

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
«Βελτιστοποίηση Χαρακτηριστικών Ροής σε Συστήματα Ενεργού Ιλύος
για Αφαίρεση Άνθρακα, Αζώτου και Φωσφόρου»

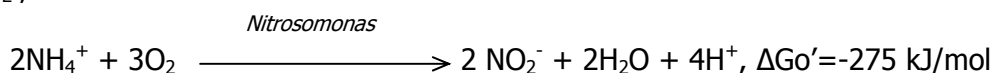
Διατύπωση προβλήματος – Στόχος Διάλεξης

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι η μέθοδος της ενεργού ιλύος και ο βαθμός επεξεργασίας συνήθως περιορίζεται στο δεύτερο, ο οποίος αποσκοπεί στην απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, του οργανικού και μέρος του μικροβιακού φορτίου. Στα πλαίσια, όμως, της βιώσιμης ανάπτυξης, η δευτεροβάθμια επεξεργασία δεν αρκεί. Ο βασικός σκοπός είναι η παρουσίαση και εξοικείωση με ένα νέο ολοκληρωμένο σύστημα επεξεργασίας για την απομάκρυνση οργανικών και θρεπτικών συστατικών. Οι επιμέρους στόχοι είναι:

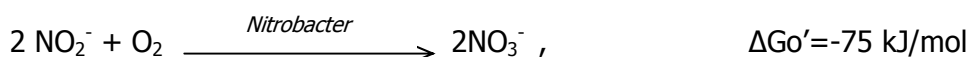
- κατανόηση μηχανισμών απομάκρυνσης άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου,
- κατανόηση σχεδιασμού και λειτουργίας μονάδας τριτοβάθμιας επεξεργασίας Υ.Α.,
- εντοπισμός βέλτιστων χαρακτηριστικών ροής μιας πρότυπης πιλοτικής μονάδας τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων(Υ.Α.).

Διεργασίες & Μέθοδοι τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Οι **διεργασίες** που επιτελούνται κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία είναι η νιτροποίηση, η απονιτροποίηση και η αποφωσφόριση. Η νιτροποίηση είναι διεργασία δύο σταδίων (νιτροδωποίηση και νιτρικοποίηση), έχει υψηλές απαιτήσεις σε οξυγόνο και οδηγεί σε πτώση του pH, ενώ οι νιτροποιητές έχουν χαμηλό ρυθμό ανάπτυξης. Στο πρώτο στάδιο (νιτροδωποίηση), που είναι και το ρυθμορυθμιστικό, η αμμωνία οξειδώνεται από νιτροδωποιογόνικα βακτήρια (nitrosifying) του γένους *Nitrosomonas* (π.χ. *N. europaea*) σε NO_2^- :



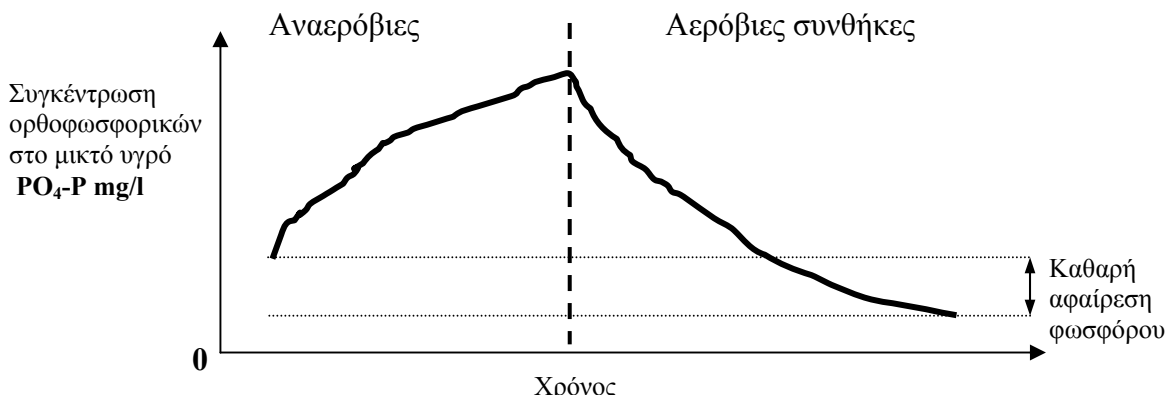
Στο δεύτερο στάδιο (νιτρικοποίηση) νιτροποιητικά βακτήρια (nitrifying) του γένους *Nitrobacter* (π.χ. *N. agilis*, *N. winogradski*) μετατρέπουν το NO_2^- σε NO_3^- .



