ΓΕΩΡΓΙΟΥ Α. ΤΕΡΖΙΔΗ M.Sc., Ph.D.
ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

3. ανοικτοί αγωγοί

σταθερή
ασταθής ροή
θεωρία - εφαρμογές
προβλήματα

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
1982

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τό βιβλίο αὐτό ἀποτελεῖ τόν τρίτο τόμο μιᾶς σειρᾶς ἀπό τόμους πού καλύπτουν σέ μεγάλο ποσοστό τίς διδακτικές καί ἐρευνητικές ἀνάγκες τῶν μαθημάτων Ὑδραυλικῆς πού διδάσκονται στούς προπτυχιακούς καί μεταπτυχιακούς φοιτητές τῆς Εἰδικότητας τῶν Ἐγγείων Βελτιώσεων τῆς Γεωπονικῆς Σχολῆς τοῦ Ἀριστοτέλειου Πανεπιστήμιου τῆς Θεσσαλονίκης.

Ἡ σειρά διατάξεως τῆς ὕλης, ἡ περιγραφή τῶν φυσικῶν φαινομένων καί ἡ μαθηματική ἀνάλυσή τους γίνονται ἔτσι ὥστε νά εἶναι εὔκολη ἡ κατανόηση, αὐστηρή ἡ ἐμπέδωση καί ἁπλή ἡ χρήση τῶν ἀπαραίτητων γνώσεων τῆς σύγχρονης Ὑδραυλικῆς τόσο ἀπό τούς φοιτητές τῶν Γεωπονικῶν καί Πολυτεχνικῶν Σχολῶν ὅσο καί ἀπό τούς ἐπιστήμονες Γεωπόνους καί Μηχανικούς πού ἀσχολοῦνται μέ τήν ἔρευνα καί ἐφαρμογή τῆς Ὑδραυλικῆς Ἐπιστήμης.

Ὁ τόμος αὐτός ἀποσκοπεῖ στό νά δώσει στόν ἀναγνώστη τίς ἀπαραίτητες γνώσεις τῆς Ρευστομηχανικῆς καί Ὑδραυλικῆς γιά τή σωστή ἐπίλυση πρακτικῶν προβλημάτων τῆς ροῆς τοῦ νεροῦ μέσα στούς ἀνοικτούς ἀγωγούς.

Οἱ ἀνοικτοί ἀγωγοί διακρίνονται σέ φυσικούς καί τεχνικούς καί χρησιμοποιοῦνται συνήθως εἴτε γιά τήν ἀπομάκρυνση τοῦ πλημμυρικοῦ καί ἀκατάλληλου νεροῦ ἀπό μιά περιοχή ἤ γιά τή μεταφορά τοῦ χρήσιμου νεροῦ γιά τήν ἄρδευση ἀγροτικῶν περιοχῶν, γιά τήν ὕδρευση κατοικημένων ἤ βιομηχανικῶν περιοχῶν, καθώς καί γιά τήν παραγωγή ὑδροηλεκτρικῆς ἐνέργειας.

Ἡ ροή τοῦ νεροῦ στούς φυσικούς καί τεχνητούς ἀνοικτούς ἀγωγούς εἶναι κατά κανόνα ἀσταθής καί ἀνομοιόμορφη. Λόγω ὅμως τῆς πολυπλοκότητάς της καί τῆς ἐλλείψεως πειραματικῶν δεδομένων ἐπικράτησε ἀκόμη καί σήμερα τα προβλήματα τῶν τεχνητῶν ἀνοικτῶν ἀγωγῶν νά ἀντιμετωπίζονται μέ τήν παραδοχή τῆς σταθερῆς ὁμοιόμορφης καί ἀνομοιόμορφης ροῆς. Ἔτσι στήν πράξη γίνεται δεκτό ὅτι ἡ ροή εἶναι σταθερή καί ὁμοιόμορφη στά εὐθύγραμμα τμήματα τῶν ἀγωγῶν σταθερῆς διατομῆς καί μεγάλου μήκους καί σταθερή καί ἀνομοιόμορφη στίς γωνίες, ρυθμιστικές θυρίδες, στούς καταβαθμούς, ἐκχειλιστές κλπ.

Ἡ σταθερή ὁμοιόμορφη ροή καλύπτεται στό πρῶτο μέρος τοῦ βιβλίου σέ 220 περίπου σελίδες καί περιλαμβάνει ὅλη σχεδόν τήν ὕλη, θεωρία καί σύγχρονες μεθόδους ἐπιλύσεως τῶν σχετικῶν προβλημάτων, τοῦ ἕκτου κεφαλαίου τοῦ βιβλίου μου Ὑδραυλική 1. ὑδρομηχανική (1973), καθώς καί τή λύση 35 ἐπιλεγμένων προβλημάτων.

Ἡ ἀσταθής ροή, πού παρουσιάζεται γιά πρώτη φορά σέ διδακτικό βιβλίο στήν Ἑλληνική βιβλιογραφία, καλύπτεται στό δεύτερο μέρος τοῦ βιβλίου, σέ 160 περίπου σελίδες καί περιλαμβάνει τήν ἐξαγωγή τῶν διαφορικών ἐξισώσεων, τήν κατασκευή τῶν ὑπολογιστικῶν σχημάτων γιά τήν ἀριθμητική ἐπίλυσή τους καθώς καί τίς κυριότερες ἀριθμητικές μεθόδους πού χρησιμοποιοῦνται σήμερα γιά τήν ἐπίλυση πρακτικῶν προβλημάτων τῆς ἀσταθοῦς ροῆς. Οἱ ἀριθμητικές μέθοδοι γιά τήν ἐπίλυση πρακτικῶν προβλημάτων ἀσταθοῦς ροῆς σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς ἔχουν ἀναπτυχθεῖ τά τελευταῖα τριάντα χρόνια μέ τή μεγάλη ἀνάπτυξη καί διάδοση τῶν ἠλεκτρονικῶν ὑπολογιστῶν. Ἀρκετοί Ἕλληνες ἐπιστήμονες, μεταξύ τῶν ὁποίων διακρίνονται τά ὀνόματα τῶν Γ. Τερζίδη (1968), Θ. Δράκου (1970), Χ. Τζιμόπουλου (1971), Ι. Σακκᾶ (1972), Ν. Κατωπόδη (1977), Εὐαγγελίας Ἀναστασιάδου - Παρθενίου (1976), πρωτοπορειακά ἀσχολήθηκαν καί ἀσχολοῦνται μέ προβλήματα τῆς ἀσταθοῦς ροῆς.

Στίς τελευταῖες παραγράφους παρουσιάζονται διάφορες ἐφαρμογές τῶν ρητῶν ὑπολογιστικῶν σχημάτων σέ προβλήματα μέ πειραματικά δεδομένα ὥστε νά γίνεται εὔκολα ἡ πειραματική ἐπαλήθευση τῆς ἰσχύος καί ἀκρίβειάς τους. Τέλος, στά παραρτήματα I και II παρουσιάζονται μερικά προγράμματα ἠλεκτρονικοῦ ὑπολογιστῆ σέ γλώσσα Fortran IV.

