



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

# Χημικές διεργασίες στην επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων

Διάλεξη 7



**Επικ. Καθηγητής Αλέξανδρος Στεφανάκης**

Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Κτήριο Κ3, Γραφείο Α23, Τηλ: 28210 06121

[astefanakis@enveng.tuc.gr](mailto:astefanakis@enveng.tuc.gr)

[www.leem.tuc.gr](http://www.leem.tuc.gr)

## Σκληρότητα

χαρακτηρίζει το νερό που δεν “αφρίζει” καλά (lather), δημιουργεί ακαθαρσία στα είδη υγιεινής, και αφήνει σημάδια-άσπρες, σκληρές αποθέσεις

- το σύνολο όλων των πολυδύναμων κατιόντων

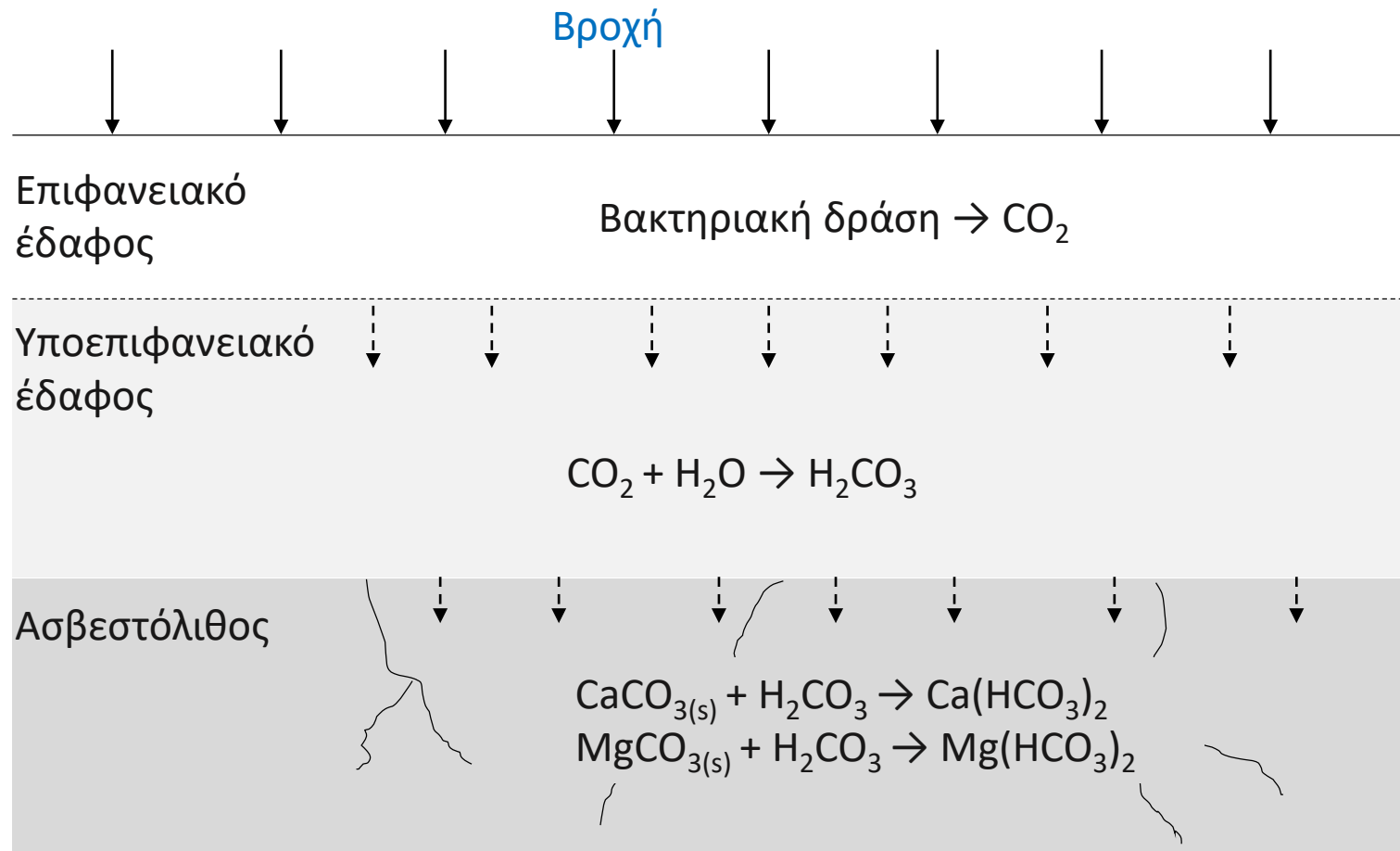
| Εύρος σκληρότητα (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | Περιγραφή      |
|--------------------------------------------|----------------|
| 0-75                                       | Μαλακό         |
| 75-100                                     | Μερικώς σκληρό |
| 100-300                                    | Σκληρό         |
| >300                                       | Πολύ σκληρό    |

Σκληρότητα προέρχεται από την παρουσία μεταλλικών κατιόντων και κυρίως των Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> και εκφράζεται σε mg/L CaCO<sub>3</sub>

Ένας κοινός στόχος επεξεργασίας είναι η παροχή νερού με σκληρότητα μεταξύ 75-120 mg/L CaCO<sub>3</sub>.

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

## Σχηματισμός φυσικής σκληρότητας



- Το βρόχινο νερό φθάνει στο έδαφος.
- Τα βακτήρια αυξάνουν την συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στο νερό κατά τη διάρκεια της αναπνοής τους.
- Το CO<sub>2</sub> αντιδρά με το νερό και σχηματίζει H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ανθρακικό οξύ)
- Τα ασβεστούχα πετρώματα που αποτελούνται από στερεό CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> αντιδρούν με το ανθρακικό οξύ του νερού και σχηματίζουν όξινο ανθρακικό ασβέστιο (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> και μαγνήσιο (Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>
- Εάν στο υπόστρωμα υπάρχει και γύψος CaSO<sub>4</sub> τότε σχηματίζεται η μη ανθρακική σκληρότητα.

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

Επειδή τα  $\text{Ca}^{+2}$  και  $\text{Mg}^{+2}$  κυριαρχούν στο νερό, η ολική σκληρότητα (TH – total hardness)

συνήθως ορίζεται ως

$$\text{TH} = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$$

Η TH μπορεί να χωριστεί σε δύο συστατικά:

- (1) αυτά που σχετίζονται με  $\text{HCO}_3^-$  (ανθρακική σκληρότητα – carbonate hardness, **CH**),
- (2) αυτά που σχετίζονται με άλλα ιόντα (μη ανθρακική σκληρότητα – noncarbonate hardness, **NCH**)

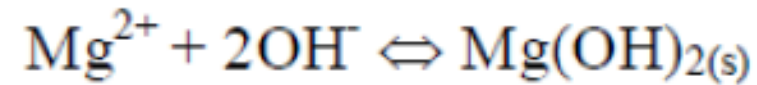
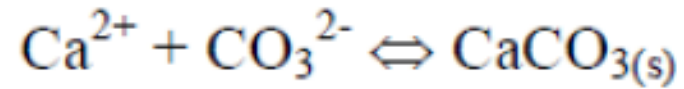
$$\text{TH} = \text{CH} + \text{NCH}$$

Ανθρακική Σκληρότητα (ΑΣ): ποσότητα σκληρότητας που ισούται με την ολική σκληρότητα ή ολική αλκαλικότητα. Σε  $\text{pH} < 8,3$  το  $\text{HCO}_3^-$  είναι η κύρια μορφή αλκαλικότητας. Προσωρινή, απομακρύνεται κατά την θέρμανση του νερού

Μη Ανθρακική Σκληρότητα (ΜΑΣ): ολική σκληρότητα πλέον της αλκαλικότητας – μόνιμη, δεν απομακρύνεται κατά την θέρμανση του νερού.

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

Η αποσκλήρυνση του νερού με **χημική κατακρήμνιση** βασίζεται στις παρακάτω αντιδράσεις



- Η **ιζηματοποίηση** των  $\text{CaCO}_3$  και  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  εξαρτάται από το pH
- Το βέλτιστο pH για την κατακρήμνιση  **$\text{CaCO}_3$  είναι 10,3** και  **$\text{Mg}(\text{OH})_2$  είναι 11**
- Πολλά φυσικά νερά έχουν ένα pH κάτω από αυτές τις τιμές → **θα πρέπει να αυξήσουμε το pH!**

Προσθήκη περίσσειας υδρασβέστου  **$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^-$**

- Πρακτικά, μετατρέπουμε την φυσικά εμφανιζόμενη διττανθρακική αλκαλικότητα ( $\text{HCO}_3^-$ ) σε ανθρακικό ιόν ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) με την προσθήκη  $\text{OH}^- \rightarrow$  η πιο συνήθης πηγή είναι το  $\text{Ca(OH)}_2$
- Πολλές εγκαταστάσεις επεξεργασίας βρίσκουν πιο οικονομική τη χρήση ασβέστου ( $\text{CaO}$ ), από ότι την υδράσβεστο  $\text{Ca(OH)}_2$  (lime)



lime (calcium hydroxide,  $\text{Ca(OH)}_2$ )  
soda ash (sodium carbonate,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

- Η αποσκλήρυνση με **lime-soda** δεν μπορεί να παράξει νερό με μηδενική σκληρότητα λόγω της διαλυτότητας του  $\text{CaCO}_3$  και  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , τους φυσικούς περιορισμούς της ανάμιξης και επαφής, και τον επαρκή χρόνο για την ολοκλήρωση των αντιδράσεων.
- Έτσι, η ελάχιστη ανθρακική σκληρότητα που μπορεί να επιτευχθεί είναι **30 mg/L ως  $\text{CaCO}_3$** , και η ελάχιστη σκληρότητα μαγνησίου είναι περίπου **10 mg/L ως  $\text{CaCO}_3$** .
- Λόγω της γλοιώδους κατάστασης που προκύπτει όταν χρησιμοποιείται σαπούνι με ένα νερό που είναι πολύ μαλακό, συνήθως στοχεύουμε σε μια τελική ολική σκληρότητα γύρω στα 75-120 mg/L ως  $\text{CaCO}_3$ .
- Για την επίτευξη ικανοποιητικής απομάκρυνσης σκληρότητας σε εύλογο χρονικό διάστημα, συνήθως προσίθεται μια **περίσσεια  $\text{Ca}(\text{OH})_2$** , πέρα από την στοιχειομετρικά απαιτούμενη ποσότητα. Εμπειρικά, μια ελάχιστη περίσσεια 20 mg/L ως  $\text{CaCO}_3$  πρέπει να παρέχεται.

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

**Mg > 40 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>**: σχηματίζει scales (αποθέσεις) σε εναλλάκτες θερμότητας

Επειδή η απομάκρυνση Mg είναι ακριβή, συνήθως απομακρύνουμε μόνο το Mg πάνω από τα 40 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>.

**Για απομακρύνσεις Mg < 20 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>**, το lime δίνει καλά αποτελέσματα.

**Για απομακρύνσεις 20 < Mg < 40 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>**, απαιτείται περίσσεια lime.

**Για απομακρύνσεις Mg > 40 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>**, απαιτείται περίσσεια lime 40 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>

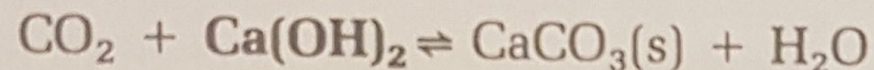
**Προσθήκη περίσσειας lime πάνω από 40 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>**, δεν βελτιώνει σημαντικά τις αντιδράσεις

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

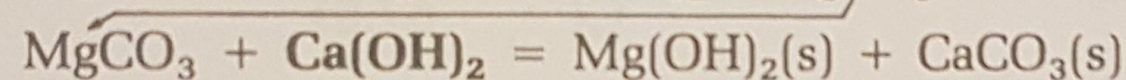
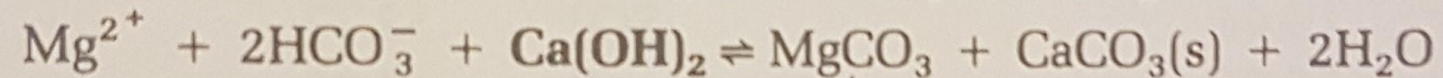
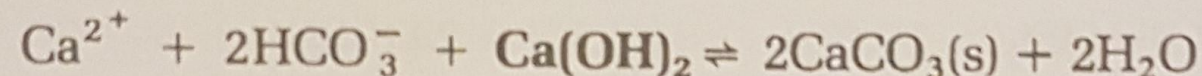
## Αντιδράσεις αποσκλήρυνσης

ελέγχονται μέσω της ρύθμισης του pH

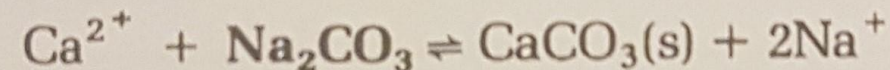
Neutralization of Carbonic Acid



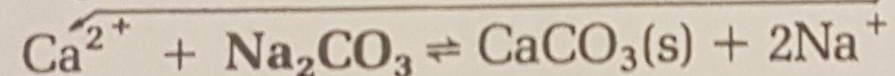
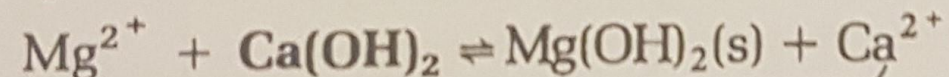
Precipitation of Carbonate Hardness



Precipitation of Noncarbonate Hardness Due to Calcium



Precipitation of Noncarbonate Hardness Due to Magnesium



Εξουδετέρωση του ανθρακικού οξέος,  
πριν αυξήσουμε το pH

Κατακρήμνιση ανθρακικής σκληρότητας  
λόγω ασβεστίου (για να αυξήσουμε το  
pH στο 10,3)

Κατακρήμνιση ανθρακικής σκληρότητας  
λόγω μαγνησίου (για να αυξήσουμε το  
pH στο 11)

Απομάκρυνση μη-ανθρακικής  
σκληρότητας λόγω ασβεστίου  
Απομάκρυνση μη-ανθρακικής  
σκληρότητας λόγω μαγνησίου

## Χημικές προσθήκες (ως $\text{CaCO}_3$ ) για αποσκλήρυνση

| Βήμα                    | Προσθήκη χημικού                                | Αιτιολογία                                                  |
|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Ανθρακική σκληρότητα    |                                                 |                                                             |
| 1                       | Lime = $\text{CO}_2$                            | Καταστροφή $\text{H}_2\text{CO}_3$                          |
| 2                       | Lime = $\text{HCO}_3^-$                         | Αύξηση pH: μετατροπή $\text{HCO}_3^-$ σε $\text{CO}_3^{2-}$ |
| 3                       | Lime = $\text{Mg}^{+2}$ προς απομάκρυνση        | Αύξηση pH: κατακρήμνιση $\text{Mg}(\text{OH})_2$            |
| 4                       | Lime = απαιτείται περίσσεια                     | Drive reaction (στοχευμένη αντίδραση)                       |
| Μη Ανθρακική σκληρότητα |                                                 |                                                             |
| 5                       | Soda = μη ανθρακική σκληρότητα προς απομάκρυνση | Παροχή $\text{CO}_3^{2-}$                                   |

Οι όροι lime & soda αναφέρονται σε mg/L  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  και  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ως  $\text{CaCO}_3$   
ίσο με mg/L του ιόντος (ή αερίου στην περίπτωση του  $\text{CO}_2$ ) ως  $\text{CaCO}_3$

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

| Αντίδραση Ισορροπίας                            | $K_{sp}$ στους<br>25 °C | Εφαρμογή στην περιβαλλοντική Μηχανική |
|-------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $MgCO_3 \rightleftharpoons Mg^{2+} + CO_3^{2-}$ | $4 \times 10^{-5}$      | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $Mg(OH)_2 \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2OH^-$   | $9 \times 10^{-12}$     | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{2-}$ | $5 \times 10^{-9}$      | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $Ca(OH)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2OH^-$   | $8 \times 10^{-6}$      | Απομάκρ. σκληρότητας                  |

## Άσκηση

Από την παρακάτω ανάλυση νερού, να προσδιοριστεί η ποσότητα lime & soda (σε mg/L ως  $\text{CaCO}_3$ ) που απαιτείται για την αποσκλήρυνση του νερού σε 80,0 mg/L σκληρότητα ως  $\text{CaCO}_3$ .

$\text{Ca}^{+2}$  : 95,20

$\text{HCO}_3^-$  : 241,46

$\text{Mg}^{+2}$  : 13,44

$\text{SO}_4^{-2}$  : 53,77

$\text{Na}^+$  : 25,76

$\text{Cl}^-$  : 67,81

$\text{CO}_2$  : 19,36

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

Ca<sup>2+</sup>: 95,20

Mg<sup>2+</sup>: 13,44

Na<sup>+</sup>: 25,76

CO<sub>2</sub>: 19,36

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 241,46

SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>: 53,77

Cl<sup>-</sup>: 67,81

Μετατρέπουμε τα συστατικά σε ισοδύναμα CaCO<sub>3</sub>

MB CaCO<sub>3</sub> = 100 g/mol

| Ιόν                           | mg/L ως ιόν | Ισοδ. Βάρος CaCO <sub>3</sub> / IB ιόντος | mg/L ως CaCO <sub>3</sub> |
|-------------------------------|-------------|-------------------------------------------|---------------------------|
| Ca <sup>2+</sup>              | 95,20       | 2,50 [=100/40]                            | 238,0                     |
| Mg <sup>2+</sup>              | 13,44       | 4,12                                      | 55,37                     |
| Na <sup>+</sup>               | 25,76       | 2,18                                      | 56,16                     |
| CO <sub>2</sub>               | 19,36       | 0,82                                      | 198,0                     |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 241,46      | 1,04                                      | 55,92                     |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 53,77       | 1,41                                      | 95,61                     |
| Cl <sup>-</sup>               | 67,81       | 2,28                                      | 44,14                     |

ΑΒ

Ca=40

C=12

O=16

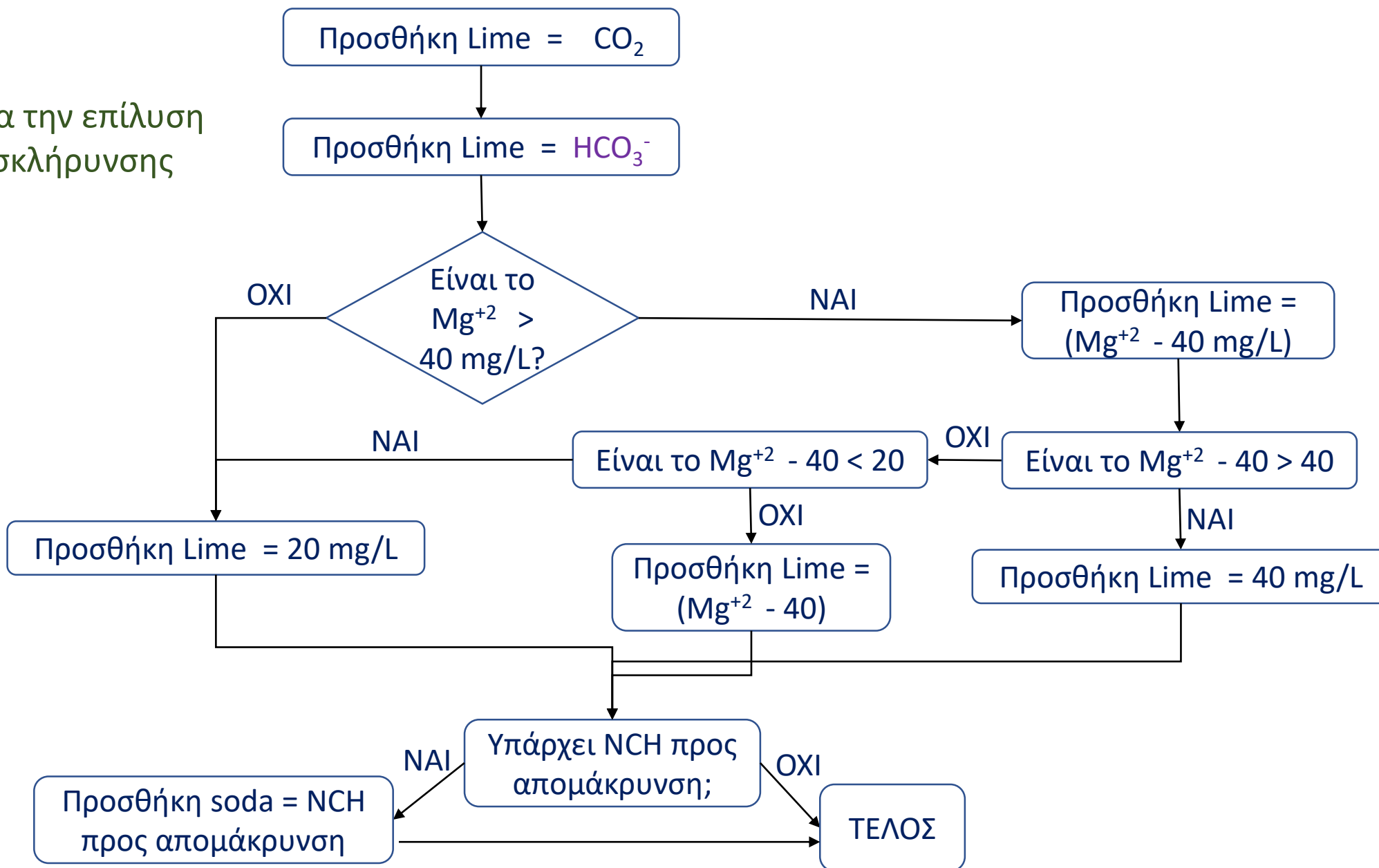
Mg=24,3

S=32

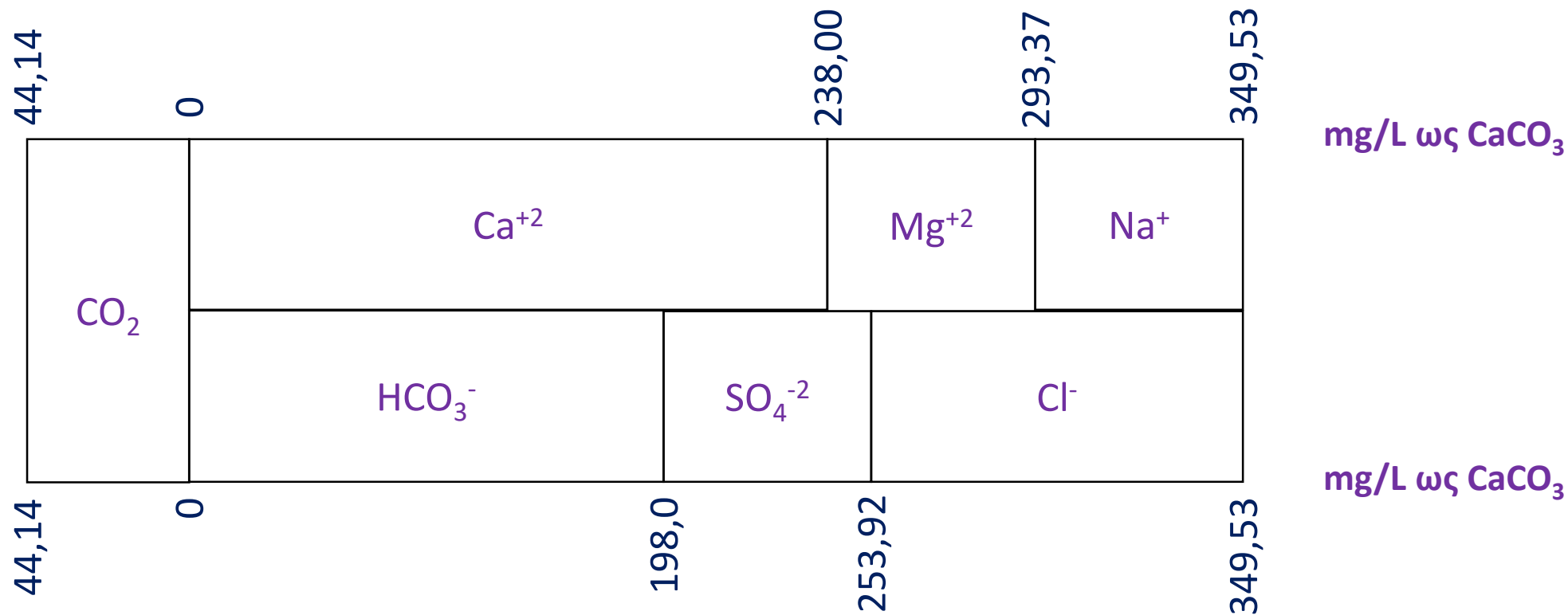
Cl=35,5

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

Διάγραμμα ροής για την επίλυση  
προβλημάτων αποσκλήρυνσης



# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ



Από το bar chart προκύπτει: το CO<sub>2</sub> δεν συνεισφέρει στη σκληρότητα.

- Η ολική σκληρότητα TH = 293,37 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>
- Η ανθρακική σκληρότητα CH = 198,0 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>
- Η μη ανθρακική σκληρότητα NCH = TH – CH = 95,37 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>

Από το διάγραμμα που καθοδηγεί τα λογικά βήματα, προσδιορίζουμε τη δόση lime:

| Βήμα                                      | Δόση mg/L ως $\text{CaCO}_3$ |
|-------------------------------------------|------------------------------|
| Lime = $\text{CO}_2$                      | 44,14                        |
| Lime = $\text{HCO}_3^-$                   | 198,0                        |
| Lime = $\text{Mg}^{+2} - 40 = 55,37 - 40$ | 15,37                        |
| Lime = περίσσεια                          | 20,0                         |
|                                           | 277,51                       |

Η ποσότητα lime για προσθήκη είναι 277,51 mg/L ως  $\text{CaCO}_3$ .

Η περίσσεια δόση ήταν η μικρότερη, καθώς  $(\text{Mg}^{+2} - 40)$  ήταν μικρότερο από 20.

## ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (1) ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΝΕΡΟΥ

Τώρα πρέπει να προσδιορίσουμε **αν πρέπει να απομακρυνθεί NCH**.

Η ποσότητα NCH που μπορεί να αφεθεί ( $NCH_f$ ) ισούται με την επιθυμητή τελική σκληρότητα (80 mg/L) μείον την CH που απέμεινε λόγω διαλυτότητας και άλλων παραγόντων (40 mg/L).

$$NCH_f = 80 - 40 = 40 \text{ mg/L}$$

Έτσι, 40 mg/L μπορούν να αφεθούν. Η NCH που πρέπει να απομακρυνθεί ( $NCH_R$ ) είναι η αρχική  $NCH_i$  (95,37 mg/L) μείον την NCH

$$\begin{aligned} NCH_R &= NCH_i - NCH_f \\ NCH_R &= 95,37 - 40 = 55,37 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

Άρα, η ποσότητα soda για προσθήκη είναι 55,37 mg/L ως  $\text{CaCO}_3$ . Το γεγονός ότι συμπίπτει με τη συγκέντρωση του μαγνησίου είναι απλά σύμπτωση.

