



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Διερεύνηση της εφαρμογής ONLINE  
αισθητήρων για την παρακολούθηση , τον  
έλεγχο και τη βελτιστοποίηση συστημάτων  
επεξεργασίας υγρών αποβλήτων**

Γουργουλέτης Γιώργος

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Συμεών Μαλαμής

Αθήνα, Ιούνιος 2021



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**Διερεύνηση της εφαρμογής ONLINE αισθητήρων για την παρακολούθηση ,  
τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση συστημάτων επεξεργασίας υγρών  
αποβλήτων**

Γουργουλέτης Γιώργος

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Συμεών Μαλαμής

## Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας σημαίνει και το πέρας των Μεταπτυχιακής εκπαίδευσης μου στο πρόγραμμα «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων». Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ.Συμεών Μαλαμή για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το ενδιαφέρον και την καθοδήγηση κατά την διάρκεια της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Αναπληρωτή καθηγητή κ.Νουτσόπουλο Κωνσταντίνο και Καθηγητή κ.Μαμάη Δανιήλ για την πολύτιμη συνεργασία και εκπαίδευση μου σε όλα τα χρόνια των μεταπτυχιακών σπουδών .

Βαθύτατες ευχαριστίες στον Διδάκτορα Βαγγέλη Στατήρη για την άριστη συνεργασία και πολύτιμες συμβουλές για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς επίσης στον κο Νίκο Κουρή και κα Μαριάννα Γιολλάση για την πολύτιμη βοήθεια τους και άψογη συνεργασία κατά την διάρκεια των σπουδών μου .

Θερμές ευχαριστίες στους συναδέλφους συμφοιτητές της Β' ειδίκευσης για την στήριξη, συνεργασία και την υπέροχη φιλία τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συνεχή υποστήριξη και πολύτιμη βοήθεια τους σε όλα τα χρόνια των Μεταπτυχιακών μου σπουδών και την μέλλουσα σύζυγο μου Έφη για την καθημερινή υποστήριξη και την εμπιστοσύνη της .

### Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία διερευνώνται οι εφαρμογές Online αισθητήρων και συγκεκριμένα φυσικοχημικών αισθητήρων σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων . Οι αισθητήρες παρακολούθησης φυσικοχημικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο στη λειτουργία και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είτε συμβατικών μεθόδων ενεργού ιλύος είτε νέων τεχνολογιών όπως συστημάτων Anammox.

Με την εγκατάσταση Online αισθητήρων ενισχύεται η συλλογή δεδομένων με αποτέλεσμα να υπάρχει καλύτερη απεικόνιση της κατάστασης του συστήματος, διευκολύνοντας την λήψη άμεσων μέτρων για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος ως προς την απομάκρυνση των ρύπων. Η εφαρμογή online αισθητήρων δεν υποκαθιστά τις απαιτούμενες εργαστηριακές αναλύσεις, αλλά αποτελεί ένα εξελισσόμενο τρόπο αποτίμησης της λειτουργίας του συστήματος επεξεργασίας και σύγκρισης με τα αποτελέσματα του εργαστηρίου. Η συλλογή δεδομένων των Online αισθητήρων, με την τακτική συντήρηση και βαθμονόμηση των αισθητήρων για αξιόπιστα & επαναλήψιμα αποτελέσματα , δίνει τη δυνατότητα άμεσης απεικόνισης της λειτουργίας και απόδοσης του συστήματος, πράγμα το οποίο δεν μπορεί να επιτευχθεί με τις εργαστηριακές αναλύσεις. Επιπλέον υπάρχει η ικανότητα βελτιστοποίησης της απόδοσης του συστήματος επεξεργασίας, καθώς η λεπτομερής πληροφόρηση από τους αισθητήρες μπορεί να αναδείξει χρόνους και απόδοση νιτροποίησης-απονιτροποίησης αλλά και τα σημεία στα οποία η μονάδα επεξεργασίας ωφελείται ενεργειακά και υπάρχει η δυνατότητα για αυξημένη ικανότητα επεξεργασίας θρεπτικών και οργανικού φορτίου .

Η μελέτη μεθόδων και στρατηγικών ελέγχου όπως η παρακολούθηση παραμέτρων pH, ORP, DO και η σύνδεση μεταξύ τους, είναι σημαντικό βήμα ώστε να αποτυπωθούν τα οφέλη και οι δυνατότητες της αντίστοιχης μεθόδου . Επομένως, στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν απλές στρατηγικές δυναμικής σύνδεσης παραμετρικών τιμών όπως NH<sub>4</sub>-N & DO αλλά και απλή παρακολούθηση και ρύθμιση της παραμέτρου διαλυμένου οξυγόνου. Στη συνέχεια και με βάση την εγκατάσταση επιπλέον αισθητήρων μελετήθηκαν στρατηγικές ελέγχου με βάση τους αισθητήρες όπως οξειδοαναγωγικό δυναμικό (ORP), pH, NH<sub>4</sub>-N και πιο ενεργό έλεγχο στις εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας καθώς εκεί παρατηρείται η υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε μια ΕΕΛ. Με την εφαρμογή αισθητήρων μέτρησης pH ,ORP,DO,NH<sub>4</sub>-N , διαπιστώθηκε πως είναι δυνατόν να έχουμε διαφορετικές επιλογές στρατηγικών ελέγχου της μονάδας. Για παράδειγμα η συνεχής μέτρηση NH<sub>4</sub>-N στην βιολογική βαθμίδα και αντίστοιχα η τοποθέτηση αισθητήρα σε μονάδα αερισμού ή ανοξική ζώνη μπορεί να αναδείξει καλύτερα αποτελέσματα για την ικανότητα και πορεία της νιτροποίησης/απονιτροποίησης του συστήματος και σε συνδυασμό με τιμές DO να επιτευχθεί καλύτερη διαχείριση του αερισμού και των ζωνών αερισμού. Η εγκατάσταση online αισθητήρων όπως DO, NH<sub>4</sub>-N, ORP έχουν ως στόχο να επιτευχθεί σύνδεση με βασικά συστήματα της μονάδας όπως την παροχή αερισμού και τους διαχυτήρες, τα σημεία υδραυλικών επανακυκλοφοριών και την επιλεκτική αλλαγή μονάδων σε διαφορετικές φάσεις αερισμού ή ανοξικές και τέλος την βελτιστοποίηση των χρόνων και των φάσεων σε μονάδες μικρής κλίμακας όπως αντιδραστήρες διαλείποντος έργου τύπου SBR (Sequencing Batch Reactor). Ο όρος στρατηγική ελέγχου στη διαχείριση της μονάδας και συγκεκριμένα στη βιολογική βαθμίδα αφορά την διαχείριση , σύνδεση και εξάρτηση των παραμετρικών τιμών pH,ORP,DO και ενδεχομένως NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N με ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό όπως το σύστημα και η παροχή αερισμού στη μονάδα ή αντλίες επανακυκλοφορίας και βάνες τροφοδοσίας χημικών ή ηλεκτρολυτών .

Σημαντικό στις στρατηγικές ελέγχου που είδαμε όπως η closed loop με συγκεκριμένες αλληλουχίες δράσεων όπως η ρύθμιση παροχής οξυγόνου βασισμένη σε όριο DO στη μονάδα αερισμού & δυναμικός

έλεγχος με συνεχείς μετρήσεις  $\text{NH}_4\text{-N}$  σε σημεία της μονάδας αερισμού και την ανοξική ζώνη , να τοποθετούνται αισθητήρες σε συγκεκριμένα σημεία /ζώνες εγκατεστημένοι και στόχο τις αποδόσεις του συστήματος , με την λογική ότι το σύστημα έχει την δυνατότητα ψηφιακού ελέγχου και αλληλεπιδράσεων αλλά και τη διασφάλιση για την σωστή εγκατάσταση των αισθητήρων στα καίρια σημεία .

Σκοπός της παρούσας εργασία είναι διερεύνηση της εφαρμογής online αισθητήρων αποτίμησης της ποιότητας με στόχο την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση μιας μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Στην πιλοτική μονάδα SMART-PLANT που αποτελεί μονάδα επεξεργασίας στραγγιδίων του ΚΕΛ Ψυττάλειας , απομονώθηκαν συγκεκριμένες χρονικές περιόδους από τις καταγραφές των online αισθητήρων προκειμένου να διαπιστωθούν συσχετίσεις παραμέτρων και διερευνηθούν σε πραγματικό δείγμα σημεία βελτιστοποίησης και ελέγχου του συστήματος. Συγκεκριμένα απομονώθηκαν οι παράμετροι της αγωγιμότητας και του αμμωνιακού αζώτου ( $\text{COND}$  &  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) σε τυχαία δείγματα όπου διαπιστώθηκε συσχετισμός των δεδομένων και παρόμοιες τάσεις των αισθητήρων όπου αποδίδουν καλύτερη εικόνα στα σημεία απόδοσης της νιτροδοποίησης και της απονιτροδοποίησης. Τέλος παρατηρήθηκε με την χρήση οικονομικών αισθητήρων pH, ORP, DO η απόδοση του συστήματος και τα σημεία δυναμικής επέμβασης στη μονάδα SBR του πιλοτικού .

## **Abstract**

In the present master's thesis, the applications of Online sensors and specifically physicochemical sensors in wastewater treatment plants are investigated. Real-time physicochemical monitoring sensors are increasingly being applied to the operation and optimization of biological wastewater treatment systems, either conventional activated sludge methods or new technologies such as Anammox systems.

The installation of Online sensors enhances data collection resulting in a better display of the system status, facilitating immediate measures to increase system performance in terms of the removal of pollutants. The application of online sensors does not replace the required laboratory analyzes, but is an evolving way of evaluating the operation of the processing system and comparing it with the results of the laboratory. The collection of data of Online sensors, with the regular maintenance and calibration of the sensors for reliable & repeatable results, enables the direct display of the operation and performance of the system, which can not be achieved with laboratory analyzes. In addition, there is the ability to optimize the efficiency of the treatment system, as detailed information from the sensors can highlight times and nitrification-denitrification efficiency but also the points where the treatment unit benefits energy and there is the possibility for increased ability to process nutrients and organic load. .

The study of control methods and strategies such as monitoring the parameters pH, ORP, DO and the connection between them, is an important step to capture the benefits and capabilities of the respective method. Therefore, in the present work, simple dynamical coupling strategies of parametric values such as NH<sub>4</sub>-N & DO but also simple monitoring and adjustment of the dissolved oxygen parameter were investigated. Then, based on the installation of additional sensors, control strategies based on sensors such as redox potential (ORP), pH, NH<sub>4</sub>-N and more active control in biological treatment plants were studied as there is the highest energy consumption in an EEL. By applying pH, ORP, DO, NH<sub>4</sub>-N measurement sensors, it was found that it is possible to have different options of control strategies of



the unit. For example, continuous measurement of NH<sub>4</sub>-N in the biological stage and respectively placement of a sensor in a ventilation unit or stainless steel zone can show better results for the nitrification / denitrification capacity of the system and in combination with DO values to achieve better ventilation and zone management. The installation of online sensors such as DO, NH<sub>4</sub>-N, ORP aim to achieve connection to basic systems of the unit such as ventilation and diffusers, hydraulic recirculation points and selective change of units in different ventilation phases or anoxic and finally the optimization of times and phases in small scale units such as SBR (Sequencing Batch Reactor) type reactors. The term control strategy in the management of the unit and specifically in the biological stage refers to the management, connection and dependence of the parametric values pH, ORP, DO and possibly NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N with electromechanical equipment such as the system and the supply of ventilation to the unit or recirculation pumps and supply valves for chemicals or electrolytes.

Important in the control strategies we saw such as the closed loop with specific sequences of actions such as the regulation of oxygen supply based on DO limit in the ventilation unit & dynamic control with continuous measurements NH<sub>4</sub>-N at points of the ventilation unit and the anoxic zone, to place sensors in specific points / zones installed and target the performance of the system, with the logic that the system has the ability of digital control and interactions but also ensuring the correct installation of sensors at key points.

The purpose of this work is to investigate the application of online quality assessment sensors in order to monitor, control and optimize a wastewater treatment plant.

In the pilot unit SMART-PLANT, which is a drain treatment unit of KEL Psyttalia, specific time periods were isolated from the recordings of the online sensors in order to ascertain parameter correlations and to investigate in a real sample points of optimization and control of the system. Specifically, the parameters of conductivity and ammonia nitrogen (COND & NH<sub>4</sub>-N) were isolated in random samples

where correlation of the data and similar sensors tendencies were found where they give a better picture at the nitrification and denitrification performance points. Finally, the performance of the system and the dynamic intervention points in the pilot SBR unit were observed using economical pH, ORP, DO sensors.

## Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή .....	17
2. Online αισθητήρες μέτρησης, περιγραφές τεχνολογίας και μέθοδοι μέτρησης.....	24
2.1. Γενικές προκλήσεις Online αισθητήρων .....	24
2.2. Αρχές Μεθόδου λειτουργίας Online Αισθητήρων.....	26
2.2.1 Αρχή μεθόδου Online μέτρησης DO .....	26
2.2.2 Αρχή μεθόδου Online μέτρησης pH.....	28
2.2.3.Αρχή μεθόδου Online μέτρησης Cond.....	30
2.2.4 Αρχή μεθόδου Online μέτρησης NH <sub>4</sub> -N.....	34
2.2.5 Αρχή μεθόδου Online μέτρησης Online Φασματοσκοπίας.....	36
2.2.5.1.Online Φασματοσκοπία – Βασικές Αρχές μέτρησης.....	36
2.2.5.2. Online Φασματοσκοπία – Αρχή λειτουργίας,Παραμετροποίηση αισθητήρα.....	41
2.2.5.3. Online Φασματοσκοπία – Σύγκριση Online αισθητήρα με εργαστηριακά δεδομένα.....	45
2.2.6 Αισθητήρες μέτρησης αέριων εκπομπών θερμοκηπίου .....	50
2.2.6.1 Αισθητήρας μέτρησης CO <sub>2</sub> & CH <sub>4</sub> .....	51
2.2.6.2 Αισθητήρας μέτρησης N <sub>2</sub> O.....	52
2.2.7 Ηλεκτρόδια μέτρησης Οξειδοαναγωγικού δυναμικού (Redox/ORP ) .....	53
2.2.8 Αισθητήρας Θολερότητας / Ολικών Στερεών ( TS -Total Solids , TSS-Total Suspended Solids, MLSS – Mixed Liquor Suspended Solids ) .....	54
3. Εφαρμογή αισθητήρων για την παρακολούθηση και τον έλεγχο βιοχημικών διεργασιών Ανάλυση γραφημάτων και επεξήγηση αποτελεσμάτων από πιλοτικά/ case studies.....	56
3.1 Η τρέχουσα κατάσταση εφαρμογής Online αισθητήρων.....	56
3.2 Ενεργειακή διαχείριση με χρήση online αισθητήρων.....	64
3.3 Βασικές μέθοδοι και εφαρμογές ελέγχου με χρήση Online αισθητήρων .....	56
3.4 Δυναμικός έλεγχος βιολογικής βαθμίδας με μέτρηση NH <sub>4</sub> -N.....	70
3.5 Έλεγχος & Παρακολούθηση της Απονιτροποίησης.....	76
3.6 Βασικές μέθοδοι ελέγχου βιολογικών βαθμίδων.....	79
3.7 Τεχνική Ανοικτού Ελέγχου κύκλων λειτουργιών / Open Loop Control (sequencing).....	80
3.8 Κλειστό σύστημα ελέγχου (Closed Loop Control ).....	82
3.9 PID Control.....	87
3.10 Ο απευθείας έλεγχος Αμμωνιακών.....	89
3.11 Ο έλεγχος feed forward.....	90
3.12 Online παρακολούθηση παραμετρικών τιμών σε συστήματα Νιτροποίησης-Απονιτροποίησης .....	92

4. Βιολογική απομάκρυνση αζώτου σε αντιδραστήρες SBR και εφαρμογή online αισθητήρων	
4.1. Φορτίο Αζώτου στα λύματα .....	101
4.2.Νιτροποίηση .....	102
4.3Απονιτροποίηση.....	103
4.4 Νιτρωδοποίηση-Απονιτρωδοποίηση (Short Cut Nitrogen Removal) .....	104
4.5 Αντιδραστήρες εναλλασσόμενων φάσεων διαλείποντος έργου (SBR).....	105
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SMART PLANT.....	107
5.1Περιγραφή πιλοτικού Smart Plant.....	107
5.2 Σχήμα λειτουργίας πιλοτικού.....	109
5.3 Εργαστηριακά δεδομένα.....	110
5.4Διαχείριση Online δεδομένων πιλοτικού συστήματος .....	111
5.5 Ανίχνευση συσχετίσεων Online παραμέτρων.....	116
5.6 Έλεγχος διεργασιών μονάδας Smart Plant με χρήση Online αισθητήρων.....	122
6. Συμπεράσματα .....	126
7.Βιβλιογραφία .....	130

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Παράμετροι Online αισθητήρων που συνήθως εγκαθίστανται σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	58
Πίνακας 3.2 Ανάλυση κόστους Online Αισθητήρα – Κύρια σημεία.....	59
Πίνακας 5.1 Στάδια κύκλων της δεξαμενής SBR ( Διπλωματική εργασία, Βαγγέλης Στατήρης ) .....	110
Πίνακας 5.2 Βασικές παράμετροι πιλοτικού SMART PLANT για την περίοδο από 7 Μαρτίου 2018 μέχρι 25 Ιουλίου του 2018. ....	111
Πίνακας 5.3 Ενδεικτικό διάγραμμα Online τιμών δεξαμενής SBR , Smart Plant.....	112
Πίνακας 5.4 Ενδεικτικό διάγραμμα Online τιμών δεξαμενής SBR συναρτήσει σταδίων της μονάδας.....	113

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2 Δομή οπτικού αισθητήρα διαλυμένου οξυγόνου.....	26
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα περιόδου απορρόφησης της μεμβράνης οπτικού αισθητήρα .....	27
Σχήμα 2.4 Δομή μεμβράνης ηλεκτροδίου pH .....	29
Σχήμα 2.5 Σχεδιάγραμμα ηλεκτροδίου pH.....	30
Σχήμα 2.6 Δομή μέτρησης πυκνωτών αγωγιμότητας.....	31
Σχήμα 2.7 Μετατροπή τάσης στην επιφάνεια πυκνωτή αγωγιμόμετρου.....	33
Σχήμα 2.8 Νόμος Lambert-Beer & απεικόνιση απορρόφησης από διάλυμα.....	36
Σχήμα 2.9 Φάσμα ορατού υπεριώδους.....	38
Σχήμα 2.10 Σχεδιάγραμμα οπτικού συστήματος φασματοφωτομετρικού αισθητήρα.....	38
Σχήμα 2.11 Οπτικό σύστημα φασματοφωτομετρικού αισθητήρα.....	39
Σχήμα 2.12 Σύστημα μέτρησης και αναφοράς πηγής δεσμής .....	40
Σχήμα 2.13 Απεικόνιση μετρήσεων φάσματος UV-VIS αισθητήρα.....	43
Σχήμα 2.14 Διακριτά σημεία χρόνου μέτρησης UV-VIS αισθητήρα.....	44
Σχήμα 2.15 Φασματοφωτομετρική μέτρηση δείγματος στραγγιδίων.....	45
Σχήμα 2.16 Διάγραμμα Online μέτρησης ολικού COD πρωτοβάθμιας εκροής ΕΕΛ.....	46
Σχήμα 2.17 Διάγραμμα Online μέτρησης COD σε εγκατάσταση εισόδου Αστικών λυμάτων.....	48
Σχήμα 2.18 Διάγραμμα Online μέτρησης COD σε εγκατάσταση εισόδου Βιομηχανικών αποβλήτων .....	49
Σχήμα 2.19 Φωτογραφία απεικόνισης αισθητήρα μέτρησης CH <sub>4</sub> ή CO <sub>2</sub> .....	51
Σχήμα 2.20 Φωτογραφία απεικόνισης αισθητήρα μέτρησης N <sub>2</sub> O.....	52
Σχήμα 2.21 Σχεδιάγραμμα απεικόνισης τρόπου μέτρησης Θολερότητας.....	54
Σχήμα 2.22 Σχεδιάγραμμα απεικόνισης τρόπου μέτρησης Στερεών.....	55
Σχήμα 3.3 έξοδο της ανοξικής ζώνης σε δεξαμενή από-νιτροποίησης σε ΕΕΛ στην περιοχή Lund της Σουηδίας – Τεχνολογία Ενεργού Ιλύος .....	60
Σχήμα 3.4 . Επιμερισμός ενεργειακών απαιτήσεων σε ποσοστά της συνολικής ενεργειακής απαίτησης ενός εργοστασίου ( Energy Awareness in Wastewater Systems, DERF, June 4 2008).....	62
Σχήμα 3.5 Επεξήγηση χρωματικών κατηγοριών στις ενεργειακές απαιτήσεις.....	63
Σχήμα 3.6 Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης αισθητήρων σε δεξαμενή ενεργού ιλύος , MLSS στην είσοδο, NH <sub>4</sub> -N ή NH <sub>4</sub> -N/NO <sub>3</sub> -N και DO σε κάθε ζώνη, NO <sub>3</sub> -N στην έξοδο .....	66
Σχήμα 3.7 Ρυθμοί απομάκρυνσης Οργανικού φορτίου και Αμμωνίας σε σχέση με τα επίπεδα DO.....	67
Σχήμα 3.8 Ρυθμοί Νιτροποίησης & Απονιτροποίησης συναρτήσει των συγκεντρώσεων DO (Gustaf Olsson, Lund University ).....	69
Σχήμα 3.9 Αναπαράσταση στρατηγικής ελέγχου μονάδας αερισμού σύμφωνα με τις μετρήσεις αμμωνιακών .....	71
Σχήμα 3.10 Διάγραμμα παραμετρικών τιμών NH <sub>4</sub> -N, DO και παροχής αερισμού σε στρατηγική feedback .....	72
Σχήμα 3.11 Διάγραμμα παραμετρικών τιμών NH <sub>4</sub> -N & DO σε στρατηγική ελέγχου feedback .....	75
Σχήμα 3.12 Ροϊκό διάγραμμα Βιολογικής μονάδας σύμφωνα με διαμόρφωση Ludzack-Ettinger .....	77
Σχήμα 3.13 Online μέτρηση Νιτρικών σε Οξική & Ανοξική ζώνη.....	78

Σχήμα 3.14 Τυπικό διάγραμμα παραμετρικών Online τιμών DO, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N σε δεξαμενή τύπου SBR.....	81
Σχήμα 3.15 Διάγραμμα στρατηγικής feedback ελέγχου μονάδας .....	83
Σχήμα 3.16 Διάγραμμα ελέγχου ON-OFF παροχής αερισμού .....	85
Σχήμα 3.17 Διάγραμμα ελέγχου ON-OFF παροχής αερισμού με χρονική υστέρηση.....	85
Σχήμα 3.18 Διάγραμμα απεικόνισης ελέγχου μονάδας αερισμού σύμφωνα με την παραμετρική τιμή DO.....	88
Σχήμα 3.19 Διάγραμμα Online τιμών NH <sub>4</sub> -N, DO και παροχής Οξυγόνου σε στρατηγική ελέγχου feed forward .....	91
Σχήμα 3.20 Τυπικά διαγράμματα NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N , pH, ORP, DO σε κύκλο SBR .....	94
Σχήμα 3.21 Τυπικά διαγράμματα NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N , pH, ORP, DO σε κύκλο SBR.....	95
Σχήμα 3.22 Σημεία καμπής Βιοχημικών διεργασιών συναρτήσει παραμετρικών τιμών.....	98
Σχήμα 3.23 Διάγραμμα χρονικών αλλαγών Online παραμετρικών τιμών .....	100
Σχήμα 4.1 Οι κύριες διεργασίες μετατροπής του αζώτου. Προέλευση Gustavsson (2010) .....	101
Σχήμα 4.2 . Βιοχημικές διεργασίες μορφών Αζώτου σε συστήματα απομάκρυνσης θρεπτικών και απαιτήσεις των διεργασιών αυτών.....	102
Σχήμα 4.3 Βιοχημικές μορφές αζώτου στα λύματα κατά τις διεργασίες της Νιτροποίησης / Απονιτροποίησης.....	104
Σχήμα 4.4 Κύκλοι λειτουργίας του SBR.....	106
Σχήμα 5.1 Ροϊκό διάγραμμα Ιλύος & Ανάμεικτου υγρού ΚΕΛ Ψυττάλειας .....	107
Σχήμα 5.2 Βασικά λειτουργικά συστήματα και Η/Μ εξοπλισμός .....	108
Σχήμα 5.4 Ενδεικτικό διάγραμμα Online τιμών pH, COND, DO, Temp, ORP, NH <sub>4</sub> -N , Smart Plant.....	114
Σχήμα 5.5 Ενδεικτικό διάγραμμα Online τιμών pH, COND, DO, Temp, ORP, NH <sub>4</sub> -N , Smart Plant.....	115
Σχήμα 5.7 Εξάρτηση μεταβολών Αγωγιμότητας κατά την διάρκεια βιοχημικών διεργασιών.....	117
Σχήμα 5.8 Στάδιο Αερισμού Καταγραφές DO, COND, NH <sub>4</sub> -N .....	119
Σχήμα 5.9 Στάδιο Αερισμού Καταγραφές DO, COND, NH <sub>4</sub> -N.....	119
Σχήμα 5.10 Τυχαίο δείγμα 1 Στάδιο Αερισμού Καταγραφές COND, NH <sub>4</sub> -N.....	120
Σχήμα 5.11 Τυχαίο δείγμα 2 Στάδιο Αερισμού Καταγραφές COND, NH <sub>4</sub> -N.....	121
Σχήμα 5.12 Τυχαίο δείγμα 3 Στάδιο Αερισμού Καταγραφές COND, NH <sub>4</sub> -N.....	121
Σχήμα 5.13 Τυχαίο δείγμα Κύκλος SBR, Online καταγραφές pH,ORP,DO, NH <sub>4</sub> -N.....	123
Σχήμα 5.14 Τυχαίο δείγμα Κύκλος SBR, Online καταγραφές pH,ORP.....	125





## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η διαχείριση αστικών λυμάτων και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων την τελευταία δεκαετία γνωρίζει ανάπτυξη και εισαγωγή καινοτόμων τεχνολογιών, κάτι που απαιτείται από την αυστηροποίηση των παραμέτρων εκροής στις αντίστοιχες νομοθεσίες (Wang et al., 2015) . Οι καινοτόμες τεχνολογίες οδηγούν την διαχείριση των λυμάτων σε μονάδες με μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και διαφορετικές βιοχημικές μεθόδους. Στόχος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) είναι η επίτευξη των όρων της Κοινοτικής νομοθεσίας 91/271/EEC καθώς και της Ελληνικής νομοθεσίας επαναχρησιμοποίησης ανακτημένου νερού για τις παραμετρικές τιμές εκροής, καθώς στοχεύουμε την επίτευξη των ορίων του ανακτημένου νερού και την περαιτέρω απόθεση του στο περιβάλλον .

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων μπορούν να αποκτήσουν σημαντικούς αυτοματισμούς ώστε η διαχείριση των λυμάτων να γίνεται αποτελεσματικά με υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και με χαμηλό ενεργειακό κόστος και χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Οι προκλήσεις αρκετές, αποτελεσματική διαχείριση με υψηλές και σταθερές απαιτήσεις εκροής , ενεργειακή διαχείριση της λειτουργίας των βιοαντιδραστήρων, αξιόπιστη παρακολούθηση βιοχημικών διεργασιών και συστηματική επεξεργασία της παραγόμενης υλύος .

Μέρος της σύγχρονης πρόκλησης είναι η μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των μονάδων επεξεργασίας αλλά και η διαχείριση τους, συγκεκριμένα ο έλεγχος των επιμέρους συστημάτων επεξεργασίας (πρωτοβάθμια καθίζηση, δευτεροβάθμια επεξεργασία, έργα υλύος κτλ.) για τον εντοπισμό των ενεργειακών hotspots. Έρευνες έχουν δείξει πως οι βιοαντιδραστήρες έχουν το σημαντικότερο ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με ολόκληρη την μονάδα .

Ο έλεγχος βιολογικών διεργασιών στις ανωτέρω μονάδες αποτελεί τον κυρίαρχο στόχο ώστε να αποτυπώνεται καλύτερη εικόνα της μονάδας αλλά και να βελτιωθεί το ενεργειακό αποτύπωμα.

Οι περισσότερες ΕΕΛ εφαρμόζουν συμβατικά συστήματα ελέγχου όπου ουσιαστικά γίνεται μόνο παρακολούθηση των παραμετρικών τιμών pH & DO και σε ορισμένες περιπτώσεις η μέτρηση τιμών MLSS , τα επόμενα βήματα για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα στον έλεγχο διεργασιών είναι η παρακολούθηση περισσότερων παραμέτρων αλλά και πλέον ο άμεσος ή έμμεσος έλεγχος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού βασισμένο στις παραμετρικές τιμές (για παράδειγμα pH, DO κ.ο.κ)

Η πρόσβαση σε μεγαλύτερο όγκο δεδομένων , η διαχείριση του και ο έλεγχος αποτελεί επιτακτική ανάγκη σε μονάδες τύπου SBR, όπου η αποτελεσματικότητα τους κρίνεται από τον όγκο δεδομένων και τον καλύτερο έλεγχο των παραμέτρων με χρονικά περιθώρια.

Σε μονάδες SBR συναντώνται απλές συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας θρεπτικών (νιτροποίηση / απονιτροποίηση) αλλά και σύγχρονες μεθόδους (Anammox, Short cut Nitrogen removal) , ανεξαρτήτως τεχνολογίας η απαίτηση για πλήρη εικόνα των βιοχημικών διεργασιών αλλά και ο έλεγχος αυτών συνδέεται & ικανοποιείται από την εγκατάσταση και εφαρμογή Online φυσικοχημικών αισθητήρων όπως pH, ORP, DO κ.ο.κ .

Η τεχνολογία των αντιδραστήρων SBR με αντίστοιχες επιλεγόμενες τεχνολογίες απομάκρυνσης θρεπτικών επιλέγεται αρκετές φορές για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων υψηλών σε φορτία Αζώτου ή Φωσφόρου , καθώς υπάρχει μεγάλη ευελιξία στον χειρισμό λειτουργικών παραμέτρων και την χρονική επιλογή σταδίων αερισμού, ανοξικής, αναερόβιας . Συναντώνται σε επεξεργασία υγρών αποβλήτων με υψηλά φορτίου Αζώτου και Φωσφόρου και μη-τυπικές διακυμάνσεις αυτών , για παράδειγμα σε επεξεργασίες στραγγιδίων μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων καθώς μειώνουν σημαντικά το φορτίο . Συγκεκριμένα η επεξεργασία των στραγγιδίων πραγματοποιείται σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων για επιτυχή μείωση του φορτίου των στραγγιδίων που προέρχονται από στάδια διαχείρισης παραγόμενης ιλύος όπως η πάχυνση και η αφυδάτωση .

Οι συγκεκριμένες διεργασίες παράγουν στραγγίδια. Τα στραγγίδια αφυδάτωσης χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου (15-20% του συνολικού εισερχόμενου φορτίου) (Aslan και Dahab, 2008).

Το παραγόμενο ρεύμα στραγγιδίων αφυδάτωσης απαιτεί ιδιαίτερη διαχείριση καθώς είναι απαγορευτικό να επιστρέφει στην είσοδο της εγκατάστασης, επίσης φέρει μεγάλες συγκεντρώσεις αζώτου και οργανικό φορτίο χαμηλής βιοδιασπασιμότητας . Η αντιμετώπισή του απαιτεί πλέον εναλλακτικούς τρόπους επεξεργασίας που ξεφεύγουν από τη συμβατική νιτροποίηση – απονιτροποίηση (Ge et al., 2015).

Η αποτελεσματική επιλογή της μερικής νιτροποίησης , γνωστή ως νιτρωδοποίηση-απονιτρωδοποίηση , επιτρέπει την διαχείριση των στραγγιδίων της εγκατάστασης καθώς απαιτούνται μειωμένες απαιτήσεις οξυγόνου (ενεργειακές) και προσθήκης εξωτερικής πηγής άνθρακα σε επίπεδα 25% & 40% αντίστοιχα (Fux et al., 2006).

Η μερική νιτροποίηση ή short cut nitrogen removal όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία, επιτελείται με την την επιλεκτική ανάπτυξη των βακτηρίων AOB που οξειδώνουν την αμμωνία και την παράλληλη παρεμπόδιση των NOB βακτηρίων που οξειδώνουν τα νιτρώδη σε νιτρικά (Guo et al., 2010).

Σε πραγματική κλίμακα έχουμε αρκετούς σχεδιασμούς της επεξεργασίας των στραγγιδίων με την μέθοδο της νιτρωδοποίησης – απονιτρωδοποίησης και συνήθως επιλέγονται αντιδραστήρες SBR ή SHARON (Magri et al., 2013).

Η αποτελεσματική διαχείριση, έλεγχος και παρακολούθηση των ανωτέρω βιοχημικών διεργασιών πραγματοποιείται από Online τεχνολογίες αισθητήρων φυσικοχημικών παραμέτρων, με στόχο την αξιόπιστη παρακολούθηση και φυσικά τον καλύτερο έλεγχο της εγκατάστασης .

Στην παρούσα εργασία αξιολογείται η αξιοπιστία των online αισθητήρων , αναλύονται τα δεδομένα αισθητήρων τα οποία χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της απόδοσης βιολογικού συστήματος επεξεργασίας στραγγιδίων αφυδάτωσης διαλείποντος έργου (SBR) .

Η εφαρμογή των αισθητήρων προσφέρει ένα μεγάλο όγκο δεδομένων τα οποία ο διαχειριστής καλείται να επεξεργασθεί ώστε να εξάγει συμπεράσματα ως προς τη λειτουργία της εγκατάστασης.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της εφαρμογής online αισθητήρων σε συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων για την παρακολούθηση, των έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της επεξεργασίας. . Επιπλέον ο έλεγχος διεργασιών και η διάκριση σημαντικών σημείων ελέγχου στην πιλοτική μονάδα SMART PLANT επεξεργασίας στραγγιδίων του ΚΕΛ Ψυττάλειας .

## **Ευρετήριο Συμβόλων**

AD, anaerobic digestion;

AOB, ammonium oxidizing bacteria;

AUR, ammonium uptake rate;

BNR, biological nutrients removal;

CM&MS, cattle manure and maize silage;

COD, chemical oxygen demand;

DL, drainage liquid;

DO, dissolved oxygen;

DPRN, denitrifying phosphorus removal via nitrite;

FA, free ammonia;

FNA, free nitrous acid;

F/M, food to microorganisms ratio;

HRT, hydraulic retention time;

MBR, membrane bioreactor;

MLSS, mixed liquor suspended solids;

MLVSS, mixed liquor volatile suspended solids;

NH<sub>4</sub>-N, ammonium nitrogen;

NLR, nitrogen loading rate;

NO<sub>2</sub>-N, nitrite nitrogen;

NO<sub>3</sub>-N, nitrate nitrogen;

NO<sub>x</sub>-N, nitrogen in nitrate and nitrite;

NOB, nitrite oxidizing bacteria;

NUR, nitrite uptake rate;

OFMSW, organic fraction of municipal solid waste;

OLR, organic loading rate;

ORP, oxidation reduction potential;

PAOs, phosphorus accumulating organisms;

PHA, poly-beta-hydroxyalkanoate;

PLC, programmable logic controller;

PO<sub>4</sub>-P, phosphorus in phosphate;

sAUR, specific ammonium uptake rate;

sCOD, soluble chemical oxygen demand;

sNLR, solids nitrogen loading rate;

sNUR, specific nitrite uptake rate;

sPUR, specific phosphate uptake rate;

vNLR, volumetric nitrogen loading rate;

SBR, sequencing batch reactor;

SCND, short-cut nitrification/denitrification;

SCNR, short-cut nitrogen removal;

SRT, solids retention time;

TKN, total Kjeldahl nitrogen;

TS, total solids;

WAS, waste activated sludge;

WWTP, wastewater treatment plant

## Κεφάλαιο 2 :Online αισθητήρες μέτρησης, περιγραφές τεχνολογίας και μέθοδοι μέτρησης

### 2.1. Γενικές προκλήσεις Online αισθητήρων

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται για να γνωρίζει ο λειτουργός της μονάδας τις απαιτήσεις , τα σημεία βελτιστοποίησης και ενδεχομένως τεχνικά προβλήματα , οι απαιτήσεις αυξάνονται οπότε ταυτόχρονα αυξάνεται η ζήτηση για ικανοποιητική και αποδοτική λειτουργία των αισθητήρων . Διαχρονικά και ενώ η τεχνολογία έχει βελτιωθεί σημαντικά και με σημαντικές καινοτομίες σε αναλυτικές μετρήσεις .

Παράμετροι που παρακολουθούνται σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων :

Υδραυλική παροχή , στάθμη, πίεση, θερμοκρασία, pH, Redox, Αγωγιμότητα, Διαλυμένο οξυγόνο, Θολρότητα, Συγκέντρωση λάσπης, συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών, επίπεδο στάθμης ιλύος, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>x</sub>-N, Φωσφορικά, COD, BOD, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> .

Η απόδοση των αισθητήρων ποικίλλει στη σημερινή εποχή ακόμα και σε περιπτώσεις που η τεχνολογία έχει αποδείξει πως δίνει επιβεβαιωμένες λύσεις, με συνέπεια την ανεπαρκή παρακολούθηση βιολογικών διαδικασιών και φυσικά την μειωμένη δυνατότητα ελέγχου στην εγκατάσταση .

Φυσικά η εγκατάσταση των αισθητήρων δεν αποτελεί πανάκεια καθώς από μόνη της δεν σημαίνει απαραίτητα ότι διασφαλίζεται αυτόματα η απόδοση και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων . Απαιτείται συνεχής έλεγχος και σύγκριση με εργαστηριακά αποτελέσματα για να διασφαλιστεί η υψηλή απόδοση στις online μετρήσεις με αξιοπιστία και επαναληψιμότητα .





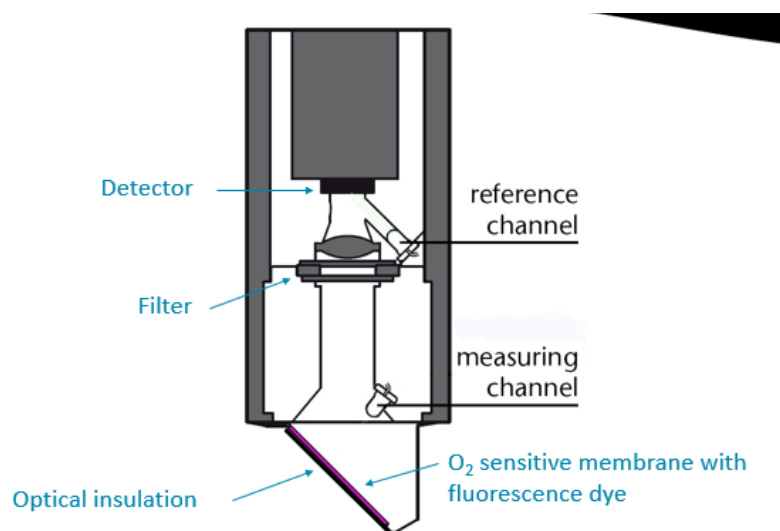
## 2.2. Αρχές Online Μέτρησης Αισθητήρων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές μέτρησης για τους αισθητήρες μέτρησης pH, DO, ORP, COND, NH<sub>4</sub>-N, COD, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> και αποτελούν παρόμοιες μέθοδοι μέτρησης ανεξαρτήτως κατασκευαστή ως προς τον βασικό τρόπο λειτουργίας .

### 2.2.1 Αρχή Online μέτρησης DO

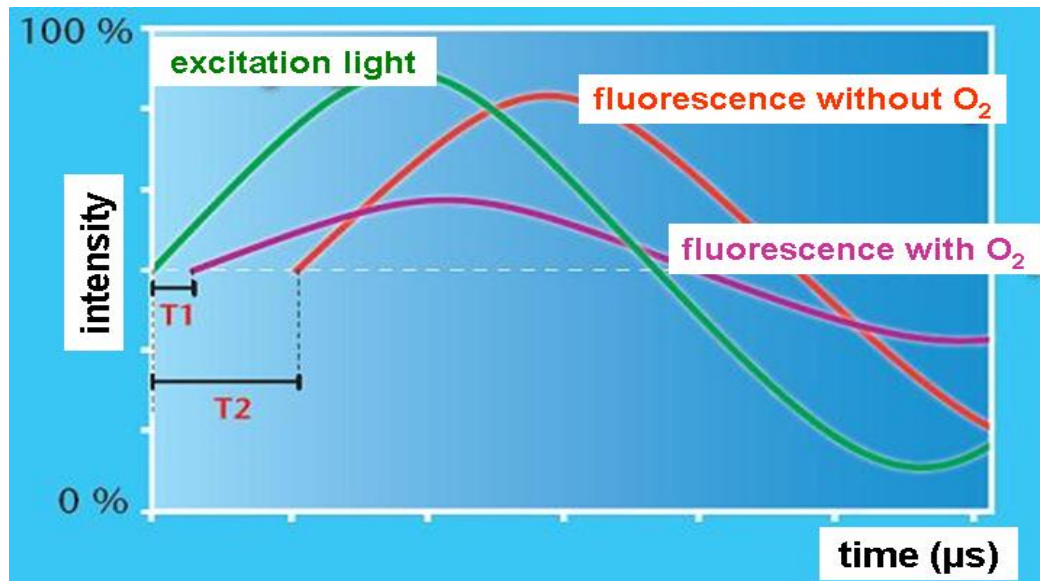
Η online μέτρηση Διαλυμένου Οξυγόνου είναι από τις βασικές μετρήσεις σε Βιολογικούς καθαρισμούς και συγκεκριμένα στις μονάδες αερισμού στα συστήματα ενεργού ιλύος αλλά και στις νεότερες τεχνολογίες απομάκρυνσης θρεπτικών .

Οι οπτικοί αισθητήρες διαλυμένου οξυγόνου όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2, αποτελούνται από οπτικό σύστημα με ακτινοβολία (συνήθως LED σε μήκος κύματος ορατού) και μεμβράνη ευαίσθητη σε μεταβολές παρουσία Οξυγόνου (συνήθως πολυστυρένιο) .



Σχήμα 2.2 Δομή οπτικού αισθητήρα διαλυμένου οξυγόνου ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )

Η μεμβράνη εκπέμπει σε συγκεκριμένο μήκος κύματος απουσία οξυγόνου και παρατηρείται σημαντική μεταβολή στην περιοδική φάση σε συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου, η οποία και μεταφράζεται σε συγκέντρωση DO σε mg/l (ppm). Οι μεταβολές όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα 2.3 αποδίδουν αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς το αποτέλεσμα εξαρτάται από την παρουσία μορίων οξυγόνου διαλυμένα στο δείγμα. Η συγκεκριμένη μέθοδος οπτικών αισθητήρων αποτελεί μια χρήσιμη και αξιόπιστη μέθοδο μέτρησης σε πραγματικό χρόνο, καθώς αποδίδει άμεσα αξιόπιστα και επαναλήψιμα αποτελέσματα χωρίς να απαιτείται βαθμονόμηση αλλά μόνο συντήρηση και καθαρισμός του αισθητήρα.



