



Τμήμα Χημικών Μηχανικών- Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΚΑΘΙΖΗΣΗ

Διεργασίες απομάκρυνσης σωματιδίων με βάση τη βαρύτητα

Καθίζηση

Μία εξαιρετικά απλή φυσική διεργασία, με αρκετές όμως περιπλοκές κατά το σχεδιασμό της.

Οι βασικότεροι παράμετροι σχεδιασμού η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων (αυτοτελών ή θρόμβων) και η ανοδική ταχύτητα του νερού (επιφανειακή φόρτιση).

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

**Η ουσιαστικότερη διαφορά στη φιλοσοφία
σχεδίασης
καθίζησης στις διεργασίες επεξεργασίας νερού και
αποβλήτων έγκειται στην απαιτούμενη απόδοση σε
σχέση με τη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών
στην
είσοδο.**

- Συνήθως η καθίζηση και η επίπλευση αποτελούν το πρώτο στάδιο κύριας απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων από το νερό, ενώ για την πλήρη απομάκρυνσή τους ακολουθεί η διήθηση.

Για σωματίδια συγκέντρωσης $> 50\text{mg/L}$ και

- με $d > 100\mu\text{m}$

- μεγάλο εύρος τιμών $d \rightarrow$ επιλέγεται καθίζηση / επίπλευση

Θεωρία της καθίζησης

Τα ιδανικά συστήματα που εξετάζονται ώστε να ληφθούν χρήσιμες κατευθύνσεις για την κατανόηση της συμπεριφοράς περισσότερο σύνθετων καταστάσεων είναι 4:

Κατηγορία 1: Καθίζηση διακεκριμένων σωματιδίων σε αιώρημα μικρής συγκέντρωσης. Π.χ. αμμοσυλλέκτης.

Κατηγορία 2: Μικρή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων τα οποία όμως συσσωρεύονται. Π.χ. καθίζηση αραιής διασποράς μετά από θρόμβωση με χημικές ενώσεις.

Κατηγορία 3: Υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων, όπου παρατηρείται παρεμποδιζόμενη καθίζηση. Πχ. καθίζηση βιολογικής λάσπης.

Κατηγορία 4: Πύκνωση λάσπης.

Καθίζηση διακεκριμένων σωματιδίων

Η ταχύτητα κατακάθισης V_{κ} εξαρτάται από ορισμένα φυσικά χαρακτηριστικά του σωματιδίου και δίνεται από τη σχέση

$$V_{\kappa} = \left[\frac{2g(\rho_s - \rho)v_s}{C_D \rho A_s} \right]^{1/2}$$

όπου, ρ_s : πυκνότητα σωματιδίου

ρ : πυκνότητα νερού

v_s : όγκος σωματιδίου

A_s : διατομή της προβολής του σωματιδίου
στην κατεύθυνση της ροής

C_D : συντελεστής οπισθέλκουσας

Για σφαιρικά σωματίδια η προηγούμενη σχέση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$V_{\kappa} = \left[\frac{4g(\rho_s - \rho)d}{3C_D \rho} \right]^{1/2}$$

Περιοχή	Περιοχή τιμών αριθμού Re	C_D
Stokes	$10^{-4} < \text{Re} < 0,2$	$\frac{24}{\text{Re}}$
Allen	$0,2 < \text{Re} < 500-1000$	$\frac{24}{\text{Re}} + \frac{3}{\text{Re}^{1/2}} + 0,34$
Newton	$500-1000 < \text{Re} < 2 \times 10^5$	0,44

Εξισώσεις υπολογισμού για σφαιρικά σωματίδια του συντελεστή οπισθέλκουσας ως συνάρτηση της τιμής του αριθμού Re

$$\text{Re} = \frac{V_{\kappa} \rho d}{\mu}$$

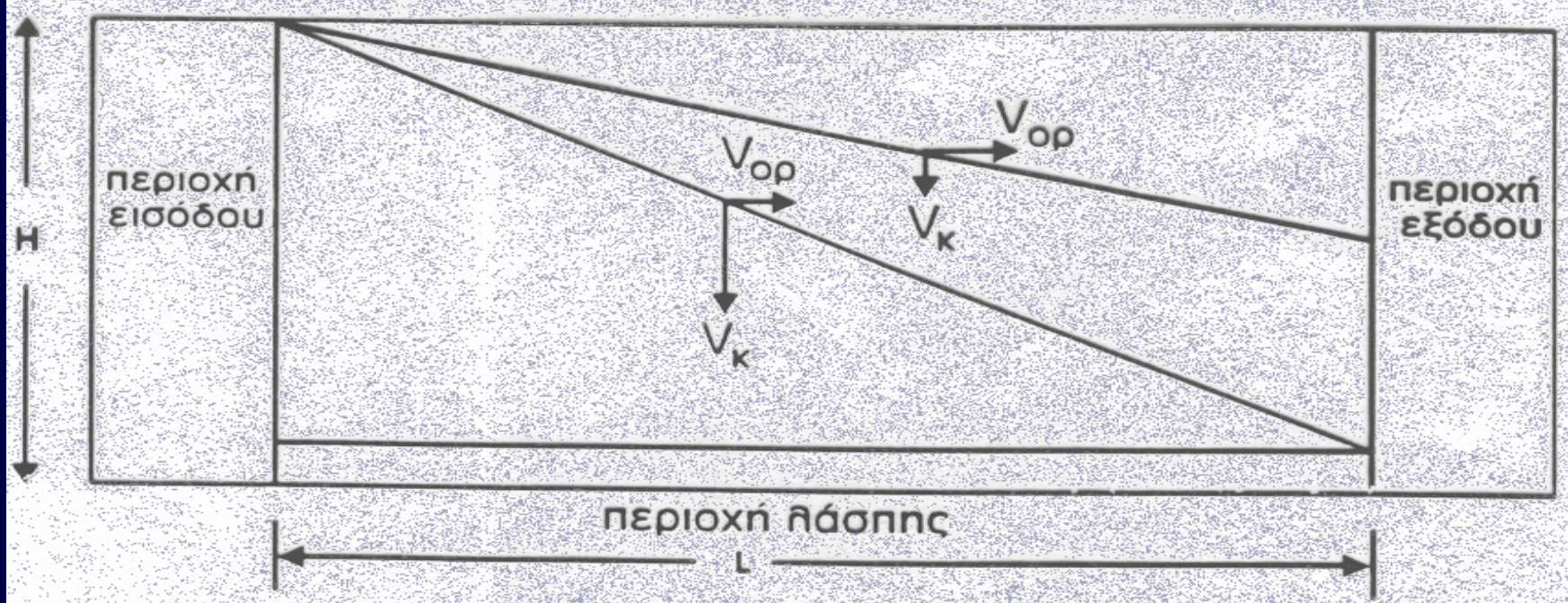
όπου, V_{κ} : ταχύτητα κατακάθισης – σχετική
ταχύτητα του σωματιδίου ως προς
το νερό

d : διάμετρος σωματιδίου

μ : ιξώδες του νερού

Υλικό	Φ	Υλικό	Φ
Άμμος	2	Γύψος	4
Κωκ	2,25	Φύλλα γραφίτη	22
Τάλκης	3,25	Μίκα	170

Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή Φ για



Ιδανική περιοχή καθίζησης ορθογωνικής διατομής

Σχεδιασμός καθίζησης διακεκριμένων σωματιδίων

1)

$$V_{\kappa} \geq \frac{Q}{A} = V_E$$

όπου Q = παροχή νερού

A = επιφάνεια δεξαμενής

2)

$$V_{ορ} < V_{\sigma} = \left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{\delta \kappa g d}{f} \right]^{1/2}$$

