

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Διάλεξη 3: Πρωτοβάθμια Επεξεργασία

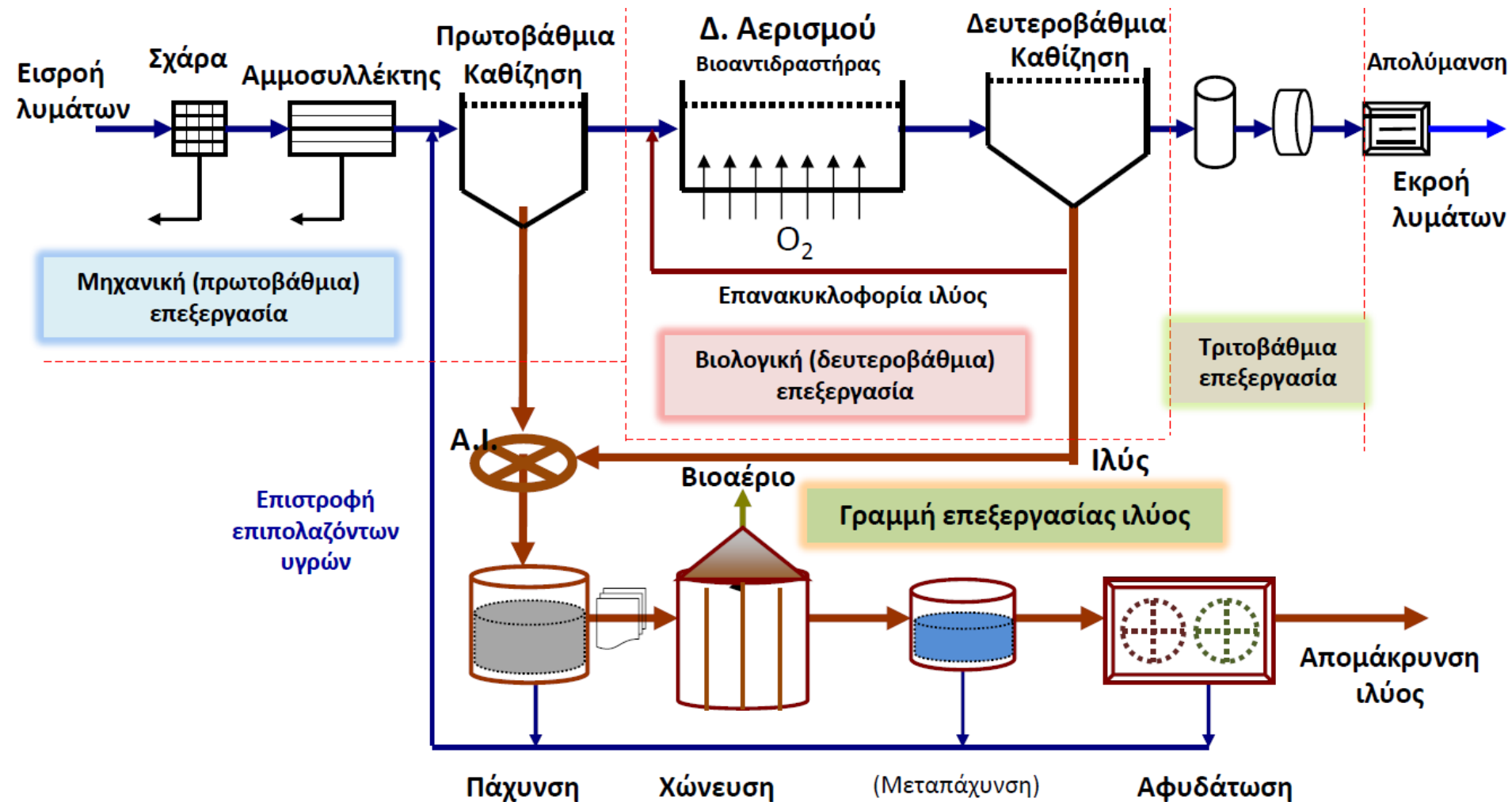
Κροκίδωση – Συσσωμάτωση

Πρωτοβάθμια Καθίζηση

Ανέστης Βλυσίδης

Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

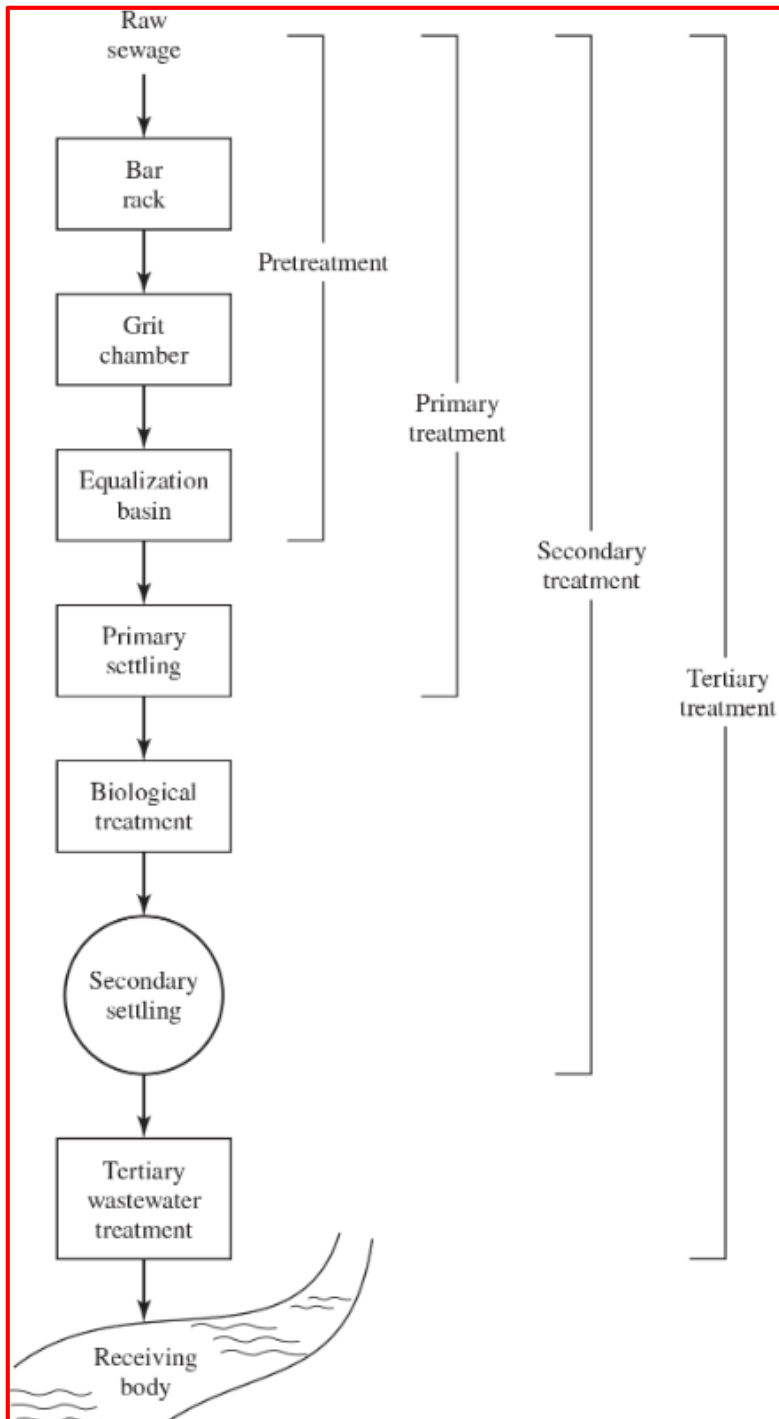
Επεξεργασία Αστικών Λυμάτων



Χημική Κατακρήμνιση

- Αρχικά προτίμηση σε **βιολογικές** και **φυσικές** διεργασίες
 - Ήπιες συνθήκες
 - **Οικονομικές** διεργασίες (μη προσθήκη χημικών ουσιών)
 - Υπάρχουν **περιορισμοί** στο βαθμό απόδοσης
- Προσθήκη επιπλέον χημικών και φυσικών διεργασιών
 - **Βελτίωση απόδοσης** απομάκρυνσης στερεών (καθίζησης)
 - **Απομάκρυνση ρύπων** που διαφεύγουν της κύριας επεξεργασίας (μη βιοδιασπώμενοι ή/και τοξικοί)
 - **Θρεπτικά συστατικά** που διαφεύγουν της κύριας επεξεργασίας
- **Χημική Κατακρήμνιση**
 - Καθαρή απορροή, **απαλλαγμένη** από αιωρούμενα στερεά ή κολλοειδή σωματίδια
 - 80-90% της αιωρούμενης ύλης (TSS)
 - 40-70% του BOD₅

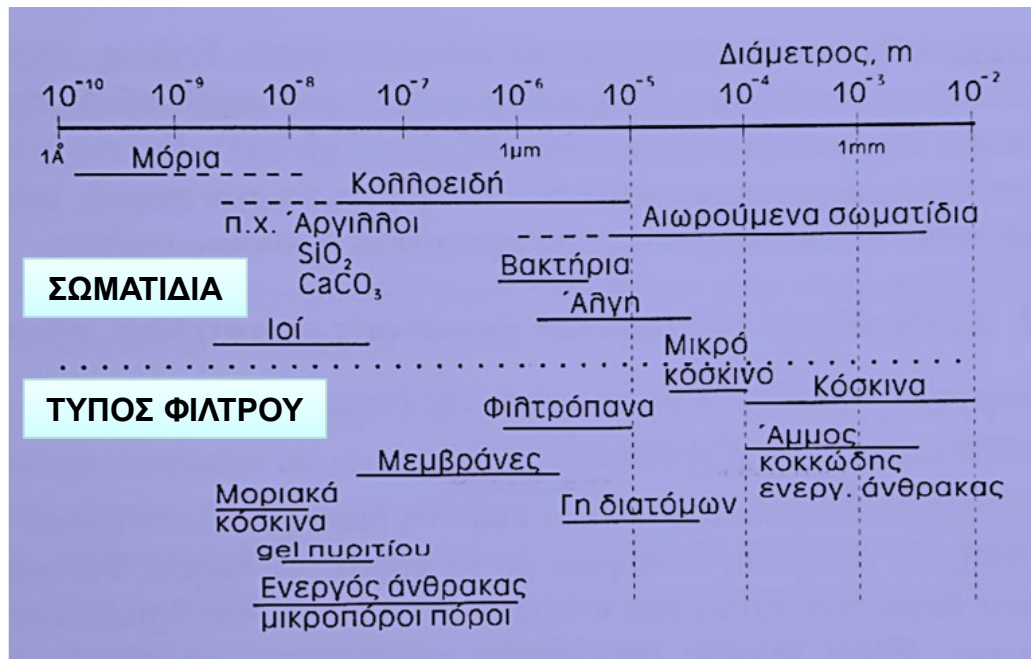
Βαθμοί Επεξεργασίας



Κροκίδωση-Συσσωμάτωση

Απομάκρυνση σωματιδίων

Μέγεθος σωματιδίων που συναντάμε στα υγρά απόβλητα
και το είδος φίλτρου που μπορεί να τα συγκρατήσει.



Φύση και κατάσταση διασποράς των σωματιδίων στα ΥΑ:

- Αιωρούμενα σωματίδια: $> 5\text{ }\mu\text{m}$
- Κολλοειδή σωματίδια: $5\text{ nm} - 1\text{ }\mu\text{m}$
- Τα σωματίδια τα οποία είναι μικρότερα από 5 nm θεωρούνται διαλυμένα

Σε αντίθεση με τα διαλύματα, τα κολλοειδή εμφανίζουν σκέδαση στο φως.

Κροκίδωση-συσσωμάτωση (1)

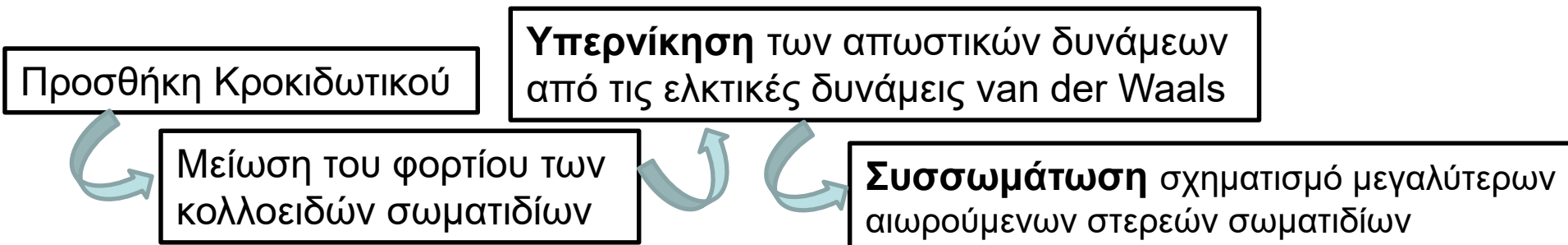
- Τα **κολλοειδή** είναι υλικά (στερεά, υγρά και αέρια) που έχουν **διαχυθεί** σ' ένα μέσο στην μορφή λεπτών σωματιδίων (5 nm – 1 μm).
- Τα μικροσκοπικά αυτά σωματίδια παραμένουν **μη αναμίξιμα** και **μη παρασυρόμενα** από τη βαρύτητα. Οπότε δεν καθιζάνουν, παραμένοντας έτσι **αιωρούμενα**.
- Τα κολλοειδή είναι **υδρόφιλα** ή **υδρόφοβα** και στα υδατικά απόβλητα είναι συνήθως **αρνητικά φορτισμένα** εξαιτίας:
 - επιλεκτικής προσρόφησης ανιόντων (κυρίως υδροξειδίων)
 - ιονισμού καρβοξυλομάδων και αμινομάδων πρωτεϊνών, και
 - ισόμορφης αντικατάστασης ιόντων.

Το ομώνυμο αυτό φορτίο τους τα βοηθά να παραμένουν σε διασπορά.

Κροκίδωση-συσσωμάτωση (2)

- Η αντίσταση των κολλοειδών στη συσσωμάτωση ορίζει τη σταθερότητά τους.
- Τα κολλοειδή στα **υγρά απόβλητα** είναι συνήθως **αρνητικά φορτισμένα** με αποτέλεσμα να **απωθούνται** μεταξύ τους.

Κροκίδωση (coagulation): Η χημική αποσταθεροποίηση των κολλοειδών διασπορών εξαιτίας της προσθήκης κατάλληλων ηλεκτρολυτών (**κροκιδωτικά μέσα**).



Συσσωμάτωση (flocculation): Η διασύνδεση των κολλοειδών σωματιδίων που υπάρχουν σε διασπορά μέσα στο υγρό με σχηματισμό “**συσσωματωμάτων**” τα οποία **καθιζάνουν ευκολότερα**.

Κροκίδωση-συσσωμάτωση (3)

Κροκιδωτικά: Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για την **αποσταθεροποίηση** των σωματιδίων:

Στα στερεά σωματίδια αναπτύσσονται σταθεροποιητικές δυνάμεις (**απωθητικές δυνάμεις**) με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η συσσωμάτωσή τους

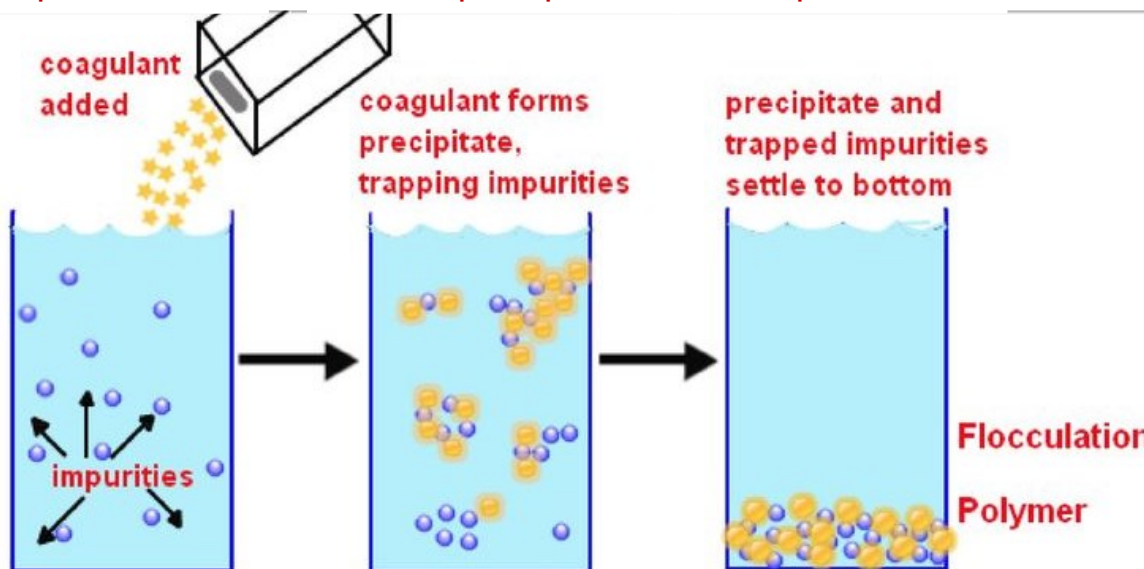
Με την κροκίδωση, μέσω χημικών διεργασιών, πετυχαίνουμε την **αποσταθεροποίηση των δυνάμεων αυτών** με αποτέλεσμα να **επιτυγχάνεται ευκολότερα η συσσωμάτωση**, δηλαδή ο **σχηματισμός μεγαλύτερων αιωρούμενων στερεών σωματιδίων**.

