ΑΝΟΙΧΤΑ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΑ

Μηχανική Ρευστών ΙΙ

Ενότητα 7): Ροή σε ανοικτούς αγωγούς

Δ. Μισηρλής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Τίτλος ενότητας

Ροή σε ανοικτούς αγωγούς

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ροή σε κλειστούς αγωγούς, όπως είδαμε στο μάθημα "Μηχανική Ρευστών Ι" στο κεφάλαιο 6, προκαλείται από τη **διαφορά πίεσης** μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του αγωγού. Σε κλειστούς αγωγούς, το ρευστό (υγρό ή αέριο) καταλαμβάνει ολόκληρο τον όγκο του αγωγού. Αντίθετα, στους ανοικτούς αγωγούς υπάρχει πάντοτε ένα υγρό ρευστό, το οποίο όμως δεν πληρεί όλο τον όγκο του αγωγού και συνυπάρχει με ένα αέριο (συνήθως αέρα), συνεπώς η πίεση είναι παντού η ίδια (ατμοσφαιρική), άρα η ροή προκαλείται από την επίδραση της **βαρύτητας** και όχι της διαφοράς πίεσης. Συνεπώς για να υπάρξει ανοικτή ροή απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο αγωγός να έχει **κλίση** ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ώστε να επιδράσει η βαρύτητα και το βάρος του υγρού να προκαλέσει τη ροή.

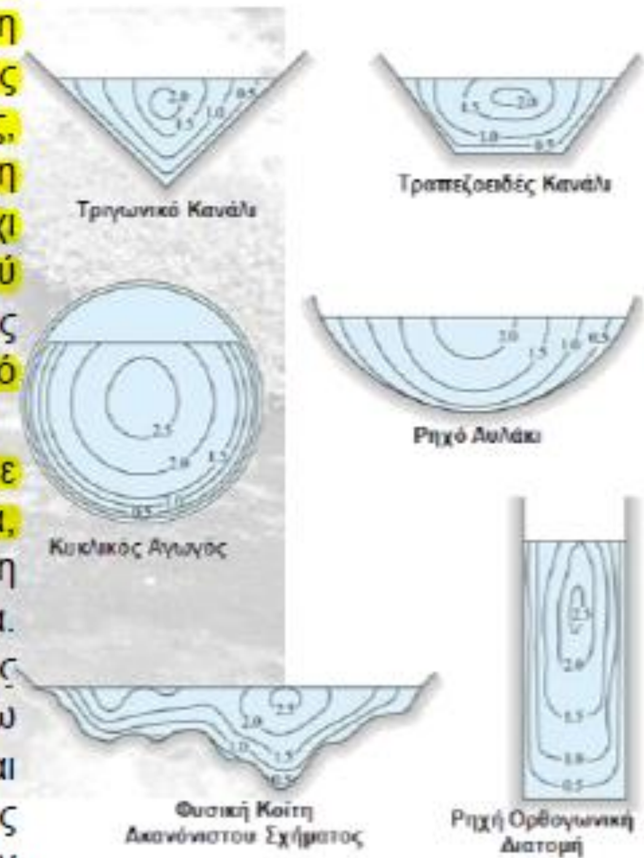
Οι ροές στους ανοικτούς αγωγούς συνήθως αφορά στο νερό και γενικά είναι **τυρβώδης**, λόγω του μικρού ιξώδους του νερού και της μεγάλης κλίμακας μήκους που τις χαρακτηρίζει, που προκαλούν μεγάλη τιμή για τον αριθμό Reynolds. Επίσης, η ροή σε ανοικτούς αγωγούς είναι γενικά **τρισδιάστατη** και πολλές φορές **μη–μόνιμη**, παρουσιάζοντας συχνά πολύπλοκη δομή, παρά την απλή γεωμετρική μορφή που έχει ο αγωγός. Για την ανάλυση των ανοικτών ροών, χρησιμοποιούμε πολλές έννοιες από τη μόνιμη ροή κλειστών αγωγών, όπως η υδραυλική διάμετρος, ο συντελεστής τριβής, οι απώλειες πίεσης, κ.λπ.

Ένας απλός και περιεκτικός ορισμός της ροής αυτής είναι, "η ροή ενός υγρού μέσα σε έναν αγωγό όπου υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια". Τέτοιες ροές είναι είτε φυσικές (ποτάμια, χείμαρροι), είτε τεχνητές (κανάλια, αρδευτικά δίκτυα, υπερχειλιστές, δίκτυα αποχέτευσης, κλειστοί τάφροι).