= οριζόντια ταχύτητα συμπαρασυρμού

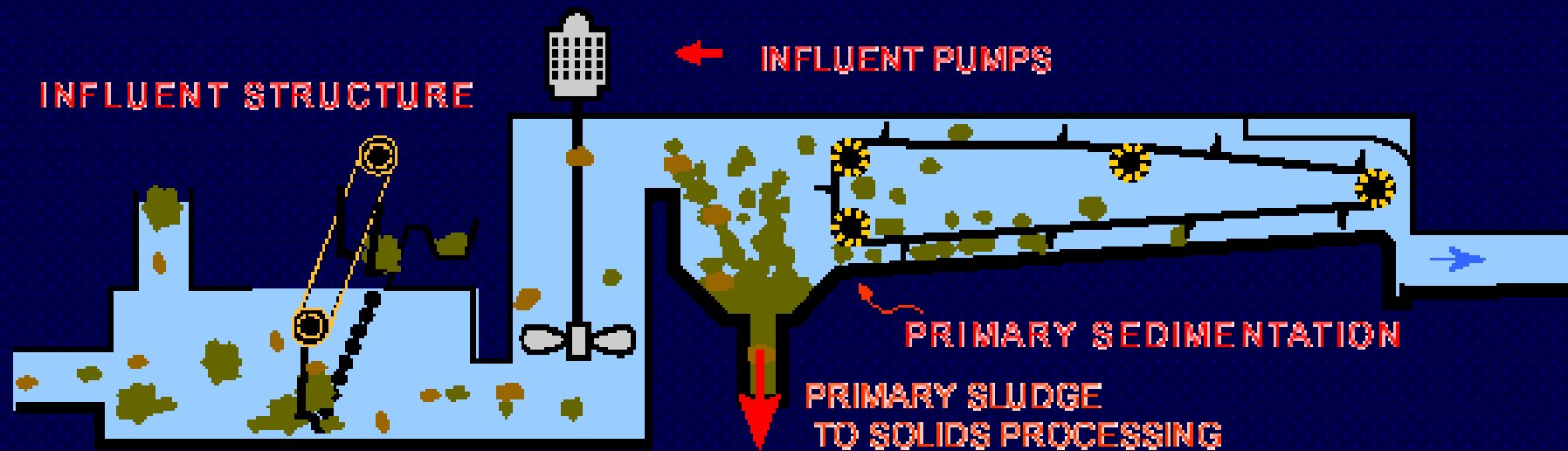
όπου $\kappa = 0,04$ για άμμο

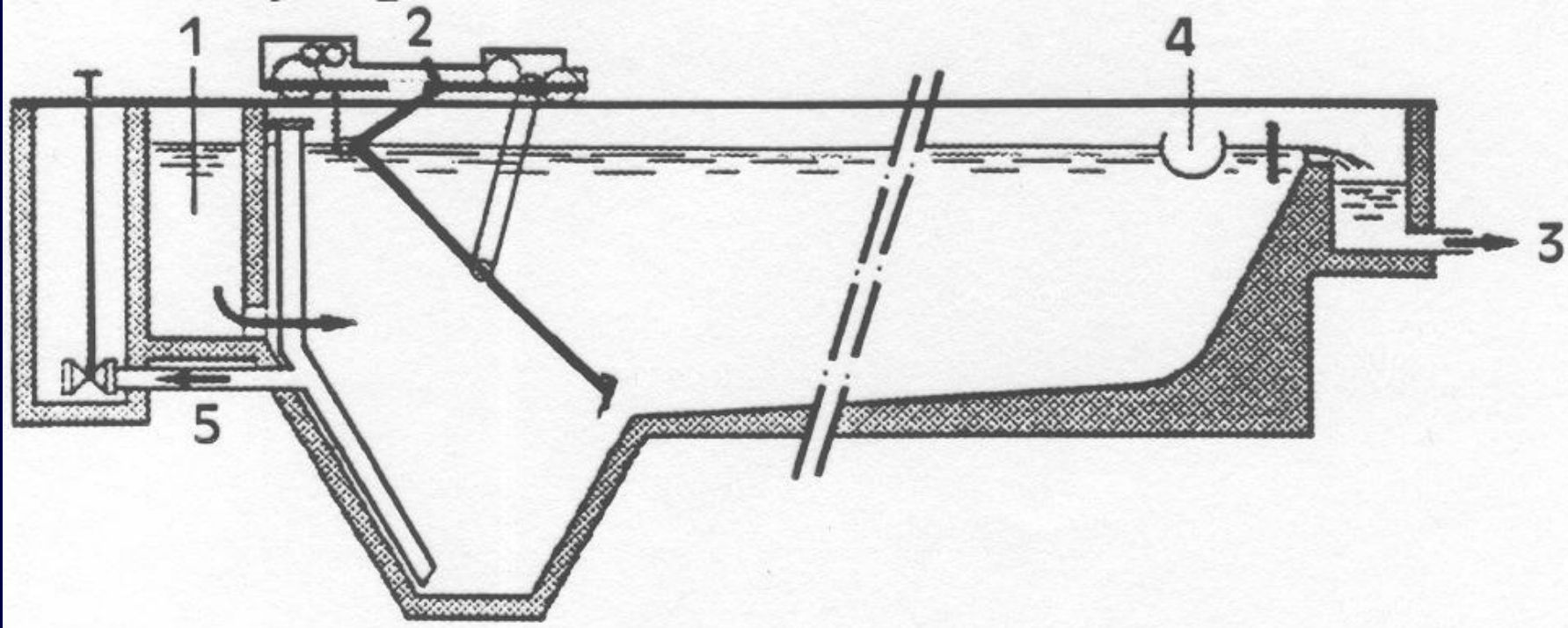
$\kappa = 0,06$ για

συσσωματώματα

**$f =$ συντελεστής Darcy-
Fanning $= 0,03$**

3)
$$t = \frac{H}{V_{\kappa} - V_E}$$





Παραλληλόγραμμη δεξαμενή καθίζησης με ξέστρο. 1) Φρεάτιο εισόδου, 2) Γέφυρα ξέστρου, 3) Επεξεργασμένο νερό, 4) Συλλέκτης επιπλεόντων, 5) Εξαγωγή λάσπης.

Παράμετρος σχεδιασμού	Περιοχή τιμών
Επιφανειακή φόρτιση, $m/h=V_E$	0,8-2,5
Βάθος νερού, m	3-5
Υδραυλικός χρόνος παραμονής, h	1,5-3

Αμμοσυλλέκτης



2. Καθίζηση συσσωματωμένων στερεών [Πρωτοβάθμια καθίζηση]

➔ Η συσσωμάτωση των σωματιδίων που καθιζάνουν συνοδεύεται από αλλαγές στην πυκνότητα και στην ταχύτητα καθίζησης



Ξέστρο καθίζησης



Διάταξη εισροής: κυκλικές ΔΠΚ

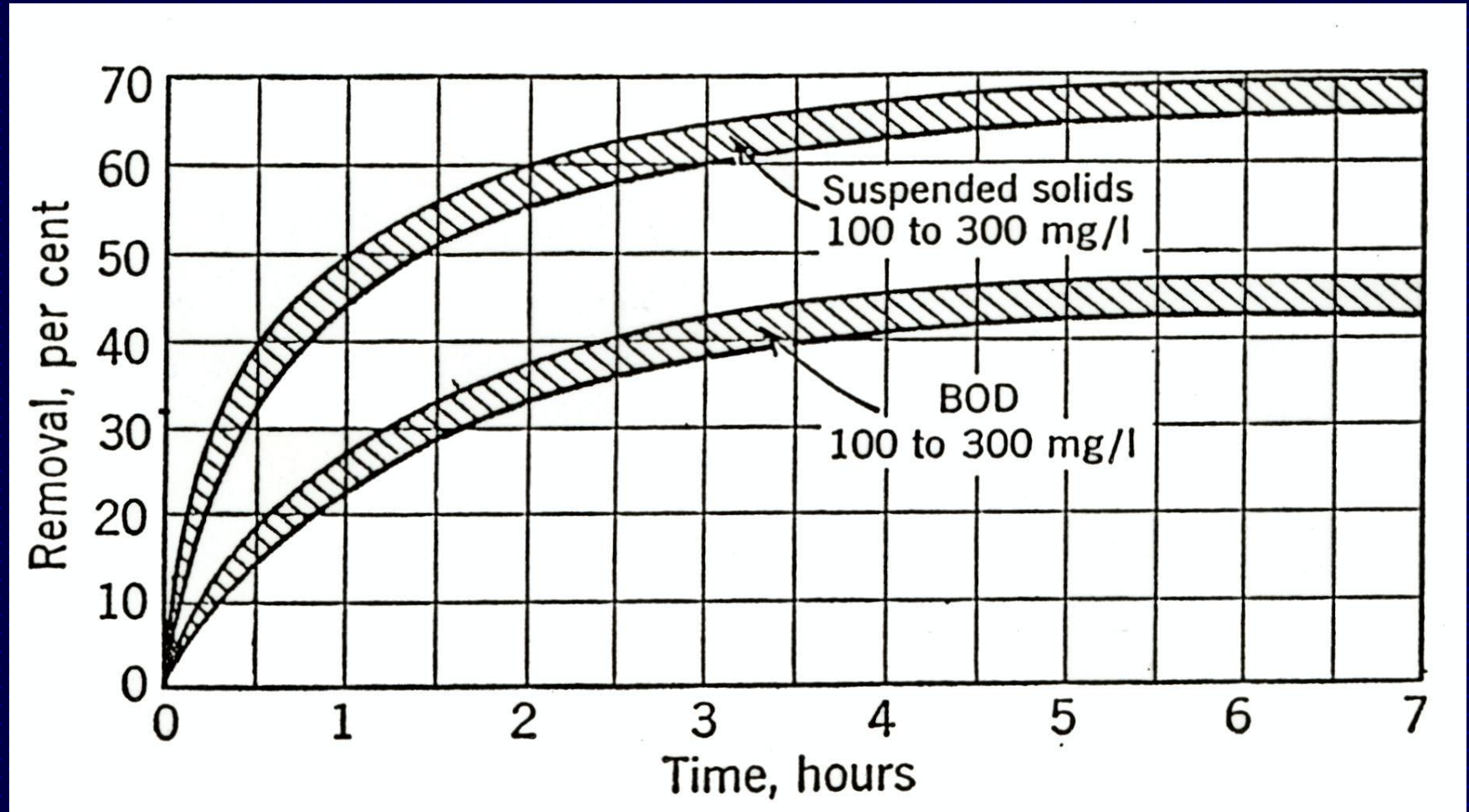
- ⇒ Η διάταξη εισροής είναι πιο σημαντική από ότι στις ορθογώνιες και μπορεί να είναι κεντρική ή περιφερειακή.
- ⇒ Η κεντρική διάταξη εισροής είναι ένας δακτύλιος - κόφτρα με διάμετρο 15 - 20% της διαμέτρου της ΔΠΚ που εκτείνεται μέχρι το μισό του βάθους της ΔΠΚ.
- ⇒ Η περιφερειακή διάταξη έχει επίσης δακτύλιο-κόφτρα που εκτείνεται μέχρι τον πυθμένα και η εισροή γίνεται εφαπτομενικά. Η διάταξη αυτή έχει βρεθεί να δημιουργεί καλύτερες συνθήκες ροής, να μην επηρεάζεται από ρεύματα και να κάνει τη ΔΠΚ 2,4 φορές αποδοτικότερη. από ότι με κεντρική διάταξη.

Διάταξη εκροής στις ΔΠΚ

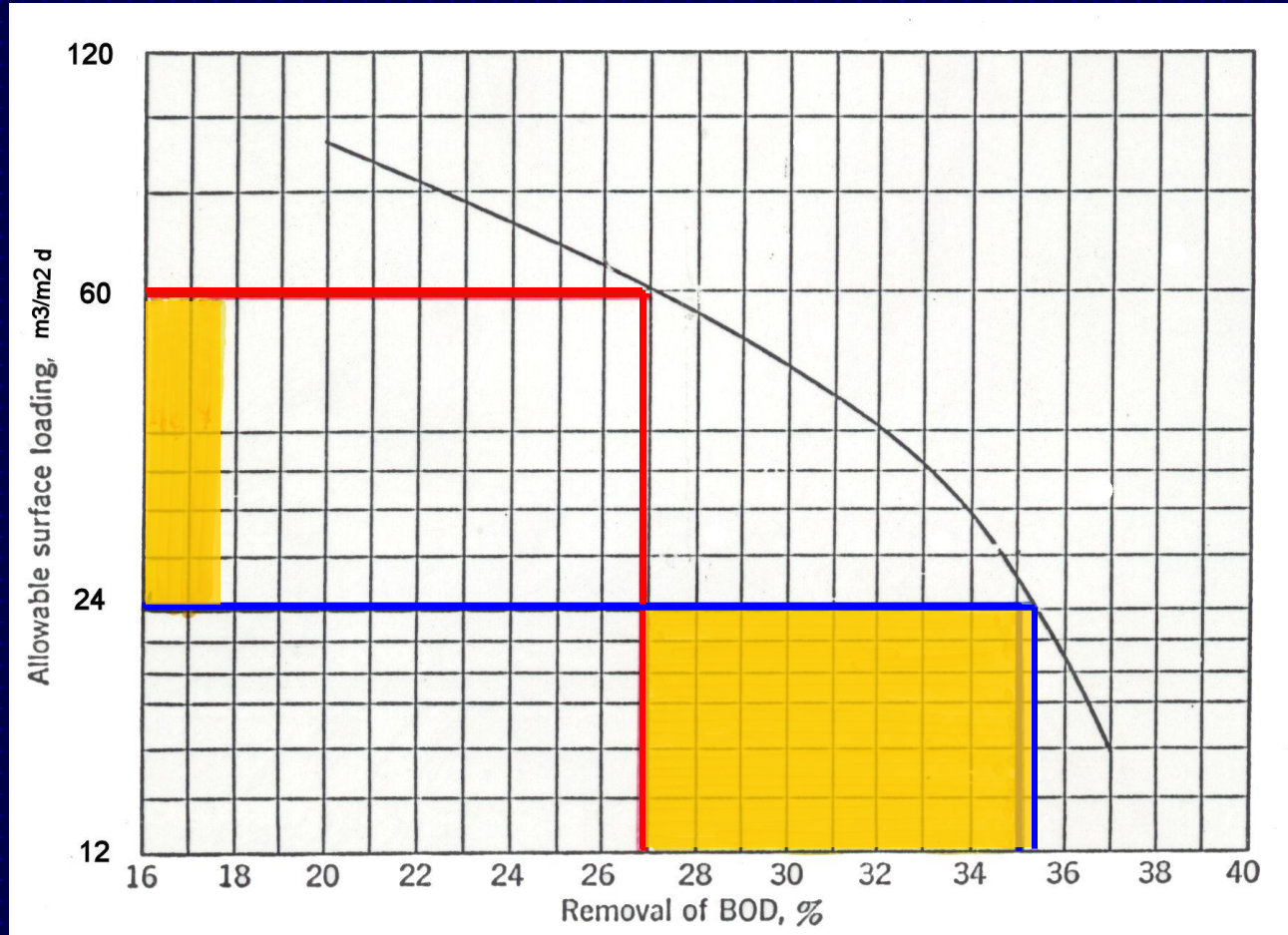
- ➔ Αποτελείται από έναν κεντρικό ή περιφερειακό υπερχειλιστή στις κυκλικές ΔΠΚ και από έναν ή πολλούς κατά πλάτος υπερχειλιστές στις ορθογώνιες.
- ➔ Εάν στις ΔΠΚ γίνεται συλλογή επιπλεόντων, ο υπερχειλιστής εκροής πρέπει να προστατεύεται με κόφτρα επιπλεόντων, που τοποθετείται πριν από αυτόν και σε βάθος 20-30 cm από την επιφάνεια του υγρού.



Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και οργανικού φορτίου από λύματα σε δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης



Διάγραμμα απομάκρυνσης BOD_5 στην πρωτοβάθμια καθίζηση σε σχέση με την επιφανειακή φόρτιση



Τυπικές τιμές σχεδιασμού δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης

Μέγεθος	Τυπική τιμή
Χρόνος παραμονής, h	1,5 - 3
Επιφανειακή φόρτιση, m³/m² d	24 – 48 (μέση παροχή) 80 – 120 (μέγιστη παροχή)
Βάθος πλευρικό, m	2 – 4
Κλίση πυθμένα, %	5 – 15
Ταχύτητα υπερχειλίσης, m³/m d	125 – 500

⇒ Χαρακτηριστικά και ποσότητες πρωτοβάθμιας λάσπης

- Η ποσότητά της εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου, την απόδοση της δεξαμενής καθίζησης και τα χαρακτηριστικά της λάσπης (συγκέντρωση, ειδική βαρύτητα, συνθήκες λειτουργίας που τα επηρεάζουν κλπ).

⇒ Η μάζα των στερεών που καθιζάνουν (λάσπη) υπολογίζεται με βάση τη μάζα των στερεών στην εισροή της ΔΠΚ και το ποσοστό απομάκρυνσής τους. Η παροχή της λάσπης :

$$Q_A = \frac{M}{1000 * C_A * s}$$

όπου Q_A παροχή λάσπης (στερεά+νερό) m^3/d , M η μάζα στερεών που απομακρύνονται kg/d , C_A συγκέντρωση στερεών λάσπης %, s ειδική πυκνότητα της λάσπης.

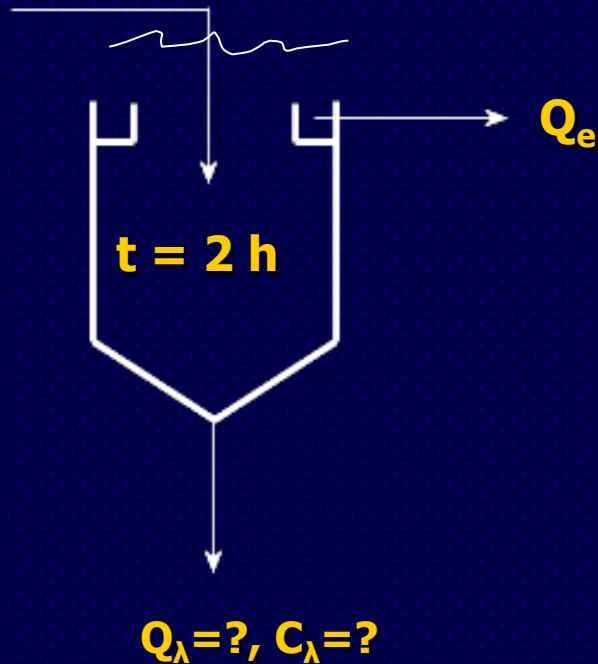
Παράδειγμα

Να βρεθεί η συγκέντρωση βιολογικού φορτίου στην έξοδο της παρακάτω δεξαμενής καθίζησης

$$Q_o = 100 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_o = 300 \text{ mg/L BOD}_5$$

$$SS_o = 220 \text{ mg/L}$$



$$SS_\lambda = 2 \% = 20000 \text{ mg/L}$$

Λύση

Για χρόνο παραμονής 2 h, η μείωση στερεών φτάνει το 60 % και του οργανικού φορτίου που καταλήγει στη λάσπη το 30 %. Επομένως:

$$Q_\lambda = Q_o \times \frac{SS_o}{SS_\lambda} \times [60/100] = 0,66 \text{ m}^3/\text{h}$$

Το φορτίο που έχει απομακρυνθεί

$$m_{\text{BOD}_5} = [30/100] \times Q_o \times C_o = 9.000 \text{ g/h}$$

$$C_\lambda = \frac{m_{\text{BOD}_5}}{Q_\lambda} = 13.636 \text{ g/m}^3$$

Άρα επιτυγχάνεται υψηλή συγκέντρωση βιολογικού φορτίου σε μικρό όγκο, γεγονός που διευκολύνει την αναερόβια επεξεργασία

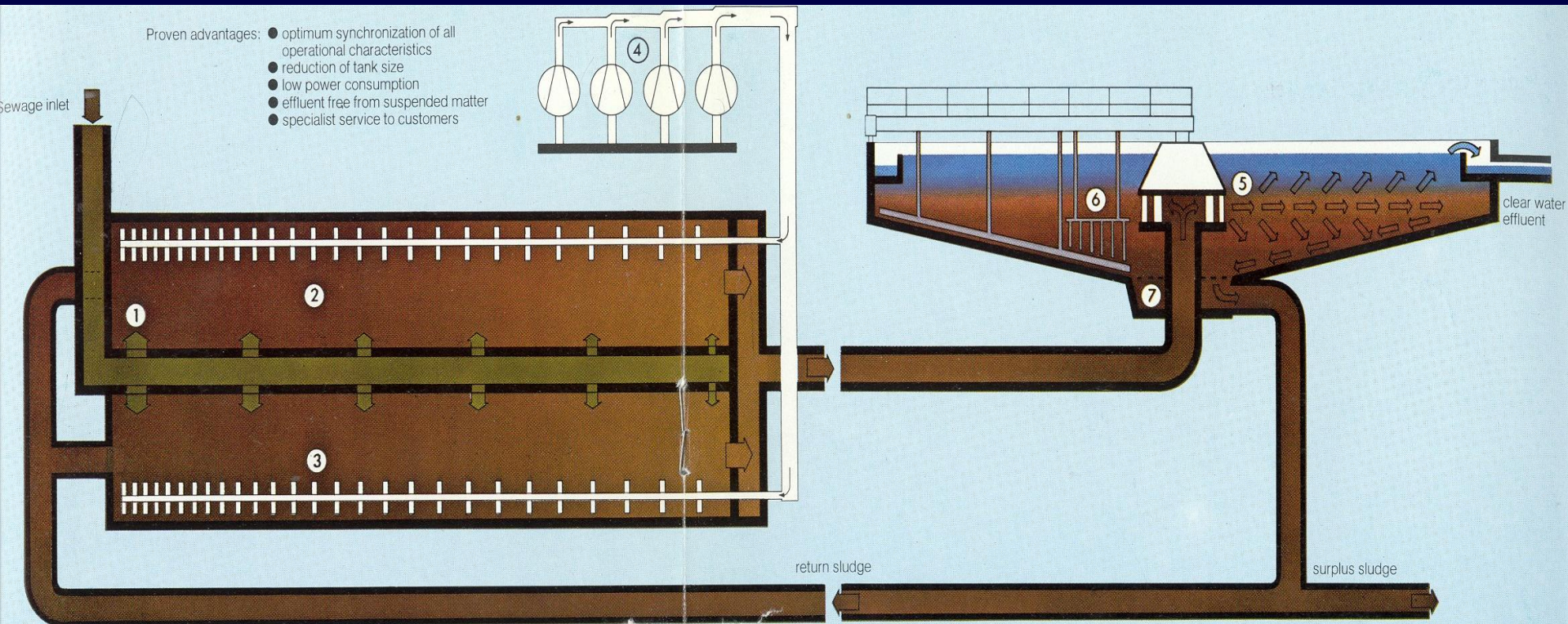
3. Καθίζηση θρόμβων

Οι θρόμβοι έχουν την τάση να συνενώνονται κατά την καθίζηση για δύο λόγους:

- 1. Εξαιτίας των διαφορών στην ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων, καθώς τα ταχύτερα καθιζάνοντα συμπαρασύρουν τα αργά συνεννούμενα με αυτά**
- 2. Επειδή οι δημιουργούμενες βαθμίδες ταχύτητας βοηθούν στη συνένωση**

Η καθίζηση θρόμβων επομένως επηρεάζεται :

- 1. πολύ από το βάθος**
- 2. λίγο από την απόλυτη ηρεμία**
- 3. πολύ από τη δημιουργία βαθμίδων ταχύτητας**



Proven advantages:

- optimum synchronization of all operational characteristics
- reduction of tank size
- low power consumption
- effluent free from suspended matter
- specialist service to customers

Activation:

- ① High solids concentration due to incremental feed – consequently high purification efficiency.
- ② Constant sludge loading throughout the tank – therefore uniform residual pollution throughout the tank.

③ Constant oxygen concentration throughout the tank due to step aeration – consequently optimum oxygen utilisation.

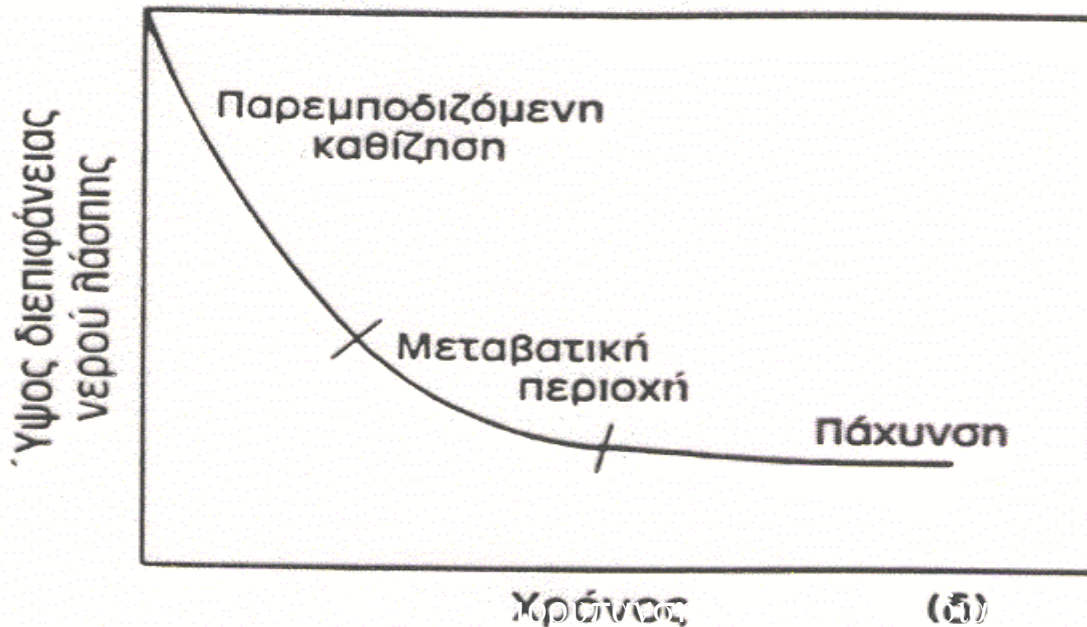
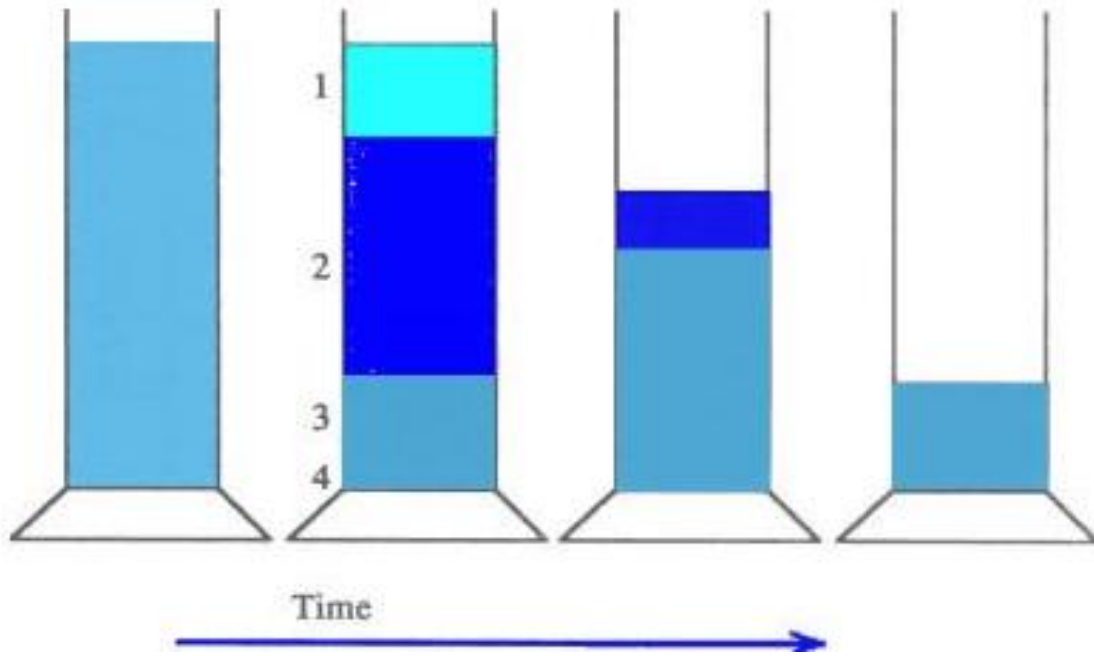
④ Excellent adjustment of oxygen supply to pollution load variations by central control of blowers – consequently minimum power consumption.

Sedimentation tank:

⑤ Low inlet velocity due to large inlet – therefore no turbulence in clear water zone and consequently effluent free from suspended matter.

⑥ Improved thickening of sludge by tubular rakes – therefore increased solids concentration in return sludge
 ⑦ Sludge removal over perforated plates – therefore uniform sludge removal at the entire circumference; low sludge depth.

Εξέλιξη καθίζησης θρόμβων [σε κύλινδρο του 1 L]



Κριτική εξέλιξη καθίζησης ζώνη

Παράδειγμα

- Ζητείται ο υπολογισμός της διαμέτρου της δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης της εγκατάστασης βιολογικής επεξεργασίας δυναμικότητας 10.000 ατόμων.

