



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

## « ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ »

Γεώργιος Χ. Καρατσώκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Κ. Νουτσόπουλος



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ**

**« ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ »**

**« ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΟΤΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ  
ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ »**

**Καρατσώκης Χ. Γεώργιος**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2019**

**Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Κ. Νουτσόπουλος**

## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνησή της.

Αρχικά ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, τον Καθηγητή κ. Ανδρέα Ανδρεαδάκη καθώς και τον Καθηγητή κ. Δανιήλ Μαμάη για την πολύτιμη συνεισφορά τους, τη σημαντική καθοδήγηση και τις συμβουλές σε όλα τα στάδια πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω τόσο στην ερευνήτρια Ελένη Νύκταρη όσο και στον υποψήφιο διδάκτορα Γεράσιμο Φραγκισκάτο για τις πολύτιμες συμβουλές και την στήριξη καθ' όλη τη χρονική διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του εργαστηρίου υγειονομικής τεχνολογίας της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και ιδιαίτερα τον ερευνητή κ. Νίκο Κουρή.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση δύο πιλοτικών συστημάτων επεξεργασίας τυπικών αστικών λυμάτων, τα οποία λειτουργούν σε συνθήκες υψηλής οργανικής φόρτισης. Κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε καθημερινή παρακολούθηση της λειτουργίας των πιλοτικών συστημάτων όσον αφορά διάφορες λειτουργικές παραμέτρους (π.χ. SRT, HRT, DO, SAS) αλλά και παραμέτρων που σχετίζονται με την απόδοση των συστημάτων ως προς την ικανότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου (διάφορα κλάσματα COD, BOD<sub>5</sub>, TSS). Επίσης διερευνήθηκε η ικανότητα εμπλουτισμού της παραγόμενης πλεονάζουσας ιλύος σε οργανικό φορτίο με την ενίσχυση της επίδρασης μηχανισμών απομάκρυνσης του COD όπως η προσρόφηση και η ενδοκυτταρική αποθήκευση, καθώς και τα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας της. Σκοπός λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των λειτουργικών παραμέτρων καθώς αυτές μεταβάλλονται με τον χρόνο, στην απόδοση των δύο πιλοτικών συστημάτων υψηλής οργανικής φόρτισης όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων που συντελούν στην ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους.

Για τον παραπάνω λόγο σχεδιάστηκαν και τέθηκαν σε λειτουργία δύο πιλοτικά συστήματα υψηλής οργανικής φόρτισης. Τα πιλοτικά συστήματα βρίσκονταν σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο, εντός εμπορευματοκιβωτίου (container) στο Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας. Το πρώτο σύστημα ονομάζεται συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης (HiCAS), περιελάμβανε μία δεξαμενή επαφής (contact tank) όπου εκεί συντελούνταν όλες οι βιολογικές διεργασίες και μια δεξαμενή τελικής καθίζησης για τον διαχωρισμό των επεξεργασμένων λυμάτων από το ανάμεικτο υγρό. Το δεύτερο σύστημα ονομάζεται σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής-σταθεροποίησης (HiCS) και αποτελεί ουσιαστικά παραλλαγή του πρώτου συστήματος. Η διαφοροποίηση από το προηγούμενο σύστημα (HiCAS) είναι ότι η ανακυκλοφορούμενη ιλύς από τον πυθμένα της ΔTK διερχόταν πρώτα από μια δεξαμενή σταθεροποίησης (stabilization tank), υπό αερόβιες συνθήκες ώστε να αυξηθεί η ικανότητα της για απομάκρυνση οργανικού φορτίου στην δεξαμενή επαφής.

Τα λύματα από το κανάλι προσαγωγής του ΚΕΛ Ψυττάλειας μεταφέρονταν μέσω αντλίας σε δεξαμενή τροφοδοσίας των συστημάτων. Η παροχή της αντλίας στη δεξαμενή ήταν 4 m<sup>3</sup>/h και ο ωφέλιμος όγκος της 0.5 m<sup>3</sup>. Τα λύματα από την δεξαμενή

τροφοδοσίας, μέσω κατάλληλης διάταξης υπερχειλίζουν πίσω στο κανάλι προσαγωγής του ΚΕΛΨ. Δύο περισταλτικές αντλίες, εργαστηριακής κλίμακας μεταβαλλόμενης παροχής, χρησιμοποιούνταν για την μεταφορά των λυμάτων από την δεξαμενή τροφοδοσίας στα δύο συστήματα. Η λειτουργία των δύο συστημάτων ξεκίνησε δοκιμαστικά στις 30/06/2018 για μία εβδομάδα ενώ ημερομηνία έναρξης της κανονικής λειτουργίας με λύματα ήταν η 06/07/2018. Κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκαν τέσσερις κύκλοι λειτουργίας με χρονική διάρκεια 113, 60, 90 και 75 μέρες αντίστοιχα, με ημερομηνία λήξης του τέταρτου κύκλου λειτουργίας την 21/6/2019. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας υπήρξε μεταβολή στους χρόνους παραμονής στερεών (SRT) και υδραυλικής επαφής (HRT), σε όλο και συντομότερες συνθήκες επεξεργασίας. Ο πρώτος κύκλος λειτουργούσε σε SRT 2d και HRT 2h, και στην συνέχεια οι χρόνοι μειώθηκαν σε SRT 2d – HRT 1h στον δεύτερο, SRT 1d – HRT 1h στον τρίτο και τελικά σε SRT 1d και HRT 0,5h στον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα για το πιλοτικό σύστημα HiCAS έδειξαν ότι οι πιο αποτελεσματικοί κύκλοι λειτουργίας όσον αφορά την απομάκρυνση σε οργανικό φορτίο ήταν ο πρώτος και ο τρίτος με ποσοστά απομάκρυνσης 79 και 71,5 % ως προς το ολικό COD (tCOD), ενώ τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) στην έξοδο είχαν τιμές συγκέντρωσης 35 και 65 mg/L αντίστοιχα. Για το πιλοτικό σύστημα HiCS τα αποτελέσματα έδειξαν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης οργανικού φορτίου κατά τους τρεις πρώτους κύκλους (85, 90 και 86% ως προς tCOD) με τον δεύτερο κύκλο (SRT 2d, HRT 1h) να εμφανίζεται πιο αποδοτικός. Οι συγκεντρώσεις των TSS εξόδου του HiCS ήταν αντίστοιχα για τους τρεις πρώτους κύκλους 23, 20 και 44 mg/L. Βέβαια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για τα υπό εξέταση συστήματα ήταν το ποσοστό και η ποσότητα εκτροπής του οργανικού φορτίου στο ρεύμα της ιλύος καθώς και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα χαρακτηρισμού της πλεονάζουσας ιλύος με τη μέθοδο του προσδιορισμού του ρυθμού αποξυγόνωσης (O.U.R.) αλλά και κατασκευή του ισοζυγίου COD για τα υπό εξέταση συστήματα. Για το σύστημα HiCAS τα υψηλότερα ποσοστά COD στην ιλύ εντοπίζονται στον πρώτο και τρίτο κύκλο με 34%, ενώ για το HiCS τα ποσοστά του COD στο ρεύμα της ιλύος ήταν 37, 44,5, 49 και 40,5 % αντίστοιχα για τον καθένα από τους τέσσερις κύκλους λειτουργίας. Από τα πειράματα O.U.R. φάνηκε πως όσο κατευθυνόμασταν σε συνθήκες υψηλότερης οργανικής φόρτισης η συγκέντρωση του

COD στην πλεονάζουσα ιλύ αυξανόταν. Για τους κύκλους λειτουργίας όπου εμφανίστηκαν αρκετά υψηλά ποσοστά COD εξόδου (HiCAS-2, HiCAS-4, HiCS-4) ενδέχεται να ευθύνεται η πολύ υψηλή συγκέντρωση βιομάζας που δημιουργήθηκε βάση των επιλεγόμενων λειτουργικών συνθηκών που οδήγησε σε διαφυγή ποσότητας της στην έξοδο των συστημάτων από την δεξαμενή τελικής καθίζησης (κυρίως σωματιδιακό COD). Τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος παρουσίασαν τα βέλτιστα αποτελέσματα στον 4<sup>ο</sup> κύκλο λειτουργίας αμφότερων των δύο συστημάτων.

Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των συστημάτων HiCAS και HiCS για να εξεταστούν τα αποτελέσματα των δύο τεχνολογιών με δεδομένη εισερχόμενη παροχή λυμάτων και όγκο αντιδραστήρων σε κύκλους με όμοιους χρόνους επεξεργασίας (SRT και HRT). Φάνηκε το σύστημα HiCS να υπερτερεί σε συνθήκες χαμηλότερης οργανικής φόρτισης (SRT 2d, HRT 2h) ενώ το συμβατικό σύστημα HiCAS να έχει καλύτερα αποτελέσματα σε συνθήκες υψηλότερης οργανικής φόρτισης (SRT 1d, HRT 0,5h) όσον αφορά την απομάκρυνση οργανικού φορτίου. Το πιλοτικό σύστημα επαφής-σταθεροποίησης φαίνεται να εκτρέπει μεγαλύτερα ποσοστά COD στο ρεύμα της ιλύος σε σχέση με το συμβατικό σύστημα σε όλες τις συνθήκες που εξετάστηκαν. Επίσης η ποσότητα της πλεονάζουσας ιλύος που απορρίπτεται καθημερινά είναι σημαντικά υψηλότερη στο σύστημα επαφής-σταθεροποίησης συγκριτικά με το συμβατικό, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη δυνατότητα ενεργειακής ανάκτησης μέσω αναερόβιας χώνευσης της απορριπτόμενης ιλύος, ακόμα και αν η ιλύς του HiCAS έχει υψηλότερη συγκέντρωση βιοδιασπάσιμου COD. Βέβαια το σύστημα επαφής-σταθεροποίησης έχει αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω της επιπλέον δεξαμενής σταθεροποίησης όπως έδειξαν και τα αποτελέσματα για την ημερήσια ζήτηση των συστημάτων σε g O<sub>2</sub>.

## Abstract

The main purpose of this postgraduate study is to investigate two pilot-scale wastewater treatment systems operating under high organic loading rate conditions. During the preparation of this postgraduate study, daily monitoring of the pilot scale systems was occurred on a variety of operational parameters (e.g. SRT, HRT, DO, SAS) but also on the performance of the systems in terms of organic load removal efficiencies (various COD fractions, BOD<sub>5</sub>, TSS). The ability to enrich the excess sludge with organic matter was also examined by enhancing the effect of specific COD removal mechanisms such as adsorption and intracellular storage. Sedimentation characteristics of the sludge were also investigated. In conclusion, the purpose of this study was to examine the performance of two high-rate pilot scale systems and also the effect of operating parameters variation throughout time, in order to draw conclusions that contribute to the complete optimization of their operation.

For this reason, two high-rate activated sludge pilot-scale systems were designed and set in operation. The pilot-scale systems were demonstrated in a specially designed container at Psyttalia Wastewater Treatment Plant. The first system is a conventional high-rate system (HiCAS), which consists of a contact tank where all biological processes were performed and a final sedimentation tank in order to separate the treated wastewater from the mixed liquor. The second system is a high-rate Contact-Stabilization System (HiCS) and is essentially a variant form of the HiCAS system. The difference from HiCAS is that the returned sludge from the bottom of the sedimentation tank was first passed through a stabilization tank under aerobic conditions in order to increase its ability to remove organic substances in the contact tank.

Municipal wastewater from a feed channel of Psyttalia was pumped into a systems-feed tank. The pump flow was 4 m<sup>3</sup> / h with a working volume of 0.5 m<sup>3</sup>. Wastewater from the feed tank, flowed back into the Psyttalia's supply channel through an appropriate layout mechanism. Two laboratory-scale peristaltic pumps were used to transport wastewater from the feed tank into the two systems. The trial operation of the two systems started on 30/06/2018 for one week while the date of normal operation with sewage was from 06/07/2018 until 21/6/2019. During this study, four operating cycles of 113, 60, 90 and 75 days respectively were investigated. For each of the four



operating cycles, a change in solids retention time (SRT) and hydraulic retention time (HRT) was occurred at increasingly shorter treatment conditions. During the first cycle, the SRT was set to 2d and the HRT to 2h. During the next two cycles, the HRT was reduced to 1 h while the SRT was set to 2 days and 1 day respectively. During the fourth cycle, the SRT was set again to 1 d while the HRT was reduced to 0.5 h.

HiCAS pilot system results showed that the most efficient cycles to remove organic load were the first and the third with 79 and 71.5% removal rates in total COD (tCOD), while total suspended solids (TSS) in the effluent had concentration values of 35 and 65 mg / L, respectively. HiCS pilot system results showed particularly high organic load removal rates during the first three cycles (85, 90 and 86% tCOD) with the second cycle (SRT 2d, HRT 1h) being the most efficient. TSS outflow concentrations for the first three cycles were 23, 20 and 44 mg / L respectively. A particularly important parameter for the two HIRAS pilot-scale systems was the rate and amount of organic charge diverted to the sludge stream and its qualitative characteristics. For this reason, surplus sludge characterization experiments were carried out using the method of oxygen uptake rate (O.U.R.). In addition, COD mass balance was constructed for each operation cycle of the two systems. Regarding HiCAS system, the highest COD percentages in the sludge identified during the first and the third cycles of 34%, while for the HiCS the COD percentages in the sludge stream were 37, 44.5, 49 and 40.5%, respectively for each of the four operating cycles. The O.U.R. experiments showed that as we headed towards higher organic loading rate conditions the concentration of COD in the excess sludge increased. The selected operating conditions for HiCAS-2, HiCAS-4 and HiCS-4 led to very high biomass concentrations. This might be responsible for the high concentrations of COD effluent due to leakage of solids in the effluent (mainly particulate COD). The 4th operation cycle of both systems, proved to be the most efficient in terms of sedimentation characteristics of the sludge.

Finally, a comparison was made between HiCAS and HiCS in order to examine the results of the two technologies with a given incoming sewage supply and reactor volume, in cycles with similar processing times (SRT and HRT). The results showed that HiCS system appeared to outperform at lower organic loading conditions (SRT 2d, HRT 2h) while the conventional HiCAS system performed better in terms of organic

charge removal at higher organic loading conditions (SRT 1d, HRT 0.5h. The contact-stabilization system appears to divert higher COD levels in the sludge stream than the conventional system under all conditions examined. Also, the amount of excess sludge discharged daily is significantly higher in the contact-stabilization system than conventional, which indicates greater energy recovery ability through anaerobic digestion of the disposed sludge, even if HiCAS sludge had higher COD concentration. Nevertheless, the contact-stabilization system has higher energy requirements due to the additional stabilization tank as shown by the results for the daily demand of the systems in g O<sub>2</sub>.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>20</b>
<b>2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση συστημάτων υψηλής φόρτισης</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1 Συμβατικά συστήματα επεξεργασίας – στόχοι και μειονεκτήματα</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2 Ενεργειακή απαίτηση και ανάκτηση στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων – Στόχοι και μελλοντικές προοπτικές</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3 Μέθοδοι επεξεργασίας στην κατεύθυνση αξιοποίησης του ενεργειακού περιεχομένου των λυμάτων (μείωση ενεργειακής απαίτησης / αύξηση ανάκτησης)</b> .....	<b>30</b>
2.3.1 Πρωτοβάθμια καθίζηση .....	30
2.3.2 Αναερόβια επεξεργασία.....	31
2.3.2.1 Αναερόβιες διεργασίες στρώματος ίλως – UASB αντιδραστήρας.....	33
2.3.2.2 Αναερόβια επεξεργασία με χρήση μεμβρανών – AnMBR αντιδραστήρας .....	34
2.3.3 Συστήματα υψηλής φόρτισης ( <i>High Rate Activated Sludge Systems</i> ) .....	35
2.3.3.1 Συμβατικά συστήματα υψηλής φόρτισης (HiCAS).....	37
2.3.3.2 Συστήματα επεξεργασίας δύο σταδίων (AB process system) .....	39
2.3.3.3 Συστήματα επαφής-σταθεροποίησης (HiCS) .....	42
<b>2.4 Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρυπαντικού φορτίου στα συστήματα υψηλής φόρτισης – Βιολογικές, φυσικές και χημικές διεργασίες</b> .....	<b>44</b>
2.4.1 Βιολογική Προσρόφηση-Συσσωμάτωση.....	45
2.4.2 Ενδοκυτταρική αποθήκευση .....	52
2.4.3 Αερόβια και αναερόβια βιοδιάσπαση .....	57
2.4.4 Υδρόλυση.....	61
2.4.5 Παραγωγή EPS ( <i>extracellular polymeric substances</i> ).....	64
<b>2.5 Λειτουργικές παράμετροι που επιδρούν στην απόδοση των συστημάτων υψηλής φόρτισης</b> .....	<b>71</b>
2.5.1 Χρόνος παραμονής στερεών ( <i>SRT</i> ).....	71
2.5.2 Υδραυλικός χρόνος παραμονής ( <i>HRT</i> ).....	76
2.5.3 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου ( <i>DO</i> ).....	79
<b>3. Πειραματικό μέρος και εργαστηριακές μέθοδοι</b> .....	<b>83</b>
<b>3.1 Εισαγωγικά στοιχεία</b> .....	<b>83</b>
<b>3.2 Παρουσίαση των πιλοτικών συστημάτων υψηλής φόρτισης</b> .....	<b>84</b>
<b>3.3 Λειτουργικές παράμετροι των πιλοτικών συστημάτων κατά τις τέσσερις περιόδους λειτουργίας</b> .....	<b>90</b>

<b>3.4 Δειγματοληψίες πιλοτικών συστημάτων και εργαστηριακές αναλύσεις ....</b>	<b>91</b>
3.4.1 Προσδιορισμός ολικών αιωρούμενων (TSS) και πτητικών στερεών (VSS) ..	92
3.4.2 Προσδιορισμός του ολικού και διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD).....	93
3.4.2.1 Μέθοδος χαρακτηρισμού κλασμάτων COD (σωματιδιακό, κολλοειδές και διαλυτό COD) .....	94
3.4.2.2 Προσδιορισμός αδρανούς διαλυτού COD λυμάτων εισόδου .....	96
3.4.3 Προσδιορισμός βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) .....	97
3.4.4 Προσδιορισμός διαλυτού οξυγόνου (DO), pH, θερμοκρασίας (T) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας .....	99
3.4.5 Μέτρηση των εξωκυτταρικών πολυμερών .....	99
3.4.5.1 Διαλυτά εξωκυτταρικά πολυμερή (SMP) .....	100
3.4.5.2 Δεσμευμένα εξωκυτταρικά πολυμερή (EPS).....	100
<b>3.5 Εξειδικευμένα πειράματα διερεύνησης.....</b>	<b>101</b>
3.5.1 Χαρακτηρισμός πλεονάζουσας ιλύος μέσω της ταχύτητας αποξυγόνωσης (OUR).....	101
3.5.2 Ισοζύγιο μάζας COD.....	102
3.5.3 Διερεύνηση των χαρακτηριστικών καθιζησιμότητας της ιλύος .....	104
<b>4. Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων .....</b>	<b>107</b>
<b>4.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....</b>	<b>107</b>
<b>4.2 Πιλοτικό συμβατικό σύστημα επεξεργασίας υψηλής φόρτισης (HiCAS).107</b>	
4.2.1 Λειτουργικές παράμετροι του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	108
4.2.2 Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	111
4.2.3 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	118
4.2.4 Ισοζύγιο COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	121
4.2.5 Χαρακτηρισμός της πλεονάζουσας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCAS με τη μέθοδο προσδιορισμού της ταχύτητας αποξυγόνωσης (O.U.R.) .....	128
4.2.6 Χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCAS	133
<b>4.3 Πιλοτικό σύστημα επεξεργασίας υψηλής φόρτισης επαφής - σταθεροποίησης (HiCS).....</b>	<b>134</b>
4.3.1 Λειτουργικές παράμετροι του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	134

4.3.2 Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	138
4.3.3 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	145
4.3.4 Ισοζύγιο COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	148
4.3.5 Χαρακτηρισμός της πλεονάζουσας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCS με τη μέθοδο προσδιορισμού της ταχύτητας αποξυγόνωσης (O.U.R.).....	154
4.3.6 Χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCS..	158
<b>4.4 Σύγκριση πιλοτικών συστημάτων υψηλής φόρτισης HiCAS και HiCS ...</b>	<b>159</b>
4.4.1 Λειτουργικές παράμετροι, μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης και αποδόσεις των συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων.....	160
4.4.2 Ισοζύγιο COD και χαρακτηρισμός πλεονάζουσας ιλύος των συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων.....	162
<b>5. Συμπεράσματα - Προτάσεις .....</b>	<b>166</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>174</b>

## Ευρετήριο Πινάκων

<b>Πίνακας 2.1:</b> Όρια των παραμέτρων ποιότητας των επεξεργασμένων λυμάτων (Οδηγία 91/271/EEC) .....	26
<b>Πίνακας 2.2:</b> Ενεργειακά χαρακτηριστικά τυπικών αστικών λυμάτων (McCarty, Bae, and Kim 2011) .....	28
<b>Πίνακας 2.3:</b> Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αναερόβιων διεργασιών σε σύγκριση με τις αερόβιες διεργασίες (Metcalf & Eddy, 2003) .....	32
<b>Πίνακας 2.4:</b> Τυπικά κριτήρια σχεδιασμού για συστήματα υψηλής φόρτισης (Jimenez et al. 2014) .....	37
<b>Πίνακας 2.5:</b> Λειτουργικές παράμετροι και απόδοση των δύο αντιδραστήρων υψηλής φόρτισης σταδίου-A (HRSD, UNO) για τα διάφορα κλάσματα COD (Nogaj et al. 2019) .....	57
<b>Πίνακας 2.6:</b> Επίδραση των αναερόβιων και αερόβιων συνθηκών της δεξαμενής επαφής και σταθεροποίησης στην παραγωγή EPS με ακατέργαστα λύματα ως πηγή άνθρακα σε ένα batch πείραμα πλήρους κλίμακας με SRT 2 ημερών (Rahman, Mosquera, et al. 2017) .....	70
<b>Πίνακας 2.7:</b> Συνοπτική απόδοση του βιοαντιδραστήρα υψηλής φόρτισης σε κάθε περίοδο λειτουργίας (Ge et al. 2017).....	74

<b>Πίνακας 3.1:</b> Ημερομηνία έναρξης – λήξης, καθώς και χρονική διάρκεια του κάθε κύκλου λειτουργίας.....	91
<b>Πίνακας 3.2:</b> Λειτουργικές παράμετροι των πιλοτικών συστημάτων κατά τις τέσσερεις περιόδους λειτουργίας .....	91
<b>Πίνακας 4.1:</b> Ημερομηνία έναρξης – λήξης, καθώς και χρονική διάρκεια του κάθε κύκλου λειτουργίας.....	107
<b>Πίνακας 4.2:</b> Λειτουργικές παράμετροι του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	108
<b>Πίνακας 4.3:</b> Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	111
<b>Πίνακας 4.4:</b> Βαθμοί απόδοσης απομάκρυνσης του πιλοτικού συστήματος HiCAS ως προς τα διαφορετικά κλάσματα του COD κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	118
<b>Πίνακας 4.5:</b> Χαρακτηρισμός κλασμάτων COD της πλεονάζουσας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	130
<b>Πίνακας 4.6:</b> Παράμετροι καθιζησιμότητας $V_0$ και $n$ του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	133
<b>Πίνακας 4.7:</b> Λειτουργικές παράμετροι του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	134
<b>Πίνακας 4.8:</b> Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	138
<b>Πίνακας 4.9:</b> Βαθμοί απόδοσης απομάκρυνσης του πιλοτικού συστήματος HiCS ως προς τα διαφορετικά κλάσματα του COD .....	145
<b>Πίνακας 4.10:</b> Χαρακτηρισμός κλασμάτων COD της πλεονάζουσας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	155
<b>Πίνακας 4.11:</b> Παράμετροι καθιζησιμότητας $V_0$ και $n$ του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	158
<b>Πίνακας 4.12:</b> Λειτουργικές παράμετροι συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων (HiCAS 1 - HiCS 2 και HiCAS 3 – HiCS 4).....	160
<b>Πίνακας 4.13:</b> Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων (HiCAS 1 - HiCS 2 και HiCAS 3 – HiCS 4).....	160
<b>Πίνακας 4.14:</b> Βαθμοί απόδοσης συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων (HiCAS 1 - HiCS 2 και HiCAS 3 – HiCS 4) ως προς την απομάκρυνση των διαφορετικών κλασμάτων COD.....	161
<b>Πίνακας 4.15:</b> Κατανομή ισοζυγίου του COD σε όρους μάζας (g/d) και ποσοστών (%) συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων (HiCAS 1 - HiCS 2 και HiCAS 3 – HiCS 4) .....	162
<b>Πίνακας 4.16:</b> Χαρακτηρισμός κλασμάτων COD της πλεονάζουσας ιλύος των συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων .....	164

## Ευρετήριο Σχημάτων

<b>Σχήμα 2.1:</b> Σχηματική απεικόνιση τυπικού συστήματος ενεργού ιλύος CAS (Verstraete & Vlaeminck, 2011).....	26
<b>Σχήμα 2.2:</b> Σχηματική απεικόνιση συμβατικού συστήματος υψηλής φόρτισης HiCAS (Meerburg, 2016).....	39
<b>Σχήμα 2.3:</b> Σχηματική απεικόνιση συστήματος AB (AB process system) (Meerburg, 2016).....	41
<b>Σχήμα 2.4:</b> Σχηματική απεικόνιση συστήματος επαφής-σταθεροποίησης HiCS (Meerburg, 2016).....	43
<b>Σχήμα 2.5:</b> Σχηματική απεικόνιση των μηχανισμών απομάκρυνσης των κλασμάτων του COD.....	45
<b>Σχήμα 2.6:</b> a) Σχέση μεταξύ ανακατανομής του άνθρακα, οξείδωσης άνθρακα και ολικού SRT σε σύστημα CS πειραματικής κλίμακας, b) επίπτωση συνολικού SRT στην απόδοση βιο-προσρόφησης που προσδιορίστηκε σε σύστημα CS σε πιλοτικής κλίμακας, c) σχέση μεταξύ της παρατηρούμενης απόδοσης και της απόδοσης βιο-προσρόφησης της ιλύος της δεξαμενής επαφής σε συστήματα CS πειραματικής κλίμακας και d) σχέση μεταξύ της απόδοσης ανακατανομής του άνθρακα, της οξείδωσης και της βιο-προσρόφησης της ιλύος της δεξαμενής επαφής σε συστήματα CS πειραματικής κλίμακας (Rahman et al., 2017).....	50
<b>Σχήμα 2.7:</b> Οι οδοί ανακατανομής του εισερχόμενου COD υπό μεταβλητές συνθήκες SRT σε σύστημα επαφής - σταθεροποίησης (CS) πιλοτικής κλίμακας. (Rahman et al., 2017).....	52
<b>Σχήμα 2.8:</b> Συντελεστές κατανομής υποστρώματος kEPS.PC (fEPS) και kSTO, PC (fSTO) που υπολογίζονται από το μοντέλο του αντιδραστήρα σταδίου A στα (a) μεταβαλλόμενα SRT και (b) DO (SRT = 1,5 ημέρες) (Nogaj et al. 2019).....	56
<b>Σχήμα 2.9:</b> Χαρακτηρισμός κινητικής των διαφορετικών φάσεων των αντιδραστήρων HiCS σε (A) $t_c / t_s = 1$ και (B) $t_c / t_s = 0.14$ . Το εξωγενές SOUR φαίνεται στον αριστερό άξονα ενώ τα διαφορετικά κλάσματα του COD στον δεξιό άξονα (Meerburg et al. 2015).....	61
<b>Σχήμα 2.10:</b> Η διεργασία της υδρόλυσης σύμφωνα με τα μοντέλα ASM 1 και ASM 2 (Morgenroth, Kommedal, and Harremoës 2002).....	63
<b>Σχήμα 2.11:</b> Σχηματική απεικόνιση μικροβιακής συσσωμάτωσης λόγω της παρουσίας EPS (Liu, Liu, & Tay, 2004).....	65
<b>Σχήμα 2.12:</b> Σχηματική αναπαράσταση της δομής εξωκυτταρικών πολυμερικών ουσιών (Lin, et al., 2014).....	66
<b>Σχήμα 2.13:</b> Μέση απόδοση του πιλοτικού συστήματος HRAS σταδίου A (Kinyua, Elliott, et al. 2017).....	68
<b>Σχήμα 2.14:</b> Μέση απόδοση συγκέντρωση των διαφόρων κλασμάτων των EPS (Kinyua, Elliott, et al. 2017).....	69
<b>Σχήμα 2.15:</b> Μέσες συνολικές συγκεντρώσεις EPS σε αναλογία πρωτεϊνών / πολυσακχαριτών ( $P_n / P_s$ ) και αναλογία LB / TB (Kinyua, Elliott, et al. 2017).....	69
<b>Σχήμα 2.16:</b> Απόδοση απομάκρυνσης κλασμάτων COD για τους διαφορετικούς αντιδραστήρες (Meerburg, Boon, et al. 2016).....	76
<b>Σχήμα 2.17:</b> SVI της ιλύος του πιλοτικού αντιδραστήρα υψηλής φόρτισης (Abbas, Seif, and Moursi 2001).....	77

<b>Σχήμα 2.18:</b> Συγκεντρώσεις a) sCOD, b) pCOD και c) tCOD εισόδου και εξόδου και απόδοση απομάκρυνσης στα διάφορα HRT (Abbas, Seif, and Moursi 2001) .....	78
<b>Σχήμα 2.19:</b> Απόδοση απομάκρυνσης των διαφόρων κλασμάτων COD και της συγκέντρωσης των EPS του ανάμικτου υγρού ως συνάρτηση της συγκέντρωσης DO (Jimenez et al., 2015) .....	82
<b>Σχήμα 3.1:</b> Διάγραμμα ροής πιλοτικών συστημάτων HIRAS .....	87
<b>Σχήμα 4.1:</b> Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας	109
<b>Σχήμα 4.2:</b> Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας ...	109
<b>Σχήμα 4.3:</b> Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας .....	110
<b>Σχήμα 4.4:</b> Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας....	110
<b>Σχήμα 4.5:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας .....	112
<b>Σχήμα 4.6:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας.....	113
<b>Σχήμα 4.7:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας .....	113
<b>Σχήμα 4.8:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	114
<b>Σχήμα 4.9:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας .....	115
<b>Σχήμα 4.10:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας .....	116
<b>Σχήμα 4.11:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	116
<b>Σχήμα 4.12:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	117
<b>Σχήμα 4.13:</b> Συγκεντρώσεις EPS και SMP πιλοτικού συστήματος HiCAS ανά εξεταζόμενο κύκλο λειτουργίας.....	117
<b>Σχήμα 4.14:</b> Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας .....	119
<b>Σχήμα 4.15:</b> Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας .....	119



<b>Σχήμα 4.16:</b> Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	120
<b>Σχήμα 4.17:</b> Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.....	120
<b>Σχήμα 4.18:</b> Συγκεντρωτικό γράφημα απομάκρυνσης κλασμάτων COD κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας πιλοτικού συστήματος HiCAS.....	121
<b>Σχήμα 4.19:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας .....	122
<b>Σχήμα 4.20:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας.....	123
<b>Σχήμα 4.21:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας .....	124
<b>Σχήμα 4.22:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.....	125
<b>Σχήμα 4.23:</b> Συγκεντρωτικό γράφημα ποσοστιαίας κατανομής του ισοζυγίου του COD πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	126
<b>Σχήμα 4.24:</b> Ημερήσια απαίτηση σε g O <sub>2</sub> πιλοτικού συστήματος HiCAS για τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	126
<b>Σχήμα 4.25:</b> Επίδραση της οργανικής φόρτισης στο ημερήσιο ισοζύγιο μάζας του COD στο πιλοτικό σύστημα HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	127
<b>Σχήμα 4.26:</b> Συγκεντρωτικό γράφημα πειραμάτων O.U.R. πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	129
<b>Σχήμα 4.27:</b> Συσχέτιση ημερήσιας οργανικής φόρτισης – συγκέντρωσης COD που προέκυψε από πειράματα ouf πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCAS. 131	
<b>Σχήμα 4.28:</b> Ποσοστιαία κατανομή κλασμάτων COD πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	132
<b>Σχήμα 4.29:</b> Συγκεντρώσεις κλασμάτων COD πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	132
<b>Σχήμα 4.30:</b> Καμπύλες ροής μάζας λόγω βαρύτητας πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	133
<b>Σχήμα 4.31:</b> Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας .....	135
<b>Σχήμα 4.32:</b> Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας.....	136
<b>Σχήμα 4.33:</b> Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας .....	136
<b>Σχήμα 4.34:</b> Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.....	137
<b>Σχήμα 4.35:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας .....	139

<b>Σχήμα 4.36:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας.....	139
<b>Σχήμα 4.37:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας .....	140
<b>Σχήμα 4.38:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.....	140
<b>Σχήμα 4.39:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας.....	142
<b>Σχήμα 4.40:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας.....	142
<b>Σχήμα 4.41:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	143
<b>Σχήμα 4.42:</b> Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας .....	143
<b>Σχήμα 4.43:</b> Συγκεντρώσεις EPS και SMP δεξαμενής επαφής πιλοτικού συστήματος HiCS ανά εξεταζόμενο κύκλο λειτουργίας.....	144
<b>Σχήμα 4.44:</b> Συγκεντρώσεις EPS και SMP δεξαμενής σταθεροποίησης πιλοτικού συστήματος HiCS ανά εξεταζόμενο κύκλο λειτουργίας .....	144
<b>Σχήμα 4.45:</b> Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας.....	146
<b>Σχήμα 4.46:</b> Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας .....	146
<b>Σχήμα 4.47:</b> Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας.....	147
<b>Σχήμα 4.48:</b> Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.....	147
<b>Σχήμα 4.49:</b> Συγκεντρωτικό γράφημα απομάκρυνσης κλασμάτων COD κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας πιλοτικού συστήματος HiCS .....	148
<b>Σχήμα 4.50:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας .....	149
<b>Σχήμα 4.51:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας.....	150
<b>Σχήμα 4.52:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας .....	151
<b>Σχήμα 4.53:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας.....	152
<b>Σχήμα 4.54:</b> Συγκεντρωτικό γράφημα ποσοστιαίας κατανομής του ισοζυγίου του COD πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	153

<b>Σχήμα 4.55:</b> Ημερήσια απαίτηση σε gr O <sub>2</sub> πιλοτικού συστήματος HiCS για τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας.....	153
<b>Σχήμα 4.56:</b> Επίδραση της οργανικής φόρτισης στο ημερήσιο ισοζύγιο μάζας του COD στο πιλοτικό σύστημα HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας	154
<b>Σχήμα 4.57:</b> Συγκεντρωτικό γράφημα πειραμάτων O.U.R. πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	155
<b>Σχήμα 4.58:</b> Συσχέτιση ημερήσιας οργανικής φόρτισης – συγκέντρωσης COD που προέκυψε από πειράματα our πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCS....	156
<b>Σχήμα 4.59:</b> Ποσοστιαία κατανομή κλασμάτων COD πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	157
<b>Σχήμα 4.60:</b> Συγκεντρώσεις κλασμάτων COD πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	157
<b>Σχήμα 4.61:</b> Καμπύλες ροής μάζας λόγω βαρύτητας πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας .....	158
<b>Σχήμα 4.62:</b> Σύγκριση απόδοσης ως προς τα ποσοστά απομάκρυνσης των διαφόρων κλασμάτων του COD των συστημάτων HiCAS 1 – HiCS 2.....	161
<b>Σχήμα 4.63:</b> Σύγκριση απόδοσης ως προς τα ποσοστά απομάκρυνσης των διαφόρων κλασμάτων του COD των συστημάτων HiCAS 3 – HiCS 4.....	162
<b>Σχήμα 4.64:</b> Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων .....	163
<b>Σχήμα 4.65:</b> Ημερήσια απαίτηση σε g O <sub>2</sub> συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων	164
<b>Σχήμα 4.66:</b> Γράφημα πειραμάτων O.U.R. πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικών συστημάτων HiCAS-1 και HiCS-2.....	165
<b>Σχήμα 4.67:</b> Γράφημα πειραμάτων O.U.R. πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικών συστημάτων HiCAS-3 και HiCS-4.....	165

### Ευρετήριο Εικόνων

<b>Εικόνα 3.1:</b> Δεξαμενή επαφής HiCS (αριστερά) και Δεξαμενές Τελικής Καθίζησης (δεξιά) των δύο πιλοτικών συστημάτων – Αρχική τροφοδότηση με νερό .....	85
<b>Εικόνα 3.2:</b> Δεξαμενή σταθεροποίησης HiCS (αριστερά) και Δεξαμενή Επαφής HiCAS (δεξιά) – Αρχική τροφοδότηση με νερό.....	86
<b>Εικόνα 3.3:</b> Δεξαμενή σταθεροποίησης HiCS (αριστερά) και Δεξαμενές Επαφής HiCAS και HiCS (δεξιά) – Λειτουργία με λύματα.....	88
<b>Εικόνα 3.4:</b> Δεξαμενές Τελικής Καθίζησης HiCAS (αριστερά) και HiCS (δεξιά) – Λειτουργία με λύματα.....	89
<b>Εικόνα 3.5:</b> Διάταξη των δεξαμενών των δύο πιλοτικών συστημάτων HiCAS και HiCS – Λειτουργία με λύματα.....	90

## 1. Εισαγωγή

Το νερό τα τρόφιμα και η ενέργεια είναι τρία από τα πιο σημαντικά ζητήματα διαθεσιμότητας πόρων που αντιμετωπίζει σήμερα η παγκόσμια κοινότητα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, σύμφωνα με το σύγχρονο ανθρωπογενή υδρολογικό κύκλο αντλούνται ετησίως 3900 km<sup>3</sup> νερού από το περιβάλλον, εκ των οποίων το 12% προορίζεται για οικιακή, το 19% για βιομηχανική και το 69% για γεωργική χρήση (AQUASTAT, 2014). Στη Δυτική Ευρώπη, η ετήσια χρήση νερού φτάνει τα 99,7 km<sup>3</sup>/y ενώ μόλις το 15,9% του όγκου αυτού αναπληρώνεται κάθε χρόνο μέσω των τοπικών βροχοπτώσεων. Περισσότερες από τις μισές ευρωπαϊκές πόλεις πραγματοποιούν απόρριψη στα υπόγεια ύδατα με μη βιώσιμες μεθόδους σε αρκετά υψηλά ποσοστά (OHE, 2006). Περιοχές με πολύ περιορισμένη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων, όπως η χερσόνησος της Αραβίας, αντλεί το νερό με ρυθμό σχεδόν πέντε φορές μεγαλύτερο από το ρυθμό κατακρήμνισης που δέχεται (AQUASTAT, 2014). Μέχρι το 2050, η κλιματική αλλαγή και η ταχεία κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη αναμένεται να αυξήσουν τις υδάτινες απορρίψεις στις λεκάνες απορροής των ποταμών κατά περίπου 50% (Alcamo et al., 2007). Παγκοσμίως 1,1 δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν είχαν επαρκή πρόσβαση σε πόσιμο νερό το 2006 και 2,6 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν είχαν πρόσβαση σε συνθήκες βασικής υγιεινής (OHE, 2006), γεγονός που μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διαθεσιμότητα των γλυκών υδάτων για ασφαλή κατανάλωση. Αυτά τα παραδείγματα τονίζουν την επείγουσα ανάγκη μετάβασης προς ένα περισσότερο βιώσιμο ανθρωπογενή υδρολογικό κύκλο.

Με σκοπό λοιπόν την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων σε μια περισσότερο βιώσιμη κατεύθυνση, τα τυπικά αστικά λύματα θεωρούνται και υπολογίζονται πλέον ως πόροι παρά ως απόβλητα. Πόροι για νερό, ενέργεια, καθώς και για την παραγωγή λιπάσματος των φυτών, με την ανάκτηση του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P) που εμπεριέχονται σε αυτά. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού από την επεξεργασία λυμάτων για άρδευση, πότισμα καλλιεργειών αλλά και για οικιακή κατανάλωση είναι μια ευρέως αποδεκτή και αναπτυσσόμενη πρακτική για την εξοικονόμηση νερού και την εκμετάλλευση των στοιχείων που περιέχουν. Η εκμετάλλευση των αστικών λυμάτων ως πηγή ενέργειας έχει εφαρμοστεί ιστορικά στο παρελθόν, ιδίως μέσω της αναερόβιας χώνευσης του οργανικού φορτίου των λυμάτων που οδηγεί στην παραγωγή μεθανίου (CH<sub>4</sub>), ένα ιδιαίτερα χρήσιμο βιοκαύσιμο. Ωστόσο, μέσω των συμβατικών

πρακτικών επεξεργασίας των λυμάτων, οι οποίες συνδυάζουν εκτεταμένες αερόβιες διεργασίες με την αναερόβια χώνευση της παραγόμενης ιλύος, μόνο ένα μέρος των ενεργειακών δυνατοτήτων των λυμάτων αξιοποιείται. Το διαλυμένο οργανικό κλάσμα που εμπεριέχεται στα λύματα δεν ανακτάται αλλά απομακρύνεται με αερόβιες διεργασίες οι οποίες απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας. Ως αποτέλεσμα των παραδοσιακών προσεγγίσεων επεξεργασίας, περισσότερη ενέργεια καταναλώνεται στην επεξεργασία των λυμάτων από ό, τι ανακτάται μέσω της χώνευσης (McCarty, Bae, and Kim 2011).

Τι πρακτικές όμως μπορούμε να εφαρμόσουμε ώστε να καταφέρουμε καλύτερη και πληρέστερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων ανάκτησης πόρων που μας δίνονται μέσω της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων (νερό, ενέργεια, θρεπτικά); Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων εφαρμόζεται ήδη ευρέως, ιδιαίτερα σε περιοχές που η διαθεσιμότητα του νερού είναι περιορισμένη, αλλά αυτό συνεπάγεται και αυξημένη απαίτηση σε ενέργεια για την επεξεργασία τους λόγω των υψηλών απαιτήσεων ποιότητας των υδάτων για επαναχρησιμοποίηση. Η μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων επεξεργασίας μπορεί να συμβάλει στην αντιστάθμιση αυτής της κατάστασης, ιδιαίτερα μέσω της αποτελεσματικότερης αξιοποίησης του δυναμικού των βιο-καυσίμων που μπορούν να παραχθούν από τα ίδια τα απόβλητα. Η μείωση των καθαρών ενεργειακών απαιτήσεων για την επεξεργασία των λυμάτων είναι ένας συμπληρωματικός, αλλά όχι ένας εναλλακτικός στόχος για την επαναχρησιμοποίησή τους. Το ίδιο μπορεί να ειπωθεί σε σχέση με την ανάκτηση θρεπτικών ουσιών. Επιπλέον, οι ανησυχίες σχετικά με την κλιματική αλλαγή που συνδέονται με την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων καθώς και το αυξανόμενο ενεργειακό κόστος απαιτούν να καταβληθούν μεγαλύτερες προσπάθειες για μεγαλύτερη αξιοποίηση και περισσότερο βιώσιμη χρήση του ενεργειακού δυναμικού των λυμάτων.

Υπάρχουν πολλά εναλλακτικά συστήματα που εφαρμόζονται σήμερα για την επεξεργασία τυπικών αστικών λυμάτων. Ο αριθμός και η εφαρμογή αυτών των εναλλακτικών λύσεων συναντάται σε μικρότερο βαθμό στις ανεπτυγμένες χώρες λόγω του αυστηρού περιορισμού όσον αφορά την επιθυμητή ποιότητα εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων με βάση το υπάρχον νομοθετικό πλαίσιο. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, ωστόσο, όπου η οικονομία, οι κυβερνήσεις και οι πολιτικές αλλάζουν διαρκώς, τα όρια που αφορούν την απόρριψη ποικίλλουν σε ευρεία κλίμακα, και μπορεί να είναι από αυστηρά έως και αρκετά ευέλικτα. Οι συνιστώσες του κόστους

και των λειτουργικών αναγκών μιας μονάδας επεξεργασίας λυμάτων είναι σημαντικές στις αναπτυγμένες χώρες, ενώ διαδραματίζουν τον καθοριστικό ρόλο για να αποφασιστεί ο τύπος των μονάδων επεξεργασίας που θα εφαρμοστούν στις χώρες αυτές (Sperling, 1996).

Τα απόβλητα περιέχουν μια σειρά από ρύπους, όπως παθογόνους μικροοργανισμούς, οργανική ύλη, άζωτο και φώσφορο. Η αποτελεσματική επεξεργασία των λυμάτων είναι υψίστης σημασίας για την προστασία της δημόσιας υγείας, της επάρκειας διαθέσιμου οξυγόνου στα φυσικά ύδατα και στην αντιμετώπιση του φαινομένου του ευτροφισμού. Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας ενεργού ιλύος (CAS) που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επεξεργασία λυμάτων, μολονότι μπορούν να επιτύχουν καλές αποδόσεις απομάκρυνσης ρύπων, έχουν υψηλή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, υψηλό κόστος και περιορισμένη δυνατότητα ανάκτησης πόρων, όπως ενεργειακά και θρεπτικά υλικά.

Για να αυξηθεί η ικανότητα ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα, μεγαλύτερη ποσότητα οργανικού φορτίου (η οποία υπολογίζεται σε όρους χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD)) πρέπει να δεσμευτεί στο ρεύμα της ιλύος, αντί να οξειδωθεί σε CO<sub>2</sub> το οποίο θα απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες για να μειωθεί η συνολική οξείδωση του COD και να αυξηθεί η εκτροπή του στην λάσπη. Τα συστήματα υψηλής φόρτισης ενεργού ιλύος (HRAS) παράγουν περισσότερη ιλύ με καλύτερη ικανότητα χώνευσης (περισσότερο πλούσια σε οργανικό φορτίο) συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα χαμηλής φόρτισης. Τα συστήματα HRAS λειτουργούν σε μικρούς χρόνους παραμονής στερεών ( $SRT \leq 2$  d) και υψηλό ρυθμό φόρτισης ιλύος ( $SLR = 2 - 10$  g bCOD / g VSS d) (Meerburg, Vlaeminck et al., 2016). Επειδή τα συστήματα HRAS συνήθως δεν απομακρύνουν επαρκή ποσοστά COD και θρεπτικών ουσιών έτσι ώστε να επιτρέπουν την άμεση απόρριψη της εκροής σε έναν αποδέκτη, είναι πολύτιμα ως πρώτο στάδιο σε μονάδες επεξεργασίας δύο σταδίων, όπου μπορεί να απομακρυνθεί η υπολειπόμενη ποσότητα COD και άλλοι ρύποι από τα λύματα κατά τη διάρκεια δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Παρά το γεγονός ότι οι μονάδες HRAS λειτουργούν παγκοσμίως εδώ και δεκαετίες, πολλές από αυτές αντιμετωπίζουν διάφορα λειτουργικά προβλήματα που σχετίζονται με τη διατήρηση και ανάπτυξη της μικροβιακής κοινότητας της ιλύος. Λίγα είναι γνωστά για τη μικροβιακή οικολογία των συστημάτων HRAS ή για το πώς οι μικροβιακές κοινότητες στα συστήματα υψηλής φόρτισης διαφέρουν από αυτές των συστημάτων χαμηλής φόρτισης. Υπάρχει ανάγκη

για βαθύτερη κατανόηση των διεργασιών που επηρεάζουν τη μικροβιολογία αλλά και μια σειρά πολλών παραμέτρων που επιδρούν στην απόδοση των συστημάτων αυτών. Έτσι θα μπορούν να αναπτυχθούν στρατηγικές για τον καλύτερο έλεγχο της λειτουργίας των συστημάτων HRAS.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της λειτουργίας και της απόδοσης δύο πιλοτικών συστημάτων, ενός συμβατικού συστήματος υψηλής φόρτισης (HiCAS) και ενός συστήματος υψηλής φόρτισης επαφής-σταθεροποίησης (HiCS). Η περιγραφή των συστημάτων καθώς και οι διαφορές στην λειτουργία τους περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια. Πραγματοποιήθηκε καθημερινή παρακολούθηση της λειτουργίας των πιλοτικών συστημάτων καθώς και μελέτη της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας (π.χ. SRT, HRT, DO) έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα και να πραγματοποιηθούν συγκεκριμένες προτάσεις που θα στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους.

Η διπλωματική εργασία περιέχει πέντε κεφάλαια, η δομή και το περιεχόμενο των οποίων συνοψίζονται στα εξής:

- **Κεφάλαιο πρώτο:** Περιλαμβάνει την παρούσα εισαγωγή, όπου γίνεται μια γενική περιγραφή της κατάστασης όσον αφορά την διαθεσιμότητα και την ανάγκη ανάκτησης πόρων από την επεξεργασία των λυμάτων, και επίσης καθορίζεται ο σκοπός της εργασίας
- **Κεφάλαιο δεύτερο:** Περιλαμβάνει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των συστημάτων υψηλής φόρτισης, αρχίζοντας από τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας (τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους), και συνεχίζοντας με αναφορά στις τεχνολογίες επεξεργασίας που βρίσκονται στην κατεύθυνση αξιοποίησης του ενεργειακού περιεχομένου των λυμάτων, με μεγαλύτερη έμφαση στα συστήματα υψηλής φόρτισης. Έπειτα γίνεται αναλυτική περιγραφή των μηχανισμών απομάκρυνσης του ρυπαντικού φορτίου καθώς και των λειτουργικών παραμέτρων που επιδρούν στην απόδοση των συστημάτων υψηλής φόρτισης. Παρουσιάζονται αποτελέσματα και συμπεράσματα διαφόρων ερευνητών σχετικά με τα συστήματα αυτά έτσι ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η λειτουργία τους αλλά και να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τα υπό διερεύνηση πιλοτικά συστήματα.

- **Κεφάλαιο τρίτο:** Περιλαμβάνει την αναλυτική παρουσίαση των πιλοτικών συστημάτων υψηλής φόρτισης, τις λειτουργικές παραμέτρους των συστημάτων κατά τις περιόδους λειτουργίας που εξετάστηκαν καθώς και την περιγραφή των εργαστηριακών αναλύσεων και πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν.
- **Κεφάλαιο τέταρτο:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα που εκτελέστηκαν.
- **Κεφάλαιο πέμπτο:** Παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν ως αποτέλεσμα των υπό διερεύνηση πιλοτικών συστημάτων καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

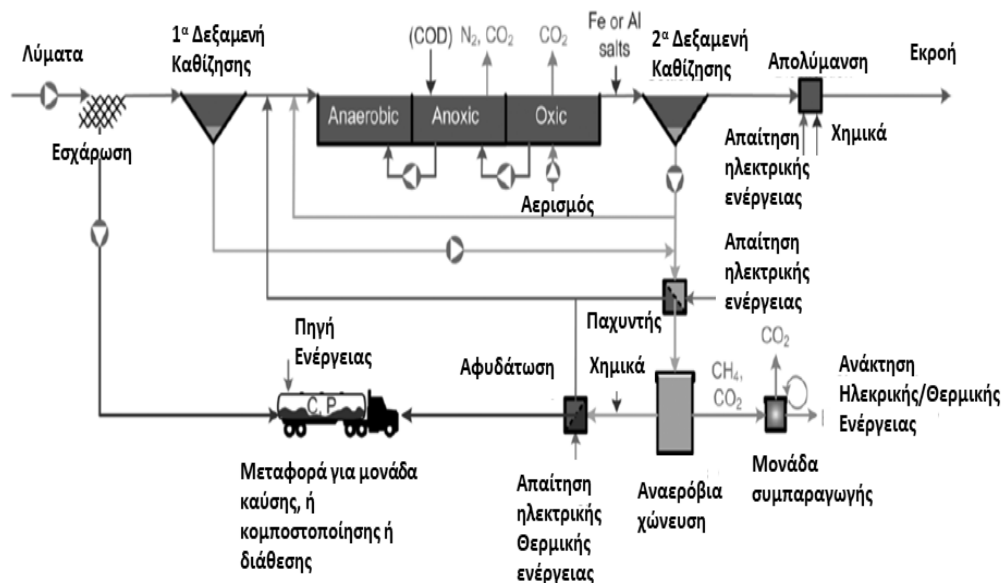


## **2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση συστημάτων υψηλής φόρτισης**

### **2.1 Συμβατικά συστήματα επεξεργασίας – στόχοι και μειονεκτήματα**

Τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων στοχεύουν κυρίως στην προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Ως αποτέλεσμα του στόχου αυτού, οι σύγχρονες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) επιτυγχάνουν την τήρηση ιδιαίτερα αυστηρών περιβαλλοντικών και υγεινολογικών ορίων, εφαρμόζοντας όμως διεργασίες με αρκετά υψηλό ενεργειακό κόστος (Stamatelatos & Tsagarakis, 2015). Τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος (CAS) αποτελούν την πιο διαδεδομένη και συχνά εφαρμοζόμενη μέθοδο κατά την επεξεργασία τυπικών αστικών υγρών αποβλήτων (Guven et al., 2019). Καθοριστική διεργασία στο σύστημα ενεργού ιλύος είναι η απομάκρυνση από τα λύματα των απλών και σύνθετων οργανικών ενώσεων. Η απομάκρυνση αυτή επιτυγχάνεται καθώς τα λύματα έρχονται σε επαφή με ένα μίγμα μικροοργανισμών (βιομάζα), που βρίσκεται με τη μορφή αιωρούμενων συσσωματωμάτων (βιοκροκίδων), σε μια αεριζόμενη και αναδευόμενη δεξαμενή συνήθως υπό καθεστώς πλήρους μίξης. Στην συνέχεια η απομάκρυνση των διαφόρων τύπων οργανικού φορτίου που εμπεριέχεται στα λύματα, πραγματοποιείται μέσα από ένα σύνολο φυσικών, χημικών και κυρίως βιολογικών διεργασιών που επιτελούνται στο σύστημα (Ανδρεαδάκης, 2015).

Η αξιοπιστία και η σχετική απλότητα στη λειτουργία τους με ταυτόχρονη επίτευξη υψηλού βαθμού απομάκρυνσης των ρυπαντικών φορτίων των λυμάτων, είναι κάποιες από τις βασικές αιτίες που έχουν συμβάλει στην επικράτησή τους.



**Σχήμα 2.1:** Σχηματική απεικόνιση τυπικού συστήματος ενεργού ιλύος CAS (Verstraete & Vlaeminck, 2011)

Σημαντικό μέρος της βιολογικής επεξεργασίας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω επιτελείται με αερόβιες διεργασίες οι οποίες χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης ρύπων αλλά και υψηλές ενεργειακές καταναλώσεις ενώ υπάρχουν περιορισμένες δυνατότητες ανάκτησης πόρων, όπως τα ενεργειακά και θρεπτικά στοιχεία που εμπεριέχονται στα λύματα (Stamatelatou & Tsagarakis, 2015).

**Πίνακας 2.1:** Όρια των παραμέτρων ποιότητας των επεξεργασμένων λυμάτων (Οδηγία 91/271/EEC)

Παράμετρος	Περιβαλλοντικοί Όροι ΚΥΑ 129241/2004	Οδηγία 91/271/EEC (Κανονικός Αποδέκτης)	Οδηγία 91/271/EEC (Ευαίσθητος Αποδέκτης)
BOD <sub>5</sub>	25 mg / L <sup>α</sup>	25 mg / L <sup>α</sup>	25 mg / L <sup>α</sup>
COD	125 mg / L <sup>α</sup>	125 mg / L <sup>α</sup>	125 mg / L <sup>α</sup>
TSS (για οικισμούς με ι.π. άνω των 10.000)	35 mg / L <sup>α</sup>	35 mg / L <sup>α</sup>	35 mg / L <sup>α</sup>
TSS (για οικισμούς με ι.π. μεταξύ 2.000 και 10.000)	60 mg / L <sup>α</sup>	60 mg / L <sup>α</sup>	60 mg / L <sup>α</sup>

Παράμετρος	Περιβαλλοντικοί Όροι ΚΥΑ 129241/2004	Οδηγία 91/271/EEC (Κανονικός Αποδέκτης)	Οδηγία 91/271/EEC (Ευαίσθητος Αποδέκτης)
Ολικό N (για οικισμούς με ι.π. άνω των 100.000)	-	-	10 mg / L <sup>β</sup>
Ολικό N (για οικισμούς με ι.π. μεταξύ 10.000 και 100.000)	-	-	15 mg / L <sup>β</sup>
Ολικός P (για οικισμούς με ι.π. άνω των 100.000)	-	-	1 mg / L <sup>β</sup>
Ολικός P (για οικισμούς με ι.π. μεταξύ 10.000 και 100.000)	-	-	2 mg / L <sup>β</sup>
N-NH <sub>4</sub>	5 mg / L	-	-

α) για συγκεκριμένο ποσοστό δειγμάτων, που κυμαίνεται συνήθως από 90-95%, β) ως μέση ετήσια τιμή

## 2.2 Ενεργειακή απαίτηση και ανάκτηση στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων – Στόχοι και μελλοντικές προοπτικές

Η υπάρχουσα κατάσταση στην επεξεργασία λυμάτων, η οποία βασίζεται σε συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος, συμπεριλαμβανομένου χώνευσης ιλύος, ανακτά μόνο το 33% της περιεχόμενης ενέργειας (Wett et al., 2007). Η κατανάλωση ενέργειας για τον αερισμό, ο οποίος αντιπροσωπεύει περίπου το ήμισυ της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, εκτιμάται περίπου σε 0,6 kWh ανά m<sup>3</sup> λυμάτων (McCarty et al., 2011). Τα αστικά λύματα με τυπικές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου (που εκφράζονται σε χημική ζήτηση οξυγόνου ή COD) 400-500 mg COD / L (Owen, 1982) περιέχουν δυνητικά χημική ενέργεια της τάξης του 1,5-1,9 kWh / m<sup>3</sup> λυμάτων, δηλαδή διπλάσιο ενεργειακό φορτίο από αυτό που απαιτείται για την επεξεργασία των λυμάτων ενός τυπικού συστήματος CAS. Σε ένα σύστημα CAS η εν λόγω ενέργεια καταναλώνεται σε μεγάλο βαθμό για την αερόβια οξείδωση της οργανικής ύλης σε CO<sub>2</sub>. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι δεν ανακτώνται άζωτο (N) και φώσφορος (P) παρά μόνο σε περιορισμένη ποσότητα.

Σύμφωνα με στοιχεία από Ε.Ε.Λ. στην Ελλάδα (Mamais et al. 2015) η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση των εγκαταστάσεων κυμαίνεται μεταξύ 15 – 86 kWh/ισοδύναμο κάτοικο και η ετήσια παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου σε 61 – 160 kg CO<sub>2e</sub>/ισοδύναμο κάτοικο. Με βάση τα στοιχεία αυτά το σύστημα αερισμού των βιοαντιδραστήρων έχει την υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση από όλα τα στάδια επεξεργασίας, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 40% - 75% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης της εγκατάστασης (Mamais et al., 2015).

Περίπου το 3 έως 4% της χρήσης ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής προέρχεται από συστήματα επεξεργασίας πόσιμου νερού και εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες συμβάλλουν ετησίως σε 45 εκατομμύρια τόνους αερίων του θερμοκηπίου (Spellman et al., 2013). Το 2011, οι εγκαταστάσεις ανάκτησης υδατικών πόρων (WRRF) στις Ηνωμένες Πολιτείες κατανάλωσαν περίπου το 0,8% (30,2 δισεκατομμύρια kWh / έτος) της ηλεκτρικής ενέργειας του έθνους και το 50% αυτής της ενέργειας αποδόθηκε στον αερισμό των συστημάτων επεξεργασίας (Arzbaecher et al., 2011). Εκτιμάται πως τα επόμενα χρόνια (20-30) οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων αναμένεται να αυξηθούν κατά 30-40 % καθώς αυξάνονται αντίστοιχα και οι απαιτήσεις για την επεξεργασία μεγαλύτερων ποσοτήτων με αυστηρότερα όρια εκροής (Spellman et al., 2013).

**Πίνακας 2.2:** Ενεργειακά χαρακτηριστικά τυπικών αστικών λυμάτων (McCarty, Bae, and Kim 2011)

Συστατικό	Τυπικές συγκεντρώσεις (mg / L) <sup>α</sup>	Ενέργεια (kWh/m <sup>3</sup> )		
		Μέγιστο δυναμικό ενέργειας από την οργανική οξείδωση <sup>β</sup>	Απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή συστατικών λιπασμάτων <sup>γ</sup>	Διαθέσιμη ενέργεια με χρήση αντλιών θερμότητας <sup>δ</sup>
Οργανικό φορτίο (COD)				
<b>Ολικό COD</b>	500			
<b>Δύσκολα βιοδιασπάσιμο</b>	<b>180</b>			
Σωματιδιακό	80	0,31		
Διαλυτό	100	0,39		
<b>Εύκολα βιοδιασπάσιμο</b>	<b>320</b>			
Σωματιδιακό	175	0,67		
Διαλυτό	145	0,56		

Συστατικό	Τυπικές συγκεντρώσεις (mg / L) <sup>α</sup>	Μέγιστο δυναμικό ενέργειας από την οργανική οξείδωση <sup>β</sup>	Απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή συστατικών λιπασμάτων <sup>γ</sup>	Διαθέσιμη ενέργεια με χρήση αντλιών θερμότητας <sup>δ</sup>
<b>Άζωτο</b>				
Οργανικό	15		0,29	
Αμμωνία	25		0,48	
<b>Φώσφορος</b>	8		0,02	
<b>Νερό</b>				7
<b>Συνολικά</b>		1,93	0,79	7

α) Tchobanoglous & Burton, β) Με βάση μια θεωρητική τιμή παραγωγής ενέργειας 3,86 kWh / kg COD που οξειδώνεται σε CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O (Owen, 1982), γ) Με βάση μια θεωρητική τιμή παραγωγής ενέργειας 19.3 kWh / kg N και 2.11 kWh / kg P (Gellings & Parmenter, 2004), δ) Ενέργεια που σχετίζεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού κατά 6 °C μέσω της θερμικής άντλησης

Σε μια εποχή όπου υπάρχουν ανησυχίες για την επάρκεια αποθεματικών των καυσίμων, της αποδεδειγμένης κλιματικής αλλαγής, του κόστους της ενέργειας και τα συνεχώς αυξανόμενα επίπεδα επεξεργασίας που έχουν σαν αποτέλεσμα την αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας, ο σχεδιασμός και η λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων στρέφονται όλο και περισσότερο στην βελτίωση της αποδοτικότητας της ενεργειακής χρήσης και τη μείωση του κόστους της επεξεργασίας. Διάφορες τεχνολογίες έχουν προταθεί ως προς την παραπάνω κατεύθυνση με βασικό στόχο τον εμπλουτισμό της παραγόμενης ιλύος με οργανικό υλικό το οποίο θα την καθιστά περισσότερο ενεργειακά αξιοποιήσιμη, ενώ λιγότερη έμφαση θα δίνεται στην οξείδωση του οργανικού φορτίου σε CO<sub>2</sub>.

Πρόσφατα, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) απομακρύνονται από τις υψηλά ενεργοβόρες τεχνικές επεξεργασίας και προσεγγίζουν περισσότερο βιώσιμες μεθόδους που δύναται να έχουν χαμηλότερη καθαρή ενεργειακή ζήτηση και υψηλότερα ποσοστά ανάκτησης ενέργειας (Rahman, Yaruwa, et al. 2017). Με τη χρήση και τον έλεγχο κατάλληλων συστημάτων επεξεργασίας, τα αστικά λύματα μπορούν να αποτελέσουν πηγή χημικής ενέργειας, θρεπτικών ουσιών και πόσιμου νερού. Η επαναχρησιμοποίηση των συστατικών των λυμάτων δεν αποτελεί καινοτόμα σκέψη αφού έχει εφαρμοστεί από τότε που η ανθρωπότητα ανακάλυψε ότι οι αγροτικές καλλιέργειες αναπτύσσονται καλύτερα με ζωικά ή ανθρώπινα απόβλητα ως λίπασμα (Orhon, 2015).

Στον δυτικό κόσμο, η ανάκτηση ενέργειας μέσω αναερόβιας χώνευσης (AD) έχει τις ρίζες της στις αρχές του 20ού αιώνα αλλά αρκετές δεκαετίες αργότερα, στη δεκαετία του 1950, η διεργασία ήταν επαρκώς κατανοητή ώστε να επιτρέπει ευρεία εφαρμογή της (Khanal, 2008). Με την καθιέρωση της αναερόβιας χώνευσης ως τεχνολογία ανάκτησης ενέργειας διαπιστώθηκε ότι η περίσσεια βιολογικής ιλύς δεν πρέπει να θεωρείται ως «απόβλητο» αλλά ως πηγή ανακτημένης ενέργειας.

Έτσι λοιπόν διάφορες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί ως προς την κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης του ενεργειακού αποτυπώματος με ταυτόχρονη εκμετάλλευση του ενεργειακού περιεχομένου των λυμάτων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες από αυτές, ενώ εκτενέστερη αναφορά και περιγραφή γίνεται στα συστήματα υψηλής οργανικής φόρτισης (HRAS) καθώς αποτελούν το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## **2.3 Μέθοδοι επεξεργασίας στην κατεύθυνση αξιοποίησης του ενεργειακού περιεχομένου των λυμάτων (μείωση ενεργειακής απαίτησης / αύξηση ανάκτησης)**

### **2.3.1 Πρωτοβάθμια καθίζηση**

Με τον όρο καθίζηση στην Περιβαλλοντική Τεχνολογία ορίζεται η φυσική διεργασία κατά την οποία πραγματοποιείται διαχωρισμός αιωρούμενων στερεών σωματιδίων από το υγρό (νερό ή λύματα), υπό την επίδραση βαρύτητας. Μέσω της παραπάνω διεργασίας προκύπτει ένα υπερκείμενο διαυγασμένο υγρό καθώς και ένα συμπυκνωμένο υποκείμενο αιώρημα (Ανδρεαδάκης, 2015).

Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης (Δ.Π.Κ.) αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ολόκληρης της διεργασίας επεξεργασίας λυμάτων καθώς και του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης της πρωτοβάθμιας ιλύος. Με νέες τεχνολογίες στην επεξεργασία λυμάτων και ιλύος να εφαρμόζονται τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, (λόγω και της απαίτησης απομάκρυνσης σε θρεπτικά συστατικά), η λειτουργία τους έχει γίνει πιο σύνθετη (Patziger et al., 2016).

Η πρωτοβάθμια καθίζηση στοχεύει στην απομάκρυνση ενός μέρους των στερεών σωματιδίων που εμπεριέχονται στα ανεπεξέργαστα λύματα. Η διεργασία πραγματοποιείται σε δεξαμενές (ορθογωνικές ή κυκλικές) υπό συνθήκες ηρεμίας και έχει την ικανότητα απομάκρυνσης ενός σημαντικού ποσοστού στερεών (50 – 65%).

Βελτιστοποίηση της απομάκρυνσης σωματιδιακής οργανικής ύλης θα αυξήσει το δυναμικό παραγωγής βιοαερίου στους αναερόβιους χωνευτές, αλλά η υπερβολική απομάκρυνση ενδεχομένως να προκαλέσει πρόβλημα σε επόμενο στάδιο επεξεργασίας όπου μπορεί να απαιτείται βιολογική απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου. Για τον σχεδιασμό των Δ.Π.Κ. λαμβάνονται υπόψιν κάποια εμπειρικά κριτήρια από τα οποία προκύπτουν τα χαρακτηριστικά τους (υδραυλική επιφανειακή φόρτιση, υδραυλικός χρόνος παραμονής, πλευρικό βάθος, φόρτιση υπερχειλιστών) (Ανδρεαδάκης, 2015). Υπάρχει η δυνατότητα εάν κριθεί αναγκαίο, ένα κλάσμα της πρωτοβάθμιας ιλύος που παράγεται να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η απαραίτητη ποσότητα άνθρακα για τις διεργασίες απομάκρυνσης θρεπτικών (Alanya et al., 2012).

**Παραγωγή πρωτοβάθμιας ιλύος:** Το βιοαέριο που προκύπτει από την αναερόβια χώνευση της πρωτοβάθμιας ιλύος αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο χρόνος παραμονής της ιλύος στο πυθμένα των δεξαμενών καθίζησης καθορίζει την πυκνότητά της η οποία κυμαίνεται από 1,5-5 % (Ανδρεαδάκης 2015).

### 2.3.2 Αναερόβια επεξεργασία

Η αναερόβια επεξεργασία των αστικών λυμάτων έχει τη δυνατότητα να επιτύχει καθαρή παραγωγή ενέργειας ενώ ταυτόχρονα να τηρεί και τα αυστηρά πρότυπα εκροής. Η τεχνολογία αυτή είναι γνωστή πάνω από ένα αιώνα (σηπτικές δεξαμενές, δεξαμενές Imhoff) (McCarty et al., 1981). Ωστόσο, τα επόμενα 50 χρόνια αναπτύχθηκαν πιο αποτελεσματικές αναερόβιες διεργασίες οδηγώντας έτσι στη δεκαετία του 1980 σε προτάσεις που εφαρμόστηκαν για την πληρέστερη επεξεργασία των αστικών λυμάτων (Lettinga et al., 1983). Από τότε έχουν υπάρξει πολλές εφαρμογές αναερόβιας επεξεργασίας αστικών λυμάτων πλήρους κλίμακας, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Βραζιλία, η Κολομβία, το Μεξικό, η Αίγυπτος και η Ινδία, όπου η αναερόβια επεξεργασία θεωρείται μία χαμηλού κόστους εναλλακτική λύση (Van Haandel et al., 2006).

Η χαμηλή θερμοκρασία και οι χαμηλές οργανικές συγκεντρώσεις αποτελούν συχνά εμπόδια στην άμεση αναερόβια επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Ωστόσο, πολλές εργαστηριακές μελέτες έχουν δείξει καλές επιδόσεις σε θερμοκρασίες χαμηλές έως και 5 °C και με υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT) μερικών ωρών (Dague et

al., 1998). Η απομάκρυνση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) που αναμένεται βάση των υπαρχόντων αναερόβιων αντιδραστήρων, κυμαίνεται από 70 έως 80%, και αρκετές φορές δεν επαρκεί για να ανταποκριθεί στα αυστηρά νομοθετικά όρια εκροής (Oliveira et al., 2008) (Aiyuk et al., 2004). Λόγω αυτού αλλά και άλλων παραμέτρων, ενδέχεται να χρειάζεται κάποιο επίπεδο προ-επεξεργασίας ως πρώτο βήμα για να μπορέσει στη συνέχεια η αναερόβια επεξεργασία να ανταποκριθεί στα όρια εκροής (Foresti et al., 2006). Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες με αναερόβιους βιοαντιδραστήρες μεμβράνης υποδεικνύουν ότι η προεπεξεργασία μπορεί να επιτευχθεί μέσα στον ίδιο τον αναερόβιο αντιδραστήρα ο οποίος μπορεί να παράξει ποιοτική εκροή με χαμηλά αιωρούμενα στερεά και συγκεντρώσεις BOD (Berube et al., 2006).

Η λογική και το ενδιαφέρον για τη χρήση των διεργασιών αναερόβιας επεξεργασίας μπορεί να εξηγηθεί μελετώντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της αναερόβιας επεξεργασίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 2.3:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αναερόβιων διεργασιών σε σύγκριση με τις αερόβιες διεργασίες (Metcalf & Eddy, 2003)

<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
Μικρότερη ενεργειακή απαίτηση	Μεγαλύτερος χρόνος εκκίνησης για την ανάπτυξη του απαραίτητου αποθέματος βιομάζας
Μικρότερη παραγωγή βιολογικής ιλύος	Πιθανή απαίτηση σε αλκαλικότητα με προσθήκη συγκεκριμένων ιόντων
Μικρότερη απαίτηση σε θρεπτικά συστατικά	Πιθανή απαίτηση για περαιτέρω επεξεργασία με αερόβιες διεργασίες, έτσι ώστε να επιτευχθούν οι απαιτήσεις απόρριψης εκροής
Παραγωγή μεθανίου ως πιθανή πηγή ενέργειας	Δεν είναι εφικτή η ικανοποιητική απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου
Απαίτηση για αντιδραστήρες μικρότερου όγκου	Μεγαλύτερη ευαισθησία στη δυσμενή επίδραση των χαμηλών θερμοκρασιών στην ταχύτητα των αντιδράσεων
Με εγκλιματισμό, οι περισσότερες οργανικές ενώσεις μπορούν να μετατραπούν	Ενδέχεται να είναι περισσότερο ευαίσθητες σε διαταραχές λόγω της παρουσίας τοξικών ουσιών
Γρήγορη ανταπόκριση στην προσθήκη υποστρώματος μετά από μακρά περίοδο χωρίς τροφοδοσία	Πιθανή παραγωγή οσμών και διαβρωτικών αερίων



### 2.3.2.1 Αναερόβιες διεργασίες στρώματος ιλύος – UASB αντιδραστήρας

Μία από τις πιο αξιοσημείωτες εξελίξεις στην τεχνολογία της αναερόβιας επεξεργασίας, ήταν ο αντιδραστήρας αναερόβιας κλίνης ανοδικής ροής (UASB). Τα εισερχόμενα απόβλητα διανέμονται στον πυθμένα του UASB αντιδραστήρα και μετακινούνται με ανοδική ροή μέσω του στρώματος ιλύος. Τα κρίσιμα στοιχεία στο σχεδιασμό ενός UASB αντιδραστήρα είναι το σύστημα διανομής της εισροής, ο διαχωριστής αερίου – στερεών και ο σχεδιασμός απόρριψης της εκροής. Το χαρακτηριστικό μέγεθος της διεργασίας UASB, το οποίο επιτρέπει τη χρήση υψηλών ογκομετρικών φορτίσεων COD σε σύγκριση με άλλες αναερόβιες διεργασίες, είναι η ανάπτυξη πυκνής λάσπης σε μορφή κόκκων. Λόγω του σχηματισμού κροκίδων ιλύος με μορφή κόκκων, η συγκέντρωση των στερεών μπορεί να κυμαίνεται από 50-100 g/L στον πυθμένα του αντιδραστήρα και 5-40 g/L σε μια περισσότερο διάχυτη ζώνη στην κορυφή του στρώματος ιλύος. Ο διαχωριστής αερίου – στερεών (Gas Solids Separator, GSS) σχεδιάζεται για να συλλέγει το βιοαέριο, να μην επιτρέπει την παράσυρση των στερεών, να προωθεί το διαχωρισμό των στερεών σωματιδίων και του αερίου, να επιτρέπει την επιστροφή των στερεών μέσα στη ζώνη του στρώματος ιλύος και να βοηθά στη βελτίωση της απομάκρυνσης των στερεών από το ρεύμα εκροής (Metcalf & Eddy, 2003).