Στην απονιτροποίηση τα νιτρικά και τα οργανικά χρησιμοποιούνται ως τελικοί ηλεκτρονιακοί δέκτες και δότες αντίστοιχα σε αναερόβια αναπνοή, ενώ η διεργασία έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του pH.



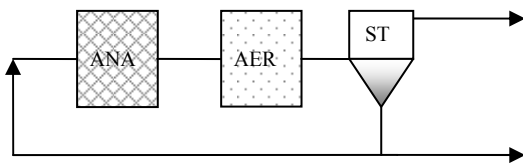
Η βιολογική αφαίρεση φωσφόρου έγκειται στη συσσώρευση πολυφωσφορικού (poly-P) σε μικροοργανισμούς, οι οποίοι είναι γνωστοί ως "βακτήρια poly-P" ή PAOs (Phosphorus Accumulating Organisms). Πρόκειται για βακτήρια τα οποία αποθηκεύουν περισσότερο φωσφορικό από αυτό που χρειάζονται για την ανάπτυξή τους. Αυτό που έχει ιδιαίτερη αξία είναι ότι, κάτω από αερόβιες συνθήκες συντίθεται και αποθηκεύεται πολύ περισσότερο πολυφωσφορικό σε σχέση με αυτό που αποδίδεται κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Έτσι, υπάρχει καθαρή αφαίρεση ποσότητας φωσφόρου.



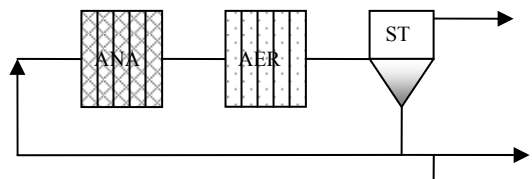
Σχήμα 1. Πορεία αφαίρεσης φωσφόρου στην εκτεταμένη βιολογική αφαίρεση φωσφόρου.

Βάσει των παραπάνω, οι ΜΕΥΑ για τη βιολογική αφαίρεση του φωσφόρου προτάσσουν μια αναερόβια δεξαμενή πριν τη διαδικασία αφαίρεσης αζώτου και άνθρακα. Έτσι, περιλαμβάνουν αερόβιες και αναερόβιες δεξαμενές, ενώ ενσωματώνουν και ανοξικές φάσεις για τη βιολογική αφαίρεση αζώτου. Αυτό που διαφοροποιεί τις μεθόδους είναι ο τρόπος ανακυκλοφορίας της ιλύος και η δυνατότητα απονιτροποιητική αποφωσφόρισης. Αναφορικά οι γνωστότερες **μέθοδοι** απομάκρυνσης άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου είναι η Phoredox, η Bardenpho και η τροποποίησή της, η UCT και η τροποποίησή της, η Johannesburg, η Bidentipho, η VIP και η μέθοδος δύο ιλύων Dephanox που εφαρμόζεται για απονιτροποιητική αποφωσφόριση.

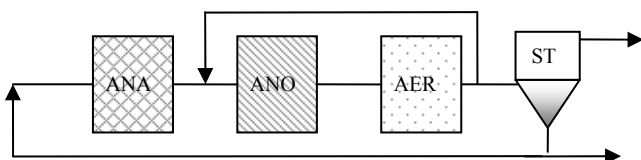
Phoredox



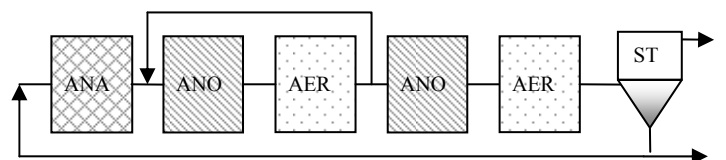
A/O



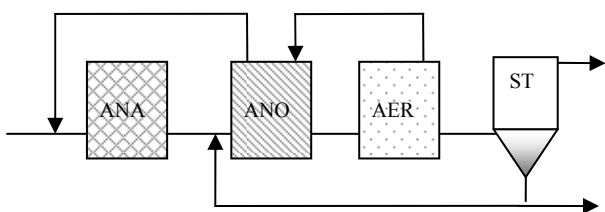
Bardenpho ή A²/O



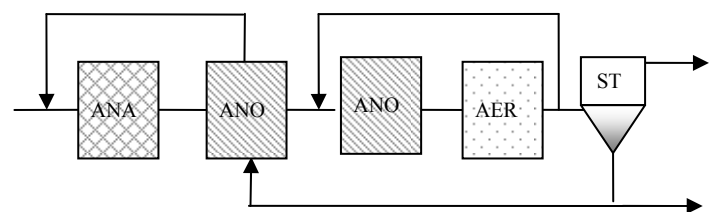
Τροποποιημένη Bardenpho



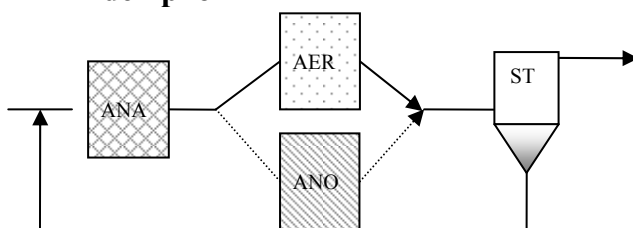
UCT



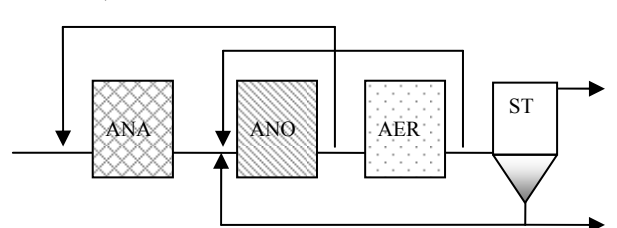
Τροποποιημένη UCT

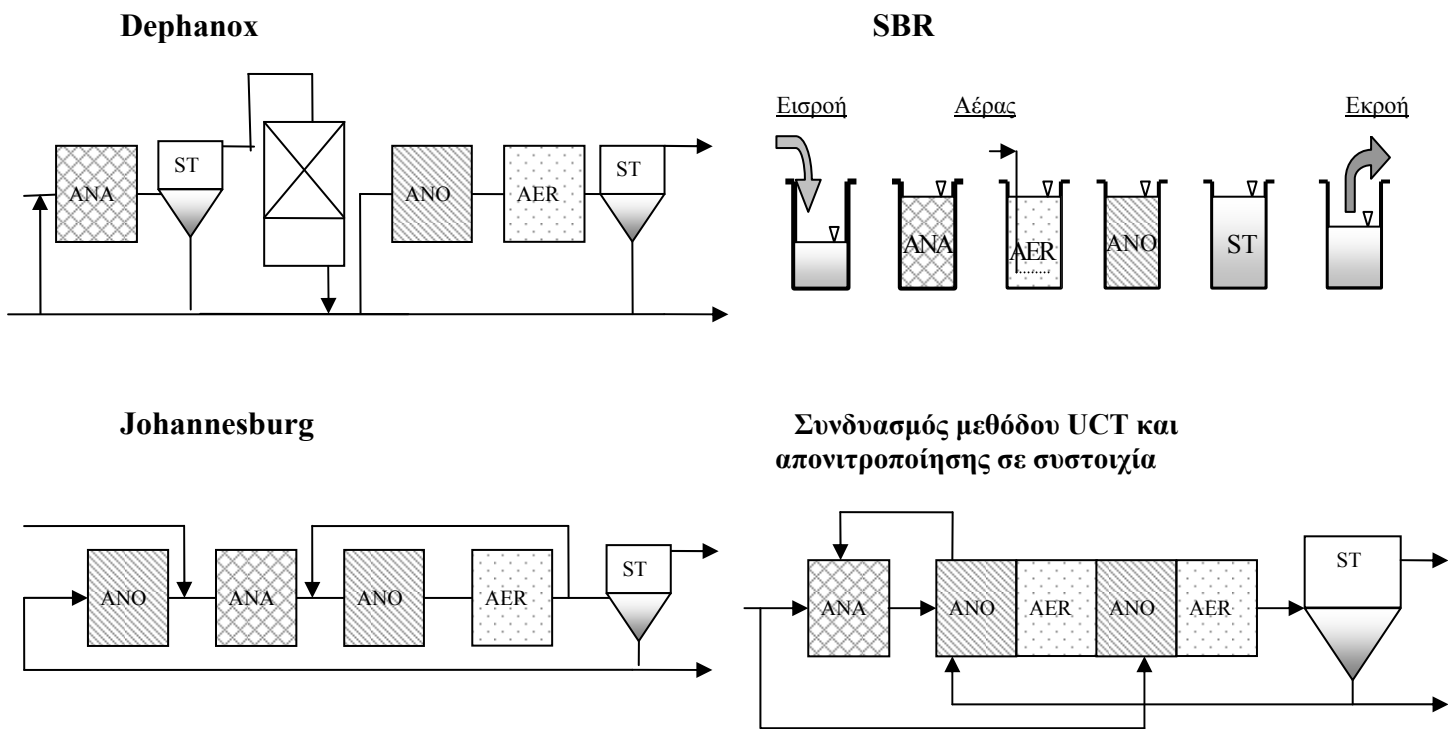


Bidentipho



VIP





Σχήμα 2. Μέθοδοι βιολογικής απομάκρυνσης PO_4^{3-} .

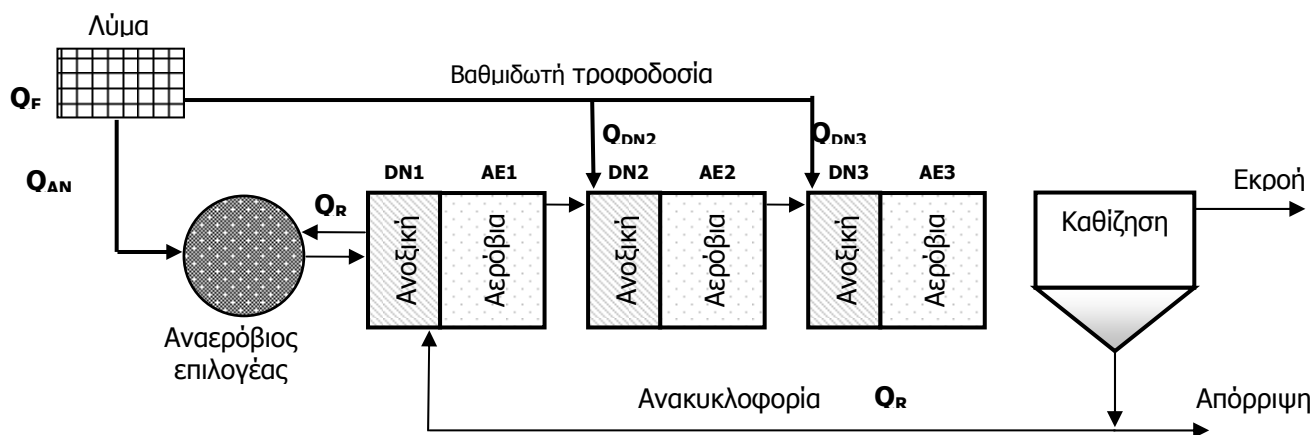
Πρότυπη μονάδα τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Βάσει της σχετικής βιβλιογραφίας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μία πρότυπη πιλοτική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με βέλτιστα χαρακτηριστικά ροής:

- Προτεταμένη αναερόβια δεξαμενή για την άσκηση επιλεκτικής πίεσης υπέρ της ανάπτυξης ορισμένων ομάδων μικροοργανισμών που συσσωρεύουν ορθοφωσφορικά (PO_4^{3-} -P), αλλά και την καταστολή της ανάπτυξης νηματοειδών βακτηρίων (επιλογέας).
- Συστοιχία (cascade) τριών ζευγών βιοαντιδραστήρων, όπου κάθε ζεύγος αποτελείται από δύο διακριτά τμήματα με ανοξικές και οξικές συνθήκες. Η διαμόρφωση της συστοιχίας με τρεις βαθμίδες έχει ως αποτέλεσμα η δυνητική αφαίρεση ολικού αζώτου να ξεπερνά το 83%. Παράλληλα, παρέχεται λειτουργική ασφάλεια, αφού ότι δεν απομακρύνθηκε στην προηγούμενη βαθμίδα μπορεί να επεξεργαστεί στην επόμενη.
- Βαθμιδωτή τροφοδοσία (step-feeding) του εισερχόμενου λύματος σε ανοξικές/ αναερόβιες δεξαμενές, έτσι ώστε να διατίθεται η απαραίτητη πηγή ανθρακούχου υποστρώματος για την απονιτροποίηση ή την απελευθέρωση φωσφόρου, αλλά και να δρουν οι αντίστοιχες δεξαμενές ως επιλογείς για την καταστολή της ανάπτυξης νηματοειδών μικροοργανισμών.
- Η πρωτοβάθμια καθίζηση εκλείπει, με συνέπεια να διατηρείται το οργανικό υπόστρωμα για τη βιολογική αφαίρεση πολυφωσφορικού και την απονιτροποίηση.
- Η ροή ανακυκλοφορίας ιλύος από τη δεξαμενή καθίζησης λαμβάνει χώρα μόνο στο ανοξικό τμήμα του πρώτου ζεύγους βιοαντιδραστήρων, ώστε να απομακρύνεται το νιτρικό άζωτο πριν την εισαγωγή της ανακυκλοφορίας στον αναερόβιο επιλογέα και την ελαχιστοποίηση των ροών ανακυκλοφορίας ιλύος σε μία.
- Η ροή ανακυκλοφορίας μικτού υγρού από τις ανοξικές συνθήκες του πρώτου ζεύγους βιοαντιδραστήρων στον αναερόβιο επιλογέα είναι ίση με τη ροή ανακυκλοφορίας της ιλύος. Οι δύο ροές ανακυκλοφορίας εξασφαλίζουν πραγματικά αναερόβιες συνθήκες

(μηδενική συγκέντρωση νιτρικού αζώτου) στον αναερόβιο επιλογέα, ενώ παράλληλα εμπλουτίζεται με νέα βιομάζα.

→ Η περιορισμένη αξονική διασπορά στη συστοιχία των βιοαντιδραστήρων (εμβολική ροή) εξαιτίας του στενού φάσματος της κατανομής του χρόνου παραμονής (RTD) ανταποκρίνεται με ιδανικό τρόπο στην κινητική πρώτης τάξης. Η περιορισμένη αξονική διασπορά σε συνδυασμό με την επίδραση του αναερόβιου επιλογέα δρα ευεργετικά στην καταστολή της ανάπτυξης νηματοειδών βακτηρίων.



Σχήμα 3. Πρότυπη μονάδα τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Η απόδοση της μονάδας σε αφαίρεση παραμέτρων ρύπανσης διερευνήθηκε σε 14 καταστάσεις σταθερής ροής μεταβάλλοντας την παροχή τροφοδοσίας και τα ποσοστά βαθμιδωτής τροφοδοσίας στο σύστημα.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικές παράμετροι λειτουργίας και απόδοση της μονάδας τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

St-st no.	Q _F [L/hr] (AN/DN2/DN3) [%Q _F]	Απόδοση σε αφαίρεση παραμέτρων ρύπανσης (%)				Ρυθμός Φόρτισης Ιλύος (L _{RX}) [kg _{BOD5} /(kg _{MLVSS} ·d)]	Χρόνος παραμονής τ [hrs]
		COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ - N	PO ₄ ⁻³ - P		
1	2 (60/25/15)	91	95	98	64	0,088	17,80
2	2 (40/30/30)	81		97	42	0,118	17,80
3	2 (25/40/35)	94	96	96	71	0,150	17,80
4	3 (60/25/15)	97	97	99	67	0,164	11,87
5	3 (40/30/30)	92	98	98	64	0,328	11,87
6	3 (25/40/35)	83	98	99	56	0,117	11,87
7	4 (60/25/15)	94	98	99	93	0,329	8,90
8	4 (40/30/30)	88	92	95	69	0,155	8,90
9	4 (25/40/35)	91	94	94	50	0,389	8,90
10	5 (60/25/15)	93	93	98	96	0,518	7,12
11	5 (40/30/30)	88	96	98	71	0,421	7,12
12	5 (25/40/35)	88	87	100	54	0,270	7,12

13	6 (60/25/15)	88	96	87	92	0,817	5,93
14	7 (60/25/15)	82	89	77	89	0,558	5,09

Τα ευνοϊκότερα χαρακτηριστικά ιλύος, τα υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης και οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις παραμέτρων ρύπανσης στην εκροή διαπιστώνονται όταν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι 9 h και η εισερχόμενη παροχή των 4 L/h κατανέμεται σε ποσοστά 60%, 25% και 15% στον αναερόβιο επιλογέα, τη δεύτερη και τρίτη ανοξική δεξαμενή, αντίστοιχα. Σε αυτή την κατάσταση ροής οι τιμές αφαίρεσης οργανικών συστατικών ήταν 94% και 98% για COD και BOD₅ αντίστοιχα, ενώ των ορθοφωσφορικών ήταν 93%. Η απομάκρυνση των αζωτούχων παραμέτρων ρύπανσης ήταν 83% ως ολικό άζωτο, 94% ως ολικό κατά Kjeldahl άζωτο, 99% ως αμμωνιακό άζωτο και 83% ως οργανικό άζωτο. Οι συγκεντρώσεις εκροής των κύριων παραμέτρων ρύπανσης ήταν 43 mg COD/L, 6 mg BOD₅/L, 0,7 mg NH₄⁺-N/L, 7 mg NO₃⁻-N/L, 4,4 mg TKN/L, 0,2 mg NO₂⁻-N/L και 0,2 mg PO₄³⁻-P/L.

Επιπλέον, ο προτεινόμενος σχεδιασμός για μονάδες τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων οδηγεί στη συρρίκνωση τόσο του επενδυτικού όσο και του λειτουργικού κόστους. Το επενδυτικό κόστος περιορίζεται εξαιτίας της μείωσης όγκου των δεξαμενών κατά 94-152 L/IK ως προς το βιολογικό κατασκευαστικό μέρος (αερόβια/ αναερόβια/ ανοξική δεξαμενή) σε σύγκριση με άλλα συστήματα τριτοβάθμιας επεξεργασίας. Αν το κόστος κατασκευής ενός κυβικού (m³) είναι 400 €, η εξοικονόμηση για την κατασκευή μιας ΜΕΥΑ που εξυπηρετεί 100.000 ισοδύναμους κατοίκους (IK) φτάνει τα 2.400.000 €. Το κόστος λειτουργίας, που επικεντρώνεται στο ενεργειακό κόστος για την παροχή οξυγόνου και τη λειτουργία αντλιών, περιορίζεται, επειδή ένα μέρος των ανθρακούχων συστατικών απομακρύνεται απονιτροποιητικά. Το όφελος που προκύπτει μεταφράζεται τόσο με οικονομικά μεγέθη όσο και με φιλοπεριβαλλοντικά χαρακτηριστικά, αφού οδηγεί στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η ετήσια ενεργειακή εξοικονόμηση για μία ΜΕΥΑ που εξυπηρετεί 100.000 IK μπορεί να φτάσει 35.000-70.000 €/ a και να μειώσει τις εκπομπές κατά 600 tn – 1.200 tn CO₂ το χρόνο.

Βιβλιογραφία

- 1) E. Vaiopoulou, A. Aivasidis (2008). A Modified UCT Method for Biological Nutrient Removal: Configuration and Performance, *Chemosphere*, 72(7), 1062-1068.
- 2) E. Vaiopoulou, P. Melidis, A. Aivasidis (2007). An activated sludge treatment plant for integrated removal of carbon, nitrogen and phosphorus, *Desalination*, 211(1-3), 192-199.
- 3) E. Vaiopoulou, A. Aivasidis (2007). A Modified UCT Method for Enhanced Biological Phosphorus Removal, *European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)*, September 16-20 2007, Copenhagen, Denmark.
- 4) E. Βαϊοπούλου (2006). Νέα μέθοδος επεξεργασίας υγρών απόβλητων για την απομάκρυνση άνθρακα, αζώτου & φωσφόρου, *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονικές εκδόσεις ΤΕΕ*.
- 5) E. Βαϊοπούλου και A. Αϊβαζίδης (2006). Επεξεργασία Αποβλήτων για την Απομάκρυνση Άνθρακα, Αζώτου και Φωσφόρου, *Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου για Μονάδες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων Μικρής Κλίμακας*, Απρίλιος 8-9 2006, Πήλιο.