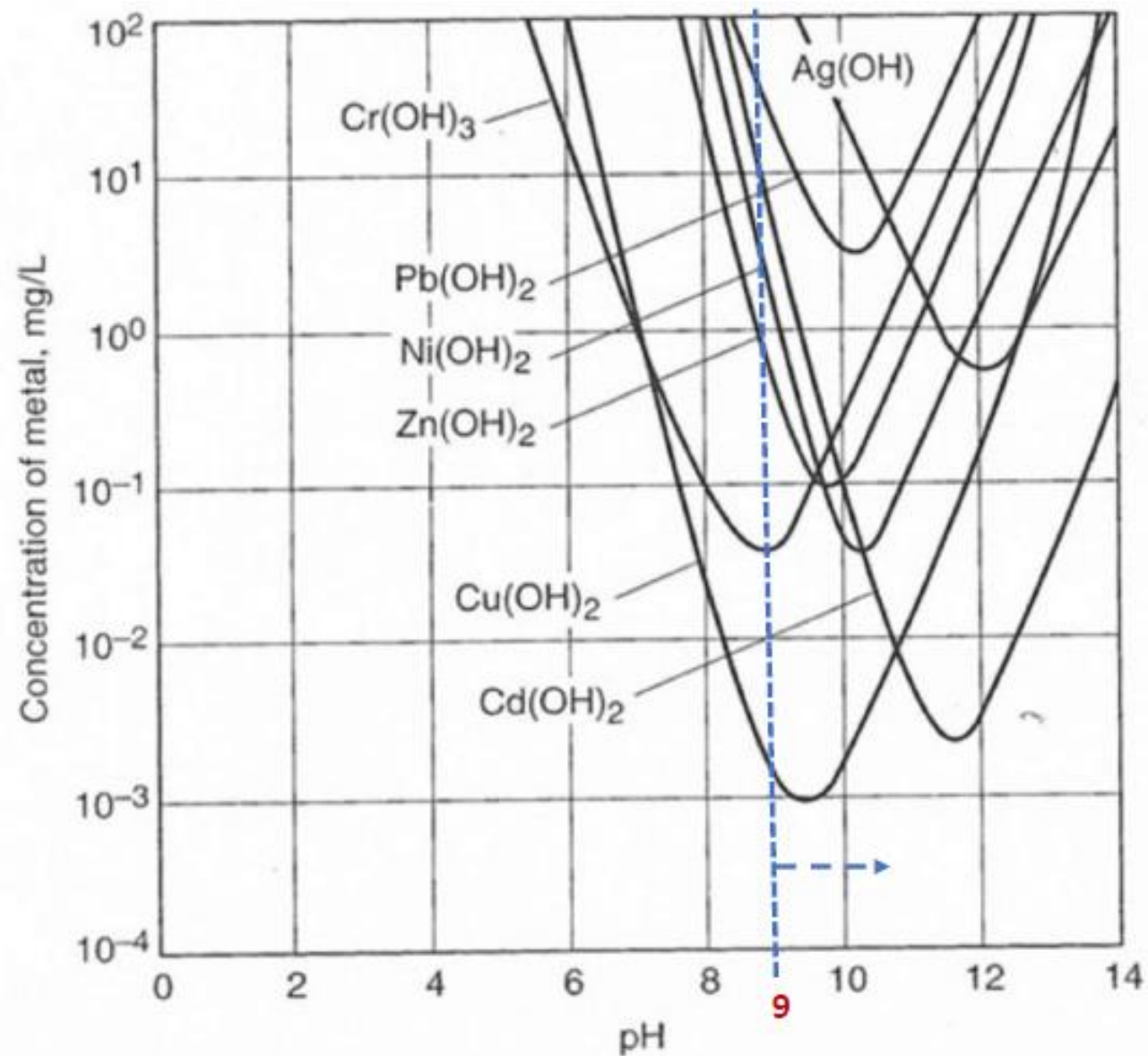
## ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (2) ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Μέσω σχηματισμού αδιάλυτων υδροξειδίων.

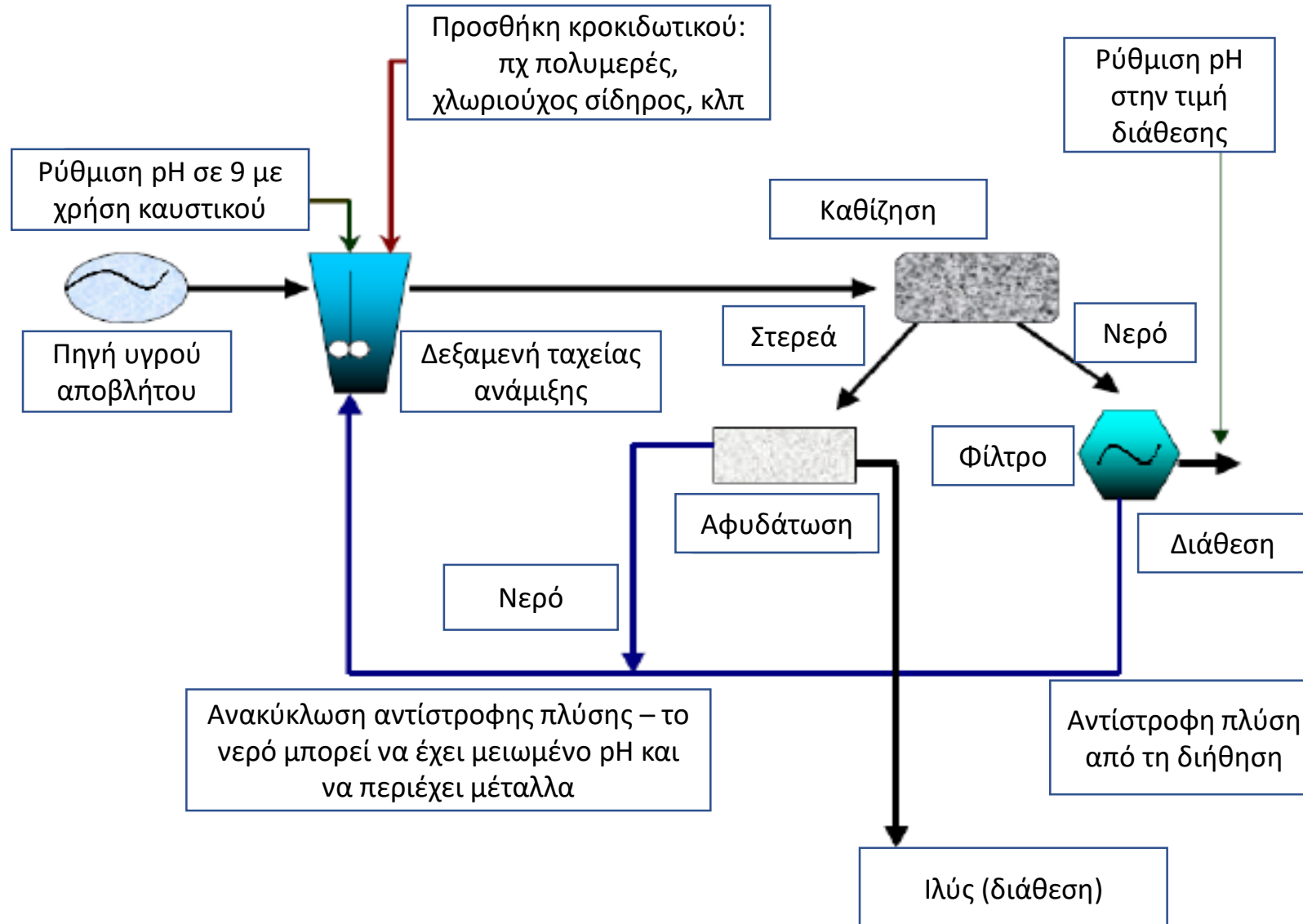
Πηγή των  $\text{OH}^-$  είναι συνήθως η προσθήκη  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (άσβεστος)

| Αντίδραση Ισορροπίας                                                      | $K_{sp}$ στους<br>25 °C | Εφαρμογή στην περιβαλλοντική Μηχανική |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $\text{MgCO}_3 \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$      | $4 \times 10^{-5}$      | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $\text{Mg}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{OH}^-$ | $9 \times 10^{-12}$     | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$      | $5 \times 10^{-9}$      | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$ | $8 \times 10^{-6}$      | Απομάκρ. σκληρότητας                  |
| $\text{CaSO}_4 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$      | $2 \times 10^{-5}$      | Μείωση θεικών από απαέρια             |
| $\text{Cu}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{OH}^-$ | $2 \times 10^{-19}$     | Αφαίρεση βαρέων μετάλλων              |
| $\text{Zn}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2\text{OH}^-$ | $3 \times 10^{-17}$     | Αφαίρεση βαρέων μετάλλων              |
| $\text{Ni}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Ni}^{2+} + 2\text{OH}^-$ | $2 \times 10^{-16}$     | Αφαίρεση βαρέων μετάλλων              |
| $\text{Cr}(\text{OH})_3 \rightleftharpoons \text{Cr}^{3+} + 3\text{OH}^-$ | $6 \times 10^{-31}$     | Αφαίρεση βαρέων μετάλλων              |

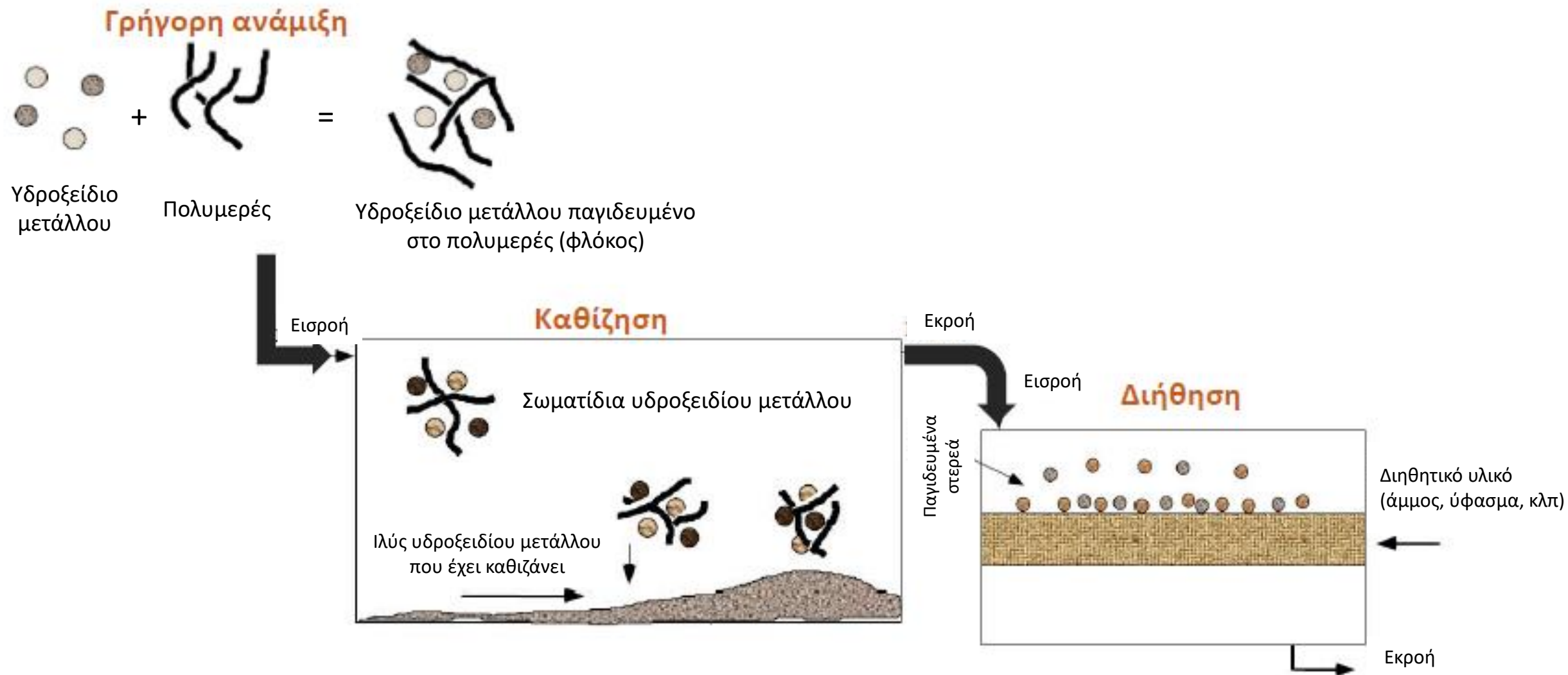
# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (2) ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ



# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (2) ΣΤΑΔΙΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ



# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (2) ΒΑΣΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

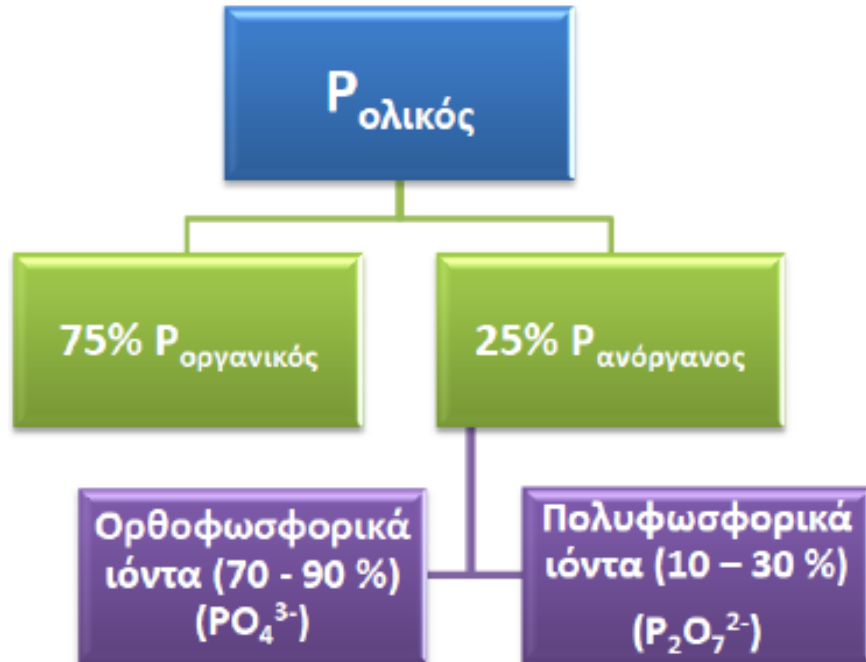


# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (3) ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

| Αντίδραση Ισορροπίας                                    | $K_{sp}$ στους 25 °C | Εφαρμογή στην περιβαλλοντική Μηχανική |
|---------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| $MgCO_3 \rightleftharpoons Mg^{2+} + CO_3^{2-}$         | $4 \times 10^{-5}$   | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $Mg(OH)_2 \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2OH^-$           | $9 \times 10^{-12}$  | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{2-}$         | $5 \times 10^{-9}$   | Απομάκρ. σκληρότητας, πέτρα           |
| $Ca(OH)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2OH^-$           | $8 \times 10^{-6}$   | Απομάκρ. σκληρότητας                  |
| $CaSO_4 \rightleftharpoons Ca^{2+} + SO_4^{2-}$         | $2 \times 10^{-5}$   | Μείωση θεικών από ασπέρια             |
| $Cu(OH)_2 \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2OH^-$           | $2 \times 10^{-19}$  | Αφαίρεση βαρέων μετάλλων              |
| $Zn(OH)_2 \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2OH^-$           | $3 \times 10^{-17}$  | Αφαίρεση βαρέων μετάλλων              |
| $Ni(OH)_2 \rightleftharpoons Ni^{2+} + 2OH^-$           | $2 \times 10^{-16}$  | Αφαίρεση βαρέων μετάλλων              |
| $Cr(OH)_3 \rightleftharpoons Cr^{3+} + 3OH^-$           | $6 \times 10^{-31}$  | Αφαίρεση βαρέων μετάλλων              |
| $Al(OH)_3 \rightleftharpoons Al^{3+} + 3OH^-$           | $1 \times 10^{-32}$  | Κροκίδωση                             |
| $Fe(OH)_3 \rightleftharpoons Fe^{3+} + 3OH^-$           | $6 \times 10^{-36}$  | Κροκίδωση, αφαίρεση σιδήρου, διάβρωση |
| $Fe(OH)_2 \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2OH^-$           | $5 \times 10^{-15}$  | Κροκίδωση, αφαίρεση σιδήρου, διάβρωση |
| $Mn(OH)_3 \rightleftharpoons Mn^{3+} + 3OH^-$           | $1 \times 10^{-36}$  | Αφαίρεση μαγγανίου                    |
| $Mn(OH)_2 \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2OH^-$           | $8 \times 10^{-14}$  | Αφαίρεση μαγγανίου                    |
| $Ca_3(PO_4)_2 \rightleftharpoons 3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-}$ | $1 \times 10^{-27}$  | Αφαίρεση φωσφόρου                     |
| $CaHPO_4 \rightleftharpoons Ca^{2+} + HPO_4^{3-}$       | $3 \times 10^{-7}$   | Αφαίρεση φωσφόρου                     |

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (3) ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

## Περιεκτικότητα και μορφές φωσφόρου (P) στα Υ/Α



- Στα υγρά απόβλητα, ο P βρίσκεται (περίπου 4 g / κάτοικο / ημέρα) κυρίως στις οργανικές ενώσεις και αποτελεί το 75% περίπου του συνολικά υπάρχοντος P
- Ο υπόλοιπος (25% περίπου) βρίσκεται υπό τη μορφή των **ορθοφωσφορικών** ( $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HPO}_4^{-2}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) διαλυτών ιόντων από 70-90% και **πολυφωσφορικών** ( $\text{P}_2\text{O}_7^{-2}$ ) ιόντων τα οποία είναι περίπλοκα μόρια, αλλά και με τη μορφή οργανικών φωσφορικών ενώσεων.
- Τα ορθοφωσφορικά ( $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HPO}_4^{-2}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) ιόντα χρησιμεύουν για το βιολογικό μεταβολισμό χωρίς να διασπώνται περαιτέρω.

## ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: (3) ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

- Η απομάκρυνση του φωσφόρου κρίνεται απαραίτητη στην περίπτωση που η τελική εκροή των Ε.Ε.Λ. διατίθεται σε ευαίσθητους αποδέκτες (γλυκά νερά).
- Στην περίπτωση που η τελική διάθεση γίνεται σε ευαίσθητους αποδέκτες, ικανοποιητική ποσότητα P στην εκροή θεωρείται όταν δεν υπερβαίνει τα **2 mg/L** (επιθυμητή απομάκρυνση είναι συνήθως 90-95%).



- Με τη βιολογική επεξεργασία επιτυγχάνεται 10 – 30 % απομάκρυνση του P.
- Το σύνολο των φωσφορικών ενώσεων μετατρέπεται σε διαλυτά ορθοφωσφορικά ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) ιόντα.
- Τα ορθοφωσφορικά ιόντα κατακρημνίζονται πολύ εύκολα.
- Εάν μετά τη βιολογική, ακολουθήσει χημική επεξεργασία, θα απομακρυνθεί όλος ο φώσφορος.

## Υγρά αστικά απόβλητα

- Βιολογική δέσμευση από μ/ο
- Χημική κατακρήμνιση



Κάθε μία έχει διαφορετικό βαθμό απόδοσης αλλά και διαφορετικά λειτουργικά έξοδα

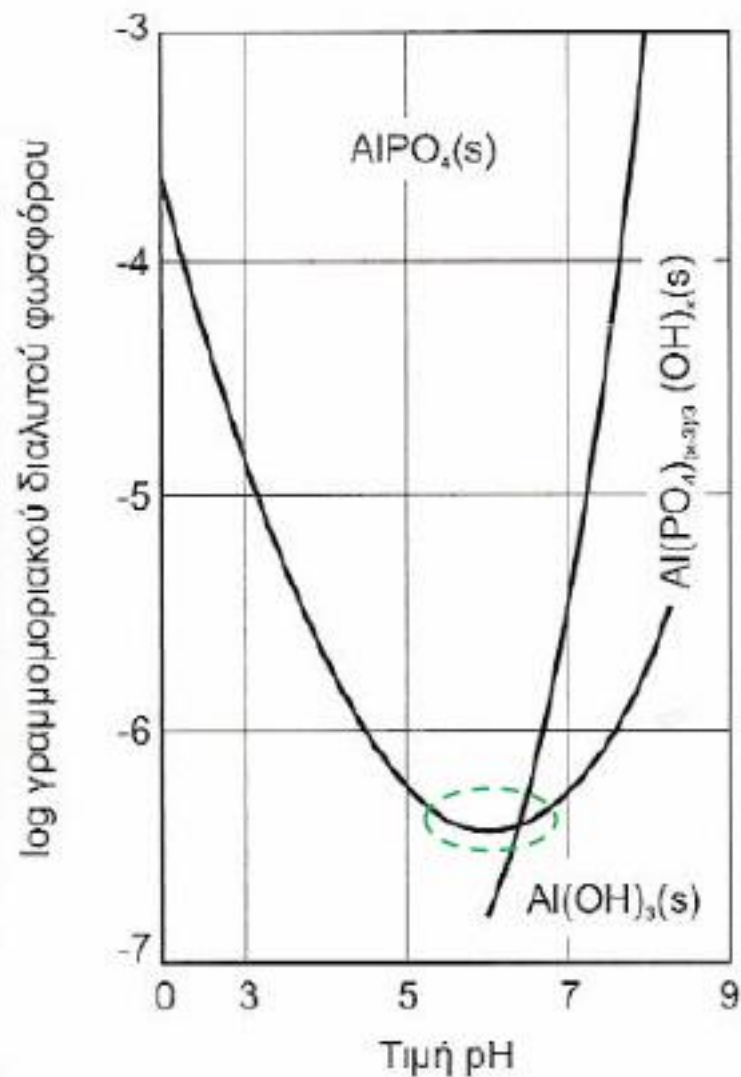
## Χημική κατακρήμνιση P

Προσθήκη των αλάτων μετάλλων που αντιδρούν με τον διαλυτό φώσφορο και σχηματίζουν στερεά ιζήματα φωσφορικού άλατος που αφαιρούνται με τις διαδικασίες διαχωρισμού στερεών από υγρά (π.χ. διαύγαση και διήθηση).

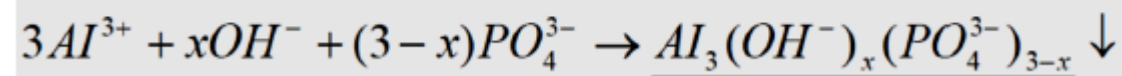
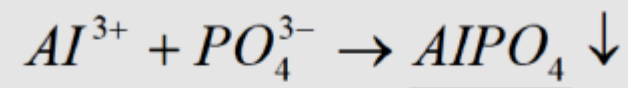
Άλατα των  $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$

- ένυδρο θεικό αργίλιο (alum)  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$
- χλωριούχος σίδηρος (III)  $FeCl_3$
- θεικός σίδηρος (III)  $Fe_2(SO_4)_3$
- άσβεστος (lime)  $Ca(OH)_2$

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: Κατακρήμνιση με $Al(III)$

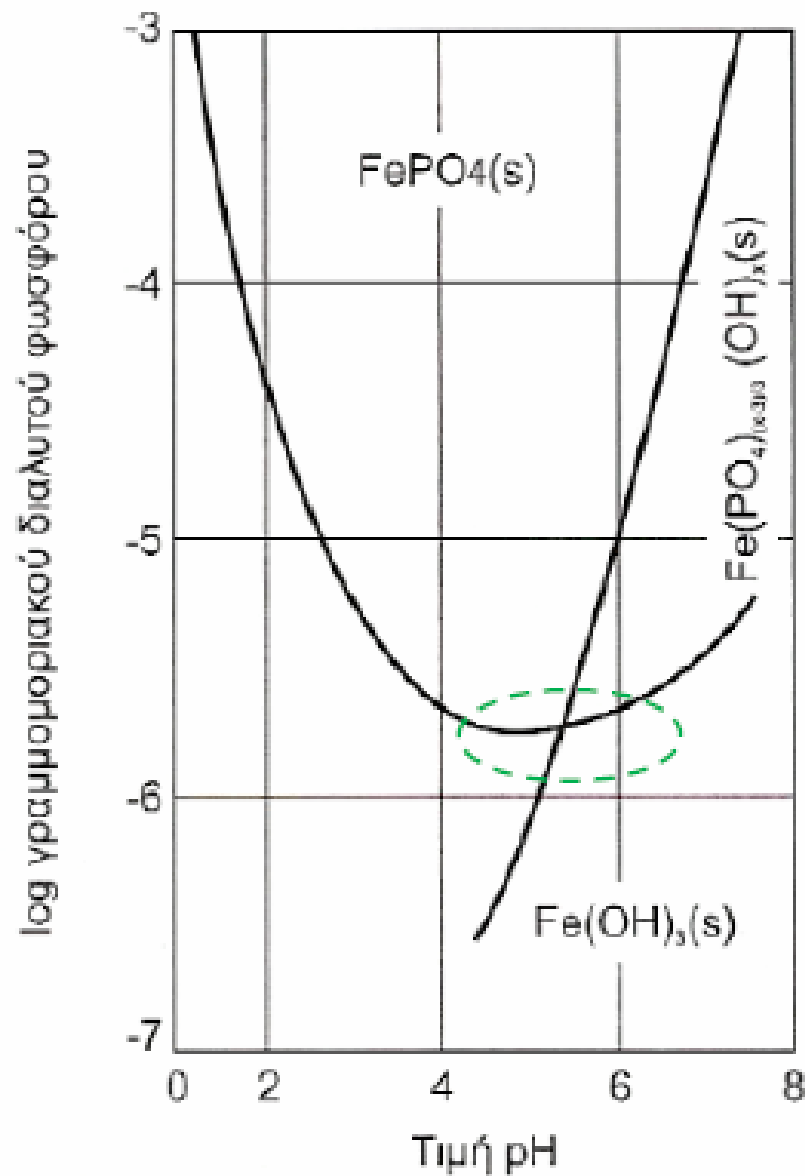


ένυδρο θειικό αργίλιο (alum)  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

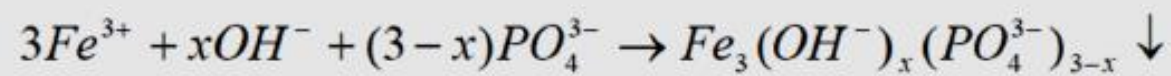
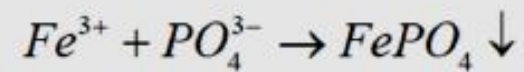


Βέλτιστο pH= 5,5 - 6,5

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: Κατακρήμνιση με Fe(III)

