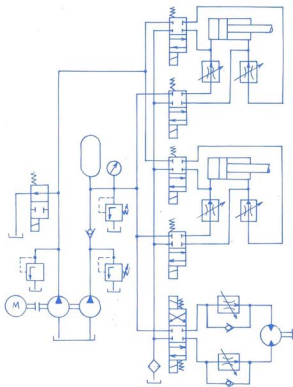


ΝΙΚΟΛΑΟΥ Β. ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

# ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με τον όρο «υδροστατική μετάδοση κίνησης» εννοείται ένας μηχανισμός, στον οποίο η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε υδραυλική ενέργεια πίεσης ενός υγρού και με τη μορφή αυτή μεταφέρεται με μικρή σχετικά ταχύτητα του υγρού σε μια ή περισσότερες άλλες θέσεις, όπου μετατρέπεται πάλι σε μηχανική ενέργεια.

Οι υδροστατικοί αυτοί μηχανισμοί εκτός απ' τη δυνατότητα εύκολης κατανομής της ισχύος που παρουσιάζουν, δίνουν πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες μετατροπής των χαρακτηριστικών μεγεθών της μηχανικής ισχύος, δηλαδή των δυνάμεων και ταχυτήτων ή των ροπών στρέψης και στροφών, απ' ότι οι μηχανισμοί μηχανικής μετάδοσης της κίνησης. Πέρα απ' αυτά τα πλεονεκτήματα, οι υδροστατικοί μηχανισμοί παρουσιάζουν τη δυνατότητα άμεσης και τέλει συνεργασίας τους με ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά ή πνευματικά συστήματα ρύθμισης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα χρήσιμους στις διατάξεις αυτόματου ελέγχου.

Παρ' όλο ότι η υδροστατική μετάδοση κίνησης άρχισε στοιχειωδώς να χρησιμοποιείται απ' τον άνθρωπο πριν δυο αιώνες περίπου, πρέπει να θεωρηθεί ως ένας νέος σχετικά κλάδος της Τεχνικής, γιατί η μεγάλη της ανάπτυξη και διάδοση άρχισε μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Οι δυνατότητες όμως που δίνει αποδείχτηκαν τόσο χρήσιμες στη σύγχρονη Τεχνολογία, ώστε παρ' όλο το σοβαρό μειονέκτημα του χαμηλού βαθμού απόδοσης και ορισμένα άλλα μικρότερης σημασίας μειονεκτήματα που παρουσιάζει, εφαρμόζεται σήμερα σε πολλές περιοχές της Τεχνικής, όπως στην κατασκευή εργαλειομηχανών, αεροπλάνων, πλοίων, αυτοκινήτων, δομικών μηχανών, γεωργικών μηχανών κλπ.

Οι υδροστατικές μεταδόσεις κίνησης αποτελούν σήμερα ένα γρήγορα αναπτυσσόμενο κλάδο της Τεχνικής, που παρουσιάζει ένα συνεχώς διευρυνόμενο πεδίο εφαρμογής. Η συνεχιζόμενη δε βελτίωση των στοιχείων τους, των βαθμών απόδοσής τους και των δυνατοτήτων που παρέχουν, συντελεί πολύ στη διαδοσή τους αυτή.

Δυστυχώς όμως στον τόπο μας δεν δόθηκε ακόμα στον κλάδο

αυτόν η σημασία που πραγματικά έχει. Έτσι, παρ' όλο ότι από πολλούς συναδέλφους μηχανολόγους παρουσιάζεται σχετικό ενδιαφέρον, η εξυπηρέτηση του κλάδου έχει μείνει στο μεγαλύτερο μέρος της στα χέρια εμπειρικών τεχνικών. Το Τμήμα Μηχανολόγων της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ. αναγνώρισε το ρόλο που παίζει ο κλάδος αυτός στην εν γένει ανάπτυξη της Τεχνολογίας και έχει εισαγάγει από χρόνια το μάθημα των υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης στο πρόγραμμα εκπαίδευσης των μηχανολόγων.

Η Ελληνική όμως βιβλιογραφία παρουσιάζεται πολύ φτωχή στην περιοχή των υδροστατικών μεταδόσεων και αυτό είναι κυρίως που έδωσε στον γράφοντα την παρόρμηση για την συγγραφή του παρόντος βιβλίου.

Στο βιβλίο αυτό, μετά μια απαραίτητη αναφορά στις γενικές αρχές της υδραυλικής, που περιλαμβάνεται στο πρώτο κεφάλαιο, αναπτύσσεται στα επόμενα κεφάλαια, μέχρι και το δέκατο, η συγκρότηση, η λειτουργία και τα υπάρχοντα είδη των διαφόρων στοιχείων υδροστατικών μεταδόσεων. Στο ενδέκατο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα υδροστατικά κιβώτια ταχυτήτων, στο δε δωδέκατο και τελευταίο κεφάλαιο δίνονται ορισμένα παραδείγματα υπολογισμού διατάξεων υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης. Σκοπός του τελευταίου αυτού κεφαλαίου, που έχει και αρκετά μεγάλη έκταση, είναι η εμπέδωση των γνώσεων που αποκτήθηκαν απ' τα προηγούμενα κεφάλαια και κυρίως η συνειδητοποίηση του ρόλου που παίζει το κάθε στοιχείο στη λειτουργία μιας υδροστατικής διάταξης. Ακόμα, με τα παραδείγματα του δωδέκατου κεφαλαίου, γίνεται προσπάθεια να δοθεί στον αναγνώστη η μεθοδολογία, με την οποία αντιμετωπίζονται τα διάφορα προβλήματα των υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης.

Τέλος, σε δυο παραρτήματα περιλαμβάνονται ο σχεδιαστικός συμβολισμός των στοιχείων των υδροστατικών μεταδόσεων και ορισμένα τυπικά υδροστατικά κυκλώματα.

Το βιβλίο αποτελεί βασικά ένα εκπαιδευτικό βοήθημα για τους φοιτητές μηχανολόγους, στα πλαίσια του μαθήματος των υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης. Ο συγγραφέας όμως κατέβαλε αρκετή προσπάθεια, ώστε να γίνει προσιτό σε κάθε τεχνικό, που έχει τις βασικές γνώσεις του μηχανολόγου, έστω κι αν αυτός δεν παρακολούθησε το παραπάνω μάθημα. Αν το πέτυχε ή όχι, θα το κρίνουν οι αναγνώστες.

Η έκταση που αναγκαστικά έπρεπε να έχει το βιβλίο σύμφωνα με την ισχύουσα Νομοθεσία, για την εκπλήρωση του βασικού του ρόλου ως εκπαιδευτικού βοηθήματος, δεν επέτρεψε να περιληφθεί σ' αυτό το σημαντικότερο κεφάλαιο των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, στα οποία χρησιμοποιούνται υδροστατικές διατάξεις. Άλλωστε η έκταση που πρέπει να έχει το κεφάλαιο αυτό, το κάνει αντικείμενο ενός ιδιαίτερου βιβλίου, το οποίο ο συγγραφέας ελπίζει να γράψει, Θεού θέλοντος, στο προσεχές μέλλον.

Θεσσαλονίκη 1985

Ν.Β.Π.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### 1. Βασικές αρχές της Μηχανικής των ρευστών

1.1.	Αναλογία δυνάμεων διατομών - Νόμος συνέχειας .....	1
1.2.	Θεώρημα του Bernouilli .....	2
1.2.1.	Δυνάμεις αδράνειας του υγρού - Πίεση επιτάχυνσης .....	6
1.3.	Η ισχύς στις υδροστατικές μεταδόσεις .....	7
1.4.	Η ροή του υγρού .....	8
1.4.1.	Παράλληλη ροή .....	9
1.4.1.1.	Παράλληλη ροή του υγρού μέσα σε σωλήνα κυκλικής διατομής .....	9
1.4.1.2.	Παράλληλη ροή μέσα σε στενό άνοιγμα .....	12
1.4.2.	Τυρβώδης ροή .....	14