**Σχήμα 2.3 Διάγραμμα περιόδου απορρόφησης της μεμβράνης οπτικού αισθητήρα ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

Με τον αισθητήρα DO δίνεται η δυνατότητα για μετρήσεις συγκεντρώσεων DO αλλά και επιπλέον επιπέδων κορεσμού οξυγόνου σε μορφές αποτελεσμάτων με ποσοστά κορεσμού .

## 2.2.2 Αρχή Online μέτρησης pH

Η συγκέντρωση κατιόντων υδρογόνου σε ένα υδατικό διάλυμα καταδεικνύει πόσο όξινο ή βασικό είναι το διάλυμα αυτό. Η βασική μέτρηση pH είναι ένδειξη της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου, ωστόσο αποτελεί λογαριθμική έκφραση  $pH = -\log [H^+]$

$\log [H^+] =$  λογαριθμική έκφραση της συγκέντρωσης κατιόντων Υδρογόνου

Για παράδειγμα αυτό σημαίνει πως μεταβολή στη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου σε μονάδα 10, δημιουργεί μεταβολή μίας μονάδας στην κλίμακα pH.

Στην πραγματικότητα τα διαλυμένα ιόντα δημιουργούν ηλεκτρικά φορτία και ενώ σε μακροσκοπικό επίπεδο το διάλυμα μοιάζει ουδέτερο, σε μικροσκοπικό επίπεδο οι αλλαγές είναι σημαντικές. Επομένως, είναι τεχνικά σωστό στην μέτρηση pH να λάβουμε υπόψιν τις ενεργότητες των ιόντων, έτσι θα έχουμε  $pH = -\log a_{H^+}$ .

$\log a_{H^+} =$  λογαριθμική έκφραση της ενεργότητας κατιόντων Υδρογόνου

Η μέτρηση pH βασίζεται στην εξίσωση Nernst και σε ηλεκτρόδια μεμβράνης υάλου κατάλληλα για μετρήσεις διαφοράς δυναμικού.

Η εξίσωση Nernst δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E = E_0 + 2,303 \frac{RT}{nF} \log c$$

### Εξίσωση no 1

$E =$  Δυναμικό μεταξύ Ηλεκτροδίου μέτρησης και αναφοράς, Volts

$E_0 =$  Κανονικό Δυναμικό μεταξύ Ηλεκτροδίου μέτρησης και αναφοράς, Volts

R Παγκόσμια σταθερά αερίων ( $R = 8.314 \text{ Joule mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

T = Θερμοκρασία (K)

F = Σταθερά Faraday ( $F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$ )

n = αριθμός ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση (eq/mol)

c = Συγκέντρωση ιόντος ( mol/l)

Τα ηλεκτρόδια pH είναι υπεύθυνα για την μέτρηση της συγκεκριμένης παραμέτρου και ο σχεδιασμός τους είναι κοινός ανεξαρτήτως κατασκευαστή ή τύπου , με σημαντικές αλλαγές ανάλογα την εφαρμογή μέτρησης και τις απαιτήσεις σε ακρίβεια και επαναληψιμότητα . Στο Σχήμα 2.4 έχουμε την εικόνα ενός ηλεκτροδίου pH και συγκεκριμένα το μέρος που είναι υπεύθυνο για τη μέτρηση .



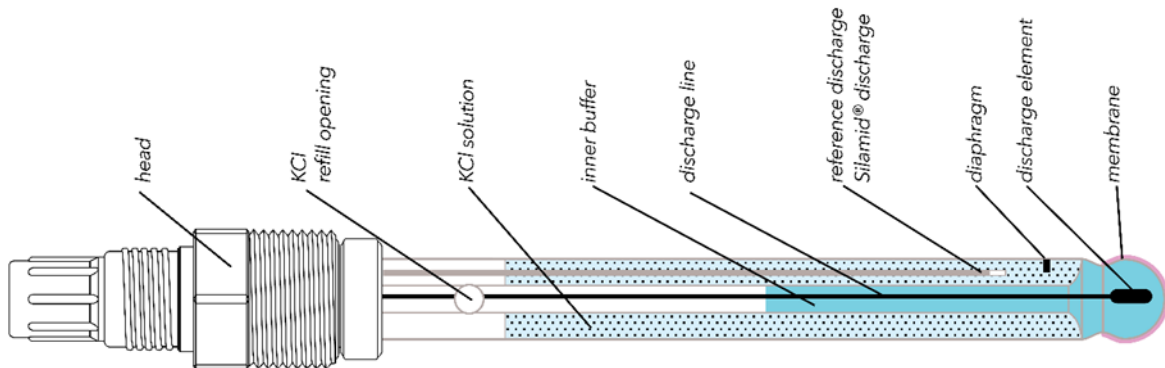
**Σχήμα 2.4 Δομή μεμβράνης ηλεκτροδίου pH ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

Η μέτρηση pH είναι η μέτρηση του δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων όπου ο σημερινός σχεδιασμός επιτρέπει την αναφορά ως ηλεκτρόδια συνδυασμού .

Το ηλεκτρόδιο συνδυασμού φέρει δύο ηλεκτρόδια ενσωματωμένα , μέτρησης και αναφοράς .

Η μεμβράνη του ηλεκτροδίου είναι επιλεκτική σε ιόντα υδρογόνου και η τάση μεταξύ του ηλεκτροδίου και αναφοράς μεταβάλλεται. Αυτό γίνεται καθώς αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού που προκαλείται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα τυπικό ηλεκτρόδιο συνδυασμού



**Σχήμα 2.5 Σχεδιάγραμμα ηλεκτροδίου pH ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

### **2.2.3.Αρχή Online μέτρησης αγωγιμότητας**

Η ειδική αντίσταση αγωγιμότητας και η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ενδείξεις της ικανότητας ενός διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω αυτού. Στα διαλύματα αυτό συμβαίνει εξαιτίας του φορτίου ανιόντων, κατιόντων και των ηλεκτρονίων μετάλλων .

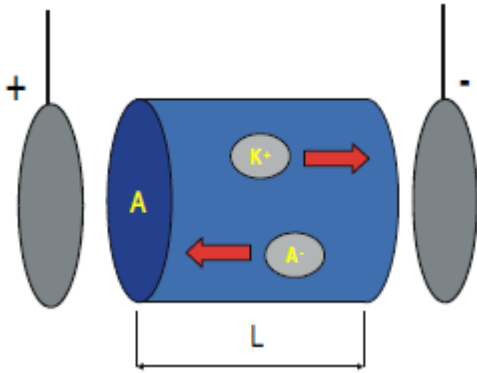
Εάν διάλυμα έχει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα (G) , τότε η ωμική αντίσταση του (R) είναι μικρή .

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της αντίστασης όπως αναπαριστάται από τον τύπο  $G = 1 / R$

#### **Εξίσωση νο 2**

Η αντίσταση έχει μονάδες Ohm και η Αγωγιμότητα σε Siemens ανά cm. Για να μετρήσει κανείς ηλεκτρική αγωγιμότητα, εφαρμόζεται τάση σε ζεύγος ηλεκτροδίων και μετράται το ρεύμα που διαχέεται στο διάλυμα . Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας τα κατιόντα μεταναστεύουν στον αρνητικό πόλο, και τα ανιόντα στον θετικό πόλο, έτσι το διάλυμα ουσιαστικά αναπαριστά τον αγωγό

του ρεύματος. Ένας αγωγός καθορίζεται από το μήκος και τη διατομή του . Όσο μικρότερο το μήκος ή απόσταση των ηλεκτροδίων (L) και μεγαλύτερη η επιφάνεια του (A) , τόσο μεγαλύτερο το ρεύμα σε ίδια συγκέντρωση ηλεκτρολύτη και ίδια τάση .



**Σχήμα 2.6 Σχεδιάγραμμα μέτρησης πυκνωτών αγωγιμότητας ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$G = \gamma \cdot \frac{A}{l} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{A}{l}$$

### Εξίσωση νο 3

**A**= επιφάνεια ηλεκτροδίου,

**L**= απόσταση των ηλεκτροδίων ,

$\gamma$  = ειδική αγωγιμότητα

$\rho$  = ειδική αντίσταση,

$\gamma$  ,  $\rho$  = σταθερές εξαρτώμενες από το υλικό σε μονάδες S/m και  $\Omega \cdot m$  .

Η εξίσωση αυτή απεικονίζει ωστόσο και την σχέση μεταξύ ειδικής αγωγιμότητας  $\gamma$  και αγωγιμότητας G.

Η παρακάτω εξίσωση αναπαριστά τη σταθερά κυψελίδας αγωγιμότητας ( $K$ ) σε μονάδες  $m^{-1}$ .

$$K = \frac{l}{A}$$

#### Εξίσωση νο 4

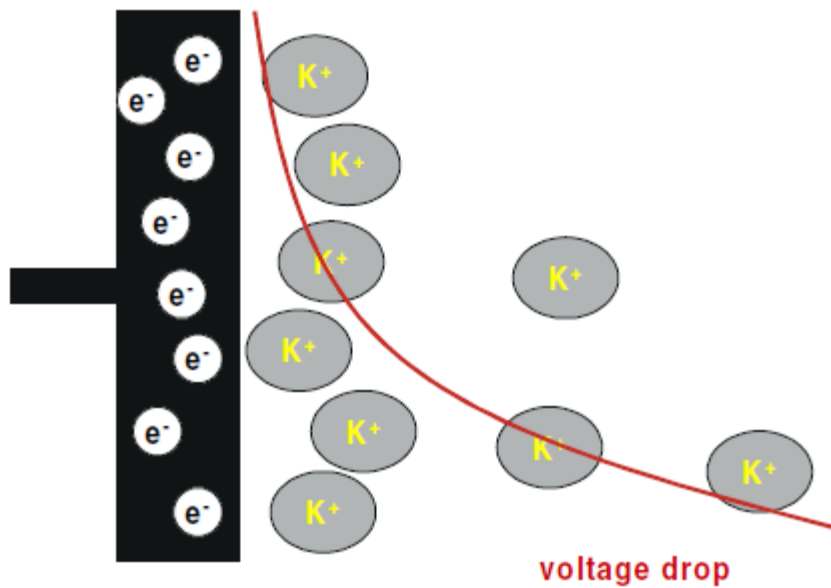
Σε περίπτωση που δίνεται η σταθερά κυψελίδας αγωγιμότητας, η ειδική αγωγιμότητα μπορεί αντίστοιχα να καθοριστεί από την μετρούμενη αγωγιμότητα και κατά συνέπεια να υφίσταται μέτρηση αγωγιμότητας.

Οι αισθητήρες αγωγιμότητας ή όπως αλλιώς ονομάζονται κυψελίδες αγωγιμότητας, αποτελούνται από ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων όπου εφαρμόζεται τάση ανάμεσα τους.

Το ρεύμα διατρέχει ανάμεσα τους και η αγωγιμότητα  $H$  τάση που εφαρμόζεται είναι το δυναμικό που απαιτείται για να μειωθούν τα φαινόμενα πόλωσης.

Η πόλωσης της κυψελίδας μέτρησης αγωγιμότητας περιλαμβάνει φαινόμενα που συμβαίνουν στο διάφραγμα μεταξύ του μετάλλου και του διαλύματος όταν ρεύμα διατρέχει και προφανώς προκαλεί φαινόμενα αλλαγής της αγωγιμότητας του διαλύματος. Εάν τάση εφαρμοστεί στο ηλεκτρόδιο, τότε η επιφάνεια του πυκνωτή σχηματίζει ένα στρώμα εξαιτίας της προσέλκυσης ιόντων στο ηλεκτρόδιο.





**Σχήμα 2.7 Μετατροπή τάσης στην επιφάνεια πυκνωτή αγωγιμόμετρου ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

Αυξάνοντας το βάθος του ηλεκτροδίου στο διάλυμα , η εφαρμοσμένη τάση συνεχίζει να μειώνει, τα φαινόμενα πόλωσης μπορούν να μειωθούν ή να αποφευχθούν εφαρμόζοντας τάση και βελτιώνοντας την επιφάνεια των ηλεκτροδίων.

Για να αντιμετωπιστούν φαινόμενα πόλωσης και συχνότητας μέτρησης δίνεται μεγάλη σημασία στο υλικό κατασκευής του ηλεκτροδίου, έτσι προτιμάται συνήθως γραφίτης ή λευκόχρυσος. Η επιλογή εξαρτάται επιπλέον από το απαιτούμενο εύρος μέτρησης της αγωγιμότητας.

Η συνήθης κυψελίδα αγωγιμότητας αποτελείται από ζεύγος ηλεκτροδίων ή τεσσάρων ηλεκτροδίων σε ακόμα πιο σύγχρονες κατασκευές, όπου έχει ζεύγος ηλεκτροδίων τάσης και επιπλέον ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ωμική τάση να μειώνεται και να καθορίζεται μαζί με το ρεύμα που διαχέεται . Η αγωγιμότητα του δείγματος προέρχεται σαν αποτέλεσμα από την γνωστή ένταση ρεύματος και τη μετρούμενη μείωση της τάσης . Οι κυψελίδες αγωγιμότητας με διπλά ζεύγη ηλεκτροδίων είναι ανθεκτικές σε σφάλματα και επιμολύνσεις από το δείγμα .

#### 2.2.4 Αρχή Online μέτρησης NH<sub>4</sub>-N

Η μέτρηση ιόντων NH<sub>4</sub><sup>+</sup> κυρίως επιτελείται από αισθητήρες με ηλεκτρόδια που φέρουν μεμβράνες εκλεκτικές των συγκεκριμένων ιόντων , η μέτρηση πραγματοποιείται με εμβάπτιση του αισθητήρα στο δείγμα και τον προσδιορισμό διαφοράς δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίου αναφοράς και μέτρησης η οποία οφείλεται στην παρουσία των προσδιοριζόμενων ιόντων στο διάλυμα .

Η ιοντοεπιλεκτική μέτρηση είναι αναλυτική μέθοδος με συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, όπως γρήγορες και αξιόπιστες μετρήσεις, ακριβή αποτελέσματα σε δείγματα με μεγάλη θολερότητα ή άλλα δείγματα όπου η φασματοσκοπία δεν μπορεί άμεσα και εύκολα να λύσει λόγω υψηλής απορρόφησης παρεμποδίζοντων ενώσεων ή/και ενώσεων που δεν απορροφούν σημαντικά στο επίπεδο UV-VIS .

Ωστόσο οι αισθητήρες εκλεκτικοί ιόντων έχουν και πολλές προκλήσεις να αντιμετωπίσουν, καθώς απαιτούν συχνά συντήρηση, καθαρισμό της μεμβράνης και συνήθη σφάλματα μέτρησης μεγέθους 2-5% λόγω γήρανσης της μεμβράνης και φθοράς / κατανάλωσης του ηλεκτρολύτη

Η μέτρηση ιόντων βασίζεται όπως και στην μέτρηση του pH, σε αλληλεπίδραση των ιόντων του διαλύματος με την επιφάνεια/ μεμβράνη του ηλεκτροδίου (το ηλεκτρόδιο pH φέρει μεμβράνη που είναι εκλεκτική σε ιόντα Υδρογόνου ) . Έτσι τα ιόντα συγκεντρώνονται στην επιφάνεια/μεμβράνη του ηλεκτροδίου και επιπλέον διαχέονται ιόντα από την μεριά του ηλεκτροδίου στο διάλυμα . Το ηλεκτρόδιο είναι ένας ηλεκτρικός αγωγός όπου ουσιαστικά το ένα μέρος βυθίζεται στο δείγμα και το άλλο μέρος είναι συνδεδεμένο με ένα βολτόμετρο .

Τα ιόντα του δ/τος φέρουν ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και έτσι δημιουργούν τάση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του δ/τος , στην τεχνολογία μέτρησης ηλεκτροδίων εκλεκτικών

ιόντων το μέγεθος αυτής της τάσης είναι σχετιζόμενη με τη συγκέντρωση ιόντων στο δ/μα που βρίσκεται υπό μέτρηση .

Το δεύτερο ηλεκτρόδιο είναι ηλεκτρόδιο αναφοράς, και συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο όπως το ηλεκτρόδιο μέτρησης και έτσι προκαλεί διαφορά τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων . Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου μέτρησης είναι επικαλυμμένη με μεμβράνη που είναι εκλεκτική στα ιόντα που επιθυμούμε να μετρήσουμε κάθε φορά και που αλληλεπιδρά μόνο με τα συγκεκριμένα ιόντα .

Οι σύγχρονοι αισθητήρες εκλεκτικών ιόντων βασίζονται τα ανωτέρω δύο ηλεκτρόδια μέτρησης και αναφοράς πλέον τα συμπεριλαμβάνουν σε ένα ενιαίο σχεδιασμό που καλείται ηλεκτρόδιο συνδυασμού.

Η ιοντοεπιλεκτική μέτρηση αποτελεί το αποτέλεσμα της μετρούμενης τάσης που μεταβάλλεται λόγω συγκέντρωσης ιόντων . Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποδίδεται μαθηματικά από την εξίσωση Nernst

$$E = E_0 + 2,303 \frac{RT}{nF} \log c$$

#### **Εξίσωση νο 5**

$E$  = Δυναμικό μεταξύ Ηλεκτροδίου μέτρησης και αναφοράς , Volts

$E_0$  = Κανονικό Δυναμικό μεταξύ Ηλεκτροδίου μέτρησης και αναφοράς , Volts

$R$  Παγκόσμια σταθερά αερίων ( $R = 8.314 \text{ Joule mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$T$  = Θερμοκρασία (K)

$F$  = Σταθερά Faraday ( $F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$ )

$n$  = αριθμός ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση (eq/mol)

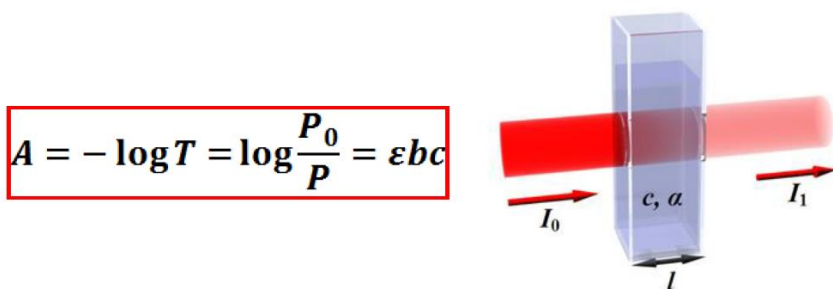
$c$  = Συγκέντρωση ιόντος ( mol/lit)

## 2.2.5 Αρχή μέτρησης Online Φασματοσκοπίας

### 2.2.5.1. Online Φασματοσκοπία – Βασικές Αρχές μέτρησης

Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες αποτελούν UV-VIS φασματοφωτόμετρα , σύμφωνα με την βασική αρχή της φασματοσκοπίας όπου η μετρούμενη ουσία ή προσδιοριζόμενο συστατικό αλληλεπιδρά με την ακτινοβολία του οργάνου. Η αλληλεπίδραση αυτή αφορά την απορρόφηση μέρους της ακτινοβολίας η οποία και εκφράζεται ως συγκέντρωση της υπό προσδιορισμό ουσίας .

Η γενική αρχή της φασματοσκοπίας και συγκεκριμένα η χρήση του νόμου Beer-Lambert είναι η βασική μέθοδος για κάθε φασματοφωτόμετρο και επιπλέον για τα online φασματοφωτόμετρα. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η αποτύπωση του νόμου Lambert-Beer, όπου η μέτρηση απορρόφησης αποδίδεται λογαριθμικά με την διαπερατότητα ή την αναλογία ακτινοβολούμενης ισχύος δείγματος και αναφοράς .



**Σχήμα 2.8** Νόμος Lambert-Beer & απεικόνιση απορρόφησης από διάλυμα

(Skoog "Principles of Instrumental Analysis" edition 1992)

Όπου οι παράμετροι

$A$ = Απορρόφηση

$-\log T$  = λογαριθμική έκφραση της διαπερατότητας

$P, P_0$  = Ακτινοβολούμενη ισχύς δείγματος & Ακτινοβολούμενη ισχύς αναφοράς

$b$  = μήκος διαδρομής της ακτινοβολίας

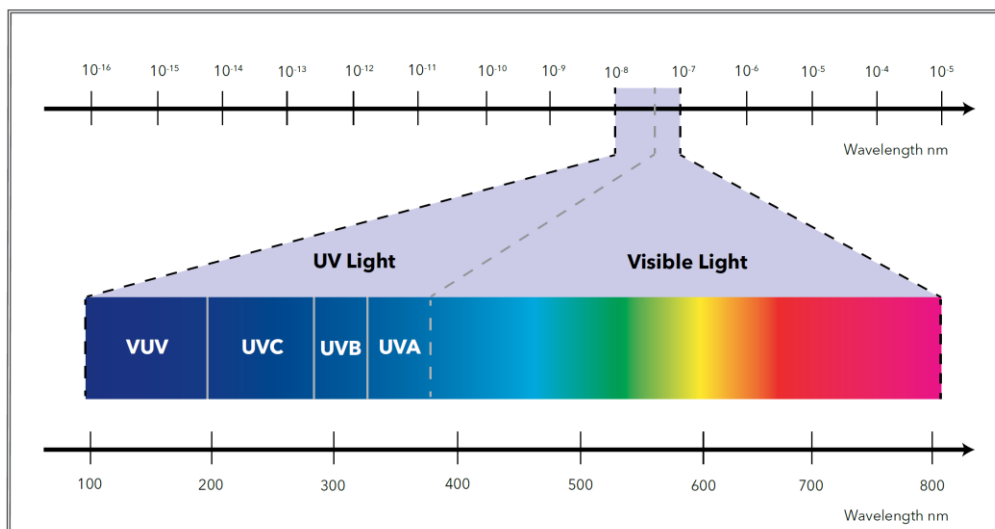
$\epsilon$  = γραμμομοριακή απορροφητικότητα

$c$  = συγκέντρωση προσδιοριζόμενης ουσίας

Ακτινοβολία δέσμης φωτός που παράγεται από λυχνία κατευθύνεται με συγκεκριμένη αρχική ισχύ  $P_0$  σε υδατικό διάλυμα με την υπό προσδιορισμό ουσία σε ορισμένη συγκέντρωση. Το διάλυμα απορροφά μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό και έχει ισχύ  $P$ , μικρότερη από την αρχική .

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο διάλυμα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της υπό προσδιορισμό ουσίας . Επομένως, όσο πιο πυκνό είναι το διάλυμα τόσο περισσότερη ακτινοβολία απορροφάται .

Η ακτινοβολία που παράγεται από το όργανο είναι συγκεκριμένου μήκους κύματος  $\lambda$  ή στην περίπτωση φασματοφωτομέτρου ανήκει σε ένα εύρος μήκους κύματος. Στις περιπτώσεις που υπάρχει απαίτηση για πληρέστερη εικόνα για το μετρούμενο διάλυμα , καλό είναι να εφαρμόζονται ακτινοβολίες με όσο γίνεται μεγαλύτερο εύρος μήκους κύματος .

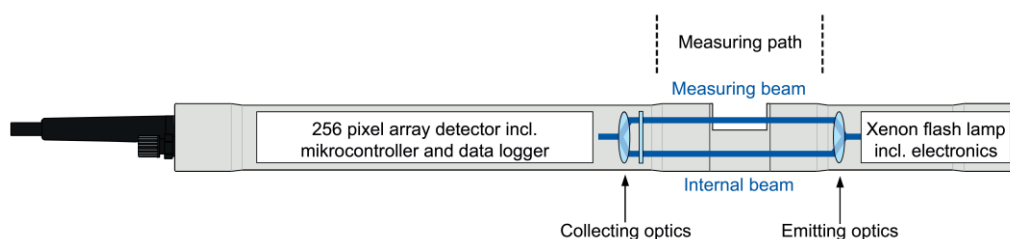


**Σχήμα 2.9 Φάσμα ορατού υπεριώδους (Skoog “Principles of Instrumental Analysis” edition 1992)**

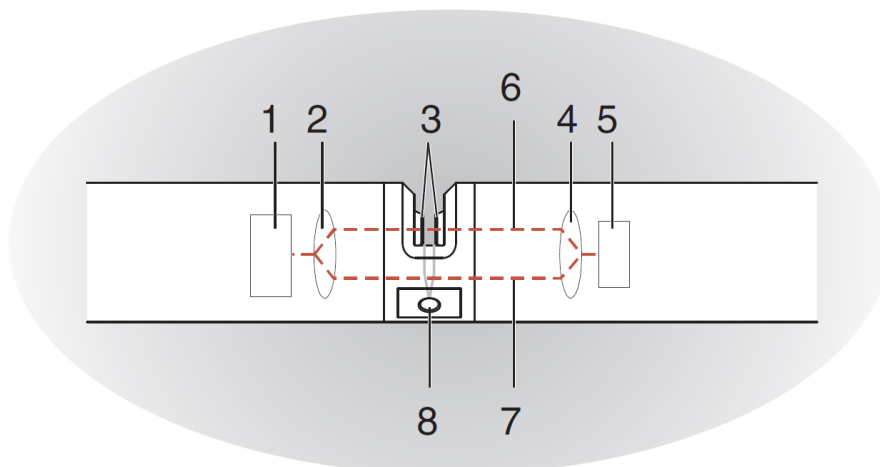
Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην εφαρμογή και φυσικά στην επεξεργασία του αποτελέσματος, αρκεί να κατανοηθεί πως κάθε μήκος κύματος αντιστοιχεί σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που απορροφάται από τα μόρια της ουσίας που κάθε φορά βρίσκονται προς μέτρηση .

Με δυνατότητα να εξαλειφθούν παρεμποδίσσεις που υπάρχουν σε συγκεκριμένα μήκη κύματος αλλά και ουσίες που πιθανόν απορροφούν στις ίδιες περιοχές .

Ο Online αισθητήρας σχεδιαστικά παρουσιάζεται ως εξής :



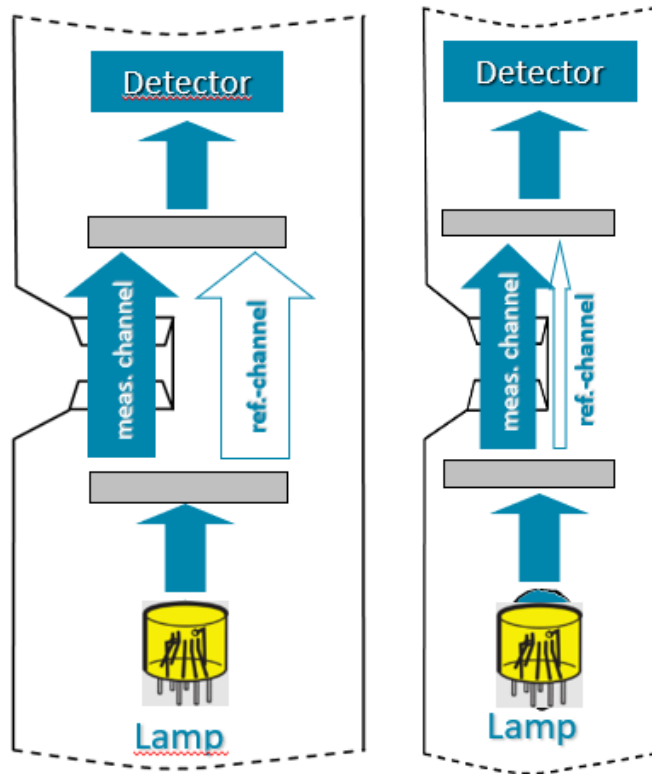
**Σχήμα 2.10 Σχεδιάγραμμα οπτικού συστήματος φασματοφωτομετρικού αισθητήρα ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας S-CAN )**



**Σχήμα 2.11 Οπτικό σύστημα φασματοφωτομετρικού αισθητήρα** (1 Πηγή ακτινοβολίας, 2 Επιλογέας μήκους κύματος, 3 Περιοχή μέτρησης δείγματος, 4 Επιλογέας μήκους κύματος, 5 Ανιχνευτής, 6 Ακτινοβολία μέτρησης, 7 Ακτινοβολία αναφοράς, 8 Σύνδεση για πιθανό εξωτερικό σύστημα καθαρισμού)

**( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

Ο αισθητήρας φέρει πηγή ακτινοβολίας φωτός, παράθυρο οπτικής διαδρομής το οποίο επιτρέπει την επαφή της ακτινοβολίας με το δείγμα και ανιχνευτή για να μετρήσει την ισχύ της ακτινοβολίας που εξέρχεται από το δείγμα. Η πηγή ακτινοβολίας κατευθύνει δέσμη φωτός στο παράθυρο οπτικής διαδρομής με την υπό προσδιορισμό ουσία, την ίδια στιγμή δεύτερη ακτινοβολία φωτός προσπίπτει στον ανιχνευτή χωρίς να διαπερνά το παράθυρο οπτικής διαδρομής, αυτό είναι το σύστημα αναφοράς . Ο ανιχνευτής διαβάζει στο τέλος την ακτινοβολία φωτός που συλλέγεται από συγκεκριμένες φωτοδιόδους δύο διαφορετικά σήματα απορρόφησης ακτινοβολίας, από την πρόπτωση στο διάλυμα και χωρίς αυτό.



**Σχήμα 2.12 Σύστημα μέτρησης και αναφοράς πηγής δεσμής**

**( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός επιτρέπει το οπτικό σύστημα να αλληλεπιδρά με τον ίδιο τρόπο στην μέτρηση και στην αναφορά, να υπάρχουν τα ίδια χαρακτηριστικά μέτρησης με το πέρασμα του χρόνου, να εξασφαλίζεται υψηλή ακρίβεια, επαναληψιμότητα ,σταθερότητα στα αποτελέσματα και αντισταθμίσεις σε αποκλίσεις ενεργειακές και ακτινοβολίας .



### 2.2.5.2. Online Φασματοσκοπία – Αρχή λειτουργίας, Παραμετροποίηση αισθητήρα

Οι Online UV-Vis αισθητήρες πραγματοποιεί μετρήσεις φάσματος σε 200-720 nm, των ακόλουθων παραμέτρων: COD (Chemical Oxygen demand), BOD (Biological Oxygen Demand), TOC (Total Organic Carbon), SAC (Spectral Absorbent Coefficient), UVT ( UltraViolet Transmission), TS (Total Solids), NO<sub>3</sub>-N (Nitrate Nitrogen), NO<sub>2</sub>-N ( Nitrite Nitrogen), NO<sub>x</sub>-N ( Nitrogen Oxidation forms), COD<sub>diss</sub> (Chemical Oxygen Demand dissolved).

Συγκεκριμένα τα Online φασματοφωτόμετρα χρησιμοποιήθηκαν στην αρχή των εφαρμογών τους για την εκτίμηση του οργανικού φορτίου σε απορροφήσεις μήκους κύματος στα 254nm, καθώς εκεί η απορρόφηση συσχετίζεται σε μεγάλο και σημαντικό βαθμό με την συγκέντρωση φυσικής οργανικής ύλης (Natural Organic Matter – NOM). Γρήγορα η τεχνολογία αναπτύχθηκε καθώς σε απορροφήσεις μονού μήκους κύματος υπάρχει πεπερασμένο όριο εφαρμογών, αρκετές ολισθήσεις αποτελεσμάτων αλλά και μεγάλα σφάλματα μετρήσεων. Το πιο σημαντικό είναι η έλλειψη ολοκληρωμένης εικόνας για το δείγμα και συγκεκριμένα το φασματικό «αποτύπωμα». Πλέον έχουν αναπτυχθεί Online φασματομέτρα – φασματοφωτόμετρα με τις εξής επιλογές πηγών φωτός:

A. Διπλού μήκους κύματος, το δεύτερο μήκος κύματος χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση θολερότητας και ολικών στερεών

B. Μετρήσεις σε συγκεκριμένα μήκη κύματος στο Ορατό με λυχνίες LED, και ευρεία χρήση μοντέλων αλγορίθμων για τη βελτίωση της μέτρησης.

Γ. Μετρήσεις σε ολόκληρη την περιοχή του UV (200-400nm) ή UV/VIS (200-720nm) με χρήση αναπτυγμένων αλγορίθμων

Στην πιλοτική εφαρμογή SMART Plant χρησιμοποιήσαμε την ανωτέρω Γ επιλογή, αισθητήρα Online UV-VIS με ενσωματωμένη ανεπτυγμένη χρήση αλγορίθμων προκειμένου να υπάρχουν απευθείας τιμές και συγκεντρώσεις παραμέτρων.

Συγκεκριμένα, το δείγμα κάθε είδους (λύματα, νερό, υγρά απόβλητα) αποτελείται από μείγμα διαφόρων οργανικών ενώσεων. Η χρήση Online UV-VIS φασματοσκοπίας με μέτρηση σε ολοκληρωμένο φασματικό εύρος δίνει ένα φάσμα απορροφήσεων σύμφωνα με τα συστατικά του δείγματος. Το συγκεκριμένο φάσμα παρέχει αρκετή πληροφορία και ενδεχομένως κορυφές που παρουσιάζουν αλληλοεπικαλύψεις, καθώς υπάρχουν ενδεχομένως συγγενείς οργανικές ενώσεις που απορροφούν σε κοντινά μήκη κύματος.

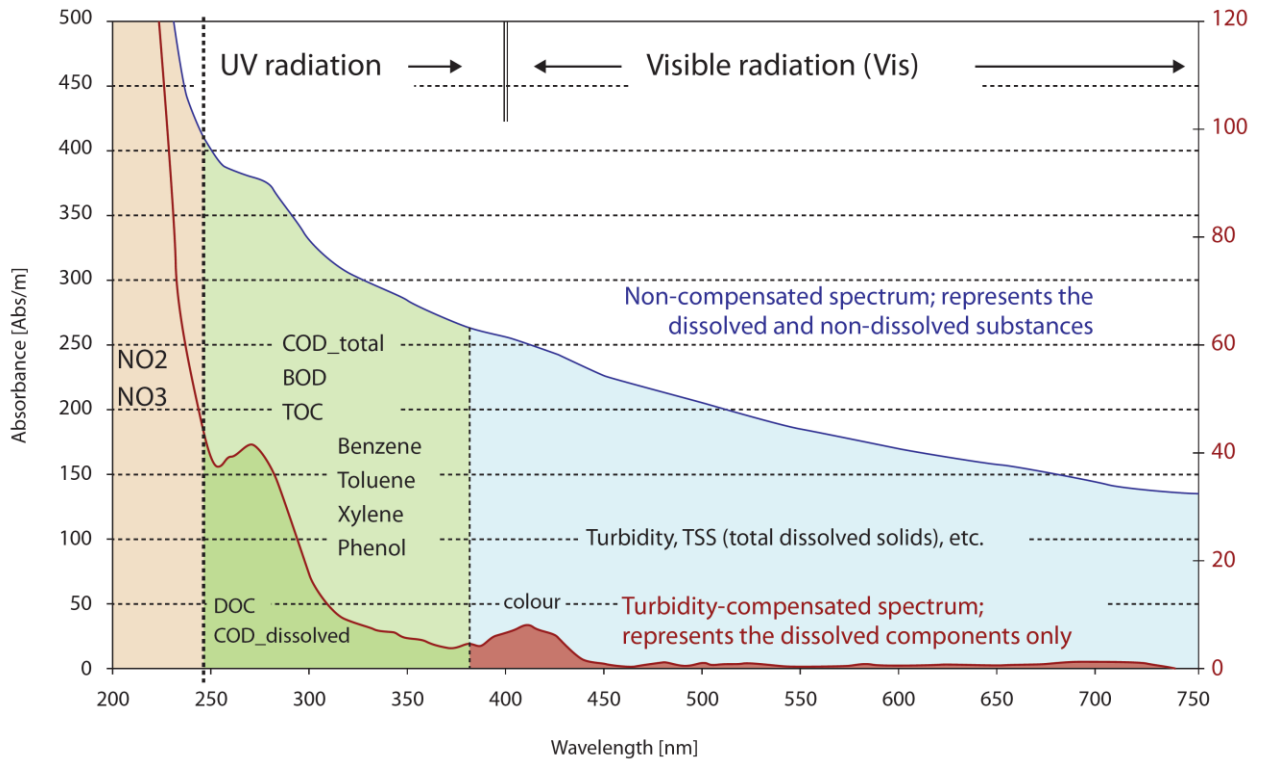
Ωστόσο υπάρχουν συγκεκριμένες περιοχές με αναμενόμενες απορροφήσεις που δίνουν ισχυρά σήματα και παραμετρικές τιμές απορροφήσεων ώστε ο αλγόριθμος να κάνει σύγκριση του μετρούμενου φάσματος και να αποδώσει συγκεκριμένες τιμές συγκεντρώσεων σε παραμέτρους όπως COD, TOC, BOD, DOC.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται το φάσμα που λαμβάνεται από τις μετρήσεις του αισθητήρα σε ένα τυπικό δείγμα βιολογικού καθαρισμού (εισόδου ή εξόδου ή αερισμού), σημειωμένες οι περιοχές που σύμφωνα με έρευνα των κατασκευαστών απορροφούν συγκεκριμένες ενώσεις ή παράμετροι.

Ανεξάρτητα με την υπό εξέταση παράμετρο, το φάσμα χρησιμεύει ως μέτρηση στη διαμόρφωση του αλγόριθμου που δίνει το αποτέλεσμα της απευθείας συγκέντρωσης, καθώς ενσωματώνει παραμέτρους χρήσιμες για το δείγμα όπως η θολερότητα, τα ολικά στερεά, το χρώμα και γενικώς το φασματογραφικό αποτύπωμα του διαλύματος.

Επιτρέπει την δημιουργία πληρέστερης εικόνας για το δείγμα που βρίσκεται προς μέτρηση, καθώς ενσωματώνει μετρήσεις απορροφήσεων σε πολλαπλά μήκη κύματος αποδίδοντας ένα ολοκληρωμένο προφίλ στο δείγμα και ιδιαίτερα για συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου, όπως είναι το COD, TOC, DOC.

Οι μετρήσεις σε ολόκληρο το φάσμα βοηθούν στην απόδοση πιο αξιόπιστου αποτελέσματος καθώς όπως προαναφέρθηκε και παρατηρείται στο παρακάτω γράφημα ενσωματώνονται μετρήσεις απορροφήσεων σε περιοχές μήκους κύματος με αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον και συνεισφορά στη διαμόρφωση ποιότητας του δείγματος .

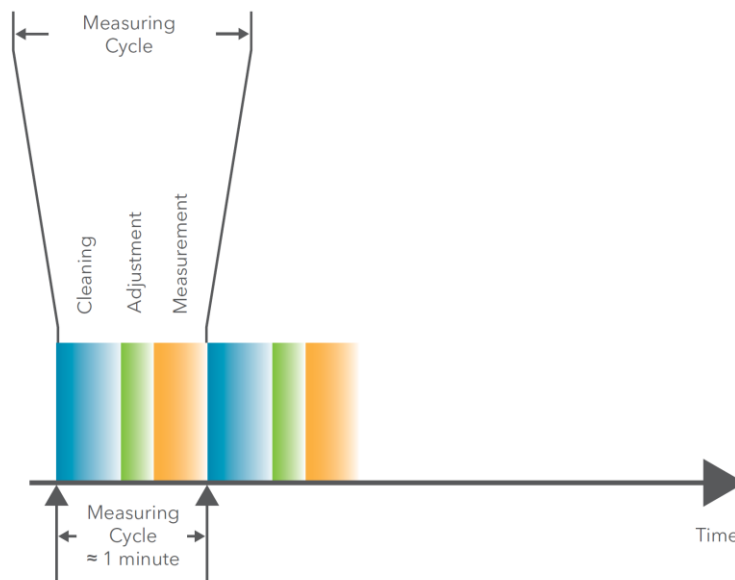


**Σχήμα 2.13** Απεικόνιση μετρήσεων φάσματος UV-VIS αισθητήρα( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας S-CAN )

Οι online φασματοσκοπικές αναλύσεις απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή τόσο στην εγκατάσταση αλλά και στην έκφραση του αποτελέσματος., Οι μετρήσεις φάσματος πραγματοποιούνται στον εσωτερικό ελεγκτή του αισθητήρα κάθε λεπτό με δυνατότητα έκφρασης αποτελέσματος συγκέντρωσης σε κάθε λεπτό της ώρας , φυσικά υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης ώστε η συγκέντρωση να προέρχεται από μεγαλύτερη διάρκεια. Η μέτρηση συγκέντρωσης κάθε λεπτό προέρχεται από εκατοντάδες μετρήσεις φάσματος που πραγματοποιούνται και συνυπολογίζονται στον αλγόριθμο, αντιστοιχίζονται με τις

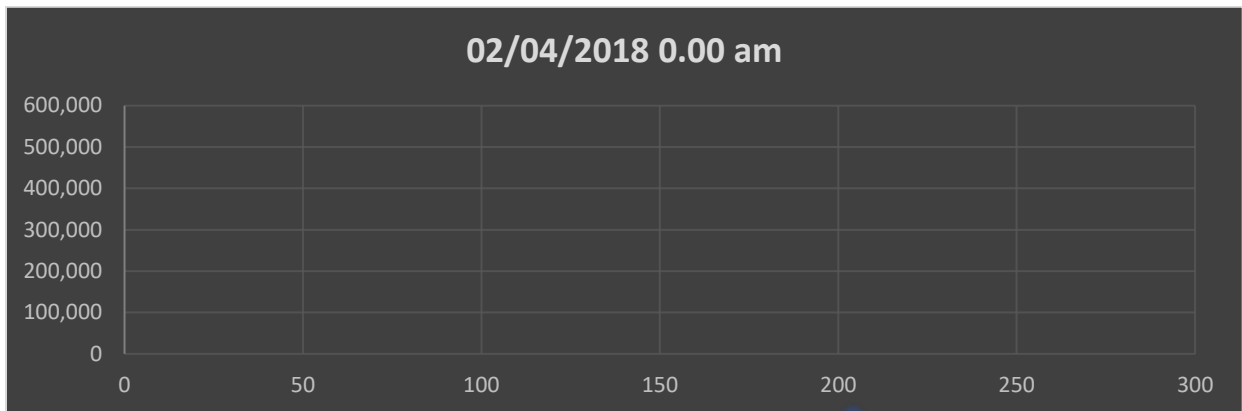
«πρότυπες» καμπύλες απορρόφησης που υπάρχουν στον αισθητήρα και αντισταθμίζονται με απορροφήσεις σε συγκεκριμένα μήκη κύματος όπου αποτελούν δείκτες ποιότητας της εφαρμογής ή του δείγματος, για παράδειγμα υψηλός χρωματισμός, μεγάλη θολερότητα, υψηλή περιεκτικότητα διαλυμένων αλάτων κ.ο.κ

Οι online μετρήσεις φασματοσκοπίας έχουν συγκεκριμένα βήματα χρονικά προκειμένου να ολοκληρωθεί η μέτρηση αλλά και να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία . Έτσι σύμφωνα με την τεχνολογία που φέρει ο κάθε αισθητήρας, υπάρχουν διαχωρισμένα βήματα όπως αποδίδονται σχηματικά παρακάτω και περιλαμβάνουν το χρόνο ρύθμισης όπου συγκεκριμένα αναφέρεται στην εκπομπή ακτινοβολίας και αρχές τεχνολογίας Doppler προκειμένου να εξακριβωθούν από τα μοντέλα τυχόν υψηλές συγκεντρώσεις ή παρεμποδίζοντα σωματίδια, στη συνέχεια η μέτρηση και τέλος ο καθαρισμός του οπτικού παραθύρου με τεχνολογία υπερήχων ή συνδυασμός με πεπιεσμένο αέρα .