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας UASB συνοψίζονται σε (Daud et al. 2018):

- Υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης ακόμα και σε μεγάλους ρυθμούς οργανικής φόρτισης.
- Απλή κατασκευή και το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Ενέργεια που παράγεται με τη μορφή μεθανίου. Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση των αντιδραστήρων που συνεπάγονται τη μείωση του κόστους λειτουργίας.
- Λιγότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>.
- Χαμηλή παραγωγή ιλύος σε σύγκριση με αερόβιες διαδικασίες. Η παραγόμενη ιλύς σταθεροποιείται έχοντας καλά χαρακτηριστικά αφυδάτωσης και μπορεί να αποθηκευτεί για παρατεταμένες χρονικές περιόδους έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί εκ νέου ως τροφοδοσία στους αντιδραστήρες.

- Ικανότητα επεξεργασίας λυμάτων λόγω της διαθεσιμότητας μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών ουσιών και σταθερότητας του pH χωρίς προσθήκη χημικών ουσιών.

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας UASB συνοψίζονται σε (Daud et al. 2018):

- Απαιτήση πολύ μεγάλου όγκου αντιδραστήρα για δεδομένη παροχή λυμάτων.
- Αναγκαιότητα για μετέπειτα επεξεργασία καθώς δεν απομακρύνονται επαρκώς τα θρεπτικά συστατικά (άζωτο, φώσφορος) και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί.
- Χρειάζεται μακρύς χρόνος εκκίνησης λόγω του χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης των αναερόβιων μικροοργανισμών, και της παραγωγής κοκκώδους βιομάζας σε περίπτωση που αυτή δεν είναι άμεσα διαθέσιμη.
- Προβλήματα οσμής, τοξικότητας και διάβρωσης: Το H<sub>2</sub>S δημιουργείται κατά την αναερόβια χώνευση, ιδιαίτερα όταν υπάρχει υψηλή συγκέντρωση θεικών αλάτων στα λύματα. Το βιοαέριο χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία για να αποφευχθεί η κακή οσμή.
- Στις ψυχρές περιοχές η θερμοκρασία πρέπει να διατηρείται στους αντιδραστήρες (15-35 ° C) ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή απόδοση.
- Σημαντική ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου μπορεί να διαλυθεί στο υγρό συνεπώς απαιτείται καλός έλεγχος

### 2.3.2.2 Αναερόβια επεξεργασία με χρήση μεμβρανών – AnMBR αντιδραστήρας

Μία άλλη ανερχόμενη τεχνολογία που μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των αναερόβιων διεργασιών είναι οι AnMBRs. Οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBRs) συνδυάζουν τη βιολογική επεξεργασία με τη διήθηση (μέσω μεμβρανών) για τη δευτεροβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων και έχουν εφαρμοστεί έως σήμερα με μεγάλη επιτυχία στην αερόβια επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε πολλές Ε.Ε.Λ. μεγάλης κλίμακας (Malamis et al. 2011).

Ένα βασικό πλεονέκτημα των MBR είναι η πλήρης κατακράτηση βιομάζας, κάτι που οδηγεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στο ανάμικτο υγρό (MLSS) συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος και ταυτόχρονα σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στην έξοδο. Δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στη συγκέντρωση των MLSS αφού στις περισσότερες περιπτώσεις απουσιάζει η δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης. Το παραπάνω

χαρακτηριστικό επιτρέπει μεγάλες τιμές SRT με αντίστοιχες μικρές τιμές HRT (Wen et al., 1999; Baek et al., 2003). Οι αντιδραστήρες MBR μπορούν να είναι αποδοτικοί και σε μικρότερα SRT (5-10 d) όμως αυτό αποφεύγεται λόγω της συχνής έμφραξης των μεμβρανών. Κατά την αναερόβια επεξεργασία η παραγωγή περίσσειας ιλύος είναι 20 φορές μικρότερη σε σύγκριση με εκείνη των αερόβιων διεργασιών (Seghezzi et al. 1998). Κατά συνέπεια, η εφαρμογή των MBR σε πλήρως αναερόβιες συνθήκες επιτρέπει μείωση του απαιτούμενου χώρου κάτι που είναι κρίσιμο στο σημερινό πυκνοκατοικημένο αστικό περιβάλλον. Οι AnMBR εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην επεξεργασία λυμάτων από τον Grethlein το 1978 και από τότε η έρευνα πάνω σε αυτό τον τύπο αντιδραστήρα παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξητική τάση (Liao, Kraemer, and Bagley 2006).

Παρά τα δεδομένα πλεονεκτήματα της μεθόδου, έχουν εντοπιστεί και ορισμένα πιθανά προβλήματα τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπισθούν για την επιτυχή εφαρμογή των MBR στην αναερόβια επεξεργασία των λυμάτων, όπως: α) ο ανταγωνισμός μεταξύ μεθανογόνων βακτηρίων και βακτηρίων που απομακρύνουν τα θειικά (SRB) για τα διαθέσιμα οργανικά υποστρώματα, β) η έμφραξη της μεμβράνης και γ) η αποτελεσματική λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (Liao et al., 2006). Οι υψηλές συγκεντρώσεις θειικών στα αστικά λύματα μπορούν να μειώσουν σημαντικά την παραγωγή βιοαερίου αλλά και οι υψηλές συγκεντρώσεις SRB μπορεί να οδηγήσουν σε παραγωγή οσμών, αναστολή των μεθανογόνων αλλά και προβλήματα διάβρωσης.

### **2.3.3 Συστήματα υψηλής φόρτισης (High Rate Activated Sludge Systems)**

Τα συστήματα υψηλής φόρτισης (HRAS) αναπτύχθηκαν αρχικά από τους Chase and Eddy (1944) και χρησιμοποιούν υψηλές αναλογίες τροφής προς μικροοργανισμούς (F/M ratio) και χαμηλούς χρόνους παραμονής στερεών (SRT) με ταυτόχρονα σχετικά μικρούς υδραυλικούς χρόνους επαφής (HRT) για την απομάκρυνση του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) από τα λύματα (Grady et al., 2011). Η σημερινή εφαρμογή των τεχνολογιών υψηλής φόρτισης κάνει την παραδοχή ότι υπάρχουν τρία είδη βιοδιασπάσιμου οργανικού φορτίου στα λύματα, το σωματιδιακό, κολλοειδές, και διαλυτό. Το σωματιδιακό και το κολλοειδές οργανικό φορτίο απομακρύνονται αποτελεσματικά με βιολογικό τρόπο (προσρόφηση εντός της

βιολογικής κροκίδας) και μετέπειτα με τον διαχωρισμό του υγρού από τα στερεά μέσω καθίζησης (Jimenez et al., 2005). Το διαλυτό κλάσμα μπορεί να απομακρυνθεί με ενδοκυτταρική αποθήκευση, βιοσύνθεση ή βιολογική οξείδωση (EPA, 1975).

Η εφαρμογή των συστημάτων υψηλής φόρτισης (HRAS) κατά την επεξεργασία των λυμάτων, στοχεύει κυρίως στη μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την επεξεργασία τους, με ταυτόχρονη αξιοποίηση του οργανικού (συνεπώς και ενεργειακού) φορτίου που εμπεριέχεται στα ίδια τα λύματα. Ο στόχος αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αυξημένη εκτροπή του οργανικού φορτίου των λυμάτων στο ρεύμα της ιλύος, και στην συνέχεια εφαρμόζοντας την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, όπου το οργανικό φορτίο της ιλύος μετατρέπεται σε βιοαέριο, δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της καύσης του. Επιπλέον, για να επιτευχθεί ενεργειακά αποδοτική απομάκρυνση του αζώτου μέσω αναερόβιας οξείδωσης αμμωνίας (anammox) η εφαρμογή τεχνολογιών απομάκρυνσης οργανικού άνθρακα όπως το Α-στάδιο της επεξεργασίας δύο σταδίων (AB process) και η τεχνική επαφής-σταθεροποίησης (CS) ως μια εφαρμογή των συστημάτων υψηλής φόρτισης (HRAS), κερδίζουν έδαφος σε αρκετές Ε.Ε.Λ. (Rahman, Warner, et al. 2017).

Τα συστήματα HRAS εκμεταλλεύονται το μέγιστο δυνατό ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών για την απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων από τα λύματα. Αυτό συχνά οδηγεί σχεδιαστικά σε σχετικά μικρούς όγκους αντιδραστήρων με ενδεχομένως χαμηλότερο κόστος. Τα συστήματα HRAS μπορούν να σχεδιαστούν και να λειτουργούν αυτόνομα για ικανοποιητική απομάκρυνση οργανικού φορτίου (π.χ. όρια εκροής 30 mg / L BOD<sub>5</sub> και 30 mg / L TSS ) ή ως συστήματα που προωθούν κυρίως διεργασίες προσρόφησης άνθρακα όταν χρησιμοποιούνται ως το πρώτο στάδιο σε συστήματα επεξεργασίας δύο σταδίων (π.χ. Προσρόφησης / Βιολογικής οξείδωσης, AB process) (Jimenez et al. 2014). Τυπικά κριτήρια σχεδιασμού για αυτούς τους δύο τύπους συστημάτων HRAS παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 2.4:** Τυπικά κριτήρια σχεδιασμού για συστήματα υψηλής φόρτισης (Jimenez et al. 2014)

Τύπος συστήματος HRAS	Κριτήρια σχεδιασμού
Συστήματα για οξείδωση οργανικού άνθρακα	SRT < 2.0 μέρες F:M:0.561 g BOD / g VSS Χρόνος επαφής: 2 – 4 ώρες MLSS: 1,000 - 3,000 mg/L Τύπος αερισμού: συνεχής DO: > 2.0 mg/L
Συστήματα για προσρόφηση οργανικού άνθρακα	SRT < 0.5 μέρα F:M: 2.0610 g BOD / g VSS Χρόνος επαφής: ~ 0.5 ώρα MLSS: 1,000 - 3,000 mg/L Τύπος αερισμού: συνεχής ή διακοπτόμενος DO: < 1.0 mg/L (συχνά 0.5 mg/L)

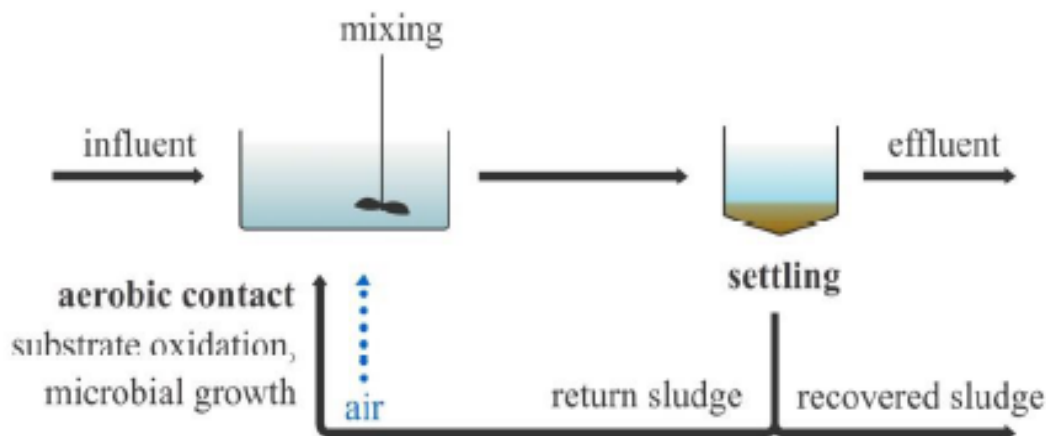
Όταν ένα σύστημα HRAS χρησιμοποιείται ως πρώτο στάδιο σε σύστημα δύο σταδίων, η λειτουργία του είναι διαφορετική (Wingen et al., 1987, Böhnke 1994, Winkler, 1994, Böhnke et al., 1997, Demoulin, 1998). Σε αυτή τη περίπτωση, με τη λειτουργία να είναι σε χαμηλότερους χρόνους παραμονής και χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου, η οξείδωση του άνθρακα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και η βιολογική κροκίδωση και η ενδοκυτταρική αποθήκευση του διαλυτού οργανικού κλάσματος να μεγιστοποιείται. Οι γενικοί στόχοι της τεχνολογίας υψηλής φόρτισης στα συστήματα τύπου A/B, είναι να μεγιστοποιηθεί η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου μέσω προσρόφησης και όχι μέσω οξείδωσης και η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ιλύος που μπορούν να αξιοποιηθούν σε παραγωγή βιοαερίου με αναερόβια χώνευση, μειώνοντας το οργανικό φορτίο στο επακόλουθο στάδιο απομάκρυνσης θρεπτικών ουσιών (BNR) ή στο δεύτερο στάδιο επεξεργασίας (B) (Schulze Rettmer et al., 1998).

### 2.3.3.1 Συμβατικά συστήματα υψηλής φόρτισης (HiCAS)

Οι διεργασίες των συστημάτων υψηλής φόρτισης (HRAS) χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς φόρτισης ιλύος (SLR) και χαμηλούς χρόνους παραμονής στερεών (SRT). Δεν υπάρχει αυστηρός ορισμός, αλλά συστήματα με SLR άνω των 2 g bCOD g<sup>-1</sup> VSS d<sup>-1</sup> και SRT που κυμαίνεται από 2 d και χαμηλότερα θεωρούνται ότι λειτουργούν με διεργασίες υψηλής φόρτισης. Συγκριτικά, διεργασίες χαμηλού ρυθμού

ορίζονται συχνά ότι λειτουργούν με SLR κάτω από  $0,6 \text{ g bCOD g}^{-1} \text{ VSS d}^{-1}$  και SRT πάνω από 3 d (Metcalf & Eddy, 2003). Το αν ένα σύστημα με ενδιάμεσα χαρακτηριστικά θεωρείται υψηλής φόρτισης εξαρτάται από τον επιστήμονα-συγγραφέα. Οι διεργασίες ενός συμβατικού συστήματος ενεργού ιλύος τυπικά λειτουργούν αποδοτικά εντός των τιμών χαμηλού ρυθμού φόρτισης, δηλαδή για SLR περίπου  $0,25 \text{ g bCOD g}^{-1} \text{ VSS d}^{-1}$  και  $\text{SRT} > 10 \text{ d}$ , αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι διεργασίες υψηλής φόρτισης λειτουργούν συνήθως σε χαμηλότερους υδραυλικούς χρόνους παραμονής (HRT), της τάξης των λεπτών έως μερικών ωρών, σε σύγκριση με τις διεργασίες στα συμβατικά συστήματα, των οποίων ο υδραυλικός χρόνος παραμονής κυμαίνεται από ώρες μέχρι οι ημέρες (Meerburg, 2016).

Τα συστήματα υψηλής φόρτισης των οποίων η λειτουργία έχει μεγάλες ομοιότητες με αυτή των συμβατικών συστημάτων, αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως συμβατικά συστήματα υψηλής φόρτισης (High Rate Conventional Activated Sludge systems – HiCAS). Η ομοιότητα στις αρχές λειτουργίας εξηγείται διότι και στους δύο τύπους συστημάτων τα εισερχόμενα λύματα έρχονται σε επαφή με τη βιομάζα μέσα σε μια δεξαμενή υπό καθεστώς πλήρους μίξης και στην συνέχεια ακολουθεί μία δεξαμενή καθίζησης για το διαχωρισμό του υγρού με τα αιωρούμενα στερεά (Meerburg, 2016). Όλες οι διεργασίες της βιολογικής επεξεργασίας (η προσρόφιση της οργανικής ύλης, η αποθήκευση ενδοκυτταρικά ή εξωκυτταρικά, η υδρόλυση και η οξείδωση της, η χρήση της για τη σύνθεση νέας βιομάζας, η ενδογενής αναπνοή και η φθορά) λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυτό το στάδιο.



**Σχήμα 2.2:** Σχηματική απεικόνιση συμβατικού συστήματος υψηλής φόρτισης HiCAS (Meerburg, 2016)

### 2.3.3.2 Συστήματα επεξεργασίας δύο σταδίων (AB process system)

Η εφαρμογή της τεχνολογίας υψηλής φόρτισης για την επεξεργασία λυμάτων έχει προταθεί ήδη από τη δεκαετία του 1920 (Buswell & Long, 1923, που αναφέρεται από τον Jimenez et al., 2015). Τα συστήματα HRAS κέρδισαν έδαφος ως αυτοδύναμα συστήματα επεξεργασίας επειδή πετυχαίνουν απόδοση απομάκρυνσης οργανικού φορτίου που θεωρήθηκε αποδεκτή - 80-85% απομάκρυνση BOD - με σημαντικά μικρότερη απαίτηση για αερισμό σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος (Wuhrmann, 1954). Τα αυτόνομα συστήματα HRAS εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα για την επεξεργασία λυμάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες (DeArmond et al., 2015, Jimenez et al., 2015). Στην Ευρώπη, η τεχνολογία των συστημάτων υψηλής φόρτισης χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ως μέρος της επεξεργασίας λυμάτων σε συστήματα δύο σταδίων. Καθώς οι απαιτήσεις για απομάκρυνση ως προς BOD αποκτούσαν αυστηρότερες προδιαγραφές, ο Böhnke (1977) ανέπτυξε το σύστημα προσρόφησης-βιολογικής οξείδωσης ή AB-διεργασία δύο σταδίων που αποτελείται από ένα σύστημα HRAS και ένα συμβατικό σύστημα επεξεργασίας χαμηλού ρυθμού. Στα συστήματα αυτά, η επεξεργασία με την εφαρμογή υψηλής φόρτισης αναφέρεται ως στάδιο A, ενώ η επεξεργασία με χαμηλό ρυθμό φόρτισης αναφέρεται ως στάδιο B. Από τον ορισμό ενός συστήματος δύο σταδίων

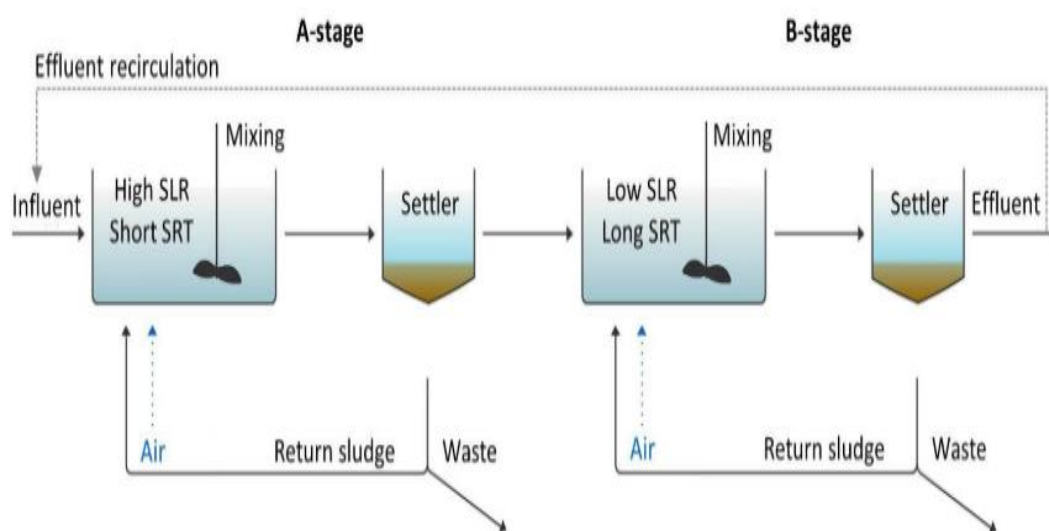
(Imhoff, 1955), τα δύο στάδια του συστήματος AB λειτουργούν με ξεχωριστή καθίζηση και ανακυκλοφορία ιλύος.

Το σύστημα AB σχεδιάστηκαν αρχικά για την απομάκρυνση του BOD από τα λύματα με χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, ενεργειακή απαίτηση και μικρότερο αποτύπωμα αερισμού σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος, ενώ θα επιτρέπουν και υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση της ιλύος (Böhnke, 1984, Versprille et al., 1985). Επειδή το στάδιο A μπορεί να λειτουργήσει ως ρυθμιστικός παράγοντας για το στάδιο B, ένα σύστημα δύο σταδίων είναι περισσότερο ανθεκτικό σε απότομες μεταβολές του pH και της τοξικότητας (Böhnke, 1985).

Ιστορικά, εφόσον μία πρωταρχική μονάδα επεξεργασίας δύο σταδίων σε εργοστάσιο στο Krefeld της Γερμανίας αποδείχθηκε επιτυχής, πολλές μονάδες AB κατασκευάστηκαν στη Γερμανία και αλλού στην Ευρώπη (Gethke, 1984, Salomé, 1990). Αργότερα, καθώς τα θρεπτικά συστατικά κατέστησαν ένα σημαντικό κριτήριο στα ολόενα και αυστηρότερα όρια εκροής, διαπιστώθηκε ότι το B-στάδιο χρειαζόταν να επανασχεδιαστεί για να καταστεί δυνατή η απομάκρυνση σε αζώτου και φώσφορο, αν και το σύστημα AB παρέμεινε μια επαρκής τεχνολογία για την επεξεργασία λυμάτων (Salomé, 1990). Το στάδιο A επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει την οξείδωση του οργανικού άνθρακα και να μεγιστοποιήσει την ανάκτηση οργανικού άνθρακα στην ιλύ μέσω της βιο-προσρόφησης και της ενδοκυτταρικής αποθήκευσης, σε πολύ χαμηλούς χρόνους παραμονής στερεών (SRT 0,1-1d) και υδραυλικού χρόνου επαφής (HRT 0,5-1h) (Miller et al, 2017). Λίγες εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας του σταδίου A έχουν δείξει ότι παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απομάκρυνσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) (έως 82%) και παραγωγής ιλύος πλούσιας σε ενέργεια (0,8-1,4 kg ιλύος / kg BOD που απομακρύνεται) (de Graaff et al. 2016) (Rahman, Yaruwa, et al. 2017). Ανάλογα με τον τύπο αποβλήτων, η απομάκρυνση σε BOD και COD στο στάδιο A θα μπορούσε να φθάσει το 80%, αλλά η εκροή του σταδίου A χρειάζεται να περιέχει επαρκή ποσότητα BOD για να επιτρέψει την απονιτροποίηση στο στάδιο B (Böhnke et al., 1997). Λόγω των συνεχιζόμενων δυσκολιών ορισμένων μονάδων να επιτύχουν επαρκή ποιότητα εκροής, πολλές αρχικές εγκαταστάσεις AB μετατράπηκαν σε συμβατικά συστήματα (de Graaff & Roest, 2012,). Οι μονάδες που εξακολουθούσαν να λειτουργούν σύμφωνα με τις παραδοσιακές αρχές ενός συστήματος AB έπρεπε να επανακυκλοφορούν ένα μέρος της τελικής εκροής, το οποίο περιέχει νιτρικά που δεν ήταν δυνατό να αφαιρεθούν, πίσω στο στάδιο A για να



πραγματοποιηθεί εκεί η απονιτροποίηση. Ενώ η ανακυκλοφορία της εξόδου μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απομάκρυνση σε άζωτο, αυξάνει το υδραυλικό φορτίο της εγκατάστασης, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερους πραγματικούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής και μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο απόπλυσης ιλύος από τις δεξαμενές καθίζησης.



**Σχήμα 2.3:** Σχηματική απεικόνιση συστήματος AB (AB process system) (Meerburg, 2016)

Όσον αφορά τη βελτίωση του ενεργειακού ισοζυγίου στην επεξεργασία των λυμάτων, θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν περαιτέρω οι διεργασίες των συστημάτων υψηλής φόρτισης. Η απομάκρυνση του COD στα συστήματα HRAS λαμβάνει χώρα κυρίως μέσω της προσρόφησης και σε μικρότερο βαθμό μέσω οξείδωσης. Αυτό καθιστά τα συστήματα υψηλής φόρτισης μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας (Meerburg, Vlaeminck, et al. 2016). Ωστόσο, η προσρόφηση και η ενδοκυτταρική αποθήκευση διαλυτού οργανικού υλικού δεν παίζουν πάντα σημαντικό ρόλο στα συμβατικά συστήματα υψηλής φόρτισης (HiCAS). Μόνο το 2-10% του εισερχόμενου διαλυτού COD αποθηκεύεται ως PHB (Haider, 2002, Haider et al., 2000) και η καθαρή απομάκρυνση του διαλυτού COD μπορεί να είναι κυμαίνεται μεταξύ 7-30% σε λειτουργικές συνθήκες που δεν είναι βέλτιστες (HRT, SRT και DO) (Jimenez et al., 2015, Wett et al., 2014). Ορισμένες από τις εγκαταστάσεις AB που εξακολουθούν να λειτουργούν σήμερα, περιοδικά αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην βιολογική κροκίδωση που λαμβάνει χώρα στο στάδιο A (WBD, 2012, επικοινωνία με

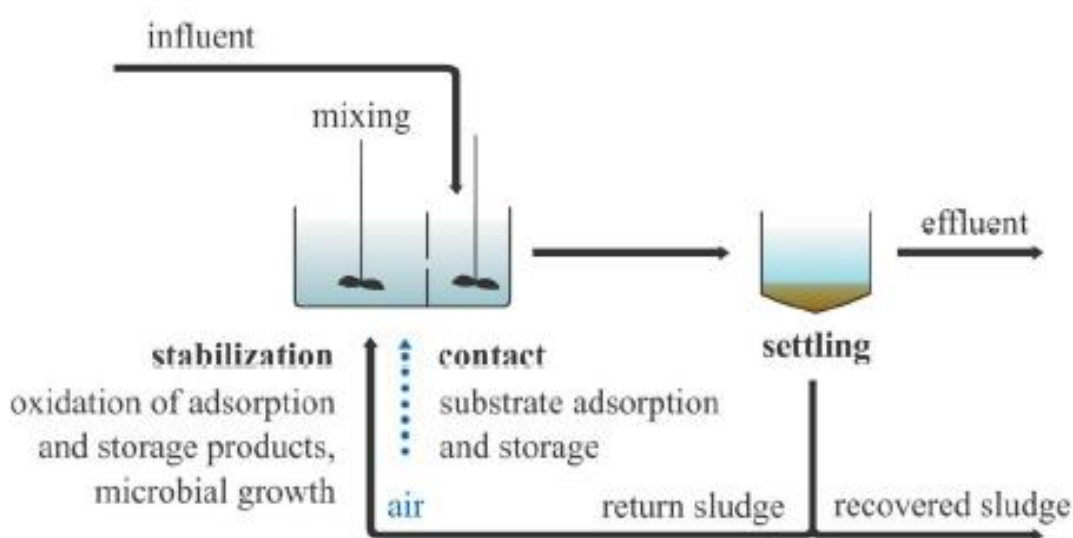
φορείς επίβλεψης εγκαταστάσεων). Η απόρριψη στερεών σωματιδίων από το στάδιο A οδηγεί σε αύξηση του COD και συνεπώς σε υψηλότερη απαίτηση αερισμού στο στάδιο B. Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξήσει τον ανταγωνισμό των συστημάτων HRAS με λιγότερο σύνθετες, μη βιολογικές διεργασίες για την ανάκτηση ενέργειας από τα λύματα όπως η πρωτοβάθμια καθίζηση (Wett et al., 2014). Η μέθοδος της χημικώς ενισχυμένης πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (CEPT), όπου με την προσθήκη χημικών ευνοείται η συσσωμάτωση και η κροκίδωση οργανικών ενώσεων (κυρίως κολλοειδών), βελτιώνει το ποσοστό απομάκρυνσης οργανικής ύλης σε πρώτη φάση και προσφέρει δυνατότητα για ανάκτηση ενέργειας και θρεπτικών στοιχείων από τα λύματα (Diamantis et al., 2013). Η πρωτοβάθμια καθίζηση και η CEPT μπορούν να επιτύχουν απομάκρυνση στερεών μέχρι 70% και 90% αντίστοιχα (Metcalf & Eddy, 2003). Ωστόσο, οι διεργασίες αυτές δεν βελτιστοποιούν την απομάκρυνση διαλυμένων οργανικών ενώσεων, γεγονός που περιορίζει τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί εάν τα απόβλητα χαρακτηρίζονται από μεγάλο κλάσμα διαλυμένου COD. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, το συνεπαγόμενο κόστος αγοράς των χημικών κροκιδωτικών καθώς και η αύξηση της ποσότητας και του περιεχόμενου της ιλύος σε αδρανή στερεά τα οποία δυσχεραίνουν την ικανότητα χώνευσης είναι δύο παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν την επιλογή της παραπάνω μεθόδου.

### 2.3.3.3 Συστήματα επαφής-σταθεροποίησης (HiCS)

Προκειμένου τα συστήματα υψηλής φόρτισης να καταστούν μια αποτελεσματική, αξιόπιστη και οικονομικά ανταγωνιστική τεχνολογία για την ανάκτηση ενέργειας από τα λύματα, πρέπει να ενισχυθεί η ικανότητα προσρόφησης και ενδοκυτταρικής αποθήκευσης του συστήματος.

Η τεχνολογία επαφής-σταθεροποίησης (CS), μελετήθηκε αρχικά ως τεχνολογία με χαμηλή φόρτιση από τον Coombs (1922) και τους Ullrich και Smith (1951). Τελευταία, εφαρμόζεται η συγκεκριμένη τεχνολογία στα συστήματα υψηλής φόρτισης για τη βελτίωση της αξιοποίησης του οργανικού άνθρακα από τα λύματα (Meerburg et al., 2015). Το σύστημα επαφής-σταθεροποίησης (CS) αποτελείται από δύο αντιδραστήρες, όπου στον αντιδραστήρα/δεξαμενή επαφής (contact tank) τροφοδοτούνται τα εισερχόμενα λύματα μαζί με σταθεροποιημένη βιομάζα, κάτω από

αναερόβιες συνθήκες ή συνθήκες χαμηλού διαλυμένου οξυγόνου (DO). Ακολουθεί η δεξαμενή καθίζησης στην οποία το πλεόνασμα της ιλύος απομακρύνεται από τον πυθμένα της, ενώ η υπόλοιπη βιομάζα επανακυκλοφορείται στον αντιδραστήρα/δεξαμενή σταθεροποίησης (stabilization tank) υπό αερόβιες συνθήκες και καθεστώς πλήρους μίξης. Στην δεξαμενή σταθεροποίησης ο αερισμός οδηγεί στην οξείδωση βιο-προσροφημένου και ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου οργανικού υλικού. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται ελεύθερες περιοχές στην επιφάνεια των κροκίδων και κενός χώρος για ενδοκυτταρική αποθήκευση. Στη συνέχεια η σταθεροποιημένη βιομάζα έρχεται σε επαφή με τα εισερχόμενα φρέσκα λύματα στην δεξαμενή επαφής έχοντας αυξημένη δυνατότητα προσρόφησης και αποθήκευσης ενδοκυτταρικά.



**Σχήμα 2.4:** Σχηματική απεικόνιση συστήματος επαφής-σταθεροποίησης HiCS (Meerburg, 2016)

Ως εκ τούτου προκύπτει, ότι με την ενίσχυση των διεργασιών επαφής-σταθεροποίησης υπάρχει δυνατότητα αντιμετώπισης του περιορισμού της ικανότητας προσρόφησης των υπαρχουσών προσεγγίσεων HRAS μέσω της εναλλαγής συνθηκών από περιβάλλον πλούσιο σε τροφή σε περιβάλλον απουσίας τροφής (feast-famine regime) (Alexander et al., 1980, Vasquez Sarría et al., 2011 ). Έτσι οι μικροοργανισμοί υποβάλλονται σε συγκεκριμένες συνθήκες ανάπτυξης. Μια δεύτερη υπόθεση για την βελτίωση της προσροφητικής ικανότητας είναι οι δυνητικές επιδράσεις μιας

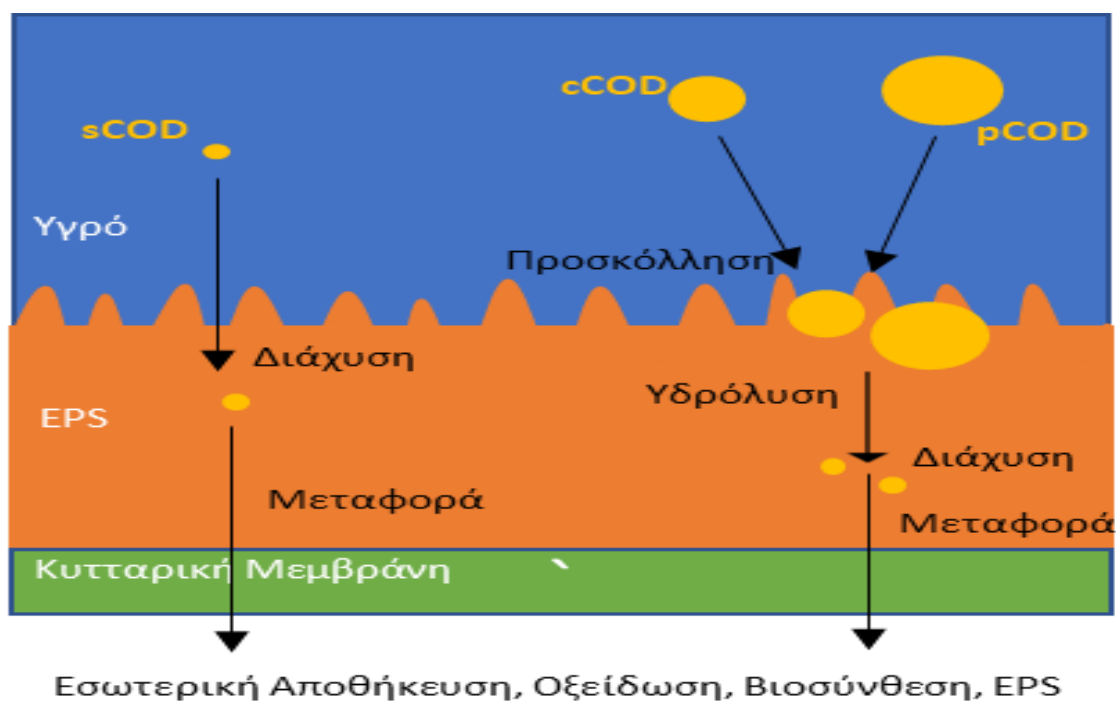
χαμηλότερης έντασης αερισμού στην δεξαμενή επαφής σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα HRAS.

Οι μονάδες επεξεργασίας επαφής-σταθεροποίησης ήταν δημοφιλείς κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα επειδή απαιτούσαν μικρότερους όγκους σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες επεξεργασίας (Ramalho, 1977). Σε μια συμβατική προσέγγιση, οι όγκοι των δεξαμενών της διαδικασίας επαφής-σταθεροποίησης επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) στην δεξαμενή επαφής να είναι μεταξύ 0,5 και 3 ωρών και ο HRT της δεξαμενής σταθεροποίησης μεταξύ 3 και 6 ωρών (Kharatjian & Sherrard, 1977). Η τεχνολογία επαφής-σταθεροποίησης θεωρήθηκε επίσης ότι παράγει μικρότερο πλεόνασμα ιλύος, επειδή η διαμόρφωση του συστήματος επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της μικροβιακής ανάπτυξης και αποσύνθεσης (Orhon, 2015). Λόγω των χαμηλών χρόνων επαφής και της ταχείας διάδοσης των λυμάτων μέσω του συστήματος, η ποιότητα εκροής των συστημάτων επαφής-σταθεροποίησης ήταν ευαίσθητη στις διακυμάνσεις του εισερχόμενου φορτίου. Επιπλέον, οι απαιτήσεις για απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου δεν μπορούσαν να ικανοποιηθούν με το σχεδιασμό των συστημάτων επαφής-σταθεροποίησης. Για τους λόγους αυτούς, πολλές μονάδες που είχαν αρχικά κατασκευαστεί ως συστήματα επαφής-σταθεροποίησης μετατράπηκαν σε μονάδες CAS (Orhon, 2015, Rittmann & McCarty, 2001). Εκτός από τα συστήματα επαφής-σταθεροποίησης, άλλες μέθοδοι που έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώσουν την καθιζηματικότητα της ιλύος, εφάρμοζαν αερισμό (μέρους) της ανακυκλοφορούμενης ιλύος, όπως η μέθοδος του Hatfield (Hatfield, 1959) και η μέθοδος Kraus (Kraus, 1945). Για να βελτιωθεί η βιολογική απομάκρυνση αζώτου των συστημάτων επαφής-σταθεροποίησης, έχουν προταθεί υβριδικές διεργασίες όπως η διαδικασία ανάκτησης-απονιτροποίησης-νιτροποίησης (RDN) (Kos et al., 1992).

#### **2.4 Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρυπαντικού φορτίου στα συστήματα υψηλής φόρτισης – Βιολογικές, φυσικές και χημικές διεργασίες**

Η μελέτη των βιολογικών, φυσικών και χημικών διεργασιών των συστημάτων υψηλής φόρτισης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την περεταίρω βελτιστοποίηση τους, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο βασικός σκοπός τους: Η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου των λυμάτων με έμφαση στην εκτροπή του στο ρεύμα της ιλύος έτσι ώστε να μπορεί να υπάρξει αυξημένη ενεργειακή αξιοποίηση. Οι βασικοί μηχανισμοί

απομάκρυνσης των συστημάτων HRAS είναι η βιολογική προσρόφηση-συσσωμάτωση, η ενδοκυτταρική αποθήκευση και η οξείδωση του οργανικού φορτίου με ταυτόχρονη σύνθεση νέου κυτταρικού υλικού. Επίσης άλλες διεργασίες όπως η υδρόλυση και η παραγωγή εξωκυτταρικών πολυμερών (EPS) είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την λειτουργία των συστημάτων, καθώς φαίνεται να επιδρούν δραστικά στους μηχανισμούς απομάκρυνσης (π.χ. προσρόφηση).



**Σχήμα 2.5:** Σχηματική απεικόνιση των μηχανισμών απομάκρυνσης των κλασμάτων του COD

#### 2.4.1 Βιολογική Προσρόφηση-Συσσωμάτωση

Τα συστήματα υψηλής φόρτισης (συστήματα AB, συμβατικά συστήματα υψηλής φόρτισης HiCAS, συστήματα επαφής-σταθεροποίησης HiCS) αποτελούν μια παραλλαγή των συμβατικών συστημάτων ενεργού ιλύος που βελτιώνουν σημαντικά την εκτροπή του οργανικού άνθρακα από τα λύματα στο ρεύμα της ιλύος μέσω βιοπροσρόφησης (Rahman et al., 2017). Έτσι, για να επιτευχθεί μέγιστη ανάκτηση οργανικού άνθρακα μέσω τεχνολογιών υψηλής φόρτισης, η ποσοτικοποίηση της βιοπροσρόφησης στα συστήματα HRAS είναι ζωτικής σημασίας για να μετατραπεί η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων σε μονάδα αξιοποίησης υδατικών πόρων.

Ο βασικός μηχανισμός πίσω από τη βιο-προσρόφηση για την ανάκτηση του άνθρακα από τα λύματα μέσω του συστήματος υψηλής φόρτισης (HRAS) δεν έχει μελετηθεί επαρκώς.

Ο μηχανισμός βιο-προσρόφησης είναι ένας συνδυασμός φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών στην ενεργό ιλύ, η οποία περιλαμβάνει την προσρόφηση σωματιδιακών και κολλοειδών οργανικών ουσιών από την εξωτερική κυτταρική επιφάνεια και την αποθήκευση διαλυτού COD μέσα στο κύτταρο. Η ικανότητα βιο-συσσωμάτωσης της ιλύος προσδιορίζεται ως επί το πλείστον σε πειραματική κλίμακα για να κατανοηθεί ο μηχανισμός της κινητικής της οργανικής ύλης από τα λύματα στο ρεύμα της ιλύος (Rahman et al., 2017).

Οι Riffat και Dague (1995) μέτρησαν πρώτοι την ικανότητα βιο-προσρόφησης σε αναερόβια κοκκώδη βιομάζα αναμειγμένη με άπαχο γάλα σε μορφή σκόνης (διαλυτό COD) για σύντομο χρόνο επαφής (2-30 min) όπου η απομάκρυνση COD προσδιορίστηκε αφαιρώντας το υπερκείμενο COD (μετά από καθίζηση) από την αρχική ποσότητα COD. Το πλεονέκτημα της δοκιμής αυτής ήταν ότι η κοκκώδης ιλύς γενικά έχει υψηλότερη ταχύτητα καθίζησης από την ιλύ στην οποία έχει πραγματοποιηθεί συσσωμάτωση-κροκίδωση και έτσι το υπερκείμενο υγρό ήταν επαρκώς διαυγές για να προσδιοριστεί η απομάκρυνση του COD.

Οι Tan και Chua (1997) και Zhang et al. (2014), υιοθέτησαν μια παρόμοια προσέγγιση για τη μέτρηση της ικανότητας βιο-προσρόφησης ενεργού ιλύος στην οποία υπήρχε βιομάζα με SRT 5 d. Η συγκεκριμένη ιλύς αναμείχθηκε με τυπικά αστικά λύματα σε ένα σύστημα batch ανοικτό στην ατμόσφαιρα. Στη μελέτη τους, η οξείδωση του COD από τα λύματα σε σύντομο χρόνο επαφής ήταν αμελητέα. Επιπλέον, το μη καθιζάνων κλάσμα της βιομάζας ήταν επίσης αμελητέο λόγω της καλύτερης ικανότητας καθίζησης της ιλύος με το σχετικά υψηλό SRT (5 d).

Αργότερα, οι Guellil et al. (2001) και Lim et al. (2015) εφάρμοσαν μια τροποποιημένη προσέγγιση των Tan και Chua (1997) με φυγοκέντρηση του υπερκείμενου υγρού μετά από καθίζηση για να διαχωριστεί η μη καθιζήσιμη βιομάζα από τα λύματα. Σε αυτή την περίπτωση, η πιθανή οξείδωση του διαλυτού COD (sCOD) και η ανάπτυξη βιομάζας επίσης ήταν αμελητέα. Εντούτοις, τα μη καθιζήσιμα σωματίδια από τα λύματα και η προσρόφηση σωματιδιακού και κολλοειδούς

οργανικού υλικού στη μη-καθιζήσιμη βιομάζα δεν μπορούν να διαχωριστούν με τη φυγοκέντρωση, υπερεκτιμώντας έτσι την ικανότητα βιο-προσρόφησης.

Οι Modin et al. (2015) βελτίωσαν περαιτέρω τη μέθοδο διαχωρίζοντας την οξείδωση του διαλυτού COD με ενεργή και ανενεργή βιομάζα (προσθήκη αζιδίου του νατρίου) για τον προσδιορισμό της βιο-προσρόφησης των αστικών λυμάτων. Οι Lim et al. (2016) ανέφεραν ότι η αδρανής βιομάζα που αναμιγνύεται με λύματα για ένα σύντομο χρόνο επαφής εμφανίζει εξωκυτταρική προσρόφηση ενώ η ενεργός βιομάζα προσδίδει ικανότητα εξωκυτταρικής προσρόφησης και ενδοκυτταρικής αποθήκευσης. Ωστόσο, δεν μέτρησαν τα πολύ-υδροξυ-αλκανοϊκά (PHAs) ως αποθηκευμένες ενώσεις και παραμέλησαν την οξείδωση του διαλυτού COD.

Δεδομένου ότι η συμβατική προσέγγιση της ικανότητας βιο-προσρόφησης επηρεάζεται από την πιθανή παρεμπόδιση της οξείδωσης, την ανάπτυξη της βιομάζας, τα μη καθιζήσιμα σωματίδια από τα λύματα και τη μη καθιζήσιμη βιομάζα, απαιτείται μια εναλλακτική προσέγγιση για τα συστήματα HRAS έτσι ώστε να ποσοτικοποιηθεί η πραγματική προσρόφηση οργανικής ύλης από τα λύματα. Επιπλέον, τα συστήματα HRAS έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά καθίζησης (χαμηλότερη ποιότητα εκροής) σε σύγκριση με τα συστήματα χαμηλής φόρτισης (W.A. Mancell-Egala et al., 2017, Metcalf & Eddy, 2003) επομένως απαιτείται μια κατάλληλη μέθοδος για τον ποσοτικό προσδιορισμό βιο-προσρόφησης σε αυτά τα συστήματα.

Στα συστήματα HRAS, η διοχέτευση του οργανικού υλικού στο ρεύμα της ιλύος πραγματοποιείται με παγίδευση, προσρόφηση και αποθήκευση του COD, διεργασίες οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από το χρόνο παραμονής των στερεών (J. Jimenez et al., 2014, A. Rahman et al., 2016). Όσο χαμηλότερο ήταν το SRT σε ένα σύστημα HRAS, τόσο υψηλότερη ήταν η εκτροπή των ενώσεων του άνθρακα από τα λύματα στην ιλύ σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (J.A. Jimenez et al., 2015, F.A. Meerburg et al., 2015). Επιπλέον, διαπιστώθηκε η ικανότητα βιο-προσρόφησης αυξάνεται με τη μείωση του SRT και κατ' επέκταση υπάρχει αυξημένη εκτροπή του άνθρακα από τα λύματα στο ρεύμα της ιλύος (A. Rahman et al., 2016). Στα συνεχή συστήματα υψηλής φόρτισης, η παρατηρούμενη απόδοση ορίζεται ως αυξημένη παραγωγή ιλύος που περιλαμβάνει την προσρόφηση σωματιδιακού και κολλοειδούς οργανικού υλικού, την ενδοκυτταρική αποθήκευση διαλυτού COD, την ανάπτυξη μικροοργανισμών και ενδεχομένως τη διάσπαση. Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί

συμβάλλουν στην παραγωγή ιλύος για την απομάκρυνση του COD από τα λύματα και επηρεάζουν έτσι την απόδοση του συστήματος. Για το λόγο αυτό, οι Rahman et al. (2017), πρότειναν μια προσέγγιση για τον ποσοτικό προσδιορισμό της βιο-απορρόφησης στα συστήματα HRAS, προσδιορίζοντας την ex-situ αερόβια απόδοση μέσω της δημιουργίας συνθηκών εναλλαγής της ποσότητας τροφής (παρόμοια με τα συστήματα CS) σε αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (batch reactor).

Δεδομένου ότι η συμβατική προσέγγιση της ικανότητας βιο-απορρόφησης πιθανώς καθορίζει τη μέγιστη ή κορεσμένη ικανότητα δέσμευσης άνθρακα της ενεργού ιλύος, θα πρέπει να είναι γνωστή η συνεισφορά της in-situ βιο-απορρόφησης στα συστήματα HRAS για να κατανοήσουμε την ανακατανομή άνθρακα μεταξύ των ρευμάτων λυμάτων - ιλύος. Οι Rahman et al. (2017) πρότειναν για πρώτη φορά μια απλή προσέγγιση για τον ποσοτικό προσδιορισμό της βιο-προσρόφησης σε αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (batch reactor), με τη χρήση της μεθόδου του προσδιορισμού της ταχύτητας αποξυγόνωσης (OUR) της ιλύος. Η ιλύς περιείχε βιοδιασπάσιμο οργανικό υλικό ως αποτέλεσμα βιο-προσρόφησης που σημειώθηκε σε ένα συνεχές σύστημα. Σε αυτή τη μελέτη οι Rahman et al. (2017) αξιολόγησαν αυτή την προσέγγιση για τον ποσοτικό προσδιορισμό της βιο-προσρόφησης διαφόρων συστημάτων HRAS σε διαφορετικές συνθήκες SRT για να μελετήσουν τη σχέση μεταξύ της απόδοσης βιο-συσσώρευσης, του ισοζυγίου του εισερχόμενου άνθρακα και άλλων λειτουργικών παραμέτρων (SRT).

Η ικανότητα βιο-συσσωμάτωσης και η απόδοση της συνήθως προσεγγίζονται με βάση τις ex-situ μετρήσεις. Η βιο-απορρόφηση σε συστήματα in situ συνεχούς λειτουργίας σπανίως έχει διερευνηθεί για να εξετασθεί η επίδραση διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων (SRT, HRT), της εισροής και εκροής, τα χαρακτηριστικά της πλεονάζουσας ιλύος (WAS) και κυρίως των εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών (EPS) στον αντιδραστήρα. Στην πραγματικότητα, το EPS είναι το κλειδί για την ανάπτυξη της μικροβιακής κοινότητας σε συνθήκες αυξημένης παρουσίας τροφής η οποία πραγματοποιείται με τη σύνδεση των επιφανειών τους (Y. Liu et al., 2003, V. Urbain et al., 1993). Ως εκ τούτου, οι μικροοργανισμοί προσκολλώνται μέσω της παραγωγής EPS για καλύτερη βιολογική κροκίδωση που οδηγεί σε βιο-απορρόφηση οργανικής ύλης από τα λύματα (C.S. Lapidou et al., 2002). Μια νέα προσέγγιση προτάθηκε από τους Rahman et al. για τον ποσοτικό προσδιορισμό της in situ βιο-απορρόφησης μελετώντας της επίδραση λειτουργικών παραμέτρων, το ισοζύγιο του



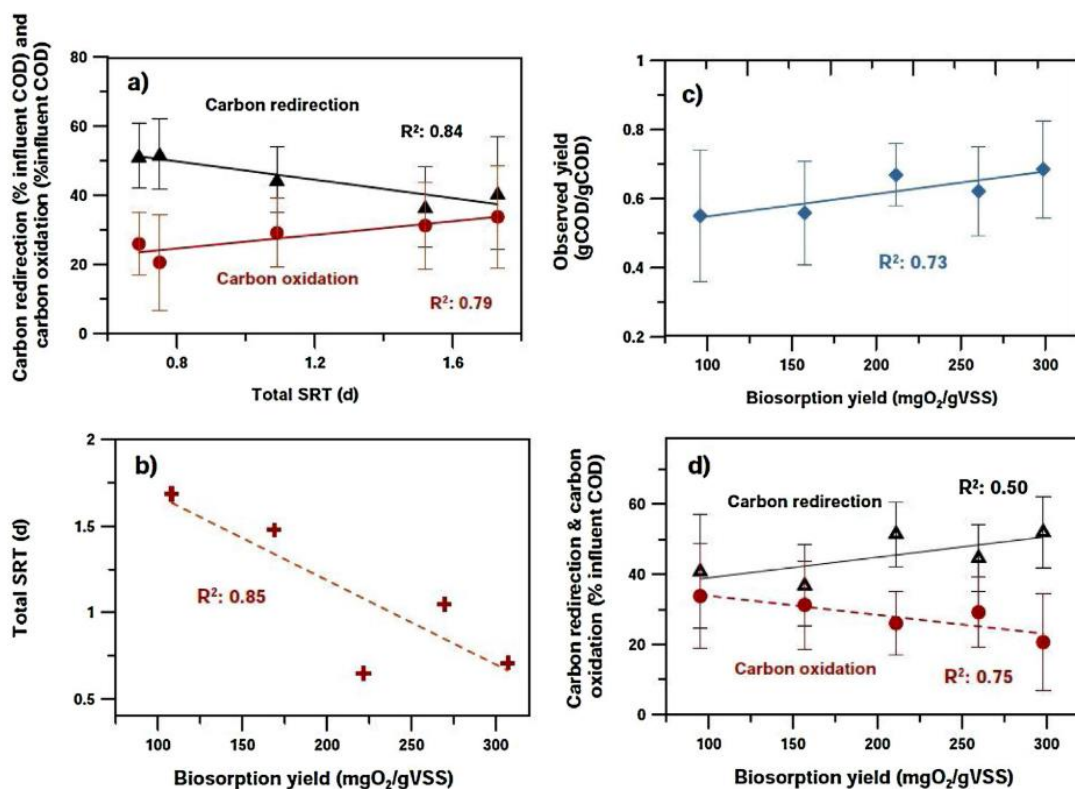
άνθρακα και την παραγωγή των EPS ενός αντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας που επεξεργάζεται την εκροή από χημικά ενισχυμένη πρωτοβάθμια επεξεργασία (CEPT). Ο κύριος σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να αξιολογηθούν τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις για την ποσοτική εκτίμηση της βιο-απορρόφησης στα συστήματα HRAS και οι δυνητικές εφαρμογές τους, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους. Οι ειδικοί στόχοι αυτής της μελέτης ήταν:

- (α) να ποσοτικοποιηθεί η ικανότητα βιο-απορρόφησης της ιλύος συστήματος HRAS και η βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών (BNR) σε συστήματα διαλείποντος έργου χρησιμοποιώντας τη συμβατική μέθοδο (ιλύς που αναμιγνύεται με τα λύματα)
- (β) να προσδιοριστεί η βιο-απορρόφηση εκτιμώντας την ex-situ αερόβια απόδοση (συντελεστής μετατροπής ετεροτροφικής βιομάζας) σταθεροποιημένης και μη σταθεροποιημένης βιομάζας συστημάτων HRAS
- (γ) την απόδοση ex-situ βιο-συσσωμάτωσης (συντελεστής μεταροπής ποσότητας οργανικού υλικού που προσροφήθηκε) χρησιμοποιώντας πειράματα OUR σε λάσπες με διάφορα SRT
- (δ) να εκτιμηθεί η in situ βιο-απορρόφηση σε πιλοτικά συστήματα HRAS μελετώντας λειτουργικές παραμέτρους, το ισοζύγιο του άνθρακα και τη συγκέντρωση των EPS
- (ε) Τέλος να αξιολογηθούν αυτές οι τέσσερις προσεγγίσεις της ικανότητας βιο-συσσωμάτωσης, την σχέση της με το SRT και την εκτροπή του άνθρακα, τα οφέλη και τους περιορισμούς για μελλοντικές εφαρμογές τους στις διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων

Αφού ολοκληρώθηκαν τα πειράματα πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση για τις τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις προσδιορισμού της ικανότητας βιο-απορρόφησης συστήματος HRAS.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ικανότητα βιο-απορρόφησης δεν φαίνεται να είναι αρκετά ευαίσθητη ώστε να συσχετίζεται άμεσα με το SRT του συστήματος, ένας παράγοντας που καθορίζει την ικανότητα βιο-συσσωμάτωσης στα συστήματα υψηλής φόρτισης. Επιπλέον, αυτή η μελέτη έδειξε ότι το καθιζήσιμο οργανικό κλάσμα των λυμάτων είχε σημαντική επίδραση (αυξημένη ικανότητα βιο-απορρόφησης λόγω της καθιζήσιμης οργανικής ύλης που έφτανε σε ποσοστό το 55%) στη συμβατική προσέγγιση για τη μέτρηση της ικανότητας βιο-απορρόφησης. Ως εκ τούτου, η

συμβατική προσέγγιση δεν φαίνεται να είναι η καλύτερη μέθοδος για τη μελέτη της ικανότητας βιο-συσσωμάτωσης στα συστήματα HRAS (Rahman et al., 2017).



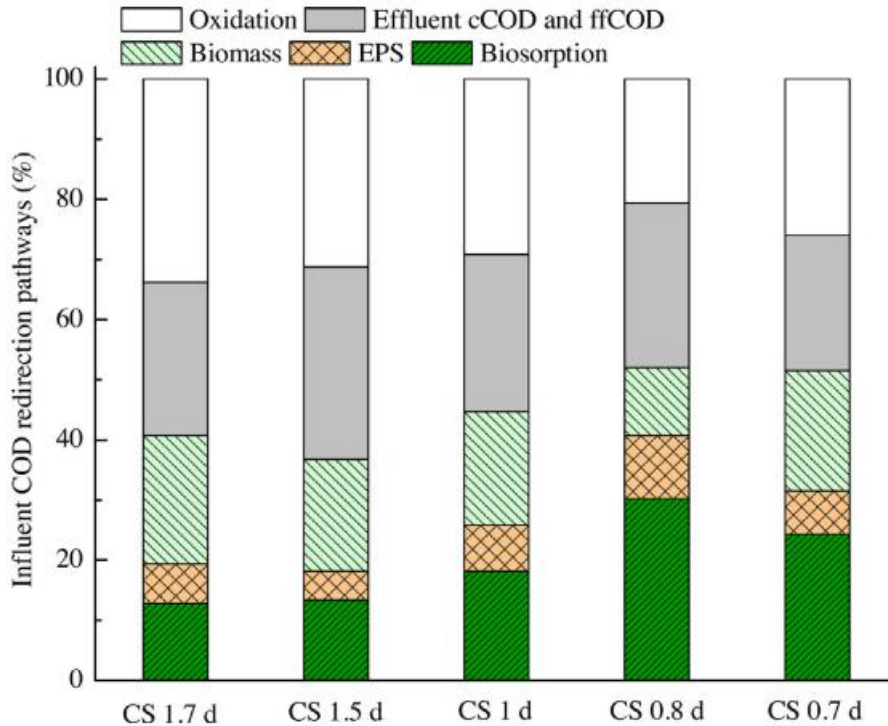
**Σχήμα 2.6:** a) Σχέση μεταξύ ανακατανομής του άνθρακα, οξείδωσης άνθρακα και ολικού SRT σε σύστημα CS πειραματικής κλίμακας (συνθήκες σταθερής κατάστασης), b) επίπτωση συνολικού SRT στην απόδοση βιο-προσρόφησης που προσδιορίστηκε σε σύστημα CS σε πιλοτικής κλίμακας (συνθήκες σταθερής κατάστασης) , c) σχέση μεταξύ της παρατηρούμενης απόδοσης και της απόδοσης βιο-προσρόφησης της ιλύος της δεξαμενής επαφής σε συστήματα CS πειραματικής κλίμακας (συνθήκες σταθερής κατάστασης) και d) σχέση μεταξύ της απόδοσης ανακατανομής του άνθρακα, της οξείδωσης και της βιο-προσρόφησης της ιλύος της δεξαμενής επαφής σε συστήματα CS πειραματικής κλίμακας (συνθήκες σταθερής κατάστασης) (Rahman et al., 2017)

Η προσέγγιση της ex situ αερόβιας απόδοσης έδειξε μέγιστη απόδοση (λόγω αποθήκευσης) για οποιονδήποτε τύπο ενεργού ιλύος λόγω του υψηλού λόγου F / M και της μεταφοράς ιλύος από συνθήκες περιορισμένης ανάπτυξης (συνεχές σύστημα) σε συνθήκες αφθονίας τροφής (συστήματα batch). Επίσης, σε αυτή την περίπτωση, η ex-situ αερόβια απόδοση δεν διαφοροποιούνταν στα δείγματα ιλύος με διαφορετικές ικανότητες βιο-προσρόφησης, ακόμα και όταν τα δείγματα εμπεριείχαν αερισμένη ιλύ. Επιπρόσθετα, η δοκιμή της ex-situ απόδοσης μπορεί να περιγράψει μόνο τη μέγιστη απόδοση της ετεροτροφικής βιομάζας υπό αυξημένο λόγο F / M και όχι την ικανότητα βιο-απορρόφησης. Επομένως, ο υψηλός συντελεστής απόδοσης στις ex-situ συνθήκες

μπορεί να υποδηλώνει ότι η εξωκυτταρική προσρόφηση είναι δύσκολο να διαφοροποιηθεί από την ενδοκυτταρική αποθήκευση και συνεπώς είναι αναγκαία περαιτέρω έρευνα για την εκτίμηση της σύνθεσης της βιομάζας, τις ιδιότητες των κροκίδων καθώς και η μέτρηση των αποθηκευμένων ενώσεων (Rahman et al., 2017) .

Αντίθετα με τη συμβατική προσέγγιση ικανότητας βιο-απορρόφησης και την προσέγγιση *ex situ* αερόβιας απόδοσης, η *ex-situ* απόδοση βιο-απορρόφησης βάση πειραμάτων OUR ήταν η μόνη προσέγγιση που έδειξε άμεση συσχέτιση με το SRT και το ισοζύγιο μάζας άνθρακα των συνεχών συστημάτων. Η προσέγγιση ποσοτικοποίησε το βιοδιασπάσιμο κλάσμα που υπάρχει στις κροκίδες μέσω πειραματικής μέτρησης του OUR. Ένας από τους περιορισμούς αυτής της προσέγγισης ήταν ότι θα μπορούσε να έχει επίδραση στην υποβάθμιση της μέτρησης των EPS εξαιτίας της σταθεροποίησης της λάσπης και συνεπώς δεν θα μπορούσε να κάνει διάκριση μεταξύ των απορροφηθέντων στερεών και των EPS. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης δείχνει ότι ήταν θετικά συσχετιζόμενη με την ανακατανομή του άνθρακα και την παρατηρούμενη απόδοση του συστήματος και είχε αντίθετη συσχέτιση με την οξείδωση του άνθρακα και το SRT του συστήματος. Επομένως, η απόδοση βιο-προσρόφησης φαίνεται μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση που μπορεί να εφαρμοστεί *ex-situ* για την αξιολόγηση της ικανότητας βιο-συσσωμάτωσης στα συστήματα HRAS. Επιπλέον, θα μπορούσε να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βαθμονόμηση των μοντέλων HRAS και των κινητικών παραμέτρων εκτός από τα δεδομένα ισοζυγίου μάζας (Rahman et al., 2017).

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της βιο-προσρόφησης με τη χρήση του ισοζυγίου COD, των EPS, και των λειτουργικών παραμέτρων ήταν η μοναδική προσέγγιση μεταξύ των υπολοίπων, η οποία καθόρισε την *in situ* βιο-απορρόφηση ενός συνεχούς συστήματος. Η προσέγγιση ήταν σε θέση να ποσοτικοποιήσει το κλάσμα COD που συλλαμβάνεται μέσω της βιο-απορρόφησης και υπήρχε καλή συσχέτιση με το SRT και την εκτροπή του άνθρακα. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης ήταν ότι παρέχει άμεσα την ποσοτικοποίηση της βιο-απορρόφησης που λαμβάνει χώρα στον αντιδραστήρα υπό την επίδραση των χαρακτηριστικών εισροής, εκροής, WAS, λειτουργικών παραμέτρων, EPS και συντελεστή ετεροτροφικής απόδοσης. Η βασική παραδοχή της μεθόδου είναι η χρήση του συντελεστή ετεροτροφικής απόδοσης, ο οποίος καθορίστηκε τυπικά (0,67 g COD / g COD) για τον υπολογισμό της συμβολής της ανάπτυξης βιομάζας (Rahman et al., 2017).



**Σχήμα 2.7:** Οι οδοί ανακατανομής του εισερχόμενου COD υπό μεταβλητές συνθήκες SRT σε σύστημα επαφής - σταθεροποίησης (CS) πιλοτικής κλίμακας. Οι οδοί ανακατανομής του COD διαιρέθηκαν σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες: βιοσυσσωμάτωση, παραγωγή EPS, ο σχηματισμός βιομάζας, το κολλοειδές και το κροκιδωμένο COD στην έξοδο και η οξείδωση COD που υπολογίστηκε για να κλείσει το ισοζύγιο μάζας (% βιοσυσσωμάτωσης, % παραγωγής EPS και % σχηματισμού βιομάζας ισούται με % εκροής pCOD (ως βιομάζα) συν % WAS) (Rahman et al., 2017)

#### 2.4.2 Ενδοκυτταρική αποθήκευση

Στα συστήματα υψηλής φόρτισης (HRAS), η εξωκυτταρική προσρόφηση και η ενδοκυτταρική αποθήκευση χαρακτηρίζονται ως κυρίαρχοι μηχανισμοί δέσμευσης οργανικού άνθρακα από τα λύματα. Αναφέρεται ότι η προσρόφηση και η ενδοκυτταρική αποθήκευση μπορούν να ποσοτικοποιηθούν μαζί έτσι ώστε να προβλεφθεί η συνολική ικανότητα δέσμευσης άνθρακα από τα λύματα στα συστήματα HRAS (Nogaj et al. 2019). Εντούτοις, ο ποσοτικός προσδιορισμός των προϊόντων αποθήκευσης υπό συνθήκες χαμηλών χρόνων παραμονής στερεών (SRT) των συστημάτων HRAS δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Δεδομένου ότι η μέτρηση των προϊόντων αποθήκευσης είναι πολύπλοκη και εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, απαιτούνται εναλλακτικές λύσεις για την απομάκρυνση του οργανικού υποστρώματος

μέσω αποθήκευσης, προκειμένου να κατανοηθεί η αποτελεσματικότητα της δέσμευσης του άνθρακα στα συστήματα υψηλής φόρτισης (Nogaj et al. 2019).

Σε παλαιότερη μελέτη τους οι Carucci A. et al. (2001) ποσοτικοποίησαν την αποθήκευση ως προς το συστατικό πολυ-β-υδροξυβουτυρικός εστέρας (PHB) και διαπίστωσαν ότι συνέβαλε σε ποσοστό 18-22% της απομάκρυνσης του εύκολα βιοδιασπώμενου COD (rbCOD) σε πειράματα batch. Αυτό σημαίνει ότι η αποθήκευση παίζει σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση του διαλυτού COD, αλλά υπό δυναμικές συνθήκες (σύστημα συνεχούς ροής) η απομάκρυνση του διαλυτού COD από τα αστικά λύματα μέσω αποθήκευσης μπορεί να διαφέρει από εκείνη στα πειράματα batch όπου οι συνθήκες εναλλαγής προσφερόμενης τροφής διαδραματίζουν βασικό ρόλο για την αποθήκευση διαλυτού υποστρώματος (Carucci et al., 2001). Η αποθήκευση ως πολύ-υδροξυαλκανοϊκού εστέρα (PHA) μελετήθηκε σε πειραματικό αντιδραστήρα σταδίου A που επεξεργάστηκε ακατέργαστα λύματα και η δέσμευση διαλυτού COD μέσω αποθήκευσης ήταν  $0,33 \pm 0,02$  kg PHA COD / kg sCOD (Kinyua, Miller, et al. 2017). Δεδομένου ότι το αποτέλεσμα αυτό δημοσιεύθηκε ως ποσότητα μάζας της ένωσης PHA, είναι δύσκολο να ερμηνευθεί το ποσοστό συνεισφοράς αποθήκευσης ως μηχανισμός απομάκρυνσης διαλυτού COD. Μια προηγούμενη μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε αντιδραστήρες batch σε σειρά ομοίως λειτουργούσαν ως σύστημα επαφής-σταθεροποίησης υψηλής φόρτισης (0,5-1,3 d SRT) για την επεξεργασία ισχυρών συνθετικών λυμάτων, έδειξε ότι τα PHBs αντιπροσώπευαν περίπου το 2-3% του ανακτώμενου COD στο ρεύμα της ιλύος, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η αποθήκευση δεν είναι ο καθοριστικός παράγοντας που συμβάλλει στην απομάκρυνση του COD (Meerburg, Boon, et al., 2016). Επιπλέον, αναφέρθηκε ότι τα PHBs αντιπροσωπεύουν περίπου το 2% του COD εισόδου υγρών αποβλήτων που τροφοδοτούνταν σε πιλοτικό αντιδραστήρα που λειτουργούσε σε SRT 0,5 d (Haider S. et al., 2000). Μια εξήγηση ήταν ότι κάτω από συνθήκες έντονης εναλλαγής προσφερόμενης τροφής το οξικό ως πηγή άνθρακα γίνεται ως επί το πλείστον συστατικό PHB και παραμένει σε σταθερό εύρος όταν το SRT είναι μεγαλύτερο από 2 d (Beun et al., 2000). Ωστόσο, αυτή η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η παραγωγή PHB είναι λιγότερο προβλέψιμη υπό συνθήκες χαμηλότερων SRTs.

Για να ξεπεραστεί πειραματικά η πολυπλοκότητα του ποσοτικού προσδιορισμού της ενδοκυτταρικής αποθήκευσης, οι M. Nogaj et al. (2019) μελέτησαν μια διαφορετική προσέγγιση για τον προσδιορισμό των προϊόντων ενδοκυτταρικής

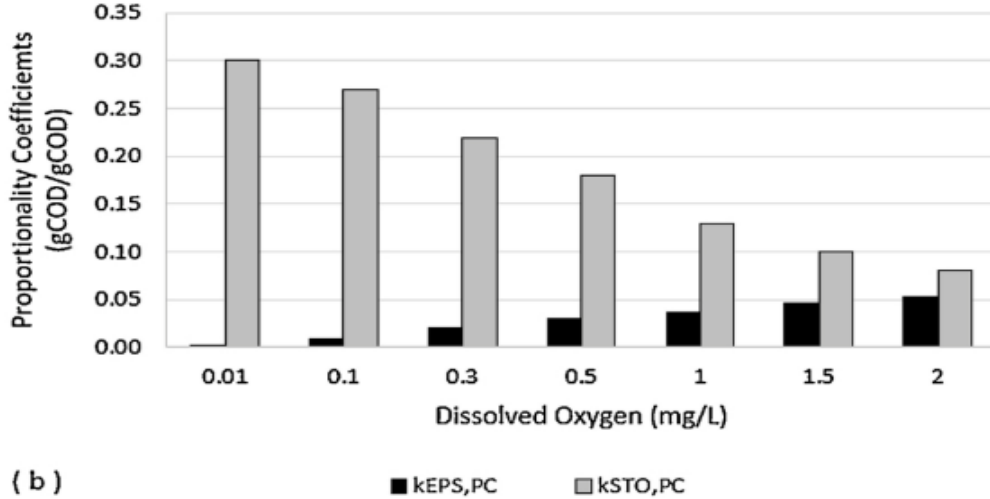
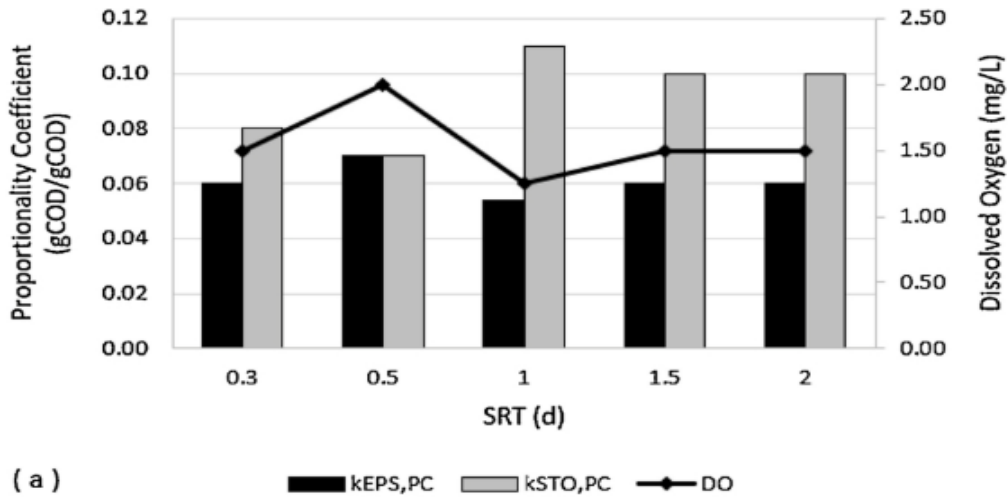
αποθήκευσης από την απομάκρυνση του διαλυτού οργανικού άνθρακα από τυπικά αστικά λύματα. Μελετήθηκε μια προσέγγιση κατανομής υποστρώματος η οποία στόχευε στην κατανομή της συνολικής απομάκρυνσης COD σε ενδοκυτταρική αποθήκευση, ουσίες εξωκυτταρικών πολυμερών, ανάπτυξη βιομάζας και παραγωγή ενέργειας. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ισοζύγιο μάζας (στοιχειομετρικά) για τον προσδιορισμό των σχηματιζόμενων βιολογικών προϊόντων (αποθήκευση) από την απομάκρυνση του διαλυτού υποστρώματος σε έναν αντιδραστήρα σταδίου A (A-stage reactor) που λειτουργούσε σε χαμηλή τιμή SRT ( $\leq 2$  ημέρες), χαμηλό HRT (30 λεπτά), μεταβλητές τιμές DO (0 - 2 mg / L). Ο αντιδραστήρας λειτουργούσε ως προεπεξεργασία για μια επόμενη διεργασία ενεργού ιλύος για απομάκρυνση αζώτου.

