

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Αν. Καθηγητής Δρ. Π. Μελίδης
Εργαστήριο Διαχείρισης και Τεχνολογίας
Υγρών Αποβλήτων
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος - ΔΠΘ

Περιεχόμενα

θα συζητηθούν:

- (1) ορολογία των διεργασιών με μεμβράνες
- (2) κατηγορίες των μεμβρανών
- (3) διατάξεις μεμβρανών
- (4) εφαρμογή των τεχνολογιών των μεμβρανών

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Ορισμός

Διήθηση αφορά το διαχωρισμό αιωρούμενης και κολλοειδούς ύλης από ένα υγρό

Στην διήθηση με μεμβράνες το εύρος του μεγέθους των σωματιδίων εκτείνεται και περιλαμβάνει διαλυτά συστατικά (από 0.0001 – 1.0 μm)

Ο ρόλος των μεμβρανών είναι να λειτουργήσουν ως ένα εκλεκτικό φράγμα το οποίο θα επιτρέψει τη διέλευση ορισμένων συστατικών και θα κατακρατήσει άλλα συστατικά που υπάρχουν στο υγρό.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Ορολογία των διεργασιών με μεμβράνες

Νερό τροφοδοσίας (f)

Q_f = παροχή του νερού τροφοδοσίας

C_f = συγκέντρωση του νερού τροφοδοσίας

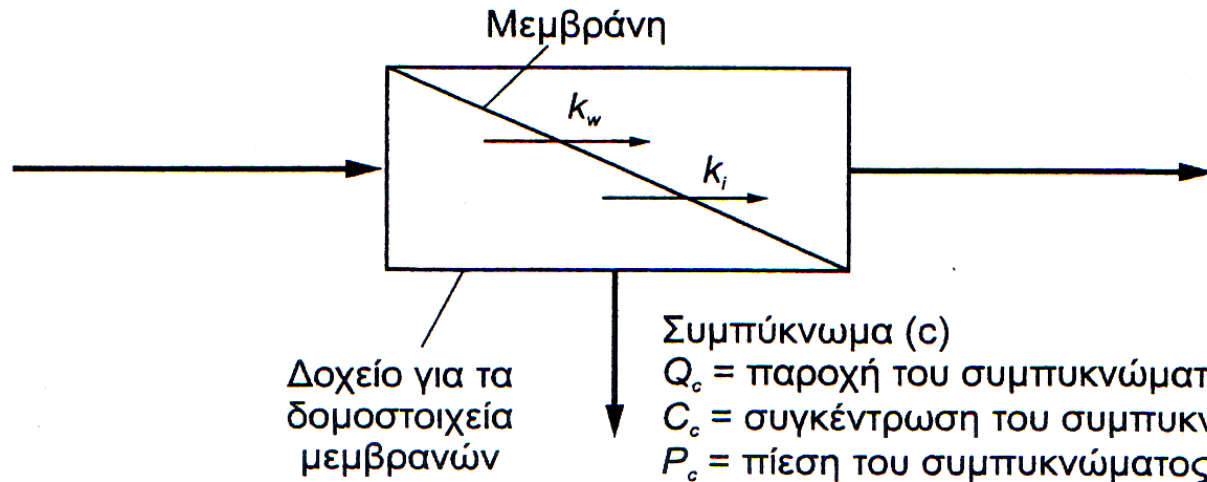
P_f = πίεση του νερού τροφοδοσίας

Διήθημα (p)

Q_p = παροχή του διηθήματος

C_p = συγκέντρωση του διηθήματος

P_p = πίεση του διηθήματος



Σημείωση:

οι όροι k_w και k_i είναι οι συντελεστές μεταφοράς μάζας για το νερό και το διαλυμένο συστατικό

Σχηματικό διάγραμμα μιας διεργασίας με μεμβράνες

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Ορολογία των διεργασιών με μεμβράνες

Σύμφωνα με το Σχήμα και τον Πίνακα η εισροή στο δομοστοιχείο (module) των μεμβρανών είναι γνωστή ως *ρεύμα τροφοδοσίας (feed stream)* ή ως νερό τροφοδοσίας.

Το υγρό που διέρχεται διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης είναι γνωστό ως *διήθημα (permeate)* (επίσης γνωστό ως ρεύμα προϊόντος ή ρεύμα διαπέρασης) και

το υγρό που περιέχει τα συστατικά που κατακρατήθηκαν είναι γνωστό ως *συμπύκνωμα (concentrate)* (γνωστό επίσης ως κατακράτημα, απόρριμα, κατακρατημένη φάση ή ρεύμα αποβλήτων).

Ο ρυθμός με τον οποίο το διήθημα ρέει διαμέσου της μεμβράνης είναι γνωστός ως *ρυθμός πυκνότητας ροής (flux)* και τυπικά εκφράζεται ως $\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

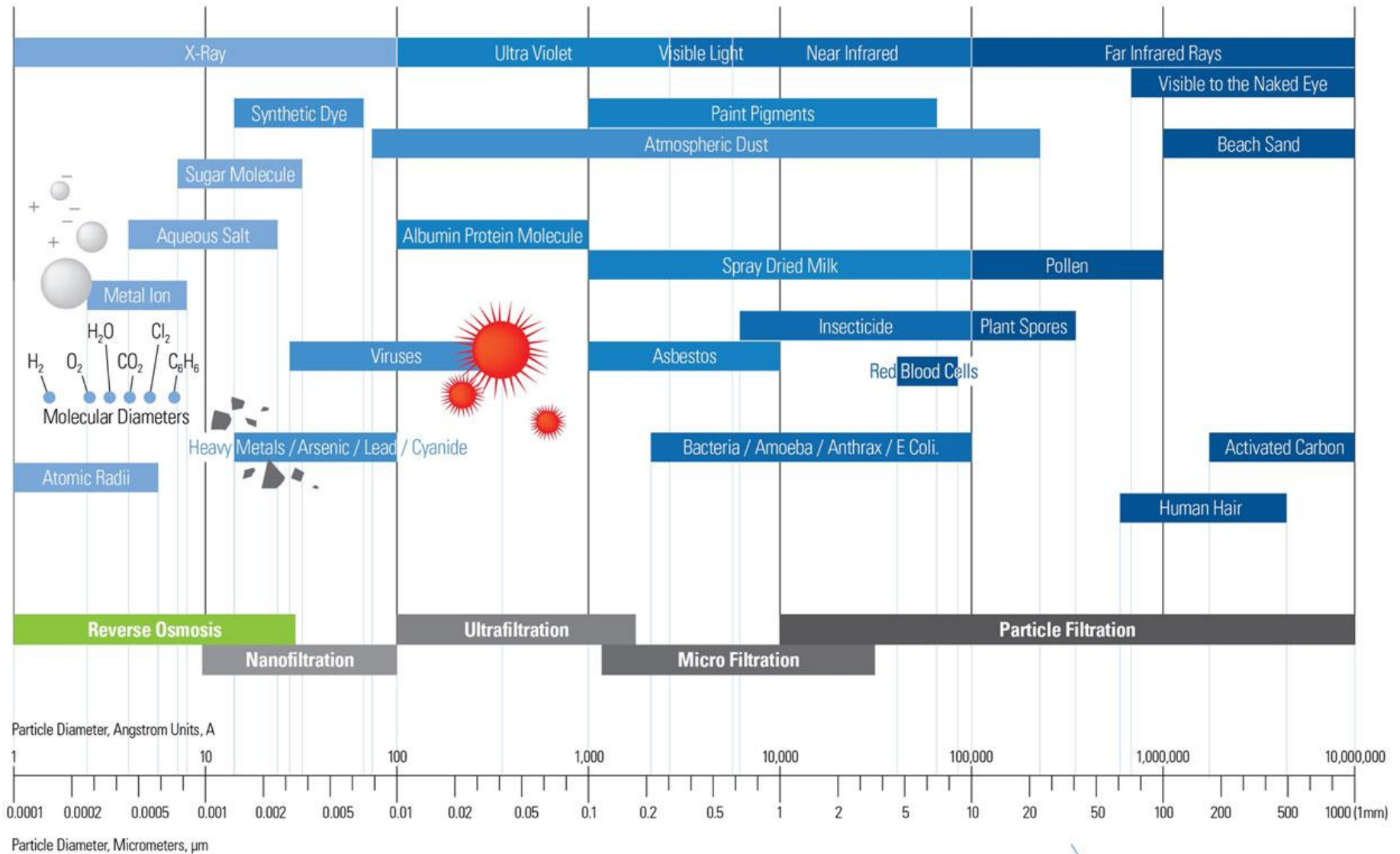
Κατηγορίες των διεργασιών με μεμβράνες

Οι διεργασίες με μεμβράνες περιλαμβάνουν την μικροδιήθηση (microfiltration, MF, 0.1 – 10 μm), την υπερδιήθηση (ultrafiltration, UF, 0.001 – 0.1 μm), τη νανοδιήθηση (nanofiltration, NF, 1-10 nm, δισθενή ιόντα, και μέρος των μονοσθενών πχ βαρέα μέταλλα), την αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis, RO), τη διάλυση (dialysis) και την ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis, ED).

Οι διεργασίες με μεμβράνες μπορούν να ταξινομηθούν σε ένα μεγάλο αριθμό μεθόδων με βάση

- (1) τον τύπο του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η μεμβράνη,
- (2) τη φύση της ωθούσας δύναμης,
- (3) τον μηχανισμό διαχωρισμού και
- (4) το ονομαστικό μέγεθος (nominal size) του διαχωρισμού που επιτυγχάνεται.

Particle Filtration Chart



Water Quality Association © 2000 Technical Charts

15/5/2018

1 Å = 0.1 nm

Αν. καθηγητής Π Μελίδης

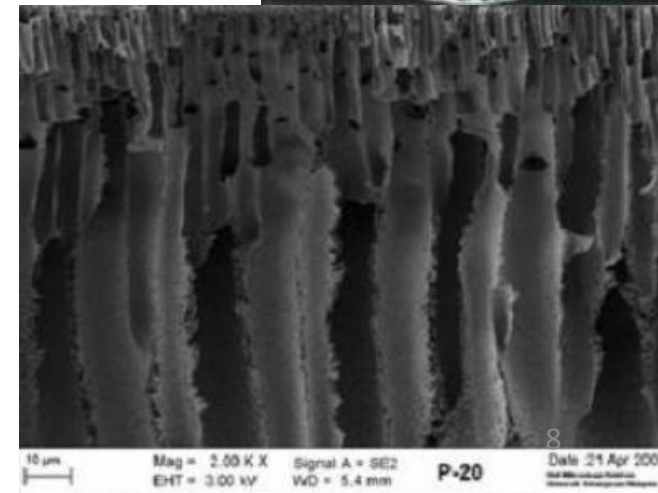
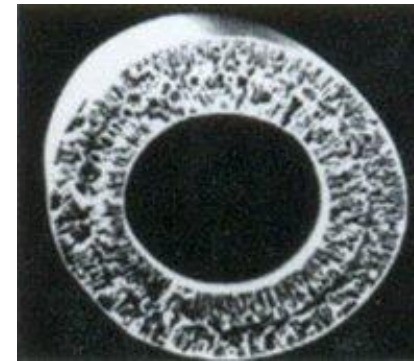
Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Υλικά μεμβρανών

Αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πάχους περίπου 0.20 έως 0.25 μm το οποίο υποστηρίζεται από μια πιο πορώδη δομή πάχους περίπου 100 μm .

Παράγονται ως :

επίπεδα φύλλα,
λεπτές κοίλες ίνες, ή
σε αυλωτή μορφή.



Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Υλικά μεμβρανών

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι συνήθως οργανικές.

Οι βασικοί τύποι μεμβρανών περιλαμβάνουν μεμβράνες:

Πολυπροπυλενίου ($\text{CH}_2\text{-CH}_2(\text{CH}_3)_n$), 0.855 g/cm³, amorphous 0.946 g/cm³, crystalline

οξικής κυτταρίνης ($\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_3)_n$, $d=1.5$ g/cm³,

αρωματικών πολυαμιδίων και

σύνθετες μεμβράνες λεπτού στρώματος (TFC).

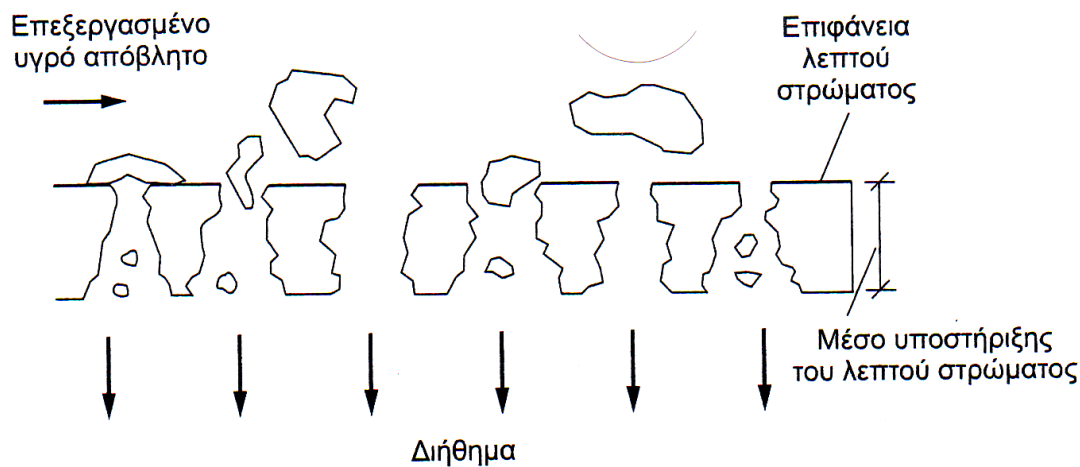
Η επιλογή των μεμβρανών και της διαμόρφωσης/ διάταξης του συστήματος βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της έμφραξης και της φθοράς των μεμβρανών και συνήθως βασίζεται σε μελέτες πιλοτικής κλίμακας.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

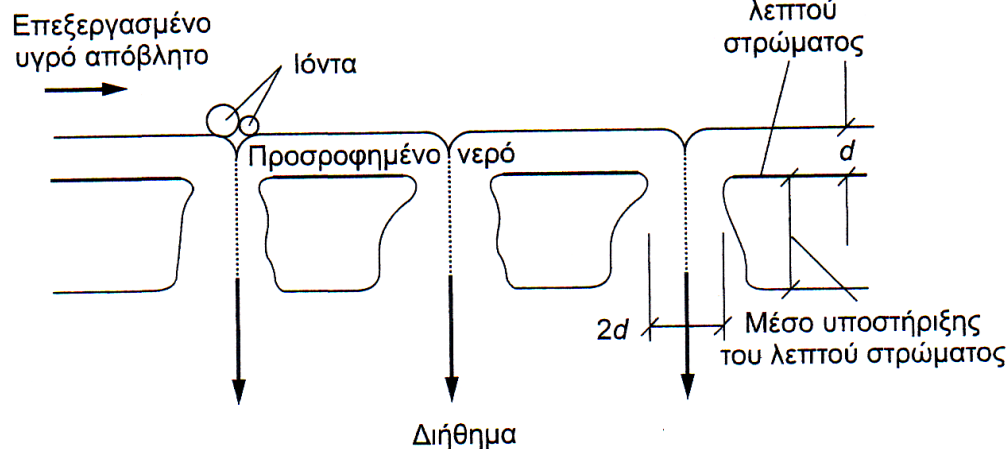
Διεργασία μεμβρανών	Ωθούσα δύναμη στη μεμβράνη	Τυπικός μηχανισμός διαχωρισμού	Λειτουργική δομή (μέγεθος πόρων)	Τυπικό λειτουργικό εύρος, μμ	Περιγραφή του διηθήματος	Τυπικά συστατικά που απομακρύνονται
Μικροδιήθηση	Διαφορά υδροστατικής πίεσης ή κενό σε ανοιχτά δοχεία	Κοσκίνιση	Μακροπόροι (> 50 nm)	0.08 - 2.0	Νερό + διαλυμένα στοιχεία	TSS, θολότητα, πρωτόζωα, ωκύστες και κύστες, ορισμένα βακτήρια και ιοί
Υπερδιήθηση	Διαφορά υδροστατικής πίεσης	Κοσκίνιση	Μεσοπόροι (2-50 nm)	0.005 – 0.2	Νερό + μικρά μόρια	Μακρομόρια, κολλοειδή, τα περισσότερα βακτήρια, ορισμένοι ιοί, πρωτεΐνες
Νανοδιήθηση	Διαφορά υδροστατικής πίεσης	Κοσκίνιση + Διάλυση/διάχυση	Μικροπόροι (< 2 nm)	0.001 - 0.01	Νερό + πολύ μικρά μόρια, διαλυμένα ιοντικά στοιχεία	Μικρά μόρια, μέρος της σκληρότητας, ιοί
Αντίστροφη όσμωση	Διαφορά υδροστατικής πίεσης	Διάλυση/διάχυση + αποκλεισμός	Μη-πορώδες (< 2 nm)	0.0001 - 0.001	Νερό, πολύ μικρά μόρια, διαλυμένα ιοντικά στοιχεία	Πολύ μικρά μόρια, χρώμα, σκληρότητα, θειικά, νιτρικά, νάτριο, άλλα ιόντα

Όταν τα στοιχεία των μεμβρανών MF είναι βυθισμένα σε ανοιχτά δοχεία χρησιμοποιείται κενό αντί για πίεση.

Διήθηση με μεμβράνες - Μηχανισμοί απομάκρυνσης



(α)



(β)

Οι ιοντικές μορφές μεταφέρονται διαμέσου της μεμβράνης με διάχυση μέσα στους πόρους των μακρομορίων που συνιστούν την μεμβράνη.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Μέγεθος διαχωρισμού

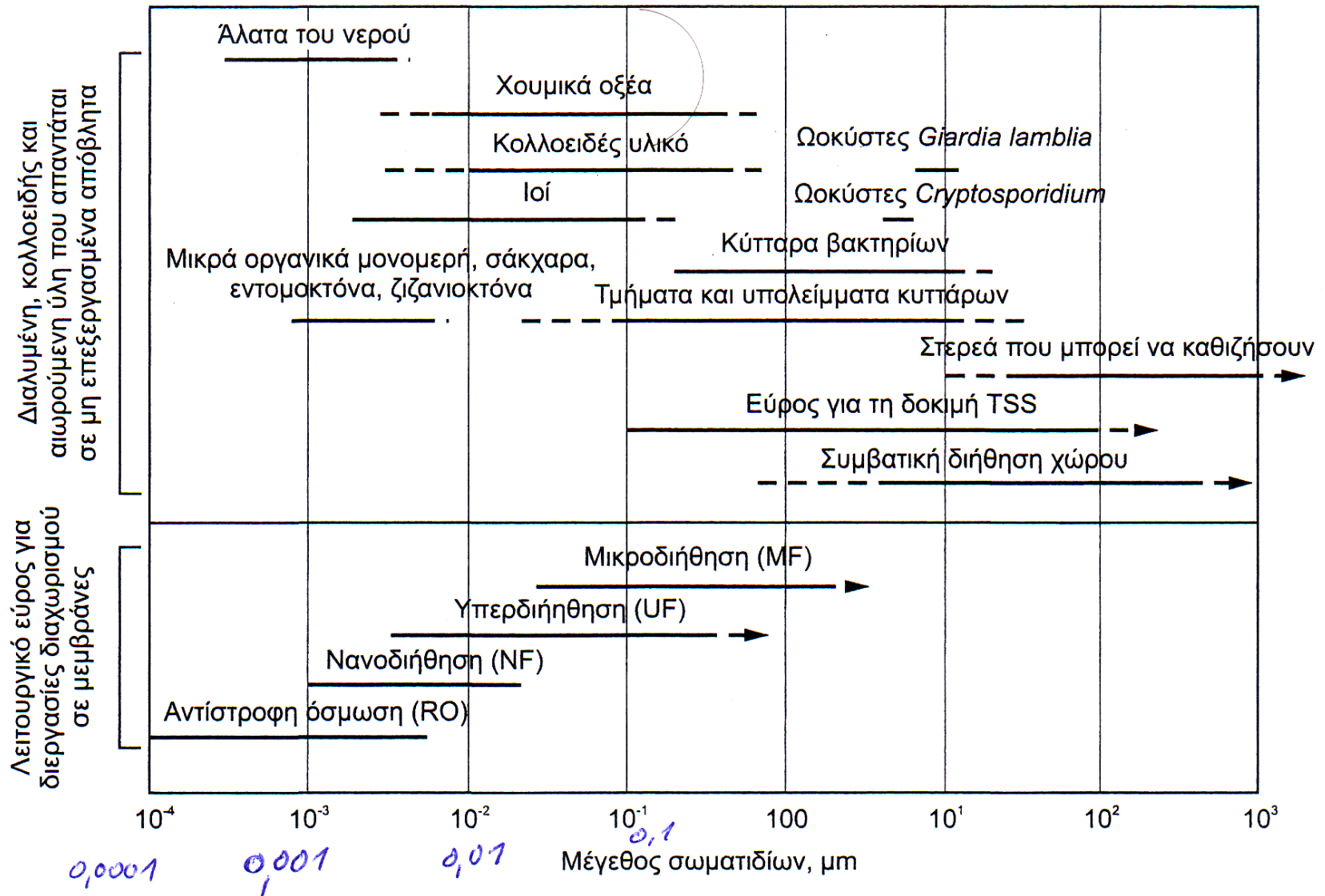
Το μέγεθος των πόρων στις μεμβράνες ταυτοποιούνται ως μακροπόροι (> 50 nm), μεσοπόροι (2-50 nm) και μικροπόροι (< 2 nm).

Επειδή το μέγεθος των πόρων στις μεμβράνες PA (πολυαμιδίου) είναι πολύ μικρό, οι μεμβράνες ορίζονται ως μη-πορώδεις.

Παρατηρείται μια σημαντική αλληλοεπικάλυψη στο μέγεθος των σωματιδίων που απομακρύνονται, ιδιαίτερα ανάμεσα στην NF και RO.

Η νανοδιήθηση χρησιμοποιείται συνήθως σε διεργασίες αποσκλήρυνσης νερού αντί της χημικής κατακρήμνισης.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών



Σύγκριση μεγέθους των συστατικών που απαντώνται στα υγρά απόβλητα και λειτουργικό εύρος μεγέθους για τις τεχνολογίες μεμβρανών

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Διαμόρφωση των μεμβρανών

Στον τομέα των μεμβρανών, ο όρος *δομοστοιχείο μεμβρανών* (module) χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια πλήρη μονάδα που αποτελείται από τις μεμβράνες, την κατασκευή υποστήριξης των μεμβρανών για την πίεση, το σύστημα εισόδου της τροφοδοσίας και εξόδου του διηθήματος και του κατακρατήματος και μια συνολική κατασκευή υποστήριξης.

Οι βασικοί τύποι των δομοστοιχείων μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι (1) σωληνοειδείς, (2) κοίλων ινών και (3) ελικοειδούς περιέλιξης.

Επίσης είναι διαθέσιμοι οι τύποι πλάκας-πλαisiού και πτυχωτών φίλτρων σε κυλινδρικό περίβλημα, αλλά χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Σωληνοειδή δομοστοιχεία

Στη σωληνοειδή διαμόρφωση η μεμβράνη επιστρώνεται στο εσωτερικό ενός σωλήνα υποστήριξης.

Στη συνέχεια τοποθετείται ένας αριθμός σωλήνων (μεμονωμένοι ή σε δέσμη) σε κατάλληλο δοχείο πίεσης.

Το νερό τροφοδοσίας εισάγεται με πίεση διαμέσου του αγωγού τροφοδοσίας και το παραγόμενο νερό συλλέγεται από την άλλη άκρη



A cutaway of a tubular membrane module

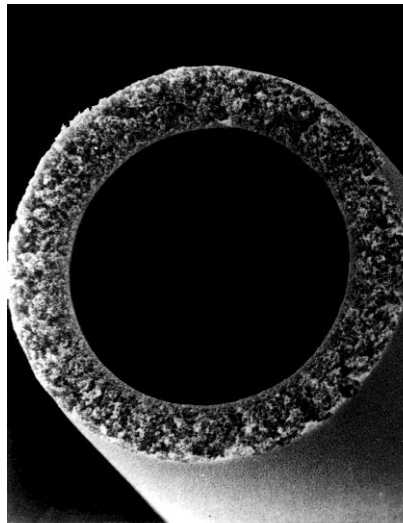
Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Σωληνοειδή δομοστοιχεία



15/5/2018

A cutaway of a tubular membrane module



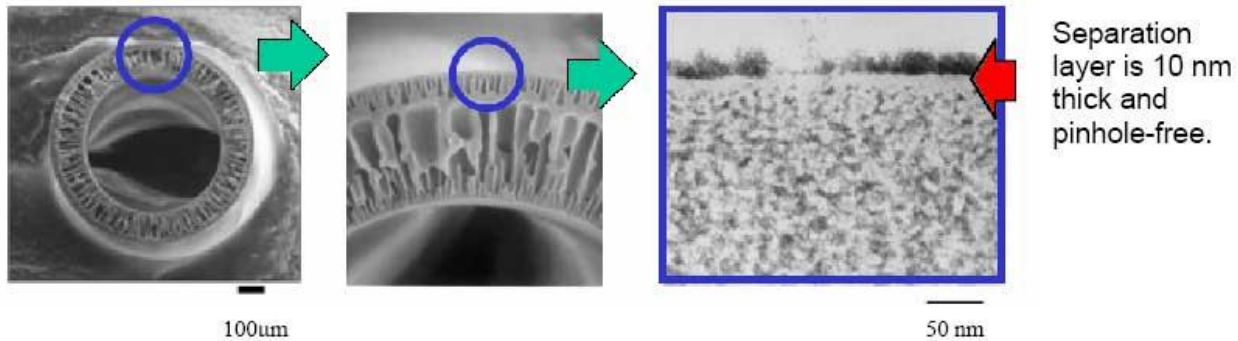
100 μm

Αν. καθηγητής Π Μελίδης



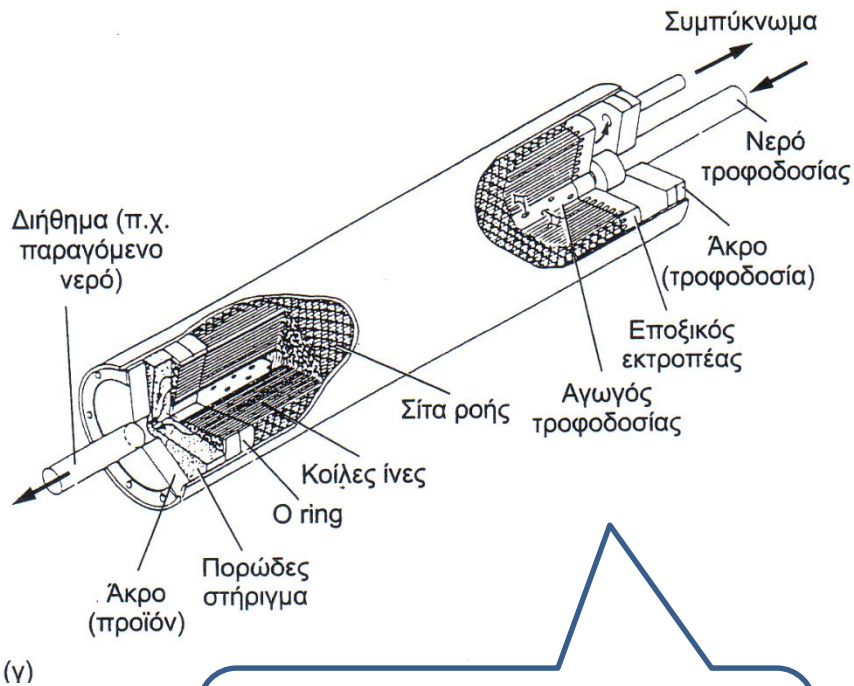
Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Λεπτές κοίλες ίνες

