

# **Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης (συναρμογές, προβλήματα μεγάλων και μικρών ταχυτήτων)**

Δημήτρης Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών & Θαλάσσιων Έργων  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

# Προβλήματα συναρμογών

- ◆ Σε ποιες περιπτώσεις χρειάζεται συναρμογή;
  - Αλλαγή διεύθυνσης
  - Αλλαγή κλίσης
  - Αλλαγή διαμέτρου
  - (Απότομη) αλλαγή υψομέτρου
  - Συμβολή
- ◆ Πως κατασκευάζεται μια τυπική συναρμογή;
  - Μέσα σε φρεάτιο επίσκεψης, με χυτό σκυρόδεμα (εξαίρεση: επισκέψιμες διατομές)
  - Πρακτικός κανόνας: Μεταξύ δύο φρεατίων υπάρχει ευθυγραμμία με σταθερά χαρακτηριστικά αγωγού (εξαίρεση: επισκέψιμες διατομές)
- ◆ Ποιοι είναι οι κύριοι τύποι των φρεατίων επίσκεψης
  - Σχήμα κάτοψης: Κυκλικά, ορθογωνικά, πρισματικά
  - Σχήμα κατακόρυφης τομής: Με ή χωρίς λαιμό
  - Σχήμα κατακόρυφης τομής κυκλικών φρεατίων: Με ή χωρίς κολουροκωνικό τμήμα
  - Τοπολογία αγωγών: Απλά φρεάτια επίσκεψης ή φρεάτια συμβολής
  - Υψομετρική τοποθέτηση αγωγών: Απλά φρεάτια επίσκεψης ή φρεάτια πτώσης
  - Ύπαρξη ειδικών μηχανισμών: Απλά φρεάτια επίσκεψης ή φρεάτια πλύσης

## Προβλήματα συναρμογών 2

- ◆ Εκτός των θέσεων συναρμογής, σε ποιες άλλες θέσεις τοποθετούνται φρεάτια επίσκεψης;
  - Αρχή αγωγού
  - Σε ευθυγραμμίες αγωγών σε τρόπο ώστε το μήκος ανάμεσα σε δύο φρεάτια επίσκεψης να μην υπερβαίνει τα 60-100 m για αγωγούς ακαθάρτων και τα 100-150 m για αγωγούς ομβρίων

# Προβλήματα συναρμογών 3

## ◆ Πως υπολογίζονται οι τοπικές απώλειες στις συναρμογές;

- Πρακτικός τρόπος: αύξηση του συντελεστή τραχύτητας ( $n = 0.015$ )
- Λεπτομερής τρόπος: ( $n = 0.013$ )

✿ Αύξηση ταχύτητας προς τα κατόντη:

$$h_{\tau} = k_c \left( \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

✿ Μείωση ταχύτητας προς τα κατόντη:

$$h_{\tau} = k_e \left( \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

✿ Στροφές αγωγού

$$h_{\tau} = k_b \frac{V^2}{2g}$$

✿ Συμβολές (για συμβολή του δευτερεύοντα αγωγού 3 στον κύριο αγωγό 1-2)

$$h_{\tau} = k_j \frac{V_1^2}{2g}$$

όπου

$$k_j = 0.5 \left( Q_3 / Q_1 \right)^{0.7}$$

# Προβλήματα συναρμογών 4

## ◆ Πώς τοποθετούνται υψομετρικά οι αγωγοί σε θέσεις αλλαγής διαμέτρου;

- Πρακτικοί κανόνες:
  - ✿ Δεν επιτρέπεται η μείωση διαμέτρων προς τα κατάντη
  - ✿ Ταύτιση αντύγων (ή σημείων  $0.8 D$ )
- Αναλυτικός υπολογισμός
  - ✿ Ομοιόμορφη ροή ανάντη και κατάντη

- ✿ 
$$\Delta z = \left( y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left( y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) + h_\tau$$

- ✿ 
$$\Delta z \geq 0$$

# Προβλήματα συναρμογών 5

## ◆ Εφαρμογή 4.14.α

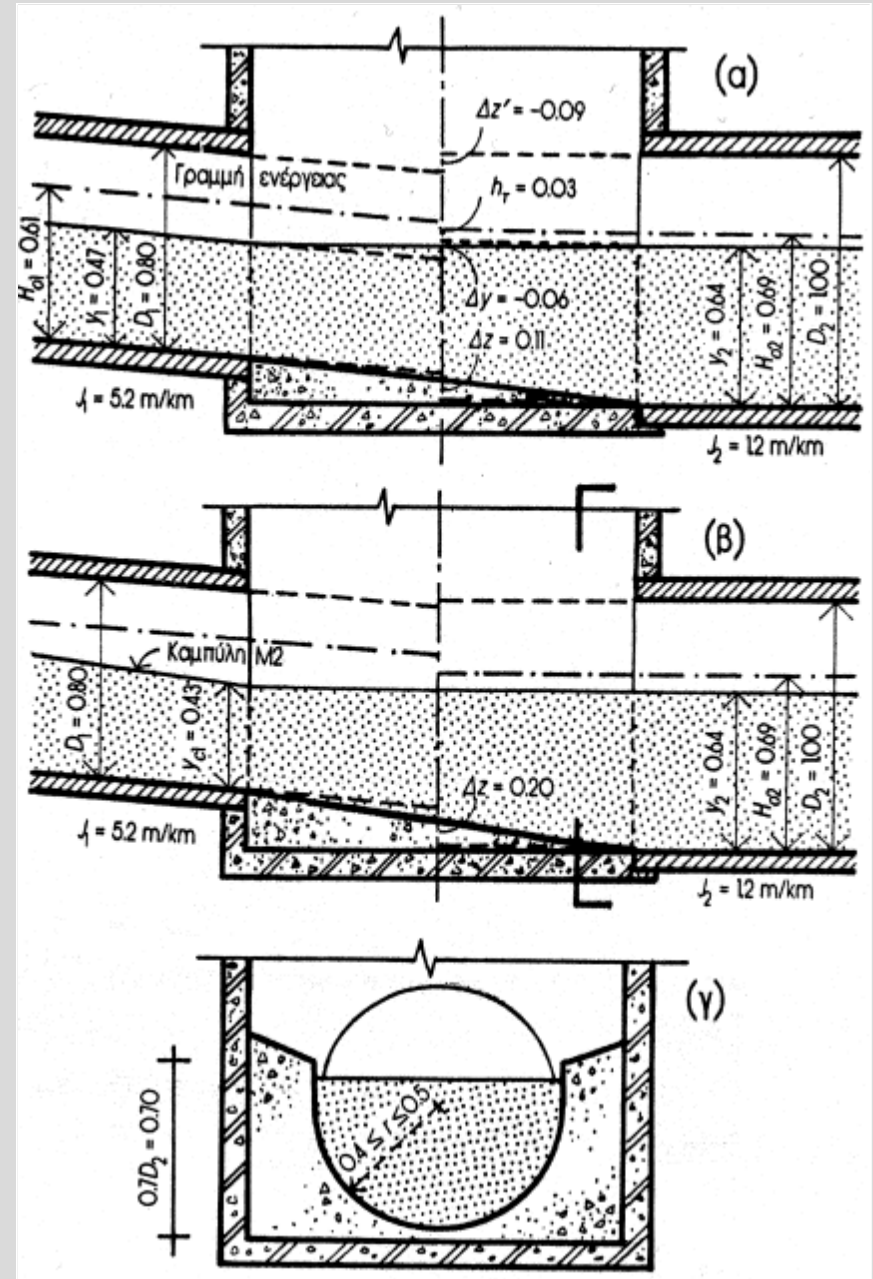
- Να σχεδιαστεί συναρμογή αγωγού ακαθάρτων με παροχή σχεδιασμού 500 L/s για μετάβαση από κλίση 5.2 m/km (ανάντη) σε κλίση 1.2 m/km (κατάντη)

## ◆ Εφαρμογή 4.14.β

- Τι θα συνέβαινε αν δεν διαμορφώνονταν καμιά πτώση στον πυθμένα του αγωγού;

## ◆ Εφαρμογή 4.14.γ

- Τι θα συνέβαινε αν η διαδοχή κλίσεων ήταν η αντίστροφη (κλίση ανάντη 1.2 m/km και κατάντη 5 m/km).



# Προβλήματα μεγάλων ταχυτήτων - υπερκρίσιμων ροών

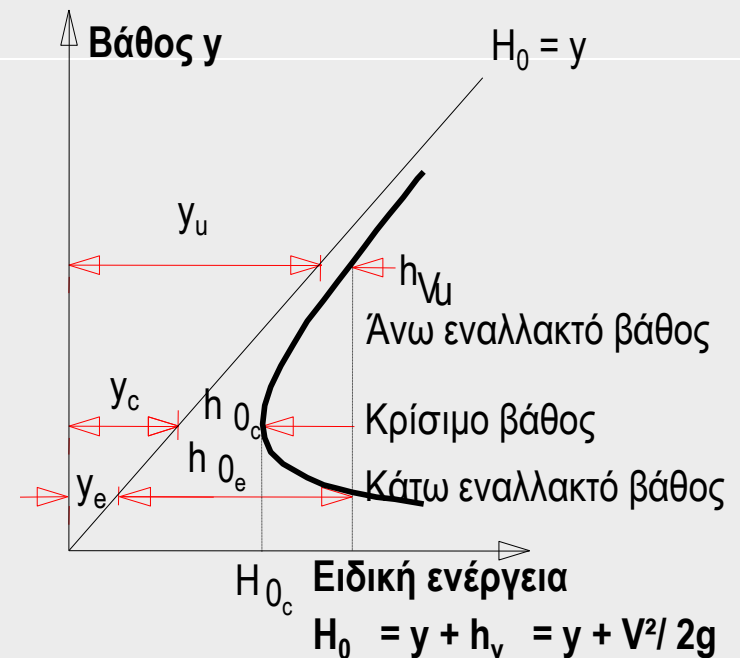
- ◆ Ποια προβλήματα είναι πιθανό να εμφανιστούν στο δίκτυο όταν έχουμε μεγάλη ταχύτητα;
  - Διάβρωση τοιχωμάτων αγωγών και φρεατίων.
  - Μεγάλο ύψος κινητικής ενέργειας  $\Rightarrow$  Πιθανότητα γραμμής ενέργειας πάνω από το οδόστρωμα  $\Rightarrow$  Πιθανή έξοδος λυμάτων στο δρόμο ή στα υπόγεια.
  - Σε περίπτωση υπερκρίσιμης ροής  $\Rightarrow$  Πιθανή εμφάνιση υδραυλικών αλμάτων, ασταθειών ροής, στάσιμων κυμάτων (μη προβλέψιμες συνθήκες ροής).
- ◆ Πώς μπορούμε να μειώσουμε την ταχύτητα ροής κατά τη διαστασιολόγηση ενός αγωγού
  - Με μείωση της κλίσης του αγωγού (+ φρεάτια πτώσης).
- ◆ Εφαρμογή 4.10
  - Να διαστασιολογηθεί αγωγός ακαθάρτων για παροχή  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  και κλίση 5%.
  - Αρχική λύση:  $D = 80 \text{ cm}$ ,  $y/D = 0.62 < 0.70$ ,  $V = 4.64 \text{ m/s}$
  - Τελική λύση με μείωση της ταχύτητας στα  $3 \text{ m/s}$ , η οποία επιτυγχάνεται με μείωση της κλίσης και κατασκευή φρεατίων πτώσης:  $J = 1.65\%$ ,  $D = 100 \text{ cm}$ ,  $y/D = 0.608 < 0.70$ ,  $V = 3.00 \text{ m/s}$ .

# Προβλήματα μεγάλων ταχυτήτων - υπερκρίσιμων ροών 2

- ◆ Ποια είναι η βασική ποιοτική διαφορά μεταξύ της υποκρίσιμης και της υπερκρίσιμης ροής;
  - Στην υποκρίσιμη ροή οι διαταραχές μεταδίδονται και προς τα ανάντη και προς τα κατόντη ( $\Rightarrow$  βαθμιαία προσαρμογή της ροής στα ανάντη) ενώ στην υπερκρίσιμη μεταδίδονται μόνο προς τα κατόντη.

- ◆ Πώς ορίζεται το κρίσιμο βάθος;
  - Είναι το βάθος ροής που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ειδική ενέργεια της ροής για δεδομένη γεωμετρία διατομής και παροχή. Γενικά υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\frac{Q^2 B_c}{g A_c^3} = 1$$





# Προβλήματα μεγάλων ταχυτήτων - υπερκρίσιμων ροών 3

- ◆ Πως υπολογίζεται το κρίσιμο βάθος σε κυκλικές διατομές;

Προσεγγιστική σχέση:

$$\frac{y_c}{D} = \begin{cases} \left(1 - \sqrt{1 - 0.767\xi^{0.247}}\right) / 2 & (\xi < 0.001) \\ 0.207\xi^{0.255} & (0.001 \leq \xi \leq 300) \\ \left(1 + \sqrt{1 - 190/\xi^{1.69}}\right) / 2 & (\xi > 300) \end{cases}$$

όπου

$$\xi = (512Q^2) / (gD^5)$$

- ◆ Ποιες είναι οι βασικές διαφορές στα χαρακτηριστικά μεταξύ της υποκρίσιμης και της υπερκρίσιμης ροής;

Τύπος ροής	Υποκρίσιμη	Κρίσιμη	Υπερκρίσιμη
Βάθος ροής, $y$	$> y_c$	$= y_c$	$< y_c$
Ταχύτητα ροής, $V$	$< V_c$	$= V_c$	$> V_c$
Αριθμός Froude, $Fr = V / \sqrt{gym}$	$< 1$	$= 1$	$> 1$
Κλίση	$< J_c$	$= J_c$	$> J_c$

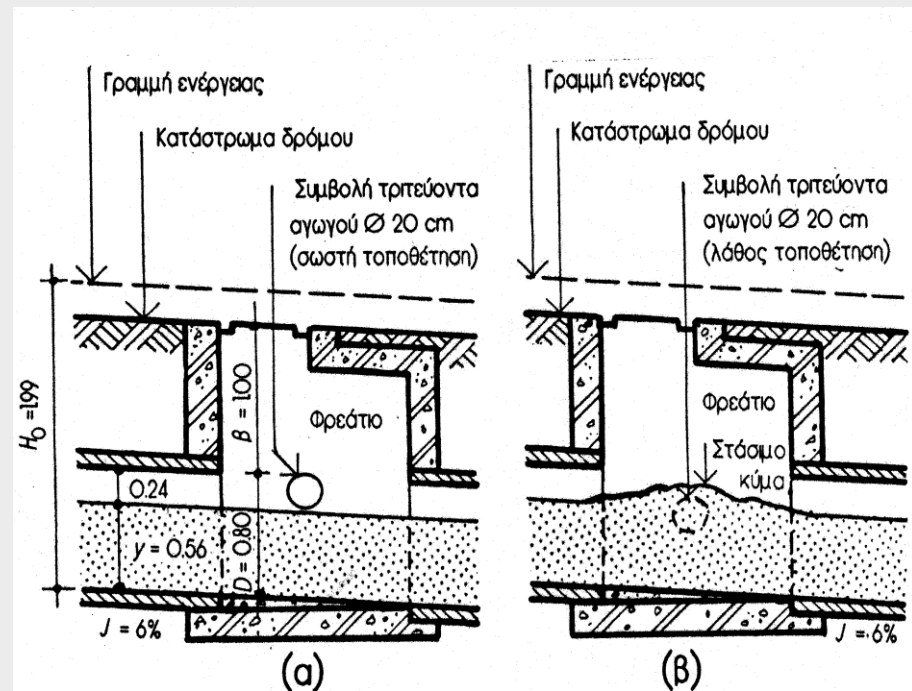
# Προβλήματα μεγάλων ταχυτήτων - υπερκρίσιμων ροών 4

## ◆ Εφαρμογή 4.15

- Αγωγός ακαθάρτων διαμέτρου 80 cm με κλίση 6% μεταφέρει παροχή 2.00 m<sup>3</sup>/s. Ζητούνται τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ομοιόμορφης και της κρίσιμης ροής.
  - ✦ Ομοιόμορφη ροή:  $y = 0.56$  m,  $y/D = 0.70$ ,  $V = 5.3$  m/s,  $H_0 = 1.99$  m,  $y_m = 0.51$  m,  $Fr = 2.37 > 1$ .
  - ✦ Κρίσιμη ροή:  $y_c = 0.77$  m,  $V_c = 4.03$  m,  $J_c = 2.83\%$ .

## ◆ Εφαρμογή 4.16

- Ποια προβλήματα μπορεί να υπάρξουν στον αγωγό της εφαρμογής 4.15;



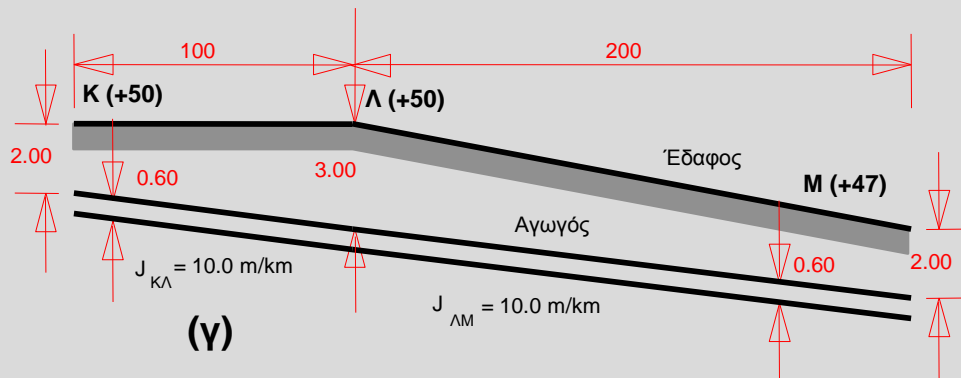
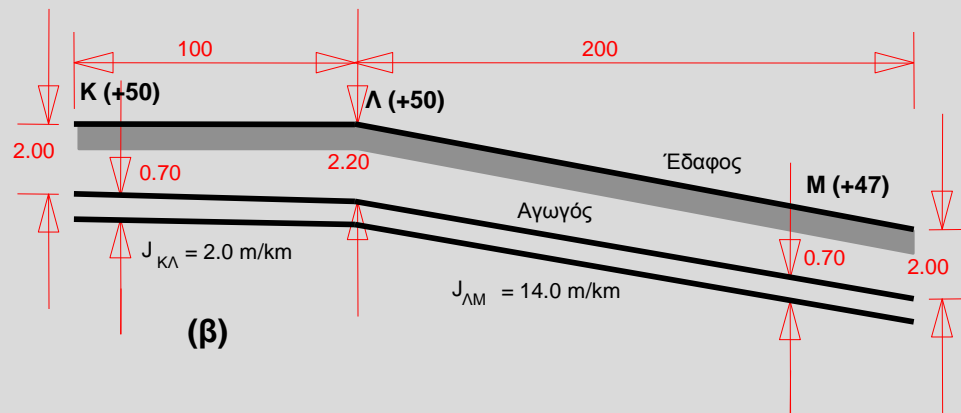
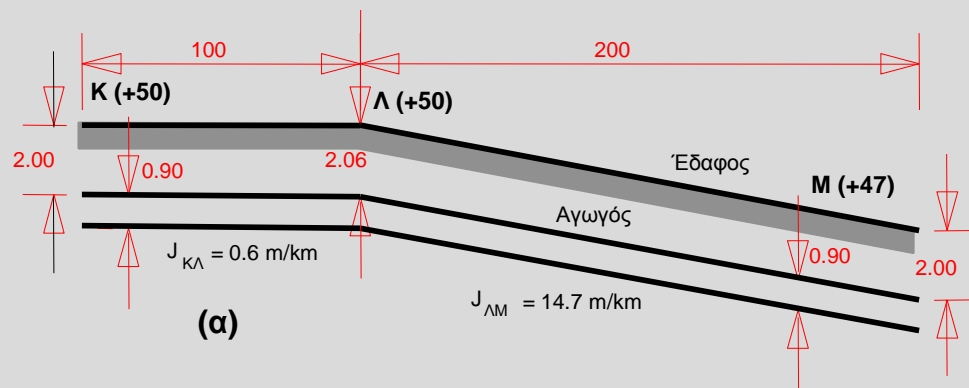
# Προβλήματα μικρών ταχυτήτων

- ◆ Ποια προβλήματα είναι πιθανό να εμφανιστούν στο δίκτυο όταν έχουμε πολύ μικρή ταχύτητα;
  - Αποθέσεις φερτών στους αγωγούς και τα φρεάτια.
  - Κακός αερισμός των λυμάτων  $\Rightarrow$  Δημιουργία αναερόβιων συνθηκών  $\Rightarrow$  Πιθανότητα παραγωγής υδροθείου  $\Rightarrow$  Πιθανή διάβρωση των τοιχωμάτων αγωγών και φρεατίων.
- ◆ Πώς μπορούμε να αυξήσουμε την ταχύτητα ροής κατά τη διαστασιολόγηση ενός αγωγού;
  - Με αύξηση της κλίσης του αγωγού.
- ◆ Πώς αντιμετωπίζονται πολύ μικρές ταχύτητες στα πλέον ανάντη τμήματα τριτευόντων αγωγών;
  - Με κατασκευή φρεατίων πλύσης

# Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 2

## ◆ Εφαρμογή 4.12.β

- Η χάραξη κεντρικού συλλεκτήρα ακαθάρτων περνάει από τα σημεία Κ, Λ, και Μ με αποστάσεις  $(ΚΛ) = 100$  m και  $(ΛΜ) = 200$  m και υψόμετρα εδάφους  $z_K = z_Λ = +50$  m και  $z_M = +47$  m. Η παροχή σχεδιασμού του αγωγού είναι 250 L/s, ενιαία για όλο το μήκος ΚΛΜ. Η διάμετρος του αγωγού ανάντη του Κ είναι 60 cm. Το ελάχιστο βάθος είναι 2 m, μετρούμενο από την άντυγα του αγωγού. Ζητείται η διαστασιολόγηση και σκαρίφημα της μηκοτομής του αγωγού. Ο συντελεστής τραχύτητας  $n$  είναι 0.015.



# Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 3

## ◆ Πως υπολογίζεται η ταχύτητα αυτοκαθαρισμού;

- **Κρίσιμη συρτική τάση:**  $\tau_{mc} = \beta g (\rho_s - \rho) d_s$

όπου  $d_s$  η χαρακτηριστική διάσταση του κόκκου,  $\rho_s$  η πυκνότητά του,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $g$  η επιτάχυνση βαρύτητας και  $\beta$  χαρακτηριστική αδιάστατη παράμετρος του Shields, με τιμή 0.06 για συνθήκες πλήρως τραχείας ροής (δηλαδή για  $Re^* > u_* d_s / \nu > 11.6$ , όπου  $u_* = (\tau_{mc}/\rho)^{1/2}$ ). Σε προβλήματα ροής σε υπονόμους χρησιμοποιείται η τιμή  $\beta = 0.04 - 0.8$ .

- Συρτική τάση στον πυθμένα για δεδομένα χαρακτηριστικά ροής  $R$  και  $i$

$$\tau_m = \rho g R i$$

- Για την ύπαρξη συνθηκών αυτοκαθαρισμού θα πρέπει:  $\tau_m \geq \tau_{mc}$ , ή στην οριακή περίπτωση  $\tau_m = \tau_{mc}$ ,

$$Ri = \beta \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s$$

- Συνδυασμός με τις εξισώσεις Chezy, Manning, Darcy-Weisbach

$$V_{\min} = C \sqrt{\beta \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s} \quad V_{\min} = \frac{R^{1/6}}{n} \sqrt{\beta \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s} \quad V_{\min} = \sqrt{\frac{8g}{f} \beta \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s}$$

# Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 4

- Εφαρμογή 4.11
- Να υπολογιστούν οι ελάχιστες διαστάσεις κόκκων, (α) άμμου με  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$  και (β) οργανικού υλικού με  $\rho_s = 1200 \text{ kg/m}^3$ , που μετακινούνται (δεν καθιζάνουν) όταν η ταχύτητα είναι  $0.60 \text{ m/s}$ . Να θεωρηθεί  $f = 0.025$ .
  - ✿ Για  $\beta = 0.04$  (ξεκίνημα απόπλυσης)  $d_s = 1.7 \text{ mm}$  για άμμο και  $14.3 \text{ mm}$  για οργανικό υλικό.
  - ✿ Για  $\beta = 0.8$  (πλήρης απόπλυση)  $d_s = 0.09 \text{ mm}$  για άμμο και  $0.72 \text{ mm}$  για οργανικό υλικό.

# Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 5

- ◆ Ποια είναι τα κυριότερα προβλήματα που προκαλούνται από το υδρόθειο στους αγωγούς ακαθάρτων;
  - Πρόκληση απεχθών οσμών.
  - Δημιουργία δηλητηριώδους ατμόσφαιρας, επικίνδυνης για τη ζωή όσων εργάζονται στη συντήρηση των υπονόμων.
  - Διάβρωση των οροφών των αγωγών από σκυρόδεμα, αμιαντοτσιμέντο ή μέταλλο (στην περιοχή που δεν καλύπτεται από τη ροή). Είναι ενδιαφέρον ότι τα τοιχώματα των σωλήνων που βρέχονται δεν προσβάλλονται σοβαρά από το διαλυμένο υδρόθειο.
  - Προβλήματα στην εφαρμογή αερόβιων διεργασιών στην εγκατάσταση καθαρισμού όταν τα λύματα φτάνουν εκεί. Επίσης αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας χλωρίου, όταν εφαρμόζεται χλωρίωση των λυμάτων.
- ◆ Πως προκαλείται η διάβρωση των οροφών των αγωγών;
  - Πρώτο στάδιο, που προκαλείται από λευκοβακτηριοειδή, όπως η θειοθρίξ: οξείδωση του  $\text{H}_2\text{S}$  σε S:
$$2 \text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{S}$$
  - Δεύτερο στάδιο, που προκαλείται από πρωτοβακτηρίδια, όπως ο θειοβάκιλος: οξείδωση θείου σε θειικό οξύ:
$$2 \text{S} + 3 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{SO}_4$$

# Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 6

- ◆ Τι προκαλεί αύξηση της παραγωγής υδροθείου σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια;
  - αύξηση του χρόνου παραμονής
  - αύξηση του οργανικού φορτίου
  - αύξηση της θερμοκρασίας
  - αύξηση της βρεχόμενης περιμέτρου του αγωγού
  - μείωση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας του αγωγού
  - μείωση της τύρβης στη ροή, που έχει συνέπεια τη μείωση του ρυθμού μεταφοράς αέρα (και άρα οξυγόνου) στα λύματα. Η τύρβη συναρτάται με την κλίση του αγωγού και την ταχύτητα.
- ◆ Τι προκαλεί αύξηση του ρυθμού έκλυσης υδροθείου από την ελεύθερη επιφάνεια της ροής;
  - αύξηση της συγκέντρωσης υδροθείου στα λύματα
  - μείωση του pH των λυμάτων
  - έντονη αύξηση της τύρβης στη ροή



# Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 7

- ◆ Ποια μέτρα μπορούν να λαμβάνονται για τη μείωση της παραγωγής υδροθείου σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια;
  - Τήρηση ικανοποιητικών περιθωρίων αερισμού και ελάχιστων ταχυτήτων κατά το σχεδιασμό των αγωγών.
  - Σε δυσμενείς συνθήκες, αύξηση της διαμέτρου του αγωγού, πράγμα που έχει συνέπεια τη μείωση του λόγου βρεχόμενης περιμέτρου προς πλάτος ελεύθερης επιφάνειας ( $P/B$ ).
  - Ελαχιστοποίηση των περιοχών υψηλής τύρβης στο δίκτυο, για τον περιορισμό της απελευθέρωσης υδροθείου στον αέρα.
  - Εφοδιασμός των αγωγών με κατασκευές αερισμού.
- ◆ Πως εκτιμάται η ελάχιστη ταχύτητα αυτοαερισμού;

- Σχέση του Pomeroy
$$V_{\min,a} = \frac{[\text{EBOD}]}{590} \text{ (m / s)}$$

όπου [EBOD] η συγκέντρωση του ενεργού οργανικού φορτίου στα λύματα σε mg/l, που συνδέεται με την αντίστοιχη συγκέντρωση του  $\text{BOD}_5$  με τη σχέση

$$[\text{EBOD}] = [\text{BOD}_5] 1.07^{T-20}$$

στην οποία  $T$  είναι η θερμοκρασία σε  $^{\circ}\text{C}$ .

# Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 8

- ◆ Ποια παράμετρος χρησιμοποιείται ως εμπειρικό μέτρο της πιθανότητας παραγωγής υδροθείου;

Ο δείκτης  $Z$  του Pomeroy, που ορίζεται από την ακόλουθη σχέση, γνωστή ως “τύπος  $Z$ ”

$$Z = \frac{0.3[\text{EBOD}]}{J^{1/2} Q^{1/3}} \frac{P}{B}$$

όπου [EBOD] το ενεργό οργανικό φορτίο (mg/L),  $J$  η κλίση του αγωγού,  $Q$  η παροχή (m<sup>3</sup>/s),  $P$  η βρεχόμενη περίμετρος και  $B$  το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας του αγωγού (μονάδες ίδιες με αυτές του  $P$ ). Για τιμές του  $Z$  μικρότερες από 5000 η πιθανότητα παραγωγής υδροθείου είναι μικρή. Για  $Z$  στην περιοχή 5000-10000 αναμένεται σχηματισμός μικρών ποσοτήτων υδροθείου (0.2-0.4 mg/L) χωρίς όμως σοβαρούς κινδύνους. Σοβαρά προβλήματα αναμένονται για  $Z$  μεγαλύτερο του 10000 και ιδιαίτερα στην περιοχή 15000-20000. Συνήθως θεωρείται ως όριο του  $Z$ , προκειμένου να μην υπάρξουν προβλήματα στον αγωγό η τιμή 7500.