

Κεφάλαιο 11

Μηχανική Φλεβών και Πλουμιών

Σύνοψη

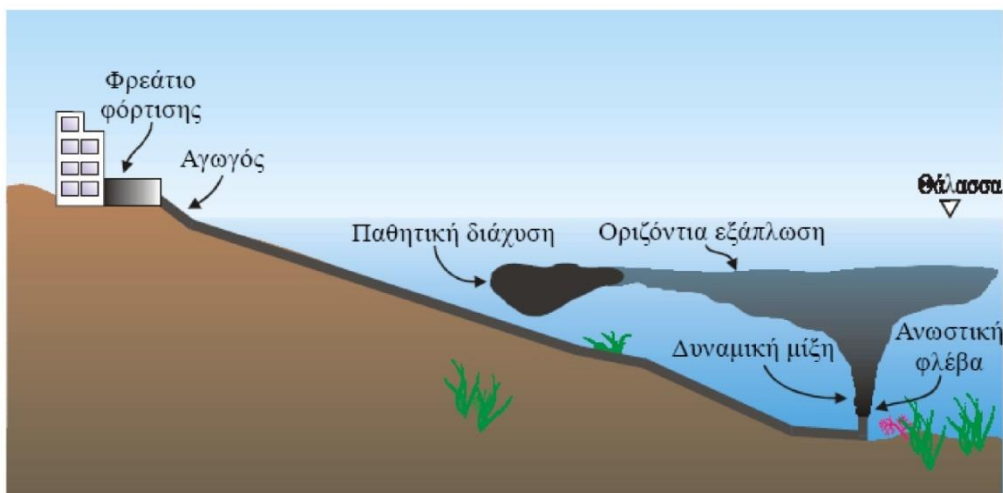
Διασύνδεση του παράκτιου υδροδυναμικού ομοιώματος με το ομοίωμα διασποράς ρύπων που εκρέουν από υποθαλάσσιο αγωγό. Εξηγούνται τα χαρακτηριστικά εκροής και ορίζεται η έννοια της φλέβας, του πλουμίου και της τυρβώδους ανωστικής φλέβας. Δίνονται οι εξισώσεις περιγραφής των χαρακτηριστικών της φλέβας (κυκλικής και επίπεδης) στο κοντινό και στο μακρινό πεδίο ροής. Δίνονται οι εξισώσεις περιγραφής της κατακόρυφης ταχύτητας και της κατανομής ρύπων εντός της φλέβας. Αντίστοιχα δίνονται οι εξισώσεις περιγραφής της κατανομής της κατακόρυφης ταχύτητας και της συγκέντρωσης ρύπων σε υποβρύχιο ανωστικό πλούμιο. Παρουσιάζεται κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab για την επίλυση των ομοιωμάτων διασποράς ρύπων από υποβρύχιες φλέβες και πλούμια.

11.1. Ορισμός υποβρύχιας φλέβας και πλουμίου

Πολλές παραθαλάσσιες πόλεις διοχετεύουν τα επεξεργασμένα ή ανεπεξέργαστα απόβλητά τους μέσω ενός υποβρύχιου αγωγού. Η μελέτη της μηχανικής διασποράς αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων μέσα στη θάλασσα παρουσιάζει ενδιαφέρον, καθώς αποτελεί το αναγκαίο υπόβαθρο για το μελετητή μηχανικό που αναζητεί απάντηση στα παρακάτω ερωτήματα:

- Πόσο μακριά από την ακτή πρέπει να γίνεται η διοχέτευση των λυμάτων στη θάλασσα, ώστε οι ακτές να μη μολύνονται και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κολύμβηση κ.λπ.
- Σε ποιο βάθος πρέπει να γίνει η εκροή των λυμάτων, και
- Ποιος είναι ο αναγκαίος βαθμός καθαρισμού των λυμάτων πριν τη διάθεσή τους στη θάλασσα.