Αναπτύχθηκε μια στοιχειομετρική ανάλυση βασισμένη σε ισοζύγια μάζας COD για τον προσδιορισμό της κατανομής του εισερχόμενου οργανικού άνθρακα των λυμάτων σε προϊόντα οξείδωσης ( $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$ ), προϊόντα βιοσύνθεσης, EPS και προϊόντα αποθήκευσης. Επίσης αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο (βασισμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή) το οποίο αναλύοντας διάφορα δεδομένα υπολόγιζε τους στοιχειομετρικούς συντελεστές και τα κλάσματα που αντιπροσωπεύουν κάθε οδό απομάκρυνσης του οργανικού υποστρώματος (Nogaj et al. 2019).

Αξιολογήθηκαν τα δεδομένα λειτουργίας από δύο πειραματικά συστήματα αντιδραστήρων σταδίου A για να κατανοηθούν οι μηχανισμοί απομάκρυνσης του οργανικού υποστρώματος και τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και την επικύρωση του μοντέλου διεργασίας A-σταδίου που αναπτύχθηκε από τους Nogaj et al. (2019) Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης περιλαμβάνουν δεδομένα λειτουργίας από πειραματικό αντιδραστήρα σταδίου A που επεξεργάζεται αστικά λύματα (SRT  $< 0,5$  d, HRT 0,5 h) και λόγω του φορέα λειτουργίας, επίβλεψης και αξιολόγησης των δεδομένων του αναφέρεται ως HRSD (Hampton Roads Sanitation District). Η άλλη πειραματική μονάδα σταδίου A είχε λειτουργικές συνθήκες SRT  $\leq 2$  d και HRT 0,5 h και επεξεργαζόταν αστικά λύματα. Την λειτουργία του είχε αναλάβει το Πανεπιστήμιο της Νέας Ορλεάνης και αναφέρθηκε στη μελέτη ως UNO (University of New Orleans).

## **Επίδραση SRT και DO στην ικανότητα ενδοκυτταρικής αποθήκευσης ως μηχανισμό απομάκρυνσης COD**

Αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα από τον αντιδραστήρα Α-σταδίου υψηλής φόρτισης της βάσης δεδομένων UNO για να κατανοηθεί η συμπεριφορά των συντελεστών κατανομής του οργανικού υποστρώματος για την παραγωγή EPS (kEPS, PC ή fEPS) και του σχηματισμού των προϊόντων ενδοκυτταρικής αποθήκευσης (kSTO, PC ή fSTO). Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι καθώς το SRT μειώνεται, ενώ διατηρείται το  $DO > 1,0 \text{ mg / L}$ , το kSTO, PC (fsto) αυξήθηκε ελαφρώς σε SRT 1 d. Ωστόσο, το kEPS, PC (fEPS) δεν άλλαξε σημαντικά με την αύξηση του SRT (Nogaj et al. 2019). Έχει αναφερθεί σε προηγούμενη μελέτη (Jimenez et al., 2015) ότι περίπου το 4% του συνολικού εισερχόμενου COD ευθύνεται για την παραγωγή EPS σε 0,3 d SRT σε συστήματα σταδίου Α που επεξεργάζονται ακατέργαστα λύματα. Στην μελέτη των Nogaj, παρατηρήθηκε ότι το ποσοστό συνεισφοράς του εισερχόμενου COD στην παραγωγή EPS είναι 6% και συμφωνεί και με προηγούμενη μελέτη (Jimenez et al., 2015). Συνολικά, η ενδοκυτταρική αποθήκευση συνέβαλε περίπου στο 7 έως 11% της απομάκρυνσης του διαλυτού εισερχόμενου COD σε τιμές SRT από 0,3 έως 1,5 σε συστήματα υψηλής φόρτισης σταδίου Α. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η αποθήκευση (kSTO, PC) αυξήθηκε με μειωμένη συγκέντρωση DO, ενώ η παραγωγή EPS (kEPS, PC) αυξήθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης DO. Συνοπτικά, η απομάκρυνση του διαλυτού COD μέσω αποθήκευσης αυξήθηκε από 8% έως 30% όταν η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μειώθηκε από 2 σε 0,01 mg / L σε 1,5 d SRT. Η λειτουργία σε χαμηλό DO και SRT υποδηλώνει την αυξημένη παραγωγή προϊόντων αποθήκευσης, η οποία υποστηρίζεται επίσης και από διαφορετική μελέτη όπου παρατηρήθηκε ότι ο περιορισμός οξυγόνου ενισχύει τις διεργασίες βιοσύνθεσης PHA (Steinbuechel 1996). Στο μέλλον, συνιστάται τα δεδομένα αποθήκευσης που προσδιορίζονται από το στοιχειομετρικό ισοζύγιο μάζας να μπορούν να επικυρώνονται πειραματικά. Τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



**Σχήμα 2.8:** Συντελεστές κατανομής υποστρώματος kEPS.PC (fEPS) και kSTO, PC (fSTO) που υπολογίζονται από το μοντέλο του αντιδραστήρα σταδίου Α στα (a) μεταβαλλόμενα SRT και (b) DO (SRT = 1,5 ημέρες) (Nogaj et al. 2019)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι λειτουργικές παράμετροι καθώς και τα δεδομένα εισόδου και εξόδου για όλα τα κλάσματα COD των δύο αντιδραστήρων υψηλής φόρτισης σταδίου-Α (HRSD, UNO).



**Πίνακας 2.5:** Λειτουργικές παράμετροι και απόδοση των δύο αντιδραστήρων υψηλής φόρτισης σταδίου-A (HRSD, UNO) για τα διάφορα κλάσματα COD (Nogaj et al. 2019)

Παράμετρος		Μονάδα μέτρησης	Αντιδραστήρας HRSD A-σταδίου	Αντιδραστήρας UNO A-σταδίου
Λειτουργικές παράμετροι	Όγκος	L	510	151
	HRT	min	30	30
	SRT	d	0,1 – 0,3	0.3 - 2
	DO	mg/L	0,5 – 1,3	0 - 2
	OLR	KgCOD/m <sup>3</sup> /d	26,5	23
Δεδομένα εισόδου	tCOD	mgCOD/L	551±74	480±110
	pCOD	mgCOD/L	335±67	290±80
	cCOD	mgCOD/L	Δεν μετρήθηκε	80±25
	sCOD	mgCOD/L	217±30	110±33
Δεδομένα εξόδου	tCOD	mgCOD/L	301±64	230 ± 11.8 – 67.5 ± 9.2
	pCOD	mgCOD/L	157±45	183 ± 15 – 61.9 ± 10
	cCOD	mgCOD/L	Δεν μετρήθηκε	74.1 ± 4.7 – 6.1 ± 1.45
	sCOD	mgCOD/L	144±31	46.9 ± 7.1 – 5.6 ± 0.7
Ποσοστό απομάκρυνσης COD	tCOD	%	45±12	52 ± 12 - 85 ± 11
	pCOD	%	52±16	36 ± 16 - 79 ± 10
	cCOD	%	Δεν μετρήθηκε	7.5 ± 5 - 92 ± 1.5
	sCOD	%	33±12	58 ± 7 - 95 ± 1

### 2.4.3 Αερόβια και αναερόβια βιοδιάσπαση

#### Αρχή της βιοαποδόμησης

Η βιοαποδόμηση είναι μια διεργασία που χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς, μύκητες, πράσινα φυτά και ένζυμα για την απομάκρυνση των ρύπων από το φυσικό περιβάλλον ή για την μετατροπή τους σε λιγότερο βλαβερά και επικίνδυνα συστατικά. Η βιοαποδόμηση χρησιμοποιείται στην επεξεργασία λυμάτων τα τελευταία χρόνια, καθώς η ανθρωπότητα προσπαθεί να βρει βιώσιμους τρόπους για να επεξεργαστεί το μολυσμένο νερό οικονομικά και με ασφάλεια (Zheng et al., 2013).

## **Βιοδιασπασιμότητα οργανικών ενώσεων**

Χημικές, φυσικές και βιολογικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων από τα λύματα. Στη βιολογική μέθοδο έχει δοθεί μεγάλη προσοχή λόγω της οικονομικής και περιβαλλοντικής υπεροχής της. Ο ρυθμός βιοαποδόμησης και ο βαθμός βιοαποδόμησης της οργανικής ουσίας εξαρτώνται εν μέρει από τους χαρακτηριστικά της ουσίας. Μερικοί από τους οργανικούς ρύπους, όπως οργανικές ουσίες, οργανοφωσφορικά, τα οποία έχουν σχετικά υψηλή υδατοδιαλυτότητα και χαμηλή τοξικότητα, είναι εύκολα βιοδιασπασίμα (Kaur 2019). Εντούτοις, για ορισμένους οργανικούς ρύπους, όπως τα πολυχλωροδифαινύλια (PCBs), οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH), οι ετεροκυκλικές ενώσεις, οι φαρμακευτικές ουσίες που διαθέτουν ιδιότητες βιοσυσσώρευσης και βιοτοξικότητας, είναι πολύ πιο δύσκολο να υποστούν βιοδιάσπαση στη φυσική κατάσταση. Το οργανικό υλικό μπορεί να αποικοδομείται αερόβια με οξυγόνο ή αναερόβια, χωρίς οξυγόνο (Scott & Ollis 1995).

## **Αερόβια οξείδωση-βιοδιάσπαση**

Η αρχή της αερόβιας οξείδωσης είναι η ακόλουθη: Οι αερόβιοι μικροοργανισμοί χρειάζονται οξυγόνο κατά την βιοαποικοδόμησή τους σε δύο μεταβολικές θέσεις, στην αρχική έκθεσή τους στο οργανικό υπόστρωμα και στο τέλος της αναπνευστικής τους αλυσίδας. Τα βακτήρια και οι μύκητες μπορούν να παράγουν οξυγενάσες και υπεροξειδάσες που τους δίνουν την ικανότητα να επωφεληθούν από την λήψη των ενεργειακών, ανθρακικών και θρεπτικών στοιχείων που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της αερόβιας οξείδωσης των ρύπων. Ένας τεράστιος αριθμός βακτηρίων και μυκήτων γενικά έχουν την ικανότητα να απελευθερώνουν μη-ειδική οξειδάση και να αποικοδομούν οργανικούς ρύπους.

Οι κλασικοί αντιδραστήρες που βασίζονται στην αερόβια οξείδωση περιλαμβάνουν τους αντιδραστήρες ενεργού ιλύος και τους βιοαντιδραστήρες μεμβράνης (Zheng et al. 2013).

## **Αναερόβια βιοδιάσπαση**

Η αναερόβια βιοδιάσπαση είναι μια σειρά διεργασιών στις οποίες οι μικροοργανισμοί διασπών το βιοαποικοδομήσιμο υλικό απουσία οξυγόνου. Η αρχή της αναερόβιας βιοδιάσπασης είναι η εξής: πρώτον, οι αδιάλυτοι οργανικοί ρύποι

διαφοροποιούνται από τις διαλυτές ουσίες, καθιστώντας τους διαθέσιμους για άλλου τύπου βακτήρια. Δεύτερον, τα οξυγενή βακτήρια μετατρέπουν τα σάκχαρα και το αμινοξύ σε διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, αμμωνία και οργανικά οξέα. Τρίτον, τα οργανικά οξέα μετατρέπονται σε οξικό οξύ, αμμωνία, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τέλος, τα μεθανογόνα βακτήρια μετατρέπουν το οξικό οξύ σε υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο (Zheng et al. 2013).

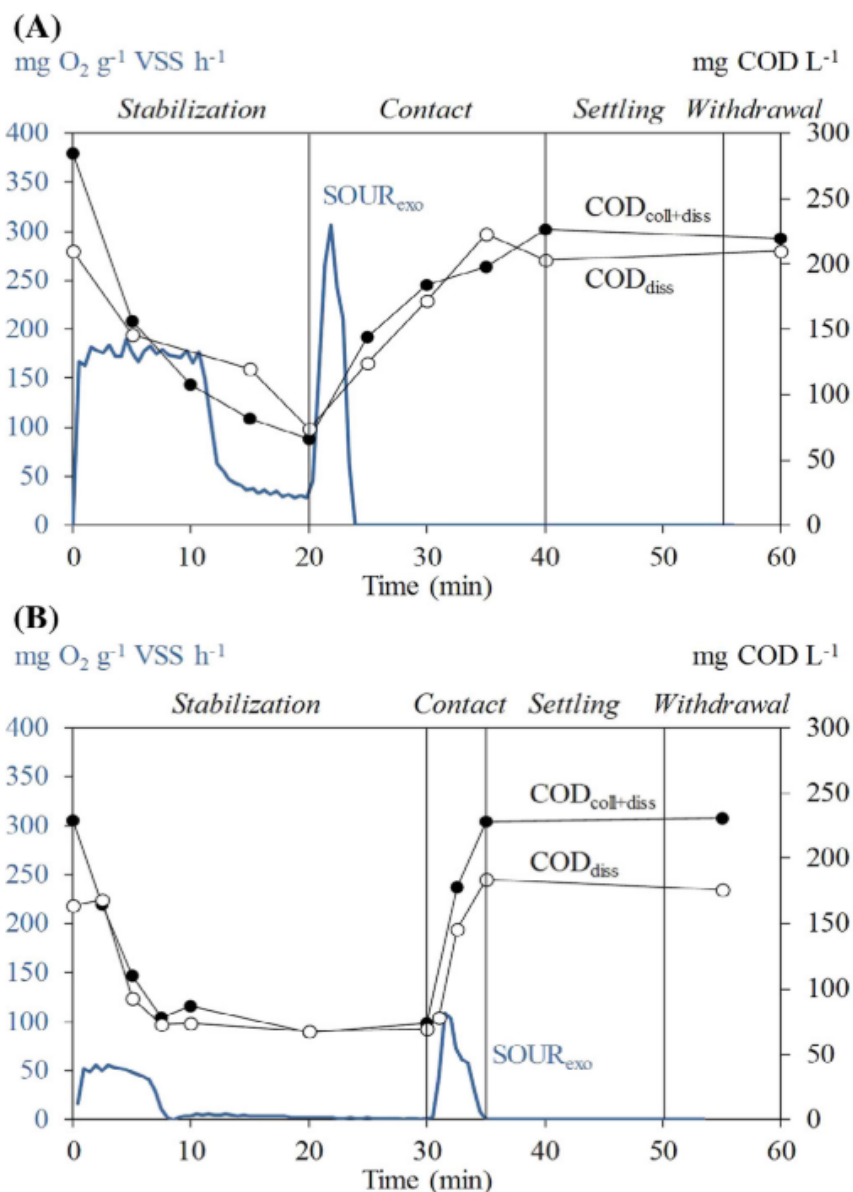
### **Ο ρόλος της οξείδωσης ως μηχανισμός απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου στα συστήματα υψηλής φόρτισης**

Προκειμένου τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων να κατευθύνονται σε μια περισσότερο ενεργειακά αυτόνομη κατάσταση, πρέπει να αναπτυχθούν τεχνολογίες που να βελτιώνουν ριζικά το συνολικό ενεργειακό τους ισοζύγιο. Η ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί από τα λύματα με αναερόβια χώνευση (AD) της λάσπης που παράγεται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, σχηματίζεται βιοαέριο, το οποίο μπορεί να καίγεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για να αυξηθεί η ανάκτηση της ενέργειας από τα λύματα, μια μέγιστη ποσότητα οργανικής ύλης, η οποία μετριέται ως χημική ζήτηση οξυγόνου (COD), πρέπει να εκτραπεί στο ρεύμα της ιλύος αντί να οξειδωθεί σε CO<sub>2</sub>. Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές για να μειωθεί η συνολική οξείδωση του COD και να αυξηθεί η ανακατεύθυνση στην λάσπη. Τα συστήματα υψηλής οργανικής φόρτισης (HRAS) παράγουν περισσότερη ιλύ με καλύτερη ικανότητα χώνευσης σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος (Meerburg et al., 2015).

Οι A. Jimenez et al. (2015), διερεύνησαν τη δυνατότητα συστήματος υψηλής φόρτισης επαφής-σταθεροποίησης (CS) σε σύγκριση με αντιδραστήρα σταδίου A για τη μεγιστοποίηση της ανακατεύθυνσης και της σύλληψης του άνθρακα. Οι αντιδραστήρες τροφοδοτούνταν με ακατέργαστα λύματα. Στην περίπτωση επεξεργασίας τέτοιου τύπου λυμάτων (υψηλής αντοχής) όπου ο περιορισμός του αποθέματος βιομάζας δεν αποτελεί πρόβλημα, ο αντιδραστήρας σταδίου A και το σύστημα επαφής-σταθεροποίησης σε παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας (0,15-0,3 d SRT) ήταν σε θέση να μεγιστοποιήσουν τη δέσμευση άνθρακα, όπως παρατηρήθηκε σε αυτή τη μελέτη. Το CS μεγιστοποιεί τη δέσμευση άνθρακα με χαμηλή οξείδωση, ενώ το στάδιο A παρουσιάζει παρόμοια αποτελεσματικότητα δέσμευσης με ελαφρώς υψηλότερη οξείδωση. Το CS εμφανίζει υψηλότερες συγκεντρώσεις COD στην εκροή σε σύγκριση με τα συστήματα σταδίου A. Επομένως, και τα δύο συστήματα είχαν

πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Αν ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας για την οξείδωση τότε το CS θα ήταν προτιμότερο σε σχέση με τους αντιδραστήρες του σταδίου A. Εάν είναι επιθυμητή η καλή ποιότητα εκροής, προτιμάται το στάδιο A (Rahman, Warner, et al. 2017).

Οι Francis A. Meerburg et al. (2015), ανέπτυξαν ένα σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής-σταθεροποίησης (HiCS) με υψηλούς ρυθμούς φόρτισης ( $> 2 \text{ kg bCOD kg}^{-1} \text{ TSS d}^{-1}$ ) και χαμηλό χρόνο παραμονής στερεών ( $< 1,2 \text{ d}$ ) και προσπάθησαν να αποδείξουν ότι είναι σε θέση να ανακτήσει περισσότερη χημική ενέργεια του οργανικού περιεχομένου των λυμάτων από τα συμβατικά συστήματα υψηλής φόρτισης (HiCAS) και τις παραλλαγές χαμηλού ρυθμού των HiCS και HiCAS. Η ποσότητα του οργανικού υποστρώματος που χάθηκε λόγω οξείδωσης σε  $\text{CO}_2$  ήταν χαμηλότερη στους αντιδραστήρες HiCS ενώ προσέγγισε ακόμα και το μηδέν για τον αντιδραστήρα σε  $t_c / t_s 0,14$ . Αυτό δείχνει ότι η έκταση της οξείδωσης ήταν πολύ περιορισμένη στον τελευταίο αντιδραστήρα, αν και η οξείδωση υποστρώματος εξακολουθούσε να ανιχνεύεται με τη βοήθεια μετρήσεων SOUR (specific oxygen uptake rate). Ο ειδικός ρυθμός αποξυγόνωσης (SOUR) της ιλύος των συστημάτων HiCS στα  $t_c / t_s 1$  και  $0,14$ , καθώς και συγκεντρώσεις κolloειδούς και διαλυμένου υποστρώματος, παρακολουθήθηκαν κατά τη διάρκεια τριών διαδοχικών κύκλων SBR (Meerburg et al. 2015).



**Σχήμα 2.9:** Χαρακτηρισμός κινητικής των διαφορετικών φάσεων των αντιδραστήρων HiCS σε (A)  $t_c / t_s$  1 και (B)  $t_c / t_s$  0.14. Το εξωγενές SOUR φαίνεται στον αριστερό άξονα ενώ τα διαφορετικά κλάσματα του COD στον δεξιό άξονα (Meerburg et al. 2015)

#### 2.4.4 Υδρόλυση

Ένα σημαντικό κλάσμα του οργανικού φορτίου στα αστικά λύματα είναι σωματιδιακής μορφής και πρέπει να υδρολυθεί προτού να μπορέσει να απορροφηθεί και να αποικοδομηθεί από τα βακτηρίδια (Levine et al., 1985). Απαιτείται ποσοτική κατανόηση της διαθεσιμότητας σωματιδιακής οργανικής ύλης για την πρόβλεψη της συνολικής απόδοσης των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και της ζήτησης οξυγόνου που θα απαιτούνται. Η απομάκρυνση των θρεπτικών ουσιών (απονιτροποίηση και

απομάκρυνση του βιολογικού φωσφόρου) σε πολλές περιπτώσεις περιορίζεται από την έκταση και την κινητική των διεργασιών υδρόλυσης, έτσι η σωματιδιακή οργανική ύλη μπορεί να είναι σημαντική για την επιλογή συγκεκριμένων βακτηριακών πληθυσμών (Frigon et al., 2002). Όσο οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων δεν απαιτούσαν απονιτροποίηση ή βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου, η τελική κατάσταση της σωματιδιακής οργανικής ύλης στα αστικά λύματα ήταν λιγότερο σημαντική. Η σωματιδιακή οργανική ύλη προσκολλάται ταχέως στις κροκίδες της ιλύος και κατόπιν αποικοδομείται ή απομακρύνεται με την περίσσεια ιλύ. Και στις δύο περιπτώσεις, επιτυγχάνεται ο στόχος επεξεργασίας της απομάκρυνσης της οργανικής ύλης από τα λύματα. Στο σχεδιασμό αντιδραστήρων σε μονάδα επεξεργασίας η οποία επιτυγχάνει απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων, τα ποσοστά υδρόλυσης καθορίζουν τη μετατροπή της αργά βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης σε ευκολότερα βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη που μπορεί να χρησιμεύσει ως πηγή άνθρακα για την απονιτροποίηση ή στην βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου. Το σωματιδιακό οργανικό κλάσμα και τα σχετικά ποσοστά υδρόλυσης έχουν άμεση επίπτωση στον όγκο των μονάδων επεξεργασίας για την αφαίρεση θρεπτικών ουσιών (Morgenroth, Kommedal, & Harremoës 2002).

### **Ορισμός της υδρόλυσης**

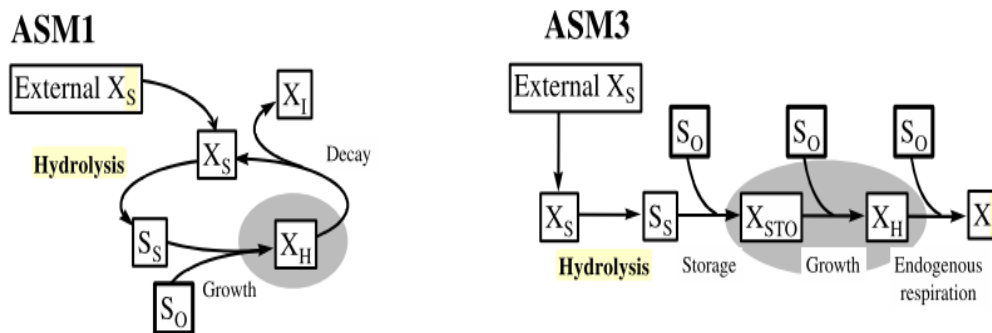
Η υδρόλυση αναφέρεται στην διάσπαση του οργανικού υποστρώματος σε μικρότερα και απλούστερα δομικά προϊόντα που μπορούν στη συνέχεια να απορροφηθούν και να βιοαποδομηθούν από τα βακτηρίδια. Η υδρόλυση μπορεί να διαφοροποιηθεί σε δύο τύπους:

α) η υδρόλυση του πρωτογενούς υποστρώματος όπου το οργανικό υπόστρωμα που υπάρχει αρχικά στα λύματα διαλύεται ·

(β) υδρόλυση δευτερεύοντος υποστρώματος που αναφέρεται στην αποσύνθεση του υποστρώματος που έχει παραχθεί (Henze et al., 2000) από τα βακτήρια (π.χ. υδρόλυση προϊόντων εσωτερικής αποθήκευσης, ουσιών που απελευθερώνονται από τα βακτηρίδια κατά τη διάρκεια του φυσιολογικού μεταβολισμού τους ή σωματιδίων που παράγονται κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης των βακτηριδίων) (Bryers & Mason 1987)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο ASM1 (μοντέλο ενεργού ιλύος - Activated Sludge Model) e και ASM3 (Gujer et al., 1999) ο όρος υδρόλυση αναλύεται διαφορετικά. Στο ASM1, η υδρόλυση αναφέρεται στο άθροισμα της πρωτογενούς και

της δευτερογενούς υδρόλυσης, ενώ στο ASM3 η υδρόλυση διαχωρίζεται από την κυκλοφορία των εσωτερικών προϊόντων. Ο πιο συγκεκριμένος ορισμός της υδρόλυσης είναι η διάσπαση ενός πολυμερούς σε μικρότερες μονάδες με προσθήκη νερού (Brock & Madigan, 1991). Στις τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων οι διαδικασίες υδρόλυσης συνοψίζουν όλους τους μηχανισμούς που καθιστούν διαθέσιμο το αργά βιοδιασπάσιμο οργανικό υπόστρωμα για βακτηριακή ανάπτυξη (Gujer et al., 1999) . Με τον ευρύτερο ορισμό της υδρόλυσης στη μοντελοποίηση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη διεργασίες όπως αυτές της χημικής διαλυτοποίησης και μεταφοράς μάζας για την καλύτερη αξιολόγηση των ποσοστών υδρόλυσης.



**Σχήμα 2.10:** Η διεργασία της υδρόλυσης σύμφωνα με τα μοντέλα ASM 1 και ASM 2 (Morgenroth, Kommedal, and Harremoës 2002)

Στο μοντέλο ASM1, η διεργασία της υδρόλυσης συνδυάζει πρωτογενή και δευτερογενή υδρόλυση (Henze et al., 1987). Στο μοντέλο ASM3, η βιοαποδόμηση του εξωτερικού υποστρώματος και η βιοαποδόμηση των κυτταρικών προϊόντων αποσυνδέονται και η διεργασία της υδρόλυσης αναφέρεται μόνο στην πρωτογενή υδρόλυση (Gujer et al., 1999). (Η σκιασμένη περιοχή σηματοδοτεί τα συστατικά που θεωρούνται μέρος του βακτηριακού κυττάρου  $S_s$  = εύκολα βιοδιασπάσιμα οργανικά υποστρώματα,  $SO_2$  = διαλυμένο οξυγόνο,  $X_s$  = βραδέως βιοδιασπάσιμα υποστρώματα,  $X_H$  = ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί,  $X_{sto}$  = προϊόντα εσωτερικής αποθήκευσης κυττάρων ετεροτροφικών μικροοργανισμών,  $X_I$  = αδρανές σωματιδιακό οργανικό υλικό)(Morgenroth, Kommedal, and Harremoës 2002).

## **Υδρόλυση στα συστήματα υψηλής φόρτισης**

Οι A. Jimenez et al. (2015), μελέτησαν μια πιλοτική μονάδα HRAS η οποία λειτουργούσε υπό ελεγχόμενες συνθήκες με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση του σωματιδιακού, κολλοειδούς και διαλυτού COD σε ένα ρεύμα στερεών αποβλήτων (ιλύος) με ελάχιστη εισροή ενέργειας με μεγιστοποίηση της παραγωγής λάσπης, αποθήκευσης βακτηριδίων και βιο-συσσωμάτωσης. Έχει αποδειχτεί ότι όσο πιο χαμηλή είναι η τιμή του SRT, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή ιλύος. Αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι η απώλεια βιομάζας λόγω ενδογενούς αναπνοής και υδρόλυσης των κολλοειδών και σωματιδιακών οργανικών ενώσεων ήταν πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την ανάπτυξη της βιομάζας. Επιπλέον, τα δεδομένα υποδηλώνουν υψηλότερη περιεκτικότητα COD στην πλεονάζουσα ιλύ (WAS) σε χαμηλότερες τιμές SRT που υποδεικνύουν λιγότερη υδρόλυση του κολλοειδούς και σωματιδιακού COD και αποθήκευση του διαλυτού COD (sCOD) σε χαμηλότερα SRT. Παρατηρείται επίσης ότι η μεγιστοποίηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα στη βιομάζα, διατηρώντας παράλληλα μια ορισμένη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης COD, μπορεί να είναι το κλειδί για τη μεγιστοποίηση της τελικής ανάκτησης ενέργειας.

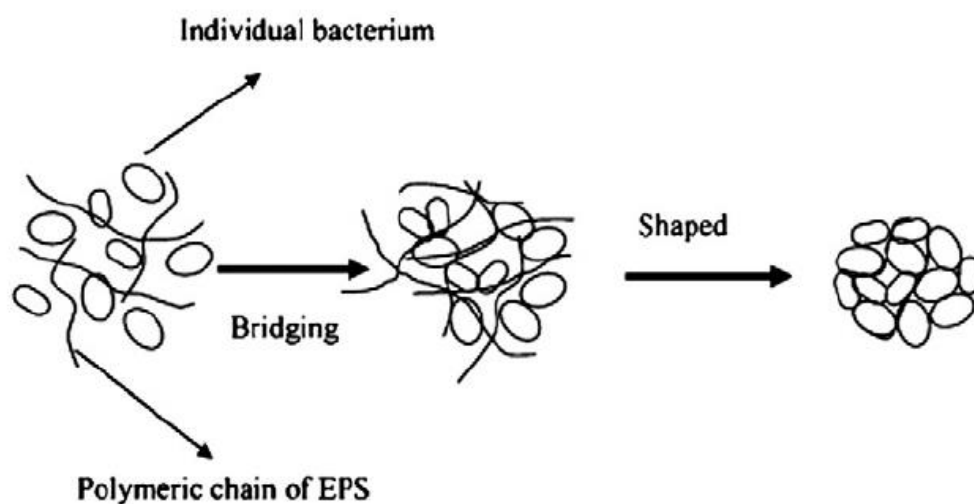
### **2.4.5 Παραγωγή EPS (extracellular polymeric substances)**

#### **Εισαγωγικά στοιχεία**

Για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου που υπάρχει στα ακατέργαστα λύματα είναι απαραίτητη η αερόβια βιολογική επεξεργασία έτσι ώστε η εκροή των συστημάτων να μπορεί να ανταποκριθεί στις ελάχιστες απαιτήσεις που θέτονται από τις αρμόδιες αρχές και φορείς. Μία κατεύθυνση που βρίσκει όλο και μεγαλύτερο έδαφος τα τελευταία χρόνια είναι να μειωθεί η ενέργεια κατανάλωσης μέσω της αερόβιας οξειδωσης του οργανικού άνθρακα (αερισμός) στην ανάκτηση ενέργειας μέσω της δέσμευσης του οργανικού άνθρακα από τα ακατέργαστα λύματα και της ανακατεύθυνσης τους σε έναν αναερόβιο χωνευτή για την παραγωγή ενέργειας (Kinyua, Elliott, et al. 2017). Υπάρχουν δύο κύρια κλάσματα COD στα λύματα: εύκολα και αργά βιοδιασπάσιμο COD (rbCOD και sbCOD). Το rbCOD οξειδώνεται εύκολα και είναι πιο δύσκολο να συλληφθεί σε σύγκριση με το sbCOD που αποτελείται από κολλοειδές COD (cCOD) και σωματιδιακό COD (pCOD) (J.A. Jimenez et al., 2007). Ένας από τους κύριους μηχανισμούς για τη δέσμευση του sbCOD είναι μέσω της

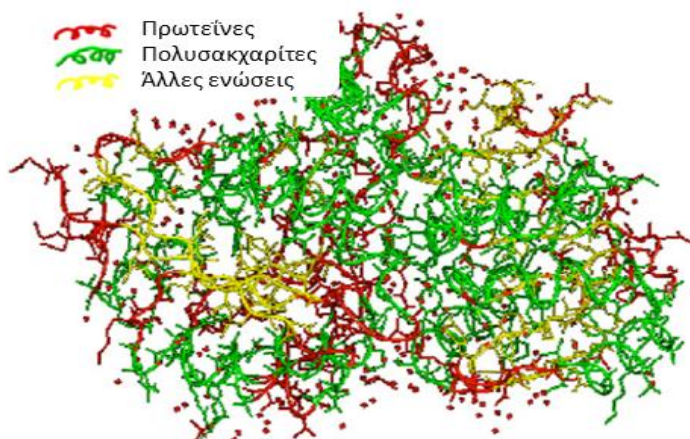


δέσμευσης αυτού του κλάσματος στις κροκίδες που σχηματίζονται στην ενεργό ιλύ. Τα εξωκυτταρικά πολυμερή (EPS) βοηθούν σε αυτή τη διεργασία και επίσης δρουν ως παράγοντας έναντι της οξείδωσης του δεσμευμένου cCOD και pCOD (J.A. Jimenez et al., 2007). Τα EPS είναι μικροβιακές εκκρίσεις και προϊόντα κυτταρικής λύσης τα οποία αποτελούνται κυρίως από υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, χουμικά, ουρονικά οξέα και DNA (Sheng & Yu 2007). Είναι αρνητικά φορτισμένες και αποτελούν περίπου το 50-80% του οργανικού κλάσματος στην ενεργό ιλύ. Τα EPS χρησιμεύουν ως μικροβιακό συσσωμάτωμα, δένουν μεταξύ τους τα κύτταρα με ένα πολύπλοκο δίκτυο, έτσι ώστε να σχηματίσουν μία ανοιχτή πορώδη δομή, που περιέχει υγρό και προστατεύουν τα κύτταρα από την αφυδάτωση, την ανεπάρκεια θρεπτικών συστατικών και τις τοξικών ουσίες (C.S. Laspidou et al., 2002).



**Σχήμα 2.11:** Σχηματική απεικόνιση μικροβιακής συσσωμάτωσης λόγω της παρουσίας EPS (Liu, Liu, & Tay, 2004)

Η δομή των EPS χωρίζεται σε τρία κλάσματα: διαλυτό EPS (S-EPS), χαλαρά συνδεδεμένο με το κύτταρο EPS (LB-EPS) και στενά συνδεδεμένο με το κύτταρο EPS (TB-EPS) (C.S. Laspidou et al., 2002, B.Q. Liao et al., 2001). Τα S-EPS τα οποία μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως διαλυτά μικροβιακά προϊόντα (SMP) παράγονται από μικροοργανισμούς κατά τη διάρκεια της κυτταρικής ανάπτυξης και της λύσης (C.S. Laspidou et al., 2002) . Τα TB-EPS περιβάλλουν το κύτταρο ενώ τα LB-EPS παρέχουν την πρωτεύουσα επιφάνεια για την προσάρτηση των κυττάρων (X.Y. Li et al., 2007).



**Σχήμα 2.12:** Σχηματική αναπαράσταση της δομής εξωκυτταρικών πολυμερικών ουσιών (Lin, et al., 2014)

### **Επίδραση των EPS στην λειτουργία και την απόδοση συστημάτων υψηλής φόρτισης**

Δεδομένου ότι η βιο-συσσωμάτωση διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη υψηλής ποιότητας εκροής, διάφοροι ερευνητές έχουν διερευνήσει τη σχέση μεταξύ της παραγωγής των EPS σε σχέση με διάφορες λειτουργικές παραμέτρους όπως η συγκέντρωση του DO, η θερμοκρασία, το SRT και το HRT. Οι Jimenez et al. (2012) λειτούργησαν ένα σύστημα HRAS πιλοτικής κλίμακας με SRTs 1, 2, 3, 5 και 10 d και διαπίστωσε ότι η αύξηση του SRT σε τιμές άνω των 3 ημερών δεν βελτίωσε την βιο-συσσωμάτωση ή την ποιότητα της εκροής.

Ωστόσο, οι Li και Yang (2007) που διερεύνησαν ένα σύστημα bench-scale τροφοδοτώντας το με γλυκόζη και οξική τροφή έδειξαν ότι η αύξηση του SRT από 5 έως 20 ημέρες βελτίωσε τη βιο-συσσωμάτωση. Η ίδια μελέτη έδειξε επίσης ότι καθώς αυξήθηκε η συγκέντρωση LB-EPS, η καθιζιστικότητα και η ικανότητα βιο-συσσωμάτωσης μειώθηκαν ως αποτέλεσμα του κλάσματος LB-EPS διότι αυξήθηκε η ποσότητα δεσμευμένου νερού μεταξύ συσσωματωμάτων, εξασθενίζοντας έτσι την προσκόλληση μεταξύ των κυττάρων.

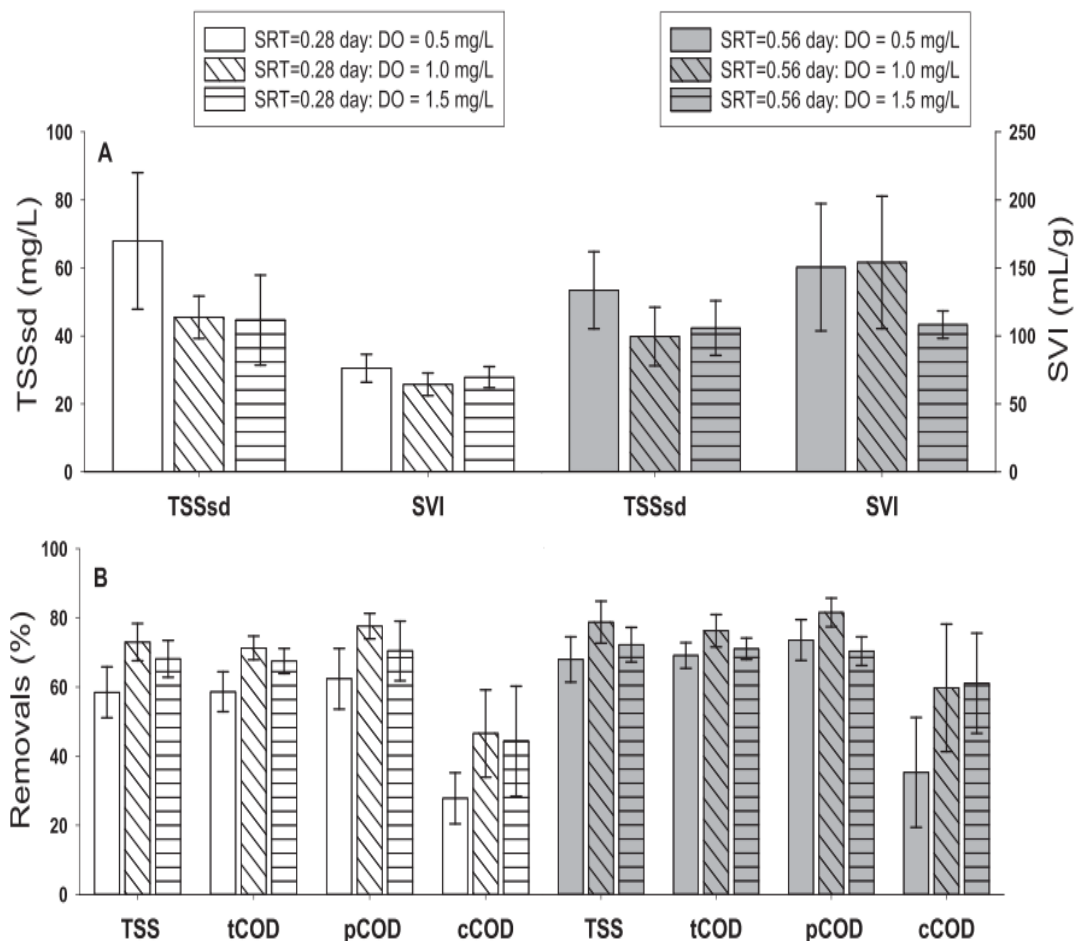
Σε συγκέντρωση DO 1 mg / L, οι Jimenez et al. (2015), ανέφεραν ότι αυξημένη παραγωγή EPS από 50 έως 105 mgCOD / gVSS συντέλεσε και σε αύξηση της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης cCOD και pCOD από 22 έως 65% καθώς το SRT αυξήθηκε από 0,3 σε 1 ημέρα. Εκτός από τη συγκέντρωση των EPS, τα συστατικά και οι ιδιότητες της επιφάνειας των EPS επηρεάζουν επίσης την καθίζηση και την βιο-

συσσωμάτωση. Περίπου το 70-80% των EPS σχετίζονται με πρωτεΐνες και πολυσακχαρίτες (M.F. Dignac et al., 1998). Η αυξημένη συγκέντρωση δισθενών κατιόντων έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει την βιο-συσσωμάτωση, την αντοχή των κροκίδων, την αντοχή σε διάτμηση και την περιεκτικότητα σε δεσμευμένο νερό με τη δέσμευση τους με αρνητικά φορτισμένες υδρόφοβες πρωτεΐνες (M. Higgins et al., 1997). Οι πολυσακχαρίτες αυτόνομα δεν έχουν δείξει μεγάλη συσχέτιση με την καθίζηση και την βιο-συσσωμάτωση, η αναλογία πρωτεΐνης προς πολυσακχαρίτες όμως επηρεάζει αυτούς τους μηχανισμούς. Οι υψηλές συγκεντρώσεις πολυσακχαριτών που καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο του σχηματισμού των EPS μπορούν να περιορίσουν την επίδραση των πρωτεϊνών οι οποίες θα μπορούσαν να ενισχύσουν την βιο-συσσωμάτωση μέσω διασωματιδιακών δυνάμεων (B.Q. Liao et al., 2001).

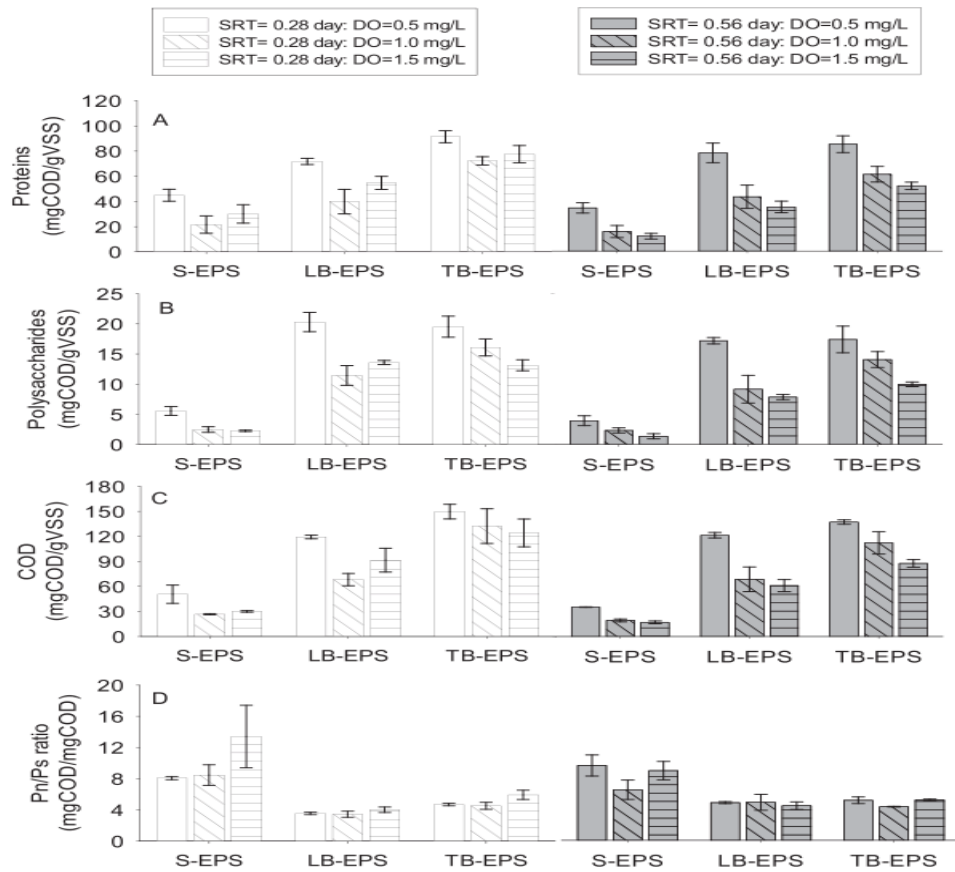
Οι Liao et al. (2006) επεξεργάστηκαν συνθετικά λύματα σε αντιδραστήρα SBR και ανέφεραν ότι η αναλογία πρωτεϊνών προς πολυσακχαρίτες αυξήθηκε από 1,3 σε 5,0 καθώς το SRT αυξήθηκε από 4 σε 12 ημέρες. Όταν αυξήθηκε αυτός ο λόγος (αύξηση της συνολικής συγκέντρωσης EPS), μειώθηκε η ικανότητα καθίζησης της ιλύος. Παρόλο που προηγούμενες έρευνες έχουν χαρακτηρίσει την παραγωγή των EPS σε συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος HRAS, απαιτείται περισσότερη έρευνα για να διερευνηθεί καλύτερα η επίδραση των EPS σε συστήματα Α-σταδίου που δουλεύουν σε SRTs < 1 ημέρας, χαμηλά HRTs και διάφορες συγκεντρώσεις DO.

Οι M. N. Kinyua et al. (2017), μελέτησαν την επίδραση του χρόνου παραμονής στερεών (SRT), του υδραυλικού χρόνου παραμονής (HRT) και του διαλυμένου οξυγόνου (DO) στην παραγωγή εξωκυτταρικών πολυμερών (EPS) και κατόπιν την ποιότητα εκροής, τη δέσμευση άνθρακα (βιο-συσσωμάτωση) και την ικανότητα καθίζησης σε σύστημα υψηλής φόρτισης Α-σταδίου που επεξεργάστηκε αστικά λύματα. Δύο αντιδραστήρες σταδίου-Α πιλοτικής κλίμακας ρυθμίστηκαν με HRT 30 και 60 min. Χρησιμοποιήθηκε ρυθμιστής οξυγόνου για τη διατήρηση 3 σημείων ρύθμισης της συγκέντρωσης του DO σε 0,5, 1 και 1,5 mg / L. Μία συγκέντρωση στερεών του ανάμικτου υγρού (MLSS) της τάξης των 3000 mg / L διατηρήθηκε και η ποσότητα της περίσσειας ιλύος (WAS) μεταβαλλόταν για να επιτευχθούν SRTs 0,28 και 0,56 d αντίστοιχα. Τα κλάσματα των EPS και οι συγκεντρώσεις πρωτεϊνών και πολυσακχαριτών του ανάμικτου υγρού μετρήθηκαν. Η λειτουργία του αντιδραστήρα σε SRT 0.56 d και 1.0 mg / L DO οδήγησε σε υψηλότερη απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS), ολικό COD (tCOD), σωματίδιο COD (pCOD) και

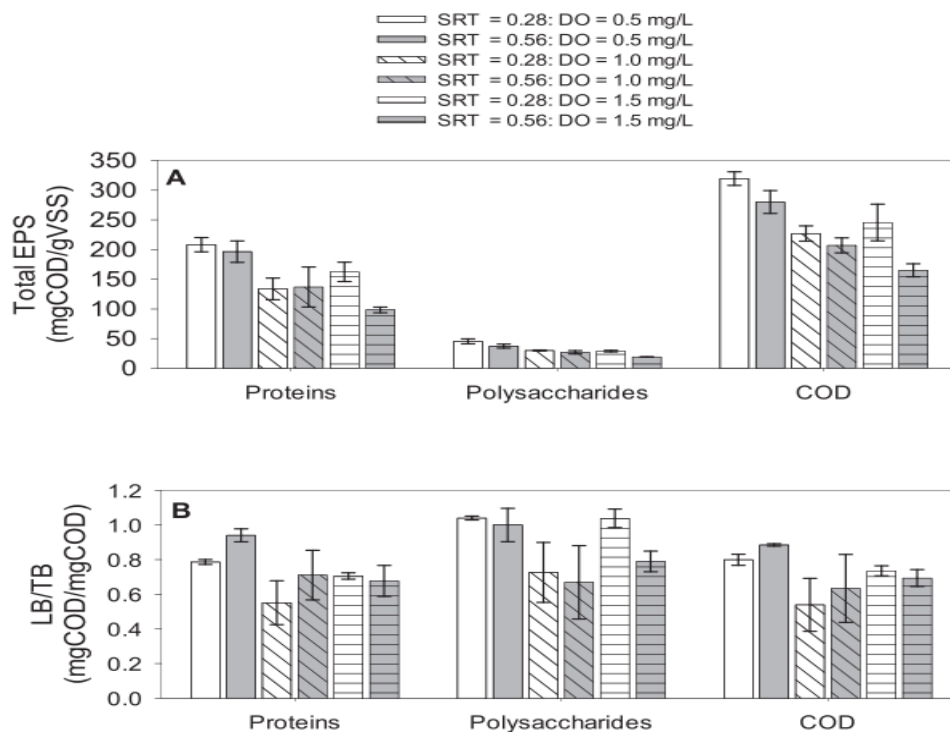
κολλοειδές (cCOD). Η υψηλότερη απόδοση βιο-συσσωμάτωσης (απομάκρυνση του cCOD) και της δέσμευσης του άνθρακα (ποσοστό COD στην WAS) συνέβη σε SRT 0,56 d και συνέπεσε με τη μείωση των συνολικών συγκεντρώσεων EPS. Τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος ήταν καλύτερα σε SRT 0,28 ημέρας. Συνολικά, διαπιστώθηκαν χαμηλές συσχετίσεις μεταξύ της παραγωγής EPS και της απόδοσης του συστήματος. Είναι πιθανό ότι με τον υψηλό ρυθμό φόρτισης του συστήματος σταδίου A, η παραγωγή EPS δεν έπαιξε σημαντικό ρόλο σε σύγκριση με την επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στην ποιότητα της εκροής, τη δέσμευση και την ανακατεύθυνση του άνθρακα στο ρεύμα της ιλύος.



**Σχήμα 2.13:** Μέση απόδοση του πιλοτικού συστήματος HRAS σταδίου A (Kinyua, Elliott, et al. 2017)



**Σχήμα 2.14:** Μέση απόδοση συγκέντρωση των διαφόρων κλασμάτων των EPS (Kinyua, Elliott, et al. 2017)



**Σχήμα 2.15:** Μέσες συνολικές συγκεντρώσεις EPS σε αναλογία πρωτεϊνών / πολυσακχαριτών (Pn / Ps) και αναλογία LB / TB (Kinyua, Elliott, et al. 2017)

Οι Rahman et al. (2017), διερεύνησαν το ρόλο των εξωκυτταρικών πολυμερών (EPS) στην βελτίωση της βιο-συσσωμάτωσης και τη δέσμευση του άνθρακα από αστικά λύματα σε συστήματα επαφής – σταθεροποίησης (CS) πιλοτικής κλίμακας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εναλλαγή από συνθήκες απουσίας τροφής (συνθήκες «πείνας») της δεξαμενής σταθεροποίησης σε συνθήκες έντονης παρουσίας τροφής της αερόβιας δεξαμενής επαφής, οδήγησαν σε ταχεία αύξηση των EPS. Συμπεράνανε λοιπόν ότι ο μηχανισμός αυτός επέδρασε στη βελτιωμένη βιο-συσσωμάτωση, την αποτελεσματικότητα δέσμευσης του άνθρακα και την ποιότητα της εκροής στα συστήματα CS. Αντίθετα, αυτές οι βελτιώσεις δεν παρατηρήθηκαν υπό αναερόβιες συνθήκες στη δεξαμενή επαφής, ευνοώντας έτσι την εφαρμογή αερόβιας επαφής. Η παραγωγή EPS προήλθε από τον υψηλό ρυθμό οργανικής φόρτισης και τον ελάχιστο χρόνο σταθεροποίησης που απαιτείται για την δημιουργία συνθηκών «πείνας». Η κατανόηση του μηχανισμού της εναλλαγής συνθηκών διαθέσιμης τροφής στο σύστημα CS μέσω αυτής της μελέτης, συνέβαλλε στη μελλοντική σχεδίαση και λειτουργία συστημάτων CS για αυξημένη ανάκτηση άνθρακα.

**Πίνακας 2.6:** Επίδραση των αναερόβιων και αερόβιων συνθηκών της δεξαμενής επαφής και σταθεροποίησης στην παραγωγή EPS με ακατέργαστα λύματα ως πηγή άνθρακα σε ένα batch πείραμα πλήρους κλίμακας με SRT 2 ημερών (Rahman, Mosquera, et al. 2017)

Συνθήκες στη δεξαμενή σταθεροποίησης	Συνθήκες στη δεξαμενή επαφής	sCOD στη δεξαμενή σταθεροποίησης (mg / L)	Λόγος F/M στη δεξαμενή σταθεροποίησης (mg sCOD /mg VSS)	sCOD στη δεξαμενή επαφής (mg / L)	Λόγος F/M στη δεξαμενή σταθεροποίησης (mg sCOD /mg VSS)	EPS <sub>s</sub> (mg COD/g VSS)	EPS <sub>c</sub> (mg COD/g VSS)	(EPS <sub>c</sub> - EPS <sub>s</sub> )/EPS <sub>s</sub> (%)
Αναερόβιες	Αναερόβιες	39 ± 9	0.03 ± 0.01	60 ± 4	0.08 ± 0	241 ± 2	242 ± 24	0 ± 10
Αερόβιες	Αναερόβιες	36 ± 3	0.03 ± 0	85 ± 0.4	0.24 ± 0	267 ± 1	193 ± 13	-28 ± 5.5
Αερόβιες	Αναερόβιες	34 ± 0	0.03 ± 0.01	78 ± 2	0.15 ± 0	282 ± 1	216 ± 0	-23 ± 0.1
Αερόβιες	Αναερόβιες	39 ± 9	0.01 ± 0	70 ± 0	0.1 ± 0	199 ± 17	190 ± 14	-5 ± 3
Αερόβιες	Αερόβιες	43 ± 6	0.04 ± 0	77 ± 5	0.15 ± 0	253 ± 23	292 ± 24	15 ± 6

Σημείωση: EPS<sub>c</sub> - EPS στη δεξαμενή επαφής, EPS<sub>s</sub> - EPS στη δεξαμενή σταθεροποίησης. Ο χρόνος σταθεροποίησης και ο χρόνος επαφής ήταν 1 ώρα και 5 λεπτά αντιστοίχως, οι αναερόβιες συνθήκες στη δεξαμενή επαφής διατηρήθηκαν με απομάκρυνση του αέριου αζώτου, οι αερόβιες συνθήκες στη δεξαμενή επαφής

*πραγματοποιήθηκαν με ανάμιξη της ιλύος ενώ οι αερόβιες συνθήκες στη δεξαμενή σταθεροποίησης διατηρήθηκαν με αερισμό της ιλύος.*

## **2.5 Λειτουργικές παράμετροι που επιδρούν στην απόδοση των συστημάτων υψηλής φόρτισης**

### **2.5.1 Χρόνος παραμονής στερεών (SRT)**

Η λειτουργία συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων σε χαμηλά SRTs είναι γνωστή για τη βελτίωση της συνολικής δέσμευσης του άνθρακα και της αποικοδόμησης της ιλύος (Ge et al., 2013, Meerburg et al., 2015), αλλά ο βαθμός στον οποίο η δέσμευση και η αποικοδόμηση βελτιώνονται σε όλο το εύρος των διαφόρων SRTs δεν έχει αξιολογηθεί πλήρως στα συστήματα υψηλής φόρτισης. Επιπλέον, δεν έχει αξιολογηθεί συστηματικά η ικανότητα απομάκρυνσης των θρεπτικών ουσιών (ιδιαίτερα του αζώτου) μέσω της ανάπτυξης βιομάζας η οποία θα έχει προκύψει με την λειτουργία τέτοιων συστημάτων. Η μελέτη των Huoqing Ge et al. (2017), εξετάζει λεπτομερώς αυτούς τους περιορισμούς χρησιμοποιώντας ένα σύστημα υψηλής φόρτισης σε εργαστηριακή κλίμακα για την επεξεργασία αστικών λυμάτων και προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο η δέσμευση άνθρακα, αζώτου και η αποικοδόμηση μεταβάλλονται στην περιοχή των 0,5-3 d χρόνο παραμονής στερεών.

Τα λύματα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη ήταν η εκροή ενός αντιδραστήρα βιοφίλμ που ήταν τοποθετημένος υπόγεια (υπόνομος). Αυτός ο αντιδραστήρας τροφοδοτούνταν με αστικά λύματα που συλλέγονταν σε εβδομαδιαία βάση από έναν τοπικό σταθμό άντλησης λυμάτων στο Brisbane της Αυστραλίας. Συνεπώς, τα απόβλητα του αντιδραστήρα βιοφίλμ παρουσίασαν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα ακατέργαστα λύματα, αλλά με ελαφρώς χαμηλότερο επίπεδο COD (περίπου 10% λιγότερο από τα ακατέργαστα λύματα). Διεξήχθη τακτική ανάλυση για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών και της σύστασης των λυμάτων τροφοδοσίας. Οι μέσοι όροι των 20 δειγμάτων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των 6 μηνών της μελέτης ήταν:

TCOD - 393 mg L<sup>-1</sup>

SCOD - 290 mg L<sup>-1</sup>

pH 7-7,8,

TKN- 65 mg N L<sup>-1</sup>

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 54 mgN L<sup>-1</sup>

TKP - 12 mgP L<sup>-1</sup>

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - 9 mgP L<sup>-1</sup>

Για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα υψηλής φόρτισης εργαστηριακής κλίμακας το οποίο αποτελούνταν από έναν αερόβιο αντιδραστήρα όγκου 300 ml ακολουθούμενο από ένα διαυγαστήρα (καθίζηση) διαμέτρου 20 cm και βάθους 15 cm. Το σύστημα λειτουργούσε σε δωμάτιο ελεγχόμενης θερμοκρασίας (20-22 ° C) υπό συνθήκες συνεχούς ροής. Η αναλογία της ανακυκλοφορούμενης ιλύος στο βιοαντιδραστήρα (RAS) διατηρήθηκε στο 2:1. Αυτός ο υψηλός λόγος RAS ήταν απαραίτητος για να καταστήσει τον μικρό διαυγαστήρα αποτελεσματικό. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) στον βιοαντιδραστήρα διατηρήθηκε στα 30 λεπτά, ενώ για τον χρόνο παραμονής στερεών (SRT) πραγματοποιούνταν περιοδικός έλεγχος έτσι ώστε να υπάρχει ισορροπία στα στερεά με τη συσχέτιση της λάσπης που έχανε ο βιοαντιδραστήρας λόγω ανακυκλοφορίας από την καθίζηση. Αέρας συνεχώς τροφοδοτούνταν στον βιοαντιδραστήρα και το διαλυμένο οξυγόνο (DO) κυμαινόταν μεταξύ 3-3.5 mg O<sub>2</sub>/L (Ge et al. 2017).

Το σύστημα υψηλής φόρτισης λειτούργησε για πάνω από 6 μήνες. Κατά τη διάρκεια αυτού το SRT του βιοαντιδραστήρα μεταβλήθηκε για να δημιουργηθούν διαφορετικές περιόδους λειτουργίας. Η παρατηρούμενη τιμή του SRT ήταν γενικά ελαφρώς διαφορετική από την στοχευμένη, λόγω διακυμάνσεων της συγκέντρωσης της πλεονάζουσας ιλύος και των απωλειών της εκροής, αλλά οι τιμές ήταν γενικά αντιπροσωπευτικές και θεωρήθηκαν ως πραγματικές τιμές SRT. Τα αιωρούμενα στερεά του ανάμικτου υγρού (MLSS) υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο σε 0,6 g/L, αλλά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το SRT. Η μικρότερη συγκέντρωση που μετρήθηκε ήταν 0,2 g/L σε 0,5 d SRT (0,6 g L<sup>-1</sup> σε 2 d SRT) (Ge et al., 2017).

Το ποσοστό απομάκρυνσης ολικού COD (TCOD) ήταν περίπου 62% στον βιοαντιδραστήρα υψηλής φόρτισης με 1 d SRT (Περίοδος 1) και μειώθηκε σε 54% όταν μειώθηκε ο SRT σε 0,75 d και 0,5 d (Περίοδοι 2-3). Η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του διαλυτού COD (SCOD) διατηρήθηκε περίπου στο 48% σε αυτά τα τρία SRTs, πράγμα που επιβεβαιώθηκε με την επανάληψη των συνθηκών λειτουργίας του αντιδραστήρα σε 0,5 d SRT (Περίοδος 7) και 1 d SRT (Περίοδος 4). Αυτό



υποδεικνύει ότι η μεταβολές του SRT έχουν επίδραση στην αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης διαφορετικών κλασμάτων COD (Jimenez et al., 2005), π.χ. μειώνονται οι αποδόσεις απομάκρυνσης σωματιδιακού ή και κολλοειδούς COD σε SRTs <1 d, αλλά υπάρχει περιορισμένη επίδραση στο διαλυτό κλάσμα του COD. Τα επίπεδα παραγωγής εξωκυτταρικών πολυμερών (EPS) έχουν εκτιμηθεί χαμηλότερα στα χαμηλότερα SRTs, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την βιολογική κροκίδωση που συνεισφέρει αποφασιστικά στην απομάκρυνση σωματιδιακού και κολλοειδούς COD από τα λύματα (Faust et al., 2014, Jimenez et al., 2007). Όταν το SRT ήταν ρυθμισμένο πάνω από 1 d, παρατηρήθηκε προοδευτική βελτίωση στην αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης TCO<sub>D</sub> με αύξηση του SRT, σε ποσοστά από 62% σε 1 d SRT σε 78% σε 1,5 d SRT (Περίοδος 5) και επιπλέον σε 85% 2 d SRT (Περίοδος 6). Εντούτοις, δεν υπήρξε περαιτέρω βελτίωση στα 2,5d και 3d SRTs (Περίοδοι 10-11). Αυτή η τάση ήταν επίσης εμφανής στην αύξηση της απομάκρυνσης του SCOD μεταξύ 1,5 και 3 d SRTs. Επιπρόσθετα, η τιμή του DO στο βιοαντιδραστήρα υψηλής φόρτισης μειώθηκε προσωρινά από 3-3,5 σε 1-1,5 mg O<sub>2</sub>/L στις περιόδους 8-9 (0,5d και 2d SRTs), στις οποίες, οι επιδόσεις απομάκρυνσης του COD μειώθηκαν σε σύγκριση με τις επιδόσεις που επιτεύχθηκαν στα ίδια SRTs στις περιόδους 6-7. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλότερη παραγωγή βιομάζας, σύμφωνα με μετρήσεις VSS που πραγματοποιήθηκαν με βάση άλλα αποτελέσματα, όπως η μειωμένη κροκίδωση-συσσωμάτωση λόγω της μείωσης του σχηματισμού EPS (Jimenez et al., 2007).

Η απομάκρυνση COD στον βιοαντιδραστήρα υψηλής φόρτισης επιτεύχθηκε μέσω δύο διεργασιών: (α) προσρόφηση στη βιομάζα και (β) οξείδωση. Γενικά, η προσρόφηση στη βιομάζα ήταν ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης του COD (> 70%), με ένα μικρό κλάσμα COD να οξειδώνεται, ιδιαίτερα σε <1 d SRT. Αυτή η χαμηλή απόδοση της οξείδωσης του COD υποδηλώνει ότι η απαιτούμενη ζήτηση αερισμού μπορεί να μειωθεί, γεγονός που θα μειώσει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος (Ge et al., 2017).

**Πίνακας 2.7:** Συνοπτική απόδοση του βιοαντιδραστήρα υψηλής φόρτισης σε κάθε περίοδο λειτουργίας (Ge et al. 2017)

Περίοδος λειτουργίας	SRT (d)	Απομάκρυνση TCOD (%)	Απομάκρυνση sCOD (%)	Απομάκρυνση ολικού N (%)	Απομάκρυνση NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (%)	Απομάκρυνση ολικού P (%)	Απομάκρυνση PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (%)
Περίοδος 1	1	65.3 ± 3.3	49.2 ± 4.0	31.8 ± 4.3	13.6 ± 2.3	15.3 ± 3.0	7.8 ± 2.0
Περίοδος 2	0,7	54.5 ± 2.6	48.5 ± 2.7	26.2 ± 5.1	10.5 ± 1.6	17.7 ± 2.5	5.4 ± 2.1
Περίοδος 3	0,5	52.2 ± 3.1	48.2 ± 2.4	22.3 ± 4.6	8.2 ± 2.1	15.2 ± 2.1	5.1 ± 2.3
Περίοδος 4	0,9	60.4 ± 4.2	54.8 ± 3.1	28.6 ± 3.7	12.8 ± 1.4	14.3 ± 2.6	7.1 ± 1.9
Περίοδος 5	1,5	77.8 ± 3.6	69.3 ± 4.2	35.2 ± 5.0	16.3 ± 2.0	20.6 ± 4.3	8.3 ± 3.0
Περίοδος 6	1,9	84.6 ± 3.4	80.9 ± 2.4	38.6 ± 4.8	25.4 ± 3.1	24.2 ± 6.7	10.2 ± 2.1
Περίοδος 7	0,5	50.4 ± 4.8	47.3 ± 3.8	21.5 ± 3.4	8.0 ± 1.6	14.6 ± 3.7	4.8 ± 1.8
Περίοδος 8	0,6	35.6 ± 5.	30.8 ± 4.1	14.6 ± 4.7	5.2 ± 2.1	8.1 ± 3.5	3.3 ± 1.4
Περίοδος 9	2	62.7 ± 3.1	60.7 ± 3.6	22.4 ± 3.9	15.1 ± 2.5	15.1 ± 3.2	6.3 ± 1.5
Περίοδος 10	2,4	82.8 ± 1.9	80.6 ± 2.7	42.6 ± 4.1	29.6 ± 3.0	28.3 ± 4.7	14.7 ± 2.0
Περίοδος 11	2,9	84.3 ± 3.4	81.3 ± 3.7	49.6 ± 4.8	36.5 ± 3.2	34.2 ± 4.6	18.2 ± 1.8

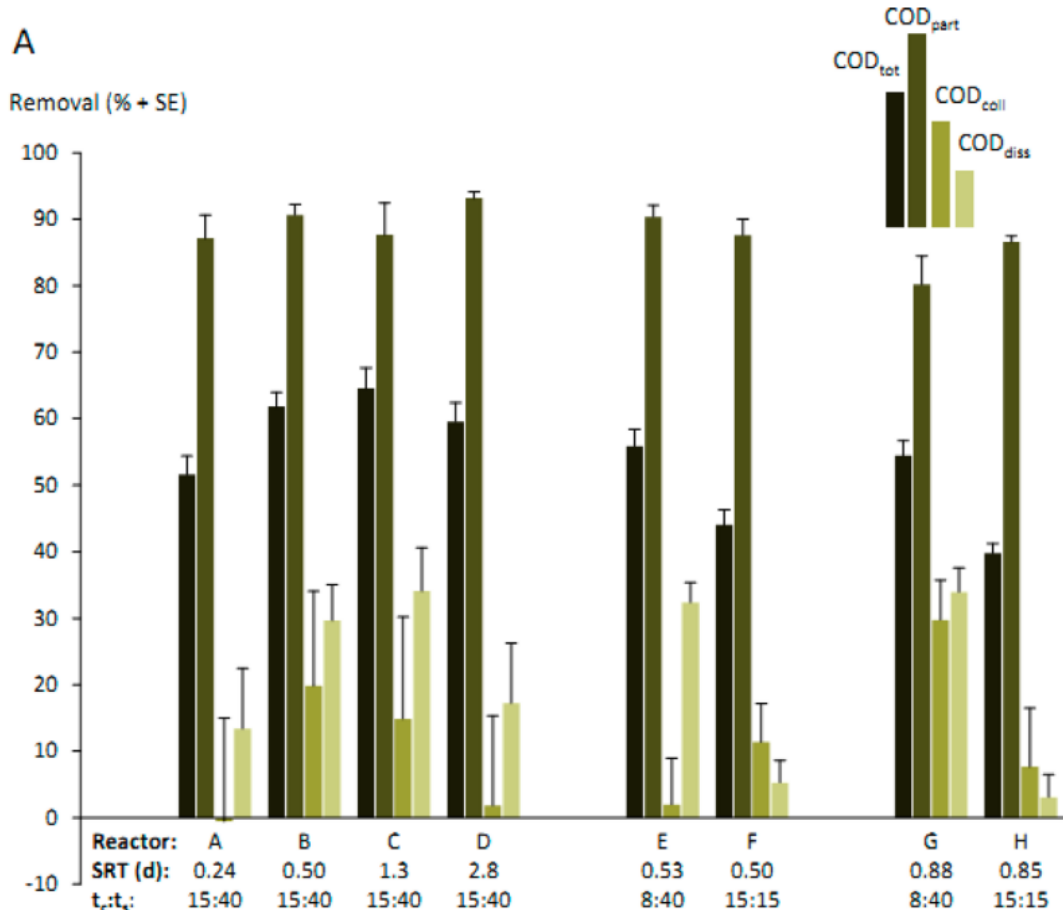
Οι A. Meerburg et al. (2016), πραγματοποίησαν μελέτη που στόχευε στην βελτιστοποίηση των χρόνων παραμονής σε σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής-σταθεροποίησης για μέγιστη ανάκτηση οργανικών ουσιών από τα λύματα. Συνολικά οκτώ αντιδραστήρες HiCS λειτούργησαν ως αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (SBR) με λειτουργικό όγκο 3 L για καθέναν από τους 8 αντιδραστήρες. Χρησιμοποιήθηκαν συνθετικά λύματα τα οποία παρασκευάστηκαν από διάφορες οργανικές ενώσεις (π.χ. οξικό οξύ, πεπτόνη, άμυλο) που έφτασαν σε συγκέντρωση τα 800 mg COD/L. Αυτή η συγκέντρωση COD, μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική για ισχυρά οικιακά ή βιομηχανικά λύματα. Εφαρμόστηκε πειραματικός σχεδιασμός για τη βελτιστοποίηση του SRT, του χρόνου επαφής (tc) και του χρόνου σταθεροποίησης (ts). Η απόρριψη ιλύος πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της φάσης επαφής. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ελεγχόμενη θερμοκρασία 15 °C (τυπική απόκλιση 1 °C) έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν τις μέσες θερμοκρασίες λυμάτων της Δυτικής Ευρώπης. Το pH ήταν μεταξύ 7,2 και 8,7.

## Απόδοση απομάκρυνσης και παραγωγή ιλύος

Με αύξηση του SRT από 0,24 σε 2,8 d (αντιδραστήρες A έως D), η συνολική απόδοση απομάκρυνσης του COD αυξήθηκε σημαντικά από 52% σε SRT 0,24 d σε 65% σε SRT 1,3 d, έπειτα ελαττώθηκε ελαφρώς στο 60% σε SRT 2,8 d. Σε SRT 0,5 ημερών, η μείωση του χρόνου επαφής ( $t_c$ ) από 15 (αντιδραστήρας B) σε 8 min (αντιδραστήρας E) δεν οδήγησε σε χαμηλότερη απομάκρυνση του ολικού COD, ενώ η μείωση του χρόνου σταθεροποίησης ( $t_s$ ) από 40 σε 15 min (αντιδραστήρας F) ελάττωσε σημαντικά το ποσοστό απομάκρυνσης στο 44%. Η ίδια τάση παρατηρήθηκε σε υψηλότερα SRTs (αντιδραστήρες C, G και H), αλλά επειδή το  $SRT_{ef}$  αυτών των αντιδραστήρων δεν ήταν ίσο με το σχεδιασμένο SRT τους (1 ημέρα), η ποσοτική σύγκριση δεν είναι αντιπροσωπευτική. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι μόνο ο χρόνος σταθεροποίησης συσχετίζεται σημαντικά με την απόδοση απομάκρυνσης του ολικού  $COD_{tot}$  και του διαλυτού  $COD_{diss}$ , με θετικό συντελεστή συσχέτισης (Meerburg, Boon, et al., 2016).

Από το ολικό COD το κλάσμα το οποίο εμφάνισε τη μεγαλύτερη απομάκρυνση ήταν αυτό του σωματιδιακού  $COD_{part}$  με ποσοστά απομάκρυνσης μεταξύ 80 και 93%, τα οποία δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ των αντιδραστήρων. Όσον αφορά την επίδραση της σχέσης SRT και χρόνου επαφής – χρόνου σταθεροποίησης ( $t_c$ -to- $t_s$ ), τα ποσοστά απομάκρυνσης του διαλυτού  $COD_{diss}$  ακολουθούσαν την ίδια τάση όπως για το ολικό  $COD_{tot}$ , δηλαδή η υψηλότερη απόδοση απομάκρυνσης  $COD_{diss}$  παρατηρήθηκε σε SRT 1,3 ημέρες (34%, αντιδραστήρας C) και η μείωση του χρόνου σταθεροποίησης ( $t_s$ ) από 40 σε 15 λεπτά μείωσε σημαντικά την απόδοση απομάκρυνσης  $COD_{diss}$  σε μόλις 5%. Οι χαμηλότερες και πιο μεταβαλλόμενες αποδόσεις απομάκρυνσης παρατηρήθηκαν για το κολλοειδές COD (Meerburg, Boon, et al., 2016).