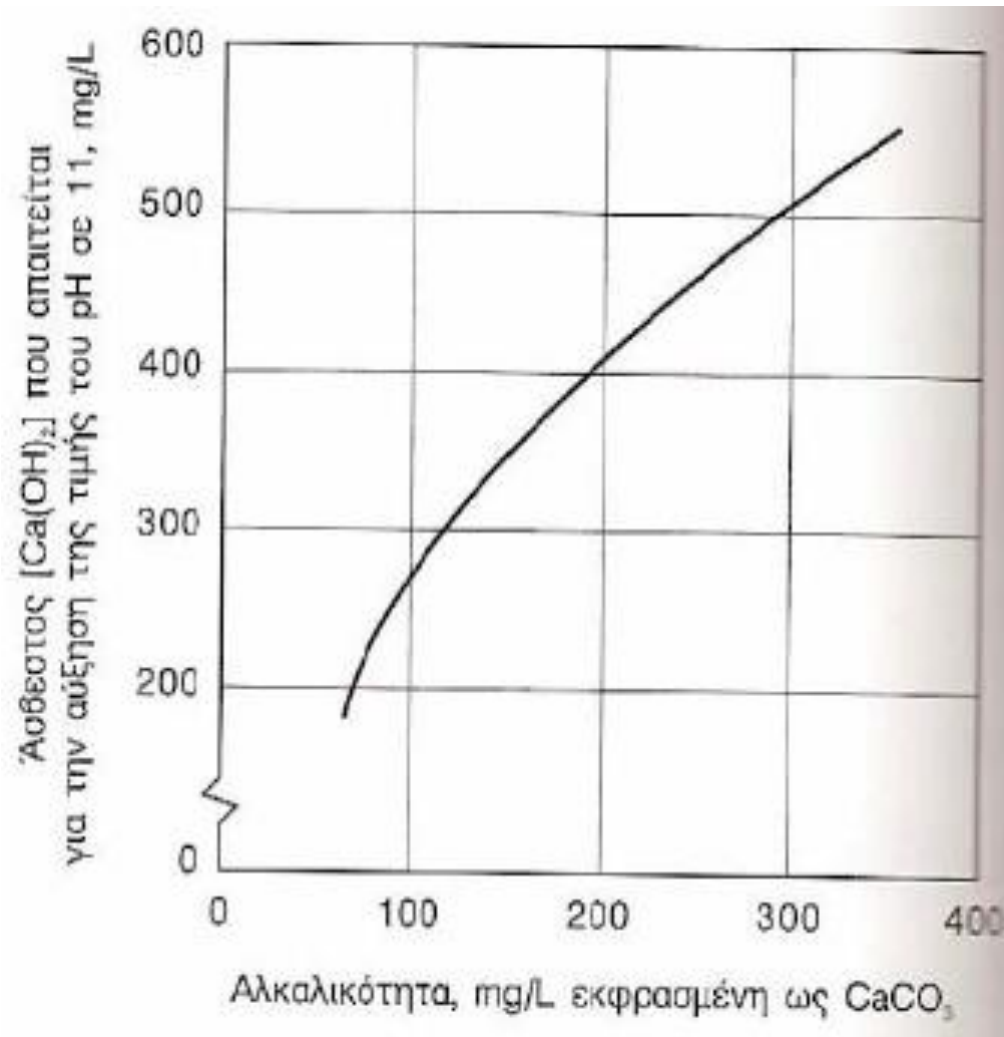


χλωριούχος σίδηρος (III) FeCl<sub>3</sub>  
θειικός σίδηρος (III) Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

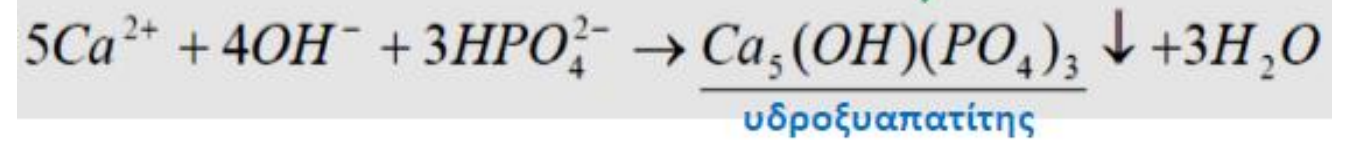


Βέλτιστο pH= 4,5 - 7

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: Κατακρήμνιση με Ca(II)

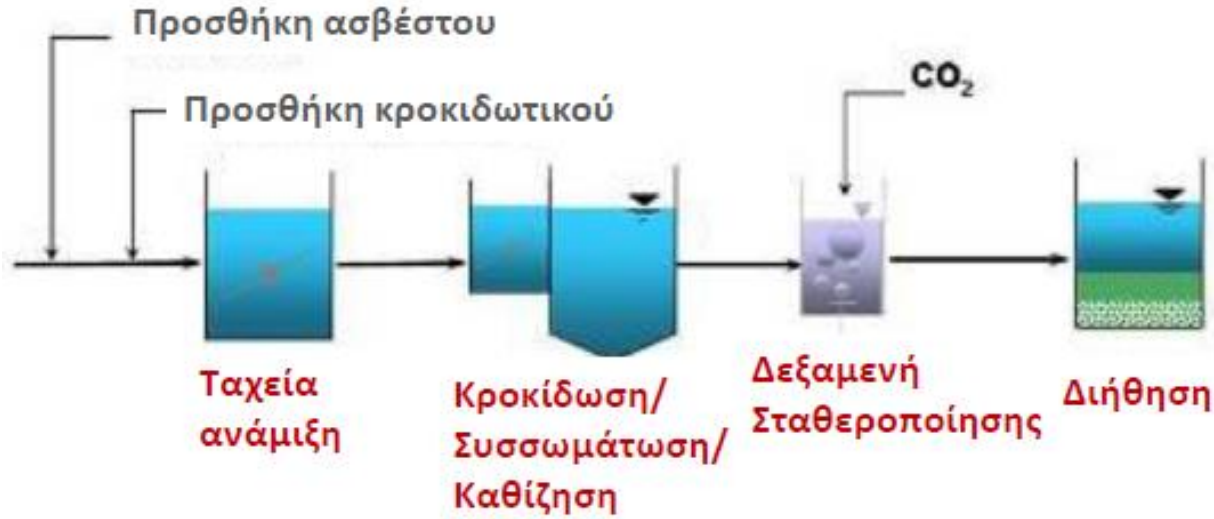


άσβεστος (lime) Ca(OH)<sub>2</sub>



Βέλτιστο pH >9

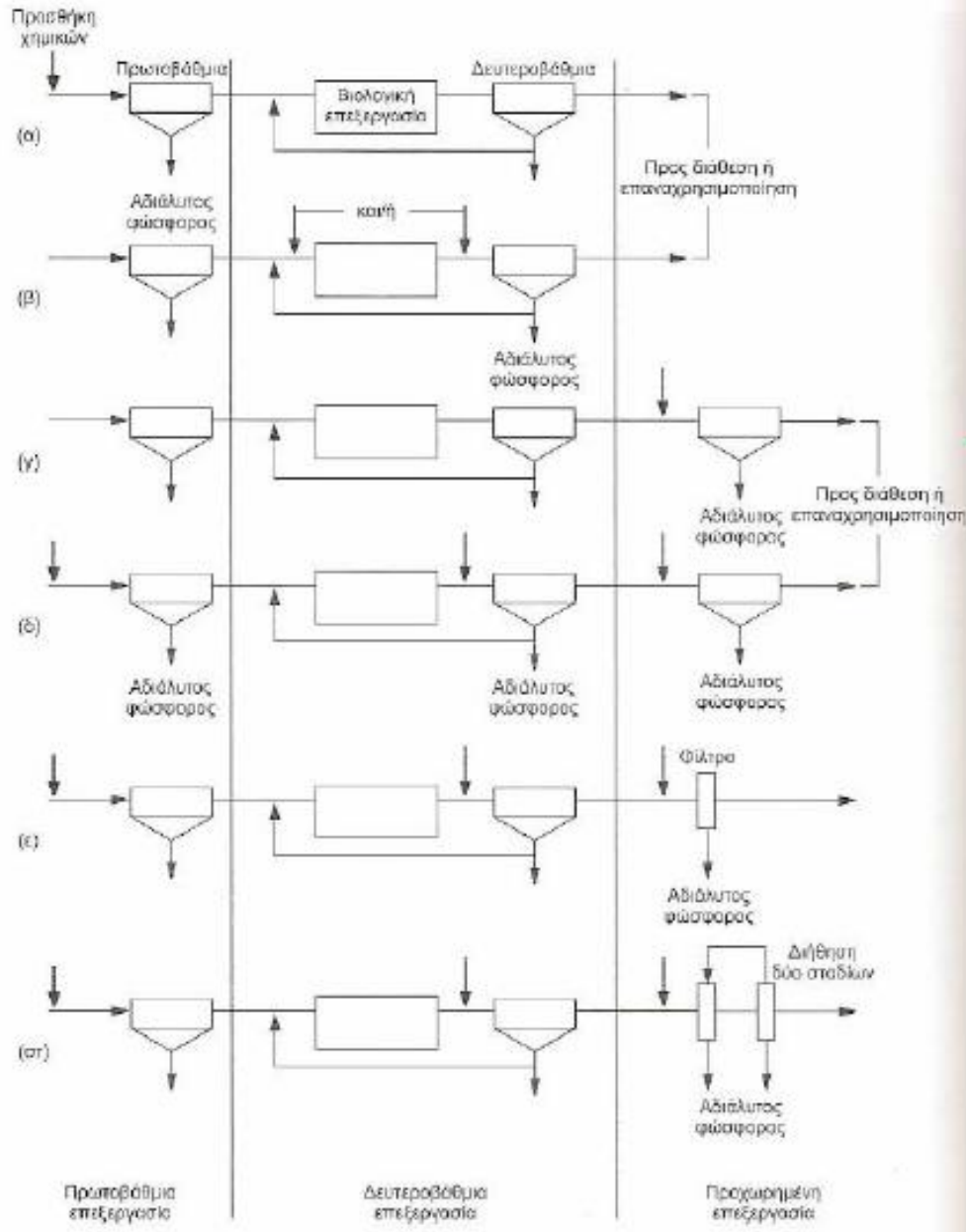
# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: Κατακρήμνιση με $\text{Ca(II)}$



Εάν δεν εφαρμοστεί σταθεροποίηση, θα λαμβάνει χώρα καταβύθιση κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου στα ακόλουθα στάδια της επεξεργασίας.

Μετά την κροκίδωση με άσβεστο το νερό πρέπει να σταθεροποιηθεί με ελάττωση του pH (προσθήκη  $\text{CO}_2$  ή  $\text{SO}_4^{-2}$ ) και απομάκρυνση της περίσσειας  $\text{Ca(OH)}_2$  (τελικό pH 7-8,5).

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ



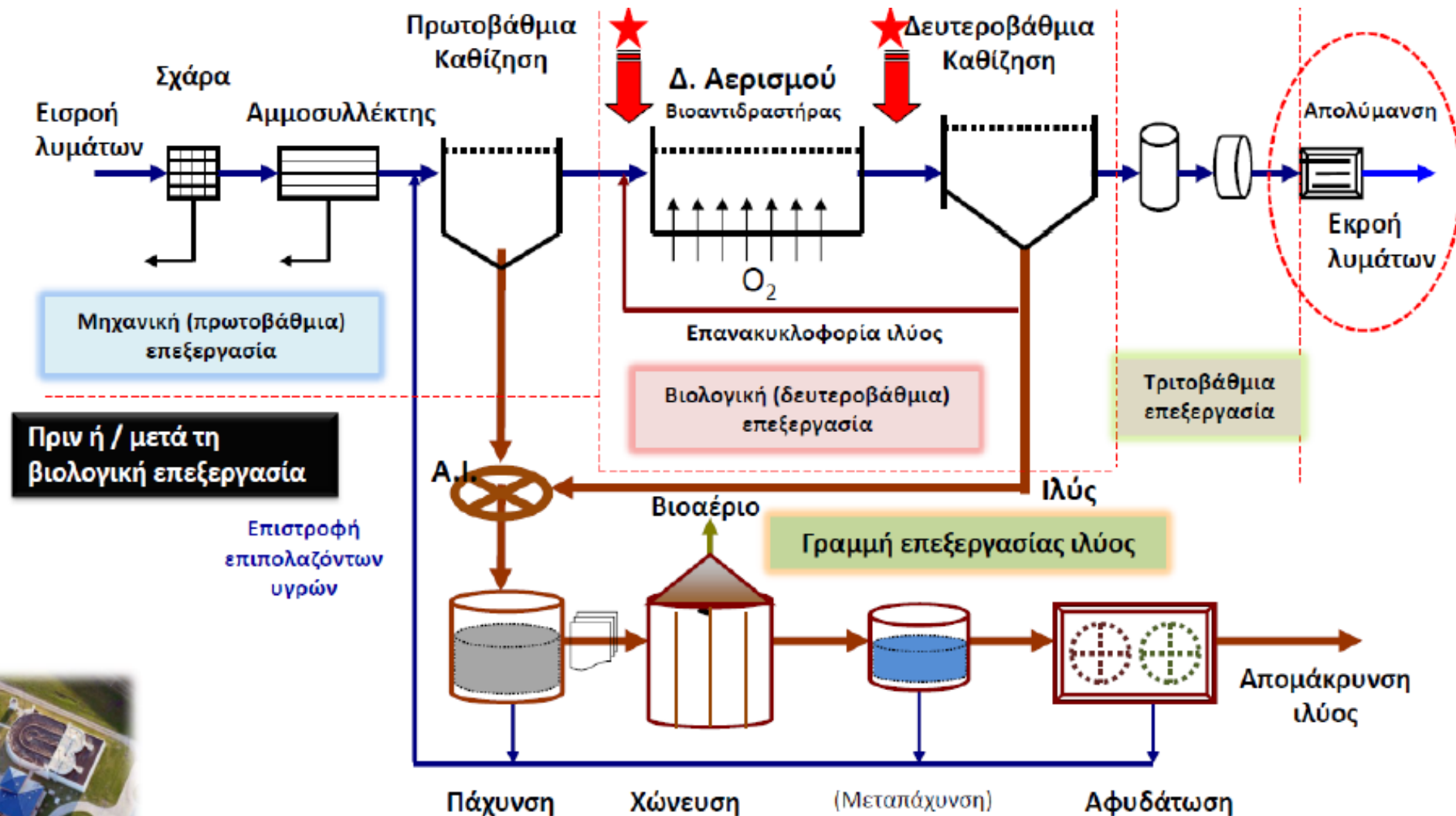
Μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε στάδιο της επεξεργασίας των λυμάτων, με διαφορετικό βαθμό όμως στην απόδοση.

Ο βαθμός απομάκρυνσης των φωσφορικών εξαρτάται από το στάδιο της επεξεργασίας στο οποίο θα λάβει χώρα προσθήκη των χημικών.

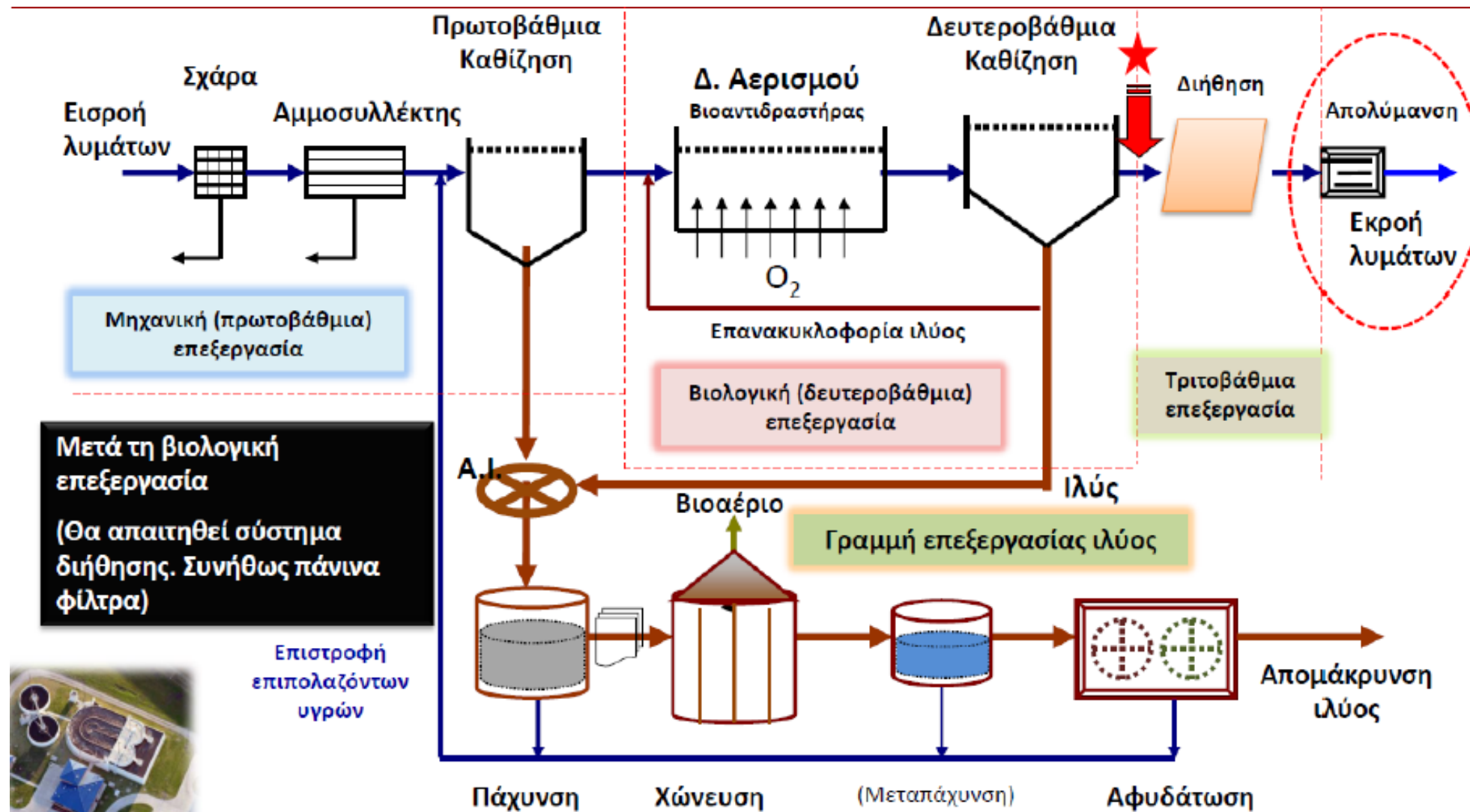
Εναλλακτικά σενάρια για τα σημεία στο διάγραμμα διεργασιών όπου θα γίνει προσθήκη των χημικών  
(ένα ή περισσότερα σημεία)

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

Πριν και/ή μετά την Βιολογική Επεξεργασία



## Μετά την Δευτεροβάθμια Επεξεργασία



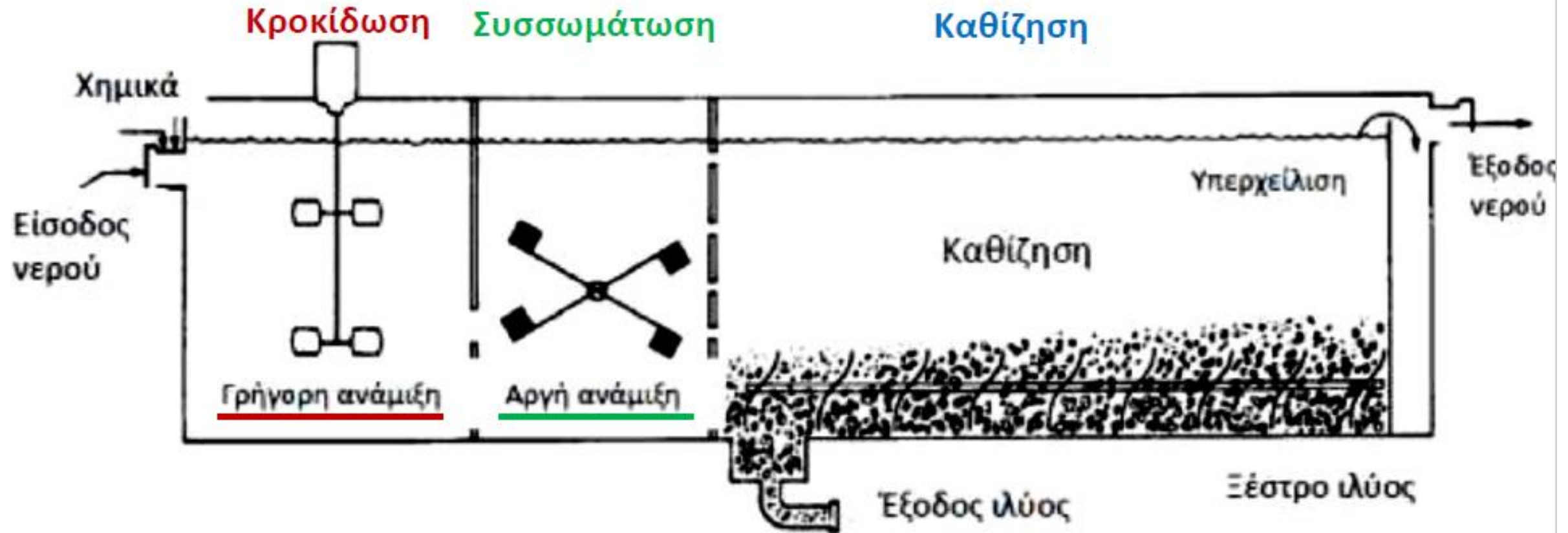
# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ: ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

| Επίπεδο επεξεργασίας                     | Πλεονεκτήματα                                                                                                                                           | Μειονεκτήματα                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Πρωτοβάθμια                              | Μπορεί να εφαρμοστεί στις περισσότερες μονάδες· αυξημένη απομάκρυνση BOD και αιωρούμενων στερεών· μικρότερος βαθμός απώλειας μετάλλων ανάκτηση άσβεστου | Λιγότερο αποτελεσματική η χρήση μεταλλικών κροκιδωτικών· μπορεί να απαιτούνται πολυμερή για τη συσσωμάτωση· δυσκολότερη η αφυδάτωση της λάσπης από την αφυδάτωση της πρωτοβάθμιας λάσπης                                                                                                                                                   |
| Δευτεροβάθμια                            | Χαμηλότερο κόστος· μικρότερη δόση χημικών από την πρωτοβάθμια· βελτίωση της σταθερότητας της ενεργού ιλύος· δεν απαιτούνται πολυμερή                    | Υπερβολική δόση μετάλλων μπορεί να προκαλέσει τοξικότητα χαμηλού pH· σε υγρά απόβλητα χαμηλής αλκαλικότητας μπορεί να απαιτείται ένα σύστημα ρύθμισης του pH· δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άσβεστος λόγω της υψηλής αύξησης του pH· η προσθήκη αδρανών στερεών στο ανάμικτο υγρό της ενεργού ιλύος μειώνει το ποσοστό των πτητικών στερεών |
| Προχωρημένη κατακρήμνιση                 | Έκροή με τη χαμηλότερη συγκέντρωση φωσφόρου· αποτελεσματικότερη χρήση των μεταλλικών κροκιδωτικών· ανάκτηση άσβεστου                                    | Υψηλό κόστος κεφαλαίου, υψηλή απώλεια μετάλλων                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Προχωρημένη διήθηση ενός και δύο σταδίων | Το χαμηλό κόστος μπορεί να συνδυαστεί με την απομάκρυνση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών                                                          | Η διάρκεια του χρόνου διήθησης μπορεί να μειωθεί με τη χρήση διήθησης ενός σταδίου. Επιπλέον κόστος όταν χρησιμοποιείται διήθηση δυο σταδίων                                                                                                                                                                                               |

Συνήθως γίνεται μετά τη βιολογική επεξεργασία:

- ✓ επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη απόδοση γιατί όλος ο P έχει ήδη μετατραπεί από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία σε ορθοφωσφορικά που εύκολα κατακρημνίζονται.
- ✓ δεν επηρεάζονται οι άλλες λειτουργίες της εγκατάστασης

# ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΡΟΚΙΔΩΣΗΣ-ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ



## ❑ Σχετική ισχύς κροκιδωτικού

$\text{Na}^+ = 1;$                        $\text{Mg}^{2+} = 30$   
 $\text{Al}^{3+} > 1000;$                  $\text{Fe}^{3+} > 1000$

## ❑ Τυπικά κροκιδωτικά

Aluminum sulfate:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$

Iron salt- Ferric sulfate:  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$

Iron salt- Ferric chloride:  $\text{Fe}_2\text{Cl}_3$

Polyaluminum chloride (PAC):  $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$

## Χημεία αργιλίου

Με προσθήκη alum, τι συμβαίνει στο pH του νερού?



1 mole alum καταναλώνει 6 moles διττανθρακικό ( $\text{HCO}_3^-$ )

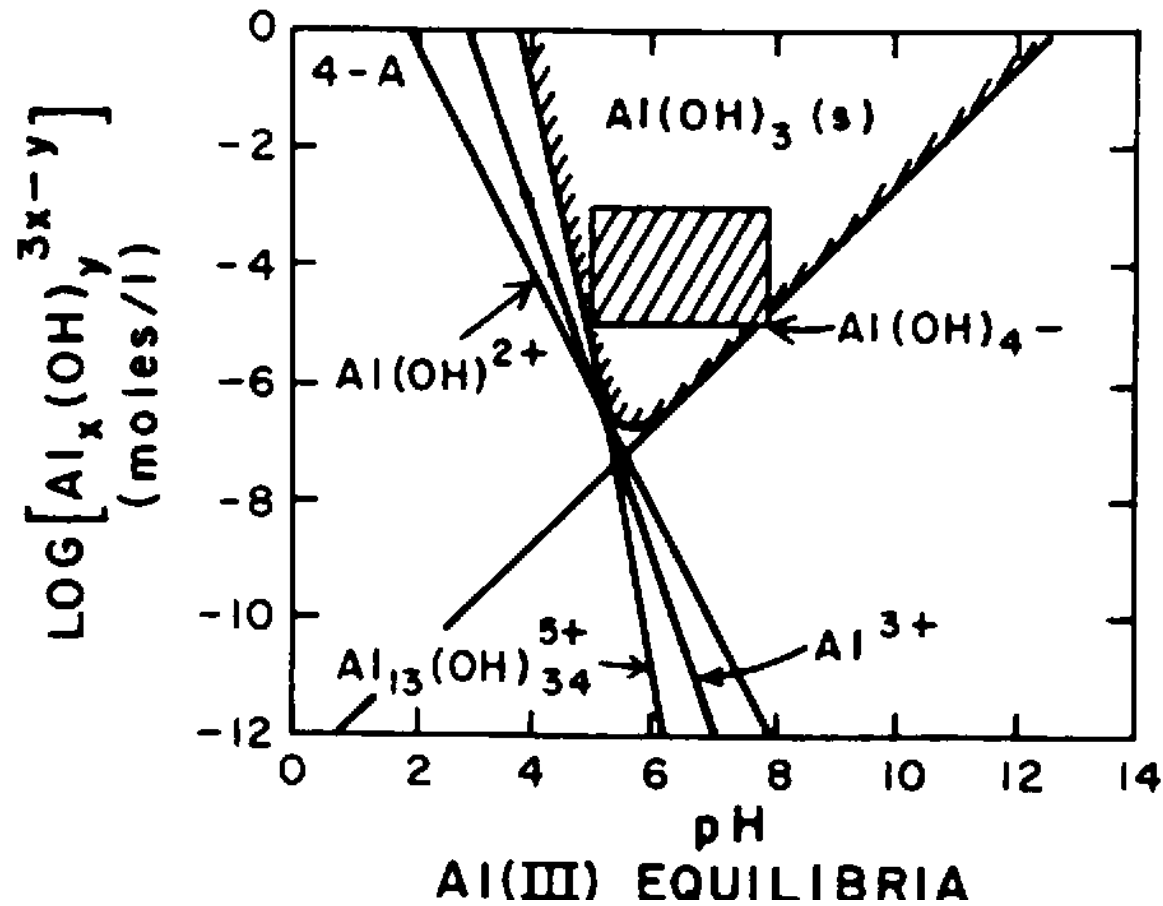


Εάν η αλκαλικότητα δεν είναι αρκετή, το pH θα μειωθεί σημαντικά

Μπορεί να χρειαστεί ασβέστης (lime) ή ανθρακικό νάτριο (sodium carbonate) για την εξουδετέρωση του οξέος.