Τα οικιακά λύματα και τα βιομηχανικά απόβλητα είναι συνήθως ελαφρύτερα του θαλασσινού νερού (το οποίο έχει πυκνότητα περίπου $1,025 \text{ gr/cm}^3$), γιατί η πυκνότητά τους είναι περίπου ίση με την πυκνότητα του γλυκού νερού (πυκνότητα περίπου $1,0 \text{ gr/cm}^3$), με αποτέλεσμα το λύμα να υφίσταται άνωση λόγω διαφοράς πυκνότητας από το θαλασσινό περιβάλλον του και να ανέρχεται στην επιφάνεια της θάλασσας. Η ροή που δημιουργείται ονομάζεται *φλέβα* (jet) όταν έχουμε εκροή ενός ρευστού από το στόμιο ενός διαχυτήρα σε έναν αποδέκτη παρόμοιου ρευστού ή *πλούμιο* (plume) όταν το εκρέον ρευστό διαθέτει θετική ή αρνητική άνωση σε σχέση με το περιβάλλον ρευστό (Εικόνα 11.1).



Εικόνα 11.1 Σχηματική παρουσίαση διεργασιών μείξης ανωστικής φλέβας λυμάτων.

Η συμπεριφορά μίας φλέβας ή ενός πλουμίου κατά την έξοδό τους από τον διαχυτήρα εξαρτάται από (Fischer et al., 1979):

- Τις παραμέτρους εκροής της φλέβας ή του πλουμίου,
- Τις επικρατούσες περιβαλλοντικές παραμέτρους και
- Τους σχεδιαστικούς γεωμετρικούς παράγοντες του διαχυτήρα.

Ειδικότερα,

A) Παράμετροι του εκρέοντος ρευστού:

- Πυκνότητα του εκρέοντος ρευστού ή $T, S \sim f(\rho)$
- Αρχική ταχύτητα εκρέοντος ρευστού
- Τυρβώδης διάχυση εκρέοντος ρευστού
- Αρχική συγκέντρωση ρύπων εκρέοντος ρευστού

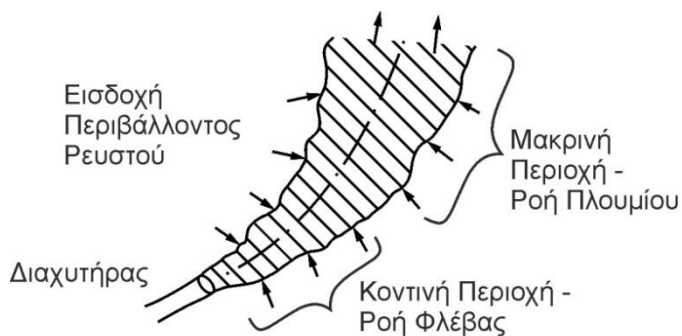
B) Παράμετροι περιβάλλοντος ρευστού:

- Ρεύματα θάλασσας ή λίμνης
- Στρωματοποίηση στήλης νερού θάλασσας ή λίμνης

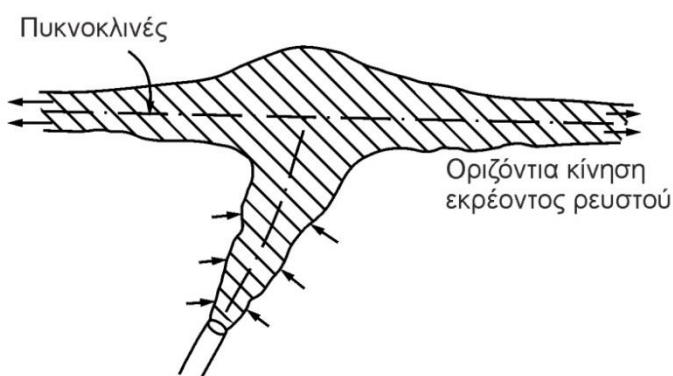
Γ) Γεωμετρικοί παράμετροι σχεδιασμού αγωγού:

- Σχήμα διαχυτήρα (Κυκλικό ή ορθογώνιο)
- Προσανατολισμός αγωγού ως προς τη διεύθυνση των θαλάσσιων ρευμάτων
- Εγγύτητα θαλασσιών ορίων