Όπως προαναφέρθηκε, ο μηχανισμός που προκαλεί τη ροή είναι η βαρύτητα, ενώ φυσικά υπάρχει και ο μηχανισμός που αντιτίθεται στη ροή, οι τριβές. Η ύπαρξη της ελεύθερης επιφάνειας, απλοποιεί αλλά και δυσκολεύει την ανάλυση. Την απλοποιεί διότι **παντού η πίεση είναι η ίδια (ατμοσφαιρική)**, δηλαδή δεν μεταβάλλεται κατά μήκος της ροής, όπως συμβαίνει στους κλειστούς αγωγούς, αλλά τη δυσκολεύει διότι το **ύψος της ροής δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται κατά μήκος της**.

Δηλαδή το βάθος της ροής αποτελεί αντικείμενο της επίλυσης, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις μη–μόνιμης ροής, όπου εμφανίζονται κυματισμοί στην ελεύθερη επιφάνεια.

Η διατομή ενός ανοικτού αγωγού, έχει γενικά τρία τοιχώματα, δύο πλάγια και τον πυθμένα και ένα ανοικτό πάνω όριο, την ελεύθερη επιφάνεια. Στα τοιχώματα ισχύει η γνωστή Συνθήκη Μη Ολίσθησης (Σ.Μ.Ο.), ενώ στην ελεύθερη επιφάνεια ισχύουν ιδιαίτερες συνθήκες, που μοιάζουν, αλλά δεν είναι ακριβώς ίδιες με τη συνθήκη συμμετρίας. Αυτό ισχύει μόνο για επίπεδη ελεύθερη επιφάνεια (όχι κυματισμοί). Άρα, λόγω της γεωμετρίας της διατομής του ανοικτού αγωγού, η κατανομή της ταχύτητας είναι τρισδιάστατη. Μερικές τέτοιες κατανομές, υπό τη μορφή ισοϋψών, δίνονται στο διπλανό σχήμα για ευθύγραμμους αγωγούς.



Είναι εμφανές ότι η κατανομή της ταχύτητας είναι αρκετά σύνθετη με τη μέγιστη τιμή να παρουσιάζεται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια, περίπου στο 80% του τοπικού βάθους ροής. Σε πλατιά κανάλια, η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται πιο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στη δευτερεύουσα ροή (ροή στο επίπεδο της διατομής) που προκαλείται από την ανισοτροπία της τύρβης λόγω της επίδρασης της ελεύθερης επιφάνειας. Η ροή αυτή ενισχύεται όταν το κανάλι δεν είναι ευθύγραμμο, λόγω της φυγόκεντρης επιτάχυνσης με τις υψηλότερες ταχύτητες να εμφανίζονται στην εξωτερική ακτίνα της στροφής. Φυσικές κοίτες με μαιανδρισμό παρουσιάζουν σημαντική διάβρωση στον πυθμένα τους.

Παρότι σήμερα με την πρόοδο των Η/Υ είναι δυνατόν να επιλυθούν με ακρίβεια οι σύνθετες ανοικτές ροές του σχήματος της προηγούμενης σελίδας, η πιο πρακτική και απλή προσέγγιση, η οποία πολλές φορές δεν στερείται ακρίβειας, είναι η μονοδιάστατη ανάλυση, όπου ολόκληρη η διατομή του αγωγού σε κάθε θέση κατά μήκος του, χαρακτηρίζεται από μία μόνο τιμή της ταχύτητας, τη μέση τιμή της, η οποία συνδέεται με την παροχή. Έτσι, εάν **x** είναι η διεύθυνση κατά μήκος του αγωγού και **V(x)** η μέση ταχύτητα σε κάθε διατομή **A(x)** του αγωγού, τότε:

$$Q=V(x)A(x)=\text{σταθερό} \qquad (1)$$

όπου Q=ογκομετρική παροχή. Η σχέση αυτή ισχύει για **μόνιμη ροή** και επειδή τα **υγρά είναι ασυμπίεστα**, δηλαδή η πυκνότητά τους είναι σταθερή, η Αρχή Διατήρησης της Μάζας καταλήγει στο ότι η ογκομετρική παροχή παραμένει και αυτή σταθερή.

Μία δεύτερη σχέση για τη μονοδιάστατη ταχύτητα V(x) μας παρέχεται από την Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας, δηλαδή από την εξίσωση Bernoulli μεταξύ δύο σημείων 1 και 2 πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια, συμπεριλαμβάνοντας τις τριβές, $\mathbf{h_f}$:

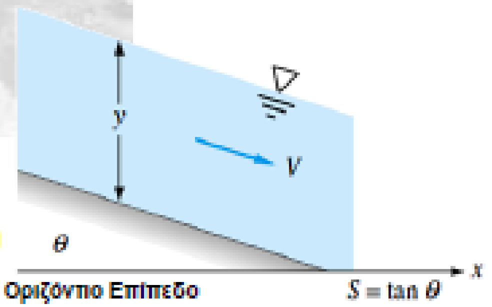
$$\frac{V_1^2}{2g}+z_1=\frac{V_2^2}{2g}+z_2+h_f \qquad (2)$$

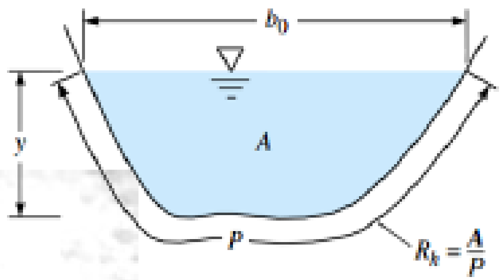
όπου επειδή $p_1=p_2=p_{atm}$, οι όροι της πίεσης απαλείφονται μεταξύ τους και οι όροι της δυναμικής ενέργειας z_1 και z_2, περιλαμβάνουν και το βάθος ροής, y, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Οι απώλειες λόγω τριβής, υπολογίζονται όπως και στους κλειστούς αγωγούς, δηλαδή από τη σχέση:

$$h_f=f\,\frac{x_2-x_1}{D_h}\,\frac{V_{\mu\varepsilon\sigma\eta}^2}{2g} \qquad (3)$$

όπου $V_{\mu\varepsilon\sigma\eta}$=μέση ταχύτητα στις διατομές 1 και 2 και f=μέσος συντ/στής τριβής στις διατομές 1 και 2.





Στην προηγούμενη σχέση εμφανίζεται η υδραυλική διάμετρος, D_h, η οποία στην περίπτωση ανοικτών αγωγών δίνεται από τη σχέση:

$$D_h = \frac{4A}{P} \qquad (4)$$

όπου **A**=επιφάνεια διατομής που καταλαμβάνει το υγρό [m^2] και **P**=βρεχόμενη περίμετρος [m]. Συχνά στους ανοκτούς αγωγούς χρησιμοποιείται η υδραυλική ακτίνα $R_h = A/P = (1/4)D_h$.

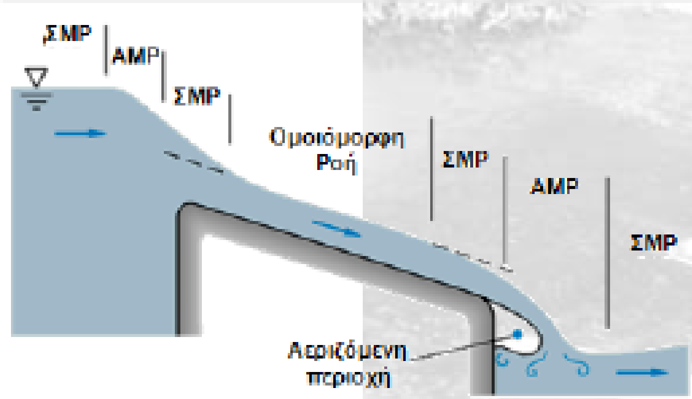
Ο τοπικός αριθμός Reynolds $Re = \rho V D_h/\mu$, είναι συνήθως της τάξης του 10^5 ή μεγαλύτερος, άρα σχεδόν πάντοτε η ροή είναι τυρβώδης. Η μόνη περίπτωση στρωτής ροής είναι όταν το βάθος ροής είναι πολύ μικρό, όπως στην περίπτωση λεπτού υμένα ροής νερού στους αεροδιαδρόμους ή στους δρόμους όταν βρέχει. Σημειώνεται ότι η βρεχόμενη περίμετρος αναφέρεται σε στερεά όρια τα οποία είναι σε επαφή με το υγρό, δηλαδή περιλαμβάνει τον πυθμένα και τα πλάγια τοιχώματα, αλλά όχι την ελεύθερη επιφάνεια. Π.χ. Στην περίπτωση ορθωγωνικού καναλιού πλάτους b και ύψους h, με βάθος ροής y, η βρεχόμενη περίμετρος ισούται με P=b+2y και όχι P=2(b+h), όπως θα ίσχυε στον αντίστοιχο κλειστό αγωγό.