Σχήμα 2.14 Διακριτά σημεία χρόνου μέτρησης UV-VIS αισθητήρα ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )

Σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης είτε σε πραγματικό χρόνο είτε αργότερα σε μορφή υπολογιστικού φύλλου των μετρήσεων απορρόφησης και συγκεκριμένα το φάσμα του δείγματος που βρίσκεται σε μέτρηση. Παράδειγμα τυπικού φάσματος αποτελεί το παρακάτω διάγραμμα / φάσμα



**Σχήμα 2.15 Φασματοφωτομετρική μέτρηση δείγματος στραγγιδίων αφυδάτωσης**

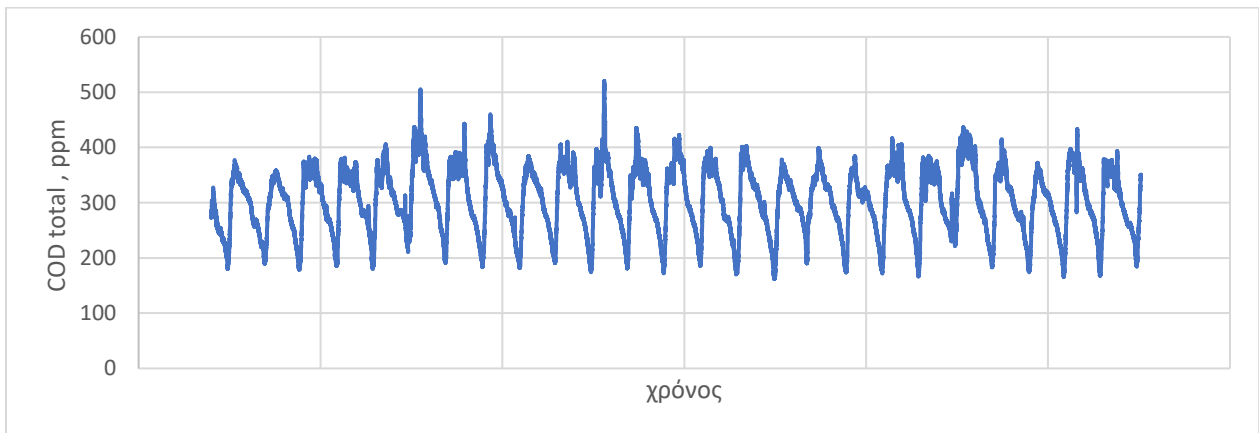
#### 2.2.5.3. Online Φασματοσκοπία – Σύγκριση Online αισθητήρα με εργαστηριακά δεδομένα

Οι Online φασματοσκοπικοί αισθητήρες αποτελούν αισθητήρες με αυξανόμενο ρυθμό καινοτομίας και τεχνολογίας σε θέματα μέτρησης και απόδοσης της παραμετρικής τιμής και πλέον υιοθετούνται περισσότερο σε διάφορες εφαρμογές και εγκαταστάσεις μονάδων επεξεργασίας. Ωστόσο η φασματοφωτομετρική ανάλυση αποτελεί ιδιαίτερη ανάλυση καθώς υπεισέρχονται διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την μέτρηση τόσο σε εργαστηριακό επίπεδο και πολύ περισσότερο σε πραγματικό χρόνο εντός της εγκατάστασης .

Η απόδοση συγκέντρωσης οργανικού φορτίου ή αντίστοιχης παραμέτρου προερχόμενη από φασματοσκοπική ανάλυση δείγματος σε πραγματικό χρόνο εντός της εγκατάστασης αποτελεί πρόκληση καθώς αρκετές παράμετροι όπως η ροή, φυσαλίδες, υδραυλική παροχή δύνανται να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό το αποτέλεσμα και την αξιοπιστία / επαναληψιμότητα του.

Η συγκεκριμένη επιρροή του αποτελέσματος είναι είτε άμεση ή έμμεση καθώς οι φασματοσκοπικοί αισθητήρες είναι κυρίως αισθητήρες βασισμένοι σε οπτική μέτρηση, τότε οι φυσαλίδες ή δίνες ροής στο οπτικό παράθυρο δύνανται να δημιουργήσουν προβλήματα. Έπειτα δείγματα ιδιαίτερα χρωματισμένα είτε από παρουσία και προσμείξεις ενώσεων ή εξαιτίας της προέλευσης τους όπως στραγγίδια, δύνανται να επηρεάσουν την αλγοριθμική έκφραση της συγκέντρωσης του αποτελέσματος καθώς απορροφούν ιδιαίτερα υψηλά στο ορατό πεδίο του αισθητήρα .

Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε online μετρήσεις ολικού COD των εισερχόμενων λυμάτων ολικού σε εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Με τον εν λόγω αισθητήρα φαίνεται η διακύμανση του ολικού COD στην είσοδο της ΕΕΛ



**Σχήμα 2.16 Διάγραμμα Online μέτρησης ολικού COD πρωτοβάθμιας εκροής ΕΕΛ**

**( άξονας x χρόνος, άξονας y συγκέντρωση CODtotal σε ppm )**

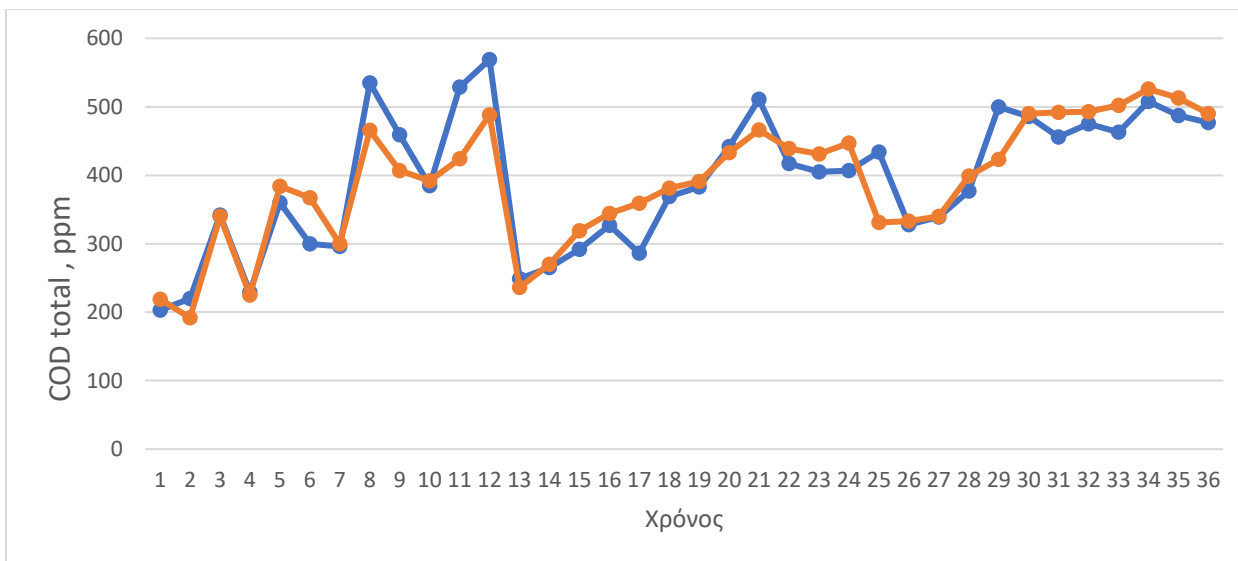
Στο ανωτέρω γράφημα ο Online αισθητήρας βοήθησε το εργαστήριο με περισσότερες μετρήσεις και έδωσε συνολική εικόνα της εισόδου της εγκατάστασης , ώστε ακόμα και αν υπάρχουν θεωρητικά τυπικές αποκλίσεις της τάξεως  $\pm 20\%$  διακρίνεται άμεσα ο γενικός μέσος όρος της τιμής COD στην είσοδο και φυσικά άμεσα διαπιστώνονται οι ημέρες με τα υψηλότερα φορτία.

Για παράμετρος όπως είναι το COD ή TOC όπου εργαστηριακά απαιτούνται αρκετές ώρες για την διαχείριση του δείγματος και την ανάλυση του , η άμεση απεικόνιση Online αποτελεσμάτων και η σύνδεση του αισθητήρα με SCADA στις μονάδες επεξεργασίας αποτελεί σύγχρονο εργαλείο απεικόνισης δεδομένων οργανικού φορτίου .

Το ζήτημα στις Online φασματοσκοπικές αναλύσεις είναι η συσχέτιση των παραμετρικών τιμών του αισθητήρα με τις τιμές του εργαστηρίου και η εναρμόνιση μεταξύ τους, έτσι ώστε να υπάρχουν αξιόπιστα αποτελέσματα για το σύνολο ή μεγάλο ποσοστό των Online τιμών όπου οι εργαστηριακές αναλύσεις δεν είναι διαθέσιμες ή δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν .

Στο Σχήμα 2.1 δίνονται τα αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σύγκριση με τις τιμές του Online αισθητήρα για την παραμετρική τιμή του ολικού COD σε λύματα εισόδου σε ΕΕΛ.

Παρατηρείται ότι οι τιμές του Online αισθητήρα και των εργαστηριακών έχουν παρόμοιες διακυμάνσεις του ολικού COD, και ενώ θεωρείται το εργαστήριο ως αναφορά, τότε συμπεραίνεται πως ο Online φασματοσκοπικός ακολουθεί τις τιμές συγκεντρώσεων του εργαστηρίου και σε κάποια σημεία σχεδόν ταυτίζεται. Συμπεραίνεται πως ο συγκεκριμένος αισθητήρας αποδίδει αρκετά αξιόπιστα και επαναλήψιμα αποτελέσματα στο σύνολο των καταγραφών του και ιδιαίτερα για τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και όπου οι εργαστηριακές μετρήσεις δεν ήταν δυνατές . Με απλή στατιστική ανάλυση σε δείγμα εισόδου έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά λύματα , ο συγκεκριμένος Online αισθητήρας παρουσίασε τυπική απόκλιση στα επίπεδα του  $\pm 2\%$  από τα εργαστηριακά αποτελέσματα και απρόσκοπτη λειτουργία, με αποτέλεσμα να ενισχύσει την εμπιστοσύνη για τις Online παραμετρικές τιμές ολικού COD σε ώρες που δεν υπήρχαν αντίστοιχα εργαστηριακά αποτελέσματα .



**Σχήμα 2.17** Διάγραμμα Online μέτρησης COD σε εγκατάσταση εισόδου Αστικών λυμάτων

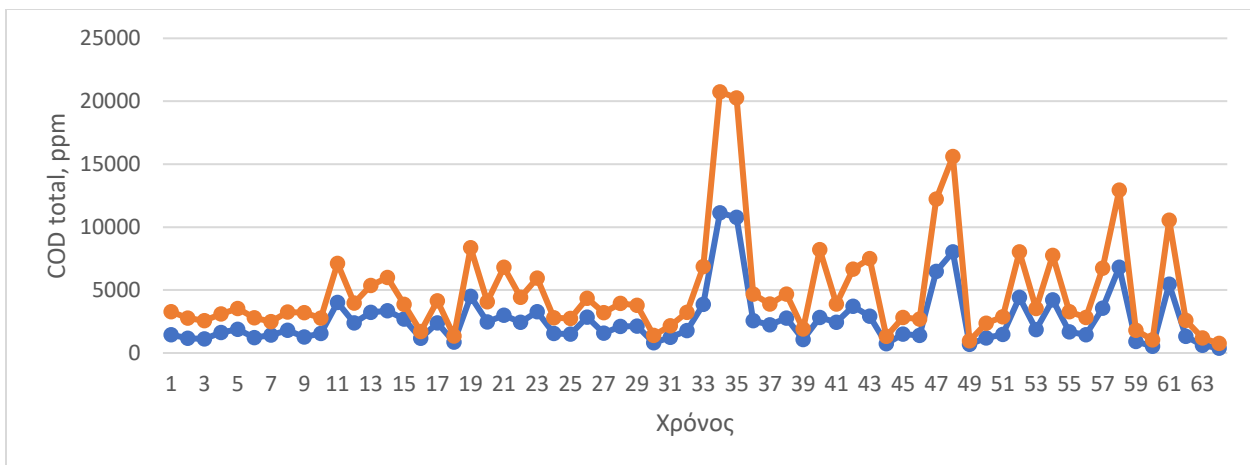
( άξονας x χρόνος, άξονας y συγκέντρωση CODtotal σε ppm )

( Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί σε εργαστηριακή μέτρηση / Η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχεί σε τιμές Online COD )

Η online μέτρηση ολικού COD είναι πολύ σημαντική για την παρακολούθηση της επεξεργασίας βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Στο Σχήμα 2.1, παρατίθενται οι εργαστηριακές μετρήσεις του ολικού COD που πραγματοποιήθηκαν σε αντιστοίχιση με τις Online τιμές. Προκειμένου να διαπιστωθεί αν θα έπρεπε να προχωρήσουμε σε παραμετροποίηση του Online αισθητήρα πραγματοποιήθηκε μια σειρά από εργαστηριακές μετρήσεις σε τακτικά χρονικά διαστήματα και με δειγματοληψία πάντα δίπλα και κοντά στον αισθητήρα .

Το γράφημα αποδεικνύει πως έχουμε αρκετά καλή συσχέτιση των δεδομένων και αντίστοιχα πολύ παρόμοιες ενδείξεις σε γεγονότα υψηλών συγκεντρώσεων όπου αυξήθηκε η τιμή του Online COD εξαιτίας εισόδου υψηλού οργανικού φορτίου .





**Σχήμα 2.18** Διάγραμμα Online μέτρησης COD σε εγκατάσταση εισόδου Βιομηχανικών αποβλήτων ( άξονας x χρόνος, άξονας y συγκέντρωση CODtotal σε ppm / Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί σε εργαστηριακή μέτρηση / Η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχεί σε τιμές Online COD )

Στην περίπτωση μέτρησης σε Βιομηχανικά υγρά απόβλητα υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το σημαντικό σε σχέση με την παράμετρο του οργανικού φορτίου είναι η κατανόηση της μονάδας για την ποιότητα εισερχόμενων αποβλήτων αλλά και ο χρονικός προσδιορισμός σύμφωνα με ημερολόγια παροχής έτσι ώστε να σχεδιαστεί ένα πλάνο συσχέτισης με τα εργαστηριακά δεδομένα .

Οι μετρήσεις Online φασματοσκοπίας είτε αναφέρονται σε δείγματα τυπικών αστικών λυμάτων είτε σε βιομηχανικά απόβλητα απαιτούν συστηματική παρακολούθηση καθώς καθίστανται σχετικά «εκτεθειμένες» σε σφάλματα , τυπικά ή μη-τυπικά. Ωστόσο είναι κάτι που πρέπει να διερευνηθεί με συνέπεια και πάντα με γνώμονα τις τυπικές αποκλίσεις και σφάλματα του εργαστηρίου. Πιθανά σφάλματα μετρήσεων σε Online φασματοσκοπία έχουν να κάνουν με τον τρόπο και το σημείο εγκατάστασης του αισθητήρα , το δείγμα με υψηλή συγκέντρωση στερεών , αδυναμία αρκετές φορές αντιστάθμισης ιόντων που ενδεχομένως επιβαρύνουν χρωματικά το δείγμα αλλά επηρεάζουν και το εργαστηριακό αποτέλεσμα .

### 2.2.6 Μέτρηση αέριων εκπομπών θερμοκηπίου

Τις τελευταίες δεκαετίες γίνονται προσπάθειες αποτίμησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε ΕΕΛ ώστε να υπολογιστεί το ανθρακικό αποτύπωμα. Τα βασικά αέρια του θερμοκηπίου είναι το CO<sub>2</sub> (διοξείδιο του άνθρακα), το CH<sub>4</sub> (μεθάνιο) & το N<sub>2</sub>O (υποξείδιο του αζώτου) τα οποία παράγονται και εκπέμπονται σε διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων .

Το CO<sub>2</sub> συνδέεται με τις βιοχημικές διεργασίες της ΕΕΛ και την κατανάλωση ενέργειας. Κατά την διάρκεια της αναερόβιας επεξεργασίας έχουμε παραγωγή CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub> ως βιοαέριο το οποίο ανακτάται ενεργειακά.

Το αέριο N<sub>2</sub>O είναι ένα φυσικό ενδιάμεσο προϊόν αποτέλεσμα των βιοχημικών διεργασιών της νιτροποίησης / απονιτροποίησης , είτε κατά την διάρκεια της μερικής οξείδωσης της NH<sub>4</sub><sup>+</sup> σε NO<sub>2</sub>-N είτε στην απονιτροποίηση κατά την παραγωγή ελεύθερου αερίου N<sub>2</sub> . Η κυρίαρχη παραγωγική οδός του N<sub>2</sub>O είναι κατά την νιτροποίηση όπου τα AOB σε συνθήκες περιορισμένου οξυγόνου ανάγουν τα NO<sub>2</sub>- σε N<sub>2</sub>O , επιπλέον στο στάδιο της απονιτροποίησης όπου δύνανται να έχουμε χαμηλές συγκεντρώσεις DO μπορεί να έχουμε την αναχαίτιση αναγωγής του N<sub>2</sub>O σε N<sub>2</sub> .

#### 2.2.6.1 Αισθητήρας μέτρησης CO<sub>2</sub> & CH<sub>4</sub>

Η τεχνολογία μέτρησης των αερίων CO<sub>2</sub> & CH<sub>4</sub> σε εφαρμογές υγρών αποβλήτων είναι παρόμοια και η διαφοροποίηση έγκειται στην παράμετρο παρακολούθησης . Ο αισθητήρας όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα έχει μεμβράνη περατή σε αέρια ( CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) και καθόλου περατή σε υγρά ή στερεά . Με την εμβάπτιση του αισθητήρα στο δείγμα έχουμε ισορροπία μερικής πίεσης των αερίων που μετράμε με τον εσωτερικό αισθητήρα μερικής πίεσης . Εσωτερικά έχουμε επιπλέον οπτικό αισθητήρα ο οποίος βασίζεται στην τεχνολογία διπλής δέσμης NDIR για την ανίχνευση μερικής πίεσης του CO<sub>2</sub> ή CH<sub>4</sub> και αντίστοιχα με την μέτρηση θερμοκρασίας του δείγματος και της ατμοσφαιρικής πίεσης έχουμε αποτέλεσμα συγκέντρωσης CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>.



**Σχήμα 2.19 Φωτογραφία απεικόνισης αισθητήρα μέτρησης CH<sub>4</sub> ή CO<sub>2</sub> ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας PRO-OCEANS)**

### 2.2.6.2 Αισθητήρας μέτρησης N2O

Οι αισθητήρες μέτρησης N2O σε δείγματα υγρών αποβλήτων έχουν παρόμοια τεχνική μέτρησης με τους παλαιότερους πολαρογραφικούς αισθητήρες διαλυμένου οξυγόνου ή ακόμα και με τους σημερινούς γαλβανικούς αισθητήρες. Η κεφαλή του αισθητήρα αποτελεί ένα πολαρογραφικό στοιχείο τύπου Clark με σύστημα αναφοράς, σύστημα καθόδου και επιπλέον σημείο όπου περιέχει αναγωγική ουσία ηλεκτρολύτη. Έτσι έχουμε την απομόνωση του Οξυγόνου και δεν παρεμποδίζει την μέτρηση N2O στα αποτελέσματα. Με τη σύνδεση του αισθητήρα έχουμε πόλωση της καθόδου και του εσωτερικού ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα το N2O να διαπερνά την μεμβράνη. Η μερική πίεση του N2O βοηθάει το αέριο να διαπεράσει τη μεμβράνη και έτσι ανάγεται στην μεταλλική επιφάνεια της καθόδου όπου και δημιουργείται ρεύμα. Η ένταση του ρεύματος είναι ευθέως ανάλογη της αναγωγής και έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή σε συγκέντρωση N2O.



Σχήμα 2.20 Φωτογραφία απεικόνισης αισθητήρα μέτρησης N2O ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας UNISENSE )

### 2.2.7 Ηλεκτρόδια μέτρησης Οξειδοαναγωγικού δυναμικού (Redox/ORP )

Τα ηλεκτρόδια μέτρησης Οξειδοαναγωγικού δυναμικού (REDOX / ORP- oxidation reduction potential) έχουν παρόμοια αρχή μεθόδου μέτρησης με τα ηλεκτρόδια pH . Τα ηλεκτρόδια ORP αποτελούν ένα γαλβανικό στοιχείο όπου δύο μεταλλικά στοιχεία εμβαπτίζονται στο δείγμα με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ηλεκτροχημικού δυναμικού. Η μέτρηση διαφοράς δυναμικού πραγματοποιείται σύμφωνα με την εξίσωση Nernst με την διαφορά έναντι της περίπτωσης ηλεκτροδίου pH όπου δεν υπάρχει μεμβράνη εκλεκτική ιόντων Υδρογόνου αλλά γαλβανικό στοιχείο με μεταλλικά ιόντα όπου βάσεις του δυναμικού που αναπτύσσεται αποδίδεται σε μονάδες mV η «οξειδοαναγωγική» κατάσταση του δείγματος .

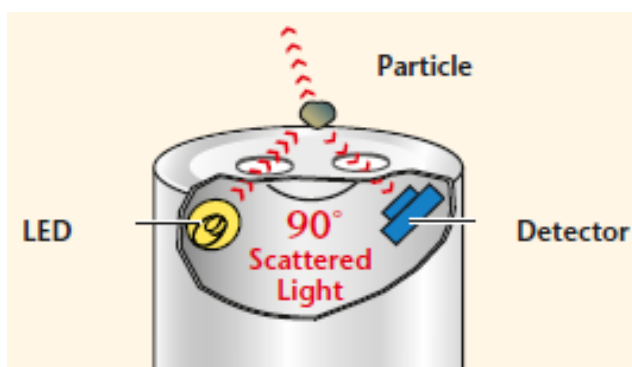
Η ανωτέρω μέτρηση που αποδίδεται σε m V αναδεικνύει την κατάσταση του δείγματος που βρίσκεται σε μέτρηση για την διενέργεια οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων συμπεριλαμβανομένων της νιτροποίησης,απονιτροποίησης, βιολογικής απομάκρυνσης P κ.ο.κ . Στην κλίμακα του ORP το σύνηθες εύρος είναι -2500....+2500 mV για τα ηλεκτρόδια/αισθητήρες . Οι θετικές ή αρνητικές τιμές είναι άμεσος δείκτης της κατάστασης του συστήματος, για παράδειγμα θετικό πρόσημο στην κλίμακα ORP σημαίνει την παρουσία οξειδωτικού παράγοντα στο δείγμα όπως το Οξυγόνο. Αντιθέτως αρνητικό πρόσημο σημαίνει την κυρίαρχη παρουσία αναγωγικού παράγοντα όπως για παράδειγμα το CBOD κατά την διάρκεια της απονιτροποίησης και παρουσία NO<sub>3</sub>-N ως αποδέκτες ηλεκτρονίων .

## 2.2.8 Αισθητήρας Θολερότητας / Ολικών Στερεών ( TS -Total Solids , TSS-Total Suspended Solids, MLSS – Mixed Liquor Suspended Solids )

Οι Online αισθητήρες Θολερότητας, Στερεών βασίζονται σε οπτικές κυρίως μεθόδους μέτρησης της Θολερότητας σε μονάδες NTU, FNU και Στερεών σε μονάδες g/lit . Για τις μετρήσεις Στερεών ανάλογα με την εφαρμογή του αισθητήρα και το σημείο μέτρησης μετονομάζονται σε Ολικά Στερεά – Total Solids για την περίπτωση εισροής ή εκροής, TSS ή MLSS και αντίστοιχα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά ή Ολικά Αιωρούμενα Στερεά για την περίπτωση μέτρησης ανάμεικτου υγρού στην βιολογική βαθμίδα της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων .

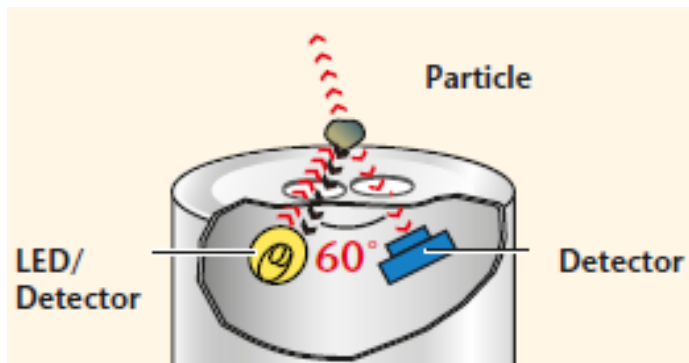
Στις δύο περιπτώσεις μετρήσεων η βασική αρχή μέτρησης οφείλεται στον τρόπο αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας φωτός με τα στερεά σωματίδια του δείγματος και αντίστοιχα η πρόσπτωση της ακτινοβολίας αυτής στο προς μέτρηση δείγμα .

Συγκεκριμένα για την μέτρηση θολερότητας όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα 2.1 σύμφωνα με την Νεφελομετρική μέθοδο είναι η μέτρηση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που προκύπτει από την πρόσπτωση σε αρχική γωνία 90 μοιρών στο σωματίδιο που βρίσκεται εντός δείγματος . Σύμφωνα με τα πρότυπα EN27027 & ISO7027 η πηγή ακτινοβολίας φωτός είναι τύπου LED στα 860 nm . Το σύνηθες εύρος κλίμακας μέτρησης είναι 0-4000 NTU ( Nephelometric Turbidity Units)



**Σχήμα 2.21 Σχεδιάγραμμα απεικόνισης τρόπου μέτρησης Θολερότητας ( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

Συγκεκριμένα για την μέτρηση Στερεών όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα 2.1 σύμφωνα με την μέθοδο είναι η μέτρηση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που προκύπτει από την πρόσπτωση σε αρχική γωνία 60 μοιρών στο σωματίδιο που βρίσκεται εντός δείγματος . Σύμφωνα με τα πρότυπα EN27027 & ISO7027 η πηγή ακτινοβολίας φωτός είναι τύπου LED στα 860 nm . Το σύνηθες εύρος κλίμακας μέτρησης είναι 0-1000 g/lTSS . Σημείο διαφοροποίησης στην μέτρηση Στερεών έναντι της θολερότητας είναι η διαφοροποίηση στη γωνία μέτρησης ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια λόγω αλληλεπίδρασης των Στερεών και επιπλέον η μέτρηση επιπλέον της επιστραφείσας ακτινοβολίας .



**Σχήμα 2.22 Σχεδιάγραμμα απεικόνισης τρόπου μέτρησης Στερεών( Τεχνικό εγχειρίδιο χρήσης & εφαρμογής αισθητήρα εταιρείας WTW – Xylem Analytics GmbH )**

### **3. Παρακολούθηση και έλεγχος διεργασιών με την εφαρμογή αισθητήρων**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Ο εξοπλισμός ελέγχου και αυτοματισμού σε ΕΕΛ μπορεί να βοηθήσει την εγκατάσταση να επιτύχει υψηλότερη ποιότητα τελική εκροής, να μειώσει το λειτουργικό κόστος και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στις σημερινές ΕΕΛ έχουν αναπτυχθεί σύγχρονα συστήματα επεξεργασίας του λυμάτων αξιοποιώντας την αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες απαιτούν και κατάλληλα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου των διεργασιών.

Στη σημερινή εποχή, υπάρχει βαθύτερη κατανόηση των βιοχημικών διεργασιών που διέπουν την επεξεργασία λυμάτων, καθώς και η κατάλληλη τεχνολογία για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση των διεργασιών., αξιοποιώντας πληροφορίες από την διαθέσιμη τεχνολογία οργάνων & αισθητήρων .

Είναι δεδομένο πως η αυξημένη χρήση της τεχνολογίας στην διαχείριση και επεξεργασία λυμάτων σηματοδότησε αυξημένη ικανότητα επεξεργασίας στις μονάδες σε επίπεδα 10-30% και έδωσε άμεση λύση στο ενεργειακό κόστος . Με την χρήση νέων τεχνολογιών είτε σε επίπεδο οργάνων / αισθητήρων είτε σε λογισμικό ( AI, machine learning, data analysis, data mining) , το λειτουργικό κόστος μπορεί να μειωθεί σημαντικά (χημικά, ενέργεια, ανθρώπινο δυναμικό σε εργατοώρες ), ενώ μπορεί να ενισχύσει τη μονάδα σε καθημερινό επίπεδο να ανταπεξέλθει σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις φορτίων ή σε ακραίες συνθήκες .

Οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων επεξεργάζονται φορτία εισόδου, τα οποία παρουσιάζουν αρκετές διακυμάνσεις στην υδραυλική παροχή και στα ρυπαντικά φορτία ( αυξομειώσεις σε συγκεντρώσεις COD, BOD), έτσι ο συγκεκριμένος τομέας απαιτεί ιδιαίτερες & πολύπλευρες γνώσεις καθώς η όποια αξιοποίηση δεδομένων και η εκτίμηση τους γίνεται κάτω από πολύπλευρο φάσμα γνώσεων και εμπειριών .



Άλλωστε ο τομέας των λυμάτων αποτελεί ένα μίγμα πολλών οργανικών και ανόργανων ουσιών και ως δείγμα είναι αρκετά πολύπλοκο .

Ο αυτοματισμός σήμερα στους βιολογικούς καθαρισμούς αποτελείται από τρία βασικά μέρη, την οργανολογία, την παρακολούθηση διεργασιών και τον έλεγχο αυτών . Επιπρόσθετα η επικοινωνία και η διαχείριση δεδομένων είναι αρκετά σημαντικά για την συνολική απόδοση .

Η οργανολογία ( όργανα , αισθητήρες, λογισμικά ) αναπτύσσονται με ιδιαίτερες δυνατότητες , ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός με νέες καινοτομίες αυξάνει την απόδοση του .

Η διαχείριση δεδομένων με νέα λογισμικά γίνεται αρκετά εύχρηστη και αποδίδει γρήγορα και άμεσα την όποια πληροφορία, σε συνεργασία με την αυξανόμενη τεχνολογία των Η/Υ μπορεί να διαχειριστεί μεγάλο όγκο δεδομένων και ευρείας πολυπλοκότητας .

Η επεξεργασία λυμάτων αποδεικνύεται πως δεν είναι φυσικά ένα απλό ζήτημα ανάγνωσης των δεδομένων αλλά όλοι οι συνδετικοί κρίκοι που συντελούν στην αποτελεσματική επεξεργασία να συνδέονται άρρηκτα , έτσι θα μεταβούμε από το στάδιο της απλής συλλογής δεδομένων στο στάδιο του αυτοματισμού και διαχείρισης πολύπλοκων διεργασιών .

Οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν είναι η συνεχής & ομαλή λειτουργικότητα της ΕΕΛ , η ικανοποίηση των απαιτήσεων των παραμέτρων εξόδου, η εξοικονόμηση του ενεργειακού κόστους και η ταυτόχρονη διαχείριση αυτών με την ορθή εφαρμογή τους στη μονάδα επεξεργασίας .

Η καινοτομία δεν έγκειται μόνο στην εγκατάσταση online αισθητήρων αλλά και στην διαχείριση των δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων από τις παραμετρικές τιμές , στο παρακάτω σχήμα 4.1 περιγράφονται οι πλέον βασικές παράμετροι Online αισθητήρων που εγκαθίστανται σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων .

**Πίνακας 3.1 Παράμετροι Online αισθητήρων που συνήθως εγκαθίστανται σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων**

Παράμετροι Online αισθητήρων που συνήθως εγκαθίστανται σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων			
Υδραυλική παροχή	Redox	Στερεά	Νιτρώδη
Επίπεδο Στάθμης	Αγωγιμότητα	Επίπεδο στάθμης υλός	Οργανικό φορτίο σε COD, BOD, TOC, DOC,SAC, UVT
Πίεση	Διαλυμένο Οξυγόνο	Αμμωνιακά	CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>
pH	Θολρότητα	Νιτρικά	N <sub>2</sub> O

Οι βασικές παράμετροι όπως Υδραυλική παροχή, Στάθμη, Πίεση, pH, Redox, DO, Στερεά αποτελούν παραμέτρους που απαντώνται σε όλες σχεδόν τις ΕΕΛ , και λιγότερο συχνά εγκαθίστανται αισθητήρες παραμέτρων όπως οργανικού φορτίου, αμμωνιακών, νιτρικών κ.ο.κ .

Η επεξεργασία των λυμάτων απαιτεί πλέον την διερεύνηση αρκετών διαφορετικών παραμέτρων. Έτσι οι συμβατικοί αισθητήρες pH, REDOX, Θολρότητας ή / και MLSS αποτελούν πλέον την βάση αλλά όχι την ολοκληρωμένη εικόνα απόδοσης των βιοχημικών διεργασιών του βιολογικού καθαρισμού .

Η αγορά και συντήρηση των αισθητήρων αυξάνει τόσο το κόστος κεφαλαίου όσο και το λειτουργικό κόστος μιας ΕΕΛ. Ειδικότερα αισθητήρες μέτρησης παραμέτρων όπως είναι τα νιτρικά, τα αμμωνιακά το ολικό και διαλυτό COD, τα νιτρώδη και τα φωσφορικά έχουν αρκετά υψηλό κόστος.

Προκειμένου να δουλέψουν απρόσκοπτα και αξιόπιστα οι αισθητήρες απαιτούν ιδιαίτερη διαχείριση και συντήρηση το οποίο συνεπάγεται αυξημένο λειτουργικό κόστος. Ο Πίνακας 3.2 αναφέρει τα κόστη που συνδέονται με την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρηση των αισθητήρων.

Υπολογίζοντας το κόστος κτήσης ενός αισθητήρα δεν αποτυπώνεται ολοκληρωμένα το κόστος χρήσης και φυσικά το συνολικό κόστος που έχει για τον βιολογικό καθαρισμό. Εκτός από το κόστος κτήσης θα πρέπει να προστεθεί το κόστος συντήρησης και απρόσκοπτης λειτουργίας, την διαδικασία

εγκατάστασης και ορθής χρήσης και τις επεμβάσεις που απαιτούνται στην εγκατάσταση. Επιπλέον το κόστος που απαιτείται για να γίνει η ενσωμάτωση του στα συστήματα SCADA και τις επιπλέον παραμετροποιήσεις που χρειάζονται, στη συνέχεια το κόστος αναλωσίμων (αν υπάρχουν ) και συντήρησης αλλά και ανταλλακτικών .

**Πίνακας 3.2** Ανάλυση κόστους Online Αισθητήρα – Κύρια σημεία

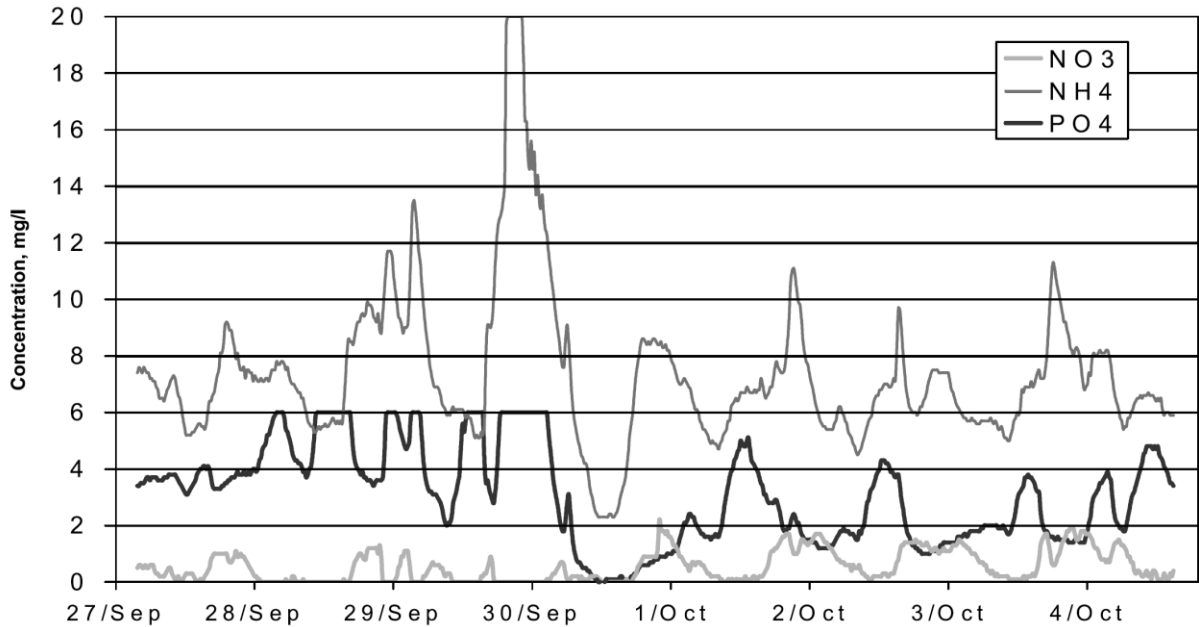
Ανάλυση κόστους Online Αισθητήρα – Κύρια σημεία	
Αισθητήρας	Κόστος αγοράς αισθητήρα
Εγκατάσταση	Κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση στη μονάδα τόσο σε εργατοώρες όσο και σε περιφερειακά εξαρτήματα σταθεροποίησης, σύνδεσης
Λειτουργία	Κόστος λειτουργικό όπως ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού, ενεργειακό κόστος κ.ο.κ
Ενσωμάτωση	Κόστος για την σύνδεση του με συστήματα SCADA
Αναλώσιμα- Συντήρηση	Χημικά ή Αντιδραστήρια που απαιτούνται για την λειτουργία του
Ανταλλακτικά	Κόστος ανταλλακτικών για την διάρκεια ζωής του αισθητήρα

Τα ανωτέρω κόστη συνυπολογίζονται ακριβώς με την μελέτη του σημείου εγκατάστασης και την κρίσιμη πληροφορία που επιθυμούμε να εξαγάγουμε από την μέτρηση του εκάστοτε αισθητήρα .

Η ενσωμάτωση αισθητήρων επιπλέον των συμβατικών αισθητήρων μπορεί μονομερώς να αυξάνει το κόστος κτήσης αλλά επιφέρει σημαντική κεφαλαιοποίηση στο λειτουργικό κόστος και φυσικά συνεισφέρει σημαντικά στην απόδοση ολοκληρωμένης εικόνας των βιοχημικών διεργασιών στην εγκατάσταση .

Στο παρακάτω γράφημα δίνονται οι online μετρήσεις Αμμωνιακών, Νιτρικών και Ορθοφωσφορικών από κατάλληλους αισθητήρες που έχουν εγκατασταθεί στην έξοδο της ανοξικής ζώνης σε δεξαμενή από-νιτροποίησης σε ΕΕΛ στην περιοχή Lund της Σουηδίας . Παρατηρώντας το γράφημα διαπιστώνεται η χρησιμότητα του κάθε αισθητήρα αλλά και η διαφορετική πληροφορία που συλλέγεται σε ένα μόνο

σημείο από την πληθώρα παραμέτρων .Το διάγραμμα παρουσιάζει την συγκέντρωση Αμμωνιακών στην επάνω καμπύλη, τα Φωσφορικά στη μεσαία και τα Νιτρικά στην χαμηλότερη καμπύλη .



**Σχήμα 3.3** έξοδο της ανοξικής ζώνης σε δεξαμενή από-νιτροποίησης σε ΕΕΛ στην περιοχή Lund της Σουηδίας – Τεχνολογία Ενεργού Ιλύος

Η συγκέντρωση αμμωνιακών στην έξοδο της ανοξικής ζώνης αναδεικνύει τις διακυμάνσεις φορτίων στην εκροή της ανοξικής δεξαμενής , τα σημεία όπου μπορεί να υπάρχει αστοχία του συστήματος και επιπλέον μπορεί να χρησιμεύσει ως έμμεση πληροφορία για καλύτερο έλεγχο της συγκέντρωσης DO στη δεξαμενή αερισμού. Επιπλέον παρατηρείται πως οι συγκεντρώσεις των Νιτρικών μηδενίζονται καταδεικνύοντας το γεγονός ότι η απονιτροποίηση είναι επιτυχής αλλά πιθανότατα οι ανοξικές ζώνες είναι μεγαλύτερες σε όγκο από τις απαιτήσεις για πλήρη απονιτροποίηση. Στη συνέχεια ο αισθητήρας Φωσφορικών δίνει την πληροφορία διακυμάνσεων στον Φώσφορο βιολογικής προέλευσης και

συγκεκριμένα παρατηρούνται προσεκτικά οι τιμές φωσφορικών να αυξάνονται όταν τα Νιτρικά είναι σχεδόν μηδενικά. Ο λόγος για το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι πως η δεξαμενή απουσία Νιτρικών ουσιαστικά γίνεται αναερόβια για συγκεκριμένα διαστήματα και έτσι παρατηρείται απελευθέρωση φωσφορικός στο ανάμικτο υγρό .

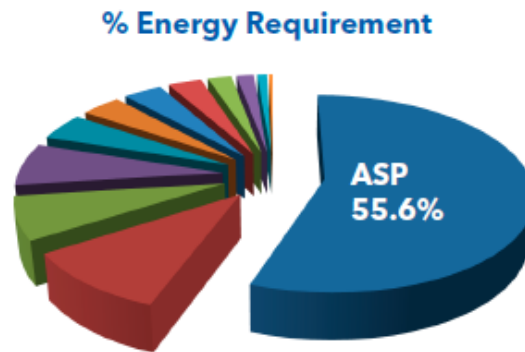
Με την ενσωμάτωση Online αισθητήρων στην ανοξική δεξαμενή αποδίδεται άμεσα και με πλήρη εικόνα η ικανότητα απονιτροποίησης αλλά και σε ποια χρονικά σημεία μπορούν να διαχειριστούν καλύτερα τις επανακυκλοφορίες ανάμεικτου υγρού ή ιλύος .

### 3.2 Ενεργειακή διαχείριση με χρήση αισθητήρων

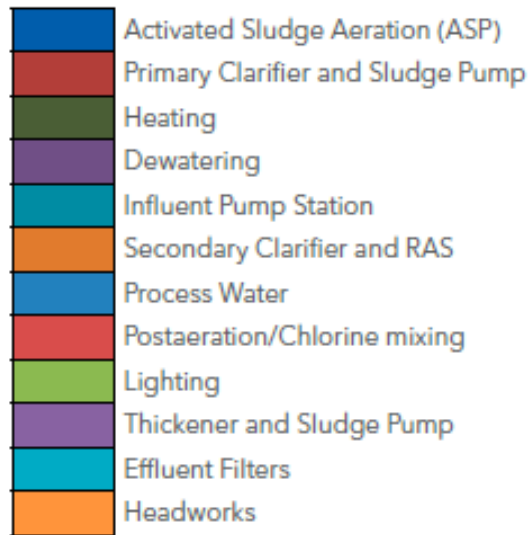
Αναζητώντας τις κρίσιμες διεργασίες για την ενεργειακή κατανάλωση σε ΕΕΛ , ο βιοαντιδραστήρας και συγκεκριμένα το στάδιο του αερισμού συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον προκειμένου να προσπαθήσει ο λειτουργός να διαχειριστεί τις διεργασίες με γνώμονα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Ο λόγος που ο αερισμός κατά τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί το στάδιο με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε μια ΕΕΛ οφείλεται στις απαιτήσεις σε οξυγόνο των βιοχημικών διεργασιών και συγκεκριμένα της οξείδωσης του οργανικού άνθρακα, της νιτροποίησης και της ενδογενούς αναπνοής.,

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 περισσότερο από το 50% των ενεργειακών απαιτήσεων οφείλονται στις διεργασίες της ενεργού ιλύος .



Σχήμα 3.4 . Επιμερισμός ενεργειακών απαιτήσεων σε ποσοστά της συνολικής ενεργειακής απαίτησης ενός εργοστασίου ( Energy Awareness in Wastewater Systems, DERF, June 4 2008)



Σχήμα 3.5 Επεξήγηση χρωματικών κατηγοριών στις ενεργειακές απαιτήσεις

### 3.3 Βασικές μέθοδοι και εφαρμογές ελέγχου με χρήση Online αισθητήρων

Στις συμβατικές ΕΕΛ ανεξαρτήτως σχεδιασμού των βιοαντιδραστήρων από τις ανωτέρω μορφές αζώτου και απαιτήσεων , η online παρακολούθηση συνήθως αφορά κυρίως το διαλυμένο οξυγόνο και το pH , και μερικές φορές το ORP/redox και τα MLSS.

Την ίδια στιγμή υπάρχουν αρκετά δεδομένα παρακολούθησης των συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου και των MLSS στις μονάδες βιοαντιδραστήρων και συγκεκριμένα του αερισμού, σε αντίθεση με ελάχιστα δεδομένα για τις συγκεντρώσεις και τις μορφές αζώτου .

Κυρίαρχη στρατηγική ελέγχου στις δεξαμενές αερισμού αποτελεί ο απλός καθορισμός set point για τιμές διαλυμένου οξυγόνου και με ρυθμισμένες τιμές-στόχους καθορίζονται οι παροχές οξυγόνου και η λειτουργία του συστήματος αερισμού και διαχυτήρων. Η απλή στρατηγική ουσιαστικά προσφέρει τυπικό έλεγχο στη μονάδα αερισμού αλλά με γνώμονα συγκεκριμένες τιμές διαλυμένου οξυγόνου γίνεται η διαχείριση βιοχημικών διεργασιών . Με αρκετές ελλείψεις σε πληροφορία όπως τον φορτίων αζώτου, φωσφόρου αλλά και οργανικού φορτίου γίνεται μονομερής προσπάθεια για διαχείριση των φορτίων με την αυξομείωση της παροχής του αέρα στη βιολογική βαθμίδα. Αξίζει να αναφερθεί πως οι αισθητήρες DO φέρουν αρκετά αξιόπιστες και υψηλής ακρίβειας τεχνολογίες ωστόσο παραμένει μία απλή παράμετρος αποδίδοντας γενική πληροφορία .

Με την λογική να ελεγχθούν καλύτερα οι διεργασίες του συστήματος της ενεργού ύλης και να εξοικονομηθεί ενέργεια θα πρέπει να εγκατασταθούν επιπλέον παράμετροι και να μην συσχετισθεί αποκλειστικά η διαχείριση στο set-point του διαλυμένου οξυγόνου . Εκτός της ενεργειακής διαχείρισης δύνανται να υπάρχουν καλύτερες ενδείξεις της αποτελεσματικότητας της νιτροποίησης-απονιτροποίησης και των ενδιάμεσων σταδίων .

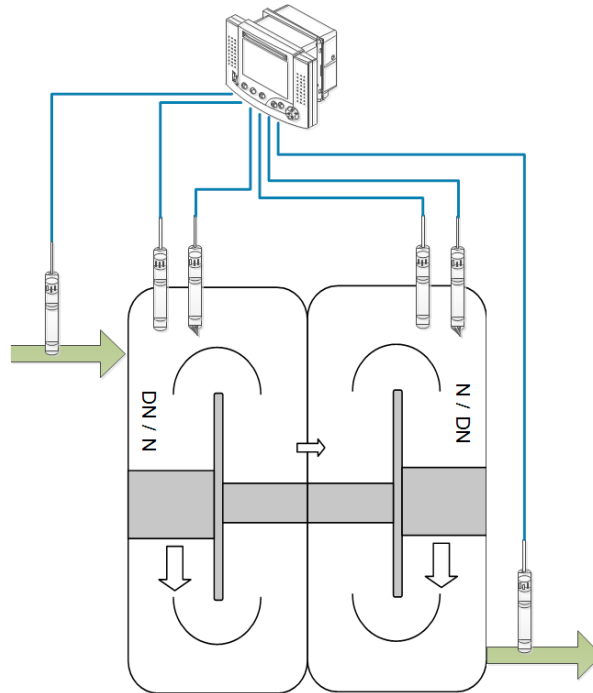


Το επόμενο στάδιο είναι να αυτοματοποιηθεί η εγκατάσταση βασιζόμενοι σε περισσότερα online δεδομένα όπου θα υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα , έτσι η εγκατάσταση αισθητήρων μέτρησης αμμωνιακών-νιτρικών δίνει συνεχή ενδειξη για την πορεία της νιτροποίησης-απονιτροποίησης . Η αυτοματοποίηση της εγκατάστασης εξαρτάται από το πως είναι σχεδιασμένη η εγκατάσταση και τι δυνατότητες υπάρχουν . Τα επίπεδα συγκεντρώσεων αζώτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνεχή ρύθμιση του set point του διαλυμένου οξυγόνου παρατηρώντας τις συγκεντρώσεις  $\text{NH}_4\text{-N}$  &  $\text{NO}_3\text{-N}$  έτσι ώστε να υπάρχει ευκρινή εικόνα της πορείας νιτροποίησης και αντίστοιχα ρύθμιση παροχής αερισμού , επιπλέον αισθητήρες MLSS μπορούν να αναδεικνύουν την ποσότητα της βιομάζας στους βιοαντιδραστήρες . Με περισσότερους αισθητήρες αλλά και αξιοποίηση των δεδομένων έχουμε το άμεσο πλεονέκτημα να αναδειχθούν τα όποια προβλήματα και κρίσιμα σημεία της εγκατάστασης .

Στο Σχήμα έχουμε το παράδειγμα εγκαταστάσεων με διαφορετικές ζώνες, όπου για την αποτελεσματική ενεργειακή διαχείριση αλλά και βελτιστοποίηση της νιτροποίησης-απονιτροποίησης απαιτείται ολοκληρωμένη εγκατάσταση αισθητήρων και δεδομένων σε διαφορετικά σημεία .

Για παράδειγμα στο Σχήμα 3.6 η εγκατάσταση αισθητήρα MLSS στην είσοδο προκειμένου να αποδοθεί εικόνα του φορτίου στερεών στη μονάδα , στη συνέχεια και συγκεκριμένα στη μέση των αερόβιων αντιδραστήρων τοποθετούνται αισθητήρες DO,  $\text{NH}_4\text{-N}$  /  $\text{NO}_3\text{-N}$  , για εικόνα των συγκεντρώσεων οξυγόνου στη μέση των δεξαμενών αερισμού με μεγάλη ευελιξία να ρυθμιστεί τμηματικά η απόδοση διαχυτήρων . Επιπλέον στη μέση των βιοαντιδραστήρων με την εγκατάσταση αισθητήρων  $\text{NH}_4\text{-N}$  /  $\text{NO}_3\text{-N}$  υπάρχει αρκετά καλή εικόνα για την πρόοδο της νιτροποίησης και σε συνδυασμό με τις συγκεντρώσεις οξυγόνου διευκολύνονται οι αποφάσεις για στρατηγική έλεγχου της μονάδας προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματικός έλεγχος και ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση.

Στο τέλος της μονάδας με εγκατάσταση αισθητήρα  $\text{NO}_3\text{-N}$  γνωρίζοντας έτσι τις συγκεντρώσεις Νιτρικών όπου οδηγούνται σε επόμενο στάδιο αλλά και πόσο αποτελεσματική απονιτροποίηση υπάρχει στο τελευταίο στάδιο της Ανοξικής έτσι ώστε να αποφασιστεί η ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος.

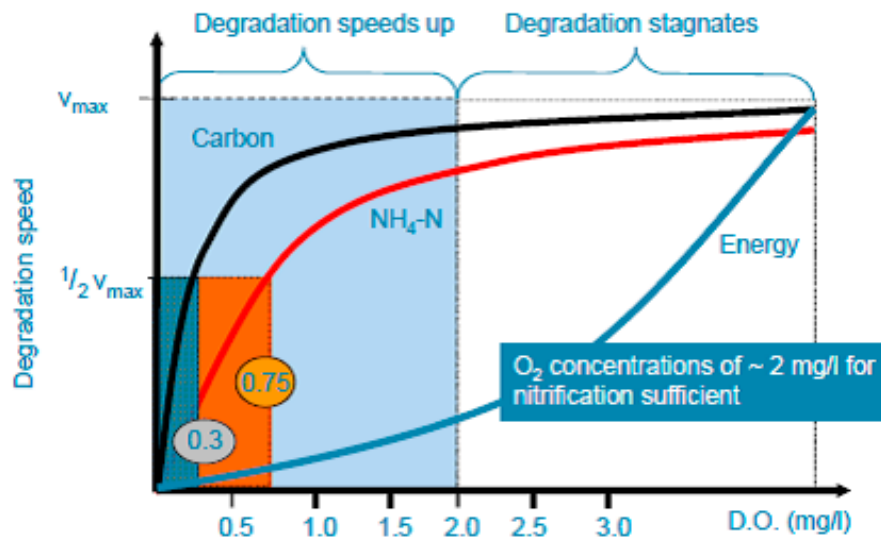


**Σχήμα 3.6 Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης αισθητήρων σε δεξαμενή ενεργού ιλύος , MLSS στην είσοδο,  $\text{NH}_4\text{-N}$  ή  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{NO}_3\text{-N}$  και DO σε κάθε ζώνη,  $\text{NO}_3\text{-N}$  στην έξοδο**

Για τις εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος που δεν έχουν εγκατασταθεί αισθητήρες μέτρησης μορφών αζώτου , η διαχείριση είναι αρκετά ευαίσθητη καθώς υπάρχουν λιγότερα στοιχεία για την εικόνα των διεργασιών .

Το παρακάτω γράφημα αποσκοπεί στο να εξηγήσει καλύτερα πως ο αποτελεσματικός έλεγχος βιοχημικών διεργασιών απαιτεί την παρακολούθηση επιπλέον παραμέτρων . Βλέπουμε συγκριτικά την ταχύτητα απομάκρυνσης αζώτου και οργανικού φορτίου μέσω βιοχημικών διεργασιών σε συνάρτηση με τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αποτυπώνονται

ικανοποιητικές απομακρύνσεις και με υψηλούς ρυθμούς σε επίπεδα DO 0.3ppm για το οργανικό φορτίο και 0.75 ppm για τα NH<sub>4</sub>-N . Ενδεχομένως να έχει οριστεί ένα set point στην παράμετρο DO για περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης ή προσπάθειας επάρκειας οξυγόνου στο σύστημα σε επίπεδα τιμών 3-4 ppm, τότε παρατηρείται πως θα υπάρχει πλεονασμός στην διάρκεια αερισμού είτε σε μονάδες/ζώνες αερισμού είτε σε παροχή αερισμού, καθώς από το διάγραμμα συμπεραίνεται πως υπάρχει ικανοποιητική και αποτελεσματική απομάκρυνση οργανικού φορτίου και NH<sub>4</sub>-N μέχρι τα 2 ppm.



**Σχήμα 3.7 Ρυθμοί απομάκρυνσης Οργανικού φορτίου και Αμμωνίας σε σχέση με τα επίπεδα DO**

Η ρύθμιση ενός απλού set point DO χωρίς να υπάρχει εικόνα των άλλων παραμέτρων που είναι εξίσου χρήσιμες ώστε να διαχειριστεί η μονάδα ως πληροφορία , αποδεικνύεται ελλιπής σε ενεργειακό επίπεδο αλλά και ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών. Στο προηγούμενο γράφημα αποτυπώνεται πως η ενέργεια αυξάνεται εκθετικά σε συγκεντρώσεις DO που δεν έχουν καμία επίδραση πλέον στην απομάκρυνση θρεπτικών με συνέπεια να έχουμε υψηλό ενεργειακό κόστος .

Τα ανωτέρω γραφήματα και η λειτουργία batch συστημάτων ή εγκαταστάσεων ενεργού ιλύος αποτελούν γενικά δυναμικά συστήματα όπου η ιστορικότητα εργαστηριακών μετρήσεων μπορεί να φανεί αρκετά χρήσιμη, ωστόσο σε επίπεδο online μετρήσεων τα πράγματα είναι εντελώς διαφορετικά .

Το πιο σημαντικό είναι πως κάθε εγκατάσταση και λειτουργός πρέπει να αποφασίσει για τις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου και παρακολούθησης των βιοχημικών διεργασιών της μονάδας του και αυτό σε συνάρτηση με τους αισθητήρες και τις παραμέτρους που παρακολουθεί .

Η απλή στρατηγική ελέγχου όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι η ρύθμιση βασικού set point τιμών DO και άμεση σύνδεση με το σύστημα αερισμού , ωστόσο δεν αποτελεί δυναμικό έλεγχο αλλά περισσότερο παθητική λειτουργία του συστήματος .

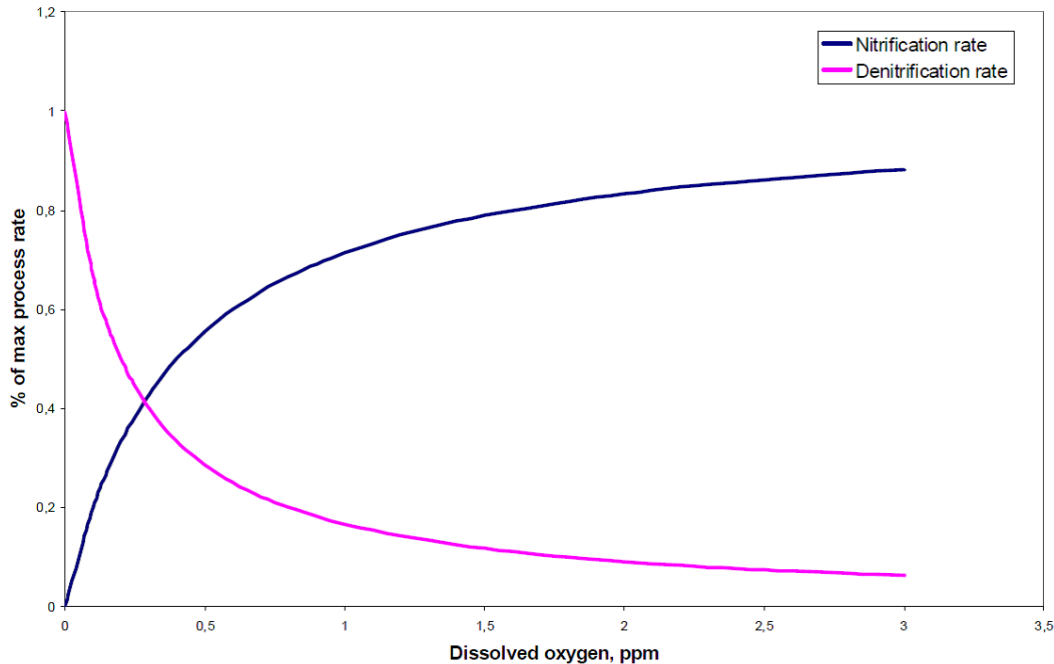
Το επόμενο βήμα για στρατηγική ελέγχου της μονάδας αερισμού είναι η απεικόνιση τιμών και οι πληροφορίες των φορτίων αζώτου, όπου το σύστημα αερισμού και η απόδοση του είναι συνδεδεμένη με τις συγκεντρώσεις Αμμωνιακού, Νιτρικού αζώτου . Συγκεκριμένα η εγκατάσταση WWSA ( Wyoming Valley Sanitary Authority , ([www.wvsa.org](http://www.wvsa.org)) στην Πενσυλβάνια , εφαρμόζει έλεγχο με αισθητήρα Αμμωνιακού αζώτου σε set points μεταξύ 0.7 – 1.0 mgN/L σε κάθε μία από τις 4 μονάδες .

Τα συστήματα ρύθμισης του αερισμού είναι κλειστά στο 25% του χρόνου με αυτή την τακτική πετυχαίνουν σημαντικό ενεργειακό όφελος με ταυτόχρονη αποτελεσματική διαχείριση των φορτίων αζώτου και επίτευξη στόχων για τον τελικό αποδέκτη .

Η συγκεκριμένη στρατηγική δίνει απευθείας έλεγχο στις δεξαμενές και με τη δυνατότητα για on-off των blower φαίνεται να αποδίδει καλύτερα. Ειδικότερα ο έλεγχος γίνεται μέσω των συγκεντρώσεων Αμμωνιακού αζώτου , με πλεονέκτημα πως η διαχείριση βάσει των συγκεντρώσεων NH<sub>4</sub>-N είναι αρκετά πιο σταθερή χρονικά και αποτελεσματική, καθώς οι αισθητήρες οξυγόνου αλλάζουν δυναμικά συγκεντρώσεις συνέχεια με συνέπεια να έχουν τάση αύξησης/μείωσης σε διάφορες συγκεντρώσεις .

Ο ρυθμός νιτροποίησης αυξάνεται μέχρι και τα επίπεδα DO 1.5-2.0 ppm , και σε επίπεδα περισσότερο από τα 2.0 ppm δεν υπάρχει σημαντική αύξηση του ρυθμού , κάτι που φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.

Με την εφαρμογή αισθητήρα μέτρησης NH<sub>4</sub>-N & NO<sub>3</sub>-N αμέσως διαπιστώνουμε τις δυνατότητες του συστήματος για νιτροποίηση-απονιτροποίηση , κάτι που χωρίς τους συγκεκριμένους αισθητήρες στο παρακάτω διάγραμμα θα είχαμε μόνο διακυμάνσεις DO βάσει χρόνου .



**Σχήμα 3.8 Ρυθμοί Νιτροποίησης & Απονιτροποίησης συναρτήσει των συγκεντρώσεων DO (Gustaf Olsson, Lund University )**

Με την τιμή DO να αυξάνει χρονικά παρατηρείται πως ο ρυθμός νιτροποίησης φτάνει σε ένα «πλατό» με συνέπεια να μην έχει νόημα η περεταίρω αύξηση του DO παρά μόνο να αυξάνει το ενεργειακό αποτύπωμα της εγκατάστασης. Με την ανωτέρω πληροφορία διαπιστώνεται πως η μονάδα αερισμού στο σχήμα 4.9 δουλεύει αρκετά στα μέγιστα επίπεδα DO των 2 ppm .

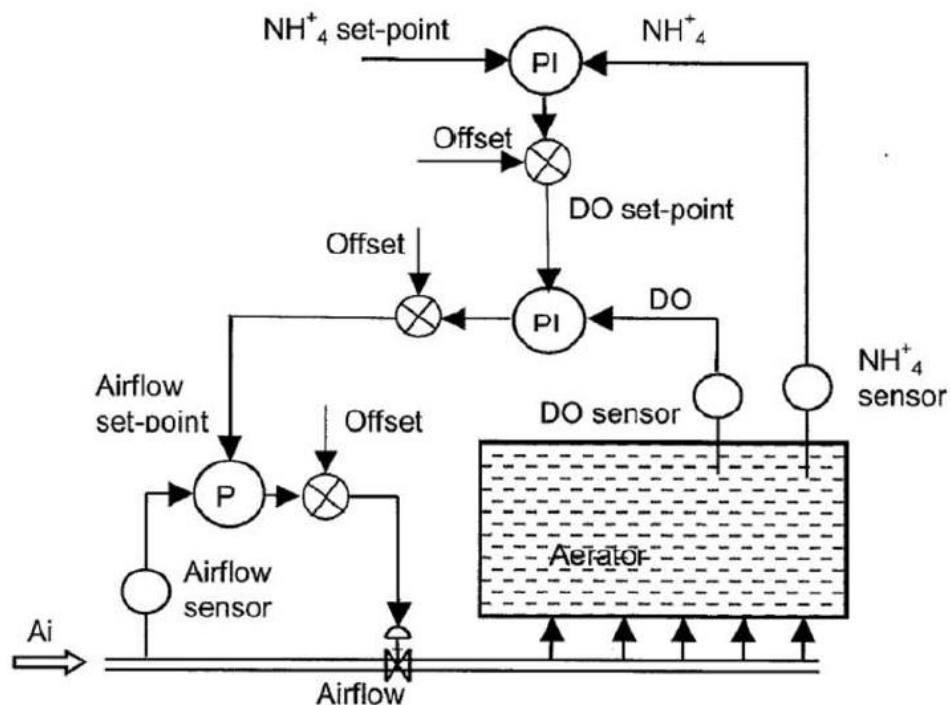
Αξίζει να αναφέρουμε πως αρκετοί βιολογικοί καθαρισμοί λειτουργούν τις μονάδες αερισμού σε επίπεδα DO 3-4 ppm και ίσως αρκετές φορές και σε υψηλότερα επίπεδα καθώς η αμμωνία έχει οξειδωθεί και δεν υπάρχει ζήτηση Οξυγόνου από την μονάδα .

### 3.4 Δυναμικός έλεγχος βιολογικής βαθμίδας με μέτρηση NH<sub>4</sub>-N

Η επόμενη στρατηγική είναι ο δυναμικός έλεγχος , είναι αρκετά αποτελεσματικός αρκεί η εγκατάσταση ή ο βιοαντιδραστήρας να είναι σχεδιασμένος για αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Εδώ το σημαντικό δεν είναι μόνο η μέγιστη δυνατή πληροφορία από αρκετούς εγκατεστημένους αισθητήρες αλλά και πως αυτές οι πληροφορίες συνδέονται μεταξύ τους με την δυναμική διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης και των φορτίων αζώτου. Απαιτεί τη συνεργασία αρκετών συστημάτων και επιμέρους μονάδων προκειμένου να υπάρχει υψηλή απόδοση και αποτελεσματικότητα .

Συγκεκριμένα ο αισθητήρας NH<sub>4</sub>-N στο παρακάτω σχεδιάγραμμα μετράει συνέχεια και το σύστημα ελέγχου (controller) συγκρίνει την τιμή στον βιοαντιδραστήρα με το set point και αυτόματα υπολογίζει το απαιτούμενο set point του DO το οποίο προωθείται σαν πληροφορία στο σύστημα ελέγχου του DO . Ο ελεγκτής του DO συγκρίνει την τιμή του DO στη δεξαμενή αερισμού με την τιμή set point DO που έχει υπολογιστεί και αντίστοιχα ρυθμίζεται η παροχή αέρα και δίνεται ως πληροφορία στον ελεγκτή της μονάδας αερισμού της δεξαμενής.

Εναλλακτικά μπορεί το σύστημα ελέγχου του DO να ρυθμιστεί σε προτεραιότητα έναντι του NH<sub>4</sub>-N controller και να οριστεί μια μέγιστη τιμή συγκέντρωσης για το DO . Τα κριτήρια επιλογής για το ποιος μετρητής θα είναι το βασικό σύστημα είναι η αξιοπιστία στα αποτελέσματα και η ταχύτητα απόκρισης στις βαθμιαίες μεταβολές της μονάδας και εξαρτάται κυρίως από τις τεχνικές προδιαγραφές των αισθητήρων.



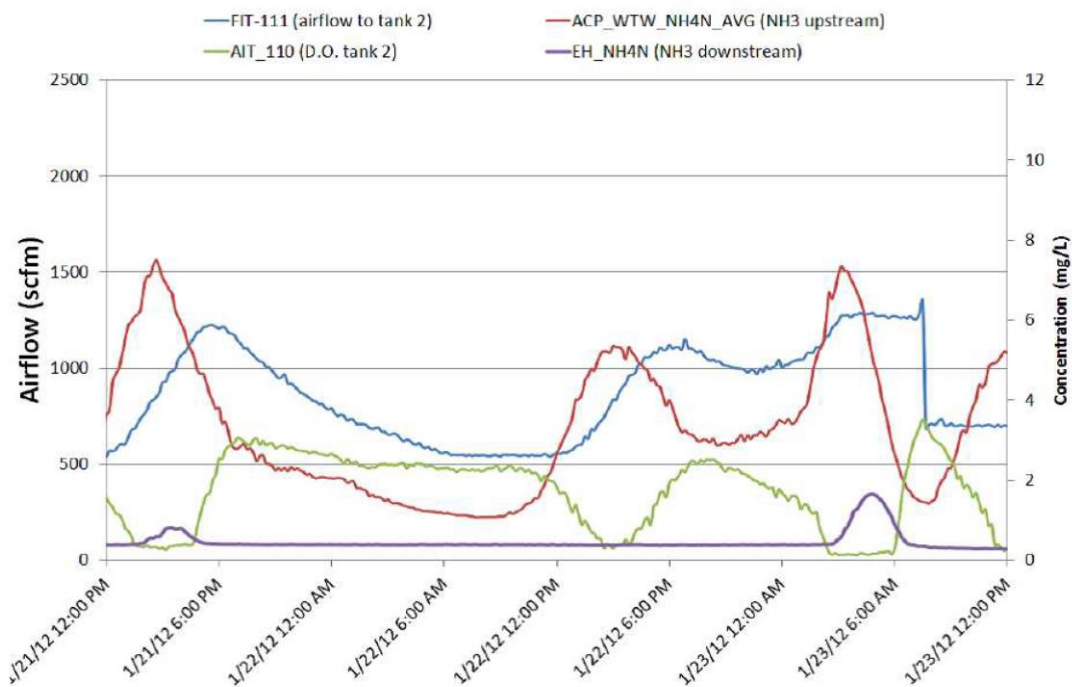
**Σχήμα 3.9 Αναπαράσταση στρατηγικής ελέγχου μονάδας αερισμού σύμφωνα με τις μετρήσεις αμμωνιακών ( Gustaf Olsson, 2005, Science & Technical report No 15, Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems )**

Στην ανωτέρω διάταξη και στρατηγική ελέγχου απαιτείται ιδιαίτερη γνώση της εγκατάστασης , της δυναμικότητας αερισμού και γρήγορη εφαρμογή των σταδίων ελέγχου καθώς η εναλλαγή προτεραιότητας DO έναντι NH<sub>4</sub>-N και αντίστροφα θα είναι συχνό φαινόμενο .

Σημαντικό ρόλο παίζει το σημείο εγκατάστασης και πεδίο εφαρμογής των αισθητήρων NH<sub>4</sub>-N καθώς σε εγκαταστάσεις εμβολοειδούς ροής εισέρχεται ακόμα μία πολυπλοκότητα έναντι των μονάδων πλήρους μίξης , καθώς οι συγκεντρώσεις των ρύπων αλλάζουν κατά μήκος της μονάδας . Έτσι η στρατηγική χρειάζεται να προσαρμοστεί καθώς ανάντη έχουμε αυξημένες συγκεντρώσεις και χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε κατάντη διεργασίες . Η επιλογή παραμετρικής τιμής NH<sub>4</sub>-N στην έξοδο του

βιοαντιδραστήρα είναι καλή επιλογή ως προς την ένδειξη της απόδοσης νιτροποίησης , ωστόσο αν διαπιστωθεί πρόβλημα ή κάποια αυξημένη συγκέντρωση παροδικά , είναι αρκετά αργά ως προς την διαδικασία για να διορθωθεί .

Το Σχήμα 3.10 είναι βασισμένο σε έλεγχο από πληροφορία παραμετρικής τιμής DO στην τελική δεξαμενή αερισμού συστήματος ενεργού υλός. Η ανάντη μέτρηση NH4-N (κόκκινη γραμμή) που αφορά την μέτρηση στα λύματα που εισέρχονται στη βιολογική βαθμίδα δίνει αυξημένη συγκέντρωση λίγες ώρες πριν την παροχή αερισμού ( μπλε γραμμή) και επιτρέπει την έγκαιρη λήψη αποφάσεων για την ρύθμιση παροχής αέρα στη μονάδα αερισμού ώστε να ακολουθεί τις συγκεντρώσεις εισόδου των NH4



**Σχήμα 3.10** Διάγραμμα παραμετρικών τιμών NH4-N, DO και παροχής αερισμού σε στρατηγική feedback ( Case Study , WEFTEC, New Orleans LA ) .

Με την μπλέ καμπύλη παρατηρείται η παροχή Οξυγόνου στη δεξαμενή αερισμού και επίσης πως η ζήτηση Οξυγόνου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την είσοδο και διακύμανση συγκεντρώσεων NH4-N που



έχει να διαχειριστεί η μονάδα . Με τον αισθητήρα DO παρατηρείται φυσικά το διαλυμένο οξυγόνο στο ανάμεικτο υγρό , και άμεσα διαπιστώνεται πως για περίπου 6 ώρες και ενώ υπήρχε ένα set point στα 2 ppm, ουσιαστικά δεν χρειαζόταν να είναι τόσο υψηλό ιδιαίτερα τις τελευταίες 3 ώρες . Παρατηρώντας επιπλέον τα επίπεδα NH<sub>4</sub>-N κατόπιν της δεξαμενής και συγκεκριμένα την περίοδο όπου το Οξυγόνο είναι πολύ χαμηλό υπάρχει μια αύξηση της συγκέντρωσης της αμμωνίας στην έξοδο .

Η τοπολογία αισθητήρων και συγκεκριμένα η επιλογή εγκατάστασης δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα στην διαχείριση συστήματος ενεργού ιλύος ή batch συστήματος. Συγκεκριμένα σε δεξαμενές ενεργού ιλύος η εγκατάσταση αισθητήρα NH<sub>4</sub>-N ανάντη των διεργασιών της δεξαμενής (αρχή της βιολογικής βαθμίδας )πλεονεκτεί καθώς προσφέρει έγκαιρο χρόνο μετάδοσης της πληροφορίας, αν και στη ψηφιακή τεχνολογία πλέον δεν αποτελεί πρόβλημα, αλλά έγκαιρο χρόνο απόκρισης σε προβλήματα υψηλών συγκεντρώσεων . Σε συνάρτηση με εγκατάσταση αισθητήρα στο τέλος της δεξαμενής αερισμού έχουμε ένδειξη της αποτελεσματικότητας της νιτροποίησης και απονιτροποίησης . Αρκετές φορές επιλέγεται η εγκατάσταση αισθητήρων αμμωνιακών στο μέσο των μονάδων αερισμού προκειμένου να υπάρχει εικόνα για τους ρυθμούς νιτροποίησης .

Επειδή οι περισσότερες τεχνολογίες μέτρησης αζώτου σε βιοαντιδραστήρες και batch συστήματα έγκειται σε τεχνολογίες ιοντοεπιλεκτικών αισθητήρων, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη σε πραγματικό και εμπειρικό χρόνο το signal to noise ratio καθώς σε χαμηλά όρια συγκεντρώσεων που μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας με σημαντική πιθανότητα να αυξηθεί ο θόρυβος εξαιτίας παρεμποδιστικών ιόντων ή σημείου της εφαρμογής .

Στο παρακάτω γράφημα παρατηρείται η στρατηγική ελέγχου της παραμετρικής τιμής DO στη βασική ζώνη αερισμού βασισμένου στις πληροφορίες από τις παραμετρικές τιμές NH<sub>4</sub>-N από αισθητήρες στην μέση και στο τέλος της ζώνης σε σύστημα ενεργού ιλύος. Προτεραιότητες είναι η απόδοση της νιτροποίησης-απονιτροποίησης και η διαχείριση του ενεργειακού κόστους .

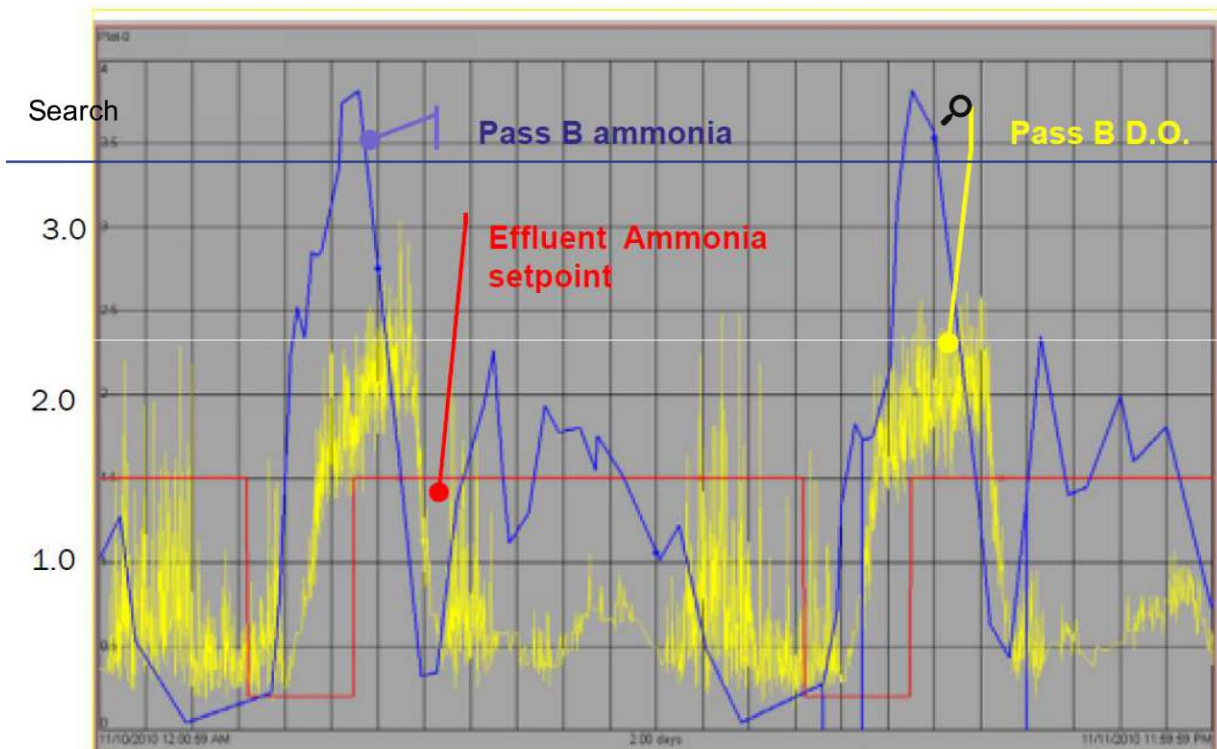
Η επίτευξη αποτελεσματικής ενεργειακής διαχείρισης πραγματοποιήθηκε με την παρακάτω αλληλουχία παραμετρικών τιμών

Για τιμές  $\text{NH}_4\text{-N} > 1.5 \text{ ppm}$  τότε το DO θα καθορισθεί με τιμή στόχο 2 ppm

Για τιμές  $\text{NH}_4\text{-N} \leq 1.5 \text{ ppm}$  τότε το DO θα καθορισθεί με τιμή στόχο 0.5 ppm

Όπου η συγκέντρωση DO ανεβαίνει αρχικά αλλά στη συνέχεια ρυθμίζεται βάσει των συγκεντρώσεων που έχουν καθορισθεί στην παράμετρο  $\text{NH}_4\text{-N}$ .

Στη συγκεκριμένη μελέτη αποδείχθηκε πως η εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου ενώ εισάγει πολυπλοκότητα στο σύστημα και αρκετούς αισθητήρες, μπορεί η εγκατάσταση να εξοικονομήσει σε ενέργεια έως και 10% στο συνολικό κόστος του αερισμού.



**Σχήμα 3.11** Διάγραμμα παραμετρικών τιμών NH<sub>4</sub>-N & DO σε στρατηγική ελέγχου feedback -, **Ammonia Controlled Aeration, Central States, WEA 85<sup>th</sup> Annual Conference ( Esping D , 2012).**

Με τον έλεγχο της μονάδας σε σύνδεση με την συγκέντρωση Αμμωνιακών και ορίζοντας χαμηλά εν γένει set point στη συγκέντρωση NH<sub>4</sub>-N & DO , και να διασφαλίζονται πως οι αισθητήρες ή αναλυτές δουλεύουν αξιόπιστα στις ζητούμενες συγκεντρώσεις .

Στο ανωτέρω διάγραμμα η συγκέντρωση της ανάντη NH<sub>4</sub>-N είναι βασικός οδηγός στη μονάδα αερισμού και άμεσα αποκρίνεται το σύστημα έτσι ώστε να υπάρχει σταθερή νιτροποίηση και χαμηλές συγκεντρώσεις κατάντη της δεξαμενής .. Για την περίπτωση που πρέπει να εφαρμοσθούν λιγότεροι αισθητήρες (λόγω κόστους), η εφαρμογή ελέγχου καθοριζόμενη από συγκεντρώσεις NH<sub>4</sub>-N σε ανάντη

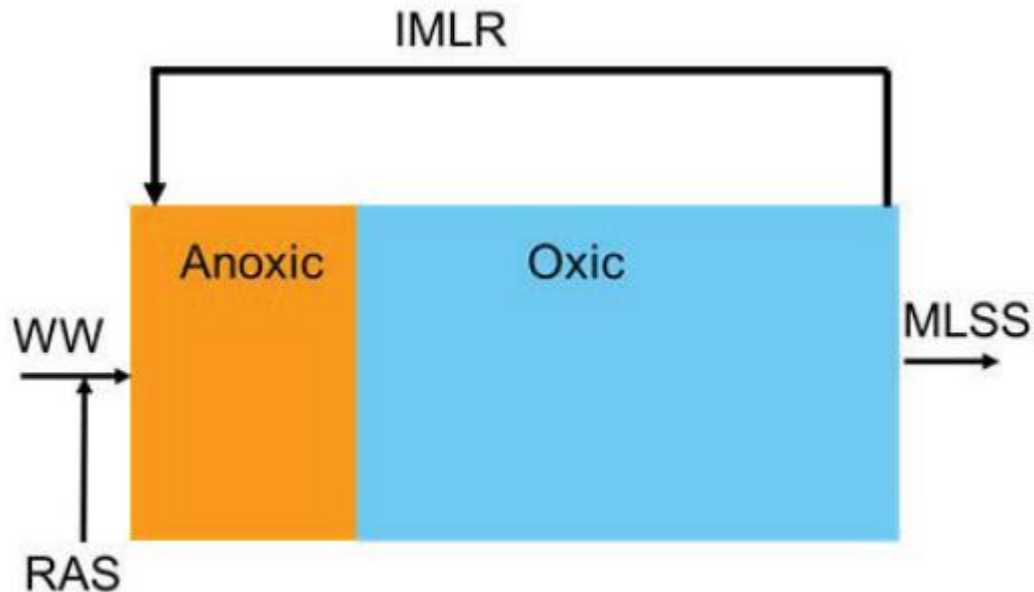
διεργασίες , επιβάλλει την ανάπτυξη μοντέλων όπου θα προβλέπουν τον ρυθμό αερισμού βασιζόμενη σε αυτή την πληροφορία . Φυσικά θα πρέπει πάντα να συνυπολογίζονται και το φορτίο εισόδου NH<sub>4</sub>-N έτσι ώστε να αναπτυχθούν περισσότερα τα μοντέλα . Σε συγκεκριμένο set point τα blower θα δουλεύουν ανάλογα των συγκεντρώσεων NH<sub>4</sub>-N ή θα ρυθμιστούν σε ελάχιστη παροχή για να επιτρέπουν την ανάμειξη . Η παροχή αερισμού θα ακολουθεί την παραμετρική τιμή της ανάντη NH<sub>4</sub>-N και έτσι η συγκέντρωση του DO θα διατηρείται κοντά στα 2.0 ppm , έτσι επιτυγχάνεται περισσότερο μειωμένη απαίτηση DO από τα blowers με παράλληλη αποτελεσματικότητα νιτροποίησης .

Η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης στρατηγικής έχει υψηλό ρίσκο , καθώς η απόδοση εξαρτάται από έναν αισθητήρα NH<sub>4</sub>-N σε ανάντη διεργασίες με ενδεχόμενο υψηλό αριθμό στερεών και παράλληλα αυξημένη απαίτηση για ένα επαρκές και αποτελεσματικό μοντέλο πρόβλεψης για την ορθή διαχείριση των blowers .

### **3.5 Έλεγχος & Παρακολούθηση της Απονιτροποίησης**

Όπως έχει αναφερθεί η διεργασία της απονιτροποίησης είναι η μετατροπή NO<sub>3</sub>-N σε μοριακό N<sub>2</sub> , με πηγή ενέργειας μορφές άνθρακα . Η απονιτροποίηση εφαρμόζεται σε ανοξικές ζώνες όπου εφαρμόζονται χωροταξικά ανάντη ή κατάντη των δεξαμενών αερισμού για τις περιπτώσεις εγκαταστάσεων ενεργού ιλύος, είτε χρονικά ανοξικές ζώνες για τις περιπτώσεις batch συστημάτων και συγκεκριμένα SBR συστήματα .Για την περίπτωση ανοξικής ζώνης ανάντη των δεξαμενών αερισμού επιτρέπει την χρήση πηγών ενέργειας άνθρακα και συγκεκριμένα του COD των εισερχόμενων λυμάτων . Στο παρακάτω Σχήμα φαίνεται το τυπικό σύστημα προ-απονιτροποίησης-νιτροποίησης , τα νιτρικά στο παρακάτω γράφημα είναι σημαντική παράμετρος που πρέπει μετρηθεί & ελεγχθεί όπως και η τοπολογία (σημεία εγκατάστασης) των αισθητήρων στις συγκεκριμένες δεξαμενές . Έτσι η εγκατάσταση αισθητήρων Νιτρικών στο τέλος κάθε ζώνης δίνει τις απαραίτητες πληροφορίες για το βαθμό

επεξεργασίας του αζώτου και συγκεκριμένα την αποτελεσματικότητα των μεθόδων νιτροποίησης / απονιτροποίησης .



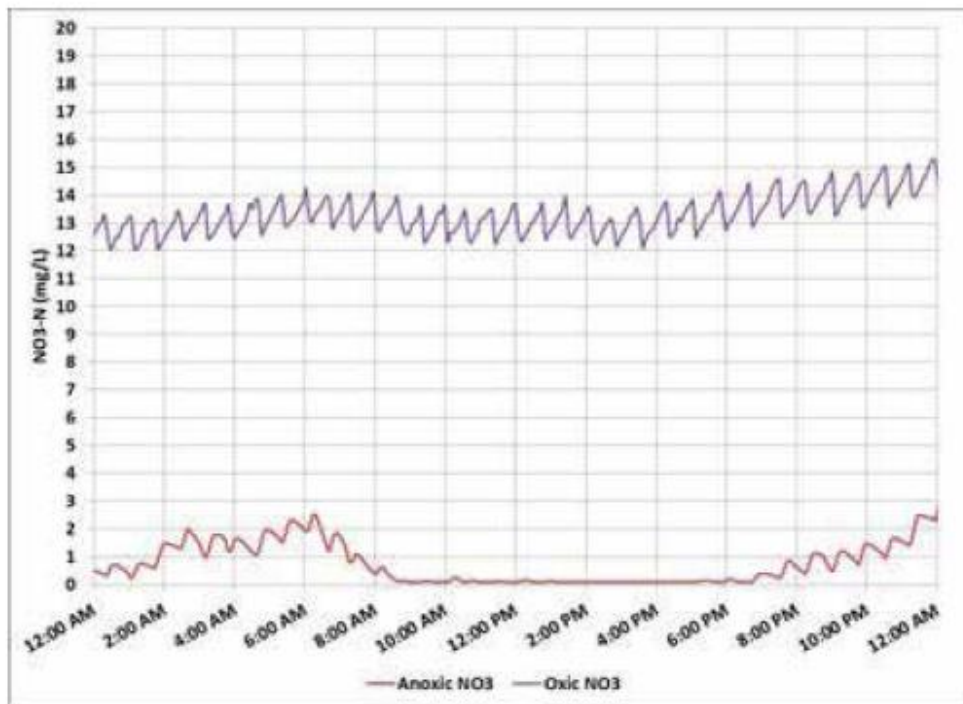
**Figure 1.** Flow diagram for Modified Ludzack-Ettinger configuration

**Σχήμα 3.12** Ροϊκό διάγραμμα Βιολογικής μονάδας σύμφωνα με διαμόρφωση Ludzack-Ettinger

Συγκεκριμένα η εγκατάσταση αισθητήρων νιτρικών σε κρίσιμα σημεία στην ανωτέρω μονάδα επιτρέπει την παρακολούθηση της πορείας των βιοχημικών διεργασιών αλλά και τις απαιτήσεις του συστήματος σε επίπεδο αντλιών, αερισμού και πιθανόν εξωτερικών πηγών ενέργειας .

Συγκεκριμένα η online μέτρηση νιτρικών επιτρέπει την άμεση πληροφορία για τα επίπεδα τελικής εκροής σε μορφή Νιτρικών mg/lit , τον έλεγχο και την μεγιστοποίηση χρήσης πηγών άνθρακα για την απονιτροποίηση και αντίστοιχα την ελαχιστοποίηση χρήσης εξωτερικών πηγών άνθρακα .

Στο παρακάτω γράφημα έχουμε ημερήσιες online μετρήσεις νιτρικών στο τέλος ανοξικής ζώνης και δεξαμενής αερισμού. Με την χρήση αισθητήρων διακρίνεται γρήγορα ότι υπάρχει αυξητική τάση στα Νιτρικά της δεξαμενής αερισμού και επιπλέον τα Νιτρικά της ανοξικής ζώνης είναι αρκετά χαμηλά . Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε πως η ταυτόχρονη μέτρηση Νιτρικών στην ανοξική ζώνη και ζώνη αερισμού δείχνει πως η απονιτροποίηση έχει περιορισμένες συγκεντρώσεις νιτρικών κάτι που μπορεί να βελτιωθεί με εσωτερική επανακυκλοφορία από την δεξαμενή αερισμού έτσι ώστε να έχουμε την ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικού φορτίου στην ανοξική ζώνη . Ταυτόχρονα βλέπουμε πως αύξηση Νιτρικών στη ζώνη αερισμού συνοδεύεται αντίστοιχα από αντίστοιχα αύξηση νιτρικών στην ανοξική ζώνη και μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε την ικανότητα του συστήματος να απομακρύνει οργανικό φορτίο στην ανοξική ζώνη .



**Figure 2.** Online nitrate monitoring - oxidic nitrate high/ anoxic nitrate low

Σχήμα 3.13 Online μέτρηση Νιτρικών σε Οξική & Ανοξική ζώνη

### 3.6 Βασικές μέθοδοι ελέγχου βιολογικών βαθμίδων

Οι εγκαταστάσεις βιολογικών καθαρισμών πραγματοποιώντας απομάκρυνση θρεπτικών , στοχεύουν στην αποτελεσματική ανάκτηση νερού στην τελική εκροή, μειώνοντας παράλληλα τις ενεργειακές απαιτήσεις και συνολικά το ενεργειακό τους αποτύπωμα . Ειδικότερα ο στόχος αυτός επιμερίζεται στις ανάγκες του βιολογικού στις βιοχημικές διεργασίες όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις εκεί αντιστοιχούν μέχρι και στο 60% των συνολικών απαιτήσεων των εγκαταστάσεων (Water Environment Federation (WEF), 2009). Συγκεκριμένα οι απαιτήσεις των δεξαμενών αερισμού σε τεχνολογίες ελέγχου και οργάνων, αισθητήρων είναι αρκετά κρίσιμες για το συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα και ο έλεγχος του διαλυμένου οξυγόνου αποδίδει έως και 20% των συνολικών ηλεκτρικών απαιτήσεων (Water Environment Federation (WEF), 2006).

Παραδοσιακά στις εγκαταστάσεις επιλέγονται αισθητήρες pH, ORP και διαλυμένου οξυγόνου, με την τεχνολογία να επεκτείνεται σε καινοτομίες αισθητήρων έχουμε τη δυνατότητα να έχουμε ψηφιακούς αισθητήρες με πολύ καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα . Η τεχνολογία αναβαθμίστηκε και σε επίπεδο λογισμικών και ψηφιακών τεχνολογιών έτσι ώστε η πληροφορία που συλλέγεται από τους αισθητήρες να μπορεί να υπολογιστεί και να αξιοποιηθεί άμεσα στην εγκατάσταση σε όφελος των συνολικών στόχων της εγκατάστασης .

Ο απλούστερος έλεγχος είναι ο χειροκίνητος για τα blowers βασιζόμενος σε δειγματοληψίες και εργαστηριακές μετρήσεις έτσι ώστε να καθορίζονται και να ελέγχονται συστηματικά τα set points . Διαχρονικά η αποτελεσματικότητα των βιολογικών καθαρισμών κρινόταν από τα επίπεδα εκροής στις παραμετρικές τιμές των TSS και BOD, χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε έλεγχο και ενέργεια . Με την πληθυσμιακή αύξηση σε μεγαλόπολεις αλλά και σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους εν μέσω εποχής υψηλών απαιτήσεων για πιο διακριτό έλεγχο των βιοχημικών διεργασιών και ενεργειακού αποτυπώματος της εγκατάστασης .

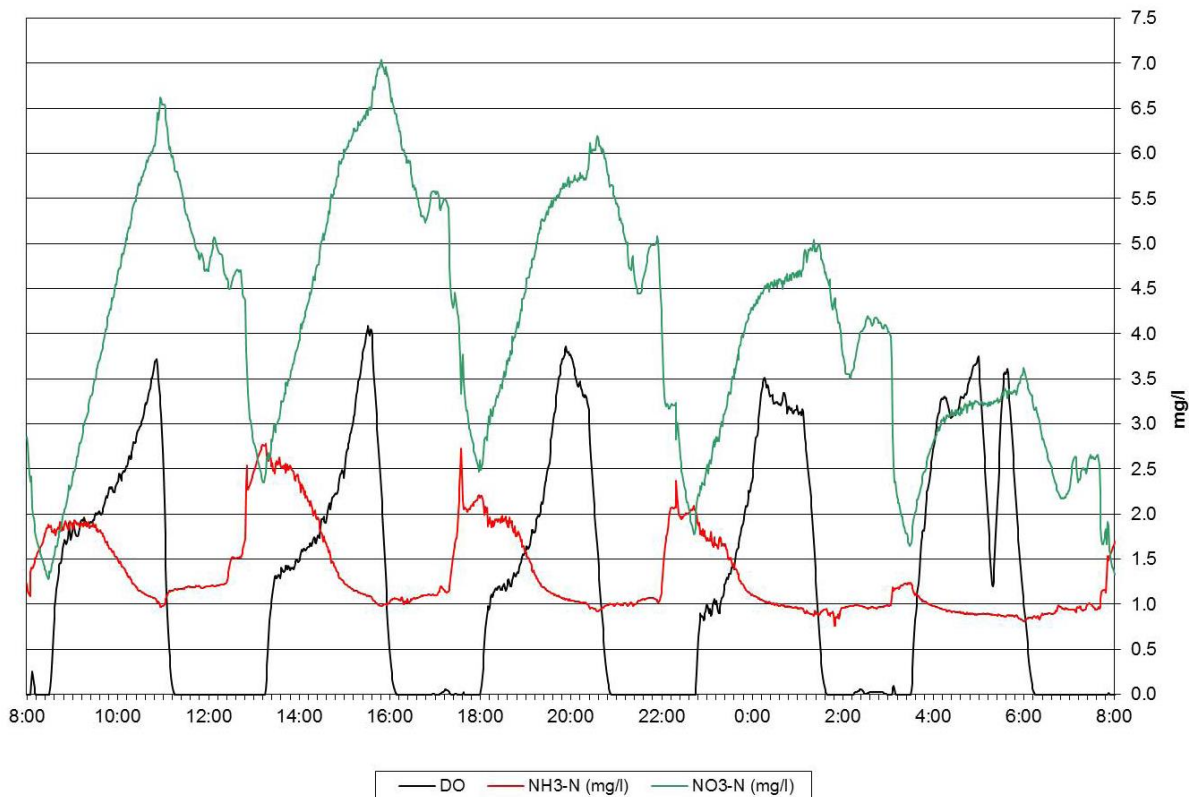
Οι εργαστηριακές μετρήσεις πρέπει να γίνονται πιο τακτικά και με ακρίβεια έτσι ώστε οι online παραμετρικοί αισθητήρες να συγκρίνονται και να ελέγχονται για την αξιοπιστία και ακρίβεια τους . Άλλωστε σε στρατηγικές χειροκίνητου ελέγχου και παρακολούθηση μόνο εργαστηριακών μετρήσεων έχουμε μεμονωμένη εικόνα και στιγμιότυπα των διεργασιών σε σχέση με την πληρέστερη εικόνα που λαμβάνουμε με ψηφιακούς online αισθητήρες . Ωστόσο σε ένα βαθμό εξαρτάται από τον σχεδιασμό της όποια υφιστάμενης εγκατάστασης και πόσο μπορεί να υιοθετηθεί στρατηγική ελέγχου και δυναμικής αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας των βιοχημικών διαδικασιών .

### **3.7 Τεχνική Ανοικτού Ελέγχου κύκλων λειτουργιών / Open Loop Control (sequencing)**

Οι περισσότερες εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος ή και batch συστημάτων έχουν πλέον την στρατηγική open loop, όπου είναι μεν μεταγενέστερο βήμα σε σχέση με χειροκίνητο έλεγχο, καθώς ο έλεγχος γίνεται μόνο χρονικά σε επίπεδο blower και αντλιών . Η απλή στρατηγική βασίζεται σε εμπειρικούς κανόνες σχεδιασμού και ελέγχου και σύμφωνα με ιστορικά δειγματοληψιών και μετρήσεων . Παραμένει πάντα η δυστοκία σε ένα τέτοιο σύστημα να ελέγξει διαφορετικές και δυναμικές συνθήκες σε διαφορετικά φορτία εισόδου αλλά και διαφορετικές αποδόσεις στην βιολογία του συστήματος .

Έτσι τα συστήματα αερισμού δεν έχουν κάποιο ιδιαίτερο έλεγχο αλλά η λειτουργία τους ορίζεται χρονικά, ένα συγκεκριμένο παράδειγμα είναι τα batch συστήματα SBR με κύκλους τροφοδοσίας, διεργασιών και απομάκρυνσης βασισμένα καθαρά σε χρόνους . Το Figure 1 δείχνει τον κύκλο λειτουργία και τις μετρήσεις σε τυπική SBR σε μία ημέρα .





**Σχήμα 3.14** Τυπικό διάγραμμα παραμετρικών Online τιμών DO, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N σε δεξαμενή τύπου SBR

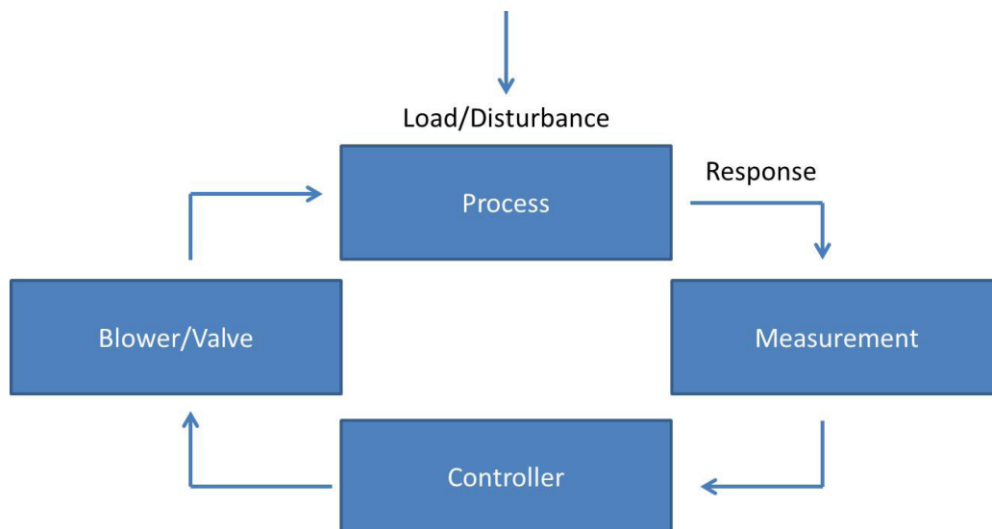
Η αναποτελεσματικότητα του ανωτέρω συστήματος αποτυπώνεται παρακολουθώντας την τάση της συγκέντρωσης αμμωνιακών που αναδεικνύει παράταση της νιτροποίησης και της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου. Οι κύκλοι είναι σχεδιασμένοι συντηρητικά για να έχουμε αποτελεσματική διαχείριση, ωστόσο οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών είναι ένας δείκτης της παρατεταμένης διαχείρισης καθώς φαίνεται πως η νιτροποίηση έχει τερματιστεί πολύ πριν και συνεχίζουμε να έχουμε αερισμό. Παρατηρώντας τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου βλέπουμε κορυφές ακόμα και στις περιπτώσεις αυξομειώσεων των φορτίων και συγκεκριμένα στον τελευταίο κύκλο βλέπουμε αυξημένη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου καθώς δεν υπάρχει απαίτηση από το σύστημα. Η διαχείριση κρίσιμων τιμών set point διαλυμένου οξυγόνου δεν αποτελεί ορθή διαχείριση ενεργειακά καθώς βλέπουμε ένα μέρος της εικόνας στη νιτροποίηση και απονιτροποίηση του συστήματος. Εάν ελέγχουμε

και κλείσουμε τα blowers αφότου οι τιμές αμμωνίας αγγίζουν την συγκέντρωση στόχο μπορούμε να ωφεληθούμε ενεργειακά και να ελέγξουμε / αυξήσουμε την ικανότητα του συστήματος για απονιτροποίηση . Παράλληλα ρυθμίζοντας τον χρόνο στους κύκλους μπορούμε να αυξήσουμε την ικανότητα του συστήματος για διαχείριση φορτίων . Το σύστημα ελέγχου μόνο με την τιμή διαλυμένου οξυγόνου παραμένει απλό και αφορά συντηρητική στρατηγική καθόλου ευέλικτη σε δυναμικές περιπτώσεις .

### **3.8 Κλειστό σύστημα ελέγχου (Closed Loop Control )**

Οι δυναμικές συνθήκες σε batch συστήματα που αφορούν αλλαγές στα φορτία εισόδου και την ποιότητα των λυμάτων αλλά και τις συνθήκες κατάστασης της βιολογίας της μονάδας απαιτούν γρήγορη διαχείριση των συνθηκών και έτσι η στρατηγική Closed loop control απαιτείται σε αυτές τις περιπτώσεις, συγκεκριμένα οι παραμετρικές τιμές online αισθητήρων προσαρμόζονται σε ολοκληρωμένα συστήματα SCADA μέσω μονάδων PLC και ελέγχονται παράλληλα διαφορετικές διεργασίες και θα μπορούσαν να περιγραφούν στο παρακάτω γράφημα .

Το παρακάτω γράφημα περιγράφει τις αλληλουχίες πληροφοριών σε ένα δυναμικό σύστημα επιλογής και ελέγχου . Η μεταβολή στα φορτία εισόδου προκαλεί μεταβολή στις διεργασίες και στη συνέχεια απόκριση σε ψηφιακή μέτρηση, αντίστοιχα ένας ελεγκτής παρακολουθεί την διαφορά της μέτρησης με το επιθυμητό set point , το αντίστοιχο σφάλμα της μέτρησης και της διεργασίας , έτσι ώστε να μεταφέρει πληροφορία σε κάποιο blower ή αντλία . Ένα απλό γράφημα που όμως απαιτεί τα επιμέρους συστήματα να δουλεύουν αξιόπιστα και να επικοινωνούν άψογα μεταξύ τους, καθώς απαιτούνται πλέον των online αισθητήρων , και μετρητές παροχής, παροχής οξυγόνου/αέρα στα blowers και παροχής στους διαχυτήρες .



**Σχήμα 3.15** Διάγραμμα στρατηγικής feedback ελέγχου μονάδας (Gustaf Olsson, Lund University, Sweden)

Στο παραπάνω διάγραμμα η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης στρατηγικής είναι ευθέως ανάλογη των online αισθητήρων, έτσι μόνο με την μέτρηση Διαλυμένου Οξυγόνου αποδίδεται αρκετά μικρή εικόνα της διεργασίας. Αν συμπεριληφθεί η συμβατική τεχνολογία μεμβράνης όπου αντίστοιχα απαιτεί ιδιαίτερες συνθήκες για αξιόπιστη μέτρηση, όπως ροή, μειωμένες εκπομπές παρεμποδίζοντων αερίων και συγγενών χημικών ενώσεων, τότε απαιτείται επιπλέον προσθήκη online παραμέτρων και σίγουρα αναβάθμιση της τεχνολογίας του αισθητήρα διαλυμένου οξυγόνου.

Στην στρατηγική ελέγχου μπορεί να προστεθεί η παράμετρος ORP όπου δίνει πληροφορίες και ενδείξεις για την κατάσταση των βιοχημικών διεργασιών και τις συνθήκες που επικρατούν εκείνη την στιγμή στον βιοαντιδραστήρα , όπως ανοξικής ή αναερόβιας διεργασίας .

Για παράδειγμα τιμές ORP + - 50 mV καταδεικνύουν ανοξικές συνθήκες και κατά συνέπεια φαινόμενα απονιτροποίησης , και αρνητικές τιμές ORP < -100 mV όπου αναδεικνύουν αναερόβιες διεργασίες .

Η παραμετρική τιμή αμμωνιακών επιπλέον δείχνει σε άμεσο χρόνο τις συγκεντρώσεις αμμωνιακών και έτσι καλή εικόνα της πορείας της νιτροποίησης όπως και του φορτίου εισόδου αζώτου στην είσοδο της εγκατάστασης ή του batch συστήματος .

Η παραμετρική τιμή νιτρικών επιπλέον προσθέτει μεγαλύτερη ασφάλεια για την πορεία της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης .

Η online μέτρηση οργανικού φορτίου δείχνει επίσης σε άμεσο χρόνο την ποιότητα του οργανικού φορτίου ολικού ή διαλυμένου , COD, BOD , για ποιοτική εικόνα του φορτίου ανάλογα την τοπολογία του αισθητήρα .

Σε αντίθεση με την ανωτέρω στρατηγική, η πιο κοινή μέθοδος είναι η ON-OFF Control , όπως προαναφέρθηκε η διαχείριση γίνεται με μόνη ένδειξη της παραμέτρου διαλυμένου οξυγόνου.

Η On-Off στρατηγική ελέγχου γίνεται επίσης απλή με χρονικό καθορισμό ελέγχου των λειτουργιών των blowers αερισμού, μέθοδος αρκετά απλή και συμβατή με το σύνολο των εγκαταστάσεων . Ωστόσο τα κρίσιμα σημεία ελέγχου στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η απόκριση των blower , η απόδοση των διαχυτήρων σε επίπεδο αερισμού και ανάμειξης του δείγματος και φυσικά η τεχνολογία των αισθητήρων οξυγόνου που είναι εγκατεστημένη . Το παρακάτω γράφημα αναδεικνύει τα ζητήματα της ON-OFF στρατηγικής, στην έναρξη της φάσης αερισμού η απαίτηση για οξυγόνο είναι μεγάλη από ότι η απαίτηση κοντά στα 2 mg/l όπου φαίνεται σταθερός ρυθμός ζήτησης οξυγόνου . Τις χρονικές στιγμές όπου έχουμε φτάσει στο επίπεδο ζήτησης οξυγόνου από το σύστημα , ο ρυθμός ζήτησης είναι τόσο κυμαινόμενος όπου τα μικρά on-off δεν αφήνουν τον αισθητήρα οξυγόνου να σταθεροποιηθεί .

Στο συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να προστεθεί ένας χρόνος «νεκρής» ζώνης ή «υστέρησης» στον ελεγκτή on-off προκειμένου να αντιδράσει το σύστημα με τους διαχυτήρες . «Νεκρή» ζώνη είναι το εύρος του set point όπου το σύστημα δεν αντιδρά , η υστέρηση είναι το ίδιο με την λογική όπου σε εύρος μεγαλύτερο από το συγκεκριμένο δεν λαμβάνεται καμία ενέργεια .

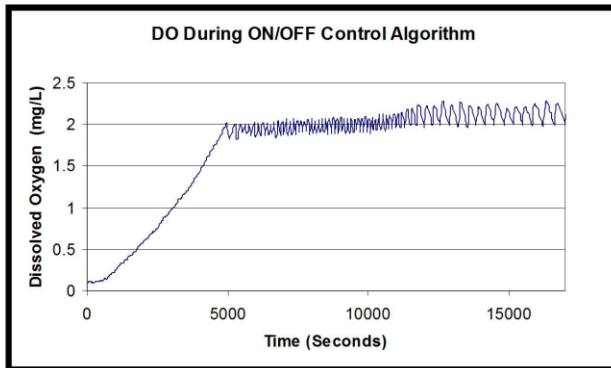


Figure 3: On-Off Control Dissolved Oxygen Response  
 Source: Meck, D., R. Odum, N. Wobbrock, Cornell University

Σχήμα 3.16 Διάγραμμα ελέγχου ON-OFF παροχής αερισμού ( Meck D, R. Odum, N.Wobbrock, Cornell University )

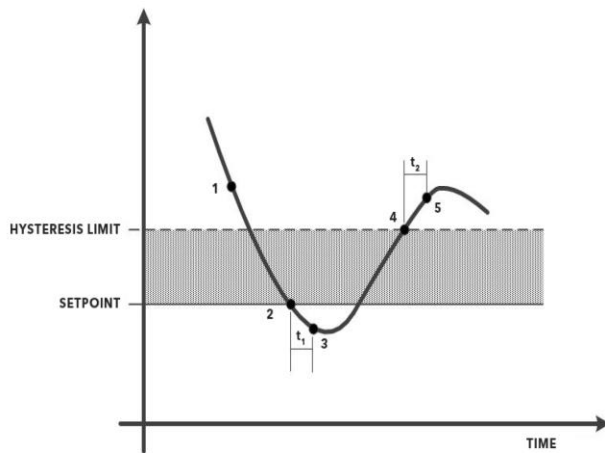


Figure 4: On-Off Control with Hysteresis

Σχήμα 3.17 Διάγραμμα ελέγχου ON-OFF παροχής αερισμού με χρονική υστέρηση

Η υστέρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ένα χρονόμετρο και όπως απεικονίζεται στο γράφημα νο 4 , έχουμε :

1. Το ρελέ ανοίγει οπότε το blower κλείνει
2. Τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου πέφτουν από το καθοριζόμενο set point , οπότε ανοίγει το χρονόμετρο καθυστέρησης
3. Το χρονόμετρο καθυστέρησης / εναλλαγής σταματάει οπότε το ρελέ κλείνει και το blower ανοίγει
4. Τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου φτάνουν σε σημεία πάνω από το επίπεδο υστέρησης οπότε ανοίγει το χρονόμετρο καθυστέρησης
5. Το χρονόμετρο σταματάει, οπότε το ρελέ ανοίγει και κλείνουν τα blower .

Η συγκεκριμένη στρατηγική ON-OFF είναι κατάλληλη για συστήματα ενεργού υλίου και συγκεκριμένα πλήρους μίξης με μεγάλους υδραυλικούς χρόνους και παραμονής στερεών .

Ο έλεγχος με συνδυασμό την συγκέντρωση DO μπορεί να συνδυαστεί με επιπλέον online αισθητήρες για ακόμη πιο δυναμική συσχέτιση . Στο παρακάτω γράφημα έχουμε ενδείξεις από τις παραμετρικές τιμές pH & ORP όπου η αμμωνία καταναλώθηκε και το σύστημα αερισμού θα μπορούσε να σταματήσει νωρίτερα . Αντίστοιχη στρατηγική θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στην απονιτροποίηση χρησιμοποιώντας τις τιμές ORP ή Νιτρικών . Η περιοχή μετρήσεων κοιλάδας Νιτρικών καταδεικνύουν ότι τα νιτρικά έχουν απομακρυνθεί , οπότε το σύστημα αερισμού θα μπορεί να ενεργοποιηθεί .

### 3.9 PID Control

Η διαχείριση της μονάδας αερισμού και η διασφάλιση της αποτελεσματικότητας αερισμού απαιτεί σύστημα ελέγχου PID ( proportional-integral-derivative ) . Η ονομασία του PID ελεγκτή προέρχεται από τις ενέργειες που αναλαμβάνει σε μια μονάδα , όπως η ανάλογη, η ολοκληρωμένη και η παράγωγη δράση . Η κάθε δράση αφορά και μια συγκεκριμένη ενέργεια που καλείται να συνδέσει σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα αερισμού, ειδικότερα αναλογικά το σήμα που μεταδίδεται για την μέτρηση οξυγόνου σύμφωνα με τα σφάλματα και την αξιοπιστία του κάθε αισθητήρα . Το διαλυμένο οξυγόνο παρακολουθείται συνεχώς και σύμφωνα με τις μεταδόσεις σήματος, έτσι καθορίζεται η τιμή στόχος και έτσι ο ελεγκτής PID προσπαθεί να σταθεροποιήσει το σύστημα κοντά στην περιοχή της τιμής στόχου , ενώ η παράγωγη δράση αναφέρεται όταν έχουμε τη δυνατότητα να επέμβουμε στο σύστημα σε περιόδους έκτακτης ανάγκης ή αυξομειώμενων φορτίων .

Όπως αναφέρθηκε η απλούστερη μέθοδος είναι ο απευθείας έλεγχος του διαλυμένου οξυγόνου σε συσχέτιση με τον καθορισμό της παροχής αέρα στη δεξαμενή αερισμού, η συγκεκριμένη μέθοδος αρκετά απλή και καθόλου δυναμική καθώς προτιμάται σε συστήματα που δεν υπάρχει η δυνατότητα ολοκληρωμένου ελέγχου .

Ο συνεχής έλεγχος βασισμένος στην μέτρηση του Οξυγόνου χρησιμοποιεί την τιμή του διαλυμένου οξυγόνου και με χρήση PID controller προσδίδει ολοκληρωμένη διαχείριση του συστήματος αερισμού όπως σχηματικά προκύπτει στο παρακάτω γράφημα . Ο ελεγκτής του διαλυμένου οξυγόνου υπολογίζει την παροχή αέρα βασισμένη στην διαφορά της τιμή στόχος του DO και της μετρούμενης τιμής . Έπειτα δίνεται τιμή σε σήμα εξόδου από τον ελεγκτή για την τιμή στόχος της παροχής αέρα και έτσι ο ελεγκτής της παροχής αέρα υπολογίζει αντίστοιχα την παροχή που πρέπει να δοθεί στη δεξαμενή αερισμού . Σε κάθε περίπτωση πρέπει να αποφασιστεί ποιος ελεγκτής θα διαχειρίζεται ολοκληρωτικά στο σύστημα άλλως οι δύο ελεγκτές θα αντιλογίζουν διαφορετικές τιμές και διαφορετικές στρατηγικές . Η μη

γραμμική σχέση μεταξύ της παροχής αέρα και της μέτρησης DO και η καθυστέρηση του χρόνου να επιτευχθεί σταθερότητα έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει συνεχής έλεγχος καθορισμού της παροχής αέρα σε αντλίες και βαλβίδες οξυγόνου .

Έτσι απαιτείται ένας δεύτερος έλεγχος για τον καθορισμό της αντλίας οξυγόνου σε απόκριση με την πίεση του συστήματος αερισμού αυξάνοντας την ακρίβεια και την απόκριση του συστήματος στις απαιτήσεις οξυγόνου.

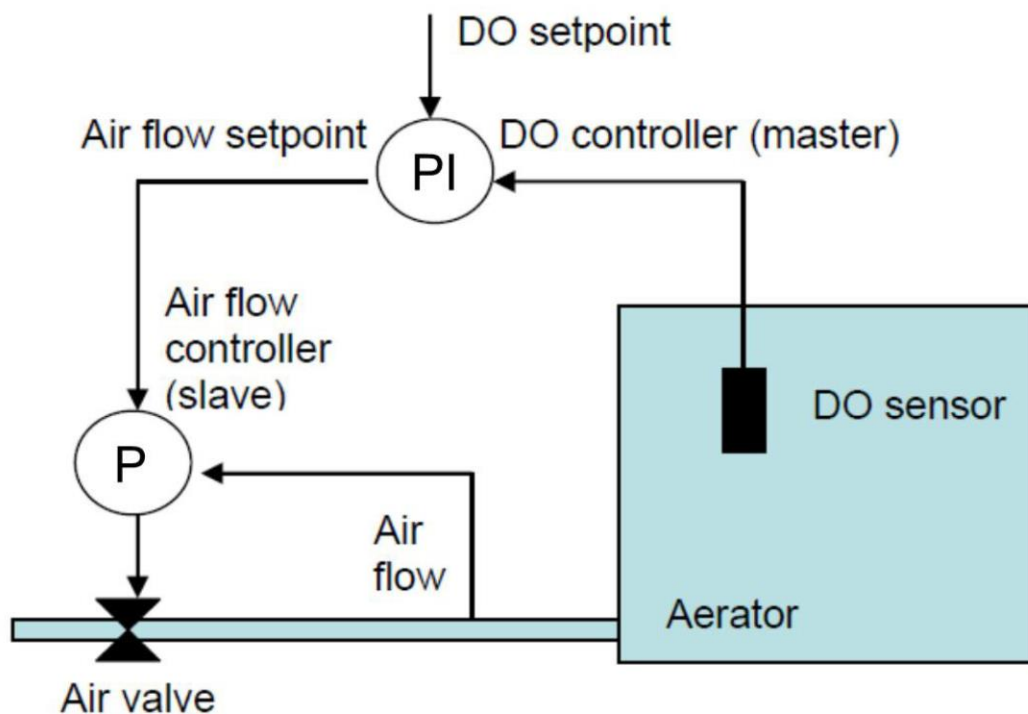


Figure 6: Dissolved Oxygen Cascade Control Diagram  
Source: Gustaf Olsson, Lund University, Sweden

Σχήμα 3.18 Διάγραμμα απεικόνισης ελέγχου μονάδας αερισμού σύμφωνα με την παραμετρική τιμή DO ( Gustaf Olsson, Lund University, Sweden )



### 3.10 Ο απευθείας έλεγχος Αμμωνιακών

Η αποτελεσματικότητα της μονάδας έγκειται στην απόδοση απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου και οργανικού φορτίου, έτσι η Νιτροποίηση είναι η μέθοδος που η αποτελεσματικότητα της δείχνει το επίπεδο απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου και BOD . Ο απευθείας έλεγχος της παραμέτρου των Αμμωνιακών ενώ εμφανίζει πλεονέκτημα καθώς απεικονίζεται άμεσα η κρίσιμη παράμετρος, ουσιαστικά υπολείπεται χρονικά καθώς η παράμετρος αλλάζει αρκετά καθυστερημένα έναντι του διαλυμένου οξυγόνου . Έτσι απαιτείται η ταυτόχρονη παρατήρηση της μέτρησης DO .

Ο συνεχής έλεγχος αλληλουχίας Αμμωνιακών είναι αρκετά πιο δυναμική στρατηγική με άμεσο αποτέλεσμα και χρήση ελεγκτών για την αλληλούχιση ενεργειών και παραμετρικών τιμών . Έτσι ο ελεγκτής αμμωνιακών καθορίζει την τιμή DO βασισμένος στην συγκέντρωση αμμωνιακών υπολογίζοντας την παροχή αέρα .

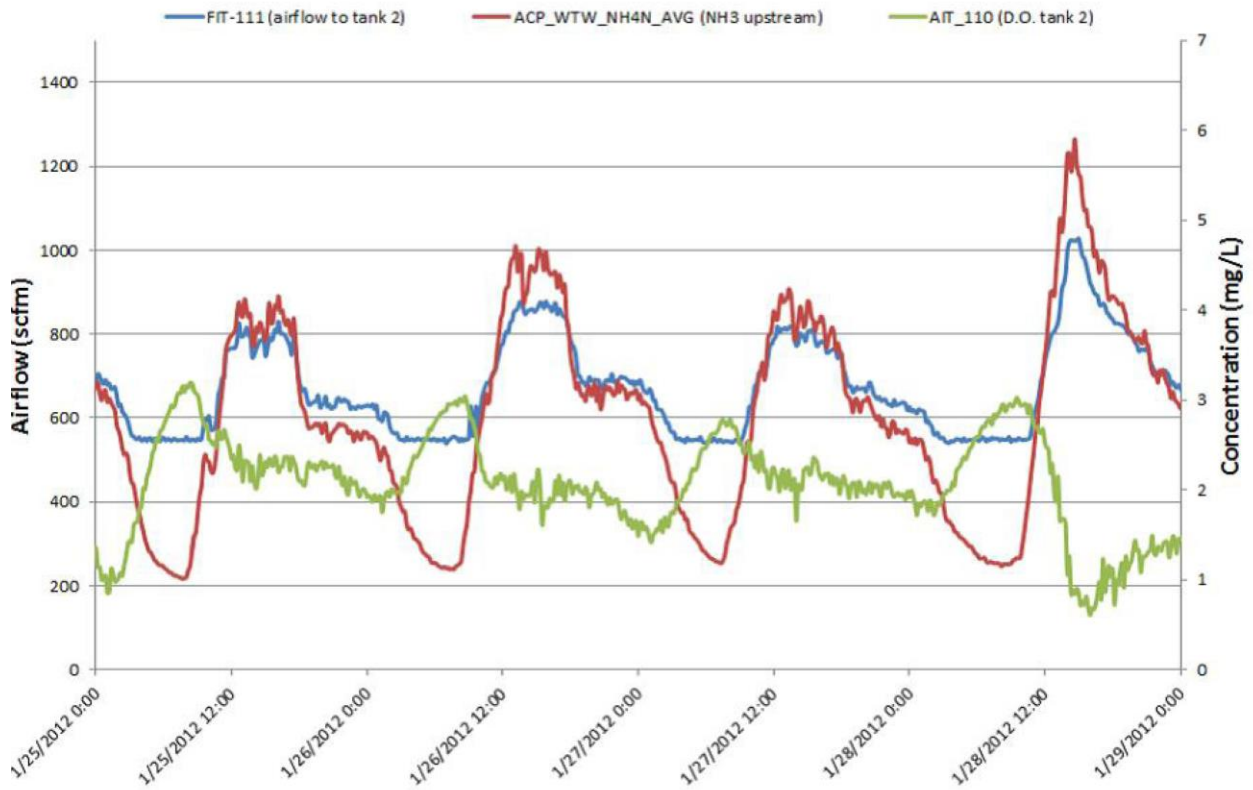
Για παράδειγμα η τιμή DO στα 2 ppm όταν τα αμμωνιακά είναι μεγαλύτερα από μια συγκεκριμένη συγκέντρωση και απαιτείται να επιταχυνθεί η αντίδραση νιτροποίησης , ενώ χαμηλότερη συγκέντρωση DO ενώ έχει επιτευχθεί απομάκρυνση θρεπτικών και άρα μπορούμε να εξοικονομήσουμε ενέργεια .

Ο απευθείας έλεγχος Αμμωνιακών δεν αποτελεί ευρεία εφαρμοσμένη μέθοδος, καθώς η τεχνολογία μέτρησης Αμμωνιακών παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από τις εργαστηριακές τιμές με συνέπεια την μερική απώλεια εμπιστοσύνης στα online δεδομένα . Με τον έλεγχο απομάκρυνσης θρεπτικών και την αναπτυγμένη εφαρμογή απευθείας ελέγχου στα Αμμωνιακά το σημαντικό ζήτημα είναι ο κατασκευαστικός & λειτουργικός εξοπλισμός που απαιτείται αρκετές φορές να αναβαθμιστεί έτσι ώστε να υπάρχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα .

### 3.11 Ο έλεγχος feed forward

Ο feed forward έλεγχος αφορά τις συνεχείς μετρήσεις και αλληλουχίσεις παραμέτρων μεταξύ τους προκειμένου να υπάρχει αποτελεσματική απόκριση του συστήματος στα φορτία εισόδου και διακυμάνσεις τιμών ακόμα και σε επίπεδο πρόβλεψης . Ο υπολογισμός φορτίων απαιτεί μετρήσεις παροχής και αμμωνιακών για την περίπτωση παρακολούθησης της νιτροποίησης ή COD αν δεν απαιτείται νιτροποίηση . Επιπλέον απαιτείται μοντέλο προκειμένου να υπολογιστεί η προβλεπόμενη απαίτηση διαλυμένου οξυγόνου και ο ρυθμός αερισμού . Ο έλεγχος feed forward είναι αποτελεσματική στρατηγική έναντι του παραδοσιακού ελέγχου , καθώς υπάρχει η δυνατότητα να ανταποκριθεί το σύστημα σε διακυμάνσεις φορτίων εισόδου και να διασφαλιστεί εκροή σταθερής ποιότητας . Η συγκεκριμένη στρατηγική εφαρμόστηκε στο Wheaton, IL Sanitary District , αποτελούμενη από PLC που υπολογίζει την απαιτούμενη παροχή αέρα βασισμένη σε αριθμό παραμέτρων , συμπεριλαμβάνοντας τις συγκεντρώσεις αμμωνιακών ανάντη του συστήματος και επιπλέον αισθητήρες .

Μόλις η συγκέντρωση αμμωνιακών είναι χαμηλότερη από την προκαθορισμένη τιμή στόχος τότε το σύστημα προσπαθεί να ελέγξει την παροχή αέρα προκειμένου να επιτευχθούν οι συγκεντρώσεις DO και αντίστοιχα η απόδοση των blowers . Όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα υπάρχει η δυνατότητα να διατηρηθούν τα επίπεδα οξυγόνου σε περιπτώσεις υψηλών φορτίων. Το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιεί κατά μέσο όρο 3,666 κυβικά πόδια το λεπτό αέρα και αντίστοιχα 1.14 κυβικά πόδια / lb BOD , έτσι η εξοικονόμηση ενέργειας υπολογίζεται σε επίπεδα 11% .



**Σχήμα 3.19** Διάγραμμα Online τιμών NH<sub>4</sub>-N, DO και παροχής Οξυγόνου σε στρατηγική ελέγχου feed forward (Poole, et al 2012 )

### **3.12 Online παρακολούθηση παραμετρικών τιμών σε συστήματα Νιτροποίησης-Απονιτροποίησης**

Οι βιοχημικές διεργασίες της Νιτροποίησης-Απονιτροποίησης και πολύ περισσότερο οι σύγχρονες τεχνολογίες απομάκρυνσης θρεπτικών (SCND , Αναπνοοχ) απαιτούν ενέργειες άμεσες σε επίπεδο ελέγχου και παρακολούθησης. Η τεχνολογία των Online αισθητήρων αναδεικνύει σημαντική πληροφορία για την κατάσταση του συστήματος και την πορεία των βιοχημικών διεργασιών. Ακόμη και στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση με εργαστηριακά αποτελέσματα, οι online αισθητήρες μπορούν να καταγράψουν συμβάντα τα οποία δεν μπορούν να αποτυπωθούν από τις εργαστηριακές αναλύσεις σε δεύτερο χρόνο.

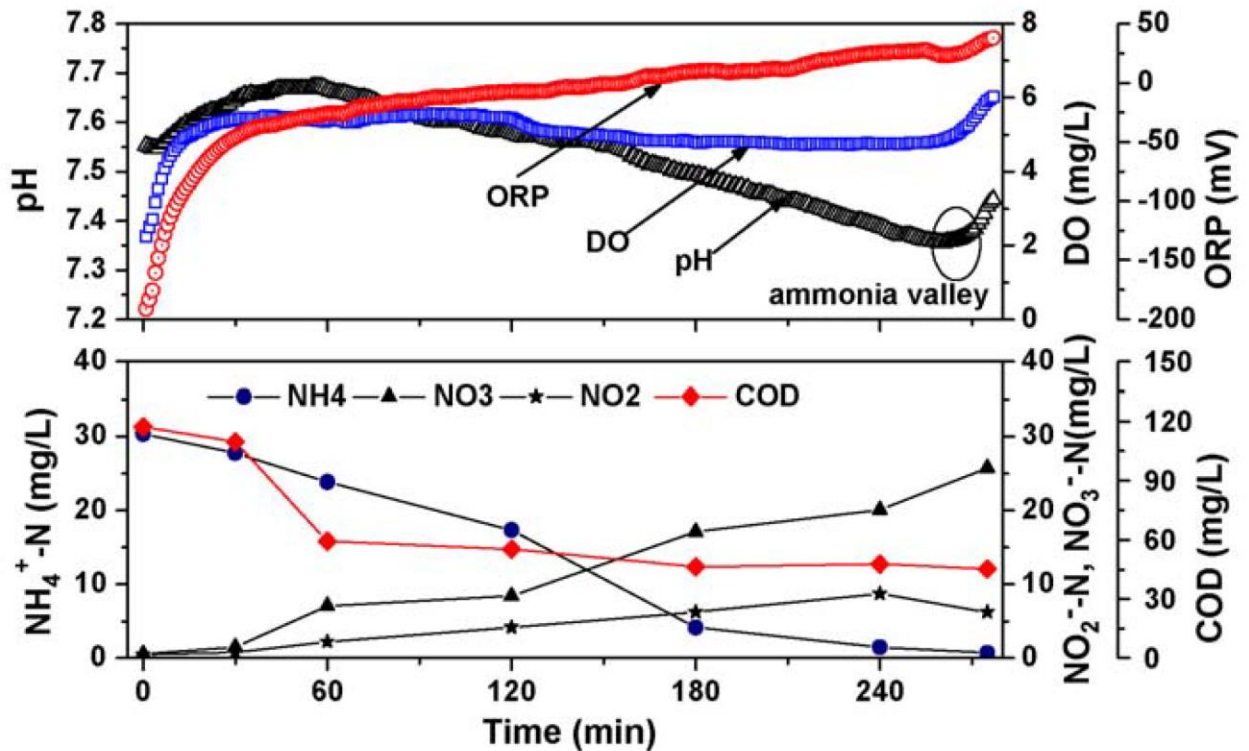
Στα παρακάτω γραφήματα αποτυπώνονται online μετρήσεις συγκεκριμένα στην περίοδο έναρξης SBR και παρατηρείται πως με τους κατάλληλους αισθητήρες και συγκεκριμένα pH,DO, ORP καταδεικνύονται σημαντικά τα στάδια των βιοχημικών διεργασιών .

Στο Σχήμα 3.4 δίνονται οι μετρήσεις των παραμέτρων ORP, DO, pH κατά την διάρκεια της νιτροποίησης και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων αζώτου και COD .

Η ανάλυση των παρακάτω γραφημάτων καταδεικνύει την απόδοση της νιτροποίησης και την πορεία της συγκεκριμένης διεργασίας. Παρατηρείται ελάττωση της  $\text{NH}_4\text{-N}$  κατά την διάρκεια οξείδωσης της και μετατροπής της σε  $\text{NO}_2\text{-N}$  και μετέπειτα  $\text{NO}_3\text{-N}$  , στο τέλος της αερόβιας φάσης η μορφή των  $\text{NO}_3\text{-N}$  είναι η κυρίαρχη μορφή αζώτου, άμεση ένδειξη αποτελεσματικότητας νιτροποίησης . Στο συγκεκριμένο συμπέρασμα συνηγορεί η ελάττωση του pH καθώς η νιτροποίηση μειώνει το pH εξαιτίας της παραγωγής ιόντων  $\text{H}^+$  .

Στο σημείο εκείνο όπου τερματίζεται η οξείδωση των  $\text{NH}_4\text{-N}$  παρατηρείται πως η τιμή του pH ανεβαίνει μετά από την καθοδική πορεία, σημείο έναρξης της μετατροπής νιτρωδών σε νιτρικά. Το συγκεκριμένο σημείο ονομάζεται «κοιλιάδα της αμμωνίας» και η άνοδος του pH οφείλεται στην απογύμνωση του  $\text{CO}_2$  κατά την ολοκλήρωση της νιτρωδοποίησης . Το σημείο αυτό είναι το τέλος της οξείδωσης της αμμωνίας  $\text{NH}_4\text{-N}$  , και με τη δυνατότητα να διακριθεί το συγκεκριμένο σημείο ελέγχεται χρονικά το στάδιο αερισμού και το τέλος της νιτρωδοποίησης .

Αρκετές φορές επιλέγεται η παράμετρος του pH & ORP ως ενδείξεις ελέγχου για τα συγκεκριμένα σημεία έναρξης και λήξης νιτρωδοποίησης-νιτροποίησης γιατί οι συγκεκριμένοι αισθητήρες εκτός της οικονομίας κόστους έχουν αρκετά γρήγορη απόκριση έναντι των Ιοντοεπιλεκτικών αισθητήρων μορφών Αζώτου ή ακόμα περισσότερο έναντι Αναλυτών.Επιπλέον παρέχεται συγκριτικό πλεονέκτημα η λειτουργία και ο έλεγχος της μονάδας να πραγματοποιείται βασιζόμενη σε παραμετρικές τιμές δύο αισθητήρων άμεσης απόκρισης έναντι ενός αισθητήρα που πιθανόν δεν αναδεικνύει ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης.



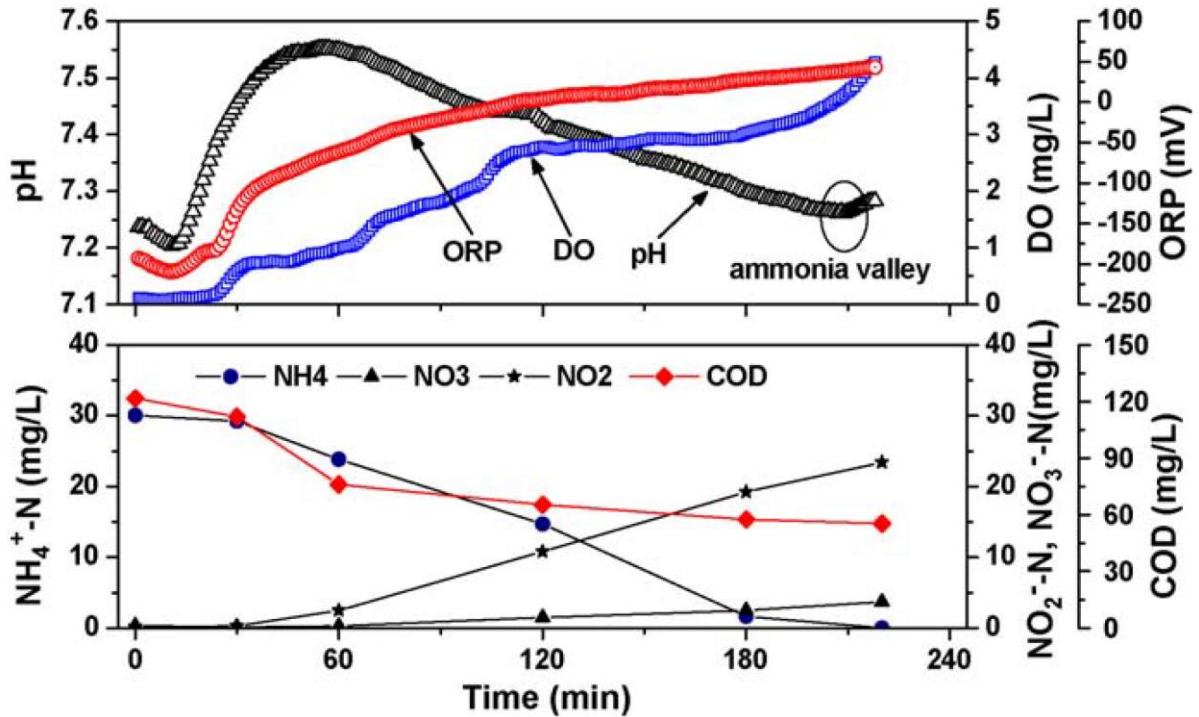
Σχήμα 3.20 Τυπικά διαγράμματα  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ , pH, ORP, DO σε κύκλο SBR (Guo , et al 2009)

(Το επάνω διάγραμμα είναι Online μετρήσεις και το κάτω διάγραμμα εργαστηριακές μετρήσεις)

Στο Σχήμα 3.5 δίνεται το προφίλ online μετρήσεων ORP, DO, pH κατά την νιτροποίηση αλλά και η διακύμανση των συγκεντρώσεων των διαφόρων μορφών αζώτου στο στάδιο του αερισμού μετρημένα σε εργαστηριακό επίπεδο.

Παρατηρείται ότι επιτελείται νιτροποίηση καθώς στο τέλος του συγκεκριμένου γραφήματος τα  $\text{NO}_2\text{-N}$  είναι το κυρίαρχο προϊόν. Παρατηρείται το σημείο της «κοιλιάδας αμμωνίας» ή αλλιώς ammonia break point που σηματοδοτεί το τέλος της οξείδωσης της  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις παρατηρείται η άνοδος της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου και συγκεκριμένα σχεδόν ταυτόσημα με το τέλος της οξείδωσης της  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Η ζήτηση

οξυγόνου στη βιομάζα έχει μειωθεί με την πλήρη οξείδωση της αμμωνίας με αποτέλεσμα την αύξηση συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου.



Σχήμα 3.21 Τυπικά διαγράμματα  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ , pH, ORP, DO σε κύκλο SBR.

Το επάνω διάγραμμα είναι Online μετρήσεις και το κάτω διάγραμμα εργαστηριακές μετρήσεις. Effective and robust partial nitrification to nitrite by real-time aeration duration control in an SBR treating domestic wastewater (J.H. Guo, et al 2009)

Η ανίχνευση σημείων ελέγχου όπως οι «κοιλιάδες» ή break points κατά την ορολογία που τα συναντώνται στην βιβλιογραφία είναι κρίσιμα σημεία ελέγχου της διεργασίας τα οποία δίνουν τη δυνατότητα να διακριθούν και ελεγχθούν σημεία των βιοχημικών διεργασιών άμεσα και αξιόπιστα. Οι βασικές παράμετροι για ανίχνευση break point σημείων σε εγκαταστάσεις μονάδων SBR είναι pH, DO, ORP, συμβατικοί αισθητήρες με αρκετά χρόνια λειτουργίας και

αξιοπιστίας σε παγκόσμια κλίμακα και γρήγορους χρόνους ολοκλήρωσης αποτελεσμάτων . Ο συνδυασμός των γραφημάτων είναι αρκετά αξιόπιστος για να υποδείξει τα σημεία έναρξης και λήξης βιοχημικών διεργασιών, με την προϋπόθεση φυσικά οι online αισθητήρες να μην έχουν δικλείδα ασφαλείας με κατώφλι παραμετρικών τιμών έτσι ώστε να αλλάζει το στάδιο βιοχημικής διεργασίας με εφαρμογή βασικών συστημάτων όπως αύξηση/μείωση παροχής αερισμού .

Τα “breaking points” ή “bending points” τα συναντάμε συνήθως σε online διαγράμματα αποτύπωσης αποτελεσμάτων εγκαταστάσεων και συνήθως μονάδων μικρής κλίμακας, για παράδειγμα τύπου SBR . Ειδικότερα κατά το στάδιο της νιτροποίησης το σημείο «κοιλάδα αμμωνίας» για την τιμή pH (Peng et al., 2006; Traore et al., 2005) (Fig. 3.6A), πλατό μέτρησης ORP (Peddie et al., 1990; Poo et al., 2006) (Fig. 3.6B), elbow for DO (Li et al., 2011; Martín de la Vega et al., 2012) (Fig. 3.6C) και μεταβολές σε επίπεδο μέτρησης του προφίλ του OUR (Paul et al. 1998; Puig et al. (2005).

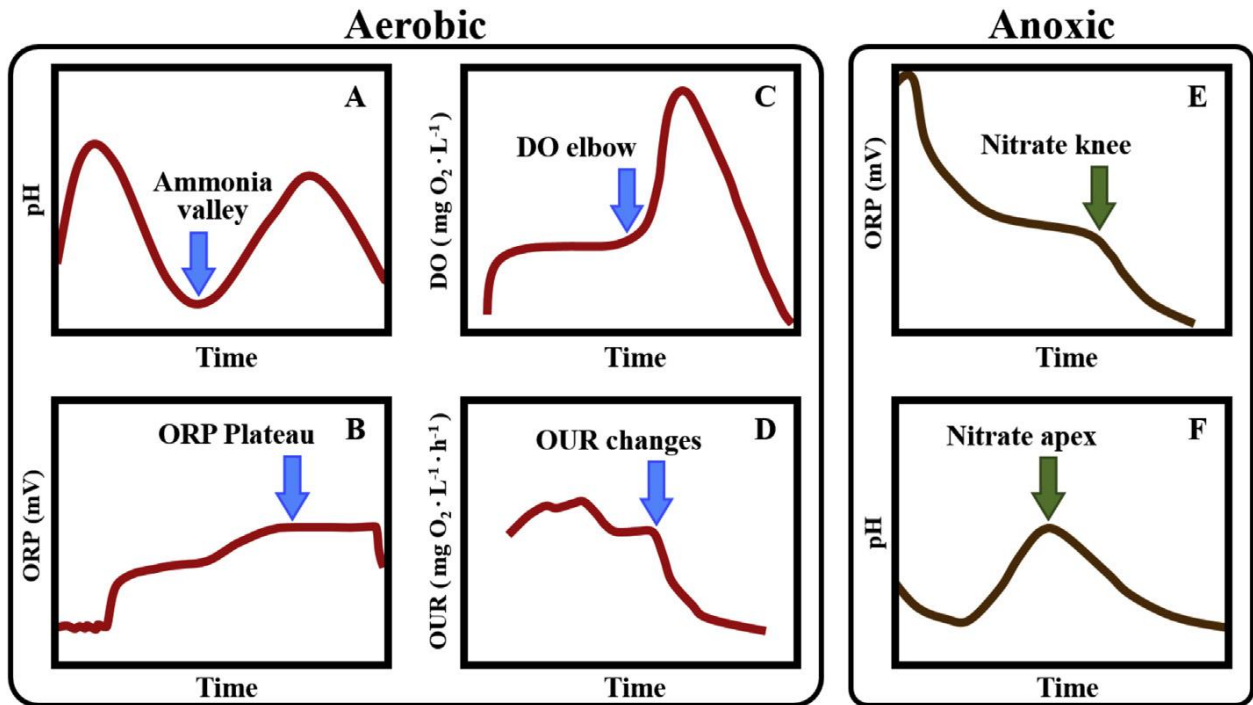
Το σημείο που αναφέρεται ως πλατό μέτρησης παρατηρείται μικρή σταθεροποίηση τιμών ORP σε θετικό πρόσημο κάτι που σηματοδοτεί ότι το σύστημα βρίσκεται στη μέγιστη οξειδωτική κατάσταση κατά το στάδιο αερισμού. Από το συγκεκριμένο σημείο και έπειτα δεν απαιτείται συνεχής αερισμός και μία στρατηγική ελέγχου ή παράτασης αερισμού καθώς φτάνοντας στο όριο οξειδωτικής κατάστασης υπάρχει ο κίνδυνος να μην υπάρχει οργανικό φορτίο για το στάδιο της απονιτροποίησης (σε περίπτωση που προβλέπεται μετά το συγκεκριμένο στάδιο) , (Chang-Six RA, 1997) .



Το σημείο που προκύπτει κατά την αερόβια φάση ως “DO elbow” είναι το σημείο όπου παρατηρείται βαθμιαία αύξηση των συγκεντρώσεων DO και αναδεικνύει την παύση ζήτησης από το σύστημα για οξυγόνο . Σημείο που αποδεικνύει πως το σύστημα έχει τερματίσει τις διαδικασίες οξείδωσης οπότε δεν απαιτείται παροχή αερισμού , δεν πραγματοποιείται ζήτηση οξυγόνου και συνέπεια να υπάρχει σημείο καμπής όπου η συγκέντρωση DO αυξάνεται. Συμπεραίνεται το τέλος της νιτροποίησης κάτι που θα μπορούσε να αποδειχθεί με συγκριτικό εργαστηριακό αποτέλεσμα της παραμέτρου OUR, καθώς μειώνεται η ζήτηση οξυγόνου από τους νιτροποιητές .

Στο στάδιο της απονιτροποίησης έχουμε την κορυφή νιτρικών για την μέτρηση ORP (Holman and Wareham, 2002; Wang et al., 2013) (Fig. 3.6E) την κορυφή νιτρικών για την μέτρηση pH(Rubio et al., 2004; Zeng et al., 2008) (Fig. 3,6F). Ωστόσο, προκειμένου να αποτυπωθούν τα συγκεκριμένα σημεία τομής των βιοχημικών διεργασιών απαιτείται εύρυθμη λειτουργία των online αισθητήρων , τακτική συντήρηση και βαθμονόμηση , καθώς υπάρχει σοβαρό ενδεχόμενο τα γραφήματα να επηρεαστούν από το σημείο εγκατάστασης και να εμφανίσουν διακυμάνσεις εξαιτίας της δεξαμενής, της ροής εισόδου-τροφοδοσίας και οποιοδήποτε θέμα κατασκευής ή στοιχείου που μπορεί να προσδίδει ένα τυπικό και επαναλήψιμο σφάλμα ή «θόρυβο» στον κάθε αισθητήρα .

Στο παρακάτω σχήμα 3.6 έχουμε συγκεντρωτικά σημεία καμπής των βιοχημικών διεργασιών και τις αντίστοιχες παραμετρικές τιμές που αυτά εμφανίζονται , ή αναζήτηση αυτών των σημείων είναι κρίσιμο σημείο για τον χρονικό έλεγχο της μονάδας , καλύτερη απόδοση , αποτελεσματική απομάκρυνση θρεπτικών και φυσικά ενεργειακό όφελος .



Σχήμα 3.22 Σημεία καμπής Βιοχημικών διεργασιών συναρτήσεσι παραμετρικών τιμών( Puig et al. (2005) and Poo et al. (2006)

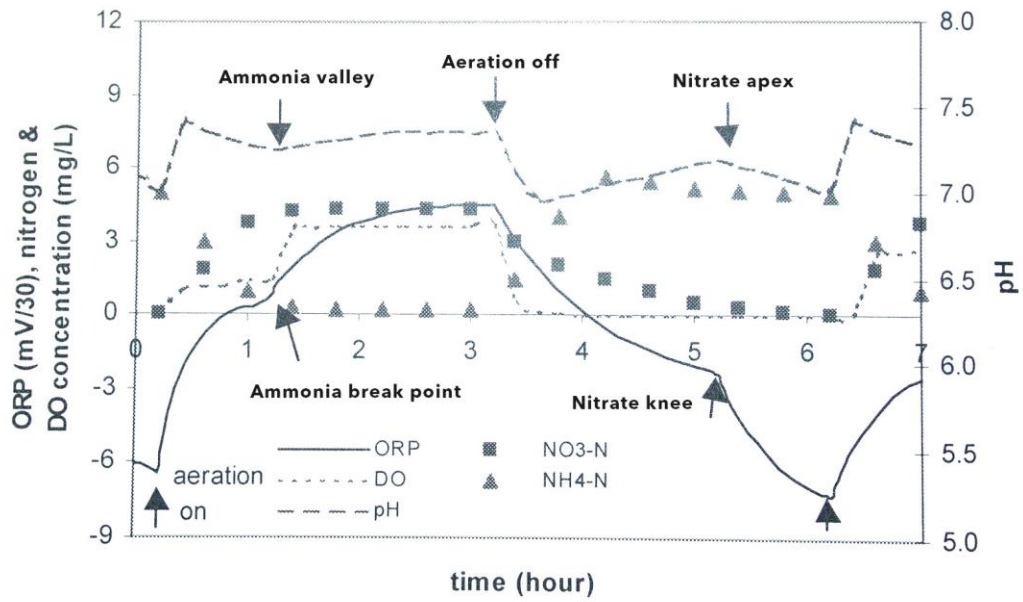
Ο συνδυασμός των ανωτέρω ενδείξεων αποτελεί χρήσιμο εργαλείο σε συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης της μονάδας και η ολοκληρωμένη εικόνα με την κατάλληλη επιλογή των αισθητήρων με αποτέλεσμα την πληρέστερη εικόνα στα σημεία καμπής των βιοχημικών διεργασιών. Στο παρακάτω γράφημα αποτυπώνεται η σύνοψη σε κύκλο SBR των παραμετρικών τιμών ORP, DO, pH και εργαστηριακών τιμών NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N. Παρατηρούμε πως στην έναρξη του κύκλου με την τροφοδοσία, κατά την έναρξη του αερισμού έτσι οι συγκεντρώσεις των Αμμωνιακών αρχίζουν να ελαττώνονται βαθμιαία. Ο τερματισμός της οξείδωσης της Αμμωνίας σηματοδοτείται στην «κοιλάδα αμμωνίας» για την τιμή pH η οποία ελαττώνεται με την παραγωγή ιόντων H<sup>+</sup>, ταυτόχρονα παρατηρούμε την αύξηση τιμών DO στο σύστημα καθώς ελαττώνεται η ζήτηση Οξυγόνου από τη βιομάζα.

Κατά την έναρξη των ανοξικών συνθηκών παρατηρείται η αναμενόμενη μείωση του DO , μείωση των τιμών ORP στο σύστημα καθώς προχωράει προς την απονιτροποίηση .

Τα σημεία καμπής Nitrate knee και Nitrate apex στην ανοξική πλέον φάση της SBR καταδεικνύουν ουσιαστικά το τέλος της απονιτροποίησης . Συγκεκριμένα το σημείο καμπής Nitrate knee είναι το σημείο κλίσης στην μέτρηση ORP που είναι συσχετισμένο με την αλλαγή πλέον δέκτη e- από νιτρικά σε θειικά ή άλλες ενώσεις .

Το σημείο Nitrate apex είναι το μέγιστο σημείο στην τιμή pH όπου υπάρχει ισορροπία στην παραγωγή ιόντων OH- που οδηγεί σε αλκαλικό περιβάλλον κατά την διάρκεια της απονιτροποίησης με την αλκαλικότητα του συστήματος . Αποτελεί σημείο που παρατηρείται κατά την διάρκεια της ανοξικής φάσης και σηματοδοτεί τον τερματισμό της απονιτροποίησης , κάτι που αποτυπώνεται στο παρακάτω γράφημα με την περαιτέρω μείωση των τιμών ORP που σημαίνει περαιτέρω παρουσία αναγωγικού παράγοντα στο δείγμα . Αξίζει να αναφερθεί πως το σημείο καμπής Nitrate apex δύνανται να μην είναι πάντα ευδιάκριτο εξαιτίας παρατηρούμενων συμβάντων όπως υψηλή αλκαλικότητα του δείγματος, φόρτιση του δείγματος με οργανικό φορτίο αλλά και «θόρυβο» που προκλήθηκε από την εφαρμογή όπως τυχαία σωματίδια ή δίνες στροβιλισμού δείγματος .

### ICA in Wastewater Systems



Σχήμα 3.23 Διάγραμμα χρονικών αλλαγών Online παραμετρικών τιμών ( G.Olsson, M.Nielsen, Z.Yan, A.lynggard-Jensen, J-P Steyer ,2005 )

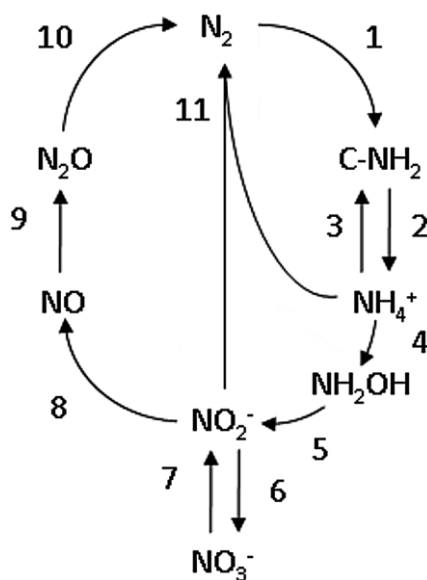
## 4. Βιολογική απομάκρυνση αζώτου σε αντιδραστήρες SBR και εφαρμογή online αισθητήρων

### 4.1. Φορτίο Αζώτου στα λύματα

Το άζωτο είναι από τα κυρίαρχα θρεπτικά στοιχεία στα λύματα και παίζει σημαντικό ρόλο στις βιοχημικές διεργασίες της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Οι ανόργανες μορφές του αζώτου είναι η αμμωνία, τα νιτρικά και τα νιτρώδη, ενώ υπάρχει και διαλυτό και σωματιδιακό οργανικό άζωτο.

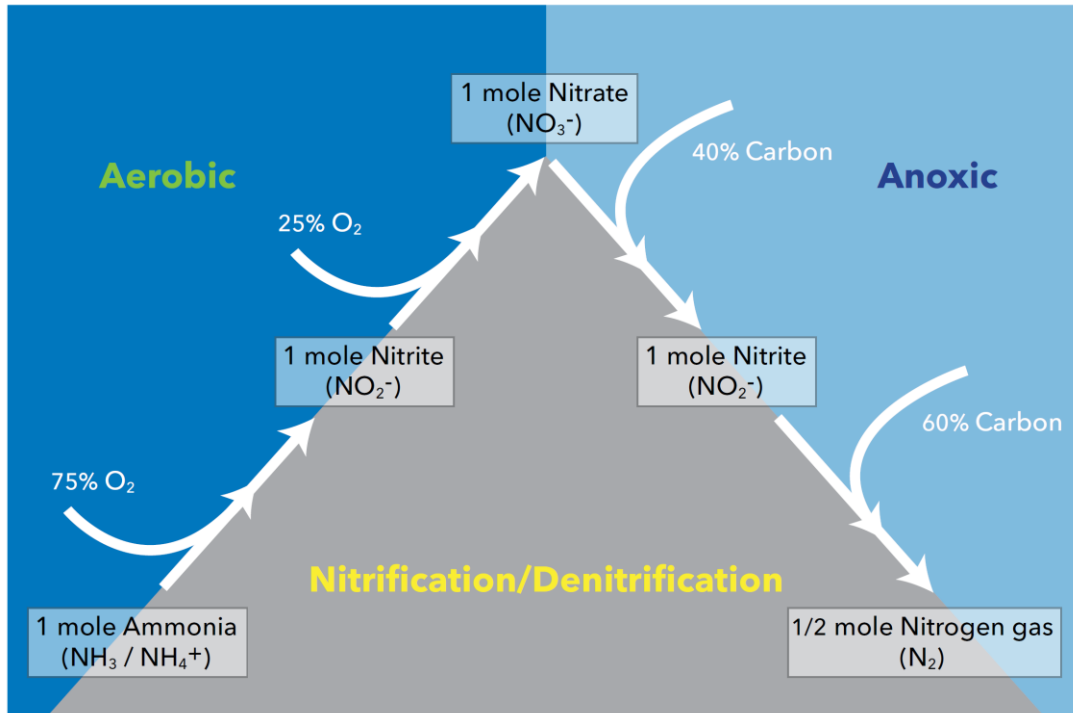
Το οργανικής προέλευσης άζωτο εισέρχεται στα λύματα από την ουρία και πρωτεΐνες, ένα μεγάλο μέρος υδρολύεται σε αμμωνία όπου ανάλογα το pH μπορεί να μετατραπεί σε αμμώνιο ή ελεύθερη αμμωνία. (Ανδρεαδάκης, 1986).

Το άζωτο είναι δομικό συστατικό του κυτταροπλάσματος οργανισμών και βακτηρίων και συνιστά σημαντικό παράγοντα στην επεξεργασία και βιοαποικοδόμηση των λυμάτων. Στο παρακάτω σχήμα 3.1 έχουμε τις κύριες μορφές Αζώτου και τα ενδιάμεσα προϊόντα κατά την διάρκεια βιοχημικών διεργασιών.



Σχήμα 3.1 Οι κύριες διεργασίες μετατροπής του αζώτου. Προέλευση Gustavsson (2010)

Στο παρακάτω γράφημα βλέπουμε τα βήματα και τις απαιτήσεις των διεργασιών και συγκεκριμένα των μονάδων αερισμού για την μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά κατά την διάρκεια της Νιτροποίησης και των ζωνών απονιτροποίησης για την μετατροπή νιτρικών σε μοριακό άζωτο .



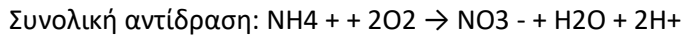
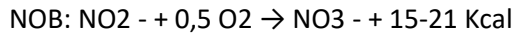
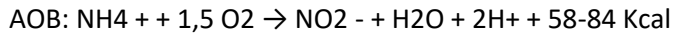
**Σχήμα 4.2 . Βιοχημικές διεργασίες μορφών Αζώτου σε συστήματα απομάκρυνσης θρεπτικών και απαιτήσεις των διεργασιών αυτών**

#### **4.2.Νιτροποίηση**

Με τη νιτροποίηση πραγματοποιείται αντίδραση δύο σταδίων και ειδικότερα οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου (NH<sub>4</sub>-N) σε νιτρικό άζωτο (NO<sub>3</sub>-N) με ενδιάμεσο προϊόν το νιτρώδες άζωτο (NO<sub>2</sub>-N) (Blackburne et al., 2008). Στην πρώτη αντίδραση έχουμε αυτότροφα βακτήρια που οξειδώνουν το αμμωνιακό άζωτο σε νιτρώδη , χρησιμοποιώντας ως αποδέκτη ηλεκτρονίων το Οξυγόνο και πηγή άνθρακα το CO<sub>2</sub> (Ahn, 2006). Τα AOB βακτήρια συγκεκριμένα είναι Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrospira, Nitrosovibrio, Nitrosolobus κ.α. (Ge et al., 2015).

Η νιτροποίηση συνεχίζεται με τη νιτρίκοποίηση και οξείδωση του ενδιάμεσου προϊόντος νιτρωδών σε νιτρικά με τη βοήθεια των NOB βακτηρίων όπως Nitrospira, Nitrospina, Nitrococcus, Nitrocystis κ.α. να συμμετέχουν (Ahn, 2006; Ge et al., 2015).

Οι αντιδράσεις που περιγράφουν την εν λόγω διεργασία είναι:



Η στοιχειομετρία των ανωτέρω αντιδράσεων καταδεικνύει ότι για την οξείδωση 1 gr αμμωνίας απαιτούνται 4,57 gr οξυγόνου, και ειδικότερα τα 3,43 gr για την οξείδωση της αμμωνίας και 1,14 gr οξυγόνου για την οξείδωση σε νιτρικά .

Στη συγκεκριμένη διεργασία οι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την νιτροποίηση (αυτότροφοι νιτροποιητές) μπορούν να παρεμποδιστούν από την παρουσία διάφορων οργανικών ενώσεων ή βαρέων μετάλλων και τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις τους σε δείγματα αστικών λυμάτων . Επιπλέον υπάρχουν λειτουργικές παράμετροι όπου καθορίζουν σημαντικά την ανάπτυξη τους όπως το pH, DO, FNA , NH<sub>3</sub>

#### **4.3 Απονιτροποίηση**

Με την απονιτροποίηση επιτελείται αναγωγή των νιτρικών σε μοριακό άζωτο και την ελεύθερωση του στην ατμόσφαιρα . Η συγκεκριμένη διεργασία πραγματοποιείται υπό ανοξικές συνθήκες, δηλαδή απουσία οξυγόνου και αποδέκτης ηλεκτρονίων είναι τα νιτρικά και πηγή ενέργειας και άνθρακα ο οργανικός άνθρακα των λυμάτων (Ανδρεαδάκης, 1986 ; Ahn, 2006).

Τα βακτήρια που είναι υπεύθυνα για την απονιτροποίηση είναι Gram αρνητικά, όπως τα Pseudomonas και Thiobacillus, είτε Gram θετικά, όπως το Bacillus, ενώ και κάποια είδη αρχαίων, όπως το

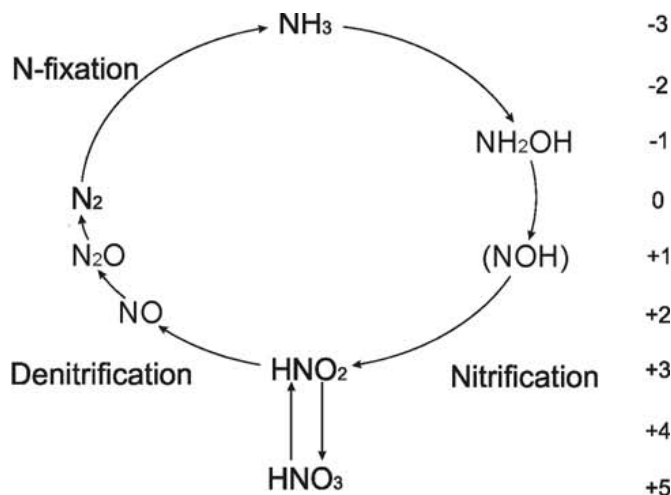
Halobacterium έχουν απονιτροποιητικές ιδιότητες (Ahn, 2006).

Στη συγκεκριμένη διεργασία απαιτείται ικανή ποσότητα οργανικού άνθρακα αλλά και αφομοιωτικά ένζυμα που συνεργούν στην αναγωγή των νιτρικών (Ανδρεαδάκης, 1986). Σε ορισμένες περιπτώσεις (μετα-απονιτροποίηση) απαιτείται η προσθήκη εξωτερικής πηγής άνθρακα ως δότη ηλεκτρονίων . Στη διεργασία της απονιτροποίησης είναι δυνατόν να έχουμε δημιουργία ενδιάμεσων προϊόντων όπως το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O) ή νιτρικού οξέος (NO) (Rodriguez-Caballero et al., 2013).

Τέλος παρατηρείται στην απονιτροποίηση αύξηση του pH καθώς ανακάτται μέρος της αλκαλικότητας (Changyong et al., 2011) , το οποίο καταναλώθηκε στη διάρκεια της νιτροποίησης .

#### 4.4 Νιτρωδοποίηση-Απονιτρωδοποίηση (Short Cut Nitrogen Removal)

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί καινοτόμες διεργασίες βιολογικής απομάκρυνσης αζώτου όπως είναι αυτή της νιτρωδοποίησης-απονιτρωδοποίησης



Σχήμα 4.3 Βιοχημικές μορφές αζώτου στα λύματα κατά τις διεργασίες της Νιτροποίησης / Απονιτροποίησης . Προέλευση Gustavsson (2010)

Τα AOB βακτήρια οξειδώνουν την αμμωνία σε νιτρώδες άζωτο και η περαιτέρω οξείδωση σε νιτρικό άζωτο αναχαιτίζεται, αυτό είναι το στάδιο της νιτρωδοποίησης (Aslan και Dahab, 2008).

Η νιτρωδοποίηση επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη των AOB βακτηρίων και ταυτόχρονα την αναχαιτίωση των NOB βακτηρίων (Blackburne et al., 2008), ένα σύστημα επιλογής βακτηρίων το οποίο επιτυγχάνεται με τον έλεγχο διάφορων παραμέτρων όπως η ελεύθερη αμμωνία, το διαλυμένο οξυγόνο, ο χρόνος παραμονής, η θερμοκρασία, η συσσώρευση νιτρωδών κ.α. (Blackburne et al., 2008; Aslan και Dahab, 2008). Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μειωμένη ενεργειακή απαίτηση κατά 25% , καθώς έχουμε μικρότερη απαίτηση διαλυμένου οξυγόνου έναντι της συμβατικής νιτροποίησης, επιπλέον μικρότερο όγκο παραγόμενης βιομάζας και ταχύτερες κινητικές ανάπτυξης (Pollice et al., 2002; Gustavsson, 2010).



Η αναχαίτιση των NOB βακτηρίων δεν είναι πάντοτε απλό ζήτημα , καθώς υπάρχουν παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν και σε βαθμό που να επιτρέπει ταυτόχρονα την ομαλή ανάπτυξη των AOB βακτηρίων, έτσι πρέπει να αποφύγουμε τη συσσώρευση νιτρωδών για να μην υπάρχει αύξηση τοξικότητας στο σύστημα , να ρυθμιστεί το pH και το διαλυμένο οξυγόνο. Η απονιτρωδοποίηση προσφέρει την απομάκρυνση αζωτούχου φορτίου από την αναγωγή νιτρωδών σε νιτρικά και απαιτεί 40% μειωμένη ποσότητα οργανικού φορτίου ως πηγή ενέργειας και άνθρακα έναντι της συμβατικής απονιτροποίησης . (Gustavsson, 2010; Pollice et al., 2002; Jenicek et al.,2007).

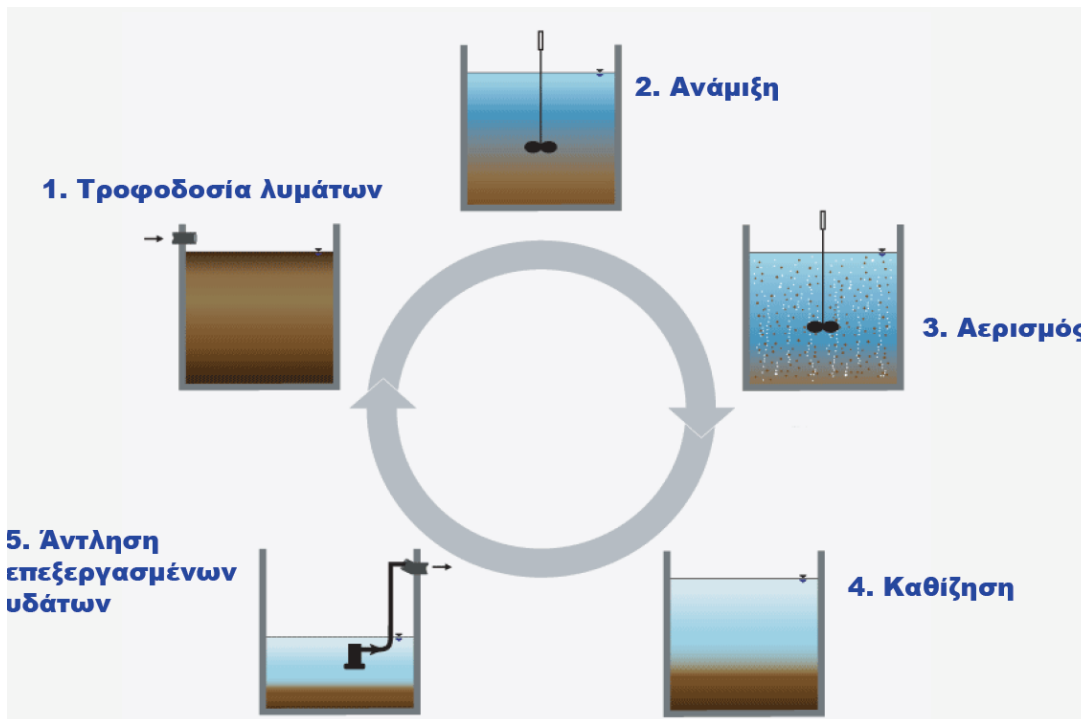
#### **4.5 Αντιδραστήρες εναλλασσόμενων φάσεων διαλείποντος έργου (SBR)**

Οι αντιδραστήρες εναλλασσόμενων φάσεων διαλείποντος έργου (SBR) έχουν ευρεία εφαρμογή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση λυμάτων αστικών και βιομηχανικών , καθώς αποτελούν ευέλικτες λύσεις και αρκετά αξιόπιστες .

Η βιβλιογραφία αναφέρει πως οι αντιδραστήρες τύπου SBR είναι αρκετά αποδοτικοί για επεξεργασία στραγγιδίων καθώς μπορούν να εφαρμοστεί η συμβατική μέθοδος νιτροποίησης – απονιτροποίησης αλλά και η νιτρωδοποίηση – απονιτρωδοποίηση . (Fux et al., 2006).

Το σημαντικό στους αντιδραστήρες SBR είναι πως όλες οι διεργασίες πραγματοποιούνται στην ίδια δεξαμενή με εναλλαγή διαφορετικών σταδίων λειτουργίας χρονικά ορισμένα .

Η λειτουργία της SBR δεξαμενής περιλαμβάνει την τροφοδοσία, βιοχημικές αντιδράσεις, καθίζηση και άντληση εξόδου (Metcalf και Eddy, 2003), όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.6.



**Σχήμα 4.4** Κύκλοι λειτουργίας του SBR( *Διπλωματική εργασία Δρ Ευάγγελου Στατήρη*)

Η ευελιξία που παρουσιάζεται με τον συγκεκριμένο τύπο αντιδραστήρα είναι πως έχουμε τη δυνατότητα για αμεσότητα και ευκολία να γίνει έλεγχος και παρακολούθηση online των φυσικοχημικών παραμέτρων σύμφωνα με τις εναλλαγές φάσεων και όλες αυτές οι επιμέρους διεργασίες μπορούν να ελεγχθούν καθώς γίνονται σε έναν αντιδραστήρα , χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν πραγματοποιείται έλεγχος σε διαφορετικούς αντιδραστήρες ή δεξαμενές .

Με την επιλογή συστήματος SBR η βιβλιογραφία αναφέρει σημαντικά καλές αποδόσεις απομάκρυνσης φορτίων αζώτου από 0,5-0,8 kgN/m<sup>3</sup>\*d με τους ρυθμούς νιτροδοποίησης να κυμαίνονται από 1,2-1,4 kg N/m<sup>3</sup>\*d και τους αντίστοιχους ρυθμούς απονιτροδοποίησης να φτάνουν τα 1,4-2,2 kg N/m<sup>3</sup>\*d (Fux et al., 2003; Gustavsson et al., 2010).

Με την εφαρμογή της μεθόδου Short Cut Nitrogen Removal σε αντιδραστήρες τύπου SBR υπάρχει η δυνατότητα για διαχείριση υψηλών φορτίων Αζώτου / Ελεύθερης αμμωνίας με αποτελεσματική και ικανοποιητική απομάκρυνση θρεπτικών αλλά και αποδοτικό έλεγχο των λειτουργικών παραμέτρων όπως DO, pH με βασικά συστήματα όπου οι λειτουργίες τους συνδέονται και επικοινωνούν με τις μετρούμενες παραμετρικές τιμές .

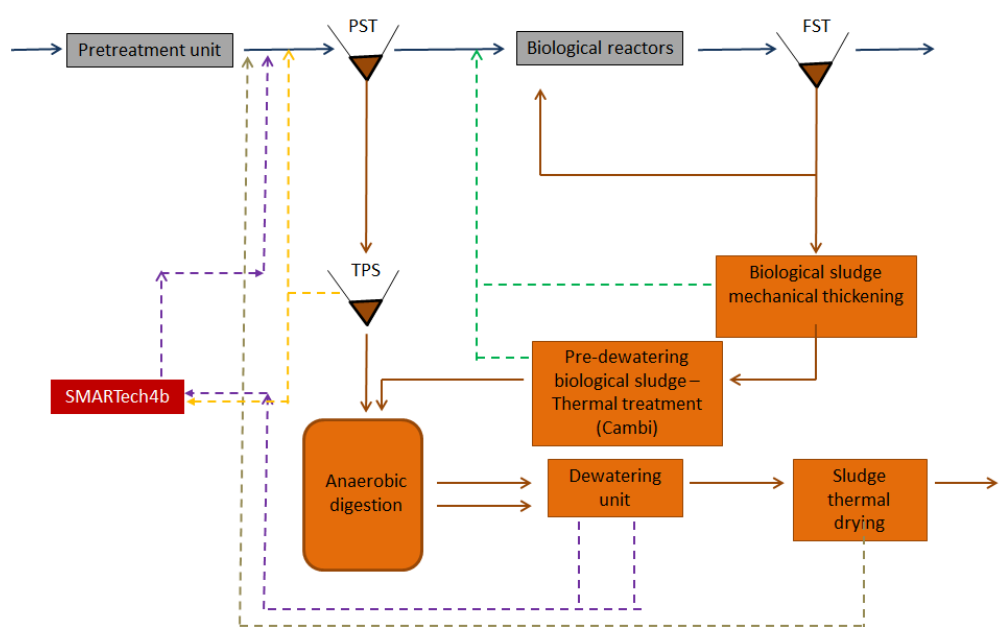
## 5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SMART PLANT.

