



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Α. Γ. Καπαγιαννίδης

Μηχανικός Περιβάλλοντος, Ph.D.

**ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΑΠΟ ΑΣΤΙΚΑ ΛΥΜΑΤΑ
ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΟΞΙΚΗ ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ**

Σύντομη περιγραφή παρουσίασης

1. Εισαγωγή - Νομοθεσία
2. Κατάσταση στην Ελλάδα
3. Αφαίρεση Ρ και Ν από αστικά λύματα
4. Τεχνικά συστήματα ΒΑΦ
5. Μέθοδος για ΒΑΦ υπό ανοξικές συνθήκες
 - Περιγραφή – Πειραματικά αποτελέσματα

Εισαγωγή

Φώσφορος (P)

- ✓ Σημαντικό **στοιχείο** στη φύση. Αποτελεί, μαζί με το **Άζωτο (N)**, κύριο **θρεπτικό συστατικό** για όλους τους **έμβιους οργανισμούς**
- ✓ Πολύτιμος **ορυκτός πόρος** με εκτεταμένη χρήση στη **βιομηχανία** (λιπάσματα, απορρυπαντικά, τσιμεντοβιομηχανία, καλλυντικά, ζωοτροφές)
- ✓ **Μη ανανεώσιμος φυσικός πόρος**. Τα παγκόσμια αποθέματα φωσφόρου με τις τρέχουσες ανάγκες εκμετάλλευσης του επαρκούν για τα επόμενα **120 έτη**
- ✓ **Επιβλαβής ρύπος**. Γνωστή η συμβολή του στο φαινόμενο του **ευτροφισμού** των υδάτων

Εισαγωγή

Ευτροφισμός

- ✓ Στην οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων ως ευτροφισμός ορίζεται:
 - ο εμπλουτισμός των υδάτων με θρεπτικές ουσίες, ιδίως ενώσεις αζώτου ή/και φωσφόρου, που προκαλεί την ταχύτερη ανάπτυξη φυκών και ανωτέρων μορφών φυτικής ζωής, με συνακόλουθη ανεπιθύμητη διαταραχή της ισορροπίας των οργανισμών που ζουν στα ύδατα και υποβάθμιση της ποιότητας των εν λόγω υδάτων
- ✓ Περισσότερο λεπτομερής ορισμός:
 - το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται υπέρμετρη αύξηση του πληθυσμού κυανοβακτηρίων και ευκαρυωτικών αλγών, ως συνέπεια διατάραξης της ομοιογένειας του πληθυσμού σε έναν ολιγοτροφικό υδάτινο αποδέκτη που δέχεται συνεχή ρύπανση με θρεπτικά συστατικά όπως το Ν και ο Ρ, σε ποσότητες που ξεπερνούν τις απαραίτητες συγκεντρώσεις για ανάπτυξη αυτών των οργανισμών

Εισαγωγή

Νομοθεσία

- ✓ *ΚΥΑ 5673/400/97: “Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων”*
- *επιβάλλει σε κάθε κράτος – μέλος τον χαρακτηρισμό ευαίσθητων και μη, υδάτινων αποδεκτών και θέτει ανώτατα όρια εκπομπής N και P στους χαρακτηριζόμενους ευαίσθητους αποδέκτες*

Ευαίσθητοι αποδέκτες

- 1. Φυσικές λίμνες γλυκών υδάτων, εκβολές ποταμών και παράκτια ύδατα όπου παρουσιάζεται ευτροφισμός ή όπου μπορεί, στο εγγύς μέλλον, να παρουσιασθεί ευτροφισμός αν δεν ληφθούν προστατευτικά μέτρα*
- 2. Επιφανειακά γλυκά ύδατα προοριζόμενα για την άντληση πόσιμου νερού τα οποία θα μπορούσαν να περιέχουν νιτρικά ιόντα σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από εκείνη που προβλέπουν οι συναφείς διατάξεις της οδηγίας 75/440/ΕΟΚ (σ.σ.: 50 mg NO₃⁻/L).*
- 3. Περιοχές όπου περαιτέρω επεξεργασία από την δευτεροβάθμια είναι αναγκαία για την τήρηση των οδηγιών του Συμβουλίου*

Εισαγωγή

Νομοθεσία

- ✓ *ΚΥΑ 5673/400/97: “Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων”*

Κατάλληλη επεξεργασία

- *η επεξεργασία των αστικών λυμάτων με μέθοδο ή/και σύστημα διάθεσης που επιτρέπει στα ύδατα υποδοχής να ανταποκρίνονται στους σχετικούς ποιοτικούς στόχους και στις συναφείς διατάξεις της συγκεκριμένης οδηγίας και άλλων κοινοτικών οδηγιών*

Ρύπος	Συγκέντρωση εκροής [mg/l]	Ελάχιστη % αφαίρεση [%]
Ολικός Φωσφόρος	2 (10.000-100.000 ΜΠΠ)	80
	1 (> 100.000 ΜΠΠ)	
Ολικό Αζωτο	15 (1.000-100.000 ΜΠΠ)	70 – 80
	10 (> 100.000 ΜΠΠ)	

- ✓ *Κατάλληλη επεξεργασία: Αφαίρεση θρεπτικών – Biological Nutrient Removal (BNR)
Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR)*

Ελληνική πραγματικότητα

Νομοθεσία

- ✓ Το 1999 συντάχθηκε ο πρώτος εθνικός κατάλογος ευαίσθητων αποδεκτών με την Κ.Υ.Α. 19661/1982/2-8-99

Πίνακας ευαίσθητων αποδεκτών στην Ελλάδα					
A/A	ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΣ ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ	ΕΤΟΣ ΘΕΣΜΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΥ ΑΠΟΔΕΚΤΗ	A/A ΑΝΑ ΕΙΔΟΣ	
1	ΣΤΕΝΟ ΛΕΥΚΑΔΑΣ	1999	ΘΑΛΑΣΣΑ	1	
2	ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΑ ΑΙΤΩΛΙΚΟΥ-ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ	1999	ΛΙΜΝΟΘΑΛΑΣΣΑ	1	
3	ΑΜΒΡΑΚΙΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ	1999	Κ Ο Λ Π Ο Ι	1	
4	ΚΟΛΠΟΣ ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ	1999		2	
5	ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΣΑΡΩΝΙΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ	2002		3	
6	ΟΡΜΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	1999		4	
7	ΚΟΛΠΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	2002		5	
10	ΔΕΛΤΑ ΠΟΤΑΜΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ	1999		Δ Ε Λ Τ Α	1
11	ΔΕΛΤΑ ΠΟΤΑΜΟΥ ΕΒΡΟΥ	1999			2

Ελληνική πραγματικότητα

Νομοθεσία

A/A	ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΣ ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ	ΕΤΟΣ ΘΕΣΜΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΥ ΑΠΟΔΕΚΤΗ	A/A ANA ΕΙΔΟΣ
12	ΛΙΜΝΗ ΒΙΣΤΩΝΙΔΑ	1999	Λ	1
11	ΛΙΜΝΗ ΒΟΛΒΗ	1999	Ι	2
12	ΛΙΜΝΗ ΜΗΤΡΙΚΟΥ	1999	Μ	3
13	ΛΙΜΝΗ ΛΑΓΚΑΔΑ	1999	Ν	4
14	ΛΙΜΝΗ ΠΕΤΡΩΝ	1999	Ε Σ	5
15	ΓΡΕΒΕΝΙΤΗΣ (Παραπόταμος Ποταμού Αλιάκμονα)	1999		1
16	ΒΑΡΔΑΡΟΒΑΣΗΣ (Παραπόταμος Ποταμού Αξιού)	1999	Π	2
17	ΠΟΡΟΙΑ (Παραπόταμος Ποταμού Αξιού)	1999	Α	3
18	ΣΑΚΟΥΛΕΒΑΣ (ΛΥΓΚΟΣ) (Παραπόταμος Ποταμού Αξιού)	1999	Ρ Α	4
19	ΜΕΤΣΟΒΙΤΙΚΟΣ (Παραπόταμος Ποταμού Αράχθου)	1999	Π	5
20	ΔΥΤΙΚΟΣ ΠΑΡΑΠΟΤΑΜΟΣ (Ποταμός Βοσβόζης)	1999	Ο	6
21	ΕΡΚΥΝΑ (Παραπόταμος Βοιωτικού Κηφισού)	1999	Τ Α	7
22	ΜΕΛΑΝΑΣ (Παραπόταμος Βοιωτικού Κηφισού)	1999	Μ	8
23	ΕΡΥΘΡΟΠΟΤΑΜΟΣ (Παραπόταμος Ποταμού Έβρου)	1999	Ο Ι	9
24	ΑΓΓΙΤΗΣ (Παραπόταμος Ποταμού Στρυμόνα)	1999		10
25	ΧΡΥΣΟΡΡΟΗΣ (Παραπόταμος Ποταμού Στρυμόνα)	1999		11
26	ΒΟΙΩΤΙΚΟΣ ΚΗΦΙΣΟΣ	1999		1
27	ΠΟΤΑΜΟΣ ΕΒΡΟΣ	1999		2
28	ΠΟΤΑΜΟΣ ΑΡΑΧΘΟΣ	1999	Π	3
29	ΠΟΤΑΜΟΣ ΑΧΕΛΩΟΣ	1999	Ο	4
30	ΠΟΤΑΜΟΣ ΚΑΛΑΜΙΤΗΣ	1999	Τ	5
31	ΠΟΤΑΜΟΣ ΚΑΡΠΕΝΙΣΣΙΩΤΗΣ	1999	Α	6
32	ΠΟΤΑΜΟΣ ΚΟΜΨΑΤΟΣ	1999	Μ	7
33	ΠΟΤΑΜΟΣ ΚΟΣΥΝΘΟΣ	1999	Ο	8
34	ΠΟΤΑΜΟΣ ΛΟΥΡΟΣ	1999	Ι	9
35	ΠΟΤΑΜΟΣ ΣΟΥΛΟΥ	1999		10
36	ΠΟΤΑΜΟΣ ΣΤΡΥΜΟΝΑΣ	1999		11

Ελληνική πραγματικότητα

Οικισμοί στους οποίους αφορά η οδηγία 91/271/ΕΟΚ

Περιοχές απόρριψης	Κανονικές περιοχές				Ευαίσθητες περιοχές				Σύνολο	
	Γλυκά ύδατα και εκβολές ποταμών		Παράκτια ύδατα		Γλυκά ύδατα και εκβολές ποταμών		Παράκτια ύδατα			
Κατηγορίες οικισμών	Αριθμός	ΜΠΠ	Αριθμός	ΜΠΠ	Αριθμός	ΜΠΠ	Αριθμός	ΜΠΠ	Αριθμός	ΜΠΠ
2.000 < ΜΠΠ <10.000	178	669.144	139	615.776	23	88.801	11	41.812	351	1.415.532
10.000 < ΜΠΠ <15.000	8	88.263	11	132.233	3	35.500	2	24.000	24	279.996
15.000 < ΜΠΠ <150.000	25	1.119.930	47	1.947.020	11	440.000	1	80.000	84	3.586.950
ΜΠΠ > 150.000	1	450.000	2	377.000	0	0	2	6.300.000	5	7.127.000
Μερικά Σύνολα	212	2.327.337	199	3.072.029	37	564.301	16	6.445.812		
									464	12.409.479

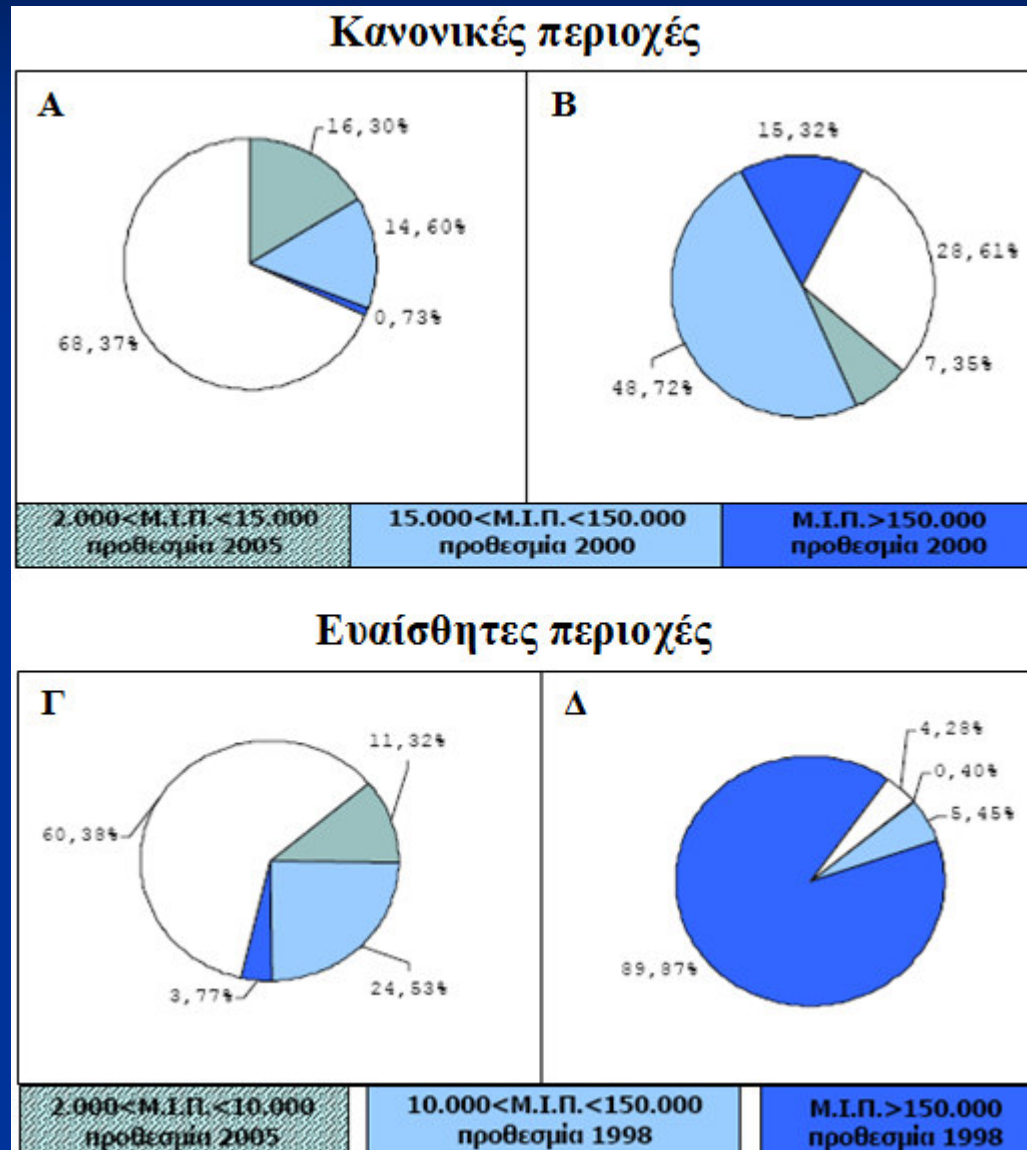
Ελληνική πραγματικότητα

Λειτουργούσες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων

Περιοχές απόρριψης	Κανονικές περιοχές				Ευαίσθητες περιοχές				Σύνολο	
	Γλυκά ύδατα και εκβολές ποταμών		Παράκτια ύδατα		Γλυκά ύδατα και εκβολές ποταμών		Παράκτια ύδατα			
Κατηγορίες οικισμών	Αριθμός	ΜΠΠ	Αριθμός	ΜΠΠ	Αριθμός	ΜΠΠ	Αριθμός	ΜΠΠ	Αριθμός	ΜΠΠ
2.000 < ΜΠΠ <10.000	37	173.563	19	97.705	4	19.148	2	8.812	62	299.228
10.000 < ΜΠΠ <15.000	7	77.838	4	48.017	2	25.000	2	24.000	15	174.855
15.000 < ΜΠΠ <150.000	19	890.930	41	1.739.520	9	333.000	0	0	69	2.963.450
ΜΠΠ > 150.000	1	450.000	2	377.000	0	0	2	6.300.000	5	7.127.000
Μερικά Σύνολα	64	1.592.331	66	2.262.242	15	377.148	6	6.332.812		
									151	10.564.533

