



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ – ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΙΛΥΟΣ

Βασιλική Χιουρέα

Επιβλέπων Καθηγητής: Κ. Νουτσόπουλος

Αθήνα, Ιούλιος 2013

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ – ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΘΙΖΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΙΛΥΟΣ**

Βασιλική Χιουρέα

Επιβλέπων Καθηγητής: Κ. Νουτσόπουλος

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας αυτή την εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, Λέκτορα του Εθνικού Μετσόβου Πολυτεχνείου για την υποστήριξη και τη συνεχή καθοδήγηση που πρόσφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ευαγγελία Ανδρόνικου για την πολύτιμη βοήθεια που πρόσφερε κατά την εκμάθηση των μεθόδων ανάλυσης και κυρίως κατά την διεξαγωγή της μικροσκοπικής παρατήρησης δειγμάτων ενεργού ιλύος.

Τέλος, ευχαριστώ τον κ. Στέλιο Γιέτο εξωτερικό συνεργάτη, για την τεχνική υποστήριξη αλλά και για την προθυμία του να με βοηθήσει στην αντιμετώπιση δυσκολιών που προέκυπταν κατά την ανάπτυξη της μεθόδου ανάλυσης εικόνας.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας μεθόδου ανάλυσης και επεξεργασίας της μικροσκοπικής εικόνας δειγμάτων ενεργού ιλύος με σκοπό τον υπολογισμό μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων ενεργού ιλύος και στη συνέχεια ο προσδιορισμός των μεταξύ τους συσχετίσεων. Επιπλέον εξετάζεται η συσχέτιση των παραμέτρων καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος, καθώς και η επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας.

Στην πρώτη φάση περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας δειγμάτων ενεργού ιλύος κατά την οποία συνδυάζεται η μικροσκοπική παρατήρηση με ένα λογισμικό επεξεργασίας εικόνας. Αυτή η εφαρμογή έχει την δυνατότητα εντοπισμού και καταγραφής των μορφολογικών παραμέτρων χιλιάδων κροκίδων ενεργού ιλύος με αρκετά μεγάλη ακρίβεια με αποτέλεσμα να καταργείται η υποκειμενικότητα του παρατηρητή. Στη συγκεκριμένη εργασία υπολογίστηκαν οι εξής παράμετροι: Επιφάνεια, περίμετρος, aspect ratio, μέγιστος άξονας, μέγιστη διάμετρος, ελάχιστη διάμετρος, μέση διάμετρος και καμπυλότητα.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων για το ίδιο δείγμα το οποίο επρόκειτο για ανάμικτο υγρό από την Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας, με σκοπό την εξέταση της επαναληψιμότητας και της ακρίβειας της μεθόδου. Από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε το συμπέρασμα ότι η μέθοδος διαθέτει επαναληψιμότητα καθώς αν εξαιρεθεί η επιφάνεια, όλες οι υπόλοιπες παράμετροι δεν παρουσίασαν σημαντικές αποκλίσεις από τον μέσο όρο. Επιπλέον στην πλειοψηφία των παραμέτρων τα περιθώρια σφάλματος εμφανίστηκαν αρκετά μικρά, ειδικά στην περίπτωση του συνόλου των μετρήσεων, γεγονός που ενισχύει την μεγάλη ακρίβεια της μεθόδου.

Στη συνέχεια, η μέθοδος εφαρμόστηκε για την εξέταση δειγμάτων ανάμικτου υγρού που προέρχονταν από διάφορα συστήματα επεξεργασίας ιλύος και διέφεραν ως προς τη σύνθεση της βιομάζας τους. Κατά την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων αρχικά καταστρώθηκαν για κάθε σύστημα οι αθροιστικές κατανομές των αποτελεσμάτων κάθε παραμέτρου και έπειτα καταγράφηκαν οι τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο 50%, 80% και 90% των κροκίδων. Παρατηρήθηκε ότι σε όλα τα συστήματα το aspect ratio είχε τιμές αρκετά μεγαλύτερες της μονάδας δηλαδή η πλειοψηφία των κροκίδων έτεινε να έχει επίμηκες σχήμα. Επίσης η καμπυλότητα εμφανιζόταν πολύ μεγαλύτερη της μονάδας που οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι κατά κύριο λόγο οι κροκίδες είχαν ακανόνιστη δομή. Επιπλέον τα συστήματα που εμφάνιζαν υψηλή τιμή στο μέγιστο άξονα, στη μέγιστη διάμετρο και στη μέση διάμετρο των κροκίδων, παρατηρήθηκε ότι εμφάνιζαν αντίστοιχα υψηλές τιμές και στην επιφάνεια των κροκίδων.

Μετέπειτα, πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της γραμμικής συσχέτισης των τιμών των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο 50%, 80% και 90% των κροκίδων μεταξύ τους καθώς και με το DSVI, το MLSS, τον αριθμό των αντικειμένων ανά mm^2 και το

ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από τις κροκίδες. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- ❖ Όσο αυξάνεται το μέγεθος των κροκίδων το aspect ratio φαίνεται ότι μειώνεται, δηλαδή η έλλειψη που τις περικλείει τείνει να αποκτά πιο σφαιρικό σχήμα.
- ❖ Όσο αυξάνεται το μέγεθος των κροκίδων, αυξάνεται και η καμπυλότητα δηλαδή η δομή τους γίνεται πιο ακανόνιστη και διάχυτη.
- ❖ Όταν αυξάνεται το aspect ratio φαίνεται ότι αυξάνεται και ο αριθμός των αντικειμένων ανά mm^2 , δηλαδή όσο πιο ελλειψοειδείς γίνονται οι κροκίδες, τόσο αυξάνεται ο αριθμός τους ανά mm^2 .
- ❖ Η καμπυλότητα παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με τον αριθμό των αντικειμένων ανά mm^2 δηλαδή όσο λιγότερο διάχυτη είναι η δομή τόσο πιο πολλές κροκίδες προκύπτουν ανά mm^2 .
- ❖ Όταν το μέγεθος των κροκίδων αυξάνεται τότε μειώνεται ο αριθμός των αντικειμένων ανά mm^2 . Δηλαδή μεγαλύτερες κροκίδες καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο στο πλακίδιο κι επομένως ο αριθμός τους ανά mm^2 είναι μικρότερος.
- ❖ Όταν αυξάνεται ο δείκτης καθιζησιμότητας DSVI και επομένως οι κροκίδες συγκρατούν νερό μέσα τους λόγω της νηματοειδούς διόγκωσης, τότε το σχήμα τους τείνει να γίνεται πιο ελλειψοειδές ή επίμηκες.
- ❖ Οι διαστάσεις της κροκίδας δηλαδή ο μέγιστος άξονας, η μέγιστη διάμετρος και η μέση διάμετρος καθώς και η επιφάνεια τους παρουσιάζουν ισχυρές θετικές συσχετίσεις μεταξύ τους.
- ❖ Η αύξηση του μεγέθους των κροκίδων οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης στερεών.
- ❖ Τέλος προέκυψε πως υψηλές τιμές του δείκτη DSVI σχετίζονται θετικά με χαμηλές συγκεντρώσεις στερεών και αντίστροφα.

Επιπρόσθετα κατά τη φάση διερεύνησης της συσχέτισης των παραμέτρων καθιζησιμότητας εξετάστηκαν δείγματα από πέντε διαφορετικές Ε.Ε.Λ. που διέφεραν ως προς τη σύνθεση τους και διαπιστώθηκε ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση ανάμεσα στο δείκτη DSVI και τις σταθερές V_0 και n της εξίσωσης Vesilind. Ειδικότερα, με την αύξηση του δείκτη καθιζησιμότητας DSVI παρατηρήθηκε μείωση στη τιμή της σταθεράς V_0 και αύξηση στη σταθερά n αντίστοιχα.

Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στις σταθερές V_0 και n και το δείκτη DSVI. Συγκεκριμένα για το ίδιο δείγμα (Ε.Ε.Λ Ψυττάλειας) πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων προσδιορισμού της ταχύτητας καθιζήσεως σε πέντε θερμοκρασίες: Στους 10°C , 20°C , 25°C , 30°C και 35°C . Σε κάθε θερμοκρασία υπολογίστηκαν οι τιμές των σταθερών V_0 και n , του DSVI και του ιξώδους του ανάμικτου υγρού εκάστοτε πειράματος και στη συνέχεια ο μέσος όρος των τιμών κάθε παραμέτρου καταγράφηκαν διαγραμματικά συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Από τη διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς V_0 παρατηρήθηκε γραμμική αύξηση στη τιμή της με την άνοδο της θερμοκρασίας αλλά κυρίως η τιμή της παρουσίασε αλματώδη άνοδο κατά τη μετάβαση από τους 25 °C στους 30 °C. Γι αυτό το λόγο το γράφημα χωρίστηκε σε δύο περιοχές, την περιοχή κάτω των 25 °C και την περιοχή άνω των 30 °C. Από την άλλη πλευρά η σταθερά n δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την μεταβολή της θερμοκρασίας και η τιμή της μάλλον καθορίζεται από το είδος της εκάστοτε ιλύος.

Όσον αφορά στο δείκτη καθιζησιμότητας DSVI φαίνεται πως η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά τη τιμή του στο θερμοκρασιακό διάστημα 20 °C – 30 °C. Κάτω από τους 20 °C δεν φαίνεται να υπάρχει καμία επιρροή πάνω στην καθιζησιμότητα, από τους 20 °C έως τους 30 °C παρατηρήθηκε γραμμική μείωση της τιμής του, ενώ πάνω από τους 30 °C παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της θερμοκρασίας αρχίζει και επηρεάζει αρνητικά την καθιζησιμότητα.

Τέλος από την εξέταση του ιξώδους σε εκάστοτε θερμοκρασία προέκυψε πως η τιμή του μειώνεται γραμμικά με την άνοδο της θερμοκρασίας. Σε αυτή τη μείωση του ιξώδους αποδόθηκε η βελτίωση της καθιζησιμότητας με την άνοδο της θερμοκρασίας μιας και οποιαδήποτε άλλη διεργασία σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί.

Συνοψίζοντας, στη παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μία μέθοδος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας που παρουσιάζει ακρίβεια και επαναληψιμότητα καθώς προέκυψαν μικρά περιθώρια σφάλματος (ειδικά στην περίπτωση του συνόλου των μετρήσεων) και η πλειοψηφία των παραμέτρων δεν παρουσίασαν σημαντικές αποκλίσεις από τον μέσο όρο. Επιπλέον αν ληφθεί υπόψιν ότι ο αριθμός των κροκίδων που καταμετρώνται σε κάθε σειρά μετρήσεων είναι μεγάλος, μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την αξιοπιστία της μεθόδου και ότι μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια για το χαρακτηρισμό της μορφολογίας δειγμάτων ενεργού ιλύος. Όσον αφορά στο δεύτερο σκέλος της εργασίας παρατηρήθηκαν σημαντικές συσχετίσεις ανάμεσα στις παραμέτρους καθιζησιμότητας καθώς επίσης ότι η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στη καθιζησιμότητα της ενεργού ιλύος.

Abstract

Introduction

The activated sludge system is today one of the prevailing systems of biological wastewater treatment. This system is widespread used due to its efficiency in delivering an effluent of great quality with the most economical operational way. In the activated sludge process, it is necessary to separate the treated wastewater from the biological sludge mass, thereby producing a clear effluent. Therefore, the effluent's quality partially depends on the secondary settling tanks performance which is very susceptible to unexpected changes in operational conditions, where several disturbances associated to activated sludge structure and sludge settling ability may arise.

The aim of this thesis is the development of an image processing and analysis technique in order to characterize the activated sludge flocs morphology as well as evaluating the relationship between the sludge settling parameters and the temperature effect on zone settling parameters.

Experimental process and results

Image analysis and processing technique

Over the years several image processing and analysis techniques have been developed in order to characterize the activated sludge flocs morphology. The main application of these techniques was focused on the flocs structure monitoring so as to control and prevent the development of filamentous bulking.

The image processing and analysis technique combines the microscopic observation with the automation of an image analysis program. This application has the capability of detecting and counting thousand of activated sludge flocs as well as measuring with great accuracy several activated sludge floc's morphological parameters. Activated sludge samples from each system were measured in an optical microscope (Nikon Eclipse 80), in phase contrast at 100x total magnification, coupled with a Lumenera Infinity 1-3c camera. Microbial structure images were acquired at 2048 x 1536 pixel and 24 bit format. One drop of the sample was deposited on the slide and afterwards was covered with a cover slip carefully without producing air leaks. Images were acquired in the middle of the slide covering an area of 1 cm², resulting in approximately 500 images. Three slides per sample were measured in order to improve the representativeness of the floc structure in the system.

The image processing was performed through the image pro plus software where the routines were developed in Visual basic. The floc counting was performed through the following steps:

1. Manual determination of the flocs color
2. Implementation of several filtering techniques for enhancing the objects definition
3. Highlighting the measuring outline and assigning a reference number to flocs on the processed image and the original image as shown in flocs trace example below.

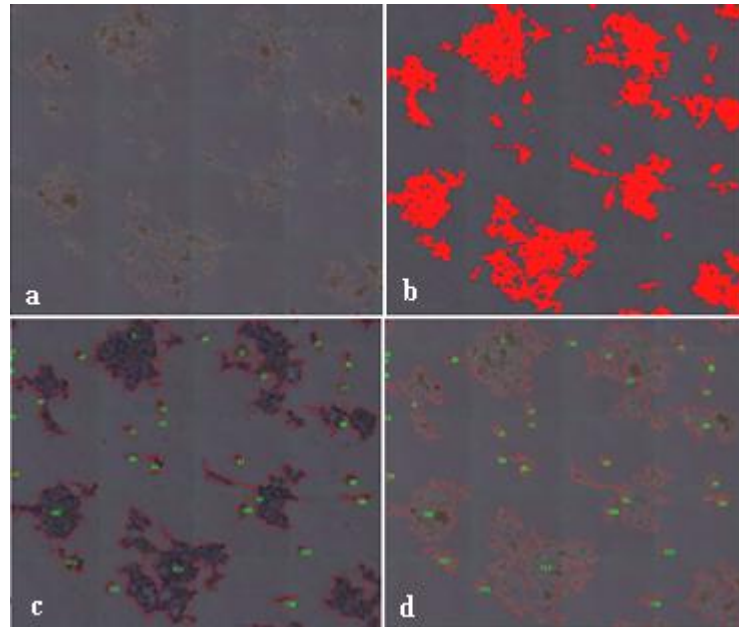


Figure 1: a) Original image, b) determination of the flocs color, c) Implementation of several filtering techniques and flocs detection d) Flocs detection on the original image

4. Manual removal of flocs touching the image border, air leaks, oil drops and debris
5. Manual separation of flocs having been counted as one floc
6. Determination of the smaller floc (diameter $<50 \mu\text{m}$) and automatic elimination of objects smaller than the determined minimum size.

In the present thesis, the parameters that were measured for each activated sludge floc were: Area (μm^2); perimeter (μm) defined as the length of the object's outline; aspect ratio defined as the ratio between major axis and minor axis of the ellipse equivalent to the object; major axis (μm) defined as the length of major axis of the ellipse equivalent to the object; maximum diameter (μm) defined as the length of longest line joining two points of floc's outline and at the same time passing through the centroide; minimum diameter (μm) defined as the length of shortest line joining two points of floc's outline and at the same time passing through the centroide; mean diameter (μm) defined as the average length of all diameters measured at 2 degrees intervals and passing through the floc's centroide; roundness, calculated by the following equation: $\frac{perimeter^2}{4 \cdot \pi \cdot Area}$. Also the activated sludge flocs were classified according to their size based on the maximum diameter, the minimum diameter and the mean diameter in

three classes: Small flocs ($D < 150\mu\text{m}$), medium flocs ($150\mu\text{m} < D < 500\mu\text{m}$) and large flocs ($D > 500\mu\text{m}$).

At first, the technique's repeatability and accuracy was tested by performing a series of examination tests to the same sample coming from the waste water treatment plant (WWTP) located at Psitalia. At total, a large number of flocs were examined (5702 flocs). Afterwards, the method was applied for the examination of the activated sludge flocs characteristics of samples coming from various activated sludge systems which had different operating conditions and biomass structure. For each system the measured values of each morphological parameter were displayed in a cumulative distribution in order to evaluate the parameter's value which corresponded to the 50%, 80% and 90% of flocs. These values (only the conventional activated sludge systems were concerned in this analysis) were statistically compared (correlation analysis) with MLSS, DSVI, the percentage of ratio of total objects area to total regions area (PERarea%) and the calculated objects number for a 1 mm^2 (OBJnum).

From the cumulative distribution of the measured values of each morphological parameter the main conclusions were the above:

The aspect ratio's and roundness values were high ($\gg 1$) at all the examined systems leading to the conclusion that the majority of flocs were elongated and had irregular boundaries. Additionally the systems having high values at the diameter max, diameter min and diameter mean parameters, had high values at the parameter Area as well.

The main conclusions from the correlation analysis with the Pearson coefficient were the above:

- ❖ Increase in floc's size results in a decrease of aspect ratio values, meaning that the ellipse equivalent to floc acquires more circular shape.
- ❖ Increase in floc's size results in an increase of roundness values, meaning that the floc's shape becomes more irregular.
- ❖ There is a negative correlation between the parameters describing the flocs size and the objects number, meaning that the more the floc's shape minimizes the more the number of flocs per area increases.
- ❖ Increase in aspect ratio values results in an increase of the objects number, meaning that the more elongated the floc's shape becomes, the more the number of flocs per area increases.
- ❖ There is a negative correlation between roundness values and objects number, meaning that the less irregular the floc's shape becomes, the more the number of flocs per area increases.
- ❖ Increase in DSVI values results in an increase to aspect ratio values, meaning that at bulking situations the flocs shape becomes more elongated.
- ❖ There is a strong positive correlation between the parameters axis major, diameter max, diameter min, diameter mean and the floc's area.
- ❖ There is a negative correlation between flocs size and MLSS concentration.

❖ Finally there is a negative correlation between DSVI and MLSS concentration.

Relationship between the sludge settling parameters and the temperature effect on them

Several authors (Tuntoolavest & Grady (1982), Daigger & Roper (1985), Pitman (1984), Daigger (1995), Wahlberg & Keinath) have established empirical relationships linking the simple indexes of sludge settleability (SVI, DSVI, SSVI_{3,5}) to the V_0 and n constants of Vesilind equation. At this thesis the correlation between the sludge settling properties and DSVI has been evaluated. Zone settling velocity tests and DSVI tests were performed at room temperature to activated sludge samples from various WWTP. Afterwards the V_0 and n constants were plotted against DSVI.

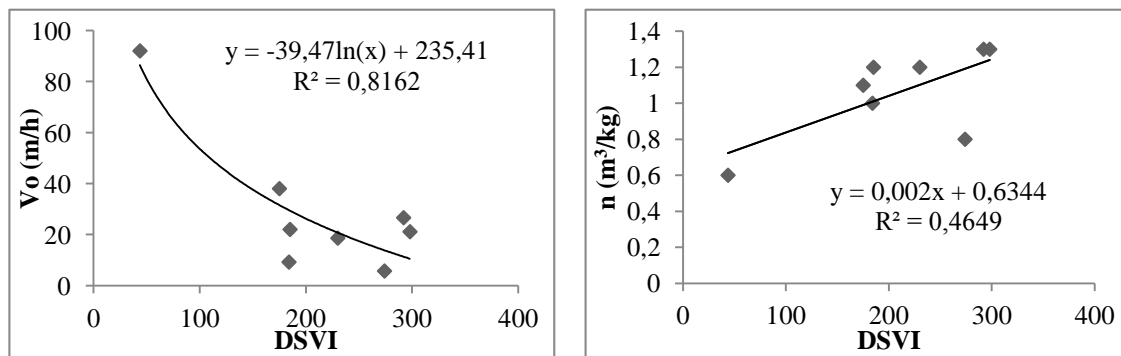


Figure 2: Measured V_0 and n constants plotted against DSVI

A significant relationship between V_0 and n constants and DSVI arises from the graphs above revealing that the DSVI increase is leading to a decrease to the V_0 settling constant and an increase to the n constant.

Furthermore, the temperature impact on zone settling characteristics and DSVI was evaluated during another experimental process. Zone settling velocity tests and DSVI tests were conducted at the temperature range of 10 °C, 20 °C, 25°C, 30°C and 35°C for the same activated sludge sample coming from the WWTP located at Psitalia. Also the mixed liquor viscosity was measured at the same temperature range. Afterwards the V_0 and n constants, DSVI and viscosity were plotted against temperature.

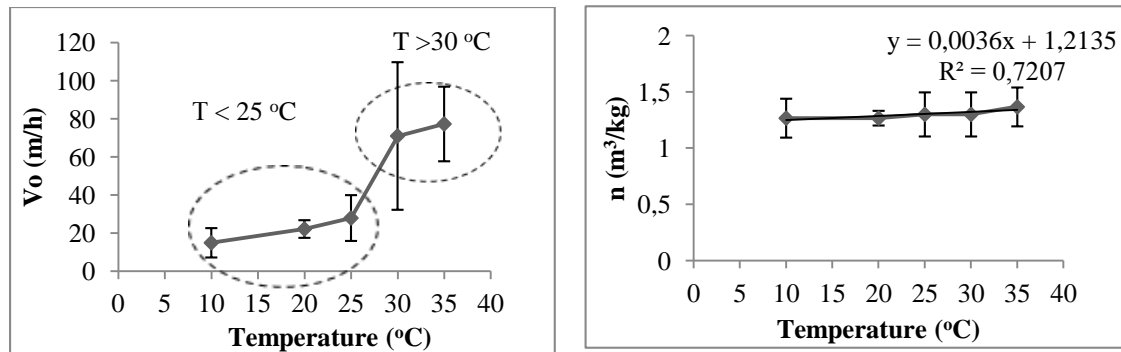


Figure 3: Measured mean values of V_o and n constants and standard deviations versus Temperature

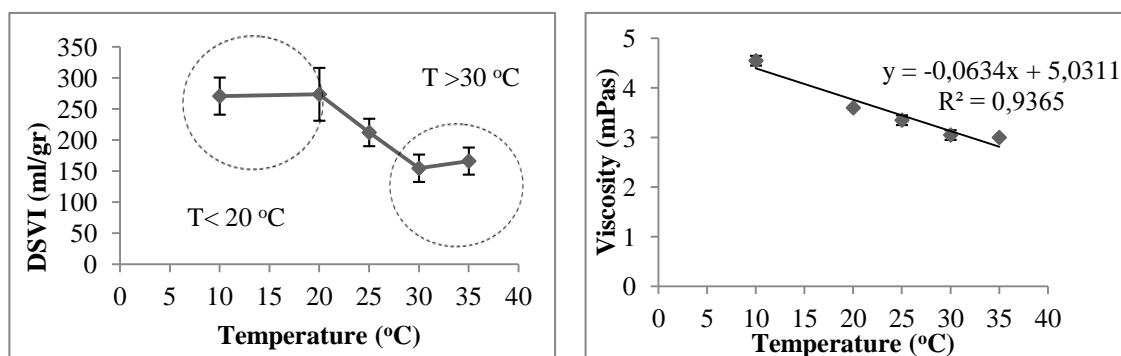


Figure 4: Measured mean values of DSVI and Viscosity versus temperature

The results from this experiment revealed a strong relationship between sludge settling characteristics and temperature:

The values of V_o constant are significantly affected from the temperature increase. Although below 25 °C there is a steady and linear increase of V_o constant values, at the temperature range 25°C - 30 °C a step increase of the constant is noted. For temperatures above 30 °C there is not a significant impact on V_o constant. On the other hand, the n constant is not significantly affected from the temperature increase.

Additionally, it seems that there is a strong temperature influence on DSVI values at the range of 20 °C - 30 °C leading to a linear DSVI decrease. A temperature impact on DSVI values for temperatures below 20 °C is not noted. Regarding temperatures over 30 °C it seems that the temperature impact leads to a DSVI increase resulting in a deterioration of sludge settling capability. Finally, the significant decrease of mixed liquor viscosity under temperature increase explains the enhancement of sludge settling parameters as a biological process could not happen at such a short period of time.

Conclusions

At this postgraduate thesis an image processing and analysis technique was developed in order to characterize the activated sludge flocs morphology. The methodology's feasibility to produce accurate results was evaluated and afterwards it was implemented for the examination of various activated sludge samples. The obtained results support the use of image analysis technique for the assessment of activate sludge flocs morphology.

Additionally, the relationship between the sludge settling parameters as well as the temperature effect on these parameters were evaluated. It was concluded that there is a significant relationship connecting Vesilind constants and DSVI. Furthermore the temperature increase results in the enhancement of activated sludge settleability and this was attributed to the decrease of mixed liquor viscosity with the temperature increase.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	v
Περίληψη	vii
Abstract	x
Κατάλογος εικόνων.....	xviii
Κατάλογος πινάκων	xx
Κατάλογος σχημάτων	xxii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	3
2.1 Καθίζηση.....	3
2.1.1 Εισαγωγή	3
2.1.2 Συσσωμάτωση.....	3
2.1.3 Λειτουργική σημασία των δεξαμενών τελικής καθίζησης (ΔTK).....	4
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καθίζηση	5
2.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην καθίζηση	6
2.4 Μέθοδοι μέτρησης της καθιζησιμότητας της ιλύος.....	9
2.4.1 Δείκτης καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος SVI (Sludge Volume Index)	9
2.4.2 Ταχύτητα ζωνικής καθίζησης ZSV (Zone Settling Velocity).....	10
2.4.3 Συσχέτιση του δείκτη SVI και της ταχύτητας καθίζησης.....	11
2.5 Προβλήματα διαχωρισμού των στερεών από τα επεξεργασμένα λύματα	14
2.6 Η επίδραση της νηματοειδούς διόγκωσης στο δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI).....	18
2.7 Νηματοειδείς μικροοργανισμοί	20
2.8 Νηματοειδείς μικροοργανισμοί στην Ελλάδα	23
2.9 Η μέθοδος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας (image analysis) για την εκτίμηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ενεργού ιλύος.....	24
Κεφάλαιο 3 Πειραματικό πρωτόκολλο.....	31
3.1 Εισαγωγή	31
3.2 Περιγραφή αναλυτικών μεθόδων	31
3.2.1 Προσδιορισμός των ολικών αιωρούμενων στερεών.....	31
3.2.2 Δείκτης καθιζησιμότητας ιλύος (DSVI)	33
3.2.3 Προσδιορισμός του ιξώδους (μ)	33

3.2.4	Προσδιορισμός της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης και των σταθερών N_0 και n της εξίσωσης Vesilind.....	34
3.3	Πρωτόκολλο του πειράματος διερεύνησης της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος	37
3.4	Διαδικασία μικροσκοπικής παρατήρησης δείγματος ενεργού ιλύος.....	38
3.5	Σύστημα ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνων.....	40
	Κεφάλαιο 4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	41
4.1	Ανάπτυξη της μεθόδου καταγραφής των μορφολογικών χαρακτηριστικών των κροκίδων μέσω ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας.....	41
4.1.1	Ψηφιακή αρχειοθέτηση των πλακιδίων στο σκληρό δίσκο	41
4.1.2	Καταμέτρηση κροκίδων.....	44
4.2	Έλεγχος και επικύρωση της μεθόδου	49
4.3	Προφίλ των δειγμάτων.....	56
4.4	Εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης εικόνας για την εξέταση διαφόρων συστημάτων ενεργού ιλύος.....	61
4.4.1	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων	61
4.4.2	Αθροιστική κατανομή των αποτελεσμάτων	64
4.4.3	Συσχέτιση των μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων	78
4.5	Συσχέτιση των σταθερών N_0 και n της εξίσωσης Vesilind ως προς το δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος DSVI.....	81
4.6	Επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας.....	85
	Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα	92
	Βιβλιογραφία	95

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2-1: a) Νηματοειδής διόγκωση, b) Ανάπτυξη μικροκροκίδων, c) Διόγκωση λόγω zoozglea, d) Κανονικές κροκίδες (Mesquita et al., 2011)	17
Εικόνα 2-2: Ψηφιοποιημένη εικόνα κροκίδων ενεργού ιλύος όπου τα pixel παίρνουν την τιμή 1 ή 0 επειδή η εικόνα είναι ασπρόμαυρη. (Μπάρα = 100μm, μεγέθυνση = 40x) (Grijnspeerdt & Verstraete, 1997)	25
Εικόνα 3-1: α) Μονάδα διήθησης και β) αντλία κενού	32
Εικόνα 3-2: α) Φούρνος στη θερμοκρασία των 103 °C και β) ξηραντήρας.....	32
Εικόνα 3-3: Αναλυτικός ζυγός ακριβείας.....	32
Εικόνα 3-4: Περιστροφικό ιξωδόμετρο	33
Εικόνα 3-5: Απεικόνιση του πειράματος προσδιορισμού της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης (Ανάμεικτο υγρό από τον βιολογικό καθαρισμό Ψυττάλειας).....	34
Εικόνα 3-6: Ανοξειδωτο υδατόλουτρο	37
Εικόνα 3-7: Διάταξη του πειράματος διερεύνησης της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος	38
Εικόνα 3-8: Μικροσκόπιο με τεχνική αντίθεσης φάσεως με ηλεκτροκίνητη τράπεζα (άξονες x,y) και έγχρωμη ψηφιακή κάμερα μικροσκοπίας	38
Εικόνα 3-9: Σύστημα H/Y και μικροσκοπίου.....	40
Εικόνα 4-1: Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού ανάλυσης εικόνας.....	41
Εικόνα 4-2: Παραθυρικός διάλογος της ψηφιακής χαρτογράφησης των πλακιδίων ..	42
Εικόνα 4-3: Παράδειγμα χάρτη που προέκυψε ύστερα από σάρωση δείγματος της Ψυττάλειας.....	43
Εικόνα 4-4: Παραθυρικός διάλογος της υπορουτίνας καταμέτρησης κροκίδων.....	44
Εικόνα 4-5: α) Πρωτότυπη εικόνα, β) καθορισμός του χρώματος των κροκίδων, γ) εφαρμογή φίλτρου και εντοπισμός των κροκίδων δ) εντοπισμός των κροκίδων στην πρωτότυπη εικόνα.....	45
Εικόνα 4-6: Η εφαρμογή της εντολής set on/off για την αφαίρεση α) φυσαλίδων αέρα, β) αντικειμένου	45
Εικόνα 4-7: Η εφαρμογή της εντολής set on/off για την αφαίρεση κηλίδας λαδιού...	46
Εικόνα 4-8: Αφαίρεση αντικειμένου με την εφαρμογή της εντολής split.....	46
Εικόνα 4-9: Διαχωρισμός των κροκίδων με την εντολή split.....	47
Εικόνα 4-10: Συγχώνευση αντικειμένων με την εντολή Draw/Merge.	47
Εικόνα 4-11: α) Ανοιχτή κροκίδα. Δείγμα από την Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας β) Ανοιχτή, ακανόνιστη δομή. Δείγμα από την Ε.Ε.Λ. Λαμίας. (Μεγέθυνση 100x με τεχνική αντίθεσης φάσης, μπάρα = 100 μm)	59

Εικόνα 4-12: Κλειστή, συμπαγής κροκίδα α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας β) Πιλοτικό ANNAMOX (Μεγέθυνση 200x με τεχνική αντίθεσης φάσης, μπάρα = 50 μm)	59
Εικόνα 4-13: Ανάπτυξη πρωτόζωων στο εξωτερικό της κροκίδας που οδηγούν στη δημιουργία μεγάλων κροκίδων με διαμέτρους πολύ μεγαλύτερων των 500 μm. Δείγμα από την Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας. (Μεγέθυνση 200x με τεχνική αντίθεσης φάσης, μπάρα = 50 μm).....	60
Εικόνα 4-14: Ο κυρίαρχος νηματοειδής μικροοργανισμός στη πλειοψηφία των ελληνικών Ε.Ε.Λ. <i>Microthrix parvicella</i> από δείγμα της Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας. α) ζωντανό δείγμα με τεχνική αντίθεσης φάσης, β) με χρώση Gram στο φωτεινό πεδίο. (Μεγέθυνση 1000x, μπάρα = 10 μm)	60
Εικόνα 4-15: α) Ο <i>Cordona</i> με χρώση Gram από δείγμα της Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας β) ο κυρίαρχος <i>type 0092</i> με χρώση Neisser στο δείγμα της Ε.Ε.Λ. Λαμίας. (Μεγέθυνση 1000x στο φωτεινό πεδίο, μπάρα = 10 μm).....	60

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2-1: Πειράματα προσδιορισμού των παραμέτρων καθιζησιμότητας που διεξήχθησαν από διαφορετικούς συγγραφείς. (Von Sperling & Froes, 1999)	12
Πίνακας 2-2: Τιμές των σταθερών N_0 και n σε πέντε διαφορετικά είδη καθίζησης για δεδομένα από διάφορους συγγραφείς (Von Sperling & Froes, 1999).....	13
Πίνακας 2-3: Κατηγοριοποίηση της βιομάζας με βάση την καθιζησιμότητα (Valter T. et al., 2006)	14
Πίνακας 2-4: Είδος επίδρασης στην συμπύκνωση και την καθίζηση που προκαλείται από διάφορους νηματοειδείς μικροοργανισμούς (Jenkins et al., 1993)	17
Πίνακας 2-5: Συνηθέστεροι νηματοειδείς μικροοργανισμοί που συναντώνται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος (Jenkins et al., 1993)	21
Πίνακας 2-6: Κυρίαρχοι νηματοειδείς μικροοργανισμοί σε συστήματα ενεργού ιλύος από διάφορες χώρες	21
Πίνακας 2-7: Οι συνθήκες λειτουργίας που συνδέονται με την γρήγορη ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών (Geraldí, 2002)	23
Πίνακας 2-8: Ποσοστιαία κατανομή επικρατέστερων νηματοειδών μικροοργανισμών σε 17 ΕΕΛ στην Ελλάδα (Νουτσόπουλος, 2002)	24
Πίνακας 4-1: Οι μορφολογικές παράμετροι που προσδιορίζονται μέσω της μεθόδου ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας.....	48
Πίνακας 4-2: Μέσες τιμές της μέγιστης, της ελάχιστης και της μέσης διαμέτρου για κάθε μέτρηση και για το σύνολο τους	49
Πίνακας 4-3: Μέσες τιμές του aspect ratio, της επιφάνειας και της καμπυλότητας των κροκίδων για κάθε πλακίδιο και για το σύνολο τους.....	51
Πίνακας 4-4: Ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση την μέση διάμετρο τους.....	55
Πίνακας 4-5: Ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση την μέγιστη διάμετρο τους	55
Πίνακας 4-6: Μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων ανάμεικτου υγρού από τις Ε.Ε.Λ. ως προς τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους.....	57
Πίνακας 4-7: Κατάταξη (rank) των νηματοειδών βακτηριδίων και βαθμονόμηση της ανάπτυξης τους (abundance) στο ανάμεικτο υγρό των Ε.Ε.Λ.....	58
Πίνακας 4-8: Η συγκέντρωση στερεών (MLSS), ο δείκτης DSVI και οι μέσες τιμές των υπολογιζόμενων παραμέτρων μέσω ανάλυσης εικόνας.	62
Πίνακας 4-9: Ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση την μέση διάμετρο τους.....	63

Πίνακας 4-10: Ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση την μέγιστη διάμετρο τους	63
Πίνακας 4-11: Για κάθε σύστημα οι τιμές του aspect ratio που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών	66
Πίνακας 4-12: Για κάθε σύστημα οι τιμές του μέγιστου άξονα που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών	68
Πίνακας 4-13: Για κάθε σύστημα οι τιμές της μέγιστης διαμέτρου που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών	70
Πίνακας 4-14: Για κάθε σύστημα οι τιμές της μέσης διαμέτρου που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών	72
Πίνακας 4-15: Για κάθε σύστημα οι τιμές της καμπυλότητας (R) που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών	74
Πίνακας 4-16: Για κάθε σύστημα οι τιμές της επιφάνειας (A) που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών	76
Πίνακας 4-17: Συσχέτιση των μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων με το συντελεστή συσχέτισης r του Pearson	80
Πίνακας 4-18: Η συγκέντρωση στερεών ανάμεικτου υγρού (MLSS), οι σταθερές Vesilind n και V_0 και το DSVI για κάθε σύστημα	81
Πίνακας 4-19: Οι σταθερές V_0 και n όπως προέκυψαν από τις εξισώσεις που προτάθηκαν από τους Koopman & Cadee (1983) και τον Daigger (1995) για διάφορες τιμές του DSVI (Von Sperling & Froes, 1999)	84
Πίνακας 4-20: Οι τιμές της σταθεράς V_0 σε κάθε θερμοκρασία για κάθε σειρά πειραμάτων	85
Πίνακας 4-21: Οι τιμές της σταθεράς n σε κάθε θερμοκρασία για κάθε σειρά πειραμάτων	86
Πίνακας 4-22: Οι τιμές του DSVI σε κάθε θερμοκρασία για κάθε σειρά πειραμάτων	87
Πίνακας 4-23: Οι τιμές του ιξώδους (μ) σε κάθε θερμοκρασία (T) για κάθε σειρά πειραμάτων	88

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2-1: Καμπύλη ροής χωνεμένης ιλύος σε διάφορες θερμοκρασίες	6
Σχήμα 2-2: Υπολογιζόμενες ταχύτητες καθίζησης και τυπικές αποκλίσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες (με κουκκίδες (●) απεικονίζονται τα μικρά σωματίδια και με τετράγωνα (■) απεικονίζονται τα μεγάλα σωματίδια). Η γραμμή απεικονίζει τις θεωρητικές ταχύτητες. (Winkler et al., 2012).....	7
Σχήμα 2-3: Επίδραση της θερμοκρασίας στη φάση ζωνικής καθίζησης (Reed & Murphy , 1969)	7
Σχήμα 2-4: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα ανάπτυξης των Μικροοργανισμών (Νουτσόπουλος, 2002).....	8
Σχήμα 2-5: Εποχιακή διακύμανση των νηματοειδών μικροοργανισμών σε ελληνικές Ε.Ε.Λ. (Noutsopoulos et al., 2007)	8
Σχήμα 2-6: Επίδραση του μήκους των νηματοειδών στο SVI σε συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών 1100 mg/l. (Sezgin, 1982)	18
Σχήμα 2-7: Συσχέτιση του δείκτη νηματοειδούς διόγκωσης (FI) με το SVI (Jin B. et al., 2003)	19
Σχήμα 2-8: : Συσχέτιση του δείκτη νηματοειδούς διόγκωσης (FI) με τον δείκτη SVI (Noutsopoulos et al., 2007).....	20
Σχήμα 2-9: Συσχέτιση του SVI και της ποσότητας των νηματοειδών όπως προσδιόριστηκε από τη μέθοδο ανάλυσης εικόνας από τους Mesquita et al. (2011). FB = Νηματοειδής διόγκωση, PP = Ανάπτυξη μικροκροκίδων, ZB = Διόγκωση λόγω zooglea, NC = Κανονικές συνθήκες.	28
Σχήμα 2-10: Μορφολογικοί παράγοντες των νηματοειδών και των κροκίδων ως προς τη ταχύτητα καθίζησης στη περίπτωση νηματοειδούς διόγκωσης (◆) και σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (▲) (Koivuranta et al., 2012).....	29
Σχήμα 3-1: Τυπική καμπύλη καθίζησης. (Valter T. et all 2006).....	35
Σχήμα 3-2: Πείραμα υπολογισμού της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης που πραγματοποιείται σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ανάμεικτου υγρού (Δείγμα από τον βιολογικό καθαρισμό Ψυττάλειας)	35
Σχήμα 3-3: Η συσχέτιση των ταχυτήτων ζωνικής καθίζησης με την συγκέντρωση στερεών ανάμεικτου υγρού από τον βιολογικό καθαρισμό Ψυττάλειας με βάση την εξίσωση Vesilind	36
Σχήμα 3-4: Η συσχέτιση του φυσικού λογάριθμου των ταχυτήτων ζωνικής καθίζησης με την συγκέντρωση στερεών ανάμεικτου υγρού από τον βιολογικό καθαρισμό Ψυττάλειας με βάση την εξίσωση Vesilind	36

Σχήμα 4-1: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της μέγιστης (D_{max}), της ελάχιστης (D_{min}) και της μέσης διαμέτρου (D_{ave}) για κάθε μέτρηση. Η διακεκομμένη γραμμή εκφράζει τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων.....	50
Σχήμα 4-2: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της μέγιστης (D_{max}), της ελάχιστης (D_{min}) και της μέσης διαμέτρου (D_{ave}) για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων και το διάστημα εμπιστοσύνης.....	51
Σχήμα 4-3: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών του aspect ratio των κροκίδων για κάθε μέτρηση. Η διακεκομμένη γραμμή εκφράζει τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων.....	52
Σχήμα 4-4: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών του aspect ratio των κροκίδων για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων και το διάστημα εμπιστοσύνης.	52
Σχήμα 4-5: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της επιφάνειας των κροκίδων για κάθε μέτρηση. Η διακεκομμένη γραμμή εκφράζει τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων.....	53
Σχήμα 4-6: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της επιφάνειας των κροκίδων για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων και το διάστημα εμπιστοσύνης.	53
Σχήμα 4-7: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της καμπυλότητας των κροκίδων για κάθε μέτρηση. Η διακεκομμένη γραμμή εκφράζει τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων.....	54
Σχήμα 4-8: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της καμπυλότητας των κροκίδων για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων και το διάστημα εμπιστοσύνης.	54
Σχήμα 4-9 (α-ν): Αθροιστική κατανομή του aspect ratio των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3, στ) Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ) Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3.....	66
Σχήμα 4-10(α-ν): Αθροιστική κατανομή του μέγιστου άξονα των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3, στ) Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ) Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3.....	68
Σχήμα 4-11 (α-ν): Αθροιστική κατανομή της μέγιστης διαμέτρου των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ)	

E.E.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) E.E.Λ Λαμίας 13-3, στ) E.E.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) E.E.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ)Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3.....	70
4-12 (α-ν): Αθροιστική κατανομή της μέσης διαμέτρου των κροκίδων: α) E.E.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) E.E.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) E.E.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) E.E.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) E.E.Λ Λαμίας 13-3, στ) E.E.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) E.E.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ)Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3.....	72
Σχήμα 4-13 (α-ν): Αθροιστική κατανομή της καμπυλότητας των κροκίδων: α) E.E.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) E.E.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) E.E.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) E.E.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) E.E.Λ Λαμίας 13-3, στ) E.E.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) E.E.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ)Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3.....	74
Σχήμα 4-14 (α-ν): Αθροιστική κατανομή της επιφάνειας των κροκίδων: α) E.E.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) E.E.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) E.E.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) E.E.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) E.E.Λ Λαμίας 13-3, στ) E.E.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) E.E.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ)Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3.....	76
Σχήμα 4-15: Διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς V_0 ως προς το DSVI για όλα τα συστήματα.....	82
Σχήμα 4-16: Διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς n ως προς το DSVI για όλα τα συστήματα.....	82
Σχήμα 4-17: Διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς V_0 ως προς το DSVI για τα δείγματα που προέρχονται από την E.E.Λ. της Ψυττάλειας.....	83
Σχήμα 4-18: Διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς n ως προς το DSVI για τα δείγματα που προέρχονται από την E.E.Λ. της Ψυττάλειας.....	83
Σχήμα 4-19: Συσχέτιση της σταθεράς V_0 με τη θερμοκρασία.....	86
Σχήμα 4-20: Συσχέτιση της σταθεράς n με τη θερμοκρασία.....	87
Σχήμα 4-21: Συσχέτιση του DSVI με τη θερμοκρασία	88
Σχήμα 4-22: Συσχέτιση του ιξώδους με τη θερμοκρασία (T)	89
Σχήμα 4-23: Συσχέτιση της σταθεράς V_0 με το DSVI.....	89

Σχήμα 4-24: Συσχέτιση της σταθεράς n με το DSVI.....	90
Σχήμα 4-25: Συσχέτιση του ιξώδους (μ) με το DSVI.....	90

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Το σύστημα ενεργού ιλύος αποτελεί μέχρι σήμερα ένα από τα επικρατέστερα συστήματα βιολογικής επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Η ευρέως διαδεδομένη χρησιμοποίηση του οφείλεται τόσο στην αποτελεσματικότητα του ως προς την απόδοση εκροής, όσο και στον οικονομικότερο τρόπο λειτουργίας του. Στην απλούστερη μορφή του αποτελείται από το στάδιο της βιολογικής απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου στη δεξαμενή αερισμού και το στάδιο του διαχωρισμού των στερεών και του υπερκείμενου υγρού στη δεξαμενή καθίζησης.

Στο αρχικό στάδιο του αερισμού, τα λύματα εισάγονται σε μία ή περισσότερες αεριζόμενες δεξαμενές πλήρους μίξης όπου έρχονται σε επαφή με ένα μίγμα μικροοργανισμών, τη βιομάζα, που επιτελεί την απομάκρυνση των ρύπων. Μέσα στη δεξαμενή αερισμού οι μικροοργανισμοί λόγω της κροκιδωτικής τους τάσης συσσωματώνονται με αποτέλεσμα το σχηματισμό των βιοκροκίδων. Η συσσωμάτωση της βιομάζας είναι καθοριστική για την αποτελεσματική λειτουργία του δεύτερου σταδίου του συστήματος δηλαδή της δεξαμενής καθίζησης, όπου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της βιομάζας από το επεξεργασμένο υπερκείμενο υγρό.

Επομένως η σύνθεση της βιομάζας είναι καθοριστική για την αποτελεσματική λειτουργία της καθίζησης. Η νηματοειδής διόγκωση αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα προβλήματα λειτουργίας της δεξαμενής καθίζησης. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην υπερβολική ανάπτυξη των νηματοειδών μικροοργανισμών και σαν αποτέλεσμα έχει την παραγωγή ιλύος που καθιζάνει με αργούς ρυθμούς και παρουσιάζει πολύ μικρή συμύκνωση. Με τη μικροσκοπική παρατήρηση δείγματος του ανάμεικτου υγρού γίνεται η αναγνώριση του είδους και του πληθυσμού των νηματοειδών μικροοργανισμών που προκαλούν αυτό το φαινόμενο καθώς και η εκτίμηση του σχήματος και της δομής των κροκίδων. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας δειγμάτων ενεργού ιλύος που έχουν την δυνατότητα της αυτόματης καταγραφής της μορφολογίας των κροκίδων και των νηματοειδών μικροοργανισμών με σκοπό την έγκαιρη πρόβλεψη αυτών των φαινομένων.

Ο στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι διττός. Ο πρώτος στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας μεθόδου ανάλυσης της μικροσκοπικής εικόνας δειγμάτων ενεργού ιλύος με σκοπό τον υπολογισμό μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων και στη συνέχεια ο προσδιορισμός των μεταξύ τους συσχετίσεων. Δεύτερο στόχο της εργασίας αποτελεί ο προσδιορισμός της συσχέτισης των χαρακτηριστικών καθιζησιμότητας, δηλαδή των σταθερών V_0 και n της εξίσωσης Vesilind, με το δείκτη καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος (DSVI) καθώς και η διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά της καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος.

Αρχικά στο κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της εργασίας. Ειδικότερα, γίνεται μία αναφορά στη θεωρία της καθίζησης και κυρίως στην επίδραση της θερμοκρασίας στην καθιζησιμότητα της ενεργού ιλύος. Στη συνέχεια αναλύονται

λεπτομερώς η έννοια του δείκτη καθιζησιμότητας SVI και της εξίσωσης Vesilind και παρουσιάζονται οι συσχετίσεις του δείκτη καθιζησιμότητας με τις σταθερές της εξίσωσης Vesilind που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές στη βιβλιογραφία. Επίσης αναφέρονται τα προβλήματα διαχωρισμού των στερεών και γίνεται μία εκτενής περιγραφή του φαινομένου της νηματοειδούς διόγκωσης και της επίδρασης του στο δείκτη καθιζησιμότητας. Τέλος γίνεται μία εισαγωγή στον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας και παρουσιάζονται κάποιες περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου στη βιβλιογραφία.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μέθοδοι ανάλυσης που πραγματοποιήθηκαν, τα πειράματα προσδιορισμού του δείκτη DSVI και των χαρακτηριστικών καθιζησιμότητας (σταθερές V_0 και n της εξίσωσης Vesilind), το πρωτόκολλο του πειράματος προσδιορισμού της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας και τέλος περιγράφηκε το σύστημα μικροσκοπίου – H/Y που χρησιμοποιήθηκε κατά την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται βήμα προς βήμα η μέθοδος ανάλυσης εικόνας, γίνεται η επικύρωση της μεθόδου καθώς και η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου σε διάφορα συστήματα ενεργού ιλύος. Έπειτα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα από τα πειράματα συσχέτισης του δείκτη DSVI με τα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας καθώς και τα αποτελέσματα από το πείραμα προσδιορισμού της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας.

Τέλος στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται σχετικά με την μέθοδο που αναπτύχθηκε αλλά και τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και αναφέρονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2.1 Καθίζηση

2.1.1 Εισαγωγή

Η καθίζηση αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές λειτουργίες σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων (Ε.Ε.Λ.). Η λειτουργία της βασίζεται στο διαχωρισμό μίας βαρύτερης στερεής φάσης (βιομάζα) από μία ελαφρύτερη υγρή φάση (λύματα) υπό την επίδραση της βαρύτητας, επομένως, πρόκειται για ένα διαχωρισμό στερεής – υγρής φάσης. Η διεργασία εφαρμόζεται συνήθως σε μεγάλες δεξαμενές που ονομάζονται δεξαμενές τελικής καθίζησης (ΔΤΚ) ή δευτεροβάθμιοι διαυγαστές (clarifiers). (Mogens Henze et al., 2008). Η ικανοποιητική καθίζηση και συσσωμάτωση είναι απαραίτητη για τη λειτουργία και την απόδοση του συστήματος καθώς και για την ποιότητα της παραγόμενης εκροής.

2.1.2 Συσσωμάτωση

Στον αντιδραστήρα ενεργού ιλύος δημιουργείται ένα μίγμα ενεργού ιλύος (βιομάζα) και λυμάτων που παραμένει σε αυτόν με σκοπό την βιολογική επεξεργασία των λυμάτων. Μόλις επιτευχθεί επαρκής βιολογική επεξεργασία, η βιομάζα πρέπει να απομακρυνθεί από τα επεξεργασμένα πλέον λύματα, τα οποία αποτελούν τη δευτεροβάθμια εκροή.

Η βιομάζα μέσα στον αντιδραστήρα συνίσταται από μικροοργανισμούς (πρωτίστως βακτήρια) και κυτταρικά υπολείμματα στο μέγεθος του μικρομέτρου τα οποία κανονικά είναι δύσκολο να διαχωριστούν από την υγρή φάση. Ωστόσο, λόγω της κροκιδωτικής τάσης της λάσπης, υπό κατάλληλες συνθήκες διαμορφώνονται κροκίδες που είναι μία με τρεις φορές μεγαλύτερες σε μέγεθος σε σχέση με κάθε βακτήριο μεμονωμένα. Η πυκνότητα των κροκίδων είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του νερού, με αποτέλεσμα να καθιζάνουν στη δεξαμενή καθίζησης. (Mogens Henze et al., 2008)

Η κροκίδα αποτελείται από ένα βιολογικό κομμάτι που συνίσταται από διάφορα βακτήρια, fungi, πρωτόζωα και μερικά μετάζωα και από ένα μη βιολογικό κομμάτι δηλαδή ανόργανα και οργανικά συστατικά που περιέχονται στο ανάμεικτο υγρό. Η δημιουργία της κροκίδας οφείλεται στο φαινόμενο της συσσωμάτωσης (flocculation) ή βιοκροκιδώσης (bioflocculation). Ο μηχανισμός της κροκιδώσης είναι αρκετά πολύπλοκος και αποδίδεται στην επίδραση των εξωκυτταρικών πολυμερών που παράγονται από τα ετεροτροφικά βακτήρια. Συγκεκριμένα, τα εξωκυτταρικά πολυμερή δημιουργούν ένα κολλώδες πλέγμα που περιβάλλει μεμονωμένα κύτταρα ή και συσσωματώματα με αποτέλεσμα να ευνοείται η συσσωμάτωση (Jenkins, 1993).

Σύμφωνα με τους Sezgin et al., (1978) οι νηματοειδείς μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται μέσα στην κροκίδα παρέχουν στα συσσωματώματα ετεροτροφικά βακτήρια ένα σκελετό πάνω στον οποίο μπορούν να προσκολληθούν. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μία μεγάλη, συμπαγής κροκίδα, που μπορεί να παραμείνει

ανέπαφη στις συνθήκες έντονης μίξης της αερόβιας δεξαμενής. Επιπλέον, οι νηματοειδείς μικροοργανισμοί επηρεάζουν το σχήμα της κροκίδας καθώς η ανάπτυξη των συσσωματώμενων βακτηρίων πραγματοποιείται κατά τη διεύθυνση που αναπτύσσονται τα νηματοειδή βακτήρια. Επομένως, όταν οι κροκίδες αποτελούνται μόνο από συσσωματώμενα βακτήρια είναι μικρές και σφαιρικές αλλά με την παρουσία νηματοειδών βακτηριδίων γίνονται μεγάλες και σχετικά κυλινδρικές.

Σε μία ιδανική κροκίδα θα πρέπει η ανάπτυξη των συσσωματώμενων και των νηματοειδών βακτηρίων να πραγματοποιείται σε ισορροπία. Συγκεκριμένα, θα πρέπει οι νηματοειδείς να αναπτύσσονται μέσα στη κροκίδα παρέχοντας της δομή και αντοχή και παράλληλα να προεξέχουν στο ανάμεικτο υγρό τόσο ώστε να μην παρεμποδίζεται η καθίζηση και η συμπύκνωση. Αυτό το είδος βιομάζας θα πρέπει να έχει δείκτη καθιζησιμότητας ιλύος (SVI) από 80 μέχρι 120 ml/gSS.

2.1.3 Λειτουργική σημασία των δεξαμενών τελικής καθίζησης (ΔTK)

Η ΔTK ανάλογα με την απόδοσή της παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα της τελικής εκροής. Γι' αυτό το λόγο ο σχεδιασμός της θα πρέπει να ικανοποιεί εξίσου δύο στόχους: Τη διαύγαση και τη πάχυνση.

❖ Διαύγαση

Η ΔTK επιτρέπει την καθίζηση της βιομάζας και το διαχωρισμό της από τα επεξεργασμένα λύματα, τα οποία διαυγασμένα και κατά το δυνατόν απαλλαγμένα από αιωρούμενα στερεά υπερχειλίζουν από τη δεξαμενή. Για να κατανοηθεί η σημασία της διαύγασης αρκεί να επισημανθεί ότι από το συνολικό BOD₅ στην έξοδο ενός συστήματος ενεργού ιλύος (π.χ. 15-20 mg/l) μόνο ένα μικρό ποσοστό της τάξεως του 20-30% ή και μικρότερο αντιστοιχεί στις διαλυμένες οργανικές ενώσεις ενώ το υπόλοιπο οφείλεται στην παρουσία αιωρούμενων στερεών, δηλαδή στην παρουσία βακτηριδίων ή μικροβιοκροκίδων που δεν καθιζάνουν. (Ανδρεαδάκης 2008) Θεωρώντας ότι μια ΔTK λειτουργεί με τυπική συγκέντρωση ανάμεικτου υγρού (MLSS) 1500 με 3000 mg/l, η απόδοση της αναμένεται να είναι 99% με 99,9%. Δύο είναι οι τρόποι για την επίτευξη αυτής της απόδοσης: Θα πρέπει οι συνθήκες μέσα στη ΔTK να επιτρέπουν την κροκίδωση της βιομάζας και την παγίδευση των μικρών σωματιδίων μέσα στην κροκίδα και δεύτερον θα πρέπει να εξασφαλίζονται ομοιόμορφες συνθήκες ροής στη ζώνη διαύγασης και ειδικότερα γύρω από τις σκάφες έκπλυσης και τα ρυθμιστικά φράγματα, έτσι ώστε να μην ανασηκώνεται υγρό από τις βαθύτερες ζώνες και να προκαλείται ανάμειξη. (Mogens Henze et al., 2008)

❖ Συμπύκνωση

Η ΔTK θα πρέπει να εξασφαλίζει επαρκή συμπύκνωση της βιομάζας ώστε να είναι εύκολη και αποτελεσματική η επαναφορά της στο βιολογικό αντιδραστήρα μέσω της ανακυκλοφορίας. (Ανδρεαδάκης, 2008) Όσο μεγαλύτερη συγκέντρωση ιλύος επιτυγχάνεται, τόσο μικρότερη θα είναι και η ποσότητα της ανακυκλοφορούμενης ιλύος. Αν μία ΔTK δεν λειτουργεί σωστά τότε θα απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμός

ανακυκλοφορίας με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το ενεργειακό κόστος της εγκατάστασης. (Mogens Henze et al., 2008) Και στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι μία επιδείνωση στα χαρακτηριστικά συμπίκνωσης της ιλύος μπορεί πολύ γρήγορα ίσως και σε μερικές ώρες και παρά τις οποιεσδήποτε ρυθμίσεις της παροχής ανακυκλοφορίας, να οδηγήσει σε αδυναμία επιστροφής της ιλύος με συνέπεια την ανύψωση της στάθμης της μέχρι την υπερχειλίση της δεξαμενής καθίζησης και διαφυγή της με την τελική εκροή. (Ανδρεαδάκης, 2008)

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καθίζηση

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία της καθίζησης είναι οι εξής (Jin B. et al., 2003):

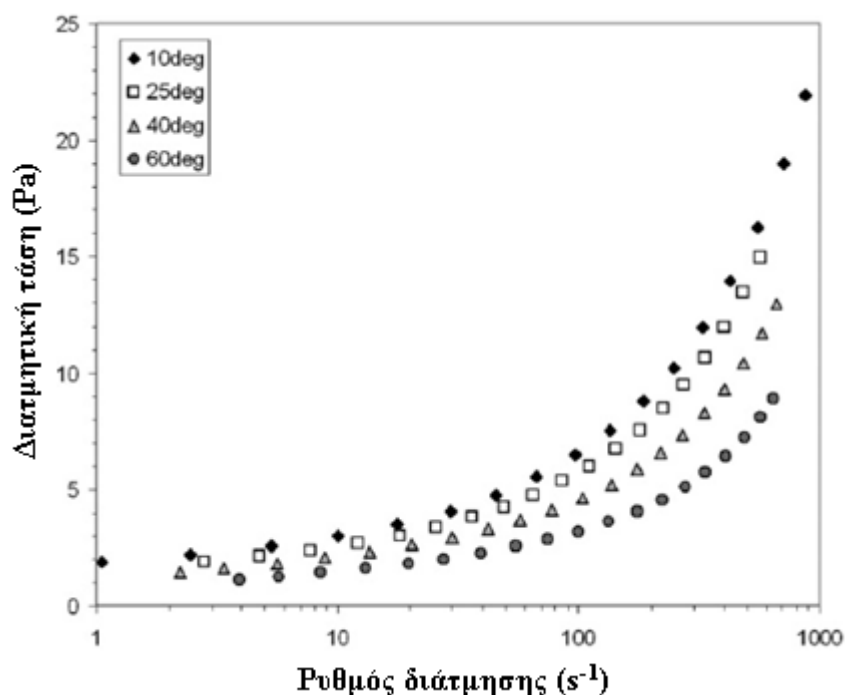
- ❖ Οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.
Η χημική σύνθεση, ο χρόνος παραμονής, η οργανική φόρτιση (F/M), η συγκέντρωση στερεών (TSS), το pH, η θερμοκρασία (T), η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO), η συγκέντρωση στερεών του ανάμεικτου υγρού (MLSS).
- ❖ Τα χημικά συστατικά των κροκίδων.
Όπως η συγκέντρωση των εξωκυτταρικών πολυμερών (EPS), οι πρωτεΐνες, οι υδρογονάνθρακες, οι οργανικές ουσίες, το DNA, τα κατιόντα.
- ❖ Οι φυσικές ιδιότητες των κροκίδων.
Η ικανότητα συσσωμάτωσης και οι κολλοειδείς ιδιότητες της επιφάνειας των κροκίδων, η υδροφοβικότητα, η πυκνότητα και το ιξώδες.
- ❖ Οι μορφολογικές ιδιότητες των κροκίδων
Το μέγεθος και οι διαστάσεις της κροκίδας, το μήκος των νηματοειδών μικροοργανισμών και η μικροδομή της.
- ❖ Το είδος των μικροοργανισμών που συνιστούν την κροκίδα και η λειτουργία τους.

Σύμφωνα με την μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Jin B. et al. (2003) τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κροκίδων δηλαδή το μέγεθος, οι διαστάσεις και ο δείκτης νηματοειδών (FI) αποτελούν τους πιο καθοριστικούς παράγοντες για μία ικανοποιητική καθίζηση. Όσο πιο μικρές και συμπαγείς είναι οι κροκίδες τόσο πιο αποτελεσματική είναι και η καθίζηση. Αντίστοιχα, ο Ανδρεαδάκης (1993), υποστηρίζει πως όσο αυξάνεται το μέγεθος των κροκίδων, μειώνεται η πυκνότητα τους και αυξάνεται η ειδική επιφάνεια και το πορώδες με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η καθίζηση.

2.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην καθίζηση

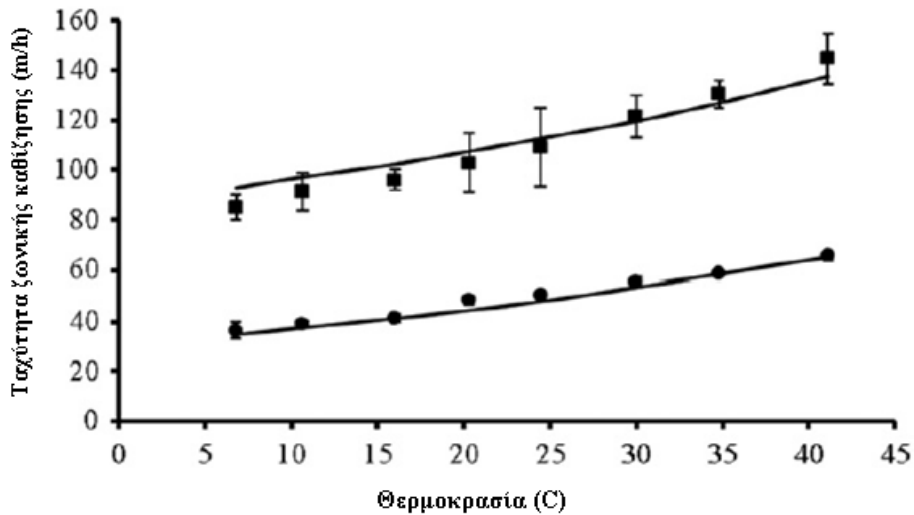
Όπως προαναφέρθηκε, η ταχύτητα καθίζησης επηρεάζεται από φυσικο – χημικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το ιξώδες του νερού, το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων καθώς και τη διαφορά πυκνότητας των σωματιδίων από αυτή του νερού. Η πυκνότητα και το ιξώδες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και τις διαλυτές ουσίες του νερού. Με την αύξηση της θερμοκρασίας τα μόρια του νερού γίνονται πιο ενεργά με συνέπεια τη μείωση του ιξώδους (Podolsky, 1994).

Την επίδραση της θερμοκρασίας στα ρεολογικά χαρακτηριστικά αναερόβιας χωνεμένης ιλύος εξέτασαν οι Baudez et al. (2013). Παρατήρησαν πως όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο αυξάνεται ο ρυθμός διάτμησης (shear rate) για την εκάστοτε διατμητική τάση (shear strain) και επομένως μειώνεται το ιξώδες (το οποίο προκύπτει από το λόγο της διατμητικής τάσης προς τον ρυθμό διάτμησης). Δηλαδή η ιλύς γίνεται όλο και λιγότερο ιξώδης όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. (s^{-1})



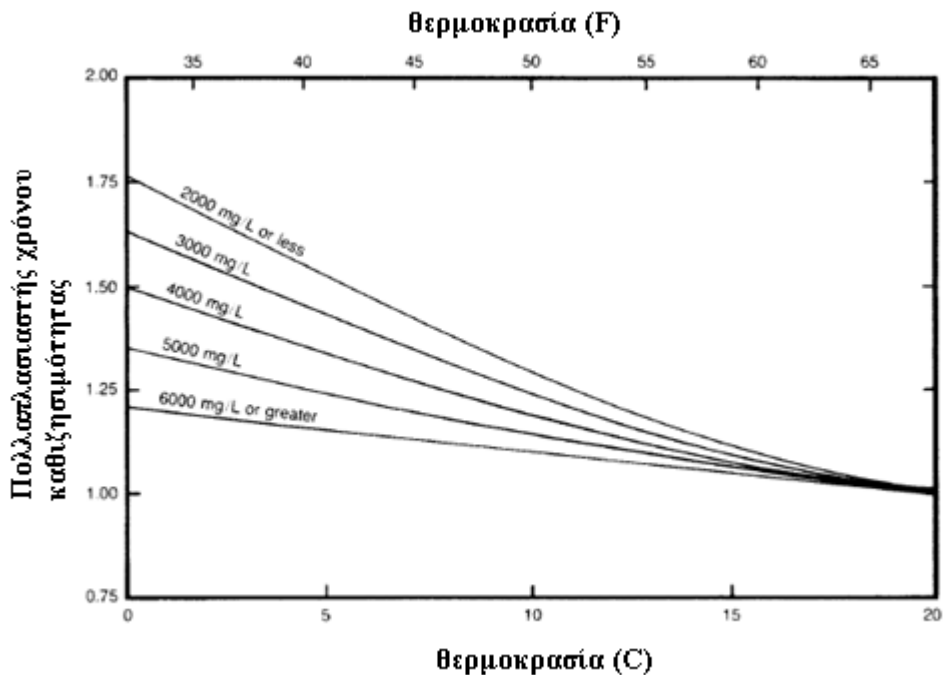
Σχήμα 2-1: Καμπύλη ροής χωνεμένης ιλύος σε διάφορες θερμοκρασίες

Οι Winkler et al. (2012) πραγματοποίησαν μία σειρά πειραμάτων καθίζησης σε διαφορετικές θερμοκρασίες (Σχήμα 2-2). Η διάμετρος και η πυκνότητα των σωματιδίων που συμμετείχαν στη καθίζηση ήταν γνωστές και χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστούν οι θεωρητικές ταχύτητες καθίζησης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων είχαν αρκετά μεγάλη σύγκλιση με τις θεωρητικές ταχύτητες όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα. παρατηρούμε ότι τα μικρότερα και ελαφρύτερα σωματίδια καθιζάνουν πιο αργά σε σχέση με τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σωματίδια. Επίσης υπάρχει σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στην καθίζηση καθώς με την άνοδο της θερμοκρασίας αυξάνεται και η ταχύτητα καθίζησης.



Σχήμα 2-2: Υπολογιζόμενες ταχύτητες καθίζησης και τυπικές αποκλίσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες (με κουκκίδες (●) απεικονίζονται τα μικρά σωματίδια και με τετράγωνα (■) απεικονίζονται τα μεγάλα σωματίδια). Η γραμμή απεικονίζει τις θεωρητικές ταχύτητες. (Winkler et al., 2012)

Οι Reed & Murphy (1969) ερεύνησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στην ζωνική καθίζηση και παρατήρησαν ότι στη συγκέντρωση των 2000 mg/l ο χρόνος καθίζησης στους 0 °C αυξήθηκε κατά 1,75 φορές σε σχέση με τον χρόνο καθίζησης στους 20 °C. Εντούτοις, με την αύξηση της συγκέντρωσης των στερεών του ανάμεικτου υγρού η θερμοκρασία δεν ασκεί σημαντική επίδραση. (Σχήμα 2-3).

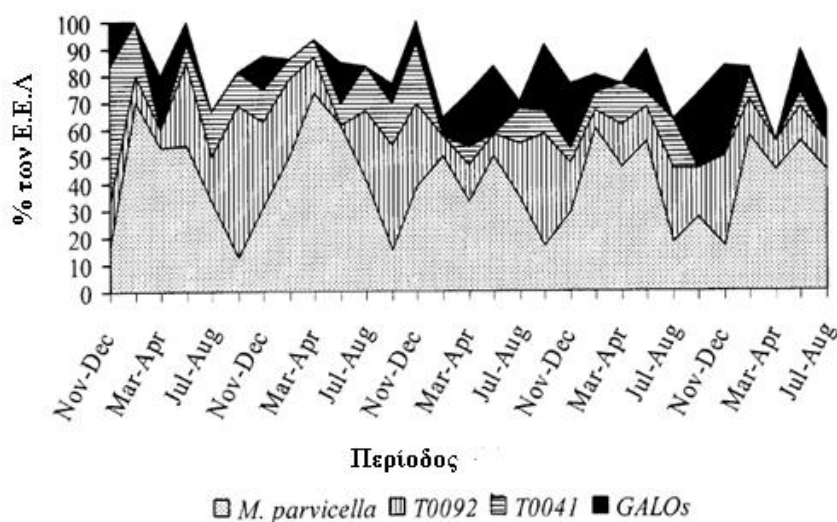


Σχήμα 2-3: Επίδραση της θερμοκρασίας στη φάση ζωνικής καθίζησης (Reed & Murphy, 1969)

Η θερμοκρασία φαίνεται ότι επηρεάζει την ανάπτυξη και την επιβίωση των μικροοργανισμών. Η άνοδος της θερμοκρασίας οδηγεί στην αύξηση της ταχύτητας ανάπτυξης των μικροοργανισμών λόγω της αύξησης των χημικών και ενζυματικών αντιδράσεων που λαμβάνουν μέρος στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, πάνω από μία θερμοκρασία, (διαφορετική για κάθε μικροοργανισμό) καμία διεργασία δεν πραγματοποιείται από τα κύτταρα και επέρχεται η αδρανοποίηση των διεργασιών. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα ανάπτυξης των μικροοργανισμών παρουσιάζεται ενδεικτικά στο σχήμα 2-4 (Νουτσόπουλος, 2002).



Σχήμα 2-4: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα ανάπτυξης των Μικροοργανισμών (Νουτσόπουλος, 2002)



Σχήμα 2-5: Εποχιακή διακύμανση των νηματοειδών μικροοργανισμών σε ελληνικές Ε.Ε.Α. (Noutsopoulos et al., 2007)

Η εποχιακή διακύμανση του πληθυσμού των νηματοειδών μικροοργανισμών οφείλεται κυρίως στην επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη τους. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και στις ελληνικές Ε.Ε.Α (σχήμα 2-5) όπου κατά τις χειμερινές περιόδους (Νοέμβριος – Ιούνιος) ο *Microthrix parvicella* εμφανίζεται πιο συχνά ως κυρίαρχος, ενώ κατά τις καλοκαιρινές περιόδους (Ιούλιος – Οκτώβριος)

εμφανίζεται ως κυρίαρχος ο Type 0092. Αυτή η εποχιακή διακύμανση φαίνεται ότι επηρεάζει και τον δείκτη SVI ο οποίος τον χειμώνα παρουσιάζει αισθητά μεγαλύτερες τιμές (ανάμεσα στα 50-1000 ml/gSS) σε σχέση με το καλοκαίρι (ανάμεσα στα 40 -330 ml/gSS). Οι αυξημένες τιμές του δείκτη SVI το χειμώνα αποδίδονται στην εμφάνιση νηματοειδούς διόγκωσης λόγω υπερβολικής ανάπτυξης κυρίως του *Microthrix parvicella* και δευτερευόντως άλλων μικροοργανισμών (Noutsopoulos et al., 2007)

2.4 Μέθοδοι μέτρησης της καθιζησιμότητας της ιλύος

Κάθε ενεργός ιλύς, ανάλογα με την προέλευση της, την σύσταση της, την πυκνότητα και τη δυνατότητα της να συσσωματώνεται, καθιζάνει διαφορετικά, και αυτό το χαρακτηριστικό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της λειτουργίας των ΔTK. Συνεπώς, αρκετές μέθοδοι μέτρησης της καθιζησιμότητας έχουν καθιερωθεί και μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες: α) Αυτές που παρέχουν πληροφορίες για την συσσωμάτωση και β) αυτές που παρέχουν πληροφορίες για την ταχύτητα καθίζησης. (Mogens Henze et al., 2008)

2.4.1 Δείκτης καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος SVI (*Sludge Volume Index*)

Η πιο κοινή παράμετρος μέτρησης της καθιζησιμότητας είναι ο δείκτης SVI (*Sludge Volume Index*). Οι Dick και Vesilind (1969) δήλωσαν πως το SVI αποτελεί ένα χρήσιμο παράγοντα για τον έλεγχο του συστήματος αλλά δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των χαρακτηριστικών καθίζησης λασπών από διαφορετικά συστήματα. Βέβαια η μέτρηση του SVI είναι ευρέως διαδεδομένη ως πρότυπη μέθοδος (A.P.H.A. et al., 1992) λόγω της ευκολίας διεξαγωγής του πειράματος και από μη εξειδικευμένο προσωπικό.

Σε αυτό το πείραμα (A.P.H.A. et al., 1992), ενεργός ιλύς τοποθετείται σε ένα κύλινδρο 1 l, και ύστερα από ανάδευση αφήνεται να καθιζάνει για 30 λεπτά. Ο δείκτης SVI υπολογίζεται διαιρώντας τον όγκο (σε ml/l σε ένα κύλινδρο 1 l) που καταλαμβάνει η ιλύς (που βρίσκεται κάτω από τη διαχωριστική επιφάνεια), με την αρχική συγκέντρωση του ανάμικτου υγρού (MLSS) εκφρασμένη σε g/l. Επομένως, ο δείκτης SVI (ml/g) εκφράζει τον όγκο που 1 γραμμάριο ιλύος καταλαμβάνει μετά από 30 λεπτά καθίζησης.

Σε περιπτώσεις υψηλών MLSS ή ιδιαίτερα κακής καθιζησιμότητας της ιλύος, είναι δυνατό η καθίζηση να μην ολοκληρωθεί στα 30 λεπτά και η τιμή του SVI να είναι πλασματική. Για παράδειγμα, ένα SVI υψηλότερο από 150 ml/g δεν μπορεί να μετρηθεί αν η συγκέντρωση της ιλύος στον κύλινδρο (ενός λίτρου) είναι υψηλότερη από 1000/150 ή 6,7 g/l. Τα τοιχεία του κυλίνδρου μπορούν επίσης να επηρεάσουν το μετρούμενο SVI καθώς η αναλογία του τοιχείου με τον όγκο της ιλύος είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη ΔTK πλήρους κλίμακας.

Με σκοπό την αντιμετώπιση των πλασματικών αποτελεσμάτων του πειράματος SVI έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Μία από αυτές είναι και ο υπολογισμός του

δείκτη DSVI (Diluted Sludge Volume Index). Σε αυτό το τεστ προηγείται αραίωση του δείγματος έτσι ώστε ο όγκος που καταλαμβάνει η ιλύς ύστερα από 30 λεπτά να μη ξεπερνά τα 150 με 250 ml. Με αυτό το πείραμα αντιμετωπίζεται το πρόβλημα των υψηλών συγκεντρώσεων καθώς επίσης αποτελεί πιο αξιόπιστο δείκτη για πιθανή νηματοειδή διόγκωση. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης των αδυναμιών του SVI που έχει προταθεί είναι η εκτέλεση του πειράματος σε ογκομετρικό κύλινδρο μεγαλύτερο του 11 ο οποίος είναι εξοπλισμένος με μηχανισμό αργής ανάδευσης, η δε αρχική συγκέντρωση MLSS ρυθμίζεται πάντα στα 3500 mg/l. Στην τελευταία αυτή περίπτωση ο δείκτης συνήθως συμβολίζεται ως SSVI (Mogens Henze et al., 2008).

Σύμφωνα με τον Ανδρεαδάκη (2008) οι δείκτες DSVI και SSVI σε γενικές γραμμές είναι μικρότεροι του SVI και πιο αντιπροσωπευτικοί της καθίζησης της ιλύος στις πολύ μεγαλύτερες του κυλίνδρου διαμέτρους των ΔTK, και έχουν αντικαταστήσει τον δείκτη SVI. Μεταξύ τους οι δείκτες DSVI και SSVI δεν εμφανίζουν σταθερή αναλογία αν και συνήθως ο πρώτος είναι κάπως μεγαλύτερος. Αν και εφαρμόζονται και οι δύο, η ευκολία προσδιορισμού του DSVI τείνει να κάνει την εφαρμογή του συνηθέστερη.

2.4.2 Ταχύτητα ζωνικής καθίζησης ZSV (Zone Settling Velocity)

Τα συσσωματώματα του ανάμεικτου υγρού όταν βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις (περίπου > 1000 mg/l) δεν καθιζάνουν ανεξάρτητα αλλά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να καθιζάνουν σαν ένα στρώμα με ομοιόμορφη ταχύτητα. Αυτός ο τύπος καθίζησης είναι γνωστός ως Ζωνική Καθίζηση και είναι χαρακτηριστικός του τρόπου καθίζησης των ΔTK.

Η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης μπορεί να προσδιοριστεί από ένα αντίστοιχο πείραμα με το SVI (για δεδομένη αρχική συγκέντρωση MLSS). Ουσιαστικά προκύπτει από τη ταχύτητα υποβιβασμού της στάθμης της ιλύος, η οποία παραμένει σταθερή μέχρι την έναρξη των φαινομένων συμπίκνωσης της ιλύος στο πυθμένα του κυλίνδρου. (Ανδρεαδάκης 2008).

Η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης μπορεί να εκφραστεί από την σχέση που έχει προταθεί από τον Vesilind (1968) σύμφωνα με την οποία:

$$V_s = V_o \cdot e^{-n \cdot X} \quad (2-1)$$

όπου:

V_s : η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης (m/h)

V_o , n : οι σταθερές που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος σε m/h και m^3/kg αντίστοιχα.

X : η συγκέντρωση του ανάμεικτου υγρού (MLSS) στα διάφορα πειράματα ZSV (g/l ή kg/m^3)

2.4.3 Συσχέτιση του δείκτη SVI και της ταχύτητας καθίζησης

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες συσχέτισης του SVI με τη ταχύτητα ζωνικής καθίζησης με ποικίλα αποτελέσματα. Οι Bye & Dold (1998) αμφισβήτησαν το συσχετισμό του SVI με τα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος καθώς παρατήρησαν ότι η γεωμετρία της συσκευής καθίζησης (διάμετρος, ύψος, κ.α) επηρεάζει τις τιμές του SVI. Το ίδιο έκριναν και οι Dick & Vesilind (1969) οι οποίοι δήλωσαν ότι δεν μπορεί να υπάρξει κάποια συγκεκριμένη σχέση συσχέτισης μεταξύ των δύο παραμέτρων. Ειδικά όταν πρόκειται για τη σύγκριση ιλύων από διαφορετικές εγκαταστάσεις, τότε γίνεται πιο περίπλοκη η συσχέτιση τους έως και δύσκολη καθώς υπεισέρχονται κι άλλοι παράγοντες όπως η παρουσία νηματοειδών, το μέγεθος και η σύσταση των κροκίδων.

Βέβαια λόγω της δυσκολίας υπολογισμού της εξίσωσης που εκφράζει την εξάρτηση της ZSV από τη συγκέντρωση, αρκετοί ερευνητές επιχείρησαν να αναπτύξουν σχέσεις που συσχετίζουν τους απλά υπολογιζόμενους δείκτες καθιζησιμότητας (SVI, DSVI, SSVI_{3.5}) με τις σταθερές της εξίσωσης Vesilind V_0 και n . Οι Tuntoolavest & Grady (1982), Daigger & Roper (1985), Pitman (1984), Daigger (1995), Wahlberg & Keinath (1995) συσχέτισαν τις σταθερές V_0 και n με το SVI. Οι Koopman & Cadee (1983) και Daigger (1995) συσχέτισαν τις σταθερές V_0 και n με το DSVI, ενώ οι Johnstone et al. (1979), Pitman (1984), Ekama & Marais (1986), Wahlberg & Keinath (1988), Catunda et al. (1989), Daigger (1995), Wahlberg & Keinath (1995) συσχέτισαν τις σταθερές V_0 και n με το SSVI_{3.5}.

Ο Daigger (1995), χρησιμοποιώντας μία μεγάλη βάση δεδομένων από τη βιβλιογραφία (Daigger & Roper 1985; Tuntoolavest & et al., 1980; Wahlberg & Keinath, 1988; Ekama & Marais, 1986) κατέληξε σε μία εξίσωση που μπορεί να προβλέψει με αρκετή ακρίβεια την ταχύτητα ζωνικής καθίζησης για ένα μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων. Δέχτηκε πως η ταχύτητα καθίζησης V_s και η συγκέντρωση X έχουν μεταξύ τους εκθετική σχέση (εξίσωση 2-1) και θεώρησε ότι η σταθερά V_0 ως προς τον δείκτη καθιζησιμότητας ΔK (SVI, DSVI, SSVI_{3.5}) και η σταθερά n ως προς τον ΔK έχουν εκθετική και γραμμική συσχέτιση αντίστοιχα:

$$V_0 = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot \Delta K) \quad (2-2)$$

$$n = \gamma + \delta \cdot \Delta K \quad (2-3)$$

Με αντικατάσταση στην εξίσωση 2-1 προκύπτει:

$$V_s = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot \Delta K - \gamma \cdot X - \delta \cdot \Delta K \cdot X) \quad (2-4)$$

Όπου α , β , γ , δ σταθερές υπολογισμένες για κάθε δείκτη καθιζησιμότητας

Από αυτή την εξίσωση μπορούμε να αναμένουμε αρκετά ακριβή αποτελέσματα μιας και προέκυψε από την επεξεργασία μίας μεγάλης βάσης δεδομένων που προέρχονται από πειράματα με διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες. Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι και άλλοι παράμετροι εκτός της συγκεντρώσεως και του δείκτη καθιζησιμότητας

επηρεάζουν την ταχύτητα ζωνικής καθίζησης. Γι αυτό εξισώσεις όπως η εξίσωση 2-4 και αυτές που αναφέρονται στον πίνακα 2-1 θα πρέπει να εφαρμόζονται κυρίως σε συστήματα παρόμοια με αυτά από όπου προέρχονται τα δεδομένα της εκάστοτε εξίσωσης.

Πίνακας 2-1: Πειράματα προσδιορισμού των παραμέτρων καθιζησιμότητας που διεξήχθησαν από διαφορετικούς συγγραφείς. (Von Sperling & Froes, 1999)

Συγγραφέας	Πείραμα	Αριθμός δεδομένων	Τιμές του δείκτη (ml/g)	Συνιστώσες της εξίσωσης Vesilind		
				Vo (m/h)	n (m ³ /kg)	
Johnstone et al. (1979)	SSVI _{3.5}	733	60 - 79	6.5	0.36	
			80 - 99	5.83	0.37	
			100 - 119	5.30	0.41	
			120 - 139	4.23	0.42	
Tuntoolavest & Grady (1982)	SVI	60	68 - 99	$4.871 * e^{0.01455 * SVI}$	$0.157 * e^{0.01306 * SVI}$	
			100 - 150	$-16.603 + 0.301 * SVI$	$-4.779 + 1.128 * \ln SVI$	
Koopman & Cadee (1983)	DSVI		65 - 300	$129.41 * DSVI^{-0.574}$	$0.249 + 0.0022 * DSVI$	
Pitman (1984)	SVI	697	45 - 360	$10.5595 * e^{(-0.00229 * SVI)}$	$0.2751 * e^{(0.00657 * SVI)}$	
Pitman (1984)	SSVI _{3.5}		35 - 150	$161.2045 * SSVI_{3.5}^{(-0.7249)}$	$0.22015 * e^{(0.00657 * SSVI_{3.5})}$	
Daigger & Roper (1985)	SVI	236	36 - 402	7.8	$0.148 + 0.0021 * SVI$	
Ekama & Marais (1986)	SSVI _{3.5}		35 - 125	$11.9 - 0.06 * SSVI_{3.5}$	$0.16 + 0.0027 * SSVI_{3.5}$	
Wahlberg & Keinath (1988)	SSVI _{3.5}	185	35 - 220	$15.3 - 0.0615 * SSVI_{3.5}$	$0.426 - 0.00384 * SSVI_{3.5} + 5.43 * 10^{-5} * SSVI_{3.5}^2$	
Catunda et al (1989)	SSVI _{3.5}		30 - 100	$16 - 0.1 * SSVI_{3.5}$	$0.16 + 0.003 * SSVI_{3.5}$	
von Sperling (1990)	SSVI _{3.5}	57	41 - 80	4.37	0.38	
			81 - 120	5.59	0.54	
Daigger (1995)	SVI		36 - 402	6.5	$0.165 + 0.001586 * SVI$	
Daigger (1995)	SSVI _{3.5}		35 - 150	7.97	$0.0589 + 0.00405 * SSVI_{3.5}$	
Daigger (1995)	DSVI		44 - 347	7.6	$0.1030 + 0.00255 * DSVI$	
Wahlberg & Keinath (1995)	SVI	185	48 - 235	$18.2 * e^{(-0.00602 * SVI)}$	$0.351 + 0.00058 * SVI$	
Wahlberg & Keinath (1995)	SSVI _{3.5}	185	35 - 220	$24.3 * e^{(-0.01073 * SSVI)}$	$0.245 + 0.00296 * SSVI$	
Fróes (1996)	SVI	11	37 - 49	8.1	0.24	
			31	50 - 99	6.2	0.27
			86	100 - 199	9.6	0.74
			87	200 - 299	9.2	1.40
			26	300 - 406	2.1	1.28

Οι Von Sperling & Froes (1999) έκαναν μία προσπάθεια συσχέτισμού των δεδομένων και εξισώσεων που προέρχονταν από δεκαεφτά έρευνες, προκειμένου να εξαγάγουν

τυπικές τιμές για τις σταθερές V_0 και n της εξίσωσης Vesilind για ένα πεδίο τιμών του SVI. Στη συνέχεια οι τιμές που υπολόγισαν χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια μίας μεθοδολογίας για το σχεδιασμό της επιφάνειας της δεξαμενής τελικής καθίζησης. Στον πίνακα 2-1 παρουσιάζονται οι τιμές των σταθερών V_0 και n όπως προτάθηκαν από διάφορους συγγραφείς, ενώ έχουν γίνει πρόσθετοι υπολογισμοί σε κάποια δεδομένα από τους Von Sperling & Froes (1999).

Στον πίνακα 2-2 παρουσιάζονται οι τιμές των σταθερών V_0 και n που υπολογίστηκαν από τους Von Sperling & Froes (1999) από τα δεδομένα εκάστοτε συγγραφέα για πέντε διαφορετικές συνθήκες καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε πως για την πλειοψηφία των αποτελεσμάτων όσο δυσχεραίνεται η καθιζησιμότητα της ιλύος, μειώνεται η σταθερά V_0 και αυξάνεται η σταθερά n .

Πίνακας 2-2: Τιμές των σταθερών V_0 και n σε πέντε διαφορετικά είδη καθίζησης για δεδομένα από διάφορους συγγραφείς (Von Sperling & Froes, 1999)

Συγγραφέας	Πείραμα	Πολύ καλή καθίζηση		Καλή καθίζηση		Μέτρια καθίζηση		Κακή καθίζηση		Ανεπαρκής καθίζηση	
		V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)
Johnstone et al. (1979)	SSVI _{3,5}	-	-	6.5	0.36	5.8	0.37	5.3	0.41	4.2	0.42
Tuntoolavest & Grady (1982)	SVI	-	-	14.5	0.42	28.6	0.87	-	-	-	-
Koopman & Cadee (1983)	DSVI	-	-	11.3	0.40	7.9	0.54	6.4	0.67	5.3	0.82
Pitman (1984)	SVI	9.5	0.30	8.9	0.31	7.5	0.35	6.0	0.42	4.7	0.50
Pitman (1984)	SSVI _{3,5}	12.3	0.28	8.3	0.33	6.2	0.40	5.3	0.45	4.5	0.55
Daigger & Roper (1985)	SVI	7.8	0.24	7.8	0.31	7.8	0.46	7.8	0.67	7.8	0.88
Ekama & Marais (1986)	SSVI _{3,5}	9.8	0.25	8.3	0.32	6.5	0.40	5.3	0.46	-	-
Wahlberg & Keinath (1988)	SSVI	12.5	0.36	11.3	0.41	8.54	0.66	4.9	1.34	-	-
Catunda et al (1989)	SSVI _{3,5}	12.5	0.27	10.0	0.34	7.0	0.43	-	-	-	-
von Sperling (1990)	SSVI _{3,5}	-	-	4.4	0.38	5.6	0.54	-	-	-	-
Daigger (1995)	SVI	6.5	0.24	6.5	0.28	6.5	0.40	6.5	0.56	6.5	0.71
Daigger (1995)	SSVI _{3,5}	8.0	0.20	8.0	0.30	8.0	0.42	8.0	0.50	8.0	0.63
Daigger (1995)	DSVI	7.6	0.21	7.6	0.28	7.6	0.44	7.6	0.59	7.6	0.77
Wahlberg & Keinath (1995)	SVI	-	-	11.6	0.39	7.4	0.44	4.4	0.49	-	-
Wahlberg & Keinath (1995)	SSVI	15.0	0.38	12.1	0.44	7.5	0.57	3.9	0.75	-	-
Fróes (1996)	SVI	8.1	0.24	6.2	0.27	9.6	0.74	9.2	1.40	2.1	1.28
Μέσος όρος		10.0	0.27	9.0	0.35	8.6	0.50	6.2	0.67	5.6	0.73
Τυπική απόκλιση		2.6	0.05	2.6	0.05	5.3	0.14	1.5	0.32	1.9	0.24
Συντελεστής μεταβλητότητας		0.30	0.19	0.30	0.14	0.60	0.28	0.20	0.48	0.30	0.30

Σύμφωνα με τον Ανδρεαδάκη (2008) μικρές ταχύτητες ζωνικής καθίζησης και μεγάλες τιμές SVI χαρακτηρίζουν ανάμικτα υγρά με δυσμενή χαρακτηριστικά καθίζησης. Επομένως η βιομάζα (Valter T. et al., 2006) μπορεί να διαχωριστεί σε κατηγορίες με βάση τον δείκτη καθιζησιμότητας SVI και την ταχύτητα ζωνικής καθίζησης (ZSV) όπως παρουσιάζεται και στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 2-3: Κατηγοριοποίηση της βιομάζας με βάση την καθιζησιμότητα (Valter T. et al., 2006)

Είδος βιομάζας	SVI (ml/g)	ZSV (m/h)
Καλή καθιζησιμότητα ενεργού ιλύος	< 100	> 3
Αποδεκτή καθίζηση	100 - 200	2 - 3
Ανεπαρκής καθίζηση	> 200	< 1,2

2.5 Προβλήματα διαχωρισμού των στερεών από τα επεξεργασμένα λύματα

Τα σημαντικότερα προβλήματα διαχωρισμού των στερεών μπορούν να διαχωριστούν σε αυτά που σχετίζονται με την αδυναμία ανάπτυξης της μικροδομής της κροκίδας, δηλαδή στην αδυναμία των βακτηριδίων να συνθέσουν την κροκίδα λόγω έλλειψης πολυκυτταρικών πολυμερών και σε αυτά που συσχετίζονται με την μακροδομή της κροκίδας δηλαδή την υπερανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών. (Jenkins D. et al., 1993; Sezgin et al., 1978)

Έξι είναι τα σημαντικότερα προβλήματα διαχωρισμού των στερεών (Valter T. et al., 2006):

Διασπαρμένη ανάπτυξη

Η διασπαρμένη ανάπτυξη οφείλεται στην αδυναμία ανάπτυξης της μικροδομής της κροκίδας καθώς οι μικροοργανισμοί δεν συσσωματώνονται. Οι μικροοργανισμοί είναι διασπαρμένοι μέσα στο ανάμεικτο υγρό με την μορφή ελεύθερων κυττάρων ή συσσωμάτων με διαμέτρους μέχρι τα 10 με 20 μm. Ο ρυθμός συσσωμάτωσης αυτών των βακτηρίων ή συσσωμάτων είναι πολύ χαμηλός και επιπλέον δεν πραγματοποιείται σχεδόν καθόλου ζωνική καθίζηση με αποτέλεσμα να μην γίνεται αποτελεσματικός διαχωρισμός των στερεών.

Λόγω αυτής της αδυναμίας η τελική εκροή συνίσταται από διασπαρμένα σωματίδια και σημαντική ποσότητα βιομάζας διαφεύγει από το σύστημα με αποτέλεσμα να απαιτούνται μόνο χαμηλοί χρόνοι παραμονής.

Η διασπαρμένη ανάπτυξη οφείλεται στην υψηλή οργανική φόρτιση λόγω της οποίας τα βακτήρια δεν έχουν την ανάγκη να παράγουν τα εξωκυτταρικά πολυμερή. Επίσης το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στην έναρξη λειτουργίας ενός συστήματος ενεργού ιλύος καθώς επίσης και στην παρουσία τοξικών ουσιών στα λύματα.

Ανάπτυξη μικροκροκίδων (pinpoint floc)

Αυτό το πρόβλημα μας δίνει μία παρόμοια εικόνα με αυτήν της διασπαρμένης ανάπτυξης. Στην τελική εκροή είναι φανερή η παρουσία στερεών που μόνο έπειτα από μία μικροσκοπική εξέταση μπορεί να διευκρινιστεί το είδος του προβλήματος. Οι μικροκροκίδες είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές της διεσπαρμένης ανάπτυξης (περίπου 50 – 100 μm) και σχετικά σφαιρικές και συμπαγείς.

Αυτό το φαινόμενο κυρίως οφείλεται κυρίως στην ανεπαρκή ανάπτυξη εξωκυτταρικών πολυμερών ή στην κατανάλωση τους στο εσωτερικό των βιοκροκίδων σε περιπτώσεις χαμηλής οργανικής φόρτισης όπως σε βιομάζα υψηλού χρόνου παραμονής. Επίσης η απουσία νηματοειδών μικροοργανισμών που αποτελούν τη ραχοκοκαλία των μεγαλύτερων κροκίδων μπορεί να δημιουργήσει αυτό το φαινόμενο καθώς και η διάσπαση των κροκίδων από μηχανικά μέσα όπως οι αεριστές.

Ιξώδης διόγκωση ιλύος

Σε αυτή τη περίπτωση παράγονται υπερβολικές ποσότητες εξωκυτταρικών πολυμερών με αποτέλεσμα η βιομάζα να αναπτύσσει μία γλοιώδη, ζελατινοειδή μορφή. Επειδή τα πολυμερή έχουν υδροφιλική τάση, η βιομάζα συγκρατεί νερό με αποτέλεσμα να έχει μικρές ταχύτητες καθίζησης και ικανότητα συμπύκνωσης. Επίσης σε συνθήκες συνεχούς αερισμού η βιομάζα μπορεί να αναπτύξει αφρισμό. Το φαινόμενο της ιξώδους διόγκωσης αναφέρεται και ως διόγκωση λόγω Zooglea (Zooglea bulking) καθώς τα βακτήρια Zooglea παράγουν υπερβολικές ποσότητες πολυμερών.

Ανύψωση ιλύος

Η ανύψωση ιλύος οφείλεται στην δημιουργία φυσαλίδων αζώτου που παράγονται κατά την απονιτροποίηση που συντελείται μέσα στην συμπυκνωμένη βιομάζα. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης στερεών της συμπυκνωμένης βιομάζας το διαλυμένο οξυγόνο καταναλώνεται πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανοξικές συνθήκες ειδικά όταν η βιομάζα προέρχεται από σύστημα απομάκρυνσης αζώτου. Το αέριο άζωτο που παράγεται από την απονιτροποίηση παρασύρει κατά την άνοδο του στην επιφάνεια στερεά με συνέπεια την ανύψωση της βιομάζας. Επομένως, αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην ανεπαρκή απονιτροποίηση του συστήματος και στην μικρή απόδοση του συστήματος δευτεροβάθμιας καθίζησης.

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό κατά τη διάρκεια του πειράματος SVI. Ενώ αρχικά η βιομάζα καθιζάνει ταχύτατα και δημιουργείται ένα συμπυκνωμένο στρώμα ιλύος, ύστερα από μικρό χρονικό διάστημα όλη ή μέρος της συμπυκνωμένης βιομάζας αρχίζει να επιπλέει και να ανέρχεται στην επιφάνεια.

Αφρισμός

Ο αφρισμός προκαλείται επίσης από τους νηματοειδείς μικροοργανισμούς (foam forming) και είναι ένας συνδυασμός φυσικο - χημικών και βιοχημικών αντιδράσεων που οδηγούν στην δημιουργία ενός τριφασικού συστήματος αέρα - νερού -

μικροβιακού κυττάρου. Τα συγκεκριμένα νηματοειδή βακτήρια παράγουν εξωκυτταρικά υλικά όπως λιπίδια, λιποπεπτίδια, πρωτεΐνες και υδρογονάνθρακες τα οποία έχουν τασιενεργές ιδιότητες και επομένως επιπλέουν. Ακόμα το κυτταρικό τοίχωμα αυτών των μικροοργανισμών είναι εξαιρετικά υδροφοβικό (Valter et al., 2006). Νηματοειδείς μικροοργανισμοί που συνδέονται κυρίως με προβλήματα αφρισμού είναι οι *Nocardia* spp. και *M. Parvicella* ενώ σε μικρότερο βαθμό σε περιπτώσεις υψηλής οργανικής φόρτισης και χαμηλού χρόνου παραμονής ο τύπος 1863 (Jenkins D et al., 1993). Σύμφωνα με τους Blackbeard et al. (1988) οι νηματοειδείς μικροοργανισμοί που συνήθως κυριαρχούν σε εγκαταστάσεις που παρουσιάζουν προβλήματα αφρισμού είναι οι τύπος 0041, τύπος 0092, τύπος 0675, τύπος 0914, *Microthrix parvicella* και *Nocardia* sp..

Μερικά από τα λειτουργικά προβλήματα που προκαλεί ο αφρισμός είναι αισθητικά (κάλυψη των διαδρόμων από αφρό που διαφεύγει), η επιδείνωση της ποιότητας της τελικής εκροής και τέλος η συσσώρευση μικροοργανισμών που προέρχονται από τον αφρό μέσα στη βιομάζα του συστήματος με αποτέλεσμα να μη μπορεί να διατηρηθεί σταθερός ο χρόνος παραμονής του ανάμεικτου υγρού.

Νηματοειδής διόγκωση

Το φαινόμενο συσχετίζεται με την μακροδομή των κροκίδων καθώς οι νηματοειδείς μικροοργανισμοί που τη συνθέτουν βρίσκονται σε υπερβολική ανάπτυξη. Συγκεκριμένα επηρεάζουν την συμπύκνωση και την καθίζηση της βιομάζας με δύο τρόπους (Valter et al., 2006):

- ❖ Παράγοντας μία διάχυτη κροκίδα που συγκρατεί νερό ανάμεσα της και παρόλο που πραγματοποιείται συσσωμάτωση μεταξύ των κροκίδων, δυσχεραίνεται η συμπύκνωση καθώς συσσωρεύεται μεγάλη ποσότητα νερού στη συμπυκνωμένη ιλύ.
- ❖ Προεξέχοντας από την κροκίδα στο ανάμεικτο υγρό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται γέφυρες με άλλους νηματοειδείς (bridging) που παρεμποδίζουν τη συσσωμάτωση των κροκίδων. Έτσι δυσχεραίνεται η καθίζηση και η συμπύκνωση της ιλύος.

Επομένως νηματοειδής διόγκωση συντελείται όταν ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις (Νουτσόπουλος 2002):

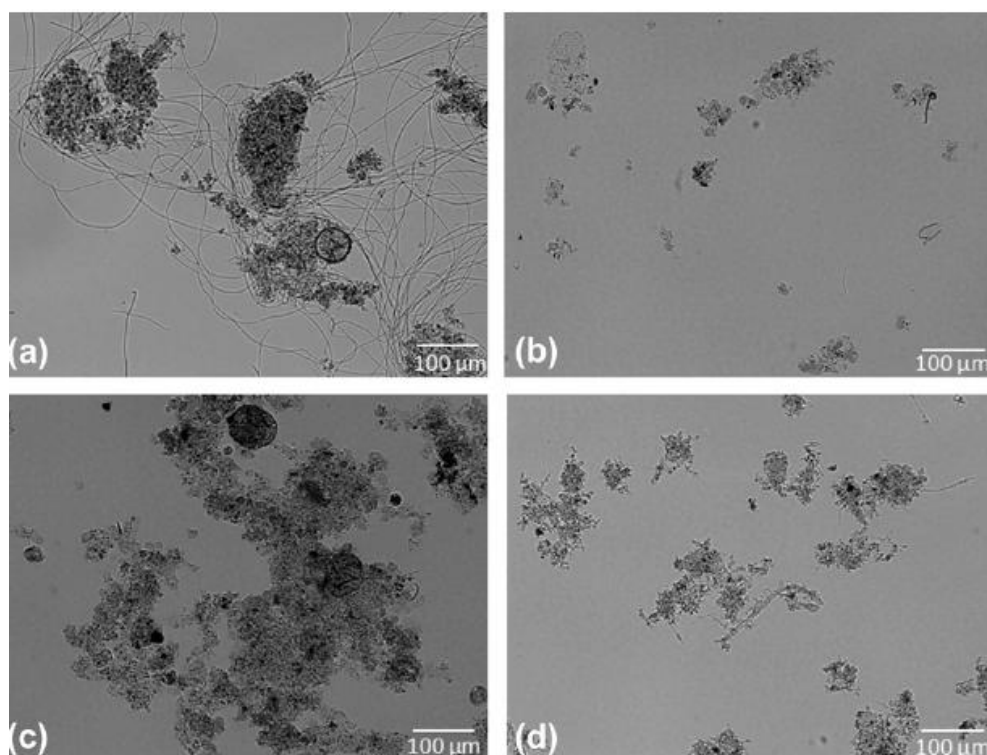
- ❖ Ο δείκτης καθιζησιμότητας ιλύος (SVI) είναι μεγαλύτερος από 150 ml/gSS.
- ❖ Η ιλύς καθιζάνει σχετικά αργά (όχι όμως τόσο αργά σε σχέση με τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω).
- ❖ Η ιλύς συμπυκνώνεται αργά και ανεπιτυχώς.
- ❖ Κατά τη μικροσκοπική ανάλυση δειγμάτων της ιλύος παρατηρείται μεγάλος αριθμός νηματοειδών βακτηριδίων στη βιομάζα.
- ❖ Η εκροή είναι υψηλής ποιότητας όσον αφορά στο οργανικό φορτίο.

Πίνακας 2-4: Είδος επίδρασης στην συμπύκνωση και την καθίζηση που προκαλείται από διάφορους νηματοειδείς μικροοργανισμούς (Jenkins et al., 1993)

Γεφύρωση	Ανοικτή Δομή στη κροκίδα
<i>type 1701</i>	<i>type 1701</i>
<i>type 0041</i>	<i>type 0041</i>
<i>Microthrix parvicella</i>	<i>Microthrix parvicella</i>
<i>type 1851</i>	<i>type 1851</i>
<i>Nostocoida limicola</i>	<i>Nostocoida limicola</i>
<i>type 021N</i>	<i>type 0675</i>
<i>Sphaerotilus natans</i>	<i>type 0092</i>
<i>type 0961</i>	
<i>type 0803</i>	
<i>Thiothrix spp.</i>	
<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>	

Συνεπώς, το φαινόμενο της νηματοειδούς διόγκωσης έχει σαν αποτέλεσμα (Valter et al., 2006; Wanner, 1994):

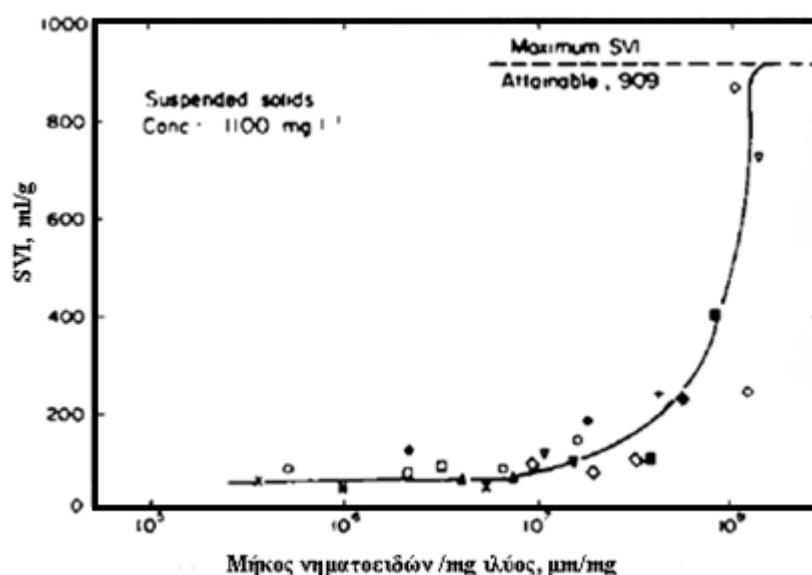
- ❖ Χαμηλές συγκεντρώσεις στερεών επανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος.
- ❖ Δυσκολία στην διατήρηση μίας σταθερής συγκέντρωσης στερεών του ανάμεικτου υγρού στις δεξαμενές αερισμού.
- ❖ Η αφυδάτωση της περίσσειας ιλύος να είναι ανεπαρκής.
- ❖ Αυξημένες υδραυλικές ανάγκες στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος.



Εικόνα 2-1: a) Νηματοειδής διόγκωση, b) Ανάπτυξη μικροκροκίδων, c) Διόγκωση λόγω zooglyca, d) Κανονικές κροκίδες (Mesquita et al., 2011)

2.6 Η επίδραση της νηματοειδούς διόγκωσης στο δείκτη καθιζησιμότητας της ιλύος (SVI)

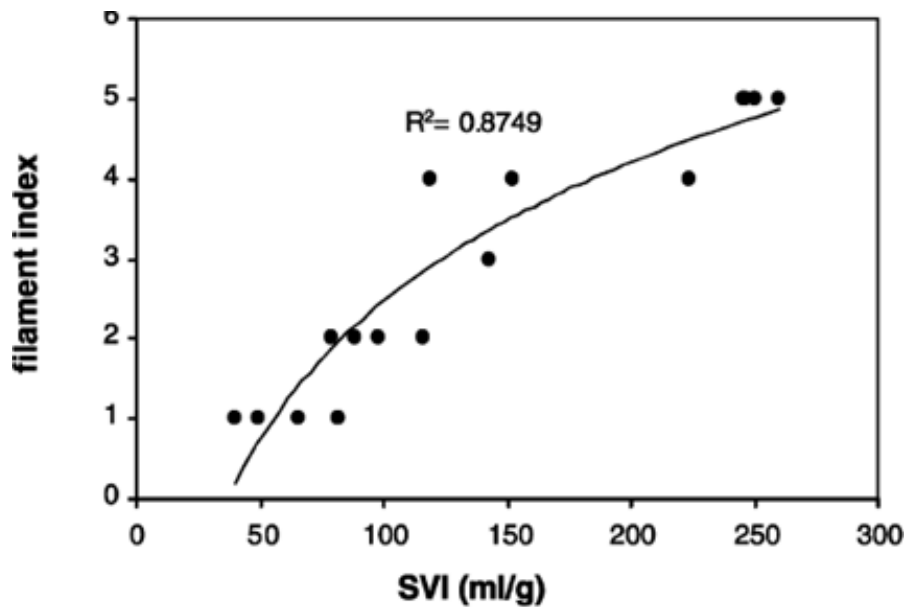
Όπως προαναφέρθηκε το φαινόμενο της νηματοειδούς διόγκωσης επηρεάζει τη διεργασία της καθίζησης και κατ' επέκταση το SVI. Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με αυτό το ζήτημα (Sezgin M., 1982; Palm et al., 1980; Lee. et al., 1982) και συμπέραναν ότι η υπερβολική ανάπτυξη των νηματοειδών μικροοργανισμών δυσκολεύει τη διεργασία του σχηματισμού της κροκίδας και κατ' επέκταση παρεμποδίζει τη συσσωμάτωση και τη καθίζηση. Οι παραπάνω ερευνητές συσχέτισαν το μήκος των νηματοειδών (TEFL) ως προς διάφορα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας όπως η ταχύτητα καθίζησης και οι δείκτες καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος (SVI, DSVI, SSVI).



Σχήμα 2-6: Επίδραση του μήκους των νηματοειδών στο SVI σε συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών 1100 mg/l. (Sezgin, 1982)

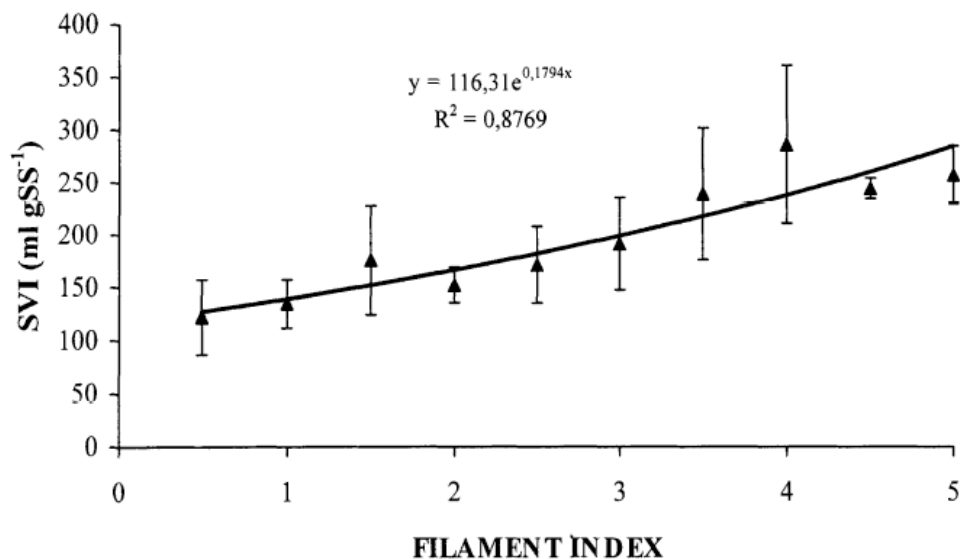
Ο Sezgin (1982) πραγματοποίησε μία έρευνα σε δείγματα που προέρχονταν από 12 εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος. Για μία σειρά συγκεντρώσεων από 700-4800 mg/l διαπίστωσε ότι το SVI αυξάνεται ραγδαία όταν το μήκος των βακτηρίων είναι μεγαλύτερο από 10⁷ μm/mg. Ωστόσο, όταν το μήκος των βακτηρίων είναι μικρότερο από 10⁷ μm/mg, τότε δεν συντελείται καμία επίδραση των νηματοειδών βακτηρίων στο δείκτη SVI (Σχήμα 2-6). Οι Lee. et al. (1982) (όπως αναφέρεται στους Jenkins et al., 1993) χρησιμοποίησαν το δείκτη TEFL που αποδεδειγμένα αποτελεί αξιόπιστο μέτρο εκτίμησης της καθιζησιμότητας, προκειμένου να προσδιορίσουν ποιος από τους δείκτες καθιζησιμότητας (SVI, DSVI, SSVI) είναι πιο αξιόπιστος. Από τα δεδομένα τους συμπέραναν ότι μεγαλύτερη συσχέτιση με τον TEFL παρουσιάζει ο δείκτης DSVI και γι αυτό το λόγο πρότειναν να χρησιμοποιείται αυτός ο δείκτης έναντι του SVI.

Συσχέτιση του δείκτη νηματοειδών ως προς το SVI πραγματοποίησαν οι Jin B. et al. (2003) σε μία έρευνα τους προκειμένου να καθορίσουν την επίδραση των χαρακτηριστικών των κροκίδων στην καθιζηματικότητα της ιλύος. Από τα δεδομένα τους προέκυψε ότι ο δείκτης νηματοειδών ασκεί σημαντική επίδραση στη καθιζηματικότητα της ενεργού ιλύος (Σχήμα 2-7).



Σχήμα 2-7: Συσχέτιση του δείκτη νηματοειδούς διόγκωσης (FI) με το SVI (Jin B. et al., 2003)

Αντίστοιχα, μία ικανοποιητική συσχέτιση του δείκτη νηματοειδών (FI) με τον δείκτη SVI πραγματοποιήθηκε και από τους Noutsopoulos et al. (2007) όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2-8. Οι μέσες τιμές και το διάστημα εμπιστοσύνης που παρουσιάζονται στο γράφημα προέκυψαν από 209 ζεύγη τιμών του FI και του SVI. Παρατηρούμε ότι για τιμές του δείκτη νηματοειδών μεγαλύτερες του 2,5, ο δείκτης SVI παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες των 200 ml/gSS.



Σχήμα 2-8: : Συσχέτιση του δείκτη νηματοειδούς διόγκωσης (FI) με τον δείκτη SVI (Noutsopoulos et al., 2007)

2.7 Νηματοειδείς μικροοργανισμοί

Η παρουσία των νηματοειδών βακτηρίων στο σύστημα είναι επιθυμητή καθώς όταν ο πληθυσμός τους βρίσκεται στο επιθυμητό μέγεθος, τότε διεκπεραιώνουν δύο καθοριστικούς ρόλους: Καταναλώνουν διαλυτό BOD και ταυτόχρονα συμμετέχουν στο σχηματισμό των κροκίδων (Geraldi, 2002).

Η αναγνώριση των νηματοειδών μικροοργανισμών πραγματοποιείται με μικροσκόπιο με τεχνική αντίθεσης φάσεως σε μεγέθυνση 1000x. Ο χαρακτηρισμός κάθε νηματοειδούς πραγματοποιείται με βάση τα εξής χαρακτηριστικά (Jenkins et al., 1993):

- ❖ Διακλαδώσεις
- ❖ Κινητικότητα
- ❖ Σχήμα νηματοειδούς μικροοργανισμού
- ❖ Τοποθεσία
- ❖ Προσκολλημένη ανάπτυξη
- ❖ Περίβλημα
- ❖ Διάφραγμα ανάμεσα στα κύτταρα
- ❖ Διάμετρος του νηματοειδούς
- ❖ Μήκος του νηματοειδούς
- ❖ Σχήμα των κυττάρων
- ❖ Μέγεθος των κυττάρων
- ❖ Ύπαρξη θείου ή άλλων μορίων (Πολυφοσφορικά και PHB)
- ❖ Αντίδραση σε χρωστικές ουσίες (Χρώσεις Gram και Neisser)

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο αναγνώρισης νηματοειδών μικροοργανισμών των Jenkins et al. (1993) το οποίο βασίστηκε στο εγχειρίδιο αναγνώρισης νηματοειδών μικροοργανισμών των Eikelboom & van Buijsen (1981) οι συνηθέστεροι νηματοειδείς μικροοργανισμοί που συναντώνται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος είναι γύρω στους 30 και παρουσιάζονται στον πίνακα 2-5.

Με βάση αποτελέσματα ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί σε αρκετές χώρες έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός νηματοειδών βακτηριδίων που ανιχνεύονται σε λάσπες που εμφανίζουν προβλήματα κακής καθαρισιμότητας και/ή αφρισμού. Η συχνότητα εμφάνισης των συγκεκριμένων νηματοειδών ως κυρίαρχοι στα διάφορα δείγματα ενεργού ιλύος διαφέρει ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω των διαφορετικών λειτουργικών συνθηκών των εγκαταστάσεων, των κλιματολογικών συνθηκών και άλλων παραγόντων. (Jenkins et al., 1993) Στον Πίνακα 2-6 παρουσιάζονται οι κυριότεροι νηματοειδείς

μικροοργανισμοί που αναγνωρίστηκαν σε βιομάζες που παρουσιάζουν προβλήματα κακής καθιζησιμότητας και αφρισμού για διάφορες γεωγραφικές περιοχές.

Πίνακας 2-5 Συνηθέστεροι νηματοειδείς μικροοργανισμοί που συναντώνται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας ιλύος (Jenkins et al., 1993)

Νηματοειδείς μικροοργανισμοί	
<i>Sphaerotilus natans</i>	type 0675
<i>Thiothrix I, II</i>	type 021N
<i>Beggiatoa spp.</i>	type 0914
<i>Microthrix parvicella</i>	type 1851
<i>Cordona</i>	type 0803
<i>Nostocoida limicola I, II, II</i>	type 0092
<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>	type 0961
<i>Flexibacter spp.</i>	type 0581
<i>Bacillus spp.</i>	type 1863
<i>Cyanophyceae</i>	type 0411
<i>fungi</i>	type 1702
type 1701	type 1852
type 0041	type 0211

Πίνακας 2-6: Κυρίαρχοι νηματοειδείς μικροοργανισμοί σε συστήματα ενεργού ιλύος από διάφορες χώρες

Rank	ΗΠΑ Jenkins et al. (1993)	Ολλανδία Seviour (1990)	Γερμανία Seviour (1990)	Ν. Αφρική Blackbeard et al.(1986)	Ιταλία Cingolani (1992)	Γαλλία Pujol (1991)	Τσεχία Krhuthov (2001)
1	<i>Cordona</i>	<i>M.parvicella</i>	<i>M.parvicella</i>	Type 0092	<i>M.parvicella</i>	Type 0092	<i>M.parvicella</i>
2	Type 1701	Type 021N	Type 0041	Type 0914	Type 0041	<i>M.parvicella</i>	Type 0092
3	Type 021N	<i>H. hydrossis</i>	<i>N. limicola</i>	<i>M.parvicella</i>	<i>N. limicola</i>	<i>Thiothrix</i> <i>spp.</i>	<i>Cordona</i>
4	Type 0041	Type 0092	Type 0092	Type 1851	<i>H. hydrossis</i>	Type 0041	Type 0041
5	<i>Thiothrix</i> <i>spp.</i>	Type 1701	Type 0803	Type 0675	Type 021N	<i>H. hydrossis</i>	Type 0675
6	<i>S. natans</i>	Type 0041	Type 0914	Type 0041	<i>Thiothrix</i> <i>spp.</i>	Type 1851	<i>N. limicola</i>
7	<i>M.parvicella</i>	<i>S. natans</i>	Type 021N	<i>Cordona</i>	Type 1701	Type 0581	Type 1851
8	Type 0092	Type 0581	<i>Thiothrix</i> <i>spp.</i>	Type 0803	Type 0092	Type 0675	<i>H. hydrossis</i>
9	<i>H. hydrossis</i>	Type 0803	Type 1851		<i>Cordona</i>	<i>Cordona</i>	Type 0803
10	Type 0675	Type 0961			Type 0675	<i>N. limicola</i>	<i>S. natans</i>

Επιπλέον, η σύσταση και το μέγεθος του πληθυσμού των νηματοειδών βακτηριδίων σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων εξαρτάται από το είδος και την προέλευση των λυμάτων (αστικά/ βιομηχανικά, ανεπεξέργαστα ή κατόπιν πρωτοβάθμιας επεξεργασίας) και τις λειτουργικές συνθήκες. Σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων αναπτύσσονται τρία με πέντε αξιοπρόσεκτα νηματοειδή βακτήρια. Εάν πρόκειται για βιομηχανικά λύματα τότε αναπτύσσονται ένα το πολύ δύο νηματοειδή βακτήρια όταν τα λύματα έχουν δύσκολα βιοδιασπάσιμο BOD και πολύπλοκη χημική σύσταση ή οχτώ ή περισσότερα όταν έχουν εύκολα βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα (Geraldi, 2002).

Επομένως, η ανάπτυξη των νηματοειδών μικροοργανισμών επηρεάζεται από τον συνδυασμό διαφόρων παραγόντων (Νουτσόπουλος, 2002):

- ❖ το χρόνο παραμονής στερεών (θc)
- ❖ το καθεστώς ροής
- ❖ τον αποδέκτης ηλεκτρονίων
- ❖ τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου
- ❖ τη συγκέντρωση των θρεπτικών (N, P)
- ❖ το pH του ανάμικτου υγρού
- ❖ τη θερμοκρασία του ανάμικτου υγρού
- ❖ τα χαρακτηριστικά των λυμάτων
- ❖ τη συγκέντρωση επιφανειακών τασιενεργών

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2-7, οι περισσότερες εγκαταστάσεις με υψηλή περιεκτικότητα διαλυμένων οργανικών ενώσεων συνήθως ευνοούν την εμφάνιση νηματοειδών βακτηριδίων όπως *type 021N*, *S. natans*, *Thiothrix spp.*, *H. hydrossis*, κ.α. Υψηλές συγκεντρώσεις θειούχων ενώσεων ευνοούν την ανάπτυξη νηματοειδών βακτηριδίων όπως *Thiothrix spp.*, *type 021N*, και *Beggiatoa spp.*. Νηματοειδή βακτηρίδια όπως *M. parvicella* και *type 0092* ευνοούνται από την παρουσία δύσκολα βιοδιασπάσιμων οργανικών ενώσεων όπως λιπαρών οξέων.

Οι διάφορες μέθοδοι ελέγχου της ανάπτυξης των νηματοειδών μικροοργανισμών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες (Νουτσόπουλος, 2009):

Στις μεθόδους που στοχεύουν στη βελτίωση της καθιζησιμότητας της ιλύος με την προσθήκη χημικών (ανόργανων κροκιδωτικών, πολυηλεκτρολυτών ή χλωρίου) που όμως δεν αντιμετωπίζουν το πραγματικό αίτιο της εμφάνισης του προβλήματος και στις μεθόδους που στοχεύουν στη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών για την ανάπτυξη συσσωματούμενων βακτηριδίων και τον περιορισμό των νηματοειδών.

Πίνακας 2-7: Οι συνθήκες λειτουργίας που συνδέονται με την γρήγορη ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών (Geraldi, 2002)

Συνθήκες λειτουργίας	Νηματοειδείς μικροοργανισμοί
Μεγάλο θc (>10 ημέρες)	<i>Type 0041, Type 0092, Type 0581, Type 0675, Type 0803, Type 0961, Type 1851, Type M. parvicella</i>
Λίπος και Λάδια	<i>Type 0092, M. parvicella, Cordona</i>
Υψηλό pH (>8,0)	<i>M. parvicella</i>
Χαμηλό διαλυμένο οξυγόνο και μεγάλο θc	<i>M. parvicella</i>
Χαμηλό διαλυμένο οξυγόνο και μικρό θc	<i>Type 1701, H. hydrossis, S. natans</i>
Χαμηλή οργανική φόρτιση (F/M<0,05)	<i>Type 021N, Type 0041, Type 0092, Type 0581, Type 0803, Type 0675, Type 0961, H. hydrossis, M. parvicella, Cordona</i>
Χαμηλό άζωτο και φώσφορος	<i>Type 021N, Type 0041, Type 0675, Type 1701, H. hydrossis, fungi, Cordona, S. natans, Thiothrix spp.</i>
Χαμηλό pH (<6,5)	<i>fungi, Cordona</i>
Οργανικά οξέα	<i>Type 021N, Beggiatoa spp., Thiothrix spp.</i>
Εύκολα βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα (αλκοόλες, θειούχα αμινοξέα, γλυκόζη, πτητικά λιπαρά οξέα)	<i>Type 021N, Type 1851, H. hydrossis, Cordona, N. limicola, S. natans, Thiothrix spp.</i>
Σηπτικότητα / Θειούχες ενώσεις (1-15mg/l)	<i>Type 021N, Type 0041, Beggiatoa spp., N. limicola, Thiothrix spp.</i>
Δύσκολα βιοδιασπάσιμο υπόστρωμα	<i>Type 0041, Type 0092, Type 0675, M. parvicella, Cordona</i>
Υψηλή θερμοκρασία λυμάτων	<i>Type 1701, S. natans</i>
Ανάπτυξη τον χειμώνα	<i>M. parvicella</i>

2.8 Νηματοειδείς μικροοργανισμοί στην Ελλάδα

Στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων που έχει διεξάγει το Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την αναγνώριση της έκτασης των προβλημάτων νηματοειδούς διόγκωσης και αφρισμού στον Ελληνικό χώρο καθώς και για τον προσδιορισμό των αιτιών και την υπόδειξη τρόπων αντιμετώπισης των φαινομένων αυτών. Στα πλαίσια αυτής της έρευνας πραγματοποιήθηκαν μικροσκοπικές αναλύσεις δειγμάτων ενεργού ιλύος από 17 Ε.Ε.Λ. για ένα χρονικό διάστημα 5 ετών (1993-1998). Από την έρευνα αυτή διαπιστώθηκε ότι κατά τη καλοκαιρινή περίοδο επικρατέστερος νηματοειδής μικροοργανισμός είναι ο *M. parvicella* ενώ κατά τη θερινή περίοδο εμφανίζεται ως επικρατέστερος νηματοειδής μικροοργανισμός ο *type 0092*. Όπως παρουσιάζεται και στον επόμενο πίνακα σε ετήσια βάση ο *M. parvicella* είναι ο επικρατέστερος μικροοργανισμός και ακολουθούν οι *type 0092, Cordona, type 0041* και *N. limicola*. (Νουτσόπουλος, 2002).

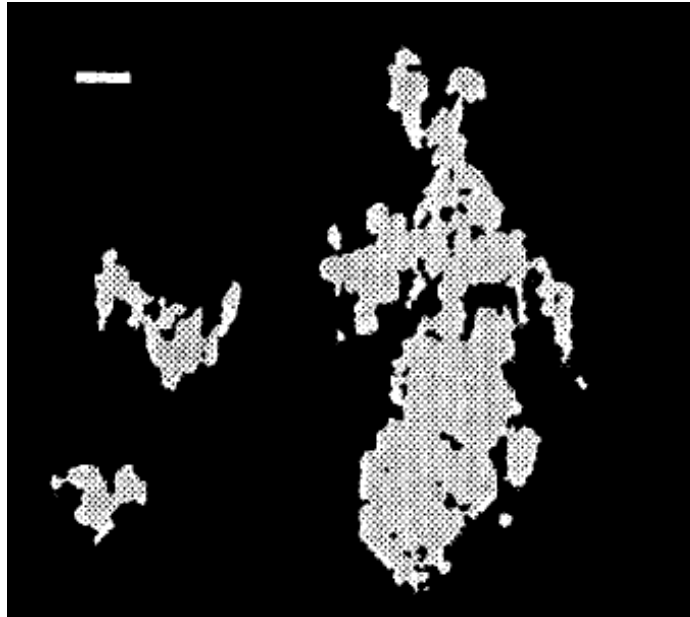
Πίνακας 2-8: Ποσοστιαία κατανομή επικρατέστερων νηματοειδών μικροοργανισμών σε 17 ΕΕΛ στην Ελλάδα (Νουτσόπουλος, 2002)

	Ετησίως (%)	Χειμώνας (%)	Καλοκαίρι (%)
<i>M. parvicella</i>	40,6	47,7	27,9
Type 0092	21,1	15,7	30,6
<i>Cordona</i>	10,4	10,2	10,8
Type 0041	9,4	9,6	9,0
<i>N. limicola</i>	6,8	7,1	6,3
Type 0675	2,3	2,0	2,7
<i>H. hydrosis</i>	1,6	0,0	4,5
Type 1863	1,3	2,0	0,0
<i>Streptococcus</i>	1,3	1,5	0,0
Άλλοι	5,2	4,1	8,1

2.9 Η μέθοδος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας (image analysis) για την εκτίμηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ενεργού ιλύος

Η επεξεργασία εικόνας (Image-Pro plus guide, 2009) είναι η διαδικασία κατά την οποία χειριζόμαστε την πληροφορία που παρέχεται από την εικόνα με σκοπό να την κάνουμε πιο χρήσιμη. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας αποτελεί ένα συγκεκριμένο είδος ανάλυσης εικόνας που πραγματοποιείται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επειδή οι υπολογιστές επεξεργάζονται τις πληροφορίες υπό την μορφή αριθμών, θα πρέπει και οι εικόνες να μετατραπούν σε μία μορφή που εκφράζεται με αριθμούς. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και ως ψηφιοποίηση εικόνας.

Κατά τη διαδικασία της ψηφιοποίησης πραγματοποιείται η ψηφιακή χαρτογράφηση (bitmap) της εικόνας από τον υπολογιστή. Η εικόνα χωρίζεται με ένα πλέγμα σε πολύ μικρές περιοχές που ονομάζονται εικονικά στοιχεία ή pixels. Κάθε pixel πάνω στο χαρτογράφημα ορίζεται από τη θέση του πάνω στο πλέγμα και συμβολίζεται από τον αριθμό της γραμμής (x) και της στήλης (y). Για παράδειγμα, η πάνω αριστερή θέση της εικόνας ορίζεται ως θέση 0,0 (γραμμή 0, στήλη 0) και επομένως πρόκειται για το pixel (0.0). Ανάλογα με την ικανότητα της συσκευής ανάκτησης των εικόνων και την πολυπλοκότητα της εικόνας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από 1 έως 32 bits για τον ορισμό της τιμής κάθε pixel και έτσι μπορούν να αναπαρασταθούν όλα τα πιθανά χρώματα που τυχόν παρουσιάζονται μέσα στην εικόνα. Για παράδειγμα τα pixel που αναπαριστούν μία ασπρόμαυρη εικόνα παίρνουν 1 bit: 0 = μαύρο, 1 = άσπρο.



Εικόνα 2-2: Ψηφιοποιημένη εικόνα κροκίδων ενεργού ιλύος όπου τα pixel παίρνουν την τιμή 1 ή 0 επειδή η εικόνα είναι ασπρόμαυρη. (Μπάρα = 100μm, μεγέθυνση = 40x) (Grijnspeerdt & Verstraete, 1997)

Το λογισμικό ανάλυσης και επεξεργασίας παρέχει ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων για την βελτίωση της ποιότητας της εικόνας. Το πιο σημαντικό εργαλείο του είναι η αυτόματη καταμέτρηση διαφόρων αντικειμένων μέσα σε μία εικόνα καθώς και η μέτρηση μορφολογικών τους παραμέτρων (Image-Pro plus guide, 2009).

Λόγω της ικανότητας του να καταργεί την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης ανάλυσης, να εξάγει ποσοτικά δεδομένα και να αντικαθιστά κουραστικές και χρονοβόρες εργασίες των ερευνητών, έχει γίνει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο με ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές του είναι στην ιατρική (μαγνητικός συντονισμός, τομογραφία ακτίνων χ, εικόνες υπερήχων), στην επεξεργασία γεωγραφικών δεδομένων και στη βιολογία και βιοτεχνολογία (Glasbey και Horgan, 1995).

Στην πραγματικότητα, οι κουραστικές και χρονοβόρες μέθοδοι μικροσκοπικής παρατήρησης της μορφολογίας των κροκίδων και των νηματοειδών μικροοργανισμών που διεξάγονται με χειροκίνητη μέτρηση (Sezgin M. κ.α., 1978), μπορούν να αντικατασταθούν από αυτοματοποιημένες μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας που έχουν προταθεί από αρκετούς ερευνητές.

Στην έρευνα που διεξήγαγαν οι Grijnspeerdt & Verstraete (1997) ανέπτυξαν δύο μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας με σκοπό την καταγραφή των μορφολογικών χαρακτηριστικών των κροκίδων και τη συσχέτιση τους με τα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας (DSVI, ZSV). Οι παράμετροι που υπολόγισαν ήταν:

$$\text{Η διάμετρος του ισοδύναμου κύκλου με βάση τη σχέση: } D = 2 \cdot \sqrt{\frac{\text{Area}}{\pi}} \quad (2-5)$$

όπου Area είναι η πραγματική επιφάνεια της κροκίδας.

Ο συντελεστής μορφολογίας (Form Factor ή FF) που περιγράφει την απόκλιση του αντικειμένου από τον κύκλο, με βάση την σχέση: $FF = \frac{4 \cdot \pi \cdot Area}{Perimeter^2}$ (2-6)

όπου Perimeter είναι η περίμετρος του αντικειμένου.

Η παράμετρος Aspect Ratio (AR) που εξαρτάται από τις διαστάσεις του αντικειμένου και προκύπτει από τη σχέση: $AR = 1 + \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{Μήκος}{Πλάτος} - 1 \right)$ (2-7)

Η καμπυλότητα (Roundness ή RD) με βάση την σχέση: $RD = \frac{4 \cdot Area}{\pi \cdot Μήκος^2}$ (2-8)

Στη πρώτη μέθοδο η δειγματοληψία του δείγματος διενεργούνταν χειροκίνητα και μάλιστα προηγούνταν αραίωση του δείγματος πριν την μεταφορά του στο πλακίδιο. Η ανάκτηση των εικόνων πραγματοποιούνταν διαδοχικά από το μικροσκόπιο έως ότου να καταγραφούν συνολικά 200 κροκίδες. Αυτή η εξέταση είχε διάρκεια από 1 έως και 2 ώρες και διενεργούνταν στο σκοτεινό πεδίο σε μεγέθυνση 50 x με αποτέλεσμα να προκύπτουν ασπρόμαυρες εικόνες. Από τη στατιστική επεξεργασία των μορφολογικών παραμέτρων προέκυψε ότι ο συντελεστής μορφολογίας και το Aspect Ratio σχετίζονται περισσότερο με τον δείκτη DSVI και την ταχύτητα ζωνικής καθίζησης και μάλιστα προτείνονται από τους συγγραφείς για την εκτίμηση της καθιζησιμότητας της ιλύος.

Η δεύτερη μέθοδος ήταν πιο αυτοματοποιημένη, καθώς το δείγμα με την βοήθεια μίας περισταλτικής αντλίας περνούσε με συνεχόμενη ροή (200 ml/min) μέσα από ένα κελί (πάχους 1 mm) που ήταν σχεδιασμένο για φασματοφωτομετρικές εφαρμογές. Ανά τακτά διαστήματα η αντλία σταματούσε και γινόταν η λήψη της εικόνας. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας της εικόνας εισάγονταν καινούργιο δείγμα από την αντλία στο κύτταρο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνονταν μέχρι να ανακτηθούν στατιστικά αποδεκτά αποτελέσματα και η συνολική εξέταση του δείγματος διαρκούσε από 10 έως 20 λεπτά. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ιλύος ενός συστήματος που αντιμετώπιζε πρόβλημα νηματοειδούς διόγκωσης και στο οποίο πραγματοποιούνταν χλωρίωση. Ύστερα από 5 μέρες οι παράμετροι FF και AR είχαν μεταβληθεί σε αντίθεση με τη τιμή του δείκτη DSVI που είχε παραμείνει αμετάβλητη. Με αυτό το τρόπο οι συγγραφείς συμπέραναν πως λόγω της ευαισθησίας της, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για την έγκαιρη πρόβλεψη ανεπιθύμητων φαινομένων.

Εκτός από την εκτίμηση της μορφολογίας των κροκίδων η μέθοδος ανάλυσης εικόνας εφαρμόστηκε και για τη καταγραφή των νηματοειδών βακτηρίων, όπως παρουσιάζεται στη μέθοδο που προτάθηκε από τους Da Motta et al. (2001). Εξετάστηκαν δείγματα ανάμεικτου υγρού από εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων στη Γαλλία καθώς και δείγματα ανάμεικτου υγρού από μέρος της ίδιας εγκατάστασης που επεξεργάζεται λύματα μπυραρίας. Η λήψη των εικόνων πραγματοποιήθηκε από μικροσκόπιο σε μεγέθυνση 100x στο φωτεινό πεδίο και

τουλάχιστον μία σειρά από 70 εικόνες προέκυπταν από την εξέταση του πλακιδίου. Στη συνέχεια ύστερα από την επεξεργασία της εικόνας με διάφορα φίλτρα, πραγματοποιούνταν ο διαχωρισμός των κροκίδων από τους νηματοειδείς και τα θραύσματα βάσει του μεγέθους τους. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για την παρακολούθηση επεισοδίων νηματοειδούς διόγκωσης στην εγκατάσταση.

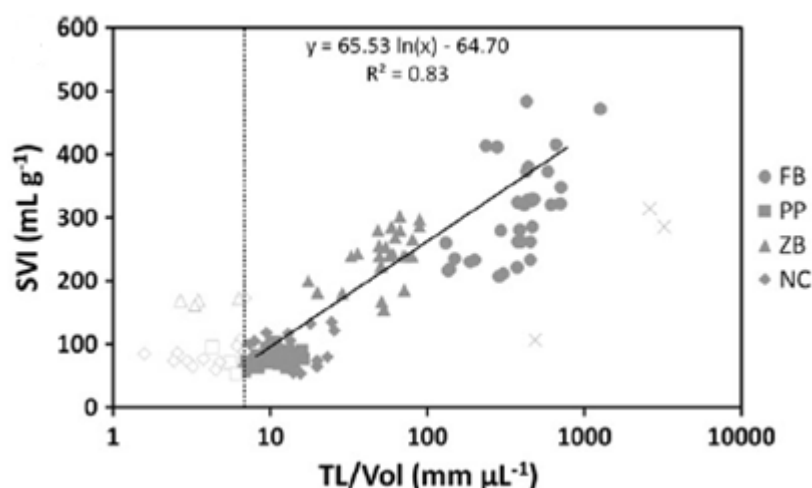
Οι Amaral & Ferreira (2005) εφάρμοσαν τη μέθοδο ανάλυσης εικόνας σε δείγματα ύλους που προέρχονταν από μία εγκατάσταση που αντιμετώπιζε πρόβλημα νηματοειδούς διόγκωσης με τον δείκτη SVI να κυμαίνεται από 200 έως 620 cm³/g. Ουσιαστικά η μέθοδος που ανέπτυξαν αποτελούνταν από δύο ρουτίνες. Η μία αφορούσε στην καταγραφή των νηματοειδών μικροοργανισμών και η άλλη των κροκίδων.

Στην ρουτίνα καταγραφής των νηματοειδών μικροοργανισμών πραγματοποιήθηκε η λήψη 30 εικόνων ανά δείγμα με τη χρησιμοποίηση μικροσκοπίου με τεχνική αντίθεσης φάσεως και μεγέθυνση 100x. Στην συνέχεια αφού μορφοποιήθηκε η εικόνα με βάση την κλίμακα του γκρι με μία σειρά βημάτων διενεργήθηκε η κατάτμηση των νημάτων από τις κροκίδες και η αφαίρεση των κροκίδων και των θραυσμάτων από την εικόνα. Υπολογίστηκαν ο συνολικός αριθμός των νηματοειδών, το μέσο μήκος τους και το συνολικό μήκος τους. Στην ρουτίνα καταγραφής των κροκίδων πραγματοποίησαν την λήψη 25 εικόνων ανά δείγμα σε μεγέθυνση 40x. Μετά την μορφοποίηση της εικόνας με τα κατάλληλα φίλτρα, ακολουθούσε η εκτίμηση μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων: Ο συνολικός αριθμός τους, η συνολική επιφάνεια τους (τα συνολικά pixel των επιφανειών όλων των κροκίδων), η μέση επιφάνεια των κροκίδων (ο λόγος της συνολικής επιφάνειας προς το συνολικό αριθμό τους), η έκταση (ο λόγος της επιφάνειας του αντικειμένου προς το κουτί που το περικλείει), η κυρτότητα (ο λόγος της κυρτής περιμέτρου ως προς την πραγματική περίμετρο), η καμπυλότητα (Roundness ή Round) που προκύπτει από τη μέση επιφάνεια και τη κυρτή περίμετρο (P_{conv}) κάθε κροκίδας σύμφωνα με τη σχέση: $Round = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P_{conv}^2}$ (2-9), η πυκνότητα δηλαδή η ικανότητα της κροκίδας να καταλαμβάνει το λιγότερο χώρο και η εκκεντρικότητα ή επιμήκυνση. Επίσης εισήγαγαν τρεις καινούργιες παραμέτρους: Το λόγο του μήκους των νηματοειδών προς τη μέση επιφάνεια των κροκίδων (L/A), το λόγο του συνολικού μήκους των νηματοειδών προς τη συνολική επιφάνεια των κροκίδων (TL/TA) και το λόγο του συνολικού μήκους των νηματοειδών προς τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TL/TSS).

Οι Mesquita et al. (2011) ανέπτυξαν μία εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης εικόνας για τον προσδιορισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών σε εικόνες που ανακτήθηκαν στο φωτεινό πεδίο αλλά και με τη τεχνική φθορισμού με σκοπό την παρακολούθηση τεσσάρων διαφορετικών λειτουργικών συνθηκών (νηματοειδής διόγκωση, διόγκωση λόγω zooglyca, σχηματισμός μικροκροκίδων και κανονικές συνθήκες). Συγκεκριμένα, στο φωτεινό πεδίο εξετάστηκαν τρία πλακίδια για κάθε δείγμα και η λήψη των εικόνων πραγματοποιούνταν στο άνω άκρο, στη μέση και στο κάτω άκρο κάθε πλακιδίου προκειμένου να είναι πιο αντιπροσωπευτικά τα

αποτελέσματα. Συνολικά λαμβάνονταν 150 εικόνες για κάθε δείγμα δηλαδή 50 εικόνες στο κάθε πλακίδιο σε μεγέθυνση 100x. Η λήψη των εικόνων με την τεχνική φθορισμού πραγματοποιούνταν με τον ίδιο τρόπο με τη διαφορά ότι εξετάζονταν δύο πλακίδια για κάθε δείγμα σε μεγέθυνση 200x. Εφαρμόστηκαν δύο φίλτρα, το ένα φίλτρο ήταν στο μήκος κύματος του πράσινου χρώματος με φάσμα απορρόφησης στα 470 – 490 nm και φάσμα εκπομπής στα 516 nm και το δεύτερο φίλτρο ήταν στο μήκος κύματος του κόκκινου χρώματος με φάσμα απορρόφησης στα 530 – 550 nm και φάσμα εκπομπής στα 591 nm.

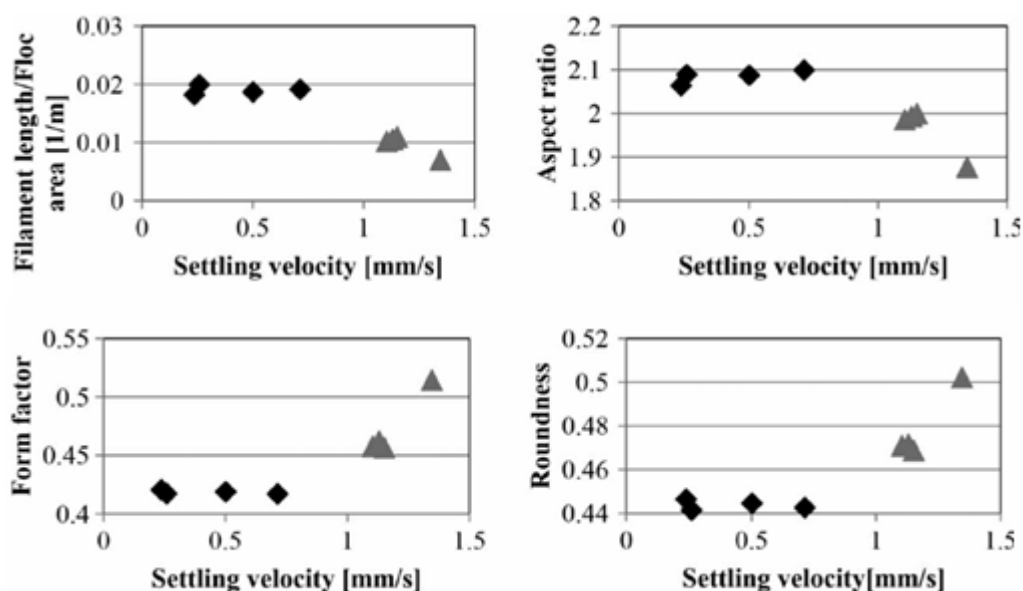
Η μέθοδος ανάλυσης των εικόνων από το φωτεινό πεδίο βασίστηκε σε αυτή που προτάθηκε από τον Amaral (2003) για την καταγραφή νηματοειδών βακτηρίων και κροκίδων στη κλίμακα του γκρι ενώ οι μορφολογικές παράμετροι προσδιορίστηκαν με βάση τους Amaral & Ferreira (2005). Η μέθοδος ανάλυσης εικόνων με τεχνική φθορισμού αναπτύχθηκε με σκοπό την καταγραφή των ζωντανών και κατεστραμμένων βακτηρίων και η ρουτίνα της διενεργούνταν σε δύο κανάλια, το πράσινο και το κόκκινο κανάλι. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων οι συγγραφείς συμπέραναν ότι η μέθοδος ανάλυσης εικόνας προσδιόρισε σε σημαντικό βαθμό την φύση και την κατάσταση κάθε φαινομένου. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το επόμενο γράφημα που συσχετίζει τον δείκτη SVI με το περιεχόμενο των νηματοειδών βακτηρίων στον όγκο του δείγματος (TL / Vol, mm/μl). Παρατηρούμε πως αυτές οι δύο παράμετροι παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους ($R^2=0.83$), βέβαια για τιμές των νηματοειδών μικρότερες των 7 mm/μl φαίνεται πως δεν επηρεάζουν την τιμή του δείκτη SVI. Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι τιμές του SVI επηρεάζονται περισσότερο στις συνθήκες νηματοειδούς διόγκωσης και διόγκωσης λόγω zooglea.



Σχήμα 2-9: Συσχέτιση του SVI και της ποσότητας των νηματοειδών όπως προσδιορίστηκε από τη μέθοδο ανάλυσης εικόνας από τους Mesquita et al. (2011). FB = Νηματοειδής διόγκωση, PP = Ανάπτυξη μικροκροκίδων, ZB = Διόγκωση λόγω zooglea, NC = Κανονικές συνθήκες.

Οι περισσότερες μέθοδοι που έχουν προταθεί είναι δύσκολο να εφαρμοστούν στο σημείο δειγματοληψίας (*in situ*) με αποτέλεσμα να εγείρονται αμφιβολίες για την αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων μετά τη μεταφορά τους στο εργαστήριο. Οι Koivuranta et al. (2012) ανέπτυξαν μία μέθοδο αυτόματης μέτρησης των κροκίδων *in situ* με σκοπό την παρακολούθηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών των κροκίδων και την έγκαιρη αντιμετώπιση συμβάντων νηματοειδούς διόγκωσης. Επρόκειτο για μία μονάδα μικρής κλίμακας που αποτελούνταν από ένα σωλήνα ροής με μία ενσωματωμένη κάμερα υψηλής ανάλυσης. Η απεικόνιση των σωματιδίων πραγματοποιούνταν σε μία κυψελίδα από την οποία το δείγμα απομακρύνονταν με μία αντλία. Πριν την εισαγωγή του δείγματος στην μονάδα απεικόνισης έπρεπε να γίνει αραίωση του με αποσταγμένο νερό σε αναλογία 1:200. Μετά την λήψη των εικόνων πραγματοποιούνταν η καταγραφή των νηματοειδών βακτηρίων και των κροκίδων με τη μέθοδο ανάλυσης εικόνας.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε δείγματα ανάμεικτου υγρού που λήφθηκαν στη περίπτωση που το σύστημα λειτουργούσε υπό κανονικές συνθήκες και στη περίπτωση που αντιμετώπιζε πρόβλημα νηματοειδούς διόγκωσης. Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν, συσχετίστηκαν με τη ταχύτητα καθίζησης και τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα για κάθε περίπτωση ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο την αξιοπιστία της μεθόδου.



Σχήμα 2-10: Μορφολογικοί παράγοντες των νηματοειδών και των κροκίδων ως προς τη ταχύτητα καθίζησης στη περίπτωση νηματοειδούς διόγκωσης (◆) και σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (▲) (Koivuranta et al., 2012).

Από το σχήμα 2-10 παρατηρούμε ότι στη περίπτωση της νηματοειδούς διόγκωσης το μήκος των νηματοειδών και οι μορφολογικοί παράγοντες των κροκίδων παρουσιάζονται εμφανώς διαφορετικοί σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες. Στη περίπτωση της νηματοειδούς διόγκωσης το μήκος των νηματοειδών είναι μεγαλύτερο όπως ήταν αναμενόμενο, ο παράγοντας aspect ratio εμφανίζεται μεγαλύτερος που σημαίνει ότι οι κροκίδες είναι πιο επιμήκεις, ο παράγοντας Form Factor και η καμπυλότητα (Roundness) εμφανίζονται μικρότεροι που σημαίνει ότι οι κροκίδες είναι πιο ανομοιόμορφες και εύθραυστες.

Κεφάλαιο 3 Πειραματικό πρωτόκολλο

3.1 Εισαγωγή

Για την υλοποίηση των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν μία σειρά από μεθόδους ανάλυσης και εφαρμογών. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι μέθοδοι ανάλυσης που πραγματοποιήθηκαν, το πειραματικό πρωτόκολλο του πειράματος επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζηματικότητας ενεργού ιλύος, η διαδικασία μικροσκοπικής παρατήρησης των δειγμάτων ενεργού ιλύος και τέλος η περιγραφή του συστήματος ανάλυσης εικόνας ενεργού ιλύος.

3.2 Περιγραφή αναλυτικών μεθόδων

3.2.1 Προσδιορισμός των ολικών αιωρούμενων στερεών

Η μέτρηση των ολικών αιωρούμενων στερεών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο 2540 D που περιγράφεται στο πρότυπο κανονισμό Standard Methods 18th edition (A.P.H.A, 1992).

Πειραματικές Συσκευές

Αναλυτικός ζυγός ακριβείας.
Φούρνος 103°C.
Φίλτρα GF/C διαμέτρου 4,7 cm.
Ξηραντήρας

Πειραματική διαδικασία

Για τον προσδιορισμό των αιωρούμενων στερεών ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

Ζυγίζεται προξηραμένο φίλτρο GF/C.

Τοποθετείται το φίλτρο στη μονάδα διήθησης και χρησιμοποιώντας την αντλία κενού διηθούνται 5-10 ml δείγματος ανάμεικτου υγρού.

Αφαιρείται το φίλτρο με την λαβίδα και τοποθετείται στο φούρνο των 103°C για 1 hr.

Μετρίεται το βάρος του δείγματος με τον αναλυτικό ζυγό.

Υπολογισμός:

$$\text{mg ολικών αιωρούμενων στερεών/L} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{όγκος του δείγματος, ml}} \quad (3-1)$$

Όπου:

A = Το βάρος του φίλτρου + το ξηραμένο υπόλειμμα, σε mg

B = Το βάρος του προξηραμένου φίλτρου, σε mg



Εικόνα 3-1: α) Μονάδα διήθησης και β) αντλία κενού



Εικόνα 3-2: α) Φούρνος στη θερμοκρασία των 103 °C και β) ξηραντήρας



Εικόνα 3-3: Αναλυτικός ζυγός ακριβείας

3.2.2 Δείκτης καθιζησιμότητας ιλύος (DSVI)

Η μέθοδος που πραγματοποιείται για τον έλεγχο της καθιζησιμότητας είναι ο δείκτης DSVI (Diluted Sludge Volume Index) έναντι του δείκτη SVI (μέθοδος 2710 D). Με αυτό το πείραμα αντιμετωπίζεται το πρόβλημα των υψηλών συγκεντρώσεων καθώς επίσης αποτελεί πιο αξιόπιστο δείκτη για πιθανή νηματοειδή διόγκωση.

Ανάμεικτο υγρό (σε θερμοκρασία δωματίου) αφήνεται να καθιζάνει σε ένα ογκομετρικό κύλινδρο 1l αλλά έχει προηγηθεί αραίωση του δείγματος έτσι ώστε ο όγκος που καταλαμβάνει η ιλύς ύστερα από 30 λεπτά να μη ξεπερνά τα 150 με 250 ml (Mogens Henze et al., 2008).

Ο υπολογισμός του δείκτη πραγματοποιείται ως εξής:

$$DSVI = \frac{\text{όγκος της ιλύος, ml}}{\text{αρχική συγκέντρωση του ανάμεικτου υγρού, g}} \times \text{αραίωση} \quad (3-2)$$

3.2.3 Προσδιορισμός του ιξώδους (μ)

Για τη μέτρηση του ιξώδους χρησιμοποιήθηκε το εργαστηριακό περιστροφικό ιξωδόμετρο V1, έκδοση L, για τη μέτρηση χαμηλού ή μέτριου ιξώδους του οίκου Viscotech Ισπανίας. Το συγκεκριμένο όργανο αποδίδει μετρήσεις απόλυτα συμβατές με τη μέθοδο Brookfield. Το ιξώδες, εκφρασμένο σε mPas, μετρήθηκε σε ρυθμό διάτμησης (shear rate) 200 rpm για περίπου 2-3 λεπτά έτσι ώστε τα στερεά να βρίσκονται σε αιώρηση.



Εικόνα 3-4: Περιστροφικό ιξωδόμετρο

3.2.4 Προσδιορισμός της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης και των σταθερών V_0 και n της εξίσωσης Vesilind

Η μέτρηση της ταχύτητας καθίζησης σε συγκεκριμένη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο 2710 E (A.P.H.A, 1992).

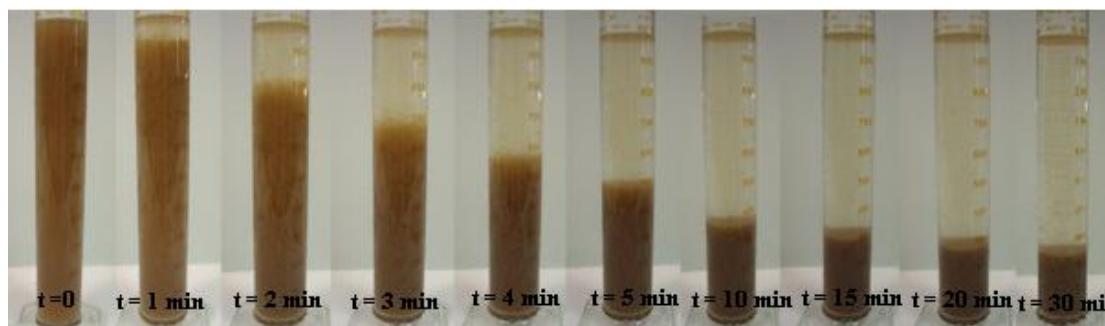
Συσκευές:

Ογκομετρικός κύλινδρος 1l

Χρονόμετρο

Πειραματική διαδικασία

Σε αυτό το πείραμα (APHA et al., 1992), ανάμεικτο υγρό τοποθετείται σε ένα κύλινδρο 1 L και στη συνέχεια σημειώνεται το ύψος της επιφάνειας της ιλύος ανά τακτά χρονικά διαστήματα (στα 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30 λεπτά).



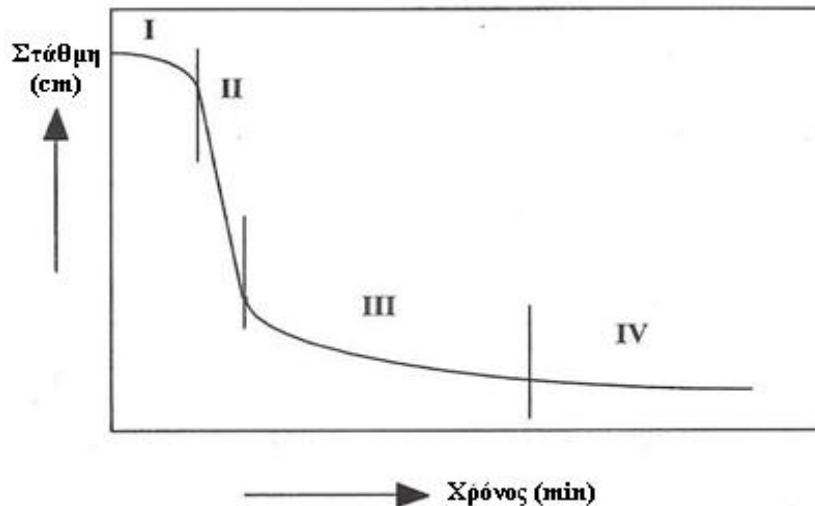
Εικόνα 3-5: Απεικόνιση του πειράματος προσδιορισμού της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης (Ανάμεικτο υγρό από τον βιολογικό καθαρισμό Ψυτάλειας)

Μετά το πέρας του πειράματος καταstrώνεται η καμπύλη του ύψους της επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα. Αυτή η καμπύλη μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις φάσεις:

I) Φάση υστέρησης. Διαρκεί ένα με δύο λεπτά στην αρχή του πειράματος.

II) Φάση γραμμικής μείωσης της επιφάνειας. Διαρκεί για 3-30 λεπτά αναλόγως με την συγκέντρωση του ανάμεικτου υγρού και το ύψος του κυλίνδρου. Η κλίση αυτής της γραμμικής περιοχής μας δίνει τη Ζωνική Ταχύτητα Καθίζησης (ZSV) της ιλύος στην συγκέντρωση που πραγματοποιήθηκε το πείραμα.

III, IV) Φάση επίδρασης της συμπύκνωσης στην ταχύτητα καθίζησης με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της.

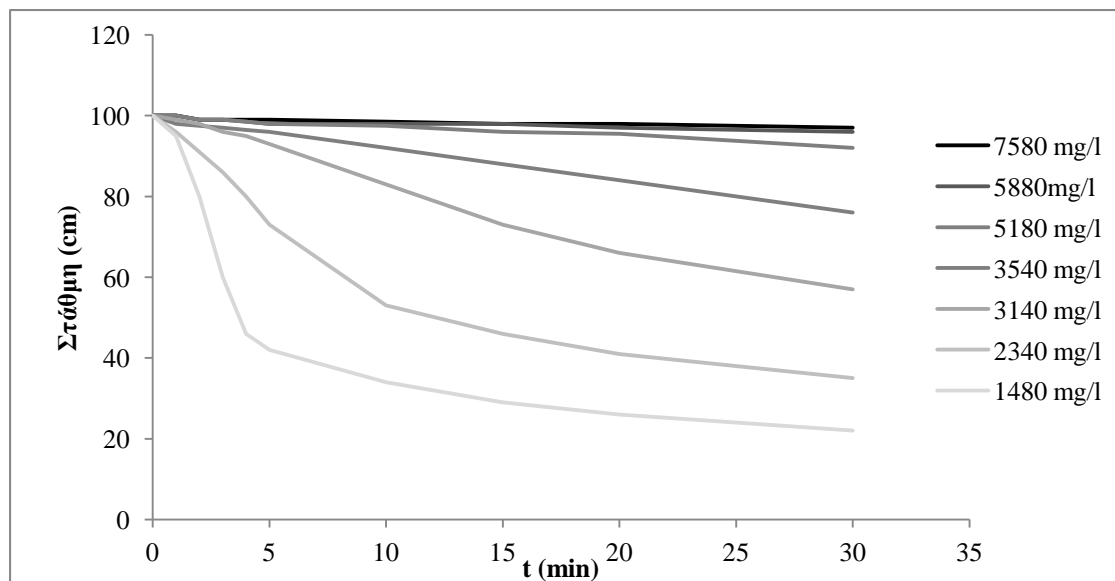


Σχήμα 3-1: Τυπική καμπύλη καθίζησης. (Valter T. et all 2006)

Η ταχύτητα ζωνικής καθίζησης προκύπτει από τη κλίση της καμπύλης στη φάση II όπως φαίνεται στο σχήμα 3-1.

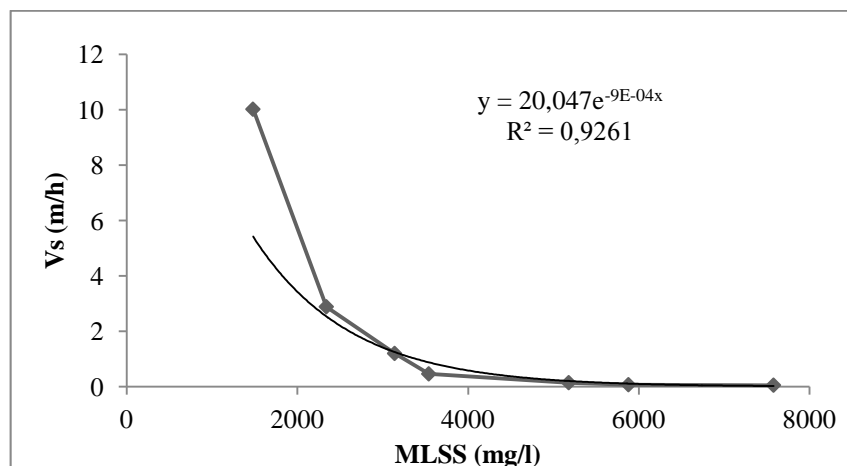
Μία σειρά πειραμάτων υπολογισμού της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης διενεργείται σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ανάμεικτου υγρού οι οποίες προκύπτουν από την ανάμειξη - σε κατάλληλες αναλογίες - ανάμεικτου υγρού και ανακυκλοφορίας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει ο υπολογισμός των σταθερών V_0 (m/h) και n m^3/kg της εξίσωσης Vesilind (1968) η οποία εκφράζει την ταχύτητα καθίζησης V_s (m/h) συναρτήσει της συγκέντρωσης των στερεών X (g/l ή kg/m^3):

$$\text{Εξίσωση Vesilind: } V_s = V_0 \cdot e^{-n \cdot X} \quad (3-3)$$



Σχήμα 3-2: Πείραμα υπολογισμού της ταχύτητας ζωνικής καθίζησης που πραγματοποιείται σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ανάμεικτου υγρού (Δείγμα από τον βιολογικό καθαρισμό Ψυττάλειας)

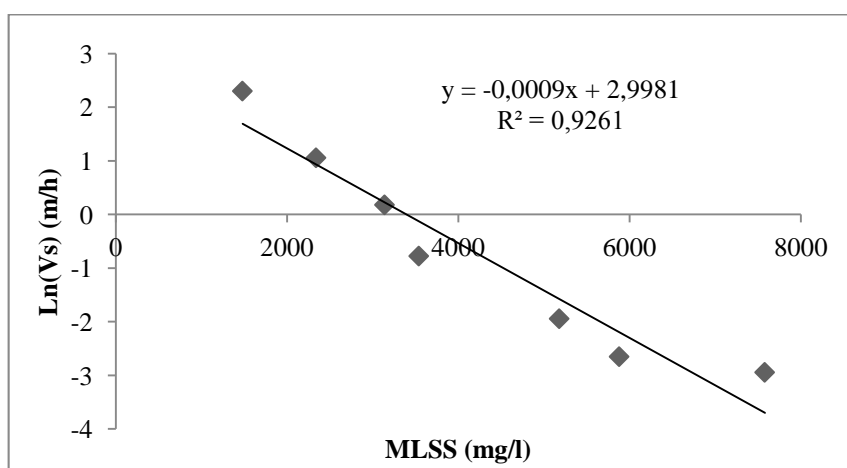
Από το σχήμα 3-2 φαίνεται καθαρά ότι τα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε χαμηλές συγκεντρώσεις ανάμεικτου υγρού παρουσιάζουν υψηλές ταχύτητες ζωνικής καθίζησης, ενώ αυτά που πραγματοποιήθηκαν σε υψηλές συγκεντρώσεις καθιζάνουν πιο αργά. Οι υπολογιζόμενες ταχύτητες καθίζησης (σε m/h) καταγράφονται σε ένα γράφημα συναρτήσεως των αντίστοιχων συγκεντρώσεων ανάμεικτου υγρού (σε mg/l) από το οποίο εξάγεται η εκθετική εξίσωση Vesilind που περιγράφει τη καμπύλη.



Σχήμα 3-3: Η συσχέτιση των ταχυτήτων ζωνικής καθίζησης με την συγκέντρωση στερεών ανάμεικτου υγρού από τον βιολογικό καθαρισμό Ψυττάλειας με βάση την εξίσωση Vesilind

Αν τα ίδια δεδομένα καταγραφούν σε γράφημα, μόνο που σε αυτή τη περίπτωση οι ταχύτητες να είναι υπό τη μορφή φυσικού λογαρίθμου, τότε θα προκύψει μία γραμμική καμπύλη. Η εξίσωση που θα τη περιγράφει θα έχει τη μορφή:

$$\ln(v_s) = \ln(v_0) - n \cdot \text{MLSS} \quad (3-4)$$



Σχήμα 3-4: Η συσχέτιση του φυσικού λογαρίθμου των ταχυτήτων ζωνικής καθίζησης με την συγκέντρωση στερεών ανάμεικτου υγρού από τον βιολογικό καθαρισμό Ψυττάλειας με βάση την εξίσωση Vesilind

3.3 Πρωτόκολλο του πειράματος διερεύνησης της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος

Ο στόχος αυτού του πειράματος ήταν η διερεύνηση της επίπτωσης της θερμοκρασιακής μεταβολής στα χαρακτηριστικά της καθίζησης. Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων προσδιορισμού των σταθερών V_0 και n της εξίσωσης Vesilind σε 5 διαφορετικές θερμοκρασίες: Στους 10 °C, 20 °C, 25°C, 30°C και 35°C. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα προέρχονταν από την Ε.Ε.Λ. της Ψυττάλειας. Η θερμοκρασία των 10 °C ήταν η θερμοκρασία ψυγείου μέσα στο οποίο συντηρούνταν τα δείγματα ενώ οι υπόλοιπες θερμοκρασίες διαμορφώθηκαν με την χρησιμοποίηση δύο ανοξειδωτων υδατόλουτρων λουτρών.

Τα δύο ανοξειδωτα υδατόλουτρα (εικόνα 3-6) είχαν εσωτερικές διαστάσεις 505mm x 300mm x 200 (μήκος x πλάτος x βάθος) με 2 θέσεις το καθένα για τις κωνικές φιάλες με διάμετρο βάσης 220mm. Η θέρμανση των υδατόλουτρων γινόταν μέσω αντίστασης στο κάτω μέρος της λεκάνης του λουτρού που ενεργοποιούνταν βάσει της θερμοκρασίας και με ανακυκλοφορία νερού μέσω αντλίας με πίεση 120mbar και εκτόνωση 10lt/min (λειτουργικά χαρακτηριστικά: 220V/50HZ, 2000W). Με τον τρόπο αυτό η θερμοκρασία μπορούσε να ρυθμιστεί με εύρος τιμών έως και 70°C με αναγνωσιμότητα 0,1°C με PID control.



Εικόνα 3-6: Ανοξειδωτο υδατόλουτρο

Στο ένα υδατόλουτρο παρέμεναν σε σταθερή θερμοκρασία μέσα σε κωνικές φιάλες των 2 l τα δείγματα του ανάμεικτου υγρού και της ανακυκλοφορίας και στο δεύτερο υδατόλουτρο πραγματοποιούνταν τα πειράματα προσδιορισμού της ταχύτητας καθίζησης σε διαφορετικές συγκεντρώσεις για την εκάστοτε θερμοκρασία. Επιπλέον, για κάθε πείραμα πραγματοποιούνταν και ο προσδιορισμός του δείκτη DSVI και του ιξώδους του ανάμεικτου υγρού στην εκάστοτε θερμοκρασία.

Στη συνέχεια, για κάθε θερμοκρασία πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των σταθερών V_0 και n της εξίσωσης Vesilind και ακολούθησε η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός του μέσου όρου των αποτελεσμάτων, της τυπικής απόκλισης και του διαστήματος εμπιστοσύνης με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



Εικόνα 3-7: Διάταξη του πειράματος διερεύνησης της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας ενεργού ιλύος

3.4 Διαδικασία μικροσκοπικής παρατήρησης δείγματος ενεργού ιλύος

Η μικροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων ανάμεικτου υγρού είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των κροκίδων και την αναγνώριση των νηματοειδών μικροοργανισμών που τα απαρτίζουν.

Χρησιμοποιήθηκε ορθό μικροσκόπιο Nikon Eclipse 80 με τεχνική αντίθεσης φάσεως και τρεις φακούς με μεγέθυνση 100x, 200x και 1000x. Το μικροσκόπιο ήταν συνδεδεμένο με ηλεκτροκίνητη τράπεζα (Marzhanser Tango 3-axis) με κίνηση στους άξονες x και y και έγχρωμη ψηφιακή κάμερα μικροσκοπίας Lumenera Infinity 1-3c.



Εικόνα 3-8: Μικροσκόπιο με τεχνική αντίθεσης φάσεως με ηλεκτροκίνητη τράπεζα (άξονες x,y) και έγχρωμη ψηφιακή κάμερα μικροσκοπίας

Η διαδικασία μεταφοράς του δείγματος στο μικροσκόπιο έχει ως εξής (Jenkins D. et al., 1993): Τοποθετείται με ένα σιφώνιο μία σταγόνα (περίπου 0,05 ml) καλά αναμειγμένου δείγματος πάνω στο πλακίδιο διαστάσεων 25mm x 75 mm. Στη συνέχεια τοποθετείται μία καλυπτρίδα στην επιφάνεια του πλακιδίου και ασκείται πίεση με ένα αμβλύ αντικείμενο. Το υγρό που αποβάλλεται από τα πλάγια απομακρύνεται με ένα απορροφητικό χαρτί. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για να δημιουργηθεί το ελάχιστο βάθος στο οποίο μπορεί να εστιάσει το μικροσκόπιο. Με αυτό τον τρόπο επιταχύνεται η ξήρανση του δείγματος στο πλακίδιο, ωστόσο είναι απαραίτητο να γίνει προκειμένου να είναι πιο αποτελεσματική η παρατήρηση.

Στην συνέχεια με την χρησιμοποίηση του φακού με μεγέθυνση 100x και με την τεχνική αντίθεσης φάσεως ελέγχονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά των κροκίδων:

1. Το μέγεθος και η μορφή των κροκίδων: Το μέγεθος των κροκίδων ταξινομήθηκε με βάση τη διάμετρο τους και συγκεκριμένα, ως μικρές ορίζονται οι κροκίδες με διάμετρο κάτω από 150 μm , ως μεσαίες οι κροκίδες με διάμετρο από 150 μm με 500 μm και ως μεγάλες οι κροκίδες με διάμετρο πάνω από 500 μm . Η μορφή τους χαρακτηρίζεται ως ακανόνιστη ή σφαιρική, ανοιχτή ή κλειστή.
2. Η παρουσία και τα είδη πρωτόζωων (zooglea και σπειροχετών ή spirochete)
3. Η παρουσία μη βιολογικών οργανικών και ανόργανων σωματιδίων
4. Η παρουσία ελεύθερων κυττάρων
5. Η παρουσία και η επίδραση των νηματοειδών μικροοργανισμών στη δομή των κροκίδων: α) Καμία, β) Γεφύρωση (Bridging) - Οι νηματοειδείς προεξέχουν από την επιφάνεια των κροκίδων μέσα στο δείγμα και κάνουν γέφυρες ανάμεσα στις κροκίδες. γ) Ανοιχτή δομή των κροκίδων - Τα βακτήρια προσκολλούν πάνω στους νηματοειδείς και αναπτύσσονται γύρω τους με αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλων ανομοιομορφων δομών.
6. Η αφθονία των νηματοειδών βακτηρίων ή δείκτης των νηματοειδών (FI): Για τον προσδιορισμό αυτού του δείκτη οι νηματοειδείς παρατηρούνται πρώτα με τον φακό με μεγέθυνση 100x και μετά με το φακό με μεγέθυνση 1000x. Βαθμονομήθηκε με βάση τη κλίμακα από 1-5 όπου το 1 αντιπροσωπεύει κανένα νηματοειδή μικροοργανισμό και το 5 υπερβολική ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών σύμφωνα με τους Eikelboom και van Bijssen (1981).

Το επόμενο βήμα είναι η αναγνώριση των νηματοειδών βακτηρίων που περιέχονται στο δείγμα και ο προσδιορισμός της αφθονίας τους με τη χρησιμοποίηση του φακού μεγέθυνσης 1000x και με την εφαρμογή της τεχνικής αντίθεσης φάσεως. Για την αποτελεσματικότερη αναγνώριση των νηματοειδών βακτηρίων γίνεται χρώση του δείγματος με βάση τις χρωστικές τεχνικές Gram και Neisser. Συγκεκριμένα, την προηγούμενη μέρα της μικροσκοπικής παρατήρησης μία σταγόνα δείγματος έχει τοποθετηθεί και απλωθεί στο 50% της επιφάνειας καθενός από δύο πλακίδια τα οποία αφήνονται να στεγνώσουν στη θερμοκρασία δωματίου. Την επόμενη μέρα αφού γίνει η χρώση Gram στο ένα πλακίδιο και η Neisser στο άλλο, εξετάζονται στο φωτεινό πεδίο με τον φακό 1000x. Η αναγνώριση των νηματοειδών μικροοργανισμών

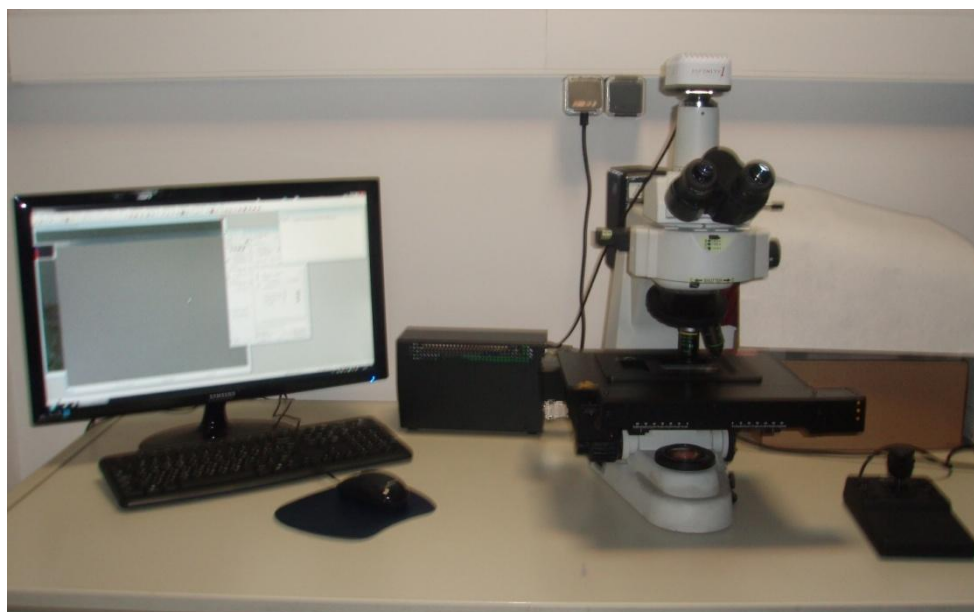
πραγματοποιείται σύμφωνα με το κλειδί αναγνώρισης που έχει προταθεί από τον Jenkins D. et al., (1993).

3.5 Σύστημα ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνων

Μέχρι πρόσφατα ο προσδιορισμός της μορφολογίας των κροκίδων και του πληθυσμού των νηματοειδών μικροοργανισμών βασιζόταν στην εκτίμηση και την εμπειρία εκάστοτε παρατηρητή με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πάντα σαφής εικόνα του δείγματος. Ο συνδυασμός της μεθόδου ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας με την τεχνική της μικροσκοπικής παρατήρησης μας έδωσε την δυνατότητα να έχουμε μία πιο έγκυρη εκτίμηση για την κατάσταση και τη φύση της βιομάζας (Grijnspeerdt K. and Verstraete W. 1997).

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από ένα ορθό μικροσκόπιο Nikon Eclipse 80 με τεχνική αντίθεσης φάσεως και τρεις φακούς με μεγέθυνση 100x, 200x και 1000x. Στο μικροσκόπιο ήταν συνδεδεμένο με ηλεκτροκίνητη τράπεζα (Marzhaner Tango 3-axis) με κίνηση στους άξονες x και y και έγχρωμη ψηφιακή κάμερα μικροσκοπίας Lumenera Infinity 1-3c με ανάλυση εικόνας 2048 x 1536 pixel και 24 bit. Επίσης το μικροσκόπιο ήταν συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows και το λογισμικό Image-Pro plus (Media Cybernetics) που είναι κατάλληλο για ανάλυση και μορφομετρία εικόνων.

Η μέθοδος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνων που αναπτύχθηκε με σκοπό την καταγραφή των μορφολογικών χαρακτηριστικών των κροκίδων με αυτοματοποιημένο τρόπο θα αναλυθεί εκτενώς στο κεφάλαιο 4-1.



Εικόνα 3-9: Σύστημα Η/Υ και μικροσκοπίου

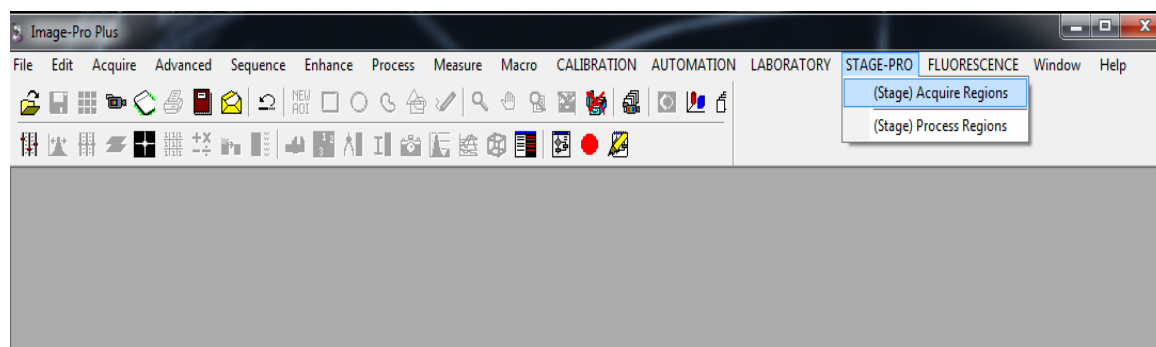
4.1 Ανάπτυξη της μεθόδου καταγραφής των μορφολογικών χαρακτηριστικών των κροκίδων μέσω ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη μίας μεθόδου ανάλυσης και επεξεργασίας της μικροσκοπικής εικόνας ενός δείγματος ενεργού ιλύος με σκοπό την καταμέτρηση των κροκίδων και τον υπολογισμό διαφόρων μορφολογικών τους παραμέτρων.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η καταγραφή των κροκίδων μέσω ανάλυσης εικόνας διενεργήθηκε με το λογισμικό image pro plus. Με τη χρησιμοποίηση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic αναπτύχθηκε η εφαρμογή μέτρησης των κροκίδων η οποία διενεργούνται σε δύο στάδια: Το πρώτο στάδιο αφορούσε την ψηφιακή αρχειοθέτηση των πλακιδίων στο σκληρό δίσκο και το δεύτερο στάδιο την καταμέτρηση των κροκίδων.

4.1.1 Ψηφιακή αρχειοθέτηση των πλακιδίων στο σκληρό δίσκο

Αρχικά, αφού αναμιχθεί καλά το δείγμα, μεταφέρεται μία σταγόνα μέσω ενός σιφωνίου στην επιφάνεια ενός πλακιδίου με διαστάσεις 25 mm x 75mm. Στη συνέχεια τοποθετείται στην επιφάνεια του πλακιδίου μία καλυπτρίδα με προσοχή για να μην δημιουργηθούν φυσαλίδες αέρα και χωρίς να ασκηθεί πίεση προκειμένου να μην υποστούν αλλοίωση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κροκίδων. Στη συνέχεια το πλακίδιο τοποθετείται στο μικροσκόπιο όπου επιλέγουμε τη τεχνική αντίθεσης φάσεως και το φακό με μεγέθυνση 100x.



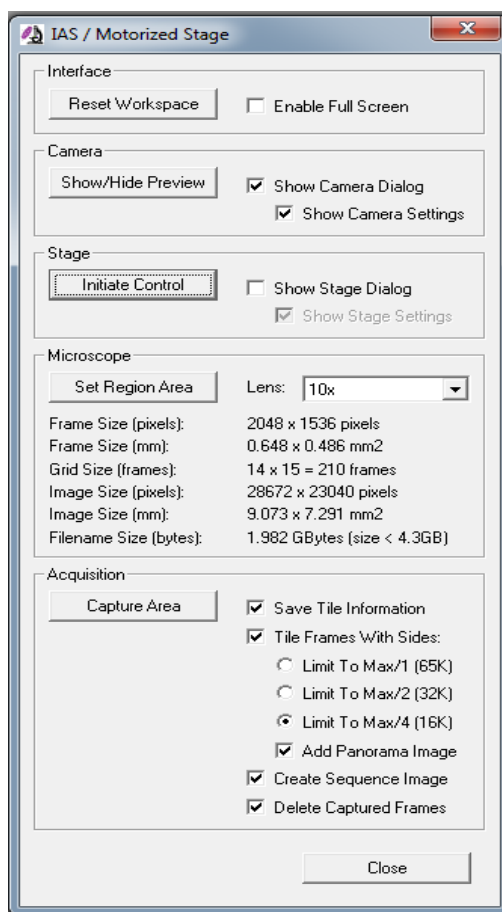
Εικόνα 4-1: Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού ανάλυσης εικόνας

Το δεύτερο βήμα είναι η έναρξη του προγράμματος ανάλυσης εικόνας. Αρχικά επιλέγεται η εντολή STAGE-PRO και στη συνέχεια η υπορουτίνα Acquire Regions (εικόνα 4-1) η οποία εμφανίζει τον παραθυρικό διάλογο σάρωσης της περιοχής (εικόνα 4-2). Πριν την σάρωση του πλακιδίου πραγματοποιείται η διόρθωση του φόντου του μικροσκοπίου στην εικόνα (Background Correction) έτσι ώστε να αποδοθεί το μέγιστο ποιοτικό φως και χρώμα και η βαθμονόμηση της φωτεινότητας

της εικόνας (White Balance) κατά την οποία η κάμερα βαθμονομεί τα κανάλια έγχρωμης εικόνας (κόκκινο, πράσινο, μπλε) για να έχουμε λευκό υπόβαθρο.

Η διόρθωση του φόντου μιας εικόνας (Background Correction) πραγματοποιείται εξαρχής ξεχωριστά για κάθε φακό (σφάλμα διάχυσης του φωτός από τον συμπυκνωτή του μικροσκοπίου) με σκοπό τη βαθμονόμηση της κάμερας έτσι ώστε να βλέπει ομοιόμορφο λευκό φως σε όλο το πεδίο της, ανεξάρτητα της διάχυσης του συμπυκνωτή. Η εφαρμογή αποθηκεύει μία «κενή» (background) εικόνα και την χρησιμοποιεί σε όλες τις μετέπειτα εικόνες του χρήστη για να διορθώσει το σφάλμα αυτό.

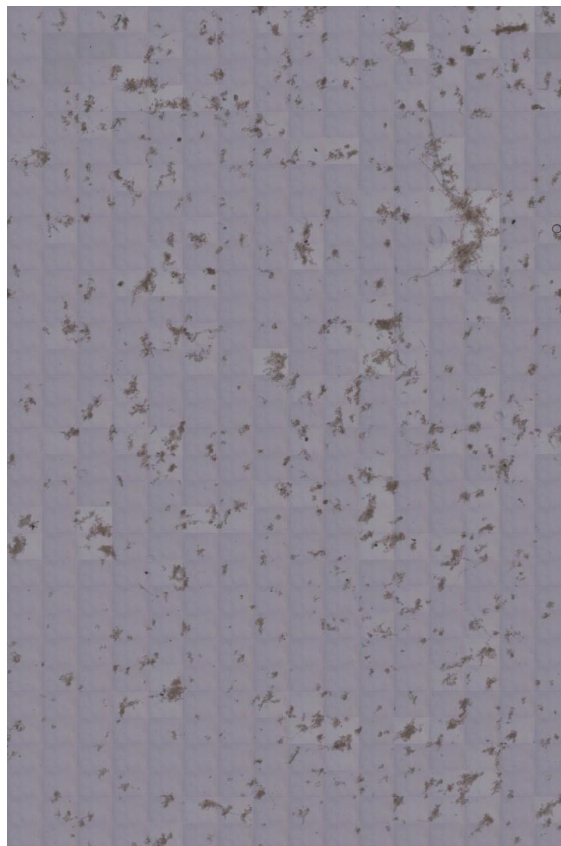
Αρχικά, στη ρουτίνα του παραθυρικού διαλόγου μόνο οι τρεις πρώτες εντολές είναι ενεργοποιημένες. Με τη σειρά επιλέγουμε πρώτα την εντολή Reset workspace που κλείνει ανοιχτά παράθυρα που δεν είναι απαραίτητα, μετά την εντολή show/ hide preview που ξεκινά ή σταματά την λειτουργία της κάμερας και στο τέλος την εντολή initiate control η οποία εμφανίζει ένα νέο παραθυρικό διάλογο. Στο διάλογο αυτό επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί το χειριστήριο της τράπεζας για τον καθορισμό της συνολικής περιοχής που είναι διαθέσιμη για σάρωση από την κάτω αριστερή γωνία προς την πάνω δεξιά γωνία του πλακιδίου.



Εικόνα 4-2: Παραθυρικός διάλογος της ψηφιακής χαρτογράφησης των πλακιδίων

Στη συνέχεια μόλις καθοριστεί η συνολική περιοχή σάρωσης ενεργοποιούνται και οι υπόλοιπες δύο εντολές του παραθυρικού διαλόγου (εικόνα 4-2). Με την εντολή Set Region Area μπορούμε να επιλέξουμε με το χειριστήριο της τράπεζας την περιοχή του πλακιδίου που επιθυμούμε να σαρώσουμε. Ύστερα από μία σειρά δοκιμών καταλήξαμε να επιλέγεται σε κάθε εξέταση δείγματος μία περιοχή 1 cm^2 από το κέντρο του πλακιδίου καθώς για περιοχή μεγαλύτερη του 1 cm^2 το δείγμα αρχίζει να στεγνώνει. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δείγμα στεγνώνει πιο γρήγορα στις άκρες, καθώς η σταγόνα έπεφτε στο κέντρο και μετά άπλωνε στο πλακίδιο κατά τη τοποθέτηση της καλυπτρίδας με αποτέλεσμα στις άκρες του πλακιδίου το πάχος του δείγματος να είναι μικρότερο από ότι στο κέντρο του.

Τέλος με την εντολή Capture Area πραγματοποιείται η αυτόματη σάρωση της επιλεγμένης περιοχής, από την οποία προκύπτουν γύρω στις 500 σειριακές εικόνες. Μετά την λήψη των εικόνων ακολουθεί η αυτόματη συνένωση τους με στόχο την δημιουργία ενός χάρτη που αντιπροσωπεύει την περιοχή που σαρώθηκε. Λόγω της ιδιαιτερότητας των Windows (32 bit) να μην μπορούν να δημιουργήσουν αρχεία μεγαλύτερα των 4 GB αλλά και να διαβάσουν εικόνα με ανάλυση μεγαλύτερη των 32000×32000 pixel το σύστημα ελέγχει το μέγεθος και τη τελική ανάλυση του χάρτη και αυτόματα κάνει μορφοποίηση των ιδιοτήτων του προκειμένου να μην υπερβεί αυτά τα όρια. Η εικόνα του χάρτη αποθηκεύεται σε μορφή TIFF στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή από όπου μπορεί να ανακτηθεί για την περαιτέρω επεξεργασία της.

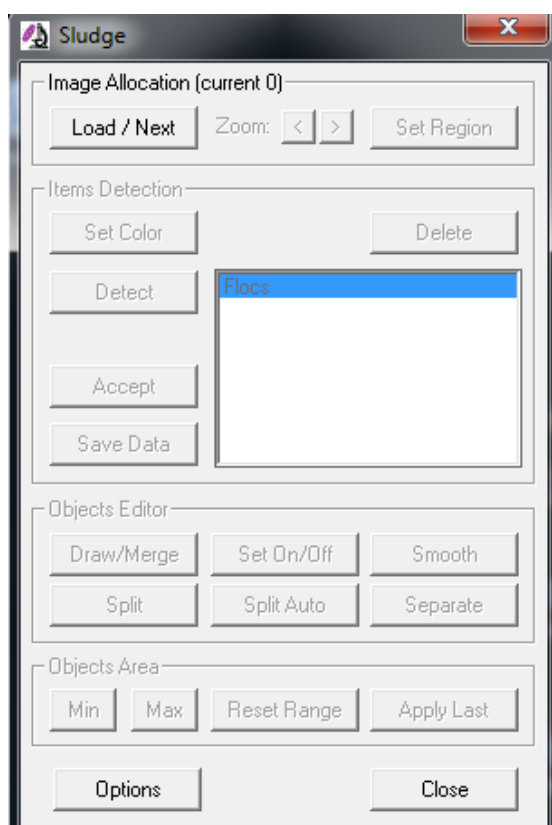


Εικόνα 4-3: Παράδειγμα χάρτη που προέκυψε ύστερα από σάρωση δείγματος της Ψυττάλειας.

Συνολικά σαρώνονται τρία πλακίδια για κάθε δείγμα προκειμένου να έχουμε πιο αντικειμενική εικόνα του δείγματος.

4.1.2 Καταμέτρηση κροκίδων

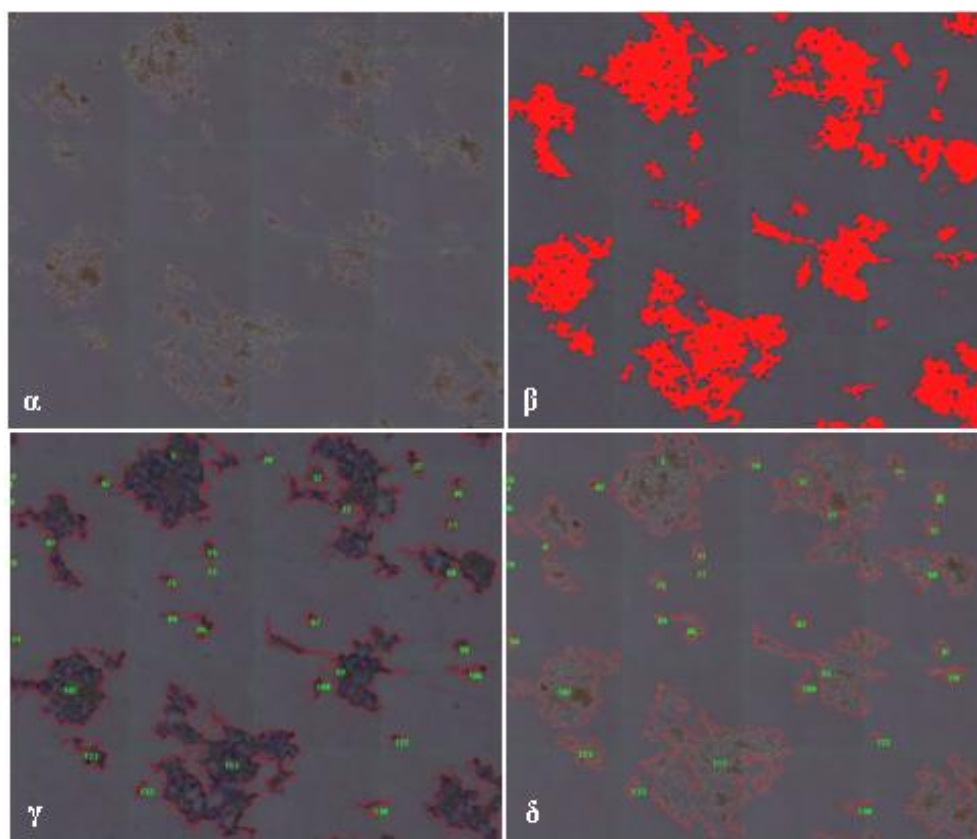
Η καταμέτρηση των κροκίδων πραγματοποιείται από τη δεύτερη υπορουτίνα της εφαρμογής που ονομάζεται process regions (εικόνα 4-1) και εμφανίζει τον παραθυρικό διάλογο που παρουσιάζεται στην εικόνα 4-4. Αφού επιλεγεί με την εντολή Load/Next από τον σκληρό δίσκο η αποθηκευμένη εικόνα που επιθυμούμε να επεξεργαστούμε, ενεργοποιούνται οι υπόλοιπες εντολές. Με την εντολή Set Color γίνεται από τον χρήστη ο καθορισμός του χρώματος των κροκίδων βάση του οποίου πραγματοποιείται από την εφαρμογή ο εντοπισμός των αντικειμένων. Αυτό το βήμα γίνεται κάθε φορά από το χρήστη καθώς το χρώμα των κροκίδων είναι διαφορετικό από δείγμα σε δείγμα.



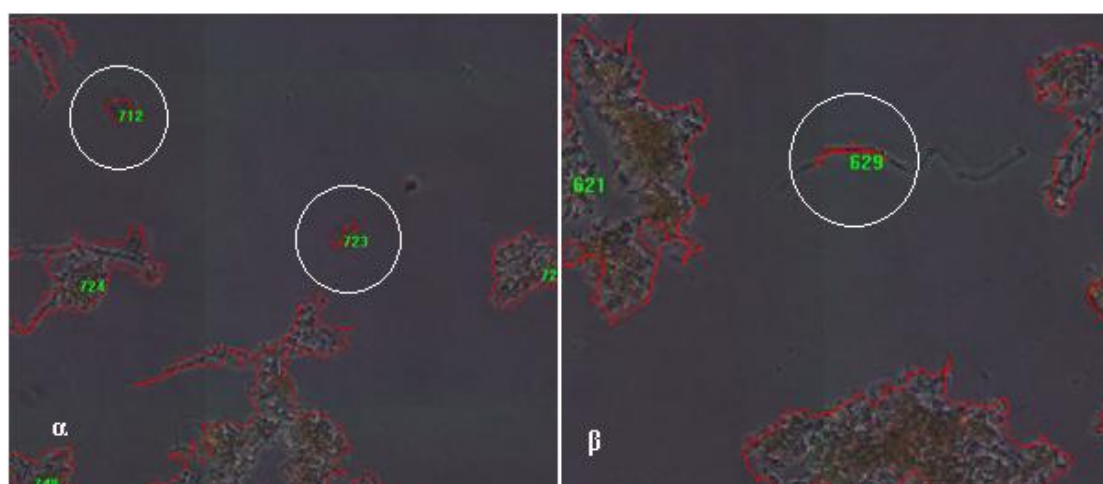
Εικόνα 4-4: Παραθυρικός διάλογος της υπορουτίνας καταμέτρησης κροκίδων

Με κατάλληλα φίλτρα η εφαρμογή βελτιώνει αυτόματα την αντίθεση της εικόνας και κάνει πιο ευδιάκριτα τα όρια κάθε κροκίδας προκειμένου να ανιχνεύσει τα αντικείμενα. Στη συνέχεια γίνεται ο εντοπισμός των κροκίδων με την εντολή Detect. Ένα κόκκινο περίγραμμα δημιουργείται γύρω από κάθε κροκίδα και εισάγεται ο αριθμός μέτρησης που τις αντιπροσωπεύει. Για να είναι πιο εύκολη η περεταίρω

επεξεργασία της εικόνας πραγματοποιείται ο εντοπισμός των κροκίδων πάνω στην πρωτότυπη εικόνα (Εικόνα 4-5).



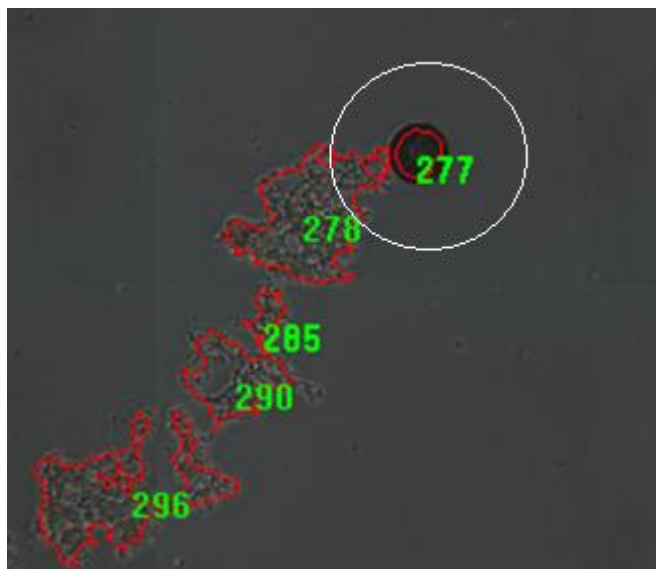
Εικόνα 4-5: α) Πρωτότυπη εικόνα, β) καθορισμός του χρώματος των κροκίδων, γ) εφαρμογή φίλτρου και εντοπισμός των κροκίδων δ) εντοπισμός των κροκίδων στην πρωτότυπη εικόνα



Εικόνα 4-6: Η εφαρμογή της εντολής set on/off για την αφαίρεση α) φυσαλίδων αέρα, β) αντικειμένου

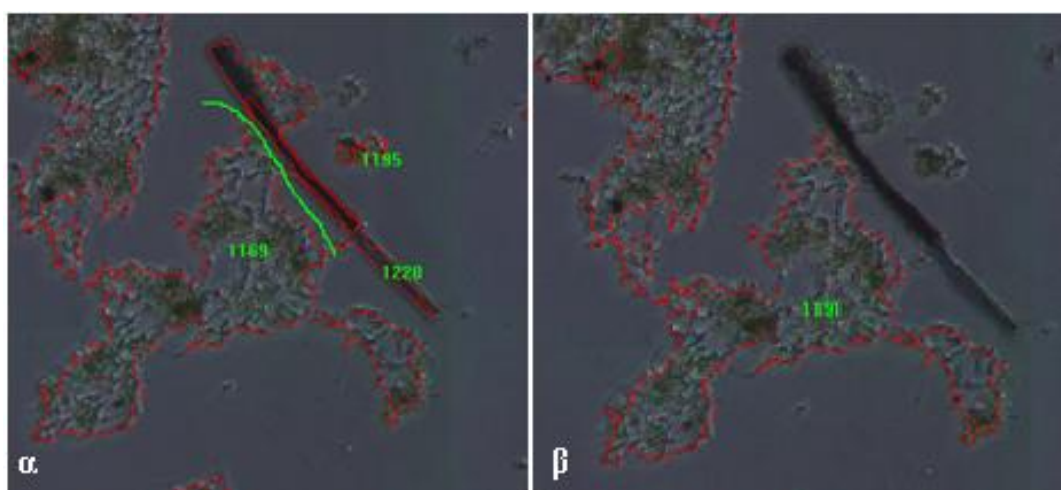
Στο επόμενο βήμα, με την εντολή zoom in γίνεται από τον χρήστη η μεγέθυνση της εικόνας (συνήθως έως 200%) για την ευκολότερη αναγνώριση των αντικειμένων. Έπειτα, με την εντολή Set on/off διενεργείται η χειροκίνητη αφαίρεση των κροκίδων

που τέμνονται από τα όρια της εικόνας καθώς και των αντικειμένων, των κηλίδων λαδιού και των φυσαλίδων αέρα που έχει εντοπίσει το πρόγραμμα ως κροκίδες (Εικόνες 4-6 και 4-7).

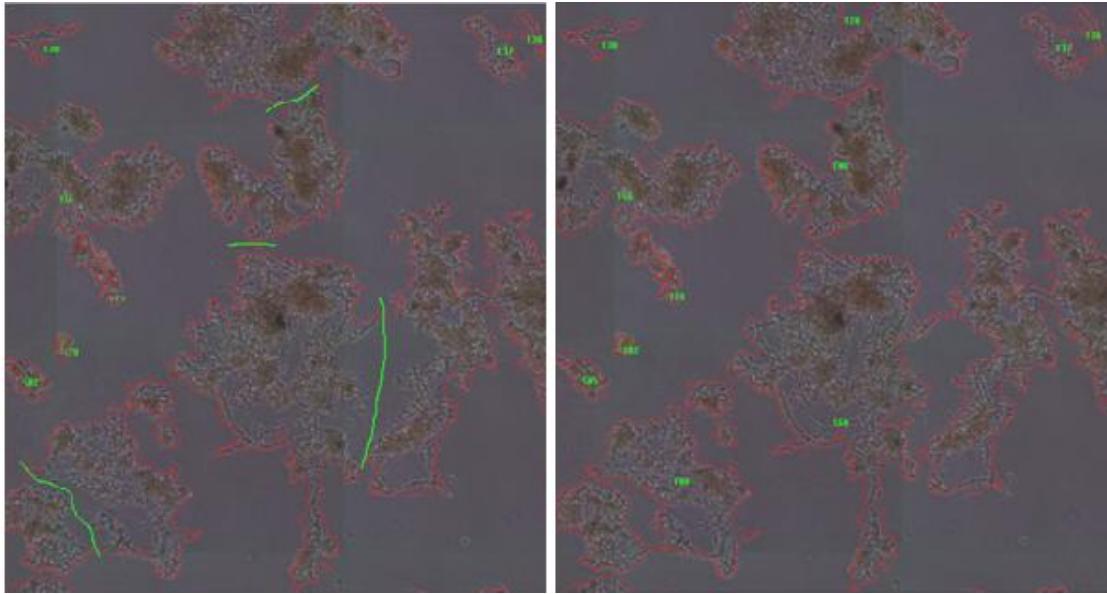


Εικόνα 4-7: Η εφαρμογή της εντολής set on/off για την αφαίρεση κηλίδας λαδιού

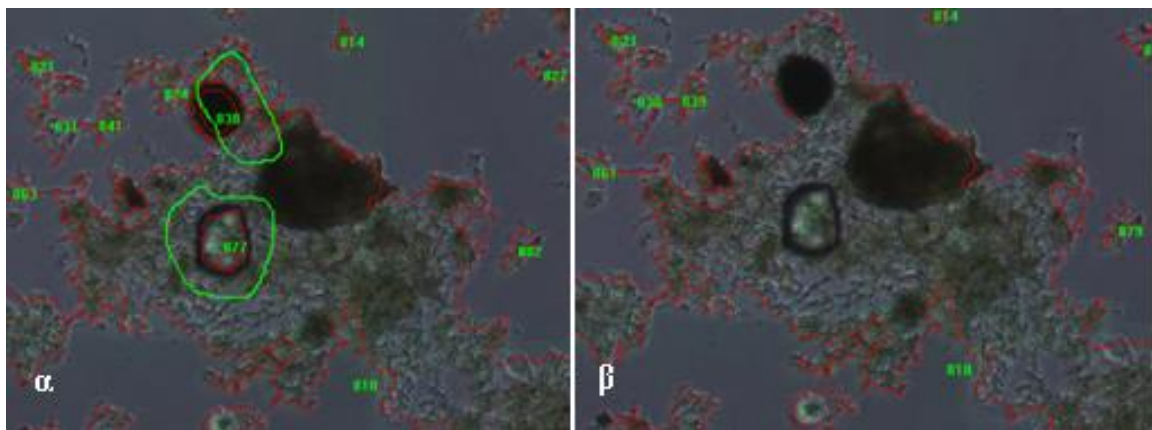
Με την εντολή Split διαχωρίζονται κροκίδες που η εφαρμογή τις έχει εκλάβει ως μία (Εικόνα 4-9) ή αφαιρούνται αντικείμενα που τα έχει ενσωματώσει στην κροκίδα (Εικόνα 4-8) ενώ με την εντολή Draw/Merge έχουμε την δυνατότητα να συνενώσουμε αντικείμενα (Εικόνα 4-10). Τέλος, με την εντολή (Min) επιλέγεται μία μικρή κροκίδα (μέγιστης διαμέτρου 50 μm) η οποία ορίζεται ως η ελάχιστη, έτσι ώστε αντικείμενα ή θραύσματα μικρότερα από αυτή να αφαιρεθούν από τα επιλεγμένα αντικείμενα.



Εικόνα 4-8: Αφαίρεση αντικειμένου με την εφαρμογή της εντολής split



Εικόνα 4-9: Διαχωρισμός των κροκίδων με την εντολή split



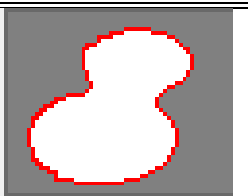
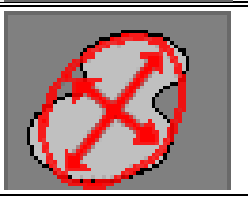
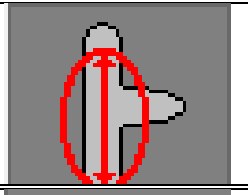
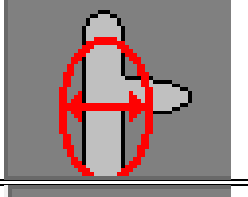
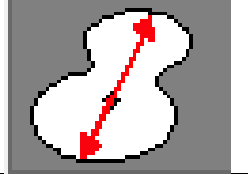
Εικόνα 4-10: Συγχώνευση αντικειμένων με την εντολή Draw/Merge.

Αφού ολοκληρωθεί αυτή η σειρά ενεργειών με τις εντολές accept και save data πραγματοποιείται από την εφαρμογή η καταμέτρηση των κροκίδων και ο προσδιορισμός των μορφολογικών τους παραμέτρων και τα αποτελέσματα εισάγονται σε ένα πρότυπο αρχείο excel το οποίο κατασκευάστηκε έτσι ώστε να περιέχει στατιστικούς τύπους (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ελάχιστο, μέγιστο) και γραφήματα για όλες τις παραμέτρους. Στη συνέχεια πραγματοποιείται με την ίδια σειρά ενεργειών η καταμέτρηση των κροκίδων στη δεύτερη και στη τρίτη εικόνα του δείγματος, τα αποτελέσματα των οποίων εισάγονται στο ίδιο φύλλο excel. Για κάθε δείγμα συνολικά καταμετρώνται τουλάχιστον 1000 κροκίδες.

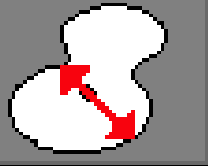
Η συγκεκριμένη εφαρμογή μας δίνει την δυνατότητα να μετρήσουμε μία πληθώρα μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλέχθηκαν οι εξής παράμετροι: Επιφάνεια, περίμετρος, aspect ratio, μέγιστος άξονας, ελάχιστος άξονας, μέγιστη διάμετρος, ελάχιστη διάμετρος, μέση διάμετρος

και καμπυλότητα. Στον πίνακα 4-1 κάθε παράμετρος επεξηγείται και ταυτόχρονα αποδίδεται σχηματικά.

Πίνακας 4-1: Οι μορφολογικές παράμετροι που προσδιορίζονται μέσω της μεθόδου ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας.

<p>Επιφάνεια (Area)</p>	<p>Η επιφάνεια του αντικειμένου. Δεν περιλαμβάνει την επιφάνεια των ανοιγμάτων.</p>	
<p>Περίμετρος</p>	<p>Το μήκος του περιγράμματος του αντικειμένου</p>	
<p>Aspect ratio</p>	<p>Ο λόγος του μέγιστου άξονα ως προς τον ελάχιστο άξονα της έλλειψης που ισοδυναμεί στο αντικείμενο. Όσο πιο κοντά στη μονάδα, τόσο πιο κυκλική είναι η κροκίδα.</p>	
<p>Μέγιστος άξονας</p>	<p>Το μήκος του μέγιστου άξονα της σχηματιζόμενης έλλειψης γύρω από το αντικείμενο</p>	
<p>Ελάχιστος άξονας</p>	<p>Το μήκος του ελάχιστου άξονα της σχηματιζόμενης έλλειψης γύρω από το αντικείμενο</p>	
<p>Μέγιστη διάμετρος</p>	<p>Το μήκος της μακρύτερης γραμμής που ενώνει δύο σημεία του αντικειμένου και ταυτόχρονα διέρχεται από το κέντρο.</p>	
<p>Μέση διάμετρος</p>	<p>Ο μέσος όρος των διαμέτρων που μετρώνται ανά 2 μοίρες και ταυτόχρονα διέρχονται από το κέντρο του αντικειμένου</p>	

Πίνακας 4-1 (συνέχεια)

Ελάχιστη διάμετρος	Η μικρότερη γραμμή που ενώνει δύο σημεία του αντικειμένου και ταυτόχρονα διέρχεται από το κέντρο	
Καμπυλότητα	<p>Το μέτρο που περιγράφει πόσο σφαιρικό είναι το αντικείμενο (η αναμενόμενη περίμετρος του αντικειμένου αν ήταν σφαιρικό, προς την πραγματική του περίμετρο). Ένα σφαιρικό αντικείμενο θα έχει καμπυλότητα 1, ενώ ανομοιομορφα αντικείμενα έχουν μεγαλύτερες τιμές. Προκύπτει από τη σχέση:</p> $\text{Καμπυλότητα} = \frac{\text{περίμετρος}^2}{4 \cdot \pi \cdot \text{Επιφάνεια}} \quad (4-1)$	

4.2 Έλεγχος και επικύρωση της μεθόδου

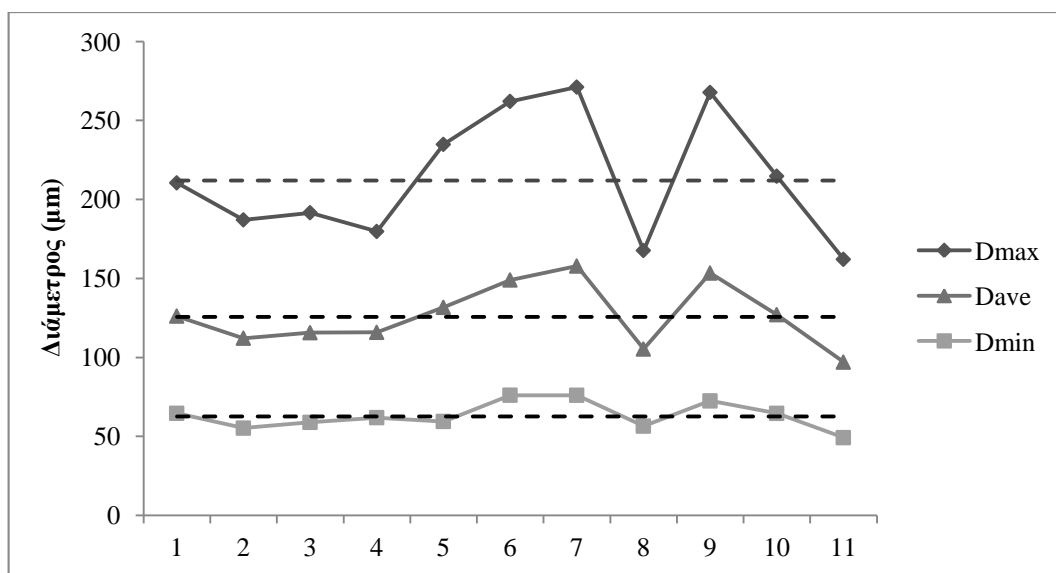
Μία σειρά 11 μετρήσεων για το ίδιο δείγμα πραγματοποιήθηκε με σκοπό την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της επαναληψιμότητας της μεθόδου. Το δείγμα επρόκειτο για ανάμεικτο υγρό από την δεξαμενή αερισμού του βιολογικού καθαρισμού της Ε.Ε.Λ Ψυττάλειας. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν για κάθε κροκίδα η μέγιστη διάμετρος, η μέση διάμετρος, η ελάχιστη διάμετρος, το aspect ratio, η επιφάνεια και η καμπυλότητα. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το διάστημα εμπιστοσύνης (με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) κάθε παραμέτρου. Συνολικά καταγράφηκαν 5702 κροκίδες.

Πίνακας 4-2: Μέσες τιμές της μέγιστης, της ελάχιστης και της μέσης διαμέτρου για κάθε μέτρηση και για το σύνολο τους

Μέτρηση	Μέγιστη διάμετρος (μm)	Ελάχιστη διάμετρος (μm)	Μέση διάμετρος (μm)
1	210,5	64,6	126,2
2	187,1	55,3	112,2
3	191,6	58,9	115,7
4	179,7	61,9	115,9
5	234,9	59,5	131,7
6	262,1	76,1	149
7	271,1	76,1	157,8
8	167,7	56,5	105,3
9	267,8	72,5	153,4
10	214,7	64,6	127,1
11	162,1	49,2	97
Σύνολο	211,9	62,7	125,7

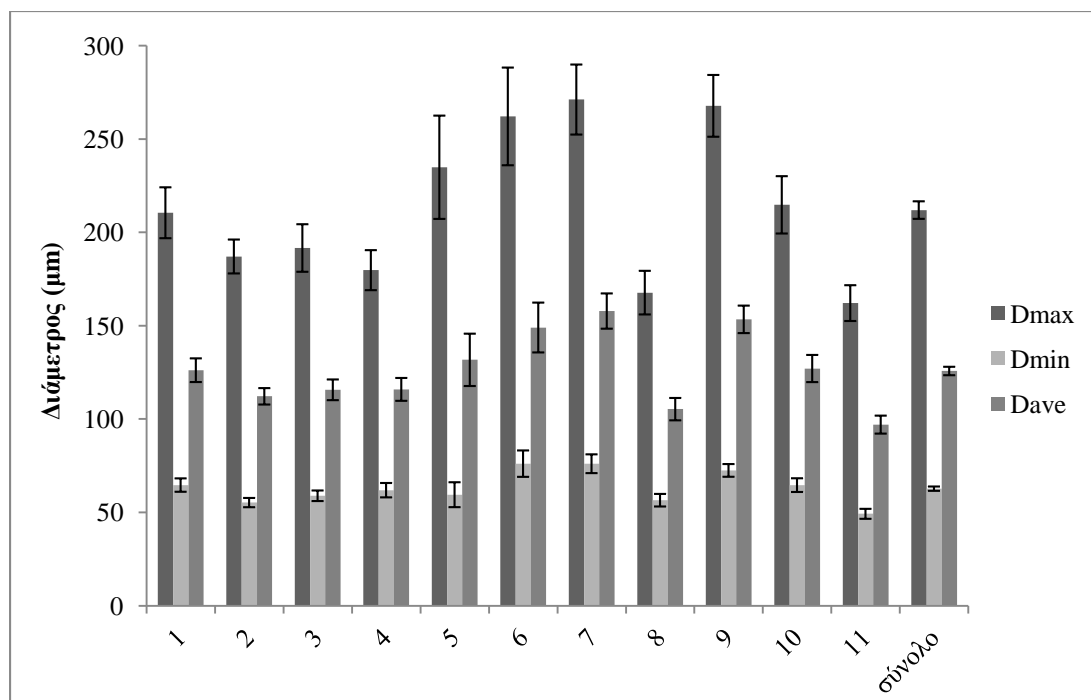
Στον πίνακα 4-2 παρουσιάζονται η μέση τιμή της μέγιστης, της ελάχιστης και της μέσης διαμέτρου για κάθε μέτρηση και το σύνολο των μετρήσεων, ενώ στο σχήμα 4-1 οι τιμές αυτές απεικονίζονται διαγραμματικά με σκοπό την σύγκριση τους. Παρατηρούμε ότι η μέση και η ελάχιστη διάμετρος για κάθε μέτρηση παρουσιάζουν σχετικά μικρές αποκλίσεις από την μέση τιμή που αντιστοιχεί στο σύνολο των μετρήσεων. Αντίθετα, η μέγιστη διάμετρος για κάθε μέτρηση παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις από το σύνολο των μετρήσεων.

Συγκρίνοντας τις τρεις παραμέτρους μεταξύ τους παρατηρούμε ότι και οι τρεις διάμετροι παρουσιάζουν τις ίδιες διακυμάνσεις. Για παράδειγμα στη μέτρηση 8 έτυχε οι κροκίδες να έχουν μικρότερο μέγεθος σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις και αυτό αποτυπώνεται από την πτώση των τιμών και των τριών παραμέτρων.



Σχήμα 4-1: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της μέγιστης (Dmax), της ελάχιστης (Dmin) και της μέσης διαμέτρου (Dave) για κάθε μέτρηση. Η διακεκομμένη γραμμή εκφράζει τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων

Στο επόμενο γράφημα απεικονίζονται η μέση τιμή της μέγιστης, της ελάχιστης και της μέσης διαμέτρου και το διάστημα εμπιστοσύνης για κάθε μέτρηση και το σύνολο των μετρήσεων. Είναι φανερό, ότι όσο αυξάνεται το εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης τόσο αυξάνεται το περιθώριο σφάλματος, ή αλλιώς, μειώνεται η ακρίβεια της εκτίμησης. Παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές η μέση και η ελάχιστη διάμετρος παρουσιάζουν μικρά διαστήματα εμπιστοσύνης δηλαδή η ακρίβεια της μεθόδου φαίνεται να είναι αρκετά μεγάλη. Επιπλέον, το διάστημα εμπιστοσύνης που αντιστοιχεί στο σύνολο των μετρήσεων είναι πολύ μικρό και στις τρεις παραμέτρους και αυτό βέβαια υποδεικνύει πως η ακρίβεια της μέτρησης είναι μεγάλη μιας και τα περιθώρια σφάλματος είναι αρκετά μικρά.



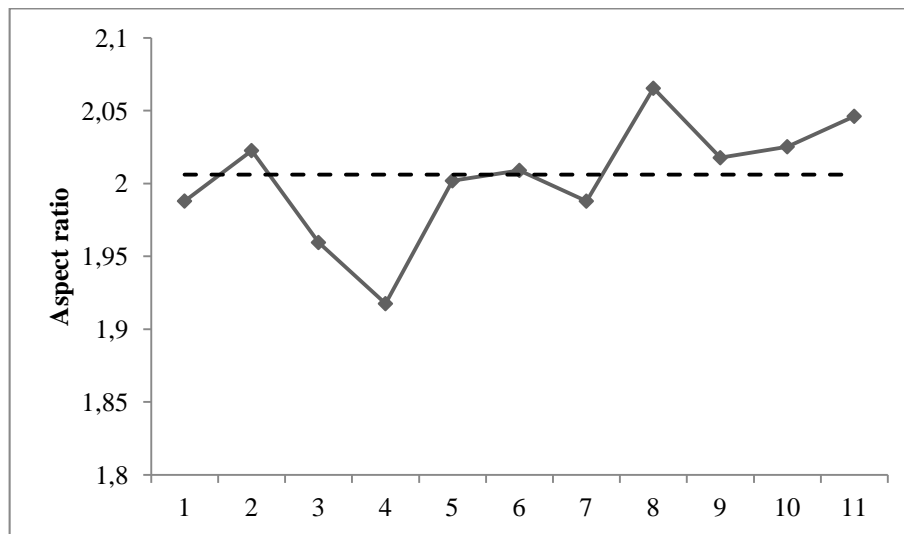
Σχήμα 4-2: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της μέγιστης (Dmax), της ελάχιστης (Dmin) και της μέσης διαμέτρου (Dave) για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων και το διάστημα εμπιστοσύνης.

Πίνακας 4-3: Μέσες τιμές του aspect ratio, της επιφάνειας και της καμπυλότητας των κροκίδων για κάθε πλακίδιο και για το σύνολο τους

Μέτρηση	Aspect ratio	Επιφάνεια (μm ²)	Καμπυλότητα
1	1,99	15578	3,80
2	2,02	12221	4,40
3	1,96	15572	3,75
4	1,92	12985	3,59
5	2,00	25075	5,50
6	2,01	27062	5,25
7	1,99	31194	4,47
8	2,07	12315	3,32
9	2,02	29343	4,56
10	2,03	20555	3,79
11	2,05	10211	4,19
Σύνολο	2,01	19008	4,15

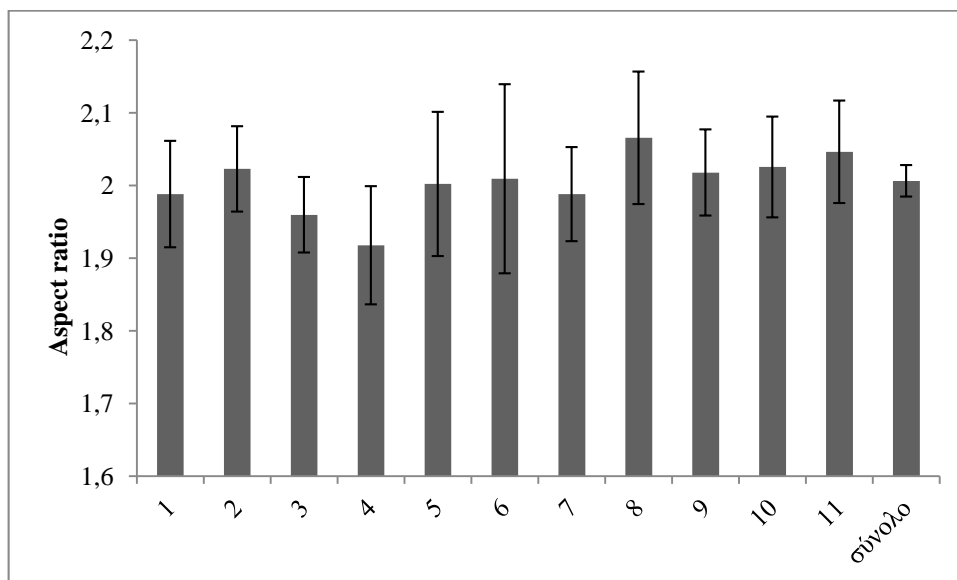
Στον πίνακα 4-3 παρουσιάζονται η μέση τιμή του aspect ratio, της επιφάνειας και της καμπυλότητας για κάθε μέτρηση και το σύνολο των μετρήσεων. Στο σχήμα 4-3 απεικονίζεται διαγραμματικά η μέση τιμή του aspect ratio των κροκίδων για κάθε

μέτρηση. Παρατηρούμε ότι για την πλειοψηφία των τιμών υπάρχει σύγκλιση με τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων.



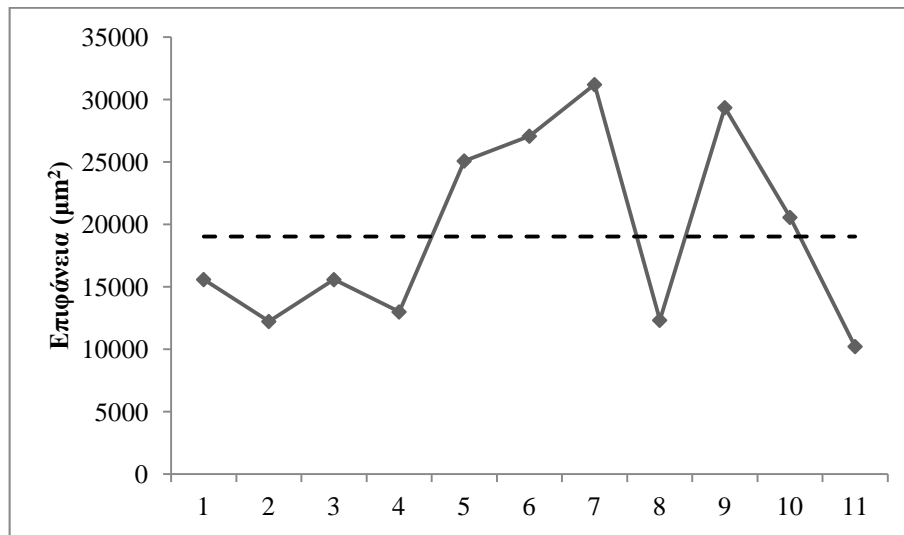
Σχήμα 4-3: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών του aspect ratio των κροκίδων για κάθε μέτρηση. Η διακεκομμένη γραμμή εκφράζει τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η μέση τιμή του aspect ratio των κροκίδων και το διάστημα εμπιστοσύνης για κάθε μέτρηση και το σύνολο των μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι παρουσιάζονται σχετικά μεγάλα περιθώρια σφάλματος εκτός από την περίπτωση του συνόλου των μετρήσεων και από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όταν το μέγεθος του δείγματος είναι μεγάλο αυξάνεται και η ακρίβεια της μεθόδου.

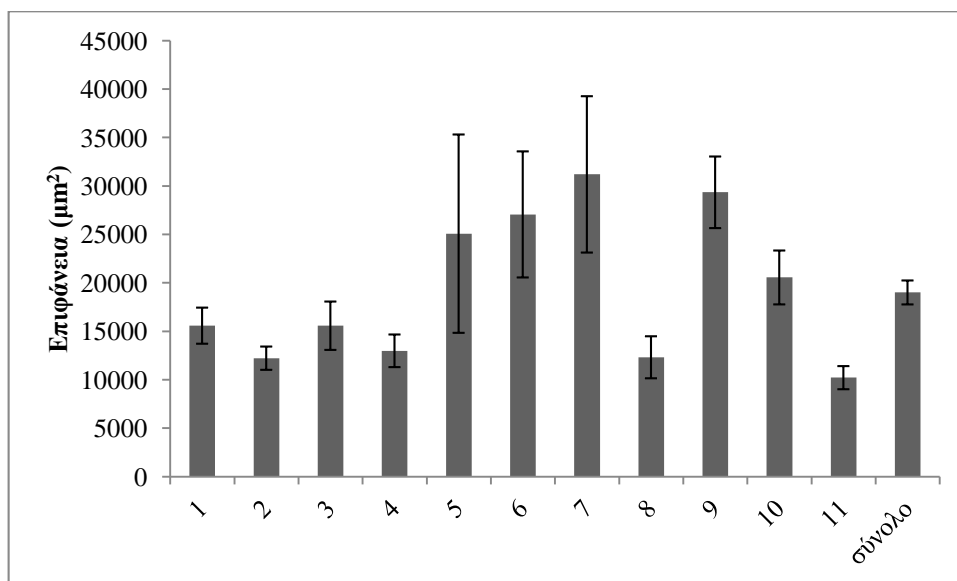


Σχήμα 4-4: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών του aspect ratio των κροκίδων για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων και το διάστημα εμπιστοσύνης.

Στο σχήμα 4-5 απεικονίζεται διαγραμματικά η μέση τιμή της επιφάνειας για κάθε μέτρηση. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν αρκετές διακυμάνσεις από τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων. Βέβαια τα περιθώρια σφάλματος για την πλειοψηφία των μετρήσεων είναι αρκετά μικρά (σχήμα 4-6). Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν στην ύπαρξη πολύ μεγάλων κροκίδων η επιφάνεια των οποίων επηρεάζει το αποτέλεσμα της παραμέτρου.

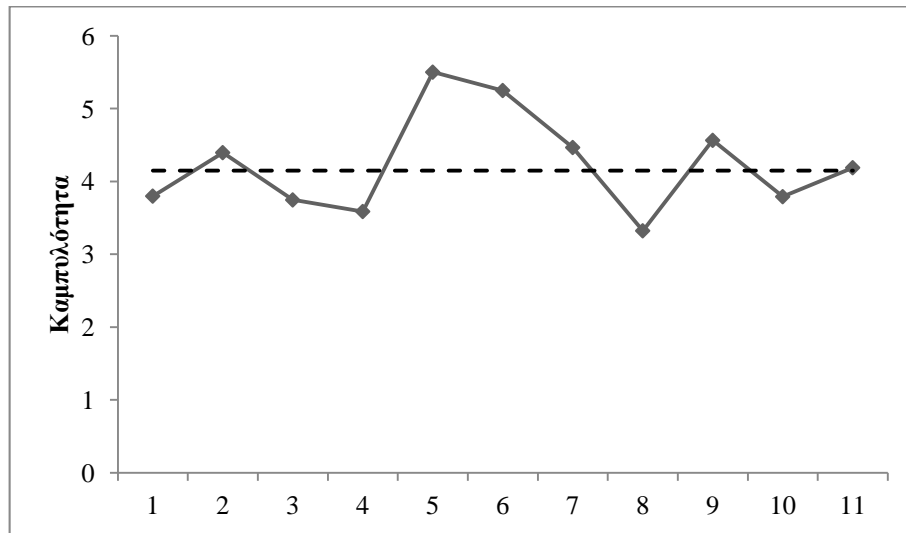


Σχήμα 4-5: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της επιφάνειας των κροκίδων για κάθε μέτρηση. Η διακεκομμένη γραμμή εκφράζει τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων

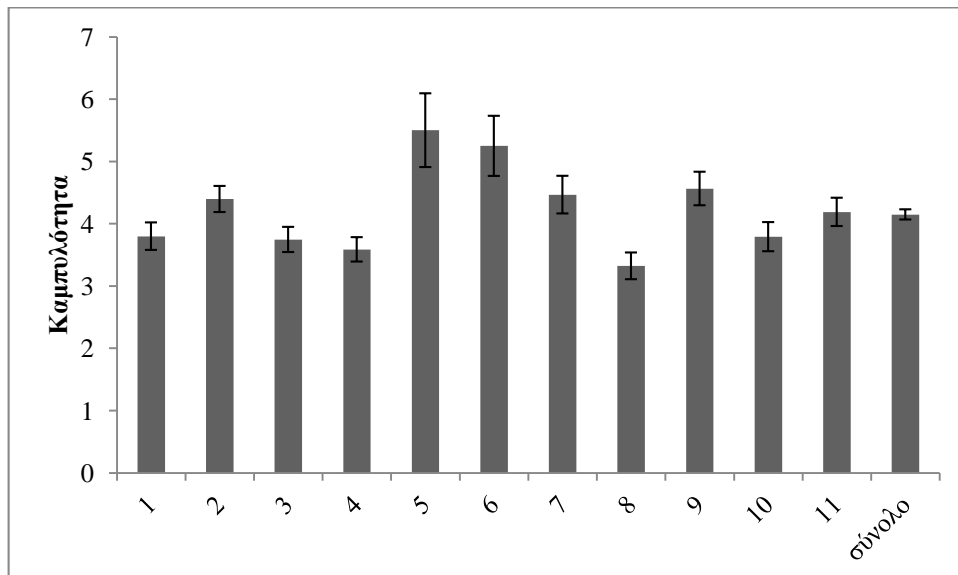


Σχήμα 4-6: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της επιφάνειας των κροκίδων για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων και το διάστημα εμπιστοσύνης.

Στο σχήμα 4-7 απεικονίζεται διαγραμματικά η μέση τιμή της καμπυλότητας για κάθε μέτρηση. Παρατηρούμε η πλειοψηφία των μετρήσεων συγκλίνει με τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων. Αντίστοιχα στο σχήμα 4-8 παρατηρούμε ότι τα περιθώρια σφάλματος για την πλειοψηφία των τιμών είναι αρκετά μικρά, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της μεθόδου.



Σχήμα 4-7: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της καμπυλότητας των κροκίδων για κάθε μέτρηση. Η διακεκομμένη γραμμή εκφράζει τη μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων



Σχήμα 4-8: Διαγραμματική απεικόνιση των μέσων τιμών της καμπυλότητας των κροκίδων για κάθε μέτρηση και για το σύνολο των μετρήσεων και το διάστημα εμπιστοσύνης.

Πίνακας 4-4: Ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση την μέση διάμετρο τους

Μέτρηση	Μέση διάμετρος		
	Μικρές (< 150 μm)	Μεσαίες (150 - 500 μm)	Μεγάλες (> 500 μm)
1	70,54%	29,46%	0,00%
2	78,36%	21,64%	0,00%
3	74,34%	25,52%	0,14%
4	76,31%	23,69%	0,00%
5	71,94%	26,88%	1,19%
6	64,22%	34,80%	0,98%
7	58,67%	40,31%	1,02%
8	81,65%	18,14%	0,21%
9	84,92%	15,08%	0,00%
10	62,20%	36,35%	1,44%
11	70,02%	29,51%	0,47%
Σύνολο	72,22%	27,31%	0,47%

Πίνακας 4-5: Ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση την μέγιστη διάμετρο τους

Μέτρηση	Μέγιστη διάμετρος		
	Μικρές (< 150 μm)	Μεσαίες (150 - 500 μm)	Μεγάλες (> 500 μm)
1	42,82%	52,97%	4,21%
2	52,05%	44,88%	3,07%
3	52,41%	42,90%	4,69%
4	49,59%	48,21%	2,20%
5	43,87%	48,22%	7,91%
6	34,80%	53,92%	11,27%
7	33,84%	54,42%	11,73%
8	58,35%	39,18%	2,47%
9	59,13%	39,03%	1,84%
10	37,93%	49,74%	12,34%
11	49,92%	41,76%	8,32%
Σύνολο	47,58%	46,07%	6,35%

Στους πίνακες 4-4 και 4-5 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων με βάση τη μέση και την μέγιστη διάμετρο τους. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι σε γενικές γραμμές και στους δύο πίνακες η μέθοδος εξήγαγε παρόμοια ποσοστά

κατηγοριοποίησης των κροκίδων. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι όταν η διάκριση έγινε με βάση τη μέση διάμετρο προέκυψαν κατά προσέγγιση 70% μικρές κροκίδες και 30% μεσαίες κροκίδες, ενώ δεν προέκυψαν καθόλου μεγάλες κροκίδες. Αντίθετα, όταν η διάκριση έγινε με βάση τη μέγιστη διάμετρο, τότε τα ποσοστά που προέκυψαν ήταν κατά προσέγγιση 50% μικρές κροκίδες, 45% μεσαίες και 5% μεγάλες. Αυτή η διαφοροποίηση στα ποσοστά είναι λογική καθώς η μέγιστη διάμετρος παίρνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη μέση διάμετρο.

Ανακεφαλαιώνοντας, από αυτή τη σειρά των μετρήσεων στο ίδιο δείγμα ανάμεικτου υγρού, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος διαθέτει επαναληψιμότητα καθώς αν εξαιρέσουμε την επιφάνεια όλες οι υπόλοιπες παράμετροι δεν παρουσίαζαν σημαντικές αποκλίσεις. Επιπλέον στην πλειοψηφία των παραμέτρων τα περιθώρια σφάλματος ήταν αρκετά μικρά, ειδικά στην περίπτωση του συνόλου των μετρήσεων, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι η μέθοδος παρουσιάζει αρκετά μεγάλη ακρίβεια.

Επιπλέον, αν λάβουμε υπόψη ότι ο αριθμός των κροκίδων που καταμετρώνται και αναλύονται σε κάθε σειρά μετρήσεων είναι αρκετά υψηλός, μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την αξιοπιστία της μεθόδου και ότι μας επιτρέπει να παίρνουμε ασφαλή συμπεράσματα για τη ποιότητα του εκάστοτε δείγματος.

4.3 Προφίλ των δειγμάτων

Τα δείγματα ανάμεικτου υγρού που αναλύθηκαν με τη μέθοδο ανάλυσης εικόνας προέρχονταν από συστήματα με διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες και διέφεραν ως προς τα χαρακτηριστικά στη σύστασή τους. Συγκεκριμένα, τα δείγματα προέρχονταν από 5 εγκαταστάσεις επεξεργασίας ενεργού ιλύος στην Ελλάδα (Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας, Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας, Ε.Ε.Λ. Λαμίας, Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου και Ε.Ε.Λ. Κορίνθου), από δύο διαφορετικά πιλοτικά συστήματα (shortcut, ANNAMOX) στην εγκατάσταση επεξεργασίας ιλύος της Βερόνας και από τρία πιλοτικά συστήματα διαλείποντος έργου (SBR) απομάκρυνσης εξασθενούς χρωμίου (αναερόβιος αντιδραστήρας με 3 κύκλους τροφοδοσίας, ανοξικός – αναερόβιος αντιδραστήρας με 3 κύκλους τροφοδοσίας, αναερόβιος αντιδραστήρας με 1 κύκλο τροφοδοσίας) που λειτουργούν στα πλαίσια των διπλωματικών εργασιών της Κορίνας Μπερτόλη και της Κωσταντίνας Κατζάβελου στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π..

Πριν από κάθε καταμέτρηση των κροκίδων προηγούνταν ο προσδιορισμός των αιωρούμενων στερών (MLSS) και ο δείκτης DSVI. Επιπλέον διενεργούνταν μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων ως προς τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κροκίδων και το είδος και τη ποικιλία των νηματοειδών βακτηρίων. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν ήταν ο δείκτης νηματοειδών (Filament Index), η γεφύρωση, η ύπαρξη ανοιχτής δομής, το μέγεθος της κροκίδας, το σχήμα της κροκίδας, η ύπαρξη οργανικών ινών και ανόργανων αντικειμένων, η ύπαρξη ελεύθερων κυττάρων, zooglea και σπειροχετών (spirochete).

Το μέγεθος των κροκίδων ταξινομήθηκε με βάση τη διάμετρο τους και συγκεκριμένα σύμφωνα με τον Jenkins D. et al. (1993), ως μικρές ορίζονται οι κροκίδες με διάμετρο κάτω από 150 μm, ως μεσαίες οι κροκίδες με διάμετρο από 150 μm έως 500 μm και ως μεγάλες οι κροκίδες με διάμετρο πάνω από 500 μm.

Η αφθονία των νηματοειδών μικροοργανισμών βαθμονομήθηκε με βάση τη κλίμακα από 1-5 όπου το 1 αντιπροσωπεύει κανένα νηματοειδή μικροοργανισμό και το 5 υπερβολική ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών σύμφωνα με τους Eikelboom και van Bijssen (1981).

Πίνακας 4-6: Μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων ανάμεικτου υγρού από τις Ε.Ε.Α. ως προς τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους.

Σύστημα	Ε.Ε.Α. ΨΥΤΤΑΛΕΙΑΣ	Ε.Ε.Α. ΛΟΥΤΡΑΚΙΟΥ	Ε.Ε.Α. ΚΟΡΙΝΘΟΥ	Ε.Ε.Α. ΛΑΜΙΑΣ	Ε.Ε.Α. ΠΡΕΒΕΖΑΣ
Μέρος δειγματοληψίας	Δ.Α.	Δ.Α.	Δ.Α.	Δ.Α.	Δ.Α.
Ημερομηνία	19/2/2013	14/3/2013	14/3/2013	7/3/2013	8/4/2013
DSVI	240	165	247	135	90
MLSS (mg/l)	3400	9190	6800	4440	5110
F.I.	4	4	5	4,5	3
Γεφύρωση	ΑΡΚΕΤΟ	ΠΟΛΥ	ΠΟΛΥ	ΠΟΛΥ	ΑΡΚΕΤΟ
Ανοιχτή δομή	40%	30%	30%	70%	60%
Μέγεθος κροκίδων	ΜΙΚΡΕΣ: 70% ΜΕΣΑΙΕΣ: 30% ΜΕΓΑΛΕΣ: ΟΧΙ	ΜΙΚΡΕΣ: 100% ΜΕΣΑΙΕΣ: ΟΧΙ ΜΕΓΑΛΕΣ: ΟΧΙ	ΜΙΚΡΕΣ: 100% ΜΕΣΑΙΕΣ: ΟΧΙ ΜΕΓΑΛΕΣ: ΟΧΙ	ΜΙΚΡΕΣ: 30% ΜΕΣΑΙΕΣ: 70% ΜΕΓΑΛΕΣ: ΟΧΙ	ΜΙΚΡΕΣ: 60% ΜΕΣΑΙΕΣ: 40% ΜΕΓΑΛΕΣ: ΟΧΙ
Μορφολογία κροκίδων	ΜΙΚΡΕΣ: 50% ΑΚΑΝΟΝ 50% ΣΦΑΙΡΙΚΕΣ	ΜΙΚΡΕΣ: ΣΦΑΙΡΙΚΕΣ	ΜΙΚΡΕΣ: ΣΦΑΙΡΙΚΕΣ	ΜΙΚΡΕΣ: ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΕΣ	ΜΙΚΡΕΣ: 80% ΑΚΑΝΟΝ 20% ΣΦΑΙΡΙΚΕΣ
	ΜΕΣΑΙΕΣ: 70% ΑΚΑΝΟΝ 30% ΣΦΑΙΡΙΚΕΣ	ΜΕΣΑΙΕΣ:	ΜΕΣΑΙΕΣ:	ΜΕΣΑΙΕΣ: ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΕΣ	ΜΕΣΑΙΕΣ: ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΕΣ
	ΜΕΓΑΛΕΣ:	ΜΕΓΑΛΕΣ:	ΜΕΓΑΛΕΣ:	ΜΕΓΑΛΕΣ:	ΜΕΓΑΛΕΣ:
Ανόργανα μέρη	OIL DROPS, CARBON	CARBON	CARBON	OIL DROPS, CARBON	OIL DROPS, CARBON, IRON
Οργανικές ίνες	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Ελεύθερα κύτταρα	ΛΙΓΑ	ΑΡΚΕΤΑ	ΑΡΚΕΤΑ	ΜΕΡΙΚΑ	ΛΙΓΑ
Zooglea	ΑΡΚΕΤΗ	ΑΡΚΕΤΗ	ΑΡΚΕΤΗ	ΑΡΚΕΤΗ	ΑΡΚΕΤΗ
Spirochaete	ΠΟΛΛΟΙ	ΠΟΛΛΟΙ	ΠΟΛΛΟΙ	ΑΡΚΕΤΟΙ	ΑΡΚΕΤΟΙ

Πίνακας 4-7: Κατάταξη (rank) των νηματοειδών βακτηριδίων και βαθμονόμηση της ανάπτυξης τους (abundance) στο ανάμεικτο υγρό των Ε.Ε.Λ.

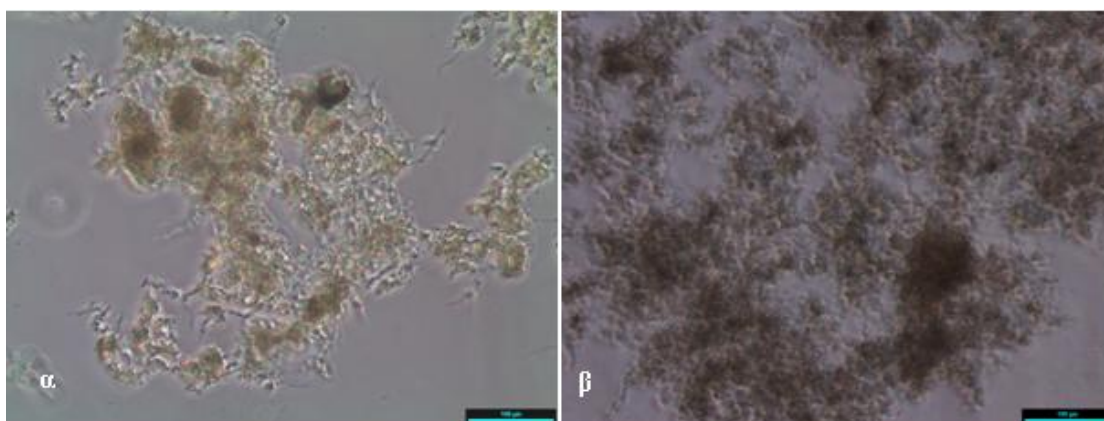
FILAMENT	Ε.Ε.Λ. ΨΥΤΤΑΛΕΙΑΣ		Ε.Ε.Λ. ΛΟΥΤΡΑΚΙΟΥ		Ε.Ε.Λ. ΚΟΡΙΝΘΟΥ		Ε.Ε.Λ. ΛΑΜΙΑΣ		Ε.Ε.Λ. ΠΡΕΒΕΖΑΣ	
	RANK	ABUND	RANK	ABUND	RANK	ABUND	RANK	ABUND	RANK	ABUND
<i>M. Parvicella</i>	1	3,5	2	3,5			5	1	1	3
<i>Cordona</i>	5	1,5			1	5	4	1,5	2	2,5
<i>T0092</i>	2	3	1	4,5	1	5	1	4,5	5	1
<i>T0041</i>	4	2,5	4	2	2	4,5	2	3,5	4	2
<i>T021N</i>	7	0,5	4	2	4	2,5	4	1,5		
<i>T1701</i>										
<i>T0803</i>										
<i>T0691</i>										
<i>S. Natans</i>										
<i>H. Hydrosis</i>	7	0,5	5	1,5	4	2,5				
<i>T0675</i>	6	1			5	2	5	1	3	2
<i>N. Limicola</i>	3	2,5	5	1,5	3	3	2	3,5	2	2,5
<i>Thiothrix</i>			3	2,5	1	5	3	3	5	1
<i>T1851</i>	1	3,5	5	1,5						
<i>Άλλοι</i>										

Τα συστήματα διαλείποντος έργου (SBR) απομάκρυνσης χρωμίου δεν παρουσίαζαν ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών. Ο πρώτος αντιδραστήρας (1) είχε 3 κύκλους τροφοδοσίας και αναερόβιες συνθήκες. Η μικροσκοπική εξέταση του δείγματος έδειξε ότι είχε κατά προσέγγιση 60% μικρές κροκίδες από τις οποίες το 80% ήταν σφαιρικές και κλειστές και το 20% ακανόνιστες και ανοιχτές. Οι υπόλοιπες ήταν μεσαίες, ακανόνιστες και ανοιχτές. Ο δεύτερος αντιδραστήρας (2) είχε 3 κύκλους τροφοδοσίας και εναλλαγή ανοξικών και αναερόβιων συνθηκών. Από τη μικροσκοπική εξέταση προέκυψε ότι όλες οι κροκίδες ήταν μικρές, ακανόνιστες και ανοιχτές και υπήρχαν αρκετά ελεύθερα κύτταρα και λίγη zooglea. Ο τρίτος αντιδραστήρας (3) είχε 1 κύκλο τροφοδοσίας και εναλλαγή ανοξικών και αναερόβιων συνθηκών. Από τη μικροσκοπική εξέταση του δείγματος προέκυψε ότι όλες οι κροκίδες ήταν μικρές με κατά προσέγγιση το 70% να είναι σφαιρικές και κλειστές και το 30% ακανόνιστες και ανοιχτές και υπήρχαν αρκετά ελεύθερα κύτταρα.

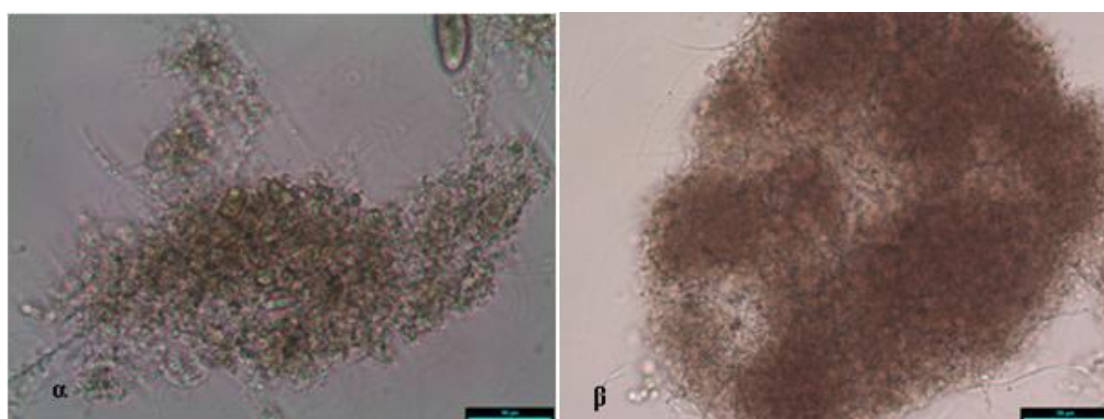
Το πιλοτικό σύστημα Annamox πρόκειται για ένα σύστημα απομάκρυνσης αμμωνιακών από τα λύματα. Ειδικότερα αποτελείται από ένα αντιδραστήρα διαλείποντος έργου στον οποίο λαμβάνουν χώρα δύο διεργασίες: Στο πρώτο βήμα υπό αερόβιες συνθήκες συντελείται από τα αυτοτροφικά βακτήρια η μερική νιτροποίηση των αμμωνιακών σε νιτρικά. Στο δεύτερο βήμα τα υπολειπόμενα αμμωνιακά και τα νιτρικά μετατρέπονται σε νιτρικό άζωτο από τα βακτήρια Annamox. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση του δείγματος προέκυψε πως το σύστημα έχει δείκτη νηματοειδών 4, αρκετή γεφύρωση και 40 % ανοιχτή δομή. Όσον αφορά στο μέγεθος των κροκίδων, το 65% ήταν μικρές από τις οποίες το 70% ήταν ακανόνιστες και το 30% σφαιρικές, ενώ οι υπόλοιπες ήταν μεσαίες και ακανόνιστες. Από την αναγνώριση των νηματοειδών μικροοργανισμών προέκυψε ότι κυρίαρχοι είναι οι *type 0092* και

Thiothrix spp. (βαθμός 3,5) ακολουθεί ο *N. limicola I, II, III* (βαθμός 3) και τέλος στο δείγμα φαίνεται να παρουσιάζεται ο *Type 021N* και ο *H. Hydrossis*.

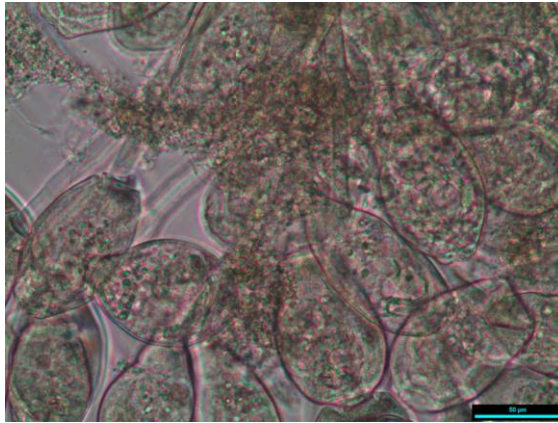
Το πιλοτικό σύστημα shortcut της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων της Βερόνας είναι ένα σύστημα που επεξεργάζεται συνθετικά αστικά λύματα τα οποία προηγουμένως έχουν υποστεί αναερόβια επεξεργασία. Δουλεύει σε χρόνο παραμονής στερεών 18 ημέρες και δουλεύει σε χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση δείγματος ανάμεικτου υγρού προέκυψε πως στο σύστημα δεν υπάρχει εμφάνιση νηματοειδών και πως επί το πλείστον οι κροκίδες αναπτύσσουν ακανόνιστη δομή. Όσον αφορά στο μέγεθος των κροκίδων, κατά προσέγγιση το 70% ήταν μεσαίες και το 30% μικρές. Τέλος το δείγμα είχε αρκετή zooglea.



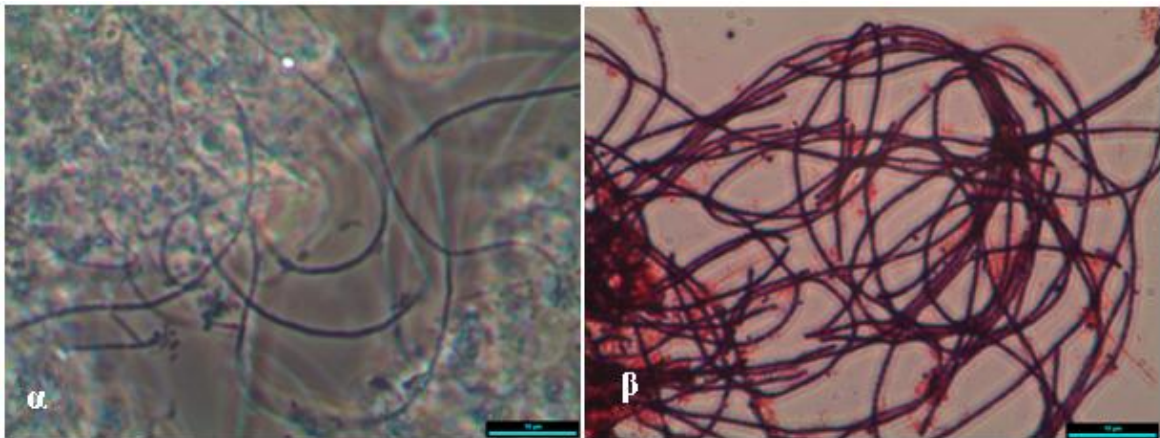
Εικόνα 4-11: α) Ανοιχτή κροκίδα. Δείγμα από την Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας β) Ανοιχτή, ακανόνιστη δομή. Δείγμα από την Ε.Ε.Λ. Λαμίας. (Μεγέθυνση 100x με τεχνική αντίθεσης φάσης, μπάρα = 100 µm)



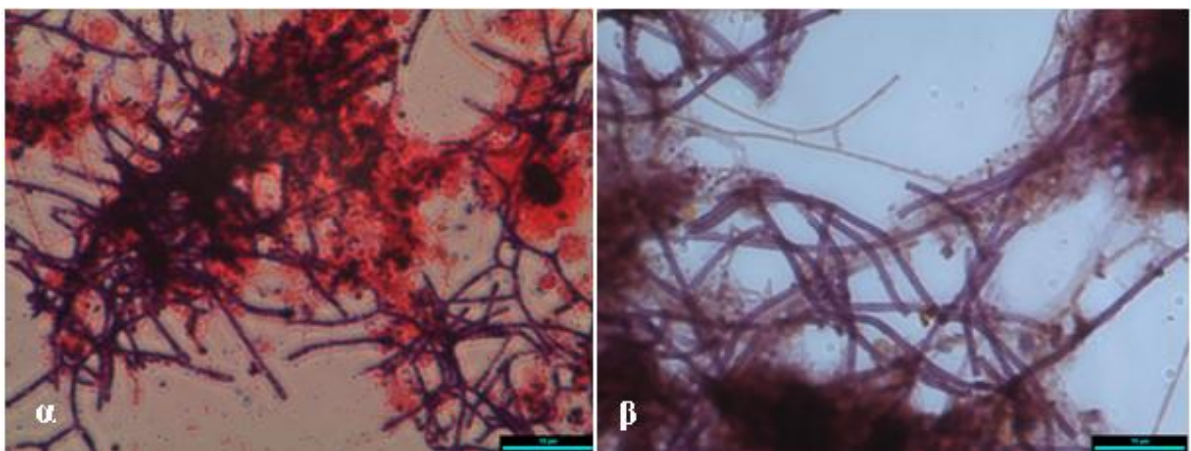
Εικόνα 4-12: Κλειστή, συμπαγής κροκίδα α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας β) Πιλοτικό ANNAMOX (Μεγέθυνση 200x με τεχνική αντίθεσης φάσης, μπάρα = 50 µm)



Εικόνα 4-13: Ανάπτυξη πρωτόζωων στο εξωτερικό της κροκίδας που οδηγούν στη δημιουργία μεγάλων κροκίδων με διαμέτρους πολύ μεγαλύτερων των 500 μm. Δείγμα από την Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας. (Μεγέθυνση 200x με τεχνική αντίθεσης φάσης, μπάρα = 50 μm)



Εικόνα 4-14: Ο κυρίαρχος νηματοειδής μικροοργανισμός στη πλειοψηφία των ελληνικών Ε.Ε.Λ. *Microthrix parvicella* από δείγμα της Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας. α) ζωντανό δείγμα με τεχνική αντίθεσης φάσης, β) με χρώση Gram στο φωτεινό πεδίο. (Μεγέθυνση 1000x, μπάρα = 10 μm)



Εικόνα 4-15: α) Ο *Cordona* με χρώση Gram από δείγμα της Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας β) ο κυρίαρχος *type 0092* με χρώση Neisser στο δείγμα της Ε.Ε.Λ. Λαμίας. (Μεγέθυνση 1000x στο φωτεινό πεδίο, μπάρα = 10 μm)

4.4 Εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης εικόνας για την εξέταση διαφόρων συστημάτων ενεργού ιλύος

4.4.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας στα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας ιλύος και στα πιλοτικά συστήματα που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με τη μέθοδο ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας προσδιορίστηκαν, για κάθε κροκίδα ξεχωριστά, παράμετροι που αφορούν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι εξής μορφολογικές παράμετροι των κροκίδων:

- ❖ Ο λόγος του μέγιστου άξονα ως προς τον ελάχιστο άξονα της σχηματιζόμενης έλλειψης γύρω από τη κροκίδα (aspect ratio ή A_s),
- ❖ Ο μέγιστος άξονας (A_x),
- ❖ Η μέγιστη διάμετρος (D_{max}),
- ❖ Η μέση διάμετρος (D_{ave}),
- ❖ Η καμπυλότητα (R) και
- ❖ Η επιφάνεια (A).

Επίσης προσδιορίστηκαν:

- ❖ Το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από τις κροκίδες (PERarea%) και
- ❖ Ο αριθμός των αντικειμένων που εντοπίζονται ανά mm^2 (OBJnum).

Στον πίνακα 4-8 παρουσιάζονται για κάθε σύστημα ο μέσος όρος των τιμών κάθε μορφολογικής παραμέτρου, οι παράμετροι PERarea% και OBJnum καθώς και η συγκέντρωση στερεών (MLSS) και ο δείκτης καθαρισιμότητας ενεργού ιλύος (DSVI) κάθε συστήματος.

Πίνακας 4-8: Η συγκέντρωση στερεών (MLSS), ο δείκτης DSVI και οι μέσες τιμές των υπολογιζόμενων παραμέτρων μέσω ανάλυσης εικόνας.

Σύστημα	MLSS (mg/l)	DSVI	As	Ax (μm)	Dmax (μm)	Dave (μm)	R	Area (μm ²)	PERarea (%)	OBJnum
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3	1510	273	1,99	282	318	174	6,43	44110	19,89%	5
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4	3890	159	2,04	224	259	141	7,18	29570	17,57%	6
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2	3400	240	2,06	192	215	118	5,42	29902	24,13%	8
Πιλοτικό shortcut 14-2	-	-	2,02	143	162	88	6,00	25969	30,87%	12
Πιλοτικό Απnamox 14-2	-	-	2,07	232	261	139	6,20	47716	27,46%	6
Πιλοτικό shortcut10-4	6060	-	1,79	182	182	115	2,74	17942	20,33%	11
Πιλοτικό Απnamox 10-4	4720	-	2,04	166	186	105	5,87	15077	18,58%	12
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	5110	90	1,98	181	203	114	5,40	20838	21,43%	10
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	4440	135	1,90	244	265	160	4,09	30408	10,63%	3
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	4595	165	2,05	110	116	72	3,13	5799	13,35%	23
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	3430	247	2,07	114	124	74	4,02	6823	14,93%	22
Πιλοτικό SBR1	1110	-	1,90	296	324	194	3,93	41174	4,15%	1
Πιλοτικό SBR2	670	-	1,87	330	380	225	4,23	57161	1,99%	0
Πιλοτικό SBR3	590	-	1,90	253	282	176	3,10	44658	1,02%	0

Πίνακας 4-9: Ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση την μέση διάμετρο τους

Σύστημα	Μέση διάμετρος		
	Μικρές (<150 μm)	Μεσαίες (150-500 μm)	Μεγάλες (>500 μm)
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3	80,93%	16,09%	2,98%
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4	60,69%	35,01%	4,30%
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2	71,94%	25,50%	2,56%
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 14-2	88,99%	9,20%	1,81%
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 14-2	72,24%	25,00%	2,76%
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 10-4	76,18%	23,29%	0,53%
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 10-4	81,85%	17,37%	0,78%
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	78,64%	20,03%	1,33%
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	55,64%	43,79%	0,58%
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	92,60%	7,35%	0,05%
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	92,01%	7,77%	0,22%
Πιλοτικό SBR1	35,73%	63,40%	0,86%
Πιλοτικό SBR2	29,85%	69,40%	0,75%
Πιλοτικό SBR3	54,95%	42,86%	2,20%

Πίνακας 4-10: Ποσοστιαία κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση την μέγιστη διάμετρο τους

Σύστημα	Μέγιστη διάμετρος		
	Μικρές (<150 μm)	Μεσαίες (150-500 μm)	Μεγάλες (>500 μm)
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3	66,40%	24,13%	9,47%
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4	37,53%	43,75%	18,72%
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2	49,47%	37,94%	12,59%
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 14-2	75,64%	19,49%	4,87%
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 14-2	55,82%	31,86%	12,32%
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 10-4	60,47%	33,97%	5,56%
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 10-4	63,22%	30,08%	6,70%
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	61,95%	29,36%	8,69%
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	32,28%	57,25%	10,47%
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	78,18%	20,65%	1,18%
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	77,86%	20,12%	2,02%
Πιλοτικό SBR1	17,87%	64,55%	17,58%
Πιλοτικό SBR2	24,63%	46,27%	29,10%
Πιλοτικό SBR3	48,35%	30,77%	20,88%

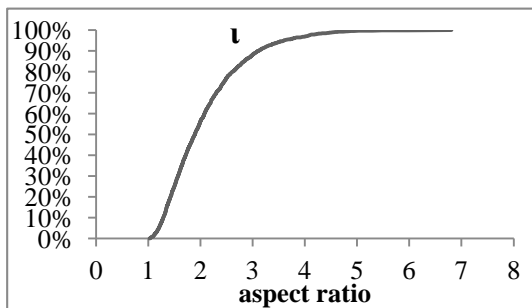
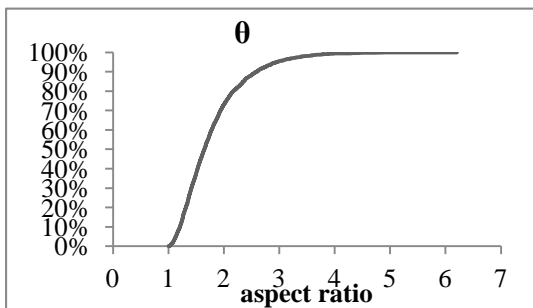
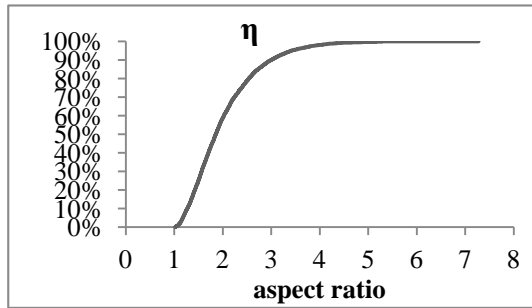
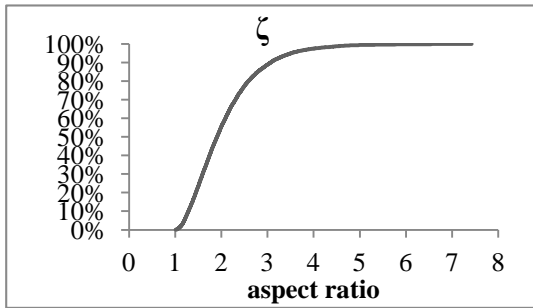
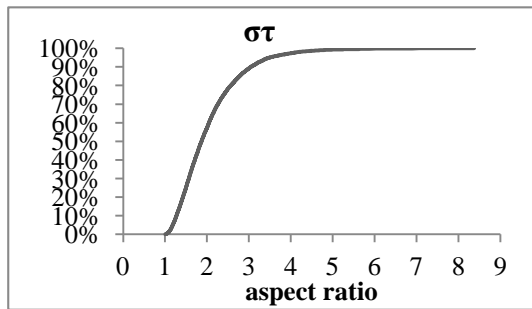
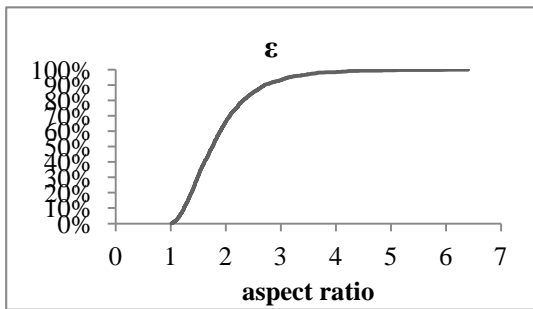
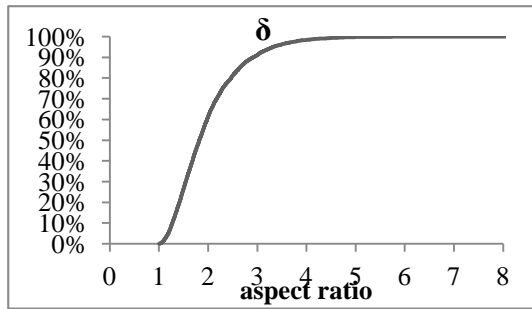
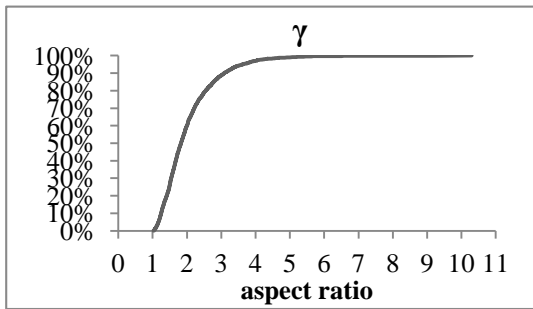
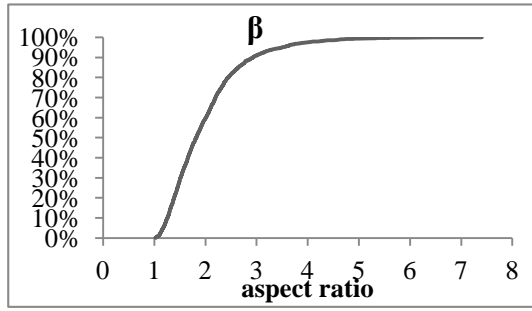
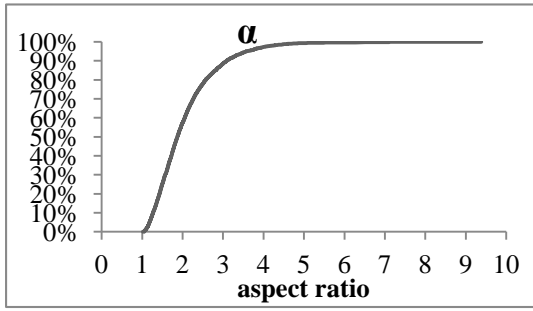
Στους πίνακες 4-9 και 4-10 πραγματοποιήθηκε η κατανομή των κροκίδων σε μικρές, μεσαίες, μεγάλες με βάση τη μέση και τη μέγιστη διάμετρο τους αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτών των δύο πινάκων παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των συστημάτων έχουν κυρίως μικρές και μεσαίες κροκίδες. Βέβαια στην περίπτωση που η κατανομή γίνεται με βάση τη μέγιστη διάμετρο τα ποσοστά για την κατηγορία των μεγάλων κροκίδων είναι εμφανώς μεγαλύτερα, που είναι αναμενόμενο καθώς οι τιμές που παίρνει η μέγιστη διάμετρος είναι μεγαλύτερες από τη μέση διάμετρο. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές τα ποσοστά κατανομής των κροκίδων συμπίπτουν με αυτά που προέκυψαν από τη μικροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων (ενότητα 4-3).

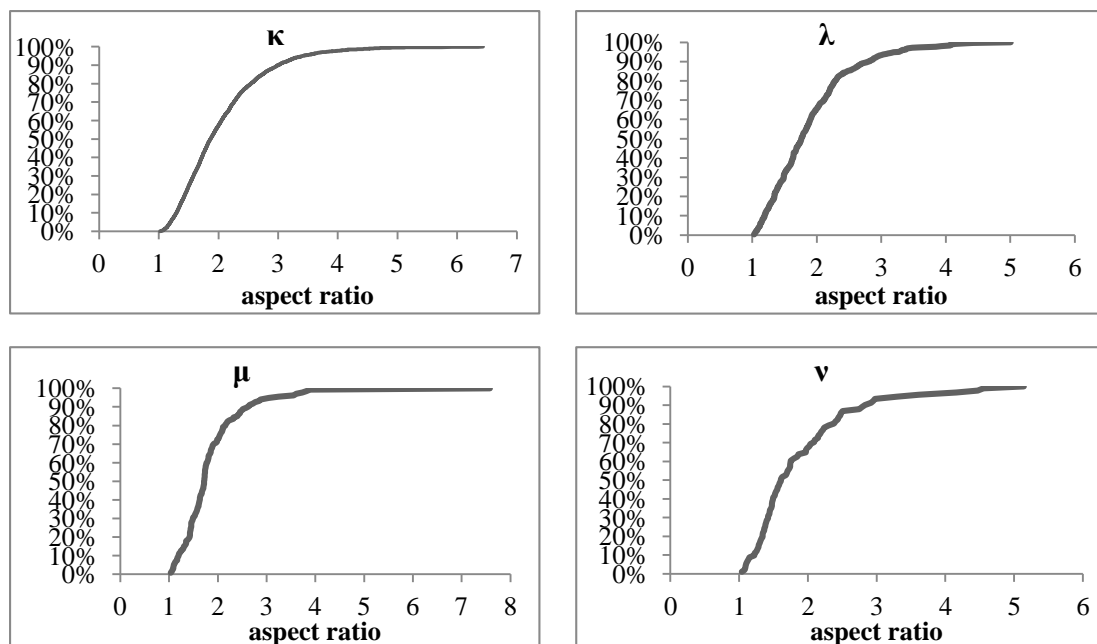
Επίσης, από τους πίνακες κατανομής παρατηρούμε ότι τα συστήματα με υψηλό δείκτη νηματοειδών όπως η Κόρινθος, το Λουτράκι, η Πρέβεζα και η Ψυττάλεια παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά σε μικρές κροκίδες σε αντίθεση με τα πιλοτικά συστήματα διαλείποντος έργου που δεν είχαν ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών και φαίνεται ότι έχουν κατά μεγαλύτερο ποσοστό μεσαίες κροκίδες. Από τα αποτελέσματα αυτά γίνεται προφανές ότι η νηματοειδής διόγκωση παρεμποδίζει τον σχηματισμό κροκίδων μεγάλου μεγέθους.

4.4.2 Αθροιστική κατανομή των αποτελεσμάτων

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται για κάθε σύστημα η αθροιστική κατανομή των τιμών κάθε παραμέτρου. Για την αποτελεσματικότερη επεξεργασία τους καταγράφηκε η τιμή της παραμέτρου που αντιστοιχεί στο 50%, στο 80% και στο 90 % των κροκίδων.

Στο σχήμα 4-9 παρουσιάζονται τα γραφήματα της αθροιστικής κατανομής του aspect ratio των κροκίδων. Στη συνέχεια στον πίνακα 4-11 παρουσιάζονται για κάθε σύστημα οι τιμές του aspect ratio που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των κροκίδων.



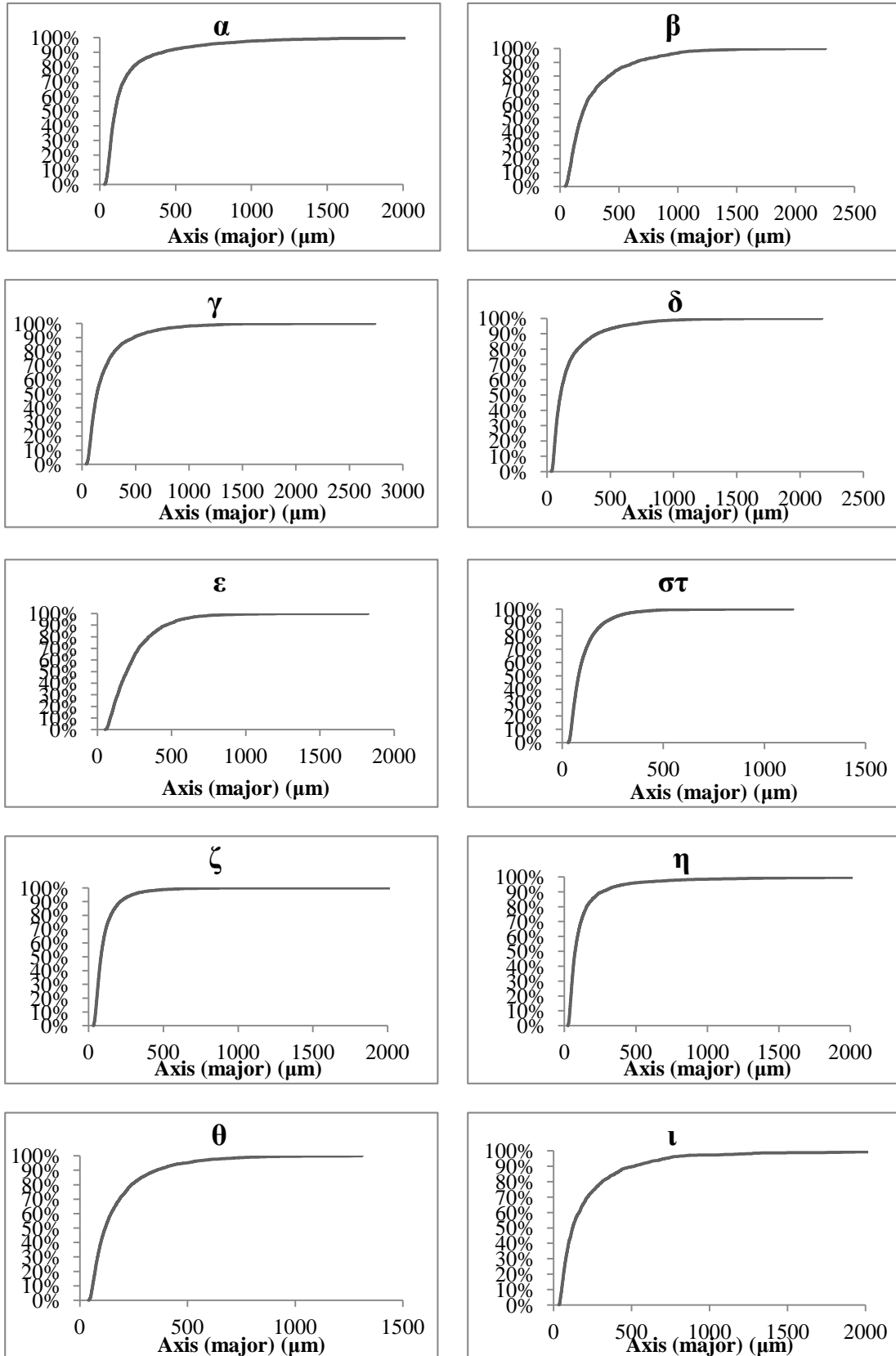


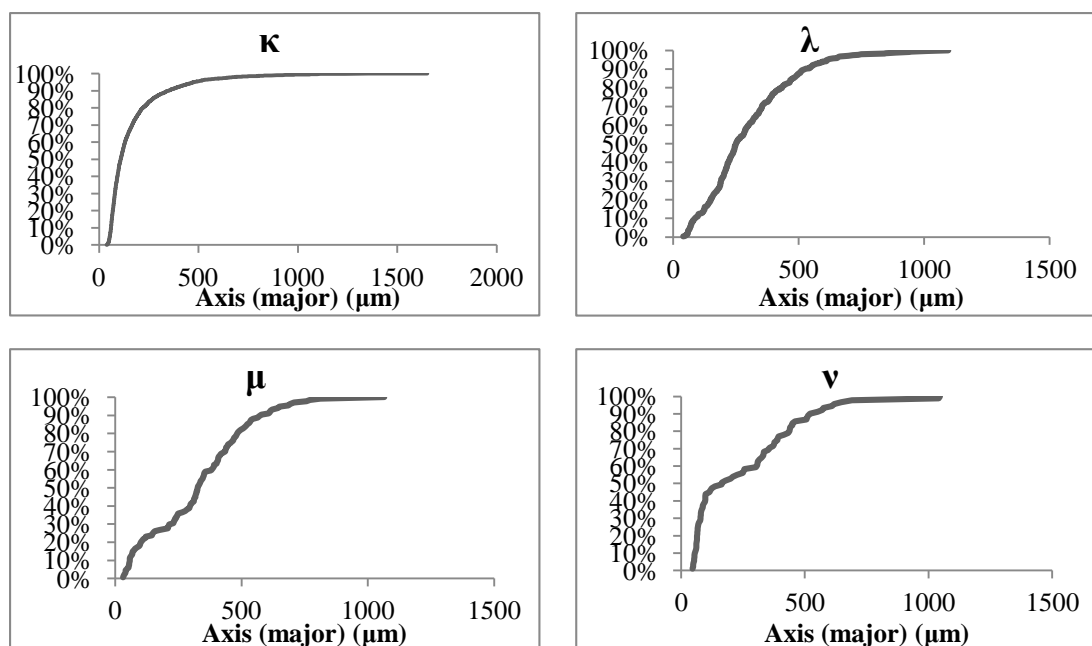
Σχήμα 4-9 (α-ν): Αθροιστική κατανομή του aspect ratio των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3, στ) Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ) Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3

Πίνακας 4-11: Για κάθε σύστημα οι τιμές του aspect ratio που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών

Σύστημα	As50	As80	As90
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 27-3	1,825	2,453	2,945
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 2-4	1,829	2,558	3,011
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 19-2	1,860	2,578	3,089
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 14-2	1,860	2,537	3,003
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 14-2	1,894	2,617	3,098
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 10-4	1,651	2,169	2,589
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 10-4	1,866	2,549	2,92
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	1,819	2,468	2,931
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	1,763	2,321	2,698
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	1,871	2,565	3,046
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	1,91	2,584	3,062
Πιλοτικό SBR1	1,761	2,282	2,789
Πιλοτικό SBR2	1,72	2,148	2,576
Πιλοτικό SBR3	1,608	2,382	2,833

Στο σχήμα 4-10 παρουσιάζονται τα γραφήματα της αθροιστικής κατανομής του μέγιστου άξονα των κροκίδων. Στη συνέχεια στον πίνακα 4-12 παρουσιάζονται για κάθε σύστημα οι τιμές του μέγιστου άξονα που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών.



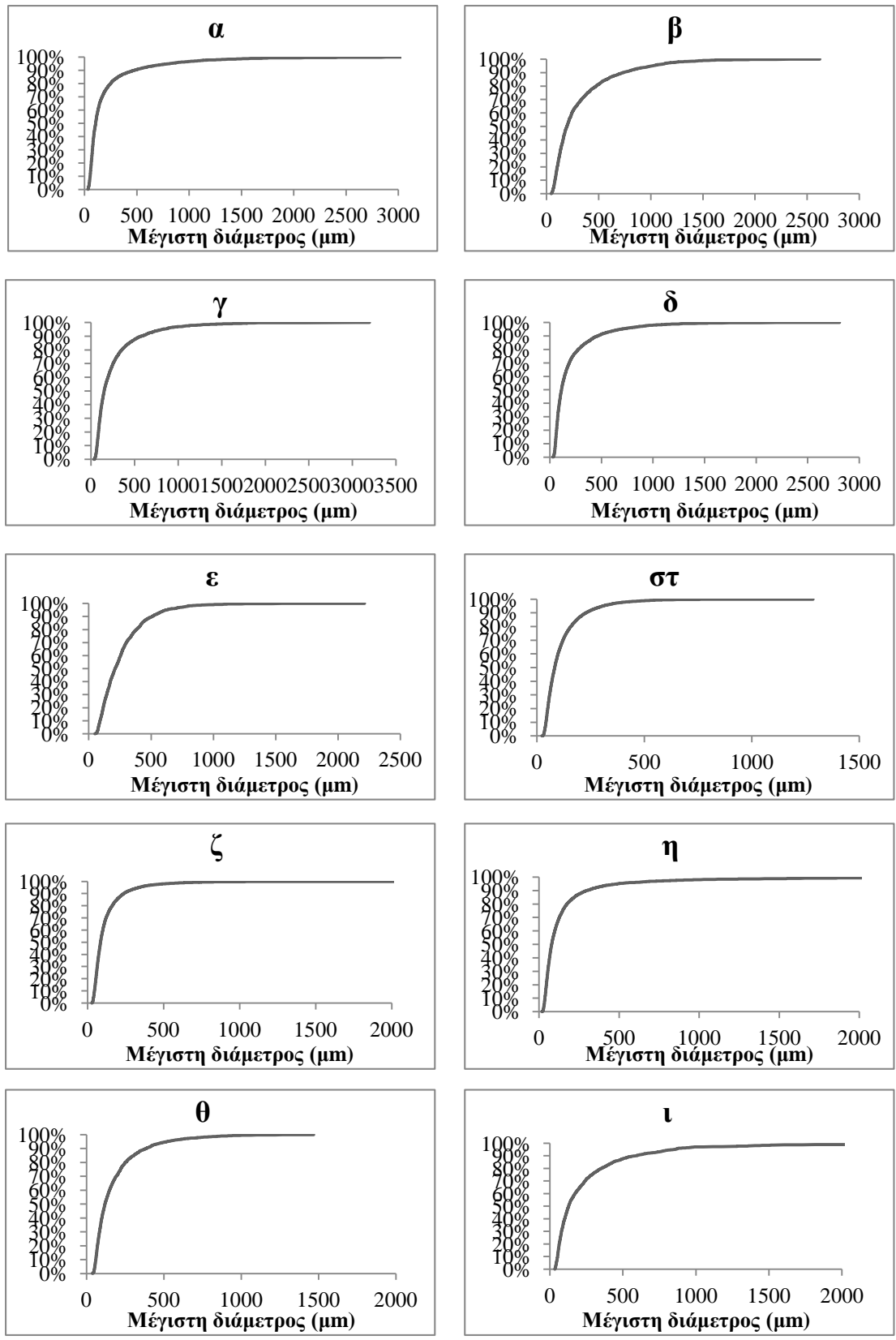


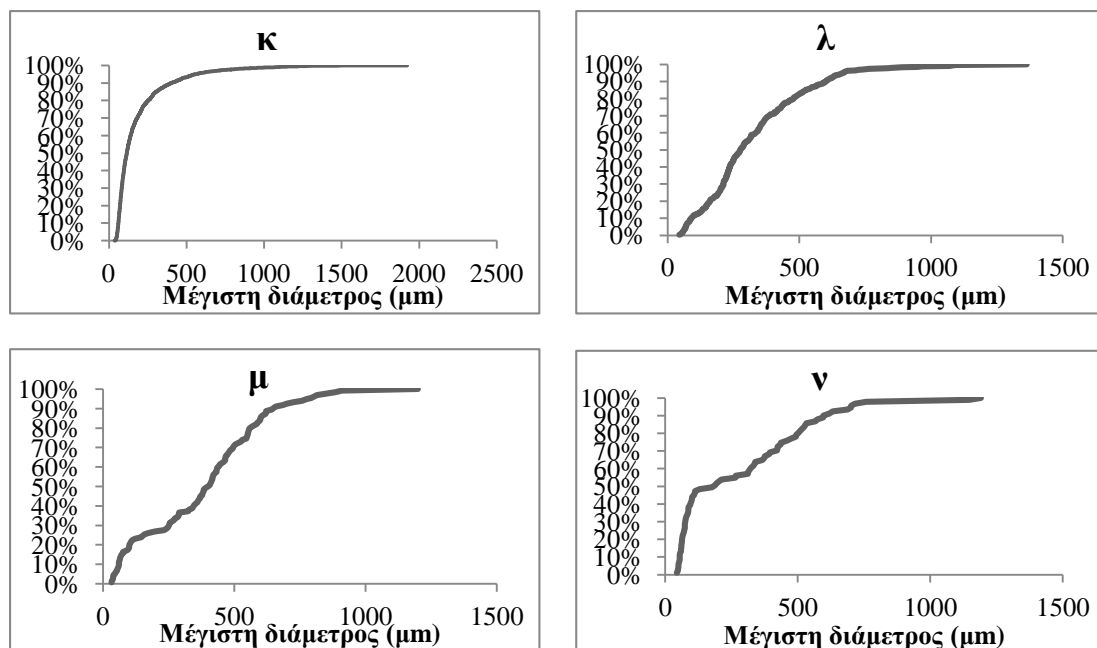
Σχήμα 4-10(α-ν): Αθροιστική κατανομή του μέγιστου άξονα των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3, στ) Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ) Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3

Πίνακας 4-12: Για κάθε σύστημα οι τιμές του μέγιστου άξονα που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών

Σύστημα	Ax50	Ax80	Ax90
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3	178,776	417,879	641,362
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4	138,106	302,106	471,990
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2	101,718	220,823	417,161
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 14-2	74,711	155,523	253,197
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 14-2	122,464	312,204	512,988
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 10-4	116,789	239,415	356,182
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 10-4	107,944	219,567	353,279
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	106,411	243,944	398,242
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	198,420	349,631	464,235
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	80,685	148,921	210,226
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	82,088	147,87	213,011
Πιλοτικό SBR1	249,014	423,353	523,970
Πιλοτικό SBR2	325,853	481,547	570,152
Πιλοτικό SBR3	164,289	437,757	520,838

Στο σχήμα 4-11 παρουσιάζονται τα γραφήματα της αθροιστικής κατανομής της μέγιστης διαμέτρου των κροκίδων. Στη συνέχεια στον πίνακα 4-13 παρουσιάζονται για κάθε σύστημα οι τιμές της μέγιστης διαμέτρου που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών.



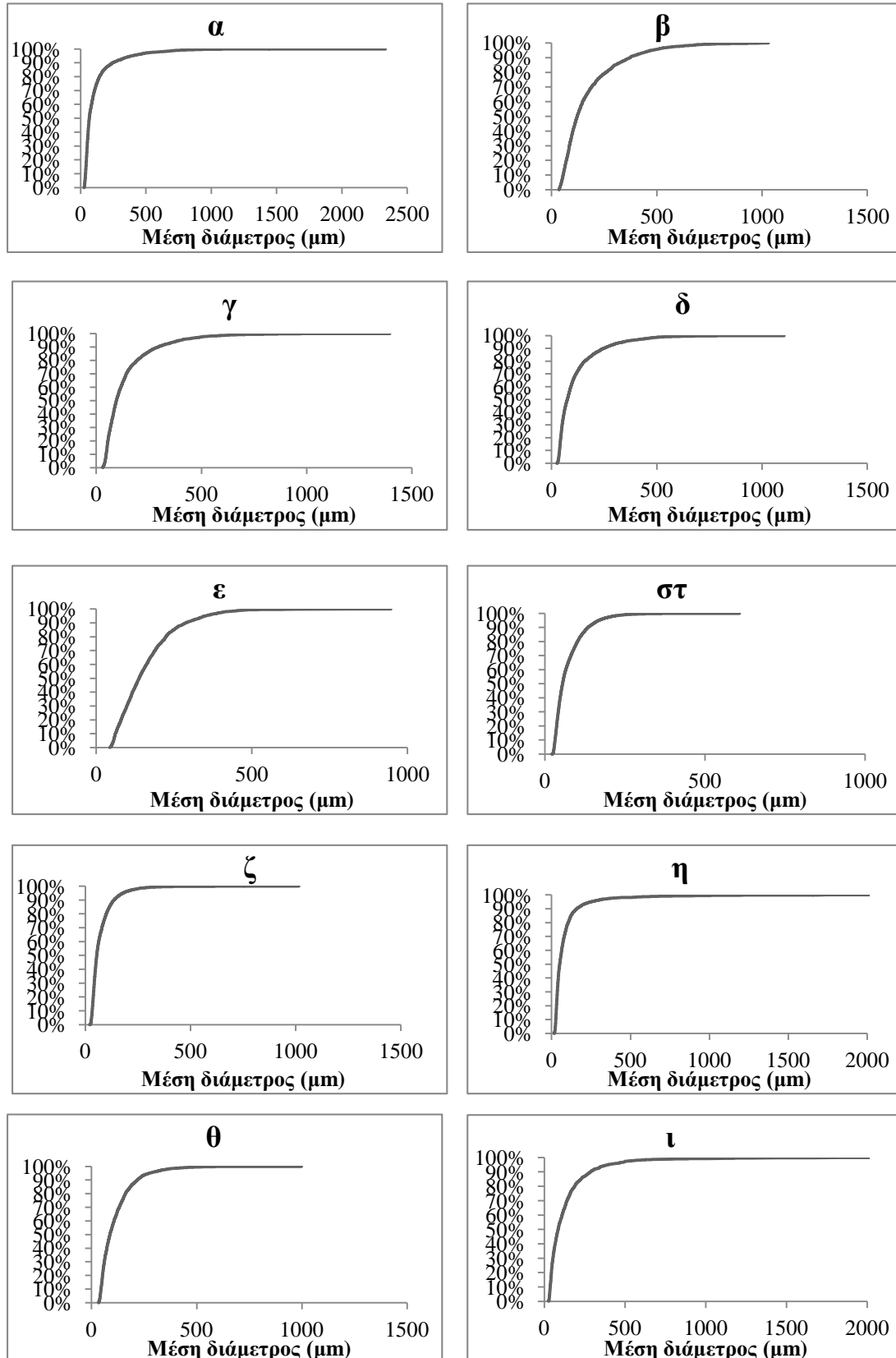


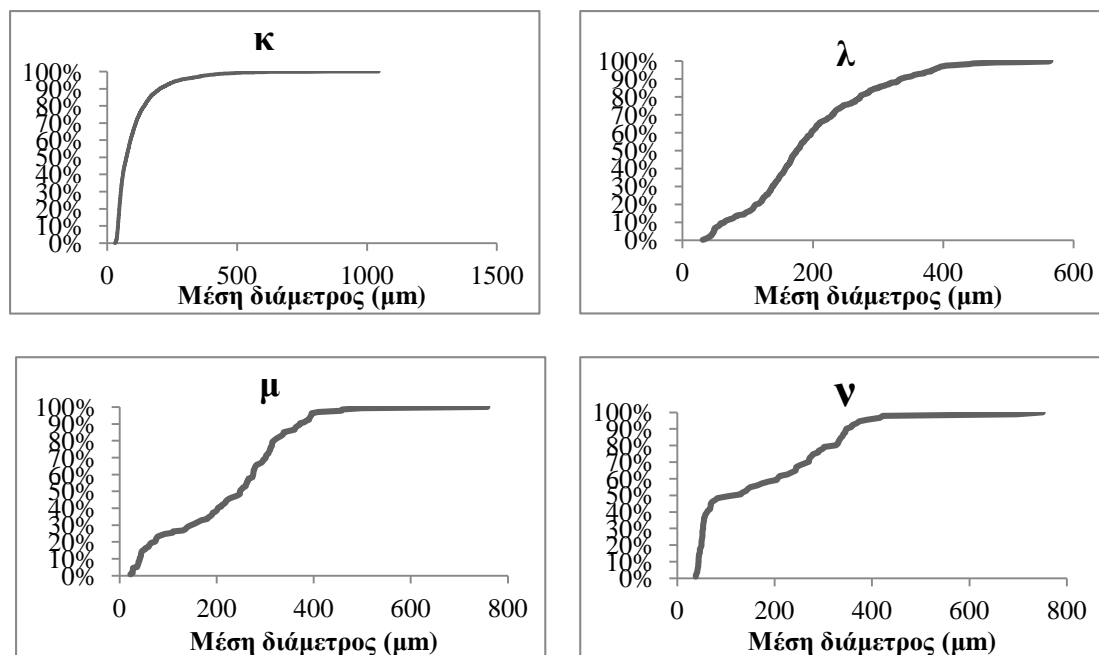
Σχήμα 4-11 (α-ν): Αθροιστική κατανομή της μέγιστης διαμέτρου των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3, στ) Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ) Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3

Πίνακας 4-13: Για κάθε σύστημα οι τιμές της μέγιστης διαμέτρου που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών

Σύστημα	$D_{\max 50}$	$D_{\max 80}$	$D_{\max 90}$
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 27-3	196,814	478,145	738,238
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 2-4	152,305	348,464	582,367
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 19-2	105,162	250,619	480,272
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 14-2	78,877	176,067	297,529
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 14-2	128,265	353,118	580,203
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 10-4	118,383	251,616	389,085
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 10-4	114,811	256,726	397,073
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	112,812	277,341	462,046
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	211,263	383,34	506,941
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	82,666	158,339	229,329
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	84,388	162,059	236,747
Πιλοτικό SBR1	275,521	476,782	598,454
Πιλοτικό SBR2	400,295	558,095	642,836
Πιλοτικό SBR3	176,737	502,559	597,602

Στο σχήμα 4-12 παρουσιάζονται τα γραφήματα της αθροιστικής κατανομής της μέσης διαμέτρου των κροκίδων. Στη συνέχεια στον πίνακα 4-14 παρουσιάζονται για κάθε σύστημα οι τιμές της μέσης διαμέτρου που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών.



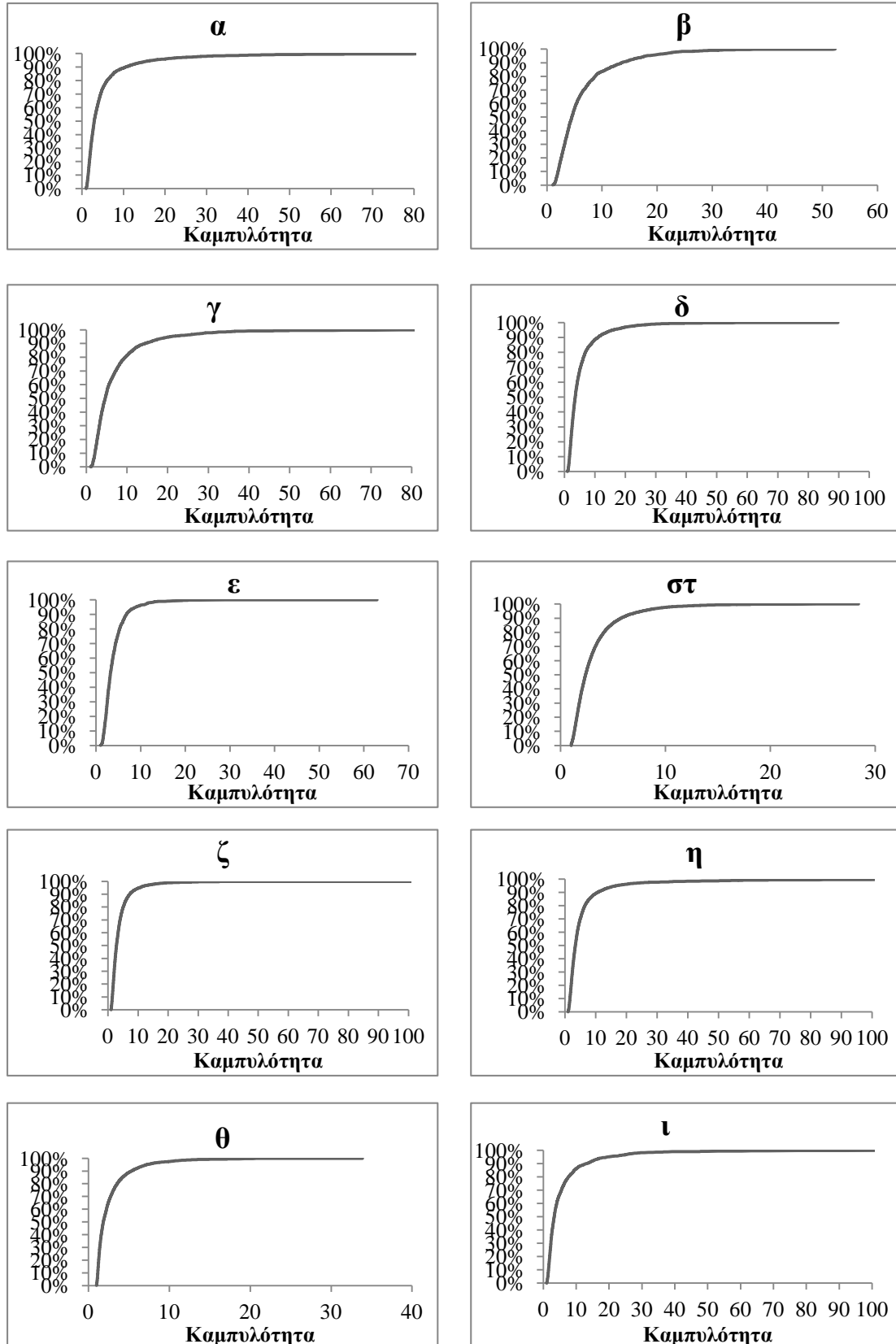


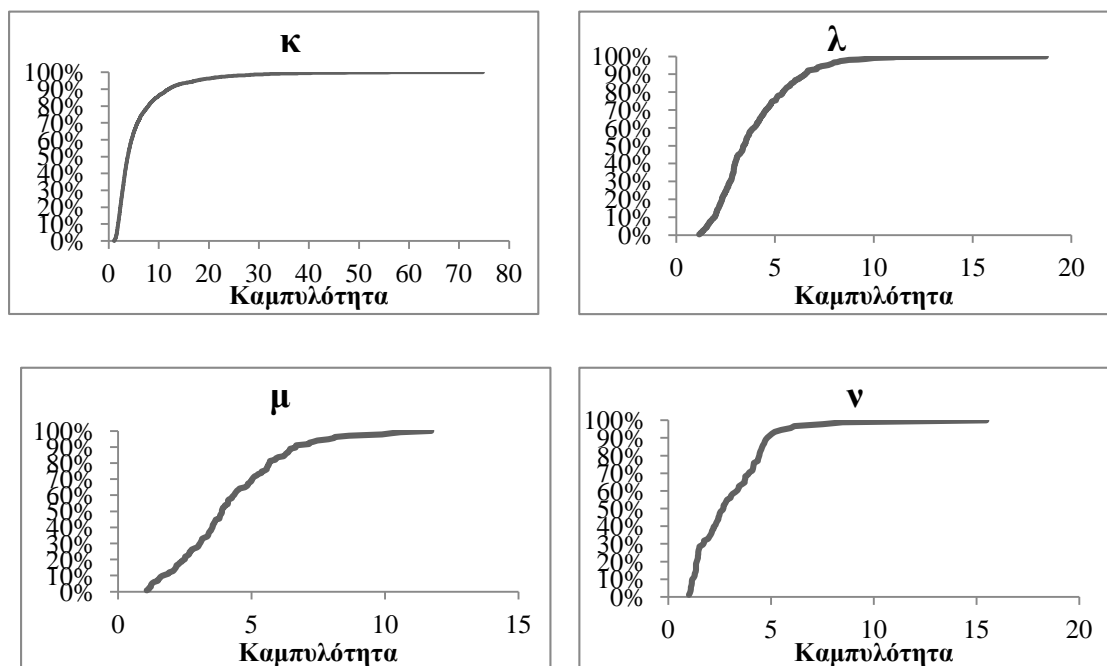
4-12 (α-ν): Αθροιστική κατανομή της μέσης διαμέτρου των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3, στ) Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ) Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3

Πίνακας 4-14: Για κάθε σύστημα οι τιμές της μέσης διαμέτρου που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών

Σύστημα	D _{av50}	D _{av80}	D _{av90}
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 27-3	121,845	258,022	365,411
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 2-4	95,197	194,948	289,449
Ε.Ε.Λ.Ψυττάλειας 19-2	66,375	144,479	245,277
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 14-2	51,330	104,988	158,150
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 14-2	84,694	187,972	284,935
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 10-4	87,127	159,251	217,284
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 10-4	74,018	143,363	203,038
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	74,486	158,63	245,956
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	137,349	222,759	287,065
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	54,698	101,317	135,415
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	54,069	99,529	136,965
Πιλοτικό SBR1	174,945	272,283	335,834
Πιλοτικό SBR2	248,199	316,895	371,921
Πιλοτικό SBR3	104,09	325,49	347,287

Στο σχήμα 4-13 παρουσιάζονται τα γραφήματα της αθροιστικής κατανομής καμπυλότητας των κροκίδων. Στη συνέχεια στον πίνακα 4-15 παρουσιάζονται για κάθε σύστημα οι τιμές της καμπυλότητας που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών.



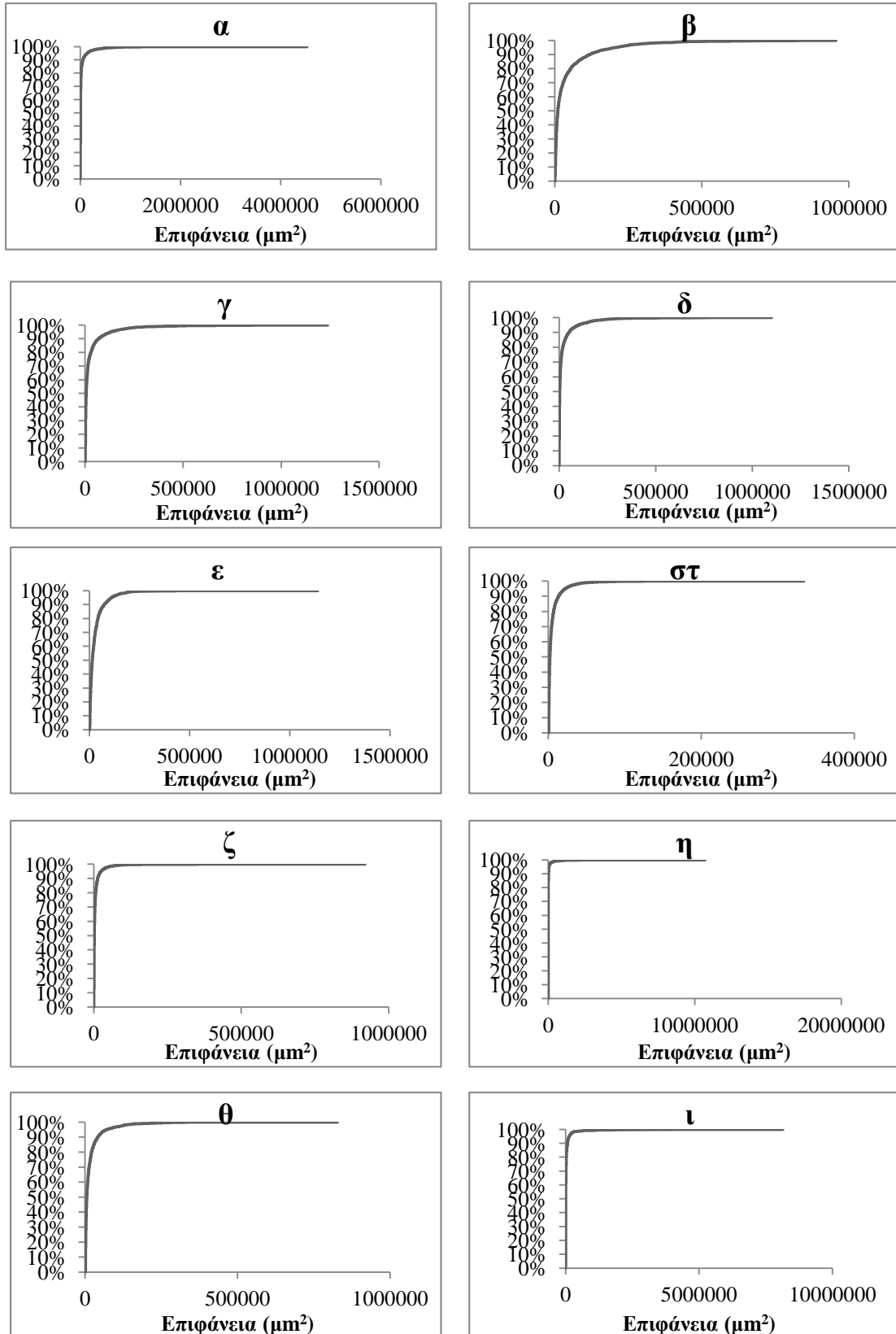


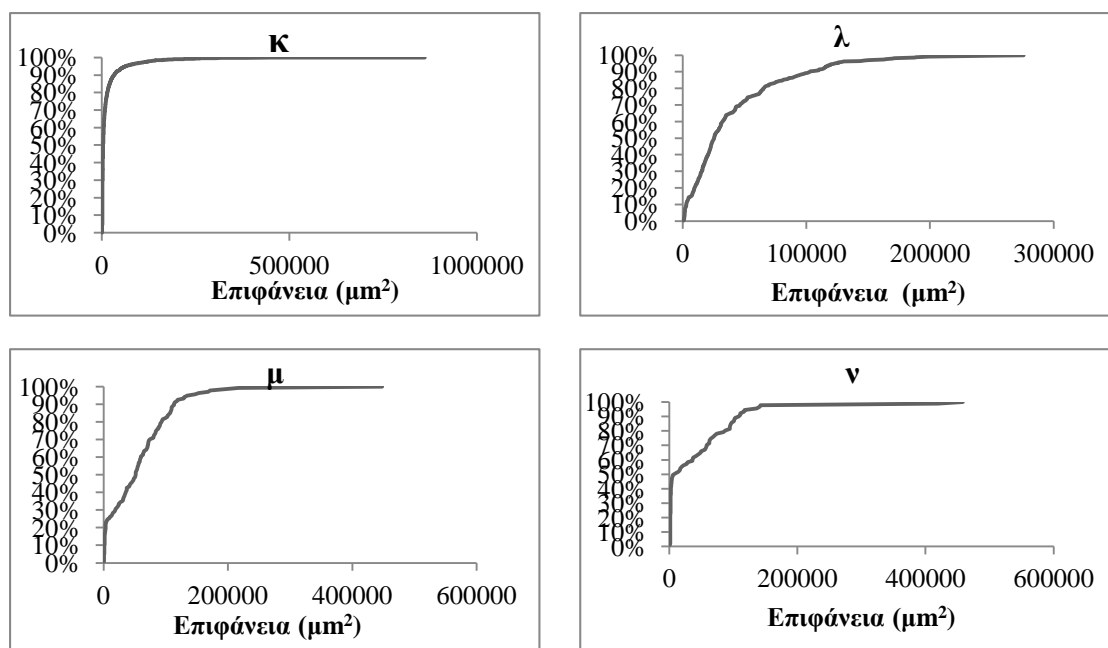
Σχήμα 4-13 (α-ν): Αθροιστική κατανομή της καμυλότητας των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3, στ) Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ) Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3

Πίνακας 4-15: Για κάθε σύστημα οι τιμές της καμυλότητας (R) που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών

Σύστημα	R50	R80	R90
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3	4,511	8,752	13,712
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4	4,638	9,502	14,399
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2	2,942	6,078	10,474
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 14-2	3,354	6,526	10,243
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 14-2	3,302	7,659	13,057
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 10-4	1,84	3,53	5,278
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 10-4	3,758	7,946	11,918
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	3,568	6,94	10,828
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	3,228	5,267	6,809
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	2,373	4,133	5,762
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	2,825	5,08	7,188
Πιλοτικό SBR1	3,423	5,413	6,514
Πιλοτικό SBR2	3,897	5,688	6,653
Πιλοτικό SBR3	2,683	4,431	4,823

Στο σχήμα 4-14 παρουσιάζονται τα γραφήματα της αθροιστικής κατανομής επιφάνειας των κροκίδων. Στη συνέχεια στον πίνακα 4-16 παρουσιάζονται για κάθε σύστημα οι τιμές της επιφάνειας που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών.





Σχήμα 4-14 (α-ν): Αθροιστική κατανομή της επιφάνειας των κροκίδων: α) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2, β) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3, γ) Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4, δ) Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4, ε) Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3, στ) Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3, ζ) Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3, η) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_14-2, θ) Πιλοτικό Βερόνα_Shortcut_10-4, ι) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_14-2, κ) Πιλοτικό Βερόνα_ANNAMOX_10-4, λ) Πιλοτικό SBR-1, μ) Πιλοτικό SBR-2, ν) Πιλοτικό SBR-3

Πίνακας 4-16: Για κάθε σύστημα οι τιμές της επιφάνειας (Α) που αντιστοιχούν στο 50%, στο 80% και στο 90% των τιμών

Σύστημα	A50	A80	A90
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27-3	10671	54716	119702
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 2-4	6017	29446	69309
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 19-2	3165	15067	50957
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 14-2	1824	7897	20192
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 14-2	4936	28297	71218
Πιλοτικό shortcut Βερόνα 10-4	5772	19525	41408
Πιλοτικό Annamox Βερόνα 10-4	3573	14840	31785
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 2-4	3614	18228	51759
Ε.Ε.Λ. Λαμίας 13-3	14725	43210	72524
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 13-3	2224	7006	13500
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 13-3	2068	6641	13296
Πιλοτικό SBR1	25449	65587	103010
Πιλοτικό SBR2	51650	92900	113450
Πιλοτικό SBR3	5810	87452	108476

Παρατηρούμε ότι στα συστήματα που εξετάστηκαν το 50% των κροκίδων εμφανίζουν aspect ratio από 1,6 έως 1,9 ενώ το 80% και το 90% των κροκίδων αντίστοιχα παρουσιάζουν τιμές της παραμέτρου πάνω από 2. Δηλαδή το aspect ratio εμφανίζεται πολύ μεγαλύτερο της μονάδας που σημαίνει ότι η πλειοψηφία των κροκίδων τείνει να έχει επίμηκες σχήμα.

Επίσης η καμπυλότητα εμφανίζεται πολύ μεγαλύτερη της μονάδας καθώς το 50% των κροκίδων παρουσιάζουν καμπυλότητα από 2,5 έως 4,5 ενώ η καμπυλότητα για το 80% και το 90% των κροκίδων παρουσιάζει τιμές από 4,5 έως 13. Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε κατά κύριο λόγο οι κροκίδες εμφανίζουν ακανόνιστη δομή.

Όσον αφορά στο μέγιστο άξονα παρατηρούμε ότι το 50% των κροκίδων παρουσιάζουν τιμές από 75 έως 325 μm , ενώ το 80% και το 90% των κροκίδων παρουσιάζει μέγιστο άξονα από 150 έως 640 μm .

Η μέγιστη διάμετρος παρατηρούμε ότι παρουσιάζει ανάλογες διακυμάνσεις με τον μέγιστο άξονα. Συγκεκριμένα το 50% των κροκίδων παρουσιάζουν τιμές από 80 έως 400 μm , ενώ το 80% και το 90% των κροκίδων παρουσιάζει μέγιστη διάμετρο από 160 έως 740 μm .

Όσον αφορά στη μέση διάμετρο παρατηρούμε ότι παρουσιάζει μικρότερες τιμές από τη μέγιστη διάμετρο. Ειδικότερα, το 50% των κροκίδων παρουσιάζουν τιμές από 50 έως 250 μm , ενώ το 80% και το 90% των κροκίδων παρουσιάζει μέση διάμετρο από 100 έως 300 μm .

Όσον αφορά στην επιφάνεια παρατηρούμε ότι το 50% των κροκίδων παρουσιάζουν τιμές από 2000 έως 52000 μm^2 , ενώ το 80% και το 90% των κροκίδων παρουσιάζει επιφάνεια από 70000 έως 120000 μm^2 .

Επιπλέον τα συστήματα που εμφανίζουν υψηλή τιμή στο μέγιστο άξονα, στη μέγιστη διάμετρο και στη μέση διάμετρο των κροκίδων, παρατηρούμε ότι εμφανίζουν αντίστοιχα υψηλές τιμές και στην επιφάνεια των κροκίδων.

Τέλος, συστήματα που εμφανίζουν υψηλό δείκτη νηματοειδών (όπως οι Ε.Ε.Α. Κορίνθου και Λουτρακίου) παρουσιάζουν μικρότερες διαμέτρους και επιφάνεια κροκίδων σε σχέση με τα πιλοτικά συστήματα διαλείποντος έργου που δεν παρουσιάζουν ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών και τα οποία φαίνεται να αναπτύσσουν πολύ μεγαλύτερες κροκίδες. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι στα συστήματα που δε παρουσιάζουν νηματοειδή διόγκωση οι τιμές της παραμέτρου aspect ratio εμφανίζονται μικρότερες και επομένως στα συστήματα αυτά οι κροκίδες τείνουν να αναπτύσσουν πιο σφαιρικό σχήμα. Από τα παραπάνω μπορούμε να βγάλουμε τη διαπίστωση ότι η νηματοειδής διόγκωση σχετίζεται άμεσα με το σχήμα και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κροκίδων.

4.4.3 Συσχέτιση των μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε η προσπάθεια προσδιορισμού του είδους της αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο 50%, το 80% και το 90% των κροκίδων καθώς και αυτών των παραμέτρων με το MLSS, το DSVI, το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας από τις κροκίδες (PERarea %) και τον αριθμό των αντικειμένων ανά mm² (OBJnum). Η συσχέτιση αυτή αποδόθηκε με το συντελεστή γραμμικής συσχέτισης r του Pearson (Πίνακας 4-17). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη συσχέτιση συμπεριλήφθησαν μόνο τα αποτελέσματα που αφορούν στα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας ιλύος δηλαδή την Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας, την Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας, την Ε.Ε.Λ. Λαμίας, την Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου και την Ε.Ε.Λ. Κορίνθου.

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r του Pearson δίνει ένα μέτρο του μεγέθους της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών και παίρνει τιμές στο κλειστό διάστημα [-1, 1].

- ❖ Αν $r = \pm 1$ υπάρχει **τέλεια γραμμική** συσχέτιση.
- ❖ Αν $-0,3 \leq r < 0,3$ **δεν υπάρχει γραμμική** συσχέτιση.
- ❖ Αν $-0,5 < r \leq -0,3$ ή $0,3 \leq r < 0,5$ υπάρχει **ασθενής γραμμική** συσχέτιση.
- ❖ Αν $-0,7 < r \leq -0,5$ ή $0,5 \leq r < 0,7$ υπάρχει **μέση γραμμική** συσχέτιση.
- ❖ Αν $-0,8 < r \leq -0,7$ ή $0,7 \leq r < 0,8$ υπάρχει **ισχυρή γραμμική** συσχέτιση.
- ❖ Αν $-1 < r \leq -0,8$ ή $0,8 \leq r < 1$ υπάρχει **πολύ ισχυρή γραμμική** συσχέτιση.

Ο βαθμός γραμμικής συσχέτισης καθορίζεται από την απόλυτη τιμή του r και όχι από το πρόσημο του r . Το πρόσημο του r καθορίζει το είδος, μόνο, της συσχέτισης (θετική ή αρνητική). Μας πληροφορεί δηλαδή για το αν η αύξηση της μίας μεταβλητής αντιστοιχεί σε αύξηση ή σε μείωση της άλλης (Παπαδόπουλος, 2011)

Από την επεξεργασία του πίνακα 4-17 για κάθε παράμετρο προέκυψαν οι εξής παρατηρήσεις:

Το aspect ratio φαίνεται ότι παρουσιάζει ισχυρή αρνητική συσχέτιση με τις διαστάσεις των κροκίδων (μέγιστος άξονας, μέγιστη και μέση διάμετρος) και με την επιφάνεια. Δηλαδή όσο αυξάνεται το μέγεθος των κροκίδων, φαίνεται πως η έλλειψη που τις περικλείει τείνει να αποκτά πιο σφαιρικό σχήμα.

Παρατηρούμε ότι το aspect ratio συσχετίζεται θετικά με τον αριθμό των αντικειμένων ανά mm², δηλαδή όσο πιο ελλειψοειδείς γίνονται οι κροκίδες, τόσο αυξάνεται ο αριθμός τους ανά mm².

Κάποια συσχέτιση που να συνδέει την καμπυλότητα με το aspect ratio δεν φαίνεται να υπάρχει. Επιπλέον το aspect ratio δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάποια συσχέτιση με τη συγκέντρωση στερεών (MLSS).

Μία μέση θετική γραμμική συσχέτιση προκύπτει ανάμεσα στο aspect ratio και τον δείκτη DSVI. Δηλαδή όταν αυξάνεται ο δείκτης καθιζημασιότητας και επομένως οι

κροκίδες συγκρατούν νερό μέσα τους λόγω της νηματοειδούς διόγκωσης, τότε το σχήμα τους τείνει να γίνεται πιο ελλειψοειδές ή επίμηκες.

Οι διαστάσεις της κροκίδας δηλαδή ο μέγιστος άξονας, η μέγιστη διάμετρος και η μέση διάμετρος όπως ήταν αναμενόμενο φαίνεται ότι παρουσιάζουν ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ τους. Επιπλέον όπως ήταν αναμενόμενο οι διαστάσεις παρουσιάζουν θετικές συσχετίσεις και με την επιφάνεια, δηλαδή η αύξηση του μεγέθους των διαστάσεων επιφέρει αύξηση και στο μέγεθος της επιφάνειας τους.

Παρατηρούμε ότι το μέγεθος των κροκίδων, δηλαδή οι διαστάσεις και η επιφάνεια τους, συσχετίζεται θετικά με την καμπυλότητα. Επομένως, όσο αυξάνεται το μέγεθος των κροκίδων, η δομή τους γίνεται πιο ακανόνιστη και διάχυτη.

Δεν φαίνεται να προκύπτει κάποια συσχέτιση ανάμεσα στο μέγεθος των κροκίδων με το ποσοστό κάλυψης της επιφάνειας, παρουσιάζονται όμως ισχυρές αρνητικές συσχετίσεις με τον αριθμό των αντικειμένων ανά mm^2 . Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί καθώς μεγαλύτερες κροκίδες καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο στο πλακίδιο κι επομένως ο αριθμός τους ανά mm^2 θα είναι μικρότερος.

Επιπρόσθετα, φαίνεται να προκύπτουν μέσες αρνητικές συσχετίσεις ανάμεσα στο μέγεθος των κροκίδων και τη συγκέντρωση στερεών. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι όταν το δείγμα έχει μεγάλες κροκίδες η συγκέντρωση στερεών μειώνεται. Κάποιου είδους συσχέτιση του μεγέθους των κροκίδων με το DSVI δεν φαίνεται να προκύπτει.

Η καμπυλότητα παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με τον αριθμό των αντικειμένων ανά mm^2 δηλαδή όσο λιγότερο διάχυτη είναι η δομή τόσο πιο πολλές κροκίδες προκύπτουν ανά mm^2 .

Τέλος παρουσιάζεται ισχυρή αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στο MLSS και το DSVI, δηλαδή αύξηση στο δείκτη DSVI επιφέρει μείωση στη συγκέντρωση στερεών και αντίστροφα.

Πίνακας 4-17: Συσχέτιση των μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων με το συντελεστή συσχέτισης r του Pearson

	As50	As80	As90	Ax50	Ax80	Ax90	Dm50	Dm80	Dm90	Dav50	Dav80	Dav90	R50	R80	R90	A50	A80	A90	PERarea (%)	OBJnum (1mm)	MLSS	DSVI
As50	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
As80	0,891	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
As90	0,885	0,979	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ax50	-0,847	-0,836	-0,807	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ax80	-0,760	-0,687	-0,611	0,935	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ax90	-0,658	-0,515	-0,412	0,812	0,956	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dmax50	-0,837	-0,814	-0,783	0,998	0,950	0,833	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dmax80	-0,738	-0,650	-0,572	0,915	0,998	0,968	0,932	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dmax90	-0,622	-0,444	-0,348	0,770	0,935	0,994	0,795	0,952	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dav50	-0,864	-0,850	-0,824	0,999	0,932	0,804	0,998	0,912	0,763	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dav80	-0,776	-0,694	-0,623	0,940	0,999	0,954	0,954	0,997	0,934	0,938	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dav90	-0,708	-0,553	-0,463	0,837	0,964	0,996	0,856	0,975	0,992	0,832	0,965	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R50	-0,425	-0,215	-0,178	0,584	0,779	0,818	0,627	0,809	0,865	0,589	0,781	0,830	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R80	-0,293	-0,028	0,016	0,426	0,667	0,766	0,472	0,706	0,829	0,427	0,668	0,771	0,974	1	-	-	-	-	-	-	-	-
R90	-0,204	0,078	0,146	0,320	0,598	0,753	0,365	0,644	0,817	0,316	0,597	0,745	0,913	0,978	1	-	-	-	-	-	-	-
A50	-0,842	-0,890	-0,873	0,982	0,858	0,699	0,971	0,828	0,642	0,981	0,863	0,726	0,430	0,250	0,134	1	-	-	-	-	-	-
A80	-0,738	-0,718	-0,645	0,954	0,989	0,912	0,965	0,981	0,881	0,950	0,986	0,918	0,716	0,582	0,501	0,898	1	-	-	-	-	-
A90	-0,650	-0,551	-0,446	0,842	0,976	0,990	0,863	0,984	0,978	0,835	0,971	0,984	0,812	0,739	0,709	0,739	0,950	1	-	-	-	-
PERarea (%)	0,176	0,374	0,499	-0,230	0,066	0,349	-0,208	0,113	0,390	-0,244	0,059	0,309	0,298	0,468	0,638	-0,369	-0,047	0,261	1	-	-	-
OBJnum (1mm)	0,818	0,619	0,572	-0,825	-0,869	-0,900	-0,830	-0,873	-0,893	-0,822	-0,880	-0,925	-0,689	-0,637	-0,614	-0,738	-0,805	-0,852	-0,264	1	-	-
MLSS	-0,161	-0,078	-0,198	-0,330	-0,493	-0,555	-0,353	-0,510	-0,547	-0,295	-0,470	-0,494	-0,452	-0,449	-0,482	-0,252	-0,526	-0,597	-0,289	0,235	1	-
DSVI	0,511	0,369	0,459	-0,028	0,075	0,157	-0,018	0,089	0,148	-0,072	0,051	0,086	0,053	0,097	0,170	-0,061	0,126	0,189	0,244	0,111	-0,888	1

4.5 Συσχέτιση των σταθερών V_0 και n της εξίσωσης Vesilind ως προς το δείκτη καθίζησιμότητας της ιλύος DSVI

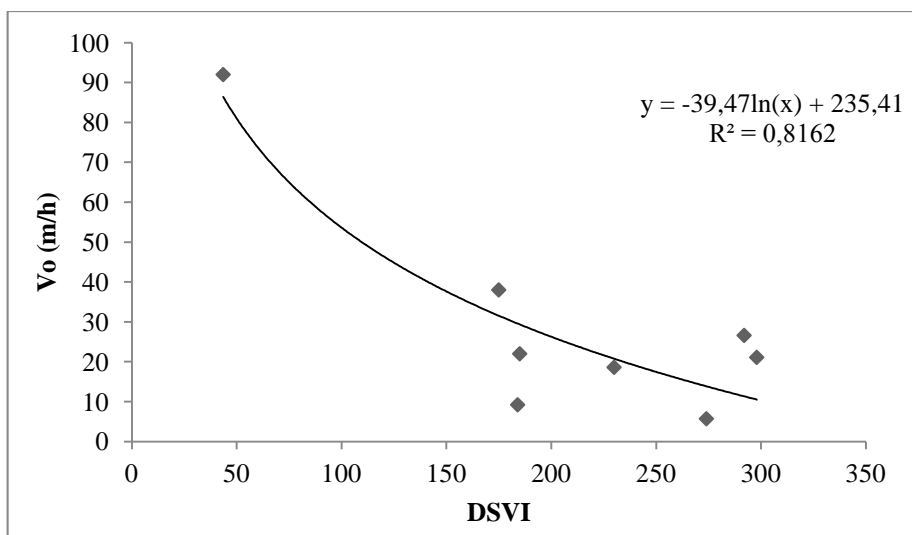
Ο στόχος αυτής της σειράς πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της συσχέτισης των χαρακτηριστικών της καθίζησιμότητας ενεργού ιλύος με το DSVI. Στα πλαίσια αυτής της έρευνας εξετάστηκαν πέντε δείγματα ανάμεικτου υγρού και ανακυκλοφορίας από την Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας και δείγματα από άλλες τρεις εγκαταστάσεις: Την Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας, την Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου και την Ε.Ε.Λ. Κορίνθου. Όλες οι εγκαταστάσεις αντιμετώπιζαν πρόβλημα νηματοειδούς διόγκωσης και διέφεραν ως προς τη συγκέντρωση στερεών και των χαρακτηριστικών της σύνθεσης των δειγμάτων τους.

Πίνακας 4-18: Η συγκέντρωση στερεών ανάμεικτου υγρού (MLSS), οι σταθερές Vesilind n και V_0 και το DSVI για κάθε σύστημα

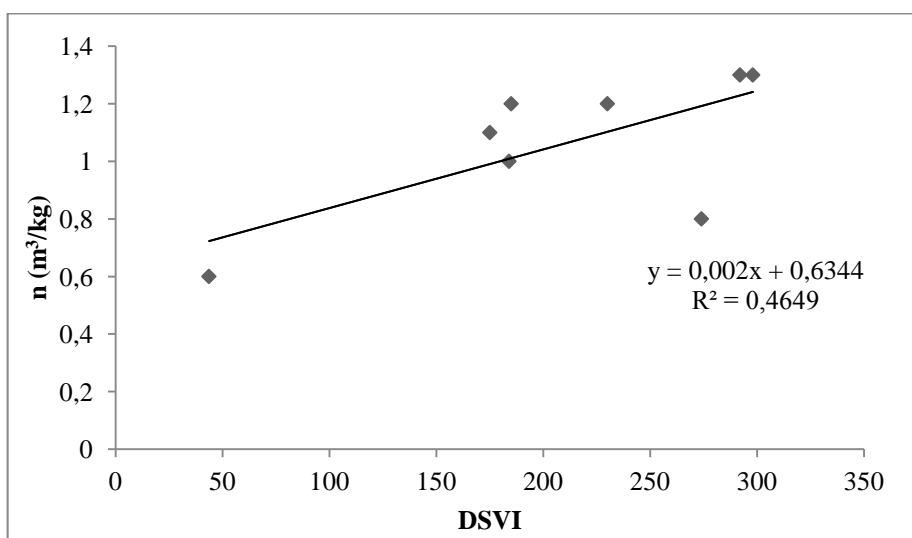
Σύστημα	MLSS (mg/l)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	DSVI
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 20/11	3140	1,1	38	175
Ε.Ε.Λ. Πρέβεζας 26/11	4660	0,6	92	43,6
Ε.Ε.Λ. Κορίνθου 4/12	7430	1	9,2	184
Ε.Ε.Λ. Λουτρακίου 4/12	8050	1,2	22	185
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 15/1	3770	1,2	18,6	230
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 29/1	3610	1,3	26,6	292
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 5/2	3720	1,3	21,1	298
Ε.Ε.Λ. Ψυττάλειας 27/3	1570	0,8	5,7	274

Παρατηρούμε (Σχήμα 4-15) ότι μπορεί να υπάρξει μία μη γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στο V_0 και το DSVI καθώς για υψηλές τιμές του δείκτη DSVI παρατηρούνται χαμηλές τιμές της σταθεράς V_0 και αντίστροφα. Εκτός από τη περίπτωση του δείγματος της Πρέβεζας όπου σε χαμηλό DSVI παρατηρήθηκε αρκετά υψηλή τιμή στη σταθερά V_0 , τα υπόλοιπα δείγματα προέρχονταν από εγκαταστάσεις που αντιμετώπιζαν πρόβλημα νηματοειδούς διόγκωσης εκείνη τη περίοδο και αυτό διαφαίνεται και από τις αρκετά υψηλές τιμές στο δείκτη DSVI. Η υψηλή τιμή στο δείκτη DSVI υποδηλώνει χαμηλή ταχύτητα καθίζησης της ενεργού ιλύος. Επομένως, η εμφάνιση χαμηλών τιμών στη σταθερά V_0 με την αύξηση της τιμής του δείκτη DSVI, μπορεί να αιτιολογηθεί βάση της εξίσωσης Vesilind η οποία ορίζει ότι η ταχύτητα καθίζησης είναι ανάλογη της σταθεράς V_0 .

Από την άλλη πλευρά (Σχήμα 4-16), η σταθερά n παρουσιάζει μία γραμμική συσχέτιση με το δείκτη DSVI. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της τιμής του DSVI παρουσιάζεται αντίστοιχα αύξηση της τιμής της σταθεράς n .



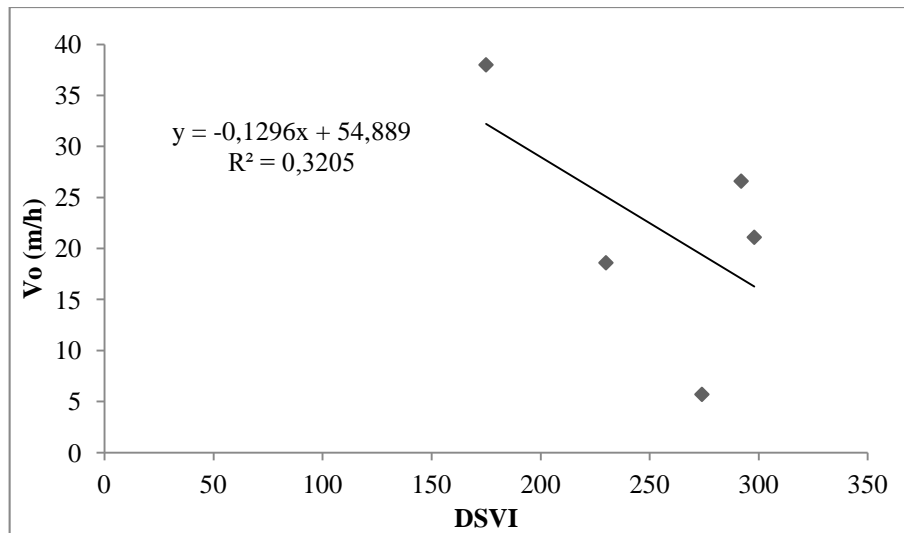
Σχήμα 4-15: Διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς V_0 ως προς το DSVI για όλα τα συστήματα



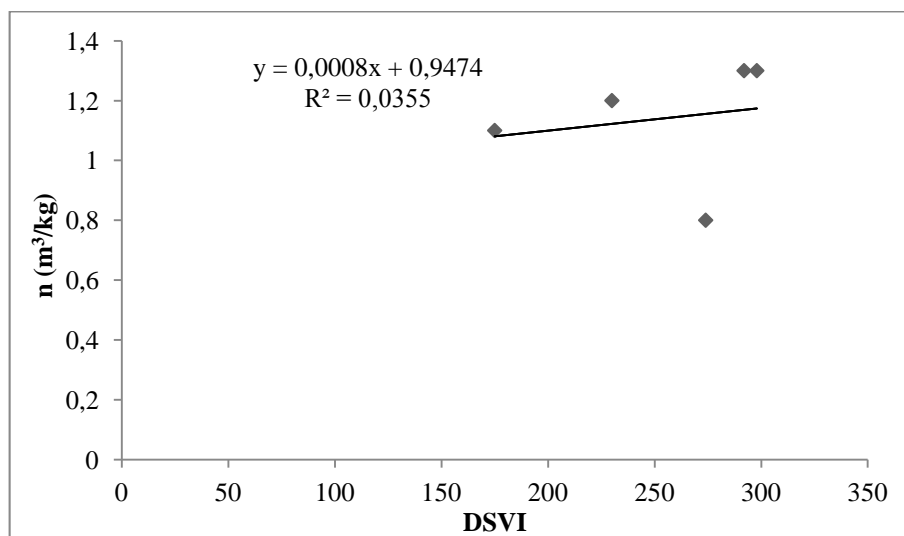
Σχήμα 4-16: Διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς n ως προς το DSVI για όλα τα συστήματα

Επιπρόσθετα, καταστρώθηκαν τα διαγράμματα των σταθερών V_0 και n συναρτήσει του DSVI μόνο με τα δεδομένα που αφορούν στα δείγματα που προέρχονται από το σύστημα της Ψυττάλειας, έτσι ώστε η σύγκριση να πραγματοποιηθεί με όσο το δυνατόν του ίδιους όρους. Παρατηρούμε ότι όλα τα δείγματα παρουσίασαν υψηλό δείκτη DSVI και πως η πλειονοψηφία τους παρουσίασε χαμηλή τιμή της σταθεράς V_0 (από 15-25 m/h) (Σχήμα 4-17).

Όσον αφορά στη σταθερά n (Σχήμα 4-18), παρατηρούμε ότι για όλα τα δείγματα η απόκλιση στη τιμή της ήταν αρκετά μικρή και υπήρξε μια μικρή αύξηση στη τιμή της με την αύξηση του DSVI.



Σχήμα 4-17: Διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς V_0 ως προς το DSVI για τα δείγματα που προέρχονται από την Ε.Ε.Λ. της Ψυττάλειας



Σχήμα 4-18: Διαγραμματική απεικόνιση της σταθεράς n ως προς το DSVI για τα δείγματα που προέρχονται από την Ε.Ε.Λ. της Ψυττάλειας

Συνοψίζοντας, στη παρούσα ενότητα προέκυψε το συμπέρασμα ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση ανάμεσα στο δείκτη DSVI και τα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας V_0 και n . Συγκεκριμένα, με την αύξηση του δείκτη καθιζησιμότητας DSVI παρατηρήθηκε μείωση στη σταθερά V_0 και αύξηση στη σταθερά n αντίστοιχα. Παρόμοια συμπεριφορά στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας έχει παρατηρηθεί και στη βιβλιογραφία. Στον πίνακα 4-19 παρουσιάζονται οι τιμές των V_0 και n για διάφορες τιμές του δείκτη DSVI που προέκυψαν από την εφαρμογή εξισώσεων που έχουν προταθεί από στη βιβλιογραφία. Οι περισσότεροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί περισσότερο με την ανάπτυξη εξισώσεων που αφορούν στη συσχέτιση των δεικτών

SVI και SSVI με τα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας και λιγότερο με το DSVI. Ωστόσο, οι Koorman & Cadee (1983) και ο Daigger (1995) ανέπτυξαν εξισώσεις που συσχετίζουν το DSVI με τις σταθερές V_0 και n της εξίσωσης Vesilind. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε την μείωση της σταθεράς V_0 με την αύξηση της τιμής του δείκτη DSVI και αντιστρόφως η τιμή της σταθεράς n φαίνεται πως αυξάνεται με την αύξηση του δείκτη DSVI.

Πίνακας 4-19: Οι σταθερές V_0 και n όπως προέκυψαν από τις εξισώσεις που προτάθηκαν από τους Koorman & Cadee (1983) και τον Daigger (1995) για διάφορες τιμές του DSVI (Von Sperling & Froes, 1999)

Συγγραφέας	DSVI = 0-45		DSVI = 45-95		DSVI = 95-165		DSVI = 165-215		DSVI = 215-305	
	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)	V_0 (m/h)	n (m ³ /kg)
Koorman & Cadee (1983)	-	-	11.3	0.40	7.9	0.54	6.4	0.67	5.3	0.82
Daigger (1995)	7.6	0.21	7.6	0.28	7.6	0.44	7.6	0.59	7.6	0.77

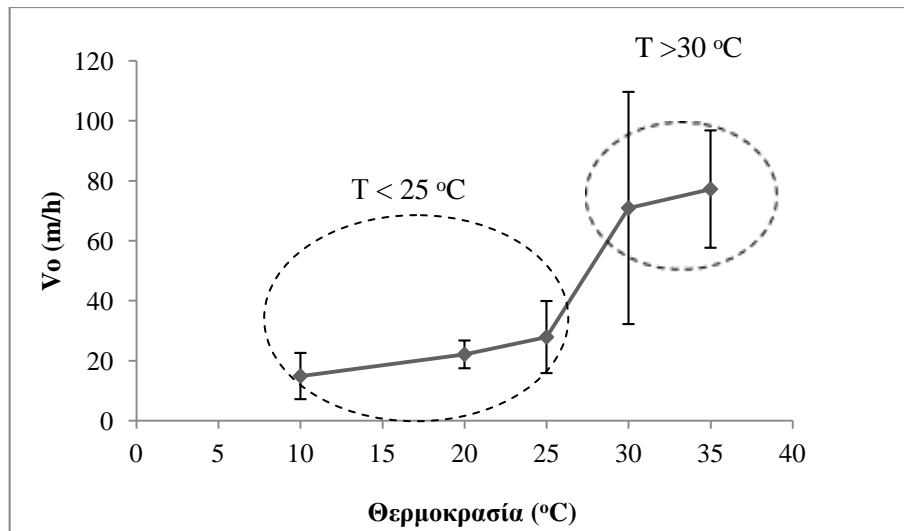
4.6 Επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας

Στόχος αυτού του πειράματος ήταν ο προσδιορισμός της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας της ενεργού ιλύος. Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 10 – 35 °C με σκοπό τον προσδιορισμό των σταθερών V_0 και n και του ιξώδους του ανάμεικτου υγρού σε κάθε θερμοκρασία. Στη συνέχεια, για κάθε παράμετρο υπολογίστηκαν ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και το διάστημα εμπιστοσύνης (με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) της περιοχής των αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν σε κάθε θερμοκρασία.

Πίνακας 4-20: Οι τιμές της σταθεράς V_0 σε κάθε θερμοκρασία για κάθε σειρά πειραμάτων

T (°C)	V ₀ (m/h)							
	1η σειρά	2η σειρά	3η σειρά	M.O.	Τυπική απόκλιση	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	όρια διαστήματος εμπιστοσύνης	
10	7,8	15,4	21,4	14,9	6,8	7,7	7,2	22,6
20	18,6	26,6	21,1	22,1	4,1	4,6	17,5	26,7
25	15,60	34,00	34,00	27,9	10,6	12,0	15,8	39,9
30	32,80	81,00	99,00	70,9	34,2	38,7	32,2	109,7
35	57,3	88,4	86	77,2	17,3	19,6	57,7	96,8

Στο σχήμα 4-19 παρουσιάζεται ο μέσος όρος (M.O.) των αποτελεσμάτων για τη σταθερά V_0 συναρτήσει της θερμοκρασίας (T) και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Παρατηρούμε ότι μέχρι τους 25 °C υπάρχει μία σταθερή και γραμμική αύξηση στη τιμή της σταθεράς V_0 , ενώ από τους 30 °C και μετά παρατηρούμε ραγδαία αύξηση στη τιμή της και στη συνέχεια η θερμοκρασία δεν φαίνεται ασκεί σημαντική επίδραση στη σταθερά. Επομένως το γράφημα μπορεί να χωριστεί σε δύο περιοχές επίδρασης της θερμοκρασίας: Την περιοχή κάτω των 25 °C όπου παρατηρείται η γραμμική αύξηση της σταθεράς και την περιοχή άνω των 30 °C όπου πραγματοποιείται απότομη αύξηση στη σταθερά V_0 .

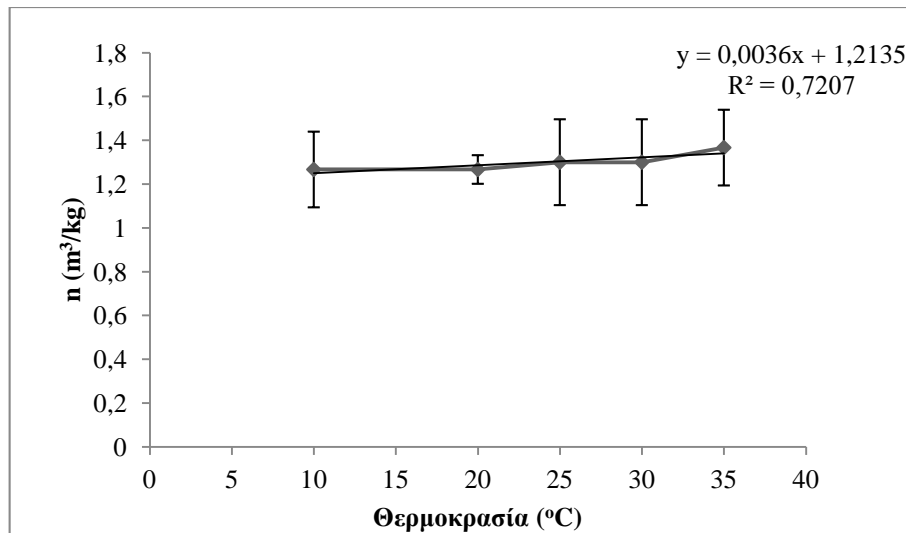


Σχήμα 4-19: Συσχέτιση της σταθεράς V_0 με τη θερμοκρασία

Πίνακας 4-21: Οι τιμές της σταθεράς n σε κάθε θερμοκρασία για κάθε σειρά πειραμάτων

T (°C)	n (m ³ /kg)							
	1η σειρά	2η σειρά	3η σειρά	M.O.	Τυπική απόκλιση	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	όρια διαστήματος εμπιστοσύνης	
10	1,1	1,3	1,4	1,27	0,15	0,17	1,09	1,44
20	1,2	1,3	1,3	1,27	0,06	0,07	1,20	1,33
25	1,1	1,4	1,4	1,30	0,17	0,20	1,10	1,50
30	1,1	1,4	1,4	1,30	0,17	0,20	1,10	1,50
35	1,2	1,4	1,5	1,37	0,15	0,17	1,19	1,54

Στο σχήμα 4-20 παρουσιάζεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων για τη σταθερά n συναρτήσει της θερμοκρασίας (T) και το διάστημα εμπιστοσύνης. Η αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά την τιμή της σταθεράς και παρατηρείται μία σχετικά μικρή άνοδο στη τιμή της. Από την υψηλή διακύμανση των τιμών της σταθεράς φαίνεται πως η τιμή της εξαρτάται κυρίως από το είδος της εκάστοτε βιομάζας.

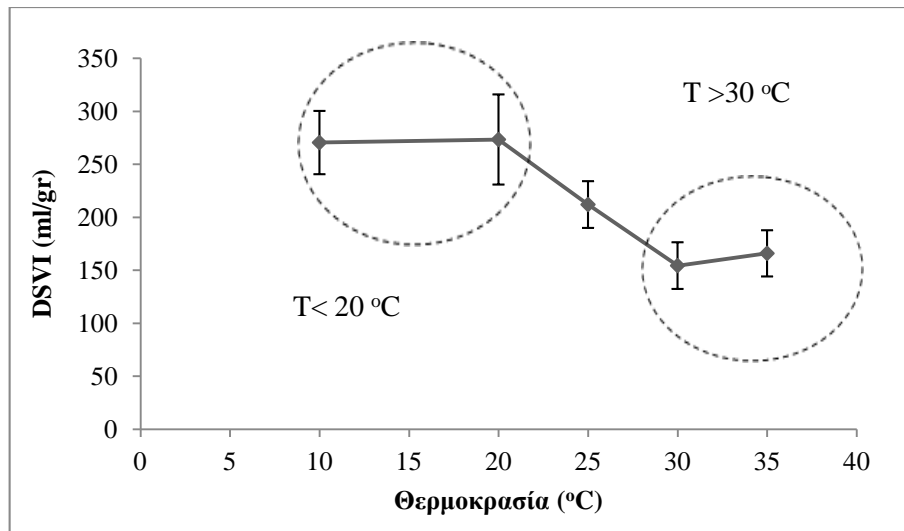


Σχήμα 4-20: Συσχέτιση της σταθεράς n με τη θερμοκρασία

Πίνακας 4-22: Οι τιμές του DSVI σε κάθε θερμοκρασία για κάθε σειρά πειραμάτων

T (°C)	DSVI							
	1η σειρά	2η σειρά	3η σειρά	M.O.	Τυπική απόκλιση	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	όρια διαστήματος εμπιστοσύνης	
10	244	297	270	271	26	30	241	300
20	298	292	230	273	38	43	231	316
25	235	201	200	212	20	22	190	234
30	132	166	165	154	19	22	132	176
35	147	166	185	166	19	22	144	188

Στο σχήμα 4-21 παρουσιάζεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων για τον δείκτη DSVI συναρτήσει της θερμοκρασίας (T) και το διάστημα εμπιστοσύνης. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία ασκεί σημαντική επίδραση στο δείκτη DSVI καθώς στο θερμοκρασιακό διάστημα των 20°C - 30°C η τιμή του παρουσιάζει γραμμική μείωση. Αντίθετα, για θερμοκρασίες κάτω των 20°C η τιμή του δείκτη DSVI παραμένει αμετάβλητη, ενώ για θερμοκρασίες άνω των 30°C φαίνεται πως η διαδικασία της καθίζησης επηρεάζεται αρνητικά καθώς η τιμή του δείκτη αυξάνεται.

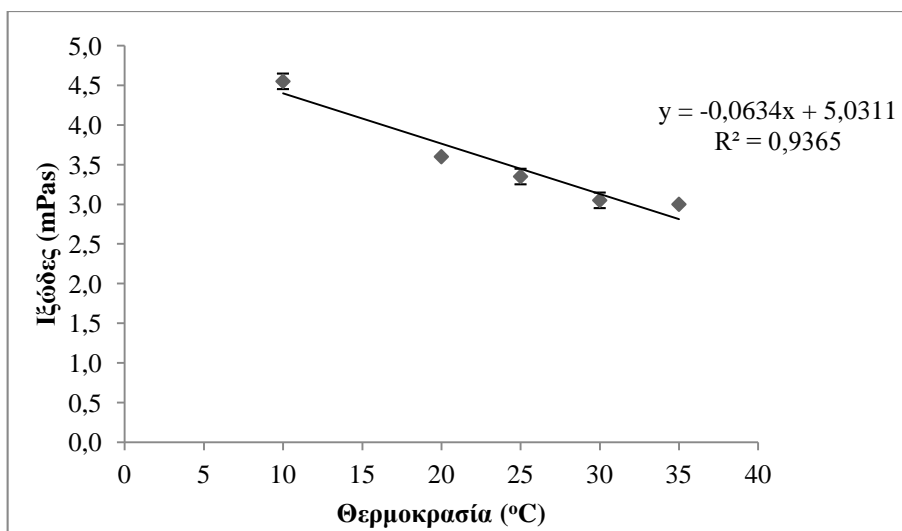


Σχήμα 4-21: Συσχέτιση του DSVI με τη θερμοκρασία

Πίνακας 4-23: Οι τιμές του ιξώδους (μ) σε κάθε θερμοκρασία (T) για κάθε σειρά πειραμάτων

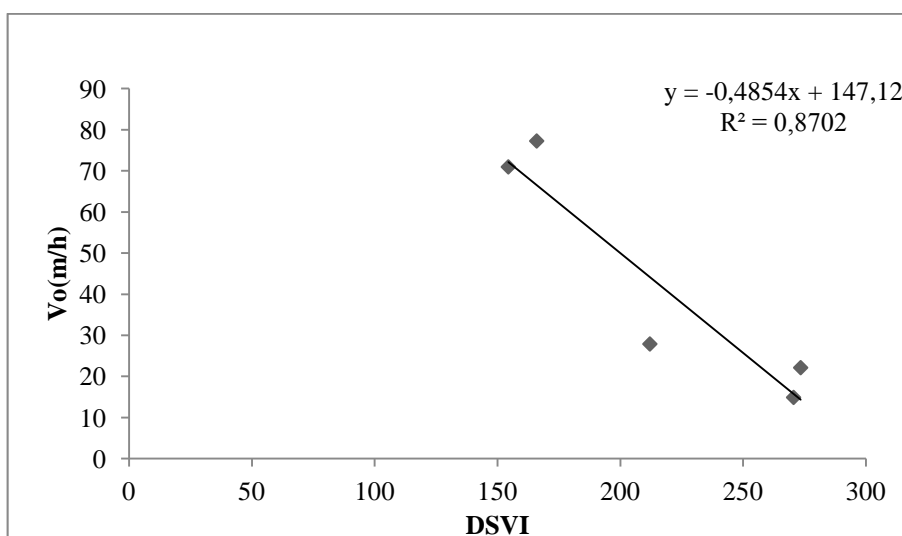
T (°C)	μ (mPas)						
	2η σειρά	3η σειρά	M.O.	Τυπική απόκλιση	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	όρια διαστήματος εμπιστοσύνης	
10	4,6	4,5	4,55	0,07	0,10	4,45	4,65
20	3,6	3,6	3,6	0,00	0,00	3,60	3,60
25	3,3	3,4	3,35	0,07	0,10	3,25	3,45
30	3,1	3	3,05	0,07	0,10	2,95	3,15
35	3	3	3	0,00	0,00	3,00	3,00

Στο σχήμα 4-22 παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τιμών του ιξώδους του ανάμεικτου υγρού συναρτήσει της θερμοκρασίας (T) και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Παρατηρούμε πως με την άνοδο της θερμοκρασίας μειώνεται η τιμή του ιξώδους του ανάμεικτου υγρού και μάλιστα όπως φαίνεται στο διάγραμμα μειώνεται γραμμικά. Η μείωση του ιξώδους συναρτήσει της θερμοκρασίας μπορεί να εξηγήσει τη βελτίωση στα χαρακτηριστικά καθιζηματότητας που παρατηρήσαμε παραπάνω (αύξηση V_0 – μείωση DSVI) και αυτό υποστηρίζεται και από τη βιβλιογραφία.



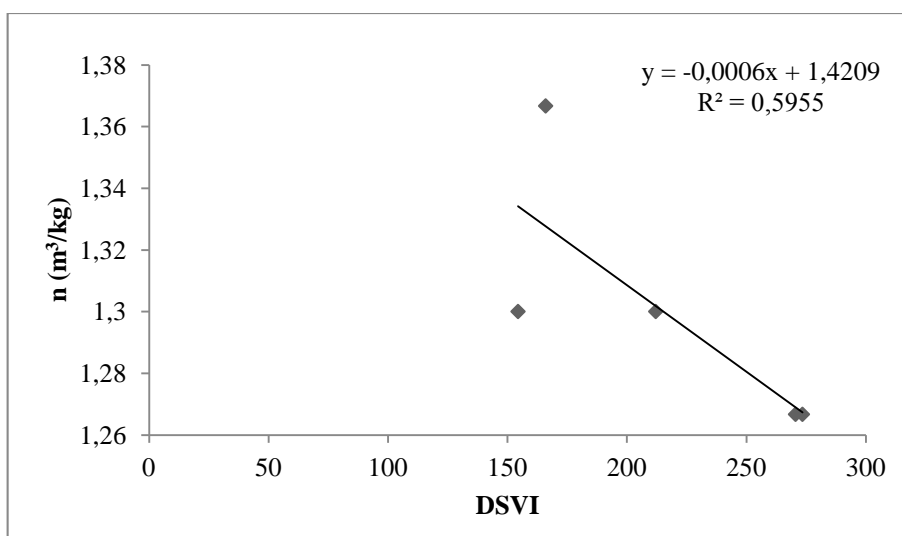
Σχήμα 4-22: Συσχέτιση του ιξώδους με τη θερμοκρασία (T)

Στα επόμενα γραφήματα έγινε η απόπειρα συσχέτισης των σταθερών V_0 και n και του ιξώδους ως προς το DSVI. Παρατηρούμε ότι η τιμή της σταθεράς V_0 μειώνεται με την αύξηση του DSVI λόγω της μείωσης της καθιζησιμότητας.

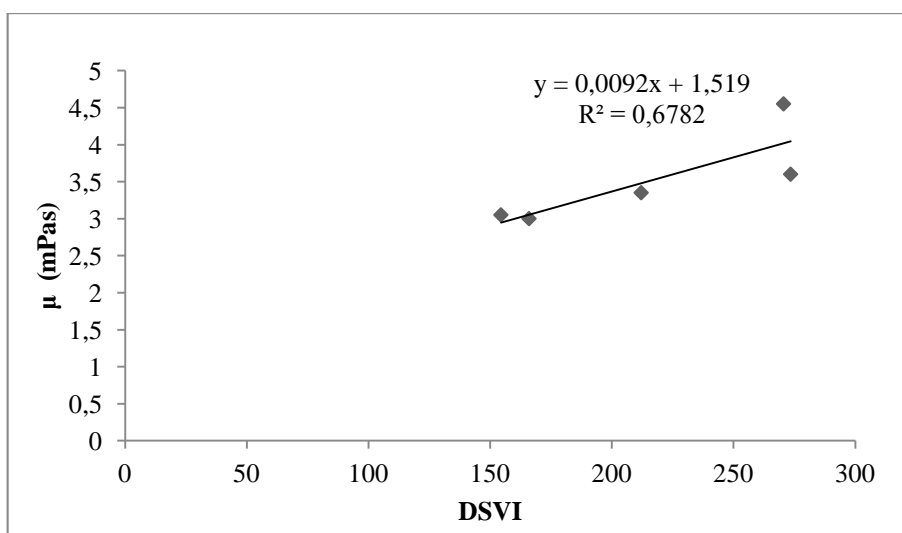


Σχήμα 4-23: Συσχέτιση της σταθεράς V_0 με το DSVI

Η σταθερά n επίσης μειώνεται με την αύξηση του DSVI, βέβαια, το εύρος των τιμών του n (1,3 -1,4) είναι αρκετά μικρό και δε μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα. Τέλος, Στο σχήμα 4-25 που ακολουθεί παρατηρούμε πως υπάρχει εξάρτηση του DSVI με το ιξώδες, δηλαδή η αύξηση του ιξώδους (μ) επιφέρει αύξηση και στη τιμή του δείκτη.



Σχήμα 4-24: Συσχέτιση της σταθεράς n με το DSVI



Σχήμα 4-25: Συσχέτιση του ιξώδους (μ) με το DSVI

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση αυτού του πειράματος ήταν σε γενικές γραμμές τα αναμενόμενα. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία φαίνεται πως επηρεάζει την καθιζησιμότητα της ενεργού ιλύος σε ένα πολύ σημαντικό βαθμό μεν αλλά για ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος (20 °C – 30 °C). Κάτω από τους 20 °C δεν φαίνεται να υπάρχει καμία επιρροή πάνω στην καθιζησιμότητα ενώ πάνω από τους 30 °C παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της θερμοκρασίας αρχίζει και λειτουργεί αντίστροφα. Από την εξέταση του ιξώδους του ανάμεικτου υγρού σε εκάστοτε θερμοκρασία προέκυψε ότι η τιμή του μειώνεται γραμμικά με την άνοδο της θερμοκρασίας. Σε αυτή τη μείωση του ιξώδους αποδίδεται η βελτίωση της

καθιζισιμότητας μιας και οποιαδήποτε άλλη διεργασία σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με αυτά του Νουτσόπουλου (2002), ο οποίος ερεύνησε την επίδραση της θερμοκρασίας στον δείκτη DSVI σε πέντε συστήματα προαπονιτροποίησης. Συγκεκριμένα, παρατήρησε πως στην πλειοψηφία των συστημάτων ο δείκτης καθιζισιμότητας ήταν αρκετά αυξημένος για θερμοκρασίες κάτω των 20 °C και αισθητά μικρότερος όταν η θερμοκρασία ήταν μικρότερη από τους 20 °C.

Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά καθιζισιμότητας η σταθερά N_0 παρουσιάζει αύξηση στη τιμή της με την άνοδο της θερμοκρασίας αλλά κυρίως η τιμή της παρουσιάζει αλματώδη άνοδο κατά τη μετάβαση από τους 25 °C στους 30 °C. Γι αυτό το λόγο το γράφημα χωρίστηκε σε δύο περιοχές, την περιοχή κάτω των 25 °C και την περιοχή άνω των 30 °C. Από την άλλη πλευρά η σταθερά n δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την μεταβολή της θερμοκρασίας και η τιμή της μάλλον καθορίζεται από το είδος της εκάστοτε ιλύος. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με αυτά των Winkler et al. (2012) οι οποίοι παρατήρησαν πως με την άνοδο της θερμοκρασίας αυξάνεται και η ταχύτητα καθίζησης.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν διττός. Αρχικά ήταν η ανάπτυξη μίας μεθόδου ανάλυσης εικόνας δειγμάτων ενεργού ιλύος με σκοπό τον υπολογισμό διαφόρων μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων και ο προσδιορισμός των μεταξύ τους συσχετίσεων και στη συνέχεια η διερεύνηση των συσχετίσεων των χαρακτηριστικών καθιζησιμότητας της ενεργού ιλύος και της επίδρασης της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας συνοψίζονται στα ακόλουθα:

A. Μέθοδος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναπτύχθηκε μία μέθοδος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας δειγμάτων ενεργού ιλύος κατά την οποία συνδυάζεται η μικροσκοπική παρατήρηση με ένα λογισμικό επεξεργασίας εικόνας. Αυτή η εφαρμογή μας δίνει την δυνατότητα να εκτιμήσουμε μία πληθώρα μορφολογικών παραμέτρων των κροκίδων της ενεργού ιλύος με αρκετά μεγάλη ακρίβεια και να καταργήσουμε την υποκειμενικότητα του παρατηρητή. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν οι εξής παράμετροι: Επιφάνεια, περίμετρος, aspect ratio, μέγιστος άξονας, ελάχιστος άξονας, μέγιστη διάμετρος, ελάχιστη διάμετρος, μέση διάμετρος και καμπυλότητα.

Από την διαδικασία της επικύρωσης της μεθόδου, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος διαθέτει επαναληψιμότητα καθώς αν εξαιρεθεί η επιφάνεια, όλες οι υπόλοιπες παράμετροι δεν παρουσίασαν σημαντικές αποκλίσεις από τον μέσο όρο. Επιπλέον στην πλειοψηφία των παραμέτρων τα περιθώρια σφάλματος είναι αρκετά μικρά, ειδικά στην περίπτωση του συνόλου των μετρήσεων, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι η μέθοδος παρουσιάζει αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, αν λάβουμε υπόψη ότι ο αριθμός των κροκίδων που καταμετρώνται και αναλύονται σε κάθε σειρά μετρήσεων είναι αρκετά υψηλός, μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την αξιοπιστία της μεθόδου και ότι μας επιτρέπει να παίρνουμε ασφαλή συμπεράσματα για τη ποιότητα του εκάστοτε δείγματος.

Στην συνέχεια η μέθοδος εφαρμόστηκε για την εξέταση δειγμάτων ανάμικτου υγρού που προέρχονταν από διάφορα συστήματα επεξεργασίας ιλύος. Η μέθοδος έδωσε σημαντικά αποτελέσματα τα οποία κατά κύριο λόγο επικυρώνουν την αξιοπιστία και την ακρίβεια της μεθόδου.

Από τις αθροιστικές κατανομές των αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι σε όλα τα συστήματα το aspect ratio παρουσιάζεται πολύ μεγαλύτερο της μονάδας δηλαδή η πλειοψηφία των κροκίδων τείνει να έχει επίμηκες σχήμα. Επίσης η καμπυλότητα εμφανίζεται πολύ μεγαλύτερη της μονάδας που σημαίνει ότι κατά κύριο λόγο οι κροκίδες έχουν ακανόνιστη δομή. Επιπλέον τα συστήματα που εμφανίζουν υψηλή τιμή στο μέγιστο άξονα, στη μέγιστη διάμετρο και στη μέση διάμετρο των κροκίδων, παρατηρούμε ότι εμφανίζουν αντίστοιχα υψηλές τιμές και στην επιφάνεια των κροκίδων. Επιπροσθέτως, συστήματα που εμφανίζουν υψηλό δείκτη νηματοειδών παρουσιάζουν μικρές διαμέτρους και μικρή επιφάνεια κροκίδων, σε αντίθεση με τα

πιλοτικά συστήματα διαλείποντος έργου που δεν παρουσιάζουν ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών και φαίνεται να αναπτύσσουν μεγαλύτερες κροκίδες. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι στα συστήματα που δε παρουσιάζουν νηματοειδή διόγκωση οι τιμές της παραμέτρου aspect ratio εμφανίζονται μικρότερες και επομένως στα συστήματα αυτά οι κροκίδες τείνουν να αναπτύσσουν πιο σφαιρικό σχήμα. Με βάση τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι η νηματοειδής διόγκωση σχετίζεται με το σχήμα και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κροκίδων.

Στη συνέχεια από τη διερεύνηση της γραμμικής συσχέτισης των παραμέτρων μεταξύ τους με τον συντελεστή συσχέτισης του Pearson προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Όσο αυξάνεται το μέγεθος των κροκίδων το aspect ratio φαίνεται ότι μειώνεται, δηλαδή η έλλειψη που τις περικλείει τείνει να αποκτά πιο σφαιρικό σχήμα.
- ❖ Όσο αυξάνεται το μέγεθος των κροκίδων, αυξάνεται και η καμπυλότητα δηλαδή η δομή τους γίνεται πιο ακανόνιστη και διάχυτη.
- ❖ Όταν αυξάνεται το aspect ratio φαίνεται ότι αυξάνεται και ο αριθμός των αντικειμένων ανά mm^2 , δηλαδή όσο πιο ελλειψοειδείς γίνονται οι κροκίδες, τόσο αυξάνεται ο αριθμός τους ανά mm^2 .
- ❖ Η καμπυλότητα παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με τον αριθμό των αντικειμένων ανά mm^2 δηλαδή όσο λιγότερο διάχυτη είναι η δομή τόσο πιο πολλές κροκίδες προκύπτουν ανά mm^2 .
- ❖ Όταν το μέγεθος των κροκίδων αυξάνεται τότε μειώνεται ο αριθμός των αντικειμένων ανά mm^2 . Δηλαδή μεγαλύτερες κροκίδες καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο στο πλακίδιο κι επομένως ο αριθμός τους ανά mm^2 είναι μικρότερος.
- ❖ Όταν αυξάνεται ο δείκτης καθιζησιμότητας DSVI και επομένως οι κροκίδες συγκρατούν νερό μέσα τους λόγω της νηματοειδούς διόγκωσης, τότε το σχήμα τους τείνει να γίνεται πιο ελλειψοειδές ή επίμηκες.
- ❖ Οι διαστάσεις της κροκίδας δηλαδή ο μέγιστος άξονας, η μέγιστη διάμετρος και η μέση διάμετρος καθώς και η επιφάνεια τους παρουσιάζουν ισχυρές θετικές συσχετίσεις μεταξύ τους.
- ❖ Η αύξηση του μεγέθους των κροκίδων οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης στερεών.
- ❖ Τέλος προέκυψε πως υψηλές τιμές του δείκτη DSVI σχετίζονται θετικά με χαμηλές συγκεντρώσεις στερεών και αντίστροφα.

B. Συσχέτιση παραμέτρων καθιζησιμότητας

Τα κυριότερα συμπεράσματα αυτού του μέρους της διπλωματικής είναι:

- ❖ Ο δείκτης DSVI συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά καθιζησιμότητας V_0 και n . Ειδικότερα, με την αύξηση του δείκτη καθιζησιμότητας DSVI παρατηρήθηκε μείωση στη τιμή της σταθεράς V_0 και αύξηση στη σταθερά n αντίστοιχα.

- ❖ Η σταθερά N_0 αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας αλλά κυρίως η τιμή της παρουσιάζει αλματώδη άνοδο κατά τη μετάβαση από τους $25\text{ }^\circ\text{C}$ στους $30\text{ }^\circ\text{C}$. Αντίθετα, η σταθερά n δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την μεταβολή της θερμοκρασίας και η τιμή της μάλλον καθορίζεται από το είδος της εκάστοτε ύλης.
- ❖ Η θερμοκρασία φαίνεται πως επηρεάζει θετικά την καθιζηματικότητα της ενεργού ύλης για το θερμοκρασιακό διάστημα των $20\text{ }^\circ\text{C} - 30\text{ }^\circ\text{C}$. Κάτω από τους $20\text{ }^\circ\text{C}$ δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά ο δείκτης καθιζηματικότητας ενώ πάνω από τους $30\text{ }^\circ\text{C}$ παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της θερμοκρασίας αρχίζει και λειτουργεί αντίστροφα. Το φαινόμενο θα πρέπει να αποδοθεί στην μείωση του ιξώδους με την αύξηση της θερμοκρασίας μιας και οποιαδήποτε άλλη διεργασία σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η μέθοδος ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας που αναπτύχθηκε θα αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη μίας πληθώρας εφαρμογών που θα αποσκοπούν στην εκτίμηση μορφολογικών παραμέτρων όχι μόνο των κροκίδων αλλά και των νηματοειδών μικροοργανισμών που συνθέτουν το εκάστοτε δείγμα ενεργού ύλης. Το επόμενο βήμα εξέλιξης της μεθόδου αποτελεί η ανάπτυξη της εφαρμογής καταμέτρησης των νηματοειδών μικροοργανισμών και ο προσδιορισμός του μήκους τους. Επιπλέον, οι μορφολογικές παράμετροι που υπολογίστηκαν στη παρούσα εργασία εξετάζουν την μορφολογία των κροκίδων μόνο ως προς το σχήμα τους. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να εισαχθούν περαιτέρω μορφολογικοί παράμετροι που να περιγράφουν τις κροκίδες ως προς τη δομή τους, όπως το πόσο συμπαγείς ή ανοιχτές είναι. Τέλος στα πλαίσια αυτής της μεθόδου μελλοντικά μπορούν να αναπτυχθούν και άλλες εφαρμογές όπως η εκτίμηση της συγκέντρωσης στερεών του δείγματος ενεργού ύλης που εξετάζεται.

Επομένως τα περιθώρια χρησιμοποίησης αυτής της μεθόδου πάνω στην έρευνα της καθιζηματικότητας της ενεργού ύλης είναι σαφώς πολύ μεγάλα. Για παράδειγμα η μέθοδος ανάλυσης εικόνας μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση της εποχιακής διακύμανσης της μορφολογίας των κροκίδων και των νηματοειδών μικροοργανισμών και η συσχέτιση τους με τις παραμέτρους καθιζηματικότητας ενεργού ύλης.

Βιβλιογραφία

- Ανδρεαδάκης Α. (2008). Βιολογική επεξεργασία με ενεργό ιλύ. ΕΜΠ. Αθήνα.
- Νουτσόπουλος Κ. (2002). Επίδραση εναλλακτικών σχημάτων επεξεργασίας στα χαρακτηριστικά καθίζησης συστημάτων ενεργού ιλύος με απομάκρυνση θρεπτικών. ΕΜΠ.
- Νουτσόπουλος Κ., Μαμάης Δ. (2009). Καθιζησιμότητα ιλύος, Προβλήματα καθίζησης, Νηματοειδής διόγκωση και αφρισμός, Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη νηματοειδών βακτηρίων, Μέθοδοι αντιμετώπισης και ελέγχου. ΕΜΠ.
- Παπαδόπουλος Γ. (2011). Συσχέτιση δύο μεταβλητών. Εργαστήριο Μαθηματικών & Στατιστικής <<http://www.aua.gr/gpapadopoulos/files/sisxetisi091.pdf>>
- Amaral, A.L. (2003). Image Analysis in Biotechnological Processes: Applications to Wastewater Treatment. PhD Thesis, University of Minho, Braga, Portugal. <<http://hdl.handle.net/1822/4506>>
- Amaral A.L. και Ferreira E.C. (2005). Activated sludge monitoring of a wastewater treatment plant using image analysis and partial least squares regression. *Analytica Chimica Acta*, 544, 246–253
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (1992). *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*.
- Andreadakis A. (1993). Physical and chemical properties of activated sludge floc *Water Sci. Technol.* 27 (12) 1707–1714.
- Blackbeard J.R., Gabb D.M.D., Ekama G.A. and Marais G.R. (1986). Identification of filamentous organisms in nutrient removal activated sludge plants in South Africa. *Water SA*, Vol. 14, No 1, pp. 29-33.
- Baudez J.C, Slatter P., Eshtiaghi N. (2013). The impact of temperature on the rheological behaviour of anaerobic digested sludge. *Chemical Engineering Journal*, 215–216, 182–187
- Bye CM, Dold PL. (1998). Sludge volume index settleability measures: Effect of solids characteristics and test parameters. *Water Environ Res.*, 70(1):87–93.
- Catunda P. F. C., Van Haandel A. C., Araujo L. S. and Vilar A. (1989). Determination of the settleability of activated sludge. In Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, September 1989, Vol. 15, pp. 53±85.
- Cingolani L., Ciccarelli E. and Scarlata V. (1992). Filamentous organisms observed in paper mill activated sludge. In: Proceedings of two-day Workshop on Prevention and Control of Bulking Activated Sludge, *IAWPRC – IRSA*, Perugia, Italy

- Daigger G. T. and Roper R. E., Jr. (1985). The relationship between SVI and activated sludge settling characteristics. *Journal Water Pollution Control Federation*, 57(8), 859±866.
- Daigger G. T. (1995). Development of refined clarifier operating diagrams using an updated settling characteristics database. *Water Environment Research*, 67(21), 95±100.
- Da Motta M., Pons M. , Roche N., Vivier H. (2001). Characterization of activated sludge by automated image analysis. *Biochemical Engineering Journal*, 9, 165–173
- Dick R., Vesilind P. (1969). The sludge volume index – what is it? *J WPCF*, 41 (7) 1285-1291.
- Eikelboom D. H. and van Buijsen H. J. J. (1981). Microscopic Sludge Investigation Manual. TNO Research Institute for Environmental Hygiene, Water and Soil Division, The Netherlands.
- Ekama G. A. and Marais G. v. R. (1986). Sludge settleability. Secondary settling tank design procedures. *Water Pollution Control*, 1, 101±114.
- Fróes C. M. V. (1996). Evaluation of the performance of the Morro Alto wastewater treatment plant, with emphasis on the solids flux theory. Dissertação de mestrado, *UFMG* (in Portuguese).
- Geraldí M.H. (2002). Settleability Problems and Loss of Solids in the Activated Sludge Process. *John Wiley & Sons, Inc., Publication*, New Jersey.
- Glasbey C.A., Horgan G.W. (1995). *Image Analysis for the Biological Sciences*, Wiley, Chichester.
- Grijspeerdt K. and Verstraete W. (1997). Image analysis to estimate the settleability and concentration of activated sludge. *Wat. Res.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1126-1134.
- Henze M., van Loosdrecht M.C.M., Ekama G.A. and Brdjanovic D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design*. *IWA Publishing*.
- Image-Pro plus start up guide (2009). Media Cybernetics, Inc.
- Jenkins D., M.G. Richard and G.T. Daigger (1993). Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming. *Lewis Publishers*, USA.
- Jin B., Wilén B.M., Lant P. (2003). A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge. *Chemical Engineering Journal* 95, 221–234
- Johnstone D. W. M., Rachwall A. J. and Hanbury M. J. (1979). Settlement characteristics and settlement-tank performance in the Carrousel activated sludge system. *Water Pollution Control* 78, 337±353.

- Koivuranta E., Keskitalo J., Haapala A., Stoor T., Sarén M.c., Niinimäki J. (2012). Optical monitoring of activated sludge flocs in bulking and non-bulking conditions. *Environmental Technology* iFirst, 1–8
- Koopman B. and Cadee K. (1983). Prediction of thickening capacity using diluted sludge volume index. *Water Research* 17(10), 1427±1431.
- Krhuthov O., Ruzickova I. and Wanner J. (2001). Microbial evaluation of activated sludge and filamentous population in 8 nutrient removal activated sludge plants during year 2000. In: Proceedings of the 3rd IWA International Specialized Conference on Microorganisms in Activated Sludge and Biofilm Processes, IWA, Rome
- Lee S.E., Koopman B.I., Jenkins D. and Lewis R.F. (1982). The effect of aeration basin configuration on activated sludge bulking at low organic loading, *Water sci. Technol.*, 14, 407.
- Mesquita D.P., Amaral A.L., Ferreira E.C. (2011). Characterization of activated sludge abnormalities by image analysis and chemometric techniques *Analytica Chimica Acta*, 705, 235– 242
- Noutsopoulos C., Andreadakis A., Mamais D., Gavalakis E. (2007). Identification of type and causes of filamentous bulking under mediterranean conditions. *Environmental Technology*, Vol. 28. pp 115-122
- Pitman A. R. (1984). Settling of nutrient removal activated sludges. *Water Science and Technology*, 17, 493±504.
- Pujol R., Duchene P., Schetrite S. and Canler J.P. (1991). Biological foams in activated sludge plants: characterization and situation. *Water Res.*, 25, 1399-1404
- Reed, S. C.; Murphy, R. S. (1969). Low Temperature Activated Sludge Settling. *J. Sanit. Eng. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 95, 747.
- Seviour E. M., Williams C. J., Seviour R. J., Soddell J. A. and Lindrea K. C. (1990). A survey of filamentous bacterial populations from foaming activated sludge plants in eastern states of Australia. *Water Res.*, 24, 493-498
- Sezgin M., Jenkins D. and Parker D.S. (1978). A Unified Theory of Filamentous Activated Sludge Bulking. *J. Water Polln. Control Fedn.*, 50, 362
- Sezgin M. (1982). Variation of sludge volume index with activated sludge characteristics. *Water Research Vol. 16* pp. 83-88.
- Tuntoolavest M. and Grady L. C. P. (1982). Effect of activated sludge operational conditions on sludge thickening characteristics. *Journal Water Pollution Control Federation*, 54(7), 1112±1117.
- Podolsky, R.D. (1994). Temperature and water viscosity: Physiological versus mechanical effects on suspension feeding. *Science*, 265, 100-103.

- Valter T., Jenkins D. and Wanner J. (2006). Activated sludge separation problems. Theory, Control Measures, Practical Experience. *IWA Publishing*.
- Vesilind PA. (1968). Design of prototype thickeners from batch settling tests. *Water Sew Works*, 115:302–7.
- Von Sperling M. (1990). Optimal management of the oxidation ditch process. Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London, 1990, 371 p.
- Von Sperling M. and Froes C.M.V (1999). Determination of the Required Surface Area for Activated Sludge Final Clarifiers Based on a Unified Database. *Wat. Res.*, Vol. 33, No. 8, pp. 1884±1894
- Wahlberg E. J. and Keinath T. M. (1988). Development of settling flux curves using SVI. *Journal Water Pollution Control Federation*, 60(12), 2095±2100.
- Wahlberg E. J. and Keinath T. M. (1995). Development of settling flux curves using SVI: an addendum. *Water Environment Research*, 67, 872.
- Wanner J. (1994). Activated Sludge Bulking and Foaming Control. *Technomic Publishing Co. Inc.* Lancaster (PA), USA.
- Winkler M.-K.H., Bassin J.P., Kleerebezem R., van der Lans R.G.J.M., van Loosdrecht M.C.M. (2012). Temperature and salt effects on settling velocity in granular sludge technology. *Water research*, 46, 3897 – 3902