Τά χειρόγραφα αὐτοῦ τοῦ τόμου δακτυλογραφήθηκαν μέ προσοχή ἀπό τήν κ. Νίκη Τάκου, ὅλα δέ τά σχέδια σχεδιάστηκαν μέ ἐπιμέλεια ἀπό τήν κ. Ἀθηνᾶ Σιγανοῦ-Χαλούλα. Ἡ κ. Μαίρη Παπαδοπούλου-Παναγιωτίδου βοήθησε πολύ στή διάρκεια τῆς ἐκτυπώσεως. Μεγάλη βοήθεια στή διόρθωση τῶν δοκιμίων εἶχα ἀπό τούς συνεργάτες μου Θωμᾶ Ζήση, Χρῆστο Μπαμπατζιμόπουλο, Νίκη Καλαϊτζίδου-Πάϊκου, Σοφία Παπουτσῆ - Ψυχουδάκη καί Δημήτρη Παπαμιχαήλ. Τήν πιό μεγάλη ὅμως βοήθεια εἶχα ἀπό τή βοηθό τῆς ἕδρας κ. Εὐαγγελία Ἀναστασιάδου-Παρθενίου πού βοήθησε ὄχι μόνο στή διόρθωση των δοκιμίων ἀλλά μέ τήν καλογραμμένη μεταπτυχιακή διατριβή της καί τά κοινά δημοσιεύματά μας μέ διευκόλυνε στή συγγραφή ἀρκετῶν παραγράφων τῆς ἀσταθοῦς ροῆς.

Ὅλους αὐτούς καθώς καί ἄλλους πού βοήθησαν στήν τελική ἐμφάνιση τοῦ τόμου αὐτοῦ, εὐχαριστῶ θερμά.

Θεσσαλονίκη, Μάϊος 1982

Γ. ΤΕΡΖΙΔΗΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ Α΄
ΣΤΑΘΕΡΗ ΡΟΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

		Σελ
6.1	Γενικότητες	9
6.2	Στρωτή ροή σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς	11
6.3	Ἡ κατανομή τῆς ταχύτητας	13
6.4	Διαφορικές ἐξισώσεις ἀσταθοῦς ροῆς σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς	14
6.4.1	Σταθερή ἀνομοιόμορφη ροή	17
6.4.2	Σταθερή ὁμοιόμορφη ροή	18
6.4.3	Εἰδική ἐνέργεια ἤ εἰδικό φορτίο Ε	19
6.4.4	Κρίσιμη ροή	23
6.4.5	Κρίσιμη ταχύτητα καί ταχύτητα μεταδόσεως κυμάτων	25
6.4.6	Ἀριθμός τοῦ Froude (Fr)	28
6.4.7	Κατασκευές ἐλέγχου ὅπου δημιουργεῖται κρίσιμη ροή	29
6.5	Ἀνομοιόμορφη ροή σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς ὁποιασδήποτε διατομῆς	35
6.5.1	Γενικότητες	35
6.5.2	Διαφορικές ἐξισώσεις ἐνέργειας	43
6.5.3	Κατά μῆκος τομές ἤ προφίλς τῆς ἐλεύθερης ἐπιφάνειας τοῦ νεροῦ	49
	α) Κρίσιμη, ἤπια, ἀπότομη κλίση πυθμένα	49
	β) Κρίσιμη ροή σέ ἀλλαγή κλίσεως ἀπό ἤπια σέ ἀπότομη	51
	γ) Ποιοτική ἀνάλυση τῆς ἐξισώσεως ἀνομοιόμορφης ροῆς	53
6.6	Μέθοδοι ὑπολογισμοῦ ἀνομοιόμορφης ροῆς	64
6.6.1	Γενικότητες	64
6.6.2	Μέθοδοι κατ' εὐθείαν ὁλοκληρώσεως	65
	α) Ἀνομοιόμορφη ροή μέσα σέ πρισματικούς ἀγωγούς μέ ὁριζόντιο πυθμένα καί ἐκθετική διατομή	66
	β) Ἀνομοιόμορφη ροή σέ κεκλιμένους πρισματικούς ἀγωγούς	70
6.6.3	Μέθοδοι κατά βήματα	83
	α) Μέθοδος κατά βήματα. Ἡ ἀπόσταση ὑπολογίζεται ἀπό τό βάθος	84
	β) Βελτιωμένη μέθοδος κατά βήματα	87
	γ) Μέθοδος κατά βήματα. Τό βάθος ὑπολογίζεται ἀπό τήν ἀπόσταση	93
6.7	Νόμος διατηρήσεως τῆς ποσότητας κινήσεως στή ροή νεροῦ σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς	98
6.7.1	Γενικές ἐξισώσεις ποσότητας κινήσεως	198
6.7.2.	Συνάρτηση ποσότητας κινήσεως	102
6.7.3	Ὑδραυλικά ἅλματα σέ ὁριζόντιους ἀγωγούς	105
	α) Ὁριζόντιοι ἀγωγοί ὀρθογωνικῆς διατομῆς	105
	β) Ὁριζόντιοι ἀγωγοί ἐκθετικῆς διατομῆς	109
	γ) Ὑδραυλικά ἅλματα σέ ὁριζόντιους τραπεζοειδεῖς ἀγωγούς	112
6.7.4	Ὑδραυλικά ἅλματα σέ κεκλιμένους ἀγωγούς	116
	α) Κεκλιμένοι ἀγωγοί ἐκθετικῆς διατομῆς	119
	β) Κεκλιμένοι ἀγωγοί ὀρθογωνικῆς διατομῆς	120
	γ) Κεκλιμένος ἀγωγός τριγωνικῆς διατομῆς	125
6.7.5	Ὑδρζαυλικά ἅλματα σέ ὁριζόντιους ἀγωγούς μέ ἀπότομη μεταβολή τῆς διατομῆς	126
	α) Ἀπότομος μικρός καταβαθμός	126
	β) Ἀπότομος μικρός ἀναβαθμός	128
	γ) Ἀπότομη διεύρυνση διατομῆς	129
6.7.6	Καταβαθμός ἐλεύθερης ὑδατοπτώσεως	130
	α) Κεφαλή της ἐλεύθερης ὑδατοπτώσεως	130
	β) Βάση τῆς ἐλεύθερης ὑδατοπτώσεως	135
	Πίνακας της συναρτήσεως ἀνομοιόμορφης ροῆς	143
6.8	Λυμένα προβλήματα ἀνοικτῶν ἀγωγῶν	147

ΜΕΡΟΣ Β΄
ΑΣΤΑΘΗΣ ΡΟΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 227

1 ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΑ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ 234
1.1 Ἐξαγωγή τῶν διαφορικῶν ἐξισώσεων 234
1.1.1 Ἐξίσωση της συνέχειας 236
1.1.2 Ἐξίσωση κινήσεως 240
1.2 Συστήματα διαφορικῶν ἐξισώσεων ἀσταθοῦς ροῆς 249
1.3 Ὁλοκληρωματικές ἐξισώσεις 251
1.4 Συνθῆκες ἀσυνέχειας 256
1.5 Χαρακτηριστικές ἐξισώσεις 258