Ελληνική πραγματικότητα

Ποσοστιαία κατανομή οικισμών που διαθέτουν τα λύματά τους σε κανονικές και ευαίσθητες περιοχές



Ελληνική πραγματικότητα

Αδυναμίες

- ✓ Από τις λειτουργούσες εγκαταστάσεις στην Ελλάδα, το **51%** έχει σχεδιαστεί για **αφαίρεση θρεπτικών** από τα λύματα, ενώ από αυτές, μόλις το **35%** αφαιρεί πλησίον του **N**, και τον **P**
- ✓ Ακόμα και η λειτουργία του κέντρου της **Ψυττάλειας** για την επεξεργασία των **λυμάτων** της **Αττικής** δεν προβλέπει **αφαίρεση φωσφόρου**
- **Μεγαλύτερο** πρόβλημα και από την **έλλειψη ικανού αριθμού** μονάδων επεξεργασίας για τις υπαρκτές ανάγκες είναι η **προβληματική λειτουργία των υφιστάμενων**
 1. Έλλιπής συμμετοχή και ευθύνη του αρχικού κατασκευαστή στη λειτουργία των έργων
 2. Έλλειψη εμπειρίας των εταιρειών που κατασκευάζουν τα έργα
 3. Έλλιπής στελέχωση με εξειδικευμένο προσωπικό λειτουργίας και συντήρησης
 4. Ακατάλληλο σχέδιο συλλογής και διάθεσης των παραπροϊόντων της επεξεργασίας (περίσσεια ιλύς)
 5. Έλλειψη πόρων

Αφαίρεση φωσφόρου

- ✓ Ο **φώσφορος** περιέχεται σε **αστικά λύματα** σε ανόργανη (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-), τα οποία αποτελούν το **90 – 100%** του διαλυτού P, ή δεσμευμένος σε μη υδατοδιαλυτές οργανικές ουσίες (νουκλεοτίδια, φωσφορούχα λιπίδια)
- ✓ Στα **αστικά λύματα** η ποσότητα P ανέρχεται περίπου σε 2 – 3 g / ΜΙΠ /d εκ των οποίων το **60 - 80%** βρίσκεται σε **ανόργανη μορφή**
- ✓ Οι **συνήθεις** συγκεντρώσεις **ολικού P** σε αστικά λύματα κυμαίνονται μεταξύ **10 – 15 mg TP/L** και προέρχονται κυρίως από τη χρήση **απορρυπαντικών** αλλά και ως περιεχόμενο των **ανθρώπινων εκκρίσεων**
- ✓ Οι συνήθεις **μέθοδοι αφαίρεσης** του κατηγοριοποιούνται σε **χημικές** και **βιολογικές**

Χημική Αφαίρεση Φωσφόρου

- ✓ Οι χημικές μέθοδοι αφαίρεσης φωσφόρου βασίζονται στη δημιουργία **αδιάλυτων ιζημάτων φωσφόρου** με την προσθήκη καταλλήλων **κροκιδωτικών**, που στη συνέχεια **καθιζάνουν** και **αφαιρούνται μαζί** με την **πρωτοβάθμια** ή **δευτεροβάθμια** λάσπη ή και σε **χωριστές δεξαμενές καθίζησης**.
- ✓ Τα **συνηθέστερα κροκιδωτικά** που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση φωσφόρου είναι ο **ασβέστης** (CaO) και τα **άλατα του αργιλίου** (Al) και του **σιδήρου** (Fe)

Κατιόν	Ίζημα
Al (III)	Aluminum phosphate [$Al_r(H_2PO_4)(OH)_{3r-1}$]
	Aluminum hydroxide [$Al(OH)_3$]
Fe (II)	Ferrous phosphate [$Fe_3(PO_4)_2$]
	Ferrous hydroxide [$Fe(OH)_2$]
Fe (III)	Ferric phosphate [$Fe_r(H_2PO_4)(OH)_{3r-1}$]
	Ferric hydroxide [$Fe(OH)_3$]
Ca (II)	Tricalcium phosphate [$Ca_3(PO_4)_2$]
	Hydroxyapatite [$Ca_5(OH)(PO_4)_2$]
	Dicalcium phosphate [$CaHPO_4$]
	Calcium carbonate [$CaCO_3$]

Βιολογική Αφαίρεση Φωσφόρου

- ✓ Λαμβάνει χώρα σε συστήματα βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (μέθοδος της ενεργού ιλύος)
- ✓ Βασίζεται στον εμπλουτισμό της ενεργού ιλύος με μικροοργανισμούς που έχουν την δυνατότητα αφομοίωσης P σε πολύ μεγαλύτερα επίπεδα από αυτά των τυπικών ετερότροφων βακτηρίων
- ✓ Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι γνωστοί με τον αθροιστικό όρο PAOs (Phosphorus Accumulating Organisms)
- ✓ Η ανάπτυξη βακτηρίων PAOs σε συστήματα ενεργού ιλύος προϋποθέτει την συνεχή ανακυκλοφορία της βιομάζας μεταξύ αναερόβιων και αερόβιων (ή ανοξικών) συνθηκών
- ✓ Ικανότητα των βακτηρίων PAOs να αποθηκεύουν ενδοκυτταρικά πολυμερή τα οποία χρησιμοποιούν κατάλληλα στις διάφορες συνθήκες στις οποίες εκτίθενται (αναερόβιες, αερόβιες, ανοξικές) για την παραγωγή ενέργειας, την συντήρηση και ανάπτυξή τους.

Βιολογική Αφαίρεση Φωσφόρου

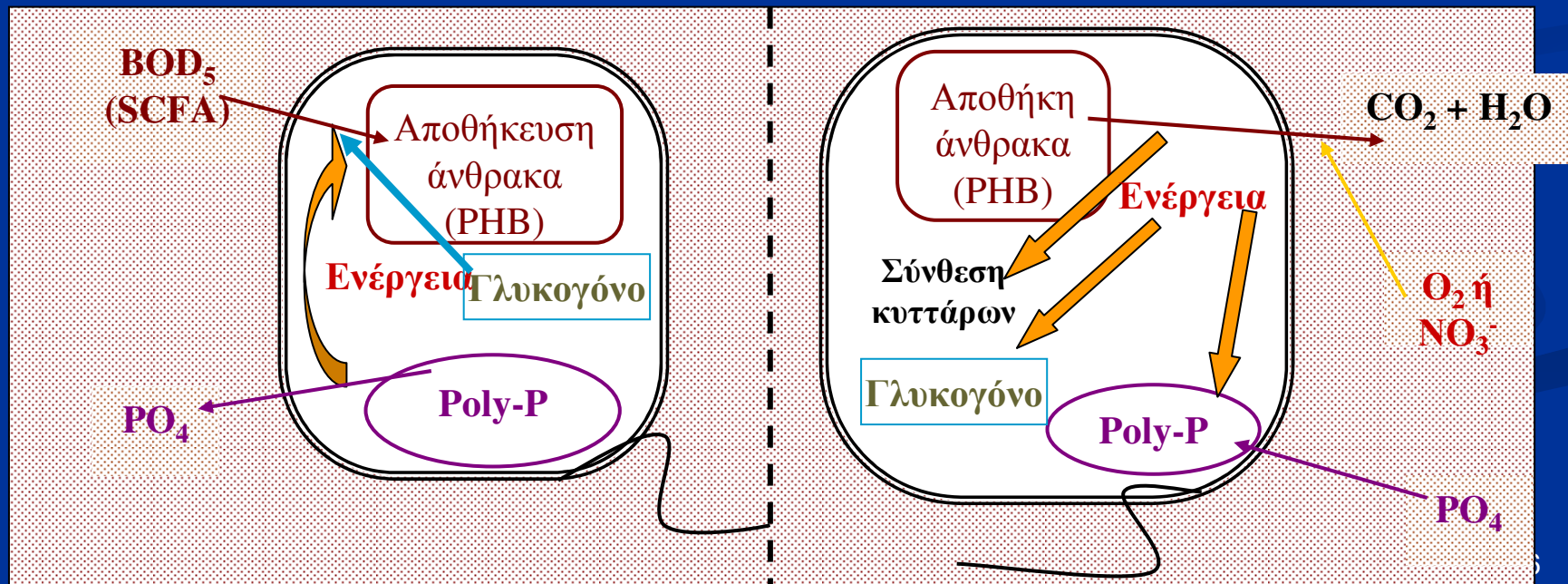
Μεταβολισμός PAOs

■ Αναερόβιο περιβάλλον

- Πρόσληψη ανθρακούχου υποστρώματος (SCFA)
- Παράλληλη διάσπαση πολυφωσφορικών και γλυκογόνου
- Απελευθέρωση φωσφορικού
- Σύνθεση ενδοκυτταρικού PHB

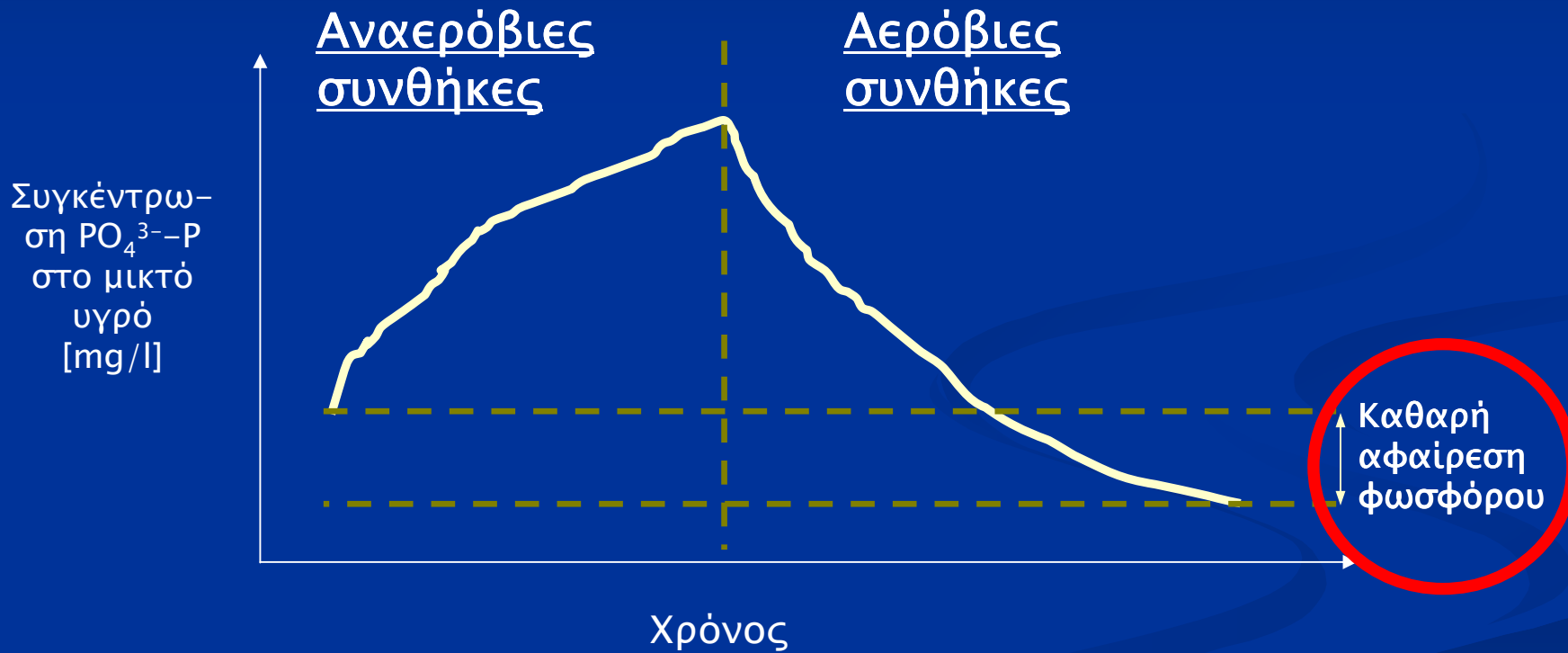
● Αερόβιο περιβάλλον

- Οξείδωση ενδοκυτταρικού PHB
- Δημιουργία γλυκογόνου
- Αφομοίωση πολυφωσφορικού ενδοκυτταρικά και βακτηριακή ανάπτυξη
- Ικανότητα χρήσης NO_3^- -N από ορισμένα βακτήρια για αφομοίωση φωσφόρου



Βιολογική Αφαίρεση Φωσφόρου

Προφίλ συγκέντρωσης PO_4^{3-}



Αφαίρεση Φωσφόρου

Συγκριτική αξιολόγηση ΒΑΦ με ΧΑΦ

Πλεονεκτήματα ΒΑΦ

1. Αποφεύγεται το κόστος χρήσης κροκιδωτικών
2. Αποφεύγεται η παραγωγή περίσσειας χημικής ιλύος (αδιάλυτα κατακρημνίσματα φωσφόρου), η οποία αποτελεί σημαντικό οικονομικό και περιβαλλοντικό πρόβλημα αναφορικά με την ασφαλή διάθεσή της
3. Η βιολογική ιλύς που προκύπτει από μια διεργασία ΒΑΦ έχει σημαντικότερη αξία σε πιθανή χρήση της (μετά από κατάλληλη επεξεργασία), ως εδαφοβελτιωτικό σε γεωργικές καλλιέργειες (λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης).
4. Προκύπτουν μικρότεροι όγκοι δεξαμενών καθίζησης, αφού αποφεύγεται η παραγωγή πρόσθετης χημικής (πλησίον της βιολογικής) ιλύος.

