

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ
ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ
ΔΙΑΣΠΟΡΩΝ**

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΜΑΡΟΥΠΑ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
Πολιτικού Μηχανικού

ΠΑΤΡΑ 2009

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή με θέμα «Μελέτη επίδρασης της εφαρμογής ακουστικών κυμάτων σε διεργασίες συσσωμάτωσης κolloειδών διασπορών» πραγματοποιήθηκε από τον Μαρούπα Δημήτριο, μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Η μελέτη εκπονήθηκε στο πλαίσιο της έρευνας στο Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος υπό τις οδηγίες και την καθοδήγηση του κ. Κωνσταντίνου Χρυσικόπουλου, καθηγητή του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, καθώς και με τη βοήθεια του κ. Ιωάννη Μαναριώτη, επιστημονικού συνεργάτη του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο συγγραφέας θα ήθελε να εκφράσει τις θερμές ευχαριστίες του προς τους δυο προαναφερθέντες, κ. Κωνσταντίνο Χρυσικόπουλο και κ. Ιωάννη Μαναριώτη, καθώς και προς όλο το προσωπικό του εργαστηρίου Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία, όπως μαρτυρά ο τίτλος της «Μελέτη επίδρασης της εφαρμογής ακουστικών κυμάτων σε διεργασίες συσσωμάτωσης κolloειδών διασπορών», έχει ως σκοπό την πρακτική διερεύνηση μέσω πειραμάτων της συμβολής των ακουστικών κυμάτων, ειδικότερα των ηχητικών κυμάτων και των υπέρηχων, στην συσσωμάτωση των κolloειδών καθώς και την έρευνα του κατά πόσο είναι δυνατή η αντικατάσταση των μέχρι τώρα γνωστών μεθόδων συσσωμάτωσης, και ειδικότερα της χρήσης κροκιδωτικών, από αυτά.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται αναφορά καθώς και εκτενέστερη παρουσίαση σε όρους όπως κolloειδή, συσσωμάτωση, κροκίδωση, θρόμβωση, ακουστικά κύματα και υπέρηχοι, ενώ επίσης παρουσιάζονται τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της μελέτης αυτής. Ειδικότερα για τα κolloειδή αναλύονται οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες τους καθώς επίσης και διάφορα ειδικά χαρακτηριστικά τους. Για τους όρους συσσωμάτωση, κροκίδωση και θρόμβωση δίνονται οι ορισμοί αυτών, ενώ γίνεται και αναφορά στις διάφορες μέχρι σήμερα μεθόδους που ακολουθούνται για την πραγματοποίησή τους, ενώ όσον αφορά τα ηχητικά κύματα και τους υπέρηχους γίνεται αναφορά τόσο στα φυσικά χαρακτηριστικά τους όσο και στα φαινόμενα που προκαλούνται κατά τη διάδοση αυτών.

Στη συνέχεια γίνεται λεπτομερής παρουσίαση του πειραματικού μέρους της εργασίας. Παρουσιάζονται όλα τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της μελέτης ενώ γίνεται πλήρης αναφορά σε όλες τις παραμέτρους, οι οποίες είχαν καθοριστικό ρολό στην πειραματική διαδικασία. Αναφέρονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν τα πειράματα, τα διάφορα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς επίσης γίνεται και εκτενής αναφορά στις διάφορες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη. Τα πειράματα παρουσιάζονται με τη βοήθεια πινάκων κάνοντας έτσι πιο απλή και πιο εύκολη την κατανόηση τους από τον αναγνώστη, ενώ ακολουθεί με μορφή κειμένου η πλήρης ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.

Όσον αφορά τη συγκεκριμένη πειραματική μελέτη, μέσω των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής, αποδείχθηκε ότι τα ηχητικά κύματα επιδρούν

σε κάποιο βαθμό στη συσσωμάτωση των κολλοειδών σε συνδυασμό όμως με κάποια από τις ήδη γνωστές μεθόδους και ειδικότερα με παράλληλη χρήση κροκιδωτικών, ενώ όσον αφορά τους υπέρηχους η εφαρμογή τους, με ή χωρίς χρήση κροκιδωτικών, δεν επέφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά η επίδραση των ακουστικών κυμάτων σε διεργασίες συσσωμάτωσης κολλοειδών διασπορών δεν μπορεί να κριθεί αυτομάτως αναποτελεσματική, καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μελέτη του συγκεκριμένου αντικειμένου βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο επιτρέποντας πολλά περιθώρια εξέλιξης και βελτίωσης.

Κλείνοντας αναφέρεται ότι η προσπάθεια ιζηματοποίησης μέσω της χρήσης ακουστικών κυμάτων αποτελεί ένα εντελώς καινούριο βήμα στον χώρο του καθαρισμού νερού, από τη μελέτη του οποίου μπορεί να προκύψουν αποτελέσματα ανατρεπτικά σε σχέση με τα μέχρι τώρα δεδομένα που δύναται να οδηγήσουν σε νέες και εντελώς διαφορετικές από τις έως τώρα γνωστές μεθόδους καθαρισμού νερού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	1
1.1 Εισαγωγή στον όρο κολλοειδές.....	1
1.2 Κολλοειδές και κολλοειδή συστήματα.....	1
1.3 Λυόφοβα και λυόφιλα κολλοειδή.....	2
1.4 Κινητικές ιδιότητες κολλοειδών.....	3
1.4.1 Κίνηση Brown.....	3
1.4.2 Καταβύθιση κολλοειδών.....	4
1.4.3 Διάχυση κολλοειδών.....	5
1.5 Φόρτιση κολλοειδών.....	5
1.5.1 Ηλεκτρική διπλοστοιβάδα.....	7
1.6 Αλληλεπίδραση κολλοειδών.....	8
1.6.1 Θεωρία DLVO.....	8
1.6.2 Δυνάμεις non – DLVO.....	9
1.7 Άργιλοι (Clays).....	11
1.7.1 Καολινίτης.....	11
1.7.1.1 Δομή του καολινίτη.....	12
1.7.1.2 Ιδιότητες καολινίτη.....	13
2. ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ – ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ – ΘΡΟΜΒΩΣΗ.....	14
2.1 Καθαρισμός νερού.....	14
2.2 Καταστάσεις σταθερότητας της κολλοειδούς διασποράς.....	14
2.2.1 Συσσωμάτωση.....	15
2.2.2 Κροκίδωση.....	16
2.2.3 Θρόμβωση.....	17
2.3 Μέθοδοι κροκίδωσης – θρόμβωσης κολλοειδών.....	17
2.3.1 Κροκίδωση με χρήση κροκιδωτικού.....	18
2.4 Γήρας κολλοειδούς – Πέψη κολλοειδούς.....	18
2.5 Κροκιδωτικά.....	19
2.5.1 Θεϊκό αργίλιο.....	20

3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	22
3.1 Έννοια του κύματος.....	22
3.2 Εγκάρσια και διαμήκη κύματα.....	22
3.3 Ακουστικά κύματα.....	23
3.3.1 Διάδοση ακουστικών κυμάτων.....	24
3.3.2 Βασικά μεγέθη ακουστικών κυμάτων.....	25
3.4 Κυματικά φαινόμενα κατά τη διάδοση του ακουστικού κύματος.....	27
3.5 Αρμονικά ακουστικά κύματα.....	28
3.6 Συμβολή ακουστικών κυμάτων – Η αρχή της επαλληλίας.....	29
3.7 Στάσιμα ακουστικά κύματα.....	30
3.7.1 Στάσιμα κύματα σε αέριες στήλες.....	31
4. ΥΠΕΡΗΧΟΙ.....	34
4.1 Εισαγωγή στους υπέρηχους.....	34
4.2 Εφαρμογές υπερήχων.....	34
4.3 Χημεία υπερήχων.....	35
4.4 Φυσικά και χημικά φαινόμενα κατά τη διάδοση υπερήχων.....	38
4.4.1 Ακουστική σπηλαιώση.....	38
4.4.1.1 Ιστορική αναδρομή.....	38
4.4.1.2 Περιγραφή φαινομένου.....	39
4.4.1.3 Παροδική σπηλαιώση (Transient cavitation).....	39
4.4.1.4 Σταθερή σπηλαιώση (Rectified diffusion).....	40
4.4.1.5 Θερμική θεωρία επεξήγησης του φαινομένου (Hot spot theory).....	42
4.4.1.6 Ενέργεια ακουστικής σπηλαιώσης.....	42
4.4.1.7 Παράγοντες επιρροής.....	43
4.4.2 Acoustic streaming.....	44
4.4.2.1 Ιστορική αναδρομή.....	44
4.4.2.2 Δημιουργία φαινομένου.....	45
4.4.2.3 Χαρακτηριστικά φαινομένου.....	46
4.4.2.4 Παράγοντες επιρροής.....	48
4.4.2.5 Χαρακτηριστικά φαινομένου.....	46
4.4.2.6 Παράγοντες επιρροής.....	48
4.4.3 Υπερηχοφωταύγεια (Sonoluminescence).....	49
4.4.3.1 Εισαγωγή στο φαινόμενο της υπερηχοφωταύγειας.....	49
4.4.3.2 Είδη υπερηχοφωταύγειας.....	50
4.4.3.3 Χαρακτηριστικά και διαφορές SBSL και MBSL.....	52

4.2.3.4 Παράγοντες επιρροής.....	53
----------------------------------	----

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ

ΥΠΕΡΗΧΩΝ.....	54
5.1 Σκοπός πειραματικής έρευνας.....	54
5.2 Πειραματική διάταξη.....	54
5.2.1 Υλικά παρασκευής κολλοειδών διασπορών.....	56
5.3 Πειραματικές μετρήσεις.....	56
5.4 Πειράματα σε υδατικές κολλοειδή διασπορές με διαλυμένα σωματίδια καολινίτη	58
5.4.1 Μελέτη επίδρασης υπερήχων συνεχούς εφαρμογής σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό.....	58
5.4.1.1 Χαρακτηριστικά δείγματος.....	58
5.4.1.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα.....	59
5.4.1.3 Συμπεράσματα.....	70
5.4.2 Μελέτη επίδρασης υπερήχων συνεχούς εφαρμογής σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου, CaCl_2 (5g/L).....	71
5.4.2.1 Χαρακτηριστικά δείγματος.....	71
5.4.2.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα.....	71
5.4.2.3 Συμπεράσματα.....	79
5.4.3 Μελέτη επίδρασης υπερήχων συνεχούς εφαρμογής σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....	79
5.4.3.1 Χαρακτηριστικά δείγματος.....	79
5.4.3.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα.....	81
5.4.3.3 Συμπεράσματα.....	88
5.4.4 Μελέτη επίδρασης υπερήχων παλμικής εφαρμογής σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....	88
5.4.4.1 Χαρακτηριστικά δείγματος.....	89
5.4.4.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα.....	89

5.4.4.3 Συμπεράσματα.....	93
5.4.5 Μελέτη επίδρασης υπερήχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....	93
5.4.5.1 Χαρακτηριστικά δείγματος.....	94
5.4.5.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα.....	95
5.4.5.3 Ανάλυση της χρονικής διάρκειας ως μεταβλητού παράγοντα.....	97
5.4.5.4 Ανάλυση της συχνότητας ως μεταβλητού παράγοντα.....	98
5.4.5.5 Ανάλυση της ισχύς ως μεταβλητού παράγοντα.....	100
5.4.5.6 Συμπεράσματα.....	102
5.5 Πειράματα σε κolloειδή διασπορές με διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex.....	102
5.5.1 Χαρακτηριστικά δείγματος.....	102
5.5.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα.....	104
5.5.3 Ανάλυση της χρονικής διάρκειας ως μεταβλητού παράγοντα.....	106
5.5.4 Ανάλυση της συχνότητας ως μεταβλητού παράγοντα.....	108
5.5.5 Ανάλυση της ισχύς ως μεταβλητού παράγοντα.....	110
5.5.6 Συμπεράσματα.....	111
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	113
6.1 Σκοπός πειραματικής έρευνας.....	113
6.2 Πειραματική διάταξη.....	113
6.3 Πειραματικές μετρήσεις.....	114
6.4 Χαρακτηριστικά δείγματος.....	114
6.5 Πειραματική διαδικασία.....	115
6.5.1 Μελέτη επίδρασης ηχητικής συχνότητας και πίεσης.....	115
6.5.2 Μελέτη επίδρασης του χρόνου εφαρμογής ηχητικών κυμάτων.....	118
6.5.3 Μελέτη επίδρασης της ποσότητας κροκιδωτικού.....	119
7. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	121
7.1 Σκοπός πειραματικής έρευνας.....	121
7.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας με υπέρηχους.....	122
7.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων πειραματικής διαδικασίας με ακουστικά κύματα.....	123

7.4 Σχολιασμός – Προτάσεις.....	124
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Διαγραμματική παράσταση κολλοειδούς σωματιδίου.....	7
Εικόνα 1.2 Καμπύλη ολικής δυναμικής ενέργειας συναρτήσει της αποστάσεως μεταξύ δύο κολλοειδών.....	9
Εικόνα 1.3 Απεικόνιση δυνάμεων δίπολου – δίπολου.....	10
Εικόνα 1.4 Χαρακτηριστική μορφή κρυστάλλου καολινίτη.....	11
Εικόνα 1.5 Κρυσταλλική δομή καολινίτη.....	12
Εικόνα 1.6 Διάλυση καολινίτη στο νερό.....	13
Εικόνα 3.1 Απεικόνιση εγκάρσιου και διάμηκες κύματος.....	23
Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση ημιτονοειδούς ακουστικού κύματος.....	24
Εικόνα 3.3 Βασικά μεγέθη οδεύοντος κύματος.....	26
Εικόνα 3.4 Απεικόνιση αρμονικού συνημιτονοειδούς κύματος.....	29
Εικόνα 3.5 Διαταραχή σωματιδίου από συνδυασμό κυμάτων.....	30
Εικόνα 3.6 Στάσιμα διαμήκη κύματα σε (α) σωλήνα κλειστό στο ένα άκρο και (β) σωλήνα ανοικτό στα δύο άκρα.....	33
Εικόνα 3.7 Εμφάνιση ιδιοσυχνοτήτων σε αντιστοιχία με το μήκος σε σωλήνα (α) όταν είναι ανοικτά και τα δύο άκρα και (β) όταν το ένα άκρο είναι κλειστό.....	33
Εικόνα 4.1 Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου, πίεσης και ενέργειας διαφόρων χημικών διεργασιών.....	37
Εικόνα 4.2 Δημιουργία, ανάπτυξη και κατάρρευση μιας φυσαλίδας.....	40
Εικόνα 4.3 Απεικόνιση του φαινομένου rectified diffusion.....	41
Εικόνα 4.4 Απεικόνιση φυσαλίδας κατά το φαινόμενο της σπηλαίωσης.....	43
Εικόνα 4.5 Χαρακτηριστικές περιοχές acoustic streaming.....	47
Εικόνα 4.6 Καμπύλη φάσματος-χρόνου μίας φυσαλίδας αέρα σε έναν ακουστικό κύκλο.....	51
Εικόνα 5.1 α) MFLG – transducer E/805/T/M, β) transducer E/805/T και γ) T02 glass reactor.....	55
Εικόνα 5.2 Πειραματική διάταξη υπερήχων.....	55
Εικόνα 6.1 Πειραματική διάταξη ηχητικών κυμάτων.....	114

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 5.1 Μέγεθος σωματιδίων σε διασπορά από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό.....	95
Σχήμα 5.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 5 min.....	97
Σχήμα 5.3 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 15 min.....	98
Σχήμα 5.4 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 30 min.....	98
Σχήμα 5.5 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα συχνότητας 582 kHz.....	99
Σχήμα 5.6 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα συχνότητας 1142 kHz.....	100
Σχήμα 5.7 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα ισχύος 85 W.....	101
Σχήμα 5.8 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα ισχύος 165 W.....	101
Σχήμα 5.9 Μέγεθος σωματιδίων σε διασπορά από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm σε αποσταγμένο νερό.....	104
Σχήμα 5.10 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 5 min.....	107
Σχήμα 5.11 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 15 min.....	107
Σχήμα 5.12 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 30 min.....	108
Σχήμα 5.13 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα συχνότητας 582 kHz.....	109
Σχήμα 5.14 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα συχνότητας 1142 kHz.....	109
Σχήμα 5.15 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα ισχύος 85 W.....	110
Σχήμα 5.16 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα ισχύος 165 W.....	111

Σχήμα 5.17 Παρουσίαση όλων των πειραματικών αποτελεσμάτων σε υδατικές
διασπορές από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm112

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1	Σημαντικότερες διαφορές μεταξύ SBML και MBSL.....	52
Πίνακας 5.1	Παρουσίαση πειραμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό χωρίς προσθήκη αλκαλικότητας ή κροκιδωτικού.....	59
Πίνακας 5.2	Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό χωρίς προσθήκη αλκαλικότητας ή κροκιδωτικού.....	60
Πίνακας 5.3	Παρουσίαση πειραμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου CaCl_2 (5g/L).....	71
Πίνακας 5.4	Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου CaCl_2 (5g/L).....	72
Πίνακας 5.5	Αποτελέσματα Jar test προς εύρεση ιδανικότερης ποσότητας κροκιδωτικού.....	80
Πίνακας 5.6	Παρουσίαση πειραμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....	81
Πίνακας 5.7	Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....	82
Πίνακας 5.8	Παρουσίαση πειραμάτων παλμικής εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....	89
Πίνακας 5.9	Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων παλμικής εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....	90

- Πίνακας 5.10 Παρουσίαση πειραμάτων επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....95
- Πίνακας 5.11 Παρουσίαση αποτελεσμάτων επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....96
- Πίνακας 5.12 Παρουσίαση πειραμάτων επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....104
- Πίνακας 5.13 Παρουσίαση αποτελεσμάτων επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).....105
- Πίνακας 6.1 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων επιβολής ηχητικών κυμάτων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L) με σταθερό χρόνο εφαρμογής και σταθερή ποσότητα κροκιδωτικού στη διασπορά για διάφορες συχνότητες και πιέσεις.....116
- Πίνακας 6.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων επιβολής ηχητικών κυμάτων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L) για διάφορους χρόνους εφαρμογής σε σταθερή συχνότητα και πίεση και με σταθερή ποσότητα κροκιδωτικού.....118
- Πίνακας 6.3 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων επιβολής ηχητικών κυμάτων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L) για

διάφορες ποσότητες κροκιδωτικού σε σταθερή συχνότητα και πίεση και με σταθερό χρόνο εφαρμογής κυμάτων.....	120
---	-----

1. ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΟΡΟ ΚΟΛΛΟΕΙΔΕΣ

Ο όρος κολλοειδές χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από το Σκοτσέζο χημικό Thomas Graham το 1860, όταν ανακάλυψε ότι συγκεκριμένες ουσίες, όπως η κόλλα και η ζελατίνη, μπορούν να διαχωριστούν από κάποιες άλλες, όπως το αλάτι ή η ζάχαρη, μέσω της διεργασίας της διαπίδυσης. Με τον όρο κολλοειδές (colloid) χαρακτήρισε τις ουσίες που δε διαχέονταν μέσω ημιπερατής μεμβράνης, ενώ με τον όρο κρυσταλλοειδές (crystalloid) τις ουσίες που διαχέονταν και ουσιαστικά βρίσκονταν σε πλήρη διάλυση.

Η ακριβής ετυμολογία της λέξης είναι κόλλα + είδος, δηλαδή αυτό που μοιάζει με κόλλα. Ο συγκεκριμένος όρος όταν χρησιμοποιήθηκε από τον Graham ήταν κατάλληλος για να περιγράψει τα συστήματα τα οποία μελετούσε, (διαλύματα κόλλας), όμως για τα συστήματα που μελετώνται σήμερα θεωρείται πλέον ετυμολογικά ακατάλληλος.

1.2 ΚΟΛΛΟΕΙΔΕΣ ΚΑΙ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα κολλοειδή είναι πολύ μικρά σωματίδια ύλης με κύριο χαρακτηριστικό τους το μέγεθος, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος ενός μορίου, αλλά τόσο μικρό ώστε να είναι αόρατα στο γυμνό μάτι ή ακόμη και στο απλό οπτικό μικροσκόπιο. Σύμφωνα με μελέτες το μέγεθος ενός κολλοειδούς κυμαίνεται μεταξύ του 1nm (10^{-9} m) και 1 μ m (10^{-6} m) (Χρυσικόπουλος, 2005). Ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι η ηλεκτρική φόρτιση, καθώς έχει διαπιστωθεί ότι στη φύση συναντώνται συνήθως με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Αποτελεί πάντως γεγονός ότι πλέον στην επιστημονική κοινότητα με τη χρήση του όρου κολλοειδές γίνεται λόγος όχι για τα μικρά αυτά σωματίδια της ύλης, αλλά για τα κολλοειδή συστήματα.

Τα κολλοειδή συστήματα, ή η κολλοειδής διασπορά (colloidal dispersion) όπως αλλιώς συχνά αναφέρονται, είναι ένα είδος ομογενούς μείγματος. Ένα κολλοειδές σύστημα αποτελείται από δύο διαφορετικές φάσεις, τη διασπαρμένη ή ασυνεχή φάση (dispersed phase) και τη συνεχή φάση ή αλλιώς μέσο διασποράς (continuous phase).

Σε ένα κολλοειδές σύστημα η διασπαρμένη φάση βρίσκεται σε κατάσταση λεπτού διαμερισμού και είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο μέσο διασποράς. Οι δύο αυτές φάσεις είναι δυνατόν να βρίσκονται σε οποιαδήποτε μορφή της ύλης (στερεή, υγρή, αέρια), χωρίς η μορφή της μίας να επηρεάζει την άλλη.

Για να χαρακτηριστεί ένα μείγμα ως κολλοειδές δεν είναι απαραίτητο και οι τρεις διαστάσεις να είναι κάτω του ενός μικρού ($1 \mu\text{m}$), καθώς η κολλοειδής συμπεριφορά παρατηρείται και σε συστήματα που περιέχουν διασπαρμένες ίνες (δύο μόνο διαστάσεις μικρότερες του $1 \mu\text{m}$) ή σε λεπτά υμένα και αργίλους (μία μόνο κολλοειδής διάσταση) (Παναγιώτου, 1998). Οι ιδιότητες κολλοειδούς χαρακτήρα εμφανίζονται όταν οι διαστάσεις της διασπαρμένης φάσης είναι μεταξύ 1 και 1000 nm , δηλαδή, μεταξύ 10 \AA (Armstrong) και $1 \mu\text{m}$, χωρίς αυτά τα όρια να είναι απόλυτα, δεδομένου ότι σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις (π.χ. γαλακτώματα) τα διασπαρμένα σωματίδια είναι μεγαλύτερων διαστάσεων. Τέλος σημειώνεται ότι όταν οι διαστάσεις της διασπαρμένης φάσης είναι μικρότερες του 1 nm η κολλοειδής συμπεριφορά ταυτίζεται με εκείνη των μοριακών διαλυμάτων.

1.3 ΛΥΟΦΟΒΑ ΚΑΙ ΛΥΟΦΙΛΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ

Τα κολλοειδή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες βάση της ευκολίας με την οποία εγκαταλείπουν την κολλοειδή κατάσταση, στα λυόφιλα, τα οποία την εγκαταλείπουν δύσκολα και στα λυόφοβα, τα οποία την εγκαταλείπουν εύκολα. Ειδικότερα λυόφιλα ονομάζονται τα κολλοειδή των οποίων τα μικκύλια συγκροτούν τα μόρια αυτών έναντι του μέσου διασποράς, γεγονός που τα καθιστά πολύ σταθερά και δεν κατακρημνίζονται εύκολα, ενώ λυόφοβα ονομάζονται τα κολλοειδή των οποίων τα μικκύλια δεν συγκροτούν τα μόρια αυτών έναντι του μέσου διασποράς με αποτέλεσμα να κατακρημνίζονται εύκολα. Αναφέρεται ότι με τον όρο μικκύλια χαρακτηρίζονται οι πολύ μικρές ενότητες από τις οποίες αποτελούνται τα κολλοειδή σωματίδια. Όταν το υγρό μέσο διασποράς είναι το νερό, τότε τα κολλοειδή χαρακτηρίζονται ως υδρόφοβα και υδρόφιλα αντίστοιχα.

Με τον όρο λυόφοβα κολλοειδή συστήματα περιγράφονται οι διασπορές υγρών ή στερεών σωματιδίων σε υγρά μέσα, οι οποίες παράγονται με μηχανική ή χημική διεργασία. Στις διασπορές αυτές η διασπαρμένη φάση και το μέσο διασποράς είναι δύο σαφώς διαφορετικές φάσεις, καθώς η διασπαρμένη φάση αποτελείται ουσιαστικά από άπειρες μικροφάσεις. Η διάκριση αυτή των φάσεων συνεπάγεται την παρουσία

διαφασικής περιοχής, ή διεπιφανειών, στις συγκεκριμένες διασπορές, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι τα λυόφοβα κολλοειδή είναι μικροετερογενή συστήματα.

Τα λυόφιλα κολλοειδή αντιθέτως αποτελούν μία ομογενή φάση χωρίς διακριτή διαφασική περιοχή. Με το συγκεκριμένο όρο περιγράφονται γενικώς τα διαλύματα μακρομορίων, στα οποία υπάρχει συνήθως ένα λυόφιλο σύστημα ή ένα λυόφιλο κολλοειδές. Στις διασπορές αυτές τα διαλυμένα μακρομόρια επηρεάζουν δραματικά τις ιδιότητες του μέσου διασποράς, δεδομένου ότι το ομογενές διάλυμα έχει νέες ιδιότητες, οι οποίες είναι γενικά ένας συγκερασμός των ιδιοτήτων του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι θερμοφυσικές ιδιότητες των λυόφιλων κολλοειδών, όπως το ιξώδες ή η επιφανειακή τάση, να είναι σημαντικά διαφορετικές από τις αντίστοιχες ιδιότητες του μέσου διασποράς, ενώ αντίθετα στα λυόφοβα κολλοειδή οι θερμοφασικές ιδιότητες του μέσου διασποράς γενικά δε μεταβάλλονται σημαντικά με την προσθήκη της διασπαρμένης φάσης (Σκουλικίδης, 1964).

1.4 ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

Οι κινητικές ιδιότητες των κολλοειδών σωματιδίων έχουν κυρίως μελετηθεί σε υγρά μέσα διασποράς, με τη θερμική κίνηση, τη κίνηση υπό την επίδραση πεδίων βαρύτητας και τη κίνηση υπό την επίδραση εξωτερικών διατμητικών τάσεων, να αποτελούν τις πιο σημαντικές από αυτές. Σημαντική επίσης είναι η κίνηση των κολλοειδών υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, αλλά αυτή ανήκει στις ηλεκτροκινητικές ιδιότητες των κολλοειδών.

Η θερμική κίνηση γίνεται αντιληπτή, στην μεν μικροσκοπική κλίμακα, με τη μορφή της κίνησης Brown, στη δε μακροσκοπική, με τη μορφή της ώσμωσης και της διάχυσης. Τέλος η βαρύτητα παρέχει την κινούσα δύναμη για την κατακρήμνιση ή καταβύθιση (sedimentation) και την ανάδυση ή κορυφή (creaming) των κολλοειδών. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή των κινητικών ιδιοτήτων των κολλοειδών.

1.4.1 Κίνηση Brown

Σύμφωνα με τη μοριακή κινητική θεωρία, η κίνηση Brown οφείλεται στις τυχαίες συγκρούσεις των μορίων του μέσου διασποράς με το κολλοειδές σωματίδιο.

Οι κατευθύνσεις των κινήσεων των μορίων του μέσου περί το σωματίδιο είναι τυχαία προσανατολισμένες, ενώ οι ταχύτητές τους κατανέμονται σύμφωνα με το νόμο Maxwell-Boltzman. Η δύναμη, η οποία ασκείται πάνω στην επιφάνεια του κολλοειδούς σωματιδίου είναι ανάλογη τόσο της συχνότητας των συγκρούσεων όσο και της ταχύτητας των συγκρουόμενων μορίων του μέσου. Η συχνότητα των συγκρούσεων είναι προφανώς ανάλογη της πυκνότητας του μέσου σε μία περιοχή περί το σωματίδιο πάχους ίσου με τη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του μέσου. Επειδή η τοπική πυκνότητα ενός υγρού διαρκώς μεταβάλλεται, όπως άλλωστε και η μοριακή ταχύτητα, η ασκούμενη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας του σωματιδίου θα μεταβάλλεται, επίσης, διαρκώς. Την κάθε χρονική στιγμή θα υπάρχει μία καθαρή συνισταμένη δύναμη στο σωματίδιο οφειλόμενη στη μη εξισορρόπηση των δυνάμεων στα διάφορα μέρη της επιφανείας του σωματιδίου

Όταν το κολλοειδές σωματίδιο είναι σφαιρικό, η κίνηση Brown είναι μία απλή μεταφορική κίνηση οδηγώντας σε απλή διάχυση του κολλοειδούς. Όταν το σωματίδιο είναι μη σφαιρικό, τότε, εκτός από την μεταφορική κίνηση, έχουμε και περιστροφική κίνηση Brown.

1.4.2 Καταβύθιση κολλοειδών

Αν υποθεθεί ότι ένα σωματίδιο όγκου V και πυκνότητας ρ_2 βρίσκεται μέσα σε ένα υγρό πυκνότητας ρ_1 , τότε πάνω στο σωματίδιο ασκείται μία δύναμη F_g λόγω της βαρύτητας και ταυτόχρονα μία αντίθετη δύναμη F_b λόγω της άνωσης. Το σωματίδιο επιταχύνεται υπό την επίδραση της συνισταμένης των δύο δυνάμεων:

$$F = F_g - F_b = V(\rho_2 - \rho_1)g,$$

όπου g η επιτάχυνση βαρύτητας

Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι το σωματίδιο θα κινηθεί προς την διεύθυνση της F_g (κατακρήμνιση) αν $\rho_2 > \rho_1$ ενώ θα κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση της δύναμης άνωσης (κρέμωση) αν $\rho_2 < \rho_1$. Καθώς αυξάνει η ταχύτητα του σωματιδίου, η ιξώδης δύναμη (ή δύναμη τριβής), F_v , που αντιτίθεται στην κίνησή του, αυξάνει, επίσης, έως ότου γίνει ίση και αντίθετη με την F . Υπό τις συνθήκες αυτές το σωματίδιο κινείται ισοταχώς με οριακή ταχύτητα v . Σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, η ιξώδης δύναμη είναι ίση και αντίθετη με την F , έχοντας:

$$V(\rho_2 - \rho_1)g = m(1 - \rho_1/\rho_2)g = F_v,$$

όπου $m (= \rho_2 V)$ είναι η μάζα του σωματιδίου.

Η μέθοδος της καταβύθισης λόγω βαρύτητας έχει ένα πρακτικό κατώτερο όριο μεγέθους σωματιδίου, περίπου 1 μm . Κολλοειδή σωματίδια μικρότερα από το όριο αυτό κατακάθονται υπό την επίδραση του πεδίου βαρύτητας, τόσο αργά, ώστε η δράση της καταβύθισης να παραμορφώνεται από την τάση προς ανάμειξη λόγω διάχυσης και συναγωγής.

1.4.3 Διάχυση κολλοειδών

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής επιβάλλει ομοιόμορφη κατανομή (τυχαία κατανομή) των μορίων μίας φάσης σε ισορροπία, όταν απουσιάζουν εξωτερικά πεδία δυνάμεων. Αν για κάποιο λόγο υπάρξει μία μη ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στην φάση, τότε στα σωματίδια θα ασκηθεί μία δύναμη, η οποία θα τείνει να τα διασπείρει ομοιόμορφα. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται από το δεύτερο νόμο του Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Παραθέτοντας ορισμένες τυπικές τιμές του συντελεστή διάχυσης αναφέρεται ότι για συνήθη υγρά μικρού μοριακού βάρους ο συντελεστής αυτοδιάχυσης είναι της τάξης των $10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, ενώ για τις κολλοειδείς ουσίες ο συντελεστής διάχυσης είναι της τάξης των $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

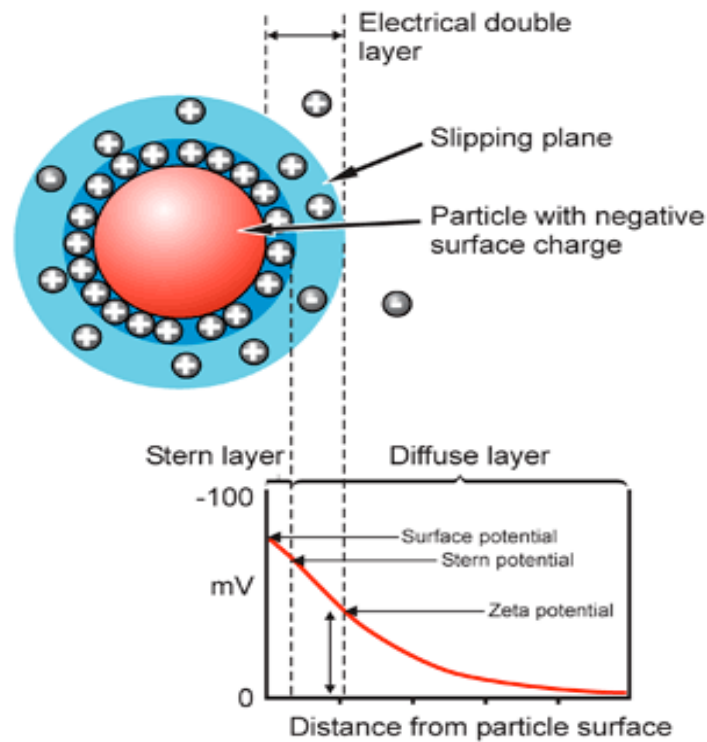
1.5 ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

Οι δυνάμεις ηλεκτροστατικού τύπου είναι εκείνες που επενεργούν και διασφαλίζουν τη σταθερότητα των κολλοειδών αιωρημάτων. Τα πιο πολλά μικκύλια των κολλοειδών είναι ηλεκτρικά φορτισμένα. Το πρόσημο και η τιμή του ηλεκτρικού φορτίου ενός μικκυλίου εξαρτάται από τα διάφορα χαρακτηριστικά του. Τα μικκύλια τα οποία αντιστοιχούν σε μεταλλικά οξείδια είναι συνήθως θετικά φορτισμένα ενώ

εκείνα που αντιστοιχούν σε μη μεταλλικά οξείδια και σε σουλφίδια είναι συνήθως αρνητικά φορτισμένα. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι ότι μικκύλια με ετερόνυμα φορτία έλκονται και αλληλοεξουδετερώνονται ενώ μικκύλια με ομώνυμα φορτία απωθούνται. Έτσι λοιπόν μετά την αλληλεξουδετέρωση των μικκυλίων αντιθέτου φορτίου εξακολουθούν να παραμένουν στο κολλοειδές σύστημα μικκύλια που είναι φορτισμένα με εκείνο το φορτίο που βρίσκεται σε περίσσεια. Τα μικκύλια αυτά είναι ομώνυμου φορτίου και απωθούνται μεταξύ τους και έτσι το κολλοειδές σύστημα εμφανίζεται σταθερό. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση των κολλοειδών συστημάτων που αντιστοιχούν σε φυσικά υδατικά αποθέματα έχει παρατηρηθεί ότι τα μικκύλια είναι πάντα αρνητικά φορτισμένα.

Η αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια του κολλοειδούς σωματιδίου έλκει αντιόντα (θετικά ιόντα) και σχηματίζεται ένα στρώμα από θετικά ιόντα που είναι γνωστό ως στρώμα Stern. Από την περιοχή του στρώματος Stern έλκονται μόρια νερού (στα υδρόφιλα κολλοειδή) λόγω της ασύμμετρης κατανομής των ηλεκτρικών φορτίων στο μόριο του νερού. Ένα δεύτερο στρώμα από ιόντα που είναι γνωστό ως διάχυτο στρώμα περιβάλλει επίσης το κολλοειδές σωματίδιο. Το διάχυτο στρώμα θεωρείται ότι αποτελείται από ένα εσωτερικό μέρος και ένα εξωτερικό μέρος που έχουν όριο την επιφάνεια διάσπασης. Μέχρι την επιφάνεια διάσπασης τα μόρια του νερού που υφίστανται τις επιδράσεις του ηλεκτρικού πεδίου του κολλοειδούς σωματιδίου συμπαρασύρονται και ακολουθούν την πορεία του σωματιδίου ενώ τα μόρια του νερού που βρίσκονται πέραν από την επιφάνεια διάσπασης είναι ασθενέστερα συνδεδεμένα με το κολλοειδές σωματίδιο και δεν είναι δυνατόν να συμπαρασυρθούν από αυτό καθώς κινείται. Το ηλεκτρικό δυναμικό στην επιφάνεια διάσπασης ονομάζεται και δυναμικό Ζήτα. Στην επιφάνεια διάσπασης υπάρχει ένα καθαρό αρνητικό φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί το ηλεκτρικό δυναμικό στην επιφάνεια αυτή. Επειδή τα εξωτερικά όρια του κολλοειδούς σωματιδίου είναι στην επιφάνεια διάσπασης, το φορτίο της επιφάνειας διάσπασης και το αντίστοιχο δυναμικό είναι εκείνα τα μεγέθη που επηρεάζουν την ηλεκτροκινητική συμπεριφορά του σωματιδίου. Τα δύο στρώματα που περιβάλλουν το κολλοειδές (στρώμα Stern και διάχυτο στρώμα) ονομάζονται συχνά διπλό στρώμα (Τσώνης, 2003).

Η επιφάνεια διάσπασης βρίσκεται εντός του διάχυτου στρώματος και αρκετοί ερευνητές την τοποθετούν στην αρχή του διάχυτου στρώματος ή στα εξωτερικά όρια του σταθερά προσδεδεμένου στρώματος αντιόντων (στρώμα Stern).



Εικόνα 1.1 Διαγραμματική παράσταση κολλοειδούς σωματιδίου

1.5.1 Ηλεκτρική διπλοστοιβάδα

Ουσιαστικά αυτά που μόλις προαναφέρθηκαν αποτελούν μια λεπτομερή αναφορά στο φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας, η κατανόηση του οποίου είναι ιδιαίτερος σημαντική στην επιστήμη των κολλοειδών. Γενικότερα μπορεί να ειπωθεί ότι η προσρόφηση διπολικών μορίων δεν οδηγεί στην εμφάνιση ενός καθαρού επιφανειακού φορτίου αλλά η παρουσία ενός στρώματος προσανατολισμένων διπόλων στην επιφάνεια μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά στη φύση της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας.

Οι ιοντικές ουσίες μπορούν να αποκτήσουν επιφανειακό φορτίο λόγω της άνισης διάλυσης των αντίθετα φορτισμένων ιόντων, από τα οποία αποτελούνται. Η παρουσία του επιφανειακού αυτού φορτίου επηρεάζει την κατανομή των γειτονικών ιόντων στο πολικό μέσο, καθώς ιόντα αντίθετου φορτίου (counter-ions) έλκονται προς την επιφάνεια, ενώ ιόντα όμοιου φορτίου (co-ions) ωθούνται μακριά από την επιφάνεια.

Το παραπάνω φαινόμενο, σε συνδυασμό με την τάση προς ανάμειξη λόγω θερμικής κίνησης στο διάλυμα, οδηγεί στην εμφάνιση μιας ηλεκτρικής

διπλοστοιβάδας, η οποία συνίσταται από τη φορτισμένη επιφάνεια και μία εξουδετερωτική περίσσεια ιόντων αντιθέτου φορτίου (σε σχέση με τα ιόντα όμοιου φορτίου) κατανεμημένων με έναν διάχυτο τρόπο στο πολικό μέσο. Η θεωρία της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας ασχολείται με αυτή την κατανομή των ιόντων και, κατά συνέπεια, με τα μεγέθη των ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία αναπτύσσονται στην περιοχή της φορτισμένης επιφάνειας.

Κλείνοντας μπορεί να θεωρηθεί, γενικά, ότι η ηλεκτρική διπλοστοιβάδα αποτελείται από δύο περιοχές, μία εσωτερική περιοχή, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει προσροφημένα ιόντα και μία εξωτερική διάχυτη περιοχή, στην οποία τα ιόντα κατανέμονται υπό την επίδραση των ηλεκτροστατικών δυνάμεων και της θερμικής κίνησης (Παναγιώτου, 1998).

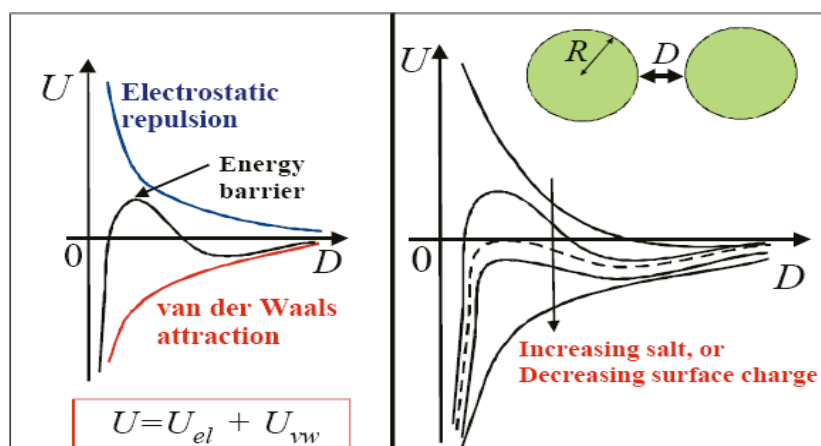
1.6 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

Στα κολλοειδή σωματίδια οι κυριότερες δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι οι ελκτικές δυνάμεις van der Waals, οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ ομώνυμων φορτισμένων μικυλίων καθώς και η έλξη των σωματιδίων από το διαλύτη. Επίσης παρουσιάζονται και οι στερικές δυνάμεις, οι οποίες είναι απωστικές καθώς και δυνάμεις εντροπίας (ταλαντωτικής φύσης) οι οποίες οφείλονται στη θερμική κίνηση Brown που παρουσιάζεται σε ένα ρευστό μέσο διασποράς. Οι δυνάμεις λόγω βαρύτητας θεωρούνται αμελητέες εξαιτίας της πολύ μικρής μάζας των κολλοειδών. Γενικότερα οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των κολλοειδών κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις δυνάμεις DLVO (DLVO forces) και στις “non – DLVO” δυνάμεις (non DLVO forces).

1.6.1 Θεωρία DLVO

Η ποσοτική περιγραφή της σταθερότητας και της συσσωμάτωσης των κολλοειδών γίνεται βάση της κλασικής θεωρίας DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey και Overbeek). Η θεωρία DLVO αποτελεί μία ποσοτική θεωρία για τη σταθερότητα κολλοειδών και στηρίζεται στη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας που παρουσιάζεται καθώς δύο κολλοειδή σωματίδια προσεγγίζουν μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη μεταβολή οφείλεται στην ηλεκτροστατική άπωση (electrostatic repulsion) λόγω της επικάλυψης των διάχυτων διπλοστοιβάδων και στη

διασωματιδιακή έλξη λόγω των διαμοριακών δυνάμεων van der Waals. Η θεωρία DLVO εξετάζει την σταθερότητα των κolloειδών με βάση την καμπύλη της ολικής αυτής δυναμικής ενέργειας με την απόσταση μεταξύ των κolloειδών. Η αντίσταση των κolloειδών στη συσσωμάτωση εξαρτάται από το ύψος ενός ενεργειακού φραγμού (energy barrier). Αν η κινητική ενέργεια των κolloειδών είναι ικανή να ξεπεραστεί ο ενεργειακός φραγμός και να ελαττωθεί η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων, τότε είναι δυνατή η συσσωμάτωση των κolloειδών (Rhonda Lee, 2005).



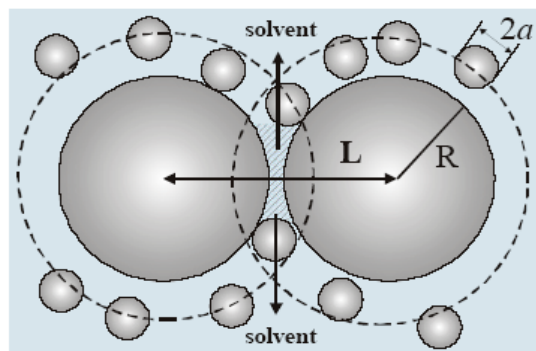
Εικόνα 1.2 Καμπύλη ολικής δυναμικής ενέργειας συναρτήσει της αποστάσεως μεταξύ δύο κolloειδών.

1.6.2 Δυνάμεις non – DLVO

Η θεωρία DLVO είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επιστήμη των κolloειδών σωματιδίων, παρόλα αυτά υπάρχουν κolloειδείς διασπορές η σταθερότητα των οποίων δεν μπορεί να εξηγηθεί αποκλειστικά βάση των DLVO δυνάμεων. Το κενό αυτό το καλύπτουν οι δυνάμεις non – DLVO οι οποίες έχουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες από τις δυνάμεις van der Waals και από τις ηλεκτροστατικές απώσεις και είναι εξίσου σημαντικές στην κατανόηση των ιδιοτήτων των κolloειδών. Ως δυνάμεις non – DLVO χαρακτηρίζονται οι δομικές ταλαντωτικές δυνάμεις μεταξύ των κolloειδών, οι στερικές δυνάμεις και οι δυνάμεις (ελκτικές ή απωστικές) που οφείλονται στην αλληλεπίδραση των κolloειδών με το διαλύτη.

Οι δομικές δυνάμεις (colloidal structural forces) σταθεροποιούν διασπορές μεγάλων σε μέγεθος σωματιδίων όταν η συγκέντρωση των μικρών σε μέγεθος

σωματιδίων στη διασπορά είναι σχετικά υψηλή (5 % – 10%). Αντίθετα λειτουργούν αποσταθεροποιητικά σε διασπορές μεγάλων σε μέγεθος σωματιδίων όταν η συγκέντρωση των μικρών σε μέγεθος σωματιδίων στη διασπορά είναι χαμηλή. Η οριακή περίπτωση των συγκεκριμένων δυνάμεων είναι η περίπτωση δυνάμεων δίπολου – δίπολου (depletion attraction), όπου τα μικρά σωματίδια δεν μπορούν να διεισδύσουν στο κενό μεταξύ των δύο επιφανειών των μεγάλων κολλοειδών σωματιδίων προκαλώντας με τον τρόπο αυτό ένα πεδίο αρνητικής οσμωτικής πίεσης, το οποίο δεν επιτρέπει τη ροή δαυλίτη και οδηγεί σε έλξη μεταξύ των δύο μεγάλων επιφανειών. Η περίπτωση δυνάμεων δίπολου – δίπολου εμφανίζεται όταν η συγκέντρωση των μικρών σωματιδίων είναι ιδιαίτερα χαμηλή σε διασπορές μεγάλων κολλοειδών (ουσιαστικά αποτελεί εκφυλισμό των δομικών δυνάμεων) και μπορεί να αποσταθεροποιήσει τη διασπορά (Παναγιώτου, 1998).



Εικόνα1.3 Απεικόνιση δυνάμεων δίπολου – δίπολου.

Οι στερικές δυνάμεις προσρόφησης προκύπτουν όταν προσροφημένα στρώματα μεταξύ των μακρομορίων διεισδύουν το ένα μέσα στο άλλο δίνοντας μια αύξηση της τοπικής συγκέντρωσης των δομικών μονάδων των πολυμερών. Αυτή η αλληλοδιείσδυση μπορεί να οδηγεί είτε σε διασωματιδιακή άπωση ή έλξη με έναν οσμωτικό μηχανισμό, ανάλογα της ισορροπίας των αλληλεπιδράσεων πολυμερούς – πολυμερούς και πολυμερούς – μέσου διασποράς. Όταν η αλληλεπίδραση αυτή είναι εκτεταμένη οδηγεί σε μια ελαστική άπωση η οποία σταθεροποιεί την κολλοειδή διασπορά. Οι συνθήκες στερικής σταθεροποίησης είναι ίδιες με τις συνθήκες σταθεροποίησης των διαλυμάτων πολυμερών, οπότε έχοντας ως μέσο διασποράς έναν καλό διαλύτη, η αλληλοδιείσδυση για τα λυόφιλα τμήματα του προσροφημένου πολυμερούς δεν ευνοείται και προκύπτει μια διασωματιδιακή άπωση, ενώ έχοντας

έναν κακό διαλύτη ως μέσο διασποράς η αλληλοδιείσδυση ευνοείται με αποτέλεσμα τη διασωματιδιακή έλξη (Παναγιώτου, 1998).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της στερικής σταθεροποίησης (non – DLVO forces) και της ηλεκτροστατικής σταθεροποίησης (DLVO forces).

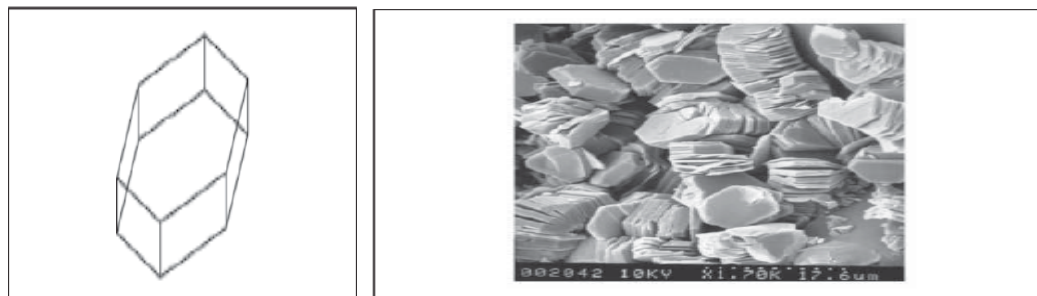
1.7 ΑΡΓΙΛΟΙ (CLAYS)

Γενικά ως αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζονται τα φυλλοπυριτικά ορυκτά με μέγεθος κόκκων μικρότερο των 2 μm . Οι άργιλοι είναι υλικά κolloειδούς και κρυσταλλικής φύσεως και συνιστούν το ενεργό μεταλλικό μέρος του εδάφους. Οι περισσότεροι άργιλοι είναι κρυσταλλικοί και έχουν μια καθορισμένη και επαναλαμβανόμενη διάταξη που αποτελείται από άτομα πυριτίου και αργιλίου συγκρατούμενα από στρωματικά επίπεδα ατόμων οξυγόνου.

Οι πιο κοινές άργιλοι είναι ο καολινίτης (kaolinite), ο ιλλίτης (illite) και ο μονμοριλλονίτης (monmorillonite).

1.7.1 Καολινίτης

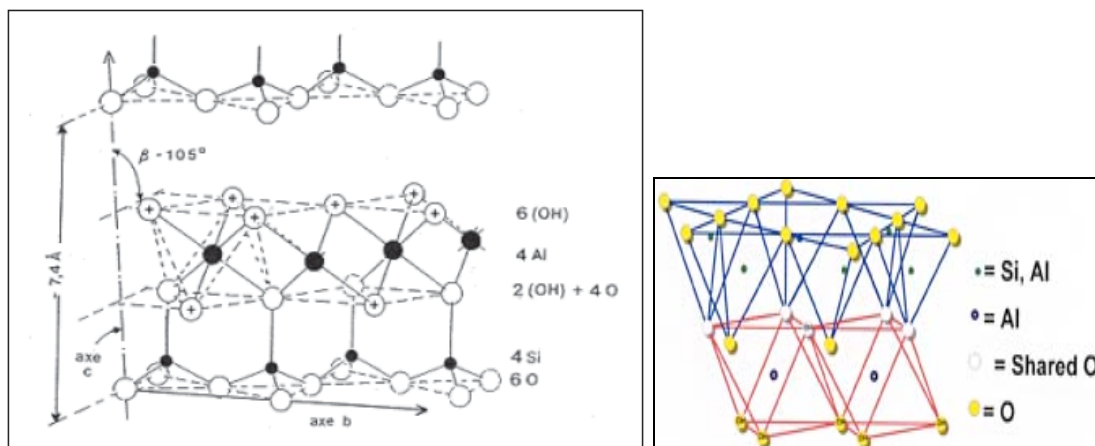
Ο καολινίτης είναι ένα λευκό, ένυδρο και πολύ μαλακό αργιλοπυριτικό ορυκτό με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Είναι προϊόν εξαλλοίωσης των αστρίων και άλλων πυριτικών ορυκτών των εκρηξιγενών πετρωμάτων. Έχει σταθερή χημική δομή και συναντάται σε εξαιρετικά μικρούς, εξαγωνικού σχήματος, και πεπλατυσμένους κρυστάλλους. Αποτελεί το βασικό συστατικό του καολίνης, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στην κεραμοποιία.



Εικόνα1.4 Χαρακτηριστική μορφή κρυστάλλου καολινίτη

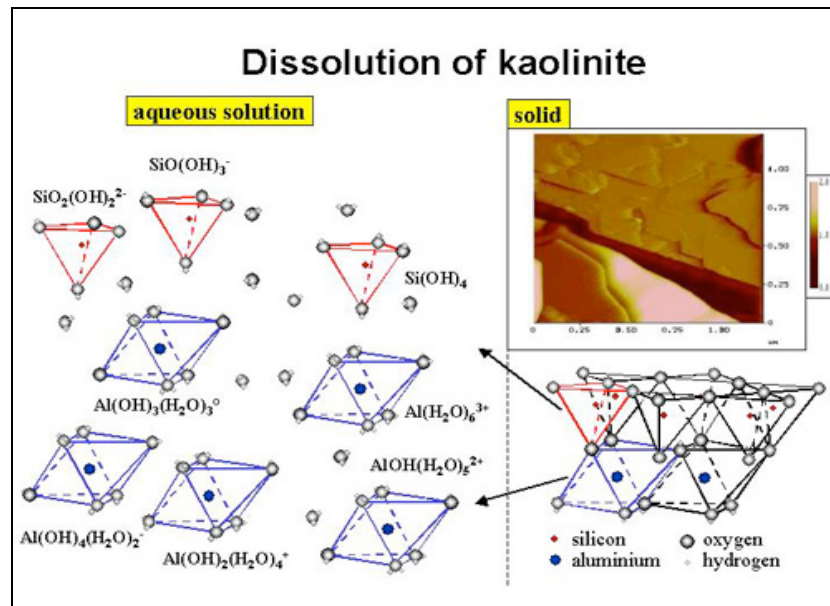
1.7.1.1 Δομή του καολινίτη

Ο θεωρητικός χημικός τύπος του καολινίτη είναι $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ και περιέχει κατά μέσο όρο 29,5% Al_2O_3 , 46,5% SiO_2 και 14% κρυσταλλικό νερό. Αποτελείται βασικά από επαναλαμβανόμενες στρώσεις ενός τετραεδρικού και ενός οκταεδρικού φύλλου (ορυκτό δομής 1:1). Τα δύο φύλλα συνδέονται έτσι ώστε οι κορυφές του τετραεδρικού φύλλου να βρίσκονται σε ένα επίπεδο με τα (OH) του οκταεδρικού φύλλου. Η βασική απόσταση είναι 0.72nm. Ο κρύσταλλος του καολινίτη αποτελείται από πολλές στρώσεις, που συγκρατούνται μεταξύ τους με δεσμούς υδρογόνου μεταξύ των υδροξυλίων του οκταεδρικού φύλλου και των οξυγόνων του τετραεδρικού φύλλου. Ο δεσμός αυτός που είναι σχετικά ισχυρός, σε σχέση με τις δυνάμεις van der Waals, εμποδίζει την προσρόφηση νερού στο διαστρωματικό χώρο και επιτρέπει στα στρώματα να στοιβάζονται και να δημιουργούν ένα σχετικά μεγάλο κρύσταλλο. Ένας τυπικός κρύσταλλος καολινίτη μπορεί να έχει πάχος 70 έως 100 στρωμάτων.



Εικόνα 1.5 Κρυσταλλική δομή καολινίτη

Τέλος όσον αφορά τις διασπορές διαλυμένων σωματιδίων καολινίτη σε νερό αναφέρεται ότι η επιφανειακή φόρτιση που παρατηρείται στα σωματίδια είναι πάντα αρνητική, με το δυναμικό ζήτα του καολινίτη να κυμαίνεται μεταξύ από -25 έως -40 mV.



Εικόνα 1.6 Διάλυση καολινίτη στο νερό

1.7.1.2 Ιδιότητες καολινίτη

Ορισμένες από τις σημαντικότερες ιδιότητες του καολινίτη είναι οι ακόλουθες:

- Απορρόφηση νερού. Τα σωματίδια καολινίτη απορροφούν νερό και μπορούν εύκολα να διογκωθούν και να μεταβληθεί η συνεκτικότητά τους.
- Διασπορά και θρόμβωση. Είναι δυνατό αιώρημα καολινίτη, με την προσθήκη κάποιων ηλεκτρολυτών, να διατηρηθεί σε διασπορά ή και να αποχωρισθεί από το νερό δια της θρομβώσεως.
- Πλαστικότητα. Κατά την επαφή με το νερό τα σωματίδια καολινίτη περιβάλλονται με ένα λεπτό υμένα με νερό, με συνέπεια οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των σωματιδίων να εξασθενούν και έτσι το μίγμα αργίλου – νερού να γίνεται πλαστικό
- Υδατοπερατότητα. Τα συσσωματώματα των σωματιδίων καολινίτη απορροφούν μεν νερό αλλά είναι μη υδατοπερατά.

2. ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ – ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ – ΘΡΟΜΒΩΣΗ

2.1 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΝΕΡΟΥ

Το νερό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αγαθά στη φύση καθώς σχετίζεται με οποιαδήποτε μορφή ζωής και παρά το γεγονός ότι αποτελεί ανανεώσιμο φυσικό πόρο είναι απαραίτητο να γίνεται η όσο το δυνατόν ηπιότερη χρήση, εξασφαλίζοντας την ελάχιστη επιβάρυνση του. Παρόλα αυτά ο άνθρωπος, παράλληλα με την πρόοδο και την τεχνολογική ανάπτυξη δεν έδωσε την απαραίτητη προσοχή στο συγκεκριμένο αγαθό, με αποτέλεσμα σήμερα μεγάλο μέρος από τις ποσότητες φυσικού νερού να είναι ακατάλληλο για τον ίδιο.

Έγινε λοιπόν απαραίτητο με την πάροδο του χρόνου η ανάπτυξη μιας επιστήμης η οποία θα είχε ως σκοπό την μετατροπή του χρησιμοποιημένου νερού από τον άνθρωπο σε μορφή κατάλληλη για επιστροφή του στη φύση ή επαναχρησιμοποίηση. Η επιστήμη αυτή ονομάστηκε επιστήμη του καθαρισμού του νερού (water treatment). Ο καθαρισμός του νερού είναι μια περιβαλλοντολογική, οικολογική και φυσική επιστήμη σε συνδυασμό με εφαρμοσμένη μηχανική και μηχανολογία και περιλαμβάνει μηχανικές, φυσικές, βιολογικές και χημικές διεργασίες. Ορισμένες από τις σημαντικότερες διεργασίες του καθαρισμού του νερού είναι οι διεργασίες της συσσωμάτωσης, της κροκίδωσης και της θρόμβωσης.

2.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

Οι όροι συσσωμάτωση, κροκίδωση και θρόμβωση συχνά χρησιμοποιούνται με ταυτόσημη έννοια, γεγονός το οποίο αποτελεί σφάλμα. Πρέπει να αναφερθεί ότι και με τρεις αυτούς όρους (συσσωμάτωση, κροκίδωση και θρόμβωση) περιγράφονται καταστάσεις σταθερότητας της κολλοειδούς διασποράς, οι οποίες όμως έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για να γίνει αντιληπτή η διαφορετικότητα αυτών των διεργασιών παρακάτω παρατίθενται οι περιληπτικοί ορισμοί αυτών.

Το γενικό φαινόμενο της συσσωμάτωσης χωρίς καμία διαφοροποίηση ως προς τα αίτια και το μηχανισμό αποδίδεται με τον όρο συσσωμάτωση (aggregation). Η περισσότερο σταθερή κατάσταση συσσωμάτωσης αποδίδεται με τον όρο κροκίδωση (coagulation). Η κροκίδωση είναι στην ουσία μία διεργασία μη αντιστρεπτής

συσσωμάτωσης. Η κατάσταση συσσωμάτωσης που προκύπτει από ένα μηχανισμό γεφύρωσης λόγω προσροφημένων πολυμερών, αποδίδεται με τον όρο θρόμβωση (flocculation). Πρόκειται για μια διεργασία ουσιαστικά αντιστρεπτής συσσωμάτωσης. Η αντιστρεπτότητα της διεργασίας θα είναι το κριτήριο για την ονομασία της συσσωμάτωσης ως κροκίδωσης ή θρόμβωσης (Παναγιώτου, 1998).

2.2.1 Συσσωμάτωση

Η συσσωμάτωση των κολλοειδών μπορεί να προέλθει από την επαφή των σωματιδίων είτε λόγω της θερμικής κίνησης Brown, είτε κατά τη διάρκεια της ανάδευσης, είτε κατά τη διάρκεια της καθίζησης. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες, η περικινητική και η ορθοκινητική συσσωμάτωση.

Περικινητική ονομάζεται η συσσωμάτωση που οφείλεται στη θερμική κίνηση Brown, η οποία είναι γνωστή και με τον όρο αυθόρμητη κροκίδωση. Γίνεται βραδύτατα με τη πάροδο του χρόνου και είναι αισθητή μόνο στα πολύ μικρά αιωρούμενα στερεά. Αυτό το είδος συσσωμάτωσης έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα κολλοειδή λόγω του ομώνυμου ηλεκτρικού φορτίου απωθούνται οπότε δε θα έπρεπε να παρατηρείται καμία τάση για κροκίδωση. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού έγκειται στην κίνηση Brown, η οποία οδηγεί σε συγκρούσεις μεταξύ των κολλοειδών. Οι συγκρούσεις αυτές είναι ελαστικές και κανονικά δε θα έπρεπε να παρατηρείται κανένα αποτέλεσμα, όμως το γεγονός ότι η σύγκρουση συμβαίνει συγχρόνως μεταξύ περισσοτέρων από δύο σωματιδίων αποτελεί την απάντηση. Υποθέτοντας ένα σύστημα τριών σωματιδίων κατά τη σύγκρουση τους, δύο εξ αυτών χάνουν κινητική ενέργεια, η οποία κερδίζεται από το τρίτο σωματίδιο, με αποτέλεσμα τα δύο πρώτα να χάνουν ταχύτητα και να κατακρημνίζονται συσσωματωμένα. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός εξαφάνισης των κολλοειδών σωματιδίων σε συνάρτηση του χρόνου λόγω της περικινητικής συσσωμάτωσης δεν εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων.

Ορθοκινητική ονομάζεται η συσσωμάτωση των κολλοειδών η οποία οφείλεται στη διαφορική κίνηση του υγρού, ενώ επιταχυντικό ρόλο στη συσσωμάτωση έχει η διαδικασία της ανάδευσης λόγω της αύξησης της διαφορικής κίνησης των σωματιδίων (Παναγιώτου, 1998).

2.2.2 Κροκίδωση

Όπως προαναφέρθηκε τα κολλοειδή που αιωρούνται στο νερό είναι φορτισμένα με αρνητικό φορτίο και απωθούνται μεταξύ τους. Για να μπορέσουν λοιπόν να πλησιάσουν τα σωματίδια μεταξύ τους και να υπερνικηθούν οι απωστικές δυνάμεις από τις ελκτικές δυνάμεις van der Waals, θα πρέπει να αποσταθεροποιηθεί η κολλοειδής διασπορά. Για να επιτευχθεί αυτό είναι αναγκαίο να λάβουν χώρα οι διεργασίες της κροκίδωσης και της θρόμβωσης.

Ο όρος κροκίδωση αναφέρεται σε μία χημική διεργασία αποσταθεροποίησης της κολλοειδούς διασποράς με εξουδετέρωση των δυνάμεων που κρατούν τα κολλοειδή σε απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση κροκιδωτικών, όπως άλατα του σιδήρου και του αργίλου, τα οποία μειώνουν τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις άπωσης, δηλαδή το δυναμικό ζήτα (zeta potential), μεταξύ των ομοιόμορφα φορτισμένων μικκυλίων. Είναι απαραίτητο για τη σωστή δράση του κροκιδωτικού να πραγματοποιείται διαδικασία ταχείας ανάδευσης, ώστε να διασκορπίζεται πλήρως και όσο το δυνατόν ισομερώς σε όλη τη κολλοειδή φάση, καθώς επίσης και έλεγχος της ποσότητας που χρησιμοποιείται, διότι μπορεί να προκύψουν αρνητικά αποτελέσματα, ουσιαστικά απλή αντιστροφή του φορτίου της κολλοειδούς διασποράς, λόγω υπερβολικής δόσης.

Ιδιαίτερη σημασία κατά τη διαδικασία της κροκίδωσης πρέπει να δίνεται στον παράγοντα pH. Το μέτρο του pH επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα της όλης διαδικασίας. Όταν η κροκίδωση πραγματοποιείται σε λανθασμένη ζώνη pH, οδηγούμαστε σε απώλεια των κροκιδωτικών στο διάλυμα και κατά συνέπεια σε υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Η ζώνη του pH καθορίζεται κυρίως από το κροκιδωτικό που θα χρησιμοποιηθεί, καθότι καθένα βάση των χημικών ιδιοτήτων του έχει διαφορετική ζώνη μέγιστης απόδοσης.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στην απόδοση της κροκίδωσης είναι η θερμοκρασία νερού στην οποία πραγματοποιείται η διαδικασία. Χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην όλη διαδικασία. Όσο πιο χαμηλή η θερμοκρασία τόσο πιο αργά πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις, καθώς επίσης εμποδίζεται και η σωστή διασπορά του κροκιδωτικού στο διάλυμα, οδηγώντας σε μία λιγότερο αποδοτική διαδικασία η οποία απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες κροκιδωτικών, επιβαρύνοντας τόσο το κόστος όσο και την ποιότητα (Rubio and Rosa, 2005).

Τέλος σημαντικό ρόλο στην απόδοση έχουν οι διαδικασίες ανάδευσης διότι ελλιπής διαδικασίες οδηγούν σε χαμηλές αποδόσεις και σε επιπλέον χρήση κροκιδωτικών, οπότε αύξηση του κόστους και υποβάθμιση της ποιότητας, ενώ ιδιαίτερης σημασίας είναι και η σωστή επιλογή του κατάλληλου κροκιδωτικού ανάλογα την κολλοειδή διασπορά.

2.2.3 Θρόμβωση

Με τον όρο θρόμβωση γίνεται αναφορά στη συσσωμάτωση μικρών αιωρούμενων στο νερό θρόμβων σε μεγαλύτερους, συνήθως με χρήση συνθετικών οργανικών πολυμερών. Η λειτουργία της θρόμβωσης βασίζεται στην ιδιότητα των πολυμερών να δημιουργούν γέφυρες μεταξύ των θρόμβων προκαλώντας με τον τρόπο αυτό το σχηματισμό μεγαλύτερων συσσωματωμάτων. Η γεφύρωση επιτυγχάνεται όταν τμήματα της πολυμερικής αλυσίδας προσροφούνται από διάφορα σωματίδια διευκολύνοντας τη δημιουργία μεγαλύτερων ενοποιημένων σωματιδίων.

Είναι απαραίτητο κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία η προσθήκη του θρομβωτικού να γίνεται με αργούς ρυθμούς σε συνδυασμό με ήπια ανάδευση επιτρέποντας την επαφή μεταξύ των μικρών θρόμβων, βοηθώντας το σχηματισμό μεγαλύτερων σωματιδίων. Τα νεοδημιουργητά αυτά σωματίδια είναι αρκετά εύθραυστα και μπορεί να διαχωριστούν λόγω διατμητικών δυνάμεων κατά τη διάρκεια της μίξης. Είναι επίσης σημαντικό η ποσότητα των θρομβωτικών που χρησιμοποιούνται να ελέγχεται, διότι υπερβολική δόση αυτών μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην αφαίρεση των σωματιδίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολυμερή τα οποία είναι ελαφρύτερα από το νερό με συνέπεια υπερβολική δόση αυτών να οδηγεί τους θρόμβους σε επίπλευση αντί για καθίζηση. Τέλος αναφέρεται ότι η διαδικασία της θρόμβωσης δεν επηρεάζει μόνο το μέγεθος των θρόμβων, αλλά και τις φυσικές ιδιότητες αυτών, καθώς τους κάνει λιγότερο ζελατινώδης (πηκτοειδής) διευκολύνοντας την αποστράγγιση τους.

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΡΟΚΙΔΩΣΗΣ – ΘΡΟΜΒΩΣΗΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ

Οι βασικότερες μέθοδοι κροκίδωσης είναι οι εξής:

- με χρήση κροκιδωτικού, που είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος κροκίδωσης και εφαρμόζεται σε όλα τα είδη κολλοειδών

- με προσθήκη ετέρου κολλοειδούς αντίθετου φορτίου, που εφαρμόζεται κυρίως στα λυόφοβα κολλοειδή

ενώ οι βασικότεροι μέθοδοι θρόμβωσης είναι οι ακόλουθες:

- με χρήση πολυμερών, που εφαρμόζεται και στα λυόφοβα και στα λυόφιλα κολλοειδή
- με προσθήκη ηλεκτρολυτών, που εφαρμόζεται και στα λυόφοβα και στα λυόφιλα κολλοειδή
- με χρήση θερμοκρασίας, που εφαρμόζεται κυρίως στα λυόφοβα κολλοειδή και ορισμένες πρωτεΐνες
- μέσω ηλεκτροφόρησης, που εφαρμόζεται κυρίως στα λυόφοβα κολλοειδή
- με επίτευξη του ισοηλεκτρικού σημείου, που εφαρμόζεται κυρίως στις πρωτεΐνες και σε αμφολύτες

2.3.1 Κροκίδωση με χρήση κροκιδωτικού

Η κροκίδωση είναι μια διεργασία που χρησιμοποιείται για την αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων. Κατά τη διεργασία κροκίδωσης επενεργούν τα χημικά τα οποία έχουν προστεθεί, ώστε να μειθούν οι δυνάμεις που παρεμποδίζουν την προσέγγιση και συνένωση των κολλοειδών σωματιδίων. Τα κυριότερα κροκιδωτικά που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της επεξεργασίας του νερού είναι άλατα του τρισθενούς αργιλίου και του τρισθενούς σιδήρου. Κατά τα τελευταία χρόνια εκτός από τα παραπάνω άλατα χρησιμοποιούνται και διάφορα πολυμερή ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη αφαίρεση κολλοειδούς υλικού.

Τα κροκιδωτικά είναι δυνατόν να σταθεροποιούν τα κολλοειδή με διάφορους τρόπους (Σκουλικίδης, 1964), όπως:

- συμπίεση του διπλού στρώματος
- επιρρόφηση αντιόντων και εξουδετέρωση του ηλεκτρικού φορτίου
- διασωματιδιακή γεφύρωση
- εγκλωβισμό στο ίζημα

2.4 ΓΗΡΑΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ – ΠΕΨΗ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ

Κατά τη διαδικασία κροκίδωσης με την προσθήκη ηλεκτρολύτη κατά διαστήματα η κροκίδωση δεν είναι άμεση. Ειδικά όταν η ποσότητα του ηλεκτρολύτη είναι σχετικά μικρή τότε δεν παρατηρείται εμφανής θρόμβωση αλλά προκαλείται απλή θολότητα του συστήματος, ορατή και διά γυμνού οφθαλμού. Θόλωση του κολλοειδούς, ορατή και διά γυμνού οφθαλμού, χωρίς την επίδραση ηλεκτρολύτη ή άλλου παράγοντα επέρχεται και με τη πάροδο του χρόνου. Η θόλωση αυτή καλείται γήρας ή παρακμή του κολλοειδούς και έχει μεγάλη σημασία στα βιολογικά φαινόμενα. Μετά το γήρας και αφού έχει περάσει αρκετός χρόνος θα προκληθεί θρόμβωση του κολλοειδούς.

Πέψη κολλοειδούς είναι η διαδικασία κατά την οποία επιτυγχάνεται διασπορά (με ελάχιστη ή καθόλου ανάδευση) αλλάζοντας τη σύσταση του μέσου διασποράς. Κλασικές μέθοδοι πέψης είναι η προσθήκη πολυσθενών ομώνυμων ιόντων (π.χ. προσθήκη πολυφωσφορικών ιόντων σε ένα αρνητικά φορτισμένο θρομβωμένο κολλοειδές), καθώς επίσης και η προσθήκη τασιενεργών ουσιών. Τέλος πέψη μπορεί να προέλθει με αραίωση του μέσου διασποράς, ή με διαπίδυση (χρήση μεμβρανών κατάλληλου πορώδους για την εκλεκτική απομάκρυνση των ηλεκτρολυτών από την διασπορά) (Σκουλικίδης, 1964).

2.5 ΚΡΟΚΙΔΩΤΙΚΑ

Τα κροκιδωτικά είναι χημικές ουσίες οι οποίες χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό του νερού κατά τη διεργασία της κροκίδωσης και βοηθούν στην αποσταθεροποίηση της κολλοειδούς διασποράς. Είναι σημαντικό ότι αποτελούν το πιο ακριβό, από άποψη κόστους, στάδιο της κροκίδωσης, οπότε η χρήση τους πρέπει να πληρεί ορισμένους περιορισμούς όπως το κόστος αγοράς, την αποτελεσματικότητα σε σχετικά μικρή ποσότητα, τη διαθεσιμότητα, την εύκολη χρήση και την εύκολη αποθήκευση (Χρυσικόπουλος, 2005).

Τα κροκιδωτικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα ανόργανα και τα οργανικά.

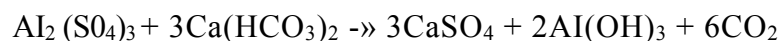
2.5.1 Ανόργανα κροκιδωτικά

Οι κυριότερες ανόργανες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στην φυσικοχημική επεξεργασία αποβλήτων είναι το θεικό αργίλιο, ο τριχλωριούχος σίδηρος, ο τρισθενής και ο δισθενής θεικός σίδηρος και το αργλικό νάτριο. Συχνά επίσης χρησιμοποιούνται διάφορες ουσίες υποβοηθητικές της κροκιδώσης σε συνδυασμό με τα παραπάνω κροκιδωτικά όπως ο ασβέστης, η ενεργός σίλικα κ.α. Τα ανόργανα κροκιδωτικά σε μορφή υδρολυμένων ιόντων βοηθούν στο να μειωθεί το επιφανειακό φορτίο των αιωρούμενων στο νερό κolloειδών σωματιδίων και στο να δημιουργούν αδιάλυτα υδροξείδια τα οποία καταβυθίζονται εύκολα, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρουν (κατακρημνίζουν) τα αιωρούμενα σωματίδια με τα οποία έρχονται σε επαφή. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ανόργανων κροκιδωτικών είναι ότι τα υδροξείδια των μεταλλικών κατιόντων που δημιουργούνται οδηγούν στην παραγωγή σημαντικής ποσότητας λάσπης.

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες, οι δόσεις και ο τρόπος χρήσης ενός εκ των πιο διαδεδομένων σε χρήση ανόργανων κροκιδωτικών ουσιών, του θεικού αργιλίου, περιγράφονται εν συντομία.

2.5.1.1 Θεικό αργίλιο (Aluminum sulfate)

Το θεικό αργίλιο είναι γνωστό στο εμπόριο σαν στυπτηρία ή alum και ο χημικός του τύπος είναι $[Al_2(SO_4)_3] \cdot 14H_2O$. Διαλύεται εύκολα στο νερό και αντιδρά με την αλκαλικότητα σύμφωνα με την αντίδραση:



Το υδροξείδιο του αργιλίου που σχηματίζεται συνιστά μια ογκώδη ζελατινοειδή μάζα που καθώς καθιζάνει συμπαρασύρει και απορροφά κolloειδή σωματίδια. Αν η αλκαλικότητα του νερού δεν επαρκεί για την παραπάνω αντίδραση τότε πρέπει να προστεθεί η κατάλληλη δόση ανθρακικού ασβεστίου ή ανθρακικού νατρίου ή υδροξειδίου του ασβεστίου. Γενικά για κάθε gr θεικού αργιλίου απαιτούνται 0.5 gr αλκαλικότητας $CaCO_3$.

Το θεικό αργίλιο διατίθεται στο εμπόριο σε στερεά μορφή και σαν διάλυμα. Το στερεό θεικό αργίλιο συσκευάζεται συνήθως σε σάκους των 45 kg, και διατίθεται σε

μορφή σκόνης ή κόκκων. Η μορφή σκόνης πρέπει κανονικά να αποφεύγεται γιατί δημιουργεί κινδύνους για την υγεία του προσωπικού. Έχει χρώμα υπόλευκο και ειδικό βάρος που κυμαίνεται από 640-1120 kg/ιτι³, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων. Έχει μεγάλη διαλυτότητα στο νερό που κυμαίνεται από 0.94-1.1 kg/L νερού για θερμοκρασίες από 0-35 °C. το στερεό θεικό αργίλιο διαλύεται συνήθως πριν τη χρήση του για αποτελεσματικότερο έλεγχο της δόσης εφαρμογής.

Το υγρό θεικό αργίλιο είναι διαβρωτικό, το pH διαλύματος περιεκτικότητας 1% είναι 3.5. Συσκευάζεται συνήθως σε βαρέλια. Η χρήση του είναι ευκολότερη αλλά το κόστος μεταφοράς του στην εγκατάσταση είναι συχνά υψηλό. Η επιλογή μεταξύ των δύο τύπων εξαρτάται από το μέγεθος της εγκατάστασης και την τιμή και διαθεσιμότητα του προϊόντος. Γενικά το υγρό θεικό αργίλιο είναι οικονομικότερο για εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν πάνω από 200 kg/ημ θεικού αργιλίου.

Το θεικό αργίλιο είναι το κύριο κροκιδωτικό που χρησιμοποιείται στα έργα βελτίωσης της ποιότητας του πόσιμου νερού. Οι απαιτούμενες δόσεις εξαρτώνται από την ποιότητα του φυσικού νερού και την φύση και συγκέντρωση των ρυπαντών. Προσδιορίζεται πειραματικά με εργαστηριακές δοκιμές (jar tests). Ενδεικτικές δόσεις στο πόσιμο νερό είναι 10-50 mg/L ενώ στα λύματα ξεπερνούν τα 30-60 mg/L. Βέλτιστη περιοχή pH 4.0-7.0 (Κουζέλη – Κατσίρη, 1996).

3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

3.1 ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Ως κύμα χαρακτηρίζεται η διαταραχή μέσα στο χώρο και το χρόνο που μεταφέρει ενέργεια και ορμή διαμέσου ενός υλικού ή ακόμη και στο κενό. Υπάρχουν τα μηχανικά κύματα για την ύπαρξη των οποίων είναι απαραίτητη η παρουσία ενός μέσου διαταραχής, ενώ υπάρχουν τα ηλεκτρομαγνητικά και τα κύματα βαρύτητας τα οποία διαδίδονται και στο κενό. Τα μηχανικά κύματα ταξιδεύουν στο χώρο μεταφέροντας ενέργεια από το ένα σημείο στο άλλο προκαλώντας μη μόνιμη ή μερικές φορές πολύ μικρή μετατόπιση των σωματιδίων του μέσου διάδοσης. Είναι σημαντικό λοιπόν να γίνει απολύτως κατανοητό ότι το μηχανικό κύμα αντιστοιχεί σε μια κίνηση διαταραχής του μέσου ή του σώματος δια του οποίου διαδίδεται, η οποία δεν πρέπει να συγχέεται με κίνηση σωματιδίων και χρειάζεται ένα αίτιο, δηλαδή μια πηγή της διαταραχής, για να παραχθεί, ένα μέσον που μπορεί να διαταραχθεί και έναν φυσικό μηχανισμό με τον οποίο κάθε ελάχιστο τμήμα του μέσου θα μπορεί να επικοινωνεί με τα διπλανά του.

Αν και γενικά η περιγραφή ενός κύματος μπορεί να γίνει βάση ορισμένων φυσικών ποσοτήτων, όπως το μήκος κύματος, η συχνότητα και η ταχύτητα, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές για όλα τα είδη των κυμάτων, είναι αντιληπτό ότι εξαιτίας των πολλών διαφορετικών ειδών κυμάτων που υπάρχουν, όπως τα μηχανικά ή τα ακουστικά ή τα ηλεκτρομαγνητικά ή τα κύματα βαρύτητας, είναι δύσκολο με έναν ορισμό να δοθεί πλήρης εξήγηση του φαινομένου. Για το λόγο αυτό η κυματική θεωρία αποτελεί έναν ιδιόμορφο κλάδο της φυσικής που ασχολείται με τις ιδιότητες της κυματικής διάδοσης, ανεξαρτήτως φυσικής προελεύσεως.

3.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΑ

Τα κύματα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο που κινούνται τα διαταρασσόμενα σωματίδια του μέσου διάδοσης. Τα κύματα στα οποία η κυματική διαταραχή διαδίδεται με μορφή παλμού ονομάζονται οδεύοντα κύματα και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα εγκάρσια και στα διαμήκη κύματα.

Σε ένα εγκάρσιο κύμα τα διαταρασσόμενα σωματίδια του μέσου διάδοσης κινούνται κάθετα στη φασική ταχύτητα, δηλαδή κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, ενώ σε ένα διάμηκες κύμα τα διαταρασσόμενα σωματίδια του μέσου διάδοσης κινούνται παράλληλα στη φασική ταχύτητα, δηλαδή παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Εικόνα 3.1 Απεικόνιση εγκάρσιου και διάμηκες κύματος

Άλλη κατηγορία κυμάτων, ξεχωριστή από τα οδεύοντα κύματα, είναι τα επιφανειακά που διαδίδονται στην ελεύθερη επιφάνεια των στερεών και τα σωματίδια του μέσου διάδοσης διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές με το μεγάλο άξονα κάθετο στην επιφάνεια και εστία την θέση ισορροπίας.

3.3 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

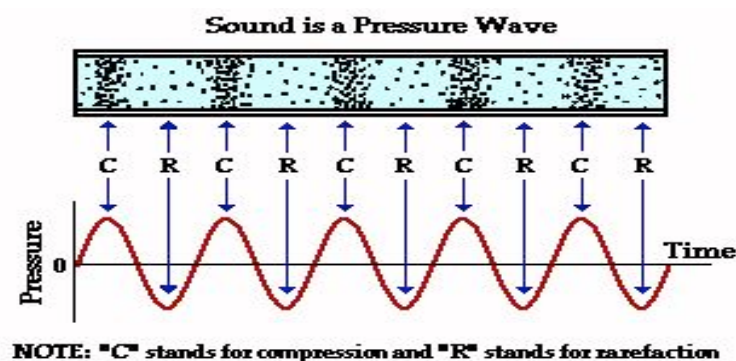
Στη φύση τα πιο γνωστά διαμήκη κύματα που συναντώνται είναι τα ακουστικά. Τα ακουστικά κύματα διαδίδονται σε οποιοδήποτε μέσο (αέριο, υγρό ή στερεό) με μέτρο ταχύτητας το οποίο εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη συχνότητά τους:

- στα ηχητικά κύματα, τα οποία είναι διαμήκη κύματα που διεγείρουν το αίσθημα της ακοής στον άνθρωπο και έχουν συχνότητα από 20 Hz έως 20000 Hz,
- στους υπόηχους, που είναι διαμήκη κύματα με μικρότερες συχνότητες από εκείνες των ηχητικών κυμάτων και
- στους υπερήχους, που είναι διαμήκη κύματα με συχνότητες μεγαλύτερες από εκείνες των ηχητικών κυμάτων.

3.3.1 Διάδοση ακουστικών κυμάτων

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μετάδοση του ήχου αποτελεί η ύπαρξη ενός μέσου διάδοσης. Όταν ένα σωματίδιο του μέσου απομακρυνθεί από την αρχική του θέση, οι ελαστικές δυνάμεις του μέσου τείνουν να το επαναφέρουν σε αυτή, όμως λόγω αδράνειας το σωματίδιο την προσπερνά, ενεργοποιώντας ελαστικές δυνάμεις προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ουσιαστικά το σωματίδιο του μέσου εξαναγκάζεται λόγω της ενέργειας του διερχόμενου ηχητικού κύματος να πάλλεται γύρω από τη θέση ισορροπίας.

Καθώς τα ακουστικά κύματα διαδίδονται σε ένα μέσο, τα σωματίδια του ταλαντώνονται και παράγουν μεταβολές πυκνότητας και πίεσης κατά την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η ακουστική κυματική διαταραχή προκαλεί μετατοπίσεις, από τη θέση ισορροπίας, των επιμέρους μορίων σε παράλληλη διεύθυνση προς τη διάδοση του κύματος. Το αποτέλεσμα είναι μια σειρά από περιοχές υψηλής και χαμηλής πίεσεως, που λέγονται πυκνώματα και αραιώματα, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση ημιτονοειδούς ακουστικού κύματος

3.3.2 Βασικά μεγέθη ακουστικών κυμάτων

Η περιγραφή ενός κύματος γίνεται μέσω ορισμένων φυσικών μεγεθών. Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό ενός κύματος είναι:

Το μήκος κύματος (λ) που είναι η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δύο τυχαία σημεία του κύματος που όταν διαταράσσονται συμπεριφέρονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, Η περίοδος (T) που είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το κύμα διανύει απόσταση ίση προς το μήκος κύματος,

Η συχνότητα (f) που είναι ο ρυθμός με τον οποίο επαναλαμβάνεται η κυματική διαταραχή. Ουσιαστικά είναι ο αριθμός των μηκών κύματος που περνούν ανά μονάδα χρόνου, με μονάδα μέτρησης το Hertz, το οποίο ορίζεται ως ο αριθμός των κύκλων που περνά από ένα ορισμένο σημείο μέσα σε ένα δευτερόλεπτο και ισχύει ότι:

$$f = \frac{1}{T}$$

Η κυκλική συχνότητα (ω), όπου:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Το γωνιακό ή κυκλικό κυματάριθμο (k) όπου:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου (c) που είναι η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται ένα ακουστικό κύμα μέσω ενός συμπιεστού μέσου.

Πρέπει να αναφερθεί ότι ανάμεσα στις φυσικές ποσότητες του μήκους κύματος, της συχνότητας και της ταχύτητας ισχύει η σχέση:

$$c = \lambda \times f$$

Η ταχύτητα των σωματιδίων (u) που είναι η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου.

Το πλάτος μετατόπισης που είναι η μέγιστη μετατόπιση της διαταραχής ως προς τον άξονα y .

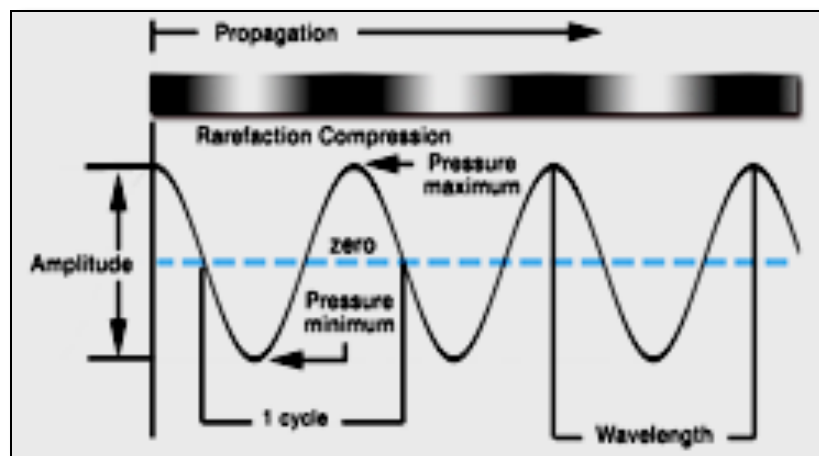
Το πλάτος πίεσης (amplitude) που είναι η μέγιστη μεταβολή της πίεσης από τη θέση ισορροπίας, ουσιαστικά από την ατμοσφαιρική πίεση .

Επίσης σημαντικά μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν ένα ακουστικό κύμα είναι:

Η ακουστική ισχύς (Acoustic Power) που είναι ο ρυθμός μεταφοράς ακουστικής ενέργειας στο χρόνο, με μονάδα μέτρησης το Watt, όπου $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$

Η ακουστική ένταση (intensity) που είναι η ισχύς που μεταφέρει το ακουστικό κύμα ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο η ηχητική ενέργεια μεταφέρεται δια μέσου της μοναδιαίας επιφάνειας, κάθετης προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και ισχύει:

$$I = \frac{W}{s}$$



Εικόνα 3.3 Βασικά μεγέθη οδεύοντος κύματος

Τέλος ένα ακόμα μέγεθος με το οποίο χαρακτηρίζεται ένα κύμα είναι η ακουστική πίεση που είναι η δημιουργούμενη υπερπίεση ή υποπίεση, σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση, που δημιουργεί το κύμα κατά τη διάδοσή του.

3.3.2.1 Ταχύτητα ακουστικού κύματος

Καθώς τα ακουστικά κύματα είναι κύματα που διαδίδονται με μεταβολές πίεσης, το μέτρο της ταχύτητας ενός τέτοιου κύματος πίεσεως εξαρτάται από την συμπιεστότητα του μέσου διάδοσης και από την πυκνότητα της μάζας του. Εάν το συμπιεστό μέσο έχει μέτρο ελαστικότητας όγκου:

$$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

και πυκνότητα μάζας (όταν δεν διαταράσσεται) ρ , τότε το μέτρο της ταχύτητας διάδοσης των ηχητικών κυμάτων στο μέσο είναι:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Ας σημειωθεί ότι το B είναι πάντοτε θετικό, διότι μια αύξηση της πίεσης (δηλαδή θετικό ΔP) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου, έτσι ο λόγος $\Delta P/\Delta V$ είναι πάντοτε αρνητικός.

Γενικά, η ταχύτητα του ήχου στα υγρά είναι μικρότερη από την ταχύτητα του στα στερεά, διότι τα υγρά, γενικά, συμπιέζονται ευκολότερα από τα στερεά και, συνεπώς, έχουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας όγκου.

Η ταχύτητα του κύματος καλείται και ταχύτητα φάσης ή φασική ταχύτητα. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μη γίνεται σύγχυση ανάμεσα στη φασική ταχύτητα και την ταχύτητα με την οποία κινούνται τα διαταρασόμενα σωματίδια του μέσου διάδοσης.

3.4 ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Τα μέτωπα κύματος του ήχου κινούνται σε ευθείες κατά την ιδανική διάδοση τους, δηλαδή δίχως παρεμβολές ή αλλαγές του μέσου διάδοσης, όμως στη φύση είναι σχεδόν αδύνατο να παρατηρηθεί ιδανική διάδοση. Όταν ένα ηχητικό κύμα πέσει

πάνω σε ένα εμπόδιο, ή γενικά σε κάποια επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων, ένα μέρος από την ενέργεια του ανακλάται, ενώ ένα άλλο μέρος της ενέργειάς του απορροφάται ή διαδίδεται από την άλλη πλευρά του μέσου. Κατά τη διάδοση του ήχου παρατηρούνται τα φαινόμενα της ανάκλασης, της σκέδασης, της διάθλασης και της απορρόφησης.

Με τον όρο ανάκλαση περιγράφεται το φαινόμενο της αλλαγής κατεύθυνσης κίνησης όταν ένα ηχητικό κύμα συναντά κάποιο εμπόδιο με διαστάσεις μεγαλύτερες από το μήκος κύματος και συνοδεύεται με απώλεια ενέργειας του κύματος.

Με τον όρο σκέδαση περιγράφεται το φαινόμενο της αλλαγής κατεύθυνσης της κίνησης όταν ένα ηχητικό κύμα συναντά εμπόδια πολύ μικρότερων διαστάσεων από το μήκος κύματος.

Με τον όρο διάθλαση περιγράφεται το φαινόμενο της αλλαγής στην κατεύθυνση της κίνησης κατά τη μετάβαση μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης, χωρίς να συναντάται απαραίτητα απώλεια ενέργειας.

Με τον όρο απορρόφηση περιγράφεται η απώλεια της ακουστικής ενέργειας κατά τη διάδοση του κύματος. Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από ένα συντελεστή απορρόφησης, ο οποίος εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά τον ήχο.

Τέλος όταν σε έναν κλειστό χώρο που αποτελείται από επιφάνειες που δεν ανακλούν τον ήχο αλλά τον διαχέουν προς όλες τις κατευθύνσεις παρατηρείται το φαινόμενο της διάχυσης. Ουσιαστικά διάχυτος ήχος καλείται ο ήχος που έχει υποστεί πολλές ανακλάσεις από λεία επίπεδα τοιχώματα.

3.5 ΑΡΜΟΝΙΚΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Εάν η πηγή που παράγει ένα διαμήκες κύμα ταλαντώνεται με απλή αρμονική κίνηση, τότε και η διαταραχή την οποία δημιουργεί είναι αρμονική. Αποτέλεσμα αυτής της ταλάντωσης είναι το αρμονικό ηχητικό κύμα. Τα αρμονικά κύματα είναι οδεύοντα κύματα των οποίων η κυματική μορφή έχει ημιτονοειδές ή συνημιτονοειδές σχήμα.

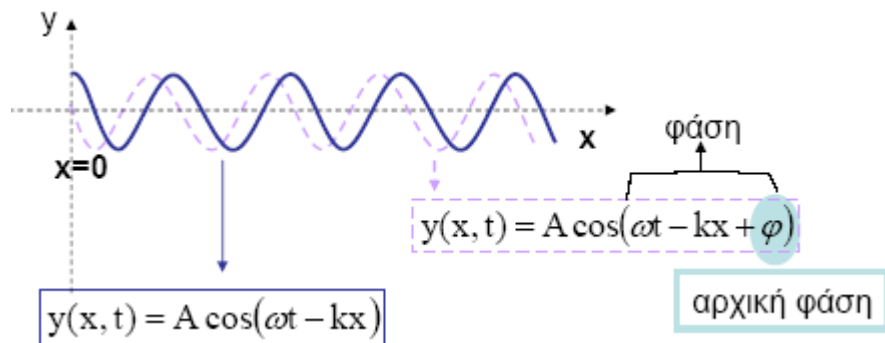
Η εξίσωση μονοδιάστατης κίνησης του αρμονικού κύματος, για $y = 0$, όταν $x = 0$, $t = 0$ και με διάδοση προς τα δεξιά, δίνεται από τις σχέσεις:

$$y = A \sin(kx - \omega t) \text{ και } y = A \cos(kx - \omega t)$$

Ενώ σε γενικές συνθήκες ισχύει ότι:

$$y = A \sin(kx - \omega t + \varphi) \text{ και } y = A \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

όπου φ η σταθερά φάσης.



Εικόνα 3.4 Απεικόνιση αρμονικού συνημιτονοειδούς κύματος

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα αρμονικά κύματα το πλάτος της πίεσης είναι ανάλογο προς το πλάτος της μετατόπισης καθώς και ότι η καμπύλη της μετατόπισης έχει διαφορά φάσης 90° από την καμπύλη πίεσης.

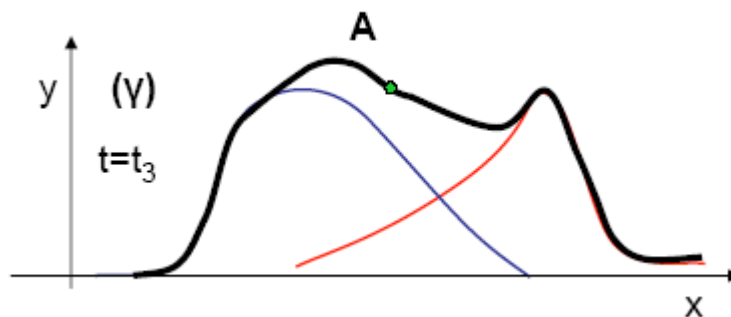
Το αρμονικό ακουστικό κύμα μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ως ένα κύμα μετατόπισης ή ως ένα κύμα πίεσης.

3.6 ΣΥΜΒΟΛΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ – Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΕΠΑΛΛΗΛΙΑΣ

Όταν συναντώνται δύο ή περισσότερα ακουστικά κύματα, δημιουργείται μια νέα πολύπλοκη ταλάντωση που τα χαρακτηριστικά της εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που συναντήθηκαν. Στην περίπτωση που το μέσο διάδοσης είναι γραμμικό, η δύναμη επαναφοράς είναι ανάλογη προς τη μετατόπιση του μέσου, η ολική διαταραχή υπολογίζεται βάση της αρχής της επαλληλίας (ή υπέρθεσης).

Η συγκεκριμένη αρχή ορίζει ότι, όταν δύο ή περισσότερα κύματα κινούνται στο ίδιο μέσο η ολική μετατόπιση του διαταρασσόμενου μέσου, δηλαδή το συνισταμένο κύμα, σε οποιοδήποτε σημείο του ισούται με τη διανυσματική συνισταμένη των επιμέρους κυμάτων.

Όταν τα κύματα που συμβάλουν έχουν την ίδια συχνότητα και την ίδια φάση προκύπτει ένα νέο κύμα με την ίδια συχνότητα και με πλάτος το άθροισμα των πλάτων των επιμέρους κυμάτων, ενώ όταν τα κύματα έχουν την ίδια συχνότητα αλλά διαφορετική φάση, τότε το νέο πλάτος που προκύπτει θα εξαρτάται από τη διαφορά φάσης (ελάχιστο για $\varphi=180$).



Εικόνα 3.5 Διαταραχή σωματιδίου από συνδυασμό κυμάτων

3.7 ΣΤΑΣΙΜΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Όταν δύο αρμονικά κύματα που έχουν την ίδια συχνότητα, το ίδιο πλάτος και το ίδιο μήκος κύματος διαδίδονται στο ίδιο μέσο, αλλά σε αντίθετες κατευθύνσεις, δημιουργούν στάσιμα κύματα. Η κυματοσυνάρτηση που περιγράφει ένα στάσιμο κύμα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχει τη μορφή:

$$y = 2A_0 (\sin kx) \cos \omega t$$

Χαρακτηριστικό των στάσιμων κυμάτων είναι ότι το πλάτος τους δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση της συντεταγμένης τους. Ουσιαστικά καθένα από τα σωματίδια του μέσου πάλλεται εκτελώντας απλή αρμονική κίνηση με την ίδια συχνότητα αλλά με διαφορετικό πλάτος ταλάντωσης, κάτι που αποτελεί και τη διαφορά μεταξύ στάσιμων και οδευόντων κυμάτων. Τα σημεία μέγιστου πλάτους λέγονται αντιδεσμοί και έχουν συντεταγμένη:

$$x = \frac{n\pi}{2\kappa} = \frac{n\lambda}{4}, \text{ όπου } n \text{ περιττός ακέραιος}$$

και τα σημεία με μηδενικό πλάτος λέγονται δεσμοί και έχουν συντεταγμένη:

$$x = \frac{n\pi}{\kappa} = \frac{n\lambda}{2}, \text{ όπου } n \text{ ακέραιος}$$

Οι διαδοχικοί αντιδεσμοί χωρίζονται με απόσταση ίση με $\lambda/2$, όπως και οι διαδοχικοί μεταξύ τους δεσμοί. Η απόσταση ανάμεσα σε έναν δεσμό και στον επόμενο αντιδεσμό είναι ίση με $\lambda/4$.

Τα στάσιμα κύματα ονομάζονται και μόνιμα ή ακίνητα κύματα καθώς δεν μεταδίδεται ενέργεια κατά μήκος του μέσου, το οποίο γίνεται αντιληπτό από το γεγονός ότι οι δεσμοί παραμένουν ακίνητοι.

Στάσιμα κύματα δημιουργούνται σε ορισμένες συχνότητες σε συστήματα όπως χορδές, αέριες στήλες (σωλήνες), ράβδους ή μεμβράνες

3.7.1 Στάσιμα κύματα σε αέριες στήλες

Τα διαμήκη κύματα όταν διαδίδονται σε αντίθετες κατευθύνσεις συμβάλλουν και δημιουργούν στάσιμα κύματα. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια διάδοσης ακουστικών κυμάτων μέσα σε αέριες στήλες. Βέβαια σε μια τέτοια περίπτωση έχει πολύ σημαντικό ρόλο η φύση του χώρου όπου διαδίδονται τα διαμήκη κύματα, ειδικότερα όταν γίνεται λόγος για κίνηση μέσα σε αέριες στήλες, καθώς η διαφορά φάσης ανάμεσα στο προσπίπτον και στο ανακλώμενο κύμα από το άκρο του σωλήνα εξαρτάται από το εάν αυτό το άκρο είναι κλειστό ή ανοικτό.

Σε μία στήλη με κλειστό το ένα άκρο, το κλειστό άκρο αυτής είναι δεσμός μετατόπισης, ενώ είναι αντιδεσμός πίεσης (παρατηρείται μέγιστη διαταραχή της πίεσης). Η εξήγηση είναι απλή λαμβάνοντας υπόψη ότι το κύμα που ανακλάται από το άκρο της στήλης έχει διαφορά φάσης 180° με το προσπίπτον κύμα σε συνδυασμό με το δεδομένο ότι η διαφορά φάσης μεταξύ της κυματικής διαταραχής μετατόπισης με τη κυματική διαταραχή πίεσης είναι 90° .

Αντίθετα σε μια στήλη με ανοικτό άκρο, όπου υπάρχει ελεύθερη επικοινωνία με την ατμόσφαιρα, ισχύει ότι το ανοικτό άκρο αυτής είναι, προσεγγιστικά, αντιδεσμός μετατόπισης και δεσμός πίεσης. Προσεγγιστικά διότι ένα πύκνωμα δεν εκτονώνεται αμέσως μόλις φτάσει στο ανοικτό άκρο του σωλήνα, αλλά πρέπει να βγει έξω κατά 60% περίπου της ακτίνας του σωλήνα.

Κατά τη διάδοση των διαμήκων κυμάτων που δημιουργούν στάσιμα κύματα σε στήλη παρατηρούνται ορισμένα χαρακτηριστικά σχήματα ταλάντωσης, οι λεγόμενες ιδιομορφές ταλάντωσης, όπου σε κάθε μια από αυτές αντιστοιχεί μια χαρακτηριστική συχνότητα, η οποία ονομάζεται ιδιοσυχνότητα. Η χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα καλείται θεμελιώδης συχνότητα, ενώ οι υπόλοιπες, οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, καλούνται αρμονικές. Η εξίσωση που περιγράφει τις αρμονικές ιδιοσυχνότητες σε στήλη μήκους L με δύο άκρα ανοικτά είναι:

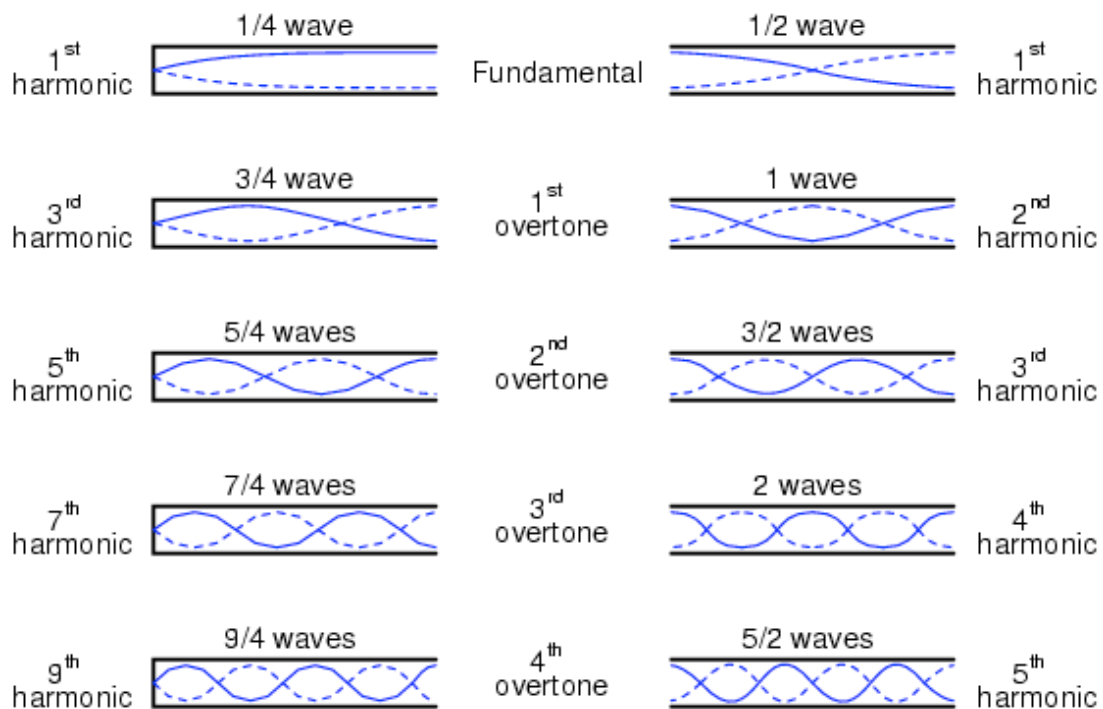
$$f_n = n \frac{u}{2\lambda}, \text{ όπου } n = 1, 2, 3 \dots$$

ενώ η εξίσωση που περιγράφει τις αρμονικές ιδιοσυχνότητες σε στήλη μήκους L με το ένα άκρο κλειστό είναι:

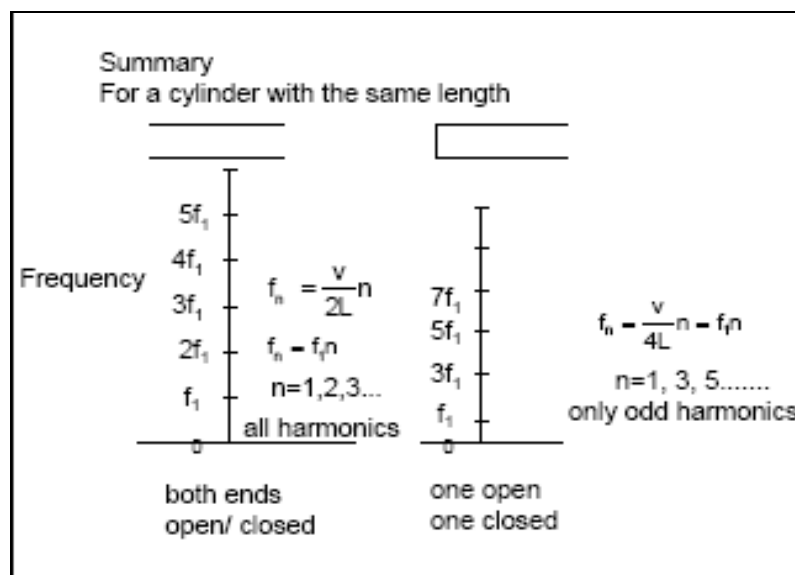
$$f_n = n \frac{u}{4\lambda}, \text{ όπου } n = 1, 3, 5 \dots$$

όπου u η ταχύτητα του ήχου στο μέσο διάδοσης.

Γενικότερα όταν ένας σωλήνας είναι ανοικτός και στα δύο άκρα του, οι ιδιοσυχνότητες της ταλάντωσης αποτελούν αρμονική σειρά, ενώ όταν το ένα άκρο του σωλήνα είναι κλειστό τότε παράγονται στάσιμα κύματα μόνο από τις περιττές αρμονικές συχνότητες.



Εικόνα 3.6 Στάσιμα διαμήκη κύματα σε (α) σωλήνα κλειστό στο ένα άκρο και (β) σωλήνα ανοικτό στα δύο άκρα



Εικόνα 3.7 Εμφάνιση ιδιοσυχιοτήτων σε αντιστοιχία με το μήκος σε σωλήνα (α) όταν είναι ανοικτά και τα δύο άκρα και (β) όταν το ένα άκρο είναι κλειστό

4. ΥΠΕΡΗΧΟΙ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Οι υπέρηχοι είναι ακουστικά κύματα με συχνότητες μεγαλύτερες των 20 kHz, δηλαδή πάνω από το αντιληπτό ανθρώπινο ακουστικό όριο, και με εύρος μηκών κύματος από 10 cm μέχρι και 10^{-3} cm. Ανάλογα με τη συχνότητα τους οι υπέρηχοι χωρίζονται σε τρεις μεγάλες ομάδες:

- Conventional Ultrasonics (ultrasounds)
- High Frequency Ultrasonics
- Megasonics

Στην πρώτη ανήκουν υπέρηχοι με συχνότητες μέχρι 150 kHz, στη δεύτερη υπέρηχοι με συχνότητες από 150 kHz μέχρι 800 kHz και στην τελευταία υπέρηχοι με συχνότητες από 800 kHz και άνω.

Γενικότερα η χρήση των υπερήχων χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στη χρήση υπερήχων συχνότητας από 20 kHz μέχρι 2 MHz, που αποτελούν κύματα χαμηλής συχνότητας (ως προς τα μεγέθη των υπερήχων) και υψηλής πίεσης, και προκαλούν φυσικές και χημικές μεταβολές στο μέσο διάδοσης, και στη χρήση υψηλών συχνοτήτων και χαμηλής πίεσης κυμάτων, από 5 MHz έως ορισμένα GHz, όπου δεν επιφέρουν καμία αλλαγή στο μέσο διάδοσης (Capote and Castro, 2006).

4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Στην επιστημονική κοινότητα εδώ και πάρα πολλά χρόνια είναι γνωστή η επιστήμη των υπερήχων αλλά μόλις τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται επισταμένη χρήση αυτών. Πλέον η χρήση τους είναι διαδεδομένη σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, όπως η ιατρική, η φαρμακευτική, η εφαρμοσμένη μηχανική, η επιστήμη των υλικών και η βιομηχανία τροφίμων. Ειδικότερα στο πεδίο της ιατρικής, από όπου κυρίως έγινε ευρέως γνωστή η χρησιμότητα των υπερήχων, η χρήση τους βοήθησε πολύ στην εξέλιξη τομέων όπως η χειρουργική, η καρδιολογία και η εμβρυολογία. Είναι όμως σημαντικό να αναφερθεί ότι η εφαρμογή τους στα συγκεκριμένα πεδία

εκμεταλλεύεται κυρίως τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους και όχι τόσο τη χημική τους δραστηριότητα.

Αν και η πρώτη αναφορά της επίδρασης των υπερήχων σε χημικές αντιδράσεις έγινε πριν από 70 και πλέον χρόνια, καθώς ο πρώτος που παρατήρησε τις χημικές τους επιδράσεις ήταν ο Alfred L. Loomis το 1927, λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των συσκευών εκείνης της εποχής δεν ακολούθησαν οι αντίστοιχες εφαρμογές (Henglein, 1987). Έπειτα από χρόνια ερευνών και τη δημιουργία των κατάλληλων συσκευών παραγωγής υπερήχων, χρησιμοποιούνται, εκτός από τους τομείς που προαναφέρθηκαν, στην αναλυτική χημεία καθώς και σε παρεμφερείς τομείς όπως η πράσινη χημεία (green chemistry) και η πράσινη μηχανική (green engineering).

Η πράσινη χημεία στοχεύει στο σχεδιασμό διαδικασιών και προϊόντων τα οποία μειώνουν ή εξαλείφουν τη χρήση ή τη δημιουργία επιβλαβών ουσιών και γενικότερα έχει ως βασικό σκοπό τη μείωση ή την αποφυγή της μόλυνσης, ενώ πράσινη μηχανική είναι ο σχεδιασμός, η εμπορευματοποίηση και η χρήση διαδικασιών οικονομικών και φιλικών προς το περιβάλλον, οι οποίες μειώνουν τη ρύπανση και ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον (Mason, 2006).

4.3 ΧΗΜΕΙΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Έχει αποδειχτεί ότι υπέρηχοι με εύρος συχνοτήτων από 20 kHz έως και 2 MHz έχουν χρησιμότητα σε τομείς της χημείας όπως σε διαδικασίες ομογενοποίησης, γαλακτοματοποίησης, ιονισμού καθώς και σε χημικές διαδικασίες περισσότερο βιομηχανικά διαδεδομένες όπως ο καθαρισμός. Είναι ιδιαίτερης προσοχής το γεγονός ότι οι υπέρηχοι αναβαθμίζουν το επίπεδο αποτελεσματικότητας πολλών και διαφορετικών χημικών διαδικασιών (Ando et al, 1985; Luche, 1992; Suslick and Doktyez, 1990).

Η χημική δραστηριότητα που προκαλείται σε διάφορες χημικές αντιδράσεις ή διαδικασίες εξαιτίας της εφαρμογής υπερηχητικών κυμάτων καλείται υπερηχοχημεία και αποτελεί ένα εντελώς νέο επιστημονικό πεδίο που ξεκίνησε να αναπτύσσεται κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες. Ο όρος που χρησιμοποιείται διεθνώς για την υπερηχοχημεία είναι sonochemistry. Είναι κατανοητό ότι η υπερηχοχημεία αποτελεί

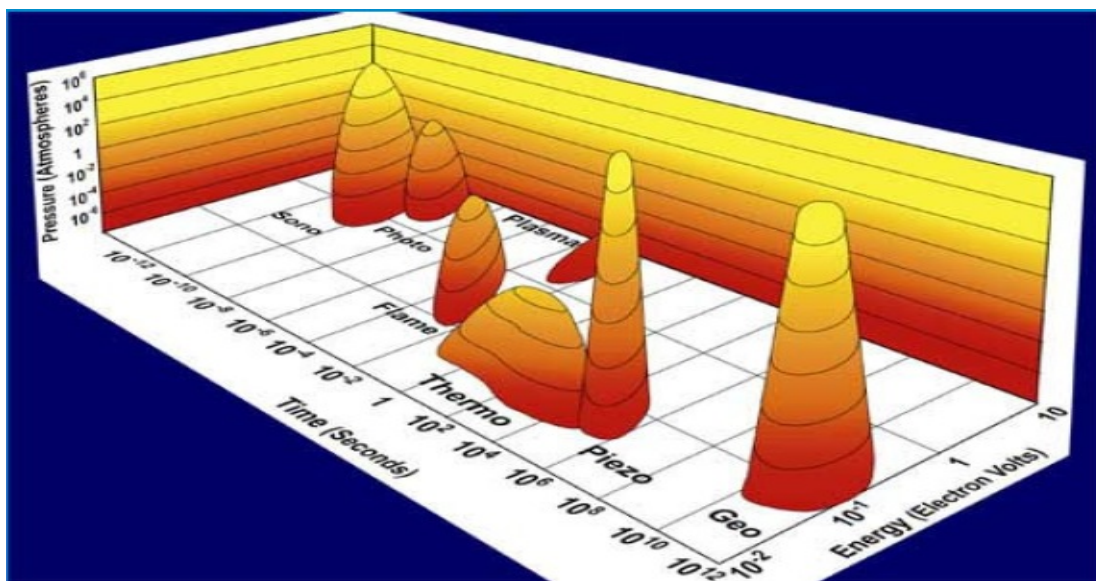
σημαντικό κομμάτι της πράσινης χημείας και της πράσινης μηχανικής (Mason, 2006), καθώς αποσκοπεί στα εξής:

- χρήση λιγότερο επικίνδυνων και όσο το δυνατό πιο φιλικών προς το περιβάλλον χημικών
- ανάπτυξη κατάλληλων συνθηκών που οδηγούν στη βελτιστοποίηση των προϊόντων
- ελαχιστοποίηση της ενέργειας που απαιτείται για χημικές διεργασίες
- χρήση εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών, όπως βιοπροϊόντα.

Γενικότερα ο ρόλος της υπερηχοχημείας στις πράσινες επιστήμες περιγράφεται από την έκφραση: υψηλό επίπεδο απόδοσης σε συνδυασμό με εξοικονόμηση υλικών και ενέργειας, χαμηλό επίπεδο αποβλήτων και προτιμώμενη καθώς και βέλτιστη χρήση ανανεώσιμων πηγών (Νικολακόπουλος). Η χημεία υπερήχων ανταποκρίνεται σε αυτούς τους στόχους, δεδομένου ότι τα κυριότερα πλεονεκτήματά της είναι:

- η δυνατότητα μεταβολής της πορείας μιας αντίδρασης, οδηγώντας προς νέες μέσω της υπερηχοχημικής αλλαγής μηχανισμού (sonochemical switching)
- η ενίσχυση των ρυθμών με ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας και των αποδόσεων με αντίστοιχη μείωση αποβλήτων
- η δυνατότητα της χρήσης μη συμβατικών αντιδραστηρίων, ή αντιδραστηρίων που λαμβάνονται κάτω από ασυνήθιστες συνθήκες.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η υπερηχοχημεία παρουσιάζει εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις κλασικές μεθόδους που εφαρμόζονται στον τομέα της χημείας, όπως η θερμοχημεία, η φωτοχημεία και ο ιονισμός, όσο αφορά τη διάρκεια, την πίεση και την ενέργεια. Ειδικότερα η εφαρμογή υπερήχων επιτυγχάνει σε πολύ μικρή χρονική κλίμακα την επίτευξη πολύ υψηλών πιέσεων και ενέργειας, σε αντίθεση με τη φωτοχημεία, η οποία παρουσιάζει παρόμοια μεν χαρακτηριστικά αλλά σε μικρότερη κλίμακα και εξαιτίας θερμικών και όχι ηλεκτροχημικών φαινομένων, και με τη θερμοχημεία η οποία παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερες τιμές ενέργειας σε μεγαλύτερο χρόνο. Χαρακτηριστικό είναι το διάγραμμα που ακολουθεί και παρουσιάζει τις ιδιότητες διαφόρων τύπων ενεργειών.



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου, πίεσης και ενέργειας διαφόρων χημικών διεργασιών (Suslick, 1994)

Όπως έχει γίνει πλέον αντιληπτό ο ρόλος των υπερήχων στον τομέα της χημείας είναι πολλαπλός και ιδιαίτερα σημαντικός. Πιο ειδικά ο ρόλος των υπερήχων στη χημεία μπορεί να χωρισθεί σε τρεις τομείς:

- ομογενείς υπερηχοχημεία των υγρών συστημάτων (homogeneous sonochemistry of liquids)
- ετερογενείς υπερηχοχημεία συστημάτων υγρού-υγρού (heterogeneous sonochemistry of liquid-liquid)
- ετερογενείς υπερηχοχημεία συστημάτων υγρού-στερεού (heterogeneous sonochemistry of liquid-solid systems)

Σε συστήματα στερεών ή στερεών-αερίων η εφαρμογή υπερήχων δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες (Suslick et al., 1999).

Εν κατακλείδι, όσον αφορά την χημεία υπερήχων, είναι πλέον αντιληπτό ότι αποτελεί πια ένα πολύ σημαντικό τομέα της χημείας, που αναπτύσσεται συνεχώς με ραγδαίους ρυθμούς, βρίσκοντας ολοένα και περισσότερες εφαρμογές σε διάφορα επιστημονικά πεδία.

4.4 ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Τα σημαντικότερα φαινόμενα τα οποία προκαλούνται κατά την εφαρμογή υπερήχων και στα οποία οφείλονται οι φυσικές και χημικές ιδιότητες αυτών είναι τα εξής :

- acoustic cavitation
- acoustic streaming
- sonoluminescence

4.4.1 Ακουστική σπηλαιώση

4.4.1.1 Ιστορική αναδρομή

Όπως προαναφέρθηκε η εφαρμογή υπερήχων σε υγρές διασπορές προκαλεί μια πληθώρα υψηλών ενεργειακά και μη αντιστρεπτών χημικών αντιδράσεων, αυτό συμβαίνει λόγω της ιδιότητας των υπερήχων να προκαλούν στις διασπορές αυτές φυσικά φαινόμενα ικανά για τη δημιουργία των αντιδράσεων αυτών (Parfutchik, 2007). Ίσως το πιο σημαντικό αυτών των φαινομένων είναι η ακουστική σπηλαιώση ή διεθνώς acoustic cavitation, βάση του επίσημου όρου που χρησιμοποιείται από την επιστημονική κοινότητα, που περιγράφει τη δημιουργία, την ανάπτυξη και το βίαιο κατακρήμνισμα φυσαλίδων στην υγρή διασπορά.

Το φαινόμενο της ακουστικής σπηλαιώσης παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στο τέλος του 19^{ου} αιώνα, όταν το 1894 οι Sir John I. Thornycroft και Sydney W. Barnaby κατέληξαν ότι η ακουστική σπηλαιώση είναι ο λόγος για τη μη σωστή λειτουργία και την καταστροφή των προπελών των πλοίων. Η πρώτη εμπειριστατωμένη μελέτη που βοήθησε σημαντικά στην κατανόηση του φαινομένου δημοσιεύθηκε από τον Lord Rayleigh το 1917 με τίτλο “On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity” (Neppiras, 1984), ενώ η πρώτη μελέτη που αφορούσε τις χημικές ιδιότητες των υπερήχων πραγματοποιήθηκε το 1927 από τους Richards και Loomis. Πλέον η ακουστική σπηλαιώση έχει μελετηθεί εκτεταμένα και οι ιδιότητες τις έχουν κατανοηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό.

4.4.1.2 Περιγραφή φαινομένου

Τα υγρά συνήθως περιέχουν μικρούς θύλακες αέρα ή αέριο εγκλωβισμένο μέσα στη διάσπαρτη στερεά κολλοειδή φάση, όσον αφορά τις διασπορές υγρών - στερεών. Με την εφαρμογή υπερήχων, οι οποίοι είναι κύματα πίεσης με διαδοχικές φάσεις πύκνωσης και αραιώσης, στις υγρές διασπορές προκαλούνται ταλαντώσεις στα μόρια αυτών γύρω από συγκεκριμένες θέσεις ισορροπίας. Στη φάση της πύκνωσης, όπου η πίεση των κυμάτων είναι θετική, η μέση απόσταση μεταξύ των μορίων μικραίνει, ενώ κατά τη διάρκεια της αραιώσης, όπου έχουμε αρνητική πίεση, η μέση απόσταση αυξάνεται (Sauter et al., 2007). Όταν η πίεση πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο τέτοιο ώστε να ξεπεραστεί η μέγιστη εφελκυστική αντοχή του υγρού, η οποία εξαρτάται από το είδος και την καθαρότητα της διασποράς, τότε ξεπερνιέται η κρίσιμη μέση απόσταση μεταξύ των μορίων της διασποράς που είναι απαραίτητη για να διατηρήσει τα μόρια αυτής σε επαφή με αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων αέρα (Suslick et al., 1999). Το όριο αυτό ονομάζεται βάση της διεθνούς ορολογίας cavitation threshold. Έπειτα κατά τα επόμενα στάδια πύκνωσης οι φυσαλίδες μεγαλώνουν και καταρρέουν. Η συνεχής διαδικασία δημιουργίας και κατάρρευσης των φυσαλίδων καλείται ακουστική σπηλαίωση (Mason and Lorimer, 1988). Ο βαθμός έντασης του φαινομένου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα επίπεδα πίεσης των εφαρμοσμένων υπερήχων καθώς και από τις περιβάλλουσες συνθήκες.

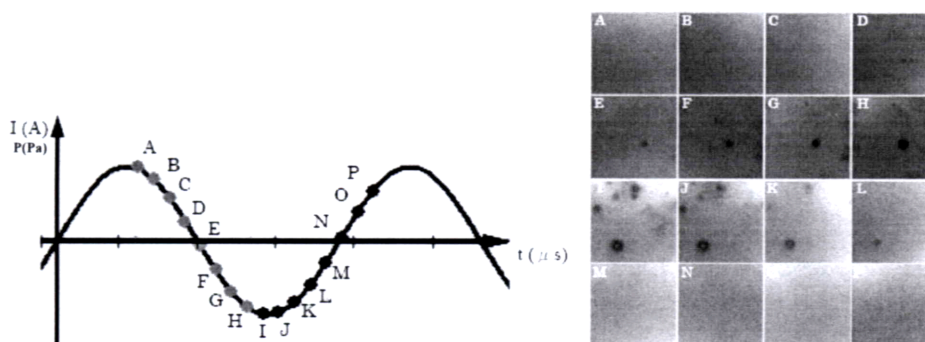
Από την αρχή της μελέτης του φαινομένου οι επιστήμονες είχαν διακρίνει δύο είδη ακουστικής σπηλαίωσης, την παροδική σπηλαίωση (transient cavitation) που προκαλείται από την βίαιη εφαρμογή των υπερήχων, και τη σταθερή σπηλαίωση (stable cavitation) που προκαλείται από την ήπια εφαρμογή υπερήχων (Neppiras, 1984). Με την πάροδο του χρόνου και τα δύο είδη μελετήθηκαν εκτενέστερα, με τη σταθερή σπηλαίωση να παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και έχοντας πλέον μετονομαστεί από stable cavitation σε rectified diffusion (ανορθωτική διάχυση).

4.4.1.3 Παροδική σπηλαίωση (Transient cavitation)

Όπως προαναφέρθηκε η ένταση του φαινομένου της σπηλαίωσης εξαρτάται από την ένταση και την πίεση του ακουστικού κύματος. Οι αέριες φυσαλίδες που δημιουργούνται κατά τη σπηλαίωση απορροφούν ενέργεια από το ακουστικό κύμα

και διευρύνονται. Κατά την εφαρμογή υπέρηχων υψηλής εντάσεως και πίεσης παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της παροδικής σπηλαιώσης. Μια αέρια φυσαλίδα εξαιτίας της υψηλής απορρόφησης ενέργειας μπορεί να δημιουργηθεί και να αναπτυχθεί ραγδαία λόγω αδράνειας. Αν στη φάση της πύκνωσης που ακολουθεί αμέσως μετά τη δημιουργία της, δηλαδή στη φάση αραιώσης του ακουστικού κύματος, η φυσαλίδα έχει προλάβει να αναπτυχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, τότε δεν έχει τον κατάλληλο χρόνο να αποσυμπιεστεί με αποτέλεσμα να καταρρέει εντός του ενός κύκλου ακουστικού κύματος.

Χαρακτηριστικό είναι το διάγραμμα που ακολουθεί από την εργασία των Chaoqun WU, Noritoshi Nakagawa και Masaya Fujihara, όπου παρουσιάζεται η δημιουργία, η ανάπτυξη και η κατάρρευση μια φυσαλίδας σε ένα κύκλο ακουστικού κύματος. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα η φυσαλίδα δημιουργείται στα αρχικά στάδια της αραιώσης, στα αρχικά στάδια της πύκνωσης λαμβάνει τη μεγαλύτερη ανάπτυξη της, ενώ στα τελικά στάδια πύκνωσης καταρρέει καθώς δεν προλαβαίνει να αποσυμπιεστεί. Μπορεί λοιπόν να ειπωθεί ότι η διάρκεια ζωής της φυσαλίδας βρίσκεται σε αντίθετη φάση με την πίεση του ακουστικού κύματος (Wu et al., 2006).



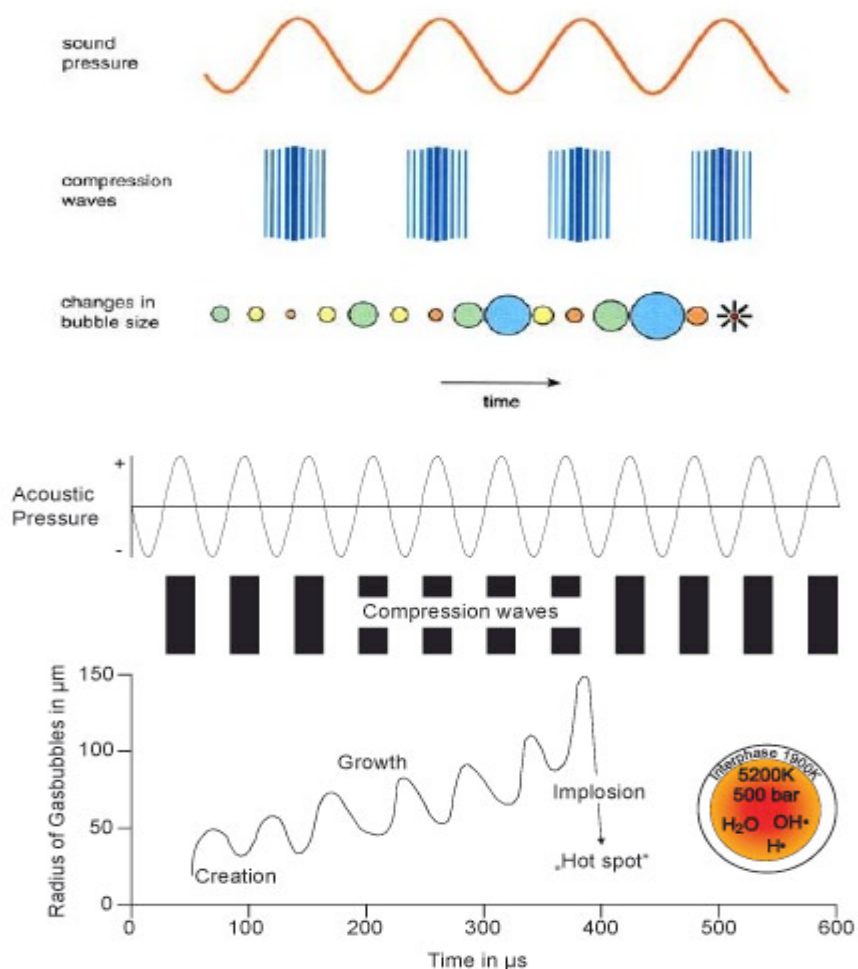
Εικόνα 4.2 Δημιουργία, ανάπτυξη και κατάρρευση μιας φυσαλίδας (Wu et al., 2006).

4.4.1.4 Σταθερή σπηλαιώση (Rectified diffusion)

Εκτός από την παροδική σπηλαιώση (transient cavitation), το φαινόμενο της σπηλαιώσης μπορεί να προκύψει και σε χαμηλότερης έντασης υπέρηχους, βάση μιας πιο αργής διαδικασίας που ονομάζεται rectified diffusion. Κατά την πύκνωση, στο πρώτο μισό του ημιτονοειδούς ακουστικού κύκλου, η φυσαλίδα συμπιέζεται και

αέριο διαχέεται εκτός αυτής στο περιβάλλοντα υγρό, ενώ κατά το δεύτερο μισό του κύκλου, στη φάση της αραιώσης, το αέριο εισρέει από το υγρό προς τη φυσαλίδα (Meidani and Hasan, 2003). Κάτω από αυτές τις συνθήκες, συνεχείς πυκνώσεις και αραιώσεις, το μέγεθος της φυσαλίδας ταλαντώνεται αναλόγως.

Κατά τη διάρκεια αυτής της παλμικής κίνησης η επιφάνεια της διαστελλόμενης φυσαλίδας είναι λίγο μεγαλύτερη από ότι της συστελλόμενης, με συνέπεια έπειτα από ορισμένους ακουστικούς κύκλους η φυσαλίδα να διογκώνεται, φτάνοντας σε ένα κρίσιμο μέγεθος, όπου δεν μπορεί πλέον να απορροφήσει επιπλέον ενέργεια από το ακουστικό κύμα. Χωρίς εισροή ενέργειας η φυσαλίδα δεν μπορεί να συνεχίσει να υπάρχει, με αποτέλεσμα το περιβάλλοντα υγρό να εισέρχεται σε αυτή και η φυσαλίδα να κατακρημνίζεται (Suslick, 1994).



Εικόνα 4.3 Απεικόνιση του φαινομένου rectified diffusion (Suslick, 1994; Gogate, 2003).

4.4.1.5 Θερμική θεωρία επεξήγησης του φαινομένου (Hot spot theory)

Το φαινόμενο της ακουστικής σπηλαιώσης αν και έχει μελετηθεί εκτενώς δεν είναι ακόμα απόλυτα κατανοητό. Για την ερμηνεία της χημείας των υπερήχων έχουν αναπτυχθεί θεωρίες, οι οποίες προσπαθούν να επεξηγήσουν τις χημικές ιδιότητες που παρουσιάζει η εφαρμογή αυτών σε υγρές διασπορές, εκ των οποίων δύο είναι οι βασικές ανταγωνίστριες. Η θερμική (hot spot theory) των Noltingk και Neppiras, που υποθέτει ότι οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την τελευταία πύκνωση πριν την κατάρρευση της φυσαλίδας ευθύνονται για τη διάσπαση των μοριακών δεσμών, και η ηλεκτρική (electrical theory) των Margulis και Lepoint, που υποθέτει ότι οι μικροαποφορτίσεις οφείλονται στα υψηλά ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται από τη διάσπαση των φυσαλίδων (Contamine et al., 1994).

Η επικρατέστερη από τις δύο θεωρίες είναι η θερμική, σύμφωνα με την οποία εκλύεται θερμότητα κατά την κατάρρευση της φυσαλίδας στο περιβάλλοντα υγρό. Υπολογίζεται ότι αναπτύσσονται θερμοκρασίες μέχρι 5000 K και πιέσεις μέχρι 1000 ατμόσφαιρες, με διάρκεια ζωής μικρότερη από 100 ns και ρυθμούς ψύξης μεγαλύτερους από 10^{10} K/s, ελευθερώνοντας με τον τρόπο αυτό ενέργεια ικανή για να παραχθούν δραστικές χημικές αντιδράσεις μέσω των θερμικών φαινομένων (Crum, 1994; Putterman, 1995).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκαλεί ο καθορισμός των θερμοκρασιών και των πιέσεων στο φαινόμενο της σπηλαιώσης καθώς είναι υπερβολικά μικρής διάρκειας και με έντονο ρυθμό μεταβολής. Οι πρώτοι που κατάφεραν να υπολογίσουν τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του φαινομένου είναι οι K.S. Suslick, D.A. Hammerton και R.E. Cline από το πανεπιστήμιο του Ιλλινόις, μέσω της τεχνικής “comparative – rate chemical thermometry”, όπου σε αντιδράσεις των οποίων οι απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας και πίεσης είχαν ήδη μετρηθεί, εφάρμοσαν αποτελεσματικά για την πραγματοποίησή τους υπερήχους.

4.4.1.6 Ενέργεια ακουστικής σπηλαιώσης

Η ακουστική σπηλαιώση ουσιαστικά αποτελεί ένα μηχανισμό συγκέντρωσης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου η συνεχής παραγόμενη χαμηλής έντασης ενέργεια του ακουστικού πεδίου μετατρέπεται σε υψηλής έντασης ενέργεια με την κατάρρευση των φυσαλίδων. Κατά την κατάρρευση η κινητική ενέργεια που

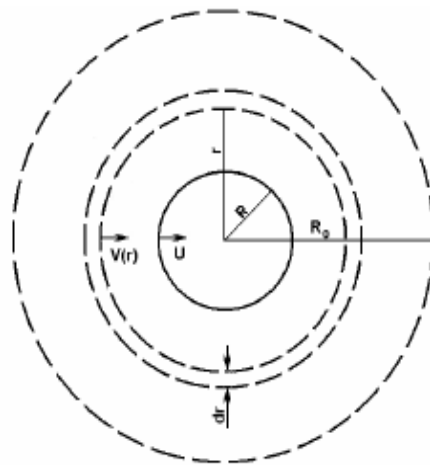
προκαλείται από την κίνηση του υγρού μετατρέπεται σε θερμική δημιουργώντας συνθήκες ιδανικές για ιδιαίτερα απαιτητικές σε ενέργεια χημικές διεργασίες. Σύμφωνα με τη μελέτη των (Lavrinenko and Leonov, 2007) η παραγόμενη ενέργεια κατά την κατάρρευση δίνεται από τη σχέση:

$$W = 2\pi\rho U^2 R^4 \int_R^\infty \frac{dr}{r^2} = 2\pi\rho U^2 R^3$$

με τη ταχύτητα να δίνεται από τη σχέση:

$$U = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{P}{\rho}\right) \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1\right)}$$

όπου U η ταχύτητα της φυσαλίδας, P η πίεση του ακουστικού πεδίου και R και R_0 οι ακτίνες της φυσαλίδας κατά το φαινόμενο της ακουστικής σπηλαιώσης



Εικόνα 4.4 Απεικόνιση φυσαλίδας κατά το φαινόμενο της σπηλαιώσης (Parfutchik, 2007)

4.4.1.7 Παράγοντες επιρροής

Έχει ήδη αναφερθεί ότι το φαινόμενο της ακουστικής σπηλαιώσης εξαρτάται από την ένταση και την ακουστική πίεση των υπέρηχων που το προκαλούν. Υψηλής

έντασης υπέρηχοι οδηγούν στο φαινόμενο της παροδικής σπηλαιώσης, ενώ χαμηλότερης στο φαινόμενο *rectified diffusion*, με όσο υψηλότερη είναι η ένταση τόσο πιο έντονο να είναι το φαινόμενο της σπηλαιώσης

Όσον αφορά όμως τον παράγοντα πίεση δεν ισχύει κάτι αντίστοιχο όπως με την ένταση. Παρά το ότι γενικά ισχύει όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της ακουστικής σπηλαιώσης, υπάρχει κάποιο όριο έπειτα από το οποίο η αύξηση της δεν οδηγεί και σε εντονότερη ακουστική σπηλαιώση. Αυτό οφείλεται στην παράλληλη αύξηση του κατώτατου ορίου πίεσης, *cavitation threshold*, που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να προκληθεί σπηλαιώση (Sauter et al., 2007).

Τέλος βάση ορισμένων επιστημονικών μελετών έχει παρατηρηθεί ότι όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα των υπέρηχων που εφαρμόζονται τόσο πιο γρήγορα προκαλείται το φαινόμενο της σπηλαιώσης και με λιγότερο παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά (Laborde et al., 2000).

4.4.2 Acoustic streaming

4.4.2.1 Ιστορική αναδρομή

Ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα που προκαλεί η εφαρμογή υπέρηχων στις υγρές διασπορές είναι, βάση της ξένης ορολογίας καθώς στα ελληνικά δεν υπάρχει σαφής ορισμός, το φαινόμενο *acoustic streaming*. Ο συγκεκριμένος όρος στα ελληνικά θα μπορούσε να αποδοθεί, χωρίς να είναι ακριβής, ως ακουστικό ρεύμα ή ακουστικοί μικροχείμαρροι.

Το φαινόμενο *acoustic streaming* προκαλείται λόγω της εξασθένησης των ακουστικών κυμάτων κατά τη διέλευση τους μέσω μίας υγρής διασποράς (Frenkel et al., 2001). Βάση διαφόρων μελετών αναφέρεται ότι είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε διεργασίες που αφορούν τη διεπιφάνεια στερεής – υγρής φάσης, όπως στη μεταφορά θερμότητας ή στον καθαρισμό επιφανειών (Looh et al., 2002).

Ο πρώτος που μελέτησε το συγκεκριμένο φαινόμενο ήταν ο Rayleigh (1945). Περισσότερες μελέτες πάνω στο θεωρητικό υπόβαθρο πραγματοποιήθηκαν από τους Schlichting (1955), Nyborg (1958) και Lighthill (1978), όπου δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο θεμελιώδη ρόλο της σκέδασης της ακουστικής ενέργειας που προκαλεί συνεχή αλλαγές στη φορά της ορμής του *acoustic streaming*. Επίσης οι Jackson και Nyborg ασχολήθηκαν με τα χαρακτηριστικά του προκαλούμενου από ηχητική

δονούμενη διαμήκη πηγή acoustic streaming, ενώ με τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου ασχολήθηκαν και οι Bolyriaan και Morris (Kumar et al., 2007).

4.4.2.2 Δημιουργία φαινομένου

Το φαινόμενο acoustic streaming είναι η προκαλούμενη συνεχής ροή σε ένα υψηλής έντασης ακουστικό πεδίο (Looh et al., 2002). Όσον αφορά τις υγρές διασπορές συναντάται ως αποτέλεσμα συμβολής του πεδίου ακουστικής πίεσης και του φαινομένου της ακουστικής σπηλαιώσης, καθώς η προκαλούμενη εξασθένηση του κύματος κατά τη διέλευση του οδηγεί σε μείωση της ενέργειας με συνέπεια την εμφάνιση ροής (Kumar et al., 2007). Υπάρχουν δύο γνωστοί παράγοντες που δημιουργούν το φαινόμενο του acoustic streaming, η χωρική εξασθένηση σε ελεύθερο πεδίο και η τριβή μεταξύ του μέσου διάδοσης και ενός, συνήθως δονούμενου, αντικειμένου (Lee and Wang, 1990).

Η χωρική εξασθένηση σε ελεύθερο πεδίο, δηλαδή στο κυρίως σώμα της διασποράς όπου διαδίδεται το κύμα, παρατηρείται περισσότερο σε αέριες παρά σε υγρές μορφές διασπορές και είναι γνωστή με τον όρο quartz wind (Riley, 1998). Όταν ηχητικά κύματα διαδίδονται σε ένα μέσο προκαλείται εξασθένηση αυτών εξαιτίας του φαινομένου της απορρόφησης και της σκέδασης, η οποία όσον αφορά μικρού μήκους διάδοση είναι αμελητέα. Στην περίπτωση όμως υψηλής έντασης υπερήχων παρόμοια απορρόφηση οδηγεί σε εξασθένηση πίεσης ικανή να δημιουργήσει σταθερή ροή στο μέσο διάδοσης (Looh et al., 2002). Αναφέρεται ότι εξασθένηση σε ελεύθερο πεδίο στην υγρή φάση εμφανίζεται κυρίως σε διασπορές υψηλού ιξώδους.

Όπως προαναφέρθηκε η προκαλούμενη ροή λόγω χωρικής εξασθένησης στο κυρίως σώμα της διασποράς αποκαλείται quartz wind, έχει επικρατήσει λοιπόν στην επιστημονική κοινότητα, με τον όρο acoustic streaming να αποκαλείται η συνεχής ροή που προκαλείται λόγω τριβής του μέσου διάδοσης με δονούμενες επιφάνειες και μεμβράνες ή με επιφάνειες που αποτελούν φυσικά όρια, όπως τα τοιχώματα ενός αντιδραστήρα (Lee and Wang, 1990). Η δημιουργία του φαινομένου προκαλείται είτε από καμπτική είτε από διαμήκη δόνηση και η ένταση του εξαρτάται από τη συχνότητα και το εύρος της δόνησης (Looh et al., 2002). Αναφέρεται ότι για να παρατηρηθεί το φαινόμενο οπτικά είναι απαραίτητο η δονούμενη επιφάνεια να έχει συχνότητα και εύρος μεγαλύτερο από κάποιο όριο, το οποίο όμως δεν μπορεί να

καθοριστεί πλήρως ως συνάρτηση λόγω της ιδιαίτερα περίπλοκης φύσης του φαινομένου.

4.2.2.3 Χαρακτηριστικά φαινομένου

Παρά την ημιτονοειδή φύση της μετάδοσης των ακουστικών κυμάτων έχει παρατηρηθεί ότι η κίνηση των σωματιδίων που προκαλείται στο μέσο διάδοσης δεν είναι παντού αυστηρά ημιτονοειδής καθώς επίσης και χρονικά εξαρτώμενη, όπως ορίζουν οι εξισώσεις Navier – Stokes, γεγονός που όπως προαναφέρθηκε οφείλεται στην απορρόφηση της ενέργειας του κύματος (Busnaina and Gale, 1995). Ισχύει επίσης ότι στο μέσο όπου διαδίδονται υπερηχητικά κύματα η προκαλούμενη ροή δεν έχει τα ίδια χαρακτηριστικά σε όλο τον όγκο του.

Βάση επιστημονικών μελετών το φαινόμενο acoustic streaming, που προκαλείται λόγω τριβής μεταξύ του μέσου διάδοσης και μίας επιφάνειας, απαρτίζεται από δύο κυρίως ξεχωριστά μέρη, το εξωτερικό και το εσωτερικό streaming. Ο διαχωρισμός αυτός οφείλεται στην ύπαρξη ενός ορίου, εκτός του οποίου το μέσο δονείται μεν περιστροφικά, αλλά εν μέρει ακανόνιστα σε σχέση με το ακουστικό πεδίο, ενώ εντός αυτού η ροή είναι κυκλική (Lighthill, 1978). Το όριο που καθορίζει το εσωτερικό από το εξωτερικό streaming είναι μία λεπτή συνοριακή επιφάνεια (Kuznetsova and Coakley, 2007) που χαρακτηρίζεται ως:

$$\delta = \sqrt{(2\nu/\omega)}, \text{όπου}$$

δ , είναι το πάχος της συγκεκριμένης επιφάνειας,

ν , είναι το κινητικό ιξώδες του μέσου και

ω , είναι η γωνιακή συχνότητα του κύματος.

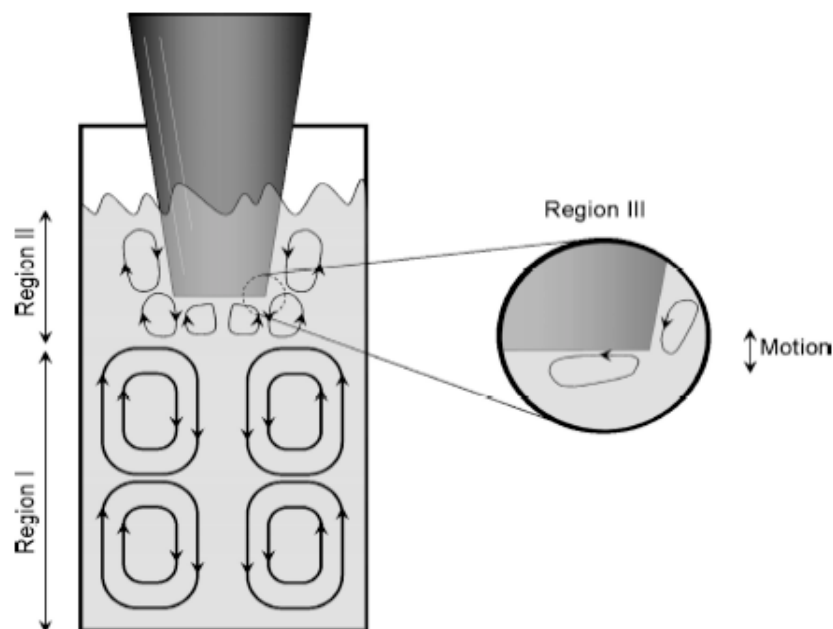
Στην περίπτωση υψηλής έντασης υπέρηχων το πάχος της συγκεκριμένης επιφάνειας είναι της τάξης ορισμένων δεκάδων μικρομέτρων, προκαλώντας ένα λεπτό στρώμα υψηλής έντασης περιστροφικής ροής, το οποίο είναι ικανό προς μεταφορά θερμότητας και μάζας (Looh et al., 2006), ενώ μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα των κυμάτων (Busnaina and Gale, 1995). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για συχνότητα 20 kHz σε υδατικές διασπορές στους 20 °C το όριο αυτό είναι

μικρότερο από 4 μm (Graff, 1998), ενώ για 2 MHz περίπου 0,27 μm (Kuznetsova and Coakley, 2007).

Το streaming, εκτός του κύριου διαχωρισμού σε εσωτερικό ή εξωτερικό, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρία βασικά είδη:

- Eckart streaming
- Rayleigh streaming
- Schlichting streaming

εκ των οποίων τα δύο πρώτα είδη ανήκουν στην κατηγορία του εξωτερικού streaming, ενώ το τελευταίο στο εσωτερικό streaming.



Εικόνα 4.5 Χαρακτηριστικές περιοχές acoustic streaming (Khanal et al., 2007).

Το Eckart streaming αποτελεί το μεγαλύτερο σε έκταση είδος και λαμβάνει χώρα σε πιο μακρινή απόσταση από τη δονούμενη επιφάνεια σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη streaming. Παρουσιάζει περιστροφική ροή της οποίας όμως η ακριβής μορφή καθορίζεται από το σχήμα του δοχείου όπου βρίσκεται η υγρή διασπορά και από το μήκος κύματος των εφαρμοζόμενων υπερήχων (Khanal et al., 2007).

Το δεύτερο είδος streaming συναντάται στις όχι τόσο απομακρυσμένες περιοχές από το σημείο δόνησης και ονομάζεται Rayleigh streaming. Παρουσιάζει περιστροφική ροή αλλά το ακριβές σχήμα της καθορίζεται από τη συχνότητα και το

εύρος της δόνησης. Χαρακτηριστικό είναι πάντως το γεγονός ότι το μήκος κύματος της κυκλοφορίας για το συγκεκριμένο είδος είναι αρκετά υψηλότερο από αυτό των μεταδιδόμενων ακουστικών κυμάτων.

Το τρίτο είδος ονομάζεται Schlichting streaming ή Schlichting micro-streaming και παρουσιάζεται πολύ κοντά στην επιφάνεια δόνησης. Ουσιαστικά αποτελεί ροή με μορφή στροβίλων εντός του λεπτού ορίου που καθορίζει το εσωτερικό streaming όπου η εφαπτομενική ταχύτητα του υγρού είναι παραπλήσια της ταχύτητας ταλάντωσης (Khanal et al., 2007).

4.2.2.4 Παράγοντες επιρροής

Η ταχύτητα του acoustic streaming επηρεάζεται από τις ιδιότητες της υγρής διασποράς, όπως ακουστική εξασθένηση, ιξώδες και ταχύτητα του ήχου στο μέσο, καθώς επίσης από την ένταση, τη συχνότητα και την πίεση του διαδιδόμενου κύματος και τέλος από τα χαρακτηριστικά της πηγής παραγωγής του κύματος (Nyborg, 1965), (Nightingale et al., 1999).

Η ταχύτητα streaming αυξάνεται κατά την εφαρμογή υπερήχων σε διασπορές μεγάλης ακουστικής εξασθένησης, ενώ μειώνεται σε διασπορές υψηλού ιξώδες (Shi et al., 2001). Επίσης ισχύει ότι αύξηση της συχνότητας ή της πίεσης οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες streaming. Εικάζεται ότι η αύξηση της ταχύτητας σε μεγαλύτερες συχνότητες οφείλεται σε τυχόν μεγαλύτερη εξασθένηση του ακουστικού κύματος, ενώ σε μεγαλύτερες πιέσεις λόγω μεταφοράς υψηλότερων ποσοτήτων ενέργειας (Nightingale et al., 1999).

Είναι γνωστό ότι σε χαμηλές συχνότητες υπερήχων οι φυσαλίδες που δημιουργούνται κατά την ακουστική σπηλαιώση είναι μεγάλου μεγέθους και η κατάρρευση τους είναι βίαιη, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες δημιουργούνται μικρότερες φυσαλίδες οπότε η ακουστική σπηλαιώση έχει πιο ήπια χαρακτηριστικά. Αντιστρόφως η ακουστική ενέργεια που παράγεται από μία πηγή υψηλής συχνότητας υπέρηχων απορροφάται κυρίως από τη διασπορά και όχι από το φαινόμενο της ακουστικής σπηλαιώσης οδηγώντας σε μεγαλύτερες ταχύτητες streaming σε σχέση με μικρότερης συχνότητας πηγές, όσον αφορά πάντα ίδιας έντασης υπερήχους (Muthukumaran et al., 2007).

Τέλος σύμφωνα με θεωρητικές μελέτες των Fogler και Lund καθώς και μελέτες του Rooney αποδείχθηκε ότι η ταχύτητα του acoustic streaming είναι ανάλογη της

συχνότητας της πηγής παραγωγής των υπερήχων. Αναλυτικότερα αποδείχθηκε ότι υπάρχει μία θετική γραμμική σχέση ανάμεσα στο μέγιστο της ταχύτητας streaming και της ακουστικής έντασης. Τα αποτελέσματα αυτά ήρθαν σε συμφωνία με προγενέστερες μελέτες του Barnett όπου η σχέση μεταξύ της μέγιστης ταχύτητας streaming και της ακουστικής έντασης (Frenkel et al., 2001) ορίζεται ως εξής:

$$u_s = \left(\frac{\alpha \times I}{\mu \times c} \right) \times r^2 \times \Phi, \text{ όπου}$$

α , είναι ο συντελεστής ακουστικής εξασθένησης του μέσου

μ , είναι το ιξώδες της διασποράς

c , είναι η ταχύτητα του ήχου στο μέσο

r , είναι η ακτίνα της δέσμης των υπερήχων

Φ , είναι ο γεωμετρικός συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από τις διαστάσεις του χώρου και συνήθως καθορίζεται εμπειρικά.

4.2.3 Υπερηχοφωταύγεια (Sonoluminescence)

4.2.3.1 Εισαγωγή στο φαινόμενο της υπερηχοφωταύγειας

Η ακτινοβολία υγρών διασπορών από υψηλής ενέργειας υπέρηχους είναι γνωστό ότι δημιουργεί φυσαλίδες οι οποίες κατακρημνίζονται βίαια (φαινόμενο ακουστικής σπηλαιώσης), προκαλώντας ιδιαίτερα ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Διαπιστώθηκε έπειτα από μελέτες ότι οι συνθήκες αυτές ήταν υπεύθυνες για ένα πολύ ιδιαίτερο φαινόμενο που παρατηρήθηκε κατά το βίαιο κατακρήμνισμα των φυσαλίδων, την έκλυση φωτός (McNamara et al., 2000). Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίστηκε διεθνώς με τον όρο sonoluminescence, όπου στα ελληνικά μπορεί να αποδοθεί με το σύνθετο όρο υπερηχοφωταύγεια. Με τον όρο λοιπόν sonoluminescence ορίζεται η παλμική έκλυση φωτός από κατακρημνιζόμενες αέριες φυσαλίδες μίας υγρής διασποράς που ιονίζεται από υψηλής έντασης ακουστικό πεδίο (Borissenok, 2007). Υπάρχουν δύο κατηγορίες υπερηχοφωταύγειας (Crum, 1994; Matula et al., 1995): η πολλαπλών φυσαλίδων και η μονής φυσαλίδας υπερηχοφωταύγεια, γνωστά ως multi-bubble (MBLS) και single-bubble sonoluminescence (SBLS) αντίστοιχα.

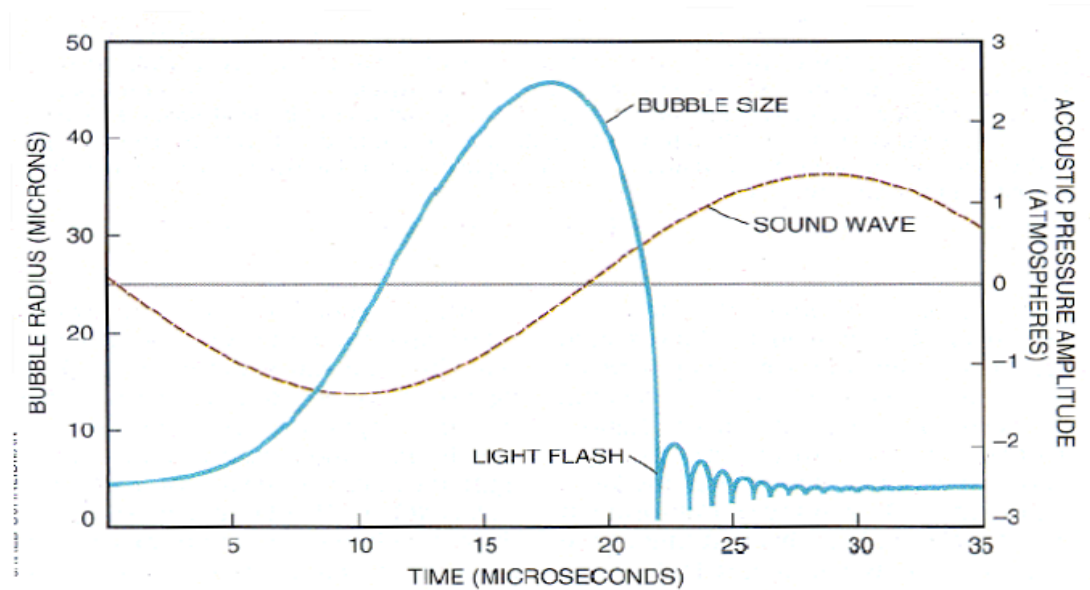
Η υπερηχοφωταύγεια πολλαπλών φυσαλίδων παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1933 από τους Marinesco και Trillat αλλά οι πρώτοι που συνέδεσαν την έκλυση φωτός με το φαινόμενο ήταν οι Frenzel και Schultes το 1934. Την εποχή εκείνη η συγκεκριμένη ανακάλυψη δεν θεωρήθηκε αρκετά σημαντική με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιηθούν περαιτέρω μελέτες. Χρειάστηκε να περάσουν 50 και πλέον χρόνια για να δημοσιοποιηθεί η πρώτη μελέτη που αφορούσε το φαινόμενο της υπερηχοφωταύγειας μονής φυσαλίδας από τους Gaitan και Crum το 1990, οι οποίοι στην πειραματική τους μελέτη κατάφεραν να παγιδεύσουν μία φυσαλίδα σε μία υγρή διασπορά όπου διαδιδόταν ένα στάσιμο κύμα (Kanthale et al., 2006).

Παρά τις διάφορες θεωρητικές και πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί το φαινόμενο της υπερηχοφωταύγειας δεν έχει επεξηγηθεί πλήρως καθώς υπάρχουν πολλά αναπάντητα ερωτήματα. Είναι χαρακτηριστικό ότι παρά το ότι έχουν αναπτυχθεί δύο θεωρίες που προσπαθούν να επεξηγήσουν το φαινόμενο, η θερμική και η ηλεκτρική, καμία δεν το επιτυγχάνει πλήρως. Σύμφωνα με την πρώτη το εκπεμπόμενο φως είναι το αέριο που θερμαίνεται μέσα στη φυσαλίδα κατά την κατακρήμνιση αυτής, ενώ βάση της δεύτερης η περιοχή από όπου εκπέμπεται φως είναι το αέριο στο εσωτερικό της φυσαλίδας ή στην υγρή διασπορά (Borissenok, 2007). Τέλος πολλοί μελετητές έχουν επισημάνει την ιδιαίτερως περίπλοκη φύση του φαινομένου καθώς πιστεύουν ότι η υπερηχοφωταύγεια είναι συνδυασμός της ακτινοβολίας μαύρου σώματος ή βάση της διεθνούς ορολογίας black body radiation (Notlingk et al., 1950), της ακτινοβολίας επιβράδυνσης ή bremsstrahlung (Yasui et al., 2004) και της εκπομπής υπερδιεγερμένων σωματιδίων ή excited state emission (Didenko et al., 2000).

4.2.3.2 Είδη υπερηχοφωταύγειας

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν δύο κατηγορίες υπερηχοφωταύγειας, η πολλαπλών φυσαλίδων και η μονής φυσαλίδας υπερηχοφωταύγεια. Υπερηχοφωταύγεια πολλαπλών φυσαλίδων παρατηρείται σε υγρές διασπορές όταν στο πεδίο που προκαλείται λόγω ακουστικής σπηλαιώσης (cavitation field), το οποίο εμπεριέχει πολύ μεγάλο αριθμό αμοιβαία αλληλοεπιδρώντων φυσαλίδων, η ακουστική σπηλαιώση έχει την απαραίτητη ένταση ώστε να προκληθεί έκλυση φωτός (Suslick et al., 1999).

Σε αντίθεση με των πολλαπλών φυσαλίδων το φαινόμενο της υπερηχοφωταύγειας μονής φυσαλίδας παρατηρείται μόνο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες όταν η ακουστική δύναμη επιτυγχάνει να συγκρατεί μία φυσαλίδα σε σταθερή θέση, ακινητοποιώντας την ουσιαστικά μέσα στην υγρή διασπορά υπερνικώντας την άνοση, όπου αυτή η μόνη και σταθερά ταλαντευόμενη φυσαλίδα εξαιτίας των πολύ υψηλής έντασης ακουστικών παλμών που δέχεται, εκπέμπει φως κατά τη διάρκεια κάθε ακουστικού κύκλου (Cheeke, 1997).



Εικόνα 4.6 Καμπύλη φάσματος-χρόνου μίας φυσαλίδας αέρα σε έναν ακουστικό κύκλο (Putterman, 1995).

Έχει υπολογισθεί, σύμφωνα με πειραματικές και θεωρητικές μελέτες, ότι οι φυσαλίδες που εκπέμπουν φως έχουν μέγεθος αρκετά μικρότερο συγκριτικά με το μήκος κύματος του ακουστικού πεδίου. Χαρακτηριστικά σε συχνότητα 20kHz το μέγιστο μέγεθος ακτίνας που έχει παρατηρηθεί σε πειράματα υπερηχοφωταύγειας μονής φυσαλίδας είναι 50 μm (Suslick et al., 1999). Επίσης σε παρόμοια πειράματα έχει υπολογισθεί ότι η διάρκεια έκλυσης φωτός είναι της τάξεως των 40 έως 350 ps (Yasui, 1999).

4.2.3.3 Χαρακτηριστικά και διαφορές SBSL και MBSL

Είναι γεγονός ότι και τα δύο είδη υπερηχοφωταύγειας ορίζονται στο πεδίο της ημιαδιαβατικής συμπίεσης των φυσαλίδων, οπότε θα ήταν αναμενόμενο να λογίζονται ως δύο επιμέρους καταστάσεις του ίδιου φαινομένου. Παρόλα αυτά η επιστημονική κοινότητα σήμερα, παρά τις αρχικές υποθέσεις, δεν έχει καταλήξει αν οι δύο αυτές περιπτώσεις υπερηχοφωταύγειας αποτελούν δύο υποκατηγορίες ενός φαινομένου ή είναι δύο εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους φαινόμενα (Borissenok, 2007). Ο λόγος είναι ότι παρά τις αρκετές ομοιότητες οι δύο συγκεκριμένες καταστάσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερα σημαντικές διαφορές.

Χαρακτηριστικότερη αυτών αποτελεί η δραματική διαφορά στο φάσμα των δύο περιπτώσεων (Matula et al., 1995), καθώς και ότι το φάσμα της υπερηχοφωταύγειας μονής φυσαλίδας είναι ελάχιστα ερμηνεύσιμο. Σημαντικό είναι ακόμα ότι η υπερηχοφωταύγεια πολλαπλών φυσαλίδων παρατηρείται σε όλες σχεδόν τις υγρές διασπορές ενώ η μονής φυσαλίδας αποκλειστικά σε υδάτινες διασπορές (Suslick et al., 1999). Τέλος η σφοδρότητα της κατάρρευσης σε καταστάσεις υπερηχοφωταύγειας μονής φυσαλίδας είναι αρκετά εντονότερη, ίσως λόγω της σφαιρικής φύσης της φυσαλίδας καθώς σε καταστάσεις πολλαπλών φυσαλίδων το σχήμα αυτών απέχει αρκετά από το σφαιρικό, με αποτέλεσμα τις πολύ υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες (Suslick et al., 1999). Υπολογίζεται ότι οι θερμοκρασίες σε καταστάσεις υπερηχοφωταύγειας μονής φυσαλίδας είναι από δύο έως δέκα φορές μεγαλύτερες, ενώ οι πιέσεις έως και δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερες.

Πίνακας 4.1 Σημαντικότερες διαφορές μεταξύ SBML και MBSL (Yasui, 1999)

	<i>SBSL</i>	<i>MBSL</i>
Θερμοκρασία	10000 - 50000 K	3000 – 5000 K
Πίεση	10^9 - 10^{10} (Pa)	10^7 – 10^8 (Pa)
Εκπομπή φωτός	Πλάσμα	Μοριακή

4.2.3.4 Παράγοντες επιρροής

Βασικοί παράγοντες επιρροής του φαινομένου της υπερηχοφωταύγειας είναι η ακουστική ισχύς και η συχνότητα. Όσον αφορά την ακουστική ισχύ τα πράγματα

είναι πιο ξεκάθαρα καθώς έχει αποδειχθεί ότι αύξηση αυτής, σε σταθερή πάντα ακουστική συχνότητα, οδηγεί σε αύξηση της έντασης του φαινομένου της υπερηχοφωταύγειας. Γεγονός που δικαιολογείται από την αύξηση του αριθμού των φυσαλίδων ακουστικής σπηλαιώσης καθώς και από την αύξηση του μεγέθους αυτών λόγω έκθεσης σε εντονότερες συνθήκες αρνητικής πίεσης κατά την φάση της συμπίεσης και θετικής πίεσης κατά την φάση της εκτόνωσης (Kanthale et al., 2006).

Για την ακουστική συχνότητα όμως τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα καθώς η αύξηση αυτής μειώνει το χρόνο ανάπτυξης των φυσαλίδων και οδηγεί σε ταχύτερη κατάρρευση αυτών, οπότε για να παρουσιαστούν τα ίδια αποτελέσματα όπως σε χαμηλότερες συχνότητες είναι απαραίτητη η αύξηση της ακουστικής πίεσης. Οπότε όσον αφορά την ακουστική συχνότητα είναι αντιληπτό ότι είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ακουστική πίεση και μέχρι στιγμής μόνο υποθέσεις μπορούν να γίνουν για την επιρροή αυτής στο φαινόμενο της υπερηχοφωταύγειας (Kanthale et al., 2006).

5. ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

5.1 ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Σκοπός της έρευνας είναι η μελέτη του φαινομένου της συσσωμάτωσης κολλοειδών διασπορών μέσω της χρήσης υπερηχητικών κυμάτων σε μακροσκοπικές διαστάσεις.

Οι διασπορές στις οποίες επιβλήθηκαν υπέρηχοι ήταν:

- υδατικές διασπορές με διαλυμένα σωματίδια καολινίτη και
- υδατικές διασπορές με διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm.

Κατά την πειραματική διαδικασία μελετήθηκε η επιρροή ορισμένων παραμέτρων στη διαδικασία της συσσωμάτωσης, όπως:

- η συχνότητα των υπέρηχων
- η ισχύς των υπέρηχων
- ο χρόνος εφαρμογής των κυμάτων
- η χρήση ή μη κροκιδωτικού
- ο τρόπος εφαρμογής των κυμάτων

5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Ως πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε το σύστημα παραγωγής συχνοτήτων υψηλής πίεσης της Meinhardt Ultraschalltechnik με την ονομασία Multifrequency high power system MFLG – transducer E/805/T/M, με μετασηματιστή υπέρηχων το ultrasonic transducer E/805/T και με αντιδραστήρα το T02 glass reactor.

Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στις Εικόνες 5.1 και 5.2 και αποτελείται από:

- ένα γυάλινο κυλινδρικό αντιδραστήρα μήκους 50 cm με εσωτερική διάμετρο 7 cm και με πλευρικά τοιχώματα πάχους 1 cm
- ένα μετασηματιστή εκπομπής υπέρηχων
- έναν ενισχυτή παραγωγής υψηλών πιέσεων
- μια γεννήτρια συνεχούς εκπομπής υπέρηχων υψηλής συχνότητας και
- μια συσκευή παλμικής εκπομπής υπέρηχων

Η συγκεκριμένη διάταξη έχει την ικανότητα εκπομπής κυμάτων στις συχνότητες των 582 kHz, 862 kHz και 1142 kHz, με μέγιστη ισχύ παραγωγής στα 250 W.



Εικόνα 5.1 α) MFLG – transducer E/805/T/M, β) transducer E/805/T και γ) T02 glass reactor



Εικόνα 5.2 Πειραματική διάταξη υπερήχων

5.2.1 Υλικά παρασκευής κολλοειδών διασπορών

Για τη δημιουργία των κολλοειδών διασπορών από καολινίτη χρησιμοποιήθηκε το προϊόν “pure natural kaolinite” της εταιρίας Fluka Analytical, ενώ για τη δημιουργία κολλοειδών διασπορών από μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm χρησιμοποιήθηκαν τα “latex microspheres suspensions d 1 μm ” της σειράς “research and test particles” της Duke Scientific Corporation. Τα συγκεκριμένα προϊόντα διαλύθηκαν σε απιονισμένο νερό, το οποίο παρασκευάστηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Σε ορισμένα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έγινε χρήση αλκαλικότητας και κροκιδωτικού. Ως αλκαλικότητα χρησιμοποιήθηκε όξινο ανθρακικό νάτριο NaHCO_3 (10g/L), ενώ ως κροκιδωτικά χρησιμοποιήθηκαν θειικό αργίλιο $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L) ή χλωριούχο ασβέστιο CaCl_2 (5g/L). Όλες οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν προϊόντα της εταιρίας Riedel – de Haen.

Στη συγκεκριμένη μελέτη λόγω των πολλών και διαφορετικών δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση των αντίστοιχων πειραματικών σειρών, είναι δύσκολο να δοθεί μια γενική περιγραφή της διαδικασίας παρασκευής δείγματος. Η διαδικασία παρασκευής του εκάστοτε δείγματος θα περιγράφεται λεπτομερώς κατά την παρουσίαση της αντίστοιχης πειραματικής σειράς

5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Κατά την πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκαν ορισμένες μετρήσεις ώστε να μελετηθεί το ενδεχόμενο επίτευξης ή όχι του φαινομένου της συσσωμάτωσης, καθώς και ο βαθμός επιτυχίας αυτού. Οι παράμετροι οι οποίες μετρήθηκαν ήταν οι εξής:

- η θολότητα
- το δυναμικό ζήτα (zeta potential) και
- το μέγεθος των σωματιδίων του δείγματος

Η θολότητα αποτελεί το πρώτο μέτρο καθαρότητας των υγρών διασπορών καθώς και μέτρο ύπαρξης σωματιδίων σε αυτές. Στη συγκεκριμένη μελέτη για τις

μετρήσεις θολότητας χρησιμοποιήθηκε το όργανο “Turbidimeter model 2100A” της Hack company.

Το δυναμικό ζήτα αποτελεί την πρώτη ένδειξη ηλεκτροκινητικού δυναμικού των κolloειδών διασπορών, αντικατοπτρίζοντας ουσιαστικά τη σταθερότητα των διασπορών. Διασπορές με υψηλό δυναμικό ζήτα, ανεξαρτήτως πρόσημου, θεωρούνται σταθερές, ενώ διασπορές με δυναμικό ζήτα κοντά στο μηδέν τείνουν να συσσωματωθούν. Οι μετρήσεις δυναμικού ζήτα πραγματοποιήθηκαν με χρήση του οργάνου “Zetasizer – Nano Zs” από τη σειρά “Nano series” της εταιρίας Malvern instruments.

Η μέτρηση του μεγέθους των σωματιδίων πραγματοποιήθηκε ώστε να γίνει μία πιο διεξοδική έρευνα στη σύσταση των κolloειδών διασπορών μετά την υποβολή αυτών σε υπέρηχους. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το όργανο “Mastersizer 2000 μP” της εταιρίας Malvern instruments. Η συγκεκριμένη μέτρηση δεν πραγματοποιήθηκε σε όλες τις πειραματικές σειρές αλλά σε ορισμένες εξ αυτών.

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν βάση συγκεκριμένης χρονικής σειράς, ακολουθώντας τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας. Αναλυτικότερα η πειραματική διαδικασία αποτελείτο από τα εξής στάδια:

- δημιουργία του διαλύματος
- εφαρμογή υπέρηχων στο διάλυμα
- καθίζηση διάρκειας 30 min

και οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν αμέσως μετά το πέρας κάθε σταδίου. Η πρώτη σειρά μετρήσεων γίνονταν πριν την εφαρμογή των υπέρηχων στην υδάτινη κolloειδή διασπορά, η δεύτερη αμέσως μετά την εφαρμογή και η τελευταία μετά το πέρας της καθίζησης διάρκειας 30 min.

Τέλος σημειώνεται ότι για κάθε σειρά μετρήσεων λαμβάνονταν δείγμα όγκου 25 mL από τρεις συγκεκριμένες περιοχές του κυλινδρικού αντιδραστήρα, εντός του οποίου πραγματοποιούνταν το πείραμα. Οι συγκεκριμένες περιοχές ήταν:

- 2 cm κάτω από την επιφάνεια του διαλύματος
- στο μέσον του διαλύματος και
- 2 cm πάνω από τον πυθμένα του αντιδραστήρα.

Κλείνοντας αναφέρεται ότι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές σειρές καθώς και όλες οι πειραματικές

μετρήσεις ήταν οι επικρατούσες συνθήκες εντός του Εργαστηρίου Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΥΔΑΤΙΚΕΣ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΔΙΑΣΠΟΡΕΣ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΚΑΟΛΙΝΙΤΗ

Στη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων μελετάται το φαινόμενο της συσσωμάτωσης σε υδατικές κολλοειδή διασπορές με διαλυμένα σωματίδια καολινίτη. Ειδικότερα πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε διασπορές με τα εξής χαρακτηριστικά:

- απλές διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό
- διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου, CaCl_2 (5g/L), ως κροκιδωτικό
- διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L), ως αλκαλικότητα, και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L), ως κροκιδωτικό.

Σε κάθε είδος διασποράς πραγματοποιήθηκαν πειράματα, στα οποία η εφαρμογή των υπέρηχων ήταν συνεχής και οι μεταβλητές παράμετροι ήταν η συχνότητα, η ισχύς και ο χρόνος εφαρμογής αυτών. Στις διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου και θεικού αργιλίου πραγματοποιήθηκαν ορισμένα επιπλέον πειράματα όπου μελετήθηκε και η παλμική εφαρμογή των υπέρηχων.

5.4.1 Μελέτη επίδρασης υπέρηχων συνεχούς εφαρμογής σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό

5.4.1.1 Χαρακτηριστικά δείγματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή του συγκεκριμένου δείγματος είναι η εξής:

Σε ποτήρι αναδέυσεως χωρητικότητας 2 L διαλύθηκαν 0,4 g καολινίτη σε 2 L αποσταγμένου νερού. Το διάλυμα αφέθηκε σε περιοδική ανάδευση για 24 h στις 60 στρ/min. Μετά το πέρας των 24 ωρών επιβλήθηκε στο διάλυμα διαδικασία ταχείας ανάδευσης στις 100 στρ/min για 1 min και στη συνέχεια ανάδευση για 30 min. στις

80στρ/min. Έπειτα ακολούθησε διαδικασία καθίζησης για 30 min. Από το διάλυμα των 2 L επιλέχθηκε το υπερκείμενο 1 L, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό το τελικό διάλυμα με τα εξής χαρακτηριστικά:

- θολότητα: 55 – 60 NTU και
- zeta potential: -24 – -28 mV

Σε κάθε πείραμα τοποθετήθηκαν στον αντιδραστήρα 900 mL από το διάλυμα.

5.4.1.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Στη συγκεκριμένη πειραματική σειρά η εφαρμογή των υπέρηχων ήταν συνεχής και μεταβλητές παραμέτρους αποτέλεσαν ο χρόνος εφαρμογής, η συχνότητα και η ισχύς των υπέρηχων. Τα πειράματα παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.1 Παρουσίαση πειραμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό χωρίς προσθήκη αλκαλικότητας ή κροκιδωτικού

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ (min)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (kHz)	ΙΣΧΥΣ (W)
1	2	582	85
2	2	862	85
3	2	1142	85
4	5	582	85
5	5	862	85
6	5	1142	85
7	10	582	85
8	10	862	85
9	10	1142	85
10	2	582	165
11	2	862	165
12	2	1142	165
13	5	582	165
14	5	862	165
15	5	1142	165
16	10	582	165

17	10	862	165
18	10	1142	165
19	15	582	85
20	15	862	85
21	15	1142	85
22	30	582	85
23	30	862	85
24	30	1142	85
25	15	582	165
26	15	862	165
27	15	1142	165
28	30	582	165
29	30	862	165
30	30	1142	165

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό χωρίς προσθήκη αλκαλικότητας ή κροκιδωτικού

ΠΕΙΡΑΜΑ 1						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 2						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 3						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 4						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 5						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 6						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 7						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 8						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 9						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 10						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 11						
Χρόνος εφαρμογής: 2min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 12						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 13						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 14						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 15						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 16						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 17						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 18						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 19						
Χρόνος εφαρμογής: 15 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 20						
Χρόνος εφαρμογής: 15 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 21						
Χρόνος εφαρμογής: 15 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 22						
Χρόνος εφαρμογής: 30 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 23						
Χρόνος εφαρμογής: 30 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 24						
Χρόνος εφαρμογής: 30 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 25						
Χρόνος εφαρμογής: 15 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 65	24 - 28	60 - 65	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 26						
Χρόνος εφαρμογής: 15 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 27						
Χρόνος εφαρμογής: 15 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 28						
Χρόνος εφαρμογής: 30 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 29						
Χρόνος εφαρμογής: 30 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28

ΠΕΙΡΑΜΑ 30						
Χρόνος εφαρμογής: 30 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 1655 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Μέσον	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28
Πυθμένας	55 - 60	24 - 28	60 - 70	24 - 28	60 - 70	24 - 28

5.4.1.3 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων η προσπάθεια πρόκλησης συσσωμάτωσης μέσω της χρήσης υπέρηχων ήταν ανεπιτυχής. Αποδείχτηκε ότι οι διαφορές στη συχνότητα, στην ισχύ και στο χρόνο εφαρμογής δεν επιφέρουν καμία ειδοποιό διαφορά στη θολότητα και στο δυναμικό ζήτα για το συγκεκριμένο είδος διασποράς. Τέλος έγινε αντιληπτό ότι εφαρμογή υπέρηχων άνω των 15 min. λειτουργεί ανατρεπτικά, προκαλώντας μία μικρή αύξηση στη θολότητα του δείγματος.

5.4.2 Μελέτη επίδρασης υπέρηχων συνεχούς εφαρμογής σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου, CaCl_2 (5g/L)

Σκοπός της πειραματικής αυτής σειράς ήταν η διερεύνηση του φαινομένου της συσσωμάτωσης σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με την προσθήκη ενός ήπιου κροκιδωτικού.

5.4.2.1 Χαρακτηριστικά δείγματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή του συγκεκριμένου δείγματος είναι παρόμοια με τη διαδικασία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 5.4.2.1, η μόνη διαφορά έγκειται ότι στα 900 mL που τοποθετούνται στον αντιδραστήρα προστίθεται επιπλέον ποσότητα 9 mL CaCl_2 (5g/L) και το δείγμα ανακινείται ελαφρά, ώστε να επιτευχθεί πλήρης διασκορπισμός του κροκιδωτικού σε όλο τον όγκο του, πριν την έναρξη της εφαρμογής υπέρηχων.

Το διάλυμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- θολότητα: 55 – 60 NTU και
- zeta potential: -21 – -25 mV

5.4.2.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Στη συγκεκριμένη πειραματική σειρά η εφαρμογή των υπέρηχων ήταν συνεχής και μεταβλητές παραμέτρους αποτέλεσαν ο χρόνος εφαρμογής, η συχνότητα και η ισχύς των υπέρηχων. Τα πειράματα παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.3 Παρουσίαση πειραμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου CaCl_2 (5g/L)

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ (min)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (kHz)	ΙΣΧΥΣ (W)
1	2	582	85
2	2	862	85
3	2	1142	85
4	5	582	85
5	5	862	85
6	5	1142	85
7	10	582	85
8	10	862	85
9	10	1142	85
10	2	582	165
11	2	862	165
12	2	1142	165
13	5	582	165
14	5	862	165
15	5	1142	165
16	10	582	165
17	10	862	165
18	10	1142	165

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.4 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου CaCl_2 (5g/L)

ΠΕΙΡΑΜΑ 1						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 2						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 3						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 4						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 5						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 6						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 7						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 8						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 9						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 10						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 11						
Χρόνος εφαρμογής: 2min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 12						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 13						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 14						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 15						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	55 - 60	13 - 15	55 - 60	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 16						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 17						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15

ΠΕΙΡΑΜΑ 18						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (-mV)
Επιφάνεια	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Μέσον	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15
Πυθμένας	55 - 60	21 - 25	60 - 65	13 - 15	60 - 65	13 - 15

5.4.2.3 Συμπεράσματα

Η προσπάθεια πρόκλησης συσσωμάτωσης μέσω της χρήσης υπέρηχων ήταν ανεπιτυχής, παρά τη χρήση ήπιου κροκιδωτικού στη διασπορά. Αποδείχτηκε ότι οι διαφορές στη συχνότητα, στην ισχύ και στο χρόνο εφαρμογής δεν επιφέρουν καμία ειδοποιό διαφορά στη θολότητα, ενώ αν και προκαλείται μία ικανοποιητική μείωση στο δυναμικό ζήτα δεν επιφέρει κάποιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα.

5.4.3 Μελέτη επίδρασης υπέρηχων συνεχούς εφαρμογής σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

Σκοπός της πειραματικής αυτής σειράς ήταν η διερεύνηση το φαινομένου της συσσωμάτωσης σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με την προσθήκη ενός πιο δραστικού κροκιδωτικού από το χλωριούχο ασβέστιο. Για το λόγο αυτό προστέθηκαν στη διασπορά όξινο ανθρακικό νάτριο και θεικό αργίλιο.

5.4.3.1 Χαρακτηριστικά δείγματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή του συγκεκριμένου δείγματος είναι παρόμοια με τη διαδικασία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 5.4.2.1, η μόνη διαφορά έγκειται ότι στα 900 mL που τοποθετούνται στον αντιδραστήρα προστίθεται επιπλέον ποσότητα 9 mL NaHCO_3 (10g/L) και 2 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L) με το δείγμα να ανακινείται ελαφρά, ώστε να επιτευχθεί πλήρης διασκορπισμός των χημικών σε όλο τον όγκο του, πριν την έναρξη της εφαρμογής υπέρηχων.

Το διάλυμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- θολότητα: 55 – 60 NTU και
- zeta potential: -22 – -25 mV

Η ποσότητα των 2 mL κροκιδωτικού επιλέχθηκε έπειτα από διαδικασία “jar test”, η οποία περιγράφεται αναλυτικά, καθώς αποδείχτηκε η πιο αποτελεσματική

βάση σχέσεως δοσολογίας - επίτευξη συσσωμάτωσης.. Σε έξι ποτήρια ζέσεως του 1 L τοποθετήθηκαν 900 mL δείγματος από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό μαζί με ποσότητα 9 mL NaHCO_3 (10g/L). Έπειτα σε κάθε διάλυμα τοποθετήθηκαν συγκεκριμένες ποσότητες κροκιδωτικού $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).

Ειδικότερα:

- Διάλυμα 1: 0 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Διάλυμα 2: 0,5 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Διάλυμα 3: 1 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Διάλυμα 4: 2 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Διάλυμα 5: 4 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- Διάλυμα 6: 8 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Στα διαλύματα επιβλήθηκε διαδικασία ταχείας ανάδευσης στις 100 στρ/min για 1 min., στη συνέχεια ανάδευση για 30 min. στις 80στρ/min. και έπειτα ακολούθησε διαδικασία καθίζησης για 30 min. Αναφέρεται ότι οι μετρήσεις για το δυναμικό ζήτα έγιναν μετά το πέρας της διαδικασίας ανάδευσης, ενώ οι μετρήσεις για τη θολότητα έγιναν με το πέρας της καθίζησης. Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα Jar test προς εύρεση ιδανικότερης ποσότητας κροκιδωτικού

Δείγμα	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Δείγμα 1	58	-39
Δείγμα 2	35	-35
Δείγμα 3	23	-30
Δείγμα 4	1	-8
Δείγμα 5	0,5	-7
Δείγμα 6	0,05	+2

5.4.3.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Στη συγκεκριμένη πειραματική σειρά η εφαρμογή των υπερήχων ήταν συνεχής και μεταβλητές παραμέτρους αποτέλεσαν ο χρόνος εφαρμογής, η συχνότητα και η ισχύς των υπερήχων. Τα πειράματα παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.6 Παρουσίαση πειραμάτων εφαρμογής υπερήχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ (min)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (kHz)	ΙΣΧΥΣ (W)
1	2	582	85
2	2	862	85
3	2	1142	85
4	5	582	85
5	5	862	85
6	5	1142	85
7	10	582	85
8	10	862	85
9	10	1142	85
10	2	582	165
11	2	862	165
12	2	1142	165
13	5	582	165
14	5	862	165
15	5	1142	165
16	10	582	165
17	10	862	165
18	10	1142	165

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.7 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

ΠΕΙΡΑΜΑ 1						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-23	55 - 60	-14	55 - 60	-12
Μέσον	55 - 60	-22	55 - 60	-13	55 - 60	-14
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-14

ΠΕΙΡΑΜΑ 2						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-14
Μέσον	55 - 60	-23	55 - 60	-14	55 - 60	-13
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-13

ΠΕΙΡΑΜΑ 3						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-23	55 - 60	-13	55 - 60	-13
Μέσον	55 - 60	-24	55 - 60	-14	55 - 60	-14
Πυθμένας	55 - 60	-22	55 - 60	-13	55 - 60	-14

ΠΕΙΡΑΜΑ 4						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-12
Μέσον	55 - 60	-23	55 - 60	-12	55 - 60	-13
Πυθμένας	55 - 60	-22	55 - 60	-13	55 - 60	-13

ΠΕΙΡΑΜΑ 5						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-25	55 - 60	-13	55 - 60	-12
Μέσον	55 - 60	-23	55 - 60	-13	55 - 60	-13
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-12

ΠΕΙΡΑΜΑ 6						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-22	55 - 60	-12	55 - 60	-12
Μέσον	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-14
Πυθμένας	55 - 60	-25	55 - 60	-14	55 - 60	-13

ΠΕΙΡΑΜΑ 7						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-23	55 - 60	-12	55 - 60	-12
Μέσον	55 - 60	-24	55 - 60	-11	55 - 60	-11
Πυθμένας	55 - 60	-23	55 - 60	-11	55 - 60	-12

ΠΕΙΡΑΜΑ 8						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-23	55 - 60	-11	55 - 60	-12
Μέσον	55 - 60	-24	55 - 60	-11	55 - 60	-11
Πυθμένας	55 - 60	-23	55 - 60	-12	55 - 60	-12

ΠΕΙΡΑΜΑ 9						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-25	55 - 60	-11	55 - 60	-11
Μέσον	55 - 60	-24	55 - 60	-12	55 - 60	-12
Πυθμένας	55 - 60	-25	55 - 60	-11	55 - 60	-11

ΠΕΙΡΑΜΑ 10						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-24	55 - 60	-14	55 - 60	-13
Μέσον	55 - 60	-25	55 - 60	-13	55 - 60	-14
Πυθμένας	55 - 60	-23	55 - 60	-13	55 - 60	-14

ΠΕΙΡΑΜΑ 11						
Χρόνος εφαρμογής: 2min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-23	55 - 60	-13	55 - 60	-14
Μέσον	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-13
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-14	55 - 60	-13

ΠΕΙΡΑΜΑ 12						
Χρόνος εφαρμογής: 2 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-23	55 - 60	-12	55 - 60	-13
Μέσον	55 - 60	-23	55 - 60	-14	55 - 60	-13
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-14

ΠΕΙΡΑΜΑ 13						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-25	55 - 60	-13	55 - 60	-12
Μέσον	55 - 60	-22	55 - 60	-12	55 - 60	-14
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-13

ΠΕΙΡΑΜΑ 14						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-25	55 - 60	-12	55 - 60	-13
Μέσον	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-12
Πυθμένας	55 - 60	-23	55 - 60	-15	55 - 60	-14

ΠΕΙΡΑΜΑ 15						
Χρόνος εφαρμογής: 5 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-23	55 - 60	-12	55 - 60	-13
Μέσον	55 - 60	-24	55 - 60	-13	55 - 60	-13
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-12	55 - 60	-12

ΠΕΙΡΑΜΑ 16						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-23	55 - 60	-11	55 - 60	-13
Μέσον	55 - 60	-23	55 - 60	-11	55 - 60	-11
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-12	55 - 60	-12

ΠΕΙΡΑΜΑ 17						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-24	55 - 60	-11	55 - 60	-11
Μέσον	55 - 60	-23	55 - 60	-12	55 - 60	-12
Πυθμένας	55 - 60	-25	55 - 60	-12	55 - 60	-11

ΠΕΙΡΑΜΑ 18						
Χρόνος εφαρμογής: 10 min. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W						
Σημείο λήψης δείγματος	Πριν την εφαρμογή υπέρηχων		Μετά το πέρας της εφαρμογής υπέρηχων		Μετά από 30 min καθίζηση	
	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)	Θολότητα (NTU)	Zeta potential (mV)
Επιφάνεια	55 - 60	-25	55 - 60	-11	55 - 60	-11
Μέσον	55 - 60	-23	55 - 60	-12	55 - 60	-11
Πυθμένας	55 - 60	-24	55 - 60	-11	55 - 60	-12

5.4.3.3 Συμπεράσματα

Η προσπάθεια πρόκλησης συσσωμάτωσης μέσω της χρήσης υπέρηχων ήταν ανεπιτυχής, παρά τη χρήση αλκαλικότητας και ενός πιο δραστικού κροκιδωτικού στη διασπορά. Αποδείχτηκε ότι οι διαφορές στη συχνότητα, στην ισχύ και στο χρόνο εφαρμογής δεν επιφέρουν καμία ειδοποιό διαφορά στη θολότητα, ενώ αν και προκαλείται μία ικανοποιητική μείωση στο δυναμικό ζήτα πάλι δεν επέρχεται κάποιο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα.

5.4.4 Μελέτη επίδρασης υπέρηχων παλμικής εφαρμογής σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

Στα μέχρι τώρα πειράματα μελετήθηκε η συνεχής εφαρμογή υπέρηχων με αλλαγές στη συχνότητα, την πίεση και το χρόνο εφαρμογής. Στη συγκεκριμένη σειρά έγινε αλλαγή στον τρόπο εφαρμογής των υπέρηχων, από συνεχή σε περιοδικό. Εφαρμόστηκαν υπέρηχοι με παλμική μορφή μετάδοσης και εκτός από τη μεταβολή στους παράγοντες συχνότητας και πίεσης, πραγματοποιήθηκαν εναλλαγές στους παράγοντες διάρκεια παλμού, διάρκεια παύσης μεταξύ των παλμών και πλήθος παλμών.

5.4.4.1 Χαρακτηριστικά δείγματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή του δείγματος για τη συγκεκριμένη σειρά είναι η διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.3.1.

Το διάλυμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- θολότητα: 55 – 60 NTU και
- zeta potential: -22 – -25 mV

5.4.4.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Στη συγκεκριμένη πειραματική σειρά η εφαρμογή των υπερήχων ήταν παλμική και μεταβλητές παραμέτρους, εκτός της συχνότητας και της ισχύς των υπερήχων, αποτέλεσαν:

- το πλήθος των παλμών
- η διάρκεια του παλμού
- η διάρκεια παύσης μεταξύ διαδοχικών παλμών

Τα πειράματα παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.8 Παρουσίαση πειραμάτων παλμικής εφαρμογής υπερήχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΛΜΟΥ (ms)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΥΣΗΣ (sec)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (kHz)	ΙΣΧΥΣ (W)
1	200	2	582	165
2	500	4	582	165
3	500	4	862	165
4	500	4	1142	165
5	500	4	582	85
6	500	4	862	85
7	500	4	1142	85
8	200	2	582	85

Αναφέρεται ότι για κάθε πείραμα μελετήθηκαν τα εξής πλήθη παλμών:

- 20
- 50
- 100

Στη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μόνο για τον παράγοντα της θολότητας. Οι μετρήσεις θολότητας πραγματοποιήθηκαν έπειτα από διαδικασία καθίζησης διάρκειας 30 min.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.9 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων παλμικής εφαρμογής υπέρηχων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

ΠΕΙΡΑΜΑ 1			
Διάρκεια παλμού: 200 ms Διάρκεια παύσης: 2 sec. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W			
	Θολότητα (NTU)		
Πλήθος παλμών	Επιφάνεια	Μέσον	Πυθμένας
0	55 - 60	55 - 60	55 - 60
20	55 - 60	55 - 60	55 - 60
50	55 - 60	55 - 60	55 - 60
100	55 - 60	55 - 60	55 - 60

ΠΕΙΡΑΜΑ 2			
Διάρκεια παλμού: 500 ms Διάρκεια παύσης: 4 sec. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 165 W			
	Θολότητα (NTU)		
Πλήθος παλμών	Επιφάνεια	Μέσον	Πυθμένας
0	55 - 60	55 - 60	55 - 60
20	55 - 60	55 - 60	55 - 60
50	55 - 60	55 - 60	55 - 60
100	55 - 60	55 - 60	55 - 60

ΠΕΙΡΑΜΑ 3			
Διάρκεια παλμού: 500 ms Διάρκεια παύσης: 4 sec. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 165 W			
	Θολότητα (NTU)		
Πλήθος παλμών	Επιφάνεια	Μέσον	Πυθμένας
0	55 - 60	55 - 60	55 - 60
20	55 - 60	55 - 60	55 - 60
50	55 - 60	55 - 60	55 - 60
100	55 - 60	55 - 60	55 - 60

ΠΕΙΡΑΜΑ 4			
Διάρκεια παλμού: 500 ms Διάρκεια παύσης: 2 sec. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 165 W			
	Θολότητα (NTU)		
Πλήθος παλμών	Επιφάνεια	Μέσον	Πυθμένας
0	55 - 60	55 - 60	55 - 60
20	55 - 60	55 - 60	55 - 60
50	55 - 60	55 - 60	55 - 60
100	55 - 60	55 - 60	55 - 60

ΠΕΙΡΑΜΑ 5			
Διάρκεια παλμού: 500 ms Διάρκεια παύσης: 4 sec. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W			
	Θολότητα (NTU)		
Πλήθος παλμών	Επιφάνεια	Μέσον	Πυθμένας
0	55 - 60	55 - 60	55 - 60
20	55 - 60	55 - 60	55 - 60
50	55 - 60	55 - 60	55 - 60
100	55 - 60	55 - 60	55 - 60

ΠΕΙΡΑΜΑ 6			
Διάρκεια παλμού: 500 ms Διάρκεια παύσης: 4 sec. Συχνότητα: 862 kHz Ισχύς: 85 W			
	Θολότητα (NTU)		
Πλήθος παλμών	Επιφάνεια	Μέσον	Πυθμένας
0	55 - 60	55 - 60	55 - 60
20	55 - 60	55 - 60	55 - 60
50	55 - 60	55 - 60	55 - 60
100	55 - 60	55 - 60	55 - 60

ΠΕΙΡΑΜΑ 7			
Διάρκεια παλμού: 500 ms Διάρκεια παύσης: 4 sec. Συχνότητα: 1142 kHz Ισχύς: 85 W			
	Θολότητα (NTU)		
Πλήθος παλμών	Επιφάνεια	Μέσον	Πυθμένας
0	55 - 60	55 - 60	55 - 60
20	55 - 60	55 - 60	55 - 60
50	55 - 60	55 - 60	55 - 60
100	55 - 60	55 - 60	55 - 60

ΠΕΙΡΑΜΑ 8			
Διάρκεια παλμού: 200 ms Διάρκεια παύσης: 2 sec. Συχνότητα: 582 kHz Ισχύς: 85 W			
	Θολότητα (NTU)		
Πλήθος παλμών	Επιφάνεια	Μέσον	Πυθμένας
0	55 - 60	55 - 60	55 - 60
20	55 - 60	55 - 60	55 - 60
50	55 - 60	55 - 60	55 - 60
100	55 - 60	55 - 60	55 - 60

5.4.4.3 Συμπεράσματα

Η προσπάθεια πρόκλησης συσσωμάτωσης μέσω της παλμικής εφαρμογής υπέρηχων ήταν ανεπιτυχής. Αποδείχτηκε ότι διαφορές στη συχνότητα, στην ισχύ, στο πλήθος, στη διάρκεια καθώς και στη διάρκεια παύσης μεταξύ των παλμών δεν επιφέρουν καμία ειδοποιό διαφορά στη θολότητα.

5.4.5 Μελέτη επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

Σκοπός της συγκεκριμένης πειραματικής σειράς ήταν μία πιο διεξοδική έρευνα της επίδρασης των υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων των διασπορών. Η αναγκαιότητα της μέτρησης του μεγέθους προέκυψε από το γεγονός ότι στις προηγούμενες πειραματικές σειρές παρά τη χρήση κροκιδωτικού και τη μείωση του δυναμικού ζήτα δεν επήλθε καμία διαφορά στον παράγοντα θολότητα. Έχοντας λοιπόν προκληθεί ερωτήματα όπως αν όντως πραγματοποιείται ή όχι συσσωμάτωση ή αν αντί για συσσωμάτωση προκαλείται διάσπαση των σωματιδίων κρίθηκε απαραίτητη η μέτρηση του μεγέθους των σωματιδίων της διασποράς.

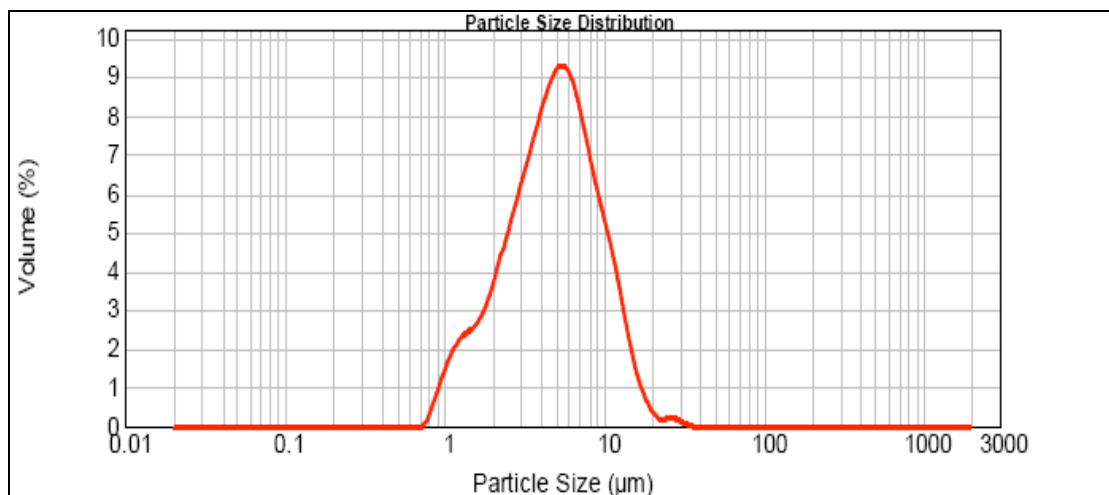
5.4.5.1 Χαρακτηριστικά δείγματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή του δείγματος για τη συγκεκριμένη σειρά είναι η διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.3.1.

Το διάλυμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- θολότητα: 55 – 60 NTU και
- zeta potential: -22 – -25 mV

Πριν την προσθήκη κροκιδωτικού και πριν την εφαρμογή υπερήχων μετρήθηκε το μέγεθος των σωματιδίων της διασποράς, αποτελώντας μέτρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν από τα επικείμενα πειράματα. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι στο 80 % του όγκου επί του συνολικού δείγματος το μέγεθος των σωματιδίων ήταν της τάξης των 2 – 10 μm , με μέση διάμετρο $d = 4,84 \mu\text{m}$. Το μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορά από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί.



Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.105	0.00	1.096	1.89	11.482	3.37
0.120	0.00	1.259	2.15	13.183	2.16
0.138	0.00	1.445	2.34	15.136	1.20
0.158	0.00	1.660	2.70	17.378	0.59
0.182	0.00	1.905	3.36	19.953	0.23
0.209	0.00	2.188	4.22	22.909	0.19
0.240	0.00	2.512	5.07	26.303	0.18
0.275	0.00	2.884	5.85	30.200	0.06
0.316	0.00	3.311	6.66	34.674	0.00
0.363	0.00	3.802	7.46	39.811	0.00
0.417	0.00	4.365	8.12	45.709	0.00
0.479	0.00	5.012	8.41	52.481	0.00
0.550	0.00	5.754	8.14	60.256	0.00
0.631	0.00	6.607	7.33	69.183	0.00
0.724	0.15	7.586	6.27	79.433	0.00
0.832	0.78	8.710	5.30	91.201	0.00
0.956	1.41	10.000	4.40	104.713	0.00
1.096		11.482		120.226	

Σχήμα 5.1 Μέγεθος σωματιδίων σε διασπορά από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό

5.4.5.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Στη συγκεκριμένη πειραματική σειρά η εφαρμογή των υπερήχων ήταν συνεχής και μεταβλητές παραμέτρους αποτέλεσαν ο χρόνος εφαρμογής, η συχνότητα και η ισχύς των υπέρηχων. Η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή πίνακα.

Πίνακας 5.10 Παρουσίαση πειραμάτων επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ (min)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (kHz)	ΙΣΧΥΣ (W)
1	5	582	85
2	5	582	165
3	5	1142	85
4	5	1142	165
5	15	582	85
6	15	582	165

7	15	1142	85
8	15	1142	165
9	30	582	85
10	30	582	165
11	30	1142	85
12	30	1142	165

Η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή πίνακα όπου δίνεται η μέση διάμετρος των σωματιδίων μετά το πέρας κάθε πειράματος. Αναφέρεται ότι στη συγκεκριμένη σειρά οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά το πέρας κάθε πειράματος καθώς δεν ακολουθήθηκε διαδικασία καθίζησης, ενώ δείγματα λαμβάνονταν μόνο από το μέσο του αντιδραστήρα.

Πίνακας 5.11 Παρουσίαση αποτελεσμάτων επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

Παρουσίαση μέσων διαμέτρων σωματιδίων έπειτα από επιβολή υπέρηχων	
	d (μm)
Αρχικό δείγμα	4,84
Πείραμα 1	6,013
Πείραμα 2	6,592
Πείραμα 3	5,076
Πείραμα 4	3,85
Πείραμα 5	6,353
Πείραμα 6	6,631
Πείραμα 7	5,82
Πείραμα 8	4,03
Πείραμα 9	6,322
Πείραμα 10	6,605
Πείραμα 11	6,25
Πείραμα 12	4,098

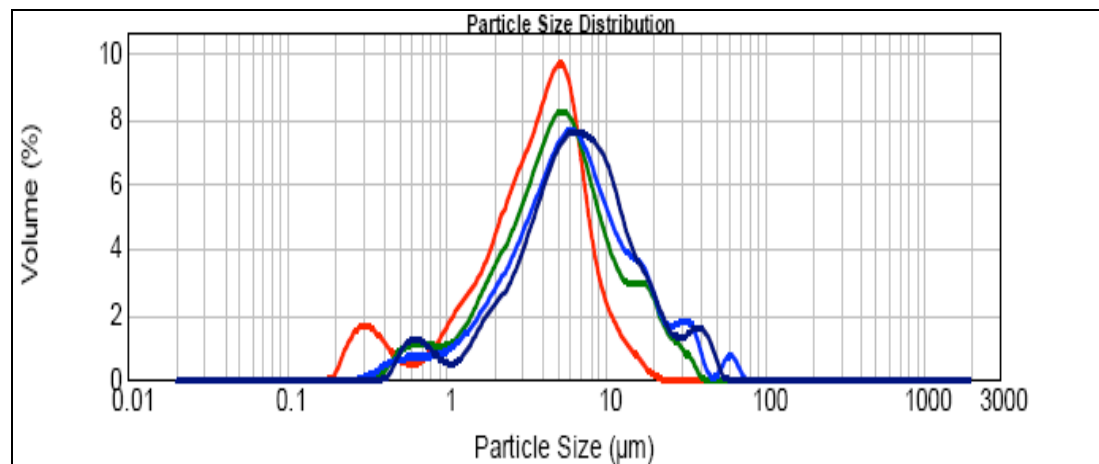
5.4.5.3 Ανάλυση της χρονικής διάρκειας ως μεταβλητού παράγοντα

Στη συγκεκριμένη σειρά πραγματοποιήθηκαν πειράματα, ανεξαρτήτως συχνότητας και ισχύς, για τα εξής χρονικά διαστήματα:

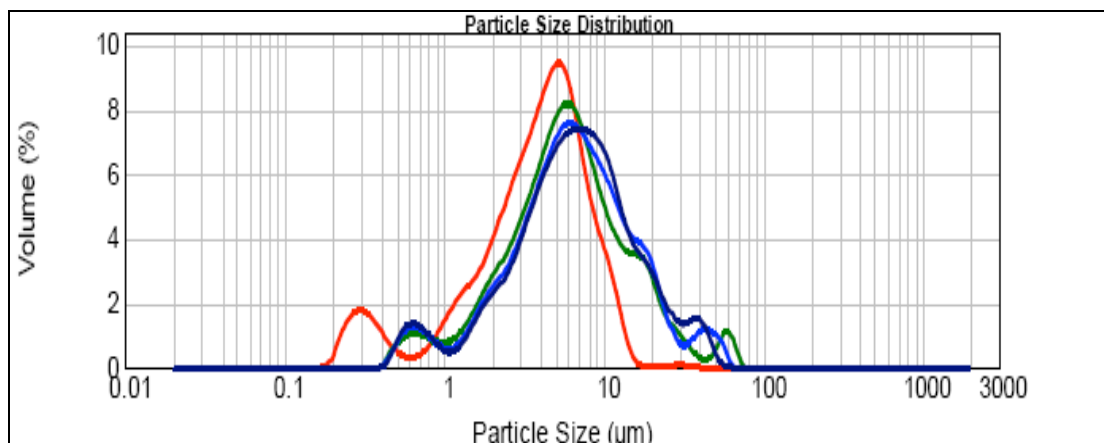
- 5 min.
- 15 min.
- 30 min.

Τα αποτελέσματα της επιρροής του συγκεκριμένου παράγοντα παρουσιάζονται στα ακόλουθα τρία σχήματα όπου στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα πειράματα διάρκειας 5 min., στο Σχήμα 5.3 για διάρκεια 15 min. και στο Σχήμα 5.4 για διάρκεια 30 min. Στα τρία αυτά σχήματα αντιστοιχούν:

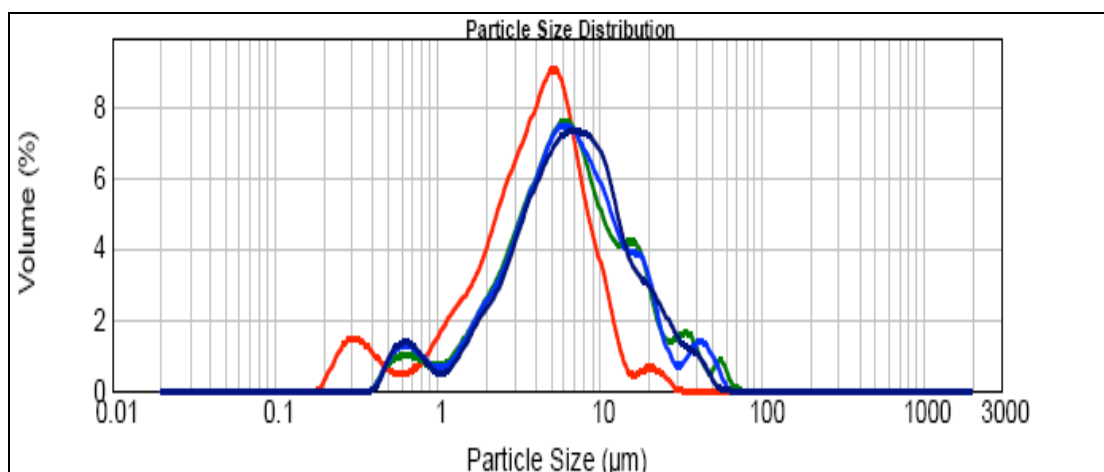
- με μπλε χρώμα τα πειράματα με: Συχνότητα 582 kHz και Ισχύ 85 W
- με μωβ χρώμα τα πειράματα με: Συχνότητα 582 kHz και Ισχύ 165 W
- με πράσινο χρώμα τα πειράματα με: Συχνότητα 1142 kHz και Ισχύ 85 W
- με κόκκινο χρώμα τα πειράματα με: Συχνότητα 1142 kHz και Ισχύ 165 W



Σχήμα 5.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 5 min.



Σχήμα 5.3 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 15 min.



Σχήμα 5.4 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 30 min.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζεται από τη χρονική διάρκεια της εφαρμογής υπέρηχων.

5.4.5.4 Ανάλυση της συχνότητας ως μεταβλητού παράγοντα

Στη συγκεκριμένη σειρά πραγματοποιήθηκαν πειράματα, ανεξαρτήτως χρονικής διάρκειας και ισχύς, για τις εξής συχνότητες:

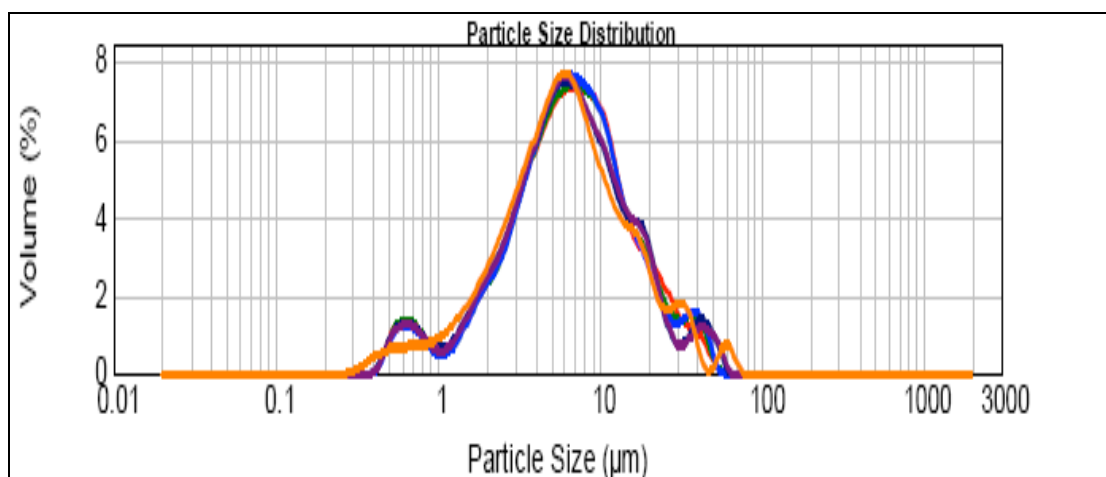
- 582 kHz

- 1142 kHz

Τα αποτελέσματα της επιρροής του συγκεκριμένου παράγοντα παρουσιάζονται στα ακόλουθα δύο σχήματα, όπου στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα πειράματα συχνότητας 582 kHz και στο Σχήμα 5.6 για συχνότητα 1142 kHz.

Στο σχήμα 5.5 απεικονίζονται:

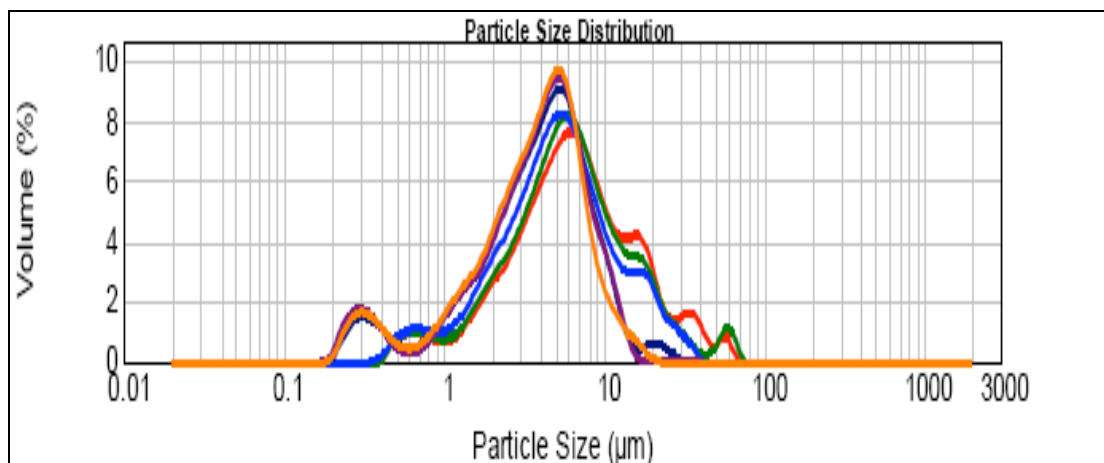
- με πορτοκαλί χρώμα το πείραμα 1, με Διάρκεια 5 min. και Ισχύ 85 W
- με μπλε χρώμα το πείραμα 2, με Διάρκεια 5 min. και Ισχύ 165 W
- με μωβ χρώμα το πείραμα 5, με Διάρκεια 15 min. και Ισχύ 85 W
- με πράσινο χρώμα το πείραμα 6, με Διάρκεια 15 min. και Ισχύ 165 W
- με μπλε σκούρο χρώμα το πείραμα 9, με Διάρκεια 30 min. και Ισχύ 85 W
- με κόκκινο χρώμα το πείραμα 10, με Διάρκεια 30 min. και Ισχύ 85 W



Σχήμα 5.5 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα συχνότητας 582 kHz

Στο σχήμα 5.6 απεικονίζονται:

- με μπλε χρώμα το πείραμα 3, με Διάρκεια 5 min. και Ισχύ 85 W
- με πορτοκαλί χρώμα το πείραμα 4, με Διάρκεια 5 min. και Ισχύ 165 W
- με πράσινο χρώμα το πείραμα 7, με Διάρκεια 15 min. και Ισχύ 85 W
- με μωβ χρώμα το πείραμα 8, με Διάρκεια 15 min. και Ισχύ 165 W
- με κόκκινο χρώμα το πείραμα 11, με Διάρκεια 30 min. και Ισχύ 85 W
- με μπλε σκούρο χρώμα το πείραμα 12, με Διάρκεια 30 min. και Ισχύ 85 W



Σχήμα 5.6 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα συχνότητας 1142 kHz

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζεται από τη συχνότητα των υπέρηχων επιβολής.

5.4.5.5 Ανάλυση της ισχύς ως μεταβλητού παράγοντα

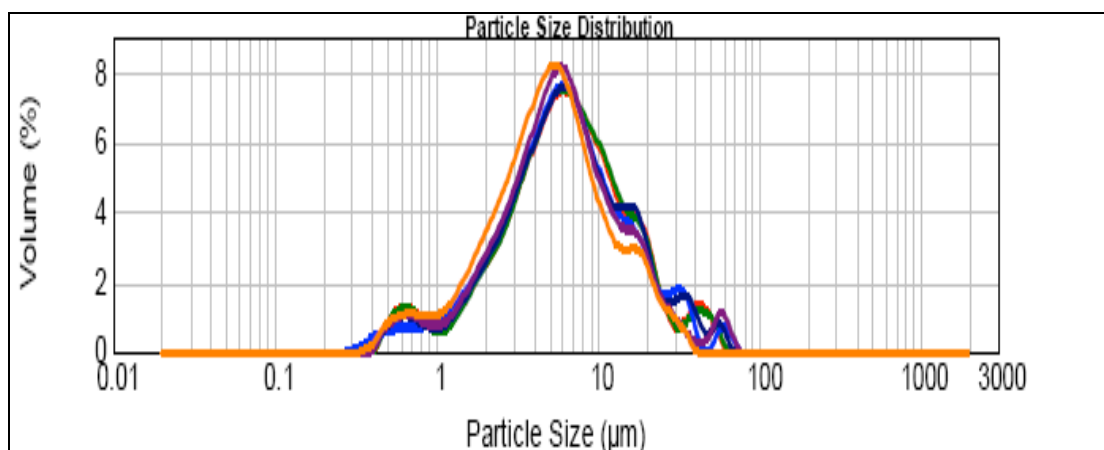
Στη συγκεκριμένη σειρά πραγματοποιήθηκαν πειράματα, ανεξαρτήτως χρονικής διάρκειας και συχνότητας, για τις εξής ισχύς:

- 85 Watts
- 165 Watts

Τα αποτελέσματα της επιρροής του συγκεκριμένου παράγοντα παρουσιάζονται στα ακόλουθα δύο σχήματα, όπου στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα πειράματα ισχύος 85 W και στο Σχήμα 5.8 για ισχύ 165 W.

Στο σχήμα 5.7 απεικονίζονται με:

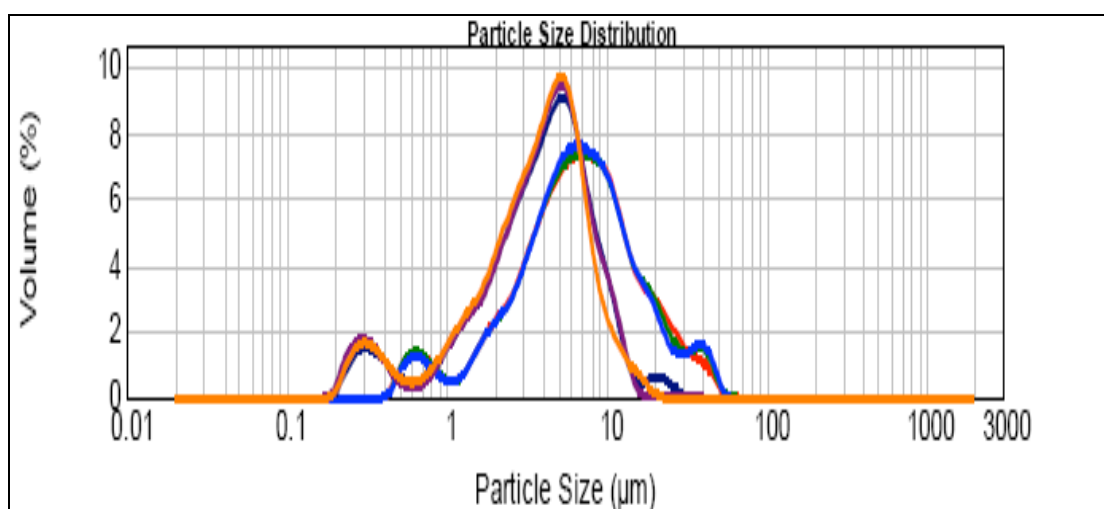
- μπλε χρώμα το πείραμα 1, με Διάρκεια 5 min. και Συχνότητα 582 kHz
- πορτοκαλί χρώμα το πείραμα 3, με Διάρκεια 5 min. και Συχνότητα 1142 kHz
- μωβ χρώμα το πείραμα 5, με Διάρκεια 15 min. και Συχνότητα 582 kHz
- πράσινο χρώμα το πείραμα 7, με Διάρκεια 15 min. και Συχνότητα 1142 kHz
- κόκκινο χρώμα το πείραμα 9, με Διάρκεια 30 min Συχνότητα 582 kHz
- μπλε σκούρο χρώμα το πείραμα 11, με Διάρκεια 30 min. και Συχνότητα 1142 kHz



Σχήμα 5.7 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα ισχύος 85 W

Στο σχήμα 5.8 απεικονίζονται:

- μπλε χρώμα το πείραμα 2, με Διάρκεια 5 min. και Συχνότητα 582 kHz
- πορτοκαλί χρώμα το πείραμα 4, με Διάρκεια 5 min. και Συχνότητα 1142 kHz
- μωβ χρώμα το πείραμα 6, με Διάρκεια 15 min. και Συχνότητα 582 kHz
- πράσινο χρώμα το πείραμα 8, με Διάρκεια 15 min. και Συχνότητα 1142 kHz
- κόκκινο χρώμα το πείραμα 10, με Διάρκεια 30 min Συχνότητα 582 kHz
- μπλε σκούρο χρώμα το πείραμα 12, με Διάρκεια 30 min. και Συχνότητα 1142 kHz



Σχήμα 5.8 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα ισχύος 165 W

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζεται από την ισχύ των υπέρηχων επιβολής.

5.4.5.6 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη σειρά διαπιστώθηκε ότι παρά τις όποιες μεταβολές στο χρόνο επιβολής, στη συχνότητα ή στην ισχύ των υπέρηχων το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζεται καθώς μένει αμετάβλητο.

5.5 Μελέτη επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε υδατικές διασπορές από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm

Από τη έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τη μελέτη επίδρασης των υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη διαπιστώθηκε ότι η χρήση αυτών δεν επιφέρει κάποια αλλαγή στη μέγεθος των σωματιδίων. Στο πλαίσιο μιας πιο εμπειριστατωμένης διερεύνησης, όσον αφορά τη μεταβολή του μεγέθους των σωματιδίων σε διασπορές όπου εφαρμόζονται υπέρηχοι, πραγματοποιήθηκαν ορισμένα πειράματα σε διασπορές με διαφορετικά χαρακτηριστικά από αυτές που μέχρι τώρα μελετήθηκαν. Οι νέες διασπορές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν υδατικές διασπορές από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm .

5.5.1 Χαρακτηριστικά δείγματος

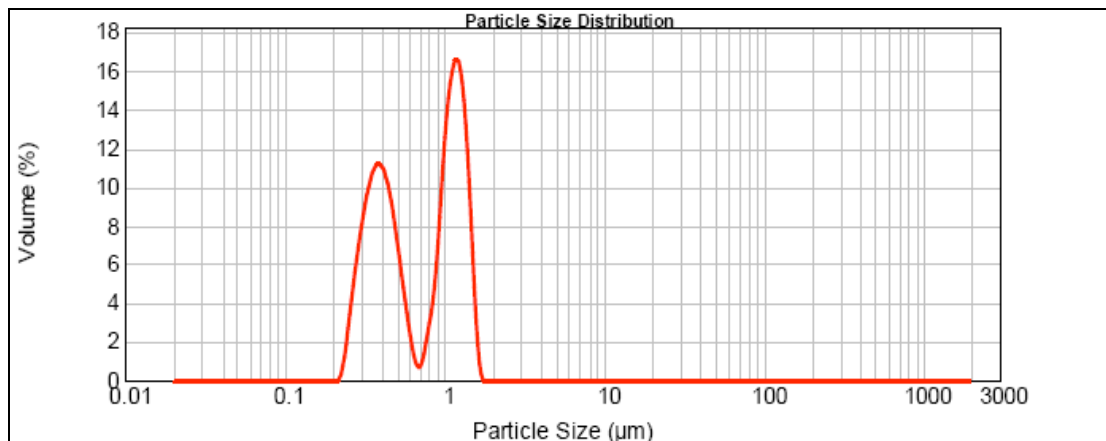
Σε 1 L απιονισμένου νερού διαλύθηκαν 0,2 mL διαλύματος μικροσφαιριδίων διαμέτρου 1 μm . Στο διάλυμα επιβλήθηκε ανάδευση στις 80 στρ/min διάρκειας 4h, επιτυγχάνοντας τελικό διάλυμα με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Θολότητα: 85 – 90 NTU
- Zeta potential: -35 – 40 mV

Κατά το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 900 mL από το διάλυμα, στα οποία προστέθηκε επιπλέον ποσότητα 9 mL NaHCO_3 (10g/L) και 2 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L) με το δείγμα να ανακινείται ελαφρά, ώστε να επιτευχθεί πλήρης διασκορπισμός των χημικών σε όλο τον όγκο του, πριν την έναρξη της εφαρμογής υπέρηχων. Αναφέρεται

ότι η ποσότητα των 2 mL κροκιδωτικού επιλέχθηκε έπειτα από διαδικασία “jar test” καθώς αποδείχτηκε η πιο αποτελεσματική βάση σχέσεως δοσολογίας - επίτευξη συσσωμάτωσης.

Πριν την προσθήκη κροκιδωτικού και πριν τη εφαρμογή υπέρηχων μετρήθηκε το μέγεθος των σωματιδίων της διασποράς, αποτελώντας μέτρο σύγκρισης για τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν από τα επικείμενα πειράματα. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι μπορεί η μέση διάμετρος των σωματιδίων του δείγματος να είναι κοντά στο 1 μm , αλλά στην πραγματικότητα στο δείγμα παρουσιάζονται δύο διαφορετικές ομάδες σωματιδίων. Στην πρώτη ομάδα, όπου περιλαμβάνεται κοντά στο 55% των σωματιδίων του δείγματος, εμφανίζονται σωματίδια με μέγεθος από 0,2 έως 0,95 μm , ενώ στη δεύτερη ομάδα, όπου περιλαμβάνεται το 45% των σωματιδίων του δείγματος, ανήκουν σωματίδια με μέγεθος από 0,95 έως 1,45 μm . Το μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορά από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm σε αποσταγμένο νερό παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 5.9 που ακολουθεί.



Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %
0.105	0.00	1.096	15.01
0.120	0.00	1.259	12.49
0.138	0.00	1.445	4.16
0.158	0.00	1.660	0.00
0.182	0.00	1.905	0.00
0.209	0.41	2.188	0.00
0.240	3.73	2.512	0.00
0.275	6.97	2.884	0.00
0.316	9.36	3.311	0.00
0.363	10.13	3.802	0.00
0.417	8.87	4.365	0.00
0.479	6.02	5.012	0.00
0.550	2.71	5.754	0.00
0.631	0.60	6.607	0.00
0.724	2.09	7.586	0.00
0.832	5.40	8.710	0.00
0.955	12.05	10.000	0.00
1.096		11.482	0.00

Σχήμα 5.9 Μέγεθος σωματιδίων σε διασπορά από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm σε αποσταγμένο νερό

5.5.2 Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Στη συγκεκριμένη πειραματική σειρά η εφαρμογή των υπερήχων ήταν συνεχής και μεταβλητές παραμέτρους αποτέλεσαν ο χρόνος εφαρμογής, η συχνότητα και η ισχύς των υπέρηχων. Η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή πίνακα.

Πίνακας 5.12 Παρουσίαση πειραμάτων επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θειικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ (min)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (kHz)	ΙΣΧΥΣ (W)
1	5	582	85
2	5	582	165
3	5	1142	85
4	5	1142	165
5	15	582	85

6	15	582	165
7	15	1142	85
8	15	1142	165
9	30	582	85
10	30	582	165
11	30	1142	85
12	30	1142	165

Η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή πίνακα όπου δίνεται η μέση διάμετρος των σωματιδίων μετά το πέρας κάθε πειράματος. Αναφέρεται ότι στη συγκεκριμένη σειρά οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά το πέρας κάθε πειράματος καθώς δεν ακολουθήθηκε διαδικασία καθίζησης, ενώ δείγματα λαμβάνονταν μόνο από το μέσο του αντιδραστήρα.

Πίνακας 5.13 Παρουσίαση αποτελεσμάτων επίδρασης υπέρηχων στο μέγεθος των σωματιδίων σε διασπορές από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L)

Παρουσίαση μέσων διαμέτρων σωματιδίων έπειτα από επιβολή υπέρηχων	
	d (μm)
Αρχικό δείγμα	0,8
Πείραμα 1	0,89
Πείραμα 2	0,92
Πείραμα 3	0,83
Πείραμα 4	1,02
Πείραμα 5	0,96
Πείραμα 6	0,87
Πείραμα 7	1,09
Πείραμα 8	0,93
Πείραμα 9	0,97

Πείραμα 10	1,17
Πείραμα 11	1,03
Πείραμα 12	1,07

Πρέπει να αναφερθεί εξ αρχής ότι η αύξηση που παρατηρείται στη μέση διάμετρο δεν προκύπτει λόγω συσσωμάτωσης αλλά εξαιτίας της παρουσίας φυσαλίδων που έχουν προκληθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο δείγμα.

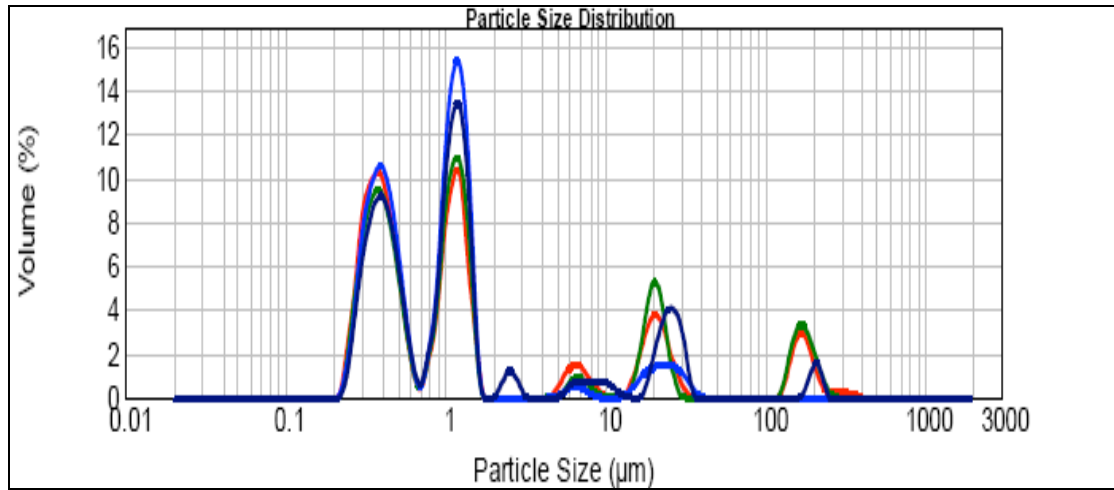
5.5.3 Ανάλυση της χρονικής διάρκειας ως μεταβλητού παράγοντα

Στη συγκεκριμένη σειρά πραγματοποιήθηκαν πειράματα, ανεξαρτήτως συχνότητας και ισχύς, για τα εξής χρονικά διαστήματα:

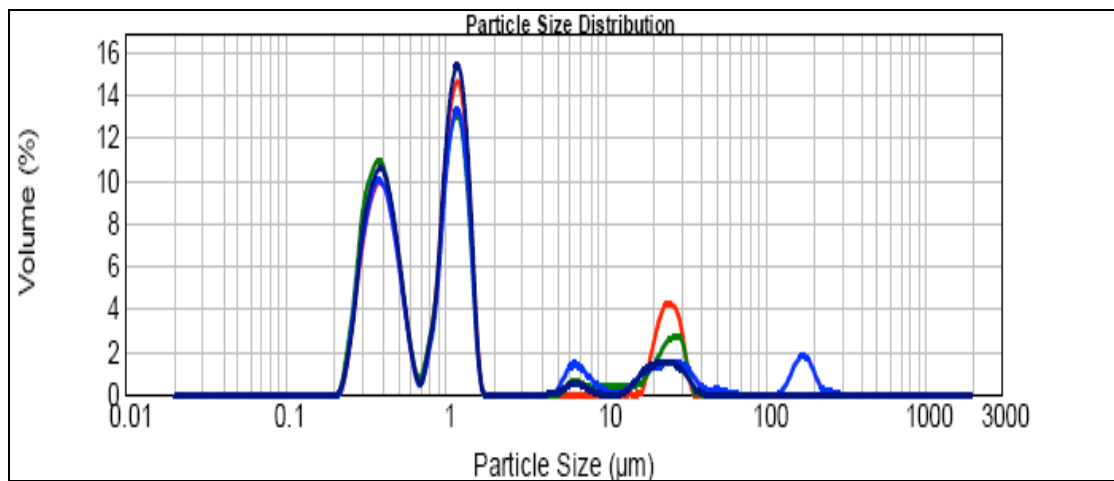
- 5 min.
- 15 min.
- 30 min.

Τα αποτελέσματα της επιρροής του συγκεκριμένου παράγοντα παρουσιάζονται στα ακόλουθα τρία σχήματα όπου στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα πειράματα διάρκειας 5 min., στο Σχήμα 5.11 για διάρκεια 15 min. και στο Σχήμα 5.12 για διάρκεια 30 min. Στα τρία αυτά σχήματα αντιστοιχούν:

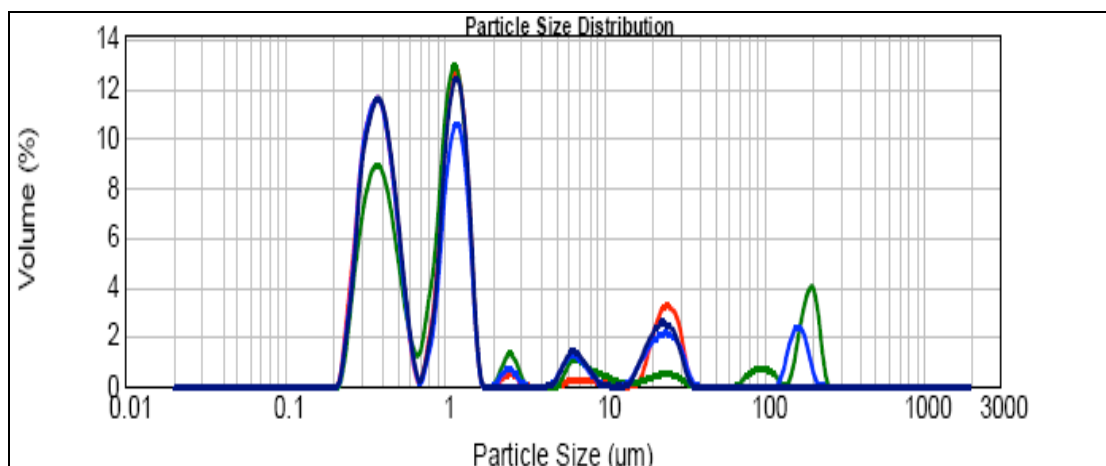
- με μπλε χρώμα τα πειράματα με: Συχνότητα 582 kHz και Ισχύ 85 W
- με μωβ χρώμα τα πειράματα με: Συχνότητα 582 kHz και Ισχύ 165 W
- με πράσινο χρώμα τα πειράματα με: Συχνότητα 1142 kHz και Ισχύ 85 W
- με κόκκινο χρώμα τα πειράματα με: Συχνότητα 1142 kHz και Ισχύ 165 W



Σχήμα 5.10 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 5 min.



Σχήμα 5.11 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 15 min.



Σχήμα 5.12 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα χρονικής διάρκειας 30 min.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζεται από τη χρονική διάρκεια της εφαρμογής υπέρηχων.

5.5.4 Ανάλυση της συχνότητας ως μεταβλητού παράγοντα

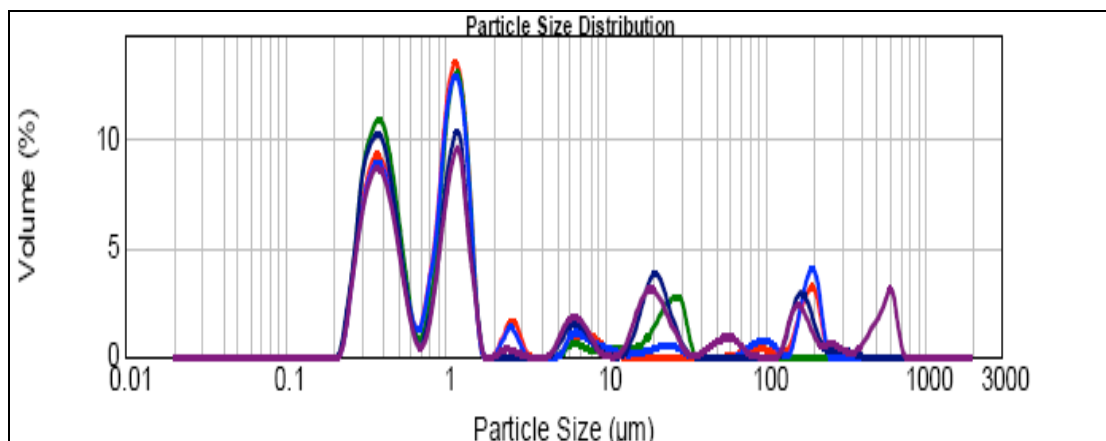
Στη συγκεκριμένη σειρά πραγματοποιήθηκαν πειράματα, ανεξαρτήτως χρονικής διάρκειας και ισχύς, για τις εξής συχνότητες:

- 582 kHz
- 1142 kHz

Τα αποτελέσματα της επιρροής του συγκεκριμένου παράγοντα παρουσιάζονται στα ακόλουθα δύο σχήματα, όπου στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα πειράματα συχνότητας 582 kHz και στο Σχήμα 5.14 για συχνότητα 1142 kHz.

Στο σχήμα 5.13 απεικονίζονται:

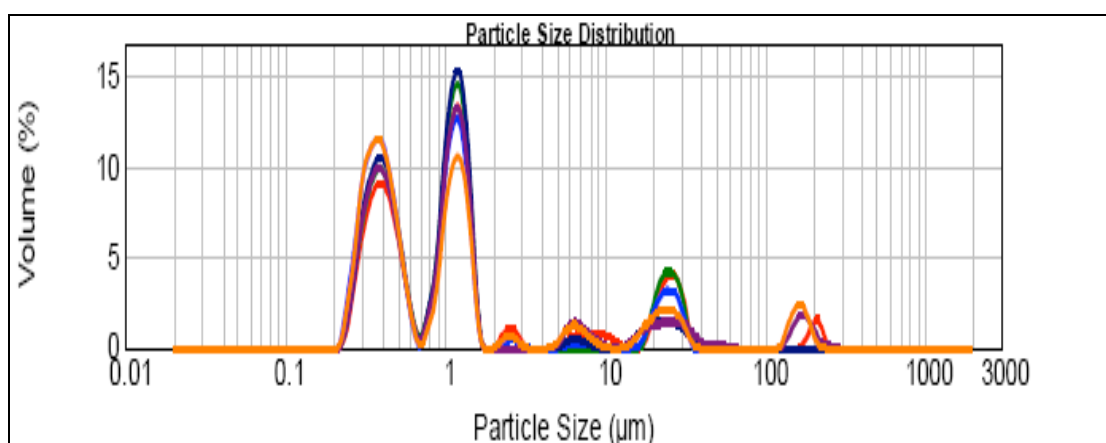
- με πορτοκαλί χρώμα το πείραμα 1, με Διάρκεια 5 min. και Ισχύ 85 W
- με μπλε χρώμα το πείραμα 2, με Διάρκεια 5 min. και Ισχύ 165 W
- με μωβ χρώμα το πείραμα 5, με Διάρκεια 15 min. και Ισχύ 85 W
- με πράσινο χρώμα το πείραμα 6, με Διάρκεια 15 min. και Ισχύ 165 W
- με μπλε σκούρο χρώμα το πείραμα 9, με Διάρκεια 30 min. και Ισχύ 85 W
- με κόκκινο χρώμα το πείραμα 10, με Διάρκεια 30 min. και Ισχύ 85 W



Σχήμα 5.13 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα συχνότητας 582 kHz

Στο σχήμα 5.14 απεικονίζονται:

- με μπλε χρώμα το πείραμα 3, με Διάρκεια 5 min. και Ισχύ 85 W
- με πορτοκαλί χρώμα το πείραμα 4, με Διάρκεια 5 min. και Ισχύ 165 W
- με πράσινο χρώμα το πείραμα 7, με Διάρκεια 15 min. και Ισχύ 85 W
- με μωβ χρώμα το πείραμα 8, με Διάρκεια 15 min. και Ισχύ 165 W
- με κόκκινο χρώμα το πείραμα 11, με Διάρκεια 30 min. και Ισχύ 85 W
- με μπλε σκούρο χρώμα το πείραμα 12, με Διάρκεια 30 min. και Ισχύ 85 W



Σχήμα 5.14 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα συχνότητας 1142 kHz

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζεται από τη συχνότητα των υπέρηχων επιβολής.

5.5.5 Ανάλυση της ισχύς ως μεταβλητού παράγοντα

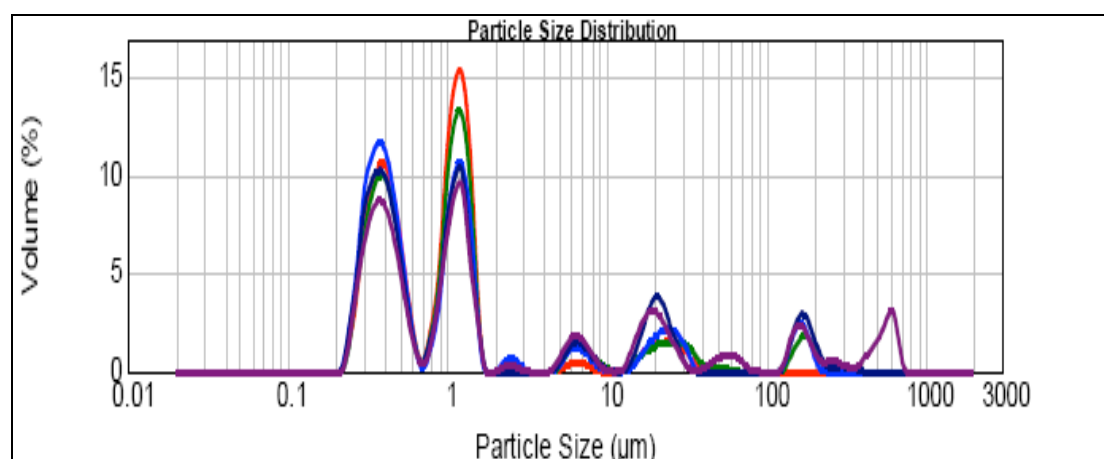
Στη συγκεκριμένη σειρά πραγματοποιήθηκαν πειράματα, ανεξαρτήτως χρονικής διάρκειας και συχνότητας, για τις εξής ισχύς:

- 85 Watts
- 165 Watts

Τα αποτελέσματα της επιρροής του συγκεκριμένου παράγοντα παρουσιάζονται στα ακόλουθα δύο σχήματα, όπου στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα πειράματα ισχύος 85 W και στο Σχήμα 5.16 για ισχύ 165 W.

Στο σχήμα 5.15 απεικονίζονται με:

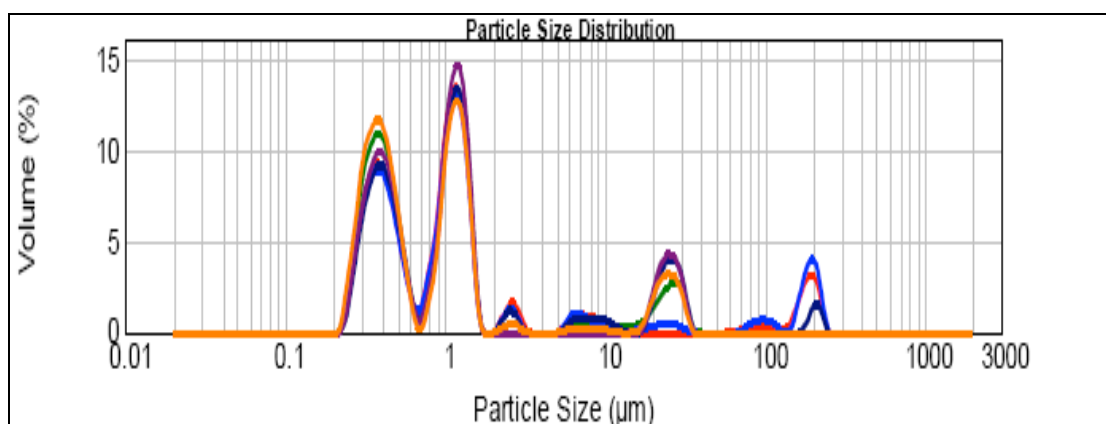
- μπλε χρώμα το πείραμα 1, με Διάρκεια 5 min. και Συχνότητα 582 kHz
- πορτοκαλί χρώμα το πείραμα 3, με Διάρκεια 5 min. και Συχνότητα 1142 kHz
- μωβ χρώμα το πείραμα 5, με Διάρκεια 15 min. και Συχνότητα 582 kHz
- πράσινο χρώμα το πείραμα 7, με Διάρκεια 15 min. και Συχνότητα 1142 kHz
- κόκκινο χρώμα το πείραμα 9, με Διάρκεια 30 min Συχνότητα 582 kHz
- μπλε σκούρο χρώμα το πείραμα 11, με Διάρκεια 30 min. και Συχνότητα 1142 kHz



Σχήμα 5.15 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα ισχύος 85 W

Στο σχήμα 5.16 απεικονίζονται:

- μπλε χρώμα το πείραμα 2, με Διάρκεια 5 min. και Συχνότητα 582 kHz
- πορτοκαλί χρώμα το πείραμα 4, με Διάρκεια 5 min. και Συχνότητα 1142 kHz
- μωβ χρώμα το πείραμα 6, με Διάρκεια 15 min. και Συχνότητα 582 kHz
- πράσινο χρώμα το πείραμα 8, με Διάρκεια 15 min. και Συχνότητα 1142 kHz
- κόκκινο χρώμα το πείραμα 10, με Διάρκεια 30 min Συχνότητα 582 kHz
- μπλε σκούρο χρώμα το πείραμα 12, με Διάρκεια 30 min. και Συχνότητα 1142 kHz

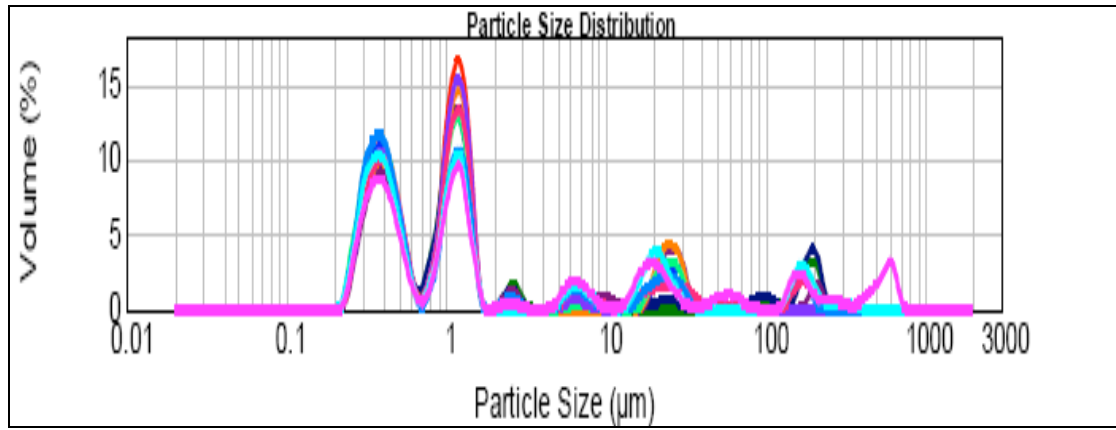


Σχήμα 5.16 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων για πειράματα ισχύος 165 W

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζεται από την ισχύ των υπέρηχων επιβολής.

5.5.6 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη σειρά διαπιστώθηκε ότι παρά τις όποιες μεταβολές στο χρόνο επιβολής, στη συχνότητα ή στην ισχύ των υπέρηχων το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζεται καθώς μένει αμετάβλητο. Είναι σημαντικό να σχολιαστεί το γεγονός ότι δεν παρατηρείται η παραμικρή διαφοροποίηση σε καμία από τις τρεις ομάδες σωματιδίων διαφορετικού μεγέθους που ουσιαστικά περιέχονται στο διάλυμα.



Σχήμα 5.17 Παρουσίαση όλων των πειραματικών αποτελεσμάτων σε υδατικές διασπορές από διαλυμένα μικροσφαιρίδια latex διαμέτρου 1 μm

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ - ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

6.1 ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Σκοπός της έρευνας είναι η μελέτη του φαινομένου της συσσωμάτωσης κολλοειδών διασπορών μέσω της χρήσης ηχητικών κυμάτων σε μακροσκοπικές διαστάσεις.

Οι διασπορές στις οποίες επιβλήθηκαν ηχητικά κύματα συνεχούς εκπομπής ήταν υδατικές διασπορές με διαλυμένα σωματίδια καολινίτη και κατά την πειραματική διαδικασία μελετήθηκε η επιρροή ορισμένων παραμέτρων στη διαδικασία της συσσωμάτωσης, όπως:

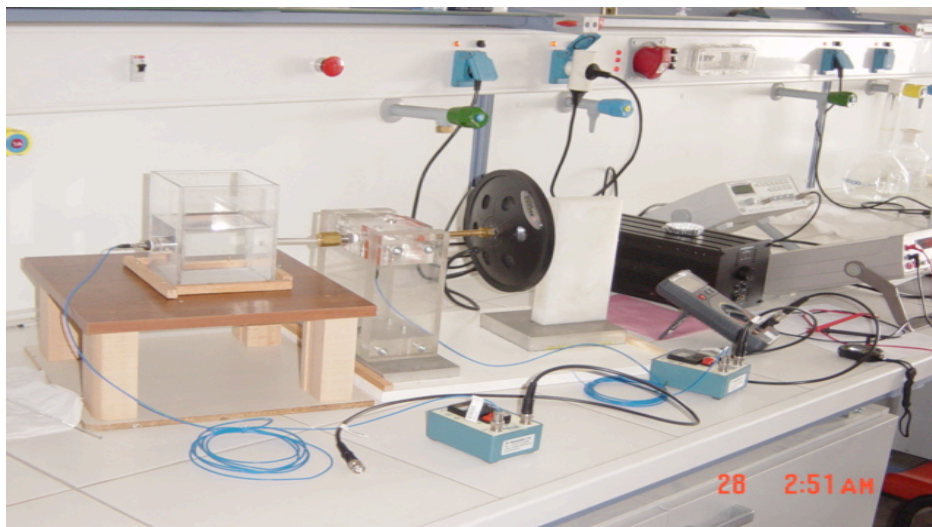
- η συχνότητα των κυμάτων
- η πίεση των κυμάτων
- ο χρόνος εφαρμογής των κυμάτων
- η ποσότητα κροκιδωτικού

6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από:

- μια δεξαμενή από πλεξιγκλάς διαστάσεων 10.5 cm x 10.5 cm x 16 cm
- μια γεννήτρια συχνοτήτων
- έναν ενισχυτή
- ένα ηχείο
- έναν αισθητήρα μετρήσεως της πίεσης
- μια συσκευή μετρήσεως της πίεσης
- δυο ειδικές συσκευές ελέγχου τάσης

Ως γεννήτρια συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο GFG – 8216A της GW instek, ως ενισχυτής το μοντέλο 5.3A Monoblock Amplifier της Audio Source και ως ηχείο το μοντέλο TST429 – Platinum της Clark Synthesis Tactile Sound.



Εικόνα 6.1 Πειραματική διάταξη ηχητικών κυμάτων

6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Η παράμετρος η οποία μετρήθηκε ώστε να διαπιστωθεί το ενδεχόμενο συσσωμάτωσης ήταν η θολότητα. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν βάση συγκεκριμένης χρονικής σειράς, ακολουθώντας τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας. Η πρώτη σειρά μετρήσεων γίνονταν πριν την εφαρμογή των ηχητικών κυμάτων στην υδάτινη κolloειδή διασπορά, η δεύτερη αμέσως μετά την εφαρμογή και η τελευταία μετά το πέρας της καθίζησης διάρκειας 30 min. Σημειώνεται ότι για κάθε μέτρηση λαμβάνονταν δείγμα όγκου 20 mL από την επιφάνεια του δείγματος.

6.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Στη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων μελετάται το φαινόμενο της συσσωμάτωσης σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, NaHCO_3 (10g/L), ως αλκαλικότητα, και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L), ως κροκιδωτικό.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή του συγκεκριμένου δείγματος ήταν η εξής:

Σε ποτήρι αναδέυσεως χωρητικότητας 2 L διαλύθηκαν 0,4 g καολινίτη σε 2 L αποσταγμένου νερού. Το διάλυμα αφέθηκε σε περιοδική ανάδευση για 24 h στις 60

στρ/min. Μετά το πέρας των 24 ωρών επιβλήθηκε στο διάλυμα διαδικασία ταχείας ανάδευσης στις 100 στρ/min για 1 min και στη συνέχεια ανάδευση για 30 min. στις 80στρ/min. Έπειτα ακολούθησε διαδικασία καθίζησης για 30 min. Από το διάλυμα των 2 L επιλέχθηκε το υπερκείμενο 1 L, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό το τελικό διάλυμα με θολότητα: 55 - 60 NTU.

Σε κάθε πείραμα τοποθετήθηκαν στη δεξαμενή 900 mL από το διάλυμα στα οποία προστέθηκε επιπλέον ποσότητα 9 mL NaHCO_3 (10g/L). Κατά την πειραματική διαδικασία ως κροκιδωτικό χρησιμοποιήθηκε θειικό αργίλιο, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L). Η ποσότητα κροκιδωτικού δεν ήταν ίδια σε όλα τα πειράματα.

6.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Όπως έχει προαναφερθεί στη συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκαν ως παράγοντες επιρροής η συχνότητα, η πίεση, ο χρόνος εφαρμογής των ηχητικών κυμάτων καθώς και η ποσότητα κροκιδωτικού. Ειδικότερα μελετήθηκαν οι:

- συχνότητες: 20 Hz, 40 Hz και 100 Hz
- πιέσεις: 50 kPa και 100 kPa
- χρόνοι εφαρμογής: 5 min, 15 min, 30 min και 45 min
- ποσότητες κροκιδωτικού: 1 mL, 2 mL, 4 mL και 8 mL

6.5.1 Μελέτη επίδρασης ηχητικής συχνότητας και πίεσης

Στο πρώτο στάδιο της έρευνας μελετήθηκε η επίδραση της ηχητικής συχνότητας και πίεσης στο φαινόμενο της συσσωμάτωσης. Για να επιτευχθεί αυτό, σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη σειρά ο χρόνος εφαρμογής των ηχητικών κυμάτων και η ποσότητα του κροκιδωτικού που προστέθηκε στις διασπορές παρέμειναν σταθερά. Ειδικότερα σε κάθε πείραμα εφαρμόστηκαν ηχητικά κύματα συνεχούς εκπομπής για 30 min και προστέθηκαν 2 mL $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L).

Στη συγκεκριμένη σειρά πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα με τις εξής παραμέτρους:

- Συχνότητα: 20 Hz, Πίεση: 50 kPa
- Συχνότητα: 20 Hz, Πίεση: 100 kPa
- Συχνότητα: 40 Hz, Πίεση: 50 kPa
- Συχνότητα: 40 Hz, Πίεση: 100 kPa

- Συχνότητα: 100 Hz, Πίεση: 50 kPa
- Συχνότητα: 100 Hz, Πίεση: 100 kPa

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.1 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων επιβολής ηχητικών κυμάτων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L) με σταθερό χρόνο εφαρμογής και σταθερή ποσότητα κροκιδωτικού στη διασπορά για διάφορες συχνότητες και πιέσεις

ΠΕΙΡΑΜΑ 1		
Συχνότητα: 20 Hz, Πίεση: 50 kPa, Χρόνος εφαρμογής: 30 min, Ποσότητα $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: 2mL		
Πριν την εφαρμογή ηχητικών κυμάτων	Μετά το πέρας της εφαρμογής ηχητικών κυμάτων	Μετά από 30 min καθίζηση
Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)
55 - 60	55 - 60	45 - 50

ΠΕΙΡΑΜΑ 2		
Συχνότητα: 20 Hz, Πίεση: 100 kPa, Χρόνος εφαρμογής: 30 min, Ποσότητα $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: 2mL		
Πριν την εφαρμογή ηχητικών κυμάτων	Μετά το πέρας της εφαρμογής ηχητικών κυμάτων	Μετά από 30 min καθίζηση
Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)
55- 60	55 - 60	40 - 45

ΠΕΙΡΑΜΑ 3		
Συχνότητα: 40 Hz, Πίεση: 50 kPa, Χρόνος εφαρμογής: 30 min, Ποσότητα $Al_2(SO_4)_3$: 2mL		
Πριν την εφαρμογή ηχητικών κυμάτων	Μετά το πέρας της εφαρμογής ηχητικών κυμάτων	Μετά από 30 min καθίζηση
Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)
55 - 60	55 - 60	50 - 55

ΠΕΙΡΑΜΑ 4		
Συχνότητα: 40 Hz, Πίεση: 100 kPa, Χρόνος εφαρμογής: 30 min, Ποσότητα $Al_2(SO_4)_3$: 2mL		
Πριν την εφαρμογή ηχητικών κυμάτων	Μετά το πέρας της εφαρμογής ηχητικών κυμάτων	Μετά από 30 min καθίζηση
Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)
55 - 60	55 - 60	30 - 35

ΠΕΙΡΑΜΑ 5		
Συχνότητα: 100 Hz, Πίεση: 50 kPa, Χρόνος εφαρμογής: 30 min, Ποσότητα $Al_2(SO_4)_3$: 2mL		
Πριν την εφαρμογή ηχητικών κυμάτων	Μετά το πέρας της εφαρμογής ηχητικών κυμάτων	Μετά από 30 min καθίζηση
Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)
55 - 60	55 - 60	50 - 55

ΠΕΙΡΑΜΑ 6		
Συχνότητα: 100 Hz, Πίεση: 100 kPa, Χρόνος εφαρμογής: 30 min, Ποσότητα $Al_2(SO_4)_3$: 2mL		
Πριν την εφαρμογή ηχητικών κυμάτων	Μετά το πέρας της εφαρμογής ηχητικών κυμάτων	Μετά από 30 min καθίζηση
Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)
55 - 60	55 - 60	45 - 50

Διαπιστώνεται ότι τα βέλτιστα αποτελέσματα, χωρίς όμως να κρίνονται ικανοποιητικά, παρατηρούνται σε συχνότητα 40 Hz και πίεση 100 kPa. Γενικότερα παρατηρείται ότι οι συχνότητες των 20 και 100 Hz είναι αναποτελεσματικές, ενώ καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται σε καταστάσεις πίεσης 100 kPa.

6.5.2 Μελέτη επίδρασης του χρόνου εφαρμογής ηχητικών κυμάτων

Το επόμενο στάδιο της έρευνας ήταν η μελέτη της επίδρασης του χρόνου εφαρμογής των ηχητικών κυμάτων στο φαινόμενο της συσσωμάτωσης. Έχοντας εντοπίσει τη βέλτιστη συχνότητα και πίεση και διατηρώντας την ποσότητα του κροκιδωτικού στη διασπορά σταθερή στα 2 mL, πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα με τους εξής χρόνους εφαρμογής:

- 5 min
- 15 min
- 30 min
- 45 min

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων επιβολής ηχητικών κυμάτων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, $NaHCO_3$ (10g/L) και θεικού αργιλίου, $Al_2(SO_4)_3$ (5g/L) για

διάφορους χρόνους εφαρμογής σε σταθερή συχνότητα και πίεση και με σταθερή ποσότητα κροκιδωτικού

ΠΕΙΡΑΜΑ			
Συχνότητα: 40 Hz, Πίεση: 100 kPa, Ποσότητα $Al_2(SO_4)_3$: 2mL			
Χρόνος εφαρμογής ηχητικών κυμάτων (min)	Πριν την εφαρμογή ηχητικών κυμάτων	Μετά το πέρας της εφαρμογής ηχητικών κυμάτων	Μετά από 30 min καθίζηση
	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)
5	55 - 60	55 - 60	55 - 60
15	55 - 60	55 - 60	50 - 55
30	55 - 60	55 - 60	30 - 35
45	55 - 60	55 - 60	30 - 35

Διαπιστώνεται ότι ο βέλτιστος χρόνος εφαρμογής ακουστικών κυμάτων είναι τα 30 min καθώς για μικρότερους χρόνους δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή στη θολότητα της διασποράς, ενώ για χρόνους μεγαλύτερους από 30 min δεν παρατηρείται επιπλέον μείωση της θολότητας.

6.5.3 Μελέτη επίδρασης της ποσότητας κροκιδωτικού

Τέλος μελετήθηκε η επίδραση της ποσότητας κροκιδωτικού στο φαινόμενο της συσσωμάτωσης. Έχοντας εντοπίσει τη βέλτιστη συχνότητα και πίεση και το βέλτιστο χρόνο εφαρμογής ηχητικών κυμάτων πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων με διαφορετικές ποσότητες κροκιδωτικού. Οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

- 1 mL

- 2 mL
- 4 mL
- 8 mL

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.3 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων επιβολής ηχητικών κυμάτων σε διασπορές από διαλυμένα σωματίδια καολινίτη σε αποσταγμένο νερό με προσθήκη όξινου ανθρακικού νάτριου, NaHCO_3 (10g/L) και θεικού αργιλίου, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5g/L) για διάφορες ποσότητες κροκιδωτικού σε σταθερή συχνότητα και πίεση και με σταθερό χρόνο εφαρμογής κυμάτων

ΠΕΙΡΑΜΑ			
Συχνότητα: 40 Hz, Πίεση: 100 kPa, Χρόνος εφαρμογής ηχητικών κυμάτων: 30 min			
Ποσότητα $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mL)	Πριν την εφαρμογή ηχητικών κυμάτων	Μετά το πέρας της εφαρμογής ηχητικών κυμάτων	Μετά από 30 min καθίζηση
	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)	Θολότητα (NTU)
1	55 - 60	55 - 60	50 - 55
2	55 - 60	55 - 60	30 - 35
4	55 - 60	55 - 60	30 - 35
8	55 - 60	55 - 60	25 - 30

Παρατηρείται ότι η βέλτιστη ποσότητα είναι τα 2 mL. Μεγαλύτερες ποσότητες δεν επιφέρουν επιπλέον αποτελέσματα, ενώ μικρότερες ποσότητες είναι αναποτελεσματικές.

7. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Από τις μέχρι τώρα γνωστές και χρησιμοποιούμενες μεθόδους καθαρισμού νερού η πιο διαδεδομένη και πιο αποτελεσματική είναι η χρήση κροκιδωτικών σε συνδυασμό με ανάδευση. Η συγκεκριμένη μέθοδος όμως, παρά την αποτελεσματικότητά της, παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα καθώς:

- τα κροκιδωτικά, ως χημικές ουσίες, μπορεί να είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία
- η μακροχρόνια χρήση αυτών έχει επιφέρει “συνήθεια” των κολλοειδών απέναντι τους οδηγώντας σε μειωμένη αποτελεσματικότητα, δηλαδή τα κολλοειδή πλέον να μην αντιδρούν στον ίδιο βαθμό απέναντι στα κροκιδωτικά όπως αρχικά, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η διαδικασία της κροκίδωσης απαιτώντας ολοένα και μεγαλύτερα ποσά κροκιδωτικών για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων
- το κόστος χρήσης αυτών είναι υψηλό
- η κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαδικασία της ανάδευσης είναι αυξημένη

Στην προσπάθεια εύρεσης μιας νέας μεθόδου, εντελώς διαφορετικής από τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες και πιο φιλικής προς το περιβάλλον, η χρήση ακουστικών κυμάτων θεωρήθηκε ιδανική. Η χρήση των ακουστικών κυμάτων παρουσιάζει, σε θεωρητικό επίπεδο, ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς:

- τα ακουστικά κύματα είναι ακίνδυνα για τον άνθρωπο
- αποφεύγεται το φαινόμενο της “συνήθειας”
- παρέχεται η δυνατότητα εφαρμογής υψηλών ποσών ενέργειας σε διασπορές, ειδικότερα σε διασπορές υγρού – στερεού είναι δυνατή η επιβολή ενέργειας στα στερεά σωματίδια εντός του υγρού μέσου, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της κινητικής ενέργειας αυτών
- η κινητική ενέργεια, η οποία προκαλείται από την ταλαντωτική κίνηση που παρατηρείται στα σωματίδια των διασπορών όπου επιβάλλονται ακουστικά κύματα, ίσως είναι ικανή να ξεπεραστεί ο ενεργειακός φραγμός και να

ελαττωθεί η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων, ώστε να επέλθει συσσωμάτωση αυτών

Η συγκεκριμένη εργασία λοιπόν, όπως μαρτυρά ο τίτλος της, «Μελέτη επίδρασης της εφαρμογής ακουστικών κυμάτων σε διεργασίες συσσωμάτωσης κολλοειδών διασπορών», έχει ως σκοπό την πρακτική διερεύνηση μέσω πειραμάτων της συμβολής των ακουστικών κυμάτων, ειδικότερα των ηχητικών κυμάτων και των υπέρηχων, στην συσσωμάτωση των κολλοειδών καθώς και την έρευνα του κατά πόσο είναι δυνατή η αντικατάσταση των μέχρι τώρα γνωστών μεθόδων συσσωμάτωσης, και ειδικότερα της χρήσης κροκιδωτικών, από αυτά.

7.2 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Κατά την πειραματική διαδικασία με υπέρηχους μελετήθηκε αρχικά η αποτελεσματικότητα αυτών χωρίς χρήση κροκιδωτικού. Αποδείχτηκε ότι εναλλαγές σε παράγοντες όπως η συχνότητα, η ισχύς ή ο χρόνος εφαρμογής δεν επέφεραν αποτελέσματα. Έπειτα μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα αυτών με παράλληλη χρήση κροκιδωτικού, με αντίστοιχες εναλλαγές σε παράγοντες όπως η συχνότητα, η ισχύς ή ο χρόνος εφαρμογής, όπου και πάλι όμως δεν προέκυψε κάποιο επιθυμητό αποτέλεσμα. Τέλος πραγματοποιήθηκαν ορισμένα πειράματα όπου διαφοροποιήθηκε ο τρόπος εφαρμογής των υπέρηχων από συνεχή, που ήταν στις προηγούμενες πειραματικές σειρές, σε παλμικό, χωρίς όμως πάλι να παρατηρηθεί κάποια διαφορά.

Αναφέρεται ότι η εφαρμογή υπέρηχων χωρίς χρήση κροκιδωτικού δεν επέφερε καμία σημαντική μεταβολή τόσο στον παράγοντα θολότητα όσο και στον παράγοντα δυναμικό ζήτα, αντιθέτως η εφαρμογή υπέρηχων σε συνδυασμό με κροκιδωτικό, παρά το γεγονός ότι δεν επηρέαζε τη θολότητα της διασποράς, προκαλούσε αξιόλογη μείωση στο δυναμικό ζήτα. Το συγκεκριμένο γεγονός, δηλαδή η μείωση του δυναμικού ζήτα χωρίς όμως παράλληλη μείωση της θολότητας, θεωρήθηκε άξιο διερεύνησης. Μια πρώτη επεξήγηση του φαινομένου αυτού οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι ίσως η χρήση υπέρηχων αντί για συσσωμάτωση οδηγούσε σε διάσπαση των σωματιδίων των διασπορών. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μια νέα σειρά πειραμάτων όπου με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού μελετήθηκε το μέγεθος των σωματιδίων, έπειτα από εφαρμογή υπέρηχων. Αποδείχτηκε όμως, ότι παρά τη μείωση του δυναμικού ζήτα, το μέγεθος των σωματιδίων των κολλοειδών

διασπορών παρέμενε ανεπηρέαστο, χωρίς να προκαλείται ούτε συσσωμάτωση ούτε διάσπαση.

Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η χρήση υπέρηχων δεν επιφέρει κάποια ουσιαστική επίδραση στην συσσωμάτωση κολλοειδών διασπορών. Ίσως η ενέργεια που μεταφέρεται στα σωματίδια της διασποράς μέσω των υπέρηχων να μην είναι αρκετή ώστε να ξεπεραστεί ο ενεργειακός φραγμός μεταξύ των κολλοειδών ώστε να ελαττωθεί η μεταξύ τους απόσταση και να επέλθει συσσωμάτωση αυτών. Πρέπει πάντως να αναφερθεί ότι η συνεχής κατακρήμνιση φυσαλίδων λόγω της ακουστικής σπηλαίωσης καθώς και η βίαιη και συνεχής ανάδευση λόγω του φαινόμενου acoustic streaming επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την κίνηση των κολλοειδών σωματιδίων, μην επιτρέποντας σε αυτά να πλησιάσουν σε κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις ώστε να συσσωματωθούν. Πιστεύεται μάλιστα ότι αυτός είναι και ο λόγος που παρά τη μείωση του δυναμικού ζήτα λόγω της χρήσης κροκιδωτικών δεν παρατηρείται μείωση στη θολότητα, καθώς μπορεί σε κάθε σωματίδιο να αλλάζει το φορτίο της επιφάνειας διάσπασης και να μειώνεται το ζήτα δυναμικό του, όμως η τόσο βίαιη και απότομη ανάδευση να μην επιτρέπει στα κολλοειδή τη δημιουργία συσσωμάτων.

7.3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Κατά την πειραματική διαδικασία με ηχητικά κύματα μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα αυτών με παράλληλη χρήση κροκιδωτικού. Αναφέρεται ότι η μελέτη αποκλειστικής εφαρμογής ηχητικών κυμάτων, δηλαδή χωρίς την παράλληλη χρήση κροκιδωτικών, σε κολλοειδή διασπορές έχει ήδη μελετηθεί σε προηγούμενη εργασία χωρίς να επιφέρει θεμιτά αποτελέσματα. Από τις συχνότητες και τις πιέσεις οι οποίες μελετήθηκαν αποδείχθηκε ότι τα ευνοϊκότερα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σε συχνότητα 40 Hz και πίεση 100 kPa. Από τα επιπλέον πειράματα αποδείχθηκε ότι ο βέλτιστος χρόνος εφαρμογής ήταν τα 30 min, ενώ η ποσότητα του κροκιδωτικού μετά από κάποιο όριο, συγκεκριμένα των 2 mL σε διάλυμα συνολικού όγκου 900 mL, δεν προκαλούσε επιπλέον μείωση της θολότητας. Πρέπει να αναφερθεί πάντως ότι παρά τη μείωση τη θολότητας, τα αποτελέσματα δεν κρίνονται ενθαρρυντικά, ειδικότερα αν συγκριθούν με αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από διαδικασία ανάδευσης με παράλληλη χρήση κροκιδωτικού.

Γενικότερα μπορεί να ειπωθεί ότι η εφαρμογή ηχητικών κυμάτων σε συνδυασμό με χρήση κροκιδωτικού προκαλεί ως ένα βαθμό συσσωμάτωση σε κολλοειδή διασπορές, χωρίς όμως να επιφέρει αποτελέσματα καλύτερα από τις μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Βάση οπτικών παρατηρήσεων και πάντα μιλώντας για τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη, η εφαρμογή ηχητικών κυμάτων ουσιαστικά αντικαθιστούσε τη λειτουργία της ανάδευσης.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι πολύ σημαντικό ρόλο στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία είχε η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Ειδικότερα ο αντιδραστήρας όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα δεν επέτρεπε την εκμετάλλευση ορισμένων πολύ σημαντικών χαρακτηριστικών των κυμάτων, όπως η δημιουργία στάσιμων ακουστικών κυμάτων.

7.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Βάση των αποτελεσμάτων των πειραματικών διαδικασιών, τόσο με χρήση υπέρηχων όσο και ηχητικών κυμάτων, η επίτευξη συσσωμάτωσης κολλοειδών διασπορών μέσω της χρήσης ακουστικών κυμάτων κρίνεται ανεπιτυχής.

Κρίνοντας τη χρήση των υπέρηχων ως μέσο συσσωμάτωσης των κολλοειδών διασπορών, μπορεί να ειπωθεί ότι ίσως λόγω των πολύ έντονων φαινομένων που παρατηρούνται κατά τη διάδοση τους, όπως το acoustic cavitation και acoustic streaming, η εφαρμογή τους να λειτουργεί αποτρεπτικά. Όσον αφορά τα ηχητικά κύματα ίσως η χρήση τους να είναι ιδανικότερη, ιδιαίτερα σε αντιδραστήρια όπου θα μπορούν να αναπτυχθούν στάσιμα κύματα βοηθώντας με τον τρόπο αυτό τα σωματίδια των κολλοειδών διασπορών να έρθουν σε όσο το δυνατό κοντινότερες αποστάσεις ώστε να επέλθει το φαινόμενο της συσσωμάτωσης.

Η επίτευξη συσσωμάτωσης μέσω της χρήσης ακουστικών κυμάτων σε κολλοειδή διασπορές αποτελεί αναμφίβολα μια περίπλοκη, χρονοβόρα και δύσκολη διαδικασία, η οποία όμως έχει τεράστια περιθώρια εξέλιξης και τη δυνατότητα να οδηγήσει την επιστήμη του καθαρισμού του νερού σε εντελώς καινούριους δρόμους μέσω των ανατρεπτικών αποτελεσμάτων που μπορεί να προκύψουν. Για το λόγο αυτό η περαιτέρω διερεύνηση της συγκεκριμένης διαδικασίας κρίνεται απαραίτητη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Κουζέλη – Κατσίρη Α., (1996), “Φυσικοχημική Επεξεργασία Αποβλήτων”, Σεμινάριο Επεξεργασίας και Διάθεσης Υγρών Βιομηχανικών Αποβλήτων, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος.
- Νικολακόπουλος Α.Ν., Ο. Ιγγλέση-Μαρκοπούλου και Ν. Παπαγιαννάκος, “Πράσινη Χημεία και Υπέρηχοι”, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα.
- Παναγιώτου Κ. (1998), “Διεπιφανειακά Φαινόμενα & Κolloειδή Συστήματα”, Εκδόσεις Ζήτη, β’ έκδοση, Θεσσαλονίκη.
- Σκουλικίδης Θ.,(1964), “Φυσικοχημεία I₂“, Αθήνα.
- Τσώνης Σ.Π., (2003), “Καθαρισμός Νερού”, Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Χρυσικόπουλος Κ.Β., (2005), “Καθαρισμός Νερού”, Τμήμα Εκτυπώσεων – Τυπογραφείου Πανεπιστημίου Πατρών.
- Ando T., J. Ichihara and T. Hanafusa (1985), “Ultrasonic acceleration of solid-liquid two-phase organic reactions”, *Mem. Int. Sci. Ind. Res. (Osaka Univ.)* 42, 27-39.
- American Water Works Association and Water Environment Federation, (1999), “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*”.
- Borissenok V.A. (2007), “Sonoluminescence: Two sources of light”, *Physics Letters A*, 372, pp 3496 – 3500.
- Busnaina A.A. and G.W. Gale (1995), “Ultrasonic and megasonic particle removal”, *Precision Cleaning '95 Proceedings*, pp 347 – 360.
- Capote F.P. and M.D.L. Castro (2006), “Ultrasound in analytical chemistry”, *Anal. Bional. Chem.* 2007, 387, pp 249-257.
- Cheeke J.D.N. (1997), *Can. J. Phys.*, 75, pp 77 – 98.
- Contamine F., F. Faïd, A.M. Wilhelm, J. Berlan and H. Delmas (1994), “Chemical Reactions under Ultrasound: Discrimination of Chemical and Physical Effects”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 49, No 24B, pp 5865-5873.
- Crum L.A. (1994), *Physics Today*, 47, 22.
- Didenko Y.T., W.B. McNamara III and K.S. Suslick (2000), *Nature*, 407, 877.

- Frenkel V., R. Gurka, A. Liberzon, U. Shavit and E. Kimmel (2001), "Preliminary investigations of ultrasound induced acoustic streaming using particle velocimetry", *Ultrasonics*, Vol. 39, pp 153 - 156.
- Global Health and Education Foundation (2007), Conventional Coagulation-Flocculation-Sedimentation, "*Safe Drinking Water is Essential*". National Academy of Sciences.
- Gogate P.R., S. Mujumdar and A.B. Pandit (2003), "Large-scale sonochemical reactors for process intensification: design and experimental validation", *Journal of Chemical and Biotechnology*, 78, pp 685-693.
- Graff K. (1998), "*Independent study on high power ultrasonic*", Lecture Notes. WE 795, The Ohio State University, Columbus, OH.
- Heinglein A. (1987), "Sonochemistry: historical development and modern aspects", *Ultrasonics*, 25, pp 6-16.
- Kanthale P., M. Ashokkumar and F. Grieser (2006), "Sonoluminescence, sonochemistry (H₂O₂ yield) and bubble dynamics: Frequency and power effects", *Ultrasonics Sonochemistry* (2008), 15, pp 143 – 150.
- Khanal S.K., D. Grewell, S. Sung and J.H.V. Leeuwen (2007), "Ultrasound applications in wastewater sludge pretreatment: A review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37:4, pp 227 – 313.
- Kumar A., P.R. Gotage and A. B. Pandit (2007), "Mapping of acoustic streaming in sonochemical reactors", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol 46, pp 4368 - 4373.
- Kuznetsova L.A. and W.T. Coakley (2007), "Applications of ultrasound streaming and radiation force in biosensors", *Biosensors and Bioelectronics*, 22, pp 1567 – 1577.
- Laborde J.L., A. Hita, J.P. Caltagirone and A. Gerard (2000), "Fluid dynamics phenomena induced by power ultrasounds", *Ultrasonics*, 38, pp 297 – 300.
- Lee C.P. and T.G. Wang (1990), "Outer acoustic streaming", *J. Acoust. Soc. Am.*, 88(5), pp 2367 – 2375.
- Lighthill J. (1978b), *J. Sound Vibration*, Vol. 61, pp 391 – 418.
- Looh B. G., S. Hyun, P.I. Ro and C. Kleinstreuer (2002), "Acoustic streaming induced by ultrasonic flexural vibrations and associated enhancement of convective heat transfer", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 111, No. 2.

- Looh B.G., D.R. Lee and K. Kwon (2006), "Acoustic streaming pattern induced by longitudinal ultrasonic vibration in an open channel using particle imaging velocimetry", *Applied Physics Letters*, 89.
- Luche J.L. (1992), "Developments of the new experimental theory of sonochemistry initiated in Grenoble", *Ultrasonics*, 30, pp 156-162.
- Mason T.J. (2006), "Sonochemistry and the environment – Providing a green link between chemistry, physics and engineering", *Ultrasonics Sonochemistry* (2007), 14, pp 476-483.
- Mason T.J. and J.P. Lorimer (1988), "*Sonochemistry: Theory, Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry*", Ellis Horwood Ltd., Chichester, U.K.
- Matula T.J., R.A. Roy, P.D. Mourad, W.B. McNamara III and K.S. Suslick (1995) *Phys. Rev. Lett.*, 75, 2602.
- McNamara III W.B., Y.T. Didenko and K.S. Suslick (2000), "The Nature of the Continuum in Multibubble Sonoluminescence", *J. Am. Chem. Soc.*, 122, pp 8563 – 8564.
- Meidani A.R.N. and M. Hasan (2003), "Mathematical and physicsl modeling of bubble growth due to ultrasound", *Applied Mathematical Modelling* 2004, 28, pp 333-351.
- Muthukumar S., S. E. Kentish, G. W. Stevens, M. Ashokkumar and R. Mawson (2007), "The application of ultrasound to dairy ultrafiltration: The influence of operating conditions", *Journal of food Engineering*, 81, pp 364 – 373.
- Neppiras E.A. (1984), "Acoustic cavitation: on introduction", *Ultrasonics*
- Nightingale K. R., P. J. Kornguth and G. E. Trahey (1999), "The use of acoustic streaming in breast lesion diagnosis: A clinical study", *Ultrasound Med. Biol.*, 25, pp 75 – 87.
- Noltingk B.E. and E.A. Neppiras (1950), *Proc. Phys. Soc. B*, 63, 674.
- Nyborg W. L. (1965), "Acoustic streaming", *Physical acoustics, New York: Academic Press*, 1965, pp 265 – 331.
- Parfutchik E.I., O.V. Lavrinenko and G.V. Leonov (2007), "Simulation of Mechano-Physical Chemistry Effects in the Process of Collapsing the Cavitation Bubbles", *8th International Siberian Workshop and Tutorials EDM*, Session V, July 1-5 2007.
- Putterman S.J. (1995), "Sonoluminescence: Sound into light", *Scientific American* (February 1995), pp 32 – 37.

- Riley N. (1998), "Acoustic streaming", *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, 10, pp 349 – 356.
- Rhonda Lee-Desautels, 2005, "*Theory of van der Waals Forces as Applied to Particulate Materials*", licensed to ERPT, Department of Chemical and Materials Engineering University of Kentucky.
- Rubio J. and Rosa J., (2005), "*The FF (flocculation-flotation) process*", *Minerals Engineering* 18, pp. 701-707.
- Sauter C., M.A. Emin, H.P. Schuchmann and S. Tavman (2007), "Influence of hydrostatic pressure and sound amplitude on the ultrasound induced dispersion and de-agglomeration of nanoparticles", *Ultrasonics* 2008, 15, pp 517-523.
- Shi X., R. Martin, S. Vaezy, P. Kaczkowski and L. Crum (2001), "Colour Doppler detection of acoustic streaming in a hematoma model", *Ultrasound Med. Biol.*, 27, pp 1255 – 1264.
- Suslick K.S. (1994), "The Chemistry of Ultrasound", *The Yearbook of Science & the Future* 1994, pp 138-155.
- Suslick K.S., Y. Didenko, M.F. Fang, T. Hyeon, K.J. Kolbeck, W.B. McNamara III, M.M. Mdleleni and M. Wong (1999), "Acoustic cavitation and its chemical consequences", *Phil. Trans. Roy. Soc A*
- Suslick K.S and Doktycz, S.J. (1990), "Effects of ultrasound on surfaces and solids", in *Advances in Sonochemistry*, Vol. 1 (Edited by T. J. Mason), pp. 3459-3461.
- Wu C., N. Nakagawa and M. Fujihara (2006), "Study on Acoustic Cavitations in the Ultrasonic Radiation Field", *JSME International Journal*, Vol. 49, No 3.
- Yasui K. (1999), "Single-Bubble and Multi-Bubble Sonoluminescence", *Phys. Rev. Lett.*, 83, pp 4297 – 4300.
- Yasui K., T. Tuziuti, M. Sivakumar and Y. Iida (2004), *Appl. Spec. Rev.*, 39, 399.