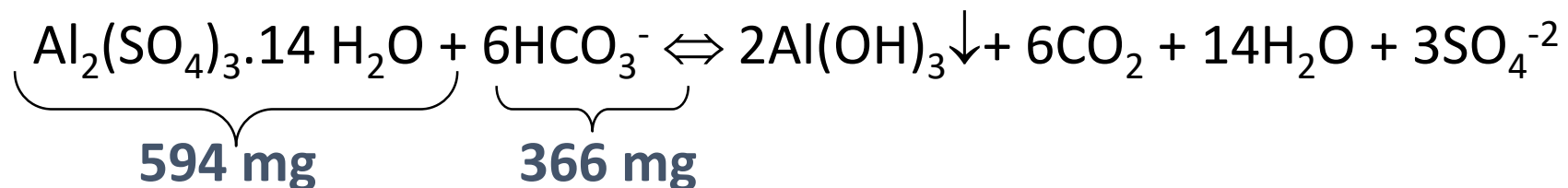
(βέλτιστο pH: 5.5 – 6.5)

Είδη  $\text{Al}^{3+}$  ως συνάρτηση του pH



## Υπολογισμός αλκαλικότητας

*Αν πρόκειται να προστεθούν 200 mg/L alum για την επίτευξη πλήρους κροκίδωσης, πόση αλκαλικότητα καταναλώνεται σε mg/L ως CaCO<sub>3</sub>?*



594 mg alum καταναλώνουν

366 mg HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

200 mg alum θα καταναλώσουν

(366/594) x 200 mg HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

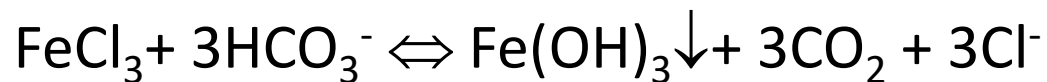
= 123 mg HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Αλκαλικότητα σε mg/L ως CaCO<sub>3</sub>

= 123 x (50/61)

= 101 mg/L ως CaCO<sub>3</sub>

## Χημεία σιδήρου



Με την προσθήκη άλατος σιδήρου, τι συμβαίνει στο pH του νερού;  
(μεγαλύτερο εύρος pH: 4 – 9; καλύτερο εύρος pH 4.5 – 5.5)

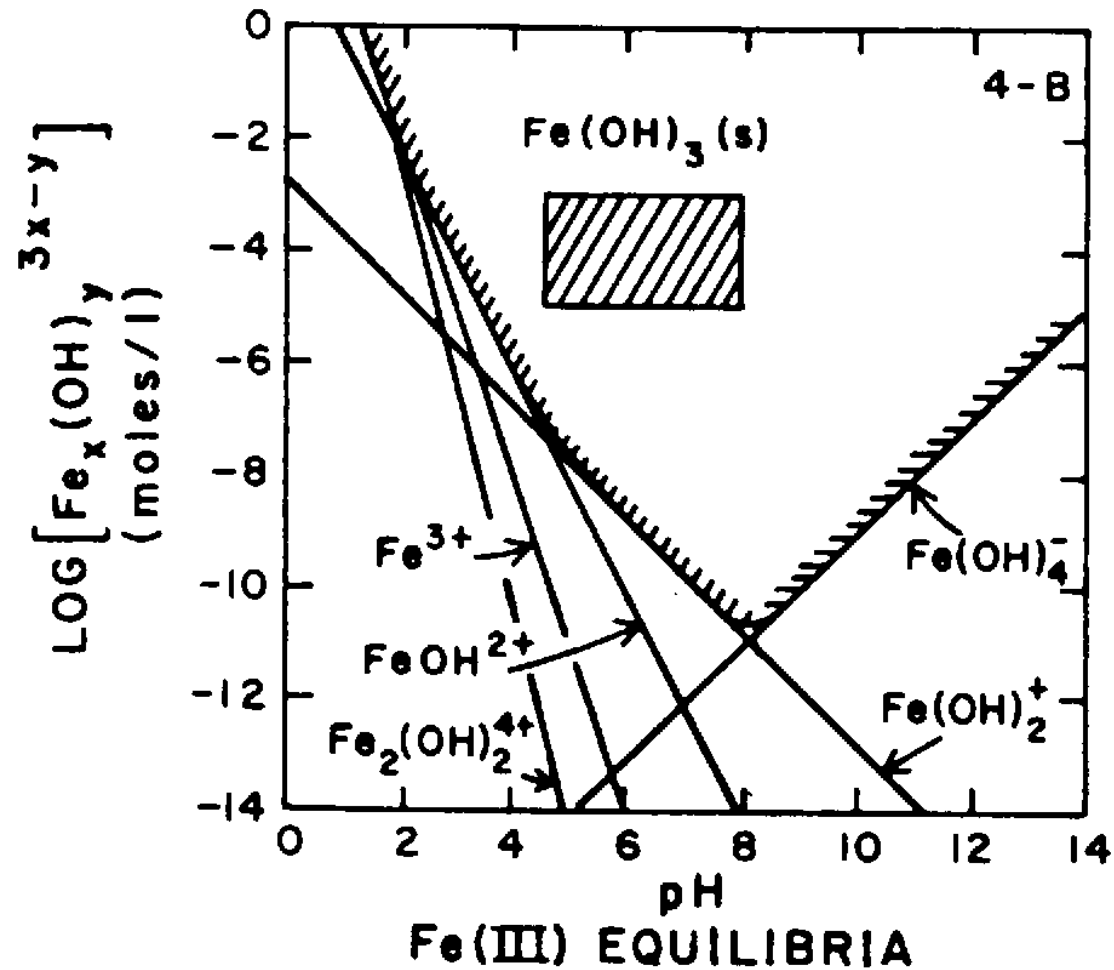
1 mole  $\text{FeCl}_3$  καταναλώνει 3 moles διττανθρακικό ( $\text{HCO}_3^-$ )

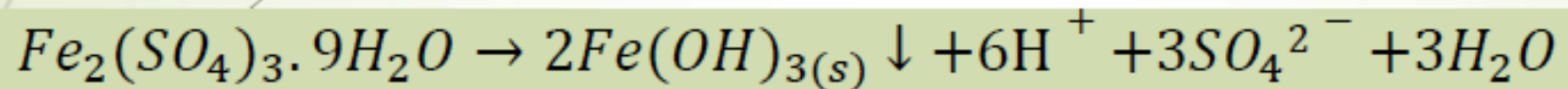
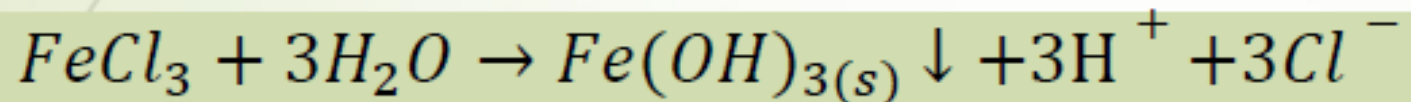
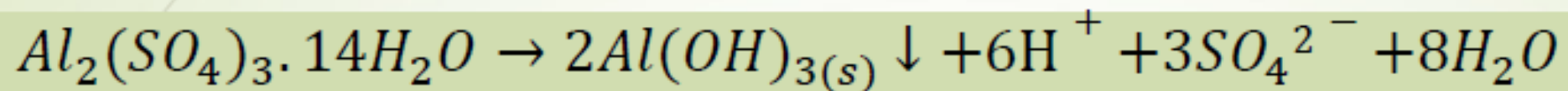
Εάν η αλκαλικότητα δεν είναι αρκετή, το pH θα μειωθεί σημαντικά λόγω σχηματισμού υδροχλωρικού οξέος.

Μπορεί να χρειαστεί ασβέστης (Lime) ή ανθρακικό νάτριο για την εξουδετέρωση του οξέος. Ο ασβέστης είναι το φθηνότερο.

*Αν προστεθούν 200 mg/L χλωριούχου σιδήρου για κροκίδωση, πόση αλκαλικότητα καταναλώνεται σε mg/L ως  $\text{CaCO}_3$ ?*

## Είδη Fe ως συνάρτηση του pH





## Συνολική Μάζα Λάσπης

Λάσπη από κροκιδωτικό  
+ Λάσπη από αιωρούμενα στερεά  
+ Λάσπη από άλλα χημικά ή υλικά

Πυκνότητα (υγρής) Λάσπης,  $\rho_{sl}$

$$\rho_{sl} = \rho_w S_{sl}$$

$\rho_w$  = πυκνότητα νερού,  $\text{kg/m}^3$

$S_{sl}$  = ειδικό βάρος λάσπης (χωρίς μονάδες)

Όγκος (υγρής) Λάσπης,  $V$

$$V = \frac{W_s}{\rho_w S_{sl} P_s}$$

$V$  = όγκος υγρής λάσπης,  $\text{m}^3$

$W_s$  = μάζα ολικών στερεών,  $\text{kg}$

$\rho_w$  = πυκνότητα νερού,  $\text{kg/m}^3$

$S_{sl}$  = ειδικό βάρος λάσπης (χωρίς μονάδες)

$P_s$  = ποσοστιαία σύσταση σε στερεά

- 1) Το είδος και η δόση των κροκιδωτικών ουσιών και των ενισχυτικών συσσωμάτωσης.
- 2) Η ένταση και διάρκεια της ανάμιξης και η μέθοδος διασποράς των χημικών ουσιών που προστίθενται στο νερό για αποσταθεροποίηση των κολλοειδών (κροκίδωση)
- 3) Η ένταση της ανάμιξης και ο χρόνος συσσωμάτωσης.
- 4) Η επιλογή της διεργασίας διαχωρισμού στερεής υγρής φάσης (π.χ. καθίζηση, επίπλευση και διήθηση).

Η ανάμιξη για (i) ταχεία και πλήρη διασπορά των προστιθέμενων χημικών στο νερό,  
και (ii) για να επιτευχθεί συσσωμάτωση

**Ανάμιξη** είναι η διεργασία με την οποία διασπείρεται ένα υλικό μέσα σε ένα άλλο, της ίδιας ή και διαφορετικής φάσης, έτσι ώστε να επιτευχθεί τελικά μια ομογενής διασπορά

Π.χ. στην κροκίδωση με προσθήκη κροκιδωτικών, χλωρίωση μετά τη Β-βάθμια επεξεργασία

**Ανάδευση** (agitation) είναι η μηχανική διεργασία, με την οποία παρέχεται κινητική ενέργεια στο ρευστό για να επιταχυνθεί η διεργασία της ανάμιξης.

Π.χ. στη συσσωμάτωση το νερό αναδεύεται για να έρθουν σε επαφή τα κολλοειδή, αφού έχει προηγηθεί το στάδιο της κροκίδωσης και έχουν εξουδετερωθεί οι μεταξύ τους απωστικές δυνάμεις.

**Μπορεί να υπάρξει ανάμιξη χωρίς ανάδευση;**

- ☐ απλή διάχυση,
- ☐ εισροή ενός ρευστού μέσα σ' ένα άλλο (jet),
- ☐ με ροή μέσα από ειδικά διαμορφωμένες σωληνώσεις

**Συνεπώς, η ανάδευση είναι ένα υποσύνολο της ευρύτερης διεργασίας της ανάμιξης.**

Έστω ότι στη μάζα ενός ρευστού (A) εγχύεται μια μικρή ποσότητα από ένα άλλο ρευστό (B). Οι νόμοι της Φυσικοχημείας επιτάσσουν ότι το δεύτερο αυτό ρευστό θα τείνει να διασπαρεί σε όλο το αρχικό ρευστό, μέχρις ότου η συγκέντρωση του (B) να είναι ομοιόμορφη σε όλη τη μάζα του (A), μέσω της **διάχυσης**.

Ο τρόπος αυτός της ομογενοποίησης είναι εξαιρετικά αργός και καθόλου πρακτικός. Για τον λόγο αυτό επεμβαίνουμε και επιταχύνουμε την ανάμιξη. Η επιτάχυνση αυτή επιτυγχάνεται με τον εξαναγκασμό του ρευστού σε κίνηση με αποτέλεσμα να μειώνεται σταδιακά η ανομοιογένεια του ρευστού.

- ❖ **Μηχανική ανάδευση** (την ισχύ την δίνει κινητήρας που περιστρέφει κατάλληλη διάταξη ανάδευσης)
- ❖ **Υδραυλική ανάδευση** (η ισχύς προέρχεται από τη βαρύτητα)

- Μηχανισμός με τον οποίο προκαλείται η **σύγκρουση** και η **συγκόλληση** των αιωρούμενων στερεών στο νερό.
- Κατά τη συσσωμάτωση, τα σωματίδια (αποσταθεροποιημένα κολλοειδή) συγκρούονται και συνενώνονται, σχηματίζοντας μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία απομακρύνονται με καθίζηση και μετέπειτα διήθηση.
- Συνήθως η συσσωμάτωση λαμβάνει χώρα σε ξεχωριστή δεξαμενή, στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων.

## Μηχανισμοί Συσσωμάτωσης

### 1. Περικινητική Συσσωμάτωση (Perikinetic or Microscale Flocculation)

Στην άτακτη θερμική κίνηση Brown , η οποία προκαλείται από τη θερμική ενέργεια του νερού και εκδηλώνεται με την κινητικότητα των μορίων του νερού (σωματίδια  $< 0,1 \mu\text{m}$ )

### 2. Ορθοκινητική Συσσωμάτωση (Orthokinetic or Macroscale Flocculation)

Στην ήπια μηχανική ανάδευση του νερού το οποίο περιέχει αιωρούμενα σωματίδια.

Η μηχανική αυτή ανάδευση μεταβάλλει την ταχύτητα κίνησης του νερού και δημιουργεί βαθμίδες ταχύτητας (velocity gradients), οι οποίες προκαλούν αύξηση των συγκρούσεων των σωματιδίων στο νερό (σωματίδια  $> 1 \mu\text{m}$ )

### 3. Διαφορική καθίζηση (Differential ή Flocculant settling)

Στη βαθμίδα ταχύτητας που δημιουργείται εξαιτίας της βαρύτητας. Αυτή η φυσική διεργασία σχετίζεται με την καθίζηση σωματιδίων.

Ο **ρυθμός συσσωμάτωσης**, δηλαδή ο ρυθμός μείωσης του αριθμού των σωματιδίων καθώς συσσωματώνονται, μπορεί να περιγραφεί από τη γενική εξίσωση:

$$\frac{dn_T}{dt} = -0,5\alpha \cdot \beta \cdot n_T^2$$

Όπου:

- $n_T$  = ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων, στη χρονική στιγμή  $T$ , ο αριθμός αυτός έχει διαστάσεις  $L^{-3}$
- $\alpha$  = συντελεστής αποτελεσματικότητας των συγκρούσεων (collision efficiency factor)
- $\beta$  = Σταθερά του ρυθμού σύγκρουσης (collision frequency constant)

# ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ (COLLISION EFFICIENCY FACTOR ), $\alpha$

$$\alpha = \frac{\text{αριθμός αποτελεσματικών συγκρούσεων}}{\text{αριθμός συνολικών συγκρούσεων}}, \quad 0 < \alpha < 1$$

Αποτελεσματικές συγκρούσεις  $\rightarrow$  τα δύο σωματίδια παραμένουν ενωμένα μετά τη σύγκρουσή τους.

Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την αποδοτικότητα της αποσταθεροποίησης των κολλοειδών αιωρημάτων, π.χ. με πλήρη αποσταθεροποίηση του κολλοειδούς συστήματος διασποράς τότε  $\alpha = 1$ .

Ο ρυθμός περικινητικής συσσωμάτωσης  $J_{pk}$  για σωματίδια ενός μόνο μεγέθους δίνεται από τη σχέση:

$$J_{pk} = \frac{dn}{dt} = -\frac{4\alpha kT}{3\mu} n^2$$

Όπου

- $n$  : η συγκέντρωση των σωματιδίων, σε αριθμό/L
- $\alpha$ : συντελεστής αποτελεσματικότητας των συγκρούσεων
- $k$  : σταθερά Boltzmann,  $1,3807 \times 10^{-23}$  J/K
- $T$  : απόλυτη θερμοκρασία, σε βαθμούς K
- $\mu$ : το ιξώδες του ρευστού, σε  $\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

Αν ολοκληρώσουμε την παραπάνω εξίσωση λαμβάνοντας υπόψη ότι για  $t = 0$  είναι  $n = n_0$ ,

τότε έχουμε:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4\alpha kT}{3\mu} n^2 \Leftrightarrow \frac{dn}{n^2} = -\frac{4\alpha kT}{3\mu} dt \Leftrightarrow \int_{n_0}^n \frac{dn}{n^2} = -\frac{4\alpha kT}{3\mu} \int_0^t dt \Leftrightarrow$$

$$-\left[\frac{1}{n}\right]_{n_0}^n = -\frac{4\alpha kT}{3\mu} t \Leftrightarrow \frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = \frac{4\alpha kT}{3\mu} t \Leftrightarrow \frac{1}{n_0} \left( \frac{n_0}{n} - 1 \right) = \frac{4\alpha kT}{3\mu} t \Leftrightarrow$$

$$\frac{n_0}{n} - 1 = \frac{4\alpha kT n_0}{3\mu} t \Leftrightarrow \frac{n_0}{n} = 1 + \frac{4\alpha kT n_0}{3\mu} t \Leftrightarrow \frac{n}{n_0} = \frac{1}{1 + \frac{4\alpha kT n_0}{3\mu} t} \Leftrightarrow$$

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{4\alpha kT n_0}{3\mu} t}$$

Ο χρόνος στον οποίο μειώνεται ο αριθμός των σωματιδίων στο μισό (χρόνος ημίσειας ζωής,  $t_{1/2}$ ) μπορεί να προσδιοριστεί αν θέσουμε  $n = n_0/2$ .

$$\frac{n_0}{2} = \frac{n_0}{1 + \frac{4\alpha k T n_0}{3\mu} t_{1/2}} \Leftrightarrow \frac{1}{2} = \frac{1}{1 + \frac{4\alpha k T n_0}{3\mu} t_{1/2}} \Leftrightarrow 1 + \frac{4\alpha k T n_0}{3\mu} t_{1/2} = 2 \Leftrightarrow$$

$$\frac{4\alpha k T n_0}{3\mu} t_{1/2} = 1 \Leftrightarrow t_{1/2} = \frac{3\mu}{4\alpha k T n_0}$$

• Άρα:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{4\alpha k T n_0}{3\mu} t} \Leftrightarrow n = \frac{n_0}{1 + \frac{t}{\frac{3\mu}{4\alpha k T n_0}}} \Leftrightarrow n = \frac{n_0}{1 + \frac{t}{t_{1/2}}}$$

Το ιξώδες του νερού στους 25°C ισούται με  $\mu = 8,9008 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} = 8,9008 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ .

• Άρα:

$$\frac{3\mu}{4kT} = \frac{3 \cdot 8,9008 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{4 \cdot 1,3807 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 1,6216 \cdot 10^{17} \frac{\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}} =$$

$$1,6216 \cdot 10^{17} \frac{\text{s}}{\text{m}^3} = 1,6216 \cdot 10^{11} \frac{\text{s}}{\text{mL}}$$

➤ Άρα:  $t_{1/2} = \frac{3\mu}{4\alpha k T n_0} = \frac{1,6216 \cdot 10^{11}}{\alpha n_0} \text{ s}$   $n_0$ : αριθμός σωματιδίων ανά mL

Ένα δείγμα νερού στους 20°C περιέχει ιούς (μεγέθους 0,1  $\mu\text{m}$ ) σε συγκέντρωση ίση με 10.000 ιοί/mL.

Σε πόσο χρόνο η συγκέντρωση των ιών θα μειωθεί στο ήμισυ λόγω συσσωμάτωσης, αν δεν υπάρχουν άλλα σωματίδια στο υδατικό δείγμα;

Δίνεται ότι για το νερό στους 20°C ισχύει ότι  $\mu = 1,00161 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Επίσης, θεωρούμε ότι οι συγκρούσεις είναι όλες αποτελεσματικές, δηλαδή  $\alpha = 1$ .

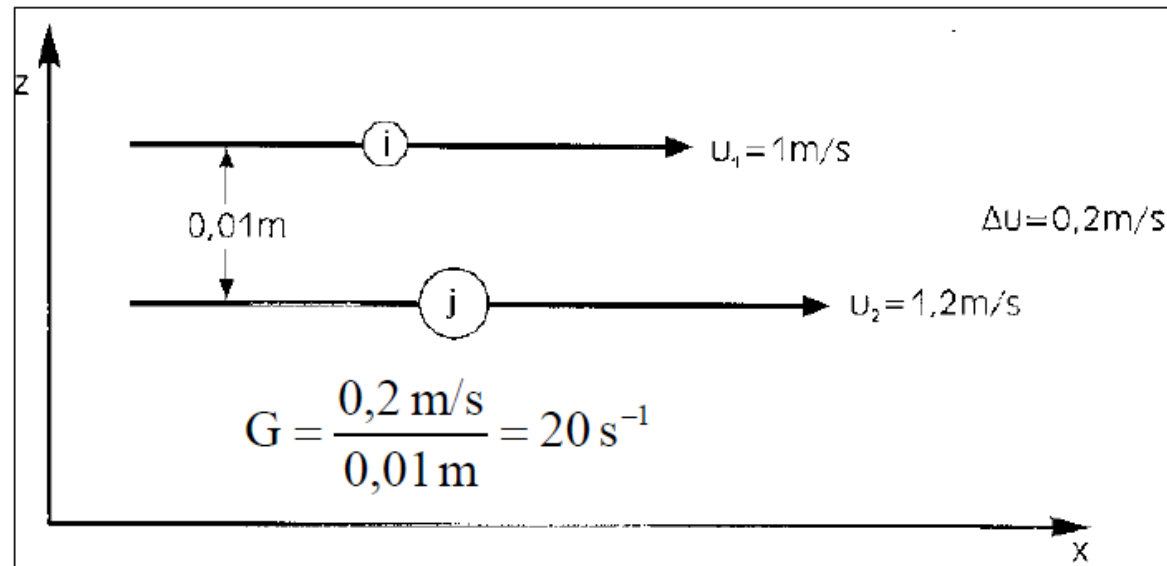
Ο ρυθμός ορθοκινητικής συσσωμάτωσης  $J_{ok}$  για σωματίδια ενός μόνο μεγέθους δίνεται από τη σχέση:

$$J_{ok} = \frac{dn}{dt} = -\frac{2}{3} \alpha G d^3 n^2$$

Όπου

- $n$ : η συγκέντρωση των σωματιδίων, σε αριθμό σωματιδίων/L
- $\alpha$ : συντελεστής αποτελεσματικότητας των συγκρούσεων
- $G$ : βαθμίδα ταχύτητας (velocity gradient)
- $d$ : διάμετρος των κολλοειδών σωματιδίων, cm.

- Η **βαθμίδα ταχύτητας** είναι ένα μέγεθος το οποίο χαρακτηρίζει τις χωρικές μεταβολές της ταχύτητας του ρευστού (νερού) λόγω της ανάδευσής του.
- Η ανάδευση του νερού μεταβάλλει την ταχύτητά του τοπικά και χρονικά οπότε τα σωματίδια τα οποία είναι διασπαρμένα στο νερό υπόκεινται σε βαθμίδα ταχύτητας.
- Τα σωματίδια τα οποία ακολουθούν τις κινήσεις του ρευστού επίσης έχουν διαφορετικές ταχύτητες, αυξάνοντας τις πιθανότητες για σύγκρουση.



- Συγκρίνουμε τους ρυθμούς (ή ταχύτητες) επαφής ανάμεσα στους δύο μηχανισμούς συσσωμάτωσης, για τον ίδιο βαθμό αποτελεσματικότητας των συγκρούσεων:

$$\frac{J_{ok}}{J_{pk}} = \frac{-2\alpha G d^3 n^2 / 3}{-4\alpha k T n^2 / 3\mu} \Leftrightarrow \frac{J_{ok}}{J_{pk}} = \frac{\mu G d^3}{2kT}$$

- Η μέση βαθμίδα ταχύτητας για να έχουμε ίσες ταχύτητες συσσωμάτωσης  $r_M = r_\mu$  θα είναι:

$$G = \frac{2kT}{\mu d^3}$$

- Για την περίπτωση του νερού στους 25°C το ιξώδες ισούται  $\mu = 8,9008 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ .
- Αν θεωρήσουμε σωματίδια μεγέθους  $d = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$  έχουμε:

$$G = \frac{2kT}{\mu d^3} = \frac{2 \cdot 1,3807 \cdot 10^{-23} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} 298,15 \text{ K}}{8,9008 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \cdot (10^{-6} \text{ m})^3} = 9,25 \text{ s}^{-1} \approx 10 \text{ s}^{-1}$$

- Αντίστοιχα προσδιορίζουμε για  $d = 0,1 \mu\text{m} \rightarrow G = 10.000 \text{ s}^{-1}$   
 $d = 10 \mu\text{m} \rightarrow G = 0,01 \text{ s}^{-1}$ .
- Για επεξεργασία του νερού και των υγρών αποβλήτων,  $G = 10$  έως  $100 \text{ s}^{-1}$
- Με βάση τα παραπάνω, είναι πρακτικά αδύνατη η ορθοκίνητική συσσωμάτωση για  $d < 1 \mu\text{m}$

- Επειδή η περικινητική συσσωμάτωση είναι πολύ αργή διαδικασία, η προσθήκη κροκιδωτικών για κατακρήμνιση ιζήματος θα δημιουργήσει μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία μπορούν να συσσωματωθούν με ήπια ανάδευση (ορθοκινητική συσσωμάτωση).

- Αν τα κολλοειδή σωματίδια συσσωματώνονται χωρίς να αφήνουν καθόλου κενούς όγκους, τότε ο **όγκος,  $\Omega$** , τον οποίο καταλαμβάνουν ανά μονάδα όγκου του αιωρήματος ισούται με:

$$\Omega = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot n = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \cdot n = \frac{\pi d^3}{6} \cdot n$$

όπου,

- $\Omega$ : ο όγκος του συσσωματώματος ανά μονάδα όγκου του αιωρήματος, σε  $\text{cm}^3/\text{L}$
- $d$ : η διάμετρος των σωματιδίων, σε  $\text{cm}$
- $n$ : ο αριθμός των σωματιδίων, σε  $\text{L}^{-1}$

- Αναδιατάσσοντας την παραπάνω εξίσωση έχουμε

$$\left. \begin{aligned} \Omega &= \frac{\pi d^3}{6} \cdot n \Leftrightarrow d^3 n = \frac{6 \Omega}{\pi} \\ J_{ok} &= \frac{dn}{dt} = -\frac{2}{3} \alpha G d^3 n^2 \end{aligned} \right\} \frac{dn}{dt} = -\frac{2}{3} \alpha G \frac{6 \Omega}{\pi} n \Leftrightarrow \frac{dn}{dt} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} n$$

- Ολοκληρώνοντας έχουμε

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} n \Leftrightarrow \frac{dn}{n} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} dt \Leftrightarrow \int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} \int_0^t dt \Leftrightarrow$$

$$\boxed{\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} t} \Leftrightarrow \boxed{n = n_0 e^{-\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} t}}$$

Ο χρόνος στον οποίο μειώνεται ο αριθμός των σωματιδίων στο μισό (χρόνος ημίσειας ζωής,  $t_{1/2}$ ) μπορεί να προσδιοριστεί αν θέσουμε  $n = n_0/2$ .

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} t \Leftrightarrow \ln \frac{\frac{n_0}{2}}{n_0} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} t_{1/2} \Leftrightarrow \ln \frac{1}{2} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} t_{1/2} \Leftrightarrow$$

$$\ln 2 = \frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} t_{1/2} \Leftrightarrow t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi}}$$

• Άρα:

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} t \Leftrightarrow \boxed{\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{\ln 2}{t_{1/2}} t}$$

Ένα δείγμα νερού έχει 10.000 κολοβακτηρίδια/mL και ασήμαντες ποσότητες άλλων κολλοειδών.

Θεωρούμε ότι τα κολοβακτηρίδια προσομοιάζονται με σφαίρες μεγέθους (διαμέτρου) 1  $\mu\text{m}$

Να υπολογιστεί ο χρόνος για 50% μείωση στον αριθμό των κολοβακτηριδίων με ορθοκίνητική συσσωμάτωση για  $G = 10 \text{ s}^{-1}$  και χωρίς προσθήκη κροκιδωτικού.

Θεωρούμε απόδοση συγκρούσεων  $\alpha=1$

Για να επιτευχθεί ικανοποιητική μετατροπή κολλοειδούς υλικού σε θρόμβους που αφαιρούνται αποτελεσματικά στο στάδιο της καθίζησης θα πρέπει τόσο στο στάδιο της ταχείας ανάδευσης όσο και στο στάδιο της βραδείας ανάδευσης να επιβληθούν οι **κατάλληλες συνθήκες** (ισχύς, χρόνος ανάδευσης).

Κρίσιμη παράμετρος για το σχεδιασμό συστημάτων ανάδευσης και σχετίζεται με την **ισχύ** που είναι απαραίτητη για την ανάδευση ανά μονάδα όγκου υγρού καθώς και με το δυναμικό ιξώδες του υγρού.

Ο βαθμός μίξης μετριέται με την **Βαθμίδα Ταχύτητας (G)**. Η έννοια της βαθμίδας ταχύτητας μεταξύ δύο διαφορετικών σωματιδίων ορίζεται ως εξής:

$$G = \frac{dv}{dy}$$

$d_v$  η διαφορά των ταχυτήτων μεταξύ των δύο σωματιδίων και  
 $d_y$  η μεταξύ τους απόσταση.  
Οι διαστάσεις της κλίσης ταχύτητας είναι (χρόνος)<sup>-1</sup>.

# ΒΑΘΜΙΔΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ, G

Η βαθμίδα ταχύτητας (G) είναι μέτρο του ρυθμού διασκορπισμού ισχύος στην δεξαμενή ανάδευσης, εξαρτάται από την ισχύ (P) η οποία καταναλώνεται για την ανάδευση του νερού. Στο σχεδιασμό του αναμίκτη, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$G = \sqrt{\frac{P}{V\mu}} \Leftrightarrow P = G^2 V \mu$$

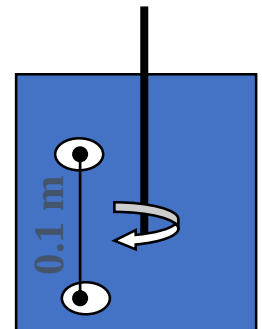
G= βαθμίδα ταχύτητας,  $s^{-1}$ ;

P = παροχή ισχύος, W

V = όγκος δεξαμενής,  $m^3$ ;

$\mu$  = δυναμικό ιξώδες, (Pa.s)

- P: η ισχύς η οποία καταναλώνεται στο ρευστό, σε W
- V: ο όγκος του ρευστού (όγκος της δεξαμενής συσσωμάτωσης), σε  $m^3$
- $\mu$ : το ιξώδες του νερού, σε  $Pa \cdot s = N \cdot s / m^2$



1 m/s

- Τιμή  $G$  για κροκίδωση: 700 έως 1000  $S^{-1}$ ; 3000 έως 5000  $S^{-1}$  για χρόνο μίξης: 30 έως 60 S σε in-line μίκτη: 1-2 sec
- Τιμή  $G$  για συσσωμάτωση: 20 έως 80  $S^{-1}$   
χρόνος μίξης: 20 έως 60 min

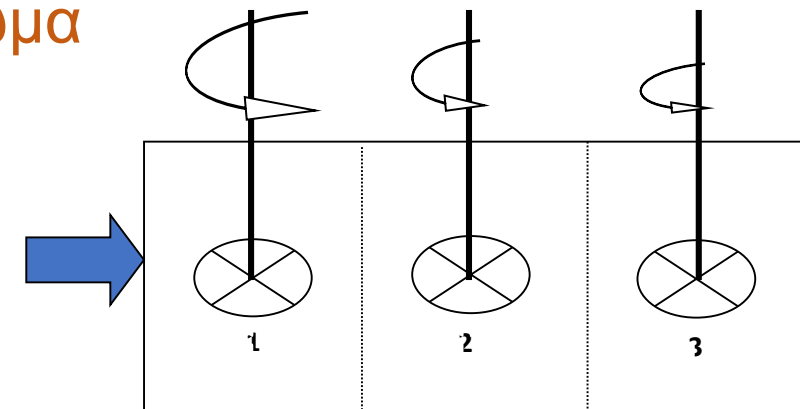
Στο σχεδιασμό του συσσωματωτή: **Gt**  
ένα προϊόν της  $G$  και  $t$  χρησιμοποιείται ευρέως ως σχεδιαστική παράμετρος

Τυπική τιμή  $Gt$  για συσσωμάτωση είναι  $2 \times 10^4 - 10^5$

Μεγάλη  $G$  και μικρό  $T$  δίνει μικρό αλλά πυκνό συσσωμάτωμα

Μικρή  $G$  και μεγάλο  $T$  δίνει μεγάλο αλλά ελαφρύ συσσωμάτωμα

Χρειαζόμαστε μεγάλα αλλά και πυκνά **συσσωματώματα**,  
που μπορούν να ληφθούν με το σχεδιασμό του  
συσσωματωτή με διαφορετικές τιμές  $G$



Πόση ιπποδύναμη χρειάζεται να παράσχουμε σε μια δεξαμενή συσσωμάτωσης για την παροχή μιας τιμής  $G$  των  $100\text{s}^{-1}$  και ενός  $Gt$  των 100,000 για ροή 10 MGD?  
(Δίνονται:  $\mu = 0.89 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ ;  $1 \text{ hp} = 745.7 \text{ watts}$ )

Χρόνος παραμονής,  $t = Gt/G = 100,000/100 = 1000 \text{ secs}$

Όγκος δεξαμενής συσσωμάτωσης,  $V = (0.438 \text{ m}^3/\text{sec}) \times (1000 \text{ sec})$   
 $= 438 \text{ m}^3$

$$G = \left[ \frac{P}{V \pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \begin{aligned} P &= G^2 V \times \mu \\ &= 100^2 \times 438 \times 0.89 \times 10^{-3} = 3900 \text{ W} \\ &= 3900/746 = 5.2 \text{ hp} \end{aligned}$$

$$F = ma. \text{ Σε βαρυτικό πεδίο, } F = mg$$

*Δύναμη σε N, όπου a N είναι η δύναμη για την επιτάχυνση 1kg @1m/s<sup>2</sup>*

$$\text{Δύναμη για να κινήσει h, Δυνητική Ενέργεια} = Fh = mgh$$

*Διαστάσεις MLT<sup>-2</sup>L, kgm<sup>2</sup>s<sup>-2</sup> = Nm ή J*

*Δύναμη που κινείται σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα, εισάγει τη διάσταση του χρόνου*

*Οι διαστάσεις εδώ είναι MT<sup>-1</sup>, L/s (1L=1kg)*

$$\text{Ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας, ή ισχύς, } P = mgh/t$$

*Οι διαστάσεις εδώ είναι ML<sup>2</sup>T<sup>-3</sup>, ή kgm<sup>2</sup>s<sup>-3</sup> = J/s or W.*

*Ισχύς (W) για την άντληση νερού σε h, παροχή σε L/s (ή kg/s)*

$$W = \text{kg/s} \times h \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

*kW, διαίρεση με 1000*

*HP, διαίρεση με 746*

**Ιξώδες** του νερού είναι ένα μέτρο της αντίστασης στη ροή

Η μονάδα cgs είναι το Poise,  $1 \text{ gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

Το ιξώδες του νερού είναι περίπου  $1\text{cP} = 0.01\text{P} = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$$\text{Pa} = \text{N/m}^2 \text{ ή } \text{kgms}^{-2}\text{m}^{-2},$$

$$\text{έτσι } \text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kgms}^{-2}\text{m}^{-2}\text{s} = \text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$$

Αυτό μπορεί και να ληφθεί μεταβαίνοντας από  $\text{gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$ , πολλαπλασιάζοντας με 100/1000.

$$\text{Συνεπώς } 1\text{cP} = 0.001 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$$

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ & ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ: υπολογισμός βαθμίδας ταχύτητας

Υπολογίστε τη βαθμίδα ταχύτητας σε έναν συσσωματωτή, όπου η απαιτούμενη ενέργεια είναι 1 J/L.

Παροχή 4ML/d, χρόνος παραμονής = 20 min

$$\text{Όγκος, } V = 4000 / (24 \times 60 / 20) = 55.5 \text{ m}^3$$

$$\text{Παροχή} = \frac{4000 \times 1000}{24 \times 60 \times 60} = 46.3 \text{ L/s}$$

$$\begin{aligned} G &= \sqrt{P/V\mu} = \sqrt{1 \times 46.3 / 0.001 \times 55.5} \\ &= 28 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

# ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ & ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ: υπολογισμός ύψους για υδραυλικό συσσωματωτή

Υπολογίστε τη διαφορά ύψους στήλης ύδατος διαμέσου ενός υδραυλικού συσσωματωτή, όπου η απαιτούμενη ενέργεια είναι 1 J/L.

Παροχή 4ML/d

$$\begin{aligned}\text{Ισχύς} &= \text{ενέργεια/χρόνος} \\ 1 \text{ J} \times \text{L/s} &= \text{kg/s} \times 9.8 \times h\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Συνεπώς, } h &= 1/9.8 \text{ m} \\ &= 0.102\text{m}\end{aligned}$$

Υπολογίστε τον αριθμό Gt ενός υδραυλικού συσσωματωτή στο προηγούμενο παράδειγμα

$$Gt = 28 \times 20 \times 60$$

$$= 33,000$$

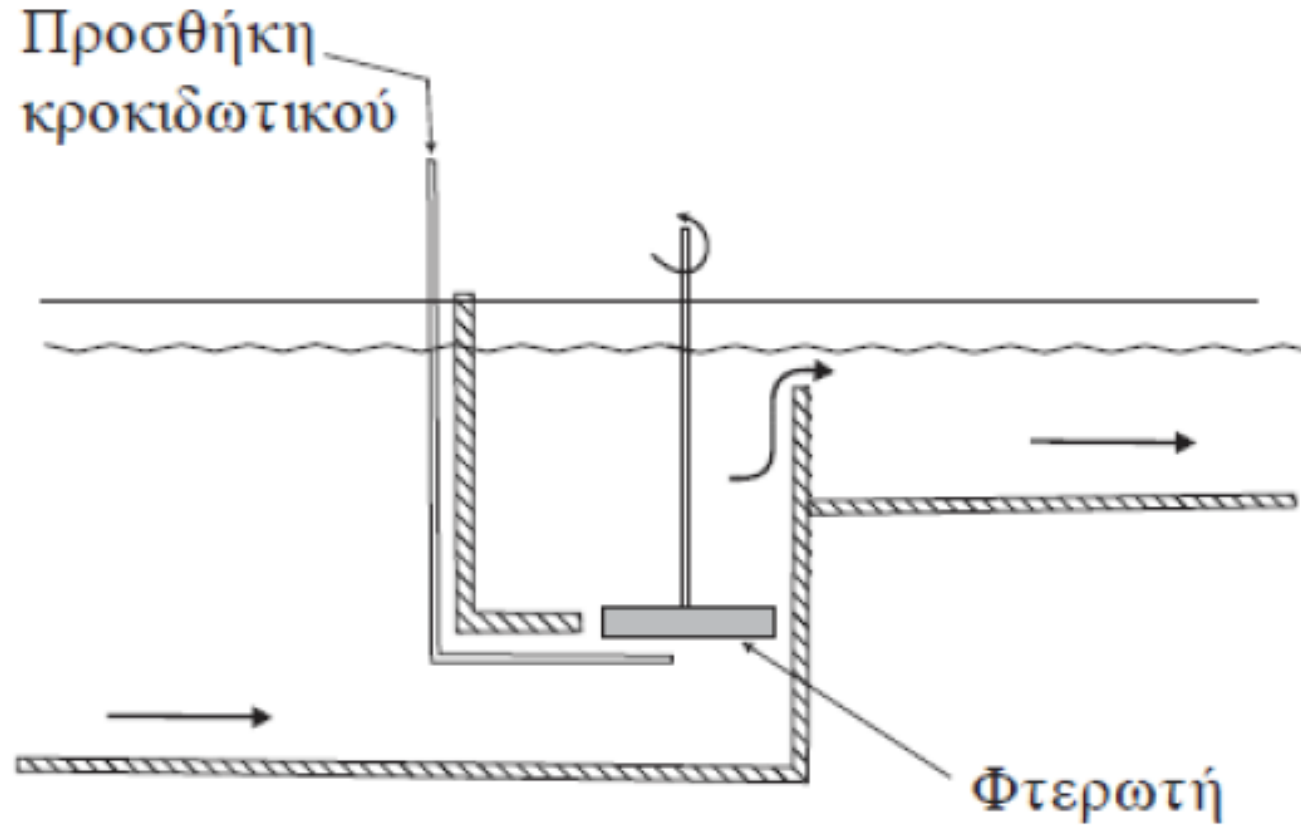
(εντός των ορίων 20,000 – 200,000)

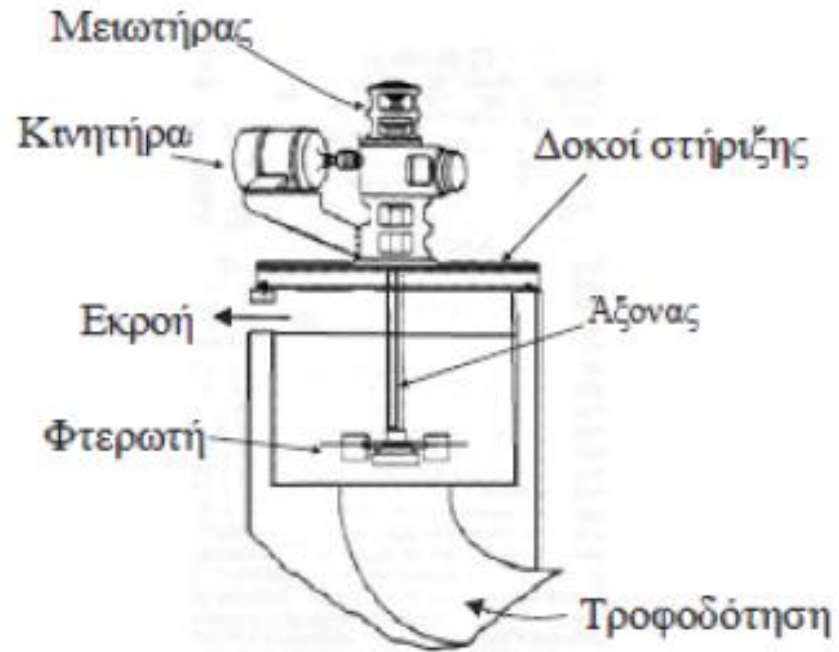
| Τύπος                                               | $G \text{ (s}^{-1}\text{)}$ | $Gt_o \text{ (αδιάστατο)}$ |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Χαμηλή θολότητα, κροκίδωση για απομάκρυνση χρώματος | 20-70                       | 60.000-200.000             |
| Υψηλή θολότητα, κροκίδωση για απομάκρυνση στερεών   | 30-80                       | 36.000-96.000              |
| Αποσκλήρυνση, 10% στερεά                            | 130-200                     | 200.000-250.000            |
| Αποσκλήρυνση, 39% στερεά                            | 150-300                     | 390.000-400.000            |

Επειδή οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την διαλυτοποίηση των κροκιδωτικών γίνονται με πολύ μεγάλη ταχύτητα είναι φανερό ότι η ανάμιξη θα πρέπει να πραγματοποιείται σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και με μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Οι συνιστώμενες τιμές για ταχεία ανάμιξη είναι οι εξής:

- Υδραυλικός χρόνος παραμονής ( $T$ , sec ): 20-120
- Βαθμίδα ταχύτητας ( $G$ ,  $s^{-1}$ ): 700-1000

Τυπικό σύστημα μηχανικής ταχείας ανάδευσης

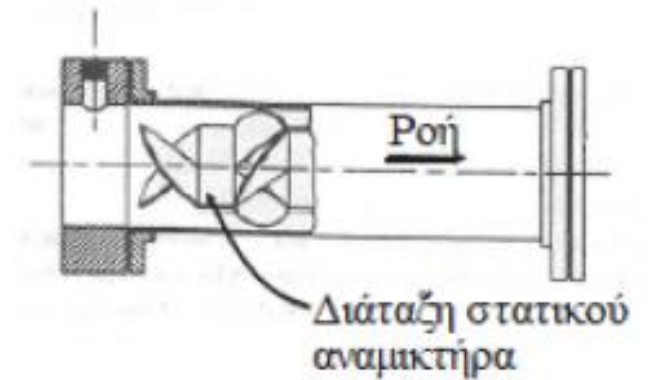




α. Μηχανική ταχεία ανάμιξη με περιστρεφόμενη φτερωτή



β. Φωτογραφία συστημάτων με μηχανική ταχεία ανάμιξη μέσα σε σωλήνα



γ. Υδραυλική ταχεία ανάμιξη μέσα σε σωλήνα εξοπλισμένο με στατικό αναμικτήρα



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)



(ζ)



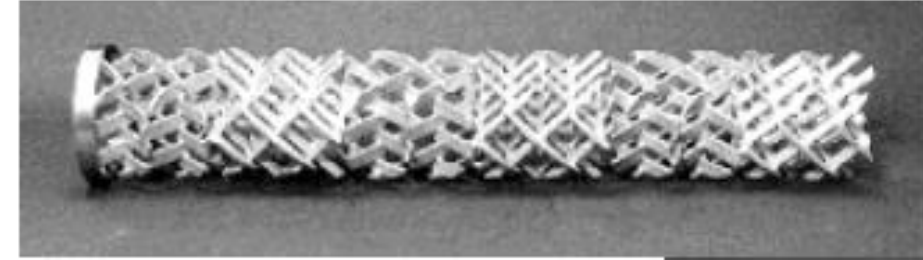
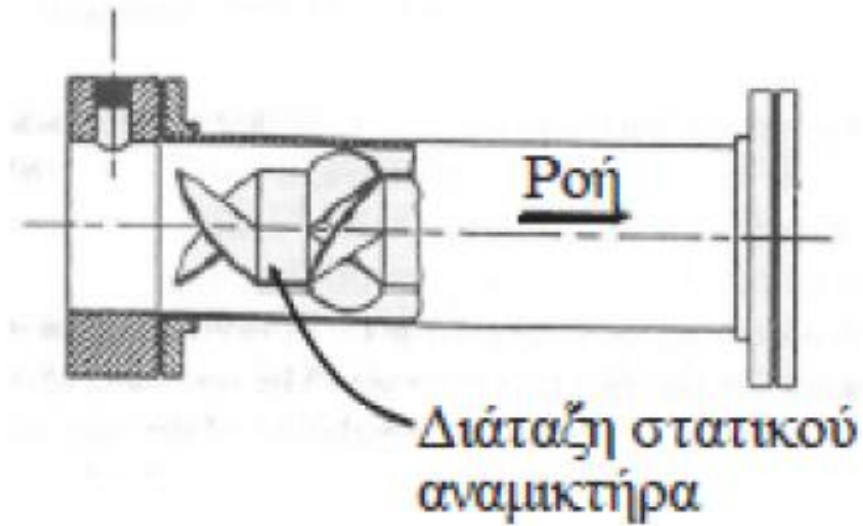
(η)



(θ)

**Σχήμα 10.3.** Τύποι αναδευτήρων: (α) στρόβιλος Rushton, (β) στρόβιλος με επίπεδα πλάγια πτερύγια (γ) ναυτική προπέλα (δ) στρόβιλος Bakker (Chemineer BT-6) (ε) αναδευτήρας HE-3 (Chemineer) (στ) αναδευτήρας Intermig (Ekato) (ζ) αναδευτήρας TT (Mixel) (η) αναδευτήρας A315 (Lightnin) (θ) ελικοειδής άγκυρα [για πολύ ιξώδη ρευστά].

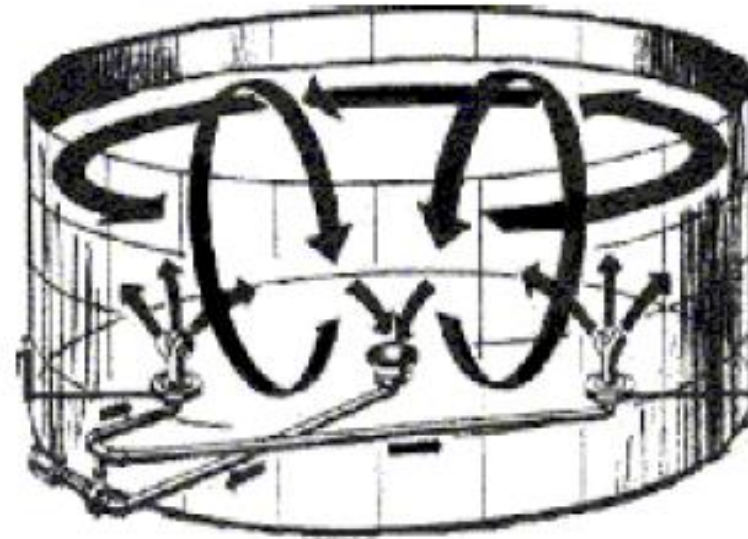
# ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ: Στατικός αναμικτήρας



- Στους στατικούς αναμικτές, οι τυρβώδεις συνθήκες ροής εξασφαλίζονται με την παρεμβολή εμποδίων στη ροή του υγρού (ελάσματα).



# ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ: Εγχυτήρας (jet mixer)



Μια δεξαμενή ταχείας ανάμιξης έχει μήκος 1,2 m, πλάτος 1,2 m και βάθος υγρού 1,1 m.

Η ισχύς που καταναλώνεται για την ανάμιξη του περιεχομένου της δεξαμενής είναι ίση με 1 hp.

Να υπολογισθεί η κλίση της ταχύτητας  $G$ .

Η θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου νερού είναι ίση με 15°C.