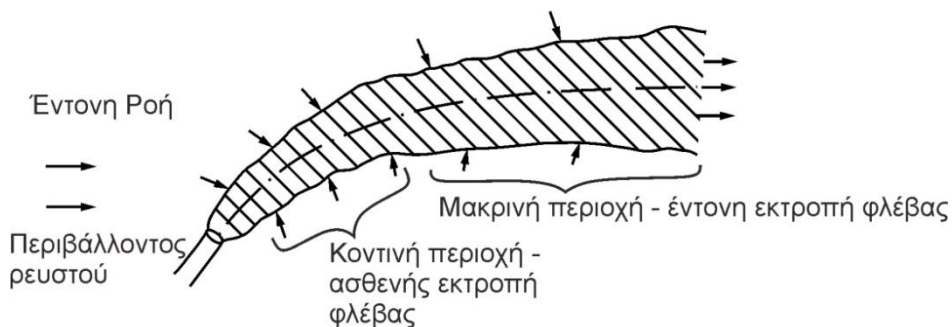
Η Εικόνα 11.2 παρουσιάζει τη συμπεριφορά μίας υποβρύχιας ανωστικής φλέβας (α) σε συνθήκες ομοιόμορφης κατανομής πυκνότητας του περιβάλλοντος ρευστού (συνήθως τον χειμώνα στην παράκτια θάλασσα ή στη λίμνη), (β) σε συνθήκες κατακόρυφα στρωματοποιημένης κατανομής πυκνότητας του περιβάλλοντος ρευστού (συνήθως το καλοκαίρι στην παράκτια θάλασσα ή στη λίμνη) και (γ) σε συνθήκες έντονης οριζόντιας ροής (έντονου παλιρροιακού ρεύματος σε παλίρροια υψηλού εύρους).



A) Ανωστική φλέβα σε ακίνητο ομοιόμορφο κατακόρυφα ρευστό



B) Ανωστική φλέβα σε στρωματοποιημένο κατακόρυφα περιβάλλον ρευστό



Γ) Ανωστική φλέβα σε ρευστό με κεντονο ρεύμα

Εικόνα 11.2 Ανωστική φλέβα υπό συνθήκες α) ομοιόμορφης πυκνότητας περιβάλλοντος ρευστού, β) στρωματοποιημένου περιβάλλοντος ρευστού και γ) σε ρευστό με έντονη οριζόντια ροή.

11.2. Βασικοί Ορισμοί

- Υποβρύχια Φλέβα (Jet)
Είναι η εκροή ρευστού από διαχυτήρα σε έναν αποδέκτη με ρευστό παρόμοιας πυκνότητας.

- Πλούμιο (Plume)
Είναι η εκροή ρευστού παρόμοια με της φλέβας, όμως το εκρέον ρευστό διαθέτει θετική ή αρνητική άνωση ως προς το περιβάλλον ρευστό. Στα πλούμια η αρχική ορμή, άρα και η αρχική ταχύτητα, θεωρούνται αμελητέες.
- Ανωστική Φλέβα (Buoyant Jet)
Είναι η εκροή ρευστού στην οποία υπάρχει διαφορά πυκνότητας μεταξύ του εκρέοντος και του περιβάλλοντος ρευστού και η αρχική ταχύτητα (ή ορμή) είναι σημαντική (Εικόνα 11.3).



Εικόνα 11.3 Ανωστική Φλέβα.

11.3. Χαρακτηριστικά Εκροής

Η παροχή του διατιθέμενου ρευστού χαρακτηρίζεται από τη *ροή ορμής* (momentum flux) και την *ανωστική ροή* (buoyancy flux).

Η ανωστική ροή οφείλεται στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του διατιθέμενου και του περιβάλλοντος ρευστού και αποτελεί ένα μέτρο της τάσης του για την άνοδο ή πτώση του.

Κατά την εκροή λυμάτων σε υδάτινο αποδέκτη, η διαδικασία ανάμειξης συμβαίνει σε δύο κύριες περιοχές (Lee & Chu, 2003):

1. στην «κοντινή» περιοχή (near-field area, NFA), όπου τα χαρακτηριστικά της ροής ορμής, της τυρβώδους ανωστικής ροής και της γεωμετρίας του αγωγού επηρεάζουν την «τροχιά» της ροής και τις διεργασίες μείξης. Ο κατάλληλος σχεδιασμός του διαχυτήρα επηρεάζει τη ροή και τη μείξη στην περιοχή αυτή.
2. στη «μακρινή» περιοχή (far-field area, FFA), όπου τα χαρακτηριστικά της ροής γίνονται λιγότερο σημαντικά και οι συνθήκες του περιβάλλοντος ρευστού επηρεάζουν τη ροή, την τροχιά κίνησης και την αραίωση.

Συνεπώς:

Near-field area → τυρβώδης ανάμειξη και ροή εκροής

Far-field area → παθητική άνωση και ροή άνωσης (Εικόνα 11.4).