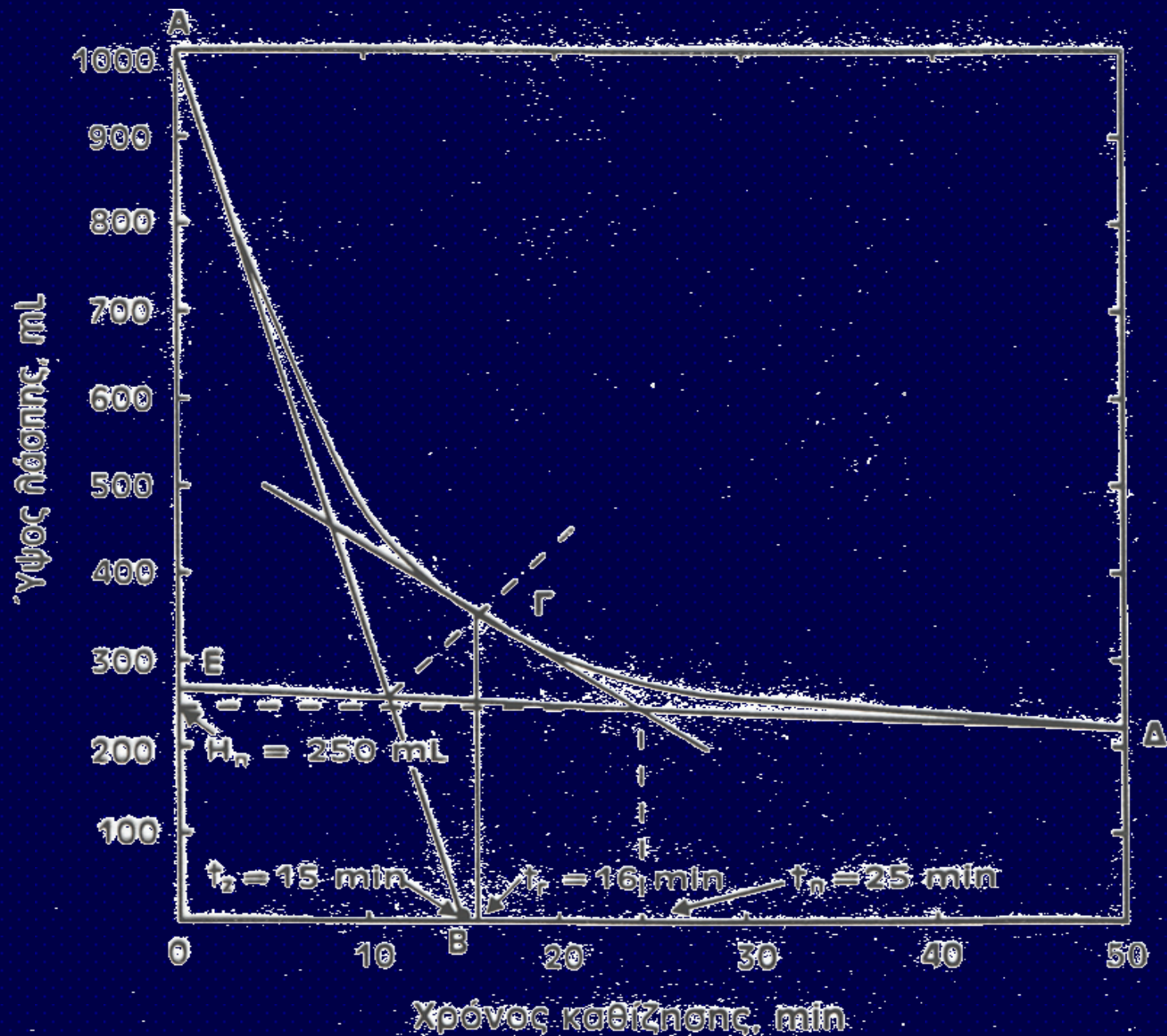
- **Δεδομένα:**

1. Παροχή αποβλήτων: $Q = 2.000 \text{ m}^3/\text{d}$,
2. Συγκέντρωση λάσπης στη δεξαμενή αερισμού: $X_v = 2.500 \text{ mg/L}$,
3. Επιθυμητή συγκέντρωση λάσπης στην καθίζηση: $X_{rv} = 2.500 \text{ mg/L}$.

Τα πειραματικά δεδομένα καθίζησης της βιολογικής λάσπης σε ογκομετρικό κύλινδρο 1L και ύψους 35 cm δίνονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

Χρόνος, min	0	2	4	6	10	16	24	32	40	50
Όγκος βιολογικής λάσπης*, mL	1000	850	725	600	450	350	280	240	220	210

* ο όγκος ορίζεται από το ύψος της διεπιφάνειας νερού-λάσπης.



7.6. Γραφική παράσταση των πειραματικών αποτελεσμάτων

Λύση

V_z : ταχύτητα καθίζησης ζώνης, m/h.

Q_r : παροχή ανακύκλωσης, m^3/d .

Q_k : συνολικά εισερχόμενη παροχή καθίζησης, m^3/d .

A_Δ : θεωρητικά απαιτούμενη δεξαμενής καθίζησης επιφάνεια διαύγασης, m^2 .

A_p : απαιτούμενη επιφάνεια δεξαμενής καθίζησης για πύκνωση λάσπης, m^2 .

D : διάμετρος δεξαμενής καθίζησης, m.

Προεκτείνοντας το ευθύγραμμο τμήμα παρεμποδιζόμενης καθίζησης της καμπύλης στο Σχήμα, ορίζεται το σημείο B, $t_z = 15 \text{ min}$.

$$V_z = \frac{OA}{OB} = \frac{H}{t_2} = \frac{0,35 \text{ m}}{\left(\frac{15}{60}\right)_h} = 1,4 \frac{m}{h}$$

Από τη συγκέντρωση στερεών στη δεξαμενή αερισμού και στην παροχή ανακύκλωσης της λάσπης υπολογίζεται η παροχή ανακύκλωσης

$$Q_r = \frac{Q \cdot X_v}{(X_{rv} - X_v)} = \frac{Q}{3}$$

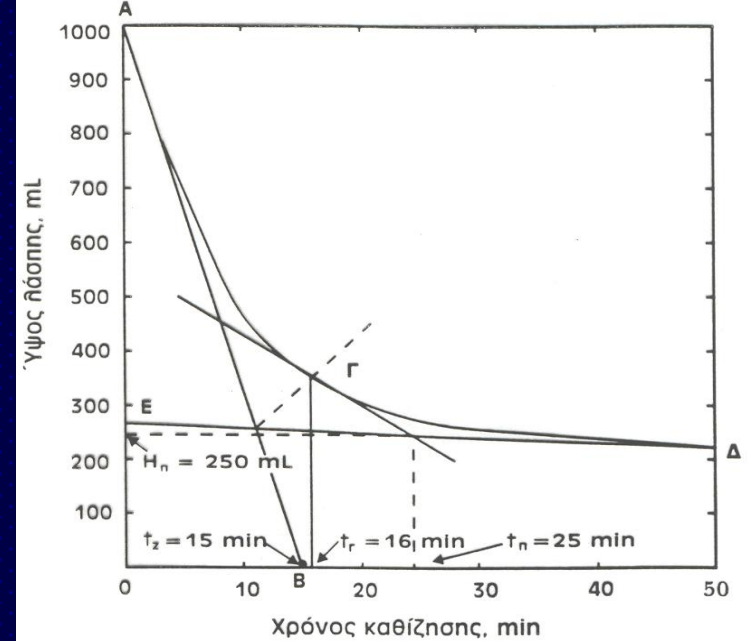
Επομένως, η συνολικά εισερχόμενη παροχή στη δεξαμενή καθίζησης υπολογίζεται

$$Q_r = Q + Q_r = \frac{4}{3} \cdot Q$$

Επομένως, η A_Δ υπολογίζεται:

$$A_\Delta = \frac{Q_k}{V_z} = \frac{\frac{4}{3} \times 2000 \frac{m^3}{d}}{1,4 \times 24 \frac{m}{d}} = 79,4 \text{ m}^2$$

- Φέρεται η ευθεία ΔΕ ως προέκταση του ευθύγραμμου τμήματος στο τμήμα πύκνωσης.
- Η διχοτόμος της γωνίας των ευθειών ΑΒ και ΔΕ τέμνει την καμπύλη στο σημείο Γ, το οποίο ορίζει το χρόνο $t_r = 16 \text{ min}$ έναρξης του σταδίου συμπίκνωσης της λάσπης.
- Φέρεται η εφαπτομένη της καμπύλης στο σημείο Γ.



7.6. Γραφική παράσταση των πειραματικών αποτελεσμάτων

Από το ισοζύγιο μάζας προκύπτει ότι ο όγκος που θα καταλαμβάνει η λάσπη για να έχει την επιθυμητή συγκέντρωση στερεών θα είναι:

$$H_{\pi} = \frac{2500}{10000} \cdot 1000 = 250 \text{ mL}$$

Ο όγκος αυτός σε συνδυασμό με την εφαπτομένη της καμπύλης στο σημείο Γ ορίζει τον απαιτούμενο χρόνο $t_{\pi} = 25 \text{ min}$ για την πύκνωση της λάσπης στην επιθυμητή συγκέντρωση στερεών.

$$A_{\pi} = \frac{\frac{4}{3}Q}{V_{\pi}} = \frac{\frac{4}{3}Q}{H} = \frac{\frac{4}{3} \cdot 2000 \frac{m^3}{d}}{\frac{0,35}{25} \cdot 60 \left(\frac{\text{min}}{h} \right) \cdot 24 \left(\frac{h}{d} \right)} = 132,3 \text{ m}^2$$

Επομένως η απαιτούμενη επιφάνεια της δεξαμενής καθίζησης για πύκνωση λάσπης στην επιθυμητή συγκέντρωση 10.000 mg/L δίνεται από την σχέση:

Άρα η διάμετρος υπολογίζεται:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 132,3}{\pi}} = 13 \text{ m}$$

Παράμετροι σχεδιασμού καθίζησης

Είδος αποβλήτων	Επιφανειακή Φόρτιση, m³/m²d		Χρόνος παραμονής, h
	Μέση	Μέγιστη	
Πρωτογενής, Σύμφωνα με VSS που περιέχονται	18 – 36	36 – 72	1 – 3
Πρωτογενής + ενεργός, Σύμφωνα με VSS που περιέχονται	18 – 36	36 – 48	1 – 3
Ενεργός λάσπης	12 – 24	24 - 48	2 – 4
Βιολογικό φίλτρο		24 - 48	2 - 3

Δεξαμενή καθίζησης

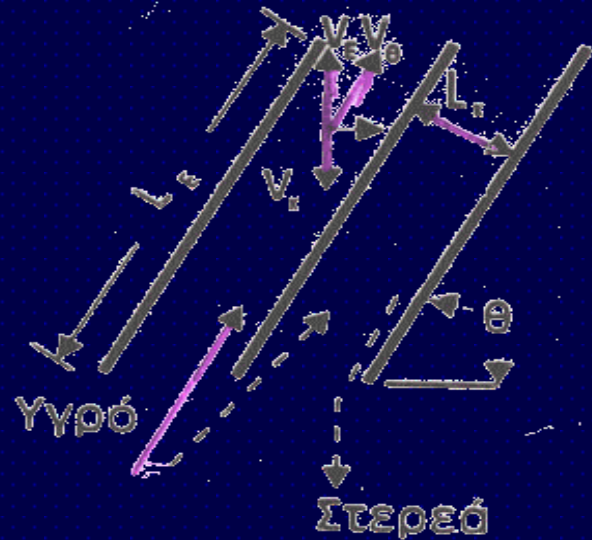


Ξέστρο καθίζησης

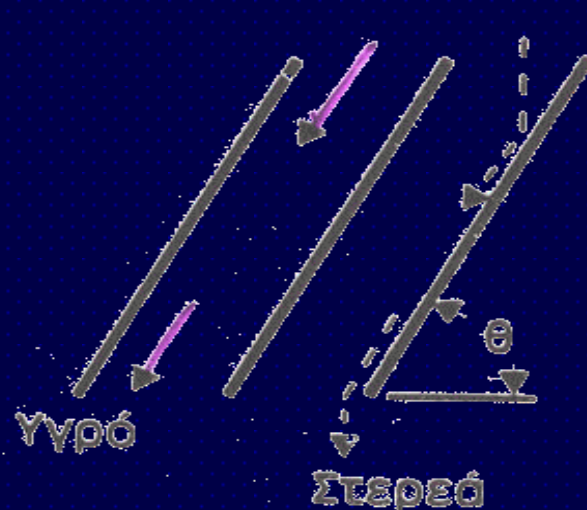


Δεξαμενή καθίζησης

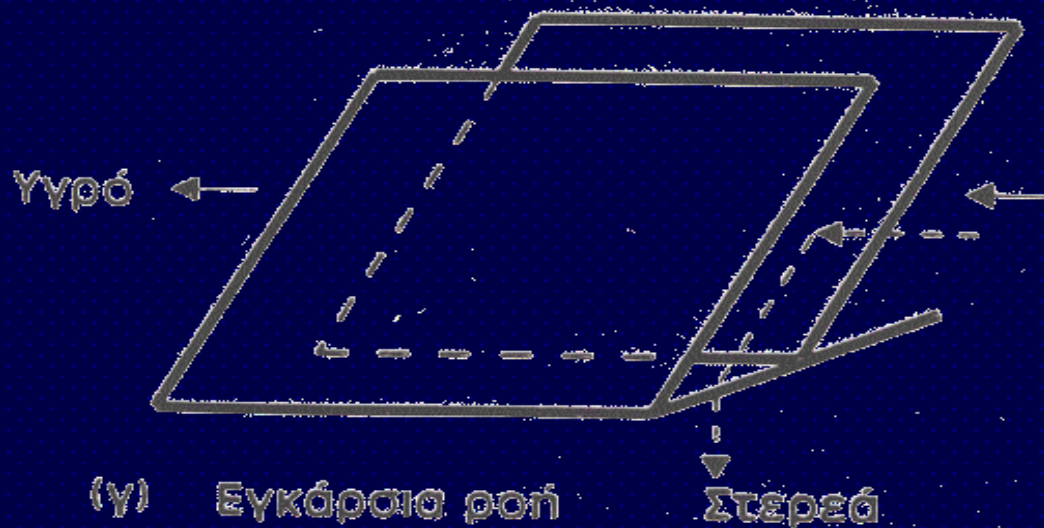




(α) Αντιρροή



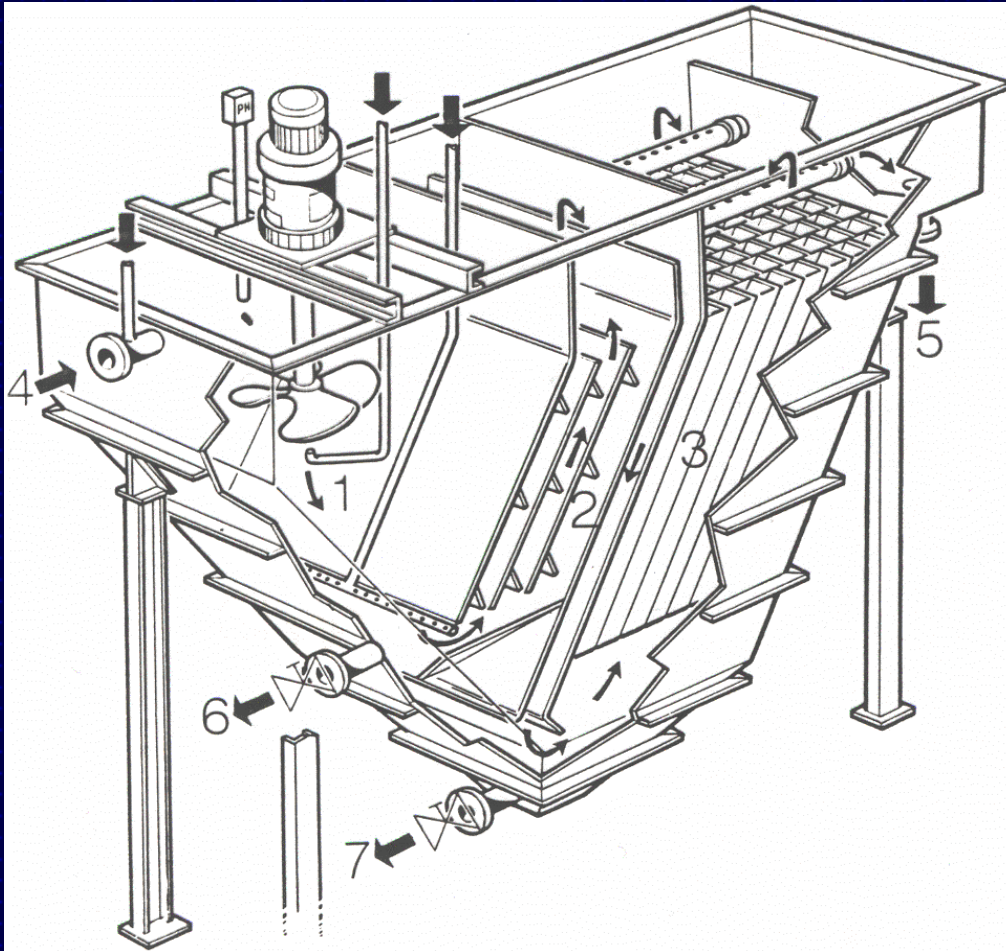
(β) Ομορροή



(γ) Εγκάρσια ροή

Εναλλακτικές λύσεις ροής σε δεξαμενές καθίζησης με

Καθίζηση με κεκλιμένες πλάκες (καθώς κυψέλες, τετράγωνοι ή στρογγ. σωλήνες)



- Κλίση πλακών 50 - 600
- Απόσταση πλακών ~ 5cm
- Μήκος πλακών 1 - 2cm
- Βάθος δεξαμενής 2,5 - 3m
- Επιφανειακή φόρτιση 2-3 m³/m²h

1. Ανάμιξη, 2. Συσσωμάτωση, 3. Ζώνη, 4. Είσοδος νερού, 5. Έξοδος επεξεργασμένου νερού, 6. Αποχέτευση

Παράγοντες που επηρεάζουν την καθίζηση

[1]

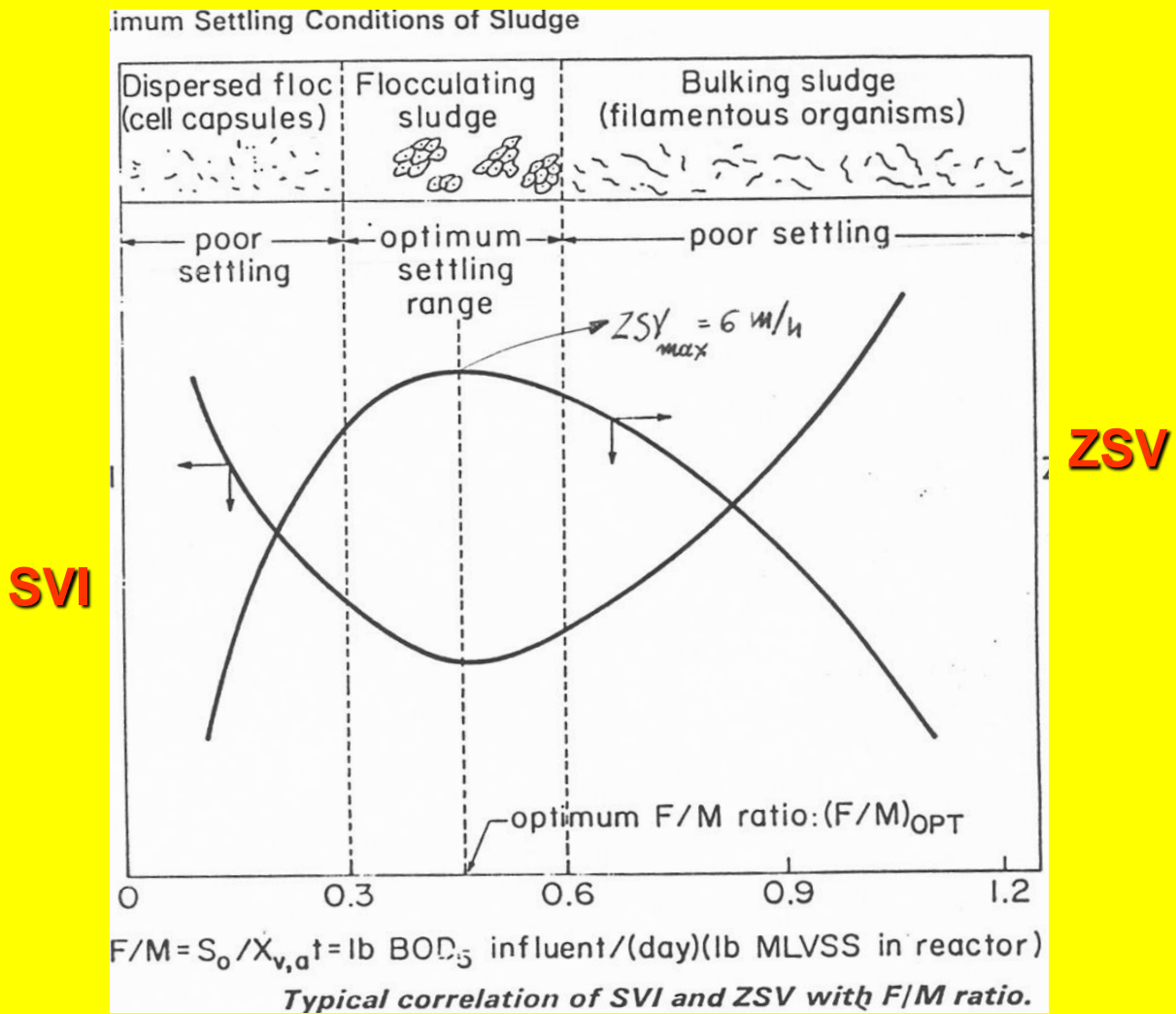
- **Οι παράμετροι που επηρεάζουν την πυκνότητα**
 - Θερμοκρασιακές διαφορές
 - Επίδραση της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων
 - Επίδραση θολότητας
- **Άνεμοι**
Δημιουργούν «κυματισμό» - ροή κυρίως σε μεγάλες δεξαμενές διαστάσεων $\geq 30\text{m}$

Παράγοντες που επηρεάζουν την καθίζηση [2]

- Τρόπος εισροής και εκροής του νερού
 - Κατανομή εισροής
 - Υπερχείλιση εκροής
- Κίνηση μηχανισμών απομάκρυνσης λάσπης
Επιθυμητή ταχύτητα ξέστρου $\leq 1\text{m/min}$
- Επιφανειακή φόρτιση – χρόνος παραμονής
- Βάθος δεξαμενής

Παράγοντες που επηρεάζουν την καθίζηση [3]

Επίδραση F/M



F/M

Πάχυνση λάσπης

- Ως πάχυνση αναφέρεται η διεργασία συμπύκνωσης της λάσπης που εξέρχεται από τη δεξαμενή καθίζησης. Αποτελεί το σημαντικό ενδιάμεσο βήμα πριν από τη μηχανική αφυδάτωση.
- Ο υπολογισμός της δεξαμενής πάχυνσης γίνεται με τη διαδικασία του παραδείγματος 7.2, όπου όμως ο άξονας του χρόνου αναφέρεται σε ώρες και όχι σε min.
- Τα ξέστρα του παχυντή είναι κατασκευασμένα με ειδικούς σχαστήρες της λάσπης για τον αποτελεσματικό διαχωρισμό του νερού.
- Βάθος των δεξαμενών πάχυνσης 3-4m

Ξέστρο παχυντή



