



## **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

---

**Διατμηματικό – Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών  
Σπουδών**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**« Οι Νανοφυσαλίδες και οι εφαρμογές τους στην επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων»**

**Όνοματεπώνυμο Φοιτητή: Παναγιωτακοπούλου Χριστίνα**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Νουτσόπουλος**

**Οκτώβριος 2019**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ- ΠΜΣ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»-  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΘΕΜΑ: « Η ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ»

*“As the discoveries of modern science create tremendous hope, they also lay vast ethical mine fields. “*

*G.W.Bush*



## Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	9
2.	ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ .....	12
2.1	ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ .....	12
2.2	ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ .....	13
2.2.1	Ορισμός.....	13
2.2.2	Δομή .....	14
2.2.3	Κατηγοριοποίηση των Φυσαλίδων .....	16
2.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ .....	20
2.3.1.	Μικρό Μέγεθος .....	20
2.3.2	Μακροζωία Φυσαλίδων .....	21
2.3.3	Χαμηλή Ταχύτητα Ανόδου .....	21
2.3.4	Υψηλή Επιφανειακή Τριβή .....	23
2.3.5	Μεγάλη εσωτερική πίεση .....	23
2.3.6	Αναλογία Επιφάνειας- Όγκου Μικροφυσαλίδας .....	24
2.3.7	Διαλυτότητα Αερίου .....	25
2.3.8	Δυναμικό Ζήτη .....	26
2.3.9	Δημιουργία Ελευθέρων Ριζών .....	30
2.3.10	Μεταβολή Των Ιδιοτήτων του Υγρού Μέσω της Ανάδευσης των Μικροφυσαλίδων .....	30
2.3.11	Εμφάνιση .....	32
2.3.12	Σύγκριση με συμβατικές φυσαλίδες .....	33
2.3.13	Μέθοδοι Μέτρησης του μεγέθους των Νανοφυσαλίδων .....	34
2.4	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ .....	36
2.4.1	Ο Μηχανισμός Δημιουργίας Νανοφυσαλίδων – Σπηλαίωση .....	37
2.4.2	Δημιουργία Νανοφυσαλίδων από Μικροφυσαλίδες .....	41
2.4.3	Δημιουργία Νανοφυσαλίδων μέσω Ηλεκτρόλυσης .....	41
2.4.4	Δημιουργία Νανοφυσαλίδων με Μηχανικούς τρόπους .....	42
3	ΟΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ .....	46
3.1.	ΥΨΗΛΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΕΡΙΟΥ .....	47
3.2	ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΟΓΟΝΩΝ- ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ..	48
3.3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΑ ΛΥΜΑΤΑ .....	49
3.4	ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ- ΑΦΡΙΣΜΟΣ.....	49
4	ΟΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ .....	52



4.1	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ .....	53
4.2	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ .....	54
4.3	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗ ΛΙΜΩΝ .....	56
4.4	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟ ΥΔΑΤΩΝ .....	61
4.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗ ΕΔΑΦΩΝ .....	63
4.6	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΓΕΩΡΓΙΑ .....	66
4.6	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ .....	70
4.7	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....	71
4.8	ΟΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΥΓΕΙΑΣ .....	71
4.9	ΟΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΣΤΗΝ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ ΖΩΗ .....	72
5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΛΙΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ .....	74
5.1	ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ .....	75
5.2	ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΡΥΠΑΝΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ .....	75
5.3	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ ΑΠΟ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ .....	77
5.4	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ Ν ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ .....	79
5.5	ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΧΥΤΑ .....	80
5.6	ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΚΑΙ UV ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ....	81
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	83
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	87

### Λίστα Εικόνων:

Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα μεταβολής διαμέτρου των Νανοφυσαλίδων σε σχέση με τον χρόνο .....	15
Εικόνα 2: Σχηματικό διάγραμμα Κατάταξης των φυσαλίδων με βάση το μέγεθος .....	18
Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα διαφορών Συμβατικών Φυσαλίδων, Μικροφυσαλίδων και Νανοφυσαλίδων .....	18
Εικόνα 4: Σχηματικό διάγραμμα μεταβολή της ταχύτητας ανόδου των Νανοφυσαλίδων σε σχέση με το μέγεθός τους.....	23
Εικόνα 5: Χρονικός Κύκλος της Διαμέτρου της φυσαλίδας .....	24
Εικόνα 6: Αρνητικά Φορτισμένη Επιφάνεια Μακροφυσαλίδων .....	26
Εικόνα 7: Διεπιφάνεια Υγρού- αερίου και το Δυναμικό ζήτα.....	27
Εικόνα 8: Σχηματικό διάγραμμα μεταβολής της διαμέτρου των νανοφυσαλίδων σε σχέση με την μεταβολή του δυναμικού ζήτα με βάση τον χρόνο .....	28
Εικόνα 9: Επίδραση του pH στο Δυναμικό ζήτα.....	29



Εικόνα 10: Μεταβολή του pH σε σχέση με το χρόνο ανάδευσης των μικρο/νανοφυσαλίδων και την θερμοκρασία.....	29
Εικόνα 11: Μεταβολή του Ιξώδους σε σχέση με το χρόνο ανάδευσης των μικρο/νανοφυσαλίδων .....	31
Εικόνα 12: Μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υγρού σε σχέση με το χρόνο ανάδευσης των μικρο/νανοφυσαλίδων .....	31
Εικόνα 13: Μεταβολή της ανθεκτικότητας της επιφάνειας της φυσαλίδας σε σχέση με το χρόνο ανάδευσης των μικρο/νανοφυσαλίδων .....	32
Εικόνα 14: Παραγωγή μικροφυσαλίδων με μηχανικά μέσα .....	32
Εικόνα 15: Διαλυμένος αέρας σε ζεστό νερό προκαλεί μικροφυσαλίδες στην ανάμειξή του με κρύο νερό βρύσης .....	32
Εικόνα 16: Εμφάνιση Νανοφυσαλίδων .....	33
Εικόνα 17: Οι διαφορές των συμβατικών φυσαλίδων με τις μικρο/νανοφυσαλίδες .....	34
Εικόνα 18: Παραγωγή Νανοφυσαλίδων .....	37
Εικόνα 19: Κατηγοριοποίηση Σπηλαιώσης- βάσει του μηχανισμού μείωσης της πίεσης κάτω από μια κρίσιμη τιμή .....	39
Εικόνα 20: Ακουστική Σπηλαιώση- Μεταβολή διαμέτρου φυσαλίδας με τον χρόνο .....	40
Εικόνα 21: Παραγωγή νανοφυσαλίδων με συσκευή τύπου αποσυμπίεσης.....	42
Εικόνα 22: Παραγωγή νανοφυσαλίδων με συσκευή τύπου Διατμητικής Ροής .....	42
Εικόνα 23: Παραγωγή νανοφυσαλίδων με συσκευή τύπου Στροβιλισμού.....	43
Εικόνα 24: Παραγωγή νανοφυσαλίδων με συσκευή τύπου Ανάμειξης .....	44
Εικόνα 25: Γεννήτρια Venturi Aerator.....	44
Εικόνα 26: Δυνητική Συνεισφορά των νανοφυσαλίδων στην Περιβαλλοντική Μηχανική .....	47
Εικόνα 27: Μεταβολή του διαλυμένου Οξυγόνου σε σχέση με τον χρόνο .....	54
Εικόνα 28: Μηχανισμός του υδάτινου ταμειυτήρα απεικονίζοντας το φαινόμενο του ευτροφισμού και της κατανάλωσης οξυγόνου του συστήματος .....	56
Εικόνα 29: Σχηματική απεικόνιση συμβατικού συστήματος αερισμού .....	57
Εικόνα 30: Γεννήτρια μικροφυσαλίδων σε υπολίμνιο νερό .....	58
Εικόνα 31: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης των συστημάτων αερισμού των νερών της λίμνης.....	59
Εικόνα 32: Υγροποίηση εδάφους- Σεισμική απόκριση υγροποιημένου εδάφους με μικροφυσαλίδες .....	64
Εικόνα 33: Μεταβολή του κορεσμού στο έδαφος σε σχέση με την ποσότητα μικροφυσαλίδων που προστίθεται στο έδαφος.....	64
Εικόνα 34: Οριζόντια επιτάχυνση εδάφους στα εξεταζόμενα εδαφικά δείγματα.....	65
Εικόνα 35: Μεταβολή της ροής του αίματος σε σχέση με τον χρόνο.....	72
Εικόνα 36: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης εξυγίανσης νερού .....	76
Εικόνα 37: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης DAF.....	78
Εικόνα 38: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας απομάκρυνσης αζώτου μέσω της ενεργοποίησης μικροοργανισμών που χρησιμοποιείται από την SHARP Corporation στην Ιαπωνία .....	80



**Περιεχόμενα Πινάκων**

Πίνακας 1: Πόσιμο νερό πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων .....	53
Πίνακας 2: Θαλασσινό νερό πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων .....	55
Πίνακας 3: Νερό Λίμνης πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων .....	60
Πίνακας 4: Σχηματική απεικόνιση των εφαρμογών της τεχνολογίας των νανοφουσαλίδων σε σχέση με την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων .....	61
Πίνακας 5: Οικιακά Λύματα πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων .....	70
Πίνακας 6: Βιομηχανικά Λύματα πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων .....	71



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με στόχο την παρουσίαση των νανοφουσαλίδων, των ιδιοτήτων τους και των εφαρμογών τους κυρίως στην περιβαλλοντική μηχανική και σε εφαρμογές επεξεργασίας υδατικών πόρων και υγρών αποβλήτων.

Αρχικά έγινε μια παρουσίαση της δομής και των βασικών χαρακτηριστικών των νανοφουσαλίδων και ειδικά αυτών των χαρακτηριστικών που τις διαφοροποιούν από τις συμβατικές φουσαλίδες.

Στην συνέχεια αναλύθηκαν οι λόγοι στους οποίους οφείλεται η μακροζωία τους, και αναπτύχθηκαν οι μηχανικοί τρόποι παραγωγής τους, όπως εφαρμόζονται σήμερα.

Έγινε επίσης αναφορά στην χαμηλή πλευστότητα των νανοφουσαλίδων, και στον αργό ρυθμό διάχυσης του αερίου τους, ιδιότητες που τις καθιστούν ευνοϊκότερες των συμβατικών στην χρήση τους στην περιβαλλοντική μηχανική, δεδομένου ότι διευκολύνουν το φαινόμενο επίπλευσης κατά την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, και την ταχεία απομάκρυνση των ρυπαντικών φορτίων.

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν διάφορες πειραματικές εφαρμογές των νανοφουσαλίδων βάσει των οποίων προέκυψε ότι η απόδοση των κρίσιμων παραμέτρων κατά την επεξεργασία πόσιμου, θαλασσινού νερού, νερού λίμνης, καθώς και οικιακών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, ήταν αρκετά αυξημένη, συγκρινόμενη με την απόδοση των συμβατικών μεθόδων επεξεργασίας.

Πολύ θετικά αποτελέσματα προέκυψαν και κατά την χρήση των νανοφουσαλίδων στον τομέα της γεωργίας, των καλλιεργειών, στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, αλλά και στον τομέα της υγείας. Η εφαρμογή των νανοφουσαλίδων στα καθαριστικά απορρυπαντικά που χρησιμοποιούμε καθημερινά, βρέθηκε εξίσου αποτελεσματική.

Ως εκ τούτου, προέκυψε ότι η χρήση των νανοφουσαλίδων σε συστήματα επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων είναι μια μέθοδος φιλική στο περιβάλλον και με βάση τα μέχρι τώρα στοιχεία είναι πολλά υποσχόμενη. Περαιτέρω, προκειμένου να προκύψουν πιο ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τα πλεονεκτήματα χρήσης τους στην επεξεργασία υδατικών πόρων και υγρών αποβλήτων, και επειδή το πειραματικό φάσμα των εφαρμογών τους είναι ακόμα περιορισμένο, προτείνονται οι ακόλουθες ερευνητικές δράσεις:

- Μελέτη της σχέσης αλληλεπίδρασης των νανοφουσαλίδων με τις μικροβιακές κοινότητες των μικροοργανισμών.
- Μελέτη χρήσης νανοφουσαλίδων αέρα/όζοντος σε εφαρμογές απολύμανσης πόσιμου νερού.
- Μελέτη της απόδοσης των νανοφουσαλίδων στην απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων από τα λύματα, εφόσον με βάση τα ανωτέρω στοιχεία και λόγω της καλύτερης διάχυσης του διαλυμένου οξυγόνου, εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα θα είναι πολύ ενθαρρυντικά.



## **ABSTRACT**

The overall objective of the current study is to present the Nano bubbles, their properties and their applications mainly in the environmental engineering and in the water and wastewater treatment applications.

The study initially focused on the structure and the basic characteristics of the Nano bubbles and more specifically to those characteristics that diverge them from the conventional bubbles.

Reference was also made to the longevity of the Nano bubbles, which is the most beneficial characteristic of the Nano bubbles, and it was also analyzed the mechanical means of Nano bubble production, as applied today.

Additionally, the study explicitly referred to the low buoyancy of the Nano bubbles, and to the slow diffusion rate of their gas, properties which make them more favorable than the conventional ones which are currently used in the environmental engineering applications. Nano bubbles are found to facilitate the floating rate and to accelerate the organic removal during the wastewater treatment process.

In addition, various experimental applications of Nano bubbles have shown that the performance of critical parameters in the treatment of potable, sea water, lake water, as well as domestic and industrial wastewater has been significantly improved, compared to the performance of the use of the conventional bubbles.

Moreover, the use of Nano bubbles in agriculture, planting, soil bearing capacity and health has also shown positive results. The application of Nano bubbles to the detergents has been found to be equally effective.

Therefore, it has been concluded that the use of Nano bubbles in water and wastewater treatment systems is an environmentally friendly method and considering the experiments that have been done so far, it is considered as a highly promising method. Furthermore, in order to obtain more precise conclusions about their use, and as the experimental range of their applications is still limited, the following research actions are suggested:

- The study of the interaction of Nano bubbles with the microbial communities of microorganisms.
- The study of the use of air/ ozone Nano bubbles in drinking water depollution applications.
- The study of the performance of Nano bubbles in the removal of organic loads from wastewater, which based on the aforementioned reasons, are expected to be very promising.





## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα των τελευταίων χρόνων σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι η έλλειψη των υδατικών πόρων και ο τρόπος διαχείρισής τους. Εξαιτίας της ολοένα και λιγότερο σταθερής παροχής νερού αλλά και της συνεχόμενης αύξησης του πληθυσμού παγκοσμίως, η διαθεσιμότητα των πηγών του καθαρού νερού αγγίζει τα όρια της βιωσιμότητας, και η ανακύκλωση του νερού έχει γίνει επιτακτική ανάγκη. Από την άλλη πλευρά, ο αυξανόμενος ρυθμός της αστικοποίησης και της βιομηχανοποίησης έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλου όγκου υγρών αποβλήτων απειλώντας ταυτόχρονα τους υπάρχοντες υδατικούς πόρους.

Σύμφωνα με έρευνα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) το 2015, έχει υπολογιστεί ότι κάθε χρόνο πεθαίνουν περίπου 842.000 άνθρωποι, ενώ βρέθηκε ότι 361.000 παιδιά πεθαίνουν σε διάστημα λιγότερο από πέντε χρόνια, από αρρώστιες και διάρροια που οφείλονται κατά κύριο λόγο σε μολυσμένο νερό, σε έλλειψη προσωπικής υγιεινής και ανεπαρκούς καθαρισμό των χεριών. Βέβαια, το ποσοστό της παγκόσμιας θνησιμότητας από τέτοια αίτια μπορεί να εξαλειφθεί αν οι αρμόδιες αρχές λάβουν τα κατάλληλα μέτρα για την υγεία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα που αντικατοπτρίζει πλήρως την προαναφερθείσα κατάσταση εντοπίζεται στα πολυπληθή κέντρα του Περού όπου τα υγρά απόβλητα μέσω καναλιών και ρευμάτων κυκλοφορούν περιμετρικά των αστικών κέντρων αποτελώντας έναν κίνδυνο μείζονος σημασίας για το νερό, τη βιοποικιλότητα της περιοχής και την υγεία των κατοίκων.

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι είναι απόλυτη ανάγκη η κατασκευή εγκαταστάσεων επεξεργασίας και διαχείρισης υγρών αποβλήτων, και η ύπαρξη μιας βιώσιμης τεχνολογίας που θα έχει θετική επίδραση τόσο στην παγκόσμια έλλειψη υδατικών πόρων όσο και την διεθνή ενεργειακή κρίση.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με διεθνείς καταγραφές, έχει βρεθεί ότι στις ανεπτυγμένες χώρες περίπου το 1% της κρατικής ζήτησης σε ηλεκτρισμό καταναλώνεται σε δαπάνες αερισμού κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.



Επομένως, η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας που απαιτούν οι μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αλλά κυρίως η μείωση των υδατικών αποθεμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο, καθιστά επιτακτική την ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών και λιγότερο δαπανηρών λύσεων ως προς την διαχείριση των υδατικών πόρων και υγρών λοιπών αποβλήτων

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια μεγάλη προσπάθεια ανεύρεσης τρόπων επαναχρησιμοποίησης των υδατικών πόρων, ενώ η πιο πρόσφατα διαδεδομένη μέθοδος επεξεργασίας οικιακών και αστικών υγρών αποβλήτων, που υπόκειται στην «αρχή της επαναχρησιμοποίησης» είναι η ενεργή ίλυσ, η οποία όμως είναι μια ιδιαίτερα δαπανηρή διαδικασία.

Μια εναλλακτική μέθοδος επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων βασίζεται στην χρήση μικροφουσαλίδων. Οι μικροφουσαλίδες γνώρισαν μεγάλη απήχηση στις εφαρμογές του μηχανικού από τα μέσα του 1990 και μετά, και παρόλο που η παραγωγή τους είναι χαμηλού ενεργειακού κόστους και η χρήση τους μέχρι σήμερα είναι περιορισμένη, μεγάλο ποσοστό ερευνητών θεωρεί ότι μπορούν να αποτελέσουν μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο στην επεξεργασία των υδατικών πόρων και άλλων υγρών αποβλήτων. Στις μέρες μας, οι μικροφουσαλίδες χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές ιατρικές εφαρμογές με μεγάλη απήχηση.

Με την παρούσα εργασία σκοπεύουμε να παρουσιάσουμε τις «νανοφουσαλίδες» και να εμβυθύνουμε στις μοναδικές ιδιότητές του. Επιπλέον θα παρουσιάσουμε τους λόγους για τους οποίους έγιναν τα τελευταία χρόνια ευρέως διαδεδομένες και χρησιμοποιούνται στον κλάδο της υγείας, βιομηχανίας, και του περιβάλλοντος.

Επιπλέον αντικείμενο της εργασίας είναι η αξιολόγηση και οι δυνατότητες χρήσης των νανοφουσαλίδων ως προς την βελτίωση των υφιστάμενων μεθόδων καθαρισμού του νερού και της επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Πιο συγκεκριμένα στα πρώτα κεφάλαια της εργασίας παρουσιάστηκαν κάποιες γενικές πληροφορίες σχετικά με την νανοτεχνολογία και τα υλικά της. Στην συνέχεια έγινε μια παρουσίαση των νανοφουσαλίδων, ενώ έγινε αναφορά στην δομή τους και την κατηγοριοποίησή τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκαν αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των νανοφουσαλίδων και έγινε σύγκρισή με τις συμβατικές φουσαλίδες.

Εν συνέχεια, αναλύθηκε το φαινόμενο στο οποίο οφείλεται η δημιουργία των νανοφουσαλίδων καθώς και οι τρόποι παραγωγής τους όπως εφαρμόζονται σήμερα.



Στα επόμενα δύο (2) κεφάλαια επισημάνθηκε ο ρόλος των νανοφουσαλίδων στην περιβαλλοντική μηχανική και τα διάφορα πειράματα που έχουν γίνει με αυτές τα τελευταία χρόνια.

Τέλος, παρουσιάστηκαν οι εφαρμογές των νανοφουσαλίδων σε διεθνές επίπεδο κατά την επεξεργασία του νερού και υγρών αποβλήτων, καθώς και οι όποιες αντίστοιχες εφαρμογές εντός Ελλάδας.

Στα τελευταία κεφάλαια αναφέρθηκαν τα συμπεράσματα της εργασίας και οι προτάσεις χρήσης των νανοφουσαλίδων.



## 2. ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ

### 2.1 ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Η νανοτεχνολογία με απλά λόγια είναι η βασική έρευνα της ύλης σε επίπεδο ατόμων και μορίων, και ασχολείται κυρίως με τα άτομα, και δη με τον φλοιό του ατόμου. Το ιδιαίτερο σημείο της επιστήμης αυτής είναι ότι τα μεγέθη που εξετάζει είναι πάρα πολύ μικρά ( 1 δισεκατομμυριοστό του μέτρου), και ορατά μόνο με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, το οποίο και ουσιαστικά βοήθησε στην ανάπτυξη της επιστήμης αυτής.

Η νανοτεχνολογία είναι ένα πεδίο έρευνας που τυγχάνει μεγάλης ανάπτυξης και έρευνας τα τελευταία χρόνια, και δεδομένου ότι είναι δυσδιάκριτα τα όρια των εφαρμογών της μεταξύ των επιστημών, ο χαρακτήρας της είναι διεπιστημονικός.

Θεωρείται η επιστήμη του αιώνα αφού υπόσχεται τα πιο μικρά υλικά με πολύ μικρό βάρος και μεγάλες αποδόσεις, τα οποία μπορούν να δώσουν λύσεις σε πολλά τρέχοντα προβλήματα της εποχής μας. Η νανοτεχνολογία μπορεί να κατορθώσει περισσότερα με λιγότερες πρώτες ύλες και αυτό την καθιστά μια επιστήμη φιλική προς το περιβάλλον. Επιπλέον, υπόσχεται την εξοικονόμηση πόρων και την μείωση των αποβλήτων και των εκπομπών ρύπων.

Για να αποδώσουμε με απλά λόγια τον ορισμό της νανοτεχνολογίας, μπορούμε να πούμε ότι είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει έναν ανέξοδο έλεγχο των κατασκευών, μέσω της λειτουργίας των ατόμων. Η νανοτεχνολογία είναι η επιστήμη που εφαρμόζει την κλίμακα του  $10^{-9}$  του μέτρου στα μεγέθη της. Για να καταλάβουμε την νανοκλίμακα του  $1/1.000.000.000$  του μέτρου, φτάνει να αναφέρουμε ότι τα μαλλιά του ανθρώπου μετρούν 50.000 nm, ενώ το μέγεθος ενός μέσου βακτηρίου υπολογίζεται σε μερικές εκατοντάδες νανόμετρα. Επιπλέον μπορούμε να πούμε ότι 1nm ισούται με το μήκος 10 ατόμων Υδρογόνου στην σειρά. Το μικρότερο υλικό που έχει κατασκευαστεί μέχρι σήμερα έχει μέγεθος 130 νανόμετρα και είναι τμήμα από μικροσίπ. Το οπτικό πεδίο του ανθρώπου, έχει την δυνατότητα να δει μεγέθη μεγαλύτερα από 10.000 νανόμετρα.

Ο τομέας της περιβαλλοντικής νανοτεχνολογίας ασχολείται με τις εφαρμογές φυσικών νανο-υλικών, εφαρμογών και τεχνικών για τη βελτίωση ποικίλων οικοσυστημάτων.



Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο ορισμός των νανοϋλικών δεν είναι πολύ ξεκάθαρος, όμως σε γενικές γραμμές τα νανοϋλικά είναι όλα τα υλικά που το μέγεθός τους είναι μεταξύ 1-100 nm.

Τα νανοϋλικά παρουσιάζουν συγκεκριμένα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά συγκριτικά με τα παρόμοια υλικά μεγαλύτερου μεγέθους, και μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες ανάλογα με τις ιδιότητές τους, το σχήμα τους ή το μέγεθός τους. Ο βαθμός αντίδρασής τους και η σκληρότητά τους επίσης εξαρτώνται από τις ιδιότητές τους, το σχήμα τους και το μέγεθός τους.

Οι διαφορετικές κατηγορίες των νανοϋλικών είναι τα μέταλλα, τα κεραμικά και τα πολυμερή.

Στα παρακάτω κεφάλαια παρουσιάζονται οι νανοφουσαλίδες και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και οι εφαρμογές τους στην επεξεργασία του νερού και των υγρών αποβλήτων

## 2.2 ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ

### 2.2.1 Ορισμός

Ως φουσαλίδα ορίζεται μια μικρή κοιλότητα με αέρα ή οποιοδήποτε άλλο αέριο με μικρή διάμετρο, βρισκόμενη σε υδαρό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να πούμε ότι οι φουσαλίδες είναι αέρια πεδία που προσκολλώνται/απορροφώνται σε μια στερεή επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το νερό.

Σχετικά με τον ορισμό των νανοφουσαλίδων, όπως κάποιος θα περίμενε με βάση την ονοματολογία, μπορούμε να πούμε ότι ως νανοφουσαλίδες, ορίζονται οι μικροσκοπικές κοιλότητες αερίου (φουσαλίδες) μεγέθους <100 nm που έχουν μοναδικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, όπως μεγάλη πίεση στο εσωτερικό τους, εξαιρετικά μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο και μεγάλη ανθεκτικότητα. Ωστόσο, σύμφωνα με μια διαφορετική ερμηνεία ως νανοφουσαλίδες μπορεί να ορίζονται οι εξαιρετικά λεπτές φουσαλίδες με διάμετρο από 1nm έως 1μm οι οποίες έχουν ταυτόχρονα ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες. Οι νανοφουσαλίδες αποκαλούνται επίσης και φουσαλίδες επιφάνειας, επειδή μπορούν να διατηρούν μια σταθερότητα στην επιφάνειά τους.

Αναφερόμενοι γενικά στην νανοκλίμακα, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο ορισμός του μεγέθους νάνο σημαίνει ένα μέγεθος μέχρι 10nm. Όμως στην περίπτωση των νανοφουσαλίδων μέχρι σήμερα



οι επιστήμονες δεν έχουν καταλήξει σε μια κοινά αποδεκτή κατηγοριοποίηση του μεγέθους τους, αλλά έχουν θεωρήσει ότι το μέγεθός τους στο νερό, μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 100 nm.

Η πρώτη προσέγγιση στις νανοφουσαλίδες έγινε περίπου 20 χρόνια πριν . Περίπου το 1994 προτάθηκε η ιδέα των νανοφουσαλίδων με σκοπό να ερμηνευτούν οι απρόβλεπτες ελκτικές δυνάμεις που παρατηρήθηκαν στις υδροφοβικές επιφάνειες του νερού, όμως επειδή η δομή τους δεν μπορούσε να εξηγηθεί αποκλειστικά με την κλασική εξίσωση του Young-Laplace, η ύπαρξη των νανοφουσαλίδων αποτέλεσε πεδίο αμφισβητήσεων και διαμάχης για αρκετά χρόνια.

Η αναγνώριση των νανοφουσαλίδων άρχισε να κερδίζει έδαφος μόλις το 2000 όταν η πρώτη εικόνα αυτής της νανο-μεγέθους φουσαλίδας, παρατηρήθηκε μέσω του ατομικού μικροσκοπίου. Από τότε, σημαντικές έρευνες έχουν εστιάσει στην διερεύνηση των βασικών χαρακτηριστικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων της επιφάνειας των νανοφουσαλίδων, καθώς επίσης και στους τρόπους παραγωγής τους.

Οι νανοφουσαλίδες έχουν την ικανότητα να αλλάζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδάτινου σώματος μέσα στο οποίο βρίσκονται. Επιπλέον έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της μηχανικής για τη χρήση τους στον τομέα της εξυγίανσης του νερού μέσω της επίπλευσης του αέρα.

Τα τελευταία χρόνια οι βιομηχανίες έχουν εντείνει τις έρευνες τους στα πεδία εφαρμογών των νανοφουσαλίδων, εφόσον έχει ήδη βρεθεί ότι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με θετικά αποτελέσματα στην φαρμακοβιομηχανία, την χημεία, την βιολογία και στην παραγωγή διαφόρων υλικών. Επίσης στις μέρες μας η χρήση τους στην χορήγηση φαρμάκων λόγω των βραδύτερων ρυθμών αποσυνθέσεώς τους και των υψηλών ηχογενών ιδιοτήτων τους είναι αρκετά διαδεδομένη.

### 2.2.2 Δομή

Ανεξαρτήτως κοινά αποδεκτού ορισμού, αναγνωρίσιμη από όλους είναι η μοναδική ιδιότητα των νανοφουσαλίδων να παραμένουν σταθερές υπό Κ.Σ για μεγάλο χρονικό διάστημα λόγω των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ισχυρών υδροφοβικών δεσμών που εμφανίζει η επιφάνειά τους.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, λόγω του πολύ μικρού μεγέθους τους έχουν πολύ συγκεκριμένη επιφάνεια η οποία αυξάνει την μεταφορική τους δράση , την φυσική απορρόφηση και τις χημικές αντιδράσεις που διενεργούνται στην διεπιφάνεια αέρα και υγρού. Η σταθερότητα των φουσαλίδων

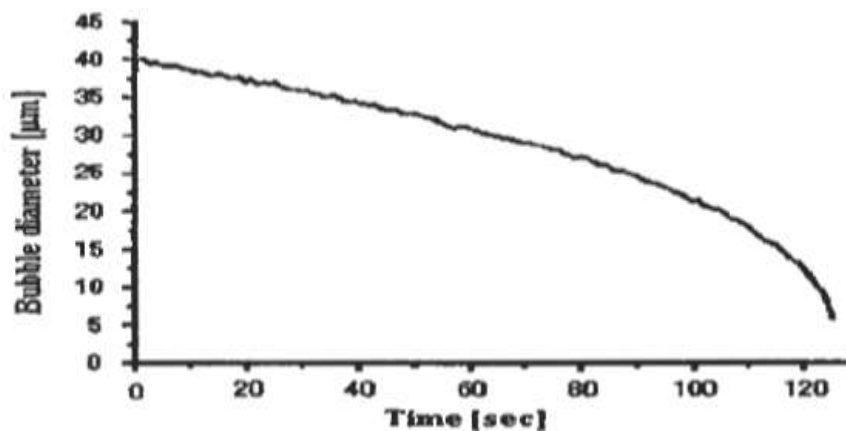


αποδόθηκε τελικώς στην παρουσία ενός αδιάβροχου δέρματος στην επιφάνεια της φυσαλίδας και ουσιαστικά σε μια ισόρροπη δράση ανάμεσα στην αέρια κοιλότητα και στο υδάτινο περιβάλλον.

Επομένως, ο κύριος λόγος της μεγάλης αντοχής που παρουσιάζουν οι νανοφυσαλίδες είναι η δημιουργία της διεπιφάνειας μεταξύ της αέριας επιφάνειας τους και του φορτισμένου υδατικού περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα το αντισταθμιστικό στρώμα μεταξύ της εξωτερικής φορτισμένης στοιβάδας και της εσωτερικής αυξανόμενης τάσης είναι κυρίως υπεύθυνο για την δομική σταθερότητα της νανοφυσαλίδας.

Οι νανοφυσαλίδες εμφανίζουν μια συρρικνούμενη δομή εξαιτίας της εξωτερικής πίεσης του περιβάλλοντος υγρού προς το αέριο που βρίσκεται εσωτερικά της φυσαλίδας, ενώ έχουν μια μοναδική ικανότητα να αυτό-οργανώνονται σε υδατικές συνθήκες όπως ακριβώς οι στάλες λαδιού όταν περικλείονται από υδάτινο περιβάλλον.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά η μεταβολή της διαμέτρου των φυσαλίδων σε σχέση με την μεταβολή του χρόνου.



Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα μεταβολής διαμέτρου των Νανοφυσαλίδων σε σχέση με τον χρόνο  
Πηγή: Ashutosh Agarwal, Wun Jern Ng, Yu Liu- May 2011

Η σχέση μεταξύ της εσωτερικής πίεσης του αερίου και της διαμέτρου της νανοφυσαλίδας, εκφράζεται μέσω της εξίσωσης του Young-Laplace όπως παρουσιάζεται ακολούθως:

$$P = P_l + 2\sigma/r$$

Όπου :

P:είναι η πίεση του αερίου

P<sub>l</sub>:είναι η πίεση του περιβάλλοντος υγρού



$\sigma$ : είναι η επιφανειακή τάση

$r$ : η ακτίνα της νανοφουσαλίδας

Σύμφωνα με την κλασική θερμοδυναμική θεωρία, και την εξίσωση του Young- Laplace, θα προέκυπτε ότι οι νανοφουσαλίδες δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν εξαιτίας της μείωσης της ακτίνας καμπυλότητάς τους. Με αυτήν την θεώρηση η πίεση που θα δέχονταν εσωτερικά θα ήταν συγκριτικά μεγαλύτερη από την εξωτερική πίεση, ως εκ τούτου η φουσαλίδα δεν θα μπορούσε να κρατηθεί και θα διαλυόταν.

Για παράδειγμα μια φουσαλίδα με ακτίνα 100 nm, επιφανειακή τάση 72 mN/m και ατμοσφαιρική πίεση στο περιβάλλον νερό  $10^5 \text{ Nm}^{-2}$  θα έδινε μια εσωτερική πίεση της τάξης του 1.5 MPa. Η βασική θεωρία πίσω από αυτό το φαινόμενο είναι ότι εξαιτίας της μεγάλης πίεσης που δέχεται εσωτερικά η φουσαλίδα, δεν θα μπορούσε να διατηρήσει μια ισορροπία με το εξωτερικό ατμοσφαιρικό περιβάλλον και αναπόφευκτα θα οδηγούσε στην έκρηξη των φουσαλίδων σε ένα πολύ σύντομο χρονικό ορίζοντα.

Πρώτοι οι ερευνητές Parker, Claesson και Attard το 1994, σε αντίθεση με την κλασική θεωρία του Young- Laplace, μέτρησαν την μεγάλη ελκτική ικανότητα ( μεγαλύτερη από τις δυνάμεις Van der Waals) που αναπτυσσόταν στην υδροφοβική επιφάνεια του νερού, ενώ πρώτος ο ερευνητής Louet al (2000) ανακάλυψε την ύπαρξη των νανοφουσαλίδων πειραματικά, κατόπιν παρατήρησής τους με το ατομικό μικροσκόπιο.

### 2.2.3 Κατηγοριοποίηση των Φουσαλίδων

Η κατηγοριοποίηση των φουσαλίδων, απασχόλησε τους ερευνητές για περισσότερο από μισό αιώνα. Παρόλο τις εκτεταμένες και μακρόχρονες έρευνες που έγιναν με σκοπό την κατηγοριοποίησή τους, ο τύπος και η κατάταξη των φουσαλίδων ακόμα προσδιορίζεται μετά δυσκολίας. Συχνά οι ερευνητές προσπάθησαν να κατηγοριοποιήσουν τις νανοφουσαλίδες βάσει των βασικών τους χαρακτηριστικών, με την ελπίδα ότι αυτό θα αποτελέσει έναυσμα για την κωδικοποίηση των ιδιοτήτων τους.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία προέκυψε ότι τα βασικά χαρακτηριστικά των φουσαλίδων εξαρτώνται από το εγκλωβισμένο αέριο και την διασπορά του μεγέθους των φουσαλίδων, αν και πολλές φορές τα μεγέθη συγχέονται και αντί για την διασπορά του μεγέθους, χρησιμοποιείται απλά η διαφορά του μεγέθους της φουσαλίδας.





Στην προσπάθεια των ερευνητών να κατηγοριοποιήσουν τις φυσαλίδες με έναν κοινά αποδεκτό τρόπο, προτάθηκε η εισαγωγή της έννοιας « συμβατικές φυσαλίδες» η οποία αφορούσε φυσαλίδες μεγέθους μεταξύ 600-2500  $\mu\text{m}$ , οι οποίες γενικά θεωρούνται μεγάλες φυσαλίδες.

Άλλη έρευνα όρισε συμβατικές φυσαλίδες αυτές με διάμετρο 2-5 mm τις οποίες επίσης ονόμασε μακροφυσαλίδες, και είναι αυτές που συνήθως παράγονται από τους αεριστές. Με παρόμοιο τρόπο ως «μεγάλες φυσαλίδες» θεωρήθηκαν οι ελλειψοειδούς σχήματος φυσαλίδες με διάμετρο από 1-10 mm.

Η διάμετρος των χρησιμοποιούμενων φυσαλίδων στις συνήθεις βιομηχανικές εφαρμογές κυμαίνεται μεταξύ 1-7 mm, ενώ σχετικές πειραματικές έρευνες, έχουν ορίσει ως συμβατικό μέγεθος φυσαλίδων τα μεγέθη μεταξύ 0.6-10 mm. Οι ίδιες έρευνες έχουν δείξει ότι οι φυσαλίδες με διάμετρο >10 mm παρουσιάζουν μια αλλαγή στο σχήμα τους από σφαιρικό σε ελλειπτικό με αύξηση των μεγεθών τους, ενώ λόγω του διαφορετικού τους σχήματος εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ροής.

Με παρόμοιο τρόπο ως μακροφυσαλίδες ή λεπτές φυσαλίδες, έχουν χαρακτηριστεί οι μικροσκοπικές φυσαλίδες μεγέθους 10-50  $\mu\text{m}$ .

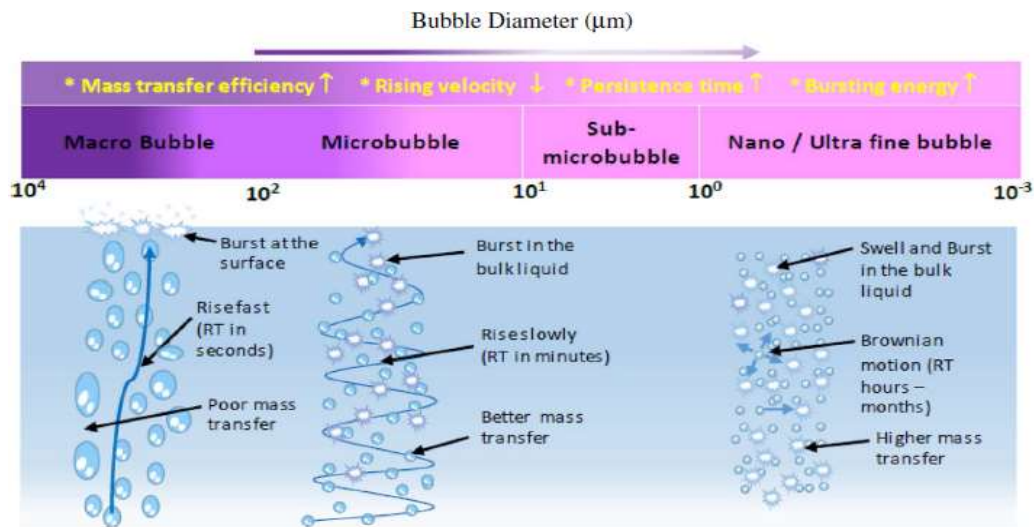
Άλλη παρόμοια έρευνα έχει χαρακτηρίσει τις φυσαλίδες με άκαμπτο σφαιρικό σχήμα και μέγεθος μερικών 100 $\mu\text{m}$  και μικρότερο, ως μικρές φυσαλίδες, ενώ ως μακροφυσαλίδες χαρακτηρίστηκαν αυτές που έχουν μέγεθος μεταξύ 30-100 $\mu\text{m}$  ή και 10-50  $\mu\text{m}$ .

Το πρόβλημα του διαχωρισμού των φυσαλίδων συναντάται και σε μικρότερη κλίμακα, στον διαχωρισμό των νανοφυσαλίδων. Ειδικότερα όμως, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το εύρος τιμών για αυτή την κατηγορία κυμαίνεται από 10  $\mu\text{m}$ -200 nm.

Επισημαίνεται ότι το πραγματικό μέγεθος των νανοφυσαλίδων κάθε φορά ποικίλει αφού εξαρτάται και από τον κορεσμό του υδατικού περιβάλλοντος.

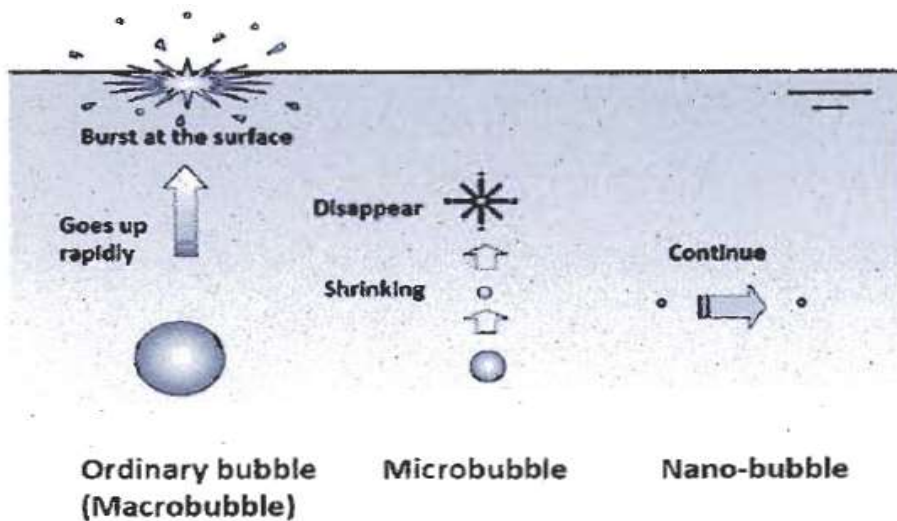
Σύμφωνα με την σχετική βιβλιογραφία έχει προκύψει ότι αναλογικά με το μέγεθος των νανοφυσαλίδων διαφοροποιούνται και οι ιδιότητές τους.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά το εύρος μεγέθους των φυσαλίδων και οι βασικές τους ιδιότητες.



Εικόνα 2: Σχηματικό διάγραμμα Κατάταξης των φυσαλίδων με βάση το μέγεθος  
Πηγή: Tatek Temesgen, Thi Thuy Bui, Mooyoung Han, Tschung-il Kim, Hyunju Park- June 2017

Η διαφορετική συμπεριφορά που έχουν τα διαφορετικά μεγέθη των μικρών φυσαλίδων στο υγρό, παρουσιάζεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα διαφόρων Συμβατικών Φυσαλίδων, Μικροφυσαλίδων και Νανοφυσαλίδων  
Πηγή: Ashutosh Agarwal, Wun Jern Ng, Yu Liu- May 2011

Πειραματικά, η κατηγοριοποίηση των φυσαλίδων γίνεται με βάση το καθεστώς ροής. Κατά την πειραματική διαδικασία λαμβάνεται υπόψη η επιφανειακή ταχύτητα και η διάμετρος της χρησιμοποιούμενης πειραματικής στήλης.



Με αυτόν τον τρόπο και αξιολογώντας το καθεστώς ροής, το οποίο μπορεί να είναι είτε ομοιογενές είτε ετερογενές, κατηγοριοποιούνται οι φυσαλίδες στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μακροφυσαλίδες
- Νανοφυσαλίδες
- Συμβατικές ή μεγάλες φυσαλίδες
- Λεπτές φυσαλίδες
- Πολύ λεπτές φυσαλίδες

Αρχικά η ροή των φυσαλίδων ακολουθεί την ροή των συσσωματωματούμενων φυσαλίδων, ενώ στην συνέχεια τα συσσωματώματα διασπώνται και ακολουθούν χαμηλές επιφανειακές ταχύτητες με διαφορετικό καθεστώς ροής. Η ροή των φυσαλίδων επηρεάζεται από τις επιφανειακές ροές αερίου και υγρού αλλά και από ρύπους που πιθανόν να υπάρχουν στο νερό.

Έχει παρατηρηθεί ότι στις εργαστηριακές στήλες μικρής διαμέτρου εμφανίζεται βραδεία ροή, ενώ αντίστοιχα ροή αναρρόφησης παρατηρείται σε μεγάλου μεγέθους βιομηχανικά συστήματα.

Τελικώς, αν και οι επιστήμονες διαφωνούν με τα όρια μεγέθους των φυσαλίδων, έχουν καταλήξει σε (3) βασικές κατηγορίες, τις μακροφυσαλίδες, μικροφυσαλίδες και νανοφυσαλίδες. Οι περισσότερες απόψεις συγκλίνουν σε ένα κατώτατο όριο προσδιορισμού της μακροφυσαλίδας το μέγεθος 10  $\mu\text{m}$ , ενώ το ανώτατο όριο προτάθηκε να είναι τα 100  $\mu\text{m}$ .

Περαιτέρω και προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί δόκιμα ένα εύρος μεγεθών, προτάθηκε ο όρος « μικρο- νανο φυσαλίδες», ο οποίος δείχνει ακριβώς την σύγχυση και την έλλειψη προσδιορισμού μιας ξεκάθαρης κατηγορίας για τις πολύ λεπτές φυσαλίδες.

Παρολαυτά με βάση τις πιο πρόσφατες έρευνες, μπορούμε να πούμε ότι ορίστηκε το ένα 1 $\mu\text{m}$  ως το ανώτατο όριο προσδιορισμού της νανοφυσαλίδας.

Σε εμπορικό επίπεδο, δύο τύποι νανοφυσαλίδων είναι διαθέσιμοι. Οι νανοφυσαλίδες με οξυγόνο και αυτές με το όζον.



## 2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Εκτός από το μοναδικό τους μέγεθος, οι νανοφυσαλίδες έχουν πληθώρα χαρακτηριστικών που τις διαφοροποιούν από τις συμβατικές φυσαλίδες.

Κάποιες από τις βασικές ιδιότητές τους είναι οι ακόλουθες:

1. Η μακροζωΐα/ σταθερότητα διατήρησής τους στο νερό
2. Δυναμικό ζήτα
3. Μέγεθος της φυσαλίδας και μεγάλη διασπορά του μεγέθους τους
4. Χαμηλή ταχύτητα ανόδου
5. Αυξημένη μεταφορική δράση

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα ως σήμερα, η μακροζωΐα/σταθερότητα είναι το πιο εντυπωσιακό χαρακτηριστικό των νανοφυσαλίδων.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία και λαμβάνοντας υπόψη ένα θεωρητικό μοντέλο προκειμένου να αιτιολογηθεί η μακροζωΐα των νανοφυσαλίδων, προέκυψε ότι αυτή οφείλεται στην περιορισμένη διάχυση του αερίου μέσα στο υγρό, στην συνεργατική συμπεριφορά των συσσωματωμάτων των φυσαλίδων, και στην προσδιορισμένη διεπιφάνεια επαφής των νανοφυσαλίδων.

Επιπλέον, βρέθηκε ότι φυσαλίδες που δημιουργούνται από διάφορα αέρια όπως CO<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub> και από αέρα, παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ τους, αναλογιζόμενοι το διαφορετικό μοριακό βάρος του εγκλωβισμένου αερίου.

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των νανοφυσαλίδων.

### 2.3.1. Μικρό Μέγεθος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι νανοφυσαλίδες χαρακτηρίζονται από την διάμετρό τους η οποία είναι μικρότερη από 1μm και μεγαλύτερη από 1nm.

Το μέγεθος των νανοφυσαλίδων όπως έχουμε ήδη αναφέρει και παραπάνω, ποικίλλει αναλόγως το πεδίο εφαρμογών που θα χρησιμοποιηθούν οι νανοφυσαλίδες. Για παράδειγμα αν θα χρησιμοποιηθούν στην ιατρική ή σε βιολογικές εφαρμογές, το μέγεθός τους θα



κυμαίνεται από 10-40 $\mu\text{m}$ , ενώ όταν αυτές θα χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές φυσικής και μηχανικής το μέγεθός τους θα είναι μικρότερο από 100 $\mu\text{m}$ .

### 2.3.2 Μακροζωία Φυσαλίδων

Το πιο ξεχωριστό χαρακτηριστικό των νανοφυσαλίδων που τις κάνει ανταγωνιστικές και σαφώς καλύτερες έναντι των συμβατικών φυσαλίδων είναι τα υψηλά επίπεδα σταθερότητάς τους και η μακροζωία που εμφανίζουν.

Η ανθεκτικότητά τους αυτή, έχει δύο πτυχές.

Η προφανής είναι η εξαφάνιση της πλευστότητας. Φυσαλίδες διαμέτρου μικρότερης των 5 $\mu\text{m}$  δεν ανεβαίνουν στην επιφάνεια, αφού η δύναμη της πλευστότητας είναι μικρή, σχεδόν αμελητέα, δεδομένων και των υπολοίπων απωθητικών δυνάμεων που ενεργούν στην φυσαλίδα.

Η δεύτερη πτυχή και λιγότερη προφανής είναι η φυσική σταθερότητα που εμφανίζουν οι συγκεκριμένες φυσαλίδες. Υπάρχει μια ετερογένεια που διατηρείται με την μορφή ατελειών στην κρυσταλλική δομή των φυσαλίδων.

Οι νανοφυσαλίδες απ' την στιγμή του σχηματισμού τους και μετά, διατηρούνται εξαιρετικά σταθερές. Πιο συγκεκριμένα και κατόπιν παρατήρησης στο μικροσκόπιο βρέθηκε ότι η επιφάνεια της νανοφυσαλίδας περιέχει δεσμούς υδρογόνου που μπορεί να μειώσουν τη διάχυση του αερίου διαμέσου του μεσοφασικού φιλμ της φυσαλίδας.

Επομένως συμπεραίνουμε ότι η διεπιφανειακή σύνθεση και δομή είναι η πιθανή εξήγηση για τη μακροζωία των νανοφυσαλίδων.

### 2.3.3 Χαμηλή Ταχύτητα Ανόδου

Μία από τις βασικές μοναδικές ιδιότητες των νανοφυσαλίδων είναι ότι λόγω του μικρού τους μεγέθους έχουν χαμηλή πλευστότητα το οποίο τις καθιστά ανθεκτικές στον χρόνο και στην διάλυση.



Επιπλέον, η ταχύτητα ανόδου των νανοφουσαλίδων στην επιφάνεια του υγρού, εξαρτάται άμεσα από τις φυσικές ιδιότητες του περιβάλλοντος υγρού.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές έρευνες με σκοπό να προσδιορίσουν την τελική ταχύτητα ανόδου μιας νανοφουσαλίδας, χρησιμοποιώντας τους νόμους του Stoke, Hadmard-Rybczynski και του Reynolds.

Σχετικές πειραματικές έρευνες έδειξαν ότι η ταχύτητα ανόδου της νανοφουσαλίδας ακολουθεί το νόμο του Stokes :

$$U = \rho g d^2 / 18\mu$$

Όπου U είναι η ταχύτητα ανόδου

$\rho$  : η πυκνότητα του υγρού

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας

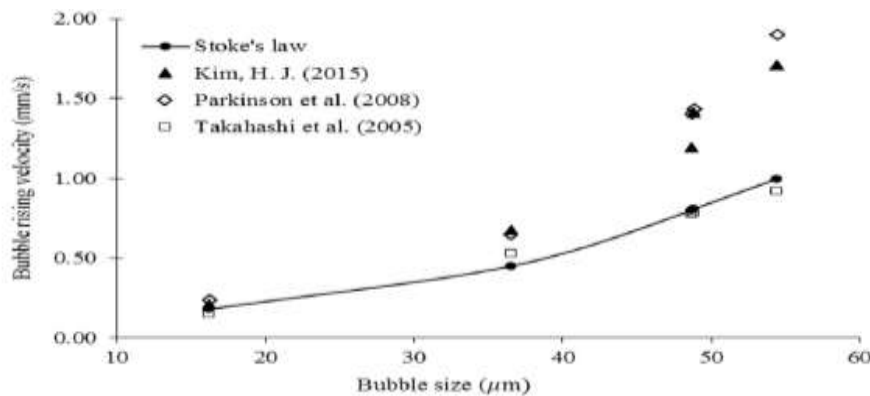
$d$ : η διάμετρος της φουσαλίδας

$\mu$ : το ιξώδες του υγρού

Επομένως, με βάση την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι η διάμετρος των νανοφουσαλίδων ( $d$ ) και το ιξώδες του υγρού ( $\mu$ ), θεωρούνται παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα της φουσαλίδας, και πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το μέγεθος της νανοφουσαλίδας συνδέεται με την ταχύτητά της αναλογικά, δηλαδή όσο μικρότερο είναι το μέγεθος της φουσαλίδας, τόσο μικρότερη είναι και η ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει η νανοφουσαλίδα.

Από σχετικά πειράματα που εκτελέστηκαν λαμβάνοντας υπόψη την ανωτέρω σχέση προέκυψε ότι μια νανοφουσαλίδα διαμέτρου 10 $\mu\text{m}$  ανεβαίνει 20cm σε διάστημα μίας (1) ώρας.

Η παρακάτω εικόνα περιγράφει σχηματικά την ταχύτητα ανύψωσης της νανοφουσαλίδας σε σχέση με το μέγεθός της.



Εικόνα 4: Σχηματικό διάγραμμα μεταβολή της ταχύτητας ανόδου των Νανοφουσαλίδων σε σχέση με το μεγεθός τους  
Πηγή: Tatek Temesgen, Thi Thuy Bui, Mooyoung Han, Tschung-il Kim, Hyunju Park- June 2017

### 2.3.4 Υψηλή Επιφανειακή Τριβή

Η επιφανειακή τριβή της διεπιφάνειας αερίου και υγρού είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου της φυσαλίδας. Επομένως όσο αυξάνει η διάμετρος της φυσαλίδας τόσο μειώνεται η επιφανειακή τριβή στην διεπιφάνεια του υγρού- αερίου της φυσαλίδας, και το αντίστροφο.

### 2.3.5 Μεγάλη εσωτερική πίεση

Η εσωτερική πίεση του αερίου μέσα στην μικροφυσαλίδα είναι περίπου 0.06 MPa που προκύπτει μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση. Οι μικροφυσαλίδες όπως έχει ήδη αναφερθεί σχηματίζονται από την αλληλεπίδραση της ατμοσφαιρικής και της στατικής πίεσης, μέσω της συμπίεσης του υγρού.

Επομένως, χαρακτηριστικό γνώρισμα των μικρο/νανοφυσαλίδων είναι η αυξημένη πίεση που εμφανίζουν στο εσωτερικό τους. Η μαθηματική σχέση που εκφράζει αυτό το φυσικό φαινόμενο είναι η εξίσωση Young- Laplace:

$$\Delta P = 4\sigma / d$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Young- Laplace, προκύπτει ότι η πίεση ( $\Delta P$ ) εσωτερικά της φυσαλίδας διαμέτρου  $d$ , αυξάνει έως να φτάσει μια ανώτερη εσωτερική τιμή ανάλογη με την ασκούμενη επιφανειακή τάση  $\sigma$ . Επίσης, με βάση την παραπάνω σχέση, φαίνεται ότι η

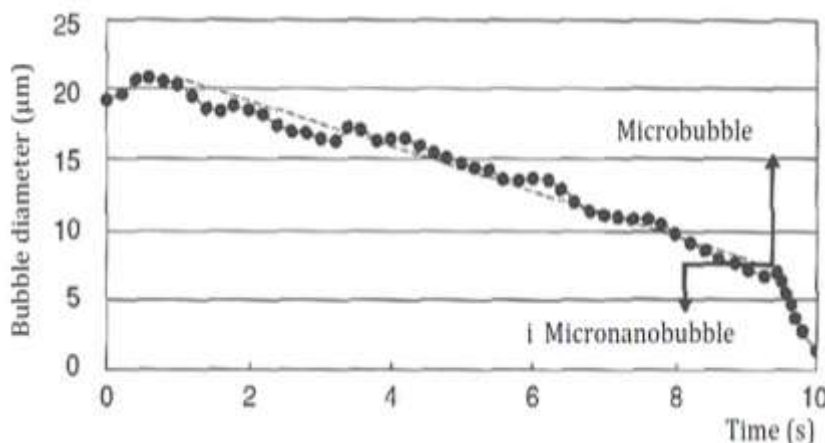


εσωτερική πίεση των νανοφουσαλίδων είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος τους, δηλαδή όσο πιο μικρή είναι η φουσαλίδα τόσο μεγαλύτερη πίεση έχει εσωτερικά.

Για παράδειγμα η εσωτερική πίεση των φουσαλίδων με διάμετρο 1  $\mu\text{m}$  και 100 nm είναι 3,87 και 29,7 atm αντίστοιχα, δεδομένου ότι η επιφανειακή πίεση του νερού στους 20 ° C είναι 72.8 mN/m , ενώ η περιβάλλουσα ατμοσφαιρική πίεση είναι 1 atm. Επομένως, με αύξηση του μεγέθους της φουσαλίδας, αυξάνει και την εσωτερική πίεση του αερίου.

Με βάση τα παραπάνω, έχει βρεθεί ότι λόγω της μεγάλης πίεσης και της υψηλής θερμοκρασίας παρατηρείται αύξηση της διαλυτότητας του αερίου μέσα στην φουσαλίδα, ενώ ταυτόχρονα η ίδια προσπαθώντας να διατηρήσει το καμπύλο σχήμα της συστέλλεται.

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα μικροφουσαλίδα μεγέθους 20 $\mu\text{m}$  συστέλλεται ενώ κάτω από τα 10  $\mu\text{m}$  συστέλλεται τόσο γρήγορα που εξαφανίζεται. Από την άλλη μεριά φουσαλίδα μεγέθους μεγαλύτερου από 65  $\mu\text{m}$  θα εξαφανιστεί ακόμα πιο γρήγορα.



Εικόνα 5: Χρονικός Κύκλος της Διαμέτρου της φουσαλίδας  
Πηγή: Hideki Tsuge-2015

### 2.3.6 Αναλογία Επιφάνειας-Όγκου Μικροφουσαλίδας

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των φουσαλίδων είναι η αναλογία της επιφάνειας και του όγκου τους. Η συγκεκριμένη περιοχή διεπαφής των φουσαλίδων διαχωρίζεται με όγκο A/V και προσδιορίζεται από την σχέση :

$$A/V = 6/d$$

A: η επιφάνεια της μικροφουσαλίδας





$V$  : ο όγκος της μικροφουσαλίδας

$d$ : η διάμετρος της μικροφουσαλίδας

Ως εκ τούτου προκύπτει ότι οι νανοφουσαλίδες έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια η οποία αυξάνει την επαφή μεταξύ του αερίου και των υγρών στοιχείων και βελτιώνει την αποτελεσματική μεταφοράς μάζας αέρα στην επιφάνεια του υγρού. Ως εκ τούτου, προκύπτει ότι οι μικρο/νανοφουσαλίδες έχουν μεγάλη ικανότητα στην μεταφορά του εγκλωβισμένου αερίου τους.

Επομένως μειώνοντας κατά το ήμισυ την διάμετρο  $d$ , διπλασιάζεται ο λόγος  $A/V$ , ο οποίος όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο, σχετίζεται με την διαλυτότητα του αερίου.

### 2.3.7 Διαλυτότητα Αερίου

Ο ρυθμός μετάβασης από την αέρια μορφή στην υγρή, ή αλλιώς ο βαθμός διαλυτότητας  $N$  ( mol/sec) , λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντίσταση του αερίου είναι αμελητέα, περιγράφεται από την εξίσωση :

$$N = k_i A ( p - p^*)/H$$

Όπου  $k_i$  είναι ο συντελεστής μετάβασης από την αέρια στην υγρή φάση (m/sec),

$A$  : η διπλή επιφάνεια επαφής ( $m^2$ ),

$p$  : η τοπική πίεση του διαλυμένου υγρού στην φουσαλίδα (Pa)

$p^*$  : η πίεση ισορροπίας μεταξύ του υγρού και του αερίου (Pa),

$H$  : η σταθερά Henry (  $p = HC$  ).

Με βάση την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι όταν ο ρυθμός μεταφοράς της φουσαλίδας διαμέτρου 1mm λαμβάνεται ως 1, τότε ο ρυθμός μεταφοράς φουσαλίδων των 10μm και των 100nm γίνεται  $10^8$  και  $10^{18}$  αντίστοιχα. Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι χρησιμοποιώντας μικρο/νανο φουσαλίδες ο ρυθμός διάλυσης αυξάνει πολύ γρήγορα.

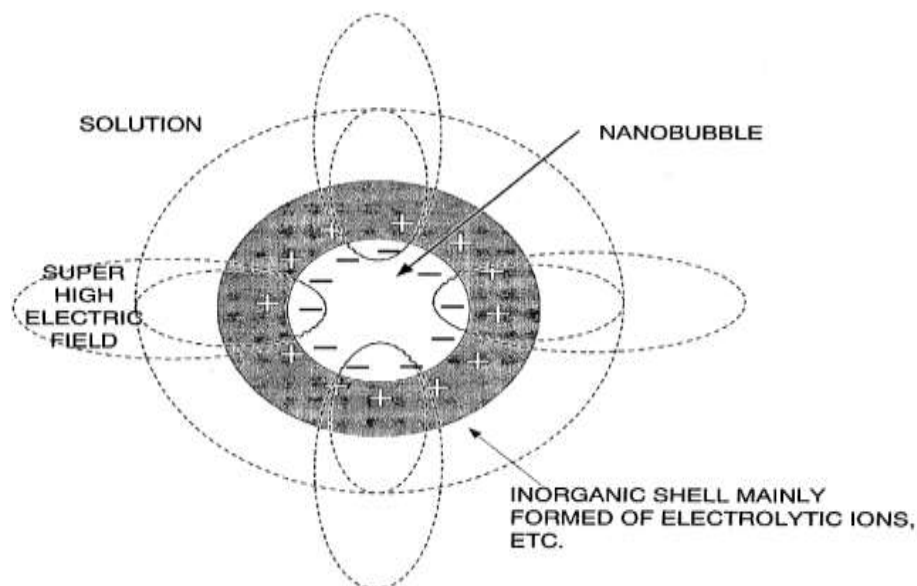


### 2.3.8 Δυναμικό Ζήτα

Πειραματικές έρευνες έδειξαν ότι άτομα Υδρογόνου εμφανίζονται να κινούνται στο υγρό ενώ άτομα του Οξυγόνου εμφανίζονται να κινούνται στον διαχεόμενο αέρα. Επομένως, προέκυψε ότι η διεπιφάνεια νερού και αερίου φορτίζεται αρνητικά λόγω της αυξημένης συσσώρευσης του σχηματιζόμενου  $\text{OH}^-$  στην επιφάνεια της φυσαλίδας. Ως εκ τούτου προκύπτει ότι  $\text{OH}^-$  και  $\text{H}^+$  είναι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν την διεπιφάνεια αερίου- υγρού .

Εκτιμάται ότι τα ιόντα που περιβάλλουν και φορτίζουν την διεπιφάνειά της φυσαλίδας, είναι υπεύθυνα για την σταθερότητά της, και για τις περισσότερες από τις ιδιότητές της.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει σχηματικά την φορτισμένη επιφάνεια μιας μικρο/ νανοφυσαλίδας.

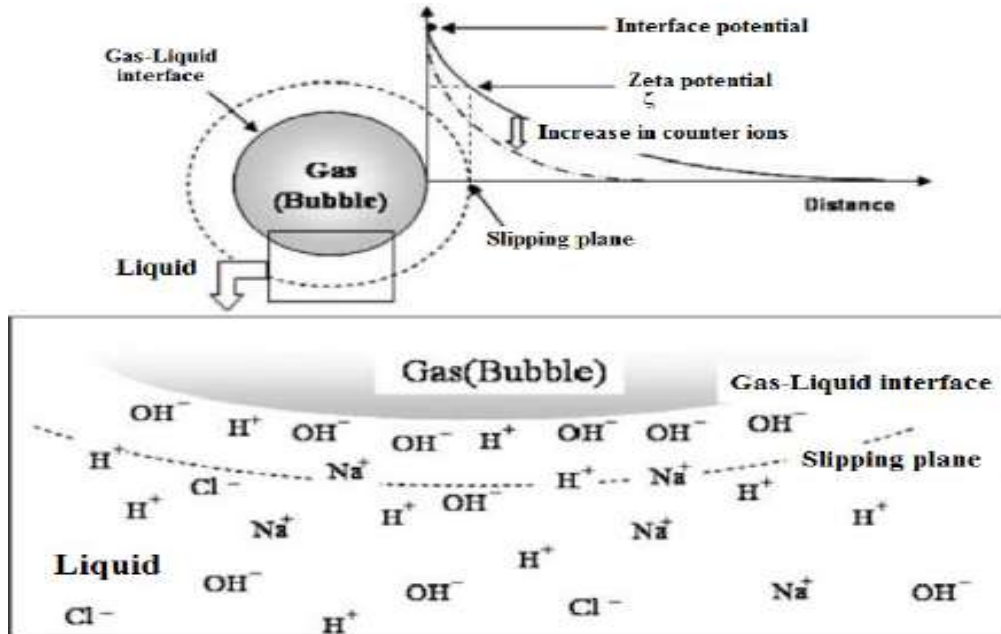


Εικόνα 6: Αρνητικά Φορτισμένη Επιφάνεια Μακροφυσαλίδων  
Πηγή: Kaneo Chiba, Miyagi, Masayoshi, Takahashi, Ibaraki- August 2007

Η φορτισμένη επιφάνεια της νανοφυσαλίδας, όπως θα περίμενε κανείς δημιουργεί ένα δυναμικό, το οποίο είναι γνωστό ως δυναμικό ζήτα. Το δυναμικό ζήτα είναι ένα μέτρο της μαγνητικής ηλεκτροστατικής απώθησης ή έλξης μεταξύ σωματιδίων και φυσαλίδων. Είναι ανάλογο της ταχύτητας και της κατεύθυνσης της κίνησης, και ουσιαστικά είναι μια φυσική ιδιότητα οποιουδήποτε σωματιδίου βρίσκεται σε εναιώρημα.



Η παρακάτω εικόνα παριστάνει γραφικά την φορτισμένη διεπιφάνεια της φυσαλίδας και την ανάπτυξη του δυναμικού ζήτα.



Εικόνα 7: Διεπιφάνεια Υγρού-αερίου και το Δυναμικό ζήτα  
Source: Tomohiro Marui-2013

Το δυναμικό ζήτα για την φυσαλίδα όπως και για όλα τα υλικά είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στις εφαρμογές του μηχανικού εφόσον ορίζει και χαρακτηρίζει την αλληλεπίδραση της ναοφυσαλίδας με όλα τα υπόλοιπα υλικά που έρχονται σε επαφή με αυτήν, και μπορεί να δώσει πληροφορίες για την σταθερότητα του κolloειδούς συστήματος που δημιουργείται γύρω από αυτήν. Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του μεγέθους της ηλεκτροστατικής απώθησης ή έλξης μεταξύ σωματιδίων και φυσαλίδων, είναι συνήθως αρνητικό και η τιμή του σχετίζεται με το είδος του αερίου της ναοφυσαλίδας.

Από την παρατήρηση των μεταβολών του δυναμικού ζήτα έχει προκύψει ότι όταν τα υλικά που έρχονται σε κατάσταση έλξης εμφανίζουν ένα υψηλό δυναμικό ζήτα (είτε θετικό είτε αρνητικό) έχουν μεγάλη σταθερότητα στους δεσμούς έλξης τους. Από την άλλη, όταν το δυναμικό ζήτα είναι χαμηλό, τα υλικά τείνουν να πλησιάζουν και να δημιουργούν συσσωματώματα. Το δυναμικό ζήτα βρίσκεται από την εφαρμογή της εξίσωσης του Smoluchowski.

$$\zeta = \mu/\epsilon$$

ζ: το δυναμικό ζήτα



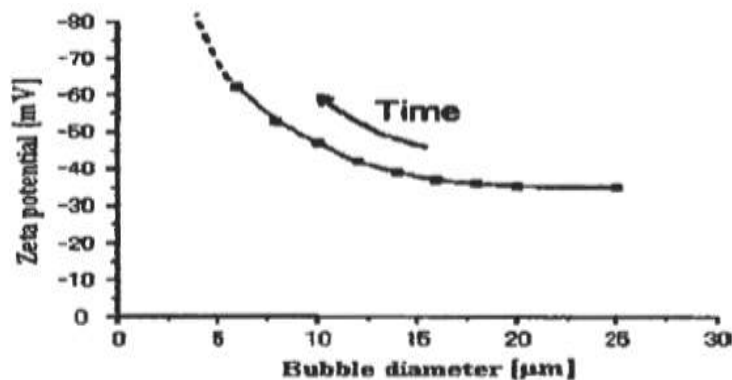
$u$ : η κινητικότητα ( $m^2/sV$ )

$\mu$ : το ιζώδες του νερού

$\epsilon$ : η περατότητα του νερού ( $s^2C^2/kgm^3$ )

Οι αρνητικές τιμές του δυναμικού ζήτα μπορούν να εξηγηθούν με την διάχυση των  $OH^-$  στην διεπιφάνεια μεταξύ αερίου και νερού. Έρευνες έδειξαν ότι φυσαλίδες με δυναμικό ζήτα  $>30mV$  είναι πολύ πιο σταθερές, από ότι οι φυσαλίδες με δυναμικό ζήτα  $<30mV$ .

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της διαμέτρου των φυσαλίδων σε σχέση με την μεταβολή του δυναμικού ζήτα.



Εικόνα 8: Σχηματικό διάγραμμα μεταβολής της διαμέτρου των νανοφυσαλίδων σε σχέση με την μεταβολή του δυναμικού ζήτα με βάση τον χρόνο  
Πηγή: Ashutosh Agarwal, Wun Jern Ng, Yu Liu- May 2011

Έχει βρεθεί ότι ανεξαρτήτως διαμέτρου φυσαλίδας, το μέσο δυναμικό ζήτα του απιονισμένου νερού κυμαίνεται μεταξύ  $-30$  έως  $-40 mV$ . Ενώ, οι τιμές αυτές μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος υγρού.

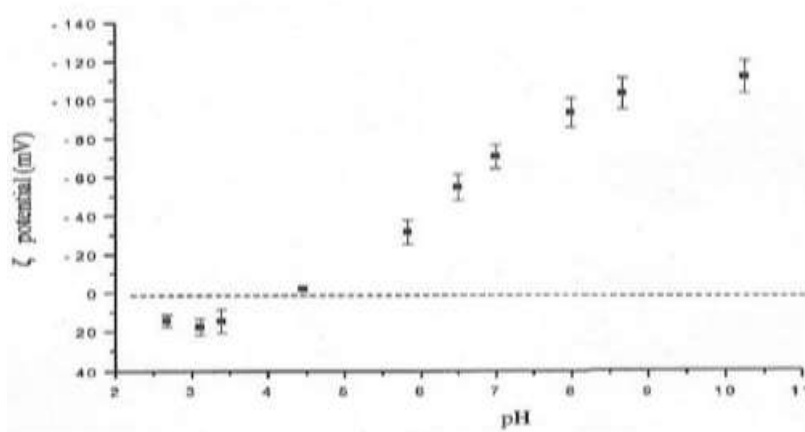
Επιπλέον σύμφωνα με πειραματικές έρευνες, η αρνητικά φορτισμένη διεπιφάνεια του υγρού και κατ' επέκταση το δυναμικό ζήτα των μικροφυσαλίδων επηρεάζεται από το pH του περιβάλλοντος υγρού.

Έρευνες έχουν δείξει ότι το δυναμικό ζήτα για τις νανοφυσαλίδες από οξυγόνο κυμαίνεται μεταξύ  $-34$  έως  $-45 mV$  ( pH: 6.2-6.4).

Βάσει ερευνών, όσο πιο όξινο είναι το pH του περιβάλλοντος υγρού, τόσο το δυναμικό ζήτα τείνει προς τα  $0 mV$ , ενώ όσο πιο βασικό γίνεται το pH, τότε το δυναμικό ζήτα μπορεί να φτάσει έως και τα  $-100 mV$ .

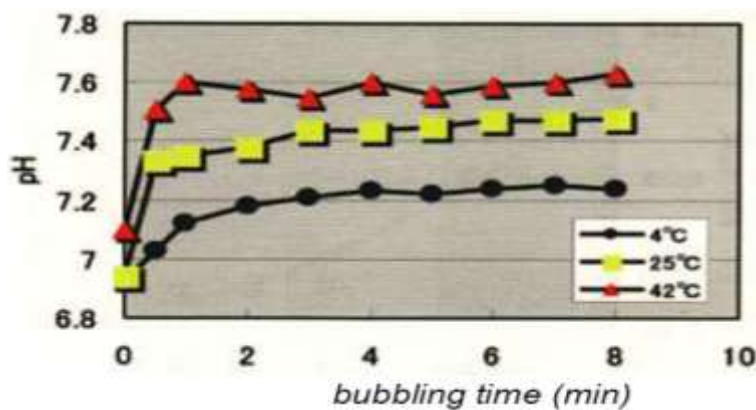


Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η επίδραση που έχει το pH στο δυναμικό ζήτα.



Εικόνα 9: Επίδραση του pH στο Δυναμικό ζήτα  
Source: Hideki Tsuge-2015

Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι το pH διαφόρων υγρών αποβλήτων μεταβάλλεται με την ανάδευση των μικροφουσαλίδων στο υγρό. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται σχηματικά η μεταβολή του pH σε σχέση με τον χρόνο ανάδευσης και την θερμοκρασία.



Εικόνα 10: Μεταβολή του pH σε σχέση με το χρόνο ανάδευσης των μικρο/νανοφουσαλίδων και την θερμοκρασία  
Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση ανάδευσης μικροφουσαλίδων σε απιονισμένο νερό, αναμένεται μείωση του pH, ενώ όταν η ανάδευση γίνεται σε νερό βρύσης, αναμένεται αύξηση του pH.



Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι το δυναμικό ζήτα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση των εναιωρημάτων και των γαλακτωμάτων εφόσον ενισχύει τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης μεταξύ σωματιδίων και φυσαλίδων.

### 2.3.9 Δημιουργία Ελευθέρων Ριζών

Με βάση την βιβλιογραφία έχει προκύψει ότι η κατάρρευση/διάσπαση των μικροφουσαλίδων συνοδεύεται από την δημιουργία νανοφουσαλίδων και ελευθέρων ριζών. Το φαινόμενο συνήθως παρατηρείται όταν χρησιμοποιούνται υπερηχητικά κύματα. Για μικροφουσαλίδες διαμέτρου μικρότερης από 50μm η δημιουργία των ελεύθερων ριζών γίνεται μέσα σε μερικά λεπτά.

Τα αίτια που κυρίως οδηγούν στην δημιουργία των ελευθέρων ριζών είναι η αύξηση του δυναμικού ζήτα, και κατ' επέκταση η αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων γύρω από την επιφάνεια της μικροφουσαλίδας.

Οι νανοφουσαλίδες που προκύπτουν ως αποτέλεσμα διάσπασης των μικροφουσαλίδων, έχει προκύψει ότι είναι οργανικά ουδέτερες, και δεν έχουν κανένα βακτηριακό αποτέλεσμα, αντιθέτως έχει βρεθεί ότι έχουν σημαντική απολυμαντική δράση, όπως θα αναλυθεί και στα παρακάτω κεφάλαια.

### 2.3.10 Μεταβολή Των Ιδιοτήτων του Υγρού Μέσω της Ανάδευσης των Μικροφουσαλίδων

Σχετικές έρευνες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια, έδειξαν ότι με την ανάδευση των μικροφουσαλίδων στο υγρό, μεταβάλλονται κάποιες από τις φυσικές ιδιότητες του υγρού. Πιο συγκεκριμένα με την εισαγωγή και ανάδευση μικρο/νανοφουσαλίδων στο υγρό, παρατηρούνται μεταβολές στο ιξώδες του υγρού, στην ηλεκτρική αγωγιμότητά του, αλλά επίσης παρατηρούνται και μεταβολές στην ανθεκτικότητα της φυσαλίδας.

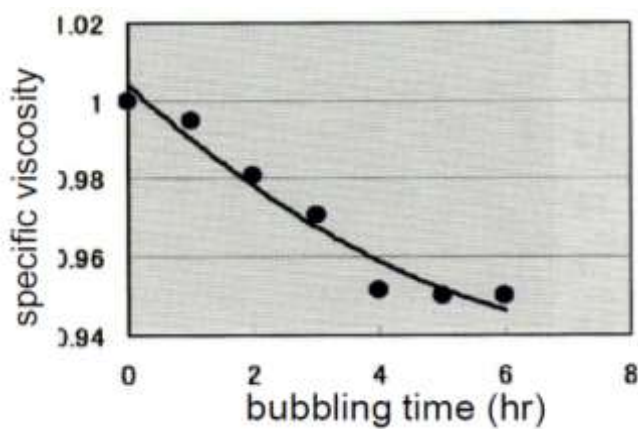
Πιο συγκεκριμένα, σε πείραμα που έγινε με ανάδευση μικροφουσαλίδων σε νερό στους 25 °C προέκυψε μείωση του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης, ενώ ταυτόχρονα παρατηρήθηκε και μια αύξηση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού.



Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν γραφικά τις μεταβολές των ιδιοτήτων του υγρού που προκαλούνται από την ανάμειξή του με μικρο/ νανοφουσαλίδες

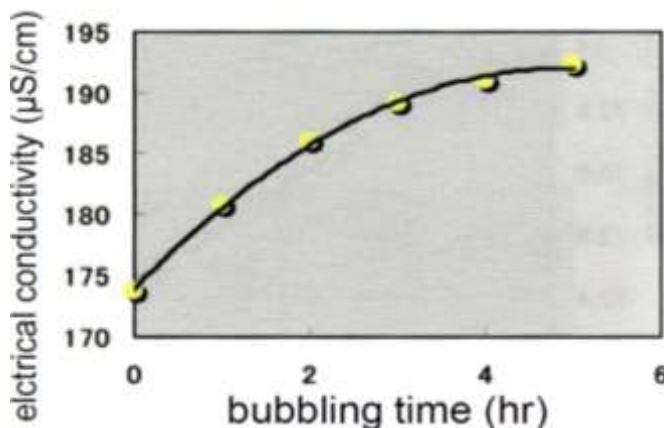
Από την παρατήρησή τους, προκύπτει ότι η σχέση του ιξώδους του υγρού και του χρόνου ανάδευσης είναι αντιστρόφως ανάλογη, όπως παρόμοια συμβαίνει και στην περίπτωση της ανθεκτικότητας της φυσαλίδας.

Αντιθέτως, αυξάνοντας τον χρόνο ανάδευσης, παρατηρείται μια αναλογική αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υγρού.



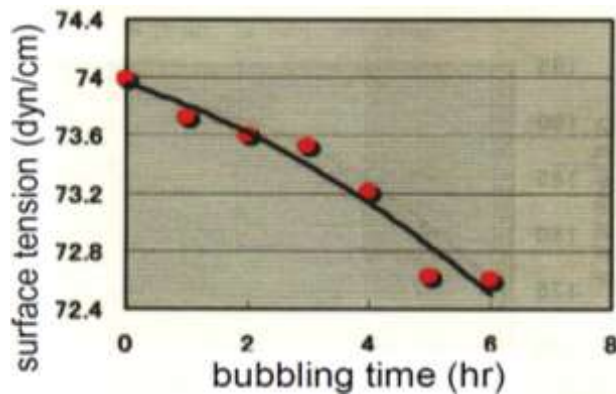
Εικόνα 11: Μεταβολή του Ιξώδους σε σχέση με το χρόνο ανάδευσης των μικρο/νανοφουσαλίδων

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017



Εικόνα 12: Μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υγρού σε σχέση με το χρόνο ανάδευσης των μικρο/νανοφουσαλίδων

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017



Εικόνα 13: Μεταβολή της ανθεκτικότητας της επιφάνειας της φυσαλίδας σε σχέση με το χρόνο ανάδευσης των μικρο/νανοφυσαλίδων

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

### 2.3.11 Εμφάνιση

Οι μικροφυσαλίδες είναι ορατές με γυμνό μάτι και μοιάζουν σαν λευκά κινούμενα σύννεφα μέσα στο νερό. Τις συναντάμε στην καθημερινότητά μας, αλλά παράγονται και με μηχανικούς τρόπους προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

Οι παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζουν μερικά παραδείγματα μικροφυσαλίδων.



Εικόνα 14: Παραγωγή μικροφυσαλίδων με μηχανικά μέσα

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017



Εικόνα 15: Διαλυμένος αέρας σε ζεστό νερό προκαλεί μικροφυσαλίδες στην ανάμειξή του με κρύο νερό θρύση

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

Οι νανοφυσαλίδες είναι τόσο μικρές που δεν γίνονται ορατές με γυμνό μάτι.





Στην παρακάτω φωτογραφία, η λευκή δέσμη, φανερώνει την ύπαρξη νανοφουσαλίδων στο υγρό που βρίσκεται μέσα στο ποτήρι.



Εικόνα 16: Εμφάνιση Νανοφουσαλίδων

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

### 2.3.12 Σύγκριση με συμβατικές φουσαλίδες

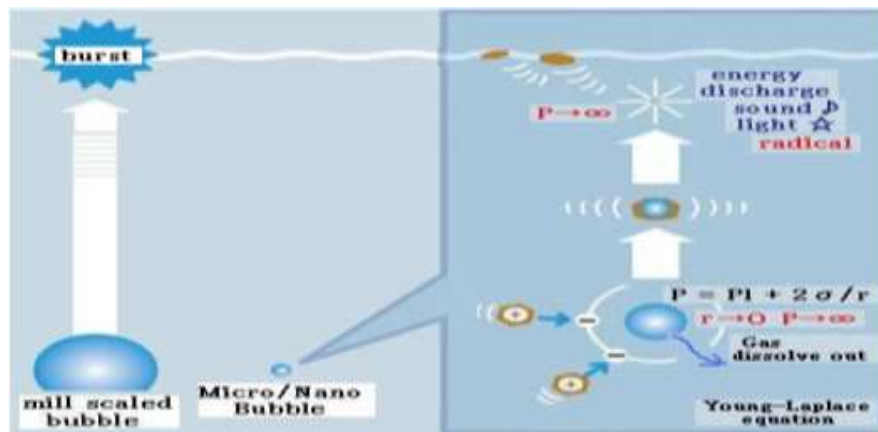
Οι συμβατικές φουσαλίδες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι μικρές σφαίρες από αέριο που κινούνται σε ένα υδαρό περιβάλλον, και έχουν την τάση να φτάσουν στην επιφάνεια του περιβάλλοντος υγρού και να απελευθερωθούν στην επιφάνεια του. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οι μελέτες των τελευταίων χρόνων, έδειξαν ότι οι φουσαλίδες αυτές αποκτούν διαφορετικές ιδιότητες, όταν μικραίνουν.

Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι εκτός από το μοναδικά μικρό τους μέγεθος, οι νανοφουσαλίδες διαφέρουν από τις συμβατικές φουσαλίδες στα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Ανθεκτικότητα
- Αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια τους
- Χαμηλή πλευστότητα, που της διατηρεί αναλλοίωτες στην υγρή φάση
- Υψηλή διαλυτότητα αερίου
- Ικανότητα να δημιουργούν ελεύθερες ρίζες

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει σχηματικά την διαφορά της συμπεριφοράς μεταξύ των συμβατικών φουσαλίδων και των μικρο/νано φουσαλίδων.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα, οι συμβατικές φουσαλίδες ανεβαίνουν στην επιφάνεια του νερού γρήγορα και διασπώνται, ενώ οι μικρο/νано φουσαλίδες διατηρούνται στον πυθμένα σε μία σταθερή αναλλοίωτη δομή.



Εικόνα 17: Οι διαφορές των συμβατικών φυσαλίδων με τις μικρο/νανοφυσαλίδες  
Source: Tomohiro Marui-2013

Επιπλέον έχει βρεθεί ότι οι συμβατικές φυσαλίδες εμφανίζουν σημαντικές παραμορφώσεις στο σχήμα τους και παίρνουν διάφορα σχήματα, εν αντιθέσει με τις νανοφυσαλίδες που είναι σχεδόν σφαιρικές αλλά με μεγάλες διακυμάνσεις τάσεων στην επιφάνειά τους.

### 2.3.13 Μέθοδοι Μέτρησης του μεγέθους των Νανοφυσαλίδων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι μικροφυσαλίδες είναι αόρατες με το γυμνό μάτι, ενώ το μικροσκοπικό τους μέγεθος το οποίο ευθύνεται για την πλειοψηφία των μοναδικών ιδιοτήτων τους, είναι δύσκολο να μετρηθεί.

Τα τελευταία χρόνια, αρκετές τεχνικές έχουν τεθεί σε εφαρμογή προκειμένου να προσδιοριστεί το μέγεθος, η διασπορά του μεγέθους των νανοφυσαλίδων και κατ' επέκταση οι μοναδικές τους ιδιότητες.

Μεταξύ των εφαρμόσιμων αυτών μεθόδων μέτρησης, είναι ο αναλυτής λέιζερ που μετρά την διάθλαση των σωματιδίων, το ατομικό μικροσκόπιο και ο αναλυτής της εικόνας. Σε κάθε περίπτωση και λόγω του ότι οι νανοφυσαλίδες διατηρούνται σταθερές στο νερό και για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, η επιλογή μιας απλής μεθόδου μέτρησης, είναι προτιμητέα.

Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματά της και τα μειονεκτήματά της. Για παράδειγμα ο αναλυτής εικόνας και το ατομικό μικροσκόπιο μετρούν την μέση διάμετρο της φυσαλίδας, ενώ απαιτούν αρκετό χρόνο προκειμένου να ολοκληρώσουν την κάθε μέτρηση. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο



αναλυτής εικόνας κυρίως χρησιμοποιείται για να μετρήσει μεγέθη φυσαλίδας 0,8 μm, που είναι ελαφρώς μεγαλύτερα σε σχέση με τα μεγέθη που μετρούν άλλες μέθοδοι.

Σχετικά με τον αναλυτή λέηζερ, έχει βρεθεί ότι μετράει το μέσο μέγεθος από ένα μεγάλο πλήθος νανοφυσαλίδων και συνήθως χρησιμοποιείται για μεγέθη φυσαλίδας μεταξύ 0.1μm-3mm. Θεωρείται μια εύκολη μέθοδος μέτρησης.

Οι σύγχρονες μετρήσεις του μεγέθους των νανοφυσαλίδων χρησιμοποιούν συνήθως το δυναμικό σαρωτικό μηχανήμα φωτός (DLS – Dynamic light scattering) , το οποίο μετρά την διασπορά του μεγέθους των νανοφυσαλίδων σε ένα εύρος μεγεθών μεταξύ 0.5 nm έως 6μm. Η βασική ιδιότητα του συγκεκριμένου μηχανήματος είναι ότι το δείγμα φωτίζεται από μια ακτίνα λέηζερ. Η θερμότητα που παράγεται προκαλεί την κίνηση των φυσαλίδων και ανάλογα με την ταχύτητα κίνησής τους, προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με το μέγεθός τους. Για παράδειγμα οι μικρού μεγέθους φυσαλίδες κινούνται πιο γρήγορα συγκριτικά με αυτές του μεγαλύτερου μεγέθους.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να προβεί στον διαχωρισμό του μεγέθους μεταξύ των φυσαλίδων αερίου και των μικρών σωματιδίων που υπάρχουν στο διάλυμα.

Επομένως, για πιο ακριβή αποτελέσματα, προτείνεται επικουρικά η εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων μέτρησης πέραν των οπτικών, που να στηρίζονται σε φυσικά φαινόμενα που δημιουργούνται από την ύπαρξη των νανοφυσαλίδων.



## 2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Η δημιουργία των νανοφυσαλίδων μπορεί να θεωρηθεί μια διαδικασία στατική ή ημι-στατική. Είναι μια δυναμική διαδικασία που βασίζεται στην συνένωση και τον διαχωρισμό, ενώ απλουστευμένα μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία εμφανίζει παρόμοια διεργασία με αυτή του βρασμού, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση πρόκειται για μεταβολή στην πίεση και όχι μεταβολή στην θερμοκρασία.

Οι τρόποι δημιουργίας νανοφυσαλίδων με διάμετρο μικρότερη από 50μm, δεν είναι μια εύκολη διαδικασία.

Οι νανοφυσαλίδες σήμερα παράγονται με μηχανικό τρόπο, είτε με παροχή αερίου και ταυτόχρονη παροχή υγρού, είτε με παροχή αερίου χωρίς ταυτόχρονη παροχή υγρού.

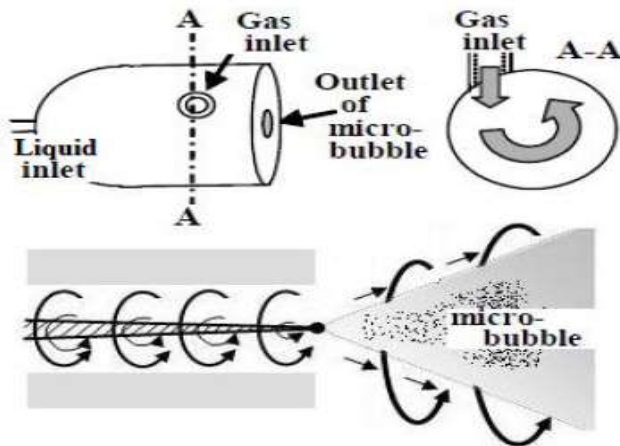
Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιεί παροχή αερίου και ταυτόχρονη παροχή υγρού είναι ο ακόλουθος:

- Αναδευτήρας με περιστροφική ροή υγρού
- Στατικός Αναμεικτήρας
- Εκτοξευτής
- Αεριστής Venturi

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιεί παροχή αερίου χωρίς παροχή υγρού είναι ο ακόλουθος:

- Τριχοειδούς τύπου
- Υπερηχητικού τύπου
- Συμπύκνωσης υδρατμών
- Ηλεκτρολυτικού τύπου

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά η δημιουργία νανοφυσαλίδων μέσω ενός τυπικού συστήματος παραγωγής νανοφυσαλίδων.



Εικόνα 18: Παραγωγή Νανοφουσαλίδων  
Πηγή: Hideki Tsuge-2015

#### 2.4.1 Ο Μηχανισμός Δημιουργίας Νανοφουσαλίδων – Σπηλαιώση

Οι μικροφουσαλίδες κυρίως εμφανίζονται στην επιφάνεια υδροφοβικών σωματιδίων. Η δημιουργία των μικροφουσαλίδων γίνεται με πολλούς πιθανούς τρόπους είτε λόγω εσωτερικών είτε λόγω εξωτερικών παραγόντων. Η δημιουργία των νανοφουσαλίδων συνήθως οφείλεται σε μια απότομη πτώση πίεσης κάτω από μια οριακή τιμή, και σαν αποτέλεσμα η ομοιογενής υγρή φάση του υγρού τείνει να αλλάξει. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο που βασίζεται στην μεταβολή της πίεσης η οποία δημιουργεί μικρές περιοχές συμπίεσης και αραίωσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «σπηλαιώση».

Η πρώτη αναφορά σπηλαιώσης δημοσιεύτηκε το 1895 από τους συγγραφείς Thornycroft, J.I Barnaby, S.W Inst Chem. Eng. Οι οποίοι παρατήρησαν ότι η προπέλα του πλοίου τους είχε σχηματίσει κοιλότητες και είχε διαβρωθεί εξαιτίας του στροβιλισμού της.

Η σπηλαιώση έχει σημαντικές ομοιότητες με τον βρασμό, αλλά διαφέρει στο γεγονός ότι η γεννεσιουργός αιτία της είναι η διαφορά της πίεσης σε αντίθεση με τον βρασμό, που η αιτία δημιουργίας του είναι η διαφορά της θερμοκρασίας. Βάσει ερευνών που έχουν γίνει τα προηγούμενα χρόνια, έχει προκύψει ότι η δημιουργία των φουσαλίδων οφείλεται αποκλειστικά στην σπηλαιώση η οποία μπορεί να είναι διαφόρων τύπων, όπως υδροδυναμική, σωματιδιακή, ακουστική, υπερηχητική, ηλεκτροχημική, ακόμα και μηχανικής ανάδευσης.

Το φαινόμενο της σπηλαιώσης εξηγείται λαμβάνοντας υπόψη το θεώρημα του Bernoulli ως ακολούθως:



$$\rho_e + \gamma u^2 / 2g + \gamma h = C$$

όπου  $\rho_e$  : η πίεση του υγρού

$\gamma$ : το ειδικό βάρος του

$u$  : η ταχύτητα αυτού και

$h$ : το στατικό ύψος

και  $C$  μια σταθερά τιμή

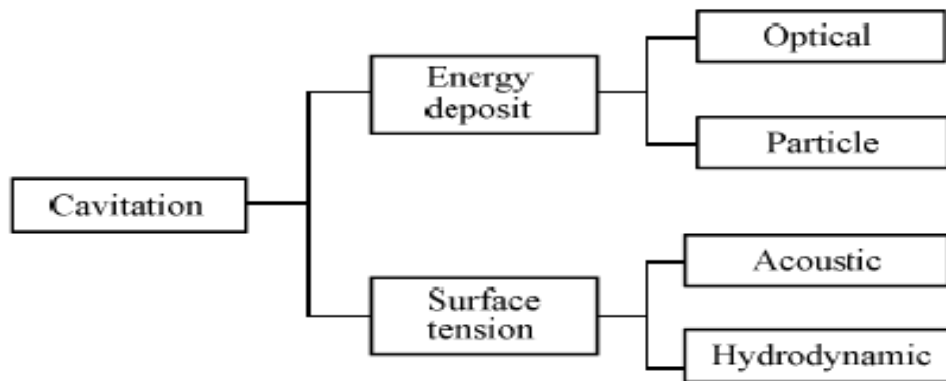
Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι όταν η ταχύτητα ροής  $\gamma$  σε μια περιοχή λαμβάνει μεγάλες τιμές, τότε η πίεση του υγρού θα πρέπει να λαμβάνει πολύ μικρές, προκειμένου το άθροισμα να παραμένει σταθερό.

Όπως έχει προκύψει από την βιβλιογραφία σε υψηλές ταχύτητες ροής νερού εμφανίζονται στιγμιαία απόλυτες πιέσεις αρκετά χαμηλές, έτσι ώστε τοπικά και στιγμιαία η πίεση να γίνεται μικρότερη από την πίεση ατμών. Σε αυτές τις συνθήκες το νερό στιγμιαία μεταπίπτει από την υγρή του φάση στην αέρια και έτσι δημιουργούνται τοπικά μικρές φυσαλίδες.

Εν συνεχεία όταν αυτές οι φυσαλίδες μεταφερθούν σε περιοχές με μεγαλύτερες πιέσεις, μεταπίπτουν πάλι στιγμιαία στην υγρή φάση απελευθερώνοντας τοπικά κρουστικές πιέσεις (στιγμιαίες πιέσεις) πολύ μεγάλου μεγέθους, που καταστρέφουν τα στερεά όρια της ροής οποιουδήποτε υγρού.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα (19), υπάρχουν δύο (2) τρόποι να μειωθεί η επιφανειακή πίεση και να δημιουργηθεί σπηλαίωση. Ο ένας είναι με την μεταβολή της ταχύτητας ροής του υγρού και τότε έχουμε την υδροδυναμική σπηλαίωση και ο άλλος είναι μέσω ενός ακουστικού πεδίου το οποίο συχνά ονομάζεται ακουστική σπηλαίωση.

Το είδος της σπηλαίωσης που προκύπτει με τοπική εναπόθεση ενέργειας μπορεί να προκληθεί είτε από πρωτόνια από το φως του λέιζερ είτε από άλλα στοιχειώδη σωματίδια.



Εικόνα 19: Κατηγοριοποίηση Σπηλαιώσης- βάσει του μηχανισμού μείωσης της πίεσης κάτω από μια κρίσιμη τιμή  
Πηγή: FAN Maoming, TAO Daniel, HONAKER Rick, LUO Zhenfu- September 2010

Όλοι οι τύποι σπηλαιώσης είναι πιθανό να επιτευχθούν μέσω της κατάλληλης γεωμετρίας του συστήματος και μέσω της κατάλληλα εφαρμοζόμενης ταχύτητας ροής του υγρού.

Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι με γρήγορη ανάδευση, ενεργοποιώντας το φαινόμενο της σπηλαιώσης, μπορεί να προκύψει παραγωγή νανοφουσαλίδων ακόμα και μέσης διαμέτρου < από 500 nm. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, οι ερευνητές Ahmadi και Khodadadi Darban (2013) βασιζόμενοι στο υδροδυναμικό μηχανισμό της σπηλαιώσης, δημιούργησαν νανοφουσαλίδες μέσω γεννήτριας Venturi με μέση διάμετρο 130-545 nm.

Οι δύο (2) πιο διαδεδομένοι τύποι της σπηλαιώσης που εφαρμόζονται ευρέως τα τελευταία χρόνια είναι η υδροδυναμική και η ακουστική σπηλαιώση.

Γενικά, επισημαίνεται ότι η υδροδυναμική σπηλαιώση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί ανάδευση υψηλής ταχύτητας με τη χρήση μηχανικών αναμικτών σε έναν δεδομένο όγκο χύδην υγρού με περιορισμένη ποσότητα αερίου.

Η υδροδυναμική σπηλαιώση έχει αποδειχθεί ότι είναι μία πολύ αποδοτική τεχνική για την απολύμανση του νερού, σε σύγκριση με την ακουστική σπηλαιώση, και είναι η μέθοδος που εφαρμόζεται πιο συχνά στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η υδροδυναμική σπηλαιώση επιτυγχάνεται με συμπίεση στα όρια του κορεσμού, με διάσπαση και διάτμηση φυσαλίδων και με μηχανική ανάδευση. Θεωρείται μία από τις πιο φθηνές και πιο αποτελεσματικές μεθόδους δημιουργίας σπηλαιώσης, με χαμηλό λειτουργικό κόστος και με χρήση απλού εξοπλισμού.

Ωστόσο, σε σχετικές μελέτες εργαστηριακής κλίμακας που διενεργήθηκαν βρέθηκε ότι το κόστος της υδροδυναμικής σπηλαιώσης για την απολύμανση του νερού εξακολουθεί να είναι υψηλότερο από αυτό των συμβατικών μεθόδων της χλωρίωσης και του οζονισμού.

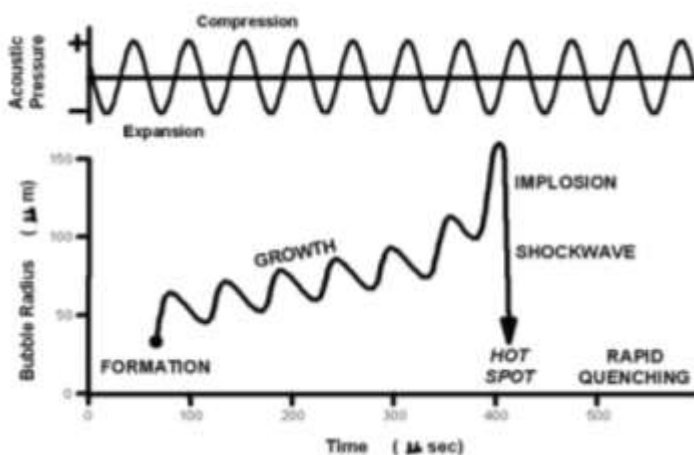


Σχετικά με την ακουστική σπηλαιώση, αυτή εξαρτάται από το μέσο, μέσα στο οποίο συμβαίνει η αντίδραση και ως εκ τούτου εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Ομογενής αντίδραση στην υγρή φάση
- Τον υγρό διαλύτη κοντά στην διεπιφάνεια
- Εάν υπάρχουν αιωρούμενα σωματίδια στο ρευστό
- Εάν υπάρχει διφασικό υγρό σύστημα

Η ακουστική σπηλαιώση είναι μια μέθοδος παραγωγής νανοφουσαλίδων που τυγχάνει μεγάλης αποδοχής τα τελευταία χρόνια και βασίζεται στους υπέρηχους, και στην δυνατότητα του ήχου να διαδίδεται μέσω κυματοειδούς μορφής, με αποτέλεσμα την έναρξη ή την ενίσχυση της χημικής δραστηριότητας στο υγρό, την μεταβολή πίεσης και την δημιουργία περιοχών συμπίεσης και αραιώσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, η πίεση λειτουργεί στο φάσμα της υποπίεσης, εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας ροής του υγρού.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η μεταβολή της διαμέτρου της φουσαλίδας σε σχέση με τον χρόνο κατά την φάση της ακουστικής σπηλαιώσης.



Εικόνα 20: Ακουστική Σπηλαιώση- Μεταβολή διαμέτρου φουσαλίδας με τον χρόνο  
Πηγή: Χρ. Αργυρούσης Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ-2012

Το 2003 επιτυγχάνθηκε η παραγωγή νανοφουσαλίδων σε διάλυμα με την μέθοδο των υπερήχων, κάτι το οποίο αυτομάτως διευκόλυνε την εφαρμογή των νανοφουσαλίδων στην φαρμακευτική βιομηχανία.





#### 2.4.2 Δημιουργία Νανοφουσαλίδων από Μικροφουσαλίδες

Έχει παρατηρηθεί ότι οι μεγάλες μικροφουσαλίδες διαμέτρου 1-100 $\mu\text{m}$  έχουν τη τάση να ανεβαίνουν αργά προς την επιφάνεια του υγρού, και μόλις φτάσουν στην επιφάνεια να διασπώνται εξαιτίας της υψηλής εσωτερικής τους πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, έχει βρεθεί ότι η εσωτερική πίεση μιας φουσαλίδας διαμέτρου 1  $\mu\text{m}$  σε θερμοκρασία 298° K είναι 390 kPa, και άρα είναι περίπου τέσσερις (4) φορές μεγαλύτερη από την περιβάλλουσα ατμοσφαιρική πίεση.

Τα υψηλά επίπεδα εσωτερικής πίεσης είναι αυτά που τελικά προκαλούν την κατάρρευση των μικροφουσαλίδων και την δημιουργία ενός κύματος κλονισμού που καταλήγει στην δημιουργία νανοφουσαλίδων και ελεύθερων Υδροξυλικών ριζών.

Οι μικρές αυτές φουσαλίδες που δημιουργήθηκαν, με διάμετρο μικρότερη από 20  $\mu\text{m}$  μένουν στον πυθμένα λόγω της εξωτερικής πίεσης από το υδάτινο περιβάλλον, και προκειμένου να αντισταθμίσουν την αυξανόμενη επιφανειακή τάση, συρρικνώνονται εξαιτίας της διαρροής των εσωτερικών αερίων. Οι μικρές αυτές φουσαλίδες που δημιουργήθηκαν, όπως έχουμε ήδη αναφέρει ονομάζονται νανοφουσαλίδες και εμφανίζουν εξαιρετικά σταθερή δομή.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιες νανοφουσαλίδες με διάμετρο μικρότερη από 1  $\mu\text{m}$  ζουν στιγμιαία κατά την φάση κατάρρευσης της μικροφουσαλίδας. Αυτές οι νανοφουσαλίδες, είναι περιτριγυρισμένες από μια πολύ διακριτή επιφάνεια, η οποία τις διαχωρίζει απόλυτα από το υδάτινο περιβάλλον που τις περιβάλλει.

#### 2.4.3 Δημιουργία Νανοφουσαλίδων μέσω Ηλεκτρόλυσης

Μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νανοφουσαλίδων είναι η μέθοδος του ιονισμού. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνά το νερό η ηλεκτρολυτική αποσύνθεση των μορίων του νερού οδηγεί στην παραγωγή οξυγόνου και αέριου υδρογόνου, και ως εκ τούτου προκαλούνται φουσαλίδες στο διάλυμα.

Η διαδικασία αυτή έχει παρατηρηθεί ότι εξελίσσεται γρήγορα μέσα στο θαλασσινό νερό, ενώ παρατηρείται να εξελίσσεται αργά στο καθαρό νερό, λόγω της χαμηλής αγωγιμότητάς του.

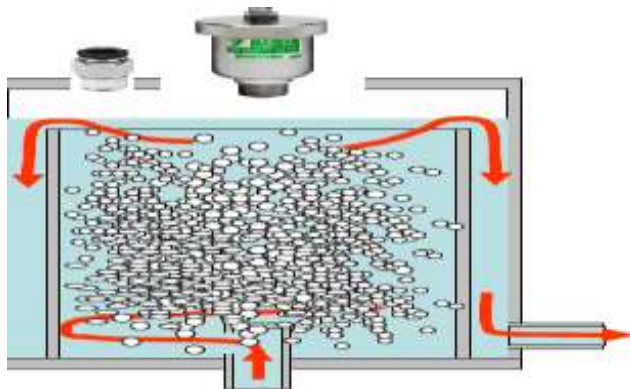
Ως εκ τούτου, οι φουσαλίδες που δημιουργούνται στο καθαρό νερό είναι πολύ μικρού μεγέθους, τόσο που είναι σχεδόν άρατες με το απλό μικροσκόπιο.



#### 2.4.4 Δημιουργία Νανοφουσαλίδων με Μηχανικούς τρόπους

Υπάρχει πληθώρα μηχανημάτων που παράγουν ποικιλοτρόπως μικρο/νανοφουσαλίδες. Ομαδοποιώντας τους τύπους των μηχανημάτων μπορούμε να πούμε ότι αυτοί χωρίζονται στις ακόλουθες έξι (6) μεγάλες κατηγορίες:

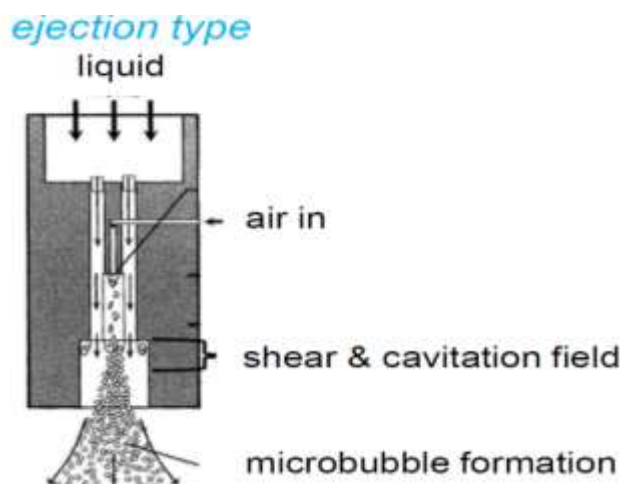
- Τύπου Αποσυμπίεσης. Βασίζεται στην λειτουργία ομογενοποίησης, ενώ η εισαγωγή του πεπιεσμένου αέρα γίνεται με απότομο τρόπο, μέσω ενός στομίου που έχει η συσκευή. Στην παρακάτω φωτογραφία απεικονίζεται ένα τυπικό σύστημα αυτού του εξοπλισμού.



Εικόνα 21: Παραγωγή νανοφουσαλίδων με συσκευή τύπου αποσυμπίεσης

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

- Υδροδυναμικός Διαχωριστής Φουσαλίδων. Βασίζεται στη φαινόμενο της σπηλαιώσης. Εφαρμόζει μια μεγάλη διατμητική ροή μέσω αέρα και με αυτόν τον τρόπο προκαλείται η δημιουργία φουσαλίδων. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει μια τυπική συσκευή αυτού του τρόπου παραγωγής μικροφουσαλίδων.



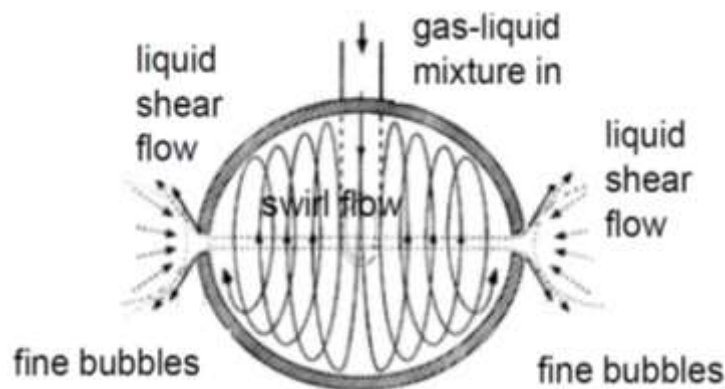
Εικόνα 22: Παραγωγή νανοφουσαλίδων με συσκευή τύπου Διατμητικής Ροής

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017



- Τύπου Στροβιλισμού. Η διαδικασία της ανάδευσης γίνεται μέσα σε μια κυλινδρική δεξαμενή, όπου δημιουργείται αρνητική πίεση στο υγρό, λόγω της μεταφοράς του αέρα από την επιφάνεια της δεξαμενής προς τον πυθμένα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια νοητά κάθετη στήλη αέρα. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνεται με μια κατασκευή χαμηλού κόστους.

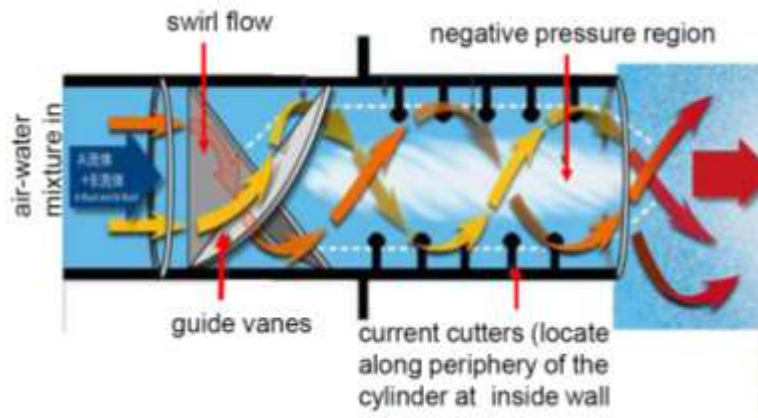
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο συγκεκριμένος μηχανισμός παραγωγής φυσαλίδων.



Εικόνα 23: Παραγωγή νανοφυσαλίδων με συσκευή τύπου Στροβιλισμού

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

- Στατικός αναμείκτης (Mixer). Όλοι οι αναδευτήρες λειτουργούν ουσιαστικά ως αντλίες, δηλαδή αναρροφούν ρευστό από την μία πλευρά και το εκτινάσσουν προς την άλλη. Οι λεπτές φυσαλίδες που δημιουργούνται, προκύπτουν από το συνδυασμό των φαινομένων της, σπηλαίωσης, της εφαρμοζόμενης διατμητικής δύναμης και την δημιουργία κρουστικών κυμάτων. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει ένα τυπικό σύστημα ανάδευσης αυτής της μορφής.



Εικόνα 24: Παραγωγή νανοφουσαλίδων με συσκευή τύπου Ανάμειξης

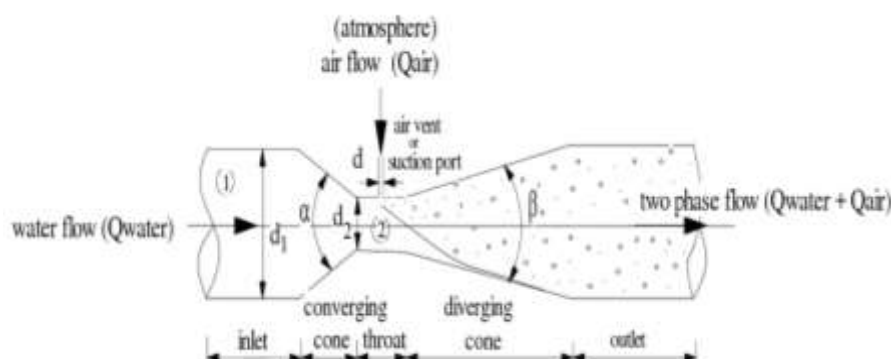
Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

- Γεννήτριες Venturi aerator. Η υδροδυναμική σπηλαιώση είναι μια από τις πολύ διαδεδομένες τεχνικές και συνήθως παράγεται από τις γεννήτριες Venturi aerator.

Οι γεννήτριες Venturi αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα. Το κομμάτι της εισροής, το σωληνωτό τμήμα και το κωνικό κομμάτι της εξόδου. Η μείωση της πίεσης μέσα στην γεννήτρια Venturi προκύπτει μειώνοντας την ταχύτητα του υγρού.

Στην γεννήτρια Venturi ο αέρας και το υγρό, περνούν ταυτόχρονα μέσα από το σωληνώδες κομμάτι την γεννήτριας. Όταν το συμπιεσμένο υγρό εισέρχεται μέσα από το σωληνώδες τμήμα, η ταχύτητα του υγρού στο κυλινδρικό στόμιο της γεννήτριας αυξάνει, ενώ ταυτόχρονα η πίεση γίνεται μικρότερη συγκρινόμενη με το κομμάτι της εισόδου, και όλος αυτός ο μηχανισμός, προκαλεί σπηλαιώση.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τον μηχανισμό λειτουργίας μιας γεννήτριας Venturi aerator.



Εικόνα 25: Γεννήτρια Venturi Aerator

Πηγή: Tamer Bağatur, Fevzi Önen, Necati Kayaalp-2018



- Υπερηχητικός καθητήρας/Εξωτερική Γεννήτρια Υπερήχων. Το ακουστικό σύστημα ή το σύστημα υπερήχων χρησιμοποιεί τα υπερηχητικά κύματα είτε με τη χρήση υπερηχητικού καθητήρα στο εσωτερικό του υγρού δοχείου είτε με εξωτερική γεννήτρια υπερήχων.



### 3 ΟΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

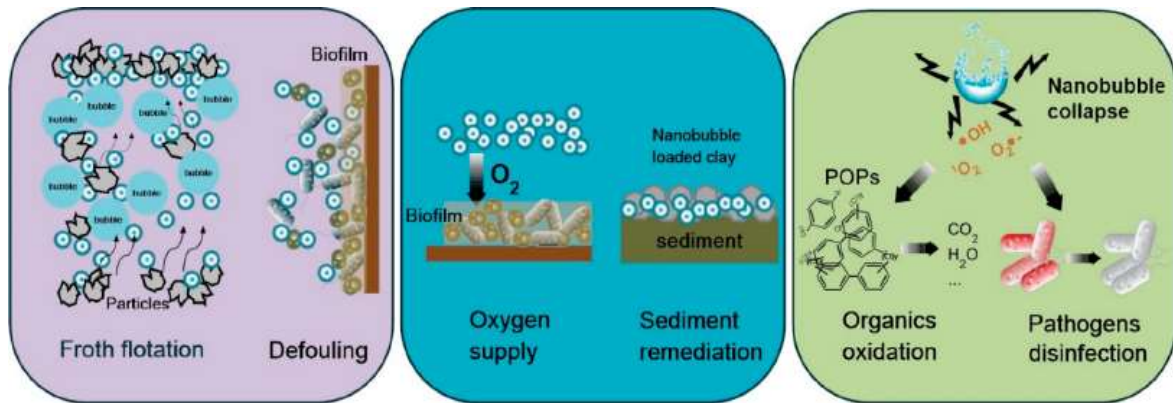
Οι νανοφυσαλίδες διαφέρουν από τους άλλους τύπους των φυσαλίδων κυρίως ως προς την μακροζωία, την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια, την χαμηλή πλευστότητα λόγω του μεγέθους τους, την υψηλή διαλυτότητα στο αέριο και την δυνατότητα δημιουργίας ελευθέρων ριζών. Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω χαρακτηριστικές ιδιότητες, τα τελευταία χρόνια πολλές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί προκειμένου να μπορέσουν να χρησιμοποιήσουν τις ιδιότητες των νανοφυσαλίδων στην ανακλαστικότητα των νετρονίων, την ανακλαστικότητα των ακτίνων Χ, την μικροανάλυση των κρυστάλλων χαλαζία, την υπέρυθρη φασματοσκοπία ολικής ανάκλασης και την ηλεκτρονική μικροσκοπία μετάδοσης. Επιπλέον, πρόσφατα και σταδιακά από το 2004 και μετά η χρήση των νανοφυσαλίδων έχει εξαπλωθεί και σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στις μεθόδους επεξεργασίας υγρών αποβλήτων λόγω της υψηλής βιοενεργητικότητάς τους αλλά και της μεγάλης μεταφορικής τους ικανότητας.

Τα χαρακτηριστικά των νανοφυσαλίδων που θα μπορούσαν να είναι αξιοποιήσιμα στην περιβαλλοντική μηχανική, είναι η μεγάλη τους ανθεκτικότητα και σταθερότητα, η χαμηλή τους πλευστότητα, η αρνητικά φορτισμένη επιφάνειά τους, η υψηλή διαλυτότητα και η ικανότητά τους να δημιουργούν ελεύθερες ρίζες, χαρακτηριστικά που τις κάνουν μοναδικές, συγκρινόμενες με τις συμβατικές φυσαλίδες.

Με βάση τα ανωτέρω, εκτιμάται ότι η επιτυχής και ολοένα και πιο δυναμική εισχώρηση της τεχνολογίας των νανοφυσαλίδων στην περιβαλλοντική μηχανική, μπορεί να οδηγήσει σε μια τεχνολογική επανάσταση με πολύ θετικά αποτελέσματα, κυρίως στα ακόλουθα περιβαλλοντικά πεδία:

- Βελτιωμένη αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση της ρύπανσης
- Μικρότεροι Όγκοι στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων
- Μείωση στον χρόνο λειτουργίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων
- Μείωση του λειτουργικού κόστους των εγκαταστάσεων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει σχηματικά την δυναμική συνεισφορά των νανοφυσαλίδων στην περιβαλλοντική μηχανική που οφείλεται στα μοναδικά φυσικά, βιολογικά και χημικά χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 26: Δυνητική Συνεισφορά των νανοφουσαλίδων στην Περιβαλλοντική Μηχανική  
Πηγή: Tao Lyu, Shubiao Wu, Robert J.G.Mortimer and Gang Pan-May 2019

Ως εκ τούτου, πολλές εργαστηριακές έρευνες τα τελευταία χρόνια στοχεύουν να αποδείξουν την αποτελεσματικότητα που έχει η εφαρμογή των νανοφουσαλίδων στην πλεύση του αφρού, την απολύμανση με νερό και την αποκατάσταση ιζημάτων.

Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι παρόλο που οι καταγεγραμμένες ιδιότητες των νανοφουσαλίδων είναι εντυπωσιακές, λόγω της διασποράς του μεγέθους τους και της δυσκολίας κατηγοριοποίησής τους, τα συμπεράσματα των πειραματικών ερευνών είναι επισφαλή, και μη αποδεκτά ακόμα από όλους, γι αυτό και η χρήση τους είναι προς το παρόν πολύ περιορισμένη.

Με βάση τα ανωτέρω, οι πιο σημαντικοί λόγοι που επιτάσσουν την ανάγκη εφαρμογής των νανοφουσαλίδων στην επεξεργασία του νερού και των υγρών αποβλήτων παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

### 3.1. ΥΨΗΛΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΕΡΙΟΥ

Κατά την φάση της φυσικής αποκατάστασης του νερού, αλλά και της βιολογικής επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, ο αερισμός παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, στην παροχέτευση οξυγόνου, στην βιωσιμότητα του υδάτινου περιβάλλοντος, αλλά και σαν υπόστρωμα βιοχημικής αντίδρασης για την αποδόμηση των οξειδωτικών ρύπων.

Παρόλο που η λειτουργία των συμβατικών μηχανικών αεριστών απαιτεί μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο συνήθως αποτελεί το 45-75% του ολικού λειτουργικού κόστους των μονάδων επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, η απόδοση μεταφοράς οξυγόνου περιορίζεται σε ποσοστό



6-10%. Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι νανοφουσαλίδες έχουν χαμηλή πλευστότητα, άρα μπορούν με αργό ρυθμό να παροχετεύσουν οξυγόνο στο περιβάλλον υγρό.

Με βάση την βιβλιογραφία έχει βρεθεί ότι ο ρυθμός χρησιμοποίησης οξυγόνου και ο συντελεστής ογκομετρικής μεταφοράς μάζας σε συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που χρησιμοποιούν τις νανοφουσαλίδες είναι σχεδόν διπλάσιος από ότι στα συστήματα που χρησιμοποιούν τις συμβατικές φουσαλίδες.

Επιπλέον, η αποδόμηση του οργανικού φορτίου χρησιμοποιώντας τις νανοφουσαλίδες έχει παρατηρηθεί ότι απαιτεί λιγότερο από τον μισό χρόνο στέρξης, συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Περαιτέρω έρευνες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η παροχέτευση οξυγόνου με την χρήση νανοφουσαλίδων στην αποκατάσταση των ιζηματογενών λιμνών, διατηρεί μια συγκέντρωση οξυγόνου < 6 mg/l για πάνω από έξι (6) μήνες.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω καταγραφές, προκύπτει ότι η παροχέτευση οξυγόνου με νανοφουσαλίδες, αποτελεί μια πολύ αποδοτική λύση στα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και γενικά στα συστήματα επεξεργασίας νερού.

Από την άλλη, με βάση την σχετική βιβλιογραφία, ένα μειονέκτημα της διαδικασίας είναι ότι λόγω της κίνησης Brown, τα υψηλά επίπεδα θερμότητας και η παλμική κίνηση των νανοφουσαλίδων είναι πιθανόν να δημιουργήσουν βλάβες στα βιολογικά κύτταρα και να διαρρήξουν τον κυτταρική μεμβράνη των μικροοργανισμών, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό.

### 3.2 ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΟΓΟΝΩΝ- ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η οξείδωση των ρυπαντικών οργανικών φορτίων, καθώς και των παθογενών οργανισμών είναι καταλυτικός παράγοντας, προκειμένου να αξιολογηθεί μια εναλλακτική πρόταση ως προς το αποτέλεσμα που επιφέρει στην επεξεργασία του πόσιμου νερού αλλά και των λοιπών υγρών αποβλήτων

Η τεχνολογία των νανοφουσαλίδων δίνει την δυνατότητα μιας αποδοτικής λύσης, που προσφέρει παροχή διαφόρων μορφών οξυγόνου, όπως είναι το  $\text{OH}$ , τα υπεροξειδία ( $\text{O}^{\cdot 2}$ ), το οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ) αλλά και το όζον ( $\text{O}_3$ ).





Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές η αποτελεσματική δράση της παροχέτευσης διαφόρων τύπων  $O_2$  στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων δεν έχει ακόμα επαρκώς εκτιμηθεί.

### 3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΑΝΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

Ο κύριος λόγος που η τεχνολογία των νανοφουσαλίδων συγκεντρώνει το μεγάλο ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια, έγκειται στο ότι η τεχνολογία αυτή προσφέρει μια σταθερή και φτηνή λύση ως προς την επεξεργασία λυμάτων.

Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι επειδή η παραγωγή μικροφουσαλίδων είναι πολύ φθηνότερη από την αντίστοιχη παραγωγή των νανοφουσαλίδων, εξετάζεται το ενδεχόμενο να μην είναι τόσο πρακτική η παραγωγή αποκλειστικά νανοφουσαλίδων, αλλά ενός μείγματος από μικροφουσαλίδες και νανοφουσαλίδες, το οποίο θα μπορούσε να μειώσει το λειτουργικό κόστος σε έναν βαθμό, και να αποτελέσει μια πιο συμφέρουσα και αποτελεσματική λύση στις εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων.

Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η υδροδυναμική σπηλαιώση που είναι η μέθοδος που περισσότερο χρησιμοποιείται για την παραγωγή νανοφουσαλίδων, πολλές φορές θεωρείται αναποτελεσματική για τα ανεπεξέργαστα λύματα που περιέχουν σωματίδια, δεδομένου ότι τα σωματίδια μπορεί να εμποδίσουν την δημιουργία των νανοφουσαλίδων.

### 3.4 ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ- ΑΦΡΙΣΜΟΣ

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, έχει βρεθεί ότι οι νανοφουσαλίδες που παράγονται μέσω της υδροδυναμικής σπηλαιώσης, βελτιώνουν την επίπλευση των σωματιδίων εξαιτίας των αλλαγών που επιφέρουν στην επιφάνεια των σωματιδίων, και ως εκ τούτου μειώνουν την απαίτηση για προσθήκη χημικών.

Η παραγωγή νανοφουσαλίδων στο σώμα του αφρού είναι μια συνήθης και αρκετά σύνθετη φυσιοχημική διεργασία, η οποία εξαρτάται από πολλές παραμέτρους.



Με βάση την βιβλιογραφία, πειραματικές διαδικασίες οι οποίες μελέτησαν κυρίως την διασπορά του μεγέθους των νανοφουσαλίδων και το δυναμικό ζήτα κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα, τα οποία σχετίζονται με την επίδραση που έχουν οι νανοφουσαλίδες στο φαινόμενο του αφρισμού:

- Οι νανοφουσαλίδες έχουν την τάση να δημιουργούν τον πυρήνα τους στην επιφάνεια κυρίως υδροφοβικών σωματιδίων με μεγάλη γωνία τριβής ( $\theta$ ).
- Το μέγεθος των νανοφουσαλίδων μειώνεται όσο αυξάνει η συγκέντρωση του αφρού. Συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι το μέσο μέγεθος των νανοφουσαλίδων μειώνεται από 529 nm σε 191 nm, όταν η συγκέντρωση του αφρού αυξάνεται από  $14 \cdot 10^{-6}$  σε  $23 \cdot 10^{-6}$ .
- Το μέγεθος των νανοφουσαλίδων αυξάνει όσο αυξάνει το διαλυμένο οξυγόνο και το  $\text{CO}_2$ . Συγκεκριμένα το μέσο μέγεθος των νανοφουσαλίδων αυξάνεται από 285 nm μέχρι και 636 nm όσο η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αυξάνει από  $5,2 \cdot 10^{-6}$  σε  $7,9 \cdot 10^{-6}$ .
- Υδροφοβικά σωματίδια μεγέθους  $< 50$  nm φαίνεται ότι έχουν άμεση επίδραση στο μέγεθος των νανοφουσαλίδων, αφού ουσιαστικά δημιουργούν τις προϋποθέσεις σχηματισμού του πυρήνα, γύρω από τον οποίο παράγονται οι νανοφουσαλίδες. Επομένως έχει παρατηρηθεί ότι η ύπαρξη υδροφοβικών σωματιδίων μεγέθους  $< 50$  nm, λειτουργεί αυξητικά ως προς το μέγεθος των νανοφουσαλίδων. Πιο συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι όταν τα σωματίδια είναι υδροφοβικά, το μέσο μέγεθος των νανοφουσαλίδων αυξάνει από 199 μέχρι 562 nm.
- Στην περίπτωση που τα σωματίδια μεγέθους  $< 50$  nm είναι υδροφιλικά, τότε η επίδραση που έχουν στις νανοφουσαλίδες είναι θετική, ουδέτερη ή ακόμα και αρνητική. Στις περισσότερες περιπτώσεις έχει βρεθεί ότι όταν τα σωματίδια είναι υδροφιλικά, το μέγεθος των νανοφουσαλίδων αυξάνει ελάχιστα.
- Το μέγεθος των νανοφουσαλίδων επίσης αυξάνει όσο αυξάνει η πτώση πίεσης κατά την διάρκεια του φαινομένου σπηλαίωσης. Συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι το μέσο μέγεθος της νανοφουσαλίδας αυξάνει από 275 σε 454nm, όσο αυξάνει και η πίεση από 170 σε 260 kPa.
- Η θερμοκρασία του υδατικού διαλύματος έχει μεγαλύτερη επίδραση στο μέσο μέγεθος των νανοφουσαλίδων ιδίως όταν η συγκέντρωση του διαλυμένου αερίου είναι υψηλή. Επομένως έχει παρατηρηθεί ότι όταν η συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  είναι  $8,3 \cdot 10^{-6}$ , και παράλληλα η θερμοκρασία αυξάνεται από 25 στους 27 °C, το μέσο μέγεθος των νανοφουσαλίδων επίσης αυξάνεται από 368 nm σε 462nm μέχρι και 830 nm. Σε συνθήκες ίδιας θερμοκρασίας και όταν συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  είναι  $7,3 \cdot 10^{-6}$ , το μέσο μέγεθος των νανοφουσαλίδων αυξάνεται από 194 nm σε 365nm μέχρι και 559 nm. Επιπλέον η αύξηση



που προκαλείται στο μέγεθος των νανοφουσαλίδων εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας από τους 25 στους 27 °C, είναι 174 nm υψηλότερη όταν η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> είναι 8,3 \*10<sup>-6</sup>, απ' ότι όταν η αντίστοιχη συγκέντρωση είναι 7,3 \*10<sup>-6</sup>.

- Το μέσο μέγεθος των νανοφουσαλίδων στιγμιαία αυξάνει, με την πάροδο του χρόνου, και το φαινόμενο είναι πιο έντονο όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου CO<sub>2</sub>.
- Επίσης παρατηρήθηκε ότι η σταθερότητα των μικροφουσαλίδων αυξήθηκε όσο η συγκέντρωση του αφρού αυξήθηκε από 5\*10<sup>-6</sup> σε 10\*10<sup>-6</sup>.

Όπως έχει ήδη αναλυθεί και παραπάνω, η παρουσία των νανοφουσαλίδων μειώνει σημαντικά την ταχύτητα ανόδου του αέρα στην επιφάνεια. Η ταχύτητα μιας φούσκας διαμέτρου 2,5 mm μπορεί να υποστεί μια μείωση της τάξης του 4,5 cm/sec με την χρήση νανοφουσαλίδων, το οποίο δημιουργεί ευνοϊκότερες συνθήκες για την δημιουργία του φαινομένου του αφρισμού.

Σε κάθε περίπτωση βρέθηκε ότι οι νανοφουσαλίδες βελτιώνουν την πλευστότητα των σωματιδίων και ευνοούν του μηχανισμούς δημιουργίας αφρού, εφόσον διατηρούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα το εγκλωβισμένο αέριο κάτω από την επιφάνεια του υγρού.



#### 4 ΟΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να πούμε ότι οι λειτουργίες που αφορούν αλλαγές φάσεων είναι ευρέως εφαρμόσιμες σε ενεργειακό, χημικό και βιομηχανικό επίπεδο.

Ανάμεσα στις διαδικασίες που αφορούν τις αλλαγές φάσης το συνδυαστικό μοντέλο αέριο- υγρό, έχει συχνά χρησιμοποιηθεί στις επιστήμες διαχείρισης νερού και αποβλήτων. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου «αέριο-υγρό», εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Σε θεωρητική βάση όμως και όπως ευρέως αναπτύχθηκε παραπάνω, η επιτυχία του συγκεκριμένου μοντέλου οφείλεται στην διεπιφάνεια μεταξύ του υγρού και του αερίου. Επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του μοντέλου είναι ο τρόπος ανάδευσης του υγρού, ο χρόνος του διαφράγματος, το ακροφύσιο της έκχυσης κτλ.

Τις τελευταίες δύο (2) δεκαετίες, πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν επισταμένως με τις μικρο και νανοφυσάλιδες προκειμένου να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα του μοντέλου υγρό- αέριο κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Οι έρευνες βασίστηκαν στην ιδιαίτερη ιδιότητα που έχουν οι νανοφυσάλιδες να μειώνουν το μεγεθός τους και να διατηρούνται κάτω από το υγρό αναλοιώτες, σε σχέση με τις συμβατικές και μεγαλύτερες φυσάλιδες, που με μεγάλη ταχύτητα ανόδου ξεσπούν όταν φτάνουν στην επιφάνεια του υγρού.

Με βάση το μοναδικό αυτό χαρακτηριστικό των νανοφυσάλιδων, τα τελευταία χρόνια προτάθηκε η χρήση τους στην επεξεργασία του πόσιμου και θαλασσινού νερού, αλλά και στην επεξεργασία των οικιακών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, προέκυψε ότι η παραγωγή των ελεύθερων ριζών, δίνει την δυνατότητα απολύμανσης του νερού, χωρίς την προσθήκη χημικών, ενώ με βάση πρόσφατες εφαρμογές, βρέθηκε ότι οι εξεταζόμενοι παράμετροι ύστερα από την χρήση των νανοφυσάλιδων, προέκυπταν πολύ μειωμένες ως προς το ρυπαντικό τους φορτίο.

Ως εκ τούτου, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, ενισχύεται περισσότερο η άποψη ότι το νερό με νανοφυσάλιδες θα πρέπει να αντικαταστήσει το νερό βρύσης τουλάχιστον κατά τις βιομηχανικές χρήσεις.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα της επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων, πριν και μετά την εφαρμογή των νανοφυσάλιδων.



#### 4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ

Η αποτελεσματικότητα των νανοφουσαλίδων στα συστήματα επεξεργασίας νερού έχει αποτελέσει αντικείμενο ερευνών τα τελευταία χρόνια, ενώ υπάρχουν καταγεγραμμένα αποτελέσματα τα οποία αποδεικνύουν ότι η ποιότητα του νερού έχει βελτιωθεί πάρα πολύ μετά από την εφαρμογή των νανοφουσαλίδων.

Πιο συγκεκριμένα, ο παρακάτω πίνακας Νο 1 παρουσιάζει τις διαφοροποιήσεις στις τιμές των βασικότερων παραμέτρων που εξετάστηκαν πριν και μετά την χρήση νανοφουσαλίδων κατά την επεξεργασία του πόσιμου νερού.

Πίνακας 1: Πόσιμο νερό πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων  
Πηγή: G. Senthilkumar<sup>1</sup> · C. Rameshkumar<sup>2</sup> · M. N. V. S. Nikhil<sup>1</sup> · J. Navin Ram Kumar<sup>1</sup>- June 2018

No	Εξεταζόμενοι Παράμετροι	Πριν (mg/lit)	Μετά (mg/lit)
1	Χημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	36	31
2	Βιοχημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)	6	5
3	Διαλυμένο Οξυγόνο (DO)	6,1	6,6
4	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)	72	2
5	Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS)	2394	614
6	Νιτρικά NO <sub>3</sub>	36,3	21,5
7	Ολικός Φώσφορος PO <sub>4</sub>	0,11	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,01)
8	Ολικό Χρώμιο Cr	2,16	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,005)
9	Θείο S	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,01)	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,01)

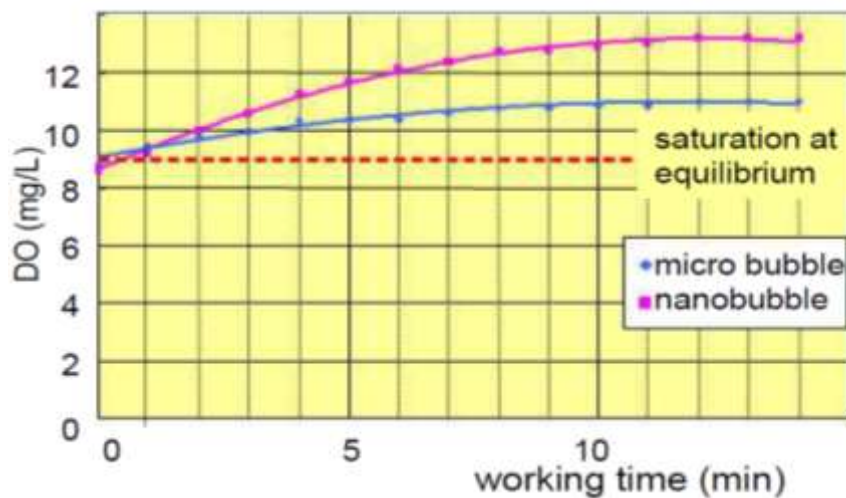
Με βάση τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι το πόσιμο νερό είχε COD 36 mg/lit το οποίο με την χρήση των νανοφουσαλίδων μειώθηκε στα 31 mg/lit. Παρόμοια πτώση παρατηρήθηκε και στην τιμή του BOD. Η μείωση αυτή εξηγείται λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη παροχή του Οξυγόνου στο νερό, και λόγω του ότι η αύξηση του DO, συνεισφέρει στην βελτίωση όλων των παραμέτρων ελέγχου.



Το πλέον εντυπωσιακό με βάση τα ανωτέρω στοιχεία είναι ότι παρατηρήθηκε εξίσου μεγάλη μείωση της τάξης του 97,22% για τα TSS και αντίστοιχα 75,32% για τα TDS.

Συνολικά όλες οι παράμετροι ελέγχου παρατηρήθηκαν βελτιωμένες με την χρήση των νανοφουσαλίδων, και βρέθηκαν εντός προδιαγραφών.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει σχηματικά την μεταβολή του διαλυμένου οξυγόνου σε σχέση με τον χρόνο εφαρμογής των νανοφουσαλίδων.



Εικόνα 27: Μεταβολή του διαλυμένου Οξυγόνου σε σχέση με τον χρόνο

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

#### 4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ

Σε παρόμοιες με τις ανωτέρω εργαστηριακές έρευνες, εξετάστηκε η χρήση των νανοφουσαλίδων στο θαλασσινό νερό. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι που εξετάστηκαν πριν και μετά την χρήση νανοφουσαλίδων. Τα αποτελέσματα είναι παρομοίως θετικά όπως και κατά τον έλεγχο του πόσιμου νερού.

Άξιο αναφοράς είναι ότι η μείωση του BOD και του COD προέκυψε 77,77% και 75% αντίστοιχα.



Πίνακας 2: Θαλασσινό νερό πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων  
Πηγή: G. Senthilkumar<sup>1</sup> · C. Rameshkumar<sup>2</sup> · M. N. V. S. Nikhil<sup>1</sup> · J. Navin Ram Kumar<sup>1</sup>- June 2018

No	Εξεταζόμενοι Παράμετροι	Πριν (mg/lit)	Μετά (mg/lit)
1	Χημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	54	12
2	Βιοχημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)	16	4
3	Διαλυμένο Οξυγόνο (DO)	5,6	6,7
4	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)	748	26
5	Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS)	19,686	18,689
6	Νιτρικά NO <sub>3</sub>	4,2	3,7
7	Ολικός Φώσφορος PO <sub>4</sub>	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,01)	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,01)
8	Ολικό Χρώμιο Cr	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,005)	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,005)
9	Θείο S	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,01)	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο ( Ανιχνεύσιμο όριο : 0,01)

Πέραν των παραμέτρων που εξετάστηκαν σχετικά με την ποιότητα του θαλασσινού νερού, η χρήση νανοφουσαλίδων στο θαλασσινό νερό, βελτίωσε πολύ την ανάπτυξη της θαλάσσιας ζωής. Από τα σχετικά πειράματα, προέκυψε ότι η αύξηση στην παροχέτευση του διαλυμένου οξυγόνου DO, ενίσχυσε την ανάπτυξη των αερόβιων μικροοργανισμών, ενώ απέτρεψε την δημιουργία θαλάσσιων αλγών, το οποίο κατ' επέκταση προκάλεσε μια αξιοσημείωτη αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης της θαλάσσιας ζωής, λόγω της βελτιωμένης παροχτευτικότητας του οξυγόνου μέσα στην θάλασσα.

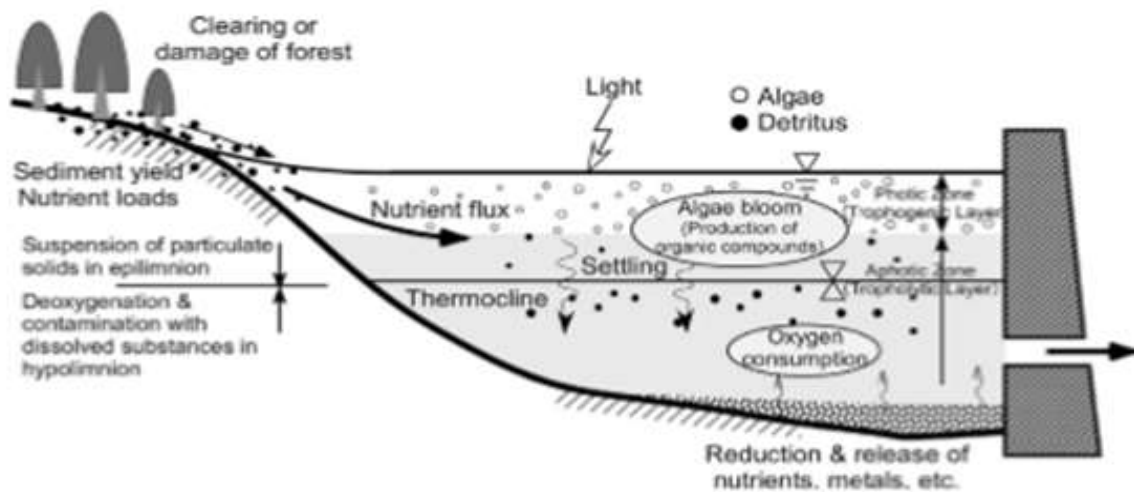
Πιο συγκεκριμένα, μέσα σε ένα διάστημα 28 ημερών παρατηρήθηκε ότι το βάρος των ψαριών σε νερό χωρίς νανοφουσαλίδες αυξήθηκε από 2.0 kgr σε 5.6 kgr, ενώ για το ίδιο χρονικό διάστημα σε νερό με νανοφουσαλίδες το βάρος τους αυξήθηκε από 2.0 kgr σε 9.2 kgr.

Μια πολύ διαδεδομένη πρακτική εφαρμογή των μικρο/νανοφουσαλίδων είναι η χρήση τους στην καλλιέργεια των οστρακοειδών όπου και έχει καταγραφεί μεγάλη ανάπτυξη.



#### 4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗ ΛΙΜΝΩΝ

Χαρακτηριστικό γενικευμένο παράδειγμα της χρήσης νανοφουσαλίδων με σκοπό την εξυγίανση του υδάτινου οικοσυστήματος είναι στις λίμνες οι οποίες λειτουργούν ως ρεζερβουάρ με αποτέλεσμα να γίνεται ορατό το φαινόμενο του ευτροφισμού (Εικόνα 28). Ωστόσο η καινοτόμος έρευνα που έδειξε πως εφαρμόζεται η χρήση των νανοφουσαλίδων σε τέτοιο περιβάλλον πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία από τους Michioku & Kanda 2006, και το 2012.



Εικόνα 28: Μηχανισμός του υδάτινου ταμειυτήρα απεικονίζοντας το φαινόμενο του ευτροφισμού και της κατανάλωσης οξυγόνου του συστήματος

Πηγή: Michioku & Kanda 2006, Michioku et al., 2006, 2012

Όπως είναι ήδη γνωστό, κατά τη διάρκεια των θερινών περιόδων η περιεκτικότητα των θρεπτικών συστατικών μειώνεται και ως εκ τούτου παρατηρείται εμφάνιση αλγών στα νερά της λίμνης. Σύμφωνα με τις βιοχημικές διεργασίες που εκτελούνται, οι οργανικές ενώσεις διασπώνται καταναλώνοντας μεγάλες ποσότητες του διαλυμένου οξυγόνου που κυκλοφορεί στην λίμνη, και το νερό τμήματος της λίμνης μετασχηματίζεται σε ανοξικό. Η στρωματοποίηση που πραγματοποιείται στην λίμνη από την ηλιακή ακτινοβολία διαφοροποιεί το ανοξικό στρώμα της λίμνης, το αποκόβει από το περιβάλλον και καθιστά δύσκολη την κυκλοφορία του οξυγόνου μέσα σε αυτό. Στην συνέχεια και όταν το στρώμα των έμβιων οργανισμών έρχεται σε επαφή με το δημιουργηθέν ανοξικό στρώμα, αδιάλυτες ουσίες όπως είναι οι οργανικές ενώσεις και τα θρεπτικά συστατικά απελευθερώνονται μαζί με το μεθάνιο κάτω από οξειδωτικές συνθήκες, και μολύνουν το νερό που είναι αποθηκευμένο στον ταμειυτήρα. Για να εξυγιανθεί αυτού του είδους

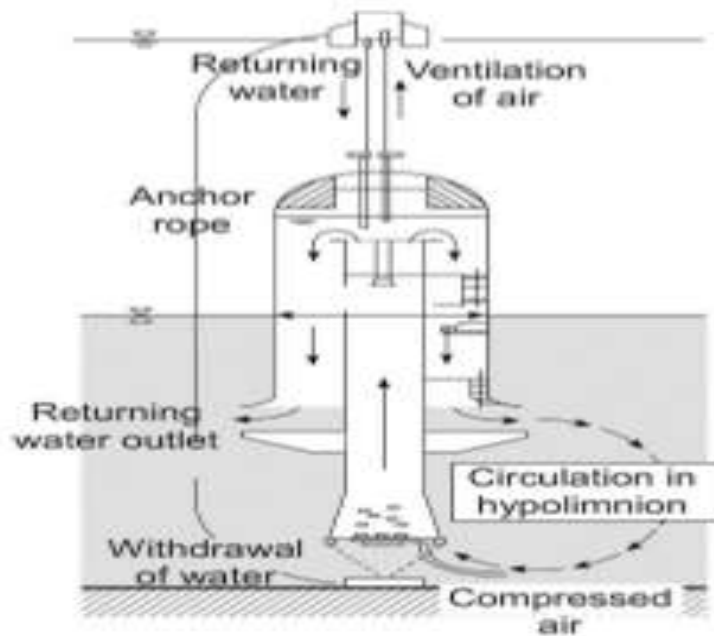




το νερό είναι πολύ σημαντικό να τροφοδοτηθεί με συγκεκριμένα επίπεδα οξυγόνου το ανοξικό στρώμα.

Ο αερισμός του ανοξικού στρώματος με βάση τα πειράματα που έγιναν επιτυγχάνθηκε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος σχετιζόταν με την ανατροπή των υδατικών στρωμάτων της λίμνης μέσω τεχνητής εισαγωγής νανοφουσαλίδων. Ο δεύτερος τρόπος εστίασε στον αερισμό του νερού της λίμνης χωρίς ωστόσο να πραγματοποιείται εισαγωγή νανοφουσαλίδων ή οξυγονομένου νερού στο υπολίμνιο νερό.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά ένα κοινό σύστημα αερισμού των υπολίμνιων νερών.

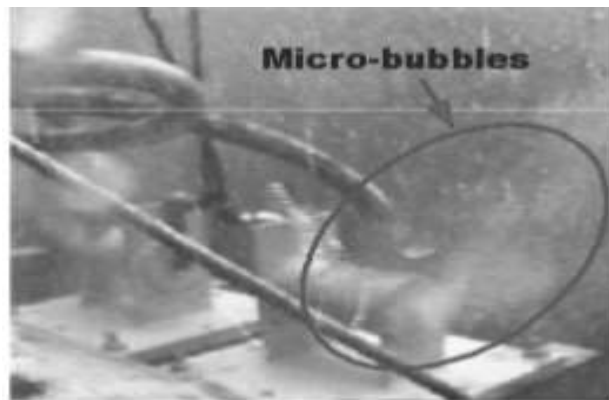


Εικόνα 29: Σχηματική απεικόνιση συμβατικού συστήματος αερισμού

Πηγή: Takahashi et al., 2003, Takahashi et al., 2005, Takahashi et al., 2007, Bendo et al., 2008, Li et al., 2009

Σύμφωνα με το ανωτέρω σύστημα οι νανοφουσαλίδες που παράγονται από την γεννήτρια κινούνται κατακόρυφα και προς τα πάνω με τη βοήθεια ενός κινητήρα παρασέρνοντας το ανοξικό νερό από τον πάτο του κυλίνδρου προς τα πάνω. Στην πορεία προς τα πάνω το νερό οξειδώνεται, αερίζεται και τέλος επιστρέφει στο υπόλοιπο νερό της λίμνης καθαρό.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η εισαγωγή μικροφουσαλίδων στο υπολίμνιο νερό.



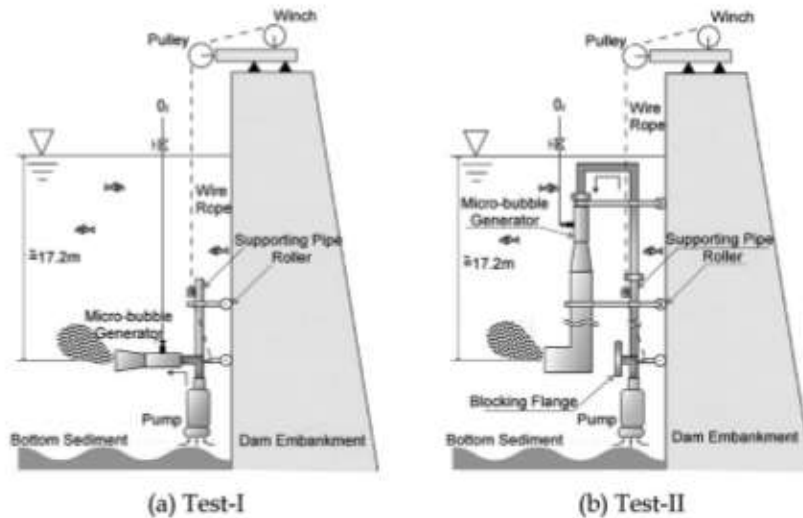
Εικόνα 30: Γεννήτρια μικροφουσαλίδων σε υπολίμνιο νερό  
Πηγή: Takahashi et al., 2003, Takahashi et al., 2005, Takahashi et al., 2007, Bendo et al., 2008, Li et al., 2009

Στην περίπτωση που το υπολίμνιο νερό είναι ανοξικό και αρκετά μολυσμένο με τοξικές ουσίες όπως π.χ με βαρέα μέταλλα τότε ο τύπος του κάθετου αερισμού που παρουσιάστηκε παραπάνω δεν συνίσταται.

Ως εκ τούτου, το 2007 εφαρμόστηκε ένας άλλος τύπος αερισμού του νερού της λίμνης, κατά τον οποίο στην γεννήτρια παραγωγής νανοφουσαλίδων χρησιμοποιήθηκε οξυγόνο αντί για ατμοσφαιρικός αέρας, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη διαλυτότητα του οξυγόνου με την ελάχιστη ενέργεια.

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πείραμα, οι νανοφουσαλίδες παράγονταν από το ανοξικό νερό με φορτίο  $Q_L=300$  (l/min) το οποίο εισερχόταν στο σύστημα μέσω μιας αντλίας και αναμιγνυόταν με το οξυγόνο που τροφοδοτούνταν από έναν συμπιεστή. Από τη διάταξη εξήλθε ένα υγρό με καλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο.

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει σχηματικά την πειραματική διάταξη των συστημάτων αερισμού στο νερό της λίμνης.



Εικόνα 31: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης των συστημάτων αερισμού των νερών της λίμνης  
Πηγή: Takahashi et al., 2003, Takahashi et al., 2005, Takahashi et al., 2007, Bendo et al., 2008, Li et al., 2009

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές. Η πρώτη διεξήχθη από τις 30 Μαΐου έως τις 24 Ιουλίου 2007 και περιελάμβανε την εισαγωγή των νανοφουσαλίδων απευθείας στο υδάτινο σύστημα. Η δεύτερη δοκιμή πραγματοποιήθηκε κατά το διάστημα 23 Αυγούστου έως 23 Οκτωβρίου 2007 και το υδάτινο σύστημα τροφοδοτούνταν από οξειδωμένο νερό που παραγόταν από ένα σύστημα αερισμού. Οι δύο διατάξεις είχαν διαφορά στην απόσταση του φυσητήρα και της γεννήτριας για αυτό και όπως ήταν αναμενόμενο να υπήρχε μεγαλύτερη ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου στη διάταξη όπου η απόσταση ήταν μεγαλύτερη.

Με παρόμοιο τρόπο εξετάστηκε και η ποιότητα των νερών της λίμνης, πριν και μετά την χρήση νανοφουσαλίδων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα Νο 3.



Πίνακας 3: Νερό Λίμνης πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων  
Πηγή: C.Rameshkumar, G.Senthilkumar, R.Subalakshmi, Risa Gogoi- Μαυ 2019

No	Εξεταζόμενοι Παράμετροι	Πριν (mg/lit)	Μετά (mg/lit)
1	Χημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	121	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο :4
2	Βιοχημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)	18	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο :2
3	Διαλυμένο Οξυγόνο (DO)	4,2	6,07
4	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)	38	8
5	Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS)	1537	242
6	Νιτρικά NO <sub>3</sub>	7	1,4
7	Ολικός Φώσφορος PO <sub>4</sub>	0,04	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο: 0,01

Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι πριν από την χρήση των νανοφουσαλίδων τα επίπεδα του COD ήταν 121 mg/lit , ενώ μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων έπεσαν κάτω από τα ανιχνεύσιμα επίπεδα (BDL- Below Detection Limit). Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για το BOD που η αρχική τιμή του ήταν 18 mg/lit, ενώ μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων έπεσε κάτω από το ανιχνεύσιμο όριο.

Ιδιαίτερη σημασία είχε η μεγάλη μείωση στην τιμή του φωσφόρου η οποία τελικώς έφτασε να είναι 0,01 mg/lit.

Ως εκ τούτου, και με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι η επεξεργασία του νερού λίμνης με την χρήση των νανοφουσαλίδων έχει επιτύχει τον στόχο της και το τελικό προϊόν της επεξεργασίας της, είναι αποδεκτό προς διάθεση στον τελικό αποδέκτη.



#### 4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟ ΥΔΑΤΩΝ

Η τεχνολογία των νανοφουσαλίδων έχει ερευνηθεί εκτενώς σε βιομηχανικές εφαρμογές και έχει βρεθεί ότι η χρήση τους έχει θετικά αποτελέσματα σε τομείς όπως η μεταφορά αερίων, και η ανάκτηση σωματιδίων που επιπλέουν σε υδάτινα σώματα, χωρίς προσθήκη απορρυπαντικών.

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων αναπτύσσεται σε τρεις τομείς οι οποίοι αναφέρονται σχηματικά στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 4: Σχηματική απεικόνιση των εφαρμογών της τεχνολογίας των νανοφουσαλίδων σε σχέση με την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων*  
*Πηγή: Fan & Tao, 2008; Tao, Yu, Zhou, Honaker, & Parekh, 2008*



Ο διαχωρισμός υγρών- στερεών είναι το πρωταρχικό βήμα σε κάθε διαδικασία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικές τεχνικές. Η επίπλευση είναι μια ευρέως διαδεδομένη τόσο από άποψη αποτελεσματικότητας όσο και από αξιοπιστίας, και χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση σωματιδίων όπως λίπη, έλαια αναμειγμένα με χαμηλής πυκνότητας οργανικά στερεά και κolloειδή, που βρίσκονται στην επιφάνεια του υγρού σώματος.

Ο μηχανισμός διαχωρισμού βασίζεται στην απορρόφηση φυσαλίδων αερίου καθώς αυτές ανεβαίνουν στην επιφάνεια και συναντούν τα μικροσκοπικά σωματίδια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η βαρύτητα των σωματιδίων και ως εκ τούτου να ανεβαίνουν οι ρύποι



στην επιφάνεια. Η ηλεκτρο- επίπλευση, η επίπλευση με τη βοήθεια ακροφυσίου, η επίπλευση με στήλη, η επίπλευση με φυγοκέντριση κ.α. είναι μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες για να επιτύχουν το συγκεκριμένο αποτέλεσμα.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές δοκιμές προκειμένου να αποδειχτεί ότι η χρήση των νανοφουσαλίδων βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της τεχνικής της επίπλευσης.

Η συμβατική μέθοδος της επίπλευσης είναι αποδοτική για σωματίδια μικρού μεγέθους που κυμαίνονται από 50 έως 600μm για τον άνθρακα, και 10 έως 100μm για τα ανόργανα στοιχεία.

Η ερευνητική ομάδα του Fan (2010) ανέπτυξε ένα ειδικό μοντέλο παραγωγής νανοφουσαλίδων για να εκτιμηθεί η επίδρασή τους στην επίπλευση φυσαλίδων αέρα. Έδειξε ότι η παρουσία των νανοφουσαλίδων στο υγρό είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά η ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων στην επιφάνεια. Μελέτησε επίσης και την επίδραση των νανοφουσαλίδων στη επίπλευση του άνθρακα και των φωσφορικών αλάτων και κατέληξε ότι οι νανοφουσαλίδες μετατράπηκαν σε υδρόφοβα σωματίδια άνθρακα και φωσφορικών αλάτων στην επιφάνεια του υγρού.

Λίγα χρόνια αργότερα, το 2013, οι Sobhy και Tao, μελέτησαν την δραστική ικανότητα των νανοφουσαλίδων στην ανάκτηση άνθρακα χρησιμοποιώντας μια στήλη επίπλευσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν σαφή αύξηση ανάκτησης του άνθρακα με ποσοστό επιτυχίας από 5 έως 50% ενώ το μέγεθος που ανακτήθηκε ήταν περίπου 150μm.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι νανοφουσαλίδες βελτίωσαν συνολικά την απόδοση της μεθόδου του διαχωρισμού στερεών-υγρών ενώ ταυτόχρονα μειώθηκε η παροχή φυσαλίδων και η κατανάλωση αέρα.

Από την ομάδα του Ahmadí (2014) έγινε χρήση νανοφουσαλίδων για το διαχωρισμό λεπτόκοκκων σωματιδίων χαλκοπυρίτη με αύξηση περίπου 24% της ανάκτησης των σωματιδίων του μεταλλικού ορυκτού.

Αξίζει να σημειωθεί πως η συνολική επιτυχία της μεθόδου της επίπλευσης έγγυται στην σύγκρουση της φυσαλίδας με το σωματίδιο- στόχο, στην προσκόλληση και την αποκόλληση τους.



#### 4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Η Υγροποίηση του εδάφους είναι βασικής σημασίας, κυρίως για τους Γεωτέχνες Μηχανικούς, και συγκεντρώνει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών κυρίως σε χώρες όπως η Ιαπωνία, που έρχεται αντιμέτωπη με συχνούς ισχυρούς σεισμούς.

Παρόλο που πολλές έρευνες έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια με σκοπό τον προσδιορισμό της υδαρότητας του εδάφους και των άλλων χαρακτηριστικών του, η διαδικασία αυτή τις περισσότερες φορές είναι δαπανηρή και δύσκολα εφαρμόσιμη, λόγω της πυκνής δόμησης των εξεταζόμενων περιοχών.

Σύμφωνα με την εξεταζόμενη βιβλιογραφία, τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί μια εναλλακτική μέθοδος σταθεροποίησης του εδάφους με χρήση νανοφουσαλίδων, χωρίς όμως να έχει τύχει μεγάλης αποδοχής έως σήμερα. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, γίνονται ενέσεις νερού με νανοφουσαλίδες στο έδαφος, με σκοπό να γεμίσουν τα κενά που υπάρχουν στην εδαφική δομή και να αυξήσουν την αντοχή του εδάφους. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις καθαρισμού του εδάφους.

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει δύο (2) πολύ ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα και εκτιμάται ότι τα επόμενα χρόνια θα χρησιμοποιείται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

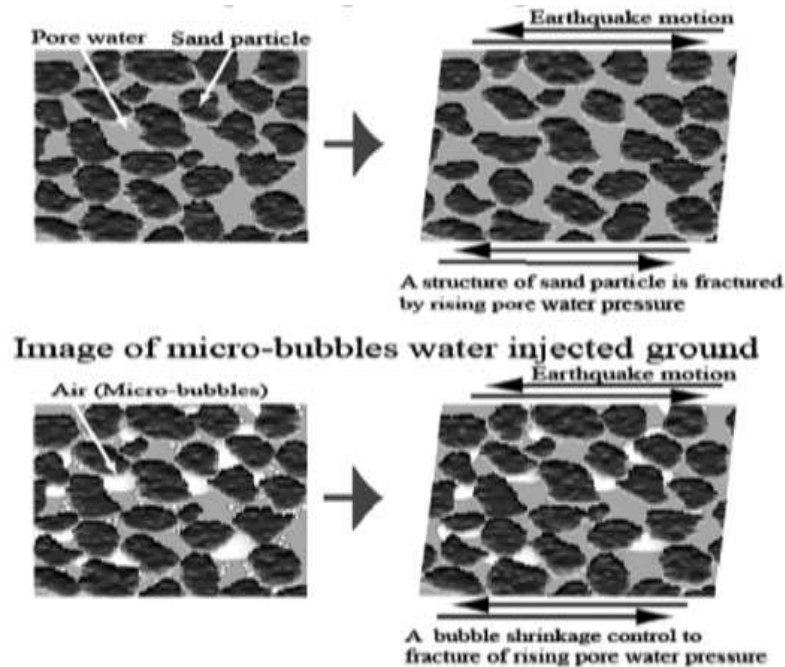
Το πρώτο ανταγωνιστικό της πλεονέκτημα είναι ότι ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις ενέσεις είναι πολύ απλός, και σχετικά χαμηλού κόστους, και το δεύτερο ότι η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά φιλική προς το περιβάλλον.

Κατά την διαδικασία που ακολουθείται εισάγεται με μορφή ένεσης συμπιεσμένος αέρας μέσω μικροφουσαλίδων από τρύπα που υπάρχει στο έδαφος. Το μικρό μέγεθος των μικροφουσαλίδων τους δίνει τη δυνατότητα να μπορούν να εισχωρούν ακόμα και ενδιάμεσα από τους πολύ μικρούς εδαφικούς κόκκους. Πολλές φορές, λόγω του μικρού μεγέθους τους, ο παροχτετευμόμενος αέρας, αιχμαλωτίζεται σε μικρές εδαφικές κοιλότητες και δημιουργεί συσσωματώματα αέρα και εδάφους μεγαλύτερου μεγέθους, που έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση της επιφανειακής τάσης και την μείωση της εσωτερικής πίεσης της μικροφουσαλίδας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι βρέθηκε ακόμα αν και η πίεση του νερού έτεινε να αυξηθεί με την εφαρμογή επαναλαμβανόμενης σεισμικής τάσης, η αυξημένη αυτή πίεση μπορούσε να απορροφηθεί από τη συρρίκνωση των φουσαλίδων.



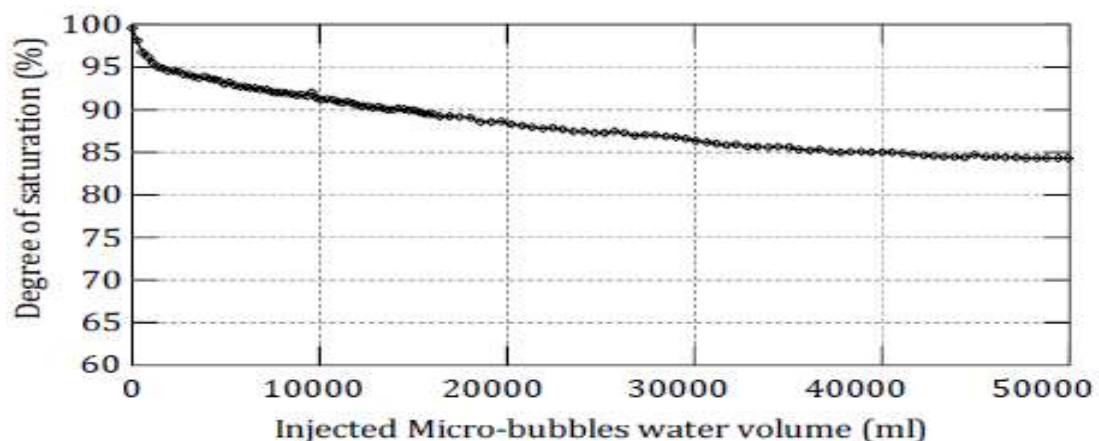
Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν τον μηχανισμό της υγροποίησης του εδάφους και της απόκρισής του σε περίπτωση εφαρμογής σεισμικής δράσης.



Εικόνα 32: Υγροποίηση εδάφους- Σεισμική απόκριση υγροποιημένου εδάφους με μικροφουσαλίδες  
Πηγή: Hideki Tsuge-2015

Με βάση πειραματικές μετρήσεις βρέθηκε ότι το επίπεδο κορεσμού του εδάφους με την χρήση μικροφουσαλίδων αυξήθηκε κατά 80% .

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει σχηματικά το ποσοστό μεταβολής του εδαφικού κορεσμού, σε σχέση με την ποσότητα των μικροφουσαλίδων που προστίθενται στο έδαφος.



Εικόνα 33: Μεταβολή του κορεσμού στο έδαφος σε σχέση με την ποσότητα μικροφουσαλίδων που προστίθεται στο έδαφος  
Πηγή: Hideki Tsuge-2015

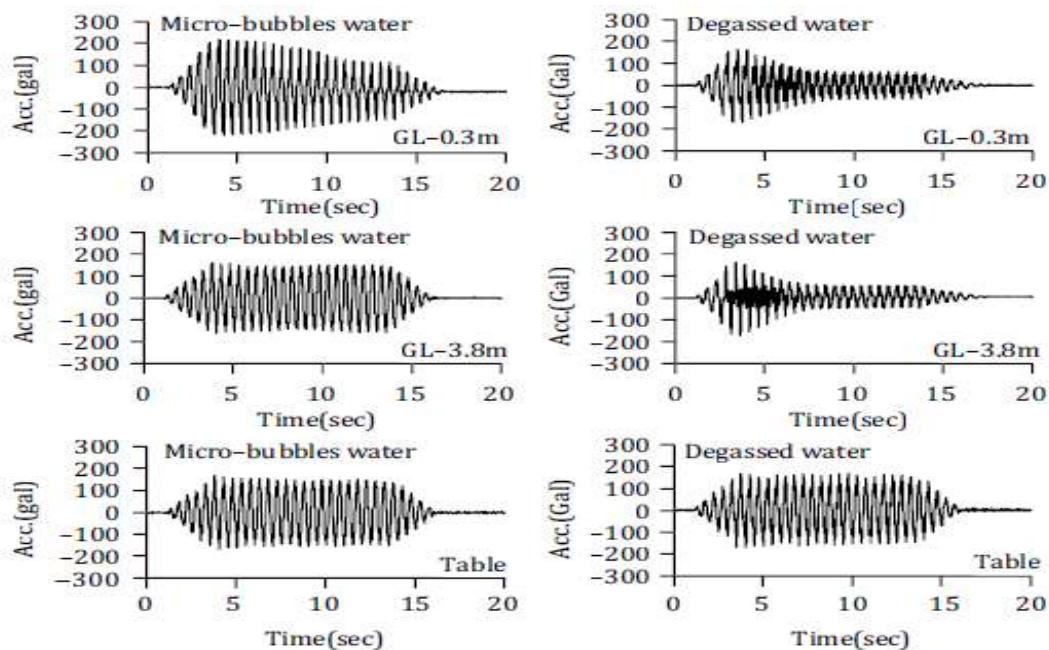




Από το ανωτέρω σχήμα, προκύπτει ότι αρχικά το επίπεδο κορεσμού αυξάνεται απότομα και γρήγορα σε ένα ποσοστό της τάξης του 90%, και στην συνέχεια φθίνει μέχρι να φτάσει το ποσοστό του 80 %. Από σχετικά πειράματα που έγιναν στο Εθνικό Ινστιτούτο Εδάφους και Υποδομών στην Ιαπωνία τον Δεκέμβρη του 2008 και τον Ιανουάριο του 2009, βρέθηκε ότι η αντίσταση του υγροποιημένου εδάφους με ποσοστό κορεσμού 90% και σχετική πυκνότητα 60%, ήταν διπλάσια από την αντίσταση που είχε ένα 100% κορεσμένο έδαφος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω αποτελέσματα οι ερευνητές μελέτησαν την σεισμική απόκριση που θα μπορούσε να έχει ένα τέτοιο έδαφος εφαρμόζοντας πειραματικές σεισμικές δονήσεις σε δείγμα εδάφους. Από τα πειράματα , προέκυψε ότι όταν το έδαφος βρεθεί σε ποσοστό κορεσμού της τάξης του 80 % εμφανίζει πολύ καλή σεισμική απόκριση και αντίσταση σε φορτία.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται σχηματικά η οριζόντια επιτάχυνση του εδάφους στα διάφορα δείγματα εδάφους που εξετάστηκαν.



Εικόνα 34: Οριζόντια επιτάχυνση εδάφους στα εξεταζόμενα εδαφικά δείγματα  
Πηγή: Hideki Tsuge

Μια άλλη εφαρμογή των νανοφουσαλίδων στο έδαφος, είναι η χρήση τους σε περιπτώσεις απολύμανσης του εδάφους από διάφορα λάδια. Στις περιπτώσεις αυτές, βρέθηκε ότι η αποτελεσματικότητα της χρήσης των νανοφουσαλίδων έφτασε ποσοστά της τάξης του 70-80%.



#### 4.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΓΕΩΡΓΙΑ

Η γεωργία είναι ένας γοργά αναπτυσσόμενος τομέας, στόχος του οποίου είναι η υψηλή παραγωγική ικανότητα σε συνδυασμό με τον ελάχιστο απαιτούμενο χρόνο. Η χρήση θρεπτικών διαλυμάτων είναι ευρέως διαδομένη στον τομέα των καλλιεργειών, αλλά επειδή η επαναχρησιμοποίηση τους μπορεί να οδηγήσει σε γρήγορη εξάπλωση διαφόρων ασθενειών, διαμέσου των ριζών των φυτών, η αποστείρωση του εδάφους είναι μια διαδικασία άκρως αναγκαία.

Οι μικρο-νανο φυσαλίδες και οι μοναδικές τους ιδιότητες να αυτοσυμπιέζονται, να παράγουν ελεύθερες ρίζες και να φορτίζονται αρνητικά, έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον των ερευνητών, που πιστεύουν ότι η χρήση τους στην γεωργία, θα επιταχύνει την διαδικασία της αποστείρωσης και θα βοηθήσει στην αποτελεσματική απομάκρυνση των παρασιτοκτόνων.

Με βάση την βιβλιογραφία έχει προκύψει ότι η χρήση των νανοφυσαλίδων στην γεωργία έχει θετικά αποτελέσματα, χωρίς όμως να μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς ο ρυθμός επίδρασής τους στις διάφορες καλλιέργειες. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες να ερμηνευτεί ο βαθμός επίδρασής τους στην ανάπτυξη των καλλιεργειών, όμως είναι αρκετά δύσκολο, γιατί οι νανοφυσαλίδες έχουν την τάση να εξαφανίζονται χωρίς να έχουν προλάβει να φτάσουν στις ρίζες των φυτών.

Η εφαρμογή των νανοφυσαλίδων στην καλλιέργεια αποσκοπεί στα παρακάτω αποτελέσματα:

- Να βελτιώσει την παραγωγή, επιταχύνοντας τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών
- Να βελτιώσει τις βιολογικές συνθήκες ανάπτυξης των καλλιεργειών εξαιτίας:
  - Καταστολής του φαινομένου του ευτροφισμού
  - Μείωσης στην παραγωγή της αμμωνίας
  - Αύξησης των αερόβιων μικροοργανισμών
  - Ενίσχυσης των αερόβιων μικροοργανισμών στις διαδικασίες αποσύνθεσης των οργανικών ενώσεων
  - Αύξησης της περατότητας του εδάφους
- Να ενισχύσει τις διαδικασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που προέρχονται από καλλιεργήσιμες εκτάσεις λόγω της μεγάλης παροχετευτικότητας που προσδίδουν οι νανοφυσαλίδες στο νερό μέσα στο έδαφος, και λόγω του διαλυμένου οξυγόνου.



- Να ενισχύσει την αποστείρωση του εδάφους, με την χρήση νανοφουσαλίδων από όζον.

Οι μέθοδοι επεξεργασίας που εφαρμόζουν διαλυμένο όζον με την μορφή μικρο/νανοφουσαλίδων, έχει προκύψει ότι παράγουν ελεύθερες ρίζες, οι οποίες είναι πολύ δραστικές στην αποσύνθεση των οργανικών παθογόνων οργανισμών, όπως είναι τα παράσιτα. Η μεγάλη επιτυχία των μικροφουσαλίδων με όζον οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το διαλυμένο όζον παραμένει διαλυμένο σε μεγάλες συγκεντρώσεις, επομένως οι υδροξυλικές ρίζες εξακολουθούν να παράγονται καθόλη την διάρκεια της επεξεργασίας.

Τα πλεονεκτήματα εφαρμογής νανοφουσαλίδων από όζον παρουσιάζονται ως ακολούθως:

- Αυξημένη ικανότητα οξειδωσης. Το όζον είναι χημικά ασταθές και μετασχηματίζεται σε σταθερό οξυγόνο, αποβάλλοντας ένα άτομο Οξυγόνου. Η αποβολή αυτή υποδηλώνει την μεγάλη ικανότητα οξειδωσής του. Είναι επομένως ισχυρός οξειδωτικός παράγοντας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις αποστειρώσεις, στην αδρανοποίηση ιών, στην απομάκρυνση οσμών, στον αποχρωματισμό αλλά και στην αποδόμηση της οργανικής ύλης.
- Πολύ ισχυρό απολυμαντικό μέσο. Έχει βρεθεί ότι το όζον είναι 10 φορές πιο ισχυρό απολυμαντικό μέσο συγκρητικά με το χλώριο
- Αυξημένη ικανότητα διάλυσης στο νερό
- Εύκολη παραγωγή νανοφουσαλίδων όζοντος μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
- Αυξημένη ικανότητα αποσύνθεσης των οργανικών ενώσεων

Τα σχετικά πειράματα που έγιναν με την χρήση νανοφουσαλίδων, έδειξαν ότι οι νανοφουσαλίδες μπορούν να απομακρύνουν υψηλές συγκεντρώσεις παράσιτων από λαχανικά και φρούτα.

Τα πιο συνήθη αποτελέσματα από την εφαρμογή των νανοφουσαλίδων στην καλλιέργεια παρουσιάζονται ως ακολούθως:

- Μεταβολές στην μορφολογία των ριζών των φυτών. Η αυξημένη ικανότητα αναπνοής των ριζών, λόγω της αυξημένη συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, βοηθά τις ρίζες των φυτών να μεγαλώσουν πιο γρήγορα.
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Αυξημένη παραγωγή, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου.



- Αυξημένη ποιότητα. Εφόσον έχει γίνει απομάκρυνση νιτρικών στις ρίζες των φυτών, η ανάπτυξη των φυτών γίνεται πιο ομαλά, και τα φυτά δημιουργούν μεγαλύτερες αντιστάσεις στις ασθένειες
- Αύξηση στα έσοδα από την καλλιέργεια. Η καλλιέργεια με την χρήση νερού με μικρο/νανοφουσαλίδες ενισχύει την παραγωγή και αυξάνει την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Ως εκ τούτου, τα προϊόντα αυτά τυγχάνουν μεγαλύτερης αποδοχής από το αγοραστικό κοινό και σίγουρα θα πουληθούν σε καλύτερη τιμή.
- Μικρότερο περιβαλλοντικό φορτίο. Δεδομένου της καλής υγείας των καλλιεργειών και της μεγάλης παροχτευτικής ικανότητας του διαλυμένου οξυγόνου, παρατηρείται μείωση των παρασίτων στις καλλιέργειες. Επιπλέον, η παροχή του διαλυμένου οξυγόνου στο έδαφος, βοηθά την αποστείρωση του εδάφους από παθογόνους μικροοργανισμούς.
- Αποφυγή ζημιών εξαιτίας των νιτρικών. Η επίδραση των νιτρικών στα φυτά έχει συνδεθεί με την εμφάνιση καρκίνου, κυάνωση και άλλες σοβαρές ασθένειες για τους ζώντες οργανισμούς.

Επομένως, η χρήση των μικρο/νανοφουσαλίδων στις καλλιέργειες, βοηθά να αναπτυχθούν πιο γρήγορα υγιή φυτά, χωρίς νιτρικά τα οποία είναι επιβλαβή, για την υγεία όλων των ζώντων οργανισμών που εμπλέκονται στην αλυσίδα.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο παραδείγματα εφαρμογής νανοφουσαλίδων στην εξυγίανση νερού σε ορυζώνες και στην άρδευση του εδάφους.

- Εξυγίανση νερού σε ορυζώνες

Μια επιπλέον χρήση που έχει εφαρμοστεί στην Ιαπωνία είναι η εξυγίανση του νερού σε ορυζώνες.

Οι ορυζώνες είναι μια μορφή αγροτικής καλλιέργειας που χαρακτηρίζονται από μεγάλο ποσοστό νερού. Οι βιοχημικοί κύκλοι στους ορυζώνες είναι πολύ ιδιαίτεροι και αποτελούνται από διαδοχικές αναγωγικές διαδικασίες των εδαφικών οξειδωτικών όπως είναι το οξυγόνο, τα νιτρικά και θειικά ιόντα, το μαγγάνιο και ο σίδηρος. Η ύπαρξη αναγωγικών συνθηκών καθιστά αυτά τα εδάφη με υψηλά ποσοστά υγρασίας κατάλληλα σε πολλαπλές καλλιέργειες για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Ωστόσο τέτοιες συνθήκες έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Το μεθάνιο που αποτελεί ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου, παράγεται στο έδαφος και διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα.

Επιπλέον, οι ορυζώνες εμφανίζουν μεγάλες συγκεντρώσεις σε αρσενικό, ένα ιδιαίτερα τοξικό



χημικό στοιχείο, το οποίο βρίσκεται σε διαλυμένη μορφή και προσλαμβάνεται από το ρύζι στην αναγωγική του μορφή.

Μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες πρακτικές εξυγίανσης του νερού οι οποίες βασίζονται στην παροχή  $O_2$  στο έδαφος, και έχουν σαν στόχο την επίλυση των παραπάνω δύο προβλημάτων χωρίς ωστόσο να είναι πάντοτε εφικτή η υλοποίηση του στόχου αυτού.

Μερικά από τα προβλήματα που έχουν προκύψει σε τέτοιες καταστάσεις παρουσιάζονται ως ακολούθως:

- 1 Ειδικές απαιτήσεις σε νερό στο στάδιο ανάπτυξης του ρυζιού
- 2 Αναστολή ανάπτυξης του φυτού κάτω από εξαιρετικά ξηρές συνθήκες
- 3 Πλημμύρες με στόχο την θέρμανση του εδάφους κάτω από κρύες συνθήκες
- 4 Συνεχείς πλημμύρες στους ορυζώνες εξαιτίας βροχερών καιρικών συνθηκών

Με στόχο την επίλυση των προαναφερθέντων προβλημάτων οι επιστήμονες, βασιζόμενοι σε μερικές χαρακτηριστικές ιδιότητες των νανοφουσαλίδων, όπως η ικανότητα να διατηρούνται στο νερό για πάνω από εβδομήντα μέρες (εξαιτίας της αρνητικά φορτισμένης επιφάνειάς τους), και η υψηλή ικανότητα διαλυτότητας του αερίου τους (λόγω της υψηλής εσωτερικής τους πίεσης), χρησιμοποίησαν τις νανοφουσαλίδες, ως ένα μέσο μόνιμης παροχής νερού και οξυγόνου.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκε επίσης ότι οι νανοφουσαλίδες έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην αδρανοποίηση των μικροοργανισμών και καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό τις διάφορες βιολογικές διεργασίες που εκτελέστηκαν.

- Άρδευση νερού με νανοφουσαλίδες

Το 2015, η ερευνητική ομάδα του Minimikawa, υπέθεσε ότι η άρδευση νερού με νανοφουσαλίδες πλούσιες σε οξυγόνο θα μπορούσε να καθυστερήσει τις αναγωγικές συνθήκες του εδάφους και συνεπώς να μειώσει τις εκπομπές μεθανίου όπως και την διάλυση αρσενικού σε συνεχώς πλημμυρισμένους ορυζώνες. Για να επαληθευτεί η υπόθεση, διεξήχθησαν διάφορα πειράματα και μελετήθηκαν τα αποτελέσματα των νανοφουσαλίδων κάτω από τεχνητές συνθήκες εργαστηρίου.

Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν πειράματα με και χωρίς την παρουσία φυτών ρυζιού όπως και με χρήση αρδευτικού νερού με νανοφουσαλίδες. Οι μετρήσεις της πειραματικής



διαδικασίας σχετίζονταν με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα του μεθανίου, των υποξειδίων του αζώτου, του διοξειδίου του άνθρακα. Ακόμα μετρήθηκαν η τελική συγκέντρωση των οξειδοαναγωγικών προϊόντων, η ανάπτυξη του ρυζιού και η μικροβιακή ποικιλότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το νερό με νανοφυσαλίδες μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε ορυζώνες έτσι ώστε οι αναγωγικές συνθήκες να μείνουν σε χαμηλά επίπεδα.

Επίσης, με τη χρήση του νερού προέκυψε τελικά αμβλύνηκαν τόσο οι εκπομπές του μεθανίου όσο και η διαλυτότητα του αρσενικού στους ορυζώνες. Η πρακτική αυτή είναι εξαιρετικά καινοτόμα τόσο στη διαχείριση και επεξεργασία υγρών αποβλήτων όσο και στις καλλιέργειες.

#### 4.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Κατ' αντιστοιχία των παραπάνω εργαστηριακών αποτελεσμάτων, ο παρακάτω πίνακας Νο 5 παρουσιάζει τις εξεταζόμενες παραμέτρους πριν και μετά την χρήση των νανοφυσαλίδων στην επεξεργασία οικιακών υγρών αποβλήτων

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα η μείωση της τιμής του COD και του BOD είναι της τάξης του 98%. Από τον πίνακα επίσης προκύπτει ότι οι τιμές όλων των εξεταζόμενων παραμέτρων μετά την χρήση των νανοφυσαλίδων ικανοποιούν τα κατώτατα όρια που ορίζονται από την σχετική Νομοθεσία.

Πίνακας 5: Οικιακά Λύματα πριν και μετά την χρήση των νανοφυσαλίδων  
Πηγή: C.Rameshkumar, G.Senthilkumar, R.Subalakshmi, Risa Gogoi- May 2019

No	Εξεταζόμενοι Παράμετροι	Πριν (mg/lit)	Μετά (mg/lit)
1	Χημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	399	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο :4
2	Βιοχημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)	105	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο :2
3	Διαλυμένο Οξυγόνο (DO)	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο :2	7,4
4	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)	300	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο :1
5	Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS)	1742	181
6	Νιτρικά NO <sub>3</sub>	4,6	2,2
7	Ολικός Φώσφορος PO <sub>4</sub>	1,46	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο: 0,01



#### 4.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η χρήση των νανοφουσαλίδων εξετάστηκε και σε δείγμα βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, ενώ τα αποτελέσματα πριν και μετά την εφαρμογή των νανοφουσαλίδων όπως προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα ήταν εντυπωσιακά.

Με βάση τον παρακάτω πίνακα οι αρχικές τιμές των COD, BOD, TSS, TDS, του θείου και του χρωμίου, αρχικά ήταν πολύ υψηλές. Όμως μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων οι τιμές μειώθηκαν εντυπωσιακά, με αποτέλεσμα το τελικό επεξεργασμένο νερό να ικανοποιεί τα αποδεκτά όρια όπως έχουν οριστεί από την σχετική νομοθεσία.

Συγκεκριμένα παρατηρείται μια μείωση της τάξης του 97,82% για τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά TSS και μια μείωση της τάξης του 97,71 % για τα Ολικά Διαλυμένα Στερεά.

Πίνακας 6: Βιομηχανικά Λύματα πριν και μετά την χρήση των νανοφουσαλίδων  
Πηγή: - C.Rameshkumar, G.Senthilkumar, R.Subalakshmi, Risa Gogoi- May 2019

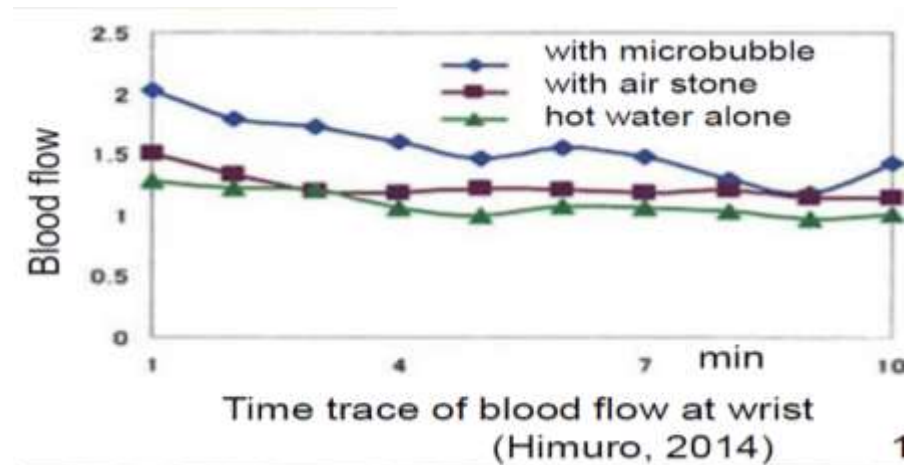
No	Εξεταζόμενοι Παράμετροι	Πριν (mg/lit)	Μετά (mg/lit)
1	Χημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	4520	124
2	Βιοχημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)	2620	0,17
3	Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)	12244	258
4	Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS)	10556	242
5	Θείο	264	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο :0,01
6	Χρώμιο	72,6	Κάτω από το ανιχνεύσιμο Όριο :0,005

#### 4.8 ΟΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

Οι εφαρμογές των νανοφουσαλίδων στον τομέα της υγείας, τα τελευταία χρόνια έχουν εξαπλωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Οι μικροφουσαλίδες έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον προκειμένου να βελτιώσουν την ροή του αίματος στον ανθρώπινο οργανισμό.



Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει σχηματικά την μεταβολή της ροής του αίματος σε σχέση με τον χρόνο κατά την εφαρμογή νανοφουσαλίδων στον ανθρώπινο οργανισμό.



Εικόνα 35: Μεταβολή της ροής του αίματος σε σχέση με τον χρόνο

Πηγή: 1st International Symposium on Application of High voltage, Plasmas&Micro/Nano Bubbles, 5<sup>th</sup>-7<sup>th</sup> of January 2017

Οι νανοφουσαλίδες έχουν εφαρμοστεί στις μέρες μας στον τομέα της υγείας, συνήθως μέσω της χορήγησης φαρμάκων, ενώ έχει επίσης αποδειχτεί ότι οι νανοφουσαλίδες αυξάνουν τον ανθρώπινο μεταβολισμό.

#### 4.9 ΟΙ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΣΤΗΝ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ ΖΩΗ

Οι νανοφουσαλίδες δοκιμάστηκαν και ως απορρυπαντικά, για παράδειγμα κατά το πλύσιμο των πιάτων από λίπη που επιμένουν, και βρέθηκε ότι τα λίπη απομακρύνθηκαν πολύ πιο εύκολα εφαρμόζοντας νερό με νανοφουσαλίδες. Επομένως οι νανοφουσαλίδες θα μπορούσαν να έχουν πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή, κυρίως στο πλύσιμο και το καθάρισμα.

Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση τους λειτουργεί ως αποτρεπτικός παράγοντας απορρόφησης πρωτεϊνών σε ποικίλες επιφάνειες.

Ο Wu (2006) και η ομάδα του ερεύνησαν το πως επιδρούν οι νανοφουσαλίδες στην απορρόφηση αλβουμίνης και ορού βοοειδών πάνω σε επιφάνεια μαρμαρυγία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι νανοφουσαλίδες εμπόδισαν την απορρόφηση σχηματίζοντας κυκλικές οπές πάνω στο πρωτεϊνικό φιλμ.

Στην περίπτωση των νανοφουσαλίδων που είχαν επεξεργαστεί με ηλεκτροχημικές μεθόδους παρατηρήθηκε μείωση της απορρόφησης πρωτεϊνών κατά 26-34%.





Με βάση την βιβλιογραφία έχει βρεθεί επίσης ότι οι νανοφουσαλίδες μπορούν να ψυχθούν από μια υψηλή θερμοκρασία σε μια χαμηλή πιο γρήγορα από ότι το νερό βρύσης.

Επίσης οι νανοφουσαλίδες έχουν εφαρμοστεί και στο μοριακό διαχωρισμό. Στη βιολογία, έχουν χρησιμοποιηθεί ως βελτιωτικά ανάπτυξης σπόρων αχύρου, για την ανάπτυξη φυτών, ψαριών και ποντικών.

Ενώ σε σχέση με τα φυτά και τα ζώα, έχει παρατηρηθεί μεγάλη ανάπτυξη των πληθυσμών τους όταν χρησιμοποιούνται νανοφουσαλίδες.



## 5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΛΙΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ

Η ποιότητα του νερού στις μέρες μας συγκεντρώνει το ενδιαφέρον και την ανησυχία των ερευνητών και αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένων ερευνών σε μια προσπάθεια ανεύρεσης λύσεων για τον καθαρισμό και την επεξεργασία του νερού και των υγρών αποβλήτων. Η διάθεση νερού κακής ποιότητας στο έδαφος, είναι μια μη αναστρέψιμη ενέργεια, η οποία ενδέχεται να έχει σοβαρές συνέπειες και στον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής, και στην υγεία των ανθρώπων. Οι μέθοδοι επεξεργασίας του νερού που εφαρμόζονται στις μέρες μας, έχουν μεγάλα λειτουργικά κόστη, δεδομένου ότι ακολουθούν σύνθετες διαδικασίες επεξεργασίας. Επομένως η ανάγκη εύρεσης λύσεων που είναι λιγότερο δαπανηρές, είναι επιτακτική.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι η χρήση νανοφυσαλίδων στο πόσιμο, θαλασσινό νερό αλλά και στο νερό των λιμνών, έχει επιτύχει πολύ μεγάλη μείωση στις τιμές των TSS, COD και BOD. Και αυτός είναι ο βασικότερος λόγος που τα τελευταία χρόνια γίνεται μια πιο οργανωμένη προσπάθεια για να εξαπλωθεί η χρήση των νανοφυσαλίδων και στις μονάδες επεξεργασίας νερού και των υγρών αποβλήτων.

Περαιτέρω, και όπως έχει ήδη αναφερθεί και παραπάνω, η πιο σημαντική ιδιότητα των νανοφυσαλίδων είναι η ικανότητα διατήρησής τους μέσα στο υγρό συγκριτικά με τις κανονικές φυσαλίδες που ανεβαίνουν προς την επιφάνεια του υγρού γρήγορα και σκάνε. Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι νανοφυσαλίδες έχουν την ικανότητα να μειώνουν το μέγεθός τους και να συρρικνώνονται όντας μέσα στο περιβάλλον υγρό. Κατά την συρρίκνωση των νανοφυσαλίδων, η εσωτερική πίεση αυξάνεται εξαιτίας της επιφανειακής πίεσης, ενώ ιόντα συσσωρεύονται στην επιφάνεια μεταξύ υγρού και αερίου. Η ιδιότητα αυτή καθιστά τις νανοφυσαλίδες ως εξαιρετικό εργαλείο για μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Ποικίλοι και σημαντικοί ρύποι έχουν εντοπιστεί σε λεκάνες απορροής υδάτων εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων θρεπτικών συστατικών αλλά και ουσιών που απαιτούν οξυγόνο όπως οι οργανικές ενώσεις με αρνητικό αντίκτυπο στα υδάτινα οικοσυστήματα.



### 5.1 ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Στη διαδικασία εξυγίανσης των υγρών αποβλήτων είναι εξαιρετικά σημαντική η μείωση του μικροβιακού φορτίου (κολοβακτηριοειδή, άλλα βακτήρια, ιοί, πρωτόζωα, κλπ). Οι συμβατικές μέθοδοι σχετίζονται με την προσθήκη χλωρίου και όζοντος.

Η απολύμανση με χλώριο μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους ως ακολούθως:

- Με αέριο χλώριο  $Cl_2$ :
- Με υποχλωριώδες Νάτριο  $NaCl$ :
- Με υποχλωριώδες Ασβέστιο ( $Ca(OCl)_2$ )

Και στις τρεις περιπτώσεις στο τέλος προκύπτει υποχλωριώδες ( $HOCl$ ).

Η διαφορά της απολύμανσης με χλώριο και με όζον σχετίζεται με τη δράση του απολυμαντικού. Το χλώριο έχει την ικανότητα απολύμανσης από το σημείο εισόδου έως το σημείο εξόδου του λύματος ενώ το όζον έχει μόνο τοπική δράση.

Εναλλακτικά τα τελευταία χρόνια, για σκοπούς απολύμανσης, εφαρμόστηκαν οι νανοφυσαλίδες, και όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα η βακτηριοκτόνος δράση τους βρέθηκε πιο ισχυρή από τη χλωρίνη και το όζον.

### 5.2 ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΡΥΠΑΝΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Ένα πεδίο εφαρμογών στο οποίο προτάθηκε η χρήση των νανοφυσαλίδων ήταν η αποδόμηση των οργανικών ρυπαντών, κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια έχουν εφαρμοστεί τεχνικές εξυγίανσης των αστικών υγρών αποβλήτων με την χρήση των νανοφυσαλίδων.

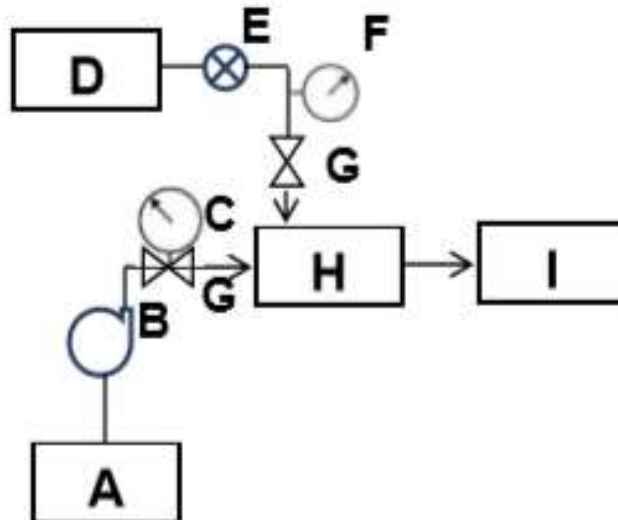
Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές βρέθηκε ότι τα θερμοανθεκτικά κολοβακτήρια σε οικιακά υγρά απόβλητα παρουσιάζουν σημαντική μείωση της τάξης του 96% στον πληθυσμό τους με την εφαρμογή νανοφυσαλίδων αζώτου.

Πιο συγκεκριμένα οι Reyes και Flores (2017), δοκίμασαν να δουν την αποτελεσματικότητα των νανοφυσαλίδων σε δείγματα νερού από τα αστικά κέντρα του Περού.

Για τον προσδιορισμό της καθαρότητας του νερού μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των κολοβακτηρίων, η θερμοκρασία, το pH, η θολερότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το  $BOD_5$  και το COD και το διαλυμένο οξυγόνο (DO).



Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει διαγραμματικά την πειραματική διάταξη που εφαρμόστηκε στην εξυγίανση του νερού.



Εικόνα 36: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης εξυγίανσης νερού  
Πηγή: BVSE, 2006; Abate and Valverde, 2017

Όπου ισχύουν τα ακόλουθα:

- A: δεξαμενή νερού
- B: αντλία
- C: ροόμετρο
- D: γεννήτρια αέρα E: βαλβίδα πίεσης
- F: μανόμετρο
- G: γενική βαλβίδα
- H: γεννήτρια νανοφουσαλίδων
- I: δεξαμενή συγκέντρωσης λύματος με νανοφουσαλίδες

Από τα αποτελέσματα του ανωτέρω πειράματος, παρατηρήθηκε μείωση στην τελική συγκέντρωση των κολοβακτηρίων στα οικιακά υγρά απόβλητα.

Πιο συγκεκριμένα, ενώ η αρχική συγκέντρωση των βακτηρίων ήταν 14500 CFU /100 ml, μετά την εφαρμογή των νανοφουσαλίδων η συγκέντρωση εμφανίστηκε αρκετά μειωμένη και μέσα στα επιτρεπτά όρια που δόθηκαν από το Εθνικό Πρωτόκολλο για την ποιότητα του νερού του Περού.



### 5.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ ΑΠΟ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Η επεξεργασία της ενεργού ιλύος είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος βιολογικής επεξεργασίας των οικιακών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Ωστόσο είναι μια διαδικασία ενεργειακά δαπανηρή και η οποία οδηγεί στον σχηματισμό ιλύος, που πολλές φορές είναι πιο δύσκολη στον καθαρισμό της σε σχέση με τα υγρά απόβλητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μεγάλος χρόνος φύλαξης της ιλύος έχει αντίστοιχα υψηλό κόστος. Συγκεκριμένα επισημαίνεται ότι από το συνολικό κόστος που αντιστοιχεί στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων το 25-60% σχετίζεται με την επεξεργασία της περισσευούμενης ιλύος. Επομένως, η διαχείριση της ιλύος και δη η μείωση του όγκου της αποτελεί πρόβλημα για τις βιομηχανικές μονάδες καθώς έχει υψηλό κόστος.

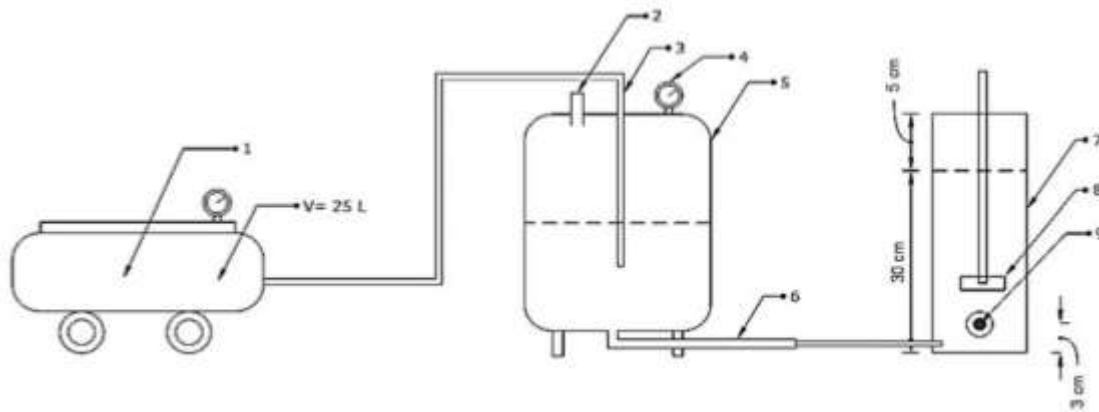
Προκειμένου να μειωθεί ο όγκος της ιλύος, συνήθης διαδικασία είναι η απονιτροποίηση, η οποία έχει βρεθεί ότι λόγω της αφαίρεσης του αζώτου, παράγει ιλύ με όγκο 20% μικρότερο.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, τα τελευταία χρόνια έχουν εφαρμοστεί οι νανοφυσαλίδες και στην φάση επεξεργασίας της ιλύος, με πολύ θετικά αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα, η χρήση των νανοφυσαλίδων έχει εφαρμοστεί στην διαδικασία επίπλευσης, ως μέσο για το διαχωρισμό των φάσεων της ενεργού ιλύος, και βρέθηκε ότι ο χρόνος διαχωρισμού της ιλύος από το υγρό ήταν αρκετά μικρότερος σε σχέση με την συνήθη λειτουργία της καθίζησης, ενώ η πυκνότητα της παραγόμενης ιλύος προέκυψε αρκετά αυξημένη.

Η διαδικασία της επίπλευσης του διαλυμένου αέρα με τη χρήση φυσαλίδων (DAF) έχει χρησιμοποιηθεί με επίσης θετικά αποτελέσματα στην προ- επεξεργασία των υγρών αποβλήτων αλλά και στην επεξεργασία του πόσιμου νερού. Σύμφωνα με την διαδικασία αυτή, ο διαλυμένος αέρας παρέχεται στο νερό μέσα σε μια δεξαμενή υπό πίεση, ενώ το καθαρό νερό μεταφέρεται προς τα πάνω με τη βοήθεια του ατμοσφαιρικού αέρα, παράγοντας εκατοντάδες φυσαλίδες με ανοδική κατεύθυνση. Ακριβώς αυτή η ανοδική κίνηση είναι που ευθύνεται για το διαχωρισμό των σωματιδίων από το υγρό.

Μια τυπική διάταξη (DAF) για την παραγωγή νανοφυσαλίδων παρουσιάζεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 37: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης DAF  
Πηγή: Ortiz-Oliveros et al., 2012

Όπου ισχύουν τα ακόλουθα:

- 1) Συμπιεστής αέρα
- 2) Σωλήνας μεταφοράς νερού
- 3) Σωλήνας μεταφοράς αέρα
- 4) Μετρητής πίεσης αέρα
- 5) Δεξαμενή πίεσης
- 6) Σωλήνας μεταφοράς αέρα/νερού
- 7) Δεξαμενή επίπλευσης
- 8) Μίξερ και
- 9) Χώρος συλλογής

Ένα σημαντικό πείραμα για την διαχείριση και επεξεργασία της ιλύος με χρήση νανοφουσαλίδων πραγματοποιήθηκε στο Ιράν από μια ερευνητική ομάδα που ασχολείται συγκεκριμένα με τα νοσοκομειακά απόβλητα, τα οποία είναι ένα από τα πολυσυζητημένα θέματα στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Τα απόβλητα αυτά, περιέχουν εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις σε φαρμακευτικές ουσίες, κυρίως αντιβιοτικά και αναλγητικά και η επεξεργασία τους είναι πιο δύσκολη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα αστικά υγρά απόβλητα.

Σύμφωνα με το πείραμα, ελήφθησαν δείγματα από το νοσοκομείο Kashan's Shahid Beheshti, στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικά όπως το pH, τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια, η θολρότητα και η ηλεκτρική αγωγιμότητα.



Από τα αποτελέσματα του πειράματος κατά την διάρκεια του οποίου έγινε εφαρμογή νανοφυσαλίδων, προέκυψε μείωση των παραμέτρων της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, των ολικών στερεών και της θολότητας σε ποσοστά 23.3, 44.5 και 88% αντίστοιχα. Ενώ, η διαλυτότητα του αέρα στο νερό εμφάνισε γραμμική αύξηση σε σχέση με την αύξηση της πίεσης.

Ως εκ τούτου, με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα, προκύπτει ότι η χρήση των νανοφυσαλίδων στην επεξεργασία νοσοκομειακών αποβλήτων ήταν πιο αποδοτική ως προς τις βασικές κρίσιμες παραμέτρους αξιολόγησης, στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

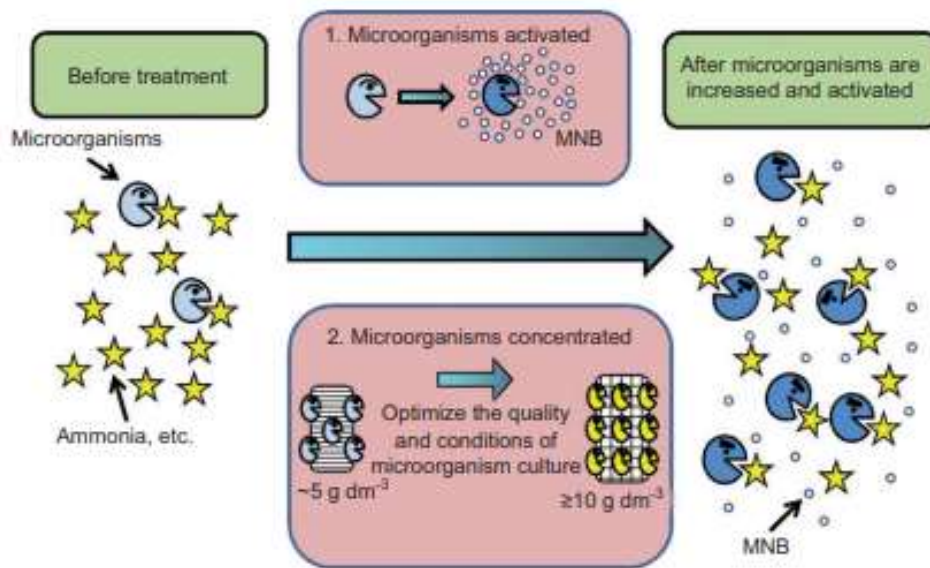
#### 5.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ Ν ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Στην Ιαπωνία η SHARP Corporation έχει αναπτύξει μια τεχνολογία με στόχο την απομάκρυνση του 90% του αζώτου από τα λύματα που απορρέουν από τους ημιαγωγούς των εγκαταστάσεών της. Η διαδικασία που χρησιμοποιεί η εταιρεία περιλαμβάνει τη χρήση νανοφυσαλίδων με στόχο την ενεργοποίηση της αποικίας των μικροοργανισμών που βρίσκονται στα λύματα.

Ως αποτέλεσμα της χρήσης των νανοφυσαλίδων είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών.

Ως εκ τούτου, το αυξημένο πλήθος των μικροοργανισμών, μέσω των βιοχημικών μονοπατιών που διαθέτει, καταλήγει να απομακρύνει το Αμμωνιακό φορτίο κατά 90%, χωρίς να χρειάζεται πρόσθετη αραίωση του δείγματος.

Η αναφερθείσα διαδικασία παρουσιάζεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 38).



Εικόνα 38: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας απομάκρυνσης αζώτου μέσω της ενεργοποίησης μικροοργανισμών που χρησιμοποιείται από την SHARP Corporation στην Ιαπωνία  
Πηγή: Khuntia et al.,2012

## 5.5 ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΧΥΤΑ

Στην Ιαπωνία το 2009, έγιναν πειραματικές δοκιμές με σκοπό την εξυγίανση του νερού που προέρχεται από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και γενικότερα αποβλήτων. Το μέρος της μελέτης ήταν η πόλη Kobe όπου υπήρχε χώρος απόρριψης αποβλήτων από το 1960 έως το 1970, και ο όγκος του στραγγίσματος έφτανε τα  $20.000 \text{ m}^3$ .

Δεδομένου ότι η τεχνολογία των νανοφουσαλίδων καινοτομεί στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων έγινε προσπάθεια χρήσης τους με στόχο τη νιτροποίηση του στραγγίσματος. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκαν *ex situ* και *in situ* πειράματα και βρέθηκε ότι όσο καλύτερος ήταν ο αερισμός του συστήματος μέσω των νανοφουσαλίδων τόσο πιο αποδοτική ήταν η προσδοκώμενη νιτροποίηση.

Ωστόσο το πείραμα κατέληξε επιπλέον και στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ✓ Ότι η μικροβιακή δραστηριότητα ήταν εξίσου ή και περισσότερο σημαντική σε τέτοια συστήματα συγκρίνοντάς τα με τα συμβατικά,
- ✓ Οι ελεύθερες ρίζες που παράγονταν από την διάλυση των νανοφουσαλίδων συμμετείχαν ενεργά στην αποδόμηση του οργανικού άνθρακα





## 5.6 ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΚΑΙ UV ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η τεχνολογία των νανοφυσαλίδων έχει επίσης εφαρμοστεί και στην αποδόμηση ενώσεων με τη χρήση UV ακτινοβολίας. Από πειραματική δοκιμή που έγινε από τον Tasaki (2009) μελετήθηκε η επίδραση της ακτινοβολίας λάμπας υδραργύρου στην παρουσία νανοφυσαλίδων διαμέτρου 720nm για την αποδόμηση σουλφονικών αλάτων αλκυλοβενζολίου (SDBS). Τα πειράματα διεξήχθησαν τόσο με την παρουσία όσο και με την απουσία της λάμπας. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική βελτίωση στο ρυθμό οξειδωσης (99.8%) του SBDS υπό τη χρήση της ακτινοβολίας ενώ ήταν επιτυχής και η απομάκρυνση του TOC (76,8%) μετά από 24 ώρες έκθεσης στην ακτινοβολία.

Ως εκ τούτου, και μετά από πολλές πειραματικές δοκιμές τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία των νανοφυσαλίδων έχει εδραιωθεί σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο για την χρήση τους στην επεξεργασία και διαχείριση των υγρών αποβλήτων. Το Ηνωμένο Βασίλειο, οι ΗΠΑ, ο Καναδάς, η Ινδία, η Νότια Αμερική, η Αυστραλία, οι χώρες της Σκανδιναβίας, η Ολλανδία και οι χώρες της Ανατολικής Ευρώπης χρησιμοποιούν πλέον την καινοτόμα αυτή τεχνολογία στις μονάδες επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων τους έχοντας έτσι την ευκαιρία να ανακυκλώνουν πιο αποδοτικά τα υγρά τους απόβλητα αλλά και η ποιότητά τους να είναι σαφώς πιο αναβαθμισμένη σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται.

Στις ΗΠΑ , η πιο γνωστή χρήση νανοφυσαλίδων γίνεται στο Texas για τον καθαρισμό λυμάτων από πετρελαιοειδή.

Στην Ελλάδα, η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων γίνεται με τις συμβατικές μεθόδους που συνοψίζονται στα τρία (3) ακόλουθα σημεία:

- Απομάκρυνση του αζώτου
- Απολύμανση
- Απομάκρυνση του οργανικού φορτίου

Τα συστήματα που είναι διαθέσιμα και χρησιμοποιούνται είναι: τα συστήματα της ενεργής ιλύος, βιολογικά φίλτρα, βιολογικοί περιστρεφόμενοι δίσκοι και συστήματα μεμβρανών. Στις



εγκαταστάσεις επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων χρησιμοποιούνται τα παραπάνω συστήματα είτε ως έχουν ή με παραλλαγές αυτών.

Ωστόσο στον ελληνικό χώρο η τεχνολογία των νανοφυσαλίδων έχει βρει επιτυχή εφαρμογή στον πρωτογενή τομέα. Συγκεκριμένα το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης σε συνεργασία με την Αμερικάνικη Γεωργική Σχολή δοκίμασαν να ποτίσουν καλλιέργειες μαρουλιού με νερό εμπλουτισμένο με νανοφυσαλίδες και νερό αρδευτικό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυξήθηκε η παραγωγή των μαρουλιών κατά +30% με την χρήση εμπλουτισμένου νερού.



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν οι «νανοφουσαλίδες», και αναφέρθηκαν εκτενώς οι μοναδικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα πεδία εφαρμογών τους έως σήμερα, ενώ έγινε ειδική αναφορά στις εφαρμογές τους στην περιβαλλοντική μηχανική, και δη στην επεξεργασία λυμάτων και λοιπών υγρών αποβλήτων.

Αν και οι επιστήμονες δεν έχουν καταλήξει σε έναν κοινά αποδεκτό ορισμό για τις νανοφουσαλίδες, μπορούμε να πούμε ότι ως «νανοφουσαλίδες» ορίζονται οι μικροσκοπικές κοιλότητες αερίου μεγέθους  $< 100$  nm που έχουν μοναδικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Οι νανοφουσαλίδες έχουν την ικανότητα να αλλάζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδάτινου σώματος μέσα στο οποίο βρίσκονται και γι αυτό τον λόγο έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της περιβαλλοντικής μηχανικής ως προς την χρήση τους στον τομέα της εξυγίανσης του νερού και των υγρών αποβλήτων.

Το πιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους γνώρισμα, που γνώρισε μεγάλης αποδοχής από τους ερευνητές, είναι η σταθερότητά τους στην διάρκεια του χρόνου. Ο κύριος λόγος της μεγάλης αντοχής και σταθερότητας που παρουσιάζουν οι νανοφουσαλίδες βρέθηκε ότι είναι η δημιουργία μιας διεπιφάνειας μεταξύ του εγκλωβισμένου αέρα και του φορτισμένου υδατικού περιβάλλοντος.

Όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω τα βασικά χαρακτηριστικά των νανοφουσαλίδων εξαρτώνται κυρίως από το μέγεθός τους και από το εγκλωβισμένο αέριο.

Οι πιο χαρακτηριστικές ιδιότητες των μικροφουσαλίδων είναι οι ακόλουθες:

1. Πολύ μικρό τους μέγεθος
2. Η μακροζωία/ σταθερότητα διατήρησής τους στο νερό
3. Αυξημένη εσωτερική πίεση
4. Δυναμικό ζήτα
5. Χαμηλή ταχύτητα ανόδου
6. Μεταφορικές Ιδιότητες
7. Δημιουργία Ελευθέρων ριζών

Η δημιουργία των νανοφουσαλίδων συνήθως οφείλεται σε μια απότομη πτώση πίεσης κάτω από μια οριακή τιμή, και τότε η ομοιογενής υγρή φάση του υγρού αλλάζει. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο που βασίζεται στην μεταβολή της πίεσης και ονομάζεται «σπηλαίωση».



Οι δύο (2) πιο διαδεδομένοι τύποι της σπηλαιώδους που εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια στην παραγωγή νανοφουσαλίδων είναι η υδροδυναμική και η ακουστική σπηλαιώση, με την υδροδυναμική σπηλαιώση να έχει αποδειχθεί ως μια αποδοτική και φθηνή τεχνική για την απολύμανση του νερού και την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, με χαμηλό κόστος λειτουργίας και εξοπλισμού.

Τα χαρακτηριστικά των νανοφουσαλίδων προέκυψε ότι θα μπορούσαν να είναι αξιοποιήσιμα στην περιβαλλοντική μηχανική, κυρίως λόγω της μεγάλης ανθεκτικότητας, της χαμηλής πλευστότητας, της υψηλής διαλυτότητας και της ικανότητάς των νανοφουσαλίδων να δημιουργούν ελεύθερες ρίζες.

Ως εκ τούτου, εκτιμάται ότι η τεχνολογία των νανοφουσαλίδων στην περιβαλλοντική μηχανική, μπορεί να οδηγήσει σε μια τεχνολογική επανάσταση με πολύ θετικά αποτελέσματα, ως προς την απομάκρυνση της ρύπανσης, την μείωση των έργων Π.Μ στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων, καθώς και την μείωση χρόνων και κόστους λειτουργίας.

Με βάση τα ανωτέρω, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει διάφορα πειράματα που χρησιμοποιούν τις νανοφουσαλίδες στην επεξεργασία πόσιμου και θαλασσινού νερού, στην επεξεργασία οικιακών, βιομηχανικών ακόμα και νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων, αλλά και στην γεωργία, και σε χρήσεις νερού της καθημερινής ζωής.

Σε όλες τις εφαρμογές προέκυψε μεγάλη μείωση του ρυπαντικού φορτίου, ενώ η παραγωγή ελεύθερων ριζών είχε ως αποτέλεσμα την απολύμανση του νερού χωρίς την προσθήκη χημικών.

Μια επίσης σημαντική εφαρμογή των νανοφουσαλίδων ήταν η έγχυσή τους στο έδαφος, με σκοπό την πληρότητα των εδαφικών κενών. Η μέθοδος αυτή έδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα κυρίως ως προς την σεισμική απόκριση και αντίσταση του εδάφους σε μεγάλες φορτίσεις.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω, προκύπτει ότι η χρήση των νανοφουσαλίδων στην επεξεργασία νερού και των υγρών αποβλήτων φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος, αλλά επειδή το πειραματικό φάσμα των εφαρμογών της είναι ακόμα περιορισμένο, κρίνεται σκόπιμο η περαιτέρω έρευνα του συγκεκριμένου πεδίου αποσκοπώντας στην δημιουργία μιας «πράσινης» νανοτεχνολογίας που δεν αφήνει πίσω της δευτερογενή απόβλητα.

Πιο συγκεκριμένα προτείνονται οι ακόλουθες ερευνητικές δράσεις:



- Η μελέτη της σχέσης αλληλεπίδρασης των νανοφουσαλίδων με τις μικροβιακές κοινότητες των μικροοργανισμών.
- Η μελέτη χρήσης νανοφουσαλίδων αέρα/όζοντος σε εφαρμογές απολύμανσης πόσιμου νερού.
- Η μελέτη της απόδοσης των νανοφουσαλίδων στην απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων από τα υγρά απόβλητα, εφόσον με βάση τα ανωτέρω στοιχεία και λόγω της καλύτερης διάχυσης του διαλυμένου οξυγόνου, εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα θα είναι πολύ ενθαρρυντικά.
- Η μελέτη χρήσης των νανοφουσαλίδων στην επίπλευση των σωματιδίων είτε ογκωδών είτε λεπτών στα συστήματα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.

Ως εκ τούτου και με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε στις ιδιότητες των νανοφουσαλίδων και στο σχετικό πεδίο εφαρμογών τους, τα μέχρι τώρα πειραματικά αποτελέσματα κρίνονται ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, και όπως φαίνεται η χρήση των νανοφουσαλίδων σε συστήματα επεξεργασίας νερού και των υγρών αποβλήτων είναι μια μέθοδος φιλική στο περιβάλλον, και ως εκ τούτου, πολλά υποσχόμενη.

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά αποτελέσματα όπως έχουν προκύψει από τις έρευνες που έχουν γίνει έως σήμερα, προτείνεται η χρήση των νανοφουσαλίδων στις ακόλουθες εφαρμογές:

- Στην επεξεργασία λυμάτων και λοιπών υγρών αποβλήτων (οικιακών, βιομηχανικών και νοσοκομειακών), στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και διαχείρισης των υγρών αποβλήτων, προκειμένου να απομακρυνθεί το οργανικό φορτίο
- Στην απολύμανση του πόσιμου νερού, με σκοπό την απομάκρυνση του μικροβιακού φορτίου
- Στο νερό των λιμνών προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία ελών
- Στην άρδευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων, προκειμένου να αυξηθεί η γεωργική παραγωγή
- Στο θαλασσινό νερό στις περιπτώσεις που επιδιώκεται η αύξηση του πληθυσμού των ψαριών και των οστρακοειδών.



- Στον καθαρισμό λυμάτων από πετρελαιοειδή
- Με ενέσιμη μορφή στο έδαφος προκειμένου να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα του εδάφους και να βελτιωθεί η σεισμική του απόκριση.
- Στην καθημερινή μας ζωή, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν είτε μέσα στο πόσιμο νερό, προκειμένου να ενισχύσουν τους μεταβολικούς μας μηχανισμούς, είτε σε εργασίες καθαρισμού
- Στον τομέα της υγείας, στην παραγωγή φαρμάκων, προκειμένου να αυξήσουν τον ρυθμό απορρόφησής τους από τον ανθρώπινο οργανισμό



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment – Ashutosh Agrwal, Wun Jern, Yu Liu- May 2011
- Method of Performing Nanobubbles- Kaneo Chiba, Miyagi (JP), Masayoshi, Takahashi, Ibaraki (JP)- August 2007
- An Introduction to Micro/Nano- Bubbles and their Applications- Tomohiro Marui -2013
- An investigation of nanobubbles in aqueous solutions for various applications- G.Senthilkumar, C.Rameshkumar, M.N.V.S. Nikhil & J. Navin Ram Kumar- June 2018
- Nanobubble Technology in Environmental Engineering; Revolutionization Potential and Challenges ( Tao Lyu, Shubiao Wu, Robert J.G. Mortimer and Gang Pan.
- Micro- and Nanobubbles- Fundamentals Applications- Hideki Tsuge-2015
- Nanobubbles and Nanodrops- Jiist H. Weijs
- Fundamentals and Applications of Micro/ Nano Bubbles- Akimi Serizawa
- ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ-ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ-Διπλωματική εργασία «Εκτίμηση του ρυθμού οξυγόνωσης (kLa) με σύστημα παραγωγής νανοφουσαλίδων»- Μπίσδα Αργυρω
- Ηχοχημεία – Ηλεκτροχημεία- Εργαστήριο Τεχνολογίας Ανόργανων Υλικών –Χρήστος Αργυρούσης
- Noise as Data: Nucleation of Electrochemically Generated Nanobubbles- Serge G. Lemay
- Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation- William B. Zimmerman, Vaclav Tesar, HC Hemaka Bandulasena- Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield, United Kingdom
- Surface Nanobubbles Nucleate Microdroplets-Xuehua Zhang, Henri L.huissier, Chao Sun and Detlef Lohse
- The fundamental phenomena of nanobubbles and their behaviour in waste water treatment technologies- Anup Gurung, Olli Dahl & Kaj Jansson
- Why surface Nanobubbles Live for Hours- Joost H. Weijs and Detlef Lohse- February 2013
- Stability of nanobubbles – Jay N. Meegoda- Shaini Aluthgun Hewage and Janitha H. Batagoda



- Average size and zeta potential of nanobubbles in different reagent solutions- Thi Thuy Bui- Duc Canh Nguyen- Mooyounh Han
- Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques- Tatek Temesgen, Thi Thuy Bui, Mooyoung Han, Tschung-il Kim, Hyunju Park- June 2017
- Generation and characterization of nanobubbles by ionization method for waste water treatment- C. Rameshkumar, G. Senthilkumar, R. Subalakshmi, Risa Gogoi
- Diffusive Shielding Stabilizes Bulk Nanobubbles Clusters- Joost H. Weijs R.T. Seddon and Detlef Lohse
- Anup Gurung, Olli Dahl and Kaj Jansson (2016). The fundamental phenomena of nanobubbles and their behavior in wastewater treatment technologies. *Geosystem Engineering*, 133-142.
- European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit
- Nanotechnology- A gentle introduction to the next big idea- Mark Ratner, Daniel Ratner
- Nanotechnology- Basic Science and Emerging Technologies- Michael Wilson
- Nanotechnologies and Nanophysics- Claire Dupas, Philippe Houdy, Marcel Lahmani
- Nanobubble generation and its application in froth flotation – FAN Maoming, TAO Daniel, HONAKER Ric, LUO Zhenfu
- Effect of nanobubbles on the flotation of different sizes of coal particles- Maoming Fan, Daniel Tao, Yuemin Zhao, Rick Honaker
- [http://www.bvsde.paho.org/CDGDWQ/docs\\_microbiologicos/Indicadores%20PDF/Ecoli\\_bacterias\\_termo.pdf](http://www.bvsde.paho.org/CDGDWQ/docs_microbiologicos/Indicadores%20PDF/Ecoli_bacterias_termo.pdf)
- Agarwal, A., Ng, W. J., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84, 1175–1180.
- Ahmadi, R., Khodadadi, D. A., Abdollahy, M., & Fan, M. (2014). Nanomicrobubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, 559–566.
- Almeida, C., Quintar, S., González, P., & Mallea, M. (2007). Influence of urbanization and tourist activities on the water quality of the Potrero de los Funes River (San Luis – Argentina). *Environmental Monitoring and Assessment*, 133, 459–465.





- Arao T., Kawasaki A., Baba K., Mori S. and Matsumoto S., 2009, Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice *Environ.Sci.Technol.*439361–7
- Bahadori A, Zahedi G, Zendehboudi S, Bahadori M. Estimation of air concentration in dissolved air flotation (DAF) systems using a simple predictive tool. *Chem Eng Res Des.* 2013;91(1):184-90.
- Bando Y, Takahashi Y, Luo W, Wang Y, Yasuda K, Nakamura M, Funato Y, Oshima M (2008) Flow characteristics in concurrent upflow bubble column dispersed with micro-bubbles, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 41, 562–567.
- Bruch, I., Fritsche, J., Bänninger, D., Alewell, U., Sendelov, M., Hürlimann, H., Hasselbach, R., & Alewell, C. (2011). Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands. *Bioresource Technology*, 102, 937–941.
- Cho KW, Chung CM, Kim YJ, Chung TH. Continuous clarification and thickening of activated sludge by electrolytic bubbles under control of scale deposition. *Bioresour Technol.* 2010;101(9):2945-51.
- Choi M, Choi DW, Lee JY, Kim YS, Kim BS, Lee BH. Removal of pharmaceutical residue in municipal wastewater by DAF (dissolved air flotation)–MBR (membrane bioreactor) and ozone oxidation. *Water Sci Technol.* 2012;66(12):2546-55.
- Chonova T, Keck F, Labanowski J, Montuelle B, Rimet F, Bouchez A. Separate treatment of hospital and urban wastewaters: A real scale comparison of effluents and their effect on microbial communities. *Sci Total Environ.* 2016;542(Pt A):965-75.
- Choung J, Lutell GH, Yoon RH: Characterization of operating parameters in the cleaning zone of microbubble column flotation. *Int J Mineral Process* 1993, 39:31-40.
- Chu LB, Xing XH, Yu AF, Zhou YN, Sun XL, Jurcik B (2007) Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles, *Chemosphere*, 68, 1854–1860.
- Chu WH, Gao NY, Templeton MR, Yin D-Q. Comparison of inclined plate sedimentation and dissolved air flotation for the minimisation of subsequent nitrogenous disinfection by-product formation. *Chemosphere.* 2011;83(5):647-51.
- Colic, M., Morse, W., & Miller, J. D. (2007). The development and application of centrifugal flotation systems in wastewater treatment. *International Journal of Environment and Pollution*, 30, 296–312.
- Conrardy JB, Vaxelaire J, Olivier J. Electro-dewatering of activated sludge: Electrical resistance analysis. *Water Res.* 2016;100:194-200.



- Cruz R. & Valverde J.. 2017. Reduction of Coliforms presents in domestic residual waters by Air-Ozone Micro-Nanobubbles In Carhuaz city, Peru. Nanoworld Conference-2017. Boston, USA.
- Demangeat, J.-L. (2015). Gas nanobubbles and aqueous nanostructures: The crucial role of dynamization. *Homeopathy*, 104, 101–115.
- Ebina, K., Shi, K., Hirao, M., Hashimoto, J., Kawato, Y., Kaneshiro, S., Yoshikawa, H. (2013). Oxygen and air nanobubble water solution promote the growth of plants, fishes, and mice. *PLoS ONE*, 8, e65339.
- Eriksson J. C. and Ljunggren S., 1999, On the mechanically unstable free energy minimum of a gas bubble which is submerged in water and adheres to a hydrophobic wall *Colloid Surf. A* 159 159–63
- Eusebi AL, Panigutti M, Battistoni P. Reduction of biological sludge production applying an alternating oxic/anoxic process in water line. *Water Environ Res.* 2016;88(6):483-9.
- Fan, M., & Tao, D. (2008). A study on picobubble enhanced coarse phosphate froth flotation. *Separation Science and Technology*, 43(1), 1–10.
- Fan, M., Tao, D., Honaker, R., & Luo, Z. (2010a). Nanobubble generation and its application in froth flotation (part I): Nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 1–19.
- Fan, M., Tao, D., Honaker, R., & Luo, Z. (2010b). Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part II): Fundamental study and theoretical analysis. *Mining Science and Technology (China)*, 20, 159–177.
- Fan, M., Tao, D., Honaker, R., & Luo, Z. (2010c). Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part III): Specially designed laboratory scale column flotation of phosphate. *Mining Science and Technology (China)*, 20, 317–338
- Hayakumo S., Arakawa S., Takahashi M., Kondo K., Mano Y. and Izumi Y. 2014 Effects of ozone nano-bubble water on periodontopathic bacteria and oral cells—in vitro studies *Sci. Technol. Adv. Mater.* 15055003
- Holzapfel- Pschorn A., Conrad R. and Seiler W. 1985, Production, oxidation and emission of methane in rice paddies *FEMS Microbiol. Lett.* 31343–51
- Khuntia S., Majumder K. S., Ghosh P., 2012, Microbubble-aided water and wastewater purification: a review, *Rev Chem Eng* 2012; 28(4-6): 191–221



- Kivaisi, A. K. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering*, 16, 545–560.
- Kurama H, Karagüzel C, Mergan T, Çelik M. Ammonium removal from aqueous solutions by dissolved air flotation in the presence of zeolite carrier. *Desalination*. 2010;253(1-3):147-52.
- Lee KY, Kim SJ, Lee Y-W, Yeom IT. Activated Sludge Clarification Using an Advanced DAF Process Based on the Down-Flow Floating Cover Filtration. *Sep Sci Technol*. 2011;46(12):1915-21.
- Lee EJ, Kim HS, Jang A. Application of dissolved air flotation (DAF) with coagulation process for treatment of phosphorus within permeate of membrane bioreactor (MBR). *Desalination Water Treat*. 2016;57(19):9043-50
- Li P, Takahashi M, Kaneo C (2009) Enhanced free-radical generation by shrinking microbubbles using a copper catalyst, *Chemosphere*, 77, 1157–1160.
- Li P, Takahashi M. and Chiba K. 2009a, Degradation of phenol by the collapse of microbubbles, *Chemosphere* 75:1371–5
- Li R. Y., Stroud J. L., Ma J. F., McGrath S. P. and Zhao F. J. 2009b Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization, *Environ.Sci.Technol*. 43 3778–83
- Linquist B. A. ,Anders M. M. ,Adviento- Borbe M. A.,Chaney R. L., Nalley L. L., DaRosa EFF and van Kessel C. 2015, Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems *Glob.Change Biol*. 21:407–17
- Liu S., Kawagoe Y. ,Makino Y. and Oshita S., 2013, Effects of nanobubbles on the physicochemical properties of water: The basis for peculiar properties of water containing nanobubbles *Chem.Eng.Sci*. 93:250–6
- Michioku K, Kanda T (11–14 December 2006) Thermosolutal Stratification and Water Quality Behaviors in a Reservoir Hypolimnion Before and After Micro-bubble Aeration, paper presented at the Proc. 6th International Symposium on Stratified Flows, Perth, Australia.
- Michioku K, Sakatani Y, Matsuo K, Oda T, Hara Y (10–13 September 2006) Reservoir Purification by Using Micro-bubble Aerator, in Proc. 7th International Conference on HydroScience and Engineering, Philadelphia, PA.
- Michioku K, (9–14 August 2009) Micro-bubble Aeration of Polluted Leachate from a Landfill, in Proc. 33rd IAHR Congress, Vancouver, BC, Canada.



- Michioku K, Minagawa H, Yamada S, Ikeguchi T and Ohkawa N. (2012). An in-situ experiment on oxygen solubility of micro-bubble aeration in an eutrophic dam- reservoir, Proc. Intl. Sympo. Dams for a Changing World, ICOLD 2012, pp. 2-99-2-104
- Minamikawa K., Takahashi M., Makino T., Tago K. and Hayatsu M. 2015, Irrigation with oxygen-nanobubble water can reduce methane emission and arsenic dissolution in a flooded rice paddy, Environ.Res.Lett.10(2015)084012
- Ohkubo M, Sato Y, Terasaka K, Obayashi D (19–21 September 2008) Development of Novel Crystallization Using Micro-bubble Shrinkage, 40th Autumn Meeting of the Society of Chemical Engineers Japan, Sendai, Japan, A215 (in Japanese).
- Ortiz-Oliveros H, Flores-Espinosa R, JiménezDomínguez H, Jiménez-Moleón M, Cruz-González D. Dissolved air flotation for treating wastewater of the nuclear industry: preliminary results. J Radioanal Nucl Chem. 2012;292(3):957-65.
- Ponomariov, V. G. (2009). Study and application of flotation in schemes for waste water purification. Environmental Research, Engineering and Management, 4, 51–56.
- Radzuan MA, Belope MA, Thorpe R. Removal of fine oil droplets from oil-in-water mixtures by dissolved air flotation. Chem Eng Res Des. 2016;115:19-33.
- Rahmani AR, Nematollahi D, Godini K, Azarian G. Continuous thickening of activated sludge by electroflotation. Sep Purif Technol. 2013;107:166-71.
- Ralston, J., & Dukhin, S. S. (1999). The interaction between particles and bubbles. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 151, 3–14.
- Reyes R. and Flores 2017, Efficiency Of Micro-Nanobubbles for Wastewater Treatment in Puerto Bermúdez, Oxapampa, Pasco, Journal of Nanotechnology
- Rubio, J., Souza, M. L., & Smith, R. W. (2002). Overview of flotation as a wastewater treatment technique. Minerals Engineering, 15, 139–155
- Sobhy, A., & Tao, D. (2013). Nanobubble column flotation of fine coal particles and associated fundamentals. International Journal of Mineral Processing, 124, 109–116.
- Stikker, A. (1998). Water today and tomorrow: Prospects for overcoming scarcity. Futures, 30, 43–62.
- Takahashi M, Kawamura T, Yamamoto Y, Ohnari H, Himuro S, Shakutsui H (2003) Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation, J. Phys. Chem. B, 107, 2171–2173.
- Takahashi Y., Minamikawa R., Hattori K. H., Kurishima K., Kihou N. and Yuita K. 2004 Arsenic behavior in paddy fields during the cycle of flooded and non-flooded periods. Environ. Sci.Technol.381038–44



- Takahashi M (2005) ζ potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas-water, *J. Phys. Chem. B*, 109, 21858–21864.
- Takahashi MM, Chiba K, Li P (2007) Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus, *J. Phys. Chem. B*, 111, 1343–1347.
- Tao, D., Yu, S., Zhou, X., Honaker, R. Q., & Parekh, B. K. (2008). Picobubble column flotation of fine coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 28(1), 1–14.
- Tasaki, T., Wada, T., Baba, Y., & Kukizaki, M. (2009). Degradation of surfactants by an integrated nanobubbles/VUV irradiation technique. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48, 4237– 4244.
- Teng, Y., Yang, J., Zuo, R., & Wang, J. (2011). Impact of urbanization and industrialization upon surface water quality: A pilot study of Panzhihua mining town. *Journal of Earth Science*, 22, 658–668.
- Tsai JC, Kumar M, Chen S-Y, Lin J-G. Nano-bubble flotation technology with coagulation process for the cost-effective treatment of chemical mechanical polishing wastewater. *Sep. Purif. Technol.* 2007;58(1):61-7.
- Tsuge, H. 2014. *Micro and nanobubbles: fundamentals and applications*. Pan Stanford Publishing. p.375 ISBN:978-981-4463-11-9
- Uchida, T., Oshita, S., Ohmori, M., Tsuno, T., Soejima, K., Shinozaki, S., Take, Y., & Mitsuda, K. (2011). Transmission electron microscopic observations of nanobubbles and their capture of impurities in wastewater. *Nanoscale Research Letters*, 6, 295–295.
- Ushikubo F. Y., Furukawa T., Nakagawa R., Enaria M., Makino Y., Kawagoe Y., Shiina T. and Oshita S., 2010 Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water *Colloid Surf.* A36131–7
- Valverde, J. 2016. *Nanotechnology for the Environmental Engineering*. In: *First International Congress in environmental Engineering oriented to environmental technologies: 6th to 11th october*. Lima, pp. 26
- von Sperling, M., Freire, V. H., & de Lemos Chernicharo, C. A. (2001). Performance evaluation of a UASB - Activated sludge system treating
- Wang B, Peng Y, Guo Y, Zhao M, Wang S. Nitrogen removal from wastewater and external waste activated sludge reutilization/reduction by simultaneous sludge fermentation, denitrification and anammox (SFDA). *Bioresour Technol.* 2016;214:284-91.
- Wu, Z., Zhang, X., Zhang, X., Li, G., Sun, J., Zhang, Y., Li, M., & Hu, J. (2006). Nanobubbles influence on BSA adsorption on mica surface. *Surface and Interface Analysis*, 38, 990–995.



- Wu, Z., Zhang, X., Zhang, X., Sun, J., Dong, Y., & Hu, J. (2007). In situ AFM observation of BSA adsorption on HOPG with nanobubble. *Chinese Science Bulletin*, 52, 1913–1919.
- Wu, Z., Chen, H., Dong, Y., Mao, H., Sun, J., Chen, S., Hu, J. (2008). Cleaning using nanobubbles: Defouling by electrochemical generation of bubbles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 328, 10–14.
- Wu, C., Nasset, K., Masliyah, J., & Xu, Z. (2012). Generation and characterization of submicron size bubbles. *Advances in Colloid and Interface Science*, 179-182, 123–132.
- WHO. 2015. Accessed 18.09.2016. <http://www.who.int>.
- Zimmerman, W. B., Tesař, V., & Bandulasena, H. C. H. (2011). Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 16, 350–356.
- Zouboulis, A. I., & Avranas, A. (2000). Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 172, 153–161.