Αφαίρεση Φωσφόρου

Συγκριτική αξιολόγηση ΒΑΦ με ΧΑΦ

Μειονεκτήματα ΒΑΦ

1. Πολύ περισσότερο **ευαίσθητη διεργασία** σε πλήθος **περιβαλλοντικών** (σύσταση αποβλήτου, DO, pH, T, βροχόπτωση, τοξικές επιβολές) και **λειτουργικών** (HRT, ειδική φόρτιση ιλύος, ηλικία ιλύος) **παραγόντων**
2. **Ευαίσθητη** σε φαινόμενα **διόγκωσης ιλύος** (sludge bulking)
3. Εξαιτίας της **βιολογικής φύσης** της δέσμευσης P είναι πιθανό να παρατηρηθούν φαινόμενα **δευτερεύουσας απελευθέρωσης P** (δεξαμενή 2βάθμιας καθίζησης, πάχυνση, αφυδάτωση ιλύος)
4. Είναι **δύσκολο** να επιτευχθούν πολύ **μειωμένες συγκεντρώσεις TP** (< 0.5 mg/L) στην **εκροή** εξαιτίας της παρουσίας **κυττάρων βιομάζας που διαφεύγουν** από τη δεξαμενή **2βάθμιας καθίζησης**

Αφαίρεση Αζώτου

- ✓ Κύρια μορφή N στα αστικά λύματα – NH_4^+ και Οργανικό Άζωτο

NH_4^+ + Οργανικό Άζωτο = Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)

10 – 15 g TKN/ ΜΙΠ/ d

➤ Νιτροποίηση

Διαδικασία δύο σταδίων

1° στάδιο: βακτήρια του γένους *Nitrosomonas* οξειδώνουν την αμμωνία σε νιτρώδη ιόντα (βραδύ – ρυθμορυθμιστικό)



2° στάδιο: βακτήρια του γένους *Nitrobacter* μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά



Αφαίρεση Αζώτου

➤ Νιτροποίηση

- ✓ Αερόβια αυτότροφη βιολογική διεργασία
- ✓ Χαμηλός ρυθμός βακτηριακής **ανάπτυξης** (χρόνος διπλασιασμού νιτροποιητών 7 - 10h)
- ✓ Απαίτηση οξυγόνου ($1,83\text{mol O}_2/\text{mol NH}_4^+-\text{N}$ ή $4,3\text{mg O}_2 / \text{mg NH}_4^+-\text{N}$)
- ✓ Κατανάλωση αλκαλικότητας - Μείωση pH μικτού υγρού

Αφαίρεση Αζώτου

➤ Απονιτροποίηση

Βιολογική **αναγωγή νιτρικών** σε ενδιάμεσα **οξείδια αζώτου** και τελικά σε N_2



- ✓ Πραγματοποιείται από **προαιρετικά αναερόβια ετερότροφα** βακτήρια (**απονιτροποιητικά**)
- ✓ Λαμβάνει χώρα υπό **ανοξικές συνθήκες** (έλλειψη O_2)
- ✓ Απαιτείται **δότης ηλεκτρονίων**: **οργανικές** ουσίες του υγρού αποβλήτου (BOD_5/COD) ή **εξωτερική παροχή** (μεθανόλη).
Ανά g $NO_3^- - N$ καταναλώνονται 2 g BOD_5 ή 3,4 - 3,7 g COD
- ✓ **Αύξηση** της **αλκαλικότητας** – **Αύξηση pH**

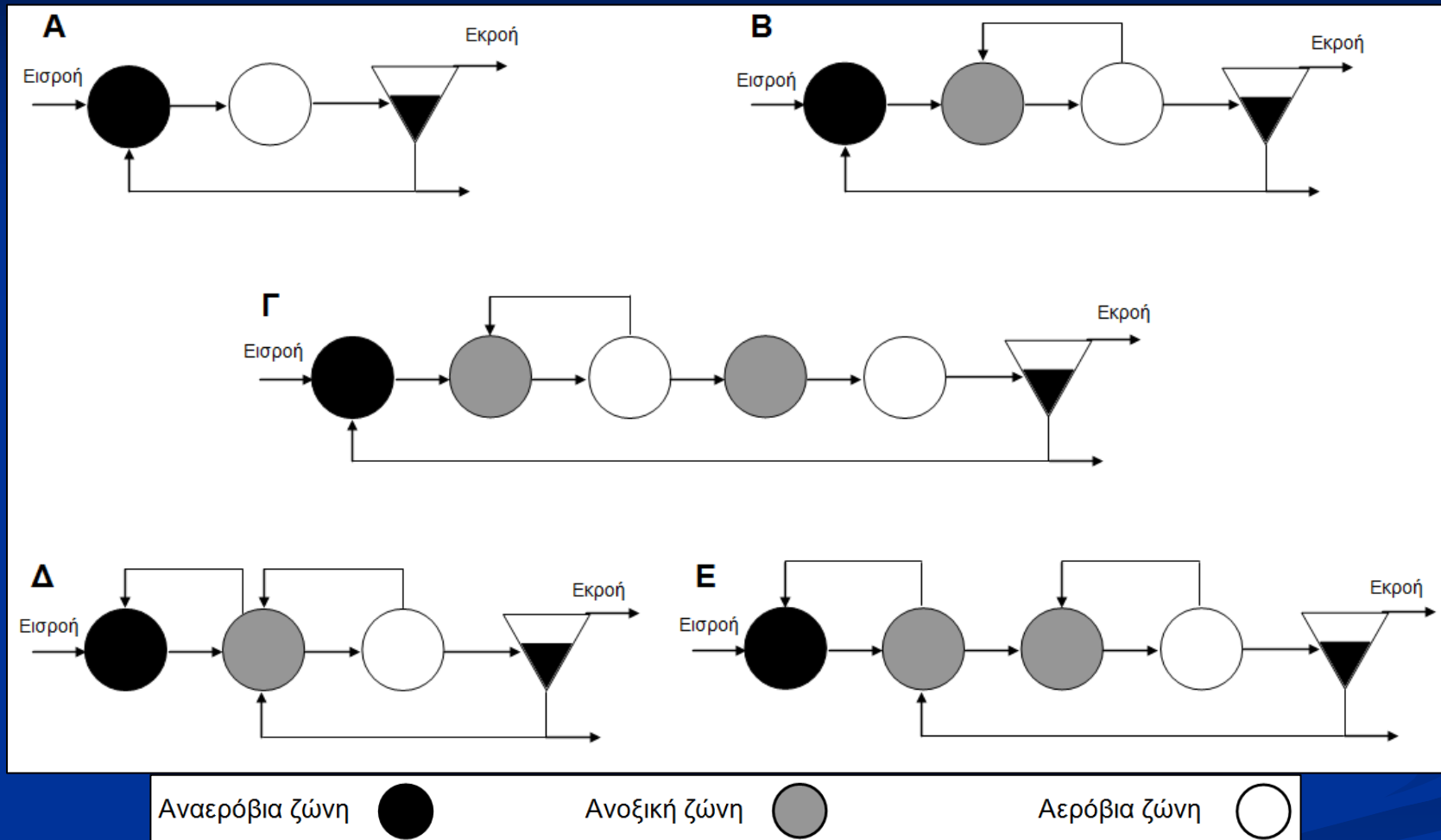
Συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας - BNR

- Εναλλαγή αναερόβιων, ανοξικών και αερόβιων (οξικών) συνθηκών

Νιτροποίηση (αερόβια) – Απονιτροποίηση (ανοξικά)
Βιολογική δέσμευση φωσφόρου (αναερόβια – αερόβια)

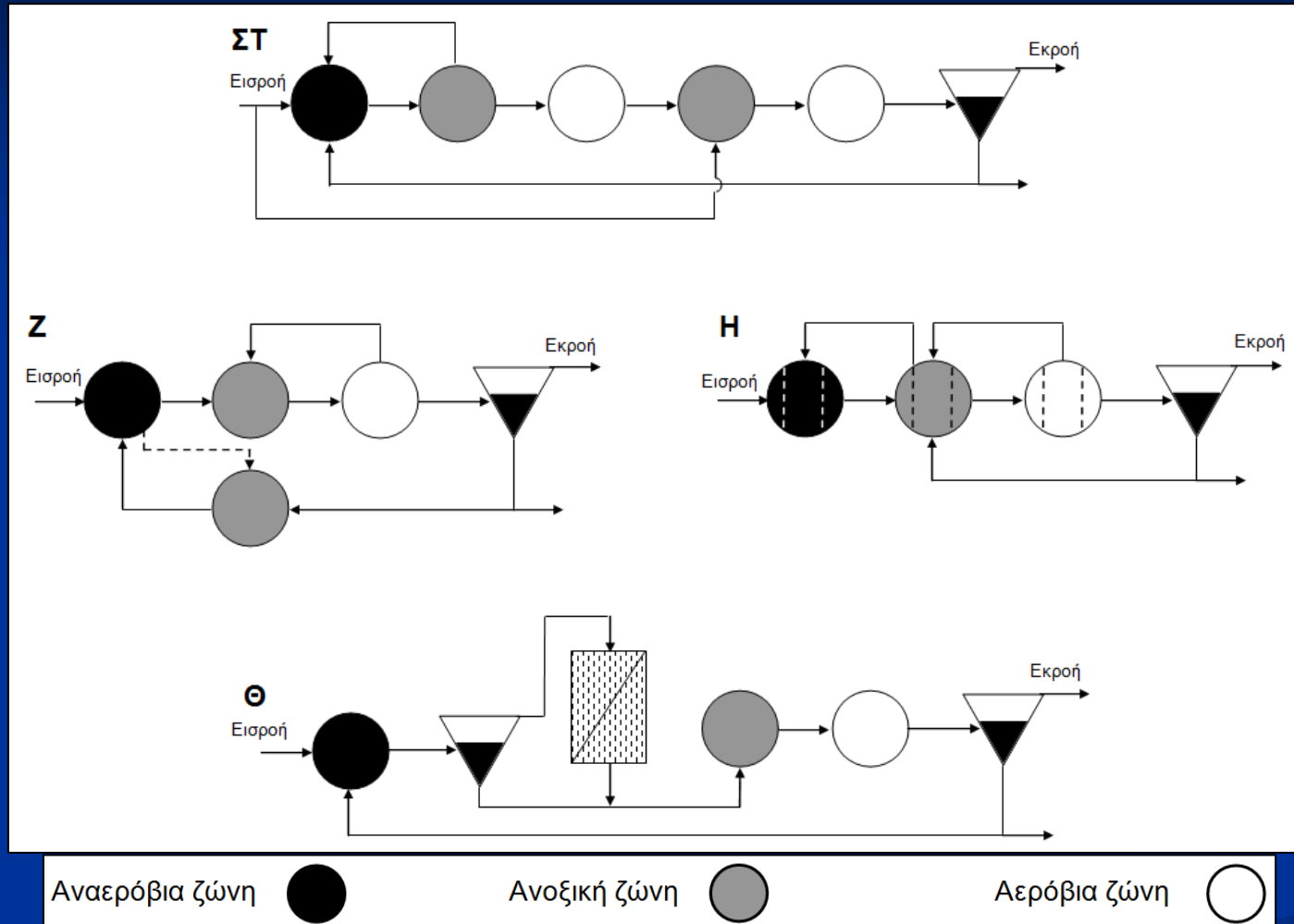
- Διαμόρφωση των αντίστοιχων φάσεων επεξεργασίας

Συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας - mainstream



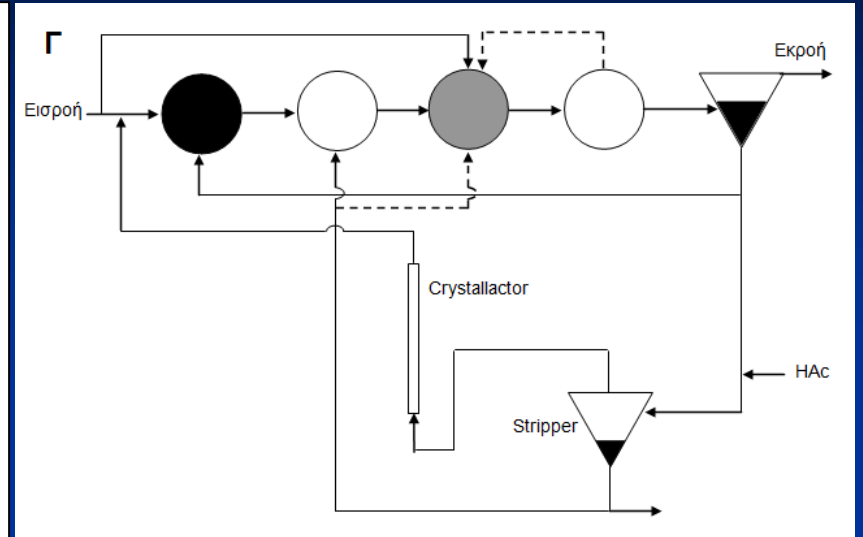
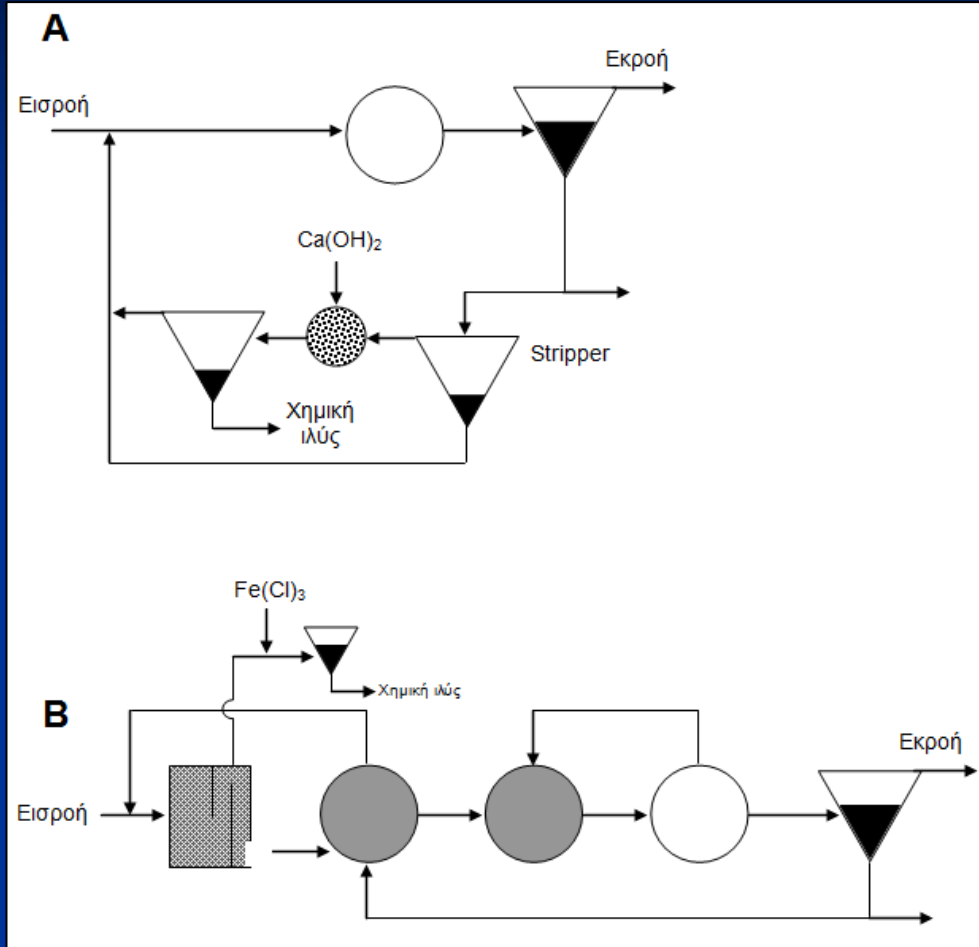
A. A/O B. A₂O ή 3 stage Phoredox Γ. Bardenpho ή 5 stage Phoredox
 Δ. UCT (University of Cape Town) E. MUCT

Συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας - mainstream



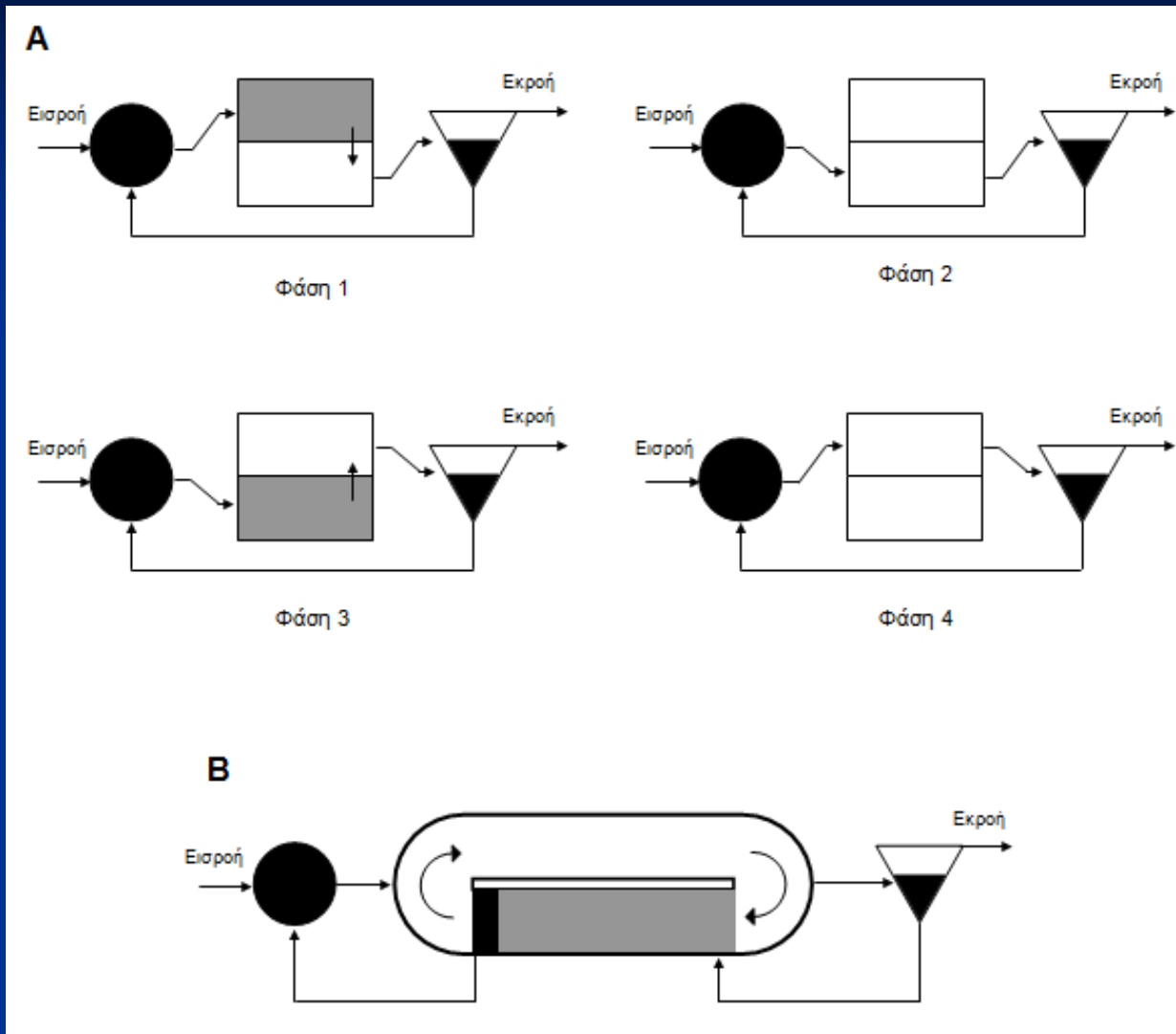
ΣΤ. Step feeding UCT Ζ. Johannesburg και ISAH Η. VIP
 Θ. Dephanox ή ENBNRAS

Συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας - sidestream



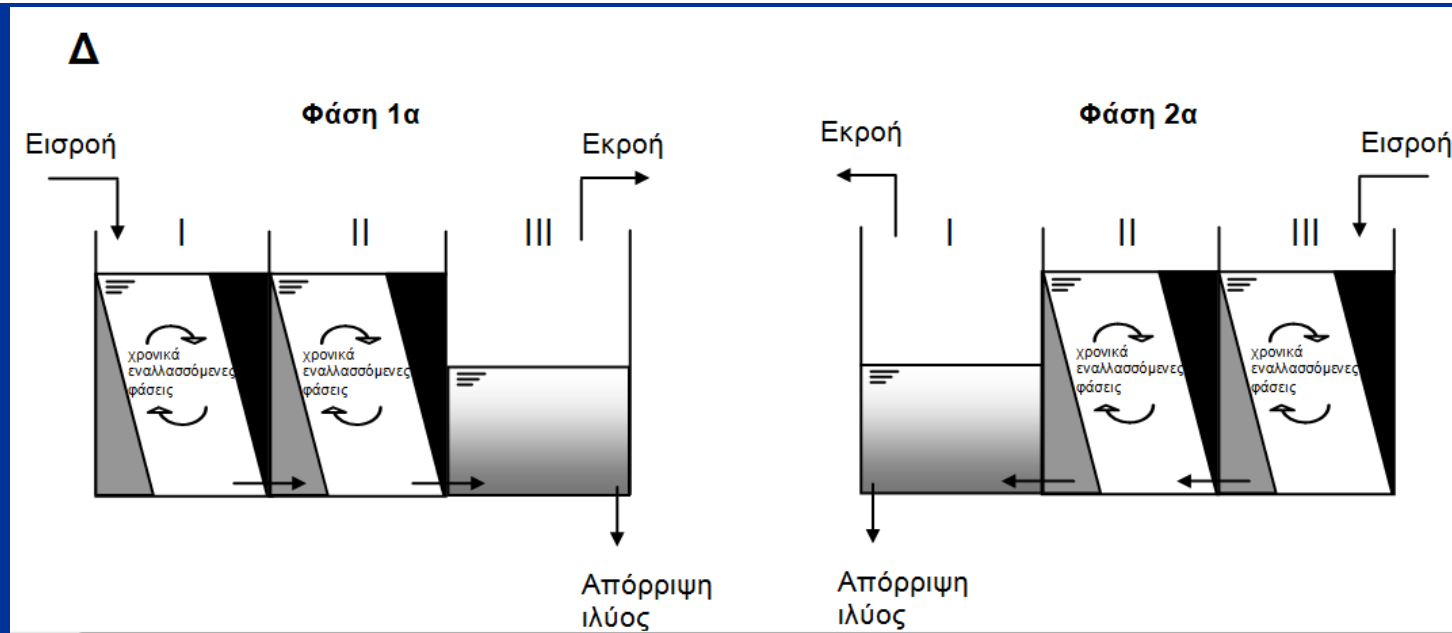
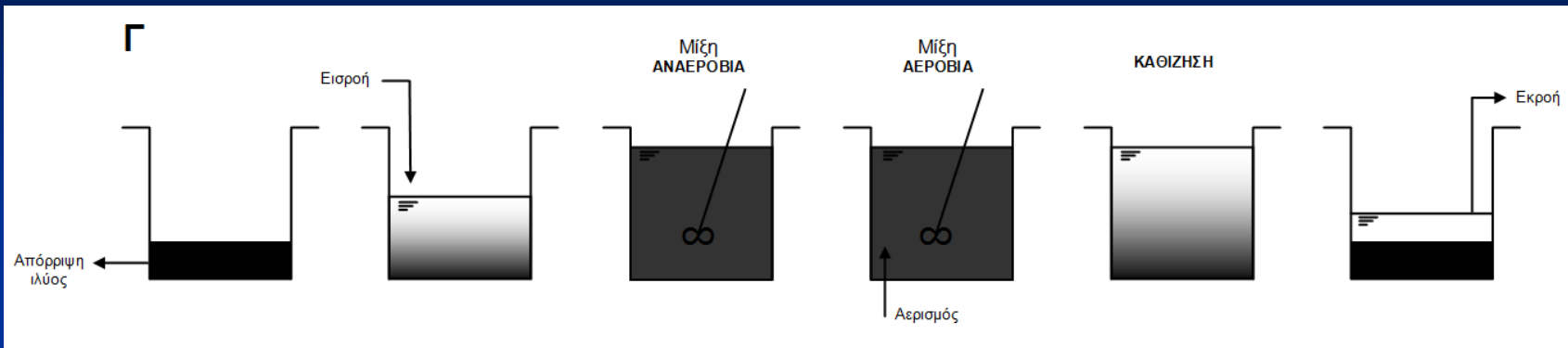
A. Phostrip B. BCFS Γ. Renphosystem

Συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας - κυκλικές μέθοδοι



A. Βιολογικό B. Οξειδωτική τάφρος

Συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας - κυκλικές μέθοδοι

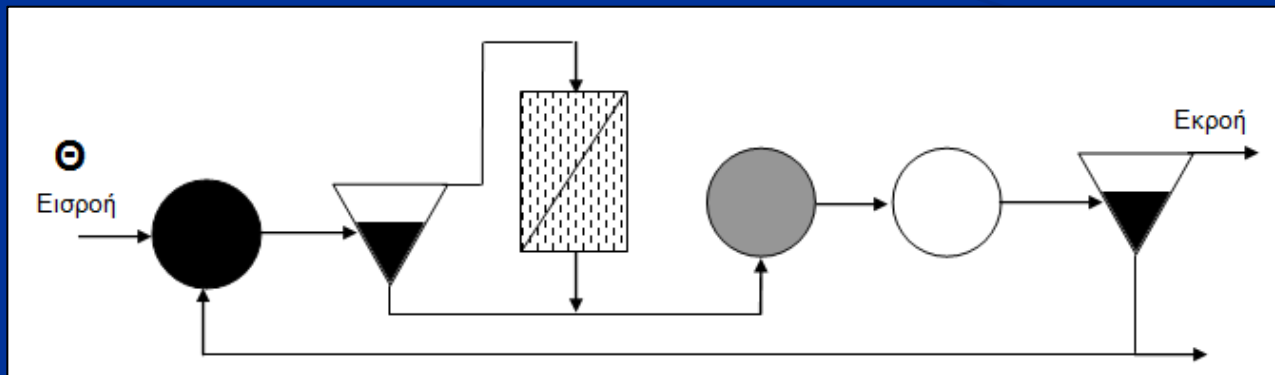


Γ. SBR Δ. UNITANK

Μέθοδος Derhanox – Ανοξική αφαίρεση φωσφόρου

Ιδιαιτερότητες

- ✓ Είναι η μόνη μέθοδος στην οποία αναπτύσσονται **δύο** ποιοτικά **διαφορετικές** μικροβιακές καλλιέργειες (διπλή ενεργός ιλύς)
- ✓ Είναι η μόνη μέθοδος στην οποία η **αφαίρεση P** λαμβάνει χώρα κυρίως υπό **ανοξικές συνθήκες**
- ✓ Η **αφαίρεση P** πραγματοποιείται από **βακτήρια PAOs** ικανά για χρήση NO_3^- , έναντι του O_2 , ώστε **απονιτροποίηση** και **δέσμευση P** συνδυάζονται σε μία **κοινή διεργασία** (Denitrifying PAOs, DPAOs)
- ✓ Ο σχεδιασμός της περιλαμβάνει και **εσωτερική δεξαμενή καθίζησης** αμέσως **ακολουθώντας** της **αναερόβιας δεξαμενής**



Μέθοδος Derhanox – Ανοξική αφαίρεση φωσφόρου

Πλεονεκτήματα

- ✓ Διαφοροποίηση των διαδικασιών της νιτροποίησης και της δέσμευσης φωσφόρου σε ξεχωριστούς αντιδραστήρες για καλύτερο έλεγχο και βελτιστοποίησή τους
- ✓ Βέλτιστη αξιοποίηση οργανικών συστατικών της εισροής για δέσμευση φωσφόρου και ταυτόχρονη απονιτροποίηση υπό ανοξικές συνθήκες
- ✓ Πλήρης αποφυγή ανακυκλοφορίας νιτροποιημένου μικτού υγρού, αφού η ανοξική δεξαμενή ακολουθεί την αερόβια (post denitrification)
- ✓ Χαμηλότερες απαιτήσεις σε αερισμό, αφού η απαίτηση για οξυγόνο αφορά μόνο στη διαδικασία της νιτροποίησης και όχι σε αυτή της αφαίρεσης P
- ✓ Μειωμένη παραγωγή περίσσειας ιλύος, εξαιτίας του συγκριτικά μικρότερου ρυθμού ανάπτυξης των DPAOs