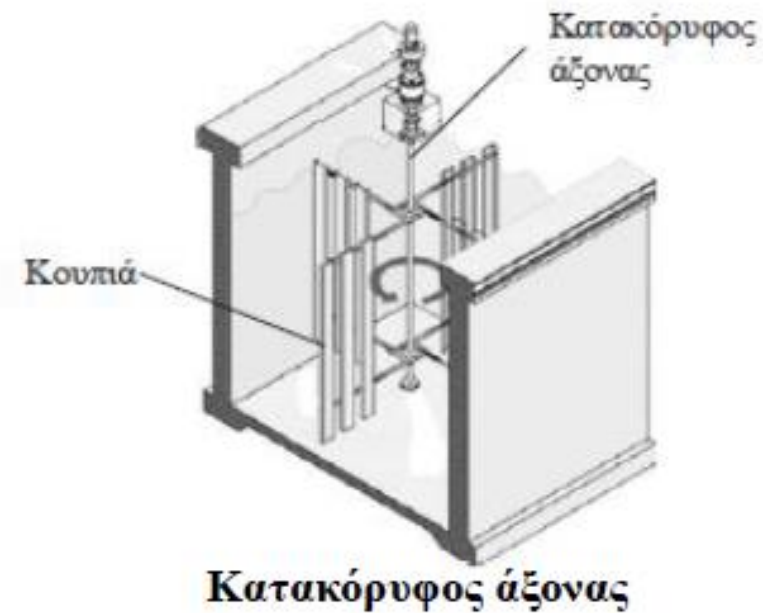
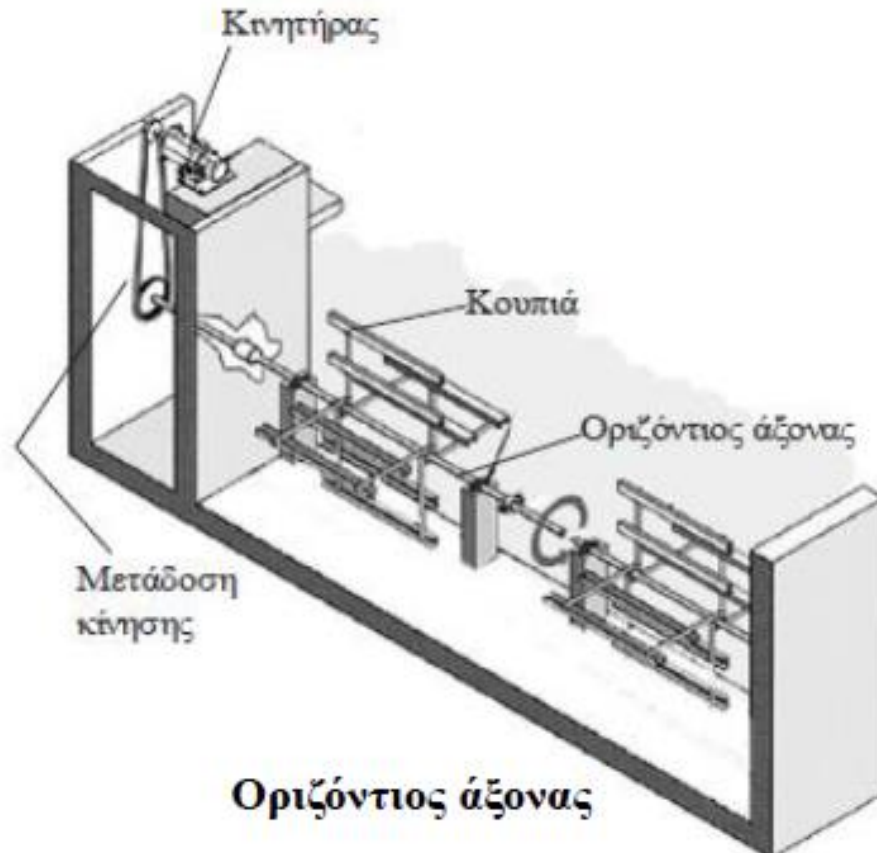
Οι δεξαμενές συσσωμάτωσης σχεδιάζονται για υδραυλικό χρόνο παραμονής στην περιοχή των 30 min και για κλίση ταχύτητας μικρότερη από  $200 \text{ s}^{-1}$  (συνήθως 50-100  $\text{s}^{-1}$ )

## Διατάξεις Συσσωμάτωσης

- με πρόσδοση ισχύος από κινητήρα που περιστρέφει κατάλληλη διάταξη ανάδευσης (μηχανική ανάδευση)
- με βαρύτητα (υδραυλική ανάμιξη)

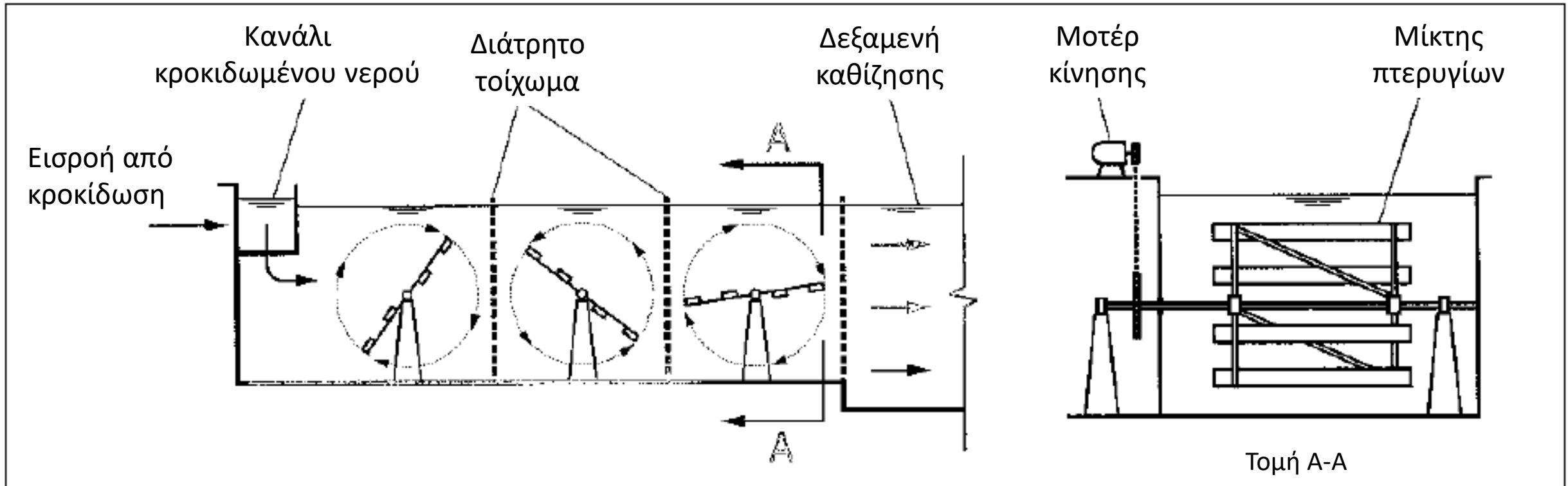
## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Σύστημα συσσωμάτωσης με πτερύγια οριζόντιου/κάθετου άξονα



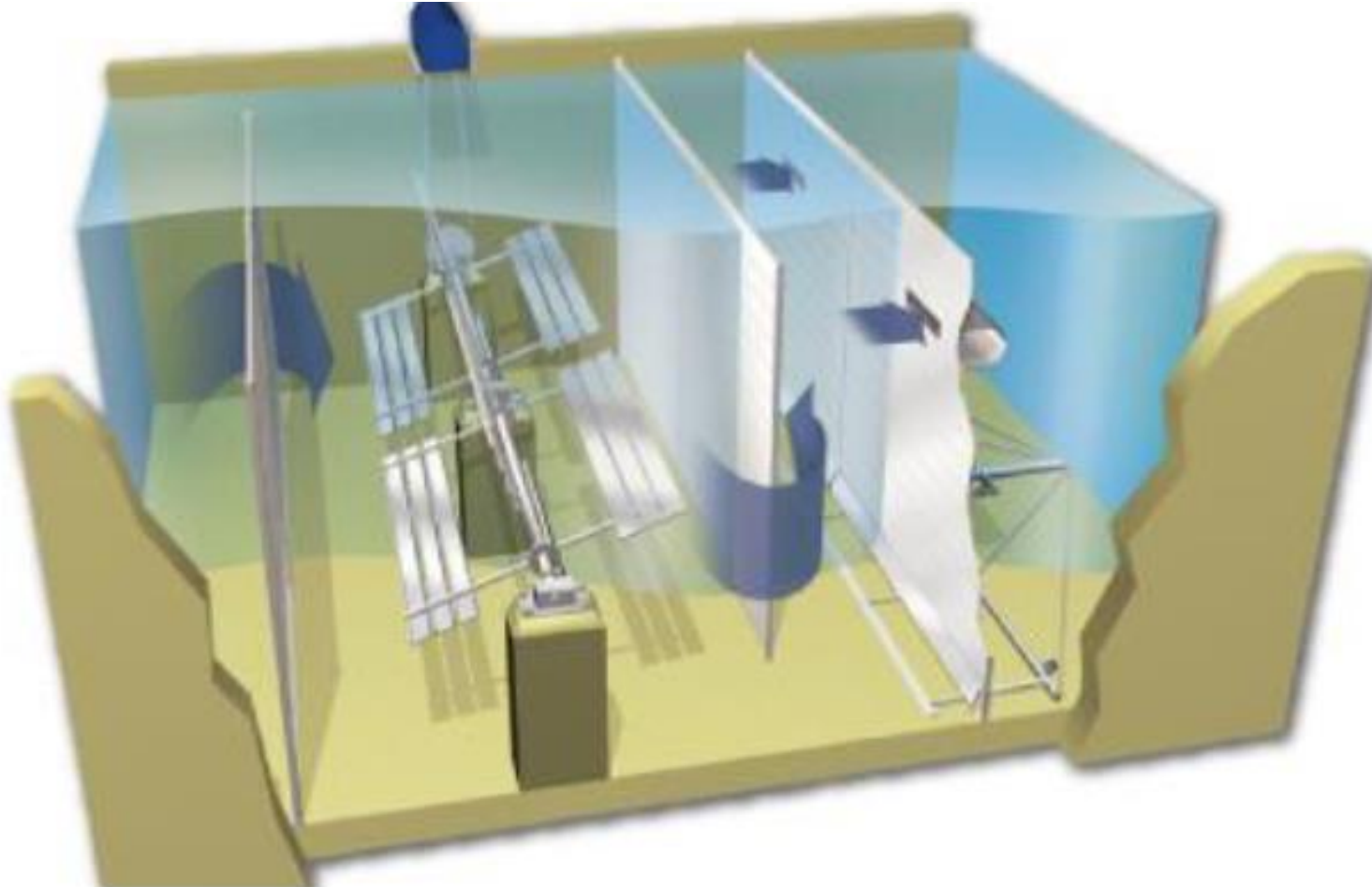
## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Σύστημα συσσωμάτωσης με πτερύγια οριζόντιου άξονα



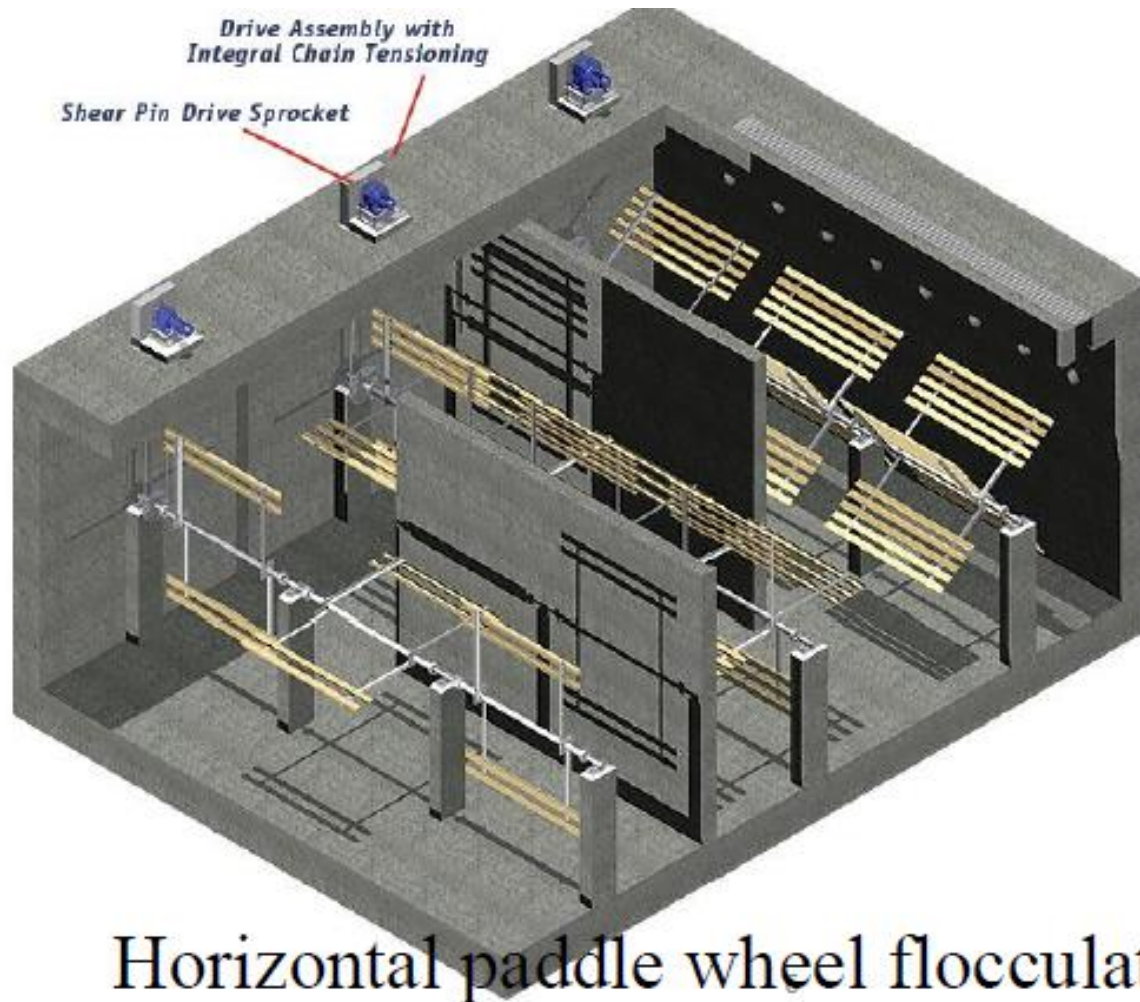
## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Σύστημα συσσωμάτωσης με πτερύγια οριζόντιου άξονα



## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

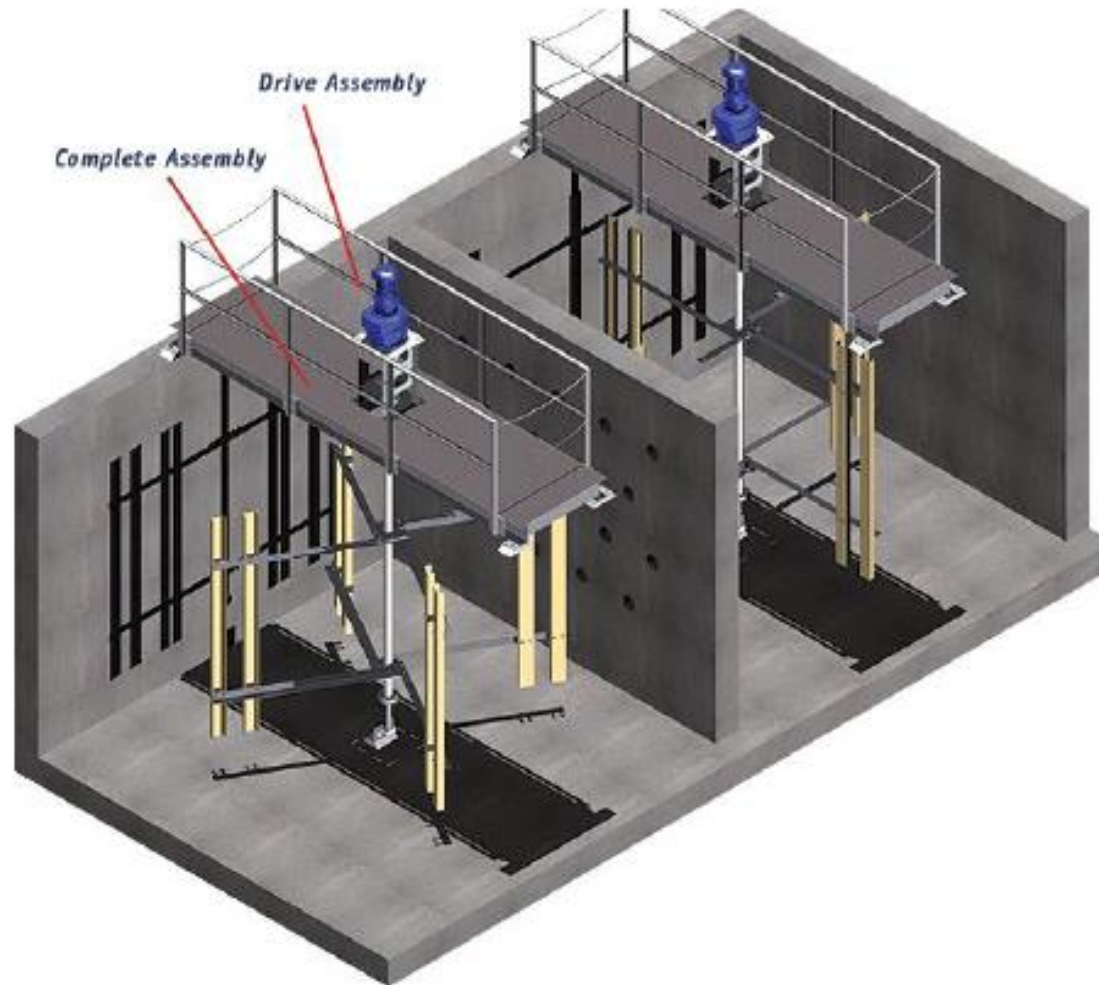
Σύστημα συσσωμάτωσης με πτερύγια οριζόντιου άξονα



Horizontal paddle wheel flocculation system

## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Σύστημα συσσωμάτωσης με πτερύγια κατακόρυφου άξονα



Για να υπολογιστεί η ισχύς η οποία απαιτείται για την περιστροφή ενός συγκεκριμένου αναδευτήρα με δεδομένη ταχύτητα χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις της ισχύος με τις διάφορες μεταβλητές του συστήματος.

Βαθμίδα Ταχύτητας G για διατάξεις με περιστρεφόμενα πτερύγια

Σχετική ταχύτητα των κουπιών  
ως προς το νερό ( $\text{m s}^{-1}$ ) ίση με 75%  
της πραγματικής ταχύτητας

Ισχύς που μεταφέρεται από  
τον κινητήρα ( $\text{N.m s}^{-1}$ )

$$P = D \cdot v_p$$

Οπισθέλκουσα δύναμη  
στα κουπιά (N)

## Οπισθέλκουσα δύναμη D

$$D = C_D A_p \rho \frac{v_p^2}{2}$$

- $C_D$  ο συντελεστής οπισθέλκουσας (Drag Coefficient), αδιάστατος, για επίπεδα πτερύγια  $C_D = 1,8$
- $A_p$  η συνολική επιφάνεια των πτερυγίων ( $m^2$ )
- $\rho$  η πυκνότητα του νερού ( $kg.m^{-3}$ )
- $v_p$  η σχετική ταχύτητα των πτερυγίων ως προς το νερό και ίση περίπου με το 75% της πραγματικής ταχύτητας των πτερυγίων (ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται το μέσο του πλάτους των κουπιών).

Βαθμίδα Ταχύτητα G για διατάξεις συσσωμάτωσης με περιστρεφόμενα πτερύγια

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω σχέσεις στην εξίσωση:  $G = \sqrt{\frac{P}{V\mu}}$

Προκύπτει

$$G = \left( \frac{C_D A_p \rho v_p^3}{2 V \mu} \right)^{\frac{1}{2}}$$

V, ο όγκος του νερού που υφίσταται ανάδευση (όγκος της δεξαμενής συσσωμάτωσης), m<sup>3</sup>

Ισχύς που αποδίδεται στο ρευστό, P, για διατάξεις με περιστρεφόμενα πτερύγια

Επιλύοντας ως προς P:

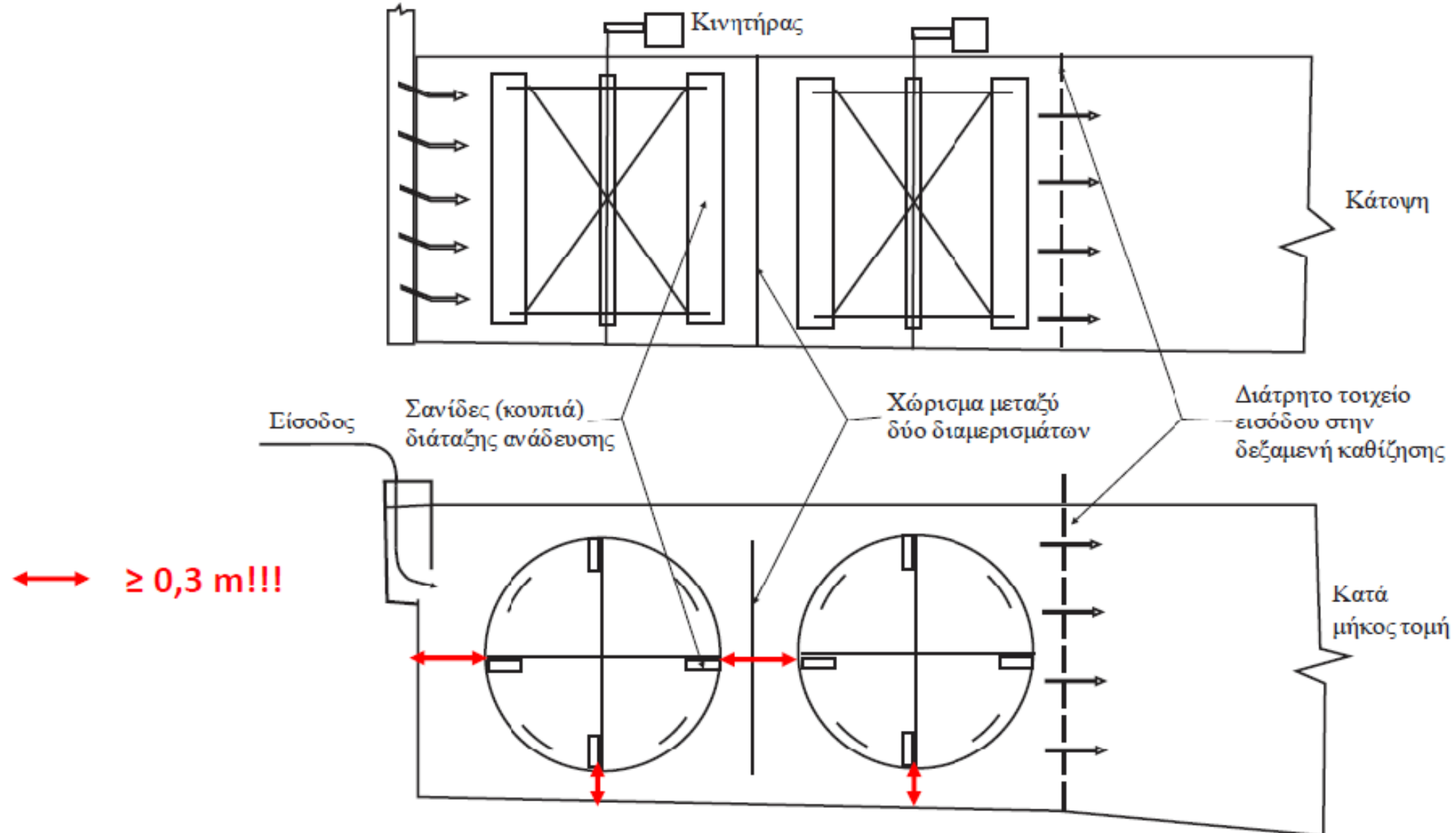
$$\left. \begin{aligned} P &= G^2 V \mu \\ G &= \left( \frac{C_D A_p \rho U_p^3}{2 \mu V} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow P = \left( \frac{C_D A_p \rho U_p^3}{2 \mu V} \right) V \mu \Leftrightarrow \boxed{P = \frac{C_D A_p \rho U_p^3}{2}}$$

- $C_D$  ο συντελεστής οπισθέλκουσας (Drag Coefficient), αδιάστατος, για επίπεδα πτερύγια  $C_D = 1,8$
- $A_p$  η συνολική επιφάνεια των πτερυγίων ( $m^2$ )
- $\rho$  η πυκνότητα του νερού ( $kg.m^{-3}$ )
- $U_p$  η σχετική ταχύτητα των κουπιών ως προς το νερό στο άκρο του πτερυγίου (κυμαίνεται από 50% έως 75% της πραγματικής γραμμικής ταχύτητας των άκρων των πτερυγίων (ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται το μέσο του πλάτους των κουπιών)).

# ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ

- Η ταχύτητα των πτερυγίων πρέπει να είναι  $< 1 \text{ m/s}$
- Ελάχιστη απόσταση ίση με  $0.3 \text{ m}$  θα πρέπει να προβλέπεται μεταξύ των άκρων των πτερυγίων καθώς και μεταξύ των άκρων των πτερυγίων και των τοιχωμάτων της δεξαμενής (πυθμένας και πλευρικά τοιχώματα) ώστε να αποφεύγονται τοπικά υψηλές τιμές της βαθμίδας της ταχύτητας.