Αν και για τον υπολογισμό του συντελεστή f στη σχέση (3) επαρκεί το διάγραμμα Moody, σπάνια αυτό χρησιμοποιείται και αντ' αυτού έχει επικρατήσει η χρήση της εμπειρικής σχέσης του Manning, όπως θα αναλύσουμε παρακάτω.

Η κατηγοριοποίηση των ανοικτών ροών γίνεται συνήθως με κριτήριο τη μεταβολή του βάθους της ροής. Η πιο απλή περίπτωση είναι αυτή της **ομοιόμορφης ροής**, δηλαδή της ροής με σταθερό βάθος. Η περίπτωση αυτή συναντάται όταν έχουμε μεγάλα μήκη ευθύγραμμου αγωγού σταθερής κλίσης πυθμένα και σταθερής διατομής (σχήμα και επιφάνεια). Σε αυτή την περίπτωση η ροή έχει το **κανονικό βάθος ροής**, y_n. Εάν η κλίση ή η διατομή του καναλιού μεταβάλλεται ή υπάρχει εμπόδιο στη ροή, τότε η ροή λέγεται **μεταβαλλόμενη**.

4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΣΧΕΣΕΙΣ

Εάν η μεταβολή είναι ασθενής και η ροή μπορεί να περιγραφεί με τη μονοδιάστατη ανάλυση, τότε ονομάζεται **σταδιακά μεταβαλλόμενη ροή (ΣΜΡ)**. Εάν η μεταβολή είναι έντονη και απαιτείται τρισδιάστατη ανάλυση, η ροή ονομάζεται **απότομα μεταβαλλόμενη ροή (ΑΜΡ)**. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η γραφική απεικόνιση των τριών αυτών περιπτώσεων μίας ανοικτής ροής.



Ένα δεύτερο κριτήριο κατάταξης είναι σύμφωνα με την τιμή του αριθμού Froude, ο οποίος για κανάλια μεγάλου πλάτους παίρνει τη μορφή:

$$Fr = \sqrt{\frac{V}{gy}} \qquad (5)$$

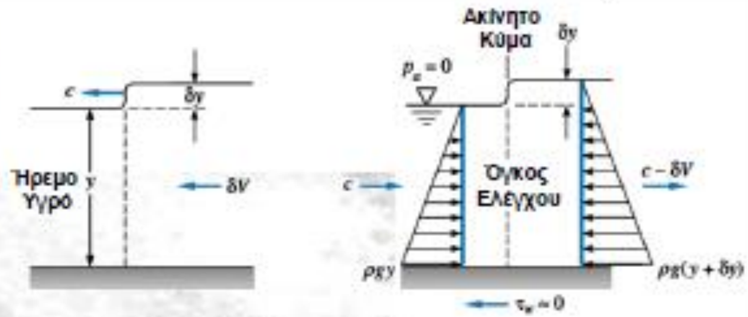
Ανάλογα με την τιμή του, ξεχωρίζουν τρεις κατηγορίες ροής:

- $Fr<1.0$ υποκρίσιμη ροή
- $Fr=1.0$ κρίσιμη ροή
- $Fr>1.0$ υπερκρίσιμη ροή

Εάν η μεταβολή είναι ασθενής και η ροή μπορεί να περιγραφεί με τη μονοδιάστατη ανάλυση, τότε ονομάζεται **σταδιακά μεταβαλλόμενη ροή (ΣΜΡ)**. Εάν η μεταβολή είναι έντονη και απαιτείται τρισδιάστατη ανάλυση, η ροή ονομάζεται **απότομα μεταβαλλόμενη ροή (ΑΜΡ)**. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η γραφική απεικόνιση των τριών αυτών περιπτώσεων μίας ανοικτής ροής. Ο αριθμός Froude για ακανόνιστη διατομή ορίζεται με διαφορετικό τρόπο, όπως θα δούμε παρακάτω. Υπάρχει αναλογία και ισχυρή σύνδεση με την συμπιεστή ροή και συγκεκριμένα σχετίεται η υποκρίσιμη ροή με την υποηχητική ροή ($Ma<1.0$), η κρίσιμη με την ηχητική ($Ma=1.0$) και η υπερκρίσιμη με την υπερηχητική ($Ma>1.0$).

Ο παρονομαστής του αριθμού Froude, $(gy)^{0.5}$ αποτελεί την ταχύτητα ενός απείρως λεπτού κύματος υγρού. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί εάν εξετάσουμε το σχήμα της επόμενης σελίδας, το οποίο δείχνει ένα κύμα ύψους δy να μεταδίδεται με ταχύτητα c μέσα σε ένα ήρεμο υγρό.

Για την επίτευξη μόνιμων συνθηκών, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το κύμα είναι ακίνητο, οπότε το υγρό κινείται αντίθετα και προς το κύμα με ταχύτητα –c. Για τον όγκο ελέγχου του σχήματος η Αρχή Διατήρησης της Μάζας γράφεται ως:



$$\rho c y b = \rho (c - \Delta V)(y + \delta y) b \qquad (6)$$

δηλαδή
$$\delta V = c\frac{\delta y}{y+\delta y} \qquad (7)$$

Η φυσική ερμηνεία της σχέσης (7) είναι ότι η μεταβολή της ταχύτητας που προκαλείται από ένα επιφανειακό κύμα είναι μικρή εάν το κύμα είναι ασθενές, δηλαδή εάν δy<<y.

Εάν αγνοήσουμε την τριβή, τότε η εξίσωση διατήρησης της γραμμικής ορμής στη διεύθυνση του κύματος γράφεται ως:

$$\frac{1}{2}\rho g b\left[(y+\delta y)^2 - y^2\right] = \rho c b y\,(c - \delta V - c) \qquad (8)$$

δηλαδή
$$g\left[1 + \frac{(1/2)\delta y}{y}\right]\delta y = c\,\delta V \qquad (9)$$

και εάν αντικαταστήσουμε το δV από την (9) στην (8), τότε παίρνουμε μία σχέση για τη μετάδοση του κύματος:

$$c^2 = g y\left(1 + \frac{\delta y}{y}\right)\left[1 + \frac{(1/2)\delta y}{y}\right] \qquad (10)$$

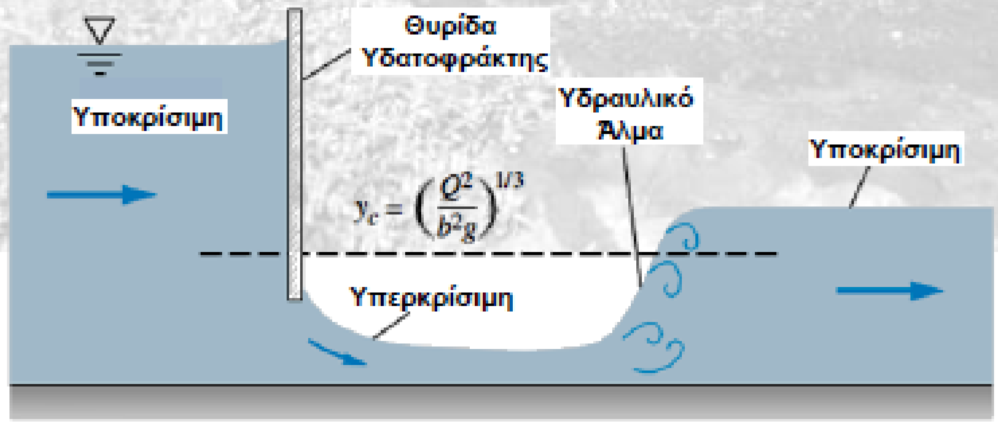
δηλαδή όσο μικρότερο το κύμα (δy→0) τόσο η ταχύτητα τείνει στο **c_o=gy**, ενώ όσο μεγαλύτερο το ύψος του κύματος, δy, τόσο πιο μεγάλη η ταχύτητα μετάδοσής του, c.

Η συνθήκη αυτή αποτελεί το ανάλογο της ταχύτητας του ήχου, α, για ένα κύμα της ελεύθερης επιφάνειας, συνεπώς ο αριθμός Froude, **$Fr=V/c_o$**, είναι το ανάλογο του αριθμού Mach.

Όπως στην περίπτωση της συμπιεστής ροής των αερίων, μία ροή μπορεί να επιταχυνθεί από υποηχητική κατάσταση σε ηχητική και μετέπειτα σε υπερηχητική ροή και μετά να επιστρέψει στην υποηχητική κατάσταση μετά τη δημιουργία ενός κρουστικού κύματος, έτσι και η υποκρίσιμη ροή μπορεί να επιταχυνθεί (λόγω μεγαλύτερης κλίσης πυθμένα) σε κρίσιμη και μετέπειτα σε υπερκρίσιμη ροή και να επιστρέψει στην υποκρίσιμη κατάσταση μετά από ένα είδος κρουστικού κύματος το οποίο ονομάζεται **υδραυλικό άλμα**.

Αυτό φαίνεται στο σχήμα, όπου ανάντη της θυρίδας η ροή είναι υποκρίσιμη, ενώ καθώς περνάει από τη θυρίδα επιταχύνεται σε κρίσιμη και μετά σε υπερκρίσιμη κατάσταση (η θυρίδα λειτουργεί ως ένα ακροφύσιο στη συμπιεστή ροή αερίου). Περαιτέρω κατάντη, η ροή μετά από ένα "κρουστικό" κύμα γυρνάει πίσω στην υποκρισιμη κατάσταση, αφού το βάθος της ροής ανυψώνεται απότομα (υδραυλικό άλμα), καθώς δεν μπορεί λόγω κλίσης να συντηρηθεί το χαμηλό βάθος ροής που εμφανίζεται στην υπερκρίσιμη κατάσταση.

Το **κρίσιμο βάθος ροής**, **$y_c=[Q^2/(b^2g)]^{1/3}$** έχει σχεδιαστεί με διακεκομμένη γραμμή. Όπως και το κανονικό βάθος y_n, έτσι και το κρισιμο βάθος, y_c, είναι χαρακτηριστικές τιμές μίας ανοικτής ροής.



Η ομοιόμορφη ροή εμφανίζεται σε ευθύγραμμο αγωγό μεγάλου μήκους και σταθερής κλίσης πυθμένα και σταθερής διατομής. Σε αυτήν την περίπτωση το βάθος ροής είναι το κανονικό, **$y=y_n$**, και η ταχύτητα είναι σταθερή **$V=V_o$**. Εάν η κλίση του πυθμένα είναι **$S_o=\tan\theta$**, όπου θ=γωνία που δημουργείται μεταξύ του πυθμένα και του οριζόντιου επιπέδου, με θετική τιμή για ροή προς τα κάτω, τότε επειδή **$V_1=V_2=V_o$**, η εξίσωση (2) γίνεται:

$$h_f = z_1 - z_2 = S_o L \qquad (11)$$

όπου L=οριζόντια απόσταση μεταξύ των διατομών 1 και 2. Δηλαδή οι απώλειες τριβής ισούνται με τη διαφορά ύψους της στάθμης του καναλιού μεταξύ των διατομών 1 και 2. Η ροή μπορεί να θεωρηθεί **πλήρως ανεπτυγμένη** (ισχύει μετά από ένα μήκος αγωγού της τάξης των 20÷40 βαθών ροής) άρα ισχύει η σχέση των Darcy–Weisbach:

$$h_f = f\frac{L}{D_h}\frac{V_o^2}{2g} \quad , \quad D_h = 4R_h \qquad (12)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (11) και (12) καταλήγουμε σε μία σχέση για την **ταχύτητα ομοιόμορφης ροής σε ανοικτό αγωγό**:

$$V_o = \left(\frac{8g}{f}\right)^{0.5} R_h^{0.5} S_o^{0.5} \qquad (13)$$

Για συγκεκριμένη διατομή και τραχύτητα πυθμένα αγωγού, η ποσότητα $(8g/f)^{0.5}$ είναι σταθερή και μπορεί να αντικατασταθεί με C, οπότε η εξίσωση (13) γράφεται:

$$V_o = C(R_h S_o)^{0.5} \quad , \quad Q = CA(R_h S_o)^{0.5} \qquad (14)$$

Οι σχέσεις (14) ονομάζονται **σχέσεις Chezy** και ο συντ/στής C, ονομάζεται **συντ/στής Chezy** και κυμαίνεται μεταξύ **30 [$m^{0.5}$/s] για στενά και τραχειά κανάλια, έως 90 [$m^{0.5}$/s] για πλατιά και λεία κανάλια**. Τον περασμένο αιώνα έγιναν πάμπολλες προσπάθειες για τη συσχέτιση του C με την τραχύτητα, σχήμα διατομής και κλίση των ανοικτών αγωγών. Η πιο διαδεδομένη από αυτές τις συσχετίσεις είναι αυτή του **Manning**.

4.3 ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ – Η ΣΧΕΣΗ ΤΟΥ CHEZY

Ο Manning βρήκε ότι ο συντ/στης Chezy, C, αυξάνει περίπου με την έκτη ρίζα του μεγέθους του καναλιού και πρότεινε μία απλή σχέση:

$$C=\left(\frac{8g}{f}\right)^{0.5}\approx\frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (15)$$

όπου n=παράμετρος τραχύτητας. Συνεπώς για ομοιόμορφη ροή, εάν συνδυάσουμε τις σχέσεις (15) και (13) έχουμε:

$$V_o=\frac{1}{n}R_h^{0.6667}S_o^{0.5} \quad , \quad Q=V_oA=\frac{A}{n}R_h^{0.6667}S_o^{0.5} \quad (16)$$

Οι τιμές της παραμέτρου n δίνονται στον παρακάτω πίνακα για διάφορα είδη επιφανειών καναλιών. Παρατηρείται μία μεταβολή κατά 15 φορές, μεταξύ της μικρότερης (για λείες γυάλινες επιφάνειες, n≈0.01) και μεγαλύτερης (για τραχειές πλημμυρικές ζώνες ποταμών με δένδρα, n≈0.15). Για παράδειγμα ο ποταμός Μισσισσιπής, έχει n≈0.032 σε βάθος κοίτης 40 ποδών, ενώ n≈0.030 για βάθος 20 ποδών και n≈0.040 για βάθος 5 ποδών. Επίσης η εποχική βλάστηση και η διάβρωση της κοίτης επηρεάζουν την παράμετρο n.

Τεχνητές Επιφάνειες	n	ε [mm]
Γυαλί	0.010±0.002	0.3
Ορείχαλκος	0.011±0.002	0.6
Χάλυβας, λείος	0.012±0.002	1.0
Βαμμένος	0.014±0.003	2.4
Περτσινωμένος	0.015±0.002	3.7
Χυτοσίδηρος	0.013±0.003	1.6
Τσιμέντο, λειασμένο	0.012±0.002	1.0
Τσιμέντο, ακατέργαστο	0.014±0.002	2.4
Πλαναρισμένο ξύλο	0.012±0.002	1.0
Πήλινο Πλακάκι	0.014±0.003	2.4
Τούβλο	0.015±0.002	3.7
Άσφαλτος	0.016±0.003	5.4
Αυλακωτό μέταλο	0.022±0.005	37
Πέτρινη τοιχοποιία	0.025±0.005	80

Σκαμμένα Κανάλια	n	ε [mm]
Καθαρή Κοίτη	0.022±0.004	37.0
Αμμοχάλικο	0.025±0.005	80.0
Βλάστηση	0.030±0.005	240.0
Πέτρες, κροκάλες	0.035±0.010	500.0
Φυσικά Κανάλια	**n**	**ε [mm]**
Καθαρά και ευθεία	0.030±0.005	1.6
Αργά κανάλια, βαθειές λίμνες	0.040±0.010	1.0
Μεγάλα ποτάμια	0.035±0.010	2.4
Πλημμυρικές Περιοχές	**n**	**ε [mm]**
Βοσκοτόπια, καλλιέργειες	0.035±0.010	2.4
Αραιή φυσική βλάστηση	0.050±0.020	3.7
Πυκνή φυσική βλάστηση	0.075±0.025	5.4
Δένδρα	0.150±0.050	37

1. Ένα κανάλι ορθογωνικής διατομής πλάτους 2.5 [m] με επιφάνεια από λείο τσιμέντο έχει κλίση 0.5° και βάθος ροής νερού 1.2 {m]. Να υπολογίσετε την παροχή της ομοιόμοφης ροής σε [m^3/s].
16.84 [m^3/s].

2. Ένα τραπεζοειδές κανάλι με επίστρωση από άσφαλτο μεταφέρει παροχή 8.5 [m^3/s] νερού σε συνθήκες ομοιόμορφης ροής. Η κλίση του καναλιού είναι S_o=0.0015. Να υπολογίσετε το κανονικό βάθος ροής.
1.949 [m].