### 2. Τα υγρά των υδροστατικών μεταδόσεων

2.1.	Γενικά .....	15
2.1.1.	Κατηγορίες ορυκτελαίων .....	15
2.2.	Ιδιότητες των ορυκτελαίων των υδροστατικών μεταδόσεων .....	17
2.2.1.	Το ιξώδες των ορυκτελαίων .....	17
2.2.2.	Η πυκνότητα των ορυκτελαίων .....	18
2.2.3.	Ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα των ορυκτελαίων .....	19
2.2.4.	Η συμπιεστότητα των ορυκτελαίων .....	20
2.2.4.1.	Γενικά .....	20
2.2.4.2.	Η συμπιεστότητα λαδιού χωρίς φυσαλίδες αέρα .....	20
2.2.4.3.	Η επίδραση της παρουσίας φυσαλίδων αέρα στο ορυκτέλαιο .....	22
2.2.4.3.1.	Η συμπιεστότητα του λαδιού με φυσαλίδες αέρα .....	23
2.2.5.	Λοιπές ιδιότητες των ορυκτελαίων .....	25
2.3.	Δύσφλεκτα υγρά υδροστατικών μεταδόσεων .....	27
2.4.	Συντήρηση των υγρών των υδροστατικών μεταδόσεων .....	28

### 3. Σωληνώσεις των υδροστατικών μεταδόσεων κινήσεως

3.1.	Γενικά .....	29
3.2.	Εκλογή σωληνώσεων .....	31
3.2.1.	Είδος σωληνώσεων .....	31
3.2.2.	Διάμετρος του σωλήνα .....	32
3.2.2.1.	Υπολογισμός απωλειών πίεσης .....	33
3.2.2.1.1.	Υπολογισμός απωλειών πίεσης σ' ευθύγραμμο σωλήνα .....	34
3.2.2.1.2.	Απώλειες στις καμπύλες, γωνίες, ται διευρύνσεις και στενώσεις των σωληνώσεων .....	36

3.2.2.1.3. Απώλειες στις θαλβίδες .....	39
3.2.3. Αντοχή του σωλήνα .....	39
3.2.3.1. Πίεση επιτάχυνσης .....	40
3.2.3.2. Αύξηση της πίεσης λόγω απότομης διακοπής της ροής του υγρού .....	47
3.2.3.2.1. Η συμπίεστικότητα του λαδιού και η παραμόρφωση των σωληνώσεων και συσκευών .....	48
3.2.3.2.2. Αύξηση της πίεσης λόγω απότομης διακοπής της ροής σ' ευθύγραμμο σωλήνα .....	56
3.2.3.2.3. Αύξηση της πίεσης λόγω απότομης διακοπής της ροής σε υδροστατική διάταξη με κινούμενες στερεές μάζες .....	60
3.2.3.3. Αύξηση της πίεσης λόγω βαθμιαίας διακοπής της ροής του λαδιού .....	63
3.2.3.4. Οι ταλαντώσεις στα υδροστατικά κυκλώματα .....	65
3.2.3.4.1. Ο συντονισμός στα υδροστατικά κυκλώματα .....	67
3.2.3.5. Αποφόρτιση κυκλωμάτων που βρίσκονται σε μεγάλη πίεση .....	69
3.2.4. Εκλογή διαστάσεων σωληνώσεων .....	69
3.2.4.1. Εκλογή διαμέτρου .....	69
3.2.4.2. Εκλογή πάχους σωλήνα .....	71

#### 4. Αντλίες υδροστατικών μεταδόσεων

4.1. Γενικά .....	72
4.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά αντλιών υδροστατικών μεταδόσεων .....	72
4.1.2. Παροχή και ογκομετρικός βαθμός απόδοσης της αντλίας .....	74
4.1.2.1. Ογκομετρικές απώλειες .....	75
4.1.2.2. Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης αντλίας .....	78
4.1.3. Ειδική παροχή $q_p$ της αντλίας .....	80
4.1.4. Παρεχόμενη στην αντλία ισχύς και συνολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας .....	81
4.1.5. Απαιτούμενη ροπή στρέψης στην άτρακτο της αντλίας και μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας .....	81
4.1.6. Αντλίες ρυθμιζόμενης ειδικής παροχής και συντελεστής ρύθμισης $\alpha$ ...	83
4.1.7. Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλιών .....	84
4.1.8. Βαθμός ανομοιομορφίας αντλίας .....	85
4.2. Κατηγορίες και είδη αντλιών υδροστατικών μεταδόσεων .....	86
4.2.1. Αντλίες οδοντωτών τροχών .....	86
4.2.1.1. Αντλίες οδοντωτών τροχών με εξωτερική οδόντωση .....	87
4.2.1.1.1. Περιγραφή και λειτουργία .....	87
4.2.1.1.2. Ειδική παροχή και βαθμός ανομοιομορφίας .....	88
4.2.1.1.3. Κατασκευαστικές παραλλαγές και ιδιότητες .....	92
4.2.1.2. Αντλίες οδοντωτών τροχών με εσωτερική οδόντωση .....	98
4.2.1.2.1. Περιγραφή και λειτουργία .....	98
4.2.1.2.2. Κατασκευαστικές παραλλαγές και ιδιότητες .....	99
4.2.1.3. Κοχλιωτές αντλίες .....	100
4.2.2. Αντλίες με πτερύγια .....	102
4.2.2.1. Αντλίες με πτερύγια σταθερής παροχής - Περιγραφή και τρόπος λειτουργίας .....	102
4.2.2.1.1. Ειδική παροχή και βαθμός ανομοιομορφίας .....	103
4.2.2.1.2. Κατασκευαστικές παραλλαγές και ιδιότητες .....	105

4.2.2.2.	Αντλίες με πτερύγια ρυθμιζόμενης παροχής .....	106
4.2.2.3.	Λοιπά χαρακτηριστικά των αντλιών με πτερύγια .....	108
4.2.3.	Εμβολοφόροι αντλίες αξονικών εμβόλων .....	109
4.2.3.1.	Τρόπος λειτουργίας της αντλίας αξονικών εμβόλων .....	111
4.2.3.2.	Ειδική παροχή και βαθμός ανομοιομορφίας .....	113
4.2.3.3.	Κατασκευαστικές παραλλαγές των αντλιών αξονικών εμβόλων .....	118
4.2.3.4.	Γενικές ιδιότητες των αντλιών αξονικών εμβόλων .....	121
4.2.4.	Εμβολοφόροι αντλίες ακτινικών εμβόλων .....	125
4.2.4.1.	Περιγραφή και τρόπος λειτουργίας αντλιών ακτινικών εμβόλων .....	125
4.2.4.2.	Ειδική παροχή και βαθμός ανομοιομορφίας .....	127
4.2.4.3.	Παράλλαγές των αντλιών ακτινικών εμβόλων .....	129
4.2.4.4.	Γενικές ιδιότητες των αντλιών ακτινικών εμβόλων .....	132
4.3.	Η εκλογή και εγκατάσταση αντλίας σε υδροστατικό κύκλωμα .....	133
4.3.1.	Η εκλογή του κατάλληλου λαδιού .....	133
4.3.2.	Συμπληρωματικά μέτρα κατά την εγκατάσταση αντλιών .....	137
4.3.3.	Συντήρηση των αντλιών .....	138
4.4.	Χειρισμός και ρυθμίσεις λειτουργίας των αντλιών ρυθμιζόμενης ειδικής παροχής .....	138
4.4.1.	Γενικά .....	138
4.4.2.	Ο χειρισμός των αντλιών ρυθμιζόμενης ειδικής παροχής .....	138
4.4.3.	Η αυτόματη ρύθμιση στις αντλίες ρυθμιζόμενης ειδικής παροχής .....	142
4.4.3.1.	Διατάξεις αυτόματης ρύθμισης σταθερής ισχύος .....	142
4.4.3.2.	Διατάξεις ρύθμισης πίεσεως της αντλίας .....	145
4.4.3.3.	Διατάξεις ρύθμισης παροχής της αντλίας .....	146
4.4.3.4.	Άλλες διατάξεις ρύθμισης .....	147
<b>5. Κινητήρες υδροστατικών μεταδόσεων</b>		
5.1.	Γενικά .....	148
5.1.1.	Γενικά χαρακτηριστικά των υδροστατικών κινητήρων .....	148
5.1.2.	Παροχή και ογκομετρικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα .....	150
5.1.3.	Ροπή στρέψης και μηχανικός βαθμός απόδοσης του υδροστατικού κινητήρα .....	151
5.1.4.	Κινητήρες ρυθμιζόμενης παροχής και συντελεστής ρύθμισης α .....	153
5.1.5.	Χαρακτηριστικές καμπύλες υδροστατικών κινητήρων .....	154
5.1.6.	Ροπή εκκινήσεως των υδροστατικών κινητήρων .....	155
5.1.7.	Ροπή ακινησίας υδροστατικού κινητήρα .....	156
5.1.8.	Βαθμός ανομοιομορφίας των υδροστατικών κινητήρων .....	156
5.1.9.	Ροπή πεδήσεως υδροστατικού κινητήρα .....	157
5.1.10.	Ιδιοσυχνότητα υδροστατικού κινητήρα .....	158
5.2.	Κατηγορίες και είδη υδροστατικών κινητήρων .....	160
5.2.1.	Ταχύστροφοι υδροστατικοί κινητήρες .....	160
5.2.1.1.	Κινητήρες οδοντωτών τροχών .....	161
5.2.1.2.	Κινητήρες με πτερύγια .....	162
5.2.1.3.	Εμβολοφόροι κινητήρες αξονικών εμβόλων .....	163
5.2.1.4.	Εμβολοφόροι κινητήρες ακτινικών εμβόλων .....	166
5.2.2.	Βραδύστροφοι υδροστατικοί κινητήρες .....	166

5.2.2.1.	Κινητήρες ακτινικών εμβόλων .....	166
5.2.2.2.	Βραδύστροφοι κινητήρες αξονικών εμβόλων .....	168
5.2.3.	Ταλαντευτικοί υδροστατικοί κινητήρες .....	169

## 6. Κύλινδροι υδροστατικών μεταδόσεων

6.1.	Γενικά .....	171
6.1.1.	Γενικά χαρακτηριστικά των υδροστατικών κυλίνδρων .....	172
6.1.2.	Παροχή και ογκομετρικός βαθμός απόδοσης του κυλίνδρου .....	173
6.1.3.	Μηχανικοί βαθμοί απόδοσης και πίεση λειτουργίας του κυλίνδρου .....	174
6.1.4.	Δύναμη επιτάχυνσης $F_b$ .....	177
6.1.5.	Ισχύς και συνολικός βαθμός απόδοσης υδροστατικού κυλίνδρου .....	177
6.1.6.	Ιδιοσυχνότητα του κυλίνδρου .....	178
6.1.7.	Ταχύτητα του εμβόλου $v_k$ .....	178
6.2.	Είδη και παραλλαγές των υδροστατικών κυλίνδρων .....	179
6.2.1.	Υδροστατικοί κύλινδροι απλής ενέργειας .....	179
6.2.2.	Υδροστατικοί κύλινδροι διπλής ενέργειας .....	180
6.2.3.	Ειδικό υδροστατικό κύλινδροι .....	181
6.3.	Η στήριξη των υδροστατικών κυλίνδρων .....	183
6.4.	Η κατασκευή των υδροστατικών κυλίνδρων .....	185
6.4.1.	Υπολογισμός πάχους $s$ κυλίνδρου και $s'$ πώματος .....	186
6.4.2.	Υπολογισμός της διαμέτρου του βάκτρου .....	188
6.5.	Το φρενάρισμα του εμβόλου .....	190

## 7. Στοιχεία χειρισμού και ρύθμισης υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης

7.1.	Γενικά χαρακτηριστικά των βαλβίδων .....	194
7.2.	Κατηγορίες και είδη βαλβίδων .....	195
7.2.1.	Βαλβίδες πίεσεως .....	195
7.2.1.1.	Βαλβίδες οριακής πίεσεως .....	195
7.2.1.1.1.	Απλή βαλβίδα οριακής πίεσεως .....	195
7.2.1.1.2.	Σύνθετη βαλβίδα οριακής πίεσεως .....	198
7.2.1.1.3.	Βαλβίδες οριακής πίεσεως με ξένη διέγερση .....	199
7.2.1.2.	Βαλβίδες ρύθμισης της πίεσεως .....	200
7.2.1.2.1.	Απλές βαλβίδες ρύθμισης της πίεσεως .....	201
7.2.1.2.2.	Σύνθετες βαλβίδες ρύθμισης της πίεσεως .....	201
7.2.1.3.	Ηλεκτροϋδραυλικές βαλβίδες οριακής πίεσεως .....	203
7.2.1.4.	Ειδικά χαρακτηριστικά βαλβίδων πίεσεως .....	204
7.2.2.	Βαλβίδες αντεπιστροφής .....	204
7.2.2.1.	Απλές βαλβίδες αντεπιστροφής .....	204
7.2.2.2.	Βαλβίδες αντεπιστροφής με δυνατότητα αντίθετης ροής .....	205
7.2.2.3.	Καμπύλες λειτουργίας και ειδικά χαρακτηριστικά των βαλβίδων αντεπιστροφής .....	206
7.2.3.	Βαλβίδες ρύθμισης παροχής .....	207



7.2.3.1.	Στραγγαλιστικές βαλβίδες .....	207
7.2.3.1.1.	Λειτουργία των στραγγαλιστικών βαλβίδων .....	207
7.2.3.2.	Βαλβίδες σταθερής παροχής .....	209
7.2.3.3.	Καμπύλες λειτουργίας και ειδικά χαρακτηριστικά των βαλβίδων ρύθμισης παροχής .....	212
7.2.4.	Βαλβίδες διευθύνσεως ροής .....	213
7.2.4.1.	Χαρακτηρισμός και σχεδιαστική παράσταση των βαλβίδων διευθύνσεως ροής .....	213
7.2.4.2.	Υποκατηγορίες των βαλβίδων διευθύνσεως ροής .....	214
7.2.4.3.	Βαλβίδες διευθύνσεως ροής με έμβολα και άμεσο χειρισμό .....	215
7.2.4.4.	Δυνάμεις χειρισμού των βαλβίδων διευθύνσεως ροής .....	217
7.2.4.5.	Βαλβίδες διευθύνσεως ροής με έμβολα και έμμεσο χειρισμό .....	220
7.2.4.6.	Τρόποι χειρισμού των βαλβίδων διευθύνσεως ροής .....	222
7.2.4.7.	Καμπύλες λειτουργίας και ειδικά χαρακτηριστικά βαλβίδων διευθύνσεως ροής .....	224
7.2.5.	Ηλεκτροϋδραυλικές σερβοβαλβίδες .....	225

## 8. Υδραυλικοί αποταμιευτές ενέργειας

8.1.	Γενικά .....	229
8.2.	Κατηγορίες αποταμιευτών ενέργειας .....	230
8.2.1.	Αποταμιευτές με κύστη ή μεμβράνη .....	231
8.2.2.	Υπολογισμός των αποταμιευτών ενέργειας με πεπιεσμένο αέριο .....	234
8.2.2.1.	Υπολογισμός αποταμιευτή για κύκλωμα με διακοπτόμενη λειτουργία των καταναλώσεων .....	234
8.2.2.2.	Ο αποταμιευτής ενέργειας σαν απορροφητής κρουστικών φορτίων .....	248

## 9. Η στεγανοποίηση των στοιχείων υδροστατικών μεταδόσεων

9.1.	Στεγανοποίηση με μικρά διάκενα .....	251
9.2.	Στεγανοποίηση με παρεμβολή στεγανοποιητικών υλικών .....	253
9.2.1.	Στεγανοποιητικά υλικά .....	254
9.2.1.1.	Ελαστομερή στεγανοποιητικά υλικά .....	254
9.2.1.2.	Θερμοπλαστικά υλικά .....	255
9.2.1.3.	Μέταλλα .....	256
9.3.	Στατική στεγανοποίηση .....	256
9.3.1.	Στατική στεγανοποίηση με μέταλλα .....	257
9.3.2.	Στατική στεγανοποίηση με λοιπά στεγανοποιητικά μέσα .....	258
9.4.	Δυναμική στεγανοποίηση .....	259
9.4.1.	Δυναμική στεγανοποίηση με μη μεταλλικά υλικά .....	260
9.4.2.	Δυναμική στεγανοποίηση με μεταλλικά ελατήρια .....	262

## 10. Λοιπά στοιχεία υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης

10.1.	Φίλτρα λαδιού .....	264
10.1.1.	Γενικά .....	264

10.1.2.	Ταξινόμηση των λαδιών ανάλογα με το βαθμό ρύπανσής τους	265
10.1.3.	Βασικά χαρακτηριστικά των φίλτρων	265
10.1.4.	Κατηγορίες φίλτρων	267
10.1.5.	Διάκριση των φίλτρων ανάλογα με τη θέση τους στο υδροστατικό κύκλωμα	268
10.1.6.	Φίλτρα ολικής και μερικής ροής - Βαλβίδες by-pass	271
10.2.	Ψυγεία λαδιού	272
10.2.1.	Γενικά	272
10.2.2.	Η ισχύς απωλειών μιας υδροστατικής διάταξης	273
10.2.3.	Υπολογισμός της θερμοκρασίας ισορροπίας $\theta_{\text{δλ max}}$ του λαδιού	274
10.2.4.	Η ψύξη του λαδιού	275
10.2.4.1.	Αερόψυκτα ψυγεία λαδιού	275
10.2.4.2.	Υδρόψυκτα ψυγεία λαδιού	278
10.2.5.	Θερμοστάτες	278
10.2.6.	Θερμαντήρες λαδιού	279
10.3.	Δοχεία λαδιού	279

## 11. Υδροστατικά κιβώτια ταχυτήτων

11.1.	Γενικά	283
11.2.	Διατάξεις υδροστατικών κιβωτίων	284
11.2.1.	Υδροστατικά κιβώτια ταχυτήτων ανοιχτού κυκλώματος	284
11.2.2.	Υδροστατικά κιβώτια ταχυτήτων κλειστού κυκλώματος	286
11.2.2.1.	Η ψύξη του λαδιού στα κλειστά κυκλώματα	288
11.2.2.2.	Διατάξεις κιβωτίων κλειστού κυκλώματος	291
11.3.	Κατηγορίες υδροστατικών κιβωτίων ανάλογα με τις δυνατότητες ρύθμισής τους	292
11.3.1.	Σχέσεις μετατροπής και βαθμός απόδοσης υδροστατικών κιβωτίων ταχυτήτων	292
11.3.2.	Κιβώτια με αντλία ρυθμιζόμενης ειδικής παροχής και κινητήρα σταθερής ειδικής παροχής	295
11.3.3.	Κιβώτια με αντλία σταθερής ειδικής παροχής και κινητήρα ρυθμιζόμενης ειδικής παροχής	297
11.3.4.	Κιβώτια με αντλία ρυθμιζόμενης ειδικής παροχής και κινητήρα ρυθμιζόμενης ειδικής παροχής	299
11.4.	Ιδιότητες υδροστατικών κιβωτίων	300
11.5.	Υδροστατικά - μηχανικά κιβώτια με διαίρεση ισχύος	301
11.5.1.	Περιγραφή και λειτουργία του κιβωτίου	302
11.5.2.	Σχέσεις μετατροπής και βαθμός απόδοσης του κιβωτίου	304

## 12. Υπολογισμός διατάξεων υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης

12.1.	Γενικά	312
12.2.	Υπολογισμός απλών κυκλωμάτων με γνωστά στοιχεία	312
12.2.1.	Κύκλωμα τροφοδοσίας υδροστατικού κυλίνδρου	312
12.2.2.	Κύκλωμα τροφοδοσίας υδροστατικού κινητήρα	330
12.3.	Σύνθετα υδροστατικά κυκλώματα με γνωστά στοιχεία	338
12.3.1.	Σύνθετο υδροστατικό κύκλωμα με μονάδα ισχύος ηλεκτροκινητήρα	338

12.3.2.	Σύνθετο υδροστατικό κύκλωμα με μονάδα ισχύος Μ.Ε.Κ. ....	372
12.4.	Υπολογισμός υδροστατικών στοιχείων σε υπάρχουσα μηχανή. Εκλογή των υδροστατικών κυλίνδρων ανύψωσης του κάδου φορτωτή .....	382
12.5.	Υπολογισμός και σχεδίαση υδροστατικής μετάδοσης κίνησης σε απλή μηχανή .....	402

### **Παράρτημα**

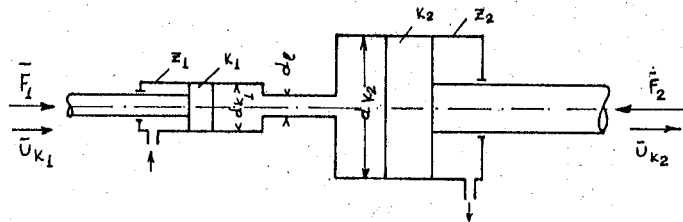
Παράρτημα Α.	Σχεδιαστικός συμβολισμός στοιχείων υδροστατικών μεταδόσεων .	439
Παράρτημα Β.	Τυπικά υδροστατικά κυκλώματα .....	447
	Βιβλιογραφία .....	459

# 1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ [1], ως [13], και [19]\*

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται ορισμένες βασικές αρχές και νόμοι της μηχανικής των ρευστών που είναι γενικής εφαρμογής και απαραίτητοι για τη μελέτη των κυκλωμάτων μεταδόσεως κίνησης.

## 1.1. ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ-ΔΙΑΤΟΜΩΝ – ΝΟΜΟΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Έστω η διάταξη του σχ. 1.1 που περιλαμβάνει δύο κυλίνδρους  $Z_1$  και  $Z_2$  με τα έμβολά τους  $K_1$  και  $K_2$  που επικοινωνούν μεταξύ τους και είναι γεμάτοι με κάποιο υγρό.



Σχ. 1.1. Αναλογία δυνάμεων διατομών.

Το έμβολο  $K_1$  κινείται με ταχύτητα  $v_{k1}$ , όπως φαίνεται στο σχήμα ενώ στο θάκτρο του ενεργεί η δύναμη  $F_1$ .

Αντίστοιχα το έμβολο  $K_2$  κινείται με ταχύτητα  $v_{k2}$  και στο θάκτρο του ενεργεί η δύναμη  $F_2$ . Οι διατομές των δύο εμβόλων είναι αντίστοιχα:

$$A_{k_1} = \frac{\pi}{4} d_{k_1}^2 \quad A_{k_2} = \frac{\pi}{4} d_{k_2}^2$$

\* Οι μονοψήφιοι και διψήφιοι αριθμοί (χωρίς τελεία μεταξύ των ψηφίων τους) που συναντώνται στο κείμενο αντιστοιχούν στα συγγράμματα ή δημοσιεύσεις που σημειώνονται στη βιβλιογραφία με τους ίδιους αριθμούς και που είναι σχετικά με το μέρος του κειμένου όπου αναφέρονται.

Γίνεται δεκτό, ότι κατά τη λειτουργία της διάταξης δεν υπάρχουν απώλειες ισχύος εξαιτίας τριβών κλπ. του υγρού, ούτε τριβές μεταξύ εμβόλων-βάκτρων και τοιχωμάτων κυλίνδρων.

Θεωρείται ακόμα, ότι το υγρό είναι ασυμπίεστο και ότι είναι αμελητέες οι διαφορές της κινητικής ενέργειας του υγρού στους δύο κυλίνδρους και στο συνδετικό σωλήνα. Εφόσο ισχύουν οι παραπάνω παραδοχές, η πίεση  $p$  του υγρού στους δύο κυλίνδρους είναι ίδια.

Έτσι είναι:

$$F_1 = A_{k_1} p \quad \text{και} \quad F_2 = A_{k_2} p$$

οπότε

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_{k_1}}{A_{k_2}} \quad (1.1)$$

Επίσης ο όγκος  $V_1 = A_{k_1} v_{k_1}$  που φεύγει στη μονάδα του χρόνου απ' τον κύλινδρο  $Z_1$ , μπαίνει στον κύλινδρο  $Z_2$  και μετακινεί το έμβολο  $K_2$ , άρα θα είναι  $V_1 = A_{k_2} v_{k_2}$ .

Συνεπώς:

$$v_{k_1} A_{k_1} = v_{k_2} A_{k_2} \quad (1.2)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει την **αρχή της συνέχειας**.

Για τις πραγματικές διατάξεις, όπου υπάρχουν απώλειες ισχύος και τα υγρά είναι συμπιεστά, οι παραπάνω σχέσεις (1.1) και (1.2) ισχύουν με ορισμένες διορθώσεις, όπως θα αναπτυχθεί στα παρακάτω κεφάλαια. Πάντως η αρχή της συνέχειας ισχύει με ακρίβεια, εφόσον η πίεση του υγρού είναι σταθερή, οπότε δεν υπάρχουν μεταβολές του όγκου του λαδιού λόγω ελαστικότητας του παραμόρφωσης.

## 1.2 ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΟΥ BERNOUILLI

Έστω ο σωλήνας μεταβλητής διατομής που φαίνεται στο σχ. 1.2, μέσα στον οποίο τρέχει ένα υγρό πυκνότητας  $\rho$ . Υποτίθεται ότι το υγρό είναι ασυμπίεστο και ότι η ροή γίνεται χωρίς απώλειες ισχύος.

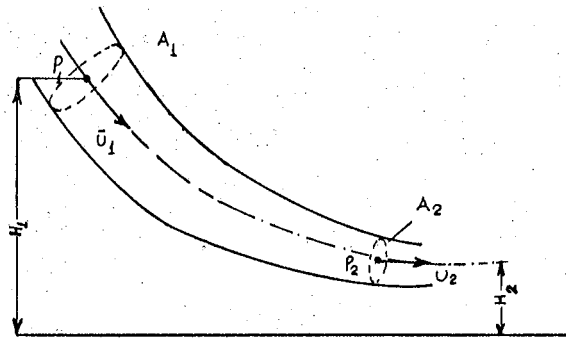
Θεωρούνται δύο διατομές του σωλήνα αυτού, η διατομή  $A_1$  που το κέντρο της βρίσκεται σε ύψος  $H_1$  από το επίπεδο αναφοράς των υψών και η  $A_2$  με ύψος αντίστοιχα  $H_2$ . Έστω ότι οι πιέσεις και οι ταχύτητες του υγρού στις δύο διατομές είναι αντίστοιχα  $p_1, v_1$  και  $p_2, v_2$ .

Απ' τη διατομή  $A_1$  σε ένα στοιχειώδες χρονικό διάστημα  $dt$  περνάει όγκος υγρού  $dV_1 = A_1 v_1 dt$ .

Ο στοιχειώδης αυτός όγκος έχει:

$$- \text{Ενέργεια πίεσης } dW_{p_1} = p_1 dV_1$$

- κινητική ενέργεια :  $dW_{k1} = dm \frac{v_1^2}{2} = \frac{\rho}{2} v_1^2 dV_1$
- ενέργεια ύψους :  $dW_H = H_1 g dm = \rho g H_1 dV_1$



Σχ. 1.2. Ροή σε σωλήνα μεταβλητής διατομής.

Η συνολική ενέργεια του στοιχειώδους όγκου  $dV_1$  είναι

$$dW_1 = \left( p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 + \rho g H_1 \right) dV_1$$

και η ανά μονάδα όγκου ενέργεια:

$$\frac{dW_1}{dV_1} = p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 + \rho g H_1$$

Στη διατομή  $A_2$  βρίσκεται ανάλογα:

$$\frac{dW_2}{dV_2} = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + \rho g H_2$$

Αφού δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας στο σωλήνα θα είναι:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 + \rho g H_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + \rho g H_2 \quad (1.3)$$

Γενικότερα, σ' οποιοδήποτε σημείο  $i$  του σωλήνα αν εξετασθεί το υγρό, ισχύει η σχέση:

$$p_i + \frac{\rho}{2} v_i^2 + \rho g H_i = \text{σταθ.} \quad (1.4)$$

Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή ως θεώρημα του Bernoulli.

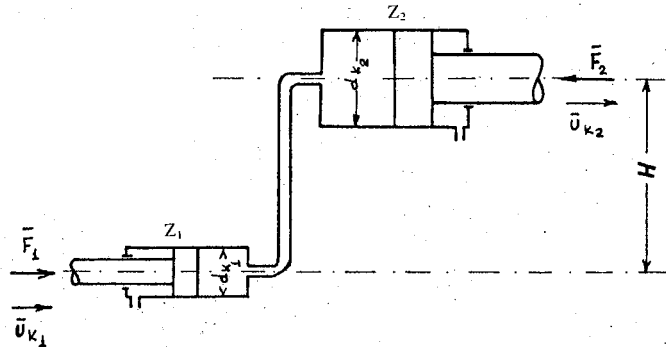
Στα πραγματικά κυκλώματα των υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης,

όπου εξαιτίας τριβών κλπ. υπάρχουν απώλειες ισχύος εκφραζόμενες σαν απώλειες πίεσης  $\Delta p_{απ}$  η παραπάνω σχέση (1.3) ισχύει διαφοροποιημένη, δηλαδή:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 + \rho g H_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + \rho g H_2 + \Delta p_{απ 1,2} \quad (1.5)$$

Επίσης, στις πρακτικές εφαρμογές των υδροστατικών μεταδόσεων, οι χρησιμοποιούμενες πιέσεις του υγρού είναι κατά κανόνα μεγάλες, ενώ αντίθετα οι ταχύτητες του υγρού και οι υψομετρικές διαφορές είναι σχετικά πολύ μικρές. Πραγματικά, οι μεν χρησιμοποιούμενες ταχύτητες του λαδιού στις υδροστατικές μεταδόσεις είναι της τάξεως  $5 \div 10$  m/sec ενώ οι υψομετρικές διαφορές είναι κατά κανόνα το πολύ μερικά μέτρα.

Έτσι, οι όροι  $\frac{\rho}{2} v_i^2$  και  $\rho g H_i$  γίνονται τόσο μικροί σε σχέση με τους άλλους, ώστε να είναι δυνατό να θεωρηθούν αμελητέοι κατά την μελέτη της ροής του υγρού στις σωληνώσεις των υδροστατικών κυκλωμάτων. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα:



Σχ. 1.3. Η επίδραση της επιτάχυνσης του υγρού και της υψομετρικής διαφοράς στα πραγματικά υδροστατικά κυκλώματα.

Έστω το κύκλωμα του σχ. 1.3.

Δίνονται:  $d_{k1} = 50$  mm,  $d_{k2} = 100$  mm,  $F_1 = 40$  KN,  $v_{k1} = 0,20$  m/sec  
 $H = 4$  m και η πυκνότητα του υγρού είναι  $\rho = 900$  kg/m<sup>3</sup>.

Γίνεται δεκτό ακόμα, ότι τα έμβολα στους κυλίνδρους παρουσιάζουν απόλυτη στεγανότητα (δεν υπάρχει διαρροή υγρού απ' τη μια μεριά του εμβόλου προς την άλλη), ότι δεν υπάρχουν απώλειες τριβών κυλίνδρων-εμβόλων και ότι οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών κατά τη ροή του λαδιού απ' τον κύλινδρο  $Z_1$  στον  $Z_2$  είναι  $\Delta p_{απ} = 5$  bar.

Οι διατομές των εμβόλων είναι:

$$A_{k_1} = \frac{\pi}{4} 5^2 = 19,63 \text{ cm}^2 \quad A_{k_2} = \frac{\pi}{4} \cdot 10^2 = 78,54 \text{ cm}^2$$

Υπολογίζεται πρώτα η δύναμη  $F_2$  με τη χρησιμοποίηση της σχέσης (1.5).  
Η πίεση  $p_1$  στον κύλινδρο  $Z_1$  είναι:

$$p_1 = \frac{F_1}{A_{k_1}} = \frac{40000 \text{ N}}{19,63 \text{ cm}^2} = 2038 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 203,8 \text{ bar}$$

Η ταχύτητα του εμβόλου  $v_{k_2}$  υπολογίζεται απ' το νόμο της συνέχειας:

$$v_{k_2} = v_{k_1} \frac{A_{k_1}}{A_{k_2}} = 0,2 \frac{19,63}{78,54} = 0,05 \text{ m/sec}$$

Με τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζεται η πίεση  $p_2$  στον κύλινδρο  $Z_2$  απ' τη σχέση (1.5):

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 + \rho g H_1 - \frac{\rho}{2} v_2^2 - \rho g H_2 - \Delta p_{\text{απ.1,2}}$$

ή

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2) + \rho g (H_1 - H_2) - \Delta p_{\text{απ.1,2}}$$

ή

$$p_2 = 203,8 \text{ bar} + \frac{900 \text{ kg/m}^3}{2} (0,2^2 - 0,05^2) \text{ m}^2/\text{sec}^2 + \\ + 900 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/sec}^2 (0 - 4) - 5 \text{ bar}$$

ή

$$p_2 = 203,8 \text{ bar} + 16,875 \text{ N/m}^2 - 35316 \text{ N/m}^2 - 5 \text{ bar}$$

ή

$$p_2 = 203,8 \text{ bar} - 5 \text{ bar} - (35316 - 16,875) \cdot 10^{-5} \text{ bar}$$

ή

$$p_2 = 203,8 \text{ bar} - 5 \text{ bar} - 0,35 \text{ bar} = 198,45 \text{ bar}$$

και η δύναμη  $F_2$  είναι:

$$F_2 = A_{k_2} p_2 = 78,54 \text{ cm}^2 \cdot 198,45 \text{ bar} = 15586,3 \text{ daN}$$

ή

$$F_2 = 155863 \text{ N}$$

Αν δεν ληφθούν υπ' όψη οι παράγοντες  $\rho \frac{v^2}{2}$  και  $\rho g H$ , βρίσκεται:

$$p_2 = p_1 - \Delta p_{\text{απ.1,2}} = 203,8 - 5 = 198,8 \text{ bar}$$

και

$$F_2 = 78,54 \cdot 198,8 = 15613,7 \text{ daN}$$

ή

$$F_2 = 156137 \text{ N}$$

Με τον απλοποιημένο υπολογισμό λοιπόν, προκύπτει μια διαφορά μικρότερη του 0,2 %, πράγμα που δείχνει, ότι πραγματικά οι όροι  $\rho \frac{v^2}{2}$  και  $\rho g H$  έχουν αμελητέα επίδραση στους υπολογισμούς. Έτσι, στις



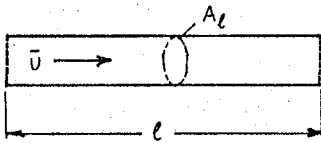
πρακτικές εφαρμογές των υδροστατικών μεταδόσεων κίνησης, αντί της σχέσης (1.5), χρησιμοποιείται η σχέση:

$$p_1 = p_2 + \Delta p_{\text{απ.1,2}} \quad (1.6)$$

### 1.2.1 Δυνάμεις αδράνειας του υγρού. Πίεση επιτάχυνσης

Στην παράγραφο αυτή θα εξετασθεί κάπως αναλυτικότερα ο όρος  $\rho \frac{v_1^2}{2}$  της εξίσωσης του Bernoulli, γιατί σ' ορισμένες περιπτώσεις λειτουργίας των υδροστατικών κυκλωμάτων, αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Με τον όρο αυτόν, εκφράζεται η ανά μονάδα όγκου του υγρού κινητική του ενέργεια και κάθε μεταβολή του, που σημαίνει αντίστοιχη μεταβολή της ταχύτητας του υγρού, έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυνάμεων αδράνειας.



Σχ. 1.4. Επιτάχυνση του υγρού σε ευθύγραμμο σωλήνα.

Αν το υγρό, που βρίσκεται σ' ένα σωλήνα διατομής  $A_l$  και μήκους  $l$  (βλ. σχ. 1.4) και τρέχει με μια ταχύτητα έστω  $v$ , πρέπει για οποιοδήποτε λόγο να επιταχυνθεί, θα αντιδράσει στην επιτάχυνση του με την ανάπτυξη δυνάμεων αδράνειας πράγμα που σημαίνει, ότι θα πρέπει για την αντιμετώπισή τους να εφαρμοσθεί μια πρόσθετη πίεση

$\Delta p_b$  στην αρχή του σωλήνα.

Αν η μεταβολή της ταχύτητας  $dv$  γίνεται σε χρόνο  $dt$  η δύναμη αδράνειας  $F_b$  είναι κατά τα γνωστά,

$$F_b = m \frac{dv}{dt} \quad \text{όπου} \quad m = \text{η μάζα του υγρού}$$

Στο σωλήνα του σχ. 1.4 περιέχεται μάζα υγρού

$$m_l = \rho l A_l \quad (\rho = \text{η πυκνότητα του υγρού):}$$

Στην αρχή λοιπόν του σωλήνα πρέπει να εφαρμοσθεί μια δύναμη ίση και αντίθετη της  $F_b$ , η οποία έχει μέτρο:

$$F_b = \rho l A_l \frac{dv}{dt}$$

Θα πρέπει λοιπόν η πίεση στην αρχή του σωλήνα, να αυξηθεί κατά  $\Delta p_b$  όπου:

$$\Delta p_b = \frac{F_b}{A_l} = \rho l \frac{dv}{dt} \quad (1.7)$$

Η πρόσθετη αυτή πίεση ονομάζεται πίεση επιτάχυνσης.

Η σχέση (1.7) μπορεί να γραφεί:

$$\Delta p_b = \frac{\rho l}{A_l} A_l \frac{dv}{dt}$$

Είναι όμως

$$A_l \frac{dv}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad (1.8)$$

Άρα η διαφορά πίεσης  $\Delta p_b$  μπορεί να εκφραστεί, ως συνάρτηση της παροχής  $Q$ :

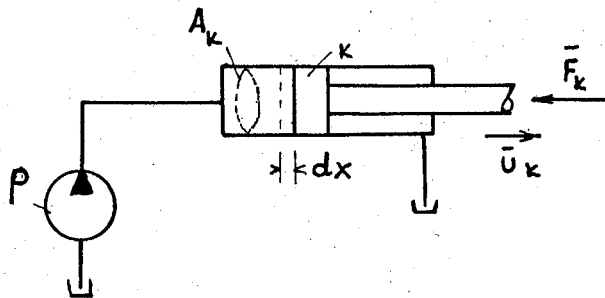
$$\Delta p_b = \frac{\rho l}{A_l} \frac{dQ}{dt} \quad (1.9)$$

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στα υδροστατικά κυκλώματα, που το λάδι τρέχει κανονικά, η πίεση  $\Delta p_b$  δεν είναι μεγάλη σε σχέση με τις χρησιμοποιούμενες πιέσεις.

Αποκτά όμως μεγάλες τιμές σ' ορισμένες περιπτώσεις, όπως π.χ. στην απότομη διακοπή της ροής του υγρού, κατά το γρήγορο κλείσιμο των βαλβίδων διακοπής. Οι περιπτώσεις όμως αυτές θα εξετασθούν παρακάτω, στο κεφάλαιο περί σωληνώσεων.

### 1.3 Η ΙΣΧΥΣ ΣΤΙΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΛΟΞΕΙΣ

Έστω το κύκλωμα του σχ. 1.5, στο οποίο θεωρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες τριβών και ότι το υγρό που κυκλοφορεί σ' αυτό είναι ασυμπίεστο.



Σχ. 1.5. Η υδραυλική ισχύς.

Το έμβολο  $K$  κινείται με ταχύτητα  $v_k$  ενώ στο βάκτρο ενεργεί η δύναμη  $F_k$ . Η αντλία  $P$  τροφοδοτεί τον κύλινδρο με υγρό.

Το στοιχειώδες έργο κατά μία μετακίνηση του εμβόλου έστω  $dx$  είναι:

$$dW = F_x dx = p A_k dx$$

όπου  $p$  η πίεση του υγρού στον κύλινδρο και  $A_k$  η διατομή του εμβόλου.

Το έργο στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή η ισχύς  $P$  που πρέπει να δοθεί για να κινείται το έμβολο με την ταχύτητα  $v_k$  είναι:

$$P = \frac{dW}{dt} = p A_k \frac{dx}{dt} = p A_k v_k \quad (1.10)$$

Είναι όμως  $A_k v_k = Q_p$  όπου  $Q_p$  η παροχή της αντλίας. Άρα (και πάντα με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν απώλειες) η ισχύς της αντλίας θα είναι

$$P_p = p Q_p \quad (1.11)$$

Δηλαδή η ισχύς εκφράζεται ως γινόμενο της πίεσης επί την παροχή.

## 1.4 Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ

Όπως είναι γνωστό απ' τη μηχανική των ρευστών, η ροή του υγρού μέσα στα υδραυλικά κυκλώματα είναι δυνατό να είναι **παράλληλη ή τυρβώδης**.

Κατά την παράλληλη ροή, τα στρώματα του υγρού κινούνται στις σωληνώσεις σε τροχιές παράλληλες μεταξύ τους, ενώ στην τυρβώδη δημιουργούνται κατά τη ροή στροβιλισμοί του υγρού.

Το είδος της ροής που αποκαθίσταται κάθε φορά σ' έναν αγωγό, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως την ταχύτητα  $v$  του υγρού, το κινηματικό ιξώδες  $\nu$ , την υδραυλική διάμετρο του σωλήνα  $d_h$  και την τραχύτητα των εσωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα.

Ο τελευταίος παράγοντας δεν παίζει ρόλο στην περίπτωση της παράλληλης ροής. Διευκρινίζεται, ότι για μεν τους αγωγούς κυκλικής διατομής η υδραυλική διάμετρος είναι ίδια με τη διάμετρο  $d$  του αγωγού, ενώ στην γενική περίπτωση οποιασδήποτε διατομής, η υδραυλική διάμετρος δίνεται απ' τη σχέση:

$$d_h = \frac{4A}{U}$$

όπου  $A$  το εμβαδόν διατομής του αγωγού και  $U$  το μήκος της περιμέτρου της διατομής.

Πληροφορίες για το είδος της ροής, όπως θα αναφερθεί λεπτομερέστερα σ' επόμενο κεφάλαιο, δίνει ο αριθμός Reynolds  $R_e$  ο οποίος υπολογίζεται απ' τη σχέση:

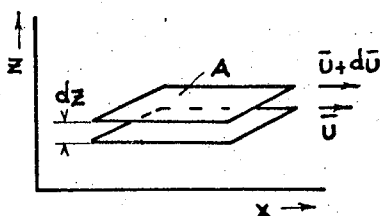
$$R_e = \frac{v d_h}{\nu}$$

### 1.4.1 Παράλληλη ροή

Έστω μια μάζα ασυμπίεστου υγρού, που κινείται με διαφορετικές ταχύτητες από στρώμα σε στρώμα. (Σχ. 1.6).

Αν μέσα στη μάζα αυτή θεωρηθούν δύο επίπεδα και παράλληλα μεταξύ τους και προς την ταχύτητα του υγρού, στρώματα επιφάνειας  $A$

που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $dz$  και έχουν διαφορά ταχυτήτων  $dv$ , τότε μεταξύ των στρωμάτων αυτών αναπτύσσεται διατμητική τάση ίση με



Σχ. 1.6

$$\tau = -\eta \frac{dv}{dz} \quad (1.12)$$

όπου  $\eta$  είναι το δυναμικό ιξώδες του υγρού.

Το σημείο (-) στην εξίσωση (1.12) σημαίνει, ότι με την αύξηση του  $z$  μειώνεται η ταχύτητα  $v$ .

Η τάση αυτή προκαλεί μια δύναμη ανάμεσα στα δύο στρώματα ίση με:

$$F = -\eta A \frac{dv}{dz} \quad (\text{τύπος του Νεύτωνα}) \quad (1.13)$$

#### 1.4.1.1 Παράλληλη ροή του υγρού μέσα σε σωλήνα κυκλικής διατομής

Θεωρείται ένας σωλήνας κυκλικής διατομής μήκους  $l$  και διαμέτρου  $d$  (σχ. 1.7) μέσα στον οποίο ένα υγρό τρέχει με παράλληλη ροή.

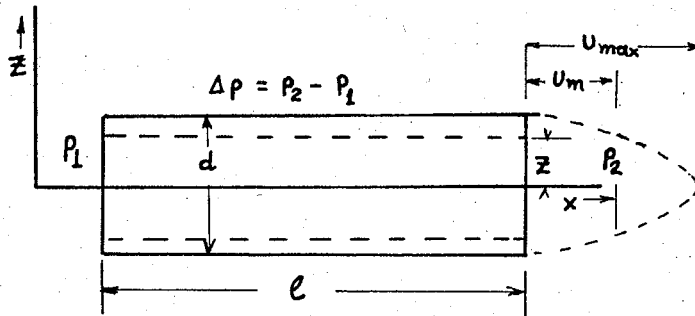
Η ταχύτητα των στρωμάτων του υγρού μέσα στο σωλήνα αυτόν, εξαρτάται απ' την απόστασή τους απ' τον άξονα του σωλήνα και η τιμή της μεταβάλλεται από μια μέγιστη τιμή  $v_{\max}$  στον άξονα του υγρού ( $z = 0$ ) μέχρι τη μηδενική τιμή  $v = 0$  για το στρώμα του υγρού που είναι σ' επαφή με τα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα ( $z = d/2$ ).

Με εφαρμογή της σχέσης (1.13) σ' ένα κυλινδρικό στρώμα υγρού

ακτίνας  $z$  προκύπτει :

$$F_r = -\eta A \frac{dv}{dz} = \pi z^2 \Delta p$$

όπου  $\Delta p$  η διαφορά πίεσης απ' το ένα άκρο του σωλήνα στο άλλο, που αντιμετωπίζει τη δύναμη  $F_r$  και που πρέπει να υπάρχει για να διατηρηθεί η ροή.



Σχ. 1.7. Ροή σε σωλήνα κυκλικής διατομής.

Η επιφάνεια  $A$  που μπαίνει στη σχέση (1.13) στην περίπτωση που εξετάζεται είναι:

$$A = 2\pi z l$$

άρα :

$$\pi z^2 \Delta p = -2\pi z l \eta \frac{dv}{dz}$$

ή

$$dv = -\frac{\Delta p}{2\eta l} z dz$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης αυτής προκύπτει :

$$v = -\frac{\Delta p}{2\eta l} \int z dz + c = -\frac{\Delta p}{4\eta l} z^2 + c$$

Για  $z = \frac{d}{2} \Rightarrow v = 0$  άρα  $c = \frac{d^2 \Delta p}{16\eta}$  και

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta l} \left( \frac{d^2}{4} - z^2 \right) \quad (1.14)$$

Η κατανομή των ταχυτήτων σύμφωνα με τη σχέση αυτή, δείχνεται στο σχ. 1.7 με διακεκομμένη γραμμή.

Η μέγιστη ταχύτητα βρίσκεται, αν δοθεί στον  $z$  η τιμή  $z = 0$  οπότε:

$$v_{\max} = \frac{d^2 \Delta p}{16 \eta l} \quad (1.15)$$

Αν θεωρηθεί η στοιχειώδης παροχή  $dQ$ , από μια δακτυλιοειδή διατομή μέσα στο υγρό διαμέτρου  $z$  και πάχους δακτυλίου  $dz$ , αυτή δίνεται απ' τη σχέση:

$$dQ = v dA = 2\pi z v dz$$

Με αντικατάσταση της  $v$  απ' τη σχέση (1.14) βρίσκεται:

$$dQ = \frac{\pi \Delta p}{2\eta l} \left[ \frac{d^2}{4} z - z^3 \right] dz$$

και με ολοκλήρωση από  $z = 0$  μέχρι  $z = \frac{d}{2}$  προκύπτει :

$$Q = \frac{\pi \Delta p}{2\eta l} \left[ \frac{d^2}{4} \int_0^{d/2} z dz - \int_0^{d/2} z^3 dz \right]$$

ή

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \eta l} \quad (1.16)$$

Απ' τη σχέση αυτή είναι δυνατό να υπολογισθεί η μέση ταχύτητα του υγρού  $v_m$  που είναι:

$$v_m = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{d^2 \Delta p}{32 \eta l} \quad (1.17)$$

Από τη σύγκριση των σχέσεων (1.15) και (1.17) προκύπτει:

$$v_{\max} = 2v_m \quad (1.18)$$

Αν στη σχέση (1.17) αντικατασταθεί το δυναμικό ιξώδες η απ' τη σχέση

$$\eta = \rho \nu$$

όπου:  $\rho$  = η πυκνότητα του υγρού και

$\nu$  = το κινηματικό ιξώδες του

και επιλυθεί η σχέση ως προς  $\Delta p$ , προκύπτει ύστερα από ορισμένες μετατροπές:

$$\Delta p = 32 \frac{\nu}{d} \cdot \frac{l}{d} \rho v_m^2$$

η ποσότητα  $Re = \frac{d v_m}{\nu}$  είναι ο γνωστός απ' τη μηχανή των ρευστών

αριθμός Reynolds άρα:

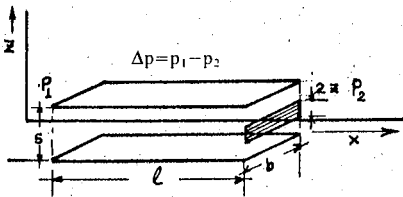
$$\Delta p = \frac{32}{Re} \frac{l}{d} \rho v_m^2$$

Αν δε τεθεί  $\lambda = \frac{64}{Re}$  προκύπτει τελικά:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} v_m^2 \quad (1.19)$$

#### 1.4.1.2 Παράλληλη ροή μέσα σε στενό άνοιγμα

Έστω ένα άνοιγμα ορθογωνικής διατομής, πλάτους  $b$ , ύψους  $s$  και μήκους  $l$  (σχ. 1.8) (όπου το ύψος  $s$  είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις), μέσα στο οποίο τρέχει κάποιο υγρό με ταχύτητα παράλληλη προς τον άξονα των  $x$ .



Σχ. 1.8. Παράλληλη ροή μέσα σε στενό άνοιγμα.

Με εφαρμογή της σχέσης (1.13) στο άνοιγμα αυτό, βρίσκεται η συνολική δύναμη που ασκείται σ' ένα στρώμα υγρού πλάτους  $b$ , μήκους  $l$  και ύψους  $2z$  (Το

στρώμα θεωρείται στο μέσο της απόστασης  $s$ ).

Σημειώνεται ότι η δύναμη που δίνεται απ' τη σχέση (1.13), εφαρμόζεται τόσο στην απάνω, όσο και στην κάτω επιφάνεια του στρώματος, άρα είναι διπλάσια. Έτσι:

$$F_\tau = 2z b \Delta p \quad \text{και} \quad 2\eta A \frac{dv}{dz} = 2\eta b l \frac{dv}{dz}$$

άρα

$$2z b \Delta p = -2\eta b l \frac{dv}{dz} \quad \text{και} \quad dv = -\frac{\Delta p}{\eta l} z dz$$

Με ολοκλήρωση βρίσκεται

$$v = -\frac{\Delta p}{\eta l} \int z dz + c = -\frac{\Delta p}{2\eta l} z^2 + c$$

Για  $z = \frac{s}{2} \Rightarrow v = 0$  άρα  $c = \frac{\Delta p s^2}{8\eta l}$  και

$$v = \frac{\Delta p}{2\eta l} \left[ \frac{s^2}{4} - z^2 \right] \quad (1.20)$$

αριθμός Reynolds άρα:

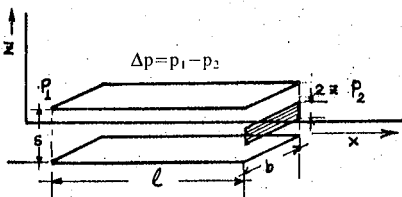
$$\Delta p = \frac{32}{Re} \frac{l}{d} \rho v_m^2$$

Αν δε τεθεί  $\lambda = \frac{64}{Re}$  προκύπτει τελικά:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} v_m^2 \quad (1.19)$$

### 1.4.1.2 Παράλληλη ροή μέσα σε στενό άνοιγμα

Έστω ένα άνοιγμα ορθογωνικής διατομής, πλάτους  $b$ , ύψους  $s$  και μήκους  $l$  (σχ. 1.8) (όπου το ύψος  $s$  είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις), μέσα στο οποίο τρέχει κάποιο υγρό με ταχύτητα παράλληλη προς τον άξονα των  $x$ .



Σχ. 1.8. Παράλληλη ροή μέσα σε στενό άνοιγμα.

Με εφαρμογή της σχέσης (1.13) στο άνοιγμα αυτό, βρίσκεται η συνολική δύναμη που ασκείται σ' ένα στρώμα υγρού πλάτους  $b$ , μήκους  $l$  και ύψους  $2z$  (Το

στρώμα θεωρείται στο μέσο της απόστασης  $s$ ).

Σημειώνεται ότι η δύναμη που δίνεται απ' τη σχέση (1.13), εφαρμόζεται τόσο στην απάνω, όσο και στην κάτω επιφάνεια του στρώματος, άρα είναι διπλάσια. Έτσι:

$$F_t = 2z b \Delta p \quad \text{και} \quad 2\eta A \frac{dv}{dz} = 2\eta b l \frac{dv}{dz}$$

άρα

$$2z b \Delta p = -2\eta b l \frac{dv}{dz} \quad \text{και} \quad dv = -\frac{\Delta p}{\eta l} z dz$$

Με ολοκλήρωση βρίσκεται

$$v = -\frac{\Delta p}{\eta l} \int z dz + c = -\frac{\Delta p}{2\eta l} z^2 + c$$

Για  $z = \frac{s}{2} \Rightarrow v = 0$  άρα  $c = \frac{\Delta p s^2}{8\eta l}$  και

$$v = \frac{\Delta p}{2\eta l} \left[ \frac{s^2}{4} - z^2 \right] \quad (1.20)$$



Ανάλογα με την προηγούμενη παράγραφο, υπολογίζεται η παροχή και βρίσκεται τελικά :

$$Q = \frac{b s^3 \Delta p}{12\eta l} \quad (1.21)$$

Απ' τους τύπους (1.20) και (1.21) προκύπτει :

$$v_{\max} = \frac{s^2 \Delta p}{8\eta l} \quad (\text{για } z = 0)$$

και

$$v_m = \frac{s^2 \Delta p}{12\eta l}$$

οπότε

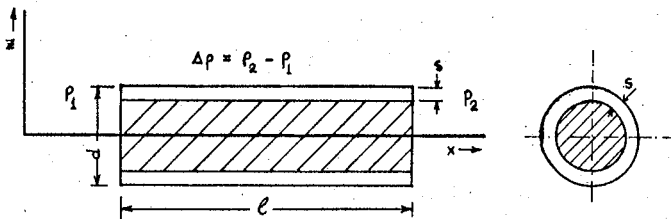
$$v_m = \frac{2}{3} v_{\max} \quad (1.22)$$

και

$$\Delta p = \frac{12\eta l}{s^2} v_m \quad (1.23)$$

Με εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας στην περίπτωση στενού ανοίγματος δακτυλιοειδούς συμμετρικής διατομής διαμέτρου  $d$  και πάχους  $s$  (Σχ. 1.9), ορίζεται η παροχή απ' τη σχέση :

$$Q_{\text{συμ.}} = \frac{\pi d s^3 \Delta p}{12\eta l} = 0,262 \frac{ds^3 \Delta p}{\eta l} \quad (1.24)$$

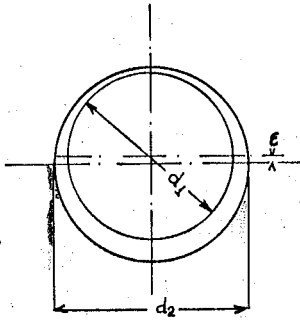


Σχ. 1.9. Ροή σε δακτυλιοειδές άνοιγμα συμμετρικής διατομής.

Στην περίπτωση ασύμμετρης δακτυλιοειδούς διατομής, η παροχή υπολογίζεται απ' τη σχέση του Chaimowitsch [4]

$$Q_{\text{ασ.}} = 0,262 \frac{ds^3}{\eta l} \left[ 1 + 1,5 \left( \frac{\varepsilon}{s} \right)^3 \right] \Delta p \quad (1.25)$$

όπου  $s = \frac{d_2 - d_1}{2}$  και  $\varepsilon =$  η εκκεντρότητα (σχ. 1.10).



Σχ. 1.10. Ασύμμετρη δακτυλιοειδής διατομή.

Όπως φαίνεται απ' την παραπάνω σχέση, στην ακραία περίπτωση που είναι  $s = \varepsilon$ , προκύπτει:

$$Q_{ασ.} \cong 2,5 Q_{συμ.}$$

**Σημείωση.** Στην περίπτωση των στενών ανοιγμάτων, ενδιαφέρει κυρίως ο υπολογισμός της παροχής, γιατί στα στοιχεία των υδροστατικών κυκλωμάτων, οι διαφυγές υγρού είναι κατά κανόνα παροχές δια μέσου στενών ανοιγμάτων.

### 1.4.2. Τυρβώδης ροή

Όπως αναφέρθηκε ήδη, στην τυρβώδη ροή το υγρό στροβιλίζεται κατά την πορεία του μέσα στις σωληνώσεις. Έτσι, οι απώλειες ενέργειας είναι ισχυρότερες και η σχέση μεταξύ μέγιστης και μέσης ταχύτητάς του είναι:

$$v_{\max} = 1,2 v_m \quad (1.26)$$

Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης  $\Delta p$  λόγω τριβών κατά την τυρβώδη ροή, χρησιμοποιείται πάλι η σχέση (1.19), με τη διαφορά ότι η τιμή του  $\lambda$ , μέχρι μεν μια τιμή του αριθμού Reynolds ( $Re < 3500$ ), που η επίδραση της τραχύτητας των τοιχωμάτων του σωλήνα είναι αμελητέα, είναι δυνατό χωρίς σοβαρό λάθος να παρθεί ίση με

$$\lambda_t = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

από κει όμως και πέρα (για  $Re > 3500$ ) η τιμή του  $\lambda_t$  επηρεάζεται αξιόλογα απ' την τραχύτητα των τοιχωμάτων του σωλήνα. Η επίδραση αυτή θα εξεταστεί λεπτομερέστερα στο κεφάλαιο περί σωληνώσεων.