | 32 | 1.5 | |

Σχήμα 4-6 Βάνα πύλης (gate valve)

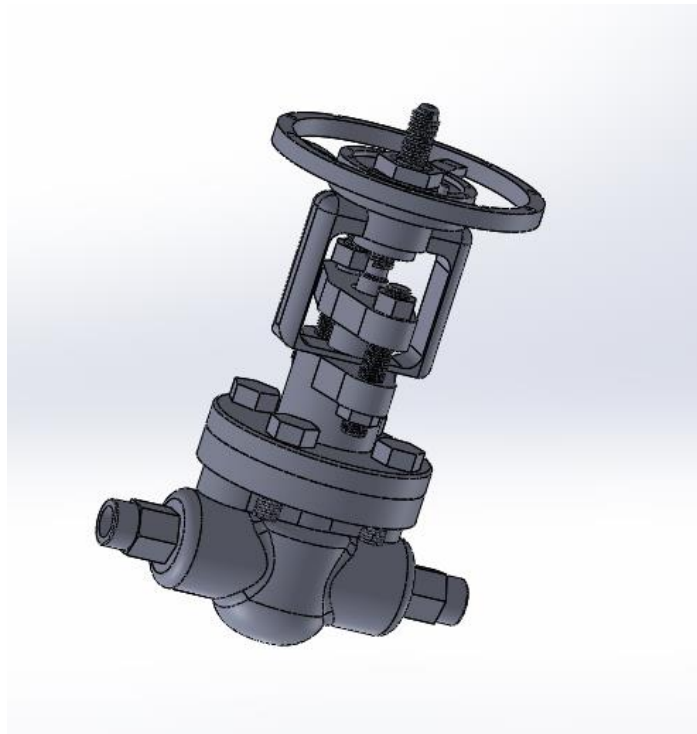
Αρχικά η εσωτερική κοιλότητα της βάνας αποτυπώθηκε με τη βοήθεια laser στο εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών του Ε.Μ.Π.. Τα σχέδια που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση της λειτουργίας της βάνας πύλης τρισδιάστατα. Για τον ακριβέστερο υπολογισμό της μεταβολής του διακένου της βάνας πύλης κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο αυτής έγινε λεπτομερής σχεδιασμός στο πρόγραμμα **Solidworks**. Βάσει αυτού του σχεδίου υπολογίστηκε το ποσοστό διακένου βάνας πύλης προς την διατομή του σωλήνα όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1-1.



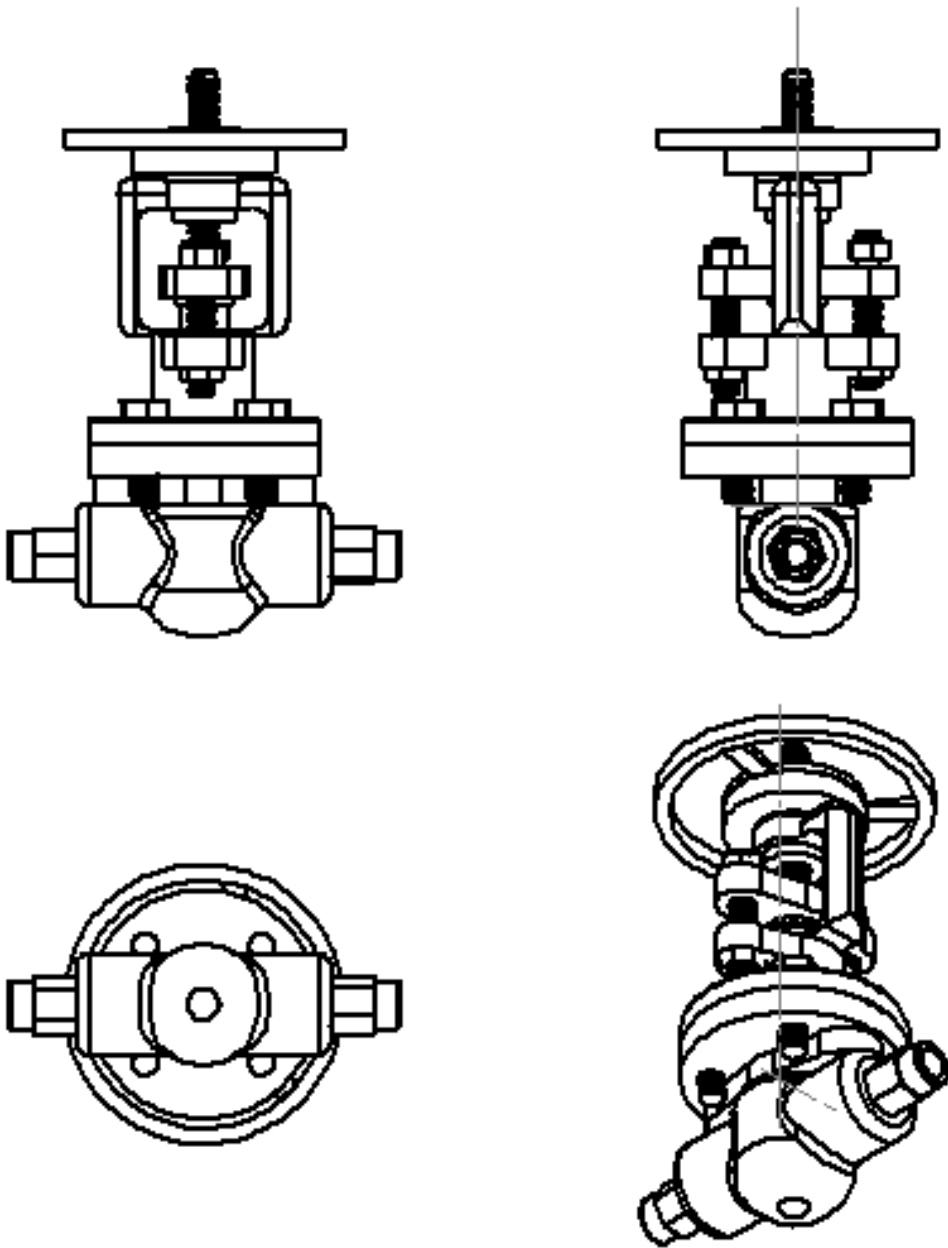
Σχήμα 4-7 Αποτύπωση βάνας πύλης με χρήση laser



Σχήμα 4-8 Απεικόνιση της βάνας πύλης σε τομή.



Σχήμα 4-9 Αξονομετρική απεικόνιση της βάνας πύλης.



Σχήμα 4-10 Απεικόνιση της βάνας πύλης σε διαφορετικές όψεις.

| Μοίρες περιστροφής βάνας πύλης [°] | Ύψος διακένου γ_r [mm] | γ_r/d (%) |
|---------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| 36 | 0,06 | -23,8125 |
| 72 | 0,2716666 | -21,1667 |
| 108 | 0,4833332 | -18,5208 |
| 144 | 0,6949998 | -15,875 |
| 180 | 0,9066664 | -13,2292 |
| 216 | 1,118333 | -10,5833 |
| 252 | 1,3299996 | -7,9375 |
| 288 | 1,5416662 | -5,29167 |
| 324 | 1,7533328 | -2,64583 |
| 360 | 1,9649994 | 0 |
| 396 | 2,176666 | 2,645833 |
| 432 | 2,3883326 | 5,291665 |
| 468 | 2,5999992 | 7,937498 |
| 504 | 2,8116658 | 10,58333 |
| 540 | 3,0233324 | 13,22916 |
| 576 | 3,234999 | 15,875 |
| 612 | 3,4466656 | 18,52083 |
| 648 | 3,6583322 | 21,16666 |
| 684 | 3,8699988 | 23,81249 |
| 720 | 4,0816654 | 26,45833 |
| 810 | 4,293332 | 29,10416 |
| 900 | 4,820832 | 35,69791 |
| 990 | 5,348332 | 42,29166 |
| 1080 | 5,875832 | 48,88541 |
| 1170 | 6,403332 | 55,47916 |
| 1260 | 6,930832 | 62,07291 |
| 1350 | 7,458332 | 68,66666 |
| 1440 | 7,985832 | 75,26041 |
| 1530 | 8,513332 | 81,85416 |
| 1620 | 9,040832 | 88,44791 |
| 1710 | 9,568332 | 95,04166 |
| 1800 | 10,095832 | 101,6354 |
| 1890 | 10,623332 | 108,2292 |
| 1980 | 11,150832 | 114,8229 |

Πίνακας 4-1 Υπολογισμός ανηγμένου ύψους διακένου βάνας πύλης γ_r/d (Σχήμα 5-3 – 5-4). Για τον ορισμό των αρνητικών τιμών βλ. Εισαγωγή Κεφαλαίου 6.

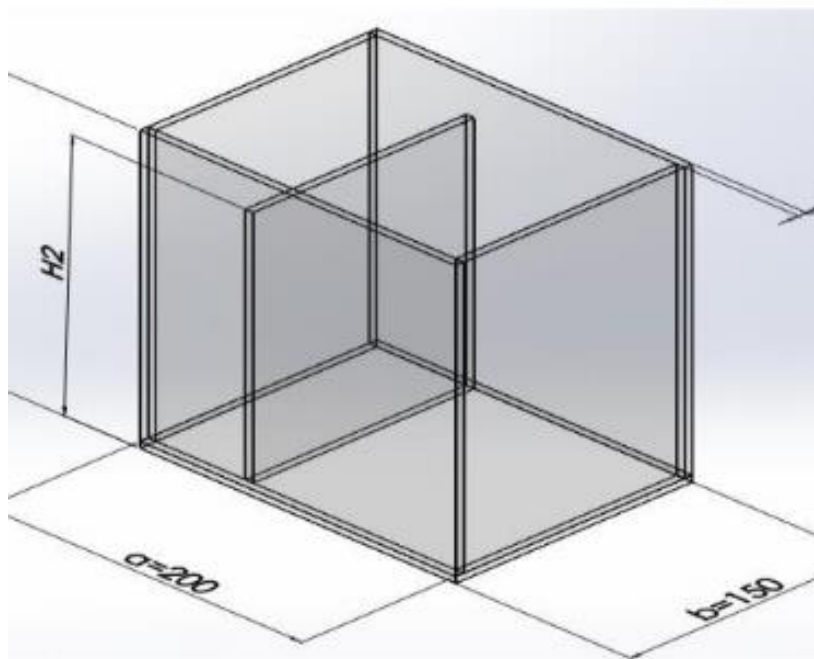
4.1.5 Δεύτερο δοχείο συγκέντρωσης νερού (Δοχείο κατάθλιψης).

Το δεύτερο δοχείο συγκέντρωσης νερού βρίσκεται δεξιά της διάταξης του σχήματος 4-1, κατάντι της θέσης 3, είναι το μικρότερο της διάταξης τοποθετημένο πάνω σε δυναμοκυψέλη μέτρησης μεταβολής του βάρους και αποτελεί την δεξαμενή εκείνη όπου το νερό καταθλίβεται, δηλαδή, καταλήγει κατά την λειτουργία του συστήματος. Το δοχείο είναι συναρμολόγημα επτά μερών κατάλληλης διάταξης και διαστάσεων.

Από τα μέρη του το δοχείο χωρίζεται σε δύο χώρους **A**, **B** διαφορετικής χωρητικότητας. Οι διαστάσεις του καθορίζονται ως εξής :-

- Ολικό δοχείο εξωτερικές διαστάσεις : 200 X 150 X 235 mm³
- Ολικό δοχείο εσωτερικές διαστάσεις : 190 X 140 X 230 mm³
- **A** χώρος εσωτερικές διαστάσεις : 60 X 140 X 200 mm³
- **B** χώρος εσωτερικές διαστάσεις : 125 X 140 X 200 mm³
-

Το δοχείο κατάθλιψης είναι τοποθετημένο σε μια ζυγαριά ακριβείας. Ρόλος αυτής είναι να μετράει την ποσότητα του νερού και τον χρόνο και ρυθμό με τον οποίο το νερό εξέρχεται από το σύστημα.



Σχήμα 4-11 Δοχείο κατάθλιψης.

Ο σωλήνας απόληξης του συστήματος αποβάλλει το νερό στο χώρο A, χωρίς να εφάπτεται, με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανές αναταράξεις που μπορεί το αποβαλλόμενο νερό να δημιουργήσει στον αισθητήρα της ζυγαριάς.

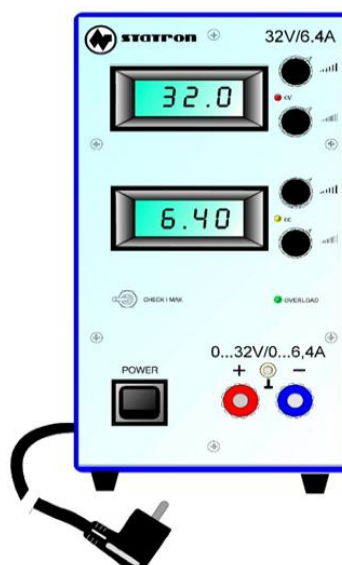
Οι χώροι Α και Β επικοινωνούν μεταξύ τους. Για να πετύχουμε μια συνεχή υπερχειλίση τοποθετείται μια δεύτερη αντλία η οποία τροφοδοτεί συνεχώς τον χώρο Α με σταθερή παροχή. Για να αποφευχθούν τυχόν αναταράξεις, ο σωλήνας απόληξης αποβάλλει το νερό χωρίς να εφάπτεται στα τοιχώματα.

Σεντίνα (Κατασκευή TMC)



Φωτογραφία 4.1-2 Φυγοκεντρική αντλία τοποθετημένη στον χώρο Α.

| Type | Power source | Deliver Volume | Outlet Diameter | Current | Deliver Head | Dimensions |
|--------------|--------------|-----------------|-----------------|---------|--------------|----------------------------|
| Caravan Pump | DC 12V | 160GPH~10lt/min | 11/32" | 2.5A | 15ft | (LxWxH) 54.5x54.5x105mm |



Φωτογραφία 4.1-3 Τροφοδοτικό.

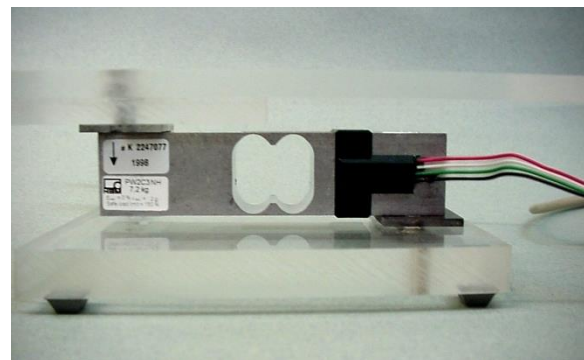
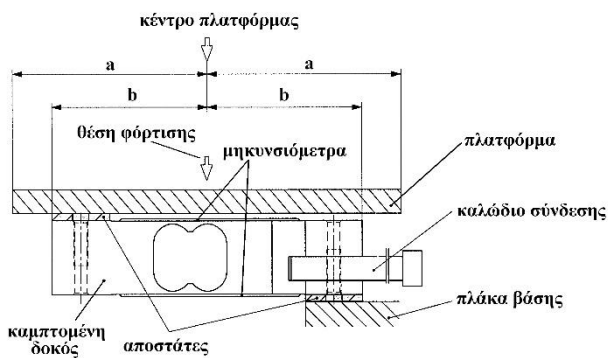
Ποτενσιόμετρο (Κατασκευή Amarad)

| Type | Voltage/Power |
|--------------|--------------------------------|
| Dimmer d 500 | 12V DC / 100 W 24V DC/200 W |

4.2 Μετρητικά όργανα.

4.2.1 Ζυγαριά ακριβείας (Δυναμοκυψέλη)

Η μέτρηση του εγχεόμενου βάρους ρευστού γίνεται με δυναμοκυψέλη καμπτόμενης δοκού ενός σημείου φόρτισης (**Εικόνα 4.11**). Είναι της εταιρίας HBM (μοντέλο PW2C3 NH-1998). Έχει ανώτατο όριο φορτίου 7.2 Kg, με όριο ασφαλούς φορτίου 150 % και διαστάσεις πλατφόρμας 200x150mm. Η καμπτόμενη δοκός είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο και η πλατφόρμα από plexiglas. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της δυναμοκυψέλης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2-1**. Η δυναμοκυψέλη καμπτόμενης δοκού ενός σημείου φόρτισης συνδέεται με αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό σήμα της δυναμοκυψέλης σε ψηφιακό και το οδηγεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 4-12 Δυναμοκυψέλη **καμπτομένης** δοκού ενός σημείου φόρτισης (μήκος πλατφόρμας: $2a = 200$ mm, μήκος καμπτομένης δοκού: $2b = 130$ mm).

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

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

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

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

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

4.2.2 Αισθητήρες πίεσης.

Για τη μέτρηση των πιέσεων χρησιμοποιούνται 3 αισθητήρες πίεσης όπως φαίνονται στην **Φωτογραφία 4.2-1**. Το εύρος λειτουργίας των αισθητήρων είναι -50 έως +300mmHg, ενώ η ιδιοσυχνότητα λειτουργίας τους είναι 40.0 Hz. Δηλαδή, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον πέντε φορές μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα του αισθητήρα, ώστε να αξιοποιείται στο μέγιστο η ικανότητα του αισθητήρα να λαμβάνει μετρήσεις.

Ο κάθε αισθητήρας είναι ενσωματωμένος σε ένα αποστειρωμένο σετ παρακολούθησης πίεσης (pressure monitoring set), όπως φαίνεται για έναν στην **Φωτογραφία 4.2-2**.



Φωτογραφία 4.2-1 Αναλώσιμοι μορφοτροπέις πίεσης TruWave της Edwards (Disposable Pressure Transducers)



Φωτογραφία 4.2-2 Αποστειρωμένο σετ παρακολούθησης πίεσης της Edwards (pressure monitoring set).

4.2.2.1 Αναλογικός-Ψηφιακός Μετατροπέας (ADC) και Η/Υ

Το καλώδιο του κάθε αισθητήρα συνδέεται με τον αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (Analog to Digital Converter, ADC, **Φωτογραφία 4.2-3α**), όπου γίνεται η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και στη συνέχεια το σήμα οδηγείται σε έναν φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (**Φωτογραφία 4.2-3β**) για την καταγραφή των χρονοσειρών της πίεσης.

Ο αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (Analog to Digital Converter, ADC) είναι ο QuantumX MX440A της HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) τεσσάρων καναλιών για τη λήψη δεδομένων. Το λογισμικό οδήγησης του ADC είναι το catmanEasy ver.:3.4.2.52 της ίδιας εταιρείας HBM και είναι εγκατεστημένο στον φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ο φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής (laptop PC) είναι ο satellite c855-2ck της εταιρείας Toshiba (εικόνα 2.1-5α) με οθόνη 15.6", επεξεργαστή core i3-2348M CPU@2.3GHz, μνήμη 4096MB RAM (1333MHz/1GB VRAM) και το λογισμικό του είναι MS Windows 8 (64-bit). Η επικοινωνία μεταξύ του PC και του ADC γίνεται μέσω θυρών ETHERNET.



(α)



(β)

Φωτογραφία 4.2-3 (α) Αναλογικός-Ψηφιακός μετατροπέας (β) Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

4.2.3 Θερμόμετρο

Θερμόμετρο με δύο αισθητήρες (κατασκευής OWIM GmbH & Co.KG, **Φωτογραφία 4.2-4**) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού για εύρεση της πυκνότητας του, καθώς και της θερμοκρασίας του χώρου του εργαστηρίου. Ο συνδεδεμένος με καλώδιο αισθητήρας βυθίζεται στο δοχείο τροφοδοσίας και καταγράφει την θερμοκρασία του νερού, ενώ ο αισθητήρας στο σώμα του θερμομέτρου την θερμοκρασία του χώρου. Οι δύο θερμοκρασίες καταγράφονται σε κάθε μέτρηση.



Φωτογραφία 4.2-4 Θερμόμετρο με δύο αισθητήρες.

Στοιχεία θερμομέτρου:

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας εσωτερικά: -10°C έως $+50^{\circ}\text{C}$

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας εξωτερικά: -50°C έως $+70^{\circ}\text{C}$

Ανοχή: $(-50^{\circ}\text{C}$ έως $0^{\circ}\text{C}) \pm 2^{\circ}\text{C}$

$(0^{\circ}\text{C}$ έως $+30^{\circ}\text{C}) \pm 1^{\circ}\text{C}$

$(+30^{\circ}\text{C}$ έως $+70^{\circ}\text{C}) \pm 2^{\circ}\text{C}$

4.2.4 Ταχύμετρο

Για την εύρεση της συχνότητας περιστροφής της αντλίας χρησιμοποιείται ταχύμετρο οπτικού τύπου χειρός, με φωτοεκπομπό δίοδο (LED) κόκκινου χρώματος (Φωτογραφία 4.2-5). Είναι της εταιρίας ITECO trading (τύπου 8801.001). Το συστηματικό σφάλμα του ταχύμετρου είναι 0.1 rpm για το διάστημα από 12 έως 999.9 rpm και 1rpm για στροφές μεγαλύτερες από 1000 rpm σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2-2 που δίνεται από τον κατασκευαστή.



Φωτογραφία 4.2-5 Οπτικό ταχύμετρο χειρός.

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

Πίνακας 4-3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ταχυμέτρου

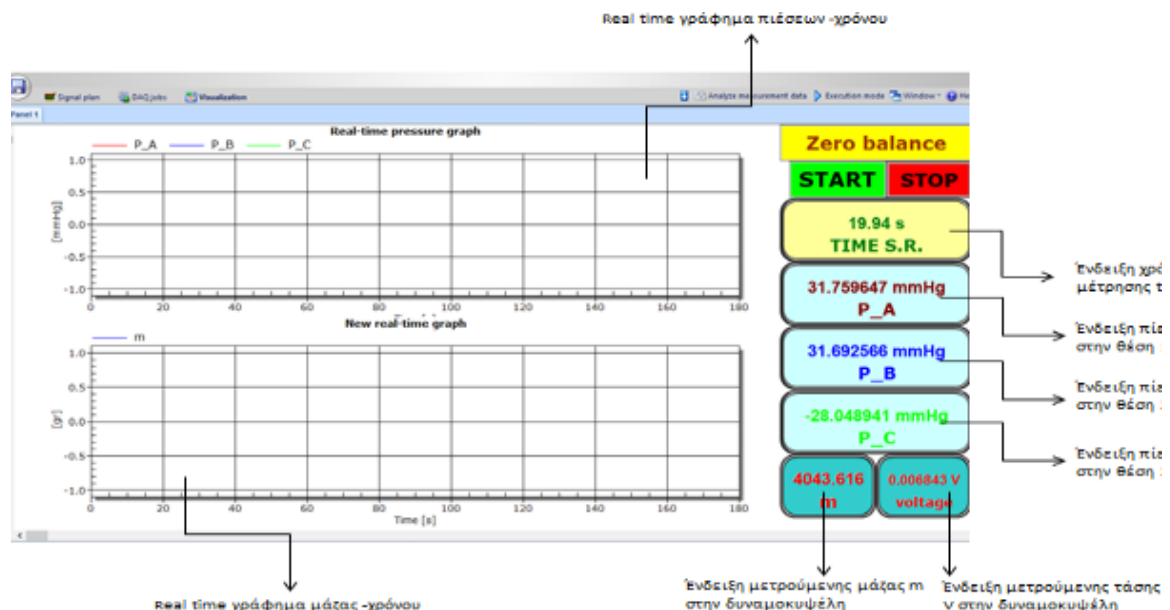
Κεφάλαιο 5 Περιγραφή πειραματική διαδικασίας και ανάλυσης των μετρήσεων

5.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Αρχικά τίθεται σε λειτουργία το κλιματιστικό, ώστε η θερμοκρασία στον χώρο να διατηρείται σταθερή. Ελέγχεται η σωστή σύνδεση όλων των συσκευών της διάταξης όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 4 και έπειτα συνδέεται ο ADC στην τροφοδοτική ισχύ. Έπειτα από χρονικό διάστημα είκοσι λεπτών έχει επιτευχθεί θερμική ισορροπία στον ADC και στο μηκυσιόμετρο της δυναμοκυψέλης.

Πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε μέτρηση, καταγράφεται η θερμοκρασία του χώρου. Στον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με τον ADC γίνεται εκκίνηση του προγράμματος CatmanEasy V3.42 στο οποίο απεικονίζονται και καταγράφονται τα μετρούμενα μεγέθη (Σχ. 5.1-1). Έπειτα γίνεται ρύθμιση των μετρητικών οργάνων.

Οι αισθητήρες πίεσης ελέγχονται για ύπαρξη φυσαλίδων αέρα, εξαερώνονται και τρέφονται με την ένδειξη OFF προς την διάταξη, ώστε να μετρούν την ατμοσφαιρική πίεση. Αυτή η μέτρηση θεωρείται ως μηδενική και αποθηκεύεται. Στην συνέχεια πρότυπα βάρη μάζας 0,1-2kg τοποθετούνται πάνω στην δυναμοκυψέλη για να διαπιστωθεί η σωστή μετρητική ικανότητά της. Σε περίπτωση σφάλματος σε αυτή την μέτρηση, αλλάζονται οι σταθερές α , c της γραμμική συνάρτηση μετάδοσης της δυναμοκυψέλης $m = \alpha V + c$, μέχρι η ένδειξη να ανταποκρίνεται στις τιμές των μετρούμενων βαριδίων. Αφού το δοχείο κατάθλιψης τοποθετηθεί άδειο επάνω στην δυναμοκυψέλη μηδενίζεται η ένδειξη.



Σχήμα 5-1 Γραφικό περιβάλλον CatmanEasy V3.42 για την καταγραφή των μετρούμενων μεγεθών.

5.1.1 Μετρήσεις μόνιμης ροής (Steady Flow) :

Για τις μετρήσεις μόνιμης ροής, η δυναμοκυψέλη και το δοχείο κατάθλιψης τοποθετούνται χαμηλότερα της αρχικής τους θέσης με διαφορά ύψους Δh , έτσι ώστε να δημιουργηθεί ροή λόγω της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των δύο δοχείων. Συγκεκριμένα πραγματοποιούνται μετρήσεις για τρία διαφορετικά ύψη $\Delta h_1=24.6$ cm, $\Delta h_2=53$ cm, $\Delta h_3=100$ cm. Γίνεται καταγραφή της μάζας m και των πιέσεων P_1, P_2, P_3 μέχρι πλήρωσης του δοχείου κατάθλιψης. Για κάθε ύψος Δh η διαδικασία επαναλαμβάνεται με σταδιακό άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης. Με την βάνα αρχικά πλήρως ανοιχτή λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση. Στην συνέχεια κλείνοντας τελείως το διάκενο αρχικά πραγματοποιείται περιστροφή κατά 36° , η οποία αντιστοιχεί σε ανύψωση του διακένου κατά $0,2116$ mm. Όταν το διάκενο της βάνας είναι κατά 57 % ανοιχτό, οι μετρήσεις λαμβάνονται με περιστροφή κατά 90° , η οποία αντιστοιχεί σε ανύψωση του διακένου κατά $0,5611$ mm. Σε κάθε μέτρηση καταγράφεται η θερμοκρασία αέρα και νερού.

5.1.2 Μετρήσεις μη-μόνιμης ροής (Unsteady Flow) :

Για τις μετρήσεις αυτές τα δοχεία παροχής και κατάθλιψης τοποθετούνται έτσι ώστε οι υπερχειλίσσεις τους να βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Για την διατήρηση των υπερχειλίσσεων τόσο στο δοχείο κατάθλιψης όσο και στο δοχείο παροχής τίθενται σε λειτουργία αντλίες, για την επίτευξη συνεχούς πλήρωσης του τμήματος υπερχειλίσσης του δοχείου. Η διαδικασία λήψης μετρήσεων αποτελείται από δυο τμήματα. Το πρώτο τμήμα, το οποίο διαρκεί 40 s, αφορά τον προσδιορισμό της σταθερής παροχής υπερχειλίσσεως της αντλίας στο δοχείο κατάθλιψης. Στην συνέχεια ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία προκαλώντας περιστροφή του στροφάλου και κίνησης του εμβόλου. Για την πρώτη σειρά μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε κινητήρας με εύρος λειτουργίας στροφών 20 RPM-65 RPM. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε κινητήρας εύρους 90 RPM- 230 RPM και η διαδικασία επαναλήφθηκε.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με μηδενική χωρητικά C αφού το δοχείο Windkessel είναι πλήρως πληρωμένο με νερό.

Ο όγκος εμβολισμού V_b , που παραμετροποιεί το πλάτος παροχής αίματος ενός αγγείου είναι άλλη μεταβλητή για την οποία χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές. Συγκεκριμένα λήφθηκαν μετρήσεις για πλάτη διέγερσης $l_1=1,5$ cm, $l_2=3,5$ cm, $l_3=5$ cm και $l_4=8,5$ cm τα οποία αντιστοιχούν σε τιμές όγκου εμβολισμού $V_{b1}=10,6$ ml, $V_{b2}=24,74$ ml, $V_{b3}=35,34$ ml και $V_{b4}=60,08$ ml.

Τέλος, με περιστροφή του επάνω μέρους της βάνας πύλης μεταβάλλεται το διάκενό της γ_R . Η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιείται αρχικά με το διάκενο της βάνας σε θέση τέτοια ώστε η βάνα να θεωρείται οριακά κλειστή ($\gamma_R=0,06$ mm). Σε κάθε ακόλουθη μέτρηση το διάκενο αυξάνεται κατά $0,2116$ mm μέχρι το διάκενο της βάνας πύλης να γίνει $\gamma_R=4,29$ mm και έπειτα κατά $0,5275$ mm μέχρι $\gamma_R= 11,15083$ mm, όπου το διάκενο διαμέτρου 8 mm έχει αποκαλυφθεί και η βάνα θεωρείται πλήρως ανοικτή. Στη στροφή της βάνας πύλης είναι εγγεγραμμένα 10 σημάδια που

την χωρίζουν σε τμήματα των 36°. Γνωρίζοντας ότι η βάνα πύλης έχει βήμα $\beta=0,2116$ mm και χρησιμοποιώντας τα σημάδια αυτά, ρυθμίζεται κάθε φορά το διάκενο γ_R .

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για κάθε συνδυασμό των παραπάνω παραμέτρων.

Για σταθερό όγκο εμβολισμού V_b αρχικά επιλεγόταν μία ταχύτητα περιστροφής n του κινητήρα, το δοχείο Windkessel ήταν πλήρως γεμάτο με νερό και η βάνα πύλης ρυθμισμένη σε διάκενο τέτοιο ώστε να έχουμε την ελάχιστη παροχή. Μετά από κάθε μέτρηση γινόταν σταδιακό άνοιγμα του διακένου γ_R έως ότου η βάνα πύλης να είναι πλήρως ανοιχτή. Όταν έχουν ληφθεί μετρήσεις για κάθε τιμή του διακένου γ_R , τότε μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής n (RPM) του κινητήρα. Όταν καλυφτεί το εύρος του κινητήρα χαμηλών στροφών επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με τον κινητήρα υψηλότερων στροφών. Επίσης ελέγχεται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος το εύρος διακύμανσης να είναι σταθερό ώστε να είναι βέβαιο ότι δε βρισκόμαστε στο αρχικό μεταβατικό διάστημα της μέτρησης. Κάθε μέτρηση έχει διάρκεια περί τα τρία λεπτά ή μέχρι να πληρωθεί το δοχείο κατάθλιψης. Μετά την πλήρωση του το νερό στον χώρο Β το δοχείου κατάθλιψης αντλείται πίσω στο δοχείο παροχής

| Παράμετροι πειράματος | Επηρεαζόμενο μέγεθος | Ελάχιστη τιμή | Μέγιστη τιμή | Βήμα αύξησης της παραμέτρου | Πλήθος τιμών |
|------------------------------|----------------------|---------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| Στροφές κινητήρα | Συχνότητα εμβολισμού | 18 rpm | 326 rpm | 40 rpm | 8 |
| Μήκος διαδρομή στροφάλου | Όγκος εμβολισμού | 1,5 cm | 8,5 cm | 1,5 cm | 4 |
| Άνοιγμα διακένου βάνας πύλης | Αντίσταση στη ροή | 0,06 mm | 11,15 mm | 0,2611 mm-0,5275 mm | 34 |

5.2 Ανάλυση Μετρήσεων :

Η επεξεργασία των καταγεγραμμένων μετρήσεων γίνεται μέσω του προγράμματος MATLAB. Προκύπτουν διαγράμματα των πιέσεων (mmHg) - χρόνου στις 3 θέσεις των αισθητήρων πίεσης καθώς και μάζας (g)-χρόνου από τον αισθητήρα της δυναμοκυψέλης. Αποκόπτεται το τελικό τμήμα κάθε μέτρησης καθώς και το μεταβατικό τμήμα την στιγμή που τίθεται σε λειτουργία ο κινητήρας για ευχέρεια επεξεργασίας και ακεραιότητας των δεδομένων, καθώς η συχνότητα και το εύρος της ταλάντωσης της πίεσης πρέπει να έχουν σταθεροποιηθεί.

Η επεξεργασία των δεδομένων για την εξαγωγή των ζητούμενων μεγεθών πραγματοποιήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον του προγράμματος MATLAB.

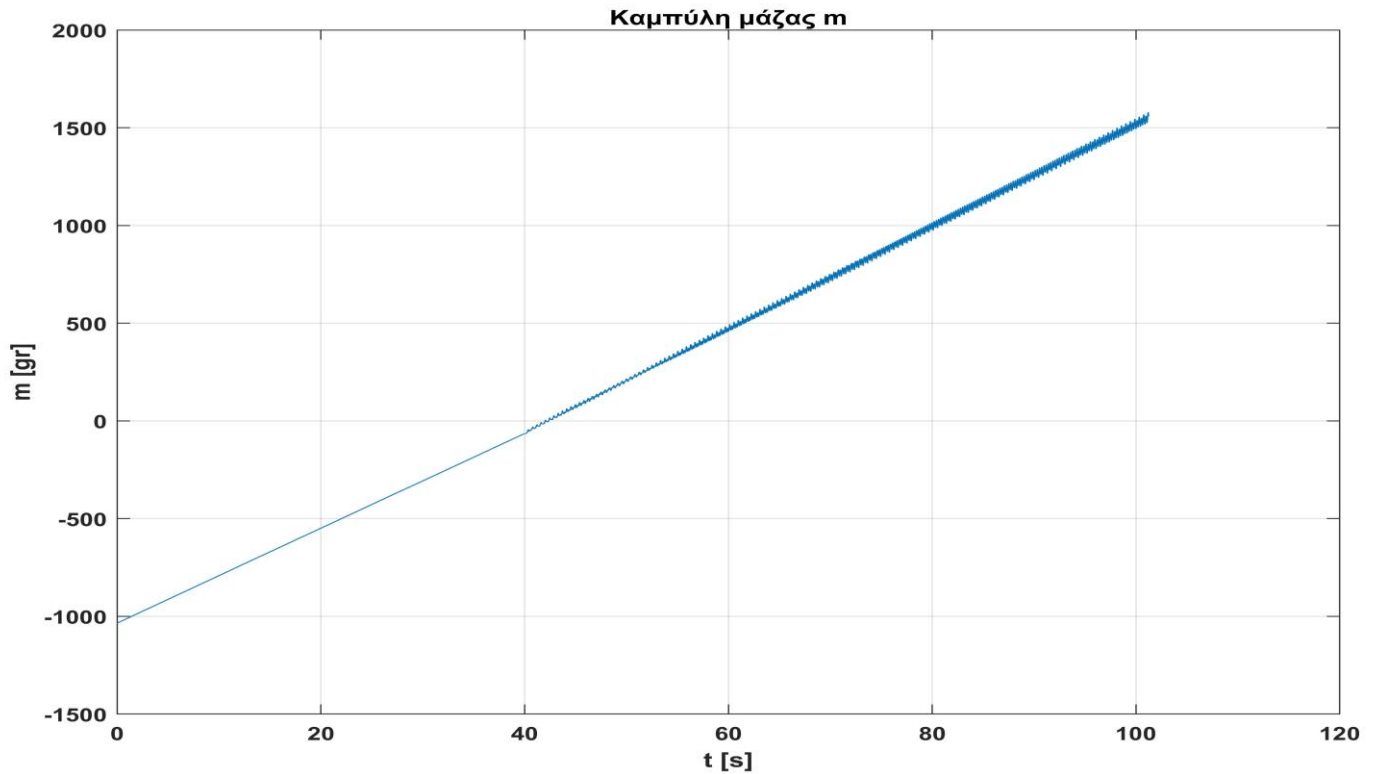
Αρχικά είναι σκόπιμο να υπολογιστεί η παροχή μάζας (\dot{m}) που προσδίδει η σταθερή αντλία στο δοχείο κατάθλιψης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την διατήρηση της υπερχειλίσσης σε αυτό. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Στο πρώτο τμήμα των μετρήσεων, για $t = 0-35$ s, με γραμμική παρεμβολή στο διάγραμμα μάζας σε συνάρτηση με τον χρόνο (Σχήμα 5-1(α)) προσδιορίζεται η εξίσωση της μάζας έγχυσης από την αντλία πρόσδοσης σταθερής παροχής στο τμήμα υπερχειλίσσης του δοχείου κατάθλιψης, η οποία είναι της μορφής $y = a * t + b$. Με χρήση της εξίσωσης αυτής υπολογίζουμε το βάρος που προστίθεται από την σταθερή αντλία. Το βάρος αυτό στη συνέχεια αφαιρείται από το ολικό βάρος όπως αυτό είχε ληφθεί από τις μετρήσεις της δυναμοκυψέλης. Το τελικό βάρος που προκύπτει είναι και το ζητούμενο. Στη συνέχεια γίνεται smoothing της καμπύλης για "καθαρισμό" από τυχόν θόρυβο.

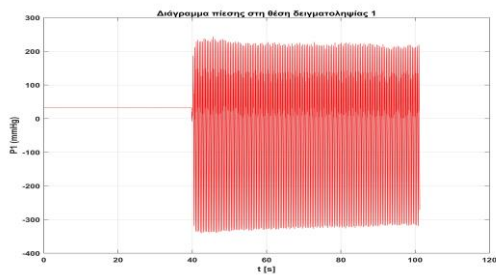
Στη συνέχεια για τον υπολογισμό των πιέσεων εργαζόμαστε με αντίστοιχο τρόπο. Αρχικά προσδιορίζεται η μέση πίεση και στις τρεις θέσεις δειγματοληψίας, όπως αυτές φαίνονται στο Σχήμα 4-1, για την κατάσταση της μόνιμης ροής. Στη συνέχεια εξετάζονται ξεχωριστά τα δεδομένα της δειγματοληψίας που αφορούν τη μη-μόνιμη ροή, δηλαδή για $t=55$ s έως την πλήρωση του δοχείου κατάθλιψης. Σημειώνεται ότι έχει γίνει αποκοπή της ενδιάμεσης μεταβατικής κατάστασης μεταξύ μόνιμης και μη-μόνιμης ροής κατά την επεξεργασία των δεδομένων. Γίνεται προσδιορισμός της μέσης, της μέγιστης και της ελάχιστης πίεσης για κάθε μια από τις τρεις θέσεις δειγματοληψίας. Συγκεκριμένα για τον υπολογισμό του μεγίστου και ελαχίστου της πίεσης, υπολογίζονται αρχικά τα τοπικά ακρότατα ($P_{max,i}$, $P_{min,i}$) για κάθε περίοδο (T_s) του χρόνου t της δειγματοληψίας. Στη συνέχεια προκύπτει ο μέσος όρος αυτών.

$$\overline{P_{max}} = \frac{\sum_1^N P_{max,i}}{N} \quad (5.2.1)$$

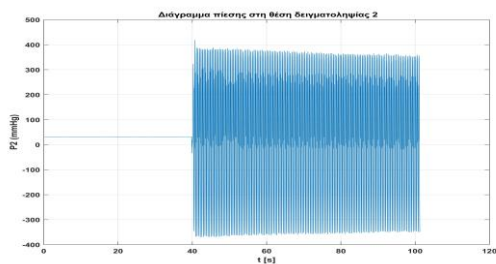
$$\overline{P_{min}} = \frac{\sum_1^N P_{min,i}}{N} \quad (5.2.2)$$



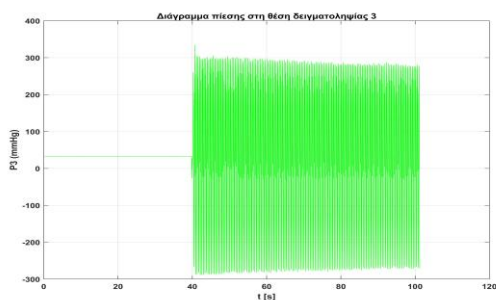
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 5-2 Πρωτογενή δεδομένα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας για $V_b=35,34$ ml, συχνότητα διέγερσης $f=2,31$ Hz και λόγο ανοιγματος διακένου βάνας πύλης $\gamma_r/d= 75,2$ %. Για χρόνο δειγματοληψίας από 0 -40 s λαμβάνονται μετρήσεις σε συνθήκες μόνιμης ροής (Steady). Στη συνέχεια για $t=40$ s, τίθεται σε λειτουργία η αντλία πιστονίου, οπότε έχουμε μεταβεί πλέον σε κατάσταση μη- μόνιμης ροής (Unsteady).

(α) Καμπύλη έγχυσης μάζας ρευστού συναρτήσει του χρόνου δειγματοληψίας. Για $t=0-40s$ λαμβάνονται μετρήσεις της μόνιμης κατάστασης ροής. Κατα το διάστημα αυτό είναι σε λειτουργία μόνο η αντλία πρόσδοσης σταθερής παροχής, Στη συνέχεια για $t=40$ s και ως ότου υπάρχει πλήρωση του δοχείου κατάθλιψης, τίθεται σε λειτουργία η πηγή διέγερσης, δηλαδή η αντλία πιστονίου

(β) Διάγραμμα πίεσης συναρτήσει του χρόνου στο σημείο δειγματοληψίας της θέσης 1 (Σχήμα 4-1).

(γ) Διάγραμμα πίεσης συναρτήσει του χρόνου στο σημείο δειγματοληψίας της θέσης 2 (Σχήμα 4-1).

(δ) Διάγραμμα πίεσης συναρτήσει του χρόνου στο σημείο δειγματοληψίας της θέσης 3 (Σχήμα 4-1).

Η νέα καμπύλη μάζας που προκύπτει είναι ημιτονοειδής μορφής (Σχήμα 5-2(α)). Για τον προσδιορισμό της εξίσωσης που την εκφράζει προκύπτει καμπύλη προσαρμογής η οποία είναι της μορφής γραμμικού συνδυασμού ημιτονικών ορών με γραμμικά ορίσματα ,όπως φαίνεται στη σχέση (5.2-2).

$$f(x) = a1 * \sin(b1 * x + c1) + a2 * \sin(b2 * x + c2) + a3 * \sin(b3 * x + c3) + a4 * \sin(b4 * x + c4) + a5 * \sin(b5 * x + c5) + a6 * \sin(b6 * x + c6) + a7 * \sin(b7 * x + c7) + a8 * \sin(b8 * x + c8) \quad (5.2-2)$$

Υπολογίζεται στη συνέχεια η παράγωγος της παραπάνω εξίσωσης και προκύπτει η παροχή (gr/s) .

$$\dot{m} = \frac{df(t)}{dt} \quad (5.2-3)$$

Από τις καταγεγραμμένες θερμοκρασίες προκύπτει η πυκνότητα ρ για κάθε μέτρηση. Σύμφωνα με τον τύπο του Kell 1992 :

$$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) = 999.85308 + 6.32693 \times 10^{-2} \cdot t - 8.523829 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 6.943248 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 3.821216 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 \quad (5.2-4)$$

Και υπολογίζεται η παροχή όγκου (ml/s) :

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (5.2-5)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ιξώδες μ , από τον τύπο του Krestin (1978).

$$\mu = \mu(20^\circ\text{C}) * 10^{\left\{ \frac{20-t}{t+96} [1.2364 - 1.37 \cdot 10^{-3} \cdot (20-t) + 5.7 \cdot 10^{-6} \cdot (20-t)^2] \right\}} \quad (5.2-6)$$

, όπου $\mu(20^\circ\text{C}) = 0.0010016 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1.0016 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Το κινηματικό ιξώδες υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.2-7)$$

Σε κάθε θέση υπολογίζεται ο αριθμός Reynolds (Re) καθώς και ο Womersley (W) από τις σχέσεις :

$$Re = u \cdot \frac{D}{\nu} \quad (5.2-8)$$

$$W = R \cdot \sqrt{\frac{D}{\nu}} \quad (5.2-9)$$

Όπου u μέση ταχύτητα του ρευστού

$$u = 4 \cdot \frac{Q}{(\pi \cdot D^2)}$$

και R, D η ακτίνα και η διάμετρος του σωλήνα αντίστοιχα.

Υπολογίζονται τα πλάτη παροχής και πίεσης σε κάθε θέση Q_b και P_b αντίστοιχα για τις θέσεις 2 και 3:

$$Q_b = Q_{max} - Q_{min} \quad (5.2-10)$$

$$P_b = P_{max} - P_{min} \quad (5.2-11)$$

Από την εξίσωση της ενέργειας για μη μόνιμη ροή με απώλειες στη διαδρομή του ρευστού μεταξύ

2^{ου} και 3^{ου} αισθητήρα έχουμε :

$$\frac{\rho}{2} \cdot U_2^2 + P_2 + \rho \cdot \int_2^3 \frac{\partial u}{\partial x} dx = \frac{\rho}{2} \cdot U_3^2 + P_3 + \zeta \cdot \frac{\rho}{2} U_2^2 \quad (5.2-12)$$

Ο όρος $\rho \cdot \int_2^3 \frac{\partial u}{\partial x} dx$ μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν μηδενικός και αμελητέος

επιπλέον ισχύει ότι $u_2 = u_3$ και $Q = \frac{u \cdot \pi \cdot D^2}{4}$, οπότε καταλήγουμε στη σχέση :

$$P_2 = P_3 + \zeta \cdot \frac{\rho}{2} U_2^2 \rightarrow P_2 - P_3 = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} U_2^2 = \frac{8 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} \quad (5.2-13)$$

Λύνοντας την σχέση ως προς ζ και υπολογίζοντας με τη μέση παροχή και πιέσεις υπολογίζεται η εμπέδηση της διάταξης ως εξής :

$$\zeta_m = \frac{\pi^2 \cdot D^4}{8 \cdot \rho} \cdot \frac{P_{m2} - P_{m3}}{Q_m^2} \quad (5.2-14)$$

Και αντίστοιχα επαναλαμβάνεται ο υπολογισμός για τα αντίστοιχα πλάτη παροχής και πίεσης :

$$\zeta_b = \frac{\pi^2 \cdot D^4}{8 \cdot \rho} \cdot \frac{P_{b2} - P_{b3}}{Q_b^2} \quad (5.2-1)$$

Στη συνέχεια για όγκο εμβολισμού $V_b = 35,34$ ml επιλέγουμε δυο τυπικές τιμές διακένου της βάννας και υπολογίζεται η εμπέδηση του συστήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο για μια περίοδο και δυο χαρακτηριστικές συχνότητες διέγερσης, με χρήση του παρακάτω τύπου :

$$(\zeta_{02} + \zeta_{10}) = \frac{P_1 - P_2}{\frac{\rho}{2} u_1 |u_1|} + \frac{1}{\frac{\rho}{2} u_1 |u_1|} \cdot \left[\rho \cdot L \cdot \frac{du}{dt} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{A_b} \right) \right] \quad (5.2-16)$$

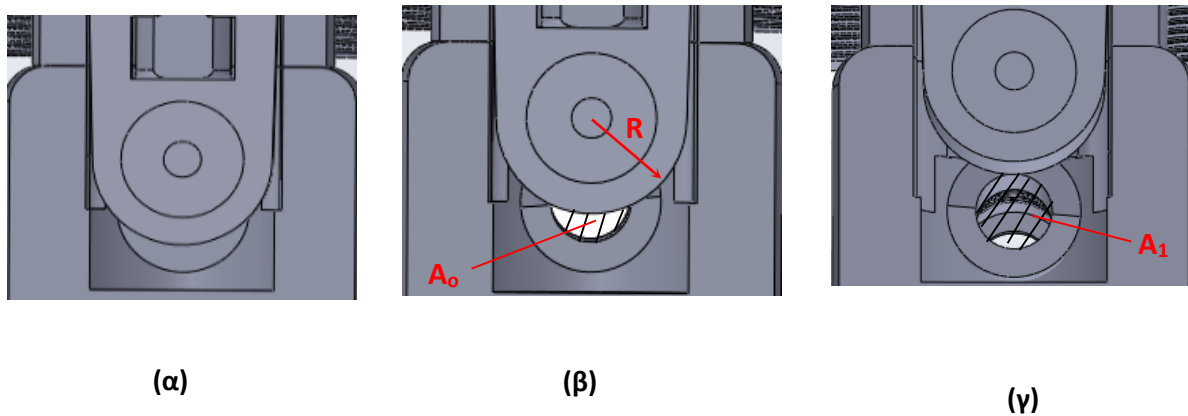
Αφού

$$u = 4 \cdot \frac{Q}{(\pi \cdot D^2)}$$

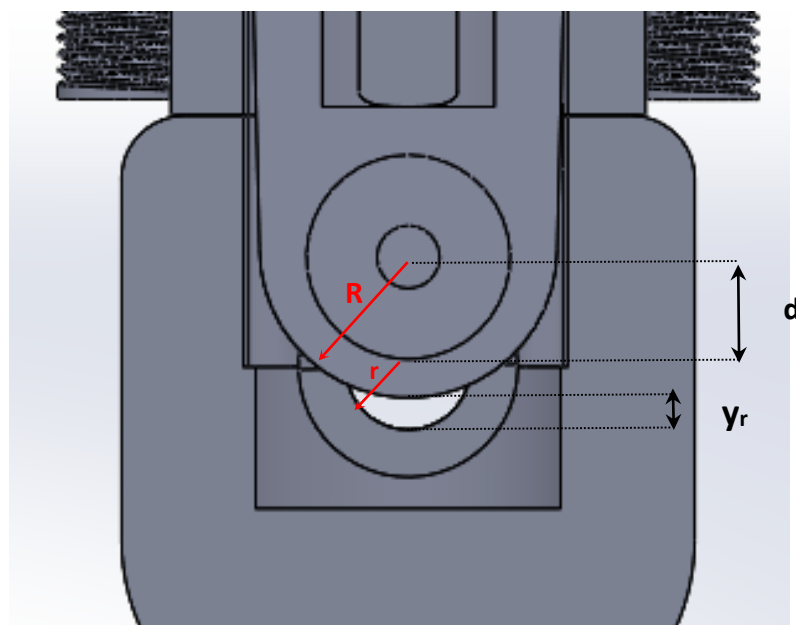
Καταλήγουμε στη σχέση της μορφής :

$$(\zeta_{02} + \zeta_{10}) = \frac{P_1 - P_2}{Q^2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot D^4}{8 \cdot \rho} + \frac{1}{Q^2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot D^4}{8 \cdot \rho} \cdot \left[\frac{2 \cdot \rho \cdot L}{\pi \cdot D^2} \cdot \left(1 + \frac{1}{A_b} \right) \cdot \frac{dQ}{dt} \right] \quad (5.2-17)$$

Για τον ακριβή υπολογισμό του διακένου της βάνας πύλης εργαστήκαμε ως εξής. Αρχικά η βάνα πύλης διαστασιολογήθηκε με ακρίβεια και λήφθηκαν σχέδια με χρήση laser(Σχ4.8).Οι εξωτερικές διαστάσεις μετρήθηκαν με τη χρήση ηλεκτρονικού παχύμετρου. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του προγράμματος Solidworks έγινε η τρισδιάστατη απεικόνιση (Σχ 4.8-4.10).



Σχήμα 5-3 Τρισδιάστατη απεικόνιση της βάνας πύλης σε τρεις χαρακτηριστικές φάσεις ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης , (α) για άνοιγμα διακένου βάνας πύλης $\gamma_r/d=0\%$ όπου η ακμή της σφήνας εφάπτεται στην ακμή της διατομής (β) για τυχαίο άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης (γ) για άνοιγμα διακένου βάνας πύλης $\gamma_r/d=100\%$, όπου έχει αποκαλυφθεί όλη η διατομή της σωλήνωσης και η βάνα θεωρείται πλήρως ανοιχτή.



Σχήμα 5-4 Λεπτομέρεια της βάνας πύλης για τυχαίο άνοιγμα γ_r .

Όπου $A_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ η εγκάρσια διατομή όπως φαίνεται στο σχήμα (5-1 γ) με εσωτερική διάμετρο της σωλήνωσης $D=0.008$ m και ακτίνα $r=0.004$ m.

Ζητούμενο είναι ο υπολογισμός του $A_b = \frac{A_o}{A_1}$, επομένως αρκεί να υπολογιστεί η διατομή A_o , η οποία αποτελεί την τομή δυο κυκλικών τομέων, για κάθε άνοιγμα του διακένου βάνας στο οποίο λήφθηκαν μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία.

$$y_r = r - (R - d) = d - R + r \quad (5.2 18)$$

Άρα

$$d = y_R + R - r \quad (5.2 19)$$

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα θα πρέπει πάντα να ισχύει :

$$0 \leq y_R \leq 2r$$

Είναι :

$$A_o = 2 \cdot \Delta + r^2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{R^2 - r^2 - d^2}{2 \cdot r \cdot d} \right) - R^2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{R^2 + r^2 - d^2}{2 \cdot R \cdot d} \right) \quad (5.2 20)$$

Όπου

$$\Delta = \frac{1}{4} \sqrt{(R + r + d) \cdot (R + d - r) \cdot (d - r - R) \cdot (r + R - d)} \quad (5.2 21)$$

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις ως προς d έχουμε

$$A_o = 2\Delta + r^2 \cdot \cos^{-1} \left(-\frac{y_R^2 + 2(R-r)(y_R-r)}{2r(y_R+R-r)} \right) - R^2 \cdot \cos^{-1} \frac{y_R^2 + 2(R-r)(y_R+R)}{2R(y_R+R-r)} \quad (5.2 22)$$

Όπου

$$\Delta = \frac{1}{4} \sqrt{(y_R + 2R) \cdot (y_R + 2R - 2r) \cdot y_R \cdot (2r - y_R)} \quad (5.2 23)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίστηκε το A_o για κάθε τιμή ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί :

| γ_R (mm) | Delta (mm ²) | A_o (mm ²) | $A_b=A_o/A_1$ | γ_R/d |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|
| 0,06 | 2,5050 | 0,0720 | 0,0010 | 0,0075 |
| 0,26 | 5,2230 | 0,6400 | 0,0130 | 0,0325 |
| 0,46 | 6,9530 | 1,4760 | 0,0290 | 0,0575 |
| 0,66 | 8,3310 | 2,4870 | 0,0490 | 0,0825 |
| 0,86 | 9,5080 | 3,6280 | 0,0720 | 0,1075 |
| 1,06 | 10,5470 | 4,8710 | 0,0970 | 0,1325 |
| 1,26 | 11,4820 | 6,1950 | 0,1230 | 0,1575 |
| 1,46 | 12,3340 | 7,5840 | 0,1510 | 0,1825 |
| 1,66 | 13,1170 | 9,0270 | 0,1800 | 0,2075 |
| 1,86 | 13,8380 | 10,5120 | 0,2090 | 0,2325 |
| 2,06 | 14,5030 | 12,0320 | 0,2390 | 0,2575 |
| 2,26 | 15,1180 | 13,5790 | 0,2700 | 0,2825 |
| 2,46 | 15,6860 | 15,1470 | 0,3010 | 0,3075 |
| 2,66 | 16,2070 | 16,7310 | 0,3330 | 0,3325 |
| 2,86 | 16,6840 | 18,3240 | 0,3650 | 0,3575 |
| 3,06 | 17,1180 | 19,9220 | 0,3960 | 0,3825 |
| 3,26 | 17,5090 | 21,5220 | 0,4280 | 0,4075 |
| 3,46 | 17,8560 | 23,1190 | 0,4600 | 0,4325 |
| 3,66 | 18,1600 | 24,7090 | 0,4920 | 0,4575 |
| 3,86 | 18,4200 | 26,2900 | 0,5230 | 0,4825 |
| 4,06 | 18,6330 | 27,8570 | 0,5540 | 0,5075 |
| 4,56 | 18,9580 | 31,6950 | 0,6310 | 0,5700 |
| 5,06 | 18,9540 | 35,3780 | 0,7040 | 0,6325 |
| 5,56 | 18,5700 | 38,8570 | 0,7730 | 0,6950 |
| 6,06 | 17,7240 | 42,0750 | 0,8370 | 0,7575 |
| 6,56 | 16,2790 | 44,9650 | 0,8950 | 0,8200 |
| 7,06 | 13,9720 | 47,4380 | 0,9440 | 0,8825 |
| 7,56 | 10,1230 | 49,3500 | 0,9820 | 0,9450 |
| 8 | 1,6000 | 50,2620 | 1,0000 | 0,9988 |

Πίνακας 5-1 Πίνακας υπολογισμού του διακένου βάνας πύλης για τις τιμές που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται διαγράμματα, όπως αυτά προέκυψαν από τις μετρήσεις που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

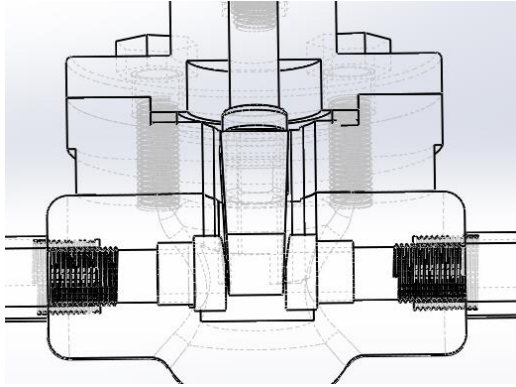
Όπως φάνηκε στο Σχήμα 5.3 (α) θεωρούμε ως $\gamma_r/d=0\%$ όταν η ακμή της σφήνας της βάνας πύλης εφάπτεται με την ακμή της σωλήνωσης στο χαμηλότερο σημείο. Παρόλο που θεωρητικά δεν θα έπρεπε να υπάρχει αξονική ροή, λόγω της μη ύπαρξης ελεύθερης, μετωπικής, εγκάρσιας διατομής, ωστόσο το ρευστό κάνει διέλευση μέσω το διακένου που διαμορφώνεται μεταξύ της κωνικής σφήνας και των δυο επικλινών στομιών του σωλήνα εκατέρωθεν. Το ρευστό σε αυτό το σημείο και σε αυτή την περίπτωση οδεύει εγκάρσια προς τα κάτω στο κενό της αύλακας που είναι διαμορφωμένη στο κάτω μέρος του σώματος της βάνας εσωτερικά (Σχήμα 6.1). Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια ροή τύπου “λαβυρίνθου” .

Αυτός ο τρόπος ροής υφίσταται για τιμές λόγου $\gamma_r/d < 0$, οριακά μέχρι η σφήνα να έρθει σε πλήρη επαφή με τα επικλινή στόμια του σωλήνα.

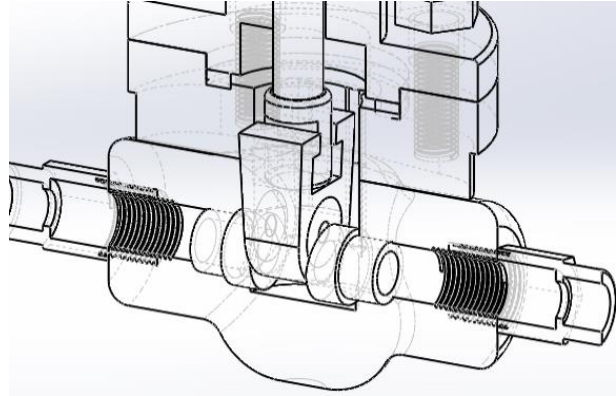
Ωστόσο υπάρχει δυσκολία, γι’ αυτούς τους λόγους, διέλευσης του ρευστού λόγω μεγάλης αντίστασης, γι’ αυτό και σε αυτές τις τιμές συχνά παρατηρείται οπισθοροή στην περίπτωση της παλλόμενης ροής. Σε αυτό το διάστημα, δηλαδή για λόγους $\gamma_r/d < 0\%$ η αντίσταση στη ροή είναι πάρα πολύ μεγάλη. Ιδιαίτερα όταν η συχνότητα διέγερσης είναι μεγάλη τότε λόγω της ιδιαίτερα υψηλής αντίστασης το ρευστό αδυνατεί να κινηθεί προς τη δεξαμενή κατάθλιψης και εξαναγκάζεται να οδηγηθεί προς τα πίσω στη δεξαμενή αναρρόφησης. Αυτός είναι ο λόγος που παρατηρείται αύξηση τόσο της μέσης τιμής όσο και του πλάτους της πίεσης στον αισθητήρα ανάντι της βάνας. Αυτή η οπισθοροή δεν μπορεί να καταγραφεί στη δεξαμενή κατάθλιψης μέσω της δυναμοκυψέλης μιας και η βάννα είναι τόσο πολύ κλειστή που στραγγαλίζει τη ροή.

Θεωρούμε ως $\gamma_r/d=100\%$ όταν η ακμή της σφήνας της βάνας πύλης εφάπτεται με την ακμή της σωλήνωσης στο ανώτερο σημείο της (Σχήμα 5.3 γ) σε αυτή την περίπτωση η ελεύθερη εγκάρσια διατομή είναι οριακά ολόκληρο το εμβαδό της εγκάρσιας διατομής του σωλήνα.

Όταν ο λόγος $\gamma_r/d \geq 100\%$ τότε το άνοιγμα της εγκάρσιας, μετωπικής επιφανείας παραμένει το ίδιο , ωστόσο δημιουργείται μια απότομη διαστολή στην περιοχή κάτωθι της σφήνας η οποία δημιουργεί επιπλέον τοπικές απώλειες λόγω ανακυκλοφοριών του ρευστού στην περιοχή αυτή. Το ρευστό από τη διαστολή οδεύεται σε απότομη συστολή για να εισαχθεί προς το σωλήνα εξόδου της βάνας πύλης.

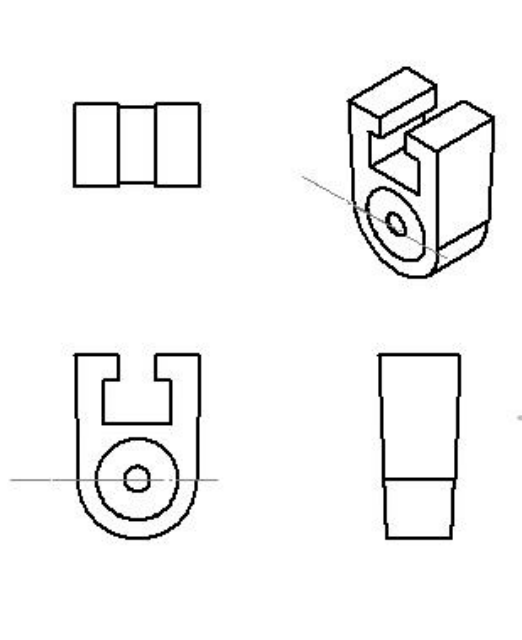


(α)



(β)

Σχήμα 6-1 Τρισδιάστατη απεικόνιση βάνας πύλης.



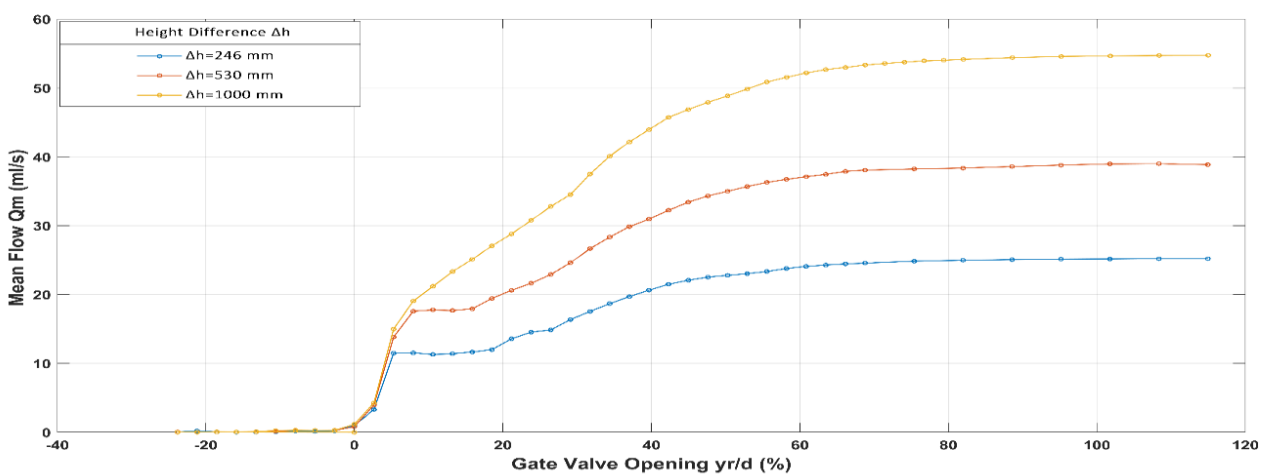
Σχήμα 6-2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της σφήνας της βάνας πύλης σε διάφορες όψεις

6.1 : Διαγράμματα μόνιμης ροής (Steady Flow)

Για τις μετρήσεις μόνιμης ροής, η δυναμοκυψέλη και το δοχείο κατάθλιψης τοποθετούνται χαμηλότερα της αρχικής τους θέσης με διαφορά ύψους Δh , έτσι ώστε να δημιουργηθεί ροή λόγω της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των δύο δοχείων. Συγκεκριμένα πραγματοποιούνται μετρήσεις για τρία διαφορετικά ύψη $\Delta h_1=24,6$ cm, $\Delta h_2=53$ cm, $\Delta h_3=100$ cm. Γίνεται καταγραφή της μάζας m και των πιέσεων P_1, P_2, P_3 (Σχήμα 4.1) μέχρι πλήρωσης του δοχείου κατάθλιψης. Για κάθε ύψος Δh η διαδικασία επαναλαμβάνεται με σταδιακό άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης. Με την βάνα αρχικά πλήρως ανοιχτή λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση. Στην συνέχεια κλείνοντας τελείως το διάκενο αρχικά πραγματοποιείται περιστροφή κατά 36° , η οποία αντιστοιχεί σε ανύψωση του διακένου κατά $0,2116$ mm. Όταν το διάκενο της βάνας είναι κατά 57% ανοιχτό, οι μετρήσεις λαμβάνονται με περιστροφή κατά 90° , η οποία αντιστοιχεί σε ανύψωση το διακένου κατά $0,5611$ mm. Σε κάθε μέτρηση καταγράφεται η θερμοκρασία αέρα και νερού.

Τα μεγέθη που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας επεξεργάστηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του προγράμματος MATLAB, ο κώδικας επεξεργασίας παρατίθεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

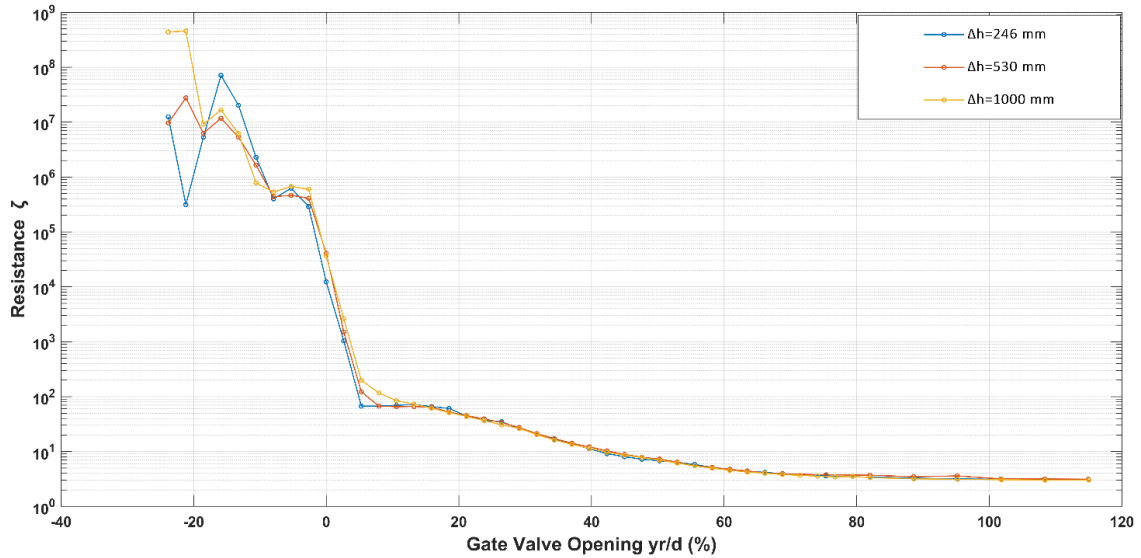
Η καμπύλης της μάζας συναρτήσει του λόγου ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης ως προς την διάμετρο της σωληνώσεων παρουσιάζεται στο διάγραμμα (Σχήμα 6.3).



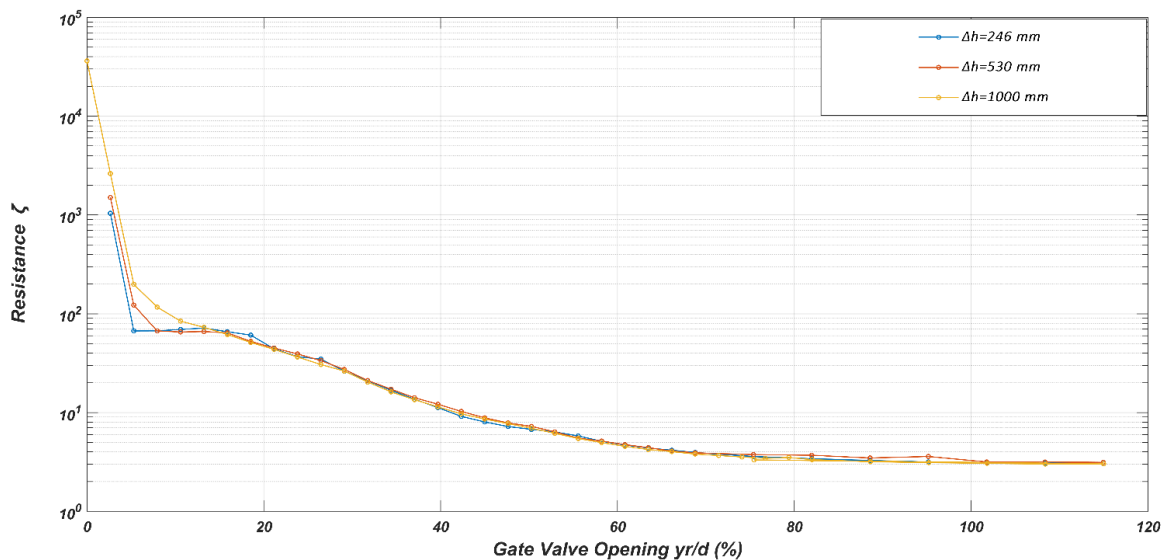
Σχήμα 6-3 Διάγραμμα μέσης παροχής Q_m με το ποσοστό ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης y_r/d (%) (-23,81 % έως 114,82%, για όλες τις διαφορές ύψους, στην περίπτωση της μόνιμης ροής (Steady Flow).

Για μικρό άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης, δηλαδή για τιμές $y_r/d \leq 0$, η μέση παροχή είναι σχεδόν μηδενική. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη εμποδίζοντας τη διέλευση του ρευστού. Όσο το διάκενο της βάνας πύλης μεγαλώνει παρατηρείται αύξηση της παροχής ανάλογη με την υψομετρική διαφορά, έως $y_r/d=70\%$. Από εκεί και πέρα η παροχή σταθεροποιείται για κάθε άνοιγμα της βάνας πύλης $y_r/d > 70\%$. Αυτό οφείλεται στη σταθεροποίηση του συντελεστή απωλειών για μεγάλα ανοίγματα της βάνας πύλης όπως δείχνει το σχήμα 6.3. Γενικά η παροχή αυξάνεται με την αύξηση της υψομετρικής διαφοράς.

Το διάγραμμα της αντίστασης στη ροή σε συνάρτηση με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης φαίνεται στο Σχήμα 6-4. Στη συνέχεια για καλύτερη επισκόπηση του φαινομένου αποκόπτονται οι τιμές για τις οποίες $\gamma_r/d < 0\%$, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5.



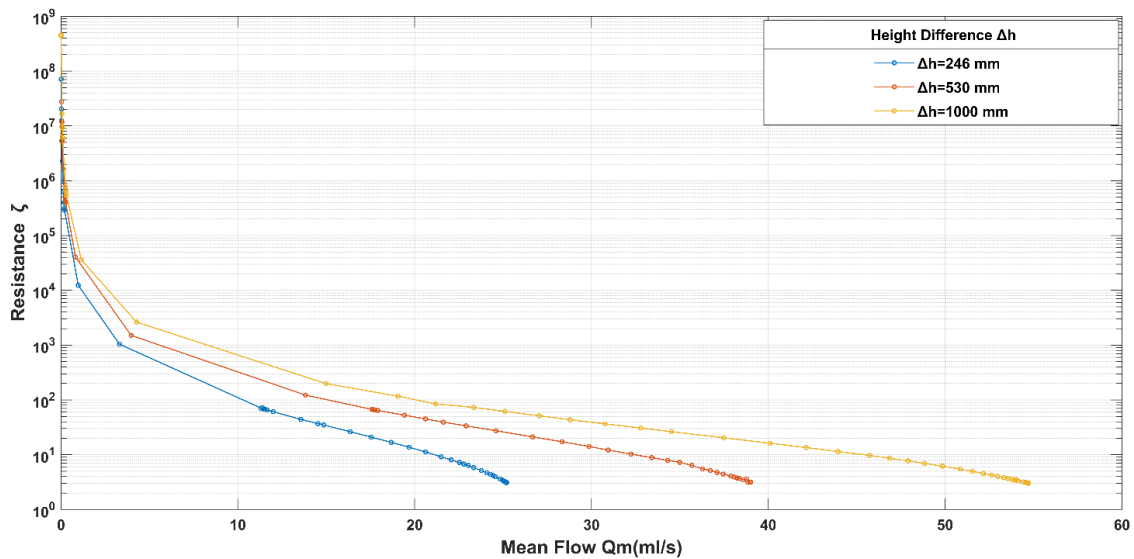
Σχήμα 6-4 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ με το ποσοστό ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8125 % εως 114,8229%) , για όλες τις διαφορές ύψους, στην περίπτωση της μόνιμης ροής (Steady Flow) .



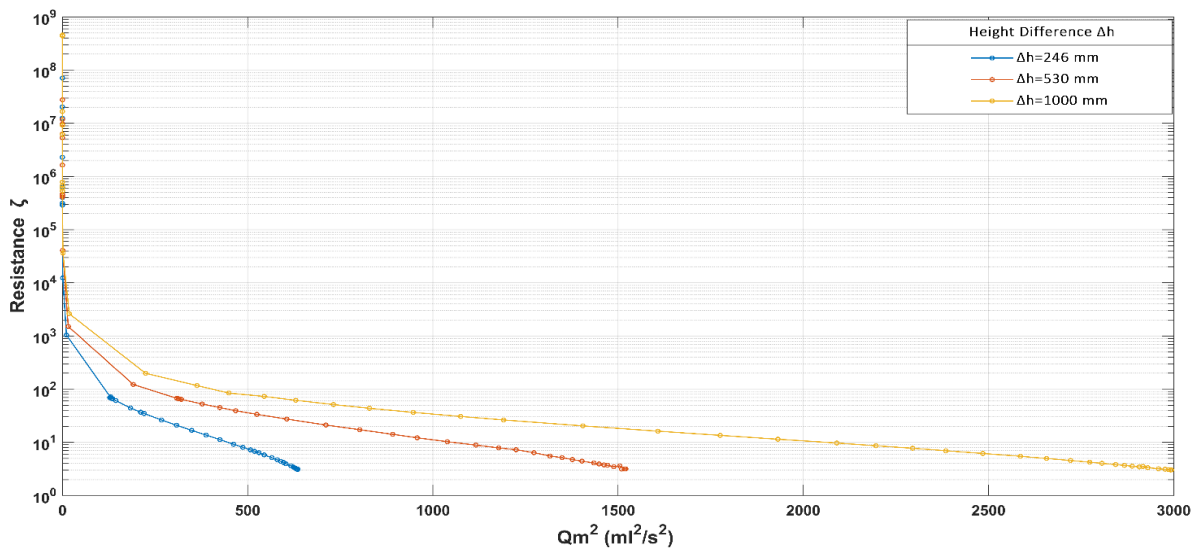
Σχήμα 6-5 Λεπτομέρεια διαγράμματος αντίστασης στη ροή ζ με το ποσοστό ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (0%-114%), για όλες τις διαφορές ύψους, στην περίπτωση της μόνιμης ροής (Steady Flow).

Η αντίσταση στη ροή ζ αυξάνεται με το κλείσιμο του διακένου της βάνας, όπως ήταν αναμενόμενο αφού το ρευστό συναντά ολοένα και μεγαλύτερη δυσκολία στη διέλευση του. Επίσης αναδεικνύεται ότι η αντίσταση στη ροή ζ είναι ανεξάρτητη του αριθμού Reynolds παρόλο που ο ίδιος μεταβάλλεται με την υψομετρική διαφορά λόγω μεταβολής της ταχύτητας. Για κάθε αριθμό Reynolds του πειράματος (εως 9000 περίπου) φαίνεται ο συντελεστής ζ να εξαρτάται μόνο από το άνοιγμα της βάνας πύλης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της αντίστασης στη ροή σε συνάρτηση με την μέση παροχή Q_m (Σχήμα 6.6) και το τετράγωνο της μέσης παροχής Q_m^2 (Σχήμα 6.7).

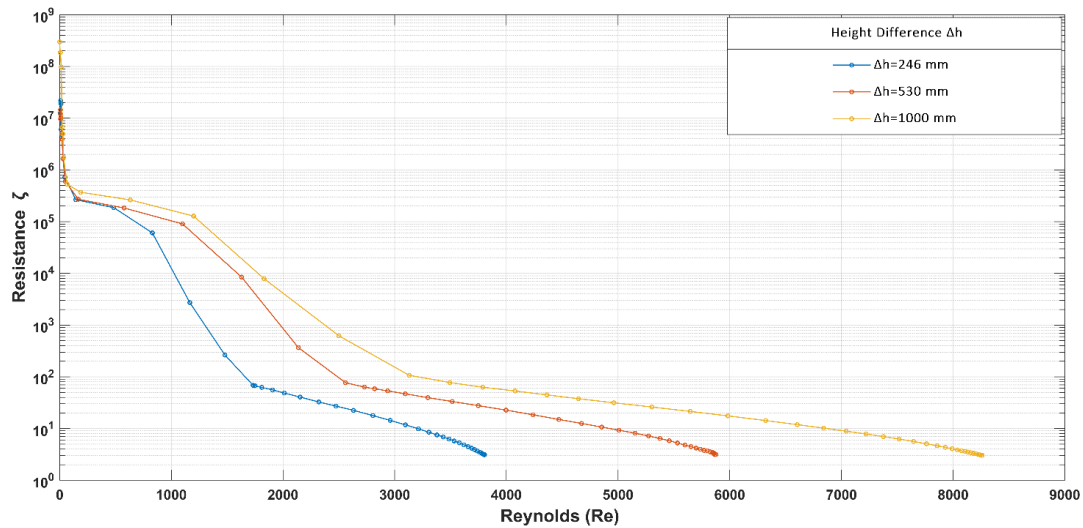


Σχήμα 6-6 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τη μέση παροχή Q_m για όλες τις διαφορές ύψους, στην περίπτωση της μόνιμης ροής (Steady Flow).

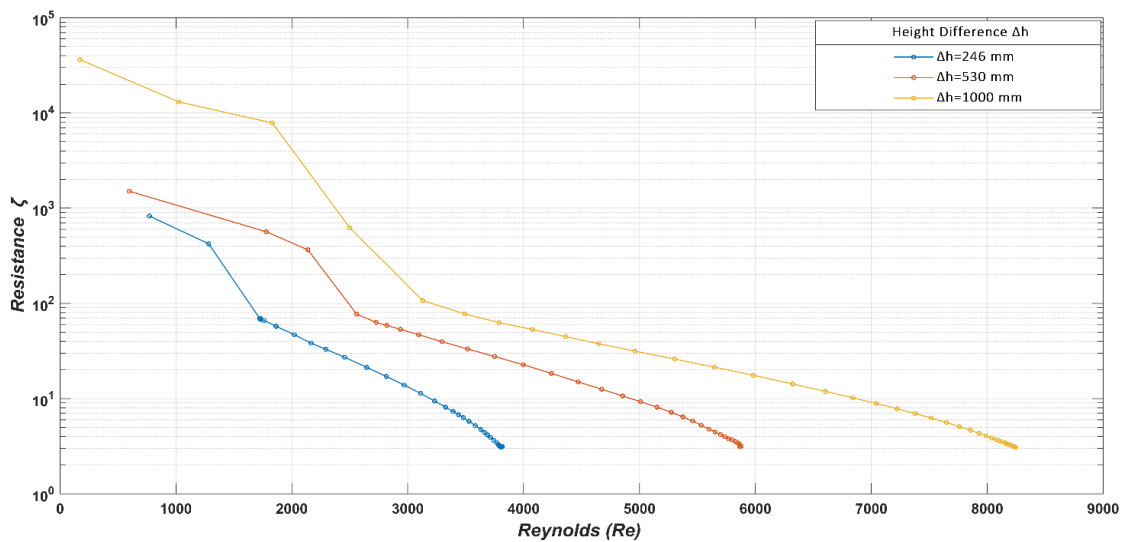


Σχήμα 6-7 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με το τετράγωνο της μέσης παροχής Q_m^2 για όλες τις διαφορές ύψους, στην περίπτωση της μόνιμης ροής (Steady Flow).

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα της αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον αδιάστατο αριθμό Reynolds (Re). Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.8 απεικονίζεται η μεταβολή των μεγεθών για άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης από -23,81 % έως 114,82 %. Ενώ στη συνέχεια στο διάγραμμα του Σχήματος 6.9 η μεταβολή των προαναφερθέντων μεγεθών για τιμές ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης από 0% έως 114,82 %.



Σχήμα 6-8 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds (Re) για όλες τις διαφορές ύψους, στην περίπτωση της μόνιμης ροής (Steady Flow) .



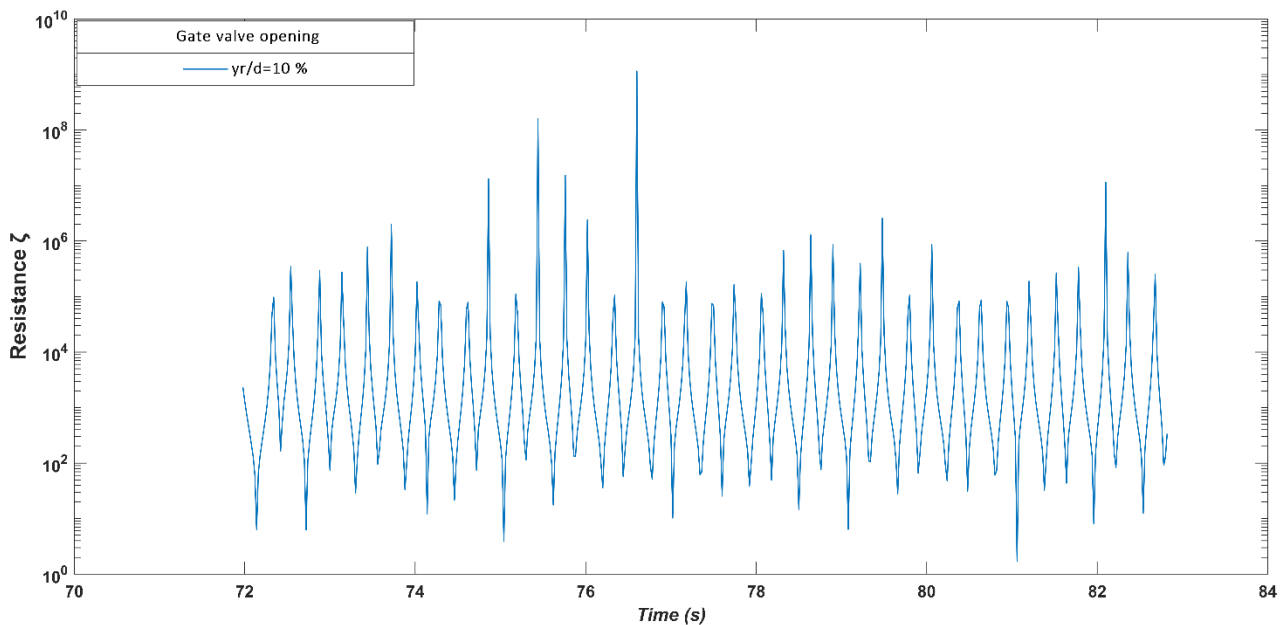
Σχήμα 6-9 Λεπτομέρεια διαγράμματος αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds (Re) για όλες τις διαφορές ύψους, στην περίπτωση της μόνιμης ροής (Steady Flow).

6.2 Μη μόνιμη ροή (Unsteady Flow)

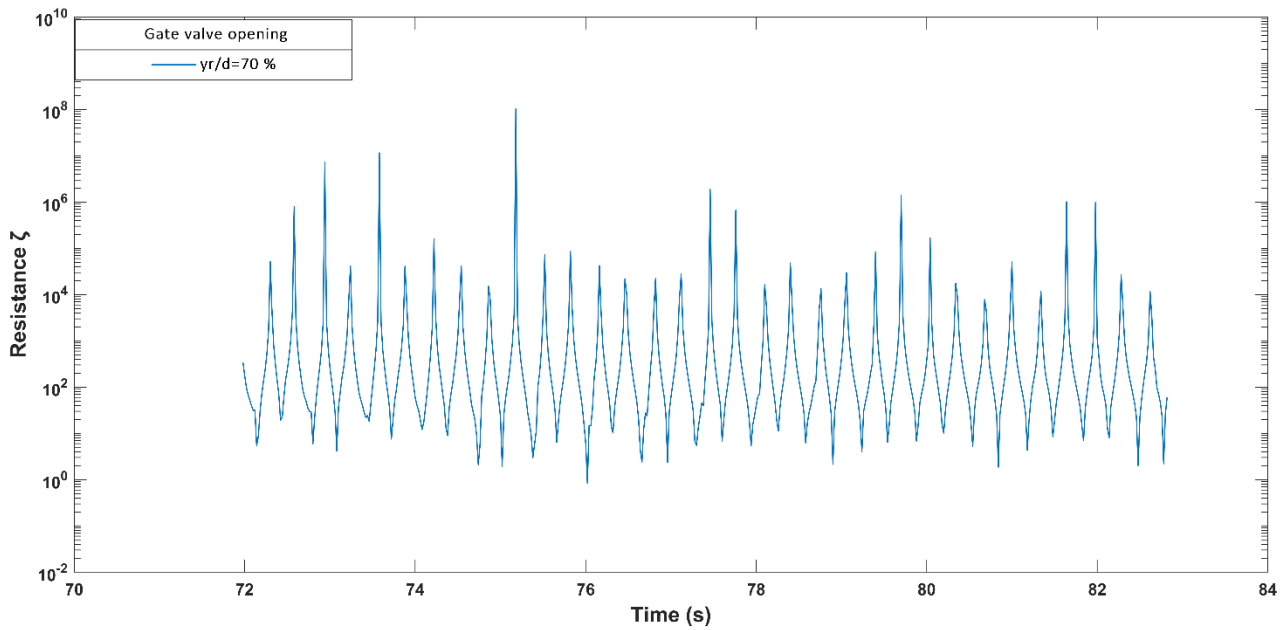
6.2.1 Διαγράμματα εμπέδησης της εγκατάστασης σε συνάρτηση με το χρόνο.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα αντίστασης σε συνάρτηση με το χρόνο για όγκο εμβολισμού $V_b=30.5$ ml και συχνότητες διέγερσης $f=1,2$ Hz (Σχήμα 6-10 έως 6-12) και $f= 2,13$ Hz (Σχήμα 6-13 έως 6-15). Επιλέχτηκαν δυο χαρακτηριστικές τιμές ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης ($\gamma_r/d=10\%$ και $\gamma_r/d=70\%$).

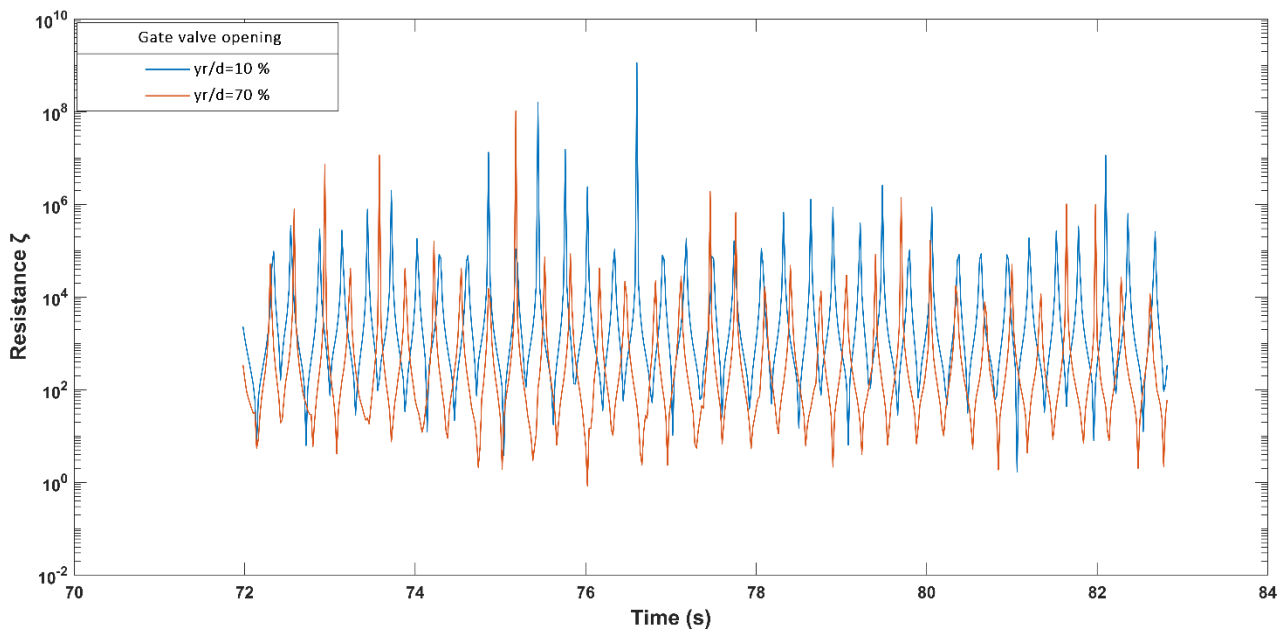
Συχνότητα διέγερσης $f=1,2$ Hz :



Σχήμα 6-10 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον χρόνο δειγματοληψίας t (s), για συχνότητα διέγερσης $f= 1.2$ Hz και τιμή ανοίγματος διακένου βάνας $\gamma_r/d=10$ %.

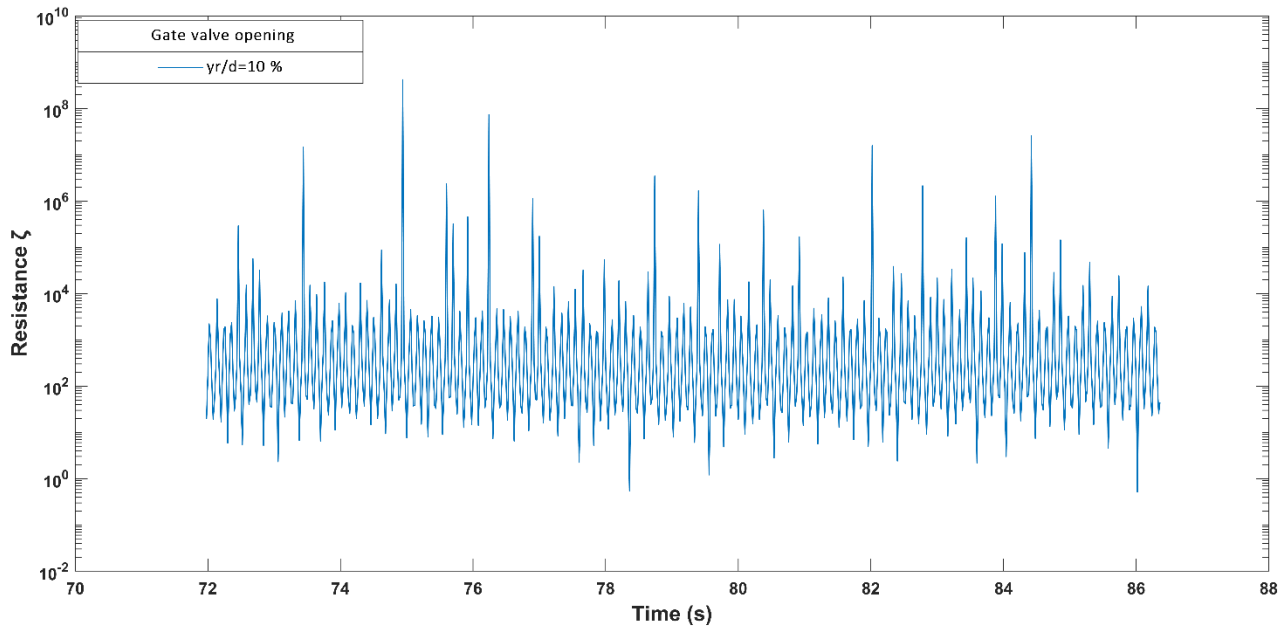


Σχήμα 6-11 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον χρόνο δειγματοληψίας t (s), για συχνότητα διέγερσης $f=1.2$ Hz και τιμή ανοίγματος διακένου βάννας $\gamma_r/d=70\%$.

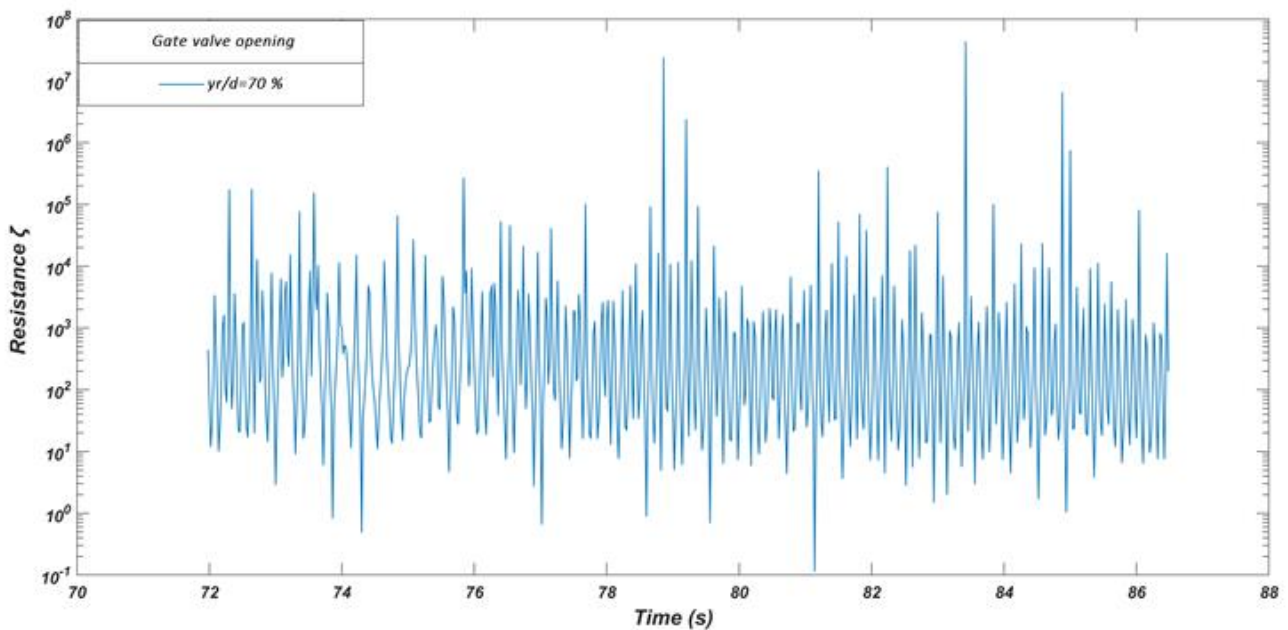


Σχήμα 6-12 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον χρόνο δειγματοληψίας t (s), για συχνότητα διέγερσης $f=1.2$ Hz και τιμές ανοίγματος διακένου βάννας 10 % και 70 % (Λεπτομέρεια διαγράμματος φαίνεται στο παράρτημα Β)

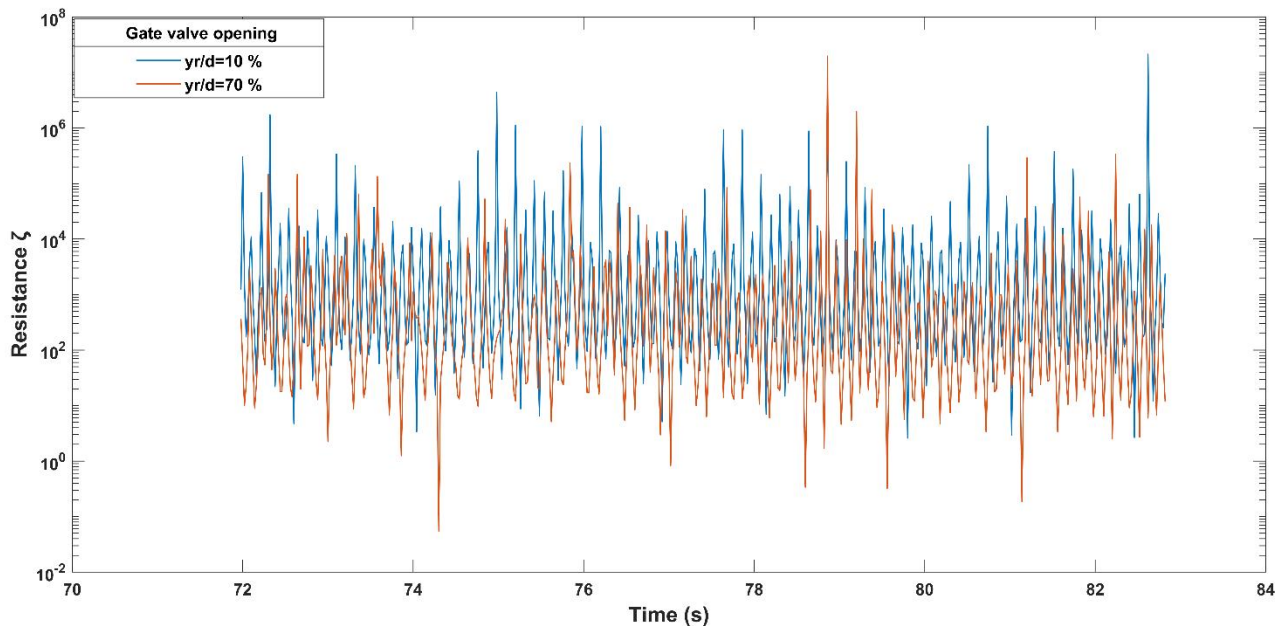
Συχνότητα διέγερσης $f=2,13$ Hz :



Σχήμα 6-13 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον χρόνο δειγματοληψίας t (s), για συχνότητα διέγερσης $f=2,13$ Hz και τιμή ανοίγματος διακένου βάνας $\gamma r/d=10\%$.



Σχήμα 6-14 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον χρόνο δειγματοληψίας t (s), για συχνότητα διέγερσης $f=2,13$ Hz και τιμή ανοίγματος διακένου βάνας $\gamma r/d=70\%$.



Σχήμα 6-15 Διάγραμμα αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον χρόνο δειγματοληψίας t (s) , για συχνότητα διέγερσης $f=2,13$ Hz και τιμές ανοίγματος διακένου βάνας 10 % και 70 % (λεπτομέρεια διαγράμματος φαίνεται στο παράρτημα Β).

Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν την συμπεριφορά της ρευστομηχανικής αντίστασης στη ροή ζ σε συνάρτηση με τον χρόνο. Εξετάζονται οι περιπτώσεις δυο διαφορετικών συχνοτήτων διέγερσης και για δύο χαρακτηριστικές τιμές του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης. Όσο η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και το πλάτος του συντελεστή της αντίστασης. Ωστόσο για δεδομένη συχνότητα διέγερσης, όσο το διάκενο της βάνας πύλης αυξάνεται το πλάτος της αντίστασης ζ δεν μεταβάλλεται, ενώ η μέση τιμή της μειώνεται.

6.2.2 Διαγράμματα μη-μόνιμης ροής

Για τις μετρήσεις της μη-μόνιμης ροής τα δοχεία παροχής και κατάθλιψης τοποθετούνται έτσι ώστε οι υπερχειλίσεις τους να βρίσκονται σε ίσο ύψος από την βάση της διάταξης. Για την διατήρηση των υπερχειλίσεων τόσο στο δοχείο κατάθλιψης όσο και στο δοχείο παροχής τίθενται σε λειτουργία αντλίες, για την επίτευξη συνεχούς πλήρωσης του τμήματος υπερχείλισης του δοχείου. Η διαδικασία λήψης μετρήσεων αποτελείται από δυο τμήματα. Το πρώτο τμήμα, το οποίο διαρκεί 40 s, αφορά τον προσδιορισμό της σταθερής παροχής υπερχείλισης της αντλίας στο δοχείο κατάθλιψης. Στην συνέχεια ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία προκαλώντας περιστροφή του στροφάλου και κίνησης του εμβόλου. Οι μετρήσεις πλέον λαμβάνονται με την επιβολή διέγερσης στο σύστημα.

Για την πρώτη σειρά μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε κινητήρας με εύρος λειτουργίας στροφών 18 RPM-65 RPM. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε κινητήρας εύρους 90 RPM- 230 RPM και η διαδικασία επαναλήφθηκε.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με μηδενική χωρητικά C αφού το δοχείο Windkessel είναι πλήρως πληρωμένο με νερό.

Ο όγκος εμβολισμού V_b ρυθμιζόταν μέσω του πλάτους διέγερσης. Συγκεκριμένα λήφθηκαν μετρήσεις για πλάτη διέγερσης $l_1=1,5$ cm, $l_2=3,5$ cm, $l_3=5$ cm και $l_4=8,5$ cm τα οποία αντιστοιχούν σε τιμές όγκου εμβολισμού $V_{b1}=10,6$ ml, $V_{b2}=24,74$ ml, $V_{b3}=35,34$ ml και $V_{b4}=60,08$ ml.

Τέλος, με περιστροφή του επάνω μέρους της βάνας πύλης μεταβάλλεται το διάκενό της γ_R . Η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιείται αρχικά με το διάκενο της βάνας σε θέση τέτοια ώστε η βάνα να θεωρείται οριακά κλειστή ($\gamma_R=0,06$ mm). Σε κάθε ακόλουθη μέτρηση το διάκενο αυξάνεται κατά 0,2116 mm μέχρι το διάκενο της βάνας πύλης να γίνει $\gamma_R=4,29$ mm και έπειτα κατά 0,5275 mm μέχρι $\gamma_R= 11,15083$ mm, όπου το διάκενο διαμέτρου 8 mm έχει αποκαλυφθεί και η βάνα θεωρείται πλήρως ανοικτή.

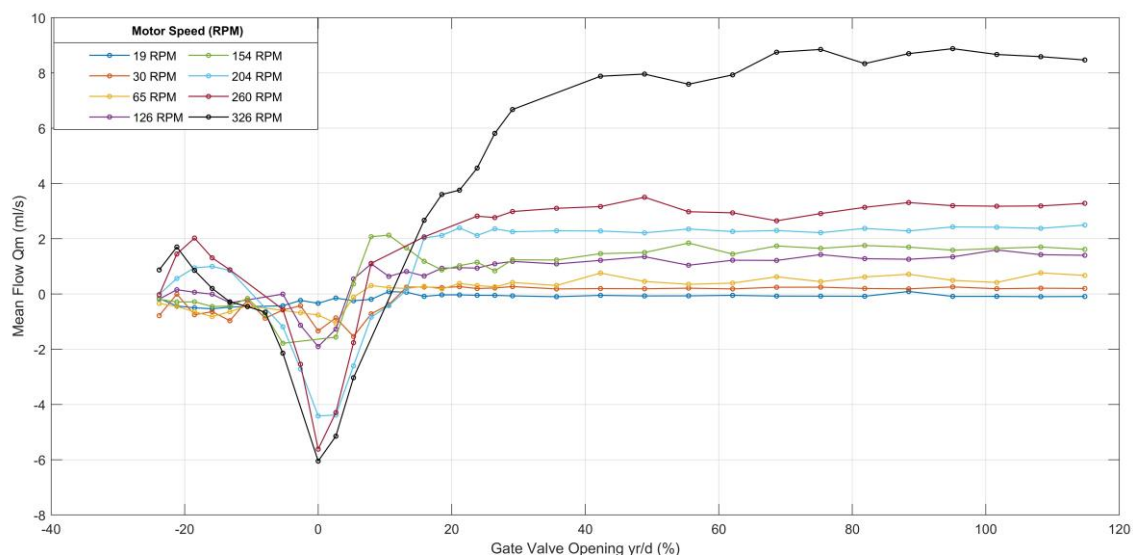
Ακολουθούν διαγράμματα μεγεθών για όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων που αναφέρθηκαν .

Τα ακόλουθα διαγράμματα αφορούν τα εξής μεγέθη για κάθε μέτρηση:

- Διάγραμμα μέσης παροχής Q_m με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d .
- Διάγραμμα πλάτους παροχής Q_b με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d .
- Διάγραμμα διαφοράς πλάτους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$ με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d .
- Διάγραμμα διαφοράς μέσης πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$ με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d .
- Διάγραμμα μέσης εμπέδησης ζ_m με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d .
- Διάγραμμα πλάτους εμπέδησης ζ_b με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d .

6.2.2.1 Διαγράμματα μεγεθών για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6 \text{ ml}$

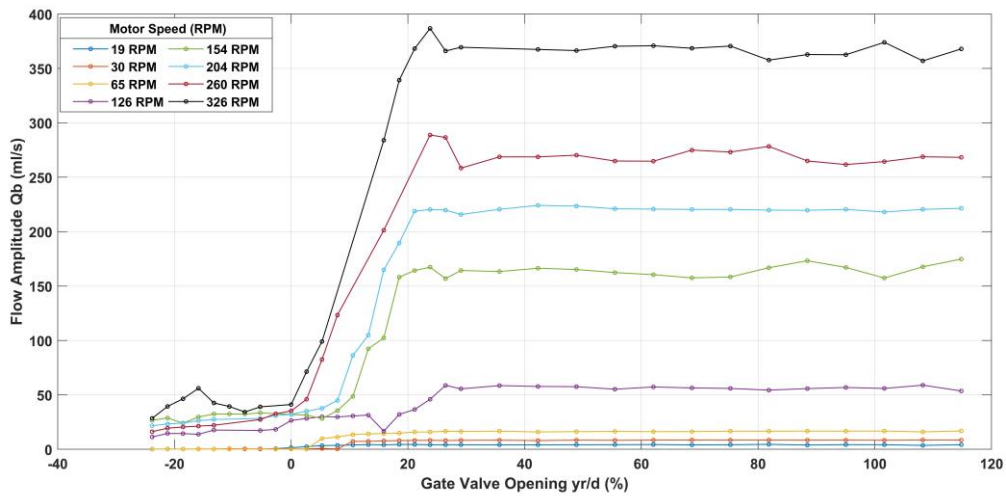
Αρχικά παρατίθεται το διάγραμμα της μέσης παροχής Q_m σε συνάρτηση με τον λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d για εύρος συχνοτήτων από 0,31 Hz έως 5,43 Hz.



Σχήμα 6-16 Διάγραμμα της μέσης παροχής Q_m για όγκο εμβολισμού $V_b=10,6 \text{ ml}$ των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

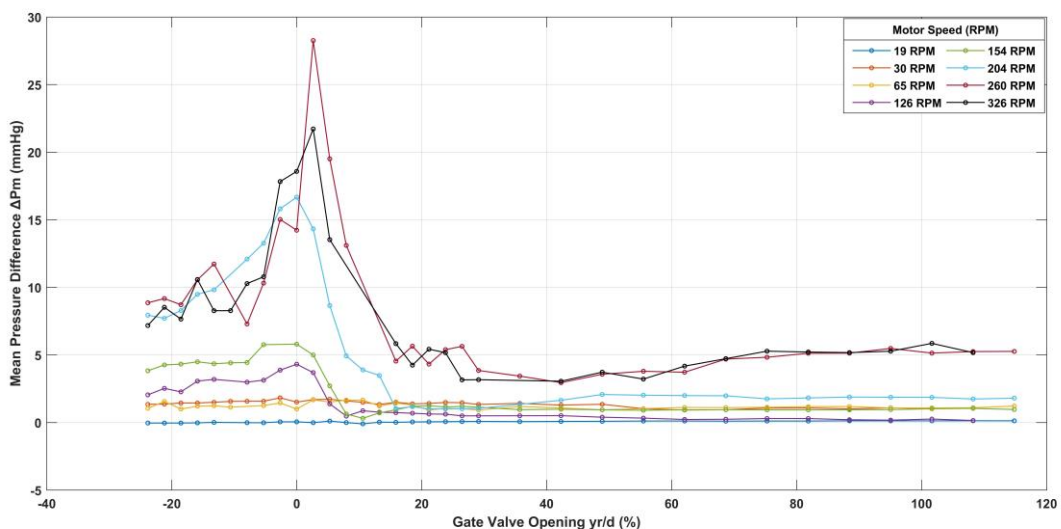
Η μέση παροχή (Σχήμα 6-16) αυξάνεται με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης αλλά και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Στην περιοχή όπου το διάκενο της βάνας πύλης είναι πολύ μικρό, δηλαδή για $\gamma_r/d \leq 0$, η μέση παροχή της ροής λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές. Όσο η σφήνα της βάνας πύλης ανυψώνεται η μέση παροχή αυξάνεται, ενώ για άνοιγμα του διακένου $\gamma_r/d > 10\%$ λαμβάνει πλέον μόνο θετικές τιμές. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 30\%$ η παροχή σταθεροποιείται.

Ακολουθεί το διάγραμμα πλάτους παροχής Q_b (Σχήμα 6-17) για μεταβλητές συχνότητες διέγερσης σε συνάρτηση με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d . Το πλάτος της παροχής έχει παρόμοια συμπεριφορά. Όσο το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης και συχνότητα διέγερσης αυξάνονται τόσο το πλάτος παροχής Q_b λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές, ενώ για $\gamma_r/d \geq 25\%$ σταθεροποιείται. Σημείο στο οποίο εμφανίζεται και ένα μέγιστο για το πλάτος της παροχής.



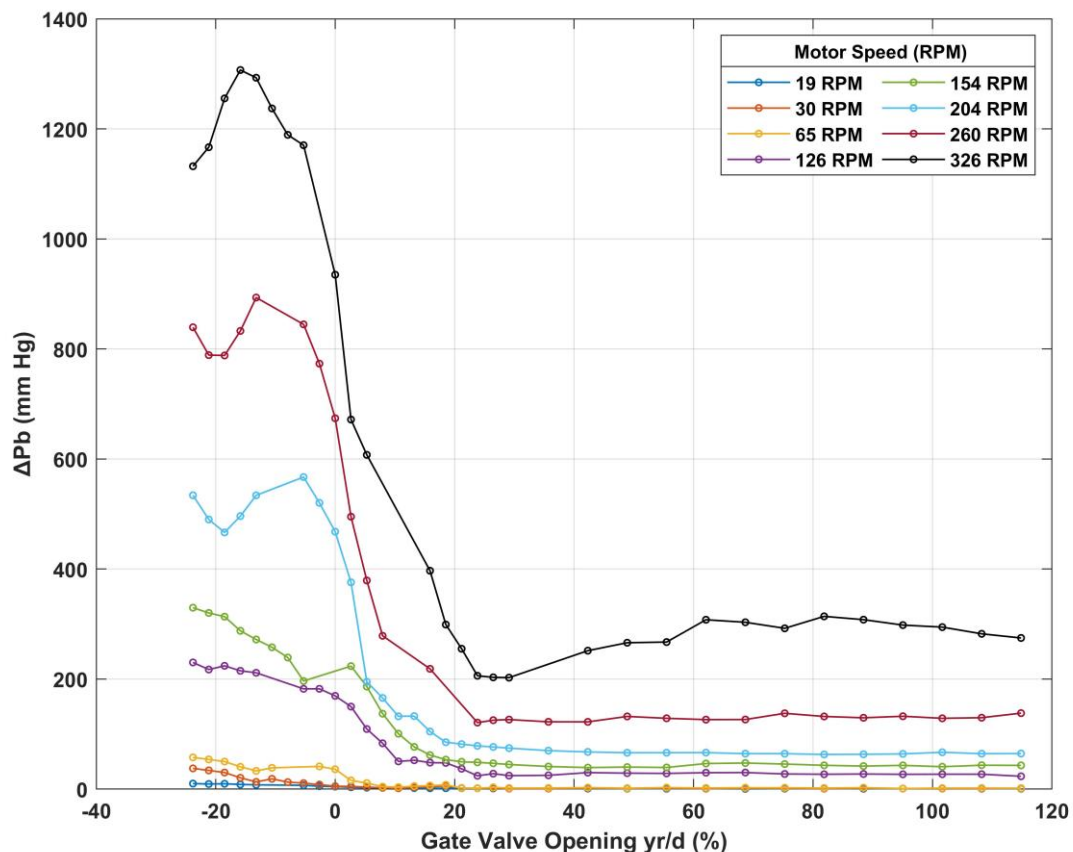
Σχήμα 6-17 Διάγραμμα του πλάτους παροχής Q_b για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Ακολουθεί το διάγραμμα διαφοράς μέσης πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$ (Σχήμα 6-18) με τον λόγο του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d . Παρατηρούμε ότι με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης μειώνεται η διαφορά πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$, ενώ για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d > 20\%$ η διαφορά της μέσης πίεσης σταθεροποιείται. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης τόσο αυξάνεται και η διαφορά της μέσης πίεσης για δεδομένο άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης. Όπως είναι αναμενόμενο, εφόσον ο αισθητήρας πίεσης στη θέση 3 είναι τοποθετημένος κατάντι της βάνας πύλης, η πτώση πίεσης προκαλούμενη από το στοιχείο αντίστασης έχει σαν αποτέλεσμα η διαφορά πίεσης να είναι πάντα θετική.



Σχήμα 6-18 Διάγραμμα της διαφοράς μέσης πίεσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 $\Delta P_{m(2-3)}$ για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα της διαφοράς του πλάτους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$ σε συνάρτηση με το λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης (Σχήμα 6-19). Με το άνοιγμα του λόγου του διακένου της βάνας πύλης μειώνεται το πλάτος του εύρους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$. Παρατηρείται ότι για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d > 30\%$ η διαφορά του πλάτους πίεσης σταθεροποιείται. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης τόσο αυξάνεται και η διαφορά του πλάτους της πίεσης για δεδομένο άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης.

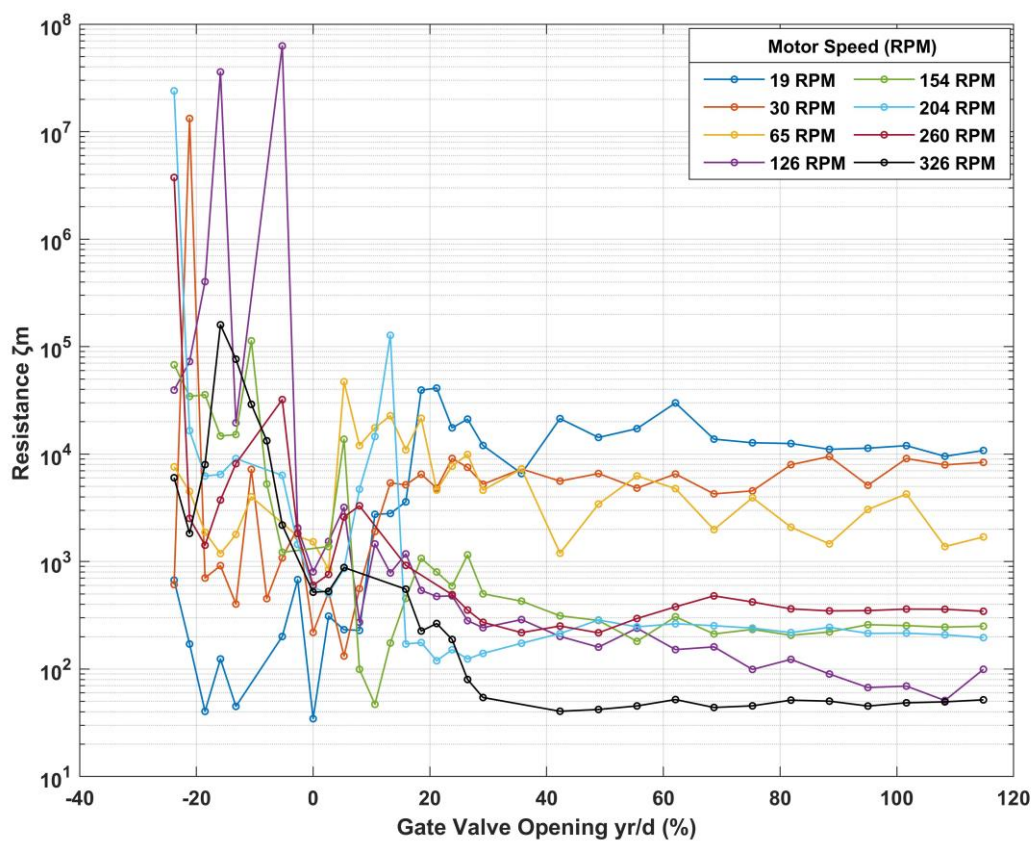


Σχήμα 6-19 Διάγραμμα της διαφοράς πλάτους πίεσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 $\Delta P_{b(2-3)}$ για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Για λόγους ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ η αντίσταση στη ροή είναι πάρα πολύ μεγάλη. Ιδιαίτερα όταν η συχνότητα διέγερσης είναι μεγάλη τότε λόγω της ιδιαίτερα υψηλής αντίστασης το ρευστό αδυνατεί να κινηθεί προς τη δεξαμενή κατάθλιψης και εξαναγκάζεται να οδηγηθεί προς τα πίσω στη δεξαμενή αναρρόφησης. Αυτός είναι ο λόγος που παρατηρείται αύξηση τόσο της μέσης τιμής όσο και του πλάτους της πίεσης (Σχήμα 6-18 - 6-19) στον αισθητήρα ανάντι της βάνας. Αυτή η οπισθοροή δεν μπορεί να καταγραφεί στη δεξαμενή κατάθλιψης μέσω της δυναμοκυψέλης μιας και η βάνα είναι τόσο πολύ κλειστή που στραγγαλίζει τη ροή.

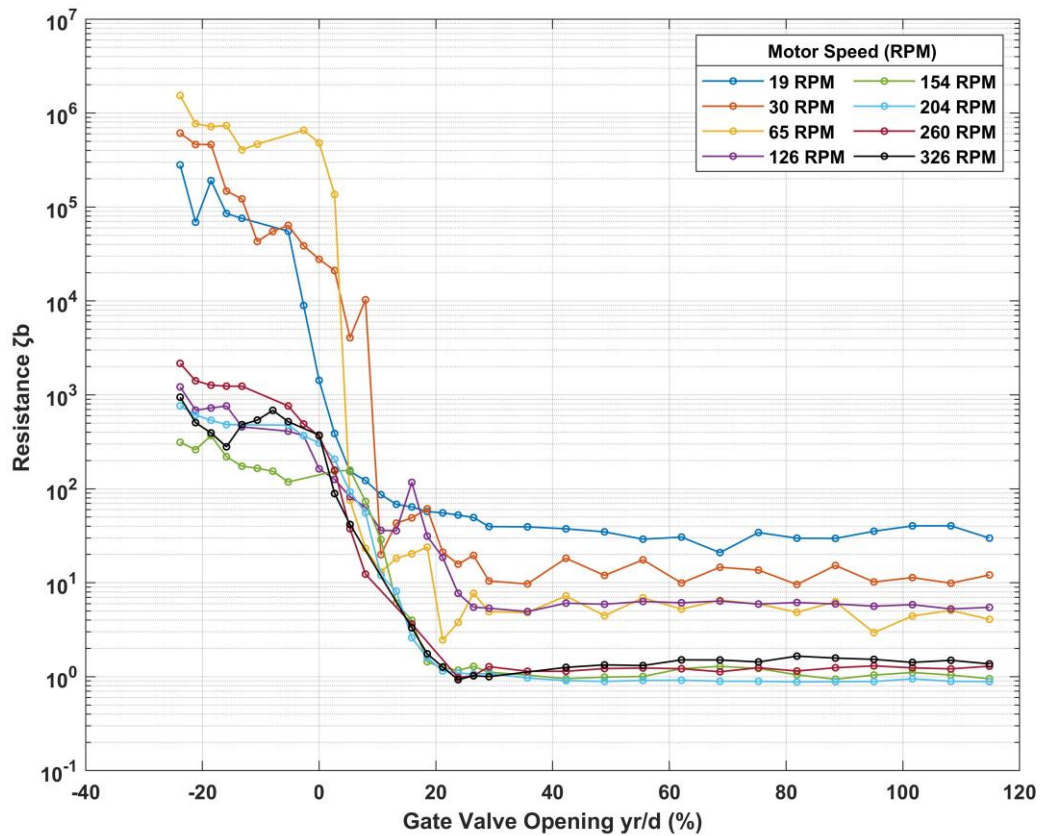
Τέλος παρατίθενται τα διαγράμματα της μέσης καθώς και του πλάτους της αντίστασης στη ροής ζ_m και ζ_b αντίστοιχα

Η μέση αντίσταση στη ροή ζ_m μειώνεται ελαφρά με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης μέχρι το άνοιγμα $\gamma_r/d=30\%$ (Σχήμα 6-18). Για άνοιγμα $\gamma_r/d>30\%$ η αντίσταση σταθεροποιείται όπως και η μέση παροχή (Σχήμα 6-14) και σε αυτήν την περιοχή μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Σε αυτό το διάστημα $\gamma_r/d >30\%$ όπως αναφέρθηκε η παροχή μεγαλώνει με τη συχνότητα (6-14) λειτουργώντας αντίστροφα με την αντίσταση όπως είναι αναμενόμενο από τον μαθηματικό τύπο που εκφράζει την αντίσταση στη ροή (5.2.14).



Σχήμα 6-20 Διάγραμμα της μέσης αντίστασης στη ροή ζ_m μεταξύ των θέσεων 2 και 3 ,για όγκο εμβολισμού $V_b=10,6$ ml των επιλεγμένων συχνότητων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Το πλάτος αντίσταση στη ροή ζ_b (Σχήμα 6-21) μειώνεται καθώς το διάκενο της βάνας πύλης αυξάνεται μέχρι το 25% όπου και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Παρατηρούμε ότι καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται το πλάτος της αντίστασης στη ροή ζ_b λαμβάνει όλο και μικρότερες τιμές για το αντίστοιχο άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης, όπως συμβαίνει με τη μέση αντίσταση ζ_m (Σχήμα 6-20).

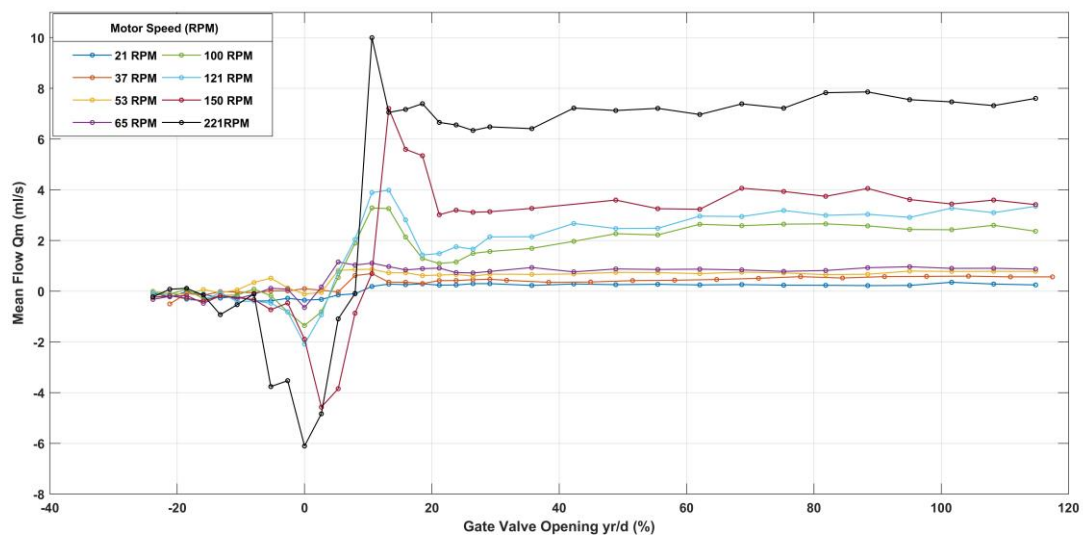


Σχήμα 6-20 Διάγραμμα του πλάτους της αντίστασης στη ροή ζ_b μεταξύ των θέσεων 2 και 3, για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

6.2.2.2 Διαγράμματα μεγεθών για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74$ ml

Καθώς αυξάνεται το πλάτος διέγερσης σε $l=3,5$ cm, μεταβάλλεται όπως είναι λογικό και ο όγκος εμβολισμού V_b . Για τον νέο όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74$ ml προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα όπως φαίνονται στα Σχήματα 6-21 έως 6-26.

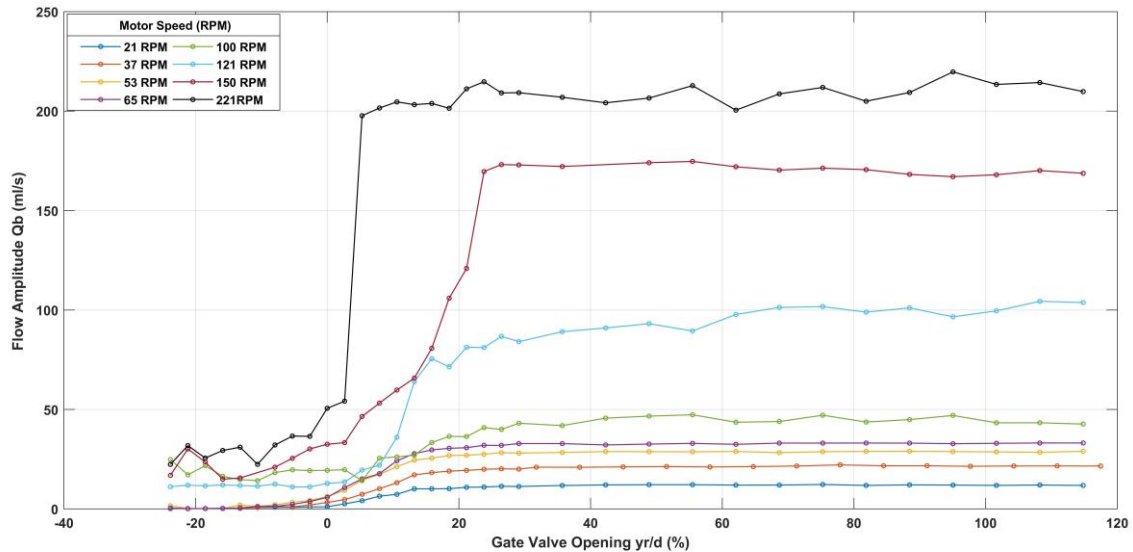
Το εύρος συχνοτήτων έχει μειωθεί σε σχέση με αυτό στο οποίο λήφθηκαν οι μετρήσεις για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6$ ml. Αυτό οφείλεται στα κατασκευαστικά όρια της διάταξης, αφού όσο μεγαλύτερο γίνεται το πλάτος διέγερσης καθώς και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης, τόσο αυξάνονται οι κραδασμοί λόγω ταλάντωσης του συστήματος, αλλοιώνοντας τις μετρήσεις. Επιπλέον σε μεγαλύτερα πλάτη παρατηρήθηκε έντονη παρουσία φυσαλίδων στο δοχείο όγκου εμβολισμού με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Συνεπώς κρίθηκε σκόπιμο να ληφθούν πειραματικά δεδομένα στον όγκο εμβολισμού $V_b=24,74$ ml για εύρος συχνοτήτων 0,35Hz – 3,68 Hz το οποίο αντιστοιχεί σε εύρος ταχυτήτων κινητήρα 21 RPM – 221 RPM.



Σχήμα 6-21 Διάγραμμα της μέσης παροχής Q_m για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Για δεδομένο πλάτος εμβολισμού $V_b=24,74$ ml και με μεταβλητά τα μεγέθη της συχνότητας διέγερσης f και του ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης γ_r παρατηρούμε ότι η μέση παροχή (Σχήμα 6-21) αυξάνεται με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης αλλά και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Στην περιοχή όπου το διάκενο της βάνας πύλης είναι πολύ μικρό, δηλαδή για $\gamma_r/d < 0$, η μέση παροχή της ροής λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές. Όσο η σφήνα της βάνας πύλης ανυψώνεται η μέση παροχή αυξάνεται, ενώ για άνοιγμα του διακένου $\gamma_r/d > 10\%$ λαμβάνει πλέον μόνο θετικές τιμές. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 20\%$ η παροχή σταθεροποιείται.

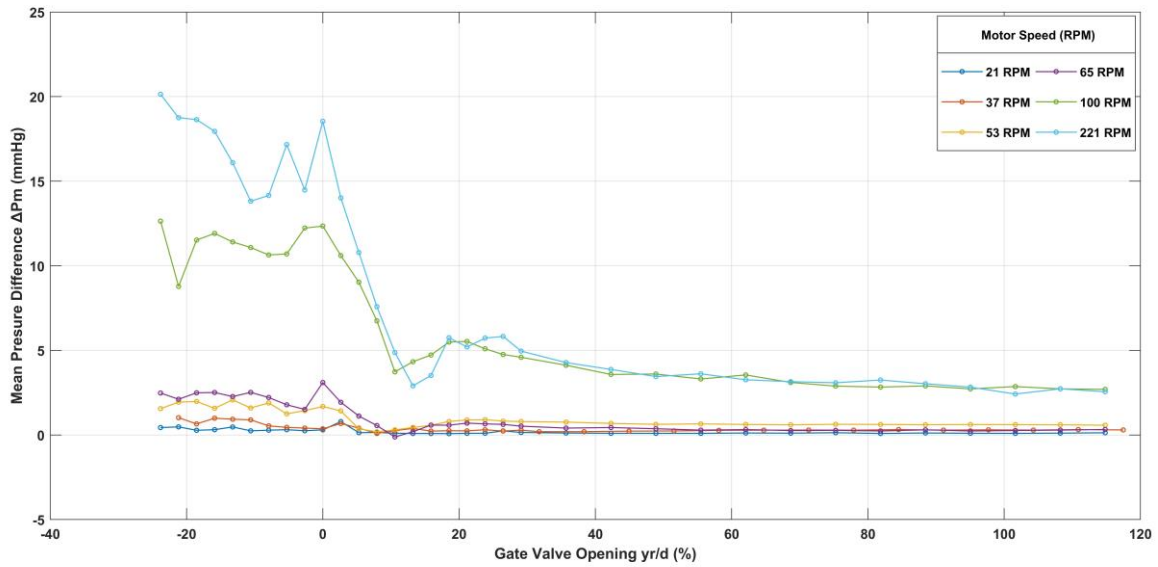
Ακολουθεί το διάγραμμα του πλάτους παροχής Q_b σε συνάρτηση με τον λόγο ανοίγματος της βάνας πύλης. Το πλάτος της παροχής (Σχήμα 6-22) έχει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της μέσης παροχής Q_m (Σχήμα 6-21). Όσο το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης και συχνότητα διέγερσης αυξάνονται τόσο το πλάτος παροχής Q_b λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές, ενώ για $\gamma_r/d \cong 22\%$ σταθεροποιείται, σημείο στο οποίο εμφανίζεται και ένα μέγιστο για το πλάτος της παροχής.



Σχήμα 6-22 Διάγραμμα του πλάτους παροχής Q_b για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=24,74$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

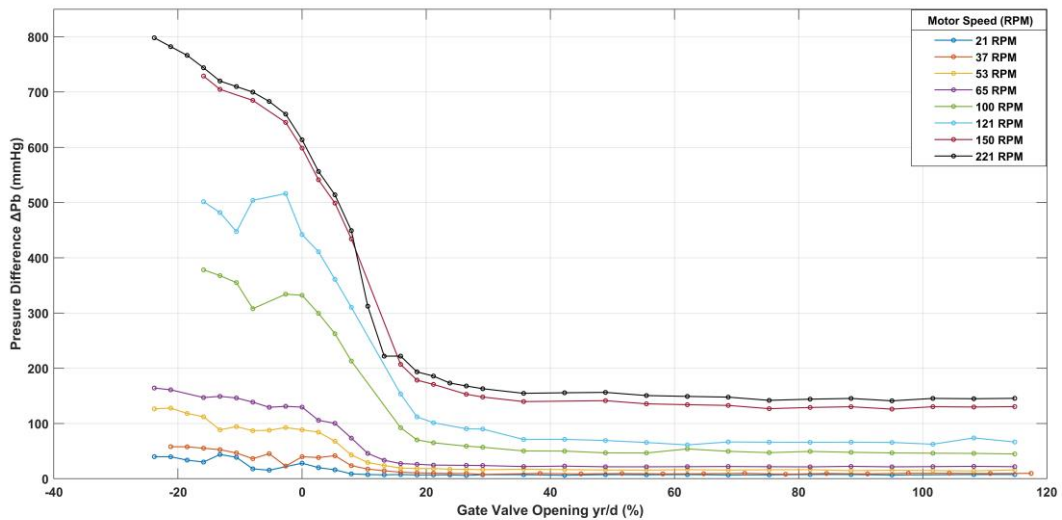
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα διαφοράς μέσης και πλάτους πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$ και $\Delta P_{b(2-3)}$ (Σχήμα 6-23 – 6-24), μεταξύ των θέσεων 2 και 3 της διάταξης (Σχήμα 4-1).

Όσον αφορά το διάγραμμα διαφοράς μέσης πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$ (Σχήμα 6-23) με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d παρατηρούμε ότι με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης μειώνεται η διαφορά πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$, ενώ για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d > 18\%$ η διαφορά της μέσης πίεσης σταθεροποιείται. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης τόσο αυξάνεται και η διαφορά της μέσης πίεσης για δεδομένο άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης. Όπως είναι αναμενόμενο, εφόσον ο αισθητήρας πίεσης στη θέση 3 (Σχήμα 4-1) είναι τοποθετημένος κατάντι της βάνας πύλης, η πτώση πίεσης προκαλούμενη από το στοιχείο αντίστασης έχει σαν αποτέλεσμα η διαφορά πίεσης να είναι πάντα θετική.



Σχήμα 6-8 Διάγραμμα της διαφοράς μέσης πίεσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 $\Delta P_{m(2-3)}$ για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Ακολουθεί το διάγραμμα διαφοράς πλάτους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$ σε συνάρτηση με τον λόγο άυξης του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%).

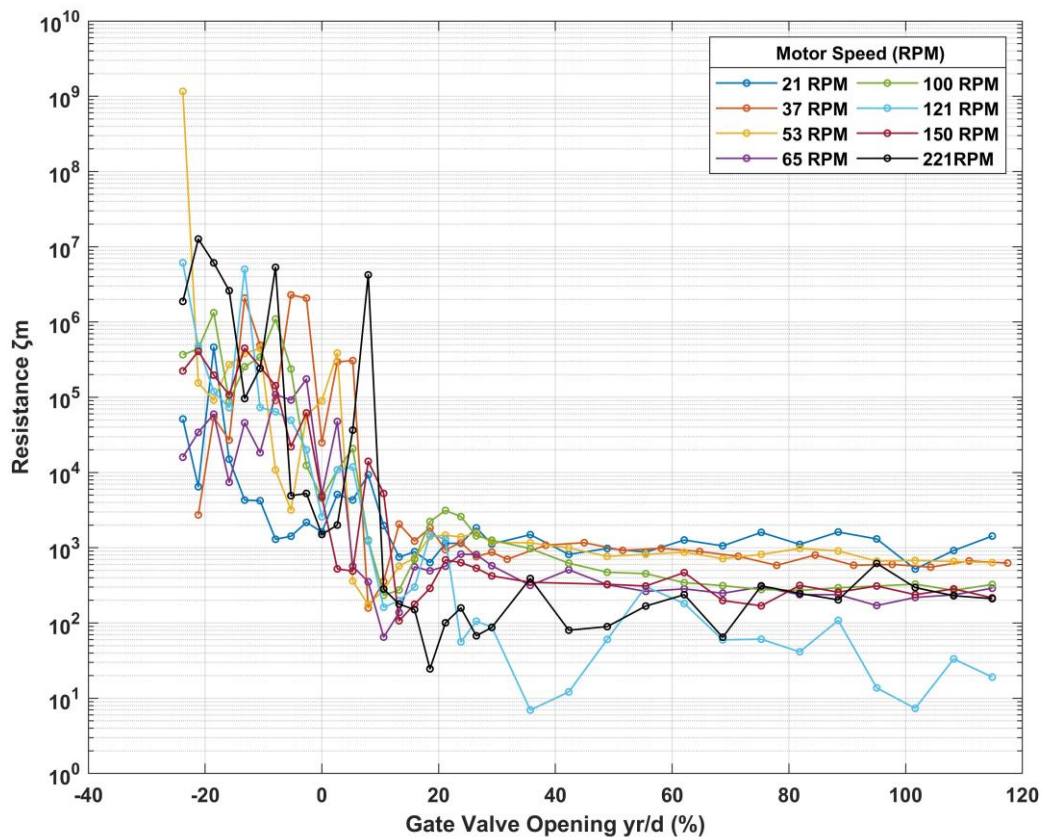


Σχήμα 6-9 Διάγραμμα της διαφοράς μέσης πίεσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 $\Delta P_{m(2-3)}$ για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Όσον αφορά το διάγραμμα διαφοράς πλάτους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$ σε συνάρτηση με τον λόγο αύξησης του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (Σχήμα 6-24) παρατηρούμε ότι με το άνοιγμα του λόγου του διακένου της βάνας πύλης μειώνεται το πλάτος του εύρους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d > 20\%$ η διαφορά του πλάτους πίεσης σταθεροποιείται. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης τόσο αυξάνεται και η διαφορά του πλάτους της πίεσης για δεδομένο άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης.

Για λόγους ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ η αντίσταση στη ροή είναι πάρα πολύ μεγάλη. Ιδιαίτερα όταν η συχνότητα διέγερσης είναι μεγάλη, τότε λόγω της ιδιαίτερα υψηλής αντίστασης το ρευστό αδυνατεί να κινηθεί προς τη δεξαμενή κατάθλιψης και εξαναγκάζεται να οδηγηθεί προς τα πίσω στη δεξαμενή αναρρόφησης. Αυτός είναι ο λόγος που παρατηρείται αύξηση τόσο της μέσης τιμής όσο και του πλάτους της πίεσης (Σχήμα 6-23 - 6-24) στον αισθητήρα ανάντι της βάνας. Αυτή η οπισθορροή δεν μπορεί να καταγραφεί στη δεξαμενή κατάθλιψης μέσω της δυναμοκυψέλης μιας και η βάνα είναι τόσο πολύ κλειστή που στραγγαλίζει τη ροή.

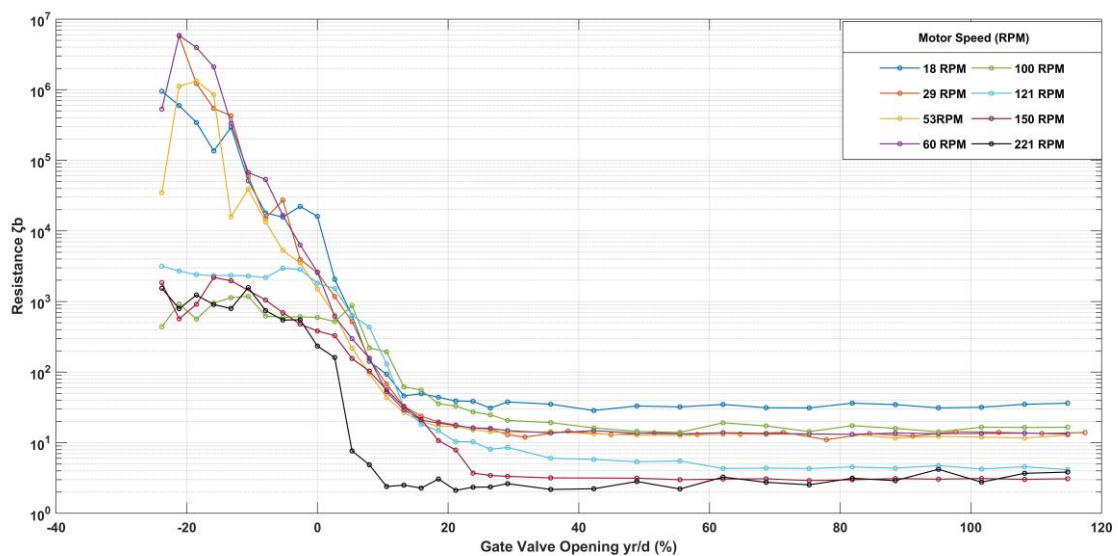
Τέλος παρατίθενται τα διαγράμματα της μέσης καθώς και του πλάτους της αντίστασης στη ροής ζ_m και ζ_b αντίστοιχα.



Σχήμα 6-25 Διάγραμμα της μέσης αντίστασης στη ροή ζ_m μεταξύ των θέσεων 2 και 3 , για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Η μέση αντίσταση στη ροή ζ_m μειώνεται ελαφρά με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης μέχρι το άνοιγμα $\gamma_r/d=30\%$ (Σχήμα 6-25). Για άνοιγμα $\gamma_r/d>30\%$ η αντίσταση σταθεροποιείται όπως και η μέση παροχή (Σχήμα 6-21) και σε αυτήν την περιοχή μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Σε αυτό το διάστημα $\gamma_r/d >20\%$, όπως αναφέρθηκε, η παροχή μεγαλώνει με τη συχνότητα (6-21) λειτουργώντας αντίστροφα με την αντίσταση όπως είναι αναμενόμενο από τον μαθηματικό τύπο που εκφράζει την αντίσταση στη ροή (5.2.14).

Το πλάτος αντίσταση στη ροή ζ_b (Σχήμα 6-26) μειώνεται καθώς το διάκενο της βάνας πύλης αυξάνεται μέχρι το 25% όπου και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Παρατηρούμε ότι καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται το πλάτος της αντίστασης στη ροή ζ_b λαμβάνει όλο και μικρότερες τιμές για το αντίστοιχο άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης, όπως συμβαίνει με την αντίσταση ζ_m (Σχήμα 6-25).

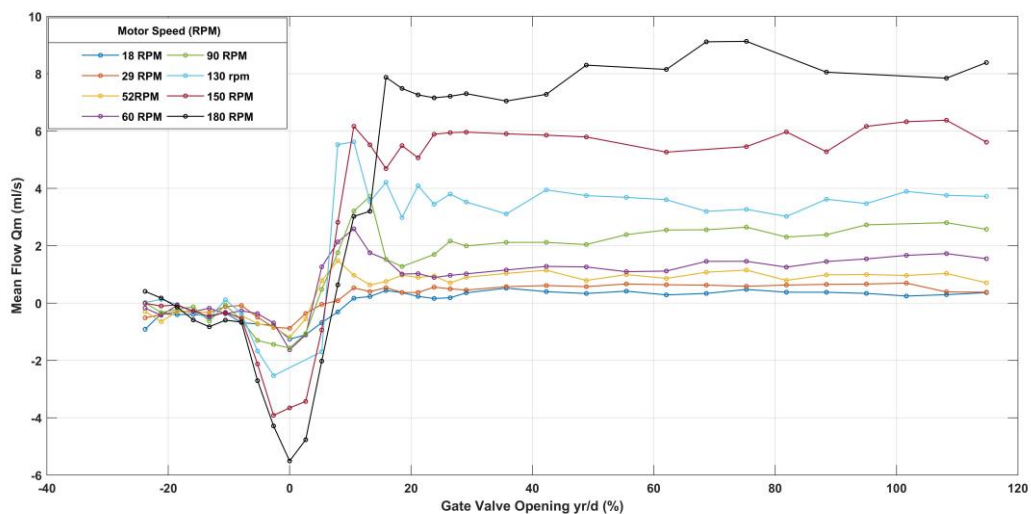


Σχήμα 6-26 Διάγραμμα του πλάτους της αντίστασης στη ροή ζ_b μεταξύ των θέσεων 2 και 3, για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,76$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

6.2.2.3 Διαγράμματα μεγεθών για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}= 35,34 \text{ ml}$

Καθώς αυξάνεται το πλάτος διέγερσης σε $l=5 \text{ cm}$, μεταβάλλεται όπως είναι λογικό και ο όγκος εμβολισμού V_b . Για τον νέο όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34 \text{ ml}$ προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα όπως φαίνονται στα σχήματα 6-25 έως 6-31. Το εύρος της συχνότητας διέγερσης διαμορφώνεται πλέον σε $0,3 \text{ Hz}$ έως 3 Hz , το οποίο αντιστοιχεί σε ταχύτητα του κινητήρα 18 RPM-180 RPM.

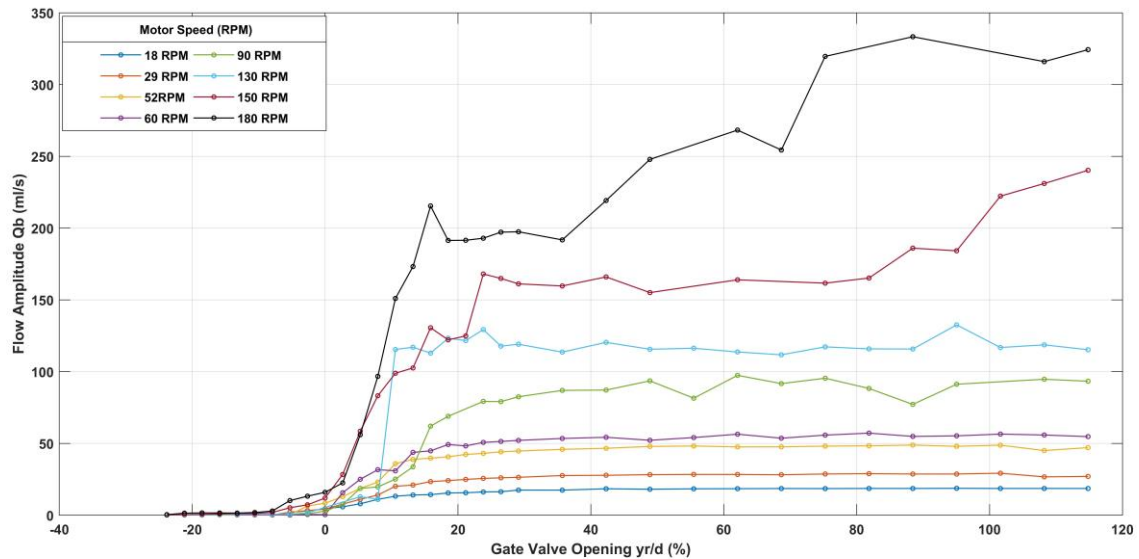
Αρχικά παρατίθεται το διάγραμμα (Σχήμα 6-27) της μέσης παροχής Q_m σε συνάρτηση με τον λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d .



Σχήμα 6-10 Διάγραμμα της μέσης παροχής Q_m για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34 \text{ ml}$ των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Για δεδομένο πλάτος εμβολισμού $V_b=35,34 \text{ ml}$ και με μεταβλητά τα μεγέθη της συχνότητας διέγερσης f και του ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης γ_r παρατηρούμε ότι η μέση παροχή (Σχήμα 6-27) αυξάνεται με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης αλλά και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Στην περιοχή όπου το διάκενο της βάνας πύλης είναι πολύ μικρό, δηλαδή για $\gamma_r/d < 0$, η μέση παροχή της ροής λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές. Όσο η σφήνα της βάνας πύλης ανυψώνεται η μέση παροχή αυξάνεται, ενώ για άνοιγμα του διακένου $\gamma_r/d > 10\%$ λαμβάνει πλέον μόνο θετικές τιμές. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 20\%$ η παροχή σταθεροποιείται.

Ακολουθεί το διάγραμμα του πλάτους παροχής Q_b σε συνάρτηση με τον λόγο ανοίγματος της βάνας πύλης. Το πλάτος της παροχής (Σχήμα 6-28) έχει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της μέσης παροχής Q_m (Σχήμα 6-27). Όσο το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης και συχνότητα διέγερσης αυξάνονται τόσο το πλάτος παροχής Q_b λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές, ενώ για $\gamma_r/d \cong 22\%$ σταθεροποιείται, σημείο στο οποίο εμφανίζεται και ένα μέγιστο για το πλάτος της παροχής.



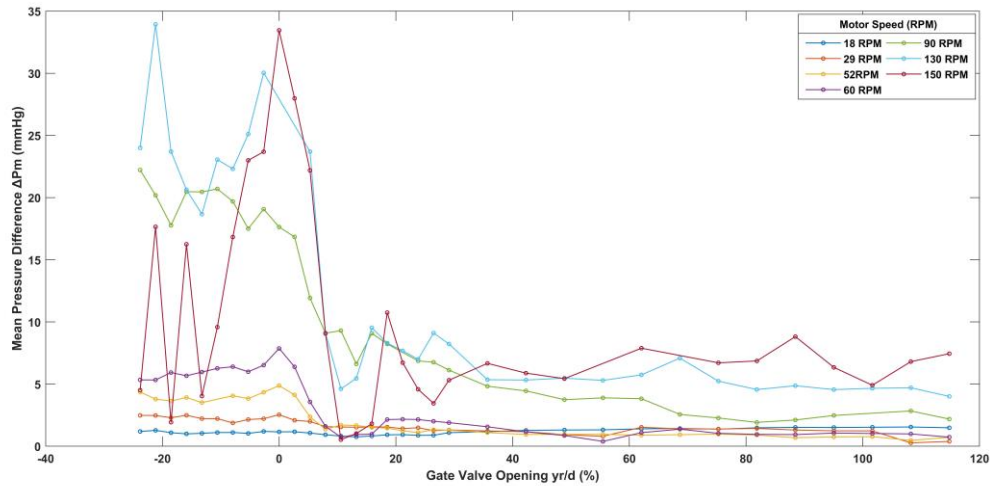
Σχήμα 6-11 Διάγραμμα του πλάτους παροχής Q_b για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα διαφοράς μέσης και πλάτους πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$ και $\Delta P_{b(2-3)}$ (Σχήμα 6-29 – 6-30), μεταξύ των θέσεων 2 και 3 της διάταξης (Σχήμα 4-1).

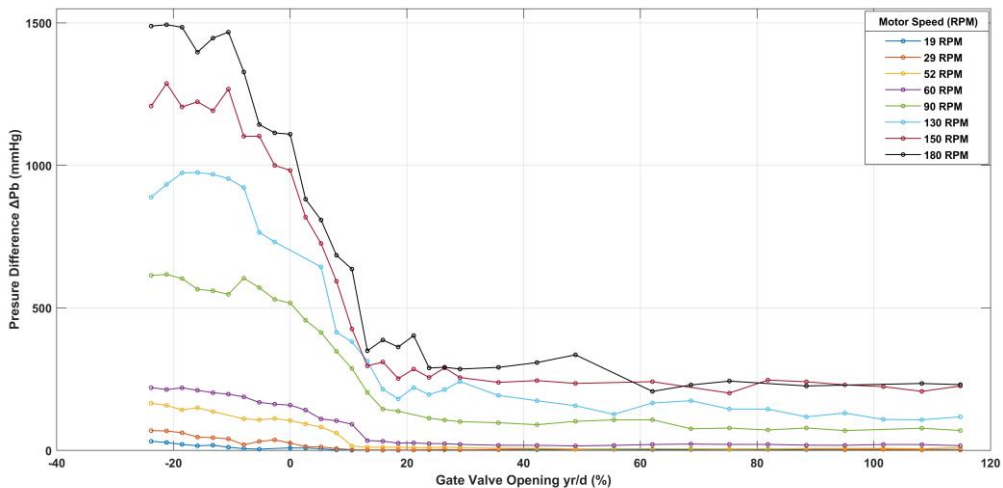
Όσον αφορά το διάγραμμα διαφοράς μέσης πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$ (Σχήμα 6-29) με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d παρατηρούμε ότι με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης μειώνεται η διαφορά πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$, ενώ για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d > 20\%$ η διαφορά της μέσης πίεσης σταθεροποιείται. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης τόσο αυξάνεται και η διαφορά της μέσης πίεσης για δεδομένο άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης. Όπως είναι αναμενόμενο, εφόσον ο αισθητήρας πίεσης στη θέση 3 είναι τοποθετημένος κατάντι της βάνας πύλης, η πτώση πίεσης προκαλούμενη από το στοιχείο αντίστασης έχει σαν αποτέλεσμα η διαφορά πίεσης να είναι πάντα θετική.

Για λόγους ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ η αντίσταση στη ροή είναι πάρα πολύ μεγάλη. Ιδιαίτερα όταν η συχνότητα διέγερσης είναι μεγάλη τότε λόγω της ιδιαίτερα υψηλής αντίστασης το ρευστό αδυνατεί να κινηθεί προς τη δεξαμενή κατάθλιψης και εξαναγκάζεται να οδηγηθεί προς τα πίσω στη δεξαμενή αναρρόφησης. Αυτός είναι ο λόγος που παρατηρείται αύξηση

τόσο της μέσης τιμής όσο και του πλάτους της πίεσης (Σχήμα 6-29 - 6-30) στον αισθητήρα ανάντι της βάνας. Αυτή η οπισθοροή δεν μπορεί να καταγραφεί στη δεξαμενή κατάθλιψης μέσω της δυναμοκυψέλης μιας και η βάνα είναι τόσο πολύ κλειστή που στραγγαλίζει τη ροή.



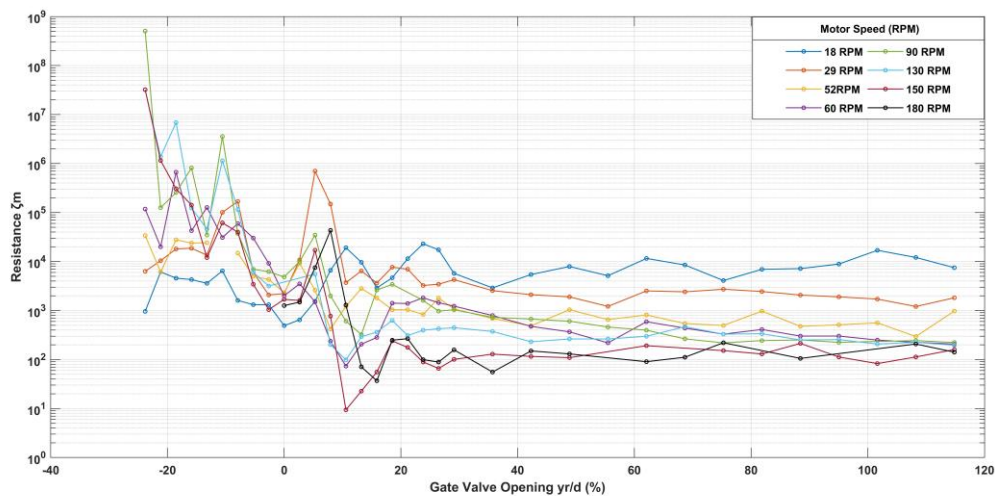
Σχήμα 6-29 Διάγραμμα της διαφοράς μέσης πίεσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 $\Delta P_{m(2-3)}$ για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).



Σχήμα 6-30 Διάγραμμα της διαφοράς μέσης πίεσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 $\Delta P_{m(2-3)}$ για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Όσον αφορά το διάγραμμα διαφοράς πλάτους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$ σε συνάρτηση με τον λόγο αύξησης του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (Σχήμα 6-30) παρατηρούμε ότι με το άνοιγμα του λόγου του διακένου της βάνας πύλης μειώνεται το πλάτος του εύρους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d > 20\%$ η διαφορά του πλάτους πίεσης σταθεροποιείται. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης τόσο αυξάνεται και η διαφορά του πλάτους της πίεσης για δεδομένο άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης.

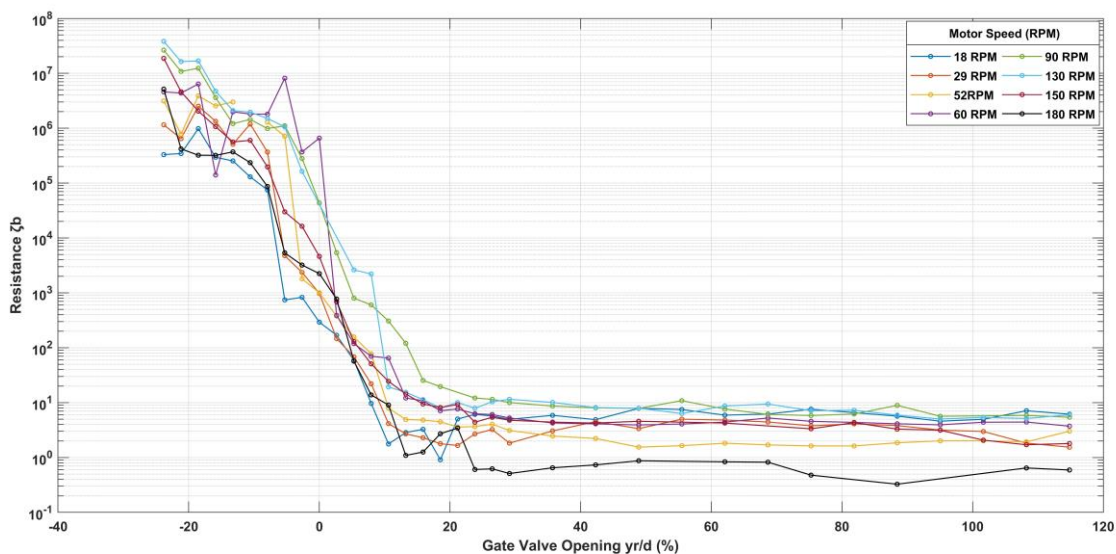
Τέλος παρατίθενται τα διαγράμματα της μέσης καθώς και του πλάτους της αντίστασης στη ροή ζ_m και ζ_b αντίστοιχα.



Σχήμα 6-31 Διάγραμμα της μέσης αντίστασης στη ροή ζ_m μεταξύ των θέσεων 2 και 3 , για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Η μέση αντίσταση στη ροή ζ_m μειώνεται ελαφρά με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης μέχρι το άνοιγμα $\gamma_r/d=30\%$ (Σχήμα 6-31). Για άνοιγμα $\gamma_r/d > 30\%$ η αντίσταση σταθεροποιείται όπως και η μέση παροχή (Σχήμα 6-27) και σε αυτήν την περιοχή μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Σε αυτό το διάστημα $\gamma_r/d > 20\%$,όπως αναφέρθηκε, η παροχή μεγαλώνει με τη συχνότητα (6-27) λειτουργώντας αντίστροφα με την αντίσταση όπως είναι αναμενόμενο από τον μαθηματικό τύπο που εκφράζει την αντίσταση στη ροή (5.2.14).

Το πλάτος αντίσταση στη ροή ζ_b (Σχήμα 6-32) μειώνεται καθώς το διάκενο της βάνας πύλης αυξάνεται μέχρι το 25% όπου και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Παρατηρούμε ότι καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται το πλάτος της αντίσταση στη ροή ζ_b λαμβάνει όλο και μικρότερες τιμές για το αντίστοιχο άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης, όπως συμβαίνει με την αντίσταση ζ_m (Σχήμα 6-31).



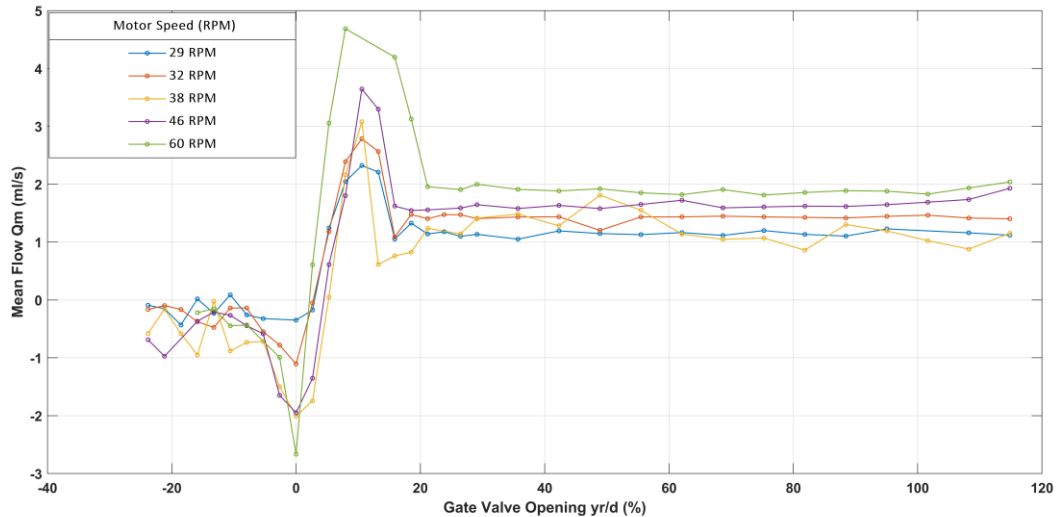
Σχήμα 6-32 Διάγραμμα της μέσης αντίστασης στη ροή ζ_m μεταξύ των θέσεων 2 και 3 , για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=35,34$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

6.2.2.4 Διαγράμματα μεγεθών για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml

Καθώς αυξάνεται το πλάτος διέγερσης σε $l_4=8,5$ cm, μεταβάλλεται όπως είναι λογικό και ο όγκος εμβολισμού V_b . Για τον νέο όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα όπως φαίνονται στα σχήματα 6-29 έως 6-33. Το εύρος της συχνότητας διέγερσης διαμορφώνεται πλέον σε 0,48 Hz – 1 Hz, το οποίο αντιστοιχεί σε ταχύτητα του κινητήρα 29 RPM-60 RPM.

Το εύρος συχνοτήτων έχει μειωθεί πολύ σε σχέση με αυτό στο οποίο λήφθηκαν οι μετρήσεις για τους προηγούμενους όγκους εμβολισμού. Αυτό οφείλεται στα κατασκευαστικά όρια της διάταξης, καθώς όσο μεγαλύτερο γίνεται το πλάτος διέγερσης και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης, αυξάνονται οι κραδασμοί λόγω ταλάντωσης του συστήματος, αλλοιώνοντας τις μετρήσεις. Επιπλέον σε μεγαλύτερα πλάτη παρατηρήθηκε έντονη παρουσία φυσαλίδων στο δοχείο όγκου εμβολισμού όσο αυξανόταν η συχνότητα διέγερσης. Συνεπώς κρίθηκε σκόπιμο να ληφθούν πειραματικά δεδομένα στον όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml για εύρος συχνοτήτων από 0,48 Hz –1 Hz το οποίο αντιστοιχεί σε εύρος ταχυτήτων κινητήρα 29 RPM – 60 RPM.

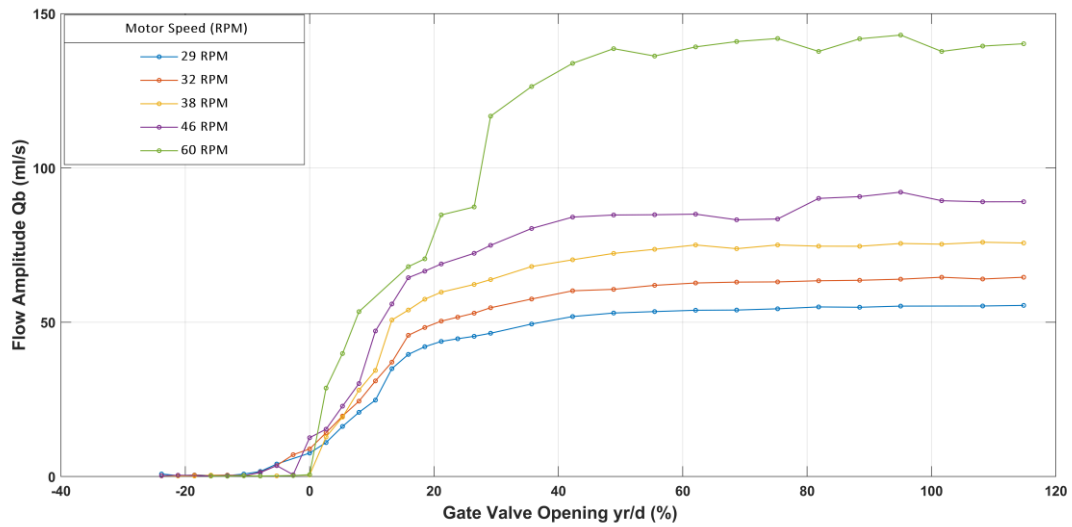
Αρχικά παρατίθεται το διάγραμμα (Σχήμα 6-33) της μέσης παροχής Q_m σε συνάρτηση με τον λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d .



Σχήμα 6-33 Διάγραμμα της μέσης παροχής Q_m για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml των επιλεγμένων συχνότητων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%). (-23,8 % -114,8 %).

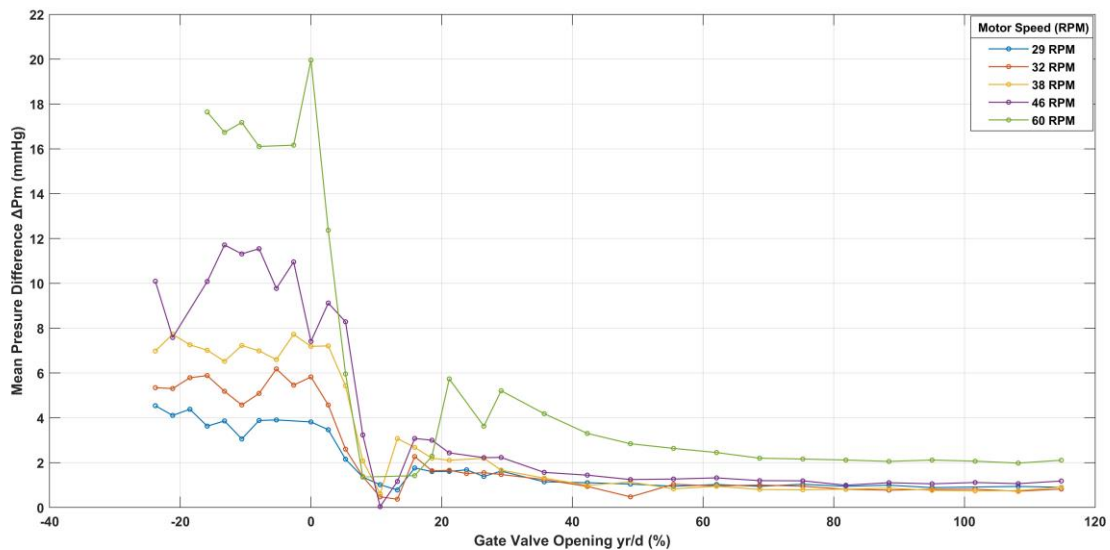
Για δεδομένο πλάτος εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml και με μεταβλητά τα μεγέθη της συχνότητας διέγερσης f και του ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης γ_r παρατηρούμε ότι η μέση παροχή (Σχήμα 6-33) αυξάνεται με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης αλλά και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Στην περιοχή όπου το διάκενο της βάνας πύλης είναι πολύ μικρό, δηλαδή για $\gamma_r/d < 0$, η μέση παροχή της ροής λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές. Όσο η σφήνα της βάνας πύλης ανυψώνεται η μέση παροχή αυξάνεται, ενώ για άνοιγμα του διακένου $\gamma_r/d > 10\%$ λαμβάνει πλέον μόνο θετικές τιμές. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 20\%$ η παροχή σταθεροποιείται.

Ακολουθεί το διάγραμμα του πλάτους παροχής Q_b σε συνάρτηση με τον λόγο ανοίγματος της βάνας πύλης. Το πλάτος της παροχής (Σχήμα 6-34) έχει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της μέσης παροχής Q_m (Σχήμα 6-33). Όσο το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης και συχνότητα διέγερσης αυξάνονται τόσο το πλάτος παροχής Q_b λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές, ενώ για $\gamma_r/d \cong 22\%$ σταθεροποιείται, σημείο στο οποίο εμφανίζεται και ένα μέγιστο για το πλάτος της παροχής.



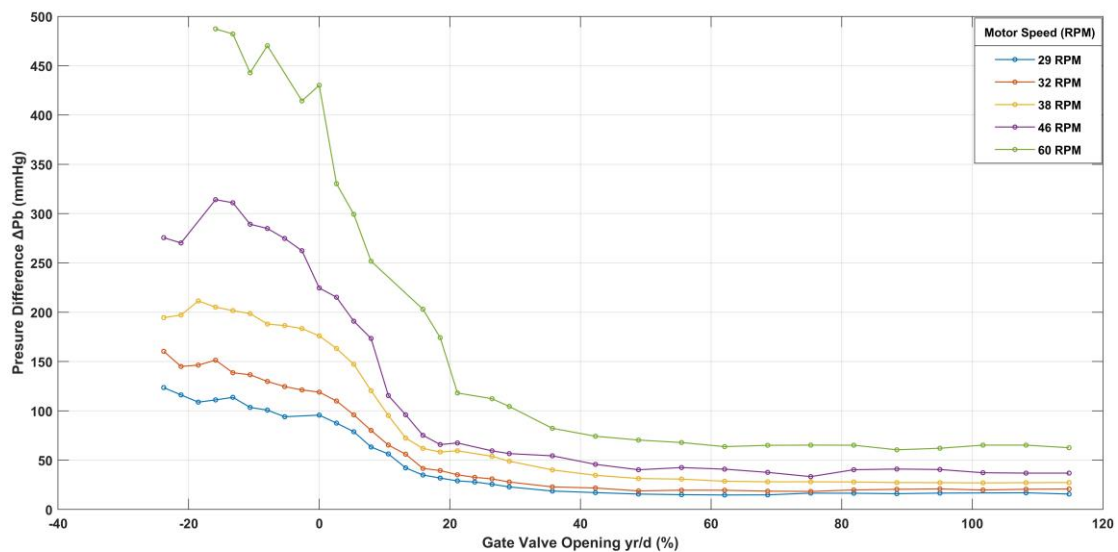
Σχήμα 6-34 Διάγραμμα του πλάτους παροχής Q_b για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα διαφοράς μέσης και πλάτους πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$ και $\Delta P_{b(2-3)}$ (Σχήμα 6-35 – 6-36) , μεταξύ των θέσεων 2 και 3 της διάταξης (Σχήμα 4-1).



Σχήμα 6-35 Διάγραμμα της διαφοράς μέσης πίεσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 $\Delta P_{m(2-3)}$ για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

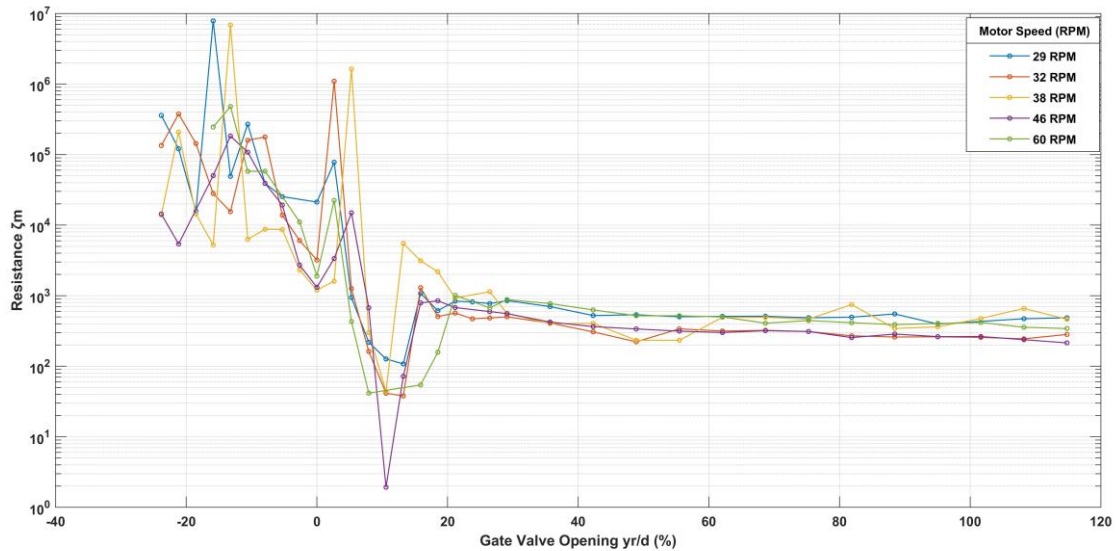
Όσον αφορά το διάγραμμα διαφοράς μέσης πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$ (Σχήμα 6-35) με το άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης γ_r/d παρατηρούμε ότι με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης μειώνεται η διαφορά πίεσης $\Delta P_{m(2-3)}$, ενώ για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d > 20\%$ η διαφορά της μέσης πίεσης σταθεροποιείται. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης τόσο αυξάνεται και η διαφορά της μέσης πίεσης για δεδομένο άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης. Όπως είναι αναμενόμενο, εφόσον ο αισθητήρας πίεσης στη θέση 3 είναι τοποθετημένος κατάντι της βάνας πύλης, η πτώση πίεσης προκαλούμενη από το στοιχείο αντίστασης έχει σαν αποτέλεσμα η διαφορά πίεσης να είναι πάντα θετική.



Σχήμα 6-36 Διάγραμμα της διαφοράς μέσης πίεσης μεταξύ των θέσεων 2 και 3 $\Delta P_{m(2-3)}$ για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Όσον αφορά το διάγραμμα διαφοράς πλάτους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$ σε συνάρτηση με τον λόγο αύξησης του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (Σχήμα 6-36) παρατηρούμε ότι με το άνοιγμα του λόγου του διακένου της βάνας πύλης μειώνεται το πλάτος του εύρους πίεσης $\Delta P_{b(2-3)}$. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d > 20\%$ η διαφορά του πλάτους πίεσης σταθεροποιείται. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης τόσο αυξάνεται και η διαφορά του πλάτους της πίεσης για δεδομένο άνοιγμα του διακένου βάνας πύλης.

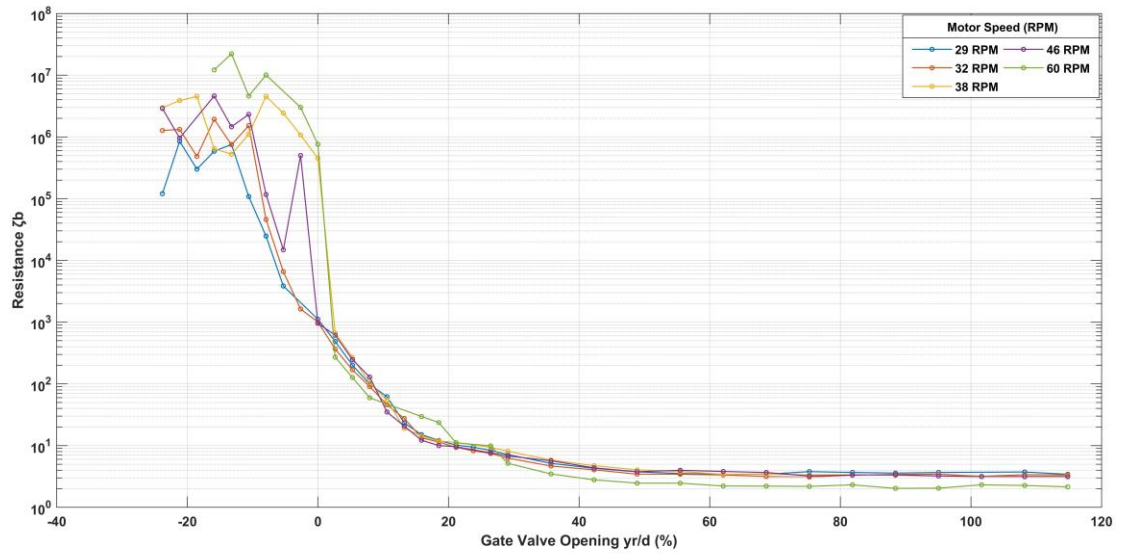
Τέλος παρατίθενται τα διαγράμματα της μέσης καθώς και του πλάτους της αντίστασης στη ροής ζ_m και ζ_b αντίστοιχα.



Σχήμα 6-37 Διάγραμμα της μέσης αντίστασης στη ροή ζ_m μεταξύ των θέσεων 2 και 3 , για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

Η μέση αντίσταση στη ροή ζ_m μειώνεται ελαφρά με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης μέχρι το άνοιγμα $\gamma r/d=30\%$ (Σχήμα 6-37). Για άνοιγμα $\gamma r/d>30\%$ η αντίσταση σταθεροποιείται όπως και η μέση παροχή (Σχήμα 6-33) και σε αυτήν την περιοχή μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Σε αυτό το διάστημα $\gamma r/d >20\%$, όπως αναφέρθηκε, η παροχή μεγαλώνει με τη συχνότητα (6-33) λειτουργώντας αντίστροφα με την αντίσταση όπως είναι αναμενόμενο από τον μαθηματικό τύπο που εκφράζει την αντίσταση στη ροή (5.2.14).

Το πλάτος αντίσταση στη ροή ζ_b (Σχήμα 6-38) μειώνεται καθώς το διάκενο της βάνας πύλης αυξάνεται μέχρι το 25% όπου και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Παρατηρούμε ότι καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται το πλάτος της αντίσταση στη ροή ζ_b λαμβάνει όλο και μικρότερες τιμές για το αντίστοιχο άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης, όπως συμβαίνει με την αντίσταση ζ_m (Σχήμα 6-37).



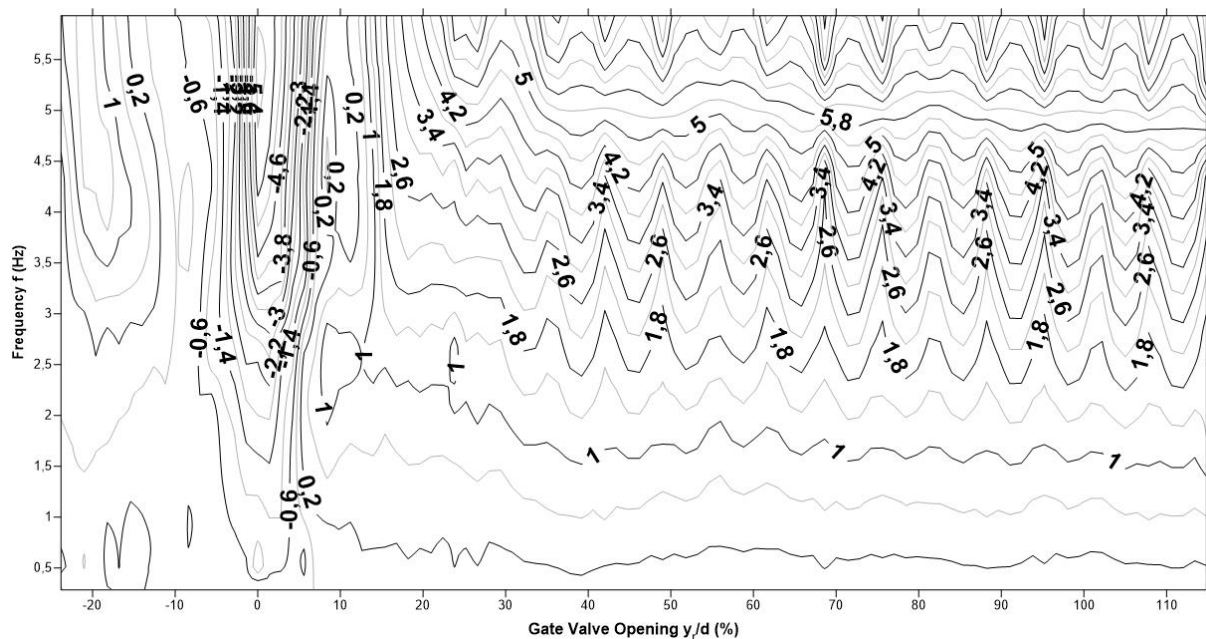
Σχήμα 6-12 Διάγραμμα του εύρους αντίστασης στη ροή ζ_b μεταξύ των θέσεων 2 και 3 , για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml των επιλεγμένων συχνοτήτων διέγερσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του λόγου άνοιγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%) (-23,8 % -114,8 %).

6.2.3 Νομογραφήματα για την μη-μόνιμη ροή

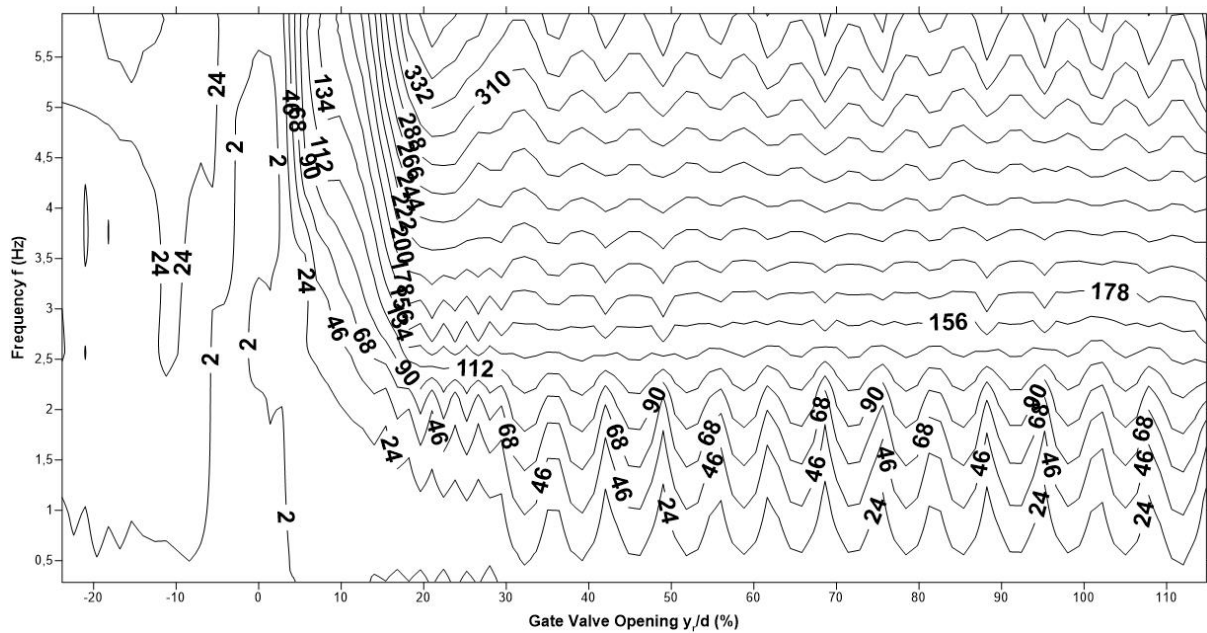
Στο σημείο αυτό παρατίθενται νομογραφήματα των παραμέτρων που θα αναφερθούν παρακάτω για την καλύτερη επισκόπηση του φαινομένου. Για δεδομένο όγκο εμβολισμού V_b κατασκευάζονται διαγράμματα που απεικονίζουν :

- Την μεταβολή της μέσης παροχής Q_m συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%).
- Την μεταβολή του πλάτους παροχής Q_b συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%).

6.2.3.1 Διαγράμματα συμμεταβολής για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6 \text{ ml}$



Σχήμα 6-39 Νομογράφημα για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6 \text{ ml}$ της μέσης παροχής Q_m συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%).

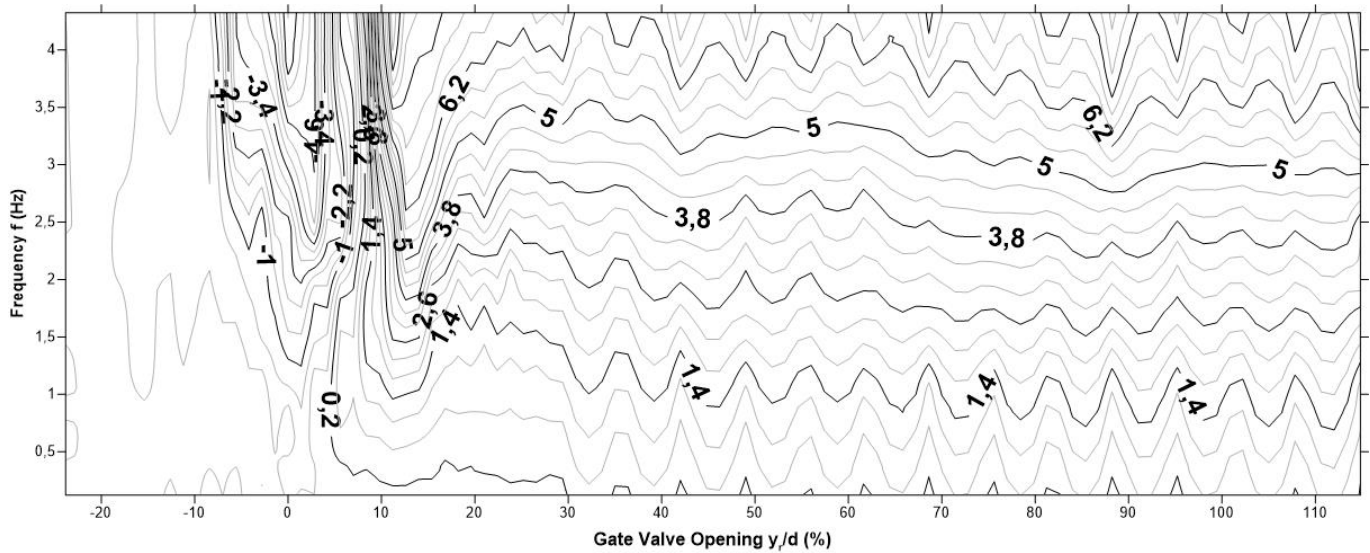


Σχήμα 6-40 Νομογράφημα για όγκο εμβολισμού $V_{b,1}=10,6$ ml του εύρους παροχής Q_b συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%).

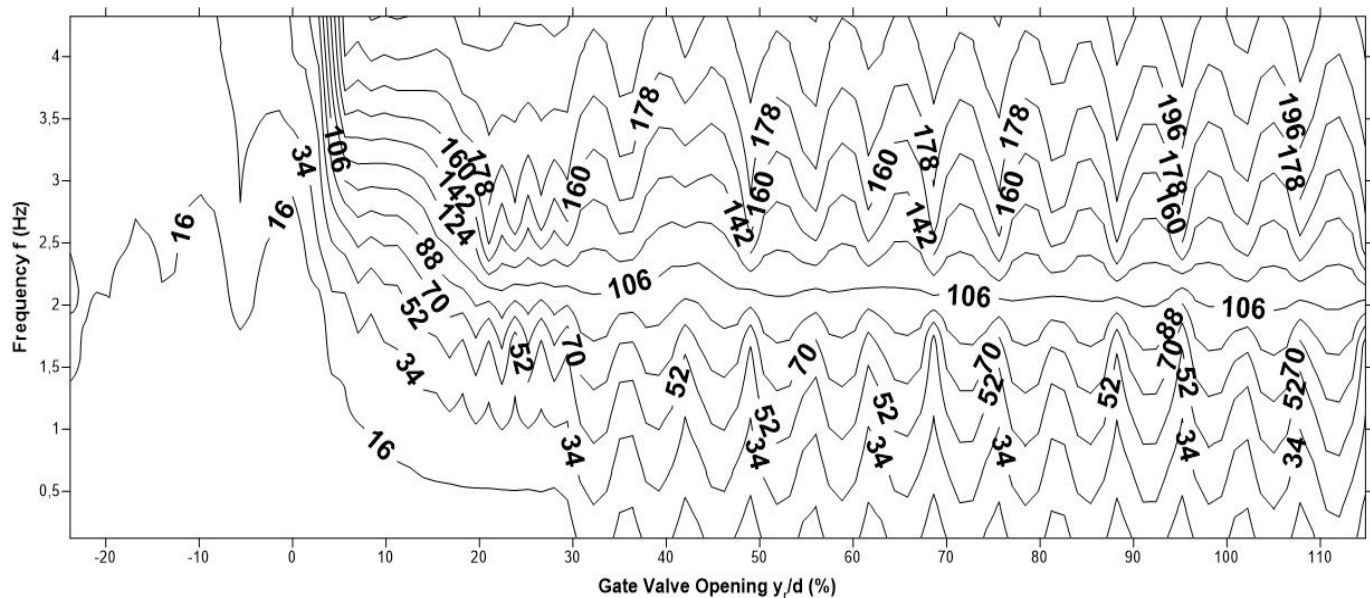
Για δεδομένο πλάτος εμβολισμού $V_b=10,6$ ml και με μεταβλητά τα μεγέθη της συχνότητας διέγερσης f και του ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης γ_r γίνονται οι εξής παρατηρήσεις: Η μέση παροχή (Σχήμα 6-39) αυξάνεται με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης αλλά και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές. Όσο η σφήνα ανυψώνεται και για τιμές του λόγου του διακένου βάνας πύλης $0 < \gamma_r/d < 10\%$ η μέση παροχή αυξάνεται. Στο διάστημα αυτό παρατηρείται κυρίως οπισθορροή και οι τιμές της παροχής αυτής αυξάνονται όσο η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται. Όταν ο λόγος του διακένου βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 10\%$ το φαινόμενο της οπισθορροής παύει να υφίσταται και η μέση παροχή λαμβάνει πλέον μόνο θετικές τιμές. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 30\%$ η παροχή σταθεροποιείται. Σε αυτόν τον όγκο εμβολισμού και για εύρος συχνοτήτων διέγερσης f από 0,5 Hz - 5,5 Hz η μέση παροχή λαμβάνει τιμές από -6,05 ml/sec έως 8,88 ml/sec.

Το πλάτος της παροχής (Σχήμα 6-40) έχει παρόμοια συμπεριφορά. Όσο το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης και συχνότητα διέγερσης αυξάνονται τόσο το πλάτος παροχής Q_b λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ λαμβάνει τιμές πολύ μικρές καθώς η αντίσταση της βάνας πύλης είναι πολύ έντονη. Όσο η σφήνα της βάνας πύλης ανυψώνεται και η διατομή A_0 αυξάνεται (Σχήμα 5-3 β) το πλάτος παροχής λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 25\%$ το εύρος της παροχής σταθεροποιείται. Σε αυτόν τον όγκο εμβολισμού και για εύρος συχνοτήτων διέγερσης f από 0,5 Hz - 5,5 Hz το εύρος της παροχής λαμβάνει τιμές από 0,15 ml/sec έως 386,78 ml/sec.

6.2.3.2 Νομογραφήματα για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74 \text{ ml}$



Σχήμα 6-41 Νομογράφημα για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74 \text{ ml}$ της μέσης παροχής Q_m συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ/d (%).



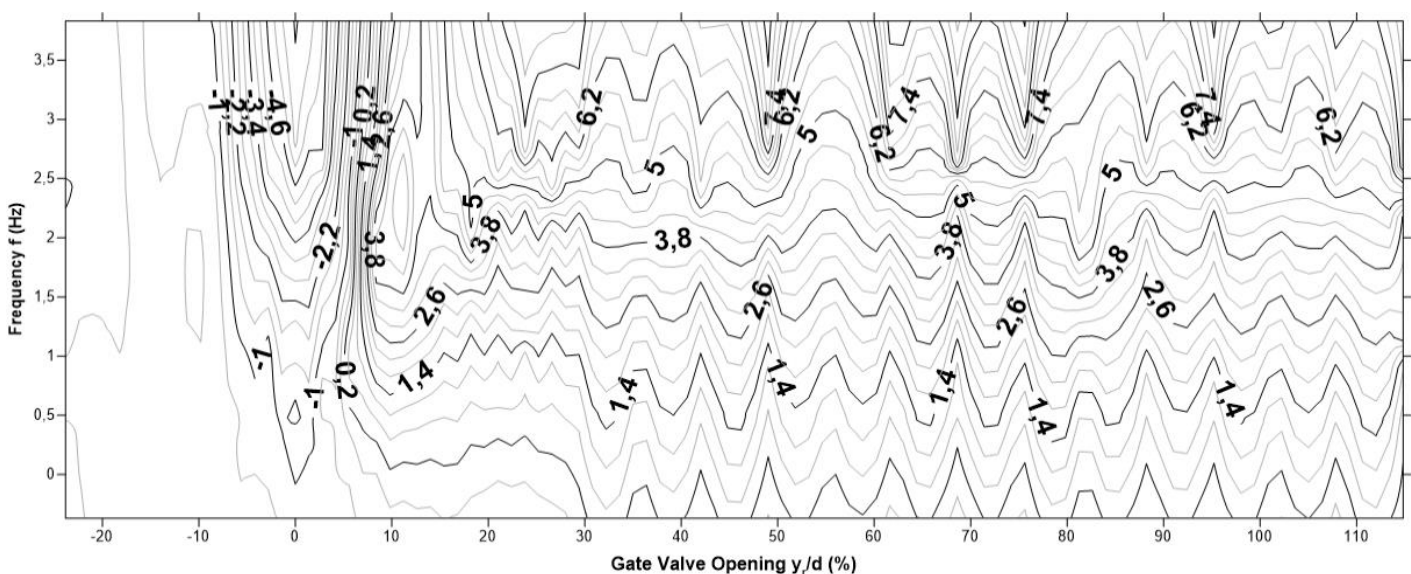
Σχήμα 6-42 Νομογράφημα για όγκο εμβολισμού $V_{b,2}=24,74 \text{ ml}$ του εύρους παροχής Q_b συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ/d (%).

Για δεδομένο πλάτος εμβολισμού $V_{b,2}=24,74$ ml και με μεταβλητά τα μεγέθη της συχνότητας διέγερσης f και του ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης γ_r γίνονται οι εξής παρατηρήσεις:

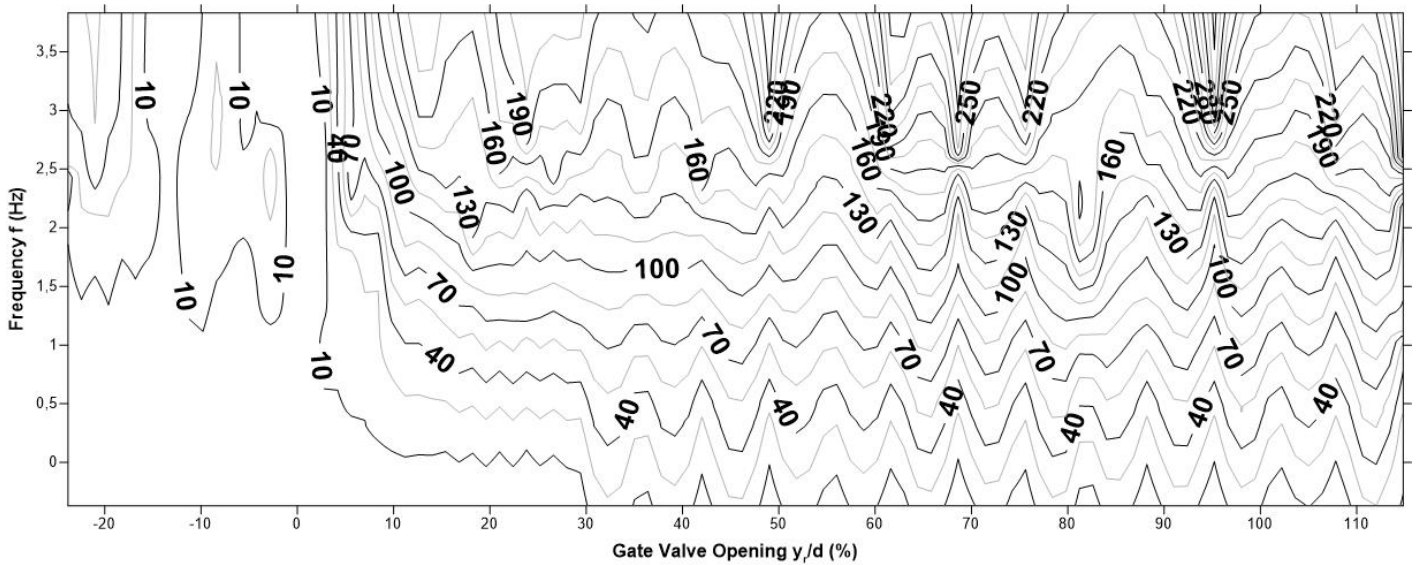
Η μέση παροχή (Σχήμα 6-41) αυξάνεται με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης αλλά και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές. Όσο η σφήνα ανυψώνεται και για τιμές του λόγου του διακένου βάνας πύλης $0 < \gamma_r/d < 10\%$ η μέση παροχή αυξάνεται. Στο διάστημα αυτό παρατηρείται κυρίως οπισθορροή και οι τιμές της παροχής αυτής αυξάνονται όσο η συχνότητα διέγερσης αυξάνονται. Όταν ο λόγος του διακένου βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 10\%$ το φαινόμενο της οπισθορροής παύει να υφίσταται και η μέση παροχή λαμβάνει πλέον μόνο θετικές τιμές. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 30\%$ η παροχή σταθεροποιείται. Σε αυτόν τον όγκο εμβολισμού και για εύρος συχνοτήτων διέγερσης f από 0,34 Hz - 4,09 Hz η μέση παροχή λαμβάνει τιμές από -6,1 ml/sec έως 9,9 ml/sec.

Το πλάτος της παροχής (Σχήμα 6-42) έχει παρόμοια συμπεριφορά. Όσο το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης και συχνότητα διέγερσης αυξάνονται τόσο το πλάτος παροχής Q_b λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές,. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ λαμβάνει τιμές πολύ μικρές καθώς η αντίσταση της βάνας πύλης είναι πολύ έντονη. Όσο η σφήνα της βάνας πύλης ανυψώνεται και η διατομή A_0 αυξάνεται (Σχήμα 5-3 β) το πλάτος παροχής λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 25\%$ το εύρος της παροχής σταθεροποιείται. Σε αυτόν τον όγκο εμβολισμού και για εύρος συχνοτήτων διέγερσης f από 0,34 Hz - 4,09 Hz το εύρος της παροχής λαμβάνει τιμές από 0,15 ml/sec έως 219,71 ml/sec.

6.2.3.3 Νομογραφήματα για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34$ ml



Σχήμα 6-43 Νομογράφημα για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34$ ml της μέσης παροχής Q_m συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%).



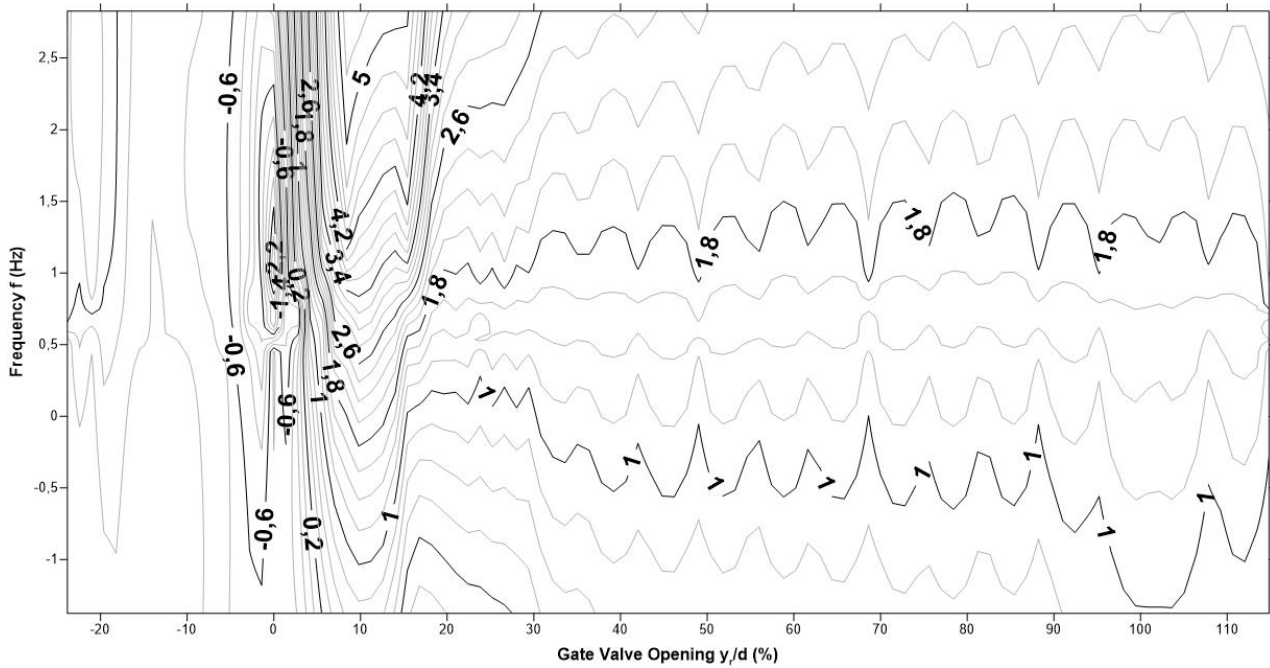
Σχήμα 6-44 Νομογράφημα για όγκο εμβολισμού $V_{b,3}=35,34$ ml του εύρους παροχής Q_b συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d (%).

Για δεδομένο πλάτος εμβολισμού $V_{b,3}=35,34$ ml και με μεταβλητά τα μεγέθη της συχνότητας διέγερσης f και του ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης γ_r γίνονται οι εξής παρατηρήσεις:

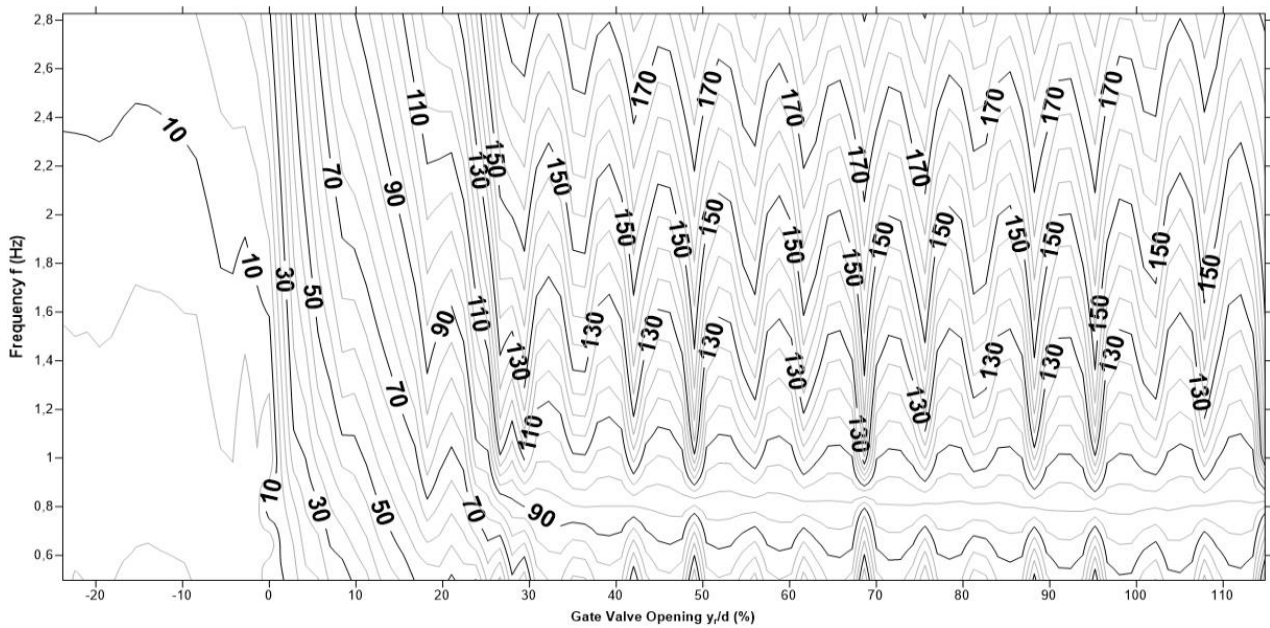
Η μέση παροχή (Σχήμα 6-43) αυξάνεται με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης αλλά και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές. Όσο η σφήνα ανυψώνεται και για τιμές του λόγου του διακένου βάνας πύλης $0 < \gamma_r/d < 10\%$ η μέση παροχή αυξάνεται. Στο διάστημα αυτό παρατηρείται κυρίως οπισθορροή και οι τιμές της παροχής αυτής αυξάνονται όσο η συχνότητα διέγερσης αυξάνονται. Όταν ο λόγος του διακένου βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 10\%$ το φαινόμενο της οπισθορροής παύει να υφίσταται και η μέση παροχή λαμβάνει πλέον μόνο θετικές τιμές. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 20\%$ η παροχή σταθεροποιείται. Σε αυτόν τον όγκο εμβολισμού και για εύρος συχνοτήτων διέγερσης f από 0,31 Hz - 3,14 Hz η μέση παροχή λαμβάνει τιμές από -5,5 ml/sec έως 9,12 ml/sec.

Το πλάτος της παροχής (Σχήμα 6-44) έχει παρόμοια συμπεριφορά. Όσο το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης και συχνότητα διέγερσης αυξάνονται τόσο το πλάτος παροχής Q_b λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ λαμβάνει τιμές πολύ μικρές καθώς η αντίσταση της βάνας πύλης είναι πολύ έντονη. Όσο η σφήνα της βάνας πύλης ανυψώνεται και η διατομή A_0 αυξάνεται (Σχήμα 5-3 β) το πλάτος παροχής λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 22\%$ το εύρος της παροχής σταθεροποιείται. Σε αυτόν τον όγκο εμβολισμού και για εύρος συχνοτήτων διέγερσης f από 0,31 Hz - 3,14 Hz το εύρος της παροχής λαμβάνει τιμές από 0,11 ml/sec έως 333,3 ml.

6.2.3.4 Νομογραφήματα για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08 \text{ ml}$



Σχήμα 6-45 Νομογράφημα για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08 \text{ ml}$ της μέσης παροχής Q_m συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης y_r/d (%).



Σχήμα 6-46 Νομογράφημα του εύρους παροχής Q_b για όγκο εμβολισμού $V_{b,4}=60,08 \text{ ml}$ συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης f και του λόγου ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης y_r/d (%).

Για δεδομένο πλάτος εμβολισμού $V_{b,4}=60,08$ ml και με μεταβλητά τα μεγέθη της συχνότητας διέγερσης f και του ανοίγματος του διακένου βάνας πύλης γ_r γίνονται οι εξής παρατηρήσεις:

Η μέση παροχή (Σχήμα 6-45) αυξάνεται με το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης αλλά και με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν ή και αρνητικές. Όσο η σφήνα ανυψώνεται και για τιμές του λόγου του διακένου βάνας πύλης $0 < \gamma_r/d < 10\%$ η μέση παροχή αυξάνεται. Στο διάστημα αυτό παρατηρείται κυρίως οπισθορροή και οι τιμές της παροχής αυτής αυξάνονται όσο η συχνότητα διέγερσης αυξάνονται. Όταν ο λόγος του διακένου βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 10\%$ το φαινόμενο της οπισθορροής παύει να υφίσταται και η μέση παροχή λαμβάνει πλέον μόνο θετικές τιμές. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 20\%$ η παροχή σταθεροποιείται. Σε αυτόν τον όγκο εμβολισμού και για εύρος συχνοτήτων διέγερσης f από 0,43 Hz -1,01 Hz η μέση παροχή λαμβάνει τιμές από -2,67 ml/sec έως 4,69 ml/sec.

Το πλάτος της παροχής (Σχήμα 6-46) έχει παρόμοια συμπεριφορά. Όσο το άνοιγμα του διακένου της βάνας πύλης και συχνότητα διέγερσης αυξάνονται τόσο το πλάτος παροχής Q_b λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές. Για λόγο ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης $\gamma_r/d < 0\%$ λαμβάνει τιμές πολύ μικρές καθώς η αντίσταση της βάνας πύλης είναι πολύ έντονη. Όσο η σφήνα της βάνας πύλης ανυψώνεται και η διατομή A_b αυξάνεται (Σχήμα 5-3 β) το πλάτος παροχής λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης. Τέλος όταν ο λόγος του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης είναι $\gamma_r/d > 20\%$ το εύρος της παροχής σταθεροποιείται. Σε αυτόν τον όγκο εμβολισμού και για εύρος συχνοτήτων διέγερσης f από 0,43 Hz -1,01 Hz το εύρος της παροχής λαμβάνει τιμές από 0,12 ml/sec έως 143,04 ml/se

Κεφάλαιο 7 Συμπερασματική επισκόπηση

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε πειραματικά το φαινόμενο της άντλησης χωρίς βαλβίδες μέσω μιας πρότυπης διάταξης ανοιχτού συστήματος. Με μεταβολή των παραμέτρων του όγκου εμβολισμού V_b , της συχνότητας διέγερσης f και της αντίστασης στη ροή ζ εξετάστηκε η συμπεριφορά του ρευστού στη συγκεκριμένη διάταξη. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν παρατίθενται στη συνέχεια.

Η αύξηση της συχνότητας διέγερσης f προκαλεί :

- την αύξηση της μέσης τιμής Q_m και του πλάτους της παροχής Q_b .
- την αύξηση της διαφοράς της μέσης πίεσης ΔP_m καθώς και του πλάτους αυτής ΔP_b .
- την μείωση της μέσης αντίστασης στη ροή ζ_m καθώς και του πλάτους της αντίστασης ζ_b

Η αύξηση του λόγου του διακένου της βάνας πύλης γ_r/d έχει ως αποτέλεσμα:

- την βαθμιαία αύξηση της μέσης τιμής Q_m και του πλάτους της παροχής Q_b .
- η διαφορά της μέσης πίεσης να μειώνεται ελαφρώς
- την μείωση της διαφοράς του πλάτους και της μέσης πίεσης ΔP_b και ΔP_m
- την μείωση του πλάτους της ρευστομηχανικής αντίστασης ζ_b
- την ελαφριά μείωση της μέσης ρευστομηχανικής αντίστασης ζ_m .

Η αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b έχει ως αποτέλεσμα :

- την αύξηση της μέσης τιμής Q_m και του πλάτους της παροχής Q_b .

Από τα νομογραφήματα που αφορούν τη μέση παροχή (Κεφάλαιο 6.2-3) συμπεραίνουμε ότι για την ταυτόχρονη αύξηση της συχνότητας διέγερσης και του ανοίγματος του διακένου της βάνας πύλης μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερες τιμές μέσης παροχής. Επιπλέον με την αύξηση του όγκου εμβολισμού αυξάνεται και η μέση παροχή για δεδομένες συχνότητες και άνοιγμα διακένου βάνας πύλης.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από τα νομογραφήματα για το πλάτος της παροχής (Κεφάλαιο 6.2-3).

Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία

- **Anderson M.**, “Electrophysiological studies on initiation and reversal of the heart beat in *Ciona intestinalis*”, *Journal of Experimental Biology*, **49**, 363-385, (1968).
- **Anderson D.A.**, Tannehill J.C., Pletcher R.H., “Application of finite-difference methods to selected model equations”, chapter 4, in *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, ed. Hemisphere Publishing Corporation, New York, pp. 87-177, (1984).
- **Auerbach D.**, W. Moehring and M. Moser, “An Analytic Approach to the Liebau Problem of Valveless Pumping”, *Cardiovascular Engineering: An International Journal*, **4**(2), 201-207, (2004).
- **Beattie C.**, Guerci A.D., Hall T., Borkon A.M., Baumgartner W., Stuart R.S., Peters J., Halperin H., Robotham J.L., “Mechanisms of blood flow during pneumatic vest cardiopulmonary resuscitation”, *Journal of Applied Physiology*, **70**, 454-465, (1991).
- **Bredow H.-J.**, “Untersuchung eines ventillosen Pumpprinzipts”, *Fortschritt Berichte Verein Deutscher Ingenieure (VDI) Zeitschrift*, Reihe **7**, Nr. 9, pp. 89, (1968).
- **Borzì A.**, **Propst G.**, “Numerical investigation of the Liebau phenomenon”, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik (ZAMP)*, **54**, 1050-1072, (2003).
- **Bredow H.-J.**, “Untersuchungen über ein vom menschlichen Kreislauf abgeleitetes, ventilloses Strömungsprinzip”, *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Kreislaufforschung*, **34**, 296-300, (1968).
- **Brusca R.C.**, **Brusca G.J.**, “Phylum annelida: The segmented worms”, chapter 13 in *Invertebrates*, Sinauer Associates, Sunderland, MA, (2003).
- **Coll J.-L.**, Chollet P., Brambilla E., Desplanques D., Behr J.-P., Favrot M., “In vivo delivery to tumors of DNA complexed with linear polyethylenimine”, *Human Gene Therapy*, **10**, 1659-1666, (1999).
- **Constantinou C.E.**, “Renal pelvic pacemaker control of ureteral peristaltic rate”, *American Journal of Physiology*, **226**, 1413-1419, (1974).
- **Criley J.M.**, Niemann J.T., Rosborough J.P., Ung S., Suzuki J., “The heart is a conduit in CPR”, *Critical Care Medicine*, **9**, 373-374, (1981).
- **Dash A.K.**, **Cudworth G.C.**, “Therapeutic applications of implantable drug delivery systems - the role of intraluminal antibiotics”, *Journal of Pharmacological and Toxicological Methods*, **40**, 1-12, (1998).
- **Farrell A.**, “Evolution of cardiovascular systems: insights into ontogeny”, chapter 9 in *Development of Cardiovascular Systems* (vol. 1), Burggren W. and Keller B.B. (eds), Cambridge University Press, New York, pp. 360, (1997).
- **Forouhar A.S.**, Liebling M., Hickerson A., Nasiraei-Moghaddam A., Tsai H.-J., Hove J.R., Fraser S.E., Dickinson M.E., Gharib M., “The embryonic vertebrate heart tube is a dynamic suction pump”, *Science*, **312**, 751-753, (2006).
- **Halperin H.R.**, Tsitlik J.E., Beyar R., Chandra N., Guerci A.D., “Intrathoracic pressure fluctuations move blood during CPR: Comparison of hemodynamic data with predictions from a mathematical model”, *Annals of Biomedical Engineering*, **15**, 385-403, (1987).
- **Hertel W.**, **Pass G.**, “An evolutionary treatment of the morphology and physiology of circulatory organs in insects”, *Comparative Biochemistry Physiology*, **A 133**, 555-575, (2002).
- **Hickerson A.I.**, “An Experimental Analysis of the Characteristic Behaviors of an Impedance Pump”, *Dissertation*, California Institute of Technology, Pasadena California, pp. 90, (2005).
- **Hickman, Cleveland, Larson, Allan, Roberts, Larry**, “*Ζωολογία Ολοκληρωμένες αρχές ΤΟΜΟΣ Ι, ΙΙ*”

- **Gillot C.**, “The Circulatory System”, chapter 17 in *Entomology*, 3rd edition Springer, Netherlands, 515-536, (2005).
- **Kardong K.V.**, “Vertebrates: Comparative Anatomy, Function, Evolution”, McGraw-Hill, Boston, (2002).
- **Kenner T.**, “Biological asymmetry and cardiovascular blood transport”, *Cardiovascular Engineering: An International Journal*, **4**, 209-218, (2004).
- **Kriebel M.E.**, “Studies on cardiovascular physiology of tunicates”, *The Biological Bulletin*, **134**, 434-455, (1968).
- **Lang J.R.**, Davidson E.M., Exintaris B., “Pyeloureteral motility and ureteral peristalsis: essential role of sensory nerves and endogenous prostaglandins (review)”, *Experimental Physiology*, Cambridge University Press, **87**, 129-146, (2002).
- **Larsen W.J.**, “Development of the heart”, chapter 7 in *Human Embryology*, 2nd edition Churchill Livingstone, New York, 151-188, (1997).
- **Liebau G.**, “Arterielle Pulsation und venöse Repulsation”, *Zeitschrift für die Gesamte Experimentelle Medizin*, **123**, 71-90, (1954).
- **Liebau G.**, “Über ein ventillosoes Pumpprinzip”, *Naturwissenschaften*, **41**, 327, (1954).
- **Liebau G.**, “Herzpulsation und Blutbewegung”, *Zeitschrift für die Gesamte Experimentelle Medizin*, **125**, 482-498, (1955).
- **Liebau G.**, “Prinzipien kombinierter ventillosen Pumpen, abgeleitet vom menschlichen Blutkreislauf”, *Naturwissenschaften*, **42**, 339, (1955).
- **Liebau G.**, “Die Strömungsprinzipien des Herzens”, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, **44**, 677-684, (1955).
- **Liebau G.**, “Aus welchem Grunde bleibt die Blutförderung durch das Herz bei valvulärem Versagen erhalten?”, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, **45**, 481-488, (1956).
- **Liebau G.**, “Möglichkeit der Förderung des Blutes im Herz- und Gefäßsystem ohne Herz- und Venenklappenfunktion”, *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Kreislaufforschung*, **22**, 354-359, (1956).
- **Liebau G.**, “Die Bedeutung der Trägheitskräfte für die Dynamik des Blutkreislaufs”, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, **46**, 428-438, (1957).
- **Liebau G.**, “Ursache und Wirkung des hohen Druckgefälles im Arteriolenbereich”, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, **47**, 385-393, (1958).
- **Liebau G.**, “Beobachtungen über ventillosoe Förderung im Kapillargewebe-Kreislauf”, *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Kreislaufforschung*, **29**, 152-155, (1963).
- **Liebau G.**, “Über die funktionelle Bedeutung der Venenklappen”, *Zeitschrift für Kreislaufforschung*, **52**, 419-424, (1963).
- **Liebau G.**, “Über physiologische Grundlagen klappenloser Blutförderung“, *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Kreislaufforschung*, **34**, 293-296, (1968).
- **Liebau G.**, “Über periphere Blutförderung”, in *Phänomen der pulsierenden Strömung im Blutkreislauf aus technologischer, physiologischer und klinischer Sicht*, Pestel E. and Liebau G. (eds), Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich, **738/738a***, 67-78, (1970).
- **Μανόπουλος Χ.Γ.**, Μαθιουλάκης Δ., Τσαγγάρης Σ., “Θεωρητική και πειραματική μελέτη του αντλητικού μηχανισμού χωρίς βαλβίδες στο κυκλοφορικό σύστημα”, στα *πρακτικά της 3ης Συνάντησης «ΡΟΗ 2002» Ερευνητικές Δραστηριότητες στα Φαινόμενα Ροής Ρευστών στην Ελλάδα*, Συνεδριακό Κέντρο Πανεπιστημίου Πατρών, σ.: 83-90, 2-3 Οκτωβρίου (2002).
- **Mahrenholtz O.**, “Ein Beitrag zum Förderprinzip periodisch arbeitender, ventillosen Pumpen”, *Forschung im Ingenieurwesen*, **29**, 47-56 & 73-81, (1963).
- **Mahrenholtz O.**, “Untersuchungen zum Liebauschen Strömungsprinzip”, *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Kreislaufforschung*, **29**, 155-159, (1963).
- **Mahrenholtz O.**, **Bredow H.-J.**, “Modelle ventillosen Pumpen”, in *Phänomen der pulsierenden Strömung im Blutkreislauf aus technologischer, physiologischer und klinischer Sicht*, Pestel E. and Liebau G. (eds), Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich, **738/738a***, 79-87, (1970).

- **Mahrenholtz O.**, “Zur Pumpwirkung kollabierfähiger ventillosen Schläuche”, *Ingenieur-Archiv*, **43**, S. 173-182, (1974).
- **McMinn M.H.R.**, Gaddum-Rosse P., Hutchings T.R., Logan M.B., “Functional & Clinical Anatomy”, Mosby, London, (1995).
- **Moller P.C., Philpott C.W.**, “The circulatory system of amphioxus (*Branchiostoma floridae*)”, *Journal of Morphology*, **139**, 389-406, (1973).
- **Moore K.L., Persaud T.V.N.**, “The third week of human development”, chapter 5 in *Before we are born. Essentials of embryology and birth defects*, 5th edition Saunders W.B. Company, Philadelphia-Pennsylvania, 61-79, (1998).
- **Moorman A.F.M., Christoffels V.M.**, “Cardiac chamber formation: development, genes, and evolution”, *Physiological Reviews*, **83**, 1223-1267, (2003).
- **Noordergraaf A., Horeman H.W.**, “Numerical evaluation of volume pulsations in man. II. Calculated volume pulsations of forearm and calf”, *Physics in Medicine and Biology*, **3**, 59-70, (1958).
- **Olsson A., Stemme G., Stemme E.**, “A valve-less planar fluid pump with two pump chambers”, *Sensors Actuators A Physical*, **47**, 549-556, (1995).
- **Olsson A., Stemme G., Stemme E.**, “A numerical design study of the valveless diffuser pump using a lumped-mass model”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **9**, 34-44, (1999).
- **Ozanam M.**, “De la circulation veineuse par influence”, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de L’Académie des Sciences*, **93**, 92-94, (1881).
- **Randall D.J., Davie P.S.**, “The Heart of Urochordates and Cephalochordates”, In *Heart and Heart-like Organs*, Bourne G.H. (ed), Academic Press, London, 41-59, (1980).
- **Rahr H.**, “The circulatory-system of amphioxus [*branchiostoma lanceolatum* (pallas)]. A light-microscopic investigation based on intravascular injection technique”, *Acta Zoologica (Stockholm)*, **60**, 1 -18, (1979).
- **Rahr H.**, “The ultrastructure of the blood-vessels of *branchiostoma lanceolatum* (pallas) (Cephalochordata), I. Relations between blood vessels, epithelia, basal laminae, and «connective-tissue»”, *Zoomorphology*, **97**, 53-74, (1981).
- **Rath H.J.**, “Berechnungen zu einem ventillosen Pumpprinzip”, *Dissertation*, Fakultät für Maschinenwesen, T.U. Hannover, pp. 138, (1976).
- **Rath H.J.**, “ Mathematisches Modell einer ventillosen Schlauchpumpe”, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM)*, **57**, 201-203, (1977).
- **Rath H.J.**, “Ein Beitrag zur Berechnung einer peristaltischen Strömung in elastischen Leitungen”, *Acta Mechanica*, **31**, 1-12, (1978).
- **Rath H.J., Teipel I.**, “Der Fördereffekt in ventillosen, elastischen Leitungen”, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik (ZAMP)*, **29**, 123-133, (1978).
- **Rudikoff M.T., Maughan W.L., Effron M., Freund P., Weisfeldt M.L.**, “Mechanisms of blood flow during cardiopulmonary resuscitation”, *Circulation*, **61**, 345-352, (1980).
- **Schuit E.**, “Valveless impedance pump behavior. An experimental study”, *Internship*, National University of Singapore & Eindhoven University of Technology, pp. 56, (2007).
- **Stemme E., Stemme G.**, “A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump”, *Sensors and Actuators A Physical*, **39**, 159-167, (1993).
- **Takagi S., Saijo T.**, “Study of a Piston Pump without Valves (1st Report, On a Pipe-capacity-system with a T-junction)”, *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **26**, No. 218, 1366-1372, (1983).
- **Takagi S., Takahashi K.**, “Study of a Piston Pump without Valves (2nd Report, Pumping Effect and Resonance in a Pipe-capacity-system with a T-junction)”, *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **28**, No. 239, 831-836, (1985).
- **Thomann H.**, “A Simple Pumping Mechanism in a Valveless Tube”, *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)*, **29**, 169-177, (1978).

- **Yang K.-S.**, Chen I.-Y., Shew B.-Y., C.-C. Wang, “Investigation of the flow characteristics within a micronozzle/diffuser”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **14**, 26–31, (2004).
- **Werner J.A.**, Greene H.L., Janko C.L., Cobb L.A., “Visualization of cardiac valve motion in man during external chest compression using two-dimensional echocardiography: Implications regarding the mechanism of blood flow”, *Circulation*, **63**, 1417-1421, (1

Παράρτημα-A

Στη συνέχεια παρατίθεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων στο προγραμματιστικό περιβάλλον του προγράμματος MATLAB.

```
%Εισαγωγή Δεδομένων

D=0.8; % διάμετρος σωλήνωσης σε cm
d=0.008; % διάμετρος σωλήνωσης σε m
ra=dd/2; % ακτίνα σωλήνωσης σε m
t=17.3; % θερμοκρασία μετρήσεων
%% ευρεση παροχής kg/sec
[d1,d2] = differentiate(f,t2); % d1 πρώτη παράγωγος d2 δευτερη παράγωγος

%% Πυκνότητα (g/m^3) από τύπο Kell

tt=t.^2;
ttt=t.^3;
tttt=t.^4;
r=(999.85308+6.32693*10.^-2*t-8.523829*10.^-3*tt+6.943248*10.^-5*ttt-
3.821216*10.^-7*tttt); % πυκνότητα ρ kg/m^3
rr=r/1000;% πυκνότητα g/cm^3
%% ixodes
mi=0.0010016*10.^(((20-t)/(t+96))*(1.2364-1.37*10.^-3*(20-t)+5.7*10.^(-
6)*(20-t).^2)); % ixodes m [pa*s]
n=(mi/r); % ν (κινηματικό ιξώδες) [m^2/s]

%% Ευρεση παροχών (m^3/s)

q=(d1/r); % [m^3/s]
qm=mean(q); % μέση παροχή qm

%% FFT για εύρεση συχνότητας διέγερσης

fs=length(pc2)/(max(t2)-min(t2));
T=1/fs;
L=length(pc2); %πλήθος πειραματικών δεδομένων
t=(0:L-1)*T;
y=fft(pa2);
p2=abs(y/L);
p1=p2(1:(L/2)+1);
p1(2:end-1)=2*p1(2:end-1);
f=fs*((0:(L/2))/L);
[pksf,locsf]=findpeaks(p1,f,'MinPeakHeight',10)
fhertz=locsf(1); % f
RPM=(locsf(1)*60); %RPM

%% Ευρεση τοπικών μεγίστων και ελαχίστων για παροχή
[pksm,locsm]=findpeaks(q,t2,'MinPeakDistance',(1/fhertz))
[pksmm,locsmm]=findpeaks(-q,t2,'MinPeakDistance',(1/fhertz))
maxq=mean(pksm); % max qmax
minq=mean(-pksmm); % min qmin
qrange=(maxq-minq)*10.^6;
```

```

qb=(maxq-minq);

%Γραμμική παρεμβολή σε καμπύλη παροχής

fk=polyfit(t2,sm,1);
k= polyval(fk,t2);
paroxikk=fk(1)/r;
paroxik=paroxikk*10.^6;

%% Ευρεση τοπικών μεγίστων και ελαχίστων της πίεσης σε κάθε θέση

[pksa,locsa]=findpeaks(pa2,t2,'MinPeakHeight',55);
maxa=mean(pksa); % μεγιστες τιμές πίεσης p1
[pksaa,locsaa]=findpeaks(-pa2,t2,'MinPeakHeight',7 );
maxaa=mean(-pksaa); % ελαχιστη τιμή πίεσης p1
[pksb,locsb]=findpeaks(pb2,t2 , 'MinPeakHeight',79 );
maxb=mean(pksb); % μεγιστες τιμές πίεσης p2
[pksbb,locsb]=findpeaks(-pb2,t2 , 'MinPeakHeight',30 );
maxbb=mean(-pksbb); % ελαχιστη τιμή πίεσης p2
[pksc,locsc]=findpeaks(pc2,t2,'MinPeakHeight',70 );
maxc=mean(pksc); % μεγιστες τιμές πίεσης p3
[pkscc,locsc]=findpeaks(-pc2,t2 , 'MinPeakHeight',13);
maxcc=mean(-pkscc); % ελαχιστη τιμή πίεσης p3
%% mean Pressure 55-130 s
ma=mean(pa2); % μέση τιμή πίσης p1 55-10.001 s Pm1
mb=mean(pb2); % μέση τιμή πίσης p2 55-10.001 s Pm2
mc=mean(pc2); % μέση τιμή πίσης p3 55-10.001 s Pm3
%% mean Pressure 0-0.001 s
palm=mean(pa1); %p1
pblm=mean(pb1); %p2
pclm=mean(pc1); %p3
atelikes_pieseis=[maxa,maxaa,ma,maxb,maxbb,mb,maxc,maxcc,mc]; % telikos
pinakas_pieseon

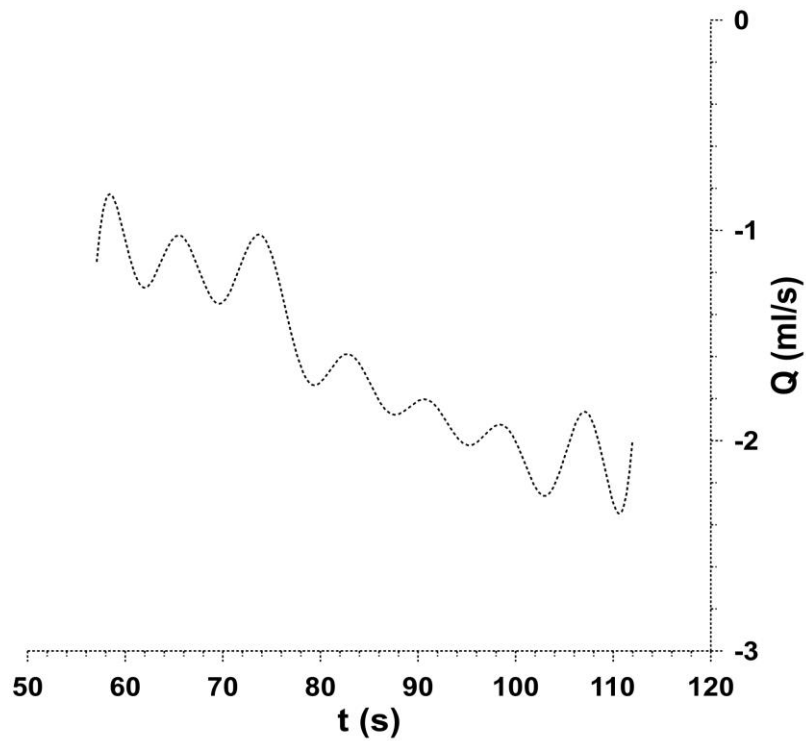
pbb=(maxb-maxbb); % Pb=Pmax-Pmin Pb2
pbc=(maxc-maxcc); % Pb=Pmax-Pmin Pb3

%%εμπέδηση εγκατλαστασης ζ (ola se m )
%Πιέσεις απο mmhg σε Pa (*133.322387415)

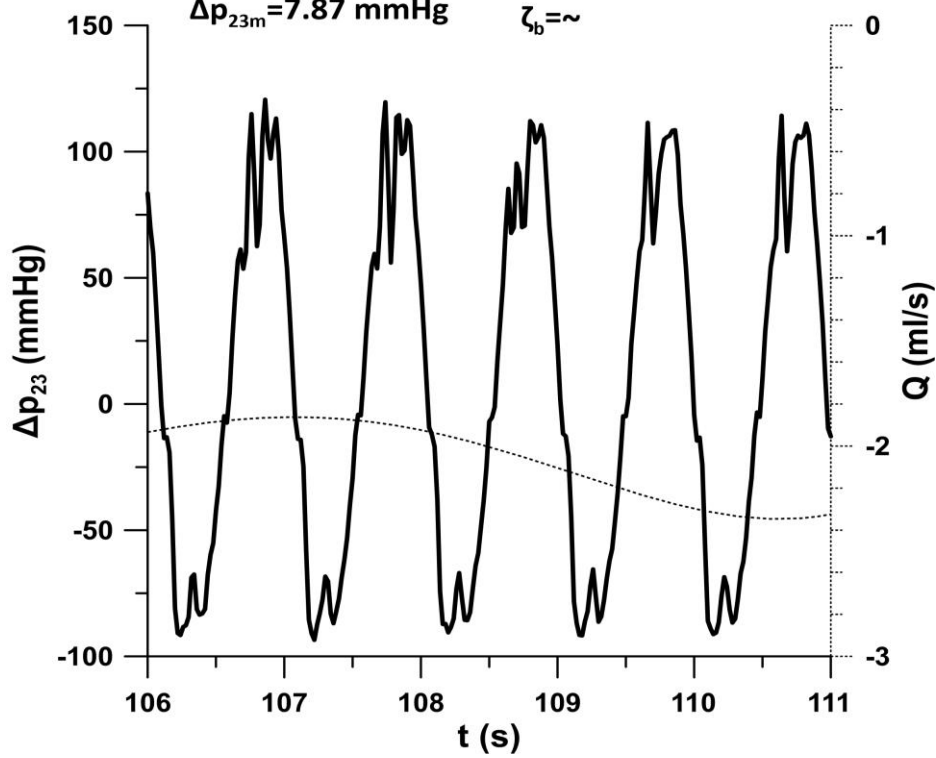
zb=(pi.^2*dd.^4)/(8*r))*(pbb*133.322387415-pbc*133.322387415)/qb.^2);
zm=(pi.^2*dd.^4)/(8*r))*(mb*133.322387415-mc*133.322387415)/meanm.^2);

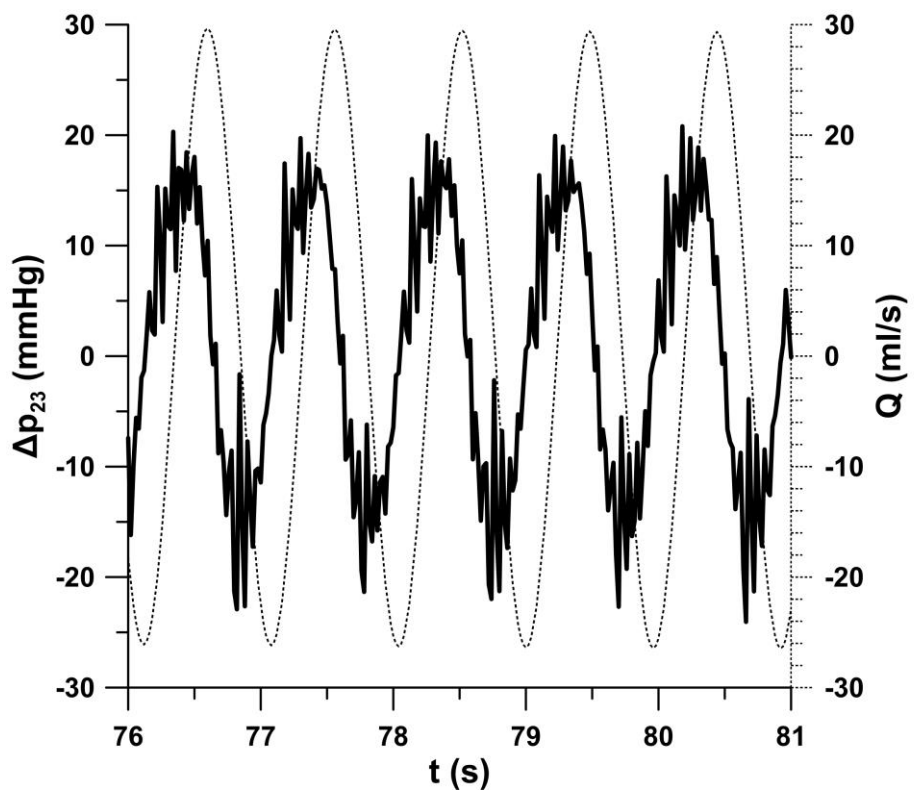
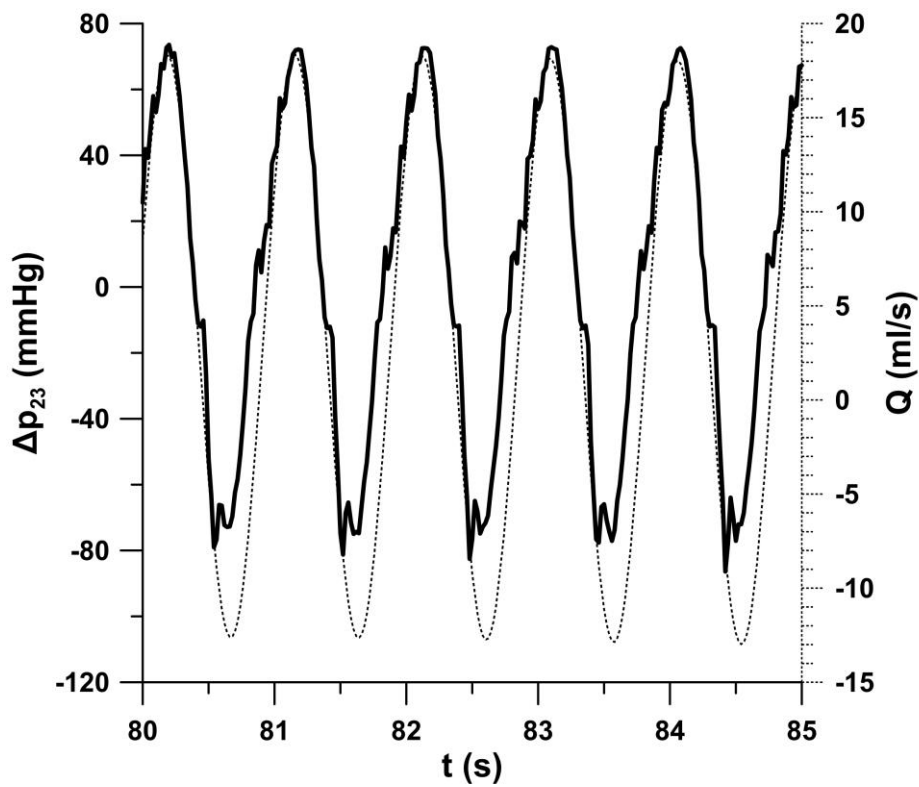
```

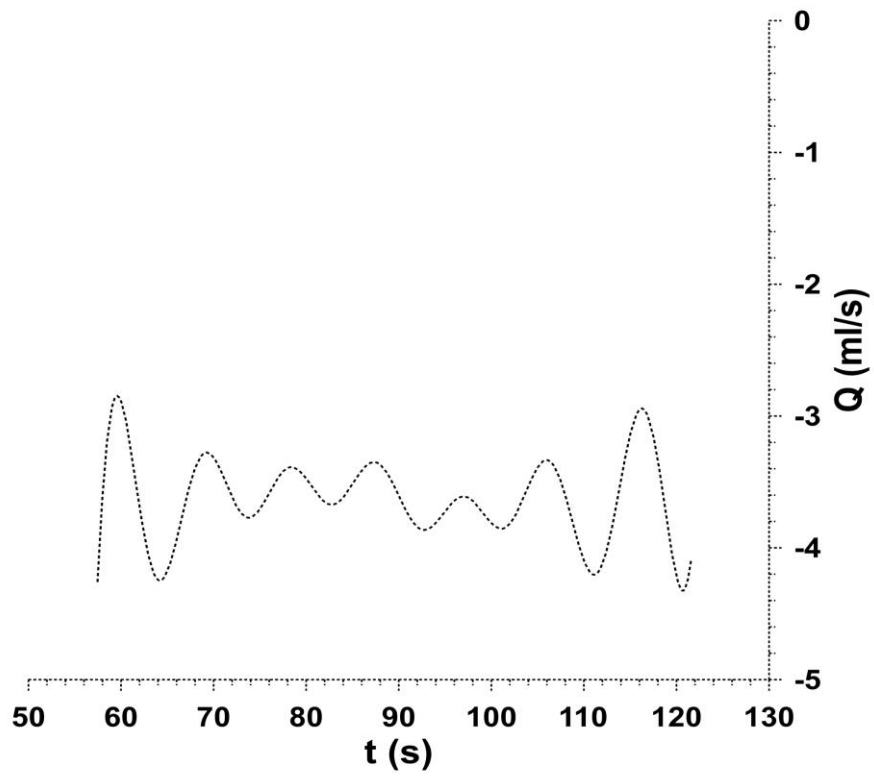
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β



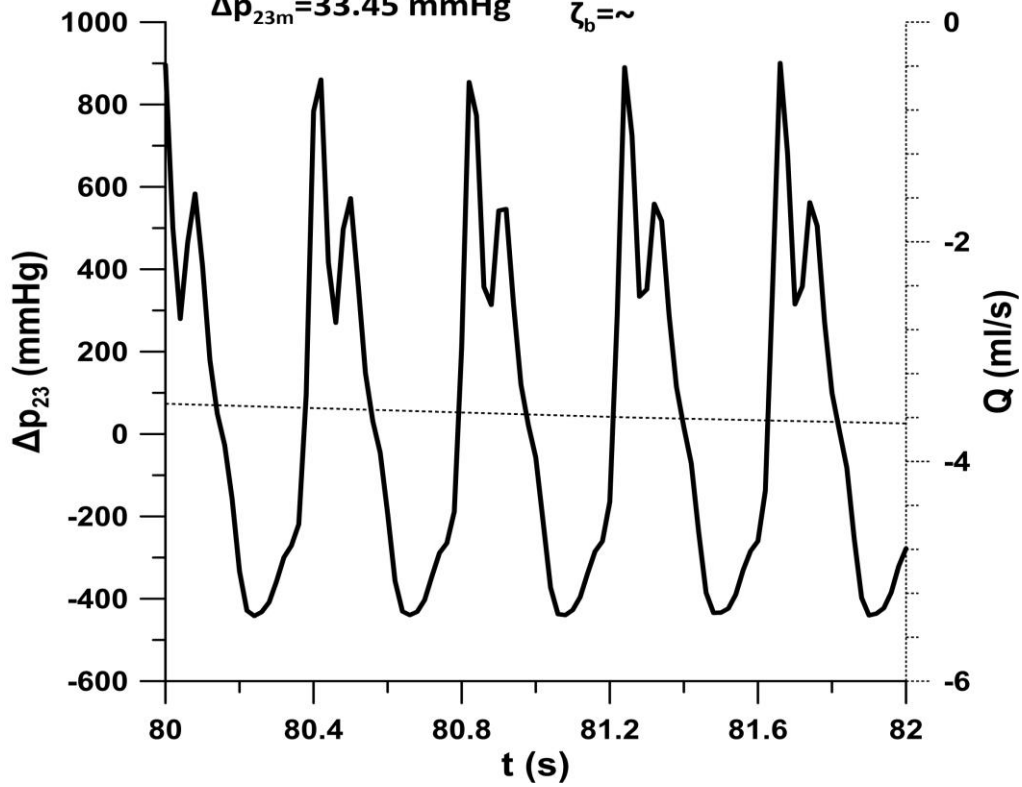
$V_b=35.34$ ml $\Delta p_{23b}=158.92$ mmHg
 $f=1.04$ Hz $Q_m=-1.64$ ml
 $n=62.14$ rpm $Q_b \sim$
 $y_R/D=0\%$ $\zeta_m=2004$
 $\Delta p_{23m}=7.87$ mmHg $\zeta_b \sim$

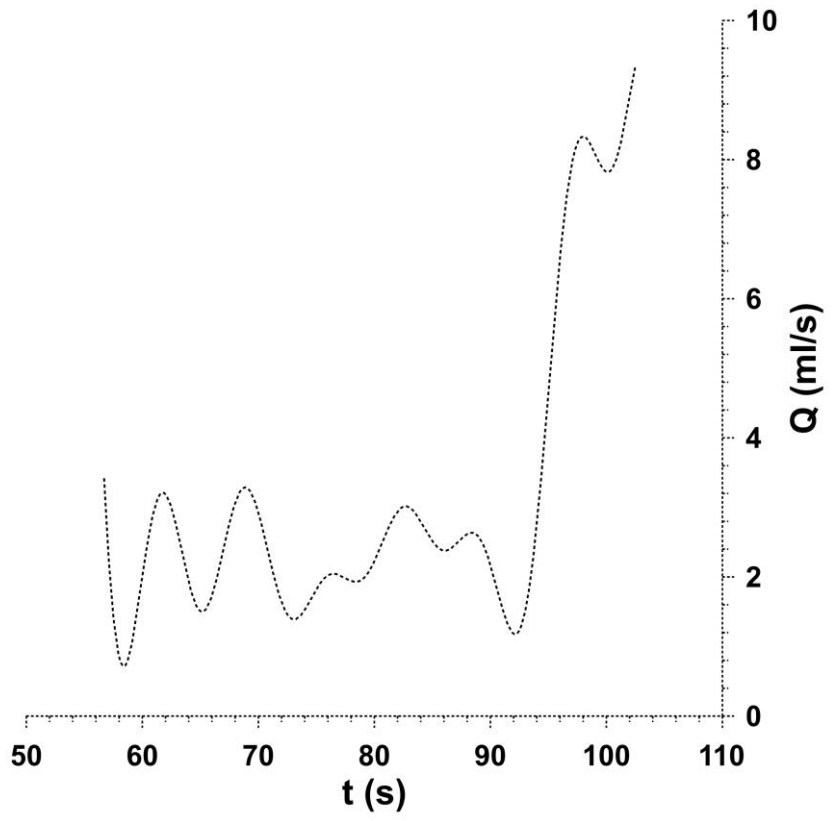




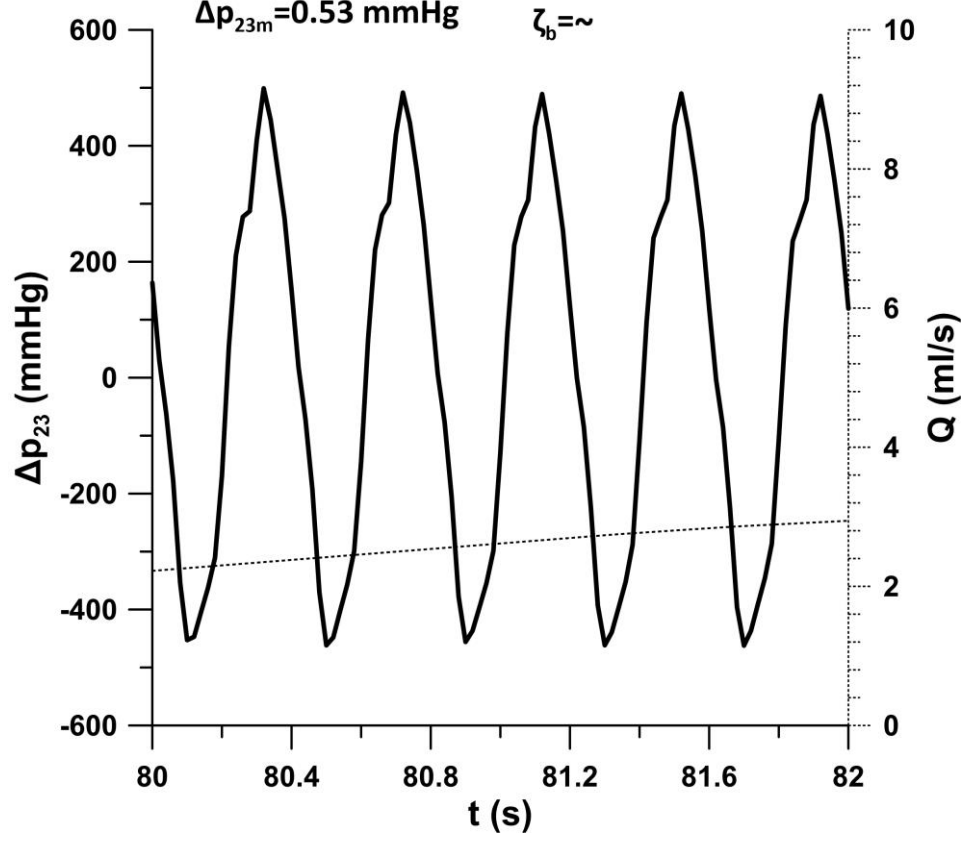


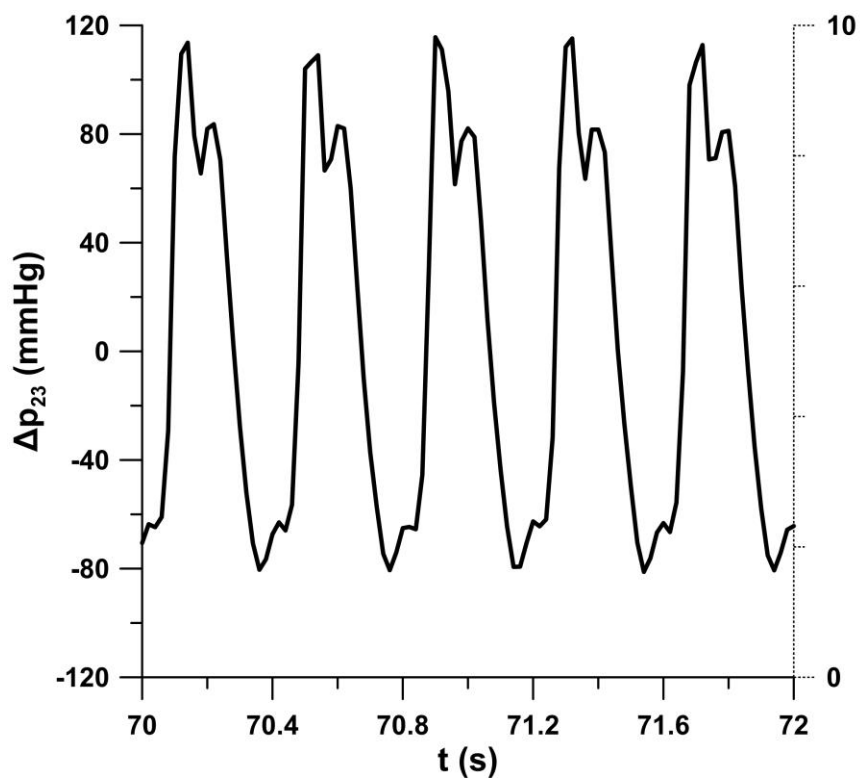
$V_b = 35.34$ ml $\Delta p_{23b} = 982.68$ mmHg
 $f = 2.31$ Hz $Q_m = -3.65$ ml
 $n = 138.42$ rpm $Q_b = \sim$
 $y_R/D = 0\%$ $\zeta_m = 1689.57$
 $\Delta p_{23m} = 33.45$ mmHg $\zeta_b = \sim$





$V_b = 35.34$ ml $\Delta p_{23b} = 426.04$ mmHg
 $f = 1.04$ Hz $Q_m = 6.17$ ml
 $n = 62.14$ rpm $Q_b = \sim$
 $y_R/D = 0\%$ $\zeta_m = 9.39$
 $\Delta p_{23m} = 0.53$ mmHg $\zeta_b = \sim$





$V_b = 35.34 \text{ ml}$
 $f = 2.49 \text{ Hz}$
 $n = 149.16 \text{ rpm}$
 $y_R/D = 75.26 \%$
 $\Delta p_{23m} = 6.71 \text{ mmHg}$
 $\Delta p_{23b} = 201.16 \text{ mmHg}$
 $Q_m = 5.46 \text{ ml/s}$
 $Q_b = 61.66 \text{ ml/s}$
 $\zeta_m = 152.04$
 $\zeta_b = 3.33$