2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΧΗΜΑΤΑ
2.1 Γενικότητες 261
2.2 Κατασκευή διαφόρων ὑπολογιστικῶν σχημάτων 261
2.2.1 Γενικό ὑπολογιστικό σχῆμα 262
2.2.2 Ἁπλούστατο ρητό σχῆμα 266
2.2.3 Ἁπλό ρητό σχῆμα τύπου διαχύσεως 266
2.2.4 Ὑπολογιστικό σχῆμα δύο βημάτων 268
2.2.5. Ἁπλο ὑπολογιστικό σχῆμα πεπλεγμένης μορφῆς 269
2.2.6. Πρόσω καί ὀπίσω ρητά ὑπολογιστικά σχήματα 270
2.2.7. Ὑπολογιστικό σχῆμα τῶν Amien-Hsiao Ling Chu 271
2.3 Ὑπολογισμός ὁριακῶν συνθηκῶν 275
2.4 Πεπλεγμένο ὑπολογιστικό σχῆμα τοῦ Strelkoff 278

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ
3.1 Γενικότητες 284
3.2 Ἀνάλυση εὐστάθειας τοῦ ἁπλοῦ ρητοῦ σχήματος τύπου διαχύσεως 285
3.3. Ἀνάλυση εὐστάθειας τοῦ ὑπολογιστικοῦ σχήματος τῶν δύο βημάτων 291
3.4 Ἀνάλυση εὐστάθειας πρόσω καί ὀπίσω ρητῶν ὑπολογιστικῶν σχημάτων ... 294

4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΡΗΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ 296
4.1 Στένωση σέ ὀρθογωνικό ἀγωγό 296
4.2 Διάφορες ἐφαρμογές καί συγκρίσεις μέ ἄλλα ὑπολογιστικά σχήματα 321
4.2.1 Ὁμοιόμορφη κίνηση μιᾶς ἀσυνέχειας 321
4.2.2. Διάδοση ἑνός κύματος κρούσεως σέ ἀκίνητο νερό 324
4.2.3 Διάδοση θετικοῦ κύματος ὑπερυψώσεωςδμοιόμορφης κινήσεως 324
4.2.4 Κινούμενο ὑδραυλικό ἅλμα πάνω σέ ἀνομοιόμορφη ροή 328
4.2.5 Αὐτογενές ὑδραυλικό ἅλμα ἀπό αὔξηση τῆς παροχῆς τῆς ροῆς 332
4.2.6 Αριθμητικές λύσεις μέ τό ὑπολογιστικό σχῆμα τῶν δύο βημάτων 333
4.3 Ασταθής ἀσυνεχής ροή ἀνοικτῶν ἀγωγῶν πάνω ἀπό ἐμπόδιο 337

5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗ ΑΓΩΓΟ 351
5.1 Γενικότητες 351
5.2 Δημιουργία ἀστάθειας ἀπό τά ἀνάντη 354
5.3 Δημιουργία ἀστάθειας ἀπό τά κατάντη 359

I. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Πρόγραμμα σέ γλώσσα Fortran IV για τό ρητό σχῆμα τύπου διαχύσεως σέ ὀρθογωνικό ἀγωγό 365
II. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : Προγράμματα σε γλώσσα Fortran IV γιά τά ρητά σχήματα τύπου διαχύσεως καί δύο βημάτων σέ τραπεζοειδή ἀγωγό 367
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 373

ΜΕΡΟΣ Α΄

ΣΤΑΘΕΡΗ ΡΟΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

6.1. Γενικότητες

Ἕνας ἀγωγός πού μεταφέρει νερό ὀνομάζεται *ἀνοικτός* ἤ *ἀγωγός ἐλεύθερης ροῆς*, ὅταν τό νερό πού ρέει μέσα σ' αὐτόν παρουσιάζει ἐλεύθερη ἐπιφάνεια, πού βρίσκεται κάτω ἀπό ἀτμοσφαιρική πίεση. Οἱ δυνάμεις πού προκαλοῦν τή ροή στούς ἐλεύθερους ἀγωγούς ὀφείλονται στή βαρύτητα καί οἱ δυνάμεις πού ἐπιβραδύνουν τή ροή ὀφείλονται στήν ἰξώδη διάτμηση καί στίς τριβές κατά μῆκος τῶν τοιχωμάτων τοῦ ἀγωγοῦ. (Οἱ δυνάμεις ἐπιφανειακῆς τάσεως καί ἡ ἀντίσταση τοῦ ἀέρα πάνω στή ἐλεύθερη ἐπιφάνεια θεωροῦνται ἀμελητέες καί δέν παίρνονται ὑπόψη).

Οἱ ἀνοικτοί ἀγωγοί διακρίνονται σέ *φυσικούς* ἀγωγούς καί σέ *τεχνητούς*, ἀνάλογα μέ τήν ἀρχική τους διαμόρφωση. Στήν κατηγορία τῶν φυσικῶν ἀγωγῶν ἀνήκουν οἱ ποταμοί, οἱ χείμαρροι καί τά διάφορα φυσικά ρεύματα. Στήν κατηγορία τῶν τεχνητῶν ἀγωγῶν ἀνήκουν οἱ διώρυγες, οἱ τάφροι, τά καναλέτα, κ.λ.π. καθώς καί οἱ ὑπόνομοι, σήραγγες κ.λ.π. ὅταν εἶναι μερικῶς γεμάτοι. Οἱ φυσικοί ἀνοικτοί ἀγωγοί ἔχουν συνήθως διάφορα μεγέθη καί ἀκανόνιστα σχήματα μέ μεγάλη ποικιλία τραχύτητας στά τοιχώματά τους. Οἱ τεχνητοί ἀγωγοί ἐπίσης ἔχουν διάφορα μεγέθη καί σχήματα, ἀλλά ἐξαιτίας τῆς κατασκευῆς τους ἀπό τόν ἄνθρωπο, αὐτοί εἶναι γνωστῆς γεωμετρίας καί ὑλικῶν κατασκευῆς καί ἡ ποικιλία τῆς τραχύτητας εἶναι μικρότερη. Οἱ τεχνητοί ἀγωγοί ὀνομάζονται *πρισματικοί* ὅταν ἡ διατομή καί ἡ κλίση τοῦ πυθμένα τους εἶναι σταθερές. Οἱ πρισματικοί ἀγωγοί ὀνομάζονται *ὀρθογωνικοί, τραπεζοειδεῖς, τριγωνικοί, ἡμικυκλικοί, παραβολικοί* κ.λπ., ἀνάλογα μέ τό γεωμετρικό σχῆμα τῆς διατομῆς τους.