Πειραματικό Μέρος

- ✓ Βιολογική αφαίρεση φωσφόρου με ταυτόχρονη απονιτροποίηση σε σύστημα διπλής ενεργού ιλύος για την επεξεργασία αστικών λυμάτων

Προβληματισμός

- ✓ Οι έρευνες που αφορούν σε εφαρμογή της ΒΑΦ υπό ανοξικές συνθήκες σε συστήματα συνεχούς ροής για επεξεργασία αστικών λυμάτων είναι περιορισμένες
- ✓ Επιπλέον πειραματικά δεδομένα συμβάλλουν ουσιαστικά στην διερεύνηση σχετικά με την καταλληλότητα εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου στην επεξεργασία λυμάτων και συνδράμουν σε μία πιθανή μελλοντική διαμόρφωση ενός συστήματος επεξεργασίας σε πλήρη κλίμακα

Στόχος

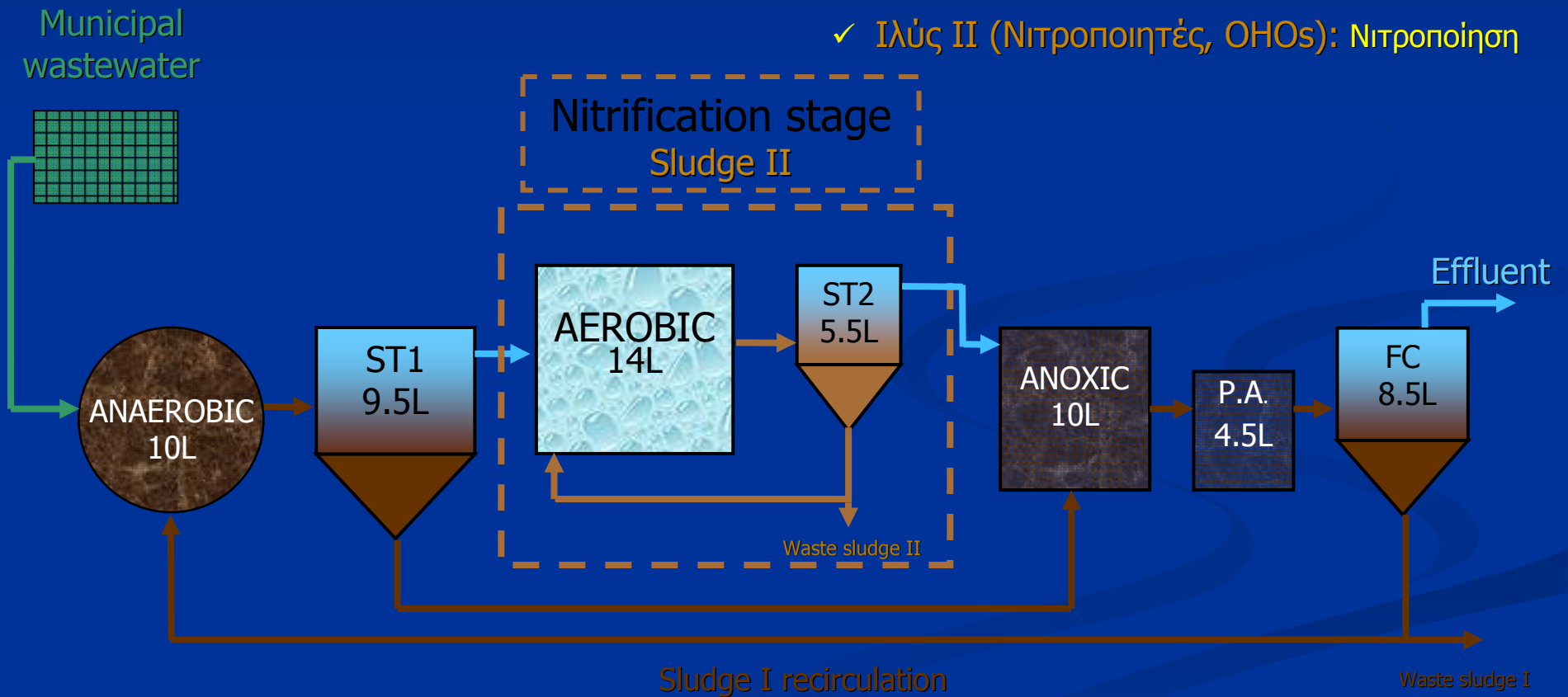
- ✓ Η διερεύνηση της απόδοσης ενός τροποποιημένου συστήματος Derhanox αναφορικά με τη συνδυασμένη αφαίρεση οργανικού άνθρακα και θρεπτικών που επιτυγχάνει, κατά την επεξεργασία αστικών λυμάτων

Πειραματικό μέρος – Υλικά και Μέθοδοι

- ✓ Σύστημα διπλής ενεργού ιλύος για την επεξεργασία αστικών λυμάτων

DEPHANOX (1996), External Nitrification BNR, A2N

- ✓ Ιλύς I (DPAOs): Απονιτροποίηση / Αφαίρεση Φωσφόρου
- ✓ Ιλύς II (Νιτροποιητές, ΟΗOs): Νιτροποίηση

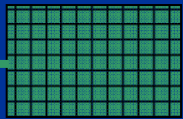


Πειραματικό μέρος - Διαδικασία

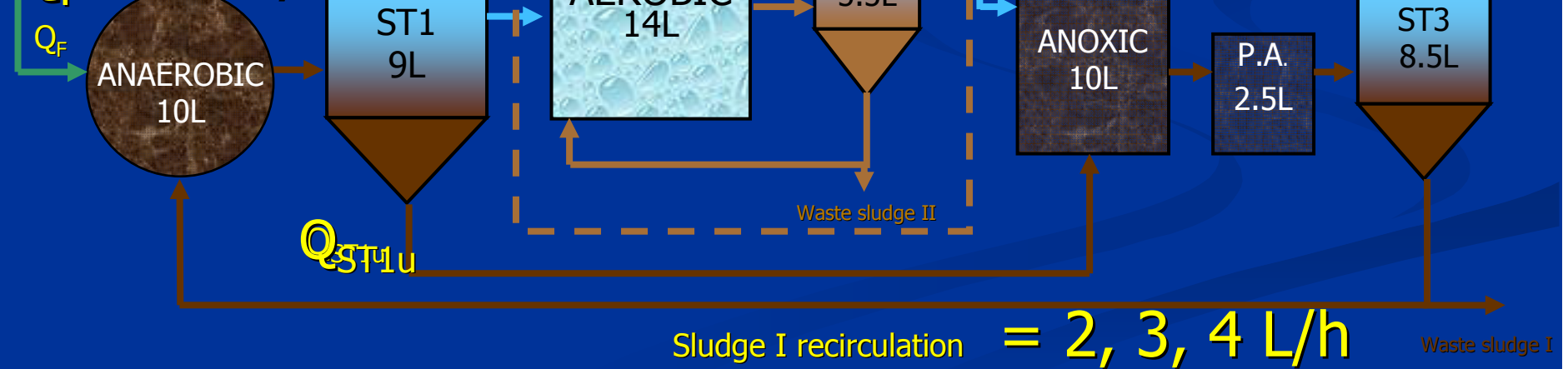
HRT = 9h

————— → split ratio
 $Q_{ST1u} +$

Municipal wastewater



$Q_F = 4 \text{ L/h}$



Πειραματικό μέρος - Διαδικασία

Τυπική σύσταση αστικού λύματος

Παράμετρος	Μονάδες	Μέση τιμή	Τυπική Απόκλιση
pH		7.3	0.2
SS	mg/L	227.0	58.0
VSS	mg/L	183.0	42.0
<u>Οργανικό</u>			
COD	mg/L	560.0	118.0
COD ₅	mg/L	226.0	35.0
BOD ₅	mg/L	326.0	61.0
<u>Αζωτο</u>			
TKN	mg/L	68.7	6.6
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	50.5	5.3
NO _x ⁻ -N	mg/L	0.0	0.0
<u>Φώσφορος</u>			
PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	6.0	1.0
TP	mg/L	8.8	1.5

Πειραματικό μέρος (1^η λειτουργική περίοδος)

- Αξιολόγηση της απόδοσης της μονάδας συνεχούς ροής σε διαφορετικά χαρακτηριστικά ροής που εφαρμόστηκαν

Μεταβλητές παράμετροι

1. **Λόγος διαχωρισμού (split ratio)**
0.05, 0.10, 0.15
2. **Ποσοστό ανακυκλοφορίας απονιτροποιητικής ιλύος (%Q_F)**
50%, 75%, 100%
3. **Λόγος COD/TKN στην εισροή**
2 – 4

Πειραματικό μέρος (1^η λειτουργική περίοδος)

Λειτουργικές παράμετροι

Παράμετρος	Μονάδες	Τιμή
Συνολικός Όγκος	L	60
Ενεργός όγκος	L	36.5
Παροχή εισροής (Q_F)	L/d	96
Λόγος διαχωρισμού (s.r.)		0.05 – 0.15
Παροχή ανακυκλοφορίας I ($Q_{R,DN}$)	% Q_F	50 – 100
Παροχή ανακυκλοφορίας II ($Q_{R,N}$)	% Q_2	100
SRT (ιλύς I)	d	10
SRT (ιλύς II)	d	20

Πειράματα σε καταστάσεις ισορροπίας ροής

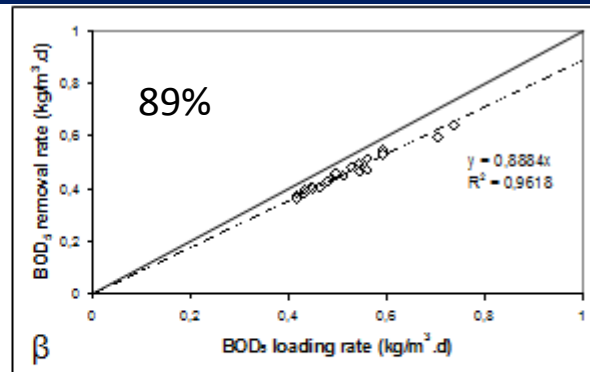
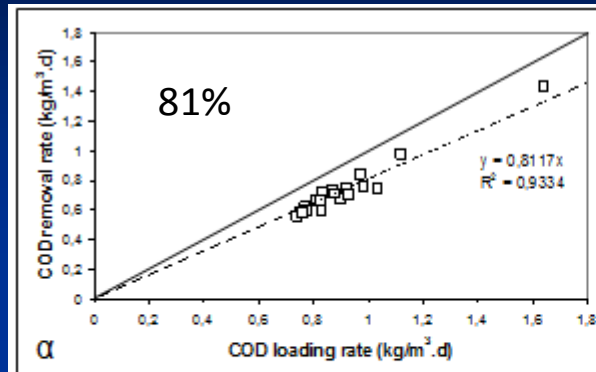
steady state No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Λόγος διαχωρισμού (s. r.)	0.15							0.10							0.05					
Ανακυκλοφορία απονιτροποιητικής ιλύος (% Q_F)	100			75		50		100			75		100							

Αποτελέσματα (1^η λειτουργική περίοδος)

Συνολική απόδοση

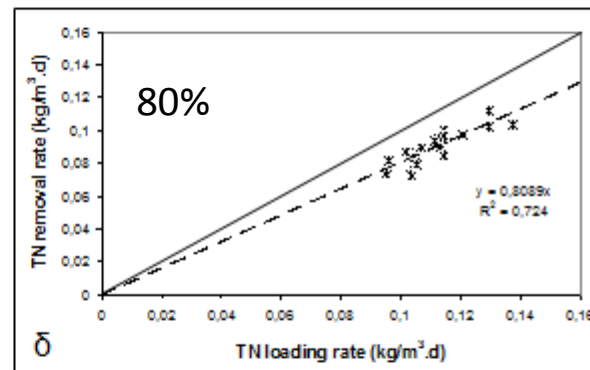
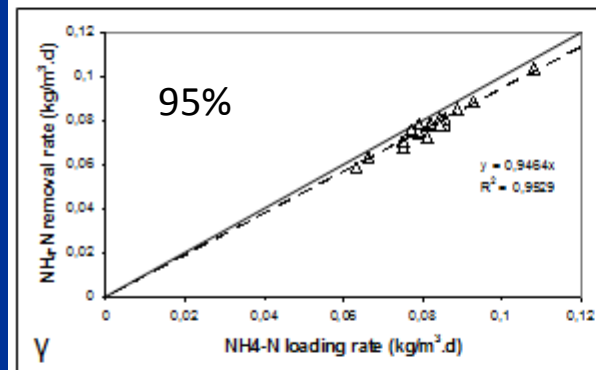
COD

80 – 120 mg/L



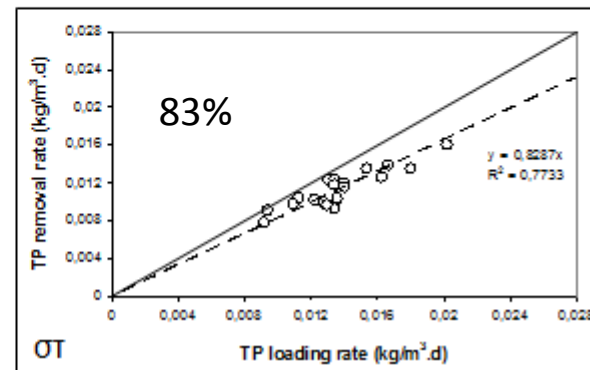
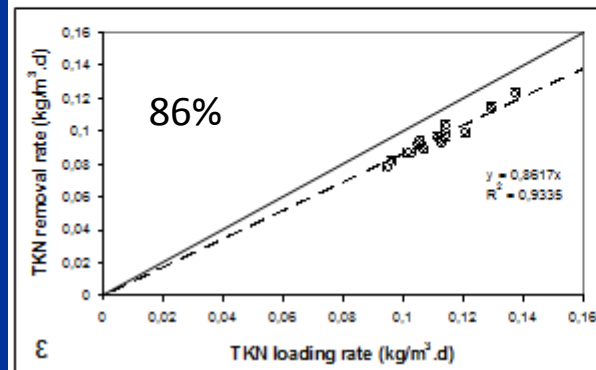
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$

1 - 2 mg/L



TKN

8 - 9 mg/L



BOD_5

25 - 35 mg/L

TN

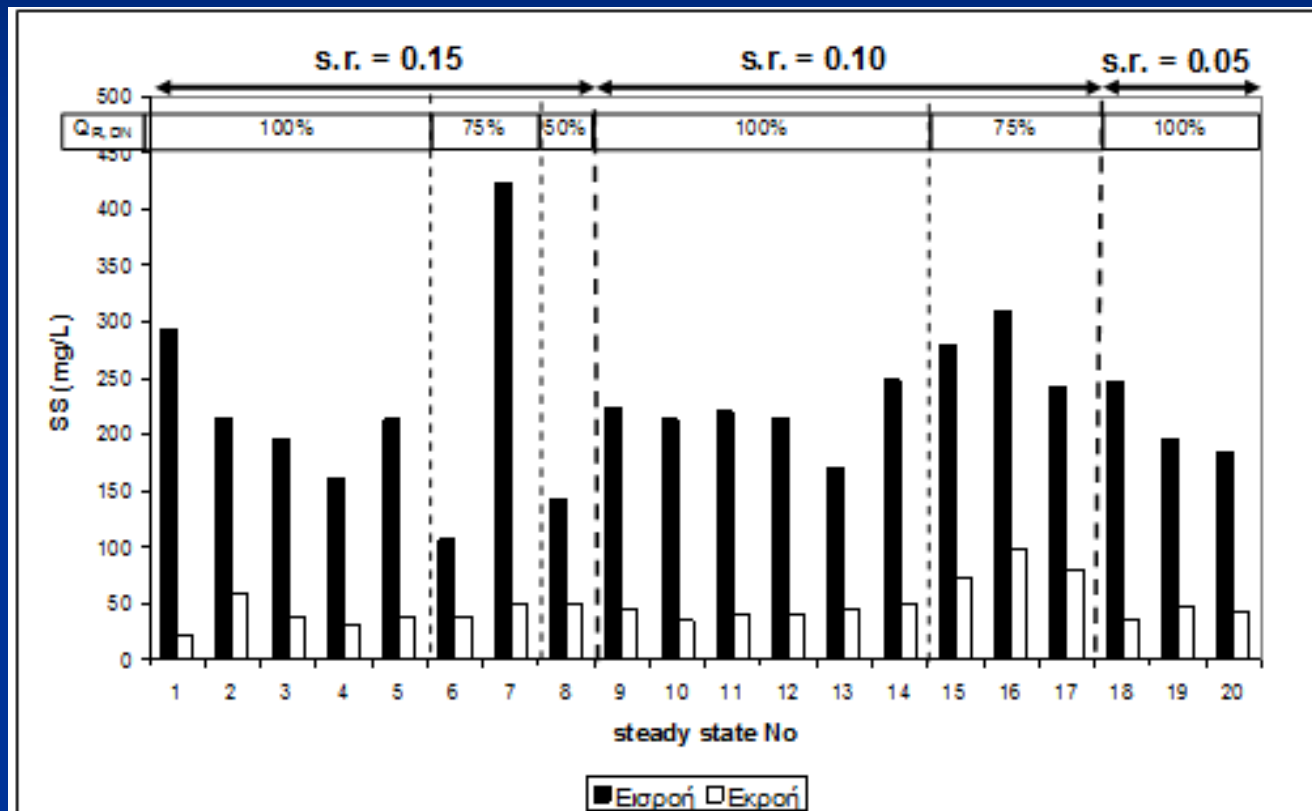
10 - 12 mg/L

TP

1 – 1.5 mg/L

Αποτελέσματα (1^η λειτουργική περίοδος)

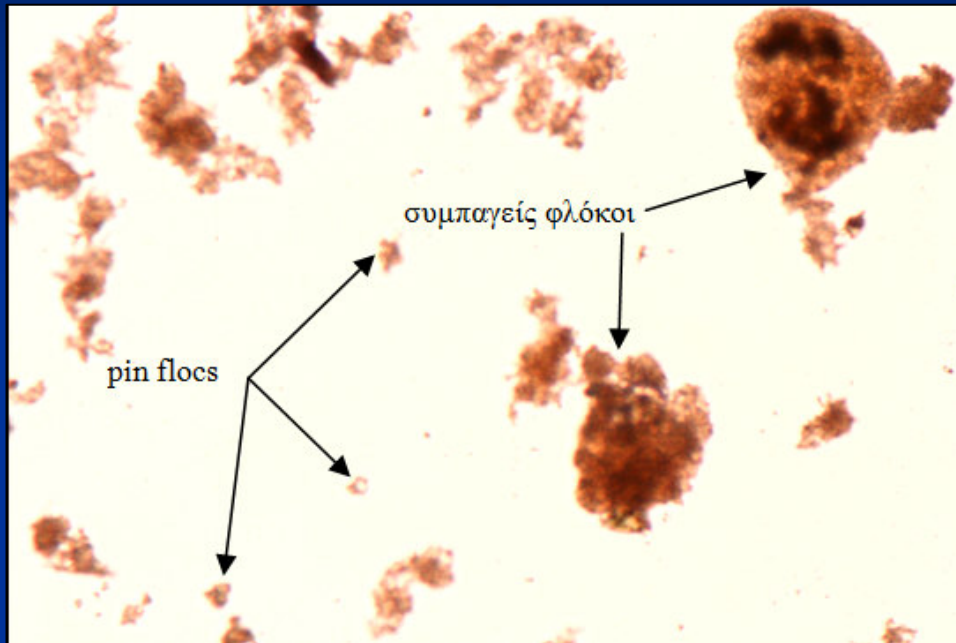
Αφαίρεση αιωρούμενων στερεών



✓ Συγκέντρωση εκροής 41 ± 9 mg SS/L

Αποτελέσματα (1^η λειτουργική περίοδος)

Μικροσκόπηση απονιτροποιητικής ιλύος (x100)



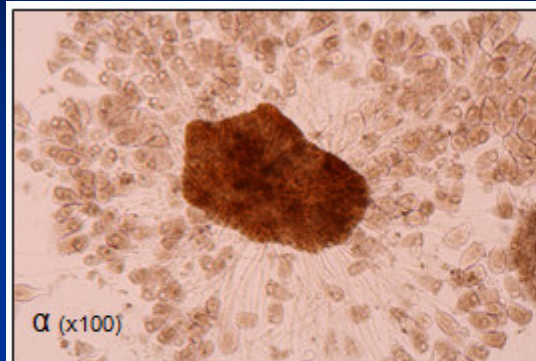
- ✓ Παρουσία συμπαγών νιφάδων ($SVI_1 = 43 \text{ mL/g}$)
- ✓ Έλλειψη νηματοειδών βακτηρίων, τα οποία σε ισορροπία με τα **floc forming bacteria** είναι **απαραίτητα** για τη διασύνδεση των νιφάδων ιλύος (**filamentous backbone**)
- ✓ Έλλειψη πρωτοζώων

➤ **Αιτία:** το εξαιρετικά μειωμένο ποσοστό αεριζόμενης βιομάζας για την απονιτροποιητική ιλύ – **11 – 12%**

Αποτελέσματα (1^η λειτουργική περίοδος)

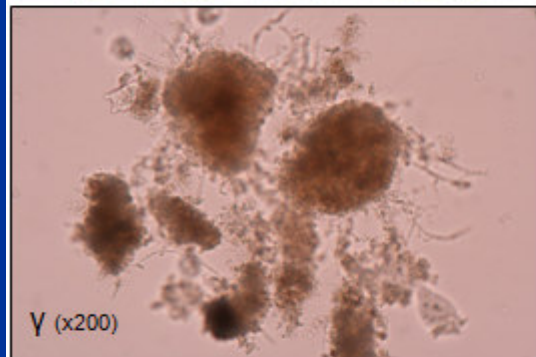
Μικροσκόπηση μικτού υγρού από τη νιτροποιητική βαθμίδα

epistylis



epistylis

Νιφάδες ιλύος



vorticella

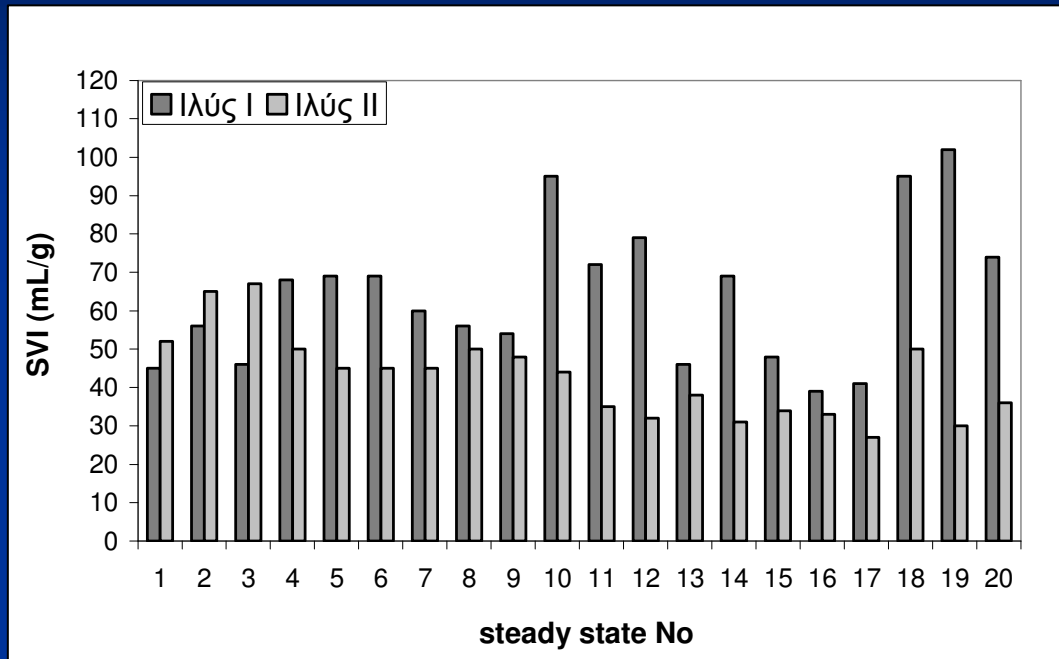
rotifer



Nais

Αποτελέσματα (1^η λειτουργική περίοδος)

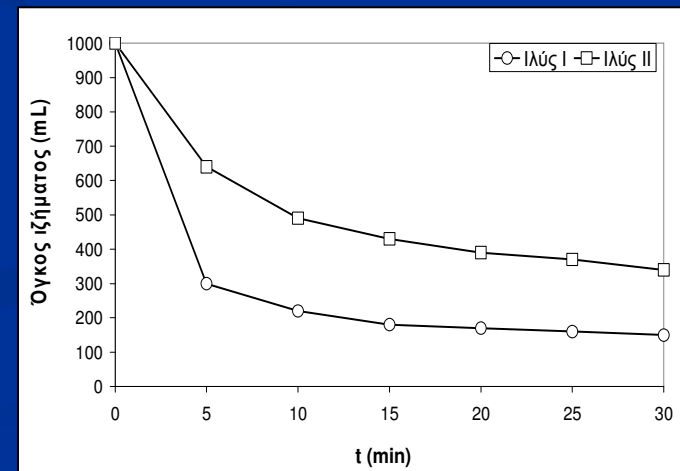
Χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας



✓ $SVI_I = 43 \pm 11 \text{ mL/g}$

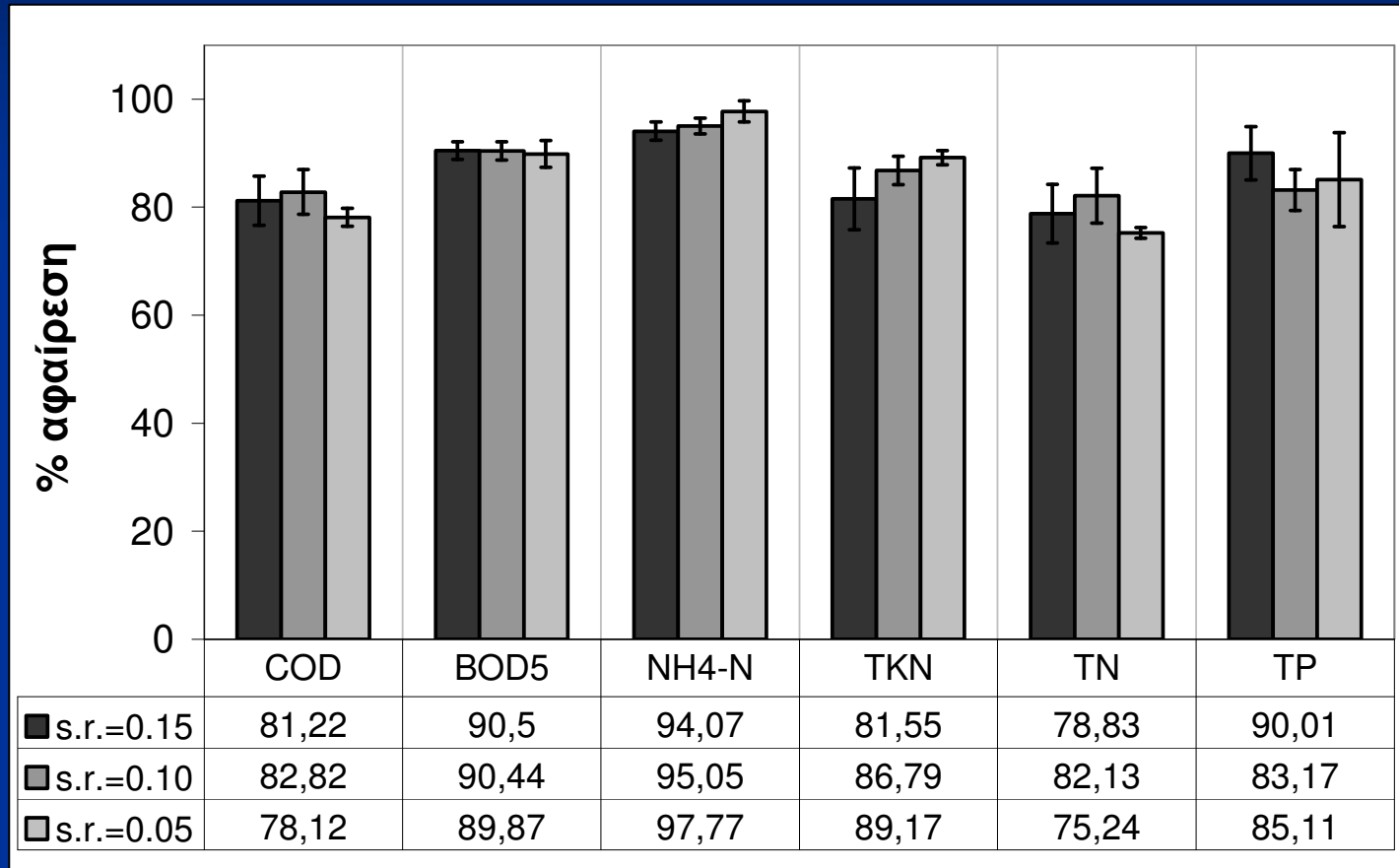
✓ $SVI_{II} = \text{καί } 64 \pm 19 \text{ mL/g}$

Τυπικό προφίλ σε τεστ καθιζησιμότητας



Αποτελέσματα (1^η λειτουργική περίοδος)

Διαμόρφωση βέλτιστων λειτουργικών παραμέτρων

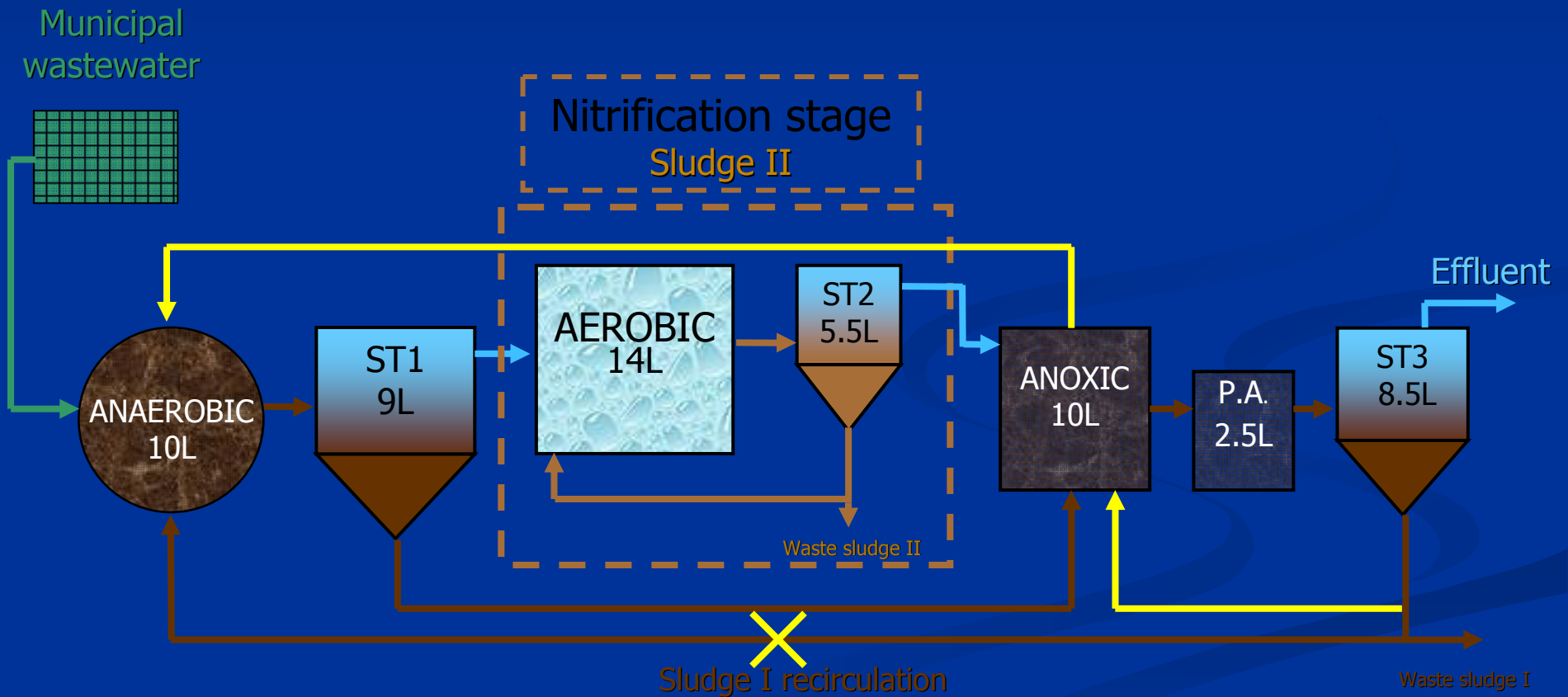


Βέλτιστη διαμόρφωση για $HRT = 9$ h: $Q_{R, DN} = 100\%$, s.r. = 0.10

Μεσες συγκεντρώσεις εκροής (mg/L): COD = 92, BOD₅ = 31,
TKN = 9.8, TN = 11.0, TP = 1.5

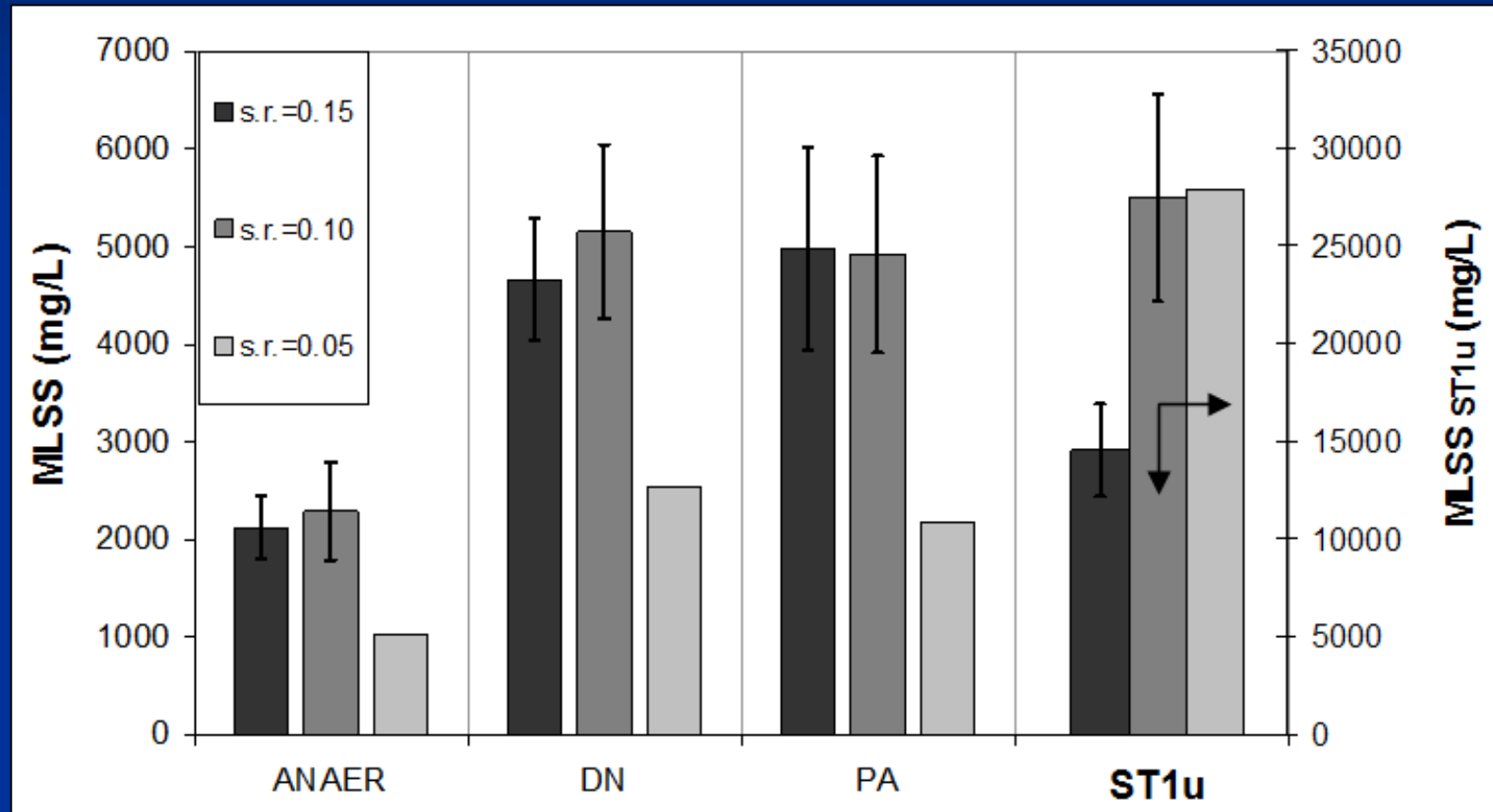
Πειραματικό μέρος (2^η λειτουργική περίοδος)

- ✓ Τροποποίηση στο ρεύμα ανακυκλοφορίας απονιτροποιητικής ιλύος



Αποτελέσματα (2^η λειτουργική περίοδος)

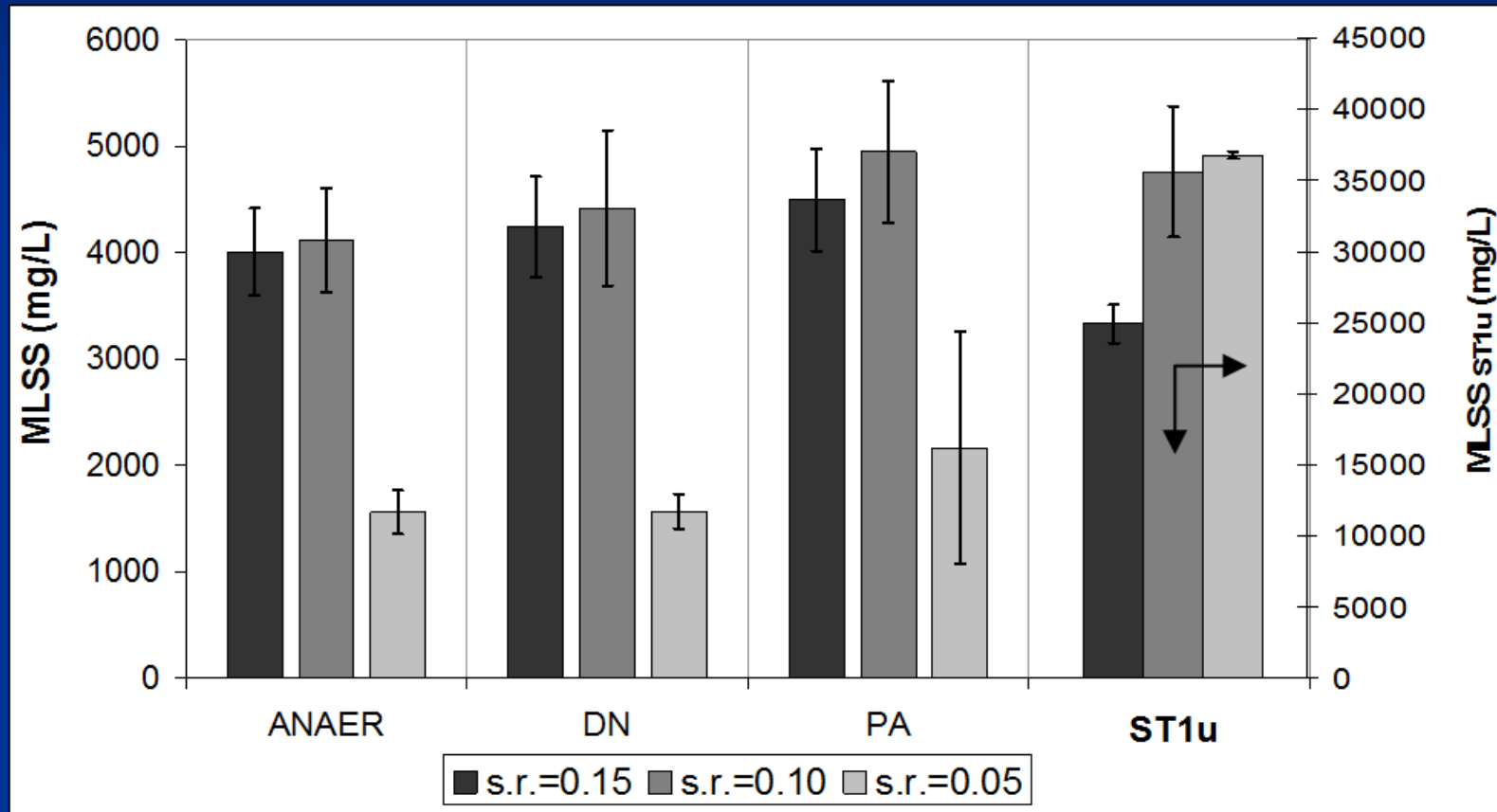
Συγκέντρωση βιομάζας



- ✓ Αύξηση στη συγκέντρωση βιομάζας κατά 11, 17 και 67% αντίστοιχα για s.r. = 0.15, 0.10 και 0.05 συγκριτικά με την 1^η λειτουργική περίοδο

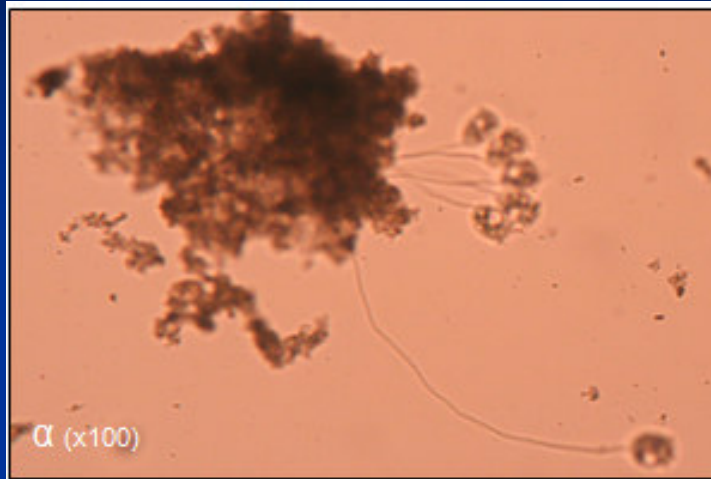
Αποτελέσματα (1^η λειτουργική περίοδος)

Συγκέντρωση βιομάζας



Αποτελέσματα (2^η λειτουργική περίοδος)

Μικροσκόπηση απονιτροποιητικής ιλύος



∴ α. *vorticella*, β. *paramecium*, γ. *opercularia*

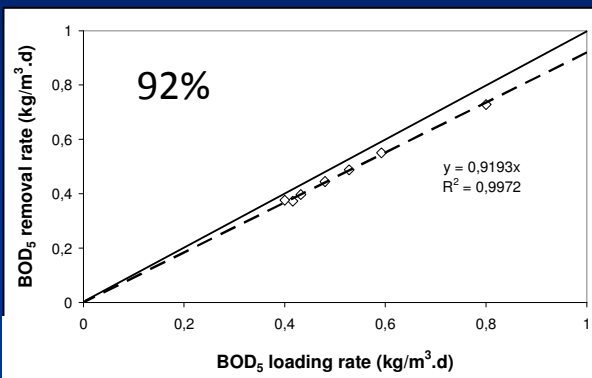
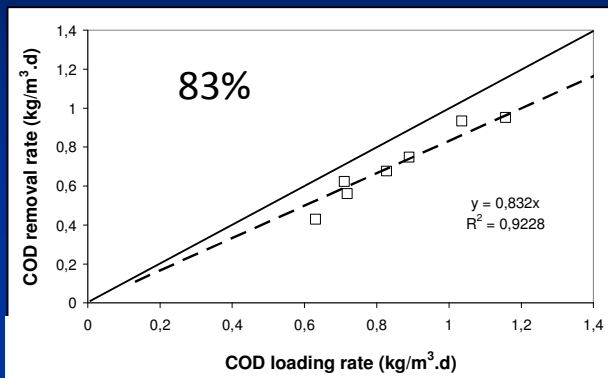
- ✓ Αύξηση του αεριζόμενου ποσοστού της απονιτροποιητικής βιομάζας από 11 – 12% σε 15 – 16% – εμφάνιση πρωτόζων – βελτίωση θολότητας

Ενότητα 3 – Αποτελέσματα (2^η λειτουργική περίοδος)

Συνολική απόδοση

COD

80 – 100 mg/L

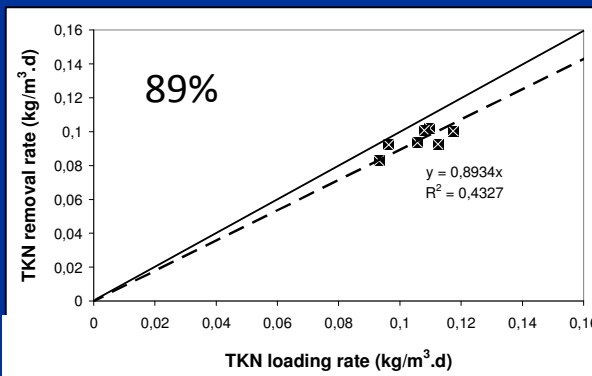
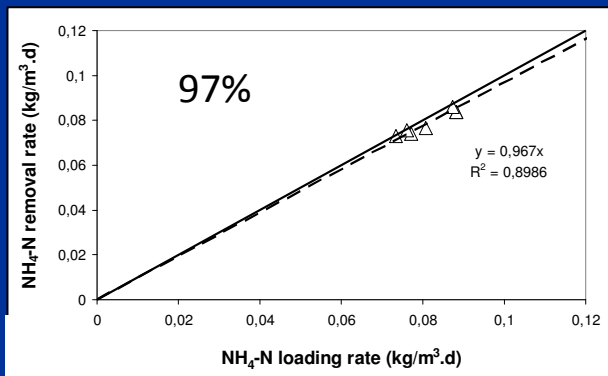


BOD₅

15 - 25 mg/L

NH₄⁺-N

0.5 – 1.5 mg/L

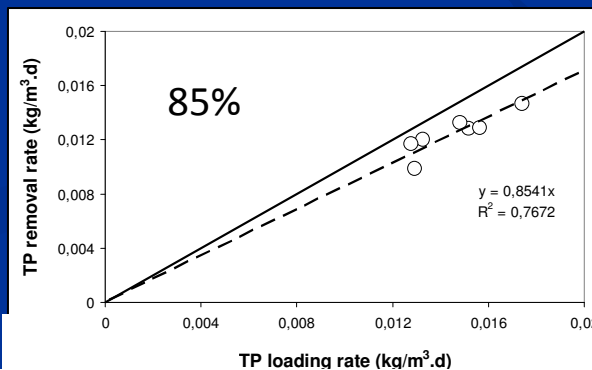
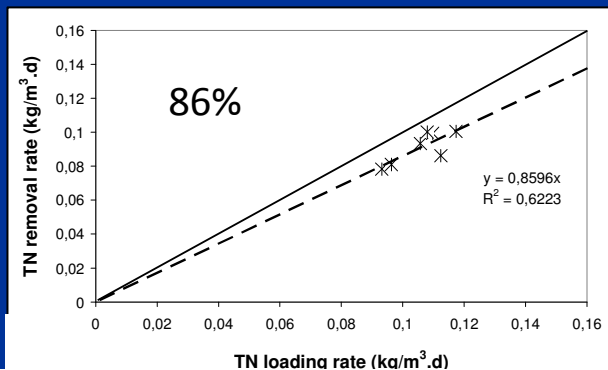


TKN

5 - 8 mg/L

TN

7 - 10 mg/L

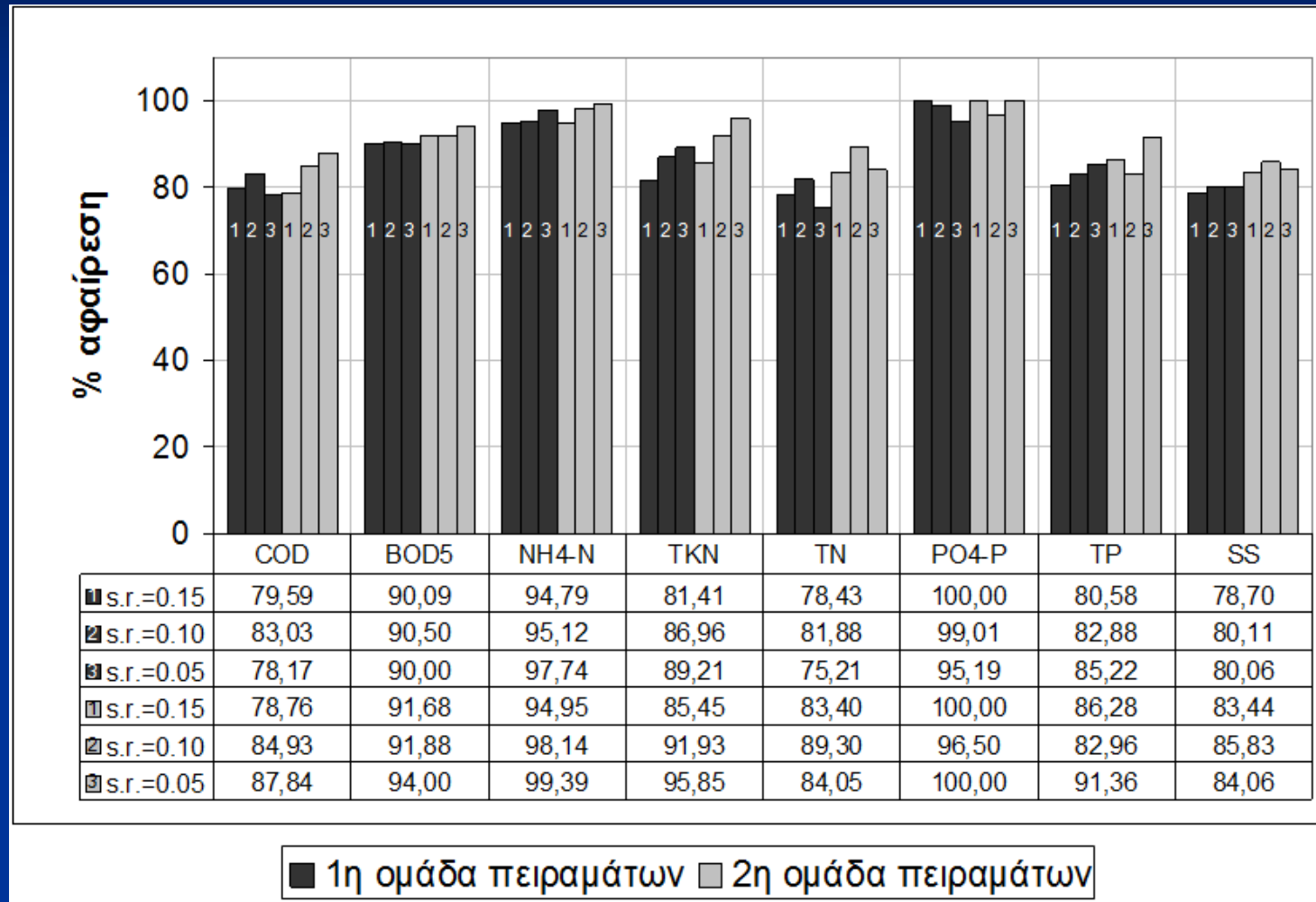


TP

1 – 1.5 mg/L

Αποτελέσματα

Συγκριτική αξιολόγηση 1ης και 2ης ομάδας πειραμάτων



Αποτελέσματα

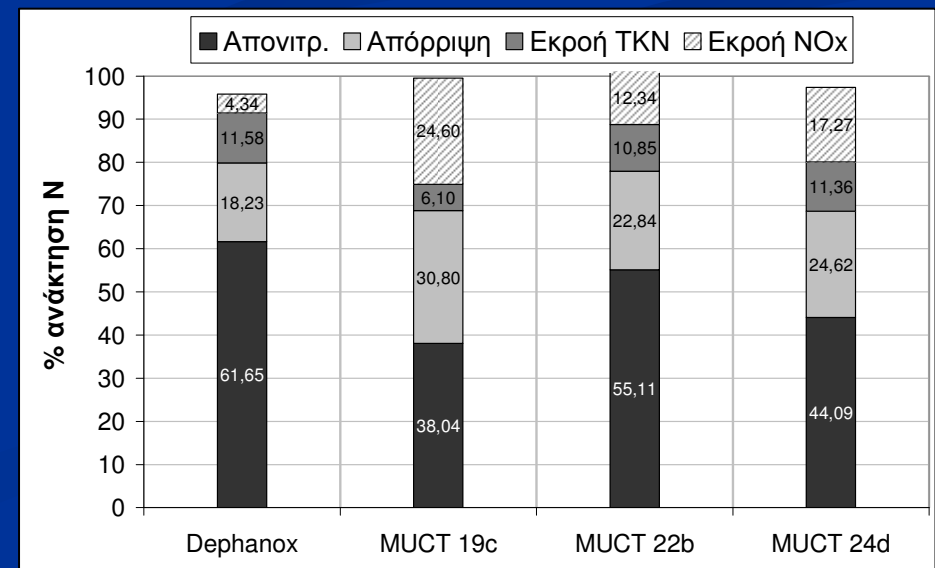
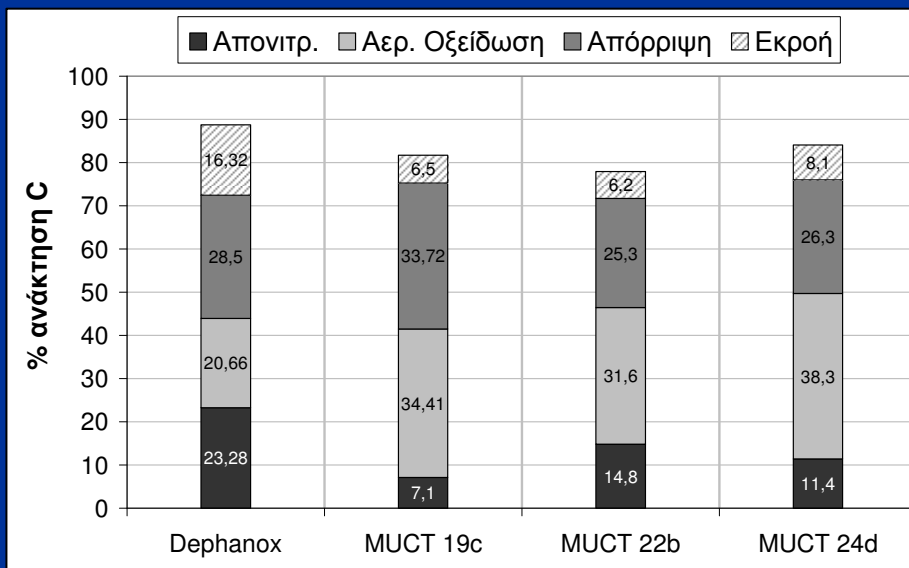
Διαμόρφωση βέλτιστων λειτουργικών παραμέτρων

HRT (h)	15
SRT (ιλύς I) (d)	10
Διαμόρφωση ανακυκλοφορίας ιλύος I	ανοξική δεξαμενή
Παροχή ανακυκλοφορίας ιλύος, $Q_{R, DN}$ (% Q_F)	50
Παροχή ανακυκλοφορίας μικτού υγρού, $Q_{R, Anaer}$ (% Q_F)	100
Λόγος διαχωρισμού (split ratio)	0.10

Παράμετρος ρύπανσης	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TKN	TN	PO ₄ ³⁻ -P	TP	SS
ποσοστό αφαίρεσης (%)	84.9	91.9	98.1	91.9	89.3	96.5	82.96	85.83
συγκέντρωση εκροής (mg/L)	83 (18)	25 (1.0)	0.93 (0.82)	5.23 (1.06)	6.93 (2.23)	0.21 (0.15)	1.54 (0.49)	30 (3.0)

Αποτελέσματα (Σύγκριση Mod. UCT/Mod. Dephanox)

Λειτουργική παράμετρος	19c	22b (Siebritz et al., 1983)	24d (Siebritz et al., 1983)
Παροχή εισροής, Q_F (L/d)	30	30	30
HRT (h)	19	16	17.5
SRT (d)	15	20	20
Εξωτερική ανακυκλοφορία (% Q_F)	100	100	100
Ανακυκλοφορία προς αναερόβια (% Q_F)	100	100	100
Ανακυκλοφορία προς ανοξική (% Q_F)	400	400	400



Αποτελέσματα (Σύγκριση Mod. UCT/Mod. Derhanox)

Συγκριτικά οφέλη της μεθόδου Derhanox σε πιθανή εφαρμογή της σε πλήρη κλίμακα

Αναφορά	Μείωση αερισμού	Μείωση ενέργειας για άντληση	Μείωση όγκου	Μείωση περίσσειας ιλύος
Kuba et al. (1996)	30%	—	—	50%
Hao et al. (2001)	35%	85%	30%	- 6%
Παρούσα έρευνα	έως 45%	72%	20 – 30%	0 %



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Α. Γ. Καπαγιαννίδης

Μηχανικός Περιβάλλοντος, Ph.D.

**ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΑΠΟ ΑΣΤΙΚΑ ΛΥΜΑΤΑ
ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΟΞΙΚΗ ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ**