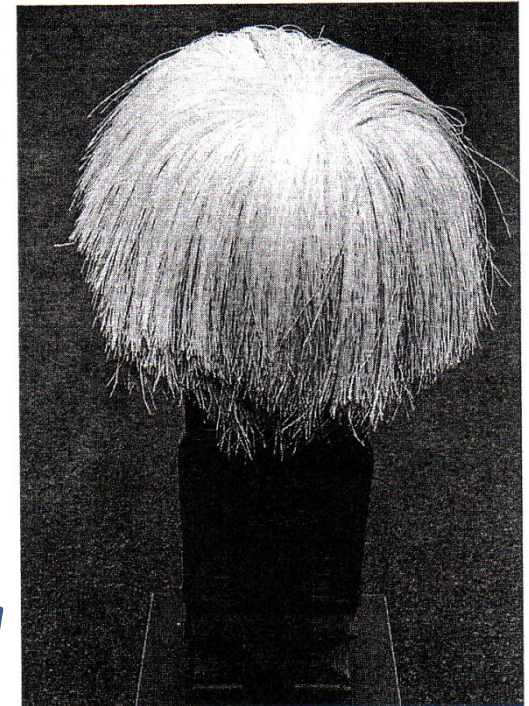


Cardo polyimide hollow fiber membrane with a thin, functional outer layer

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών



Δέσμη μεμβρανών λεπτών κοίλων ινών με ροή από το εξωτερικό προς το εσωτερικό της ίνας

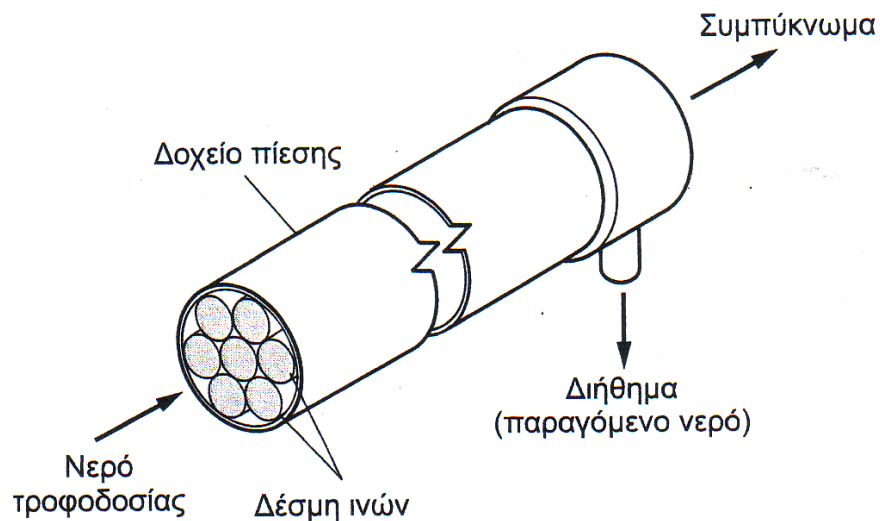
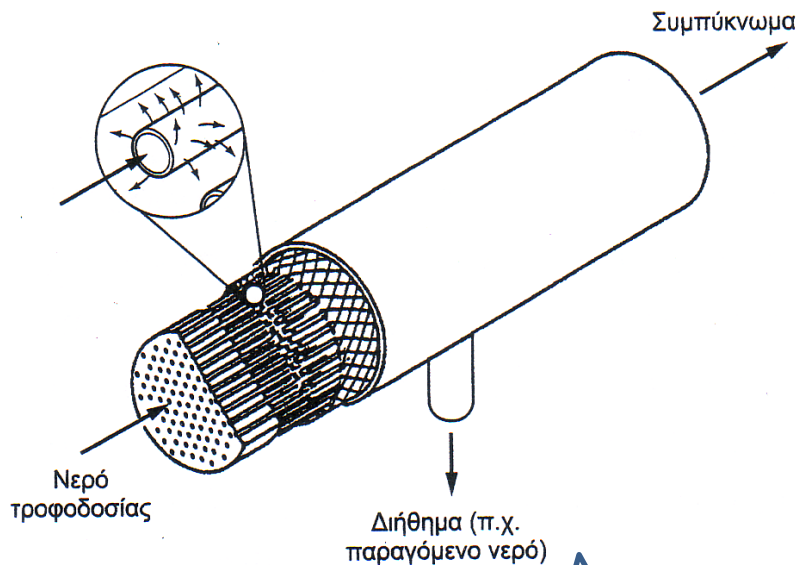


Άποψη μιας ακάλυπτης δέσμης μεμβρανών λεπτών κοίλων ινών

Κοίλων ινών

Το δομοστοιχείο μεμβρανών κοίλων ινών η οποία παρουσιάζεται αποτελείται από μια δέσμη εκατοντάδων έως χιλιάδων κοίλων ινών. Η συνολική κατασκευή εισάγεται σε ένα δοχείο πίεσης. Η τροφοδοσία μπορεί να εφαρμοστεί στο εσωτερικό της ίνας (ροή από μέσα προς τα έξω) ή εξωτερικά της ίνας (ροή από έξω προς τα μέσα).

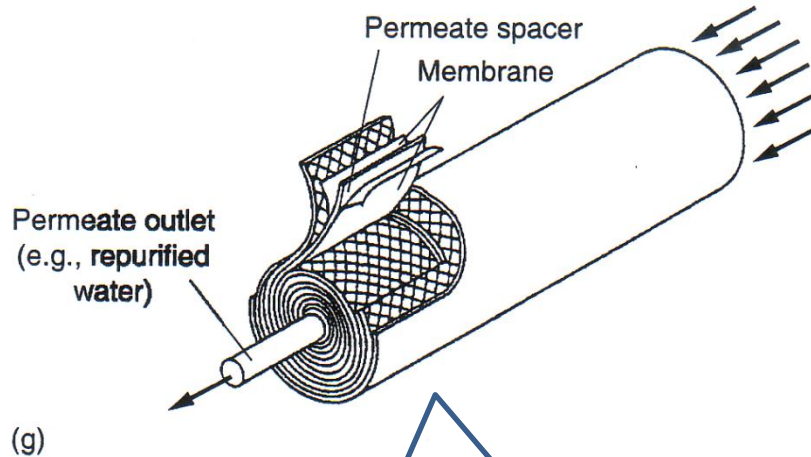
Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών



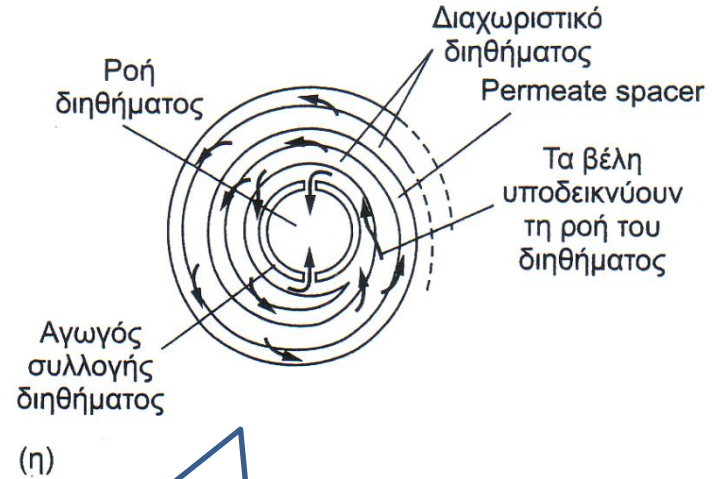
Δέσμη μεμβρανών λεπτών
κοίλων ινών με ροή από το
εσωτερικό προς το εξωτερικό
της ίνας

Δέσμη μεμβρανών λεπτών
κοίλων ινών τοποθετημένη σε
ένα δοχείο πίεσης

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών



Τομή ενός δομοστοιχείου
σύνθετων μεμβρανών
ελικοειδούς περιέλιξης



Εγκάρσια τομή ενός
δομοστοιχείου σύνθετων
μεμβρανών ελικοειδούς
περιέλιξης λεπτού στρώματος

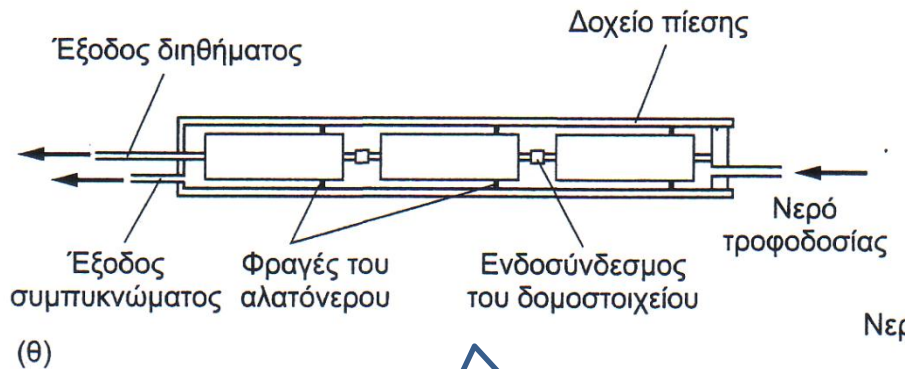
Ελικοειδούς περιέλιξης

Εύκαμπτο διαχωριστικό ανάμεσα σε δύο φύλλα μεμβράνης.

Οι μεμβράνες φράσσονται ερμητικά στις τρεις πλευρές. Η ανοιχτή πλευρά προσκολλάται σε έναν διάτρητο αγωγό.

Προστίθεται ένα εύκαμπτο διαχωριστικό τροφοδοσίας και τα επίπεδα φύλλα τυλίγονται σε μία σφικτή κυλινδρική διαμόρφωση

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών



Δοχείο πίεσης που περιέχει 3 δομοστοιχεία σύνθετων μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης λεπτού στρώματος



Τυπική εγκατάσταση δοχείων πίεσης με μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης η οποία περιέχει δομοστοιχεία σύνθετων μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης λεπτού στρώματος σε σειρά

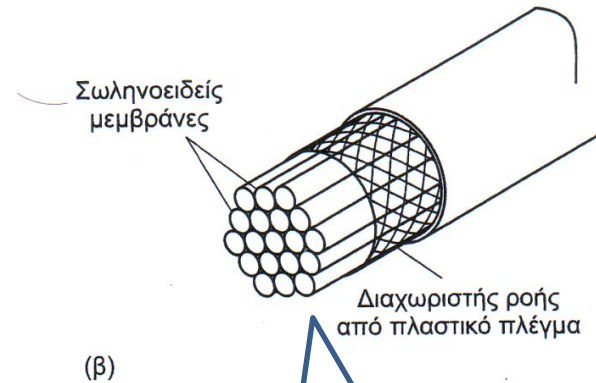
Ελικοειδούς περιέλιξης

Οι συνθέτες μεμβράνες λεπτού στρώματος χρησιμοποιούνται συνήθως σε δομοστοιχεία μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης. Ο όρος ελικοειδής οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή στην διάταξη περιτύλιξης των μεμβρανών και των φύλλων υποστήριξης είναι ελικοειδούς

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών



Μοναδιαία μεμβράνη σωληνοειδούς κοίλης ίνας



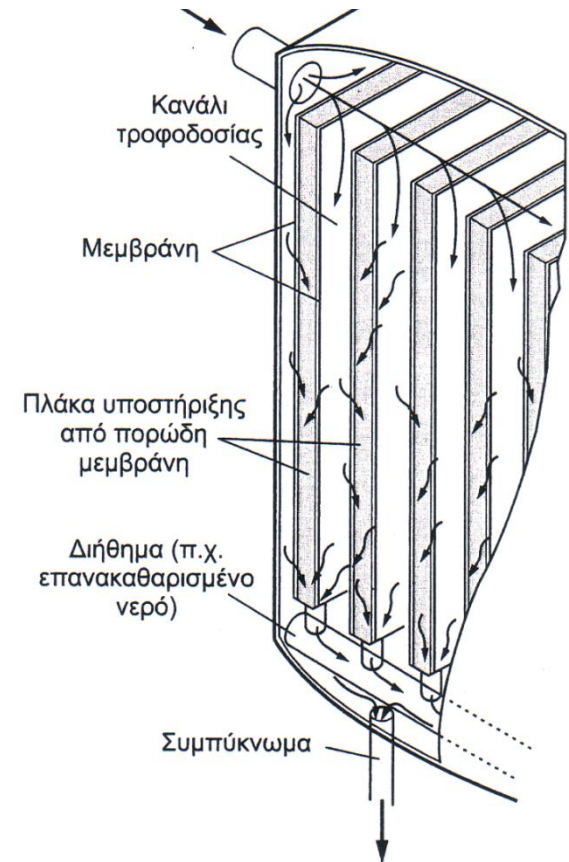
Δέσμη μεμβρανών σωληνοειδών κοίλων ίνων

Το συμπύκνωμα ρέει διαμέσου του αγωγού τροφοδοσίας
Χρησιμοποιούνται γενικά για νερά με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών ή για νερά με μεγάλη πιθανότητα έμφραξης.

Είναι οι πιο εύκολες στον καθαρισμό, ο οποίος πραγματοποιείται με κυκλοφορία χημικών
Παράγουν χαμηλούς ρυθμούς προϊόντος σε σχέση με το μέγεθος τους και οι μεμβράνες είναι γενικά ακριβές

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Μεμβράνες παράλληλων
πλακών και πλαισίων



Πλάκας και πλαισίου

Αποτελούνται από μια σειρά επίπεδων φύλλων μεμβρανών και πλακών υποστήριξης. Το νερό που πρόκειται να υποστεί επεξεργασία διέρχεται διαμέσου μιας διαμόρφωσης δύο διαδοχικών μεμβρανών.

Η πλάκα υποστηρίζει τις μεμβράνες και παρέχει ένα κανάλι για να ρέει το διήθημα έξω από τη μονάδα.

Χρησιμοποιείται συνήθως σε δομοστοιχεία ηλεκτροδιάλυσης

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Δοχεία πίεσης

Το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη διήθηση με μεμβράνες είναι συνηθισμένο στη βιομηχανία χημικών και διεργασιών.

Ο σκοπός του δοχείου πίεσης (ή του σωλήνα) είναι να υποστηρίξει τη μεμβράνη και να διατηρήσει τα ρεύματα τροφοδοσίας και προϊόντος απομονωμένα.

Το δοχείο θα πρέπει επίσης να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μην επιτρέπει διαρροές και απώλειες πίεσης προς το εξωτερικό, να ελαχιστοποιεί την συσσώρευση αλάτων ή έμφραξης και να επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση των μεμβρανών.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Δοχεία πίεσης

Ανάλογα με την πίεση λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας, χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά τα οποία περιλαμβάνουν σωλήνες από πλαστικό και υαλοβάμβακα και υδραυλικά τμήματα.

Για ορισμένες εφαρμογές της αντίστροφης όσμωσης απαιτούνται ανοξείδωτοι σωλήνες πίεσης, ενώ ανοξείδωτο ατσάλι απαιτείται επίσης για την επεξεργασία θαλασσινού νερού και υφάλμυρου νερού (TDS).

Για την MF, UF και την NF μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυγοκεντρικές αντλίες, ενώ για την RO είναι απαραίτητες αντλίες θετικής εκτόπισης ή στροβιλαντλίες υψηλής πίεσης.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Λειτουργία των μεμβρανών

Είναι αρκετά απλή.

Χρησιμοποιείται μια αντλία για να τροφοδοτήσει με πίεση το διάλυμα τροφοδοσίας και να κυκλοφορήσει μέσα από το δομοστοιχείο.

Μια ρυθμιστική βάννα χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την πίεση στο κατακράτημα.

Το διήθημα συνήθως συλλέγεται σε ατμοσφαιρική πίεση.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

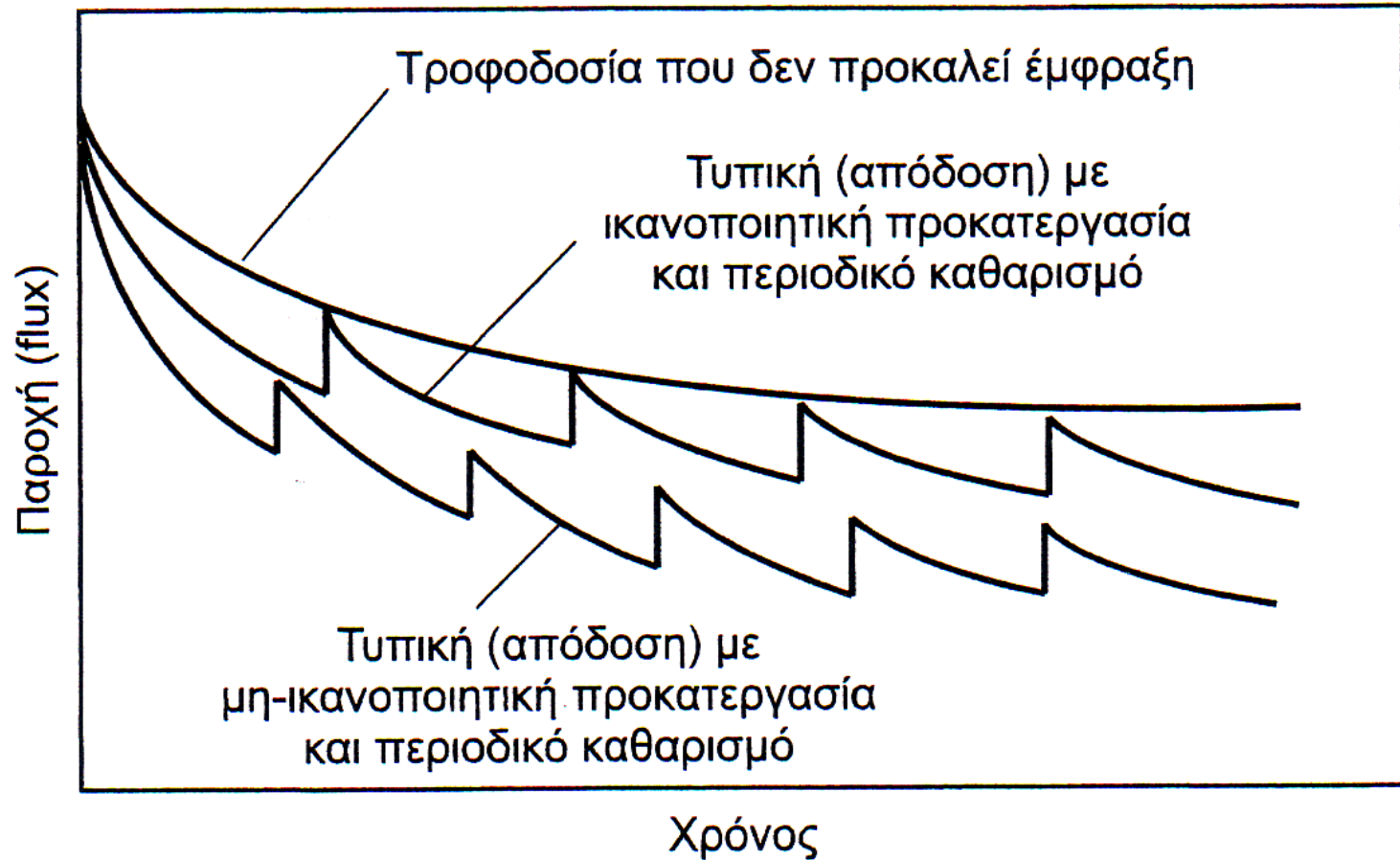
Λειτουργία των μεμβρανών

Καθώς τα συστατικά του νερού τροφοδοσίας συσσωρεύονται στις μεμβράνες (συννά χρησιμοποιείται ο όρος έμφραξη των μεμβρανών), η πίεση στην πλευρά της τροφοδοσίας αυξάνει, η πυκνότητα ροής (δηλ. η ροή διαμέσου της μεμβράνης) αρχίζει να μειώνεται και το ποσοστό της απόρριψης επίσης αρχίζει να μειώνεται (Σχήμα 6).

Όταν η απόδοση μειωθεί σε κάποιο επίπεδο, οι συσκευές των μεμβρανών θέτονται εκτός λειτουργίας και ακολουθεί αντίστροφη πλύση και/ή χημικός καθαρισμός.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Λειτουργία των μεμβρανών



Σχήμα 6 Απόδοση ενός συστήματος διήθησης με μεμβράνες

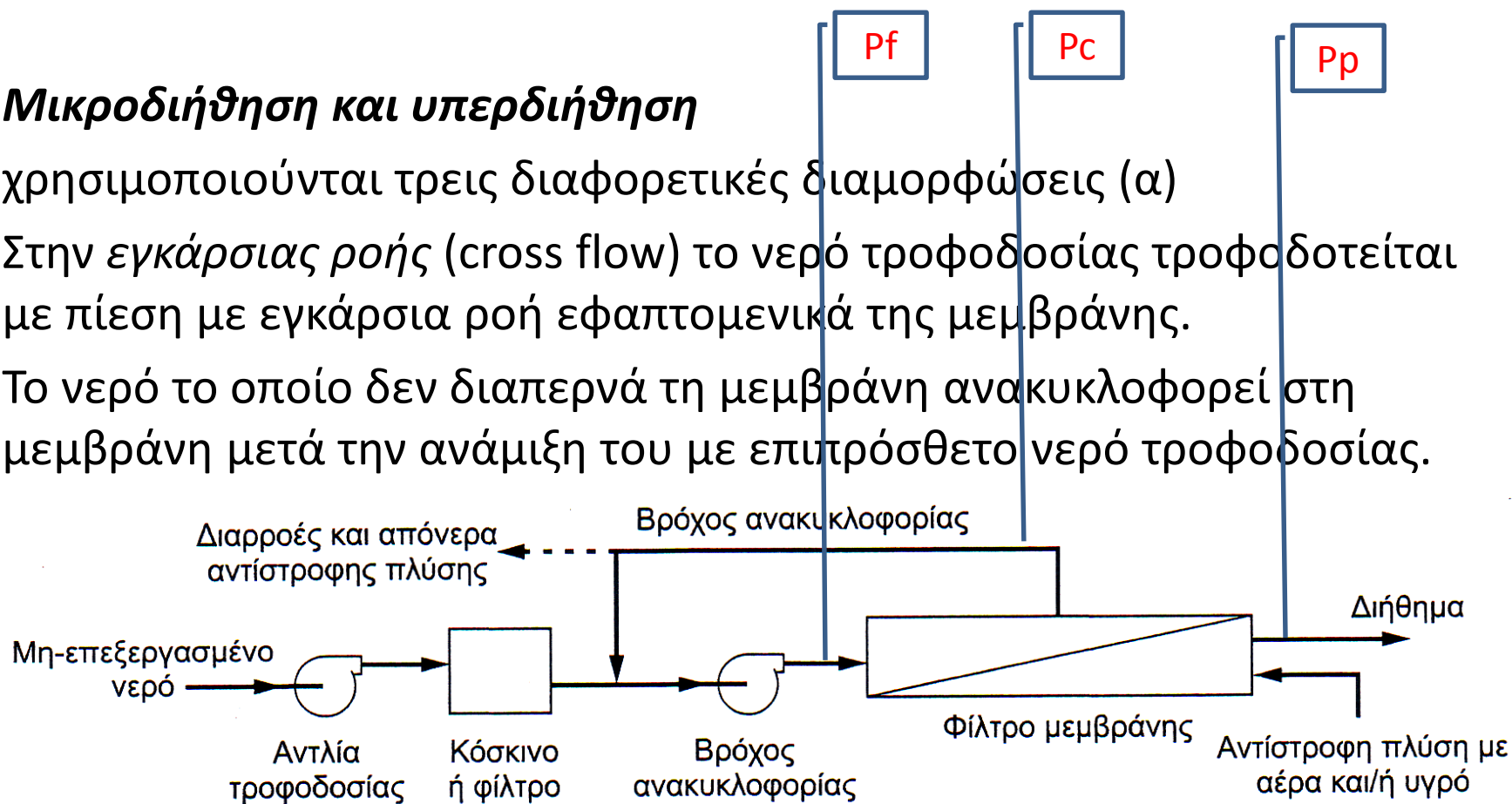
Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις (α)

Στην εγκάρσια ροής (cross flow) το νερό τροφοδοσίας τροφοδοτείται με πίεση με εγκάρσια ροή εφαπτομενικά της μεμβράνης.

Το νερό το οποίο δεν διαπερνά τη μεμβράνη ανακυκλωρεί στη μεμβράνη μετά την ανάμιξη του με επιπρόσθετο νερό τροφοδοσίας.



(α)

η πίεση ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης (transmembrane pressure, TMP) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

όπου P_{tm} = η κλίση της πίεσης ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης, kPa

P_f = η πίεση εισόδου του ρεύματος τροφοδοσίας, kPa

P_c = η πίεση του ρεύματος του συμπυκνώματος, kPa

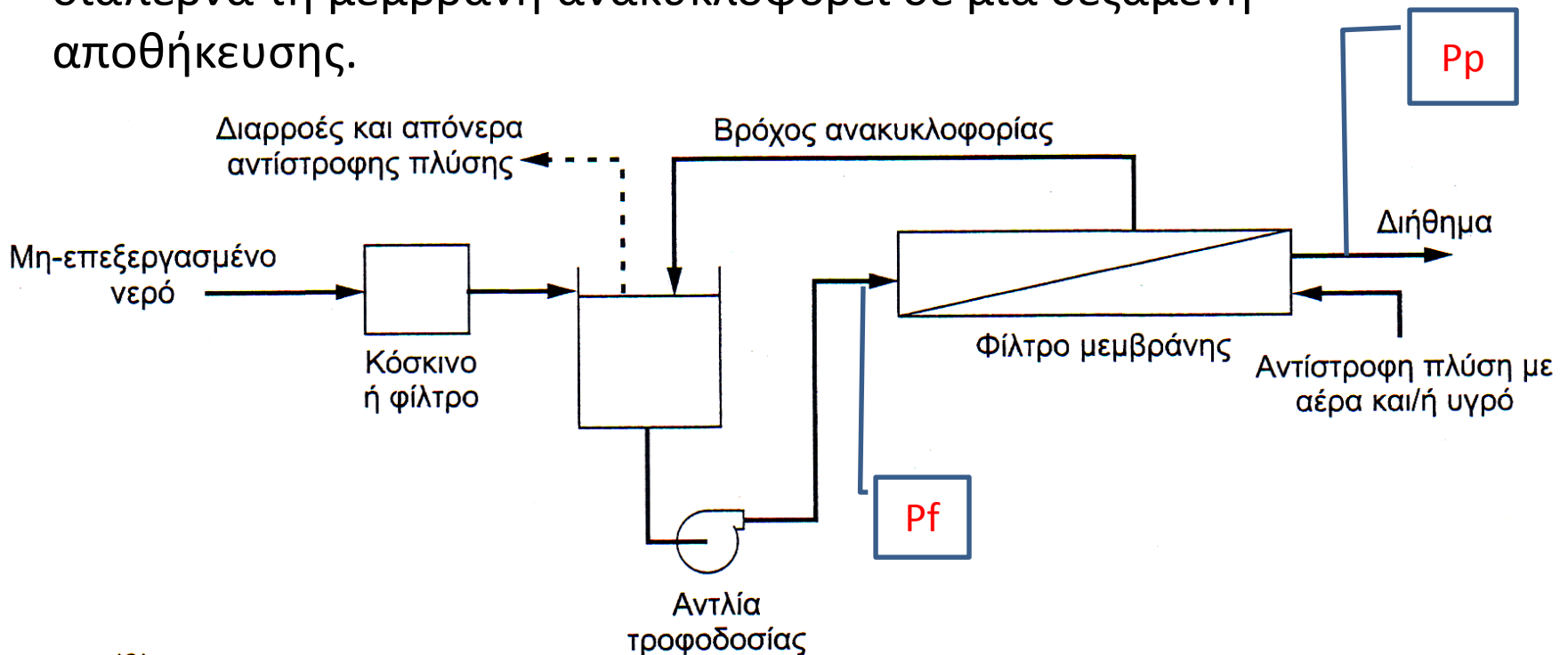
P_p = η πίεση του ρεύματος του διηθήματος, kPa

$$P_{tm} = \left[\frac{P_f + P_c}{2} \right] - P_p$$

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Η δεύτερη διαμόρφωση, επίσης εγκάρσια ροής το νερό το οποίο δεν διαπερνά τη μεμβράνη ανακυκλοφορεί σε μια δεξαμενή αποθήκευσης.