Ἡ ροή σ' ἕνα ἀνοικτό ἀγωγό ὀνομάζεται *σταθερή* ἤ *μόνιμη* ὅταν καμία μεταβλητή της (ταχύτητα, βάθος κ.λπ.) δέν μεταβάλλεται μέ τό χρόνο· στήν ἀντίθετη περίπτωση ἡ ροή ὀνομάζεται *ἀσταθής* ἤ *μή μόνιμη*. Ἡ ροή τοῦ νεροῦ στούς φυσικούς ἀνοικτούς ἀγωγούς, ὅπως εἶναι οἱ ποταμοί, οἱ χείμαρροι κ.λπ. οὐδέποτε εἶναι σταθερή. Στούς τεχνητούς ἀγωγούς, πού βρίσκονται σέ κανονική λειτουργία, πολύ σπάνια καί γιά σχετικά μικρό χρονικό διάστημα μπορεῖ ἡ ροή νά χαρακτηριστεῖ σάν σταθερή. Μεταβολές στίς ἀπαιτήσεις ὑδροηλεκτρικῶν ἐργοστασίων, ἀρδευτικῶν ἀναγκῶν κ.λ.π., ἔχουν σάν συνέπεια τήν ἀστάθεια τῆς ροῆς, πού γίνεται αἰσθητή κυρίως μέ τή μεταβολή τοῦ βάθους της. Ἡ αὔξηση τοῦ βάθους τῆς ροῆς δημιουργεῖ κινδύνους πλημμυρῶν καί ἡ ἀπότομη μείωσή του μπορεῖ νά δημιουργήσει ἀνισορροπία στίς ὑδροστατικές πιέσεις πάνω στήν ἐπένδυση τῆς διώρυγας, ἐξαιτίας τοῦ ὑπόγειου νεροῦ, μέ ἀποτέλεσμα τήν καταστροφή τῆς ἐπενδύσεως. Ἐπιπλέον, οἱ ἴδιες μεταβολές τοῦ βάθους τῆς ροῆς, ἐπηρεάζουν τήν παροχή, τόσο στήν κύρια διώρυγα ὅσο καί στίς δευτερεύουσες, μέ ἀποτέλεσμα νά γίνεται δύσκολος ὁ αὐτοματισμός στά συστήματα διανομῆς. Μόνο κάτω ἀπό ἐλεγχόμενες συνθῆκες ἐργαστηρίου ἤ πειραματικές συνθῆκες σέ τμῆμα τεχνητῆς διώρυγας, μποροῦμε νά πετύχουμε σταθερή ροή.

Ἐντούτοις, οἱ περισσότερες ἀπό τίς μέχρι σήμερα ὑδραυλικές μελέτες βασίστηκαν πάνω στίς ἀρχές καί παραδοχές τῆς σταθερῆς ροῆς, ἐξαιτίας τῶν μαθηματικῶν δυσκολιῶν, πού παρουσιάζονται στήν ἐπίλυση τῶν προβλημάτων τῆς ἀσταθοῦς ροῆς τῶν ἀνοικτῶν ἀγωγῶν.

Ἡ σταθερή ροή διακρίνεται σέ *ὁμοιόμορφη* καί *ἀνομοιόμορφη ροή*.

Ἡ ροή ὀνομάζεται ὁμοιόμορφη ὅταν ἡ μέση ταχύτητά της εἶναι σταθερή κατά μέγεθος καί διεύθυνση. Γιά τούς ἀνοικτούς ἀγωγούς, ἐξαιτίας τῆς ἐλεύθερης ἐπιφάνειας, ἡ ὁμοιόμορφη ροή συνεπάγεται σταθερότητα στήν ὑγρή διατομή. Ἄν ἡ ὑγρή διατομή εἶναι ὀρθογωνική τότε τό βάθος τῆς ὁμοιόμορφης ροῆς εἶναι σταθερό καί ὀνομάζεται *ὁμοιόμορφο* ἤ *κανονικό βάθος*. Τό ὁμοιόμορφο βάθος τῆς ροῆς ἐξαρτιέται ἀπό τήν παροχή, τήν κλίση καί τραχύτητα τοῦ ἀγωγοῦ καί τήν ἐπιτάχυνση τῆς βαρύτητας.

Ἡ ροή ὀνομάζεται ἀνομοιόμορφη ὅταν ἡ μέση ταχύτητά της μεταβάλλεται μέ τή θέση σέ ὅλο τό μῆκος τοῦ ἀγωγοῦ πού μελετιέται. Οἱ μεταβολές τῆς ταχύτητας μπορεῖ νά ὀφείλονται σέ μεταβολές τῆς διατομῆς ἤ τῆς κλίσεως τοῦ πυθμένα τοῦ ἀγωγοῦ ἤ στήν παρεμβολή μιᾶς ὑδραυλικῆς κατασκευῆς ὅπως π.χ. ἑνός ἐκχειλιστῆ ἤ μιᾶς θυρίδας κ.λ.π.

Ἐπειδή οἱ παραπάνω αἰτίες, ἐπηρεάζουν τή συμπεριφορά τῆς ροῆς σέ μεγάλη ἀπόσταση (θεωρητικά στό ἄπειρο) καί ἐπειδή σέ ὅλους τούς ἀνοικτούς ἀγωγούς ὑπάρχει τουλάχιστο μία αἰτία ἀνομοιόμορφης ροῆς, ἀκόμη καί ἄν αὐτή βρίσκεται στήν ἀρχή ἤ καί στό τέλος τοῦ ἀγωγοῦ, ἡ ὁμοιόμορφη ροή εἶναι μία ἰδανική κατάσταση πού οὐδέποτε πετυχαίνεται στήν πραγματικότητα. Σέ πολλές περιπτώσεις ὅμως, ὅπου ὁ ἀνοικτός ἀγωγός εἶναι εὐθύς, ἔχει σταθερή διατομή καί κλίση καί σχετικά μεγάλο μῆκος, ἡ ροή εἶναι σχεδόν ὁμοιόμορφη. Στίς περιπτώσεις αὐτές ἡ παραδοχή τῆς ὁμοιόμορφης ροῆς εἶναι λογική καί χρησιμοποιεῖται γιατί ἁπλοποιεῖ τήν ἀνάλυση καί ἐπίλυση τῶν προβλημάτων. Ἐπιπλέον ἡ παραδοχή τῆς ὁμοιόμορφης ροῆς δικαιολογεῖται καί ἀπό τούς περιορισμούς τῶν ἐξισώσεων τῶν ἀνοικτῶν ἀγωγῶν καθώς καί ἀπό τίς δυσκολίες τῆς ἀκριβοῦς μετρήσεως τῆς παροχῆς.

Ὅπως στούς κλειστούς κάτω ἀπό πίεση ἀγωγούς ἔτσι καί στούς ἀνοικτούς ἀγωγούς ἡ ροή διακρίνεται, μέ βάση τόν ἀριθμό *Reynolds*, σέ *στρωτή ροή* ($Re < 500$) καί σέ *τυρβώδη* ἤ *στροβιλώδη ροή* ($Re > 2000$). Ἡ τελευταία εἶναι συχνότερη καί ἀναφέρεται σέ περισσότερα ἀπό 99% τῶν προβλημάτων τῆς ροῆς τῶν ἀνοικτῶν ἀγωγῶν πού συναντοῦμε στήν πράξη.