Η παρατηρούμενη απόδοση παραγωγής ιλύος έδειξε μια τάση μείωσης με την αύξηση του SRT. Η χαμηλότερη απόδοση παρατηρήθηκε σε SRT 2,8 ημερών (αντιδραστήρας D), ο οποίος ήταν σημαντικά χαμηλότερος από τους αντιδραστήρες με χαμηλότερο SRT, όπου η παρατηρούμενη απόδοση προσέγγισε το θεωρητικό μέγιστο των 1 g  $COD_{ilύος}$ / g  $COD_{απομ.}$ . Οι μεταβολές στα  $t_c$  και  $t_s$  δεν είχαν σημαντική επίδραση στην παρατηρούμενη παραγωγή ιλύος.



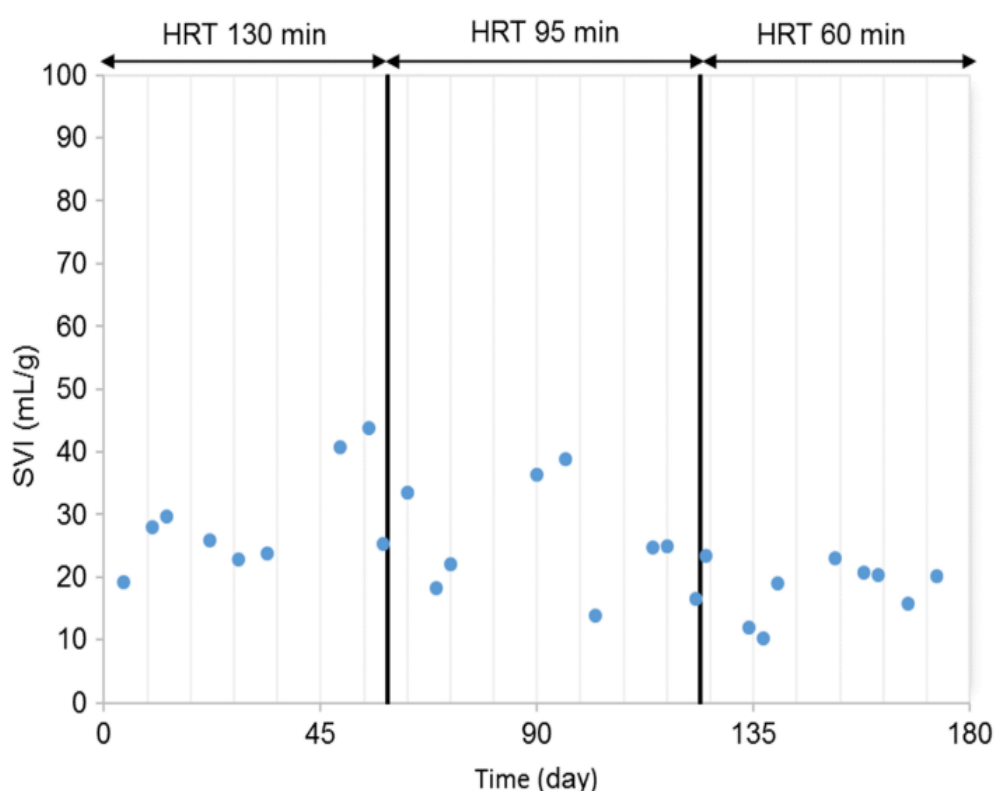
**Σχήμα 2.16:** Απόδοση απομάκρυνσης κλασμάτων COD για τους διαφορετικούς αντιδραστήρες (Meerburg, Boon, et al. 2016)

### 2.5.2 Υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT)

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) είναι μια ιδιαίτερα σημαντική λειτουργική παράμετρος των συστημάτων υψηλής φόρτισης, η οποία μελετάται και μεταβάλλεται ανάλογα με το σχεδιασμό του συστήματος, τα χαρακτηριστικά των λυμάτων και άλλες παραμέτρους, έτσι ώστε να υπάρχουν καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τους στόχους αυτών των συστημάτων που είναι κυρίως η μεγιστοποίηση της ενεργειακής εκμετάλλευσης των λυμάτων αλλά και η ελαχιστοποίηση της κοστοβόρας λειτουργίας σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα ενεργού ιλύος παρατεταμένου αερισμού.

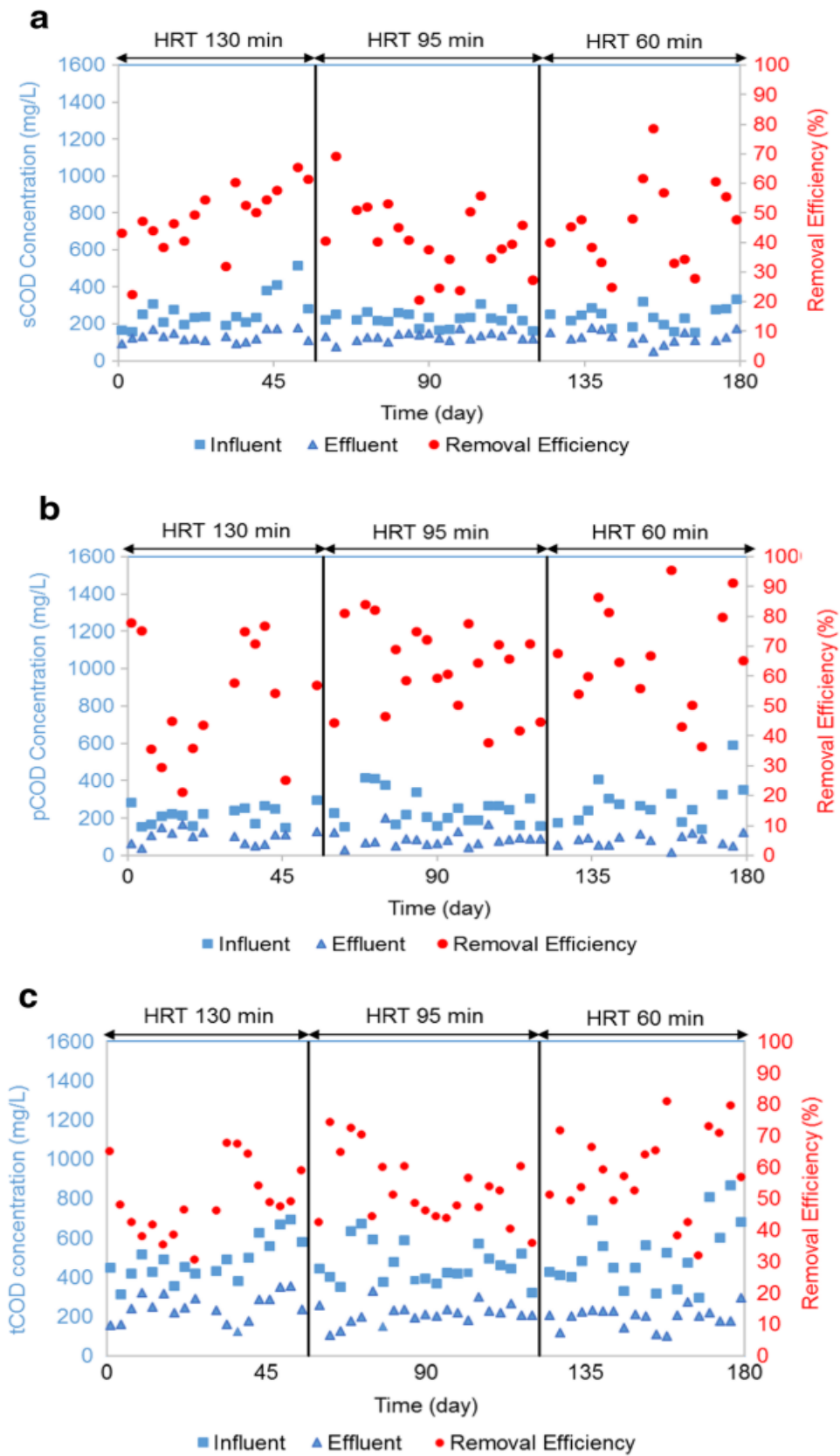
Οι H. Abbas et al. (2001), λειτούργησαν ένα σύστημα HRAS πιλοτικής κλίμακας σε τρία διαφορετικά HRTs (130, 95 και 60 min) προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή τους στις επιδόσεις επεξεργασίας. Το πιλοτικό σύστημα τροφοδοτήθηκε με

φυσικά επεξεργασμένα αστικά λύματα που λαμβάνονται από ένα σημείο εκφόρτωσης ενός θαλάμου καθαρισμού μιας εγκατάστασης επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Το SRT δεν άλλαξε σημαντικά σε αυτή τη μελέτη και ήταν περίπου 0,35 d. Μείωση του SVI παρατηρήθηκε με τη μείωση της HRT. Η μέση τιμή SVI ήταν 29 mL / g σε HRT 130 min, ενώ υπολογίστηκε σε 18 mL / g σε HRT 60 min. Το SVI της ιλύος ενός αντιδραστήρα Α-σταδίου αναφέρθηκε μεταξύ 40 και 80 mL / g (Boehnke et al., 1998). Οι μετρούμενες τιμές του δυναμικού z (z potential) ήταν μεταξύ - 15 και - 25 mV γεγονός που δείχνει ότι οι τιμές του δυναμικού z δεν επηρεάστηκαν από τις αλλαγές στο HRT (Abbas, Seif, and Moursi 2001).



**Σχήμα 2.17:** SVI της ιλύος του πιλοτικού αντιδραστήρα υψηλής φόρτισης (Abbas, Seif, and Moursi 2001)

Όσον αφορά την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μέσες αποδόσεις απομάκρυνσης του συστήματος σε tCOD ήταν 49% και 53% για HRT 130 και 95 λεπτά αντίστοιχα. Η μέγιστη απόδοση απομάκρυνσης tCOD (59%) επιτεύχθηκε στο τελικό στάδιο με HRT 60 min. Η μέση απόδοση απομάκρυνσης σε sCOD ήταν 45% καθόλη τη διάρκεια της μελέτης. Η απόδοση απομάκρυνσης pCOD αυξήθηκε από 52 σε 66% καθώς το HRT μειώθηκε από 130 σε 60 min.



**Σχήμα 2.18:** Συγκεντρώσεις α) sCOD, β) pCOD και γ) tCOD εισόδου και εξόδου και απόδοση απομάκρυνσης στα διάφορα HRT (Abbas, Seif, and Moursi 2001)

Για τα ολικά αιωρούμενα στερεά παρατηρήθηκε μείωση της συγκέντρωσης των TSS εκροής με τη μείωση του HRT, ενώ η μέση συγκέντρωση των TSS ήταν 120 mg / L στα 130 min HRT και μειώθηκε στα 90 mg / L σε HRT 60 min. Αυτή η τάση ήταν παρόμοια με τις συγκεντρώσεις του tCOD εκροής. Ως εκ τούτου, αποδείχτηκε ότι το HRT των 60 λεπτών ήταν το βέλτιστο όσον αφορά την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης COD και TSS και την λειτουργική σταθερότητα για το πιλοτικό σύστημα που μελετήθηκε (Abbas, Seif, and Moursi 2001).

Οι Zhao et al. (2000), εξέτασαν την απομάκρυνση του COD ενός συστήματος επαφής-σταθεροποίησης το οποίο λειτουργούσε σε διαφορετικά HRTs στη δεξαμενή επαφής. Παρατηρήθηκε ότι η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης sCOD ήταν σταθερή καθώς αυξήθηκαν τα HRTs. Ωστόσο, παρατηρήθηκε απότομη αύξηση στην απομάκρυνση tCOD στο HRT των 30 λεπτών. Η σταθερή απομάκρυνση sCOD και η αύξηση στο tCOD υποδεικνύουν ότι η απομάκρυνση του pCOD ενισχύθηκε μέχρι τα 30 λεπτά υδραυλικού χρόνου επαφής.

### **2.5.3 Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO)**

#### **Επίδραση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) στα συστήματα ενεργού ιλύος**

Στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ενεργού ιλύος, η ιλύς υποβάλλεται σε περιόδους όπου επικρατούν συνθήκες περιορισμού οξυγόνου ή αναερόβιες συνθήκες. Για παράδειγμα σε συνθήκες υψηλής οργανικής φόρτισης, στις δευτεροβάθμιες δεξαμενές καθίζησης ή σε εγκαταστάσεις που πραγματοποιούν βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών, υπάρχουν τμήματα των δεξαμενών αερισμού τα οποία διατηρούν ανοξικές ή αναερόβιες συνθήκες. Είναι γεγονός ότι ο περιορισμός του οξυγόνου μπορεί να προκαλέσει από-κροκίδωση στις υπάρχουσες κροκίδες της ενεργού ιλύος, πράγμα που συντελεί σε μια περισσότερο θολή εκροή λόγω της παρουσίας στερεών (Wilén & Balmer 1998). Οι Eikelboom και van Buijsen (1981) εξήγησαν το φαινόμενο αυτό με την ανάπτυξη αναερόβιων ή φαινομενικά αναερόβιων βακτηριδίων μεταξύ των κροκίδων και με την αποσύνθεση αυστηρά αερόβιων οργανισμών στις κροκίδες. Οι Starkey και Karr (1984) εξήγησαν ότι δύο μηχανισμοί θα μπορούσαν να συντελέσουν σε αυτά τα φαινόμενα: αναστολή της παραγωγής

εξωκυτταρικών πολυμερών και αναστολή ευκαρυωτικού κυτταρικού πληθυσμού. Η παρεμπόδιση της παραγωγής εξωκυτταρικών πολυμερών ενδέχεται να μειώνουν την ικανότητα προσρόφησης των κροκίδων της ενεργού ιλύος και να μειώνουν επίσης και την αντοχή τους. Έτσι λοιπόν φαίνεται πως η συγκέντρωση του DO μπορεί να επηρεάσει τη θολερότητα της εκροής με δύο τρόπους: την κακή προσρόφιση των συστατικών που υπάρχουν στα λύματα ή την αποσάθρωση των κροκίδων λόγω περιορισμού του οξυγόνου (Wilén and Balmer 1998).

Τα δεδομένα της βιβλιογραφίας είναι αντιφατικά. Για παράδειγμα έχει αναφερθεί ότι φαινόμενα αφρισμού της ιλύος λαμβάνουν χώρα υπό χαμηλή και υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (Sezgin et al., 1978, Wilén & Balmer 1999) σε χαμηλή (Martins et al., 2003) και υψηλή (Chudoba et al., 1974, Palm et al., 1980) οργανική φόρτιση ή σε συνδυασμό χαμηλής συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου και υψηλού ρυθμού οργανικής φόρτισης (Palm et al., 1980, Pernelle et al., 2001).

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες, περιορίζοντας τις συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου, ο χρόνος επαφής σε έναν αντιδραστήρα έχει εξαιρετικά ισχυρή μη γραμμική επίδραση στην καθιζηματικότητα της ιλύος (Martins et al., 2003). Μόνο ένας καλά διαμερισματοποιημένος αντιδραστήρας ή ένας αντιδραστήρας εμβολικής ροής εγγυάται κατάλληλες συνθήκες της συγκέντρωσης του υποστρώματος, ελέγχοντας με τον τρόπο αυτό την καθίζηση της ιλύος (Martins, Heijnen, and Van Loosdrecht, 2003). Στην πράξη, όμως, τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων εκτίθενται σε ιδιαίτερα δυναμικές συνθήκες, όπως σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ροής και οι ρυθμούς οργανικής φόρτισης, όπου οι κροκίδες της ενεργού ιλύος βρίσκονται σε διαφορετικές συνθήκες θρεπτικών συστατικών (π.χ. οργανικό υπόστρωμα και διαλυμένο οξυγόνο). Επιπλέον, στα συστήματα εμβολικής ροής οι αρχικοί ρυθμοί ζήτησης οξυγόνου είναι πολύ υψηλοί, καθιστώντας δύσκολο τον αερισμό. Επομένως, ένας καλά διαμερισματοποιημένος αντιδραστήρας δεν οδηγεί υποχρεωτικά σε ιλύ καλής καθίζησης (Martins et al., 2003).

### **Επίδραση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) στα συστήματα υψηλής φόρτισης**

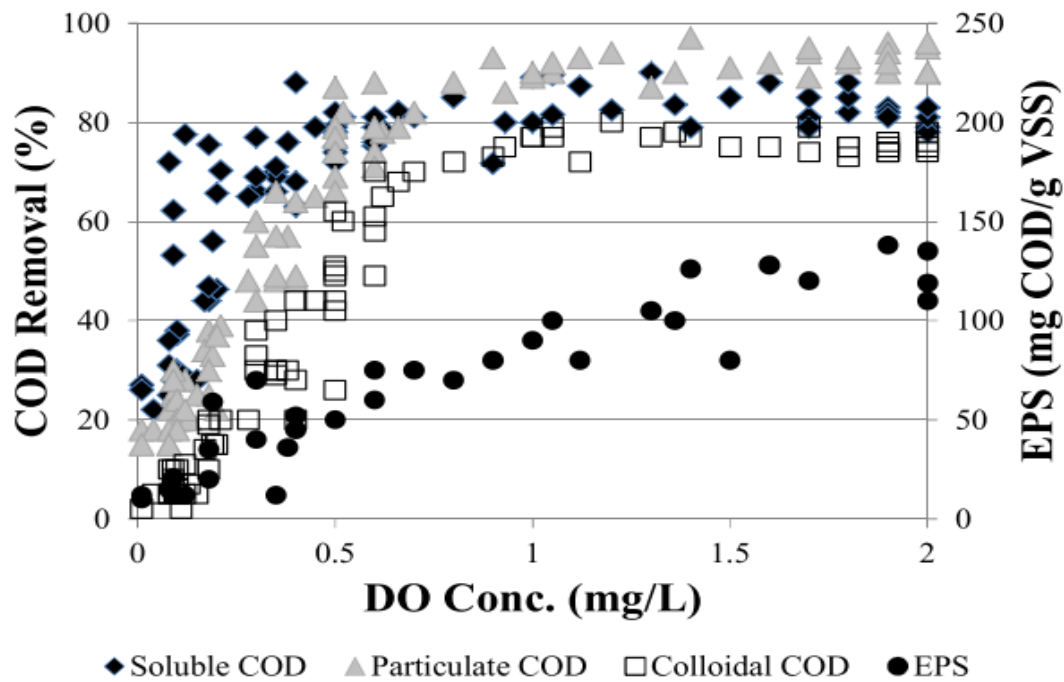
Οι J.A. Jimenez et al. (2015), μελέτησαν μια πειραματική μονάδα HRAS η οποία λειτουργούσε υπό ελεγχόμενες συνθήκες και στόχευε στη δέσμευση του σωματιδιακού, κολλοειδούς και διαλυτού COD σε ένα ρεύμα στερεών αποβλήτων



(ιλύς) με ελάχιστη εισροή ενέργειας και μεγιστοποίηση της παραγωγής λάσπης, αποθήκευσης βακτηριδίων και βιο-συσσωμάτωσης. Η επίδραση σημαντικών παραμέτρων λειτουργίας, όπως ο χρόνος παραμονής στερεών (SRT), ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) και η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) στην απόδοση του συστήματος HRAS, παρουσιάστηκαν σε πιλοτική μελέτη.

Η απόδοση του συστήματος αξιολογήθηκε σε τρεις κύριες φάσεις βασισμένες σε διαφορετικές λειτουργικές παραμέτρους. Η φάση I αντιστοιχούσε σε μεταβλητά SRT και υψηλή συγκέντρωση DO. Για να αξιολογηθεί η επίδραση του SRT στην απόδοση της μονάδας, το σύστημα λειτουργούσε σε συγκέντρωση DO πάνω από 1 mg O<sub>2</sub> / L. Η φάση II περιελάμβανε σταθερές συνθήκες SRT και μεταβλητές συνθήκες DO. Κατά τη φάση II, το αερόβιο SRT του συστήματος διατηρήθηκε σταθερό στη 1 ημέρα. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, η μέση συγκέντρωση του ανάμικτου υγρού ήταν περίπου 2600 ± 250 mg / L. Σε αυτή τη φάση, η συγκέντρωση DO κυμαινόταν από 0,1 έως 2 mg O<sub>2</sub> / L. Η φάση III συνίστατο από σταθερά SRT και DO αλλά μεταβλητή HRT. Η φάση III λειτουργούσε σε σταθερά SRT και DO αλλά μεταβλητά HRT. Η συγκέντρωση DO ήταν περίπου 1 mg O<sub>2</sub> / L (Jimenez et al., 2015).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη απόδοση απομάκρυνση sCOD επιτεύχθηκε σε DO > 0,3 mgO<sub>2</sub> / L, SRT > 0,5 d και HRT σε τουλάχιστον 15 min. Η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης sCOD μειώθηκε σημαντικά σε DO < 0,1 mgO<sub>2</sub> / L, SRT < 0,1 ημέρες και HRT < 10 min. Σε αντίθεση με την απομάκρυνση του sCOD, η επίδραση των SRT, DO και HRT στην απομάκρυνση cCOD και pCOD ήταν πιο σημαντική σε υψηλότερες συνθήκες λειτουργίας. Γενικά, η απομάκρυνση του cCOD μεγιστοποιήθηκε σε DO > 0,7 mg O<sub>2</sub> / L, SRT > 1,5 d και HRT > 45 min. Η απομάκρυνση pCOD μεγιστοποιήθηκε υπό παρόμοιες συνθήκες με το κολλοειδές κλάσμα του COD, δηλ. σε DO > 0.7 mg O<sub>2</sub> / L, SRT > 1.5 d και HRT > 30 min (Jimenez et al., 2015).



**Σχήμα 2.19:** Απόδοση απομάκρυνσης των διαφόρων κλασμάτων COD και της συγκέντρωσης των EPS του ανάμικτου υγρού ως συνάρτηση της συγκέντρωσης DO (Jimenez et al., 2015)

Οι A. Rahman et al. (2017), πραγματοποίησαν μια σειρά μελετών πιλοτικής κλίμακας για τη σύγκριση των συμβατικών συστημάτων ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης (HRAS) (αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας και πλήρους μίξης (CSTR) και αντιδραστήρας εμβολικής ροής (PFR)) με τα συστήματα επαφής- σταθεροποίησης (CS) ως προς τη δυνατότητα ανάκτησης άνθρακα από χημικά ενισχυμένα πρωτοβάθμια επεξεργασίας σε μια τοπική μονάδα επεξεργασίας λυμάτων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βελτίωση της βιο-συσσωμάτωσης σχετίζεται με τη λειτουργία της δεξαμενής επαφής σε χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) κάτω από 0,5 mg / L. Το παραπάνω συμπέρασμα προέκυψε χωρίς την κατάλληλη διερεύνηση της σύνθεσης της βιομάζας (Rahman et al., 2016). Ωστόσο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία φαίνεται ότι η λειτουργία του συστήματος σε χαμηλό DO θεωρείται ένας σημαντικός παράγοντας, που θα ευνοούσε την ανάπτυξη και την υπεροχή νηματοειδών μικροοργανισμών (Jenkins et al., 1993). Οι Palm et al. (1980) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συγκέντρωση DO πρέπει να αυξηθεί για να αποτραπεί η νηματοειδής ανάπτυξη στα συστήματα υψηλής φόρτισης, δηλ. όσο υψηλότερος είναι ο λόγος F / M, τόσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση DO που απαιτείται.

### 3. Πειραματικό μέρος και εργαστηριακές μέθοδοι

#### 3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Προκειμένου να γίνουν βήματα ως προς την ενεργειακή αξιοποίηση της επεξεργασίας των λυμάτων αλλά και την ελαχιστοποίηση ενεργοβόρων και κοστοβόρων διεργασιών, είναι απαραίτητο να μεγιστοποιήσουμε την παγίδευση του οργανικού φορτίου αυξάνοντας έτσι τη συμβολή της προσρόφησης και της ενδοκυτταρικής αποθήκευσης των συστατικών, έναντι της οξείδωσης ή άλλων εκτεταμένων διεργασιών βιοαποδόμησης. Διερευνάται η αποτελεσματικότητα των συστημάτων υψηλής φόρτισης επαφής – σταθεροποίησης (HiCS) συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα υψηλής φόρτισης (HiCAS) ως προς την ανάκτηση της χημικής ενέργειας των λυμάτων προς παραγωγή βιοαερίου. Τα συστήματα HiCS έχουν την ικανότητα να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα του υψηλού ρυθμού επιφανειακής φόρτισης στερεών (SLR) και του χαμηλού χρόνου παραμονής στερεών (SRT) (παρόμοια με τα συστήματα HiCAS) με μία ροπή προς την προσρόφηση και την ενδοκυτταρική αποθήκευση ως κύριους μηχανισμούς για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου των λυμάτων (παρόμοια με τα συστήματα CS) (Meerburg, Vlaeminck, et al. 2016).

Ένας μικρός αριθμός μελετών έχει διεξαχθεί σχετικά με διεργασίες ενεργού ιλύος που μπορούν να προσδιοριστούν ως διεργασίες HiCS (Meerburg, Vlaeminck, et al., 2016). Οι Huang και Li (2000) διαπίστωσαν ότι ένα σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής - σταθεροποίησης επιτυγχάνει ταχεία προσρόφηση οργανικού υλικού κατά τη διάρκεια της φάσης επαφής, και οι Zhao et al. (2000) συμπεράνανε ότι ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση συγκριτικά με ένα συμβατικό σύστημα HiCAS όσον αφορά την απόδοση απομάκρυνσης οργανικού φορτίου. Ωστόσο, απαιτείται συστηματική μελέτη και σύγκριση για την αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων HiCS και HiCAS όσον αφορά την ανάκτηση ενέργειας και τις προοπτικές εφαρμογής τους σε ένα ενεργειακά ουδέτερο σύστημα επεξεργασίας λυμάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε παρακολούθηση και διερεύνηση δύο πιλοτικών συστημάτων υψηλής φόρτισης και μελετήθηκε η απόδοσή τους ως προς διάφορες παραμέτρους. Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας γίνεται παρουσίαση και περιγραφή της λειτουργίας των δύο πιλοτικών συστημάτων (σύστημα

HiCAS, σύστημα HiCS), καθώς και εκτενής ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση όλων των εργαστηριακών μετρήσεων που κρίθηκαν απαραίτητες για την σωστή και ολοκληρωμένη παρακολούθησή τους.

### 3.2 Παρουσίαση των πιλοτικών συστημάτων υψηλής φόρτισης

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων υψηλής φόρτισης και η επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοσή τους. Για τον παραπάνω λόγο έχουν σχεδιαστεί και τεθεί σε λειτουργία δύο πιλοτικά συστήματα υψηλής φόρτισης. Τα πιλοτικά συστήματα βρίσκονται σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο, εντός εμπορευματοκιβωτίου (container) στο Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας.

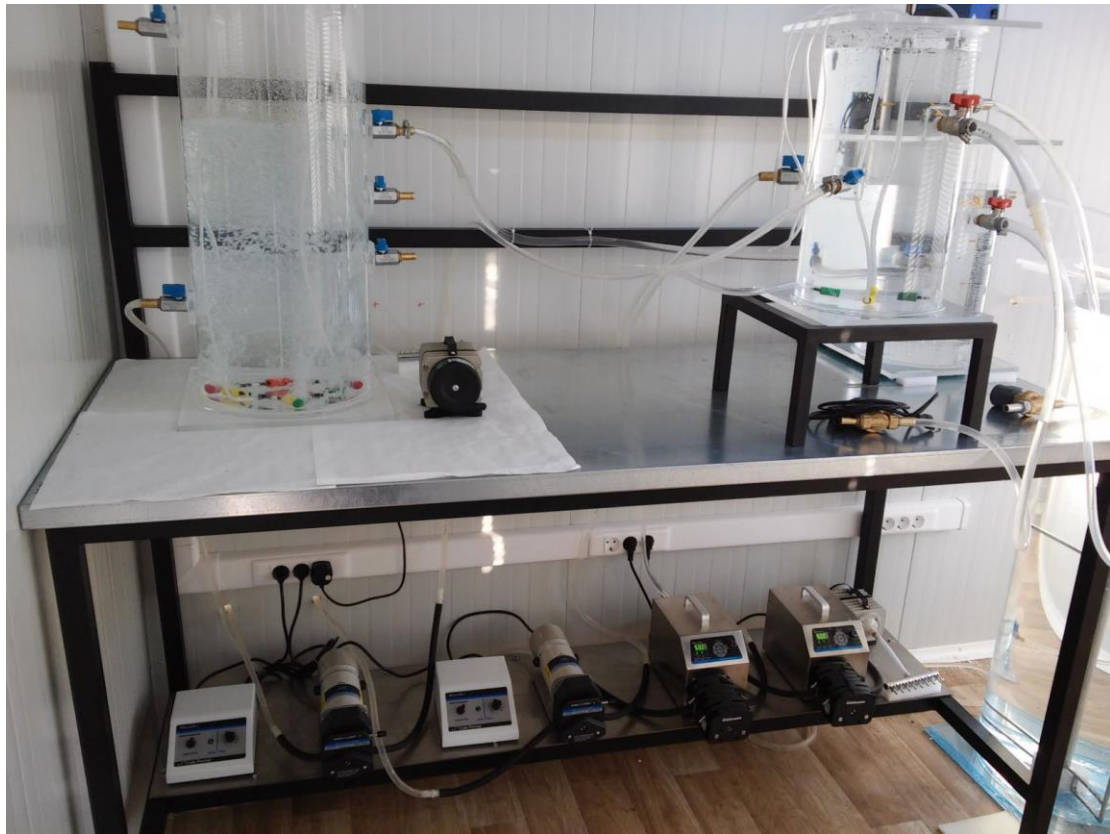
Το πρώτο σύστημα ονομάζεται συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης (HiCAS), περιλαμβάνει μία δεξαμενή επαφής (contact tank) όπου εκεί συντελούνται όλες οι βιολογικές διεργασίες και μια δεξαμενή τελικής καθίζησης για τον διαχωρισμό των επεξεργασμένων λυμάτων από το ανάμεικτο υγρό. Στην δεξαμενή επαφής, βιομάζα που επανακυκλοφορείται από τον πυθμένα της δεξαμενής καθίζησης αναμιγνύεται με φρέσκα λύματα υπό αερόβιες συνθήκες. Ο όγκος της δεξαμενής επαφής είναι 15 L και της ΔTK 130 L περίπου.

Το δεύτερο σύστημα ονομάζεται σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής-σταθεροποίησης (HiCS) και αποτελεί ουσιαστικά παραλλαγή του πρώτου συστήματος. Τόσο το πρώτο όσο και το δεύτερο σύστημα έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, όσον αφορά τη λειτουργία τους αλλά και τους στόχους για τους οποίους σχεδιάζονται. Τα εισερχόμενα λύματα στο σύστημα HiCS έρχονται σε επαφή με την βιομάζα στην δεξαμενή επαφής (contact tank) όμοια με αυτήν του HiCAS και από εκεί μεταφέρονται στην δεξαμενή καθίζησης. Η διαφοροποίηση από το προηγούμενο σύστημα (HiCAS) είναι ότι η ανακυκλοφορούμενη ιλύς από τον πυθμένα της ΔTK διέρχεται πρώτα από μια δεξαμενή σταθεροποίησης (stabilization tank) όγκου 24 L, υπό αερόβιες συνθήκες ώστε να αυξηθεί η ικανότητα της για απομάκρυνση οργανικού φορτίου στην δεξαμενή επαφής. Ο αερισμός της βιομάζας στη δεξαμενή σταθεροποίησης επιτρέπει την οξείδωση του ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου

κλάσματος του COD και ενός μέρους του προσροφημένου σωματιδιακού και κολλοειδούς COD που υδρολύεται, δημιουργώντας έτσι ελεύθερες περιοχές στην επιφάνεια των κροκίδων και κενό χώρο για ενδοκυτταρική αποθήκευση. Οι όγκοι της δεξαμενής επαφής και ΔTK είναι όμοιοι με το σύστημα HiCAS. Η δεξαμενή σταθεροποίησης έχει σχεδιαστεί με δυνατότητα μεταβολής του ωφέλιμου όγκου μιας και η εύρεση του βέλτιστου χρόνου σταθεροποίησης της ιλύος αποτελεί στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



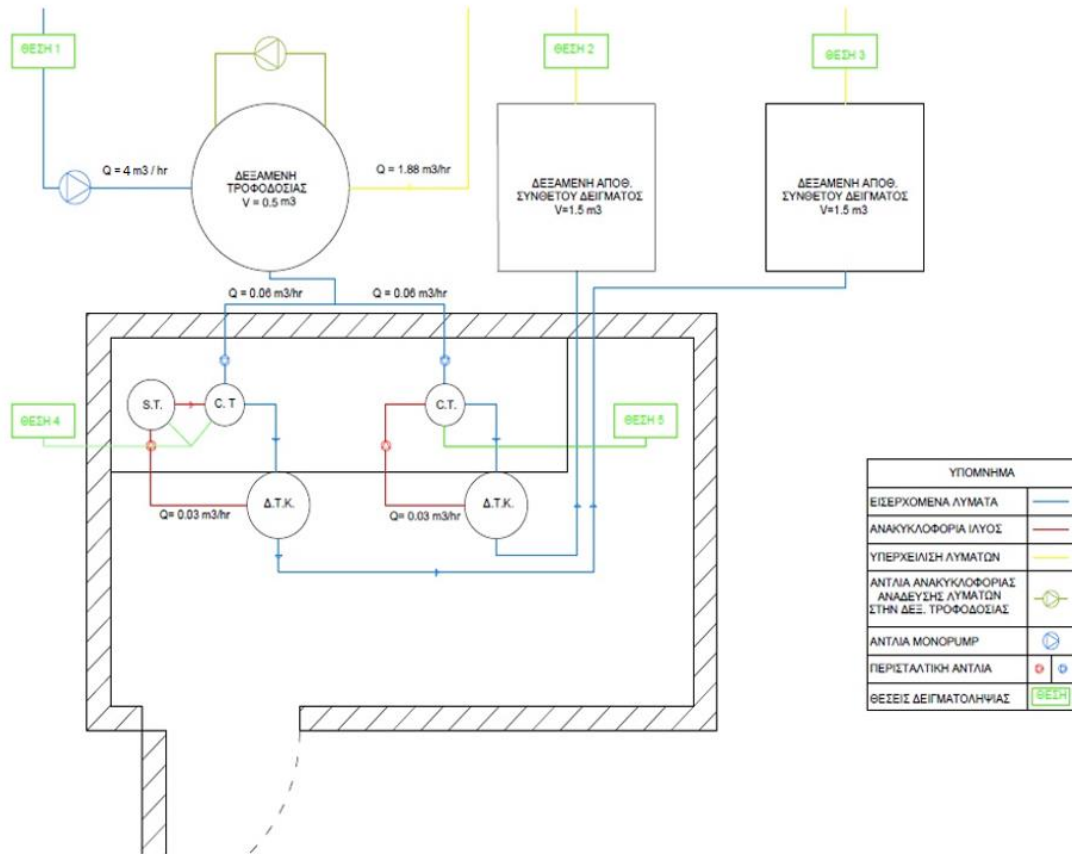
**Εικόνα 3.1:** Δεξαμενή επαφής HiCS (αριστερά) και Δεξαμενές Τελικής Καθίζησης (δεξιά) των δύο πιλοτικών συστημάτων – Αρχική τροφοδότηση με νερό



**Εικόνα 3.2:** Δεξαμενή σταθεροποίησης HiCS (αριστερά) και Δεξαμενή Επαφής HiCAS (δεξιά) – Αρχική τροφοδότηση με νερό

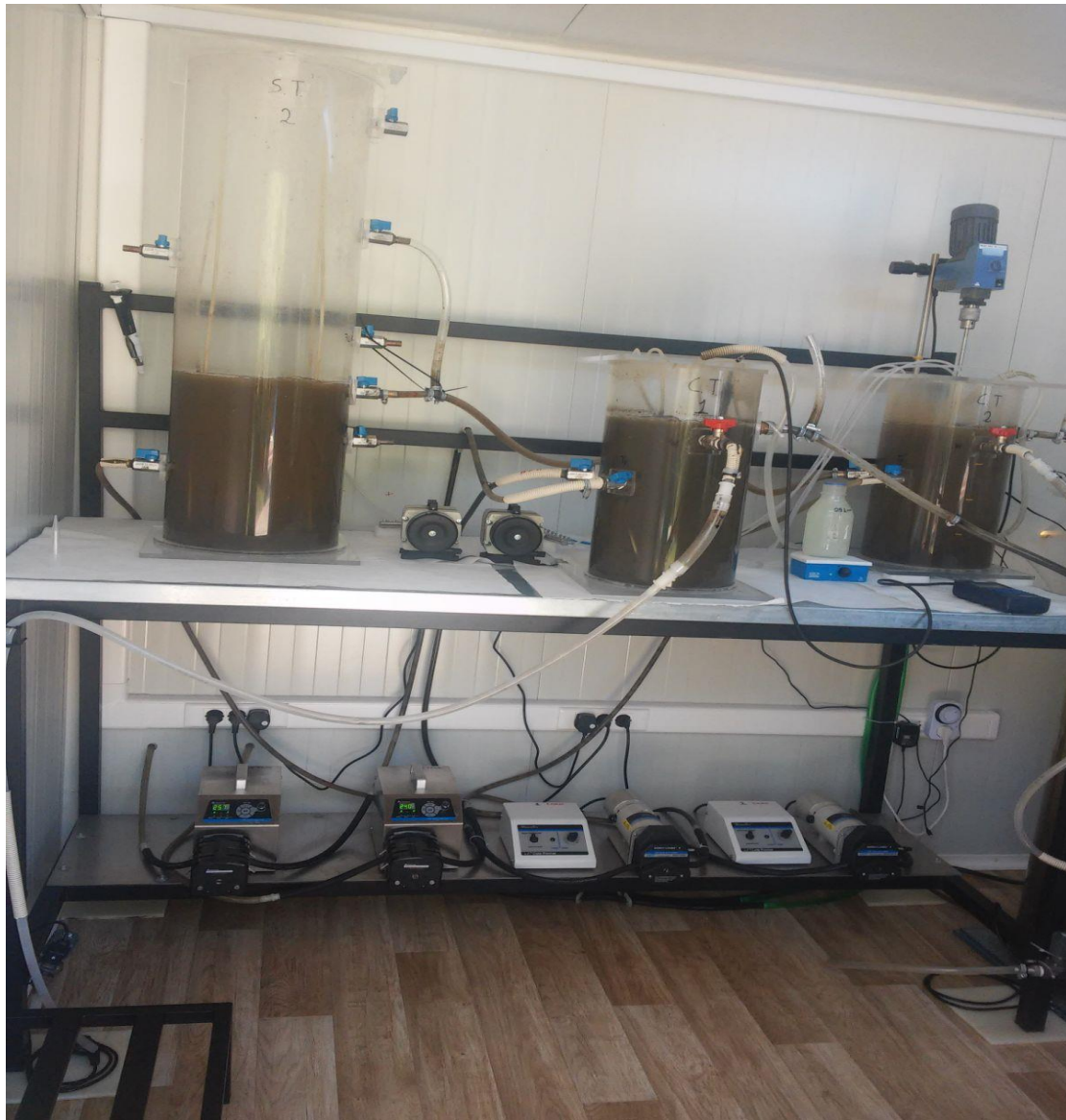
Τα λύματα από το κανάλι προσαγωγής του ΚΕΛ Ψυττάλειας μεταφέρονται μέσω αντλίας πορομπρ σε δεξαμενή τροφοδοσίας των συστημάτων. Η παροχή της αντλίας στη δεξαμενή είναι  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  και ο ωφέλιμος όγκος της  $0.5 \text{ m}^3$ . Οι συγκεκριμένες παράμετροι που έχουν επιλεγεί εξασφαλίζουν υδραυλικό χρόνο παραμονής  $\text{HRT} = 7.5 \text{ min}$  έτσι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα καθίζησης στερεών εντός της δεξαμενής. Τα λύματα από την δεξαμενή τροφοδοσίας, μέσω κατάλληλης διάταξης υπερχειλίζουν πίσω στο κανάλι προσαγωγής του ΚΕΛΨ. Δύο περισταλτικές αντλίες, εργαστηριακής κλίμακας μεταβαλλόμενης παροχής, χρησιμοποιούνται για την μεταφορά των λυμάτων από την δεξαμενή τροφοδοσίας στα δύο συστήματα. Οι περισταλτικές αντλίες έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να μπορούν να καλύψουν όλο το εύρος παροχών εισόδου που θα εξεταστούν.





**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα ροής πιλοτικών συστημάτων HIRAS

Σε κάθε δεξαμενή καθίζησης έχει τοποθετηθεί κατάλληλα διαμορφωμένος άξονας με σκοπό την μεταφορά της συμπυκνωμένης ιλύος από τον πυθμένα των δεξαμενών προς τα επιστόμια επανακυκλοφορίας. Η κίνηση του άξονα γίνεται μέσω ηλεκτρικού μοτέρ με ταχύτητα περιστροφής 1.8 rpm. Ανά τέσσερις ώρες λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων πραγματοποιείται διακοπή της παροχής ρεύματος μέσω χρονοδιακόπτη για διάστημα μισής ώρας έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η επαρκής ανάπαυση τους.



**Εικόνα 3.3:** Δεξαμενή σταθεροποίησης HiCS (αριστερά) και Δεξαμενές Επαφής HiCAS και HiCS (δεξιά) – Λειτουργία με λύματα

Η λειτουργία των δύο συστημάτων ξεκίνησε δοκιμαστικά στις 30/06/2018 για μία εβδομάδα. Κατά την δοκιμαστική λειτουργία τα συστήματα τροφοδοτήθηκαν με νερό σε όλα τα εύρη παροχών εισόδου και επανακυκλοφορίας που θα εξεταστούν ώστε να ελεγχθεί η υδραυλική συμπεριφορά τους. Ημερομηνία έναρξης της κανονικής λειτουργίας με λύματα ήταν η 06/07/2018. Από τότε τα συστήματα τροφοδοτούνται συνεχώς χωρίς κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα κατά την λειτουργίας τους. Όποια προβλήματα εμφράξεων συνέβησαν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των πιλοτικών συστημάτων αντιμετωπίστηκαν άμεσα και αποτελεσματικά χωρίς να προκαλέσουν ιδιαίτερο πρόβλημα στις συνθήκες λειτουργίας. Η παρακολούθηση γινόταν



καθημερινά και περιελάμβανε εργασίες συντήρησης, καθαρισμού και μέτρα αποτροπής πιθανών εμφράξεων των αγωγών μεταφοράς λυμάτων.



**Εικόνα 3.4:** Δεξαμενές Τελικής Καθίζησης HiCAS (αριστερά) και HiCS (δεξιά) – Λειτουργία με λύματα



**Εικόνα 3.5:** Διάταξη των δεξαμενών των δύο πιλοτικών συστημάτων HiCAS και HiCS – Λειτουργία με λύματα

### **3.3 Λειτουργικές παράμετροι των πιλοτικών συστημάτων κατά τις τέσσερις περιόδους λειτουργίας**

Κατά την παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η απόδοση των πιλοτικών συστημάτων υψηλής φόρτισης και πως διάφορες λειτουργικές παράμετροι επιδρούν σε αυτήν, σε τέσσερις περιόδους (κύκλους) λειτουργίας. Οι χρονικές περίοδοι των τεσσάρων κύκλων λειτουργίας καθώς και οι λειτουργικές τους παράμετροι παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

**Πίνακας 3.1:** Ημερομηνία έναρξης – λήξης, καθώς και χρονική διάρκεια του κάθε κύκλου λειτουργίας

	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
Ημερομηνία έναρξης	6/7/2018	28/10/2018	28/12/2018	7/4/2019
Ημερομηνία λήξης	26/10/2018	27/12/2018	28/3/2019	21/6/2019
Χρονική διάρκεια (d)	113	60	90	75

**Πίνακας 3.2:** Λειτουργικές παράμετροι των πιλοτικών συστημάτων κατά τις τέσσερις περιόδους λειτουργίας

Παράμετρος	Κύκλος 1		Κύκλος 2		Κύκλος 3		Κύκλος 4	
	HiCAS-1	HiCS-1	HiCAS-2	HiCS-2	HiCAS-3	HiCS-3	HiCAS-4	HiCS-4
<b>Q (L / d)</b>	180	180	360	360	360	360	720	720
<b>DO (mg / L)</b>	> 2	> 2	> 2	> 2	> 2	> 2	> 1	> 1
<b>T (°C)</b>	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2
<b>r (%)</b>	100	150	100	150	100	150	100	150
<b>HRT (h)</b>	2	2/2*	1	1/1*	1	1/1*	0,5	0,5/0,5*
<b>SRT (d)</b>	2	2	2	2	1	1	1	1
<b>OLR (kg COD / kg VSS * d)</b>	1,51	3,4/1,6*	2,5	4,5/0,95*	3,3	6,6/1,64*	3,65	8,86/3,07*
<b>SAS (L / d)</b>	6,6 ± 1,2	20 ± 3	3,2 ± 1,8	23 ± 2	9,7 ± 1,7	42,4 ± 7	3,5 ± 2	32 ± 4,5

\*Δεξαμενή επαφής (contact tank) / Δεξαμενή σταθεροποίησης (stabilization tank)

### 3.4 Δειγματοληψίες πιλοτικών συστημάτων και εργαστηριακές αναλύσεις

Η δειγματοληψία γινόταν κάθε πρωί και ακολουθούσε προετοιμασία των δειγμάτων για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών αναλύσεων. Δείγματα λαμβάνονταν από τις θέσεις 2,3 για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της τελικής εξόδου και από τις θέσεις 4,5 για τον προσδιορισμό των αιωρούμενων στερεών στους αντιδραστήρες. Ο χαρακτηρισμός των λυμάτων εισόδου έγινε σε 14 δείγματα το διάστημα από 08/05/18 έως 06/06/18. Από τον παραπάνω χαρακτηρισμό προέκυψαν τα επιμέρους κλάσματα του COD εισόδου και εκφράστηκαν ως ποσοστά επί τοις εκατό του ολικού COD. Η διακύμανση των τιμών των επιμέρους κλασμάτων στα 14 δείγματα που ελέγχθηκαν είναι πολύ μικρή και συνεπώς θεωρήθηκε ότι τα ποσοστά που εκτιμήθηκαν είναι αντιπροσωπευτικά των κλασμάτων του οργανικού φορτίου εισόδου. Στην θέση δειγματοληψίας 1 γινόταν ορισμένες φορές προσδιορισμός της παραμέτρου του ολικού COD εισόδου. Συχνότερα, για λόγους ευκολίας, χρησιμοποιούνταν η

αντίστοιχη τιμή που μετρούνταν από εργαστήριο της κοινοπραξίας που λειτουργεί το ΚΕΛΨ. Στο κανάλι προσαγωγής λυμάτων, στο ύψος που έχουν εγκατασταθεί τα δύο πιλοτικά συστήματα υπάρχει αυτόματος δειγματολήπτης που εξυπηρετεί τις ανάγκες της εγκατάστασης. Από την παραπάνω τιμή και βάσει των ποσοστών που προέκυψαν από τον χαρακτηρισμό, εκτιμώνται οι συγκεντρώσεις των επιμέρους κλασμάτων του οργανικού φορτίου εισόδου του συστήματος. Χαρακτηρισμός γίνεται και στα σύνθετα δείγματα εξόδου και από την διαφορά τους με τα αντίστοιχα δείγματα εισόδου προκύπτουν οι βαθμοί απόδοσης. Αναλυτικά αποτελέσματα από τον χαρακτηρισμό των προ-επεξεργασμένων λυμάτων παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

### **3.4.1 Προσδιορισμός ολικών αιωρούμενων (TSS) και πτητικών στερεών (VSS)**

Η διαδικασία προσδιορισμού των ολικών αιωρούμενων στερεών και των πτητικών στερεών περιλαμβάνει τα στάδια της διήθησης του δείγματος, της εξάτμισης, της καύσης και της ζύγισης.

Το στάδιο της διήθησης πραγματοποιείται με χρήση στρωματικών φίλτρων GF/C της Whatman με μέγεθος πόρων 1,2 μm, κατάλληλα προετοιμασμένων για την εν λόγω διαδικασία. Το φίλτρο αρχικά τοποθετείται σε φούρνο θερμοκρασίας 550 °C για 20 λεπτά περίπου έτσι ώστε να απομακρυνθεί πιθανή υγρασία και τυχόν πτητικές ενώσεις. Στη συνέχεια τοποθετείται σε αφυγραντήρα για χρονικό διάστημα περίπου 20 λεπτών ώστε να επανέλθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και τέλος ζυγίζεται και καταγράφεται το αρχικό βάρος του. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της ξήρανσης και της ζύγισης του, το φίλτρο τοποθετείται σε συσκευή διήθησης. Με το εφαρμοζόμενο κενό αέρος από τη συσκευή, δείγμα γνωστού όγκου -ύστερα από καλή ανάδευση- διέρχεται από το φίλτρο. Ο όγκος του δείγματος που επιλέγεται, εξαρτάται από την συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών στο δείγμα. Για τον προσδιορισμό των TSS και VSS του ανάμεικτου υγρού των πιλοτικών συστημάτων (contact tank HiCAS, contact tank HiCS και stabilization tank HiCS) ο όγκος του υγρού που επιλεγόταν προς διήθηση ήταν περίπου 4-5 ml ενώ για τον προσδιορισμό των στερεών της εξόδου των πιλοτικών συστημάτων επιλεγόταν όγκος υγρού με βάση τη θολότητα και την εκτίμηση που υπήρχε για κάθε κύκλο λειτουργίας και κυμαινόταν από 30 (υψηλή θολότητα) μέχρι και 100 ml.

Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της διήθησης το φίλτρο τοποθετείται σε φούρνο θερμοκρασίας 103 έως 105 °C για μία ώρα έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ξήρανση του. Μετά το πέρας της μίας ώρας τοποθετείται ξανά στον αφυγραντήρα για μερικά λεπτά ώστε να κρυώσει και τέλος το φίλτρο ζυγίζεται.

Ο προσδιορισμός των ολικών αιωρούμενων στερεών προκύπτει μέσω της σχέσης:

$$MLSS \text{ ή } TSS = \frac{(M_2 - M_1)}{V_{\text{δείγματος}}} \times 10^6 \left( \frac{mg}{L} \right)$$

όπου:

$M_1$  : Μάζα καθαρού φίλτρου (gr)

$M_2$  : Μάζα φίλτρου μετά τη διήθηση και την ξήρανση στους 103 °C (gr)

$V$  : Όγκος δείγματος που διηθήθηκε (mL)

Αφού ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός των TSS ακολουθεί το στάδιο της καύσης ώστε να υπολογιστούν και τα πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS). Το φίλτρο τοποθετείται σε κλίβανο θερμοκρασίας 550 °C για 15 λεπτά και έπειτα στον αφυγραντήρα για τουλάχιστον 20 λεπτά ώστε να κρυώσει. Τέλος ζυγίζεται και καταγράφεται το βάρος του.

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης των πτητικών αιωρούμενων στερεών VSS γίνεται μέσω της σχέσης:

$$MLVSS \text{ ή } VSS = \frac{(M_2 - M_3)}{V_{\text{δείγματος}}} \times 10^6 \left( \frac{mg}{L} \right)$$

όπου:

$M_3$  : Μάζα του φίλτρου μετά τους 550 °C (gr)

### 3.4.2 Προσδιορισμός του ολικού και διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)

Το COD αποτελεί το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο για την οξειδωση οργανικών και ανόργανων ενώσεων ενός δείγματος. Μέσω της μέτρησής του δύναται να προσδιοριστεί το οργανικό φορτίο των λυμάτων είτε αυτό είναι βιοαποικοδομήσιμο είτε όχι. Η μέθοδος στηρίζεται στην οξειδωση των οργανικών ενώσεων σε CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub><sup>+1</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-3</sup> και του διχρωμικού ανιόντος (Cr<sup>+6</sup>) σε χρωμικό (Cr<sup>+3</sup>). Για την πραγματοποίηση της διεργασίας απαιτείται όξινο περιβάλλον με προσθήκη 50%

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, παρουσία καταλύτη Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, καθώς και χώνευση σε θερμοκρασία 150 °C για 2 ώρες.

Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν:

- Έτοιμα αντιδραστήρια COD της εταιρίας HACH με εύρος τιμών 15-150 mg L<sup>-1</sup> και 150-1000 mg L<sup>-1</sup>
- Συσκευή χώνευσης της εταιρίας HACH
- Φασματοφωτόμετρο ορατού φωτός τύπου LANGE DR/2800 της εταιρείας HACH
- Συσκευή διήθησης για τον προσδιορισμό του διαλυτού COD
- Μembrάνες Whatman με μέγεθος πόρων 0,45 μm για τον προσδιορισμό του διαλυτού COD

Η διαδικασία σύμφωνα με τη μέθοδο APHA 5220 D:2012 περιλαμβάνει την τοποθέτηση 2 ml δείγματος στα φιαλίδια με τα έτοιμα αντιδραστήρια για τον προσδιορισμό της παραμέτρου COD. Στη συνέχεια αφού ανακινηθούν τα φιαλίδια οδηγούνται σε συσκευή χώνευσης, όπου παραμένουν για 2 ώρες στους 150 °C. Μετά το πέρας της χώνευσης και αφού τα φιαλίδια αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος τοποθετούνται σε φασματοφωτόμετρο, το οποίο αποδίδει τις συγκεντρώσεις κάθε δείγματος σε mg/L. Η παρουσία χλωριόντων προκαλεί παρεμβολή στη μέθοδο αυξάνοντας πλασματικά την μετρούμενη τιμή του COD.

#### **3.4.2.1 Μέθοδος χαρακτηρισμού κλασμάτων COD (σωματιδιακό, κolloειδές και διαλυτό COD)**

Για τον προσδιορισμό των επιμέρους κλασμάτων του οργανικού φορτίου τόσο στα εισερχόμενα λύματα αλλά και στα δείγματα εξόδου των δύο συστημάτων, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός μεθόδων διήθησης και κροκίδωσης με χρήση θειούχου ψευδαργύρου ως κροκιδωτικό.

Η μέθοδος της κροκίδωσης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πραγματικά διαλυτού κλάσματος του COD. Η πιο συνήθης εφαρμοσμένη πρακτική περιλαμβάνει την διήθηση δείγματος μέσω μεμβράνης μεγέθους πόρων 0,45 μm.

Θεωρείται ότι στο διήθημα που προκύπτει το COD που υπολογίζεται πειραματικά αντιπροσωπεύει το διαλυτό COD του εξεταζόμενου δείγματος. Στην πραγματικότητα όμως, μικρού μοριακού βάρους ενώσεις που ανήκουν στην κατηγορία των κολλοειδών (μικρο-κολλοειδή) διέρχονται μέσω της μεμβράνης διήθησης και αλλοιώνουν προς τα πάνω την προσδιοριζόμενη τιμή. Το παραπάνω φαινόμενο αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν τα αποτελέσματα του διαλυτού COD πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κάποιο μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης όπου εκεί απαιτείται μια πιο ακριβής διαδικασία υπολογισμού του συγκριμένου κλάσματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την μέτρηση του πραγματικά διαλυτού COD χρησιμοποιήθηκε μέθοδος κροκίδωσης που βασίζεται στη λογική ότι ύστερα από διήθηση ενός δείγματος στο οποίο έχει γίνει αρχικά κροκίδωση με θειούχο ψευδάργυρο σε pH 10,5 θα προκύψει διήθημα που περιέχει μόνο το πραγματικά διαλυτό COD, δηλαδή μικρού μοριακού βάρους οργανικές ενώσεις όπως τα πτητικά λιπαρά οξέα και κάποιες λίγο πιο σύνθετες που μπορούν να εισέλθουν άμεσα στο κύτταρο χωρίς να απαιτείται πρότερη υδρόλυση τους. Επισημαίνεται ότι, στο κλάσμα που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία περιλαμβάνεται και το αδρανές διαλυτό COD και θα πρέπει να αφαιρεθεί ώστε να εκτιμηθεί με ακρίβεια το διαλυτό μέρος που μπορεί να καταναλωθεί άμεσα από τους μικροοργανισμούς.

Αναλυτικότερα, η διαδικασία περιλαμβάνει τα κάτωθι βήματα:

- Αρχικά σε 100 mL εξεταζόμενου δείγματος προστίθεται 1 mL διαλύματος θειούχου ψευδαργύρου ( $ZnSO_4$ ) συγκέντρωσης 100 g / L
- Ακολουθεί έντονη ανάδευση του μείγματος σε μαγνητικό αναδευτήρα για περίπου 1 λεπτό.
- Στη συνέχεια το pH του δείγματος ρυθμίζεται στην τιμή 10.5 με χρήση διαλύματος καυστικού νατρίου (NaOH) 6 M
- Η λειτουργία του αναδευτήρα διακόπτεται και το δείγμα αφήνεται να καθιζάνει για μερικά λεπτά
- Από το διαυγασμένο υπερκείμενο υγρό λαμβάνονται 20-30 mL τα οποία στη συνέχεια διηθούνται μέσω μεμβράνης 0.45  $\mu m$

Το COD που προκύπτει στο διηθημένο δείγμα περιλαμβάνει το πραγματικά διαλυτό κλάσμα και το διαλυτό αδρανές όπως αναλύθηκε νωρίτερα.

Τέλος να αναφερθεί ότι κατά τον χαρακτηρισμό των λυμάτων εισόδου έγινε σύγκριση της τιμής του COD ύστερα από την παραπάνω διαδικασία με την τιμή που προκύπτει από απευθείας διήθηση δείγματος σε μεμβράνη 0,45 μm. Παρατηρήθηκε απόκλιση των τιμών της τάξης των 20-30 mg/L κάτι που επιβεβαιώνει ότι στο απευθείας διήθημα περιέχονται οργανικές ενώσεις της κατηγορίας των μικρο-κολλοειδών.

Για τον προσδιορισμό του σωματιδιακού κλάσματος δείγμα κατάλληλου όγκου διηθούνταν από φίλτρο whatman 1,2 μm. Η διαφορά της τιμής του ολικού COD πριν και μετά την διήθηση αποτελεί το σωματιδιακό κλάσμα του οργανικού φορτίου. Αφαίρεση της τιμής που προκύπτει από την διαδικασία κροκίδωσης από την τιμή του COD στο διήθημα των 1,2 μm δίνει την τιμή του κολλοειδούς κλάσματος.

#### **3.4.2.2 Προσδιορισμός αδρανούς διαλυτού COD λυμάτων εισόδου**

Για τον προσδιορισμό του αδρανούς διαλυτού COD των εισερχόμενων λυμάτων πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων παράλληλα με την διαδικασία χαρακτηρισμού τους. Κατάλληλος όγκος δείγματος αφήνόταν σε αερισμό για 24 ώρες μαζί με σταθεροποιημένη βιομάζα. Το διαλυτό COD της σταθεροποιημένης βιομάζας είχε προσδιοριστεί πριν την έναρξη του πειράματος. Μετά από 24 ώρες αερισμού το μείγμα λυμάτων βιομάζας αφήνόταν σε καθίζηση για τουλάχιστον μισή ώρα. Στο υπερκείμενο υγρό, ύστερα από διήθηση διαμέσου μεμβράνης 0.45 μm μέγεθος πόρων, γινόταν προσδιορισμός του COD το οποίο θεωρήθηκε ότι αποτελεί το διαλυτό αδρανές κλάσμα. Από το προηγούμενο αποτέλεσμα, εκφρασμένο σε όρους μάζας, γινόταν αφαίρεση της τιμής που είχε υπολογιστεί για την σταθεροποιημένη βιομάζα πριν την προσθήκη λυμάτων. Στη συνέχεια, διαιρώντας την παραπάνω διαφορά με τον όγκο των λυμάτων που προστέθηκαν στον αντιδραστήρα προκύπτει η τιμή του αδρανούς διαλυτού COD των λυμάτων εισόδου

Η σχέση υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκε έχει ως εξής:



$$\begin{aligned} \text{Μάζα}_{COD \text{ αδρανούς λυμάτων}} \\ = \text{Μάζα}_{COD \text{ αδρανούς αντιδραστήρα}} - \text{Μάζα}_{COD \text{ αδρανούς ιλύος}} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Μάζα}_{COD \text{ αδρανούς λυμάτων}} &= V_{\text{αντιδραστήρα}}(Lt) \\ &\times C_{COD \text{ αδρανούς αντιδραστήρα}} \left( \frac{mg}{Lt} \right) \\ &- V_{\text{ιλύος}}(Lt) \times C_{COD \text{ αδρανούς ιλύος}} \left( \frac{mg}{Lt} \right) \end{aligned}$$

### 3.4.3 Προσδιορισμός βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD)

Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD) εκφράζει την απαίτηση σε mg/l οξυγόνου για την αποδόμηση των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στα λύματα από μικροοργανισμούς. Το BOD δεν χαρακτηρίζει το σύνολο των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στα λύματα αλλά μόνο το ποσοστό αυτών που είναι δυνατόν να βιοαποικοδομηθούν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Το σύνολο των βιοχημικών αντιδράσεων που καταναλώνουν οξυγόνο κατά την αερόβια πλήρη διάσπαση της οργανικής ύλης από αερόβιους μικροοργανισμούς (μ/ο) μπορεί να απεικονισθεί από την κάτωθι γενικευμένη αντίδραση:



Το πείραμα εκτελούνταν σε σταθερές συνθήκες (θερμοκρασία ίση με 20°C, pH = 7.2). Θεωρητικά απαιτείται ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα για την πλήρη οξείδωση όλης της βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης. Πρακτικά όμως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το πείραμα ολοκληρώνεται εντός 20 ημερών. Έχει βρεθεί εμπειρικά ότι ένα σημαντικό ποσοστό της βιοχημικής απαίτησης οξυγόνου ικανοποιείται εντός 5 ημερών. Για το λόγο αυτό έχει συμφωνηθεί να μετριέται η ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώνεται εντός 5 ημερών (BOD<sub>5</sub>). Στη περίπτωση αστικών λυμάτων το BOD<sub>5</sub> είναι περίπου το 60 – 80% του ολικού BOD. Καθώς η ανάλυση αποσκοπεί στην μέτρηση όλης της βιοδιασπάσιμης οργανικής ύλης όλοι οι άλλοι παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν στο ρυθμό (πχ διαλυμένο οξυγόνο, θρεπτικά, ιχνοστοιχεία) ή στο βαθμό βιοδιάσπασης (θερμοκρασία, pH, κλπ) πρέπει να μην είναι περιοριστικοί και για λόγους σύγκρισης να διατηρούνται σταθεροί.

Η εκτέλεση της μεθόδου προσδιορισμού βιοχημικώς απαιτούμενου οξυγόνου έγινε εντός πέντε ημερών (BOD<sub>5</sub>) με βάση την πρότυπη μέθοδο 5210 B του Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012.

### **Πειραματικό Πρωτόκολλο**

Πειραματική Συσκευή

A) Οξυγονόμετρο (ηλεκτρόδιο μέτρησης συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου)

B) Μπουκάλια BOD χωρητικότητας 300 ml

Γ) Επωαστήρας BOD, σταθερής θερμοκρασίας 20°C

*Αντιδραστήρια*

Ρυθμιστικό διάλυμα φωσφορικών για τη διατήρηση του pH = 7.2

Διάλυμα θειικού μαγνησίου

Διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου

Διάλυμα χλωριούχου σιδήρου

Allylthiourea

### **Διαδικασία εκτέλεσης μετρήσεων**

Ο προσδιορισμός του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου πραγματοποιούνταν στα δείγματα εξόδου των πιλοτικών συστημάτων HiCAS και HiCS περίπου δύο φορές σε κάθε κύκλο λειτουργίας.

Αρχικά πραγματοποιούνταν αραιώση στα μπουκάλια του BOD ανάλογα με το δείγμα εξόδου που είχαμε προς μέτρηση κάθε φορά, με βάση την εκτίμηση του COD της εξόδου έτσι ώστε να καλύπτεται επαρκώς το εύρος των τιμών της μέτρησης. Οι αραιώσεις κυμαινόταν από 1/60 μέχρι και 1/15. Σε πρώτη φάση μετρούνταν το αρχικό DO των δειγμάτων. Στην συνέχεια πληρωνόντουσαν καλά τα μπουκάλια του BOD ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος παγίδευσης αέρα στο μπουκάλι. Στα δείγματα που δεν περιέχουν μικροοργανισμούς προστέθηκε και ποσότητα μ/ο (περίπου 1 - 2 ml) από δείγμα βιομάζας των συστημάτων. Έπειτα τοποθετούνταν τα μπουκάλια του BOD στον επωαστήρα στους 20°C. Μετά από 5 ημέρες γινόταν μέτρηση των συγκεντρώσεων του οξυγόνου σε κάθε μπουκάλι. Για τον έλεγχο της διαδικασίας μετρήθηκε η απαίτηση σε

οξυγόνο ενός τυφλού δείγματος. Το δείγμα αυτό έπρεπε να παρουσιάζει μείωση του διαλυμένου οξυγόνου μικρότερη των 0,2 mg/l.

Η τιμή του BOD σε κάθε δείγμα δίνεται από την ακόλουθη σχέση στη περίπτωση των δειγμάτων όπου δεν έχει προστεθεί ποσότητα μ/ο:  $BOD = (DO_{\text{αρχικό}} - DO_{\text{τελικό}}) \times \text{αραίωση (mg/l)}$

Στη περίπτωση που στο δείγμα έχει προστεθεί κάποια ποσότητα μ/ο η τιμή του BOD δίδεται από την κατωτέρω σχέση:  $BOD = \{(DO_{\text{αρχικό}} - DO_{\text{τελικό}})_{\text{δειγμα}} - (DO_{\text{αρχικό}} - DO_{\text{τελικό}})_{\text{τυφλό}}\} \times \text{αραίωση (mg/l)}$

#### **3.4.4 Προσδιορισμός διαλυτού οξυγόνου (DO), pH, θερμοκρασίας (T) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας**

Ο προσδιορισμός του διαλυτού οξυγόνου (DO) γινόταν εντός των δεξαμενών επαφής και σταθεροποίησης αλλά και κατά την εκτέλεση των πειραμάτων OUR. Στόχος της μέτρησης ήταν η διαπίστωση παρουσίας επαρκούς ποσότητας διαλυμένου οξυγόνου εντός των βιοαντιδραστήρων κατά την λειτουργία των συστημάτων και ο προσδιορισμός του ρυθμού κατανάλωσης του στα OUR πειράματα. Για την μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου χρησιμοποιήθηκε φορητό οξυγονόμετρο τύπου oxii 330i της εταιρείας WTW.

Ο έλεγχος της τιμής του pH και της θερμοκρασίας γινόταν μέσω φορητού πολύμετρου Multi 3410 της εταιρείας WTW. Με το ίδιο όργανο γινόταν και ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

#### **3.4.5 Μέτρηση των εξωκυτταρικών πολυμερών**

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας προσδιορίζονται τόσο τα δεσμευμένα εξωκυτταρικά πολυμερή (EPS) όσο και τα διαλυτά εξωκυτταρικά προϊόντα (SMP) μεταβολισμού των μικροοργανισμών. Τα EPS βρίσκονται παγιδευμένα στις βιοκροκίδες και λόγω αυτού απαιτείται διαδικασία αποδέσμευσης τους, ώστε να προσδιοριστεί η μέτρησή τους. Αντίθετα τα SMP βρίσκονται διαλυμένα στο ανάμεικτο υγρό οπότε δεν απαιτείται αντίστοιχη διαδικασία για την πραγματοποίηση της μέτρησής τους.

### 3.4.5.1 Διαλυτά εξωκυτταρικά πολυμερή (SMP)

Για τα SMP δείγμα βιομάζας από τους βιο-αντιδραστήρες φυγοκεντρείται άμεσα - για να εξασφαλιστεί όσο το δυνατόν λιγότερη αλλοίωση του - για 15 λεπτά στα 3500 g. Στη συνέχεια το δείγμα διηθείται από μεμβράνη 0,45 μm και έπειτα προσδιορίζεται το περιεχόμενο σε SMP σε όρους COD. Σε επόμενο στάδιο διερεύνησης του συστήματος (το οποίο δεν περιλαμβάνεται στη χρονική διάρκεια της παρούσας διπλωματικής) σχεδιάζεται και ο προσδιορισμός του περιεχόμενου σε πρωτεΐνες και υδατάνθρακες αφού αποτελούν μέρος των SMP.

### 3.4.5.2 Δεσμευμένα εξωκυτταρικά πολυμερή (EPS)

Για την αποδέσμευση των EPS από την βιομάζα γίνεται χρήση κατιονικής ρητίνης ιοντοανταλλαγής (Cation Exchange Resin - CER). Η κατιονική ρητίνη εναλλάσσει κατιόντα με την βιομάζα με αποτέλεσμα την μεταφορά των EPS στην υγρή φάση με ελάχιστες επιμολύνσεις από ενδοκυτταρικές ουσίες. Τα EPS δεσμεύονται στη βιομάζα μέσω δεσμών δισθενών ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέγεται γιατί προκαλεί ελάχιστη λύση των κυττάρων των μικροοργανισμών σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν. Αποτελεί επίσης την πλέον εφαρμοζόμενη πρακτική εξαγωγής των EPS σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Προσδιορισμό των πτητικών αιωρούμενων στερεών VSS του δείγματος της ύλης που έχει συλλεχθεί από τους αντιδραστήρες
- Φυγοκέντρηση 400 mL δείγματος για 15 λεπτά στα 3500 g
- Απομάκρυνση του υπερκείμενου υγρού και επανα-αιώρηση του συμπυκνώματος βιομάζας σε ίση ποσότητα ρυθμιστικού διαλύματος 2mM  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , 4 mM  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 9 mM  $\text{NaCl}$ , 1mM  $\text{KCl}$  σε pH 7,5
- Στο δείγμα ύλης ρυθμιστικού διαλύματος προστίθεται 70 gr CER ανά γραμμάριο βιομάζας
- Ακολουθεί ανάδευση του μείγματος για 2 h στα 800 rpm σε θερμοκρασία 4 °C με μηχανικό αναδευτήρα.

- Έπειτα από την ανάδευση ακολουθεί φυγοκέντρωση για 15 λεπτά στα 3500 g και στη συνέχεια διήθηση από μεμβράνη 0,45 μm.

Στο τελικό διήθημα περιέχονται τα EPS σε διαλυτή μορφή. Η ποσοτικοποίηση τους γίνεται σε όρους COD ενώ σχεδιάζεται η μέτρηση του περιεχόμενου σε πρωτεΐνες και υδατάνθρακες στο άμεσο μέλλον μιας και αποτελούν τα σημαντικότερα δομικά συστατικά των EPS.

### **3.5 Εξειδικευμένα πειράματα διερεύνησης**

#### **3.5.1 Χαρακτηρισμός πλεονάζουσας ιλύος μέσω της ταχύτητας αποξυγόνωσης (OUR)**

Ο στόχος του πειράματος είναι ο προσδιορισμός των κλασμάτων του COD των εισερχόμενων λυμάτων που έχει δεσμευθεί στη βιομάζα είτε με τον μηχανισμό της προσρόφησης είτε με τον μηχανισμό της ενδοκυτταρικής αποθήκευσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της μέτρησης της ταχύτητας αποξυγόνωσης (oxygen uptake rate (OUR)).

Το πειραματικό πρωτόκολλο και η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα.

#### **Πειραματικό Πρωτόκολλο**

- Μέρος του πλεονάσματος ιλύος που απομακρύνεται καθημερινά από τα δύο πιλοτικά συστήματα μεταφέρεται σε δοχείο όπου ρυθμίζεται η θερμοκρασία στους 20°C περίπου και αερίζεται ώστε το διαλυμένο οξυγόνο να μην είναι χαμηλότερο των 4 mg/L. Τα ετεροτροφικά βακτηρίδια δεν είναι πολύ ευαίσθητα στο pH το οποίο μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 7-9.
- Λόγω του πολύ μικρού χρόνου παραμονής στερεών στα δύο συστήματα η χρήση θειουρίας αρχικά δεν κρίθηκε απαραίτητη ωστόσο ύστερα από πειραματική διερεύνηση διαπιστώθηκε παρουσία χαμηλών συγκεντρώσεων νιτρώδους και νιτρικού αζώτου (<2 mg/L) όταν η συνολική διάρκεια του πειράματος αποξυγόνωσης ξεπερνούσε τις 18 ώρες. Για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων στα

πειράματα OUR γινόταν προσθήκη κατάλληλης ποσότητας διαλύματος θειουρίας ώστε η συνολική συγκέντρωση της εντός του αντιδραστήρα να είναι 20 mg/L.

- Ο προσδιορισμός της ενδογενούς φάσης ανάπτυξης των ετεροτροφικών βακτηρίων γίνεται σε αντίστοιχο πείραμα 24 ώρες πριν την έναρξη του πειράματος διερεύνησης.
- Κατά την διάρκεια του τεστ απαιτείται η μέτρηση των αιωρούμενων και πτητικών στερεών ώστε να είναι δυνατή η αναγωγή της ταχύτητας αποξυγόνωσης ανά γραμμάριο πτητικών στερεών(mgO<sub>2</sub>/gVSS-hr). Όταν το πείραμα διαρκούσε μεγάλο διάστημα ωρών (>17 ώρες) τα πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) μετρούνταν εκ νέου ώστε να έχουμε αντιπροσωπευτικότερη εικόνα για τον προσδιορισμό της ταχύτητας αποξυγόνωσης.
- Ο συνολικός όγκος του ανάμεικτου υγρού στον batch αντιδραστήρα είναι 500 mL. Το δείγμα αερίζεται και ανά τακτά χρονικά διαστήματα μετράται ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου. Κατά την έναρξη του πειράματος ο ρυθμός αποξυγόνωσης προσδιορίζεται ανά 5 λεπτά ενώ στη συνέχεια μετά την ολοκλήρωση της κατανάλωσης των εύκολα βιοδιασπάσιμων οργανικών ενώσεων οι μετρήσεις γίνονται ανά μισή και μία ώρα όσο πλησιάζει η λήξη του πειράματος.