Θρόμβωση Σωματιδίων

Προσθήκη
Κροκιδωτικών

Δημιουργία
συσσωμαμάτων

Καθίζηση
σωματιδίων



Κροκιδωτικά: Άλατα του τρισθενούς σιδήρου ή του τρισθενούς αργιλίου (Θειικό αργίλιο, θειικός σίδηρος, χλωριούχος σίδηρος) ή διάφορα πολυμερή που ονομάζουμε κροκιδωτικά (coagulants).

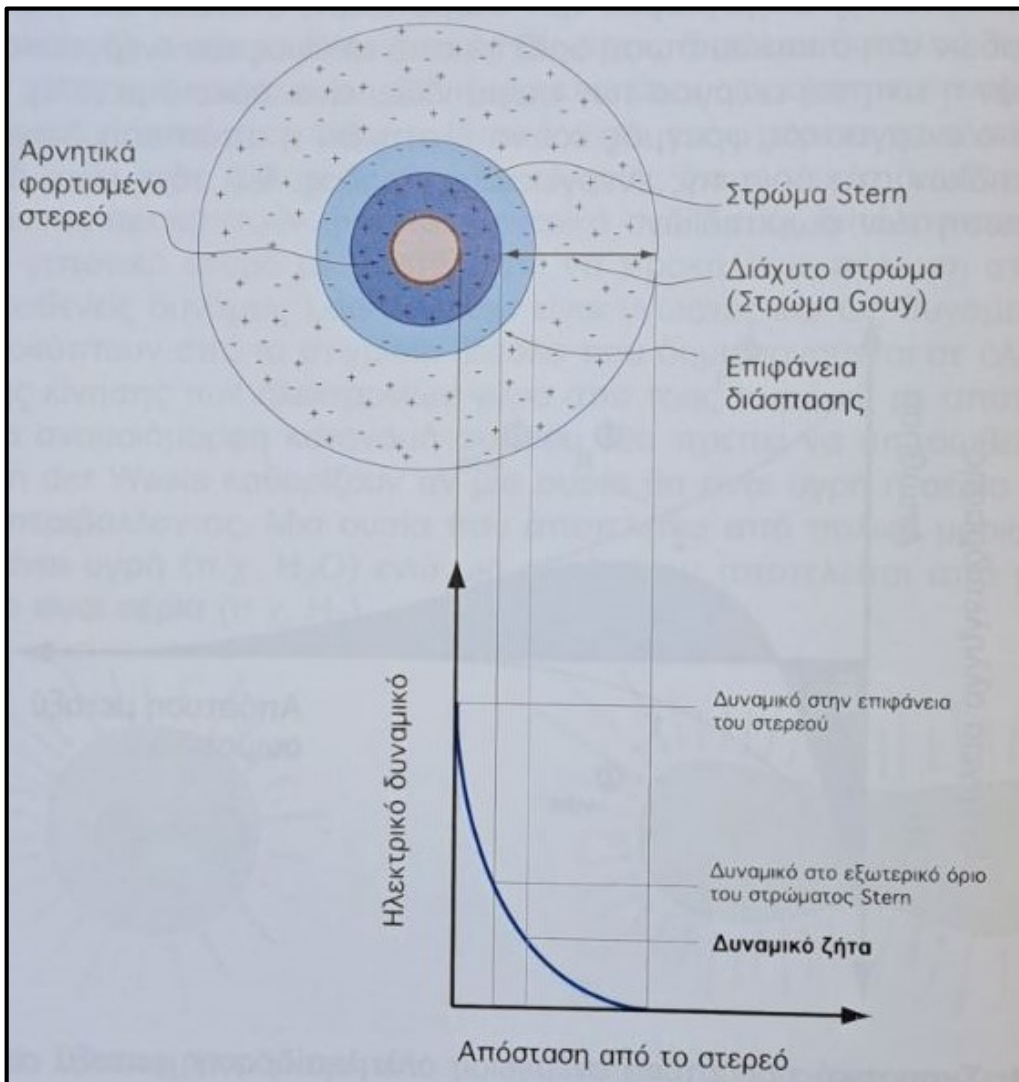
Εφαρμογή Κροκίδωσης - Συσσωμάτωσης

- Στα **Αστικά Λύματα** μπορεί να εφαρμοστεί:
 - **πριν** από την Πρωτοβάθμια Καθίζηση
 - **μετά** τη δευτεροβάθμια (βιολογική) επεξεργασία, ως **τελικό** στάδιο επεξεργασίας
- Στα βιομηχανικά απόβλητα εφαρμόζεται συνήθως **πριν** την Πρωτοβάθμια Καθίζηση
- Στα βιομηχανικά ενδέχεται να απαιτείται και εξουδετέρωση (ρύθμιση pH)
 - Ταυτόχρονα

Μηχανισμός Αποσταθεροποίησης

- Η αποσταθεροποίηση των κολλοειδών γίνεται με την προσθήκη στο απόβλητο αδιάστατων ουσιών ή ιόντων **φορτισμένων αντίθετα** από τα σωματίδια του κολλοειδούς.
- Ο μηχανισμός είναι **συνδυασμός** των εξής επιμέρους σταδίων:
 - Συμπίεσης της **ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας**,
 - Ρόφησης και εξουδετέρωσης φορτίου (ηλεκτροστατική έλξη),
 - Παγίδευσης σε ίζημα (σχηματισμός γεφυρών),
 - Διασωματιδιακής ζεύξης (παγίδευση σωματιδίων).

Ηλεκτροστατικά στρώματα & Ηλεκτροστατικές δυνάμεις γύρω από ένα σωματίδιο



Ηλεκτρική διπλοστοιβάδα:

Ένα διαχεόμενο σύννεφο ιόντων, το οποίο περιβάλλει τα σωματίδια σε ένα διάλυμα και επεκτείνεται έως και 300 nm προς το διάλυμα.

Πηγή: Εισαγωγή στις Διεργασίες Καθαρισμού νερού και λυμάτων, Χρυσικόπουλος Κ.Β.

Αποσταθεροποίηση σωματιδίων (Κροκίδωση)

Η σταθερότητα (φορτίο) των σωματιδίων αποτρέπει την συνένωση μεταξύ τους με αποτέλεσμα να μη μπορούν να δημιουργήσουν συσσωματώματα και έτσι να μην καθιζάνουν (ή να μην επιπλέουν)

Η κατακρήμνιση των σωματιδίων είναι μια φυσική εξέλιξη, όπου **ο χρόνος καθίζησης εξαρτάται από το μέγεθος τους.**

Τα σωματίδια ακολουθούν τη **κίνηση Brown** (τυχαίες συγκρούσεις των μορίων του μέσου διασποράς (δλδ νερού) με το αιωρούμενο κολλοειδές σωματίδιο)

Χαρακτηριστικά καθίζησης αιωρούμενων σωματιδίων

Υλικό	Μέγεθος, μm	Χρόνος καθίζησης, 1 m
Χαλαζίας	10.000	1 δευτερόλεπτα
	1.000	10 δευτερόλεπτα
	100	125 δευτερόλεπτα
Ιλύς	10	108 λεπτά
Βακτήρια	1	180 ώρες
Κολλοειδή	0,1	755 ημέρες

*Μήτρακας Μ.,
“Ποιοτικά
χαρακτηριστικά και
επεξεργασία
νερού”, 2001,
Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ*

Αποσταθεροποίηση σωματιδίων (Κροκίδωση)

Για να μειωθεί ο χρόνος καθίζησης

Πρέπει
να

δημιουργηθούν σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους

Πρέπει
να

δημιουργηθούν συσσωματώματα

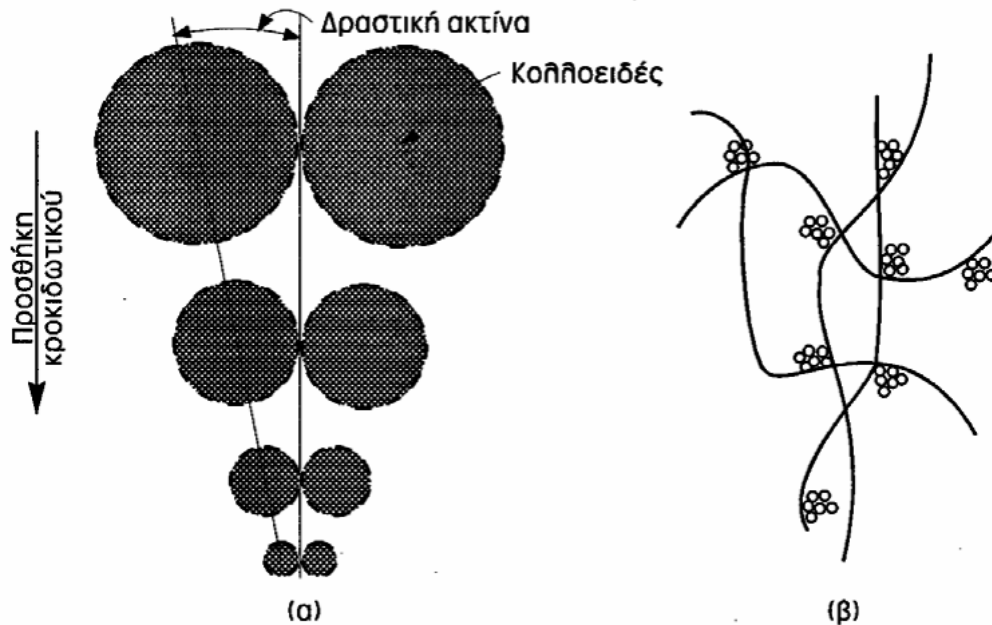
Πρέπει
να

αποσταθεροποιηθούν τα σωματίδια

=

ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ

Θρόμβωση Σωματιδίων



Σχηματική παράσταση (α) Κροκίδωσης και (β) Συσσωμάτωσης (Kemmer, 1988)

- ✓ Η προσθήκη του κροκιδωτικού εξουδετερώνει τα φορτία που καλύπτουν τα κολλοειδή και συνεισφέρει στη συσσώρευσή τους.
- ✓ Ο σχηματισμός γεφυρών ανάμεσα στα συσσωρευμένα κολλοειδή σωματίδια και του αντιδραστηρίου συσσωμάτωσης δημιουργεί μεγάλους θρόμβους που καθιζάνουν.

Συνήθη Κροκιδωτικά

- Άλατα (θειϊκό αργίλιο –alum-, τριχλωριούχος σίδηρος, θειϊκός δισθενής και τρισθενής σίδηρος),
- Οξείδια και υδροξείδια (CaO , Ca(OH)_2)
- Οργανικά (πολυηλεκτρολύτες)

Τι παραμέτρους θα εξετάζατε σε ένα πείραμα κροκίδωσης – συσσωμάτωσης;

Η επιλογή:

- του τύπου του κροκιδωτικού,
 - της βέλτιστης ποσότητας (δόσης) καθώς και
 - του άριστου pH κατά την κροκίδωση, χρόνος παραμονής, ταχύτητα ανάμ.
- Προσδιορίζονται συνήθως πειραματικά σε εργαστηριακή κλίμακα (Jar tests) λόγω της πολυπλοκότητας της σύστασης των αποβλήτων.

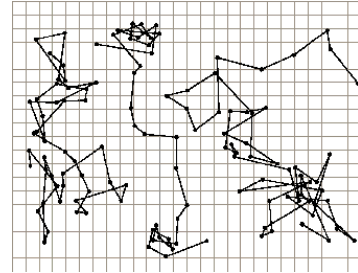


Περικινητική Συσσωμάτωση (διάχυση Brown)

Η συσσωμάτωση σωματιδίων εξ αιτίας της **θερμικής κίνησης Brown** ονομάζεται **περικινητική συσσωμάτωση**.

Κίνηση Brown: Τυχαία κίνηση σωματιδίων εξαιτίας του συνεχούς βομβαρδισμού τους από τα μόρια νερού.

- Επηρεάζει μόνο τα **κολλοειδή**
- Ελάχιστη επίδραση σε σωματίδια $>1\mu\text{m}$



Ο ρυθμός εξαφάνισης των κολλοειδών σωματιδίων σε συνάρτηση του χρόνου λόγω της **περικινητικής συσσωμάτωσης** δίνεται από τη σχέση (Montgomery, 1985):

$$\frac{dN_T}{dt} = -\frac{4}{3} \alpha \frac{\kappa T}{\mu} N_T^2$$

N_T : η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων (σωματίδια / m^3)

κ : σταθερά Boltzmann ($13,8 \cdot 10^{-24} \text{ N m/K}$)

T : θερμοκρασία του υγρού (K)

μ : δυναμικό ιξώδες του υγρού (Pa s ή N s/m^2 ή kg/m s)

α : ο συντελεστής αποτελεσματικότητας των συγκρούσεων

Ορθοκινητική Συσσωμάτωση

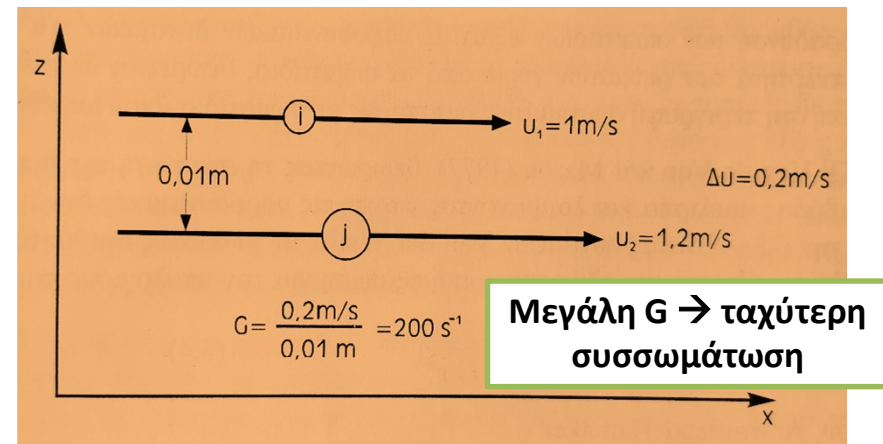
Η μηχανική ανάμιξη είναι αναγκαία για:

- Την **επιτάχυνση** του σχηματισμού θρόμβων από τα κολλοειδή
- Ικανοποιητική συσσωμάτωση των **μεγάλων σωματιδίων** ($> 1\mu\text{m}$)

Δημιουργία βαθμίδας ταχύτητας
G (Velocity Gradient)

Μέση βαθμίδα ταχύτητας: ένας μέσος όρος στο δοχείο που αντιστοιχεί με την **ισχύ που προσφέρεται** από τη διάταξη ανάμειξης στο κινούμενο ρευστό ανά μονάδα όγκου του.

Όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο γρηγορότερη κροκίδωση και συσσωμάτωση επιτυγχάνεται.



Παράδειγμα υπολογισμού βαθμίδας ταχύτητας G .
Μήτρακας Μ., "Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού", 2001

<

Μηχανικό σπάσιμο των θρόμβων λόγω υπερβολικών διατμητικών τάσεων.

Η μέση βαθμίδα ταχύτητας υπολογίζεται από τη σχέση:

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

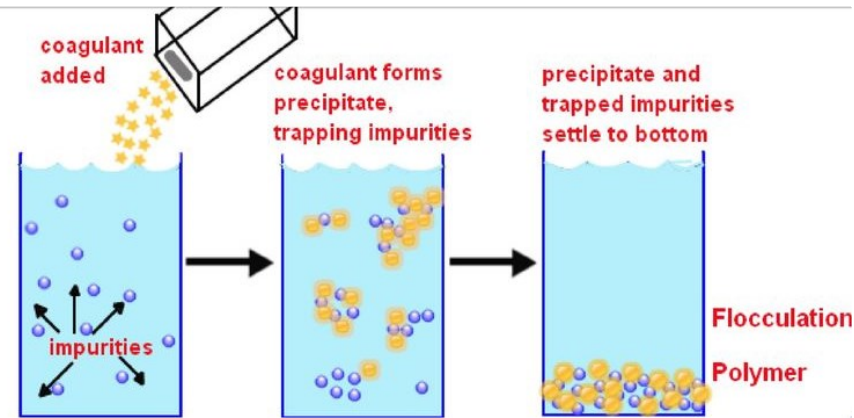
Είναι ένα μέτρο
διασκορπισμού
ισχύος στη δεξαμενή
ανάδευσης (s^{-1})

P: η ισχύς ανάδευσης, W

V: ο όγκος του αντιδραστήρα-κροκιδωτή, m^3

μ : το ιξώδες του αιωρήματος, Pa.s (kg/m/s)

Τρία βασικά στάδια:



- **ταχεία ανάμιξη (κροκίδωση):** το κροκιδωτικό και το απόβλητο φέρονται σε επαφή υπό έντονη ανάμιξη
- **Συσσωμάτωση:** υπό βραδεία ανάδευση γίνεται η αύξηση μεγέθους των συσσωματωμάτων
- **Καθίζηση**

Παράμετροι σχεδιασμού

Για το πρώτο στάδιο: ο **χρόνος παραμονής** (τ) και η **βαθμίδα ταχύτητας** (G).

