

Βιολογική αφαίρεση θρεπτικών από υγρά απόβλητα με έμφαση στην ανοξική δέσμευση φωσφόρου

Καπαγιαννίδης Αναστάσιος
Μηχανικός περιβάλλοντος, Ph.D.

1. Εισαγωγή - Γενικά

Σχεδόν κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα συνοδεύεται από την παραγωγή αποβλήτων, η έκθεση σε πολλά από τα οποία ενδέχεται να είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία. Αναφορικά με τα υγρά απόβλητα αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο με την καθημερινή οικιακή χρήση ο μέσος άνθρωπος παράγει ημερησίως περίπου 150 L υγρών αποβλήτων «αστικής», όπως λέγεται, φύσης και προέλευσης.

Σημαντικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις προκαλεί το περιεχόμενο των λυμάτων σε άζωτο (N) και φώσφορο (P). Το περιεχόμενο των υγρών αποβλήτων στα συστατικά αυτά οφείλεται κυρίως στη χρήση απορρυπαντικών και γεωργικών λιπασμάτων. Το άζωτο και ο φώσφορος, γνωστά και ως μακροθρεπτικά, είναι θρεπτικά στοιχεία αμφότερα απαραίτητα για τη ζωή. Σε υψηλές συγκεντρώσεις, όμως, προκαλούν σημαντικές επιβαρύνσεις σε φυσικά οικοσυστήματα (π.χ. είναι γνωστός ο τοξικός ρόλος της αμμωνίας για τα ψάρια), με κύριο το φαινόμενο του ευτροφισμού των υδάτων.

Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία 91/271/EEC, καθορίζονται ήδη από το 1991 ανώτατα όρια συγκεντρώσεων των μακροθρεπτικών σε επεξεργασμένα αστικά λύματα. Τα όρια αυτά είναι 10 – 15 mg N/L για το ολικό άζωτο και 1 – 2 mg P/L για τον ολικό φώσφορο.

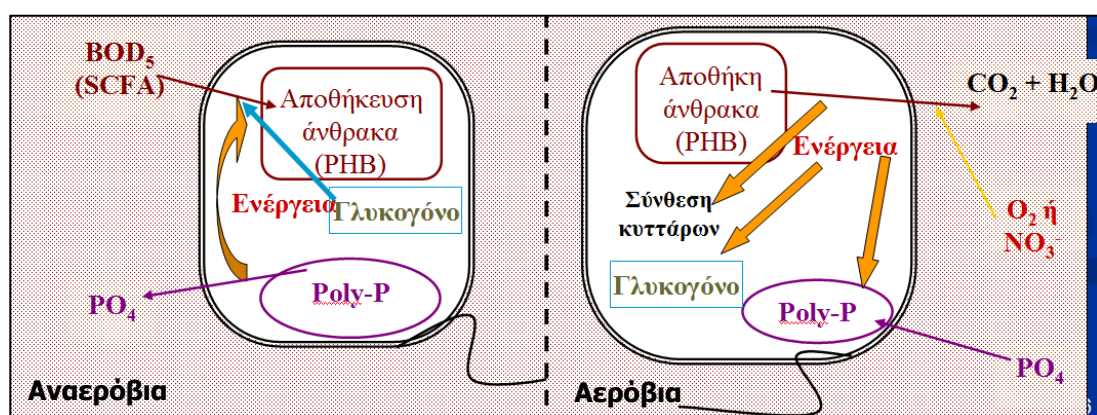
2. Βιοχημικοί μηχανισμοί της βιολογικής αφαίρεσης φωσφόρου

Σήμερα, μία σειρά από μέθοδοι είναι γνωστές και πρακτικά εφαρμόσιμες για την αφαίρεση αζώτου και φωσφόρου πλησίον της οξειδωσης ανθρακούχων ρυπαντικών συστατικών σε υγρά απόβλητα (μέθοδοι τριτοβάθμιας επεξεργασίας). Οι μέθοδοι οι οποίες έχουν επικρατήσει μπορούν να διακριθούν σε χημικές και βιολογικές, με τις τελευταίες να υπερτερούν σε σχέση με τις χημικές από οικονομική και φιλοπεριβαλλοντική σκοπιά. Παρόλα αυτά, οι βιολογικές μέθοδοι είναι πολλές φορές δύσκολο να επιτύχουν μία σταθερή απόδοση, ενώ οι βιολογικές διεργασίες, οι οποίες εμπλέκονται στην ταυτόχρονη αφαίρεση αζώτου και φωσφόρου εξακολουθούν, εν πολλοίς, ακόμα και σήμερα να στερούνται επαρκούς κατανόησης.

Μετά από εκτεταμένη έρευνα στη βιολογική αφαίρεση φωσφόρου (ΒΑΦ), σήμερα έχει υιοθετηθεί ένα κοινώς αποδεκτό μοντέλο που περιγράφει τις μεταβολικές διεργασίες που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των βακτηρίων αφομοίωσης φωσφόρου (Phosphorus Accumulating Organisms ή PAOs). Οι μικροοργανισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από την ικανότητα αφομοίωσης φωσφόρου σε ποσότητες πολύ μεγαλύτερες από κοινά ετερότροφα βακτήρια και αναπτύσσονται σε συστήματα επεξεργασίας λυμάτων με συνεχή ανακυκλοφορία της ενεργού ιλύος μεταξύ αναερόβιων και αερόβιων (ή ανοξικών) συνθηκών

Υπό αναερόβιες συνθήκες, όπου και διατίθεται το οργανικό υπόστρωμα (οργανικά συστατικά του αποβλήτου), τα βακτήρια του τύπου αυτού λαμβάνουν το οργανικό υπόστρωμα και το αποθηκεύουν ενδοκυτταρικά με τη μορφή ανθρακούχων πολυμερών, τα

οποία είναι γνωστά και με τον αθροιστικό όρο πολύ-β-υδροξυαλκανοϊκά (poly-β-hydroxyalkanoates ή PHAs). Για τη μετατροπή του εξωγενούς υποστρώματος και την αποθήκευσή του ενδοκυτταρικά ως PHAs απαιτείται ενέργεια, η οποία λαμβάνεται από τον αποπολυμερισμό ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου πολυφωσφορικού (poly-P) – και δευτερευόντως από κατανάλωση ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου γλυκογόνου – το οποίο αναερόβια απελευθερώνεται στο μικτό υγρό με την μορφή φωσφορικών ιόντων (PO_4^{3-}). Κατά τις ακόλουθες αερόβιες συνθήκες τα βακτήρια PAOs χρησιμοποιούν τα ενδοκυτταρικά PHAs που αποθήκευσαν κατά την προηγούμενη αναερόβια φάση, ως υπόστρωμα για την ανάπτυξή τους. Η οξείδωση των PHAs οδηγεί στην παραγωγή ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται από τα PAOs για εκτεταμένη αφομοίωση τόσο του P που είχε απελευθερωθεί κατά την προηγούμενη φάση, όσο και αυτού που περιέχεται στο εισρέον υγρό απόβλητο, για σχηματισμό πολυφωσφορικού. Στη φάση αυτή, επίσης, λαμβάνει χώρα και σχηματισμός γλυκογόνου, ενδοκυτταρικά. Οι μετατροπές αυτές παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Κύριες μεταβολικές διεργασίες βακτηρίων αφομοίωσης φωσφόρου

3. Τεχνικά συστήματα αφαίρεσης θρεπτικών από υγρά απόβλητα

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα αφαίρεσης θρεπτικών από υγρά απόβλητα περιλαμβάνει στο σχεδιασμό του αερόβιες (παρουσία οξυγόνου), ανοξικές (απουσία οξυγόνου, παρουσία νιτρικών ιόντων), καθώς και αναερόβιες (απουσία οξυγόνου και νιτρικών ιόντων) συνθήκες. Η εναλλαγή αναερόβιων-αερόβιων συνθηκών απαιτείται για την αφαίρεση φωσφόρου, ενώ υπό ανοξικές συνθήκες τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-), που παράγονται κατά την οξείδωση της αμμωνίας (NH_4^+), ανάγονται προς αέριο άζωτο (N_2) μέσω της διεργασίας της απονιτροποίησης και αφαιρούνται από το σύστημα. Συνοπτικά, οι βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα υπό διαφορετικές συνθήκες σε ένα σύστημα ενεργού ιλύος για αφαίρεση αζώτου και φωσφόρου συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Κάθε μία από τις αναερόβιες/ανοξικές/αερόβιες συνθήκες είναι απαραίτητο να εξασφαλίζονται σε ένα σύστημα βιολογικής αφαίρεσης θρεπτικών, ενώ η διαμόρφωσή τους διαφοροποιείται ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται σε κάθε τεχνική μονάδα επεξεργασίας λυμάτων.

Οι κυριότερες μέθοδοι συνεχούς ροής που έχουν αναπτυχθεί για την αφαίρεση αζώτου και φωσφόρου από υγρά απόβλητα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Στις περισσότερες από τις μεθόδους αυτές η ανοξική ζώνη προηγείται της αερόβιας (προ-απονιτροποίηση) εξαιτίας του ότι για αποτελεσματική απονιτροποίηση απαιτείται οργανικός άνθρακας (οργανικά συστατικά του αποβλήτου), το μεγαλύτερο μέρος του οποίου θα οξειδωνόταν υπό αερόβιες συνθήκες και δε θα ήταν διαθέσιμο ανοξικά, στην περίπτωση που η ανοξική ζώνη ακολουθούσε την αερόβια (μετα-απονιτροποίηση). Ως εκ τούτου, η ανοξική ζώνη κρίνεται

σκόπιμο να τοποθετείται ανάντη της αερόβιας και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται ανακυκλοφορία του νιτροποιημένου περιεχομένου της αερόβιας ζώνης πίσω στην ανοξική βαθμίδα, ώστε να επιτευχθεί αναγωγή των NO_3^- που περιέχονται σε αυτό (απονιτροποίηση). Ακολούθως επιχειρείται μία σύντομη περιγραφή των κυριότερων (συχνότερα συναντώμενων σε πρακτικές εφαρμογές) από τις μεθόδους βιολογικής αφαίρεσης θρεπτικών.

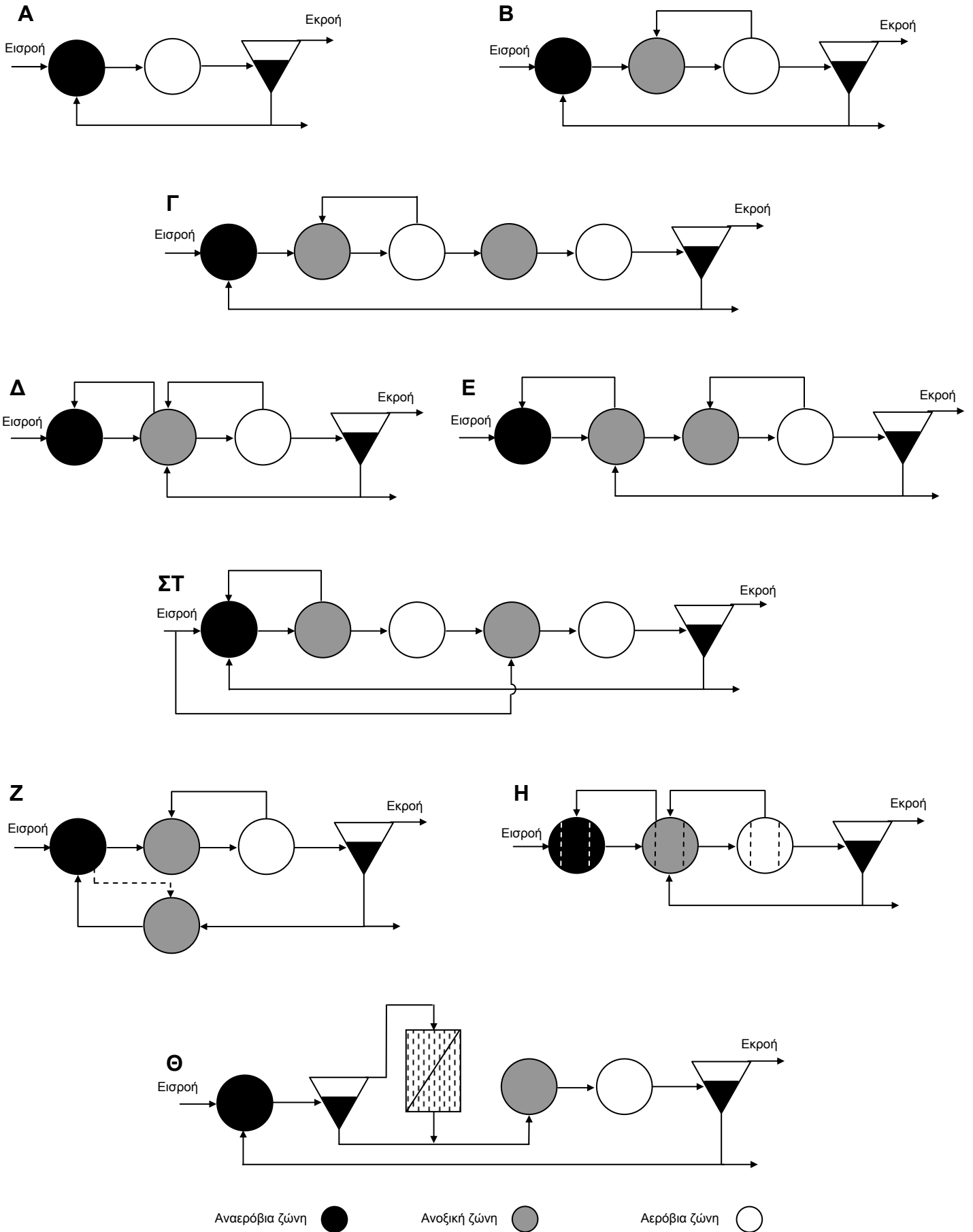
Πίνακας 1: Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές συνθήκες ενός συστήματος ενεργού ιλύος για αφαίρεση N και P

Συνθήκες Διεργασία	Αναερόβιες	Ανοξικές	Αερόβιες
Οξείδωση οργανικού C		+	+
Αποθήκευση οργανικού C / Απελευθέρωση PO_4^{3-}	+		
Αφομοίωση PO_4^{3-}		+*	+
Νιτροποίηση (οξείδωση NH_4^+ σε NO_3^-)			+
Απονιτροποίηση (αναγωγή NO_3^- σε N_2)		+	

* Η ανοξική αφομοίωση PO_4^{3-} ευνοείται στη μέθοδο DEPHANOX

3.1. Οι μέθοδοι Bardenpho και Phoredox

Η μέθοδος Bardenpho (**Barnard Denitrification Phosphorus Removal**) προτάθηκε από τον Barnard στη Νότια Αφρική. Στον αρχικό σχεδιασμό, η μέθοδος δεν περιελάμβανε αναερόβιο επιλογέα και σκοπό είχε την αφαίρεση άνθρακα και αζώτου μέσω νιτροποίησης – απονιτροποίησης. Όταν η αναγκαιότητα ύπαρξης προτεταμένης αναερόβιας βαθμίδας συνδέθηκε με την ανάπτυξη των PAOs στο σύστημα, μία αναερόβια βαθμίδα προστέθηκε στον προϋπάρχοντα σχεδιασμό και η νέα μέθοδος ονομάστηκε τροποποιημένη (ή πέντε βαθμίδων) Bardenpho (Σχήμα 2Γ). Η μέθοδος Bardenpho αποτελείται από έναν αναερόβιο αντιδραστήρα ακολουθούμενο από δύο ζεύγη δεξαμενών υπό ανοξικές και αερόβιες συνθήκες. Ανακυκλοφορία νιτροποιημένου υγρού (εσωτερική) λαμβάνει χώρα από την πρώτη αερόβια βαθμίδα στην πρώτη ανοξική, παρέχοντας την απαραίτητη για τη βαθμίδα αυτή συγκέντρωση NO_3^- . Το συμπύκνωμα ιλύος από τον πυθμένα της δευτεροβάθμιας καθίζησης επίσης ανακυκλοφορείται στην αναερόβια δεξαμενή. Η πρακτική εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί έναν ιδιαίτερα υψηλό ρυθμό εσωτερικής ανακυκλοφορίας ίσο περίπου με 400% της παροχής εισροής. Η ανακυκλοφορία της συμπυκνωμένης ιλύος στην αναερόβια βαθμίδα υπολογίζεται σε 100% της εισροής συνήθως. Η μέθοδος A2O (Anaerobic – Aerobic – Oxidic, Σχήμα 2B) ή Phoredox τριών βαθμίδων είναι όμοια με την τροποποιημένη Bardenpho, παραλείποντας τις δύο τελευταίες βαθμίδες (ανοξική και αερόβια). Η



Σχήμα 2: Μέθοδοι για τη βιολογική αφαίρεση N και P. **A.** AO **B.** Phoredox τριών βαθμίδων (three stage Phoredox) ή A2O **Γ.** Τροποποιημένη Bardenpho **Δ.** UCT **Ε.** Τροποποιημένη UCT **ΣΤ.** Συνδυασμός UCT και απονιτροποίησης σε συστοιχία **Z.** Johannesburg (και ISAH) **H.** VIP **Θ.** DEPHANOX

αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε αφαίρεση N είναι συγκριτικά μειωμένη, αν και αυτό μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες παραμέτρους λειτουργίας (επί μέρους υδραυλικοί χρόνοι παραμονής, φόρτιση ιλύος).

3.2. Η μέθοδος UCT

Στη μέθοδο αυτή (Σχήμα 2Δ), η οποία αποτελεί τροποποίηση της A2O, το ρεύμα ανακυκλοφορίας της ιλύος εισέρχεται πρώτα από την ανοξική ζώνη όπου υπόκειται σε αναγωγή πιθανόν υπολειμματικών συγκεντρώσεων NO_3^- που περιέχει και έπειτα καταλήγει στην αναερόβια δεξαμενή, ώστε να εξασφαλίζονται πραγματικά αναερόβιες συνθήκες στην τελευταία (έλλειψη NO_3^-). Ο ρυθμός εσωτερικής ανακυκλοφορίας και στην περίπτωση αυτή ρυθμίζεται αρκετά υψηλός, ίσος με 300%-500% της συνολικής εισροής στο σύστημα, ενώ ο αντίστοιχος ρυθμός για την ανακυκλοφορία της συμπυκνωμένης ιλύος στην ανοξική βαθμίδα είναι 50-100% της εισροής. Ο τελευταίος συνήθως είναι ίσος και με το ρυθμό ανακυκλοφορίας από την ανοξική δεξαμενή πίσω στην αναερόβια. Εξαιτίας του ότι η ανακυκλοφορία της συμπυκνωμένης ιλύος από την τελική καθίζηση πραγματοποιείται μέσω της ανοξικής ζώνης, η συγκέντρωση της βιομάζας στην αναερόβια δεξαμενή αναμένεται μειωμένη συγκριτικά με τη μέθοδο A2O. Ως εκ τούτου, ο αναερόβιος χρόνος παραμονής στη μέθοδο UCT θα πρέπει να διαμορφώνεται συγκριτικά υψηλότερος.

3.3. Η τροποποιημένη μέθοδος UCT

Στην τροποποιημένη μέθοδο UCT η ανοξική ζώνη χωρίζεται σε δύο διαμερίσματα. Το πρώτο διαμέρισμα δέχεται την ανακυκλοφορία της συμπυκνωμένης ιλύος από τη δεξαμενή καθίζησης, ενώ το δεύτερο, την εσωτερική ανακυκλοφορία του νιτροποιημένου υγρού από την αερόβια δεξαμενή. Αυτή η διαμόρφωση επιτυγχάνει καλύτερη απόδοση αναφορικά με την απονιτροποίηση και λειτουργική ασφάλεια στο σύστημα επεξεργασίας (Σχήμα 2Ε).

3.4. Η μέθοδος DEPHANOX

Η μέθοδος DEPHANOX (Σχήμα 2Θ) είναι η μοναδική από τις μεθόδους βιολογικής αφαίρεσης θρεπτικών, που η διαμόρφωσή της έχει ως σκοπό την ανάπτυξη και τον διαχωρισμό δύο ποιοτικά διαφορετικών μικροβιακών καλλιέργειών, γι' αυτό και ονομάζεται μέθοδος των δύο ιλύων (two sludge system). Η μία ιλύς αναπτύσσεται υπό αμιγώς αερόβιες συνθήκες και πραγματοποιεί τη νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου, ενώ η άλλη αναπτύσσεται υπό εναλασσόμενες αναερόβιες – ανοξικές (και δευτερευόντως αερόβιες) συνθήκες, συντελώντας στην αφαίρεση P αλλά και στην απονιτροποίηση των NO_3^- που παράχθηκαν κατά τη διεργασία της νιτροποίησης. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μίας δεξαμενής καθίζησης αμέσως μετά την αναερόβια δεξαμενή, όπου βιομάζα με πλούσιο περιεχόμενο σε ενδοκυτταρικά οργανικά πολυμερή (PHAs) διαχωρίζεται από το διαυγασμένο υγρό. Το υπερκείμενο υγρό, πλούσιο σε NH_4^+-N και P, αντλείται σε έναν αντιδραστήρα με καθηλωμένη νιτροποιητική βιομάζα (εναλλακτικά μπορεί να γίνει χρήση μίας αερόβιας δεξαμενής με πλήρη ανάδευση σε συνδυασμό με μία ακόλουθη δεξαμενή καθίζησης), με εφαρμογή αερισμού απαραίτητου στη διεργασία της νιτροποίησης, όπου λαμβάνει χώρα οξειδωση του αμμωνιακού αζώτου σε NO_3^- . Το νιτροποιημένο υγρό από τον αντιδραστήρα αυτό (απαλλαγμένο από βιομάζα) οδηγείται σε μια ανοξική ζώνη, όπου, επίσης, διατίθεται και το συμπύκνωμα της βιομάζας από την πρώτη δεξαμενή καθίζησης. Στην ανοξική αυτή ζώνη λαμβάνει χώρα η αφαίρεση P με ταυτόχρονη απονιτροποίηση από βακτήρια PAOs με δυνατότητα χρήσης NO_3^- , εναλλακτικά του O_2 (ανοξική δέσμευση φωσφόρου). Ακολουθεί μία μικρότερη σε μέγεθος δεξαμενή αερισμού, απαραίτητη για αφομοίωση τυχόν υπολειμματικής συγκέντρωσης P, αλλά και για την εκφύσηση αερίου αζώτου (N_2) από τους φλόκους της ιλύος, που παράγεται κατά την προηγούμενη

απονιτροποιητική βαθμίδα και δύναται να οδηγήσει σε φαινόμενα επίπλευσης στην τελική δεξαμενή καθίζησης.

Η πρακτική εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος αποδείχθηκε επιτυχώς σε εργαστηριακή κλίμακα παρουσιάζοντας μία σειρά σημαντικών πλεονεκτημάτων:

1. Χαμηλότερες απαιτήσεις σε αερισμό (ενέργειας), αφού η απαίτηση για οξυγόνο αφορά μόνο στη διαδικασία της νιτροποίησης και όχι σε αυτήν της αφαίρεσης φωσφόρου.
2. Μείωση συνολικού όγκου αντιδραστήρα, αφού η απονιτροποίηση και η αφαίρεση φωσφόρου λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα σε κοινή (ανοξική) δεξαμενή.
3. Έλλειψη αναγκαιότητας για ανακυκλοφορία νιτροποιημένου υγρού, αφού η ανοξική ζώνη ακολουθεί την αερόβια (μετα-απονιτροποίηση)
4. Διαφοροποίηση των διαδικασιών της νιτροποίησης και της αφαίρεσης φωσφόρου σε ξεχωριστούς αντιδραστήρες για καλύτερο έλεγχο και βελτιστοποίησή τους.
5. Βέλτιστη αξιοποίηση οργανικού άνθρακα για ταυτόχρονη απονιτροποίηση και δέσμευση φωσφόρου υπό ανοξικές συνθήκες.
6. Ελαχιστοποίηση του ανταγωνισμού μεταξύ των ετερότροφων απονιτροποιητικών βακτηρίων και αυτών που επιτελούν τη δέσμευση φωσφόρου αναφορικά με την κατανάλωση ανθρακούχου υποστρώματος.

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, εξαιτίας του μειωμένου αερισμού στη γραμμή επεξεργασίας για αφαίρεση P, είναι πιθανό να μην αναπτύσσονται τόσο νιτροποιητικά βακτήρια όσο και πρωτόζωα στην ιλύ αυτή, με αποτέλεσμα υπολειμματικές συγκεντρώσεις NH_4^+-N , αλλά και σωματιδιακή ρύπανση, να κινδυνεύουν να διαφύγουν χωρίς επεξεργασία στην εκροή, αν το ρεύμα από τον πυθμένα της πρώτης καθίζησης προς την ανοξική βαθμίδα αυξηθεί σημαντικά.