Για την εκτέλεση του τεστ απαιτούνται τα κάτωθι όργανα:

- δοχεία ενός λίτρου
- οξυγονόμετρο (ηλεκτρόδιο μέτρησης συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου)
- μαγνητικός αναδευτήρας
- θερμόμετρο
- όργανο μέτρησης pH
- όργανο μέτρησης αιωρούμενων και πτητικών στερεών

### 3.5.2 Ισοζύγιο μάζας COD

Από τα δεδομένα των φορτίων εισόδου και τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την παρακολούθηση των συστημάτων και των πειραμάτων αποξυγόνωσης πραγματοποιείται το ισοζύγιο του COD ως εξής:

$$MCOD_{EΙΣ} = MCOD_{EΕ} + MCOD_{IΛΥΟΣ} + MCOD_{OΞEΙΔ}$$

Όπου:

$MCOD_{EΙΣ}$ : Μάζα COD που εισέρχεται στο κάθε πιλοτικό σύστημα (g/d)

$MCOD_{EΕ}$ : Μάζα COD εκροής κάθε πιλοτικού συστήματος (g/d)

$MCOD_{IΛΥΟΣ}$ : Μάζα COD πλεονάσματος ιλύος (g/d)

$MCOD_{OΞEΙΔ}$ : Μάζα COD που καταναλώνεται λόγω της αναπνοής των κυττάρων (g/d)

Η μάζα του COD που εισέρχεται είναι:

$$MCOD_{EΙΣ} = Q_{EΙΣ} \times COD_{EΙΣ}$$

$Q_{EΙΣ}$ : Παροχή λυμάτων στο σύστημα (Lt/d)

$COD_{EΙΣ}$ : Συγκέντρωση COD στα εισερχόμενα λύματα (mg/Lt)

Η μάζα του COD που εξέρχεται είναι:

$$MCOD_{EΕ} = Q_{EΕ} \times COD_{EΕ}$$

$Q_{EΕ}$ : Παροχή εξόδου από το σύστημα (Lt/d)

$COD_{EΕ}$ : Συγκέντρωση COD στην εκροή (mg/Lt)

Η μάζα του COD του πλεονάσματος ιλύος είναι:

$$MCOD_{IΛΥΟΣ} = W \times COD_{IΛΥΟΣ}$$

$W$ : Παροχή απομάκρυνσης περίσσειας ιλύος (Lt/d)

$COD_{IΛΥΟΣ}$ : Συγκέντρωση COD πλεονάσματος ιλύος

Το COD που οξειδώνεται είναι:

$$MCOD_{OΞEΙΔ} = OUR_{αντιδραστήρα} \times MLVSS \times V_{αντιδραστήρα} \times \frac{24}{1000}$$

$OUR_{αντιδραστήρα}$ : Ταχύτητα αποξυγόνωσης σε κάθε αντιδραστήρα (mgO<sub>2</sub>/grVSS-h)

Σημειώνεται ότι λόγω της έντονης ημερήσιας διακύμανσης του COD στα εισερχόμενα λύματα, ο ρυθμός αποξυγόνωσης εντός των βιοαντιδραστήρων

μεταβάλλεται σημαντικά κατά την διάρκεια της ημέρας. Για την εκτίμηση μιας μέσης ταχύτητας αποξυγόνωσης θα πρέπει να γίνει 24ωρη παρακολούθηση των συστημάτων κάτι που μέχρι τώρα δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί.

Σύμφωνα με στοιχεία που λήφθηκαν από το εργαστήριο της κοινοπραξίας αλλά και από την επί τόπου παρατήρηση των συστημάτων διαπιστώθηκε ότι τα φορτία εισόδου διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα μέχρι περίπου τις 11:00 π.μ. κάτι που φαίνεται και από τις ταχύτητες αποξυγόνωσης εντός των βιοαντιδραστήρων. Από εκεί και μετά οι αντίστοιχοι ρυθμοί παρουσιάζουν σημαντική αύξηση λόγω αύξησης των φορτίων εισόδου. Από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν γίνεται πρόβλεψη μιας μέσης ημερήσιας ταχύτητα αποξυγόνωσης για κάθε βιοαντιδραστήρα λαμβάνοντας υπόψη τις ημερήσιες αιχμές των φορτίων εισόδου έτσι ώστε να καταστρωθεί το ισοζύγιο μάζας. Ασφαλέστερη εκτίμηση μπορεί να γίνει μόνο με 24ωρη παρακολούθηση των συστημάτων. Κατά την εκτέλεση κάποιων πειραμάτων συλλέχθηκε σύνθετο δείγμα λυμάτων, με πραγματοποίηση δειγματοληψιών ανά μία ώρα έτσι ώστε να έχουμε ασφαλέστερη και περισσότερο αντιπροσωπευτική εκτίμηση των ταχυτήτων αποξυγόνωσης και των υπολοίπων ρευμάτων του COD.

### **3.5.3 Διερεύνηση των χαρακτηριστικών καθίζησιμότητας της ιλύος**

Η πιο απλή μέθοδος σχεδιασμού των δεξαμενών τελικής καθίζησης περιλαμβάνει κανόνες που βασίζονται στην διεθνή εμπειρία και πρακτική και έχουν δείξει ότι παρέχουν ικανοποιητική απόδοση ως προς την διαύγαση του επεξεργασμένου υγρού και την συμπύκνωση της ιλύος. Τέτοιοι κανόνες συνήθως θέτουν ένα ανώτατο όριο ως προς την επιτρεπόμενη υδραυλική φόρτιση ή την φόρτιση στερεών εντός των δεξαμενών χωρίς όμως να λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος τα οποία όπως έχει αποδειχθεί, μπορούν να διαφοροποιούνται ανάλογα με τις λειτουργικές παραμέτρους.

Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία αλλά και την μέχρι τώρα εμπειρία από την παρακολούθηση των πιλοτικών συστημάτων, στα συστήματα υψηλής φόρτισης λόγω των οριακών συνθηκών που επιλέγονται, τα χαρακτηριστικά καθίζησης μεταβάλλονται σημαντικά ακόμα και με μικρές μεταβολές παραμέτρων όπως ο χρόνος παραμονής στερεών, ο χρόνος επαφής των λυμάτων με την βιομάζα και η



σταθεροποίηση της ανακυκλοφορούμενης ιλύος πριν την επαφή με φρέσκα λύματα (HiCS).

Γενικοί κανόνες σχεδιασμού των ΔTK για HRAS συστήματα πιθανόν να μην είναι δυνατόν να διατυπωθούν, ωστόσο έγινε μια προσπάθεια εκτίμησης των χαρακτηριστικών καθίζησης της ιλύος που αναπτύσσονται ανάλογα με την λειτουργική παράμετρο που επιλέγεται. Στόχος της εν λόγω διαδικασίας είναι να προκύψουν οριακές τιμές φόρτισης στην ΔTK για κάθε μια λειτουργική παράμετρο. Ενδεχόμενος σχεδιασμός δεξαμενής καθίζησης για HRAS συστήματα θα μπορούσε να συμπεριλάβει τα συμπεράσματα που θα προκύψουν.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου σχεδιάστηκαν ένα σύνολο πειραμάτων προσδιορισμού των παραμέτρων καθίζησης  $V_0$  και  $n$ . Σε κυλίνδρους του 1 L τοποθετείται ανάμεικτο υγρό από κάθε πιλοτικό συστήματα με γνωστή συγκέντρωση στερεών. Στη συνέχεια μετράται η στάθμη της διεπιφάνειας διαυγασμένου υγρού και ιλύος σε χρόνο  $t = 1,2,3,4,5,10,20$  και  $30$  min (ή και σε μεγαλύτερη συχνότητα αναλόγως την συγκέντρωση των MLSS). Από τα αποτελέσματα σχεδιάζεται διάγραμμα με τον χρόνο εκφρασμένο σε λεπτά στον άξονα των X και την στάθμη της διεπιφάνειας εκφρασμένο σε μέτρα στον άξονα των Y. Η διαδικασία πραγματοποιείται εκ νέου, με διαφορετική συγκέντρωση στερεών για τουλάχιστον 5 επαναλήψεις (1,2,3,4,5 gSS/L). Στο διάγραμμα που προκύπτει για κάθε συγκέντρωση στερεών υπολογίζεται η κλίση της ευθείας στην περιοχή γραμμικής μείωσης της διεπιφάνειας. Στη συνέχεια προβάλλεται η ταχύτητα που υπολογίζεται συναρτήσει της αντίστοιχης συγκέντρωσης στερεών. Η σχέση που συνδέει την ταχύτητα ζωνικής καθίζησης με την συγκέντρωση στερεών είναι εκθετική και έχει την μορφή:

$$V_{sz} = V_0 \times e^{-nX}$$

Όπου  $V_{sz}$  η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης και  $V_0$ ,  $n$  οι παράμετροι καθιζησιμότητας. Όπως είναι γνωστό από την θεωρία καθίζησης υπάρχει εξάρτηση της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης από την συγκέντρωση στερεών που εκφράζεται από την παραπάνω συνάρτηση. Η παραπάνω εικόνα επιβεβαιώνεται στα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Η μεταβολή του λογαρίθμου της ταχύτητας  $V_{sz}$  ως προς τη συγκέντρωση στερεών είναι γραμμική της μορφής:

$$Y = -\alpha X + B$$

Όπου  $B = \ln(V_0)$  και  $\alpha = n$

Από τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων σχεδιάζεται η καμπύλη ροής μάζας λόγω βαρύτητας σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$G = V_{sz} \times X = V_0 \times e^{-nX} \times X$$

Γνωρίζοντας την παροχή εισόδου και επανακυκλοφορίας κι έχοντας ένα αξιόπιστο εργαλείο πρόβλεψης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών στον βιολογικό αντιδραστήρα του συστήματος, σχεδιάζεται το σημείο λειτουργίας της ΔΤΚ.

Από το διάγραμμα που προκύπτει μπορεί να εκτιμηθεί η επιτρεπόμενη οριακή φόρτιση ( $G_{επ}$ ) στην ΔΤΚ για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά καθίζησης του εκάστοτε συστήματος υψηλής φόρτισης.

Υπολογίστηκαν οι παράμετροι καθίζησης των πιλοτικών συστημάτων HiCAS και HiCS για όλους τους χρόνους παραμονής στερεών (SRT) και υδραυλικής επαφής (HRT) που ρυθμίστηκαν κατά τους κύκλους λειτουργίας που διερευνήθηκαν.

## 4. Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

### 4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων κατά τη διερεύνηση των δύο πιλοτικών συστημάτων υψηλής φόρτισης HiCAS και HiCS. Η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων ως προς τις διάφορες παραμέτρους που εξετάστηκαν, παρουσιάζονται παρακάτω σε υποκεφάλαια αναλύοντας αρχικά τη λειτουργία του κάθε πιλοτικού συστήματος ξεχωριστά κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται συσχετίσεις και συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ συγκεκριμένων κύκλων λειτουργίας των δύο συστημάτων που συντελούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την απόδοσή των δύο τεχνολογιών.

**Πίνακας 4.1:** Ημερομηνία έναρξης – λήξης, καθώς και χρονική διάρκεια του κάθε κύκλου λειτουργίας

	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4
Ημερομηνία έναρξης	6/7/2018	28/10/2018	28/12/2018	7/4/2019
Ημερομηνία λήξης	26/10/2018	27/12/2018	28/3/2019	21/6/2019
Χρονική διάρκεια (d)	113	60	90	75

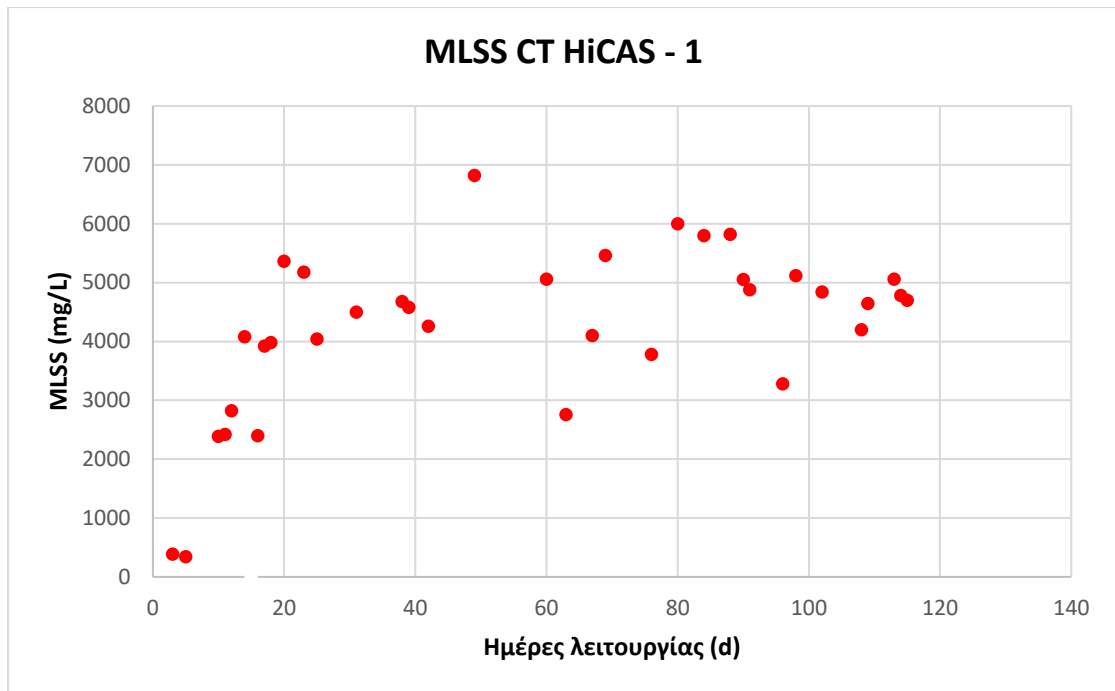
### 4.2 Πιλοτικό συμβατικό σύστημα επεξεργασίας υψηλής φόρτισης (HiCAS)

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους κύκλους λειτουργίας που εξετάστηκαν στη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Η παρουσίαση γίνεται ξεκινώντας με τις λειτουργικές παραμέτρους του κάθε κύκλου και τις μέσες τιμές των παραμέτρων παρακολούθησης (διάφορα κλάσματα του COD, BOD<sub>5</sub>, TSS, EPS και SMP). Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι αποδόσεις του συστήματος HiCAS ως προς το ποσοστό απομάκρυνσης των διαφορετικών κλασμάτων COD (tCOD, pCOD, cCOD, sCOD), το ισοζύγιο του COD σε κάθε κύκλο λειτουργίας, καθώς και ο χαρακτηρισμός της πλεονάζουσας ιλύος μέσω των πειραμάτων του ρυθμού αποξυγόνωσης (OUR) και τα χαρακτηριστικά καθίζησής της.

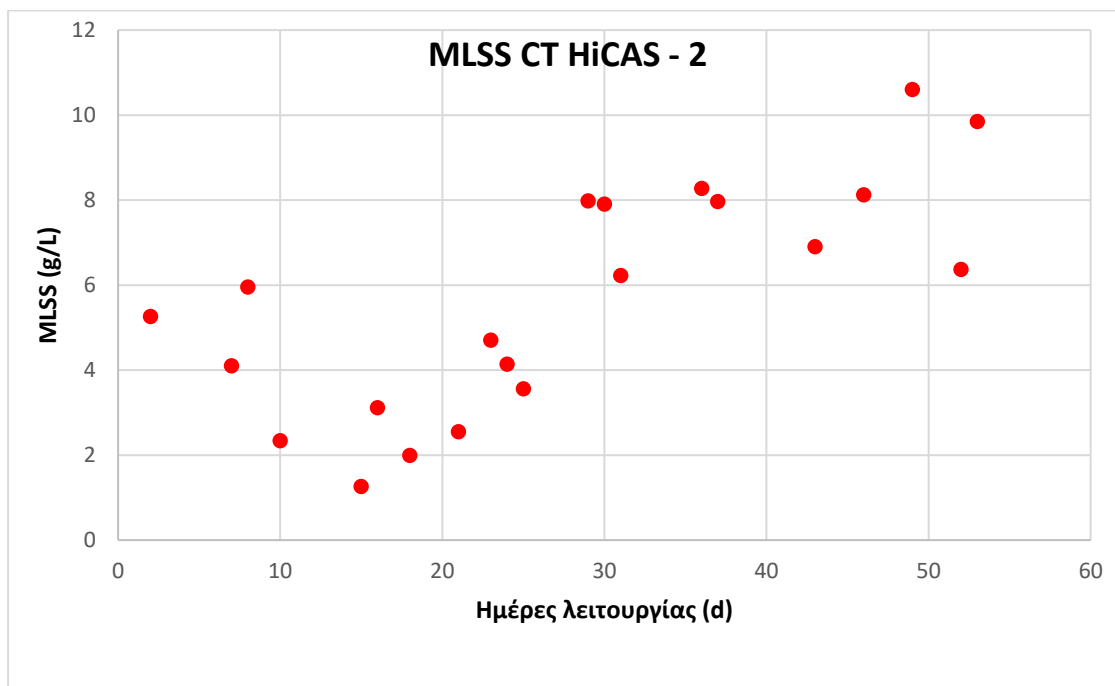
#### 4.2.1 Λειτουργικές παράμετροι του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

**Πίνακας 4.2:** Λειτουργικές παράμετροι του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

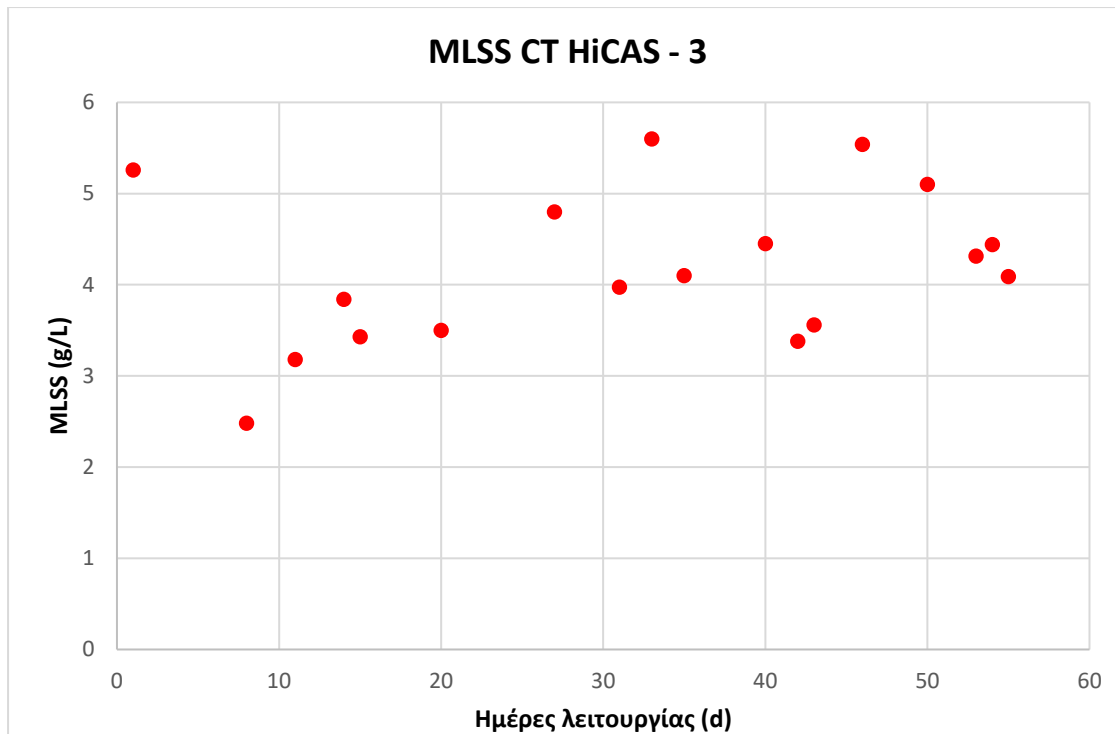
<b>Παράμετρος</b>	<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>3<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>4ος Κύκλος λειτουργίας</b>
<b>Πιλοτικό Σύστημα</b>	<b>HiCAS-1</b>	<b>HiCAS-2</b>	<b>HiCAS-3</b>	<b>HiCAS-4</b>
<b>Q (L / d)</b>	180	360	360	720
<b>DO (mg / L)</b>	> 2	> 2	> 2	> 1
<b>T (°C)</b>	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2
<b>r (%)</b>	100	100	100	100
<b>MLSS (g / L)</b>	4,8 ± 1,1	8 ± 1,4	4,6 ± 0,8	8,2 ± 1,2
<b>MLVSS (g / L)</b>	3,98 ± 0,7	6,24 ± 0,3	3,19 ± 0,3	5,92 ± 1,1
<b>MLVSS / MLSS (%)</b>	83	78	69	72
<b>HRT (h)</b>	2	1	1	0,5
<b>SRT (d)</b>	2	2	1	1
<b>OLR (kg COD / kg VSS * d)</b>	1,69	2,56	4,27	5,03
<b>SAS (L / d)</b>	6,6 ± 1,2	3,2 ± 1,8	9,7 ± 1,7	3,5 ± 2



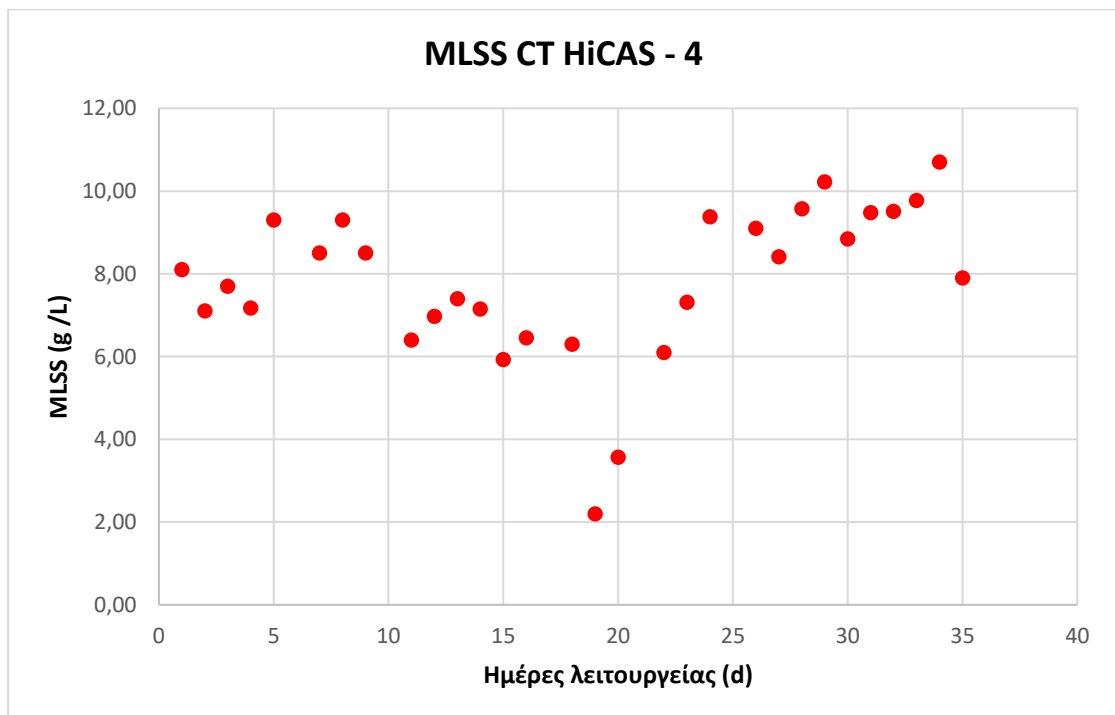
**Σχήμα 4.1:** Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.2:** Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.3:** Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.4:** Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα της κατανομής των MLSS του πιλοτικού συστήματος HiCAS φαίνεται ότι κατά τον πρώτο κύκλο, το σύστημα ξεκίνησε να

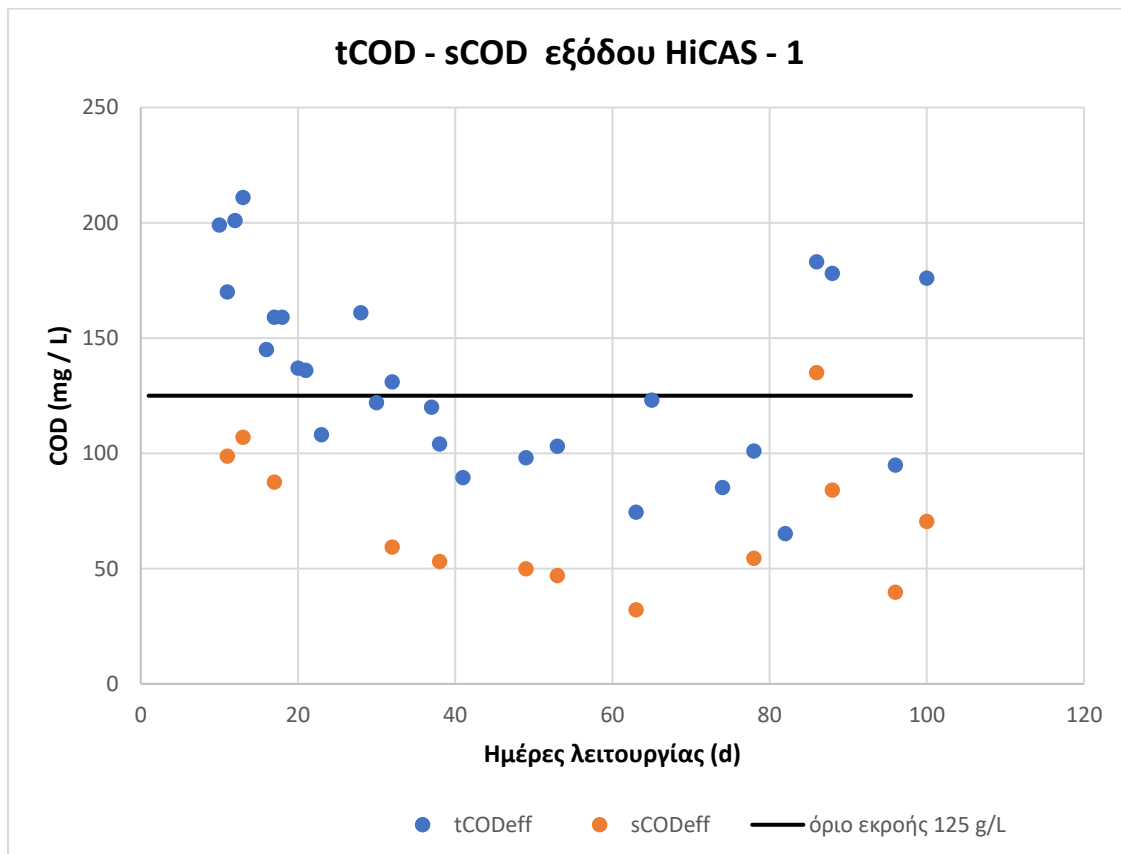
ισορροπεί και να διατηρεί τιμές συγκέντρωσης των MLSS κοντά στα 4 - 5 g/L από την 14<sup>η</sup> μέρα λειτουργίας και έπειτα, ενώ από την αρχή υπήρχε αυξητική τάση (λογικό εφόσον μεσολάβησε η περίοδος έναρξης του συστήματος). Στην συνέχεια και μέχρι το τέλος του πρώτου κύκλου λειτουργίας (113<sup>η</sup> μέρα) οι τιμές της συγκέντρωσης των MLSS διατηρήθηκαν κοντά στα 5 g/L με ελάχιστες μετρήσεις οι οποίες είχαν μεγάλες αποκλίσεις που δεν επηρέασαν τη λειτουργία του συστήματος. Στον δεύτερο κύκλο λειτουργίας φαίνεται να υπάρχει μία μικρή ανομοιομορφία όπου ενώ το σύστημα ξεκίνησε μέχρι την 8<sup>η</sup> μέρα με τιμές συγκέντρωσης κοντά στα 5 g/L στην συνέχεια παρουσίασε μία μείωση (10<sup>η</sup> μέρα – 2,34 g/L) και έπειτα αυξητική τάση μέχρι και το τέλος του δευτέρου κύκλου (53<sup>η</sup> μέρα) με τιμές κοντά στα 7-8 g/L. Η διακύμανση ενδεχομένως να οφείλεται σε εμφράξεις που οδήγησαν σε διαφυγή βιομάζας. Όσον αφορά στον τρίτο κύκλο λειτουργίας φαίνεται να παρουσιάζει σταθερή λειτουργία με τιμές συγκέντρωσης των MLSS να κυμαίνονται μεταξύ 4 και 5 g/L. Για τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας οι τιμές της συγκέντρωσης των MLSS βρίσκονται σταθερά πάνω από τα 6 g/L μέχρι την 19 - 20 μέρα όπου υπάρχει απότομη μείωση (2,2 g/L) που πιθανώς οφειλόταν σε κάποια μικρή έμφραξη που οδήγησε σε διαφυγή βιομάζας. Έπειτα η λειτουργία του συστήματος σταθεροποιήθηκε με τιμές κοντά στα 8,5 mg/L. Προκύπτει λοιπόν ότι με τη μείωση του HRT συνεπάγεται αύξηση των MLSS (μείωση HRT από κύκλο 1 σε κύκλο 2 κατά μία ώρα οδήγησε σε αύξηση των MLSS από 4,8 σε 8 g/L, αντίστοιχα και μετάβαση από κύκλο 3 σε κύκλο 4). Μείωση του SRT από 2 σε 1 μέρα (κύκλος 2 σε κύκλο 3) έφερε φυσιολογικά μείωση της συγκέντρωσης των MLSS (από 8 σε 4,6 g/L).

#### 4.2.2 Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

**Πίνακας 4.3:** Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

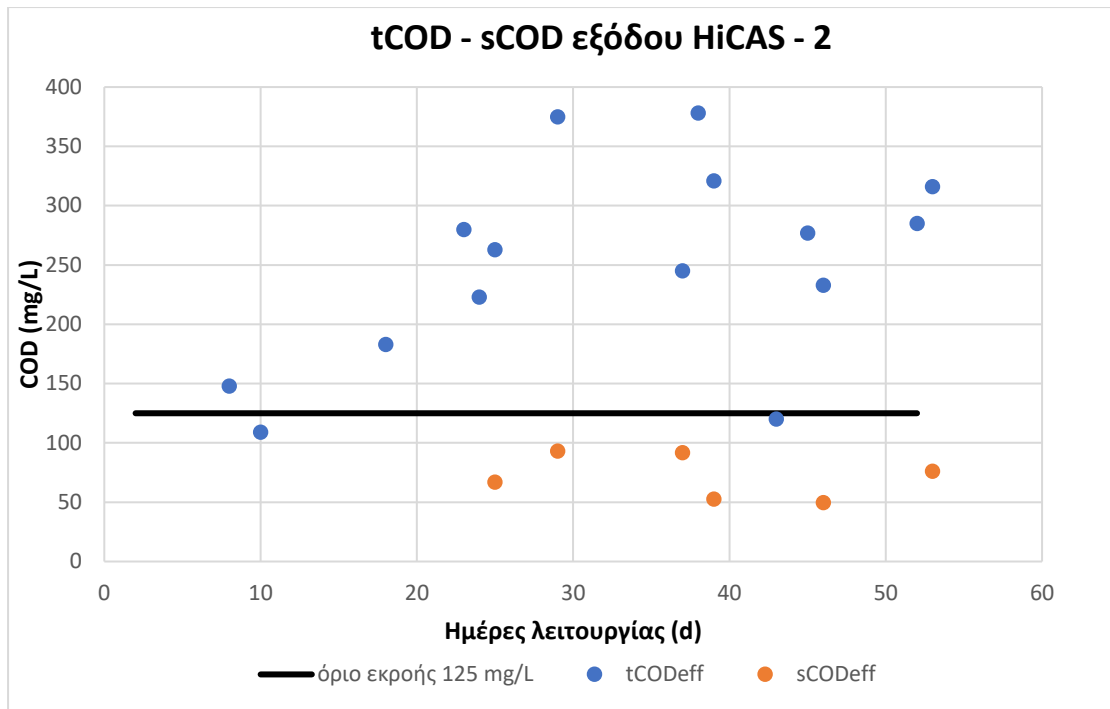
<b>Παράμετρος</b>	<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>3<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>4<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>
<b>Πιλοτικό σύστημα</b>	<b>HiCAS - 1</b>	<b>HiCAS - 2</b>	<b>HiCAS - 3</b>	<b>HiCAS - 4</b>
<b>tCOD<sub>in</sub> (mg / L)</b>	560 ± 61	664,5 ± 77,5	568 ± 51	620 ± 78
<b>pCOD<sub>in</sub> (mg / L)</b>	380 ± 41,5	444 ± 51	386 ± 37	422 ± 53
<b>cCOD<sub>in</sub> (mg / L)</b>	50 ± 5,5	59 ± 7	51 ± 5	56 ± 7

<b>Παράμετρος</b>	<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>3<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>4<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>
<b>sCOD<sub>in</sub></b> (mg / L)	128,5 ± 14	150 ± 17	130,5 ± 12,5	143 ± 18
<b>TSS<sub>in</sub></b> (mg / L)	266 ± 82	291 ± 40	276 ± 58	285 ± 55
<b>tCOD<sub>eff</sub></b> (mg / L)	120 ± 30	284 ± 84	165 ± 22	322 ± 40
<b>pCOD<sub>eff</sub></b> (mg / L)	40 ± 15	169 ± 51	84 ± 15	194 ± 53
<b>cCOD<sub>eff</sub></b> (mg / L)	22 ± 6	38 ± 19	27 ± 5	32 ± 9
<b>sCOD<sub>eff</sub></b> (mg / L)	61 ± 27	67 ± 17	61 ± 9	85 ± 17
<b>TSS<sub>eff</sub></b> (mg / L)	35 ± 13	100 ± 40	65 ± 16	136 ± 30
<b>BOD<sub>5eff</sub></b> (mg / L)	26	133	133	155
<b>EPS</b> (mgCOD/gVSS)	65	58	62	89,9
<b>SMP</b> (mgCOD/gVSS)	12	59,7	73	-

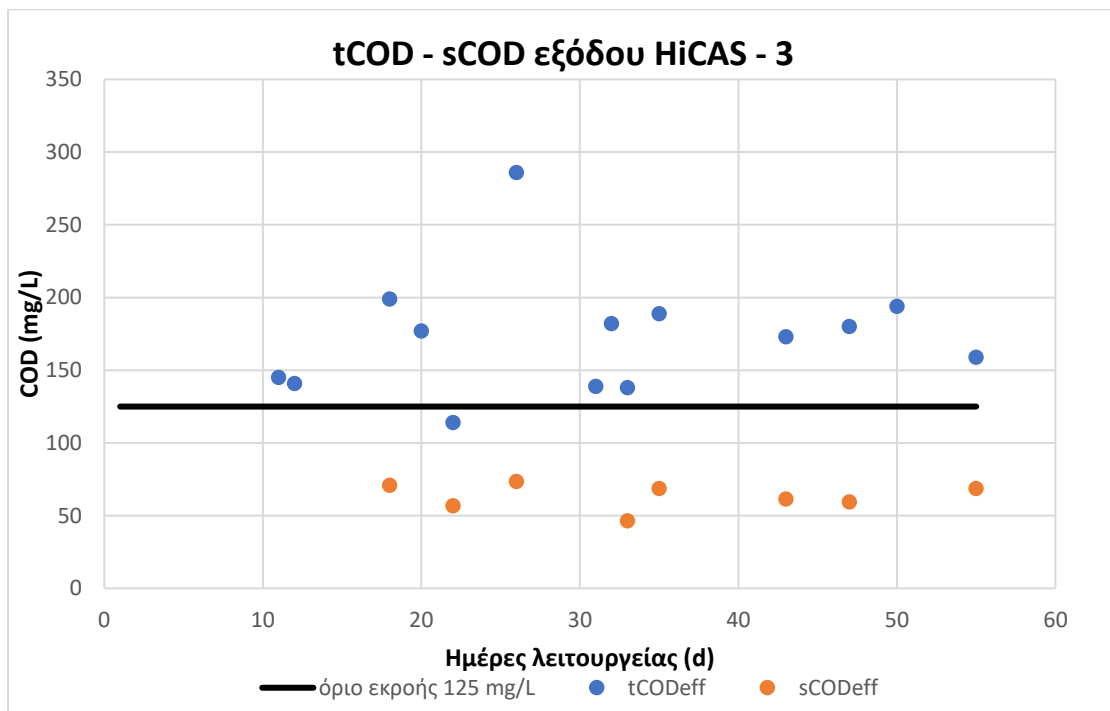


**Σχήμα 4. 5:** Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας

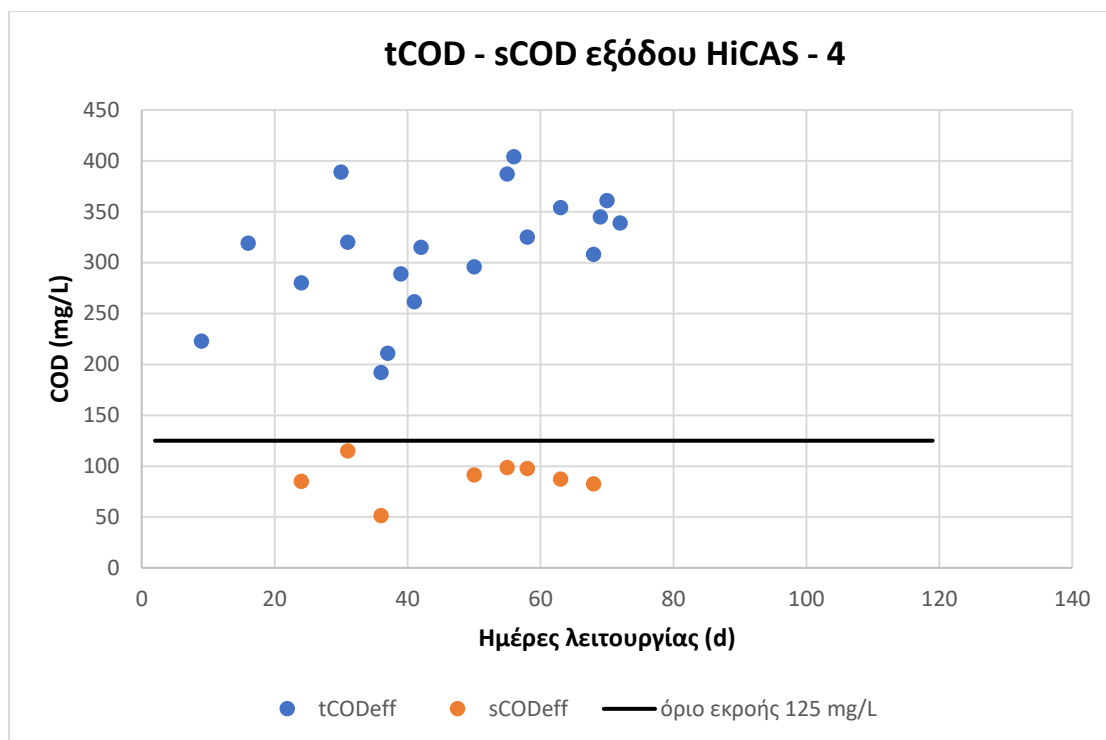




**Σχήμα 4.6:** Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας



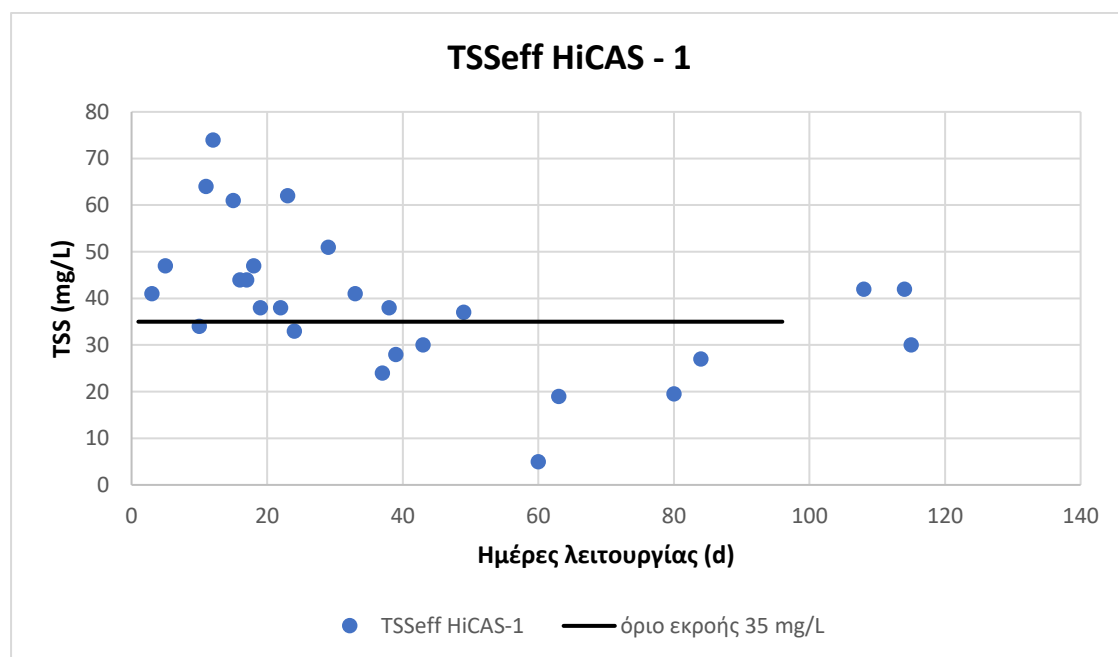
**Σχήμα 4.7:** Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



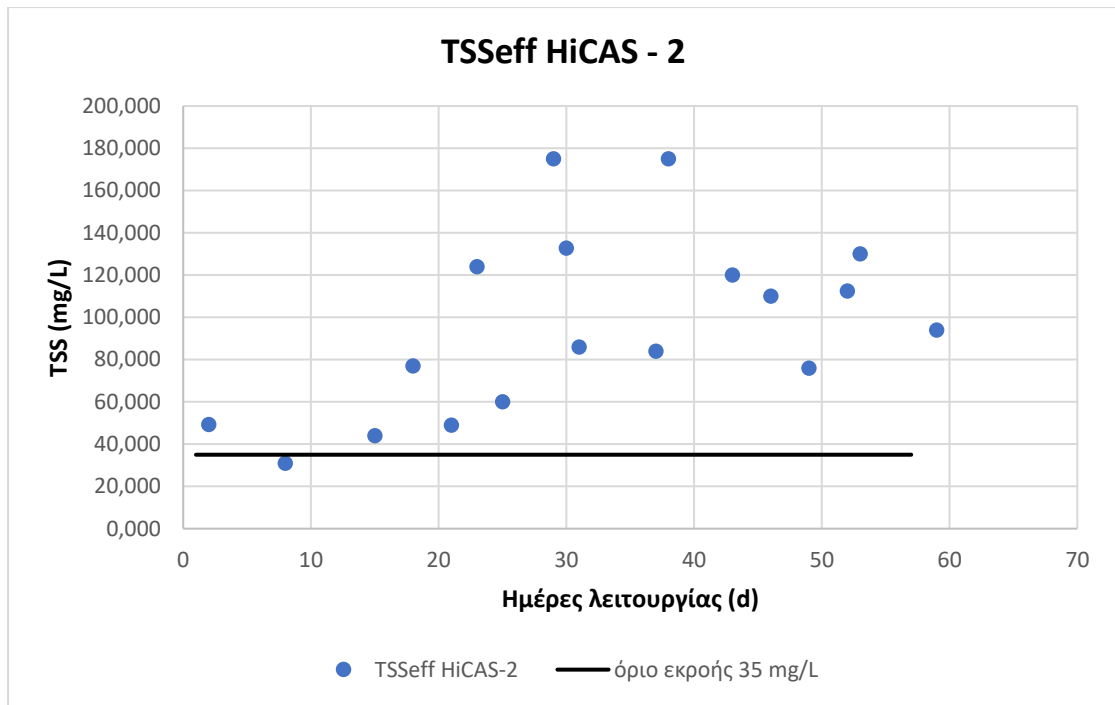
**Σχήμα 4.8:** Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης του ολικού (t) και του διαλυτού (s) COD στην έξοδο του πιλοτικού συστήματος HiCAS, φαίνεται ότι μόνο κατά τον πρώτο κύκλο και αφού το σύστημα σταθεροποίησε τη συγκέντρωση των MLSS του (20<sup>η</sup> μέρα) το ολικό COD της εξόδου βρίσκεται κάτω από το όριο που επιβάλλει η Ελληνική νομοθεσία. Στον πρώτο κύκλο έχουμε τους μεγαλύτερους χρόνους για την επεξεργασία των λυμάτων (2 h – HRT, 2 d – SRT) ενώ όσο οι κύκλοι συνεχίζονται οι συνθήκες γίνονται περισσότερο έντονες (μείωση SRT και HPT) με αποτέλεσμα να έχουμε συχνά μεγαλύτερες ποσότητες COD στην έξοδο (καλύτερα αποτελέσματα στον τρίτο κύκλο σε σχέση με τους κύκλους 2 και 4). Σχετικά σημαντικές ποσότητες διαλυτού COD εξόδου συναντάμε κατά τους τρεις πρώτους κύκλους (61-67 mg/L) ενώ στον τέταρτο κύκλο λειτουργίας η συγκέντρωση ανεβαίνει στα 85 mg/L. Βέβαια δεν αποτελεί μοναδικό ζητούμενο για το συγκεκριμένο σύστημα να επιτυγχάνει τα όρια εκροής καθώς με τις αλλαγές των συνθηκών λειτουργίας γίνεται η προσπάθεια ενίσχυσης μηχανισμών (προσρόφηση, ενδοκυτταρική αποθήκευση) που θα αυξήσουν την ποσότητα και την ποιότητα της παραγόμενης ιλύος, ενώ φαίνεται και η ανάγκη μετέπειτα επεξεργασίας αναλόγως των συνθηκών. Αντίστοιχα

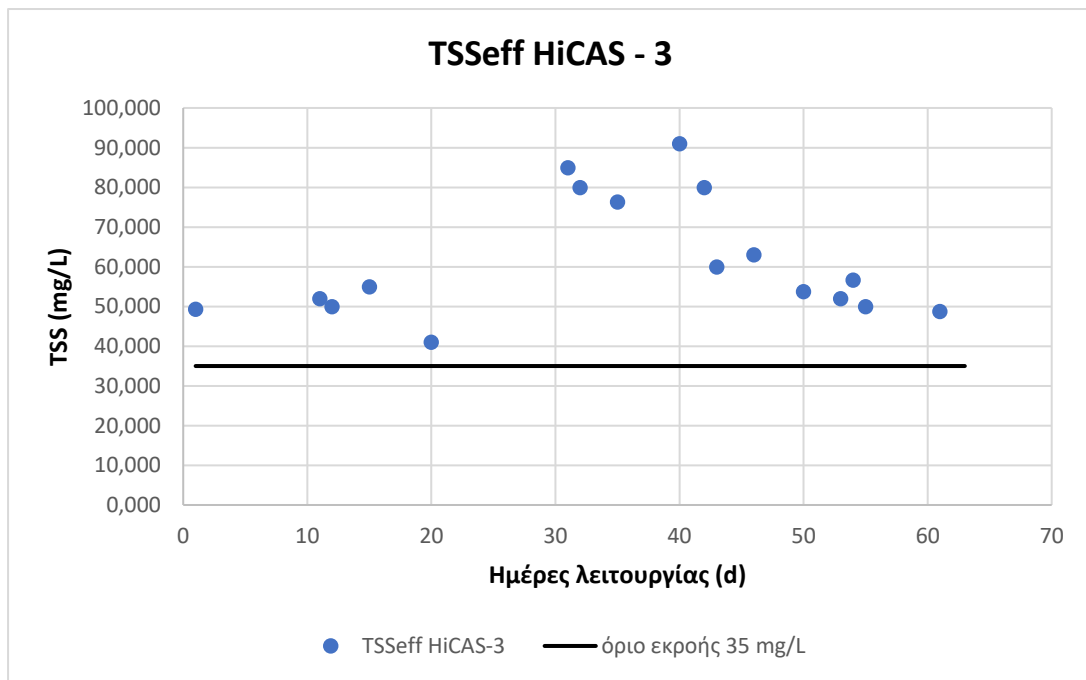
αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και από τα διαγράμματα της κατανομής των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στην έξοδο του HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας, καθώς στον πρώτο κύκλο το σύστημα καλύπτει οριακά το όριο της Ελληνικής νομοθεσίας (35 mg/L) ενώ στους τρεις επόμενους κύκλους οι συγκεντρώσεις αυξάνονται με τον τρίτο να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα (65 mg /L) ενώ στον τέταρτο κύκλο συναντάμε τα υψηλότερα στερεά εξόδου με τιμή συγκέντρωσης 136 mg/L.



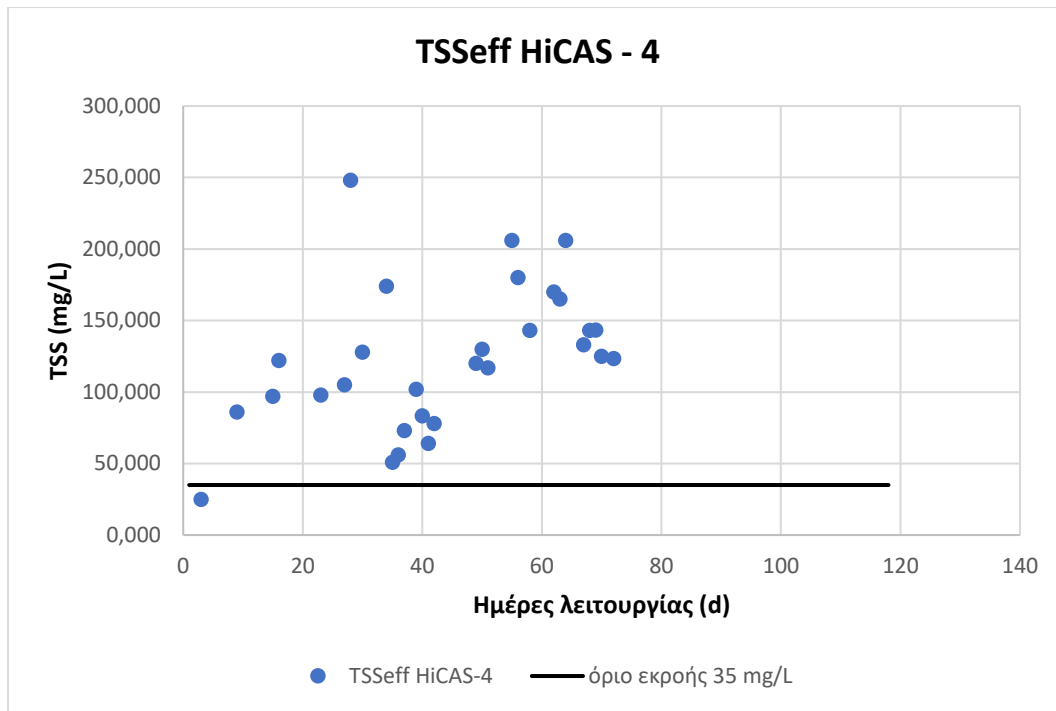
**Σχήμα 4.9:** Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας



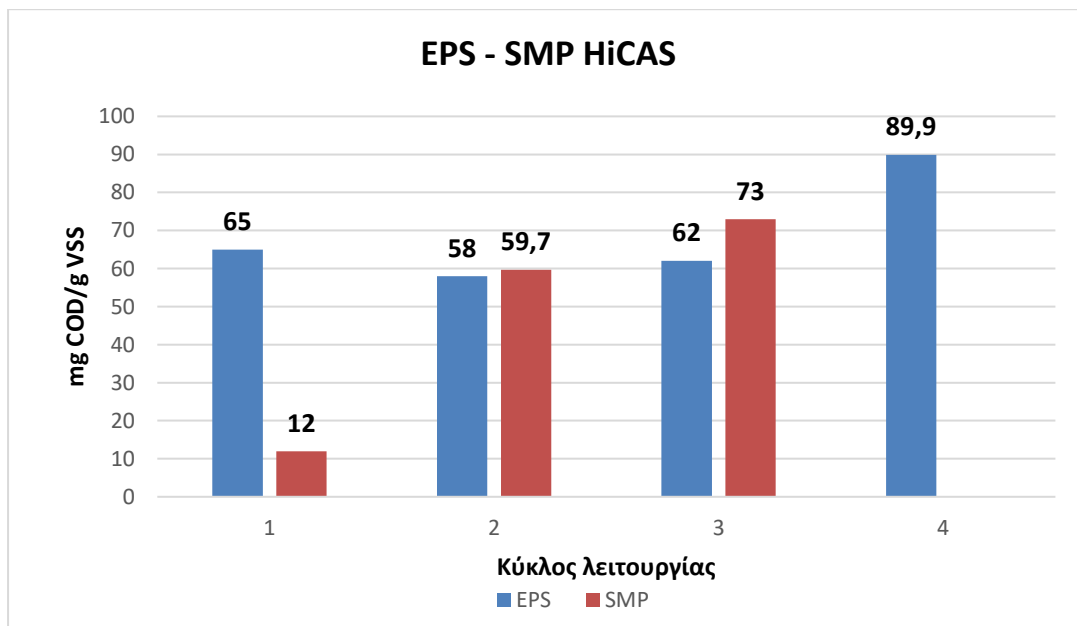
**Σχήμα 4.10:** Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSEff) του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.11:** Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSEff) του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.12:** Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSEff) του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.13:** Συγκεντρώσεις EPS και SMP πιλοτικού συστήματος HiCAS ανά εξεταζόμενο κύκλο λειτουργίας

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η συγκέντρωση των EPS είναι μεταξύ 58 και 65 mgCOD / gVSS δηλαδή σχετικά σταθερή συγκέντρωση μεταξύ των τριών πρώτων κύκλου λειτουργίας ενώ στον τέταρτο κύκλο η συγκέντρωσή τους

αυξάνεται σε 89,9 mgCOD / gVSS σε συνθήκες εντονότερης οργανικής φόρτισης. Για τα SMP φαίνεται ότι η συγκέντρωσή τους αυξάνεται όσο μειώνεται το HRT και το SRT, ιδιαίτερα μετά τον πρώτο κύκλο όπου η συγκέντρωσή τους είναι χαμηλή σε σχέση με τα EPS (12 mg COD / g VSS).

#### 4.2.3 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ως προς την απομάκρυνση των διαφορετικών κλασμάτων COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

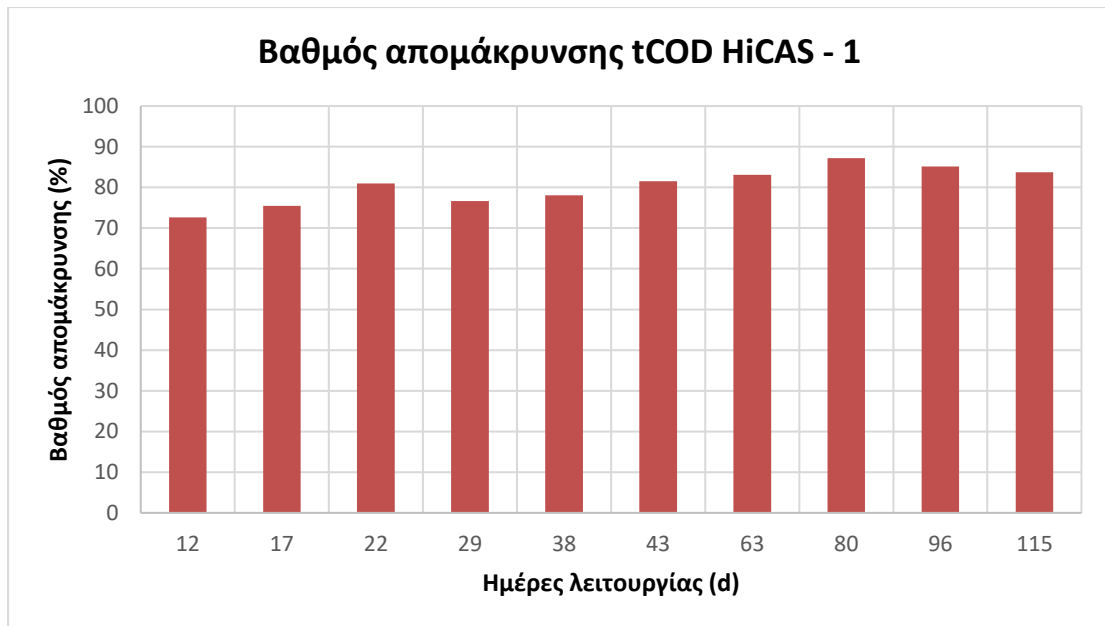
Ο υπολογισμός της απόδοσης του πιλοτικού συστήματος HiCAS ως προς το ποσοστό απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου (COD) πραγματοποιήθηκε μέσω της σχέσης:

$$\text{Βαθμός απόδοσης (\%)} = \frac{COD_{in} - COD_{eff}}{COD_{in}} * 100$$

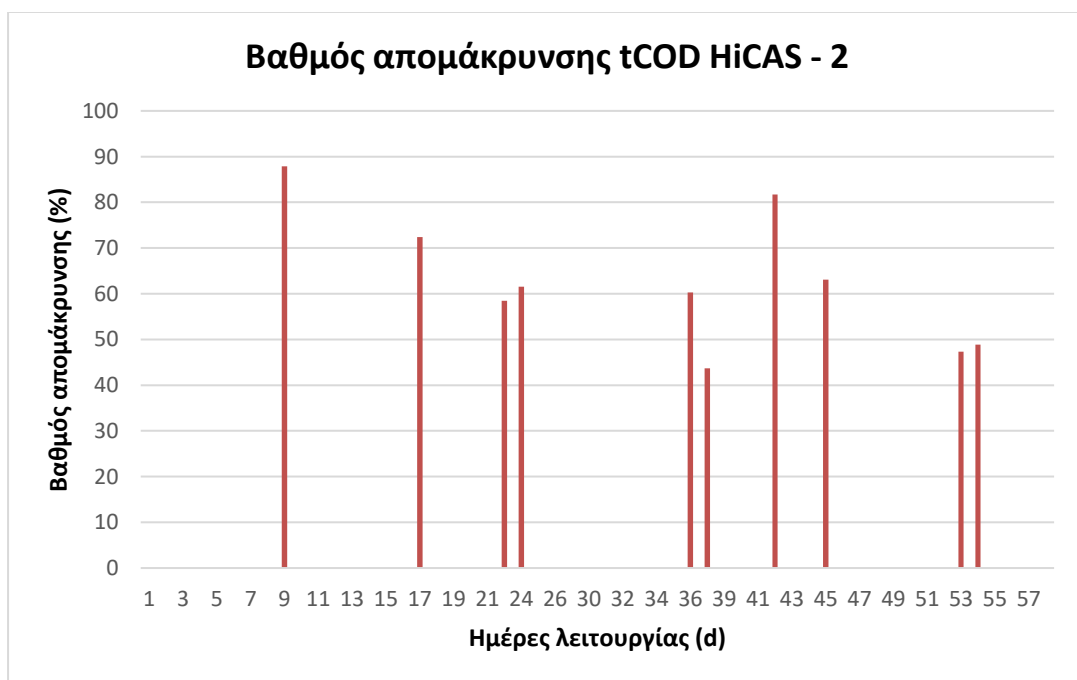
Ο παραπάνω υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για τα διαφορετικά κλάσματα του COD (ολικό, σωματιδιακό, κολλοειδές, διαλυτό).

**Πίνακας 4.4:** Βαθμοί απόδοσης απομάκρυνσης του πιλοτικού συστήματος HiCAS ως προς τα διαφορετικά κλάσματα του COD κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

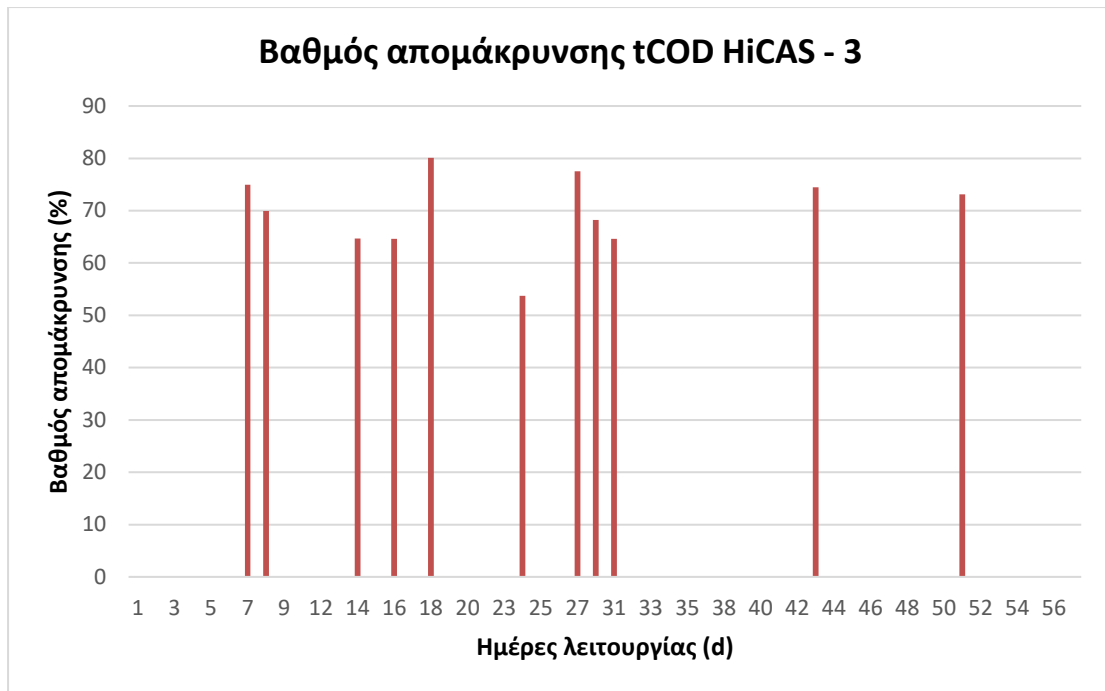
	1 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	2 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	3 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	4 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας
<b>Πιλοτικό σύστημα</b>	<b>HiCAS - 1</b>	<b>HiCAS - 2</b>	<b>HiCAS - 3</b>	<b>HiCAS - 4</b>
<b>Παράμετρος</b>	<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>	<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>	<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>	<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>
<b>tCOD</b>	79 ± 6	55 ± 13	71,5 ± 6	49,5 ± 13
<b>pCOD</b>	90 ± 4	57 ± 17	81 ± 8	49,5 ± 12
<b>cCOD</b>	56 ± 11	60 ± 3	39 ± 20	39,5 ± 21,5
<b>sCOD</b>	65 ± 27	59 ± 20	69 ± 15	36,5 ± 6,5



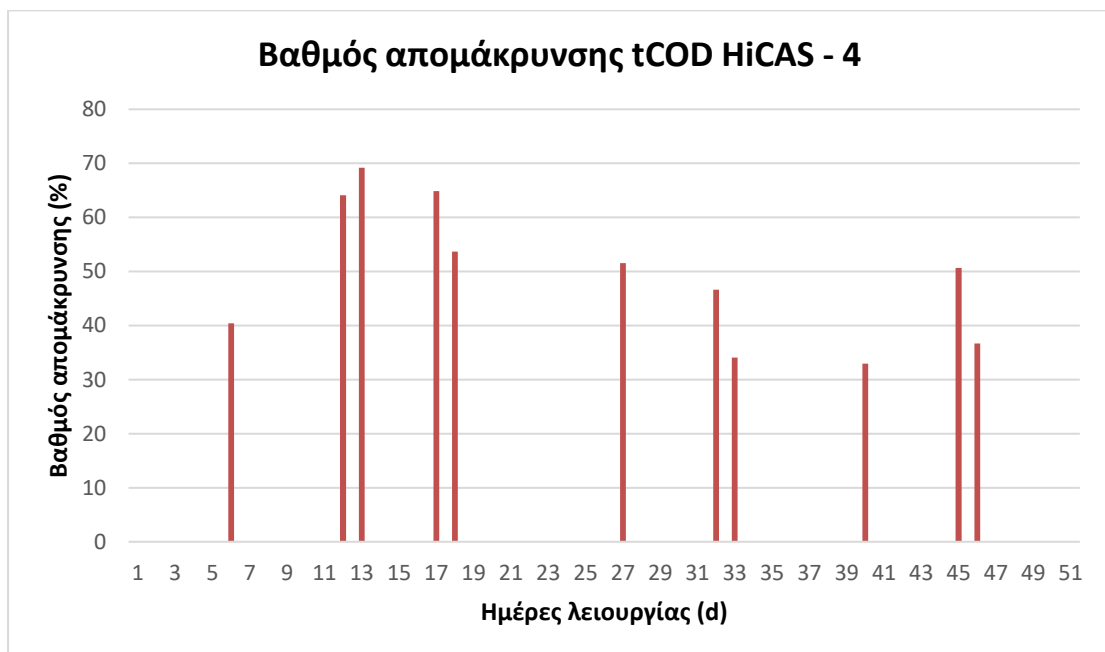
**Σχήμα 4.14:** Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.15:** Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.16:** Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας

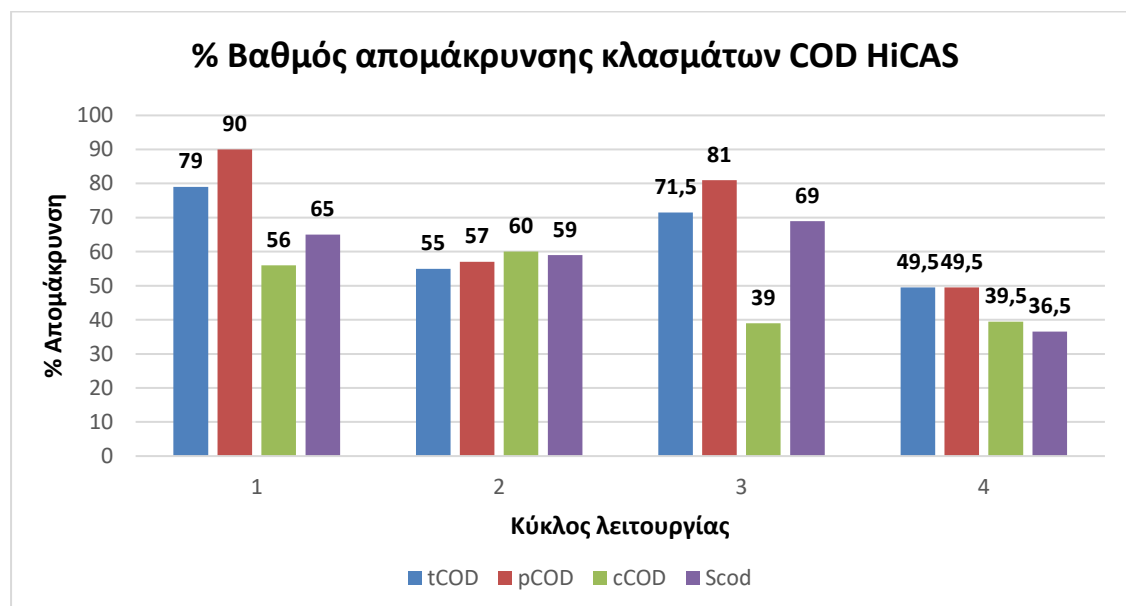


**Σχήμα 4.17:** Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

Κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας οι βαθμός απόδοσης είναι σχετικά υψηλός (79% tCOD). Έπειτα οι αποδόσεις μειώνονται όσο οι συνθήκες αλλάζουν με τον τρίτο κύκλο να εμφανίζει καλύτερες αποδόσεις από τον δεύτερο σε ίδιο HRT (1 h) και διαφορετικό SRT (2<sup>ος</sup> – 2d, 3<sup>ος</sup> 1d). Από τους βαθμούς απόδοσης του πιλοτικού συστήματος HiCAS ως προς τα κλάσματα του COD φαίνεται ότι η μεγαλύτερη



απομάκρυνση πραγματοποιείται στο σωματιδιακό κλάσμα του COD. Φαίνονται παραπλήσια ποσοστά απομάκρυνσης όσον αφορά το κολλοειδές και το διαλυτό COD κατά τους κύκλους λειτουργίας με εξαίρεση τον τρίτο κύκλο όπου παρουσιάζεται σημαντικά υψηλότερη απομάκρυνση σε διαλυτό (69%) σε σχέση με το κολλοειδές COD (39%).