Εικόνα 11.4 Φωτογραφία εκροής από διαχυτήρα όπου διακρίνονται η σταθερή NFA και η πιο δυναμικά μεταβαλλόμενη FFA.

Στην περιοχή NFA γίνεται η εκτόξευση του ρευστού από το διαχυτήρα, οπότε η ροή είναι έντονα τυρβώδης. Η τύρβη αυξάνει κατά μήκος του κύριου άξονα της ροής. Λόγω της τύρβης το περιβάλλον ρευστό εισέρχεται στη ροή και αυξάνει την ανάμειξη, προκαλώντας μείωση των συγκεντρώσεων των ρύπων μέσω της αραίωσης.

- Αν η εκροή είναι καθαρή υποβρύχια φλέβα, τότε προκύπτει υψηλή τυρβώδης ανάμειξη λόγω της υψηλής αρχικής ορμής, δηλαδή της υψηλής ταχύτητας εκροής.
- Αν η εκροή είναι πλούμιο, τότε προκύπτει υψηλή τυρβώδης ανάμειξη λόγω της αρχικής ανωστικής ορμής.
- Αν η εκροή είναι ανωστική φλέβα, τότε προκύπτει τυρβώδης ανάμειξης λόγω της υψηλής αρχικής ορμής και της ανωστικής ροής.

11.4. Φυσικά Μεγέθη Προσδιορισμού της Ροής

Ας θεωρήσουμε την περίπτωση της Εικόνα 11.1, όπου από μια κυκλική οπή διαμέτρου D εκρέει συνεχώς ρευστό πυκνότητας ρ_0 με ομοιόμορφη ταχύτητα U_0 και συγκέντρωση ρυπαντών C_0 μέσα σε ένα σχεδόν ακίνητο περιβάλλον ρευστό πυκνότητας ρ_a (ή ρ_a , ambient density), που έχει ήδη συγκέντρωση ρυπαντών C_a .

Υποθέτουμε ότι $\rho_0 < \rho_a$, δηλαδή ότι το ρευστό εκροής είναι ελαφρύτερο του περιβάλλοντος ρευστού, άρα υφίσταται *άνωση* (buoyancy). Τότε (Turner, 1973):

[1] Η ροή μάζας της φλέβας, δηλαδή η ποσότητα μάζας που διέρχεται από μία διατομή της ανά μονάδα χρόνου ορίζεται ως:

$$\rho m = \int_A \rho w dA \quad (11.1)$$

[2] Η ροή ορμής της φλέβας, δηλαδή η ποσότητα της ορμής που διέρχεται από μία διατομή της ανά μονάδα χρόνου ορίζεται ως:

$$\rho m = \int_A \rho w^2 dA \quad (11.2)$$

[3] Η ροή άνωσης της φλέβας, δηλαδή το ανωστικό βάρος του ρευστού που διέρχεται από μία διατομή της ανά μονάδα χρόνου ορίζεται ως:

$$\rho\beta = \int_A g \Delta\rho w dA \quad (11.3)$$

όπου A το εμβαδόν της διατομής, w η κατακόρυφη ταχύτητα της φλέβας, μ ο συντελεστής ειδικής ροής μάζας ή ροής όγκου της φλέβας [L^4/T^2], m ο συντελεστής ειδικής ροής ορμής [L^3/T], $\Delta\rho$ η διαφορά πυκνότητας μεταξύ του ρευστού της φλέβας και του περιβάλλοντος ρευστού και β ο συντελεστής ειδικής ανωστικής ροής [L^4/T^3].

Προκύπτει ότι:

$$\mu = \int_A w dA \quad (11.4)$$

$$m = \int_A w^2 dA \quad (11.5)$$

$$\beta = \int_A g \frac{\Delta\rho}{\rho} w dA \quad (11.6)$$

Από τα παραπάνω έχουμε τις εξής τρεις περιπτώσεις:

- Αν οι πυκνότητες του ρευστού εκροής και του περιβάλλοντος ρευστού είναι ίσες, δηλαδή ο συντελεστής ειδικής ανωστικής ροής $\beta = 0$, τότε έχουμε εκροή τύπου υποβρύχιας φλέβας.
- Αν ο συντελεστής ροής ορμής (m) είναι αμελητέος και υπάρχει σημαντική διαφορά πυκνότητας μεταξύ του εκρέοντος και του περιβάλλοντος ρευστού, δηλαδή ο συντελεστής β είναι σημαντικό, τότε έχουμε εκροή τύπου πλουμίου.
- Αν ο συντελεστής ροής ορμής (m) είναι σημαντικός και υπάρχει σημαντική διαφορά πυκνότητας μεταξύ του εκρέοντος και του περιβάλλοντος ρευστού, δηλαδή ο συντελεστής β είναι σημαντικός, τότε έχουμε εκροή τύπου ανωστικής φλέβας.