### 5.1 Περιγραφή πιλοτικού Smart Plant

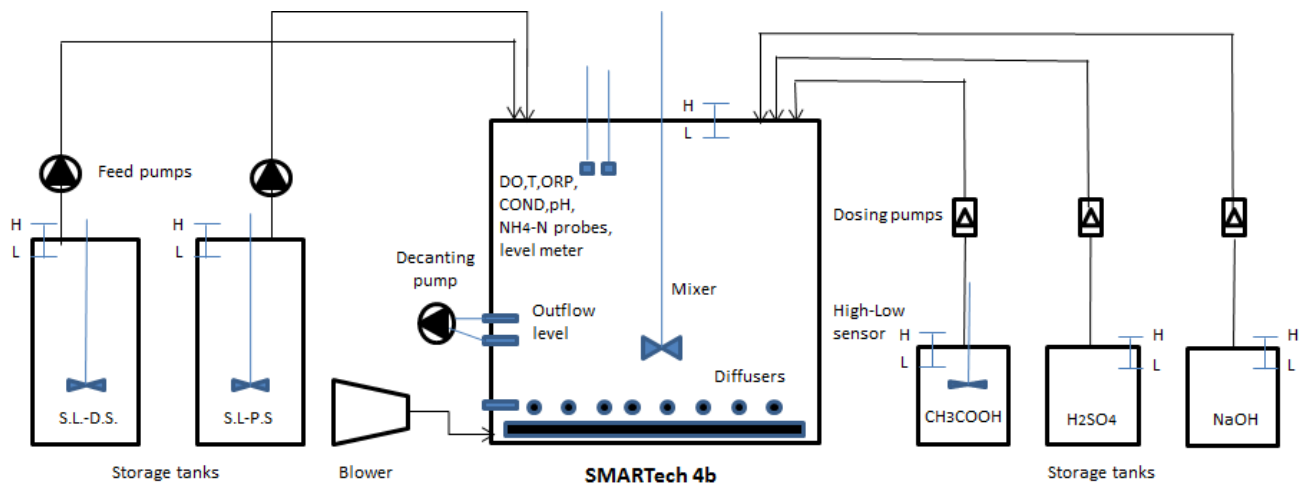
Το πιλοτικό σύστημα είναι ένα καινοτόμο σύστημα βιολογικής απομάκρυνσης αζώτου μέσω των διεργασιών νιτρωδοποίησης και απονιτρωδοποίησης – απονιτρωδοποιήσεως, εγκατεστημένο στην Ψυττάλεια και επεξεργάζεται το ρεύμα των στραγγιδίων που έρχεται από τις διαδικασίες πάχυνσης & αφυδάτωσης της εγκατάστασης.

Το συγκεκριμένο πιλοτικό σύστημα επεξεργάζεται βιολογικά τα στραγγίδια της εγκατάστασης με αφαίρεση των θρεπτικών στοιχείων όπως άζωτο και φώσφορος και επιστροφή πάλι στην είσοδο της εγκατάστασης.

Η συγκεκριμένη διαδικασία ωφελείται από το οργανικό φορτίο που βρίσκεται στο ρεύμα των στραγγιδίων προερχόμενο από την πάχυνση της πρωτοβάθμιας καθιζήσεως και αποτελεί εύκολα βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση θρεπτικών.



Σχήμα 5.1 Ροϊκό διάγραμμα Ιλύος & Ανάμεικτου υγρού ΚΕΛ Ψυττάλειας ( Διπλωματική εργασία Δρ Ευάγγελου Στατήρη)



**Σχήμα 5.2 Βασικά λειτουργικά συστήματα και Η/Μ εξοπλισμός ( Διπλωματική εργασία Δρ Ευάγγελου Στατήρη)**

Το πιλοτικό σύστημα διαθέτει δεξαμενή τύπου SBR με σύστημα ανάδευσης , δίνοντας τη δυνατότητα ανάδευσης ισχύος  $8 \text{ W} / \text{m}^3$  . Με ωφέλιμο βάθος  $1.5 \text{ m}$  κατά τη διάρκεια του αερισμού ωφελεί δυναμικά την μετάδοση οξυγόνου από τους αεριστήρες .

Το σύστημα αερισμού έχει δυναμική για  $252 \text{ m}^3 / \text{hr}$  στα  $200 \text{ mbar}$  με αποτελεσματική ικανότητα άμεσου αερισμού της δεξαμενής .

Η SBR δεξαμενή τροφοδοτείται με στραγγίδια από την μονάδα αφυδάτωσης και την παχυμένη πρωτοβάθμια λύ . Τα στραγγίδια μεταφέρονται και αποθηκεύονται σε δύο δεξαμενές ανάντη της SBR με ικανότητα αποθήκευσης κατ'ελάχιστο 2 ημερών και όγκο  $8 \text{ m}^3$  έκαστη .

Κάθε δεξαμενή στραγγιδίων έχει εγκατεστημένο σύστημα αντλίας με ικανότητες που να επιτρέπουν την τροφοδοσία του συστήματος με ελάχιστο αριθμό 3 κύκλων ημερησίως και τη διάρκεια τροφοδοσίας στα 15 λεπτά περίπου .

Επιπλέον και ενώ υπάρχει σύστημα απομάκρυνσης της ιλύος , έχουμε την ικανότητα να προσθέτουμε στο σύστημα διάλυμα οξικού οξέος για να καλυφθούν οι απαιτήσεις βιοδιασπάσιμου οργανικού φορτίου και δυνατότητες ενεργού όγκου 1 m<sup>3</sup> και αποθήκευσης 7 ημερών .

Συγκεκριμένα αποτελείται από μονάδα δοσομέτρησης οξέος και βάσης όπου είναι συνδεδεμένο με τον controller και τον αισθητήρα pH που είναι εγκατεστημένος στην δεξαμενή SBR .

Η μονάδα SBR έχει εγκατεστημένο πιεζοηλεκτρικό μεταδότη στάθμης για τον έλεγχο της στάθμης ιλύος και επιπλέον για την παρακολούθηση και έλεγχο φυσικοχημικών παραμέτρων , αισθητήρες παραμέτρων pH ,REDOX, Διαλυμένο Οξυγόνο, Αγωγιμότητα, Θερμοκρασία , NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>x</sub>-N .

## 5.2 Σχήμα λειτουργίας πιλοτικού

Η λειτουργία της μονάδας του πιλοτικού συστήματος περιλαμβάνει σειρά από ενέργειες και ρυθμίσεις που πρέπει να γίνονται και μπορούμε να τις χωρίσουμε στις εξής κατηγορίες :

- Προετοιμασία των χημικών που θα δοσομετρηθούν στον αντιδραστήρα
- Επιλογή αυτοματισμού και καθορισμών των συγκεντρώσεων στόχων
- Βαθμονόμηση , ρύθμιση και καθαρισμός / συντήρηση των online αισθητήρων

Στη συγκεκριμένη εργασία θα εξετασθεί ο αυτοματισμός και η ρύθμιση των αισθητήρων

Οι εγκατεστημένοι αισθητήρες αφορούν παραμέτρους όπως pH, θερμοκρασία, αγωγιμότητα, redox, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N , NO<sub>x</sub> , CODs και επίπεδο στάθμης ιλύος μετρώντας συνεχώς δεδομένα και μεταφέροντας δεδομένα στο κεντρικό PLC για ευελιξία ενεργειών και ρυθμίσεων .Η απόδοση της δεξαμενής SBR αξιολογείται καθημερινά καθώς τα online δεδομένα είναι προσβάσιμα από τοπικό ελεγκτή της κύριας μονάδας και επιπλέον συγκρίνονται με εργαστηριακά δεδομένα. Η κυρίαρχη στρατηγική λειτουργίας του πιλοτικού SBR είναι βασισμένη σε χρονικά ορισμένους κύκλους και φάσεις της SBR

Σύμφωνα με τον αυτοματισμό του συστήματος και τη λειτουργικότητα μπορεί να επιλεγθεί η φάση ( αναερόβια, ανοξική, αερόβια) του κάθε κύκλου και να οριστεί μέγιστος αριθμός κύκλο ή φάσεων .Το στάδιο της τροφοδοσίας ρυθμίζει την ενεργοποίηση της αντλίας ,και η διάρκεια τροφοδοσίας ρυθμίζεται από την τιμή ορισμού στον αισθητήρα στάθμης ( φυσικά μπορεί να γίνει και χρονική ρύθμιση) Η διάρκεια της αναερόβιας φάσης κυρίως γίνεται χρονικά , κατά τη διάρκεια της το PLC

ενεργοποιεί τον αναδευτήρα και αν είναι απαραίτητο ρυθμίζει την τιμή pH σύμφωνα με το σύστημα δοσομέτρησης pH που εξηγήσαμε παραπάνω .

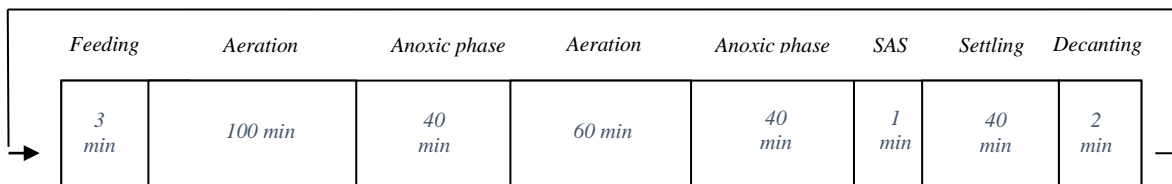
Στο στάδιο αερισμού το PLC ενεργοποιεί το σύστημα αερισμού χωρίς να απαιτείται ανάδευση, καθώς αυτό επιτυγχάνεται ταυτόχρονα από τους αεριστήρες , και η ρύθμιση της παροχής οξυγόνου γίνεται από την αντλία σε συμφωνία με την τιμή στόχο του διαλυμένου οξυγόνου .Η διάρκεια του αερισμού ελέγχεται επιπλέον χρονικά ή από την τιμή στόχο του NH<sub>4</sub>-N μετατρέποντας το σύστημα ενεργειακά ωφέλιμο καθώς αποκλείονται περιττοί χρόνοι αερισμού .

### 5.3 Εργαστηριακά δεδομένα ( πηγή ( Διπλωματική εργασία Δρ Ευάγγελου Στατήρη)

Τα εργαστηριακά δεδομένα που παρουσιάζονται αφορούν τη λειτουργία του SBR την περίοδο από 7 Μαρτίου 2018 μέχρι 25 Ιουλίου του 2018.

Στην 3<sup>η</sup> περίοδο η φόρτιση αζώτου NLR έφτασε στα μέγιστα επίπεδα (0.4 Kg N/m<sup>3</sup> d ως προς το NH<sub>4</sub>-N και 0.5 Kg N/m<sup>3</sup> d ως προς το TKN) με το σύστημα να επιτυγχάνει ικανοποιητικά επίπεδα απομάκρυνσης NH<sub>4</sub>-N >88% ΚΑΙ TN>70%. Τα μειωμένα ποσοστά απομάκρυνσης TN οφείλονται σε προβλήματα με την προμήθεια οξικού νατρίου και προβλήματα της αντλίας προσθήκης διαλύματος οξικού με αποτέλεσμα την μη επίτευξη πλήρους απονιτροδοποίησης κατά διαστήματα. Η τροφοδοσία των στραγγιδίων αφυδάτωσης στην έναρξη κάθε κύκλου κυμάνθηκε μεταξύ 230-350L (1.15-1.75 m<sup>3</sup>/d) ανάλογα με τις συγκεντρώσεις του αμμωνιακού αζώτου στα στραγγίδια ενώ παράλληλα κατά την έναρξη των ανοξικών φάσεων τροφοδοτούνταν αποκλειστικά διάλυμα οξικού νατρίου ως πηγή άνθρακα (10-30L/ανοξική φάση). Ο κύκλος λειτουργίας του SBR παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

**Πίνακας 5.1** Στάδια κύκλων της δεξαμενής SBR ( Διπλωματική εργασία, Βαγγέλης Στατήρης )



**Πίνακας 5.2 Βασικές παράμετροι πιλοτικού SMART PLANT για την περίοδο από 7 Μαρτίου 2018 μέχρι 25 Ιουλίου του 2018. ( Διπλωματική εργασία, Βαγγέλης Στατήρης )**

Βασικές παράμετροι πιλοτικού SMART PLANT για την περίοδο από 7 Μαρτίου 2018 μέχρι 25 Ιουλίου του 2018.	
Φορτίο αζώτου (NLR)	0,40 ± 0,03 kg N / m <sup>3</sup> / d
Ποσοστό απομάκρυνσης NH <sub>4</sub> -N	88,5 ± 5 %
Όγκος στραγγιδίων εισόδου – εξόδου	250 – 350 L ανά κύκλο λειτουργίας
NH <sub>4</sub> rem	88,5 ± 5 %
TNrem	65,5 ± 14,2 %
pH	8,4 ± 0,2
MLSS	7867 ± 768 mg / L
MLVSS	5689 ± 509 mg / L
SRT	12 d
HRT	3,7 ± 0,27 d
NH <sub>4</sub> -N <sub>in</sub>	1150 ± 363 mg / L

#### 5.4 Διαχείριση Online δεδομένων πιλοτικού συστήματος

Τα online δεδομένα των αισθητήρων αποθηκεύονται συνεχώς τοπικά στον ελεγκτή της μονάδας όπου με καθημερινή πρόσβαση , αποδίδοντας σε πραγματικό χρόνο τις μετρήσεις αλλά και με δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένη παραμέτρου για το ιστορικό δεδομένων . Η δυνατότητα αυτή είναι αρκετά χρήσιμη έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα καθημερινά για την απόδοση και κατάσταση των αισθητήρων .

Για την επεξεργασία των online δεδομένων αποθηκεύονται σε usb stick , συγκεκριμένα αποθηκεύεται ένα αρχείο .csv για κάθε online αισθητήρα . Για την επεξεργασία των δεδομένων επιλέχθηκε η χρονική περίοδος (7/3/2018-25/7/2018) όταν το σύστημα είχε σταθερές συνθήκες λειτουργίας και υψηλή απόδοση ως προς τη βιολογική απομάκρυνση αζώτου

Έπειτα ενοποιήθηκαν τα αρχεία .csv για τους αισθητήρες pH, αγωγιμότητα , DO, ORP & NH<sub>4</sub>-N , Οι μετρήσεις θερμοκρασία πάρθηκαν από τον ενσωματωμένο αισθητήρα θερμοκρασίας που βρίσκεται στον αισθητήρα pH .

Στο παρακάτω γράφημα αποτυπώνεται δείγμα από το αρχείο .csv όπως προκύπτει μετά την πρώτη ενοποίηση και με προσπάθεια οι αισθητήρες να έχουν ίδια χρονικά σημεία . Δεδομένου ότι οι

αισθητήρες εκείνη την περίοδο παρουσίαζαν αποκλίσεις λόγω απαίτησης αντικατάστασης νέων ηλεκτροδίων και καθαρισμών/συντηρήσεων , επιλέχθηκε για την επεξεργασία των online δεδομένων η περίοδος 03-04 με 01-06 .

**Πίνακας 5.3 Ενδεικτικό διάγραμμα Online τιμών δεξαμενής SBR , Smart Plant**

Date Time	PH	Temp	ORP	COND	OXY	NH4-N
2018-04-03 14:07	7.88	24.40	-43.07	8.91	0.08	329.34
2018-04-03 14:08	7.89	24.41	-44.80	8.89	0.06	328.39
2018-04-03 14:09	7.91	24.42	-46.46	8.90	0.05	328.26
2018-04-03 14:10	7.92	24.43	-48.32	8.88	0.04	328.98
2018-04-03 14:11	7.94	24.45	-50.37	9.04	0.03	328.03
2018-04-03 14:12	7.95	24.45	-52.36	8.98	0.02	326.27
2018-04-03 14:13	7.97	24.47	-54.35	8.83	0.02	322.82
2018-04-03 14:14	7.98	24.48	-56.14	8.90	0.01	320.29
2018-04-03 14:15	7.98	24.48	-58.00	8.83	0.01	317.74
2018-04-03 14:16	7.98	24.49	-59.41	8.84	0.01	316.14
2018-04-03 14:17	7.99	24.49	-60.56	8.87	0.01	313.61
2018-04-03 14:18	7.99	24.50	-61.52	8.92	0.01	312.83

Στη συνέχεια και ενώ είναι αρκετά σημαντικό το στάδιο της SBR αντίστοιχα με τις online παραμετρικές τιμές , μετατράπηκε το αρχικό αρχείο .csv σε .xlsx και έγινε εισαγωγή νέας στήλης όπου την ονομάστηκε “ PHASE “ και όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα δίνει την άμεση εικόνα του σταδίου της SBR . Η συγκεκριμένη προσθήκη κατηγορίας σταδίου της SBR όπου πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα έγινε βάσει των παρακάτω φάσεων όπου λειτουργούσε για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο η SBR και σύμφωνα με τις παραμέτρους DO, ORP, NH4-N .



**Πίνακας 5.4 Ενδεικτικό διάγραμμα Online τιμών δεξαμενής SBR συναρτήσει σταδίων της μονάδας**

Date Time	PHASE	PH	Temp	ORP	COND	OXY	NH4-N
2018-04-03 14:07	Aeration	7.88	24.40	-43.07	8.91	0.08	329.34
2018-04-03 14:08	Aeration	7.89	24.41	-44.80	8.89	0.06	328.39
2018-04-03 14:09	Sedimentation	7.91	24.42	-46.46	8.90	0.05	328.26
2018-04-03 14:10	Sedimentation	7.92	24.43	-48.32	8.88	0.04	328.98
2018-04-03 14:11	Sedimentation	7.94	24.45	-50.37	9.04	0.03	328.03
2018-04-03 14:12	Sedimentation	7.95	24.45	-52.36	8.98	0.02	326.27
2018-04-03 14:13	Sedimentation	7.97	24.47	-54.35	8.83	0.02	322.82
2018-04-03 14:14	Sedimentation	7.98	24.48	-56.14	8.90	0.01	320.29
2018-04-03 14:15	Sedimentation	7.98	24.48	-58.00	8.83	0.01	317.74
2018-04-03 14:16	Sedimentation	7.98	24.49	-59.41	8.84	0.01	316.14
2018-04-03 14:17	Sedimentation	7.99	24.49	-60.56	8.87	0.01	313.61
2018-04-03 14:18	Sedimentation	7.99	24.50	-61.52	8.92	0.01	312.83
2018-04-03 14:19	Sedimentation	7.99	24.50	-62.29	8.92	0.01	312.00
2018-04-03 14:20	Sedimentation	7.99	24.51	-62.49	8.90	0.02	311.18
2018-04-03 14:21	Sedimentation	8.00	24.52	-63.13	8.84	0.02	310.32
2018-04-03 14:22	Sedimentation	8.00	24.52	-63.32	8.93	0.02	309.45
2018-04-03 14:23	Sedimentation	8.00	24.53	-63.51	8.95	0.02	308.63
2018-04-03 14:24	Sedimentation	8.00	24.53	-63.77	8.84	0.02	308.60
2018-04-03 14:25	Sedimentation	8.00	24.54	-63.83	8.86	0.02	307.73
2018-04-03 14:26	Sedimentation	8.00	24.55	-64.09	8.99	0.02	307.69
2018-04-03 14:27	Sedimentation	8.01	24.55	-64.34	8.96	0.02	306.81

Η συγκεκριμένη στήλη διαμορφώθηκε σύμφωνα με την πληροφόρηση των κύκλων και των χρονικά προσδιορισμένων φάσεων της SBR που δόθηκε από τον Δρ Στατήρη Ευάγγελο και συγκεκριμένα για την περίοδο από 7/3/2018-25/7/2018 :

7/3/18-27/6/18

Κύκλοι: 5 / Τροφοδοσία / Αερισμός: 100 min / Ανοξική:40 min / Αερισμός: 60 min / Ανοξική:40 min

Καθίζηση: 40 min / Άδειασμα

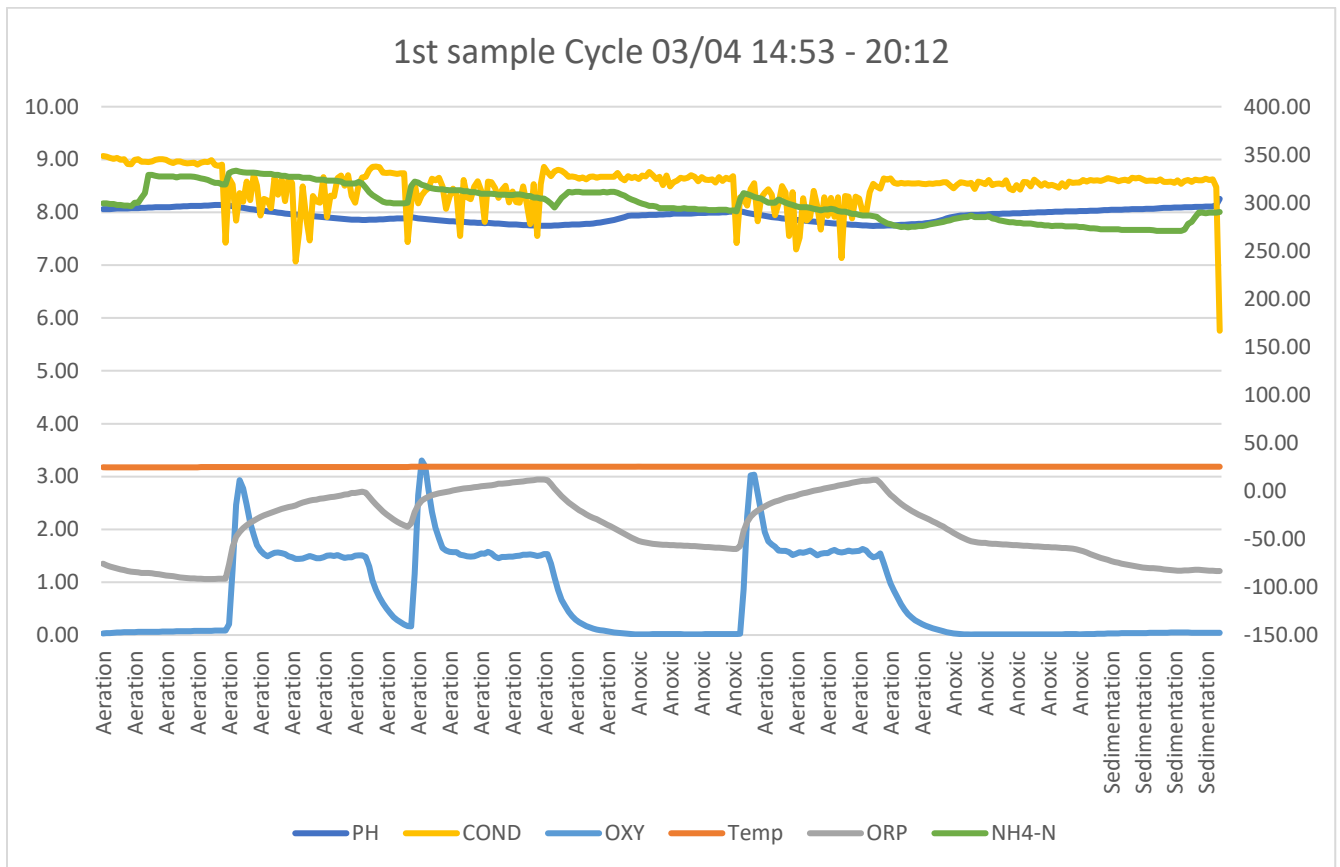
Τέλος το αρχείο excel έχει την περίοδο 03-04 με 01-06 και παρέχει ουσιαστική πληροφόρηση για τις online καταγραφές του controller .

Με τις αρχικές online καταγραφές έγινε προσπάθεια για συνολικό συμπέρασμα πως οι αισθητήρες κατέγραψαν και παρακολούθησαν το σύστημα έναντι των εργαστηριακών μετρήσεων και αναφορών .

Από τις συνεχείς καταγραφές και προκειμένου αποτυπωθούν οι διακυμάνσεις των αισθητήρων, απομονώθηκε το παρακάτω διάγραμμα τυχαίου κύκλου στις αρχές Απριλίου , όπου παρατηρείται σταθερή τιμή θερμοκρασίας , ελαφρές διακυμάνσεις στις τιμές αγωγιμότητας , οι τιμές pH στις παραμετρικές τιμές όπου γενικά επιθυμούνται να διατηρηθούν στο σύστημα .

Παρατηρείται η αρχική τροφοδοσία στο σύστημα με αυξανόμενες τιμές NH4-N και επιπλέον αρκετές διακυμάνσεις στην τιμή αγωγιμότητας σε επίπεδα του 1 ms/cm . Κατά την διάρκεια όπου οι διεργασίες βρίσκονταν σε σταθερή κατάσταση και δεν υπήρχε ανάδευση ή φυσσαλίδες ο αισθητήρας COND παρουσίαζε διακυμάνσεις στα επίπεδα του 1 ms/cm με συνέπεια να υπάρχει συγκεκριμένος «θόρυβος» .

Στο επόμενο σχήμα 5.4 παρατηρούνται μάλιστα αρκετές διακυμάνσεις των επιπέδων αγωγιμότητας, διαπιστώνονται τα σημεία τροφοδοσίας της παραμέτρου NH4-N και η πτωτική τάση κατά την περίοδο αερισμού και συγκεκριμένα σε τιμές DO περίπου 1.5 ppm . Η πτώση του DO και η αύξηση του σηματοδοτεί την μειωμένη απαίτηση Οξυγόνου από την μονάδα σε λίγο χρόνο καθώς μόλις το σύστημα τροφοδοτείται επανέρχεται σε κανονικά επίπεδα .

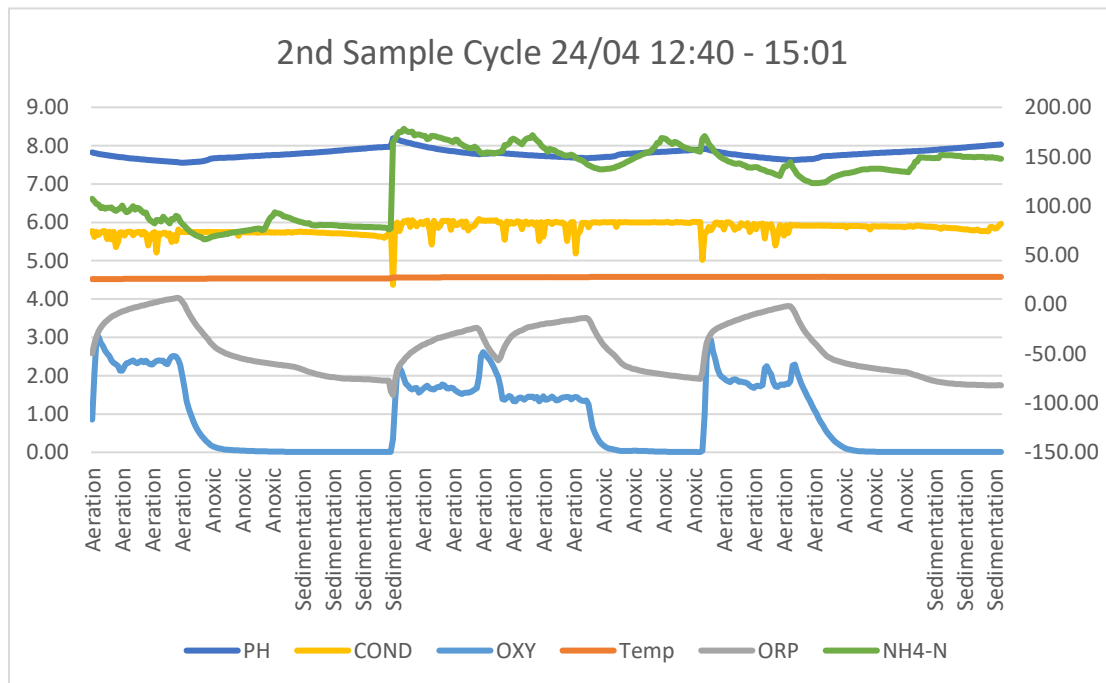


**Σχήμα 5.4 Ενδεικτικό διάγραμμα Online τιμών pH, COND, DO, Temp, ORP, NH4-N , στο πιλοτικό σύστημα SBR**

Στο Σχήμα 5.5 παρατηρείται πως οι αισθητήρες DO, ORP δίνουν αρκετά επαναλήψιμα αποτελέσματα βάσει των διεργασιών και αναμενόμενα επίπεδα τιμών. Ενώ στους συμβατικούς αισθητήρες όπως DO, ORP, pH παρατηρούνται αναμενόμενες και επαναλήψιμες τιμές, αντιθέτως στις παραμετρικές τιμές NH4-N, COND υπάρχουν αρκετές διακυμάνσεις. Στις περιόδους αερισμού διαπιστώνεται εύκολα την τιμή της αγωγιμότητας να έχει διακυμάνσεις σε επίπεδα του 0.5 ms/cm, κάτι που εξηγείται κυρίως από τον σχεδιασμό του αισθητήρα, η επίπεδη επιφάνεια μέτρησης που βρίσκονται εγκατεστημένοι οι αισθητήρες – πυκνωτές, λόγω του σχεδιασμού τους είναι αρκετά εύκολο να επηρεάζονται από τις φυσαλίδες αερισμού και τον αφρισμό του ανάμεικτου υγρού. Το αντίθετο συμβαίνει με τον αισθητήρα DO καθώς ο γωνιακός σχεδιασμός στη μεμβράνη του επιτρέπει να μην έχει μεγάλες διακυμάνσεις στα στάδια αερισμού.

Λόγω της διάταξης της μονάδας SBR και του μικρού βάθους δεν υπήρχε η δυνατότητα για μεγαλύτερη σε βάθος εισαγωγή του αισθητήρα COND έτσι ώστε να αποφευχθεί το μεγάλο εύρος της διακύμανσης, χωρίς ωστόσο να σημαίνει πως θα επιλυόταν το πρόβλημα. Επιπλέον και προκειμένου να διασφαλίσουμε ότι ο Online COND αισθητήρας μετράει σωστά, αντιπαρατέθηκε με φορητό πολύμετρο και οι μετρήσεις ήταν σχεδόν ταυτόσημες τόσο στο ανάμεικτο υγρό όσο και σε διάλυμα εκτός SBR.

Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι πως ο COND αισθητήρας δεν πραγματοποιούσε σωστές και επαναλήψιμες μετρήσεις εντός της SBR, κάτι που παρατηρείται στις παρακάτω διακυμάνσεις.



**Σχήμα 5.5 Ενδεικτικό διάγραμμα Online τιμών pH, COND, DO, Temp, ORP, NH4-N, Smart Plant**

## 5.5 Ανίχνευση συσχετίσεων Online παραμέτρων

Επόμενος στόχος είναι να αποτυπωθούν οι όποιες συσχετίσεις δεδομένων ηλεκτροχημικών παραμέτρων και ιδιαίτερα αισθητήρων που είναι ευμετάβλητοι από διάφορους φυσικοχημικούς παράγοντες. Στη συνέχεια μπορούν να κατανοηθούν βιοχημικές διεργασίες από τις συμπεριφορές των αισθητήρων και αντίστοιχα να συνδέονται γεγονότα των φάσεων/κύκλων της SBR .

Στόχος είναι η εκμετάλλευση της πληθώρας παραμετρικών τιμών και να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα είτε για την διαμόρφωση συμπερασμάτων για τις βιοχημικές διεργασίες είτε για τον αποτελεσματικό έλεγχο λειτουργίας της μονάδας .

Στην πρώτη σειρά τυχαίων δειγμάτων απομονώθηκαν οι φάσεις αερισμού και συγκεκριμένα τις παραμέτρους Αγωγιμότητας, Διαλυμένου Οξυγόνου και Αμμωνιακών ώστε να παρατηρηθούν οι όποιες διακυμάνσεις αλλά και τυχαίες συσχετίσεις ή τάσεις παραμετρικών τιμών .

Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρήθηκαν κάποιες τάσεις μεταξύ των παραμετρικών τιμών COND & NH4-N και σε «συμμετρικές» συμπεριφορές των Online αισθητήρων ανάλογα το στάδιο της SBR.

Στο πρώτο τυχαίο δείγμα και στην φάση αερισμού παρατηρούνται παραμετρικές τιμές NH4-N όπου σύμφωνα με την πορεία του αερισμού προχωρούν σε βαθμιδωτές μειώσεις εξαιτίας της πορείας της νιτροδοποίησης και στα επιθυμητά επίπεδα DO 1-2 ppm. .

Για να κατανοηθούν καλύτερα τα επίπεδα αγωγιμότητας πρέπει να διαπιστωθούν που οφείλονται εν γένει οι παραμετρικές τιμές και οι όποιες διακυμάνσεις . Η παράμετρος της αγωγιμότητας δεν αποτελεί κυρίαρχη παράμετρος για τον έλεγχο των βιολογικών βαθμίδων και χρησιμοποιείται αρκετά σπάνια ως Online αισθητήρας στις μετρήσεις ενεργών σημείων επεξεργασίας με εξαίρεση τα σημεία εισόδου-εξόδου της εγκατάστασης για την απεικόνιση ποιότητας του εισερχόμενου δείγματος ή ανακτημένου νερού .

Η αγωγιμότητα ως φυσικοχημική παράμετρος εξαρτάται από την κινητικότητα ιόντων, συγκεκριμένα στα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων οφείλει τις μεταβολές στις τιμές της σε H<sup>+</sup> , OH<sup>-</sup> και μορφές ιόντων όπως NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-2</sup> και πάντα σύμφωνα με τις βιοχημικές διεργασίες .

Ειδικότερα παρατηρείται η συνεισφορά των ιόντων H & OH στην αγωγιμότητα και πάντα σε συνάρτηση με την παράμετρο pH (Levlin, Erik. (2007). Conductivity measurements for controlling municipal

wastewater treatment. 15 ) . Στις παρακάτω εξισώσεις αποδίδονται οι ιονικές συνεισφορές στις αγωγιμομετρικές τιμές βάσει τιμής pH του δείγματος .

$$[H_+] = 10^{(-pH)} \text{ mol/liter} = 10^{(-pH+3)} \text{ mole/m}^3 = 10^{(-pH+3)} \text{ g/m}^3$$

$$[OH^-] = 10^{(pH-14)} \text{ mol/liter} = 10^{(pH-11)} \text{ mol/m}^3 = 10^{(pH-11)/17} \text{ g/m}^3$$

Επιπλέον στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι αλλαγές ιονικής συμπεριφοράς (Levlin, Erik. (2007). Conductivity measurements for controlling municipal wastewater treatment. 15) όπου παρατηρούνται οι αλλαγές στις τιμές αγωγιμότητας βάσει της βιοχημικής διεργασίας και των κυρίαρχων ιόντων στο διάλυμα .

A	Reaction	Change in ion content	mSm <sup>ε</sup>	mSm <sup>ε</sup>
			mol N	g N
Nitrification	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 2O <sub>2</sub> → NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 2H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> O	-1 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-7.34	-0.524
		+1 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7.14	0.510
		+2 H <sup>+</sup>	70.00	4.998
			69.80	4.983
Denitrification	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + <sup>5</sup> / <sub>6</sub> CH <sub>3</sub> OH + H <sup>+</sup> → <sup>1</sup> / <sub>2</sub> N <sub>2</sub> + <sup>5</sup> / <sub>6</sub> CO <sub>2</sub> + 2 <sup>1</sup> / <sub>6</sub> H <sub>2</sub> O	-1 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-7.14	-0.510
		-1 H <sup>+</sup>	-35.00	-2.499
			-42.14	-3.009
Nitrification + Denitrification			27.66	1.975

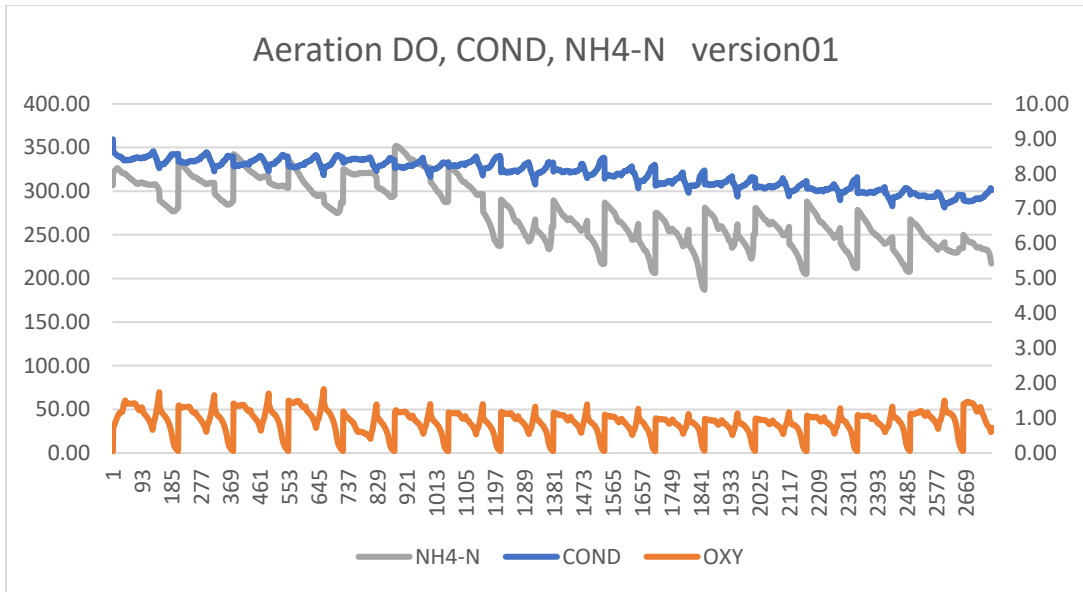
B	Reaction	Change in ion content	mSm <sup>2</sup>	mSm <sup>2</sup>
			mol N	g N
Nitrification	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 2O <sub>2</sub> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> → NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 3H <sub>2</sub> O + 2CO <sub>2</sub>	-1 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-7.34	-0.524
		+1 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7.14	0.510
		-2 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-8.90	-0.635
			-9.10	-0.650
Denitrification	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + <sup>5</sup> / <sub>6</sub> CH <sub>3</sub> OH + <sup>1</sup> / <sub>6</sub> CO <sub>2</sub> → <sup>1</sup> / <sub>2</sub> N <sub>2</sub> + 1 <sup>1</sup> / <sub>6</sub> H <sub>2</sub> O + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-1 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-7.14	-0.510
		+1 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4.45	0.318
			-2.69	-0.192
Nitrification + Denitrification			-11.59	-0.842

Σχήμα 5.7 Εξάρτηση μεταβολών Αγωγιμότητας κατά την διάρκεια βιοχημικών διεργασιών

Σε γενικές γραμμές οι μεταβολές της αγωγιμότητας στην βιολογική απομάκρυνση του αζώτου στην νιτροποίηση / απονιτροποίηση είναι αποτέλεσμα των κατιόντων Υδρογόνου ( $H^+$ ) ή της κατανάλωσης αλκαλικότητας . Στην οξείδωση των  $NH_4-N$  σε  $NO_2-N$  ή  $NO_3-N$  οι αλλαγές στην αγωγιμότητα είναι αποτέλεσμα ανάλογα με την κυρίαρχη μορφή της οξείδωσης ή σε ποιο στάδιο της νιτροποίησης βρίσκεται η μονάδα. Παρατηρείται από τον ανωτέρω πίνακα και την αντίστοιχη βιβλιογραφία ότι οι κυρίαρχες μεταβολές στην αγωγιμότητα κατά την διεργασία απομάκρυνσης θρεπτικών και ιδιαίτερα Αζώτου μέσω Νιτροποίησης-Απονιτροποίησης , οφείλονται στην παραγωγή ιόντων  $H^+$  και την κατανάλωση αλκαλικότητας .

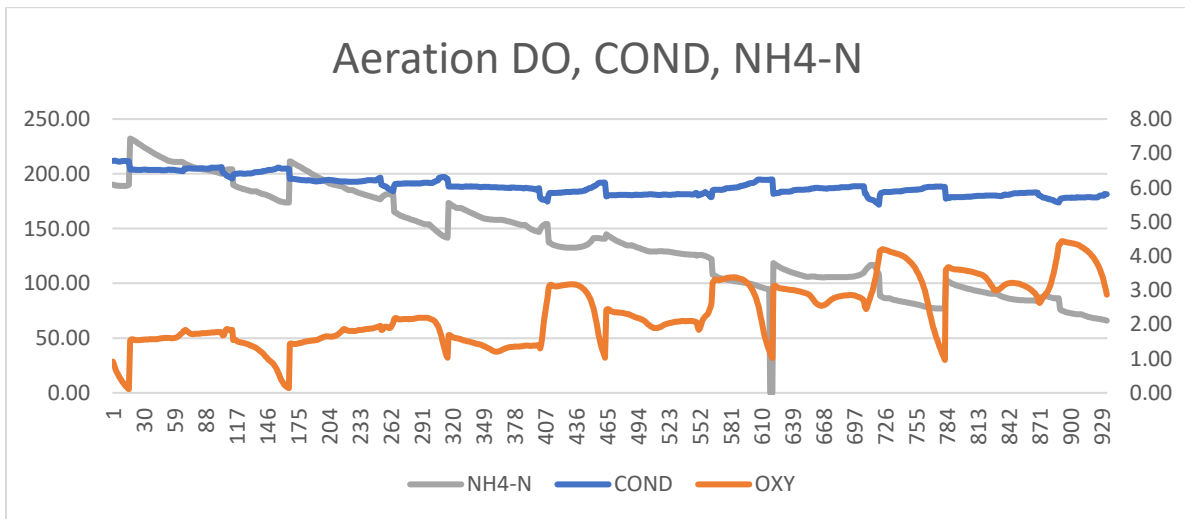
Κατά τη νιτροποίηση καταναλώνεται αμμωνιακό άζωτο και παράγεται νιτρικό άζωτο. Η αύξηση της αγωγιμότητας που παρατηρείται από την παραγωγή νιτρικών εξισορροπείται από τη μείωση της αγωγιμότητας η οποία παρατηρείται από την κατανάλωση του αμμωνίου/αμμωνίας. Επομένως, η μεταβολή της αγωγιμότητας κατά τη νιτροποίηση εξαρτάται από τα άλλα ιόντα που παράγονται ή καταναλώνονται στο σύστημα. Η κατανάλωση αλκαλικότητας και  $OH^-$  μειώνει την αγωγιμότητα. Από την άλλη μεριά η παραγωγή  $H^+$  αυξάνει την αγωγιμότητα. Εάν τα υγρά απόβλητα προς επεξεργασία έχουν επαρκή αλκαλικότητα τότε κατά τη νιτροποίηση (και τη νιτρωδοποίηση) αναμένεται αύξηση της αγωγιμότητας. Εάν όμως η αλκαλοκότητα δεν είναι επαρκής για τη διεργασία της νιτροποίησης τότε αναμένεται μείωση της αγωγιμότητας μόνο μέχρις ότου καταναλωθεί η αλκαλικότητα.

Για την περίπτωση του πιλοτικού SMART-PLANT παρατηρούμε τα δύο διαγράμματα του COND &  $NH_4-N$  (Σχήμα 5.8) να έχουν παράλληλες πορείες κατά την διάρκεια αερισμού και ιδιαίτερα ως προς τις κορυφές, κάτι που αρχικά αναδεικνύει μια ενδεχόμενη συσχέτιση και αλληλουχία τιμών , ωστόσο η αρχική εκτίμηση είναι πως αυτές οι παράλληλες κορυφές είναι συνέπεια της εφαρμογής και της τροφοδοσίας του συστήματος , κάτι που επηρεάζει ουσιαστικά την επίπεδη επιφάνεια των πυκνωτών του αισθητήρα COND



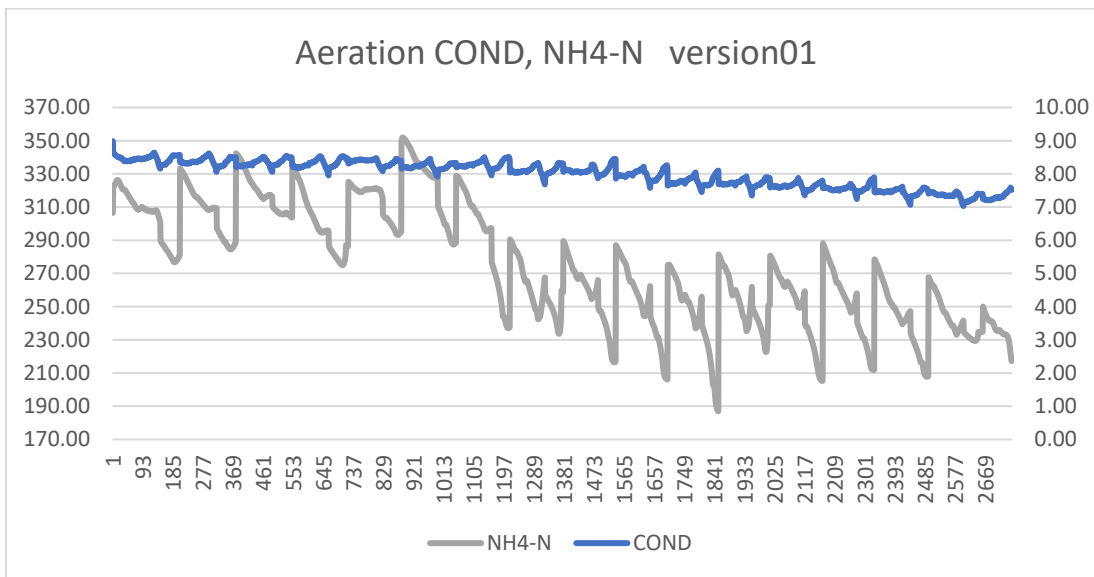
**Σχήμα 5.8** Στάδιο Αερισμού Καταγραφές DO, COND, NH4-N

Στο δεύτερο τυχαίο δείγμα παρατηρούνται καλύτερα τις διακυμάνσεις του COND, NH4-N , και ενώ διακρίνονται σχεδόν οι κορυφές να συμπίπτουν με τα γεγονότα τροφοδοσίας στο σύστημα, η αγωγιμότητα αυξάνεται κατά την βαθμιαία απομάκρυνση NH4-N , έπειτα σημειώνεται μικρή αύξηση κατά την τροφοδοσία αλλά στην διάρκεια της νιτρωδοποίησης βλέπουμε την αγωγιμότητα να πραγματοποιεί βήμα αύξησης .



**Σχήμα 5.9** Στάδιο Αερισμού Καταγραφές DO, COND, NH4-N

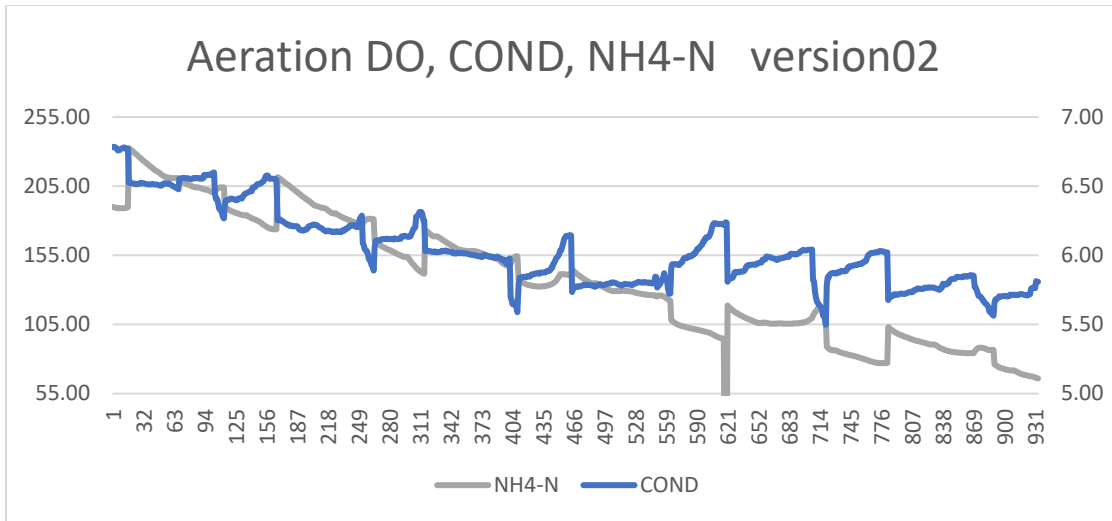
Στη συνέχεια εξετάζονται τυχαία χρονικά δείγματα από την φάση αερισμού στη συγκεκριμένη περίοδο και συγκεκριμένα για τις παραμέτρους COND, NH4-N έτσι ώστε να κατανοηθούν ενδεχόμενες συσχετίσεις μεταξύ τους .Στο παρακάτω γράφημα και παραμένοντας πάντα στην φάση αερισμού όπου οι τροφοδοσίες δίνουν παράλληλες κορυφές στα δύο γραφήματα , όσο ο αερισμός συνεχίζεται και παρατηρείται οξείδωση της αμμωνίας έχουμε ταυτόχρονα αύξηση της τιμής της αγωγιμότητας. Ενώ παρατηρούνται διακυμάνσεις της αγωγιμότητας διακρίνεται η πτωτική τάση της αγωγιμότητας κατά την περίοδο του αερισμού όπου συνάδει με την βιβλιογραφία για κατανάλωση της αλκαλικότητας και αντίστοιχα τα βήματα αύξησης αγωγιμότητας με ταυτόχρονη μείωση της συγκέντρωσης NH4-N .



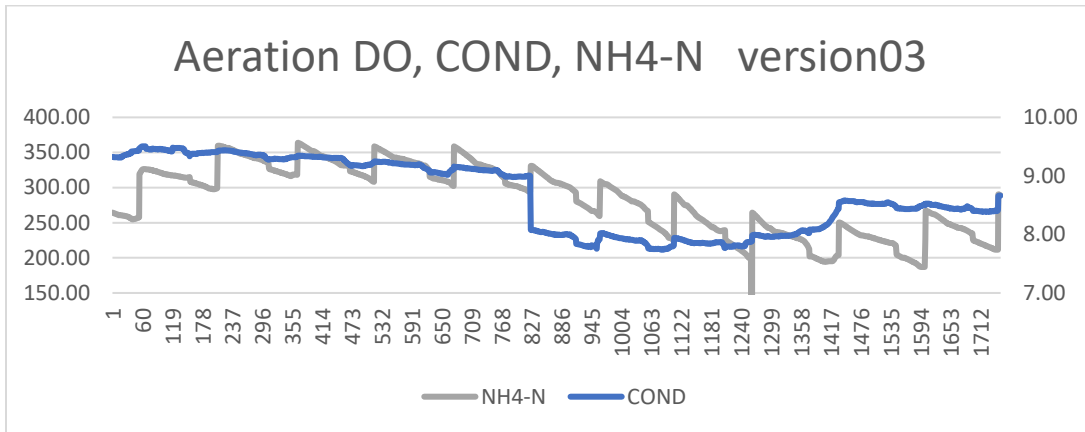
**Σχήμα 5.10 Τυχαίο δείγμα 1 Στάδιο Αερισμού Καταγραφές COND, NH4-N**

Στα επόμενα γραφήματα είναι κάτι που παρατηρείται καλύτερα καθώς διακρίνουμε τα στάδια αερισμού , την βαθμιαία απομάκρυνση θρεπτικών και αύξηση αγωγιμότητας . Παρατηρούμε την αύξηση αγωγιμότητας κατά την διάρκεια οξείδωσης της NH4-N στο αρχικό στάδιο της νιτροποίησης. Στη διάρκεια της φάσης του αερισμού παρατηρούμε την αγωγιμότητα ωστόσο να έχει μια καθοδική τάση καθώς έχουμε «κατανάλωση» της αλκαλικότητας για την πορεία της νιτροποίησης .





**Σχήμα 5.11 Τυχαίο δείγμα 2 Στάδιο Αερισμού Καταγραφές COND, NH4-N**



**Σχήμα 5.12 Τυχαίο δείγμα 3 Στάδιο Αερισμού Καταγραφές COND, NH4-N**

Διαπιστώνεται πως ο online αισθητήρας αγωγιμότητας μπορεί να αξιοποιηθεί έμμεσα και με καταγραφές online δεδομένων ως προφίλ για την έμμεση απεικόνιση της πορείας νιτροποίησης και συγκεκριμένα για την κατανάλωση αλκαλικότητας και παραγωγής ιόντων  $H^+$  λόγω οξείδωσης  $NH_4-N$ . Στα ανωτέρω γραφήματα η μέτρηση αγωγιμότητας αποδείχθηκε πολύ καλή ένδειξη στην πορεία της νιτροποίησης και σε συμφωνία με την βιβλιογραφία καθώς ακολούθησε την τάση της πορείας οξείδωσης και της κατανάλωσης αλκαλικότητας χρονικά.

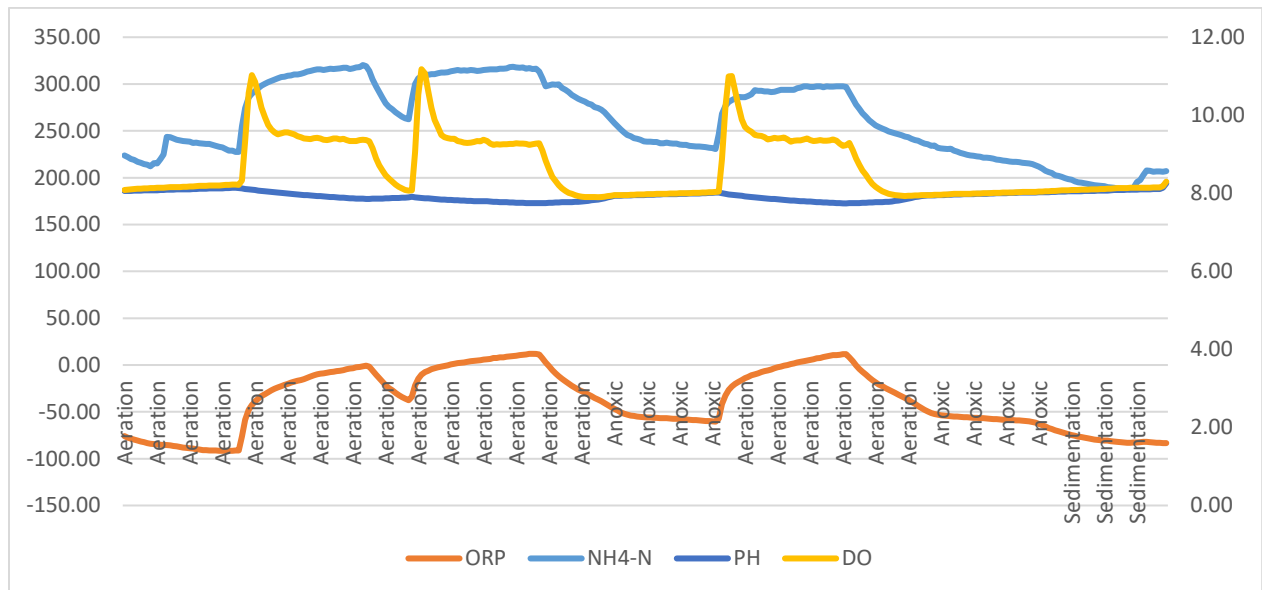
Επιπλέον όφελος είναι πως ο αισθητήρας της αγωγιμότητας έχει χρόνο ολοκλήρωσης της μέτρησης σε λιγότερο από 1min έναντι των Ιοντοεπιλεκτικών Ηλεκτροδίων που έχουν χρόνο ολοκλήρωσης περίπου στα 3min ή σε περιπτώσεις αναλυτών όπου η μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και σε 20-30 min .

### **5.6 Έλεγχος διεργασιών μονάδας Smart Plant με χρήση Online αισθητήρων**

Ο έλεγχος της πιλοτικής μονάδας SBR πραγματοποιήθηκε με κυρίαρχες παραμέτρους pH , ORP, DO και προσπάθεια συσχετισμών των αισθητήρων COND, NH<sub>4</sub>-N , με αποτέλεσμα την εξαγωγή συμπερασμάτων για την πορεία των βιοχημικών διεργασιών και την απόδοση της μονάδας . Στα παρακάτω γραφήματα έχουμε συλλέξει τυχαίες ημέρες λειτουργίας της μονάδας με σκοπό την ανάγνωση των Online παραμετρικών τιμών και αντίστοιχα την διερεύνηση σημείων ελέγχου και πορείας των διεργασιών .

Στο πρώτο τυχαίο γράφημα της μονάδας αποτυπώνονται οι παράμετροι NH<sub>4</sub>-N, DO, ORP & pH και σε χρονικό ενός (1) κύκλου της μονάδας SBR , ενώ την παράμετρο ORP να αποδίδει συνήθεις τιμές οξειδοαναγωγικών τιμών mV στις διεργασίες αερισμού και ανοξικής ζώνης, την τιμή pH να παραμένει σε επίπεδα τιμών 7.7 – 8.0 προκειμένου να επιτευχθεί νιτρωδοποίηση-απονιτρωδοποίηση, οι τιμές NH<sub>4</sub>-N & DO παρουσιάζουν μια συσχέτιση στην έναρξη του αερισμού . Δεδομένου ότι ο αισθητήρας DO ανιχνεύει άμεσα την έναρξη αερισμού και έχουμε απότομη αύξηση παρουσίας φυσαλίδων στη συνέχεια εναρμονίζεται με την συγκέντρωση DO στο δείγμα. Αντιθέτως οι συγκεντρώσεις NH<sub>4</sub>-N έχουν αύξηση στην πρώτη φάση αερισμού και στη συνέχεια ακολουθούν την έναρξη σε κάθε αντίστοιχο στάδιο της SBR. Αυτό οδηγεί σε συμπεράσματα πως ο αισθητήρας NH<sub>4</sub>-N δεδομένης της εφαρμογής και της συγκεκριμένης εγκατάστασης μικρής κλίμακας απαιτεί λίγο περισσότερο χρόνο από το σύνηθες

προκειμένου να ανιχνεύσει τις μεταβολές τροφοδοσίας αλλά και να δείξει άμεσα την όποια εξέλιξη στην αντίστοιχη βιοχημική διεργασία .



**Σχήμα 5.13 Τυχαίο δείγμα Κύκλος SBR, Online καταγραφές pH,ORP,DO, NH4-N**

Αυτό εξηγείται μερικώς καθώς οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι ηλεκτροχημικοί με άμεση απόκριση στα mV ή την παρουσία οξυγόνου στο δείγμα χωρίς να επηρεάζονται αρκετά από την εφαρμογή ή ιδιαιτερότητες της εγκατάστασης. Για παράδειγμα ο ιοντοεπιλεκτικός αισθητήρας NH4-N απαιτεί χρόνο ολοκλήρωσης στα 3 λεπτά περίπου και με τεχνική απαίτηση οι μεμβράνες να είναι σχετικά καθαρές και σε επαφή με νέο «φρέσκο» δείγμα. Για την περίπτωση που έχουμε εναλασσόμενες φάσεις σε μικρές μονάδες ο αισθητήρας απαιτεί χρόνο καθώς υπάρχουν ιζήματα ή επικαθίσεις δείγματος από την προηγούμενη μόλις φάση της μονάδας .

Στο επόμενο γράφημα και ενώ έχουν ταυτοποιηθεί τα στάδια της SBR βάσει του πίνακα σταδίων λειτουργίας της SBR και βάσει του DO, παρατηρούνται τα σημεία καμψής των διεργασιών όπου αναδεικνύουν τα βασικά σημεία των βιοχημικών διεργασιών και δύνανται να εξαχθούν συμπεράσματα.

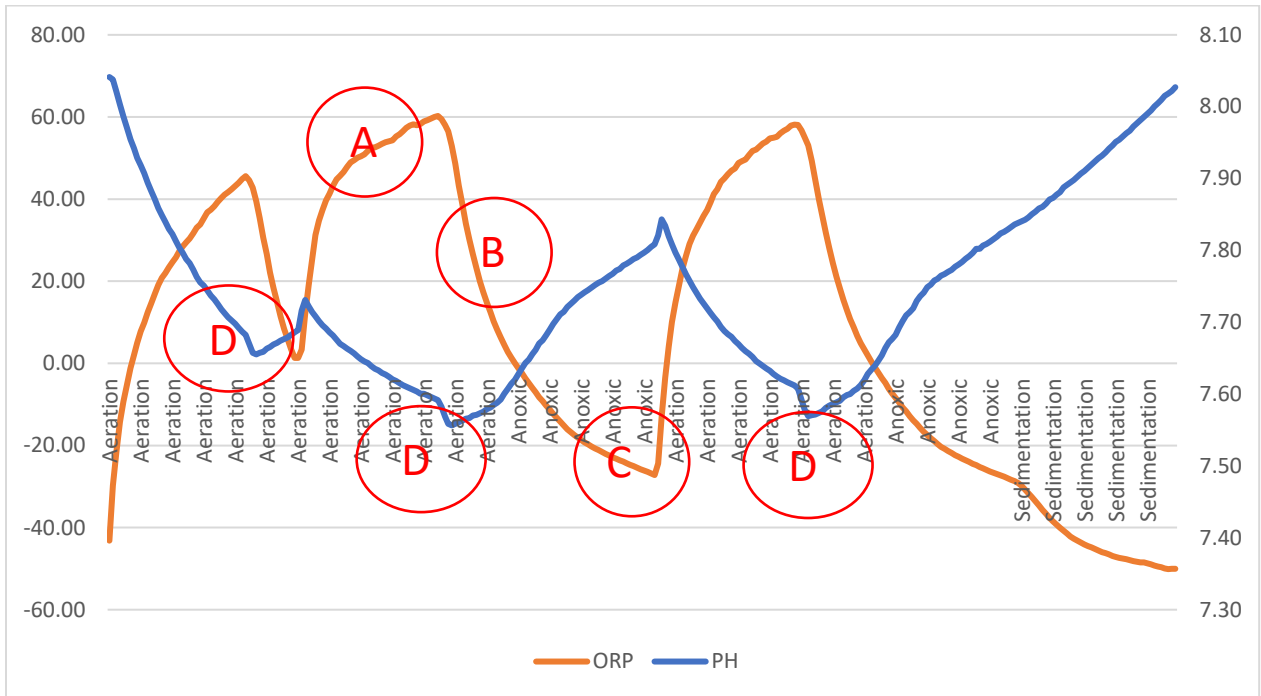
Στο παρακάτω γράφημα αποτυπώνεται τυχαίο online γράφημα κύκλου της SBR , και συγκεκριμένα τις παραμέτρους pH, ORP . Οι τιμές ORP ακολουθούν φυσιολογικές τιμές στην οξειδωτική φάση και τιμές σε υψηλά mV με εξαίρεση κάποιο σημείο στον αερισμό όπου παρατηρείται απότομη πτώση και ενδεχομένως υπάρχει κάποια προσκόλληση φυσσαλίδων ή στερεών για ελάχιστο χρονικό διάστημα . Με την τιμή του ORP εύκολα διακρίνονται τα στάδια της SBR και επιπλέον διακρίνεται απότομη μείωση την έναρξη του σταδίου Ανοξικής ζώνης . Επιπλέον ο αισθητήρας ORP μπορεί να αναδείξει δυνατότητες του συστήματος όπου βοήθησαν στην κατανόηση των ικανοτήτων και της απόδοσης του συστήματος.

Οι ανοδικές τιμές στις μονάδες ORP είναι σήμα για βιοχημικές διεργασίες οξείδωσης και συγκεκριμένα οξείδωση οργανικού φορτίου , νιτροποίηση , νιτροδοποίηση . Στο σημείο A υπάρχει η δυνατότητα στο σύστημα να συνεχίσει να οξειδώνει το οργανικό φορτίο ή υπάρχει υπολειπόμενο οργανικό φορτίο στο σύστημα . Παρατηρούνται πως οι τιμές του ORP είναι σχετικά ανοδικές αλλά εν γένει σταθερές, σε αυτό το σημείο το στάδιο του αερισμού μπορεί να τερματιστεί ανάλογα φυσικά με το οργανικό φορτίο και τις μορφές αζώτου .

Στο σημείο B με πτώση των δυναμικών οξειδοαναγωγής καθώς ο αερισμός έχει σταματήσει και προχωράει σε ανοξική φάση . Παρατηρείται στο σημείο C πως ο σχεδιασμός των σταδίων της SBR είναι πετυχημένος καθώς σε εκείνο το σημείο βρίσκεται σχεδόν η έναρξη “Nitrate knee” και σημαίνει το τέλος του σταδίου της απονιτροποίησης και είτε μπορεί να συνεχίσει σε αρνητικά επίπεδα για δέκτες ηλεκτρονίων διαφορετικούς από τα NO<sub>3</sub>-N είτε να αλλάξουμε στάδιο της SBR .

Στο διάγραμμα του pH βρίσκονται εν γένει σε τιμές που επιτρέπουν την έκπλυση των NOB λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων ελεύθερης αμμωνίας. Τα σημεία D στο διάγραμμα του pH πρόκειται για σημεία όπου προαναφέρθηκε ως «κοιλιάδες αμμωνίας» . Συγκεκριμένα στο αρχικό στάδιο της νιτροποίησης με την βαθμιαία πτώση τιμών pH όπου η NH<sub>4</sub>-N μετατρέπεται σε NO<sub>2</sub>-N και έχουμε την παραγωγή ιόντων H<sup>+</sup> και όξινες συνθήκες στο ανάμεικτο υγρό . Στα σημεία όπου σημείο κοιλιάδας στην

τιμή του pH και απότομη αύξηση , είναι τα σημεία όπου τερματίζει η Νιτρωδοποίηση και η απότομη αύξηση είναι λόγω της απονιτρωδοποίησης. Σημαντικά σημεία ελέγχου καθώς μπορούμε να ελέγξουμε την Νιτρωδοποίηση στην αερόβια φάση .



Σχήμα 5.14 Τυχαίο δείγμα Κύκλος SBR, Online καταγραφές pH,ORP

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διερεύνηση της εφαρμογής online αισθητήρων μέτρησης ποιοτικών παραμέτρων σε ΕΕΛ και η διερεύνηση μεθόδων ελέγχου και βελτιστοποίησης διεργασιών αποδεικνύεται ως σύγχρονη απαίτηση των ΕΕΛ προκειμένου να επιτυγχάνεται καλή ποιότητα εκροής με χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα.

Οι Online αισθητήρες αποδεικνύονται ως κατάλληλα εργαλεία για τη βελτιστοποίηση τόσο προχωρημένων μεθόδων βιολογικής απομάκρυνση αζώτου όπως είναι η νιτρωδοποίηση-απονιτρωδοποίηση και η αυτοτροφική απομάκρυνση αζώτου με βακτήρια αναπνοο όσο και συμβατικών τεχνολογιών όπως είναι το σύστημα της ενεργού ιλύος. Με την διεξοδική μελέτη της αρχής μέτρησης για τους αισθητήρες, pH, DO, ORP, NH<sub>4</sub>-N, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, COD θεμελιώνεται η βάση για την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα ή αισθητήρων και τα σημεία ή στάδια ή μονάδες που είναι κατάλληλα για την εγκατάσταση προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση της μονάδας επεξεργασίας.

Συγκεκριμένα μελετήθηκαν διεξοδικά οι αρχές μέτρησης αισθητήρων όπως :

- Διαλυμένο Οξυγόνο
- pH
- Αγωγιμότητα
- Αμμωνιακών
- Online Φασματοσκοπία για παραμέτρους όπως COD, TOC, DOC, BOD, SAC, UVT
- CH<sub>4</sub>
- N<sub>2</sub>O
- CO<sub>2</sub>
- ORP / REDOX
- Θολρότητας / Στερεών

Αναπτύχθηκε και μελετήθηκε η εφαρμογή Online αισθητήρων για τον έλεγχο διεργασιών με στόχο τον έλεγχο και την αύξηση της απόδοσης των συστημάτων επεξεργασίας αλλά και τη μείωση του λειτουργικού κόστους της μονάδας. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν καίρια σημεία εφαρμογής όπως :

- Ενεργειακή διαχείριση με την χρήση Online αισθητήρων
- Βασικές μέθοδοι χρήσης Online αισθητήρων
- Δυναμικός έλεγχος βιολογικής βαθμίδας ΕΕΛ
- Έλεγχος & Παρακολούθηση της Απονιτροποίησης
- Τεχνικές Ανοικτών & Κλειστών συστημάτων ελέγχου παραμετρικών τιμών
- Απευθείας έλεγχος αισθητήρα Αμμωνιακών

Η μελέτη εξειδικεύτηκε σε συστήματα Νιτροποίησης-Απονιτροποίησης όπου αναπτύχθηκαν περισσότερο τα βασικά σημεία καμπής βιοχημικών διεργασιών όπως :

- Κοιλιάδα της αμμωνίας
- Αύξηση DO
- Σημείο καμπής Νιτρικών
- Σημείο κλίσης Νιτρικών
- Πλατό μέτρησης ORP
- Μεταβολές OUR

Τα ανωτέρω αποτελούν βασικά σημεία μελέτης και θεμελιώδης βάση για την περαιτέρω διερεύνηση συσχετισμού παραμετρικών τιμών σε μονάδες SBR με τεχνολογία Short Cut Nitrogen Removal όπως η πιλοτική μονάδα SMART PLANT στο ΚΕΛ Ψυττάλειας .

Η χρήση και η μελέτη δεδομένων Online αισθητήρων στο πιλοτικό SMART PLANT οδήγησε στα εξής συμπεράσματα

- Με χρήση απλών αισθητήρων όπως pH, ORP, DO μπορούν να αναγνωριστούν βασικά στάδια της μονάδας SBR όπως η αερόβια ή η ανοξική φάση
- Με χρήση απλών αισθητήρων όπως pH, ORP, DO μπορούν εξαχθούν έμμεσα στοιχεία για τις διεργασίες νιτροποίησης, απονιτροποίησης με αξιόπιστα και επαναλήψιμα αποτελέσματα.
- Μπορούν να αναγνωριστούν φαινόμενα τροφοδοσίας του συστήματος σε δεύτερο χρόνο και διακυμάνσεις σε επίπεδο μορφών αζώτου όπως NH<sub>4</sub>-N με απευθείας μέτρηση
- Αναδεικνύονται φαινόμενα θορύβου των αισθητήρων ή διακυμάνσεων όπου κάποιοι αισθητήρες δεν επιτυγχάνουν αξιόπιστα αποτελέσματα βάσει της εφαρμογής ή προβλημάτων εγκατάστασης (δίνες δείγματος, φυσαλίδες, μικρός σχεδιασμός κ.ο.κ )
- Αποτύπωση σημείων βιοχημικών διεργασιών βάσει μέτρησης της Αγωγιμότητας όπου αναγνωρίζονται σημεία έναρξης / λήξεως νιτροποίησης με τα online δεδομένα αγωγιμότητας
- Συσχέτιση Online δεδομένων Αγωγιμότητας & NH<sub>4</sub>-N κατά την πορεία Νιτροποίησης
- Ο αισθητήρας Αγωγιμότητας μπορεί έμμεσα να χρησιμοποιηθεί για απεικόνιση της πορείας της νιτροποίησης και την πορεία αυτής πάντα ως συμπληρωματικός αισθητήρας των pH, ORP, DO .
- Εξέταση των σημείων καμπής pH, ORP σε πραγματικά Online δεδομένα της μονάδας SMART PLANT
- Απαραίτητη η επιλογή αισθητήρων με γνώμονα την πληρέστερη εικόνα της μονάδας, συγκεκριμένα βασικών αισθητήρων όπως το pH, ORP και όχι απαραίτητα η επιλογή εγκατάστασης αρκετών αισθητήρων και δεδομένων .





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Αιβαζίδης Α. (2000). Τεχνολογία και Διαχείριση υγρών αποβλήτων ΙΙ. ΔΠΘ

Ανδρεαδάκης Α. (1986). Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας και Διάθεσης Αστικών Αποβλήτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ανδρεαδάκης Α. (1986). Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας και Διάθεσης Αστικών Αποβλήτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Λυμπεράτος Γ., Βαγενάς Δ. (2012). Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων. Εκδόσεις Τζιόλα

Ahn, Y. -. (2006). Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. *Process Biochemistry*, 41(8), 1709-1721.

Ahn, Y. -, & Choi, H. -. (2006). Autotrophic nitrogen removal from sludge digester liquids in upflow sludge bed reactor with external aeration. *Process Biochemistry*, 41(9), 1945-1950.

Aslan, S., & Dahab, M. (2008). Nitritation and denitritation of ammonium-rich wastewater using fluidized-bed biofilm reactors. *Journal of Hazardous Materials*, 156(1-3), 56-63.

Aslan, S., Miller, L., & Dahab, M. (2009). Ammonium oxidation via nitrite accumulation under limited oxygen concentration in sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, 100(2), 659-664.

Binbin Chi, Longhang Guo. (2019). Wastewater treatment sensor fault detection using RBF neural network with set membership estimation

Changkyu Lee, Sang Wook Choi, In-Beum Lee . (2003) . Sensor fault identification based on time-lagged PCA in dynamic processes

Constantinos Noutsopoulos, Daniel Mamais, Evangelos Statiris, Eleftherios Lerias, Simos Malamis and Andreas Andreadakis . (2018) . Reject water characterization and treatment through short-cut nitrification/denitrification: assessing the effect of temperature and type of substrate

Davide Sottara, Luca Luccarini, and Paola Mello . (2007) . AI Techniques for Waste Water Treatment Plant Control Case Study: Denitrification in a Pilot-Scale SBR

DAVID JÉRÔME DURRENMATT . (2011) . DATA MINING AND DATA-DRIVEN MODELING APPROACHES TO SUPPORT WASTEWATER TREATMENT PLANT OPERATION

D. J. I. Gustavsson.(2010). Biological sludge liquor treatment at municipal wastewater treatment plants – a review

Dosta, J., Galí, A., Benabdallah El-Hadj, T., Macé, S., & Mata-Álvarez, J. (2007). Operation and model description of a sequencing batch reactor treating reject water for biological nitrogen removal via nitrite. *Bioresource Technology*, 98(11), 2065-2075.

D. Mamais , C. Noutsopoulos , A. Andreadakis , J. Droubogianni , A. Georgakopoulos , E. Tsepapadakis & J. Mariolos . (2010) . Optimization of Nitrogen Removal and Startup of Psyttalia Sewage Treatment Works

De Prá, M. C., Kunz, A., Bortoli, M., Scussiato, L. A., Coldebella, A., Vanotti, M., & Soares, H. M. (2016). Kinetic models for nitrogen inhibition in ANAMMOX and nitrification

process on deammonification system at room temperature. *Bioresource Technology*, 202, 33-41.

Frison, N., Katsou, E., Malamis, S., Bolzonella, D., & Fatone, F. (2013). Biological nutrients removal via nitrite from the supernatant of anaerobic co-digestion using a pilot-scale sequencing batch reactor operating under transient conditions. *Chemical Engineering Journal*, 230, 595-604. doi:10.1016/j.cej.2013.06.071

Frison, N., Di Fabio, S., Cavinato, C., Pavan, P., & Fatone, F. (2013). Best available carbon sources to enhance the via-nitrite biological nutrients removal from supernatants of anaerobic co-digestion. *Chemical Engineering Journal*, 215-216, 15-22. doi:10.1016/j.cej.2012.10.094

Fux, C., Velten, S., Carozzi, V., Solley, D., & Keller, J. (2006). Efficient and stable nitrification and denitrification of ammonium-rich sludge dewatering liquor using an SBR with continuous loading. *Water Research*, 40(14), 2765-2775. doi:10.1016/j.watres.2006.05.003

Fux, C., Bohler, M., Huber, P., Brunner, I., & Siegrist, H. (2002). Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant. *Journal of Biotechnology*, 99(3), 295-306.

Gabarró, J., González-Cárcamo, P., Rusalleda, M., Ganigué, R., Gich, F., Balaguer, M. D., & Colprim, J. (2014). Anoxic phases are the main N<sub>2</sub>O contributor in partial nitrification reactors treating high nitrogen loads with alternate aeration. *Bioresource Technology*, 163, 92-99.

Gabriel J. Odom<sup>1,2</sup> Kathryn B. Newhart<sup>3</sup> Tzahi Y. Cath<sup>3</sup> Amanda S. Hering<sup>1</sup> . (2017) . Multistate multivariate statistical process control

Galí, A., Dosta, J., van Loosdrecht, M. C. M., & Mata-Alvarez, J. (2007). Two ways to achieve an anammox influent from real reject water treatment at lab-scale: Partial SBR nitrification and SHARON process. *Process Biochemistry*, 42(4), 715-720.

G. Bortone, S. Longhi, L. Luccarini, E. Porrà and P. Ratini . On-line Control of a SBR Reactor for the Biological Wastewater Treatment

Ge, S., Peng, Y., Qiu, S., Zhu, A., & Ren, N. (2014). Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process. *Water Research*, 55, 95-105.

Ge, S., Wang, S., Yang, X., Qiu, S., Li, B., & Peng, Y. (2015). Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 140, 85-98.

Gonzalez-Martinez, A., Morillo, J. A., Garcia-Ruiz, M. J., Gonzalez-Lopez, J., Osorio, F., Martinez-Toledo, M. V., & van Loosdrecht, M. C. M. (2015). Archaeal populations in fullscale autotrophic nitrogen removal bioreactors operated with different technologies: CANON, DEMON and partial nitritation/anammox. *Chemical Engineering Journal*, 277, 194-201.

Gustavsson, D.J.I. (2010). Biological sludge liquor treatment at municipal wastewater treatment plants – a review. *VATTEN*. 66, 179–192.

Gustaf Olsson.(2005). Current status of Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Treatment Operations

Henri Haimi a,\* , Michela Mulas a, Francesco Corona b, Riku Vahala . (2013) . Data-derived soft-sensors for biological wastewater treatment plants: An overview

Henri Haimi a,n, MichelaMulas a,b, FrancescoCorona c,d, StefanoMarsili-Libelli e,PaulaLindell f, MariHeinonen f, RikuVahala . (2015). Adaptive data-derived anomaly detection in the activated sludge process of a large-scale wastewater treatment plant

J.H. Guo a, Y.Z. Peng a,b,\*, S.Y. Wangb, Y.N. Zheng b, H.J. Huang b, S.J. Ge . (2009) . Effective and robust partial nitrification to nitrite by real-time aeration duration control in an SBR treating domestic wastewater

Juan Carlos Leyva-Díaz1 | Maria del Mar Muñío2 | Massimiliano Fenice3 | José Manuel Poyatos . (2020) . Respirometric method for kinetic modeling of ammonium oxidizing and nitrite-oxidizing bacteria in a membrane bioreactor

Jinsong Wang , Zhaoji Zhang \* , Xin Ye , Fuyi Huang and Shaohua Chen . (2018) . Performance and mechanism of free nitrous acid on the solubilization of waste activated sludge

Kathryn B. Newhart a, Ryan W. Holloway b, Amanda S. Hering c, \*, Tzahi Y. Cath . (2019) . Data-driven performance analyses of wastewater treatment plants: A review

Lackner, S., Gilbert, E. M., Vlaeminck, S. E., Joss, A., Horn, H., & van Loosdrecht, M. C. M. (2014). Full-scale partial nitrification/anammox experiences - an application survey. *Water Research*, 55, 292-303.

Ll. Corominas a, \*, M. Garrido-Baserba b, K. Villez c, G. Olsson d, U. Cortes e, M. Poch . (2017) . Transforming data into knowledge for improved wastewater treatment operation: A critical review of techniques

Malamis, S., Katsou, E., Di Fabio, S., Bolzonella, D., & Fatone, F. (2014). Biological nutrients removal from the supernatant originating from the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Critical Reviews in Biotechnology*, 34(3), 244-257. doi:10.3109/07388551.2013.791246

Ma, B., Wang, S., Cao, S., Miao, Y., Jia, F., Du, R., & Peng, Y. (2016). Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances. *Bioresource Technology*, 200, 981-990.

M. Coma\*, S. Puig, M.D. Balaguer, J. Colprim . (2010) . The role of nitrate and nitrite in a granular sludge process treating low-strength wastewater

Magrí, A., Béline, F., & Dabert, P. (2013). Feasibility and interest of the anammox process as treatment alternative for anaerobic digester supernatants in manure processing - an overview. *Journal of Environmental Management*, 131, 170-184.

Metcalf & Eddy (1991). "Wastewater Engineering: Treatment, disposal, reuse". McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series

M. H. Kim\*, Y. S. Kim, A. A. Prabu\* and C. K. Yoo . (2007) . A systematic approach to data-driven modeling and soft sensing in a full-scale plant

Mosquera-Corral, A., González, F., Campos, J. L., & Méndez, R. (2005). Partial nitrification in a SHARON reactor in the presence of salts and organic carbon compounds. *Process Biochemistry*, 40(9), 3109-3118.

Moomen Soliman . Ahmed Eldyasti . (2018) . Ammonia-Oxidizing Bacteria (AOB): opportunities and applications—a review

Molly C. Klanderman a, Kathryn B. Newhart b, Tzahi Y. Cath b, Amanda S. Hering a,\* . (2020) . Case studies in real-time fault isolation in a decentralized wastewater treatment facility

Mulder, A. (2003). The quest for sustainable nitrogen removal technologies. *Water Sci. Technol.* 48, 67–75.

Mihaela Miron, Laurențiu Frangu, Sergiu Caraman, Laurențiu Luca . (2018) . Artificial Neural Network Approach for Fault Recognition in a Wastewater Treatment Process

N. Banadda<sup>1\*</sup>, I. Nhapi<sup>2</sup> and R. Kimwaga . (2011) . A review of modeling approaches in activated sludge Systems

N. Frison a, E. Katsou b,c, S. Malamis b,c, D. Bolzonella b,c, F. Fatone .(2013). Biological nutrients removal via nitrite from the supernatant of anaerobic co-digestion using a pilot-scale sequencing batch reactor operating under transient conditions

Peng, Y., & Zhu, G. (2006). Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 73(1), 15-26.

Pitman, A. R. (1999). Management of biological nutrient removal plant sludges - change the paradigms? *Water Research*, 33(5), 1141-1146.

Pollice, A., Tandoi, V., & Lestingi, C. (2002). Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate. *Water Research*, 36(10), 2541-2546.



Pollice, A., Tandoi, V., & Lestingi, C. (2002). Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate. *Water Research*, 36(10), 2541-2546. doi:10.1016/S0043-1354(01)00468-7

Rodriguez-Caballero, A., Ribera, A., Balcázar, J. L., & Pijuan, M. (2013). Nitritation versus full nitrification of ammonium-rich wastewater: Comparison in terms of nitrous and nitric oxides emissions. *Bioresource Technology*, 139, 195-202.

Ruiz, G., Jeison, D., & Chamy, R. (2003). Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration. *Water Research*, 37(6), 1371-1377.

Ruey-Fang Yu", Shu-Liang Liaw", Cheng-Nan Chang\*\* and Wan-Yuan Cheng\* . (1998) . APPLYING A REAL-TIME CONTROL TO ENHANCE THE PERFORMANCE OF NITROGEN REMOVAL IN THE CONTINUOUS-FLOW SBR SYSTEM

Richard Blackburne - Zhiguo Yuan - Ju"rg Keller . (2007) . Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor

Schmidt, I., Sliemers, O., Schmid, M., Bock, E., Fuerst, J., Kuenen, J. G., . . . Strous, M. (2003). New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. *FEMS Microbiology Reviews*, 27(4), 481-492.

Strous, M., Heijnen, J.J., Kuenen, J.G., Jetten, M.S.M. (1998). The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 50, 589–596.

Spooner, Max Peter . Methods and tools for the statistical data analysis of large datasets collected from biobased manufacturing processes

Sheng-Peng Sun, Carles Pellicer i Na`cher,<sup>2</sup> Brian Merkey,<sup>2</sup> Qi Zhou,<sup>1</sup> Si-Qing Xia,<sup>1</sup> Dian-Hai Yang,<sup>1</sup> Jian-Hui Sun,<sup>3</sup> and Barth F. Smets<sup>2</sup> . (2009) . Effective Biological Nitrogen Removal Treatment Processes for Domestic Wastewaters with Low C=N Ratios: A Review

Tang, H. L., & Chen, H. (2015). Nitrification at full-scale municipal wastewater treatment plants: Evaluation of inhibition and bioaugmentation of nitrifiers. *Bioresource Technology*, 190, 76-81.

Torà, J. A., Moliné, E., Carrera, J., & Pérez, J. (2013). Efficient and automated start-up of a pilot reactor for nitrification of reject water: From batch granulation to high rate continuous operation. *Chemical Engineering Journal*, 226, 319-325.

van den Broeke, J. and T. Koster. 2021. Spectroscopic Methods for Online Water Quality Monitoring. *Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 102. doi:10.1007/698\_2019\_391. www.scopus.com.

V. Vasilaki a, E.I.P. Volcke b, A.K. Nandi c, M.C.M. van Loosdrecht d, E. Katsou . (2018) . Relating N<sub>2</sub>O emissions during biological nitrogen removal with operating conditions using multivariate statistical techniques

Vasileia K. Vasilaki.(2019). Knowledge discovery and data mining to understand and optimise the environmental behavior of wastewater treatment processes

Vázquez-Padín, J., Fernández, I., Figueroa, M., Mosquera-Corral, A., Campos, J. -, & Méndez, R. (2009b). Applications of anammox based processes to treat anaerobic digester supernatant at room temperature. *Bioresource Technology*, 100(12), 2988-2994.

WANG, F., XIA, S. -, LIU, Y., CHEN, X. -, & ZHANG, J. (2007). Community analysis of ammonia and nitrite oxidizers in start-up of aerobic granular sludge reactor. *Journal of Environmental Sciences*, 19(8), 996-1002.

Wu, C., Peng, Y., Wang, S., Li, X., & Wang, R. (2011). Effect of sludge retention time on nitrite accumulation in real-time control biological nitrogen removal sequencing batch reactor. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 19(3), 512-517.

Wei Chai, Longhang Guo, Xuemeng Li and Jian Tang. (2019) . Interval prediction of effluent TP for wastewater treatment plants

Zhijia Miao ,Duo Li, Shan Guo, Zhirui Zhao,Xiaofeng Fang, Xueyou Wen, Jingmin Wan, and Aiguo Li. (2018) . Effect of Free Nitrous Acid on Nitrous Oxide Production and Denitrifying Phosphorus Removal by Polyphosphorus-Accumulating Organisms in Wastewater Treatment

Zanetti, L., Frison, N., Nota, E., Tomizioli, M., Bolzonella, D., & Fatone, F. (2012). Progress in real-time control applied to biological nitrogen removal from wastewater. A shortreview. *Desalination*, 286, 1-7.

Zhou, Y., Oehmen, A., Lim, M., Vadivelu, V., & Ng, W. J. (2011). The role of nitrite and free nitrous acid (FNA) in wastewater treatment plants. *Water Research*, 45(15), 4672-4682.

Zheng, M., Wu, S., Zuo, Z., Wang, Z., Qiu, Y., Liu, Y., . . . Yuan, Z. (2018). Predictions of the influent and operational conditions for partial nitrification with a model incorporating pH dynamics. *Environmental Science and Technology*, 52(11), 6457-6465. doi:10.1021/acs.est.8b00202