

## **Άσκηση 1: Βιολογικός Αντιδραστήρας Διακοπτόμενης Λειτουργίας**

Σε αεριζόμενο βιολογικό αντιδραστήρα με αρχική συγκέντρωση μικροοργανισμών  $X_0$  προστίθεται οργανικό φορτίο με συγκέντρωση  $F_0$ . Δεχόμενοι ότι η κινητική διάσπασης του οργανικού άνθρακα ακολουθεί κινητική Monod, να υπολογιστεί η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών ( $X$ ) και του οργανικού φορτίου ( $F$ ) και να βρεθούν:

- (α) ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη διάσπαση του οργανικού υλικού,  
(β) ο χρόνος που απαιτείται ώστε η τελική συγκέντρωση των μικροοργανισμών να είναι ίση με το μισό της αρχικής.

### **Δεδομένα:**

$$X_0 = 1000 \text{ mg/l}$$

$$F_0 = 500 \text{ mg/l}$$

$$\text{Κινητική Monod} = \mu_{\max} * F / (K_s + F)$$

όπου:  $\mu_{\max} = 2,4 \text{ ημέρες}^{-1}$

$$K_s = 60 \text{ mg/l}$$

Συσχέτιση παραγωγής μικροοργανισμών και καταναλισκόμενου οργανικού υλικού:

$$\Delta X / \Delta t = (Y * \Delta F / \Delta t) - bX$$

όπου:  $Y = 0,7 \text{ gr/gr}$

$$b = 0,05 \text{ ημέρα}^{-1}$$

### **Λύση**

1. Η αρχική συγκέντρωση των μικροοργανισμών στο βιολογικό αντιδραστήρα είναι ίση με  $X_0=1000 \text{ mg/l}$ , ενώ η συγκέντρωση του αρχικά προστιθέμενου οργανικού φορτίου είναι ίση με  $F_0=500 \text{ mg/l}$ . Η διαδικασία διάσπασης του οργανικού άνθρακα ακολουθεί κινητική Monod. Συνεπώς η ταχύτητα ανάπτυξης των μικροοργανισμών υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$\mu = \mu_{\max} F / (K_s + F) \quad (1)$$

Για  $F = F_0$  και  $X = X_0$  προκύπτει  $\mu_0 = 2,14 \text{ d}^{-1}$

2. Οι μεταβολές των συγκεντρώσεων μικροοργανισμών  $\Delta X$  και οργανικού φορτίου  $\Delta F$  κατά το πρώτο χρονικό βήμα  $\Delta t_0$  δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\Delta X_0 = (\mu_0 - b_0) \Delta t_0 X_0 \quad (2)$$

$$\Delta F_0 = (\Delta X_0 + b_0 X_0 \Delta t_0) / Y \quad (3)$$

όπου:  $\Delta t_0 = 0,5 \text{ hr}$  το χρονικό βήμα

3. Μετά από  $\Delta t_0 = 0,5 \text{ hr}$  οι συγκεντρώσεις των μικροοργανισμών και του οργανικού φορτίου σύμφωνα με τις σχέσεις (2), (3) είναι:

$$X_1 = X_0 + \Delta X_0 = 1000 + 46,60 = 1046,60 \text{ mg/l}$$

$$F_1 = F_0 - \Delta F_0 = 500 - 63,78 = 436,22 \text{ mg/l}$$

4. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1-3 με τις εκάστοτε αρχικές συγκεντρώσεις  $X$ ,  $F$ .
5. Κατασκευάζεται ο Πίνακας 1 στις στήλες του οποίου αναγράφονται οι συγκεντρώσεις των μικροοργανισμών και του οργανικού φορτίου όπως υπολογίζονται για την αρχή του εκάστοτε χρονικού βήματος σύμφωνα με τις σχέσεις 2 και 3.

Πίνακας 1. Μεταβολή συγκεντρώσεων μικροοργανισμών και οργανικού φορτίου.

Χρόνος (h)	$\Delta t$ (h)	$F_t$ (mg/l)	$X_t$ (mg/l)	$\mu_t$ (d <sup>-1</sup> )	$\Delta X_t$ (mg/l)	$\Delta F_t$ (mg/l)
0-0,5	0,5	500,00	1000,00	2,14	43,60	63,78
0,5-1	0,5	436,22	1043,60	2,11	44,78	65,53
1-1,5	0,5	370,69	1088,38	2,07	45,70	66,91
1,5-2	0,5	303,78	1134,09	2,00	46,17	67,65
2-2,5	0,5	236,14	1180,26	1,91	45,83	67,22
2,5-3	0,5	168,91	1226,09	1,77	43,96	64,62
3-3,5	0,5	104,29	1270,05	1,52	38,99	57,59
3,5-4	0,5	46,70	1309,03	1,05	27,28	40,93
4-4,5	0,5	5,78	1336,32	0,21	4,48	8,38
4,5-5	0,5	0,00	1340,80	0,00	-1,40	0,00

6. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1 το F μηδενίζεται μεταξύ 4 και 4,5 ωρών. Θεωρώντας  $\Delta F = F_{4-4,5} = 5,78 \text{ mg/l}$ ,  $\mu = 0,21 \text{ d}^{-1}$  και  $\Delta t = (T_0 - 4)$  από τις σχέσεις (2) και (3) προκύπτει ότι ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη διάσπαση του οργανικού φορτίου F είναι  $T_0 = 4,32 \text{ h}$ .
7. Τη στιγμή που μηδενίζεται το F η συγκέντρωση των μικροοργανισμών παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Μετά το μηδενισμό του F η συγκέντρωση των μικροοργανισμών αρχίζει να μειώνεται εκθετικά ( $\mu=0$ ) σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta X = -b X \Delta T \quad (4)$$

Από τη σχέση (4) ολοκληρώνοντας προκύπτει:

$$X = X_0 e^{-b(t-T_0)} \quad (5)$$

όπου  $X_0$  η συγκέντρωση των μικροοργανισμών τη στιγμή  $T_0$ , δηλαδή  $X_0 = 1339,19 \text{ mg/l}$  και  $t$  ο χρόνος από την αρχή.

Άρα ο χρόνος που απαιτείται ώστε η τελική συγκέντρωση των μικροοργανισμών να είναι ίση με τη μισή της αρχικής ( $X' = 500 \text{ mg/l}$ ) προκύπτει από τη σχέση (5):

$$500 = 1336,32 e^{-0,05(t-T_0)/24}$$

$$t - T_0 = 471,8 \text{ h και } t = 471,8 + 432 = 476,12 \text{ ώρες}$$

## Άσκηση 2: Υπολογισμός Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (BOD)

- α) Σε λύματα έχει μετρηθεί  $BOD_5$  και έχει βρεθεί ίσο με 400 mg/l. Αν η σταθερά της κινητικής 1ης τάξης που περιγράφει την ικανοποίηση του BOD είναι 0,15  $ημ^{-1}$  να βρεθεί το τελικό (ολικό) BOD των λυμάτων.
- β) Πως μεταβάλλεται ο λόγος  $BOD_5 / COD$  μεταξύ ανεπεξέργαστων και δευτεροβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων (διακιολογείστε την απάντησή σας)

### Λύση

α) Το BOD σε χρονική στιγμή t ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$BOD_t = BOD_{ολικό} \times (1 - e^{-K_{xt}})$$

Αντικαθιστώντας στην ανωτέρω σχέση για

$$t = 5 \text{ ημέρες}$$

$$BOD_5 = 400 \text{ mg/l}$$

$$K = \text{κινητική 1ης τάξης} = 0,15 \text{ ημέρες}^{-1}$$

$$\text{προκύπτει: } BOD_{ολικό} = 400 / (0,5276) = 758 \text{ mg/l}$$

β) Τόσο η μέθοδος μέτρησης του BOD όσο και του COD αποσκοπούν στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου στα λύματα. Λόγω της διαφορετικής μεθοδολογίας που ακολουθείται, η μέτρηση του BOD προσδιορίζει το βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο, ενώ η μέτρηση του COD προσδιορίζει τόσο το βιοδιασπάσιμο όσο και το μη βιοδιασπάσιμο κλάσμα του οργανικού φορτίου στα λύματα. Με βάση τα ανωτέρω ο λόγος του  $BOD_5 / COD$  μπορεί προσεγγιστικά να υπολογισθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$BOD_5 / COD = \text{βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο} / (\text{βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο} + \text{μη βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο})$$

Κατά την επεξεργασία των λυμάτων το βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο απομακρύνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από το άθροισμα του βιοδιασπάσιμου και μη βιοδιασπάσιμου οργανικού φορτίου. Συνεπώς ο λόγος  $BOD_5 / COD$  αναμένεται να έχει υψηλότερη τιμή στα ανεπεξέργαστα λύματα από τα επεξεργασμένα, όπου στη περίπτωση που έχει απομακρυνθεί όλο το βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο θα είναι μηδέν.

### Άσκηση 3: Διαχωρισμός Απορριμμάτων

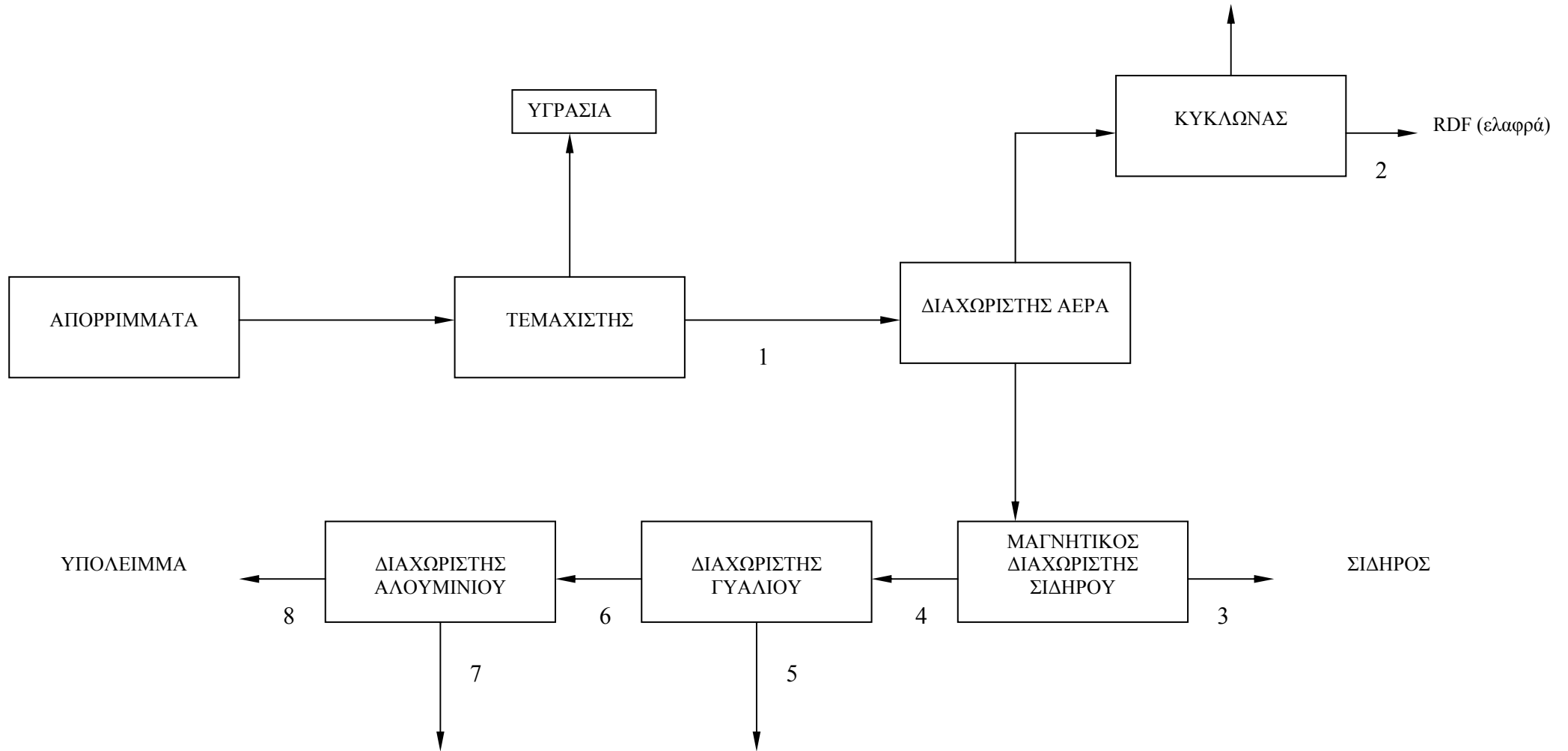
1000 τόνοι απορριμμάτων με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 1 υφίστανται την επεξεργασία του Σχήματος 1 για ανάκτηση υλικών. Να υπολογισθούν οι μάζες των υλικών σε κάθε υποδεικνυόμενη θέση.

**Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά απορριμμάτων**

Συστατικό	% κ.β.	% κ.β. υγρασίας	% κ.β. ελαφρών	% κ.β. βαριά
<b>Οργανικά Υπολλ.</b>	52	65	52	
<b>Χαρτί</b>	20	6	20	
<b>Πλαστικό</b>	7	2	7	
<b>Ξύλο</b>	1	20	1	
<b>Γυαλί</b>	4	2		4
<b>Αλουμίνιο</b>	5	3		5
<b>Σιδηρούχα μέταλλα</b>	2	3		2
<b>Μη σιδηρούχα μέταλλα</b>	1	2		1
<b>Ανόργανα</b>	8	8		8

1. Ο τεμαχιστής απομακρύνει 20% της συνολικής υγρασίας. Η υγρασία αυτή απομακρύνεται από τα ελαφρά στερεά.
2. Ο διαχωριστής διαχωρίζει το 85% των ελαφρών στερεών και το υπόλοιπο μένει με τα βαρεία στερεά.
3. Ο διαχωριστής διαχωρίζει το 94% των βαρειών στερεών και τα υπόλοιπα παρασέρνονται με τα ελαφρά στερεά.
4. Ο μαγνητικός διαχωριστής απομακρύνει το 80% των σιδηρούχων στερεών.
5. Ο διαχωριστής γυαλιού απομακρύνει το 80% του γυαλιού.
6. Ο διαχωριστής αλουμινίου απομακρύνει το 70% του αλουμινίου.

Στα 2 – 6 το βάρος των στερεών είναι αυτό μετά τον τεμαχισμό.



Σχήμα 1: Τυπικό διάγραμμα προεπεξεργασίας ΑΣΑ

### Λύση

Για την επίλυση της άσκησης υπολογίζονται αρχικά οι ποσότητες των απορριμμάτων βάσει των χαρακτηριστικών τους.

- Οι ποσότητες των επιμέρους συστατικών των απορριμμάτων [Στήλη 1] υπολογίζονται από τη συνολική μάζα (1000 τόννοι) επί το αντίστοιχο ποσοστό κατά βάρος.
- Η υγρασία των απορριμμάτων [Στήλη 2] προκύπτει άμεσα από το αντίστοιχο ποσοστό επί τα ολικά στερεά [Στήλη 1]. Κατά συνέπεια οι ξηροί τόννοι απορριμμάτων [Στήλη 3] είναι η διαφορά των ολικών στερεών μείον την αντίστοιχη υγρασία.
- Βάσει των χαρακτηριστικών τους τα απορρίμματα χωρίζονται σε βαριά [Στήλη 4] και ελαφρά [Στήλη 5] με τις ποσότητες που αντιστοιχούν στα ποσοστά του Πίνακα 1.

	1	2	3	4	5
	ΘΕΣΗ 0	ΘΕΣΗ 0	ΘΕΣΗ 0	ΘΕΣΗ 0	ΘΕΣΗ 0
Συστατικό	Ολικά στερεά (τόννοι)	Υγρασία (τόννοι)	Ξηρά στερεά (τόννοι)	Μάζα βαριών στερεών τόννοι	Μάζα ελαφρών στερεών τόννοι
Οργανικά Υπολλ.	520	338,00	182,00		520
Χαρτί	200	12,00	188,00		200
Πλαστικό	70	1,40	68,60		70
Ξύλο	10	2,00	8,00		10
Γυαλί	40	0,80	39,20	40	
Αλουμίνιο	50	1,50	48,50	50	
Σιδηρούχα μέταλλα	20	0,60	19,40	20	
Μη σιδηρούχα μέταλλα	10	0,20	9,80	10	
Ανόργανα	80	6,40	73,60	80	

- Δεδομένου ότι ο τεμαχιστής απομακρύνει το 20% της συνολικής υγρασίας από τα ελαφρά στερεά, η υγρασία που χάνεται [Στήλη 6] προκύπτει από την αρχική [Στήλη 2] επί το ποσοστό αυτό. Κατά συνέπεια η ποσότητα των στερεών στη θέση 1 [Στήλη 7] είναι η διαφορά των στερεών της θέσης 0 [Στήλη 1] μείον την υγρασία που χάνεται [Στήλη 6].
- Τα ελαφρά στερεά που παραμένουν και οδηγούνται προς το μαγνητικό διαχωριστή [Στήλη 9] προκύπτουν από την ποσότητα των ελαφρών στερεών στη



θέση 1 [Στήλη 7] μείον τα ελαφρά στερεά που οδηγούνται προς τον κυκλώνα [Στήλη 10], που δεν είναι παρά το 85% των στερεών της θέσης 1.

- Αντίστοιχα, τα βαριά στερεά που παραμένουν και οδηγούνται προς το μαγνητικό διαχωριστή [Στήλη 11] προκύπτουν από την ποσότητα των βαριών στερεών στη θέση 1 [Στήλη 7] μείον τα βαριά στερεά που οδηγούνται προς τον κυκλώνα [Στήλη 12], που δεν είναι παρά το 6% των στερεών της θέσης 1.
- Ο συνδυασμός των στηλών 10 και 12 μας δίνει τις ποσότητες των απορριμμάτων στη θέση 2.
- Στο μαγνητικό διαχωριστή απομακρύνεται το 80% των σιδηρούχων μετάλλων και ως αποτέλεσμα στη θέση 3 συλλέγεται ποσότητα σιδηρούχων μετάλλων ίση με  $18,80 \text{ τόννοι} \times 0,80 = 15,05 \text{ τόννοι}$ . Η παραμένουσα ποσότητα απορριμμάτων, θέση 4, [Στήλη 15 = Στήλη 9 (ή 11) – Στήλη 14], οδηγείται προς το διαχωριστή γυαλιού, όπου απομακρύνεται το 80 % του γυαλιού (θέση 5), με ποσότητα γυαλιού στη θέση αυτή ίση με  $37,60 \text{ τόννοι} \times 0,80 = 30,08 \text{ τόννοι}$ .
- Στη θέση 6 [Στήλη 17] οδηγείται υπόλοιπη ποσότητα απορριμμάτων [Στήλη 15-Στήλη 16].
- Στην τελική φάση του διαχωρισμού απομακρύνεται το 70% του αλουμινίου θέση 7, με ποσότητα αλουμινίου ίση με  $47 \text{ τόννοι} \times 0,70 = 32,90 \text{ τόννοι}$ .
- Το υπόλειμμα του διαχωρισμού των στερεών, θέση 8 προκύπτει εύκολα [Στήλη 19 = Στήλη 17-Στήλη 18]

	6	7	8
	ΘΕΣΗ 1	ΘΕΣΗ 1	ΘΕΣΗ 1
Συστατικό	Υγρασία που χάνεται	Μάζα στερεών τόννοι	Υγρασία που μένει
Οργανικά Υπολλ.	67,60	452,40	270,40
Χαρτί	2,40	197,60	9,60
Πλαστικό	0,28	69,72	1,12
Ξύλο	0,40	9,60	1,60
Γυαλί		40,00	0,80
Αλουμίνιο		50,00	1,50
Σιδηρούχα μέταλλα		20,00	0,60
Μη σιδηρούχα μέταλλα		10,00	0,20
Ανόργανα		80,00	6,40

	9	10	11	12
Συστατικό	ελαφρά που παραμένουν προς μαγνητικό	ελαφρά που παραμένουν προς κυκλώνα	βαριά που παραμένουν προς μαγνητικό	βαριά που παραμένουν προς κυκλώνα
Οργανικά Υπολλ.	67,86	384,54		
Χαρτί	29,64	167,96		
Πλαστικό	10,46	59,26		
Ξύλο	1,44	8,16		
Γυαλί			37,60	2,4
Αλουμίνιο			47,00	3
Σιδηρούχα μέταλλα			18,80	1,2
Μη σιδηρούχα μέταλλα			9,40	0,6
Ανόργανα			75,20	4,8

	13	14	15	16
Συστατικό	ΘΕΣΗ 2	ΘΕΣΗ 3	ΘΕΣΗ 4	ΘΕΣΗ 5
Οργανικά Υπολλ.	384,54		67,86	
Χαρτί	167,96		29,64	
Πλαστικό	59,26		10,46	
Ξύλο	8,16		1,44	
Γυαλί	2,40		37,60	30,08
Αλουμίνιο	3,00		47,00	
Σιδηρούχα μέταλλα	1,20	15,04	3,76	
Μη σιδηρούχα μέταλλα	0,60		9,40	
Ανόργανα	4,80		75,20	

	17	18	19
Συστατικό	ΘΕΣΗ 6	ΘΕΣΗ 7	ΘΕΣΗ 8
Οργανικά Υπολλ.	67,86		67,86
Χαρτί	29,64		29,64
Πλαστικό	10,46		10,46
Ξύλο	1,44		1,44
Γυαλί	7,52		7,52
Αλουμίνιο	47,00	32,90	14,10
Σιδηρούχα μέταλλα	3,76		3,76
Μη σιδηρούχα μέταλλα	9,40		9,40
Ανόργανα	75,20		75,20

### Άσκηση 4: Θερμογόνος Δύναμη Απορριμμάτων

Να υπολογιστεί η θερμογόνος δύναμη (kcal/kg απορριμμάτων) 1 τόννου αστικών απορριμμάτων με τη σύνθεση του Πίνακα 1 για τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις.

- i) Χωρίς ανακύκλωση υλικών στην πηγή
- ii) Με την παραδοχή ότι η περιοχή εντάσσεται σε πρόγραμμα ανακύκλωσης υλικών (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, αλουμίνιο και σιδηρούχα μέταλλα) σε ποσοστά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Να σχολιαστεί η διαφοροποίηση της θερμογόνου δύναμης των απορριμμάτων στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Κατά την επίλυση να γίνει η παραδοχή ότι η μάζα της υγρασίας πρακτικά αφορά στην υγρασία των οργανικών υπολειμμάτων και παραμένει σταθερή και στην περίπτωση όπου γίνεται ανακύκλωση υλικών.

**Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά απορριμμάτων**

Συστατικό	Μάζες υλικών kg	% ανακύκλωσης	Θερμογόνος δύναμη υλικών kcal/kg
Οργανικό ξηρό Υπόλλ.	180	-	
Υγρασία οργ. υπολ.	360	-	
Οργανικό υπόλοιπο (με υγρασία)	540	-	1000
Χαρτί	190	40	4000
Πλαστικό	70	20	7000
Γυαλί	40	60	30
Αλουμίνιο	50	60	160
Σιδηρούχα μέταλλα	20	60	160
Μη σιδηρούχα μέταλλα	10	-	0
Ανόργανα	80	-	500

**Λύση****Υπολογισμός θερμοαντικτικής αξίας απορριμμάτων χωρίς ανακύκλωση υλικών**

Με τη βοήθεια του Πίνακα 2 που ακολουθεί υπολογίζεται αρχικά η θερμοαντικτική αξία των συστατικών των απορριμμάτων πολλαπλασιάζοντας τη μάζα των υλικών [Στήλη 1] με την αντίστοιχη θερμογόνο δύναμη του κάθε υλικού [Στήλη 4] ώστε να υπολογιστεί η θερμογόνο δύναμη των υλικών [Στήλη 5] και στη συνέχεια ως άθροισμα των επιμέρους τιμών, η συνολική θερμογόνο δύναμη των απορριμμάτων. Έτσι για την περίπτωση (i) προκύπτει συνολική θερμογόνο δύναμη  $\Theta_{\Delta i} = 1.842.400$  kcal. Η θερμοαντικτική αξία των απορριμμάτων στην περίπτωση αυτή προκύπτει άμεσα διαιρώντας τη θερμογόνο δύναμη  $\Theta_{\Delta i}$  (kcal) με τη συνολική ποσότητα των απορριμμάτων  $M_i = 1000$  kg, ίση με

<b><math>\Theta_{\Delta i} = 1842,4</math> kcal/kg απορριμμάτων</b>
---

**Υπολογισμός θερμοαντικτικής αξίας απορριμμάτων με ανακύκλωση υλικών**

Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη περίπτωση υπολογίζεται αρχικά η νέα, μετά την ανακύκλωση υλικών, ποσότητα των απορριμμάτων [Στήλη 3], από την αρχική ποσότητα των υλικών [Στήλη 1], επί το ποσοστό των υλικών που παραμένει [1-Στήλη 2/100]. Η συνολική μάζα των συστατικών με την παραδοχή ότι η μάζα της υγρασίας παραμένει, ισούται με  $M_{ii} = 818$  kg. Η θερμοαντικτική αξία των συστατικών των απορριμμάτων προκύπτει με όμοιο τρόπο όπως πριν πολλαπλασιάζοντας τη μάζα των υλικών [Στήλη 3] με την αντίστοιχη θερμογόνο δύναμη του κάθε υλικού [Στήλη 4] ώστε να υπολογιστεί η θερμογόνο δύναμη των υλικών [Στήλη 6] και στη συνέχεια ως άθροισμα των επιμέρους τιμών, η συνολική θερμογόνο δύναμη των απορριμμάτων. Έτσι για την περίπτωση (ii) προκύπτει συνολική θερμογόνο δύναμη  $\Theta_{\Delta ii} = 1.307.960$  kcal. Η θερμοαντικτική αξία των απορριμμάτων στην περίπτωση αυτή προκύπτει άμεσα διαιρώντας τη θερμογόνο δύναμη  $\Theta_{\Delta ii}$  (kcal) με τη συνολική ποσότητα των απορριμμάτων  $M_{ii}$ , ίση με

<b><math>\Theta_{\Delta ii} = 1599</math> kcal/kg απορριμμάτων</b>
--

Η ανακύκλωση υλικών με μεγάλη σχετικά θερμογόνο δύναμη, όπως το χαρτί και το πλαστικό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση στην ανά τόνο θερμογόνο δύναμη των απορριμμάτων, παρά τη μείωση του συνολικού βάρους.

Πίνακας 2: Πίνακας υπολογισμών

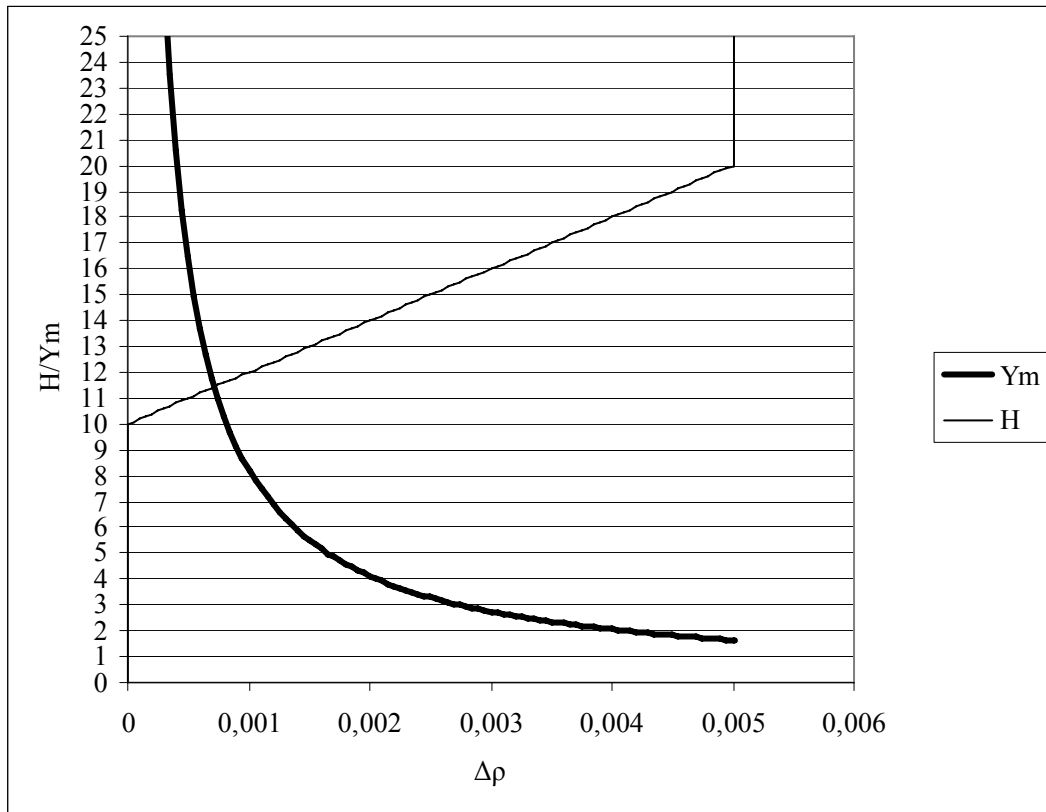
	1	2	3	4	5
Συστατικό	Μάζες υλικών kg	% ανακύκλωσης	Μάζες υλικών μετά την ανακύκλωση kg	Θερμογόνος δύναμη υλικών kcal/kg	Αρχική θερμοαντική ικανότητα kcal
Οργανικά Υπολλ.+Υγρασία	540		540	1000	540.000
Χαρτί	190	50	95	4000	760.000
Πλαστικό	70	30	49	7000	490.000
Γυαλί	40	60	16	30	1.200
Αλουμίνιο	50	60	20	160	8.000
Σιδηρούχα μέταλλα	20	60	8	160	3.200
Μη σιδηρούχα μέταλλα	10		10	0	
Ανόργανα	80		80	500	40.000
<b>Σύνολο</b>	<b>1000</b>		<b>818</b>		<b>1.842.400</b>

**Άσκηση 5: Παγίδευση Πεδίου Λυμάτων**

Λύματα παροχής  $1800 \text{ m}^3/\text{hr}$  εκβάλλουν σε στρωματομένη θάλασσα σε βάθος  $25 \text{ m}$ , μέσω διαχυτήρα μήκους  $L = 100 \text{ m}$ . Η πυκνότητα της θάλασσας είναι  $1.030 \text{ gr/cm}^3$  στον πυθμένα και διατηρείται σταθερή μέχρι ύψους  $10 \text{ m}$  από τον πυθμένα. Στη συνέχεια μεταξύ  $10 \text{ m}$  και  $20 \text{ m}$  από τον πυθμένα η κλίση της πυκνότητα είναι  $5 \times 10^{-4} \text{ gr/cm}^3 \cdot \text{m}$ . Στα τελευταία μέτρα, από  $20 \text{ m}$  μέχρι  $25 \text{ m}$  (επιφάνεια) η πυκνότητα της θάλασσας είναι σταθερή και ίση με  $1.025 \text{ gr/cm}^3$ . Να βρεθεί το βάθος παγίδευση (με ακρίβεια μισού μέτρου) και η αραίωση του πεδίου λυμάτων.

**Λύση**

	<i>H</i>	<i>ρ<sub>a</sub></i>	<i>Δρ</i>	<i>Υ<sub>m</sub></i>
	0-10	1,03000	0	
	10,1	1,02995	5E-05	164,72526
	10,2	1,02990	0,0001	82,362629
	10,3	1,02985	0,00015	54,908419
	10,4	1,02980	0,0002	41,181314
	***	***	***	***
	11,2	1,02940	0,0006	13,727105
	11,3	1,02935	0,00065	12,671174
	11,4	1,02930	0,0007	11,76609
	11,5	1,02925	0,00075	10,981684
	11,6	1,02920	0,0008	10,295329
	11,7	1,02915	0,00085	9,6897211
	11,8	1,02910	0,0009	9,1514032
	11,9	1,02905	0,00095	8,6697504
	12	1,02900	0,001	8,2362629
	***	***	***	***
	14	1,02800	0,002	4,1181314
	14,1	1,02795	0,00205	4,0176892
	***	***	***	***
	14,9	1,02755	0,00245	3,36174
	15	1,02750	0,0025	3,2945052
	***	***	***	***
	19	1,02550	0,0045	1,8302806
	19,1	1,02545	0,00455	1,8101677
	***	***	***	***
	19,8	1,02510	0,0049	1,68087
	19,9	1,02505	0,00495	1,6638915
	20-25	1,02500	0,005	1,6472526



Για  $Y_m=11,5$  m η αραίωση είναι 11

### Άσκηση 6: Επιφανειακή Διασπορά

Για συγκέντρωση κολοβακτηριδίων  $C_0 = 10^6/100$  ml, μήκος διαχυτήρα  $\alpha_0 = 29$  m, ταχύτητα  $u_x = 0,1$  m/sec και συντελεστή καταστροφής κολοβακτηριδίων  $K = 7$  ημ<sup>-1</sup>, να βρεθεί η συγκέντρωση των κολοβακτηριδίων στην ακτή που απέχει 1000 m από τη θέση του επιφανειακού πεδίου λυμάτων που δημιούργησε ο διαχυτήρας και με την παραδοχή ότι το ρεύμα κινείται με ταχύτητα  $u_x$  κατ' ευθείαν προς την ακτή.

#### Λύση

Εφαρμόζοντας την εξίσωση μεταφοράς ύλης (εξ. 8-2, κεφάλαιο 8 του βιβλίου), για συντηρητικό ρύπο ( $r_c = 0$ ) και με τις παραδοχές α)  $u_y, u_z = 0$  β)  $E_x, E_y = 0$  γ) μόνιμες

συνθήκες  $\left( \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \right)$  προκύπτει:

$$u_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Η εξίσωση αυτή διαφέρει από την 8-86, κατά το ότι δεν θεωρεί το  $E_z$  σταθερό. Κατά Brooks ο συντελεστής  $E_z$  σχετίζεται με το  $\alpha$  με την σχέση:

$$E_z = 0,01 \alpha^{4/3} \quad (2)$$

οπότε στη θέση  $x = 0$

$$E_{z0} = 0,01 \alpha_0^{4/3} \quad (3)$$

με  $E_{z0}$  σε cm<sup>2</sup>/sec και  $\alpha_0$  σε cm.

Ο Brooks έλυσε την διαφορική εξίσωση για την μέγιστη συγκέντρωση που βρίσκεται στη θέση  $z = 0$ , δηλαδή για την  $C_{(x,0)}$  και βρήκε ότι:



$$C_{(x,0)} = C_o \operatorname{erf} \left[ \frac{1,5}{\left(1 + \frac{8E_{z_0} x}{u_x \alpha_o^2}\right)^3 - 1} \right]^{1/2} \quad (4)$$

όπου erf x είναι η συνάρτηση κατανομής σφάλματος, δηλαδή

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-v^2} dv \quad (5)$$

Η επίλυση της εξίσωσης (4) μπορεί να γίνει με υπολογισμό της τιμής της παράστασης που βρίσκεται στην αγκύλη (για δεδομένα  $E_{z_0}$ ,  $x$ ,  $u_x$ ,  $\alpha_o$ ), εύρεση της τετραγωνικής της ρίζας και στη συνέχεια με τη βοήθεια πινάκων εύρεση της συνάρτησης σφάλματος, που ισούται με  $C(x,0)/C_o$ .

Για  $\alpha_o = 29 \text{ m}$  προκύπτει

$$E_{z_0} = 0,01 * \alpha_o^{4/3} \quad \rightarrow \quad E_{z_0} = 0,01 * 2900^{4/3} = 413,55 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$\operatorname{erf} = \left[ \frac{1,5}{\left(1 + \frac{8 * 413,55 * 100000}{10 * 2900^2}\right)^3 - 1} \right]$$

Από τον πίνακα erf x προκύπτει για  $x = 0,11$  τιμή συνάρτησης 0,125 (= Cm/Co).

Εξάλλου λόγω φθοράς κολοβακτηριδίων προκύπτει μείωση

$$\frac{C'(x,0)}{C(x,0)} = e^{-7 \frac{1000}{6 \times 60 \times 24}} = 0,445$$

Επομένως

$$\frac{C'(x,0)}{C_0} = \frac{C'(x,0)}{C(x,0)} \frac{C(x,0)}{C_0} = 0,445 * 0,125 = 0,0561$$

και

$$C'_{(x,0)} = 0,0561 * 106 = 56070 \text{ FC/100ml}$$

### Πίνακας Συνάρτησης Σφάλματος

x	erf x	x	erf x
0.0	0.0000	1.6	0.9763
0.1	0.1125	1.7	0.9840
0.2	0.2227	1.8	0.9891
0.3	0.3287	1.9	0.9930
0.4	0.4284	2.0	0.9953
0.5	0.5206	2.2	0.9981
0.6	0.6039	2.4	0.9993
0.7	0.6780	2.6	0.9998
0.8	0.7421	2.8	0.9999
0.9	0.7971	3.0	1.0000
1.0	0.8427	3.2	1.0000
1.1	0.8804	3.4	1.0000
1.2	0.9103	3.6	1.0000
1.3	0.9342	3.8	1.0000
1.4	0.9523	4.0	1.0000
1.5	0.9664		

### Άσκηση 7:ΥγειονολογικόςΣχεδιασμός Αγωγού εκβολής

Βιολογικά επεξεργασμένα λύματα με παροχή  $0,3 \text{ m}^3/\text{sec}$  διοχετεύονται μέσω αγωγού εκβολής και διαχυτήρα στη θάλασσα. Εάν η συγκέντρωση περιττωματικών κολοβακτηριδίων (FC) των βιολογικά επεξεργασμένων λυμάτων είναι  $2 \times 10^7/100 \text{ ml}$  να βρεθεί το μήκος του αγωγού εκβολής ώστε στα όρια της παρακείμενης περιοχής κολύμβησης (200 m από την ακτή, στη θέση εισόδου του αγωγού στη θάλασσα) να τηρούνται τα επιτακτικά όρια της νομοθεσίας για τις ακτές κολύμβησης ( $\text{FC} < 2000/1000 \text{ ml}$  για το 95% των δειγμάτων).

#### Δεδομένα:

- Βάθος εκβολής 20 m (σταθερός για όλα τα μήκη αγωγού)
- Μη στρωματωμένος αποδέκτης
- Πυκνότητα λυμάτων  $\rho = 1 \text{ gr/cm}^3$
- Πυκνότητα θάλασσας  $\rho_a = 1,025 \text{ gr/cm}^3$
- Μήκος διαχυτήρα  $L = 30 \text{ m}$
- Μείωση κολοβακτηριδίων λόγω επόμενης αραιώσης και εισαγωγής στο "εχθρικό" περιβάλλον κατά 10 φορές (σταθερά)
- Η πιθανοτική κατανομή των ρευμάτων προς την εξεταζόμενη ακτή δίνεται από τη σχέση:

$$p = 0,46 U^{0.26} \quad (U_{\min} = 0)$$

$$(U_{\max} = 20 \text{ cm/sec})$$

- Η πιθανοτική κατανομή του συντελεστή φθορά κολοβακτηριδίων  $K(\text{hr}^{-1})$  είναι η ακόλουθη:

$K = 0,5$	$p = 4\%$
$K = 1$	$p = 10\%$
$K = 1,5$	$p = 20\%$
$K = 2$	$p = 30\%$
$K = 2,5$	$p = 20\%$
$K = 3$	$p = 10\%$
$K = 3,5$	$p = 4\%$
$K = 4$	$p = 2\%$

**Λύση**

1. Αρχικά υπολογίζεται η αρχική αραίωση  $S_a$  των Περιττωματικών Βακτηριδίων (FC) απο τη σχέση:

$$S_a = \{a \times (g')^{1/3}\} \times y_m \times (q^{-2/3}) \quad (1)$$

- όπου :
- $y_m$ : Βάθος εκβολής (για μη στρωματωμένη θάλασσα)
  - $q$ :  $Q/L$  όπου  $L$  μήκος διαχυτήρα και  $Q$  παροχή λυμάτων
  - $a$ : Συντελεστής για μη στρωματωμένη θάλασσα =0,38
  - $g'$ :  $g(\rho_{\alpha\omega}-\rho)/\rho=9,85(1025-1000)/1000=0,245 \text{ m/sec}^3$

Από τις πράξεις προκύπτει ότι:  $S_a = 102,5$

2. Η επόμενη αραίωση είναι σταθερή και μικρότερη κατά 10 φορές από την αρχική.
3. Η τελική συγκέντρωση των FC λόγω των αραιώσεων εάν δε λάβουμε υπ' όψιν την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι:

$$C_m = C / (S_a S_{\epsilon\pi}) \quad (2)$$

Άρα  $C_m = 19514 \text{ FC}/100\text{ml}$

4. Η συγκέντρωση των FC στη ζώνη των 200m από την ακτή, λόγω της φθοράς τους από την ηλιακή ακτινοβολία δίδεται από την κινητική 1<sup>ης</sup> τάξης:

$$C = C_m e^{-kt} \quad (3)$$

- όπου:
- $t$ : ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσουν τα λύματα απόσταση ίση με το μήκος του αγωγού  $S$  με ταχύτητα  $u$ .
  - $k$ : Συντελεστής φθοράς.

5. Για τις τιμές ταχυτήτων  $u_i$  και συντελεστών  $k_i$  που δίδονται υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις FC για διάφορα μήκη αγωγών.

Για μήκος αγωγού 825m προκύπτει ο παρακάτω Πίνακας 1 για τις συγκεντρώσεις FC.

**Πίνακας 1. Συγκεντρώσεις FC/100ml για μήκος αγωγού 825m.**

u (cm/sec)	K							
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
2	63,42	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1112,43	63,42	3,62	0,21	0,01	0,00	0,00	0,00
6	2890,44	428,14	63,42	9,39	1,39	0,21	0,03	0,00
8	4659,18	1112,43	265,61	63,42	15,14	3,62	0,86	0,21
10	6204,65	1972,82	627,28	199,45	63,42	20,16	6,41	2,04
12	7510,27	2890,44	1112,43	428,14	164,78	63,42	24,41	9,39
14	8607,89	3797,06	1674,94	738,84	325,91	143,76	63,42	27,97
16	9535,16	4659,18	2276,63	1112,43	543,57	265,61	129,78	63,42
18	10324,90	5462,92	2890,44	1529,34	809,18	428,14	226,53	119,86
20	11003,52	6204,65	3498,67	1972,82	1112,43	627,28	353,71	199,45

6. Κατασκευάζεται ο λογικός Πίνακας 2 στον οποίο με τιμή 0 συμβολίζεται κάθε συγκέντρωση για την οποία ισχύει  $C_i < 2000$  FC/100ml, ενώ με 1 συμβολίζεται κάθε συγκέντρωση  $C_i > 2000$  FC/100ml.

**Λογικός Πίνακας 2**

P <sub>ui</sub>	u (cm/sec)	P <sub>ki</sub>								1,00
		0,04	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,04	0,02	
		K								
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
0,551	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,109	4	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,073	6	1	0	0	0	0	0	0	0	
0,057	8	1	0	0	0	0	0	0	0	
0,047	10	1	0	0	0	0	0	0	0	
0,041	12	1	1	0	0	0	0	0	0	
0,036	14	1	1	0	0	0	0	0	0	
0,032	16	1	1	1	0	0	0	0	0	
0,029	18	1	1	1	0	0	0	0	0	
0,027	20	1	1	1	0	0	0	0	0	
1,00										

7. Στον Πίνακα 3 υπολογίζεται η πιθανότητα κατανομή κάθε συγκέντρωσης. Κάθε στοιχείο του πίνακα προκύπτει από το γινόμενο του βάρους κάθε συγκέντρωσης, της πιθανότητας κάθε ταχύτητας (όπως προκύπτει από τη δοθείσα κατανομή) και της πιθανότητας κάθε K.

**Πίνακας 3. Πιθανότητα εμφάνισης συγκεντρώσεων**

		Pki							
		0,04	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,04	0,02
		K							
Pui	u (cm/sec)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0,551	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,109	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,073	6	0,0029	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,057	8	0,0023	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,047	10	0,0019	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,041	12	0,0016	0,0041	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,036	14	0,0014	0,0036	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,032	16	0,0013	0,0032	0,0065	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,029	18	0,0012	0,0029	0,0059	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,027	20	0,0011	0,0027	0,0054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		<b>0,0138</b>	<b>0,0166</b>	<b>0,0178</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Συνολικό άθροισμα **4,82%**

8. Αθροίζοντας τις πιθανότητες εμφάνισης συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των 2000 FC/100ml προκύπτει ότι αυτό ισχύει για ένα ποσοστό μικρότερο του 5% (4,8%).

Συνεπώς το συνολικό μήκος του αγωγού εκβολής αρκεί να είναι:

$$\underline{825 + 200 = 1025 \text{ m.}}$$

### Άσκηση 8: Υδραυλικός σχεδιασμός αγωγού εκβολής λυμάτων

Λύματα με παροχή αιχμής  $Q = 0,28 \text{ m}^3/\text{sec}$  και μέση ετήσια παροχή  $Q = 0,12 \text{ m}^3/\text{sec}$  πρόκειται να διατεθούν σε θαλάσσιο αποδέκτη σε βάθος  $y = 20 \text{ m}$ . Ο αγωγός εκβολής έχει μήκος  $1000 \text{ m}$  και διάμετρο  $D$ . Σε προέκταση του αγωγού εκβολής κατασκευάζεται διαχυτήρας με διάμετρο  $0,6 \text{ m}$  που φέρει στόμια διαμέτρου  $0,1 \text{ m}$ , σε αποστάσεις ανά  $3 \text{ m}$ . Η κλίση του πυθμένα στην περιοχή του διαχυτήρα είναι  $15\%$  και το μέσο βάθος  $y = 20 \text{ m}$ . Να βρεθούν:

- α) Το απαιτούμενο μήκος του διαχυτήρα και ο αριθμός των στομιών.
- β) Το φορτίο στην αρχή του διαχυτήρα με δεδομένο ότι στο τελευταίο στόμιο είναι επιθυμητή η διατήρηση ελάχιστου φορτίου  $H = 0,40 \text{ m}$  (για κυματισμούς).
- γ) Η βέλτιστη διάμετρος  $D$  του αγωγού εκβολής.
- δ) Το γεωμετρικό ύψος άντλησης στο φρεάτιο φόρτισης του αγωγού, με δεδομένο ότι τα λύματα καταλήγουν σε απόλυτο υψόμετρο  $+ 2\text{m}$  ανάντι του φρεατίου.
- ε) Το ετήσιο κόστος απόσβεσης και δαπανών λειτουργίας του έργου (απόδοση αντλητικού συγκροτήματος  $=65\%$ ).

#### Δεδομένα

- 1) Πυκνότητα θάλασσας  $\rho_a = 1,025 \text{ gr/cm}^3$
- 2) Υδραυλικοί υπολογισμοί κατά Manning με συντελεστή  $n = 0,0125$
- 3) - Χρόνος ζωής έργου,  $N = 40$  έτη.  
 - Αποπληθωρισμένο επιτόκιο,  $i = 6\%$ .  
 - Κόστος ενέργειας  $0,08 \text{ €/kwh}$ .  
 - Απόδοση αντλητικού συγκροτήματος  $=65\%$   
 - Κόστος κατασκευής αγωγού εκβολής, διαμέτρου  $D$  (m), ανά μέτρο μήκους  

$$K = 900 * e^{0,40D} \text{ €}$$
  
 - Δαπάνη συντήρησης  $1\%$  του κόστους κατασκευής.

**Λύση:**

**1ο στόμιο:**

$$u = 0,61 \times (2 \times 9,81 \times H)^{0,5} = 0,61 \times (2 \times 9,81 \times 0,40)^{0,5} = 1,71 \text{ m/s}$$

$$\alpha = \pi d^2/4 = \pi 0,1^2/4 = 0,0079 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } q_1 = u \times \alpha = 0,0135 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,071 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_1 = q_1 / A = 0,19 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Υδραυλική ακτίνα } R &= D/4 = 0,3/4 = 0,075 \\ R^{2/3} &= 0,17784 \end{aligned}$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} h_{f1} &= 3 \times (n \times V_1 / R^{2/3})^2 = 3 \times (0,0125 \times 0,19 / 0,17784)^2 = \\ h_{f1} &= 0,01482 \times 0,19^2 = 0,00054 \text{ m} \end{aligned}$$

$$H_2 = 0,40 + \Delta z + h_{f1} = 0,40 + 0,01125 + 0,00054 = 0,41179 \text{ m}$$

**2ο στόμιο:**

$$\begin{aligned} q_2 &= \alpha \times 0,61 \times (2 \times 9,81 \times H_2)^{0,5} \\ q_2 &= 0,0079 \times 0,61 \times (2 \times 9,81 \times 0,41179)^{0,5} = 0,0137 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_2 = q_2 / A + V_1 = 0,19292 + 0,19 = 0,38292 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Υδραυλική ακτίνα } R &= D/4 = 0,3/4 = 0,075 \\ R^{2/3} &= 0,17784 \end{aligned}$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$h_{f2} = 0,01482 \times V_2^2 = 0,01482 \times 0,38292^2 = 0,00217 \text{ m}$$

$$H_3 = H_2 + \Delta z + h_{f2} = 0,412 + 0,01125 + 0,00217 = 0,42542 \text{ m}$$

**3ο στόμιο:**

$$\begin{aligned} q_3 &= \alpha \times 0,61 \times (2 \times 9,81 \times H_3)^{0,5} \\ q_3 &= 0,0079 \times 0,61 \times (2 \times 9,81 \times 0,42542)^{0,5} = 0,01392 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$



$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_3 = q_3 / A + V_2 = 0,19609 + 0,38292 = 0,57901 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Υδραυλική ακτίνα } R &= D/4 = 0,3/4 = 0,075 \\ R^{2/3} &= 0,17784 \end{aligned}$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$V_3^2/2g = 0,01709 \text{ (} C_D = 0,60 \text{)}$$

$$h_{f3} = 0,01482 \times V_3^2 = 0,01482 \times 0,57901^2 = 0,00497 \text{ m}$$

$$H_4 = H_3 + \Delta z + h_{f3} = 0,42542 + 0,01125 + 0,00497 = 0,44164 \text{ m}$$

#### 4ο στόμιο:

$$\begin{aligned} q_4 &= \alpha \times 0,60 \times (2 \times 9,81 \times H_4)^{0,5} \\ q_4 &= 0,0079 \times 0,60 \times (2 \times 9,81 \times 0,44164)^{0,5} = 0,01395 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_4 = q_4 / A + V_3 = 0,19648 + 0,57901 = 0,77549 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Υδραυλική ακτίνα } R &= D/4 = 0,3/4 = 0,075 \\ R^{2/3} &= 0,17784 \end{aligned}$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$V_4^2/2g = 0,03065 \text{ (} C_D = 0,59 \text{)}$$

$$h_{f4} = 0,01482 \times V_4^2 = 0,01482 \times 0,77549^2 = 0,00891 \text{ m}$$

$$H_5 = H_4 + \Delta z + h_{f4} = 0,44164 + 0,01125 + 0,00891 = 0,46180 \text{ m}$$

#### 5ο στόμιο:

$$\begin{aligned} q_5 &= \alpha \times 0,59 \times (2 \times 9,81 \times H_5)^{0,5} \\ q_5 &= 0,0079 \times 0,59 \times (2 \times 9,81 \times 0,46180)^{0,5} = 0,01403 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_5 = q_5 / A + V_4 = 0,19761 + 0,77549 = 0,97309 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Υδραυλική ακτίνα } R &= D/4 = 0,3/4 = 0,075 \\ R^{2/3} &= 0,17784 \end{aligned}$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$V_5^2/2g = 0,04826 \quad (C_D = 0,58)$$

$$h_{f5} = 0,01482 \times V_5^2 = 0,01482 \times 0,97309^2 = 0,01403 \text{ m}$$

$$H_6 = H_5 + \Delta z + h_{f5} = 0,46180 + 0,01125 + 0,01403 = 0,48708 \text{ m}$$

6ο στόμιο:

$$q_6 = \alpha \times 0,58 \times (2 \times 9,81 \times H_6)^{0,5}$$

$$q_6 = 0,0079 \times 0,58 \times (2 \times 9,81 \times 0,48708)^{0,5} = 0,01416 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_6 = q_6 / A + V_5 = 0,19944 + 0,97309 = 1,17259 \text{ m/s}$$

$$\text{Υδραυλική ακτίνα} \quad R = D/4 = 0,3/4 = 0,075$$

$$R^{2/3} = 0,17784$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$V_6^2/2g = 0,07008 \quad (C_D = 0,565)$$

$$h_{f6} = 0,01482 \times V_6^2 = 0,01482 \times 1,17259^2 = 0,02038 \text{ m}$$

$$H_7 = H_6 + \Delta z + h_{f6} = 0,48708 + 0,01125 + 0,02038 = 0,51871 \text{ m}$$

7ο στόμιο:

$$q_7 = \alpha \times 0,565 \times (2 \times 9,81 \times H_7)^{0,5}$$

$$q_7 = 0,0079 \times 0,565 \times (2 \times 9,81 \times 0,51871)^{0,5} = 0,01424 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_7 = q_7 / A + V_6 = 0,20056 + 1,17259 = 1,37314 \text{ m/s}$$

$$\text{Υδραυλική ακτίνα} \quad R = D/4 = 0,3/4 = 0,075$$

$$R^{2/3} = 0,17784$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$V_7^2/2g = 0,09610 \quad (C_D = 0,545)$$

$$h_{f7} = 0,01482 \times V_7^2 = 0,01482 \times 1,37314^2 = 0,02794 \text{ m}$$

$$H_8 = H_7 + \Delta z + h_{f7} = 0,51871 + 0,01125 + 0,02794 = 0,55790 \text{ m}$$

8ο στόμιο:

$$q_8 = \alpha \times 0,545 \times (2 \times 9,81 \times H_8)^{0,5}$$

$$q_8 = 0,0079 \times 0,545 \times (2 \times 9,81 \times 0,55790)^{0,5} = 0,01424 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_8 = q_8 / A + V_7 = 0,20056 + 1,37314 = 1,57377 \text{ m/s}$$

$$\text{Υδραυλική ακτίνα } R = D/4 = 0,3/4 = 0,075$$

$$R^{2/3} = 0,17784$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$V_8^2/2g = 0,12624 \text{ (} C_D = 0,530 \text{)}$$

$$h_{f9} = 0,01482 \times V_9^2 = 0,01482 \times 1,57377^2 = 0,03671 \text{ m}$$

$$H_9 = H_8 + \Delta z + h_{f8} = 0,55790 + 0,01125 + 0,03671 = 0,60586 \text{ m}$$

9ο στόμιο:

$$q_9 = \alpha \times 0,530 \times (2 \times 9,81 \times H_9)^{0,5}$$

$$q_9 = 0,0079 \times 0,530 \times (2 \times 9,81 \times 0,60586)^{0,5} = 0,01444 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_9 = q_9 / A + V_8 = 0,20338 + 1,57377 = 1,77709 \text{ m/s}$$

$$\text{Υδραυλική ακτίνα } R = D/4 = 0,3/4 = 0,075$$

$$R^{2/3} = 0,17784$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$V_9^2/2g = 0,16 \text{ (} C_D = 0,50 \text{)}$$

$$h_{f10} = 0,01482 \times V_{10}^2 = 0,01482 \times 1,77709^2 = 0,0468 \text{ m}$$

$$H_{10} = H_9 + \Delta z + h_{f9} = 0,60586 + 0,01125 + 0,0468 = 0,66391 \text{ m}$$

10ο στόμιο:

$$q_{10} = \alpha \times 0,50 \times (2 \times 9,81 \times H_{10})^{0,5}$$

$$q_{10} = 0,0079 \times 0,50 \times (2 \times 9,81 \times 0,66391)^{0,5} = 0,01426 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \pi \times D^2/4 = \pi \times 0,30^2/4 = 0,0710 \text{ m}^2$$

$$\text{Άρα } V_{10} = q_{10} / A + V_9 = 0,20085 + 1,77709 = 1,97788 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Υδραυλική ακτίνα } R &= D/4 = 0,3/4 = 0,075 \\ R^{2/3} &= 0,17784 \end{aligned}$$

$$\Delta z = 3 \times 0,15 \times \Delta\rho/\rho = 0,45 \times 0,025 = 0,01125 \text{ m}$$

$$V_{10}^2/2g = 0,20 \text{ (} C_D = 0,48 \text{)}$$

$$h_{fB} = 0,01482 \times V_B^2 = 0,01482 \times 1,97788^2 = 0,05798 \text{ m}$$

$$H_B = H_{10} + \Delta z + h_{fB} = 0,66391 + 0,01125 + 0,05798 = 0,73314 \text{ m}$$

$$\Sigma q = 0,14044 \text{ m}^3/\text{s} \times 2 = 0,28088 \text{ m}^3/\text{s} = 280,88 \text{ l/sec} > 280 \text{ l/sec}$$

### ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

$$Q_{\max} = 280 \text{ l/sec}$$

$$Q_{\mu} = 120 \text{ l/sec}$$

$$J = (16 \text{ n}^2 Q^2) / (\pi^2 D^4 R^{4/3}) = (16 \text{ n}^2 Q^2 4^{4/3}) / (\pi^2 D^4 D^{4/3}) = 0,00012 / (D^{16/3})$$

$$\Delta h_{\text{αγωγού}} = 1000 J = 0,12 / (D^{16/3})$$

$$\text{Μέση καταναλισκόμενη ισχύς αντλιών} = [(120 \text{ l/sec} * (0,12 / D^{16/3})) / (0,65 \times 102)] = 0,217 / D^{16/3} \text{ Kw}$$

$$K_{\text{άντλησης}} = 0,08 \text{ €/Kwh} * 24 * 365 * (D^{16/3}) = 700,8 * (D^{16/3}) \text{ €/έτος}$$

$$\begin{aligned} K_{\text{κατασκευής}} &= \text{απόσβεση} + \text{συντήρηση} \\ \text{Απόσβεση} &= (900 e^{0,40D}) * [i(1+i)^N / ((1+i)^N - 1)] = 0,0665 * (900 e^{0,40D}) \\ \text{Συντήρηση} &= 0,01 * (900 e^{0,40D}) \end{aligned}$$

Συνολική ετήσια δαπάνη εξυπηρέτησης κεφαλαίου

$$K = (900 e^{0,40D}) 0,0765 * 1000 = 68,85 e^{0,40D} \times 1000$$

D	K <sub>άντλησης</sub>	K <sub>κατασκευής</sub>	ΣΚ
300	430,840	77,628	508,468
400	92,890	80,796	173,686
500	28,255	84,093	112,348
600	10,685	87,525	98,210
<b>700</b>	<b>4,696</b>	<b>91,098</b>	<b>95,794</b>
800	2,303	94,815	97,118

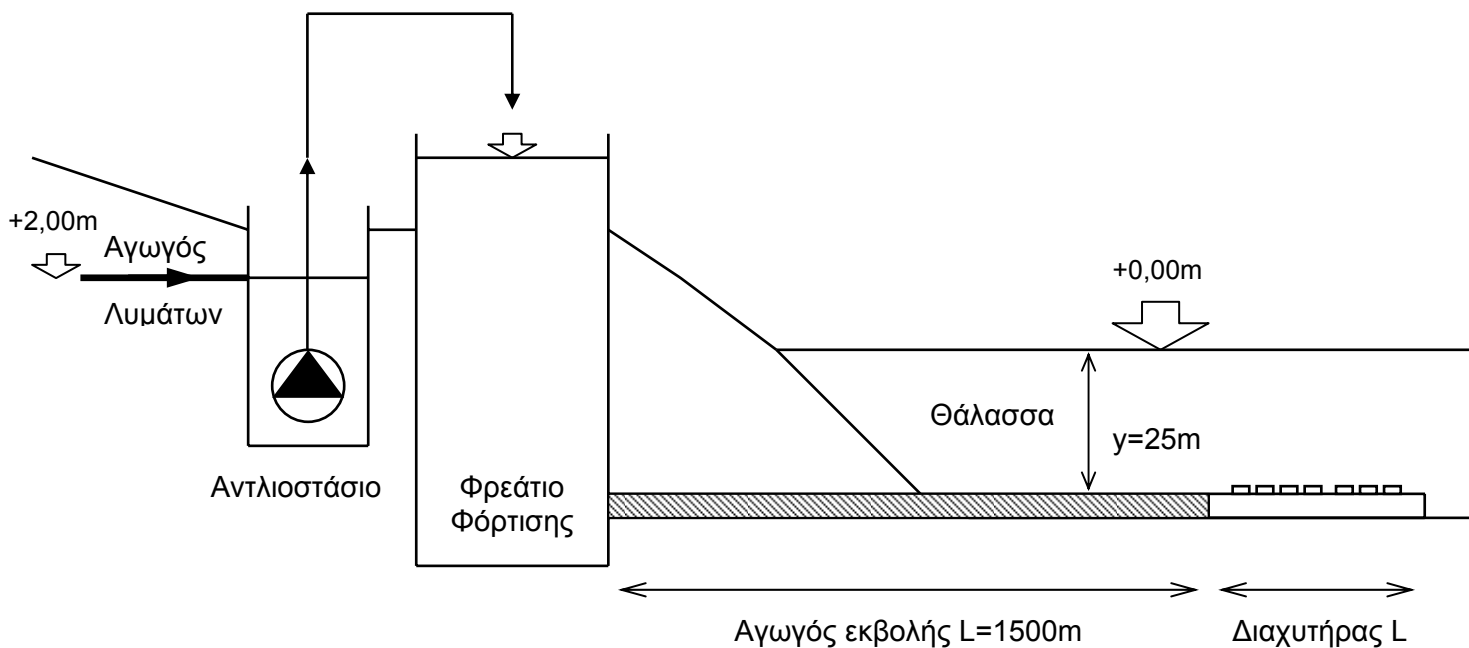
### Άσκηση 9: Σχεδιασμός Διαχυτήρα

Λύματα με παροχή αιχμής  $Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{sec}$  και μέση ετήσια παροχή  $Q = 0,20 \text{ m}^3/\text{sec}$  πρόκειται να διατεθούν σε θαλάσσιο αποδέκτη σε βάθος  $y = 25 \text{ m}$ . Ο αγωγός εκβολής έχει μήκος  $1500 \text{ m}$  και διάμετρο  $0,60 \text{ m}$ . Σε προέκταση του αγωγού εκβολής κατασκευάζεται διαχυτήρας με διάμετρο  $0,60 \text{ m}$  που φέρει στόμια με στρογγυλεμένα χείλη διαμέτρου  $0,12 \text{ m}$ , τοποθετημένα σε αποστάσεις ανά  $3,5 \text{ m}$ . Η κλίση του πυθμένα στην περιοχή του διαχυτήρα είναι μηδενική και το βάθος παραμένει σταθερό ( $y = 25 \text{ m}$ ). Να βρεθούν:

1. Το απαιτούμενο μήκος του διαχυτήρα, ο αριθμός των στομιών και το φορτίο στην αρχή του διαχυτήρα με δεδομένο ότι στο τελευταίο στόμιο είναι επιθυμητή η διατήρηση ελάχιστου φορτίου  $H = 0,50 \text{ m}$  (για κυματισμούς).
2. Η επιτυγχάνομενη αρχική αραιώση με παραδοχή ενιαίας φλέβας.
3. Το γεωμετρικό ύψος άντλησης στο φρεάτιο φόρτισης του αγωγού, με δεδομένο ότι τα λύματα καταλήγουν σε απόλυτο υψόμετρο  $+2,00\text{m}$  ανάντη του φρεατίου.
4. Το ετήσιο κόστος ενεργειακών δαπανών λειτουργίας του έργου.

#### Δεδομένα

- α) Πυκνότητα θάλασσας  $\rho_a = 1,025 \text{ gr/cm}^3$  (μη στρωματωμένη)
- β) Υδραυλικοί υπολογισμοί κατά Manning με συντελεστή  $n = 0,010$
- γ) Κόστος ενέργειας  $0,08 \text{ € / kWh}$ .
- δ) Απόδοση αντλητικού συγκροτήματος  $n = 65\%$



## Λύση

### 1) Υπολογισμός αριθμού στομίων

#### 1<sup>ο</sup> στόμιο

$$H_1 = 0,5\text{m} \quad V_{1\text{κατάντη}} = 0 \text{ m/sec} \quad C_{D1} = 0,910$$

$$q_1 = C_{D1} \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1} = 0,910 \cdot \pi \cdot \frac{0,12^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,5} = 0,0322 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

$$Q_1 = Q_0 + q_1 = 0 + 0,0322 = 0,0322 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

#### 2<sup>ο</sup> στόμιο

$$V_{2\text{κατάντη}} = \frac{Q_1}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{0,0322 \cdot 4}{\pi \cdot 0,6^2} = 0,114 \text{ m/sec} \quad R = \frac{\pi D^2 / 4}{\pi D} = \frac{D}{4} = \frac{0,6}{4} = 0,15 \text{ m}$$

$$hf_{2 \rightarrow 1} = L_{2-1} \left( \frac{n \cdot V_{2\text{κατάντη}}}{R^{2/3}} \right)^2 = 3,5 \left( \frac{0,01 \cdot 0,114}{0,15^{2/3}} \right)^2 = 0,000057 \text{ m}$$

$$H_2 = H_1 + \frac{\Delta p}{\rho_0} \cdot \Delta y_{1-2} + hf_{2 \rightarrow 1} = 0,5 + 0,000057\text{m} = 0,500057 \text{ m}$$

$$C_{D2} = 0,909 \Rightarrow$$

$$q_2 = C_{D2} \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \sqrt{2gH_2} = 0,909 \cdot \pi \cdot \frac{0,12^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,500057} = 0,0322 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

$$Q_2 = Q_1 + q_2 = 0,0322 + 0,0322 = 0,0644 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

Συνεχίζοντας με τον ίδιο τρόπο φτιάχνουμε τον παρακάτω πίνακα

α/α	H	V <sub>κατάντη</sub>	V <sup>2</sup> /2gH	Cd	q	Q	V <sub>ανάντη</sub>	hf
1	0,500	0,000	0,000	0,910	0,0322	0,032	0,114	0,000
2	0,500	0,114	0,001	0,909	0,0322	0,064	0,228	0,000
3	0,500	0,228	0,005	0,905	0,0321	0,097	0,341	0,001
4	0,501	0,341	0,012	0,899	0,0319	0,128	0,454	0,001
5	0,502	0,454	0,021	0,891	0,0316	0,160	0,566	0,001
6	0,503	0,566	0,032	0,880	0,0313	0,191	0,677	0,002
7	0,505	0,677	0,046	0,868	0,0309	0,222	0,786	0,003
8	0,508	0,786	0,062	0,854	0,0305	0,253	0,894	0,004
9	0,511	0,894	0,080	0,838	0,0300	0,283	1,000	0,004
10	0,516	1,000	0,099	0,820	0,0295	0,312	1,104	0,005
11	0,521	1,104	0,119	0,802	0,0290	0,341	1,207	0,006
12	0,527	1,207	0,141	0,782	0,0285	0,370	1,307	0,008
13	0,535	1,307	0,163	0,762	0,0279	0,398	1,406	0,009
14	0,544	1,406	0,185	0,741	0,0274	0,425	1,503	0,010
15	0,554	1,503	0,208	0,721	0,0269	0,452	1,598	0,011
16	0,565	1,598	0,230	0,700	0,0264	0,478	1,691	0,013
17	0,577	1,691	0,252	0,680	0,0259	0,504	1,783	0,014

$Q_{17} = 0,504 \text{ m}^3 / \text{sec} > Q_{\text{αιχμης}} \Rightarrow$  απαιτούνται 17 στόμια.

Μήκος διαχυτήρα =  $(17-1) \cdot 3,5 = 56 \text{ m}$

Φορτίο στην αρχή διαχυτήρα  $H_{17} = 0,577 \text{ m}$

## 2) Αραίωση

$$S = \alpha \cdot (g')^{1/3} \cdot y_m \cdot q^{-2/3}$$

$$\alpha = 0,38$$

$$g' = \frac{\rho_{\alpha_0} - \rho}{\rho} \cdot g = \frac{1,025 - 1}{1} \cdot 9,81 = 0,24525 \text{ m}^2 / \text{sec}$$

$$y_m = 25 \text{ m}$$

$$q = \frac{0,5 \text{ m}^3 / \text{s}}{56 \text{ m}} = 0,0089 \text{ m}^2 / \text{sec}$$

S = 138 φορές

## 3) Γεωμετρικό ύψος άντλησης

Απώλειες στον αγωγό εκβολής

$$V_{\alpha\gamma} = \frac{Q}{\pi \frac{D^2}{4}} = \frac{4 \cdot 0,5}{\pi \cdot 0,6^2} = 1,768 \text{ m/sec}$$

$$R_{\alpha\gamma} = \frac{D}{4} = \frac{0,6}{4} = 0,15 \text{ m}$$

$$h_{f_{αγ}} = L \cdot \left( \frac{n \cdot V_{αγ}}{R_{αγ}^{2/3}} \right)^2 = 1500 \left( \frac{0,01 \cdot 1,768}{0,15^{2/3}} \right)^2 = 5,89 \text{ m}$$

#### Απώλειες λόγω διαφοράς πυκνότητας

$$h_{\Delta\rho} = \Delta z \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} = 25 \cdot \frac{1,025 - 1}{1} = 0,625 \text{ m}$$

#### Απαιτούμενο φορτίο στο φρεάτιο φόρτισης

$$H_{\omega\phi} = H_{17} + H_{f_{αγ}} + h_{\Delta\rho} = 0,577 + 5,89 + 0,625 = 7,092 \text{ m}$$

#### **4) Ετήσιο Ενεργειακό κόστος άντλησης**

$$H_{\text{άντλησης}} = H_{\omega\phi} - 2,0 = 7,092 - 2,0 = 5,092 \text{ m}$$

$$\text{Απαιτούμενη ισχύς } I = (Q_{\text{max}} \cdot \rho \cdot g \cdot H_{\text{άντλησης}}) / \eta = (0,5 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 5,092) / 0,65 = 38425 \text{ Watt}$$

$$(\rho = 1000 \text{ kg/m}^3)$$

$$\text{Οπότε Ισχύς } I = 38,5 \text{ Kw}$$

$$\text{Ώρες λειτουργίας /έτος} = (Q_{\mu} / Q_{\text{max}}) \cdot 24 \cdot 365 = (0,2 / 0,5) \cdot 24 \cdot 365 = 3504 \text{ hr/έτος}$$

( Το αντλητικό συγκρότημα θα δουλεύει διακοπτόμενα )

$$\text{Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση} = 38,5 \cdot 3504 = 134904 \text{ Kwh}$$

$$\text{Ετήσια δαπάνη αντλήσεων} = 0,08 \cdot 134904 = 10792 \text{ €}$$



### Άσκηση 10: Διάθεση Λυμάτων σε Ποταμό

Στη θέση 1 του ποταμού Α αποχετεύονται λύματα με παροχή  $Q_{\Lambda\Upsilon\text{M}} = 0,2 \text{ m}^3/\text{sec}$ , συγκέντρωση BOD  $F_{\Lambda\Upsilon\text{M}} = 30 \text{ mg/l}$  και συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου  $C_{\Lambda\Upsilon\text{M}} = 2 \text{ mg/l}$ . Το ποτάμι ανάντη της θέσης 1 έχει παροχή  $Q = 0,6 \text{ m}^3/\text{sec}$ , αμελητέα συγκέντρωση BOD και συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου  $C = 7 \text{ mg/l}$ .

Στη θέση 2 του ποταμού Α η οποία βρίσκεται 20 km κατάντη της θέσης 1, συμβάλει παραπόταμος με παροχή  $Q_{\Pi} = 0,2 \text{ m}^3/\text{sec}$ , συγκέντρωση BOD  $F_{\Pi} = 5 \text{ mg/l}$  και συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου  $C_{\Pi} = 1,5 \text{ mg/l}$  ενώ 15 km κατάντη της θέσης 2 ο ποταμός Α εκβάλλει στη θάλασσα. Ο ποταμός Α ανάντη της θέσης 2 έχει εγκάρσια διατομή  $S_1 = 3,2 \text{ m}^2$  ενώ κατάντη της θέσης 2 η διατομή είναι  $S_2 = 3,6 \text{ m}^2$ .

Ζητείται η ελάχιστη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου του ποταμού Α.

Δίνονται

$$K_1 = 0,4 \text{ day}^{-1}$$

$$K_2 = 0,9 \text{ day}^{-1}$$

$$C_s = 8,0 \text{ mg/l}$$

### Λύση

#### Σημείο 1 κατάντη

$$Q_A = Q_{\Lambda\Upsilon\text{M}} + Q = 0,8 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$F_A = \frac{Q_{\Lambda\Upsilon\text{M}} \cdot F_{\Lambda\Upsilon\text{M}} + Q \cdot F}{Q_{\Lambda\Upsilon\text{M}} + Q} = \frac{0,2 \cdot 30 + 0,6 \cdot 0}{0,8} = 7,5 \text{ mg/l}$$

$$C_A = \frac{0,2 \cdot 2 + 0,6 \cdot 7}{0,8} = 5,75 \text{ mg/l} \quad D_A = 2,25 \text{ mg/l}$$

$$U_1 = \frac{Q_{\Lambda\Upsilon\text{M}} + Q}{S_1} = \frac{0,2 + 0,6}{3,2} = 0,25 \text{ m/sec}$$

$$f = \frac{k_2}{k_1} = \frac{0,9}{0,4} = 2,25$$



### Τμήμα 1-2

Ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου

$$D_{C_{1-2}} = \frac{F_A}{f[f(1-(f-1) \cdot \frac{D_A}{F_A})]^{\frac{1}{f-1}}} = \frac{7,5}{2,25[2,25(1-(2,25-1) \cdot \frac{2,25}{7,5})]^{\frac{1}{2,25-1}}} = 2,538 \text{ mg/l}$$

$$x_C = \frac{U_1}{k_1} \ln \frac{F_A}{f \cdot D_{C_{1-2}}} = \frac{0,25 \cdot 86400}{0,4} \ln \frac{7,5}{2,25 \cdot 2,538} = 14728\text{m} < 20\text{km}$$

### Σημείο 2 ανάντη

$$F_{20000} = F_A \cdot e^{-k_1 \cdot X/U_1} = 7,5 \cdot e^{-0,4 \cdot \frac{20000}{0,25 \cdot 86400}} = 5,179\text{mg/l}$$

$$D_{20000} = \frac{k_1 \cdot F_A}{k_2 - k_1} \left[ e^{-k_1 \frac{X}{U_1}} - e^{-k_2 \frac{X}{U_1}} \right] + D_A \cdot e^{-k_2 \frac{X}{U_1}} =$$

$$= \frac{0,4 \cdot 7,5}{0,9 - 0,4} \left[ e^{-0,4 \cdot \frac{20000}{0,25 \cdot 86400}} - e^{-0,9 \cdot \frac{20000}{0,25 \cdot 86400}} \right] + 2,25 \cdot e^{-0,9 \cdot \frac{20000}{0,25 \cdot 86400}} = 2,513 \text{ mg/l} \Rightarrow$$

$$C_{20000} = 8 - 2,513 = 5,487 \text{ mg/l}$$

### Σημείο 2 κατόντη

$$F_2 = \frac{Q_A \cdot F_{20000} + Q_{II} \cdot F_{II}}{Q_A + Q_{II}} = \frac{0,8 \cdot 5,179 + 0,2 \cdot 5}{0,8 + 0,2} = 5,143\text{mg/l}$$

$$C_2 = \frac{Q_A \cdot C_{20000} + Q_{II} \cdot C_{II}}{Q_A + Q_{II}} = \frac{0,8 \cdot 5,487 + 0,2 \cdot 1,5}{0,8 + 0,2} = 4,690 \text{ mg/l} \Rightarrow D_2 = 3.310 \text{ mg/l}$$

### Τμήμα 2-3

$$U_2 = \frac{Q_A + Q_{II}}{S_2} = \frac{1}{3.6} = 0.278 \text{ m/sec}$$

$$D_{C_{2-3}} = \frac{F_2}{f[f(1-(f-1) \cdot \frac{D_2}{f_2})]^{\frac{1}{f-1}}} = \frac{5,143}{2,25[2,25(1-(2,25-1) \cdot \frac{2,25}{7,5})]^{\frac{1}{2,25-1}}} = 4,412 \text{ mg/l}$$

$$\text{όμως } X_c = \frac{U_2}{k_1} \ln \frac{F_A}{f \cdot D_{C_{2-3}}} = \frac{0,278 \cdot 86400}{0,4} \ln \frac{5,143}{2,25 \cdot 4,412} = -39454 \text{ m}$$

δηλαδή η ελάχιστη τιμή στο τμήμα 2-3 παρατηρείται στην αρχή αυτού, στο σημείο 2.

Επομένως

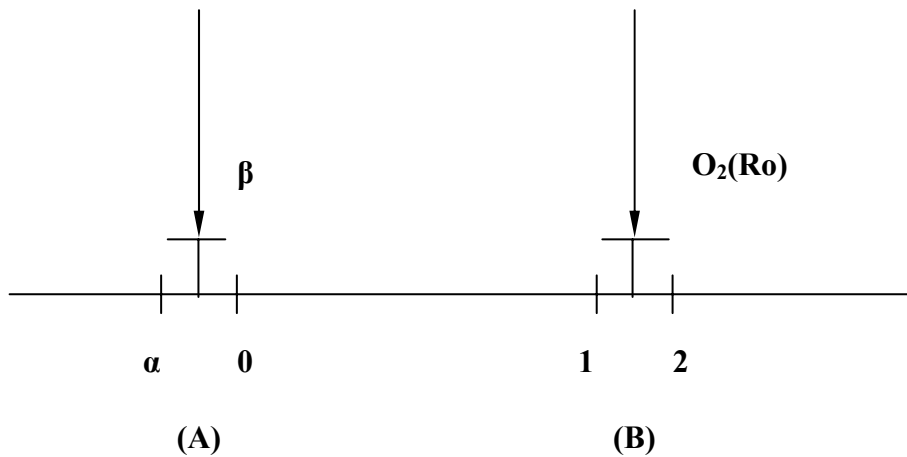
$$D_{\max} = D_2 = 3,310 \text{ mg/l} \quad C_{\min} = 4,690 \text{ mg/l}$$

**Άσκηση 11: Αποξυγόνωση Ποταμού**

Στη θέση A υδατορεύματος αποχετεύονται λύματα με παροχή  $Q_\beta = 0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ , συγκέντρωση  $\text{BOD}_5$   $F_\beta = 30 \text{ mg/l}$  και συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου  $C_\beta = 1 \text{ mg/l}$ . Ανάντη της θέσης αυτής είναι  $Q_\alpha = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $F_\alpha = 5 \text{ mg/l}$  και  $C_\alpha = 7 \text{ mg/l}$ .

Για να μην ταπεινωθεί η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε επίπεδα χαμηλότερα από  $5 \text{ mg/l}$  θα εγκατασταθεί στη θέση B του υδατορεύματος,  $8000 \text{ m}$  κατάντη της θέσης A, μηχανικός αεριστής με δυναμικότητα παροχής οξυγόνου στο νερό του υδατορεύματος ίση με  $R_o$  ( $\text{KgO}_2/\text{ώρα}$ ) έτσι ώστε η ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου κατάντη του B να είναι  $5 \text{ mg/l}$ .

Ζητείται να υπολογισθεί η δυναμικότητα  $R_o$ . Υποτίθεται ότι το μήκος του υδατορεύματος κατάντη του B είναι αρκετά μεγάλο για την πραγματοποίηση σ' αυτό του κρίσιμου ελλείμματος.



Ταχύτητα υδατορεύματος  $u = 0,30 \text{ m/s}$ . Συγκέντρωση κορεσμού  $C_s = 8 \text{ mg/l}$ . Συντελεστές αποξυγόνωσης και οξυγόνωσης  $k_1 = 0,30$  και  $k_2 = 0,60 \text{ ημ}^{-1}$ , αντίστοιχα.

### Λύση

1. Η εξίσωση ισορροπίας για τη συγκέντρωση  $O_2$  στον κόμβο Α είναι:

$$C_o(Q_\alpha + Q_\beta) = Q_\alpha C_\alpha + Q_\beta C_\beta \quad (1)$$

Από τη σχέση (1) προκύπτει η συγκέντρωση διαλυμένου  $O_2$  στο σημείο Ο μετά τον κόμβο Α:

$$C_o = (Q_\alpha C_\alpha + Q_\beta C_\beta) / (Q_\alpha + Q_\beta) \Rightarrow$$

$$C_o = 5,5 \text{ mg/l}$$

2. Το έλλειμμα  $O_2$  στο σημείο Ο δίδεται από τη σχέση:

$$D_o = C_s - C_o \quad (2)$$

$$D_o = 8 - 5,5 = 2,5 \text{ mg/l}$$

3. Η εξίσωση ισορροπίας για το BOD στον κόμβο Α είναι:

$$F_o(Q_\alpha + Q_\beta) = Q_\alpha F_\alpha + Q_\beta F_\beta \quad (3)$$

Από τη σχέση (2) προκύπτει η συγκέντρωση BOD στο σημείο Ο μετά τον κόμβο Α:

$$F_o = (Q_\alpha F_\alpha + Q_\beta F_\beta) / (Q_\alpha + Q_\beta)$$

$$F_o = 11,25 \text{ mg/l}$$

4. Το έλλειμμα  $O_2$  στο σημείο 1, ανάντη του κόμβου Β δίδεται από τη σχέση:

$$D_1 = [(k_1 F_o)(e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) / (k_2 - k_1)] + D_o e^{-k_2 t} \quad (4)$$

$$D_1 = 2,985 \text{ mg/l}$$

5. Η συγκέντρωση  $O_2$  στο σημείο 1 δίδεται από τη σχέση:

$$C_1 = C_s - D_1 \quad (5)$$

$$C_1 = 5,015 \text{ mg/l}$$

6. Η συγκέντρωση BOD στο σημείο 1 :

$$F_1 = F_0 e^{-k_1 t} \quad (6)$$

$$F_1 = 10,254 \text{ mg/l}$$

7. Η ελάχιστη συγκέντρωση O<sub>2</sub> στο υδατόρευμα πρέπει να είναι C<sub>min</sub>= 5mg/l

8. Το κρίσιμο έλλειμμα O<sub>2</sub> δίδεται από τη σχέση:

$$D_c = F_2 / [f(f(1 - (f-1) (D_2/F_2)))^{1/(f-1)}] \quad (7)$$

Όπου  $f = k_2/k_1$  και  $F_2=F_1$  αφού δεν παρεμβάλλεται άλλη πηγή BOD μεταξύ των σημείων 1 και 2. Άρα για  $D_c = C_s - C_{\min} = 8 - 5 = 3 \text{ mg/l}$  η σχέση (7) δίνει:

$$D_2 = 1,492 \text{ mg/l}$$

9. Η συγκέντρωση O<sub>2</sub> στο σημείο 2 πρέπει να είναι:

$$C_2 = C_s - D_2 \quad (8)$$

$$C_2 = 6,508 \text{ mg/l}$$

10. Για τη συγκέντρωση διαλυμένου O<sub>2</sub> στο σημείο 2 ισχύει η εξίσωση ισορροπίας:

$$Q_1 C_1 + R_o = Q_2 C_2 \Rightarrow$$

$$R_o = Q_2 C_2 - Q_1 C_1 \quad (9)$$

Όπου  $Q_1 = Q_2 = Q_a + Q_b = 2 \text{ mg/l}$  και  $R_o$  η δυναμικότητα του αεριστή.

Προκύπτει:

$$R_o = 10,75 \text{ kg O}_2/\text{hr}$$

## Άσκηση 12: Σχεδιασμός Εγκατάστασης Επεξεργασίας Πόσιμου

### Νερού

Πόλη 150,000 κατοίκων πρόκειται να υδρευθεί από νερό ταμιευτήρα κατηγορίας A2. Η ημερήσια παροχή σχεδιασμού είναι 50,000 m<sup>3</sup>/ημέρα και η εγκατάσταση θα περιλαμβάνει τις ακόλουθες μονάδες:

- Ταχεία μίξη
- Κροκίδωση
- Καθίζηση
- Δύλιση
- Χλωρίωση

Ζητούνται

- 1) Να διαστασιολογηθούν οι επιμέρους μονάδες της εγκατάστασης
- 2) Να υπολογισθεί η ισχύς ανάδευσης των αναμικτήρων στη δεξαμενή ταχείας μίξης και στην τριθάλαμη δεξαμενή κροκίδωσης και
- 3) Να υπολογισθεί η παροχή του αντλιοστασίου του νερού έκπλυσης και του αέρα έκπλυσης των φίλτρων

Κριτήρια σχεδιασμού

Χρόνος παραμονής στη δεξαμενή ταχείας μίξης	20 sec
Κλίση ταχύτητας G στη δεξαμενή ταχείας μίξης	1000 sec <sup>-1</sup>
Συνολικός χρόνος παραμονής τριθάλαμης δεξαμενής κροκίδωσης	20 min
Κλίση ταχύτητας G του 1 <sup>ου</sup> διαμερίσματος	70 sec <sup>-1</sup>
Κλίση ταχύτητας G του 2 <sup>ου</sup> διαμερίσματος	50 sec <sup>-1</sup>
Κλίση ταχύτητας G του 3 <sup>ου</sup> διαμερίσματος	30 sec <sup>-1</sup>
Τρεις δεξαμενές καθίζησης κυκλικής διατομής με επιφανειακή υδραυλική φόρτιση	40 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> - ημέρα
Οκτώ δυλιστήρια άμμου με επιφανειακή φόρτιση	8 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -hr
Νερό έκπλυσης	15 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -hr
Αέρας έκπλυσης	50 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -hr
Χρόνος παραμονής στη δεξαμενή χλωρίωσης	30 min

### Λύση

#### Δεξαμενή ταχείας μίξης

Χρόνος παραμονής =  $V/Q = 20 \text{ sec} \Rightarrow V = 20 \text{ sec} \times 50000/86400 \text{ m}^3/\text{sec} = 11,6 \text{ m}^3$

Θεωρώντας τετραγωνική ωφέλιμου βάθους 2,5 m προκύπτει:

$$V = b \times b \times \text{βάθος} = 11,6 \Rightarrow b = 2,15 \text{ m}$$

Η απαιτούμενη ισχύς ανάδευσης προκύπτει από την σχέση:

$$G = \left( \frac{P}{\mu V} \right)^{1/2} \quad (1)$$

όπου: P = ταχύτητα παροχής ενέργειας (ισχύς) (W)

V = όγκος του υγρού στη δεξαμενή κροκίδωσης (m<sup>3</sup>)

μ = απόλυτη συνεκτικότητα. (N sec/m<sup>2</sup>) = 1 x 10<sup>-3</sup> N sec/m<sup>2</sup> (για νερό)

Συνεπώς για G = 1000 sec<sup>-1</sup> προκύπτει απαιτούμενη ισχύς ανάδευσης P = 11,57 kW

### Δεξαμενή κροκίδωσης

Απαιτείται τριθάλαμη δεξαμενή κροκίδωσης με συνολικό υδραυλικό χρόνο παραμονής t, ίσο με 20 min.

Ο συνολικός όγκος της τριθάλαμης δεξαμενής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{\text{κροκίδωσης}} = t \times Q = 694,4 \text{ m}^3.$$

Άρα ο όγκος κάθε διαμερίσματος προκύπτει: V<sub>1</sub> = V<sub>2</sub> = V<sub>3</sub> = 694,4/3 = 231,5 m<sup>3</sup>.

Για βάθος κάθε δεξαμενής ίσο με 4 m υπολογίζονται οι διαστάσεις του κάθε θαλάμου:

$$L \times b = 231,5/4 \text{ m}^2$$

$$L/b = 3 \Rightarrow b = 4,4 \text{ m και } L = 13,2 \text{ m}$$

Η απαιτούμενη ισχύς ανάδευσης για κάθε διαμέρισμα προκύπτει από την σχέση (1):

$$P_1 = G_1^2 \times V_1 \times \mu \Rightarrow P_1 = 1,14 \text{ kW}$$

$$P_2 = G_2^2 \times V_2 \times \mu \Rightarrow P_2 = 0,58 \text{ kW}$$

$$P_3 = G_3^2 \times V_3 \times \mu \Rightarrow P_3 = 0,209 \text{ kW}$$



### Δεξαμενές καθίζησης

Αριθμός δεξαμενών = 3

Επιφανειακή φόρτιση  $q_{\text{υδραυλ}} = 40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ημέρα} = Q/A_{\text{ολικό}}$

Άρα η συνολική επιφάνεια δεξαμενών  $A_{\text{ολικό}} = 50000/40 = 1250 \text{ m}^2$

Συνεπώς η επιφάνεια και η διάμετρος της κάθε δεξαμενής είναι:

$$A_1 = A_2 = A_3 = 1250 / 3 = 416,7 \text{ m}^2$$

$$D_1 = D_2 = D_3 = 23 \text{ m}$$

Συνήθως το μέσο βάθος των δεξαμενών καθίζησης κυμαίνεται μεταξύ 3,5 – 5 m.

### Αυλιστήρια άμμου

Αριθμός κλινών = 8

Επιφανειακή φόρτιση =  $8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$

Η συνολική επιφάνεια των φίλτρων υπολογίζεται από την σχέση:

$$\text{Αφίλτρων} = 50000 \text{ m}^3/\text{d} / (8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \times 24 \text{ hr}/\text{d}) = 260,4 \text{ m}^2.$$

Επομένως η επιφάνεια κάθε κλίνης θα είναι  $260,4 / 8 = 32,55 \text{ m}^2$

Οι διαστάσεις κάθε κλίνης θα είναι  $L = 8,2 \text{ m}$  και πλάτος  $B = 4 \text{ m}$ . Συνήθως  $L/B > 2$ .

Το πάχος του στρώματος της άμμου στο φίλτρο κυμαίνεται μεταξύ 1 – 1,5 m.

### Δυναμικότητα αντλιοστασίου έκπλυσης φίλτρων

$$Q_{\text{αντλίας}} = 15 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \times 32,55 \text{ m}^2 = 488 \text{ m}^3/\text{hr}$$

### Δυναμικότητα αεροσυμπιεστών έκπλυσης φίλτρων

$$Q_{\text{αεροσυμπιεστή}} = 50 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \times 32,55 \text{ m}^2 = 1628 \text{ m}^3/\text{hr}$$

### Δεξαμενή χλωρίωσης

Υδραυλικός χρόνος παραμονής = 30 min

Άρα ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής χλωρίωσης ανέρχεται σε  $V_{\text{χλωρ}} = 50000/48 = 1042 \text{ m}^3$

Για ελάχιστο βάθος της δεξαμενής χλωρίωσης ίσο με 1,5 m προκύπτει ότι η συνολική επιφάνεια της δεξαμενής χλωρίωσης ανέρχεται σε  $694,7 \text{ m}^2$ .

Για την επίτευξη εμβολοειδούς ροής στη δεξαμενή χλωρίωσης κατασκευάζεται δεξαμενή μαιανδρικής ροής με σχέση συνολικού μήκους ροής προς πλάτος:

$$L_{\text{ολικό}}/b \geq 40$$

Όπου  $L_{\text{ολικό}}$  το συνολικό μήκος ροής του νερού στη δεξαμενή χλωρίωσης και  $b$  το πλάτος κάθε διαμερίσματος.

$$A \text{ χλωρίωσης} = L_{\text{ολικό}} \times b = 694,7 = 40 b \times b \Rightarrow b = 4,17 \text{ m} \Rightarrow L_{\text{ολικό}} = 166,8 \text{ m}$$

Επιλέγοντας 5 διαμερίσματα το συνολικό απαιτούμενο μήκος της δεξαμενής είναι 33,4 και το πλάτος της δεξαμενής ίσο με 20,85 m.

### Άσκηση 13: EEN

Να διαστασιολογηθεί εγκατάσταση επεξεργασίας για την παραγωγή πόσιμου νερού δυναμικότητας 10.000 m<sup>3</sup>/ημέρα, αποτελούμενη από τις ακόλουθες επί μέρους μονάδες:

1. Φρεάτιο ταχείας ανάμιξης με χρόνο παραμονής 1 min και κλίση ταχύτητας  
 $G = 500 \text{ sec}^{-1}$
2. Τριθάλαμη δεξαμενή κροκίδωσης με συνολικό χρόνο παραμονής 20 min και  
 $G = 100, 80 \text{ και } 60 \text{ sec}^{-1}$  για τους τρεις θαλάμους αντίστοιχα.
3. Δεξαμενές καθίζησης πλευρικού βάθους 3 m και επιφανειακής φόρτισης  
 $50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ημέρα}$ .
4. Μονάδες διύλισης άμμου με επιφανειακή φόρτιση  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ώρα}$  (όταν το ένα διυλιστήριο βρίσκεται εκτός λειτουργίας λόγω έκπλυσης) και παροχές έκπλυσης:  
 $q_{\text{νερού}} = 20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ώρα}$ ,  $q_{\text{αέρα}} = 50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ώρα}$ .
5. Δεξαμενή χλωρίωσης με χρόνο παραμονής 30 min, βάθος 1,8 m και λόγο μήκους διαδρομής προς πλάτος ζώνης 40/1.

Να υπολογισθούν οι διαστάσεις των μονάδων και τα βασικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού.

### Λύση

1.  $Q=10000/24*60=6,95 \text{ m}^3/\text{min}$   
 $V=6,95 \text{ m}^3$   
 $G=(P/\mu V)^{1/2} \quad ; \quad P=1,74 \text{ Kw}$
2.  $V_{\text{tot}}=6,95*20=139 \text{ m}^3 \quad ; \quad V1=V2=V3=46,34 \text{ m}^3$   
 $P1=100^2*10^{-6}*46,34=0,46 \text{ Kw}$   
 $P2=80^2*10^{-6}*46,34=0,30 \text{ Kw}$   
 $P3=60^2*10^{-6}*46,34=0,17 \text{ Kw}$
3.  $A=10000/50=200 \text{ m}^2$

Έστω 2 δεξαμενές :  $D=11,28 \text{ m}$

4. Απαιτούμενη επιφάνεια φίλτρων

$$A=10000/24*10=41,67 \text{ m}^2$$

Κατασκευάζονται 4 φίλτρα με επιφάνεια  $14 \text{ m}^2$  το καθένα

$$\text{Δυναμικότητα αντλίας έκπλυσης } Q=14*20=280 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\text{Δυναμικότητα φυσητήρα έκπλυσης } Q=14*50=700 \text{ m}^3/\text{hr}$$

5.  $V=30*6,95= 208 \text{ m}^3$

$$\text{Επιφάνεια}=208/1,8=116 \text{ m}^2$$

$$\text{Πλάτος ζώνης } =116/40=2,90 \text{ m}$$

$$\text{Μήκος διαδρομής}= 40 \text{ m}$$

Για μαίανδρο με 3 παράλληλες ζώνες, μήκος ζώνης=  $13,34 \text{ m}$

Κάτοψη χλωρίωσης  $8,70*13,34$  (καθαρές εσωτερικές διαστάσεις)

### Άσκηση 14: Διύλιση

Από παρατηρήσεις συγκεκριμένου φυσικού νερού, έχουν προκύψει οι ακόλουθες συσχετίσεις:

Θολότητα (NTU)	Αιωρούμενα στερεά SS (mg/l)	Απαιτούμενο θεικό αργίλιο Δ, (mg/l)
8	20	11
5	12	7
15	36	21
18	45	25
25	61	35
28	70	40
30	76	42
20	50	28
12	31	18
10	26	14

Κατά την επεξεργασία μέσω διυλιστηρίου κατακρατούνται τα κροκιδωμένα στερεά τα οποία εκτός από τα αιωρούμενα στερεά του φυσικού νερού περιέχουν και θεικό αργίλιο που ως στερεό αντιπροσωπεύει το 25% της δόσης.

Εάν ως κριτήριο αποδεκτού τρόπου λειτουργίας του διυλιστηρίου θεωρηθεί η απαίτηση να μην σπαταλάται για σκοπούς έκπλυσης περισσότερο από 3% του διυλισμένου νερού να βρεθεί η μέγιστη θολότητα του φυσικού νερού πέραν της οποίας απαιτείται και καθίζηση πριν από τη διύλιση.

Θα ληφθεί υπόψιν ότι:

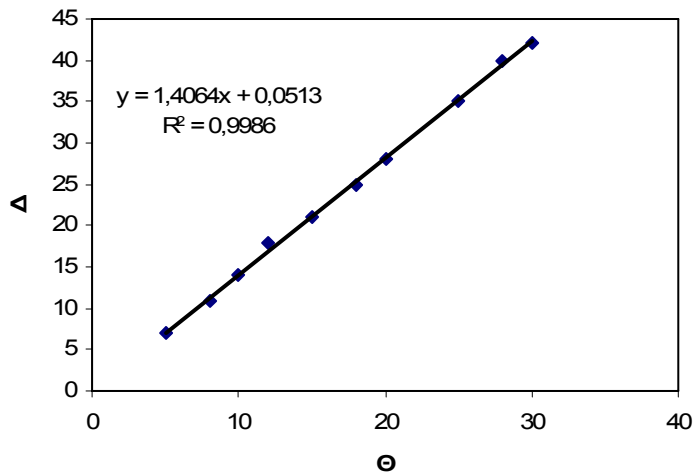
- Η φόρτιση λειτουργίας του διυλιστηρίου είναι  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ώρα}$ .
- Η μέγιστη δυνατότητα κατακράτησης στερεών στο φίλτρο μεταξύ διαδοχικών εκπλύσεων είναι  $4 \text{ kg}/\text{m}^2$  φίλτρου.
- Σε κάθε έκπλυση διοχετεύεται νερό  $60 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ώρα}$  για 3 λεπτά και στη συνέχεια  $12 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ώρα}$  για 15 λεπτά..

### Λύση

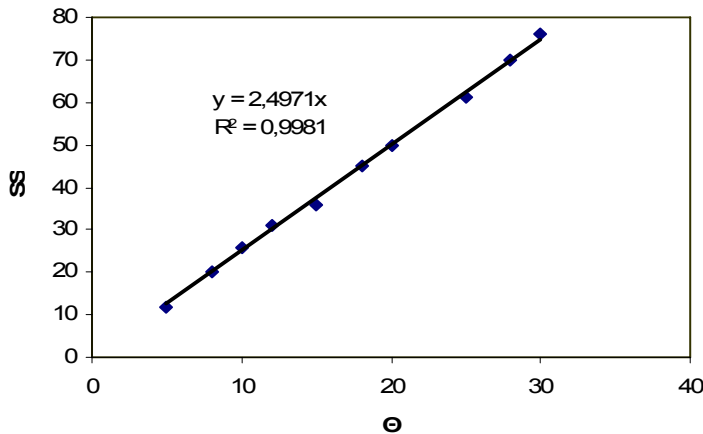
α) Από τα δεδομένα βρίσκονται οι (γραμμικές όπως προκύπτει) συσχετίσεις

- Αιρούμενα στερεά (SS)-Θολότητα (Θ)
- Δόση Θεικού Αργιλίου (Δ)-Θολότητα (Θ)

**Συσχέτιση θολότητας-δόσης Θ.Α**



**Συσχέτιση θολότητας-αιωρ.στερεών**



β) Σε κάθε έκπλυση χρησιμοποιείται ανά  $m^2$  η ακόλουθη ποσότητα νερού:

$$60 \cdot 3/60 + 12 \cdot 15/60 = 3 \text{ m}^3 + 3 \text{ m}^3 = 6 \text{ m}^3 / m^2$$

γ) Η παροχή που έχει διυλισθεί ανά  $m^2$  μεταξύ διαδοχικών εκπλύσεων πρέπει να είναι:

$$Q = 6/0,03 = 200 \text{ m}^3 \text{ και ο χρόνος μεταξύ εκπλύσεων } t = 200/10 = 20 \text{ ώρες}$$

δ) Η ποσότητα στερεών που έχει συγκρατηθεί είναι  $4 \text{ kg/m}^2$  φίλτρου. Επομένως:

$$Q \cdot (SS + 0,25 \cdot \Delta) = 4$$

$$\text{Επειδή } SS = 2,4791 \cdot \Theta \text{ και } \Delta = 1,4064 \cdot \Theta + 0,0513$$

$$Q \cdot (2,4791 \cdot \Theta + 0,25 \cdot (1,4064 \cdot \Theta + 0,0513)) = 4000 \text{ gr/ m}^2$$

**Λύνοντας ως προς  $\Theta$  προκύπτει  $\Theta = 7 \text{ NTU}$**

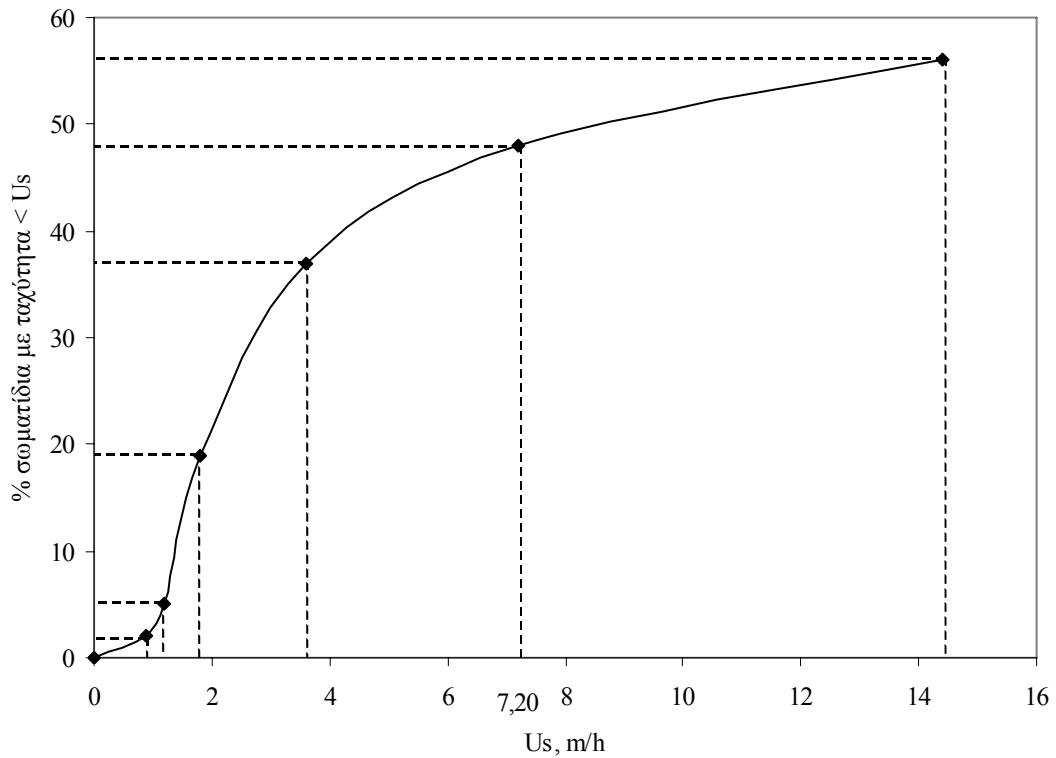
**Άσκηση 15: Διαστασιολόγηση δεξαμενής καθίζησης (κατηγορία 1)**

Από εργαστηριακή ανάλυση καθίζησης (σε σωλήνα βάθους 1,20 m), με λύματα που καθιζάνουν κατά την κατηγορία 1 βρέθηκαν τα αποτελέσματα του πίνακα που ακολουθεί. Ποια η απαιτούμενη συνολική επιφάνεια των δεξαμενών καθίζησης για την επεξεργασία 5.000 m<sup>3</sup>/ημέρα λυμάτων έτσι ώστε ο βαθμός απόδοσης ως προς αιωρούμενα στερεά να είναι 65%.

	Πίνακας					
Χρόνος καθίζησης (min)	5	10	20	40	60	80
% στερεών που παραμένουν	0,56	0,48	0,37	0,19	0,05	0,02

**Λύση**

Κατασκευάζουμε το διάγραμμα κατανομής ταχυτήτων καθίζησης



$$U_{Si} = \frac{h}{t_i} = \frac{1,20}{t_i} \quad (\text{π.χ. } U_{5,5} = \frac{1,20}{5/60} = 14,4 \text{ m/h})$$

Υπολογίζουμε τις αποδόσεις για τυχαίες τιμές επιφανειακών φορτίσεων q. Για ευκολία παίρνουμε τιμές που συμπίπτουν με τα U<sub>s</sub>.

Έτσι για q = 7,20 έχουμε:

$$E = (1 - 0,48) + \frac{1}{7,20} \int_0^{0,48} U_s dx$$

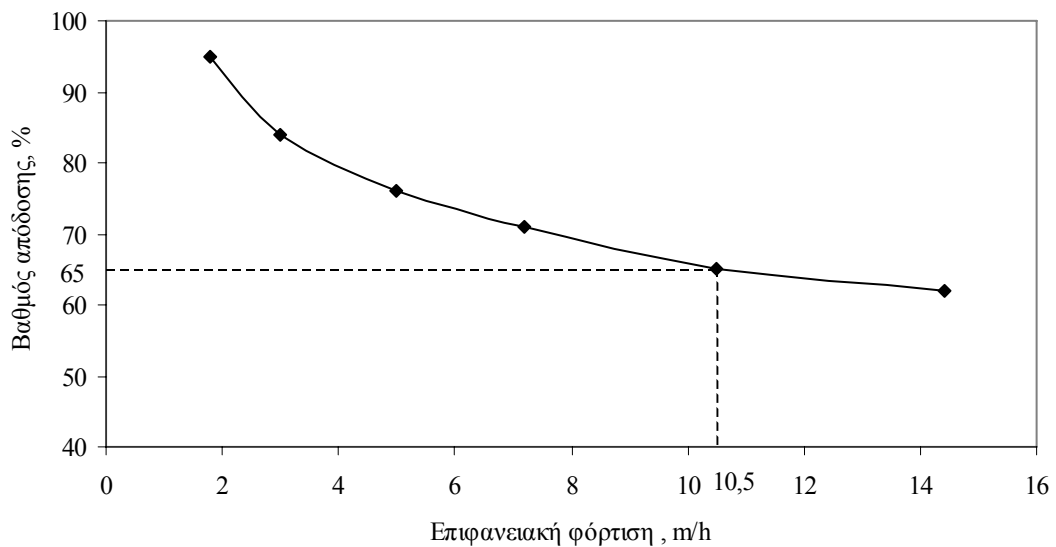
όπου:

$$\int_0^{0,48} U_s dx = \text{γραμμοσκιασμένο εμβαδόν} = 1,38 \text{ m/h}$$

$$E = 0,52 + \frac{1,38}{7,20} \rightarrow E = 0,71$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε τους βαθμούς απόδοσης για:

q = 14,4, 2,60, 1,80, 1,20 και 0,90 κατασκευάζουμε το διάγραμμα E, q.





$$\text{Για } E = 0,65 \rightarrow q = 10,5 \text{ m/h}$$

$$q_{\pi\rho} = 0,6 q_{\text{εργ.}} \rightarrow q_{\pi\rho} = 0,6 \times 10,5 \rightarrow q_{\pi\rho} = 6,30 \text{ m/h}$$

$$A = \frac{Q}{q} \quad A = \frac{5.000\text{m}^3/\text{h}}{6,30 \times 24\text{m/h}} \rightarrow A = 34\text{m}^2$$