11.5. Πυκνομετρικοί Αριθμοί Froude και Richardson

Ορίζουμε τον αδιάστατο πυκνομετρικό αριθμό Froude ως

$$F_o = \frac{W_o}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gD}} \quad (11.7)$$

όπου:

W_o είναι η αρχική ταχύτητα εκροής (στο στόμιο του διαχυτήρα),

ρ_o, ρ_a είναι οι πυκνότητες εκρέοντος και περιβάλλοντος ρευστού αντίστοιχα,

D είναι η διάμετρος της οπής του διαχυτήρα.

Ο πυκνομετρικός αριθμός Froude εκφράζει το πηλίκο των δυνάμεων αρχικής ορμής προς τις υπάρχουσες ανωστικές δυνάμεις.

Όμοια ορίζουμε τον αριθμό Richardson ως:

$$R_o = \frac{\mu_o^2 \beta_o}{m_o^{5/2}} = \frac{(\rho_a - \rho_o) g D}{\rho_o W_o^2} \left(\frac{\pi}{4} \right)^{1/4} = \frac{0.866}{F_o^2} \quad (11.8)$$

Επομένως:

- Αν $\rho_a = \rho_o$ τότε η εκροή είναι υποβρύχια φλέβα, οπότε το $F_o \rightarrow \infty$ και $R_o = 0$.
- Αν $\rho_a - \rho_o \neq 0$ και W_o αμελητέα, τότε η εκροή είναι πλούμιο ($F_o < 15$).
- Αν $\rho_a - \rho_o \neq 0$ και W_o σημαντική, τότε η εκροή είναι ανωστική φλέβα ($F_o \rightarrow \infty$ και $R_o = 15$).

11.6. Η Απλή Κυκλική Φλέβα

Παρακάτω θα χρησιμοποιούμε τα σύμβολα Q, M και B για να ορίσουμε τις αρχικές τιμές της ροής όγκου, της ειδικής ροής ορμής και της ειδικής ανωστικής ροής, αντίστοιχα. Για μία απλή κυκλική φλέβα:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{4} \pi D^2 W \\ M &= \frac{1}{4} \pi D^2 W^2 = QW \\ B &= g \left(\frac{\Delta \rho_o}{\rho} \right) Q = g'_o Q \end{aligned} \quad (11.9)$$

όπου D είναι η διάμετρος της φλέβας και W η μέση ταχύτητα εκροής θεωρούμενη ως σταθερή σε ολόκληρη την πορεία της φλέβας και g'_o είναι η αρχική φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας.

Οι διαστάσεις των τριών παραπάνω παραμέτρων είναι:

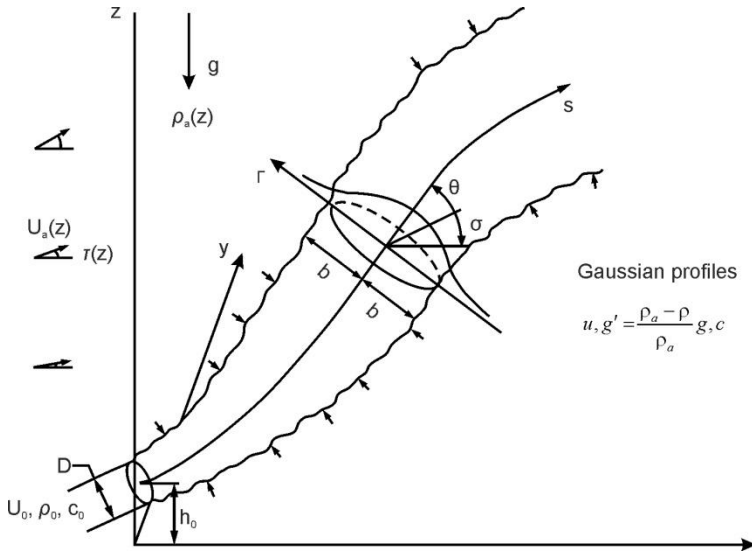
$$[Q] = L^3 / T, \quad [M] = L^4 / T^2, \quad [B] = L^4 / T^3$$

όπου L το μήκος και T ο χρόνος.