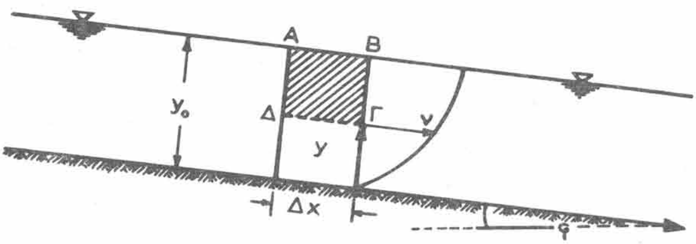
6.2. *Στρωτή ροή σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς*

Στή στρωτή ροή οἱ δυνάμεις τοῦ ἰξώδους εἶναι ἐπικρατέστερες καί δέν ὑπάρχουν δίνες ἤ δευτερεύοντα ἐγκάρσια ρεύματα. Ἡ στρωτή ροή συνήθως συνδέεται μέ πολύ μικρές ταχύτητες ἤ μικρά βάθη, ἤ πολύ ἰξώδη ὑγρά. Τέτοιες καταστάσεις πολύ σπάνια συναντιοῦνται στίς συνηθισμένες ροές τῶν ἀνοικτῶν ἀγωγῶν. Στούς ποταμούς, ὅταν ἡ ταχύτητα εἶναι πολύ μικρή, τό βάθος καί τό ἀκανόνιστο τῆς διατομῆς εἶναι γενικά ἱκανά νά δημιουργήσουν τυρβώδη ροή. Ὁπωσδήποτε ὅμως ὑπάρχει πιθανότητα στρωτῆς ροῆς στίς περιπτώσεις τῶν μικρῆς κλίμακας ὑδραυλικῶν ὁμοιωμάτων. Ἐπειδή οἱ νόμοι τῆς τυρβώδους ροῆς διαφέρουν ἀρκετά ἀπό ἐκείνους τῆς στρωτῆς ροῆς, εἶναι σημαντικό νά υἱοθετοῦμε μία κλίμακα στό ὁμοίωμα, τέτοια ὥστε ἡ ροή νά εἶναι τυρβώδης.

Ἡ ἀπορροή λεπτοῦ στρώματος νεροῦ πάνω σέ ἀσφαλτοστρωμένες ἤ ἀκόμη καί χωμάτινες ἐπιφάνειες θεωρεῖται ὅτι εἶναι στρωτή ροή. Στό Σχ. 6.2.1 φαίνεται ἡ κατά μῆκος τομή μιᾶς ὁμοιόμορφης ροῆς νεροῦ, μέ κατακόρυφο βάθος y_0, πάνω σέ κεκλιμένο ἐπίπεδο γωνίας φ. Γιά μικρές κλίσεις (π.χ. $S < 1/10$), $\sigma\upsilon\nu\, \varphi = 1$ καί τό βάθος κάθετα πρός τόν πυθμένα εἶναι $y_0\, \sigma\upsilon\nu\, \varphi \approx y_0$. Ἡ σχετική κίνηση μεταξύ τῶν στρώσεων τοῦ ὑγροῦ διέπεται ἀπό τό νόμο τοῦ *Newton* γιά τό ἰξῶδες, δηλαδή

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \qquad (6.2.1)$$

ὅπου τ = ἡ διατμητική τάση,
μ = τό δυναμικό ἰξῶδες,
y = ἡ ἀπόσταση ἀπό τόν πυθμένα καί
dv/dy = ἡ βαθμίδα ταχύτητας.



Σχ. 6.2.1. Στρωτή ροή μέ ἐλεύθερη ἐπιφάνεια.

Ἄς θεωρήσουμε τόν ὄγκο $AB\Gamma\Delta$ πλάτους ἴσου μέ τή μονάδα. Οἱ δυνάμεις πού ἐνεργοῦν πάνω σ' αὐτόν εἶναι ἡ x- συνιστώσα τοῦ βάρους, δηλαδή $\Delta x \rho g\, (y_0 - y)\, \eta\mu\, \varphi$ καί ἡ δύναμη ἰξώδους $\tau \Delta x$, πού βρίσκονται σέ ἰσορροπία γιά τή σταθερή ὁμοιόμορφη ροή. Ὁπότε ἔχουμε :

$$\tau = \rho g\, (y_0 - y)\, \eta\mu\, \varphi \qquad (6.2.2)$$

Ἀντικαθιστώντας τήν τιμή τοῦ τ ἀπό τήν ἐξίσωση (6.2.1) καί $S = \eta\mu\, \varphi$, παίρνουμε :

$$\mu \frac{dv}{dy} = \rho g\, (y_0 - y)\, S$$

ἤ

$$dv = \frac{gS}{\nu}\, (y_0 - y)\, dy \qquad (6.2.3)$$

Ὁλοκληρώνοντας τήν ἐξίσωση (6.2.3) ὡς πρός y, παίρνουμε :

$$\upsilon = \frac{gS}{\nu}\left(y_0 y - \frac{y^2}{2}\right) + C$$

Χρησιμοποιώντας τή συνθήκη ὅτι $\upsilon=0$ πάνω στό τοίχωμα $y=0$, βρίσκουμε ὅτι ἡ σταθερή ὁλοκληρώσεως $C=0$. Ἄρα ἔχουμε :

$$\upsilon = \frac{gS}{\nu}\left(y_0 - \frac{y}{2}\right) y \qquad (6.2.4)$$

Ἄρα ἡ ταχύτητα στή στρωτή ροή εἶναι παραβολική καί παίρνει τή μέγιστη τιμή στήν ἐπιφάνεια $y=y_0$, δηλαδή

$$\upsilon_{max} = \frac{gSy_0^2}{2\nu} \qquad (6.2.5)$$

Ἡ μέση ταχύτητα V παίρνεται ὡς ἑξῆς :

$$V = \frac{1}{y_0}\int_0^{y_0} \upsilon\, dy = \frac{1}{y_0}\int_0^{y_0} \frac{gS}{\nu}\left(y_0 - \frac{y}{2}\right) y dy = \frac{gSy_0^2}{3\nu}$$

ἤ

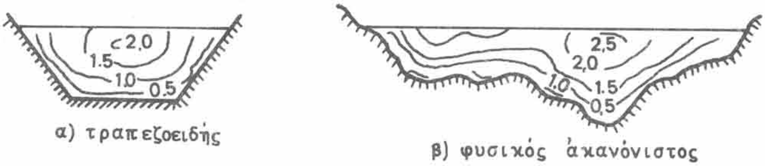
$$V = \frac{gSy_0^2}{3\nu} = \frac{2}{3}\,\upsilon_{max} \qquad (6.2.6)$$

Ἀπό τίς ἐξισώσεις (6.2.4) καί (6.2.6) βρίσκουμε ὅτι ἡ μέση ταχύτητα παίρνει τήν τιμή τῆς ταχύτητας τῆς στρώσεως, πού βρίσκεται σέ ἀπόσταση $0{,}42\, y_0$ πάνω ἀπό τόν πυθμένα ἤ σέ ἀπόσταση $0{,}58\, y_0$ κάτω ἀπό τήν ἐλεύθερη ἐπιφάνεια τοῦ νεροῦ.

