

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

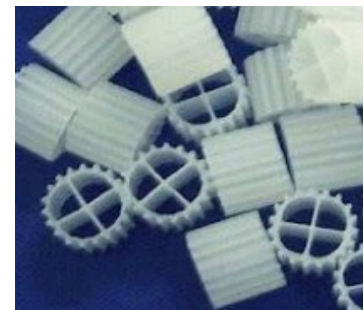
**Διάλεξη 6: Εναλλακτική δευτεροβάθμια
επεξεργασία**

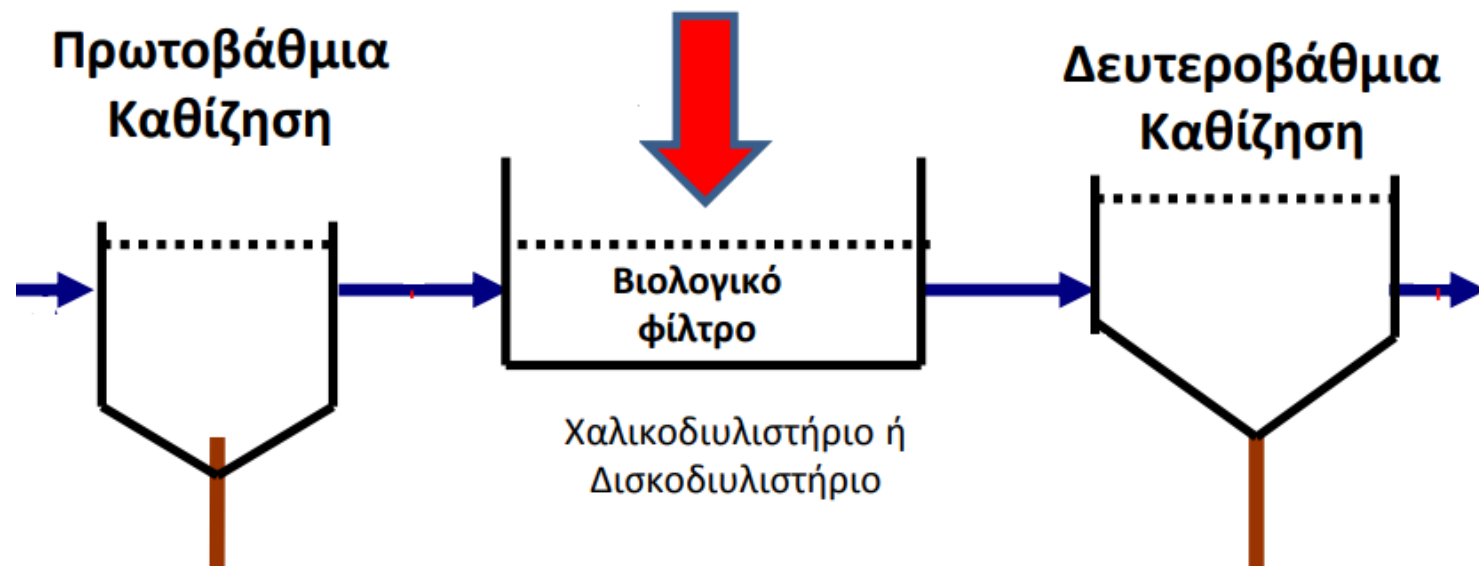
**Ετερογενείς βιολογικές
διεργασίες - Βιολογικά φίλτρα**

Ανέστης Βλυσίδης
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

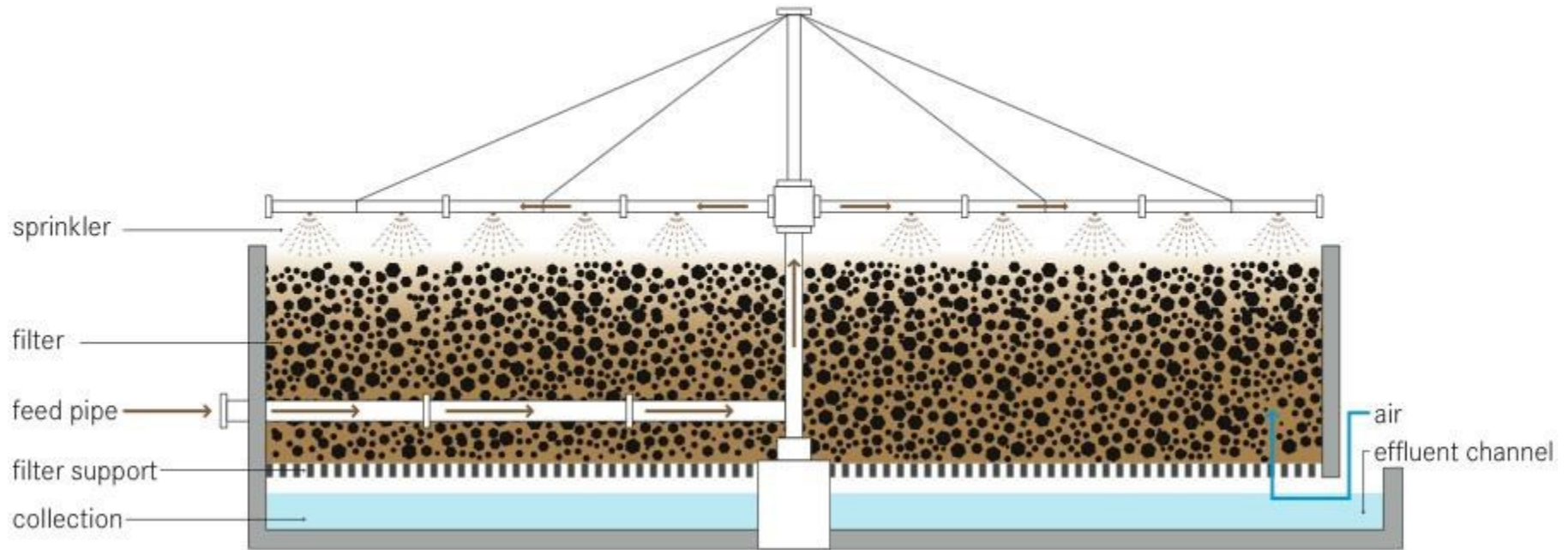
Εισαγωγή

- Μειονέκτημα απλού CSTR
 - $SRT \sim HRT$
 - Πολύ μεγάλο V για να εξασφαλίσουμε αποδοτικές βιοδιεργασίες και $D < D_{wo}$
- Τρόπος αντιμετώπισης σε διεργασίες E.I.
 - Χρήση $\Delta\Delta K \rightarrow$ ανακύκλωση λάσπης στην ΔA
 - Μεγάλα SRT και μικρά HRT
 - Μειώνοντας το V των βιοαντιδραστήρων
- Εναλλακτική λύση $\rightarrow$ χρήση πληρωτικού υλικού (ανάπτυξη βιοφίλμ)
 - Χαλικοδιυλιστήρια
 - Βιοδίσκοι
 - Βιοαντιδραστήρες μεμβράνης (MBR)

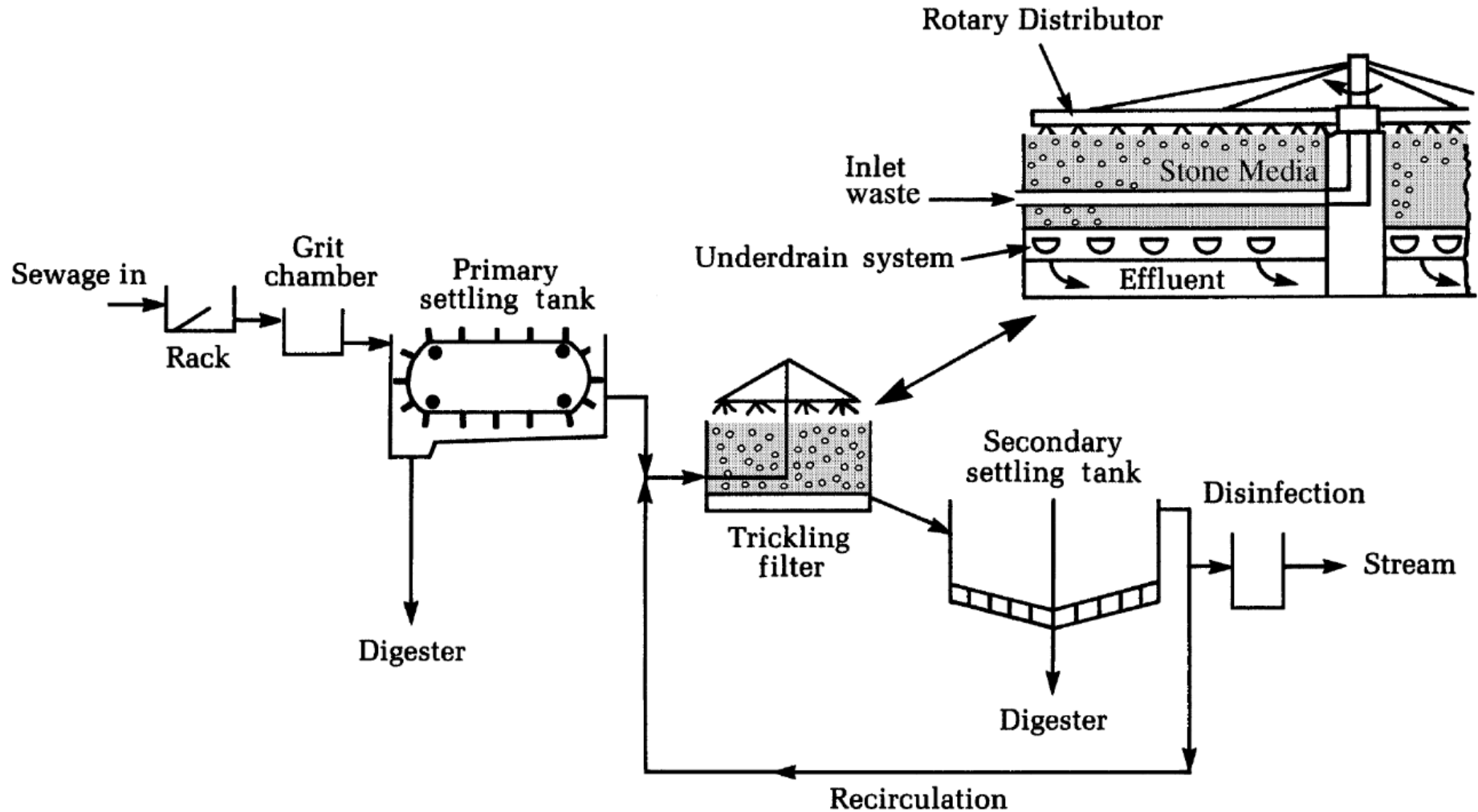




Χαλικοδιυλιστήρια (trickling filters)



Βιόφιλτρο με ανακυκλοφορία



Χαλικοδιϋλιστήριο

Το πρώτο λειτούργησε στην Αγγλία το 1893.

Το πληρωτικό υλικό είναι μεγέθους 25-100 mm. (χαλίκι ή πλαστικό)

Η ταχύτητα περιστροφής του διανομέα είναι **ανάλογη της παροχής Q** .

Το βάθος της δεξαμενής κυμαίνεται από 0,9 έως 2,5 m (τυπικά 1,8 m).

Ο αερισμός της δεξαμενής γίνεται **με φυσικό τρόπο** από **ρεύματα αέρος** που δημιουργούνται από την **θερμοκρασιακή διαφορά**:

- Όταν **T πιο χαμηλή** στο χαλικοδιϋλιστήριο απ' ότι στην ατμόσφαιρα ο **αέρας κινείται προς τα κάτω**

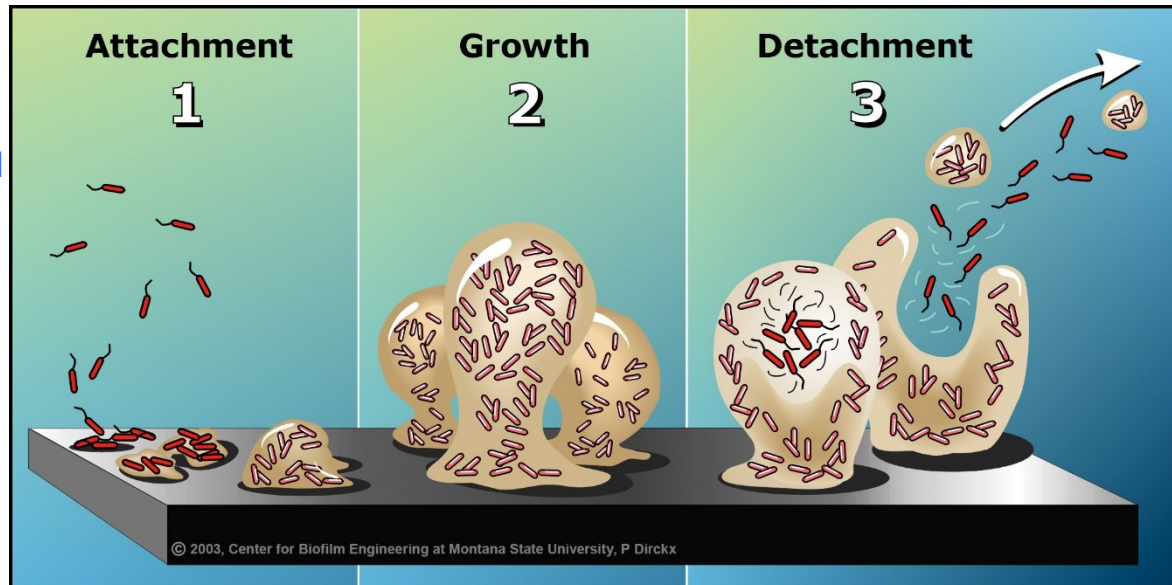
-Όταν **T πιο υψηλή** στο χαλικοδιϋλιστήριο απ' ότι στην ατμόσφαιρα ο **αέρας κινείται προς τα άνω**.

Ο βυθός, όπου γίνεται **αποστράγγιση**, αποτελείται από **κυβόλιθους**, οι οποίοι δίνουν κάλυψη το πολύ κατά 85% για να επιτρέπουν κυκλοφορία του αέρα.

Μηχανισμός

- **Προσκόλληση** κυττάρων στο πληρωτικό υλικό με έκκριση **EPS**.
- Καθώς αναπτύσσονται οι μ/ο καταναλώνουν το **οργανικό φορτίο** που διέρχεται με το ΥΑ και το **οξυγόνο**, παράγοντας **διοξείδιο του άνθρακα**.
- Βαθμηδόν το στρώμα της βιομάζας **αυξάνει** → ανάπτυξη βιοφίλμ
- Μετά από κάποιο πάχος δημιουργούνται **εσωτερικά αναερόβιες συνθήκες** και αυξάνει αισθητά ή **ενδογενής αναπνοή** των μ/ων που βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού λόγω περιορισμένης μεταφοράς θρεπτικών.

- Αυτό συμβαίνει έως ότου το στρώμα της βιομάζας **αποκολληθεί** μιας και **χάνεται η προσκολλητική** ικανότητα των μικροβίων (φαινόμενο αποκόλλησης)
- Ακολούθως, αρχίζει να δημιουργείται **νέο στρώμα** στο σωμάτιο αυτό κ.ο.κ.

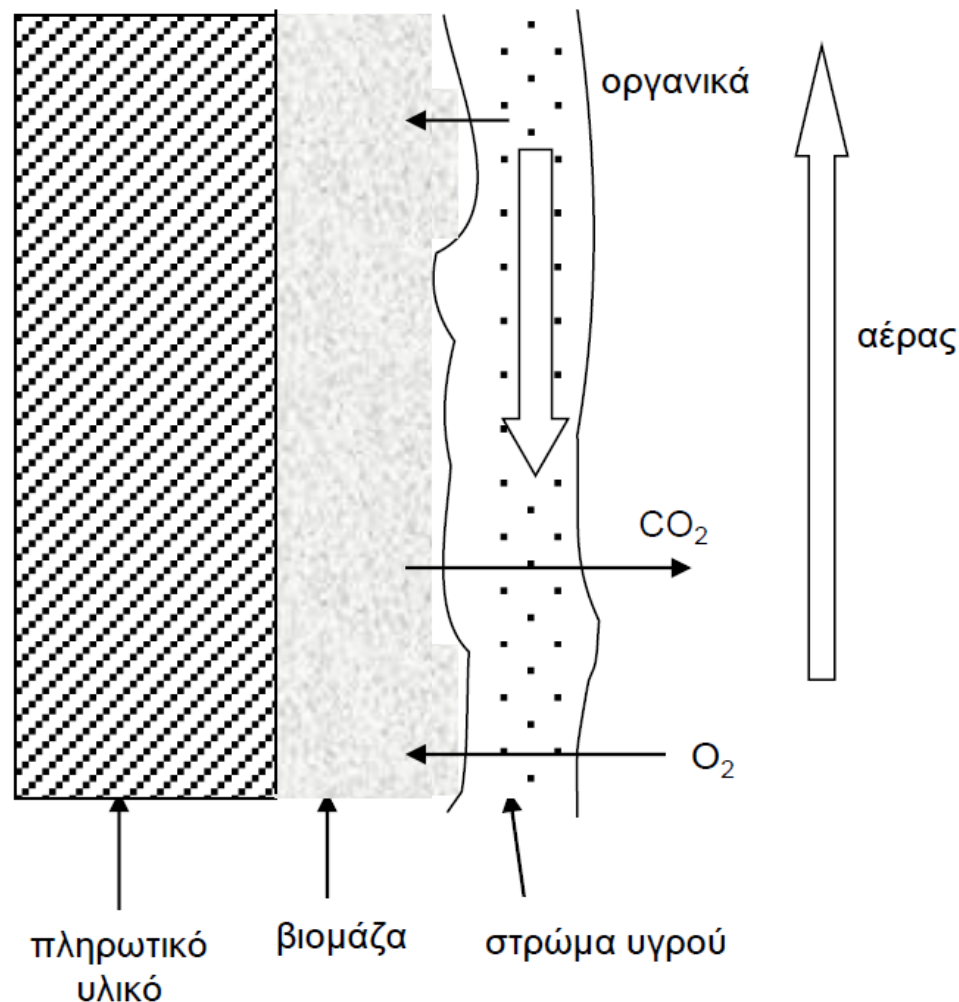


Μέγεθος Πληρωτικού Υλικού (1)

Ο ρόλος του πληρωτικού υλικού είναι ότι ουσιαστικά παρέχει αυξημένη **επιφάνεια προσκόλλησης**.



- Μεγάλης ειδικής επιφάνειας (m^2/m^3 , m^2/g)
- Χαμηλού ειδικού βάρους
- **Ειδικής διαμόρφωσης**, ώστε να μην παγιδεύονται εύκολα στερεά στα διάκενα (κίνδυνος **φραγμού**) και να εξασφαλίζεται μεγάλος χρόνος παραμονής του υγρού



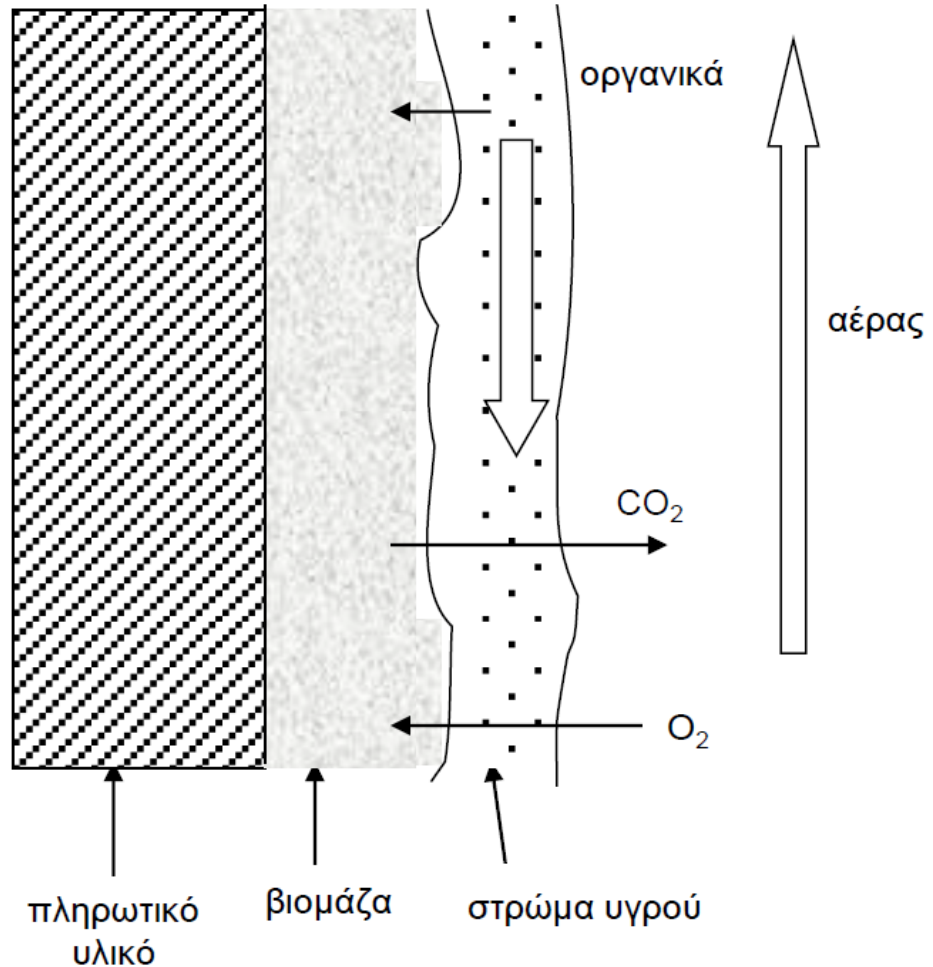
Πολύ μικρά σωμάτια σημαίνει μικρό συνολικό όγκο διάκενων για τη ροή του υγρού, και επομένως κίνδυνο **φραγμού**.

Μέγεθος Πληρωτικού Υλικού (2)

παρεμποδιστικός παράγοντας ανάπτυξης;

- Οι διεργασίες προσκολλημένης ανάπτυξης συνήθως **περιορίζονται από τη διάχυση**.
- Βαθμίδες συγκέντρωσης υποστρωμάτων στο βιοφίλμ → βαθμίδες ανάπτυξης μ/ο μέσα στο βιοφίλμ.

Biofilms can be as thin as a few cell layers or many inches thick, depending on environmental conditions.

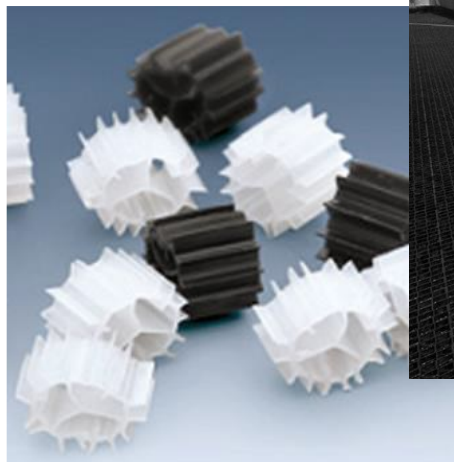


Πληρωτικά υλικά

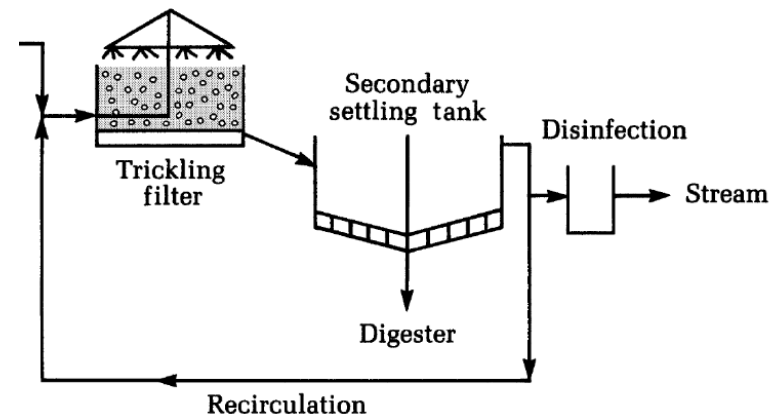
- Χαλίκια μεγέθους 25-65 mm
- Ειδική επιφάνεια 55-70 m^2/m^3
- 40-50% διάκενα



- Πλαστικά πληρωτικά υλικά
- Ειδική επιφάνεια 900-1000 m^2/m^3
- 85-95% διάκενα



Ανακυκλοφορία



- Γίνεται είτε απ' ευθείας από την απορροή του χαλικοδιϋλιστηρίου είτε από την **απορροή** της δεξαμενής καθίζησης.

Πλεονεκτήματα ανακυκλοφορίας

- **Μειώνει την ισχύ των υγρών αποβλήτων** και καθιστά το χαλικοδιϋλιστήριο **πιο ικανό** να χειριστεί **αυξομειώσεις** της παροχής και της ισχύος των αποβλήτων (**Q & BOD**).

Τα χαλικοδιυλιστήρια **ταξινομούνται** σύμφωνα με τις υδραυλικές & οργανικές φορτίσεις κάτω από τις οποίες μπορούν να έχουν ομαλή λειτουργία.

(α) Χαλικοδιυλιστήρια χαμηλής φόρτισης (Βραδυ-χαλικοδιυλιστήρια)

- Η υδραυλική φόρτιση στα φίλτρα αυτά κυμαίνεται από $1,2$ έως $3,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ και η οργανική φόρτιση (BAO_5) από $0,08$ έως $0,4 \text{ kg}/\text{m}^3\text{d}$.
- Το πληρωτικό υλικό είναι **χαλίκι**.
- Μόνο τα πρώτα στρώματα (από την κορυφή) $0,6$ έως $1,2 \text{ m}$ του χαλικιού έχουν ουσιαστικά στρώμα βιοφίλμ
- Στα χαμηλότερα τμήματα του φίλτρου μπορούν να αναπτυχθούν **αυτότροφα βακτήρια** τα οποία οξειδώνουν την **αμμωνία** σε **νιτρώδη** και **νιτρικά**.
- Η δημιουργία **δυσάρεστων οσμών** είναι σύνηθες πρόβλημα σε αυτά τα φίλτρα.

(β) Χαλικοδιυλιστήρια ενδιάμεσης φόρτισης

- Η **υδραυλική φόρτιση** κυμαίνεται από 3,5 έως 9,4 m³/m²d και η **οργανική φόρτιση** από 0,24 έως 0,48 kg BAO₅ /m³d
- Το πληρωτικό υλικό είναι και σ' αυτή την περίπτωση **χαλίκι**.
- Η χρήση **ανακυκλοφορίας** επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερης οργανικής φόρτισης.

(γ) Χαλικοδιυλιστήρια υψηλής φόρτισης

- Η υδραυλική φόρτιση κυμαίνεται από 9,4 έως 37,6 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ και η οργανική φόρτιση από 0,48 έως 0,96 $\text{kg BAO}_5 / \text{m}^3\text{d}$.
- Το πληρωτικό υλικό σ' αυτά τα φίλτρα είναι **χαλίκι** ή **πλαστικά** υλικά.
- Η **Ανακυκλοφορία** υγρού από την έξοδο της δεξαμενής καθίζησης επιτρέπει στα φίλτρα υψηλής φόρτισης να επιτυγχάνουν **το ίδιο καλή απόδοση** όπως τα φίλτρα χαμηλής και ενδιάμεσης φόρτισης.
- Επίσης, με την ανακυκλοφορία **επαναφέρονται** στο φίλτρο οι **μικροοργανισμοί** που αποκολλήθηκαν, **βελτιώνοντας** έτσι την **απόδοση** του φίλτρου, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούνται οι οσμές.

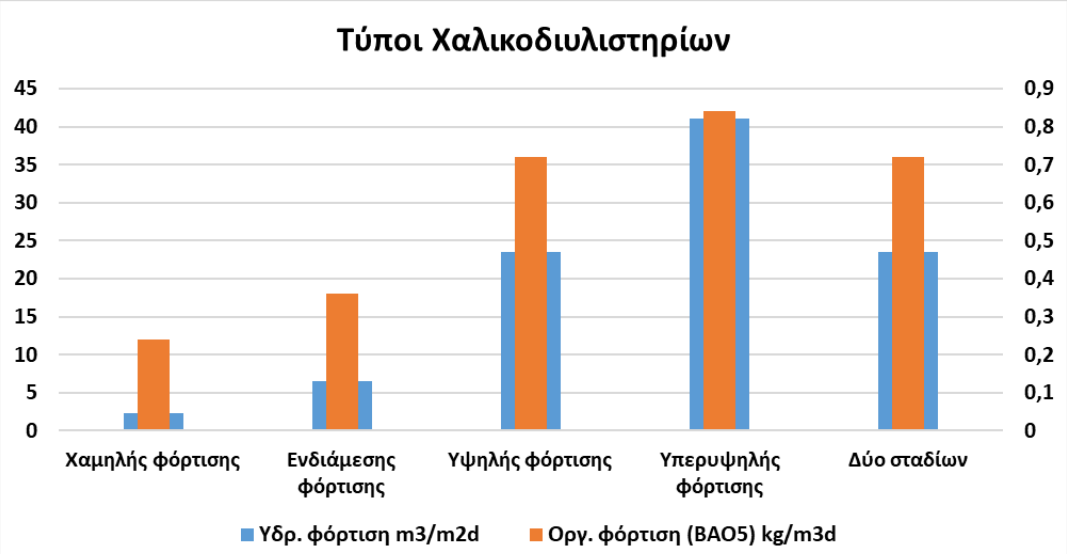
(δ) Χαλικοδιυλιστήρια υπερυψηλής φόρτισης

- Η **υδραυλική φόρτιση** κυμαίνεται από 11,7 έως 70,4 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$ και η **οργανική φόρτιση** από 0,24 έως 1,44 $\text{kg BAO}_5 / \text{m}^3\text{d}$
- Το πληρωτικό υλικό αποτελείται από διάφορα **πλαστικά υλικά**.
- Τα φίλτρα αυτά διαφέρουν από τα φίλτρα υψηλής φόρτισης στο ότι υπόκεινται σε **μεγαλύτερες φορτίσεις** και στο ότι έχουν **μεγαλύτερο βάθος**.
- Η αύξηση του βάθους επιτυγχάνεται με τη χρήση **ελαφρών πλαστικών υλικών**.

(ε) Χαλικοδιυλιστήρια δύο σταδίων

- Έχουν τα χαρακτηριστικά των **φίλτρων υψηλής φόρτισης** ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα **διαυγαστής** για να απομακρύνει (ή να ανακυκλώσει) τα στερεά/λάσπη που εξέρχονται από το πρώτο φίλτρο.
- Χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία **ισχυρού αποβλήτου** και για **νιτροποίηση**.
- Όταν χρησιμοποιούνται για νιτροποίηση, στο πρώτο φίλτρο και στον διαυγαστή γίνεται η **απομάκρυνση του BOD** ενώ στο δεύτερο φίλτρο λαμβάνει χώρα η **νιτροποίηση**.

Κατηγορίες Χαλικοδιυλιστηρίων



Χαλικοδιυλιστήρια	Υδρ. φόρτιση m³/m²d	Οργ. φόρτιση (BAO ₅) kg/m³d	Πληρωτικό υλικό	Οξείδωση αμμωνίας	Ανακυκλ οφορία	Δημιουργία οσμών
Χαμηλής φόρτισης	1,17 - 3,52	0,08 - 0,4	χαλίκι	Ναι	Όχι	Ναι
Ενδιάμεσης φόρτισης	3,52 - 9,39	0,24 - 0,48	χαλίκι	Μερική	Πιθανόν	Πιθανόν
Υψηλής φόρτισης	9,39 - 37,55	0,48 - 0,96	χαλίκι ή πλαστικά υλικά	Όχι	Ναι	Όχι
Υπερυψηλής φόρτισης	11,73 - 70,4	0,24 - 1,44	πλαστικά υλικά	Όχι	Πιθανόν	Όχι
Δύο σταδίων	9,39 - 37,55	0,48 - 0,96	χαλίκι ή πλαστικά υλικά	Ναι	Ναι	Όχι

Σχεδιασμός Χαλικοδιυλιστηρίου

Θεωρώντας επάρκεια οξυγόνου μπορεί να γραφεί το ακόλουθο ισοζύγιο μάζας για ένα διαφορικό πάχος dz , του υγρού στρώματος:

$$\frac{\partial S}{\partial t} dV = Q S - Q \left(S + \frac{\partial S}{\partial z} dz \right) + dz \cdot w r_s$$

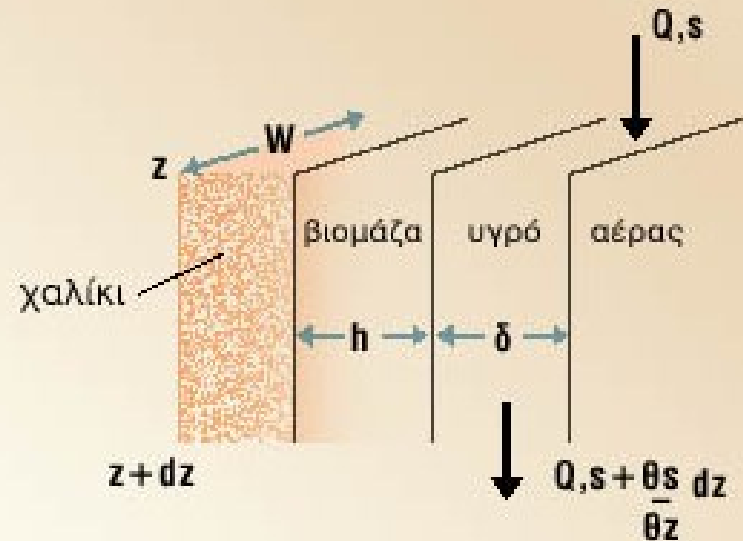
dV είναι ο όγκος του διαφορικού στοιχείου,

w το πλάτος,

Q η παροχή (ογκομετρική) υγρού στο στοιχείο,

r_s ο **ρυθμός** απορροής υποστρώματος προς την βιομάζα (δλδ **αποδόμηση**),

S η μέση συγκέντρωση υποστρώματος στο υγρό στοιχείο.



Το μοντέλο βασίζεται στην θεωρήση όλου του αντιδραστήρα αποτελούμενου από 4 φάσεις.

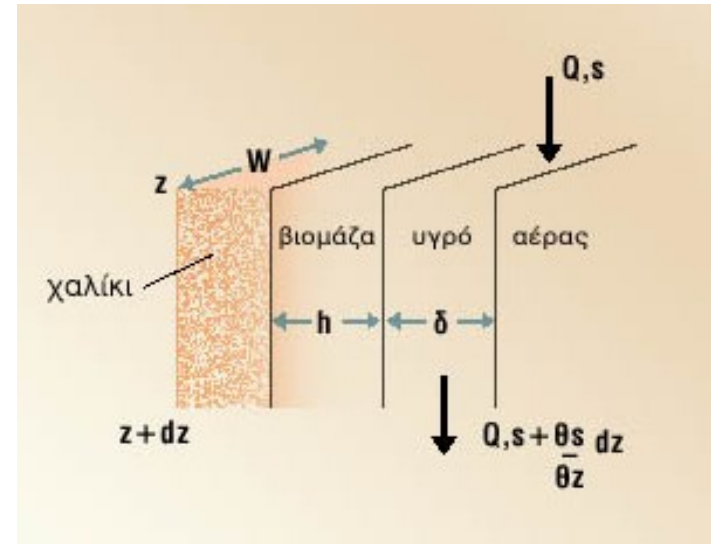
Ο ρυθμός r_s δίνεται με τις πιο πάνω παραδοχές από τη σχέση:

$$r_s = - \frac{E h \mu_{\max} S}{Y(K_s + S)} X$$

- h το **πάχος** του στρώματος της βιομάζας,
- E ο **συντελεστής αποτελεσματικότητας** ($0 < E < 1$) που "διορθώνει" το ρυθμό χρήσης υποστρώματος και θεωρείται ανάλογος της συγκέντρωσης υποστρώματος ($E = fS$)
- X η **συγκέντρωση της βιομάζας** στο στρώμα της βιομάζας.

Θέτοντας $\frac{\mu_{\max} X}{Y} = k_0$ έχουμε:

$$r_s = - \frac{f h k_0 S^2}{K_s + S}$$



Για **μόνιμη κατάσταση** έχουμε:

$$Q \frac{dS}{dz} = - f k_0 h w \frac{S^2}{K_s + S}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} dV = Q S - Q \left(S + \frac{\partial S}{\partial z} dz \right) + dz \cdot w r_s$$

Θεωρώντας ότι η σταθερά K_s είναι **αμελητέα** σε σχέση με την συγκέντρωση υποστρώματος S έχουμε:

$$\frac{dS}{dz} = - \frac{f h k_0 w S}{Q}$$

Η σχέση αυτή μπορεί να **ολοκληρωθεί** με τη οριακή συνθήκη $S(0)=S_i$, όπου S_i η συγκέντρωση του υποστρώματος στην κορυφή (δλδ στην είσοδο) του χαλικοδιύλιστηρίου για να πάρουμε:

$$S(z) = S_i e^{-\left(f h k_0\right) \frac{w z}{Q}}$$

Στην έξοδο $z=L$, η συγκέντρωση S_e θα είναι:

$$S_e = S_i e^{-\left(f h k_0\right) \frac{w L}{Q}}$$

Πρέπει να εκφράσουμε τη σχέση

$$S_e = S_i e^{-(fhk_0) \frac{wL}{Q}}$$

Συναρτήσει της **επιφανειακής φόρτισης** και των **γεωμετρικών χαρακτηριστικών** του χαλικοδιυλιστηρίου.

Αν το πληρωτικό υλικό έχει **ειδική επιφάνεια** S_a και το **κλάσμα των διάκενων** είναι ε και ο **όγκος του φίλτρου** είναι V τότε η **συνολική επιφάνεια** που προσφέρεται για ανάπτυξη των μ/ω ν είναι:

$$S_T = S_a (1 - \varepsilon) V$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση $wL = S_T$

$$S_e = S_i e^{-(fhk_0) \frac{S_a (1 - \varepsilon) V}{Q}}$$

Αν το βιόφιλτρο έχει διατομή **επιφάνειας** A και **βάθος** d , δηλ: $V = Ad$ τότε $\rightarrow$

$$S_e = S_i e^{-(fhk_0) \frac{S_a (1 - \varepsilon) d A}{Q}}$$

Θέτοντας $K = fhk_0 (1 - \varepsilon)$ έχουμε:

$$S_e = S_i e^{-\frac{K d S_a A}{Q}}$$

- Η σχέση αυτή είναι ειδική περίπτωση για $m=n=1$ της εμπειρικής σχέσης που έχει προταθεί από τον **Eckenfelder** (1963):

$$S_e = S_i e^{-K_d S_a^m (A/Q)^n}$$

$$S_e = S_i e^{-\frac{K_d S_a A}{Q}}$$

- Μια εναλλακτική εμπειρική σχέση που έχει προταθεί είναι η:

$$S_e = S_i e^{-K_T S_a^a Q_u^b}$$

όπου $Q_u=Q/V$ είναι η **υδραυλική φόρτιση** και a, b σταθερές που προσδιορίζονται πειραματικά.

- Η χρήση κάποιου μοντέλου για σχεδιασμό απαιτεί τον **πειραματικό προσδιορισμό** της **"σταθεράς"** **K** για το συγκεκριμένο χαλικοδιϋλιστήριο.

$$K=fhk_0(1-\varepsilon)$$

- Η σταθερά αυτή εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του υλικού, αλλά και από τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας (αερισμός, υπόστρωμα κλπ).

Παραδοχές: Μέσο πάχος βιομάζας (δλδ X)

Αν θεωρήσουμε ότι υπάρχει **ανακυκλοφορία** ($Q_r=rQ$), όπως συμβαίνει στην περίπτωση του ταχυχαλικοδιϋλιστηρίου, το S_i πρέπει να αντικατασταθεί με το:

$$S_0 = \frac{S_i + rS_e}{1 + r}$$

Προκύπτει από απλό ισοζύγιο με την παραδοχή ότι δεν απομακρύνεται BOD στην ΔΚ.

Τότε:

$$S_e = \frac{S_i + rS_e}{1 + r} e^{-\frac{KdS_a A}{(1+r)Q}}$$

$$S_e = S_i e^{-\frac{KdS_a A}{Q}}$$

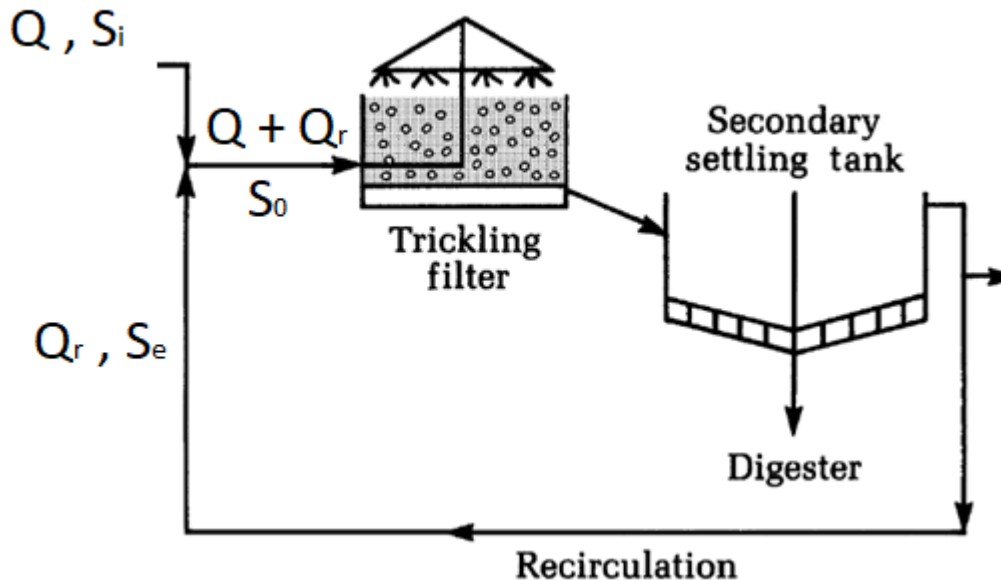
Λύνοντας ως προς S_e

$$S_e = \frac{S_i}{e^{\frac{KdS_a A}{Q(1+r)}} + r \left(e^{\frac{KdS_a A}{Q(1+r)}} - 1 \right)}$$

$$QS_i + Q_r S_e = (Q + Q_r)S_0$$

$$Q_r = rQ$$

Προκύπτει από απλό ισοζύγιο με την παραδοχή ότι δεν απομακρύνεται BOD στην ΔΚ.



$$S_0 = \frac{S_i + rS_e}{1 + r}$$

S_i : το φορτίο του αποβλήτου (mg-BOD/L)

S_0 : το φορτίο στην είσοδο του χαλικοδιυλιστηρίου

S_e : το φορτίο στην έξοδο του χαλικοδιυλιστηρίου

Διαδικασία Σχεδιασμού (1)

Τυπικά δίνονται:

- η παροχή Q
- το οργανικό φορτίο εισροής S_i
- η απαιτούμενη απομάκρυνση S_e

Απαιτείται:

- η διαστασιολόγηση του χαλικοδιϋλιστηρίου (βάθος d , επιφάνεια A)
- ο λόγος ανακυκλοφορίας r

Διαδικασία Σχεδιασμού (2)

(α) Επιλέγεται το **υλικό** των σωματιδίων και το **μέγεθός** τους

(β) Γίνεται **πειραματική μελέτη** πιλοτικής κλίμακας για προσδιορισμό της **σταθεράς K**.

$$K = fhk_0(1-\varepsilon)$$

(γ) Επιλέγεται το **βάθος** του φίλτρου **d** (τυπικά 1,8 m) και ο **λόγος ανακυκλοφορίας r** (0,75-2).

(δ) Υπολογίζεται η απαιτούμενη **επιφάνεια A** από την σχέση:

$$S_e = \frac{S_i + rS_e}{1 + r} e^{-\frac{KdS_aA}{(1+r)Q}}$$

(ε) Υπολογίζονται και ελέγχονται οι φορτίσεις:

(i) Υδραυλική φόρτιση $q = Q(1+r)/A$

(ii) Οργανική φόρτιση $\varphi = QS_i/V$

Διαδικασία Σχεδιασμού (3)

Για ταχυ-χαλικοδιύλιστήριο πρέπει:

- η Υδραυλική Φόρτιση **q** να είναι μεταξύ **9,4 – 28,0 m³/m²d**
- η Οργανική Φόρτιση **φ** να είναι μεταξύ **0,4 - 1,0 kgBAO₅/m³d**

Αν χρειασθεί, αυξάνεται η **επιφάνεια A** για να βρεθούν αυτά τα μεγέθη μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Τέλος, υπάρχουν περιορισμοί στο εμβαδόν της διατομής που πηγάζουν από το ότι στην αγορά υπάρχουν **περιστρεφόμενοι** **διανομείς μήκους 6-60 m**

Παράδειγμα

Θέλουμε να κατασκευάσουμε χαλικοδιυλιστήριο υψηλής φόρτισης που να χειρίζεται $10000 \text{ m}^3/\text{d}$, με υγρά απόβλητα $\text{BAO}_5 = 500 \text{ mg/L}$

Οι προδιαγραφές είναι 30 mg/L

Πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε χαλίκι με **ειδική επιφάνεια** = $60 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Η **σταθερά K** έχει προσδιοριστεί από πειράματα σε μία πιλοτική εγκατάσταση και είναι $0,13 \text{ m/d}$

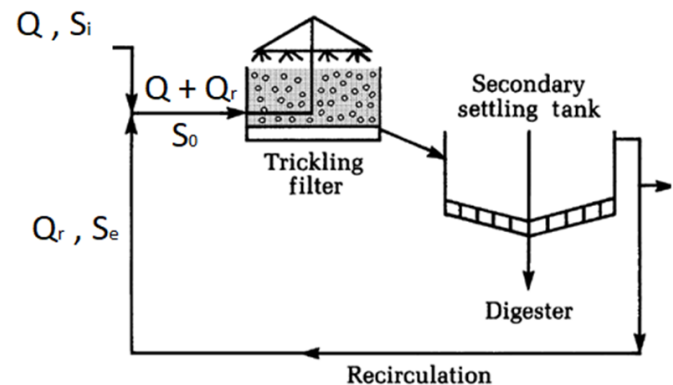
1. Επιλέγουμε $d=2 \text{ m}$, $r=1$
2. Η σχέση για το S_e τότε δίνει:

$$30 = \frac{500}{2 e^{\frac{0,13 \times 60 \times 2 A}{10.000 \times 2}} - 1}$$

εξ' ου $A=2.792 \text{ m}^2$.

Η διάμετρος τότε δίνεται από $D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 59,64 \text{ m}$ (μέσα στα επιτρεπτά όρια 6-60m).

$$S_e = \frac{S_i}{e^{\frac{KdS_a A}{Q(1+r)}} + r \left(e^{\frac{KdS_a A}{Q(1+r)}} - 1 \right)}$$



3. Υδραυλική φόρτιση

q να είναι μεταξύ **9,4 – 28,0 m³/m²d**

$$q = \frac{Q(1+r)}{A} = \frac{10.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 2}{2.792} = 7 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

Η υδραυλική φόρτιση είναι χαμηλή. Αυτό απαιτεί αύξηση της επανακυκλοφορίας, έστω $r=2$. Η σχέση για το S_e τότε δίνει:

$$S_e = \frac{S_i}{e^{\frac{KdS_a A}{Q(1+r)}} + r \left(e^{\frac{KdS_a A}{Q(1+r)}} - 1 \right)}$$

$$30 = \frac{500}{3 e^{\frac{0,13 \times 60 \times 2 \times A}{10.000 \times 3}} - 2}$$

εξ' ου $A=3.516 \text{ m}^2$.

Αυτό το εμβαδόν θα απαιτεί διανομείς μήκους μεγαλύτερους από 60 m.

Άρα θα πρέπει να αυξήσουμε το βάθος της δεξαμενής π.χ. στα 2,5 m. Τότε έχουμε (για $r=2$)

$$30 = \frac{500}{3 e^{\frac{0.13 \times 60 \times 2.5 A}{10.000 \times 3}} - 2}$$

εξ' ου $A=2.812 \text{ m}^2$ ($D=59,8 \text{ m}$).

Η υδραυλική φόρτιση τότε είναι:

$$q = \frac{Q(1+r)}{A}$$

$$q = \frac{10.000 \times 3}{2.812} = 10,67 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{d}}$$

(μέσα στα επιτρεπτά όρια).

Πόση είναι η οργανική φόρτιση;

Η οργανική φόρτιση είναι:

$$\phi = \frac{QS_i}{V} = \frac{10.000(m^3 / d) \times 0,5(kg / m^3)}{2.812(m^2) \times 2,5 (m)} = 0,71 \text{ kg BAO}_5 / m^3 d$$

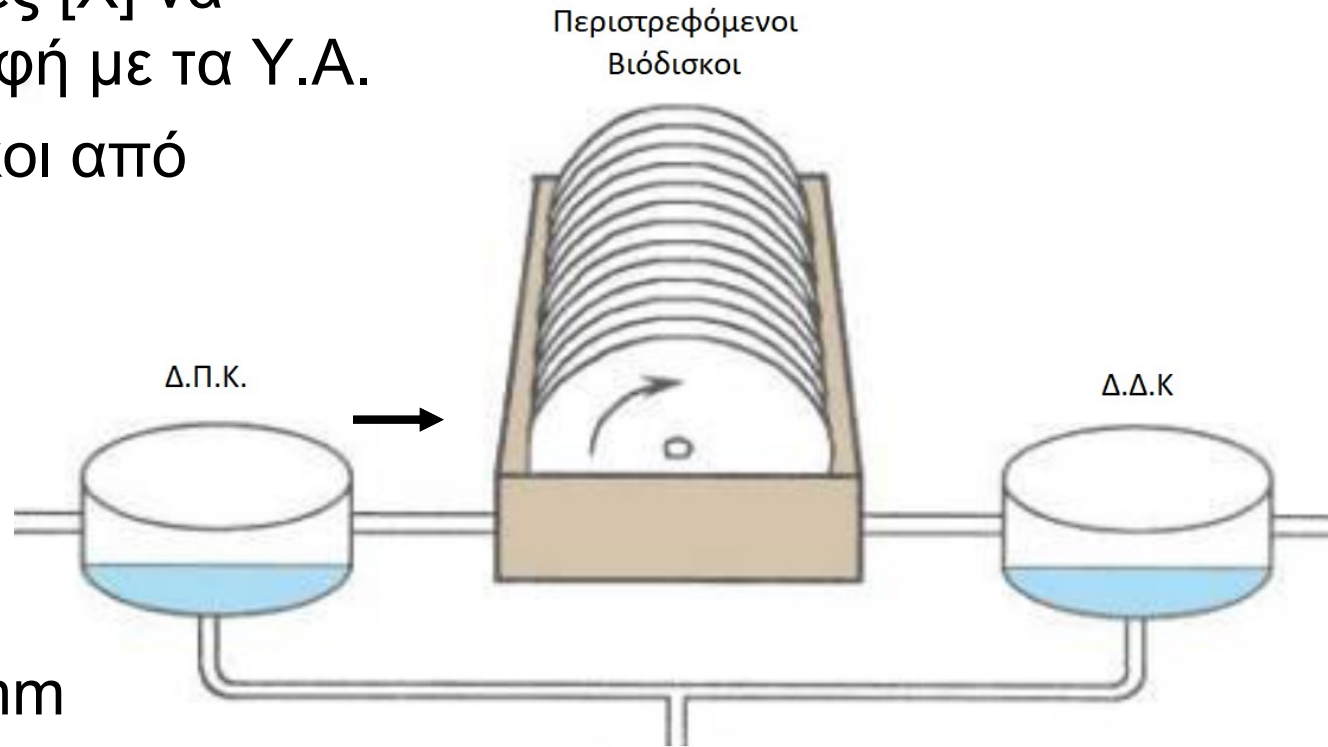
Οργανική Φόρτιση Φ 0,4 - 1,0 kg BAO₅/m³d

(μέσα στα επιτρεπτά όρια).

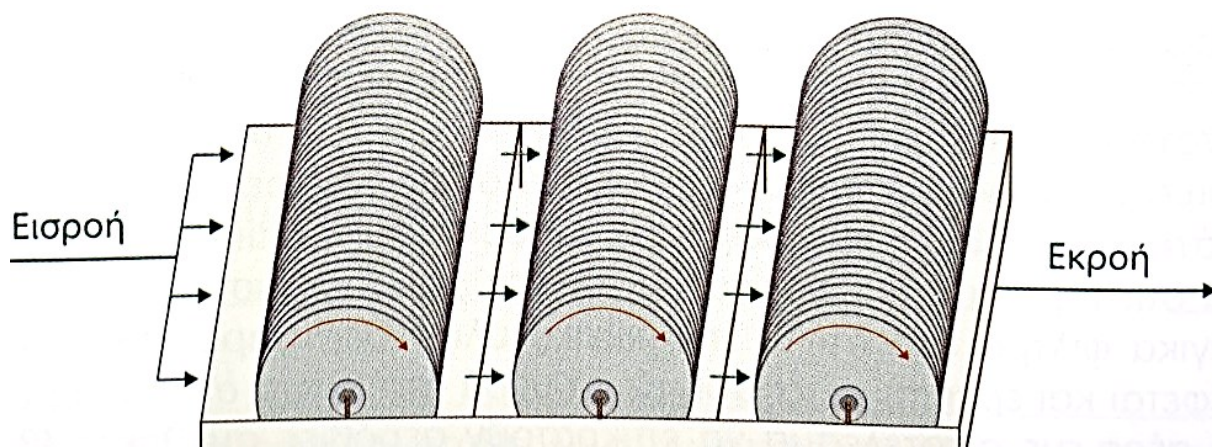
Άρα τελικά έχουμε d=2,5 m, r=2, A=2812 m², D=60 m.

Περιστρεφόμενοι Βιόδισκοι

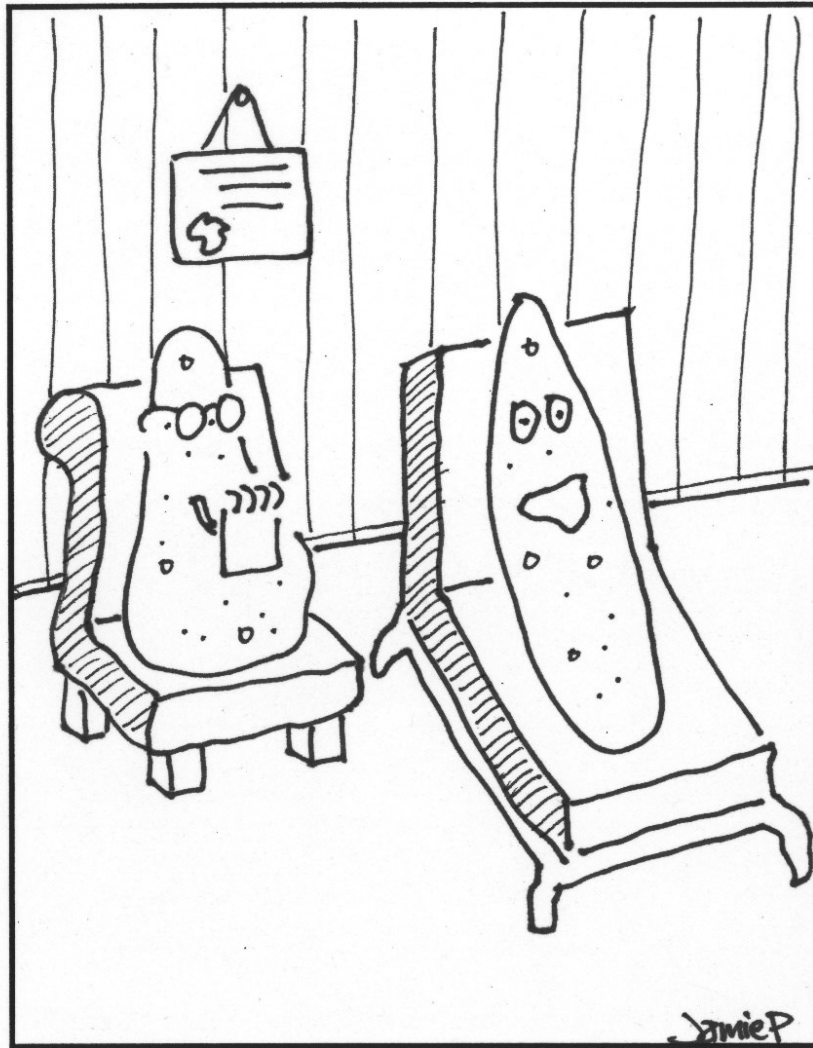
- Επιτρέπει υψηλές $[X]$ να έρχονται σε επαφή με τα Υ.Α.
- Ομόκεντροι δίσκοι από πλαστικό
- w : 10 - 12 mm
- d : 1,2 – 3 m
- Διάκενο 19-22 mm
- n : μέχρι 200
- Ταχύτητα περιστροφής 1-2 rpm
- Βυθισμένοι κατά ~ 40%



Άριστες αερόβιες συνθήκες ανάπτυξης
Πάχος βιομάζας: 1 – 3 mm



Σχηματική Διάταξη βιοδίσκων με τρεις άξονες



I just can't go with the flow anymore.
I've been thinking about joining a biofilm.