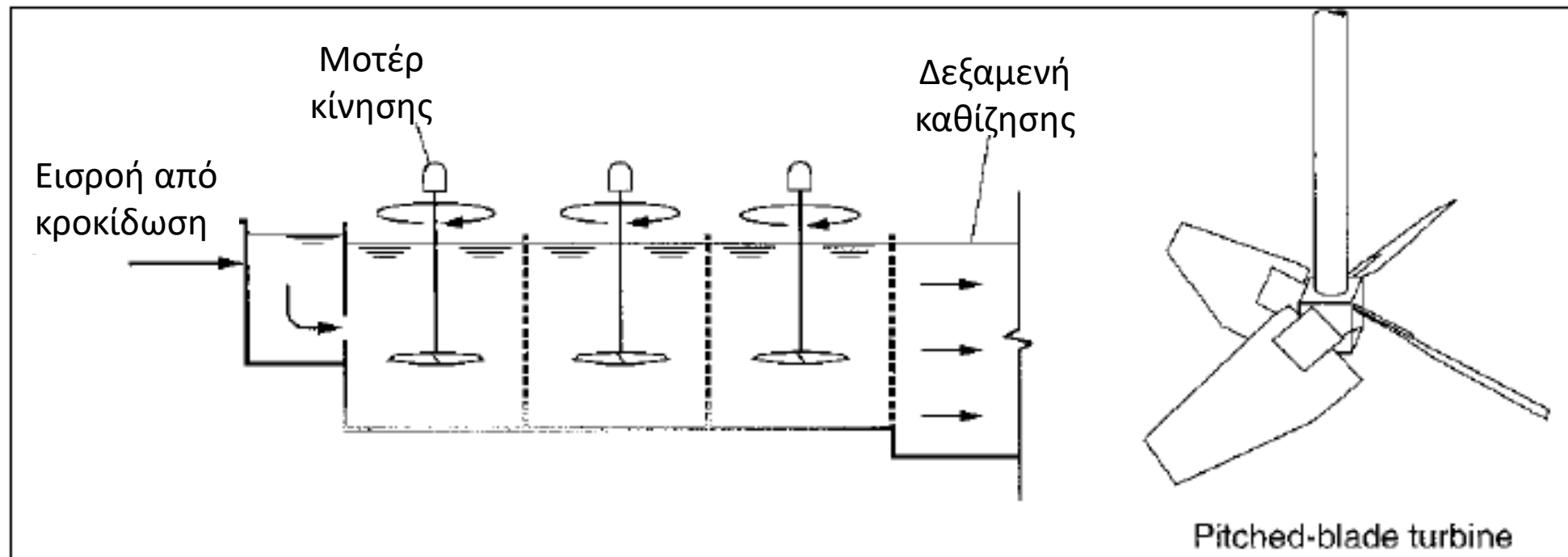
# ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ



## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Σύστημα συσσωμάτωσης με στροβίλους κατακόρυφου άξονα

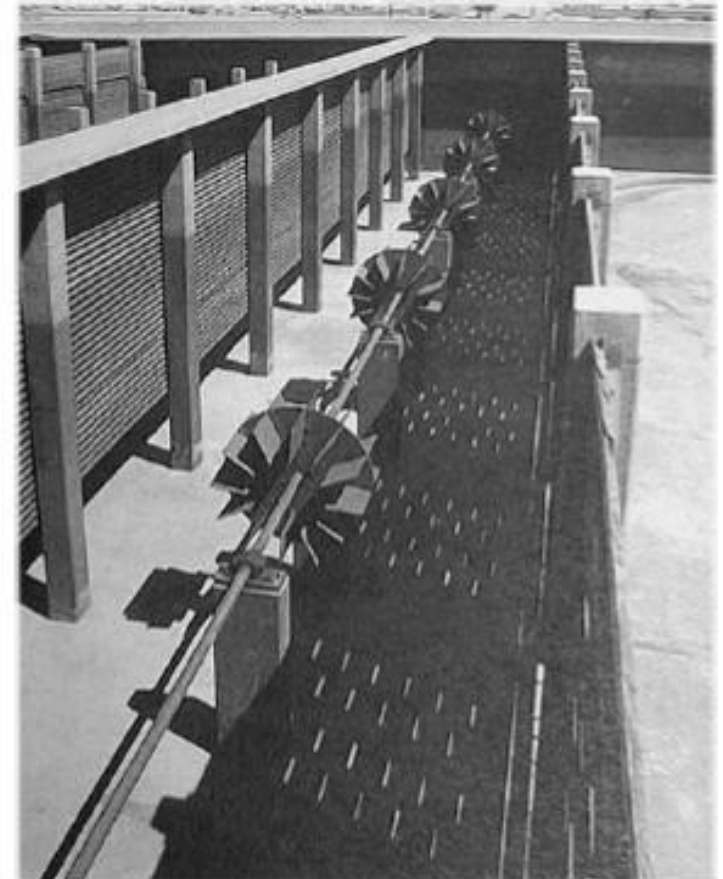
Vertical shaft turbine flocculation system



# ΒΡΑΔΕΙΑ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ)

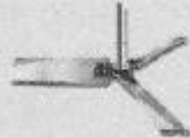
## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Σύστημα συσσωμάτωσης με στροβίλους κατακόρυφου άξονα



## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

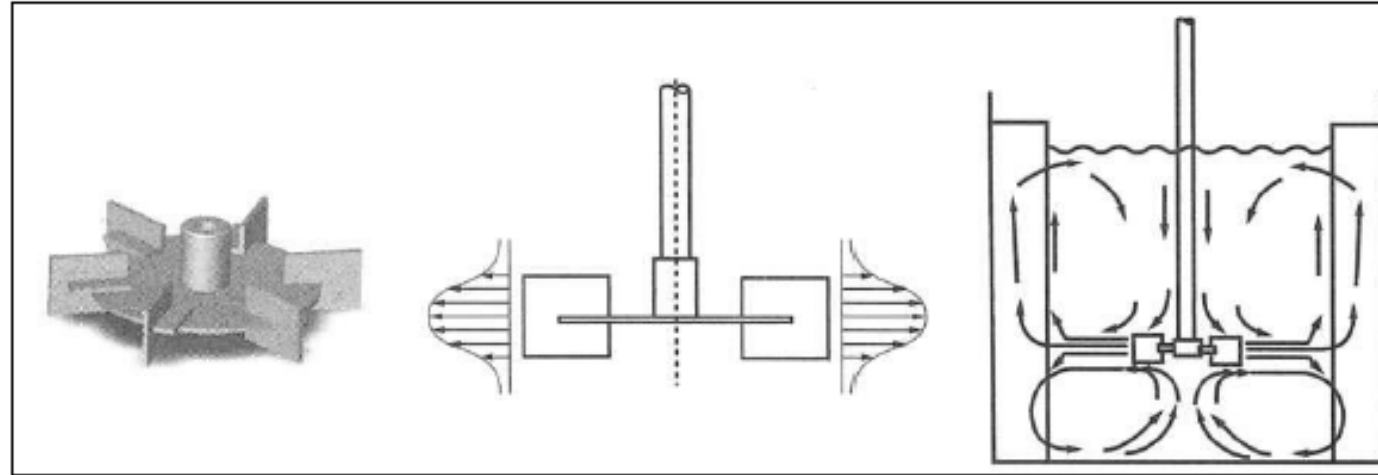
### Τύποι Μηχανικών Αναδευτήρων

| Impeller Type                                           | Photograph                                                                            | Power Number | Pumping Number | Application                                            |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|--------------------------------------------------------|
| Flat-bladed turbine (FBT)                               |    | 3.6          | 0.9            | Blending, maintaining suspensions, flocculation        |
| Pitched-blade turbine (45° PBT)                         |    | 1.26         | 0.75           | Blending, maintaining suspensions, flocculation        |
| Pitched-blade turbine with camber (hydrofoil, 3 blades) |    | 0.2–0.3      | 0.45–0.55      | Blending, maintaining suspensions, flocculation        |
| Cast foil with proplets                                 |   | 0.23         | 0.59           | Blending viscous liquids                               |
| Rushton turbine (6 blades)                              |  | 4.5–5.5      | 0.72           | Gas–liquid dispersion, solids suspension, flocculation |
| Propeller (pitch of 1:1)                                |  | 0.32–0.36    | 0.4            | Blending viscous liquids                               |

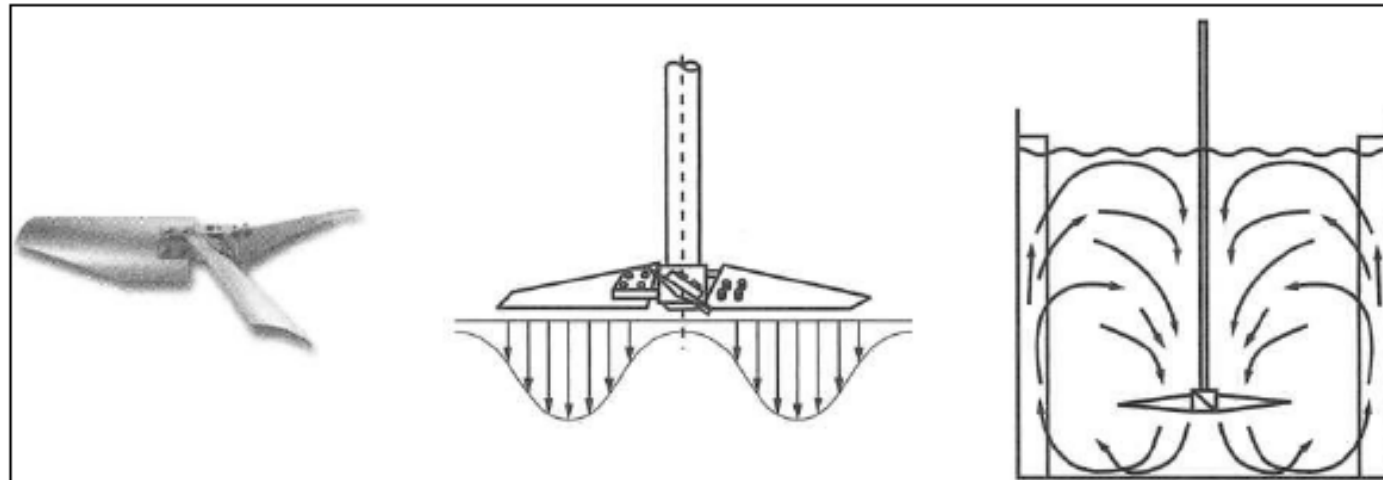
## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

### Αναδευτήρες

#### Ακτινικής (radial) ροής



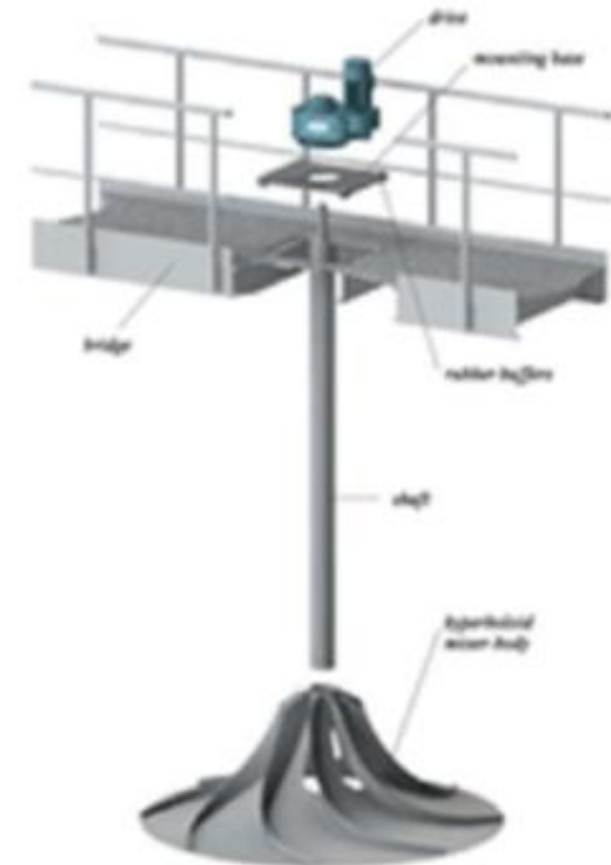
#### Αξονικής (axial) ροής



# ΒΡΑΔΕΙΑ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ)

## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Σύστημα συσσωμάτωσης με υπερβολοειδή αναμίκτη



## Υδραυλική ανάμιξη: Στατικοί αναμίκτες με χωρίσματα

Η υδραυλική ανάμιξη εκμεταλλεύεται τη δημιουργία τύρβης σε ορισμένα σημεία της ροής.

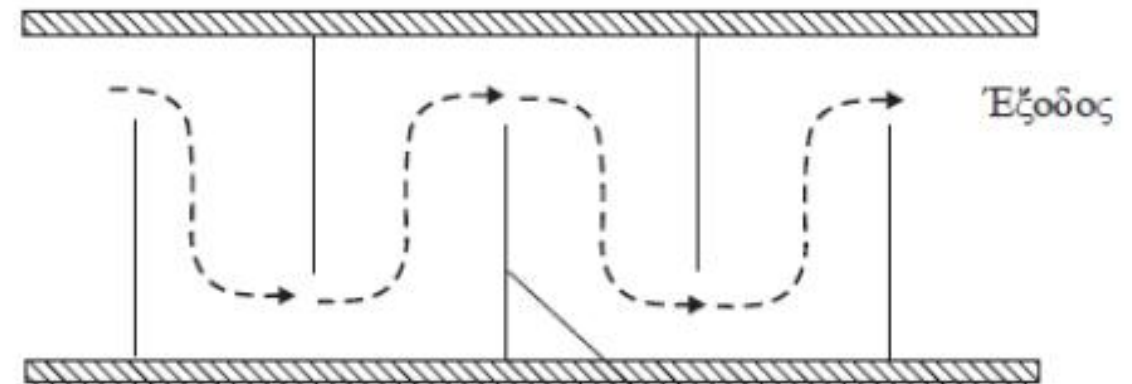
Οι βασικοί τύποι διατάξεων υδραυλικής ανάμιξης που χρησιμοποιούνται στη συσσωμάτωση, είναι οι στατικοί αναμίκτες με χωρίσματα, όπου το νερό υποβάλλεται σε διαδοχικές απότομες αλλαγές στην κατεύθυνση ροής του.

Κανάλι μαϊάνδρος



Ταχύτητα ροής  
0,1-0,7 m/s

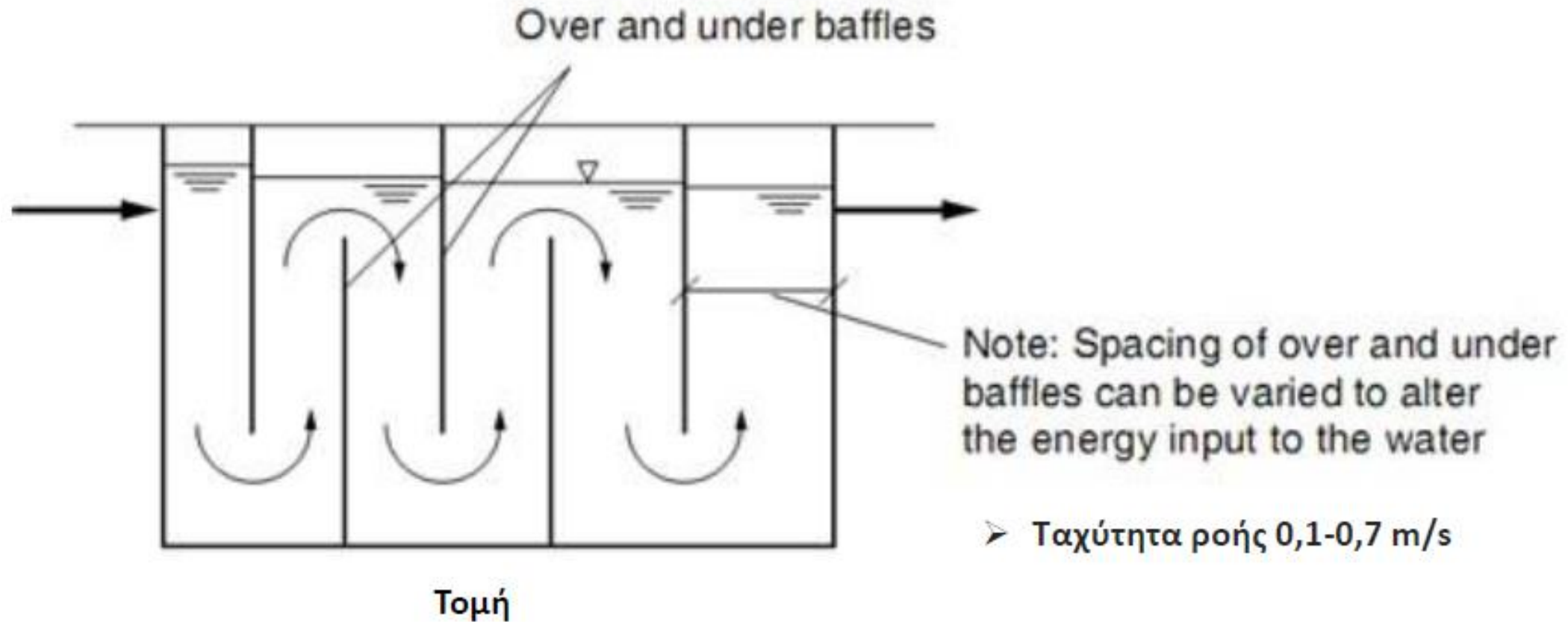
Είσοδος



Χωρίσματα

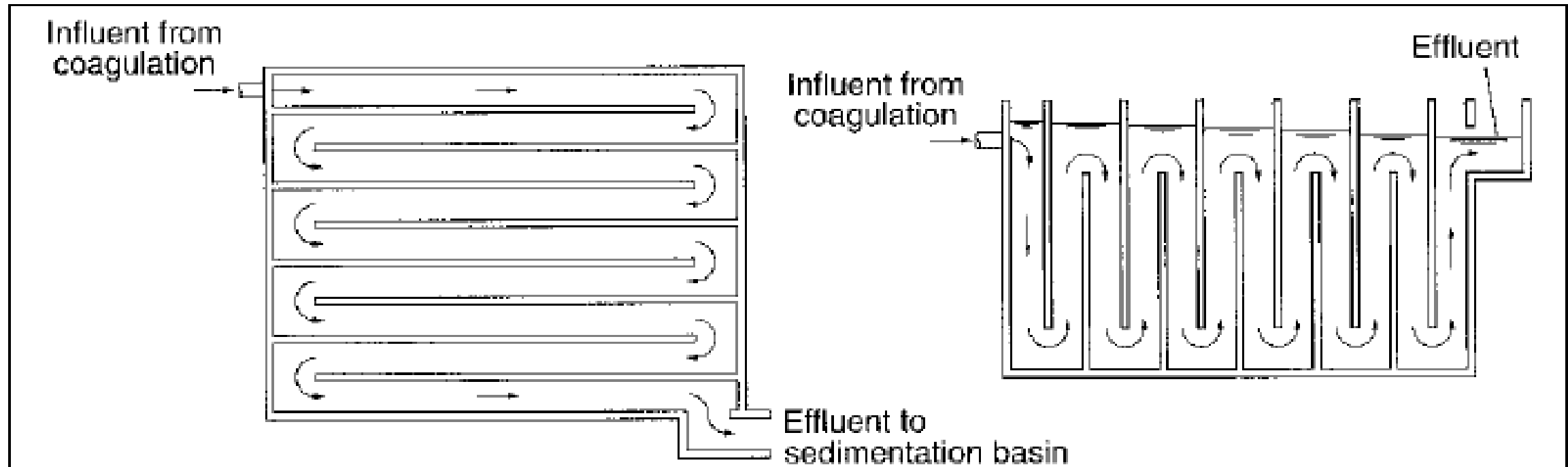
Κάτοψη

Υδραυλική ανάμιξη: Κανάλι μαίανδρος



➤ Ταχύτητα ροής 0,1-0,7 m/s

Υδραυλική ανάμιξη: Υδραυλικό σύστημα συσσωμάτωσης



## Μονάδα επεξεργασίας νερού (Γαλάτσι)



## Υπολογισμός Βαθμίδας Ταχύτητας G για διατάξεις υδραυλικής ανάμιξης

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διασκορπιζόμενης ισχύος στην υδραυλική ανάδευση είναι:

$$P = \rho g Q h_L \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{m} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} = \left( \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right) \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{watt} \right)$$

- P η διασκορπιζόμενη ισχύς (watt),
- ρ η πυκνότητα του νερού (kg/m<sup>3</sup>),
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m<sup>2</sup>/sec),
- Q η παροχή του νερού (m<sup>3</sup>/s) και
- h<sub>L</sub> οι υδραυλικές απώλειες (m).

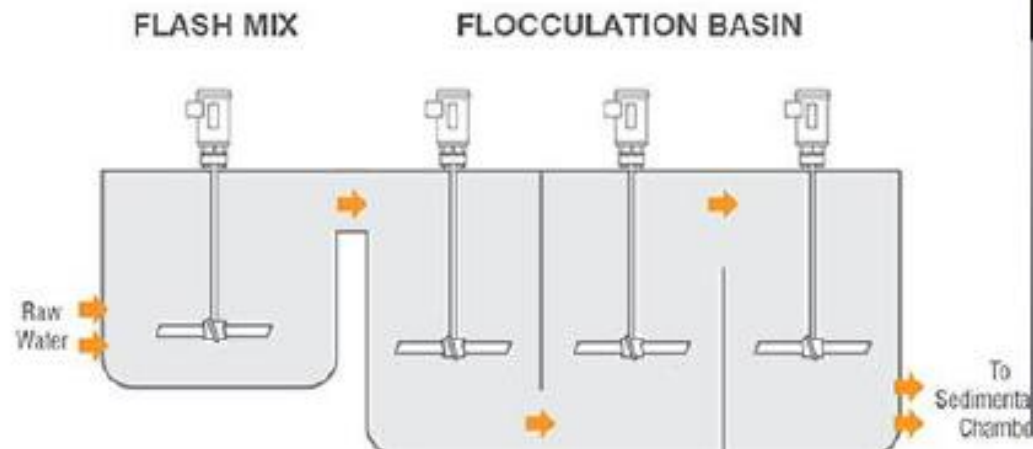
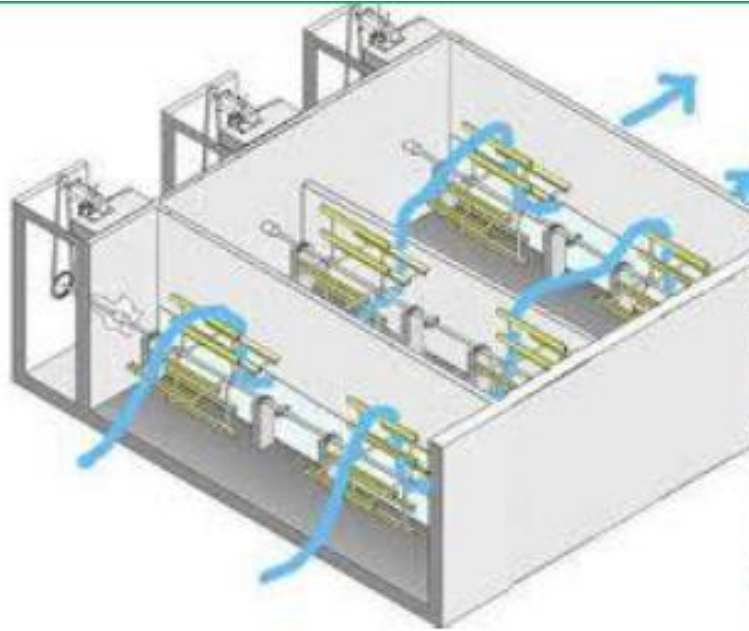
## Κροκίδωση

- χρησιμοποιείται δεξαμενή ταχείας ανάμιξης rapid mixing
- Οι δεξαμενές κροκίδωσης είναι δεξαμενές μικρού μεγέθους με υδραυλικό χρόνο παραμονής 1-2 min , στην οποία προστίθενται τα κροκιδωτικά.
- Σχεδιάζεται με  $G = 700$  έως  $1000 \text{ s}^{-1}$
- Η βέλτιστη δόση του κροκιδωτικού εκτιμάται με το Jar Test

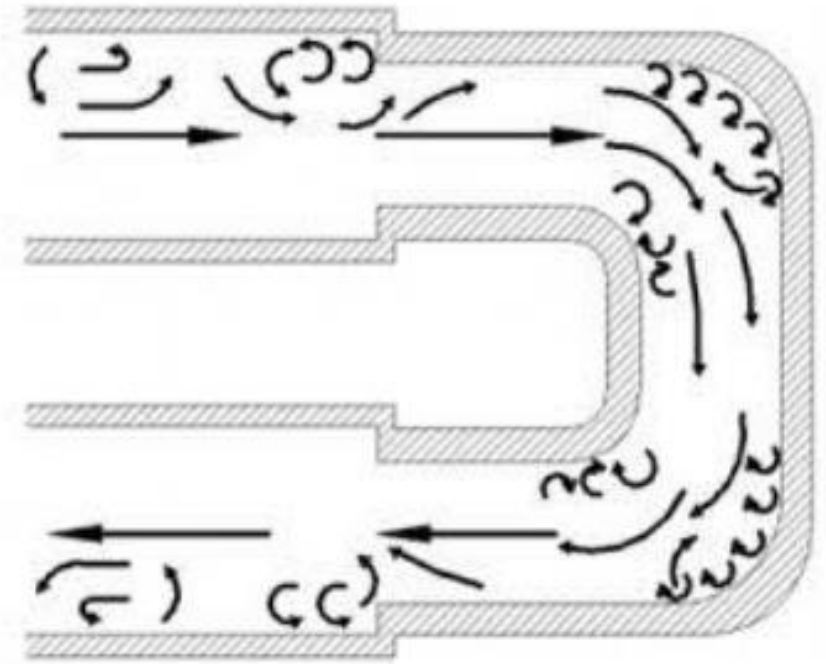
Η συσσωμάτωση λαμβάνει χώρα σε:

- Ανεξάρτητη δεξαμενή, που σχεδιάζεται ειδικά για τον σκοπό αυτό (η πλέον διαδεδομένη μέθοδος)
- Εμβόλιμες διατάξεις σε αγωγούς ή σωλήνες κατάλληλου μήκους ή διατομής (Tube Flocculation).
- Σε ειδικές ενιαίες δεξαμενές, οι οποίες περιλαμβάνουν συνδυαστικά επιμέρους τμήματα για κροκίδωση, συσσωμάτωση και καθίζηση.

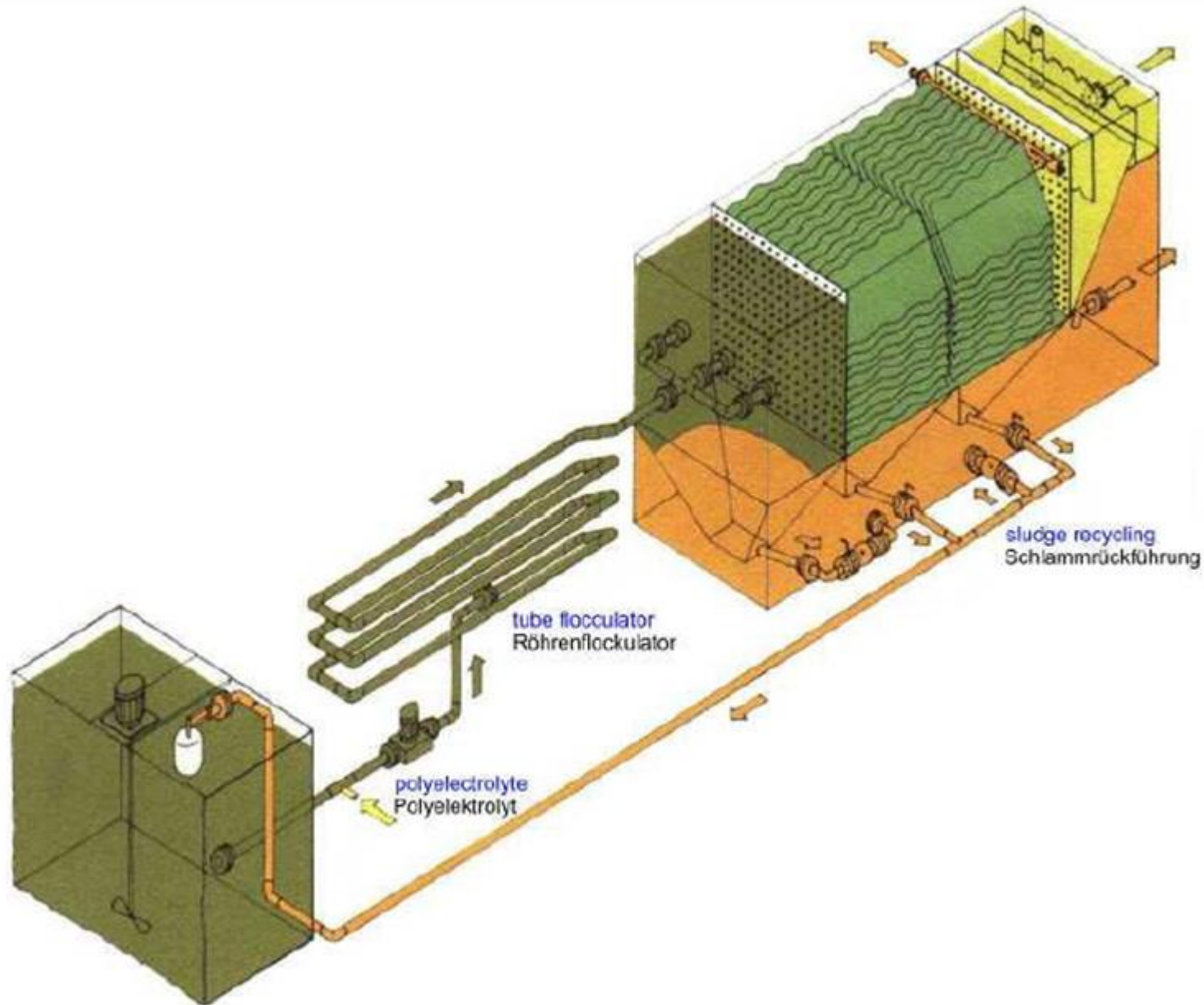
# ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ

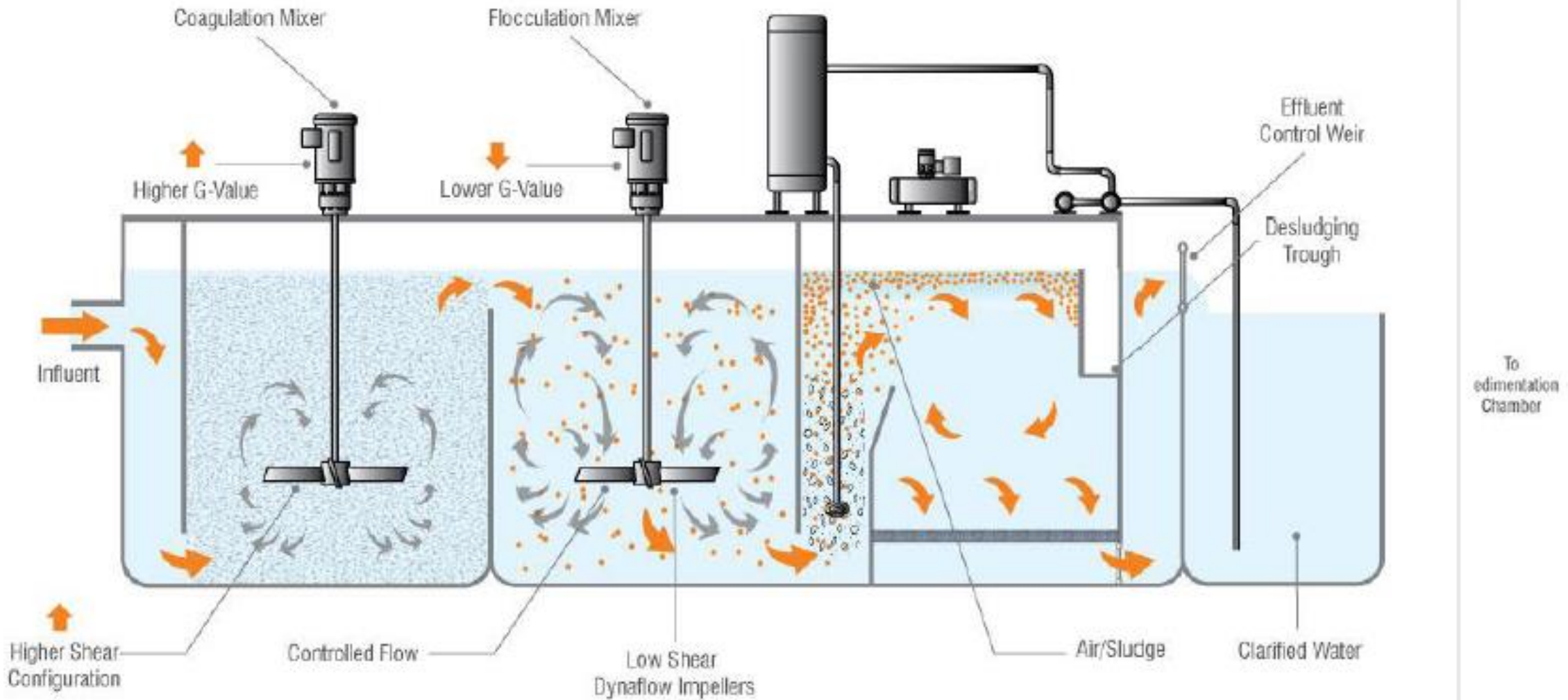


# Tube flocculator



# Tube flocculator





Stage 1.

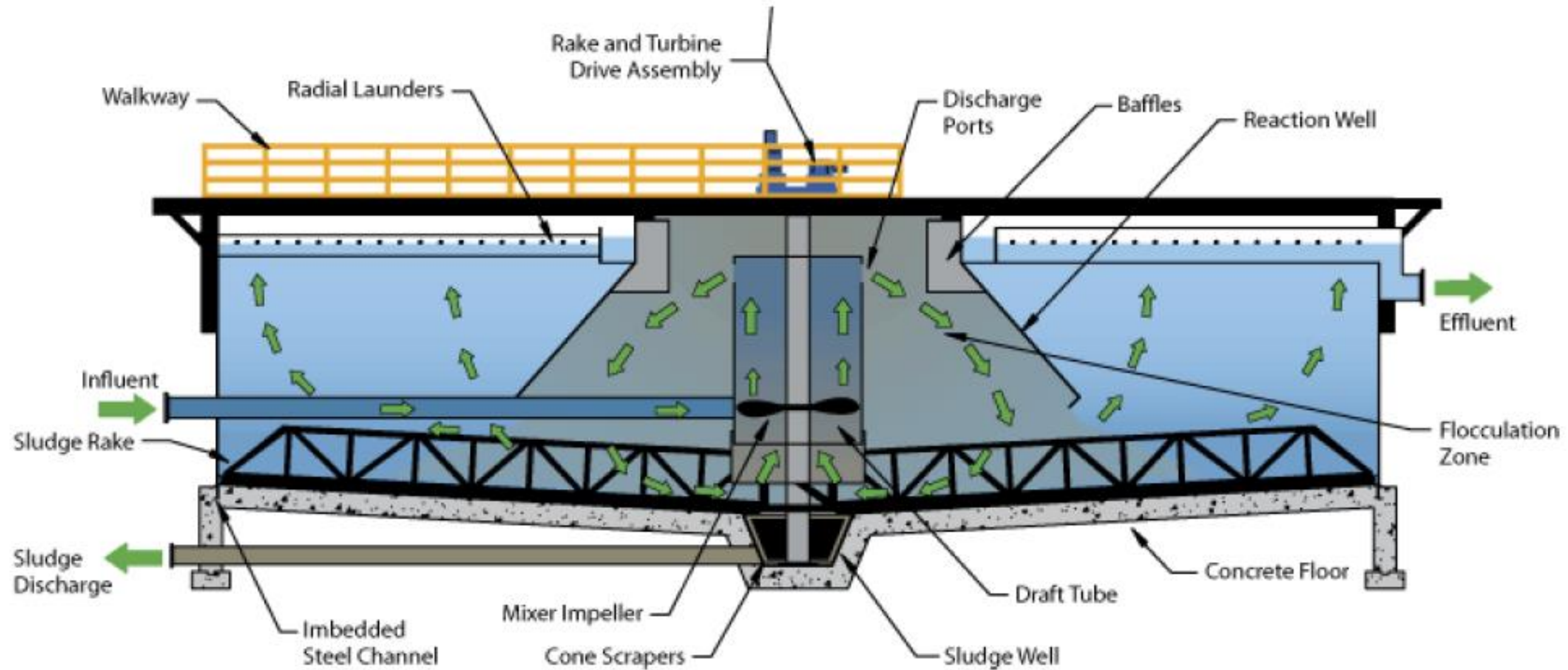
ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ  
(Προσθήκη  
Κροκιδωτικών)

Stage 2.

ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ

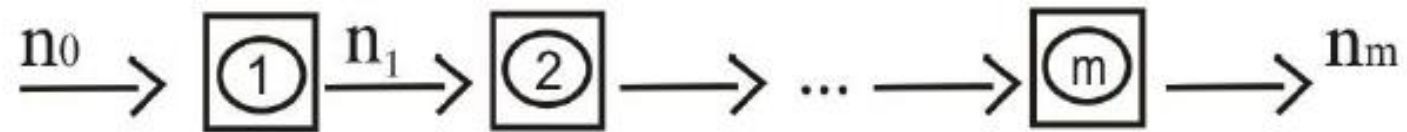
Stage 3.

ΕΠΙΠΛΕΥΣΗ ΜΕ ΑΕΡΑ



| Μεταβλητή<br>σχεδιασμού        | Εύρος τιμών                      | Νερό<br>ποταμού       | Νερό<br>ταμιευτήρα    | Αστικά<br>λύματα       |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>G</b>                       | 10-100 s <sup>-1</sup>           | 10-50 s <sup>-1</sup> | 10-75 s <sup>-1</sup> | 10-100 s <sup>-1</sup> |
| <b>G·t</b>                     | 10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> |                       |                       |                        |
| <b>t</b> (χρόνος<br>παραμονής) | 10-60 min                        | ≈ 20 min              | ≈ 30 min              | 30-60 min              |

- Συνήθως οι δεξαμενές συσσωμάτωσης απαρτίζονται από έναν αριθμό δεξαμενών πλήρους ανάμιξης (CSTR) στη σειρά.
- Σε κάθε δεξαμενή υπάρχει ανάδευση, συνήθως με σταδιακά ελαττωμένο  $G$  π.χ. 3 δεξαμενές με  $G1 = 50 \text{ s}^{-1}$ ,  $G2 = 40 \text{ s}^{-1}$  και  $G3 = 30 \text{ s}^{-1}$
- Έστω ένα σύστημα  $m$  δεξαμενών ίσου όγκου στη σειρά:



- Η κινητική της συσσωμάτωσης είναι 1<sup>ης</sup> τάξης ως προς τον αριθμό των σωματιδίων (n).

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4\alpha G\Omega}{\pi}n \Leftrightarrow \ln \frac{n}{n_0} = -\frac{4\alpha G\Omega}{\pi}t$$

- Κατά συνέπεια, ο συνολικός χρόνος παραμονής των σωματιδίων δίνεται από τη σχέση:

$$t_m = \frac{\pi m}{4\alpha G\Omega} \left[ \left( \frac{n_0}{n_m} \right)^{1/m} - 1 \right]$$

- $t_m$ : ο συνολικός υδραυλικός χρόνος παραμονής
- $m$ : αριθμός των δεξαμενών σε σειρά
- $\Omega$ : ο όγκος του συσσωματώματος ανά μονάδα όγκου του αιωρήματος,  $\text{cm}^3/\text{L}$
- $\alpha$ : συντελεστής αποτελεσματικότητας των συγκρούσεων
- $G$ : βαθμίδα ταχύτητας,  $\text{s}^{-1}$
- $n_0$ : η συγκέντρωση εισόδου των σωματιδίων στην 1<sup>η</sup> δεξαμενή
- $n_m$ : η συγκέντρωση εξόδου από την  $m$  δεξαμενή

Σε ένα σύστημα ασυνεχούς λειτουργίας (batch) επιτυγχάνεται συσσωμάτωση με ανάδευση του αποσταθεροποιημένου αιωρήματος μετά την προσθήκη κροκιδωτικού υπό συνθήκες βαθμίδας ταχύτητας  $10 \text{ s}^{-1}$  για 60 min. Ο αριθμός των σωματιδίων σε αιώρηση μειώθηκε κατά 90% ( $n/n_0 = 0,10$ ).

1. Υπολογίστε το γινόμενο του συντελεστή αποτελεσματικότητας συγκρούσεων με τον όγκο των κολλοειδών ( $\alpha\Omega$ ) για το συγκεκριμένο
2. Για να επιτευχθεί ο ίδιος βαθμός συσσωμάτωσης χρησιμοποιώντας την ίδια βαθμίδα ταχύτητας, τι χρόνος παραμονής απαιτείται για μία δεξαμενή συνεχούς παροχής και πλήρους ανάμιξης (CSTR);
3. Ποιος είναι ο συνολικός χρόνος παραμονής εάν χρησιμοποιηθούν τρεις δεξαμενές CSTR σε σειρά;
4. Εάν χρησιμοποιηθεί μία δεξαμενή CSTR με χρόνο παραμονής 60 min και βαθμίδα ταχύτητας  $10 \text{ s}^{-1}$ , ποιος είναι ο αναμενόμενος βαθμός συσσωμάτωσης;
5. Εάν χρησιμοποιηθούν τρεις δεξαμενές πλήρους ανάμιξης σε σειρά με συνολικό χρόνο παραμονής 60 min και βαθμίδα ταχύτητας  $10 \text{ s}^{-1}$ , ποιος είναι ο αναμενόμενος βαθμός συσσωμάτωσης;

$$1) \quad \ln \frac{n}{n_0} = -\frac{4 \alpha G \Omega}{\pi} t \Leftrightarrow \alpha \Omega = \frac{\pi}{4 G t} \ln \frac{n_0}{n} \Leftrightarrow$$

$$\alpha \Omega = \frac{3,14}{4 \cdot (10 \text{ s}^{-1}) \cdot (60 \cdot 60 \text{ s})} \ln \frac{1}{0,1} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3 \text{ σωμ.}/\text{cm}^3 \text{ νερού}$$

2) Σε ένα συνεχές σύστημα πλήρους ανάδευσης με μια δεξαμενή  $\rightarrow m = 1$

$$t_m = \frac{\pi m}{4 \alpha G \Omega} \left[ \left( \frac{n_0}{n_m} \right)^{1/m} - 1 \right] \stackrel{m=1}{\Leftrightarrow} t_1 = \frac{\pi}{4 \alpha \Omega G} \left[ \frac{n_0}{n} - 1 \right] \Leftrightarrow$$

$$t_1 = \frac{3,14}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-5}) \cdot 10 \text{ s}^{-1}} \left[ \frac{1}{0,1} - 1 \right] = 1,413 \cdot 10^4 \text{ s} = 235,5 \text{ min}$$

3) Για  $m = 3$

$$t_3 = \frac{3,14 \cdot 3}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-5}) \cdot 10 \text{ s}^{-1}} \left[ \left( \frac{1}{0,1} \right)^{1/3} - 1 \right] = 5,4 \cdot 10^3 \text{ s} = 90 \text{ min}$$

4) Για  $m = 1$ ,  $t = 60 \text{ min}$  και  $G = 10^{-1}$ , ο βαθμός συσσωμάτωσης είναι:

$$(60 \cdot 60 \text{ s}) = \frac{3,14 \cdot 1}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-5}) \cdot 10 \text{ s}^{-1}} \left[ \frac{n_0}{n} - 1 \right] \Leftrightarrow$$

$$\frac{n_0}{n} = 3,29 \Leftrightarrow \frac{n}{n_0} = 0,30$$

Μείωση του αριθμού των  
σωματιδίων κατά 70%  
(κροκίδωσης batch 90%).

5) Για  $m = 3$ ,  $t_{\text{total}} = 60 \text{ min}$  και  $G = 10^{-1}$  σε κάθε δεξαμενή:

$$(60 \cdot 60 \text{ s}) = \frac{3,14 \cdot 3}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-5}) \cdot 10 \text{ s}^{-1}} \left[ \left( \frac{n_0}{n} \right)^{1/3} - 1 \right] \Leftrightarrow$$
$$\frac{n_0}{n} = 5,5 \Leftrightarrow \frac{n}{n_0} = 0,18$$

Δηλαδή θα μειωθεί ο αριθμός των σωματιδίων κατά 82% (συγκρίνεται με το 90% για batch σύστημα).

Νερό με φυσική αλκαλικότητα ίση με  $12 \text{ mg/L}$  ως  $\text{CaCO}_3$  θα κροκιδωθεί με θειικό αργίλιο. Η βέλτιστη δόση κροκιδωτικού είναι  $55 \text{ mg/L}$ . Να υπολογιστεί η δόση υδρασβέστου που απαιτείται για να αντιδράσει με το θειικό αργίλιο και του οξειδίου του ασβεστίου που θα προστεθεί.

(α) Να σχεδιάσετε τη δεξαμενή γρήγορης ανάμιξης όταν η ημερήσια παροχή είναι  $4320 \text{ m}^3$ . Υδραυλικός χρόνος παραμονής  $t_0 = 40 \text{ s}$ ,  $G = 1000 \text{ s}^{-1}$ ,  $T = 18^\circ\text{C}$  ( $\mu = 1,053 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$ ).

Εξετάζετε τη χρήση μηχανικού αναδευτήρα κατακόρυφου άξονα ισχύος  $3 \text{ kW}$ . Η διάμετρος του αναδευτήρα είναι  $0,5 \text{ m}$  και ο λόγος της διαμέτρου του αναδευτήρα προς τη διάμετρο της δεξαμενής γρήγορης ανάμιξης είναι  $0,5$ . Να ελέγξετε την επάρκεια του αναδευτήρα για χρήση στη δεξαμενή γρήγορης ανάμιξης.

(β) Στη συνέχεια, να σχεδιάσετε τη δεξαμενή συσσωμάτωσης, θεωρώντας βάθος υγρού  $2 \text{ m}$  και λόγο μήκους:πλάτος ίσο με  $3:1$ . Εφαρμόζεται διαχωρισμός σε τρία όμοια διαμερίσματα για να πετύχουμε βαθμιαία συσσωμάτωση ( $G_1 = 40 \text{ s}^{-1}$ ,  $G_2 = 30 \text{ s}^{-1}$ ,  $G_3 = 20 \text{ s}^{-1}$ ) με εφαρμοζόμενη ισχύ συστήματος ανάδευσης  $0,3 \text{ kW}$ . Εάν ο χρόνος παραμονής είναι ίσος με  $60 \text{ min}$  να ελέγξετε εάν το σύστημα ανάδευσης έχει επάρκεια ισχύος για τη χρήση του στη δεξαμενή συσσωμάτωσης.

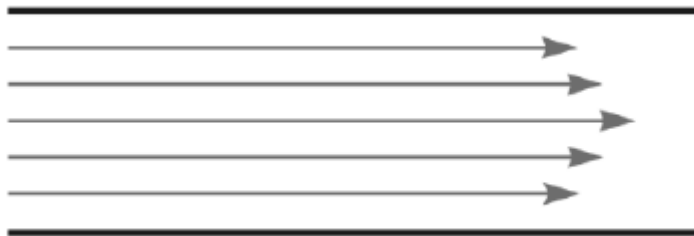
(γ) Στην ίδια δεξαμενή συσσωμάτωσης θεωρείστε ότι το πρώτο διαμέρισμα έχει διπλάσιο μήκος από τα υπόλοιπα δύο διαμερίσματα. Η ροή του νερού είναι κάθετη στο πλάτος της δεξαμενής. Θεωρούμε  $G_1 = 50 \text{ s}^{-1}$ ,  $G_2 = 30 \text{ s}^{-1}$ ,  $G_3 = 20 \text{ s}^{-1}$ . Να ελέγξετε εάν η παρεχόμενη ισχύς  $0,3 \text{ kW}$  επαρκεί για τη δεξαμενή συσσωμάτωσης και να υπολογιστεί η ισχύς που απαιτείται για κάθε διαμέρισμα ξεχωριστά.

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΝΑΔΕΥΤΗΡΑ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ

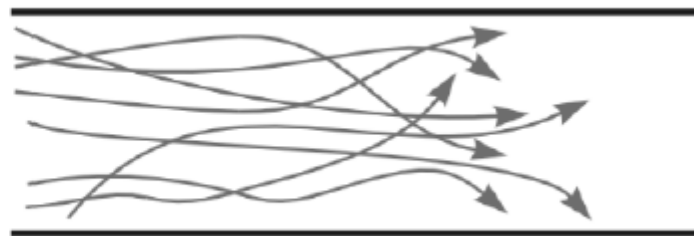
Αριθμός Reynolds

$$Re = \frac{D^2 N \rho}{\mu}$$

- $Re$  = αριθμός Reynolds (αδιάστατο)
- $D$  = διάμετρος αναδευτήρα, m
- $N$  = ταχύτητα περιστροφής αναδευτήρα,  $s^{-1}$
- $\rho$  = πυκνότητα νερού,  $kg/m^3$
- $\mu$  = δυναμικό ιξώδες νερού,  $N.s/m^2$



στρωτή ροή



τυρβώδης ροή



# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΝΑΔΕΥΤΗΡΑ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ

Αριθμός Ισχύος,  $N_p$

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

Αριθμός Άντλησης,  $N_Q$

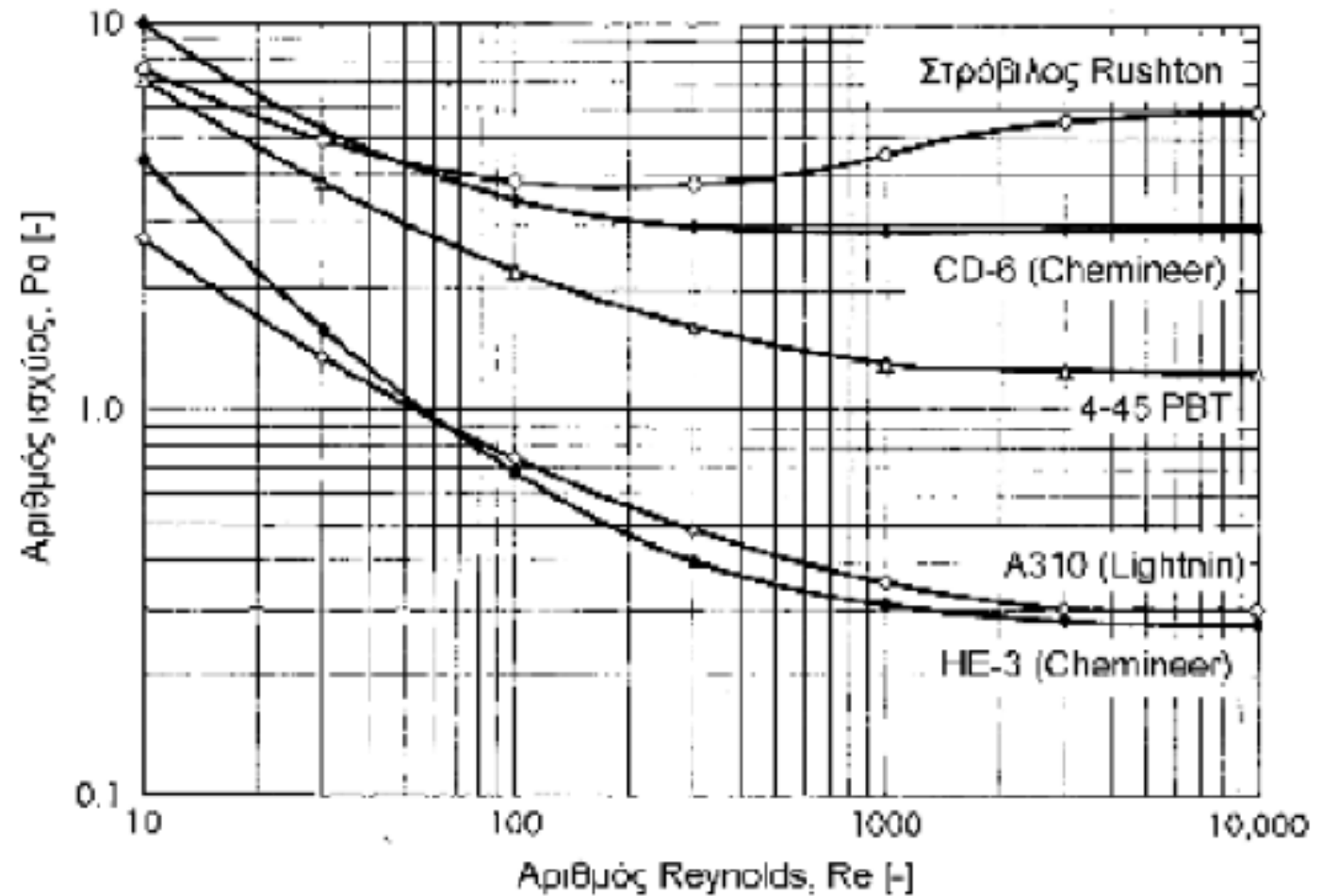
$$N_Q = \frac{Q_a}{ND^3}$$

- $P$ = απαίτηση ισχύος, W
- $N_p$ =αριθμός ισχύος (αδιάστατο)
- $D$ =διάμετρος αναδευτήρα, m
- $N$ = ταχύτητα περιστροφής αναδευτήρα,  $s^{-1}$
- $N_Q$ =Αριθμός άντλησης (αδιάστατο)
- $Q_a$ =παροχή που αναδύεται από τον αναδευτήρα,  $m^3/s$
- $\rho$ = πυκνότητα νερού,  $kg/m^3$

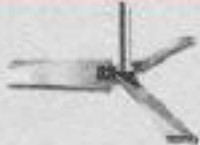
# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΝΑΔΕΥΤΗΡΑ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ

Αριθμός Ισχύος,  $N_p$

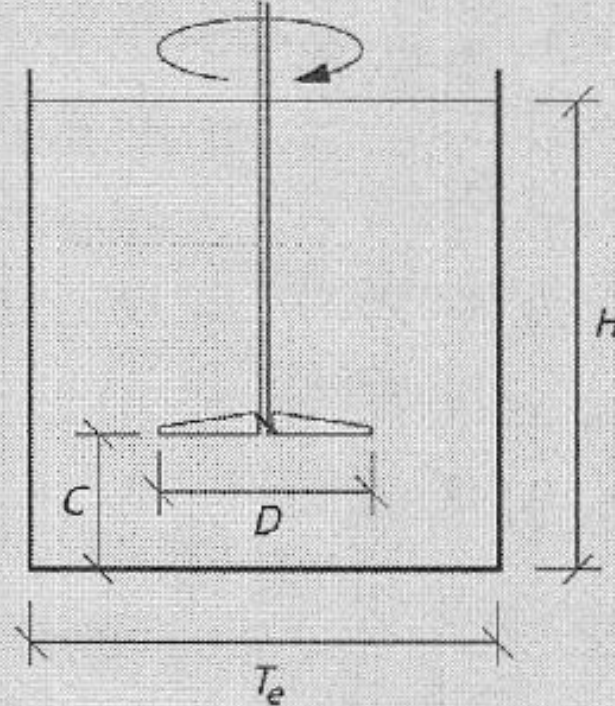
$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$



# ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ: ΣΧΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

| Impeller Type                                           | Photograph                                                                          | Power Number | Pumping Number | Application                                            |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|--------------------------------------------------------|
| Flat-bladed turbine (FBT)                               |    | 3.6          | 0.9            | Blending, maintaining suspensions, flocculation        |
| Pitched-blade turbine (45° PBT)                         |    | 1.26         | 0.75           | Blending, maintaining suspensions, flocculation        |
| Pitched-blade turbine with camber (hydrofoil, 3 blades) |    | 0.2–0.3      | 0.45–0.55      | Blending, maintaining suspensions, flocculation        |
| Cast foil with proplets                                 |   | 0.23         | 0.59           | Blending viscous liquids                               |
| Rushton turbine (6 blades)                              |  | 4.5–5.5      | 0.72           | Gas–liquid dispersion, solids suspension, flocculation |
| Propeller (pitch of 1:1)                                |  | 0.32–0.36    | 0.4            | Blending viscous liquids                               |

## Key design criteria for vertical-turbine flocculator

| Parameter | Range                                                             | Definition Sketch                                                                    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Impeller  | Hydrofoil or 45° pitched-blade turbine (PBT), hydrofoil preferred |  |
| $D/T_e^a$ | 0.3–0.6,<br>0.4–0.5 preferred                                     |                                                                                      |
| $H/T_e$   | 0.9–1.1                                                           |                                                                                      |
| $C/H$     | 0.5–0.33                                                          |                                                                                      |
| $N$       | 10–30 rev/min                                                     |                                                                                      |
| Tip speed | 2–3 m/s                                                           |                                                                                      |

<sup>a</sup>  $T_e = \sqrt{4A_{\text{plan}}/\pi}$ .

## Ανακλαστήρες (Baffles) για αποφυγή vortex

