

Παναγιώτης Πρίνος

Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Υδραυλική Κλειστών & Ανοικτών Αγωγών



ISBN 978-960-456-625-9

© Copyright, 2η έκδοση, Ιούνιος 2024, Πρίνος Παναγιώτης, Εκδόσεις Ζήτη

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση
Βιβλιοδεσία



Π. ΖΗΤΗ & Σια Ι.Κ.Ε.

18° χλμ Θεσσαλονίκης - Περαία
Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 23920 72222 • e-mail: info@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:

Αρμενοπούλου 27 - 546 35 Θεσσαλονίκη • Τηλ.: 2310 203.720
e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:

Χαριλάου Τρικούπη 22 - Τ.Κ. 106 79, Αθήνα • Τηλ.: 210 3816.650
e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Δεν υπάρχουν ιδέες
–υπάρχουν μονάχα άνθρωποι που κουβαλούν τις ιδέες–
κι αυτές παίρνουν το μπόι του ανθρώπου που τις κουβαλάει.

Νίκος Καζαντζάκης
“Οι Αδερφοφάδες”, (1963)

Πρόλογος

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται πρωταρχικά στους φοιτητές Πολιτικούς Μηχανικούς και καλύπτει την ύλη του μαθήματος «Υδραυλική» (μάθημα κορμού, 4^ο εξάμηνο), που περιλαμβάνει την Υδραυλική Κλειστών και Ανοικτών Αγωγών και διδάσκεται στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ.

Επίσης, μπορούν να συμβουλευτούν το βιβλίο αυτό, μεταπτυχιακοί φοιτητές, υποψήφιοι διδάκτορες και επαγγελματίες Πολιτικοί Μηχανικοί που ασχολούνται με θέματα όπως ο σχεδιασμός και η ανάλυση συστημάτων ύδρευσης και αποχέτευσης, η επιλογή και χρήση αντλιών, ο σχεδιασμός ανοικτών αγωγών και η αντιπλημμυρική προστασία ποταμών και χειμάρρων μεταξύ άλλων.

Στο βιβλίο, που περιλαμβάνει συνολικά δέκα κεφάλαια, (τέσσερα κεφάλαια για την Υδραυλική Κλειστών Αγωγών και έξι κεφάλαια για την Υδραυλική Ανοικτών αγωγών), παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής σε σωλήνες και σε ανοικτούς αγωγούς και οι αντίστοιχες εφαρμογές τους. Αναλύονται επίσης πρακτικά θέματα και επιλύονται προβλήματα που θα αντιμετωπίσει ο Υδραυλικός Πολιτικός Μηχανικός στην πράξη όπως η διαστασιολόγηση σωλήνων και ο υπολογισμός απωλειών ενέργειας, ο υδραυλικός υπολογισμός συστημάτων ύδρευσης (ακτινωτών και βροχωτών), η επιλογή και χρήση κατάλληλων αντλιών σε συστήματα ύδρευσης και αποχέτευσης. Επίσης, ο σχεδιασμός ανοικτών αγωγών με σταθερή κοίτη, ο υπολογισμός της ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης ροής σε ανοικτούς αγωγούς, ο σχεδιασμός έργων για την εκτόνωση της ενέργειας (υδραυλικό άλμα, λεκάνες εκτόνωσης) και η στερεο-μεταφορά σε αλλουβιακούς ποταμούς και χειμάρρους.

Το βιβλίο βασίζεται στην διδακτική εμπειρία του συγγραφέα στα μαθήματα Υδραυλικής και Υδραυλικής Ανοικτών Αγωγών από το 1992 και την ερευνητική εμπειρία του σε αντίστοιχα θέματα από το 1981 οπότε και ξεκίνησε την εκπόνηση της διδακτορικής του διατριβής στο αντικείμενο της Υδραυλικής Ανοικτών αγωγών σύνθετης διατομής στο Πανεπιστήμιο Οττάβας του Καναδά.

Για την ολοκλήρωση του βιβλίου συνέβαλαν (α) η κ. Ολυμπία Καζαντζόγλου με την συγγραφή των σημειώσεων που βασίστηκε το βιβλίο αυτό (β) ο Αν. Καθηγητής Ζήσης Μάλλιος με την ψηφιοποίηση των διαγραμμάτων και τις επισημάνσεις του σε λάθη της πρώτης έκδοσης (γ) οι συνεργάτες μου Δρ. Άγγελος Κόκκινος, Δρ. Θεοχάρης Κόφτης και Αντρέας Παπατσιότσος με την επίλυση παραδειγμάτων και (δ) ο εκδοτικός οίκος Ζήτη με την άψογη εκτύπωση τους οποίους και ευχαριστώ ολόθερμα.

Ο Συγγραφέας

Παναγιώτης ΠΡΙΝΟΣ
Ομότιμος Καθηγητής ΑΠΘ

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Ροή σε Σωλήνες

1.1 Χαρακτηριστικά της Ροής σε Σωλήνες.....	13
1.2 Τυρβώδης Ροή	15
1.3 Απώλειες Ενέργειας – Προσδιορισμός του Συντελεστή Τριβής	20

Κεφάλαιο 2: Εξίσωση Ενέργειας – Εφαρμογές

2.1 Εξίσωση Ενέργειας – Προσδιορισμός Απωλειών Φορτίου	29
2.1.1 Απώλειες Φορτίου Λόγω Τριβών	30
2.1.2 Τοπικές Απώλειες	32
2.2 Προβλήματα Ροής σε Σωλήνες	50
2.2.1 Προσδιορισμός του H	51
2.2.2 Προσδιορισμός του Q	51
2.2.3 Προσδιορισμός του D	52
2.3 Ροή σε Σωλήνα - Σίφωνα – Το φαινόμενο της Σπηλαίωσης.....	57
2.4 Σωλήνες σε Σειρά, σε Παράλληλη Διάταξη και Ισοδύναμος Σωλήνας	60
2.4.1 Σωλήνες σε Σειρά	62
2.4.2 Παράλληλοι Σωλήνες	63
2.4.3 Προβλήματα Τριών Δεξαμενών	68
Ασκήσεις για Λύση	79

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός και Ανάλυση Δικτύων

3.1 Πρότυπα Ζήτησης Νερού	89
3.2 Απώλεια Φορτίου σε Σωλήνες.....	90
3.2.1 Απώλεια Φορτίου σε Σωλήνα με Ζήτηση στους Κόμβους.....	90
3.2.2 Απώλεια Φορτίου σε Σωλήνα με Κατανεμημένη Ζήτηση	91
3.3 Ανάλυση Σωλήνων Μεταφοράς Νερού	92
3.4 Ανάλυση των Κεντρικών Αγωγών Διανομής.....	94
3.5 Δίκτυα Διανομής.....	95
3.6 Ανάλυση Ακτινωτών Δικτύων	97

3.7	Ανάλυση Βροχωτών Δικτύων	103
3.7.1	Μέθοδος Hardy Cross.....	104
3.7.2	Μέθοδος Newton - Raphson.....	114
3.7.3	Μέθοδος Γραμμικής Θεωρίας	118
3.8	Ανάλυση Δικτύων με το EPANET.....	122
3.8.1	Εισαγωγή.....	122
3.8.2	Δυνατότητες Υδραυλικής Προσομοίωσης (μοντελοποίησης).....	123
3.8.3	Δυνατότητες Προσομοίωσης Ποιότητας Νερού.....	123
3.8.4	Φυσικά Χαρακτηριστικά	124
3.8.5	Επίλυση Δικτύων.....	130
	Ασκήσεις για Λύση	133

Κεφάλαιο 4: Αντλίες

4.1	Εισαγωγή	139
4.2	Κατάταξη των Αντλιών	141
4.2.1	Ταξινόμηση Δυναμικών Αντλιών	142
4.2.2	Ταξινόμηση Αντλιών θετικής εκτόπισης.....	144
4.2.3	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	146
4.3	Δυναμικές Αντλίες (αντλίες κινητικού τύπου)	147
4.3.1	Αντλίες Ακτινικής Ροής ή Φυγόκεντρες Αντλίες	147
4.3.2	Αντλίες Αξονικής Ροής (ή αντλίες με έλικα)	154
4.3.3	Αντλίες Μικτής Ροής.....	156
4.3.4	Αντλίες Περιφερειακής Ροής ή Στροβιλοαντλίες	157
4.3.5	Αντλίες Ακροφυσίου (εκχυτήρες)	158
4.4	Θεωρητική Προσέγγιση.....	159
4.5	Χαρακτηριστικά Απόδοσης Αντλίας	167
4.6	Καθαρό Θετικό Φορτίο Αναρρόφησης (Net Positive Suction Head, NPSH).....	176
4.7	Χαρακτηριστικά Συστήματος και Επιλογή Αντλίας.....	180
4.8	Αδιάστατοι Παράμετροι και Νόμοι Ομοιότητας	193
4.8.1	Νόμοι Ομοιότητας Αντλίας.....	196
4.8.2	Ειδική Ταχύτητα.....	200
4.8.3	Ειδική Ταχύτητα Αναρρόφησης	203
4.9	Σηλαιώση Αντλιών.....	204
	Ασκήσεις για Λύση	211

Κεφάλαιο 5: Χαρακτηριστικά της Ροής σε Ανοικτούς Αγωγούς

5.1	Εισαγωγή.....	227
5.2	Κατηγορίες Ανοικτών Αγωγών	229
5.3	Κατηγορίες Ροής.....	233
5.3.1	Στρωτή και Τυρβώδης Ροή	233
5.3.2	Υποκρίσιμη και Υπερκρίσιμη Ροή	235
5.3.3	Μόνιμη και μη Μόνιμη Ροή	236
5.3.4	Ομοιόμορφη και Ανομοιόμορφη Ροή	236
5.3.5	Μονοδιάστατη, Δισδιάστατη και Τρισδιάστατη Ροή	237
5.4	Βασικές Εξισώσεις.....	238
5.4.1	Εξίσωση Συνέχειας	238
5.4.2	Εξίσωση Ενέργειας	239
5.4.3	Εξίσωση Ορμής	241

Κεφάλαιο 6: Ομοιόμορφη Ροή

6.1	Εισαγωγή.....	243
6.2	Κατανομή Διατμητικής Τάσης και Ταχύτητας.....	243
6.3	Εξίσωση Chezy.....	248
6.4	Εξίσωση Manning.....	249
6.4.1	Ισοδύναμος Συντελεστής Manning.....	254
6.4.2	Ομοιόμορφη Ροή σε Αγωγούς Σύνθετης Διατομής	256
6.4.3	Επιλογή του Συντελεστή Manning για Φυσικούς Αγωγούς	260
6.5	Παροχευτικότητα Αγωγού.....	262
6.6	Καμπύλες Z_1 για Ορθογωνικούς και Τραπεζοειδείς Αγωγούς.....	263
6.7	Ροή σε Κυκλικούς Αγωγούς (σωλήνες).....	266
6.7.1	Πολλαπλότητα Ομοιόμορφου Βάθους.....	269
6.7.2	Υπολογισμός της Διαμέτρου.....	270
6.8	Προσεγγιστικές Σχέσεις για τον Υπολογισμό του Ομοιόμορφου Βάθους..	272
6.8.1	Ορθογωνική Διατομή.....	272
6.8.2	Τραπεζοειδής Διατομή.....	273
6.8.3	Κυκλική Διατομή.....	273
6.9	Σχεδιασμός Αγωγών.....	279
6.9.1	Σχεδιασμός Αγωγών με Σταθερή, Αμετάβλητη Διατομή.....	280
6.9.2	Η Έννοια της Βέλτιστης Υδραυλικής Διατομής.....	280
6.9.3	Σχεδιασμός Αγωγών Λυμάτων, Όμβριων.....	286
6.9.4	Σχεδιασμός Αγωγών με Βλάστηση (γρασίδι).....	290
	Ασκήσεις για Λύση	294

Κεφάλαιο 7: Η Αρχή της Ενέργειας

7.1	Εισαγωγή	297
7.2	Ειδική Ενέργεια	297
7.2.1	Διάγραμμα Ειδικής Ενέργειας	298
7.2.2	Διάγραμμα Αδιάστατης Ειδικής Ενέργειας	299
7.2.3	Διάγραμμα Βάθους – Παροχής	302
7.2.4	Κρίσιμη Κλίση Πυθμένα	303
7.2.5	Εναλασσόμενα Βάθη	304
7.3	Υπολογισμός Κρίσιμου Βάθους	304
7.3.1	Καμπύλες Συντελεστή Διατομής	305
7.3.2	Προσεγγιστικές Σχέσεις για τον Υπολογισμό του Κρίσιμου Βάθους	310
7.4	Διατομές Ελέγχου	315
7.5	Εφαρμογές Ειδικής Ενέργειας και Κρίσιμου Βάθους	316
7.5.1	Ροή σε Αγωγό με Βαθμιαία Μείωση του Πλάτους	316
7.5.2	Ροή σε Αγωγό με Αναβαθμό	320
	Ασκήσεις για Λύση	328

Κεφάλαιο 8: Η Αρχή της Ορμής – Το Υδραυλικό Άλμα

8.1	Εισαγωγή	335
8.2	Εξίσωση Ορμής – Ειδική Δύναμη	335
8.2.1	Διάγραμμα Ειδικής Δύναμης	336
8.3	Το Υδραυλικό Άλμα	339
8.4	Το Υδραυλικό Άλμα σε Οριζόντιους Αγωγούς	341
8.4.1	Συζυγή Βάθη Άλματος σε Αγωγούς Ορθογωνικής Διατομής	341
8.4.2	Συζυγή Βάθη Άλματος σε Αγωγούς μη-Ορθογωνικής Διατομής	343
8.4.3	Μήκος του Άλματος	346
8.5	Υδραυλικό Άλμα σε Κεκλιμένους Αγωγούς	350
8.6	Κεκλιμένο Άλμα	353
8.7	Σκέδαση Ενέργειας	358
8.7.1	Υδραυλικό Άλμα σε Καταβαθμό	360
8.7.2	Υδραυλικό Άλμα σε Αναβαθμό	363
8.7.3	Λεκάνες Σκέδασης της Ενέργειας	366
8.7.4	Υδραυλικό Άλμα σε Ορθογωνικούς Αγωγούς Αυξανόμενου Πλάτους	376
	Ασκήσεις για Λύση	380

Κεφάλαιο 9: Ανομοιόμορφη Ροή – Βαθμιαία Μεταβαλλόμενη Ροή

9.1	Γενικά	385
9.2	Βασικές Εξισώσεις.....	386
9.3	Χαρακτηριστικά των Προφίλς (Καμπυλών Ελεύθερης Επιφάνειας)	389
9.4	Κατηγορίες Προφίλς	391
9.4.1	Προφίλς Ήπιας Κλίσης (M)	391
9.4.2	Προφίλς Απότομης Κλίσης (S).....	394
9.4.3	Προφίλς Κρίσιμης Κλίσης (C)	395
9.4.4	Προφίλς Οριζόντιας και Αντίθετης Κλίσης (H και A).....	396
9.4.5	Σύνθεση Προφίλς	398
9.5	Υπολογισμός Βαθμιαία Μεταβαλλόμενης Ροής σε Πρισματικούς Αγωγούς	400
9.5.1	Αριθμητική Ολοκλήρωση.....	400
9.5.2	Άμεση Ολοκλήρωση.....	402
9.5.3	Η Μέθοδος Βήματος.....	406
9.6	Βαθμιαία Μεταβαλλόμενη Ροή σε μη Πρισματικούς Αγωγούς	421
9.6.1	Μέθοδος Σταθερού Βήματος.....	421
9.6.2	Το μοντέλο HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System).....	422
9.7	Προσδιορισμός της Θέσης του Υδραυλικού Άλματος	428
9.8	Το Πρόβλημα της Παροχής	435
9.8.1	Επίδραση Τοπικών “Διαταραχών” στην Παροχή.....	438
9.9	Ροή σε Αγωγό που Συνδέει Δύο Δεξαμενές	442
9.9.1	Ροή από Λίμνη Σταθερού Βάθους.....	444
9.9.2	Ροή σε Λίμνη Σταθερού Βάθους.....	445
9.9.3	Αριθμητικοί Υπολογισμοί	445
	Ασκήσεις για Λύση	450

Κεφάλαιο 10: Ροή σε Αλλουβιακά Υδατορεύματα

10.1	Εισαγωγή	457
10.2	Συνθήκες Έναρξης της Κίνησης	458
10.2.1	Κρίσιμη Ελκτική Δύναμη (Κρίσιμη Τάση)	458
10.3	Μορφολογία Πυθμένα – Καθεστώτα της Ροής.....	465
10.3.1	Περιγραφή των Καθεστώτων της Ροής	465
10.3.2	Η Σημασία των Καθεστώτων της Ροής.....	469
10.3.3	Πρόβλεψη των Καθεστώτων της Ροής	470
10.4	Αντίσταση στη Ροή σε Αλλουβιακά Υδατορεύματα	475
10.4.1	Μέθοδοι Υπολογισμού Στάθμης - Παροχής	477

10.5 Σχεδιασμός Αλλουβιακών Αγωγών.....	486
10.5.1 Εισαγωγή.....	486
10.5.2 Αγωγοί με Σταθερή Διατομή.....	487
10.5.3 Αγωγοί με Μεταβαλλόμενη Διατομή.....	488
10.5.4 Αλλουβιακά Υδατορεύματα.....	495
10.6 Υπολογισμός Στερεοπαροχής.....	499
10.6.1 Παροχή Φορτίου - Πυθμένα.....	501
10.6.2 Παροχή αιωρούμενου φορτίου.....	502
10.6.3 Συνολική Στερεοπαροχή.....	515
Ασκήσεις για Λύση.....	524
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	531
Ευρετήριο Όρων.....	539

1^ο

Κεφάλαιο

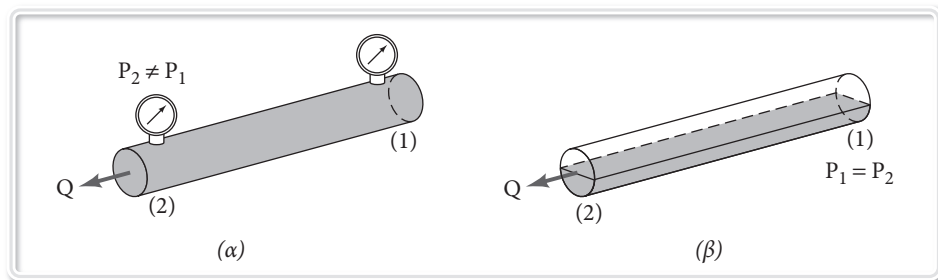
ΡΟΗ ΣΕ ΣΩΛΗΝΕΣ

1.1 Χαρακτηριστικά της Ροής σε Σωλήνες

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής σε σωλήνες και αναλύεται συνοπτικά η τυρβώδης ροή και τα κύρια χαρακτηριστικά της. Η εξίσωση ενέργειας, που χρησιμοποιείται και εφαρμόζεται για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων ροής σε σωλήνες, περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι περισσότεροι από τους συνηθισμένους αγωγούς που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ρευστού είναι κυκλικής διατομής (σωλήνες). Για παράδειγμα οι σωλήνες ύδρευσης, οι σωλήνες άρδευσης είναι αγωγοί που είναι σχεδιασμένοι να αντέχουν μια σημαντική διαφορά πίεσης στα τοιχώματα τους χωρίς αδικαιολόγητη στρέβλωση του σχήματός τους. Τυπικοί αγωγοί μη κυκλικής διατομής είναι οι αγωγοί θέρμανσης και ψύξης που είναι συχνά ορθογωνικής διατομής. Κανονικά, η διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού των αγωγών αυτών είναι σχετικά μικρή. Οι περισσότερες από τις βασικές αρχές είναι ανεξάρτητες από το σχήμα της διατομής, αν και οι λεπτομέρειες της ροής μπορεί να εξαρτώνται από αυτό. Παρακάτω, θα θεωρήσουμε δεδομένο ότι ο αγωγός είναι κυκλικής διατομής.

Για όλες τις ροές του κεφαλαίου αυτού, υποθέτουμε ότι ο σωλήνας είναι τελείως γεμάτος με το ρευστό που μεταφέρεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1α. Έτσι, δεν θα εξετάσουμε ένα σωλήνα (οχετό) μέσω του οποίου ρέει νερό της βροχής με ελεύθερη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1β που ονομάζεται ανοικτός αγωγός. Η ροή σε ανοικτούς αγωγούς περιγράφεται αναλυτικά στα κεφάλαια 5 έως 10. Η διαφορά μεταξύ της ροής σε ανοικτούς και κλειστούς αγωγούς οφείλεται στον θεμελιώδη μηχανισμό που δημιουργεί τη ροή. Για τη ροή ανοικτού αγωγού, η βαρύτητα είναι η μόνη κινητήρια δύναμη. Για τη ροή σε σω-



Σχήμα 1.1: (α) Ροή υπό πίεση σε σωλήνα (β) Ροή σε ανοικτό αγωγό.

λήνα, η βαρύτητα μπορεί να είναι σημαντική, όταν ο σωλήνας δεν είναι οριζόντιος, αλλά η κύρια κινητήρια δύναμη είναι η κλίση (μεταβολή) πίεσης κατά μήκος του σωλήνα. Αν ο σωλήνας δεν είναι γεμάτος, δεν είναι δυνατόν να διατηρηθεί αυτή η διαφορά πίεσης,

Για ροή σε σωλήνα η πιο σημαντική αδιάστατη παράμετρος είναι ο αριθμός Reynolds, Re που ορίζεται σαν ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων ως προς τις δυνάμεις λόγω του ιξώδους (συνεκτικές δυνάμεις). Ο αριθμός Reynolds ορίζεται όπως $Re = UD/\nu$, όπου U είναι η μέση ταχύτητα ροής στο σωλήνα, D η διάμετρος του σωλήνα, ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Η ροή σε ένα αγωγό είναι στρωτή, μεταβατική, ή τυρβώδης εφόσον ο αριθμός Reynolds είναι “αρκετά μικρός”, “ενδιάμεσος” ή “αρκετά μεγάλος”. Δεν είναι μόνο η ταχύτητα του ρευστού που καθορίζει το χαρακτήρα της ροής. Το ιξώδες, η πυκνότητα, καθώς και το μέγεθος του σωλήνα είναι εξίσου σημαντικοί παράμετροι. Αυτές οι παράμετροι συνδυάζονται για να προσδιορίσουν τον αριθμό Reynolds. Η διάκριση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής σε σωλήνες και η εξάρτησή τους από μια κατάλληλη αδιάστατη ποσότητα αρχικά επισημάνθηκε από τον Reynolds το 1883.

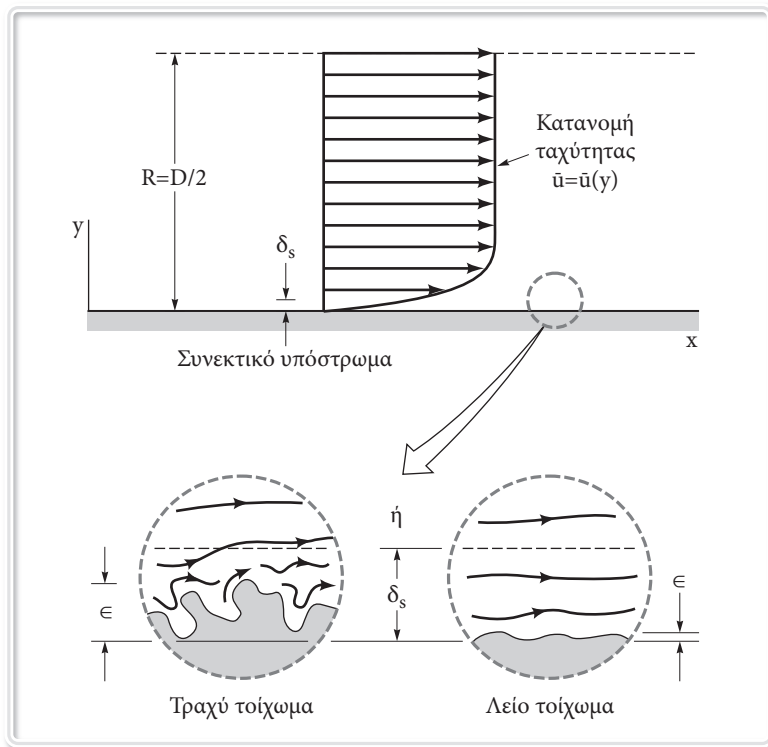
Οι περιοχές του αριθμού Reynolds για τις οποίες έχουμε στρωτή, μεταβατική, ή τυρβώδη ροή δεν μπορούν να καθορισθούν επακριβώς. Η πραγματική μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διάφορους αριθμούς Reynolds, ανάλογα με το πόσο η ροή έχει διαταραχθεί από τις ταλαντώσεις του σωλήνα, από την τραχύτητα της περιοχής εισόδου, κλπ. Γενικά, η ροή σε σωλήνα είναι στρωτή, αν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από περίπου 2100. Η ροή σε ένα σωλήνα είναι τυρβώδης, εφόσον ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος από περίπου 4000. Για αριθμούς Reynolds μεταξύ των δύο αυτών ορίων, η ροή μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ στρωτής και τυρβώδους με ένα φαινομενικά τυχαίο τρόπο (μεταβατική ροή).

Στα περισσότερα πρακτικά προβλήματα που εξετάζουμε η ροή είναι τυρβώδης αφού, για παράδειγμα, για διάμετρο σωλήνα $D = 0.1-1.0$ m και ταχύτητα

ροής $U = 1 \text{ m/s}$ ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται μεταξύ 10^5 και 10^6 (αρκετά μεγαλύτερος από το 4000).

1.2 Τυρβώδης Ροή

Σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της ταχύτητας σε τυρβώδη ροή έχουν ληφθεί μέσω της χρήσης διαστατικής ανάλυσης, πειραμάτων και ημιεμπειρικών σχέσεων. Όπως δείχνει το σχήμα 1.2 η πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδης ροή σε ένα σωλήνα μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από τις αποστάσεις τους από το τοίχωμα: το συνεκτικό υπόστρωμα πολύ κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα, η μεταβατική περιοχή και το εξωτερικό τυρβώδες στρώμα σε όλη το κεντρικό τμήμα της ροής. Μέσα στο συνεκτικό υπόστρωμα η στρωτή διατμητική τάση είναι σημαντική σε σχέση με την τυρβώδη (τάση Reynolds), και η τυχαία φύση της ροής είναι ουσιαστικά απύσχα. Στο εξω-



Σχήμα 1.2: Κατανομή της ταχύτητας - Λείο και τραχύ τοίχωμα

τερικό τυρβώδες στρώμα οι τάσεις Reynolds είναι σημαντικές, και υπάρχει σημαντική ανάμιξη και τυχαιότητα στη ροή.

Ο χαρακτήρας της ροής μέσα σε αυτές τις δύο περιοχές είναι εντελώς διαφορετικός. Για παράδειγμα, στο στρωτό συνεκτικό υπόστρωμα το ιξώδες του ρευστού αποτελεί σημαντική παράμετρο ενώ η πυκνότητα είναι ασήμαντη. Στο εξωτερικό στρώμα συμβαίνει το αντίθετο. Με μια προσεκτική χρήση της διαστατικής ανάλυσης για τη ροή σε κάθε στρώμα και με μια προσαρμογή των αποτελεσμάτων στο κοινό μεταβατικό στρώμα, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της ταχύτητας για τυρβώδη ροή σε σωλήνες.

Από πειράματα σε σωλήνες και για συνθήκες τυρβώδους ροής αναγνωρίστηκαν τρεις κατηγορίες ροής σε σχέση με την τραχύτητα του σωλήνα (Schlichting, 1968). Στην πρώτη κατηγορία, η οποία εμφανίζεται σε σωλήνα από τσιμέντο και από χυτοσίδηρο η αντίσταση στη ροή εξαρτάται αποκλειστικά από την σχετική τραχύτητα ε/D και η ροή ονομάζεται τυρβώδης, πλήρως - τραχεία. Η δεύτερη κατηγορία (μεταβατική ροή) εμφανίζεται όταν το ύψος της τραχύτητας του σωλήνα είναι σχετικά μικρό (σωλήνας από ξύλο ή από χάλυβα) και η σχετική τραχύτητα ε/D και ο αριθμός Reynolds χαρακτηρίζουν την αντίσταση στη ροή. Η τρίτη κατηγορία είναι η λεία τυρβώδης ροή όπου η αντίσταση στη ροή εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό Re .

Για την ίδια σχετική τραχύτητα ε/D η ροή μπορεί να μεταβάλλεται από μία κατηγορία σε μία άλλη. Μια αδιάστατη παράμετρος χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει τα διαφορετικά είδη ροής η οποία ορίζεται σαν ο λόγος του ύψους της τραχύτητας ε με την συνεκτική κλίμακα μήκους ν/u_* δηλαδή $\frac{\varepsilon u_*}{\nu}$ ($u_* = (\tau_w / \rho)^{0.5} = \text{ταχύτητα τριβής}$). Έτσι έχουμε (Schlichting, 1968),

$$0 \leq \frac{\varepsilon u_*}{\nu} < 5 \quad \text{Λεία Ροή}, \quad 5 \leq \frac{\varepsilon u_*}{\nu} \leq 70 \quad \text{Μεταβατική Ροή},$$

$$\frac{\varepsilon u_*}{\nu} > 70 \quad \text{Πλήρως τραχεία Ροή} \quad (1.1)$$

Η u_* δεν είναι μια πραγματική ταχύτητα του ρευστού –είναι απλώς μια ποσότητα που έχει τις διαστάσεις της ταχύτητας.

Η συνεκτική κλίμακα μήκους ορίζει επίσης το μέγεθος του στρωτού υποστρώματος δ_s (Σχήμα 1.2).

Πειραματικές μετρήσεις του Nikuradse (1894-1979) έδειξαν ότι το πάχος του στρωτού υποστρώματος μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση $\delta_s = \frac{11.6\nu}{u_*}$.

Στο ιξώδες, συνεκτικό υπόστρωμα το προφίλ ταχύτητας μπορεί να γραφεί σε αδιάστατη μορφή ως

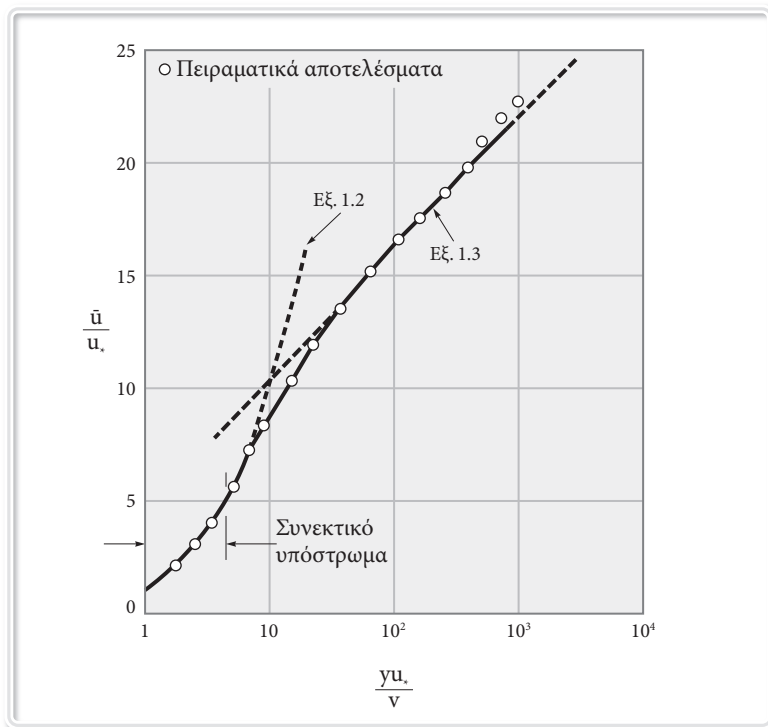
$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\gamma u_*}{\nu} \quad (1.2)$$

όπου $\gamma = R - r$ είναι η απόσταση από το τοίχωμα, u είναι η x συνιστώσα της μέσης χρονικά ταχύτητας και u_* είναι η ταχύτητα τριβής.

Όπως επισημαίνεται στο σχήμα 1.3, η εξ. (1.2) (που συνήθως ονομάζεται και νόμος του τοιχώματος) ισχύει πολύ κοντά στο λείο τοίχωμα, για $0 \leq \frac{\gamma u_*}{\nu} \leq 5$.

Η διαστατική ανάλυση δείχνει επίσης ότι στην περιοχή μακριά από το τοίχωμα η ταχύτητα θα πρέπει να μεταβάλλεται με τον λογάριθμο του γ . Έτσι, έχει προταθεί η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\gamma u_*}{\nu}\right) + C_1 \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.3: Μεταβολή της αδιάστατης ταχύτητας για τυρβώδη ροή σε σωλήνα.

όπου η σταθερά κ είναι ίση με 0.4 και η C_1 μεταβάλλεται από 5.2 μέχρι 5.5 (Davidson, 2005). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3 η εξ. (1.3), που ονομάζεται και λογαριθμικός νόμος τοιχώματος, προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα αρκετά ικανοποιητικά για $\frac{yu_*}{\nu} > 30$. Σημειώστε ότι η οριζόντια κλίμακα είναι λογαριθμική κλίμακα. Αυτό τείνει να υπερβάλει το μέγεθος του στρωτού υποστρώματος σε σχέση με το υπόλοιπο της ροής. Το στρωτό υπόστρωμα είναι συνήθως πολύ λεπτό.

Για πλήρως τραχεία τυρβώδη ροή η κατανομή της ταχύτητας περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\epsilon} + 8.5 \quad (1.4)$$

Επίσης έχει αναπτυχθεί μία εξίσωση που περιγράφει την κατανομή της ταχύτητας και για τις τρεις κατηγορίες ροής (White, 1974)

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu_*}{\nu} + 5.5 - \frac{1}{\kappa} \ln \left(1 + 0.3 \frac{\epsilon u_*}{\nu} \right) \quad (1.5)$$

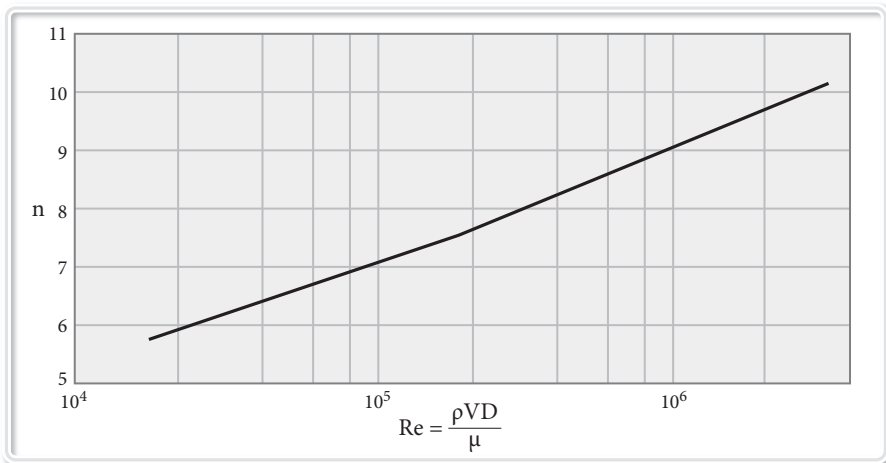
Η εξίσωση αυτή μπορεί να ερμηνευθεί σαν το αποτέλεσμα της αφαίρεσης μίας «συνάρτησης τραχύτητας» από την εξίσωση (1.3) και επομένως η κατανομή της ταχύτητας για τραχεία ροής έχει την ίδια κλίση όπως αυτή για λεία ροή και είναι μετατοπισμένη προς τα κάτω.

Μια σειρά άλλων συσχετίσεων υπάρχουν για το προφίλ της ταχύτητας στη τυρβώδη ροή σε σωλήνες. Στη κεντρική περιοχή (την εξωτερική τυρβώδη στοιβάδα) η σχέση $\frac{V_c - \bar{u}}{u_*} = 2.5 \ln \frac{R}{y}$ όπου V_c είναι η ταχύτητα στον άξονα συμμετρίας, προτείνεται συχνά ως μια καλή σχέση μετά από σύγκριση με πειραματικά δεδομένα. Μία άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη (και σχετικά εύκολη να χρησιμοποιηθεί) συσχέτιση είναι ο παρακάτω εμπειρικός νόμος:

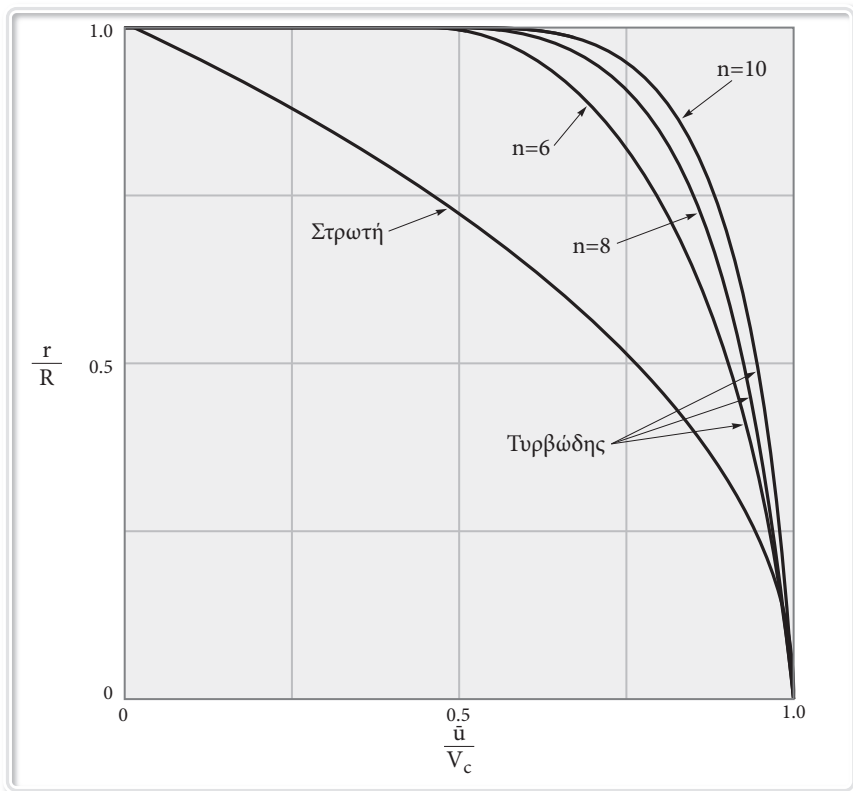
$$\frac{\bar{u}}{V_c} = \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/n} \quad (1.6)$$

Σε αυτή την σχέση, η τιμή του n είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Αυτό το προφίλ της ταχύτητας χρησιμοποιείται συχνά προσεγγιστικά για πολλές πρακτικές ροές. Τυπικά προφίλ ταχύτητας για τυρβώδη ροή που βασίζονται στον νόμο αυτό, εμφανίζονται στο σχήμα 1.5.

Μια πιο προσεκτική εξέταση της εξ. (1.6) δείχνει ότι το προφίλ αυτό δεν μπορεί να ισχύει κοντά στο τοίχωμα καθώς σύμφωνα με αυτή την εξίσωση η κλίση



Σχήμα 1.4: Μεταβολή του εκθέτη n με τον αριθμό Re για κατανομή ταχύτητας εκθετικής μορφής.



Σχήμα 1.5: Τυπικές κατανομές της ταχύτητας για στρωτή και τυρβώδη ροή.

Πίνακας 1.1: Προσεγγιστικές Σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής f .

Ερευνητές	Σχέση
Nikuradse J. (1932) Για $5000 \leq Re \leq 10^6$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$f = \frac{6.4}{\left(\ln(Re) - \ln \left(1 + 0.01 Re \frac{\varepsilon}{D} \left(1 + 10 \sqrt{\frac{\varepsilon}{D}} \right) \right) \right)^{2.4}}$
Moody M.L (1947) Για $4000 \leq Re \leq 10^6$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.01$	$f = 0.0055 \left(1 + \left(2 \frac{10^4 \varepsilon}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} \right)$
Wood D.J (1966) Για $4000 \leq Re \leq 10^6$, $0.00001 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$f = \alpha + \frac{b}{Re^c} \quad \alpha = 0.53 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + 0.094 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.225}$ $b = 88 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.44} \quad c = 1.62 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.134}$
Jain A.K. (1976) Για $5000 \leq Re \leq 10^7$ $0.00001 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + \left(\frac{21.25}{Re^{0.9}} \right) =$ $= -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.715} + \left(\frac{6.943}{Re} \right)^{0.9} \right)$
Swamee-Jain (1976) Για $5000 \leq Re \leq 10^8$, $1 \times 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 0.01$	$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$
Chen N.H. (1979) Για $4000 \leq Re \leq 10^8$, $5 \times 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7065} - \frac{5.0452}{Re} \times \right.$ $\left. \times \log \left(\frac{(\varepsilon/D)^{1.1098}}{2.8257} - \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right) \right)$
Round G.F. (1980) Για $4000 \leq Re \leq 10^6$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.04$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left(0.27 \frac{\varepsilon}{D} - \frac{6.5}{Re} \right)$

Ερευνητές	Σχέση
Barr D.I.H. (1981) Για $4000 \leq Re \leq 10^6$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{4.518 \log \left(\frac{1}{7} Re \right)}{Re \left(1 + \frac{1}{29} Re^{0.52} (\varepsilon/D)^{0.7} \right)} \right)$
Zigrang D.J. και Sylvester (1982) Για $4000 \leq Re \leq 10^6$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \right) \times \right. \\ \left. \times \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{13}{Re} \right) \right)$
Haaland (1983) Για $5000 \leq Re \leq 10^8$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right]$
Serghides T.K. (1984) Για $4000 \leq Re \leq 10^8$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$f = \left(A - \frac{(B-A)^2}{C-2B+A} \right) \quad A = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{12}{Re} \right) \\ B = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51A}{Re} \right) \quad C = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51B}{Re} \right)$
Swamee P.K. (1993) Για $0 \leq Re \leq 10^8$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9.5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0.125}$
Manadilli G. (1997) Για $5200 \leq Re \leq 10^8$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{95}{Re^{0.983}} - \frac{96.82}{Re} \right)$
Romeo E. et al (2001) Για $4000 \leq Re \leq 10^8$, $0 \leq \varepsilon/D \leq 0.05$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7065} - \frac{5.0272}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.827} - \frac{4.567}{Re} \right) \times \right. \\ \left. \times \log \left(\left(\frac{\varepsilon/D}{7.7918} \right)^{0.9924} + \left(\frac{5.3326}{208.815 + Re} \right)^{0.9345} \right) \right)$



Κεφάλαιο

ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1 Εξίσωση Ενέργειας – Προσδιορισμός Απωλειών Φορτίου

Η εξίσωση ενέργειας είναι η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται σε πολλά προβλήματα ροής σε σωλήνες όπως θα δούμε και σε πολλές εφαρμογές στη συνέχεια.

Για ασυμπίεστη, μόνιμη ροή μεταξύ δύο θέσεων (1) και (2) η εξίσωση γράφεται

$$\frac{p_1}{\gamma} + a_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + a_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (2.1)$$

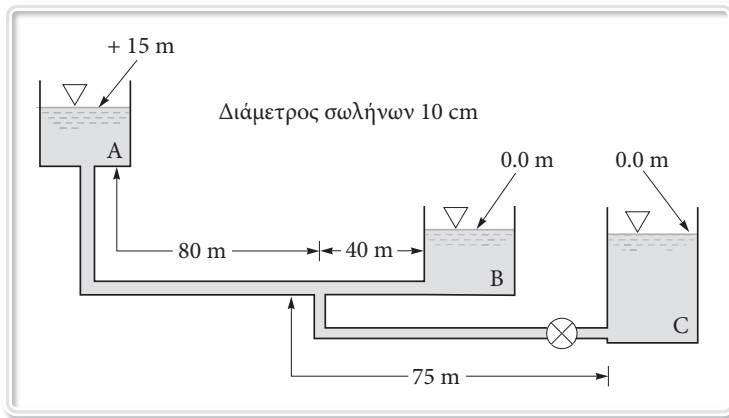
όπου p = στατική πίεση, γ = ειδικό βάρος ($=\rho g$), V_0 = ταχύτητα ροής, z = υψόμετρο από ένα επίπεδο αναφοράς, h_f = απώλειες φορτίου λόγω τριβής, a = συντελεστής κινητικής ενέργειας.

Οι συντελεστές κινητικής ενέργειας a_1 και a_2 , αντισταθμίζουν το γεγονός ότι το προφίλ της ταχύτητας στον σωλήνα δεν είναι ομοιόμορφο. Για ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας $a=1$ ενώ για ανομοιόμορφο $a>1$. Ο όρος h_f (απώλεια φορτίου) λαμβάνει υπόψη του απώλειες ενέργειας που σχετίζονται με τη ροή. Η απώλεια αυτή είναι άμεση συνέπεια της συνεκτικής (ιξώδους) σκέδασης της ενέργειας του ρευστού στο σωλήνα. Για ιδανικό (μη συνεκτικό) ρευστό η απώλεια φορτίου είναι μηδενική και η εξίσωση της ενέργειας απλοποιείται στη γνωστή εξίσωση Bernoulli.

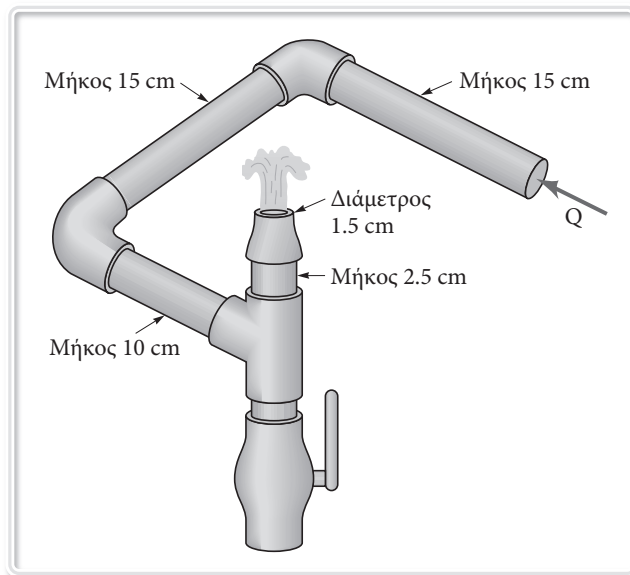
Παρά το γεγονός ότι το προφίλ της ταχύτητας για συνεκτική ροή σε σωλήνες δεν είναι ομοιόμορφο για πλήρως ανεπτυγμένη ροή, το προφίλ δεν αλλάζει από τη διατομή (1) στη διατομή (2), και επομένως $a_1=a_2$. Έτσι, η κινητική ενέργεια είναι η ίδια και στις δυο διατομές και η εξίσωση ενέργειας γίνεται

Ασκήσεις για λύση

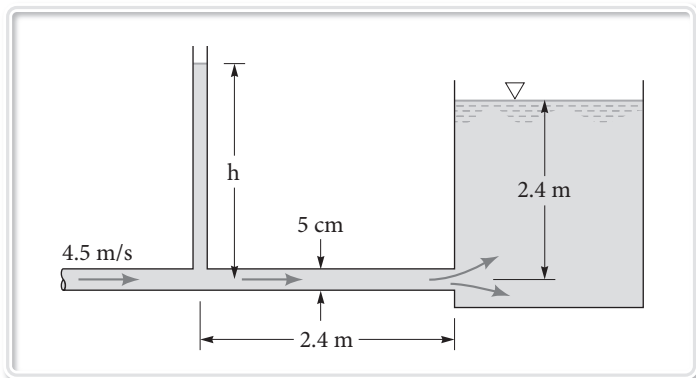
- 2.1 Όταν η βαλβίδα του σχήματος είναι ανοικτή υπολογίστε την παροχή σε κάθε σωλήνα. Ο συντελεστής τριβής για κάθε σωλήνα είναι 0.02.



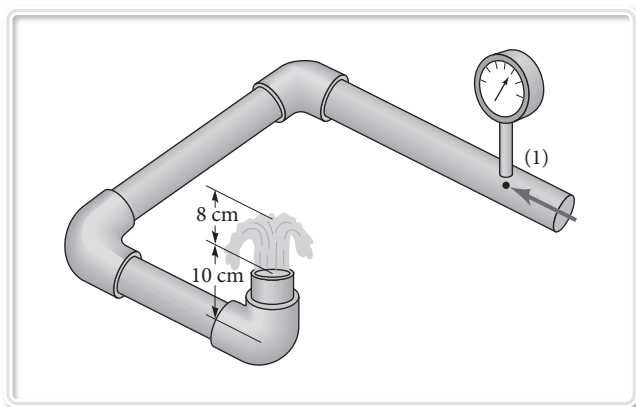
- 2.2 Η παροχή Q στον σωλήνα του σχήματος είναι $5.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Να υπολογισθούν οι απώλειες λόγω τριβών και οι απώλειες στα διάφορα εξαρτήματα του σωλήνα.



- 2.3** Νερό ρέει στο σωλήνα του σχήματος (διαμέτρου 5 cm και σχετικής τραχύτητας 0.004) με ταχύτητα 4.5 m/s. Υπολογίστε το ύψος h νερού στον πιεζομετρικό σωλήνα λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απώλειες.



- 2.4** Η ροή στο σωλήνα του σχήματος δημιουργεί πίδακα ύψους 8.0 cm. Η διάμετρος του σωλήνα είναι 2.0 cm, η τραχύτητα του 0.2 mm και το μήκος από το σημείο (1) μέχρι την έξοδο είναι 50 cm. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απώλειες ενέργειας υπολογίστε την απαιτούμενη πίεση στο σημείο (1).



- 2.5** Νερό αντλείται από μια λίμνη όπως φαίνεται στο σχήμα. Υπολογίστε τη μέγιστη δυνατή παροχή χωρίς την εμφάνιση σπηλαιώσης. Να ληφθούν υπόψη όλες οι απώλειες ενέργειας.



Κεφάλαιο

ΑΝΤΛΙΕΣ

4.1 Εισαγωγή

Οι στροβιλομηχανές είναι υδραυλικές μηχανές που είτε αποσπούν ενέργεια από ένα ρευστό (τουρμπίνα) ή προσθέτουν ενέργεια σε ένα ρευστό (αντλία), ως αποτέλεσμα των δυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ της μηχανής και του ρευστού. Ενώ ο πραγματικός σχεδιασμός και η κατασκευή των εν λόγω μηχανών απαιτούν συχνά σημαντική διορατικότητα και προσπάθεια, οι βασικές αρχές λειτουργίας τους είναι αρκετά απλές.

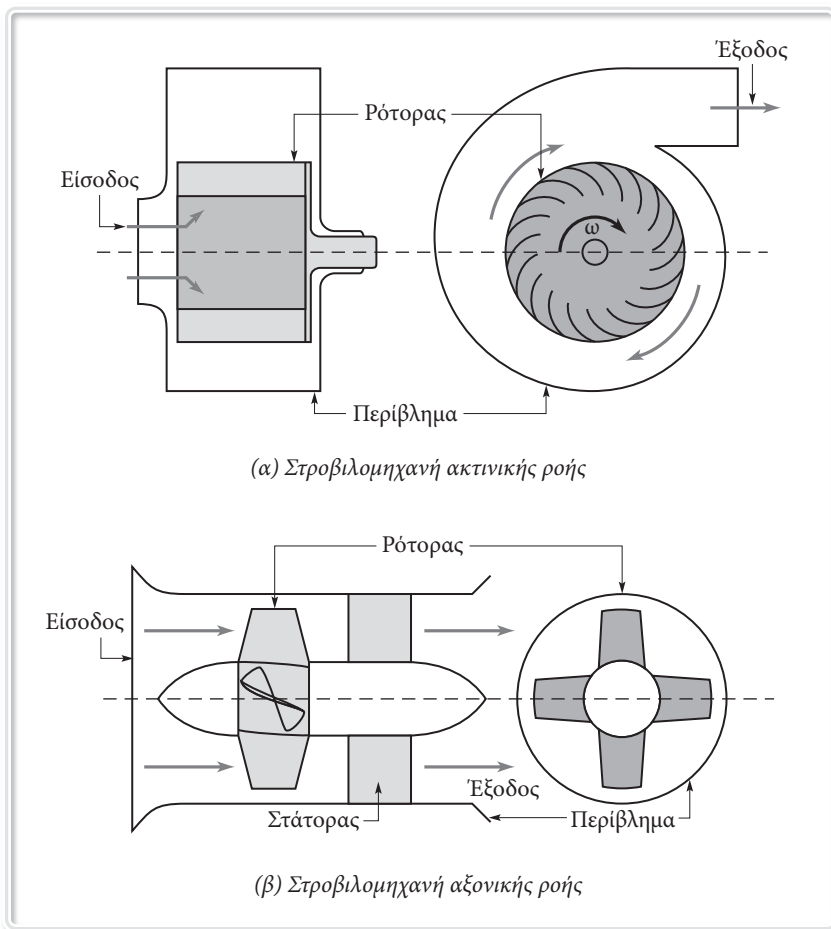
Η δυναμική αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ένα ρευστό και ένα στερεό βασίζεται συχνά στη ροή και στις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ ρευστού/στερεού. Ενέργεια παρέχεται στον περιστρεφόμενο άξονα (από τον κινητήρα, για παράδειγμα) και μεταφέρεται στο ρευστό από τα πτερύγια (αντλία), ή ενέργεια μεταφέρεται από το ρευστό στα πτερύγια και τίθεται στη διάθεση του περιστρεφόμενου άξονα ως ισχύ του άξονα (στρόβιλος).

Το χρησιμοποιούμενο ρευστό μπορεί να είναι είτε αέριο (όπως με έναν ανεμιστήρα ή έναν αεριοστρόβιλο), ή υγρό (όπως με την αντλία νερού σε ένα δίκτυο ύδρευσης ή έναν υδροστρόβιλο σε μια υδροηλεκτρική μονάδα). Ενώ οι βασικές αρχές λειτουργίας είναι οι ίδιες, είτε το ρευστό είναι υγρό ή αέριο, σημαντικές διαφορές στην δυναμική των ρευστών μπορούν να συμβούν. Για παράδειγμα, η σπηλαίωση μπορεί να είναι ένα σημαντικό στοιχείο του σχεδιασμού για τα υγρά αν η πίεση σε οποιοδήποτε σημείο της ροής γίνει ίση με την πίεση υδρατμών. Οι επιδράσεις συμπίεστικότητας μπορεί να είναι σημαντικές όταν πρόκειται για τα αέρια, εάν ο αριθμός Mach γίνει αρκετά μεγάλος.

Πολλές στροβιλομηχανές περιέχουν κάποιο είδος περιβλήματος (κελύφους), που περιβάλλει τα περιστρεφόμενα πτερύγια ή το στροφέιο (ρότορα), σχηματί-

ζοντας έτσι μια εσωτερική δίοδο ροής μέσω της οποίας το ρευστό ρέει (Σχήμα 4.1). Άλλες όπως ο ανεμόμυλος ή ο ανεμιστήρας είναι ελεύθεροι. Ορισμένοι στροβιλομηχανές περιλαμβάνουν και σταθερά πτερύγια εκτός από τα περιστρεφόμενα. Αυτά τα σταθερά πτερύγια μπορούν να κατασκευασθούν έτσι ώστε να επιταχυνθεί η ροή και, συνεπώς, χρησιμεύουν ως ακροφύσια. Επίσης τα πτερύγια μπορούν να ρυθμιστούν για την διάχυση της ροής και ενεργούν ως διαχύτες.

Οι στροβιλομηχανές ταξινομούνται ως μηχανές **αξονικής ροής**, **μικτής ροής**, ή **ακτινικής ροής**, ανάλογα με την κύρια κατεύθυνση της κίνησης του ρευστού σε σχέση με τον άξονα του ρότορα, όπως το ρευστό διαπερνά τα πτερύγια (Σχήμα 4.1). Για μία μηχανή αξονικής ροής το ρευστό διατηρεί μια κύρια συνιστώσα



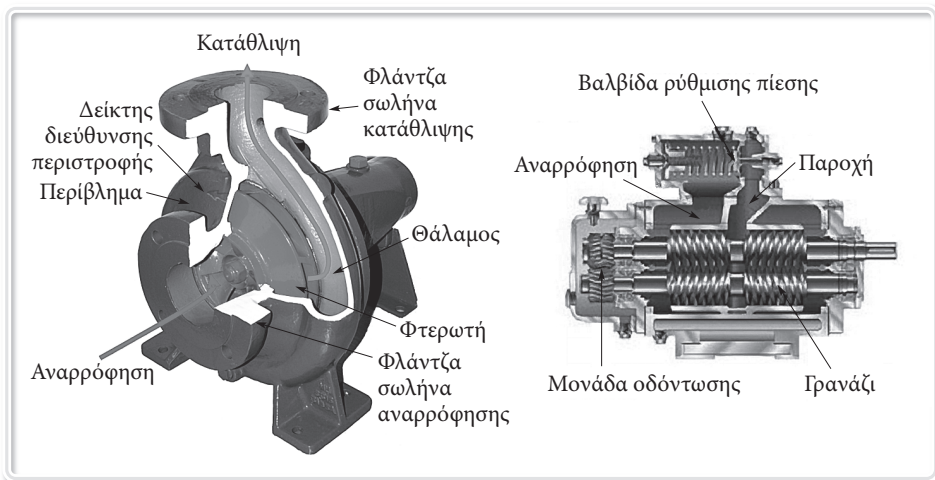
Σχήμα 4.1: (α) Στροβιλομηχανή ακτινικής ροής (β) Στροβιλομηχανή αξονικής ροής

στην κατεύθυνση της αξονικής ροής από την είσοδο στην έξοδο του ρότορα. Για μια μηχανή ακτινικής ροής η ροή εγκάρσια στα πτερύγια έχει μια κύρια συνιστώσα ακτινικής ροής στην είσοδο ή την έξοδο του στροφείου (ρότορα), ή και στα δύο. Σε άλλες μηχανές, που χαρακτηρίζονται ως μηχανές μικτής ροής, μπορεί να υπάρχουν σημαντικές συνιστώσες ταχύτητας και αξονικά και ακτινικά για τη ροή μέσω του ρότορα. Κάθε τύπος μηχανής έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για τις διαφορετικές εφαρμογές και από την άποψη της απόδοσης ρευστού-μηχανής.

4.2 Κατάταξη των Αντλιών

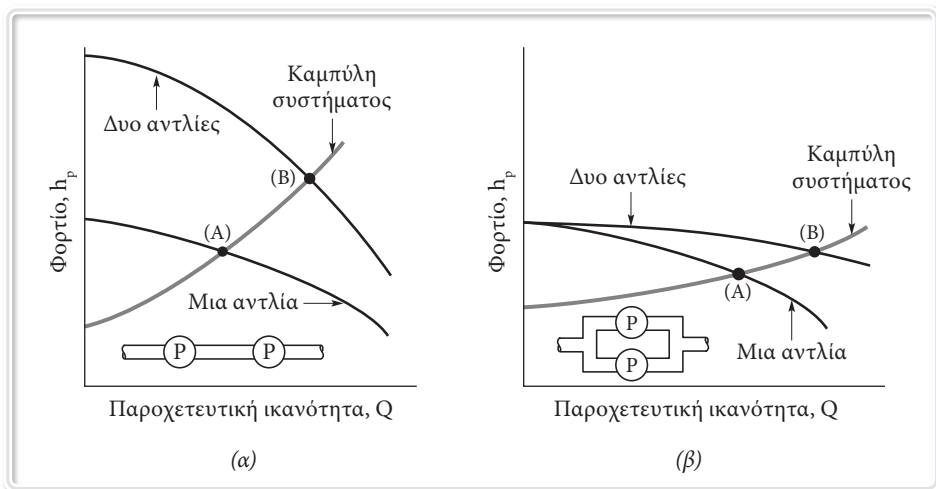
Υπάρχουν διάφορα κριτήρια για την κατάταξη των αντλιών. Το σημαντικότερο όμως κριτήριο που επιτρέπει τη συστηματική ταξινόμηση και μελέτη των αντλιών, είναι η μέθοδος με την οποία εκτελούν την αποστολή τους, με την οποία δηλαδή μεταβιβάζουν ενέργεια (υπό μορφή μηχανικού έργου) στο υγρό. Η μέθοδος μεταβίβασης του μηχανικού έργου στο υγρό, αποτελεί και την **αρχή λειτουργίας** της αντλίας. Με βάση αυτό το κριτήριο οι αντλίες ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- (α) Τις **δυναμικές αντλίες (αντλίες κινητικού τύπου)** και
- (β) τις **αντλίες θετικής εκτόπισης (αντλίες στατικού τύπου)**.



Σχήμα 4.2: (α) Δυναμική Αντλία (β) Αντλία θετικής εκτόπισης

λη του συστήματος παραμένει η ίδια. Το σημείο λειτουργίας είναι στο (A) για μία αντλία και μετατοπίζεται στο (B) για δύο αντλίες σε σειρά. Για δύο ίδιες παράλληλες αντλίες, η τελική καμπύλη απόδοσης επιτυγχάνεται με την προσθήκη των παροχών για το ίδιο φορτίο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.26β. Όπως φαίνεται, η παροχή του συστήματος δεν θα διπλασιαστεί με την προσθήκη δύο αντλιών σε παράλληλη διάταξη (αν παραμένει η ίδια καμπύλη για το σύστημα).

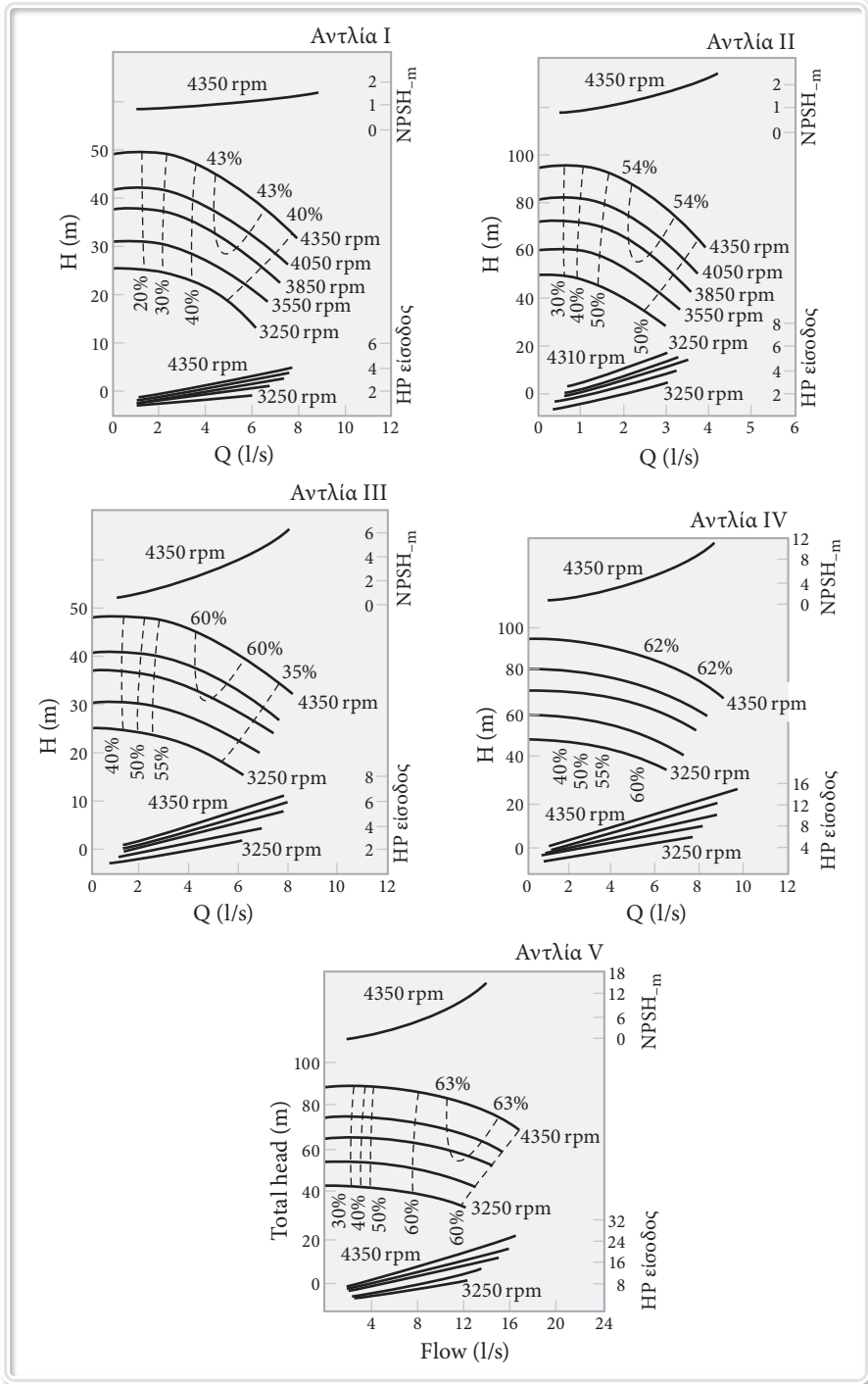


Σχήμα 4.26: Χαρακτηριστικές Καμπύλες αντλιών (α) σε σειρά, (β) σε παράλληλη διάταξη.

Ωστόσο, για μια σχετικά επίπεδη καμπύλη του συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.26β, μπορεί να επιτευχθεί μια σημαντική αύξηση της παροχής καθώς το σημείο λειτουργίας μετακινείται από το σημείο (A) στο σημείο (B).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.5 Επιλογή Αντλίας

Μία αντλία θα χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά νερού με ρυθμό 7 l/s μεταξύ δύο δεξαμενών με διαφορά στάθμης 35 m που απέχουν 1000 m. Αν χρησιμοποιηθεί σωλήνας διαμέτρου 100 mm και τραχύτητας 0.045 mm επιλέξτε την κατάλληλη αντλία και προσδιορίστε τις συνθήκες λειτουργίας της αντλίας με βάση τις χαρακτηριστικές καμπύλες των αντλιών που φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Λύση

Η ταχύτητα ροής είναι $U = Q/A = 0.89 \text{ m/s}$. Ο αριθμός $Re = UD/\nu = 89127 \approx 9 \cdot 10^5$, και η σχετική τραχύτητα $\varepsilon/D = 0.00045$.

Από το διάγραμμα Moody ο συντελεστής τριβής f είναι $f = 0.033$ και οι απώλειες λόγω τριβών

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} = 13.32 \text{ m}.$$

Το φορτίο που θα πρέπει να καλύψει η αντλία είναι (εξ. ενέργειας)

$$h_{\text{αντλ}} = 35 + 13.32 = 48.32 \text{ m}.$$

Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν αντλίες τύπου IV και V. Τα παρακάτω μεγέθη θα πρέπει να προσδιορισθούν πριν την επιλογή της αντλίας.

Q (l/s)	U (m/s)	Re	f	h_f (m)	$h_{\text{αντ}}$ (m)
5	0.637	$6.9 \cdot 10^4$	0.036	7.95	42.5
6	0.764	$7.6 \cdot 10^4$	0.034	10.11	45.1
8	1.019	$10.2 \cdot 10^4$	0.032	16.92	51.9

Από τον παραπάνω πίνακα και τα διαγράμματα για τις αντλίες IV και V υπάρχουν οι παρακάτω δυνατότητες:

- (α) Αντλία IV στις 3550 rpm: $Q = 6.8 \text{ l/s}$, Συνολικό φορτίο = 46 m, επομένως $P_{\text{αντλ}} = 7.5 \text{ hp}$ και $\eta = 60\%$.
- (β) Αντλία IV στις 3850 rpm: $Q = 8.1 \text{ l/s}$, Συνολικό φορτίο = 52 m, επομένως $P_{\text{αντλ}} = 10 \text{ hp}$ και $\eta = 75\%$.
- (γ) Αντλία V στις 3250 rpm: $Q = 6 \text{ l/s}$, Συνολικό φορτίο = 45 m, επομένως $P_{\text{αντλ}} = 7.5 \text{ hp}$ και $\eta = 58\%$.
- (δ) Αντλία V στις 3350 rpm: $Q = 8.4 \text{ l/s}$, Συνολικό φορτίο = 54 m, επομένως $P_{\text{αντλ}} = 10.5 \text{ hp}$ και $\eta = 61\%$.

Η (α) περίπτωση είναι η καλύτερη αν επιτραπεί διαφοροποίηση στην παροχή κατά 3%. Διαφορετικά επιλέγεται η (β) περίπτωση.

5^ο

Κεφάλαιο

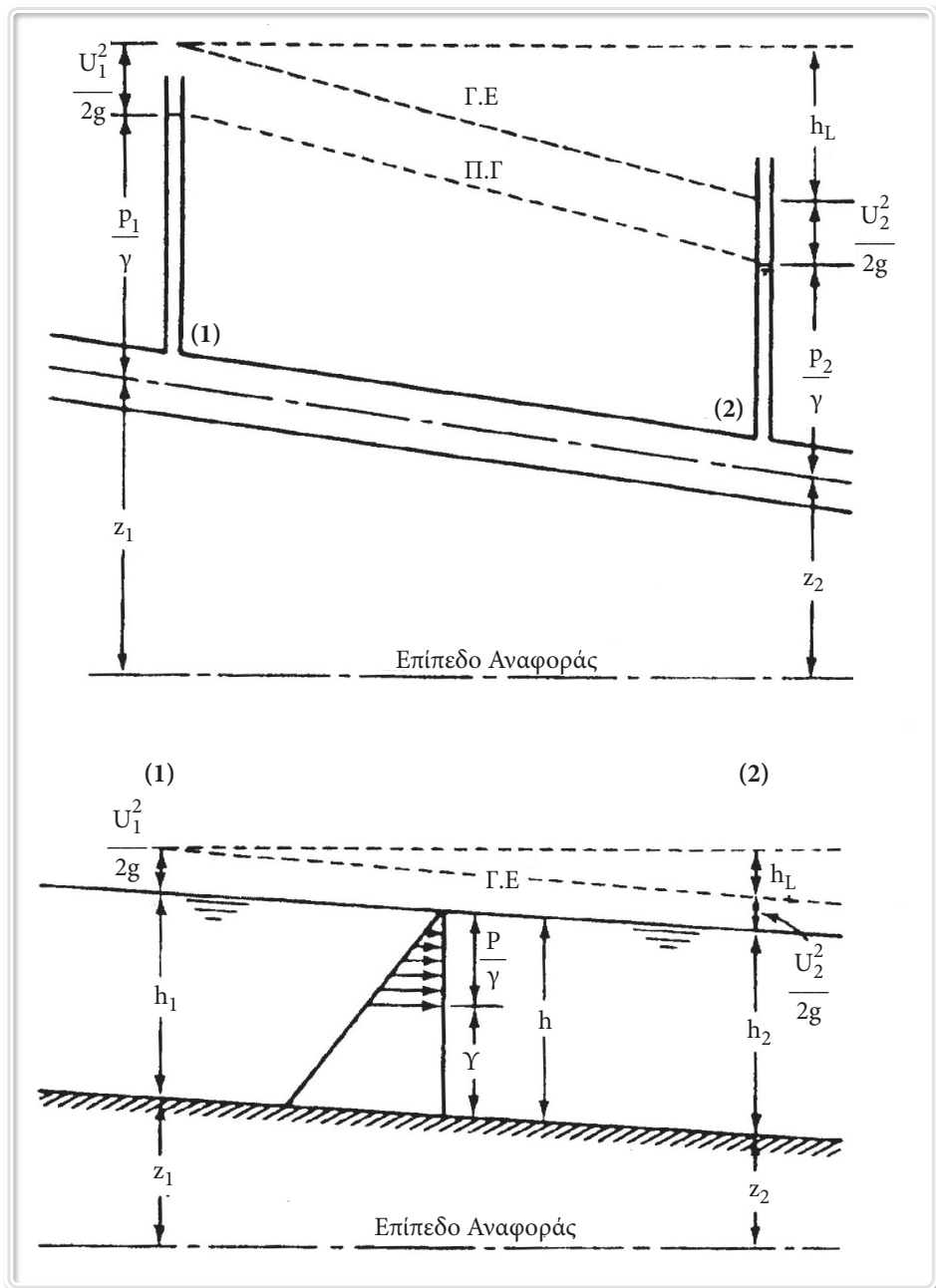
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

5.1 Εισαγωγή

Το ενδιαφέρον του ανθρώπου σε φυσικές ή τεχνητές διόδους του νερού όπου η ροή γίνεται λόγω βαρύτητας υπάρχει από πολύ παλιά χρόνια. Τα Ρωμαϊκά υδραγωγεία όπως επίσης και τα κανάλια της Αιγύπτου, Ινδίας, Ελλάδας κλπ. αποτελούν κλασικά παραδείγματα των προσπαθειών του ανθρώπου προς αυτή τη κατεύθυνση. Τα πρακτικά παραδείγματα ροής σε ανοικτούς αγωγούς είναι πολλά. Ροή σε ποταμούς, αρδευτικά κανάλια, δίκτυα αποχέτευσης είναι μερικά από τα πιο γνωστά παραδείγματα ροών σε ανοικτούς αγωγούς. Τα πρακτικά προβλήματα ροής σε ανοικτούς αγωγούς για τα οποία ο πολιτικός μηχανικός συχνά αναζητά λύσεις είναι πολλά και με ανάλογη δυσκολία. Μερικά από αυτά είναι: ο σχεδιασμός καναλιών, ο υπολογισμός στάθμης - παροχής σε ποταμούς, ο υδραυλικός σχεδιασμός λεκανών σκέδασης της ενέργειας, ο προσδιορισμός της παροχής σε εκχειλιστές και φράγματα, η κίνηση ενός πλημμυρικού κύματος σε ένα ποταμό, η διασπορά ρυπαντών σε ποταμούς κλπ.

Ένας αγωγός του οποίου το κινούμενο ρευστό δεν περιορίζεται πλήρως από στερεά τοιχώματα αλλά έχει μια ελεύθερη επιφάνεια με ατμοσφαιρική πίεση είναι γνωστός σαν **ανοικτός αγωγός**. Η ελεύθερη επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί σαν μια διεπιφάνεια μεταξύ του κινούμενου ρευστού και του κινούμενου ή ακίνητου αέρα. Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας εξαρτάται από δυνάμεις αδρανειακές, βαρύτητας ή επιφανειακές τάσεις. Στα περισσότερα πρακτικά προβλήματα, η επιφανειακή τάση δεν είναι σημαντική και επομένως η ροή σε ανοικτούς αγωγούς εξαρτάται από τη βαρύτητα, την αδράνεια και το ιξώδες.

Η ροή σε ανοικτούς αγωγούς διαχωρίζεται από αυτήν σε κλειστούς αγωγούς (σωλήνες) από τη παρουσία της ελεύθερης επιφάνειας. Το σχήμα 5.1 δείχνει τη



Σχήμα 5.1: Πιεζομετρική γραμμή και γραμμή ενέργειας σε ανοιχτούς και κλειστούς αγωγούς

πιεζομετρική γραμμή και τη γραμμή ενέργειας για τις δύο αυτές ροές. Στη περίπτωση ανοικτού αγωγού η πιεζομετρική γραμμή ταυτίζεται με την ελεύθερη επιφάνεια και για το λόγο αυτό η ροή σε ανοικτό αγωγό ονομάζεται επίσης και **ροή με ελεύθερη επιφάνεια**. Η επίλυση προβλημάτων ροής σε ανοικτούς αγωγούς μπορεί να θεωρηθεί πιο δύσκολη από την επίλυση προβλημάτων ροής σε σωλήνες. Το σχήμα της διατομής και η τραχύτητα μεταβάλλονται περισσότερο στους ανοικτούς αγωγούς. Ενώ τα τεχνητά και εργαστηριακά κανάλια έχουν συνήθως διατομή με απλή γεωμετρία (ορθογωνική, τραπεζοειδής κλπ.) τα φυσικά υδατορεύματα συνήθως έχουν σύνθετη και ακανόνιστη διατομή. Επίσης ο πυθμένας ενός εργαστηριακού καναλιού είναι συνήθως λείος ενώ ο πυθμένας ενός ποταμού μπορεί να έχει μεγάλες πέτρες ή αμμοκύματα.

5.2 Κατηγορίες Ανοικτών Αγωγών

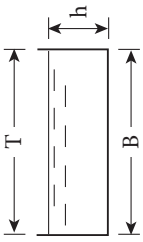
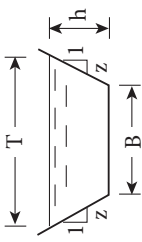
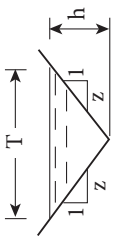
Οι ανοικτοί αγωγοί μπορούν να διαχωριστούν σε **τεχνητοί** ή **φυσικοί** ανάλογα με το τρόπο διαμόρφωσης της διατομής τους (από τον άνθρωπο ή από φυσικές διεργασίες). Οι ποταμοί είναι ένα κλασσικό παράδειγμα φυσικών ανοικτών αγωγών ενώ τα αρδευτικά κανάλια και οι αποχετευτικοί αγωγοί (όταν η ροή δεν είναι υπό πίεση) ανήκουν στη κατηγορία των τεχνητών ανοικτών αγωγών.

Ένας αγωγός με αμετάβλητη διατομή και κλίση πυθμένα ονομάζεται **πρισματικός** ενώ αν η διατομή ή η κλίση πυθμένα μεταβάλλονται κατά μήκος του αγωγού ο αγωγός ονομάζεται **μη πρισματικός**.

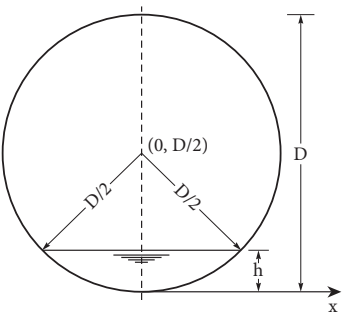
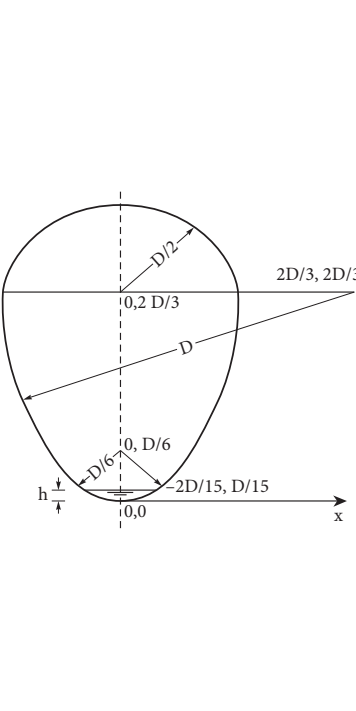
Ένας αγωγός με αμετάβλητο πυθμένα και πρηνή (π.χ. αγωγός από τσιμέντο) είναι γνωστός σαν **αγωγός αμετάβλητης διατομής** ενώ όταν η διατομή αποτελείται από σωματίδια τα οποία κινούνται λόγω της δράσης του κινούμενου νερού τότε ο αγωγός ονομάζεται **αγωγός μεταβλητής διατομής**. Ένας **αλουβιακός αγωγός** είναι ένας αγωγός μεταβλητής διατομής που μεταφέρει υλικό ίδιο με αυτό που υπάρχει στον πυθμένα και στα πρηνή.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομών ανοικτών αγωγών φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Επίσης στον Πίνακα 5.2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά διατομών αγωγών που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα αποχέτευσης στα οποία η ροή είναι με ελεύθερη επιφάνεια.

Πίνακας 5.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομών ανοικτών αγωγών

Διατομή	Εμβαδόν, A	Βρεχόμενη Περιμέτρος, P	Υδραυλική Ακτίνα R	Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας, T	Υδραυλικό βάθος	
Ορθογωνική	$B \cdot h$	$B + 2h$	$\frac{B \cdot h}{B + 2h}$	B	h	
Τραπεζοειδής	$(B + zh)h$	$B + 2h\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(B + zh)h}{B + 2h\sqrt{1 + z^2}}$	$B + 2zh$	$\frac{(B + zh)h}{B + 2zh}$	
Τριγωνική	zh^2	$2h\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zh}{2\sqrt{1 + z^2}}$	2zh	0.5h	

Πίνακας 5.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομών αγωγών σε δίκτυα αποχέτευσης

Κυκλική Διατομή ($0 < n < 1$, $n = h/D$)	Εμβαδό Α, Πλάτος Ελεύθερης Επιφάνειας Τ, Βρεχόμενη Περίμετρος Ρ
	$A = 0.25D^2 \left[\cos^{-1}(1-2\eta) - 2(1-2\eta)\sqrt{\eta(1-\eta)} \right]$ $T = 2D\sqrt{\eta(1-\eta)}$ $P = D \cos^{-1}(1-2\eta)$
Ωσειδής Διατομή ($0 < n < 1$, $n = h/D$)	Εμβαδό Α, Πλάτος Ελεύθερης Επιφάνειας Τ, Βρεχόμενη Περίμετρος Ρ
	<p>Για $\eta \leq 1/15$</p> $A = (D^2/36) \left[\cos^{-1}(1-6\eta) - 2(1-6\eta)\sqrt{3\eta(1-3\eta)} \right]$ $T = (2D/3)\sqrt{3\eta(1-3\eta)}$ $P = (D/3)\cos^{-1}(1-6\eta)$ <p>Για $1/15 \leq \eta \leq 2/3$</p> $A = D^2 \left[1.22481 - 4\eta/3 - \sin^{-1}(2/3-\eta) - (2/3-\eta)\sqrt{1-(2/3-\eta)^2} \right]$ $T = 2D \left[\sqrt{1-(2/3-\eta)^2} - 2/3 \right]$ $P = D \left[1.5961 - 2\sin^{-1}(2/3-\eta) \right]$ <p>Για $2/3 \leq \eta \leq 1$</p> $A = D^2 \left[0.33592 + (1/9)\sin^{-1}(3\eta-2) + (\eta/3-2/9)\sqrt{1-(3\eta-2)^2} \right]$ $T = 2D\sqrt{1/9-(\eta-2/3)^2}$ $P = D \left[1.5961 + (2/3)\sin^{-1}(3\eta-2) \right]$

Πίνακας 5.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομών αγωγών σε δίκτυα αποχέτευσης (συνέχεια)

Πεταλοειδής Διατομή ($0 < n < 1$, $n = h/D$)	Εμβαδό A , Πλάτος Ελεύθερης Επιφάνειας T , Βρεχόμενη Περίμετρος P
	<p>Για $\eta \leq 0.08856$</p> $T = 2D\sqrt{\eta(2-\eta)}, \quad P = 2D\cos^{-1}(1-\eta)$ $A = D^2 \left[\cos^{-1}(1-\eta) - (1-\eta)\sqrt{\eta(2-\eta)} \right]$ <p>Για $0.08856 \leq \eta \leq 0.5$</p> $T = D \left(-1 + 2\sqrt{1 - (0.5-\eta)^2} \right), \quad P = D \left[1.69612 - 2\sin^{-1}(0.5-\eta) \right]$ $A = D^2 \left[0.93662 - \eta - \sin^{-1}(0.5-\eta) - (0.5-\eta)\sqrt{1 - (0.5-\eta)^2} \right]$ <p>Για $0.5 \leq \eta \leq 1.0$</p> $T = 2D\sqrt{\eta(1-\eta)}, \quad P = D \left[1.69612 + \sin^{-1}(2\eta-1) \right]$ $A = D^2 \left[0.43662 + 0.25\sin^{-1}(2\eta-1) + (\eta-0.5)\sqrt{\eta(1-\eta)} \right]$
<p>Ημι-ελλειπτική Διατομή ($0 < n < 1$, $n = h/D$)</p>	<p>Εμβαδό A, Πλάτος Ελεύθερης Επιφάνειας T, Βρεχόμενη Περίμετρος P</p>
	<p>Για $\eta \leq 0.09605$</p> $T = D\sqrt{\eta(10-4\eta)}, \quad P = 2.5D\cos^{-1}(1-0.8\eta)$ $A = 1.5625D^2 \left[\cos^{-1}(1-0.8\eta) - 2(1-0.8\eta)\sqrt{0.4\eta(1-0.4\eta)} \right]$ <p>Για $0.09605 \leq \eta \leq 5/24$</p> $T = D \left(1/3 + 2\sqrt{1/9 - (5/24 - \eta)^2} \right),$ $P = D \left[1.10096 - (1/3)\sin^{-1}(0.6255 - 3\eta) \right]$ $A = D^2 \left[0.103428 + \eta/3 - (1/9)\sin^{-1}(0.625 - 3\eta) \right. \\ \left. - (1/9)(0.6255 - 3\eta)\sqrt{1 - (0.625 - 3\eta)^2} \right]$



Κεφάλαιο

Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η αρχή της ενέργειας και η εφαρμογή της σε ανοικτούς αγωγούς. Αναλύονται οι έννοιες της ειδικής ενέργειας και του κρίσιμου βάρους που είναι εξαιρετικά χρήσιμες στην επίλυση πολλών προβλημάτων ροής σε ανοικτούς αγωγούς. Επίσης παρουσιάζεται η επίλυση μερικών κλασικών προβλημάτων με τη χρήση των παραπάνω εννοιών.

7.2 Ειδική Ενέργεια

Η ειδική ενέργεια της ροής σε μία τυχαία διατομή ενός ανοικτού αγωγού ορίσθηκε στο κεφάλαιο 5 σαν η συνολική ενέργεια στη διατομή αυτή χρησιμοποιώντας τον πυθμένα του αγωγού σαν επίπεδο αναφοράς.

$$E = h + \frac{U^2}{2g} \quad (7.1)$$

ή χρησιμοποιώντας την εξίσωση συνέχειας ($Q = AU$)

$$E = h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (7.2)$$

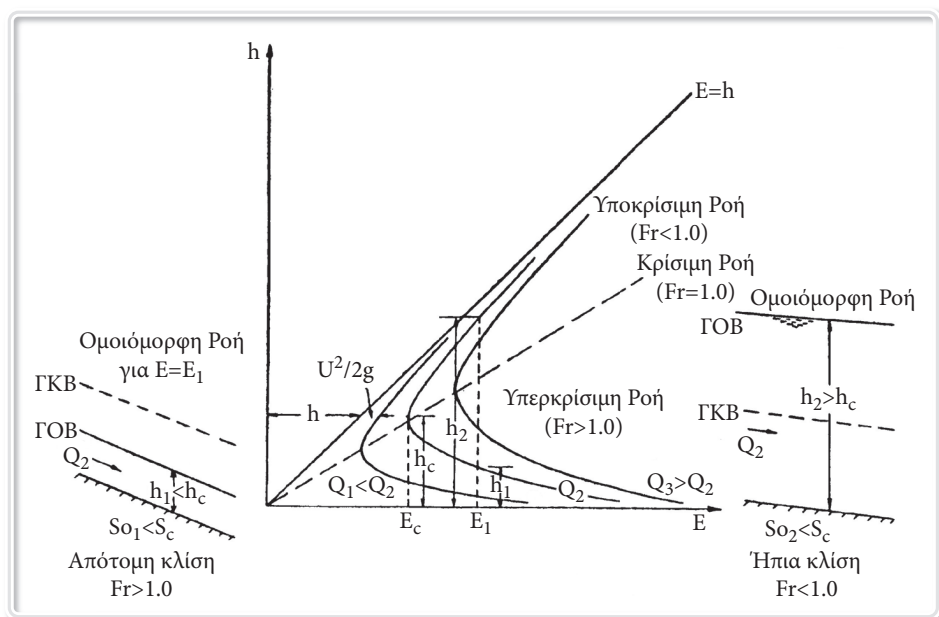
Για έναν αγωγό δεδομένου σχήματος $A = f(h)$ και έτσι η εξ. (7.2) μπορεί να γραφεί όπως

$$E = f(h) \quad (\text{για δεδομένη τιμή του } Q) \quad (7.3)$$

7.2.1 Διάγραμμα Ειδικής Ενέργειας

Η σχέση $E \sim h$, που συχνά ονομάζεται και **διάγραμμα ειδικής ενέργειας**, μπορεί να αναπτυχθεί δίνοντας στην εξ. (7.3) διάφορες τιμές στο h . Η μορφή της καμπύλης φαίνεται στο σχ. 7.1 όπου έχουν χαραχθεί καμπύλες για τρεις διαφορετικές παροχές Q_1 , Q_2 και Q_3 ($Q_3 > Q_2 > Q_1$). Από την εξ. (7.1) φαίνεται ότι, για κάθε παροχή, το E τείνει στο άπειρο όταν το h τείνει στο μηδέν (διότι $A \rightarrow 0$ όταν $h \rightarrow 0$ και επομένως η U πρέπει να είναι άπειρη για δεδομένη παροχή). Όμοια όταν το $h \rightarrow \infty$, $A \rightarrow \infty$ και επομένως $U \rightarrow 0$ και $E \rightarrow h$. Προφανώς το E έχει πεπερασμένες τιμές για ενδιάμεσες τιμές του h και θα πρέπει να έχει μία ελάχιστη τιμή για κάποια τιμή του h . Τέτοια πράγματι είναι η καμπύλη $E-h$, ασυμπτωτική στις γραμμές $h=0$ και $E=h$ με ελάχιστη τιμή του E για $h>0$ όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.1. Το βάθος της ροής για το οποίο η ειδική ενέργεια γίνεται ελάχιστη για δεδομένη παροχή ονομάζεται **κρίσιμο βάθος** h_c και η ροή ονομάζεται **κρίσιμη**. Το σχήμα 7.1 επίσης δείχνει ότι το κρίσιμο βάθος αυξάνεται με αύξηση της παροχής.

Η ελάχιστη τιμή της ειδικής ενέργειας για δεδομένη παροχή υπολογίζεται αν παραγωγίσουμε την εξ. (7.2) ως προς h και θέσουμε dE/dh ίσο με 0 έτσι ώστε το E να είναι ελάχιστο



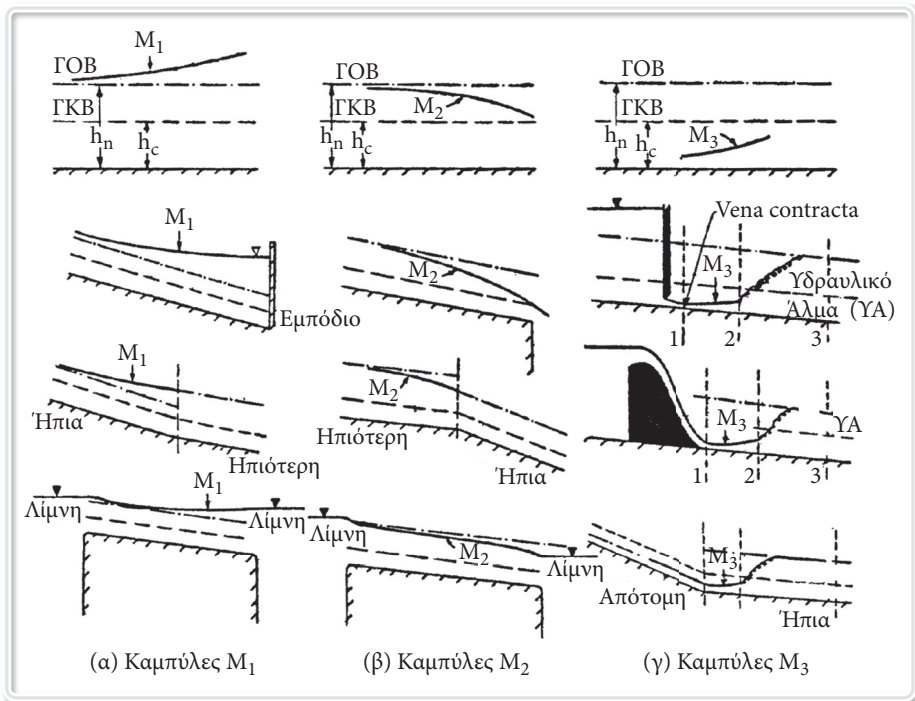
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα Ειδικής Ενέργειας

Πίνακας 9.1: Κατηγορίες Προφίλ σε Πρισματικούς Αγωγούς

Κλίση Αγωγού	Ζώνες			Τύπος καμπύλης	Καμπυλότητα από πάνω	Τύπος Ροής
	Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3			
Ήπια $S_0 < S_c$ $h_n > h_c$	M_1 ($h > h_n$)			Υπερύψωση	Κοίλη	Υποκρίσιμη
		M_2 ($h_n > h > h_c$)		Κατάπτωση	Κυρτή	Υποκρίσιμη
			M_3 ($h < h_c$)	Υπερύψωση	Κοίλη	Υπερκρίσιμη
Κρίσιμη $S_0 = S_c$ $h_n = h_c$	C_1 ($h > h_c$)			Υπερύψωση	Ευθεία	Υποκρίσιμη
			C_3 ($h < h_c$)	Υπερύψωση	Ευθεία	Υπερκρίσιμη
Απότομη $S_0 > S_c$ $h_n < h_c$	S_1 ($h > h_c$)			Υπερύψωση	Κυρτή	Υποκρίσιμη
		S_2 ($h_n < h < h_c$)		Κατάπτωση	Κοίλη	Υπερκρίσιμη
			S_3 ($h < h_c$)	Υπερύψωση	Κυρτή	Υπερκρίσιμη
Οριζόντια $S_0 = 0$ $h_n = \infty$		H_2 ($h > h_c$)		Κατάπτωση	Κυρτή	Υποκρίσιμη
			H_3 ($h < h_c$)	Υπερύψωση	Κοίλη	Υπερκρίσιμη
Αντίθετη $S_0 < 0$ $h_n = \text{φα-}$ ταστική		A_2 ($h > h_c$)		Κατάπτωση	Κυρτή	Υποκρίσιμη
			A_3 ($h < h_c$)	Υπερύψωση	Κοίλη	Υπερκρίσιμη

όταν μία ήπια κλίση ακολουθείται από μία ηπιότερη. Και στις δύο περιπτώσεις η συνθήκη $h > h_n > h_c$ ικανοποιείται και επομένως έχουμε το σχηματισμό καμπύλης M_1 . Το ομοιόμορφο βάθος προσεγγίζεται ασυμπτωτικά στο άπειρο αλλά το βάθος $1.01 h_n$ εμφανίζεται σε πεπερασμένη απόσταση από τη διατομή ελέγχου και οι υπολογισμοί γενικά γίνονται μέχρι το βάθος ίσο με $1.01 h_n$.

Γενικά, τα προφίλ εμφανίζονται κοντά σε μία υδραυλική κατασκευή (εκχειλιστές, θυρίδες, φράγματα) ή κοντά σε μία διατομή όπου υπάρχει μεταβολή της κλίσης του πυθμένα.



Σχήμα 9.3: Προφίλς τύπου M

Στις παραπάνω κατασκευές το βάθος ροής υπολογίζεται για δεδομένη παροχή και δεδομένα χαρακτηριστικά της κατασκευής. Επίσης σ' έναν αγωγό μεγάλου μήκους το ομοιόμορφο βάθος ροής λειτουργεί σαν διατομή ελέγχου. Θα πρέπει να γίνει η υπενθύμιση ότι η υπερκρίσιμη ροή λειτουργεί με ανάντη διατομή ελέγχου ενώ η υποκρίσιμη ροή με κατάντη διατομή ελέγχου. Έτσι, αν χαρακτηθούν οι γραμμές κρίσιμου και ομοιόμορφου βάθους, αναγνωρισθεί ο τύπος της κλίσης και σημειωθούν οι διατομές ελέγχου και τα βάθη ροής στις διατομές αυτές είναι δυνατόν να κινηθούμε ανάντη ή κατάντη (ανάλογα με τη ροή) και να σχεδιάσουμε το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας με τη βοήθεια και του πίνακα 9.1.

Η καμπύλη M_2 είναι μία καμπύλη κατάπτωσης που εμφανίζεται σε μία υδραυλική υδατόπτωση (ελεύθερη υδατόπτωση) στο τέλος ενός αγωγού με ήπια κλίση. Επίσης εμφανίζεται, όταν έχουμε αύξηση της κλίσης του αγωγού (από ήπια σε απότομη ή από ηπιότερη σε ήπια κλίση), στο πρώτο τμήμα του αγωγού όπου η κλίση είναι ήπια ή ηπιότερη αντίστοιχα. Στη πρώτη περίπτωση μπορεί να φανεί και από την εξ. (9.3) ότι το βάθος στην αλλαγή της κλίσης είναι κρίσιμο. Η περίπτωση $S_0 = S_f$ σύμφωνα με την εξίσωση σημαίνει ότι

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9.12**Πρόβλημα δύο δεξαμενών. Υπολογισμός της παροχής από γνωστά βάθη ροής h_1 και h_2**

Ένας αγωγός ορθογωνικής διατομής πλάτους 15 m και μήκους 10 km έχει μία κλίση πυθμένα 10^{-4} και συνδέει δύο λίμνες. Τα βάθη ροής στην είσοδο και στην έξοδο του αγωγού είναι αντίστοιχα 1.5 m και 2.0 m. Αν ο συντελεστής Manning είναι ίσος με 0.015 υπολογίστε την παροχή στον αγωγό.

Λύση

Από τα δεδομένα του προβλήματος έχουμε:

$$B = 15.0 \text{ m}, S_0 = 10^{-4}, L = 10 \text{ km}, n = 0.015 \text{ και } h_1 = 1.5 \text{ m}, h_2 = 2.0 \text{ m}.$$

Αφού $h_2 > h_1$ θα σχηματιστεί ένα προφίλ τύπου M_1 αν τα βάθη ροής h_1 και h_2 είναι μεγαλύτερα από το h_c .

Για ομοιόμορφο βάθος ροής $h_n = 1.5 \text{ m}$ η παροχή υπολογίζεται από την εξίσωση

Manning $Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \Rightarrow Q = 17.4 \text{ m}^3 / \text{s}$. Το κρίσιμο βάθος h_c υπολογίζεται από την εξίσωση

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} \Rightarrow h_c = 0.515 \text{ m}.$$

Επομένως θα εμφανισθεί στον αγωγό προφίλ τύπου M_1 .

Για παροχή $Q = 17.4 \text{ m}^3 / \text{s}$, $h_1 = 1.5 \text{ m}$ και $h_2 = 2.0 \text{ m}$ υπολογίζεται το μήκος του προφίλ M_1 και συγκρίνεται με το μήκος L του αγωγού.

Από την εξίσωση $\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - \bar{S}_f}$ (1) και για

$$E_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = 1.5 + \frac{17.4^2}{2 \cdot 9.81 \cdot (15 \cdot 1.5)^2} = 1.53 \text{ m}$$

$$E_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} = 2.0 + \frac{17.4^2}{2 \cdot 9.81 \cdot (15 \cdot 2)^2} = 2.02 \text{ m}$$

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} = 7.54 \cdot 10^{-5}$$

(Τα S_{f1} και S_{f2} υπολογίζονται με το γνωστό τρόπο).

Έχουμε $\Delta x = 19.8 \text{ km} > L$. Επομένως η πραγματική παροχή είναι μικρότερη από $17.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Με τρεις δοκιμές για την παροχή Q μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή στον αγωγό όπως περιγράφεται παρακάτω:

- (α) Για $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ υπολογίζουμε τα E_1, E_2, \bar{S}_f όπως προηγουμένως και από την εξίσωση (1) υπολογίζουμε $\Delta x = 6.2 \text{ km} < L$.
- (β) Για $Q = 12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ υπολογίζεται $\Delta x = 7.45 \text{ km}$.
- (γ) Για $Q = 15.1 \text{ m}^3/\text{s}$ υπολογίζεται $\Delta x = 10.0 \text{ km}$.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9.13**Πρόβλημα δύο δεξαμενών. Υπολογισμός του βάθους ροής h_2 από γνωστά Q και h_1**

Ένας αγωγός ορθογωνικής διατομής πλάτους 15 m , συντελεστή Manning 0.015 και μήκους 10 km έχει μία κλίση πυθμένα 10^{-4} και συνδέει δύο λίμνες. Το νερό στην πάνω λίμνη είναι 1.52 m πάνω από την στάθμη του πυθμένα του αγωγού όταν ο αγωγός μεταφέρει νερό με ρυθμό $15.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Να υπολογισθεί η στάθμη του νερού στην κάτω λίμνη.

Λύση

Από τα δεδομένα του προβλήματος έχουμε

$$B = 15 \text{ m}, n = 0.015, L = 10 \text{ km}, S_0 = 10^{-4}, Q = 15.1 \text{ m}^3/\text{s} \text{ και } h_{\lambda\mu} = 1.52 \text{ m}.$$

(Το $h_{\lambda\mu}$ δεν είναι το βάθος ροής στην είσοδο του αγωγού αλλά ουσιαστικά η ενέργεια της ροής στην λίμνη).

Το βάθος ροής στην είσοδο του αγωγού βρίσκεται από την σχέση

$$E_{\lambda\mu} = E_{\alpha\gamma} \Rightarrow h_{\lambda\mu} = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \Rightarrow 1.52 = h_1 + \frac{15.1^2}{2 \cdot 9.81 \cdot (15 \cdot h_1)^2} \Rightarrow h_1 = 1.5 \text{ m}$$

Για $Q = 15.1 \text{ m}^3/\text{s}$ το ομοιόμορφο βάθος ροής h_n και το κρίσιμο βάθος ροής h_c υπολογίζονται $h_n = 1.37 \text{ m}$ (εξίσωση Manning) και $h_c = 0.47 \text{ m}$ ($Fr = 1$). Επομένως θα σχηματιστεί προφίλ τύπου M_1 .

Για $h_1 = 1.5 \text{ m}$ και $\Delta x = L = 10 \text{ km}$ υπολογίζεται το βάθος ροής h_2 στο τέλος του αγωγού από την εξίσωση $E_2 = E_1 + \Delta x(S_0 - \bar{S}_f)$ με δοκιμές (το \bar{S}_f δεν μπορεί να υπολογισθεί απευθείας). Για $h_2 = 2 \text{ m}$ ικανοποιείται η εξίσωση ενέργειας και επομένως η στάθμη του νερού στην κάτω λίμνη σε σχέση με την στάθμη του

πυθμένα του αγωγού στο τέλος του υπολογίζεται όπως

$$E_{\alpha\gamma} = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} = E_{\lambda\mu} \Rightarrow 2.0 + \frac{15.1^2}{2 \cdot 9.81 \cdot (15 \cdot 2)^2} = h_{\lambda\mu} \Rightarrow h_{\lambda\mu} = 2.01 \text{ m}.$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9.14**Πρόβλημα δύο δεξαμενών. Υπολογισμός του βάθους ροής h_1 από γνωστά Q και h_2**

Ένας αγωγός ορθογωνικής διατομής πλάτους 15 m, συντελεστή Manning 0.015 και μήκους 10 km έχει μία κλίση πυθμένα 10^{-4} και συνδέει δύο λίμνες. Το νερό στην κάτω λίμνη είναι 2 m πάνω από την στάθμη του πυθμένα του αγωγού όταν ο αγωγός μεταφέρει νερό με ρυθμό $15.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Να υπολογισθεί η στάθμη του νερού στην πάνω λίμνη.

Λύση

Από τα δεδομένα του προβλήματος έχουμε

$$B = 15 \text{ m}, n = 0.015, L = 10 \text{ km}, S_0 = 10^{-4}, Q = 15.1 \text{ m}^3/\text{s} \text{ και } h_{\lambda\mu} = 2.01 \text{ m}.$$

Το βάθος ροής στην έξοδο του αγωγού βρίσκεται από τη σχέση

$$E_{\alpha\gamma} = E_{\lambda\mu} \Rightarrow h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} = 2.01 \text{ m} \Rightarrow h_2 = 2 \text{ m}.$$

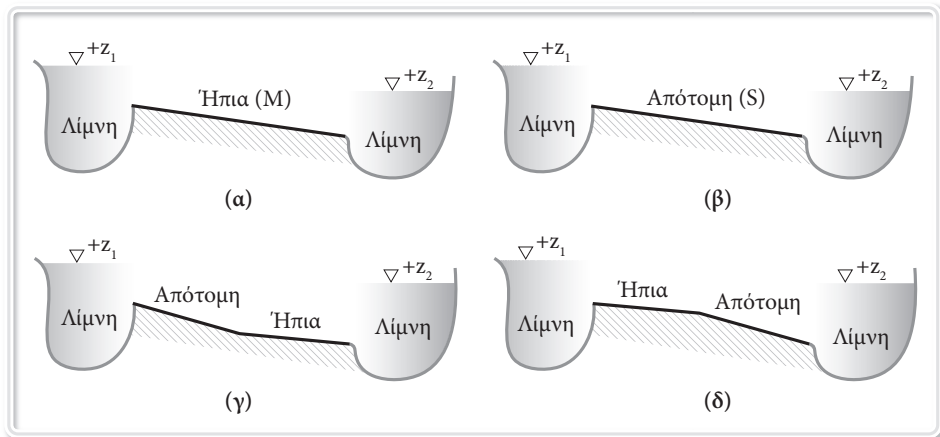
Για $Q = 15.1 \text{ m}^3/\text{s}$ το ομοιόμορφο βάθος ροής h_n και το κρίσιμο βάθος ροής h_c υπολογίζονται $h_n = 1.37 \text{ m}$ (εξίσωση Manning) και $h_c = 0.47 \text{ m}$ ($Fr=1$). Επομένως θα σχηματιστεί προφίλ τύπου M_1 .

Για $h_2 = 2.0 \text{ m}$ και $\Delta x = L = 10 \text{ km}$ υπολογίζεται το βάθος ροής h_1 στην αρχή του αγωγού από την εξίσωση $E_1 = E_2 - \Delta x(S_0 - \bar{S}_f)$ με δοκιμές. Μετά από δοκιμές βρίσκουμε $h_1 = 1.5 \text{ m}$ και το $h_{\lambda\mu}$ θα είναι

$$h_{\lambda\mu} = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \Rightarrow h_{\lambda\mu} = 1.52 \text{ m}.$$

Ασκήσεις για λύση

- 9.1** Σχεδιάστε όλα τα προφίλ που μπορούν να εμφανισθούν για όλες τις δυνατές τιμές των z_1 και z_2 στα παρακάτω σχήματα.



- 9.2** Ένας αγωγός τραπεζοειδούς διατομής με πλάτος πυθμένα 20 m, κλίση πρανών 1.25:1 (Ο:Κ), κλίση πυθμένα 10^{-4} και $\eta = 0.015$ μεταφέρει νερό βάθους 6 m. Στο τέλος του αγωγού υπάρχει ελεύθερη υδατόπτωση. Υπολογίστε την ανάντη απόσταση από το τέλος του αγωγού όπου το βάθος ροής είναι 5 m χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Chow.
- 9.3** Ένας αγωγός τραπεζοειδούς διατομής με πλάτος πυθμένα 10 m, κλίση πρανών 2:1 (Ο:Κ), κλίση πυθμένα 0.001 και $\eta = 0.027$ παροχετεύει νερό σε μία λίμνη με ρυθμό $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Η στάθμη του πυθμένα στο σημείο σύνδεσης με τη λίμνη (έξοδο του καναλιού) είναι +3 m. Προσδιορίστε τη στάθμη του νερού σε μία διατομή του αγωγού που βρίσκεται 1.6 km ανάντη της λίμνης όταν η στάθμη της λίμνης είναι (α) +4.2 m, (β) +6.3 m.
- 9.4** Ένας αγωγός τραπεζοειδούς διατομής με πλάτος πυθμένα 4.5 m, κλίση πρανών 1.5:1 (Ο:Κ), κλίση πυθμένα 0.0005 και $\eta = 0.023$ συνδέεται στην αρχή του με μία λίμνη της οποίας η στάθμη είναι 3 m πάνω από τον πυθμένα του αγωγού στο σημείο σύνδεσης. Ένας δρόμος πρόκειται να διασχίσει το κανάλι σε μία θέση 1 km κατάντη της λίμνης και προτείνεται η χρήση ενός κυκλικού οχετού διαμέτρου 3 m αντί για την κατασκευή μίας γέφυρας. Προσδιορίστε την παροχή στον αγωγό.

9.5 Να υπολογισθεί το προφίλ της ροής του ποταμού στις παρακάτω περιπτώσεις.

- (α) για παροχή $Q=27 \text{ m}^3/\text{s}$ όταν η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στη διατομή 1 (κατάντη διατομή) είναι 11.1 m,
- (β) για παροχή $Q=270 \text{ m}^3/\text{s}$ όταν η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στη διατομή 1 (κατάντη διατομή) είναι 14.5 m.

Διατομή	Απόσταση (m)
1	0
2	150
3	120
4	120

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο συντελεστής της κάθε διατομής δίνονται στον πίνακα όπως επίσης και η απόσταση μεταξύ των διατομών.

Διατομή 1			Διατομή 2			Διατομή 3			Διατομή 4		
X(m)	Y(m)	n	X(m)	Y(m)	n	X(m)	Y(m)	n	X(m)	Y(m)	n
6.	17.5		9.	17.5		12.	17.5		9.	17.8	
9.	17.2		12.	17.2		27.	17.2	0.10	22.5	17.5	0.1
13.5	16.6	0.100	15.	16.6	0.1	78.	16.6	@	39.0	17.2	@
18.0	16.0		33.	16.0		99.	16.0	0.05			0.05
33.	15.4		60.	16.0		111.	15.6	@	99.0	16.9	@
124.5	15.1	@	88.5	15.4		126.	14.5		108.0	14.2	
189.0	14.8	0.050	124.5	15.1	@	138.	13.6		111.0	12.8	0.036
195.	14.2		136.5	14.8		150.	12.3		120.	12.94	
196.5	13.9	@	151.5	13.9	0.05	159.	12.5	0.03	123.	13.9	
198.	13.9		172.5	12.85	@	165.	13.6		138.	16.6	@
201.	10.6		175.5	11.5		168.	15.34				0.05
202.5	10.3	0.030	178.8	11.26		174.	15.7		183.	16.6	@
207.	10.		184.5	11.35	0.03	180.	16.0	@	195.	17.2	
209.1	10.03		190.5	14.8		255.	16.6		202.5	17.5	0.10
210.	10.24		192.0	15.4	@	259.5	17.2	0.05	210.	17.8	
213.	10.3		282.0	15.55		262.5	17.5				
213.	13.9	@	354.0	15.4							
282.	14.05	0.050	358.5	15.4							
306.	14.2	@	361.5	16.0	0.10						
364.5	14.2		367.5	16.6							
370.5	13.6		373.5	17.2							
472.5	13.6		375.0	17.5							
477.	14.8	0.10									
484.5	14.8										
489.0	16.0										
490.5	17.5										

@ Σημείο Αλλαγής του n.

Ευρετήριο Όρων

- αγωγός αναρρόφησης, 158
- αιωρούμενο φορτίο, 500, 507
- ακροφύσιο, 158
- αλλουβιακός αγωγός, 229
- αλλουβιακά υδατορεύματα, 457, 495
- άλμα αδύναμο, 340
 - απόδοση, 343
 - βυθισμένο, 340
 - ελεύθερο, 340
 - ισχυρό, 341
 - κεκλιμένο, 335, 353
 - κλασσικό, 341
 - μήκος, 346
 - μόνιμο, 341
 - στη vena contracta, 340
 - ταλαντούμενο, 340
 - ύψος, 343
- αμμοκύματα, 465, 466
- αμμοκυμάτια, 465
- αναβαθμός, 320, 333, 361
 - αναβαθμός, 368
- ανοικτός αγωγός, 227
 - τεχνητός, 229
 - φυσικός, 229
 - αμετάβλητης διατομής, 229
 - διαφορετικός, 257
 - ενιαίος, 257
 - κυκλικής διατομής, 231
 - με μεταβαλλόμενη διατομή, 488
 - με σταθερή διατομή, 487
 - μεταβλητής διατομής, 229
 - μη πρισματικός, 229
 - πρισματικός, 229
 - τραπεζοειδούς διατομής, 306
 - τυχαίας διατομής, 263
- αντι-αμμοκύματα, 465, 468
- αντίσταση λόγω μορφής, 469
- αντλία, 75
 - ακροφυσίου, 147, 158
 - ακτινικής ροής, 143, 147
 - αξονικής ροής, 142, 143, 147, 154, 201
 - απόδοση, 167
 - αρχή λειτουργίας, 141
 - γεωμετρικά όμοιες, 194
 - δονήσεις, 210
 - δυναμική, 141, 143, 147
 - εξωτερικής οδόντωσης, 145
 - εσωτερικής οδόντωσης, 145
 - θετικής εκτόπισης, 141, 144
 - κατάταξη, 141
 - κινητήριες μηχανές, 143
 - λοβών, 145
 - μικτής ροής, 142, 144, 147, 156, 201
 - με έλικα, 154
 - μη περιστροφική, 147
 - μονοβάθμια, 151
 - νόμοι ομοιότητας, 195, 196
 - νόμος συγγένειας, 197
 - περιστροφική θετικής εκτόπισης, 145
 - περιφερειακή, 158
 - περιφερειακής ροής, 147
 - πολυβάθμια, 151, 152

- αντλία πτερυγίων, 145
- σπειροειδούς κέλυφους, 151
 - φυγόκεντρη, 143, 147
 - φυγόκεντρη κινητά μέρη, 148
 - φυγόκεντρη με διαχυτήρες και ελικόφραγμα, 154
 - φυγόκεντρη με διαχυτήρες, 153
 - - με ελικόφραγμα, 151
- άξονας περιστροφής, 147
- αξονική ροή, 140
- απότομη διαστολή, 39
- κλίση, 304
 - συστολή, 38
- απώλεια φορτίου, 32
- αριθμός Froude, 235
- Reynolds, 233
- βάθη συζυγή άλματος, 242
- βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή σε μη πρισματικούς αγωγούς, 421
- βαθμός απόδοσης ογκομετρικός, 170
- - ολικός, 171
- βαλβίδα, 33
- ανακουφιστική, 48
 - αντεπιστροφής, 47
 - γωνιακή, 46
 - ελέγχου, 48
 - κοχλιωτή, 49
 - με σφαίρα, 47
 - πεταλούδας, 48
 - συρταρωτή, 45
 - σφαιρική, 46
 - φλαντζωτή, 49
- βέλτιστη διατομή, 280, 492
- βλάστηση, 290
- γραμμή κρίσιμου βάθους, 391
- ομοιόμορφου βάθους, 391
- γρασίδι, 290
- διάβρωση, 208
- διάγραμμα Shields, 460, 464
- βάθους - παροχής, 302
 - ειδικής ενέργειας, 298
- διαθέσιμο NPSH, 176
- διατομή ελέγχου, 315
- - ανάντη, 315
 - - κατάντη, 315
- διατομή ημι-ελλειπτική, 232, 233
- κυκλική, 231, 273
 - ορθογωνική, 272
 - σύνθετη, 256
 - τραπεζοειδής, 273
 - ωοειδής, 231
- διαχυτήρας, 158
- δίκτυο ακτινωτό, 95
- βροχωτό, 95
 - διανομής, 95
 - σωλήνων, 89
- ειδική δύναμη, 335, 336
- - διάγραμμα, 336
- ειδική ταχύτητα, 200
- - αναρρόφησης, 203
- εναλασσόμενα βάθη, 304
- εξίσωση Chezy, 248
- Colebrook, 26
 - Darcy-Weisbach, 22
 - Euler για στροβιλομηχανές, 160
 - Kennedy, 478
 - Lacey, 499
 - Manning, 248, 249
 - Strickler, 253
 - συστήματος, 181
- επιφανειακός στρόβιλος, 346

- ζήτηση στους κόμβους, 30, 90
- θετικό φορτίο αναρρόφησης τελικό, 173
- ισχύς αξονική, 168
- αποδιδόμενη, 169
 - εσωτερική, 169
 - κινητήριας μηχανής, 168
 - υδατορεύματος, 473
- καμπύλη απόδοσης αντλίας, 166
- κατάπτωσης, 387, 389
 - υπερύψωσης, 387
 - φορτίου παροχής, 165
- κατάσταση αρχόμενης κίνησης, 458
- κινητήρια μηχανή, 147
- κλίση αντίθετη, 391
- απότομη, 389, 391
 - γραμμής ενέργειας, 427
 - ήπια, 304, 389, 391
 - κρίσιμη, 391
 - οριζόντια, 391
- κρίσιμη διατμητική τάση, 458
- ελκτική δύναμη, 458
 - ελκτική τάση, 458
 - κατάσταση, 458
 - κλίση, 303
 - τάση, 458
- κρίσιμο βάθος, 298
- κρίσιμος αριθμός Re, 234
- κρουστικό κύμα, 208
- κωνικός διαχύτης, 41
- λεία τυρβώδης, 16
- λειτουργία on-off, 45
- αντεπιστροφής, 45
- λειτουργία ασφαλείας, 45
- στραγγαλισμού, 45
- λεκάνες σκέδασης, 335, 366
- λογαριθμικός νόμος τοιχώματος, 246
- μέθοδος Bakhmeteff, 404
- Bresse, 403
 - Chow, 405
 - Cowan, 261
 - Englund, 480
 - Hardy Cross, 104
 - Karim - Kennedy, 482
 - Newton - Raphson, 114
 - Ranga Raju, 478
 - regime, 495
 - Van Rijn, 481
 - βήματος, 406
 - γραμμικής θεωρίας, 118
 - ελκτικής δύναμης, 495
- μεταβατική κατάσταση, 468
- ροή, 16
- μηχανικός βαθμός απόδοσης, 170
- μικροσκοπική φλέβα υγρού, 208
- μικτή ροή, 140
- μοντέλο HEC-RAS, 413
- νόμος συνεκτικού υποστρώματος, 246
- τοιχώματος, 17, 244
- οδόντες εκτόξευσης, 368
- ολοκλήρωση άμεση, 398
- αριθμητική, 396
- ομοιόμορφο βάθος ροής, 263
- οριζόντια διεπιφάνεια, 258
- παράμετρος διατομής, 262
- μεταφοράς, 473
- παροχετευτική ικανότητα, 172
- παροχετευτικότητα, 262, 411
- παροχή σχεδιασμού, 173

- περίβλημα, 142, 148
- φτερωτής, 147
- περιφερειακή ροή, 142
- πεταλοειδής διατομή, 232
- πιεζομετρικό φορτίο, 51
- προσέγγιση άντωσης, 458
- κρίσιμης ελκτικής δύναμης, 458
- προφίλς απότομης κλίσης, 394
- ήπιας κλίσης, 391
 - κρίσιμης κλίσης, 395
 - οριζόντιας και αντίθετης κλίσης, 396
 - ροής, 387
 - σύνθεση, 398
- πτερύγια διάχυσης, 155
- φτερωτής, 208
- πυθμένας αγωγού, 391
- μορφολογία, 465
- ροή ακτινική, 140, 142
- ανομοιόμορφη, 236
 - απότομα μεταβαλλόμενη, 236, 385
 - βαθμιαία μεταβαλλόμενη, 236, 385
 - δισδιάστατη, 237
 - καθεστώτα, 468
 - κρίσιμη, 235, 298
 - με ελεύθερη επιφάνεια, 229
 - μεταβαλλόμενη, 236
 - μη-μόνιμη, 236
 - μόνιμη, 236
 - μονοδιάστατη, 238
 - ομοιόμορφη, 236
 - πλήρως - τραχεία, 16
 - πλήρως αναπτυγμένη, 237
 - σε αγωγό που συνδέει δύο δεξαμενές, 440
 - σε σωλήνα, 58
 - στρωτή, 234
 - τρισδιάστατη, 237
 - τυρβώδης, 234
 - υπερκρίσιμη, 235
 - υπερκρίσιμη χειμαρρώδης, 235
 - υποκρίσιμη, 235
 - υποκρίσιμη ποτάμια, 235
 - χωρικά μεταβαλλόμενη, 385
- σημεία βέλτιστης απόδοσης, 173
- σίφωνα, 58
- σκέδαση ενέργειας, 358
- σπηλαιώδης διάβρωση, 210
- σπηλαίωση, 58, 59, 204
- δευτερεύουσα, 210
 - κύρια μορφή, 210
- στερεοπαροχή, 499, 515
- στροβιλοαντλίες, 142, 144, 147, 157
- στυπιοθάλαμος, 148
- στυπιοθλίπτης, 148
- συζυγή βάθη, 338
- σύνδεση ταυ, 50
- συντελεστής Manning ισοδύναμος, 254
- αποκατάστασης πίεσης, 42
 - απωλειών, 33
 - αύξησης φορτίου, 193
 - διατομής Z, 305
 - ισχύος, 193
 - ροής, 194
- σύστημα στεγανοποίησης, 147, 148
- σχεδιασμός αγωγών, 280
- αγωγών λυμάτων, 286
 - αγωγών ομβρίων, 286
 - αλλουβιακών αγωγών, 486
- σχετική τραχύτητα, 23
- σωλήνας ισοδύναμοι, 61
- σε σειρά, 62
 - παράλληλοι, 63
- ταχύτητα τριβής, 16

- τοίχωμα μερικώς τραχύ, 247
- πλήρως τραχύ, 247
 - υδραυλικά λείο, 247
- τοπικές απώλειες, 32
- τουρμπίνα, 75
- τραχύτητα κόκκων, 469
- άμμου ισοδύναμη, 246
- υδραυλική υδατόπτωση, 393
- διατομή βέλτιστη, 281
- υδραυλικό άλμα, 241, 339
- - σε καταβαθμό, 360
 - - σε αναβαθμό, 363
 - - σε κεκλιμένους αγωγούς, 350
 - - σε αγωγούς ορθογωνικής διατομής, 341
- - σε αγωγούς μη-ορθογωνικής διατομής, 343
- υδραυλικό βάθος, 235
- υδραυλικός βαθμός απόδοσης, 170
- υπολογισμός διαμέτρου αποχετευτικού σωλήνα, 289
- ύψος τραχύτητας άμμου, 22
- φορτίο πυθμένα, 466, 500, 501
- αναρρόφησης καθαρό θετικό, 176
- φτερωτή, 142
- ανοικτού τύπου, 149
 - απλή, 149
 - διπλής αναρρόφησης, 149
 - ημιανοικτού τύπου, 149
 - κλειστού τύπου, 149