(β)

Η ολική πτώση πίεσης στο δομοστοιχείο διήθησης για τη λειτουργία με εγκάρσια ροή δίνεται από

$$P = P_f + P_p$$

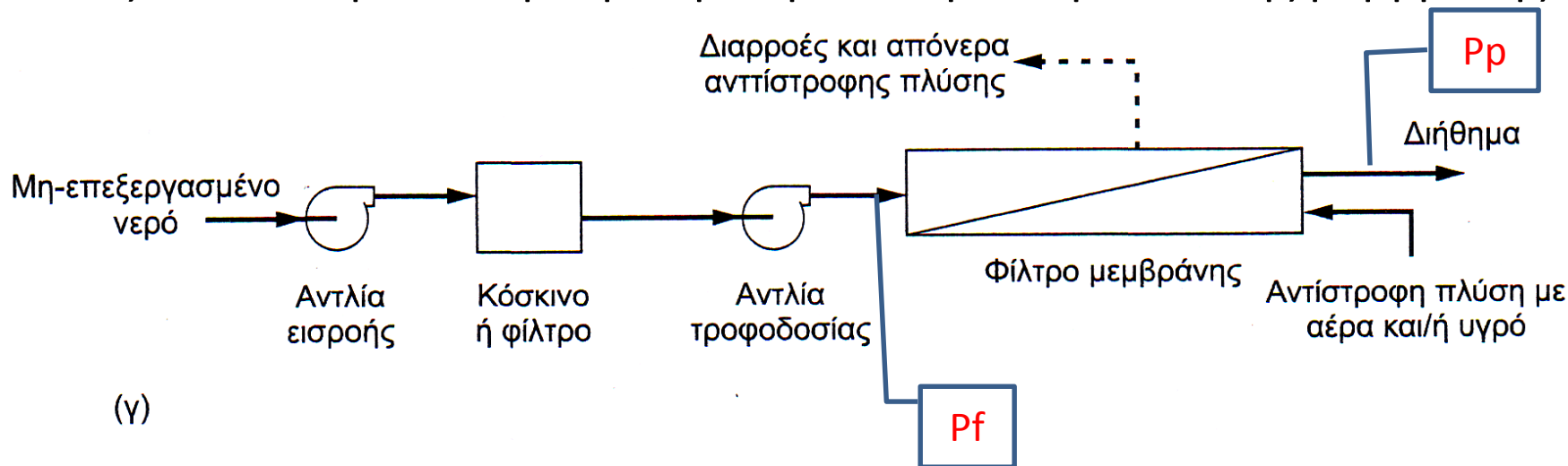
όπου P = πτώση πίεσης στο δομοστοιχείο, kPa

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Μικροδιάθηση και υπερδιάθηση

Η τρίτη διαμόρφωση είναι γνωστή ως άμεση τροφοδοσία (επίσης ως *τύπου αδιέξοδου, dead-end*) και δεν υπάρχει εγκάρσια ροή. Όλο το νερό που τροφοδοτείται στη μεμβράνη διαπερνά τη μεμβράνη.

Περιοδικά χρησιμοποιείται μη-επεξεργασμένο νερό τροφοδοσίας για να ξεπλύνει τη συσσωρευμένη ύλη από την επιφάνεια της μεμβράνης



Για τη λειτουργία άμεσης τροφοδοσίας η πίεση διαμέσου της μεμβράνης δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{tm} = P_p - P_r$$

όπου P_{tm} = κλίση της πίεσης ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Η ολική ροή διηθήματος από ένα σύστημα μεμβράνης δίνεται από

$$Q_p = F_w * A$$

όπου Q_p = παροχή του ρεύματος διηθήματος, kg/s

F_w = ρυθμός πυκνότητας ροής του νερού διαμέσου της μεμβράνης, kg/m²/s

A = επιφάνεια της μεμβράνης, m²

Ο ρυθμός πυκνότητας ροής του νερού διαμέσου της μεμβράνης εξαρτάται από,

- την ποιότητα του ρεύματος τροφοδοσίας
- τον βαθμό της προκατεργασίας,
- τα χαρακτηριστικά των μεμβρανών και
- τις λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Ο ρυθμός ανάκτησης r ορίζεται ως $r\% = Q_p * 100 / Q_f$
όπου Q_p = ροή του ρεύματος διηθήματος, kg/s
 Q_f = ροή του ρεύματος τροφοδοσίας, kg/s

θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ του ρυθμού ανάκτησης (ο οποίος αναφέρεται στο νερό) και του ρυθμού απόρριψης (ο οποίος αναφέρεται στη διαλυμένη ουσία) και δίνεται από τη σχέση

$$R, \% = (C_f - C_p) * 100 / C_f = 1 - (C_p * 100 / C_f)$$

Οι αντίστοιχες εξισώσεις του ισοζυγίου μάζας είναι

$$Q_f = Q_p + Q_c$$

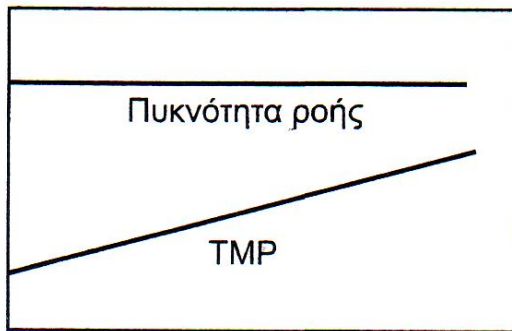
$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c$$

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

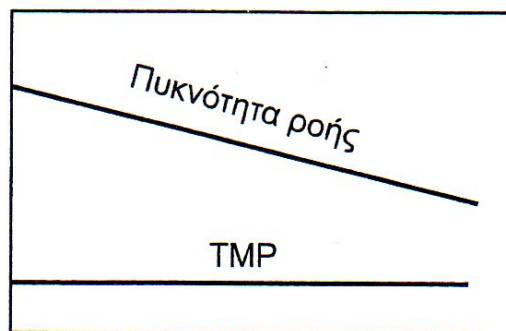
Για τον έλεγχο της λειτουργίας μιας διεργασίας μεμβρανών χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές μέθοδοι όσον αφορά την πυκνότητα ροής και τη πίεση ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης (Transmembrane Pressure, TMP).

Οι τρεις μέθοδοι είναι (1) σταθερή πυκνότητα ροής, όπου ο ρυθμός πυκνότητας ροής είναι σταθερός και η TMP μεταβάλλεται (αυξάνεται) με το χρόνο, (2) σταθερή TMP, όπου η TMP είναι σταθερή και ο ρυθμός πυκνότητας ροής μεταβάλλεται (μειώνεται) με το χρόνο, και (3) και ο ρυθμός πυκνότητας ροής και ο ρυθμός πυκνότητας ροής και η TMP μεταβάλλονται με το χρόνο. Συνήθως χρησιμοποιείται η λειτουργία με σταθερή πυκνότητα ροής (πιο αποδοτική μέθοδος λειτουργίας)



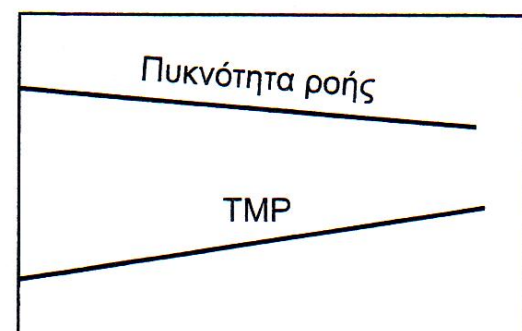
Χρόνος (min)

(α)
15/5/2018



Χρόνος (min)

(β)
Αν. καθηγητής Π Μελίδης



Χρόνος (min)

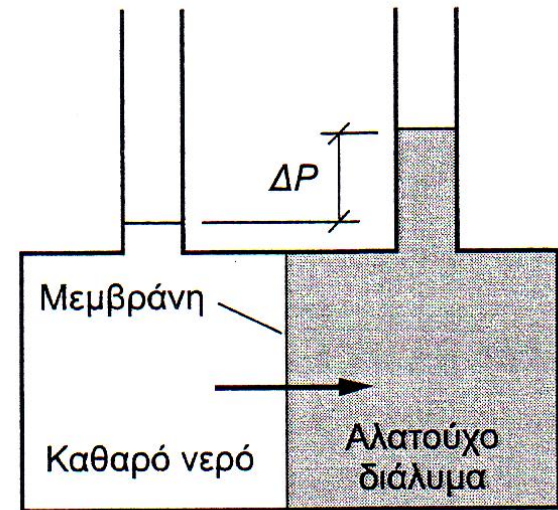
(γ)

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Αντίστροφη όσμωση

Όταν δύο διαλύματα που έχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών διαχωρίζονται με **μια ημιπερατή μεμβράνη**, υπάρχει μια **διαφορά χημικού δυναμικού** διάμεσου της μεμβράνης

Το νερό θα τείνει να διαχυθεί διαμέσου της μεμβράνης από την πλευρά της **χαμηλότερης συγκέντρωσης** (υψηλότερο δυναμικό) προς την πλευρά της **υψηλότερης συγκέντρωσης** (χαμηλότερο δυναμικό).



$\Delta P < \Delta P_0$
Όσμωση

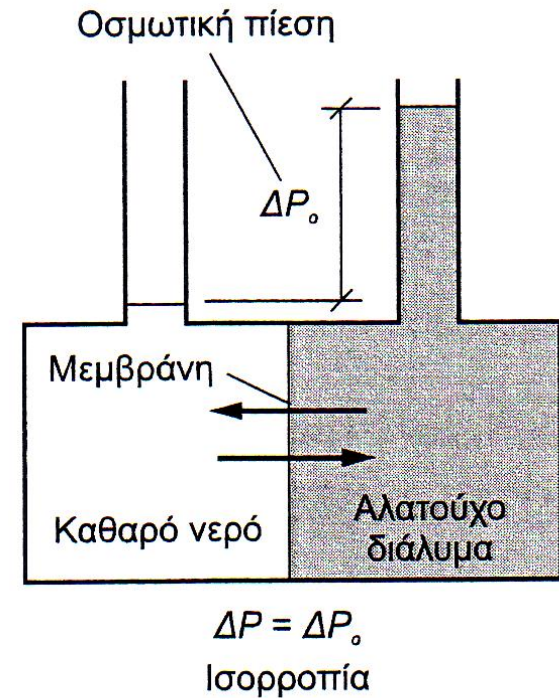
(α)

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Αντίστροφη όσμωση

Σε ένα σύστημα με πεπερασμένο όγκο, η ροή συνεχίζεται έως ότου η διαφορά πίεσης εξισορροπήσει τη διαφορά των χημικών δυναμικών.

Αυτή η εξισορροπητική διαφορά πίεσης ορίζεται ως **οσμωτική πίεση** και εξαρτάται από τα **χαρακτηριστικά της διαλυμένης ουσίας** και τη **συγκέντρωση** και τη **θερμοκρασία**.

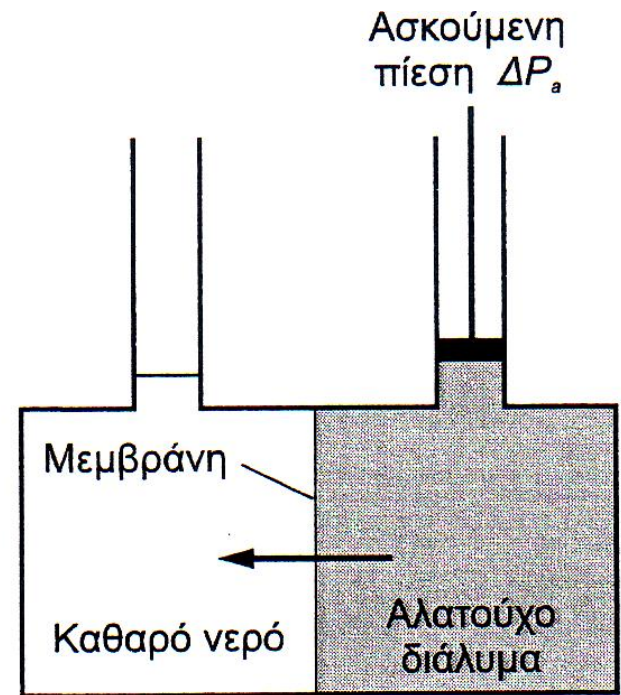


(β)

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Αντίστροφη όσμωση

Αν σε μια μεμβράνη ασκηθεί **μια κλίση πίεσης αντίθετης διεύθυνσης** μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση, θα λάβει χώρα ροή από **την πιο συμπυκνωμένη προς τη λιγότερο συμπυκνωμένη περιοχή** που ορίζεται ως **αντίστροφη όσμωση**



$$\Delta P_a > \Delta P_o$$

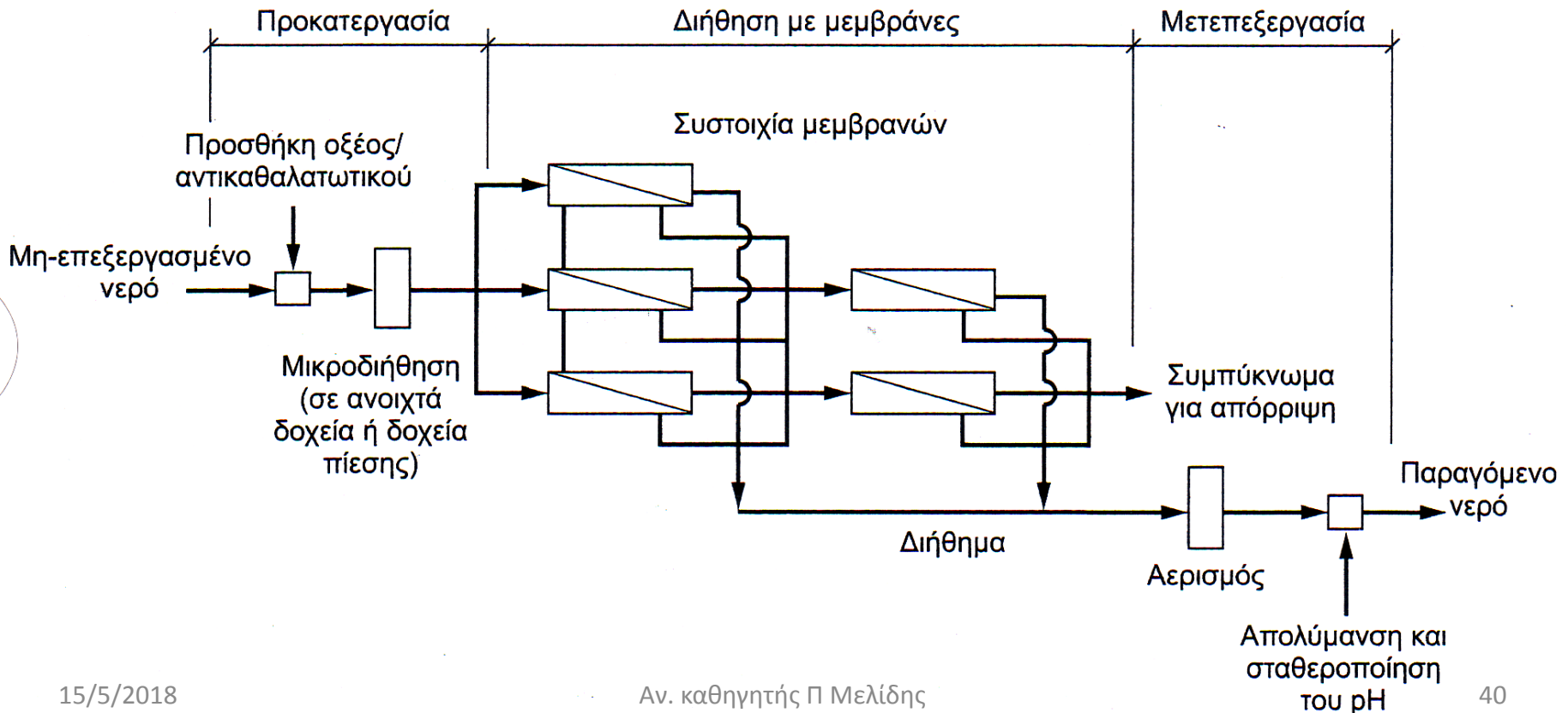
Αντίστροφη όσμωση

(Υ)

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Αντίστροφη όσμωση

Ένας αριθμός διαφορετικών μοντέλων έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της επιφάνειας μιας μεμβράνης και του απαιτούμενου αριθμού συστοιχιών μεμβρανών (Σχήμα).



Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Αντίστροφη όσμωση

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των μοντέλων υπολογισμού της απαιτούμενης επιφάνειας διήθησης είναι οι:

$$F_w = k_w(\Delta P_a - \Delta P) = Q_p/A$$

F_w = ρυθμός πυκνότητας ροής του νερού, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

K_w = συντελεστής μεταφοράς μάζας για το νερό που εξαρτάται από την θερμοκρασία, τα χαρακτηριστικά της μεμβράνης και τα χαρακτηριστικά της διαλυμένης ουσίας, s/m , $\text{m}/\text{s} \cdot \text{bar}$

$\Delta P_a = [P_f + P_c/2] - P_p$ = μέση κλίση πίεσης που ασκείται, $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$, bar

$\Delta \Pi = [\Pi_f + \Pi_c/2] - \Pi_p$ κλίση της οσμωτικής πίεσης, $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$, bar

Q_p = παροχή του διηθήματος, kg/s , m^3/s

A = επιφάνεια της μεμβράνης, m^2

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Αντίστροφη όσμωση

Ορισμένη ποσότητα της διαλυμένης ουσίας διαπερνά τη μεμβράνη σε όλες τις περιπτώσεις. Η πυκνότητα ροής της διαλυμένης ουσίας μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από μια σχέση της μορφής

$$F_i = k_i \Delta C_i = Q_p C_p / A$$

F_i = πυκνότητα ροής του διαλυτού συστατικού i , $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

k_i = συντελεστής μεταφοράς μάζας της διαλυμένης ουσίας, m/s

ΔC_i = κλίση συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, kg/m^3

C_f = συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο ρεύμα τροφοδοσίας, kg/m^3 , $= [(C_f + C_c)/2] - C_p$

C_c = συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο ρεύμα συμπυκνώματος, kg/m^3

C_p = συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο ρεύμα διηθήματος, kg/m^3

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Έμφραξη μεμβρανών

Ο ορός έμφραξη (fouling) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την πιθανή απόθεση και συσσώρευση των συστατικών πάνω στη μεμβράνη, στην πλευρά του ρεύματος τροφοδοσίας.

Η έμφραξη των μεμβρανών είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό και λειτουργία των συστημάτων μεμβρανών, διότι καθορίζει

την απαίτηση για προκατεργασία του νερού,
τις απαιτήσεις καθαρισμού,
τις λειτουργικές συνθήκες,
το κόστος και
την απόδοση.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Έμφραξη μεμβρανών

Τα συστατικά των υγρών αποβλήτων που μπορούν να προκαλέσουν έμφραξη των μεμβρανών παρουσιάζονται στον Πίνακα και μπορεί να λάβει χώρα σε τρεις γενικές μορφές:

- (1) συσσώρευση των συστατικών στην επιφάνεια της μεμβράνης στην πλευρά της τροφοδοσίας,
- (2) σχηματισμός χημικών ιζημάτων λόγω της χημείας του νερού τροφοδοσίας και
- (3) βλάβες στη μεμβράνη λόγω της παρουσίας χημικών ενώσεων που μπορούν να αντιδράσουν με τη μεμβράνη ή βιολογικών υλικών που μπορούν να αποικήσουν στη μεμβράνη.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Έμφραξη μεμβρανών

Τύπος έμφραξης μεμβρανών	Υπεύθυνα συστατικά	Παρατηρήσεις
Έμφραξη (σχηματισμός στρώματος το οποίο μερικές φορές φαίνεται ως σχηματισμός βιοφίλμ)	Μεταλλικά οξειδία Οργανικά και ανόργανα κολλοειδή Βακτήρια Μικροοργανισμοί Πόλωση της συγκέντρωσης	Η καταστροφή των μεμβρανών μπορεί να περιοριστεί με έλεγχο αυτών των ουσιών (για παράδειγμα, με χρήση μικροδιήθησης πριν την αντίστροφη όσμωση)
Επικαθίσεις αλάτων (κατακρήμνιση)	Θειικό ασβέστιο Ανθρακικό ασβέστιο Φθοριούχο ασβέστιο Θειικό βάριο Σχηματισμός μεταλλικού οξειδίου Πυρίτιο	Η δημιουργία επικαθίσεων μπορεί να μειωθεί με μείωση των περιεχόμενων αλάτων, με προσθήκη οξέος για να περιοριστεί ο σχηματισμός ανθρακικού ασβεστίου και με άλλες χημικές επεξεργασίες (π.χ. προσθήκη αντικαθαλατωτικών)
Βλάβες της μεμβράνης	Οξέα Βάσεις Ακραίες τιμές pH Ελεύθερο χλώριο Βακτήρια Ελεύθερο οξυγόνο	Οι βλάβες στις μεμβράνες μπορούν να περιοριστούν με έλεγχο αυτών των ουσιών. Ο βαθμός της βλάβης εξαρτάται από τη φύση της μεμβράνης

Τα συστατικά των υγρών αποβλήτων που μπορούν να προκαλέσουν έμφραξη των μεμβρανών

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

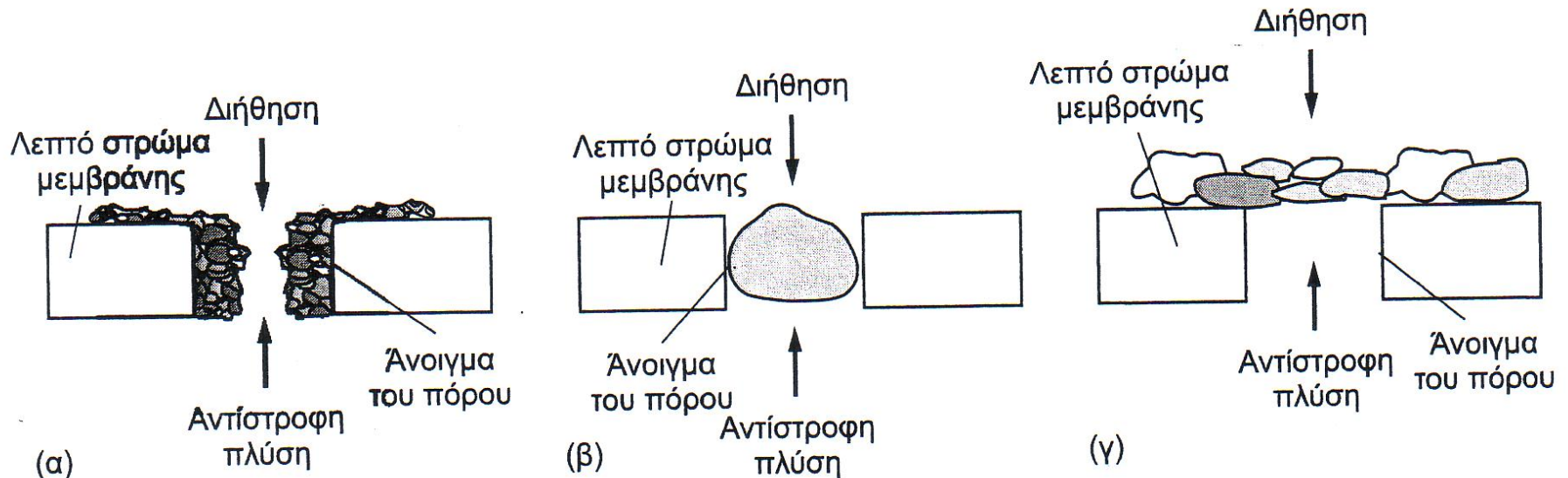
Έμφραξη μεμβρανών λόγω της σταδιακής συσσώρευσης στερεών

Οι τρεις αποδεκτοί μηχανισμοί που έχουν ως αποτέλεσμα την αντίσταση στη ροή λόγω της συσσώρευσης υλικών στο εσωτερικό του κυλινδρικού υποδοχέα είναι

(1) στένεμα των πόρων,

(2) φραγή των πόρων και

(3) σχηματισμός γέλης/στρώματος που προκλήθηκε από την πόλωση της συγκέντρωσης



(α)

15/5/2018

(β)

Αν. καθηγητής Π. Μελίδης

(γ)

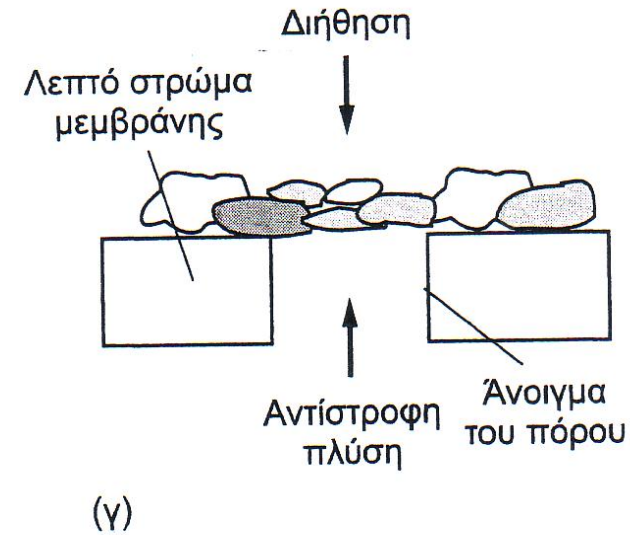
46

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Έμφραξη μεμβρανών λόγω της σταδιακής συσσώρευσης στερεών

Ο σχηματισμός της γέλης/στρώματος, που προκαλείται από την πόλωση της συγκέντρωσης, λαμβάνει χώρα όταν η πλειοψηφία των στερεών υλικών στην τροφοδοσία είναι μεγαλύτερη από το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης ή από το μοριακό βάρος που ορίζεται από τον παράγοντα απόρριψης της μεμβράνης.

Η πόλωση της συγκέντρωσης μπορεί να περιγραφεί ως η σταδιακή αύξηση υλικού κοντά ή πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης, η οποία προκαλεί μια αύξηση στην αντίσταση κατά τη μεταφορά του διαλύτη διαμέσου της μεμβράνης.



Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Έμφραξη μεμβρανών λόγω της σταδιακής συσσώρευσης στερεών

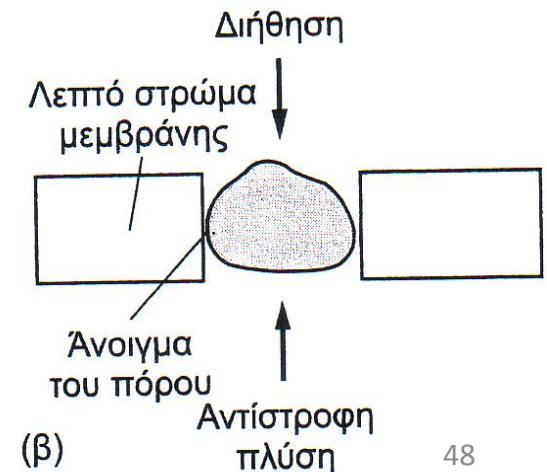
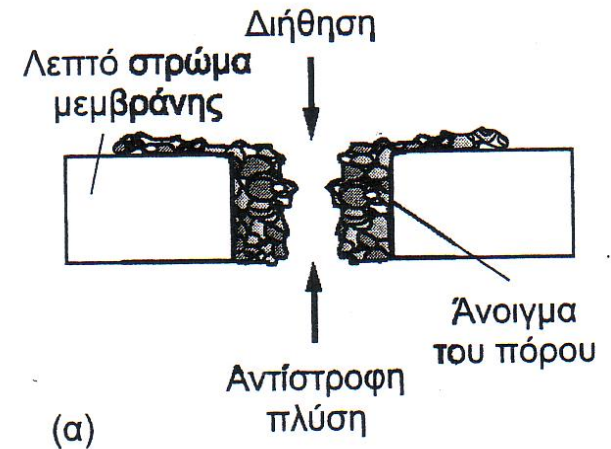
Η φραγή των πόρων λαμβάνει χώρα όταν σωματίδια μεγέθους ίσου με αυτό των πόρων φράσσουν τους πόρους της μεμβράνης.

Η στένωση αφορά την προσκόλληση στερεού υλικού στην εσωτερική επιφάνεια των πόρων με αποτέλεσμα το στένεμα των πόρων.

Έχει υποτεθεί ότι εάν το μέγεθος των πόρων μειωθεί, η πόλωση της συγκέντρωσης ενισχύεται περαιτέρω προκαλώντας αύξηση της έμφραξης

Οι μηχανισμοί της φραγής των πόρων και του στενέματος τους θα λάβουν χώρα

➤ μόνο όταν η στερεή ύλη στο νερό τροφοδοσίας είναι μικρότερη από το μέγεθος των πόρων ή το μοριακό βάρος που ορίζεται από τον παράγοντα απόρριψης.



Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Έλεγχος της έμφραξης των μεμβρανών

Για τον έλεγχο της έμφραξης των μεμβρανών συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις προσεγγίσεις:

- (1) προκατεργασία του νερού τροφοδοσίας,
- (2) αντίστροφη πλύση της μεμβράνης και
- (3) χημικός καθαρισμός των μεμβρανών.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Έλεγχος της εμφραξης των μεμβρανών

- Η προκατεργασία χρησιμοποιείται για τη μείωση των TSS και βακτηρίων που περιέχονται στο νερό τροφοδοσίας.
- Συχνά το νερό τροφοδοσίας θα επεξεργαστεί με χημικά μέσα για τον περιορισμό της χημικής κατακρήμνισης μέσα στις μονάδες.
- Η πιο συνηθισμένη μέθοδος μείωσης των συσσωρευμένων υλικών στην επιφάνεια της μεμβράνης είναι η αντίστροφη πλύση με νερό και/ή αέρα.
- Η χημική επεξεργασία χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση συστατικών τα οποία δεν απομακρύνονται με συμβατική αντίστροφη πλύση.
- Η βλάβη στη μεμβράνη από επιβλαβή συστατικά συνήθως δεν είναι αναστρέψιμη.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Προκατεργασία για νανοδιήθηση και αντίστροφη όσμωση

Για την αποτελεσματική λειτουργία μιας μονάδας νανοδιήθησης ή αντίστροφης όσμωσης απαιτείται πολύ υψηλή ποιότητα τροφοδοσίας.

Τα στοιχεία των μεμβρανών σε μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης μπορούν να υποστούν έμφραξη από κολλοειδή υλικά και συστατικά του ρεύματος τροφοδοσίας

Οι ακόλουθες επιλογές προκατεργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί από μόνες τους και/ή σε συνδυασμό.

Τεχνολογία – βασικές αρχές μεμβρανών

Προκατεργασία για νανοδιήθηση και αντίστροφη όσμωση

1. Προκατεργασία δευτεροβάθμιας εκροής με πλήρη επεξεργασία, άμεση διήθηση, ή διήθηση επαφής, με μικροδιήθηση, ή με υπερδιήθηση για την απομάκρυνση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών και κολλοειδών υλικών.
2. Κυψελοειδή φίλτρα με μέγεθος πόρων 5 έως 10 μm έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τη μείωση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών.
3. Για τον περιορισμό της βακτηριακής δραστηριότητας μπορεί να είναι απαραίτητο να απολυμανθεί το νερό τροφοδοσίας χρησιμοποιώντας χλώριο, όζον ή ακτινοβολία UV
4. Η απουσία του οξυγόνου μπορεί να είναι απαραίτητη για την αποφυγή οξείδωσης του σιδήρου, του μαγγανίου και του υδρόθειου.

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Εφαρμογές	Περιγραφή
Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση	
Αερόβια βιολογική επεξεργασία	Η μεμβράνη χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου από την ενεργή βιομάζα σε μια διεργασία ενεργού ιλύος. Η μονάδα διαχωρισμού των μεμβρανών μπορεί να είναι εγκατεστημένη εσωτερικά, βυθισμένη στον βιοαντιδραστήρα ή εξωτερικά από το βιοαντιδραστήρα (βλ. Σχήμα 11-45). Οι διεργασίες αυτές είναι γνωστές ως διεργασίες με βιοαντιδραστήρα με μεμβράνες (membrane bioreactor processes, MBR)
Αναερόβια βιολογική επεξεργασία	Η μεμβράνη χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου από την ενεργή βιομάζα σε έναν αναερόβιο αντιδραστήρα πλήρους ανάμιξης
Αερισμός με μεμβράνες σε βιολογική επεξεργασία	Μεμβράνες πλάκας και πλαισίου, σωληνοειδείς, και κοίλες μεμβράνες χρησιμοποιούνται για την μεταφορά καθαρού οξυγόνου στη βιομάζα η οποία είναι προσκολλημένη στην εξωτερική πλευρά των μεμβρανών (βλ. Σχήμα 11-47α). Οι διεργασίες αυτές είναι γνωστές ως διεργασίες με βιοαντιδραστήρα αερισμού με μεμβράνες (membrane aeration bioreactor processes, MABR)

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Εφαρμογές	Περιγραφή
Εκχύλιση με μεμβράνες σε βιολογική επεξεργασία	Οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται για την εκχύλιση βιοαπικοδομήσιμων οργανικών μορίων από ανόργανα συστατικά όπως οξέα, βάσεις και άλατα από το ρεύμα των αποβλήτων με στόχο την ακόλουθη βιολογική επεξεργασία (βλ. Σχήμα 11-47β). Οι διεργασίες αυτές είναι γνωστές ως διεργασίες βιοαντιδραστήρα εκχύλισης με μεμβράνες (extractive membrane bioreactor processes, EMBR)
Προκατεργασία για πιο αποδοτική απολύμανση	Οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των υπολειπόμενων αιωρούμενων στερεών από δευτεροβάθμιας εκροές μετά από καθίζηση ή από εκροές μετά από φίλτρα χώρου ή επιφάνειας, με στόχο την αποτελεσματική απολύμανση με χλώριο ή με ακτινοβολία UV, για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης
Προκατεργασία για νανοδιήθηση και αντίστροφη όσμωση	Τα μικροφίλτρα χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των υπολειπόμενων κολλοειδών και αιωρούμενων στερεών ως στάδιο προκατεργασίας για περαιτέρω επεξεργασία

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Εφαρμογές	Περιγραφή
Νανοδιήθηση	
Επαναχρησιμοποίηση εκροών	Χρησιμοποιείται για την επεξεργασία προδιηθημένων εκροών (συνήθως με μικροδιήθηση) για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης έμμεσα πόσιμου νερού, όπως η εισαγωγή σε υπόγεια νερά. Η χρήση νανοδιήθησης πριν την απολύμανση εγγυάται την αποτελεσματικότητά της
Αποσκλήρυνση υγρών αποβλήτων	Χρησιμοποιείται για τη μείωση των συγκεντρώσεων των πολυσθενών ιόντων που συνεισφέρουν στη σκληρότητα, σε συγκεκριμένες εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης
Αντίστροφη Όσμωση	
Επαναχρησιμοποίηση εκροών	Χρησιμοποιείται για την επεξεργασία προδιηθημένων εκροών (συνήθως με μικροδιήθηση) για εφαρμογές έμμεσης επαναχρησιμοποίησης πόσιμου νερού όπως η εισαγωγή σε υπόγεια νερά. Η χρήση αντίστροφης όσμωσης πριν την απολύμανση εγγυάται την αποτελεσματικότητά της
Αραίωση εκροών	Οι διεργασίες αντίστροφης όσμωσης έχουν αποδειχθεί ικανές να απομακρύνουν μεγάλες ποσότητες συγκεκριμένων ενώσεων όπως η NDMA
Επεξεργασία δύο σταδίων για χρήση σε λέβητες	Η αντίστροφη όσμωση δύο σταδίων χρησιμοποιείται για την παραγωγή νερού κατάλληλου για λέβητες υψηλής πίεσης

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Εφαρμογές μεμβρανών στην απομάκρυνση ειδικών συστατικών υγρών αποβλήτων

Συστατικό	Τεχνολογία μεμβρανών				Παρατηρήσεις
	MF	UF	NF	RO	
Βιοαποικοδομήσιμες οργανικές ενώσεις		✓	✓	✓	
Σκληρότητα			✓	✓	
Βαρέα μέταλλα			✓	✓	
Νιτρικά			✓	✓	
Οργανικοί ρύποι προτεραιότητας		✓	✓	✓	
Συνθετικές οργανικές ενώσεις			✓	✓	
TDS			✓	✓	
TSS	✓	✓			Τα TSS απομακρύνονται κατά την προκατεργασία πριν την NF και RO
Βακτήρια	✓ ^β	✓	✓	✓	Χρησιμοποιούνται για απολύμανση με μεμβράνες. Τα βακτήρια απομακρύνονται στο στάδιο της προκατεργασίας με MF και UF όταν ακολουθεί NF και RO
Κύστες πρωτόζωων και ωκύστες και ωάρια ελμίνθων	✓	✓	✓	✓	
Ιοί			✓	✓	Χρησιμοποιούνται για απολύμανση με μεμβράνες

^α Οι ειδικοί ρυθμοί απομάκρυνσης εξαρτώνται από τη σύσταση και τη συγκέντρωση των συστατικών στα υγρά απόβλητα

^β Μεταβλητή απόδοση

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Τυπικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών μεμβρανών που εφαρμόζονται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Τεχνολογία μεμβρανών	Τυπικό εύρος λειτουργίας, μm	Πίεση λειτουργίας		Ρυθμός πυκνότητας ροής		Λεπτομέρειες που αφορούν τις μεμβράνες	
		lb/in^2	kPa	$\text{gal/ft}^2 \cdot \text{d}$	$\text{L/m}^2 \cdot \text{d}$	Τύπος	Διαμόρφωση
Μικροδιήθηση	0.08 - 2.0	1 - 15	7 - 100	10 - 40	405 - 1 600	Πολυπροπυλένιο, ακρυλονιτρίλιο, νάιλον και πολυτετραφθοροαιθυλένιο	Ελικοειδούς περιέλιξης, κοίλων ινών, πλάκας και πλαισίου
Υπερδιήθηση	0.005 - 0.2	10 - 100	70 - 700	10 - 20	405 - 815	Οξική κυτταρίνη, αρωματικά πολυαμίδια	Ελικοειδούς περιέλιξης, κοίλων ινών, πλάκας και πλαισίου
Νανοδιήθηση	0.001 - 0.01	75 - 150	500 - 1 000	5 - 20	200 - 815	Οξική κυτταρίνη, αρωματικά πολυαμίδια	Ελικοειδούς περιέλιξης, κοίλων ινών
Αντίστροφη όσμωση	0.0001 - 0.001	125 - 1000	850 - 7 000	8 - 12	320 - 490	Οξική κυτταρίνη, αρωματικά πολυαμίδια	Ελικοειδούς περιέλιξης, κοίλων ινών, σύνθετες λεπτού στρώματος

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Τυπικά τιμές κατανάλωσης ενέργειας και απόδοσης για διάφορα συστήματα μεμβρανών

Διεργασία μεμβρανών	Πίεση λειτουργίας		Κατανάλωση ενέργειας,		Ανάκτηση προϊόντος, %
	lb/in ²	kPa	1000 gal	kWh ανά m ³	
Μικροδιήθηση	15	100	0.1	0.4	94 - 98
Υπερδιήθηση	75	525	0.8	3.0	70 - 80
Νανοδιήθηση	125	875	1.4	5.3	80 - 85
Αντίστροφη όσμωση	225	1 575	2.7	10.2	70 - 85
Αντίστροφη όσμωση	400	2 800	4.8	18.2	70 - 85
Ηλεκτροδιάλυση			2.5	9.5	75 - 85

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών επεξεργασίας με μεμβράνες

Πλεονεκτήματα

Μειονεκτήματα

Μικροδιήθηση και υπερδιήθηση

Μπορεί να επιτευχθεί μείωση της ποσότητας των χημικών ενώσεων που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία

Απαιτείται μικρότερος χώρος (εμβαδόν)? ο εξοπλισμός των μεμβρανών απαιτεί 50 έως 80% λιγότερο χώρο από τις συμβατικές μονάδες

Μειώνονται οι απαιτήσεις για εργατικά? μπορεί να αυτοματοποιηθεί εύκολα

Οι νέοι σχεδιασμοί μεμβρανών επιτρέπουν τη χρήση χαμηλότερων πιέσεων? το κόστος του συστήματος μπορεί να είναι συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών διεργασιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Απομακρύνονται κύστες των πρωτόζωων, ωκύστες και ωάρια των ελμίνθων? μερική απομάκρυνση των βακτηρίων και ιών

Χρησιμοποιείται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια τα συστήματα υψηλής πίεσης μπορεί να είναι εντατικά ως προς την κατανάλωση ενέργειας Μπορεί να απαιτείται προκατεργασία για την αποφυγή της έμφραξης οι εγκαταστάσεις προκατεργασίας αυξάνουν τις απαιτήσεις για χώρο και το ολικό κόστος

Μπορεί να απαιτηθεί διαχείριση των υπολειμμάτων και διάθεση του συμπυκνώματος Απαιτείται αντικατάσταση των μεμβρανών περίπου κάθε 3 με 5 έτη

Η δημιουργία επικαθίσεων μπορεί να είναι ένα σοβαρό πρόβλημα. Η τάση για δημιουργία επικαθίσεων είναι δύσκολο να προβλεφθεί χωρίς δοκιμές στο πεδίο

Ο ρυθμός πυκνότητας ροής (ο ρυθμός ροής του νερού τροφοδοσίας διαμέσου της μεμβράνης) σταδιακά μειώνεται με το χρόνο. Οι ρυθμοί ανάκτησης μπορεί να είναι σημαντικά μικρότεροι από 100%

Έλλειψη μιας αξιόπιστης μεθόδου χαμηλού κόστους για την καταγραφή της απόδοσης

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών επεξεργασίας με μεμβράνες

Πλεονεκτήματα

Μειονεκτήματα

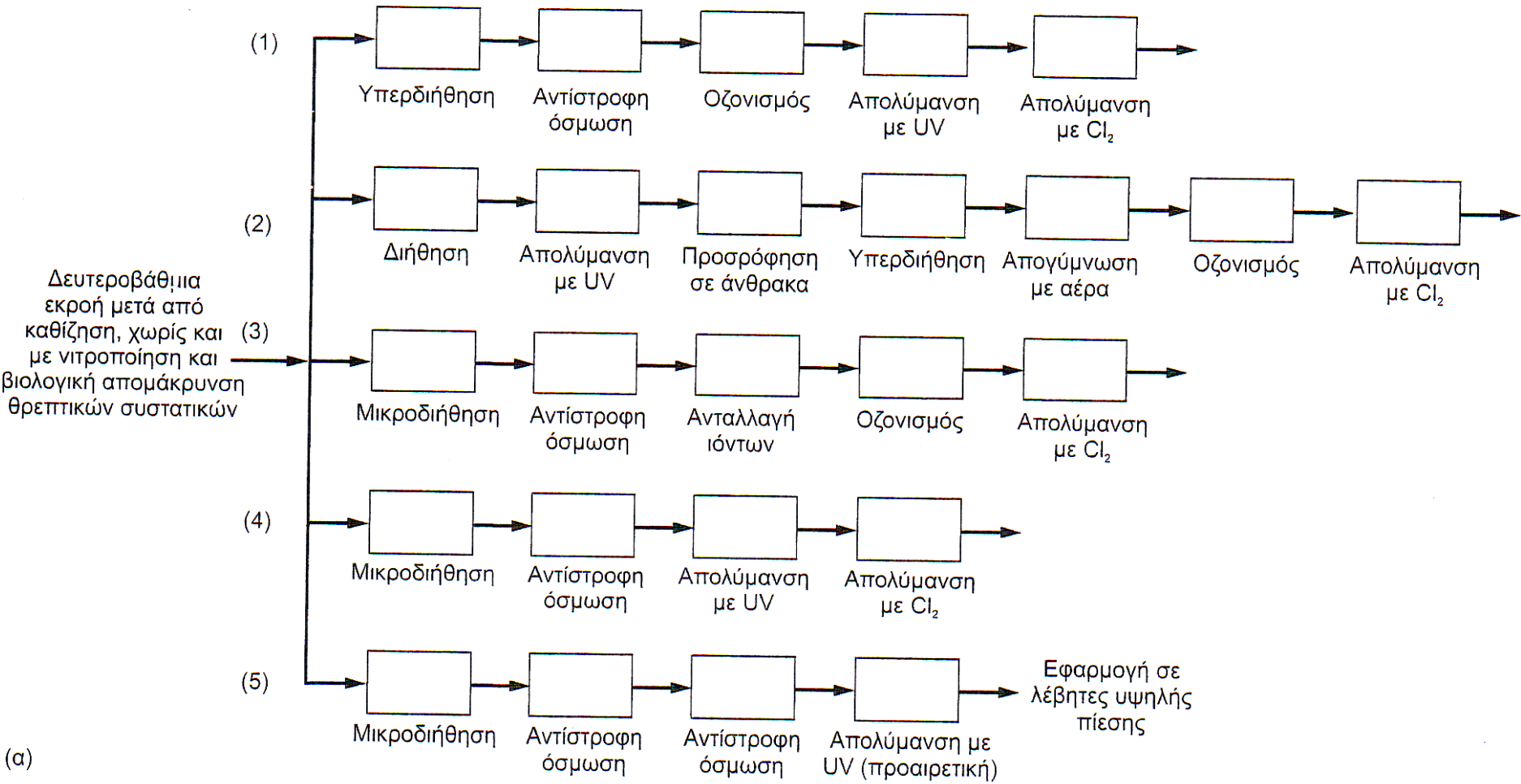
Αντίστροφη Όσμωση

Μπορεί να επιτευχθεί απομάκρυνση των διαλυμένων συστατικών
Μπορεί να επιτευχθεί απολύμανση του επεξεργασμένου νερού
Μπορεί να επιτευχθεί απομάκρυνση της NDMA και άλλων σχετικών οργανικών ενώσεων
Μπορεί να επιτευχθεί απομάκρυνση των φυσικών οργανικών ουσιών (πρόδρομες ενώσεις των παραπροϊόντων απολύμανσης) και ανόργανης ύλης

Η βέλτιστη λειτουργία επιτυγχάνεται με υπόγεια νερά ή με επιφανειακά νερά που περιέχουν χαμηλή συγκέντρωση στερεών ή με προκατεργασμένες εκροές
Έλλειψη μιας αξιόπιστης μεθόδου χαμηλού κόστους για την καταγραφή της απόδοσης
Μπορεί να απαιτηθεί διαχείριση των υπολειμμάτων και διάθεση του συμπυκνώματος
Δαπανηρή σε σύγκριση με τη συμβατική επεξεργασία

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

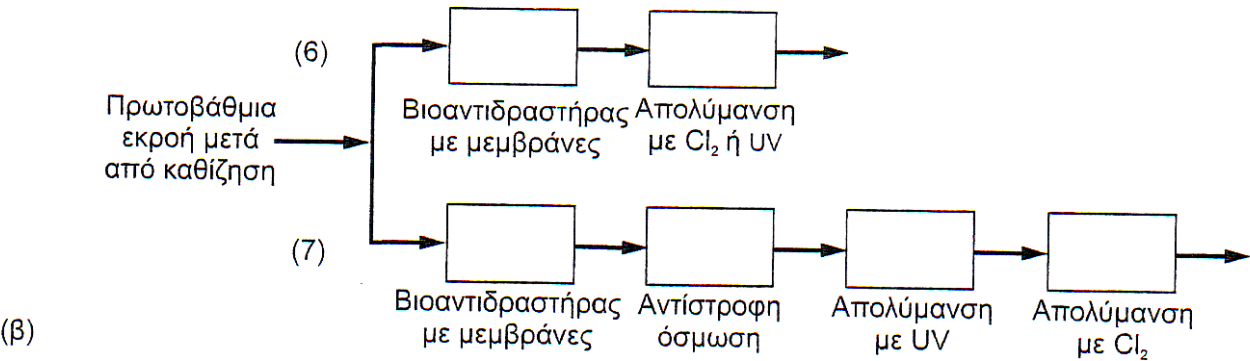
Τυπικά διαγράμματα ροής που περιέχουν μεμβράνες κατά την προχωρημένη επεξεργασία υγρών αποβλήτων – δευτεροβάθμιας εκροής



(α)

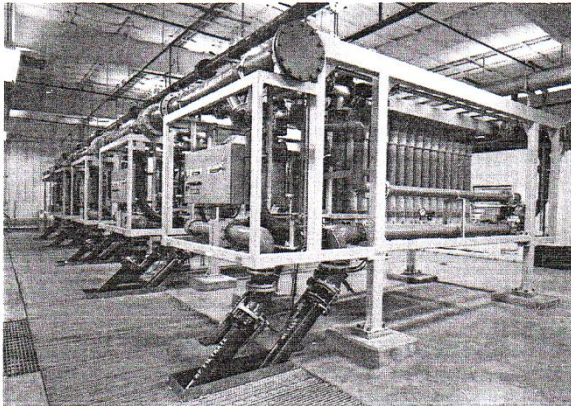
Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Τυπικά διαγράμματα ροής που περιέχουν μεμβράνες κατά την προχωρημένη επεξεργασία υγρών αποβλήτων – πρωτοβάθμιας εκροής μετά από καθίζηση



Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

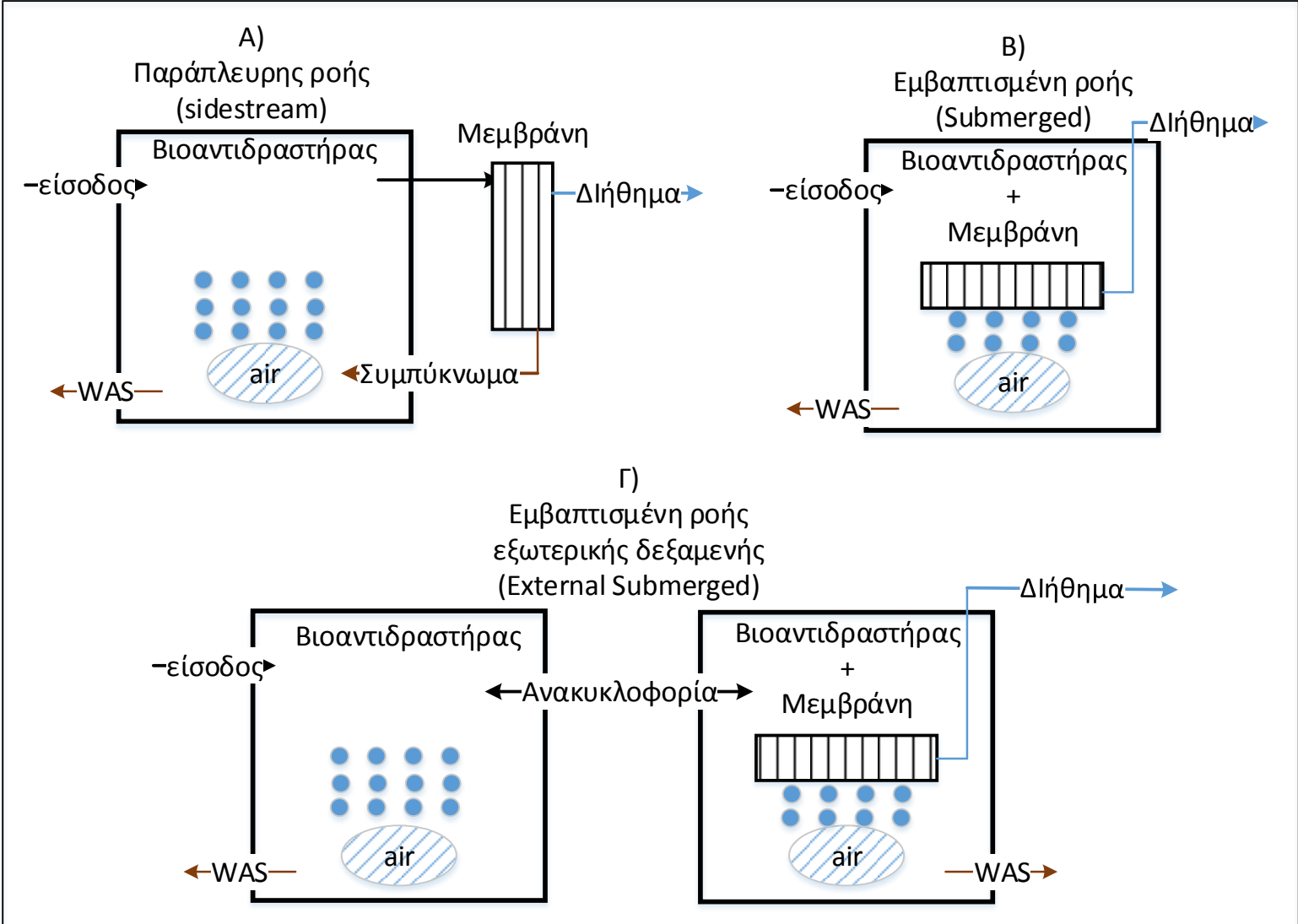
Μονάδα MF ως στάδιο προκατεργασίας για RO και πίνακας συνοπτικής απόδοσης



Συστατικό	Εισροή της MF, mg/L	Εκροή της MF, mg/L	Μέση μείωση, %	Μείωση που αναφέρθηκε στη βιβλιογραφία, %
TOC	10 - 31	9 - 16	57	45 - 65
BOD	11 - 32	< 2 - 9.9	86	75 - 90
COD	24 - 150	16 - 53	76	70 - 85
TSS	8 - 46	< 0.5	97	95 - 98
TDS	498 - 622	498 - 622	0	0 - 2
NH ₃ - N	21 - 42	20 - 35	7 ₁	5 - 15
NO ₃ - N	< 1 - 5	< 1 - 5	0	0 - 2
PO ₄ ⁻	6 - 8	6 - 8	0	0 - 2
SO ₄ ²⁻	90 - 120	90 - 120	0	0 - 1
Cl ⁻	93 - 115	93 - 115	0	0 - 1
Θολότητα	2 - 50 NTU	0.03 - 0.08 NTU	> 99	

Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

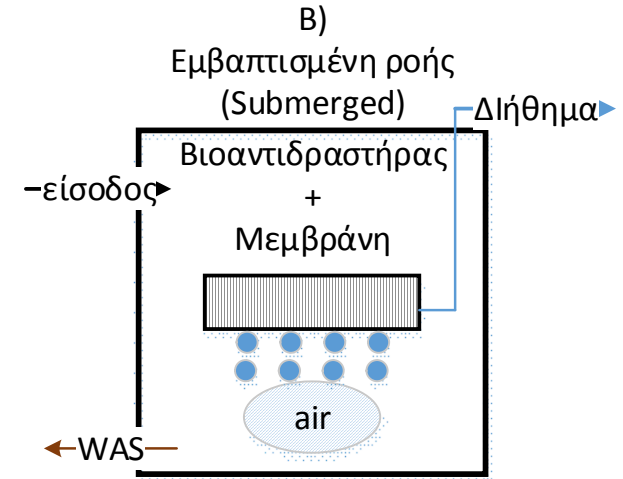
Οι βασικές διατάξεις MBR



Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Οι βασικές διατάξεις MBR

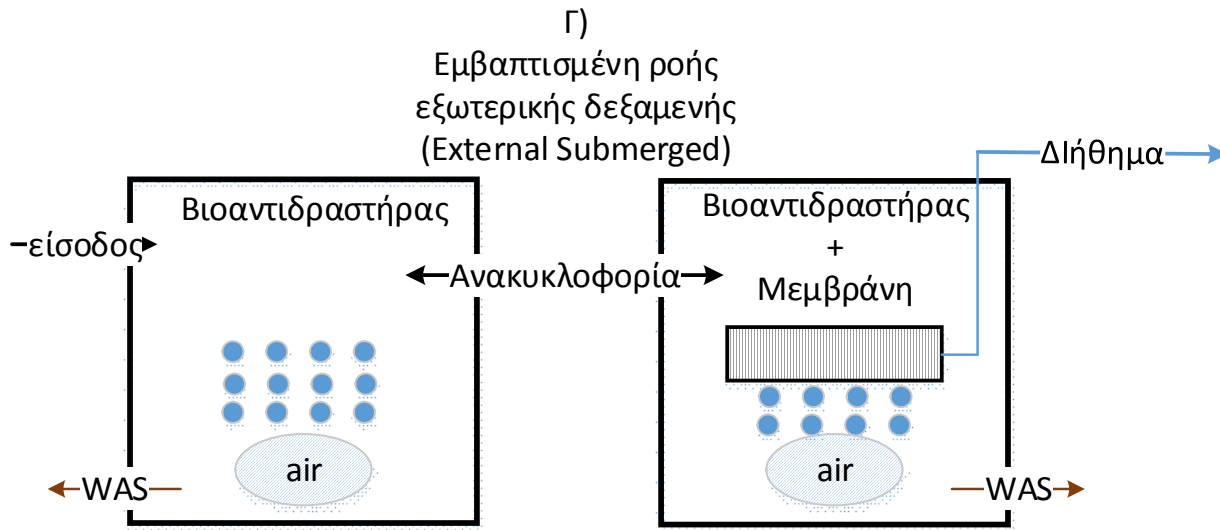
- Στις διατάξεις εμβαπτισμένης ροής το δομοστοιχείο τοποθετείται μέσα στο βιοαντιδραστήρα.
- Η διεργασία της διήθησης πραγματοποιείται με εφαρμογή αντλίας και ταυτόχρονα με τις βιολογικές διεργασίες.
- Το παραγόμενο διήθημα συλλέγεται εξωτερικά του αντιδραστήρα χωρίς να παράγεται ρεύμα συμπυκνώματος.



Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Οι βασικές διατάξεις MBR

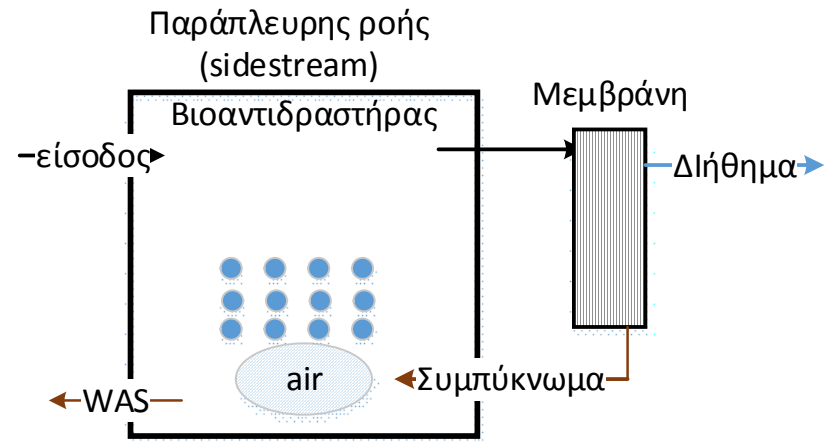
- Ενώ για τη διάταξη εξωτερικά εμβαπτισμένης ροής οι διεργασίες είναι ίδιες με μόνη διαφορά τη ανάγκη για ανακυκλοφορία του ανάμεικτου υγρού.



Εφαρμογές μεμβρανών στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Οι βασικές διατάξεις MBR

- Στη διάταξη παράπλευρης ροής το δομοστοιχείο που εφαρμόζεται είναι συνήθως σωληνοειδούς ή σπειροειδούς τύπου.
- Το διήθημα συλλέγεται εξωτερικά με τη βοήθεια αντλίας ενώ το συμπύκνωμα επιστρέφει στο αντιδραστήρα.
- Η βασική διαφοροποίηση είναι ότι απαιτείται η ανακυκλοφορία του συμπυκνώματος της παράπλευρης ροής, αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας.



MBR-πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα

πλεονεκτήματα

1. Μικρή επιφάνεια εγκατάστασης
2. Πλήρης αφαίρεση στερεών
3. Απολύμανση απορροής
4. Αφαίρεση οργανικών, θρεπτικών και στερεών
5. Υψηλή ικανότητα φόρτισης
6. Χαμηλή / ή μηδενική παραγωγή ιλύος
7. Γρήγορη εκκίνηση
8. Διόγκωση και επίπλευση ιλύος δεν αποτελούν πρόβλημα
9. Τμηματική επέκταση

μειονεκτήματα

1. Περιορισμοί αερισμού
2. Έμφραξη ανόργανη και οργανική της μεμβράνης
3. Κόστος μεμβρανών

Σύγκριση συστήματος ενεργούς ιλύος και MBR

Παράμετρος	Ενεργός ιλύς	MBR
Ηλικία ιλύος [d]	20	30
COD removal [%]	94,5	99
DOC removal [%]	92,7	97
TSS removal [%]	60,9	99,9
A/N removal [%]	98,9	99,2
TP removal [%]	88,5	96,6
Παραγωγή ιλύος kgVS/kgCOD.d	0,22	0,27
Μέσο μέγεθος νιφάδων [μm]	20	3,5

Cicek et al., 1999

Κριτήρια σχεδιασμού MBR

Φορτίσεις - Χαρακτηριστικά

Παράμετρος	Τιμές σχεδιασμού
Οργανική φόρτιση (>90% αφαίρεση)	1,2 – 3,2 kg COD/m ³ .d 0,05 – 0,66 kg BOD/m ³ .d
Οργανική φόρτιση για πλήρη νιτροποίηση	0,05 – 0,66 kg BOD/m ³ .d Ηλικία ιλύος 10-50d
Οργανική φόρτιση για πλήρη απονιτροποίηση	4 kg NH ₄ -N/m ³ .d 5 kg NO ₃ -N/m ³ .d
MLSS	10 -20 g/L
Flux	5 – 300 L/m ² .h
Specific flux	20 – 200 L/m ² .h bar
Design flux (Kubota, φ of 0.4 μm)	0,5 m ³ /m ² .h 125 – 175 L/m ² .h bar

Κριτήρια σχεδιασμού MBR

Παραδείγματα specific fluxes

Σχεδίαση	Specific flux	Reference
Εμβαπτισμένη HF (submerged HF)	50 – 65 L/m ² .h bar	Gunder & Krauth, 1998
Εμβαπτισμένη Flat Plate	115 L/m ² .h bar	Gunder & Krauth, 1998
Εξωτερική σωληνοειδής (tubular side stream)	40 – 60 L/m ² .h bar	Le Clech et al., 1999

Κριτήρια σχεδιασμού MBR

Υλικά και μέγεθος πόρων

Σχεδίαση	Specific flux	Reference
UF and MF submerged	0,02 – 0,5 μm	Polyethylene, polypropylene, polysulphone ...
UF and MF side stream	0,02 – 0,5 μm	Ceramics, Polyethylene, polypropylene, polysulphone ...
NF submerged	0,02 < μm	Polyethylene, polypropylene, polysulphone ...

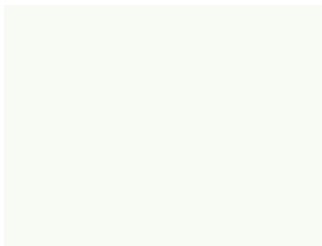
Κριτήρια σχεδιασμού MBR

Αερόβιο MBR: κατανάλωση ενέργειας
Άντληση εισροής, ανακυκλοφορία, άντληση διηθήματος, αερισμός

Σχεδίαση	Κατανάλωση ενέργειας	Reference
MF submerged	0,2 – 0,4 kW/h.m ³	Cote et al., 1998
MF side stream	2 – 10 kW/h.m ³	Cote et al., 1998
MF hollow fiber submerged	0,3 kW/h.m ³ 0,28 για αερισμό	Cote et al., 1998

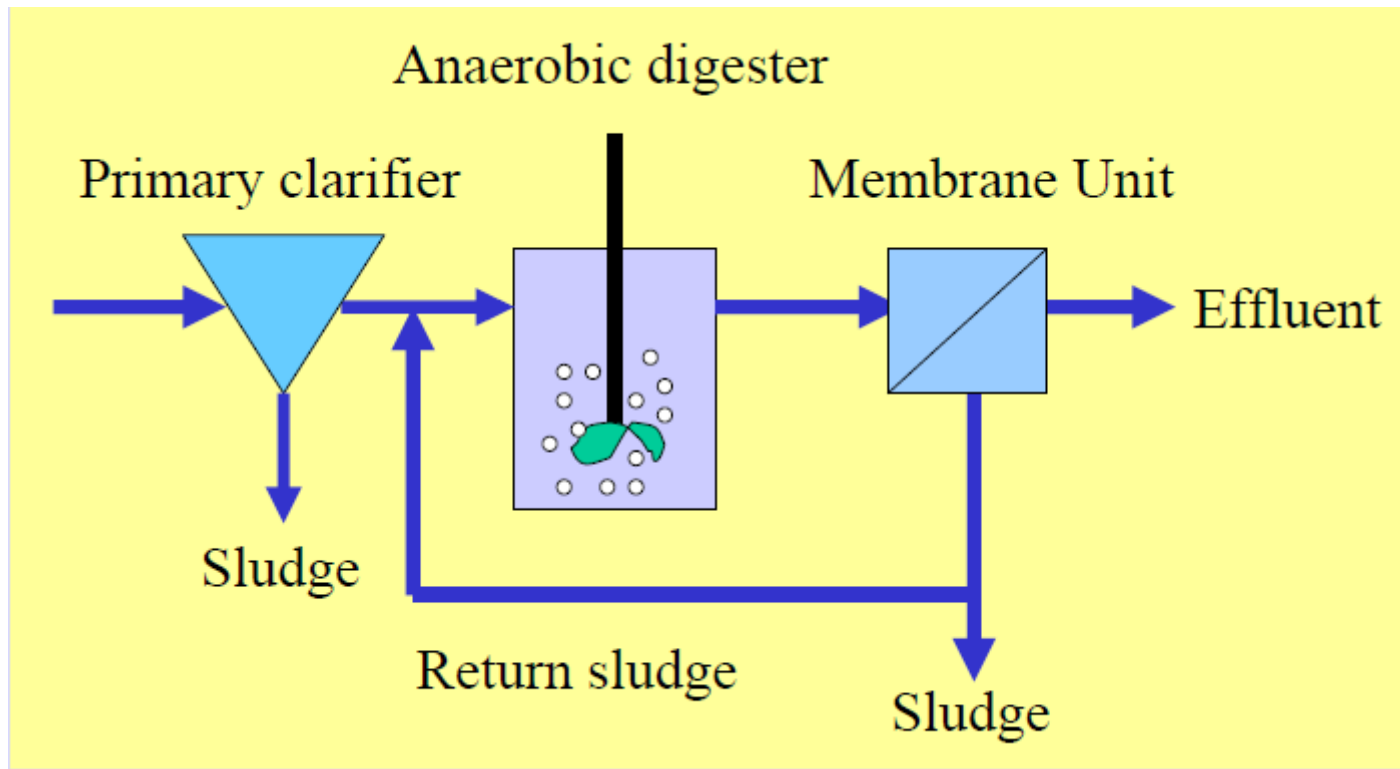
Λειτουργία MBR video

MBR Video



Κριτήρια σχεδιασμού MBR

Αναερόβιο MBR side stream



Κριτήρια σχεδιασμού MBR

Φορτίσεις - Χαρακτηριστικά

Παράμετρος	Τιμές σχεδιασμού	Reference
Side stream MBR – Loading rate acidogenic	54 kg COD/m ³ .d	Anderson et al., 1986
Side stream MBR – Loading rate methanogenic	12,2 kg COD/m ³ .d	Anderson et al., 1986
Submerged MBR Loading rates	15 kg COD/m ³ .d	Li et al., 1986 Kayawake et al., 1991
HRT	67 h POME	
HRT	124 h maize waste	

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Η ροή διηθήματος (flux) ορίζεται ως,

$$J = Q / A_{\text{μεμβρ άνης}}$$

$$J \text{ (l m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$$

- ισούται με την ογκομετρική παροχή του διηθήματος Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) ανά επιφάνεια διήθησης A (m^2) και ανά μονάδα χρόνου (hr), επηρεάζεται άμεσα από
 - την υδραυλική αντίσταση της μεμβράνης,
 - την ωθούσα δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης και
 - τις υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν και την έμφραξη (Judd, 2004).

συνήθη μονάδα μέτρησης, $\text{l m}^{-2}\text{hr}^{-1}$

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Παρόλα αυτά η “ρεαλιστική” κινητήρια δύναμη (driving force) της διήθησης είναι η διαμεμβρανική πίεση (trans membrane pressure, TMP)

$$TMP = P_{feed} - P_{permeate}$$

- που αντικατοπτρίζει τη διαφορά πίεσης που δημιουργείται μεταξύ της πλευράς τροφοδοσίας και της πλευράς του διηθήματος
- εξαιτίας της υψηλότερης πίεσης που εφαρμόζεται στο εσωτερικό από ότι εξωτερικό η TMP έχει πάντα αρνητικό πρόσημο κατά τη διάρκεια της διήθησης, υποδηλώνοντας τη κατεύθυνση ροής

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Η ροή του διηθήματος συνδέεται με την πίεση που αναπτύσσεται μέσα στη μεμβράνη από τον ακόλουθο τύπο, που βασίζεται στο νόμο του Darcy:

$$J = \frac{TMP}{\eta \times R}$$

Όπου:

J (l/m²/hr), ροή διηθήματος (Flux)

TMP (bar), διαμεμβρανική πίεση

η (N*sec/m²), ιξώδες διηθήματος

R (m⁻¹), αντίσταση διήθησης

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Η αντίσταση διήθησης (Resistance, R) και διηθητικότητα (permeability, P) είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη και υπολογίζονται,

$$R = \frac{TMP}{\eta \times J}$$

με μονάδα μέτρησης (m^{-1})

$$P = \frac{J}{TMP}$$

με μονάδα μέτρησης ($l/m^2/hr/bar$)

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

- Κατά τη διεργασία της διήθησης συσσωρεύονται συστατικά του νερού τροφοδοσίας στη επιφάνεια της μεμβράνης (πόλωση συγκέντρωσης).
- Όταν συσσωρευτεί μια οριακή ποσότητα υλικών λαμβάνουν χώρα φαινόμενα έμφραξης αυξάνοντας την διαμεμβρανική πίεση (TMP).
- Η TMP και η ροή διηθήματος (J) είναι αντίστροφος ανάλογα μεγέθη.
- Για να επανέλθει το σύστημα στη αρχική του (ή σχεδόν) κατάσταση απαιτείτε κάποια διαδικασία καθαρισμού

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Χαρακτηριστικά διαχωρισμού της μεμβράνης

1. **Αποτελέσματα καθαρισμού με αέρα** (air scouring effect) σε σχέση με την ένταση ροής του αέρα (μετράμε την μείωση του flux σύμφωνα με την ένταση του αέρα

Η αντίσταση μεταβάλλεται από αεριζόμενη σε μη αεριζόμενη συνθήκη λειτουργίας

Η απόθεση ιλύος επηρεάζεται άμεσα σύμφωνα με την ταχύτητα του αέρα, αλλά όχι αναλογικά.

Μετά από ένα όριο η επίδραση είναι πολύ μικρή και μη αποδοτική σε σχέση με την ενέργεια που σπαταλάτε

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Χαρακτηριστικά διαχωρισμού της μεμβράνης

1. Υπολογισμός απόθεσης στην μεμβράνη (sludge deposition)

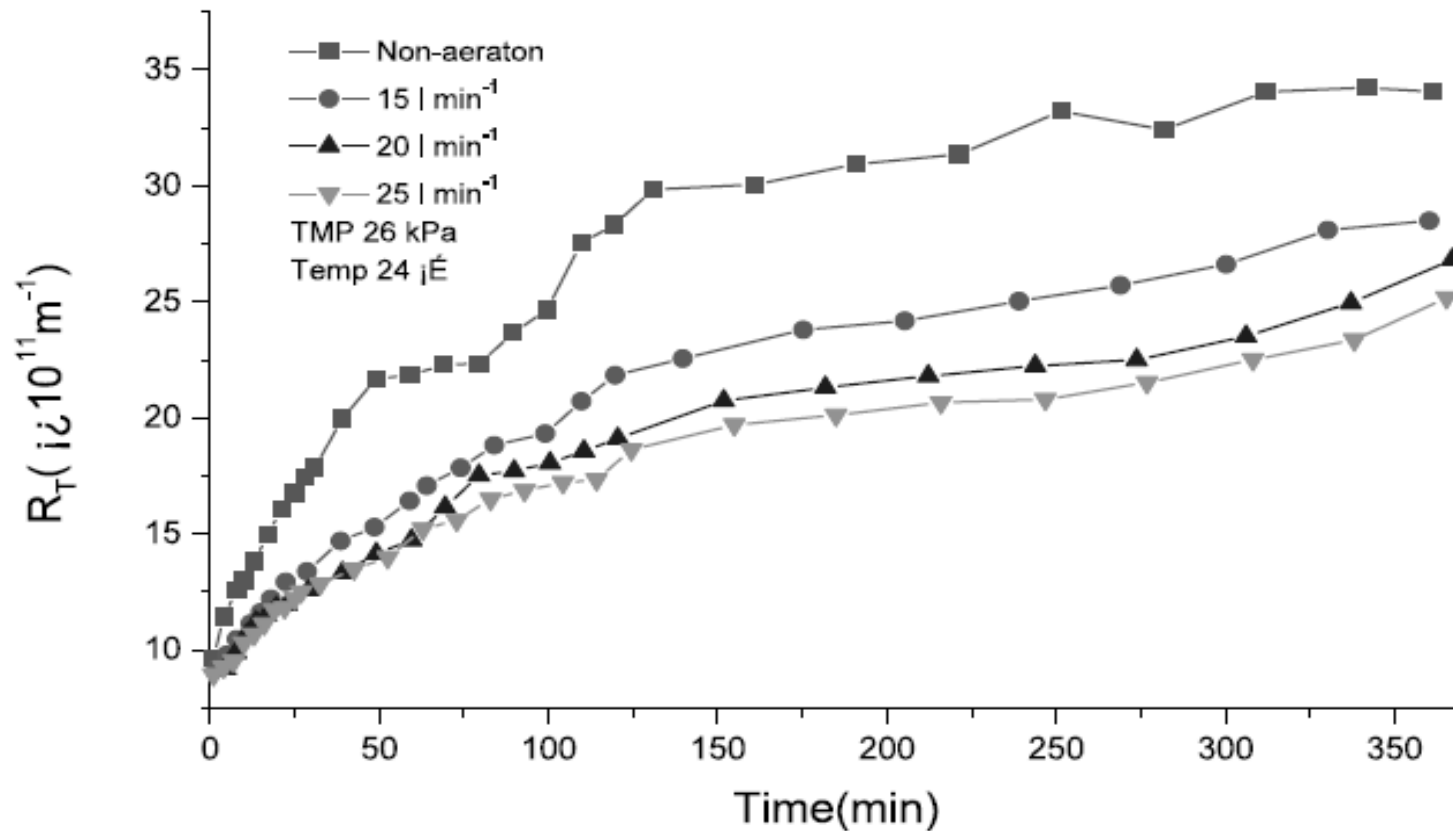


Fig. 3. Increase of total filtration resistances according to airflow intensity.

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Χαρακτηριστικά διαχωρισμού της μεμβράνης

1. Υπολογισμός απόθεσης στην μεμβράνη (sludge deposition)
υπολογίζεται ποσοτικά με το μοντέλο αντίστασης

$$R_t = \Delta P_t / \mu J_v$$

1. R_t = ολική αντίσταση διήθησης (1/m)
2. J_v = permeation flux (m/s)
3. ΔP_t = Διαμεμβρανική πίεση (TMP, Pa)
4. μ = ιξώδες του διηθήματος (Pa/s)

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Χαρακτηριστικά διαχωρισμού της μεμβράνης

2. Κρίσιμη ροή (critical flux)

είναι η ροή κατά την οποία καθίζηση στερεών αρχίζει να λαμβάνει χώρα.

Είναι αναγκαίο για την μακρόχρονη ζωή και χρήση της μεμβράνης χωρίς την αναγκαία πλύση με χημικά.

Μη αναστρέψιμος σχηματισμός βιοφίλμ (fouling) αναπτύσσεται γρήγορα όταν εργαζόμαστε πάνω από την κρίσιμη ροή.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για να μετρηθεί η κρίσιμη ροή, π.χ. παρακολουθώντας την TMP με τον χρόνο διήθησης σε σταθερή ροή (flux) και αντίστροφα. Fig 4.

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Χαρακτηριστικά διαχωρισμού της μεμβράνης – κρίσιμη ροή

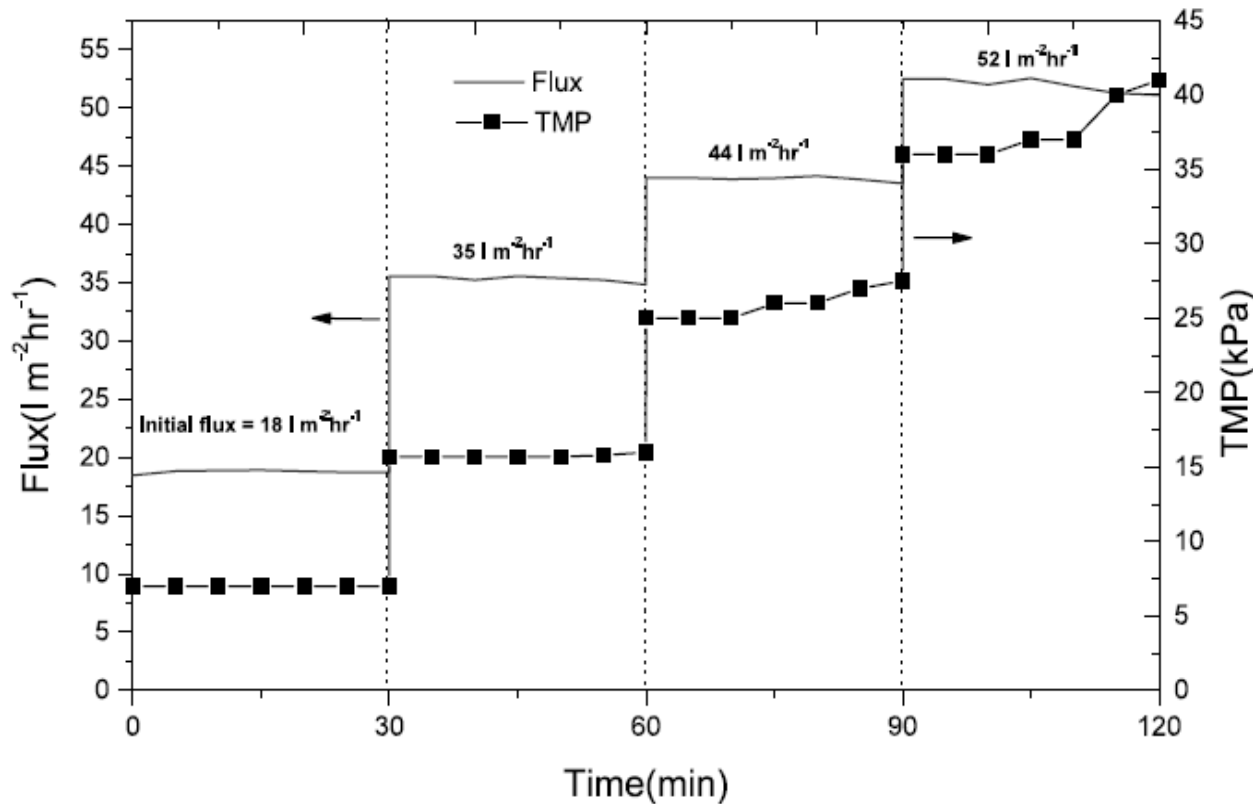


Fig. 4. Variation of TMP with time under step increment of permeate flux.

Σταθερή ροή
Καταγραφή της TMP
TMP παραμένει σταθερή
σε κάθε επιλεγμένο
ρυθμός ροής (flux) μέχρι
τα 35 L/m²_h.
Στα 44 L/m²_h η TMP
αυξάνεται από 25 σε 28
kPa.
Σε υψηλότερη ροή 52
L/m²_h η TMP αυξάνεται
πολύ απότομα
→ ο ρυθμός ροής δεν
μπορεί να ελεγχθεί από
την αντλία.

MBR-Παράμετροι λειτουργίας

Χαρακτηριστικά διαχωρισμού της μεμβράνης – κρίσιμη ροή

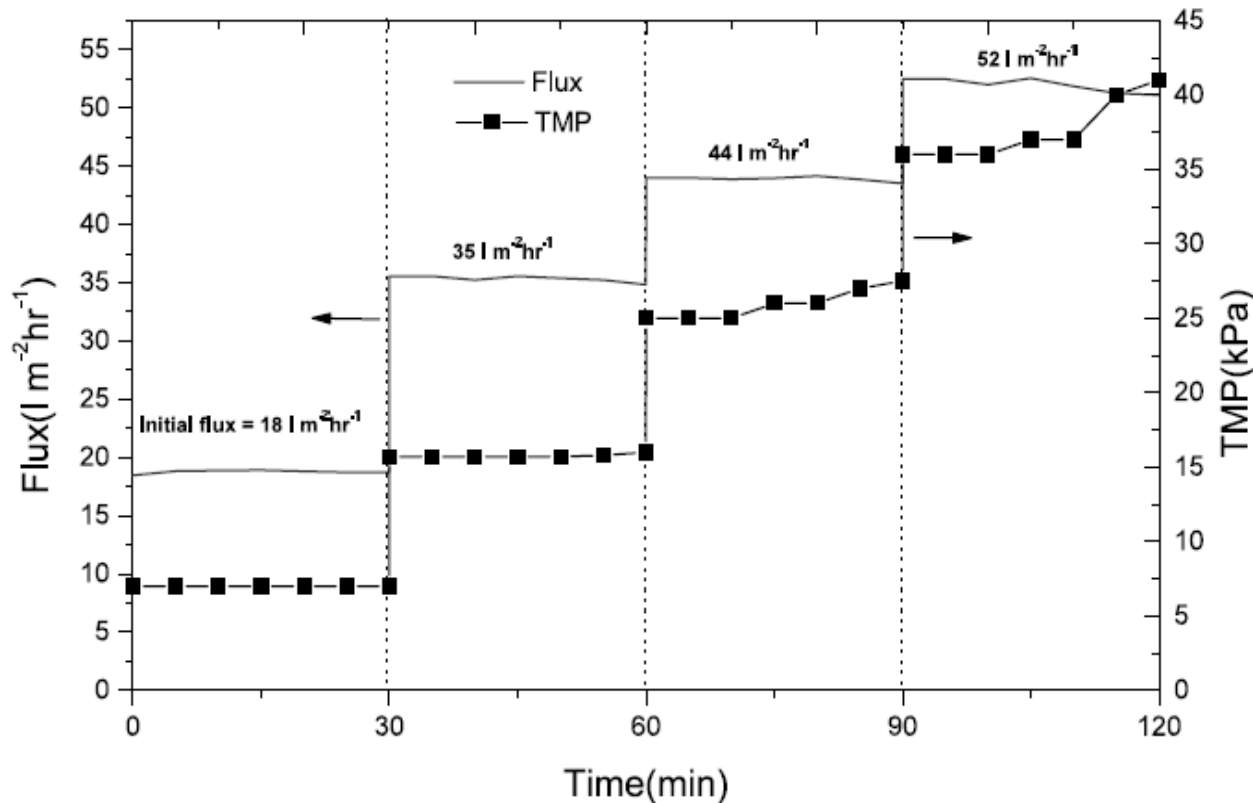


Fig. 4. Variation of TMP with time under step increment of permeate flux.

Συμπεράσματα

- Κρίσιμη ροή εμφανίζεται να υπάρχει μεταξύ 35 και 44 L/m²_h σε αυτό το σύστημα
- εάν η επιφάνεια της μεμβράνης είναι επαρκής, η μεμβράνη θα μπορούσε να λειτουργήσει σε περίπου 13 L/ m²_h προκειμένου να καταστεί δυνατός ένας υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) 36 h και να λειτουργεί κάτω από το κρίσιμο όριο λειτουργίας της.

MBR-Παράμετροι λειτουργίας μεμβράνης

4. Μεταβολή της TMP κατά την διάρκεια της λειτουργίας του MBR

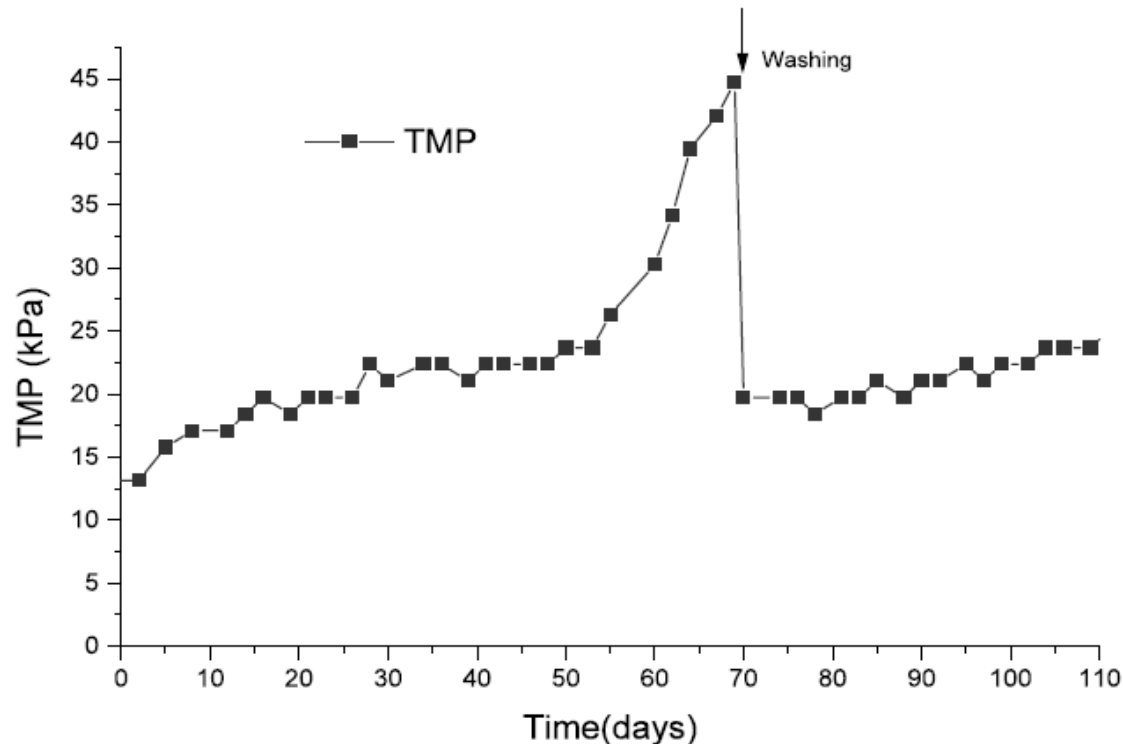


Fig. 5. Variation of TMP during the MSBR operation.

- Δείχνει πότε θα πρέπει να διεξαχθεί πλύση της μεμβράνης με χημικά (μετά την 60 ημέρα λειτουργίας η TMP φθάνει σε ένα κρίσιμο όριο 25kPa)
- Αυξάνεται απότομα εξαιτίας της ανάπτυξης μη αναστρέψιμου βιοφίλμ μεμβράνης → πρέπει να βγει και να πλυθεί με χημικά.

MBR-Παράμετροι λειτουργίας μεμβράνης

4. Μεταβολή της TMP κατά την διάρκεια της λειτουργίας του MBR

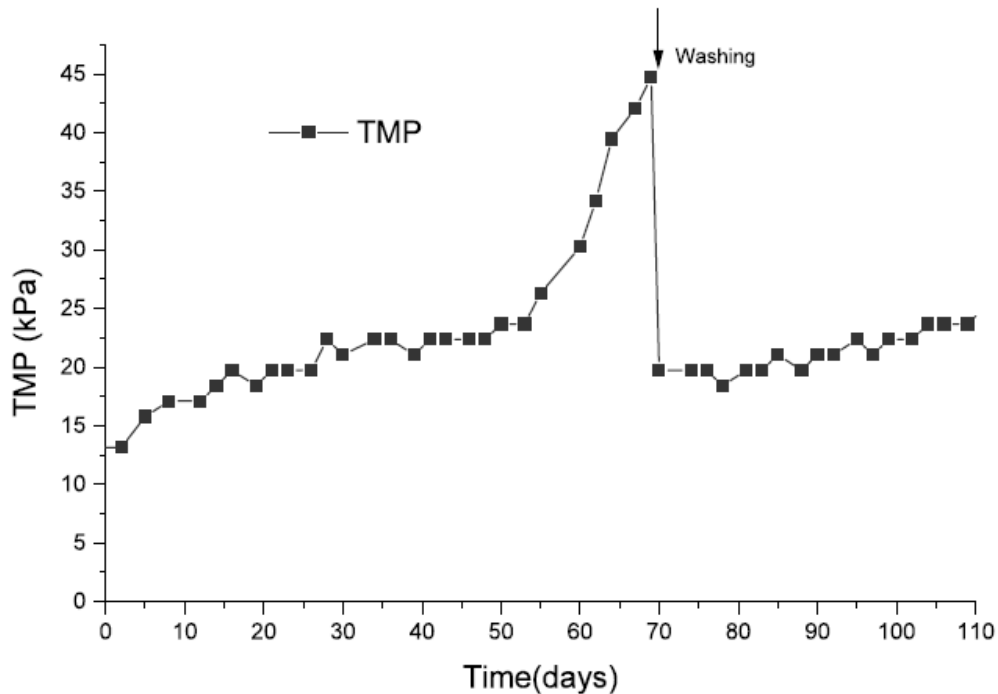


Fig. 5. Variation of TMP during the MSBR operation.

το μακρύ διάστημα είναι εφικτό λόγω:

- 1) της λειτουργίας κάτω από το κρίσιμο όριο ροής,
- 2) του αερισμού της μεμβράνης
- 3) λόγω της εναλλασσόμενης άντλησης απόρριψης.
- 4) μακρύς χρόνος αερισμού κατά την φάση της οξειδωσης.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Χαρακτηριστικά του βιοφιλμ

Για την κατανόηση του φαινομένου της έμφραξης απαιτείται να ερευνηθούν διάφοροι παράγοντες όπως οι συνθήκες λειτουργίας των MBR, τα υλικά κατασκευής μεμβρανών, τη σύσταση του νερού τροφοδοσίας και τα χαρακτηριστικά του βιοφιλμ.

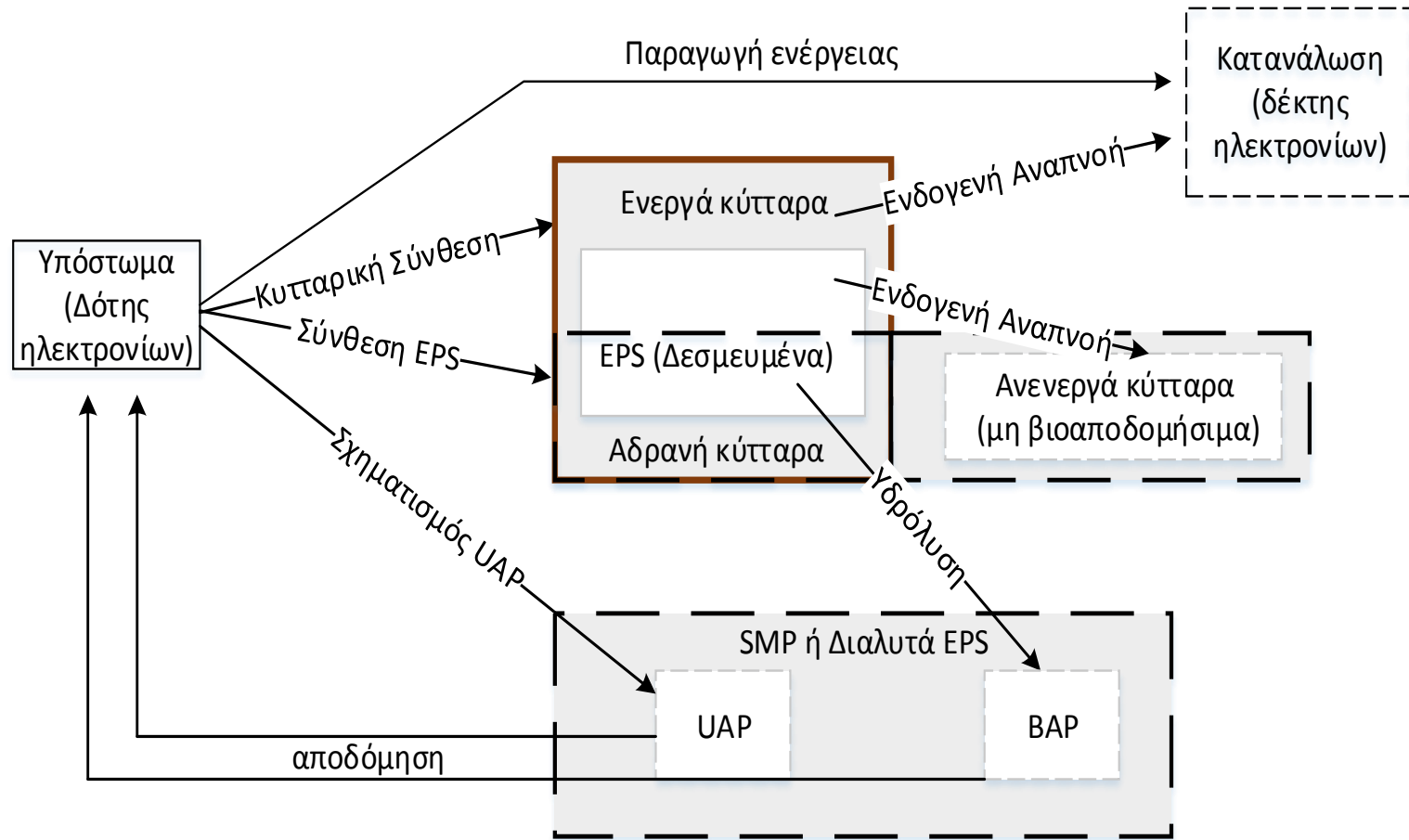
Στα συστήματα ενεργού ιλύος οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σε συγκεντρωτικές δομές όπως είναι οι νιφάδες και το βιοφιλμ, προσκολλημένοι σε ένα πλέγμα εξωκυτταρικών πολυμερών.

Με το φαινόμενο της έμφραξης των μεμβρανών σχετίζονται διάφοροι παράγοντες όπως είναι

- η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών (MLSS) και
- το ιξώδες του ανάμεικτου υγρού,
- όμως οι σημαντικότεροι φαίνεται να είναι τα προσκολλημένα εξωκυτταρικά πολυμερή και τα διαλυτά μικροβιακά προϊόντα.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

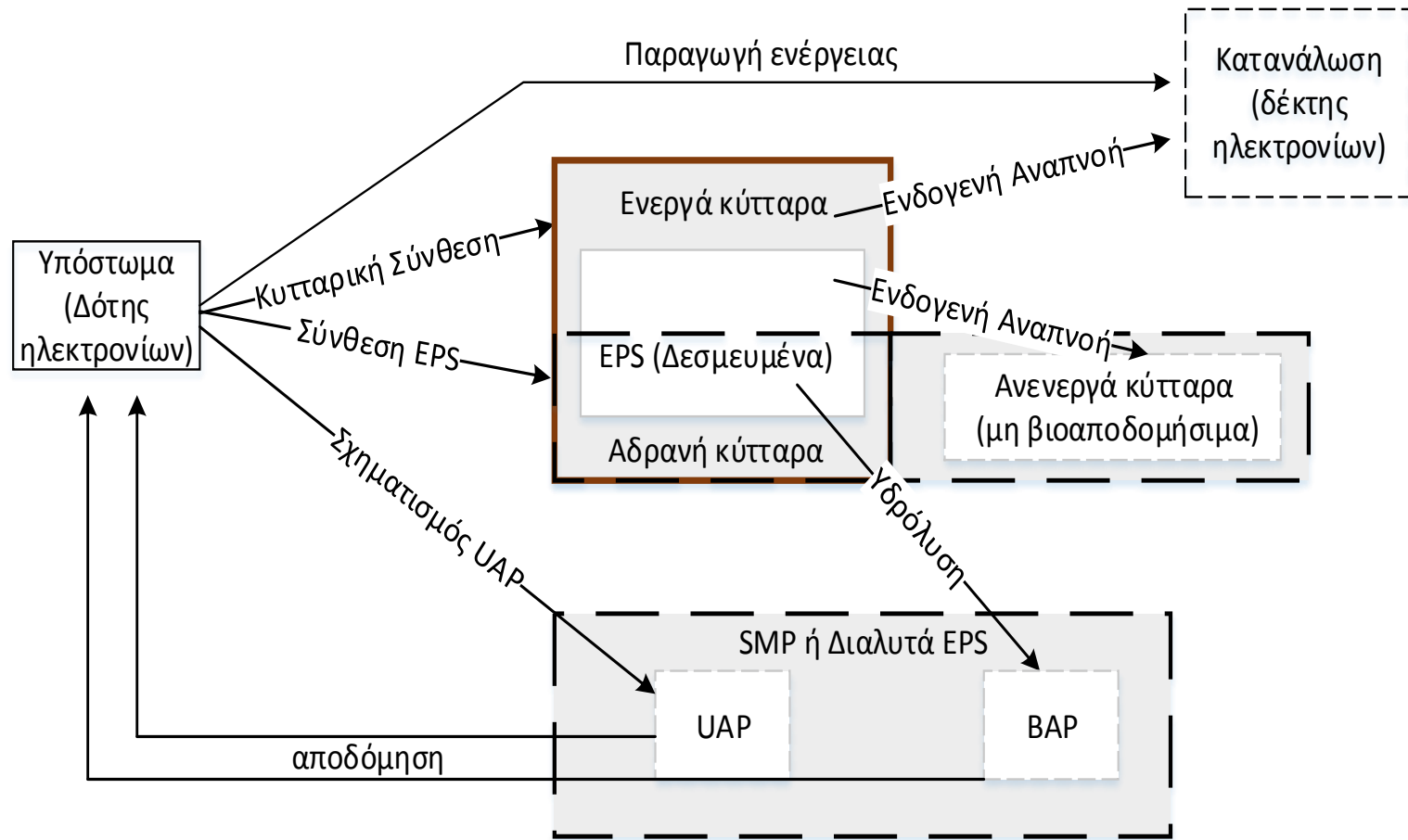
Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Τα ενεργά κύτταρα θα καταναλώσουν υπόστρωμα για να συνθέσουν ενεργή βιομάζα (νέα κύτταρα), να παράξουν ενέργεια, καθώς επίσης και να σχηματίσουν δεσμευμένα EPS και UAP (substrate utilization associated products) .

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

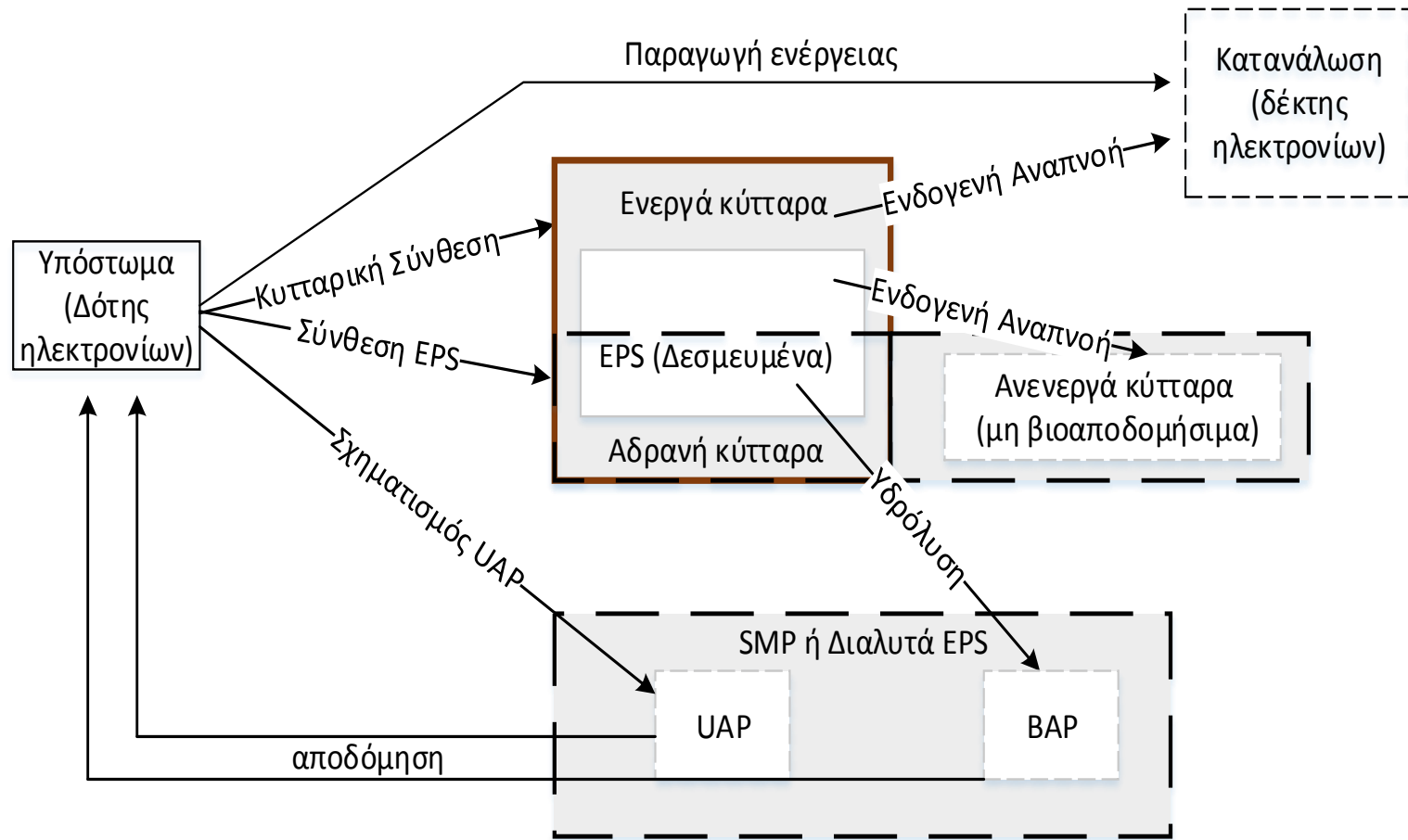
Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Τα δεσμευμένα EPS όταν υδρολύονται μετατρέπονται σε BAP (biomass-associated products).

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

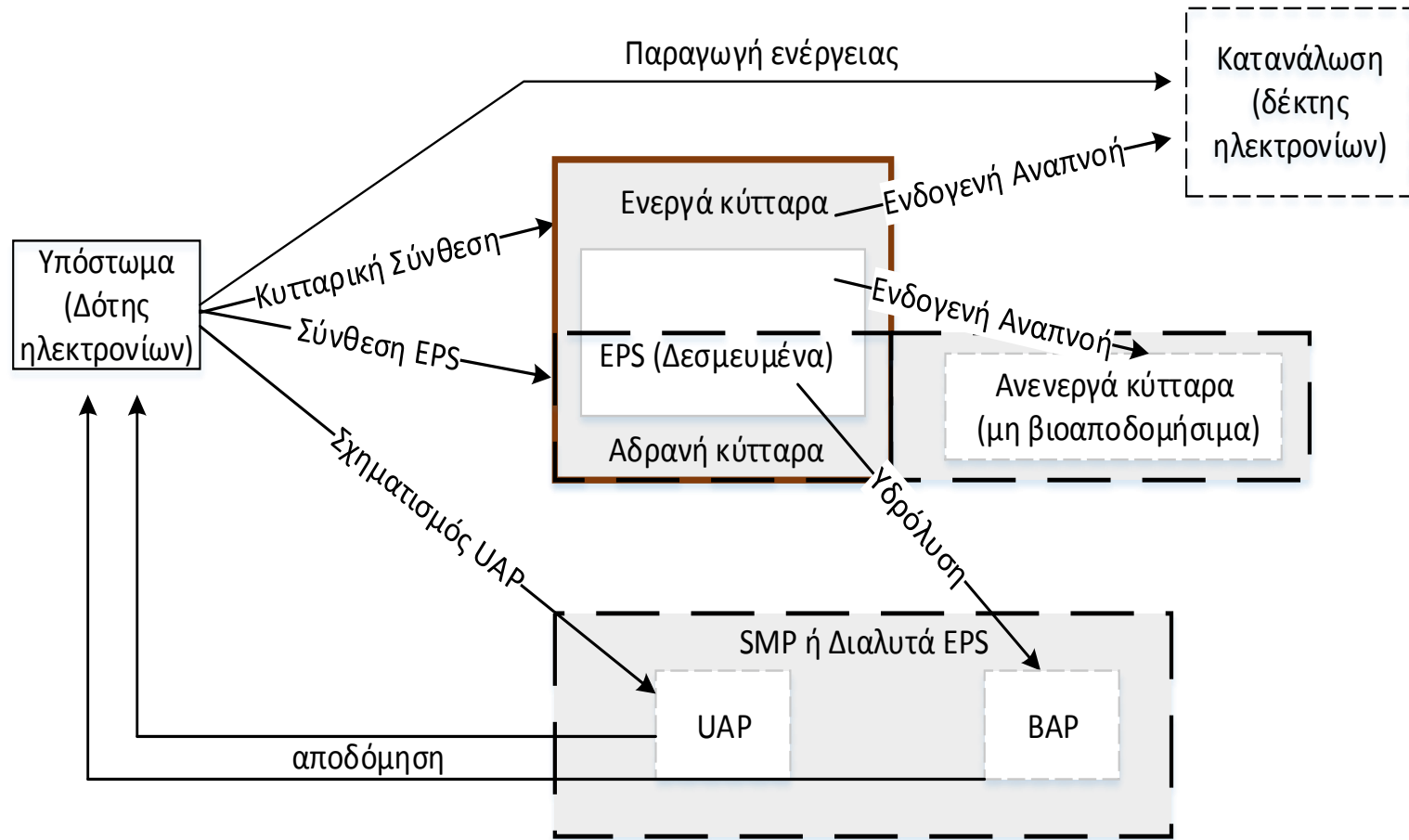
Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Κατά τη διάρκεια της ενδογενούς αναπνοής (απουσία θρεπτικών) η ενεργή βιομάζα καταφέρνει να επιβιώνει μέσα από μια διαδικασία αυτοσυντήρησης (οξειδώνει το ίδιο το βιοδιασπώμενο κλάσμα της).

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

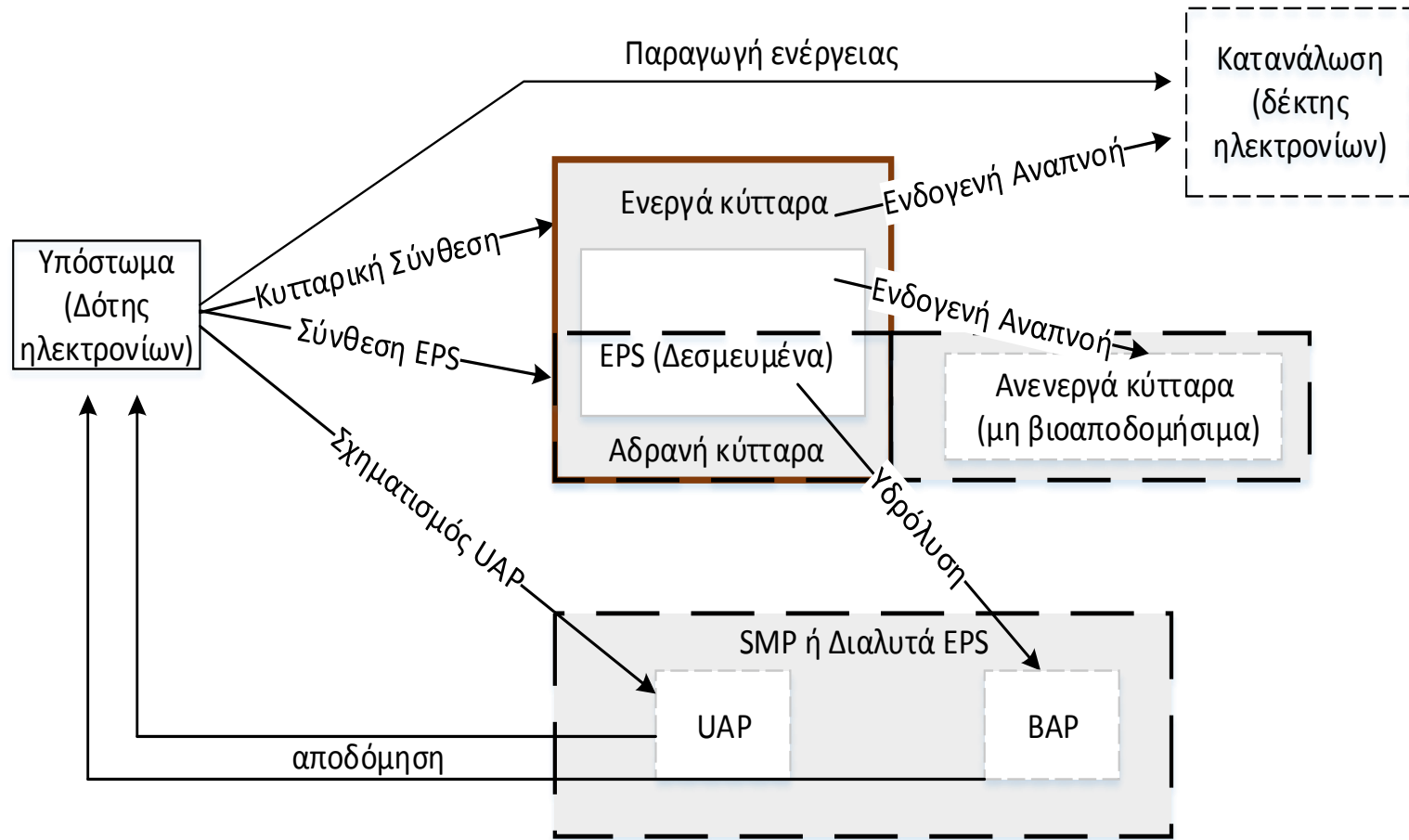
Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Παρόλα αυτά ένα μικρό ποσοστό της ενεργής βιομάζας δεν επιβιώνει στην ενδογενή αναπνοή και καταλήγει σαν αδρανή βιομάζα (νεκρά κύτταρα).

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

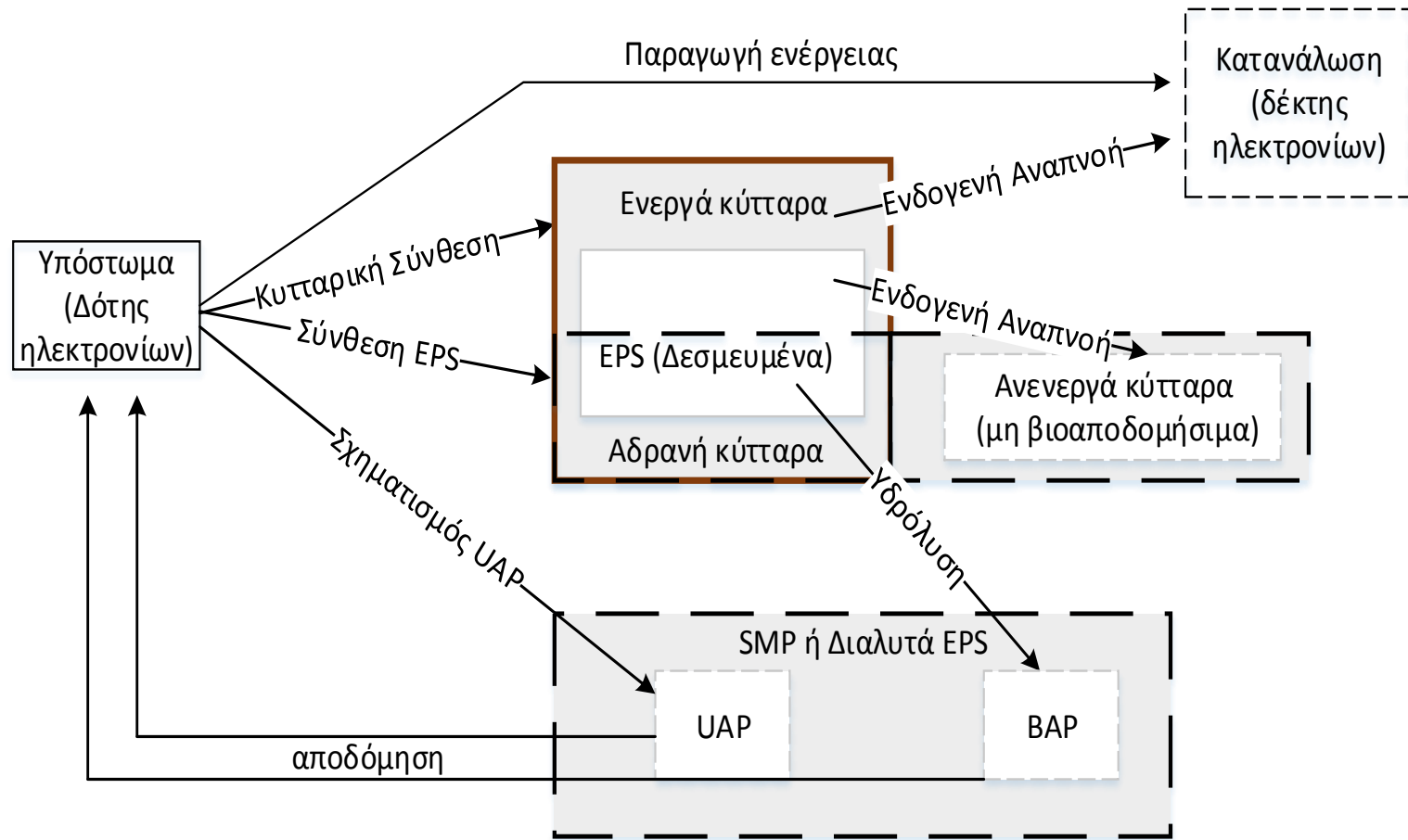
Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Η αδρανή βιομάζα περιλαμβάνει και κάποια δεσμευμένα EPS (εκτός νεκρών κυττάρων και ανόργανων συστατικών).

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

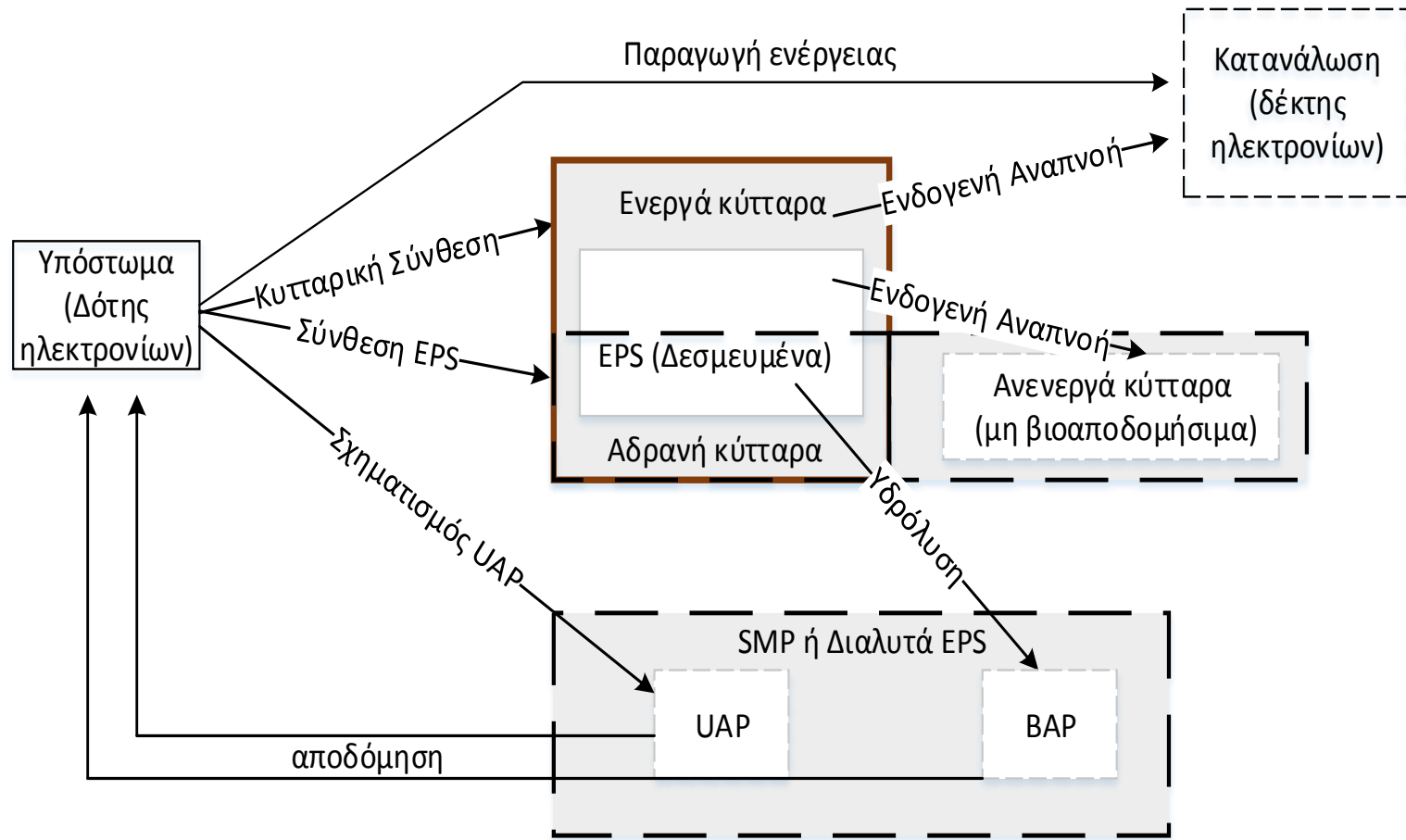
Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Η ενεργός βιομάζα (όπως ορίζεται από τη σχολή SMP) περιλαμβάνει δεσμευμένα EPS.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

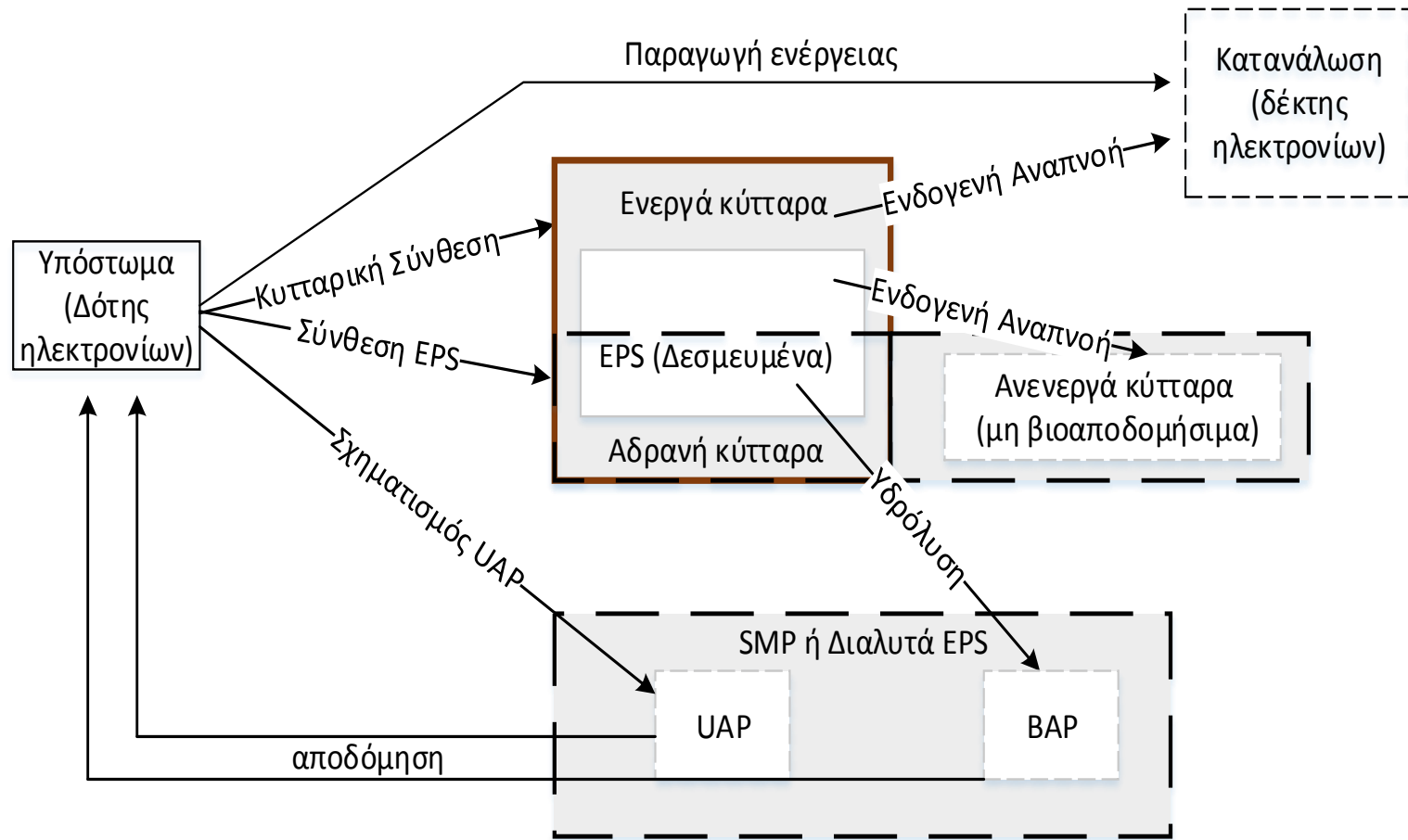
Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Τα UAP και BAP είναι βιοδιασπώμενα και χρησιμοποιούνται από την ενεργό βιομάζα ως ανακυκλωμένοι δότες ηλεκτρονίων (εναλλακτικό υπόστρωμα).

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

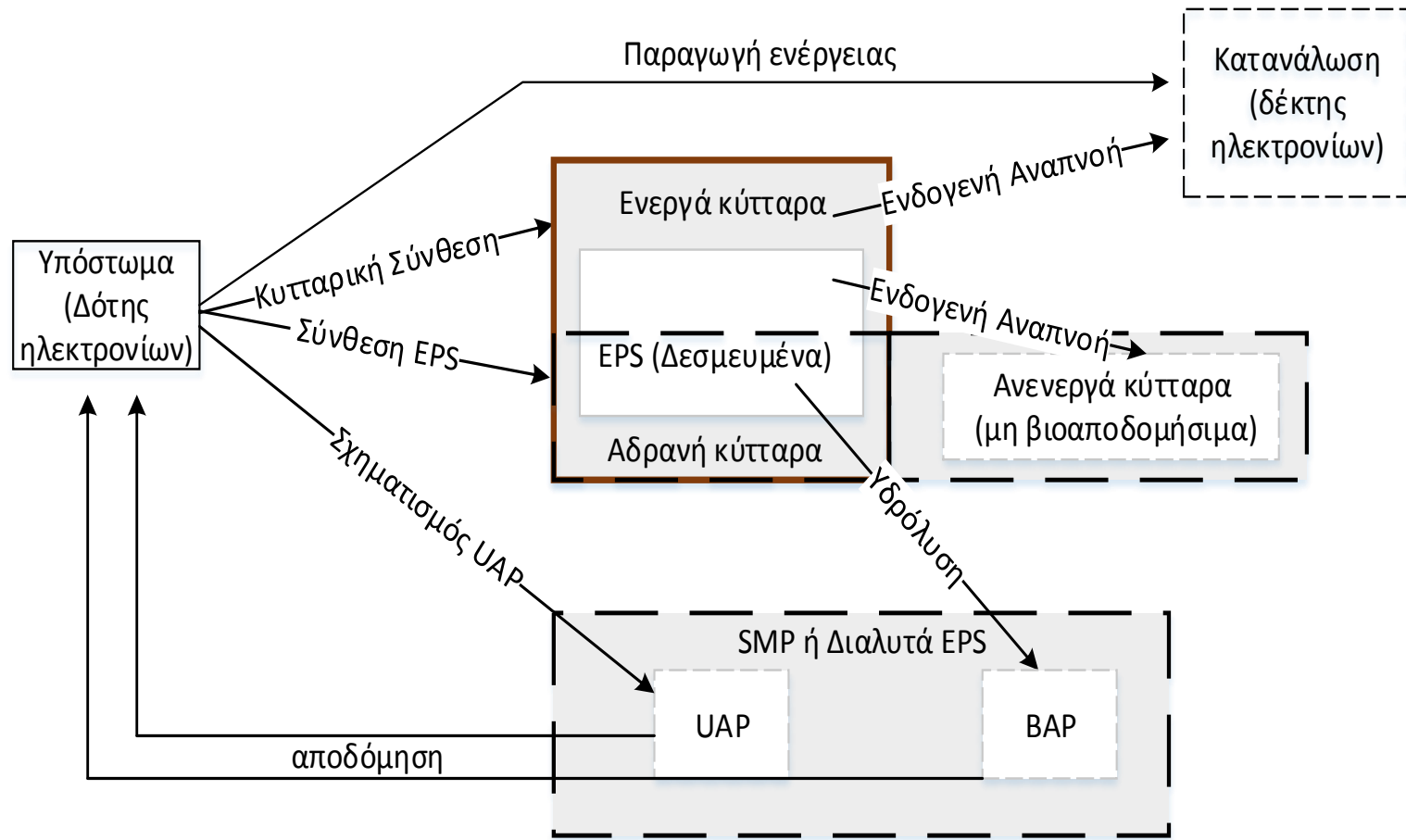
Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Τα διαλυτά EPS αποτελούν τα SMP ή το άθροισμα των UAP & BAP.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Σύγχρονες θεωρίες Σχηματική απεικόνιση της ενοποιημένης θεωρίας των Laspidou and Rittmann (2002).



Τα MWs των SMP κυμαίνονται από λιγότερο 1 kDa έως και πάνω από 20 kDa. Τα UAP είναι χαμηλού μοριακού βάρους ενώ τα BAP υψηλού μοριακού βάρους αποτελώντας αυτά το οργανικό διαλυτό υλικό της εκροής.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Σύγχρονες θεωρίες

Επίσης παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη σχέση αλληλεξάρτησης μεταξύ ετερότροφων και αυτότροφων μικροοργανισμών σε συστήματα ενεργού ιλύος.

Συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της νιτροποίησης οι αυτότροφοι μικροοργανισμοί (Ammonium oxidizing bacteria, AOB και Nitrite oxidizing bacteria, NOB) καταναλώνοντας

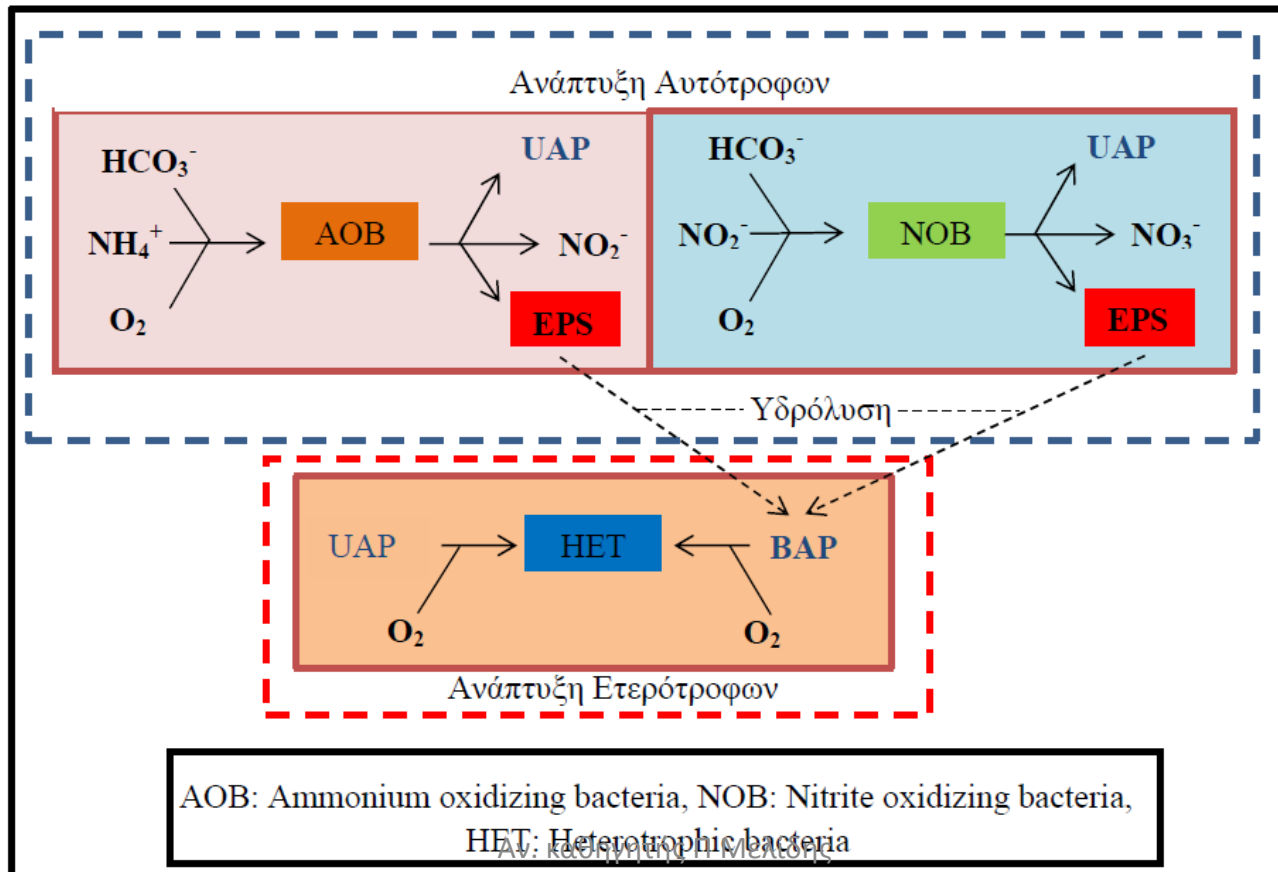
διπτανθρακικά ανιόντα (HCO_3^-) και οξυγόνο μετατρέπουν το αμμωνιακό άζωτο (NH_4^+) ή τα νιτρώδη (NO_2^-) σε νιτρώδη (NO_2^-) και νιτρικά (NO_3^-), αντίστοιχα

με ταυτόχρονο σχηματισμό SMP και EPS, όπου μετά από υδρόλυση θα καταναλωθούν από τους ετερότροφους μικροοργανισμούς, στηρίζοντας έτσι τη ανάπτυξή τους.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Σύγχρονες θεωρίες

Σχηματική αναπαράσταση μεταβολισμού των AOB, NOB & HET και κατανάλωση των SMP (UAP&BAP), σε σύστημα βασισμένο στη αυτότροφη ανάπτυξη (Ni et al., 2011).



MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Κυτταρικές πολυμερή ουσίες (EPS)

Ο όρος EPS χρησιμοποιείται σαν μια γενική αρχή για διάφορες κατηγορίες μακρομορίων όπως οι πολυσακχαρίτες, οι πρωτεΐνες, τα νουκλεϊκά οξέα, τα φωσφολιπίδια και άλλες πολυμερή ενώσεις.

Αποτελούνται από αδιάλυτα συστατικά (προσκολλημένο οργανικό υλικό), μη ισχυρά προσκολλημένα πολυμερή (με συμπυκνωμένη ζελατινώδη δομή) και εντοπίζονται πάνω στην επιφάνεια των κυττάρων.

Έχουν μικροβιακή προέλευση καθώς σχηματίζονται από κυτταρικές εκκρίσεις, κυτταρική λύση και προσροφήσεις συστατικών της βιομάζας.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Κυτταρικές πολυμερή ουσίες (EPS)

Στα συστήματα ενεργού ιλύος τα EPS αποτελούν το “δομικό” υλικό κατασκευής για συσσωρεύσεις όπως η νιφάδα, το βιοφιλμ και το ανάμεικτο υγρό.

Το χαρακτηριστικό αυτό που κάνει τα EPS μοναδικά είναι το πλέγμα που σχηματίζουν περικλείοντας και ενσωματώνοντας τα κύτταρα της βιομάζας, αποτελώντας το 50-90% της συνολικής οργανικής ύλης στο βιοφιλμ.

Σύμφωνα με τους Laspidou and Rittmann, 2002 το πλέγμα αυτό πολυμερών προσφέρει στο κύτταρο ιδιότητες όπως

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Κυτταρικές πολυμερή ουσίες (EPS)

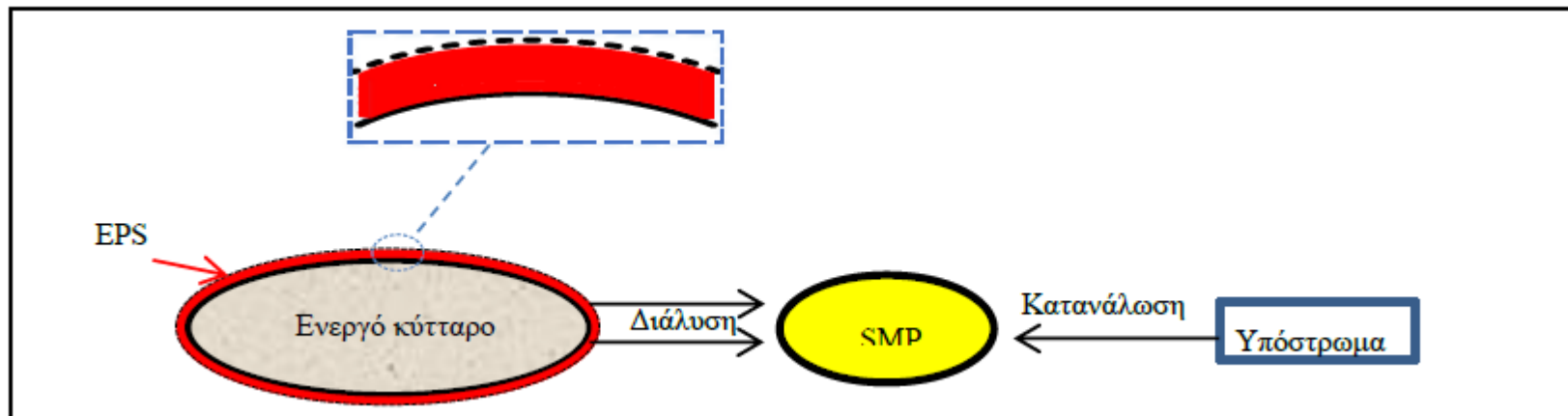
Σύμφωνα με τους Laspidou and Rittmann, 2002 το πλέγμα αυτό πολυμερών προσφέρει στο κύτταρο ιδιότητες όπως:

- Προσκόλληση σε επιφάνειες.
- Συσσωμάτωση των κυττάρων σε νιφάδες, φλόκους και βιοφιλμ.
- Σταθεροποίηση της δομής του βιοφιλμ.
- Δημιουργία ενός προστατευτικού φράγματος από επιβλαβή φαινόμενα (π.χ. βιοκτόνοι μικροοργανισμοί).
- Κατακράτηση νερού.
- Προσκόλληση εξωγενών οργανικών ενώσεων και τη συσσώρευση τους με θρεπτικά του περιβάλλοντος.
- Συγκέντρωση ενζυμικών δραστηριοτήτων όπως η πέψη των εξωγενών μακρομορίων (κατανάλωση σαν θρεπτικά).

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Κυτταρικές πολυμερή ουσίες (EPS)

Επιπλέον τα EPS επιτρέπουν στους μικροοργανισμούς τη συνεχή επιβίωση τους σε κοινότητες σταθερών συνθηκών πλήρους μίξης, με υψηλές συγκεντρώσεις κυττάρων ενισχύοντας παράλληλα την επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ των συσσωματωμένων μικροβιακών κυττάρων (Laspidou and Rittmann, 2002).



MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Κυτταρικές πολυμερή ουσίες (EPS)

Αρχικά τα EPS λειτουργούν σαν “παγίδα” δεσμεύοντας και συγκεντρώνοντας οργανικό υλικό κοντά στα κύτταρα.

Τα βακτήρια αναγκάζονται να εκκρίνουν εξωκυτταρικά ένζυμα ώστε να υδρολύσουν οργανικό υλικό (που έχει απορροφηθεί), διευκολύνοντας έτσι την αποτελεσματική απορρόφηση των προϊόντων υδρόλυσης (χαμηλού τυπικού βάρους) και μειώνοντας τη διάχυση τους στο περιβάλλον.

Όμως τα ένζυμα θα υδρολύσουν παράλληλα και ένα μέρος των EPS (τόσο πολυσακχαρίτες όσο και πρωτεΐνες) στην επιφάνεια των νιφάδων ή του σχηματισθέντος βιοφίλμ, το οποίο παραμένει χαλαρά προσκολλημένο.

Το φαινόμενο παρατηρείται εντονότερο όταν τα βακτήρια εκκρίνουν λύασες μία ειδικευμένη ομάδα ενζύμων για την υδρόλυση των πρωτεϊνών, οι οποίες προκαλούν ταχύτερη διάλυση του σχηματισθέντος πλέγματος των EPS.

Σαν αποτέλεσμα οδηγούμαστε σε μια αργή αλλά σταθερή διάλυση του εξωτερικού τμήματος των EPS, που υδρολυμένο πλέον προστίθεται στο διαλυτό κλάσμα των SMP.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Διαλυτά μικροβιακά προϊόντα (SMP)

Τα SMP (soluble microbial products) ορίζονται ως τα διαλυτά μικροβιακά (κυτταρικά) συστατικά που σχηματίζονται από το φυσιολογικό μεταβολισμό της βιομάζας.

Απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της κυτταρικής λύσης, διαχέονται από τη κυτταρική μεμβράνη και εκκρίνονται κατά τη διάρκεια της σύνθεσης.

Επίσης σχηματίζονται και κατά τη διάρκεια της κατανάλωσης του υποστρώματος.

Τα διαλυτά αυτά προϊόντα είναι βιοαποδομήσιμα ενώ σε συστήματα ενεργού ιλύος βρίσκονται στο ανάμεικτο υγρό και επιβαρύνουν με οργανικό φορτίο (BOD-COD) την εκροή βιολογικών μονάδων επεξεργασίας.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Διαλυτά μικροβιακά προϊόντα (SMP)

Η συγκέντρωση των SMP στην έξοδο είναι το αποτέλεσμα ενός ισοζυγίου των SMP που παράχθηκαν και των SMP που βιοαποδομήθηκαν κατά τη βιολογική επεξεργασία.

Ταυτόχρονα όμως ένα μέρος των SMP που είναι προϊόντα κυρίως προερχόμενα από τη δραστηριότητα της βιομάζας (BAP) είναι αργά βιοδιασπώμενα δημιουργώντας μια τάση συσσώρευσης τους.

Τα BAP αποτελούνται επί το πλείστον από υδρόφιλα οργανικά κολλοειδή και μεγαλομοριακές ενώσεις όπως είναι οι πολυσακχαρίτες και οι πρωτεΐνες.

Δεδομένου ότι τα διαλυτά οργανικά συστατικά της εισόδου είναι εύκολα βιοαποδομήσιμα, η συγκέντρωση της εξόδου σε COD ταυτίζεται με τη συγκέντρωση των SMP.

Τελικά ελέγχοντας τις συγκεντρώσεις των SMP μεγιστοποιήσουμε την ποιότητα εκροής.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Διαλυτά μικροβιακά προϊόντα (SMP)

Τέλος τα SMP επηρεάζουν ακόμα παραπάνω τα συστήματα βιομεμβρανών αφού κατά την διήθηση προσροφώνται στην επιφάνεια της μεμβράνης και εξαιτίας της ελαστικής πηκτής δομής προκαλούν αύξηση της έμφραξης.

Τα SMP θεωρείται ότι σχετίζονται με την μη αναστρέψιμη έμφραξη που παρατηρείτε σε συστήματα MBR.

Επιπλέον (δεδομένου ότι αποτελούν βιοαποδομήσιμα υλικά), δημιουργούν μια εναλλακτική (παθητική) πηγή θρεπτικών ουσιών συμβάλλοντας στο σχηματισμό βιοφιλμ στην επιφάνεια της μεμβράνης.

Τα χαρακτηριστικά τους αυτά ενισχύουν την πεποίθηση πολλών ερευνητών ότι αποτελούν την κύρια πηγή έμφραξης των μεμβρανών σε συστήματα MBR

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

EPS και SMP

Το κοινό μεταξύ των EPS και SMP είναι ότι είναι οργανικά υλικά (μικροβιακής προέλευσης) που συμπεριφέρονται ως δότες ηλεκτρονίων αλλά δεν είναι ενεργά κύτταρα.

Εξαιτίας ωστόσο της προσφοράς ηλεκτρονίων και άνθρακα στο μικτό υγρό είναι σε θέση να επηρεάζουν τη κυτταρική απόδοση (cell yield) και το ρυθμό ανάπτυξης (growth rate).

Η παραδοσιακή άποψη είναι ότι όλη η βιολογικά αποδομήσιμη οργανική ύλη (δότης ηλεκτρονίων) μετατρέπεται σε ενέργεια και σε βιομάζα (σύνθεση).

Όμως ένα σημαντικό μέρος της απαίτησης οξυγόνου προσφέρεται (χρησιμοποιείται) για το σχηματισμό των EPS και SMP, με αποτέλεσμα η διαθέσιμη (για τη σύνθεση της ενεργού βιομάζας) ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου να μειώνεται όπως και ο σχηματισμός ενεργής βιομάζας (active biomass yield) αλλά και ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης (specific growth rate).

Ως εκ τούτου η παράβλεψη των συγκεντρώσεων EPS και SMP είναι πιθανό να επηρεάσει αρνητικά τον ρυθμό της κυτταρικής ανάπτυξης.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

EPS και SMP

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των EPS και SMP όπως η **σύνθεση του υποστρώματος** και η **οργανική φόρτιση (OLR)** αλλά ο πιο σημαντικός φαίνεται να είναι ο **χρόνος παραμονής των στερεών (SRT)**.

Η συγκέντρωση των **EPS μειώνεται** όσο **αυξάνεται η ηλικία της ιλύος** για χρονικό διάστημα έως τις 30 ημέρες (από εκεί και πέρα δεν υπάρχει επίδραση).

Όταν η ηλικία της ιλύος είναι αυξημένη **ελαχιστοποιούνται** οι συγκεντρώσεις των **UAP** δεδομένου ότι αποτελούν εύκολα βιοαποδομήσιμα υλικά **ενώ αυξάνονται** οι συγκεντρώσεις των **BAP** (καθότι συσσωρεύονται εξαιτίας του χαμηλού ρυθμού βιοαποδόμησής τους), καταλήγοντας ότι σε σχετικά χαμηλά SRT (2 έως 10 ημερών) **ελαχιστοποιείτε** η συγκέντρωση των SMP στην έξοδο.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Η έμφραξη μειώνοντας τη ροή του διηθήματος

- μετριάζει τη παραγωγικότητα της μεμβράνης,
- μικραίνει τον κύκλο ζωής της και
- αυξάνει τα λειτουργικά έξοδα
- αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα για τη διεργασία της διήθησης.

Γενικά η έμφραξη (fouling) είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ μεμβράνης και του ανάμεικτου υγρού στρώματος/γέλης (cake layer) στη επιφάνεια της

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Σαν έμφραξη ορίζεται η ανεπιθύμητη επικάθηση και συσσώρευση

- μικροοργανισμών,
- κολλοειδή συστατικών,
- διαλυμένων ουσιών και
- κυτταρικών (μικροβιακών) συστατικών

τόσο στο πορώδες (εσωτερικό) όσο και στην επιφάνεια της μεμβράνης

Οι κύριοι μηχανισμοί έμφραξης των μεμβρανών είναι το στένεμα των πόρων, η φραγή των πόρων και ο σχηματισμός στρώματος/γέλης

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

το φαινόμενο της έμφραξης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε:

- **Βιο-έμφραξη** (Bio-fouling ή bio-cake),
(σχηματισμός βιοφιλμ στην επιφάνεια της μεμβράνης και στους πόρους της εξαιτίας προσκόλλησης, ανάπτυξης και μεταβολισμού των μικροοργανισμών ή/και μικρό-φλόκων).
- **Κολλοειδή** (Colloidal fouling) ως αποτέλεσμα τη συσσώρευσης κολλοειδών συστατικών, με τη μορφή "βλέννας" ή φιλμ στη επιφάνεια της μεμβράνης.
- **Οργανική** (Organic fouling), η απόθεση βιοπολυμερών (πρωτεΐνες, χουμικά και πολυσακχαρίτες) και οργανικού υλικού (διαλυτό ή μη) στη μεμβράνη που προέρχονται από το νερό τροφοδοσίας και από μικροβιακές εκκρίσεις (EPS & SMP), ενώ εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους δρουν ταχύτατα.

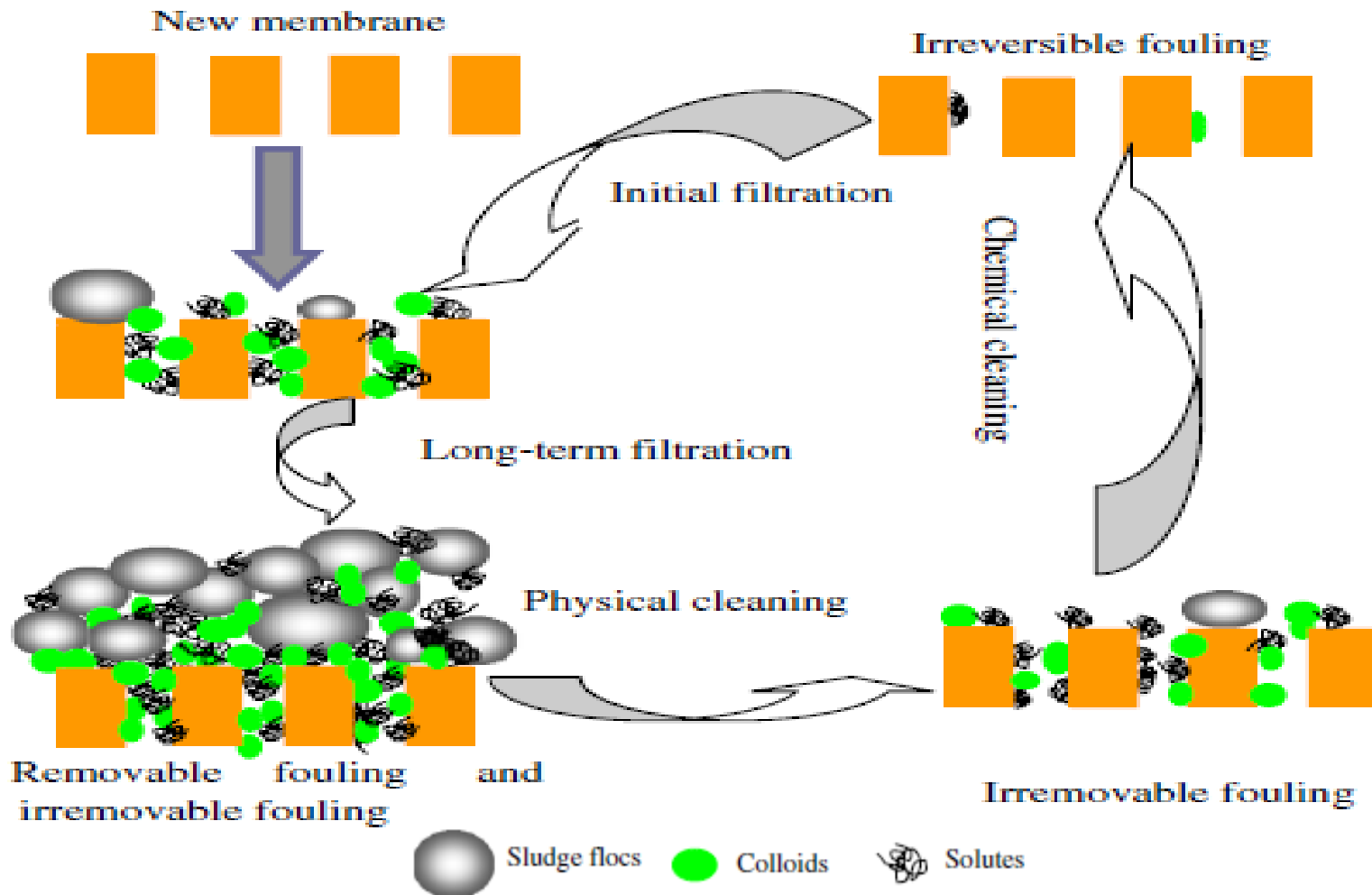
MBR-Έμφραξη μεμβράνης

το φαινόμενο της έμφραξης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε:

- Ανόργανα συστατικά αλληλεπιδρούν με τα οργανικά σχηματίζοντας σύμπλεγμα πολυμερών, ανόργανών-οργανικών συστατικών.
- **Ανόργανη** (Inorganic fouling ή Scaling) μπορεί να περιγραφεί ως μία κρυσταλοποιημένη επικάλυψη ανόργανων (κυρίως) συστατικών (τα ιόντα Ca_2^+ , Mg_2^+ , Fe_3^+ αντιδρούν με ανιόντα CO_3^- , SO_4^- , PO_4^-), δημιουργώντας ένα στρώμα/γέλης. Συνήθως εμφανίζεται σε διεργασίες υψηλής διήθησης όπως η νάνοδιήθηση και η αντίστροφη ώσμωση.
- **Αναστρέψιμη ή όχι έμφραξη**, η αναστρέψιμη έμφραξη απομακρύνεται σχετικά εύκολα με φυσικό καθαρισμό (πχ αντίστροφη πλύση) ενώ η μη αναστρέψιμη απαιτεί χημικό καθαρισμό.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

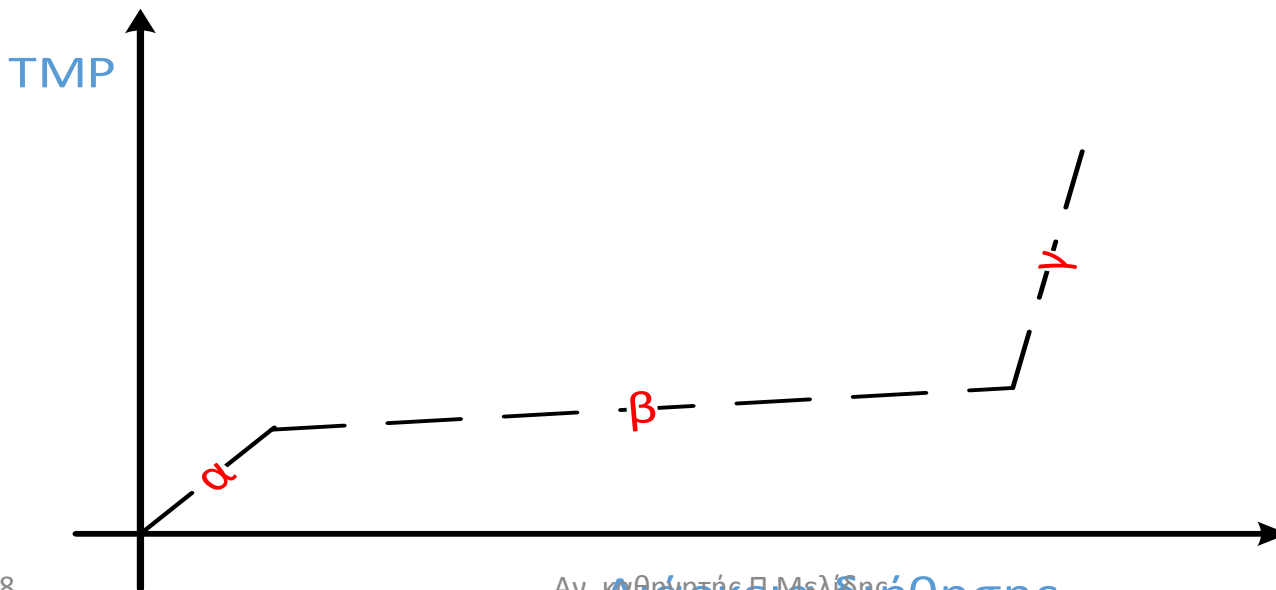
Σχηματική απεικόνιση αναστρέψιμης ή μη έμφραξης



MBR-Έμφραξη μεμβράνης

το φαινόμενο της έμφραξης

Αποτέλεσμα του φαινομένου της έμφραξης κατά τη διάρκεια της διήθησης είναι η αύξηση της διαμεμβρανικής πίεσης (TMP) σε τρία στάδια (συνήθως), α) μια αρχική βραχυπρόθεσμη αλλά ραγδαία αύξηση, β) μια μακροπρόθεσμη αδύναμη αύξηση και γ) μια απότομη αύξηση γνωστή ως "TMP jump"



MBR-Έμφραξη μεμβράνης

το φαινόμενο της έμφραξης

Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την έμφραξη στα συστήματα MBR είναι:

- τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των μεμβρανών (υλικό κατασκευής, πορώδες, υδροφοβικότητα),
- οι λειτουργικές συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα (διάταξη, αερισμός, HRT & SRT) και
- τα χαρακτηριστικά των λυμάτων και της βιομάζας (MLSS, EPS, διαλυμένα συστατικά).

Στη πάροδο του χρόνου έχουν βελτιστοποιηθεί θεαματικά τα συστήματα μεμβρανών ενώ παράλληλα αναπτύχθηκαν τρόποι αντιμετώπισης της έμφραξης, με τους περισσότερους ερευνητές να συμφωνούν ότι η έμφραξη αποδίδεται κατά κύριο λόγο στις εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες, EPS (extracellular polymeric substances)

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Αντιμετώπιση έμφραξης

Για την εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων βιομεμβρανών (MBR) απαιτείται ο συνεχής έλεγχος του φαινομένου της έμφραξης και επιβάλλεται ο καθαρισμός των μεμβρανών. Η διαδικασία του καθαρισμού μπορεί να επιφέρει αύξηση στο κόστος π.χ. αγορά χημικών ή και την προσωρινή απενεργοποίηση της μονάδας αλλά παρόλα αυτά είναι μια άκρως απαραίτητη ενέργεια για τη σωστή λειτουργία και τη βιωσιμότητα της μεμβράνης, αυξάνοντας τον χρόνο ζωής της.

Οι μέθοδοι περιορισμού της έμφραξης μπορεί να είναι,

- α) η προεπεξεργασία του τροφοδοτούμενου ρεύματος (πχ εσχάρωση),
- β) η βελτίωση των λειτουργικών συνθηκών του συστήματος (πχ μείωση flux, αύξηση αερισμού) και
- γ) η εφαρμογή μεθόδων καθαρισμού βάση πρωτοκόλλου

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Αντιμετώπιση έμφραξης - η διαδικασία του καθαρισμού κατηγοριοποιείται σε

- Φυσικός καθαρισμός χρησιμοποιείται ευρέως και επιτυγχάνεται με,
 - α) αντίστροφη πλύση με νερό ή/και αέρα,
 - β) ξεκούραση της μεμβράνης διακόπτοντας τη διήθηση με ή χωρίς ταυτόχρονο αερισμό (relax phase) και
 - γ) ο αερισμός της μεμβράνης κατά τη διάρκεια, διήθησης ή/και της φάσης ξεκούρασης, ή/και τη φάσης αντίστροφής πλύσης.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Αντιμετώπιση έμφραξης - η διαδικασία του καθαρισμού κατηγοριοποιείται σε

- Χημικός καθαρισμός εφαρμόζεται για να απομακρυνθεί η μη αντιστρεπτή έμφραξη, χρησιμοποιούνται χημικά αντιδραστήρια όπως:
 - α) βάσεις (καυστική σόδα),
 - β) οξέα (υδροχλωρικό, θειικό, κιτρικό, οξαλικό, κλπ.) και
 - γ) οξειδωτικά (υποχλωριώδες και υπεροξείδιο του υδρογόνου).
- Υπάρχουν διάφορα πρωτοκολλά που εφαρμόζονται
- α) καθαρισμός συντήρησης
 - β) καθαρισμός εντατικός

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Αντιμετώπιση έμφραξης - η διαδικασία του καθαρισμού κατηγοριοποιείται σε

- **Φυσικο-χημικός καθαρισμός:**
εφαρμόζει φυσικές μεθόδους καθαρισμού με την προσθήκη χημικών ουσιών για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας του καθαρισμού.
Χρησιμοποιείτε συνήθως μικρή συγκέντρωση χημικών στο νερό αντίστροφης πλύσης ενώ αναφέρεται και σαν καθαρισμός συντήρησης.

MBR-Έμφραξη μεμβράνης

Αντιμετώπιση έμφραξης

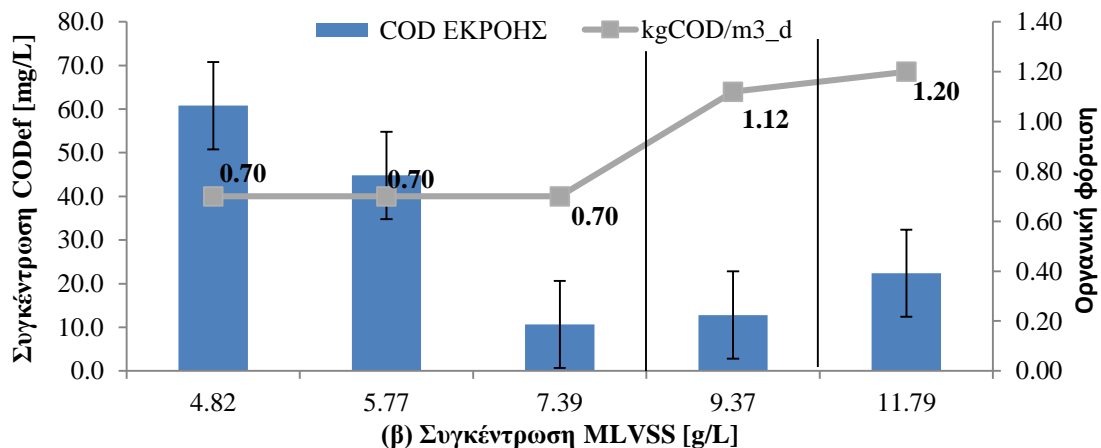
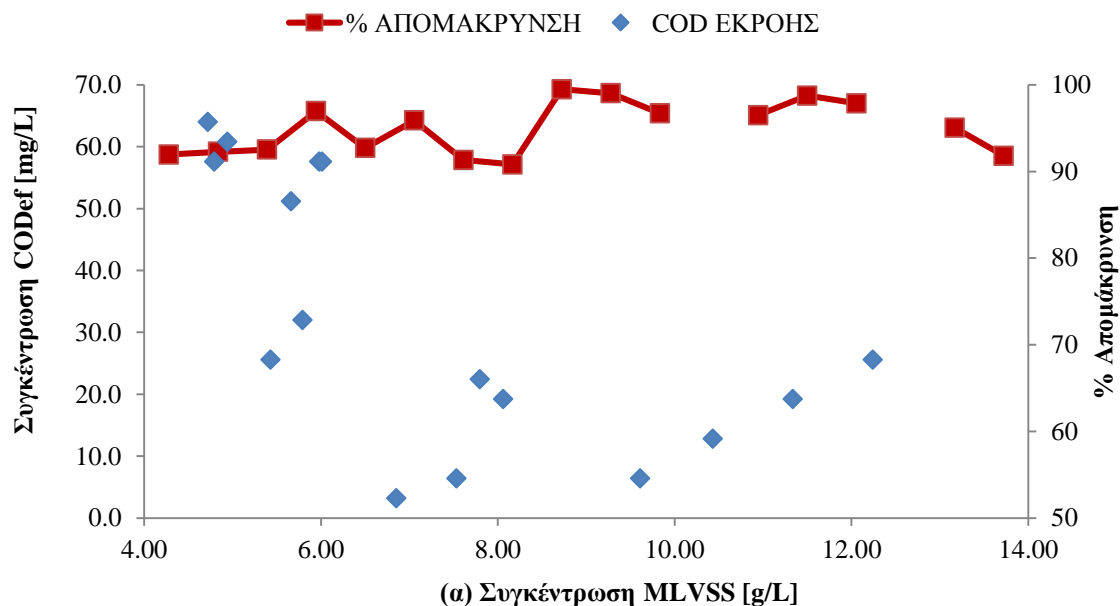
Τέλος αρκετές έρευνες έχουν διερεύνηση τη σχέση μεταξύ **ροής και έμφραξης** έχοντας βασισθεί στη θεωρία της **κρίσιμης ροής**.

Η θεωρία αναφέρεται σε μεμβράνες μικροδιήθησης (MF) και υπερδιήθησης (UF) υποστηρίζοντας ότι υπάρχει μία κρίσιμη τιμή ροής διηθήματος, που από αυτήν και κάτω δεν παρατηρείται έμφραξη ή αντίθετα όταν η ροή υπερβεί αυτή τη κρίσιμη τιμή, προκαλείτε έμφραξη

MBR-Παράδειγμα ΕΔ&ΤΥΑ -ΔΠΘ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

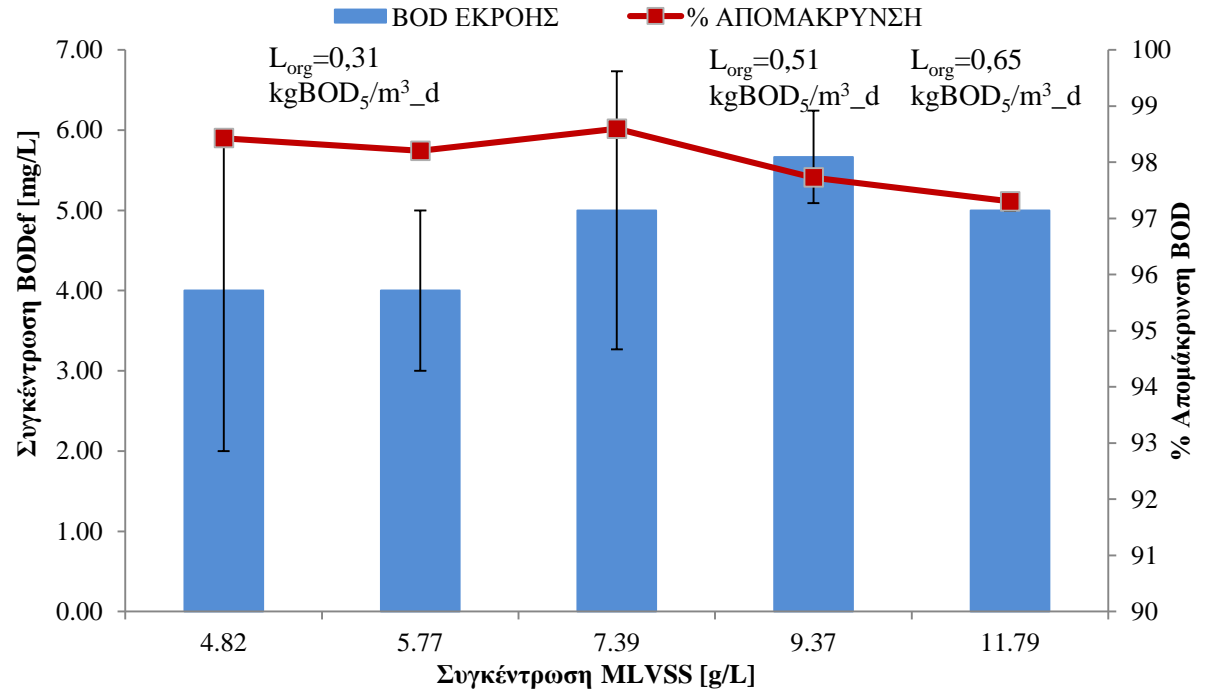
Συσχέτιση της αύξησης των MLVSS με την απομάκρυνση του COD στην εκροή της πιλοτικής μονάδας.



MBR-Παράδειγμα ΕΔ&ΤΥΑ -ΔΠΘ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

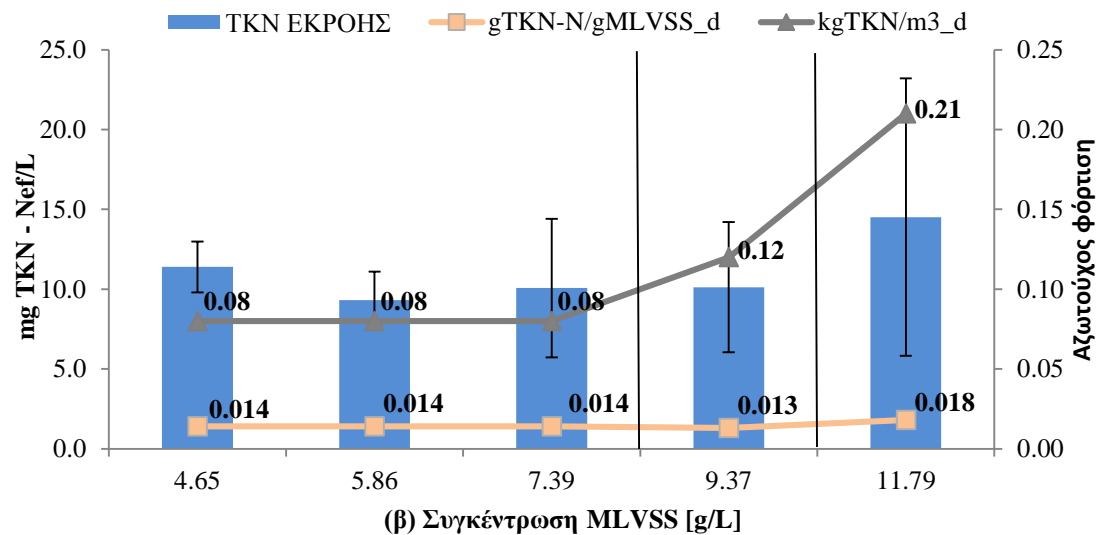
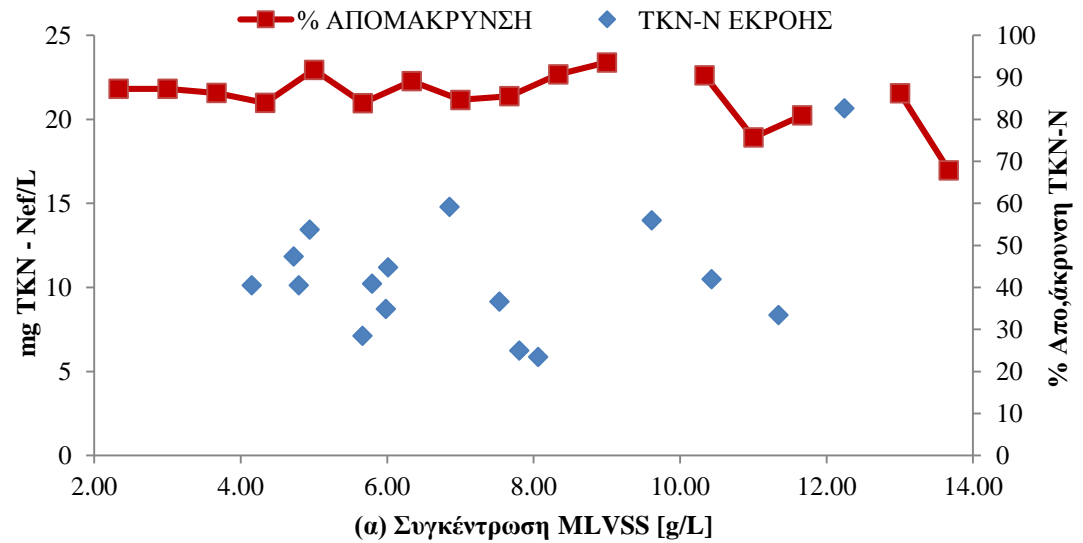
Συσχέτιση της αύξησης των MLVSS με την απομάκρυνση του BOD στην εκροή της πιλοτικής μονάδας.



MBR-Παράδειγμα ΕΔ&ΤΥΑ -ΔΠΘ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Συσχέτιση της αύξησης των MLVSS με την απομάκρυνση του αζωτούχου φορτίου κατά Kjeldahl, TKN, στην εκροή της πιλοτικής μονάδας.



MBR-Παράδειγμα ΕΔ&ΤΥΑ -ΔΠΘ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Συσχέτιση της αύξησης των MLVSS με την απομάκρυνση του αμμωνιακού αζώτου NH_4^+-N στην εκροή της πιλοτικής μονάδας.