Η απλούστερη περίπτωση που μπορούμε να θεωρήσουμε είναι αυτή της εκροής ρευστού από ένα στρογγυλό στόμιο σε ένα ρευστό όμοιας πυκνότητας. Άρα έχουμε την εκροή μίας υποβρύχιας φλέβας. Η συγκέντρωση του εκρέοντος ρύπου ακολουθεί την κανονική κατανομή (Gauss) (Εικόνα 11.5), η οποία ορίζεται ως:

$$C = C_m \exp[-k(x/z)^2] \quad (11.10)$$

όπου το m αναφέρεται στην τιμή του C κατά μήκος του άξονα της φλέβας, z η απόσταση κατά μήκος του άξονα και x η ακτινική απόσταση εγκάρσια στον άξονα της φλέβας.



Εικόνα 11.5 Εκροή από διαχυτήρα με την κεντρική γραμμή (*centerline*) και την κατανομή Gauss συγκέντρωσης ρύπου.

Αντίστοιχα, η μέση κατανομή της ταχύτητας σε μία φλέβα δίνεται:

$$w = w_m f(x/b_w) \tag{11.11}$$

όπου το m αναφέρεται στην τιμή της συγκέντρωσης ρύπου C κατά μήκος του άξονα της φλέβας, x η ακτινική απόσταση εγκάρσια στον άξονα της φλέβας και b_w η τιμή του x στην οποία η ταχύτητα w είναι ίση με το $0.37 w_m$ (συνήθως $0.37 = e^{-1}$). Η μορφή της συνάρτησης f είναι η γνωστή κατανομή Gauss, οπότε:

$$\begin{aligned} C &= C_m \exp\left[-(x/b_T)^2\right] \\ w &= w_m \exp\left[-(x/b)^2\right] \end{aligned} \tag{11.12}$$

όπου b , b_T είναι οι τιμές της απόστασης x στις οποίες η ταχύτητα w και η συγκέντρωση C παίρνουν τιμές ίσες με $0.37w_m$ και $0.37C_m$ αντίστοιχα.

Για μία απλή τυρβώδη κυκλική φλέβα μπορούμε να ορίσουμε μία χαρακτηριστική κλίμακα μήκους ως συνάρτηση της ροής όγκου Q και της ροής ορμής M ως:

$$l_Q = Q / M^{1/2} = \sqrt{A} \tag{11.13}$$

όπου A το αρχικό εμβαδόν διατομής της φλέβας. Για κυκλική φλέβα αυτό γράφεται:

$$l_Q = D \sqrt{\pi} / 4 \tag{11.14}$$

Αντίθετα, για μία επίπεδη (δισδιάστατη) φλέβα, η κλίμακα μήκους ορίζεται:

$$l_Q = Q^2 / M = w \tag{11.15}$$

όπου w το πλάτος της δισδιάστατης ορθογώνιας διατομής.

Οι κύριες ιδιότητες μίας τυρβώδους φλέβας δίνονται στον Πίνακα 1.

Παράμετρος	Κυκλική Φλέβα	Επίπεδη Φλέβα
Αρχική Ροή Όγκου, Q	Διαστάσεις [L ³ T ⁻¹]	Διαστάσεις [L ² T ⁻¹]
Αρχική Ροή Ορμής, M	Διαστάσεις [L ⁴ T ⁻²]	Διαστάσεις [L ³ T ⁻²]
Χαρακτηριστικό Μήκος, l _Q	= Q/M ^{1/2}	= Q ² /M
Μέγιστη κατακόρυφη ταχύτητα, w _m	$w_m \frac{Q}{M} = (7.0 \pm 0.1) l_Q / z$	$w_m \frac{Q}{M} = (2.41 \pm 0.04) \left(\frac{l_Q}{z} \right)^{1/2}$
Μέγιστη συγκέντρωση ρύπου, C _m	$\frac{C_m}{C_o} = (5.6 \pm 0.1) \left(\frac{l_Q}{z} \right)$	$\frac{C_m}{C_o} = (2.38 \pm 0.04) \left(\frac{l_Q}{z} \right)^{1/2}$
Μέση διάλυση, μ/Q	$\frac{\mu}{Q} = (0.25 \pm 0.01) \left(\frac{z}{l_Q} \right)$	$\frac{\mu}{Q} = (0.50 \pm 0.02) \left(\frac{z}{l_Q} \right)^{1/2}$
Μέση ταχύτητα κατά μήκος του άξονα w _m (z)	= 2.41 $\sqrt{\frac{M}{z}}$	= $\frac{7}{z} \sqrt{M}$

Πίνακας 11.1 Κύριες Ιδιότητες Τυρβωδών Φλεβών.

Άσκηση 11.1

Έστω τυρβώδης φλέβα παροχής 1 m³/s με ταχύτητα εκροής 3 m/s σε ρευστό με όμοια πυκνότητα. Να βρεθεί εντός της φλέβας η μέγιστη ταχύτητα ροής, η μέγιστη συγκέντρωση του ρύπου και η μέση διάλυση σε απόσταση 60 μ από την οπή εκροής. Η αρχική συγκέντρωση του ρύπου είναι 1 kg/m³.

Λύση

Έστω ότι, Q = 1 m³/s, M = 3 m⁴/s² και l_Q = Q/M^{1/2} = 0.58 m.

Άρα, σε απόσταση 60 μ ο λόγος z/l_Q = 60/0.58 = 103.4

Η μέγιστη κατακόρυφη ταχύτητα είναι:

$$w_m \frac{Q}{M} = (7.0 \pm 0.1) l_Q / z \Rightarrow w_m = \frac{7}{103.4} \frac{M}{Q} = 0.20 \text{ m/s}$$

Επίσης, η μέγιστη συγκέντρωση ρύπου:

$$\frac{C_m}{C_o} = (5.6 \pm 0.1) \left(\frac{l_Q}{z} \right) \Rightarrow C_m = C_o \frac{5.6}{103.4} = 10^3 \times 0.054 = 5.4 \text{ ppm}$$

Τέλος, η μέση διάλυση είναι:

$$\frac{\mu}{Q} = (0.25 \pm 0.01) \left(\frac{z}{l_Q} \right) = 0.25 \times 103.4 = 25.85$$

11.7. Το Απλό Πλούμιο

Στο απλό πλούμιο η ανάλυση είναι ευκολότερη από αυτήν της φλέβας, καθώς δεν υπάρχει αρχική ροή όγκου ή ορμής, παρά μόνο η ανωστική ροή B. Η κατακόρυφη ταχύτητα στο εσωτερικό του πλουμίου εξαρτάται από:

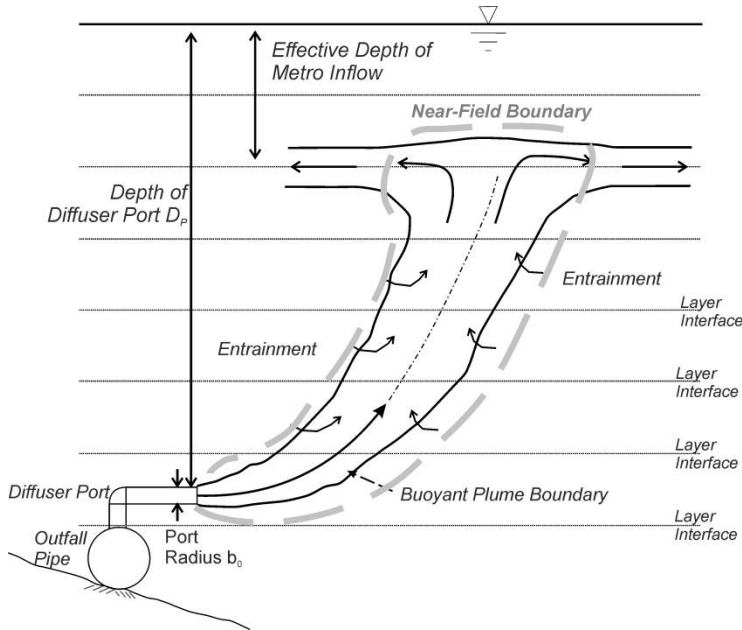
- Τη ροή άνωσης B,

- Την κατακόρυφη απόσταση από το στόμιο της εκροής z και
- Το ιξώδες του ρευστού ν .

Συνεπώς,

$$w_m = f(B, z, \nu)$$

(11.16)



Εικόνα 11.6 Εκροή τύπου ανωστικού πλουμίου που εξισορροπείται σε συγκεκριμένη απόσταση από το διαχυτήρα, καθώς οι πυκνότητα εκροής και η πυκνότητα περιβάλλοντος ρευστού εξισώνονται.

Για τα κυκλικής διατομής πλούμια, οι παραπάνω παράμετροι συνδυάζονται και ισχύει ότι:

$$w_m (z / B)^{1/3} = f(B^{1/3} z^{2/3} / \nu)$$

(12.17)

Όπου η συνάρτηση στο δεξί μέλος αποτελεί μία μορφή του Reynolds number.

Παράμετρος	Κυκλικό Πλούμιο	Επίπεδο Πλούμιο
Αρχική Ροή Άνωσης, B	Διαστάσεις [$L^4 T^{-3}$]	Διαστάσεις [$L^3 T^{-3}$]
Μέγιστη κατακόρυφη ταχύτητα, w_m	$w_m = (4.7 \pm 0.2) B^{1/3} z^{-1/3}$	$w_m = 1.66 B^{1/3}$
Μέγιστη συγκέντρωση ρύπου, C_m	$C_m = (9.1 \pm 0.5) Y B^{-1/3} z^{-5/3}$	$C_m = 2.38 Y B^{-1/3} z^{-1}$
Ροή Όγκου, μ	$\mu = (0.15 \pm 0.015) B^{1/3} z^{5/3}$	$\mu = 0.34 B^{1/3} z$

Πίνακας 11.2 Κύριες Ιδιότητες Πλουμίου.

Όπου Y η ροή μάζας του ρύπου συγκέντρωσης C .

Άσκηση 11.2

Κυκλική εκροή γλυκού νερού παροχής $1 \text{ m}^3/\text{s}$ θα τοποθετηθεί σε βάθος 70 m στη παράκτια θάλασσα. Η εκροή έχει θερμοκρασία 17.8°C και η θάλασσα θεωρείται καλά αναμεμιγμένη με $T = 11.1^\circ\text{C}$ και $S = 32.5 \text{ psu}$. Να βρεθούν: Α) η μέγιστη συγκέντρωση ρύπου και Β) η διάλυση του ρύπου 10 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας αν η αρχική συγκέντρωση του ρύπου είναι $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ ή 10^3 ppm .

Λύση

Η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού για τις συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και αλατότητας είναι:

$$\rho_w(T = 11,1^\circ\text{C} \ \& \ S = 32,5 \text{ psu}) = 1024,8 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Η πυκνότητα του εκρεόμενου ρευστού για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι:

$$\rho_{\text{eff}}(T = 17,8^\circ\text{C}) = 998,6 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Η διαφορά πυκνότητας εκρεόμενου ρευστού και περιβάλλοντος είναι:

$$\Delta\rho_o = 26,2 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Η φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας λόγω άνωσης είναι:

$$g'_o = g \frac{\Delta\rho_o}{\rho} = 9.81 \frac{26.1}{998.6} = 0.257 \text{ m} / \text{s}^2$$

Η ροή άνωσης του εκρεόμενου ρευστού είναι:

$$B = g'_o Q = 0.257 \text{ m}^4 / \text{s}^3$$

Η ροή μάζας του ρύπου είναι:

$$Y = Q C_o = 1 \text{ kg} / \text{s}$$

Τέλος η συγκέντρωση του ρύπου σε απόσταση 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας, δηλ. 60 m από τον διαχυτήρα είναι:

$$\begin{aligned} C_m &= (9.1 \pm 0.5) Y B^{-1/3} z^{-5/3} = 9.1 \times 1 \text{ kg} / \text{s} \times (0.257 \text{ m}^4 / \text{s}^3)^{-1/3} (60 \text{ m})^{-5/3} = \\ &= 0.0156 \text{ kg} / \text{m}^3 = 16 \text{ ppm} \end{aligned}$$

Η ροή όγκου του πλουμίου είναι:

$$\mu = (0.15 \pm 0.015) B^{1/3} z^{5/3} = 87.7 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Και η μέση διάλυση μ/Q είναι

$$\mu / Q = 87.7$$

Βιβλιογραφία

- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C., Imberger, J., & Brooks, N. H. (1979).** *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press.
- Lee, J. H.-w., & Chu, V. H. (2003).** *Turbulent Jets and Plumes: A Lagrangian Approach* (Vol. 1): Springer Science & Business Media.
- Turner, J. (1973).** *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge Monographs on Mechanics and Applied Mathematics.