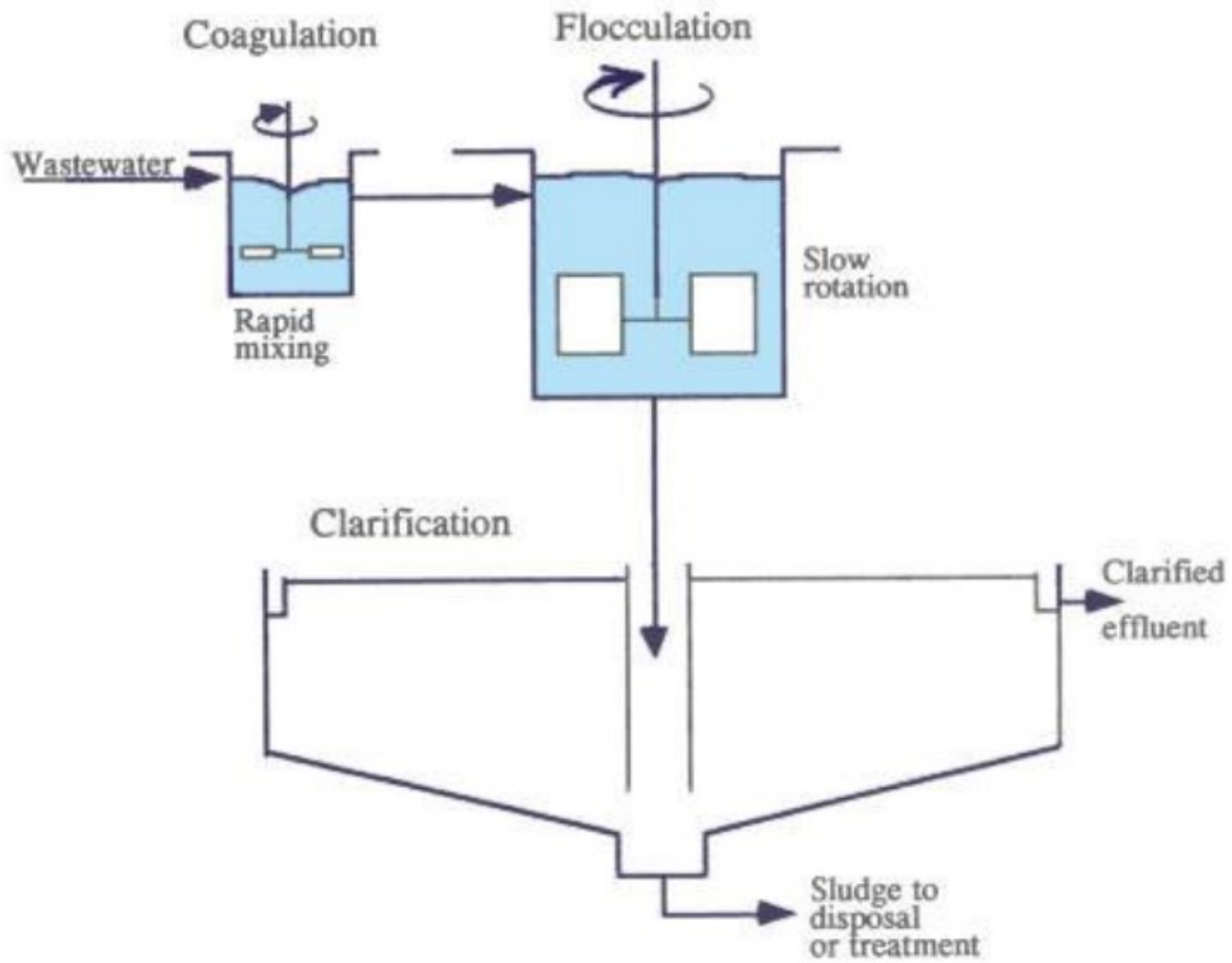
Για το δεύτερο στάδιο είναι το **αδιάστατο γινόμενο** ($G\tau$).

Βαθμίδα ταχύτητας και χρόνοι παραμονής για τις διεργασίες

Παράμετροι	Ταχεία ανάμιξη (Κροκίδωση)	Συσσωμάτωση	Καθίζηση
Χρόνος παραμονής (τ)	<30 s	30 – 60 min	90 – 180 min
Βαθμίδα ταχύτητας (G)	300-1000s ⁻¹	25 – 65 s ⁻¹	<10 s ⁻¹
Γινόμενο G· τ		10.000 – 100.000	
Περιφερειακή ταχύτητα πτερυγίων ανάδευσης	5 m/s	0,6 – 1,2 m/s	
Ισχύς αναδευτήρα	50-200 W/m ³	10-30 W/m ³	

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

P: η ισχύς ανάδευσης, W
V: ο όγκος του αντιδραστήρα-κροκιδωτή, m³
μ: το ιξώδες του αιωρήματος, Pa.s (kg/m/s)



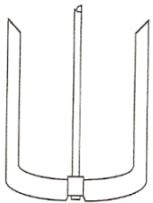
A. Μηχανικά αναδευόμενα συστήματα

Jar test:
Εμπειρικός
προσδιορισμός
παραμέτρων
κροκίδωσης

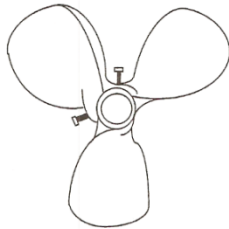


Διατάξεις Ανάμειξης – Επιλογή Τάρακτρου με Βάση το Ιξώδες

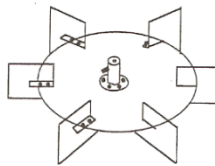
Τάρακτρα (impellers)



Άγκυρα



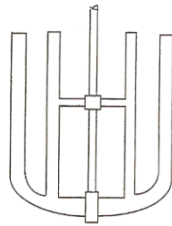
Προπέλα



Τουρμπίνα 6 επίπεδων πτερυγίων



– Πτερύγιο ή Κώπη



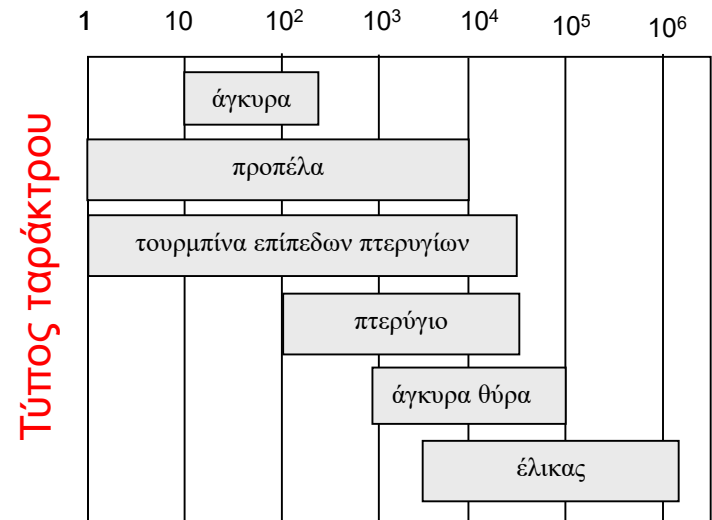
— Άγκυρα με θύρα



— Έλικας

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Ιξώδες (cp)



Διάμετρος τάρακτρου / Διάμετρος αντιδραστήρα ~ 1/3

Απαιτήσεις ισχύος για ανάμιξη σε μη αεριζόμενα ρευστά

- Η μαθηματική σχέση μεταξύ αυτών των μεταβλητών εκφράζεται συνήθως σε όρους αδιάστατων αριθμών, όπως ο αριθμός Reynolds Re_i και ο αριθμός ισχύος N_p

$$Re_i = \frac{N_i D_i^2 \rho}{\mu}$$

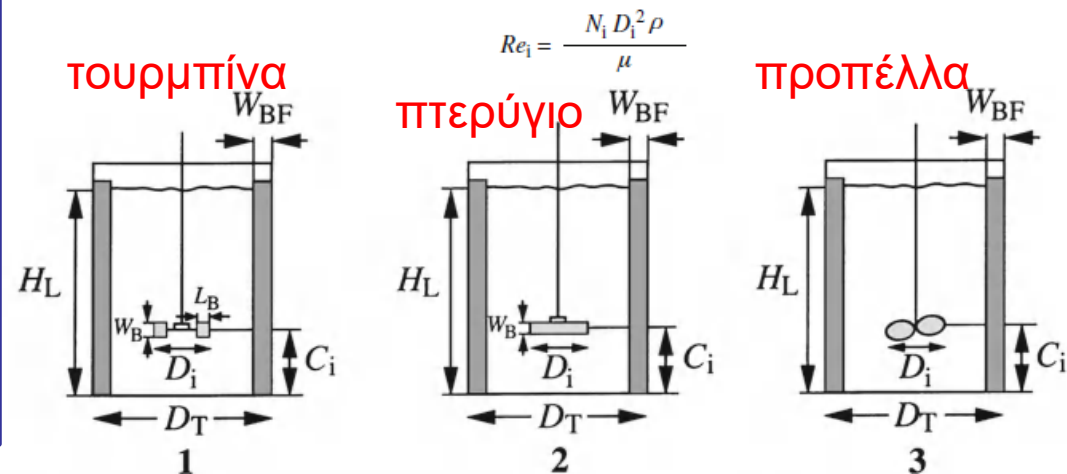
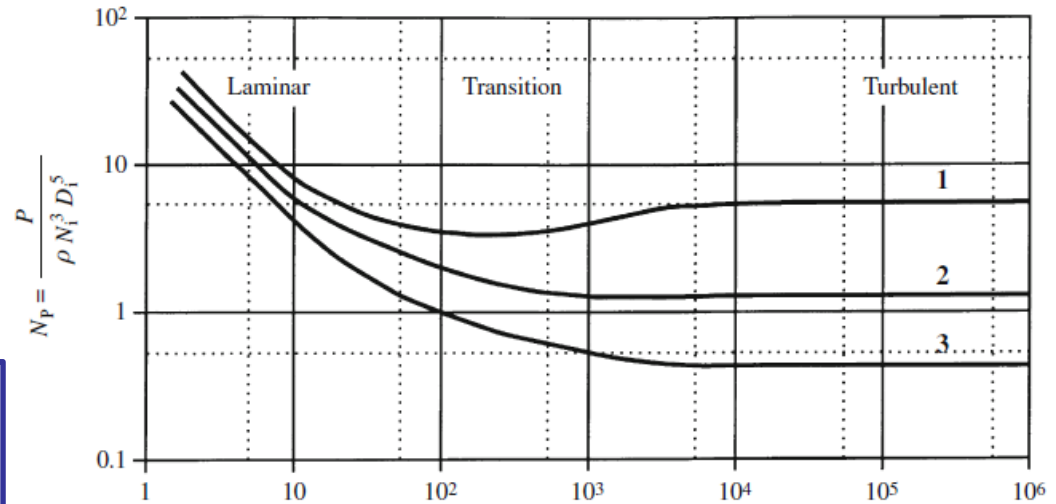
$$N_p = \frac{P}{\rho N_i^3 D_i^5}$$

Το N_i είναι η ταχύτητα του αναδευτήρα, το D_i είναι η διάμετρος του Impeller, το ρ είναι πυκνότητα του ρευστού, το μ είναι το ιξώδες του ρευστού και το P είναι η ισχύς που βάζουμε για ανάδευση

αριθμός ισχύος N_p εξαρτάται από τη γεωμετρία του αναμικτήρα και τον αδιάστατο αριθμό Reynolds (Re)

Συσχέτιση μεταξύ του αριθμού Reynolds και του αριθμού ισχύος N_p

- Η σχέση μεταξύ Re_i και N_p έχει βρεθεί **πειραματικά** για ένα εύρος πτερωτών και σχηματισμούς δεξαμενών.
- Μόλις γίνει γνωστή η τιμή του N_p υπολογίζουμε την ισχύ του αναδευτήρα



Για μια δεδομένη πτερωτή, η σχέση μεταξύ του αριθμού ισχύος και του αριθμού Reynolds εξαρτάται από το **καθεστώς ροής** στη δεξαμενή.

Πρότυπος Σχεδιασμός Δεξαμενής Κροκίδωσης

- Διάμετρος δοχείου με ύψος υγρού

$$D_T = H_L$$

- Διάμετρος αναδευτήρα με διάμετρο δοχείο

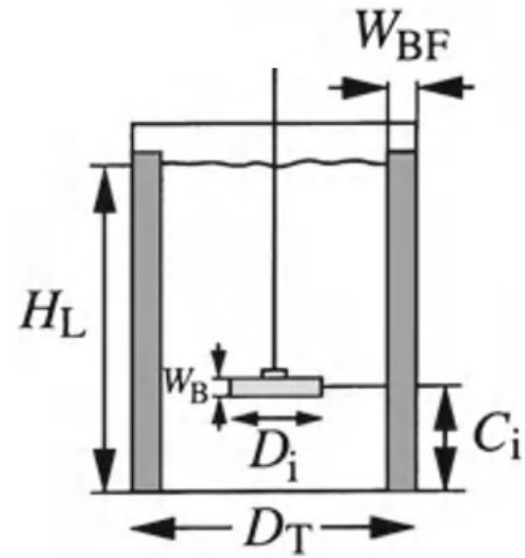
$$D_i = D_T/3$$

- Απόσταση αναδευτήρα από τον πυθμένα

$$C_i = D_T/3$$

- Αριθμός και πλάτος ανακλαστήρων ροής (baffles)

$$4, \quad W_{BF} = D_T/10$$



Ισχύς για στρωτή ροή $Re < 10$

$$P = k_i \mu N_i^2 D_i^3$$

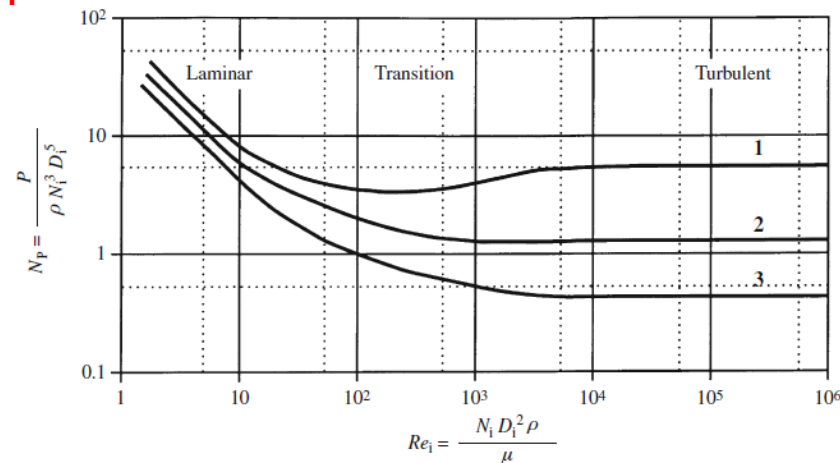
όπου το k_i είναι μία σταθερά αναλογικότητας και **εξαρτάται** από την τουρμπίνα/προπέλα που χρησιμοποιείται.

Το N_i είναι η ταχύτητα του αναδευτήρα, το D_i είναι η διάμετρος του Impeller, το ρ είναι πυκνότητα του ρευστού, το μ είναι το ιξώδες του ρευστού και το P είναι η ισχύς ανάδευσης

Ισχύς για τυρβώδη ροή $Re > 10^4$

$$P = N'_p \rho N_i^3 D_i^5$$

όπου N'_p είναι η σταθερή τιμή του αριθμού ισχύος σε τυρβώδη ροή και εξαρτάται από τον τύπο του Impeller



k_i σταθερά αναλογικότητας

στρωτή ροή τυρβώδης ροή

Impeller type	$k_1 (Re_i = 1)$	$N'_p (Re_i = 10^5)$
Rushton turbine	70	5.0
Pitched-blade turbine	50	1.3
Marine propeller	40	0.35
Anchor	420	0.35
Helical ribbon	1000	0.35

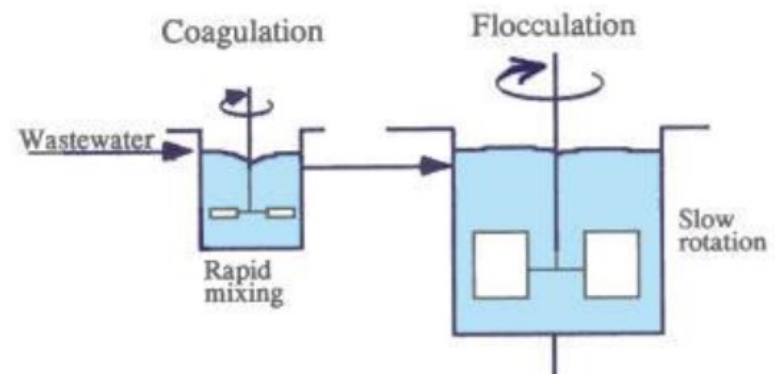
$$P = k_1 \mu N_i^2 D_i^3$$

$$P = N'_p \rho N_i^3 D_i^5$$

- Η κατανάλωση ισχύος εξαρτάται περισσότερο από τη **διάμετρο** του αναδευτήρα παρά από την **ταχύτητα** του αναδευτήρα.
- **Μικρές αλλαγές στο μέγεθος της πτερωτής** έχουν μεγάλη επίδραση στις **απαιτήσεις ισχύος**, όπως θα αναμενόταν από την εξάρτηση από τη διάμετρο της πτερωτής που αυξάνεται εις την τρίτη ή την πέμπτη δύναμη.
- Η τριβή, και συνεπώς η ισχύς που απαιτείται για την ανάδευση, εξαρτώνται από τη **γεωμετρία της πτερωτής** και τον **σχηματισμό της δεξαμενής**.

Σχεδιασμός της κροκίδωσης - συσσωμάτωσης

- ❑ Γίνεται η **επιλογή κροκιδωτικού**
 - ❑ Με βάση τη σύσταση και τις ιδιότητες του αποβλήτου
- ❑ Από δεδομένα πειραμάτων **Jar Tests** προσδιορίζονται:
 - ❑ Η ποσότητα κροκιδωτικού → διαστασιολόγηση της δοσομετρικής αντλίας και της δεξαμενής αποθήκευσης
 - ❑ Το pH κροκίδωσης (αντλία τροφοδοσίας και δεξαμενή αποθήκευσης)
 - ❑ Τα μεγέθη **G** και **t** για τα **δύο στάδια** κροκίδωσης-συσσωμάτωσης
 - ❑ Ο Χρόνος Παραμονής (t) μας δίνει τον όγκο των αντίστοιχων **Δεξαμενών Κροκίδωσης & Συσσωμάτωσης**
 - ❑ Η μέση Βαθμίδα Ταχύτητας (G) μας δίνει την ισχύ της ανάδευσης.
- ❑ Η παραγόμενη **ποσότητα στερεών** → διαστασιολόγηση της **αντλίας απαγωγής** τους και δεξαμενής/χώρου προσωρινής διάθεσης.



Παράδειγμα 1 (ταχεία ανάμιξη)

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 2,5 hp.

Υπολογίστε τη **βαθμίδα ταχύτητας G** και τον **χρόνο παραμονής τ** στη δεξαμενή.

Το κροκιδωτικό που χρησιμοποιείται είναι θειικό αργίλιο και η παροχή του αποβλήτου είναι ίση με 7350 m³/d.

(Η θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου αποβλήτου είναι ίση με 15°C με δυναμικό ιξώδες ίσο με 1,14 cp).

Ελέγξτε αν η τιμή του G και του χρόνου παραμονής (τ) βρίσκονται μέσα στα όρια σχεδιασμού.

Λύση Παραδείγματος 1 (ταχεία ανάμειξη)

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

- $\mu = 1,14 \text{ cp}$ ή $1,14 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$
- Ο ενεργός όγκος της δεξαμενής είναι: $V = 1,1 \cdot 1,2 \cdot 1,2 = 1,584 \text{ m}^3$
- Η καταναλισκόμενη ισχύς είναι $P = 2,5 \text{ hp} = 1864,25 \text{ W}$
- Άρα η βαθμίδα ταχύτητας είναι:
- $$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{1864,25 \text{ W}}{(1,14 \cdot \frac{10^{-3} \text{ Kg}}{\text{m}} \cdot \text{s})(1,584 \text{ m}^3)}} = 1016,1 \text{ s}^{-1}$$
- Ο χρόνος παραμονής $\tau = V/Q = 1,584 \text{ (m}^3) / 7350 \text{ (m}^3/\text{d}) = 18,6 \text{ s}$
- Αποδεκτή τιμή για το τ ($< 30 \text{ s}$)
- Οριακή τιμή για G ($300 - 1000 \text{ s}^{-1}$). Τι μπορούμε να κάνουμε;

Παράδειγμα 2 (Συσσωμάτωση)

Πριν την περαιτέρω επεξεργασία ενός αποβλήτου παροχής $500 \text{ m}^3/\text{d}$, θερμοκρασίας 15°C , πυκνότητας $\rho = 999 \text{ kg/m}^3$ και ιξώδους $\mu = 1,14 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ απαιτείται να επιτευχθεί η **συσσωμάτωση** των κολλοειδών που περιέχει.

Για το απόβλητο αυτό γνωρίζουμε από προηγούμενες δοκιμές τύπου **Jar Test** ότι:

- Το καλύτερο κροκιδωτικό είναι το $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (alum),
- Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται σε συνθήκες **$40 \text{ mg Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$** αποβλήτου και για τιμή **$G \cdot t$ ίση με 8×10^4** .

Να σχεδιασθεί μια δεξαμενή με βάθος μέχρι 2 m , η οποία να είναι εφοδιασμένη με έναν αναδευτήρα τύπου στροβίλου, και να υπολογισθούν:

- η **ποσότητα κροκιδωτικού** ανά μήνα,
- η **απαιτούμενη ισχύς ανάδευσης**
- η **συχνότητα περιστροφής του αναδευτήρα**

Λύση Παραδείγματος

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

$$G \cdot \tau = 8 \times 10^4$$

- Έστω $G = 40 \text{ s}^{-1} \rightarrow \tau = 33,3 \text{ min}$ ($30 \text{ min} < \tau < 60 \text{ min}$)
- Όγκος δεξαμενής: $V = Q \cdot \tau = 500 \text{ (m}^3/\text{d)} \cdot 33,3 \text{ (min)} = 11,6 \text{ m}^3$
- Έστω ότι η δεξαμενή είναι κυλινδρική και ότι $H = D$ οπότε η διάμετρος της δεξαμενής:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi}} = 2,5 \text{ m}$$

- Επιλέγεται διάμετρος αναδευτήρα $d = D/3 = 0,82 \text{ m}$
- Η απαιτούμενη ισχύς:

$$P = G^2 \cdot V \cdot \mu = 40^2 \text{ s}^{-2} \cdot 11,6 \text{ m}^3 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ (N} \cdot \text{s / m}^2\text{)} = 21,1 \text{ W}$$

Λύση Παραδείγματος (συν')

Το N_i είναι η ταχύτητα του αναδευτήρα,
το D_i είναι η διάμετρος του Impeller,
το ρ είναι πυκνότητα του ρευστού,
το μ είναι το ιξώδες του ρευστού και
το P είναι η ισχύς ανάδευσης

$$\text{Έστω ότι η ροή είναι τυρβώδης} \rightarrow P = N'_p \rho N_i^3 D_i^5$$

$$\text{Για αναδευτήρα τύπου στροβίλου} \rightarrow N'_p = 1,27$$

$$P = N'_p \rho N_i^3 D_i^5 \Leftrightarrow N_i = 0,36 s^{-1}$$

Έλεγχος της ροής αν είναι όντως τυρβώδης

$$Re = \frac{d^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = 21 \cdot 10^5 > 10^4 \Rightarrow \text{τυρβώδης ροή}$$

Η απαιτούμενη ποσότητα κροκιδωτικού θα είναι:

$$500 (m^3 / d) \cdot 40 (g / m^3) \cdot 30 (d / mo) = 600 \text{ kg / month}$$

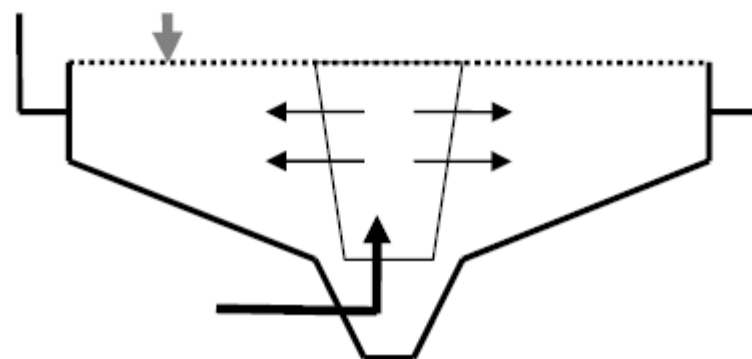
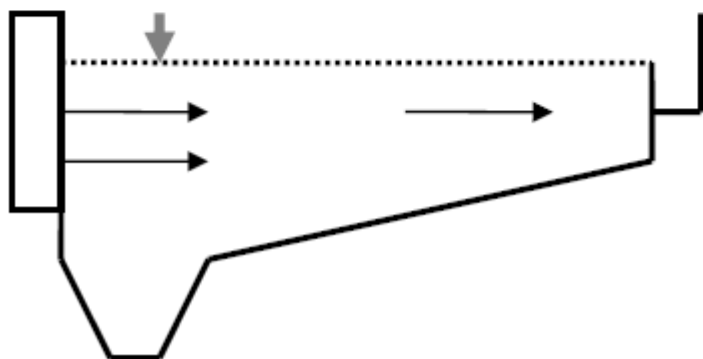
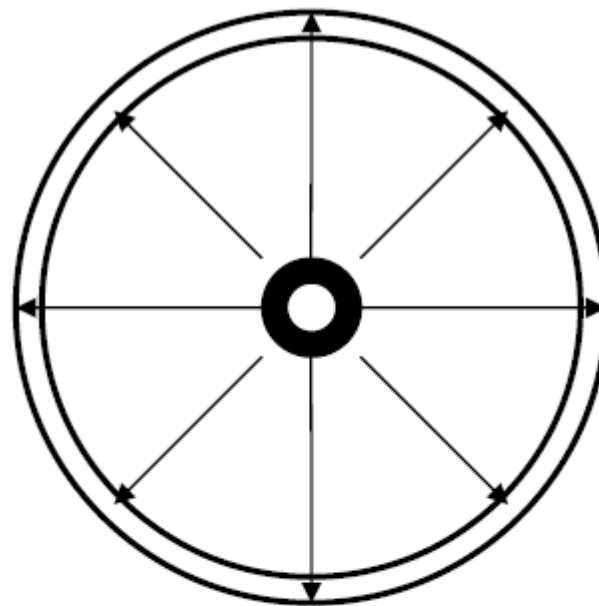
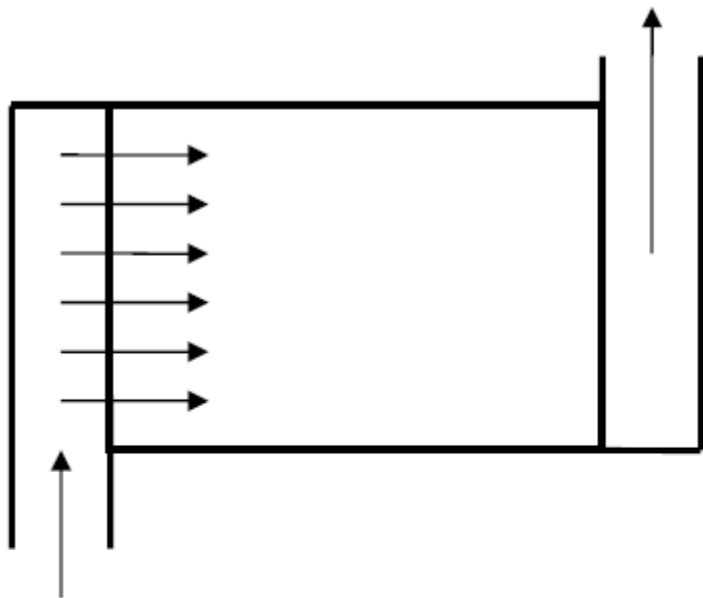
Πρωτοβάθμια Καθίζηση



Πρωτοβάθμια Καθίζηση

- Η ΠΚ είναι καθίζηση **τύπου II** (καθίζηση με συσσωμάτωση)
- Η πρωτοβάθμια καθίζηση απομακρύνει τα αιωρούμενα στερεά μεγέθους **0,1 έως 0,001 mm**.
- Η απομάκρυνση αυτή οδηγεί σε **μείωση** και του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (**BAO**), μια και αυτό, *εν μέρει*, οφείλεται σε *αδιάλυτα οργανικά συστατικά*.
- Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης τυπικά αφαιρούν το **50-70% των αιωρούμενων στερεών** και το **25-40% του BAO₅**
- Περιεκτικότητα λάσπης γύρω στο **5%**

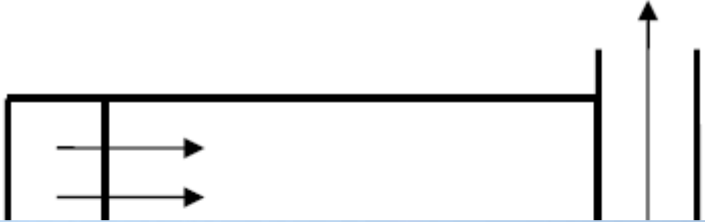
Δεξαμενές Καθίζησης



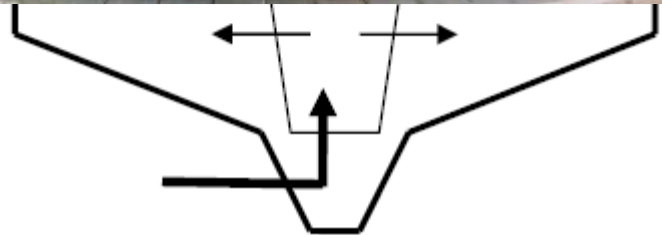
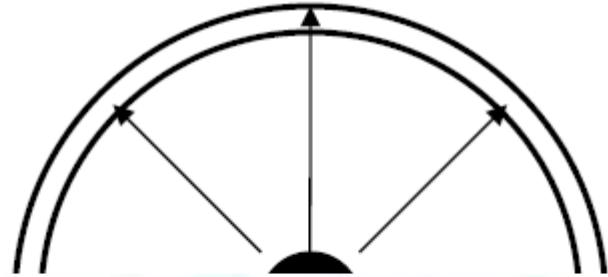
Ορθογώνια Δεξαμενή

Κυκλική Δεξαμενή

Δεξαμενές Καθίζησης

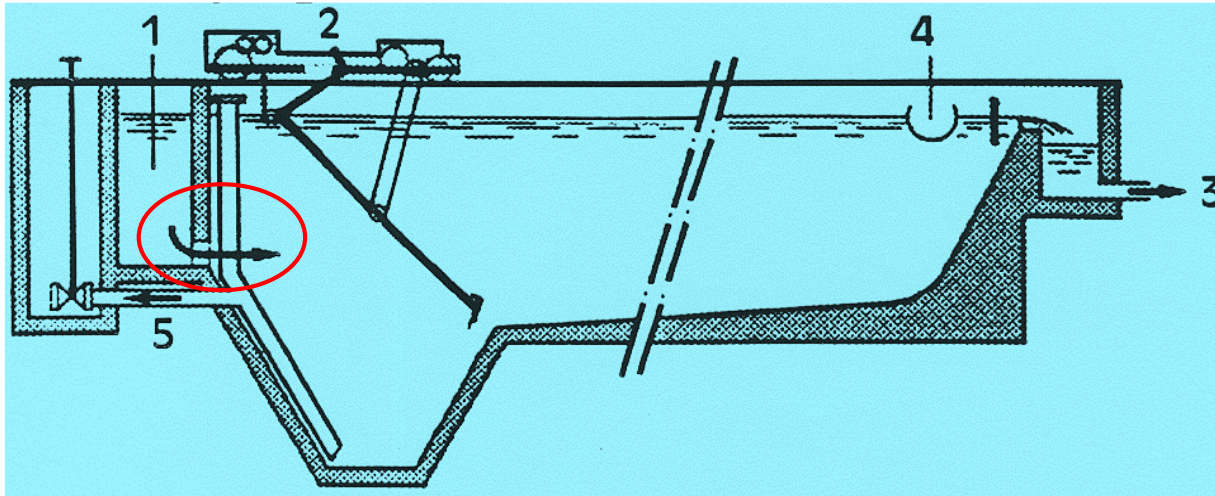


Ορθογώνια Δεξαμενή



Κυκλική Δεξαμενή

Οριζόντια δεξαμενή καθίζησης με ξέστρο



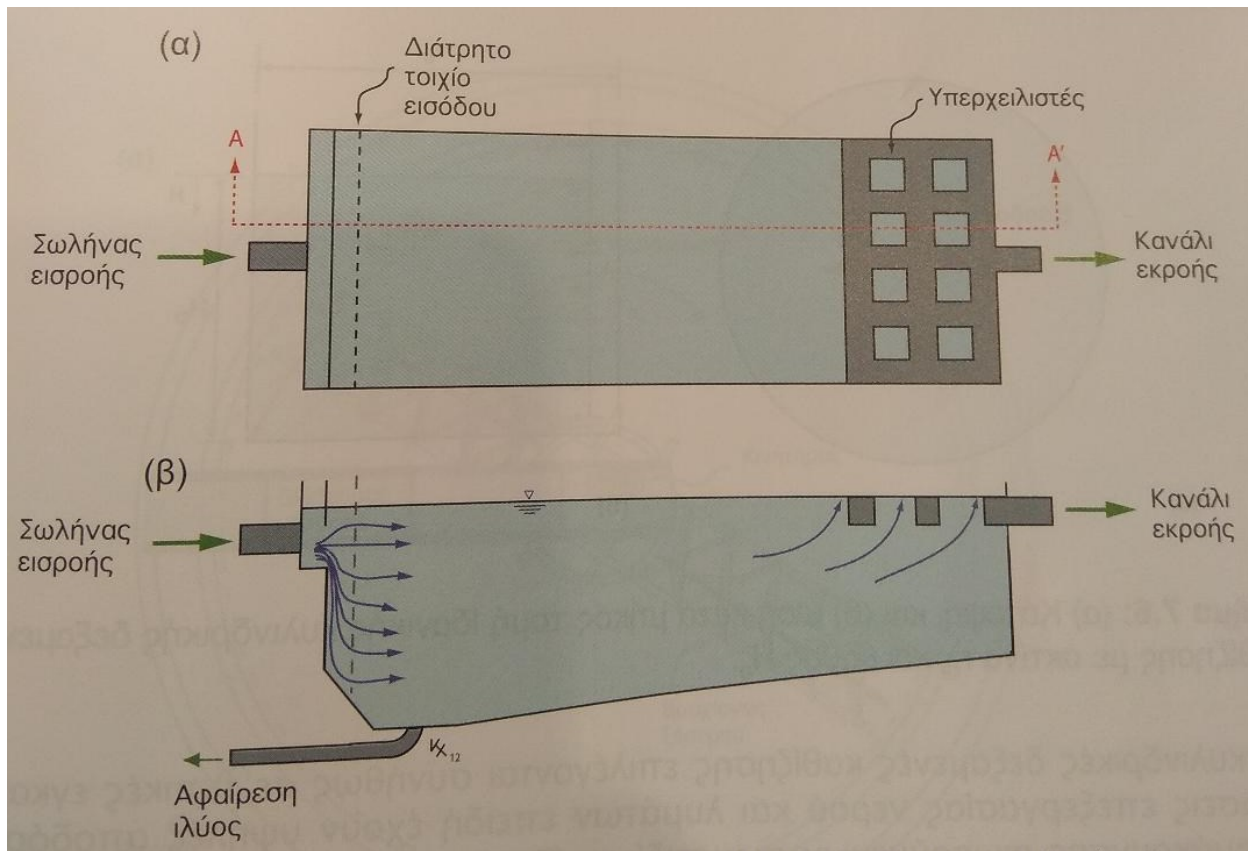
- 1) Φρεάτιο εισόδου,
- 2) Κινητή γέφυρα ξέστρου,
- 3) Έξοδος αποβλήτου,
- 4) Συλλέκτης επιπλεόντων,
- 5) Εξαγωγή λάσπης.

Το υγρό απόβλητο συνήθως δεν εισέρχεται από την επιφάνεια της δεξαμενής άρα στην πραγματικότητα απαιτείται λιγότερος υδραυλικός χρόνος παραμονής τ για την κάθοδο ενός σωματιδίου στον πυθμένα.

Οι δεξαμενές καθίζησης αυτού του είδους συνήθως πληρούν τις εξής απαιτήσεις:

Παράμετρος σχεδιασμού	Περιοχή τιμών
Επιφανειακή φόρτιση $V_E (= Q/A = Q/W \cdot L)$	0,8 - 2,5 (m/h)
Βάθος υγρού	> 1,8 (m)
Υδραυλικός χρόνος παραμονής	1,5 – 2,5 (h)

Ορθογώνια Δεξαμενή Καθίζησης



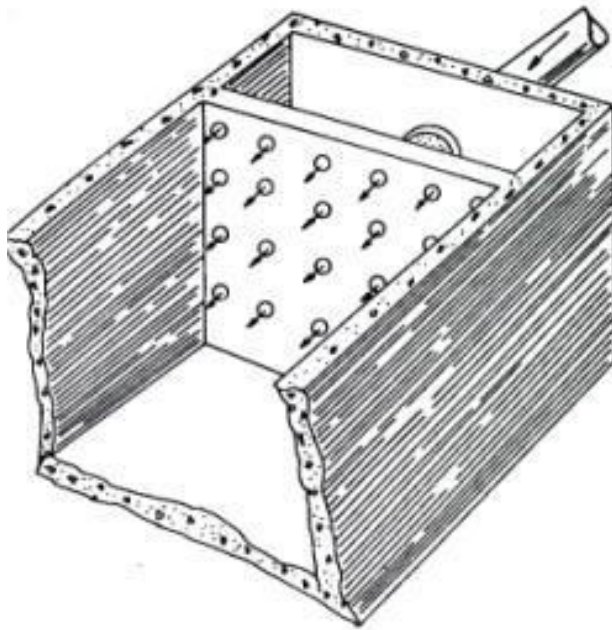
Είναι μακρόστενες ($3/1$ – $7/1$ μήκος/πλάτος)

Ο πυθμένας έχει **κατάλληλη κλίση** για την εύκολη αφαίρεση ιλύος.

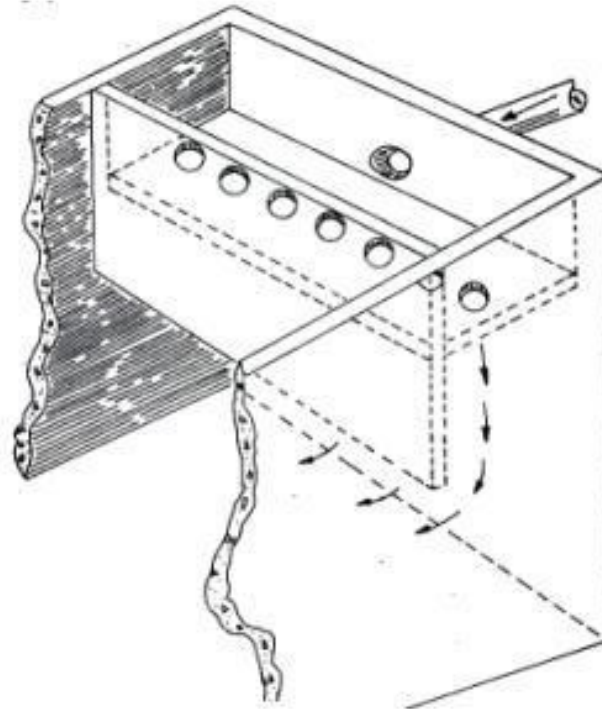
Εισροή: Στη ζώνη εισόδου υπάρχει ένα **διάτρητο τοιχίο** το οποίο βοηθάει στην **ομοιόμορφη κατανομή του νερού** για να **μειώνονται οι αναταράξεις**.

Εκροή: Γίνεται από κατάλληλους υπερχειλιστές κατά μήκος του άκρου της δεξαμενής.

Ορθογώνια Δεξαμενή Καθίζησης

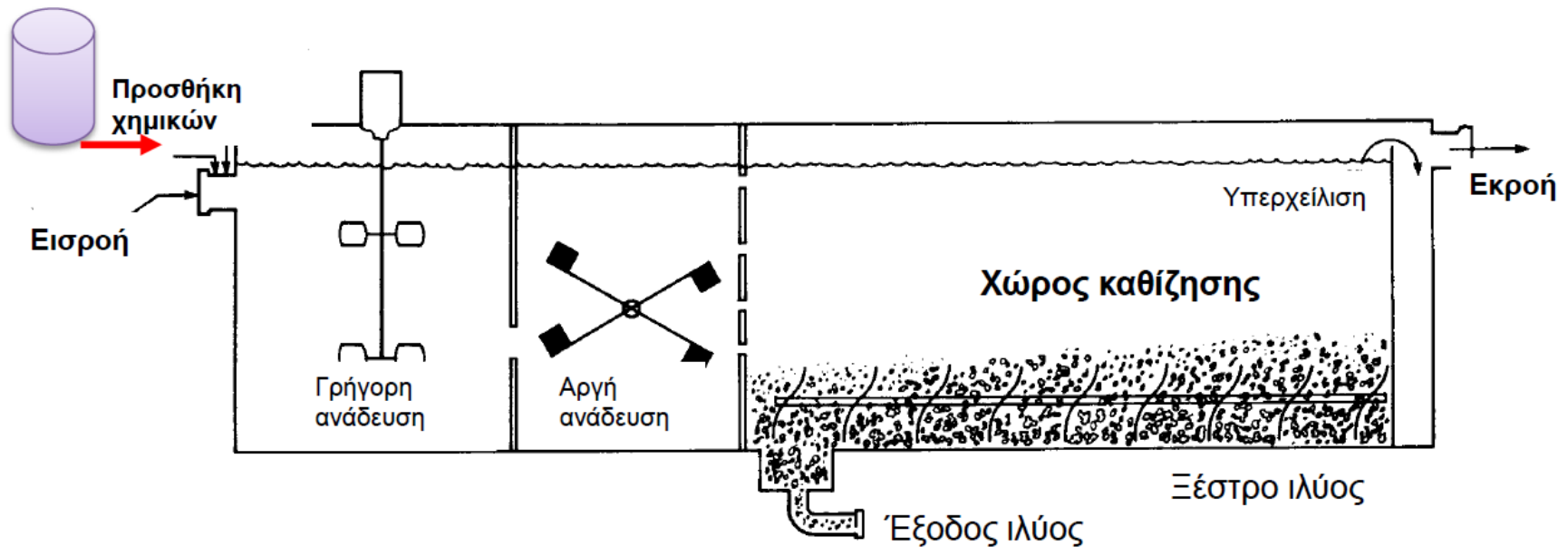


Διάτρητο τοιχίο



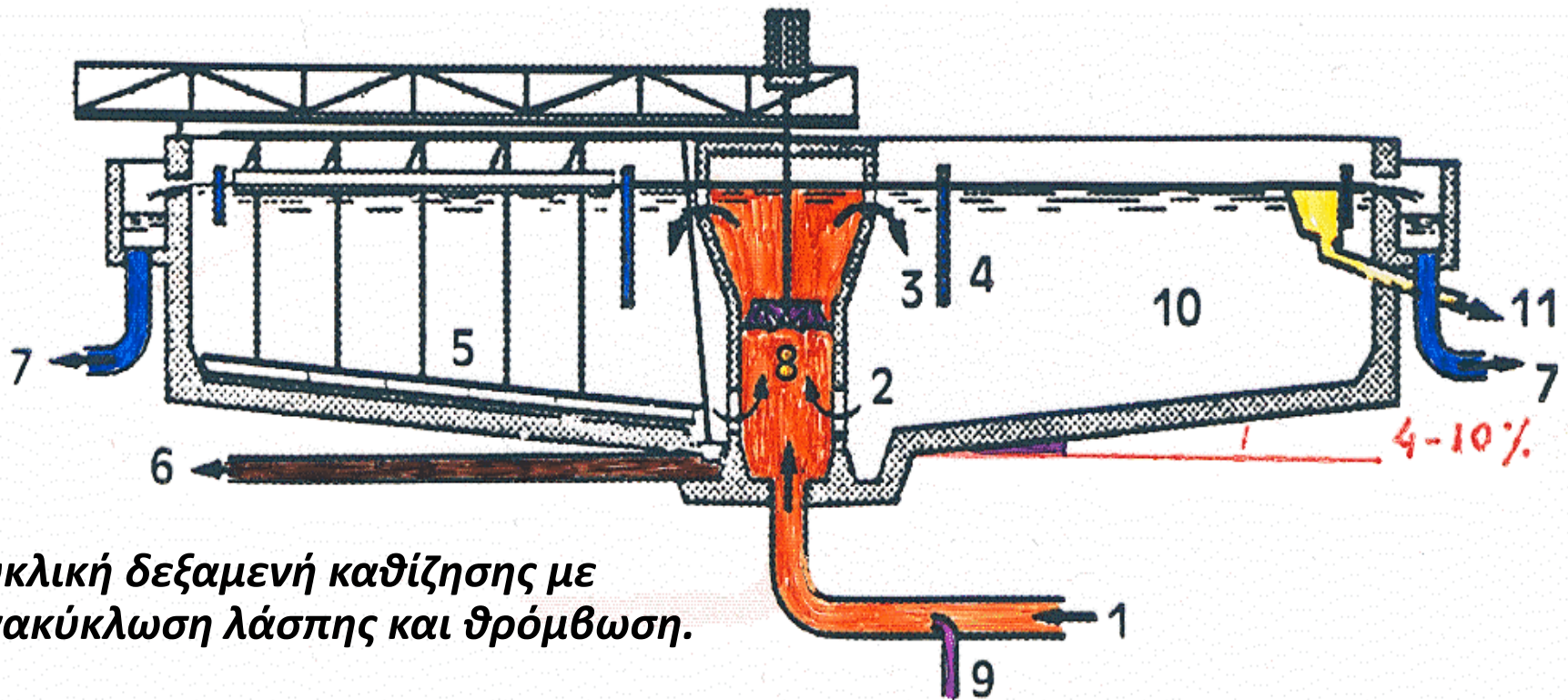
Εισροή από ένα
συγκεκριμένο βάθος

Ορθογωνική δεξαμενή κροκίδωσης – καθίζησης



- Τέτοιου είδους δεξαμενές χρησιμοποιούνται συνήθως στην **επεξεργασία** (κροκίδωση - συσσωμάτωση) **του νερού** για την απομάκρυνση της θολότητας του νερού.

Κυκλική Δεξαμενή Καθίζησης



Κυκλική δεξαμενή καθίζησης με ανακύκλωση λάσπης και θρόμβωση.

1. Είσοδος αποβλήτου, 2. Εισαγωγή λάσπης, 3. Έξοδος θρόμβων, 4. Κατανομέας ροής, 5. Ξέστρο λάσπης, 6. Εξαγωγή λάσπης, 7. Επεξεργασμένο απόβλητο, 8. Αναμικτήρας, 9. Εισαγωγή χημικών, 10. Περιοχή καθίζησης, 11. Απομάκρυνση επιπλέοντων. Μ. Μήτρακας, 2001

Το ξέστρο κινείται με μικρή ταχύτητα για αποφυγή επαναιώρησης της ιλύος (< 1 m/min).

Μήτρακας Μ., "Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού", 2001, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ



Οδοντωτός υπερχειλιστής



Λεπτομέρεια απαγωγού
επιπλεόντων

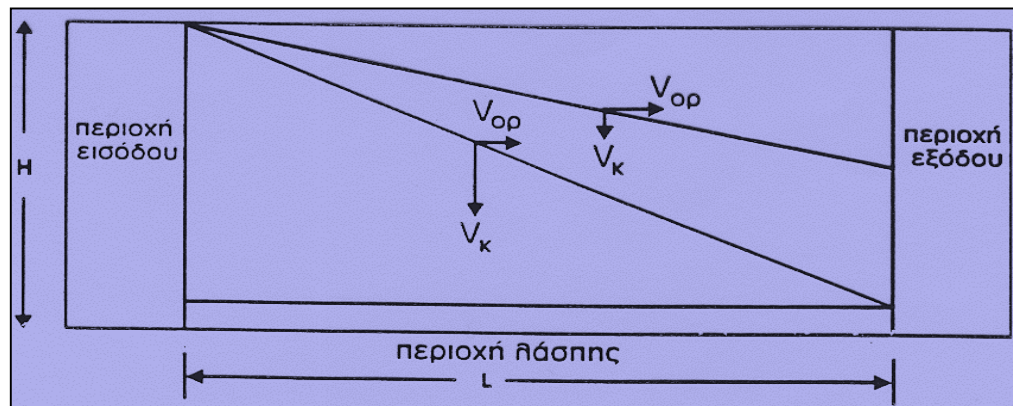
Καθίζηση τύπου II

- Το κύριο χαρακτηριστικό του τύπου αυτού καθίζησης, είναι ότι τα σωματίδια **συσσωματώνονται** καθώς καθιζάνουν, με αποτέλεσμα να **αυξάνεται η ταχύτητά τους** μιας και **αυξάνεται το μέγεθός τους** (σύμφωνα με τον νόμο του Stokes).

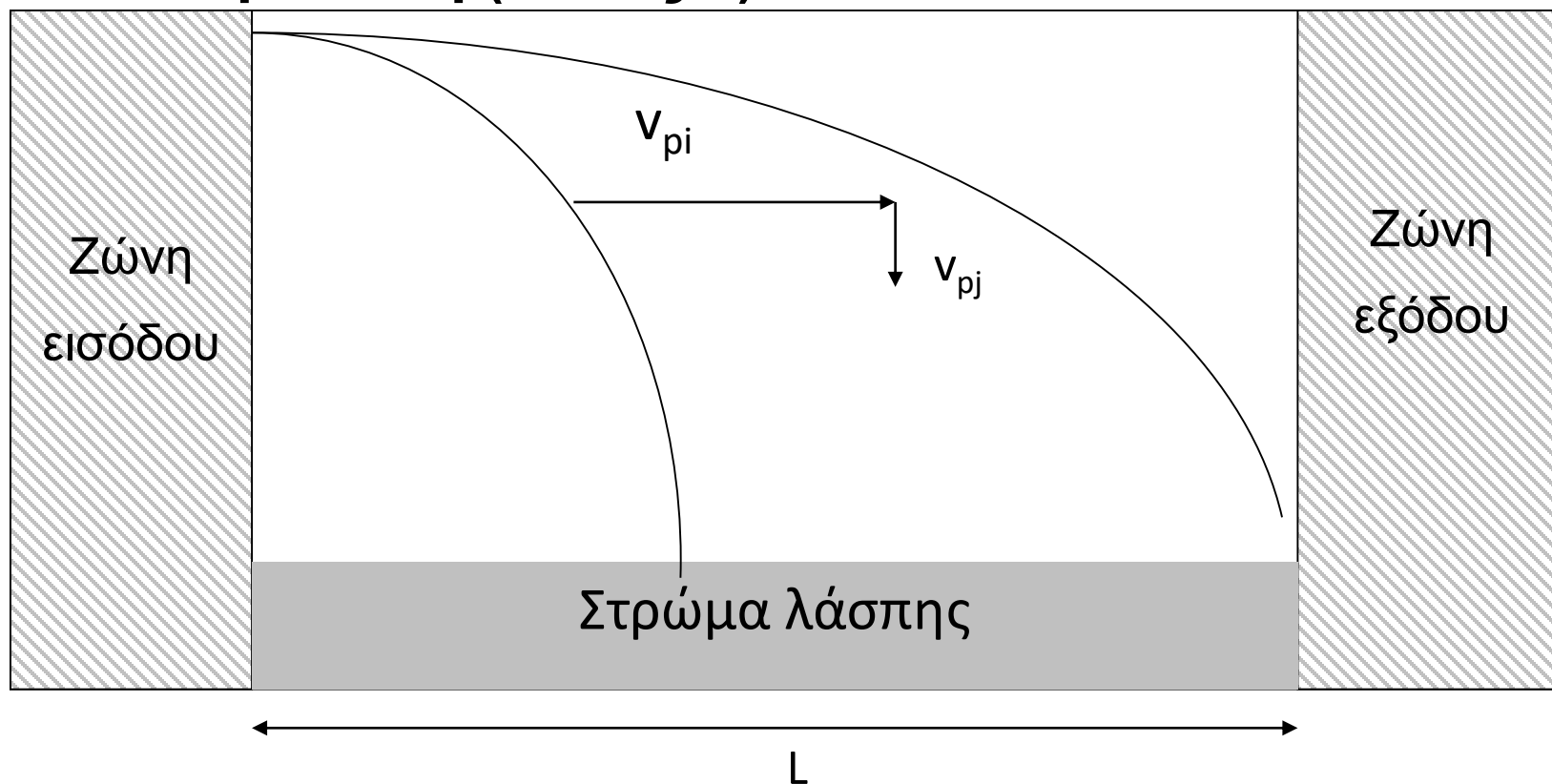
$$v_c = \frac{g (\rho_s - \rho) d^2}{18\mu}$$

- Δεν υπάρχει επαρκής μαθηματική σχέση που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της καθίζησης τύπου II.
- Ο **σχεδιασμός** βασίζεται σε **πειράματα καθίζησης** σε στήλη βάθους, **ίσου με το βάθος** της προς σχεδιασμό δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης (συνήθως 3m).
- Εάν δεν υπάρχουν $\rightarrow$ τιμές που έχουν προκύψει από τη **διεθνή εμπειρία** για απόβλητα ίδιου τύπου.

Καθίζηση Διακεκριμένων Σωματιδίων (Τύπου I)



Καθίζηση με Συσσωμάτωση (Τύπος II)



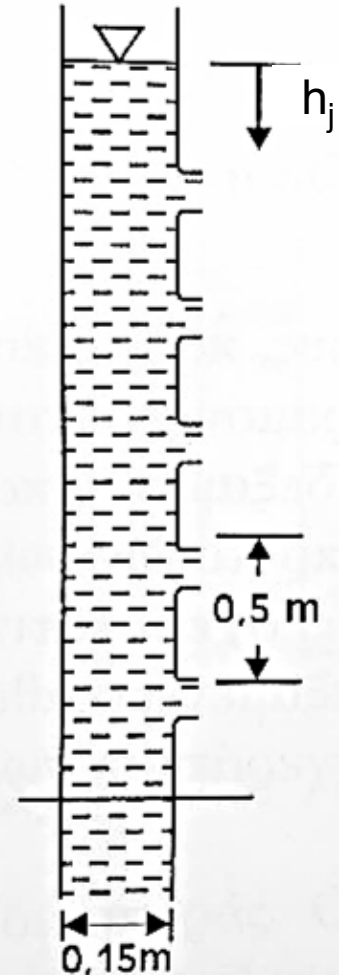
Παραβολικές τροχιές (Καθίζηση τύπου II) αντί
για ευθύγραμμες τροχιές (Καθίζηση Τύπου I)

Πειραματική στήλη για τη μελέτη χαρακτηριστικών καθίζησης

- Ανακατεύουμε το αιώρημα αρχικά (ομοιόμορφη σύσταση) και μετά σταματάμε ($t=0$)
- Παίρνουμε δείγματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα (t_i) (π.χ. ανά 20 λεπτά για 2-3 ώρες)
- **Μετράμε** τη **συγκέντρωση των σωματιδίων** (X_{ij}) και προσδιορίζουμε το **απομακρυνόμενο ποσοστό** των σωματιδίων ($x_{ij} = 1 - X_{ij}/X_0$)
- Σχηματίζουμε διάγραμμα με **πειραματικές καμπύλες** ως προς το **χρόνο** (i) και το **βάθος** (j) (ισοϋψείς).

Χαρακτηριστικά στήλης

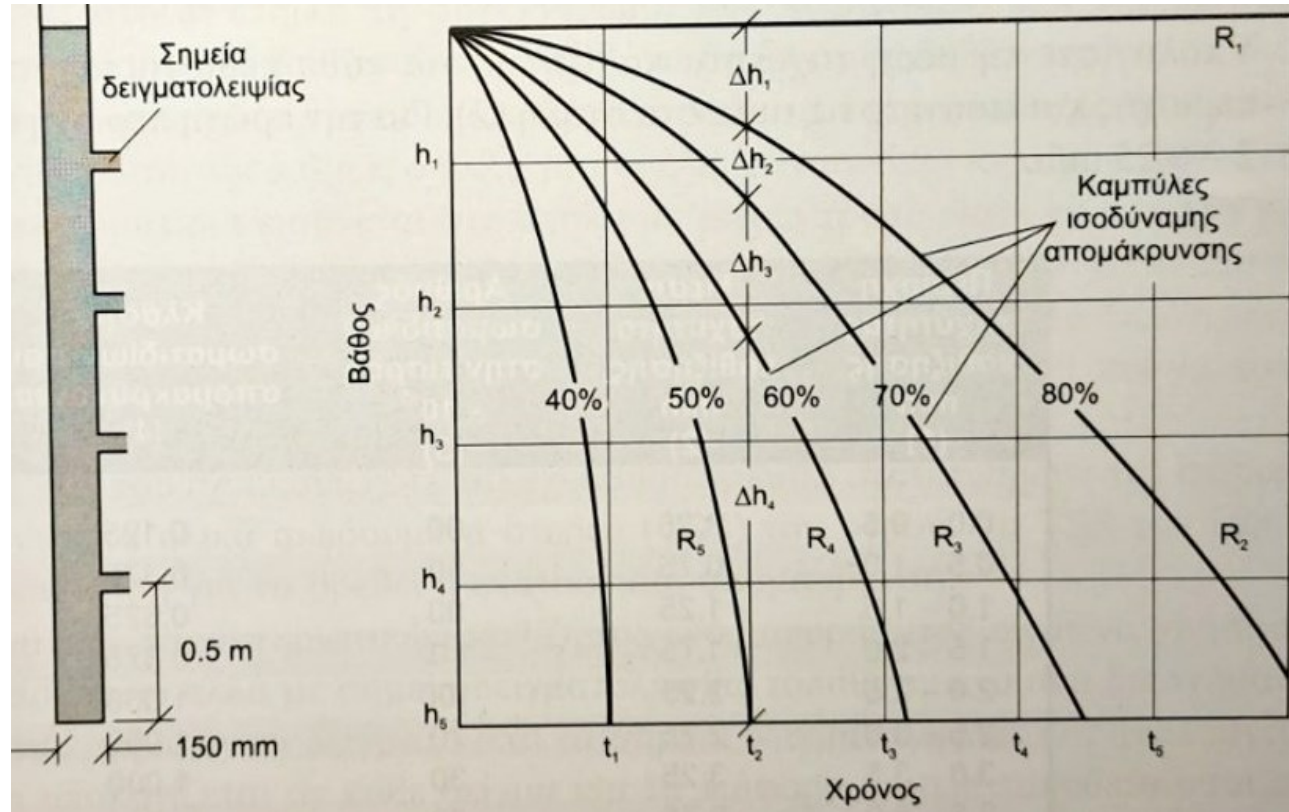
- ~ 3 m ύψος (ή ανάλογο του ύψους της δεξαμενής καθίζησης)
- >10 cm διάμετρο (~15 cm)
- Δειγματολήπτες j κατά μήκος της στήλης βάθους h_j



Σχ. Διάγραμμα για την ανάλυση της καθίζησης συσσωματωμάτων

Από τις καμπύλες ισοδύναμης απομάκρυνσης προσδιορίζεται η ταχύτητα καθίζησης (ή αντίστοιχα η επιφανειακή φόρτιση):

$$v_c = \frac{H}{t_c} = \frac{Q}{A}$$



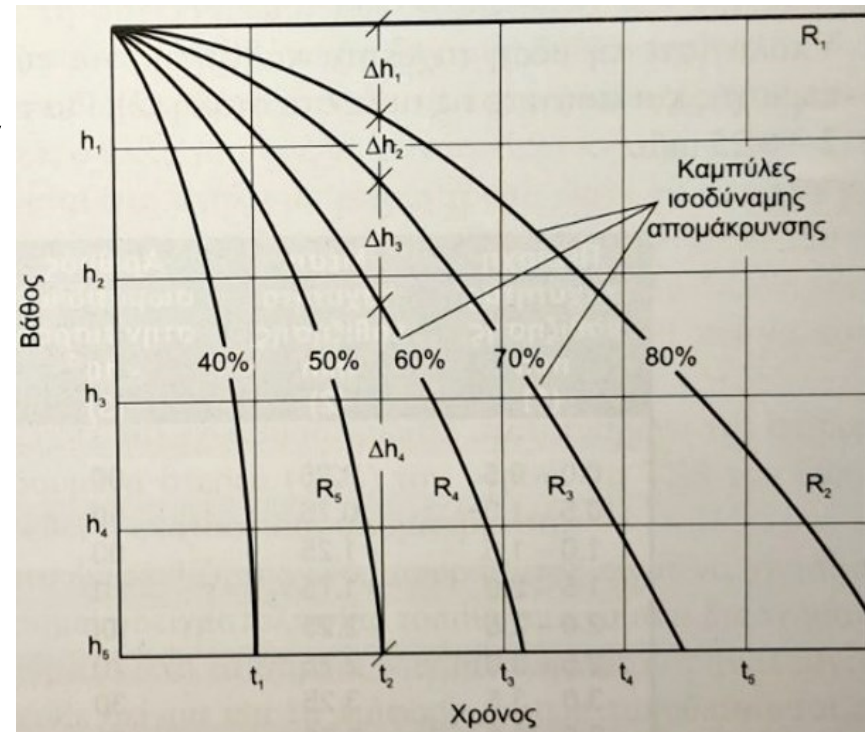
H: το ύψος της στήλης καθίζησης (~3 m)

t_c : **χρόνος που απαιτείται** για να επιτευχθεί ένας δεδομένος βαθμός απομάκρυνσης (min)

Ισοϋψείς καμπύλες ή ισοαφαιρετικές καμπύλες

- Το κλάσμα των σωματιδίων που απομακρύνονται:

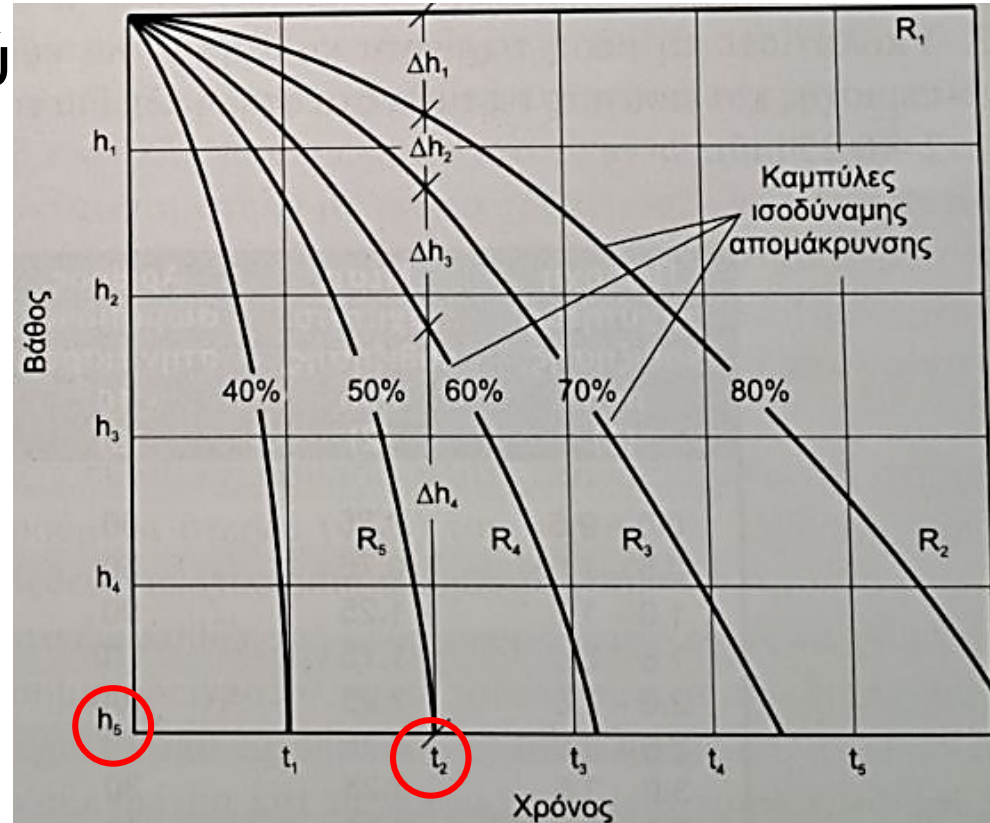
$$R, \% = \sum_{h=1}^n \left(\frac{\Delta h_n}{H} \right) \left(\frac{R_n + R_{n+1}}{2} \right)$$



- R: η απομάκρυνση των TSS, %
- n: ο αριθμός της ισοδύναμης απομάκρυνσης
- Δh_n : απόσταση μεταξύ των ισοϋψών καμπυλών (R_n και R_{n+1}) για τη χρονική στιγμή t
- H: ολικό ύψος της στήλης (m)
- R_n : καμπύλη n ίσης απομάκρυνσης
- R_{n+1} : καμπύλη n+1 ίσης απομάκρυνσης

Παράδειγμα Υπολογισμού απομάκρυνσης TSS για χρόνο παραμονής t_2 και βάθος $h_5 = 3$ m

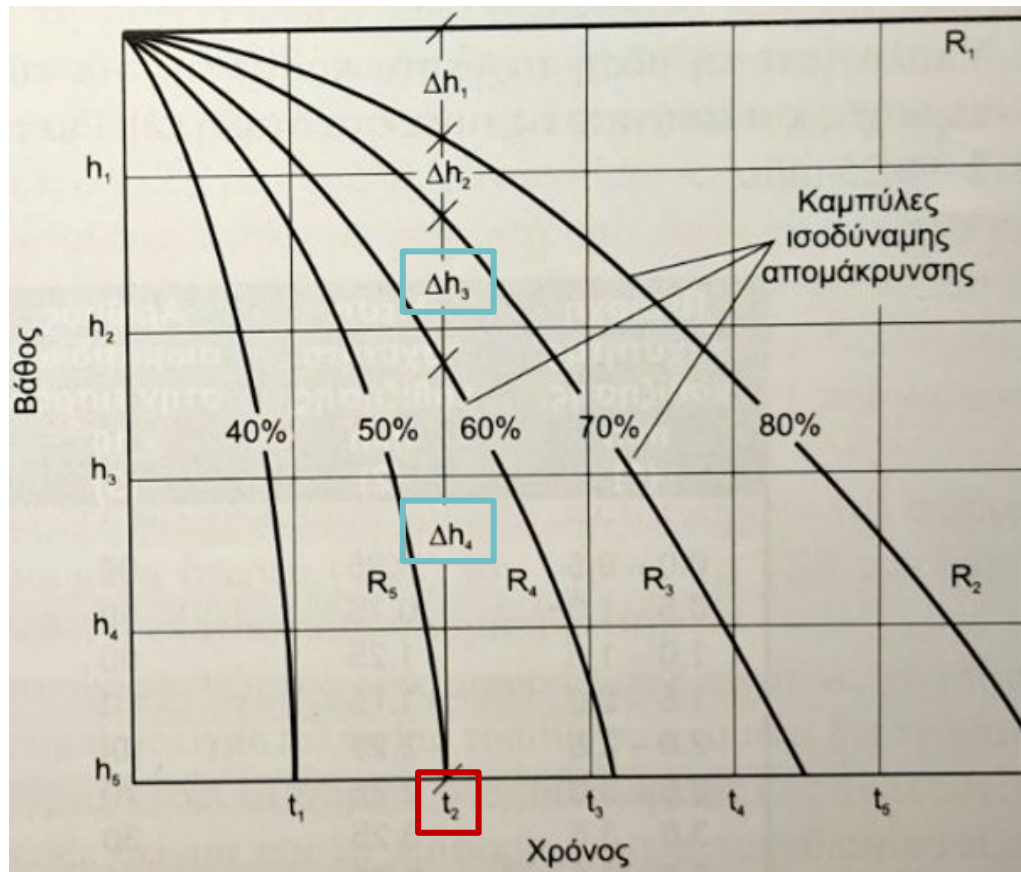
$$R, \% = \sum_{h=1}^n \left(\frac{\Delta h_n}{H} \right) \left(\frac{R_n + R_{n+1}}{2} \right)$$



$$R, \% = \frac{\Delta h_1}{h_5} * \frac{R_1 + R_2}{2} + \frac{\Delta h_2}{h_5} * \frac{R_2 + R_3}{2} + \frac{\Delta h_3}{h_5} * \frac{R_3 + R_4}{2} + \frac{\Delta h_4}{h_5} * \frac{R_4 + R_5}{2} = 64,8\%$$

			$\Delta h_n / h_5$	
Από διάγραμμα	$\Delta h_1 = 0,5$ m	0,17	m	
Από διάγραμμα	$\Delta h_2 = 0,3$ m	0,10	m	
Από διάγραμμα	$\Delta h_3 = 0,6$ m	0,20	m	
Από διάγραμμα	$\Delta h_4 = 1,6$ m	0,53	m	

R_1	100%
R_2	80%
R_3	70%
R_4	60%
R_5	50%

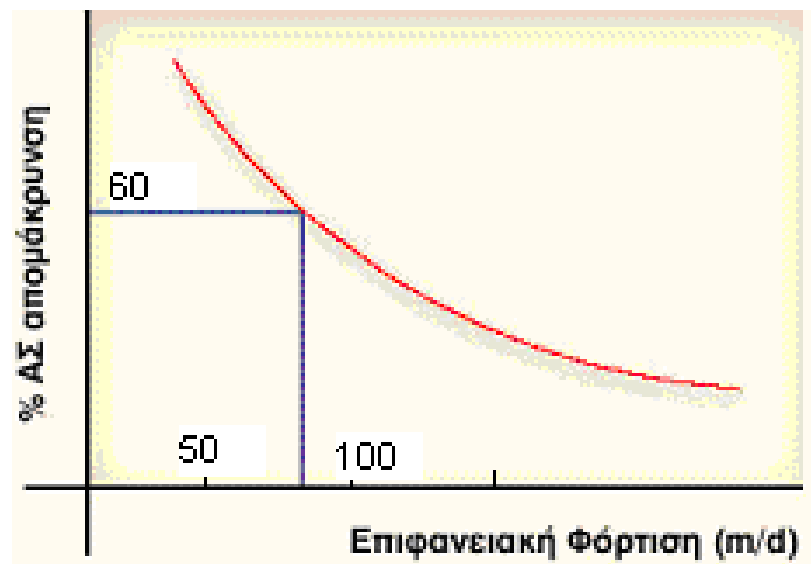
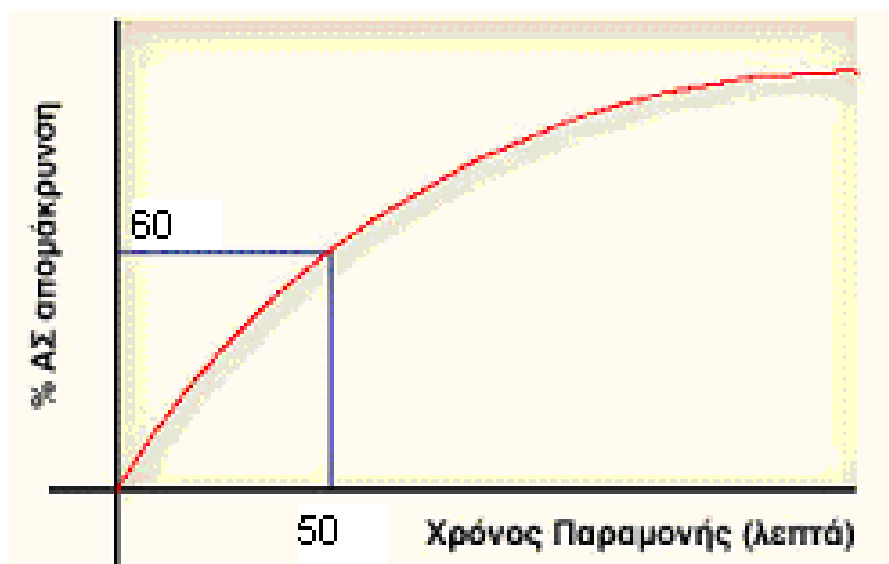


Οπότε εάν t_2 ο χρόνος παραμονής που επιλέγω, έχουμε ότι:
 το 50% των ΟΑΣ έχει καθιζάνει πλήρως,
 το 60% έχει καθιζάνει σε βάθος Δh_4 ,
 το 70% έχει καθιζάνει σε βάθος $\Delta h_4 + \Delta h_3$
 ... ΚΟΚ

Εάν $t_c = 50$ min τότε το ποσοστό απομάκρυνσης αντιστοιχεί σε **επιφανειακή φόρτιση**:

$$v_c = \frac{H}{t_c} \Leftrightarrow v_c = \frac{3 \text{ m}}{50 \text{ min}} = \frac{3 \text{ m}}{\frac{5}{6} \text{ h}} = \frac{3 \text{ m}}{\frac{5}{6} \cdot \frac{1}{24} \text{ d}} = 86,4 \frac{\text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{d}}$$

Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για **διάφορους χρόνους (t_c)** μπορούμε να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα της **% απομάκρυνσης TSS** συναρτήσει του **χρόνου παραμονής (t_c)** και της **επιφανειακής φόρτισης**, αντίστοιχα.

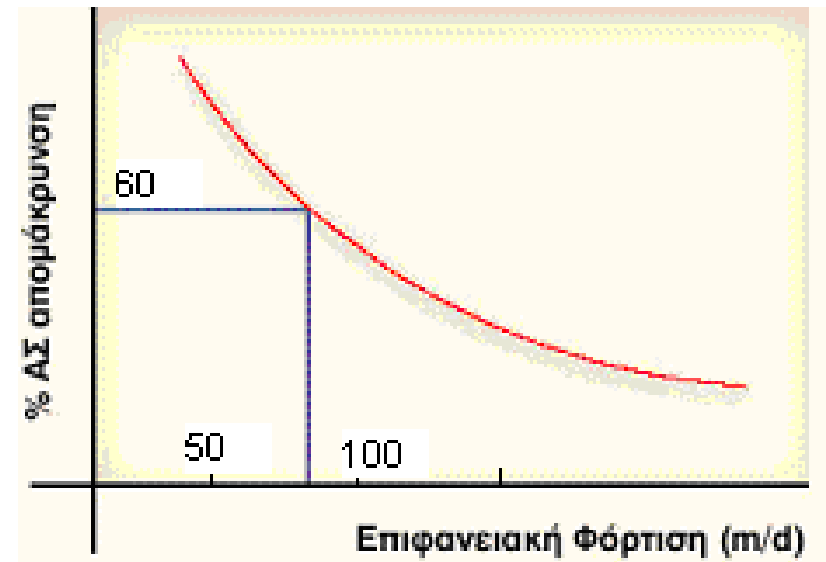
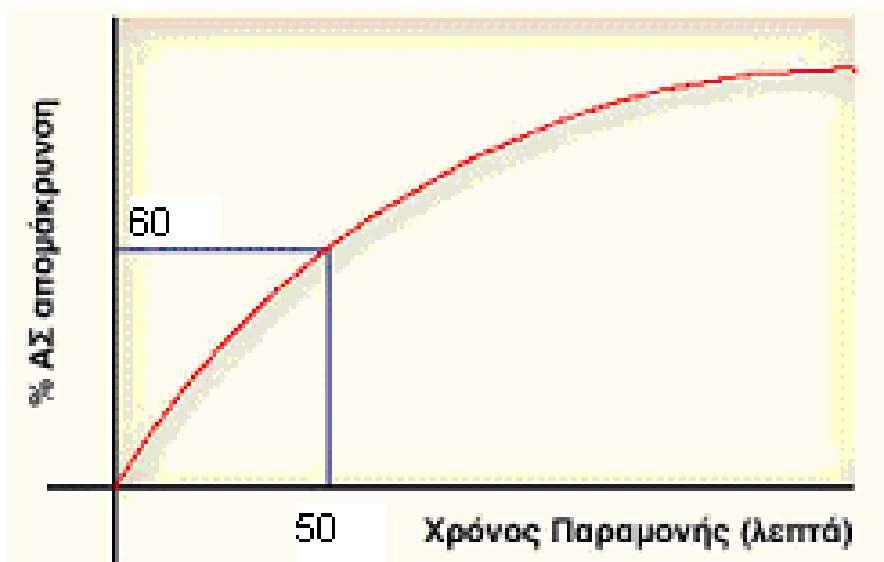


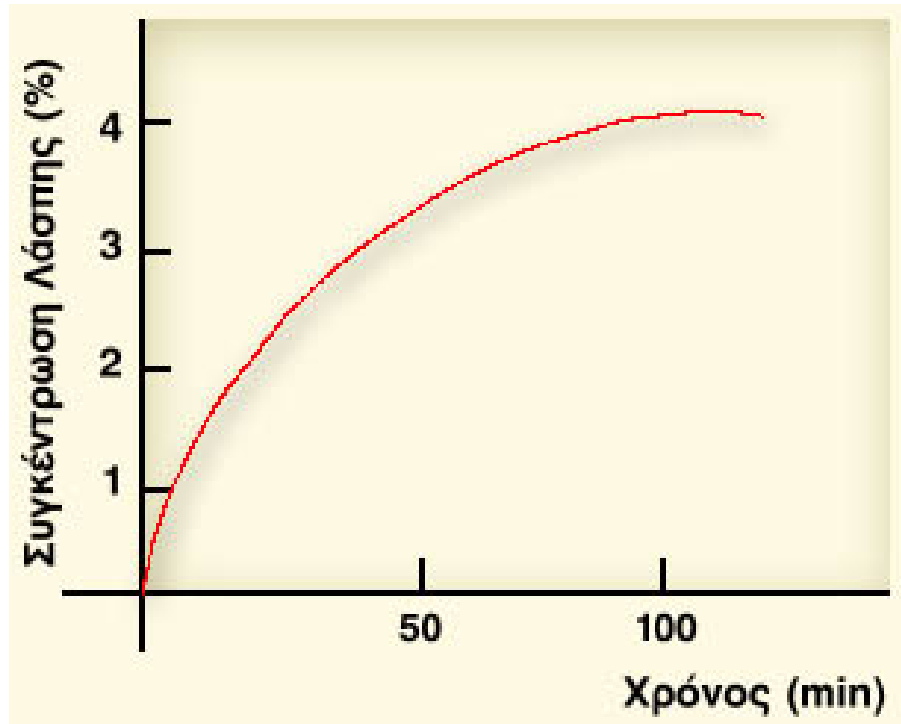
Τι μπορούμε να υπολογίσουμε από τα παραπάνω διαγράμματα;

Από τα δύο διαγράμματα, μπορούμε να υπολογίσουμε **για κάποια επιθυμητή απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών**,

- τον απαιτούμενο **χρόνο παραμονής** (t_c) και
- την αντίστοιχη **επιφανειακή φόρτιση**,
- και άρα και την **ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια**.
 - $A = W L$
 - $A = \pi r^2$

Για ασφάλεια λαμβάνουμε υπόψη μας και έναν **συντελεστή ασφαλείας** 1,25 - 1,75.





Τέλος, προσδιορίζονται και οι **συγκεντρώσεις της λάσπης** συναρτήσει του **χρόνου παραμονής** με βάση το διάγραμμα.

Η **συγκέντρωση λάσπης** μετριέται **πειραματικά** με δειγματοληψία στον **πυθμένα της στήλης καθίζησης**.

Υπολογισμός της **Μάζας των Αιωρούμενων Στερεών της Λάσπης** και της **Παροχής της**.

- Η **Μάζα** υπολογίζεται με βάση τα **εισρέοντα** και το **επιθυμητό ποσοστό απομάκρυνσής** τους και
- η παροχή Q_λ (σε m^3/d) από την σχέση:

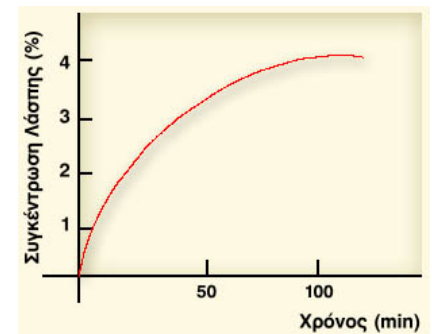
$$Q_\lambda = \frac{M}{1000 \cdot c_\lambda \cdot s}$$

όπου:

c_λ : η συγκέντρωση στερεών της ιλύος (από το **πειραματικό** διάγραμμα του προηγούμενου Σχήματος)

M : η μάζα των απομακρυνόμενων στερεών, kg/d

s : η ειδική βαρύτητα της ιλύος (τυπικά 1,02)



Όταν δεν έχουμε Πειραματικά Δεδομένα

Ελλείψει πειραματικών δεδομένων ο σχεδιασμός γίνεται με:

- Χρόνο παραμονής: **1,5 - 2,5 h** και
- Επιφανειακή φόρτιση: **80-120 m³/m²d** για την μέγιστη παροχή και **32-48 m³/m²d** για την μέση παροχή.



Από αυτά υπολογίζεται το **εμβαδόν** και το **βάθος**.

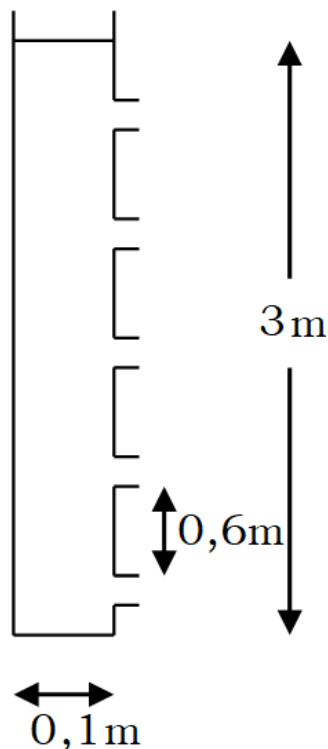
Το βάθος πρέπει να είναι **τουλάχιστον 2,0 m** για αποφυγή προβλημάτων επαναιώρησης όταν έχει αέρα. Συνήθως (3,0 - 4,5 m)

Παράδειγμα 1 Πρωτοβάθμιας Καθίζησης

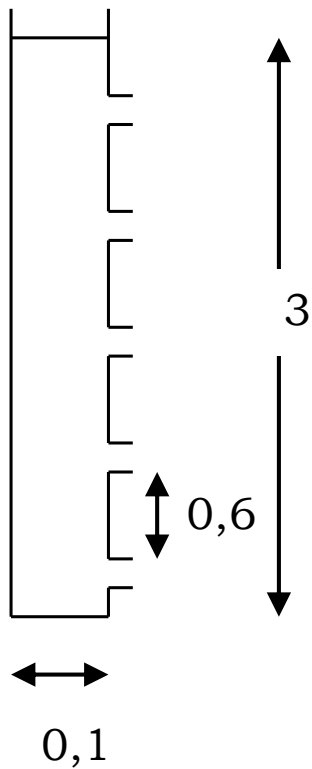
Πειραματικά δεδομένα πρωτοβάθμιας καθίζησης αποβλήτου έχουν συλλεχθεί με τη βοήθεια της εικονιζόμενης διάταξης. Το ύψος του κυλίνδρου καθίζησης είναι 3 m. Το απόβλητο περιέχει αρχικά **300 mg SS/L**.

Οι πειραματικές μετρήσεις σε **mg SS/L** στα διάφορα σημεία δειγματοληψίας κατά τις διάφορες χρονικές στιγμές είναι:

Χρόνος, min	0,6 m	1,2 m	1,8 m	2,4 m	3,0 m
10	204	234	246	255	261
20	153	189	210	219	240
30	117	162	189	195	207
40	105	144	156	174	189
50	96	114	141	153	165
60	75	102	120	135	147
70	54	90	111	120	132
80	42	72	102	108	117
100	24	45	66	84	99



Να κατασκευασθούν τα διαγράμματα απομάκρυνσης στερεών συναρτήσει της επιφανειακής φόρτισης και του χρόνου παραμονής.



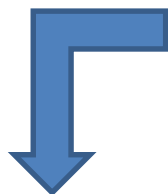
Υπολογίζονται οι % απομακρύνσεις ως $(1-X/X_0) \times 100$ με $X_0=300 \text{ mg SS/L}$

Χρόνος, min	0,6 m	1,2 m	1,8 m	2,4 m	3,0 m
10	32	22	18	15	13
20	49	37	30	27	20
30	61	46	37	35	31
40	65	52	48	42	37
50	68	62	53	49	45
60	75	66	60	55	51
70	82	70	63	60	56
80	86	76	66	64	61
100	92	85	78	72	67

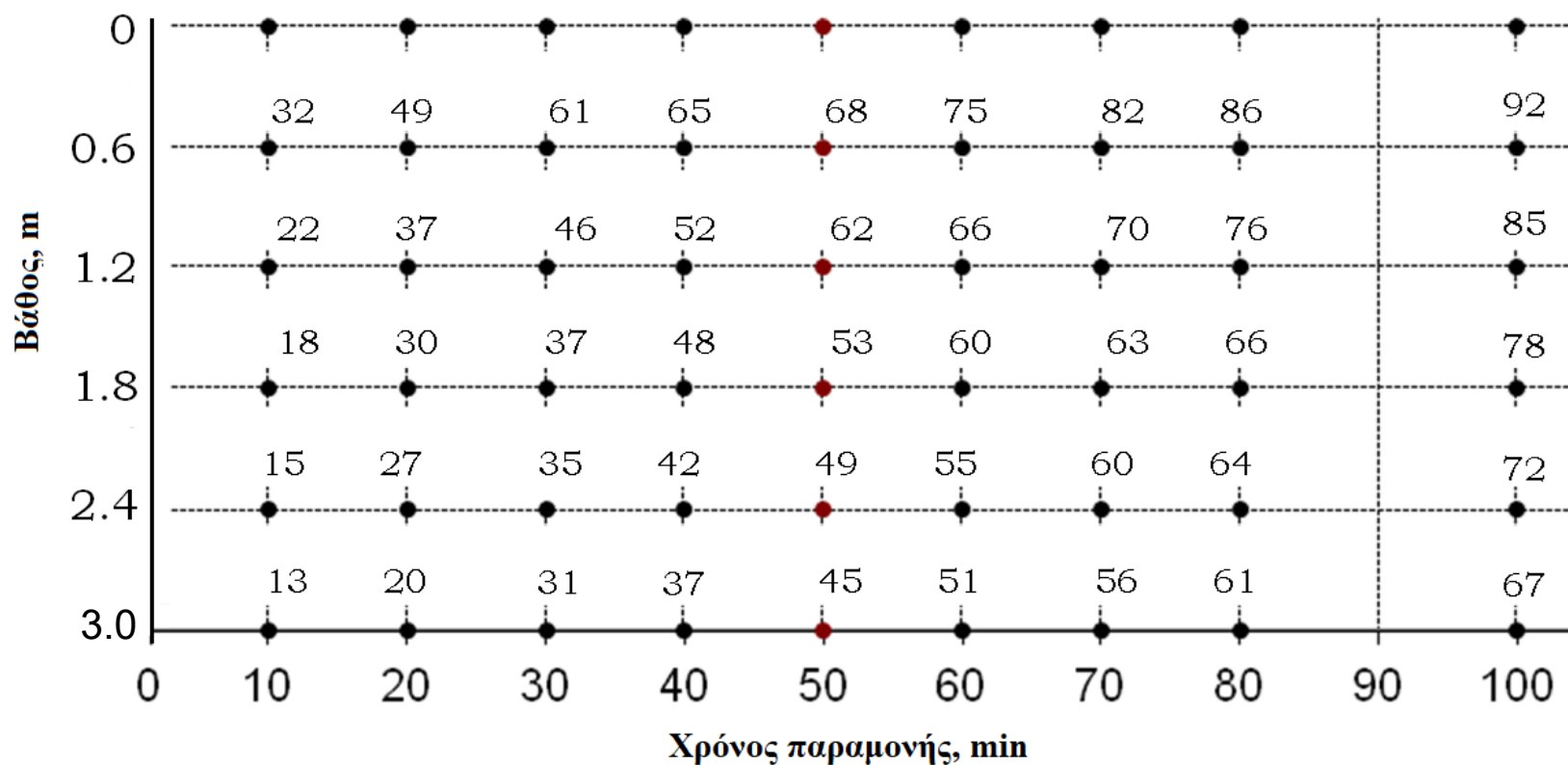
$$\% \text{απομακρυνσης } TSS = \left(1 - \frac{X}{X_0} \right) * 100$$

Μετράμε τη συγκέντρωση των σωματιδίων (X_{ij}) και προσδιορίζουμε το **απομακρυνόμενο ποσοστό** των σωματιδίων ($x_{ij} = 1 - X_{ij}/X_0$)

Βάζω τον χρόνο παραμονής
στον άξονα των x και το
βάθος του κυλίνδρου στον
άξονα των y

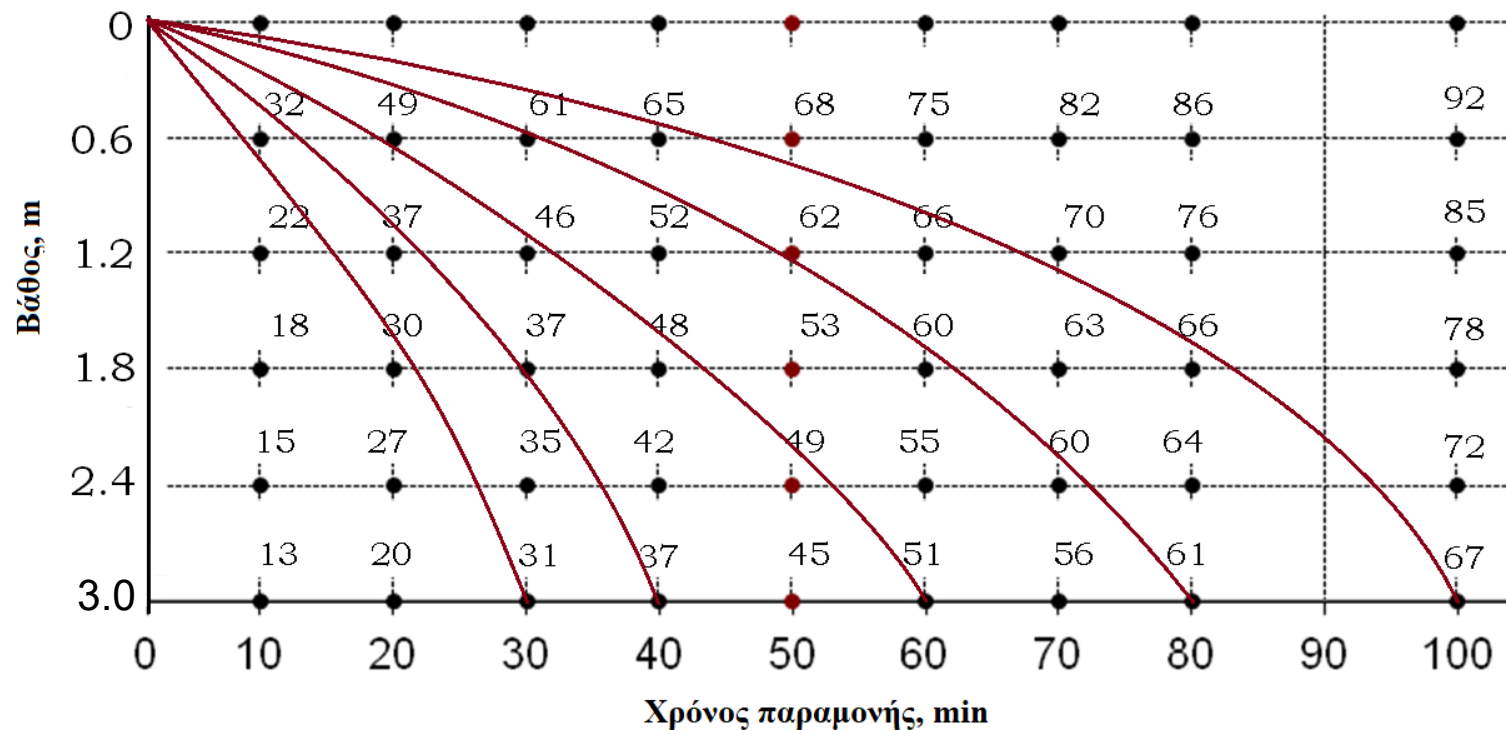


Χρόνος, min	0,6 m	1,2 m	1,8 m	2,4 m	3,0 m
10	32	22	18	15	13
20	49	37	30	27	20
30	61	46	37	35	31
40	65	52	48	42	37
50	68	62	53	49	45
60	75	66	60	55	51
70	82	70	63	60	56
80	86	76	66	64	61
100	92	85	78	72	67



Χαράζουμε τις «καμπύλες ίσης απομάκρυνσης», ενώνοντας τα σημεία που αντιστοιχούν σε ίση απομάκρυνση για τα διάφορα σημεία δειγματοληψίας, έστω και κατά προσέγγιση.

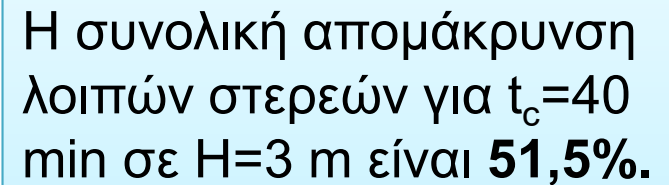
Οι καμπύλες ίσης απομάκρυνσης
ξεκινούν όλες από το σημείο
[βάθος 0, απομάκρυνση 0].



Τότε η επιφανειακή φόρτιση θα είναι:

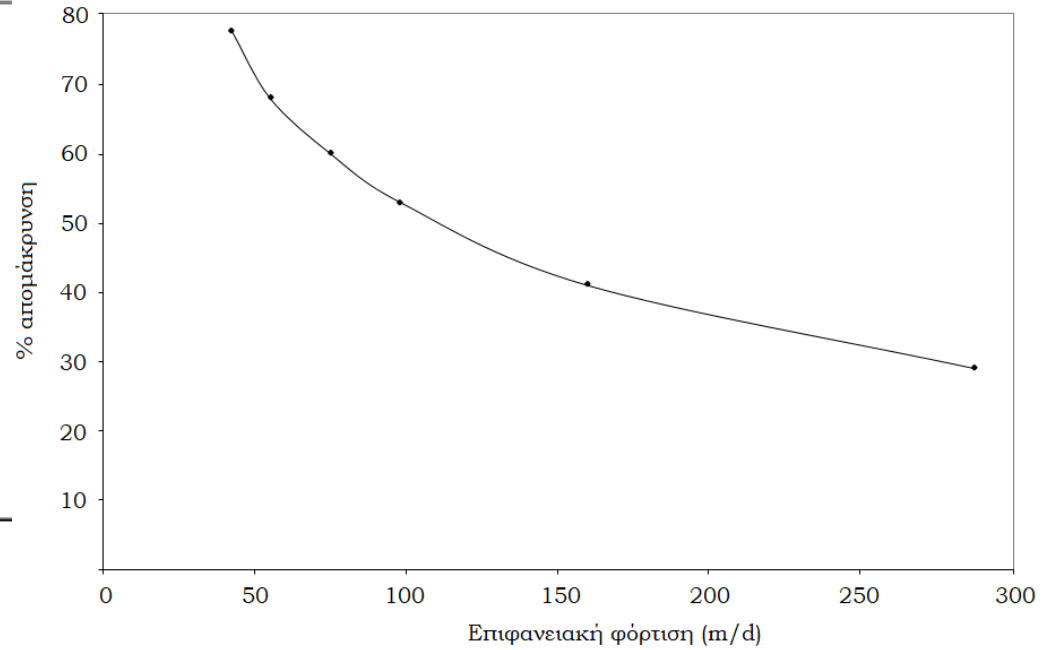
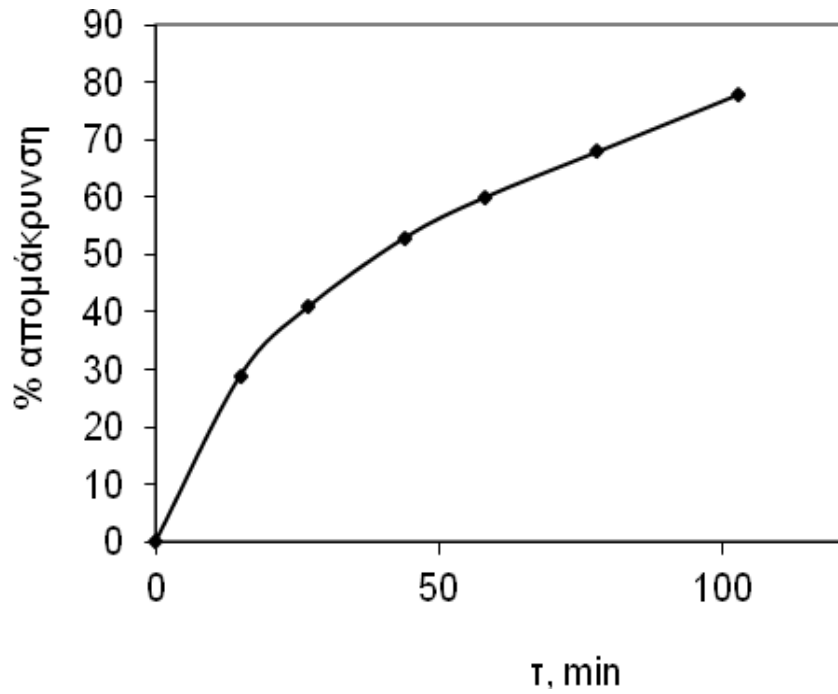
$$R, \% = \sum_{h=1}^n \left(\frac{\Delta h_n}{H} \right) \left(\frac{R_n + R_{n+1}}{2} \right)$$

$$R, \% = \frac{\Delta h_1}{h_5} * \frac{R_1 + R_2}{2} + \frac{\Delta h_2}{h_5} * \frac{R_2 + R_3}{2} + \frac{\Delta h_3}{h_5} * \frac{R_3 + R_4}{2} + \frac{\Delta h_4}{h_5} * \frac{R_4 + R_5}{2} + \frac{\Delta h_5}{h_5} * \frac{R_5 + R_6}{2} = 51,5\%$$



Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για άλλα t_c (και συνεπώς αντίστοιχες επιφανειακές φορτίσεις εφόσον πρόκειται για την ίδια δεξαμενή).

% απομάκρυνση	τ , min	v_s , $m^3/m^2.d$
29	15	288
41	27	160
52	40	108
60	58	75
68	78	55
78	103	42



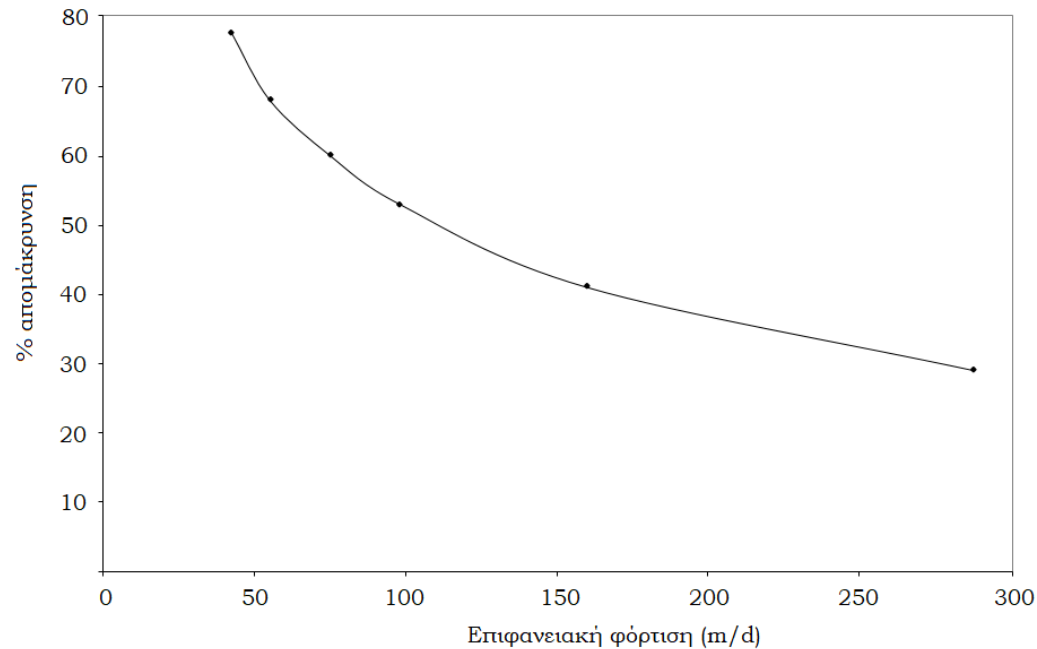
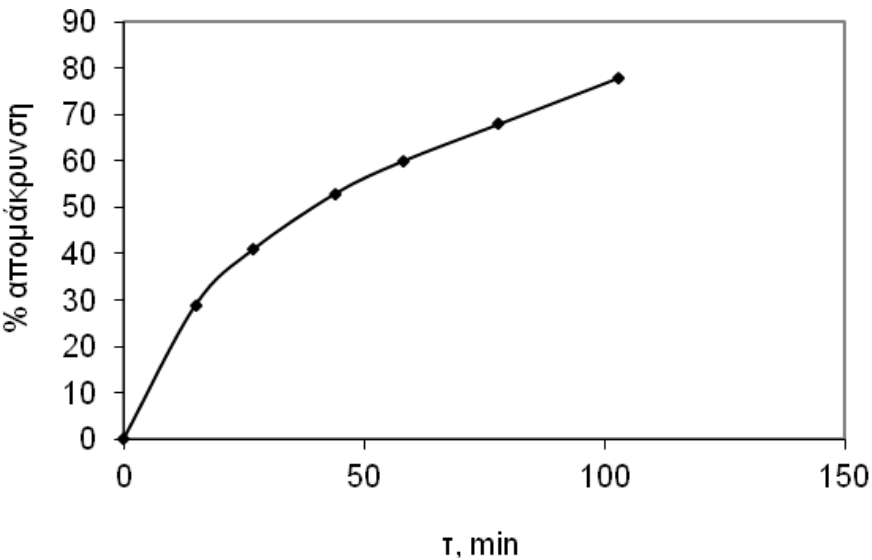
Παράδειγμα 2. Πρωτοβάθμιας Καθίζησης

Για το απόβλητο της προηγούμενης άσκησης να **σχεδιασθεί** Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (κυλινδρική) για απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών κατά **60%**, όταν η παροχή είναι **4.500 m³/d** και η αρχική συγκέντρωση αιωρούμενων είναι **300 mg/L**.

Να υπολογισθεί επίσης η **παροχή της παραγόμενης λάσπης** εάν υποθέσουμε **πυκνότητα λάσπης ~ 1,02 kg/L** και **περιεκτικότητα 4% σε στερεά**.

(α) Από τα πειραματικά διαγράμματα βρίσκουμε:

- επιφανειακή φόρτιση = $75 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$,
- χρόνος παραμονής t_c : 58 min



Β. Για κυκλική δεξαμενή με μέγιστη παροχή $Q=4.500 \text{ m}^3/\text{d}$ έχουμε:

$$v_c = \frac{Q}{A} \Rightarrow A = \frac{Q}{v_c} = \frac{4500 \text{ m}^3 / \text{d}}{75 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ d}} = 60 \text{ m}^2$$

Με συντελεστή ασφαλείας 1,75
 $A=60 \cdot 1,75=105 \text{ m}^2$

που ισοδυναμεί σε κυκλική επιφάνεια με διάμετρο:

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \approx 11,6 \text{ m}$$

Δεδομένης της επιφάνειας κάτοψης βρίσκουμε έπειτα το **βάθος** μέσω του **όγκου** της δεξαμενής:

$$V = Q \cdot t_c = 4500 \text{ m}^3 / \text{d} \times 58 \text{ min} = 181,3 \text{ m}^3$$

Με συντελεστή ασφαλείας 1,75
 $V=181,3 \cdot 1,75=317,2 \text{ m}^3$

Το βάθος είναι:

$$H = \frac{V}{A} = \frac{317,2 \text{ m}^3}{105 \text{ m}^2} = 3 \text{ m}$$

(γ) Υπολογίζεται η φόρτιση του υπερχειλιστή:

$$\text{Περίμετρος κύκλου} = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 11,6 = 36,4 \text{ m}$$

$$\text{Φόρτιση} = \frac{4.500 \text{ m}^3 / d}{36,4 \text{ m}} = 124 \text{ m}^3 / \text{m} / d$$

(δ) Να υπολογισθεί επίσης η παροχή της παραγόμενης λάσπης εάν υποθέσουμε πυκνότητα λάσπης ~ 1,02 kg/L και περιεκτικότητα 4% σε στερεά.

Υπολογίζεται πρώτα η λάσπη που απομακρύνεται σε kg/d.

ΑΣ=300 mg/L στην εισροή & απομάκρυνση ΑΣ 60%

$$M = 0,6 * 300 \frac{mg}{L} * 4500 m^3 / d = 810 \frac{kg}{d}$$

Τότε η παροχή δίνεται από:

$$Q_{\lambda} = \frac{M}{1000c_{\lambda} \cdot s}$$

c_{λ} : η συγκέντρωση στερεών της ιλύος
M: η μάζα των απομακρυνόμενων στερεών, kg/d
s: η ειδική βαρύτητα της ιλύος

$$Q_{\lambda} = \frac{810 kg_{ss} / d}{0,04 kg_{ss} / kg \times 1000 L / m^3 \times 1,02 kg / L} = 19,9 m^3 / d$$

Το ισοζύγιο μάζας τότε είναι:

