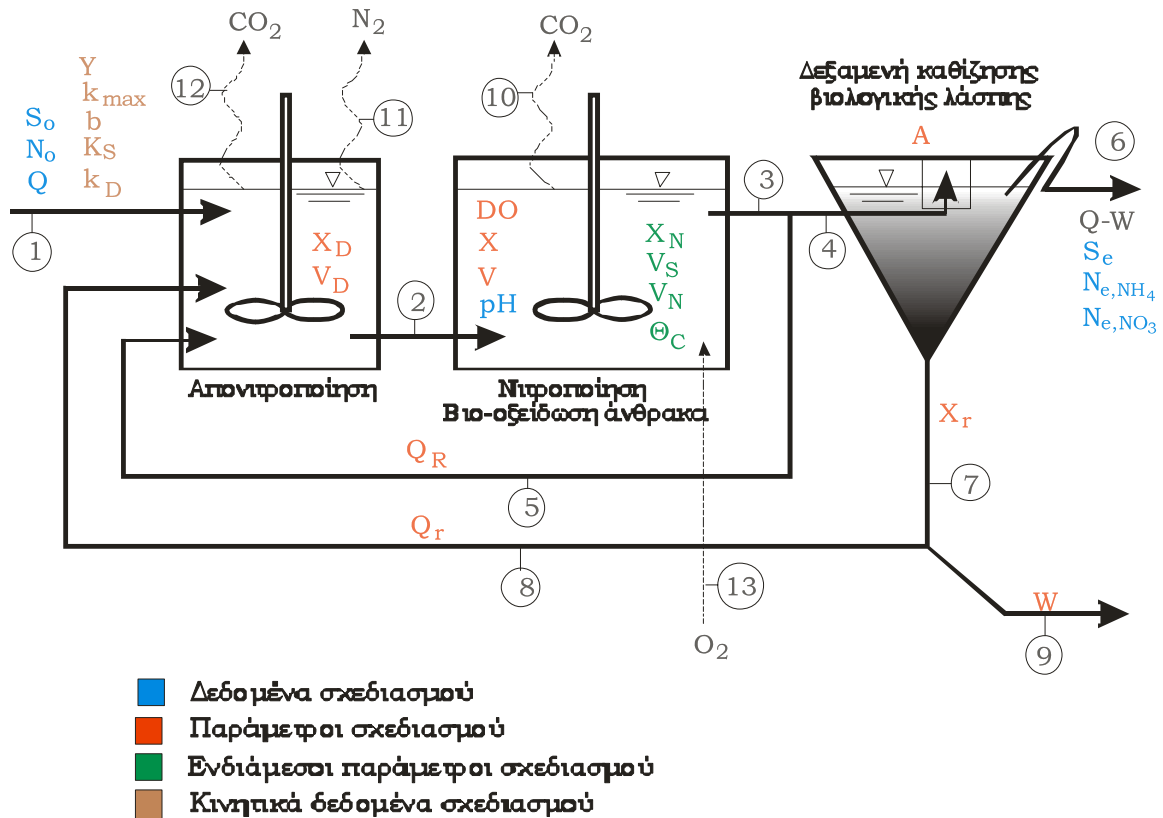


ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ
Για απομάκρυνση οργανικού άνθρακα και αζώτου

Βλυσιδης Απόστολος
 Καθηγητής ΕΜΠ



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής βιολογικού καθαρισμού

1. Περιγραφή λειτουργίας ενός βιολογικού καθαρισμού

Τα απόβλητα παροχής Q περιέχουν Βιοαποδομήσιμο Οργανικό Άνθρακα S_o και Ολικό Οργανικό Άζωτο N_o . Απαιτείται ο βιολογικός καθαρισμός τους ώστε στην έξοδό τους από τη μονάδα βιολογικού καθαρισμού η συγκέντρωση του BOC να είναι λιγότερο από S_e , η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου λιγότερο από N_{e,NH_4} και τέλος η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου λιγότερο από N_{e,NO_3}

Τα απόβλητα εισέρχονται στη δεξαμενή απονιτροποίησης (γραμμή 1) και αναμιγνύονται με μία ροή επεξεργασμένων αποβλήτων που επιστρέφει από τη δεξαμενή οξείδωσης (γραμμή 5) και τη ροή της λάσπης από τον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης (γραμμή 8). Η ανάμιξη αυτή των δύο αναερόβιων ροών (γραμμές 1 και 8) με μία αερόβια ροή (γραμμή 5) επιτυγχάνουν ανοξικές συνθήκες δηλαδή η συγκέντρωση του οξυγόνου να είναι μεγαλύτερη από 0 mg/l και μικρότερη από 0.5 mg/l. Επίσης η

γραμμή 8 τροφοδοτεί την δεξαμενή απονιτροποίησης με ετερότροφους μικροοργανισμούς, η γραμμή 1 την τροφοδοτεί με οργανικό άνθρακα ενώ οι γραμμές 8 και 5 την τροφοδοτούν με νιτρικό άζωτο το οποίο παράγεται κατά την βιο-οξείδωση του οργανικού αζώτου στη δεξαμενή νιτροποίησης. Έτσι στις ανοξικές συνθήκες, εφ' όσον ο βιοαντιδραστήρας έχει σχεδιαστεί σωστά, τα νιτρικά μετατρέπονται σε αέριο άζωτο. Επίσης ένα μέρος του εισερχομένου οργανικού άνθρακα μετατρέπεται σε CO₂. Επομένως το απόβλητο περνά στον αντιδραστήρα οξείδωσης (νιτροποίησης) με ελαττωμένο οργανικό φορτίο.

Το απόβλητο από τη δεξαμενή απονιτροποίησης περνά με μία παροχή ($Q + Q_R + Q_f$) στη δεξαμενή οξείδωσης (γραμμή 2). Στη δεξαμενή αυτή το απόβλητο αναμιγνύεται με κατάλληλη ποσότητα οξυγόνου ώστε επιτελούνται οι παρακάτω βιοαντιδράσεις:

1^{ον} : ο βιοαποδομήσιμος οργανικός άνθρακας μετατρέπεται, από ετερότροφα βακτήρια, μερικώς σε CO₂ και μερικώς σε βιόμαζα (βακτήρια). Ένα μέρος του BOC που δεν πρόλαβε να αποδομηθεί (εξαρτάται από τον σχεδιασμό) εξέρχεται από τον βιολογικό (S_e) μαζί με τον μη βιοαποδομούμενο άνθρακα.

2^{ον} : το οργανικό άζωτο (TKN), που βρίσκεται υπό την μορφή των αμμωνιακών, οξειδώνεται από αυτότροφους μικροοργανισμούς (νιτροβακτήρια) σε νιτρικά. Ένα μέρος του TKN που δεν πρόλαβε να αποδομηθεί (εξαρτάται από τον σχεδιασμό) εξέρχεται από τον βιολογικό (N_{e,NH4}).

Οι αυτότροφοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν το CO₂, που παράγεται σαν παραπροϊόν οξείδωσης από τους ετερότροφους μικροοργανισμούς, σαν πηγή άνθρακα για την δόμηση της κυτταρικής τους μάζας. Επομένως τα νιτροβακτήρια έχουν ισχυρή συμβιωτική εξάρτηση από τα ετερότροφα βακτήρια και οι οποίοι ελέγχουν τόσο τους πληθυσμούς των νιτροβακτηρίων όσο και την παροχή οξυγόνου σ' αυτά εφ' όσον και οι δύο κατηγορίες μικροοργανισμών χρησιμοποιούν το οξυγόνο σαν πηγή ενέργειας. Όσο γρηαμένος είναι ο πληθυσμός που απαρτίζει το οικοσύστημα του βιολογικού καθαρισμού (μεγάλο Θ_C) τόσο και περισσότερο ποσοστό του αρχικού οργανικού άνθρακα μετατρέπεται σε CO₂. Επίσης όσο μεγαλύτερο είναι το pH του αποβλήτου στη δεξαμενή οξείδωσης τόσο μεγαλύτερο χρόνο παραμένει το παραγόμενο CO₂ στην υγρή φάση και επομένως τόσο και περισσότερο ευνοείται η ανάπτυξη των νιτροβακτηρίων.

Συνοψίζοντας τις συνθήκες που ευνοούν την νιτροποίηση είναι: 1^{ον} το μεγάλο Θ_C, 2^{ον} η υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου και 3^{ον} η υψηλή αλκαλικότητα (ή υψηλό pH). Επί πλέον η ποσότητα του BOC που διατίθεται στην νιτροποίηση μπορεί οριακά να παρεμποδίσει την περαιτέρω ανάπτυξη των νιτροβακτηρίων εφ' όσον ο πληθυσμός αυτών δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 20% του πληθυσμού των ετερότροφων βακτηρίων.

Ένα μέρος της υπερχειλίσης από την δεξαμενή οξείδωσης οδηγείται πίσω στην δεξαμενή απονιτροποίησης (γραμμή 5) ώστε τα νιτρικά να μετατραπούν σε αέριο άζωτο, και το υπόλοιπο (γραμμή 4) οδηγείται σε μία δεξαμενή καθίζησης όπου αφήνεται το ανάμικτο υγρό να ηρεμίσει ώστε η βιολογική λάσπη να διαχωριστεί με βαρύτητα και να συγκεντρωθεί στο πυθμένα της δεξαμενής. Αν η επιφάνεια της δεξαμενής καθίζησης σχεδιαστεί σωστά τότε όχι μόνο όλη η βιολογική λάσπη διαχωρίζεται από το επεξεργασμένο απόβλητο (διαύγαση) αλλά η λάσπη, στον πυθμένα της δεξαμενής, παραλαμβάνεται στην επιθυμητή συγκέντρωση (παχυντήρας). Η καθίζηση της βιολογικής λάσπης ακολουθεί τις αρχές της παρεμποδισμένης καθίζησης και επομένως απαιτείται εργαστηριακή έρευνα ώστε να σχεδιαστεί σωστά ο παχυντήρας.

Από τον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης, η συμπυκνωμένη (παχυμένη) λάσπη (γραμμή 7) οδηγείται ένα μέρος της πίσω στη δεξαμενή απονιτροποίησης (γραμμή 8) και το υπόλοιπο απορρίπτεται από την μονάδα του βιολογικού καθαρισμού (γραμμή 9) σαν περίσσεια βιολογικής λάσπης. Η επιστροφή της βιολογικής λάσπης (γραμμή 8) δίνει: 1^{ον} ετερότροφους μικροοργανισμούς στη μονάδα απονιτροποίησης και 2^{ον} την δυνατότητα του βιοαντιδραστήρα οξείδωσης να λειτουργεί με προκαθορισμένη συγκέντρωση ετερότροφων (και επομένως αυτότροφων) μικροοργανισμών. Επίσης η ρύθμιση μοιρασιάς των παροχών των γραμμών 9 και 8 μεταξύ τους δίνει την δυνατότητα σταθεροποίησης του Θ_c του οικοσυστήματος του βιολογικού καθαρισμού έναντι των πιθανών μεταβολών των ρυπαντικών (S_0) και των υδραυλικών (Q) φορτίων της εισαγωγής του αποβλήτου.

Η υπερχειλίση από την δεξαμενή καθίζησης αποτελεί την τελική ροή (γραμμή 6) των επεξεργασμένων αποβλήτων.

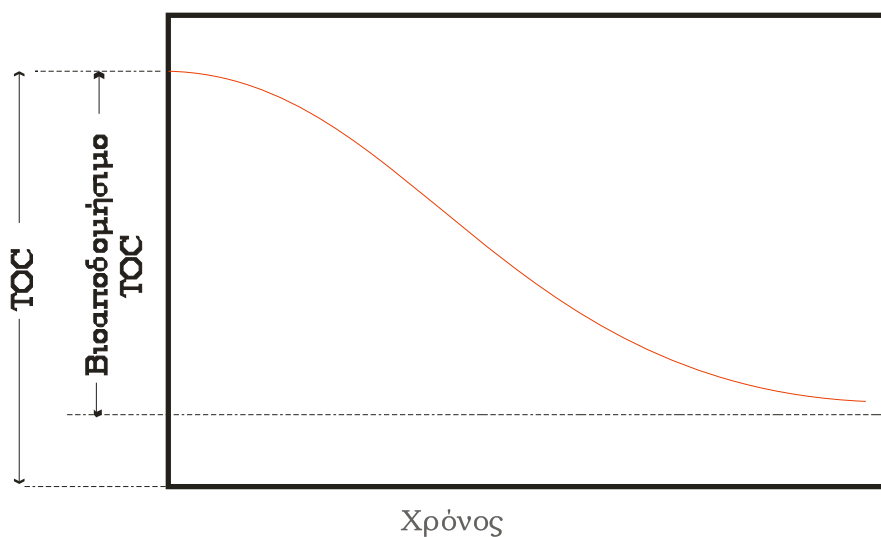
2. Θεωρητική ανάπτυξη

2.1. Εισαγωγή

2.1.1. Οξείδωση οργανικού άνθρακα

Όλος ο σχεδιασμός γίνεται με βάση τον βιοαποικοδομήσιμο οργανικό άνθρακα (BOC, Biodegradable Organic Carbon). Ισχύει γενικά $1 \text{ mg BOC} = 1 \text{ mg BOD}_5$ περίπου. Ο Συνολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC, Total Organic Carbon) σε ένα υγρό απόβλητο αναλύεται εύκολα και με ικανοποιητική ταχύτητα και ακρίβεια μέσω μιας αναλυτικής συσκευής (TOC analyzer) που βασίζεται στη ποσοτική μέτρηση του CO_2 που εκλύεται κατά την καύση του αποβλήτου σε θερμοκρασία ($550 \text{ }^\circ\text{C}$). Στη θερμοκρασία αυτή δεν διασπώνται τα ανθρακικά άλατα έτσι το παραγόμενο CO_2 αντιστοιχεί στη αποσύνθεση του οργανικού άνθρακα.

Το BOC ενός υγρού αποβλήτου υπολογίζεται με την παρακάτω διαδικασία: Τοποθετείται μία ποσότητα υγρού αποβλήτου σε ένα ποτήρι ζέσεως και προστίθεται ένα εμβόλιο από βιολογική λάσπη που έχει συλλεχθεί από έναν βιολογικό καθαρισμό που έχει ικανοποιητική απόδοση. Πριν από την έναρξη της διαδικασίας μετρούνται τα εξής χαρακτηριστικά του αποβλήτου: TOC (mg/l), TKN (mg/l) και ολικός φώσφορος P. Για να μην επέλθει παρεμπόδιση της βιοαποικοδόμησης του οργανικού φορτίου του αποβλήτου λόγω έλλειψης θρεπτικών (άζωτο, φώσφορος) προσθέτουμε τα θρεπτικά αυτά (αν απαιτείται) ώστε η αναλογία TOC/TKN/P να είναι ίση ή μεγαλύτερη από 100/2.7/0.7. Κατόπιν θέτουμε σε ισχυρή ανάδευση το περιεχόμενο του ποτηριού ώστε να επιτυγχάνεται μία ικανοποιητική οξυγόνωση του περιεχομένου ανάμικτου υγρού. Κατά τακτά χρονικά διαστήματα μετρούμε συνεχώς το TOC του περιεχομένου του ποτηριού και με τα αποτελέσματα κατασκευάζουμε το παρακάτω διάγραμμα. Υπολογίζοντας με μεθόδους προσεγγιστικής ανάλυσης την τιμή του TOC σε άπειρο χρόνο παραμονής του υγρού αποβλήτου στον πειραματικό βιοαντιδραστήρα, μπορούμε να εκτιμήσουμε το βιοαποικοδομήσιμο ποσοστό του οργανικού άνθρακα ή την αρχική συγκέντρωση του βιοαποδομήσιμου άνθρακα του αποβλήτου σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα.



Όλοι οι συντελεστές κινητικής αποδόμησης του οργανικού άνθρακα (Y , k_{max} , K_S , b και k_D) υπολογίζονται με βάση τον Βιοαποδομήσιμο Οργανικό Άνθρακα (BOC). Επίσης όλα τα ισοζύγια μαζών αναφέρονται στον BOC, έτσι π.χ. όταν αναφερόμαστε στην κυτταρική μάζα (βακτήρια) τότε αναφερόμαστε στον βιοαποδομήσιμο άνθρακα του αποβλήτου που μεταβολίστηκε σε δομικό στοιχείο των βακτηρίων. Όλος ο αποδομήσιμος άνθρακας του αποβλήτου μετατρέπεται **εν δυνάμει**, εντός του βιολογικού καθαρισμού, είτε σε CO_2 είτε σε δομικό άνθρακα των κυττάρων. Ο μη βιοαποδομήσιμος άνθρακας διέρχεται από τον βιολογικό καθαρισμό χωρίς να υποστεί, θεωρητικά, καμία μεταβολή. Επομένως ο σχεδιασμός ενός βιολογικού καθαρισμού αφορά αποκλειστικά και μόνο την ελαχιστοποίηση του βιοαποδομήσιμου οργανικού άνθρακα.

Η αποδόμηση του οργανικού άνθρακα συντελείται από ετερότροφα βακτήρια, δηλαδή από μικροοργανισμούς που χρησιμοποιούν το ίδιο θρεπτικό υπόστρωμα τόσο για την παραγωγή ενέργειας (αντίδραση αποδόμησης) όσο και για την δόμηση της κυτταρικής τους μάζας (αντίδραση σύνθεσης).

Ο βιοαποδομήσιμος οργανικός άνθρακας που δεν είναι σε διαλυτοποιημένη μορφή δεν μπορεί να αποδομηθεί από τα βακτήρια εκτός και αν μέσα στο χρόνο παραμονής των αιωρούμενων στερεών (Θ_c) διαλυτοποιηθούν από εξωκυτταρικά ένζυμα που παράγουν οι μικροοργανισμοί του βιολογικού καθαρισμού. Στο μοντέλο σχεδιασμού, που αναπτύσσεται παρακάτω, θεωρούμε ότι το εισερχόμενο απόβλητο δεν υπάρχουν αιωρούμενα οργανικά στερεά και επομένως όλα τα αιωρούμενα στερεά που υπάρχουν εντός του βιολογικού καθαρισμού αφορούν συσσωματώματα που έχουν σχηματιστεί από τους ζωντανούς και νεκρούς μικροοργανισμούς που συμμετέχουν στον βιολογικό καθαρισμό. Τα συσσωματώματα αυτά ονομάζονται βιολογική λάσπη, αποτελούν στερεά φάση και μπορούν να διαχωριστούν από την υγρή φάση του αποβλήτου με βαρύτητα. Η διασπορά της βιολογικής λάσπης μέσα στο απόβλητο ονομάζεται «ανάμικτο υγρό».

Οι συντελεστές βιοκινητικής αποδόμησης του οργανικού άνθρακα (Y , k_{max} , K_S και b) καθώς και της απονιτροποίησης k_D υπολογίζονται εργαστηριακά και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του κάθε υγρού αποβλήτου και την θερμοκρασία.

2.1.2. Οξείδωση οργανικού αζώτου (νιτροποίηση)

Η οξείδωση του οργανικού αζώτου (TKN) συντελείται από νιτροβακτήρια τα οποία είναι αυτότροφοι μικροοργανισμοί, δηλαδή χρησιμοποιούν την αντίδραση οξείδωσης του οργανικού αζώτου σε νιτρικά για παραγωγή ενέργειας αλλά χρειάζονται άλλο υπόστρωμα για τη δόμηση της κυτταρικής τους μάζας και συγκεκριμένα το CO_2 το οποίο αποτελεί παραπροϊόν της αντίδρασης ενέργειας των ετερότροφων βακτηρίων. Επομένως τα νιτροβακτήρια ισχυρά εξαρτώνται από την ανάπτυξη των ετερότροφων βακτηρίων που αποδομούν τον οργανικό άνθρακα. Η αναγκαία αυτή «υποτελής» συμβιωτική ανάπτυξη των νιτροβακτηρίων, έναντι των ετερότροφων βακτηρίων, έχει σαν αποτέλεσμα την χαμηλή ποσοστιαία ανάπτυξη τους σε σχέση με την ανάπτυξη των ετερότροφων βακτηρίων (20% κατά μέγιστο) και επομένως απαιτείται υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου για να επιτευχθεί μία ικανοποιητική προσέγγιση του στους αυτότροφους μικροοργανισμούς διαμέσου των ετερότροφων. Επομένως η συγκέντρωση του οξυγόνου επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό της νιτροποίησης. Όσο μεγαλύτερη η συγκέντρωση του οξυγόνου τόσο μεγαλύτερος και ο ρυθμός της νιτροποίησης.

Επίσης επειδή η συγκράτηση (ή όχι) του παραγόμενου CO_2 από τα ετερότροφα βακτήρια για ικανό χρόνο ώστε να αξιοποιηθεί σαν θρεπτικό

υπόστρωμα από τα αυτότροφα βακτήρια εξαρτάται από την αλκαλικότητα του αποβλήτου γι' αυτό και ο ρυθμός οξείδωσης του ΤΚΝ εξαρτάται επίσης ισχυρά από το pH του αποβλήτου στη δεξαμενή αερισμού.

Επειδή γενικά απαιτούνται χαμηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών στην έξοδο των βιολογικών καθαρισμών και επειδή η παραγωγή CO₂ από τα ετερότροφα βακτήρια είναι χαμηλότερη σε σχέση με τα πρωτόζωα, γι' αυτό και η νιτροποίηση απαιτεί αργόρυθμα συστήματα βιολογικού καθαρισμού δηλαδή απαιτεί γενικά αυξημένη ηλικία λάσπης (Θ_c).

Επομένως, αν επιθυμούμε αυξημένες αποδόσεις νιτροποίησης, πρέπει να σχεδιάσουμε συστήματα με μεγάλη ηλικία λάσπης, αυξημένη αλκαλικότητα και υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Γενικά απαιτούνται 4.6 kg οξυγόνου για κάθε kg οργανικού αζώτου που νιτροποιείται.

Οι συντελεστές βιοκινητικής της νιτροποίησης (Y_N , k_{maxN} , K_{SN} και b_N) δεν εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου αλλά μόνο από την θερμοκρασία του. Έτσι στους 20 °C οι τιμές των παραπάνω συντελεστών έχουν ως εξής: $Y_N = 0.18$, $k_{maxN} = 2.4 \text{ d}^{-1}$, $K_{SN} = 1 \text{ mg N}_{NH_4}/l$ και $b_N = 0.142 \text{ d}^{-1}$.

2.1.3. Απονιτροποίηση

Η απονιτροποίηση δηλαδή η βιομετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο συντελείται από ετερότροφους μικροοργανισμούς οι οποίοι εξαναγκάζονται να βρεθούν σε ανοξικές συνθήκες, δηλαδή σε συνθήκες όπου η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι μικρότερη από 0.5 mg/l. Στις συνθήκες αυτές οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί, για να εξασφαλίσουν την απαραίτητη ποσότητα οξυγόνου για την συντήρησή τους στη ζωή, αναγκάζονται να διασπάσουν τα νιτρικά για να αξιοποιήσουν το περιεχόμενο σ' αυτά οξυγόνο.

Όμως οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί έχουν επι πλέον την ανάγκη βιοαποικοδομήσιμου οργανικού άνθρακα για να μπορέσουν να επιβιώσουν. Στην προ-απονιτροποίηση χρησιμοποιείται ο BOC του ανεπεξέργαστου αποβλήτου. Λόγω δυσκολιών επιβίωσης των ετερότροφων βακτηρίων σε ανοξικές συνθήκες, οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν σχεδόν όλο τον οργανικό άνθρακα για παραγωγή ενέργειας και όχι για σύνθεση κυτταρικής μάζας δηλαδή στις συνθήκες αυτές οι μικροοργανισμοί δεν πολλαπλασιάζονται. Επίσης, για οποιοδήποτε οργανικό υπόστρωμα, απαιτούνται 2.4 kg BOC για κάθε kg παραγόμενου αέριου αζώτου. Όλος ο καταναλισκόμενος οργανικός άνθρακας μετατρέπεται σε CO₂.

Ο ρυθμός αναγωγής του αζώτου k_D εξαρτάται από το είδος του οργανικού άνθρακα δηλαδή από τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου και επομένως πρέπει να προσδιοριστεί με πειραματικές τεχνικές στο εργαστήριο.

Συμπερασματικά για να επιτευχθεί απονιτροποίηση του νιτρικού αζώτου πρέπει να διαθέτονται ετερότροφοι μικροοργανισμοί, ανοξικές συνθήκες καθώς και κατάλληλος οργανικός άνθρακας σε ποιότητα και ποσότητα.

2.1.4. Καθίζηση της βιολογικής λάσπης

Η καθίζηση της βιολογικής λάσπης ακολουθεί την παρεμποδισμένη καθίζηση αλλά όμως οι ταχύτητες καθίζησης των διαφόρων συγκεντρώσεων εξαρτώνται, όπως έχει αποδειχθεί, μόνο από το Θ_c του οικοσυστήματος του βιολογικού. Επομένως μπορούν να τυποποιηθούν.

2.1.5. Η ηλικία της λάσπης Θ_c

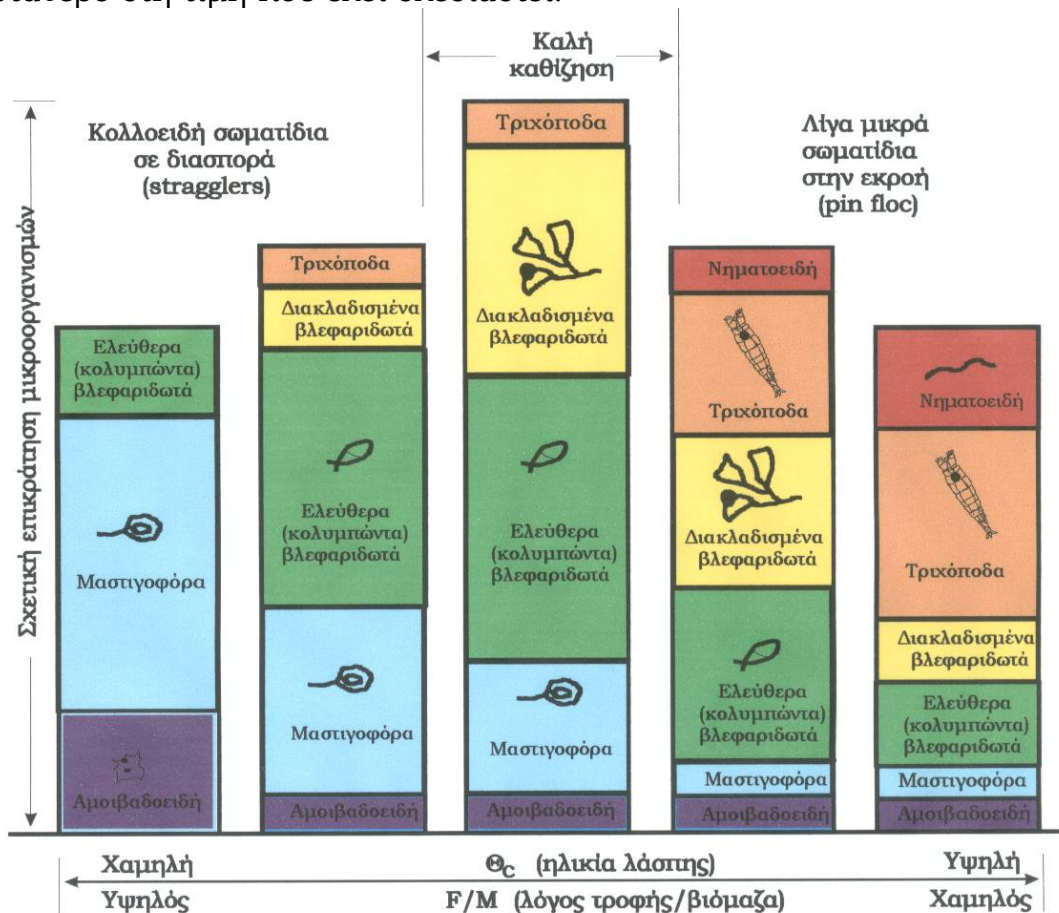
Η ηλικία της λάσπης Θ_c , ή ο μέσος χρόνος παραμονής των μικροοργανισμών στον βιολογικό καθαρισμό αποτελεί την σπουδαιότερη παράμετρο σχεδιασμού ενός βιολογικού καθαρισμού και αντιστοιχεί στο επίπεδο ανάπτυξης του οικοσυστήματος που επιτυγχάνεται. Όσο μεγαλύτερο είναι το Θ_c τόσο πιο ανεπτυγμένο είναι το οικοσύστημα δηλαδή μεγαλύτερη η διαβάθμιση των πρωτοζώων. Σημειώνεται ότι ένα οικοσύστημα βιολογικού καθαρισμού αποτελείται από δύο μεγάλες κατηγορίες μικροοργανισμών: τα βακτήρια και τα πρωτόζωα η δε αφομοίωση του οργανικού άνθρακα του αποβλήτου επιτελείται αποκλειστικά από τα βακτήρια γι' αυτό και ονομάζονται πρώτιστοι μικροοργανισμοί. Τα πρωτόζωα τα οποία τρέφονται αποκλειστικά από τα παράγωγα των βακτηρίων (νεκρά και ζωντανά βακτήρια) ελέγχουν τους πληθυσμούς των βακτηρίων και επομένως το δευτερογενές οργανικό άνθρακα που μπορεί να δημιουργηθεί από την λύση της κυτταρικής μάζας των νεκρών βακτηρίων. Όσο μεγαλύτερο είναι το Θ_c τόσο το σύστημα επιτρέπει να αναπτυχθούν ανώτερα πρωτόζωα ελαττώνοντας παράλληλα την συνολική κυτταρική μάζα (περίσσεια βιολογικής λάσπης) του συστήματος του βιολογικού καθαρισμού. Το γηρασμένο σύστημα επιτυγχάνει καλύτερες αποδόσεις αφομοίωσης του οργανικού άνθρακα και οξειδωσης του οργανικού αζώτου και παράγει λιγότερη περίσσεια βιολογικής λάσπης αλλά παράλληλα απαιτεί μεγαλύτερες εγκαταστάσεις (πάγιο κόστος) και περισσότερο οξυγόνο (λειτουργικό κόστος).

Μία άλλη έκφραση της ηλικίας της λάσπης είναι η φόρτιση των μικροοργανισμών F/M (Food per Microorganism) και η οποία αντιπροσωπεύει την ημερήσια ποσότητα BOC (kg) που αντιστοιχεί σε κάθε kg μικροοργανισμών που διατίθεται στη μονάδα οξειδωσης του βιολογικού καθαρισμού. Ανάλογα με την τιμή του F/M αναγκάζονται τα βακτήρια να λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο. Έτσι όταν $1.5 < F/M < 5$ τότε η τροφή του οργανικού άνθρακα που αντιστοιχεί στο κάθε βακτήριο είναι τόσο πολύ ώστε επιτρέπει την εκθετική ανάπτυξη των βακτηρίων. Το σύστημα αυτό ονομάζεται modified aeration και σ' αυτό το σύστημα επιτρέπεται σχεδόν αποκλειστικά η ανάπτυξη μόνο βακτηριακών πληθυσμών. Όταν $0.4 < F/M < 1.5$ τότε τα βακτήρια αναπτύσσονται με λογαριθμικό τρόπο επιτρέποντας μία μικρή ανάπτυξη και πρωτοζώων και

το σύστημα αυτό ονομάζεται high rate. Όταν $0.2 < F/M < 0.4$ τότε οι πληθυσμοί των ζωντανών βακτηρίων παραμένουν σταθεροί εφ' όσον οι θάνατοι είναι περίπου ίσοι με τις γεννήσεις επιτρέποντας μία αρκετά μεγαλύτερη ανάπτυξη των πρωτοζώων. Το σύστημα αυτό ονομάζεται conventional. Τέλος όταν $0.05 < F/M < 0.2$ τότε οι θάνατοι των βακτηρίων είναι περισσότεροι από τις γεννήσεις και επομένως οι πληθυσμοί των βακτηρίων βρίσκονται σε τάση ελάττωσης και αυτό οφείλεται στην πλήρη επικράτηση των πρωτοζώων και το σύστημα αυτό ονομάζεται extended aeration. Σημειώνεται ότι ο θάνατος των βακτηρίων προέρχεται κυρίως από το γεγονός ότι αποτελούν τροφή των πρωτοζώων. Η παράμετρος F/M έχει μία πολύ ικανοποιητική μαθηματική συσχέτιση με το Θ_C :

$$F/M = 1.041115 \Theta_C^{-0.810467} \quad [1]$$

Στη πράξη το F/M είναι πιο εύχρηστη παράμετρος ελέγχου απ' ότι είναι το Θ_C διότι αντιστοιχεί στη προβλεπόμενη δράση της εισόδου του φορτίου του αποβλήτου προτού επέλθει η πραγματική μεταβολή του Θ_C . Επομένως η οποιαδήποτε μεταβολή στα φορτία εισόδου μπορούν να εύκολα να αντιστοιχίσουν, μέσω της παραπάνω σχέσης, σε αναμενόμενη μεταβολή του Θ_C . Έτσι, εγκαίρως, μπορούν να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα μέσω των παροχών των γραμμών 8 και 9 ώστε το Θ_C να παραμένει σταθερό στη τιμή που έχει σχεδιαστεί.



Σχετική επικράτηση των διαφόρων τύπων των πρωτόζωων στους βιολογικούς καθαρισμούς

3. Μαθηματικό μοντέλο του βιολογικού καθαρισμού

3.1. Γενικό μαθηματικό μοντέλο βιοαντιδράσεων

Κάθε βιοαντίδραση αποτελείται από δύο επί μέρους αντιδράσεις: την αντίδραση ενέργειας και την αντίδραση σύνθεσης. Κατά την αντίδραση ενέργειας, ο μικροοργανισμός, αποσυνθέτει ένα μέρος του θρεπτικού υποστρώματος σε απλούστερες ενώσεις χαμηλότερου ενεργειακού περιεχομένου των αρχικών, η δε χημική ενέργεια που ελευθερώνεται, χρησιμοποιείται από τους μικροοργανισμούς για να προωθήσουν την αντίδραση σύνθεσης έτσι ώστε το υπόλοιπο υπόστρωμα να χρησιμοποιηθεί για τον πολλαπλασιασμό των μικροοργανισμών συνθέτοντας ενώσεις υψηλότερου ενεργειακού περιεχομένου των αρχικών. Οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούν το ίδιο υπόστρωμα και για τις δύο επί μέρους αντιδράσεις ονομάζονται ετερότροφοι ενώ αυτοί που χρησιμοποιούν διαφορετικό υπόστρωμα ονομάζονται αυτότροφοι.

Αν θεωρήσουμε ένα θρεπτικό υπόστρωμα μάζας S επάνω στο οποίο αναπτύσσονται βακτήρια μάζας X τότε για την αντίδραση σύνθεσης ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{dX}{dt} = Y \cdot \frac{dS}{dt} - b \cdot X \quad (2)$$

όπου: $\frac{dX}{dt}$ = ρυθμός ανάπτυξης των μικροοργανισμών, (kg/kg-d)

X = συγκέντρωση μικροοργανισμών, (kg/m³)

$\frac{dS}{dt}$ = ρυθμός αφομοίωσης του υποστρώματος, (kg/m³-d)

Y = συντελεστής ανάπτυξης των μικροοργανισμών (kg/kg)

b = ειδικός ρυθμός θανάτου μικροοργανισμών (kg/kg-d)

Ως προς την αντίδραση ενέργειας, όπου η χαμηλή συγκέντρωση του υποστρώματος (όπως συμβαίνει στην επεξεργασία των αποβλήτων) αποτελεί και παράγοντα παρεμπόδισης του ρυθμού ανάπτυξης των μικροοργανισμών, οι Lawrence – MacCarty πρότειναν ένα μοντέλο που είναι παραλλαγή του μοντέλου του Monod:

$$\frac{dS}{Xdt} = k = \frac{k_{\max} \cdot S}{K_s + S} \quad (3)$$

όπου: k_{\max} = μέγιστος ειδικός ρυθμός αφομοίωσης του υποστρώματος (kg/kg-d)

S = η συγκέντρωση του υποστρώματος (kg/m³)

K_s = σταθερά κορεσμού (kg/m³)

k = ειδικός ρυθμός αφομοίωσης του υποστρώματος (kg/kg-d)

Η σταθερά κορεσμού ορίζεται ως η συγκέντρωση του υποστρώματος κατά την οποίαν ο ειδικός ρυθμός αφομοίωσης του υποστρώματος ελαττώνεται στο μισό της μέγιστης τιμής του:

$$\text{Όταν } K_S = S \Rightarrow k = \frac{k_{\max} \cdot S}{K_S + S} = \frac{k_{\max} \cdot S}{S + S} = \frac{k_{\max}}{2}$$

Επομένως η γνώση των τεσσάρων σταθερών Y , b , k_{\max} και K_S είναι απαραίτητη για την μαθηματική έκφραση ενός οποιουδήποτε βιολογικού συστήματος που αναπτύσσεται σε ένα θρεπτικό υπόστρωμα. Οι σταθερές αυτές προσδιορίζονται στο εργαστήριο και εξαρτώνται από τα ειδικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος και την θερμοκρασία.

Γενικά ισχύει ότι το Y είναι ανεξάρτητο της θερμοκρασίας, τα b και k_{\max} διπλασιάζονται για άνοδο κάθε 10°C ενώ το K_S υποδιπλασιάζεται για άνοδο κάθε 10°C για αναερόβιες διεργασίες ενώ για αερόβιες διεργασίες διπλασιάζεται για άνοδο κάθε 10°C .

3.2. Επίλυση συστήματος ενεργούς ιλύος

3.2.1. Γενικευμένη μορφή

Το πλέον συνηθισμένο σύστημα ενεργούς ιλύος περιλαμβάνει αερόβιο βιο-αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας πλήρους ανάμιξης με επιστροφή της βιολογικής λάσπης όπως παρουσιάστηκε στο σχήμα 1.

Βάση του ορισμού του Θ_C εύκολα αποδεικνύεται ότι:

$$\Theta_C = \frac{X \cdot V}{w \cdot X_r} \quad (4)$$

Σύμφωνα με το ισοζύγιο της βιολογικής μάζας σε όλο το σύστημα ισχύει:

$$\frac{dX}{dt} \cdot V = \left(Y \cdot \frac{dS}{dt} - b \cdot X \right) \cdot V - w \cdot X_r \quad (5)$$

Για σταθερές συνθήκες λειτουργίας ($dX/dt=0$) η σχέση 5 σε συνδυασμό με τις σχέσεις 4 και 3 δίνει:

$$\frac{1}{\Theta_C} = \frac{Y \cdot k_{\max} \cdot S_e}{K_S + S_e} - b \quad (6)$$

και λύνοντας ως προς S_e έπεται:

$$S_e = \frac{K_S \cdot (1 + b \cdot \Theta_C)}{\Theta_C \cdot (Y \cdot k_{\max} - b) - 1} \quad (7)$$

Οι σχέσεις 6 και 7 αποδεικνύουν το πολύ σπουδαίο γεγονός, ότι δηλαδή το Θ_C εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου και από το επιθυμητό αποτέλεσμα επεξεργασίας.

Αν ορίσουμε την απόδοση της βιολογικής επεξεργασίας ως:

$$Ef \equiv \frac{100 \cdot (S_o - S_e)}{S_o} \quad (8)$$

Για να ισχύει $Ef=0$ πρέπει $S_o = S_e$. Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στη σχέση 35 τότε λαμβάνεται η χαμηλότερη δυνατή τιμή του Θ_C ($\lim \Theta_C$).

$$\frac{1}{\lim \Theta_C} = \frac{Y \cdot k_{\max} \cdot S_o}{K_s + S_o} - b \quad (9)$$

και επειδή γενικά ισχύει $S_o \gg K_s$ έπεται ότι:

$$\lim \Theta_C = \frac{1}{Y \cdot k_{\max} - b} \quad (10)$$

Για τιμές μικρότερες του $\lim \Theta_C$ η μονάδα βιολογικού καθαρισμού δεν μπορεί να λειτουργήσει διότι η παραγόμενη βιολογική μάζα είναι λιγότερη από αυτή που εγκαταλείπει το σύστημα μέσω της εξαγωγής λάσπης.

Αν ορίσουμε $\Theta_{C,d}$ την τιμή σχεδιασμού του Θ_C , τότε καταβάλλεται προσπάθεια κατά τον σχεδιασμό της μονάδας το $\Theta_{C,d}$ να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο από το $\lim \Theta_C$. Ο λόγος $\Theta_{C,d} / \lim \Theta_C$ δίνει το μέτρο ασφαλείας του συστήματος. Ο λόγος αυτός πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 5.

Η ευκολία ρύθμισης του γινομένου ($w X_r$) με αυξομείωση της παροχής w , δίνει την δυνατότητα ελέγχου του Θ_C ώστε αυτό να παραμένει ανεξάρτητο από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής $\Theta=V/Q$. Έτσι, γενικά, μπορεί να επιτευχθεί ταυτόχρονα ένα μεγάλο Θ_C (δηλαδή ένα χαμηλό S_e ή ένα υψηλό Ef) με ένα μικρό υδραυλικό χρόνο παραμονής Θ (δηλαδή να κατασκευάζονται οικονομικές εγκαταστάσεις)

Όμως στη πράξη το Θ_C δεν μπορεί να είναι εντελώς ανεξάρτητο του Θ , εξ' αιτίας περιορισμών που επιβάλλουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της καθιζησιμότητας της βιολογικής λάσπης. Επομένως απαιτείται μία σχέση μεταξύ των Θ_C , Θ , Q_r και X_r . Μία τέτοια σχέση μπορούμε να εξαγάγουμε εάν εφαρμόσουμε το ισοζύγιο ης βιολογικής μάζας γύρω μόνο από τον βιοαντιδραστήρα όπως παρουσιάζεται στη σχέση 11:

$$\frac{dX}{dt} \cdot V = Q_r \cdot X_r + \left(Y \cdot \frac{dS}{dt} - b \cdot X \right) \cdot V - X \cdot (Q + Q_r) \quad (11)$$

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων 2 και 11 και με δεδομένο το γεγονός ότι το σύστημα βρίσκεται σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας, προκύπτει:

$$\frac{1}{\Theta_c} = \frac{Q}{V} \left(1 + r - r \frac{X_r}{X} \right) \quad (12)$$

όπου: $r = Q_r / Q$

Ο λόγος X/X_r είναι συνάρτηση της επιφάνειας του διαχωριστήρα και των χαρακτηριστικών της βιολογικής λάσπης.

Επίσης ισχύει η σχέση:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} (S_o - S_e) \quad (13)$$

αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στη σχέση 3 προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$X \cdot V = \frac{Y \cdot Q \cdot \Theta_c (S_o - S_e)}{1 + b \cdot \Theta_c} \quad (14)$$

Η ποσότητα (XV) εκφράζει την συνολική βιολογική μάζα που υπάρχει στο σύστημα. Η ποσότητα ($w X_r = P_x$) εκφράζει την περίσσεια βιολογική μάζα η οποία παράγεται από το σύστημα και απορρίπτεται. Συνδυάζοντας τις σχέσεις 14 και 6 προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$P_x = \frac{Y \cdot Q \cdot (S_o - S_e)}{1 + b \cdot \Theta_c} \quad (15)$$

Λύνοντας τη σχέση 14 ως προς το X προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$X = \frac{Y \cdot (S_o - S_e)}{1 + b \cdot \Theta_c} \left(\frac{\Theta_c}{\Theta} \right) \quad (16)$$

3.2.2. Αφομοίωση οργανικού άνθρακα

Αφορά τους ετερότροφους μικροοργανισμούς και ισχύουν όλες οι παραπάνω σχέσεις του γενικού μοντέλου. Συνοπτικά αναφέρονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Απόδοση: } Ef \equiv \frac{100 \cdot (S_o - S_e)}{S_o} \quad [17]$$

$$\text{Συγκέντρωση εξαγωγής: } S_e = \frac{K_{SC} \cdot (1 + b_C \cdot \Theta_{CC})}{\Theta_{CC} \cdot (Y_C \cdot k_{maxC} - b_C) - 1} \quad [18]$$

$$\text{Ηλικία λάσπης: } \frac{1}{\Theta_{CC}} = \frac{Y_C \cdot k_{maxC} \cdot S_e}{K_{SC} + S_e} - b \quad [19]$$

$$\text{Οριακή ηλικία λάσπης: } \lim \Theta_{CC} = \frac{1}{Y_C \cdot k_{maxC} - b_C} \quad [20]$$

$$\text{Συγκέντρωση ετερότροφων βακτηρίων: } X_C = \frac{Y_C \cdot (S_0 - S_e)}{1 + b_C \cdot \Theta_{CC}} \left(\frac{\Theta_{CC}}{\Theta} \right) \quad [21]$$

$$\text{Συγκέντρωση πυκνωμένης λάσπης: } X_{rC} = \frac{X_C}{r} \left[1 + r - \frac{\Theta}{\Theta_{CC}} \right] \quad [22]$$

$$\text{Παραγωγή περίσσειας λάσπης: } P_{XC} = \frac{Y_C \cdot Q \cdot (S_0 - S_e)}{1 + b_C \cdot \Theta_{CC}} \quad [23]$$

3.2.3. Οξείδωση οργανικού αζώτου

Αφορά τους αυτότροφους μικροοργανισμούς (νιτροβακτήρια) οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικό υπόστρωμα (οργανικό άζωτο) για την αντίδραση ενέργειας και διαφορετικό για την σύνθεση (διοξείδιο του άνθρακα). Επομένως το γενικό μοντέλο επίλυσης διαφοροποιείται στις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Συγκέντρωση εξαγωγής: } N_{e,NH4} = \frac{K_{SN} \cdot (1 + b_N \cdot \Theta_{CN})}{\Theta_{CN} \cdot (Y_N \cdot k_{maxN} \cdot f_{pH} \cdot f_{DO} - b_N) - 1} \quad [24]$$

$$\text{Ηλικία λάσπης: } \frac{1}{\Theta_{CN}} = \frac{Y_N \cdot k_{maxN} \cdot f_{pH} \cdot f_{DO} \cdot N_{e,NH4}}{K_{SN} + N_{e,NH4}} - b \quad [25]$$

$$\text{Οριακή ηλικία λάσπης: } \lim \Theta_{CN} = \frac{1}{Y_N \cdot k_{maxN} \cdot f_{pH} \cdot f_{DO} - b_N} \quad [26]$$

$$\text{Συγκέντρωση ετερότροφων βακτηρίων: } X_N = \frac{Y_N \cdot (N_0 - N_{e,NH4})}{1 + b_N \cdot \Theta_{CN}} \left(\frac{\Theta_{CN}}{\Theta} \right) \quad [27]$$

$$\text{Συγκέντρωση πυκνωμένης λάσπης: } X_{rN} = \frac{X_N}{r} \left[1 + r - \frac{\Theta}{\Theta_{CN}} \right] \quad [28]$$

$$\text{Παραγωγή περίσσειας λάσπης: } P_{XN} = \frac{Y_N \cdot Q \cdot (N_0 - N_{e,NH4})}{1 + b_N \cdot \Theta_{CN}} \quad [29]$$

$$\text{όπου } f_{pH} = -2.2 + 0.395 \cdot pH \quad \text{και} \quad f_{DO} = DO / (K_{DO} + DO) \quad [30]$$

Επίσης η αναλογία των αυτότροφων ως προς τους ετερότροφους μικροοργανισμούς δίδεται από την σχέση:

$$\frac{X_N}{X_C} = \frac{1}{1 + \frac{S_o - S_e}{N_o - N_{e,NH4}} \cdot \frac{Y_C}{Y_N}} \quad [31]$$

Ο λόγος αυτός δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 0.2

3.2.4. Αναγωγή νιτρικών (απονιτροποίηση)

Αφορά ετερότροφους μικροοργανισμούς. Στις ανοξικές συνθήκες οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί αναστέλλουν σχεδόν εντελώς τις αντιδράσεις σύνθεσης και ισχύουν οι σχέσεις:

$$[N_2] = k_D \cdot [X_D] \quad [32]$$

$$\frac{dS}{dt} = 2.4 \cdot \frac{dN}{dt} \quad [33]$$

Η σχέση 27 εκφράζει ότι για κάθε kg νιτρικού αζώτου που μετατρέπεται σε αέριο άζωτο απαιτούνται 2.4 kg οργανικού άνθρακα τα οποία όλα σχεδόν μετατρέπονται σε CO₂.

3.2.5. Καθίζηση της βιολογικής λάσπης

Πάντοτε σχεδόν οι ανάγκες πάχυνσης της βιολογικής λάσπης, και όχι οι ανάγκες διαυγασίας, καθορίζουν τον σχεδιασμό της επιφάνειας της δεξαμενής καθίζησης. Η ταχύτητα καθίζησης μιας συγκέντρωσης εξαρτάται από το Θ_c και εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$u_i = 2.54 \cdot \exp[(-0.45 + 0.003266 \cdot \Theta_{cd}) \cdot X_i] \quad [34]$$

4. Σχεδιασμός βιολογικού καθαρισμού

4.1. Δεδομένα

- Δίδονται:
1. Χαρακτηριστικά του αποβλήτου:
Q, S_o και N_o
 2. Σταθερές κινητικής:
Y_C, k_{maxC}, K_{SC}, b_C
Y_N, k_{maxN}, K_{SN}, b_N
k_D
 3. Συνθήκες λειτουργίας
DO, pH

4.2. Απαιτήσεις

Χαρακτηριστικά επεξεργασμένου αποβλήτου:
S_e, N_{e,NH4}, N_{e,NO3}

4.3. Σχεδιασμός

Υπολογισμός των παρακάτω παραμέτρων:
 $\Theta_C, X, V, \Theta, V_D, Q_r, Q_R, W, X_r, A$

4.4. Πορεία Σχεδιασμού

Βήμα 1^{ον}: Υπολογισμός του Θ_{Cd}

1. Με βάση τον οργανικό άνθρακα
 Από τη σχέση [19] υπολογίζεται το Θ_{CC}
 Από τη σχέση [20] υπολογίζεται το $\lim \Theta_{CC}$
2. Με βάση το οργανικό άζωτο
 Από τη σχέση [30] υπολογίζονται τα f_{pH} και f_{DO}
 Από τη σχέση [25] υπολογίζεται το Θ_{CN}
3. Λαμβάνεται σαν Θ_{Cd} το μεγαλύτερο μεταξύ των τιμών Θ_{CC} , $5 \lim \Theta_{CC}$ και Θ_{CN}
4. Επαναπροσδιορίζονται τα S_e και $N_{e,NH4}$ χρησιμοποιώντας τις σχέσεις [18] και [24]

Βήμα 2^{ον}: Υπολογισμός των X_C και r

Από το Θ_{Cd} και τους περιορισμούς του παρακάτω εμπειρικού πίνακα λαμβάνουμε μία αυθαίρετη τιμή για το X_C καθώς και το r .

Τύπος διεργασίας	Θ_{cd} , days	X_C , mg/l	r
Modified aeration	0,2 – 0,5	200 – 500	0,05 – 0,15
High rate aeration	0,5 – 5	4000 – 10000	1,0 – 5,0
Conventional	5 - 15	1500 – 3000	0,25 – 0,5
Extended aeration	15 - 30	3000 - 6000	0,75 – 1,5

Επομένως η παροχή Q_r υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_r = r \cdot Q \quad [35]$$

Βήμα 3^{ον}: Υπολογισμός του X_N

Από τη σχέση [31] υπολογίζεται η συγκέντρωση X_N

Βήμα 4^{ον}: Υπολογισμός της παραγωγής της συνολικής περίσσειας βιολογικής λάσπης P_X .

Από τις σχέσεις [23] και [29] υπολογίζονται τα P_{XC} και P_{XN} και από το άθροισμά τους η συνολική παραγωγή περίσσειας κυτταρικής μάζας:

$$P_X = P_{XC} + P_{XN} \quad [36]$$

Βήμα 5^{ον}: Υπολογισμός του αζώτου που δεσμεύεται στη περίσσεια της κυτταρικής μάζας:

Επειδή ο μοριακός τύπος των βακτηρίων είναι $C_5H_7O_2NP_{0.2}$ η ποσότητα του αζώτου που δεσμεύεται στη κυτταρική μάζα δίδεται από την σχέση:

$$P_N = 14 P_X / 60 \quad [37]$$

Βήμα 6^{ον}: Υπολογισμός του αερίου αζώτου που παράγεται στην απονιτροποίηση.

Από το παρακάτω ισοζύγιο του συνολικού αζώτου υπολογίζεται η παραγωγή του αερίου αζώτου:

$$[N_o] = [N_2] + [N_e] + P_N \quad [38]$$

Βήμα 7^{ον}: Υπολογισμός του οργανικού άνθρακα που αφομοιώνεται στην απονιτροποίηση.

Ο οργανικός άνθρακας που αφομοιώνεται στην απονιτροποίηση, σύμφωνα με τη σχέση [33] δίδεται από τη σχέση:

$$[S_D] = 2.4\{N_2\} \quad [39]$$

Βήμα 8^{ον}: Υπολογισμός του οργανικού άνθρακα που αφομοιώνεται στην νιτροποίηση $[S_N]$.

Από το παρακάτω ισοζύγιο του συνολικού οργανικού άνθρακα υπολογίζεται ο οργανικός άνθρακας που αφομοιώνεται στη δεξαμενή οξείδωσης:

$$[S_o] = [S_D] + [S_N] + [S_e] + P_{XC} \quad [40]$$

Βήμα 9^{ον}: Υπολογισμός του όγκου της δεξαμενής οξείδωσης

1^{ον}: Υπολογισμός του κινητικού όγκου V_C οξείδωσης του οργανικού άνθρακα:

Από την σχέση [21] προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$V_C = \frac{[S_N]}{X_C \cdot k_C} \quad [41]$$

$$\text{όπου : } k_C = \frac{k_{\max C} \cdot S_e}{K_s + S_e} \quad [42]$$

2^{ον}: Υπολογισμός του κινητικού όγκου V_C οξείδωσης του οργανικού αζώτου:

Από την σχέση [27] προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$V_N = \frac{[N_2] + [N_{e,NO_3}]}{X_N \cdot k_N} \quad [43]$$

$$\text{όπου : } k_N = \frac{k_{\max N} \cdot N_{e,NH_4}}{K_{SN} + N_{e,NH_4}} \cdot f_{pH} \cdot f_{DO} \quad [44]$$

3^{ον}: Υπολογίζεται ο τελικός όγκος της δεξαμενής οξείδωσης V από την σχέση:

$$V = \max \{ V_C, V_N \} \quad [45]$$

Βήμα 10^{ον}: Υπολογισμός του υδραυλικού χρόνου παραμονής Θ

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής Θ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\Theta = V/Q \quad [46]$$

Βήμα 11^{ον}: Υπολογισμός της συγκέντρωσης πάχυνσης της λάσπης

Η συγκέντρωση X_r υπολογίζεται από την σχέση :

$$X_r = \frac{X}{r} \left[1 + r - \frac{\Theta}{\Theta_{Cd}} \right] \quad [47]$$

όπου: $X = X_C + X_N$ και $X_r = X_{rC} + X_{rN}$

Βήμα 12^{ον}: Υπολογισμός της παροχής W της περίσσειας λάσπης

Η παροχή W υπολογίζεται από την σχέση :

$$W = \frac{X \cdot V}{\Theta_C \cdot X_r} \quad [48]$$

Βήμα 13^{ον}: Υπολογισμός του λόγου αναρροής R και της παροχής αναρροής Q_R

Ο λόγος αναρροής R υπολογίζεται από την σχέση :

$$R = [N_2]/[N_{e,NO_3}] + 1 \quad [49]$$

Επομένως η παροχή αναρροής υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_R = R \cdot Q - Q_r \quad [50]$$

Βήμα 14^{ον}: Υπολογισμός της συγκέντρωσης των ετερότροφων μικροοργανισμών X_D στη δεξαμενή απονιτροποίησης

Η συγκέντρωση X_D υπολογίζεται από το ισοζύγιο των ετερότροφων μικροοργανισμών γύρω από την δεξαμενή απονιτροποίησης:

$$X_D = \frac{X_C \cdot Q_R + X_{rC} \cdot Q_r}{Q + Q_R + Q_r} \quad [51]$$

όπου το X_{rC} υπολογίζεται από την σχέση [22]

Βήμα 15^{ον}: Υπολογισμός του όγκου V_D της δεξαμενής απονιτροποίησης

Ο αναγκαίος όγκος απονιτροποίησης δίδεται από την σχέση:

$$V_D = \frac{[N_2]}{X_D \cdot k_D} \quad [52]$$

Βήμα 16^{ον}: Υπολογισμός της επιφάνειας A της δεξαμενής καθίζησης (πάχυνσης) της βιολογικής λάσπης

Ο ελάχιστη επιφάνεια της δεξαμενής καθίζησης δίδεται από την σχέση:

$$A = \frac{(Q + Q_r)X}{G_L} \quad [53]$$

όπου:

$$G_L = X_L^2 \cdot (0.45 - 0.003266 \cdot \Theta_{cd}) \cdot 2.54 \cdot \exp[(-0.45 + 0.003266 \cdot \Theta_{cd}) \cdot X_L] \quad [54]$$

$$\text{και } X_L = \frac{X_r}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{X_r^2 + 4 \cdot \frac{X_r}{(0.45 - 0.003266 \cdot \Theta_{cd})}} \quad [55]$$

Βήμα 17^{ον}: Οικονομική συνάρτηση

Η επίλυση του βιολογικού καθαρισμού έχει δύο βαθμούς ελευθερίας εφ' όσον δύο παράμετροι σχεδιασμού λαμβάνονται αυθαίρετα (X_C και r). Επομένως, θεωρητικά, υπάρχουν άπειρες λύσεις. Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας θα μπορούσε να οριστικοποιήσει την τελική λύση. Μία ικανοποιητική οικονομική συνάρτηση είναι η παρακάτω:

$$C = 48 \cdot (V + V_D) + 254 \cdot A \quad [56]$$

Όπου C = σχετικό κόστος

5. Παράδειγμα εφαρμογής

Πρόβλημα:

Σχεδιάστε έναν βιολογικό καθαρισμό επιλέγοντας κατάλληλο Θ_c ώστε να μην απαιτηθεί επί πλέον πρόσθεση φωσφόρου

Δίδονται:

Χαρακτηριστικά υγρού αποβλήτου	
Παροχή αποβλήτου	$Q = 100 \text{ m}^3/\text{d}$
Συγκέντρωση BOC	$S_o = 1500 \text{ mg/l}$
Συγκέντρωση TKN	$N_o = 85 \text{ mg/l}$
Συγκέντρωση Φωσφόρου	$P_o = 10 \text{ mg/l}$
Σταθερές κινητικής οξείδωσης BOC	
Συντελεστής παραγωγής κυτταρικής μάζας	$Y_c = 0,6$
Ρυθμός οξείδωσης	$k_{maxc} = 3,5 \text{ d}^{-1}$
Σταθερά κορεσμού	$K_{sc} = 120 \text{ mg/l}$
Συντελεστής θανάτου	$b_c = 0,3 \text{ d}^{-1}$
Σταθερές κινητικής οξείδωσης TKN	
Συντελεστής παραγωγής κυτταρικής μάζας	$Y_N = 0,18$
Ρυθμός νιτροποίησης	$k_{maxN} = 2,4 \text{ d}^{-1}$
Σταθερά κορεσμού	$K_{sN} = 1 \text{ mg/l}$
Συντελεστής θανάτου	$b_N = 0,142 \text{ d}^{-1}$
Σταθερά κορεσμού οξυγόνου	$K_{DO} = 1 \text{ mg/l}$
Σταθερές κινητικής Απονιτροποίησης	
ρυθμός απονιτροποίησης	$K_D = 0,072 \text{ d}^{-1}$
Συνθήκες λειτουργίας βιολογικού καθαρισμού	
Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου	$DO = 2 \text{ mg/l}$
pH στη δεξαμενή αερισμού	$pH = 7,5$
Απαιτήσεις επεξεργασίας	
Συγκέντρωση BOC	$S_e = 40 \text{ mg/l}$
Συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου	$N_{eNH_4} = 7 \text{ mg/l}$
Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου	$N_{eNO_3} = 5 \text{ mg/l}$

Επίσης δίδεται ότι ο μοριακός τύπος των βακτηρίων (αυτότροφων και ετερότροφων) είναι $C_5H_7O_2NP_{0.2}$

Λύση

Βήμα 1^ο: Υπολογισμός του Θ_{Cd}

3. Με βάση τον οργανικό άνθρακα
Από τη σχέση [19] υπολογίζεται το $\Theta_{CC}=4.5 \text{ days}$
Από τη σχέση [20] υπολογίζεται το $\lim \Theta_{CC} = 0.56 \text{ days}$
4. Με βάση το οργανικό άζωτο
Από τη σχέση [30] υπολογίζονται τα $f_{pH} = 0.76$ και $f_{DO}=0.67$
Από τη σχέση [25] υπολογίζεται το $\Theta_{CN} = 19.94 \text{ days}$
3. Λαμβάνεται σαν $\Theta_{Cd} = 19.94 = 20 \text{ days}$ το μεγαλύτερο μεταξύ των τιμών Θ_{CC} , $5 \lim \Theta_{CC}$ και Θ_{CN}
4. Επαναπροσδιορίζονται τα $S_e = 24 \text{ mg/l}$ και $N_{e,NH4} = 7 \text{ mg/l}$ χρησιμοποιώντας τις σχέσεις [18] και [24]

Βήμα 2^ο: Υπολογισμός των X_C και r

Από το Θ_{Cd} αντιλαμβανόμαστε ότι ο τύπος της διεργασίας πρέπει να είναι ένα σύστημα παρατεταμένου αερισμού (extended aeration) και λαμβάνουμε μία αυθαίρετη τιμή για το $X_C = 3500 \text{ mg/l}$ καθώς και το $r = 1$.

Επομένως η παροχή που υπολογίζεται από την σχέση (35) είναι:
 $Q_r = 95 \text{ m}^3/\text{d}$

Βήμα 3^ο: Υπολογισμός του X_N

Από τη σχέση [31] υπολογίζεται η συγκέντρωση $X_N = 54.65 \text{ mg/l}$

Βήμα 4^ο: Υπολογισμός της παραγωγής της συνολικής περίσσειας βιολογικής λάσπης P_X .

Από τις σχέσεις [23] και [29] υπολογίζονται τα $P_{Xc} = 12.65 \text{ kg/d}$ και $P_{XN} = 0.36 \text{ kg/d}$ και από το άθροισμά τους η συνολική παραγωγή περίσσειας κυτταρικής μάζας: $P_X = 13.017 \text{ kg/d}$

Βήμα 5^ο: Υπολογισμός του αζώτου που δεσμεύεται στη περίσσεια της κυτταρικής μάζας:

Από την σχέση (37) υπολογίζεται: $P_N = 3.037 \text{ kg/d}$

Βήμα 6^ο: Υπολογισμός του αερίου αζώτου που παράγεται στην απονιτροποίηση.

Από το ισοζύγιο του συνολικού αζώτου και σύμφωνα με τη σχέση (38) υπολογίζεται η παραγωγή του αερίου αζώτου στη μονάδα απονιτροποίησης:

$$[N_2] = [N_o] - [N_e] - P_N = 8.5 - 1.1957 - 3.037 = 4.267 \text{ kg/d}$$

Βήμα 7^{ον}: Υπολογισμός του οργανικού άνθρακα που αφομοιώνεται στην απονιτροποίηση.

Ο οργανικός άνθρακας που αφομοιώνεται στην απονιτροποίηση, σύμφωνα με τη σχέση [39] υπολογίζεται: $[S_D] = 10.241 \text{ kg/d}$

Βήμα 8^{ον}: Υπολογισμός του οργανικού άνθρακα που αφομοιώνεται στην νιτροποίηση $[S_N]$.

Από το ισοζύγιο του συνολικού οργανικού άνθρακα (40) υπολογίζεται ο οργανικός άνθρακας που αφομοιώνεται στη δεξαμενή οξείδωσης:

$$[S_N] = [S_o] - [S_D] - [S_e] - P_{XC} = 150 - 10.241 - 2.4 - 10.241 = 124.7 \text{ kg/d}$$

Βήμα 9^{ον}: Υπολογισμός του όγκου της δεξαμενής βιο-οξείδωσης

1^{ον}: Υπολογισμός του κινητικού όγκου V_C οξείδωσης του οργανικού άνθρακα:

Από τις σχέσεις [41] και (42) προκύπτουν:

$$k_c = 0.58 \text{ d}^{-1} \text{ και } V_C = 61.08 \text{ m}^3$$

2^{ον}: Υπολογισμός του κινητικού όγκου V_N οξείδωσης του οργανικού αζώτου:

Από τις σχέσεις [43] και (44) προκύπτουν:

$$K_N = 1.067 \text{ d}^{-1} \text{ και } V_N = 85.13 \text{ m}^3$$

3^{ον}: Από τη σχέση (45) Υπολογίζεται ο τελικός όγκος της δεξαμενής οξείδωσης $V = 86 \text{ m}^3$

Βήμα 10^{ον}: Υπολογισμός του υδραυλικού χρόνου παραμονής Θ

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής Θ υπολογίζεται από την σχέση (46):

$$\Theta = 0.86 \text{ days}$$

Βήμα 11^{ον}: Υπολογισμός της συγκέντρωσης πάχυνσης της λάσπης

Η συγκέντρωση X_r υπολογίζεται από την σχέση (47) :

$$X = X_C + X_N = 3554.7 \text{ mg/l} \text{ και } X_r = X_{rC} + X_{rN} = 3911.5 \text{ mg/l}$$

Βήμα 12^{ον}: Υπολογισμός της παροχής W της περίσσειας λάσπης

Η παροχή W υπολογίζεται από την σχέση (48): $W = 3.9 \text{ m}^3/\text{d}$

Βήμα 13^{ον}: Υπολογισμός του λόγου αναρροής R και της παροχής αναρροής Q_R

Ο λόγος αναρροής R και η παροχή αναρροής υπολογίζονται από τις σχέσεις (49) και (50): $R = 9.53$ και $Q_R = 858.4 \text{ m}^3/\text{d}$

Βήμα 14^{ον}: Υπολογισμός της συγκέντρωσης των ετερότροφων μικροοργανισμών X_D στη δεξαμενή απονιτροποίησης

Οι συγκεντρώσεις X_{rc} και X_D υπολογίζονται από τις σχέσεις (22) και (51) αντίστοιχα: $X_{rc} = 3851 \text{ mg/l}$ και $X_D = 3200 \text{ mg/l}$

Βήμα 15^{ον}: Υπολογισμός του όγκου V_D της δεξαμενής απονιτροποίησης

Ο αναγκαίος όγκος απονιτροποίησης δίδεται από την σχέση (52):

$$V_D = 18.5 \text{ m}^3.$$

Βήμα 16^{ον}: Υπολογισμός της επιφάνειας A της δεξαμενής καθίζησης (πάχυνσης) της βιολογικής λάσπης

Ο ελάχιστη επιφάνεια της δεξαμενής καθίζησης υπολογίζεται από τη σχέση (53): $A = 28.9 \text{ m}^2$

όπου: $G_L = 3.32 \text{ kg/m}^2/\text{d}$ (σχέση (54)) και

$$X_L = 3.9 \text{ g/L} \text{ (σχέση (55))}$$

Στο σχεδιασμό αυτόν η αναγκαία ποσότητα Φωσφόρου ανέρχεται σε 1.38 kg/d ενώ η διατιθέμενη από την εισαγωγή του αποβλήτου είναι μόνο 1 kg/d. Επομένως πρέπει να προστίθεται στη μονάδα επί πλέον 0.38 kg P/d με οποιαδήποτε μορφή.

Επεξήγηση συμβόλων:

A =	Επιφάνεια δεξαμενής καθίζησης βιολογικής λάσπης	m ²
b =	Ρυθμός θανάτου βακτηρίων αποδόμησης BOC (βιοαποικοδομήσιμου οργανικού άνθρακα)	kg/kg-d
b_N =	Ρυθμός θανάτου νιτροβακτηρίων οξειδωσης TKN	kg/kg-d
BOC =	Βιοαποικοδομήσιμος Οργανικός Ανθρακας	
[CO₂]	Μαζική μεταφορά οργανικού άνθρακα στην αέρια φάση υπο μορφή CO ₂ στη δεξαμενή οξειδωσης	kg/d
[CO₂]_D	Μαζική μεταφορά οργανικού άνθρακα στην αέρια φάση υπο μορφή CO ₂ στη δεξαμενή απονιτροποίησης	kg/d
DO =	Συγκέντρωση οξυγόνου στην δεξαμενή βιολογικής οξειδωσης	mg/l
f_{pH} =	Συντελεστής διόρθωσης του ρυθμού $k_{\max N}$ ως προς το pH $f_{pH} = -2.2 + 0.395 \cdot pH$	-
f_{DO} =	Συντελεστής διόρθωσης του ρυθμού $k_{\max N}$ ως προς το DO $f_{DO} = DO / (K_{DO} + DO)$	-
k_D =	Ρυθμός αναγωγής των νιτρικών σε αέριο άζωτο στη δεξαμενή απονιτροποίησης	kg/kg-d
K_{DO} =	Συντελεστής κορεσμού οξυγόνου στη δεξαμενή οξειδωσης	mg/l
k_{maxC} =	Μέγιστος ρυθμός αφομοίωσης του οργανικού άνθρακα (OC) από τα ετερότροφα βακτήρια	kg/kg-d
k_{maxN} =	Μέγιστος ρυθμός οξειδωσης του οργανικού αζώτου από τα αυτότροφα βακτήρια (νιτροβακτήρια)	kg/kg-d
K_{SC} =	Συντελεστής κορεσμού στον ρυθμό αφομοίωσης του OC	mg/l
K_{SN} =	Συντελεστής κορεσμού στον ρυθμό αφομοίωσης του TKN	mg/l
N_{e,NH4} =	Συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού	mg/l
[N_{e,NH4}] =	Μαζική παροχή αμμωνιακού αζώτου στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού: $[N_{e,NH4}] = Q \cdot N_{e,NH4}$	kg/d
N_{e,NO3} =	Συγκέντρωση ανόργανου αζώτου (νιτρικά) στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού	mg/l
[N_{e,NO3}] =	Μαζική παροχή νιτρικού αζώτου στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού: $[N_{e,NO3}] = Q \cdot N_{e,NO3}$	kg/d
N_e =	Συγκέντρωση ολικού αζώτου στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού: $N_e = N_{e,NH4} + N_{e,NO3}$	mg/l
[N_e] =	Μαζική παροχή ολικού αζώτου στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού: $[N_e] = Q \cdot (N_{e,NH4} + N_{e,NO3})$	kg/d
N_P =	Άζωτο που ενσωματώνεται στη περίσσεια του συνόλου των βακτηρίων (ετερότροφων και αυτότροφων): $N_P = 14 \cdot (P_X + P_{XN}) / 60$	kg/d
N_o =	Συγκέντρωση Ολικού Οργανικού Αζώτου (TKN) στην είσοδο του βιολογικού καθαρισμού	mg/l
[N_o] =	Μαζική παροχή TKN στην είσοδο του βιολογικού καθαρισμού: $[N_o] = Q \cdot N_o$	kg/d
[N₂] =	Μαζική παροχή αερίου αζώτου στην ατμόσφαιρα από την δεξαμενή απονιτροποίησης	kg/d

Q =	Παροχή αποβλήτου στην είσοδο του βιολογικού καθαρισμού	m ³ /d
Q_e =	Παροχή αποβλήτου στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού: Q _e = Q - W	m ³ /d
Q_R =	Παροχή αναρροής του οξειδωμένου ανάμικτου αποβλήτου από την δεξαμενή αερισμού στην δεξαμενή απονιτροποίησης: Q _R = R · Q - Q _r	m ³ /d
Q_r =	Παροχή ανακυκλοφορίας του ανάμικτου αποβλήτου από τον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης της βιολογικής λάσπης στη δεξαμενή απονιτροποίησης	m ³ /d
pH =	Το pH του ανάμικτου υγρού στη δεξαμενή αερισμού (νιτροποίησης)	
P_C =	Περίσσεια ημερήσιας παραγωγής οργανικού άνθρακα που περιέχεται στη βιόμαζα των ετερότροφων βακτηρίων: P _X = W · X _r	kg/d
P_N =	Περίσσεια ημερήσιας παραγωγής οργανικού άνθρακα που περιέχεται στη βιόμαζα των αυτότροφων βακτηρίων	kg/d
R =	Λόγος συνολικής αναρροής του αποβλήτου από τη δεξαμενή αερισμού στη δεξαμενή απονιτροποίησης R = [N ₂]/[N _{e,NO3}]+1	
r =	Λόγος ανακυκλοφορίας βιολογικής λάσπης: r = Q _r /Q	
S_o =	Συγκέντρωση Βιοαποικοδομήσιμου Οργανικού Άνθρακα (BOC) του αποβλήτου στην είσοδο του βιολογικού καθαρισμού	mg/l
[S_o] =	Μαζική παροχή του BOC στην είσοδο του βιολογικού καθαρισμού: [S _o] = Q S _o	kg/d
S_e =	Συγκέντρωση Βιοαποικοδομήσιμου Οργανικού Άνθρακα (BOC) του αποβλήτου στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού	mg/l
[S_e] =	Μαζική παροχή του BOC στην έξοδο του βιολογικού καθαρισμού: [S _e] = Q · S _e	kg/d
S_r =	Ανοιγμένη συγκέντρωση BOC που έχει αφομοιωθεί στον βιολογικό καθαρισμό	mg/l
[S_r] =	Ποσότητα BOC που έχει αφομοιωθεί στον βιολογικό καθαρισμό: [S _r] = Q S _r	kg/d
TKN =	Ολικό Οργανικό Άζωτο (Total Kjeldahl Nitrogen). Ισούται με το συνολικό άζωτο μείον το άζωτο που περιέχεται στα νιτρικά και νιτρώδη ιόντα του αποβλήτου.	
TOC =	Ολικός Οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon)	
W =	Παροχή εξαγωγής βιολογικής λάσπης από τον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης της βιολογικής λάσπης.	m ³ /d
V_d =	Όγκος σχεδιασμού της δεξαμενής αερισμού (νιτροποίησης)	m ³
V_s =	Ελάχιστος όγκος της δεξαμενής αερισμού (νιτροποίησης) με βάση τα ετερότροφα βακτήρια	m ³
V_N =	Ελάχιστος όγκος της δεξαμενής αερισμού (νιτροποίησης) με βάση τα αυτότροφα βακτήρια (νιτροβακτήρια)	m ³
V_D =	Ελάχιστος όγκος της δεξαμενής απονιτροποίησης με βάση τα ετερότροφα βακτήρια	m ³

X_C	= Συγκέντρωση οργανικού άνθρακα που περιέχεται στα ετερότροφα βακτήρια στη δεξαμενή αερισμού	mg/l
X_N	= Συγκέντρωση οργανικού άνθρακα που περιέχεται στα αυτότροφα βακτήρια (νιτροβακτήρια) στη δεξαμενή αερισμού	mg/l
X_r	= Συγκέντρωση οργανικού άνθρακα που περιέχεται στα ετερότροφα βακτήρια στον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης της βιολογικής λάσπης	mg/l
X_D	= Συγκέντρωση οργανικού άνθρακα που περιέχεται στα ετερότροφα βακτήρια στη δεξαμενή απονιτροποίησης	mg/l
$[X_C]$	= Συνολική Ποσότητα Οργανικού Άνθρακα που περιέχεται στα ετερότροφα βακτήρια στη δεξαμενή αερισμού (νιτροποίησης): $[X_C] = V \cdot X_C$	kg
$[X_N]$	= Συνολική Ποσότητα Οργανικού Άνθρακα που περιέχεται στα αυτότροφα βακτήρια στη δεξαμενή αερισμού (νιτροποίησης): $[X_N] = V \cdot X_N$	kg
$[X_D]$	= Συνολική Ποσότητα Οργανικού Άνθρακα που περιέχεται στα ετερότροφα βακτήρια στη αναγωγική (ανοξική) δεξαμενή (απονιτροποίησης): $[X_D] = V_D \cdot X_D$	kg
Y_C	= Συντελεστής παραγωγής ετερότροφων βακτηρίων	kg/kg
Y_N	= Συντελεστής παραγωγής αυτότροφων βακτηρίων	kg/kg
Θ	= Υδραυλικός χρόνος παραμονής των αποβλήτων στην δεξαμενή αερισμού	d
Θ_{CC}	= Χρόνος παραμονής των ετερότροφων βακτηρίων στον βιολογικό καθαρισμό	d
Θ_{CN}	= Χρόνος παραμονής των αυτότροφων βακτηρίων στον βιολογικό καθαρισμό	d
Θ_{Cd}	= Χρόνος παραμονής σχεδιασμού των βακτηρίων στον βιολογικό καθαρισμό	d
$\lim(\Theta_C)$	= Οριακός χρόνος παραμονής των ετερότροφων βακτηρίων στον βιολογικό καθαρισμό	d