



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

# *Μελέτη και σχεδιασμός περισταλτικής αντλίας γραμμικής έγχυσης*

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΟΔΩΡΑ ΜΕΓΚΟΥΛΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΣΩΚΡΑΤΗΣ ΤΣΑΓΓΑΡΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ  
ΙΟΥΝΙΟΣ 2011**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Βιορευστομηχανικής και Βιοϊατρικής Τεχνολογίας του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο σχεδιασμός μίας πρωτότυπης κατασκευής γραμμικής περισταλτικής αντλίας, που αποτελείται από καινοτόμο εκκεντροφόρο άξονα περιστρεφόμενο από ηλεκτροκινητήρα. Τα έκκεντρα του εκκεντροφόρου εξαναγκάζουν κατάλληλα έμβολα να παλινδρομούν και να πιέζουν έναν εύκαμπτο αγωγό, ο οποίος εκτοπίζει ρευστό προς μια κατεύθυνση.

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο σχεδιασμός διαφόρων έκκεντρων-εμβόλων ώστε να μπορεί να λειτουργεί η κατασκευή με δύο τρόπους: α) ως γραμμική περισταλτική αντλία κυματοειδούς συμπίεσης και β) ως γραμμική περισταλτική αντλία δύο σταδίων έγχυσης. Η πρώτη εφαρμόζει την αρχή της κυματοειδούς συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού μέσω του εκκεντροφόρου άξονα, μετατοπίζοντας κατάλληλα έμβολα, τα οποία λειτουργούν και ως βαλβίδες σε κάποιες χρονικές στιγμές πλήρους έμφραξης του εύκαμπτου αγωγού. Η δεύτερη εφαρμόζει την αρχή δύο σταδίων έγχυσης (δίχρονη περισταλτική αντλία), που περιλαμβάνει την ιδιαίτερη λειτουργία δύο βαλβίδων που διακόπτουν τη ροή και τη λειτουργία δύο εμβόλων που προκαλούν την έγχυση του ρευστού σε δύο χρόνους.

Ο σχεδιασμός έγκειται στον υπολογισμό των έκκεντρων, ώστε να επιτυγχάνεται σταθερός ρυθμός έγχυσης από την αντλία, χωρίς παλινδρομήσεις και φαινόμενα οπισθοροής ειδικά για χαμηλές στροφές που απαντώνται σε ιατρικές εφαρμογές. Κρίσιμος παράγοντας για την επίτευξη σταθερής παροχής είναι τόσο οι γεωμετρικές καμπυλότητες των έκκεντρων όσο και ο κατάλληλος χρονισμός τους. Και οι δύο αυτοί παράγοντες λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό.

Με την ολοκλήρωση της προσπάθειας αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βάθους καρδιάς τον Καθηγητή Σωκράτη Τσαγγάρη για τη βοήθεια και εποπτεία της εργασίας μου και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το τόσο ενδιαφέρον θέμα, και τον συνεργάτη του Δρ. Χρήστο Μανόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και συμπαράστασή του.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελ.

## 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ (peristaltic pumps)

|                                                                      |   |
|----------------------------------------------------------------------|---|
| 1.1 Η περισταλτική κίνηση και εφαρμογές περισταλτικών αντλιών.....   | 1 |
| 1.2 Περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων (roller pumps) ..... | 1 |
| 1.3 Γραμμικές περισταλτικές αντλίες (linear peristaltic pumps).....  | 2 |
| 1.4 Σωλήνας σιλικόνης.....                                           | 5 |
| 1.4.1 Ιδιότητες και εφαρμογές του σωλήνα σιλικόνης.....              | 6 |
| 1.4.2 Χημική δομή του σωλήνα σιλικόνης .....                         | 7 |
| 1.4.3 Οι σωλήνες σιλικόνης στις περισταλτικές αντλίες.....           | 9 |

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.....

11

## 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Μηχανισμός άντλησης- αρχή λειτουργίας γραμμικής περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης ..... | 20 |
| 3.2 Υπολογισμός έκκεντρου εμβόλων-βαλβίδων περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης.....           | 25 |
| 3.3 Υπολογισμός έκκεντρου 7ου διορθωτικού εμβόλου.....                                                 | 39 |
| 3.4 Σχεδιασμός έκκεντρων περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης.....                             | 60 |
| 3.4 Διάγραμμα έγχυσης- παροχής.....                                                                    | 64 |

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΔΙΧΡΟΝΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Μηχανισμός άντλησης- αρχή λειτουργίας δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας.. | 68 |
| 4.2 Υπολογισμός έκκεντρων δίχρονης περισταλτικής αντλίας.....                        | 74 |
| 4.2.1 Υπολογισμός έκκεντρου μεγάλου εμβόλου-δάχτυλου.....                            | 76 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2 Υπολογισμός έκκεντρου βαλβίδας εισόδου .....            | 79  |
| 4.2.3 Υπολογισμός έκκεντρου βαλβίδας εξόδου.....              | 82  |
| 4.2.4 Υπολογισμός έκκεντρου μικρού διορθωτικού εμβόλου.....   | 86  |
| 4.3 Σχεδιασμός έκκεντρων δίχρονης περισταλτικής αντλίας ..... | 98  |
| 4.4 Διαγράμματα έγχυσης-παροχής.....                          | 100 |
| ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....                                | 102 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....                                                | 103 |
| ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΨΕΩΝ.....                                         | 110 |

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ (peristaltic pumps)

### 1.1 Η περισταλτική κίνηση και εφαρμογές περισταλτικών αντλιών

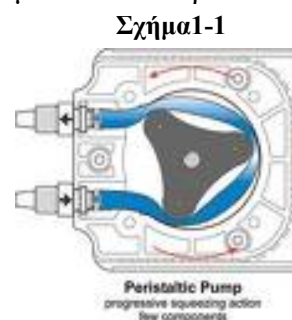
Άντληση μπορεί να επιτευχθεί μέσα από έναν εύκαμπτο αγωγό συμπιέζοντάς τον μέχρι την πλήρη έμφραξή του σε διάφορα διαδοχικά τμήματά του και σε κατάλληλες χρονικές στιγμές, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση στην προώθηση του περιεχόμενου ρευστού. Στα σημεία συμπίεσης όπου συμβαίνει η πλήρη έμφραξη του εύκαμπτου αγωγού διακόπτεται τελείως η ροή του ρευστού ακριβώς όπως συμβαίνει και με τις διαφόρων ειδών υδραυλικές βαλβίδες. Οι συσκευές που πραγματοποιούν αυτό το είδος της αντλητικής ροής μέσα από παραμορφώσιμους εύκαμπτους αγωγούς ονομάζονται περισταλτικές αντλίες.

Οι περισταλτικές αντλίες είναι αντλίες μικρής παροχής και ύψους, που λειτουργούν με την αρχή της περισταλτικής κίνησης του τοιχώματος ενός ανατάξιμου ελαστικού σωλήνα. Η περισταλτική κίνηση επιτυγχάνεται με την επιβολή κάποιας μεταβαλλόμενης πίεσης εξωτερικά στον ανατάξιμο ελαστικό σωλήνα, η οποία μεταβάλλει τη διατομή και την εσωτερική πίεση του σωλήνα με αποτέλεσμα την προώθηση του ρευστού που περιέχεται μέσα σε αυτόν. Πρόκειται ουσιαστικά για «μη διαβρεχόμενου» τύπου αντλίες όπου το ρευστό που αντλείται δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το μηχανικό μέρος της αντλίας. Αυτές οι αντλίες χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της ιατρικής κυρίως για άντληση, κυκλοφορία και δοσιμετρική χορήγηση βιολογικών ρευστών και φαρμάκων. Συνηθισμένη εφαρμογή είναι η άντληση του αίματος στις περιπτώσεις τεχνητού νεφρού και στις εγχειρήσεις ανοιχτής καρδιάς όπου η εξωσωματική κυκλοφορία του αίματος είναι απαραίτητη. Άλλες εφαρμογές αφορούν την άντληση της τροφής για παρεντερική σίτιση και τη δοσιμετρική χορήγηση υγρών φαρμάκων σε περιπτώσεις αναισθησίας και ελέγχου του πόνου ενός ασθενή με βαριά νοσήματα. Επίσης χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές και τεχνολογικές εφαρμογές όπως για άντληση ευαίσθητων ή χημικά ενεργών ουσιών που δεν πρέπει να έλθουν σε άμεση επαφή με τον αντλητικό μηχανισμό, [Τσαγγάρης, 2004].

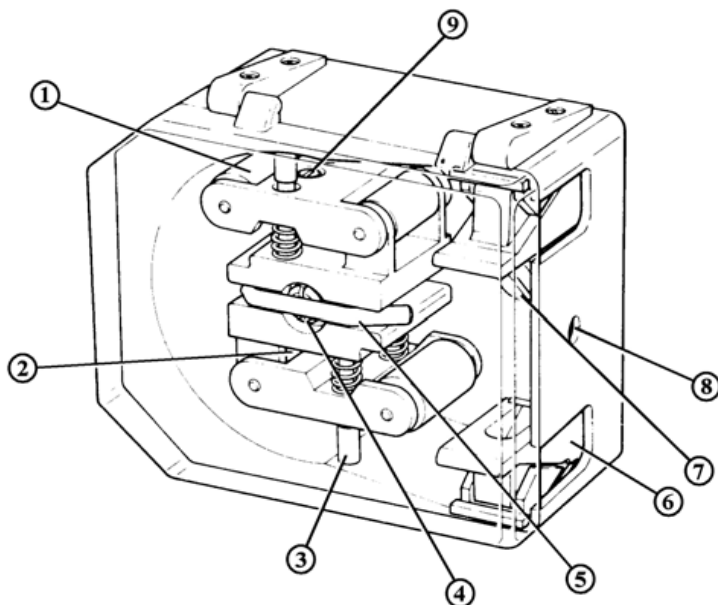
### 1.2 Περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων (roller pumps)

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

Οι περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων αποτελούνται από συνεχόμενο μήκος εύκαμπτης σωλήνωσης που ανήκει σε κυκλικό κανάλι ενός στέρεου προστατευτικού καλύμματος. Ένας μηχανικά κινούμενος στροφέας, που περιέχει πολλαπλούς κυλίνδρους (έκκεντρα-συνήθως δύο), συμπιέζει και απελευθερώνει εναλλακτικά την σωλήνωση επιδρώντας στην προώθηση ενός δεδομένου όγκου ρευστού που καθορίζεται, από την εσωτερική διάμετρο της σωλήνωσης, το κενό μεταξύ των κυλίνδρων και την ταχύτητα του στροφέα, (σχήμα 1-1, 1-2).



Αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας είναι ότι το ρευστό έρχεται σε επαφή μόνο με την εσωτερική επιφάνεια της σωλήνωσης, οπότε δεν μολύνεται από το μηχανισμό της αντλίας. Αυτοί οι τύποι αντλιών απαντώνται συνήθως στις ιατρικές εφαρμογές όσον αφορά στη διανομή τροφής και φαρμάκων σε ασθενείς, στην εξωσωματική κυκλοφορία του αίματος και κατά τη διάρκεια εγχείρησης ανοιχτής καρδιάς.



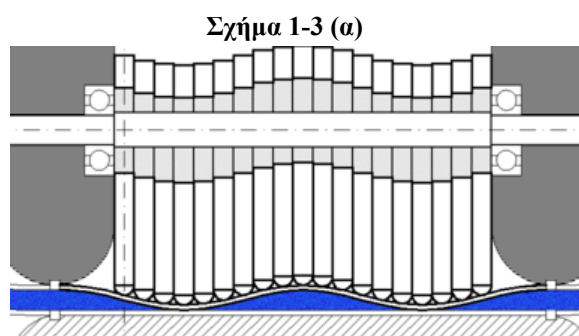
**Σχήμα 1-2** Ελατηριωτή κεφαλή αντλίας στρεφόμενων κυλίνδρων. Διακρίνονται: (1) κύριο στρεφόμενο έκκεντρο, (2) δευτερεύον στρεφόμενο έκκεντρο, (3) οδηγός εύκαμπτου σωλήνα, (4) κοιλίας συγκράτησης στρεφόμενης κεφαλής, (5) μανιβέλα στροφάλου, (6) σφικτήρας για τη συγκράτηση του εύκαμπτου σωλήνα, (7) κοιλίας στροφής της κεφαλής, (8) πρόσβαση στους κοιλίες ρύθμισης έμφραξης, (9) κοιλίας ρύθμισης έμφραξης, [Watson Marlow 501R - user manual, 1982].

Με σκοπό τη σωστή λειτουργία, η σωλήνωση περισταλτικής αντλίας των στρεφόμενων έκκεντρων πρέπει να συμπιέζεται πλήρως για να

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

### 1.3 Γραμμικές περισταλτικές αντλίες (linear peristaltic pumps)

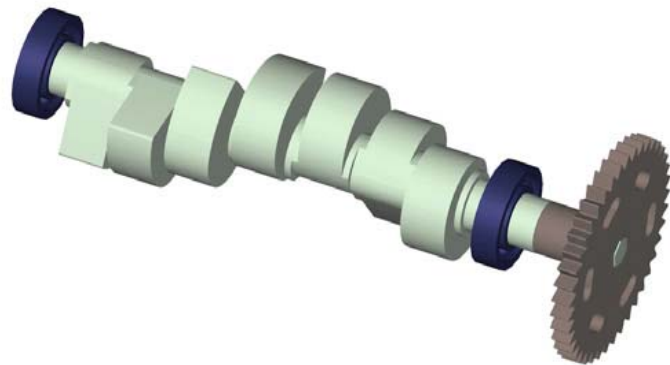
Οι γραμμικές περισταλτικές αντλίες φέρουν ελαστικό σωλήνα, συνήθως από σιλικόνη, ο οποίος πιέζεται εξωτερικά κατά κυματοειδή τρόπο από έμβολα, οπότε επιτυγχάνεται η προώθηση του ρευστού στο εσωτερικό του [σχήμα 1-3(α)]. Ο μηχανισμός αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό έκκεντρων προσαρμοσμένων με συναρμογές σύσφιξης σ' έναν άξονα. Το όλο σύστημα τότε δε διαφέρει από έναν εκκεντροφόρο άξονα, [σχήμα 1-3(β)], σαν κι αυτόν που χρησιμοποιείται στα αυτοκίνητα για το άνοιγμα και κλείσιμο των





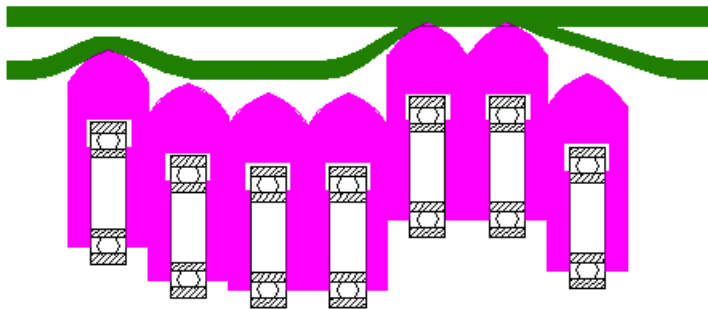
βαλβίδων του κινητήρα. Κάθε έκκεντρο εφάπτεται με τον αντίστοιχο ακόλουθο μέσω ενός μικροσκοπικού ένσφαιρου τριβέα που φέρνει ο ακόλουθος. Οι ακόλουθοι (έμβολα) βρίσκονται τοποθετημένοι διαδοχικά σε αύλακα με χαλαρή συναρμογή μεταξύ τους ώστε να μπορούν να κινούνται. Όλοι οι ακόλουθοι συμμετέχουν στην πραγματοποίηση της περισταλτικής κίνησης, εκτός από τον τελευταίο που υπάρχει για να συνεχίζει την έγχυση του ρευστού με εμβολισμό ενός τμήματος του σωλήνα, όταν ο αμέσως προηγούμενος κλείνει εντελώς το σωλήνα και το τμήμα του σωλήνα που διεγείρεται γεμίζει με νέο εισερχόμενο ρευστό, [σχήμα 1-3(γ)].

(β) Εκκεντροφόρος άξονας με ένσφαιρους τριβείς και γρανάζι στο άκρο του για τη μετάδοση της κίνησης από τον κινητήρα, [micrel Rhythmic™ - service manual, 1999].

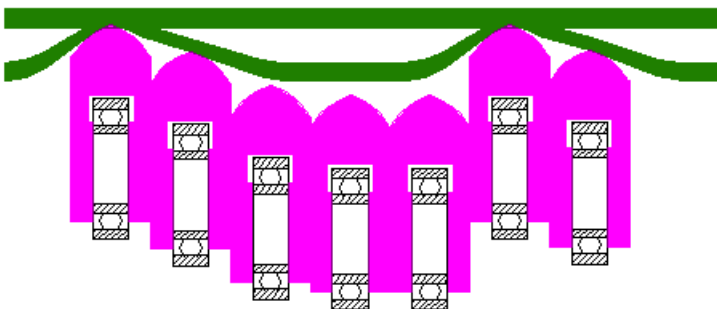


(γ) Κυματοειδή κίνηση εμβόλων (ακολουθών) για πρόκληση περισταλτικής ροής στον ελαστικό σωλήνα.

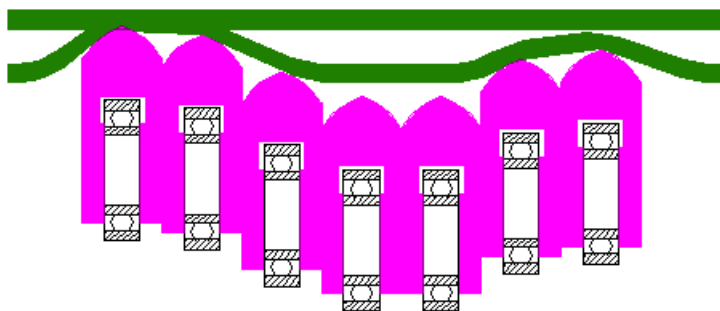
Κατεύθυνση ροής →



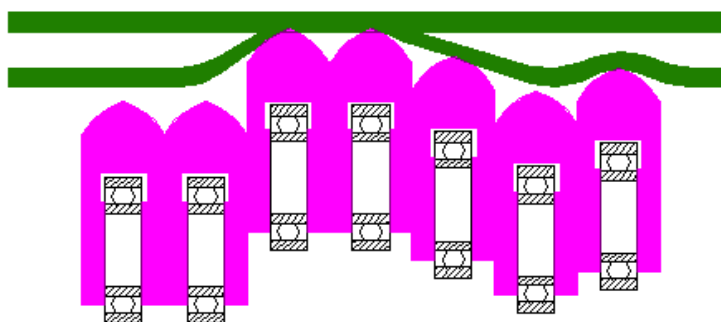
Κατεύθυνση ροής →



Κατεύθυνση ροής →



Κατεύθυνση ροής →



Με τον παραπάνω τρόπο, η ροή υφίσταται και όταν ο σωλήνας είναι κλειστός στο δεξιό του άκρο από το προτελευταίο έμβολο, περιμένοντας να γεμίσει για την εκτέλεση του επόμενου κύκλου. Έτσι πετυχαίνεται γραμμικοποίηση της ροής, ιδιαίτερα χρήσιμη στους χαμηλούς ρυθμούς έγχυσης. Όπως αναφέρθηκε, η περισταλτική ροή επιτυγχάνεται με προοδευτική κίνηση των ακολούθων, προωθώντας ρευστό προς τα δεξιά στην έξοδο του ελαστικού αγωγού, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-3(γ). Συγκεκριμένα, δημιουργείται ένα στόμιο εισόδου στον ελαστικό αγωγό όταν ο πρώτος αριστερά ακόλουθος είναι ανοιχτός, ενώ τότε ο προτελευταίος δεξιά είναι κλειστός. Στη συνέχεια κλείνει ο πρώτος αριστερά με τον προτελευταίο να παραμένει συνεχώς κλειστός. Τελικώς, ανοίγει ο προτελευταίος ακόλουθος και όλοι μαζί προωθούν το ρευστό προς την έξοδο, [micrel Rythmic™ - service manual, 1999].

Ο λόγος χρησιμοποίησης του μικροσκοπικού ένσφαιρου τριβέα μεταξύ έκκεντρου και ακόλουθου είναι για τη μείωση της φθοράς και για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται ακρίβεια πάνω από 97% για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής της αντλίας. Πιο σημαντικό στοιχείο στην ακρίβεια της αντλίας αποτελεί το ακριβές σχήμα που πρέπει να έχει το έκκεντρο. Ένσφαιροι τριβείς χρησιμοποιούνται επίσης και στα δύο άκρα του εκκεντροφόρου άξονα, ενώ σ' αυτόν προσαρμόζεται οδοντωτός τροχός μέσω του οποίου μεταδίδεται η κίνηση στον άξονα από κινητήρα, [σχήμα 1-3(β)].

Η αντλία λειτουργεί σε συγκεκριμένη πίεση και η διακύμανση αυτής πέραν κάποιων ορίων μπορεί να σημαίνει κακή τοποθέτηση της βελόνας στον ασθενή, που σχεδόν πάντα προκαλεί κάποιο φράξιμο με συνέπεια την αύξηση της πίεσης. Μεταβολή στην πίεση εκτός των φυσιολογικών ορίων οδηγεί σε ένδειξη προειδοποίησης κινδύνου (alarm) στην αντλία, από αισθητήρα πίεσης που εφάπτεται με το σωλήνα σιλικόνης μετρώντας την πίεση του ρευστού ανά πάσα στιγμή [Tsoukalis, 1998].

Παρά το γεγονός ότι εν γένει οι γραμμικές περισταλτικές αντλίες υπερέχουν έναντι των περισταλτικών αντλιών στρεφόμενων έκκεντρων, έχουν και μειονεκτήματα όπως το αξιοσημείωτο κόστος λόγω πολυπλοκότητας του μηχανισμού που απαιτείται για να συγχρονίζονται σωστά τα έμβολα (δάχτυλα - ακόλουθοι) της άντλησης. Επειδή τα έμβολα της άντλησης μετακινούνται, ώστε να κλείνουν τα διαδοχικά γειτονικά τμήματα της σωλήνωσης, οι δυνάμεις σύνθλιψης που επιβάλλονται στη σωλήνωση και στα ρευστά είναι συγκρίσιμες με εκείνες που εμφανίζονται στις περισταλτικές αντλίες στρεφόμενων έκκεντρων. Όμως, υπάρχει λιγότερη φθορά στις γραμμικές περισταλτικές αντλίες από ότι στις στρεφόμενων έκκεντρων, γιατί στις γραμμικές οι δυνάμεις έμφραξης περιορίζονται στην περιοχή κάτω από κάθε έμβολο, ενώ στις στρεφόμενων έκκεντρων εφαρμόζονται καθ' όλο το μήκος της σωλήνωσης. Παρόλα αυτά, ακόμα και στη γραμμική περισταλτική αντλία ο σωλήνας υφίσταται σε κάποιο βαθμό κάποια πλαστική παραμόρφωση. Συνεπώς, η αρχική διατομή του σωλήνα που προωθεί το ρευστό εκπίπτει και ο σωλήνας αποκτά προοδευτικά περισσότερο οβάλ σχήμα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ογκομετρική παροχή του ρευστού που διανέμεται σε κάθε κύκλο άντλησης.

Επιπλέον, με σκοπό να εξομαλυνθεί η μεταβολή της παροχής από τον έναν κύκλο στον επόμενο, όπως αναφέρθηκε ήδη, μερικές γραμμικές περισταλτικές αντλίες εφαρμόζουν την αρχή γνωστή ως “wgap cycle” ή διορθωτικού εμβόλου. Οι περισσότερες γραμμικές περισταλτικές αντλίες χρησιμοποιούν πολλά έμβολα για να μικρύνουν τον χρόνο λειτουργίας του διορθωτικού εμβόλου. Όμως, προσπαθώντας να διατηρηθεί η κατάλληλη ευθυγράμμιση και η σχετική κίνηση μεταξύ των πολλών εμβόλων, επιδεινώνεται η αξιοπιστία της λειτουργίας της συσκευής και αυξάνεται το κατασκευαστικό κόστος, [Tsoukalis, 1999].

Ένα άλλο μειονέκτημα μπορεί να είναι αυτό της οπισθοροής (back-flow), σύμφωνα με το οποίο τμήμα από το εγχυόμενο ρευστό κατευθύνεται αντίθετα από την ταχύτητα διάδοσης του περισταλτικού κύματος όταν η πίεση εξόδου (κατάθλιψης) είναι υψηλότερη από την εσωτερική πίεση στο ρευστό της περισταλτικής αντλίας. Ειδικότερα, σε περιπτώσεις δοσιμετρικής χορήγησης υγρών φαρμάκων σε ασθενείς, η οπισθοροή προκαλεί την ανάμειξη του εγχυόμενου ρευστού με το αίμα του ασθενούς όταν η πίεση του αίματος είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική πίεση του ρευστού της περισταλτικής αντλίας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε θρόμβωση του αίματος. Επιπλέον, η παρουσία αέρα στο σύστημα κατά τη μετάγχιση του ρευστού φαρμάκου στη γραμμή του ασθενούς, όταν η περισταλτική αντλία εργάζεται συνεχώς χωρίς η ροή του ρευστού να σταματά, αποτελεί επίσης μειονέκτημα. Σε αυτή την περίπτωση είναι μόνιμα συνδεδεμένα σε σειρά με την γραμμή του ασθενούς φίλτρο εξάλειψης αέρα και βαλβίδα αντεπιστροφής.[Tsoukalis, 1999].

## 1.4 Σωλήνας σιλικόνης

Τα επιθυμητά αποτελέσματα των περισταλτικών αντλιών δεν επιτυγχάνονται μόνο με τον κατάλληλο σχεδιασμό του μηχανισμού άντλησης, αλλά σημαντικό ρόλο παίζει και η επιλογή του σωλήνα που μεταφέρει το ρευστό. Το υλικό κατασκευής του σωλήνα, το οποίο χρησιμοποιείται ευρύτατα στις περισταλτικές αντλίες και έχει γίνει το σημείο αναφοράς σε ιατρικές εφαρμογές τις τελευταίες δεκαετίες είναι, όπως αναφέρεται παραπάνω, η σιλικόνη. Η ουσιαστική ύπαρξη της αντλητικής ικανότητας των περισταλτικών αντλιών οφείλεται στις ιδιότητες του σωλήνα σιλικόνης, οι οποίες αναπτύσσονται αναλυτικά παρακάτω.

### 1.4.1 Ιδιότητες και εφαρμογές του σωλήνα σιλικόνης

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

Τα ελαστικά από σιλικόνη είναι συνθετικά πολυμερή με ασυνήθιστη μοριακή δομή, η οποία αποτελείται από γιγαντιαία αλυσίδα από εναλλασσόμενα άτομα πυριτίου και οξυγόνου. Η ισχυρή χημική δομή πυριτίου-οξυγόνου της σιλικόνης δίνει στο ελαστομερές τις μοναδικές του ιδιότητες, όπως τη βιοσυμβατότητα, την υψηλή θερμοκρασιακή και χημική αντίσταση, τις καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, τη φυσική διαύγεια και την ημιδιαφάνεια, [Heide,1999].

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

Οι σιλικόνες είναι άοσμες και άγευστες, δεν ευνοούν την ανάπτυξη των βακτηριδίων και δεν επιμολύνουν ή οξειδώνουν άλλα υλικά. Επίσης έχουν την ικανότητα να αντέχουν σε ευρύτερο πεδίο ακραίων θερμοκρασιών, συγκρινόμενα με όλα σχεδόν τα άλλα ελαστομερή, διατηρώντας σταθερότητα μεταξύ θερμοκρασιακών μεταβολών από  $-59^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $260^{\circ}\text{C}$ . Μπορούν να αποστειρώνονται μέσω του αερίου EtO (Ethylene Oxide), ακτινοβολίας γάμμα ( $\gamma$ ) ή δέσμης ηλεκτρονίων (E-beam), με υπέρθετους ατμούς άνω του σημείου βρασμού (autoclaving) και ποικίλες άλλες μεθόδους. Οι σιλικόνες δε διαλύονται στο νερό και παρουσιάζουν αντοχή σε πολλά χημικά συμπεριλαμβανομένων κάποιων οξέων, οξειδωτικών χημικών, αμμωνίας και ισοπροπυλικής αλκοόλης. Αντίθετα τα συμπυκνωμένα οξέα, τα αλκάλια και οι εν γένει διαλύτες δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται με τις σιλικόνες. Τα ελαστικά από σιλικόνη παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάτμηση (έως 250 ppi) και εφελκυσμό (έως 1500 psi), μεγάλη διάταση (έως 1250 %) και ευκαμψία, καλή απόκριση σε χαμηλή συμπίεση και εύρος σκληρότητας από 5 έως 80 Shore A. Ακόμη οι σιλικόνες εξέχουν σε μονωτικές ιδιότητες έναντι του ηλεκτρικού ρεύματος σε σχέση με άλλα συγκρινόμενα μονωτικά υλικά, καθώς και στην πολλαπλή χρησιμότητά τους σε ηλεκτρικές

ιδιότητες. Επιπλέον είναι μη αγώγιμες διατηρώντας τη διηλεκτρική τους αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες σε σχέση με εκείνες που συμβατικά μονωτικά υλικά μπορούν να λειτουργήσουν. [Heide,1999].

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

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

## 1.4.2 Χημική δομή του σωλήνα σιλικόνης

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

Η αντίδραση σκλήρυνσης είναι μονόδρομη και πρόκειται για τη θερμική αποσύνθεση του υπεροξειδίου, σχηματίζοντας ελεύθερες ρίζες οι οποίες στη συνέχεια αφαιρούν άτομα υδρογόνου που υπάρχουν στα εξέχοντα μεθύλια της σιλικόνης ή/και σε ομάδες βινυλίου. Οι ρίζες που σχηματίζονται από την αφαίρεση του ατόμου υδρογόνου από τα εξέχοντα μεθύλια της σιλικόνης και τα βινύλια συνδυάζονται κατόπιν, σχηματίζοντας διασταυρώσεις (crosslinkings) μεταξύ των αλυσίδων πολυμερών πυριτίου που συμμετέχουν. Αν και πολλά οργανικά υπεροξειδία θα βουλκάνιζαν το ελαστικό σιλικόνης, μόνο το υπεροξειδίο του 2,4 διχλωροβενζολίου προσφέρει συμπαγή επιφανειακή σκλήρυνση χωρίς εγκοπές ή πορώδες και χαρακτηριστικό άρωμα κατά τη σκλήρυνση. Αυτό το ειδικό υπεροξειδίο έχει μία ώρα χρόνο ημίσειας ζωής στους 73°C και γι' αυτό είναι εξαιρετικά

αποδοτικό στο σχηματισμό διασταυρώσεων (crosslinkings) στις τυπικές θερμοκρασίες (HAV) από 538 έως 760 °C, [Lynch, 1978].

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

Η σκλήρυνση με πλατίνα του ελαστικού από σιλικόνη προσφέρει εναλλακτική προτεινόμενη σκλήρυνση έναντι αυτής με υπεροξείδιο, ειδικά για εφαρμογές στο χώρο της υγείας, όπου απαιτείται καθαριότητα και μέγιστη καθαρότητα των υλικών. Η σκλήρυνση με πλατίνα προέρχεται από την αντίδραση βουλκανισμού σύμφωνα με την οποία ένα πολύ-λειτουργικό υδρίδιο του πυριτίου (διασταυρωτής) παρουσία ενός ειδικού μεταλλικού καταλύτη, όπως η πλατίνα, προσθέτει, διαμέσου διπλού δεσμού, την ομάδα του βινυλίου στην πολυμερισμένη αλυσίδα της οργανικής ένωσης του πυριτίου. Όταν ο διασταυρωτής περιέχει περισσότερες από μία ενώσεις υδριδίου, τότε μπορεί να αντιδράσει με πιο πολλές αλυσίδες και με αυτόν τον τρόπο να σχηματιστούν αντίστοιχα πολλαπλές διασταυρώσεις (crosslinkings), [Crowther, 2003].

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

Συνήθως, τα ελαστομερή σιλικόνης με σκλήρυνση πλατίνας εφοδιάζονται ως δυο συστατικά τα οποία αναμειγνύονται πριν την παραγωγή. Η διάρκεια ζωής αυτών των υλικών από τη στιγμή που αναμειγνύονται είναι σχετικά μικρή, οπότε αυτά τα υλικά συνήθως εξωθούνται και σκληραίνονται εντός μερικών ωρών από τη στιγμή της ανάμιξης πριν χαθεί η επεξεργασιμότητά τους. Οι τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία με καταλύτη πλατίνας, ωστόσο, έχουν εισαγάγει μία καινούργια μέθοδο, ενός συστατικού, σκλήρυνσης των ελαστομερών σιλικόνης. Αυτά τα υλικά εφοδιάζονται στους κατασκευαστές σε έτοιμη μορφή προς χρήση, στην οποία ο καταλύτης και ο αναστολέας έχουν προαναμιχθεί στο μητρικό υλικό του ελαστικού, εξαλείφοντας την ανάγκη για ανάμιξη πριν τη παραγωγή. Ο τυπικός χρόνος διάρκειας ζωής αυτών των υλικών είναι τρεις μήνες και προσφέρουν στον κατασκευαστή την ευκολία της απευθείας χρήσης και του χαμηλού κόστους που χαρακτηρίζει το υλικό ενός συστατικού.

### 1.4.3 Οι σωλήνες σιλικόνης στις περισταλτικές αντλίες

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

| Χαρακτηριστική ιδιότητα                | Κλασική διεργασία σκλήρυνσης με πλατίνα | Νέα κατηγορία σκλήρυνσης με πλατίνα |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| Σκληρότητα , shore (points)            | 50                                      | 50                                  |
| Αντοχή εφελκυσμού (psi)                | 1300                                    | 1100                                |
| Διάταση θραύσης(%)                     | 900                                     | 450                                 |
| Διάτμηση B (ppi)                       | 250                                     | 100                                 |
| Μέτρο ελαστικότητας 100%(psi)          | 190                                     | 200                                 |
| Απόκριση σε συμπίεση 22hrs σε 177C (%) | 50                                      | 30                                  |
| Αναταξιμότητα Bayshore(%)              | 48                                      | 61                                  |
| Υστέρηση (%)                           | 53                                      | 41                                  |
| Ειδικό Βάρος                           | 1,15                                    | 1,12                                |

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

Ο παραγόμενος σωλήνας σιλικόνης μέσω χύτευσης με έγχυση τήγματος (LIM-Liquid Injection Molding) είναι ελαστομερές δυο συστατικών από σιλικόνη ικανό να σκληρυνθεί με πλατίνα και να χρησιμοποιηθεί σε περισταλτικές αντλίες. Το ελαστομερές αυτό μπορεί να χυτευθεί σε καλούπι και να σκληρυνθεί σε υψηλές θερμοκρασίες, μέσω ειδικά σχεδιασμένων μηχανών έγχυσης τήγματος, διαμορφώνοντάς το άπαξ υπό σταθερή θερμοκρασία. Σε αντίθεση με τη μέθοδο εκβολής (extrusion), η διαδικασία χύτευσης επιτυγχάνει σύνθετα γεωμετρικά σχήματα και ακρίβεια διαστάσεων. Η δυνατότητα αυτή επίτευξης της ακριβούς γεωμετρίας σωλήνων καθιστά δυνατή τη δημιουργία νέων σχεδιασμών φορητών περισταλτικών αντλιών με πολύ καλή ακρίβεια στην έγχυση του ρευστού. Πρόσφατα η παραπάνω μέθοδος LIM χρησιμοποιήθηκε για κατασκευή αναλωσίμων σωλήνων από ελαστικό σιλικόνης, υψηλής ποιότητας και χαμηλού κόστους για παρεντερική διατροφή. Συνεπώς, η μέθοδος LIM κατέχει διευρυμένο ρόλο σε πολλές μελλοντικές καινοτομικές εφαρμογές κατασκευής σωλήνων για τις ιατρικές συσκευές.

Συμπερασματικά, λοιπόν, το ελαστικό σιλικόνης σκληρυμένης με πλατίνα βρίσκεται εφαρμογή σε πολλές φαρμακευτικές και σχετιζόμενες με την υγεία διαδικασίες και η πρόσφατη εισαγωγή υλικών ενός συστατικού διευκολύνει τη χρήση του, τόσο σε εφαρμογές εξώθησης, όσο και σε εφαρμογές χύτευσης. Τα ελαστομερή σιλικόνης σκληρυμένης με πλατίνα μπορούν να σχεδιασθούν για να εξασφαλίζουν την απόδοση των περισταλτικών

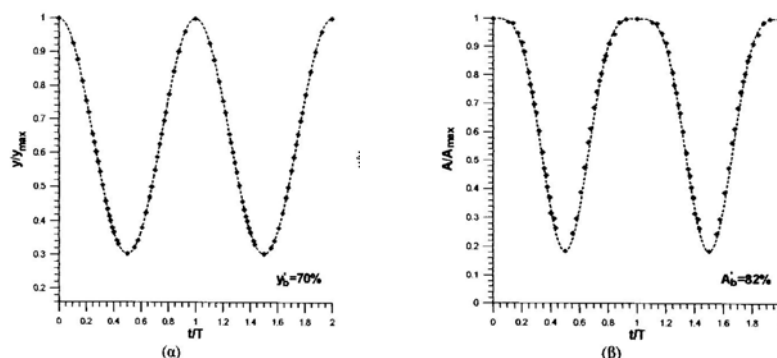
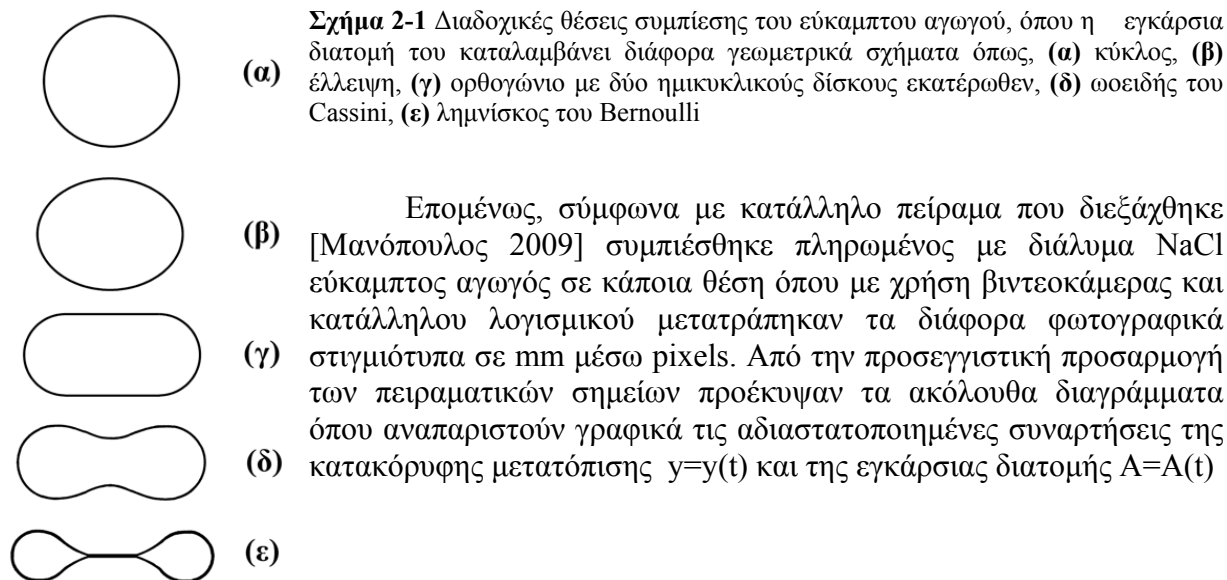
αντλιών στον ίδιο βαθμό με τα έως τώρα υλικά σκληρυμένα με υπεροξειδίο. Αυτά τα νέα ελαστομερή από σιλικόνη πλεονεκτούν λόγω της απουσίας των παραπροϊόντων υπεροξειδίου και της λείας επιφάνειας που διαθέτουν. Επιπρόσθετα, παρουσιάζουν καλή ελαστική μνήμη, χαμηλή υστέρηση και καλή απόκριση σε χαμηλή συμπίεση, πετυχαίνοντας μεγάλη διάρκεια ζωής του σωλήνα της αντλίας και ακρίβεια στην παροχή. Η μέθοδος LIM του ελαστικού σιλικόνης προσδίδει νέα εναλλακτική δυνατότητα που συγχωνεύει τη νέα λειτουργικότητα και τη βελτιωμένη αξιοπιστία στις ιατρικές συσκευές. Με τη μακρά ιστορία της επιτυχούς χρήσης της σιλικόνης στη βιομηχανία και το μοναδικό συνδυασμό των ιδιοτήτων της, η σιλικόνη είναι σε πολύ καλή θέση να συναγωνιστεί τις πλέον όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις των υλικών που προκύπτουν από τους κατασκευαστές συσκευών.



## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

Σκοπός αυτής της παραγράφου είναι να παρουσιάσει πως διαμορφώνεται η εγκάρσια διατομή του εύκαμπτου αγωγού, καθώς αυτός συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται στο σημείο διέγερσης. Δηλαδή, αναπτύσσεται η σχέση της μεταβαλλόμενης διατομής  $A$  με την εκάστοτε επιβαλλόμενη κατακόρυφη μετατόπιση  $y$  (σχήμα 2-2). Η εύρεση της διατομής του εύκαμπτου αγωγού στο σημείο που συμπιέζεται για το χρονικό διάστημα μίας περιόδου, μέσω αναλυτικής σχέσης, είναι πολύ δύσκολη. Αυτό συμβαίνει διότι η διατομή του εύκαμπτου αγωγού από κυκλική που είναι στην αρχή, καθώς συμπιέζεται προοδευτικά μετατρέπεται σε ελλειπτική, ενώ με παραπάνω συμπίεση συνίσταται από ένα ορθογώνιο και δύο ημικυκλικούς δίσκους, και προς το τέλος διαμορφώνεται η περίμετρός της αρχικά σε ωοειδή του Cassini, καταλήγοντας περαιτέρω σε ένα λημνίσκο του Bernoulli, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-1.



**Σχήμα 2-2.** **(α)** Αδιάστατη χρονική συνάρτηση κατακόρυφης μετατόπισης  $y/y_{\max}$  μέχρι του σημείου που εφάπτεται με τον εύκαμπτο αγωγό. **(β)** Αδιάστατη χρονική συνάρτηση της εγκάρσιας διατομής  $A/A_{\max}$  του εύκαμπτου αγωγού που η κατακόρυφη μετατόπιση προκαλεί συμπίεση – αποσυμπίεση

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

$$\frac{y}{D_o} = 1 - \frac{y_o}{2D_o} \left[ 1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right] = 1 - y_b \sin^2\left(\pi \frac{t}{T}\right) \quad (2.1)$$

$$\frac{A}{A_o} = 1 - \frac{A_b}{4} \left[ 1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right]^2 = 1 - A_b \sin^4\left(\pi \frac{t}{T}\right) \quad (2.2)$$

Όπου:

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

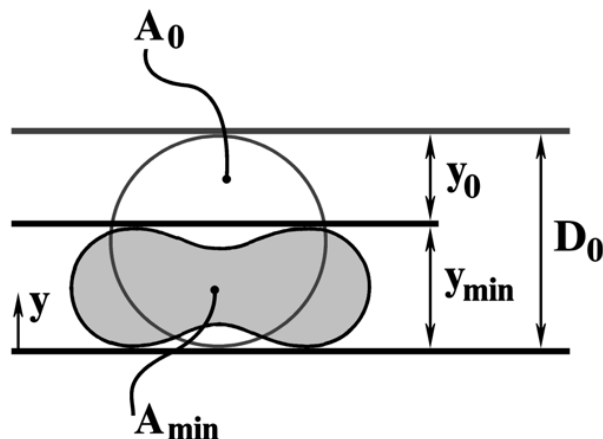
$y_o$  : η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση της διαμέτρου του εύκαμπτου αγωγού, που μπορεί να συμβεί στη διάρκεια μίας περιόδου, όταν δεν συμπιέζεται,

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

$A_{\max}$  : η αρχική μέγιστη διατομή του εύκαμπτου αγωγού πριν υποστεί οποιαδήποτε συμπίεση,

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

$T$  : η περίοδος διέγερσης του εύκαμπτου αγωγού.



Σχήμα 2-3

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

$$\frac{y}{D_o} = 1 - \frac{y_b}{\sqrt{A_b}} \sqrt{1 - \frac{A}{A_o}} \quad (2.3)$$

όπου  $A_o = \frac{\pi D^2}{4}$

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

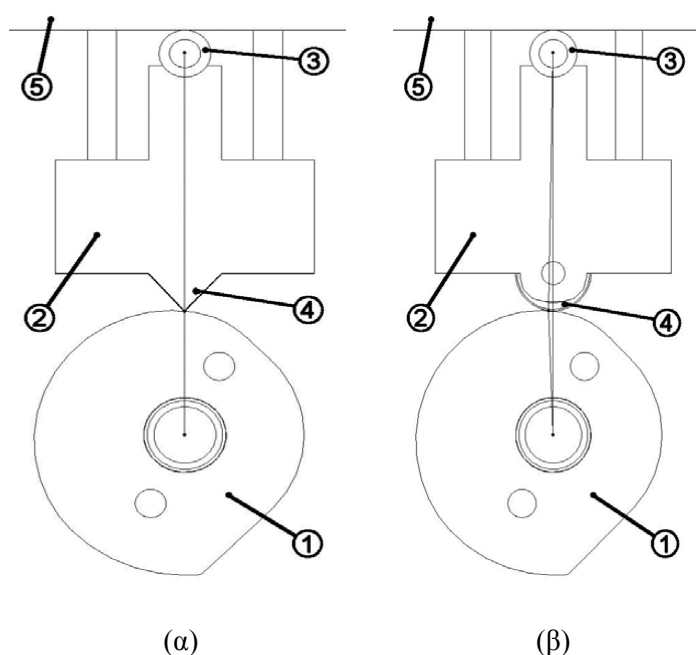
Σημειώνεται εδώ ότι για υψηλές συχνότητες διέγερσης το πώς μεταβάλλεται η εγκάρσια διατομή του εύκαμπτου αγωγού δεν παίζει σχεδόν κανένα ρόλο στην επίτευξη σταθερής, συνεχούς και συγκεκριμένης παροχής ρευστού. Αρκεί μόνο η μεταβολή της συχνότητας διέγερσης για την επίτευξη της επιθυμητής τιμής της παροχής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

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

Η παραδοχή που χρειάζεται για τον εύκολο συσχετισμό της κατακόρυφης εσωτερικής απόστασης  $y$  της εγκάρσιας διατομής του παραμορφωμένου εύκαμπτου αγωγού με την αυξανόμενη ακτίνα του έκκεντρου συμπίεσης  $r_e$ , χωρίς να προκαλείται ουσιαστικό σφάλμα στη γραμμική μεταβολή του όγκου εμβολισμού με το χρόνο, αφορά το σημείο επαφής του έκκεντρου με το έμβολο-δάχτυλο. Θεωρείται ότι αυτό το σημείο επαφής μετατοπίζεται μόνο κατακόρυφα και ανήκει στην ευθεία που ορίζεται από το ακλόνητο κέντρο περιστροφής του έκκεντρου και το κέντρο συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού, το οποίο μετατοπίζεται επίσης μόνο κατακόρυφα. Δηλαδή, τα σημεία: περιστροφής του έκκεντρου, κέντρου συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου

αγωγού και επαφής του έκκεντρου με το έμβολο-δάχτυλο είναι συνευθειακά. Αυτή η ευθεία υποτίθεται ότι παραμένει συνεχώς κάθετη στο επίπεδο συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού (καπάκι αντλίας), κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης.

Στην πραγματικότητα σχηματίζεται μεταβαλλόμενη γωνία  $\theta \neq \pi$  με κορυφή το σημείο επαφής του έκκεντρου και πλευρές τα τμήματα με άκρα το κέντρο περιστροφής του έκκεντρου και το κέντρο συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού αντίστοιχα, (σχήμα 2-4). Η γωνία αυτή εξαρτάται από το πόσο απότομη είναι η αύξηση της ακτίνας του έκκεντρου  $r_e$  με βάση την επιθυμητή συμπίεση και από την επιφάνεια του εμβόλου-δάχτυλου με την οποία έρχεται σε επαφή το έκκεντρο. Η αύξηση της ακτίνας του έκκεντρου είναι αυστηρά καθορισμένη με βάση την επίτευξη γραμμικής μεταβολής του όγκου εμβολισμού, και συνεπώς δε μπορεί να σχεδιαστεί για παράδειγμα πιο ομαλό για την προσέγγιση της γωνίας  $\theta \approx \pi$ . Ωστόσο, η επιφάνεια του εμβόλου-δάχτυλου, με την οποία έρχεται σε επαφή το έκκεντρο, μπορεί να επιλεγεί κατάλληλα, ώστε να ισχύει η προαναφερθείσα συνευθειακή συνθήκη. Αν η διαμόρφωση του εμβόλου-δάχτυλου είναι επίπεδη επιφάνεια με άπειρη ακτίνα καμπυλότητας, η οποία εφάπτεται με το έκκεντρο, τότε η γωνία  $\theta$  απομακρύνεται από την τιμή  $\pi$  και η παραπάνω θεώρηση της συνευθειακής συνθήκης δεν είναι σωστή, ώστε να χρησιμοποιηθεί για το συσχετισμό των γεωμετρικών παραμέτρων  $y$  και  $r_e$ . Αντίθετα, αν η διαμόρφωση του εμβόλου-δάχτυλου είναι ακίδα με μηδενική ακτίνα καμπυλότητας, [σχήμα 2-4(α)], η οποία εφάπτεται με το άκρο της στο έκκεντρο σε ένα σημείο, τότε δεν υφίσταται κανένα σφάλμα με τη θεώρηση της παραπάνω συνευθειακής συνθήκης, διότι είναι προφανές ότι το σημείο αυτό ανήκει στην ευθεία που ορίζουν τα δύο κέντρα, περιστροφής του έκκεντρου και συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού αντίστοιχα.



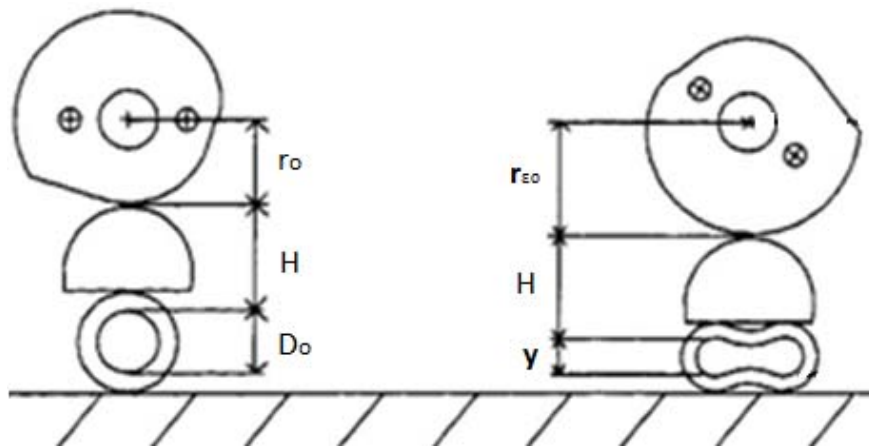
**Σχήμα 2-4.** Μηχανισμός μετάδοσης κίνησης του έκκεντρου στο δάχτυλο για τη συμπίεση του εύκαμπτου αγωγού. Διακρίνονται: (1) περιστρεφόμενο έκκεντρο, (2) έμβολο-δάχτυλο συμπίεσης, (3) εύκαμπτος αγωγός, (4) (α) αιχμηρή διαμόρφωση (ακίδα) εμβόλου-δάχτυλου ( $\theta = \pi$ ), (β) ένσφαιρος τριβέας (ρουλεμάν)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

Η αιχμηρή αυτή διαμόρφωση δημιουργεί προβλήματα αντοχής των έκκεντρων, αφού εμφανίζεται έντονη συγκέντρωση τάσεων στο σημείο επαφής με αποτέλεσμα την ισχυρή φθορά του μηχανισμού, η οποία έχει επίπτωση και στην ακρίβεια έγχυσης. Εξάλλου, από ενεργειακής άποψης η λειτουργία του μηχανισμού είναι ασύμφορη λόγω μεγιστοποίησης της τριβής ολίσθησης στα σημεία επαφής των έκκεντρων με τα αιχμηρά δάχτυλα και της βαλβίδες. Επομένως, η πιο κατάλληλη επιλογή για τη διαμόρφωση του εμβόλου-δάχτυλου είναι να χρησιμοποιηθεί καμπύλη επιφάνεια, όσο το δυνατόν σχεδιαστικά γίνεται, με

μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας. Η επιλογή αυτή μπορεί να είναι της μικροσκοπικός ένσφαιρος τριβέας (ρουλεμάν), της απεικονίζεται στο σχήμα 2-4(β). Με αυτήν την επιλογή η παραπάνω συνευθειακή συνθήκη είναι αποδεκτή με ελάχιστο σφάλμα και ικανοποιούνται οι κατασκευαστικές απαιτήσεις για αντοχή και ομαλή λειτουργία. Είναι προφανής η ελάχιστη απόκλιση του σημείου επαφής στο σχήμα 2-4(β), ( $\theta \cong \pi$ ). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας ελαττώνεται, αφού υφίσταται μόνο τριβή κύλισης και όχι ολίσθησης μέσω του ένσφαιρου τριβέα (ρουλεμάν).

Στο σχήμα 2-5 απεικονίζονται χαρακτηριστικές γεωμετρικές διαστάσεις στη θέση, όπου ο εύκαμπτος αγωγός είναι απαραμόρφωτος και σε τυχαία θέση συμπίεσης. Στην απαραμόρφωτη κατάσταση αν θεωρήσουμε  $Y$  τη σταθερή απόσταση από το κέντρο περιστροφής του έκκεντρου μέχρι το κατώτερο σημείο της εσωτερικής εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού έχουμε τη σχέση:

$$Y = r_{ε0} + H + 2R_t \quad (2.4)$$



Σχήμα 2-5

όπου  $r_{\epsilon 0}$  είναι η αρχική ακτίνα του έκκεντρου με την οποία δεν υφίσταται οριακά καμία παραμόρφωση του εύκαμπτου αγωγού, [σχήμα 2-5(α)] και  $H$  η σταθερή απόσταση από το σημείο επαφής του έκκεντρου με το έμβολο-δάχτυλο μέχρι το ανώτερο σημείο της εσωτερικής εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού (δηλαδή το σταθερό άθροισμα του πάχους του τοιχώματος του εύκαμπτου αγωγού  $s$  με το σταθερό ύψος του εμβόλου-δάχτυλου).

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

Σε τυχαία θέση συμπίεσης, (σχήμα 2-5), σύμφωνα με τις θεωρήσεις η απόσταση  $Y$  είναι σταθερή όμοια με αυτή της αρχικής και απαραμόρφωτης κατάστασης και δίνεται από τη σχέση:

$$Y = r_{\varepsilon} + H + y \quad (2.5)$$

Εξισώνοντας τις σχέσεις (2.4)  $Y = r_{\varepsilon 0} + H + D_0$  και (2.5) έχουμε:

$$r_{\varepsilon 0} + H + D_0 = r_{\varepsilon} + H + y \Rightarrow r_{\varepsilon} = r_{\varepsilon 0} + D_0 - y \quad (2.6)$$

Από τη μη γραμμική σχέση μεταξύ της αδιάστατης κατακόρυφης μετατόπισης  $y/D_0$  σε συνάρτηση με την αδιάστατη εγκάρσια διατομή  $A/A_0$  του εύκαμπτου αγωγού (2.3) είναι:

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

Για  $A = A_0$  προκύπτει ότι  $y = D_0$

$$\text{ενώ για } A=0 \Rightarrow y = D_0 - \frac{D_0 y_b}{\sqrt{A_b}} \Rightarrow y=0, \text{ αφού } A_b=1, y_b=1 \text{ επειδή θεωρούμε}$$

$y_{\min}=0$  οπότε και  $A_{\min}=0$  γιατί μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε πως μεταβάλλεται η εγκάρσια διατομή με την κατακόρυφη μετατόπιση έως την πλήρη έμφραξη.

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

Αντικαθιστώντας στη σχέση αυτή την κατακόρυφη εσωτερική απόσταση της εγκάρσιας διατομής του παραμορφωμένου εύκαμπτου αγωγού  $y$  από τη σχέση (2.6), συσχετίζεται τελικά η ακτίνα του έκκεντρου  $r_{\varepsilon}$  με το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής  $A$  ως εξής:

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

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

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

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

$$r_{\varepsilon} = r_{\varepsilon 0} + 2 \sqrt{R_t^2 - \frac{A}{\pi}} \quad (2.7)$$

Για την επίτευξη σταθερής παροχής εγγυόμενου ρευστού πρέπει να επιτυγχάνεται γραμμική μεταβολή με το χρόνο του εγγυόμενου όγκου εμβολισμού του ρευστού. Αυτό είναι δυνατό μόνο όταν συμβαίνει γραμμική μείωση του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού με το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει η μεταβολή αυτού του

εμβαδού  $A$  με τη γωνία περιστροφής του έκκεντρου  $\phi$  να είναι γραμμική σύμφωνα με τη σχέση:

$$A = C_1\phi + C_2 \quad (2.8)$$

όπου  $C_1, C_2$  προσδιοριζόμενοι συντελεστές ανάλογα με τις τιμές του εμβαδού της εγκάρσιας διατομής για τιμές γωνίας περιστροφής του έκκεντρου  $\phi=0^\circ$  και  $\phi=\phi_E$  στην αρχή και στο τέλος του διαστήματος συμπίεσης αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας την εγκάρσια διατομή από τη σχέση (2.8) στη σχέση (2.7) προκύπτει για το διάστημα συμπίεσης η εξίσωση διαμόρφωσης του έκκεντρου μετάβασης από μία αρχική ακτίνα  $r_o$  σε μία μέγιστη τελική  $r_{E\max}$  συναρτήσει της γωνίας περιστροφής  $\phi$  ως εξής:

$$r_\varepsilon = r_{\varepsilon o} + 2\sqrt{R_t^2 - \frac{C_1\phi + C_2}{\pi}} \quad (2.9)$$

Θεωρούμε λοιπόν μια μετάβαση (συμπίεσης ή αποσυμπίεσης) μεταξύ μιας αρχικής γωνιακής θέσης  $\phi_S$  και μιας τελικής  $\phi_E$  όπου ο εύκαμπτος αγωγός έχει μια αρχική διατομή  $A_S$  και μια τελική  $A_E$  αντίστοιχα. Τότε για  $\phi = \phi_S$  έχουμε  $\Rightarrow r_\varepsilon = r_s$  και  $A = A_s$  οπότε:

$$(2.8) \quad \Rightarrow A_s = C_1\phi_S + C_2 \Rightarrow C_2 = A_s - C_1\phi_S \quad (2.8\alpha)$$

Αντικαθιστώντας την εγκάρσια διατομή από τη σχέση (2.8α) στη σχέση (2.7) προκύπτει:

$$r_s = r_{\varepsilon o} + 2\sqrt{R_t^2 - \frac{C_1\phi_S + C_2}{\pi}} \quad \Rightarrow$$

$$\pi\left(\frac{r_s - r_o}{2}\right)^2 = \pi R_t^2 - C_1\phi_S - C_2 \Rightarrow C_2 = \pi R_t^2 - \pi\left(\frac{r_s - r_o}{2}\right)^2 - C_1\phi_S \quad (2.8\beta)$$

$$\text{Από (2.8α) και (2.8β) προκύπτει: } A_s = \pi R_t^2 - \pi\left(\frac{r_s - r_o}{2}\right)^2 \quad (2.8\gamma)$$

Αντίστοιχα για  $\phi = \phi_E \Rightarrow r_\varepsilon = r_E$  και  $A = A_E$  οπότε:

$$(2.8) \quad \Rightarrow A_E = C_1\phi_E + C_2 \Rightarrow C_2 = A_E - C_1\phi_E \quad (2.8\delta)$$

Αντικαθιστώντας την εγκάρσια διατομή από τη σχέση (2.8δ) στη σχέση (2.7) προκύπτει:

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

$$\pi\left(\frac{r_E - r_o}{2}\right)^2 = \pi R_t^2 - C_1\phi_E - C_2 \Rightarrow C_2 = \pi R_t^2 - \pi\left(\frac{r_E - r_o}{2}\right)^2 - C_1\phi_E \quad (2.8\epsilon)$$

$$\text{Από (2.8α) και (2.8β) προκύπτει: } A_E = \pi R_t^2 - \pi \left( \frac{r_s - r_o}{2} \right)^2 \quad (2.8\sigma\tau)$$

Η σταθερά  $C_1$  προκύπτει συνδυάζοντας τις (2.8α) και (2.8δ) οπότε:

$$A_s - C_1 \phi_s = A_E - C_1 \phi_E \quad \Rightarrow A_s - A_E = C_1 (\phi_s - \phi_E) \quad (2.10)$$

Αντικαθιστώντας στην (2.9) τις (2.8γ) και (2.8στ) έχουμε:

$$\pi R_t^2 - \pi \left( \frac{r_s - r_o}{2} \right)^2 - \pi R_t^2 - \pi \left( \frac{r_s - r_o}{2} \right)^2 = C_1 (\phi_s - \phi_E) \quad \Rightarrow$$

$$C_1 = -\frac{\pi}{4(\phi_s - \phi_E)} [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \quad (2.10\alpha)$$

Η  $C_2$  προκύπτει συνδυάζοντας τις (2.8α), (2.8γ) και (2.10α) οπότε έχουμε:

$$C_2 = \pi R_t^2 - \pi \left( \frac{r_s - r_o}{2} \right)^2 + \frac{\pi}{4(\phi_s - \phi_E)} [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi_s \Rightarrow$$

$$C_2 = \pi R_t^2 - \frac{\pi}{4} \left[ \left(1 - \frac{\phi_s}{\phi_s - \phi_E}\right) (r_s - r_o)^2 + \frac{\phi_s}{\phi_s - \phi_E} (r_E - r_o)^2 \right] \Rightarrow$$

$$C_2 = \pi R_t^2 - \frac{\pi}{4} \left[ \left( \frac{\phi_s - \phi_E - \phi_s}{\phi_s - \phi_E} \right) (r_s - r_o)^2 + \frac{\phi_s}{\phi_s - \phi_E} (r_E - r_o)^2 \right] \Rightarrow$$

$$C_2 = \pi R_t^2 - \frac{\pi}{4} \left[ \frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2}{\phi_s - \phi_E} \right] \quad (2.10\beta)$$

Αντικαθιστώντας τις σταθερές  $C_1, C_2$  στη σχέση (2.9) προκύπτει:

$$r_\varepsilon = r_o + 2 \sqrt{R_t^2 - \frac{C_1 \phi + C_2}{\pi}} \Rightarrow$$

$$r_\varepsilon = r_o + 2 \sqrt{R_t^2 - \frac{1}{\pi} \left\{ -\frac{\pi \phi}{4(\phi_s - \phi_E)} [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] + \pi R_t^2 - \frac{\pi}{4} \left[ \frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2}{\phi_s - \phi_E} \right] \right\}}$$

$$r_\varepsilon = r_o + 2 \sqrt{R_t^2 + \frac{[(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{4(\phi_s - \phi_E)} - R_t^2 + \frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2}{4(\phi_s - \phi_E)}}$$



$$r_e = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}} \quad (2.10)$$

Έτσι καταλήγουμε σε μία γενικευμένη σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου με την περιστροφή,  $r_e(\phi)$ , από μία αρχική θέση  $(\phi_s, r_s)$  σε μία τελική  $(\phi_E, r_E)$  με ελάχιστη ακτίνα αναφοράς  $r_o$ , ώστε η μεταβολή της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού να είναι γραμμική, είτε πρόκειται για συμπίεση, είτε για αποσυμπίεση.

Για την πραγματοποίηση του σχεδιασμού μίας γραμμικής περισταλτικής αντλίας είναι απαραίτητη η μελέτη της αρχής λειτουργίας τους. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται διεξοδικά ο τρόπος λειτουργίας δύο τέτοιων γραμμικών περισταλτικών αντλιών από το αρχικό στάδιο του εννοιολογικού σχεδιασμού (concept design) μέχρι τις τεχνικά σχεδιαστικές λεπτομέρειες. Η μία αντλία συμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό κατά κυματοειδή τρόπο σε μία περίοδο συμπίεσης, [Tsoukalis, 1993], ενώ η άλλη σε δύο διαδοχικά τμήματα και σε δύο διαφορετικά χρονικά στάδια στην περίοδο συμπίεσης, [Hyman et al, 1993].

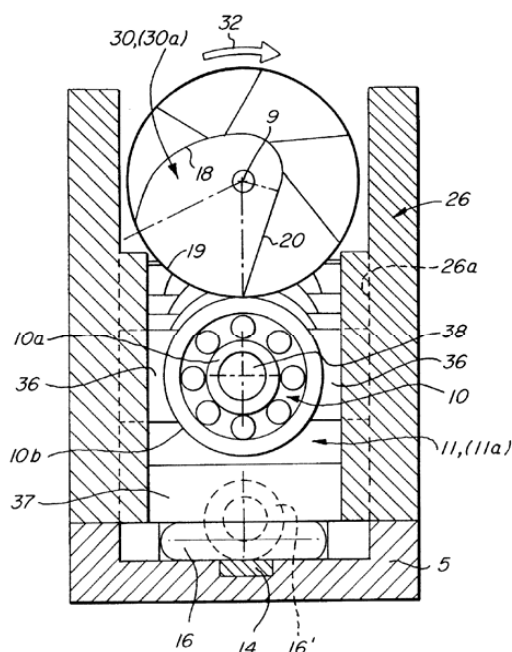
### 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

#### ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

##### 3.1 Μηχανισμός άντλησης- αρχή λειτουργίας

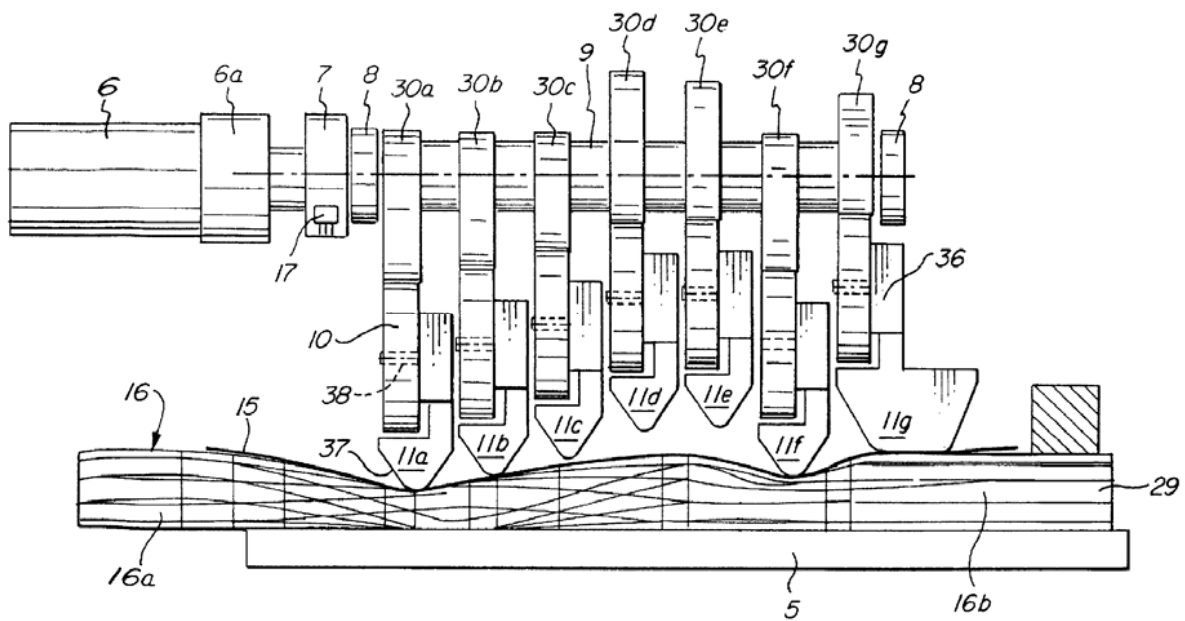
Ο μηχανισμός άντλησης γραμμικής περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης, απεικονίζεται στα σχήματα 3-1 και 3-2 σε πλάγια τομή και πρόοψη αντίστοιχα. Ο εκκεντροφόρος άξονας (9) φέροντας τα έκκεντρα από (30α) έως (30g), στηρίζεται σε δύο ρουλεμάν κύλισης (8), τα οποία εδράζονται εντός ακίνητου φορέα (26). Ο εκκεντροφόρος άξονας (9) οδηγείται από κινητήρα (6) χαμηλής ισχύος, φέροντας γραναζωτό μειωτήρα (6α). Ένας κωδικοποιητής περιστροφής (rotational position encoder) (7), μαζί με έναν αισθητήρα (17) συμπεριλαμβάνονται με σκοπό να καταγράφεται η ταχύτητα περιστροφής και η γωνιακή θέση του εκκεντροφόρου άξονα (9). Τα σήματα του αισθητήρα (17) λαμβάνονται από τα ηλεκτρονικά συστήματα, τα οποία ελέγχουν τη λειτουργία της περισταλτικής αντλίας.

Σε αντιστοιχία με κάθε ένα από τα έκκεντρα (30α) έως (30g) υπάρχουν οι ακόλουθοι (δάχτυλα) (11α) έως (11g). Κάθε ακόλουθος φέρνει ένα μικρό ρουλεμάν (10) του οποίου η εσωτερική στεφάνη (10α) στηρίζεται σε έναν πείρο (38) του ακόλουθου. Η εξωτερική στεφάνη (10b) από κάθε ρουλεμάν (10) ακουμπά την επιφάνεια του κάθε έκκεντρου (30α) έως (30g), έτσι ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυνατή τριβή μεταξύ των ακόλουθων (11α) έως (11g) των έκκεντρων και των έκκεντρων (30α) έως (30g). Τα ακροδάχτυλα (37) των ακόλουθων (11) αγγίζουν τον εύκαμπτο αγωγό (16), ο οποίος στηρίζεται στη βάση (5). Οι ακόλουθοι (11) κινούνται στην κατακόρυφη διεύθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-1, οδηγούμενοι από τις πλαϊνές τους επιφάνειες (36), μέσα σε οδηγητικά αυλάκια (26α) που υπάρχουν στα πλαϊνά τοιχώματα του ακίνητου φορέα (26). αγωγός (16), [Tsoukalis, 1999]



Σχήμα 3-1. Πλάγια τομή μηχανισμού άντλησης κυματοειδούς

συμπίεσης γραμμικής περισταλτικής αντλίας, όπου διακρίνονται κυρίως, τα έκκεντρα του εκκεντροφόρου άξονα (30), οι ακόλουθοι (11) των έκκεντρων με τα ρουλεμάν τους (10) και ο εύκαμπτος αγωγός (16), [Tsoukalis, 1999].



**Σχήμα 3-2.** Πρόοψη μηχανισμού άντλησης κυματοειδούς συμπίεσης γραμμικής περισταλτικής αντλίας, όπου διακρίνονται κυρίως, ο εκκεντροφόρος άξονας (9), τα έκκεντρα (30) του εκκεντροφόρου άξονα, οι ακόλουθοι των έκκεντρων (11) με τα ρουλεμάν τους (10), ο κινητήρας περιστροφής (6) και ο εύκαμπτος αγωγός (16), [Tsoukalis, 1999].

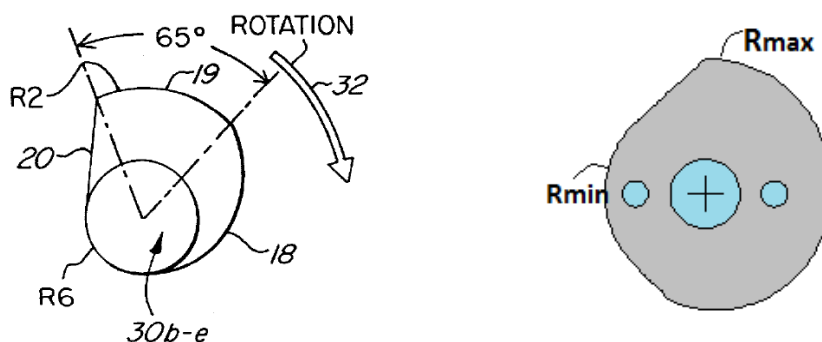
Από τα σχήματα 3-1 και 3-2 μπορεί να φανεί ότι το ακροδάχτυλο (37) του ακόλουθου (11α) του πρώτου έκκεντρου (30α) έχει πλήρως συμπίεσει τον εύκαμπτο αγωγό (16) στην κλειστή του θέση (με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται ο εύκαμπτος αγωγός (16') στην πλήρως ανοιχτή του θέση-σχήμα 3-1). Για την επίτευξη πλήρους έμφραξης (deep occlusion) του εύκαμπτου αγωγού (16), από τον πρώτο ως τον τελευταίο ακόλουθο (11α) έως (11f), τα αντίστοιχα έκκεντρά τους έχουν σχεδιασμό βαλβίδας. Έχουν ουσιαστικά το ίδιο σχήμα, αλλά διατάσσονται έτσι ώστε να διαφέρουν γωνιακά μεταξύ τους κατά 60 μοίρες. Αυτή η γωνιακή διαφορά στη διάταξή τους εξασφαλίζει ουσιαστικά ομαλό φορτίο στρέψης στον κινητήρα (6). Στο σχήμα 3-2 η είσοδος (16α) του εύκαμπτου αγωγού (16) φαίνεται στην αριστερή πλευρά του σχεδίου, ενώ η έξοδος (16b) φαίνεται στην δεξιά πλευρά.

Ο εύκαμπτος αγωγός (16) είναι φτιαγμένος από ελαστικό υλικό κατά προτίμηση σιλικόνη. Για να στεγανοποιείται ο μηχανισμός οδήγησης από τυχόν διαρροή ρευστού από τον εύκαμπτο αγωγό (16), τοποθετείται προστατευτικό λεπτό στρώμα από πλαστικό υλικό (15) ανάμεσα στον εύκαμπτο αγωγό (16) και στα ακροδάχτυλα (37) των ακόλουθων (11α) έως (11g) (απεικονίζεται μόνο στο σχήμα 3-2 και όχι στο 3-1 χάριν ευκρίνειας).

Από το σχήμα 3-1 μπορεί να φανεί ότι μολονότι η διαδρομή των ακόλουθων (11) από τα έκκεντρα (30) είναι σχετικά σημαντική, το πλάτος του μηχανισμού (φαίνεται σε πλάγια τομή στο σχήμα 3-1) δεν χρειάζεται να είναι πολύ μεγαλύτερο από την μέγιστη εξωτερική διάμετρο των έκκεντρων (30). Τα ρουλεμάν (10) τα οποία μπορεί να είναι μικρά σχετικά, τοποθετούνται με τη μεγαλύτερη διάστασή τους κατά την κατακόρυφη διεύθυνση συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού (16), ενώ η εγκάρσια οδήγηση των ακόλουθων (11) εντός του ακίνητου φορέα (26) εξασφαλίζεται, όπως αναφέρθηκε, με οδηγητικά αυλάκια (26α) που υπάρχουν στα πλαϊνά τοιχώματα. Οι ακόλουθοι (11) σπρώχνονται προς τα επάνω από την ελαστικότητα του εύκαμπτου αγωγού (16) με αποτέλεσμα να αποσυμπιέζεται. Αυτή η προς τα επάνω κίνηση είναι δυνατόν να υποστηριχθεί και με ελατήρια επαναφοράς.

Η συγκεκριμένη περισταλτική αντλία [Tsoukalis, 1998], χαρακτηρίζεται από το ότι κάθε ένα έκκεντρο έχει τρία τμήματα με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας (σχήμα 3-3). Το πρώτο τμήμα (18) έχει συνεχώς αυξανόμενη ακτίνα για τη φάση της συμπίεσης, το δεύτερο τμήμα (19) έχει σταθερή ακτίνα ίση με την ακτίνα του τέλους του πρώτου τμήματος (18) για τη διατήρηση της έμφραξης (deep occlusion) του εύκαμπτου αγωγού (16) και το τρίτο τμήμα (20) έχει απότομη μείωση της ακτίνας, καταλήγοντας σε μικρή ακτίνα, για γρήγορη επανάταξη του εύκαμπτου αγωγού (16).

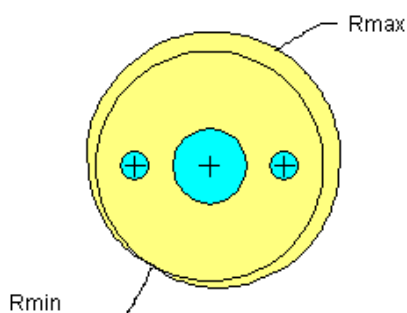
**Σχήμα 3-3.** Πλάγια όψη των ενδιάμεσων έκκεντρων, όπου διακρίνονται κυρίως, η ακτίνα καμπυλότητας  $R_2=R_{max}$  στο σημείο πλήρους εμβολισμού και η ακτίνα καμπυλότητας  $R_6=R_{min}$  στο σημείο πλήρους αποσυμπίεσης, (α) [Tsoukalis, 1999]. (β) Βελτιωμένο



Στην περισταλτική αντλία που μελετάμε το πρώτο τμήμα καμπυλότητας έχει συνεχώς αυξανόμενη ακτίνα (υπολογισμένη καμπύλη) και στο συγκεκριμένο σχεδιασμό αυτό το τμήμα εκτείνεται για 180 μοίρες γωνία. Η ακτίνα αυτού του τμήματος αυξάνεται γραμμικά με την γωνία περιστροφής. Το επόμενο δεύτερο τμήμα έχει σταθερή ακτίνα  $R_{max}$ , η οποία είναι η μέγιστη του έκκεντρο. Στο συγκεκριμένο σχεδιασμό το δεύτερο μέρος διαρκεί 30 μοίρες. Στο τρίτο τμήμα λαμβάνει χώρα απότομη μείωση από την μέγιστη ακτίνα  $R_{max}$  στην ελάχιστη ακτίνα  $R_{min}$ , η οποία διαρκεί για γωνία περιστροφής περισσότερο από 42 μοίρες στο συγκεκριμένο σχεδιασμό. Η μέγιστη ακτίνα και το μήκος των ακόλουθων είναι τέτοιο, ώστε ο εύκαμπτος αγωγός να παραμένει εντελώς κλειστός για διάστημα 60 μοιρών. Αν και στο σχήμα 3-2 τα ακροδάχτυλα (37) μερικών ακόλουθων (11) φαίνονται να έχουν κάποια απόσταση από τον εύκαμπτο αγωγό (16), αυτή η απόσταση είναι ελάχιστη ή μηδαμινή στην πραγματικότητα, ώστε να επέρχεται ο μέγιστος δυνατός όγκος εμβολισμού κατά τη συμπίεση.

Με σκοπό να επιτευχθεί συνεχόμενη σταθερή ροή έγχυσης ρευστού από την αντλία, ένα πρόσθετο έκκεντρο γραμμικοποίησης του όγκου εμβολισμού παρέχεται στο τέλος του μηχανισμού έγχυσης. Στο σχήμα (3-4) απεικονίζεται αυτό το πρόσθετο έκκεντρο γραμμικοποίησης (30g). Ο σχεδιασμός του διεξάγεται αναλυτικά παρακάτω, το οποίο τοποθετείται αμέσως μετά από τα έξι άλλα έκκεντρα (30α) έως (30f), όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3-2, με σκοπό να εξομαλύνει τις μεταβολές της ροής του ρευστού στην έξοδο κατά τη διάρκεια της άντλησης. Όπως απεικονίζει το σχήμα 3-4, το πρόσθετο έκκεντρο (30g) έχει ένα πρώτο τμήμα καμπυλότητας (18g) κατά τη διάρκεια του οποίου η ακτίνα αυξάνεται από ελάχιστη τιμή  $R_{min}$  σε μέγιστη τιμή  $R_{max}$ . Από αυτή τη μέγιστη τιμή η ακτίνα μειώνεται κατά τη διάρκεια του δεύτερου τμήματος καμπυλότητας (20g) στην ελάχιστη ακτίνα ξανά. Η μέγιστη ακτίνα είναι μικρότερη από τις μέγιστες ακτίνες των έκκεντρων (30α) έως (30f) γιατί η διατομή του εύκαμπτου αγωγού (16) πρέπει να μειωθεί χωρίς να κλείσει. Κατά τη διάρκεια που ο ακόλουθος (δάχτυλο-βαλβίδα) εξόδου (11f) διατηρεί τον εύκαμπτο αγωγό κλειστό, το υγρό ωθείται από τον ακόλουθο (δάχτυλο γραμμικοποίησης) (11g), έτσι ώστε να συνεχίζεται η ροή στην έξοδο πετυχαίνοντας τη σταθερότητά της.

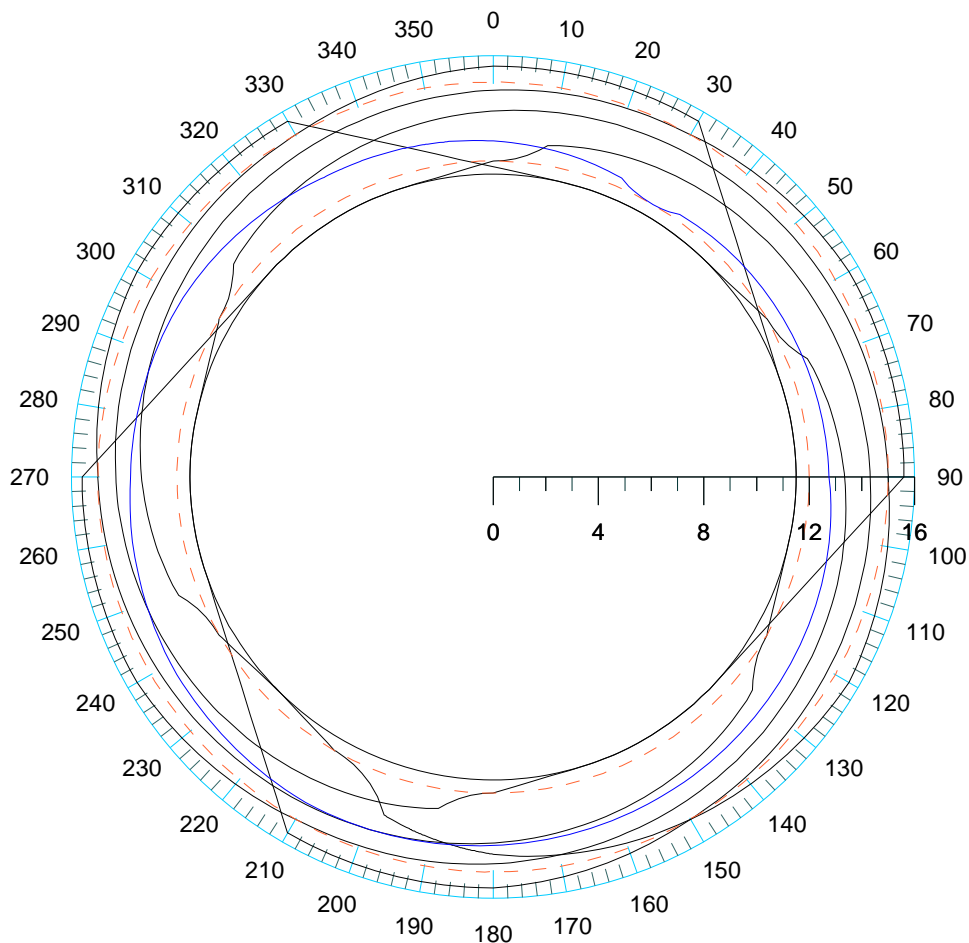
Προκειμένου να επεκταθεί το εύρος της γραμμικότητας πρέπει το κάτω μέρος του ακόλουθου (ακροδάχτυλο) (11g) του εκκεντρου σταθερής ροής (30g), να έχει μεγαλύτερη διάσταση στην κατά μήκος κατεύθυνση του εύκαμπτου αγωγού (16) και κατά προτίμηση το διπλάσιο συγκριτικά με το μήκος των δάχτυλων των άλλων εκκεντρων. Δηλαδή, ενώ κανονικά τα μήκη των ακροδάχτυλων (37) των ακόλουθων (11α) έως (11g) θα μπορούσαν να είναι τα ίδια στην κατά μήκος διεύθυνση παράλληλη του εκκεντροφόρου άξονα (9) και του εύκαμπτου αγωγού (16), στο σχήμα 3-2 φαίνεται ότι το μήκος του ακροδάχτυλου του ακόλουθου (11g) είναι μεγαλύτερο (περίπου διπλάσιο) από το μήκος των άλλων ακόλουθων (11α) έως (11f). Σκοπός αυτού είναι να αυξήσει το χρόνο γραμμικής λειτουργίας, λαμβανομένου υπόψη του χρόνου που παραμένει κλειστός ο εύκαμπτος αγωγός (16) από τον τελευταίο ακόλουθο (11f).



**Σχήμα 3-4.** Πλάγια όψη του εκκεντρου (30g) (wrap cycle), όπου διακρίνονται κυρίως, η ακτίνα καμπυλότητας R3 στο σημείο πλήρους εμβολισμού και η ακτίνα καμπυλότητας R5 στο σημείο πλήρους αποσυμπίεσης, [Tsoukalis, 1999].

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

Στο σχήμα 3-5 παρουσιάζονται σε παράθεση όλα τα εκκεντρα (30α) έως (30g), βάση του σχεδιασμού που αναλύεται παρακάτω, όπου φαίνονται, τόσο τα καμπύλα τμήματα μεταβλητής ακτίνας, όσο και τα κυκλικά με ακτίνες από  $R_{max}$  έως  $R_{min}$ . Η μέγιστη ακτίνα  $R_{max}$ , η οποία απαντάται στο πρώτο (30α) έως και το τελευταίο (30f) εκκεντρο συμπίεζει πλήρως τον εύκαμπτο αγωγό (16). Η μέγιστη ακτίνα του εκκεντρου (30g) δεν κλίνει εντελώς τον εύκαμπτο αγωγό (16). Η ελάχιστη ακτίνα των 6 εκκεντρων διατηρεί τον εύκαμπτο αγωγό (16) ανοιχτό και τον κρατά μακριά, ώστε να μην αγγίζει τα ακροδάχτυλα (37) πετυχαίνοντας πλήρη ανάταξη του εύκαμπτου αγωγού (16), ανεξάρτητα από τις κατασκευαστικές ανοχές. Η ελάχιστη ακτίνα του εκκεντρου σταθεροποίησης της ροής (30g) είναι η ελάχιστη ακτίνα η οποία διατηρεί τον εύκαμπτο αγωγό (16) ανοιχτό.



Σχήμα 3-5 Διάγραμμα έκκεντρων εμβόλων-βαλβίδων σε πολικές συντεταγμένες

Για να επιτευχθεί όπως περιγράφεται ο ανωτέρω κύκλος λειτουργίας πρέπει να υπάρχει κατάλληλος συγχρονισμός όλων των έκκεντρων και επιπλέον ο υπολογισμός τους για τα χρονικά διαστήματα συμπίεσης και αποσυμπίεσης να γίνει με βάση τη σχέση (2-10), όπου λαμβάνει υπόψη τη γραμμική μεταβολή του όγκου εμβολισμού ή αναρροφήσεως με το χρόνο. Για κάθε έκκεντρο εξάγεται η σχεδιαστική του καμπύλη  $r_e(\varphi)$  για διάφορα χαρακτηριστικά διαστήματα γωνιών, στα οποία χωρίζεται ένας πλήρης κύκλος από 0 έως 360°. Λόγω της απαίτησης αποφυγής της οπισθοροής, πρέπει να μην υπάρχει χρονική στιγμή που να μένει ο εύκαμπτος αγωγός χωρίς πλήρη έμφραξη (deep occlusion) σε κάποιο από τα σημεία λειτουργίας των εμβόλων-βαλβίδων. Ειδικότερα, όταν μία από τις βαλβίδες ετοιμάζεται να ανοίξει πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η άλλη έχει ήδη κλείσει. Γι' αυτό το λόγο, τα έκκεντρα των εμβόλων-βαλβίδων σχεδιάζονται με τρόπο ώστε πριν ανοίξει το ένα έμβολο-βαλβίδα, το άλλο να έχει ήδη φράξει τον εύκαμπτο αγωγό. Ωστόσο, βασική επιδίωξη του μηχανισμού είναι η επίτευξη συνεχούς και σταθερής παροχής ρευστού. Επομένως, παρόλο που για αυτό το διάστημα των 60° δεν πραγματοποιείται καμία έγχυση ρευστού από την αντλία, για το υπόλοιπο διάστημα των 300° (83% ενός πλήρη κύκλου) πραγματοποιείται συνεχής και σταθερή έγχυση.

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

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

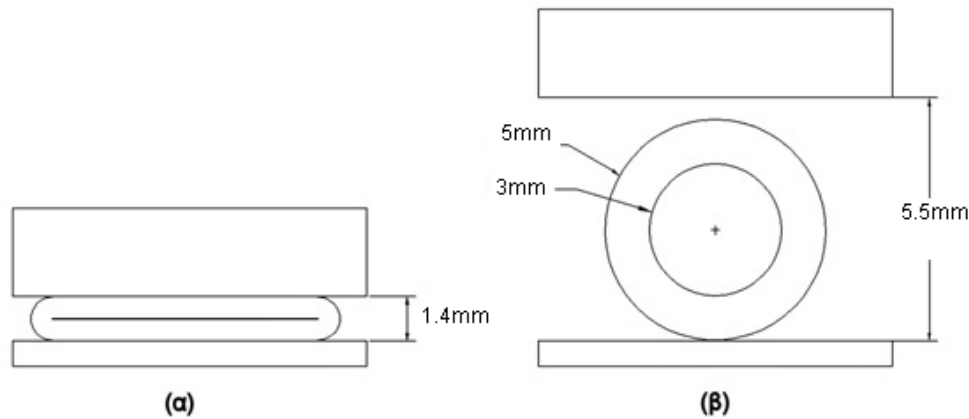
Βασικά επιπλέον κριτήρια πέραν αυτού της σταθερής παροχής έγχυσης για τον υπολογισμό των έγκεντρων αποτελούν η ομαλή κατασκευαστική επιφάνεια των έγκεντρων στα σημεία αλλαγής του συναρτησιακού που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κινηματικής του εκάστοτε δάχτυλου ή βαλβίδας και προφανώς, όπως έχει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

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

### **3.2 Υπολογισμός έγκεντρων εμβόλων-βαλβίδων περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης**

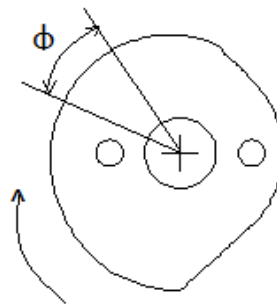
Η κίνηση των εμβόλων-βαλβίδων στην περισταλτική αντλία κυματοειδούς συμπίεσης πρέπει να εναρμονίζεται μεταξύ τους ώστε πριν ανοίξει το ένα έμβολο-βαλβίδα, το άλλο να έχει ήδη φράξει τον εύκαμπτο αγωγό. Συνεπώς, το ένα έμβολο-βαλβίδα πρέπει να φράσσει τον εύκαμπτο αγωγό όταν το αμέσως προηγούμενο μόλις αποφράσσει, ενώ το αμέσως επόμενο να ξεκινά να συμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό κ.ο.κ. ώστε το ρευστό να εμβολίζεται μόνο προς την έξοδο της αντλίας, ενώ πρέπει να αποφράσσει τον εύκαμπτο αγωγό, αφήνοντάς τον ανοικτό, όταν τα πρώτα έμβολα-βαλβίδες αποσυμπιέζουν, αναρροφώντας ρευστό από την είσοδο της αντλίας.

Για το διάστημα των πρώτων  $180^\circ$  το κάθε έμβολο-βαλβίδα πρέπει να συμπιέζει, όπως αναφέρθηκε, τον εύκαμπτο αγωγό από την απαραμόρφωτη θέση εξωτερικής κυκλικής διαμέτρου  $2Rt+2s=5\text{mm}$  στην μέγιστα συμπιεσμένη  $y_{\min}+2s=1.4\text{mm}$ , [σχήμα 3-6(β) & (α)]. όπου φράσσεται πλήρως (deep occlusion), και σε τέτοιο ισχυρό βαθμό, ώστε το υλικό του τοιχώματος του σωλήνα να συμπιέζεται κατά 160%.



Σχήμα 3-6

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



Σχήμα 3-7

Από αυτό το διάστημα συμπίεσης των  $180^\circ$ , τις πρώτες  $150^\circ$  έχουμε εμβολισμό γιατί στο σημείο αυτό των  $150^\circ$  μόλις φράσει τον εύκαμπτο αγωγό και στις υπόλοιπες  $30^\circ$  εξακολουθεί να συμπιέζει το τοίχωμα του αγωγού μέχρι να επιτευχθεί η παραπάνω φραγή που περιγράψαμε. Σε αυτή την κατώτατη θέση παραμένει για διάστημα  $30^\circ$  για κάθε έμβολο-βαλβίδα. Στη συνέχεια το κάθε έμβολο-βαλβίδα αποφράσσει τον εύκαμπτο αγωγό τάχιστα σε διάστημα  $42.5082978^\circ$  μέχρι της πλήρους αποσυμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού, αλλά και περαιτέρω μετατόπισης κατά 0.5 mm πλέον των 5 mm που απαιτούνται για να αποσυμπίεστεί πλήρως ο εύκαμπτος αγωγός, δίνοντάς του κατά αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη ευχέρεια στην ανάταξή του, [σχήμα 3-6(β)].

Σε αυτή την ανώτερη θέση παραμένει για  $90.8938601^\circ$ , επιτρέποντας την είσοδο του ρευστού στο χώρο ανάταξης του εύκαμπτου αγωγού κάτω από το έμβολο-δάχτυλο. Στις επόμενες  $16,5978421^\circ$  η βαλβίδα-έμβολο κινείται αντίθετα με προηγουμένως μέχρι απαραμόρφωτη θέση εξωτερικής κυκλικής διαμέτρου του εύκαμπτου αγωγού. Κι έτσι συμπληρώνεται ένας κύκλος περιστροφής.

Εκφράζοντας με μαθηματικά τη συνάρτηση μεταβολής του έκκεντρου των εμβόλων-βαλβίδων προκύπτουν οι συναρτήσεις  $r_e(\phi)$  ορισμένες στα αντίστοιχα γωνιακά διαστήματα:



## 1<sup>ο</sup> ΕΜΒΟΛΟ

Συμπίεση- έναρξης:

$$r_{\varepsilon} = (r_o + R_{\rho}) \cos \phi - \sqrt{R_{\rho}^2 - (r_o + R_{\rho})^2 \sin^2 \phi} \quad * \quad (3.1)$$

$$(r_o=12\text{mm}, R_{\rho}=4\text{mm})$$

$$0^{\circ} \leq \phi \leq 9.361878729^{\circ}, \\ 0 \leq \phi \leq 0.163395608\text{rad}$$

Συμπίεση:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$(r_o=12\text{mm}, r_s=12.749474965\text{mm}, r_E=15\text{mm})$$

$$9.361878729^{\circ} \leq \phi \leq 150^{\circ} \\ 0.163395608\text{rad} = 13\pi/250 \leq \phi \leq 5\pi/6$$

Συμπίεση πάχους:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$(r_o=12\text{mm}, r_s=15\text{mm}, r_E=15.6\text{mm})$$

$$150^{\circ} \leq \phi \leq 180^{\circ} \\ 5\pi/6 \leq \phi \leq \pi$$

Πλήρης έμφραξη:

$$r_E=15.6\text{mm}$$

$$180^{\circ} \leq \phi \leq 210^{\circ} \\ \pi \leq \phi \leq 7\pi/6$$

Απόφραξη-απότομη αποσυμπίεση:

$$r_{\varepsilon} = \frac{r_o}{\cos(\phi_E - \phi)} \quad (3.1\beta)$$

$$(r_o=11.5\text{mm}, r_{\max}=15.6\text{mm}, \phi_E = \phi_S + \cos^{-1} \frac{r_o}{r_{\max}})$$

$$210^\circ \leq \varphi \leq 252.5082978^\circ \approx 252^\circ$$

$$7\pi/6 \leq \varphi \leq 7\pi/5$$

Μέγιστη αποσυμπίεση:

$$r_E=11.5\text{mm}$$

$$252^\circ \approx 252.5082978^\circ \leq \varphi \leq 343.4021579^\circ \approx 343^\circ$$

$$7\pi/5 \leq \varphi \leq 343\pi/180$$

Μετακίνηση πριν την έναρξη της συμπίεσης:

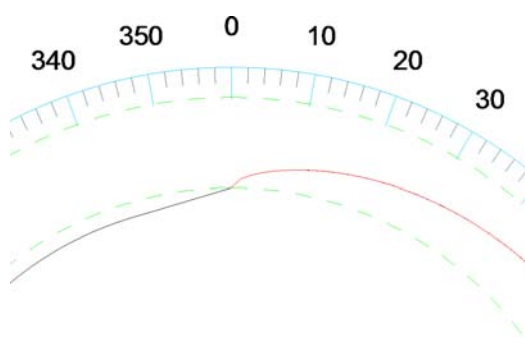
$$r_\varepsilon = \frac{r_o}{\cos(\phi - \phi_S)}$$

$$343^\circ \approx 343.4021579^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$

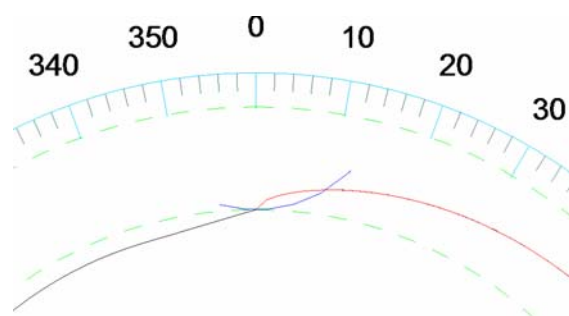
$$343\pi/180 \leq \varphi \leq 2\pi$$

$$(r_o=11.5\text{mm}, r_{\max}=12\text{mm}, \phi_S = \phi_E - \cos^{-1} \frac{r_o}{r_{\max}})$$

\*Στην έναρξη της συμπίεσης από  $0^\circ$  έως  $9.361878729^\circ$  έχουμε μία μη γραμμική εξίσωση. Επειδή δεν έχουμε αιχμηρή διαμόρφωση του εμβόλου αλλά ένσφαιρο τριβέα διαμέτρου 8mm, στις  $0^\circ$  όπου ξεκινά η συμπίεση, παρατηρούμε ο ένσφαιρος τριβέας χρειάζεται ειδική υποδοχή για να φωλιάσει μέσα στο έκκεντρο και να αποδώσει την ανάλογη συμπίεση της ακτίνας του έκκεντρο. Λόγω της απότομης καμπύλης στην έναρξη της συμπίεσης από τη γραμμική εξίσωση του έκκεντρο, στις  $0^\circ$  το έκκεντρο λόγω της ακτίνας του δεν θα βρίσκεται στη θέση των 12mm. Επομένως πρέπει στην γραμμική εξίσωση συμπίεσης πρέπει να εγγράψουμε έναν κύκλο υποδοχής του ένσφαιρου τριβέα.



Σχήμα (3-8<sup>α</sup>)



Σχήμα (3-8<sup>β</sup>)

### Απόδειξη συνάρτησης έναρξης συμπίεσης

Ο κύκλος του ρουλεμάν θα περνάει από το σημείο  $(x,y)=(12,0)$  x:κατακόρυφος, y:οριζόντιος, και έχει ακτίνα 4 mm. Συνεπώς το κέντρο του κύκλου είναι  $(16,0)$  και έχει εξίσωση:

$(x-16)^2 + y^2 = 4^2 \Rightarrow (x-16)^2 = 4^2 - y^2$ , όπου μετατρέποντας σε πολικές συντεταγμένες θα έχουμε:

$$(r\cos\theta - 16)^2 = 4^2 - r^2\sin^2\theta \quad \Rightarrow \quad r^2\cos^2\theta + 16^2 - 2 \cdot 16 \cdot r\cos\theta = 4^2 - r^2\sin^2\theta \quad \Rightarrow$$

$$r^2(\sin^2\theta + \cos^2\theta) - 32r\cos\theta + 240 = 0 \quad \Rightarrow \quad r^2 - 32r\cos\theta + 240 = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\Delta = 32^2\cos^2\theta - 4 \cdot 240 = 1024\cos^2\theta - 960 = 64(16\cos^2\theta - 15)$$

$$r_{1,2} = \frac{32\cos\theta \pm 8\sqrt{16\cos^2\theta - 15}}{2},$$

$$r = 16\cos\theta - 4\sqrt{16\cos^2\theta - 15} \quad (3.1)$$

η ρίζα '+' δεν δίνει τομή με την καμπύλη του έκκεντρου συμπίεσης

$$\text{Η } r = (r_o + R_p)\cos\theta - \sqrt{(r_o + R_p)^2(\cos^2\theta - 1) + R_p^2} \quad (\text{γενική σχέση}) \quad (3.1\beta)$$

Από τη γενική σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου για  $r_s=r_o$  καταλήγουμε στην:

$$r_\varepsilon = 12 + (15 - 12)\sqrt{\frac{(0 - \theta)}{(0 - \phi_E)}} \Rightarrow r = 12 + 3\sqrt{\frac{\theta}{150}} \quad (3.2)$$

Όπου  $\phi_E$  προκύπτει από τη γενική σχέση μεταβολής της ακτίνας του εκκέντρου για  $r_s=r_o$  και  $r_\varepsilon=15$  έχουμε:

Από (3.1) και (3.2) έχουμε:

$$12 + 3\sqrt{\frac{\theta}{150}} = 16\cos\theta - 4\sqrt{16\cos^2\theta - 15}$$

Από όπου με αριθμητική επίλυση καταλήγουμε:

$$\theta = 0.163395608\text{rad} = 9.361878729^\circ, \text{ οπότε και } r = 12.749474965\text{mm}$$

### Απόδειξη της (3.2β) με νόμο ημιτόνων

Επειδή ο ένσφαιρος τριβέας δεν εφάπτεται σε όλο το τόξο του διαστήματος αυτού θα δείξουμε ότι το μήκος του αποστήματος του ρουλεμάν, ακολουθεί την παραπάνω μη γραμμική μεταβολή. Οπότε έχουμε:

Νόμος ημιτόνων

$$\frac{R_o}{\sin 90} = \frac{x}{\sin \omega} \Leftrightarrow \sin \omega = \frac{x}{R_o} \quad (3.3)$$

$$\frac{r_o + h}{\sin 90} = \frac{x}{\sin \phi} \Leftrightarrow x = (r_o + h) \sin \phi \quad (3.4)$$

Από (3.4) και (3.5) έχουμε:

$$\sin \omega = \frac{r_o + h}{R_o} \sin \phi \quad (3.5)$$

$$h_1 = R_o - R_o \cos \omega = R_o (1 - \cos \omega) = R_o (1 - \sqrt{1 - \sin^2 \omega}) = R_o (1 - \sqrt{1 - (\frac{r_o + h}{R_o})^2 \sin^2 \phi})$$

$$h_2 = r_o + h - (r_o + h) \cos \phi = (r_o + h)(1 - \cos \phi)$$

$$h = h_1 + h_2 = R_o (1 - \sqrt{1 - (\frac{r_o + h}{R_o})^2 \sin^2 \phi}) + (r_o + h)(1 - \cos \phi) \Rightarrow$$

$$-R_o (1 - \sqrt{1 - (\frac{r_o + h}{R_o})^2 \sin^2 \phi}) = r_o (1 - \cos \phi) + h(1 - \cos \phi) - h \Rightarrow$$

$$1 - \sqrt{1 - (\frac{r_o + h}{R_o})^2 \sin^2 \phi} = -\frac{r_o (1 - \cos \phi) + h(1 - \cos \phi) - h}{R_o} \Rightarrow$$

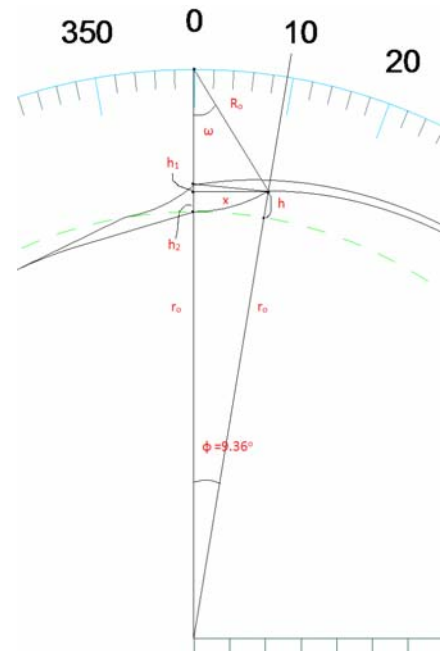
$$\sqrt{1 - (\frac{r_o + h}{R_o})^2 \sin^2 \phi} = 1 + \frac{r_o (1 - \cos \phi) - h \cos \phi}{R_o} \Rightarrow$$

$$\frac{R_o^2 - (r_o + h)^2 \sin^2 \phi}{R_o^2} = \frac{(R_o + r_o (1 - \cos \phi) - h \cos \phi)^2}{R_o^2} \Rightarrow$$

$$R_o^2 - r_o^2 \sin^2 \phi - h^2 \sin^2 \phi - 2r_o h \sin^2 \phi = (R_o - h \cos \phi)^2 + r_o^2 (1 - \cos \phi)^2 + 2(R_o - h \cos \phi)r_o (1 - \cos \phi) \Rightarrow$$

$$R_o^2 - r_o^2 \sin^2 \phi - h^2 \sin^2 \phi - 2r_o h \sin^2 \phi =$$

Σχήμα (3-9)



$$=R_o^2+h^2\cos^2\varphi-2R_o h\cos\varphi+r_o^2(1-\cos\varphi)^2+2r_o R_o(1-\cos\varphi)-2r_o(1-\cos\varphi)h\cos\varphi \quad \Rightarrow$$

$$h^2(\sin^2\varphi+\cos^2\varphi)-2[R_o\cos\varphi+r_o\cos\varphi(1-\cos\varphi)-r_o\sin^2\varphi]h+r_o^2[(1+\cos\varphi)^2+\sin^2\varphi]+$$

$$+2r_o R_o(1-\cos\varphi)=0$$

$$h^2-2(R_o\cos\varphi+r_o\cos\varphi-r_o^2\cos\varphi-r_o\sin^2\varphi)h+r_o^2(1+\cos^2\varphi-2\cos\varphi+\sin^2\varphi)+2r_o R_o(1-\cos\varphi)=0$$

$$h^2-2[(R_o+r_o)\cos\varphi-r_o(\sin^2\varphi+\cos^2\varphi)]h+r_o^2(2-2\cos\varphi)+2r_o R_o(1-\cos\varphi)=0$$

$$h^2-2[r_o-(R_o+r_o)\cos\varphi]h+2r_o^2(1-\cos\varphi)+2r_o R_o(1-\cos\varphi)=0 \quad \Rightarrow$$

$$h^2-2[r_o-(R_o+r_o)\cos\varphi]h+2(1-\cos\varphi)(r_o^2+r_o R_o)=0$$

$$\Delta=4[r_o-(R_o+r_o)\cos\varphi]^2-4\cdot 2(1-\cos\varphi)(r_o^2+r_o R_o)=$$

$$=4[r_o^2+(R_o+r_o)^2\cos^2\varphi-2r_o(r_o+R_o)\cos\varphi-2r_o^2-2r_o R_o+2r_o^2\cos\varphi+2r_o R_o\cos\varphi]=$$

$$=4(-r_o^2+r_o^2\cos^2\varphi+R_o^2\cos^2\varphi+2r_o R_o\cos^2\varphi-2r_o^2\cos\varphi-2r_o R_o\cos\varphi-2r_o^2-2r_o R_o+2r_o^2\cos\varphi+$$

$$+2r_o R_o\cos\varphi)=4[(R_o+r_o)^2\cos^2\varphi-(R_o+r_o)^2+R_o^2] \quad \Rightarrow$$

$$\Delta=4[(r_o+R_o)^2(\cos^2\varphi-1)+R_o^2] \quad \Rightarrow$$

$$h = \frac{-2[r_o-(r_o+R_o)\cos\varphi] \pm 2\sqrt{(r_o+R_o)^2(\cos^2\varphi-1)+R_o^2}}{2}$$

$$h = -r_o + (r_o + R_o)\cos\varphi \pm \sqrt{(r_o + R_o)^2(\cos^2\varphi - 1) + R_o^2} \quad \Rightarrow$$

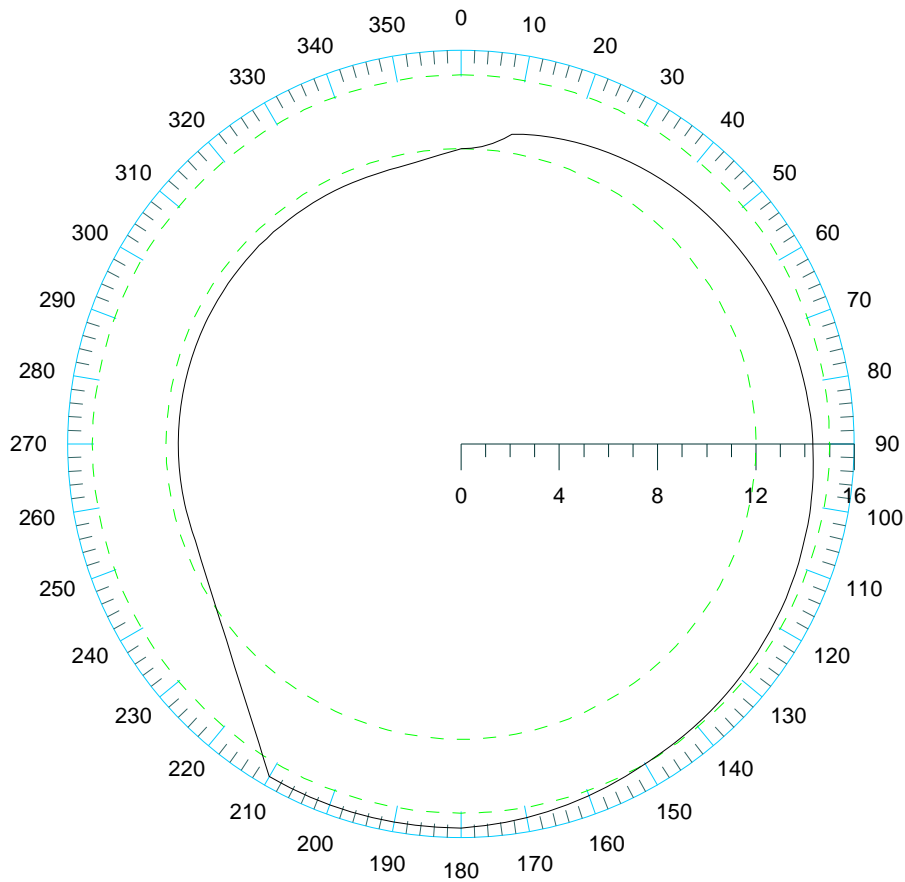
H (+) απορρίπτεται γιατί δε δίνει τομή με την καμπύλη.

$$h = -r_o + (r_o + R_o)\cos\varphi - \sqrt{R_o^2 - (r_o + R_o)^2\sin^2\varphi}$$

( $\Rightarrow r=h+r_o$ ) αναμενόμενο από τον ορισμό του αποθέματος ενός τόξου κύκλου (απόθεμα:

$$r_o=r-h)$$

**Σχήμα 3-10** Πολικό διάγραμμα 1<sup>ου</sup> έκκεντρου



Με περιστροφές ανά 60° προκύπτουν τα υπόλοιπα έκκεντρα των εμβόλων 2<sup>ου</sup> έως 5<sup>ου</sup>

**2<sup>ο</sup> ΕΜΒΟΛΟ**

Συμπίεση- έναρξης:

$$60^\circ \leq \varphi \leq 69.361878729^\circ$$

$$\pi/3 \leq \varphi \leq 1.210593159 \text{rad}$$

Συμπίεση:

$$69.361878729^\circ \leq \varphi \leq 210^\circ$$

$$1.210593159 \text{rad} \leq \varphi \leq 7\pi/6$$

Συμπίεση πάχους:

$$210^\circ \leq \varphi \leq 240^\circ$$

$$7\pi/6 \leq \varphi \leq 4\pi/3$$

Πλήρης έμφραξη:

$$240^\circ \leq \varphi \leq 270^\circ$$

$$4\pi/3 \leq \varphi \leq 3\pi/2$$

Απόφραξη-απότομη αποσυμπίεση:

$$270^\circ \leq \varphi \leq 312.5082978^\circ \approx 312^\circ$$

$$3\pi/2 \leq \varphi \leq 312\pi/180$$

Μέγιστη αποσυμπίεση:

$$312^\circ \approx 312.5082978^\circ \leq \varphi \leq 43.4021579^\circ \approx 43^\circ$$

$$312\pi/180 \leq \varphi \leq 43\pi/180$$

Μετακίνηση πριν την έναρξη της συμπίεσης:

$$43^\circ \approx 43.4021579^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$$
$$43\pi/180 \leq \varphi \leq \pi/3$$

### 3<sup>ο</sup> ΈΜΒΟΛΟ

Συμπίεση- έναρξης:

$$120^\circ \leq \varphi \leq 129.361878729^\circ$$
$$2\pi/3 \leq \varphi \leq 2.25779071 \text{rad}$$

Συμπίεση:

$$129.361878729^\circ \leq \varphi \leq 270^\circ$$
$$2.25779071 \text{rad} \leq \varphi \leq 3\pi/2$$

Συμπίεση πάχους:

$$270^\circ \leq \varphi \leq 300^\circ$$
$$3\pi/2 \leq \varphi \leq 5\pi/3$$

Πλήρης έμφραξη:

$$300^\circ \leq \varphi \leq 330^\circ$$
$$5\pi/3 \leq \varphi \leq 11\pi/6$$

Απόφραξη-απότομη αποσυμπίεση:

$$330^\circ \leq \varphi \leq 12.5082978^\circ \approx 12^\circ$$
$$11\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/15$$

Μέγιστη αποσυμπίεση:

$$12.5082978^\circ \leq \varphi \leq 103.4021579^\circ \approx 103^\circ$$
$$7\pi/5 \leq \varphi \leq 103\pi/180$$

Μετακίνηση πριν την έναρξη της συμπίεσης:

$$103.4021579^\circ \leq \varphi \leq 120^\circ$$
$$103\pi/180 \leq \varphi \leq 2\pi/3$$

### 4<sup>ο</sup> ΈΜΒΟΛΟ

Συμπίεση- έναρξης:

$$180^\circ \leq \varphi \leq 189.361878729^\circ$$
$$\pi \leq \varphi \leq 3.304988261 \text{rad}$$

Συμπίεση:

$$189.361878729^\circ \leq \varphi \leq 330^\circ$$
$$3.304988261 \text{rad} \leq \varphi \leq 11\pi/6$$

Συμπίεση πάχους:

$$330^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$
$$11\pi/6 \leq \varphi \leq 2\pi$$

Πλήρης έμφραξη:

$$0^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$$
$$0 \leq \varphi \leq \pi/6$$

Απόφραξη-απότομη αποσυμπίεση:

$$30^\circ \leq \varphi \leq 72.5082978^\circ \approx 72^\circ$$
$$\pi/6 \leq \varphi \leq 72\pi/180$$

Μέγιστη αποσυμπίεση:

$$72^\circ \approx 72.5082978^\circ \leq \varphi \leq 163.4021579^\circ \approx 163^\circ$$
$$72\pi/180 \leq \varphi \leq 163\pi/180$$

Μετακίνηση πριν την έναρξη της συμπίεσης:

$$163^\circ \approx 163.4021579^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$
$$163\pi/180 \leq \varphi \leq \pi$$

### 5<sup>ο</sup> ΈΜΒΟΛΟ

Συμπίεση- έναρξης:

$$240^\circ \leq \varphi \leq 249.361878729^\circ$$
$$4\pi/3 \leq \varphi \leq 4.352185812 \text{rad}$$

Συμπίεση:

$$249.361878729^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$$
$$4.352185812 \text{rad} \leq \varphi \leq \pi/6$$

Συμπίεση πάχους:

$$30^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$$
$$\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/3$$

Πλήρης έμφραξη:

$$60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$
$$\pi/3 \leq \varphi \leq \pi/2$$

Απόφραξη-απότομη αποσυμπίεση:

$$90^\circ \leq \varphi \leq 132.5082978^\circ \approx 132^\circ$$
$$\pi/2 \leq \varphi \leq 132\pi/180$$

Μέγιστη αποσυμπίεση:

$$132^\circ \approx 132.5082978^\circ \leq \varphi \leq 223.4021579^\circ \approx 223^\circ$$
$$132\pi/180 \leq \varphi \leq 223\pi/180$$

Μετακίνηση πριν την έναρξη της συμπίεσης:

$$223^\circ \approx 223.4021579^\circ \leq \varphi \leq 240^\circ$$
$$223\pi/180 \leq \varphi \leq 4\pi/3$$

**Συνάρτηση ακτίνας έκκεντρου 6<sup>ου</sup> εμβόλου:**

### **6<sup>ο</sup> ΕΜΒΟΛΟ**

Συμπίεση έναρξης:

$$r_\varepsilon = (r_o + R_p) \cos \phi - \sqrt{R_p^2 - (r_o + R_p)^2 \sin^2 \phi}$$

$$(r_o=12\text{mm} , R_p=4\text{mm})$$

$$0^\circ \leq \varphi \leq 9.361878729^\circ ,$$
$$0 \leq \varphi \leq 0.163395608 \text{rad}$$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*

$$300^\circ \leq \varphi \leq 309.361878729^\circ$$
$$5\pi/3 \leq \varphi \leq 5.399383363 \text{rad}$$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ*

Συμπίεση:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$(r_o=12\text{mm} , r_s=12.749474965\text{mm} , r_E=15\text{mm} )$$

$$9.361878729^\circ \leq \varphi \leq 150^\circ$$
$$0.163395608 \text{rad} = 13\pi/250 \leq \varphi \leq 5\pi/6$$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*

$$309.361878729^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$
$$5.399383363 \text{rad} \leq \varphi \leq \pi/2$$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ*



Συμπίεση πάχους:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $r_s=15\text{mm}$  ,  $r_E=15.6\text{mm}$  )

$150^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$   
 $5\pi/6 \leq \varphi \leq \pi$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*

$90^\circ \leq \varphi \leq 120^\circ$   
 $\pi/2 \leq \varphi \leq 2\pi/3$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ*

Αποσυμπίεση πάχους:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $r_s=15.6\text{mm}$  ,  $r_E=15\text{mm}$  )

$180^\circ \leq \varphi \leq 210^\circ$   
 $\pi \leq \varphi \leq 7\pi/6$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*

$120^\circ \leq \varphi \leq 150^\circ$   
 $2\pi/3 \leq \varphi \leq 5\pi/6$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ*

1<sup>ο</sup> Στάδιο αποσυμπίεσης:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $r_s=15\text{mm}$  ,  $r_E=14.32379001\text{mm}$  )

$210^\circ \leq \varphi \leq 240^\circ$   
 $7\pi/6 \leq \varphi \leq 4\pi/3$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*

$150^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$   
 $5\pi/6 \leq \varphi \leq \pi$

*ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ*

2° Στάδιο αποσυμπίεσης:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $r_s=14.32379001\text{mm}$  ,  $r_E=13.478027316\text{mm}$  )

$240^{\circ} \leq \varphi \leq 257.8635292^{\circ}$  *ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*  
 $4\pi/3 \leq \varphi \leq 4.500567605\pi$

$180^{\circ} \leq \varphi \leq 197.8635292^{\circ}$  *ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ*  
 $\pi \leq \varphi \leq 3.453370054\pi$

Αποσυμπίεση τέλους:

$$r_{\varepsilon} = -(r_o + R_{\rho}) \sin \phi - \sqrt{R_{\rho}^2 - (r_o + R_{\rho})^2 \cos^2 \phi} \quad (3.6)$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $R_{\rho}=4\text{mm}$ )

$257.8635292^{\circ} \leq \varphi \leq 270^{\circ}$  , *ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*  
 $257.8635292\pi/180 \leq \varphi \leq 3\pi/2\text{rad}$

$197.8635292^{\circ} \leq \varphi \leq 210^{\circ}$  , *ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ*  
 $197.8635292\pi/180 \leq \varphi \leq 7\pi/6\text{rad}$

Μετακίνηση στην ανώτερη θέση αποσυμπίεσης:

$$r_{\varepsilon} = \frac{r_o}{\cos(\phi_E - \phi)}$$

( $r_o=11.5\text{mm}$  ,  $r_{\max}=12\text{mm}$  ,  $\phi_E = \phi_s + \cos^{-1} \frac{r_o}{r_{\max}}$  )

$270^{\circ} \leq \varphi \leq 286.5978421^{\circ} \approx 287^{\circ}$  *ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*  
 $3\pi/2 \leq \varphi \leq 287\pi/180$

$210^{\circ} \leq \varphi \leq 226.5978421^{\circ} \approx 227^{\circ}$  *ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ*  
 $7\pi/6 \leq \varphi \leq 227\pi/180$

Μέγιστη αποσυμπίεση:

$r_E=11.5\text{mm}$

$286.5978421^{\circ} \leq \varphi \leq 343.4021579^{\circ} \approx 343^{\circ}$  *ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ*  
 $287\pi/180 \leq \varphi \leq 343\pi/180$

$$226.5978421^\circ \leq \varphi \leq 283.4021579^\circ \approx 283^\circ$$

$$227\pi/180 \leq \varphi \leq 283\pi/180$$

ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ

Μετακίνηση πριν την έναρξη της συμπίεσης:

$$r_\varepsilon = \frac{r_o}{\cos(\phi - \phi_s)}$$

$$(r_o=11.5\text{mm}, r_{\max}=12\text{mm}, \phi_s = \phi_E - \cos^{-1} \frac{r_o}{r_{\max}})$$

$$343.4021579^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$

$$343\pi/180 \leq \varphi \leq 2\pi$$

ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΥ

$$283.4021579^\circ \leq \varphi \leq 300^\circ$$

$$283\pi/180 \leq \varphi \leq 5\pi/3$$

ΓΩΝΙΑ ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΥ

Το στάδιο της αποσυμπίεσης πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μη διαταράσσει τη ροή εξόδου από την αντλία και να διασφαλίζει τη γραμμικότητα της ροής που ήδη κατορθώνουν τα έκκεντρα με τη συμπίεση.

Η μοναδική αποσυμπίεση που μπορεί να επηρεάσει τη ροή εξόδου από την αντλία είναι αυτή του 6<sup>ου</sup> εμβόλου που συμβαίνει για χρονικό διάστημα  $0 \leq t \leq T/6$ . Οι υπόλοιπες αποσυμπίεσεις, όταν συμβαίνουν, των προηγούμενων εμβόλων επηρεάζουν μόνο την είσοδο της αντλίας γεγονός που δεν ενδιαφέρει. Αυτό γίνεται επειδή κατά την αποσυμπίεση των πρώτων 5 εμβόλων, πάντα η προς την έξοδο δίοδος της αντλίας είναι κλειστή από ένα έμβολο που έπεται του αποσυμπιεζόμενου. Συνεπώς η αποσυμπίεση του 6<sup>ου</sup> εμβόλου πρέπει να γίνεται με τρόπο που να καλύπτεται η αναρρόφησή του από τα προηγούμενα έμβολα που συμπιέζουν καθώς επίσης και να αποδίδεται σε εκείνη τη διάρκεια η μέση παροχή έγχυσης  $V_m$  προς την έξοδο της αντλίας.

Όπως αναδεικνύεται παρακάτω κατά το χρονικό διάστημα  $0 \leq t \leq T/6$  όπου αποσυμπιέζεται το 6<sup>ο</sup> έμβολο η έγχυση από τα προηγούμενα έχει ως εξής:

$$V_{T/6} = V_2 + (V_3 - V_2) + (V_0 - V_3) - V_0, \quad V_3 = 2V_2$$

Έμβολα: (2) (3) (4) (6)

$$V_{T/6} = V_2 + V_2 + (V_0 - 2V_2) - V_0 = 0$$

Το 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> έμβολο εξαναγκάζουν το σωλήνα να εγγχεί γραμμικά καθ'όλο το χρονικό διάστημα  $0 \leq t \leq T/6$ , ωστόσο δε συμβαίνει το ίδιο με το 4<sup>ο</sup> έμβολο. Το 4<sup>ο</sup> δεν εγγχεί καθόλου από  $0 \leq t \leq T/12$ , ενώ ξεκινά να εγγχεί γραμμικά στο διάστημα  $T/12 \leq t \leq T/6$ . Συνεπώς, χωρίζουμε σε 2 ίσα χρονικά διαστήματα το διάστημα αποσυμπίεσης του 6<sup>ου</sup> εμβόλου ώστε να δούμε τι εγγέεται από τα προηγούμενα έμβολα στο καθένα.

Αρχικό διάστημα 1<sup>ου</sup> σταδίου αποσυμπίεσης:  $0 \leq t \leq T/12 \rightarrow 0 \equiv 0 \leq \varphi \leq 30^\circ \equiv \pi/6$

$$V_{T/12} = V_2/2 + V_2/2 + 0 - V_{6a} = 0 \quad \text{ώστε να μην επηρεάζεται η έξοδος από την αναρρόφηση.}$$

(2) (3) (4) (6)

Επομένως έως  $t=T/12$  η καμπύλη του έκκεντρου του  $6^{ου}$  εμβόλου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αναρροφά γραμμικά όγκο ρευστού ίσο με  $V_2$ . Δηλαδή:

$$V_{6\alpha} = V_2 \Rightarrow A_6 Li = A_2 Li \Rightarrow A_6 = A_2 .$$

Έτσι, η ακτίνα του  $6^{ου}$  έκκεντρου θα πρέπει την  $t=T/12$  να έχει την τιμή  $r_2=14.32379001\text{mm}$

Τελικό διάστημα  $2^{ου}$  σταδίου αποσυμπίεσης:  $T/12 \leq t \leq T/6 \rightarrow \pi/6 \equiv 30^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ \equiv \pi/3$

$$V_{T/6} = V_2/2 + V_2/2 + V_0 - 2V_2 - V_{6\beta} = 0 \quad \text{ώστε να μην επηρεάζεται η έξοδος από την αναρρόφηση.}$$

(2)      (3)      (4)      (6)

Επομένως από  $t=T/12$  έως  $T/6$  η καμπύλη του έκκεντρου του  $6^{ου}$  εμβόλου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αναρροφά γραμμικά όγκο ρευστού ίσο με  $V_0 - V_2$ . Αυτό γίνεται όταν από την τιμή της προηγούμενης ακτίνας του έκκεντρου  $r_2$  γίνει μείωση μέχρι την τιμή  $r_0$ .

### Απόδειξη συνάρτησης αποσυμπίεσης τέλους (3.6)

Ο κύκλος του ρουλεμάν θα περνάει από το σημείο (0,-12) και έχει ακτίνα 4 mm  
Συνεπώς το κέντρο του κύκλου είναι (0,-16) και έχει εξίσωση:

$x^2 + (y+16)^2 = 4^2 \Rightarrow (y+16)^2 = 4^2 - x^2$ , όπου μετατρέποντας σε πολικές συντεταγμένες θα έχουμε:

$$(r \sin \theta + 16)^2 = 4^2 - r^2 \cos^2 \theta \quad \Rightarrow$$

$$r^2 \sin^2 \theta + 16^2 - 2 \cdot 16 \cdot r \sin \theta = 4^2 - r^2 \cos^2 \theta \quad \Rightarrow$$

$$r^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) + 32 r \sin \theta + 240 = 0 \quad \Rightarrow$$

$$r^2 + 32 \sin \theta r + 240 = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\Delta = 32^2 \sin^2 \theta - 4 \cdot 240 = 4[(16^2 (\sin^2 \theta - 1) + 16)]$$

$$r_{1,2} = \frac{-32 \sin \theta \pm 2\sqrt{16^2 (\sin^2 \theta - 1) + 16}}{2} \quad \Rightarrow$$

$$r = -16 \sin \theta \pm \sqrt{16^2 (\sin^2 \theta - 1) + 16} \quad \Rightarrow$$

$$r = -16 \sin \theta - \sqrt{16 - 16^2 \cos^2 \theta} \quad (3.6)$$

η ρίζα '+' δεν δίνει τομή με την καμπύλη του έκκεντρου συμπίεσης

$$\text{Ή } r = -(r_o + R_p) \sin \theta - \sqrt{-(r_o + R_p)^2 \cos^2 \theta + R_p^2} \quad (\text{γενική σχέση})$$

Από τη γενική σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου για  $r_s=r_2=14.32379001\text{mm}$  καταλήγουμε στην:

$$r_\varepsilon = 12 + \sqrt{\frac{\theta(14.32379001 - 12)^2 - 3\pi/2(14.32379001 - 12)^2}{(4\pi/3 - 3\pi/2)}} \Rightarrow r = 12 + \sqrt{\frac{5.4\theta - 8.1\pi}{-\pi/6}} \Rightarrow$$

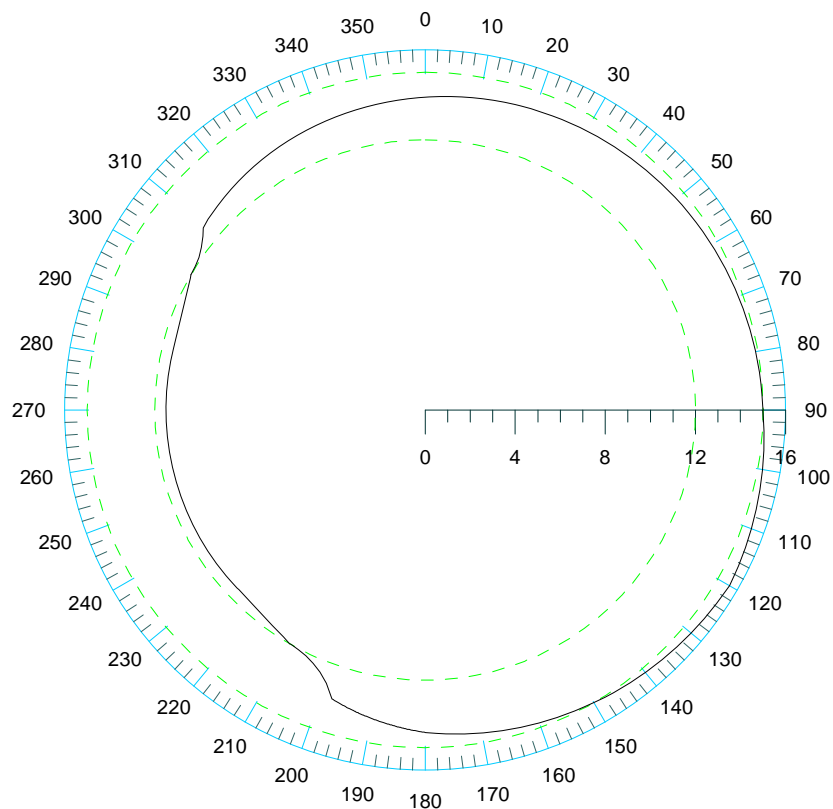
$$r = 12 + \sqrt{48.6 - 32.4 \frac{\theta}{\pi}} \quad (3.7)$$

$$(3.7), (3.6) \Rightarrow 12 + \sqrt{48.6 - 32.4 \frac{\theta}{\pi}} = -16 \sin \theta - \sqrt{16 - 16^2 \cos^2 \theta}$$

Από όπου με αριθμητική επίλυση καταλήγουμε:

$$\theta = 4.500567605 \text{ rad} = 257.8635292^\circ, \text{ οπότε και } r = 13.47802731 \text{ mm}$$

**Σχήμα 3-11** Πολικό διάγραμμα 6<sup>ου</sup> έκκεντρου



### 3.3 Υπολογισμός έκκεντρου 7<sup>ου</sup> διορθωτικού εμβόλου

Επιλύοντας τη σχέση (2.7) ως προς A προκύπτει:

$$A = \pi R^2 - \pi \frac{(r_\varepsilon - r_o)^2}{4} \quad (2.7\beta)$$

Τη χρονική στιγμή (έστω  $t=0$ ,  $\varphi=150^\circ=5\pi/6$ ) που μόλις κλείνει η είσοδος από το 1ο έμβολο η ακτίνα του εκείνη τη χρονική στιγμή μόλις έγινε  $r=15\text{mm}$ . Την ίδια στιγμή το 2<sup>ο</sup> έμβολο υστερεί κατά  $60^\circ$  συνεπώς η ακτίνα του στην ίδια ευθεία 1-2 προσδιορίζεται από τη σχέση (2.10) για  $r_s=r_o$ :

$$r_e = r_o + (r_E - r_o) \sqrt{\frac{(\phi_S - \phi)}{(\phi_S - \phi_E)}} \Rightarrow$$

$$r_2 = 12 + (15 - 12) \sqrt{\frac{0 - \pi/2}{0 - 5\pi/6}} \Rightarrow r_2 = 14.32379001 \text{ mm}$$

Ενώ το 3<sup>ο</sup> έμβολο υστερεί κατά 120<sup>ο</sup> συνεπώς η ακτίνα του στην ίδια ευθεία προσδιορίζεται ομοίως:

$$r_3 = 12 + (15 - 12) \sqrt{\frac{0 - \pi/6}{0 - 5\pi/6}} \Rightarrow r_3 = 13.34164079 \text{ mm}$$

Το 4<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> έμβολο υστερούν κατά 180<sup>ο</sup> και 240<sup>ο</sup> αντίστοιχα οπότε:

$$r_4 = r_5 = r_o = 12 \text{ mm}$$

Και τέλος το 6<sup>ο</sup> έμβολο υστερεί κατά 300<sup>ο</sup> οπότε:  $r_6 = 15 \text{ mm}$

Αυτές οι τιμές των ακτινών προσδιορίζουν κάποια αντίστοιχα εμβαδά εγκάρσια διατομής σωλήνα ακριβώς κάτω από τη θέση κάθε εμβόλου και προσδιορίζονται από τη σχέση (2.7β):

$$A_2 = \pi 1.5^2 - \pi \frac{(14.32379001 - 12)^2}{4} \Rightarrow A_2 = 2.827433388 = 0.9 \pi \text{ mm}^2$$

$$A_1 = \pi 1.5^2 - \pi \frac{(15 - 12)^2}{4} \Rightarrow A_1 = 0 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = \pi 1.5^2 - \pi \frac{(13.34164079 - 12)^2}{4} \Rightarrow A_3 = 5.654866776 = 1.8 \pi \text{ mm}^2$$

$$A_4 = A_5 = A_o = 1.5^2 \pi = 2.25 \pi = 7.068583471 \text{ mm}^2$$

Η (2.7β) για την  $A_6$  δίνει αρνητική τιμή διότι συμπιέζεται ο σωλήνας περισσότερο από το διπλάσιο πάχος του κατά 0.4 mm. Ωστόσο μας ενδιαφέρει μόνο ο εμβολιζόμενος όγκος ρευστού οπότε:  $A_6 = 0 \text{ mm}^2$ .

Το μήκος του εκκεντροφόρου άξονα που βρίσκονται τα έγκεντρα των 6 εμβόλων-βαλβίδων και του 7<sup>ου</sup> διορθωτικού εμβόλου είναι 107mm. Τα 6 έμβολα-βαλβίδες έχουν το ίδιο μήκος L και το 7<sup>ο</sup> διορθωτικό, το διπλάσιο 2L προκειμένου να επεκταθεί το εύρος της γραμμικότητας της ροής. Σε κάθε έγκεντρο αφήνουμε ανοχές 0.2mm. Επομένως το συνολικό μήκος είναι:

$$L_{ολ} = 107 = 6L + 2L + 8 \cdot 0.2 \Rightarrow L = 13.175 \text{ mm.}$$

Στρογγυλοποιούμε το κατασκευαστικό μήκος σε L=13mm οπότε διατηρώντας την ίδια ανοχή 0.2 mm προκύπτει:

$$6 \cdot 13 + 2L + 0.2 \cdot 8 = 107 \text{ mm} \Rightarrow L = 27.4 \text{ mm}$$

$$\text{Δηλαδή } L / L_i = 13 / 27.4 = 65 / 137 \Rightarrow L = 2.11 L_i$$

Η μέγιστη ακτίνα του διορθωτικού εμβόλου όπως αναφέρθηκε είναι μικρότερη από τις μέγιστες ακτίνες των έκκεντρων των προηγούμενων έξι γιατί η διατομή του εύκαμπτου αγωγού πρέπει να μειωθεί χωρίς να κλείσει έτσι ώστε να συνεχίζεται η ροή στην έξοδο πετυχαίνοντας τη σταθερότητά της, ενώ η ελάχιστη ακτίνα είναι μεγαλύτερη από των άλλων και είναι η ελάχιστη ακτίνα που διατηρεί τον εύκαμπτο αγωγό ανοιχτό.

Όταν ο εύκαμπτος αγωγός βρίσκεται στην απαραμόρφωτη θέση το εμβαδόν της διατομής του θα είναι:

$$A_0 = \pi R^2 = \pi 1.5^2 = 7.068583471 \text{ mm}^2$$

Και ο όγκος ρευστού που αναλογεί σε κάθε διάστημα L όταν ο αγωγός είναι σε απαραμόρφωτη κατάσταση είναι:

$$V_0 = A_0 L = 91.89158512 \text{ mm}^3$$

Οι αντίστοιχοι όγκοι ρευστού κάτω από τα 6 πρώτα έμβολα θα είναι:

$$V_1 = V_6 = 0 \text{ mm}^3$$

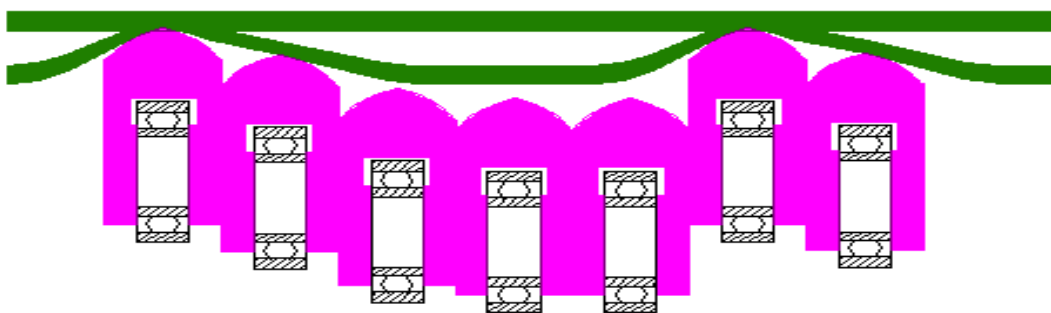
$$V_2 = A_2 L = 0.9\pi \cdot 13 = 11.7\pi = 36.75663405 \text{ mm}^3$$

$$\Rightarrow V_3 = 2V_2$$

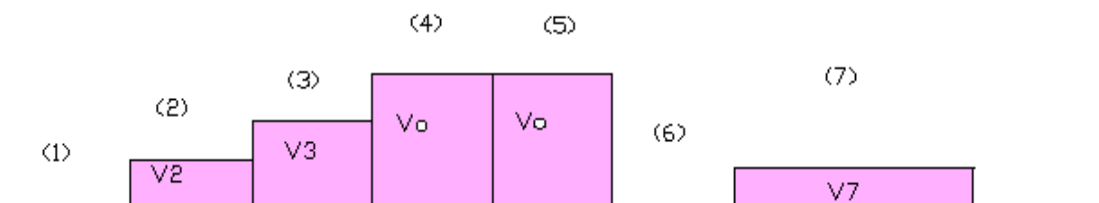
$$V_3 = A_3 L = 1.8\pi \cdot 13 = 23.4\pi = 73.51326809 \text{ mm}^3$$

$$V_4 = V_5 = V_0 = A_0 L = 2.25\pi \cdot 13 = 29.25\pi = 91.89158512 \text{ mm}^3 \Rightarrow V_0 = 2V_2 + V_2/2 \Rightarrow V_0 = 5V_2/2$$

Θα μελετήσουμε την έγχυση στη διάρκεια μίας περιόδου, ξεκινώντας από τη χρονική στιγμή (έστω  $t=0$ ,  $\varphi=150^\circ=5\pi/6$ ) που μόλις κλείνει η είσοδος από το 1ο έμβολο η διάταξη των εμβόλων είναι τέτοια που οι εναπομείναντες όγκοι ρευστού στο συμπιεζόμενο τμήμα του σωλήνα θα είναι:



Σχήμα 3-12(α)



(β)

Δηλαδή είναι κλειστές οι βαλβίδες-έμβολα 1 και 6 (εισόδου-εξόδου), και ο χώρος κάτω από τα (2), (3), (4) και (5) έχει πληρωθεί με ρευστό.

Είναι προφανές ότι σε χρόνο μιας περιόδου ( $t'=T$ ) για μια πλήρη περιστροφή του άξονα θα έχει εγχυθεί:

$$V_{ολ} = V_2 + V_3 + 2V_o - V_6 + V_6 - V_7 + V_7 \Rightarrow V_{ολ} = V_2 + V_3 + 2V_o = 11.7\pi + 23.4\pi + 2 \cdot 29.25\pi \Rightarrow$$

$$V_{ολ} = 93.6\pi = 294.0530724 \text{ mm}^3$$

Η μέση παροχή σε μια περίοδο είναι :  $Q = V_{ολ}/T$  . Ωστόσο για χρονικό διάστημα  $T/6$  (διάστημα γωνίας  $60^\circ \equiv \pi/3$ ) το διάστημα του σωλήνα από το  $1^\circ$  έως το  $6^\circ$  έμβολο γεμίζει από την είσοδο και δεν υπάρχει έγχυση στην έξοδο από τα πρώτα 6 έμβολα. Γι αυτό το διάστημα αναλαμβάνει την έγχυση το  $7^\circ$  διορθωτικό έμβολο το οποίο δρα για χρονικό διάστημα  $T/6$  και θέλουμε η μέση παροχή που αποδίδει να είναι όμοια με παραπάνω. Συνεπώς:

$$\bar{Q} = \frac{V_7}{T/6} \Rightarrow \frac{V_{ολ}}{T} = \frac{6V_7}{T} \Rightarrow V_7 = \frac{V_2 + V_3 + 2V_o}{6}$$

$$(A_{7o} - A_{7min})L = \frac{A_2L_i + A_3L_i + 2A_oL_i}{6} \Rightarrow A_{7min} = A_{7o} - \frac{L_i}{L} \cdot \frac{A_2 + A_3 + 2A_o}{6} \Rightarrow$$

$$A_{7min} = A_{7o} - \frac{13}{27.4} \cdot \frac{0.9\pi + 1.8\pi + 2 \cdot 2.25\pi}{6} \Rightarrow A_{7min} = A_{7o} - 0.5693430657\pi$$

Ο όγκος που θα εμβολίζεται και απεμβολίζεται από το  $7^\circ$  έμβολο θα είναι:

$$V_7 = \frac{V_{ολ}}{6} \Rightarrow V_7 = \frac{93.6\pi}{6} \Rightarrow V_7 = 15.6\pi \Rightarrow V_7 = 49.0088454 \text{ mm}^3$$

Από τη σχέση (2.7) προσδιορίζεται η μέγιστη ακτίνα του εκκέντρου του  $7^{ου}$  εμβόλου:

$$r_{7max} = r_o + 2\sqrt{R_t^2 - \frac{A_{min}}{\pi}} \Rightarrow r_{7max} = 12 + 2\sqrt{1.5^2 - \frac{A_{7o} - 0.5693430657\pi}{\pi}}$$

Στη συνέχεια χωρίζουμε την περίοδο σε 6 ίσα χρονικά διαστήματα  $T/6$ , όσο δηλαδή απέχουν τα 6 εκκεντρα των 6 πρώτων εμβόλων, και μελετάμε την έγχυση μέσα σε αυτά.

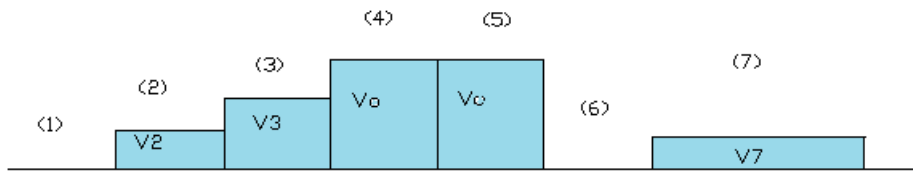


1. Από  $0 \leq t \leq T/6$  που αντιστοιχεί σε

$$0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$$

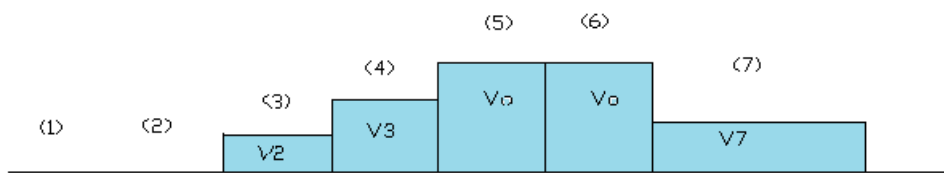
$$0 \leq \varphi \leq \pi/3$$

Στην αρχή του διαστήματος η διάταξη των εμβόλων είναι:



Σχήμα 3-13

Και στο τέλος του διαστήματος αυτού η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 3-14

Στο διάστημα αυτό από τα 6 έμβολα-βαλβίδες, θα έχει εγχυθεί:

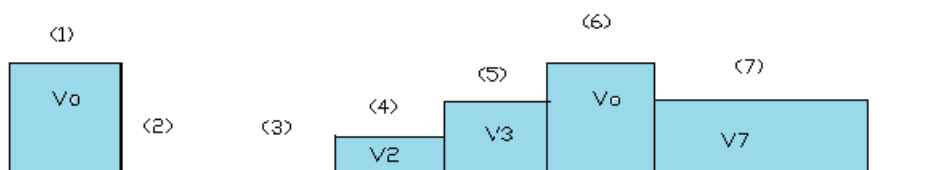
$$V_{T/6} = V_2 + (V_3 - V_2) + (V_0 - V_3) + (V_0 - V_0) + (0 - V_0) = 0$$

2. Από  $T/6 \leq t \leq T/3$  που αντιστοιχεί σε ,

$$60^\circ \leq \varphi \leq 120^\circ$$

$$\pi/3 \leq \varphi \leq 2\pi/3$$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 3-15

Στο διάστημα αυτό από τα 6 έμβολα-βαλβίδες, θα έχει εγχυθεί:

$$V_{T/3} = V_2 + (V_3 - V_2) + (V_0 - V_3) + (V_0 - V_0) = V_0$$

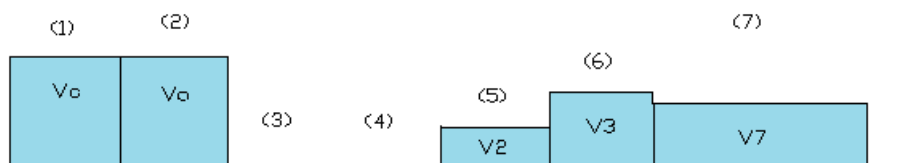
Από την είσοδο έχουμε αναρρόφηση  $V_0$  λόγω του 1ου έμβολο

3. Από  $T/3 \leq t \leq T/2$  που αντιστοιχεί σε ,

$$120^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

$$2\pi/3 \leq \varphi \leq \pi$$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 3-16

Στο διάστημα αυτό από τα 6 έμβολα-βαλβίδες, θα έχει εγχυθεί:

$$V_{T/2} = V_2 + (V_3 - V_2) + (V_0 - V_3) = V_0$$

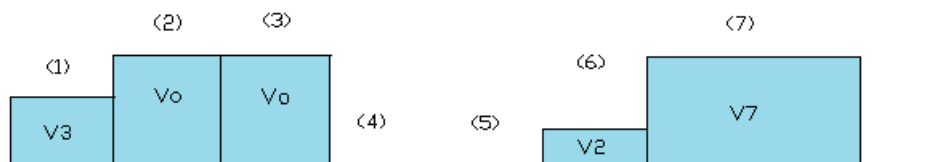
Από την είσοδο έχουμε αναρρόφηση  $V_0$  λόγω του 2ου έμβολο

4. Από  $T/2 \leq t \leq 2T/3$  που αντιστοιχεί σε ,

$$180^\circ \leq \varphi \leq 240^\circ$$

$$\pi \leq \varphi \leq 4\pi/3$$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 3-17

Στο διάστημα αυτό από τα 6 έμβολα-βαλβίδες, θα έχει εγχυθεί:

$$V_{2T/3} = V_2 + (V_3 - V_2) = V_3$$

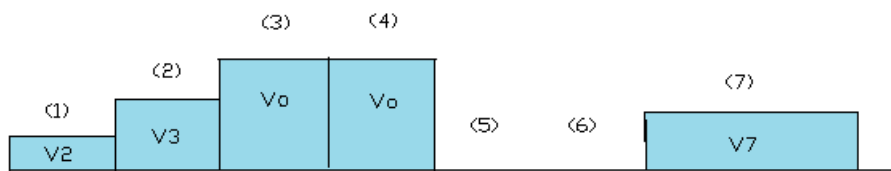
Από την είσοδο έχουμε αναρρόφηση  $V_i^- = -(V_0 - V_3) + V_0 = V_3$

5. Από  $2T/3 \leq t \leq 5T/6$  που αντιστοιχεί σε ,

$$240^\circ \leq \varphi \leq 300^\circ$$

$$4\pi/3 \leq \varphi \leq 5\pi/3$$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 3-18

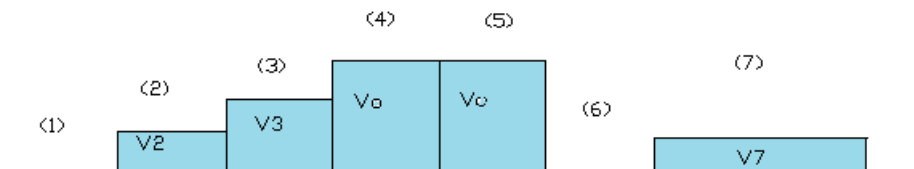
Στο διάστημα αυτό από τα 6 έμβολο-βαλβίδες, θα έχει εγχυθεί:

$$V_{5T/6} = V_2$$

Από την είσοδο έχουμε αναρρόφηση  $V_i^- = -(V_3 - V_2) - (V_0 - V_3) + V_0 = V_2$

6. Από  $5T/6 \leq t \leq T$  που αντιστοιχεί σε ,  $300^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$   
 $5\pi/3 \leq \varphi \leq 2\pi$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 3-19

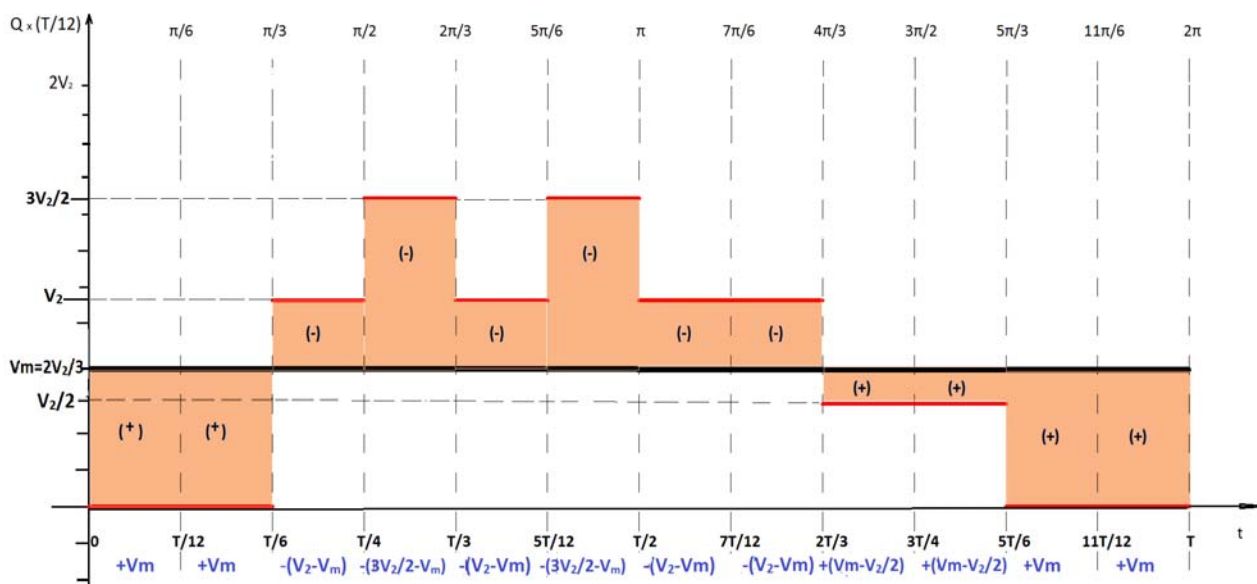
Στο διάστημα αυτό από τα 6 έμβολο-βαλβίδες, θα έχει εγχυθεί:

$$V_T = 0$$

Από την είσοδο έχουμε αναρρόφηση  $V_i^- = -V_2 - (V_3 - V_2) - (V_0 - V_3) + V_0 = 0$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η έγχυση που γίνεται συνολικά σε κάθε χρονικό διάστημα από τα 6 πρώτα έμβολο-βαλβίδες. Επειδή επιδιώκουμε σταθερή παροχή όγκου πρέπει οι τιμές των εκκέντρων του (7) να είναι τέτοιες ώστε κάθε χρονική στιγμή το  $V_7$  να ισοσταθμίζει τον όγκο, είτε αναρροφώντας είτε συμπιέζοντας ώστε να βγαίνει στην έξοδο σταθερή ποσότητα όγκου ίση με  $V_m$ .

**Σχήμα 3-20**  
Διάγραμμα έγχυσης 6 εμβόλων-βαλβίδων ανά χρονικό διάστημα T/12



(7): - EMB/ΖΕΙ - - ΑΝΑΡΡΟΦΑ - - ΑΝΑΡΡΟΦΑ - - ΑΝΑΡΡΟΦΑ - - EMB/ΖΕΙ - - EMB/ΖΕΙ

### ΠΙΝΑΚΑΣ 2

| $\alpha/\alpha$ | 0-T/12  | T/12-T/6     | T/6-T/4      | T/4-T/3         | T/3-5T/12    | 5T/12-T/2       |
|-----------------|---------|--------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| (1)             | 0       | 0            | —            | —               | —            | —               |
| (2)             | $V_2/2$ | $V_2/2$      | 0            | 0               | —            | —               |
| (3)             | $V_2/2$ | $V_2/2$      | $V_2/2$      | $V_2/2$         | 0            | 0               |
| (4)             | 0       | $V_2/2$      | $V_2/2$      | $V_2/2$         | $V_2/2$      | $V_2/2$         |
| (5)             | 0       | 0            | 0            | $V_0-2V_2$      | $V_2/2$      | $V_2/2$         |
| (6)             | $-V_2$  | $-(V_0-V_2)$ | 0            | 0               | 0            | $V_0-2V_2$      |
| Σύνολο          | 0       | 0            | $V_2$        | $V_0-V_2$       | $V_2$        | $V_0-V_2$       |
| (7)             | $V_m$   | $V_m$        | $-(V_2-V_m)$ | $-(3V_2/2-V_m)$ | $-(V_2-V_m)$ | $-(3V_2/2-V_m)$ |

| $\alpha/\alpha$ | T/2-7T/12    | 7T/12-2T/3   | 2T/3-3T/4   | 3T/4-5T/6   | 5T/6-11T/12 | 11T/12-T |
|-----------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| (1)             | —            | —            | —           | —           | —           | —        |
| (2)             | —            | —            | —           | —           | —           | —        |
| (3)             | —            | —            | —           | —           | —           | —        |
| (4)             | 0            | 0            | —           | —           | —           | —        |
| (5)             | $V_2/2$      | $V_2/2$      | 0           | 0           | —           | —        |
| (6)             | $V_2/2$      | $V_2/2$      | $V_2/2$     | $V_2/2$     | 0           | 0        |
| Σύνολο          | $V_2$        | $V_2$        | $V_2/2$     | $V_2/2$     | 0           | 0        |
| (7)             | $-(V_2-V_m)$ | $-(V_2-V_m)$ | $V_m-V_2/2$ | $V_m-V_2/2$ | $V_m$       | $V_m$    |

Έστω  $V_m$  είναι η παροχή που πρέπει να εγχέεται ανά πάσα χρονική στιγμή της περιόδου από την έξοδο της αντλίας. Συνεπώς, για τα 2 πρώτα και 2 τελευταία διαστήματα της περιόδου όπου δεν έχουμε έγχυση αναλαμβάνει το 7<sup>ο</sup> έμβολο να εγχύει την παροχή αυτή. Αυτή η παροχή πρέπει να είναι σίγουρα μικρότερη από τη μέγιστη παροχή έγχυσης  $3V_2/2$  ( $\times T/12$ ). Συγκεκριμένα πρέπει η τιμή της να είναι η μέση τιμή της συνολικής ποσότητας έγχυσης στην περίοδο. Δηλαδή:

$$V_m = V_{ολ}/12 \Rightarrow V_m = \frac{V_2 + V_3 + 2V_0}{12} \Rightarrow V_m = \frac{V_2 + 2V_2 + 2 \cdot 5V_2/2}{12} \Rightarrow V_m = 2V_2/3 \Rightarrow$$

$$V_m = 7.8\pi = 24.5044227 \text{ mm}^3, \quad V_2/2 \leq V_m \leq V_2$$

Επίσης, είναι σημαντικό τα διαστήματα εμβολισμού και αναρρόφησης να είναι ξεχωριστά διαδοχικά, δηλαδή όλες οι αναρροφήσεις του 7<sup>ου</sup> εμβόλου να είναι σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα χωρίς να παρεμβάλλονται εμβολισμοί και αντίστοιχα το ίδιο να ισχύει για τους εμβολισμούς. Με αυτόν τον τρόπο θα επιτυγχάνεται η ισότητα μεταξύ των όγκων εμβολισμού και αναρρόφησης καθώς και των αντίστοιχων χρονικών διαστημάτων τους ( $T/2$ ), το οποίο αποτελεί αναγκαία συνθήκη για τη διατήρηση της σταθερότητας της παροχής με το χρόνο, αφού ότι εμβολίζεται θα πρέπει να απορροφάται από το 7<sup>ο</sup> έμβολο, το οποίο παίζει διορθωτικό ρόλο και όχι αντλητικό. Επομένως:

$$V_{7(\epsilon\mu\beta\omicron\lambda)} = V_{7(\alpha\nu\alpha\rho)} \Rightarrow 4V_m + 2(V_m - V_2/2) = 4(V_2 - V_m) + 2(3V_2/2 - V_m) \Rightarrow$$

$$4V_m + 2V_m - V_2 = 4V_2 - 4V_m + 3V_2 - 2V_m \Rightarrow 12V_m = 8V_2 \Rightarrow V_m = 2V_2/3$$

Όμοια με την παραπάνω τιμή.

Ο εκκεντροφόρος βρίσκεται στη θέση  $\varphi=0^\circ$  όταν το 1<sup>ο</sup> έκκεντρο μόλις ξεκινά τη συμπίεση του σωλήνα. Η χρονική στιγμή που θεωρήθηκε ως αυτή που γίνεται έναρξη των χρόνων  $\varphi_i=0$  είναι όταν το 1<sup>ο</sup> έκκεντρο μόλις έχει συμπίεσει πλήρως το σωλήνα οπότε ο εκκεντροφόρος βρίσκεται στη θέση  $\varphi=150^\circ$ . Συνεπώς, η θέση του εκκεντροφόρου άξονα δίνεται αν στη γωνία των χρόνων  $\varphi_i$  προστεθεί η διαφορά φάσης των  $150^\circ$ , δηλαδή:  $\varphi = \varphi_i + 150^\circ$ . Τα έκκεντρα σχεδιάζονται πάντα με τη γωνία  $\varphi$ .

Έυρεση συνάρτησης ακτίνας έκκεντρο 7<sup>ου</sup> διορθωτικού εμβόλου:

Παρατηρώντας το διάγραμμα έγχυσης των όγκων θα πρέπει το 7<sup>ο</sup> έμβολο να εμβολίζει ρευστό μέχρι την επίτευξη του όγκου  $V_m$  από τη χρονική στιγμή  $t=2T/3$  ( $\varphi_i=4\pi/3=240^\circ$ ) και μετά, καθώς επίσης και στο πρώτο χρονικό διάστημα  $2T/3 \leq t \leq 5T/6$ . Συνεπώς:

► Στο διάστημα από  $2T/3 \leq t \leq 5T/6 \rightarrow 4\pi/3 \equiv 240^\circ \leq \varphi_i \leq 300^\circ \equiv 5\pi/3$  όπως θα πρέπει να εμβολισθεί ποσότητα:

$$V_7 = 2V_m - V_2$$

$$\text{Για } t=2T/3 \rightarrow r_o=12\text{mm} \quad A_{7(2T/3)} = \pi R^2$$

$$\text{Για } t=5T/6 \rightarrow \varphi=300^\circ \equiv 5\pi/3 \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{7(5T/6)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(5T/6)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα συμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(2T/3)} - A_{7(5T/6)} = \pi R^2 - \pi R^2 + \frac{\pi(r_{7(5T/6)} - r_o)^2}{4} = \frac{\pi(r_{7(5T/6)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7}L = L \frac{\pi(r_{7(5T/6)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$V_{b7} = L \frac{\pi(r_{7(5T/6)} - r_o)^2}{4} = 2V_m - V_2 \Rightarrow$$

$$r_{7(5T/6)} = r_o + 2\sqrt{\frac{(2V_m - V_2)}{\pi L}} \Rightarrow r_{7(5T/6)} = 12 + 2\sqrt{\frac{(15.6\pi - 11.7\pi)}{27.4\pi}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{7(5T/6)} = 12.754548252 \text{ mm}$$

Επομένως:

$$r_\varepsilon = r_{\varepsilon o} + (r_{\max} - r_{\varepsilon o}) \sqrt{\frac{(\phi_S - \phi)}{(\phi_S - \phi_E)}}$$

όπου  $r_{\varepsilon o} = 12$ ,  $r_{\max} = 12.754548252 \text{ mm}$   
 $\phi_S = \pi/6 \equiv 30^\circ$   
 $\phi_E = \pi/2 \equiv 90^\circ$

► Στο διάστημα από  $5T/6 \leq t \leq T \rightarrow 5\pi/3 \equiv 300^\circ \leq \phi \leq 360^\circ \equiv 2\pi$   
η εμβολιζόμενη ποσότητα ρευστού είναι  $V_7 = 2V_m$  οπότε:

$$\text{Για } t = 5T/6 \rightarrow r_{7(5T/6)} = 12.754548252 \text{ mm}, A_{7(5T/6)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(5T/6)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = T \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{7(T)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(T)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα συμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(5T/6)} - A_{7(T)} = -\frac{\pi(r_{7(5T/6)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi(r_{7(T)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7}L = \frac{\pi L}{4} [(r_{7(T)} - r_o)^2 - (r_{7(5T/6)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_7 = 2V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{7(5T/6)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{7(T)} - r_o)^2 = 2V_m + \frac{\pi L}{4} (r_{7(5T/6)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$r_{7(T)} = r_o + \sqrt{(r_{7(5T/6)} - r_o)^2 + \frac{4 \cdot 2V_m}{\pi L}} \Rightarrow$$

$$r_{7(T)} = 12 + \sqrt{(12.754548252 - 12)^2 + \frac{4 \cdot 15.6}{\pi \cdot 27.4}}$$

$$\Rightarrow r_{7(T)} = 13.687221185 \text{ mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$\begin{aligned} \text{όπου } r_o &= 12 \text{ mm, } r_s = 12.754548252 \text{ mm, } r_E = 13.687221185 \text{ mm} \\ \phi_s &= \pi/2 \equiv 90^\circ \\ \phi_E &= 5\pi/6 \equiv 150^\circ \end{aligned}$$

► Στο διάστημα από  $0 \leq t \leq T/6$   $\rightarrow$   $0 \equiv 0^\circ \leq \phi \leq 60^\circ \equiv \pi/3$   
η εμβολιζόμενη ποσότητα ρευστού είναι  $V_7 = 2V_m$  οπότε:

$$\text{Για } t=0 \rightarrow r_{7(0)} = 13.687221185 \text{ mm, } A_{7(0)} = A_{7(T)} = \pi R^2 - \frac{\pi (r_{7(T)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = T/6 \quad \text{η διατομή θα έχει γίνει: } A_{7(T/6)} = \pi R^2 - \frac{\pi (r_{7(T/6)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα συμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(0)} - A_{7(T/6)} = -\frac{\pi (r_{7(0)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi (r_{7(T/6)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7} L = \frac{\pi L}{4} [(r_{7(T/6)} - r_o)^2 - (r_{7(0)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_7 = 2V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/6)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{7(0)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{7(T/6)} - r_o)^2 = 2V_m + \frac{\pi L}{4} (r_{7(0)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$r_{7(T/6)} = r_o + \sqrt{(r_{7(0)} - r_o)^2 + \frac{4 \cdot 2V_m}{\pi L}} \Rightarrow$$

$$r_{7(T/6)} = 12 + \sqrt{(13.687221185 - 12)^2 + \frac{4 \cdot 15.6}{\pi \cdot 27.4}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{7(T/6)} = 14.26364476 \text{ mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$\text{όπου } r_o = 12, r_s = 13.687221185\text{mm}, r_E = 14.26364476\text{mm}$$

$$\phi_s = 5\pi/6 \equiv 150^\circ$$

$$\phi_E = 7\pi/6 \equiv 210^\circ$$

► Στο διάστημα από  $T/6 \leq t \leq T/4 \rightarrow \pi/3 \equiv 60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \equiv \pi/2$   
θα αναρροφηθεί ποσότητα ρευστού  $V_7 = V_2 - V_m$  οπότε:

$$\text{Για } t = T/6 \rightarrow r_{7(T/6)} = 14.26364476\text{mm}, A_{7(T/6)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(T/6)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = T/4 \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{7(T/4)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(T/4)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα αποσυμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα θα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(T/4)} - A_{7(T/6)} = -\frac{\pi(r_{7(T/4)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi(r_{7(T/6)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7}L = \frac{\pi L}{4} [(r_{7(T/6)} - r_o)^2 - (r_{7(T/4)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_7 = V_2 - V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/6)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/4)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{7(T/4)} - r_o)^2 = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/6)} - r_o)^2 - V_7 \Rightarrow$$

$$r_{7(T/4)} = r_o + \sqrt{(r_{7(T/6)} - r_o)^2 - \frac{4(V_2 - V_m)}{\pi L}} \Rightarrow$$

$$r_{7(T/4)} = 12 + \sqrt{(14.26364476 - 12)^2 - \frac{4(11.7\pi - 7.8\pi)}{\pi 27.4}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{7(T/4)} = 14.13418475\text{mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$



όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=14.26364476\text{mm}$ ,  $r_E=14.13418475\text{mm}$

$$\phi_s = 7\pi/6 \equiv 210^\circ$$

$$\phi_E = 4\pi/3 \equiv 240^\circ$$

► Στο διάστημα από  $T/4 \leq t \leq T/3 \rightarrow \pi/2 \equiv 90^\circ \leq \phi \leq 120^\circ \equiv 2\pi/3$   
θα αναρροφηθεί ποσότητα ρευστού  $V_7 = 3V_2/2 - V_m$  οπότε:

$$\text{Για } t = T/4 \rightarrow r_{7(T/4)} = 14.13418475\text{mm}, \quad A_{7(T/4)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(T/4)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = T/3 \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{7(T/3)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(T/3)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα αποσυμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα θα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(T/3)} - A_{7(T/4)} = -\frac{\pi(r_{7(T/3)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi(r_{7(T/4)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7}L = \frac{\pi L}{4} [(r_{7(T/4)} - r_o)^2 - (r_{7(T/3)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_7 = 3V_2/2 - V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/4)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/3)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{7(T/3)} - r_o)^2 = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/4)} - r_o)^2 - V_7 \Rightarrow$$

$$r_{7(T/3)} = r_o + \sqrt{(r_{7(T/4)} - r_o)^2 - \frac{4(3V_2/2 - V_m)}{\pi L}} \Rightarrow$$

$$r_{7(T/3)} = 12 + \sqrt{(14.13418475 - 12)^2 - \frac{6 \cdot 11.7\pi - 4 \cdot 7.8\pi}{\pi \cdot 27.4}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{7(T/3)} = 13.76957251\text{mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

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

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=14.13418475\text{mm}$ ,  $r_E=13.76957251\text{mm}$

$$\phi_s = 4\pi/3 \equiv 240^\circ$$

$$\phi_E = 3\pi/2 \equiv 270^\circ$$

► Στο διάστημα από  $T/3 \leq t \leq 5T/12$  →  $2\pi/3 \equiv 120^\circ \leq \varphi \leq 150^\circ \equiv 5\pi/6$   
 θα αναρροφηθεί ποσότητα ρευστού  $V_7 = V_2 - V_m$  οπότε:

$$\text{Για } t = T/3 \rightarrow r_{7(T/3)} = 13.76957251 \text{ mm}, \quad A_{7(T/3)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(T/3)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = 5T/12 \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{7(5T/12)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(5T/12)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα αποσυμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα θα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(5T/12)} - A_{7(T/3)} = -\frac{\pi(r_{7(5T/12)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi(r_{7(T/3)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7}L = \frac{\pi L}{4} [(r_{7(T/3)} - r_o)^2 - (r_{7(5T/12)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_7 = V_2 - V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/3)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{7(5T/12)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{7(5T/12)} - r_o)^2 = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/3)} - r_o)^2 - V_7 \Rightarrow$$

$$r_{7(5T/12)} = r_o + \sqrt{(r_{7(T/3)} - r_o)^2 - \frac{4(V_2 - V_m)}{\pi L}} \Rightarrow$$

$$r_{7(5T/12)} = 12 + \sqrt{(13.76967251 - 12)^2 - \frac{4 \cdot (11.7\pi - 7.8\pi)}{\pi \cdot 27.4}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{7(5T/12)} = 13.60074911 \text{ mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o = 12$ ,  $r_s = 13.76957251 \text{ mm}$ ,  $r_E = 13.60074911 \text{ mm}$

$$\phi_s = 3\pi/2 \equiv 270^\circ$$

$$\phi_E = 5\pi/3 \equiv 300^\circ$$

► Στο διάστημα από  $5T/12 \leq t \leq T/2$  →  $5\pi/6 \equiv 150^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \equiv \pi$   
 θα αναρροφηθεί ποσότητα ρευστού  $V_7 = 3V_2/2 - V_m$  οπότε:

$$\text{Για } t = 5T/12 \rightarrow r_{7(5T/12)} = 13.60074911 \text{ mm}, \quad A_{7(5T/12)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(5T/12)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = T/2 \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{7(T/2)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(T/2)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα αποσυμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα θα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(T/2)} - A_{7(5T/12)} = -\frac{\pi(r_{7(T/2)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi(r_{7(5T/12)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7}L = \frac{\pi L}{4} [(r_{7(5T/12)} - r_o)^2 - (r_{7(T/2)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_7 = 3V_2/2 - V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{7(5T/12)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/2)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{7(T/2)} - r_o)^2 = \frac{\pi L}{4} (r_{7(5T/12)} - r_o)^2 - V_7 \Rightarrow$$

$$r_{7(T/2)} = r_o + \sqrt{(r_{7(5T/12)} - r_o)^2 - \frac{4(3V_2/2 - V_m)}{\pi L}} \Rightarrow$$

$$r_{7(T/2)} = 12 + \sqrt{(13.60074911 - 12)^2 - \frac{4 \cdot (17.55\pi - 7.8\pi)}{\pi 27.4}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{7(T/2)} = 13.06725819 \text{ mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o = 12$ ,  $r_s = 13.60074911 \text{ mm}$ ,  $r_E = 13.06725819 \text{ mm}$

$$\phi_s = 5\pi/3 \equiv 300^\circ$$

$$\phi_E = 11\pi/6 \equiv 330^\circ$$

► Στο διάστημα από  $T/2 \leq t \leq 7T/12 \rightarrow \pi \equiv 180^\circ \leq \phi \leq 210^\circ \equiv 7\pi/6$   
θα αναρροφηθεί ποσότητα ρευστού  $V_7 = V_2 - V_m$  οπότε:

$$\text{Για } t = T/2 \rightarrow r_{7(T/2)} = 13.06725819 \text{ mm}, \quad A_{7(T/2)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(T/2)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = 7T/12 \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{7(7T/12)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{7(7T/12)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα αποσυμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα θα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(7T/12)} - A_{7(T/2)} = -\frac{\pi(r_{7(7T/12)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi(r_{7(T/2)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7}L = \frac{\pi L}{4} [(r_{7(T/2)} - r_o)^2 - (r_{7(7T/12)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_7 = V_2 - V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/2)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{7(7T/12)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{7(7T/12)} - r_o)^2 = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/2)} - r_o)^2 - V_7 \Rightarrow$$

$$r_{7(7T/12)} = r_o + \sqrt{(r_{7(T/2)} - r_o)^2 - \frac{4(V_2 - V_m)}{\pi L}} \Rightarrow$$

$$r_{7(7T/12)} = 12 + \sqrt{(13.06725819 - 12)^2 - \frac{4 \cdot (11.7\pi - 7.8\pi)}{\pi \cdot 27.4}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{7(7T/12)} = 12.75478274 \text{ mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o = 12$ ,  $r_s = 13.06725819 \text{ mm}$ ,  $r_E = 12.75478274 \text{ mm}$

$$\phi_s = 11\pi/6 \equiv 330^\circ$$

$$\phi_E = 2\pi \equiv 360^\circ$$

► Στο διάστημα από  $7T/12 \leq t \leq 2T/3 \rightarrow 7\pi/6 \equiv 210^\circ \leq \phi \leq 240^\circ \equiv 4\pi/3$   
θα αναρροφηθεί ποσότητα ρευστού  $V_7 = V_2 - V_m$  οπότε:

Για  $t = 7T/12 \rightarrow r_{7(7T/12)} = 12.75478274 \text{ mm}$

$$A_{7(7T/12)} = \pi R^2 - \frac{\pi (r_{7(7T/12)} - r_o)^2}{4}$$

Για  $t = 2T/3$  η διατομή θα έχει γίνει:  $A_{7(2T/3)} = \pi R^2 - \frac{\pi (r_{7(2T/3)} - r_o)^2}{4}$

Η διατομή που θα αποσυμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα θα είναι:

$$A_{b7} = A_{7(2T/3)} - A_{7(7T/12)} = -\frac{\pi (r_{7(2T/3)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi (r_{7(7T/12)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b7} L = \frac{\pi L}{4} [(r_{7(7T/12)} - r_o)^2 - (r_{7(2T/3)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_7 = V_2 - V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{7(7T/12)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{7(2T/3)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{7(2T/3)} - r_o)^2 = \frac{\pi L}{4} (r_{7(T/12)} - r_o)^2 - V_7 \quad \Rightarrow$$

$$r_{7(2T/3)} = r_o + \sqrt{(r_{7(T/12)} - r_o)^2 - \frac{4(V_2 - V_m)}{\pi L}} \quad \Rightarrow$$

$$r_{7(2T/3)} = 12 + \sqrt{(12.75478274 - 12)^2 - \frac{4 \cdot (11.7\pi - 7.8\pi)}{\pi \cdot 27.4}} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_{7(2T/3)} = 12.01881273 \text{ mm} \approx 12 \text{ mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$\text{όπου } r_o = 12, \quad r_s = 12.75478274 \text{ mm}, \quad r_E = 12 \text{ mm}$$

$$\phi_s = 0 \equiv 0^\circ$$

$$\phi_E = \pi/6 \equiv 60^\circ$$

Επομένως συνοπτικά έχουμε:

## 7<sup>ο</sup> ΕΜΒΟΛΟ

Αποσυμπίεση 8ου χρονικού διαστήματος:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$\text{όπου } r_o = 12, \quad r_s = 12.75478274 \text{ mm}, \quad r_E = 12.357807495 \text{ mm}$$

$$0^\circ \leq \phi \leq 23.25819478^\circ \approx 23^\circ$$

$$0 \leq \phi \leq 23\pi/180$$

Πλήρης απόφραξη:

$$r = 8(\sin\theta + \sqrt{3}\cos\theta) - 4\sqrt{4(\sin\theta + \sqrt{3}\cos\theta)^2 - 15} \quad (3.8)$$

$$23.25819478^\circ \approx 23^\circ \leq \phi \leq 35.44753331^\circ \approx 35^\circ$$

$$23\pi/180 \leq \phi \leq 7\pi/36$$

Συμπίεση 9<sup>ου</sup> και 10<sup>ου</sup> χρονικού διαστήματος:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=12.227358576\text{mm}$ ,  $r_E=12.754548252\text{mm}$

$$35.44753331 \square \approx 35 \square \leq \varphi \leq 90 \square$$

$$7\pi/36 \leq \varphi \leq \pi/2$$

Συμπίεση 11<sup>ου</sup> και 12<sup>ου</sup> χρονικού διαστήματος:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=12.754548252\text{mm}$ ,  $r_E=13.687221185\text{mm}$

$$90 \square \leq \varphi \leq 150 \square$$

$$\pi/2 \leq \varphi \leq 5\pi/6$$

Συμπίεση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> χρονικού διαστήματος:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=13.687221185\text{mm}$ ,  $r_E=14.26364476\text{mm}$

$$150 \square \leq \varphi \leq 210 \square$$

$$5\pi/6 \leq \varphi \leq 7\pi/6$$

Αποσυμπίεση 3<sup>ου</sup> χρονικού διαστήματος:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=14.26364476\text{mm}$ ,  $r_E=14.13418475\text{mm}$

$$210 \square \leq \varphi \leq 240 \square$$

$$7\pi/6 \leq \varphi \leq 4\pi/3$$

Αποσυμπίεση 4<sup>ου</sup> χρονικού διαστήματος:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=14.13418475\text{mm}$ ,  $r_E=13.76957251\text{mm}$

$$240^\circ \leq \varphi \leq 270^\circ$$

$$4\pi/3 \leq \varphi \leq 3\pi/2$$

Αποσυμπίεση 5<sup>ου</sup> χρονικού διαστήματος:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=13.76957251\text{mm}$ ,  $r_E=13.60074911\text{mm}$

$$270^\circ \leq \varphi \leq 300^\circ$$

$$3\pi/2 \leq \varphi \leq 5\pi/3$$

Αποσυμπίεση 6<sup>ου</sup> χρονικού διαστήματος:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=13.60074911\text{mm}$ ,  $r_E=13.06725819\text{mm}$

$$300^\circ \leq \varphi \leq 330^\circ$$

$$5\pi/3 \leq \varphi \leq 11\pi/6$$

Αποσυμπίεση 7<sup>ου</sup> χρονικού διαστήματος:

$$r_{\varepsilon} = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o=12$ ,  $r_s=13.06725819\text{mm}$ ,  $r_E=12.75478274\text{mm}$

$$330^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$

$$11\pi/6 \leq \varphi \leq 2\pi$$

### Απόδειξη συνάρτησης πλήρους απόφραξης (3.8):

Ο κύκλος του ρουλεμάν θα περνάει από το σημείο  $(12 \cos \frac{\pi}{6}, 12 \sin \frac{\pi}{6})$  και έχει ακτίνα 4 mm. Συνεπώς το κέντρο του κύκλου είναι  $(16 \cos \frac{\pi}{6}, 16 \sin \frac{\pi}{6}) \rightarrow (16 \frac{\sqrt{3}}{2}, 16 \frac{1}{2}) \rightarrow (8\sqrt{3}, 8)$  και έχει εξίσωση:

$$(x-8\sqrt{3})^2 + (y-8)^2 = 4^2 \Rightarrow (x-8\sqrt{3})^2 = 4^2 - (y-8)^2,$$

όπου μετατρέποντας σε πολικές συντεταγμένες θα έχουμε:

$$(r \cos \theta - 8\sqrt{3})^2 = 4^2 - (r \sin \theta - 8)^2 \Rightarrow$$

$$r^2 \cos^2 \theta + 192 - 16\sqrt{3} r \cos \theta = 16 - r^2 \sin^2 \theta - 64 + 16 r \sin \theta \Rightarrow$$

$$r^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) - 16(\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta)r + 240 = 0 \Rightarrow$$

$$r^2 - 16(\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta)r + 240 = 0 \Rightarrow$$

$$\Delta = 16^2 (\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta)^2 - 4 \cdot 240 = 256 (\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta)^2 - 960 = 64 [4 (\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta)^2 - 15]$$

$$r_{1,2} = \frac{16(\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta) \pm 8\sqrt{4(\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta)^2 - 15}}{2}$$

$$r = 8(\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta) - 4\sqrt{4(\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta)^2 - 15} \quad (3.8)$$

η ρίζα '+' δεν δίνει τομή με την καμπύλη του έκκεντρου συμπίεσης

Από τη γενική σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου για  $r_s = 12.754548252 \text{ mm}$  και  $\varphi \geq 30^\circ \equiv \pi/6$ :

$$r = 12 + (12.754548252 - 12) \sqrt{\frac{30 - \theta}{30 - 90}}$$

$$r = 12 + 0.754548252 \sqrt{\frac{30 - \theta}{-30}} \quad (3.9)$$

Από (3.8), (3.9)  $\Rightarrow$

$$8(\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta) - 4\sqrt{4(\sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta)^2 - 15} = 12 + 0.754548252 \sqrt{\frac{30 - \theta}{-30}}$$

Αριθμητική λύση:  $\theta = 0.618676168 \text{ rad} = 35.44753331^\circ$ ,  $r = 12.227358576 \text{ mm}$   
για  $\varphi \leq 30^\circ \equiv \pi/6$ :

$$r = 12 + (12.754548252 - 12) \sqrt{\frac{30 - \theta}{0 - 90}}$$



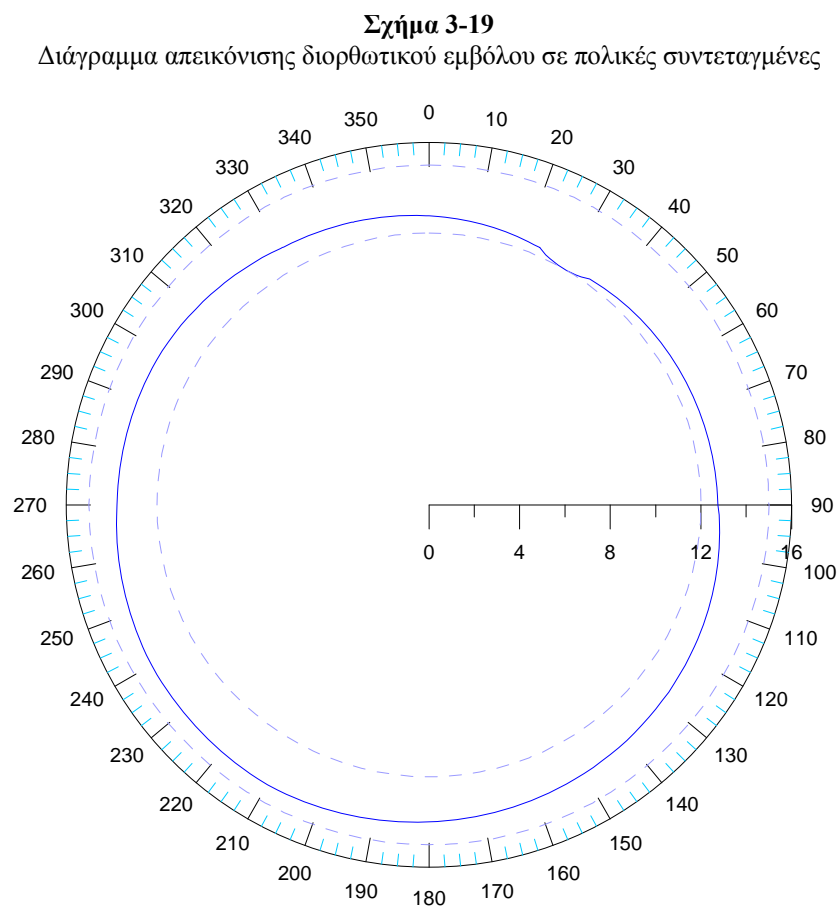
$$r = 12 + 0.754548252 \sqrt{\frac{\theta - 30}{0 - 30}} \quad (3.10)$$

Από (3.9), (3.10) =>

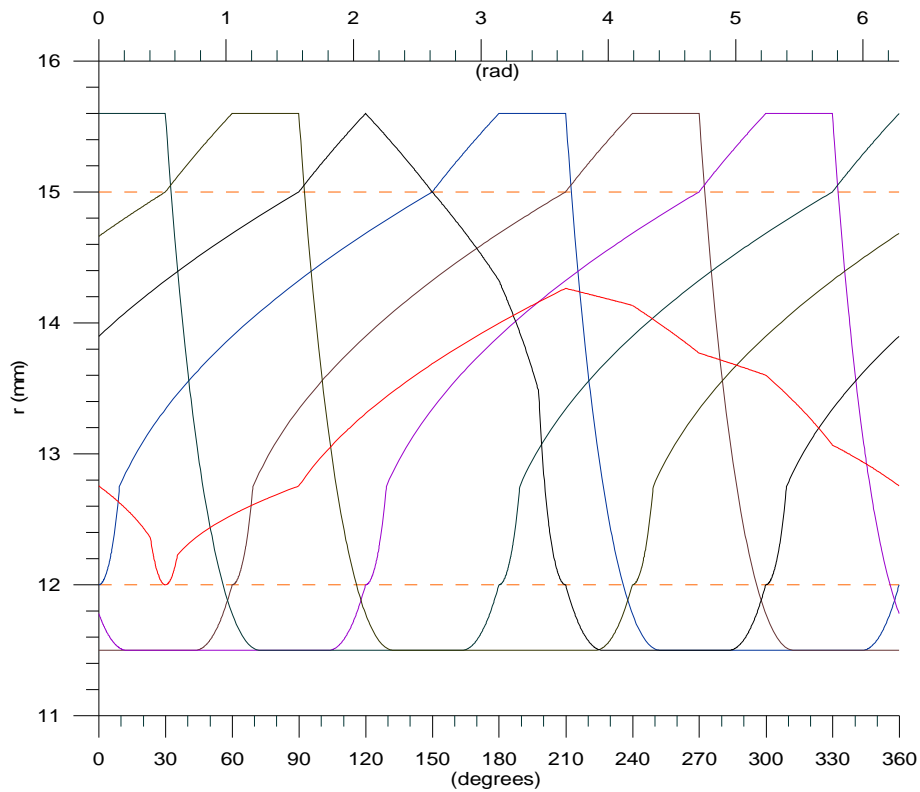
$$8(\sin\theta + \sqrt{3}\cos\theta) - 4\sqrt{4(\sin\theta + \sqrt{3}\cos\theta)^2 - 15} = 12 + 0.754548252 \sqrt{\frac{\theta - 30}{-30}}$$

Αριθμητική λύση:  $\theta = 0.405932077 \text{ rad} = 23.25819478^\circ$ ,  $r = 12.357807495 \text{ mm}$

Με τη βοήθεια του grapher σχεδιάζεται και το 7<sup>ο</sup> διορθωτικό έμβολο:



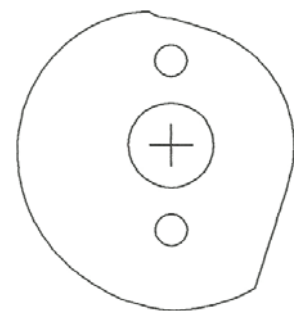
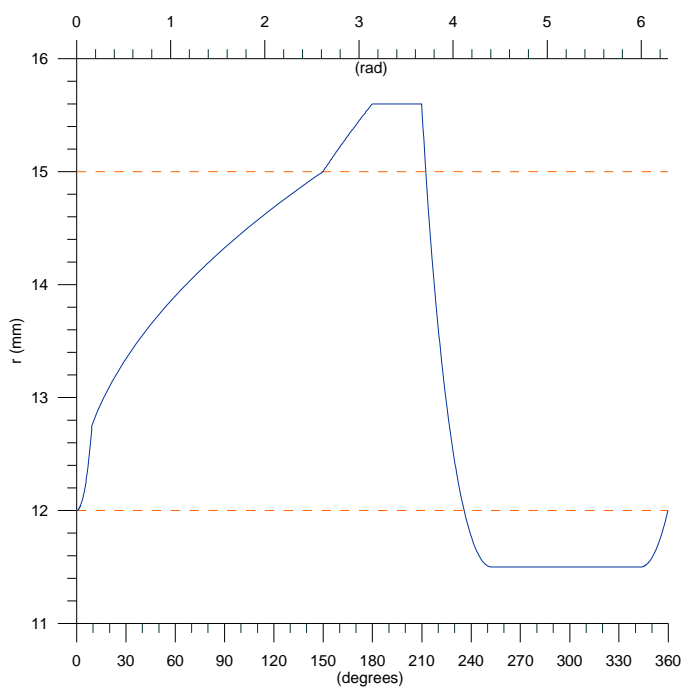
**Σχήμα 3-20** Διάγραμμα απεικόνισης όλων των εμβόλων σε καρτεσιανές συντεταγμένες



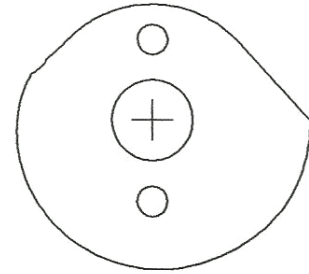
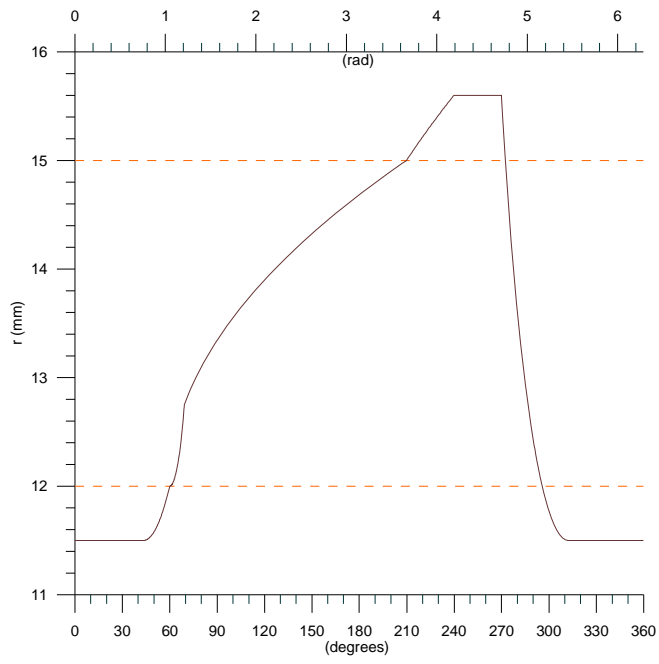
### 3.4 Σχεδιασμός έκκεντρων περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης

Με τη βοήθεια του AUTOCAD σχεδιάζονται τα έκκεντρα των αντίστοιχων εμβόλων-βαλβίδων δίπλα σε κάθε καρτεσιανή απεικόνιση (μέσω grapher ) του ανάλογου στιγμιότυπου:

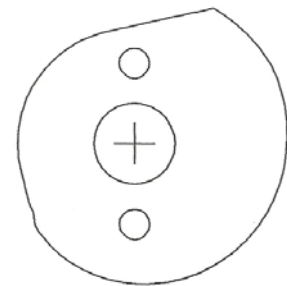
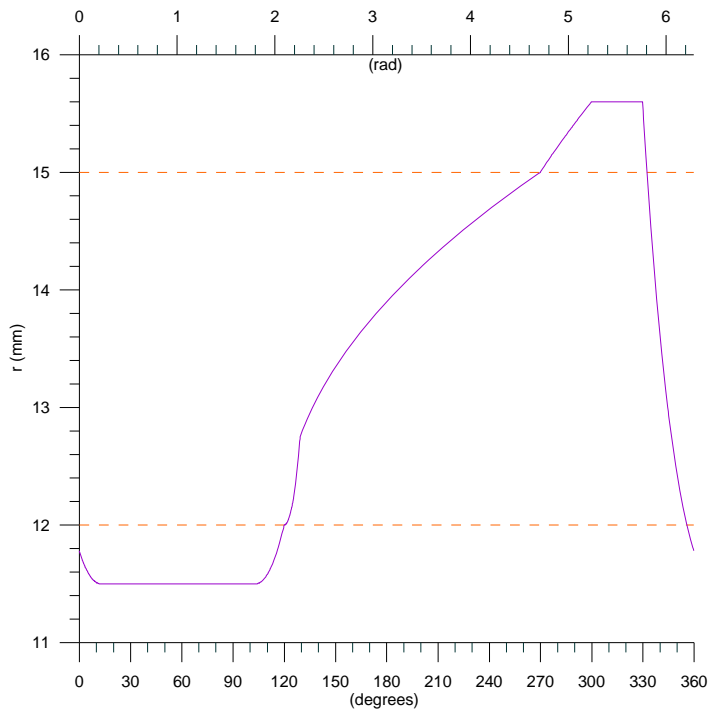
#### 1<sup>ο</sup> έμβολο



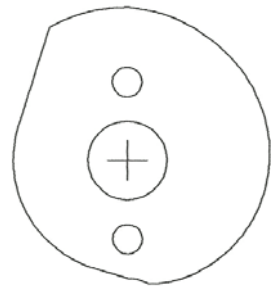
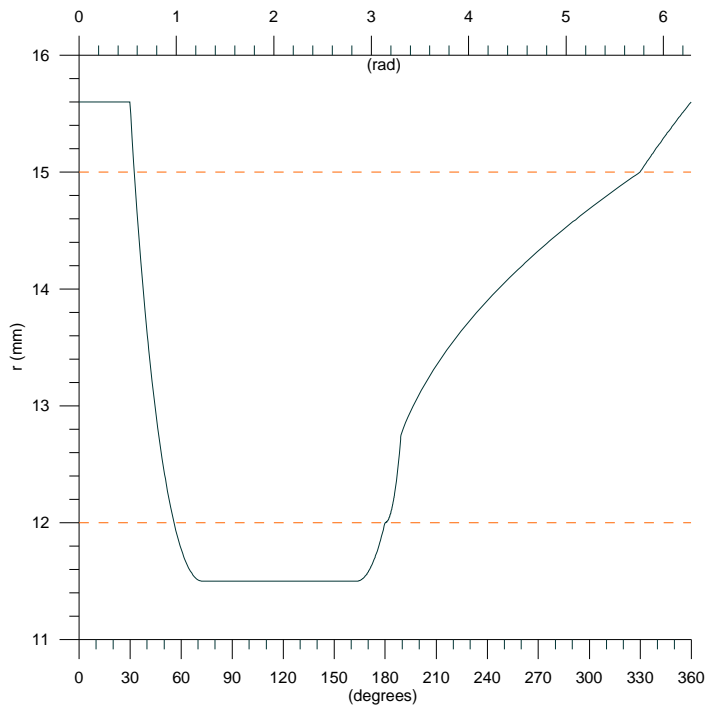
## 2<sup>ο</sup> έμβολο



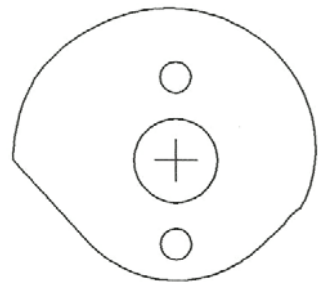
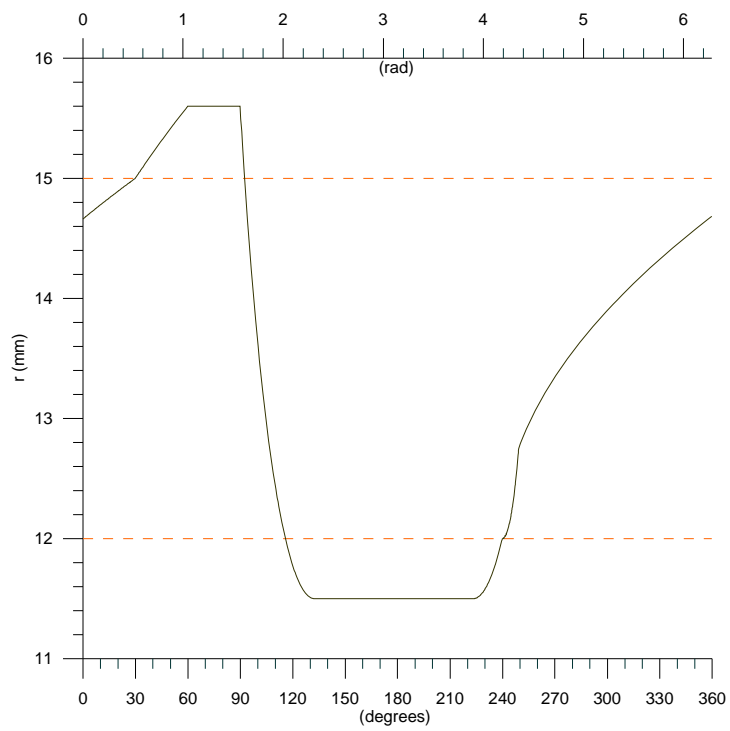
## 3<sup>ο</sup> έμβολο



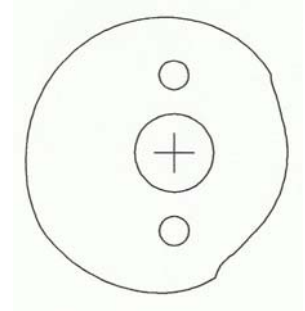
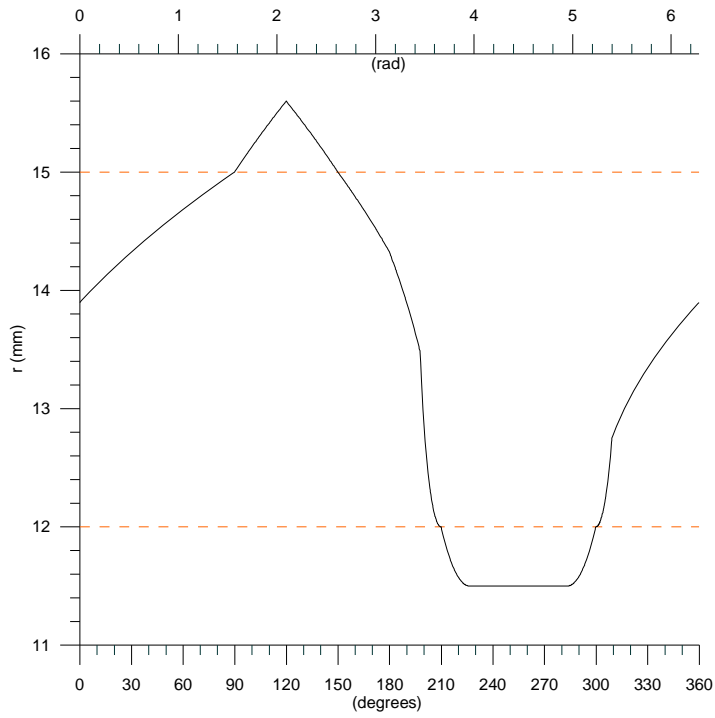
### 4<sup>ο</sup> έμβολο



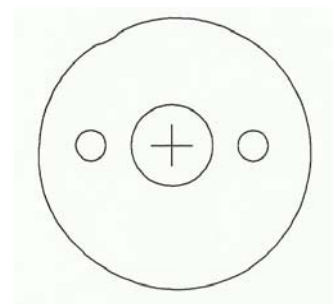
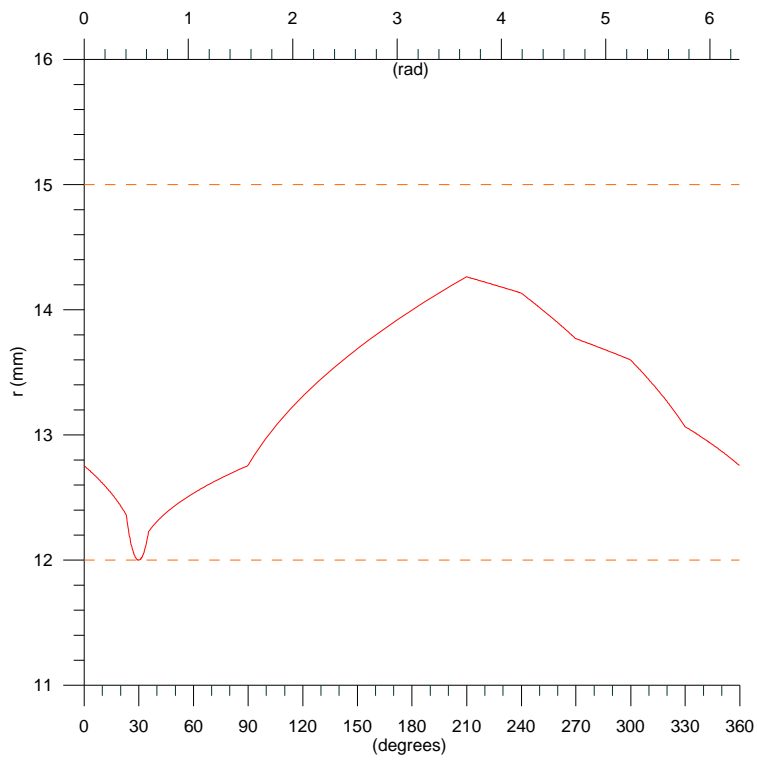
### 5<sup>ο</sup> έμβολο



### 6<sup>ο</sup> έμβολο



### 7<sup>ο</sup> έμβολο



### 3.5 Διάγραμμα έγχυσης – παροχής

Τα διαγράμματα έγχυσης  $\frac{V}{\pi}(t)$  και  $\frac{Q}{\pi}(t)$  επειδή έχουμε γραμμική ροή, προκύπτουν από τη γνωστή μαθηματική συνάρτηση:  $y=ax+b$ . Εδώ αντίστοιχα για τον εμβολιζόμενο όγκο έχουμε  $V=at+b$ . Εύκολα αποδεικνύεται ότι:  $V = V_1 + \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}(t - t_1)$

$$\text{Για } t=t_1 \rightarrow V=V_1$$

$$\text{Για } t=t_2 \rightarrow V=V_2$$

$$\alpha t_1 + b = V_1 \Rightarrow b = V_1 - \alpha t_1$$

$$\alpha t_2 + b = V_2 \quad \} \Rightarrow \alpha t_2 + V_1 - \alpha t_1 = V_2 \Rightarrow \alpha(t_2 - t_1) = V_2 - V_1 \Rightarrow$$

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \quad \text{και} \quad b = V_1 - \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} t_1 \quad \text{οπότε:} \quad V = V_1 + \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}(t - t_1) \quad (3.11)$$

όπου για κάθε διάστημα ο δείκτης (2) εκφράζει την τελική τιμή και ο (1) την αρχική.

Για  $t=t_2$  δηλαδή στο τέλος του διαστήματος θα έχουμε  $\Rightarrow V=V_1 + (V_2 - V_1) \Rightarrow$

$$V_2 = V_1 + \Delta V$$

Για τα διαγράμματα παροχής  $\frac{Q}{\pi}(t)$  αντίστοιχα έχουμε:

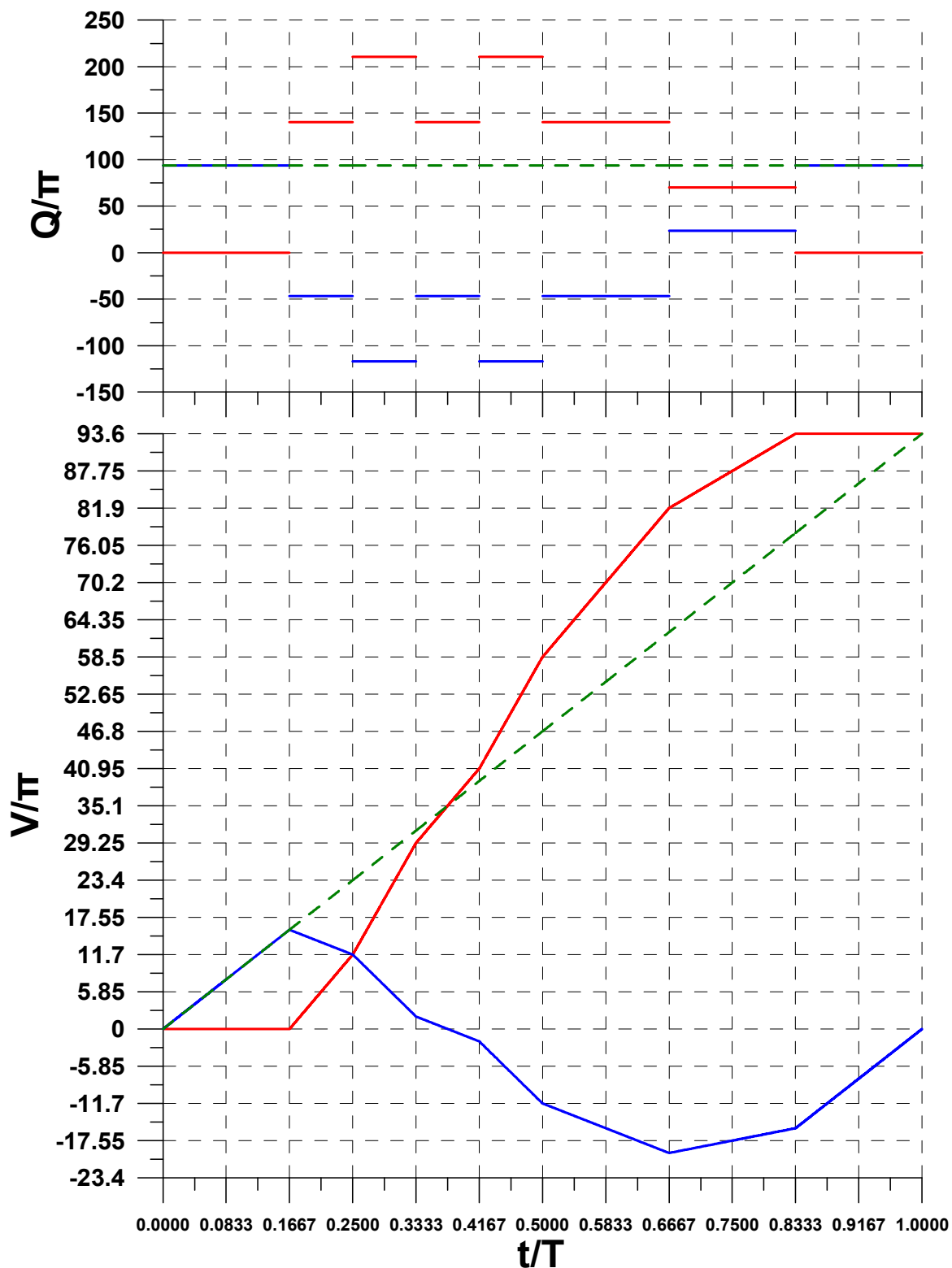
$$Q = \frac{dV}{dt} = \alpha = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \quad (3.12)$$

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι τιμές της ποσότητας όγκου που εγχέεται στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα για την κυματοειδούς αντλία όπως προκύπτουν από τον Πίνακα 2 όπου λαμβάνουμε τα διαγράμματα έγχυσης.

| $\alpha/\alpha$     | 0-T/12 | T/12-T/6 | T/6-T/4 | T/4-T/3 | T/3-5T/12 | 5T/12-T/2 |
|---------------------|--------|----------|---------|---------|-----------|-----------|
| (1)                 | 0      | 0        | —       | —       | —         | —         |
| (2)                 | 5.85   | 5.85     | 0       | 0       | —         | —         |
| (3)                 | 5.85   | 5.85     | 5.85    | 5.85    | 0         | 0         |
| (4)                 | 0      | 5.85     | 5.85    | 5.85    | 5.85      | 5.85      |
| (5)                 | 0      | 0        | 0       | 5.85    | 5.85      | 5.85      |
| (6)                 | -11.7  | -17.55   | 0       | 0       | 0         | 5.85      |
| Σύνολο              | 0      | 0        | 11.7    | 17.55   | 11.7      | 17.55     |
| <b>Αθροιστικά Σ</b> | 0      | 0        | 11.7    | 29.25   | 40.95     | 58.5      |
| (7)                 | 7.8    | 7.8      | -3.9    | -9.75   | -3.9      | -9.75     |
| <b>Αθροιστικά Σ</b> | 7.8    | 15.6     | 11.7    | 1.95    | -1.95     | -11.7     |

| α/α                 | T/2-7T/12 | 7T/12-2T/3 | 2T/3-3T/4 | 3T/4-5T/6 | 5T/6-11T/12 | 11T/12-T |
|---------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-------------|----------|
| (1)                 | —         | —          | —         | —         | —           | —        |
| (2)                 | —         | —          | —         | —         | —           | —        |
| (3)                 | —         | —          | —         | —         | —           | —        |
| (4)                 | 0         | 0          | —         | —         | —           | —        |
| (5)                 | 5.85      | 5.85       | 0         | 0         | —           | —        |
| (6)                 | 5.85      | 5.85       | 5.85      | 5.85      | 0           | 0        |
| Σύνολο              | 11.7      | 11.7       | 5.85      | 5.85      | 0           | 0        |
| <b>Αθροιστικά Σ</b> | 70.2      | 81.9       | 87.75     | 93.6      | 93.6        | 93.6     |
| (7) Διορθωτικό      | -3.9      | -3.9       | 1.95      | 1.95      | 7.8         | 7.8      |
| <b>Αθροιστικά Σ</b> | -15.6     | -19.5      | -17.55    | -15.6     | -7.8        | 0        |

Σχήμα 3-21 Διαγράμματα έγχυσης  $\frac{Q}{\pi}(t)$  και  $\frac{V}{\pi}(t)$



Στα διαγράμματα οι κόκκινες γραμμές αντιστοιχούν στην (1 έως 6 έμβολα- βαλβίδες) τελική έγχυση που θα είχαμε στην έξοδο της αντλίας αν δεν υπήρχε το τελικό διορθωτικό έμβολο. Σε κάθε χρονικό διάστημα όμως βλέπουμε τη γραμμικότητα της έγχυσης και τη σταθερή παροχή, που εξασφαλίζεται από τη γεωμετρία των έκκεντρων. Οι μπλε γραμμές δείχνουν τη διόρθωση της έγχυσης του τελικού διορθωτικού εμβόλου, που μας εξασφαλίζει τη σταθερότητα της έγχυσης μέσα στην περίοδο. Οι πράσινες αντιστοιχούν στην τελική



έγχυση στην έξοδο της αντλίας (άθροισμα κόκκινων και μπλε) από όπου αποδεικνύεται η γραμμικότητα της έγχυσης και η σταθερή παροχή.

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΔΙΧΡΟΝΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΣΤΑΛΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ

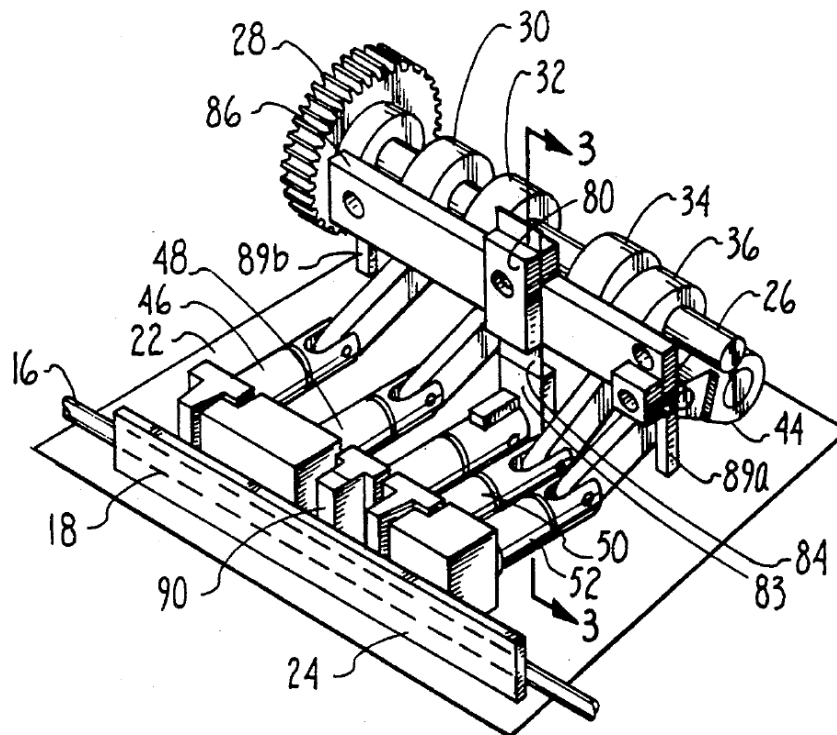
#### 4.1 Μηχανισμός άντλησης- αρχή λειτουργίας

Τα μέρη που συνθέτουν το μηχανισμό άντλησης μίας δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας απεικονίζονται στο σχήμα 4-1, όπου διακρίνεται ο φορέας (22) ο οποίος φέρνει επίπεδη πλάκα (24) ως βάση για τον εύκαμπτο αγωγό. Η πλάκα (24) εξασφαλίζει την επιφάνεια πάνω στην οποία βρίσκεται το τμήμα (18) (φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή) του εύκαμπτου αγωγού (16) και έτσι μπορεί να συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται από τις βαλβίδες και τα δάχτυλα.

Στο φορέα (22) είναι μονταρισμένος ένας περιστρεφόμενος άξονας (26), ο οποίος οδηγείται από κινητήρα (δεν απεικονίζεται στο σχήμα 4-1), που συμπλέκεται με το γρανάζι (28). Ο άξονας (26) περιλαμβάνει τα έγκεντρα (30), (32), (34) και (36), τα οποία συνεργάζονται με τους αντίστοιχους συνδέσμους [στο σχήμα 4-1 φαίνεται μόνο ο σύνδεσμος (44) που συνδέεται με το έγκεντρο (36)]. Τα έγκεντρα μετατοπίζουν τους συνδέσμους και κατά συνέπεια μετατοπίζονται τα έμβολα-δάχτυλα (46), (48), (50) και (52) σε διεύθυνση κάθετη από αυτή των συνδέσμων, ενώ χρησιμοποιούνται κατάλληλοι μηχανισμοί οδήγησης για τα έμβολα (46), (48), (50) και (52).

Τα τέσσερα έμβολα (46), (48), (50) και (52) είναι παλινδρομικά και κατάλληλα μονταρισμένα στο φορέα (22) για να κινούνται προς και από τη πλάκα (24), αποσυμπιέζοντας και συμπιέζοντας το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού (16). Με σκοπό να προστατεύεται το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού και να συγκρατούνται σκόνες και άλλα ανεπιθύμητα υλικά, παραγόμενα από τα κινούμενα εσωτερικά μέρη της περισταλτικής αντλίας, μία εύκαμπτη μεμβράνη (δεν απεικονίζεται στο σχήμα 4-1) μπορεί να τοποθετηθεί στο φορέα (22) μεταξύ των δάχτυλων (46), (48), (50), (52) και του συμπιεζόμενου τμήματος (18) του εύκαμπτου αγωγού. Κάθε δάχτυλο (46), (48), (50) και (52) μπορεί να κινηθεί μεταξύ ενός ανώτερου ορίου και ενός κατώτερου για να παραμορφώνει το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού κατά ένα καθορισμένο ποσοστό, όπως εξηγείται παρακάτω.

Συγκεκριμένα τα δάχτυλα (46) και (50) είναι βαλβίδες και χρησιμεύουν στην πλήρη έμφραξη του εύκαμπτου αγωγού. Μπορούν να μετακινηθούν μεταξύ μίας άνω ακραίας θέσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-2(α) και μίας κάτω ακραίας θέσης όπως φαίνεται στο σχήμα 4-2(β). Μελετώντας τη μία βαλβίδα, για παράδειγμα τη (46) (σχήμα 4-2), η περιστροφή του άξονα (26) προκαλεί αντίστοιχη περιστροφή του έγκεντρου (30). Το έγκεντρο (30) είναι τοποθετημένο στον άξονα (26) και μετατοπίζει την άρθρωση (56) ενός μηχανισμού διωστήρων, οι οποίοι είναι ο σύνδεσμος οδήγησης (58) και ο σύνδεσμος περιστροφής (60). Ο σύνδεσμος οδήγησης (58) είναι προσαρτημένος σε έναν αποστάτη οδηγό (62), ο οποίος είναι πακτωμένος στη βαλβίδα (46). Ομοίως, ο σύνδεσμος περιστροφής (60) είναι προσαρτημένος στον πείρο περιστροφής (64). Επιπλέον ο αποστάτης οδηγός (62) περιορίζεται σε ευθύγραμμη κίνηση εντός του χιτωνίου (63). Συνεπώς, η περιστροφική κίνηση του άξονα (26) μετασχηματίζεται από τη διάταξη του έγκεντρου-μηχανισμού συνδέσμων, που περιγράφηκε πιο πάνω, σε παλινδρομική κίνηση της βαλβίδας (46). Τα δάχτυλα (48) και (52) οδηγούνται από μηχανισμούς, όπως ο μηχανισμός του σχήματος 4-2, που περιγράφηκε πιο πάνω για την οδήγηση της βαλβίδας (46).



**Σχήμα 4-1.** Προοπτική απεικόνιση του μηχανισμού άντλησης όπου απεικονίζεται ο συνδυαστικός μηχανισμός οδήγησης των εμβόλων της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας. Διακρίνονται κυρίως, ο εκκεντροφόρος άξονας (26), τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36) του εκκεντροφόρου άξονα, τα έμβολα-δάχτυλα (46), (48), (50) και (52) των έκκεντρων και ο εύκαμπτος αγωγός (16), [Hyman et al, 1993].

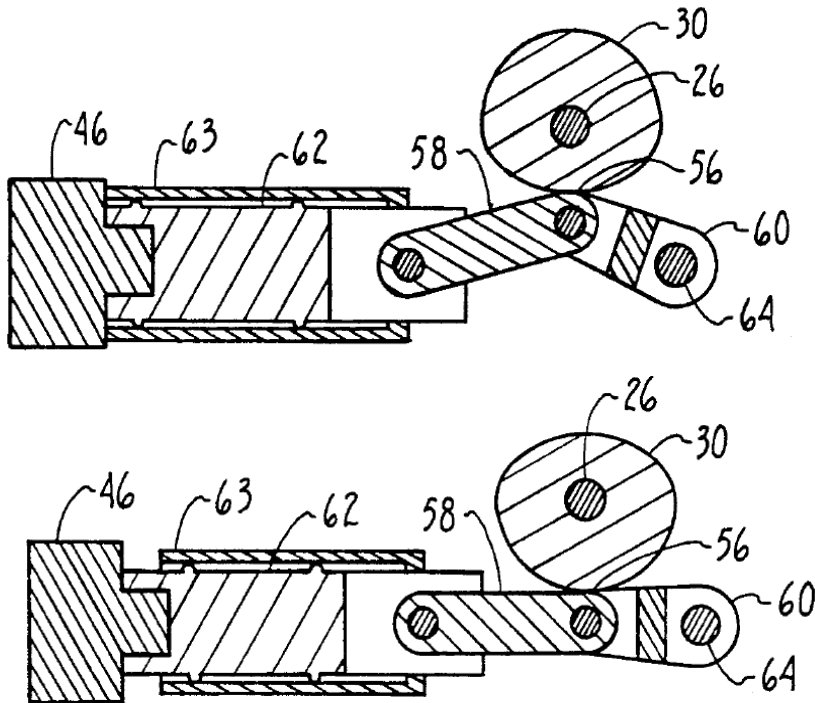
Ειδικότερα οι βαλβίδες (46) και (50) είναι τοποθετημένες, έτσι ώστε η μικρότερη δυνατή κίνησή τους να επαρκεί για να κλείνουν ή να ανοίγουν διαδοχικά το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού και να επιτρέπουν στο ρευστό να ρέει κάτω από αυτές. Με άλλα λόγια, όταν οι βαλβίδες (46), (50) είναι στην άνω ακραία θέση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-2(α), ένα άνοιγμα εξασφαλίζεται στο τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού, το οποίο είναι αρκετό για σχετικά ανεμπόδιστη ροή του ρευστού κάτω από τις βαλβίδες (46) ή (50). Τυπικά, το εύρος κίνησης των βαλβίδων (46) και (50) είναι ρυθμισμένο σε όχι περισσότερο από μία έως τρεις φορές το πάχος του τοιχώματος του τμήματος (18) του εύκαμπτου αγωγού.

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

Θεωρείται το δεύτερο έμβολο (48) και το τέταρτο (52), (σχήμα 4-1), ότι αποτελούν δάχτυλα άντλησης, τα οποία συμπιέζουν χωρίς να φράσσουν εντελώς το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού και προωθούν το ρευστό προς την έξοδό του. Δηλαδή, συμπιέζουν το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού από σχετικά μεγαλύτερο ποσοστό αρχικής διατομής σε σχετικά μικρότερο. Επιπρόσθετα, το πρώτο δάχτυλο (48) έχει ξεχωριστή διαμόρφωση και είναι σχεδιασμένο ως το «μεγάλο» δάχτυλο, το οποίο συμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό σε ένα πρώτο του τμήμα. Το δεύτερο δάχτυλο (52) έχει επίσης ξεχωριστή διαμόρφωση και είναι

σχεδιασμένο ως το «μικρό» δάχτυλο και συμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό σε ένα δεύτερό του τμήμα.

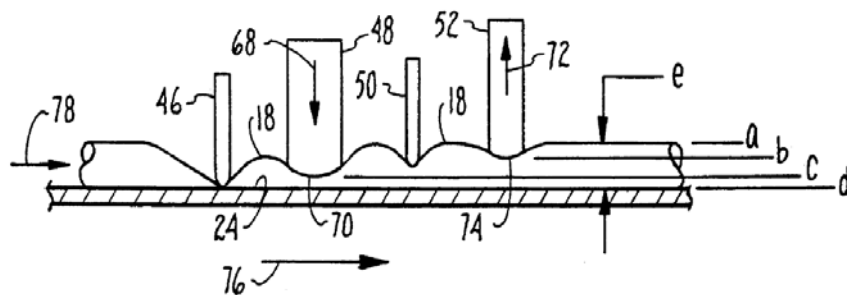
**Σχήμα 4-2.** Πλάγια όψη συνδετικού μηχανισμού οδήγησης εμβόλου της βαλβίδας εισόδου (α) στην άνω ακραία θέση (αποσυμπίεση του εύκαμπτου αγωγού) και (β) στην κάτω ακραία θέση (πλήρους έμφραξης του εύκαμπτου αγωγού). Διακρίνονται κυρίως, το έκκεντρο (30), ο σύνδεσμος οδήγησης (διωστήρας) (58) και το δάχτυλο-βαλβίδα (46), [Hyman et al, 1993].



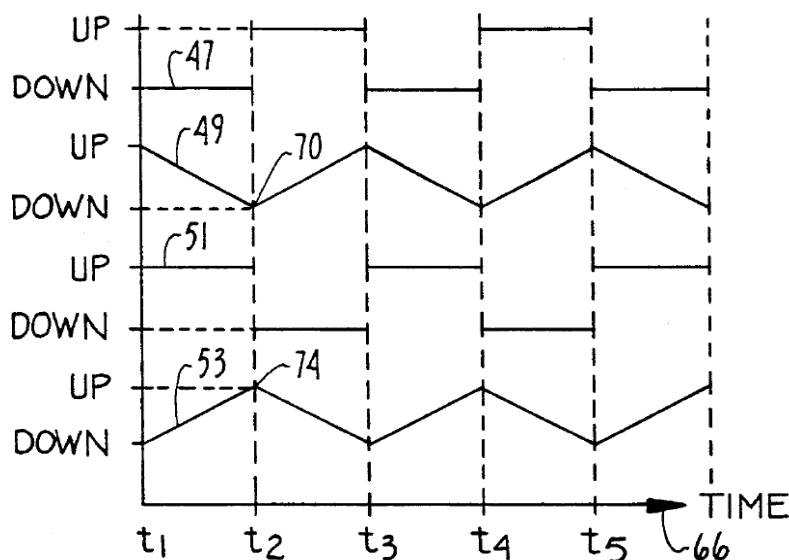
Εστιάζοντας σε αυτό το σημείο της περιγραφής, οι προσδιορισμοί «μεγάλο» και «μικρό» περιγράφουν έμβολα άντλησης τα οποία είναι κατασκευασμένα, έτσι ώστε η ποσότητα του ρευστού που εκτοπίζεται καθώς το «μεγάλο» δάχτυλο (48) κινείται προς το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού, να είναι περίπου διπλάσια της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

Η αρχή λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα παρατηρώντας το σχήμα 4-3, [Hyman & Moubayd, 1993]. Ειδικότερα, το σχήμα 4-3(α) αναπαριστά τη σχετική κίνηση των εμβόλων (46), (48), (50) και (52), ενώ στο 4-3(β) αναπαρίσταται η σχετική κίνηση των βαλβίδων (46) και (50) και των δάχτυλων (48) και (52), μέσω των καμπυλών (47), (51) και (49), (53) αντίστοιχα. Οι καμπύλες αυτές φαίνονται σε σχέση η μία με την άλλη για δύο περιόδους του χρόνου που περιλαμβάνει ενδεικτικά τις χρονικές στιγμές αναφοράς  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  και  $t_5$  στον άξονα του χρόνου (66). Τα έκκεντρα (30), (32), (34) και (36) είναι εξ αρχής διατεταγμένα στον άξονα οδήγησης (26) με τέτοιο τρόπο, ώστε όταν περιστρέφονται με τον άξονα αυτόν, για να κινούν το σύστημα συνδέσμων που περιγράφηκε πιο πάνω, έτσι ώστε τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) να παλινδρομούν, εκτελώντας κίνηση σε δύο χρόνους. Ο πρώτος χρόνος είναι μεταξύ των χρονικών στιγμών αναφοράς  $t_1$  και  $t_2$  και ο δεύτερος χρόνος μεταξύ των  $t_2$  και  $t_3$ .

Κατά τη χρονική στιγμή  $t_1$  η βαλβίδα (46) βρίσκεται κλειστή στην κάτω ακραία θέση της (down), ενώ το δάχτυλο (48) και η βαλβίδα (50) στην άνω ακραία θέση τους (up), όπως φαίνεται στο σχήμα 4-3(β). Κατά το χρονικό διάστημα  $t_2-t_1$ , καθώς τα έγκεντρα (30), (32), (34) και (36) περιστρέφονται, οι βαλβίδες (46) και (50) παραμένουν στις σταθερά σε αυτές τις θέσεις, ενώ τα δάχτυλα (48) και (52) αρχίζουν να κινούνται. Συγκεκριμένα, το δάχτυλο (48) κινείται προς τα κάτω στην κατεύθυνση που δείχνει το βέλος (68), έχοντας ξεκινήσει από την άνω ακραία θέση (up) ή επίπεδο (b) και κινείται προς την κάτω ακραία θέση (down) ή επίπεδο (c). Στο σχήμα 4-3(β) διακρίνεται η κίνησή του μέσω της καμπύλης (49), όπου το δάχτυλο έχει φτάσει στην κάτω ακραία θέση του (down) χωρίς να έχει φράξει το τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού. Στη χρονική στιγμή  $t_2$ , η βαλβίδα (46) είναι οριακά στην κάτω ακραία θέση της (down), η βαλβίδα (50) είναι οριακά στην άνω ακραία θέση της (up) και το δάχτυλο (48) έχει φθάσει στην κάτω ακραία θέση του (70). Στον ίδιο χρόνο το δάχτυλο (52), το οποίο ξεκίνησε τη χρονική στιγμή  $t_1$  από την κάτω ακραία θέση του (down) ή επίπεδο (c), έχει μετακινηθεί στην άνω ακραία θέση (74), όπως δείχνει το βέλος (72). Κατά αυτόν τον τρόπο, το δάχτυλο (48), έχοντας μετακινηθεί προς τα κάτω από την άνω ακραία θέση του (up) ή επίπεδο (b) προς την πλάκα (24), προωθεί το ρευστό προς τα δεξιά κατά την κατεύθυνση του βέλους (76). Ταυτόχρονα, το δάχτυλο (52) έχει ξεκινήσει να κινείται προς τα πάνω, ξεκινώντας από την κάτω ακραία θέση του (down), όπως φαίνεται από την καμπύλη κίνησής του (53), η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 4-3(β) μεταξύ των σημείων  $t_1$  και  $t_2$ .



(α)



(β)

**Σχήμα 4-3.** (α) Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας. (β) Γραφική παράσταση των θέσεων των εμβόλων με το χρόνο λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας για δύο περιόδους. Διακρίνεται η κίνηση των εμβόλων (46), (48), (50) και (52) μέσω των καμπυλών (47), (49), (51) και (53) αντίστοιχα, [Hyman & Moubayd, 1993].

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

Καθώς η ημιπερίοδος ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή  $t_2$ , το «μεγάλο» δάχτυλο (48) και το «μικρό» δάχτυλο (52) έχουν αλλάξει κατακόρυφες θέσεις. Επίσης τη χρονική στιγμή  $t_2$  οι βαλβίδες (46) και (50) αλλάζουν θέσεις. Η βαλβίδα (46) ανέρχεται προς την άνω ακραία θέση της (up) ή επίπεδο (c) και η βαλβίδα (50) κατέρχεται προς την κάτω ακραία θέση της (down) ή επίπεδο (d). Επειδή η βαλβίδα (50) είναι τώρα κλειστή και η βαλβίδα (46) είναι ανοιχτή, το ρευστό αναρροφάται μέσα στο τμήμα (18) του εύκαμπτου αγωγού (16) όπως δείχνει το βέλος εισόδου (78) στο σχήμα 4-3(α). Η παροχή ρευστού μέσα στην είσοδο του τμήματος (18) του εύκαμπτου αγωγού είναι διπλάσια της παροχής εξόδου, αφού το δάχτυλο (48) εμβολίζει δυο φορές περισσότερο ρευστό από ότι το δάχτυλο (52). Στη συνέχεια, ενώ το δάχτυλο (48) ανέρχεται προς την άνω ακραία θέση του μεταξύ των χρονικών στιγμών  $t_2$  και  $t_3$ , το δάχτυλο (52) κατέρχεται από το επίπεδο (b) στο επίπεδο (c), όπως φαίνεται στο σχήμα 4-3(α). Η κίνηση αυτή επιφέρει μία καθαρή μονάδα όγκου ρευστού, εγχυόμενη προς την έξοδο του εύκαμπτου αγωγού (16), κατά τη φορά του βέλους εξόδου (76).

Αυτή η κίνηση συνεχίζεται μέχρι τη χρονική στιγμή  $t_3$ , στην οποία μία περίοδος έχει συμπληρωθεί. Τη χρονική στιγμή  $t_3$  οι βαλβίδες (46) και (50) επιστρέφουν πάλι, έτσι ώστε η βαλβίδα (46) να είναι ξανά στην κάτω ακραία θέση της (down) και η βαλβίδα (50) να είναι ξανά στην άνω ακραία θέση της (up). Δηλαδή οι βαλβίδες (46) και (50) βρίσκονται ουσιαστικά στις θέσεις που ήταν τη χρονική στιγμή  $t_1$ , καθώς επίσης και ολόκληρο το σύστημα είναι στην ίδια κατάσταση που ήταν στη χρονική στιγμή  $t_1$ . Κατά το χρονικό διάστημα  $t_2-t_3$  επαναλαμβάνεται ξανά ο κύκλος λειτουργίας σε μία δεύτερη περίοδο.

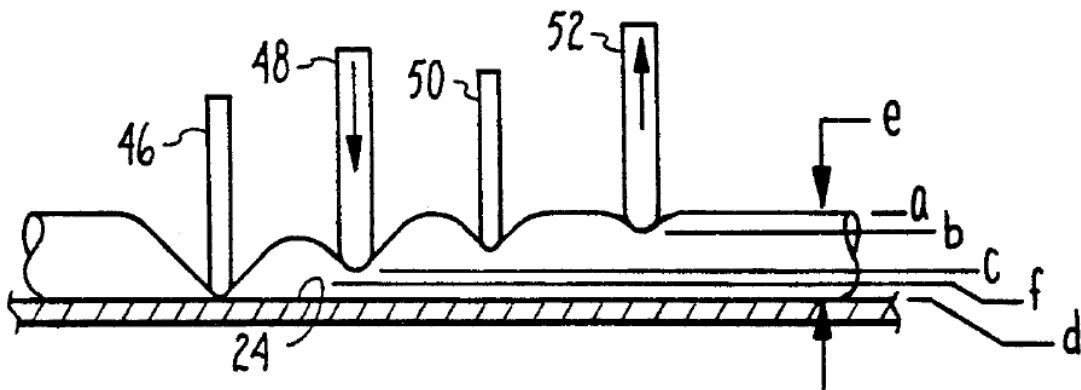
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ταχύτητα με την οποία τα δάχτυλα (48) και (52) κινούνται προς τον εύκαμπτο αγωγό κατά τη διάρκεια μίας περιόδου, δεν είναι σταθερή ακόμη και σε ιδανικές συνθήκες. Καθώς ο εύκαμπτος αγωγός αρχίζει να συμπιέζεται, ίσες μετατοπίσεις επιφέρουν εμβολισμό όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων ρευστού. Με άλλα λόγια, η γραμμική παλινδρομική κίνηση του δάχτυλου προς τον εύκαμπτο αγωγό, καθώς αυτός προοδευτικά συμπιέζεται περισσότερο, επιφέρει σταδιακά ροή ρευστού διαμέσου του παραμορφωμένου εύκαμπτου αγωγού με σχετικά μεγάλη ταχύτητα προς τα έξω. Για να διευκρινιστεί αυτό καλύτερα, ο ιδανικός σχεδιασμός των δάχτυλων (48) και (52) είναι τέτοιος ώστε η ταχύτητα κάθε δάχτυλου, όταν κινείται προς τον εύκαμπτο αγωγό, πρέπει σχετικά να αυξάνεται και καθώς προοδευτικά ο εύκαμπτος αγωγός παραμορφώνεται περισσότερο να ελαττώνεται. Το πλεονέκτημα μίας τέτοιας κίνησης είναι η επίτευξη, όσο το δυνατό, σταθερής παροχής ρευστού προκαλούμενη από τη συμπιεστική δράση των αντίστοιχων δάχτυλων.

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

φράσσουν (συνθλίβουν) εντελώς τον εύκαμπτο αγωγό, ώστε να παράγουν ανεπιθύμητα αποτελέσματα καταπόνησης.

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

Τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) επανέρχονται στις αντίστοιχες άνω ακραίες θέσεις τους από τη δύναμη που ασκείται λόγω ανάταξης του γεμάτου με ρευστό ελαστικού αγωγού. Ανεπιθύμητες μειώσεις της παροχής, διαμέσου του εύκαμπτου αγωγού (16), μπορούν να προκληθούν, αν η δύναμη λόγω ανάταξης του εύκαμπτου αγωγού (16) δεν είναι αρκετή και αποτύχει να μετατοπίσει οποιοδήποτε από τα έμβολα (46), (48), (50) ή (52) στην αντίστοιχη άνω ακραία θέση του. Αυτό μπορεί να συμβεί για παράδειγμα, όταν το υλικό του τμήματος (18) του εύκαμπτου αγωγού υποστεί ουσιαστική κόπωση κατά τη διάρκεια παρατεταμένης περιόδου χρήσης. Είναι απαραίτητο, ωστόσο, τα έμβολα (46), (48), (50) και (52) να ανέρχονται πλήρως στην άνω ακραία θέση τους, ώστε να πληρώνεται το τμήμα του εύκαμπτου αγωγού κάτω από τα έμβολα (48) και (50) πάντα με την ίδια ποσότητα ρευστού και κατά συνέπεια η συσκευή να μπορεί να διανέμει το ρευστό με τον επιθυμητό ρυθμό έγχυσης.



**Σχήμα 4-4.** Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας μίας παραλλαγής της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας, όπου τα δάχτυλα (48) και (52) είναι του ίδιου μεγέθους, [Hyman & Moubayd, 1993].

Τελικά, στο σχήμα 4-4 απεικονίζεται σχηματικά παραλλαγή της συγκεκριμένης δίχρονης περισταλτικής αντλίας, στην οποία τα δάχτυλα (48) και (52) είναι του ίδιου μεγέθους. Οι συνδεδεμένοι αποστάτες (62), (σχήμα 4-2), ωστόσο, είναι διατεταγμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε τα δάχτυλα (48) και (52), όντας του ίδιου μεγέθους, να κινούνται σε διαδρομές διαφορετικού μήκους. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-4, ενώ η κατακόρυφη διαδρομή της παλινδρομικής κίνησης του δάχτυλου (52) είναι μεταξύ των επιπέδων (b) και (c), η κατακόρυφη διαδρομή της παλινδρομικής κίνησης του δάχτυλου (48) είναι μεταξύ των επιπέδων (b) και (f). Η απόσταση μεταξύ (b) και (f) είναι μεγαλύτερη και συνεπώς το μήκος διαδρομής της είναι μεγαλύτερο. Εξασφαλίζοντας ότι αυτή η διαδρομή έχει ολοκληρωθεί κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού διαστήματος, το δάχτυλο (48) εκτοπίζει προφανώς περισσότερο ρευστό. Με κατάλληλη επιλογή του μήκους της κατακόρυφης διαδρομής και άρα της αντίστοιχης παραμόρφωσης του εύκαμπτου αγωγού, το μήκος της κατακόρυφης διαδρομής μπορεί να ρυθμιστεί, έτσι ώστε το δάχτυλο (48) να πιέζει τον εύκαμπτο αγωγό (18), εκτοπίζοντας διπλάσιο όγκο ρευστού σε σχέση με τον όγκο ρευστού που εκτοπίζεται από το δάχτυλο (52) και επομένως να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός σταθερός ρυθμός έγχυσης.

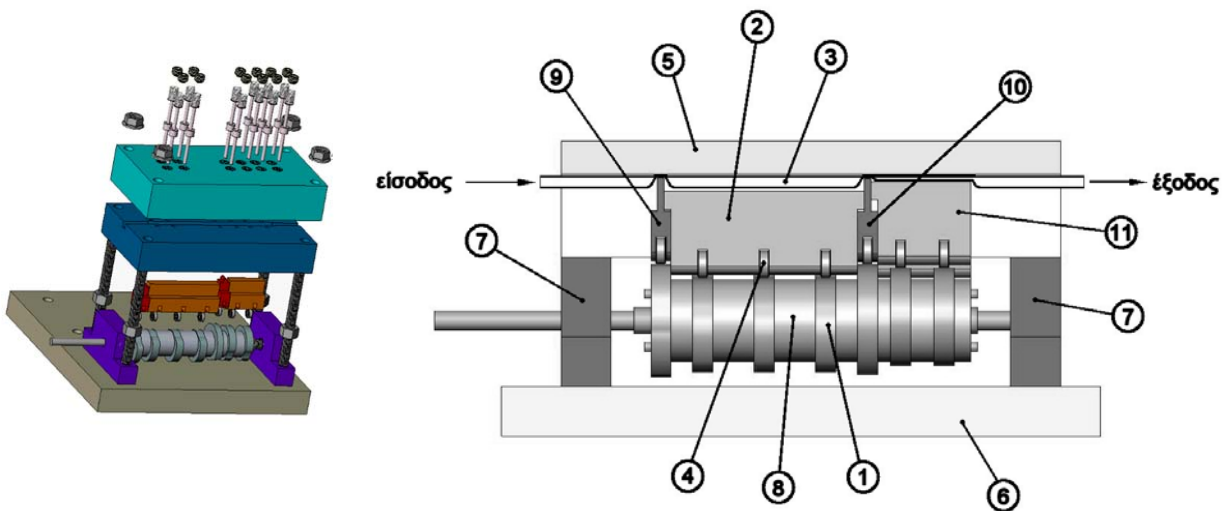
## 4.2 Υπολογισμός έκκεντρων δίχρονης περισταλτικής αντλίας

Η περισταλτική αντλία που μελετάται και σχεδιάζεται, βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας, που αναπτύχθηκε ανωτέρω. Όμως, ο σχεδιασμός του μηχανισμού της βασίζεται στο σχεδιασμό που παρουσιάστηκε κατά την περιγραφή της αρχής λειτουργίας της γραμμικής περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης. Δηλαδή, υπάρχει άμεση επαφή των έκκεντρων με τα δάχτυλα συμπίεσης χωρίς να παρεμβάλλεται κάποιου είδους συνδετικός μηχανισμός οδήγησης.

Βασικό κριτήριο για το υπολογισμό των έκκεντρων του εκκεντροφόρου άξονα είναι ο τρόπος με τον οποίο πρέπει να συμπιέζεται ο εύκαμπτος αγωγός με το χρόνο για κάθε περίοδο διέγερσης. Ο τρόπος αυτός πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη για όσο το δυνατό χρονικά σταθερή παροχή ρευστού, η οποία εξαρτάται από τη χρονική μεταβολή του όγκου εμβολισμού, όπου για σταθερό μήκος διέγερσης του εύκαμπτου αγωγού ανάγεται στη σταθερότητα της μεταβολής της εγκάρσιας διατομής για κάθε χρονικό διάστημα  $\Delta t$  μέσα σε μία περίοδο διέγερσης. Συνεπώς, η επιθυμητή παραμόρφωση της εγκάρσιας διατομής του αγωγού με το χρόνο, καθορίζεται από η γεωμετρία των έκκεντρων όπως αναλύθηκε ανωτέρω. Συνεπώς ισχύει και εδώ η συνάρτηση (2-10) με βάση την οποία υπολογίζεται το έκκεντρο στο γωνιακό διάστημα συμπίεσης και αποσυμπίεσης ( $\varphi_S \leq \varphi \leq \varphi_E$ ), ώστε να συμπιέζεται και αναρροφάται το ρευστό με σταθερή παροχή.

Παρατηρώντας το σχήμα 4-5, στο οποίο φαίνεται η πρόσοψη του μηχανισμού της αντλίας, γίνεται μία περιγραφή ενός κύκλου λειτουργίας και πώς επιτυγχάνεται η άντληση του ρευστού μέσω της κατάλληλης συμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού.





**Σχήμα 4-5.** Μηχανισμός πρότυπης δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας σε στιγμιότυπο με κλειστές τις βαλβίδες ακριβώς πριν την έναρξη του κυρίως εμβολισμού. Διακρίνονται: (1) περιστρεφόμενα έκκεντρα, (2) έμβολο-δάχτυλο συμπίεσης κυρίως εμβολισμού, (3) εύκαμπτος αγωγός, (4) ένσφαιρος τριβέας (ρουλεμάν), (5) επίπεδη βάση συμπίεσης εύκαμπτου αγωγού (καπάκι αντλίας), (6) σταθερή βάση έδρασης της αντλίας, (7) έδρανα στήριξης εκκεντροφόρου άξονα, (8) εκκεντροφόρος άξονας, (9) βαλβίδα εισόδου, (10) βαλβίδα εξόδου, (11) διορθωτικό έμβολο-δάχτυλο συμπίεσης (wrap cycle).

Ξεκινώντας από το στιγμιότυπο του σχήματος 4-5, όπου έχει εγκλωβιστεί μία ποσότητα ρευστού μεταξύ των δύο κλειστών βαλβίδων, ακολουθεί άνοιγμα της βαλβίδας εξόδου με αυτή της εισόδου να διατηρείται κλειστή και το μεγάλο δάχτυλο του κυρίως εμβολισμού να αρχίζει να συμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό, ενώ το μικρό διορθωτικό δάχτυλο να αρχίζει να τον αποσυμπιέζει, προκαλώντας αναρρόφηση με τον ίδιο ρυθμό. Επειδή η πίεση στην αριστερή πλευρά του διορθωτικού δάχτυλου είναι μεγαλύτερη, λόγω συμπίεσης του μεγάλου δάχτυλου, σε σχέση με τη δεξιά πλευρά, όπου ο εύκαμπτος αγωγός παραμένει απαραμόρφωτος, η πλήρωση με ρευστό του εύκαμπτου αγωγού κάτω από την περιοχή του διορθωτικού δάχτυλου γίνεται με το ρευστό που προέρχεται από αριστερά από τον εμβολισμό του μεγάλου δάχτυλου. Επίσης, λόγω του διπλάσιου όγκου εμβολισμού από το μεγάλο δάχτυλο σε σχέση με τον όγκο αναρρόφησης από το μικρό διορθωτικό δάχτυλο με τον ίδιο ρυθμό, η μισή ποσότητα του εμβολιζόμενου ρευστού διατίθεται για την πλήρωση του εύκαμπτου αγωγού κάτω από την περιοχή του διορθωτικού δάχτυλου και η άλλη μισή εγχύεται προς την έξοδο της αντλίας. Αυτό συμβαίνει έως ότου το μεγάλο δάχτυλο συμπιέσει πλήρως τον εύκαμπτο αγωγό και το μικρό τον αποσυμπιέσει πλήρως. Στη συνέχεια ανοίγει η βαλβίδα εισόδου και τα δύο δάχτυλα αρχίζουν να κινούνται ξανά σε αντίθετες κατευθύνσεις με τον ίδιο ρυθμό, ώστε το μεγάλο δάχτυλο να αποσυμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό και συνεπώς να αναρροφά ρευστό από την είσοδο, ενώ το μικρό δάχτυλο να τον συμπιέζει, ώστε να μην σταματά η έγχυση του ρευστού προς την έξοδο της αντλίας. Μόλις γίνει η πλήρωση του εύκαμπτου αγωγού με ρευστό κάτω από το μεγάλο δάχτυλο, τότε κλείνει η βαλβίδα εισόδου, εγκλωβίζοντας μία ποσότητα ρευστού μεταξύ αυτής και της βαλβίδας εξόδου. Κατά αυτόν τον τρόπο έχει συμπληρωθεί μία πλήρης περίοδος έγχυσης ρευστού που αντιστοιχεί σε μία πλήρη περιστροφή του εκκεντροφόρου άξονα. Ο παραπάνω κύκλος ξεκινά πάλι από την αρχή και αντιστοιχεί κάθε φορά σε έγχυση ποσότητας ρευστού, όσος είναι ο όγκος εμβολισμού του μεγάλου δάχτυλου συμπίεσης.

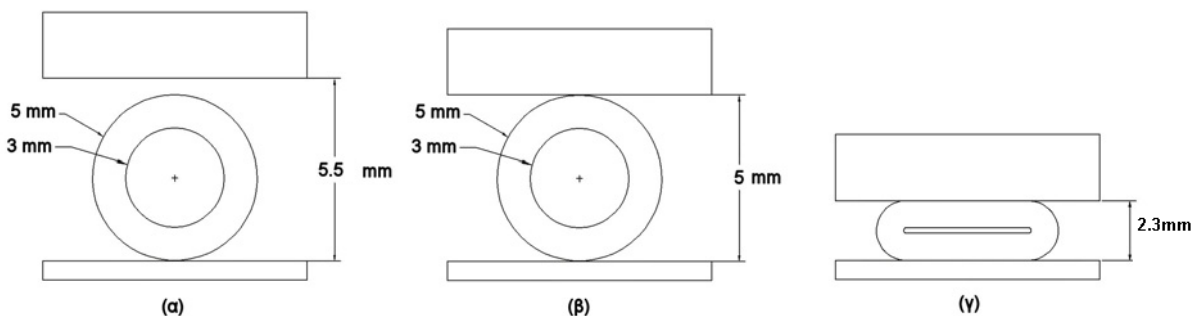
Για να επιτευχθεί όπως περιγράφεται ο ανωτέρω κύκλος λειτουργίας πρέπει να υπάρχει κατάλληλος συγχρονισμός όλων των έκκεντρων και επιπλέον ο υπολογισμός τους

(ιδίως των δάχτυλων) για τα χρονικά διαστήματα συμπίεσης και αποσυμπίεσης να γίνει με βάση τη σχέση (2.10), η οποία λαμβάνει υπόψη τη γραμμική μεταβολή του όγκου εμβολισμού ή αναρροφήσεως με το χρόνο. Για κάθε έκκεντρο εξάγεται κι εδώ η σχεδιαστική του καμπύλη  $r_e(\varphi)$  για διάφορα χαρακτηριστικά διαστήματα γωνιών, στα οποία χωρίζεται ένας πλήρης κύκλος από 0 έως 360°.

Η αρχική ελάχιστη ακτίνα του έκκεντρου  $r_{e0}$ , λαμβάνοντας υπόψη όλα τα έκκεντρα είναι ίση σε μέση τιμή με 11.5 mm.

#### 4.2.1 Υπολογισμός έκκεντρου μεγάλου εμβόλου

Το μεγάλο έμβολο πρέπει να συμπιέζει, όπως αναφέρθηκε, τον εύκαμπτο αγωγό για 180° διάστημα από την απαράμορφωτη θέση εξωτερικής κυκλικής διαμέτρου  $2Rt+2s=5\text{mm}$  στην μέγιστα συμπίεσμένη  $b_{\min}+2s=2.3\text{mm}$ , [σχήμα 4-6(β) & (γ)]. Συνεπώς, εκτελείται διαδρομή του εμβόλου 2.7 mm ικανή να συμπίεσει τον εύκαμπτο αγωγό σχεδόν πλήρως, αφήνοντας διάκενο  $b_{\min}=0.3\text{ mm}$ , ώστε να μην καταπονείται ισχυρά ο σωλήνας και φθείρεται. Επιπλέον πέραν της φθοράς, το διάκενο αυτό είναι απαραίτητο, ώστε να μη λειτουργεί σα βαλβίδα το μεγάλο δάχτυλο με πλήρη έμφραξη σε τόσο μεγάλο μήκος του εύκαμπτου αγωγού, διότι τότε προκαλείται εσφαλμένη πρόσδοση παροχής λόγω εμβολισμού από τη σύνθλιψη των τοιχωμάτων του σωλήνα (φαινόμενο πηγής υψηλής αντίστασης κατά Kenner), (high resistance flow source), [Kenner et al, 2000] και [Kenner, 2004]. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα βέβαια στα δύο σημεία όπου συμπιέζουν ισχυρά οι βαλβίδες, αλλά είναι πολύ εξασθενημένο καθότι η συμπίεση δε γίνεται για σημαντικό μήκος του εύκαμπτου αγωγού αλλά σημειακά.



Σχήμα 4-6

Στη συνέχεια το μεγάλο αυτό δάχτυλο παραμένει ακίνητο στην κατώτερη θέση για διάστημα 30°, δίνοντας τον απαραίτητο χρόνο στη βαλβίδα εξόδου να φράξει τον εύκαμπτο αγωγό, ενώ η βαλβίδα εισόδου παραμένει κλειστή, ώστε να υπάρχει κοινό διάστημα στο οποίο φράσσουν και οι δύο βαλβίδες για την εξασφάλιση της εξάλειψης του φαινομένου της οπισθοροής. Στη συνέχεια η βαλβίδα εισόδου αποφράσσει τον εύκαμπτο αγωγό τάχιστα και το μεγάλο έμβολο ανεβαίνει μέσα σε 39° περίπου κατά 0.5 mm παραπάνω από τα 5 mm που απαιτούνται για να αποσυμπίεστεί πλήρως ο εύκαμπτος αγωγός, δίνοντάς του κατά αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη ευχέρεια στην ανάταξή του, [σχήμα 4-6(α)]. Το μεγάλο δάχτυλο παραμένει σε αυτή τη θέση για 94° περίπου και αρχίζει κατόπιν και κινείται προς το σωλήνα διανύοντας απόσταση 0.5 mm για 17° περίπου μέχρι να έρθει πάλι σε επαφή με τον πληρωμένο με ρευστό εύκαμπτο αγωγό οριακά πριν αρχίσει ξανά η συμπίεση για το διάστημα των 180°.

Εκφράζοντας με μαθηματικά τη συνάρτηση μεταβολής του έκκεντρου του μεγάλου εμβόλου-δάχτυλου προκύπτουν οι συναρτήσεις  $r_e(\varphi)$  ορισμένες στα αντίστοιχα γωνιακά διαστήματα:

## Συνάρτηση ακτίνας έκκεντρου μεγάλου εμβόλου

Συμπίεση- έναρξης:

$$r_\varepsilon = (r_o + R_\rho) \cos \phi - \sqrt{R_\rho^2 - (r_o + R_\rho)^2 \sin^2 \phi} \quad (4.1)$$

$$(r_o=12\text{mm} , R_\rho=4\text{mm})$$

$$0^\circ \leq \phi \leq 8.40784443^\circ ,$$

$$0 \leq \phi \leq 0.146744394\text{rad}$$

Συμπίεση:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s (r_E - r_o)^2 - \phi_E (r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2] \phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$(r_o=12\text{mm} , r_s=12.583538597\text{mm} , r_E=14.7\text{mm} )$$

$$8.40784443^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$$

$$0.146744394\text{rad} \leq \phi \leq \pi$$

Μέγιστη συμπίεση:

$$r_\varepsilon=14.7\text{mm}$$

$$180^\circ \leq \phi \leq 210^\circ$$

$$\pi \leq \phi \leq 7\pi/6$$

Απόφραξη-απότομη αποσυμπίεση:

$$r_\varepsilon = \frac{r_o}{\cos(\phi_E - \phi)}$$

$$(r_o=11.5\text{mm} , r_{\max}=14.7\text{mm} , \phi_E = \phi_s + \cos^{-1} \frac{r_o}{r_{\max}} )$$

$$210^\circ \leq \phi \leq 248.5271648^\circ \approx 249^\circ$$

$$7\pi/6 \leq \phi \leq 83\pi/60$$

Μέγιστη αποσυμπίεση:

$$r_E=11.5\text{mm}$$

$$249^\circ \approx 248.5271648^\circ \leq \phi \leq 343.4021579^\circ \approx 343^\circ$$

$$83\pi/60 \leq \phi \leq 343\pi/180$$

Μετακίνηση πριν την έναρξη της συμπίεσης:

$$r_\varepsilon = \frac{r_o}{\cos(\phi - \phi_s)}$$

$$343^\circ \approx 343.4021579^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$$

$$343\pi/180 \leq \phi \leq 2\pi$$

$$(r_o=11.5\text{mm}, r_{\max}=12\text{mm}, \phi_s = \phi_E - \cos^{-1} \frac{r_o}{r_{\max}})$$

Η συνάρτηση έναρξης συμπίεσης είναι εκεί που φωλιάζει το ρουλεμάν, προκύπτει αν εγγράψουμε στη συνάρτηση συμπίεσης τη συνάρτηση του κύκλου του ρουλεμάν όπου περνάει από το σημείο (12,0) και έχει ακτίνα 4 mm. Συνεπώς το κέντρο του κύκλου είναι (16,0) και έχει εξίσωση:

$$(x-16)^2 + y^2 = 4^2 \Rightarrow (x-16)^2 = 4^2 - y^2, \text{ όπου μετατρέποντας σε πολικές συντεταγμένες θα έχουμε:}$$

$$(r\cos\theta - 16)^2 = 4^2 - r^2\sin^2\theta \Rightarrow r^2\cos^2\theta + 16^2 - 2 \cdot 16 \cdot r\cos\theta = 4^2 - r^2\sin^2\theta \Rightarrow$$

$$r^2(\sin^2\theta + \cos^2\theta) - 32r\cos\theta + 240 = 0 \Rightarrow r^2 - 32\cos\theta r + 240 = 0 \Rightarrow$$

$$\Delta = 32^2\cos^2\theta - 4 \cdot 240 = 1024\cos^2\theta - 960 = 64(16\cos^2\theta - 15)$$

$$r_{1,2} = \frac{32\cos\theta \pm 8\sqrt{16\cos^2\theta - 15}}{2}, \text{ οπότε καταλήγουμε:}$$

$$r = 16\cos\theta - 4\sqrt{16\cos^2\theta - 15} \quad (4.1)$$

(η ρίζα '+' δεν δίνει τομή με την καμπύλη του έκκεντρου συμπίεσης)

Από τη γενική σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

για  $r_s=r_o=12\text{mm}$ ,  $r_E=14.7\text{mm}$  και  $\phi_s=0 \equiv 0$   $\phi_E=180 \equiv \pi$  καταλήγουμε στην:

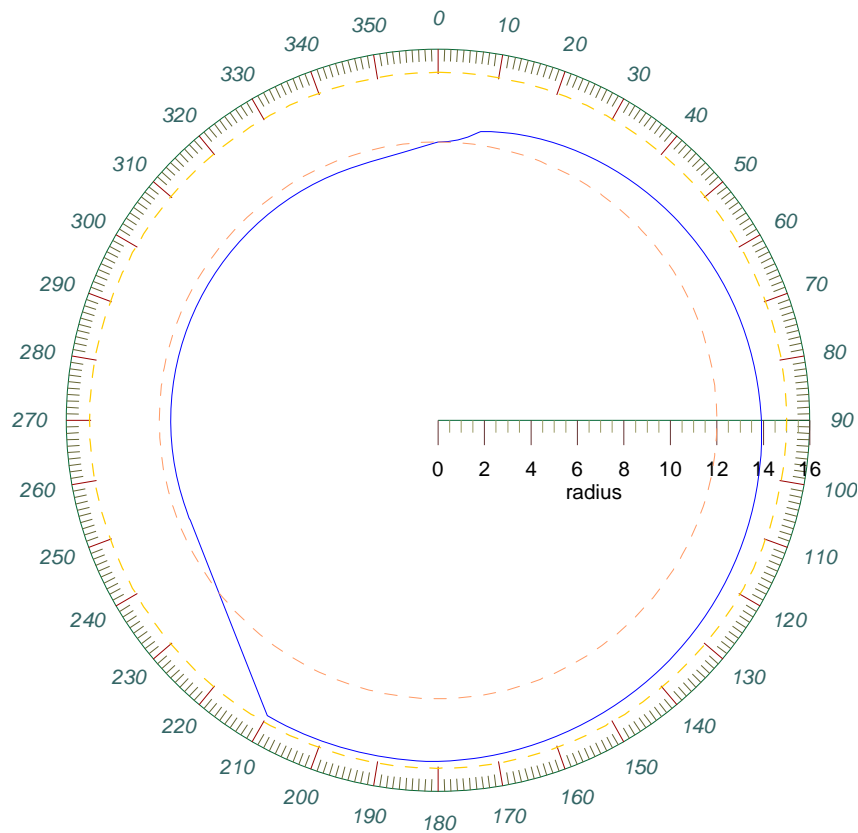
$$r_\varepsilon = 12 + (14.7 - 12) \sqrt{\frac{(0 - \theta)}{(0 - \pi)}} \Rightarrow r = 12 + 2.7 \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (4.2)$$

Από (4.1) και (4.2) έχουμε:

$$12 + 2.7 \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} = 16\cos\theta - 4\sqrt{16\cos^2\theta - 15}$$

Από όπου με αριθμητική επίλυση καταλήγουμε:  
 $\theta=0.146744394\text{rad}=8.407834443^\circ$ , οπότε και  $r=12.583538597\text{mm}$

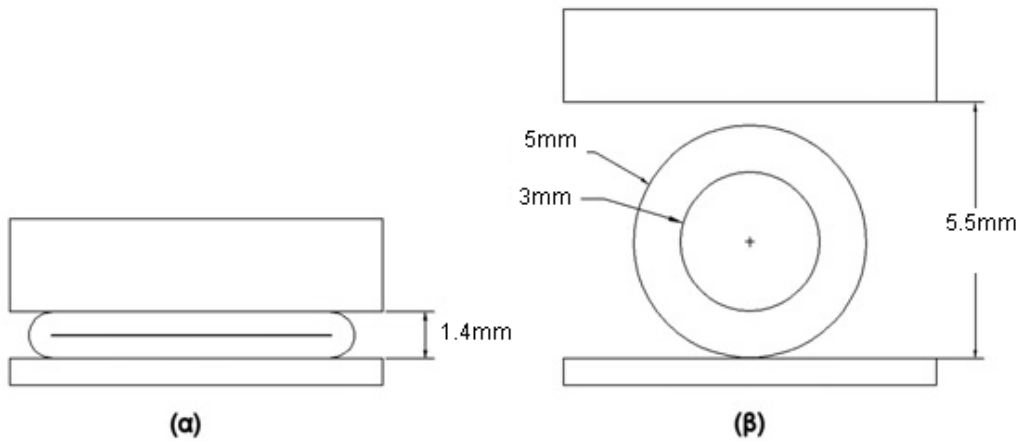
Το έκκεντρο του μεγάλου εμβόλου σε πολικό σύστημα συντεταγμένων απεικονίζεται ως εξής:



Σχήμα 4-7 Διάγραμμα απεικόνισης μεγάλου εμβόλου – δάχτυλου σε πολικές συντεταγμένες

#### 4.2.2 Υπολογισμός έκκεντρου βαλβίδας εισόδου

Η κίνηση της βαλβίδας εισόδου εναρμονίζεται κυρίως με την κίνηση του μεγάλου εμβόλου-δάχτυλου. Συνεπώς, η βαλβίδα πρέπει να φράσσει τον εύκαμπτο αγωγό όταν το μεγάλο δάχτυλο συμπιέζει, ώστε το ρευστό να εμβολίζεται μόνο προς την έξοδο της αντλίας, ενώ πρέπει να αποφράσσει τον εύκαμπτο αγωγό, αφήνοντάς τον ανοικτό, όταν το μεγάλο δάχτυλο αποσυμπιέζει, αναρροφώντας ρευστό από την είσοδο της αντλίας. Για το διάστημα των πρώτων  $210^\circ$  η βαλβίδα εισόδου φράσσει πλήρως τον εύκαμπτο αγωγό (deep occlusion), όπως φαίνεται στο σχήμα 4-8(α) και σε τέτοιο ισχυρό βαθμό, ώστε το υλικό του τοιχώματος του σωλήνα να συμπιέζεται κατά 160%.



**Σχήμα 4-8.** Διαδοχικές θέσεις συμπίεσης-αποσυμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού από τη βαλβίδα εισόδου. **(α)** Κατώτατη θέση βαλβίδας εισόδου (πλήρης έμφραξη εύκαμπτου αγωγού-deep occlusion). **(β)** Ανώτατη θέση βαλβίδας εισόδου (απαραμόρφωτος εύκαμπτος αγωγός).

Επομένως, τα δύο πάχη του εύκαμπτου αγωγού  $s+s=2s$  από 2 mm γίνονται  $2s=1.4\text{mm}$ . Η ισχυρή αυτή συμπίεση συμβαίνει για να διασφαλιστεί η απουσία οπισθοροής, λόγω αύξησης της πίεσης ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας της αντλίας. Μέσα σε αυτό το διάστημα των  $210^\circ$  συμβαίνει ο πλήρης εμβολισμός του ρευστού από το μεγάλο δάχτυλο ( $180^\circ$ ) και επιπλέον δίνεται ο απαραίτητος χρόνος στη βαλβίδα εξόδου να φράξει τον εύκαμπτο αγωγό, για την εξασφάλιση της εξάλειψης του φαινομένου της οπισθοροής.

Στη συνέχεια η βαλβίδα εισόδου αποφράσσει τον εύκαμπτο αγωγό περίπου ταυτόχρονα με την αποσυμπίεση του μεγάλου δάχτυλου. Αυτό συμβαίνει τάχιστα σε διάστημα  $42^\circ$  περίπου μέχρι της πλήρους αποσυμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού, αλλά και περαιτέρω μετατόπισης περίπου κατά 0.5 mm πλέον των 5 mm που απαιτούνται για να αποσυμπιεστεί πλήρως ο εύκαμπτος αγωγός, δίνοντάς του κατά αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη ευχέρεια στην ανάταξή του, [σχήμα 4-8(β)]. Σε αυτή την ανώτερη θέση παραμένει για  $65^\circ$  περίπου, επιτρέποντας την είσοδο του ρευστού στο χώρο ανάταξης του εύκαμπτου αγωγού κάτω από το μεγάλο δάχτυλο. Στις επόμενες  $43^\circ$  η βαλβίδα εισόδου κινείται αντίθετα με προηγουμένως μέχρι την κατώτερη θέση της, προκαλώντας τη πλήρη έμφραξη του εύκαμπτου αγωγού (deep occlusion) και παραμένει έτσι μέχρι τη συμπλήρωση ενός πλήρη κύκλου περιστροφής.

Εκφράζοντας με μαθηματικά τη συνάρτηση μεταβολής του έκκεντρου της βαλβίδας εισόδου προκύπτουν οι συναρτήσεις  $r_e(\varphi)$  ορισμένες στα αντίστοιχα γωνιακά διαστήματα:

### Συνάρτηση ακτίνας έκκεντρου 1<sup>ης</sup> βαλβίδας (εισόδου):

Πλήρης έμφραξη:

$$r_E = 15.6\text{mm}$$

$$0^\circ \leq \varphi \leq 210^\circ$$

$$0 \leq \varphi \leq 7\pi/6$$

Απόφραξη-απότομη αποσυμπίεση:

$$r_\varepsilon = \frac{r_o}{\cos(\phi_E - \phi)}$$

$$(r_o=11.5\text{mm} , r_{\max}=15.6\text{mm} , \phi_E = \phi_S + \cos^{-1} \frac{r_o}{r_{\max}} )$$

$$210^\circ \leq \varphi \leq 252.5082978^\circ \approx 252^\circ$$

$$7\pi/6 \leq \varphi \leq 7\pi/5$$

Πλήρης απόφραξη:

$$r_E=11.5\text{mm}$$

$$252.5082978^\circ \leq \varphi \leq 317.4917022^\circ \approx 317^\circ$$

$$7\pi/5 \leq \varphi \leq 317\pi/180$$

Μετακίνηση προς την πλήρη έμφραξη:

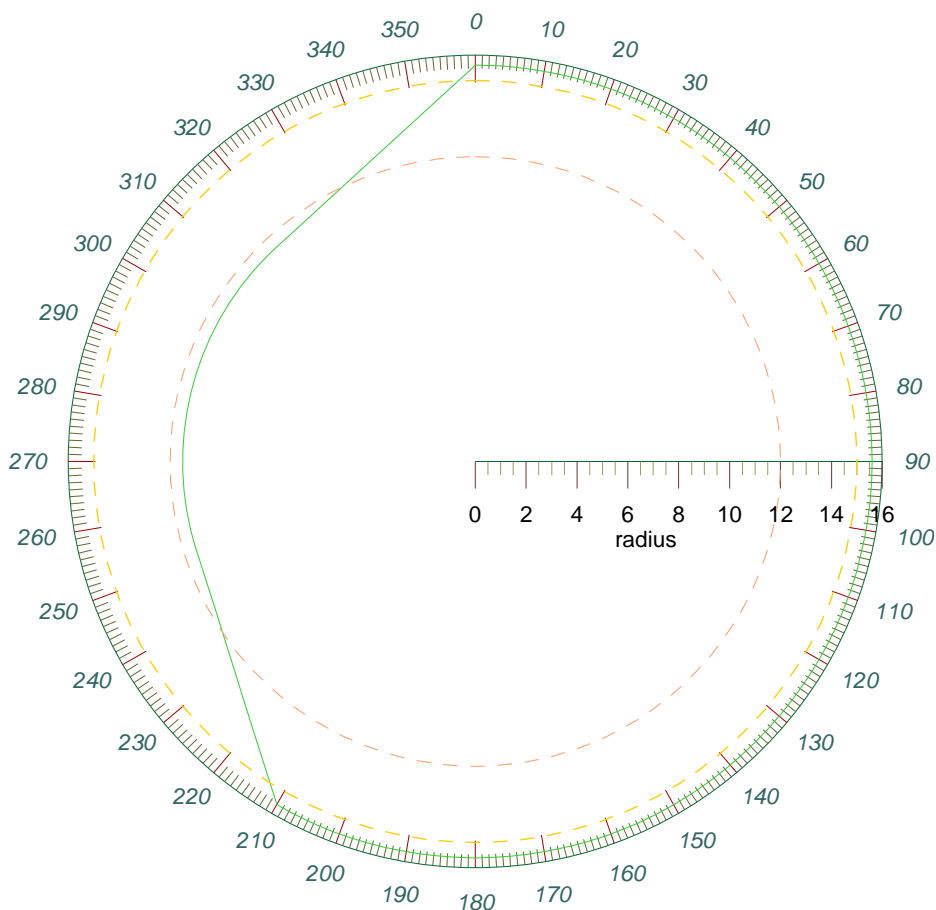
$$r_\varepsilon = \frac{r_o}{\cos(\phi - \phi_s)}$$

$$317.4917022^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$

$$317\pi/180 \leq \varphi \leq 2\pi$$

$$(r_o=11.5\text{mm} , r_{\max}=15.6\text{mm} , \phi_S = \phi_E - \cos^{-1} \frac{r_o}{r_{\max}})$$

$$\phi_S = \phi_E - \cos^{-1} \frac{11.5}{15.6}$$



Σχήμα 4-9. Διάγραμμα απεικόνισης βαλβίδας εισόδου σε πολικές συντεταγμένες

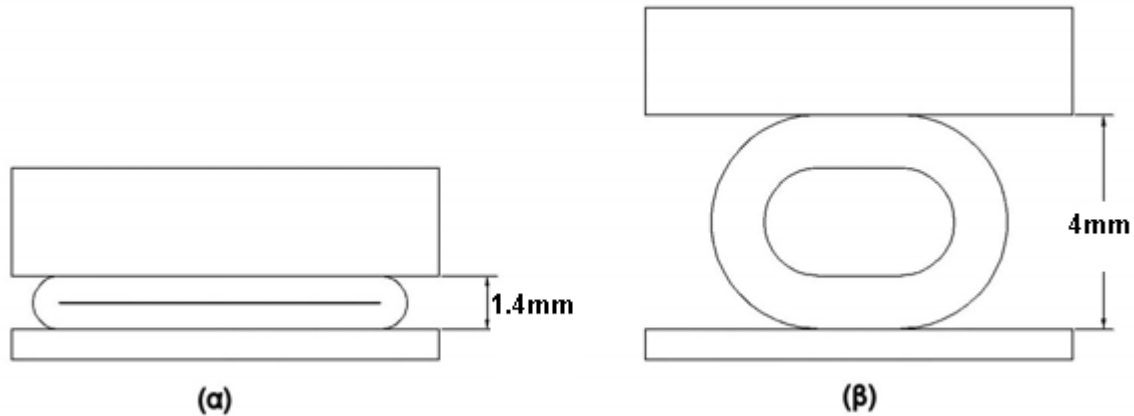
#### 4.2.3 Υπολογισμός έκκεντρου βαλβίδας εξόδου

Η κίνηση της βαλβίδας εξόδου εναρμονίζεται και με τις δύο κινήσεις, τόσο του μεγάλου εμβόλου-δάχτυλου, όσο και του μικρού (διορθωτικού). Συνεπώς, η βαλβίδα εξόδου πρέπει να φράσσει τον εύκαμπτο αγωγό όταν το μικρό δάχτυλο συμπιέζει και το μεγάλο αποσυμπιέζει, ώστε ρευστό ταυτόχρονα να εμβολίζεται προς την έξοδο της αντλίας και να αναρροφάται από την είσοδό της. Επίσης, η βαλβίδα εξόδου πρέπει να αποφράσσει τον εύκαμπτο αγωγό, αφήνοντάς τον ανοικτό, όταν το μεγάλο δάχτυλο συμπιέζει και το μικρό αποσυμπιέζει, ώστε να διατηρείται η συνεχής και σταθερή έγχυση του ρευστού από τον εμβολισμό του μεγάλου δάχτυλου.

Η κίνηση της βαλβίδας εξόδου κατά τη θεωρούμενη αρχή μέτρησης των γωνιών  $\phi$  και μετά είναι τέτοια που να αποφράζει ομαλά τον εύκαμπτο αγωγό σύμφωνα με την αρχή της γραμμικής έγχυσης και να οδεύει προς την μέγιστη απόφραξη σε διάστημα περίπου  $90^\circ$ . Στην αρχή αυτού του διαστήματος έχει ξεκινήσει η συμπίεση του μεγάλου δάχτυλου και η αποσυμπίεση του μικρού. Η μέγιστη απόφραξη του εύκαμπτου αγωγού από τη βαλβίδα εξόδου συμβαίνει με μετακίνησή της κατά 2.6 mm από τη θέση πλήρους έμφραξης (deep occlusion), (σχήμα 4-9). Συνεπώς, η βαλβίδα εξόδου δεν αποσυμπιέζει πλήρως τον εύκαμπτο αγωγό αλλά τον διατηρεί ελαφρώς παραμορφωμένο. Ένας λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι και πλήρης αποσυμπίεση να συμβεί από τη μεριά της βαλβίδας εξόδου ο εύκαμπτος αγωγός δεν ανατάσσεται πλήρως, αφού πάντα εκατέρωθεν της βαλβίδας υφίσταται συμπίεση, είτε από το μικρό, είτε από το μεγάλο δάχτυλο με επακόλουθη συνέπεια τη μερική παραμόρφωση του εύκαμπτου αγωγού στο γειτονικό σημείο ακριβώς κάτω από τη βαλβίδα. Εκτός αυτού, η ελαφρά συμπίεση του εύκαμπτου αγωγού μόνιμα σε ένα σημείο κάνει δυσκολότερη την



οριζόντια μετατόπισή του κατά τον άξονα συμμετρίας του καθώς διεγείρεται επαναλαμβανόμενα σε διαδοχικά του μήκη. Τέλος, η βαλβίδα εξόδου έχει να διανύσει μικρότερη απόσταση για την έμφραξη και απόφραξη του εύκαμπτου αγωγού, γεγονός που επιταχύνει τη δράση της, αφήνοντας περισσότερο χρόνο στη δράση των δάχτυλων εμβολισμού αυξάνοντας τη διάρκεια της έγχυσης μέσα σε ένα κύκλο διέγερσης.



**Σχήμα4-10.** Διαδοχικές θέσεις συμπίεσης-αποσυμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού από τη βαλβίδα εξόδου. **(α)** Κατώτατη θέση βαλβίδας εξόδου (πλήρης έμφραξη εύκαμπτου αγωγού-deep occlusion). **(β)** Ανώτατη θέση βαλβίδας εξόδου.

Στη φάση μέγιστης απόφραξης η βαλβίδα εξόδου παραμένει για διάστημα περίπου  $9^\circ$ , [σχήμα 4-9(β)], όπου ακολουθεί τη γεωμετρία του έκκεντρου που είναι τέτοια ώστε να φωλιάσει επακριβώς μέσα σε αυτό ο μικροσκοπικός ένσφαιρος τριβέας και να επέλθει η μέγιστη αποσυμπίεση του εύκαμπτου αγωγού που θα είναι 4mm. Στη συνέχεια μετακινείται προς την κατώτατη θέση πάλι με γραμμικό τρόπο μέχρι της πλήρους έμφραξης του εύκαμπτου αγωγού (deep occlusion), μέσα σε διάστημα περίπου  $85^\circ$  συμμετρικό ως προς της απόφραξης. (Οι γεωμετρικές καμπύλες συμπίεσης και αποσυμπίεσης του εκκέντρου ενώ θα ήταν  $90^\circ$  έκαστη, εντούτοις διακόπτονται με την εισαγωγή ενός κύκλου ακτίνας ίσης με του ένσφαιρος τριβέας που θα αρμόσει σε αυτόν. Εάν απουσιάσει ο κύκλος αυτός, τότε θα σχηματίζεται μία απότομη εσοχή, ακατάλληλη να δεχτεί τον κυλινδρικό φορέα, με αποτέλεσμα να μην έχουμε ούτε τη σωστή έδραση, ούτε την επιθυμητή απόσταση των 13mm, ίδια περίπτωση με τα έκκεντρα της αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης.) Σε αυτό το διάστημα ολοκληρώνεται, τόσο η συμπίεση του μεγάλου, όσο και η παράλληλη αποσυμπίεση του μικρού εμβόλου-δάχτυλου, όπως αποδεικνύεται παρακάτω. Στη συνέχεια η βαλβίδα εξόδου φράσσει για  $120^\circ$  πλήρως τον εύκαμπτο αγωγό (deep occlusion), όπως φαίνεται στο σχήμα 4-9(α) και σε τέτοιο ισχυρό βαθμό, ώστε το υλικό του τοιχώματος του σωλήνα να συμπιέζεται κατά 160%, όπως συμβαίνει και με τη βαλβίδα εισόδου. Πριν και μετά την πλήρη έμφραξη έχουμε για  $30^\circ$  αντίστοιχα γραμμική γεωμετρία του έκκεντρου όπου συμπιέζει και αποσυμπιέζει το τοίχωμα του αγωγού γραμμικά. Μέσα σε αυτό το διάστημα των  $120^\circ$  συμβαίνει ο πλήρης εμβολισμός του ρευστού από το μικρό δάχτυλο και επιπλέον δίνεται ο απαραίτητος χρόνος στη βαλβίδα εισόδου να φράξει τον εύκαμπτο αγωγό. Τελικά, η βαλβίδα εξόδου ξεκινά να αποσυμπιέζει τον εύκαμπτο αγωγό  $30^\circ$  πριν την ολοκλήρωση ενός κύκλου περιστροφής και να τον αποφράσει με το ξεκίνημα της συμπίεσης του μεγάλου δάχτυλου και αποσυμπίεσης του μικρού με τον επόμενο κύκλο.

Εκφράζοντας με μαθηματικά τη συνάρτηση μεταβολής του έκκεντρου της βαλβίδας εξόδου προκύπτουν οι συναρτήσεις  $r_e(\varphi)$  ορισμένες στα αντίστοιχα γωνιακά διαστήματα:

### Συνάρτηση ακτίνας έκκεντρου 2<sup>ης</sup> βαλβίδας (εξόδου):

Απόφραξη:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$(r_o=12\text{mm} , r_s=15 , r_E=13.188738171\text{mm} )$$

$$0^\circ \leq \varphi \leq 85.35264256^\circ \equiv 85^\circ$$

$$0 \leq \varphi \leq 17\pi/36$$

Μέγιστη απόφραξη:

$$r_\varepsilon = (r_o + y_o + R_\rho) \cos \phi - \sqrt{R_\rho^2 - (r_o + y_o + R_\rho)^2 \sin^2 \phi} \quad (4.3)$$

$$(r_o=12\text{mm} , y_o=1\text{mm: προσυμπίεση, } R_\rho=4\text{mm})$$

$$85.35264256^\circ \leq \varphi \leq 94.64735744^\circ \equiv 95^\circ$$

$$17\pi/36 \leq \varphi \leq 19\pi/36$$

Έμφραξη:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$(r_o=12\text{mm} , r_s=13.188738171\text{mm} , r_E=15\text{mm} )$$

$$94.64735744^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

$$19\pi/36 \leq \varphi \leq \pi$$

Συμπίεση πάχους:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$(r_o=12\text{mm} , r_s=15\text{mm} , r_E=15.6\text{mm} )$$

$$180^\circ \leq \varphi \leq 210^\circ$$

$$\pi \leq \varphi \leq 7\pi/6$$

Πλήρης έμφραξη:

$$r_E=15.6\text{mm}$$

$$210^\circ \leq \varphi \leq 330^\circ$$

$$7\pi/6 \leq \varphi \leq 11\pi/6$$

### Αποσυμπίεση πάχους:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$(r_o=12\text{mm}, r_s=15.6\text{mm}, r_E=15\text{mm})$$

$$330^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$

$$11\pi/6 \leq \varphi \leq 2\pi$$

### **Απόδειξη συνάρτησης μέγιστης απόφραξης(4.3)**

Η συνάρτηση μέγιστης απόφραξης είναι εκεί που φωλιάζει το ρουλεμάν, προκύπτει αν εγγράψουμε στη συνάρτηση απόφραξης, που είναι η γενική σχέση μεταβολής ακτίνας του έκκεντρου, τη συνάρτηση του κύκλου του ρουλεμάν όπου περνάει από το σημείο (0,13) και έχει ακτίνα 4 mm. Συνεπώς το κέντρο του κύκλου είναι (0,17) και έχει εξίσωση:

$x^2 + (y-17)^2 = 4^2 \Rightarrow (y-17)^2 = 4^2 - x^2$ , όπου μετατρέποντας σε πολικές συντεταγμένες θα έχουμε:

$$(r \sin \theta - 17)^2 = 4^2 - r^2 \cos^2 \theta \quad \Rightarrow \quad r^2 \sin^2 \theta + 17^2 - 2 \cdot 17 \cdot r \sin \theta = 4^2 - r^2 \cos^2 \theta \quad \Rightarrow$$

$$r^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) - 34 r \sin \theta + 273 = 0 \quad \Rightarrow \quad r^2 - 34 \sin \theta r + 273 = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\Delta = 34^2 \sin^2 \theta - 4 \cdot 273 = 4[(17^2 (\sin^2 \theta - 1) + 16)]$$

$$r_{1,2} = \frac{34 \sin \theta \pm 2 \sqrt{17^2 (\sin^2 \theta - 1) + 16}}{2} \quad \Rightarrow \quad r = 17 \sin \theta \pm \sqrt{17^2 (\sin^2 \theta - 1) + 16} \quad \Rightarrow$$

ή

$$r = 17 \sin \theta - \sqrt{16 - 17^2 \cos^2 \theta} \quad (4.3)$$

η ρίζα '+' δεν δίνει τομή με την καμπύλη του έκκεντρου συμπίεσης

$$\text{Η } r = (r_o + y_o + R_p) \sin \theta - \sqrt{(r_o + y_o + R_p)^2 (\sin^2 \theta - 1) + R_p^2} \quad (\text{γενική σχέση})$$

Από τη γενική σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου για  $r_s=r_2=14.32379001\text{mm}$  καταλήγουμε στην:

$$r_\varepsilon = 12 + \sqrt{\frac{0 \cdot (13-12)^2 - \pi/2 \cdot (15-12)^2 + [(15-12)^2 - (13-12)^2] \cdot \phi}{(0 - \pi/2)}}$$

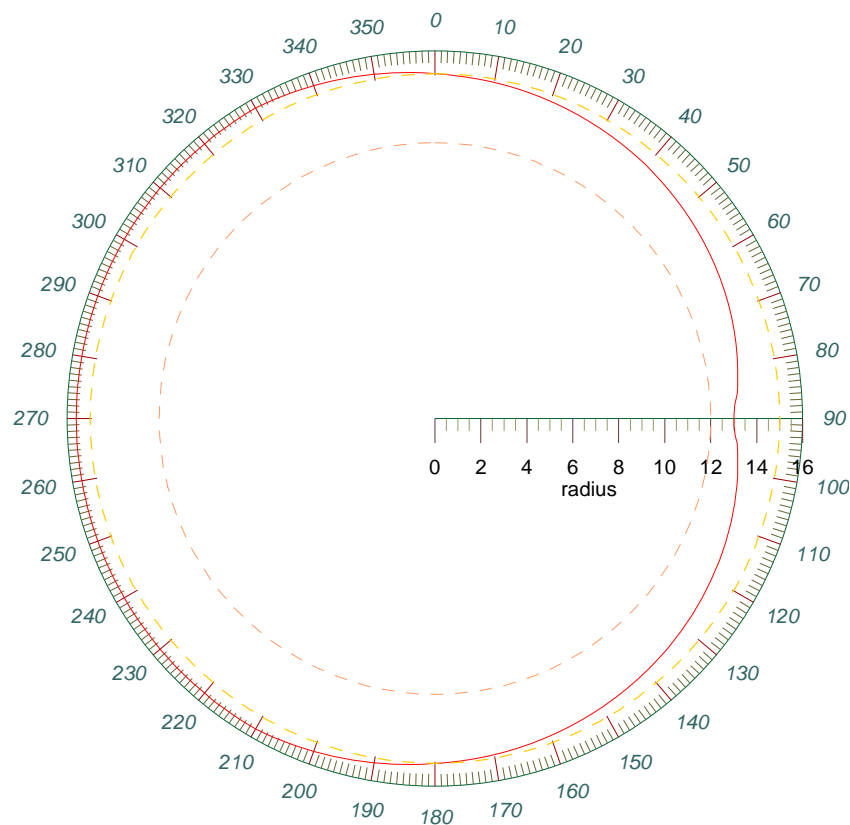
$$\Rightarrow r = 12 + \sqrt{9 - 16 \frac{\phi}{\pi}} \quad (4.4)$$

$$(4.3), (4.4) \Rightarrow 12 + \sqrt{9 - 16 \frac{\phi}{\pi}} = 17 \sin \theta - \sqrt{16 - 17^2 \cos^2 \theta}$$

Από όπου με αριθμητική επίλυση καταλήγουμε:

$$\theta = 1.489684638 \text{ rad} = 85.35264256^\circ, \text{ οπότε και } r = 13.188738171 \text{ mm}$$

**Σχήμα 4-11.** Διαγραμματική απεικόνιση έκκεντρου βαλβίδας εξόδου σε πολικές συντεταγμένες



#### 4.2.4 Υπολογισμός έκκεντρου μικρού διορθωτικού εμβόλου

Για να επιτύχουμε σταθερή παροχή ρευστού και να μη διακόπτεται η ροή ή έχουμε φαινόμενα οπισθοροής, όπως μπορεί να συμβεί στο διάστημα που φράσσει πλήρως η βαλβίδα εξόδου τον εύκαμπτο αγωγό και μετά κινείται προς την ανώτερη θέση για να αναρροφήσει ρευστό, πραγματοποιείται ισολογισμός όγκων όπως και στην περίπτωση του 7<sup>ου</sup> διορθωτικού εμβόλου της αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης, για να υπολογιστούν ακριβώς οι διαστάσεις του εκκέντρου του διορθωτικού εμβόλου.

Το μήκος του μεγάλου εμβόλου- δακτύλου, επιλέγεται να είναι 60 mm και το μήκος του μικρού να είναι το μισό, 30 mm. Η επιλογή αυτού του σχετικά μεγάλου μήκους δάχτυλων γίνεται ώστε να εμβολίζεται και συνεπώς να εγχύεται σημαντική σε μέγεθος ποσότητα ρευστού, η οποία είναι εύκολα μετρήσιμη. Το μήκος της κάθε βαλβίδας λαμβάνεται 8mm

Εύρεση χαρακτηριστικών όγκων:

Ο συνολικός όγκος κάτω από το 2<sup>ο</sup> έμβολο σε πλήρη ανάταξη του αγωγού είναι:

$$V_2 = A_o L \quad \Rightarrow \quad V_2 = \pi R^2 L \quad \Rightarrow \quad V_2 = \pi 1.5^2 30 \quad \Rightarrow \quad V_2 = 67.5\pi \text{ mm}^3$$

Ο συνολικός όγκος κάτω από το 1<sup>ο</sup> έμβολο σε πλήρη ανάταξη του αγωγού είναι:

$$V_1 = A_o 2L = 2V_2 \quad \Rightarrow \quad V_1 = 135\pi \text{ mm}^3$$

Εναπομείνουν όγκος κάτω από το 1<sup>ο</sup> έμβολο (μέγιστη συμπίεση του αγωγού):

$$V_{\min} = A_{\min} 2L \quad \Rightarrow \quad V_{\min} = \left[ \pi R^2 - \frac{\pi (r_{\varepsilon \max} - r_o)^2}{4} \right] \cdot 2L \quad \Rightarrow$$

$$V_{\min} = \left[ \pi 1.5^2 - \frac{\pi (14.7 - 12)^2}{4} \right] \cdot 2 \cdot 30 \quad \Rightarrow \quad V_{\min} = 25.65\pi \text{ mm}^3$$

Μέγιστος όγκος εμβολισμού 1<sup>ου</sup> εμβόλου συμπιέζοντας το σωλήνα στο μέγιστο:

$$V_{1b} = V_1 - V_{\min} \quad \Rightarrow \quad V_{1b} = 135\pi - 25.65\pi \quad \Rightarrow \quad V_{1b} = 109.35\pi \text{ mm}^3$$

Συνολικός όγκος κάτω από τη 2<sup>η</sup> βαλβίδα (εξόδου):

$$V_3 = V_{\beta 2} = A_{\beta 2} L_1 \quad \Rightarrow \quad V_{\beta 2} = \left[ \pi R^2 - \frac{\pi (r_{\varepsilon o} - r_o)^2}{4} \right] \cdot L_1 \quad \Rightarrow$$

$$V_{\beta 2} = \left[ \pi 1.5^2 - \frac{\pi (13 - 12)^2}{4} \right] \cdot 8 \quad \Rightarrow \quad V_{\beta 2} = 16\pi \text{ mm}^3$$

Θα μελετήσουμε την έγχυση στη διάρκεια μίας περιόδου, ξεκινώντας από τη χρονική στιγμή  $t=0$  που η έξοδος είναι κλειστή και πάει μόλις να ανοίξει την επόμενη χρονική στιγμή, και η διάταξη των εμβόλων έχει ως εξής:



Σχήμα 4-12

$$\text{Σε } t=T \text{ θα έχει εγχυθεί: } V_{ολ} = V_{1b} + V_{\beta 2} - V_{\beta 2} - V_2 + V_2 = 109.35\pi \text{ mm}^3$$

Και η παροχή θα είναι:

$$Q = V_{1b}/T$$

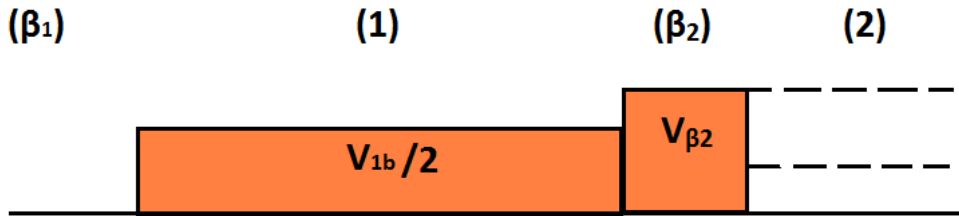
$$\dot{\eta} \quad \} \Rightarrow V_{2b} = V_{1b}/2 \Rightarrow V_{2b} = 54.675\pi \text{ mm}^3$$

$$Q = V_{2b}/T/2$$

Λαμβάνουμε τα εξής 4 χρονικά διαστήματα μέσα σε μία περίοδο  $T$  και μελετάμε την έγχυση μέσα σε αυτά:

1. Από  $0 \leq t \leq T/4$  που αντιστοιχεί σε  $\rightarrow 0 \equiv 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \equiv \pi/2$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 4-13

Στο διάστημα αυτό, θα έχει εγχυθεί:

$$V_{T/4} = (V_{1b} - V_{1b}/2) - V_{\beta 2} = 54.675\pi - 16\pi = 38.675\pi \text{ mm}^3$$

Από το μικρό έμβολο έχουμε αναρρόφηση:  $V = -V_m + V_{T/4}$

Τελική έγχυση:  $\bar{V} = V_{T/4} - V$

2. Από  $T/4 \leq t \leq T/2$  που αντιστοιχεί σε  $\rightarrow \pi/2 \equiv 90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \equiv \pi$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 4-14

Στο διάστημα αυτό, θα έχει εγχυθεί:

$$V_{T/2} = V_{1b}/2 + V_{\beta 2} = 54.675\pi + 16\pi = 70.675\pi \text{ mm}^3$$

3. Από  $T/2 \leq t \leq 7T/12$  που αντιστοιχεί σε  $\rightarrow \pi \equiv 180^\circ \leq \varphi \leq 210^\circ \equiv 7\pi/6$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 4-15

Στο διάστημα αυτό από το μεγάλο έμβολο, θα έχει εγχυθεί:

$$\bar{V}_{7T/12} = 0$$

4. Από  $7T/12 \leq t \leq T$  που αντιστοιχεί σε  $\rightarrow 7\pi/6 \equiv 210^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ \equiv 2\pi$

Η διάταξη των εμβόλων θα έχει ως εξής:



Σχήμα 4-16

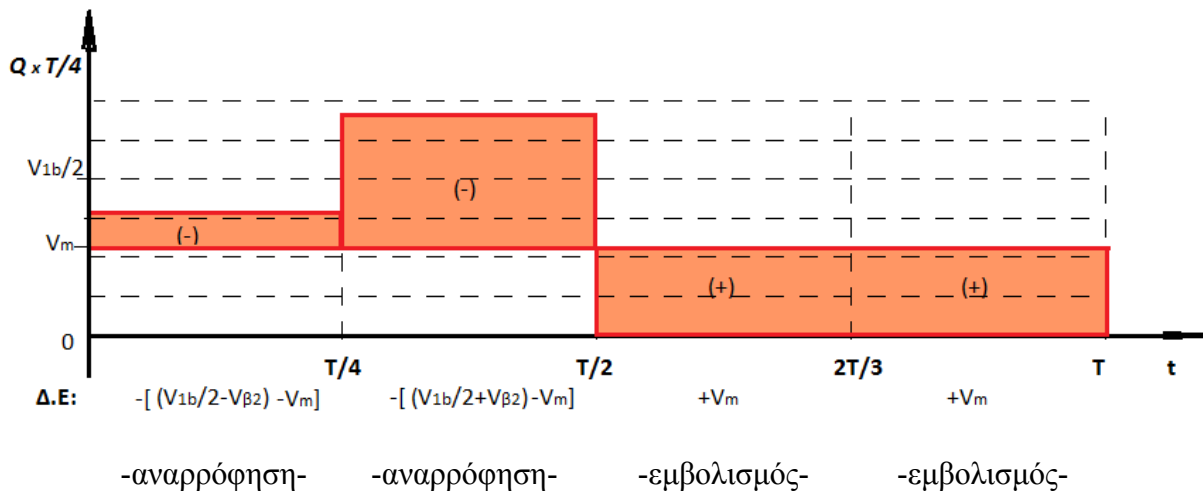
Στο διάστημα αυτό από το μεγάλο έμβολο, θα έχει εγχυθεί:

$$\bar{V}_T = 0$$

Ροή πίσω στη δεξαμενή:  $V_i^{(')} = V_{1b}$

Για να βρούμε την έγχυση που πρέπει να διασφαλίζει το διορθωτικό έμβολο, ώστε να επιτυγχάνεται η ίδια παροχή σε κάθε στιγμή της περιόδου, κάνουμε το διάγραμμα έγχυσης ρευστού από το μεγάλο έμβολο και τη βαλβίδα εξόδου, προς το χρόνο  $t$ .

**Σχήμα 4-17**  
Διάγραμμα έγχυσης ανά T/4 από M. έμβολο και B. εξόδου



Εδώ η γωνία  $\varphi$  του εκκεντροφόρου ταυτίζεται με τη γωνία  $\varphi_t$  των χρόνων.

$$V_{1b} = 109.35\pi \text{ mm}^3$$

$$V_{1b}/2 = 54.675\pi \text{ mm}^3$$

$$V_{1b}/4 = 27.3375\pi \text{ mm}^3 = V_m$$

$$V_{\beta 2} = 16\pi \text{ mm}^3$$

1. Από  $0 \leq t \leq T/4 \rightarrow 0 \equiv 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \equiv \pi/2$

Από το διορθωτικό έμβολο (4) έχουμε αναρρόφηση:

$$V_4 = -V_m + V_{T/4} = -27.3375\pi + 38.675\pi = 11.3375\pi \text{ mm}^3$$

Οπότε η τελική έγχυση είναι:

$$\bar{V} = V_{T/4} - V_4 = 38.675\pi - 11.3375\pi = 27.3375\pi = V_m$$

2. Από  $T/4 \leq t \leq T/2 \rightarrow \pi/2 \equiv 90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \equiv \pi$

Από το διορθωτικό έμβολο (4) έχουμε αναρρόφηση:

$$V_4 = -V_m + V_{T/2} = -27.3375\pi + 70.675\pi = 43.3375\pi \text{ mm}^3$$

Οπότε η τελική έγχυση είναι:

$$V = V_{T/2} - V_4 = 70.675\pi - 43.3375\pi = 27.3375\pi = V_m$$



3. Από  $T/2 \leq t \leq 7T/12 \rightarrow \pi \equiv 180^\circ \leq \varphi \leq 210^\circ \equiv 7\pi/6$

Από το διορθωτικό έμβολο (4) έχουμε εμβολισμό:

$$V_4 = V_m/2 = 27.3375\pi / 2 = 13.66875\pi \text{ mm}^3$$

Οπότε η τελική έγχυση είναι:

$$\bar{V} = V_{7T/12} + V_4 = 0 + 13.66875\pi = V_m/2$$

4. Από  $7T/12 \leq t \leq T \rightarrow 7\pi/6 \equiv 210^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ \equiv 2\pi$

Από το διορθωτικό έμβολο (4) έχουμε εμβολισμό:

$$V_4 = 3V_m/2 = 3 \cdot 27.3375\pi / 2 = 41.00625\pi \text{ mm}^3$$

Οπότε η τελική έγχυση είναι:

$$\bar{V} = V_T + V_4 = 0 + 41.00625\pi = 3V_m/2$$

### ΠΙΝΑΚΑΣ 3

|                   | $0 \rightarrow T/4$               | $T/4 \rightarrow T/2$             | $T/2 \rightarrow 3T/4$ | $3T/4 \rightarrow T$ |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------|
| Βαλβίδα εισόδου   | 0                                 | 0                                 | 0                      | 0                    |
| Μεγάλο έμβολο     | $V_{1b}/2$                        | $V_{1b}/2$                        | 0                      | 0                    |
| Βαλβίδα εξόδου    | $-V_{\beta 2}$                    | $V_{\beta 2}$                     | 0                      | 0                    |
| $\Sigma$          | $V_{1b}/2 - V_{\beta 2}$          | $V_{1b}/2 + V_{\beta 2}$          | 0                      | 0                    |
| Διορθωτικό έμβολο | $-(V_{1b}/2 - V_{\beta 2} - V_m)$ | $-(V_{1b}/2 + V_{\beta 2} - V_m)$ | $V_m$                  | $V_m$                |
|                   | αναρρόφηση                        | αναρρόφηση                        | εμβολισμός             | εμβολισμός           |

Έστω  $V_m (\times T/4)$  είναι η παροχή που πρέπει να εγχέεται ανά πάσα χρονική στιγμή της περιόδου από την έξοδο της αντλίας. Συνεπώς για τα δύο τελευταία διαστήματα της περιόδου όπου δεν έχουμε έγχυση, αναλαμβάνει το 2ο (διορθωτικό) έμβολο να εγχέει την παροχή αυτή. Αυτή η παροχή πρέπει να είναι η μέση τιμή της συνολικής ποσότητας έγχυσης στην περίοδο. Δηλαδή:

$$V_m = \frac{V_{o\lambda}}{4} \Rightarrow V_m = \frac{V_{1b}}{4} \Rightarrow V_m = 27.3375\pi \text{ mm}^3 = 85.88328917 \text{ mm}^3$$

Επίσης είναι σημαντικό τα διαστήματα εμβολισμού και αναρρόφησης να είναι ξεχωριστά διαδοχικά, δηλαδή όλες οι αναρροφήσεις του διορθωτικού εμβόλου να είναι σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα χωρίς να παρεμβάλλονται εμβολισμοί και αντίστοιχα το ίδιο να ισχύει για τους εμβολισμούς. Με αυτό τον τρόπο θα επιτυγχάνεται ισότητα μεταξύ των όγκων εμβολισμού και αναρρόφησης καθώς και των αντίστοιχων χρονικών διαστημάτων τους ( $T/2$ ), το οποίο αποτελεί συνθήκη αναγκαία για τη διατήρηση της σταθερότητας της παροχής με το χρόνο, αφού ότι εμβολίζεται θα πρέπει να αναρροφάται από το 2ο διορθωτικό έμβολο, το οποίο παίζει μόνο διορθωτικό ρόλο και όχι αντλητικό. Επομένως:

$$V_{4(\text{ΕΜΒΟΛΑ})} = V_{4(\text{ΑΝΑΡΡΟΦ})} \Rightarrow V_m + V_m = (V_{1b}/2 - V_{\beta 2} - V_m) + (V_{1b}/2 + V_{\beta 2} - V_m) \Rightarrow$$

$$4 V_m = V_{1b} \Rightarrow V_m = V_{1b}/4 \quad \text{όμοια με την παραπάνω τιμή.}$$

#### Εύρεση συνάρτησης ακτίνας διορθωτικού εμβόλου (4):

Παρατηρώντας το διάγραμμα έγχυσης όγκων θα πρέπει το διορθωτικό έμβολο να εμβολίζει ρευστό μέχρι την επίτευξη του όγκου  $V_m$  από τη χρονική στιγμή  $t=T/2$  ( $\varphi=180^\circ$ ) και μετά. Συνεπώς:

► Στο διάστημα από  $T/2 \leq t \leq T \rightarrow \pi \equiv 180^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ \equiv 2\pi$  θα εμβολίζεται ποσότητα :

$$V_{b4} = 2V_m$$

$$\text{Για } t=T/2 \rightarrow r_o = 12\text{mm} \quad A_{4(T/2)} = \pi R^2$$

$$\text{Για } t=T \rightarrow \varphi = 360^\circ \equiv 2\pi \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{4(T)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{4(T)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα συμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα είναι:

$$A_{b4} = A_{4(T/2)} - A_{4(T)} = \pi R^2 - \pi R^2 + \frac{\pi(r_{4(T)} - r_o)^2}{4} = \frac{\pi(r_{4(T)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b4}L = \frac{\pi L(r_{4(T)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$V_{b4} = 2V_m = \frac{\pi L(r_{4(T)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$r_{4(T)} = r_o + 2\sqrt{\frac{2V_m}{\pi L}} \Rightarrow r_{4(T)} = 12 + 2\sqrt{\frac{2 \cdot 27.3375\pi}{30\pi}} \Rightarrow$$

$$r_{4(T)} = 14.7\text{mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_s = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}},$$

$$\text{όπου } r_o = r_s = 12, \quad r_{\max} = 14.7$$

$$\varphi_s = \pi \equiv 180^\circ$$

$$\varphi_E = 2\pi \equiv 360^\circ$$

► Στο διάστημα από  $0 \leq t \leq T/4 \rightarrow 0 \equiv 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \equiv \pi/2$  θα αναρροφηθεί ποσότητα ρευστού:

$$V_4 = -V_m + V_{T/4} = -27.3375\pi + 38.675\pi = 11.3375\pi \text{ mm}^3 \quad \text{οπότε:}$$

$$\text{Για } t = 0 \rightarrow r_{4(0)} = 14.7 \text{ mm}, \quad A_{4(T/4)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{4(0)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = T/4 \rightarrow \text{η διατομή θα έχει γίνει} \quad A_{4(T/4)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{4(T/4)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα αποσυμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα θα είναι:

$$A_{b4} = A_{4(T/4)} - A_{4(0)} = -\frac{\pi(r_{4(T/4)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi(r_{4(0)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b4}L = \frac{\pi L}{4} [(r_{4(0)} - r_o)^2 - (r_{4(T/4)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_4 = V_{T/4} - V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{4(0)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{4(T/4)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{4(T/4)} - r_o)^2 = \frac{\pi L}{4} (r_{4(0)} - r_o)^2 - V_4 \Rightarrow$$

$$r_{4(T/4)} = r_o + \sqrt{(r_{4(0)} - r_o)^2 - \frac{4V_4}{\pi L}} \Rightarrow r_{4(T/4)} = 12 + \sqrt{(14.7 - 12)^2 - \frac{4 \cdot 11.3375\pi}{30\pi}}$$

$$\Rightarrow r_{4(T/4)} = 14.40381641 \text{ mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

όπου  $r_o = 12 \text{ mm}$ ,  $r_s = 14.7 \text{ mm}$ ,  $r_E = 14.40381641 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \phi_s &= 0 \equiv 0^\circ \\ \phi_E &= \pi/2 \equiv 90^\circ \end{aligned}$$

► Στο διάστημα από  $T/4 \leq t \leq T/2 \rightarrow \pi/2 \equiv 90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \equiv \pi$   
θα αναρροφηθεί ποσότητα ρευστού  $V_4 = -V_m + V_{T/2} = -27.3375\pi + 70.675\pi = 43.3375\pi \text{ mm}^3$   
οπότε:

$$\text{Για } t = T/4 \rightarrow r_{4(T/4)} = 14.40381641 \text{ mm}, \quad A_{4(T/4)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{4(T/4)} - r_o)^2}{4}$$

$$\text{Για } t = T/2 \text{ η διατομή θα έχει γίνει: } A_{4(T/2)} = \pi R^2 - \frac{\pi(r_{4(T/2)} - r_o)^2}{4}$$

Η διατομή που θα αποσυμπιεστεί στο χρονικό αυτό διάστημα θα είναι:

$$A_{b4} = A_{4(T/2)} - A_{4(T/4)} = -\frac{\pi(r_{4(T/2)} - r_o)^2}{4} + \frac{\pi(r_{4(T/4)} - r_o)^2}{4} \Rightarrow$$

$$A_{b4}L = \frac{\pi L}{4} [(r_{4(T/4)} - r_o)^2 - (r_{4(T/2)} - r_o)^2] \Rightarrow$$

$$V_4 = V_{T/2} - V_m = \frac{\pi L}{4} (r_{4(T/4)} - r_o)^2 - \frac{\pi L}{4} (r_{4(T/2)} - r_o)^2 \Rightarrow$$

$$\frac{\pi L}{4} (r_{4(T/2)} - r_o)^2 = \frac{\pi L}{4} (r_{4(T/4)} - r_o)^2 - V_4 \Rightarrow$$

$$r_{4(T/2)} = r_o + \sqrt{(r_{4(T/4)} - r_o)^2 - \frac{4V_4}{\pi L}} \Rightarrow$$

$$r_{4(T/2)} = 12 + \sqrt{(14.40381641 - 12)^2 - \frac{4 \cdot 43.3375\pi}{30\pi}}$$

$$\Rightarrow r_{4(T/2)} = 12 \text{ mm}$$

Οπότε η ακτίνα του έκκεντρου κάθε χρονική στιγμή σε αυτό το διάστημα θα είναι:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

$$\text{όπου } r_o = 12 \text{ mm}, r_s = 14.40381641 \text{ mm}, r_E = 12 \text{ mm}$$

$$\phi_s = \pi/2 \equiv 90^\circ$$

$$\phi_E = \pi \equiv 180^\circ$$

### Συνάρτηση ακτίνας έκκεντρου διορθωτικού εμβόλου :

1<sup>ο</sup> Διάστημα αποσυμπίεσης:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $r_s=14.7\text{mm}$  ,  $r_E=14.40381641\text{mm}$  )

$0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$

$0 \leq \varphi \leq \pi/2$

2<sup>ο</sup> Διάστημα αποσυμπίεσης:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $r_s=14.40381641\text{mm}$  ,  $r_E=12.782252803\text{mm}$  )

$90^\circ \leq \varphi \leq 170.4690943^\circ \approx 170^\circ$

$\pi/2 \leq \varphi \leq 17\pi/18$

Πλήρης απόφραξη:

$$r_\varepsilon = -(r_o + R_\rho) \cos \phi - \sqrt{R_\rho^2 - (r_o + R_\rho)^2 \sin^2 \phi} \quad (4.5)$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $R_\rho=4\text{mm}$ )

$170.4690943^\circ \leq \varphi \leq 188.4078345^\circ \approx 188^\circ$

$17\pi/18 \leq \varphi \leq 47\pi/45$

Συμπύεση:

$$r_\varepsilon = r_o + \sqrt{\frac{\phi_s(r_E - r_o)^2 - \phi_E(r_s - r_o)^2 + [(r_s - r_o)^2 - (r_E - r_o)^2]\phi}{(\phi_s - \phi_E)}}$$

( $r_o=12\text{mm}$  ,  $r_s=12.583538598\text{mm}$  ,  $r_E=14.7\text{mm}$  )

$188.4078345^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$

$47\pi/45 \leq \varphi \leq 2\pi$

### **Απόδειξη συνάρτησης πλήρους απόφραξης (4.5)**

Ο κύκλος του ρουλεμάν περνάει από το σημείο (-12,0) και έχει ακτίνα 4 mm  
Συνεπώς το κέντρο του κύκλου είναι (-16,0) και έχει εξίσωση:

$(x+16)^2 + y^2 = 4^2 \Rightarrow (x+16)^2 = 4^2 - y^2$  , όπου μετατρέποντας σε πολικές συντεταγμένες θα έχουμε:

$$(r \cos \theta + 16)^2 = 4^2 - r^2 \sin^2 \theta \quad \Rightarrow \quad r^2 \cos^2 \theta + 16^2 + 2 \cdot 16 \cdot r \cos \theta = 4^2 - r^2 \sin^2 \theta \quad \Rightarrow$$

$$r^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) + 32 r \cos \theta + 240 = 0 \quad \Rightarrow \quad r^2 + 32 \cos \theta r + 240 = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\Delta = 32^2 \cos^2 \theta - 4 \cdot 240 = 1024 \cos^2 \theta - 960 = 64(16 \cos^2 \theta - 15)$$

$$r_{1,2} = \frac{-32 \cos \theta \pm 8\sqrt{16 \cos^2 \theta - 15}}{2}$$

$$r = -16 \cos \theta - 4\sqrt{16 \cos^2 \theta - 15} \quad (4.5)$$

η ρίζα '+' δεν δίνει τομή με την καμπύλη του έκκεντρου συμπίεσης

$$\text{Η } r = -(r_o + R_p) \cos \theta - \sqrt{(r_o + R_p)^2 (\cos^2 \theta - 1) + R_p^2} \quad (\text{γενική σχέση})$$

Από τη γενική σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου για  $r_S = r_O = 12 \text{mm}$ ,  $r_E = 14.7 \text{mm}$  και  $\varphi \geq 180^\circ \equiv \pi$  καταλήγουμε στην:

$$r_\varepsilon = 12 + (14.7 - 12) \sqrt{\frac{(\pi - \theta)}{(\pi - 2\pi)}} \Rightarrow r = 12 + 2.7 \sqrt{\frac{\theta - \pi}{\pi}} \quad (4.6)$$

Από (4.5) και (4.6) έχουμε:

$$12 + 2.7 \sqrt{\frac{\theta - \pi}{\pi}} = -16 \cos \theta - 4\sqrt{16 \cos^2 \theta - 15}$$

Από όπου με αριθμητική επίλυση καταλήγουμε:

$$\theta = 3.288337048 \text{rad} = 188.4078345^\circ, \text{ οπότε και } r = 12.583538598 \text{mm}$$

Για  $r_S = r_O = 12 \text{mm}$ ,  $r_E = 14.40381641 \text{mm}$  και  $\varphi \geq 180^\circ \equiv \pi$ :

$$r_\varepsilon = 12 + (14.40381641 - 12) \sqrt{\frac{(\theta - \pi)}{(\pi/2 - \pi)}}$$

$$r_\varepsilon = 12 + 2.40381641 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \theta}{\pi}} \quad (4.7)$$

Από (4.5) και (4.7) έχουμε:

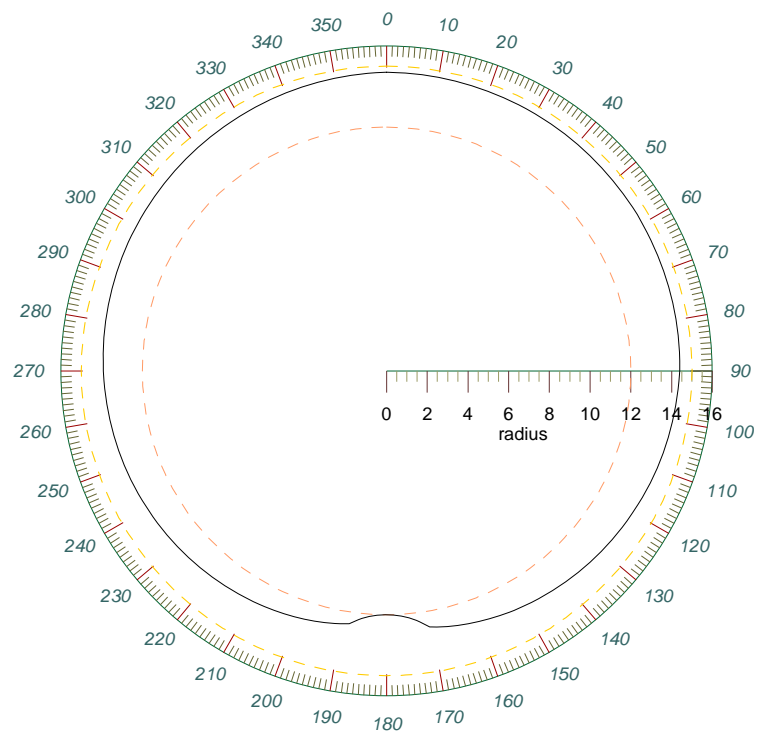
$$12 + 3.399509768 \sqrt{\frac{\pi - \theta}{\pi}} = -16 \cos \theta - 4\sqrt{16 \cos^2 \theta - 15}$$

Από όπου με αριθμητική επίλυση καταλήγουμε:

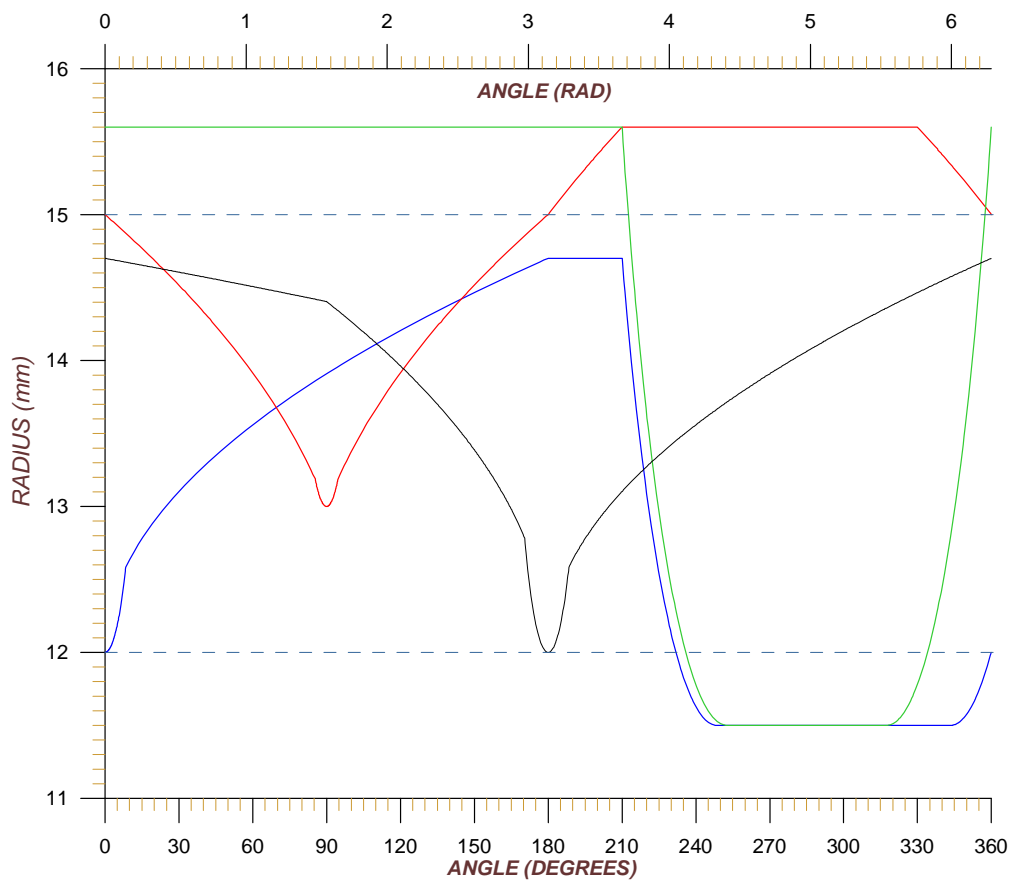
$$\theta = 2.975246968 \text{rad} = 170.4690943^\circ, \text{ οπότε και } r = 12.782252803 \text{mm}$$

Με τη βοήθεια του grapher σχεδιάζεται και το 4<sup>ο</sup> διορθωτικό έμβολο:

Σχήμα 4-18 Διάγραμμα έκεντρου διορθωτικού εμβόλου σε πολικές συντεταγμένες



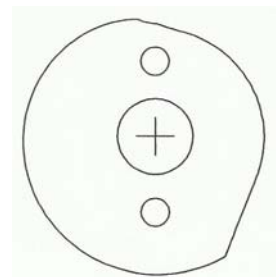
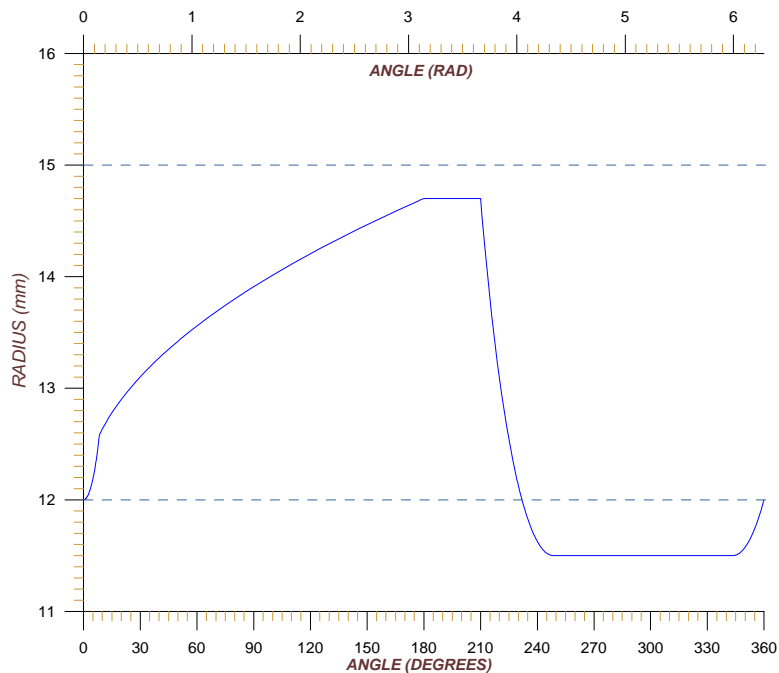
Σχήμα 4-19 Διάγραμμα έκεντρων σε καρτεσιανές συντεταγμένες



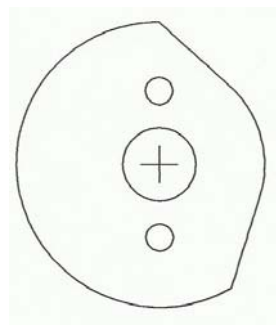
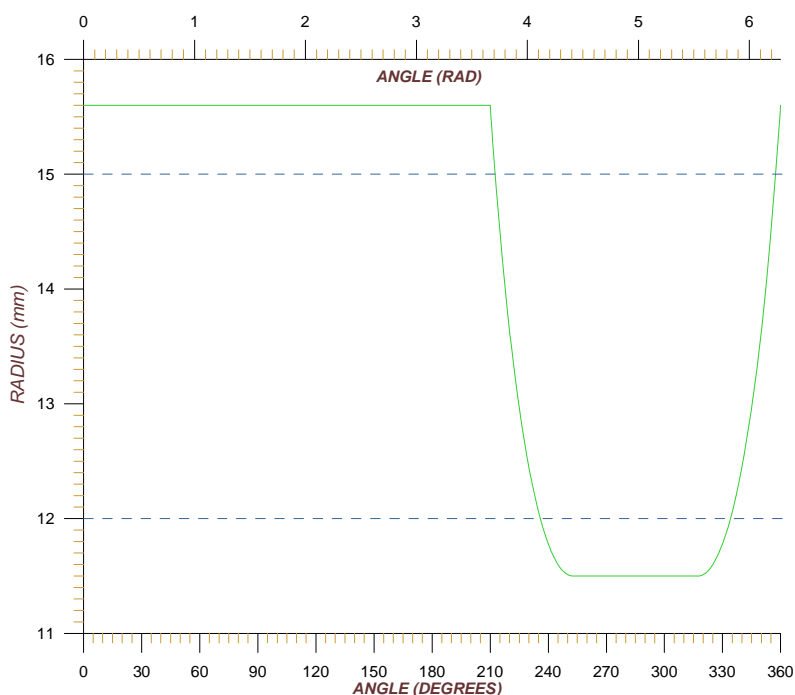
### 4.3 Σχεδιασμός έκκεντρων δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας

Παριστάνοντας γραφικά σε καρτεσιανές συντεταγμένες τις συναρτήσεις  $r_e(\varphi)$  για κάθε έκκεντρο προκύπτουν οι καμπύλες στα παρακάτω διαγράμματα με τη βοήθεια του grapher. Δίπλα σε κάθε σχήμα αντίστοιχα απεικονίζεται και η γεωμετρία των έκκεντρων με τη βοήθεια του Autocad, που προκύπτουν αν εκφραστούν οι ίδιες συναρτήσεις σε πολικές συντεταγμένες.

#### Μεγάλο έμβολο

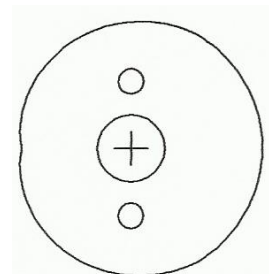
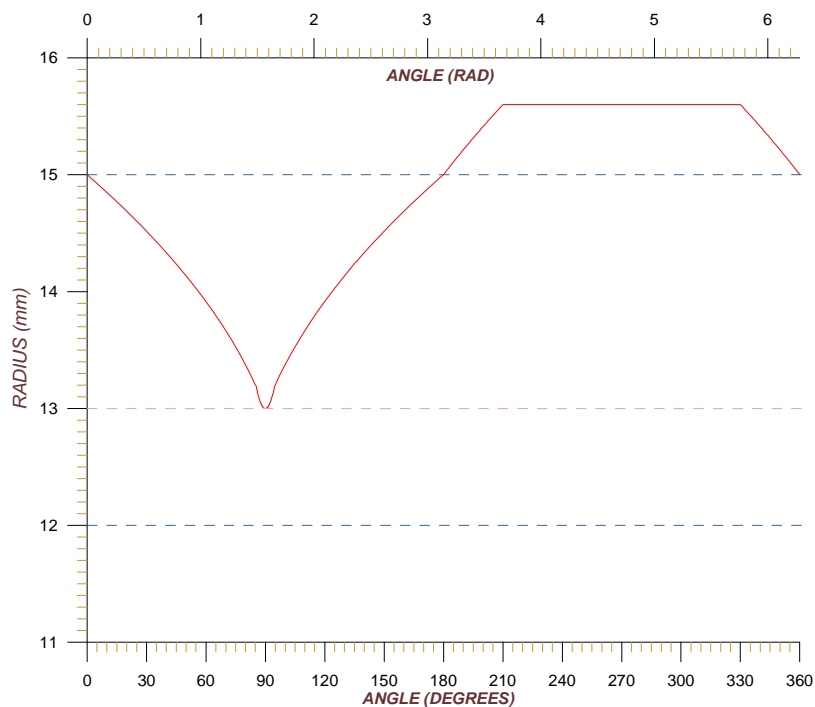


#### Βαλβίδα εισόδου

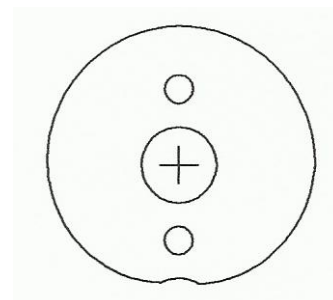
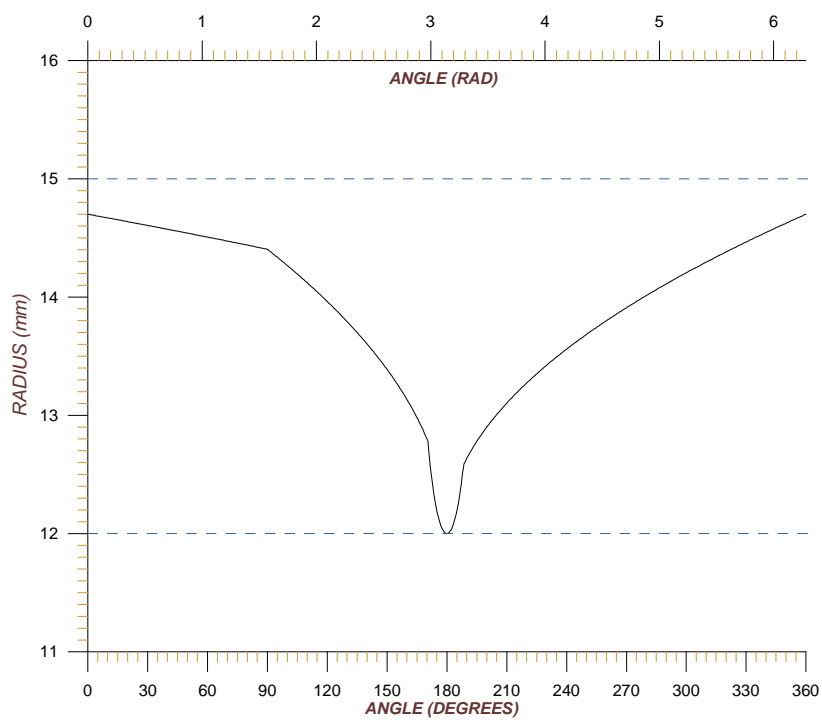




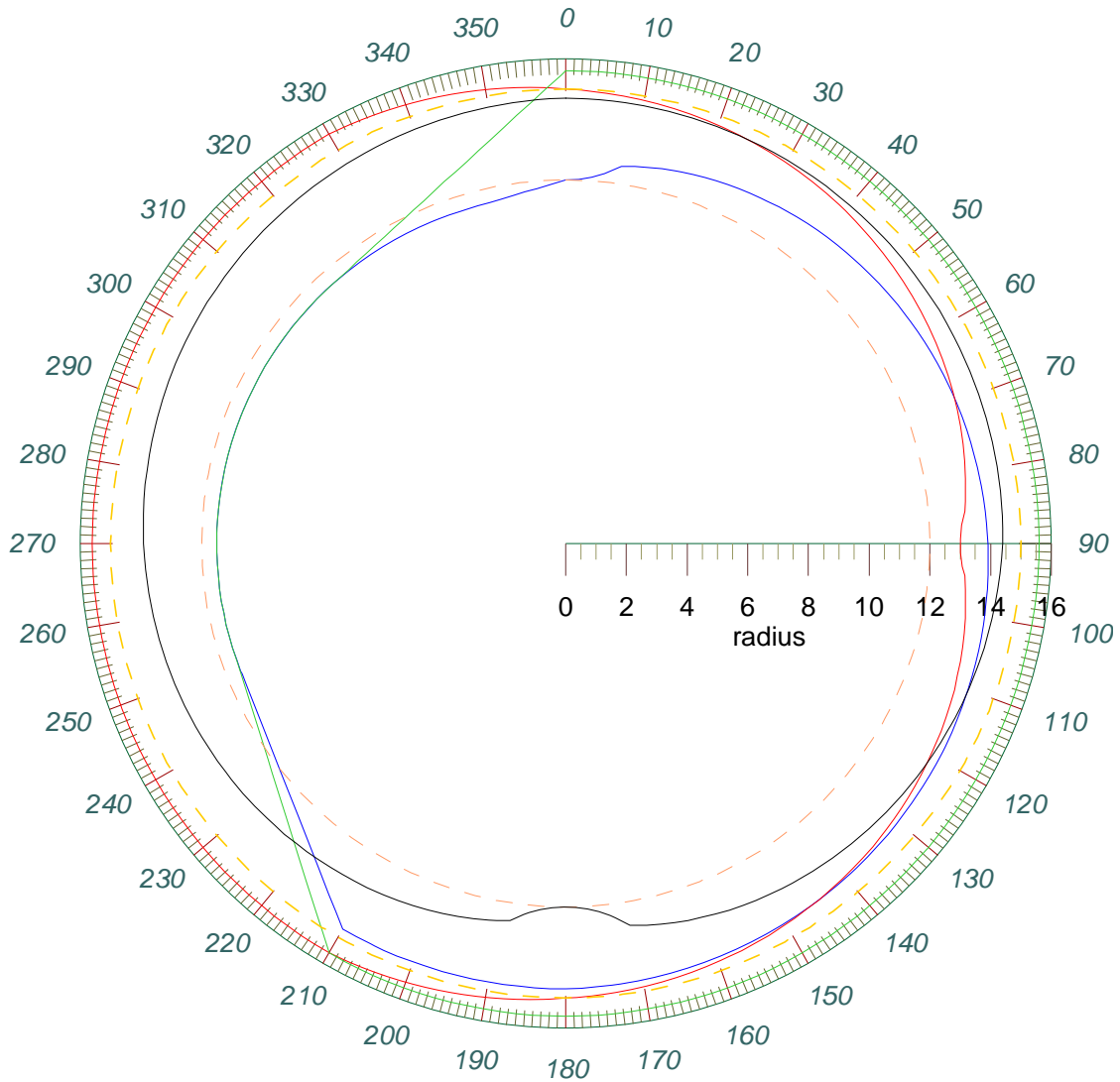
### Βαλβίδα εξόδου



### Μικρό έμβολο



Σχήμα 4-20 Πολικό διάγραμμα και των 4<sup>ων</sup> έκκεντρων

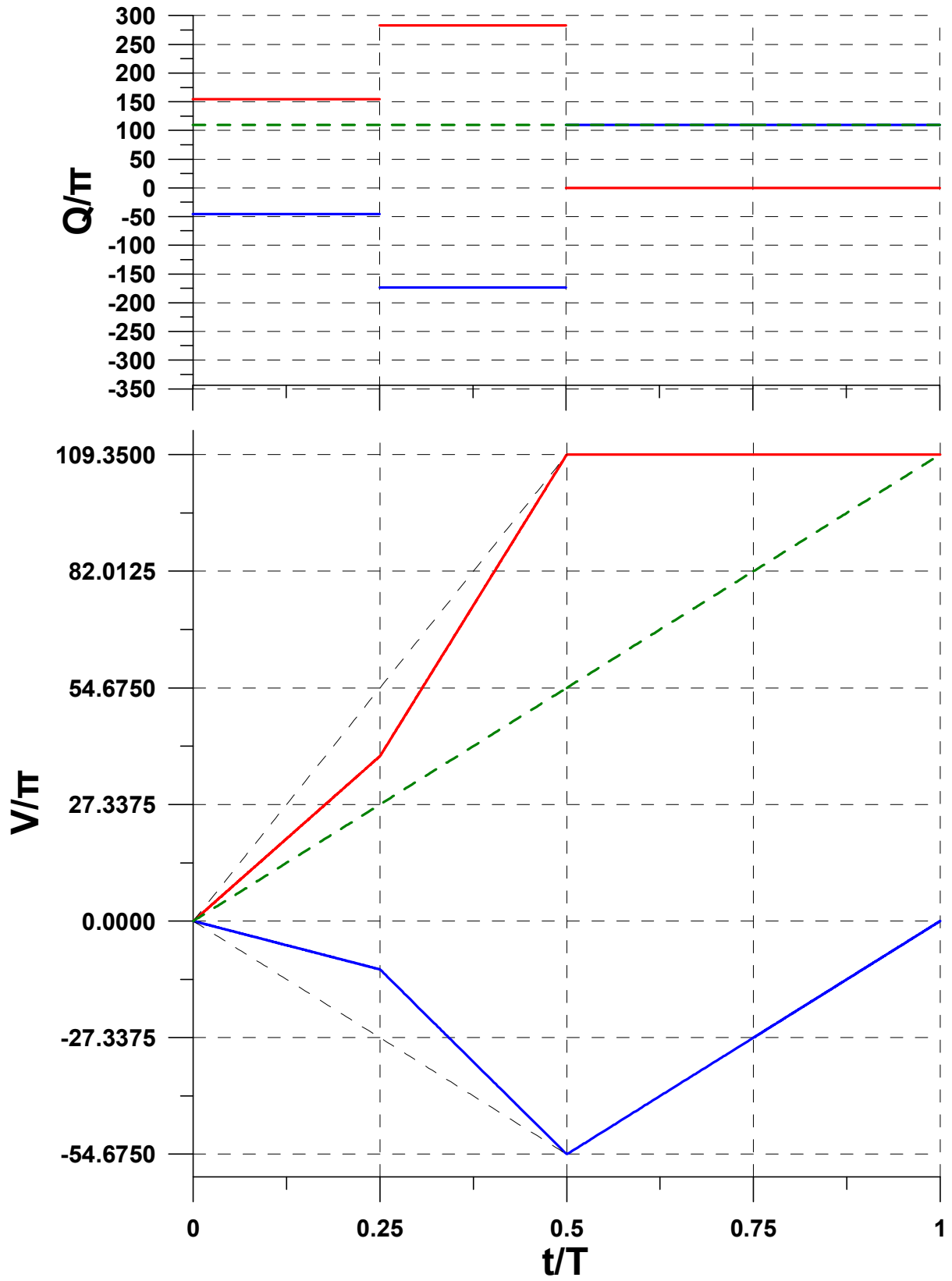


#### 4.4 Διαγράμματα έγχυσης-παροχής

Ισχύει ότι και στην αντλία κυματοειδούς συμπίεσης. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του πίνακα 3

| α/α                 | 0 → T/4         | T/4 → T/2      | T/2 → 3T/4      | 3T/4 → T      |
|---------------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|
| Βαλβίδα εισόδου     | 0               | 0              | 0               | 0             |
| Μεγάλο έμβολο       | 54.675          | 54.675         | 0               | 0             |
| Βαλβίδα εξόδου      | -16             | 16             | 0               | 0             |
| Σ                   | 38.675          | 70.675         | 91              | —             |
| <b>Αθροιστικά Σ</b> | <b>38.675</b>   | <b>109.35</b>  | <b>109.35</b>   | <b>109.35</b> |
| Διορθωτικό έμβολο   | -11.3375        | -43.3375       | 27.3375         | 27.3375       |
| <b>Αθροιστικά Σ</b> | <b>-11.3375</b> | <b>-54.675</b> | <b>-27.3375</b> | <b>0</b>      |

Σχήμα 4-21 Διαγράμματα έγχυσης  $\frac{Q}{\pi}(t)$  και  $\frac{V}{\pi}(t)$



## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Το φαινόμενο της έγχυσης της αντλίας εξετάζεται ως στατικό, όχι ως δυναμικό, λόγω των χαμηλών συχνοτήτων που απαντώνται σε ιατρικές εφαρμογές. Έτσι δε λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα αδράνειας της μάζας του τοιχώματος του εύκαμπτου αγωγού.
- Στα διαστήματα ειδικής διαμόρφωσης του κάθε έκκεντρου για την υποδοχή του ένσφαιρου τριβέα του εμβόλου, δε μπορούμε να αποφύγουμε τη μη γραμμική έγχυση, ωστόσο η απόκλιση αυτή από τη γραμμική μεταβολή είναι αμελητέα. Η ειδική αυτή διαμόρφωση του έκκεντρου είναι απαραίτητη, ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης ανάταξη του εύκαμπτου αγωγού στην αρχή κάθε κύκλου περιστροφής αμέσως πριν αρχίσει η συμπίεση του αντίστοιχου τμήματος του εύκαμπτου αγωγού.
- Το σημείο επαφής μεταξύ της καμπύλης του κάθε έκκεντρου και του κύκλου του ένσφαιρου τριβέα του εμβόλου με τα σημεία του κέντρου περιστροφής του έκκεντρου και του κέντρου του κύκλου του ένσφαιρου τριβέα δε μπορεί να είναι απολύτως συνευθειακά που θα ήταν το επιθυμητό αλλά υπάρχει μια μικρή απόκλιση η οποία δεν επιφέρει σημαντικά σφάλματα στους υπολογισμούς της εξαγόμενης παροχής. Αυτή η απόκλιση είναι αναπόφευκτη λόγω κατασκευαστικών απαιτήσεων χρήσης του ένσφαιρου τριβέα μεταξύ έκκεντρου και αντίστοιχου εμβόλου του.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Ο χρονισμός των εμβόλων – βαλβίδων, έγινε με βάση την επιδίωξη της αποφυγής του φαινομένου της οπισθοροής, την ελαχιστοποίηση των νεκρών χρόνων, και της πραγματοποίησης της περισταλτικής κίνησης. Το τελευταίο έμβολο διαφοροποιείται και υπάρχει για να συνεχίζει την έγχυση στην έξοδο της αντλίας όταν το αμέσως προηγούμενο φράσσει το σωλήνα.
- Με τη γενικευμένη σχέση μεταβολής της ακτίνας του έκκεντρου με τη γωνία περιστροφής επιτεύχθηκε γεωμετρία έκκεντρου που αποδίδει γραμμική μεταβολή της εγκάρσιας διατομής του εύκαμπτου αγωγού με το χρόνο και συνεπώς γραμμική έγχυση κάθε χρονική στιγμή.
- Σε κάθε εξεταζόμενο χρονικό διάστημα είναι και διαφορετική η ποσότητα ρευστού που εγχέεται από τα έμβολα, εκτός του τελευταίου διορθωτικού, λόγω της διαφορετικής θέσης των εμβόλων – βαλβίδων ως προς τον αγωγό και λόγω της διαφορετικής φοράς δράσης που άλλα εμβολίζουν και άλλα αναρροφούν. Έτσι το διορθωτικό έμβολο έχει τέτοιο σχεδιασμό ώστε να ισοσταθμίζει τις διαφορετικές αυτές ποσότητες και να επιτυγχάνεται πάντα σταθερή παροχή στην έξοδο της αντλίας. Αυτό γίνεται με γραμμική μεταβολή της συμπίεσης – αποσυμπίεσης του εύκαμπτου αγωγού και κατάλληλο χρονισμό όλων των εμβόλων.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Αριθμητικές τιμές ακτίνας έκκεντρου του 1ου-5ου εμβόλου-δάχτυλου της γραμμικής περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης ανά 2° περιστροφής.**

| φ°       | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°      | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm) | φ°      | ρε(mm)   |
|----------|----------|-----|----------|---------|----------|-----|--------|---------|----------|
| 0        | 12       | 84  | 14,24499 | 170     | 15,41174 | 254 | 11,5   | 340     | 11,5     |
| 2        | 12,02942 | 86  | 14,27156 | 172     | 15,45022 | 256 | 11,5   | 342     | 11,5     |
| 4        | 12,11989 | 88  | 14,29783 | 174     | 15,48827 | 258 | 11,5   | 343,402 | 11,5     |
| 6        | 12,27877 | 90  | 14,32379 | 176     | 15,5259  | 260 | 11,5   | 344     | 11,50063 |
| 8        | 12,52141 | 92  | 14,34947 | 178     | 15,56314 | 262 | 11,5   | 346     | 11,51183 |
| 9,361879 | 12,74948 | 94  | 14,37487 | 180     | 15,6     | 264 | 11,5   | 348     | 11,53713 |
| 10       | 12,7746  | 96  | 14,4     | 182     | 15,6     | 266 | 11,5   | 350     | 11,57667 |
| 12       | 12,84853 | 98  | 14,42487 | 184     | 15,6     | 268 | 11,5   | 352     | 11,63071 |
| 14       | 12,91652 | 100 | 14,44949 | 186     | 15,6     | 270 | 11,5   | 354     | 11,69957 |
| 16       | 12,9798  | 102 | 14,47386 | 188     | 15,6     | 272 | 11,5   | 356     | 11,78369 |
| 18       | 13,03923 | 104 | 14,498   | 190     | 15,6     | 274 | 11,5   | 358     | 11,88362 |
| 20       | 13,09545 | 106 | 14,5219  | 192     | 15,6     | 276 | 11,5   | 360     | 12       |
| 22       | 13,14891 | 108 | 14,54558 | 194     | 15,6     | 278 | 11,5   |         |          |
| 24       | 13,2     | 110 | 14,56905 | 196     | 15,6     | 280 | 11,5   |         |          |
| 26       | 13,249   | 112 | 14,5923  | 198     | 15,6     | 282 | 11,5   |         |          |
| 28       | 13,29615 | 114 | 14,61534 | 200     | 15,6     | 284 | 11,5   |         |          |
| 30       | 13,34164 | 116 | 14,63818 | 202     | 15,6     | 286 | 11,5   |         |          |
| 32       | 13,38564 | 118 | 14,66083 | 204     | 15,6     | 288 | 11,5   |         |          |
| 34       | 13,42829 | 120 | 14,68328 | 206     | 15,6     | 290 | 11,5   |         |          |
| 36       | 13,46969 | 122 | 14,70555 | 208     | 15,6     | 292 | 11,5   |         |          |
| 38       | 13,50997 | 124 | 14,72764 | 210     | 15,6     | 294 | 11,5   |         |          |
| 40       | 13,54919 | 126 | 14,74955 | 212     | 15,12537 | 296 | 11,5   |         |          |
| 42       | 13,58745 | 128 | 14,77128 | 214     | 14,69615 | 298 | 11,5   |         |          |
| 44       | 13,62481 | 130 | 14,79285 | 216     | 14,30756 | 300 | 11,5   |         |          |
| 46       | 13,66132 | 132 | 14,81425 | 218     | 13,95556 | 302 | 11,5   |         |          |
| 48       | 13,69706 | 134 | 14,83549 | 220     | 13,63668 | 304 | 11,5   |         |          |
| 50       | 13,73205 | 136 | 14,85657 | 222     | 13,34795 | 306 | 11,5   |         |          |
| 52       | 13,76635 | 138 | 14,8775  | 224     | 13,0868  | 308 | 11,5   |         |          |
| 54       | 13,8     | 140 | 14,89828 | 226     | 12,85103 | 310 | 11,5   |         |          |
| 56       | 13,83303 | 142 | 14,9189  | 228     | 12,63873 | 312 | 11,5   |         |          |
| 58       | 13,86548 | 144 | 14,93939 | 230     | 12,44826 | 314 | 11,5   |         |          |
| 60       | 13,89737 | 146 | 14,95973 | 232     | 12,27817 | 316 | 11,5   |         |          |
| 62       | 13,92873 | 148 | 14,97993 | 234     | 12,12725 | 318 | 11,5   |         |          |
| 64       | 13,95959 | 150 | 15       | 236     | 11,99443 | 320 | 11,5   |         |          |
| 66       | 13,98997 | 152 | 15,04368 | 238     | 11,8788  | 322 | 11,5   |         |          |
| 68       | 14,0199  | 154 | 15,08675 | 240     | 11,77959 | 324 | 11,5   |         |          |
| 70       | 14,04939 | 156 | 15,12922 | 242     | 11,69616 | 326 | 11,5   |         |          |
| 72       | 14,07846 | 158 | 15,17112 | 244     | 11,62797 | 328 | 11,5   |         |          |
| 74       | 14,10713 | 160 | 15,21248 | 246     | 11,57459 | 330 | 11,5   |         |          |
| 76       | 14,13542 | 162 | 15,25331 | 248     | 11,53569 | 332 | 11,5   |         |          |
| 78       | 14,16333 | 164 | 15,29363 | 250     | 11,51103 | 334 | 11,5   |         |          |
| 80       | 14,19089 | 166 | 15,33347 | 252     | 11,50045 | 336 | 11,5   |         |          |
| 82       | 14,21811 | 168 | 15,37283 | 252,508 | 11,5     | 338 | 11,5   |         |          |

**Αριθμητικές τιμές ακτίνας έκκεντρου του βου εμβόλου-δάχτυλου της γραμμικής  
περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης ανά 2° περιστροφής.**

| φ°       | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°      | ρε(mm)   | φ°      | ρε(mm)   |
|----------|----------|-----|----------|-----|----------|---------|----------|---------|----------|
| 0        | 12       | 84  | 14,24499 | 170 | 15,41174 | 256     | 13,58745 | 338     | 11,5     |
| 2        | 12,02942 | 86  | 14,27156 | 172 | 15,45022 | 257,864 | 13,478   | 340     | 11,5     |
| 4        | 12,11989 | 88  | 14,29783 | 174 | 15,48827 | 258     | 13,42914 | 342     | 11,5     |
| 6        | 12,27877 | 90  | 14,32379 | 176 | 15,5259  | 260     | 12,87931 | 343,402 | 11,5     |
| 8        | 12,52141 | 92  | 14,34947 | 178 | 15,56314 | 262     | 12,52141 | 344     | 11,50063 |
| 9,361879 | 12,74948 | 94  | 14,37487 | 180 | 15,6     | 264     | 12,27877 | 346     | 11,51183 |
| 10       | 12,7746  | 96  | 14,4     | 182 | 15,56314 | 266     | 12,11989 | 348     | 11,53713 |
| 12       | 12,84853 | 98  | 14,42487 | 184 | 15,5259  | 268     | 12,02942 | 350     | 11,57667 |
| 14       | 12,91652 | 100 | 14,44949 | 186 | 15,48827 | 270     | 12       | 352     | 11,63071 |
| 16       | 12,9798  | 102 | 14,47386 | 188 | 15,45022 | 272     | 11,88362 | 354     | 11,69957 |
| 18       | 13,03923 | 104 | 14,498   | 190 | 15,41174 | 274     | 11,78369 | 356     | 11,78369 |
| 20       | 13,09545 | 106 | 14,5219  | 192 | 15,37283 | 276     | 11,69957 | 358     | 11,88362 |
| 22       | 13,14891 | 108 | 14,54558 | 194 | 15,33347 | 278     | 11,63071 | 360     | 12       |
| 24       | 13,2     | 110 | 14,56905 | 196 | 15,29363 | 280     | 11,57667 |         |          |
| 26       | 13,249   | 112 | 14,5923  | 198 | 15,25331 | 282     | 11,53713 |         |          |
| 28       | 13,29615 | 114 | 14,61534 | 200 | 15,21248 | 284     | 11,51183 |         |          |
| 30       | 13,34164 | 116 | 14,63818 | 202 | 15,17112 | 286     | 11,50063 |         |          |
| 32       | 13,38564 | 118 | 14,66083 | 204 | 15,12922 | 286,598 | 11,5     |         |          |
| 34       | 13,42829 | 120 | 14,68328 | 206 | 15,08675 | 288     | 11,5     |         |          |
| 36       | 13,46969 | 122 | 14,70555 | 208 | 15,04368 | 290     | 11,5     |         |          |
| 38       | 13,50997 | 124 | 14,72764 | 210 | 15       | 292     | 11,5     |         |          |
| 40       | 13,54919 | 126 | 14,74955 | 212 | 14,95973 | 294     | 11,5     |         |          |
| 42       | 13,58745 | 128 | 14,77128 | 214 | 14,9189  | 296     | 11,5     |         |          |
| 44       | 13,62481 | 130 | 14,79285 | 216 | 14,8775  | 298     | 11,5     |         |          |
| 46       | 13,66132 | 132 | 14,81425 | 218 | 14,83549 | 300     | 11,5     |         |          |
| 48       | 13,69706 | 134 | 14,83549 | 220 | 14,79285 | 302     | 11,5     |         |          |
| 50       | 13,73205 | 136 | 14,85657 | 222 | 14,74955 | 304     | 11,5     |         |          |
| 52       | 13,76635 | 138 | 14,8775  | 224 | 14,70555 | 306     | 11,5     |         |          |
| 54       | 13,8     | 140 | 14,89828 | 226 | 14,66083 | 308     | 11,5     |         |          |
| 56       | 13,83303 | 142 | 14,9189  | 228 | 14,61534 | 310     | 11,5     |         |          |
| 58       | 13,86548 | 144 | 14,93939 | 230 | 14,56905 | 312     | 11,5     |         |          |
| 60       | 13,89737 | 146 | 14,95973 | 232 | 14,5219  | 314     | 11,5     |         |          |
| 62       | 13,92873 | 148 | 14,97993 | 234 | 14,47386 | 316     | 11,5     |         |          |
| 64       | 13,95959 | 150 | 15       | 236 | 14,42487 | 318     | 11,5     |         |          |
| 66       | 13,98997 | 152 | 15,04368 | 238 | 14,37487 | 320     | 11,5     |         |          |
| 68       | 14,0199  | 154 | 15,08675 | 240 | 14,32379 | 322     | 11,5     |         |          |
| 70       | 14,04939 | 156 | 15,12922 | 242 | 14,24499 | 324     | 11,5     |         |          |
| 72       | 14,07846 | 158 | 15,17112 | 244 | 14,16333 | 326     | 11,5     |         |          |
| 74       | 14,10713 | 160 | 15,21248 | 246 | 14,07846 | 328     | 11,5     |         |          |
| 76       | 14,13542 | 162 | 15,25331 | 248 | 13,98997 | 330     | 11,5     |         |          |
| 78       | 14,16333 | 164 | 15,29363 | 250 | 13,89737 | 332     | 11,5     |         |          |
| 80       | 14,19089 | 166 | 15,33347 | 252 | 13,8     | 334     | 11,5     |         |          |
| 82       | 14,21811 | 168 | 15,37283 | 254 | 13,69706 | 336     | 11,5     |         |          |

**Αριθμητικές τιμές ακτίνας έκκεντρου του 7ου εμβόλου-δάχτυλου της γραμμικής  
περισταλτικής αντλίας κυματοειδούς συμπίεσης ανά 2° περιστροφής.**

| φ°       | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   |
|----------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| 0        | 12,75478 | 82  | 12,70245 | 168 | 13,87881 | 254 | 13,97244 | 340 | 12,9743  |
| 2        | 12,72919 | 84  | 12,71583 | 170 | 13,8989  | 256 | 13,94824 | 342 | 12,95462 |
| 4        | 12,70266 | 86  | 12,72896 | 172 | 13,91879 | 258 | 13,92373 | 344 | 12,93453 |
| 6        | 12,6751  | 88  | 12,74187 | 174 | 13,93847 | 260 | 13,8989  | 346 | 12,914   |
| 8        | 12,64636 | 90  | 12,75455 | 176 | 13,95795 | 262 | 13,87375 | 348 | 12,89299 |
| 10       | 12,61628 | 92  | 12,80328 | 178 | 13,97724 | 264 | 13,84826 | 350 | 12,87148 |
| 12       | 12,58465 | 94  | 12,84922 | 180 | 13,99635 | 266 | 13,82241 | 352 | 12,84942 |
| 14       | 12,55122 | 96  | 12,89279 | 182 | 14,01527 | 268 | 13,79618 | 354 | 12,82678 |
| 16       | 12,51561 | 98  | 12,93434 | 184 | 14,03402 | 270 | 13,76957 | 356 | 12,8035  |
| 18       | 12,47737 | 100 | 12,97412 | 186 | 14,05259 | 272 | 13,75892 | 358 | 12,77952 |
| 20       | 12,43577 | 102 | 13,01233 | 188 | 14,071   | 274 | 13,74809 | 360 | 12,75478 |
| 22       | 12,38977 | 104 | 13,04916 | 190 | 14,08925 | 276 | 13,7372  |     |          |
| 23,25819 | 12,35781 | 106 | 13,08473 | 192 | 14,10734 | 278 | 13,72624 |     |          |
| 24       | 12,27877 | 108 | 13,11918 | 194 | 14,12527 | 280 | 13,71521 |     |          |
| 26       | 12,11989 | 110 | 13,15259 | 196 | 14,14306 | 282 | 13,70411 |     |          |
| 28       | 12,02942 | 112 | 13,18507 | 198 | 14,1607  | 284 | 13,69294 |     |          |
| 30       | 12       | 114 | 13,21667 | 200 | 14,17819 | 286 | 13,68169 |     |          |
| 32       | 12,02942 | 116 | 13,24748 | 202 | 14,19555 | 288 | 13,67037 |     |          |
| 34       | 12,11989 | 118 | 13,27754 | 204 | 14,21277 | 290 | 13,65897 |     |          |
| 35,44753 | 12,22736 | 120 | 13,30692 | 206 | 14,22986 | 292 | 13,64749 |     |          |
| 36       | 12,23861 | 122 | 13,33564 | 208 | 14,24681 | 294 | 13,63593 |     |          |
| 38       | 12,27552 | 124 | 13,36376 | 210 | 14,26364 | 296 | 13,62429 |     |          |
| 40       | 12,30804 | 126 | 13,39132 | 212 | 14,25525 | 298 | 13,61256 |     |          |
| 42       | 12,33744 | 128 | 13,41834 | 214 | 14,24681 | 300 | 13,60075 |     |          |
| 44       | 12,36448 | 130 | 13,44485 | 216 | 14,23835 | 302 | 13,57083 |     |          |
| 46       | 12,38965 | 132 | 13,47089 | 218 | 14,22986 | 304 | 13,54033 |     |          |
| 48       | 12,41328 | 134 | 13,49647 | 220 | 14,22133 | 306 | 13,50921 |     |          |
| 50       | 12,43564 | 136 | 13,52162 | 222 | 14,21277 | 308 | 13,47744 |     |          |
| 52       | 12,4569  | 138 | 13,54636 | 224 | 14,20418 | 310 | 13,44497 |     |          |
| 54       | 12,47722 | 140 | 13,57072 | 226 | 14,19555 | 312 | 13,41176 |     |          |
| 56       | 12,4967  | 142 | 13,5947  | 228 | 14,18689 | 314 | 13,37774 |     |          |
| 58       | 12,51545 | 144 | 13,61833 | 230 | 14,17819 | 316 | 13,34286 |     |          |
| 60       | 12,53355 | 146 | 13,64161 | 232 | 14,16946 | 318 | 13,30705 |     |          |
| 62       | 12,55104 | 148 | 13,66457 | 234 | 14,1607  | 320 | 13,27023 |     |          |
| 64       | 12,568   | 150 | 13,68722 | 236 | 14,1519  | 322 | 13,23232 |     |          |
| 66       | 12,58447 | 152 | 13,70957 | 238 | 14,14306 | 324 | 13,19319 |     |          |
| 68       | 12,60049 | 154 | 13,73163 | 240 | 14,13418 | 326 | 13,15275 |     |          |
| 70       | 12,61609 | 156 | 13,75341 | 242 | 14,11184 | 328 | 13,11082 |     |          |
| 72       | 12,6313  | 158 | 13,77493 | 244 | 14,08925 | 330 | 13,06726 |     |          |
| 74       | 12,64616 | 160 | 13,79618 | 246 | 14,06642 | 332 | 13,04933 |     |          |
| 76       | 12,66068 | 162 | 13,81719 | 248 | 14,04333 | 334 | 13,03108 |     |          |
| 78       | 12,67489 | 164 | 13,83796 | 250 | 14,01997 | 336 | 13,01251 |     |          |
| 80       | 12,68881 | 166 | 13,8585  | 252 | 13,99635 | 338 | 12,99359 |     |          |

**Αριθμητικές τιμές ακτίνας έκκεντρου της βαλβίδας εισόδου της δίχρονης γραμμικής  
περισταλτικής αντλίας ανά 2° περιστροφής.**

| $\varphi^\circ$ | ρε(mm) | $\varphi^\circ$ | ρε(mm) | $\varphi^\circ$ | ρε(mm)   | $\varphi^\circ$ | ρε(mm)   | $\varphi^\circ$ | ρε(mm)   |
|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| 0               | 15,6   | 86              | 15,6   | 172             | 15,6     | 256             | 11,5     | 340             | 12,44826 |
| 2               | 15,6   | 88              | 15,6   | 174             | 15,6     | 258             | 11,5     | 342             | 12,63873 |
| 4               | 15,6   | 90              | 15,6   | 176             | 15,6     | 260             | 11,5     | 344             | 12,85103 |
| 6               | 15,6   | 92              | 15,6   | 178             | 15,6     | 262             | 11,5     | 346             | 13,0868  |
| 8               | 15,6   | 94              | 15,6   | 180             | 15,6     | 264             | 11,5     | 348             | 13,34795 |
| 10              | 15,6   | 96              | 15,6   | 182             | 15,6     | 266             | 11,5     | 350             | 13,63668 |
| 12              | 15,6   | 98              | 15,6   | 184             | 15,6     | 268             | 11,5     | 352             | 13,95556 |
| 14              | 15,6   | 100             | 15,6   | 186             | 15,6     | 270             | 11,5     | 354             | 14,30756 |
| 16              | 15,6   | 102             | 15,6   | 188             | 15,6     | 272             | 11,5     | 356             | 14,69615 |
| 18              | 15,6   | 104             | 15,6   | 190             | 15,6     | 274             | 11,5     | 358             | 15,12537 |
| 20              | 15,6   | 106             | 15,6   | 192             | 15,6     | 276             | 11,5     | 360             | 15,6     |
| 22              | 15,6   | 108             | 15,6   | 194             | 15,6     | 278             | 11,5     |                 |          |
| 24              | 15,6   | 110             | 15,6   | 196             | 15,6     | 280             | 11,5     |                 |          |
| 26              | 15,6   | 112             | 15,6   | 198             | 15,6     | 282             | 11,5     |                 |          |
| 28              | 15,6   | 114             | 15,6   | 200             | 15,6     | 284             | 11,5     |                 |          |
| 30              | 15,6   | 116             | 15,6   | 202             | 15,6     | 286             | 11,5     |                 |          |
| 32              | 15,6   | 118             | 15,6   | 204             | 15,6     | 288             | 11,5     |                 |          |
| 34              | 15,6   | 120             | 15,6   | 206             | 15,6     | 290             | 11,5     |                 |          |
| 36              | 15,6   | 122             | 15,6   | 208             | 15,6     | 292             | 11,5     |                 |          |
| 38              | 15,6   | 124             | 15,6   | 210             | 15,6     | 294             | 11,5     |                 |          |
| 40              | 15,6   | 126             | 15,6   | 212             | 15,12537 | 296             | 11,5     |                 |          |
| 42              | 15,6   | 128             | 15,6   | 214             | 14,69615 | 298             | 11,5     |                 |          |
| 44              | 15,6   | 130             | 15,6   | 216             | 14,30756 | 300             | 11,5     |                 |          |
| 46              | 15,6   | 132             | 15,6   | 218             | 13,95556 | 302             | 11,5     |                 |          |
| 48              | 15,6   | 134             | 15,6   | 220             | 13,63668 | 304             | 11,5     |                 |          |
| 50              | 15,6   | 136             | 15,6   | 222             | 13,34795 | 306             | 11,5     |                 |          |
| 52              | 15,6   | 138             | 15,6   | 224             | 13,0868  | 308             | 11,5     |                 |          |
| 54              | 15,6   | 140             | 15,6   | 226             | 12,85103 | 310             | 11,5     |                 |          |
| 56              | 15,6   | 142             | 15,6   | 228             | 12,63873 | 312             | 11,5     |                 |          |
| 58              | 15,6   | 144             | 15,6   | 230             | 12,44826 | 314             | 11,5     |                 |          |
| 60              | 15,6   | 146             | 15,6   | 232             | 12,27817 | 316             | 11,5     |                 |          |
| 62              | 15,6   | 148             | 15,6   | 234             | 12,12725 | 317,492         | 11,5     |                 |          |
| 64              | 15,6   | 150             | 15,6   | 236             | 11,99443 | 318             | 11,50045 |                 |          |
| 66              | 15,6   | 152             | 15,6   | 238             | 11,8788  | 320             | 11,51103 |                 |          |
| 68              | 15,6   | 154             | 15,6   | 240             | 11,77959 | 322             | 11,53569 |                 |          |
| 70              | 15,6   | 156             | 15,6   | 242             | 11,69616 | 324             | 11,57459 |                 |          |
| 72              | 15,6   | 158             | 15,6   | 244             | 11,62797 | 326             | 11,62797 |                 |          |
| 74              | 15,6   | 160             | 15,6   | 246             | 11,57459 | 328             | 11,69616 |                 |          |
| 76              | 15,6   | 162             | 15,6   | 248             | 11,53569 | 330             | 11,77959 |                 |          |
| 78              | 15,6   | 164             | 15,6   | 250             | 11,51103 | 332             | 11,8788  |                 |          |
| 80              | 15,6   | 166             | 15,6   | 252             | 11,50045 | 334             | 11,99443 |                 |          |
| 82              | 15,6   | 168             | 15,6   | 252,508         | 11,5     | 336             | 12,12725 |                 |          |
| 84              | 15,6   | 170             | 15,6   | 254             | 11,5     | 338             | 12,27817 |                 |          |



**Αριθμητικές τιμές ακτίνας έκκεντρου του μεγάλου εμβόλου της δίχρονης γραμμικής  
περισταλτικής αντλίας ανά 2<sup>ο</sup> περιστροφή.**

| φ°       | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°      | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm) | φ°      | ρε(mm)   |
|----------|----------|-----|----------|---------|----------|-----|--------|---------|----------|
| 0        | 12       | 84  | 13,84445 | 170     | 14,62393 | 254 | 11,5   | 340     | 11,5     |
| 2        | 12,02942 | 86  | 13,86628 | 172     | 14,63932 | 256 | 11,5   | 342     | 11,5     |
| 4        | 12,11989 | 88  | 13,88786 | 174     | 14,65462 | 258 | 11,5   | 343,402 | 11,5     |
| 6        | 12,27877 | 90  | 13,90919 | 176     | 14,66983 | 260 | 11,5   | 344     | 11,50063 |
| 8        | 12,52141 | 92  | 13,93028 | 178     | 14,68496 | 262 | 11,5   | 346     | 11,51183 |
| 8,407834 | 12,58354 | 94  | 13,95115 | 180     | 14,7     | 264 | 11,5   | 348     | 11,53713 |
| 10       | 12,6364  | 96  | 13,9718  | 182     | 14,7     | 266 | 11,5   | 350     | 11,57667 |
| 12       | 12,69714 | 98  | 13,99223 | 184     | 14,7     | 268 | 11,5   | 352     | 11,63071 |
| 14       | 12,75299 | 100 | 14,01246 | 186     | 14,7     | 270 | 11,5   | 354     | 11,69957 |
| 16       | 12,80498 | 102 | 14,03249 | 188     | 14,7     | 272 | 11,5   | 356     | 11,78369 |
| 18       | 12,85381 | 104 | 14,05232 | 190     | 14,7     | 274 | 11,5   | 358     | 11,88362 |
| 20       | 12,9     | 106 | 14,07196 | 192     | 14,7     | 276 | 11,5   | 360     | 12       |
| 22       | 12,94393 | 108 | 14,09141 | 194     | 14,7     | 278 | 11,5   |         |          |
| 24       | 12,9859  | 110 | 14,11069 | 196     | 14,7     | 280 | 11,5   |         |          |
| 26       | 13,02616 | 112 | 14,12979 | 198     | 14,7     | 282 | 11,5   |         |          |
| 28       | 13,06489 | 114 | 14,14872 | 200     | 14,7     | 284 | 11,5   |         |          |
| 30       | 13,10227 | 116 | 14,16749 | 202     | 14,7     | 286 | 11,5   |         |          |
| 32       | 13,13842 | 118 | 14,18609 | 204     | 14,7     | 288 | 11,5   |         |          |
| 34       | 13,17346 | 120 | 14,20454 | 206     | 14,7     | 290 | 11,5   |         |          |
| 36       | 13,20748 | 122 | 14,22284 | 208     | 14,7     | 292 | 11,5   |         |          |
| 38       | 13,24056 | 124 | 14,24098 | 210     | 14,7     | 294 | 11,5   |         |          |
| 40       | 13,27279 | 126 | 14,25898 | 212     | 14,31105 | 296 | 11,5   |         |          |
| 42       | 13,30422 | 128 | 14,27684 | 214     | 13,95872 | 298 | 11,5   |         |          |
| 44       | 13,33492 | 130 | 14,29456 | 216     | 13,63955 | 300 | 11,5   |         |          |
| 46       | 13,36492 | 132 | 14,31214 | 218     | 13,35054 | 302 | 11,5   |         |          |
| 48       | 13,39427 | 134 | 14,32959 | 220     | 13,08914 | 304 | 11,5   |         |          |
| 50       | 13,42302 | 136 | 14,34691 | 222     | 12,85314 | 306 | 11,5   |         |          |
| 52       | 13,45121 | 138 | 14,36411 | 224     | 12,64063 | 308 | 11,5   |         |          |
| 54       | 13,47885 | 140 | 14,38118 | 226     | 12,44996 | 310 | 11,5   |         |          |
| 56       | 13,50599 | 142 | 14,39812 | 228     | 12,27969 | 312 | 11,5   |         |          |
| 58       | 13,53264 | 144 | 14,41495 | 230     | 12,12859 | 314 | 11,5   |         |          |
| 60       | 13,55885 | 146 | 14,43167 | 232     | 11,9956  | 316 | 11,5   |         |          |
| 62       | 13,58461 | 148 | 14,44826 | 234     | 11,87981 | 318 | 11,5   |         |          |
| 64       | 13,60997 | 150 | 14,46475 | 236     | 11,78045 | 320 | 11,5   |         |          |
| 66       | 13,63493 | 152 | 14,48113 | 238     | 11,69688 | 322 | 11,5   |         |          |
| 68       | 13,65952 | 154 | 14,4974  | 240     | 11,62855 | 324 | 11,5   |         |          |
| 70       | 13,68375 | 156 | 14,51356 | 242     | 11,57503 | 326 | 11,5   |         |          |
| 72       | 13,70763 | 158 | 14,52962 | 244     | 11,53599 | 328 | 11,5   |         |          |
| 74       | 13,73118 | 160 | 14,54558 | 246     | 11,5112  | 330 | 11,5   |         |          |
| 76       | 13,75442 | 162 | 14,56144 | 248     | 11,50049 | 332 | 11,5   |         |          |
| 78       | 13,77736 | 164 | 14,57721 | 248,527 | 11,5     | 334 | 11,5   |         |          |
| 80       | 13,8     | 166 | 14,59287 | 250     | 11,5     | 336 | 11,5   |         |          |
| 82       | 13,82236 | 168 | 14,60845 | 252     | 11,5     | 338 | 11,5   |         |          |

**Αριθμητικές τιμές ακτίνας έκκεντρου της βαλβίδας εξόδου της δίχρονης γραμμικής  
περισταλτικής αντλίας ανά 2<sup>ο</sup> περιστροφή.**

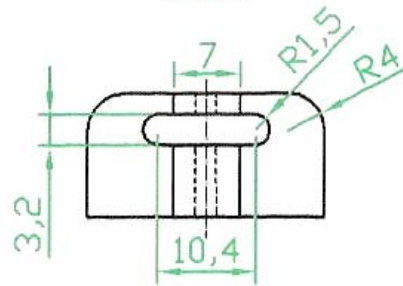
| $\varphi^\circ$ | $r_e(\text{mm})$ | $\varphi^\circ$ | $r_e(\text{mm})$ | $\varphi^\circ$ | $r_e(\text{mm})$ | $\varphi^\circ$ | $r_e(\text{mm})$ | $\varphi^\circ$ | $r_e(\text{mm})$ |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 0               | 15               | 85,3526         | 13,18874         | 168             | 14,81662         | 254             | 15,6             | 340             | 15,41174         |
| 2               | 14,97022         | 86              | 13,13841         | 170             | 14,848           | 256             | 15,6             | 342             | 15,37283         |
| 4               | 14,94014         | 88              | 13,03389         | 172             | 14,87904         | 258             | 15,6             | 344             | 15,33347         |
| 6               | 14,90975         | 90              | 13               | 174             | 14,90975         | 260             | 15,6             | 346             | 15,29363         |
| 8               | 14,87904         | 92              | 13,03389         | 176             | 14,94014         | 262             | 15,6             | 348             | 15,25331         |
| 10              | 14,848           | 94              | 13,13841         | 178             | 14,97022         | 264             | 15,6             | 350             | 15,21248         |
| 12              | 14,81662         | 94,6474         | 13,18874         | 180             | 15               | 266             | 15,6             | 352             | 15,17112         |
| 14              | 14,78488         | 96              | 13,23828         | 182             | 15,04368         | 268             | 15,6             | 354             | 15,12922         |
| 16              | 14,75278         | 98              | 13,30809         | 184             | 15,08675         | 270             | 15,6             | 356             | 15,08675         |
| 18              | 14,72029         | 100             | 13,37437         | 186             | 15,12922         | 272             | 15,6             | 358             | 15,04368         |
| 20              | 14,68742         | 102             | 13,43759         | 188             | 15,17112         | 274             | 15,6             | 360             | 15               |
| 22              | 14,65414         | 104             | 13,49815         | 190             | 15,21248         | 276             | 15,6             |                 |                  |
| 24              | 14,62043         | 106             | 13,55635         | 192             | 15,25331         | 278             | 15,6             |                 |                  |
| 26              | 14,58629         | 108             | 13,61245         | 194             | 15,29363         | 280             | 15,6             |                 |                  |
| 28              | 14,55169         | 110             | 13,66667         | 196             | 15,33347         | 282             | 15,6             |                 |                  |
| 30              | 14,51661         | 112             | 13,71917         | 198             | 15,37283         | 284             | 15,6             |                 |                  |
| 32              | 14,48104         | 114             | 13,77012         | 200             | 15,41174         | 286             | 15,6             |                 |                  |
| 34              | 14,44495         | 116             | 13,81965         | 202             | 15,45022         | 288             | 15,6             |                 |                  |
| 36              | 14,40832         | 118             | 13,86786         | 204             | 15,48827         | 290             | 15,6             |                 |                  |
| 38              | 14,37112         | 120             | 13,91485         | 206             | 15,5259          | 292             | 15,6             |                 |                  |
| 40              | 14,33333         | 122             | 13,96073         | 208             | 15,56314         | 294             | 15,6             |                 |                  |
| 42              | 14,29492         | 124             | 14,00555         | 210             | 15,6             | 296             | 15,6             |                 |                  |
| 44              | 14,25586         | 126             | 14,04939         | 212             | 15,6             | 298             | 15,6             |                 |                  |
| 46              | 14,2161          | 128             | 14,09231         | 214             | 15,6             | 300             | 15,6             |                 |                  |
| 48              | 14,17562         | 130             | 14,13437         | 216             | 15,6             | 302             | 15,6             |                 |                  |
| 50              | 14,13437         | 132             | 14,17562         | 218             | 15,6             | 304             | 15,6             |                 |                  |
| 52              | 14,09231         | 134             | 14,2161          | 220             | 15,6             | 306             | 15,6             |                 |                  |
| 54              | 14,04939         | 136             | 14,25586         | 222             | 15,6             | 308             | 15,6             |                 |                  |
| 56              | 14,00555         | 138             | 14,29492         | 224             | 15,6             | 310             | 15,6             |                 |                  |
| 58              | 13,96073         | 140             | 14,33333         | 226             | 15,6             | 312             | 15,6             |                 |                  |
| 60              | 13,91485         | 142             | 14,37112         | 228             | 15,6             | 314             | 15,6             |                 |                  |
| 62              | 13,86786         | 144             | 14,40832         | 230             | 15,6             | 316             | 15,6             |                 |                  |
| 64              | 13,81965         | 146             | 14,44495         | 232             | 15,6             | 318             | 15,6             |                 |                  |
| 66              | 13,77012         | 148             | 14,48104         | 234             | 15,6             | 320             | 15,6             |                 |                  |
| 68              | 13,71917         | 150             | 14,51661         | 236             | 15,6             | 322             | 15,6             |                 |                  |
| 70              | 13,66667         | 152             | 14,55169         | 238             | 15,6             | 324             | 15,6             |                 |                  |
| 72              | 13,61245         | 154             | 14,58629         | 240             | 15,6             | 326             | 15,6             |                 |                  |
| 74              | 13,55635         | 156             | 14,62043         | 242             | 15,6             | 328             | 15,6             |                 |                  |
| 76              | 13,49815         | 158             | 14,65414         | 244             | 15,6             | 330             | 15,6             |                 |                  |
| 78              | 13,43759         | 160             | 14,68742         | 246             | 15,6             | 332             | 15,56314         |                 |                  |
| 80              | 13,37437         | 162             | 14,72029         | 248             | 15,6             | 334             | 15,5259          |                 |                  |
| 82              | 13,30809         | 164             | 14,75278         | 250             | 15,6             | 336             | 15,48827         |                 |                  |
| 84              | 13,23828         | 166             | 14,78488         | 252             | 15,6             | 338             | 15,45022         |                 |                  |

**Αριθμητικές τιμές ακτίνας έκκεντρου του μικρού εμβόλου-δάχτυλου της δίχρονης γραμμικής περισταλτικής αντλίας ανά 2° περιστροφής.**

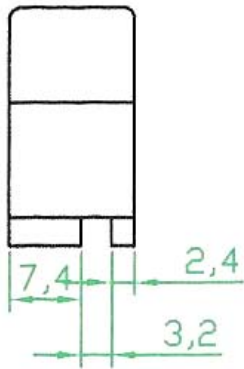
| φ° | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°      | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   | φ°  | ρε(mm)   |
|----|----------|-----|----------|---------|----------|-----|----------|-----|----------|
| 0  | 14,7     | 86  | 14,41775 | 170,469 | 12,78226 | 254 | 13,73118 | 340 | 14,54558 |
| 2  | 14,69377 | 88  | 14,41079 | 172     | 12,52141 | 256 | 13,75442 | 342 | 14,56144 |
| 4  | 14,68753 | 90  | 14,40382 | 174     | 12,27877 | 258 | 13,77736 | 344 | 14,57721 |
| 6  | 14,68127 | 92  | 14,37696 | 176     | 12,11989 | 260 | 13,8     | 346 | 14,59287 |
| 8  | 14,675   | 94  | 14,34979 | 178     | 12,02942 | 262 | 13,82236 | 348 | 14,60845 |
| 10 | 14,66871 | 96  | 14,32231 | 180     | 12       | 264 | 13,84445 | 350 | 14,62393 |
| 12 | 14,66241 | 98  | 14,29449 | 182     | 12,02942 | 266 | 13,86628 | 352 | 14,63932 |
| 14 | 14,6561  | 100 | 14,26634 | 184     | 12,11989 | 268 | 13,88786 | 354 | 14,65462 |
| 16 | 14,64977 | 102 | 14,23783 | 186     | 12,27877 | 270 | 13,90919 | 356 | 14,66983 |
| 18 | 14,64342 | 104 | 14,20895 | 188     | 12,52141 | 272 | 13,93028 | 358 | 14,68496 |
| 20 | 14,63706 | 106 | 14,1797  | 188,408 | 12,58356 | 274 | 13,95115 | 360 | 14,7     |
| 22 | 14,63068 | 108 | 14,15004 | 190     | 12,6364  | 276 | 13,9718  |     |          |
| 24 | 14,62429 | 110 | 14,11997 | 192     | 12,69714 | 278 | 13,99223 |     |          |
| 26 | 14,61788 | 112 | 14,08946 | 194     | 12,75299 | 280 | 14,01246 |     |          |
| 28 | 14,61146 | 114 | 14,05851 | 196     | 12,80498 | 282 | 14,03249 |     |          |
| 30 | 14,60502 | 116 | 14,02708 | 198     | 12,85381 | 284 | 14,05232 |     |          |
| 32 | 14,59856 | 118 | 13,99515 | 200     | 12,9     | 286 | 14,07196 |     |          |
| 34 | 14,59209 | 120 | 13,96271 | 202     | 12,94393 | 288 | 14,09141 |     |          |
| 36 | 14,5856  | 122 | 13,92972 | 204     | 12,9859  | 290 | 14,11069 |     |          |
| 38 | 14,5791  | 124 | 13,89616 | 206     | 13,02616 | 292 | 14,12979 |     |          |
| 40 | 14,57258 | 126 | 13,86199 | 208     | 13,06489 | 294 | 14,14872 |     |          |
| 42 | 14,56604 | 128 | 13,82718 | 210     | 13,10227 | 296 | 14,16749 |     |          |
| 44 | 14,55948 | 130 | 13,7917  | 212     | 13,13842 | 298 | 14,18609 |     |          |
| 46 | 14,55291 | 132 | 13,7555  | 214     | 13,17346 | 300 | 14,20454 |     |          |
| 48 | 14,54633 | 134 | 13,71854 | 216     | 13,20748 | 302 | 14,22284 |     |          |
| 50 | 14,53972 | 136 | 13,68076 | 218     | 13,24056 | 304 | 14,24098 |     |          |
| 52 | 14,5331  | 138 | 13,64212 | 220     | 13,27279 | 306 | 14,25898 |     |          |
| 54 | 14,52646 | 140 | 13,60254 | 222     | 13,30422 | 308 | 14,27684 |     |          |
| 56 | 14,5198  | 142 | 13,56197 | 224     | 13,33492 | 310 | 14,29456 |     |          |
| 58 | 14,51313 | 144 | 13,52031 | 226     | 13,36492 | 312 | 14,31214 |     |          |
| 60 | 14,50644 | 146 | 13,47747 | 228     | 13,39427 | 314 | 14,32959 |     |          |
| 62 | 14,49973 | 148 | 13,43336 | 230     | 13,42302 | 316 | 14,34691 |     |          |
| 64 | 14,493   | 150 | 13,38784 | 232     | 13,45121 | 318 | 14,36411 |     |          |
| 66 | 14,48625 | 152 | 13,34078 | 234     | 13,47885 | 320 | 14,38118 |     |          |
| 68 | 14,47949 | 154 | 13,29201 | 236     | 13,50599 | 322 | 14,39812 |     |          |
| 70 | 14,4727  | 156 | 13,24133 | 238     | 13,53264 | 324 | 14,41495 |     |          |
| 72 | 14,4659  | 158 | 13,18848 | 240     | 13,55885 | 326 | 14,43167 |     |          |
| 74 | 14,45908 | 160 | 13,13317 | 242     | 13,58461 | 328 | 14,44826 |     |          |
| 76 | 14,45224 | 162 | 13,07502 | 244     | 13,60997 | 330 | 14,46475 |     |          |
| 78 | 14,44538 | 164 | 13,01354 | 246     | 13,63493 | 332 | 14,48113 |     |          |
| 80 | 14,4385  | 166 | 12,94808 | 248     | 13,65952 | 334 | 14,4974  |     |          |
| 82 | 14,43161 | 168 | 12,87775 | 250     | 13,68375 | 336 | 14,51356 |     |          |
| 84 | 14,42469 | 170 | 12,80127 | 252     | 13,70763 | 338 | 14,52962 |     |          |

# 1ο ΕΜΒΟΛΟ

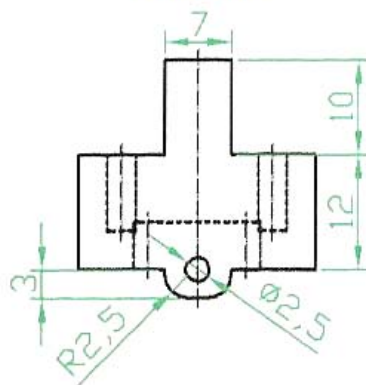
ΑΝΟΨΗ



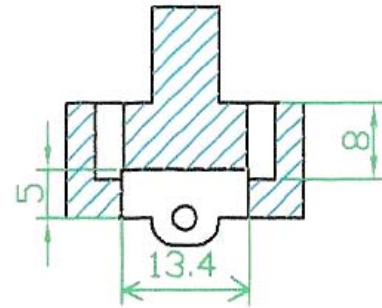
ΑΡ. ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ



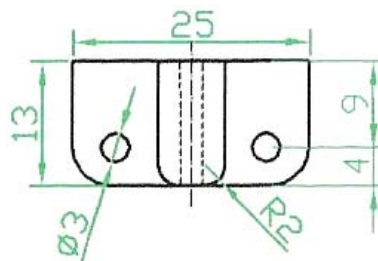
ΠΡΟΟΨΗ



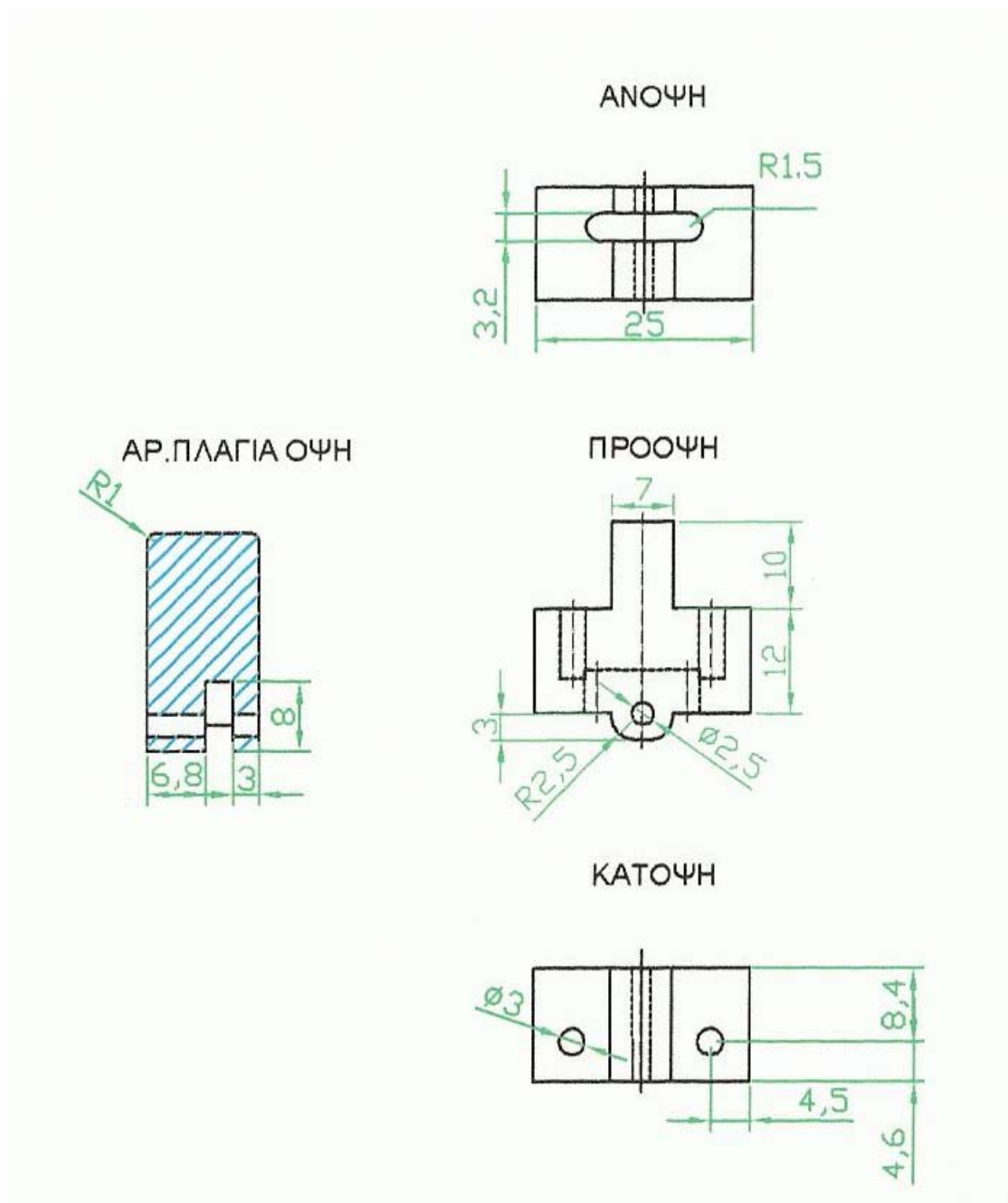
ΠΡΟΟΨΗ ΣΕ ΤΟΜΗ



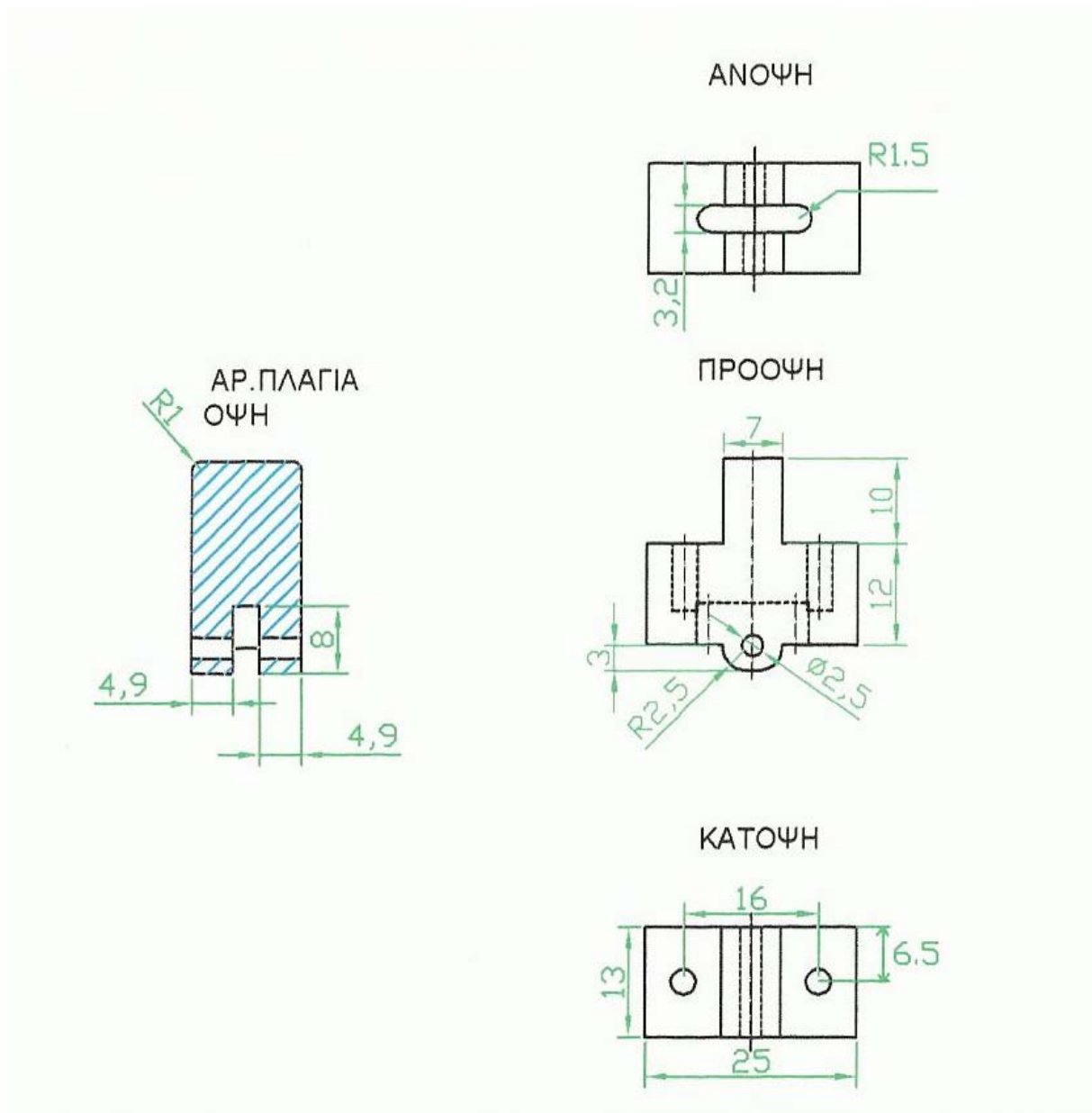
ΚΑΤΟΨΗ



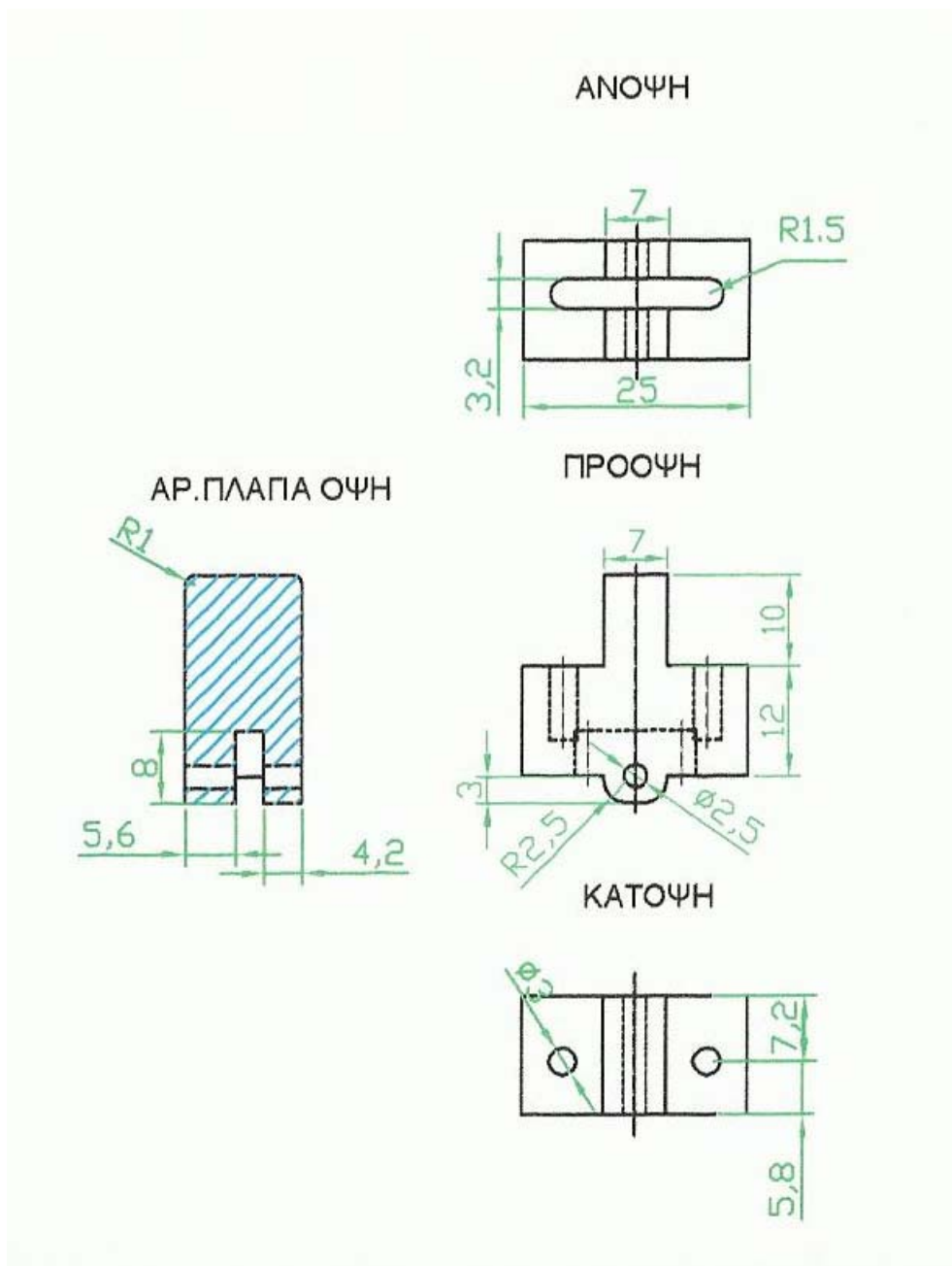
## 2ο ΕΜΒΟΛΟ



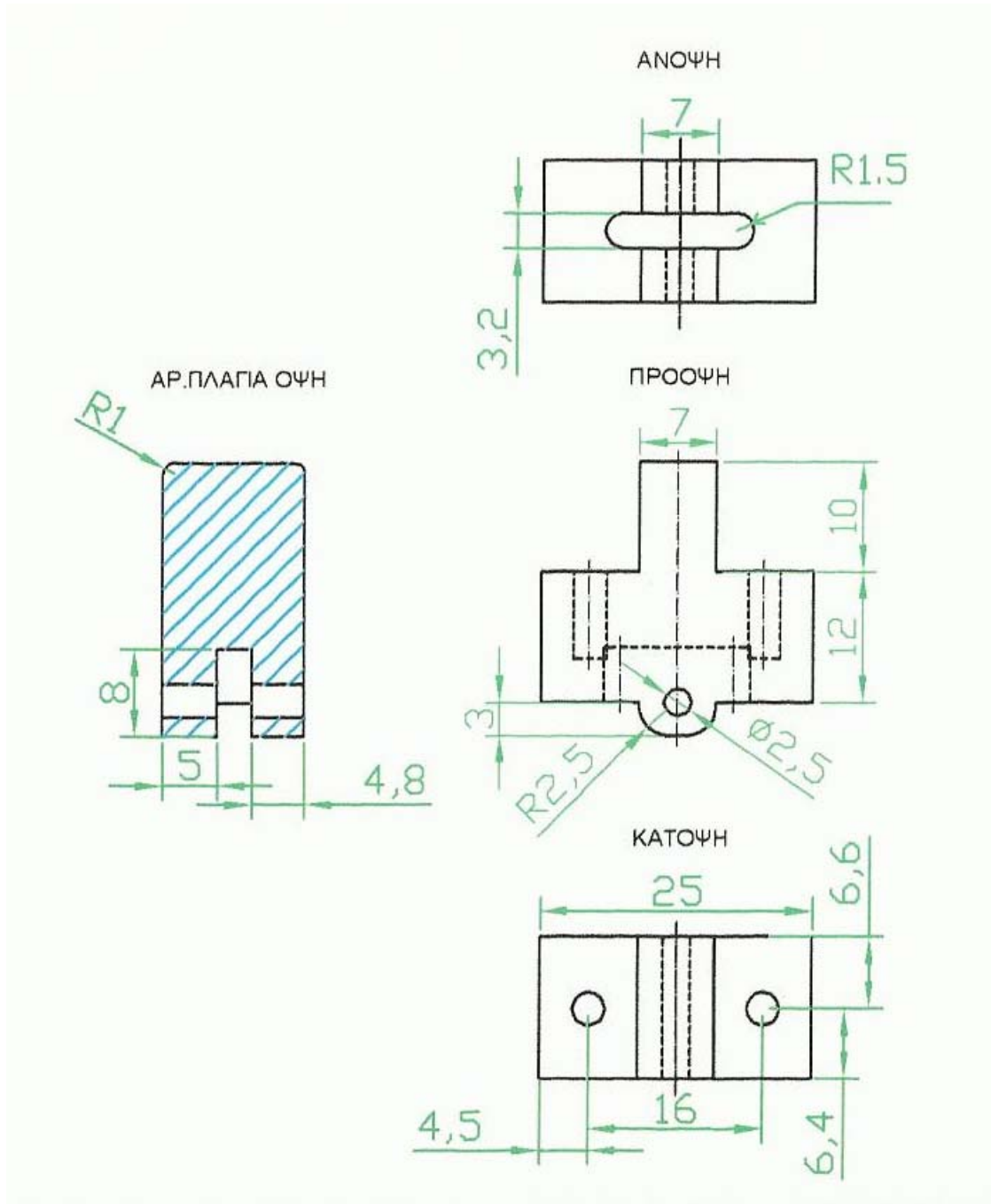
### 3ο-4ο ΕΜΒΟΛΟ



# 5ο ΕΜΒΟΛΟ

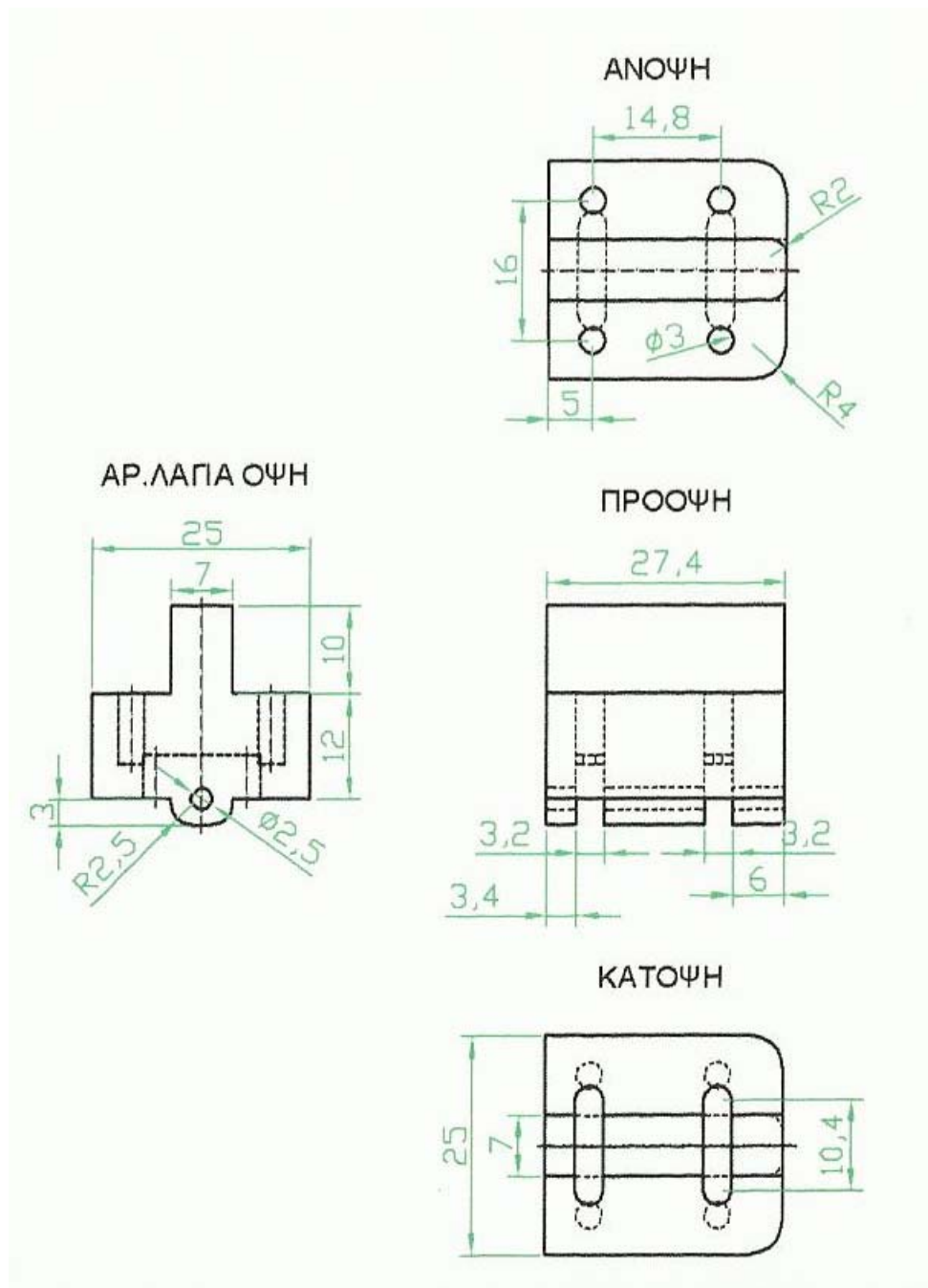


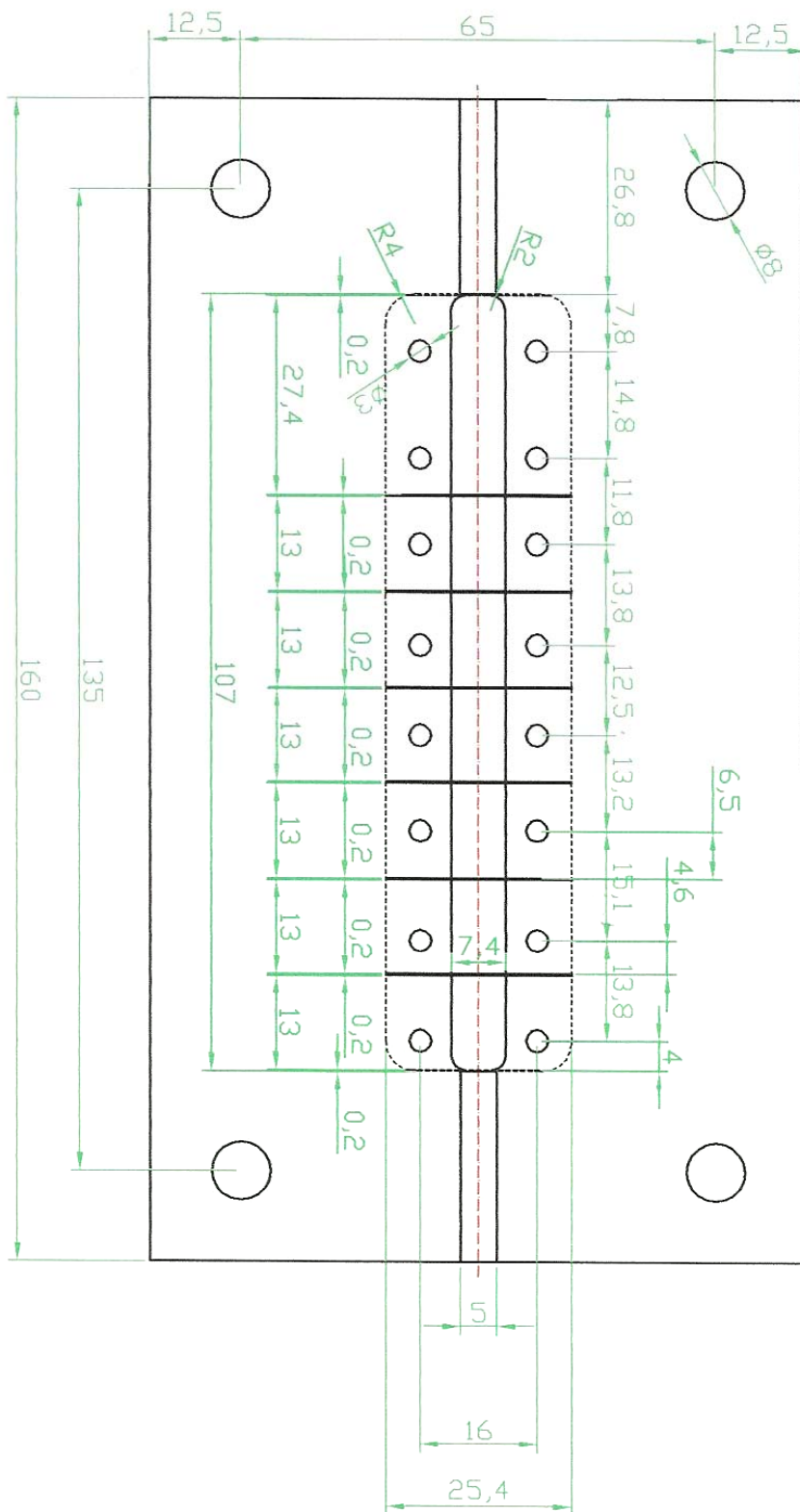
# 6ο ΕΜΒΟΛΟ



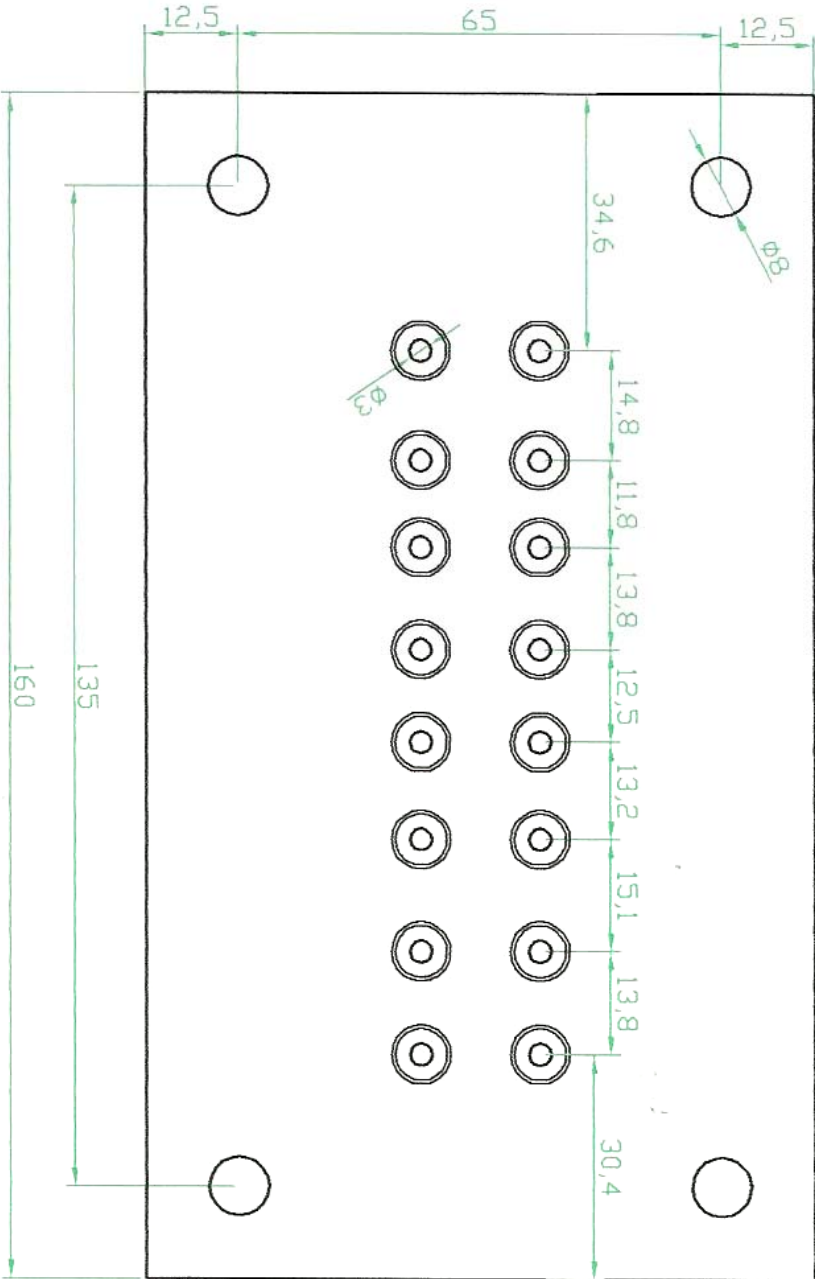


## 7ο ΕΜΒΟΛΟ



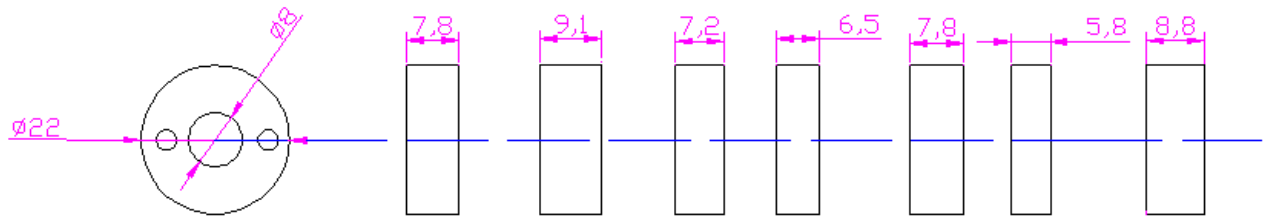


**ΚΕΦΑΛΗ**



ΚΕΦΑΛΗ

**ΣΥΝΔΕΤΙΚΑ ΕΚΚΕΝΤΡΩΝ**



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΦΙΑ

- **Crowther B.**, “The handbook of rubber bonding”, *Rapra Technology Limited*, United Kingdom, pp. 384, (2003).
- **Heide C.**, “Silicone rubber for medical device applications”, *Medical Device & Diagnostic Industry Magazine*, **11**, 38-44, (1999).
- **Hyman O.E.**, Moubayd A.M., Wilson L.L., “Two-cycle Peristaltic Pump with Occlusion Detector”, *United States Patent Office*, Nr. **5217355**, pp. 12, (1993).
- **Hyman O.E.**, **Moubayd A.M.**, “Two-cycle Peristaltic Pump with Occlusion Detector”, *European Patent Office*, Nr. **0526962 A1** (application), pp. 15, Nr. **0526962 B1** (specification), pp. 18, (1993).
- **Kenner T.**, Moser M., Tanev I., and Ono K., “The Liebau-effect or on the optimal use of energy for the circulation of blood”, *Scripta Medica (Brno)*, **73**, 9-14, (2000).
- **Kenner T.**, “Biological asymmetry and cardiovascular blood transport”, *Cardiovascular Engineering: An International Journal*, **4**, 209-218, (2004).
- **Lynch W.**, “Handbook of silicone rubber publication”, *Van Nostrand Reinhold Company (VNR)*, London, pp. 258, (1978).
- **Μανόπουλος Χ.**, “Μελέτη αντλητικών φαινομένων σε ιατροβιολογικές εφαρμογές, μέσω αλληλεπίδρασης ροής ρευστού και κίνησης σώματος” (2009).
- **Micrel Rythmic™**, PCA-Volumetric-Intermittent, model 695 pumps, *Service manual*, “Mechanical description”, micrel Medical Devices S.A., Athens, Greece, 21-29, (1999).
- **Τσαγγάρης Σ.**, “Περισταλτικές αντλίες”, Κεφάλαιο 3 στη *Βιοϊατρική τεχνολογία ιατρικών οργάνων, συσκευών και μηχανημάτων (μέρος Β')*, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, pp.1-29, (2004).
- **Τσαγγάρης Σ.**, “Μηχανική των Ρευστών”, εκδόσεις Συμεών Ο.Ε., Αθήνα, pp. 582, (2005).
- **Tsoukalis A.**, “Linear Peristaltic Pump”, *European Patent Office*, Nr. **0560270 A2** (application), pp. 12, Nr. **0560270 A3** (application), pp. 4, Nr. **0560270 B1** (specification), pp. 13, (1993).
- **Tsoukalis A.**, “Linear Peristaltic Pump”, *European Patent Office*, Nr. **0858812 A2** (application), pp. 13, Nr. **0858812 A3** (application), pp. 2, (1998).
- **Tsoukalis A.**, “Linear Peristaltic Pump”, *United States Patent Office*, Nr. **5980490**, pp. 13, (1999).

- **Watson Marlow 501R** pumphead, *User manual*, “Installation and operating instructions (roller pump)”, Watson-Marlow Limited, Falmouth, Cornwall, England, 1-3, (1982).