**Σχήμα 4.18:** Συγκεντρωτικό γράφημα απομάκρυνσης κλασμάτων COD κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας πιλοτικού συστήματος HiCAS

#### 4.2.4 Ισοζύγιο COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και αναφέρεται στο κεφάλαιο 3 (βλέπε 3.5.2) σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού του ισοζυγίου του COD των πιλοτικών συστημάτων HRAS παρακάτω παρουσιάζονται οι επιμέρους όροι του πιλοτικού συστήματος HiCAS για τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας:

##### Ισοζύγιο COD HiCAS – Πρώτος κύκλος λειτουργίας

$$MCOD_{EIS} = MCOD_{EE} + MCOD_{IAYOS} + MCOD_{OΞEIDA}$$

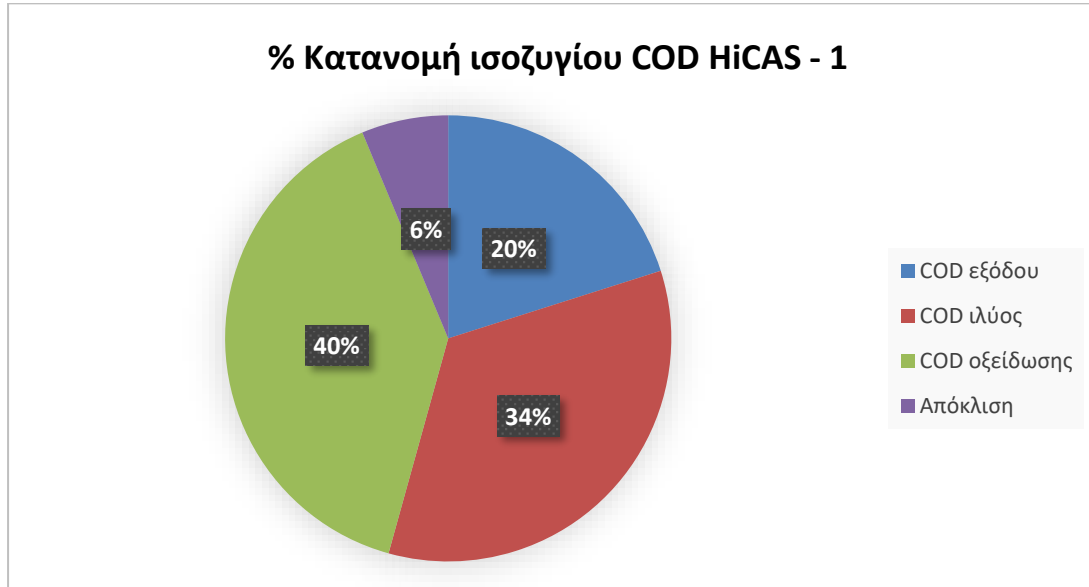
$$MCOD_{EIS} = Q_{EIS} \times COD_{EIS} = 180 \text{ L/d} * 0,526 \text{ g/L} \rightarrow MCOD_{EIS} = 94,68 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{EE} = Q_{EE} \times COD_{EE} = 173 \text{ L/d} * 0,11 \text{ g/L} \rightarrow MCOD_{EE} = 19,03 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{IAYOS} = W \times COD_{IAYOS} = 7 \text{ L/d} * 4,63 \text{ g/L} \rightarrow MCOD_{IAYOS} = 32,39 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{OΞΕΙΔ} = OUR_{αντιδραστική} \times MLVSS \times V_{αντιδραστική} \times \frac{24}{1000} \rightarrow MCO_{D_{OΞΕΙΔ}} = 37,3 \text{ g/d}$$

$$\text{Απόκλιση} = \frac{[MCOD_{ΕΙΣ} - (MCOD_{ΕΕ} + MCO_{D_{ΙΛΥΟΣ}} + MCO_{D_{OΞΕΙΔ}})]}{MCOD_{ΕΙΣ}} * 100 = 6,29 \%$$



**Σχήμα 4.19:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας

#### Ισοζύγιο COD HiCAS – Δεύτερος κύκλος λειτουργίας

$$MCOD_{ΕΙΣ} = MCO_{D_{ΕΕ}} + MCO_{D_{ΙΛΥΟΣ}} + MCO_{D_{OΞΕΙΔ}}$$

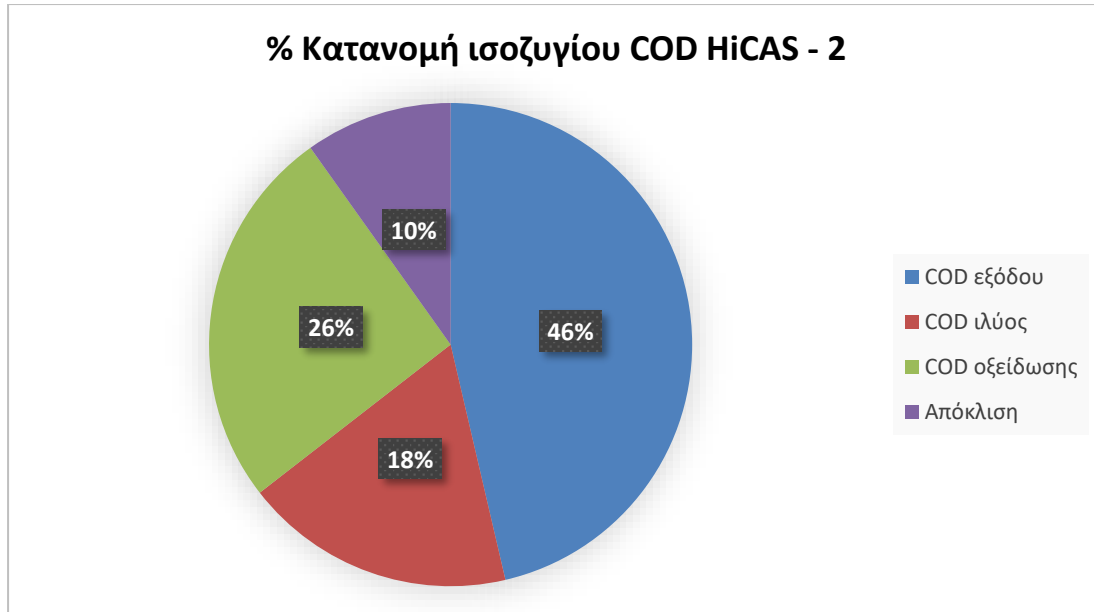
$$MCOD_{ΕΙΣ} = Q_{ΕΙΣ} \times COD_{ΕΙΣ} = 360 \text{ L/d} * 0,672 \text{ g/L} \rightarrow MCO_{D_{ΕΙΣ}} = 241,92 \text{ g/d}$$

$$MCO_{D_{ΕΕ}} = Q_{ΕΕ} \times COD_{ΕΕ} = 360 \text{ L/d} * 0,31 \text{ g/L} \rightarrow MCO_{D_{ΕΕ}} = 112,14 \text{ g/d}$$

$$MCO_{D_{ΙΛΥΟΣ}} = W \times COD_{ΙΛΥΟΣ} = 4 \text{ L/d} * 10,7 \text{ g/L} \rightarrow MCO_{D_{ΙΛΥΟΣ}} = 43,88 \text{ g/d}$$

$$MCO_{D_{OΞΕΙΔ}} = OUR_{αντιδραστική} \times MLVSS \times V_{αντιδραστική} \times \frac{24}{1000} \rightarrow MCO_{D_{OΞΕΙΔ}} = 62,06 \text{ g/d}$$

$$\text{Απόκλιση} = \frac{[MCOD_{ΕΙΣ} - (MCO_{D_{ΕΕ}} + MCO_{D_{ΙΛΥΟΣ}} + MCO_{D_{OΞΕΙΔ}})]}{MCOD_{ΕΙΣ}} * 100 = 9,85 \%$$



**Σχήμα 4.20:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας

#### Ισοζύγιο COD HiCAS – Τρίτος κύκλος λειτουργίας

$$MCOD_{EΙΣ} = MCO D_{EΕ} + MCO D_{IΛYOΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ}$$

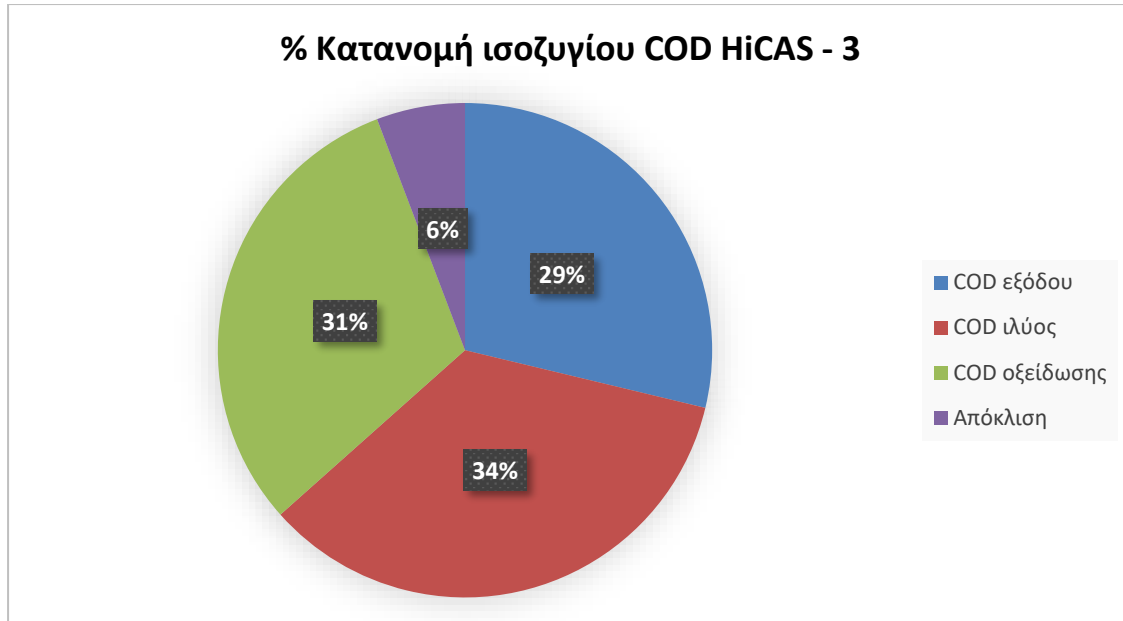
$$MCOD_{EΙΣ} = Q_{EΙΣ} \times COD_{EΙΣ} = 360 \text{ L/d} * 0,633 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΙΣ} = 227,88 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{EΕ} = Q_{EΕ} \times COD_{EΕ} = 360 \text{ L/d} * 0,182 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΕ} = 65,52 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{IΛYOΣ} = W \times COD_{IΛYOΣ} = 10 \text{ L/d} * 7,9 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{IΛYOΣ} = 79 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{OΞEΙΔ} = OUR_{αντιδραστήρα} \times MLVSS \times V_{αντιδραστήρα} \times \frac{24}{1000} \rightarrow MCO D_{OΞEΙΔ} = 70,16 \text{ g/d}$$

$$Απόκλιση = \frac{[MCOD_{EΙΣ} - (MCO D_{EΕ} + MCO D_{IΛYOΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ})]}{MCOD_{EΙΣ}} * 100 = 5,79 \%$$



**Σχήμα 4.21:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας

**Ισοζύγιο COD HiCAS – Τέταρτος κύκλος λειτουργίας**

$$MCOD_{EΙΣ} = MCO D_{EΕ} + MCO D_{IΛYOCΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ}$$

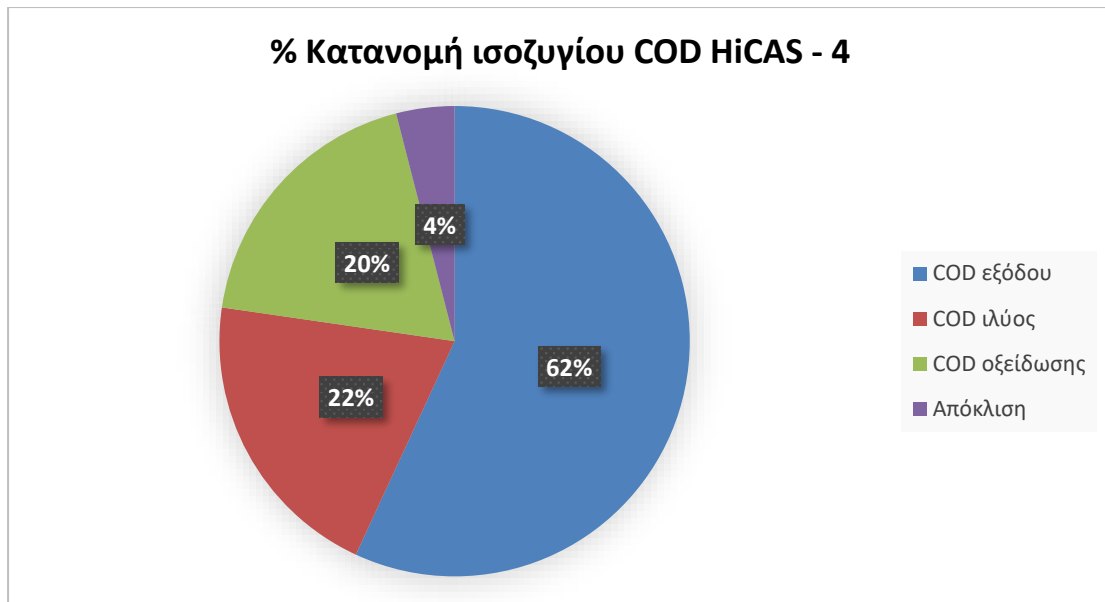
$$MCOD_{EΙΣ} = Q_{EΙΣ} \times COD_{EΙΣ} = 7200 \text{ L/d} * 0,578 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΙΣ} = 416,16 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{EΕ} = Q_{EΕ} \times COD_{EΕ} = 713 \text{ L/d} * 0,361 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΕ} = 257,39 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{IΛYOCΣ} = W \times COD_{IΛYOCΣ} = 7 \text{ L/d} * 13,18 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{IΛYOCΣ} = 92,26 \text{ g/d}$$

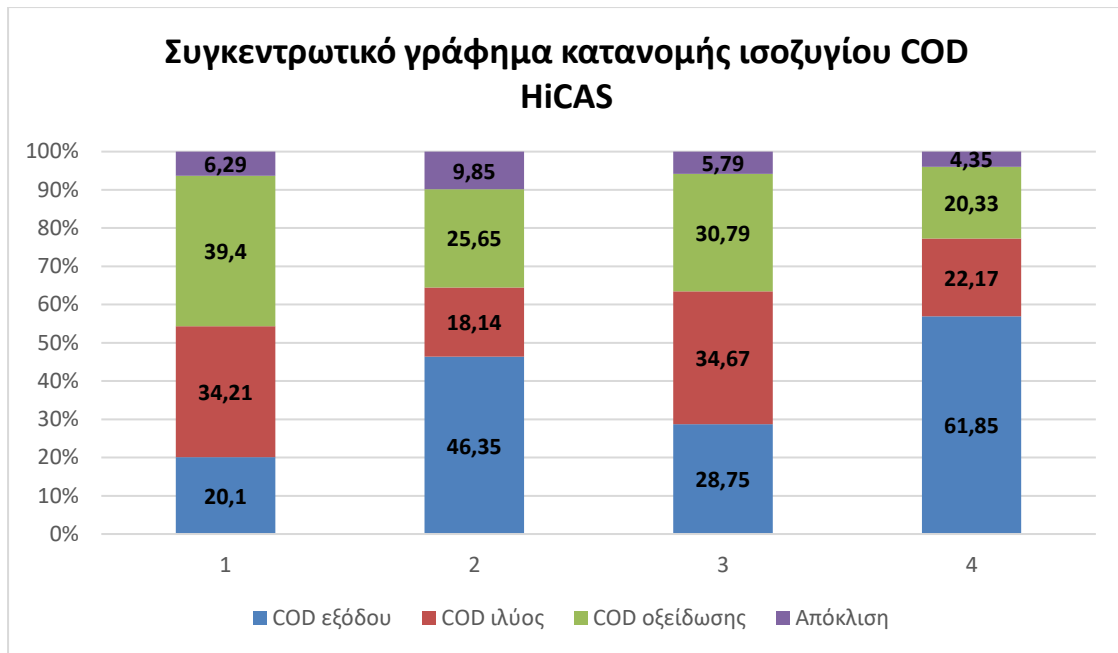
$$MCOD_{OΞEΙΔ} = OUR_{αντιδραστήρα} \times MLVSS \times V_{αντιδραστήρα} \times \frac{24}{1000} \rightarrow MCO D_{OΞEΙΔ} = 84,62 \text{ g/d}$$

$$Απόκλιση = \frac{[MCOD_{EΙΣ} - (MCOD_{EΕ} + MCO D_{IΛYOCΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ})]}{MCOD_{EΙΣ}} * 100 = - 4,35 \%$$



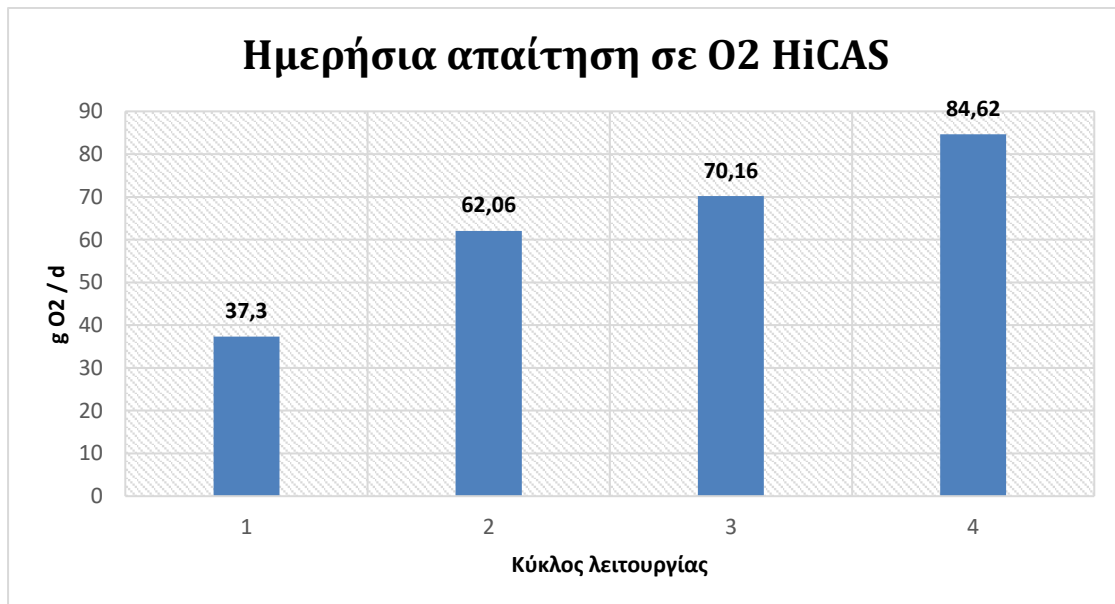
**Σχήμα 4.22:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

Από τα ισοζύγια του COD για τους κύκλους λειτουργίας που εξετάστηκαν στο πιλοτικό σύστημα HiCAS φαίνεται ότι το ποσοστό του COD που οξειδώνεται μειώνεται με τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας και ταυτόχρονα υπάρχει μια λογική αύξηση στο ποσοστό COD εξόδου. Βέβαια από τη μετάβαση από τον κύκλο 2 στον κύκλο 3 (μείωση SRT κατά 1 d) παρατηρήθηκε ικανή αύξηση του ποσοστού COD στο ρεύμα της ιλύος (από 18 σε 34%) με ταυτόχρονη αύξηση του ποσοστού οξείδωσης (από 26 σε 31%). Επίσης μείωση του χρόνου παραμονής στερεών φαίνεται να ενισχύει το ποσοστό του COD που εκτρέπεται στο ρεύμα της ιλύος αφού ενισχύονται οι μηχανισμοί απομάκρυνσης του COD που το ενσωματώνουν στην ιλύ (προσρόφηση – ενδοκυτταρική αποθήκευση) σε σχέση με την οξείδωση.



**Σχήμα 4.23:** Συγκεντρωτικό γράφημα ποσοστιαίας κατανομής του ισοζυγίου του COD πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Από το ισοζύγιο του COD υπολογίζουμε την ποσότητα οξυγόνου που απαιτήθηκε από το σύστημα HiCAS καθημερινά για τον κάθε κύκλο λειτουργίας με βάση την τιμή του COD που οξειδώθηκε σε  $gO_2/d$ .



**Σχήμα 4.24:** Ημερήσια απαίτηση σε  $g O_2$  πιλοτικού συστήματος HiCAS για τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

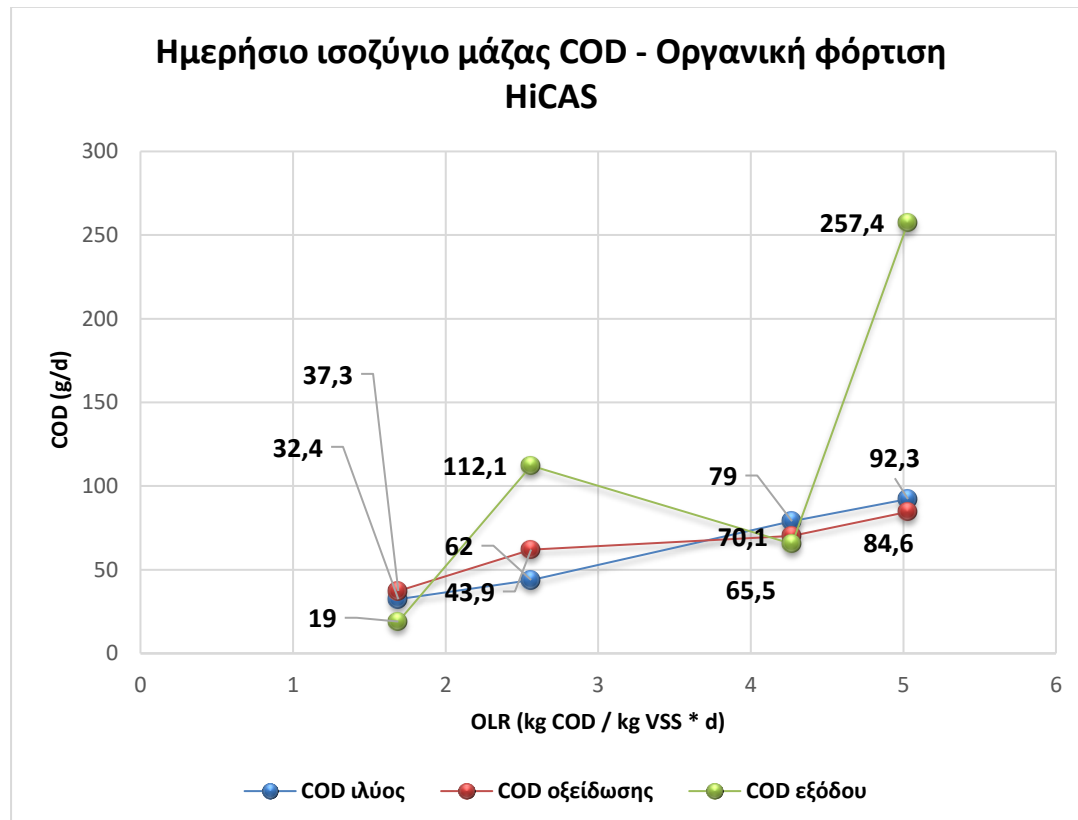
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η απαίτηση σε οξυγόνο αυξάνεται καθώς ο χρόνος επεξεργασίας μειώνεται και το φορτίο εισόδου γίνεται μεγαλύτερο. Έτσι το σύστημα απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες έτσι ώστε να οξειδωθεί η αντίστοιχη ποσότητα COD σε κάθε κύκλο λειτουργίας.

Η επίδραση της οργανικής φόρτισης στην μάζα και την κατανομή των ποσοστών του ισοζυγίου του COD, (δηλαδή τι ποσότητα του COD εκτρέπεται στην ιλύ, οξειδώνεται, και τι καταλήγει στην έξοδο του συστήματος) ταυτίζεται με την επίδραση του χρόνου παραμονής στερεών που επιλέγεται. Η αυξημένη οργανική φόρτιση παραπέμπει σε χαμηλούς χρόνους παραμονής, ενώ οι χαμηλοί λόγοι F/M (food / microorganisms ratio) παραπέμπουν σε υψηλά SRT.

Η οργανική φόρτιση υπολογίστηκε με βάση τη σχέση: 
$$OLR = \frac{Q \left(\frac{L}{d}\right) * tCODin\left(\frac{g}{L}\right)}{MLVSS \left(\frac{g}{L}\right) * Vct (L)} =$$

$$\frac{gCOD}{gVSS*d}$$

Παρακάτω παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα:



**Σχήμα 4.25:** Επίδραση της οργανικής φόρτισης στο ημερήσιο ισοζύγιο μάζας του COD στο πιλοτικό σύστημα HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

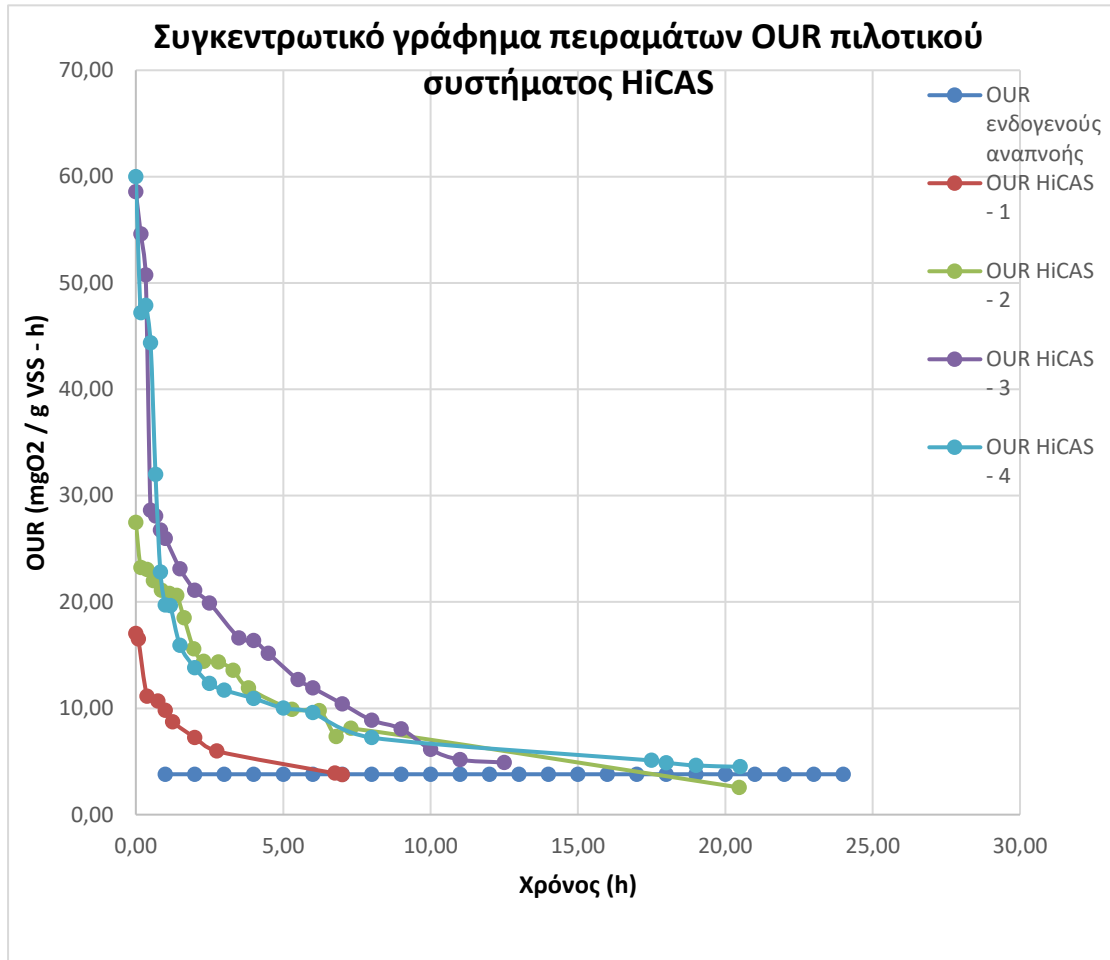
#### 4.2.5 Χαρακτηρισμός της πλεονάζουσας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCAS με τη μέθοδο προσδιορισμού της ταχύτητας αποξυγόνωσης (O.U.R.)

Κατά την διάρκεια των πειραματικών αναλύσεων σε κάθε κύκλο λειτουργίας, πραγματοποιήθηκαν μία σειρά πειραμάτων O.U.R. σε δείγματα πλεονάζουσας ιλύος των πιλοτικών συστημάτων HiCAS και HiCS με σκοπό τον προσδιορισμό της ποσότητας αλλά και το χαρακτηρισμό των διαφορετικών κλασμάτων COD που εμπεριέχονται σε αυτήν.

Για την ασφαλέστερη εκτίμηση του οργανικού φορτίου που αποθηκεύεται στη βιομάζα του κάθε πιλοτικού συστήματος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και το περιεχόμενο οργανικό φορτίο των λυμάτων που εξέρχονται του συστήματος. Όπως παρατηρήθηκε, στο κάθε πιλοτικό σύστημα αλλάζει ο βαθμός απόδοσης και η ικανότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου στην έξοδο ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες που επικρατούν. Έτσι, ιδιαίτερα σε κάποιους κύκλους λειτουργίας (τρίτος και τέταρτος) τα ποσοστά απομάκρυνση είναι χαμηλότερα του 75%, αυτό συνεπάγεται την παρουσία σημαντικών συγκεντρώσεων οργανικού φορτίου στο διαυγασμένο υγρό. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων προσδιορισμού της ταχύτητας αποξυγόνωσης ένα μέρος της κατανάλωσης του οξυγόνου που υπολογίζεται εμπεριέχεται στα εξερχόμενα λύματα και δεν είναι προσροφημένο ή αποθηκευμένο ενδοκυτταρικά στη βιομάζα. Για τον προσδιορισμό του κλάσματος του οργανικού φορτίου που καταναλώνεται στο πείραμα αποξυγόνωσης και οφείλεται στα λύματα εξόδου εκτελέστηκαν κάποια επιπλέον πείραμα OUR. Πλεόνασμα ιλύος από την δεξαμενή επαφής των συστημάτων HiCAS και HiCS αφέθηκαν σε αερισμό μέχρι ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου να αντιστοιχεί στην ενδογενή φάση ανάπτυξης. Στη συνέχεια στον αντιδραστήρα προστέθηκε ποσότητα λυμάτων εξόδου από την δεξαμενή τελικής καθίζησης.

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια προσπάθεια παράθεσης ενός συγκριτικού διαγράμματος πειραμάτων O.U.R. για τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος HiCAS (αντίστοιχα παρακάτω παρατίθεται και για το σύστημα HiCS).





**Σχήμα 4.26:** Συγκεντρωτικό γράφημα πειραμάτων O.U.R. πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Το παραπάνω διάγραμμα για κάθε πείραμα OUR σε κάθε κύκλο, μπορεί προσεγγιστικά να χωριστεί σε 4 επιμέρους τμήματα κατανάλωσης οξυγόνου. Το πρώτο τμήμα αντιπροσωπεύει την κατανάλωση του εύκολα βιοδιασπάσιμου COD που περιέχεται στα δείγματα και στο οποίο ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου OUR είναι μέγιστος (μέγιστη κλίση διαγράμματος). Το δεύτερο τμήμα θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την κατανάλωση του κολλοειδούς κλάσματος του COD που περιέχεται στην ιλύ, στο τρίτο τμήμα παρουσιάζεται το δύσκολα βιοδιασπάσιμο COD και τέλος το τέταρτο τμήμα όπου γίνεται μετάβαση στην ενδογενή αναπνοή.

Υπολογίζοντας το εμβαδόν του κάθε τμήματος και πολλαπλασιάζοντας το με την συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών VSS προκύπτει η κατανάλωση οξυγόνου σε  $\text{mg O}_2/\text{L}$  κατά την οξείδωση κάθε κλάσματος οργανικού φορτίου. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή μετατροπής  $F$ , του διαλυμένου οξυγόνου

σε COD, υπολογίζουμε το COD που αντιστοιχεί σε κάθε ομάδα οργανικών ενώσεων. Ο συντελεστής μετατροπής F κυμαίνεται μεταξύ 3 – 4 mgCOD/mgO<sub>2</sub> και εξαρτάται κυρίως από τη βιομάζα. Ο συντελεστής F υπολογίστηκε με την εκτέλεση πειραμάτων αποξυγόνωσης όπου αντί λυμάτων προσθέτουμε γνωστή ποσότητα οξικού νατρίου και προέκυψε **F = 3,88 mgCOD/mgO<sub>2</sub>**.

Από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τον κάθε κύκλο λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος HiCAS. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα είναι προσεγγιστικά με βάση τα εμβαδά που επιλέχθηκαν από το διάγραμμα OUR, ενώ ο διαχωρισμός των κλασμάτων του COD ανάλογα με τις τιμές των ταχυτήτων αποξυγόνωσης ήταν οι εξής:

- **Εύκολα βιοδιασπάσιμο COD – μέγιστη τιμή OUR έως και 16 mgO<sub>2</sub> / gVSS-h.** Σημειώνεται εδώ ότι στο εύρος 20 – 16 mgO<sub>2</sub> / gVSS-h ενδέχεται να αναπαρίσταται το ενδοκυτταρικά αποθηκευμένο COD
- **Κολλοειδές COD – 16 έως 9 mgO<sub>2</sub> / gVSS-h.**
- **Σωματιδιακό COD – 9 mgO<sub>2</sub> / gVSS-h έως τιμή ενδογενούς αναπνοής.**

**Πίνακας 4.5:** Χαρακτηρισμός κλασμάτων COD της πλεονάζουσας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Κλάσμα COD	HiCAS - 1	HiCAS - 2	HiCAS - 3	HiCAS - 4
<b>Εύκολα βιοδιασπάσιμο (mg/L)</b>	0	60	360	320
<b>Ενδοκυτταρικά αποθηκευμένο (mg/L)</b>	0	105	300	170
<b>Κολλοειδές (mg/L)</b>	30	255	470	390
<b>Σωματιδιακό (mg/L)</b>	310	530	830	1450
<b>Συνολικά (mg/L)</b>	<b>340</b>	<b>950</b>	<b>1960</b>	<b>2330</b>

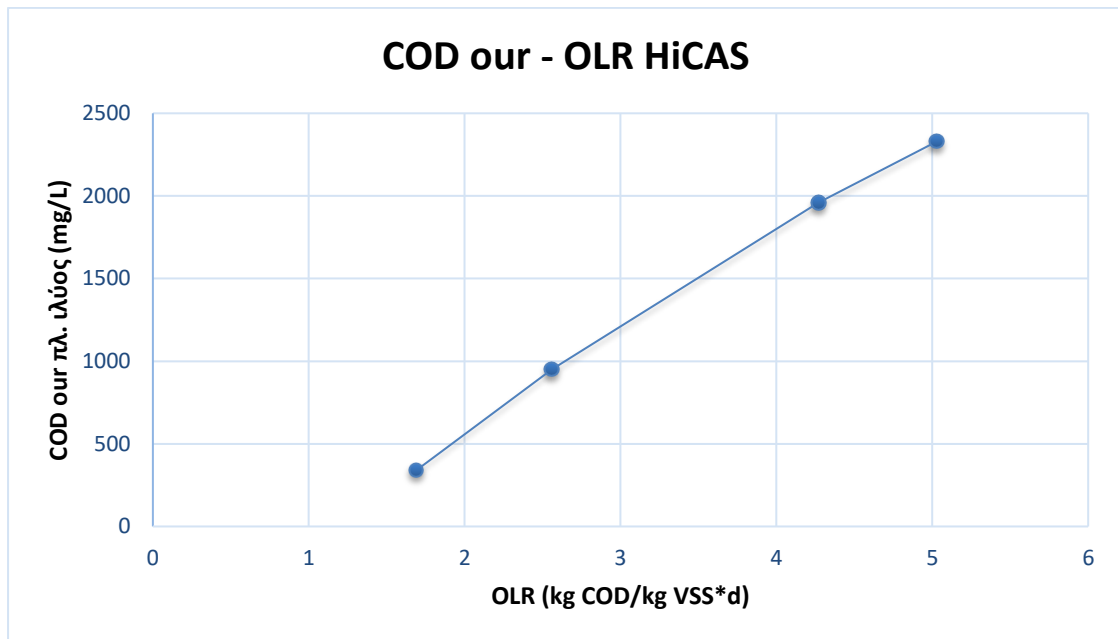
Η συγκέντρωση του COD στην πλεονάζουσα ιλύ του συστήματος HiCAS αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η οργανική φόρτιση κατά τους κύκλους λειτουργίας. Η αναλογία της συγκέντρωσης του COD που προέκυψε από τα πειράματα ο.υ.γ. με την συγκέντρωση των VSS των πειραμάτων είναι:

1<sup>ος</sup> Κύκλος → 114 mgCOD / gVSS

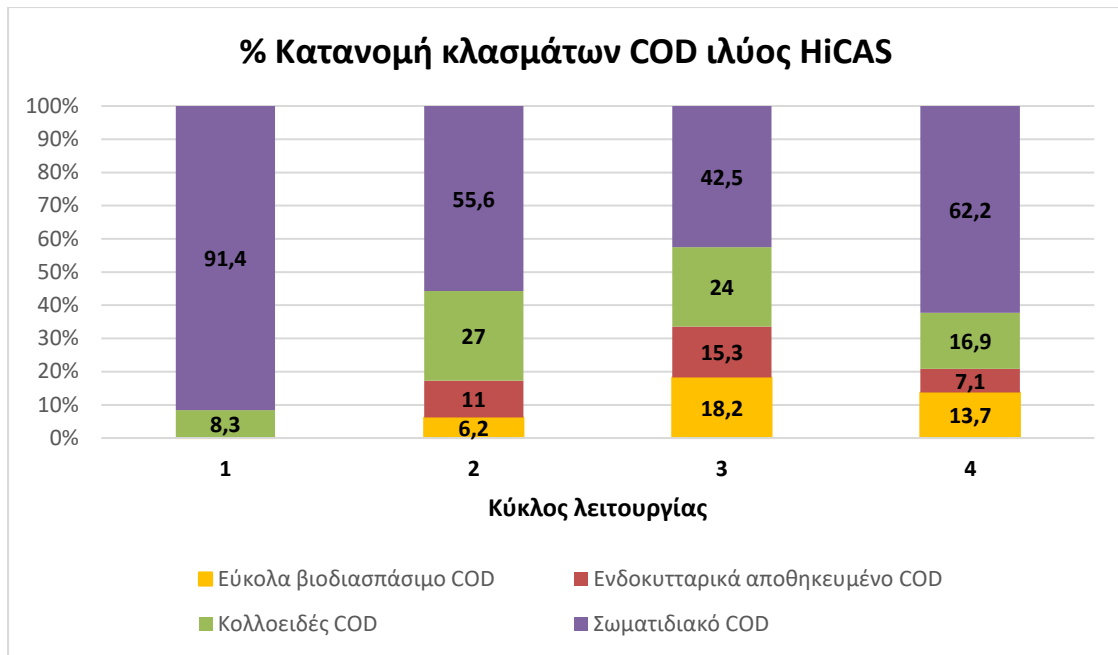
2<sup>ος</sup> Κύκλος → 296 mgCOD / gVSS

3<sup>ος</sup> Κύκλος → 360 mgCOD / gVSS

4<sup>ος</sup> Κύκλος → 440 mgCOD / gVSS

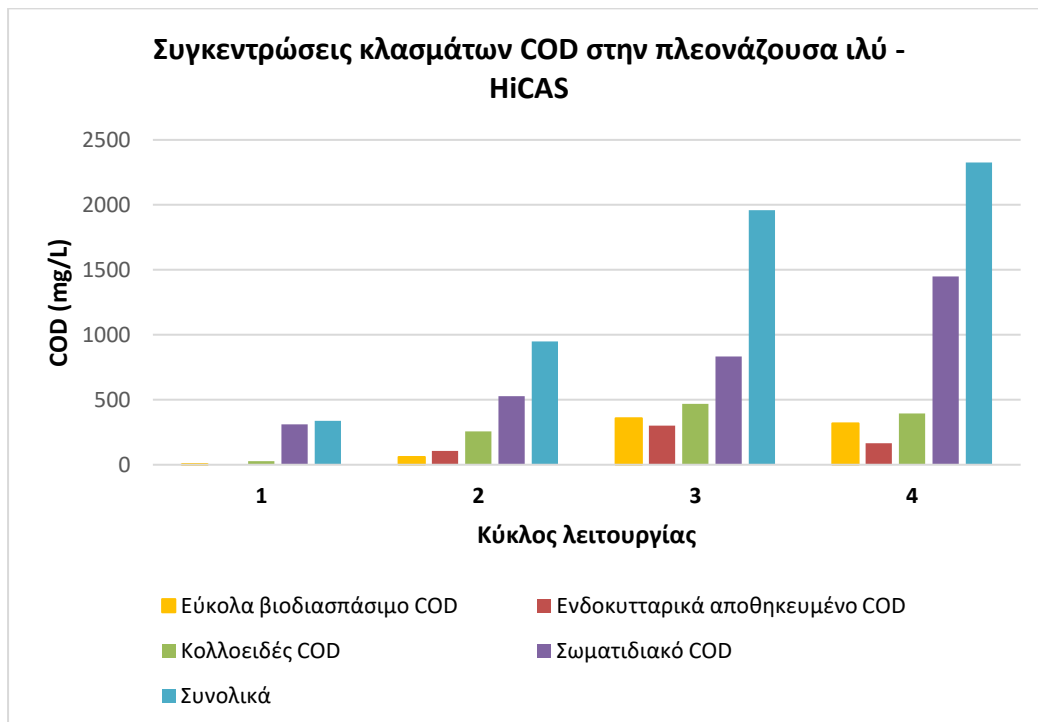


**Σχήμα 4.27:** Συσχέτιση οργανικής φόρτισης – συγκέντρωσης COD που προέκυψε από πειράματα our πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCAS



**Σχήμα 4.28:** Ποσοστιαία κατανομή κλασμάτων COD πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Το COD της πλεονάζουσας ιλύος αποτελείται κυρίως από σωματιδιακό κλάσμα 42,5–91,4%. Με εξαίρεση τον πρώτο κύκλο οι επόμενοι τρεις εμφανίζουν αξιοσημείωτα ποσοστά κολλοειδούς COD (17–27%), και χαμηλότερα ποσοστά εύκολα βιοδιασπάσιμου (6,2–18,2%) και ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου COD (7,1–15,3 %).



**Σχήμα 4.29:** Συγκεντρώσεις κλασμάτων COD πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

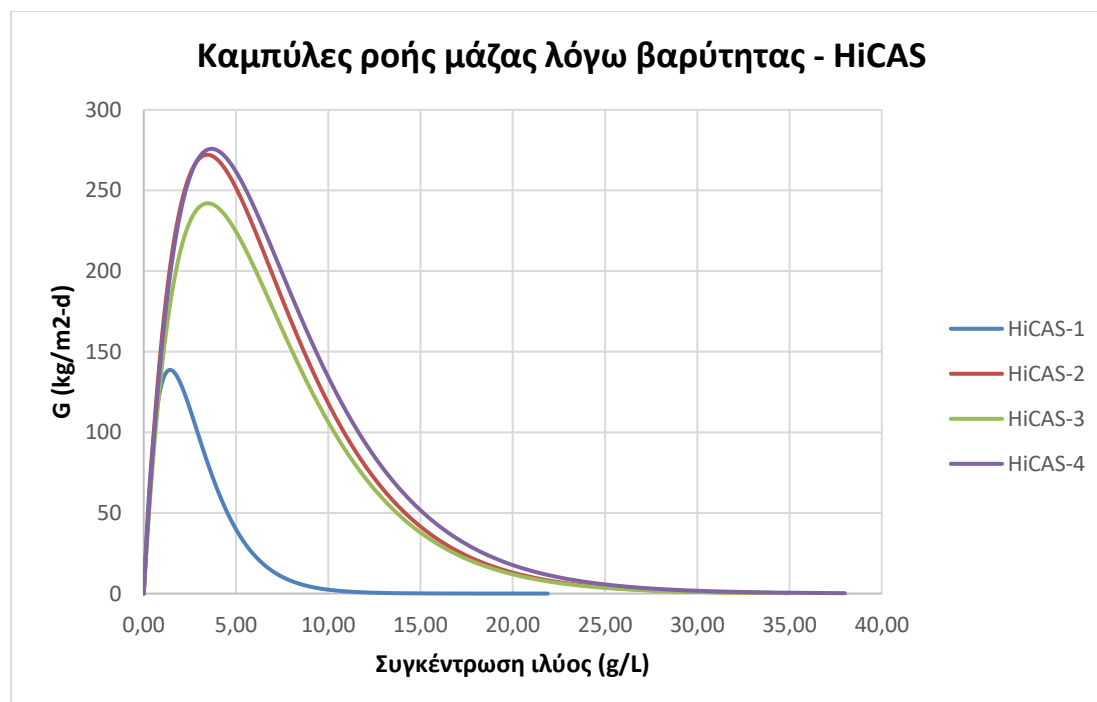
#### 4.2.6 Χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCAS

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καθίζησης της ιλύος (όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.5.3) προέκυψαν οι παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους καθιζησιμότητας  $V_o$  και  $n$  (σταθερές που εξαρτώνται από τα ποιοτικά/μορφολογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε ιλύος) του πιλοτικού συστήματος HiCAS.

**Πίνακας 4.6:** Παράμετροι καθιζησιμότητας  $V_o$  και  $n$  του πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Πιλοτικό σύστημα HiCAS				
Παράμετρος	1 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	2 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	3 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	4 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας
$V_o$	11	8,94	6,61	8,5
$n$	0,7	0,29	0,2	0,27

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα για τις παραμέτρους καθιζησιμότητας κατασκευάστηκαν οι καμπύλες ροής μάζας λόγω βαρύτητας για τον κάθε κύκλο λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος HiCAS, οι οποίες παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



**Σχήμα 4.30:** Καμπύλες ροής μάζας λόγω βαρύτητας πιλοτικού συστήματος HiCAS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι μετά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος βελτιώνονται με τις τρεις καμπύλες των κύκλων 2,3 και 4 να παρουσιάζουν πανομοιότυπη τάση.

### 4.3 Πιλοτικό σύστημα επεξεργασίας υψηλής φόρτισης επαφής - σταθεροποίησης (HiCS)

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους κύκλους λειτουργίας που εξετάστηκαν στη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Η παρουσίαση γίνεται ξεκινώντας με τις λειτουργικές παραμέτρους του κάθε κύκλου και τις μέσες τιμές των παραμέτρων παρακολούθησης (διάφορα κλάσματα του COD, BOD<sub>5</sub>, TSS, EPS και SMP). Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι αποδόσεις του συστήματος HiCS ως προς τα ποσοστά απομάκρυνσης των διαφορετικών κλασμάτων COD (tCOD, pCOD, cCOD, sCOD), το ισοζύγιο του COD σε κάθε κύκλο λειτουργίας, καθώς και ο χαρακτηρισμός της πλεονάζουσας ιλύος μέσω των πειραμάτων του ρυθμού αποξυγόνωσης (OUR) και τα χαρακτηριστικά καθίζησής της.

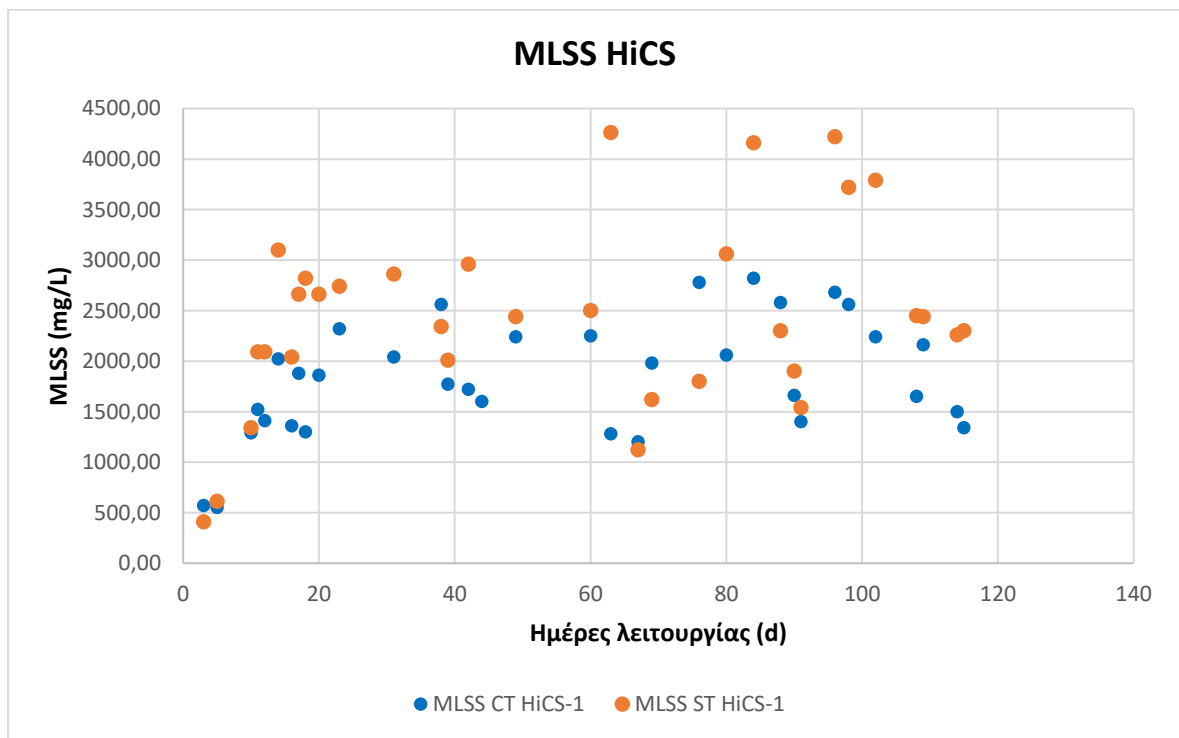
#### 4.3.1 Λειτουργικές παράμετροι του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

**Πίνακας 4.7:** Λειτουργικές παράμετροι του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

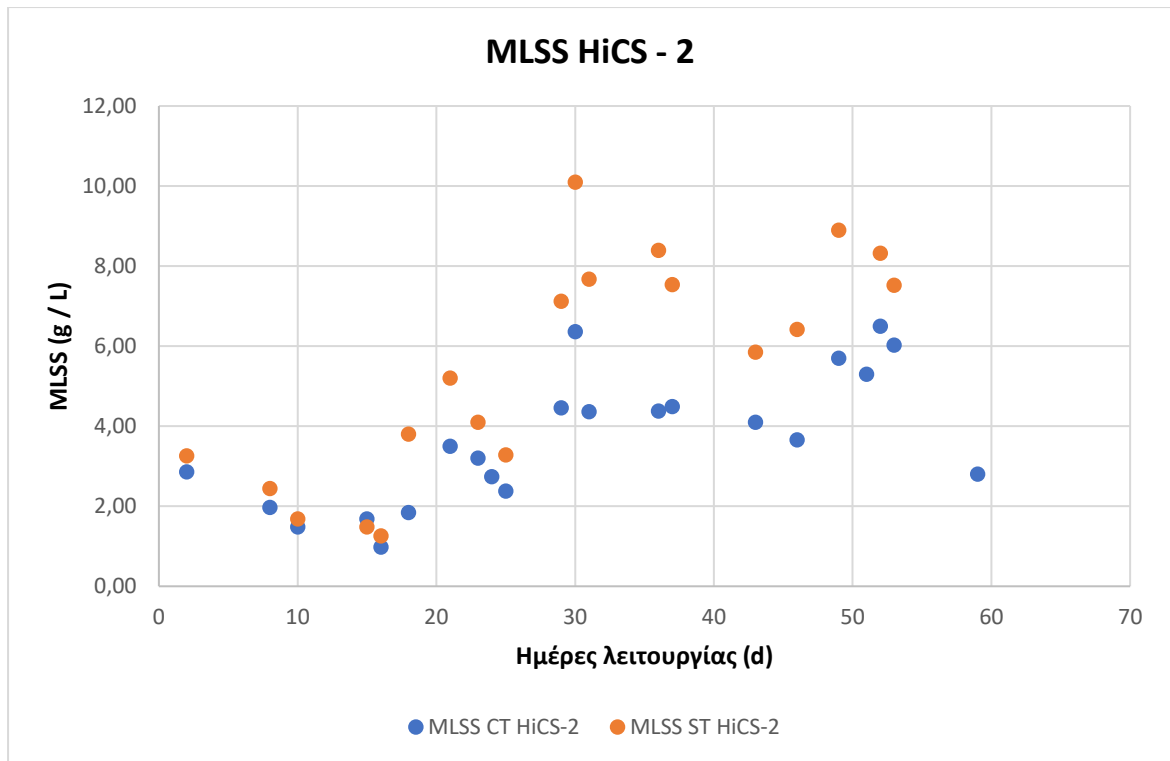
<b>Παράμετρος</b>	<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>3<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>4ος Κύκλος λειτουργίας</b>
<b>Πιλοτικό Σύστημα</b>	<b>HiCS-1</b>	<b>HiCS-2</b>	<b>HiCS-3</b>	<b>HiCS-4</b>
<b>Q (L / d)</b>	180	360	360	720
<b>DO (mg / L)</b>	> 2	> 2	> 2	> 1
<b>T (°C)</b>	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2
<b>r (%)</b>	150	150	150	150
<b>MLSS (g / L)</b>	2 (± 0,5) / 2,7 (± 0,8)*	5 (± 1) / 7,8 (± 1,2)*	1,8 (± 0,4) / 2,9 (± 0,7)*	3,4 (± 0,8) / 6,1 (± 1)*
<b>MLVSS (g / L)</b>	1,64 (± 0,4) / 2,2 (± 0,7)*	3,41 (± 0,25) / 6 (± 1)*	1,25 (± 0,2) / 2,36 (± 0,5)*	2,62 (± 0,55) / 4,7 (± 1,5)*
<b>MLVSS / MLSS (%)</b>	82 / 81,5	68 / 77	69,5 / 81	77 / 77
<b>HRT (h)</b>	2/2*	1/1*	1/1*	0,5/0,5*

<b>Παράμετρος</b>	<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>3<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>4<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>
<b>SRT (d)</b>	2	2	1	1
<b>OLR (kg COD / kg VSS * d)</b>	4,09/0,42*	4,67/0,225*	10,9 /0,76*	11,36/2,39*
<b>SAS (L / d)</b>	20 ± 3	23 ± 2	42,4 ± 7	32 ± 4,5

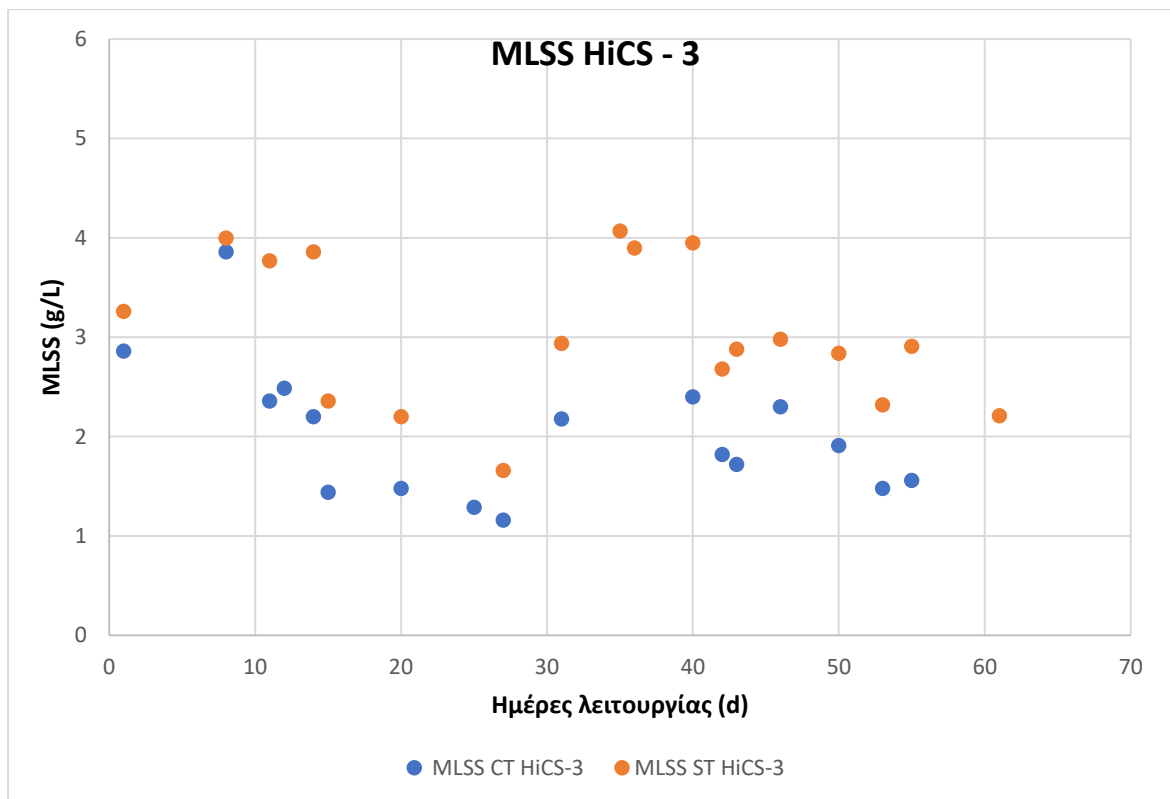
\*Δεξαμενή επαφής (contact tank) / Δεξαμενή σταθεροποίησης (stabilization tank)



**Σχήμα 4.31:** Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας

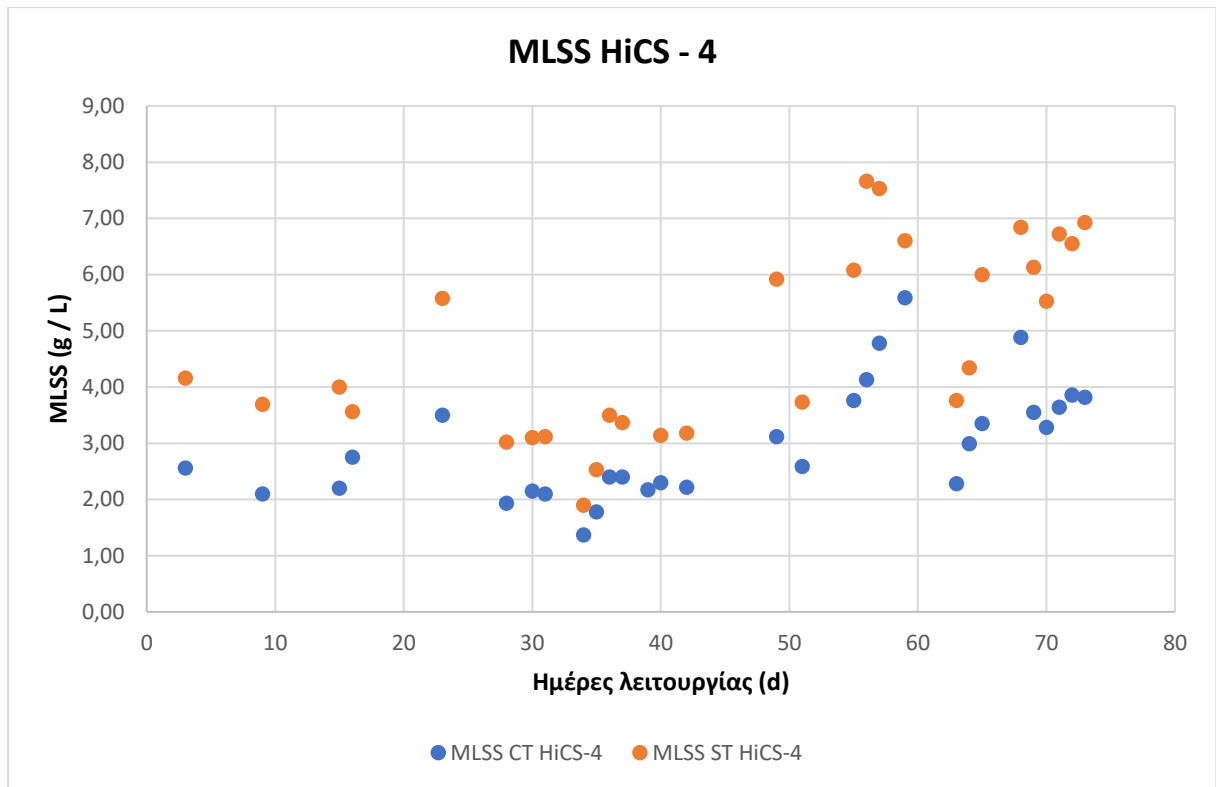


**Σχήμα 4.32:** Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.33:** Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας





**Σχήμα 4.34:** Κατανομή της ημερήσιας συγκέντρωσης των MLSS στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

Από τα διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης των MLSS ανά ημερήσιες μετρήσεις στην δεξαμενή επαφής (ct) και τη δεξαμενή σταθεροποίησης (st) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας φαίνεται ότι η δεξαμενή σταθεροποίησης λειτουργεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις MLSS. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα εισερχόμενα λύματα που δέχεται η δεξαμενή επαφής μαζί με την σταθεροποιημένη βιομάζα από την δεξαμενή σταθεροποίησης. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται ενός τύπου αραίωση στο ανάμικτο υγρό και έτσι είναι λογικό η δεξαμενή επαφής να λειτουργεί πάντα σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις MLSS σε σχέση με αυτήν της σταθεροποίησης. Κατά τον πρώτο κύκλο το σύστημα φαίνεται να σταθεροποιείται σε συγκεντρώσεις MLSS και στις δύο δεξαμενές μετά την 16<sup>η</sup> μέρα με τιμές πάνω από 2 mg/L στην δεξαμενή επαφής και πάνω από 2,5 mg/L στην δεξαμενή σταθεροποίησης. Αποκλίσεις σημειώθηκαν μεμονωμένα σε κάποιες ημερήσιες μετρήσεις όπου εμφανίστηκαν ασυνήθιστα υψηλές ή και χαμηλές τιμές που δεν επηρέασαν τη λειτουργία του συστήματος (μεταξύ 60<sup>ης</sup> και 90<sup>ης</sup> ημέρας). Στον δεύτερο κύκλο το σύστημα λειτουργούσε σε υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης MLSS

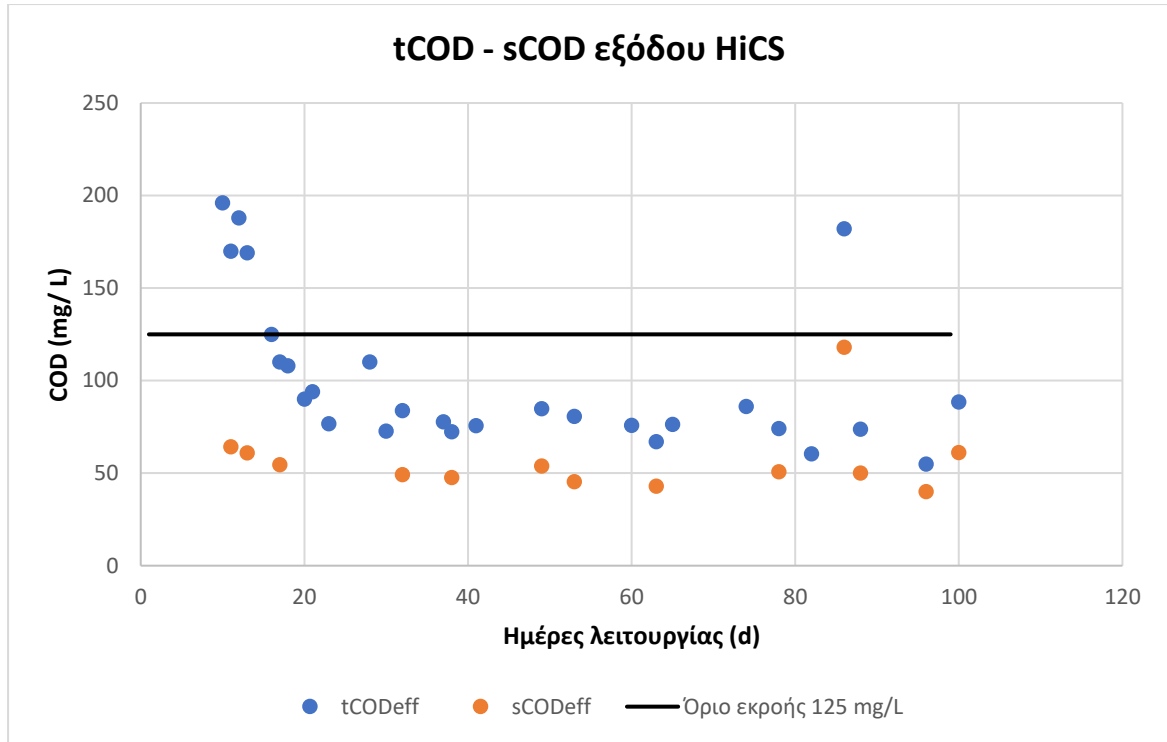
(5 g/L CT και 7,8 g/L ST) λόγω μείωσης του HRT κατά μία ώρα και σταθεροποιήθηκε περισσότερο μετά την 18<sup>η</sup> μέρα όπου εμφανίστηκε αυξητική τάση στις συγκέντρωσης. Στον τρίτο κύκλο λειτουργίας η μείωση του SRT κατά μία μέρα επέφερε και απότομη μείωση της συγκέντρωσης των MLSS (1,8 g/L CT και 2,9 g/L ST). Η λειτουργία του συστήματος στον τρίτο κύκλο ήταν σχετικά σταθερή μετά και την 8<sup>η</sup> μέρα λειτουργίας όπου σε γενικές γραμμές οι συγκεντρώσεις σταθεροποιήθηκαν. Κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας η μείωση του HRT κατά μισή ώρα επέφερε περίπου διπλάσιες συγκεντρώσεις των MLSS και στις δύο δεξαμενές σε σχέση με τον τρίτο κύκλο (3,4 g/L CT και 6,1 g/L ST).

#### 4.3.2 Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

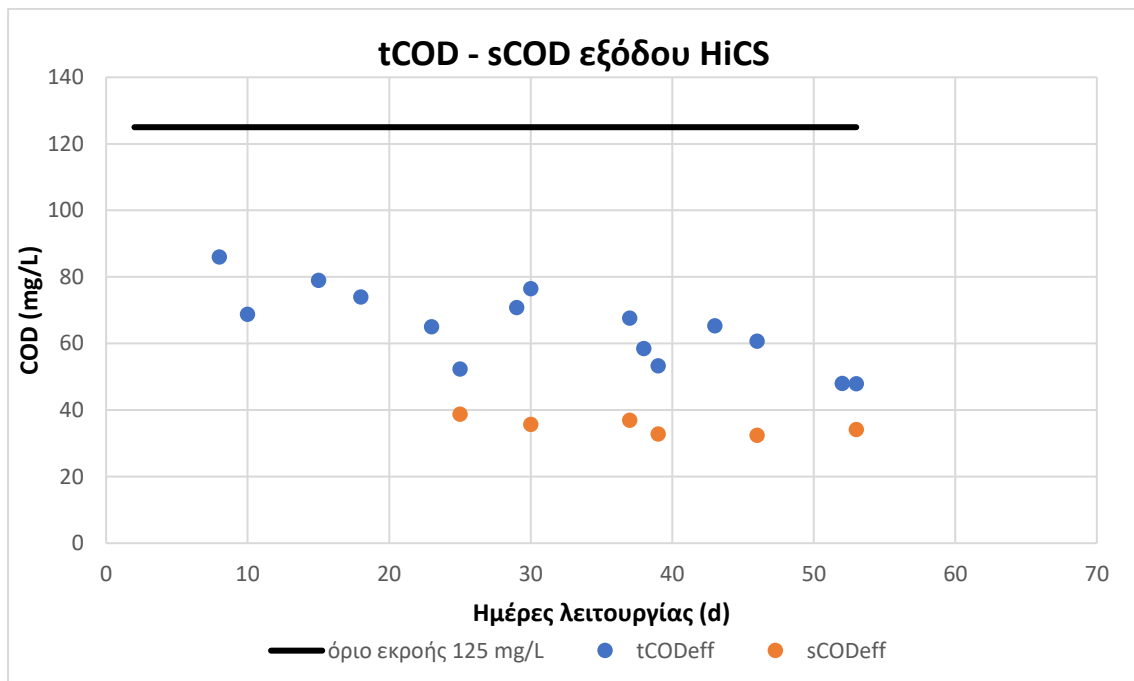
**Πίνακας 4.8:** Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

<b>Παράμετρος</b>	<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>3<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>	<b>4<sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας</b>
<b>Πιλοτικό σύστημα</b>	<b>HiCS - 1</b>	<b>HiCS - 2</b>	<b>HiCS - 3</b>	<b>HiCS - 4</b>
<b>tCOD<sub>in</sub> (mg / L)</b>	560 ± 61	664,5 ± 77,5	568 ± 51	620 ± 78
<b>pCOD<sub>in</sub> (mg / L)</b>	380 ± 41,5	444 ± 51	386 ± 37	422 ± 53
<b>cCOD<sub>in</sub> (mg / L)</b>	50 ± 5,5	59 ± 7	51 ± 5	56 ± 7
<b>sCOD<sub>in</sub> (mg / L)</b>	128,5 ± 14	150 ± 17	130,5 ± 12,5	143 ± 18
<b>TSS<sub>in</sub> (mg / L)</b>	266 ± 82	291 ± 40	276 ± 58	285 ± 55
<b>tCOD<sub>eff</sub> (mg / L)</b>	83 ± 25	60 ± 10	80 ± 22	250 ± 40
<b>pCOD<sub>eff</sub> (mg / L)</b>	24 ± 11	21 ± 8	27 ± 13	164 ± 43
<b>cCOD<sub>eff</sub> (mg / L)</b>	6 ± 4	3 ± 2	10 ± 8	26,5 ± 6,5
<b>sCOD<sub>eff</sub> (mg / L)</b>	54 ± 20	35 ± 2	38 ± 9	61 ± 12
<b>TSS<sub>eff</sub> (mg / L)</b>	23 ± 15	20 ± 20	44 ± 40	107 ± 30
<b>BOD<sub>5eff</sub> (mg / L)</b>	19,5	14	24	108
<b>EPS (mgCOD/gVSS)</b>	82 / 52*	50 / 77,5*	80,5 / 73*	49,4 / 60*
<b>SMP (mgCOD/gVSS)</b>	51 / 30*	29 / 7,7*	36 / 15 *	-

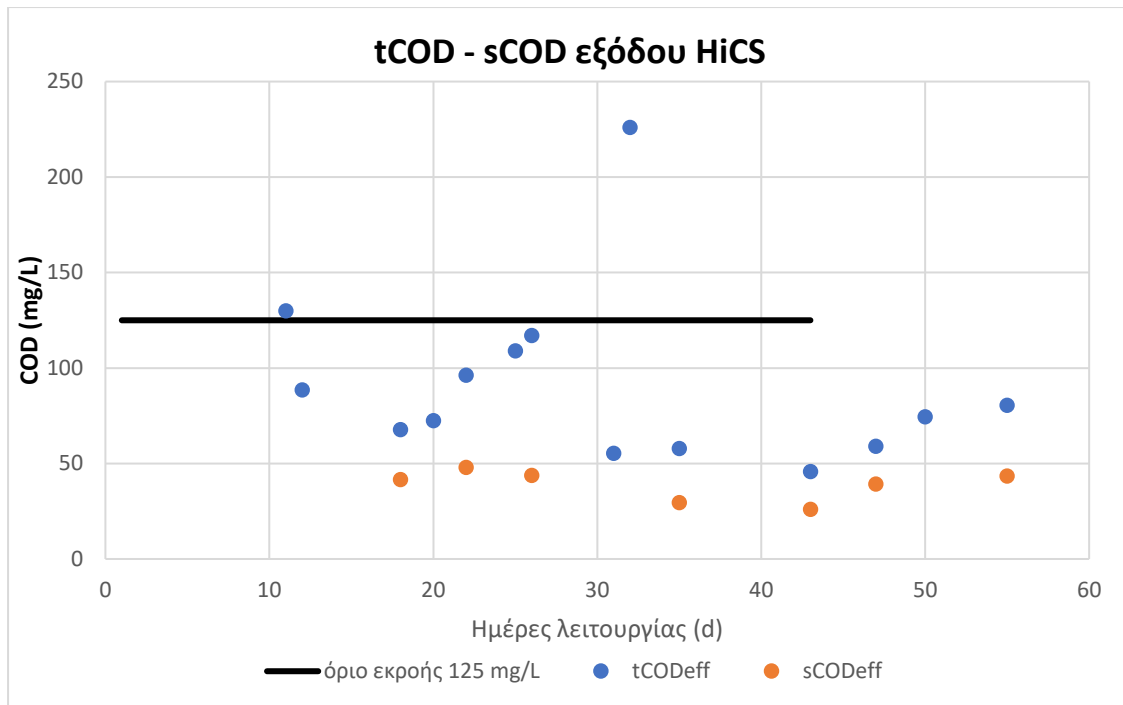
\*Δεξαμενή επαφής (contact tank) / Δεξαμενή σταθεροποίησης (stabilization tank)



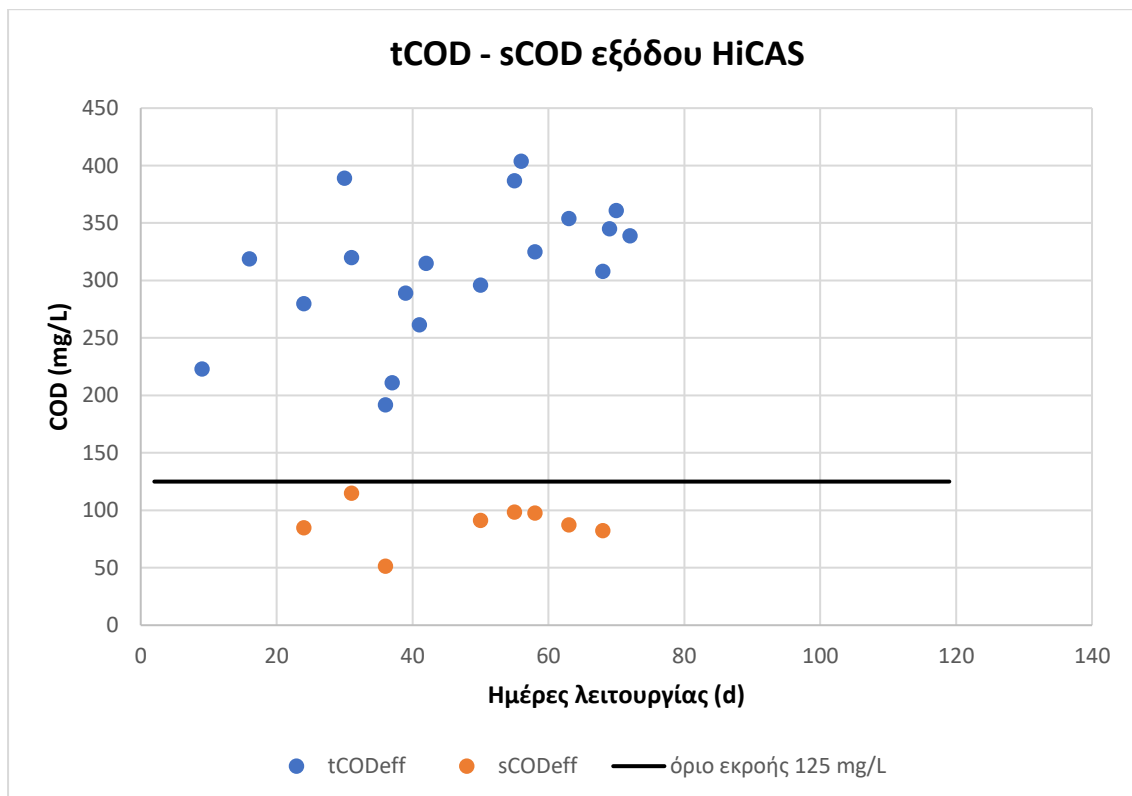
**Σχήμα 4.35:** Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.36:** Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας

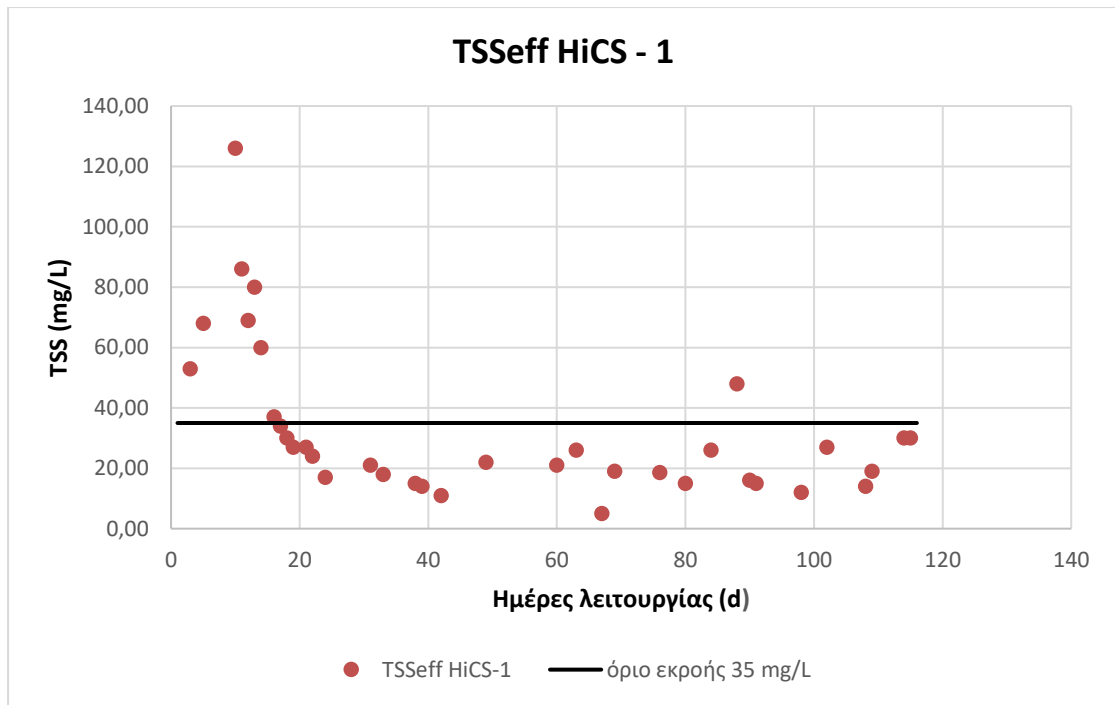


**Σχήμα 4.37:** Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας

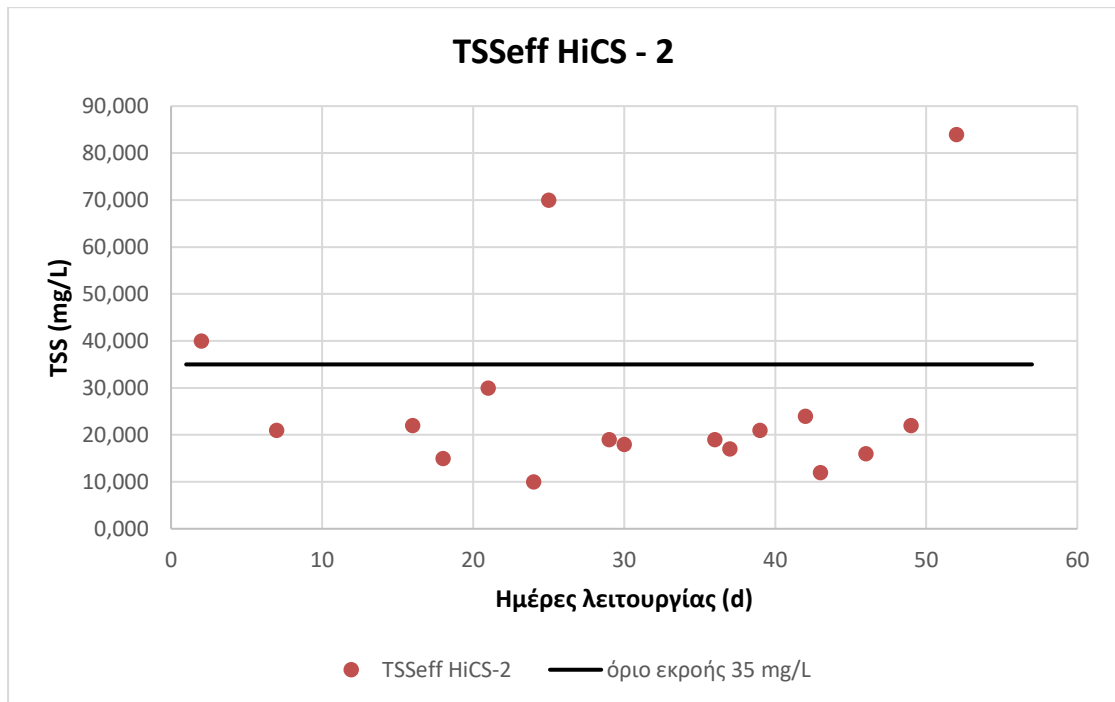


**Σχήμα 4.38:** Κατανομή της συγκέντρωσης του ολικού (t) και διαλυτού (s) COD εξόδου του πιλοτικού συστήματος HiCAS σε σχέση με το όριο εκροής που επιβάλλει η νομοθεσία κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

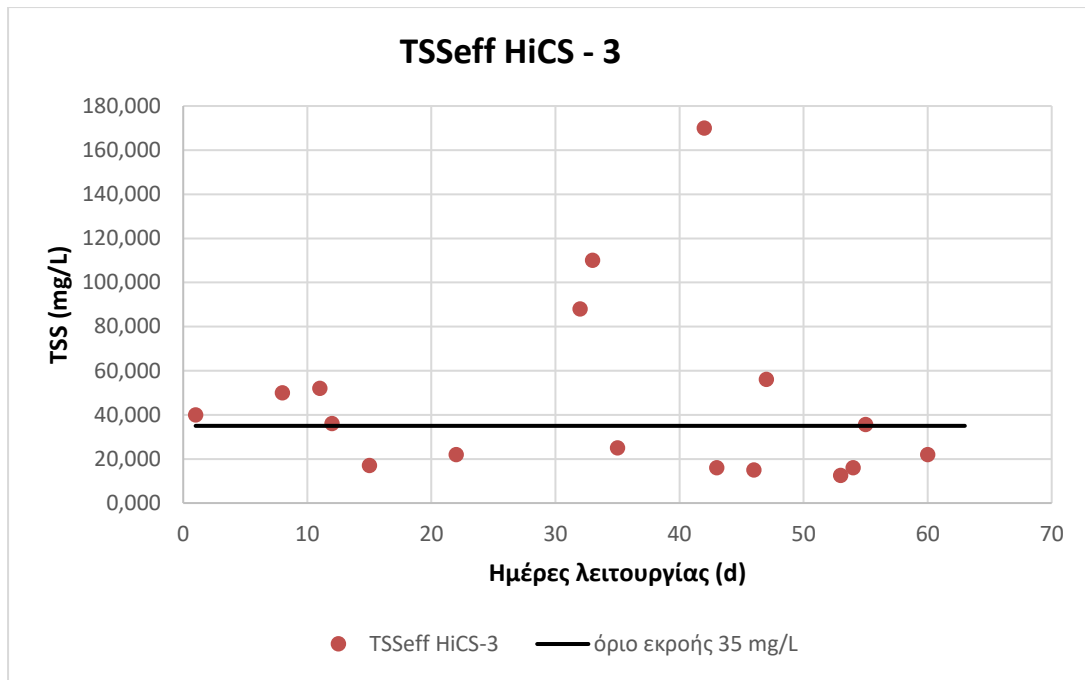
Από τα παραπάνω διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης του ολικού (t) και του διαλυτού (s) COD στην έξοδο του πιλοτικού συστήματος HiCS, φαίνεται ότι κατά τους τρεις πρώτους κύκλους και αφού το σύστημα σταθεροποίησε τη συγκέντρωση των MLSS του, το ολικό COD της εξόδου βρίσκεται κάτω από το όριο που επιβάλλει η νομοθεσία, με καλύτερη έξοδο να συναντάται στον δεύτερο κύκλο λειτουργίας (83, 60 και 80 mg/L). Η υψηλότερη συγκέντρωση COD εξόδου βρίσκεται στο διαλυτό κλάσμα με συγκεντρώσεις 54, 35 και 38 mg/L sCOD κατά τους τρεις πρώτους κύκλους λειτουργίας. Στον τέταρτο κύκλο οι συγκεντρώσεις αυξάνονται αισθητά σε 164 και 61 mg/L tCOD και sCOD αντίστοιχα. Προφανώς και τα αποτελέσματα είναι αισθητά καλύτερα σε σχέση με το σύστημα HiCAS εφόσον η επιπλέον δεξαμενή σταθεροποίησης επιτρέπει επιπλέον αερόβιο χρόνο επεξεργασίας και απομάκρυνση περεταίρω οργανικού φορτίου. Κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας όπου έχουμε τις πιο σύντομες χρονικά συνθήκες λειτουργίας (0,5 h HRT και 1 d SRT) ολικό COD εξόδου βρίσκεται πάνω από το όριο που επιβάλλει η νομοθεσία. Αντίστοιχα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και από τα διαγράμματα της κατανομής των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στην έξοδο του HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας, όπου στους δύο πρώτους οι συγκεντρώσεις στερεών εξόδου βρίσκονται κάτω από το όριο της νομοθεσίας με συγκεντρώσεις 23 και 20 mg/L αντίστοιχα, ενώ στον τρίτο κύκλο η συγκέντρωση TSS εξόδου αυξήθηκε σε 44 mg/L και στον τέταρτο κύκλο λειτουργίας οι συγκεντρώσεις των TSS αυξάνονται αισθητά στα 107 mg/L.



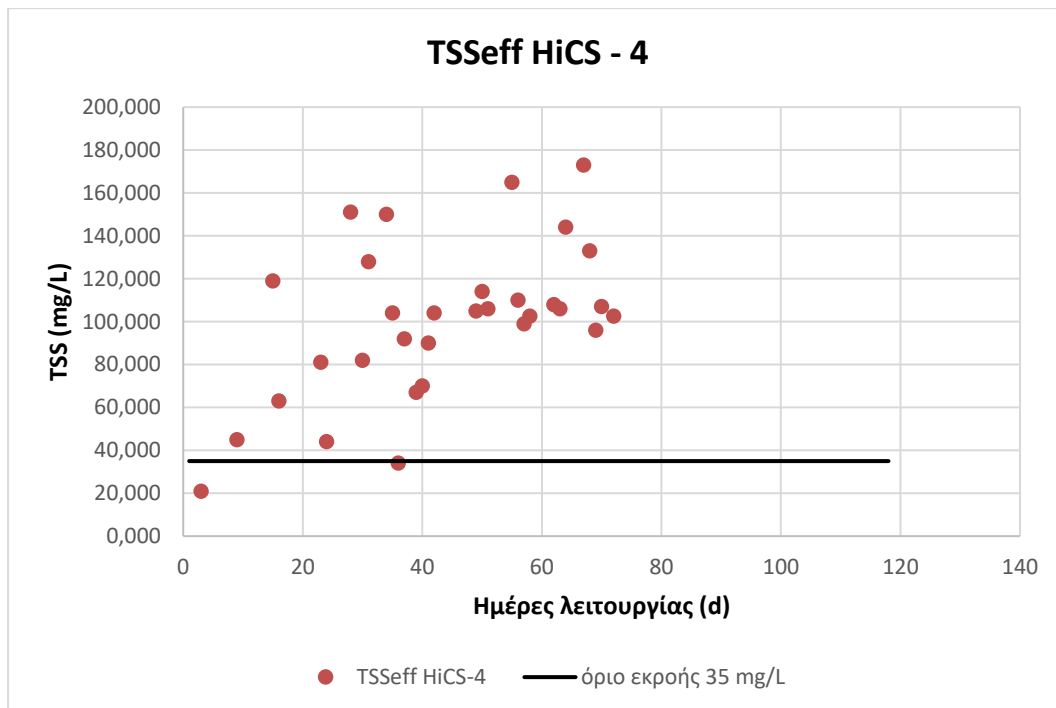
**Σχήμα 4.39:** Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας



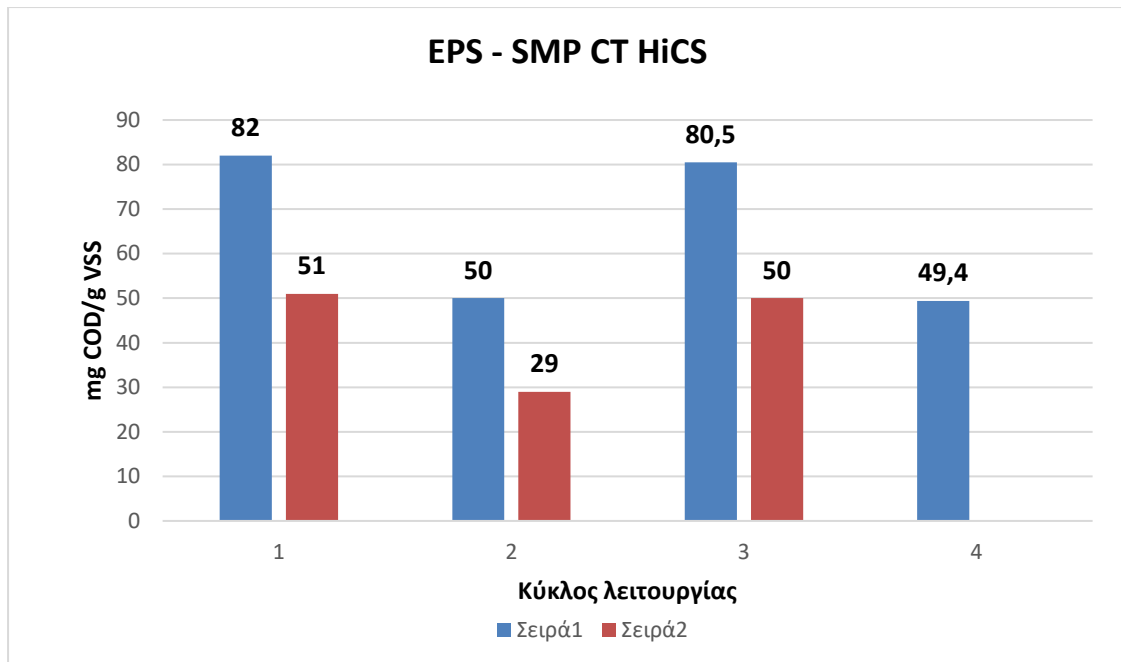
**Σχήμα 4.40:** Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSeff) του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας



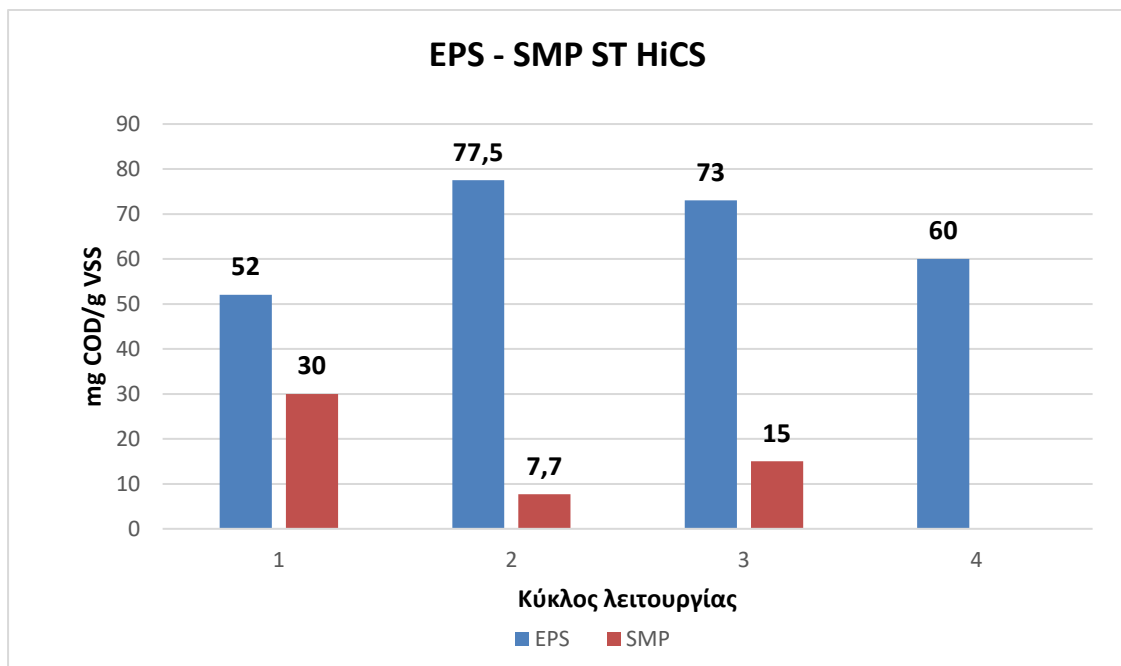
**Σχήμα 4.41:** Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSEff) του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.42:** Κατανομή της συγκέντρωσης των ολικών αιωρούμενων στερεών εξόδου (TSSEff) του πιλοτικού συστήματος HiCS σε σχέση με το όριο εκροής κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.43:** Συγκεντρώσεις EPS και SMP δεξαμενής επαφής πιλοτικού συστήματος HiCS ανά εξεταζόμενο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.44:** Συγκεντρώσεις EPS και SMP δεξαμενής σταθεροποίησης πιλοτικού συστήματος HiCS ανά εξεταζόμενο κύκλο λειτουργίας

Από τα διαγράμματα της συγκέντρωσης των EPS και SMP για τις δύο δεξαμενές του πιλοτικού συστήματος HiCS φαίνεται πως η συγκέντρωση των EPS είναι μεγαλύτερη στη δεξαμενή σταθεροποίησης από αυτήν της επαφής με εξαίρεση



τον πρώτο κύκλο λειτουργίας. Αναντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα για την συγκέντρωση των SMP όπου η συγκέντρωσή τους είναι μεγαλύτερη στη δεξαμενή επαφής.

#### 4.3.3 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ως προς την απομάκρυνση των διαφορετικών κλασμάτων COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

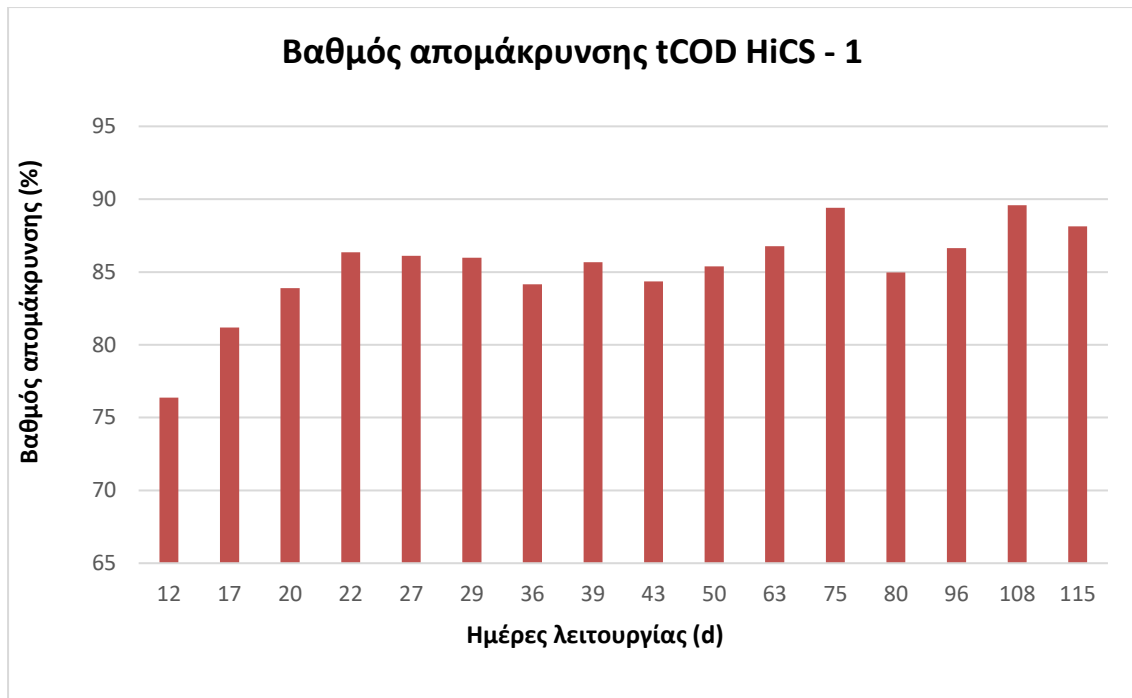
Ο υπολογισμός της απόδοσης του πιλοτικού συστήματος HiCS ως προς το ποσοστό απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου (COD) πραγματοποιήθηκε μέσω της σχέσης:

$$\text{Βαθμός απόδοσης (\%)} = \frac{COD_{in} - COD_{eff}}{COD_{in}} * 100$$

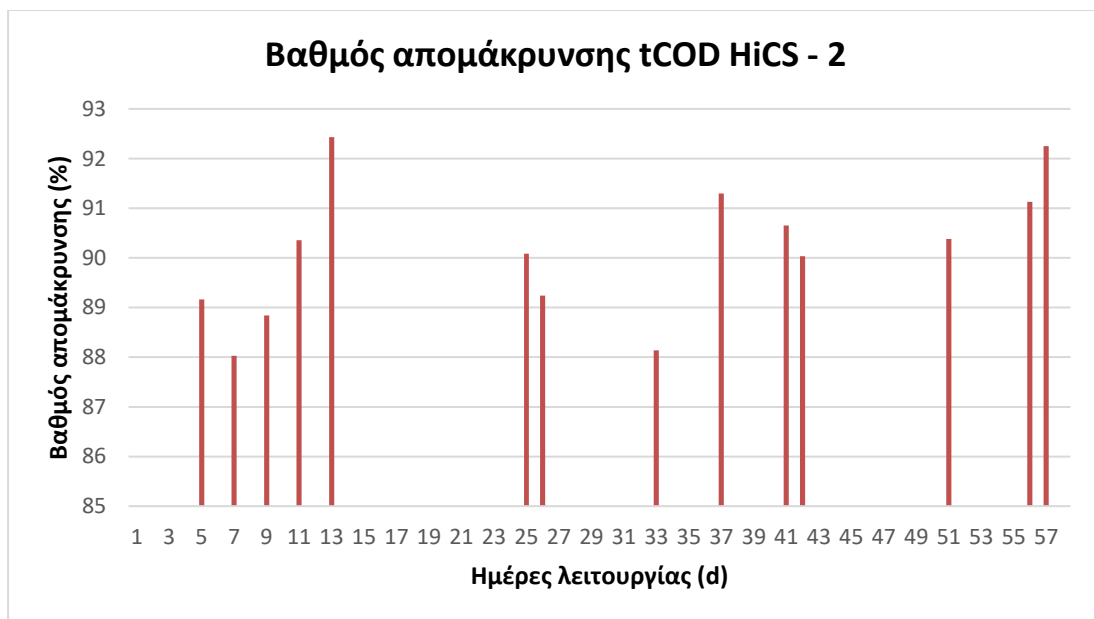
Υπολογίστηκαν οι βαθμοί απόδοσης απομάκρυνσης ως προς τα διαφορετικά κλάσματα του COD. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 4.9:** Βαθμοί απόδοσης απομάκρυνσης του πιλοτικού συστήματος HiCS ως προς τα διαφορετικά κλάσματα του COD

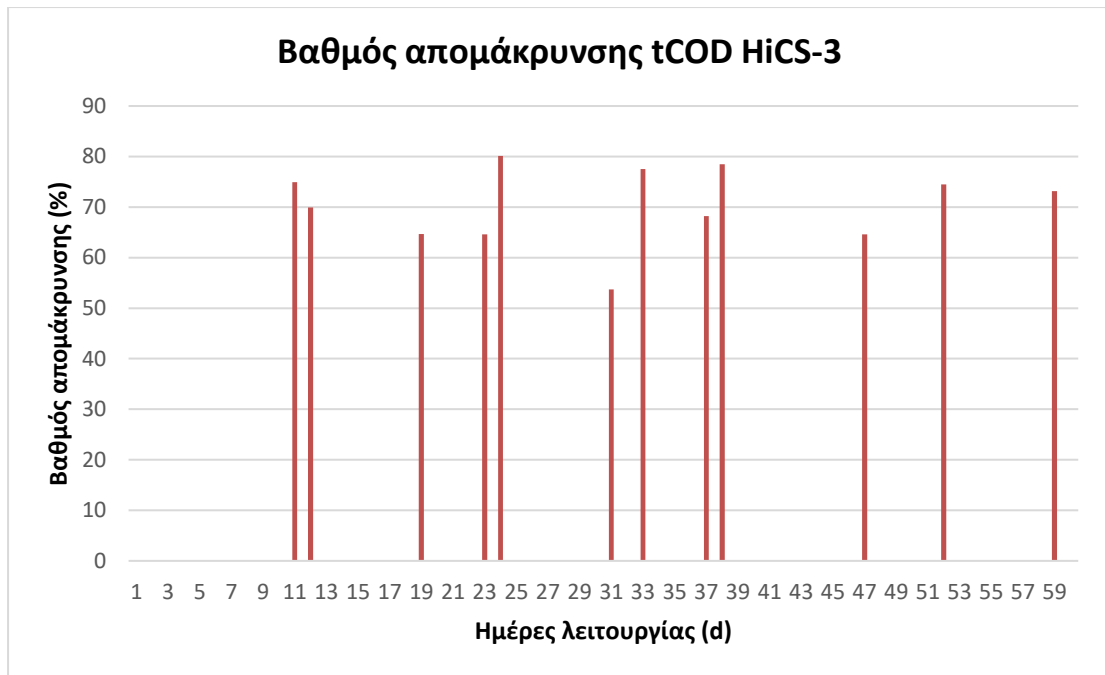
	1 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	2 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	3 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	4 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας
<b>Πιλοτικό σύστημα</b>	<b>HiCS - 1</b>	<b>HiCS - 2</b>	<b>HiCS - 3</b>	<b>HiCS - 4</b>
<b>Παράμετρος</b>	<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>	<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>	<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>	<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>
<b>tCOD</b>	85 ± 5	90 ± 1	86 ± 4	61,5 ± 6,5
<b>pCOD</b>	94 ± 3	94 ± 1	92 ± 3,5	61 ± 6
<b>cCOD</b>	84 ± 11	93 ± 4	73,5 ± 12	52 ± 11
<b>sCOD</b>	74 ± 20	97 ± 4	90,5 ± 8	57 ± 7,5



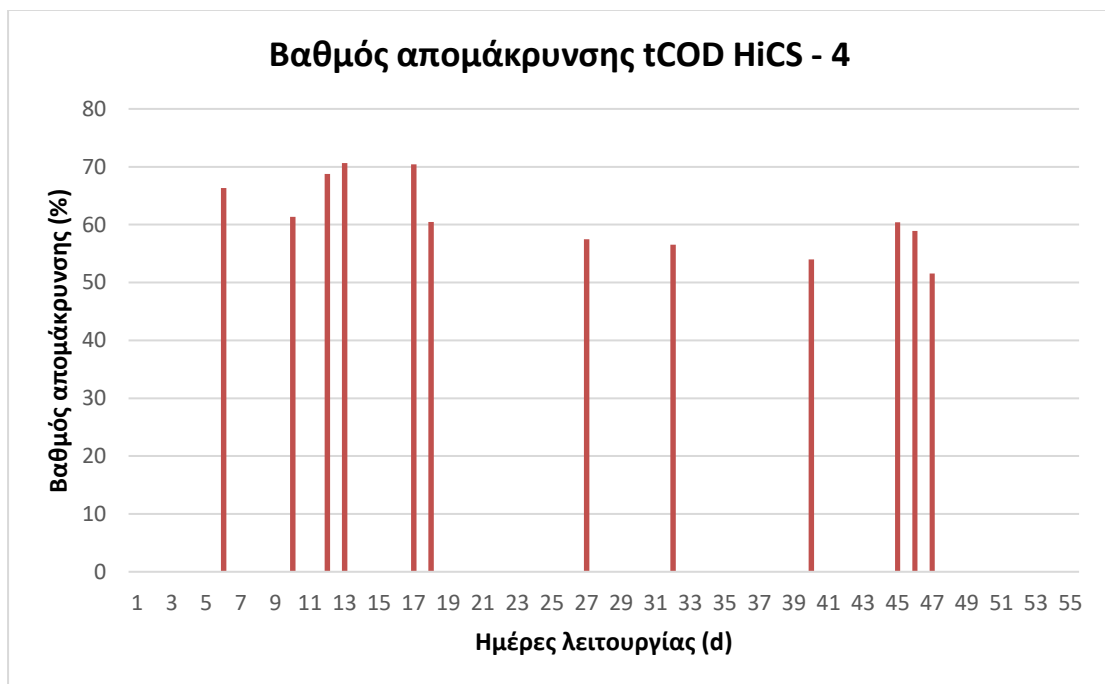
**Σχήμα 4.45:** Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.46:** Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας



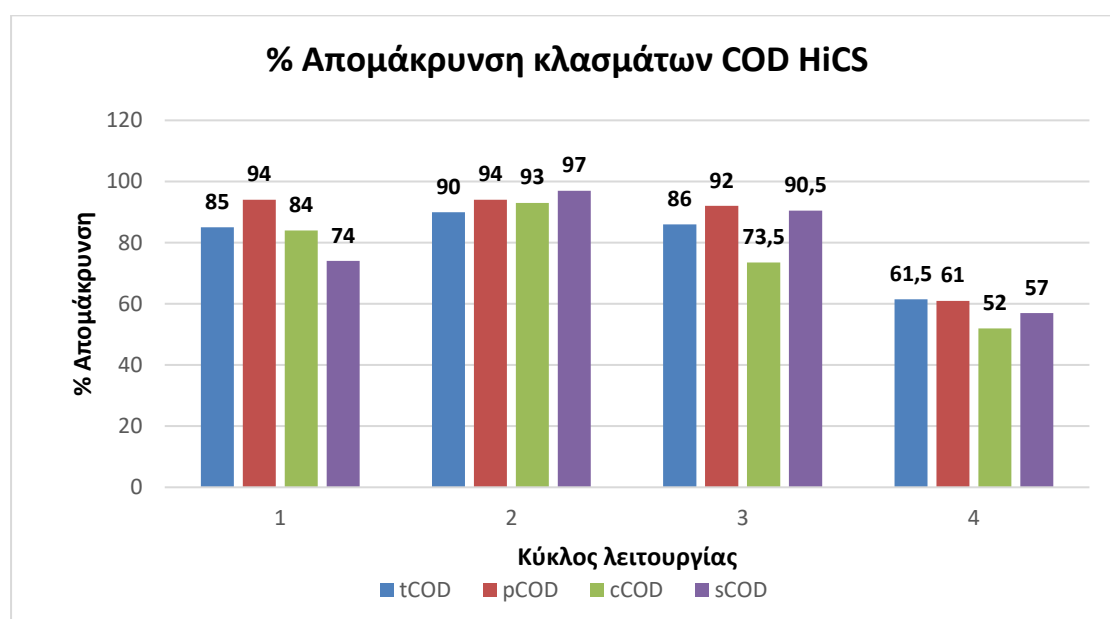
**Σχήμα 4.47:** Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας



**Σχήμα 4.48:** Βαθμός απομάκρυνσης ως προς το ολικό COD (tCOD) του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

Οι βαθμοί απόδοσης σε απομάκρυνση ολικού COD είναι αρκετά υψηλοί κατά τους τρεις πρώτους λειτουργίας και πετυχαίνουν ποσοστά απομάκρυνσης πάνω από

85%. Ιδιαίτερα υψηλή είναι η απόδοση του συστήματος HiCS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας (HRT 1 h, SRT 2 d), όπου πετυχαίνει ποσοστά απομάκρυνσης πάνω από 93% στα επιμέρους κλάσματα του COD (93% σε κολλοειδές COD, 94% σε σωματιδιακό COD και 97% σε διαλυτό COD). Παρατηρούνται παραπλήσια ποσοστά απομάκρυνσης όσον αφορά το κολλοειδές και το διαλυτό COD κατά τους κύκλους λειτουργίας με εξαίρεση τον τρίτο κύκλο όπου παρουσιάζεται σημαντικά υψηλότερη απομάκρυνση σε διαλυτό (90,5%) σε σχέση με το κολλοειδές COD (73,5%). Κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας οι βαθμοί απόδοσης μειώνονται αισθητά με τα ποσοστά να δείχνουν 61,5% απομάκρυνση σε tCOD (61% pCOD 52% cCOD και 57% sCOD).



**Σχήμα 4.49:** Συγκεντρωτικό γράφημα απομάκρυνσης κλασμάτων COD κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας πιλοτικού συστήματος HiCS

#### 4.3.4 Ισοζύγιο COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και αναφέρεται στο κεφάλαιο 3 (βλέπε 3.5.2) σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού του ισοζυγίου του COD των πιλοτικών συστημάτων HRAS παρακάτω παρουσιάζονται οι επιμέρους όροι του πιλοτικού συστήματος HiCS για τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας:

### Ισοζύγιο COD HiCS – Πρώτος κύκλος λειτουργίας

$$MCOD_{EΙΣ} = MCO D_{EΕ} + MCO D_{IAYOΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ}$$

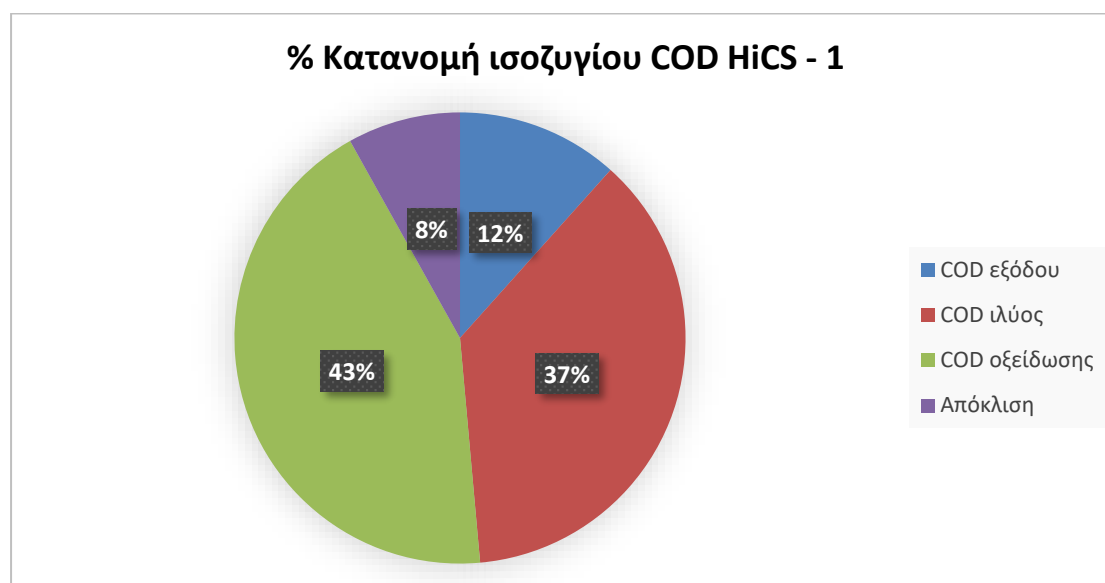
$$MCOD_{EΙΣ} = Q_{EΙΣ} \times COD_{EΙΣ} = 180 \text{ L/d} * 0,627 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΙΣ} = 112,86 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{EΕ} = Q_{EΕ} \times COD_{EΕ} = 160 \text{ L/d} * 0,082 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΕ} = 13,12 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{IAYOΣ} = W \times COD_{IAYOΣ} = 20 \text{ L/d} * 2,085 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{IAYOΣ} = 41,7 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{OΞEΙΔ} = OUR_{αντιδραστήρα} \times MLVSS \times V_{αντιδραστήρα} \times \frac{24}{1000} \rightarrow MCO D_{OΞEΙΔ} = 48,9 \text{ g/d}$$

$$Απόκλιση = \frac{[MCOD_{EΙΣ} - (MCOD_{EΕ} + MCO D_{IAYOΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ})]}{MCOD_{EΙΣ}} * 100 = 8,1 \%$$



**Σχήμα 4.50:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον πρώτο κύκλο λειτουργίας

### Ισοζύγιο COD HiCS – Δεύτερος κύκλος λειτουργίας

$$MCOD_{EΙΣ} = MCO D_{EΕ} + MCO D_{IAYOΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ}$$

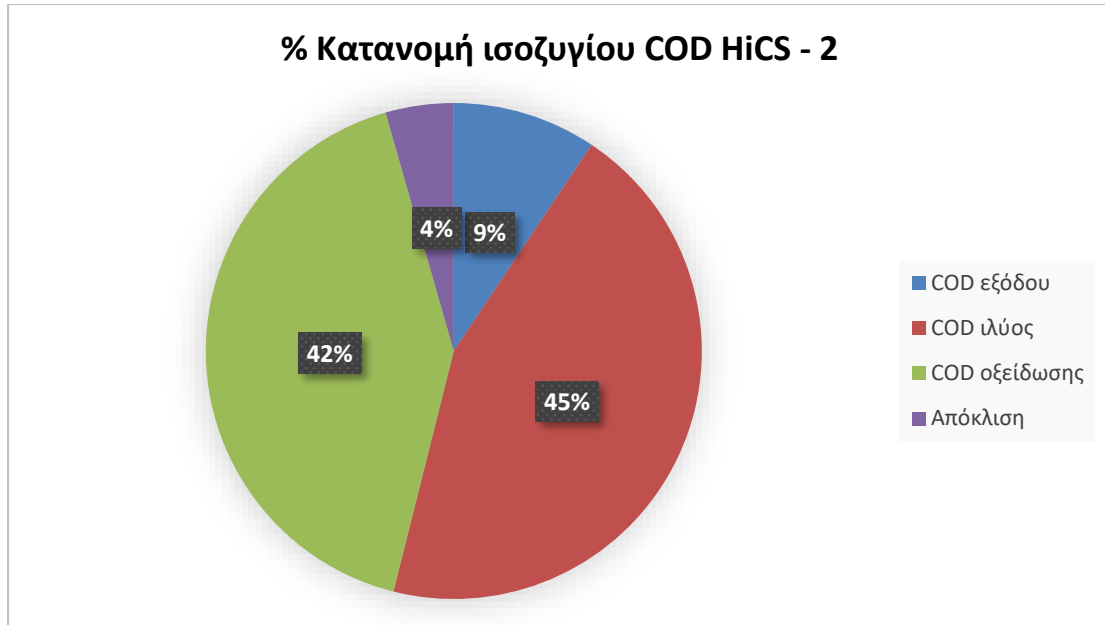
$$MCOD_{EΙΣ} = Q_{EΙΣ} \times COD_{EΙΣ} = 360 \text{ L/d} * 0,672 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΙΣ} = 241,92 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{EΕ} = Q_{EΕ} \times COD_{EΕ} = 360 \text{ L/d} * 0,063 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΕ} = 22,68 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{IAYOΣ} = W \times COD_{IAYOΣ} = 20,72 \text{ L/d} * 5,2 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{IAYOΣ} = 107,74 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{OΞEΙΔ} = OUR_{αντιδραστήρα} \times MLVSS \times V_{αντιδραστήρα} \times \frac{24}{1000} \rightarrow MCO D_{OΞEΙΔ} = 100,76 \text{ g/d}$$

$$Απόκλιση = \frac{[MCOD_{EΙΣ} - (MCOD_{EΕ} + MCO D_{IAYOΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ})]}{MCOD_{EΙΣ}} * 100 = 4,44 \%$$



**Σχήμα 4.51:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας

#### Ισοζύγιο COD HiCS – Τρίτος κύκλος λειτουργίας

$$MCOD_{EΙΣ} = MCO D_{EΞ} + MCO D_{IΛYOCΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ}$$

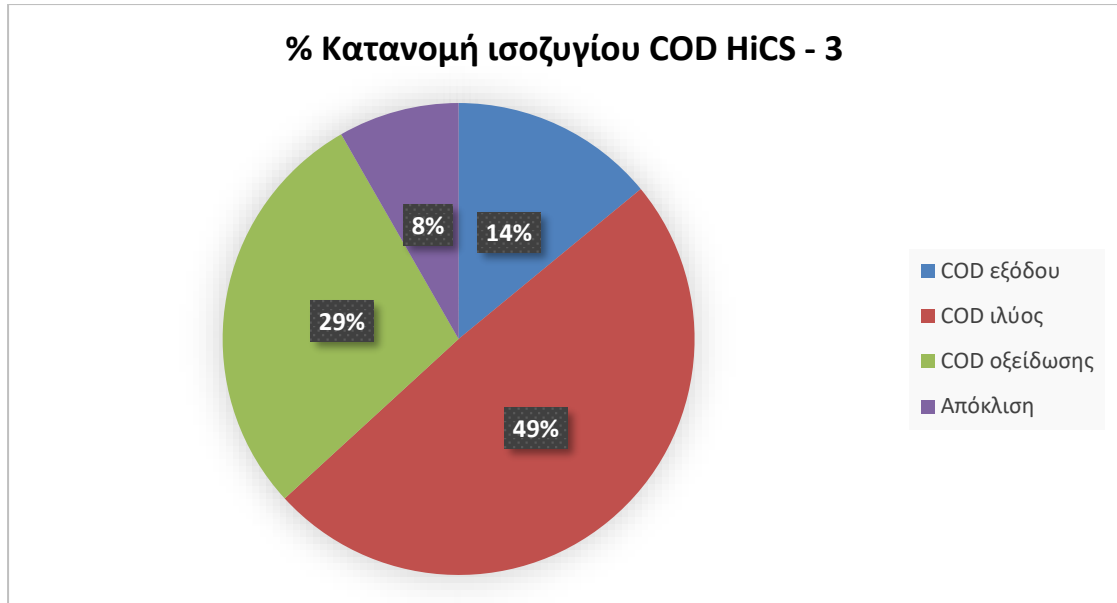
$$MCOD_{EΙΣ} = Q_{EΙΣ} \times COD_{EΙΣ} = 360 \text{ L/d} * 0,633 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΙΣ} = 227,88 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{EΞ} = Q_{EΞ} \times COD_{EΞ} = 320 \text{ L/d} * 0,1 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΞ} = 32 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{IΛYOCΣ} = W \times COD_{IΛYOCΣ} = 40 \text{ L/d} * 2,8 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{IΛYOCΣ} = 112 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{OΞEΙΔ} = OUR_{αντιδραστήρα} \times MLVSS \times V_{αντιδραστήρα} \times \frac{24}{1000} \rightarrow MCO D_{OΞEΙΔ} = 65 \text{ g/d}$$

$$Απόκλιση = \frac{[MCOD_{EΙΣ} - (MCOD_{EΞ} + MCO D_{IΛYOCΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ})]}{MCOD_{EΙΣ}} * 100 = 8,29 \%$$



**Σχήμα 4.52:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τρίτο κύκλο λειτουργίας

#### **Ισοζύγιο COD HiCS – Τέταρτος κύκλος λειτουργίας**

$$MCOD_{EΙΣ} = MCO D_{EΕ} + MCO D_{IΛΥOΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ}$$

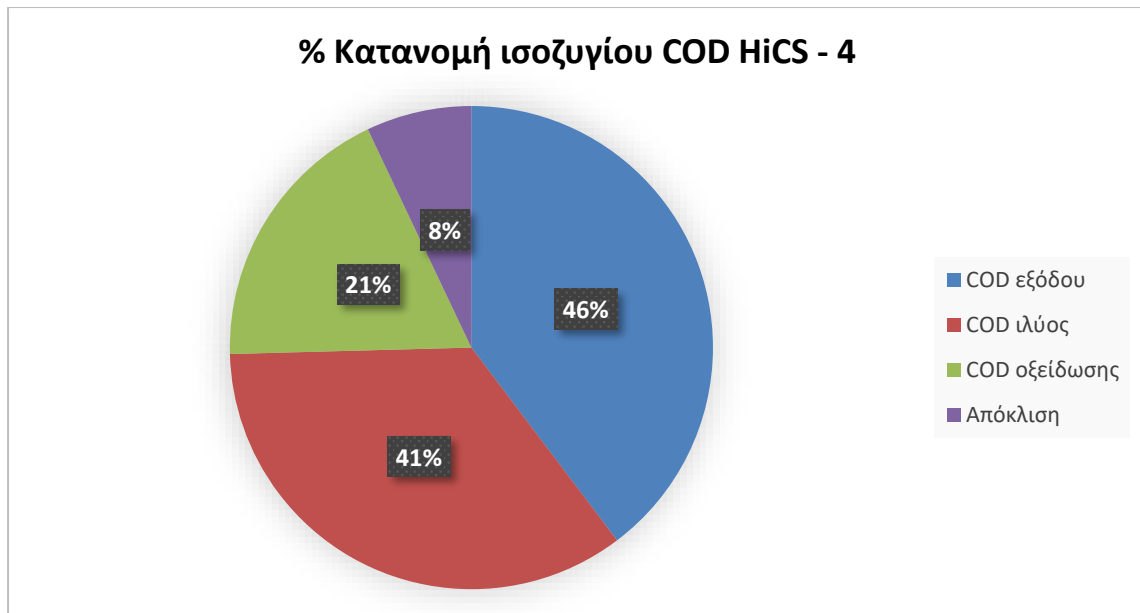
$$MCOD_{EΙΣ} = Q_{EΙΣ} \times COD_{EΙΣ} = 720 \text{ L/d} * 0,578 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΙΣ} = 416,16 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{EΕ} = Q_{EΕ} \times COD_{EΕ} = 687 \text{ L/d} * 0,28 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{EΕ} = 192,36 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{IΛΥOΣ} = W \times COD_{IΛΥOΣ} = 33 \text{ L/d} * 5,12 \text{ g/L} \rightarrow MCO D_{IΛΥOΣ} = 168,96 \text{ g/d}$$

$$MCOD_{OΞEΙΔ} = OUR_{αντιδραστική} \times MLVSS \times V_{αντιδραστική} \times \frac{24}{1000} \rightarrow MCO D_{OΞEΙΔ} = 89 \text{ g/d}$$

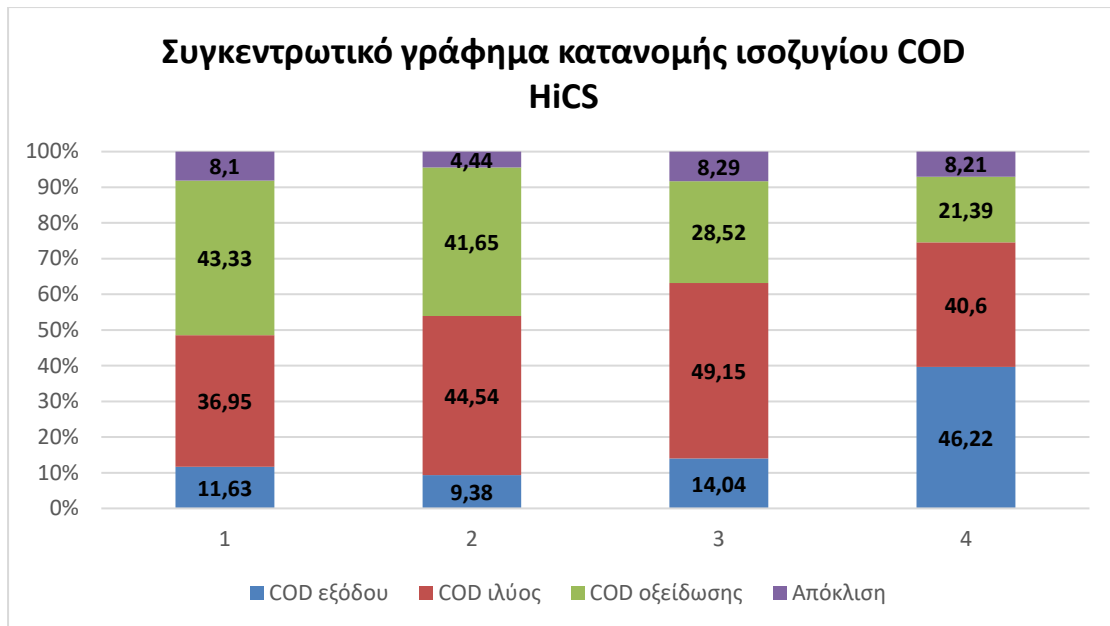
$$Απόκλιση = \frac{[MCOD_{EΙΣ} - (MCO D_{EΕ} + MCO D_{IΛΥOΣ} + MCO D_{OΞEΙΔ})]}{MCOD_{EΙΣ}} * 100 = - 8,21 \%$$



**Σχήμα 4.53:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας

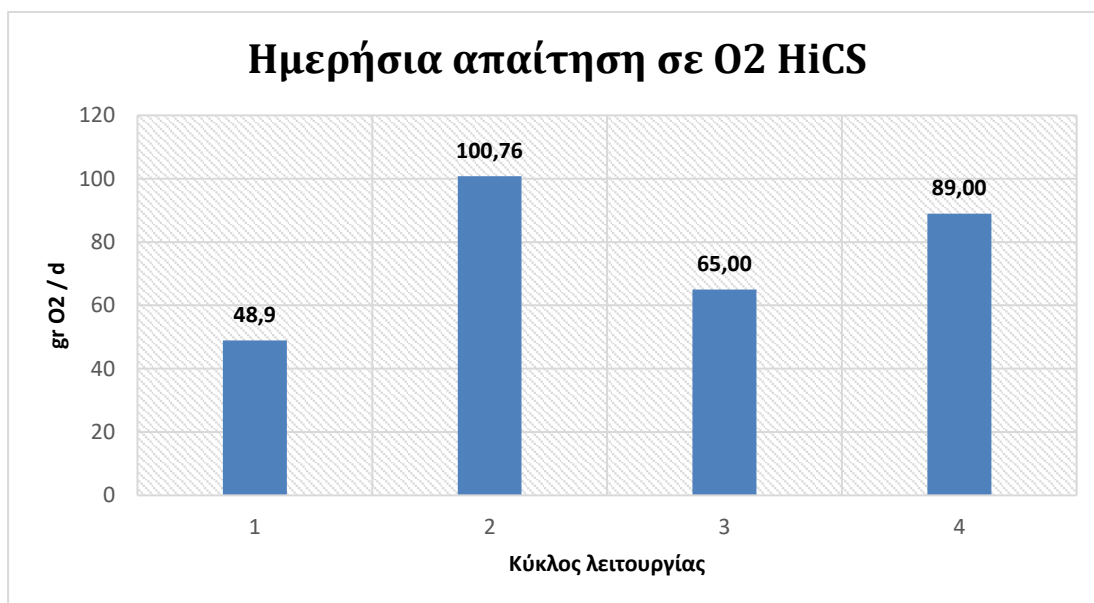
Από τα ποσοστά ισοζυγίου του COD κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας φαίνεται ότι υπάρχει αυξητική τάση στο ποσοστό του COD στο ρεύμα της ιλύος έως και τον τρίτο κύκλο λειτουργίας. Μόνο κατά την μετάβαση από τον κύκλο 3 στον κύκλο 4 το ποσοστό COD στο ρεύμα της ιλύος μειώθηκε από 49 σε 41%. Τα ποσοστά κυμαίνονται από 37 έως και 49% στην ιλύ, σχετικά υψηλά, γεγονός που ενδέχεται να οφείλεται στον αερισμό της βιομάζας στη δεξαμενή σταθεροποίησης που επιτρέπει την οξείδωση του ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου κλάσματος του COD και ενός μέρους του προσροφημένου σωματιδιακού και κολλοειδούς COD που υδρολύεται, δημιουργώντας έτσι ελεύθερες περιοχές στην επιφάνεια των κροκίδων και κενό χώρο για προσρόφηση και ενδοκυτταρική αποθήκευση έπειτα στην δεξαμενή επαφής. Το ποσοστό του COD που οξειδώνεται μειώνεται σταθερά όσο μειώνονται και οι χρόνοι επεξεργασίας σε κάθε κύκλο λειτουργίας (από 43%, 42%, 29% και 21% αντίστοιχα σε κάθε κύκλο). Το ποσοστό COD εξόδου είναι χαμηλό κατά τους τρεις πρώτους κύκλους (9-14 %) ενώ αυξάνεται κατά πολύ στον τέταρτο κύκλο (46%) πράγμα που επιβεβαιώνει και τους βαθμούς απόδοσης που αναλύθηκαν παραπάνω.





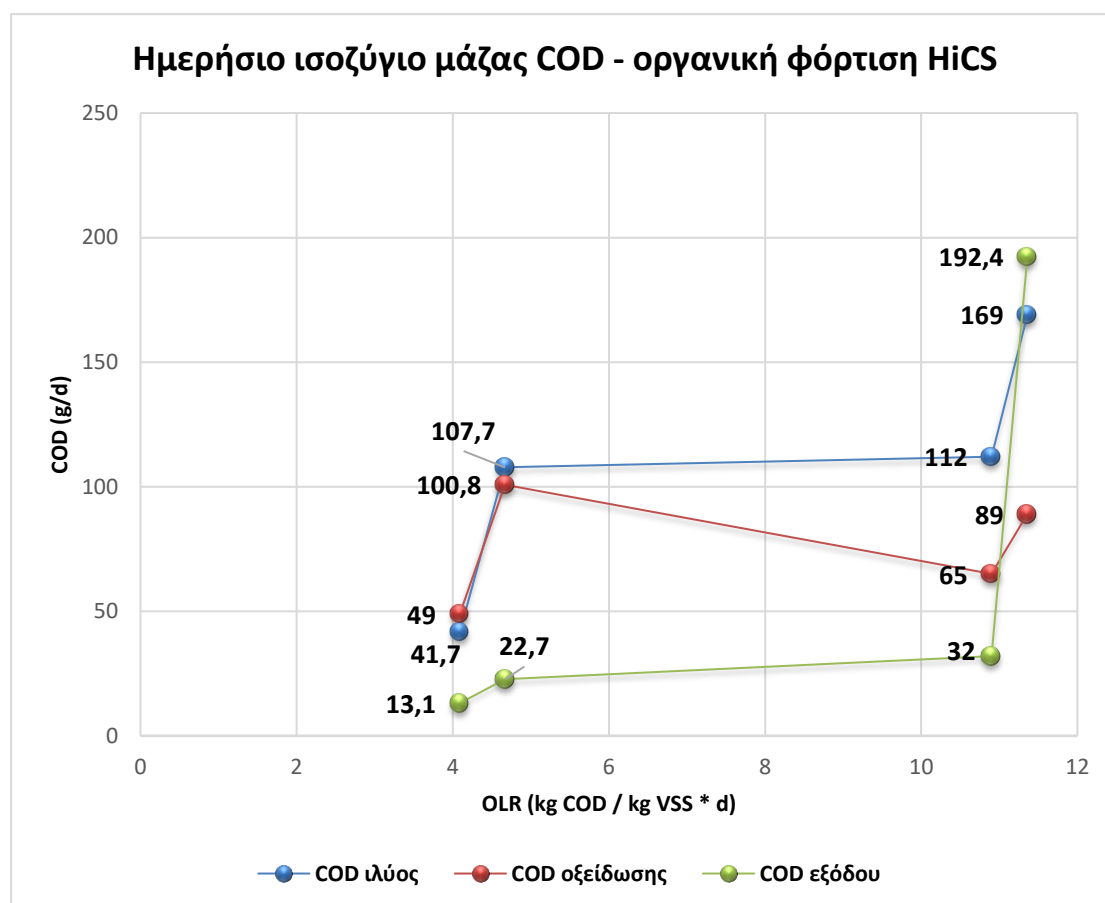
**Σχήμα 4.54:** Συγκεντρωτικό γράφημα ποσοστιαίας κατανομής του ισοζυγίου του COD πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Από το ισοζύγιο του COD υπολογίζουμε την ποσότητα οξυγόνου που απαιτήθηκε από το σύστημα HiCS καθημερινά για τον κάθε κύκλο λειτουργίας με βάση την τιμή του COD που οξειδώθηκε σε g O<sub>2</sub>/d.



**Σχήμα 4.55:** Ημερήσια απαίτηση σε g O<sub>2</sub> πιλοτικού συστήματος HiCS για τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

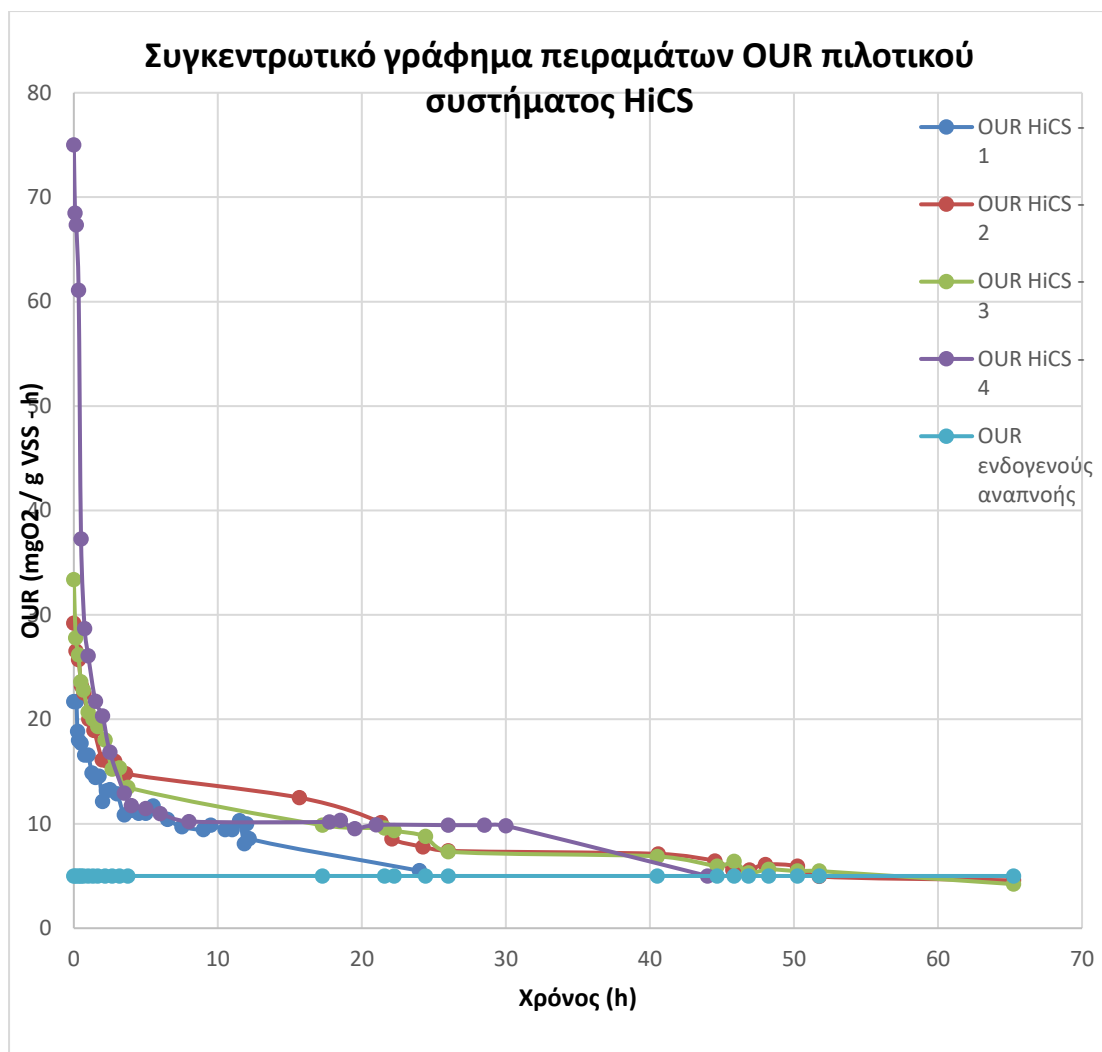
Μεγαλύτερη απαίτηση σε οξυγόνο συναντάμε στον δεύτερο κύκλο λειτουργίας όπου οξειδώνεται και μεγαλύτερη ποσότητα COD αναλογικά με την οργανική φόρτιση που δέχεται το σύστημα. Στην συνέχεια δηλαδή στον κύκλο 3 και 4 όπου είχαμε ίδιο χρόνο παραμονής στερεών (1 d) και 1 και 0,5 ώρα υδραυλικό χρόνο επαφής, φαίνεται η απαίτηση σε οξυγόνο να αυξάνεται όσο οι συνθήκες γίνονται εντονότερες.



**Σχήμα 4.56:** Επίδραση της οργανικής φόρτισης στο ημερήσιο ισοζύγιο μάζας του COD στο πιλοτικό σύστημα HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

#### 4.3.5 Χαρακτηρισμός της πλεονάζουσας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCS με τη μέθοδο προσδιορισμού της ταχύτητας αποξυγόνωσης (O.U.R.)

Η μεθοδολογία της πειραματικής διαδικασίας καθώς και η μέθοδος υπολογισμού των συγκεντρώσεων των διαφορετικών κλασμάτων COD στην πλεονάζουσα ιλύ των πιλοτικών συστημάτων έχει αναλυθεί παραπάνω. Καθώς λοιπόν δεν υπάρχει κάποια διαφορά στη μεθοδολογία για το πιλοτικό σύστημα HiCS τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:



**Σχήμα 4.57:** Συγκεντρωτικό γράφημα πειραμάτων Ο.Υ.Ρ. πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

**Πίνακας 4.10:** Χαρακτηρισμός κλασμάτων COD της πλεονάζουσας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Κλάσμα COD	HiCS - 1	HiCS - 2	HiCS - 3	HiCS - 4
Εύκολα βιοδιασπάσιμο (mg/L)	0	22	35	241
Ενδοκυτταρικά αποθηκευμένο (mg/L)	12	33	62	59
Κολλοειδές (mg/L)	106	251	377	654
Σωματιδιακό (mg/L)	342	514	886	1066
<b>Συνολικά (mg/L)</b>	<b>460</b>	<b>820</b>	<b>1360</b>	<b>2020</b>

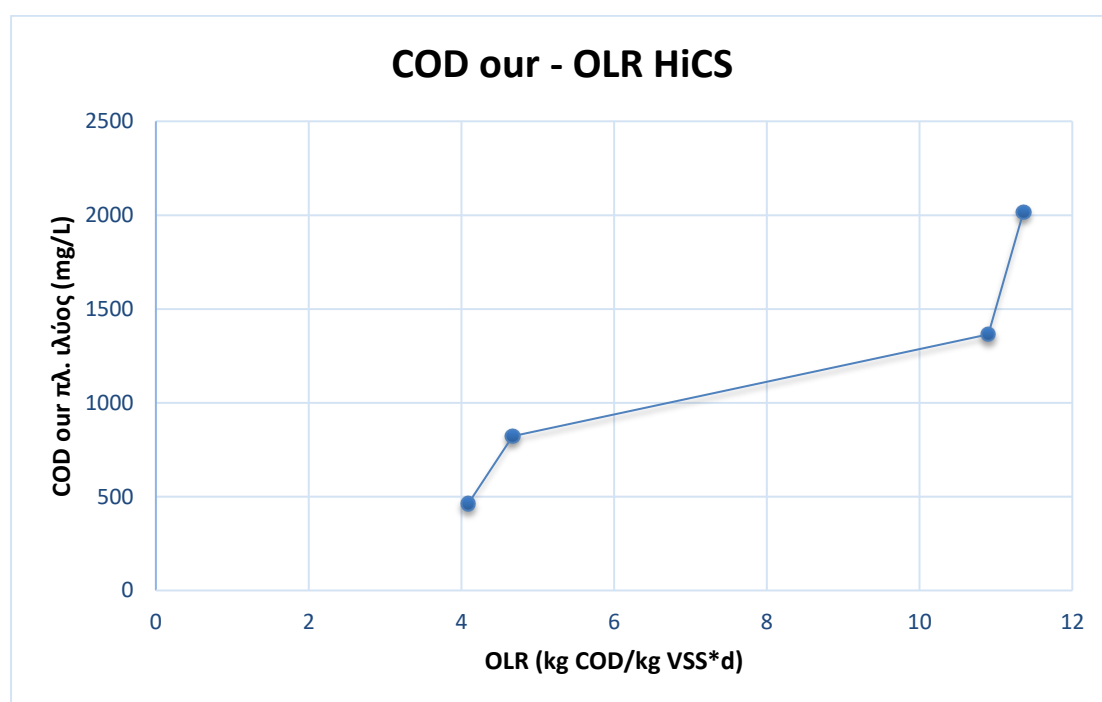
Η συγκέντρωση του COD στο ρεύμα της ιλύος αυξάνεται καθώς οι χρόνοι επεξεργασίας μειώνονται από κύκλο σε κύκλο όπως φαίνεται και από τα εμβαδά και τις μέγιστες κλίσεις του συγκεντρωτικού διαγράμματος για τα πειράματα OUR. Η αναλογία της συγκέντρωσης του COD που προέκυψε από τα πειράματα o.u.r. με την συγκέντρωση των VSS των πειραμάτων είναι:

1<sup>ος</sup> Κύκλος → 329 mgCOD / gVSS

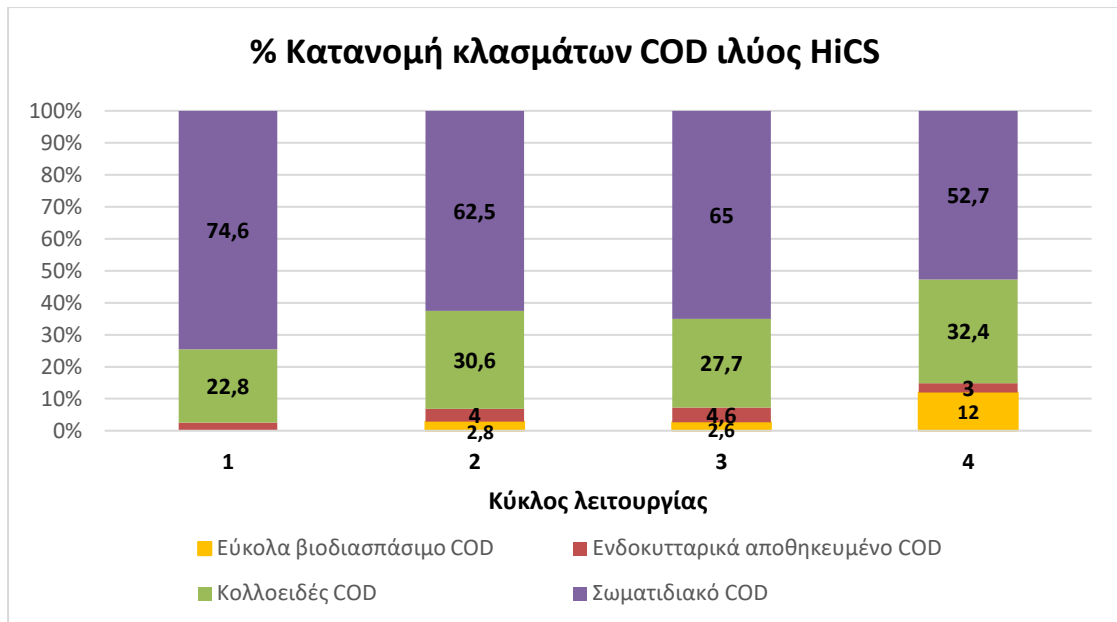
2<sup>ος</sup> Κύκλος → 390 mgCOD / gVSS

3<sup>ος</sup> Κύκλος → 791 mgCOD / gVSS

4<sup>ος</sup> Κύκλος → 1098 mgCOD / gVSS

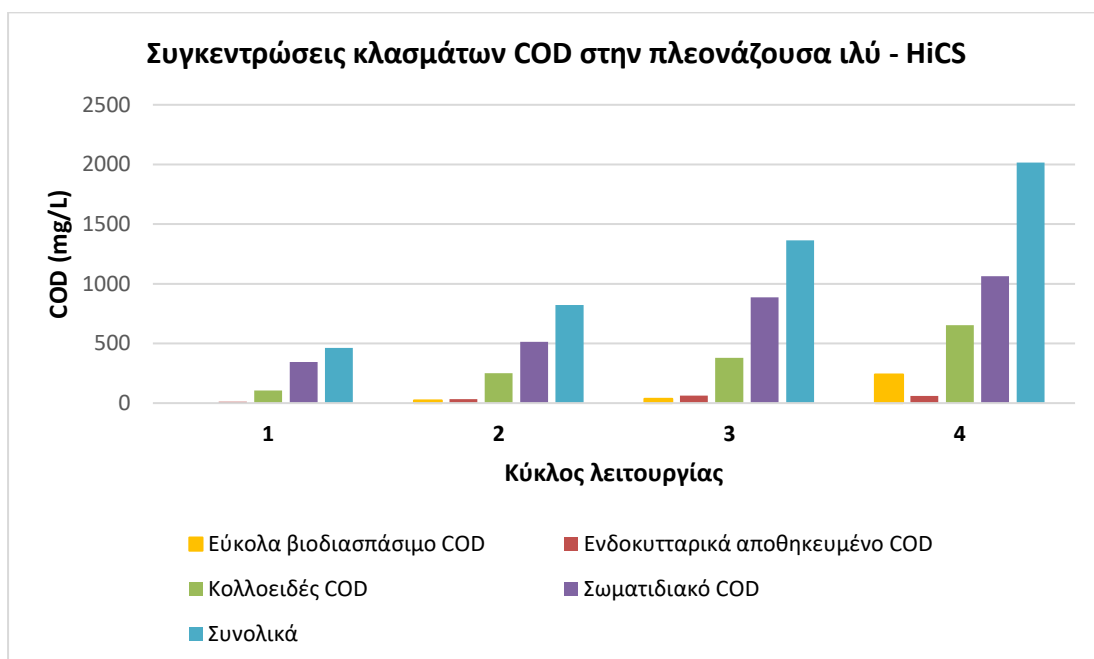


**Σχήμα 4.58:** Συσχέτιση ημερήσιας οργανικής φόρτισης – συγκέντρωσης COD που προέκυψε από πειράματα our πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCS



**Σχήμα 4.59:** Ποσοστιαία κατανομή κλασμάτων COD πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Η πλεονάζουσα ιλύς του πιλοτικού συστήματος HiCS αποτελείται κυρίως από σωματιδιακό COD (53 – 75%) και κολλοειδές COD (23 – 32,5 %). Ιδιαίτερα χαμηλά ποσοστά εύκολα βιοδιασπάσιμου και ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου COD σημειώνονται, γεγονός που δείχνει ότι τα συγκεκριμένα κλάσματα του COD ενδεχομένως να οξειδώνονται.



**Σχήμα 4.60:** Συγκεντρώσεις κλασμάτων COD πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

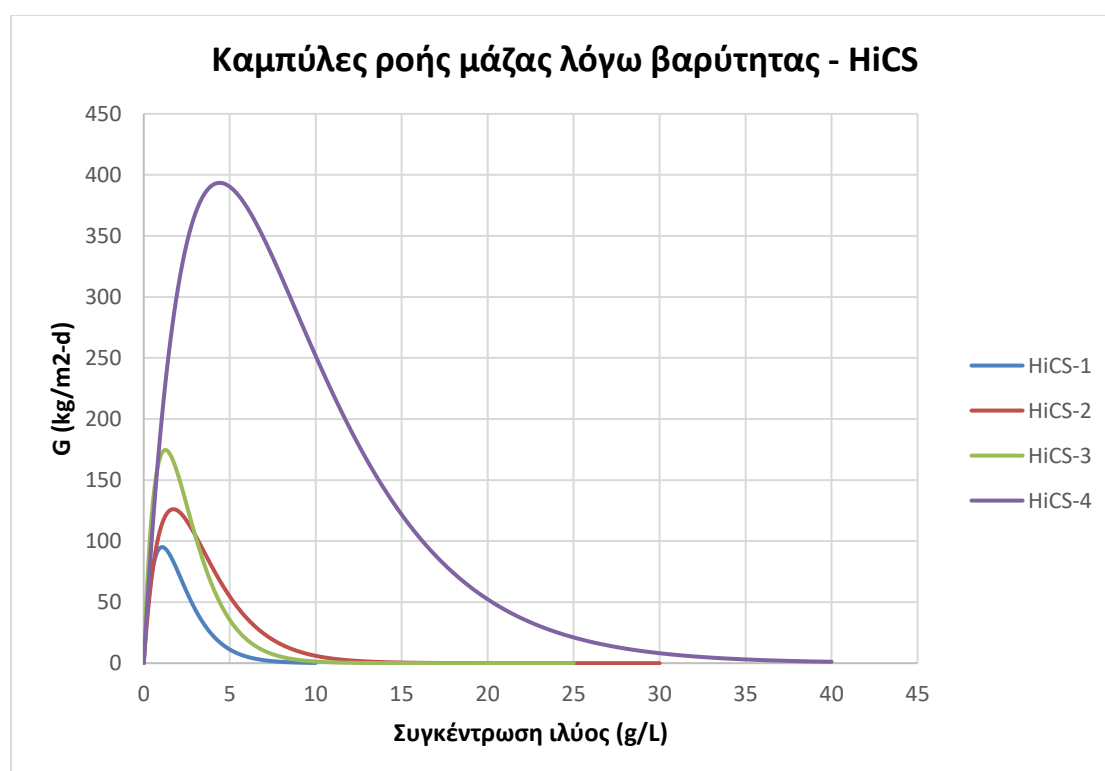
### 4.3.6 Χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ιλύος του πιλοτικού συστήματος HiCS

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καθίζησης της ιλύος (όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.5.3) προέκυψαν οι παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους καθιζησιμότητας  $V_0$  και  $n$  (σταθερές που εξαρτώνται από τα ποιοτικά/μορφολογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε ιλύος) του πιλοτικού συστήματος HiCS.