Πρέπει νά σημειωθεῖ ὅτι ἡ ταχύτητα τῆς στρωτῆς ροῆς δέν ἐξαρτιέται ἀπό τήν τραχύτητα τῶν τοιχωμάτων τοῦ ἀγωγοῦ. Ὁπωσδήποτε ὅμως, ἡ φύση τῆς ἐπιφάνειας τῶν τοιχωμάτων παρεμβαίνει ἔμμεσα καί ἡ ὑπερβολική τραχύτητα δημιουργεῖ δίνες καί τυρβώδη ροή μέ τό φαινόμενο τῆς ἀποκολλήσεως. Γι' αὐτό τό λόγο θεωρεῖται πιθανή ἡ παρουσία καί τῶν δύο καταστάσεων ροῆς, τῆς στρωτῆς καί τῆς τυρβώδους, πάνω στίς φυσικές ἐπιφάνειες τῶν ἀγωγῶν.

6.3. *Ἡ κατανομή τῆς ταχύτητας*

Ἡ κατανομή τῆς ταχύτητας στούς ἀνοικτούς ἀγωγούς καί γιά τυρβώδη ροή ἐξαρτιέται ἀπό πολλούς παράγοντες ἀνάμεσα στούς ὁποίους οἱ σπουδαιότεροι εἶναι τό ἰξῶδες, τό σχῆμα καί ἡ τραχύτητα τῶν τοιχωμάτων καί τά δευτερεύοντα ρεύματα, πού συνήθως παρουσιάζονται σέ ὅλους τούς τύπους τῶν ἀνοικτῶν ἀγωγῶν. Γενικά ἡ ταχύτητα ἔχει μηδενική τιμή πάνω στά τοιχώματα τοῦ ἀγωγοῦ καί αὐξάνει κατά μή γραμμικό τρόπο —συνήθως λογαριθμικό— μέ τήν ἀπόσταση, παίρνοντας τή μέγιστη τιμή λίγο κάτω ἀπό τήν ἐλεύθερη ἐπιφάνεια. Τό Σχῆμα 6.3.1 δείχνει τήν κατανομή τῆς ταχύτητας μερικῶν τυπικῶν περιπτώσεων ἐλεύθερης ροῆς.



Σχῆμα 6.3.1. Κατανομή ταχύτητας σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς

6.4. *Διαφορικές ἐξισώσεις ἀσταθοῦς ροῆς σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς*

Οἱ διαφορικές ἐξισώσεις πού περιγράφουν τή γενική μονοδιάστατη ἀσταθή ροή τοῦ νεροῦ σέ ἕναν ἀνοικτό ἀγωγό εἶναι γνωστές στήν Ὑδραυλική ἐπιστήμη σάν ἐξισώσεις τοῦ *Saint - Venant* ἤ *ἐξισώσεις τοῦ ἀβαθοῦς νεροῦ*. Ἀποτελοῦν τίς μαθηματικές ἐκφράσεις τῶν νόμων τῆς διατηρήσεως τῆς μάζας καί τῆς ποσότητας κινήσεως. Γιά ἕναν ὁποιονδήποτε ἀνοικτό ἀγωγό, τοῦ ὁποίου οἱ παρειές καί ὁ πυθμένας σχηματίζουν μικρές γωνίες μέ τόν ἄξονά του, οἱ ἐξισώσεις τοῦ *Saint - Venant* παίρνουν τίς μορφές (Τερζίδης 1968) :

Ἡ ἐξίσωση τῆς συνέχειας :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = I \qquad (6.4.1)$$

Ἡ ἐξίσωση τῆς κινήσεως :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{I\,(V-U)}{A} = g\,(S_0 - S_f) \qquad (6.4.2)$$

ὅπου A = τό ἐμβαδόν τῆς ὑγρῆς διατομῆς,
Q = ἡ κύρια παροχή,

I = = ἡ πλάγια παροχή εἰσροῆς ἤ ἐκροῆς ἀπό τόν ἀγωγό,
t = ὁ χρόνος,
x = ἡ ὁριζόντια ἀπόσταση,
V = ἡ μέση ταχύτητα,
g = ἡ ἐπιτάχυνση τῆς βαρύτητας,
y = τό βάθος,
U = ἡ συνιστώσα τῆς ταχύτητας τῆς πλάγιας εἰσροῆς κατά τήν x-διεύθυνση,
S_0 = ἡ κλίση τοῦ πυθμένα καί
S_f = ἡ κλίση τριβῆς ἤ κλίση ἀντιστάσεων ἤ ἐνέργειας.

Ἄν καί δέν εἶναι γνωστή ἡ ἀκριβής σχέση ἀνάμεσα στήν κλίση ἀντιστάσεως, S_f, καί στίς χαρακτηριστικές μεταβλητές τῆς ροῆς γιά ἀσταθή ἀνομοιόμορφη κίνηση, ἔχει γίνει συνήθεια στήν ὑδραυλική νά χρησιμοποιεῖται ἡ ἐμπειρική ἐξίσωση (5.6.8) τοῦ *Manning* μέ τή γενικότερη μορφή :

$$S_f = \frac{n^2 V \, |V|}{R_\upsilon^{4/3}} \tag{6.4.3}$$

ὅπου $R_\upsilon = \dfrac{A}{\Pi}$ = ὑδραυλική ἀκτίνα,

Π = ἡ περιβρεχόμενη περίμετρος καί

n = ὁ συντελεστής τριβῶν κατά *Manning*.

Στή ἐξίσωση (6.4.3) πάρθηκε τό γινόμενο $V\,|V|$ ἀντί γιά τό τετράγωνο τῆς ταχύτητας, V^2, γιατί στήν ἀσταθή ροή εἶναι ἐνδεχόμενο τό διάνυσμα τῆς ταχύτητας νά παίρνει καί ἀντίθετη διεύθυνση μέ τό χρόνο καί τήν ἀπόσταση.

Γιά τήν ἐξαγωγή τῶν ἐξισώσεων (6.4.1) καί (6.4.2) τοῦ *Saint-Venant* χρησιμοποιήθηκαν οἱ παρακάτω ἐπιπλέον παραδοχές :

1. Τό νερό εἶναι ἀσυμπίεστο καί ὁμογενές, δηλαδή ἡ πυκνότητά του ρ εἶναι σταθερή. Εἰδικά παραλείπονται ρεύματα πυκνότητας, κίνηση φερτῶν ὑλικῶν κ.λ.π.

2. Ἡ πραγματική ροή στόν ἀγωγό μπορεῖ νά ἀντιπροσωπευθεῖ καλά ἀπό ροή ὁμοιόμορφης ταχύτητας γιά κάθε διατομή.

3. Ἡ πίεση στή ροή ὑπακούει στό νόμο τῆς ὑδροστατικῆς πιέσεως.

4. Δέ συμβαίνει καμία ἀσυνέχεια ἤ ἀπότομη μεταβολή τῆς ροῆς μέ τό χρόνο καί χῶρο.

5. Τά ἀποτελέσματα τριβῆς καί τυρβώδους μποροῦν νά συνυπολογι-

στοῦν μέ τήν εἰσαγωγή τῆς κλίσεως ἀντιστάσεων, πού ἐξαρτιέται ἀπό τό τετράγωγο τῆς ταχύτητας καί ἐπίσης ἀπό τό βάθος καί τήν τραχύτητα τῶν τοιχωμάτων κατά ὁρισμένο τρόπο, ὅπως π.χ. φαίνεται στήν ἐξίσωση (6.4.3).

6. Ἡ ἐλεύθερη ἐπιφάνεια σέ κάθε διατομή παίρνεται σάν ὁριζόντια γραμμή καί ἡ τριβή στήν ἐλεύθερη ἐπιφάνεια εἶναι μηδενική.

Μαθηματικά οἱ ἐξισώσεις (6.4.1) καί (6.4.2) τοῦ *Saint-Venant* χαρακτηρίζονται σάν ἕνα σύστημα δύο πρώτης τάξεως μή γραμμικῶν μερικῶν διαφορικῶν ἐξισώσεων τοῦ ὑπερβολικοῦ τύπου.

Οἱ ἐξισώσεις αὐτές δέν ἔχουν ἀναλυτική λύση ἀλλά ἔχουν ἐπιλυθεῖ, κατά τά τελευταῖα χρόνια, μέ ἀριθμητικές μεθόδους μέ τή χρήση ἠλεκτρονικοῦ ὑπολογιστῆ. Στό σύγγραμμα αὐτό δέν θά ἀσχοληθοῦμε μέ τή λύση τῶν ἐξισώσεων τοῦ *Saint-Venant*.

Ἄν ἡ διατομή τοῦ ἀνοικτοῦ ἀγωγοῦ εἶναι ὀρθογωνική καί ἔχει σταθερό πλάτος B, ὁπότε $A=By$, $Q=Bq$ καί $I = iB$, ὅπου $q = Q/B =$ ἡ εἰδική παροχή καί $i =$ ἡ εἰδική πλάγια παροχή, καί οἱ δύο ἀνά μονάδα πλάτους τοῦ ἀγωγοῦ, τότε οἱ ἐξισώσεις (6.4.1), (6.4.2) καί (6.4.3) γίνονται ἀντίστοιχα :

ἡ ἐξίσωση συνέχειας :

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i \qquad (6.4.4)$$

ἡ ἐξίσωση κινήσεως :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{i\,(V-U)}{y} = g\,(S_0 - S_f) \qquad (6.4.5)$$

ἡ ἐξίσωση τοῦ *Manning* :

$$S_f = \frac{n^2 V\,|V|}{R_\upsilon^{4/3}} = \frac{n^2 V\,|V|}{\left(\dfrac{By}{B+2y}\right)^{4/3}} \qquad (6.4.6)$$

Ἄν τό πλάτος B τοῦ ἀνοικτοῦ ἀγωγοῦ εἶναι πολύ μεγάλο, τότε ἡ ὑδραυλική ἀκτίνα παίρνεται ἴση μέ τό βάθος y, γιατί :

$$\underset{B\to\infty}{\text{ὅριο}}\, R_\upsilon = \underset{B\to\infty}{\text{ὅριο}}\left(\frac{y}{1+\dfrac{2y}{B}}\right) = y$$

Μέ ὅμοιο τρόπο μπορεῖ νά δειχθεῖ ὅτι ἄν τό βάθος y εἶναι πολύ μεγάλο καί τό πλάτος μικρό, τότε ἡ ὑδραυλική ἀκτίνα παίρνεται ἴση μέ $B/2$.

Ἄν οἱ ἀνοικτοί ἀγωγοί εἶναι ἐπενδυμένοι καί δέν ὑπάρχει πλάγια εἰσροή ἤ ἐκροή ἐξαιτίας βροχῆς, πλημμύρας ἤ ὑπερχειλίσεως, καί οἱ ἀπώλειες ἐξαιτίας ἐξατμίσεως θεωρηθοῦν σάν μηδαμινές, τότε $I = 0 = i$ καί οἱ παραπάνω ἐξισώσεις (6.4.1), (6.4.2), (6.4.4) καί (6.4.5) τοῦ *Saint-Venant* ἀπαλλάσσονται ἀπό τούς ὅρους πού περιέχουν τίς μεταβλητές τῆς πλάγιας παροχῆς I ἤ i καί παίρνουν τίς ἀντίστοιχες μορφές :

α) Σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς ὁποιασδήποτε διατομῆς :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{6.4.1'}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g\,(S_0 - S_f) \tag{6.4.2'}$$

β) Σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς ὀρθογωνικῆς διατομῆς :

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \tag{6.4.4'}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g\,(S_0 - S_f) \tag{6.4.5'}$$

6.4.1. Σταθερή ἀνομοιόμορφη ροή

Γιά σταθερή ἤ μόνιμη ροή οἱ παράγωγοι τῶν μεταβλητῶν τῆς ροῆς ὡς πρός τό χρόνο εἶναι μηδενικές, δηλαδή $\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$ καί οἱ ἐξισώσεις τοῦ *Saint-Venant* παίρνουν τίς παρακάτω συνήθεις μορφές μέ ὁλικές παραγώγους :

α) Γιά ἀνοικτούς ἀγωγούς ὁποιουδήποτε γεωμετρικοῦ σχήματος, μέ πλάγια παροχή :

$$\frac{dQ}{dx} = I \tag{6.4.7}$$

$$V \frac{dV}{dx} + g \frac{dy}{dx} + \frac{I\,(V - U)}{A} = g\,(S_0 - S_f) \tag{6.4.8}$$

β) Γιά ὀρθογωνικούς ἀνοικτούς ἀγωγούς, μέ πλάγια παροχή :

$$\frac{dq}{dx} = i \tag{6.4.9}$$

$$V\frac{dV}{dx} + g\frac{dy}{dx} + \frac{i\,(V - U)}{y} = g\,(S_0 - S_f) \tag{6.4.10}$$

Οἱ ἐξισώσεις τοῦ *Manning* (6.4.3) ἤ (6.4.6) δέν μεταβάλλονται φαινομενικά γιατί δέν περιλαμβάνουν παραγώγους ὡς πρός t.

Ἄν οἱ ἀνοικτοί ἀγωγοί εἶναι ἐπενδυμένοι καί δέν ὑπάρχει πλάγια εἰσροή ἤ ἐκροή, ἐξαιτίας βροχῆς, πλημμύρας ἤ ὑπερχειλίσεως, καί οἱ ἀπώλειες ἐξατμίσεως θεωρηθοῦν σάν μηδαμινές, τότε $I=0=i$ καί οἱ παραπάνω ἐξισώσεις (6.4.7), (6.4.8), (6.4.9) καί (6.4.10) ἀπαλλάσσονται ἀπό τούς ὅρους πού περιέχουν τίς μεταβλητές τῆς πλάγιας παροχῆς I καί παίρνουν τίς ἀντίστοιχες μορφές :

α) Σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς ὁποιασδήποτε διατομῆς :

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \quad \text{ἤ} \quad Q = \text{σταθερό} \tag{6.4.7΄}$$

$$V\frac{dV}{dx} + g\frac{dy}{dx} = g\,(S_0 - S_f) \tag{6.4.8΄}$$

β) Σέ ἀνοικτούς ἀγωγούς ὀρθογωνικῆς διατομῆς :

$$\frac{dq}{dx} = 0 \quad \text{ἤ} \quad q = \text{σταθερό} \tag{6.4.9΄}$$

$$V\frac{dV}{dx} + g\frac{dy}{dx} = g\,(S_0 - S_f) \tag{6.4.10΄}$$

6.4.2. Σταθερή ὁμοιόμορφη ροή

Σύμφωνα μέ τόν ὁρισμό, ἡ ροή ὀνομάζεται ὁμοιόμορφη ὅταν ἡ μέση ταχύτητά της εἶναι σταθερή κατά μέγεθος καί διεύθυνση. Σάν συνέπεια ἡ ὁμοιόμορφη ροή μπορεῖ νά προκληθεῖ σέ ἐπενδυμένους πρισματικούς ἀγωγούς μεγάλου μήκους καί χωρίς πλάγια παροχή. Ἀπό τήν ἐξίσωση συνέχειας (6.4.7) γιά $I = 0$, ἔχουμε :

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \tag{6.4.11}$$

Ἐπειδή, $Q = VA$, ἡ ἐξίσωση (6.4.11) γράφεται :

$$A \frac{dV}{dx} + V \frac{dA}{dx} = 0 \qquad (6.4.12)$$

Ἀλλά γιά ὁμοιόμορφη ροή $dV/dx = 0$ καί ἑπομένως ἡ ἐξίσωση (6.4.12) γίνεται $dA/dx = 0$, ἀπό τήν ὁποία συμπεραίνεται ὅτι A = σταθερή καί ἄρα ὁ ἀγωγός εἶναι πρισματικῆς διατομῆς. Ἄν ὁ ἀγωγός εἶναι ὀρθογωνικός, τότε $A=By$, ὅπου B = τό σταθερό πλάτος καί ἄρα ἔχουμε :

$$\frac{dA}{dx} = B \frac{dy}{dx} + y \frac{dB}{dx} = 0$$

Ἀλλά $\dfrac{dB}{dx} = 0$ καί ἡ παραπάνω ἐξίσωση δίνει :

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad \text{ἤ} \quad y = \text{σταθερό} = \text{ὁμοιόμορφο βάθος} = y_0$$

Καί ἑπομένως ἡ ἐξίσωση (6.4.8) γιά σταθερή ὁμοιόμορφη ροή γίνεται :

$$S_0 = S_f \qquad (6.4.13)$$

δηλαδή ἡ κλίση ἀντιστάσεων ἰσοῦται μέ τήν κλίση τοῦ πυθμένα τοῦ ἀγωγοῦ. Ἄρα στήν ὁμοιόμορφη ροή ἡ γραμμή ἐνέργειας, ἡ ἐλεύθερη ἐπιφάνεια καί ὁ πυθμένας τοῦ ἀγωγοῦ εἶναι μεταξύ τους παράλληλοι.

6.4.3. Εἰδική ἐνέργεια ἤ εἰδικό φορτίο E.

Ἡ ἔννοια τῆς εἰδικῆς ἐνέργειας E, πού ὁρίζεται ἀπό τήν ἐξίσωση

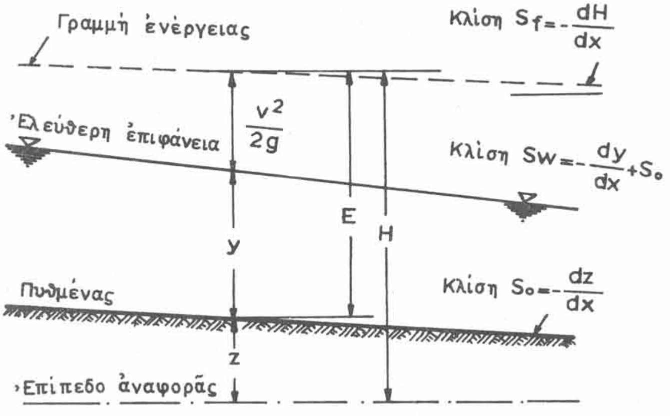
$$E = y + \frac{V^2}{2g} \qquad (6.4.14)$$

ἔχει εἰσαχθεῖ στήν ἐπιστήμη τῆς ὑδραυλικῆς τό ἔτος 1912, ἀπό τό Ρωσσοαμερικανό Μηχανικό *B. A. Bakhmeteff* καί ἀποτελεῖ σήμερα τή βάση γιά τήν ἀνάλυση ἀκόμη καί τῶν πιό πολύπλοκων φαινόμενων τῆς ροῆς τῶν ἀνοικτῶν ἀγωγῶν. Σύμφωνα μέ τήν ἐξίσωση (6.4.14) ἡ εἰδική ἐνέργεια ἐκφράζει τό φορτίο ἤ τήν ἐνέργεια ἀνά μονάδα βάρους τοῦ ὑγροῦ σέ μία διατομή τοῦ ἀγωγοῦ ἀπό τόν πυθμένα του.

Ἡ ὁλική ἐνέργεια ἤ τό ὁλικό φορτίο, H, ὁρίζεται ὡς πρός τό ἐπίπεδο ἀναφορᾶς, ἀπό τήν ἐξίσωση :

$$H = z + E = z + y + \frac{V^2}{2g} \tag{6.4.15}$$

Οἱ παραπάνω ἐκφράσεις ἐνέργειας βασίζονται στήν παραδοχή ὅτι τό πιεζομετρικό φορτίο σέ ὁποιοδήποτε σημεῖο ἀκολουθεῖ τό νόμο τῆς ὑδροστατικῆς πιέσεως καί ὅτι ἡ κατανομή τῆς ταχύτητας εἶναι ὁμοιόμορφη.



Σχ. 6.4.1. Εἰδική καί ὁλική ἐνέργεια σέ ἀνοικτό ἀγωγό

Γιά σταθερή ἀνομοιόμορφη ροή, χωρίς πλάγια παροχή, γνωρίζουμε ὅτι ἡ ἐξίσωση συνέχειας παίρνει τή μορφή :

$$Q = VA = \text{σταθερή}$$

Σάν συνέπεια οἱ ἐξισώσεις (6.4.14) καί (6.4.15) μποροῦν νά γραφοῦν μέ τή χρήση τῆς παροχῆς Q ὡς ἑξῆς :

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \tag{6.4.16}$$

$$H = z + y + \frac{Q^2}{2gA^2} \tag{6.4.17}$$

Γιά ὀρθογωνικούς ἀγωγούς $Q = qB$ καί $A = yB$ καί ἄρα οἱ ἐξισώσεις (6.4.16) καί (6.4.17) γίνονται :

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \tag{6.4.18}$$