**Πίνακας 4.11:** Παράμετροι καθιζησιμότητας  $V_0$  και  $n$  του πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Πιλοτικό σύστημα HiCS				
Παράμετρος	1 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	2 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	3 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας	4 <sup>ος</sup> Κύκλος λειτουργίας
$V_0$	10,07	8,28	21,87	10,09
$n$	0,93	0,58	0,68	0,22

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα για τις παραμέτρους καθιζησιμότητας κατασκευάστηκαν οι καμπύλες ροής μάζας λόγω βαρύτητας για τον κάθε κύκλο λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος HiCS, οι οποίες παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



**Σχήμα 4.61:** Καμπύλες ροής μάζας λόγω βαρύτητας πιλοτικού συστήματος HiCS κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μεγάλη διαφορά των χαρακτηριστικών καθίζησης στον τέταρτο κύκλο συγκριτικά με τους τρεις πρώτους. Φαίνεται πως τα χαρακτηριστικά της ιλύος του HiCS-4 δίνουν αισθητά καλύτερα αποτελέσματα καθιζησιμότητας.

#### 4.4 Σύγκριση πιλοτικών συστημάτων υψηλής φόρτισης HiCAS και HiCS

Με βάση τη μέθοδο επεξεργασίας που λειτουργούν τα δύο πιλοτικά συστήματα υψηλής φόρτισης υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης της απόδοσής τους μεταξύ διαφορετικών κύκλων λειτουργίας. Δηλαδή εφόσον το σύστημα επαφής – σταθεροποίησης διαθέτει την επιπλέον δεξαμενή σταθεροποίησης προφανώς και επιτυγχάνει καλύτερες αποδόσεις απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου καθώς ο χρόνος επεξεργασίας είναι διπλάσιος στους ίδιους κύκλους λειτουργίας. Συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν συγκρίνοντας και άλλες παραμέτρους όπως π.χ. η απαίτηση σε οξυγόνο ή η ποσότητα και η συγκέντρωση COD της πλεονάζουσας ιλύος.

Με δεδομένη την παροχή εισόδου προκύπτει ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής αερισμού έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ο επιθυμητός υδραυλικός χρόνος παραμονής στον βιολογικό αντιδραστήρα. Η σκέψη πάνω στην οποία βασίζεται η συναξιολόγηση των δύο τεχνολογιών είναι αν τελικά θα είναι προτιμότερο ο αρχικά υπολογισμένος όγκος των βιολογικών αντιδραστήρων να χωριστεί σε δύο δεξαμενές (επαφής και σταθεροποίησης). Με βάση τα παραπάνω γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης των συστημάτων HiCAS και HiCS σε ίδιο SRT και σε διπλάσιο HRT του HiCAS στην δεξαμενή επαφής σε σχέση με το HiCS καθώς στο τελευταίο προστίθεται και ο χρόνος επαφής στη δεξαμενή σταθεροποίησης. Έτσι πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ του HiCAS στον πρώτο κύκλο (SRT = 2 d, HRT = 2 h) και του HiCS στον δεύτερο κύκλο λειτουργίας (SRT = 2 d, HRT = 1 h) και αντίστοιχα των δύο συστημάτων στον τρίτο (HiCAS SRT = 1 d, HRT1 = h) και τον τέταρτο κύκλο λειτουργίας (HiCS SRT = 1 d, HRT = 0,5 h).

#### 4.4.1 Λειτουργικές παράμετροι, μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης και αποδόσεις των συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων

**Πίνακας 4.12:** Λειτουργικές παράμετροι συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων (HiCAS 1 - HiCS 2 και HiCAS 3 – HiCS 4)

Πιλοτικό Σύστημα	HiCAS - 1	HiCS - 2	HiCAS - 3	HiCS - 4
<b>Q</b> (L / d)	180	360	360	720
<b>DO</b> (mg / L)	> 2	> 2	> 2	> 1
<b>T</b> (°C)	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2	20 ± 2
<b>r</b> (%)	100	150	100	150
<b>MLSS</b> (g / L)	4,8 ± 1,1	5 (± 0,98) / 7,8 (± 1,2)*	4,6 ± 0,8	3,4 (± 0,8) / 6,1 (± 1)*
<b>HRT</b> (h)	2	1/1*	1	0,5/0,5*
<b>SRT</b> (d)	2	2	1	1
<b>OLR</b> (kg COD / kg VSS * d)	1,69	4,67/0,225*	4,27	11,36/2,39*
<b>SAS</b> (L / d)	6,6 ± 1,2	23 ± 2	9,7 ± 1,7	32 ± 4,5

\*Δεξαμενή επαφής (*contact tank*) / Δεξαμενή σταθεροποίησης (*stabilization tank*)

**Πίνακας 4.13:** Μέσες τιμές παραμέτρων παρακολούθησης συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων (HiCAS 1 - HiCS 2 και HiCAS 3 – HiCS 4)

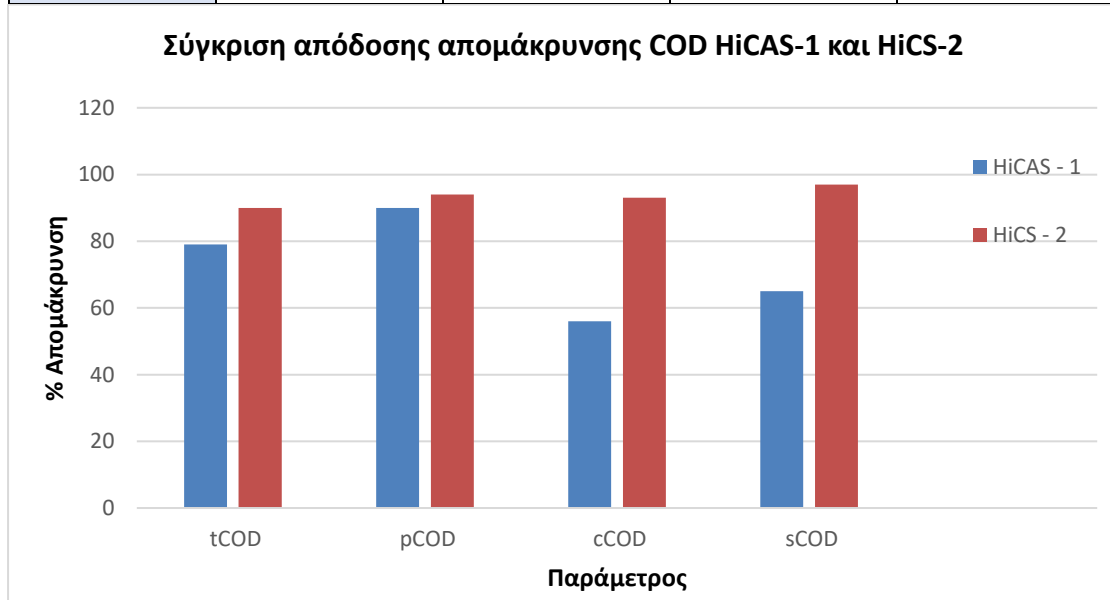
Πιλοτικό σύστημα	HiCAS - 1	HiCS - 2	HiCAS - 3	HiCS - 4
<b>tCOD<sub>in</sub></b> (mg / L)	560 ± 61	664,5 ± 77,5	568 ± 51	620 ± 78
<b>pCOD<sub>in</sub></b> (mg / L)	380 ± 41,5	444 ± 51	386 ± 37	422 ± 53
<b>cCOD<sub>in</sub></b> (mg / L)	50 ± 5,5	59 ± 7	51 ± 5	56 ± 7
<b>sCOD<sub>in</sub></b> (mg / L)	128,5 ± 14	150 ± 17	130,5 ± 12,5	143 ± 18
<b>TSS<sub>in</sub></b> (mg / L)	266 ± 82	291 ± 40	276 ± 58	285 ± 55
<b>tCOD<sub>eff</sub></b> (mg / L)	120 ± 30	60 ± 10	165 ± 22	250 ± 40
<b>pCOD<sub>eff</sub></b> (mg / L)	40 ± 15	21 ± 8	84 ± 15	164 ± 43
<b>cCOD<sub>eff</sub></b> (mg / L)	22 ± 6	3 ± 2	27 ± 5	26,5 ± 6,5
<b>sCOD<sub>eff</sub></b> (mg / L)	61 ± 27	35 ± 2	61 ± 9	61 ± 12
<b>TSS<sub>eff</sub></b> (mg / L)	35 ± 13	20 ± 20	65 ± 16	107 ± 30
<b>BOD<sub>5eff</sub></b> (mg / L)	26	14	133	108
<b>EPS</b> (mgCOD/gVSS)	65	50 / 77,5*	62	49,4 / 60*
<b>SMP</b> (mgCOD/gVSS)	12	29 / 7,7*	73	-



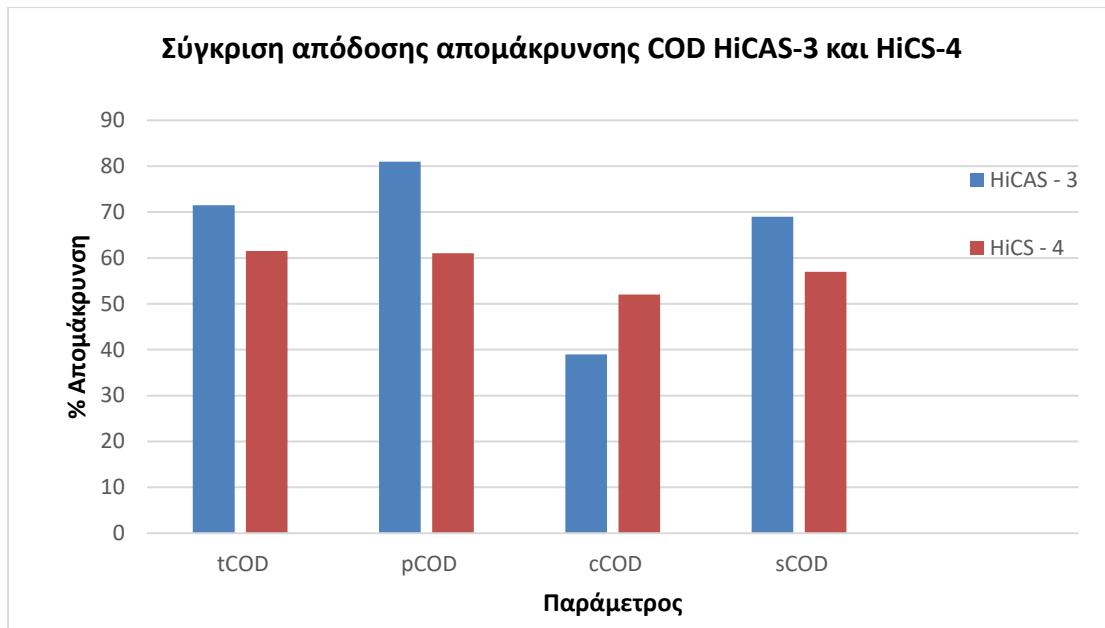
\*Δεξαμενή επαφής (contact tank) / Δεξαμενή σταθεροποίησης (stabilization tank)

**Πίνακας 4.14:** Βαθμοί απόδοσης συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων (HiCAS 1 - HiCS 2 και HiCAS 3 – HiCS 4) ως προς την απομάκρυνση των διαφορετικών κλασμάτων COD

Πιλοτικό σύστημα	HiCAS - 1	HiCS - 2	HiCAS - 3	HiCS - 4
Παράμετρος	Βαθμός απόδοσης (%)	Βαθμός απόδοσης (%)	Βαθμός απόδοσης (%)	Βαθμός απόδοσης (%)
tCOD	79 ± 6	90 ± 1	71,5 ± 6	61,5 ± 6,5
pCOD	90 ± 4	94 ± 1	81 ± 8	61 ± 6
cCOD	56 ± 11	93 ± 4	39 ± 20	52 ± 11
sCOD	65 ± 27	97 ± 4	69 ± 15	57 ± 7,5



**Σχήμα 4.62:** Σύγκριση απόδοσης ως προς τα ποσοστά απομάκρυνσης των διάφορων κλασμάτων του COD των συστημάτων HiCAS 1 – HiCS 2



**Σχήμα 4.63:** Σύγκριση απόδοσης ως προς τα ποσοστά απομάκρυνσης των διαφόρων κλασμάτων του COD των συστημάτων HiCAS 3 – HiCS 4

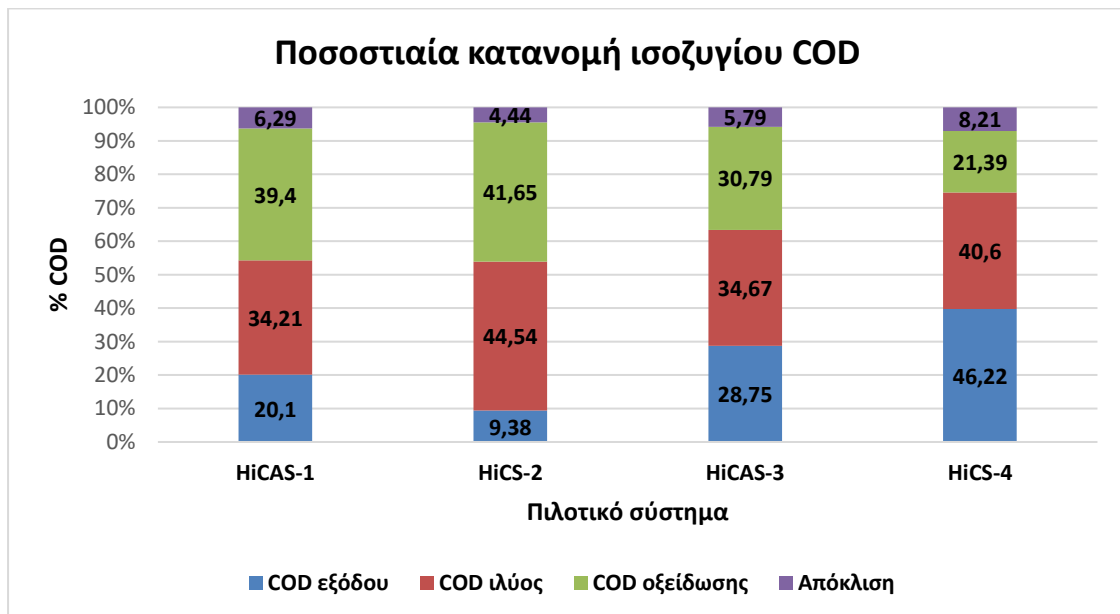
Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι το πιλοτικό σύστημα επαφής σταθεροποίησης HiCS έχει καλύτερη απόδοση από το πιλοτικό συμβατικό σύστημα HiCAS σε συνθήκες χαμηλότερης οργανικής φόρτισης, με ποσοστά μεγαλύτερα από 90% σε όλες τις παρακολουθούμενες παραμέτρους. Βέβαια και τα δύο συστήματα στις εξεταζόμενες συνθήκες επιτυγχάνουν τα όρια εκροής που επιβάλλει η Ελληνική νομοθεσία για το ολικό COD και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (το HiCAS οριακά). Σε χαμηλότερους χρόνους λειτουργίας που συνεπάγονται συνθήκες υψηλότερης οργανικής φόρτισης το σύστημα HiCAS φαίνεται να επιτυγχάνει καλύτερες αποδόσεις απομάκρυνσης όσον αφορά τα διάφορα κλάσματα του COD και τα TSS εξόδου (με εξαίρεση την απομάκρυνση σε κολλοειδές COD).

#### 4.4.2 Ισοζύγιο COD και χαρακτηρισμός πλεονάζουσας ιλύος των συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων

**Πίνακας 4.15:** Κατανομή ισοζυγίου του COD σε όρους μάζας (g/d) και ποσοστών (%) συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων (HiCAS 1 - HiCS 2 και HiCAS 3 – HiCS 4)

Πιλοτικό σύστημα	HiCAS - 1	HiCS - 2	HiCAS - 3	HiCS - 4
COD εισ. (g/d) / ποσοστό (%)	94,7 / 100	241,92 / 100	227,9 / 100	416,2 / 100

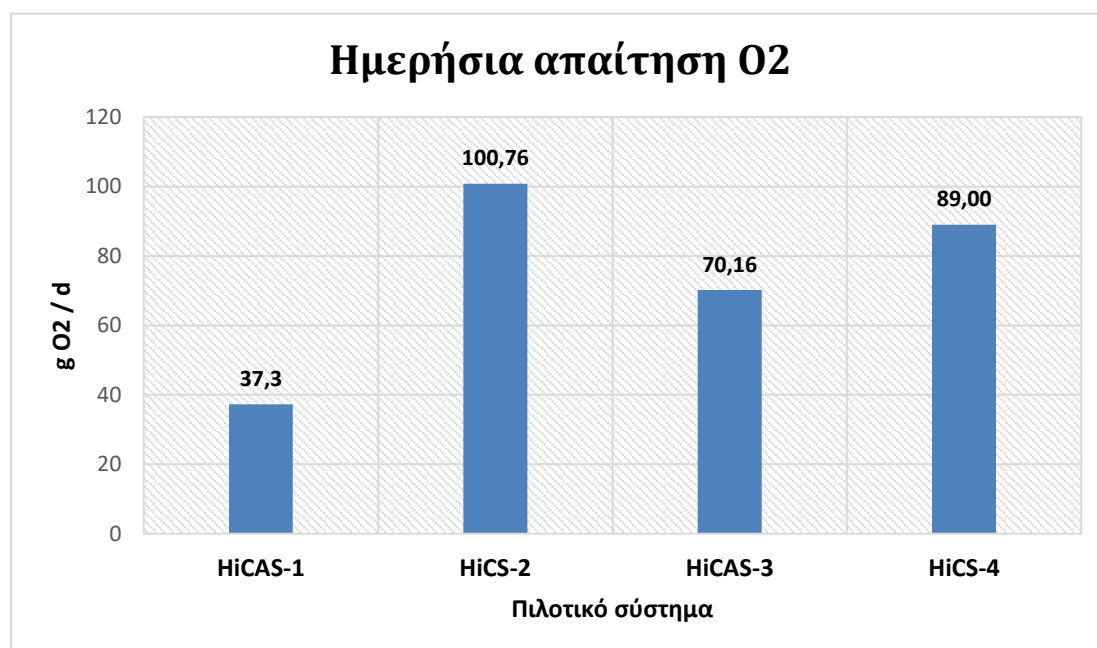
Πιλοτικό σύστημα	HiCAS - 1	HiCS - 2	HiCAS - 3	HiCS - 4
COD εξοδ. (g/d) / ποσοστό (%)	19,03 / 20,1	27,7 / 9,4	65,5 / 28,7	192,4 / 46,2
COD ιλύος. (g/d) / ποσοστό (%)	32,4 / 34,1	107,7 / 44,5	79 / 34,7	169 / 40,1
COD οξειδ. (g/d) / ποσοστό (%)	37,3 / 39,4	100,7 / 41,6	70,2 / 30,8	89 / 21,4
Απαιτούμενο οξυγόνο (g/d)	37,3	100,7	70,2	89



**Σχήμα 4.64:** Ποσοστιαία κατανομή ισοζυγίου COD συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων

Στο σύστημα HiCS-2 φαίνεται να εκτρέπεται 10% περισσότερο COD στο ρεύμα της ιλύος σε σχέση με το HiCAS-1 (44,54 και 34,21 % αντίστοιχα) με παρόμοια ποσοστά οξείδωσης (41,65 και 39,4 %). Η ημερήσια απαίτηση βέβαια του HiCS-2 σε οξυγόνο είναι σημαντικά υψηλότερη συγκριτικά με το HiCAS-1 όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (100,76 και 37,3 gO<sub>2</sub>/d αντίστοιχα). Για την σύγκριση των πιλοτικών HiCAS-3 και HiCS-4 φαίνεται ότι το συμβατικό σύστημα έχει μεγαλύτερο ποσοστό οξείδωσης κατά 9% (30,79 και 21,39% αντίστοιχα) και 6 % μικρότερη εκτροπή στο ρεύμα της ιλύος σχετικά με το σύστημα επαφής σταθεροποίησης (34,67

και 40,6% αντίστοιχα). Επίσης το HiCS-4 έχει μεγαλύτερη ημερήσια απαίτηση σε οξυγόνο κατά 19 g/d.



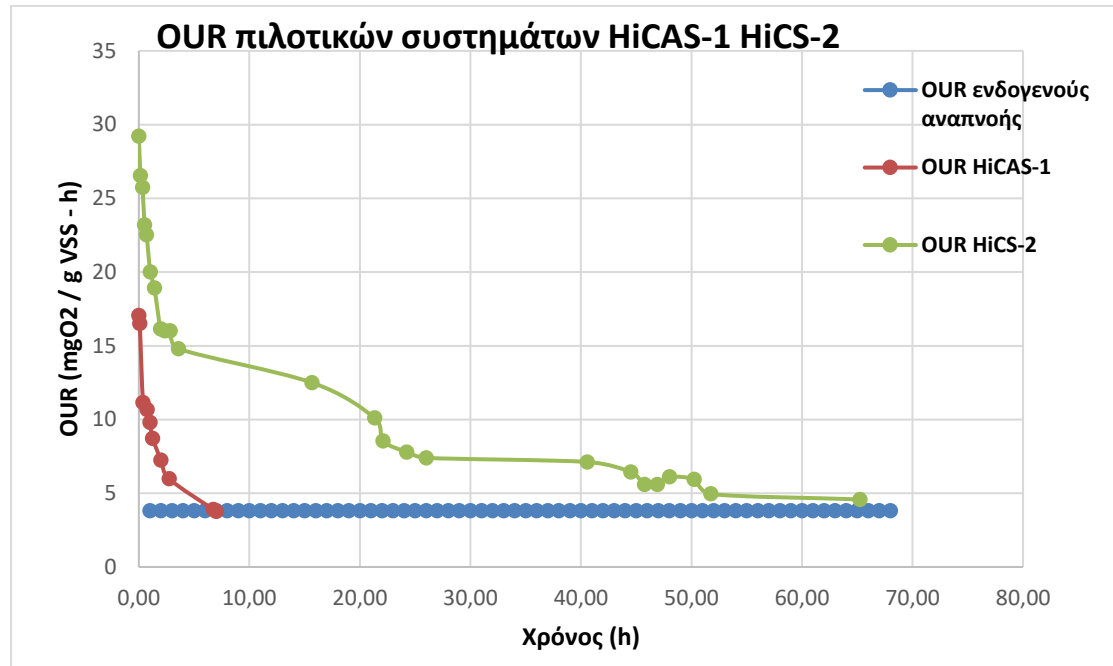
**Σχήμα 4.65:** Ημερήσια απαίτηση σε g O<sub>2</sub> συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων

**Πίνακας 4.16:** Χαρακτηρισμός κλασμάτων COD της πλεονάζουσας ιλύος των συγκρινόμενων πιλοτικών συστημάτων

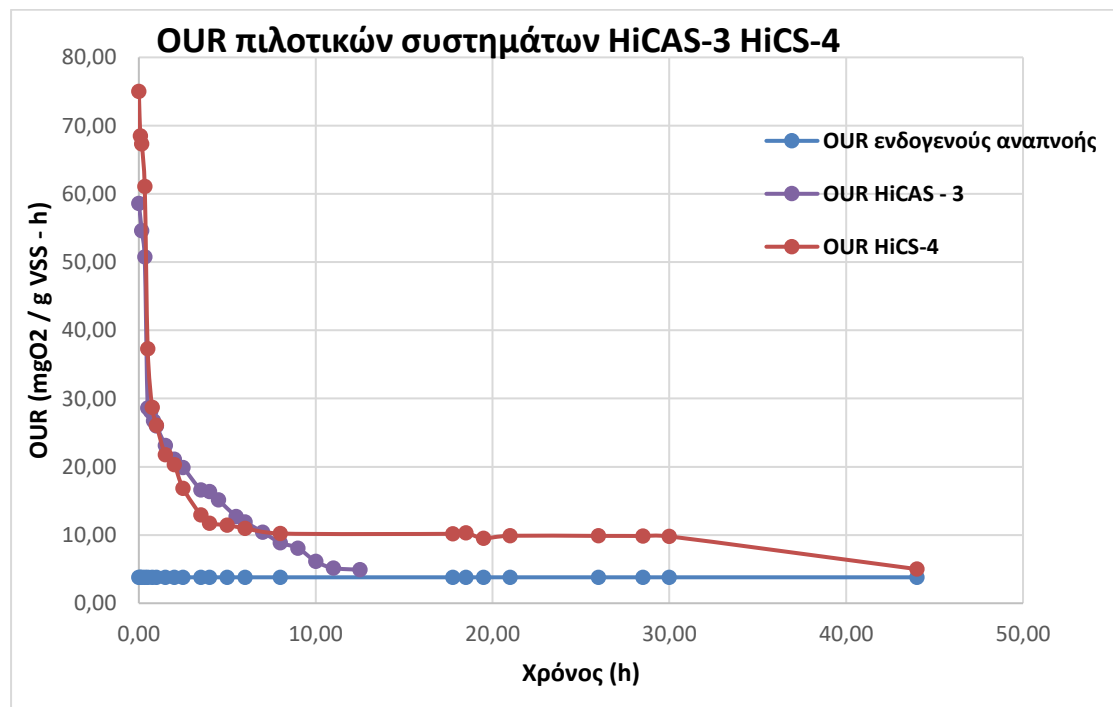
Κλάσμα COD	HiCAS - 1	HiCS - 2	HiCAS - 3	HiCS - 4
Εύκολα βιοδιασπάζσιμο (mg/L)	0	22	360	241
Ενδοκυτταρικά αποθηκευμένο (mg/L)	0	33	300	59
Κολλοειδές (mg/L)	30	251	470	654
Σωματιδιακό (mg/L)	310	514	830	1066
<b>Συνολικά (mg/L)</b>	<b>340</b>	<b>820</b>	<b>1960</b>	<b>2020</b>

Η πλεονάζουσα ιλύς του HiCS-2 έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση σε COD συγκριτικά με το HiCAS-1 με υψηλότερη συγκέντρωση σε κολλοειδές COD (λογικό εφόσον υπάρχει υψηλότερη οργανική φόρτιση). Στην δεύτερη σύγκριση φαίνονται παραπλήσιες συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου στην πλεονάζουσα ιλύ των δύο συστημάτων. Βέβαια όπως φαίνεται από τις λειτουργικές παραμέτρους, η ποσότητα

ιλύος που απορρίπτεται καθημερινά από το σύστημα επαφής-σταθεροποίησης είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με το συμβατικό σύστημα.



Σχήμα 4.66: Γράφημα πειραμάτων O.U.R. πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικών συστημάτων HiCAS-1 και HiCS-2



Σχήμα 4.67: Γράφημα πειραμάτων O.U.R. πλεονάζουσας ιλύος πιλοτικών συστημάτων HiCAS-3 και HiCS-4

## 5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Ο κύριος όγκος των πειραμάτων παρακολούθησης και διερεύνησης των δύο πιλοτικών συστημάτων υψηλής οργανικής φόρτισης HiCAS και HiCS έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π., ενώ κάποια άλλα (κυρίως χαρακτηρισμού του οργανικού φορτίου εισόδου) πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Κέντρου Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυττάλειας. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2, τα πιλοτικά συστήματα βρίσκονταν σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο, εντός εμπορευματοκιβωτίου (container) στο Κ.Ε.Λ.Ψ.. Δείγματα από τους αντιδραστήρες των δύο συστημάτων (δεξαμενές επαφής CT1 και CT2, δεξαμενή σταθεροποίησης ST2), δείγματα εξόδου καθώς και δείγματα πλεονάζουσας ιλύος μεταφέρονταν σε καθημερινή βάση στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν τα κατάλληλα πειράματα παρακολούθησης και διερεύνησης.

Η λειτουργία των δύο συστημάτων ξεκίνησε δοκιμαστικά στις 30/06/2018 για μία εβδομάδα. Για να ελεγχθεί η υδραυλική συμπεριφορά των συστημάτων έτσι ώστε να μην προκύψουν προβλήματα κατά την κανονική λειτουργίας τους με λύματα, αρχικά πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική λειτουργία με νερό σε όλα τα εύρη παροχών εισόδου και επανακυκλοφορίας που θα εξεταστούν. Τα πιλοτικά συστήματα δέχτηκαν για πρώτη φορά λύματα στις 06/07/2018 και η λειτουργία τους συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Τα λύματα από το κανάλι προσαγωγής του ΚΕΛ Ψυττάλειας μεταφέρονται μέσω αντλίας στην δεξαμενή τροφοδοσίας των συστημάτων. Από τότε τα συστήματα τροφοδοτούνται συνεχώς χωρίς κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα κατά την λειτουργίας τους, ενώ όποια προβλήματα εμφράξεων συνέβησαν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των πιλοτικών συστημάτων αντιμετωπίστηκαν άμεσα και αποτελεσματικά χωρίς να προκαλέσουν ιδιαίτερο πρόβλημα στις συνθήκες λειτουργίας. Η περίοδος λειτουργίας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική είναι από 06/07/2018 μέχρι 21/6/2019. Κατά την συγκεκριμένη χρονική περίοδο πραγματοποιήθηκαν συνολικά τέσσερις κύκλοι λειτουργίας των δύο πιλοτικών συστημάτων με διαφορετικές συνθήκες HRT και SRT, με κατεύθυνση σε όλο και μικρότερους χρόνους επεξεργασίας που οδηγούσαν σε συνθήκες υψηλότερης οργανικής φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα στον πρώτο κύκλο λειτουργίας (06/07/2018 – 26/10/2018 → 113 ημέρες) οι αντιδραστήρες λειτουργούσαν σε HRT 2h και SRT 2d, στον δεύτερο (28/10/2018 - 27/12/2018 → 60 ημέρες) σε HRT 1h και SRT 2d, στον τρίτο (28/12/2018 – 28/3/2019 → 90 ημέρες) σε

HRT 1h και SRT 1d, και τέλος στον τέταρτο κύκλο λειτουργίας (7/4/2019 – 21/6/2019 → 75 ημέρες) σε HRT 0,5h και SRT 1d. Για τον καθένα από τους παραπάνω κύκλους λειτουργίας πραγματοποιήθηκαν πειράματα προσδιορισμού της απόδοσης ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου (διάφορα κλάσματα COD, BOD<sub>5</sub>, TSS), χαρακτηρισμού της πλεονάζουσας ιλύος, πειράματα προσδιορισμού των χαρακτηριστικών καθίζησης της ιλύος καθώς και κατασκευή συνολικού ισοζυγίου του COD έτσι ώστε να προσδιοριστούν τα ποσοστά του οργανικού φορτίου που οξειδώνονται, εκτρέπονται στην ιλύ και καταλήγουν στην έξοδο των δύο πιλοτικών συστημάτων.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρακολούθηση της λειτουργίας των πειραματικών διατάξεων σε όλες τις φάσεις λειτουργίας συνοψίζονται στα ακόλουθα:

### **Συμβατικό σύστημα υψηλής φόρτισης (HiCAS)**

- Αρχικά σημειώνεται πως σε μία ενδεχόμενη εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα τόσο του συμβατικού συστήματος HiCAS όσο και του συστήματος επαφής – σταθεροποίησης HiCS θα πρέπει να διατυπωθεί με σαφήνεια ο σκοπός λειτουργίας τους. Δηλαδή εάν τα συστήματα αυτά θα λειτουργούν αυτόνομα και θα πρέπει να καλύπτουν τις αντίστοιχες απαιτήσεις εκροής με βάση τον πιθανό αποδέκτη και τη νομοθεσία (π.χ. για Ευρώπη αυστηρότερες απαιτήσεις) ή εάν θα χρησιμοποιηθούν ως πρώτο στάδιο επεξεργασίας σε μια εγκατάσταση με στόχο την ενεργειακή ανάκτηση μέσω της πλούσιας σε οργανικό φορτίο ιλύος που παράγουν.
- Η συγκέντρωση των MLSS στην δεξαμενή επαφής σχετίζεται με την επιλογή των HRT και SRT. Έτσι παρατηρήθηκε αύξηση στις μεταβάσεις όπου υπήρχε μείωση του HRT με σταθερό SRT δηλαδή από κύκλο 1 σε κύκλο 2 (4,8 g/L → 8 g/L) και από κύκλο 3 σε κύκλο 4 (4,6 g/L → 8,2 g/L) και αντίστοιχα μείωση στην μετάβαση όπου υπήρχε μείωση του SRT με σταθερό HRT δηλαδή από κύκλο 2 σε κύκλο 3 (8 g/L → 4,6 g/L).
- Το ποσοστό των πτητικών αιωρούμενων στερεών σε σχέση με τα ολικά υπολογίστηκε περίπου σε 76% που υποδηλώνει σχετικά μικρή συγκέντρωση αδρανών (επισημαίνεται ωστόσο ότι το ποσοστό των οργανικών στερεών

σχετίζεται και με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων και το σχετικό ποσοστό τους σε αυτά).

- Σχετικά με τις συγκεντρώσεις του οργανικού φορτίου στην έξοδο του πιλοτικού συστήματος HiCAS φαίνεται ότι μόνο κατά τον πρώτο κύκλο το ολικό COD της εξόδου βρίσκεται κάτω από το όριο που επιβάλλει η Ελληνική νομοθεσία με τιμή 120 mg/L (όριο νομοθεσίας 125 mg/L) όπως και η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) εξόδου οριακά καλύπτει το όριο νομοθεσίας (35 mg/L). Έτσι η επιλογή του συμβατικού συστήματος HiCAS με τις λειτουργικές παραμέτρους του πρώτου κύκλου (HRT 2h, SRT 2d) ενδεχομένως να μπορεί εφαρμοστεί αυτόνομα για απομάκρυνση οργανικού άνθρακα.
- Με την αύξηση της οργανικής φόρτισης (μείωση SRT και HRT) συναντάμε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις COD στην έξοδο (καλύτερα αποτελέσματα στον τρίτο κύκλο σε σχέση με τους κύκλους 2 και 4). Για τα TSS εξόδου οι τιμές των συγκεντρώσεών τους αυξάνονται μετά τον πρώτο κύκλο με τον τρίτο να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα (65 mg /L) ενώ στον τέταρτο συναντάμε τα υψηλότερα στερεά εξόδου με τιμή συγκέντρωσης 136 mg/L. Θα πρέπει να επισημανθεί, ωστόσο, ότι η αποτελεσματικότητα της δεξαμενής καθίζησης ενός εργαστηριακής κλίμακας συστήματος δεν αποτελεί ασφαλή ένδειξη για την αντίστοιχη αποτελεσματικότητα ενός πλήρους κλίμακας συστήματος ενεργού ιλύος υψηλής φόρτισης.
- Το εύρος της απόδοσης του πιλοτικού συστήματος HiCAS ως προς την απομάκρυνση σε ολικό COD (tCOD) κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 50-79%. Ποσοστά ικανοποιητικά για εφαρμογή του συστήματος σαν πρώτο στάδιο επεξεργασίας δεδομένου ότι π.χ. στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης επιτυγχάνονται ποσοστά απομάκρυνσης της τάξης του 30% και 50% σε tCOD και TSS αντίστοιχα. Το σύστημα φαίνεται ότι απομακρύνει κυρίως σωματιδιακό COD (pCOD) και σε μικρότερα ποσοστά κολλοειδές (cCOD) και διαλυτό COD (sCOD).
- Η οριστική επιλογή των τιμών σχεδιασμού για τον υδραυλικό χρόνο παραμονής και τον χρόνο παραμονής στερεών είναι ιδιαίτερα σημαντική. Πιθανή αιτία της



χειρότερης ποιότητας εκροής στους κύκλους 2 και 4 να είναι η υπερφόρτιση του συστήματος (υψηλές τιμές συγκέντρωσης MLSS) που ενδεχομένως οδήγησαν σε διαφυγή βιομάζας στην έξοδο από τη δεξαμενή τελικής καθίζησης (ίσως φαινόμενα από-κροκίδωσης). Ο παραπάνω ισχυρισμός επιβεβαιώνεται και από τις υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδιακού COD στην έξοδο.

- Από τα ισοζύγια του COD που πραγματοποιήθηκαν για το σύστημα HiCAS σε κάθε κύκλο παρατηρείται ότι το ποσοστό του COD που οξειδώνεται μειώνεται με τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας. Το γεγονός αυτό οδηγεί και σε μία αύξηση του ποσοστού του στο COD εξόδου. Βέβαια κατά τη μετάβαση από τον κύκλο 2 στον κύκλο 3 (μείωση SRT από 2 σε 1 d) παρατηρήθηκε ικανή αύξηση του ποσοστού COD στο ρεύμα της ιλύος (από 18 σε 34%) με ταυτόχρονη αύξηση του ποσοστού οξείδωσης (από 26 σε 31%). Επίσης μείωση του χρόνου παραμονής στερεών φαίνεται να ενισχύει το ποσοστό του COD που εκτρέπεται στο ρεύμα της ιλύος αφού ενισχύονται οι μηχανισμοί απομάκρυνσης του COD που το ενσωματώνουν στην ιλύ (προσρόφηση – ενδοκυτταρική αποθήκευση) σε σχέση με την οξείδωση.
- Συνολικά σε όρους μάζας για το οργανικό φορτίο φαίνεται πως η αύξηση της οργανικής φόρτισης οδηγεί και σε αύξηση της ποσότητας του COD στο ρεύμα της ιλύος (από 32,4 στον πρώτο κύκλο σε 92,3 gCOD/d τελικά στον τέταρτο κύκλο λειτουργίας) με ταυτόχρονη υποβάθμιση της ποιότητας εκροής.
- Σχετικά με τις απαιτήσεις σε ημερήσια ζήτηση οξυγόνου παρατηρείται λογική αύξηση καθώς ο χρόνος επεξεργασίας μειώνεται και το φορτίο εισόδου γίνεται μεγαλύτερο, με την υψηλότερη ζήτηση να σημειώνεται στον τέταρτο κύκλο με τιμή 84,62 gO<sub>2</sub>/d.
- Όσον αφορά τα πειράματα χαρακτηρισμού της πλεονάζουσας ιλύος (O.U.R.) παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης σε COD όσο αυξάνεται η οργανική φόρτιση (340, 950, 1960 και 2330 mg/L COD αντίστοιχα σε κάθε κύκλο λειτουργίας). Για τα επιμέρους κλάσματα του COD, η πλεονάζουσα ιλύς αποτελείται σε μεγαλύτερο ποσοστό κυρίως από σωματιδιακό COD (42,5 – 91,4 %), ενώ στους κύκλους 2, 3 και 4 συναντάμε αξιοσημείωτα ποσοστά

κολλοειδούς COD (16,9 – 27 %). Μικρότερα είναι τα ποσοστά ενδοκυτταρικά αποθηκευμένου (7,1 – 15,3%) και εύκολα βιοδιασπάσιμου COD (6,2 – 18,2%).

- Τα πειράματα καθιζησιμότητας καταδεικνύουν την απουσία σοβαρών προβλημάτων καθιζησιμότητας του συστήματος σε όλες τις φάσεις λειτουργίας. Επίσης βάση της καμπύλης ροής μάζας φαίνεται ότι η ιλύς του συμβατικού συστήματος υψηλής φόρτισης προσεγγίζει περισσότερο τα χαρακτηριστικά μια πρωτοβάθμιας ιλύος.

### Σύστημα υψηλής φόρτισης επαφής-σταθεροποίησης

- Όπως και στην περίπτωση του HiCAS το ποσοστό των πτητικών αιωρούμενων στερεών σε σχέση με τα ολικά είναι αρκετά υψηλό (76%) γεγονός το οποίο σχετίζεται τόσο με το είδος της επεξεργασίας όσο και με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων.
- Για χρόνους παραμονής στερεών μεταξύ 1-2 d και υδραυλικούς χρόνους παραμονής στο διάστημα 1-2 h (και στις δύο δεξαμενές) επιτυγχάνονται στην τελική εκροή συγκεντρώσεις ολικού COD χαμηλότερες από το όριο της Ελληνικής Νομοθεσίας, με καλύτερα αποτελέσματα στον δεύτερο κύκλο λειτουργίας (83, 60 και 80 mg/L αντίστοιχα). Το COD εξόδου αποτελείται κυρίως από διαλυτές ουσίες με συγκεντρώσεις 54, 35 και 38 mg/L sCOD αντίστοιχα για κάθε κύκλο. Όσον αφορά τα TSS εξόδου στους δύο πρώτους κύκλους οι συγκεντρώσεις στερεών εξόδου βρίσκονται κάτω από το όριο της νομοθεσίας με τιμές 23 και 20 mg/L TSS αντίστοιχα, ενώ στον τρίτο κύκλο η συγκέντρωση TSS εξόδου αυξήθηκε σε 44 mg/L. Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα για τους τρεις κύκλους, διαπιστώνεται ότι το σύστημα HiCS μπορεί να λειτουργήσει σαν αυτόνομο σύστημα επεξεργασίας λυμάτων όταν στόχος είναι αποκλειστικά η απομάκρυνση οργανικού φορτίου.
- Στον τέταρτο κύκλο οι συγκεντρώσεις αυξάνονται αισθητά τόσο σε COD εξόδου (250 και 164 mg/L tCOD και pCOD αντίστοιχα), όσο και σε TSS (107 mg/L). Ενδεχομένως (όπως και στους κύκλους 2 και 4 του HiCAS) δεδομένου των συγκεκριμένων λειτουργικών παραμέτρων (SRT 1d, HRT 0,5h) να

διαφεύγει ποσότητα βιομάζας στην έξοδο του συστήματος (υψηλή συγκέντρωση σωματιδιακού COD στην έξοδο). Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι με την μείωση του υδραυλικού χρόνου σε 0,5 h στις δύο δεξαμενές του συστήματος καταγράφονται αξιόλογες συγκεντρώσεις εύκολα βιοδιασπάσιμου COD στην έξοδο, της τάξης των 20-30 mg/L.

- Το εύρος της απόδοσης του πιλοτικού συστήματος HiCS ως προς την απομάκρυνση σε ολικό COD (tCOD) κατά τους εξεταζόμενους κύκλους λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 61- 90%. Ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης COD συναντάμε και στους τρεις πρώτους κύκλους λειτουργίας, με τις λειτουργικές παραμέτρους του δεύτερου (SRT 2d, HRT 1h) να είναι οι πιο αποδοτικές ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου.
- Το ισοζύγιο του COD για το πιλοτικό σύστημα HiCS έδειξε ότι το ποσοστό του οργανικού φορτίου που οξειδώνεται μειώνεται καθώς μειώνονται και οι χρόνοι επεξεργασίας από κύκλο σε κύκλο (43%, 42%, 29% και 21%). Επίσης υπάρχει αύξηση του ποσοστού που εκτρέπεται στην ιλύ μέχρι και τον τρίτο κύκλο (37%, 44,5% και 49,2% αντίστοιχα), με εξαίρεση την μετάβαση στον τέταρτο κύκλο όπου υπάρχει μια μείωση του ποσοστού COD στην ιλύ (40%) και αρκετά μεγάλη αύξηση στην έξοδο του συστήματος (46,2 %), προφανώς λόγω ατελούς επεξεργασίας.
- Τα πειράματα χαρακτηρισμού της πλεονάζουσας ιλύος (O.U.R.) για το σύστημα HiCS έδειξαν αύξηση της συγκέντρωσης σε COD όσο αυξάνεται η οργανική φόρτιση (460, 820, 1360 και 2020 mg/L COD αντίστοιχα σε κάθε κύκλο λειτουργίας). Η πλεονάζουσα ιλύς και στους τέσσερις κύκλους λειτουργίας αποτελείται σε μεγαλύτερο ποσοστό από σωματιδιακό COD (52,7 –74,7%) και κολλοειδές COD (22,8–32,4%). Τα ποσοστά σε εύκολα βιοδιασπάσιμο και ενδοκυτταρικά αποθηκευμένο COD είναι ιδιαίτερα χαμηλά.
- Η μέγιστη ημερήσια απαίτηση σε οξυγόνο καταγράφηκε στον δεύτερο κύκλο λειτουργίας (HRT 1h, SRT 2d) όπου οξειδώνεται και η μεγαλύτερη ποσότητα COD, με τιμή 100,8 gO<sub>2</sub>/d.

- Τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος του συστήματος HiCS εμφανίζουν αισθητή βελτίωση στον τέταρτο κύκλο λειτουργίας συγκριτικά με τους τρεις πρώτους. Η διαπίστωση αυτή ενισχύεται και από τα αποτελέσματα μικροσκοπικών παρατηρήσεων στην ιλύ του συστήματος (κροκίδες με καλύτερη καθιζησιμότητα λόγω μορφολογίας, απουσία νηματοειδών μικροοργανισμών). Όπως και στην περίπτωση του HiCAS έτσι και για το HiCS η ιλύς προσεγγίζει τα χαρακτηριστικά καθίζησης μιας πρωτοβάθμιας ιλύος.

### **Σύγκριση των δύο πιλοτικών συστημάτων HiCAS και HiCS**

Από την σύγκριση των δύο συστημάτων (HiCAS και HiCS) προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ως προς την απόδοση απομάκρυνσης οργανικού φορτίου φαίνεται το σύστημα HiCS να υπερτερεί σε συνθήκες χαμηλότερες οργανικής φόρτισης (SRT 2d, HRT 2h) σε σχέση με το συμβατικό σύστημα HiCAS. Το HiCS παρουσιάζει ποσοστά απομάκρυνσης σε tCOD της τάξης του 90% έναντι 79% στο HiCAS. Αντίθετα σε συνθήκες υψηλότερης οργανικής φόρτισης (SRT 1d, HRT 1h) το συμβατικό σύστημα εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με το σύστημα επαφής-σταθεροποίησης με ποσοστά απομάκρυνσης σε tCOD της τάξης του 72% έναντι 62% του HiCS.
- Ως προς το ποσοστό εκτροπής οργανικού φορτίου στο ρεύμα της ιλύος το σύστημα επαφής-σταθεροποίησης φαίνεται να υπερτερεί σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας που εξετάστηκαν.
- Δεδομένου ότι στο σύστημα HiCS και οι δύο δεξαμενές είναι αεριζόμενες η ημερήσια απαίτηση οξυγόνου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη του συμβατικού συστήματος υψηλής φόρτισης.
- Η ποσότητα της πλεονάζουσας ιλύος που απορρίπτεται καθημερινά είναι σημαντικά υψηλότερη στο σύστημα επαφής-σταθεροποίησης συγκριτικά με το συμβατικό. Έτσι ακόμα και αν η ιλύς του HiCAS έχει υψηλότερη συγκέντρωση

βιοδιασπάσιμου COD, η ποσότητα που απορρίπτεται καθημερινά είναι χαμηλότερη σε σχέση με το HiCS.

Επί τη βάση των ανωτέρω συμπεραίνεται ότι και τα δύο συστήματα θα μπορούσαν με κατάλληλο σχεδιασμό (επιλογή τιμών υδραυλικού χρόνου και χρόνου παραμονής στερεών) να λειτουργήσουν ως αυτόνομα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων σε περιπτώσεις στις οποίες δεν απαιτείται απομάκρυνση θρεπτικών. Μεταξύ των δύο συστημάτων το σύστημα επαφής-σταθεροποίησης δίνει κάπως καλύτερα αποτελέσματα. Για την επιλογή, ωστόσο, του καταλληλότερου συστήματος θα πρέπει να συνυπολογισθεί και η αναγκαιότητα κατασκευής πρόσθετης δεξαμενής σταθεροποίησης καθώς και οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις για αερισμό (στην περίπτωση του HiCS). Επιπλέον για την οριστική επιλογή μεταξύ των δύο σχημάτων επεξεργασίας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το δυναμικό παραγωγής ενέργειας από την επεξεργασία της απορριπτόμενης ιλύος σε μονάδα αναερόβιας χώνευσης έτσι ώστε να υπολογισθεί το καθαρό όφελος σε κάθε περίπτωση. Τέλος σημειώνεται ότι ύστερα από κατάλληλο σχεδιασμό και τα δύο συστήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα πρώτου σταδίου ακολουθούμενα από σύστημα περαιτέρω επεξεργασίας στην περίπτωση που απαιτείται η απομάκρυνση των θρεπτικών. Στην περίπτωση αυτή κατά τον σχεδιασμό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το είδος του συστήματος επεξεργασίας του δεύτερου σταδίου.

#### **Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:**

- Διερεύνηση διαφορετικών HRT στις δεξαμενές επαφής και σταθεροποίησης του συστήματος HiCS
- Εξέταση επίδρασης αναερόβιων συνθηκών στην δεξαμενή επαφής του συστήματος HiCS (ενδεχόμενη μείωση του κόστους επεξεργασίας)
- Διερεύνηση λειτουργίας του συστήματος HiCAS σε συντομότερα SRT (π.χ. 0,5d)
- Εκτίμηση του δυναμικού παραγωγής βιοαερίου της ιλύος για τους διάφορους κύκλους λειτουργίας με αναερόβιες μεθόδους

- Περαιτέρω διερεύνηση και έλεγχος της καθιζηματικότητας της λύσης και σε διαφορετικά HRT και SRT

## Βιβλιογραφία

- Abbas, Hamdy, Hamdy Seif, and Amal Moursi. 2001. "Effect of Hydraulic Retention Time on the Activated Sludge System." *Sixth International Water Technology Conference, IWTC, Alexandria, Egypt*, 277–84.
- Beun, J. J., F. Paletta, M. C.M. Van Loosdrecht, and J. J. Heijnen. 2000. "Stoichiometry and Kinetics of Poly- $\beta$ -Hydroxybutyrate Metabolism in Aerobic, Slow Growing, Activated Sludge Cultures." *Biotechnology and Bioengineering* 67 (4): 379–89.
- Bryers, J. D., and C. A. Mason. 1987. "Biopolymer Particulate Turnover in Biological Waste Treatment Systems: A Review." *Bioprocess Engineering* 2 (3): 95–109.
- Carucci, A., D. Dionisi, M. Majone, E. Rolle, and P. Smurra. 2001. "Aerobic Storage by Activated Sludge on Real Wastewater." *Water Research* 35 (16): 3833–44.
- Daud, M. K., Hina Rizvi, Muhammad Farhan Akram, Shafaqat Ali, Muhammad Rizwan, Muhammad Nafees, and Zhu Shui Jin. 2018. "Review of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Technology: Effect of Different Parameters and Developments for Domestic Wastewater Treatment." *Journal of Chemistry* 2018.
- Frigon, D., D. B. Oerther, E. Morgenroth, and L. Raskin. 2002. "Oligonucleotide Probe Hybridization and Modeling Results Suggest That Populations Consuming Readily Degradable Substrate Have High Cellular RNA Levels." *Water Science and Technology* 45 (6): 115–26.
- Ge, Huoqing, Damien J. Batstone, Morgan Mouiche, Shihu Hu, and Jurg Keller. 2017. "Nutrient Removal and Energy Recovery from High-Rate Activated Sludge Processes – Impact of Sludge Age." *Bioresour. Technol.* 245 (July): 1155–61.
- Graaff, Marthe S. de, Tessa P.H. van den Brand, Kees Roest, Marcel H. Zandvoort, Olaf Duin, and Mark C.M. van Loosdrecht. 2016. "Full-Scale Highly-Loaded Wastewater Treatment Processes (A-Stage) to Increase Energy Production from Wastewater: Performance and Design Guidelines." *Environmental Engineering Science* 33 (8): 571–77.
- Gujer, W., M. Henze, T. Mino, and M. Van Loosdrecht. 1999. "Errata: Activated Sludge Model No. 3 (Water Science and Technology (99) 39, 1 (183-193))." *Water Science and Technology* 39 (12): 1999.
- Güven, Hüseyin, Hale Özgün, Mustafa Evren Ersahin, Recep Kaan Dereli, İlknur Sinop, and İzzet Öztürk. 2019. "High-Rate Activated Sludge Processes for Municipal Wastewater Treatment: The Effect of Food Waste Addition and Hydraulic Limits of the System." *Environmental Science and Pollution Research*

26 (2): 1770–80.

- Henze, M., W. Gujer, T. Mino, and L. Van Loosedrecht. 2000. “Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment. No. 9. IWA Scientific and Technical Report.” *IWA Scientific and Technical Report No. 9*.
- Jimenez, Jose, Charles Bott, Mark Miller, Sudhir Murthy, Andrew Randall, Thomas Nogaj, and Bernhard Wett. 2014. “High-Rate Activated Sludge System for Carbon Removal – Pilot Results and Crucial Process Parameters.” *Proceedings of the Water Environment Federation* 2013 (16): 2443–51.
- Jimenez, Jose, Mark Miller, Charles Bott, Sudhir Murthy, Haydee De Clippeleir, and Bernhard Wett. 2015. “High-Rate Activated Sludge System for Carbon Management - Evaluation of Crucial Process Mechanisms and Design Parameters.” *Water Research* 87: 476–82.
- Kaur, Anupreet. 2019. “Microbial Degradation of Hydrocarbons in the Ecosystem.” *Microbial Action on Hydrocarbons* 54 (3): 343–51.
- Kinyua, Maureen N., Matthew Elliott, Bernhard Wett, Sudhir Murthy, Kartik Chandran, and Charles B. Bott. 2017. “The Role of Extracellular Polymeric Substances on Carbon Capture in a High Rate Activated Sludge A-Stage System.” *Chemical Engineering Journal* 322: 428–34.
- Kinyua, Maureen N., Mark W. Miller, Bernhard Wett, Sudhir Murthy, Kartik Chandran, and Charles B. Bott. 2017. “Polyhydroxyalkanoates, Triacylglycerides and Glycogen in a High Rate Activated Sludge A-Stage System.” *Chemical Engineering Journal* 316: 350–60.
- Liao, Bao Qiang, Jeremy T. Kraemer, and David M. Bagley. 2006. *Anaerobic Membrane Bioreactors: Applications and Research Directions. Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. Vol. 36.
- Malamis, Simos, Andreas Andreadakis, Daniel Mamais, and Constantinos Noutsopoulos. 2011. “Investigation of Long-Term Operation and Biomass Activity in a Membrane Bioreactor System.” *Water Science and Technology* 63 (9): 1906–12.
- Mamais, D., C. Noutsopoulos, A. Dimopoulou, A. Stasinakis, and T. D. Lekkas. 2015. “Wastewater Treatment Process Impact on Energy Savings and Greenhouse Gas Emissions.” *Water Science and Technology* 71 (2): 303–8.
- Martins, A. M.P., J. J. Heijnen, and M. C.M. Van Loosdrecht. 2003. “Effect of Dissolved Oxygen Concentration on Sludge Settability.” *Applied Microbiology and Biotechnology* 62 (5–6): 586–93.
- McCarty, Perry L., Jaeho Bae, and Jeonghwan Kim. 2011. “Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer-Can This Be Achieved?” *Environmental Science and Technology* 45 (17): 7100–7106.
- Meerburg, Francis A., Nico Boon, Tim Van Winckel, Koen T.G. Pauwels, and Siegfried E. Vlaeminck. 2016. “Live Fast, Die Young: Optimizing Retention Times in High-Rate Contact Stabilization for Maximal Recovery of Organics from Wastewater.” *Environmental Science and Technology* 50 (17): 9781–90.

- Meerburg, Francis A., Siegfried E. Vlaeminck, Hugo Roume, Dries Seuntjens, Dietmar H. Pieper, Ruy Jauregui, Ramiro Vilchez-Vargas, and Nico Boon. 2016. *High-Rate Activated Sludge Systems to Maximize Recovery of Energy from Wastewater: Microbial Ecology and Novel Operational Strategies*. *Water Research*.
- Meerburg, Francis A, Nico Boon, Tim Van Winckel, Jensen A R Vercamer, Ingmar Nopens, and Siegfried E Vlaeminck. 2015. "Toward Energy-Neutral Wastewater Treatment: A High-Rate Contact Stabilization Process to Maximally Recover Sewage Organics." *Bioresource Technology* 179: 373–81.
- Morgenroth, E., R. Kommedal, and P. Harremoës. 2002. "Processes and Modeling of Hydrolysis of Particulate Organic Matter in Aerobic Wastewater Treatment - A Review." *Water Science and Technology* 45 (6): 25–40.
- Nogaj, Thomas M., Arifur Rahman, Mark W. Miller, Jose A. Jimenez, Charles Bott, and Andrew A. Randall. 2019. "Soluble Substrate Removal Determination through Intracellular Storage in High-Rate Activated Sludge Systems Using Stoichiometric Mass Balance Approach." *New Biotechnology* 52 (May): 84–93.
- Rahman, Arifur, Francis A. Meerburg, Shravani Ravadagundhi, Bernhard Wett, Jose Jimenez, Charles Bott, Ahmed Al-Omari, Rumana Riffat, Sudhir Murthy, and Haydée De Clippeleir. 2016. "Bioflocculation Management through High-Rate Contact-Stabilization: A Promising Technology to Recover Organic Carbon from Low-Strength Wastewater." *Water Research* 104: 485–96.
- Rahman, Arifur, Mariela Mosquera, Warner Thomas, Jose A. Jimenez, Charles Bott, Bernhard Wett, Ahmed Al-Omari, Sudhir Murthy, Rumana Riffat, and Haydée De Clippeleir. 2017. "Impact of Aerobic Famine and Feast Condition on Extracellular Polymeric Substance Production in High-Rate Contact Stabilization Systems." *Chemical Engineering Journal* 328: 74–86.
- Rahman, Arifur, Thomas Warner, Mark Miller, Jose A Jimenez, Bernhard Wett, Ahmed Al-Omari, Rumana Riffat, Sudhir Murthy, Haydée De Clippeleir, and Charles Bott. 2017. "Potential of High-Rate Contact-Stabilization for Maximizing Carbon Redirection and Capture Compared to Plug Flow A-Stage Systems." *Proceedings of the Water Environment Federation* 2017 (7): 4269–75.
- Rahman, Arifur, Harold Yapuwa, Manel Garrido Baserba, Diego Rosso, Jose A. Jimenez, Charles Bott, Ahmed Al-Omari, Sudhir Murthy, Rumana Riffat, and Haydée De Clippeleir. 2017. "Methods for Quantification of Biosorption in High-Rate Activated Sludge Systems." *Biochemical Engineering Journal* 128: 33–44.
- Scott, Jon P., and David F. Ollis. 1995. "Integration of Chemical and Biological Oxidation Processes for Water Treatment: Review and Recommendations." *Environmental Progress* 14 (2): 88–103.
- Seghezze, Lucas, Grietje Zeeman, Jules B. Van Lier, H. V.M. Hamelers, and Gatze Lettinga. 1998. "A Review: The Anaerobic Treatment of Sewage in UASB and EGSB Reactors." *Bioresource Technology* 65 (3): 175–90.
- Sheng, Guo Ping, and Han Qing Yu. 2007. "Formation of Extracellular Polymeric Substances from Acidogenic Sludge in H<sub>2</sub>-Producing Process." *Applied Microbiology and Biotechnology* 74 (1): 208–14.



- Steinbuechel, A. 1996. "13 PHB and Other Polyhydroxyalkanoic Acids." *Biotechnology Second Edition*.
- Britt Marie Willen, and Peter Balmer. (1998) "Short Term Effects of Dissolved Oxygen Concentration on the Turbidity of the Supernatant of Activated Sludge." *Water Science Technology* Vol. 38 (3) pp.25–33.
- Zheng, Chunli, Ling Zhao, Xiaobai Zhou, Zhimin Fu, and An Li. 2013. "Treatment Technologies for Organic Wastewater." *Water Treatment*.
- Batts et al., 1993 "Demand side management opportunities in wastewater industry Water Environment Federation", *Proceedings of the 66th Annual Conference and Exposition*.
- Wett, B., Buchauer, K., Fimml, C., 2007. "Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems". In: *IWA Leading Edge Technology Conference. Asian Water, Singapore*, pp. 21-24.
- Owen, W.F., 1982. *Energy in Wastewater Treatment*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Grady, C., Daigger, G., and Lim, H. (2001) *Biological wastewater treatment*, 2nd Edition. Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
- Jimenez, J. A., La Motta, E. J., and Parker, D. S. (2005) "Kinetics of removal of particulate chemical oxygen demand in the activated sludge process". *Water Environment Research* 77 (6), 437-446.
- U.S. Environmental Protection Agency, EPA 670/26756037 (1975) "Demonstration of a high rate activated sludge system". *EPA, Cincinnati, OH*.
- Böhnke, B. (1994) *Korrespondenz Abwasser* 6/94, Jg 41, 900-907.
- Böhnke, B., Diering, B., and Zuckut, S. (1997) "Cost-effective wastewater treatment process for removal of organics and nutrients". *Water Engineering & Management* 7, 30-35.
- Demoulin G. (1998) *Korrespondenz Abwasser* 3/98, Jg 45, 4786491.
- Schulze Rettmer, R.; Zuckut, S.W. (1998) "Treatment of textile dyeing wastewater by adsorption/bio-oxidation process". *Textile Chemist and Colorist*, 30 (5):19-23.
- Wingen et al. (1987) *Elimination in the A6stage: Implementation multi parameter checks*. GWA Band 98.
- Winkler, H., and Widmann, W. (1994) "Comparison of single stage and two stage activated sludge process for the expansion of the Innsbruck WWTP". *Wat. Sci. Tech.*, 29(12), 69-79
- Böhnke, B. (1984). "Reaktionsabläufe in der A-Stufe als Funktion von Variabilität, Selektion und Mutation sowie von der Konjugation (in German). In *A-B-Technologie : Erfahrungsaustausch*". *Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft*, 26 - 28 September 1983, Aachen, Germany.
- De Graaff, M. & Roest, K. (2012). "Inventarisatie van AB-systemen - Optimale procescondities in de A- trap (in Dutch)". *KWR rapport 2012-094* pp. 65.

- Diamantis, V., Verstraete, W., Eftaxias, A., Bundervoet, B., Siegfried, V., Melidis, P. & Aivasidis, A. (2013). “Sewage pre-concentration for maximum recovery and reuse at decentralized level”. *Water Science and Technology* 67(6): 1188-1193.
- Haider, S., Svardal, K., Vanrolleghem, P. A. & Kroiss, H. (2003). “The effect of low sludge age on wastewater fractionation (S(S), S(I))”. *Water Science and Technology* 47(11): 203-209.
- Imhoff, K. (1955). “Two-stage operation of activated sludge plants”. *Sewage and Industrial Wastes* 27(4): 431-433.
- Khararjian, H. A. & Sherrard, J. H. (1978). “Contact stabilization treatment of a colloidal organic wastewater”. *Journal - Water Pollution Control Federation* 50(4): 645-652.
- Kos, M., Wanner, J., Sorm, I. & Grau, P. (1992). “R-D-N activated sludge process”. *Water Science and Technology* 25(4-5): 151-160.
- Ramalho, R. S. (1977a). “Chapter 5: Secondary treatment: The activated sludge process”. In *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. Academic Press, New York, U.S.A.
- Ramalho, R. S. (1977b). “Chapter 6: Secondary treatment: Other aerobic and anaerobic wastewater treatment processes”. In *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. Academic Press, New York, U.S.A.
- Vásquez-Sarria, N., Rodríguez-Victoria, J. A., Torres-Lozada, P. & Parra, C. A. M.-. (2011). “Performance of a contact stabilization process for domestic wastewater treatment of Cali”, *Colombia. Dyna-Colombia* 78(168): 98-107.
- W.A. Mancell-Egala, C. Su, I. Takacs, J.T. Novak, D.J. Kinnear, S.N. Murthy, H. De Clippeleir, “Settling regimen transitions quantify solid separation limitations through correlation with floc size and shape”, *Water Res.* 109 (2017) 54–68.
- F.A. Meerburg, N. Boon, T. Van Winckel, J.A. Vercamer, I. Nopens, S.E. Vlaeminck, “Toward energy-neutral wastewater treatment: a high-rate contact stabilization process to maximally recover sewage organics”, *Bioresour. Technol.* 179 (2015) 373–381.
- Y. Liu, H.H. Fang, “Influences of Extracellular Polymeric Substances (EPS) on Flocculation, Settling, and Dewatering of Activated Sludge”, 2003.
- Eddy Metcalf, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGrawHill, New York, 2003.
- V. Urbain, J. Block, J. Manem, “Bioflocculation in activated sludge: an analytic approach”, *Water Res.* 27 (5) (1993) 829–838.
- C.S. Lapidou, B.E. Rittmann, “A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass”, *Water Res.* 36 (11) (2002) 2711–2720.
- A. Guellil, F. Thomas, J.-C. Block, J.-L. Bersillon, P. Ginestet, “Transfer of organic matter between wastewater and activated sludge flocs”, *Water Res.* 35 (1) (2001) 143–150.

- C.-P. Lim, J.L. Neo, E. Maratusalihat, Y. Zhou, W.J. Ng, “Biosorption for carbon capture on acclimated sludge-Process kinetics and microbial community”, *Biochem. Eng. J.* (2016).
- C.-P. Lim, S. Zhang, Y. Zhou, W.J. Ng, “Enhanced carbon capture biosorption through process manipulation”, *Biochem. Eng. J.* 93 (2015) 128–136.
- O. Modin, S.S. Alam, F. Persson, B.-M. Wilén, “Sorption and release of organics by primary, anaerobic, and aerobic activated sludge mixed with raw municipal wastewater”, *PLoS One* 10 (3) (2015) e0119371.
- X. Zhang, X. Li, Q. Zhang, Q. Peng, W. Zhang, F. Gao, “New insight into the biological treatment by activated sludge: the role of adsorption process”, *Bioresour. Technol.* 153 (2014) 160–164.
- K. Tan, H. Chua, “COD adsorption capacity of the activated sludge—Its determination and application in the activated sludge process”, *Environ. Monit. Assess.* 44 (1–3) (1997) 211–217.
- R. Riffat, R.R. Dague, “Laboratory studies on the anaerobic biosorption process”, *Water Environ. Res.* 67 (7) (1995) 1104–1110.
- Verstraete, W., & Vlaeminck, S. (2011). “Zerowastewater: short-cycling of wastewater resources for sustainable cities of the future”. *International Journal of sustainable development and world ecology*, pp. 18, 253-264.
- Haider S, Vanrolleghem P, Kroiß H. “Low sludge age and its consequences for metabolisation, storage and adsorption of readily biodegradable substrate”. *Proceedings 1st World Congress of the International Water Association 2000*
- Levine, A.D., Tchobanoglous, G. and Asano, T. (1985). “Characterization of the size distribution of contaminants in wastewater: treatment and reuse implications”. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 57(7), 805–816.
- C. Arzbaecher, K. Parmenter, R. Ehrhard, J. Murphy, “Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries”. *EPRI, Walnut Creek, CA: November 2013.* CR-3002001433. 2011.
- J.A. Jimenez, E.J. La Motta, D.S. Parker, “Effect of operational parameters on the removal of particulate chemical oxygen demand in the activated sludge process”, *Water Environ. Res.* 79 (2007) 984–990.
- B.Q. Liao, D.G. Allen, I.G. Droppo, G.G. Leppard, S.N. Liss, “Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability”, *Water Res.* 35 (2001) 339–350
- X.Y. Li, S.F. Yang, “Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge”, *Water Res.* 41 (2007) 1022–1030.
- Liu, Y., Liu, Y., & Tay, J. (2004). “The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules”. *Appl Microbiol Biotechnol*, pp. 65:143-8.
- Lin, H., Zhang, M., Wang, F., Meng, F., Liao, B.-Q., Hong, H., Gao, W. (2014). “A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane

- bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies”. *Journal of Membrane Science*, pp. (460), 110-125.
- M.F. Dignac, V. Urbain, D. Rybacki, A. Brucher, D. Snidaro, P. Scribe, “Chemical description of extracellular polymers: implication on activated sludge floc structure”, *Water Sci. Technol.* 38 (1998) 45–53.
- M. Higgins, J. Novak, “Characterization of exocellular protein and its role in bioflocculation”, *J. Environ. Eng.* 123 (1997) 479–485.
- Zhao, W., Ting, Y. P., Chen, J. P., Xing, C. H., & Shi, S. Q. (2000). “Advanced primary treatment of waste water using a bio- flocculation-adsorption sedimentation process”. *Acta Biotechnology*, 20(1), 53–64.
- Eikelboom D. H. (1982). “Biosorption and prevention of bulking sludge by means of high floc loading. In: *Bulking of Activated Sludge: Preventive and Remedial Methods* (Edited by Chambers B. and Tomlinson E. 1.)”, 90-105. *Horwood, Chichester*.
- Starkey J. E. and Karr J. E. (1984). “Effect of low dissolved oxygen concentration on effluent turbidity”. *J. Wat. Poll. Contr. Fed*; 56. 837-843.
- Wilén B-M, Balmer P (1999) “The effect of dissolved oxygen concentration on the structure, size and size distribution of activated sludge flocs”. *Water Res* 33:391–400
- Sezgin M, Jenkins D, Parker D (1978) “A unified theory of filamentous activated sludge bulking”. *J Water Pollut Control Fed* 50:362–381
- Pernelle JJ, Gaval G, Cotteux, Duchene P (2001) “Influence of transient substrate overloads on the proliferation of filamentous bacterial populations of filamentous bacterial populations in an activated sludge pilot plant”. *Water Res* 35:129–134
- Chudoba J, Blaha J, Madera V (1974) “Control of activated sludge filamentous bulking—III. Effect of sludge loading”. *Water Res* 8:231–237
- Stamatelatou, K., & Tsagarakis, K. P. (2015). “Sewage treatment plants”. *London: IWA Publishing*.
- Spellman, F. R. (2013). “Water and wastewater infrastructure- energy efficiency and sustainability”. *Florida: CRC Press*.
- Gellings, C. W.; Parmenter, K. E., “Energy efficiency in fertilizer production and use. In *Knowledge for Sustainable Development—An Insight into the Encyclopedia of Life Support Systems*” Gellings, C. W., Blok, K., Eds.; *Eolss Publishers: Oxford, 2004; Vol. II*, pp 419-450.
- Orhon, D. (2015). “Evolution of the activated sludge process: The first 50 years”. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 90(4): 608-640.
- Khanal, S. K. (2008). “Overview of anaerobic biotechnology. In *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production* (ed. S. K. Khanal)”, pp. 1-27. *Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, U.S.A.*
- McCarty, P. L., “One hundred years of anaerobic treatment. In *Anaerobic Digestion 1981*; Hughes, D. E.; Stafford, D. A.; Wheatley, B. I.; Baader, W.; Lettinga, G.;

- Nyns, E. J.; Verstraete, W.; Wentworth, R. L., Eds.’’, *Elsevier Biomedical Press Inc.: Amsterdam*, 1981; pp 3-22.
- Lettinga, G.; Roersma, R.; Grin, P. “Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient - temperatures using a granular bed UASB reactor”. *Biotechnol. Bioeng.* 1983, 25 (7), 1701–1723.
- Van Haandel, A.; Kato, M. T.; Cavalcanti, P. F. F.; Florencio, L. “Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater”. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 2006, 5, 21–38.
- Dague, R. R.; Banik, G. C.; Ellis, T. G. “Anaerobic sequencing batch reactor treatment of dilute wastewater at psychrophilic temperatures”. *Water Environ. Res.* 1998, 70 (2), 155–160.
- Oliveira, S. C.; Von Sperling, M. “Reliability analysis of waste - water treatment plants”. *Water Res.* 2008, 42 (4?5), 1182–1194.
- Aiyuk, S.; Amoako, J.; Raskin, L.; van Haandel, A.; Verstraete, W. “Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept”. *Water Res.* 2004, 38 (13), 3031–3042.
- Foresti, E.; Zaiat, M.; Vallero, M. V. G. “Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges”. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 2006, 5, 3–19.
- Berube, P. R.; Hall, E. R.; Sutton, P. M. “Parameters governing permeate flux in an anaerobic membrane bioreactor treating low- strength municipal wastewaters: A literature review”. *Water Environ. Res.* 2006, 78 (8), 887–896.
- M.W. Miller, M. Elliott, J. DeArmond, M. Kinyua, B. Wett, S. Murthy, C.B. Bott, “Controlling the COD removal of an A-stage pilot study with instrumentation and automatic process control”, *Water Sci. Technol.* 75 (11–12) (2017) 2669–2679 (wst2017153).
- Huang, J.-C. & Li, L. (2000). “An innovative approach to maximize primary treatment performance”. *Water Science and Technology* 42(12): 209–222.
- Alcamo, J., Florke, M. & Marker, M. (2007). “Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes”. *Hydrological Sciences Journal* 52(2): 247-275.
- AQUASTAT. (2014). The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) global water information system. (Available at <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>). (Accessed 25 Apr. 2016).
- UN. (2006). Water - A shared responsibility. *United Nations World Water Development Report 2*.
- M.V. Sperling, “Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries”., *Water Sci. Technol.*, 33 (1996) 103–1

- Alanya, S., Yilmazel, Y. D., Park, C., Willis, J. L., Keaney, L., Kohl, P. M., Hunt, J. A. & Duran, M. (2012) “Anaerobic co-digestion of sewage sludge and primary clarifier skimmings for increased biogas production”. *Water Science and Technology* 67 (1), 174–179.
- Patziger, M., Günthert, F. W., Jardin, N., Kainz, H., & Londong, J. (2016). “On the design and operation of primary settling tanks in state of art wastewater treatment and water resources recovery”. *Water Science and Technology*, 74(9), 2060–2067.
- Ανδρεαδάκης Α. (2015) “Επεξεργασία και Διαχείριση Λυμάτων και Ιλύος”, Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου