

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗ
ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ
ΚΟΛΛΟΕΙΔΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Από
**ΜΑΡΟΥΠΑ ΔΗΜΗΤΡΙΟ
ΜΠΟΥΜΠΟΥΡΑ ΒΑΣΙΛΕΙΟ**

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2006
ΠΑΤΡΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική μελέτη με θέμα «Επίδραση των ακουστικών κυμάτων στη συσσωμάτωση και την ιζηματοποίηση των κολλοειδών» πραγματοποιήθηκε από τους Μαρούπα Δημήτριο και Μπούμπουρα Βασίλειο, φοιτητές του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Η μελέτη συντελέστηκε στο πλαίσιο της ερευνας στο Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος υπό τις οδηγίες και την καθοδήγηση του κ. Κωνσταντίνου Χρυσικόπουλου, καθηγητή του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών Πατρών, καθώς και με τη βοήθεια του κ. Ιωάννη Μαναριώτη, επιστημονικού συνεργάτη του Τμήματος Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος. Οι συγγραφείς θα ήθελαν να εκφράσουν τις θερμές ευχαριστίες τους προς τους δυο προαναφερθέντες, κ. Κωνσταντίνο Χρυσικόπουλο και κ. Ιωάννη Μαναριώτη, καθώς και προς όλο το προσωπικό του Τμήματος Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία, όπως μαρτυρά ο τίτλος της «Επίδραση των ακουστικών κυμάτων στην συσσωμάτωση και την ιζηματοποίηση των κολλοειδών», έχει ως σκοπό την πρακτική απόδειξη (μέσω πειραμάτων) της συμβολής των ακουστικών κυμάτων στην συσσωμάτωση και την ιζηματοποίηση των κολλοειδών καθώς και να ερευνηθεί κατά πόσο είναι δυνατό τα ακουστικά κύματα να αντικαταστήσουν τη χρήση κροκιδωτικών και γενικότερα τις μέχρι τώρα γνωστές μεθόδους κροκιδώσης.

Στην παρούσα μελέτη θα γίνει αναφορά καθώς και εκτενέστερη παρουσίαση σε όρους όπως κολλοειδή, κροκιδώση, θρόμβωση, ακουστικά κύματα, ενώ επίσης θα παρουσιασθούν τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της μελέτης αυτής. Ειδικότερα για τα κολλοειδή θα αναλυθούν οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες τους καθώς επίσης και διάφορα ειδικά χαρακτηριστικά τους. Για τους όρους κροκιδώση και θρόμβωση θα δοθούν οι ορισμοί αυτών, ενώ θα γίνει και αναφορά στις διάφορες μέχρι σήμερα μεθόδους που ακολουθούνται για την πραγματοποίησή τους, ενώ όσον αφορά τα ακουστικά κύματα θα γίνει αναφορά τόσο στα φυσικά χαρακτηριστικά τους όσο και στη συμπεριφορά τους μέσα στο χώρο.

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

Πριν αναφερθούμε στα συμπεράσματα που καταλήξαμε μετά το πέρας των πειραμάτων αναφέρουμε ότι το όλο αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένα εντελώς καινούριο βήμα στον χώρο της

επιστήμης του καθαρισμού νερού του, η μελέτη του οποίου βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο επιτρέποντας έτσι πολλά περιθώρια εξέλιξης και βελτίωσης, καταλήγοντας σε αποτελέσματα που μπορεί να είναι ανατρεπτικά σε σχέση με τα μέχρι τώρα δεδομένα, οδηγώντας έτσι σε νέες και εντελώς διαφορετικές από τις έως τώρα γνωστές μεθόδους καθαρισμού νερού. Όσον αφορά το πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής μελέτης, αποδείχθηκε ότι όντως τα ακουστικά κύματα επιδρούν στη συσσωμάτωση των κολλοειδών, κάτω όμως από ορισμένες συνθήκες (όπως σε συνδυασμό με κάποια από τις ήδη γνωστές μεθόδους), οδηγώντας έτσι σε ορισμένα ενθαρρυντικά συμπεράσματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	1
1.1 Δομή του καθαρού νερού.....	1
1.2 Υδρολογικός κύκλος.....	2
1.3 Φυσικά Νερά.....	4
1.4 Επεξεργασία νερού.....	5
1.5 Καθίζηση.....	8
2. ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ.....	9
2.1 Κολλοειδή και χημική αποσταθεροποίηση τους.....	9
2.2 Φόρτιση κολλοειδούς.....	10
2.3 Λυόφοβα και λυόφιλα κολλοειδή.....	12
2.4 Κύρια χαρακτηριστικά λυόφοβων και λυόφιλων κολλοειδών.....	12
3. ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ ΚΑΙ ΘΡΟΜΒΩΣΗ.....	13
3.1 Εισαγωγή στις έννοιες κροκίδωση και θρόμβωση.....	13
3.2 Αναφορά στην αυθόρμητη κροκίδωση.....	14
3.3 Μέθοδοι κροκίδωσης κολλοειδών.....	15
3.3.1 Κροκίδωση με χρήση της θερμοκρασίας.....	15
3.3.2 Κροκίδωση με προσθήκη ηλεκτρολύτη.....	16
3.3.3 Κροκίδωση με επίτευξη ισοηλεκτρικού σημείου.....	17
3.3.4 Κροκίδωση με χρήση κροκιδωτικού.....	17
3.3.4.1 Συμπύεση του διπλού στρώματος.....	18
3.3.4.2 Επιρρόφηση αντιόντων και εξουδετέρωση του ηλεκτρικού φορτίου...	19
3.3.4.3 Διασωματιδιακή γεφύρωση.....	19
3.3.4.4 Εγκλωβισμός στο ίζημα.....	19
3.4 Σειρές του Hofmeister.....	20
3.5 Μέθοδος τής αμοιβαίας κροκίδωσης.....	20
3.6 Ορισμένοι χρήσιμοι όροι.....	21
3.7 Κροκιδωτικά που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία.....	22
3.7.1 Θεικό αργίλιο.....	23
3.7.2 Τριχλωριούχος σίδηρος.....	24

3.7.3 Θειικός σίδηρος.....	24
3.7.4 Θειικός υποσίδηρος.....	25
3.7.5 Πολυηλεκτρολύτες.....	25
3.7.6 Ενεργοποιημένη πυριτία.....	26
4. ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	27
4.1 Λόγοι που οδήγησαν στη χρήση ακουστικών κυμάτων.....	27
4.2 Εισαγωγή στην κυματική.....	24
4.3 Ηχητικά κύματα.....	29
4.4 Συμβολή των ηχητικών κυμάτων.....	31
4.5 Ανάκλαση – απορρόφηση του ήχου.....	31
4.6 Συμπεριφορά του ήχου στο χώρο.....	32
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	34
5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	34
5.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	39
5.3 Πρώτο πείραμα διερεύνησης αποτελεσματικότητας των ακουστικών κυμάτων.....	40
5.4 Δεύτερο πείραμα διερεύνησης αποτελεσματικότητας των ακουστικών κυμάτων.....	40
5.5 Πείραμα διερεύνησης αποτελεσματικότητας των ακουστικών κυμάτων σε συνδυασμό με χρήση κροκιδωτικού.....	41
5.5.1 Δείγμα που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα.....	41
5.5.2 Πρώτο πείραμα test γυάλας. Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ποσότητας κροκιδωτικού και θολότητας	42
5.5.3 Δεύτερο πείραμα test γυάλας. Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ χρόνου ανάδευσης και θολότητας	43
5.5.4 Πείραμα με χρήση μόνο κροκιδωτικού.....	44
5.5.5 Πείραμα με χρήση μόνο ακουστικών κυμάτων.....	44
5.5.6 Πείραμα με χρήση ακουστικών κυμάτων και κροκιδωτικού.....	45
5.5.7 Συμπεράσματα πρώτης σειράς πειραμάτων.....	45
5.6 Σχεδιασμός μελλοντικών πειραμάτων.....	46

6. ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	
ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ	47
6.1 Πειραματική διερεύνηση.....	47
6.2 Παρατηρήσεις - λεπτομέρειες επί των πειραμάτων.....	48
6.3 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 10 Hz.....	49
6.4 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 20 Hz.....	50
6.5 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 36,6 Hz.....	51
6.6 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 70 Hz.....	52
6.7 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 100 Hz.....	53
6.8 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 200 Hz.....	54
6.9 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων με επίδραση ακουστικών κυμάτων σταθερής έντασης.....	55
6.10 Τελικά συμπεράσματα.....	61
7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	
ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ.....	62
7.1 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	62
7.2 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις.....	63
8. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	
ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ	
ΠΑΥΣΕΙΣ	67
8.1 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	67
8.2 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις.....	68
9. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	
ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΑΚΟΛΟΥΘΗ ΕΠΙΒΟΛΗ	
ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ.....	71
9.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	71
9.2 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις με σταθερά αναφοράς την χρονική διάρκεια ανάμιξης.....	73
9.3 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις με σταθερά αναφοράς την χρονική διάρκεια επιβολής ακουστικών κυμάτων.....	76

10. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	80
--	-----------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
--------------------------	-----------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Ο υδρολογικός κύκλος	3
Εικόνα 1.2 Γενικό διάγραμμα ροής για την επεξεργασία νερού.....	5
Εικόνα 1.3 Διαγράμματα ροής που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία επιφανειακού νερού	6
Εικόνα 1.4 Διαγράμματα ροής που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υπόγειου νερού	7
Εικόνα 2.1 Διαγραμματική παράσταση κολλοειδούς σωματιδίου	10
Εικόνα 5.1 Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης	35
Εικόνα 5.2 Δεξαμενή ύψους 16cm	35
Εικόνα 5.3 Βάση στην οποία τοποθετείται το ηχείο.....	36
Εικόνα 5.4 Συσκευή μετρήσεως πίεσεως.....	36
Εικόνα 5.5 Αισθητήρας μετρήσεως πίεσεως στην πίσω πλευρά της δεξαμενής	37
Εικόνα 5.6 Αισθητήρας μετρήσεως πίεσεως στη μπροστινή πλευρά της δεξαμενής	37
Εικόνα 5.7 Γεννήτρια συχνοτήτων.....	38
Εικόνα 5.8 Πεχάμετρο.....	38
Εικόνα 5.9 Θολόμετρο.....	39

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Δομή καθαρού νερού.....	1
Σχήμα 6.1 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 10 Hz.....	55
Σχήμα 6.2 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 20 Hz	56
Σχήμα 6.3 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 36,6 Hz.....	57
Σχήμα 6.4 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 70 Hz.....	58
Σχήμα 6.5 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 100 Hz.....	59
Σχήμα 6.6 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 200 Hz.....	60
Σχήμα 7.1 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Π1 και Π3.....	63
Σχήμα 7.2 Γραφική παράσταση πειράματος Π2.....	64
Σχήμα 7.3 Γραφική παράσταση πειραμάτων Π2, Π3 και Π4.....	67
Σχήμα 7.4 Γραφική παράσταση πειραμάτων Π5 και Π6.....	67
Σχήμα 8.1 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Σ1, Σ2 και Σ3.....	69
Σχήμα 8.2 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Σ1, Σ2 και Σ3.....	70
Σχήμα 9.1 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Α1, Α2, Α3 και Α4	73
Σχήμα 9.2 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Α5, Α6, Α7 και Α8.....	74
Σχήμα 9.3 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Α9, Α10, Α11 και Α12.....	75
Σχήμα 9.4 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Α1, Α5 και Α9.....	76
Σχήμα 9.5 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Α2, Α6 και Α10.....	77
Σχήμα 9.6 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Α3, Α7 και Α11.....	78
Σχήμα 9.7 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Α4, Α8 και Α12.....	79

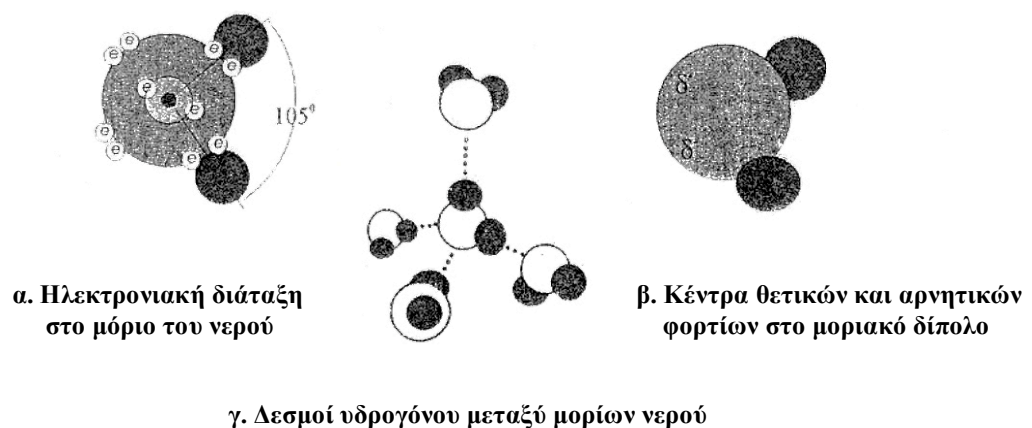
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Τυπικές συγκεντρώσεις συστατικών σε διάφορους τύπους νερού.....	4
Πίνακας 2.1 Κυρία χαρακτηριστικά λυόφοβων και λυόφιλων κολλοειδών.....	12
Πίνακας 3.1 Χρόνος καθίζησης στερεών στο νερό.....	14
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα πρώτου πειράματος test γυάλας.....	42
Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα δεύτερου πειράματος test γυάλας.....	43
Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πρώτης σειράς πειραμάτων.....	45
Πίνακας 6.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 10 Hz.....	49
Πίνακας 6.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 20 Hz.....	50
Πίνακας 6.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 36,6 Hz.....	51
Πίνακας 6.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 70 Hz.....	52
Πίνακας 6.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 100 Hz.....	53
Πίνακας 6.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 200 Hz.....	54
Πίνακας 7.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων μεταβλητής συχνότητας και πίεσης.....	62
Πίνακας 8.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων μεταβλητής συχνότητας και πίεσης με ενδιάμεσες παύσεις.....	67
Πίνακας 9.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων σταθερής συχνότητας και πίεσης και ακολούθως με επιβολή ανάδευσης.....	72

1. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

1.1 Δομή του καθαρού νερού

Το καθαρό νερό είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο και μέσο που μπορεί να διαλυτοποιεί αρκετές από τις ουσίες που έρχεται σε επαφή. Δεν υπάρχει καθαρό νερό ελεύθερο στη φύση αφού πάντοτε περιέχει διάφορες ουσίες ή συστατικά. Το νερό έχει μεγάλη σημασία για όλες τις μορφές ζωής στον πλανήτη μας, γιατί αποτελεί το 70% του βάρους του ανθρώπινου σώματος και το 80% του βάρους σε μερικά φυτικά είδη, είναι φυσικοχημικό μέσο που συμμετέχει στις μεταβολικές αντιδράσεις με τις οποίες γίνεται μετατροπή της τροφής σε ενέργεια, επιτυγχάνει την διατήρηση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος μέσω των θερμοδυναμικών μηχανισμών διαπνοής, εφύδρωσης και αναπνοής και τέλος έχει βασικό ρόλο στην φωτοσύνθεση και μέσω αυτής στην διατήρηση του επιπέδου του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1.1 Δομή καθαρού νερού (Τσώνης, 2003)

Η δομή του μορίου του νερού φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 1.1 Συμμετέχουν τέσσερα μοριακά τροχιακά τα οποία περιέχουν τέσσερα ζεύγη ηλεκτρονίων (έξι ηλεκτρόνια από το οξυγόνο και ένα από κάθε ένα από τα δύο

άτομα υδρογόνου). Δύο τροχιακά σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς O-H και τα άλλα δυο τροχιακά παραμένουν ελεύθερα και αντιστοιχούν στα δύο μονήρη ηλεκτρονικά ζεύγη. Η ηλεκτρονική αυτή διαμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό των δύο κέντρων θετικών φορτίων από τα δύο κέντρα αρνητικών φορτίων που προκύπτουν (β). Το ηλεκτρικά ουδέτερο λοιπόν μόριο του νερού είναι στη λεπτομέρεια του ένα ηλεκτρικό δίπολο.

Η διαμοριακή σύνδεση με δεσμούς υδρογόνου που παρατηρείται κυρίως στη στερεή κατάσταση του νερού και σε μικρότερο βαθμό στην υγρή κατάσταση είναι αποτέλεσμα του διαχωρισμού των κέντρων των θετικών φορτίων (δ^+) από τα κέντρα των αρνητικών φορτίων (δ^-). Τα άτομα του οξυγόνου στο μόριο του νερού ασκούν ελκτικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις κατά τις διευθύνσεις των μονήρων ηλεκτρονικών ζευγών σε άτομα υδρογόνου άλλων μορίων νερού. Ο δεσμός που επιτυγχάνεται κατά τον τρόπο αυτό είναι ηλεκτροστατικού τύπου και γνωστός ως δεσμός υδρογόνου.

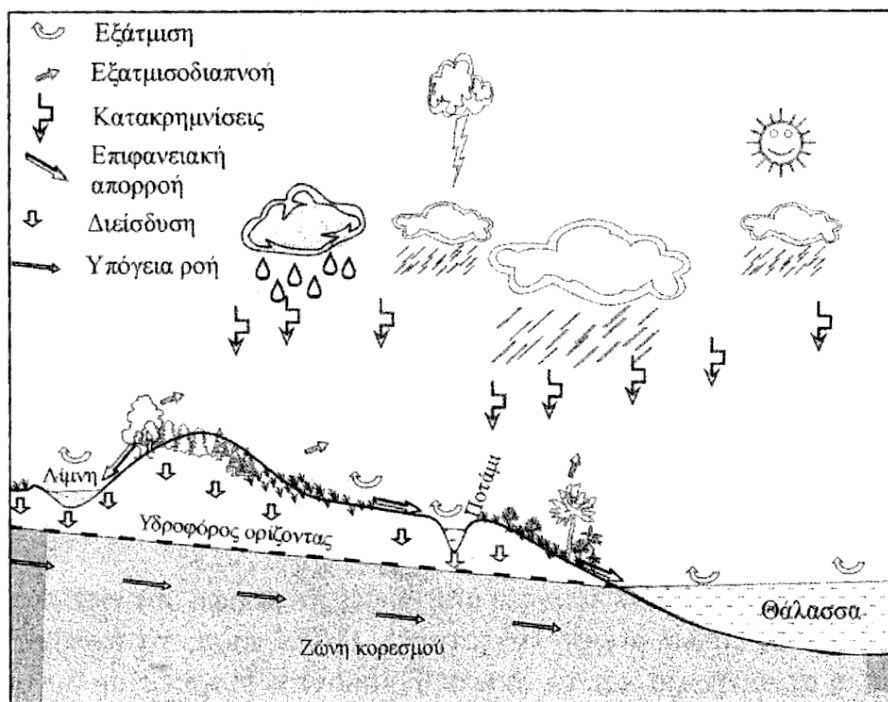
Αποτέλεσμα του δεσμού υδρογόνου είναι η διευθέτηση των μορίων στη στερεή κατάσταση του πάγου κατά τέτοιο τόπο ώστε κάθε άτομο οξυγόνου να αντιστοιχεί στην κορυφή ενός τετραέδρου και να περιβάλλεται από τέσσερα άλλα άτομα οξυγόνου που ανήκουν σε γειτονικά μόρια.

Στην τετραεδρική αυτή κρυσταλλική διευθέτηση οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων νερού είναι μεγαλύτερες από τις διαστάσεις του μορίου του νερού και έτσι είναι δυνατή η συνύπαρξη τετραεδρικών κρυσταλλικών συμπλεγμάτων μορίων νερού καθώς και ελεύθερων μορίων νερού. Στο υγρό νερό θεωρείται ότι εξακολουθεί να διατηρείται κατά ένα μέρος η ταξινομημένα μοριακή διευθέτηση που αντιστοιχεί στον πάγο. Η δομή του υγρού νερού αντιστοιχεί σε συμπλέγματα διευθετημένων μορίων με δεσμούς υδρογόνου τα οποία βρίσκονται μαζί με μη διευθετημένα και ελεύθερα κινούμενα απλά μόρια νερού.

Υδρολογικός κύκλος

Το νερό στην ατμόσφαιρα εμφανίζεται σε τρεις μορφές : την στερεή (πάγος) , την υγρή (νερό) και την αέρια (υδρατμοί). Οι βασικοί μηχανισμοί του

υδρολογικού κύκλου είναι οι εξής : εξάτμιση, εξατμισοδιαπνοή, συμπύκνωση υδρατμών, επιφανειακή απορροή, διείσδυση στο έδαφος και υπόγεια ροή νερού (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1 Ο υδρολογικός κύκλος (Τσώνης, 2003)

Καθώς το νερό πέφτει σε μορφή βροχής έρχεται σε επαφή με διάφορους σωματοδιακούς και αέριους ρύπους που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Όταν το νερό πέφτει στο έδαφος συμπαρασύρει αιωρούμενο υλικό, μικροοργανισμούς και μια μεγάλη ποικιλία οργανικών και ανόργανων ουσιών.

1.3 Φυσικά νερά

Τα φυσικά νερά περιέχουν ανόργανα συστατικά, οργανικά συστατικά και αιωρούμενο υλικό. (Χρυσικόπουλος, 2005). Τα κυριότερα ανόργανα συστατικά είναι το ασβέστιο (Ca^{2+}), το μαγνήσιο (Mg^{2+}), το νάτριο (Na^+), το

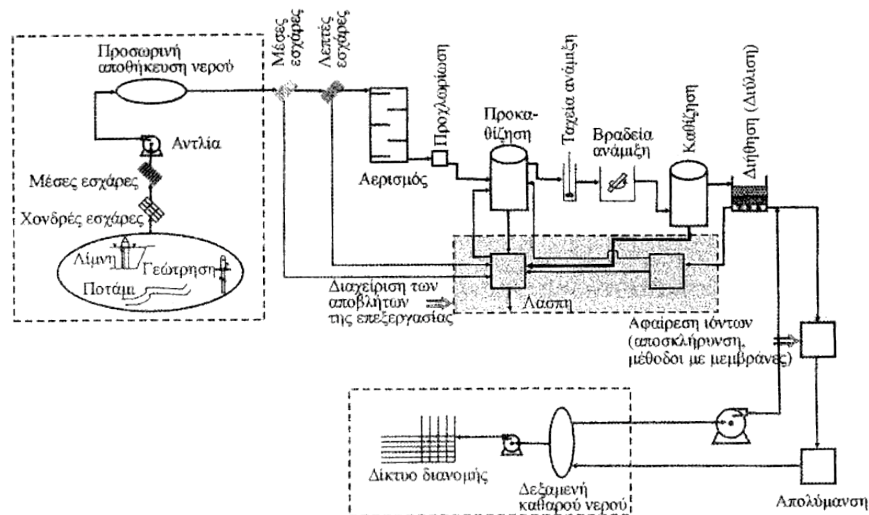
κάλιο (K^+), τα χλωριόντα (Cl^-), τα νιτρικά (NO_3^-), και τα φωσφορικά (PO_4^{3-}). Τα οργανικά συστατικά προέρχονται από την αποσύνθεση φυτικού και ζωικού υλικού και από διάφορες απορροές ή στραγγίσματα. Τα οργανικά συστατικά ποικίλουν από φυσικά χουμικά υλικά μέχρι συνθετικές οργανικές ουσίες που χρησιμοποιούνται ως απορρυπαντικά, εντομοκτόνα, μυκητοκτόνα και διαλυτικά. Τέλος τα κυριότερα συνηθέστερα αιωρούμενα σωματίδια στα φυσικά νερά είναι διάφορα κolloειδή. (Τσώνης, 2003) Στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί θα παρουσιασθούν ορισμένες από τυπικές συγκεντρώσεις συστατικών σε διάφορους τύπους νερού.

Πίνακας 1.1 Τυπικές συγκεντρώσεις συστατικών σε διάφορους τύπους νερού (Τσώνης, 2003)

Συστατικά	Τύπος Νερού				
	Βρόχινο	Βρύσης	Επιφανειακό	Υπόγειο	Θάλασσα
Βιολογικά					
Κολοβακτηρίδια	0	1	2000	100	-
Ιοί	0	0	10	1	0
Χημικά					
Ολικό άζωτο (TN), mg/L σαν N	-	-	3	<10	0,5
Ολικός φώσφορος (TP), mg/L σαν P	-	-	0,05	0,01	0,01
Αλκαλικότητα, mg/L σαν $CaCO_3$	20	80	100	150	-
Ca^{2+} , mg/L	6	20	20	50	400
Na^+ , mg/L	5	20	20	5	10500
Fe^{2+} , mg/L	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1
HCO_3^- , mg/L	18	80	90	120	150
Cl^- , mg/L	5	25	25	25	20000
Φυσικά					
Ολικά διαλυτά στερεά, mg/L	25	200	150	250	35000
Θολότητα, NTU	0	<0,5	10	<0,5	5

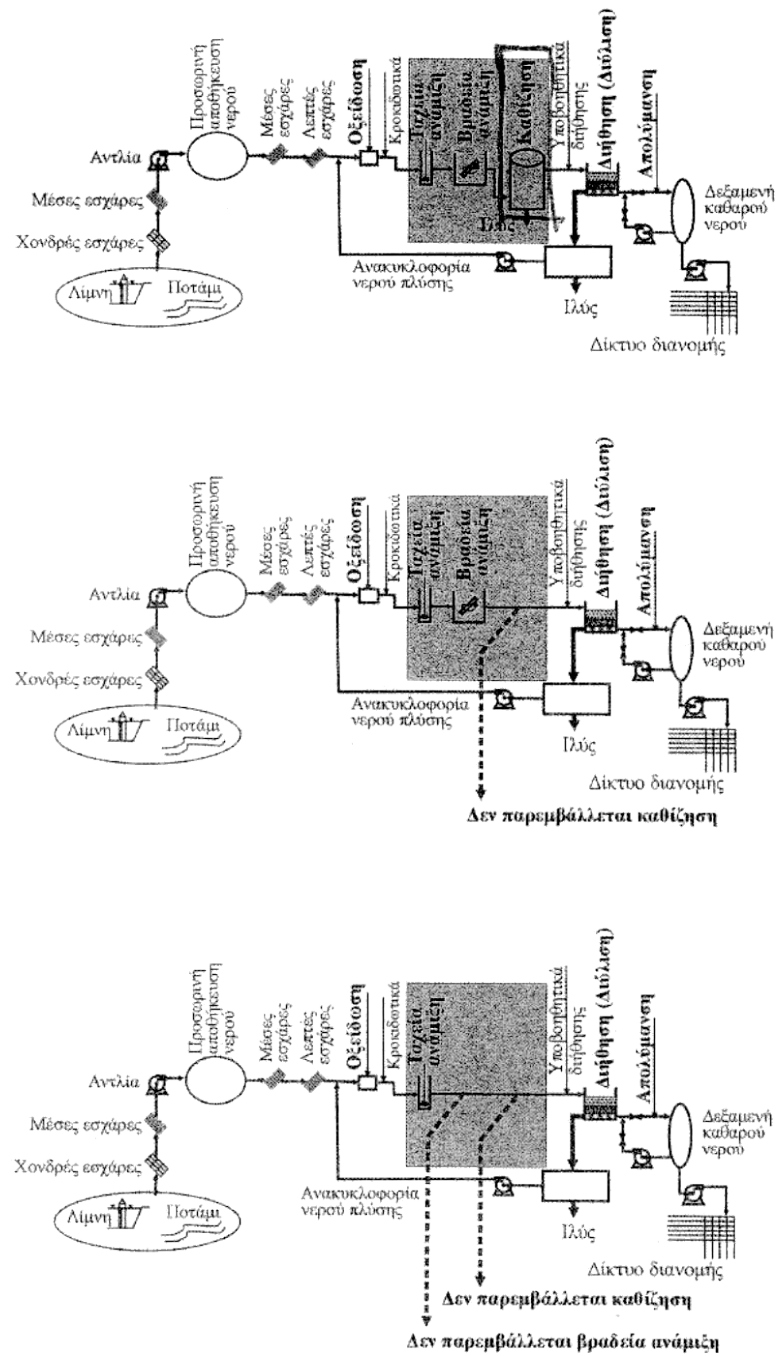
1.4 Επεξεργασία νερού

Η διαδικασία καθαρισμού νερού γίνεται μέσω των εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Στόχος είναι η παραγωγή νερού για την ποιότητα του πόσιμου νερού. Τα στάδια επεξεργασίας φαίνονται στην Εικόνα 1.2.

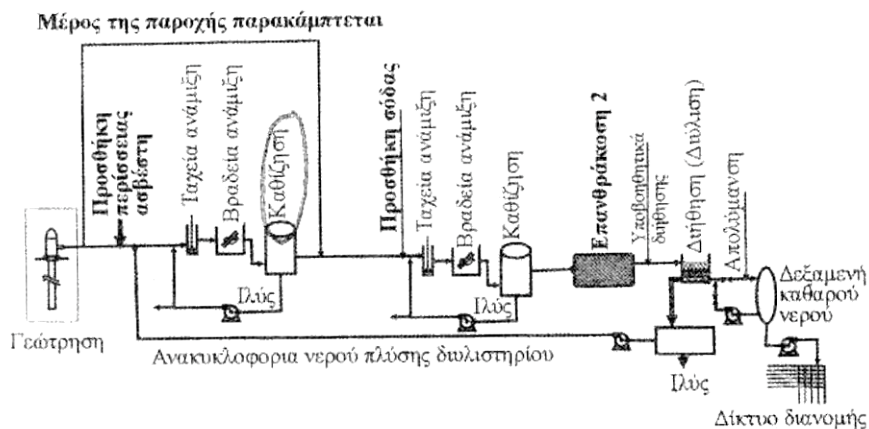
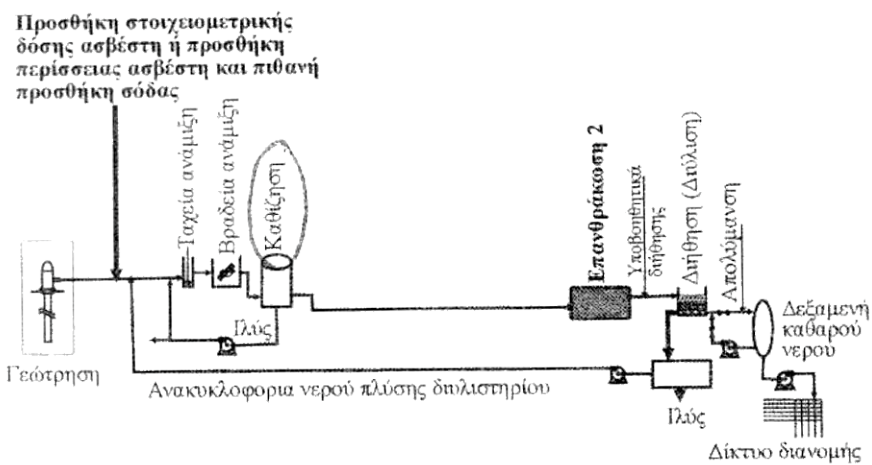
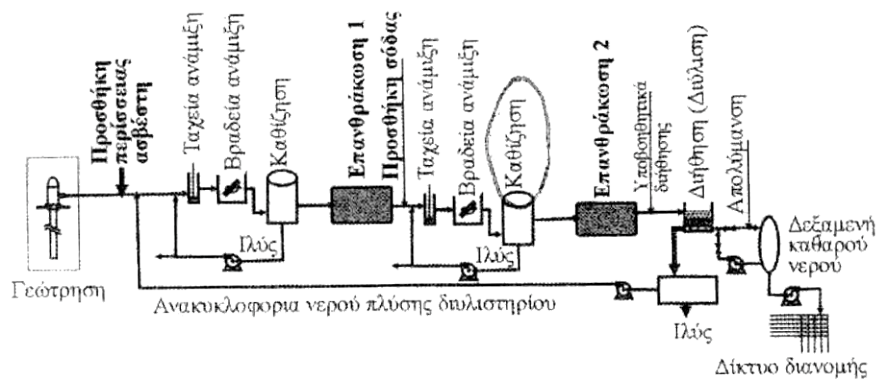


Εικόνα 1.2 Γενικό διάγραμμα ροής για την επεξεργασία νερού (Τσώνης, 2003)

Βέβαια αυτό το διάγραμμα είναι ένα γενικό διάγραμμα ροής. Στην πραγματικότητα τα διαγράμματα ροής επιφανειακών και υπόγειων νερών διαφέρουν. Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζονται τα διάφορα διαγράμματα ροής επιφανειακών νερών, ενώ στην Εικόνα 1.4 των υπόγειων νερών.



Εικόνα 1.3 Διαγράμματα ροής που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία επιφανειακού νερού (Τσώνης, 2003)



Εικόνα 1.4 Διαγράμματα ροής που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υπόγειου νερού (Τσώνης, 2003)

1.5 Καθίζηση

Ένα από τα βασικότερα στάδια τής επεξεργασίας τόσο του επιφανειακού όσο και του υπόγειου νερού είναι το στάδιο τής καθίζησης και τής θρόμβωσης. Η καθίζηση επιτυγχάνει διαχωρισμό αιωρούμενων στερεών με τη βαρύτητα και χρησιμοποιείται για την αφαίρεση αρχικής (μη θρομβώμενης) θολότητας και για την αφαίρεση αιωρούμενου υλικού που προκύπτει μετά από ιζηματοποίηση ή από κροκίδωση – θρόμβωση. Η θρόμβωση είναι η συσσωμάτωση των μικρών θρόμβων (που προκύπτουν μετά τη χημική αποσταθεροποίηση των κολλοειδών μικκυλίων) σε μεγαλύτερους θρόμβους.

2. ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ

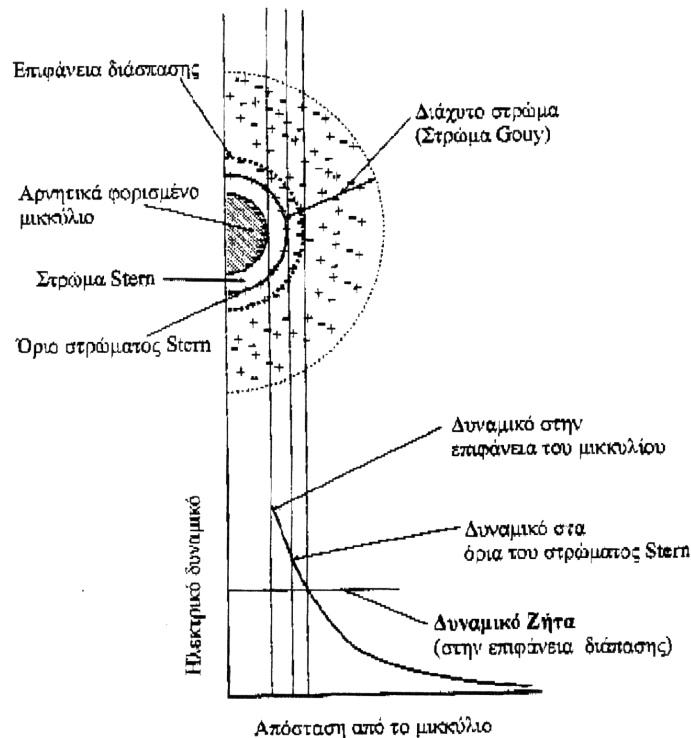
2.1 Κολλοειδή και χημική αποσταθεροποίηση τους

Τα κολλοειδή σωματίδια αποτελούνται από πολύ μικρές ενότητες που ονομάζονται μικκύλια. Τα κολλοειδή στο φυσικό νερό έχουν μέγεθος από 1nm μέχρι 10μm (Chrysicopoulos and Sim, 1996), είναι ηλεκτρικά φορτισμένα (συνήθως με αρνητικό φορτίο) και απωθούνται μεταξύ τους. Τα κολλοειδή κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα υδρόφοβα και τα υδρόφιλα (Σκουλικίδης, 1964).

Τα κολλοειδή σωματίδια στο φυσικό νερό είναι συνήθως σταθεροποιημένα και δεν παρουσιάζουν κάποια τάση για συσσωμάτωση αλλά αντίθετα καθώς είναι και ηλεκτρικά φορτισμένα (συνήθως με αρνητικό φορτίο) απωθούνται μεταξύ τους. Για να γίνει δυνατή η συσσωμάτωση θα πρέπει να αποσταθεροποιηθούν και να υποβοηθηθούν να πλησιάσουν μεταξύ τους ώστε οι απωστικές δυνάμεις να υπερνικηθούν από τις ελκτικές δυνάμεις τύπου van der Waals.

Η διεργασία που επιτυγχάνει την αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων και έχει ως αποτέλεσμα την αρχική συνένωσή τους σε μικρά συσσωματώματα (**κροκίδες**) λέγεται κροκίδωση (**coagulation**). Η κροκίδωση γίνεται με προσθήκη κροκιδωτικού (συνήθως άλατα του αργιλίου ή σιδήρου) και ταχεία ανάμιξη. Αυτό που επιτυγχάνεται είναι η ομοιόμορφη διασπορά του κροκιδωτικού, η αποσταθεροποίηση των μικκυλίων του κολλοειδούς, το πλησίασμα μικκυλίων και η δημιουργία μικρών συσσωματωμάτων μικκυλίων. Τα μικρά όμως συσσωματώματα, (κροκίδες) που προκύπτουν κατά την κροκίδωση δεν έχουν ακόμη ικανοποιητικές διαστάσεις για αφαίρεσή τους με καθίζηση. Για να αποκτήσουν μεγαλύτερες διαστάσεις υποβάλλονται σε μια διεργασία αργής ανάδευσης ώστε να τους δίνεται ευκαιρία να έρχονται σε επαφή και να κολλάει κατά κάποιον τρόπο το ένα πάνω στο άλλο. Εάν το επίπεδο ανάδευσης είναι πάνω από κάποια τιμή τότε αρχίζει να εκδηλώνεται τάση για διάσπαση των συσσωματωμάτων. Η διεργασία της βραδείας ανάδευσης που ακολουθεί τη διεργασία της κροκίδωσης και έχει ως

αποτέλεσμα τη δημιουργία **θρόμβων** (συσσωματωμάτων ικανοποιητικών διαστάσεων για παραπέρα καθίζηση) ονομάζεται θρόμβωση (**flocculation**).



Εικόνα 2.1 Διαγραμματική παράσταση κolloειδούς σωματιδίου (Τσώνης, 2003)

2.2 Φόρτιση κolloειδούς

Οι δυνάμεις ηλεκτροστατικού τύπου είναι εκείνες που επενεργούν και διασφαλίζουν τη σταθερότητα των κolloειδών αιωρημάτων. Τα πιο πολλά μικκύλια κolloειδών είναι ηλεκτρικά φορισμένα. 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 φορισμένα ενώ εκείνα που αντιστοιχούν σε μη μεταλλικά οξείδια και σε σουλφίδια είναι συνήθως αρνητικά φορισμένα. 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 αντίθετου φορτίου εξακολουθούν να παραμένουν στο κolloειδές σύστημα μικκύλια που είναι φορισμένα 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 αντιιόντα (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**.

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 αντιιόντων (στρώμα Stern).

2.3 Λυόφοβα και λυόφιλα κολλοειδή

Τα κολλοειδή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες βάση της ευκολίας με την οποία εγκαταλείπουν την κολλοειδή κατάσταση. Αυτά που την εγκαταλείπουν δύσκολα ονομάζονται λυόφιλα, ενώ αυτά που την εγκαταλείπουν εύκολα λυόφοβα (Σκουλικίδης, 1964). Γενικότερα:

Λυόφιλα ονομάζονται τα κολλοειδή των οποίων τα μικκύλια συγκροτούν τα μόρια αυτών έναντι του μέσου διασποράς, για το λόγω αυτό τα λυόφιλα κολλοειδή είναι πολύ σταθερά και δεν κατακρημνίζονται εύκολα, ενώ

Λυόφοβα ονομάζονται τα κολλοειδή των οποίων τα μικκύλια δεν συγκροτούν τα μόρια αυτών έναντι του μέσου διασποράς. για το λόγω αυτόν τα λυόφοβα κολλοειδή δεν είναι τόσο σταθερά και κατακρημνίζονται εύκολα (Σκουλικίδης, 1964).

2.4 Κυρία χαρακτηριστικά λυόφοβων και λυόφιλων κολλοειδών

Στον Πίνακα 2.1 θα παρουσιάσουμε ορισμένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των λυόφοβων και λυόφιλων, τα οποία ουσιαστικά μας βοηθούν να διακρίνουμε τα λυόφοβα από τα λυόφιλα κολλοειδή.

Πίνακας 2.1 Κυρία χαρακτηριστικά λυόφοβων και λυόφιλων κολλοειδών

	Λυόφοβα κολλοειδή	Λυόφιλα κολλοειδή
Παραδείγματα	Κολλοειδή αιωρήματα μετάλλων ένυδρων οξειδίων και αλάτων	Κολλοειδή συστήματα πρωτεϊνών και υψιπολυμερών
Πρόσληψη μορίων μέσου διασποράς	Όχι	Ναι
Θρόμβωση	Εύκολη και μη αντιστρεπτή	Δύσκολη και αντιστρεπτή
Προσθήκη ηλεκτρολύτη για θρόμβωση	Απαιτούνται μικρά ποσά	Απαιτούνται μεγάλα ποσά
Ηλεκτρικό φορτίο	Καθορισμένο σημείο	Εξαρτώμενο από της συνθήκες και το pH
Ιξώδες	Όχι πολύ μεγαλύτερο από του μέσου διασποράς και μεταβάλλεται κανονικά με τη συγκέντρωση	Πολύ μεγαλύτερο του μέσου διασποράς και αυξάνεται ταχέως με την αύξηση της συγκέντρωσης

3. ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ ΚΑΙ ΘΡΟΜΒΩΣΗ

3.1 Εισαγωγή στις έννοιες κροκίδωση και θρόμβωση

Όπως προαναφέραμε τα κολλοειδή που αιωρούνται στο νερό είναι φορτισμένα με αρνητικό φορτίο και απωθούνται μεταξύ τους. Για να μπορέσουν λοιπόν αυτά να πλησιάσουν μεταξύ τους και να υπερνικηθούν οι απωστικές δυνάμεις από τις ελκτικές δυνάμεις van der Waals θα πρέπει να αποσταθεροποιηθούν. Η διεργασία που επιτυγχάνει την αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων και την συνένωση τους σε μικρά συσσωματώματα (κροκίδες) ονομάζεται **κροκίδωση** (coagulation). Η κροκίδωση γίνεται με προσθήκη κροκιδωτικού (π.χ. άλατα τρισθενούς σιδήρου, άλατα τρισθενούς αργιλίου ή πολυμερή) και ταχεία ανάδευση, η οποία επιτυγχάνει την ομοιόμορφη μίξη των κροκιδωτικών.

Τα μικρά συσσωματώματα ή κροκίδες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της κροκίδωσης δεν είναι αρκετά μεγάλα για να αφαιρεθούν από το νερό με τη διαδικασία της καθίζησης. Για παράδειγμα ο χρόνος καθίζησης στερεών με διάμετρο μικρότερη των 0.01 mm είναι αρκετά μεγάλος και για ορισμένα κολλοειδή μπορεί να φτάσει και τα 20 χρόνια για καθίζηση μόνο ενός μέτρου. Η διεργασία που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συσσωματωμάτων με διαστάσεις που διευκολύνουν την αφαίρεση τους με καθίζηση ονομάζεται **θρόμβωση**. Η θρόμβωση είναι μια διαδικασία βραδείας ανάδευσης όπου οι κροκίδες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της κροκίδωσης έρχονται σε επαφή και φτιάχνουν μεγαλύτερα συσσωματώματα, τους θρόμβους. Η δημιουργία των θρόμβων βελτιώνεται σημαντικά με την προσθήκη συνθετικών οργανικών πολυμερών τα οποία επιταχύνουν την αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων μέσω της διασωματικής γεφύρωσης (Χρυσικόπουλος, 2005).

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται ορισμένοι χαρακτηριστικοί χρόνοι καθίζησης στερεών.

Πίνακας 3.1 Χρόνος καθίζησης στερεών στο νερό (Χρυσικόπουλος, 2005)

Χρόνος καθίζησης στερεών στο νερό

Διάμετρος στερεού (mm)	Είδος στερεού	Χρόνος καθίζησης ενός μέτρου
10	Χαλίκι	1 sec
1	Άμμος	10 sec
0.1	Λεπτή άμμος	2 min
0.01	Άργιλος	2 h
0.001	Βακτήρια	8 d
0.0001	Κολλοειδή	2 yr
0.00001	Κολλοειδή	20 yr

3.2 Αναφορά στην αυθόρμητη κροκίδωση

Όπως προαναφέραμε το φαινόμενο (ή η διαδικασία) κατά το οποίο τα κολλοειδή σωματίδια εξαναγκάζονται να συσσωματωθούν εγκαταλείποντας έτσι την κατάσταση διασποράς με συνέπεια την κατακρήμνιση αυτών υπό τη μορφή ιζήματος ονομάζεται κροκίδωση. Η κροκίδωση όπως είναι ευνόητο οδηγεί στην καταστροφή του κολλοειδούς, ή αλλιώς στο “θάνατο του κολλοειδούς”. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται το φαινόμενο της κροκίδωσης, εδώ όμως θα αναφερθούμε σε ένα ιδιαίτερο είδος, στην αυθόρμητη κροκίδωση.

Η αυθόρμητη κροκίδωση γίνεται βραδύτατα με τη πάροδο του χρόνου και είναι αρκετά αισθητή. Αυτό το είδος κροκίδωσης έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς όπως έχουμε ήδη πει 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

τριών σωματιδίων αποτελεί την απάντηση. Κατά την τριπλή αυτή σύγκρουση δύο εκ των τριών κολλοειδών σωματιδίων χάνουν κινητική ενέργεια, η οποία κερδίζεται από το τρίτο σωματίδιο έτσι τα δύο αυτά σωματίδια χάνουν ταχύτητα και κατακρημνίζονται συσσωματωμένα (Σκουλικίδης, 1964).

3.3 Μέθοδοι κροκίδωσης κολλοειδών

Οι βασικότερες μέθοδοι κροκίδωσης είναι οι εξής:

- Με χρήση θερμοκρασίας. Εφαρμόζεται κυρίως στα λυόφοβα κολλοειδή και ορισμένες πρωτεΐνες.
- Με προσθήκη ηλεκτρολυτών. Εφαρμόζεται και στα λυόφοβα και στα λυόφιλα κολλοειδή.
- Με προσθήκη ετέρου κολλοειδούς αντίθετου φορτίου. Εφαρμόζεται κυρίως στα λυόφοβα κολλοειδή.
- Μέσω ηλεκτροφόρησης. Εφαρμόζεται κυρίως στα λυόφοβα κολλοειδή.
- Με επίτευξη του ισοηλεκτρικού σημείου. Εφαρμόζεται κυρίως στις πρωτεΐνες και σε αμφολύτες.
- Με χρήση κροκιδωτικού. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κροκίδωσης. Εφαρμόζεται σε όλα τα είδη κολλοειδών.
- Μέσω υπερφυγοκέντρωσης. Εφαρμόζεται και στα λυόφοβα και στα λυόφιλα κολλοειδή

3.3.1 Κροκίδωση με χρήση της θερμοκρασίας

Η κροκίδωση με χρήση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, είτε με αύξηση αυτής είτε με μείωση. Ο συνηθέστερος τρόπος πάντως είναι αυτός με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα κολλοειδές σύστημα η ταχύτητα θρόμβωσης αυξάνεται σημαντικά εξαιτίας της αύξησης της θερμικής κίνησης των κολλοειδών σωματιδίων και συνεπώς της πιθανότητας τριπλών συγκρούσεων. Επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην ελάττωση του ποσοστού των εκλεκτικώς προσροφηθέντων ιόντων από τα κολλοειδή και

επομένως στην ελάττωση των αποσπαικών δυνάμεων. Όπως γίνεται αντιληπτό τώρα πια η κατακρήμνιση έχει γίνει αρκετά πιο εύκολη. Τέλος αναφέρουμε οτι ορισμένες πρωτεΐνες κροκιδώνονται σε καθορισμένη θερμοκρασία, η οποία είναι χαρακτηριστική της πρωτεΐνης.

Τέλος στην περίπτωση κατά την οποία τα κολλοειδή σωματίδια βρίσκονται ήδη σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας με μόρια της συσσωματούμενης στο σύστημα ουσίας είναι δυνατόν η ελάττωση της θερμοκρασίας να οδηγήσει στην αύξηση της ταχύτητας θρόμβωσης (όπως συμβαίνει στην περίπτωση των κολλοειδών συστημάτων του θείου) (Σκουλικίδης, 1964).

3.3.2 Κροκίδωση με προσθήκη ηλεκτρολύτη

Ένας άλλος τρόπος κροκίδωσης κολλοειδών που συνιστάται για την εξουδετέρωση των ηλεκτρικών φορτίων των μικκυλίων είναι η προσθήκη ηλεκτρολύτη. Μέσω της προσροφήσεως των ιόντων του ηλεκτρολύτου από τα κολλοειδή επιτυγχάνεται η εξουδετέρωση των ήδη υπαρχόντων φορτίων αυτών, με αποτέλεσμα την κατακρήμνιση των κολλοειδών.

Η ικανότητα των ηλεκτρολυτών προς θρόμβωση των κολλοειδών είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το σθένος του προσροφούμενου ιόντος κατά την προσθήκη του ηλεκτρολύτη. Η πρόταση αυτή είναι γνωστή ως νόμος των Schulze-Hardy. Οι τιμές της ικανότητας θρόμβωσης των ηλεκτρολυτών έχουν μεγάλη σημασία στη χημεία των κολλοειδών καθώς και στη βιολογική χημεία (Σκουλικίδης, 1964).

Σπουδαίο ρόλο στη θρόμβωση των κολλοειδών παίζει το σθένος και η φύση του ιόντος. Για παράδειγμα η θρομβωτική ικανότητα των κατιόντων υδρογόνου είναι πολύ μεγαλύτερη από των κατιόντων νατρίου, οπότε απαιτούνται πολύ λιγότερα ποσά υδροχλωρικού οξέος από ότι χλωριούχου νατρίου για την κροκίδωση του υδροξειδίου του σιδήρου. Επίσης είναι πολύ σημαντικό κατά τη μελέτη της θρομβωτικής ικανότητας ιόντος προς κολλοειδή αντίθετου φορτίου να λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση του ομώνυμα φορτισμένου προς το κολλοειδές ιόντος, το οποίο δρα προστατευτικά. (Σκουλικίδης, Θ., Φυσικοχημεία I₂)

Γενικά όσον αφορά την κροκίδωση μέσω ηλεκτρολύτη, εκτός του νόμου των Schulze-Hardy, ισχύουν και οι εξής δύο βασικοί κανόνες:

Κανόνας πρώτος: Η θρομβωτική ικανότητα ενός ηλεκτρολύτη είναι διαφορετική αν η απαιτούμενη προς θρόμβωση ποσότητα προστεθεί ολόκληρη σε μια μόνο δόση ή σε πολλές. Όταν ο ηλεκτρολύτης προστίθεται με τη μια απαιτούνται μικρότερα ποσά αυτού ενώ όταν προστίθεται με δόσεις απαιτούνται μεγαλύτερα λόγω εθισμού του κολλοειδούς.

Κανόνας δεύτερος: Όταν κατά τη θρόμβωση υδρόφιλου κολλοειδούς προστεθούν μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρολύτη από εκείνα που απαιτούνται για την κροκίδωση αυτού, δε γίνεται κροκίδωση του κολλοειδούς, απλά αλλάζει σημείο φόρτισης.

Κατά κανόνα τα υδρόφιλα κολλοειδή απαιτούν μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρολύτη από τα λυόφοβα για να επιτευχθεί θρόμβωση. Εξαιτίας των μεγάλων απαιτούμενων ποσοτήτων ηλεκτρολύτη για την περίπτωση των λυόφιλων κολλοειδών η θρόμβωση αυτών καλείται εξαλάτωση (Σκουλικίδης, 1964).

3.3.3 Κροκίδωση με επίτευξη ισοηλεκτρικού σημείου

Στην περίπτωση των πρωτεϊνών και ορισμένων άλλων αμφολυτικών ουσιών προκαλείται εύκολα θρόμβωση μέσω της αλλαγής του pH και επίτευξης του ισοηλεκτρικού σημείου. Στο ισοηλεκτρικό σημείο έχουμε την ευνοϊκότερη κατακρήμνιση και το ελάχιστο της σταθερότητας. Σε ορισμένες πρωτεΐνες η κατακρήμνιση στο ισοηλεκτρικό σημείο επιτυγχάνεται μέσω της διαβιβάσεως αδρανούς αερίου (Σκουλικίδης, 1964).

3.3.4 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 (κροκιδωτικά) ώστε να μειωθούν 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 πάντως εκτός από τα παραπάνω άλατα χρησιμοποιούνται και διάφορα πολυμερή ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη αφαίρεση κολλοειδούς υλικού.

Όταν προστίθενται μεταλλικά άλατα σε νερό που έχει ικανοποιητική αλκαλικότητα σχηματίζονται μεταλλικά υδροξείδια του τύπου $M_p(OH)_q$ όπου Μ παριστάνει το μεταλλικό κατιόν. Τα υδροξείδια σχηματίζονται (τιμές p και q) εξαρτώνται από τα συστατικά που περιέχουν το νερό αλλά και από το ΡΗ και τη δόση του ιζηματοποιητικού που χρησιμοποιείται.

Τα κροκιδωτικά είναι δυνατόν να σταθεροποιούν τα κολλοειδή με διάφορους τρόπους όπως: (1) συμπίεση του διπλού στρώματος, (2) επιρρόφηση αντιιόντων και εξουδετέρωση του ηλεκτρικού φορτίου, (3) διασωματιδιακή γεφύρωση και (4) εγκλωβισμό στο ίζημα.

3.3.4.1 Συμπίεση του διπλού στρώματος

Η συμπίεση του διπλού στρώματος επιτυγχάνεται με προσθήκη κροκιδωτικού που δίνει αντιιόντα σχετικά με το φορτίο των κολλοειδών σωματιδίων. Καθώς η συγκέντρωση των αντιιόντων αυξάνεται (προσθήκη μεγαλύτερων δόσεων κροκιδωτικού) προκαλείται εξουδετέρωση φορτίων εντός του διάχυτου στρώματος με αποτέλεσμα τη μείωση του πάχους του στρώματος αυτού (συμπίεση του διάχυτου στρώματος). Αυτή η συμπίεση μειώνει και το συνολικό πάχος του διπλού στρώματος με αποτέλεσμα να είναι δυνατόν να πλησιάζουν πιο κοντά τα κολλοειδή σωματίδια απ' ό,τι κατά την αρχική κατάσταση που ήταν μεγαλύτερο το πάχος του διπλού ηλεκτρικού στρώματος.

Όμως όπως φαίνεται και στο σχήμα εάν πλησιάσουν πιο κοντά τα κολλοειδή σωματίδια είναι δυνατόν να υπερισχύσουν οι ελκτικές δυνάμεις van der Waals και να προκληθεί συνένωση των μικκυλίων.

3.3.4.2 Επιρρόφηση αντιόντων και εξουδετέρωση του ηλεκτρικού φορτίου

Τα αντιόντα από το κροκιδωτικό είναι δυνατόν να επιρροφηθούν στη φορτισμένη επιφάνεια του κολλοειδούς μικκυλίου και έτσι να προκληθεί εξουδετέρωση του ηλεκτρικού φορτίου της επιφάνειας. Στην περίπτωση αυτή καθώς πλησιάζουν μεταξύ τους τα κολλοειδή σωματίδια δεν απωθούνται από δυνάμεις ηλεκτροστατικού τύπου και έτσι είναι ευκολότερη η προσέγγισή τους μέχρι εκείνου του σημείου που θα προκληθεί συνένωση από την επιρροή των δυνάμεων τύπου van der Waals.

3.3.4.3 Διασωματιδιακή γεφύρωση

Συνθετικά οργανικά πολυμερή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα αποσταθεροποίησης των κολλοειδών σωματιδίων. Τα πολυμερή αυτά είναι φορτισμένα μακρομόρια και ο μηχανισμός με τον οποίο αποσταθεροποιούν τα κολλοειδή σωματίδια έχει ως εξής: Μια φορτισμένη περιοχή του μακρομορίου προσκολλάται πάνω σε ένα κολλοειδές σωματίδιο και το υπόλοιπο του μακρομορίου εκτείνεται εκτός του σωματιδίου προς την περιοχή της υγρής φάσης. Εάν το μέρος του μακρομορίου που εκτείνεται μέσα στην υγρή φάση προσκολληθεί σε ένα άλλο κολλοειδές σωματίδιο τότε τα δυο κολλοειδή συνενώνονται και ο μηχανισμός με τον οποίο επιτυγχάνεται η συνένωση αυτή είναι μέσω γεφύρωσης με παρεμβολή του πολυμερούς.

3.3.4.4 Εγκλωβισμός στο ίζημα

Η ποσότητα των κροκιδωτικών που προστίθεται στο νερό δεν παρέχει μόνο αντιόντα για αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων αλλά έχει και σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό υδροξειδίων. Έτσι κατά τη χρησιμοποίηση θετικού αργιλίου σχηματίζεται και υδροξείδιο του αργιλίου το οποίο καθώς καθιζάνει εγκλωβίζει σωματίδια θολότητας. Επίσης τα σωματίδια θολότητας σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν πυρήνες έναρξης σχηματισμού

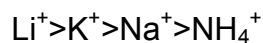
των κρυστάλλων των μεταλλικών υδροξειδίων και έτσι τα σωματίδια αυτά εγκλωβίζονται μέσα στο κρυσταλλικό ίζημα που σχηματίζεται και σαρώνονται από την υγρή φάση καθώς γίνεται καθίζηση του ιζήματος.

3.4 Σειρές του Hofmeister

Ο Hofmeister απέδειξε για την περίπτωση της αρνητικά φορτισμένης αλβουμίνης ότι η θρομβωτική δράσης του άλατος εξαρτάται πολύ από τη φύση του ανιόντος. Έφτιαξε λοιπόν δύο σειρές θρομβωτικής ικανότητας, η μια αφορά τα κατιόντα των αλκαλίων και η άλλη τα ανιόντα. Οι σειρές αυτές ισχύουν για τα περισσότερα λυόφιλα κολλοειδή και αποτελούν κατάταξη ελαττωμένου βαθμού εφυδατώσεως των ιόντων και είναι γνωστές ως σειρές του Hofmeister (Σκουλικίδης, 1964).

Σειρές του Hofmeister

- Τα κατιόντα των αλκαλίων ακολουθούν την εξής σειρά:



- Τα ανιόντα κατά σειρά θρομβωτικής δράσης κατατάσσονται:

Κιτρικά > τρυγικά > θειικά > οξικά > χλωριούχα > νιτρικά > χλωρικά

3.5 Μέθοδος τής αμοιβαίας κροκίδωσης

Μία άλλη μέθοδος κροκίδωσης κολλοειδών είναι αυτή της αμοιβαίας κροκίδωσης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικά φορτισμένων κολλοειδών. Αναμιγνύοντας δύο κολλοειδή που φέρουν αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο επιτυγχάνεται αμοιβαία κατακρήμνιση αυτών. Εκατέρωθεν της περιοχής της αμοιβαίας κροκίδωσης το μίγμα των κολλοειδών που προκύπτει συμπεριφέρεται, όσον αφορά την ηλεκτρική φύση του, ανάλογα ως προς την περίσσεια του ενός ή του άλλου κολλοειδούς.

Η μέθοδος αυτή αναφέρεται σε υδρόφοβα κολλοειδή, εν τούτοις είναι δυνατό να επιτευχθεί αμοιβαία κροκίδωση μεταξύ δύο κολλοειδών

συστημάτων ακόμα και όταν ένα από αυτά είναι υδρόφιλο. Για να προκαλέσουμε θρόμβωση ενός υδρόφοβου κολλοειδούς με ένα υδρόφιλο κολλοειδές πρέπει αυτά να έχουν αντίθετο φορτίο. Όταν προστίθεται υδρόφιλο κολλοειδές σε υδρόφοβο ομόσημου φορτίου τότε όχι μόνο δεν προκαλείται θρόμβωση αυτού αλλά αντιθέτως αυξάνεται η σταθερότητα αυτού. Συνεπώς τα θετικά υδρόφιλα κολλοειδή λειτουργούν ως προστατευτικά κολλοειδή για τα θετικά υδρόφοβα ενώ τα αρνητικά υδρόφιλα λειτουργούν προστατευτικά για τα αρνητικά υδρόφοβα (Σκουλικίδης, 1964).

Γενικότερα προστατευτικό κολλοειδές καλείται αυτό που είναι σε θέση να προστατέψει ορισμένα άλλα κολλοειδή από τη διαδικασία της θρόμβωσης. Ένα χαρακτηριστικό προστατευτικό κολλοειδές είναι η ζελατίνη. Η προστατευτική ικανότητα των λυόφιλων κολλοειδών επί των ομώνυμα φορτισμένων λυόφοβων έχει τεράστια σημασία στη βιομηχανία.

Πρέπει επίσης να πούμε ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί αμοιβαία κροκίδωση ανάμεσα σε δύο υδρόφιλα κολλοειδή αντιθέτου φορτίου (Σκουλικίδης, 1964). Τέλος πληροφοριακά αναφέρουμε ότι το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από όλα τα λυόφοβα κολλοειδή στην έρευνα και στην πράξη παρουσιάζει το υδρόφοβο κολλοειδές σύστημα του χρυσού. Μια έννοια λοιπόν ευρέως διαδεδομένη είναι ο αριθμός χρυσού. Αριθμός χρυσού καλείται ο αριθμός των χιλιοστογράμμων (mgr) ενός προστατευτικού κολλοειδούς, τα οποία πρέπει να προστεθούν σε 10ml κολλοειδούς χρυσού, ώστε να παρεμποδίσουν την αλλαγή του χρώματος από ερυθρό σε κυανό με τη προσθήκη 1ml διαλύματος NaCl 10%.

3.6 Ορισμένοι χρήσιμοι όροι

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν κάποιοι όροι, όπως αντιστρεπτή ή μη αντιστρεπτή θρόμβωση, γήρας κολλοειδούς, πέψη. Όροι οι οποίοι είναι αρκετά σημαντικοί και αρκετά συνήθης όταν αναφερόμαστε στις διαδικασίες της κροκίδωσης και της θρόμβωσης.

Είναι πιθανό ένα κολλοειδές σύστημα το οποίο έχει έλθει σε κατάσταση θρόμβωσης να επανέλθει στην αρχική κολλοειδή φάση. Γενικά μιλάμε για αντιστρεπτή θρόμβωση, όταν το κολλοειδές επανέρχεται στην αρχική

κολλοειδή διασπορά αν άρουμε τα αίτια που προκάλεσαν την κροκίδωση, ενώ για μη αντιστρεπτή θρόμβωση μιλάμε, όταν το θρόμβωμα δεν επανέρχεται στην αρχική κολλοειδή διασπορά ακόμη και με άρση των αιτιών που την προκάλεσαν. Κατά κανόνα τα λυόφοβα κολλοειδή υφίστανται μη αντιστρεπτή θρόμβωση ενώ το λυόφιλα αντιστρεπτή (Σκουλικίδης, 1964).

Ένας άλλος όρος πολύ σημαντικός είναι το γήρας ή παρακμή του κολλοειδούς. Όπως προαναφέραμε 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 (Σκουλικίδης, 1964).

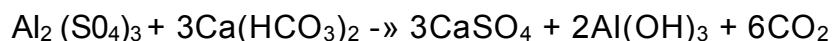
Αν η διαδικασία στην οποία αναφερθήκαμε πρόκειται για ένα λυόφιλο κολλοειδές, είναι δυνατόν με την προθήκη ενός κατάλληλου ηλεκτρολύτη και με μηχανική ανατάραξη να επαναφέρουμε αυτό στην αρχική του κατάσταση. Το φαινόμενο αυτό της αποθρόμβωσης του κολλοειδούς καλείται πέψη. Γενικά υπό τον όρο πέψη εννοούμε κάθε επαναφορά στην κολλοειδή κατάσταση οποιονδήποτε λυόφιλων ουσιών. Παρόλα αυτά είναι δυνατό ενίοτε να παρατηρηθεί πέψη και στα λυόφοβα κολλοειδή (Σκουλικίδης, 1964).

3.7 Κροκιδωτικά που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία

Οι κυριότερες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στην φυσικοχημική επεξεργασία αποβλήτων είναι το θειικό αργίλλιο, ο τριχλωριούχος σίδηρος, ο θειικός σίδηρος, ο θειικός υποσίδηρος και οι πολυηλεκτρολύτες. Συχνά επίσης χρησιμοποιούνται διάφορες ουσίες υποβοηθητικές της κροκίδωσης σε συνδυασμό με τα παραπάνω κροκιδωτικά. Τέτοιες ουσίες είναι ο ασβέστης, η ενεργός σίλικα κ.α. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες, οι δόσεις και ο τρόπος χρήσης των κροκιδωτικών ουσιών περιγράφονται σύντομα στην συνέχεια.

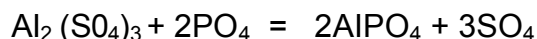
3.7.1 Θειικό αργίλιο (Aluminium sulfate)

Το Θειικό 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 υδροξειδίο του αργιλίου που σχηματίζεται συνιστά μια ογκώδη ζελατινοειδή μάζα που καθώς καθιζάνει συμπαρασύρει και απορροφά κολλοειδή 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 θειικού αργιλίου απαιτούνται 0.5 gr αλκαλικότητας $CaCO_3$.

Το θειικό αργίλιο αντιδρά επίσης με το φωσφόρο σχηματίζοντας αδιάλυτο ίζημα φωσφορικού αργιλίου για αυτό και συχνά χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του φωσφόρου από τα λύματα. Η σχετική αντίδραση είναι η ακόλουθη:



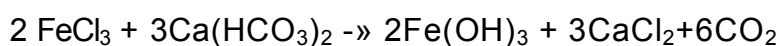
Το θειικό αργίλιο διατίθεται στο εμπόριο σε στερεά μορφή και σαν διάλυμα. Το στερεό θειικό αργίλιο συσκευάζεται συνήθως σε σάκους των 45 kg, και διατίθεται σε μορφή σκόνης ή κόκκων. Η μορφή σκόνης πρέπει κανονικά να αποφεύγεται γιατί δημιουργεί κινδύνους για την υγεία του προσωπικού. Έχει χρώμα υπόλευκο 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 θειικό αργίλιο διαλύεται συνήθως πριν τη χρήση του για αποτελεσματικότερο έλεγχο της δόσης εφαρμογής.

Το υγρό θειικό 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 θειικό αργίλιο είναι οικονομικότερο για εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν πάνω από 200 kg/ημ θειικού αργιλίου. Ανεξάρτητα του τύπου που θα επιλεγεί απαιτείται να υπάρχει εφεδρεία στην εγκατάσταση για τις ανάγκες τουλάχιστον 10 ημερών.

Το θειικό 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 Α. 1996).

3.7.2 Τριχλωριούχος σίδηρος (Ferric chloride)

Ο τριχλωριούχος σίδηρος είναι ένα από τα τρία άλατα σιδήρου που χρησιμοποιούνται στην κροκιδωση. Είναι διαθέσιμος στο εμπόριο σε τρεις μορφές, σε διάλυμα, άνυδρος (χρησιμοποιείται σπάνια) και σε ένυδρους κρυστάλλους με ακανόνιστο σχήμα. Η κρυσταλλική μορφή, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ έχει περιεκτικότητα 60% σε FeCl_3 και 25% σε Fe, χρώμα κιτρινωπό και ειδικό βάρος 950-1024 kg/m³. Ο τριχλωριούχος σίδηρος αντιδρά με την αλκαλικότητα και τον φωσφόρο με τρόπο ανάλογο με αυτόν που προαναφέρθηκε για το αργίλιο. Η βασική χημική αντίδραση με την αλκαλικότητα είναι:



Ο τριχλωριούχος σίδηρος τροφοδοτείται πάντα σε μορφή διαλύματος εξαιτίας της μεγάλης υγροσκοπικότητάς του. Ο όγκος της δεξαμενής διάλυσης πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να δέχεται την απαιτούμενη ποσότητα για τουλάχιστον 12 ώρες λειτουργίας. Οι απαιτούμενες δόσεις πρέπει να εκτιμηθούν και εδώ με πειραματικές δοκιμές. Τυπικές δόσεις είναι 5-30 gr/m³ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ανάλογα με τη θολότητα νερού. Βέλτιστη περιοχή pH 3.5-6.5 (Κουζέλη - Κατσίρη Α. 1996).

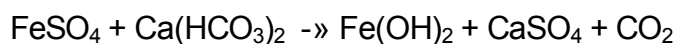
3.7.3 Θειικός σίδηρος (Ferrous sulfate)

Η χρήση του θειικού σιδήρου είναι λιγότερο διαδομένη από του τριχλωριούχου σιδήρου. Διατίθεται στο εμπόριο σε στερεά μορφή με χημικό τύπο $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ σε σάκους των 50 kg. Δεν είναι ιδιαίτερα υγροσκοπικός αλλά τα διαλύματα του είναι διαβρωτικά. Προστίθεται στο νερό με την μορφή διαλύματος με αναλογίες 1 :4 σε όρους μάζας. Οι χημικές του ιδιότητες και αντιδράσεις είναι

ανάλογες με αυτές των άλλων κροκιδωτικών. Τυπικές δόσεις 10-50 gr/m³ για το πόσιμο νερό. Βέλτιστη περιοχή pH 3.5-7.0 (Κουζέλη - Κατσίρη Α. 1996).

3.7.4 Θεϊκός υποσίδηρος (Ferrious sulfate)

Ο θεικός υποσίδηρος είναι λιγότερο αποτελεσματικός σαν κροκιδωτικό από τις άλλες ενώσεις του σιδήρου διότι ο σίδηρος βρίσκεται σε δισθενή μορφή. Ο χημικός τύπος του εμπορίου είναι FeSO₄·7H₂O και διατίθεται σε στερεά κοκκώδη μορφή με ιδιότητες ανάλογες με αυτές του θειικού σιδήρου. Η βασική χημική αντίδραση με την αλκαλικότητα είναι:



Ο θεικός υποσίδηρος προστίθεται και αυτός με μορφή διαλύματος. Η μέγιστη διαλυτότητα του στο νερό είναι 60 gr/L. Βέλτιστη περιοχή pH 8,5 και άνω (Κουζέλη - Κατσίρη Α. 1996).

3.7.5 Πολυηλεκτρολύτες

Οι πολυηλεκτρολύτες είναι χημικές ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους και μεγάλου μήκους μοριακής αλυσίδας, φέρουν δε μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών και πολικών ομάδων. Το φορτίο τους μπορεί να είναι θετικό, αρνητικό ή και ουδέτερο. Αν και οι πολυηλεκτρολύτες με θετικό φορτίο είναι πιο αποτελεσματικοί στην κροκιδωση αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων, αυτό δεν συμβαίνει πάντοτε. Διότι εκτός από την μείωση του φορτίου λειτουργούν παράλληλα και άλλοι μηχανισμοί κροκιδωσης όπως π.χ. ο σχηματισμός γεφυρώσεων.

Οι πολυηλεκτρολύτες συνήθως δεν είναι αποτελεσματικοί από μόνοι τους για απόβλητα με χαμηλή θολότητα για αυτό και χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με τα άλλα κροκιδωτικά που προαναφέρθηκαν.

Διατίθενται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία χημικών τύπων τόσο σε μορφή σκόνης όσο και σε υγρή μορφή. Το ειδικό βάρος των στερεών πολυηλεκτρολυτών κυμαίνεται από 130-980 kg/m³. Πρέπει απαραίτητα να διαλυθούν στο νερό πριν από την χρήση τους και η διάλυση είναι δύσκολη και απαιτεί ειδικό εξοπλισμό. Ο χρόνος διάλυσης κυμαίνεται από 15 min ως 1 ώρα. Η συνιστώμενη συγκέντρωση

του διαλύματος τροφοδοσίας κυμαίνεται από 0.1-4%. Οι απαιτούμενες δόσεις είναι και εδώ συνάρτηση της ποιότητας του νερού . Για το πόσιμο νερό δεν ξεπερνούν το 1 mg/L (Κουζέλη - Κατσίρη Α. 1996).

3.7.6 Ενεργοποιημένη πυριτία (activated silica)

Συχνά για τη βελτίωση της συσσωμάτωσης και τον σχηματισμό ενός βασικού ιστού κροκίδων, ειδικά σε νερά με πολύ χαμηλή θολότητα, χρησιμοποιούνται διάφορες χημικές ουσίες, η κυριότερη από τις οποίες είναι η ενεργός σίλικα. Παρασκευάζεται από την ανάμιξη πυριτικού νατρίου και θειικού οξέος σε τελική περιεκτικότητα 0.5- 1.0%. Η δόση προσδιορίζεται συνήθως σαν ποσοστό της δόσης του κυρίως κροκιδωτικού και κυμαίνεται από 7- 11% (Κουζέλη - Κατσίρη Α. 1996).

4. ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

4.1 Λόγοι που οδήγησαν στη χρήση ακουστικών κυμάτων

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει θέμα της διπλωματικής μελέτης που είναι η «Επίδραση των ακουστικών κυμάτων στη συσσωμάτωση και ιζηματοποίηση των κολλοειδών». Πριν αναφερθούμε στα ακουστικά κύματα λεπτομερώς θα αναφερθούμε στους λόγους για τους οποίους ουσιαστικά μελετάμε την κροκίδωση των κολλοειδών με τη χρήση των ακουστικών κυμάτων.

Έχοντας ήδη αναλύσει τους όρους κροκίδωση και θρόμβωση είδαμε ότι τα συνηθέστερα κροκιδωτικά είναι χημικές ουσίες, ουσίες οι οποίες να μεν είναι αποτελεσματικές για το σκοπό που χρησιμοποιούνται, παρόλα αυτά όμως ως χημικές μπορεί να είναι επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία. Επίσης λόγω της μακροχρόνιας χρήσης αυτών των κροκιδωτικών έχει επέλθει 'συνήθεια' των κολλοειδών απέναντι σε αυτά, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένη αποτελεσματικότητα των κροκιδωτικών. Τέλος καθώς η χρήση των χημικών κοστίζει, η επιστημονική κοινότητα ψάχνει για όσο το δυνατό πιο οικονομικές λύσεις. Έτσι οδηγηθήκαμε στη λύση των ακουστικών κυμάτων, τα οποία είναι φυσικά, άρα ακίνδυνα για τον ανθρώπινο οργανισμό, και με τη χρήση των οποίων αποφεύγεται το φαινόμενο της 'συνήθειας'.

4.2 Εισαγωγή στην κυματική

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφερθήκαμε στους λόγους για τους οποίους οδηγηθήκαμε στην χρήση των ακουστικών κυμάτων για την κροκίδωση των κολλοειδών, μας μένει λοιπόν να παρουσιάσουμε τι είναι και ποια είναι τα χαρακτηριστικά του κύματος και δη του ακουστικού.

Το κύμα αντιστοιχεί σε μια κίνηση διαταραχής του μέσου ή του σώματος δια του οποίου διαδίδεται. Δεν πρέπει όμως να συγχέουμε την κίνηση της διαταραχής (δηλαδή αυτού του ίδιου του κύματος ή, αν προτιμάτε, της κατάστασης του μέσου) με την κίνηση σωματιδίων. Τα μηχανικά κύματα

χρειάζονται ένα αίτιο, δηλαδή μια πηγή της διαταραχής, 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. Όλα τα κύματα μεταφέρουν ορμή και ενέργεια, οι οποίες βέβαια διαφέρουν από περίπτωση σε περίπτωση ενώ το ίδιο ισχύει και για το μηχανισμό διάδοσης (*Ohanian, 1991*).

Τρεις είναι οι χαρακτηριστικές φυσικές ποσότητες των κυμάτων, το μήκος κύματος, η συχνότητα και η ταχύτητα. Το μήκος κύματος είναι η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δύο τυχαία σημεία του κύματος που όταν διαταράσσονται συμπεριφέρονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο. Ως συχνότητα των περιοδικών κυμάτων ορίζουμε τον ρυθμό με τον οποίο η κυματική διαταραχή επαναλαμβάνεται. Εδώ είναι σημαντικό να πούμε ότι τα περισσότερα κύματα στη φύση είναι περιοδικά. Τέλος αναφέρουμε ότι τα κύματα οδεύουν ή διαδίδονται με συγκεκριμένη ταχύτητα, η οποία εξαρτάται μόνον από τις ιδιότητες του διαταρασμένου μέσου και όχι από την ένταση της διαταραχής (*Ohanian, 1991*).

Γενικά τα κύματα κατηγοριοποιούνται σε τρεις μεγάλες ομάδες, ανάλογα με τον τρόπο που κινούνται τα διαταρασόμενα σωμάτια του μέσου διάδοσης, τα εγκάρσια, τα διαμήκη και επιφανειακά ή καμπτικά κύματα. Σε ένα εγκάρσιο κύμα τα διαταρασόμενα σωμάτια του μέσου διάδοσης κινούνται κάθετα στη φασική ταχύτητα, δηλαδή κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, ενώ σε ένα διαμήκες κύμα τα διαταρασόμενα σωμάτια του μέσου διάδοσης κινούνται παράλληλα στη φασική ταχύτητα, δηλαδή παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Επιφανειακά είναι τα κύματα 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. Στα κύματα αυτά όσο αυξάνεται η απόσταση από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του στερεού το πλάτος του κύματος μειώνεται εκθετικά. Στο αέρα ο ήχος διαδίδεται με διαμήκη κύματα, στο νερό με διαμήκη και επιφανειακά ενώ στα στερεά με όλους τους τύπους κυμάτων (*Ohanian, 1964*).

Τέλος όσον αφορά τα κύματα θα παραθέσουμε μία αρχή, η οποία έχει ιδιαίτερη σημασία για τον τρόπο που διαδίδονται δύο ή περισσότερα κύματα στο χώρο. Η αρχή της επαλληλίας ορίζει ότι όταν δύο ή περισσότερα κύματα

διαδίδονται στο ίδιο μέσο, η ολική κυματική συνάρτηση είναι το αλγεβρικό άθροισμα των κυματικών συναρτήσεων των επιμέρους κυμάτων. Τα κύματα που ακολουθούν την αρχή αυτή ονομάζονται γραμμικά. Όταν δυο κύματα συναντηθούν στον χώρο, τότε συμβάλλουν και δίνουν το συνιστάμενο κύμα. Η συμβολή αυτή μπορεί να είναι ενισχυτική ή καταστρεπτική (*Ohanian, 1991*).

4.3 Ηχητικά κύματα

Αφού λοιπόν παρουσιάσαμε τα κύρια χαρακτηριστικά των κυμάτων γενικά θα ασχοληθούμε ειδικότερα με τα ακουστικά κύματα. Τα ακουστικά κύματα είναι τα πιο γνωστά διαμήκη κύματα. Διαδίδονται σε οποιοδήποτε μέσο (υγρό, αέριο ή στερεό), με μέτρο ταχύτητας το οποίο εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Καθώς τα ακουστικά κύματα διαδίδονται σε ένα μέσο, τα σωμάτια του ταλαντώνονται και παράγουν μεταβολές πυκνότητας και πίεσης κατά την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η ηχητική 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 (*Ohanian, 1991*).

Τα ακουστικά κύματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη συχνότητά τους: στα ηχητικά κύματα, τα οποία είναι 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. Γενικά πάντως χρησιμοποιώντας τον όρο ηχητικά κύματα αναφερόμαστε στα ακουστικά κύματα, παρόλο που κανονικά τα ηχητικά αποτελούν κατηγορία των ακουστικών (*Ohanian, 1991*).

Τα ηχητικά κύματα είναι κύματα που διαδίδονται με μεταβολές πίεσης κάποιου συμπιεστού μέσου. 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 $B = \Delta P / (\Delta V / \Delta P)$ και πυκνότητα μάζας (όταν δεν διαταράσσεται) ρ , τότε

το μέτρο της ταχύτητας διάδοσης των ηχητικών κυμάτων στο μέσο είναι : $U=(B/\rho)^{1/2}$. 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 (*Ohanian,, 1991*).

Εάν η πηγή που παράγει ένα διαμήκη κύμα ταλαντώνεται με απλή αρμονική κίνηση, τότε και η διαταραχή την οποία δημιουργεί είναι αρμονική. Αποτέλεσμα αυτής της ταλάντωσης είναι το αρμονικό ηχητικό κύμα, δύο βασικά χαρακτηριστικά του οποίου θα παρουσιάσουμε παρακάτω, την ισχύ και την ένταση. Ισχύς ορίζεται ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας στο χρόνο: $Ισχύς = \Delta E / \Delta t$, ενώ ως ένταση ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο η ηχητική ενέργεια μεταφέρεται δια μέσου της μοναδιαίας επιφάνειας, A , κάθετης προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Ένταση ενός κύματος, $I =$ η ισχύς που μεταφέρει το κύμα / ανά μονάδα επιφάνειας : $I = (1/2) * \rho * (\omega s_m)^2 u$

Εάν η επιφάνεια ενός σφαιρικού σώματος ταλαντώνεται περιοδικά, τότε παράγεται ηχητικό κύμα με σφαιρικά κυματικά μέτωπα. Εάν το μέσο είναι ομογενές, τότε το κύμα διαδίδεται με σταθερή ταχύτητα στο τρισδιάστατο χώρο που καλύπτεται από το μέσο, απομακρυνόμενο από τη πηγή. Η ενέργεια ενός σφαιρικού κύματος διαδίδεται κατά τρόπο ίσο προς όλες τις διευθύνσεις. Τα σφαιρικά κύματα τα συμβολίζουμε συνήθως με μια σειρά από ομόκεντρα τόξα κύκλων με κέντρο την πηγή. Κάθε τόξο κύκλου παριστάνει μια κυματική επιφάνεια πάνω στην οποία η φάση του κύματος είναι σταθερή. Κάθε τέτοια επιφάνεια ονομάζεται κυματικό μέτωπο. Τα διαδοχικά κυματικά μέτωπα χωρίζονται από απόσταση ίση με ένα μήκος κύματος λ . Για αποστάσεις από την πηγή που είναι μεγάλες σε σύγκριση με το μήκος κύματος παρομοιάζουμε κατά προσέγγιση τα σφαιρικά κυματικά μέτωπα με επίπεδα κύματα (*Ohanian, 1991*).

Τέλος θα αναφερθούμε σε ένα άλλο είδος κυμάτων, τα κρουστικά. Όταν η πηγή του κύματος κινείται με ταχύτητα u_s , μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης του κύματος u , τότε παρατηρούνται τα κρουστικά κύματα. Τα κρουστικά κύματα μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας.

4.4 Συμβολή των ηχητικών κυμάτων

Με τον όρο ηχητική πίεση εννοούμε τη δημιουργούμενη υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργεί το ηχητικό κύμα κατά τη διάδοσή του. Όταν μία πηγή βρίσκεται σε κλειστό χώρο σε κάθε σημείο η ηχητική πίεση θα είναι το άθροισμα της ηχητικής πίεσης που προέρχεται από την πηγή και αυτών που προέρχονται από διάφορες ανακλάσεις. Όταν ο χώρος είναι μικρός εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής τα οποία είναι τόσο εντονότερα όσο οι διαστάσεις του χώρου μικραίνουν, με αποτέλεσμα η πίεση σε κάποιο σημείο να αποκλίνει από την προβλεπόμενη τιμή που υπολογίζουμε χρησιμοποιώντας τους νόμους της γεωμετρικής διάδοσης. Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις όπως η κατάλληλη γεωμετρία του χώρου, η κατάλληλη συχνότητα του ήχου, ο χώρος συμπεριφέρεται σαν ένας συντονιστής και σχηματίζονται στάσιμα κύματα με συγκεκριμένους τρόπους δόνησης. Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο όταν η συχνότητα του ήχου είναι χαμηλή και όταν στον ήχο επικρατούν τόνοι (Σκαρλάτος, 2003). Στάσιμο κύμα έχουμε όταν το πλάτος της συνιστάμενης πίεσης δεν είναι σταθερό αλλά αρμονική συνάρτηση της θέσης. Στον χώρο των τριών διαστάσεων, σε κάποιο σημείο του που φθάνουν δύο σφαιρικά κύματα είναι δυνατόν κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις να παρατηρηθούν στάσιμα κύματα (Σκαρλάτος, 2003).

4.5 Ανάκλαση – απορρόφηση του ήχου

Όταν ένα ηχητικό κύμα πέσει πάνω σε ένα τοίχο ή γενικά σε κάποια επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων, ένα μέρος της ενέργειάς του απορροφάται ή διαδίδεται από την άλλη πλευρά του μέσου. Γενικά εξασθένηση του ήχου ονομάζουμε την απώλεια της ηχητικής ενέργειας του ήχου όταν αυτός διαδίδεται σε κάποιο μέσο, και οφείλεται σε δύο μηχανισμούς κυρίως: Στην εξασθένηση λόγω της κλασικής απορρόφησης και στην εξασθένηση λόγω του φαινομένου της θερμικής μοριακής αποκατάστασης (Σκαρλάτος, 2003).

4.6 Συμπεριφορά του ήχου στο χώρο

Ο ήχος όταν διαδίδεται σε κλειστούς χώρους συμπεριφέρεται πολύ διαφορετικά από ότι όταν διαδίδεται σε ανοικτούς. Στους ανοικτούς χώρους ο ήχος φθάνει από την πηγή στο δέκτη απ' ευθείας, ενώ στους κλειστούς ο ήχος εκτός από την απ' ευθείας διάδοση φθάνει και μετά από διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα του χώρου, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η αρχική κυματομορφή του (Σκαρλάτος, 2003). Βασικό ρόλο στους κλειστούς χώρους παίζει η απορρόφηση του ήχου και οι διαστάσεις του χώρου. Οι χώροι όσον αφορά τον τρόπο μελέτης τους διακρίνονται σε μικρούς, σε μεγάλους και σε πολύ μεγάλους.

Ένας χώρος θεωρείται μεγάλος όταν η μικρότερη διάστασή του είναι κατά δύο μήκη κύματος τουλάχιστον μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που μας ενδιαφέρει. Ο ίδιος χώρος θεωρείται πολύ μεγάλος όταν οι αποστάσεις των επιφανειών που ορίζουν το χώρο είναι τόσο μεγάλες ώστε η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα να είναι σημαντική. Για παράδειγμα ένας χώρος $2 \times 2 \times 2$ m να θεωρείται μικρός για συχνότητα 100 Hz και μεγάλος για συχνότητα 1000 Hz (Σκαρλάτος, 2003). Παρακάτω θα παρουσιάσουμε κάποια από τα χαρακτηριστικά των μικρών χώρων καθώς είναι και το είδος του χώρου που θα συναντήσουμε στο πείραμά μας.

Υποθέτουμε ότι σε ένα μικρό χώρο υπάρχει μία πηγή που εκπέμπει ήχο σε μία μόνο συχνότητα, τότε στο χώρο αυτό σχηματίζονται στάσιμα κύματα (στους μικρούς χώρους συνήθως σχηματίζονται στάσιμα κύματα). Υποθέτουμε επίσης ότι η συχνότητα της πηγής είναι κοντά στη συχνότητα ενός τρόπου δόνησης, τότε βλέπουμε ότι η στάθμη πίεσης παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή της όταν η συχνότητα της πηγής είναι ίδια με τη συχνότητα συντονισμού. Στους μεγάλους χώρους τα κυματικά φαινόμενα είναι εκφυλισμένα και η μελέτη τους γίνεται με τη βοήθεια στατιστικών τύπων.

Όταν ένας κλειστός χώρος αποτελείται από επιφάνειες που δεν ανακλούν τον ήχο αλλά το διαχέουν προς όλες τις κατευθύνσεις τότε ο ήχος είναι διάχυτος. Διάχυτος είναι επίσης ο ήχος που έχει υποστεί πολλές ανακλάσεις από λεία επίπεδα τοιχώματα. Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα πολύ μεγάλο χώρο όπου δεν υπάρχει καθόλου ηχητική ενέργεια και έχουμε μια πηγή εκπομπής ηχητικής ενέργειας σταθερής στάθμης η οποία αρχίζει να

εκπέμπει ήχο τη στιγμή $t=0$. Ο ήχος φθάνει στο δέκτη και σε λίγο φθάνουν οι ανακλάσεις από τα τοιχώματα. Έχουμε λοιπόν μία προοδευτική αύξηση της ηχητικής ενέργειας στο χώρο. Έστω ότι μηδενίζουμε την πηγή τη στιγμή $t=t_1$. Η ηχητική ενέργεια στο χώρο δεν μηδενίζεται αλλά διαρκεί όσο χρόνο υπάρχουν οι καθυστερημένες ανακλάσεις από τα τοιχώματα (Σκαρλάτος , 2003).

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

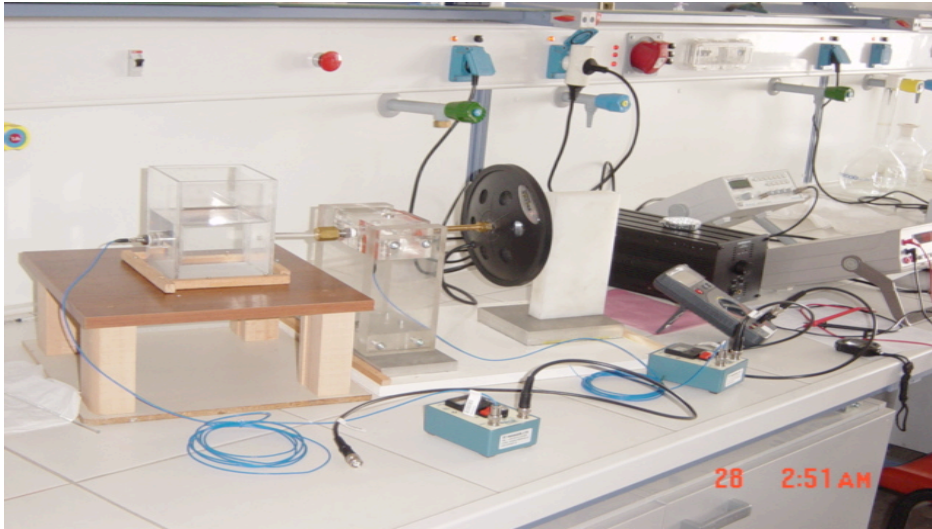
5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Για να διαπιστώσουμε αν τα ακουστικά κύματα μπορούν να επιδράσουν θετικά στην θρόμβωση και στην κροκίδωση έναντι των κροκιδωτικών και αν ο συνδυασμός τους έχει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα πραγματοποιήσαμε κατάλληλα πειράματα και συγκρίναμε τα αποτελέσματα.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε αποτελούταν από μια δεξαμενή από πλεξιγκλάς όγκου 1,7 λίτρων όπου είχαμε τοποθετήσει οπή διαμέτρου 1 εκατοστού σε ύψος 5,5 εκατοστών από τον πάτο της δεξαμενής στη μια πλευρά, ενώ στην απέναντι πλευρά σε ύψος 5,5 εκατοστών ειδικό σωλήνα από πλεξιγκλάς διαμέτρου 0,6 εκατοστών.

Οι διαστάσεις της δεξαμενής ήταν 10.5 cm x 10.5 cm x 16 cm. Η δεξαμενή ύψους 16 εκατοστών στηριζόταν σε μια ξύλινη βάση και περιστροφικά αυτής, με σκοπό την απαγόρευση οποιασδήποτε κίνησης της, υπήρχαν ξύλινα στηρίγματα. Σε μικρή απόσταση από τη δεξαμενή υπήρχε ειδική συσκευή μεταφοράς ακουστικών κυμάτων. Η πηγή αυτή ακουστικών κυμάτων αποτελούνταν από ένα ηχείο και ένα κομμάτι από πλεξιγκλάς ώστε να μεταφέρεται χωρίς απώλειες το ακουστικό κύμα στην ειδική συσκευή. Κάτοψη και όψεις ακολουθούν στο τέλος της παραγράφου.

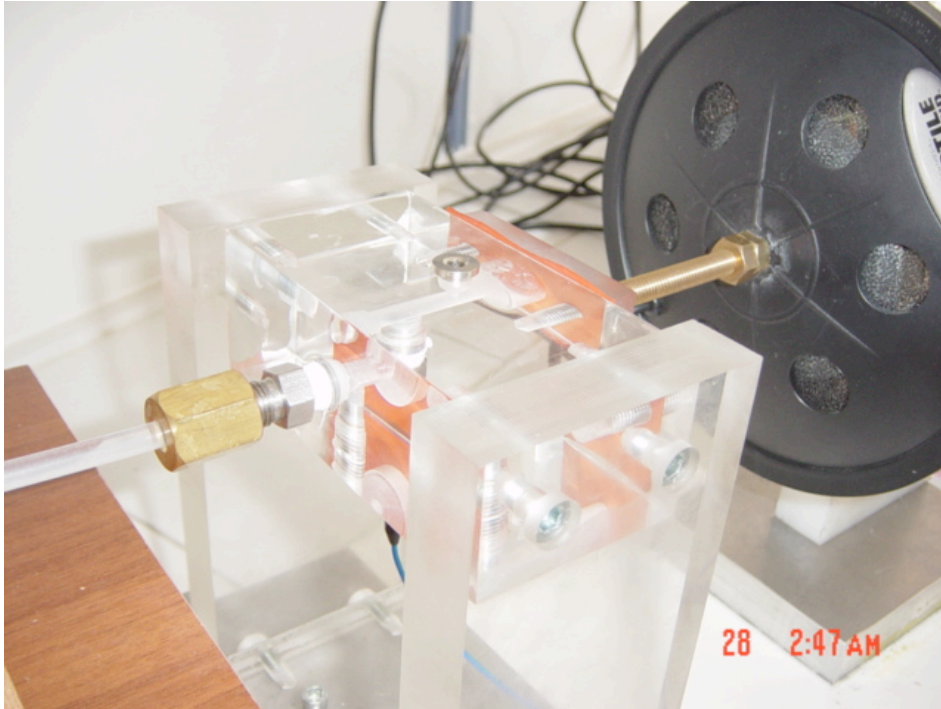
Άλλα μέρη της πειραματικής μας διάταξης ήταν μια συσκευή μετρήσεως της πίεσης, δυο αισθητήρες μετρήσεως της πίεσης όπου ο ένας τοποθετήθηκε στην πίσω πλευρά της δεξαμενής και ο άλλος στο κάτω μέρος της συσκευής μεταφοράς κυμάτων, έναν ενισχυτή με τον οποίο μεταβάλαμε την πίεση, δυο ειδικές συσκευές ελέγχου τάσης που συνδέονταν με τους αισθητήρες και με το πολύμετρο για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικών, μια γεννήτρια συχνοτήτων με την οποία καθορίζαμε τη συχνότητα και το είδος του μήκους κύματος (εμείς για όλα τα πειράματα χρησιμοποιήσαμε ημιτονοειδή μορφή κύματος), ένα χρονόμετρο, ένα πεχάμετρο και ένα θολόμετρο. Οι συσκευές παρατίθενται με τη μορφή εικόνων, από Εικόνα 5.1 έως Εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.1 Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης



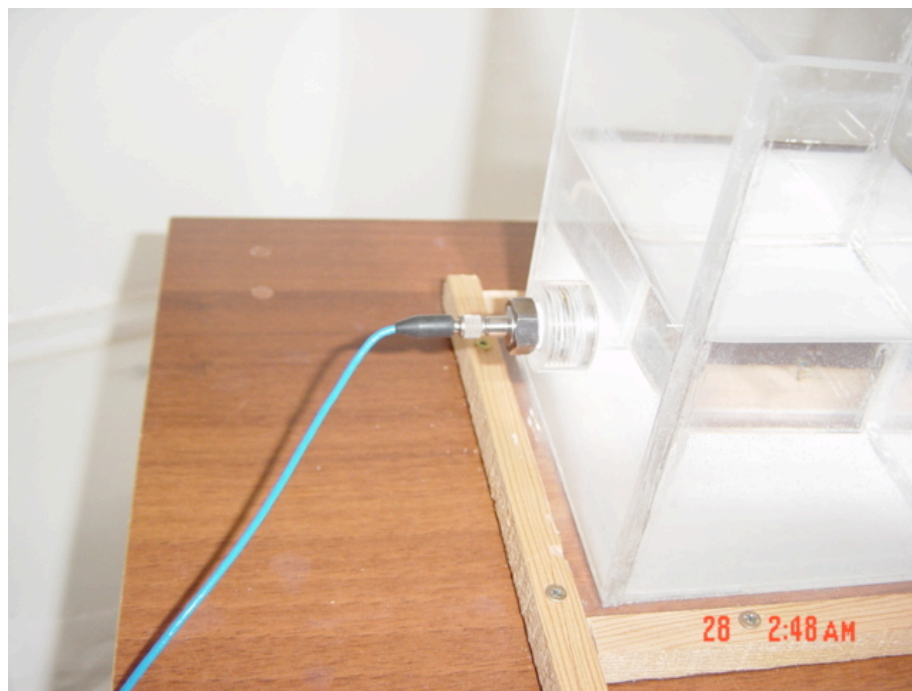
Εικόνα 5.2 Δεξαμενή ύψους 16 cm



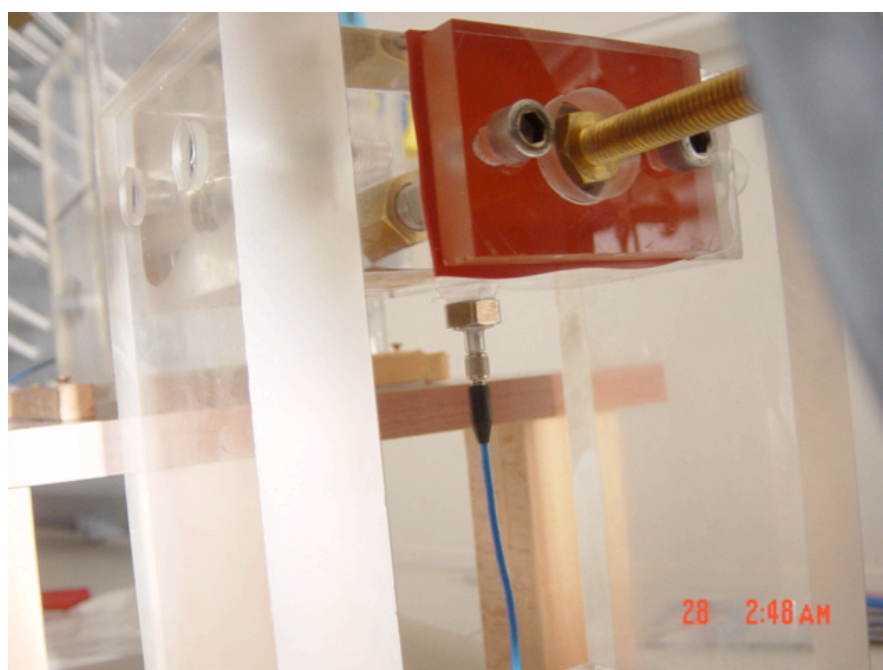
Εικόνα 5.3 Βάση στην οποία τοποθετείται το ηχείο



Εικόνα 5.4 Πολύμετρο για τη μέτρηση της διαφορά δυναμικών



Εικόνα 5.5 Αισθητήρας μετρήσεως πίεσης στην πίσω πλευρά της δεξαμενής



Εικόνα 5.6 Αισθητήρας μετρήσεως πίεσης στη μπροστινή πλευρά της δεξαμενής



Εικόνα 5.7 Γεννήτρια συχνοτήτων με την οποία καθορίζουμε τη συχνότητα και το είδος του μήκους κύματος



Εικόνα 5.8 Πεχάμετρο



Εικόνα 5.9 Θολόμετρο

5.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Αρχικά αναμιγνύουμε 11,5 γραμμάρια αργίλου σε 900ml απιονισμένου νερού και ανακατεύουμε σε 40 στροφές / min για 1 hr. Αφού το αφήσουμε να κάτσει για 48 hr (2 ημέρες), το αραιώνουμε σε 2 L αποσταγμένου νερού. Το οποίο θα ονομάζουμε χάρη συντομίας ως «Δ.ΑΡ.1». Το δείγμα αυτό το χωρίσαμε σε 2 μέρη των 1000 ml. Το ένα το τοποθετήσαμε στη δεξαμενή μας και το άλλο σε ένα ποτήρι ζέσεως 1 L. Το τελικό δείγμα είχε θολότητα 824 NTU και pH 6,5.

Η χρήση της αργίλου για την παρασκευή του δείγματος δεν είναι τυχαία. Χρησιμοποιήσαμε άργιλο γιατί καθιζάνει εύκολα σε αντίθεση με αλλά ορυκτά.

Στην συνέχεια της εργασίας το παραπάνω δείγμα αναφέρεται ως Δ.ΑΡ.1 χάριν συντομίας.

5.3 Πρώτο πείραμα διερεύνησης αποτελεσματικότητας των ακουστικών κυμάτων

Τοποθετήσαμε στη δεξαμενή ποσότητα 1 L (δείγμα 0) και ποσότητα 1 L σε ένα ποτήρι ζέσεως (δείγμα 1) από το Δ.ΑΡ.1.

Θέσαμε σε λειτουργία την γεννήτρια επιλέγοντας συχνότητα 50 Hz και μέσω του ενισχυτή επιλέξαμε τάση 0,83 V (στην συσκευή ακουστικών-μπροστά). Μετρήσαμε στη συνέχεια την τάση στο τέλος της δεξαμενής-πίσω και την βρήκαμε 14.5 mV. Έπειτα αφήσαμε τη διάταξη να λειτουργήσει για 15 min και την κλείσαμε. Αφού πήραμε μικρή ποσότητα από τα δείγματα 1 και 0 με τρόπο ώστε να μην επέλθει ανατάραξη στα δείγματα, μετρήσαμε την θολότητα και βρήκαμε 800 NTU για το δείγμα 0 και 780 NTU για το δείγμα 1. Στη συνέχεια αφήσαμε τα δυο δείγματα να καθιζάνουν για 30 min και πήραμε πάλι μικρές ποσότητες με τον ίδιο τρόπο για να μετρήσουμε ξανά τη θολότητα. Βρήκαμε 753 NTU για το δείγμα 0 και 733 NTU για το δείγμα 1. Τα αφήσαμε για περαιτέρω καθίζηση για 21 hr και μετρήσαμε την θολότητα την οποία βρήκαμε 502 NTU και για τα δυο δείγματα.

Παρατηρούμε ότι οι θολότητες των δυο δειγμάτων είναι σχεδόν ίδιες δηλαδή η επίδραση των ακουστικών κυμάτων είναι μηδαμινή. Βέβαια για να είμαστε σίγουροι για το συμπέρασμα αυτό επαναλάβουμε το πείραμα, αλλάζοντας τις παραμέτρους και το δείγμα όπως φαίνεται στο πείραμα 2 παρακάτω.

5.4 Δεύτερο πείραμα διερεύνησης αποτελεσματικότητας των ακουστικών κυμάτων

Από το Δ.ΑΡ.1 πήραμε 50 ml και τα αραιώσαμε σε 2 λίτρα απιονισμένου νερού. Στη συσκευή τοποθετήσαμε 850 ml (δείγμα 0) και σε ένα ποτήρι 1150 ml (δείγμα 1). Θέσαμε σε λειτουργία την πειραματική διάταξη με συχνότητα 101 Hz και τάση εμπρός 2,5 V. Στη συνέχεια μετρήσαμε την τάση πίσω και τη βρήκαμε 12,8 mV. Μετά από 30 min σταματήσαμε τη λειτουργία της πειραματικής διάταξης. Έπειτα μετρήσαμε θολότητες και τις βρήκαμε 228 NTU για το δείγμα 0 και 243 NTU για το δείγμα 1. Αφού αφήσαμε και τα δυο

δείγματα να καθιζάνουν για 30 min, ξαναμετρήσαμε τις θολότητες. Βρήκαμε 212 NTU για το δείγμα 0 και 207 NTU για το δείγμα 1. Ακολούθησε περαιτέρω καθίζηση για άλλα 30 min και ξαναμετρήσαμε θολότητες όπου βρήκαμε 203 NTU για το δείγμα 0 και 206 NTU για το δείγμα 1.

Παρατηρήσαμε και πάλι πολύ μικρές διαφορές στις θολότητες των δύο δειγμάτων. Επιβεβαιώσαμε έτσι με το πείραμα αυτό ότι τα ακουστικά κύματα από μόνα τους δεν βελτιώνουν την κροκιδωση και τη θρόμβωση. Προκύπτει όμως το ερώτημα, αν σε συνδυασμό με άλλες ουσίες μπορούμε να έχουμε καλά αποτελέσματα. Έτσι πραγματοποιήσαμε μια σειρά πειραμάτων που αναλύονται παρακάτω.

5.5 Πείραμα διερεύνησης αποτελεσματικότητας των ακουστικών κυμάτων σε συνδυασμό με χρήση κροκιδωτικού

Για να πάρουμε μια ξεκάθαρη εικόνα της λειτουργίας των ακουστικών κυμάτων έπρεπε να συγκρίνουμε (στο ίδιο δείγμα) τις θολότητες μετά από τις εξής μορφές επεξεργασίας. 1) καθίζηση του δείγματος με χρήση κροκιδωτικού χωρίς τη χρήση ακουστικών κυμάτων, 2) καθίζηση του δείγματος με χρήση ακουστικών κυμάτων χωρίς χρήση κροκιδωτικού, 3) καθίζηση του δείγματος με χρήση ακουστικών κυμάτων και με χρήση κροκιδωτικού.

5.5.1 Δείγμα που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα

Πήραμε ποσότητα 250 ml από το Δ.ΑΡ.1 και προσθέσαμε 100 ml $\text{Na}_2\text{CO}_3(10\text{g/L})$. Προσθέσαμε ακόμα 9,650 L απιονισμένου νερού. Πραγματοποιήσαμε ανάμιξη των παραπάνω σε μεγάλο κουβά και προσεκτικά τα αναδεύσαμε για την ομογενοποίηση του μίγματος. Το συνολικό δείγμα ήταν 10 L και παρακάτω αναφέρεται ως Δ.ΚΒ. Όποτε θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε μέρος του Δ.ΚΒ σε κάποιο πείραμα το αναδεύαμε τουλάχιστον για 1min .

5.5.2 Πρώτο πείραμα test γυάλας. Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ποσότητας κροκιδωτικού και θολότητας

Θέλοντας όμως να έχουμε μια εικόνα για το πόσο πρέπει να μειωθεί η θολότητα ώστε να θεωρείται επιτυχής η μέθοδος μας θα διενεργήσουμε τα παρακάτω πειράματα test γυάλας (jar test).

Κατά το πρώτο πείραμα test γυάλας βάλαμε σε 7 ποτήρια ζέσης 1 L ποσότητα 900 ml από το δείγμα Δ.ΚΒ στο καθένα και τα έξι από αυτά τα τοποθετήσαμε στο μηχάνημα ανάδευσης ενώ ένα το αφήσαμε να διατελέσει τη διαδικασία της καθίζησης για 30 min (χωρίς προσθήκη κροκιδωτικού). Προσθέσαμε λοιπόν και στα έξι ποτήρια $Al_2(SO_4)_3$ (διάλυμα 5 mg/cm³), διαφορετική όμως ποσότητα στο καθένα, και ρυθμίσαμε το μηχάνημα σε ταχεία ανάδευση (100 στροφές/min) για ένα min. Έπειτα ρυθμίσαμε το μηχάνημα στις 30 στροφές/min και αφήσαμε τα ποτήρια για ανάδευση για επιπλέον 30 min. Στη συνέχεια αφήσαμε τα έξι αυτά δείγματα να διατελέσουν τη διαδικασία της καθίζησης για 30 min. Στον παρακάτω Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι ποσότητες κροκιδωτικού που προσθέσαμε στο κάθε δείγμα καθώς και τα τελικά αποτελέσματα του πειράματος.

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα πρώτου πειράματος test γυάλας

ΔΕΙΓΜΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ $Al_2(SO_4)_3$ (ml)	ΧΡΟΝΟΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ (min)	ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΣΤΙΣ 30 ΣΤΡΟΦΕΣ/min (min)	ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ (min)	ΤΕΛΙΚΗ ΘΟΛΟΤΗΤΑ (NTU)
0	0	0	30	30	225
1	0,45	1	30	30	208
2	0,9	1	30	30	58
3	1,8	1	30	30	11
4	3,6	1	30	30	3,5
5	7,2	1	30	30	2,7
6	10,8	1	30	30	1,6

Βλέποντας τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερη η ποσότητα του κροκιδωτικού που προσθέσαμε τόσο μικρότερη η θολότητα που παρατηρούμε.

5.5.3 Δεύτερο πείραμα test γυάλας. Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ χρόνου ανάδευσης και της θολότητας

Παίρνουμε επτά δείγματα τα οποία αποτελούνται από 7,2 ml $Al_2(SO_4)_3$ και 900 ml από το Δ.ΚΒ, πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο συγκέντρωση 40 mg/L κροκιδωτικού στο διάλυμα. Το δείγμα 0 το αφήνουμε να καθιζάνει για 30 min χωρίς ανάδευση. Τα υπόλοιπα δείγματα τα αφήνουμε σε ταχεία ανάδευση για 1 min και στη συνέχεια μεταβάλλουμε τον χρόνο ανάδευσης από δείγμα σε δείγμα προσθέτοντας κάθε φορά 5 παραπάνω min ανάδευσης για το καθένα, δηλαδή το δείγμα 1 αναδεύεται για 5 min, το δείγμα 2 αναδεύεται για 10 min, το δείγμα 3 για 15 min, το δείγμα 4 για 20 min, το δείγμα 5 για 25 min και τέλος το δείγμα 6 το αναδεύουμε για 30 min. Στη συνέχεια αφήνουμε τα δείγματα για καθίζηση 30 min και μετράμε την τελική θολότητα. Τα τελικά αποτελέσματα καθώς και οι αντίστοιχοι χρόνοι ταχείας ανάδευσης, ανάδευσης και καθίζησης φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα δεύτερου πειράματος test γυάλας

ΔΕΙΓΜΑ	ΧΡΟΝΟΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ (min)	ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΣΤΙΣ 40 ΣΤΡΟΦΕΣ/min (min)	ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ (min)	ΤΕΛΙΚΗ ΘΟΛΟΤΗΤΑ (NTU)
0	0	0	30	238
1	1	5	30	30,9
2	1	10	30	13,46
3	1	15	30	4,82
4	1	20	30	3,91
5	1	25	30	3,32
6	1	30	30	2,75

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα στον παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι για χρόνο ανάδευσης 30 min η θολότητα έχει μειωθεί κατά 99%, συνεπώς το αποτέλεσμα είναι πολύ ικανοποιητικό. Βέβαια δεν σημαίνει ότι αν αυξήσουμε κι άλλο τον χρόνο ανάδευσης, θα έχουμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα αφού παρατηρούμε ότι μετά από χρόνο ανάδευσης 15 min τα αποτελέσματα δεν έχουν σημαντική βελτίωση.

Η παραπάνω βέλτιστη τιμή είναι πολύ σημαντική για τη συνέχεια αφού θα αποτελεί το μέτρο σύγκρισης με τα πειράματα που θα ακολουθήσουν. Όσο πιο πολύ πλησιάσουν την τιμή αυτή τόσο πιο πετυχημένη θα θεωρείται η μέθοδός μας.

5.5.4 Πείραμα με χρήση μόνο κροκιδωτικού

Πήραμε από το Δ.ΚΒ, και αφού είχαμε αναδεύσει, ποσότητα 1,1 L προσθέσαμε 8,8 ml $Al_2(SO_4)_3$, πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο συγκέντρωση 40 mg/L κροκιδωτικού στο διάλυμα, και το τοποθετήσαμε στη δεξαμενή χωρίς να ενεργοποιήσουμε τη διάταξη. Αφήσαμε να καθιζάνει για 30 min και μετρήσαμε την θολότητα ίση με 232 NTU. Ξανά αφήσαμε για καθίζηση 30 min και βρήκαμε θολότητα 157 NTU. Τέλος αφήσαμε να καθιζάνει το δείγμα για ακόμα 30 min και μετρήσαμε θολότητα ίση με 137 NTU.

5.5.5 Πείραμα με χρήση μόνο ακουστικών κυμάτων

Πήραμε από το Δ.ΚΒ ποσότητα 1,1 L και τοποθετήσαμε το δείγμα στη δεξαμενή. Έπειτα αναδεύσαμε ελαφρά. Ενεργοποιήσαμε τη διάταξη με συχνότητα 36,6 Hz και τάση εμπρός 5,6 V. Μετρήσαμε την τάση πίσω και τη βρήκαμε 72 mV. Αφού η διάταξη λειτούργησε για 30 min, την κλείσαμε και μετρήσαμε θολότητα ίση με 240 NTU. Αφήσαμε το δείγμα να καθιζάνει για 30 min και ξαναμετρήσαμε θολότητα όπου τη βρήκαμε ίση με 230 NTU. Αφήσαμε για καθίζηση άλλα 30 min και μετρήσαμε θολότητα ίση με 230 NTU.

5.5.6 Πείραμα με χρήση ακουστικών κυμάτων και κροκιδωτικού

Πήραμε από το Δ.ΚΒ ποσότητα 1,1 L, προσθέσαμε 8,8 ml $Al_2(SO_4)_3$ και τοποθετήσαμε το δείγμα στη δεξαμενή. Στη συνέχεια αναδεύσαμε ελαφρά. Ενεργοποιήσαμε τη διάταξη με συχνότητα 36,6 Hz και τάση εμπρός 5,6 V. Μετρήσαμε την τάση πίσω και βρήκαμε 72 mV. Αφού η διάταξη λειτούργησε για 30 min, την κλείσαμε και μετρήσαμε θολότητα ίση με 192 NTU. Αφήσαμε το δείγμα να καθιζάνει για 30 min και ξαναμετρήσαμε θολότητα ίση με 85 NTU. Αφήσαμε για καθίζηση άλλα 30 min και μετρήσαμε τη θολότητα ίση με 34 NTU.

5.5.7 Συμπεράσματα πρώτης σειράς πειραμάτων

Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πρώτης σειράς πειραμάτων

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ	ΚΡΟΚΙΔΩΤΙΚΟ	ΤΕΛΙΚΗ ΘΟΛΟΤΗΤΑ
3 ^α	Όχι	Ναι	137
3 ^β	Ναι	Όχι	230
3 ^γ	Ναι	Ναι	34

Όπως παρατηρούμε η χρήση ακουστικών κυμάτων μαζί με κροκιδωτικό είναι με διαφορά ο πιο αποτελεσματικός συνδυασμός. Φτάσαμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι ενώ μόνα τους τα ακουστικά κύματα δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην κροκίδωση και την θρόμβωση, σε συνδυασμό όμως με κροκιδωτικό τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά.

5.6 Σχεδιασμός μελλοντικών πειραμάτων

Με δεδομένο την θετική επίδραση των ακουστικών κυμάτων στην διαδικασία τής κροκίδωσης και τής θρόμβωσης γεννιούνται ερωτήματα όπως σε ποιο βαθμό έγκειται η επίδραση αυτή, ή κατά πόσο επηρεάζει η συχνότητα και η πίεση των ακουστικών την κροκίδωση. Επίσης αν επιδρά ο χρόνος έκθεσης στα ακουστικά, και αν ναι, ποιος συνδυασμός φέρνει το καλύτερο αποτέλεσμα και γιατί. Οι απαντήσεις αυτών των ερωτημάτων μπορούν να δοθούν μόνο μέσα από την πειραματική διαδικασία και με κατάλληλη μελέτη των παραμέτρων αυτών. Στα επόμενα λοιπόν πειράματα μεταβάλαμε την καθεμία παράμετρο κρατώντας τις άλλες δύο σταθερές και στη συνέχεια μεταβάλαμε τις δύο παραμέτρους κρατώντας την τρίτη σταθερή προσπαθώντας με τον τρόπο αυτό να οδηγηθούμε σε όσο το δυνατόν πιο σωστά συμπεράσματα.

6. ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ

6.1 Πειραματική διερεύνηση

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφαλαίο ο συνδυασμός ακουστικών κυμάτων και κροκιδωτικού είναι αποτελεσματικός. Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού συχνότητας και τάσης δηλαδή του συνδυασμού που θα προκαλέσει την μέγιστη δυνατή βελτίωση της θολότητας.

Για να επιτύχουμε κάτι τέτοιο θα πρέπει να κάνουμε κάποια πειράματα με διάφορους συνδυασμούς τάσεων και συχνοτήτων κρατώντας σταθερό το χρόνο επιρροής των ακουστικών κυμάτων. Στη παρούσα φάση ο χρόνος επιλέγεται στα 30 min. Ακόμα ο χρόνος περαιτέρω καθίζησης επιλέγεται 60 min, παίρνοντας δύο μετρήσεις δηλαδή στα 30 min και στα 60 min καθίζησης.

Είναι λογικό το ερώτημα, ποιες τάσεις και ποιες συχνότητες πρέπει να επιλεγούν ως αντιπροσωπευτικές για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Θεωρητικά θα μπορούσαμε να ελέγξουμε άπειρους συνδυασμούς όμως κάτι τέτοιο είναι αδύνατο αφού η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη μπορεί να αντέξει με ασφάλεια τάσεις μέχρι 6 V και συχνότητες μέχρι 200 Hz. Για το λόγω αυτό αποφασίσαμε να ασχοληθούμε με τους εξής συνδυασμούς:

- 1) 10 Hz με 0,5 V, 1 V, 2,4 V, 5,6 V
- 2) 20 Hz με 0,5 V, 1 V, 2,4 V, 5,6 V
- 3) 36,6 Hz με 0,5 V, 1 V, 2,4 V, 5,6 V
- 4) 70 Hz με 0,5 V, 1 V, 2,4 V, 5,6 V
- 5) 100 Hz με 0,5 V, 1 V, 2,4 V, 5,6 V
- 6) 200 Hz με 0,5 V, 1 V, 2,4 V, 5,6 V

Η διαδικασία εκτέλεσης των πειραμάτων είναι ίδια με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου και το δείγμα είναι 1,1 λίτρα από το Δ.ΚΒ με προσθήκη 8,8 ml $Al_2(SO_4)_3$, πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο συγκέντρωση 40 mg/L κροκιδωτικού στο διάλυμα. Για την ευκολότερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων τα παρουσιάζουμε παρακάτω σε μορφή πίνακα. Στο τέλος κάθε πίνακα ακολουθούν κάποιες απαραίτητες παρατηρήσεις και

συμπεράσματα. Επίσης ακολουθούν γραφικές παραστάσεις που θα μας οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα για τον βέλτιστο συνδυασμό που ψάχνουμε.

6.2 Παρατηρήσεις - λεπτομέρειες επί των πειραμάτων

- 1) Η μέτρηση της θολότητας επαναλαμβάνεται τρεις φορές και στους παρακάτω πίνακες για συντομία αναφέρεται μόνο το μέσο όρο των τριών αυτών τιμών. Έτσι επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη ασφάλεια των αποτελεσμάτων
- 2) Ο υπολογισμός των πιέσεων γίνεται με ειδικούς αισθητήρες που έχουμε τοποθετήσει για τους οποίους η αναλογία τάσεων - πιέσεων είναι γνωστή από τον κατασκευαστή των εξαρτημάτων και είναι 43,87 mV αντιστοιχεί σε 1 kPa για την θέση A (μπροστά) και 40,77 mV αντιστοιχεί σε 1 kPa για την θέση B (πίσω). Ο αισθητήρας στη θέση A έχει serial number 9411 και ο σένσορας στη θέση B έχει serial number 4596.
- 3) Οι γραφικές παραστάσεις είναι πιο απλές στη διεξαγωγή συμπερασμάτων αφού η κλίση της ευθείας είναι ανάλογη με τη βελτίωση της θολότητας.
- 4) Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της καθίζησης απαγορεύεται η οποιαδήποτε επαφή με τον πάγκο που βρίσκεται η πειραματική διάταξη για αποφυγή αλλοίωσης των αποτελεσμάτων
- 5) Κατά την παραλαβή του δείγματος φροντίζουμε να παίρνουμε κάθε φορά την ίδια ποσότητα ~30-35 ml και να διαταράσσουμε όσο το δυνατό λιγότερο το δείγμα που μένει στη δεξαμενή .
- 6) Μετά το πέρας του πειράματος η δεξαμενή αδειάζει με σιφωνισμό και στη συνέχεια καθαρίζεται σχολαστικά ώστε να αφαιρεθεί τυχόν καθιζάνον υλικό.

6.3 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 10 Hz

Πίνακας 6.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 10 Hz

Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Θολότητα NTU			pH
	Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B		t=0	t=30	t=60	
10	0,5	1,8	11,39	0,04	30	218	205	176	7
10	1	10	22,79	0,24	30	210	156	150	6,8
10	2,4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
10	5,6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Σημείωση Τα πειράματα σε τάσεις 2,4 V και 5,6 V ήταν αδύνατο να γίνουν λόγω συνεχών υπερθερμάνσεων του ενισχυτή.

Συμπεράσματα

Η βελτίωση της θολότητας είναι μόλις 37,5% δηλαδή καθόλου ικανοποιητική. Θυμίζουμε ότι η αρχική θολότητα είναι 240 NTU .

6.4 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 20 Hz

Πίνακας 6.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 20 Hz

Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Θολότητα NTU			pH
	Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B		t=0	t=30	t=60	
20	0,5	14	11,39	0,34	30	226	208	121	7,07
20	1	7,8	22,79	0,19	30	225	155	70	7,03
20	2,4	16	54,70	0,39	30	165	103	61	6,95
20	5,6	60	113,97	1,47	30	208	113	70	7

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι εδώ σε πίεση 1 V, 2,4 V, 5,6 V τα αποτελέσματα είναι παρόμοια για τη θολότητα και στο pH. Η βελτίωση της θολότητας είναι 75% αφού η αρχική θολότητα είναι 240 NTU.

6.5 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 36,6 Hz

Πίνακας 6.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 36,6 Hz

Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Θολότητα NTU			pH
	Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B		t=0	t=30	t=60	
36,6	0,5	14	11,39	0,34	30	238	230	121	8
36,6	1	23	22,79	0,56	30	239	235	104	8
36,6	2,4	32	54,70	0,78	30	229	174	92	7,35
36,6	5,6	91	113,97	2,23	10	220	119	84	7,15
36,6	5,6	91	113,97	2,23	30	192	84	33	7,53

Συμπεράσματα

Όπως παρατηρούμε για την συγκεκριμένη συχνότητα 36,6 Hz τα καλύτερα αποτελέσματα τα έχουμε με τάση 5,6 V. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αρχική θολότητα είναι 240 NTU οπότε έχουμε βελτίωση της τάξης του 86,2% για καθίζηση 1 h. Παρατηρούμε ακόμα ότι ο χρόνος επιρροής ακουστικών των 10 min δεν επαρκεί για να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα στη μείωση της θολότητας, δηλαδή δεν είναι αρκετός για τον σχηματισμό θρόμβων.

6.6 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 70 Hz

Πίνακας 6.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 70 Hz

Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Θολότητα NTU			pH
	Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B		t=0	t=30	t=60	
70	0,5	77	11,39	1,88	30	238	165	112	6,77
70	1	64	22,79	1,56	30	231	188	97	6,77
70	2,4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
70	5,6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Σημείωση Τα πειράματα σε τάσεις 2,4 V κ 5,6 V ήταν αδύνατο να γίνουν λόγω υπερβολικών δονήσεων υπήρχε εμφανής κίνδυνος καταστροφής της συσκευής.

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε βελτίωση της θολότητας κατά 59,5%. Δεν είμαστε αρκετά ικανοποιημένοι με το παραπάνω αποτέλεσμα.

6.7 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 100 Hz

Πίνακας 6.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 100 Hz

Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Θολότητα NTU			pH
	Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B		t=0	t=30	t=60	
100	0,5	65	11,39	1,61	30	237	202	105	6,55
100	1	80	22,79	1,96	30	234	201	92	6,68
100	2,4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
100	5,6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Σημείωση Τα πειράματα σε τάσεις 2,4 V και 5,6 V ήταν αδύνατο να γίνουν αφού λόγω υπερβολικών δονήσεων υπήρχε εμφανής κίνδυνος καταστροφής της συσκευής. Ακόμα μετά το 15 min παρατηρήθηκαν συνεχείς υπερθερμάνσεις του ενισχυτή με αποτέλεσμα πιθανή αλλοίωση αποτελεσμάτων λόγω των αναγκαστικών παύσεων που έγιναν για την προστασία του μηχανήματος .

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε βελτίωση της θολότητας κατά 61,6%. Δεν είμαστε αρκετά ικανοποιημένοι με το παραπάνω αποτέλεσμα.

6.8 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 200 Hz

Πίνακας 6.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 200 Hz

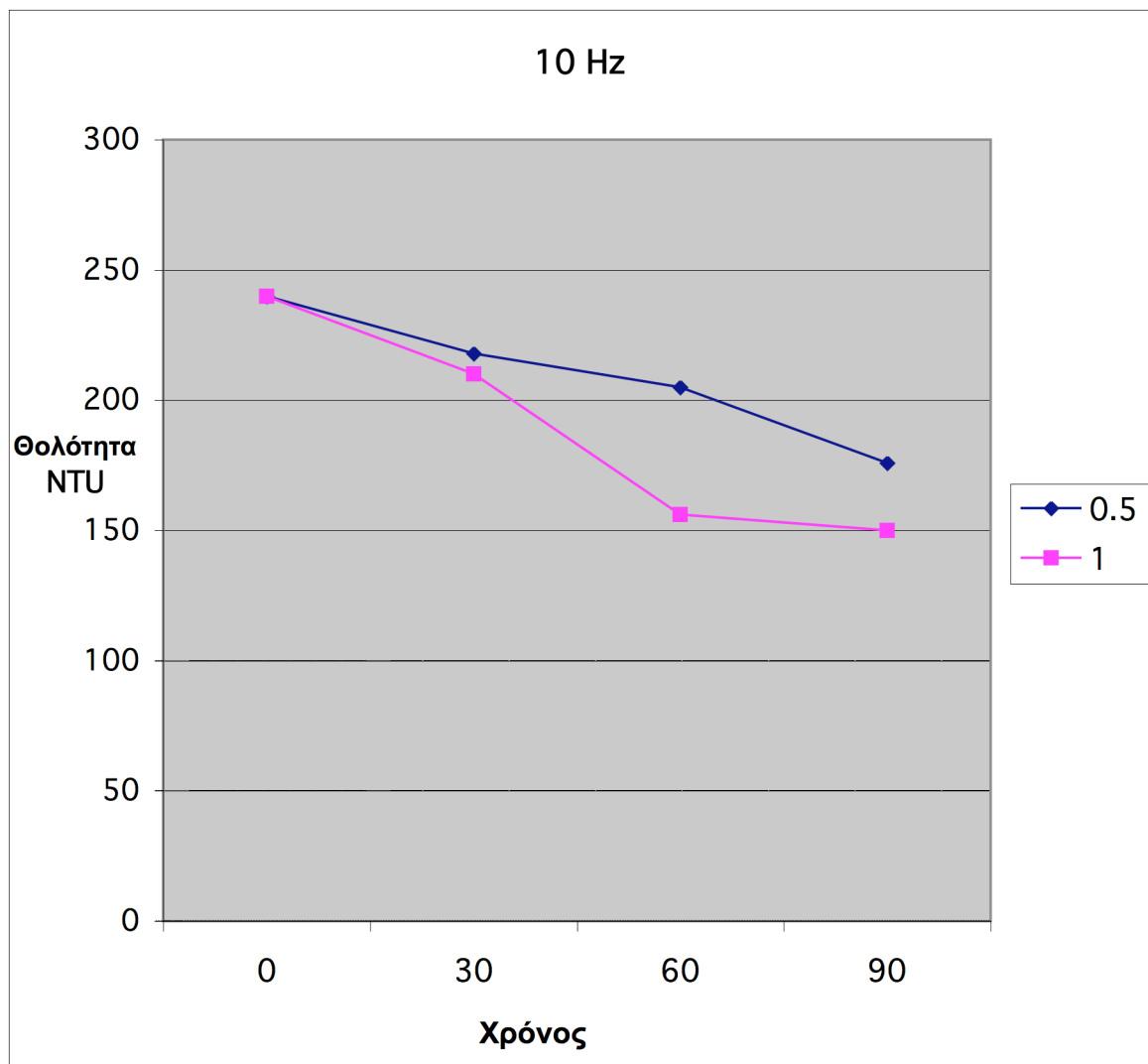
Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Θολότητα NTU			pH
	Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B		t=0	t=30	t=60	
200	0,5	0,2	11,39	0,004	30	238	198	118	7,15
200	1	----	-----	-----	-----	----	----	-----	----
200	2,4	----	-----	-----	-----	----	----	-----	----
200	5,6	----	-----	-----	-----	----	----	-----	----

Σημείωση Τα πειράματα σε τάσεις 1 V , 2,4 V και 5,6 V ήταν αδύνατο να γίνουν αφού λόγω υπερβολικών δονήσεων υπήρχε εμφανής κίνδυνος καταστροφής της συσκευής. Ακόμα παρατηρήθηκαν υπερθερμάνσεις του ενισχυτή όμως μετά το 24 min οπότε λόγω των μόλις 3 παύσεων που έγιναν δεν υπάρχει περίπτωση αλλοίωσης του αποτελέσματος .

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε βελτίωση της θολότητας κατά 50,8%. Δεν είμαστε αρκετά ικανοποιημένοι με το παραπάνω αποτέλεσμα.

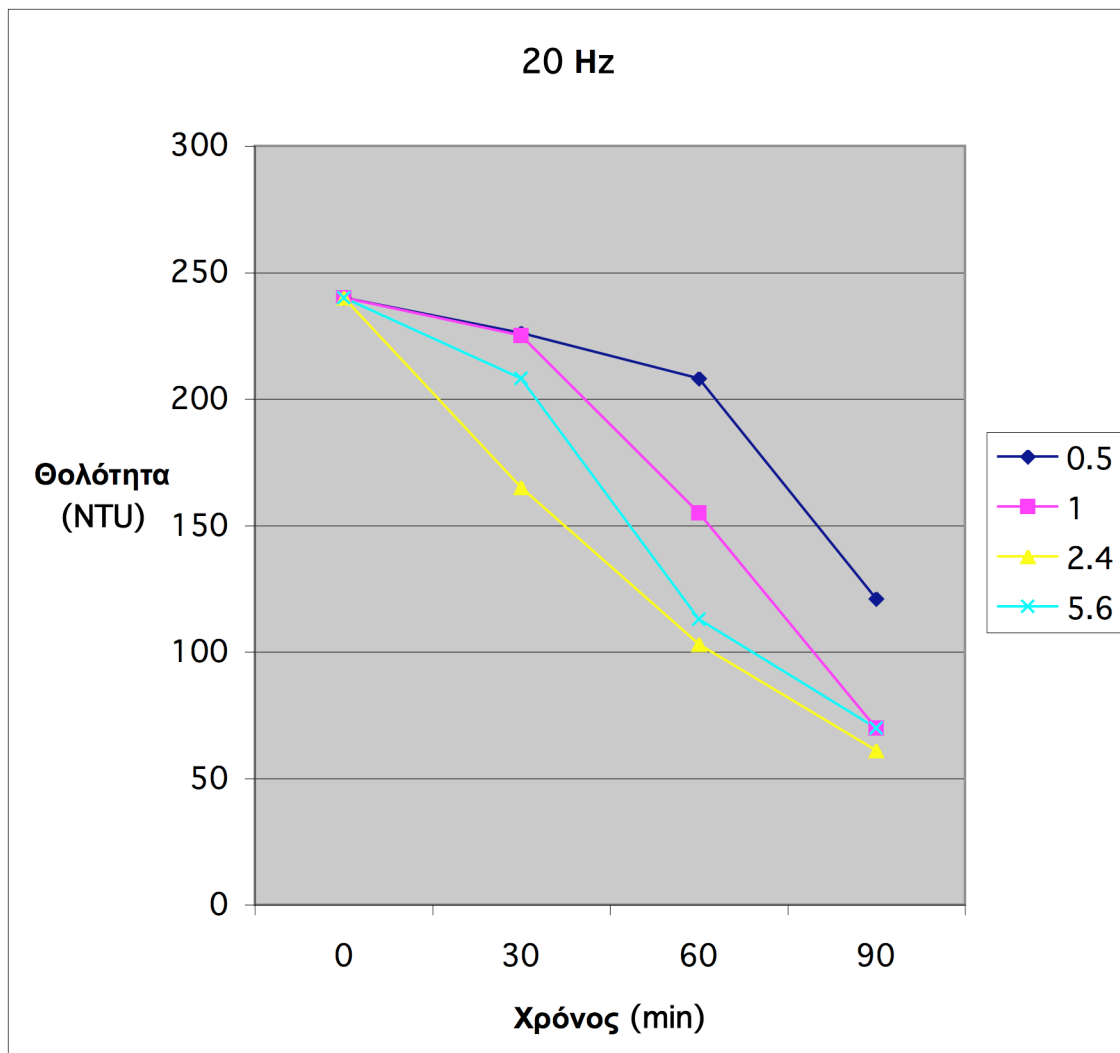
6.9 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων με επίδραση ακουστικών κυμάτων σταθερής έντασης



Σχήμα 6.1 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 10 Hz

Παρατηρήσεις

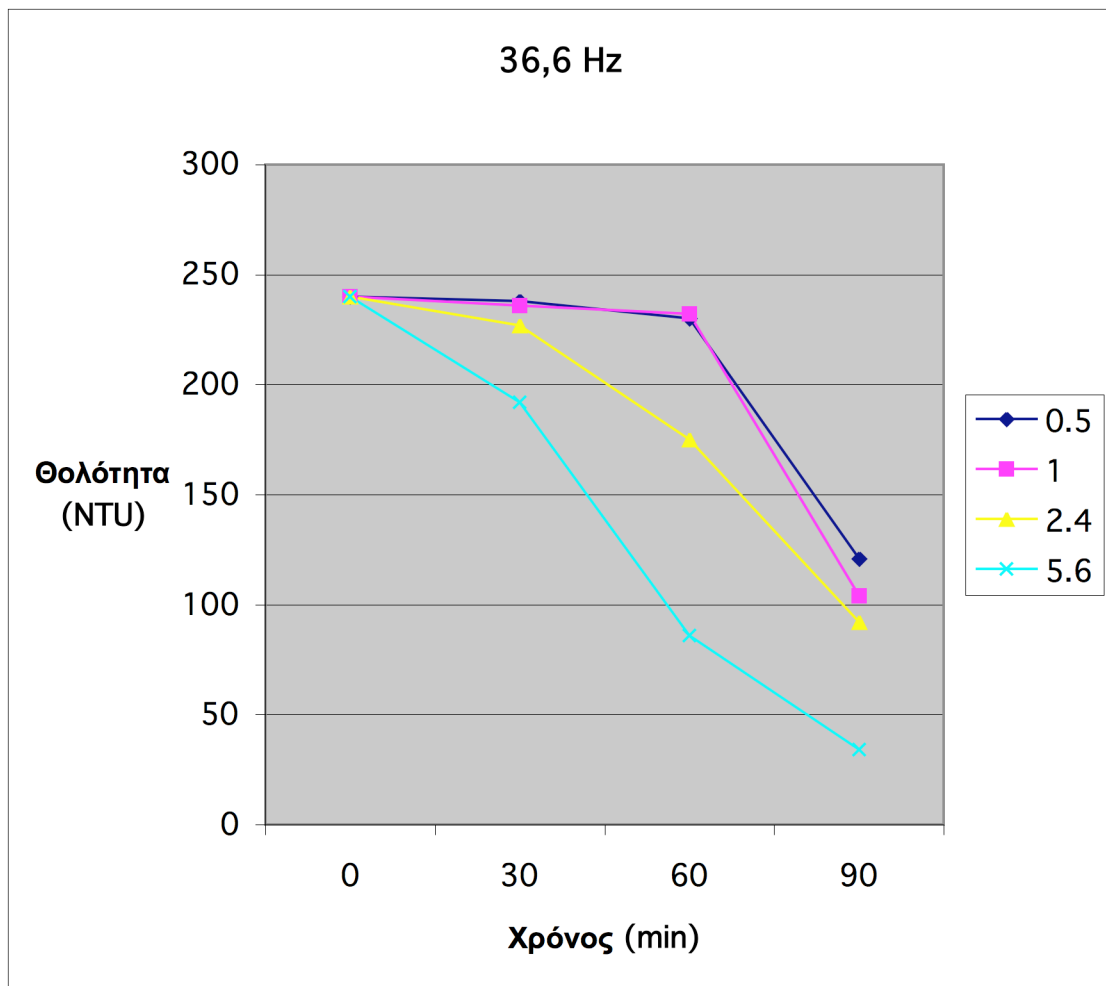
Εδώ βλέπουμε ότι η βέλτιστη τάση είναι τα 1 V, όμως το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό.



Σχήμα 6.2 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 20 Hz

Παρατηρήσεις

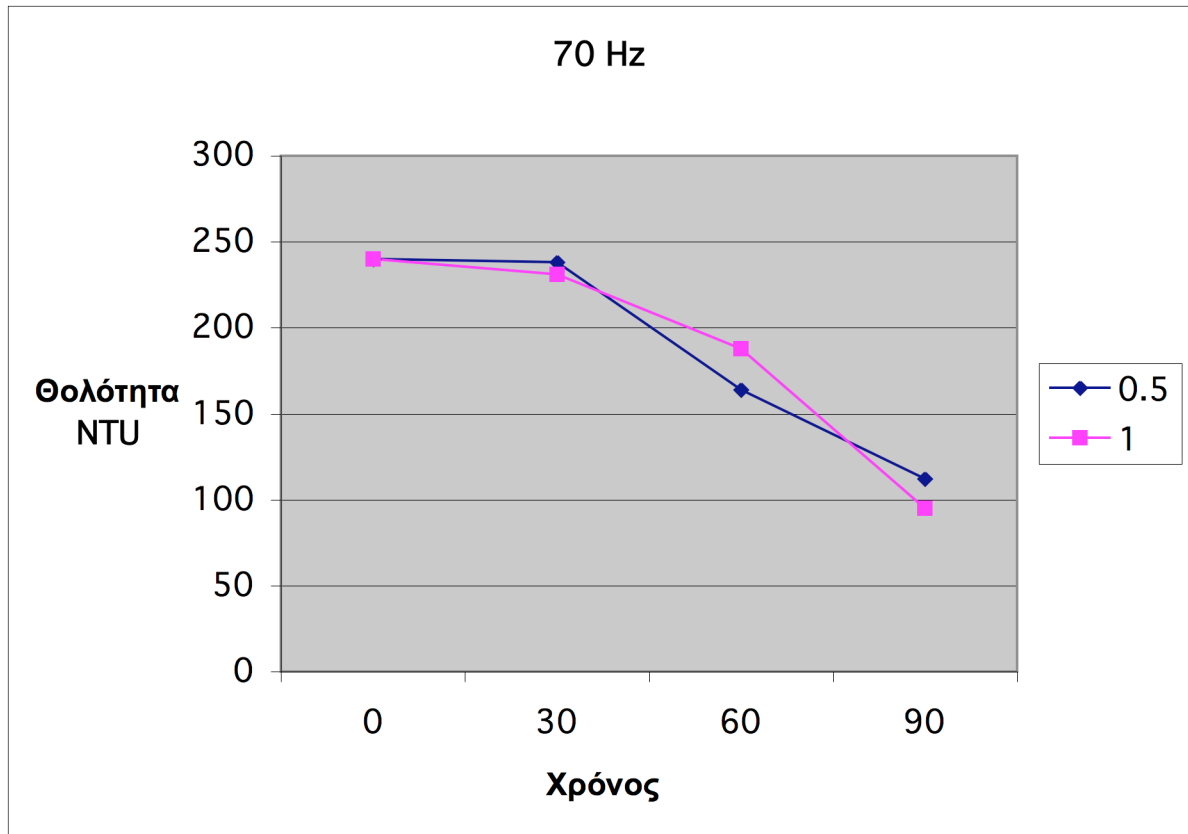
Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη τάση για την συχνότητα 20 Hz είναι τα 2,4 V. Επίσης οι διαφορές στην βελτίωση θολότητας μεταξύ των τάσεων 1 V, 2,4 V και 5,6 V είναι ελάχιστες.



Σχήμα 6.3 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 36,6 Hz

Παρατηρήσεις

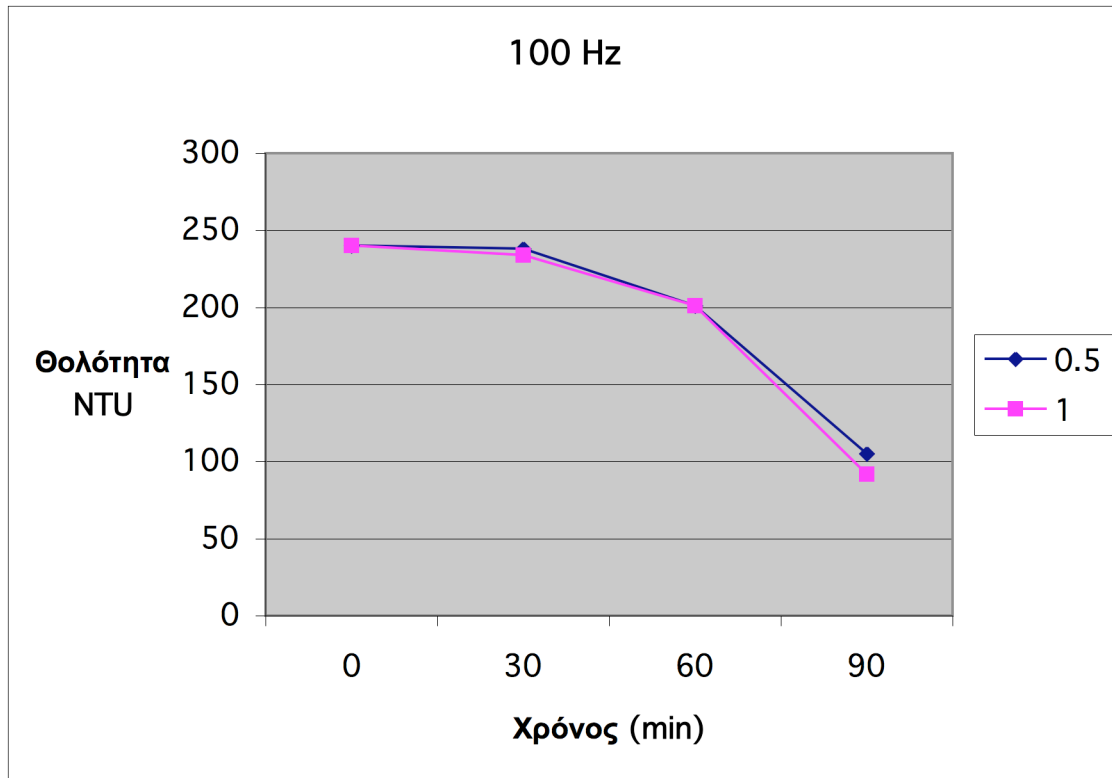
Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη συχνότητα οι διαφορές είναι μεγάλες και όσο πιο υψηλή τάση εφαρμόζω τόσο καλύτερο αποτέλεσμα έχω. Με τάση 5,6 V έχω πολύ καλά αποτελέσματα σε αντίθεση με τις άλλες τάσεις που έχουν πολύ μικρή συνεισφορά.



Σχήμα 6.4 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 70 Hz

Παρατηρήσεις

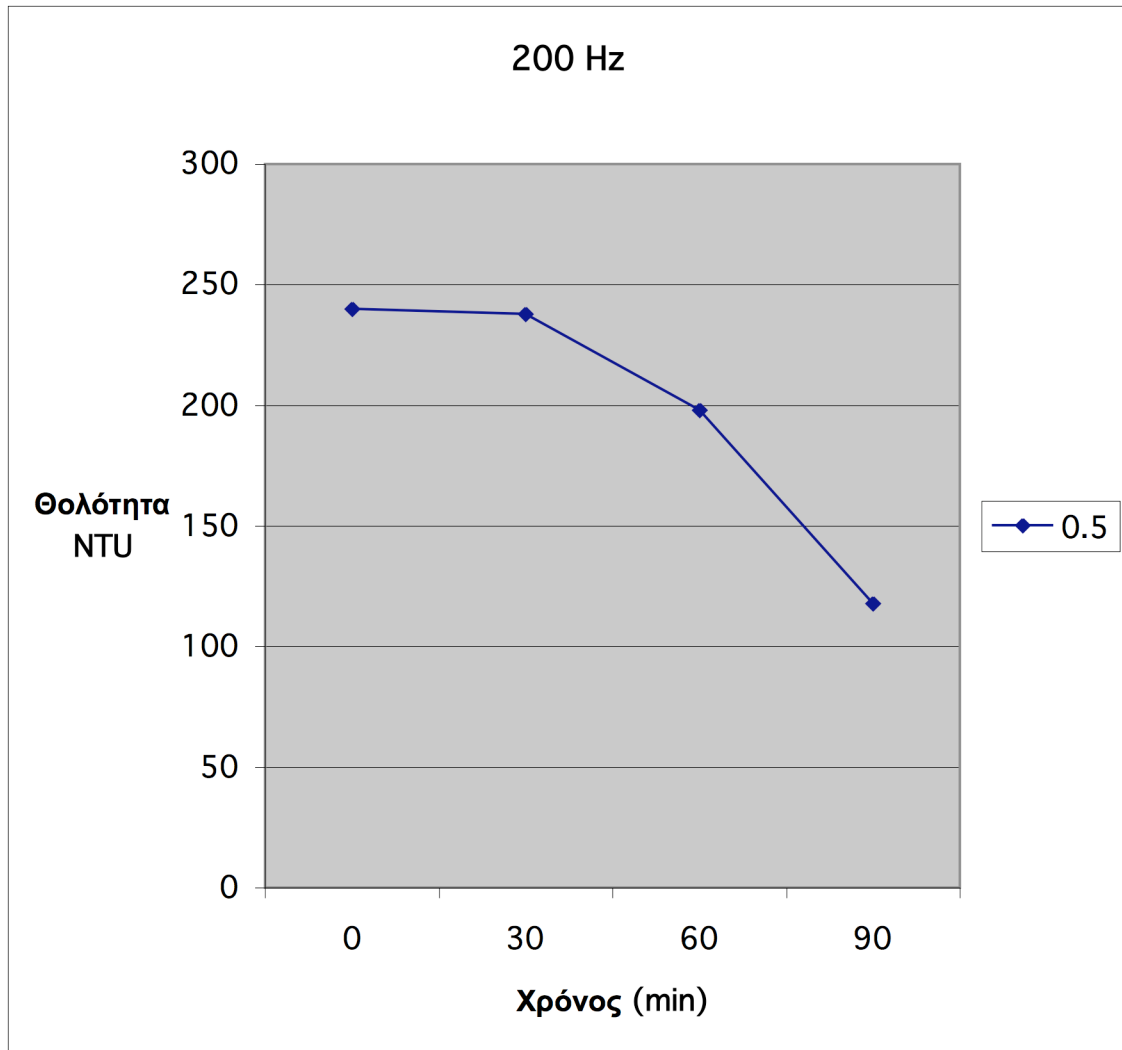
Εδώ η βέλτιστη λύση είναι τα 1 V. Επίσης παρατηρούμε ότι για χρόνο 0-30 min η αποτελεσματικότητα των δύο τάσεων είναι παρόμοια, για χρόνο 30-60 min τα 0,5 V είναι πιο αποτελεσματικά ενώ στο τέλος δηλαδή 60-90 min τα 1 V είναι πιο αποτελεσματικά, κάτι το οποίο δεν έχει συμβεί σε καμία από τις προηγούμενες συχνότητες.



Σχήμα 6.5 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 100 Hz

Παρατηρήσεις

Η βέλτιστη τάση είναι τα 1 V. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η αποτελεσματικότητα μέχρι χρόνο 60 min είναι ελάχιστη για χρόνο 60-90 min η κλίση της ευθείας είναι πολύ μεγάλη δηλαδή η αποτελεσματικότητα είναι μεγάλη.



Σχήμα 6.6 Πειράματα υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων συχνότητας 200 Hz

Παρατηρήσεις

Η βέλτιστη τάση είναι τα 0,5 V. Δυστυχώς η συγκεκριμένη συχνότητα δεν μπορεί να σχολιαστεί εκτενέστερα καθώς δεν υπάρχει άμεση σύγκριση με άλλες τάσεις λόγω μη αντοχής της πειραματικής διάταξης όπως έχουμε ήδη προαναφέρει.

6.10 Τελικά συμπεράσματα

Όπως βλέπουμε από τα πειράματα που προηγήθηκαν ο συνδυασμός των 36,6 Hz με 5,6 V είναι με διαφορά ο αποδοτικότερος. Ακόμα πιο

σημαντικό όμως είναι ότι ο αμέσως επόμενος καλύτερος συνδυασμός είναι περίπου 50% λιγότερο αποδοτικός. Επίσης είναι πολύ σημαντικό ότι και στις τρεις χρονικές περιόδους η ευθεία έχει μεγάλη κλίση δηλαδή ο συνδυασμός λειτουργεί τόσο κατά την διάρκεια των ακουστικών κυμάτων όσο και κατά την διάρκεια της καθίζησης. Ακόμα και η οπτική παρατήρηση κατά την εκτέλεση του πειράματος ήταν εντυπωσιακή αφού ο σχηματισμός θρόμβων ήταν φανερός και το μέγεθος των θρόμβων πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο πείραμα.

Έχοντας πλέον στα χέρια μας τη βέλτιστη λύση που ψάχναμε, μπορούμε να προχωρήσουμε σε περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου αλλάζοντας άλλες παραμέτρους όπως ο χρόνος επιρροής των ακουστικών ή εφαρμόζοντας συνδυασμούς δύο ή ακόμα και τριών συχνοτήτων μεταβάλλοντας ή όχι την τάση.

Ένα άλλο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι το κατά πόσο το σχήμα και το μέγεθος της δεξαμενής επηρεάζει το αποτέλεσμα.

Τέλος θα διερευνήσουμε το κατά πόσο ο συνδυασμός ακουστικών κυμάτων και ανάδευσης είναι αποδοτικός.

Τα παραπάνω ερωτήματα θα απαντηθούν στα παρακάτω κεφαλαία με την παρουσίαση κατάλληλων πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ

7.1 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων

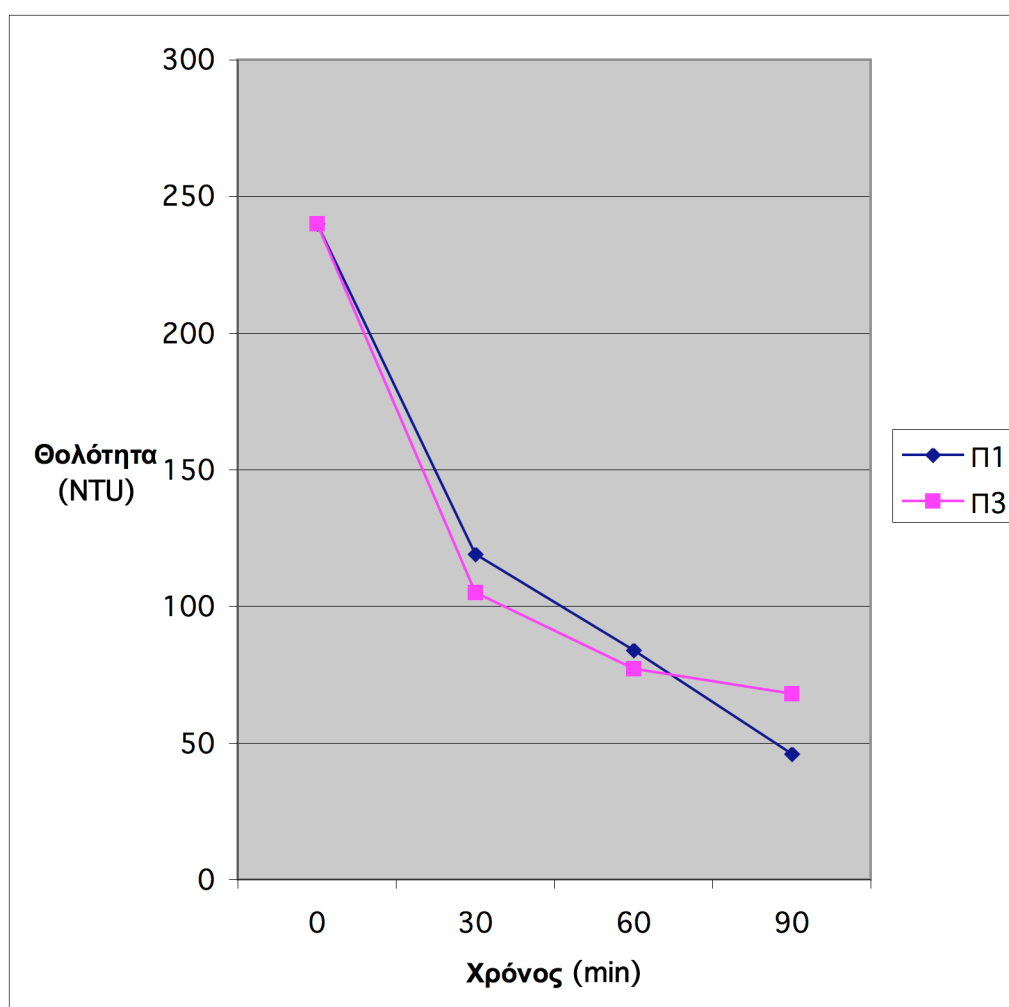
Πίνακας 7.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων μεταβλητής συχνότητας και πίεσης.

	Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Θολότητα NTU			pH
		Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B		t=0	t=30	t=60	
Π1	36,6	5,6 0,5	91 17	113,97 11,39	2,23 0,41	0-10 10-30	119	84	46	7,15
Π2	20	5,6 0,5	60 14	113,97 11,39	1,47 0,34	0-15 15-30	105	69	54	7,4
Π3	20	5,6 0,5	60 14	113,97 11,39	1,47 0,34	0-10 10-30	105	77	68	7,1
Π4	20	5,6 0,5	60 14	113,97 11,39	1,47 0,34	0-5 5-15	218	152	108	7,1
Π5	36,6 20	5,6 0,5	120 6,5	113,97 11,39	2,94 0,15	0-10 10-30	199	140	110	7
Π6	100 36,6 20	1,8 5,6 0,5	42 10 5	41 113,97 11,39	1,03 0,24 0,12	0-10 10-20 20-30	207	84	67	7

7.2 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Παρατήρηση

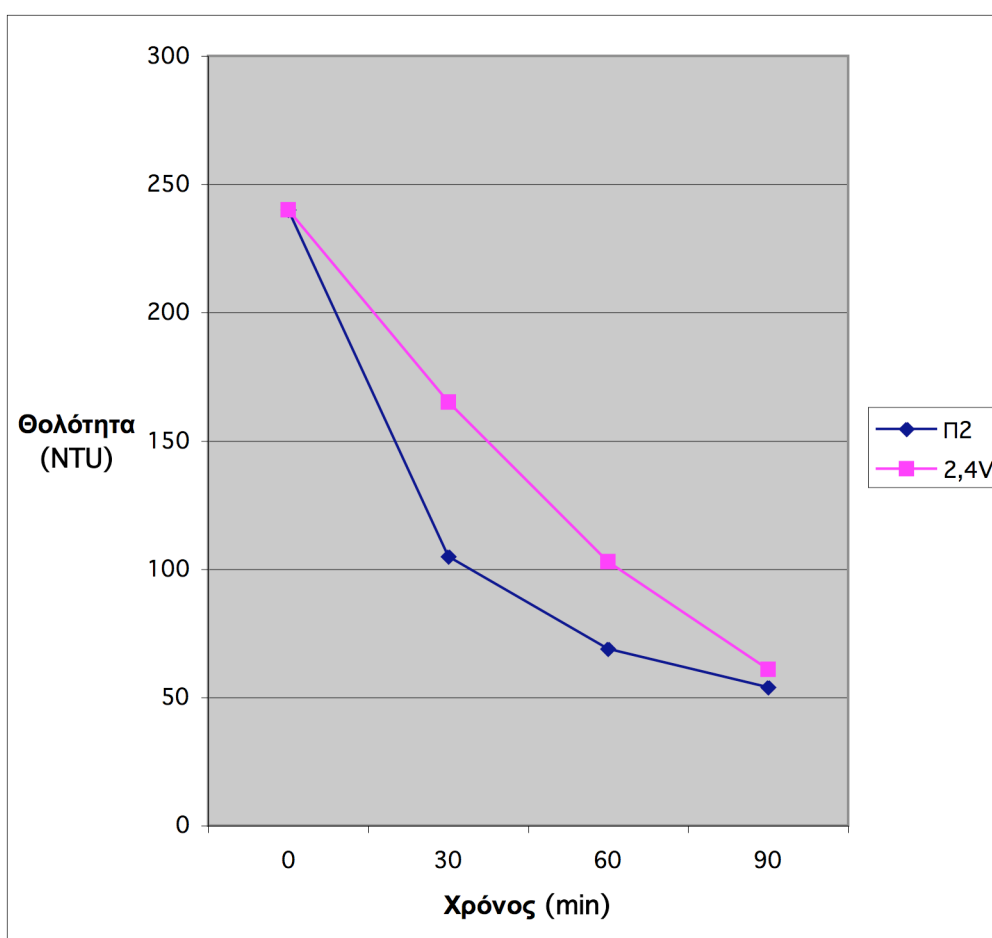
Αναλύοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων Π1 και Π3 παρατηρούμε καλύτερη απόδοση του συνδυασμού Π3 για χρόνο 0-30 min ενώ ο συνδυασμός του Π1 είναι αποδοτικότερος για χρόνο 30-90 min. Σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι να δούμε ποια από τις συχνότητες 20 Hz και 36,6 Hz είναι αποδοτικότερη στον συγκεκριμένο συνδυασμό τάσεων στον ίδιο χρόνο.



Σχήμα 7.1 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Π1 και Π3

Παρατήρηση

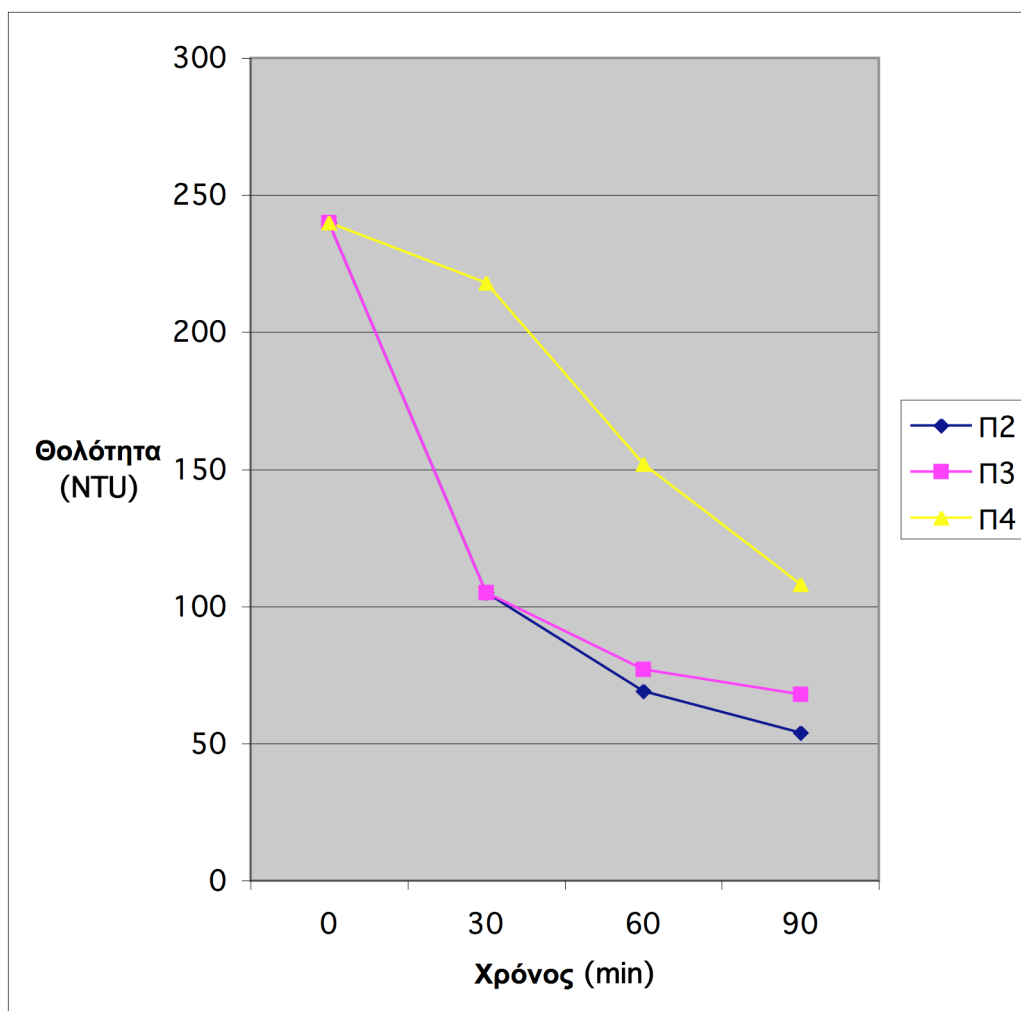
Μια πολύ σημαντική παρατήρηση φαίνεται συγκρίνοντας το πείραμα Π2 με το πείραμα εύρεσης της βέλτιστης τάσης του προηγούμενου κεφαλαίου. Είχαμε τότε υπολογίσει ως βέλτιστη τάση για τα 20 Hz τα 2,4 V, ενώ οι τάσεις 0,5 V και 5,6 V δεν αποδείχτηκαν τόσο αποδοτικές. Κατά περίεργο όμως τρόπο ο συνδυασμός των τάσεων 0,5 V και 5,6 V δίνει καλύτερο τελικό αποτέλεσμα από την βέλτιστη τάση 2,4 V. Αυτό το συμπέρασμα δικαιολογεί την απόφαση μας να μελετήσουμε την αποτελεσματικότητα της επιβολής όχι μιας αλλά περισσότερων τάσεων.



Σχήμα 7.2 Γραφική παράσταση πειράματος Π2

Παρατήρηση

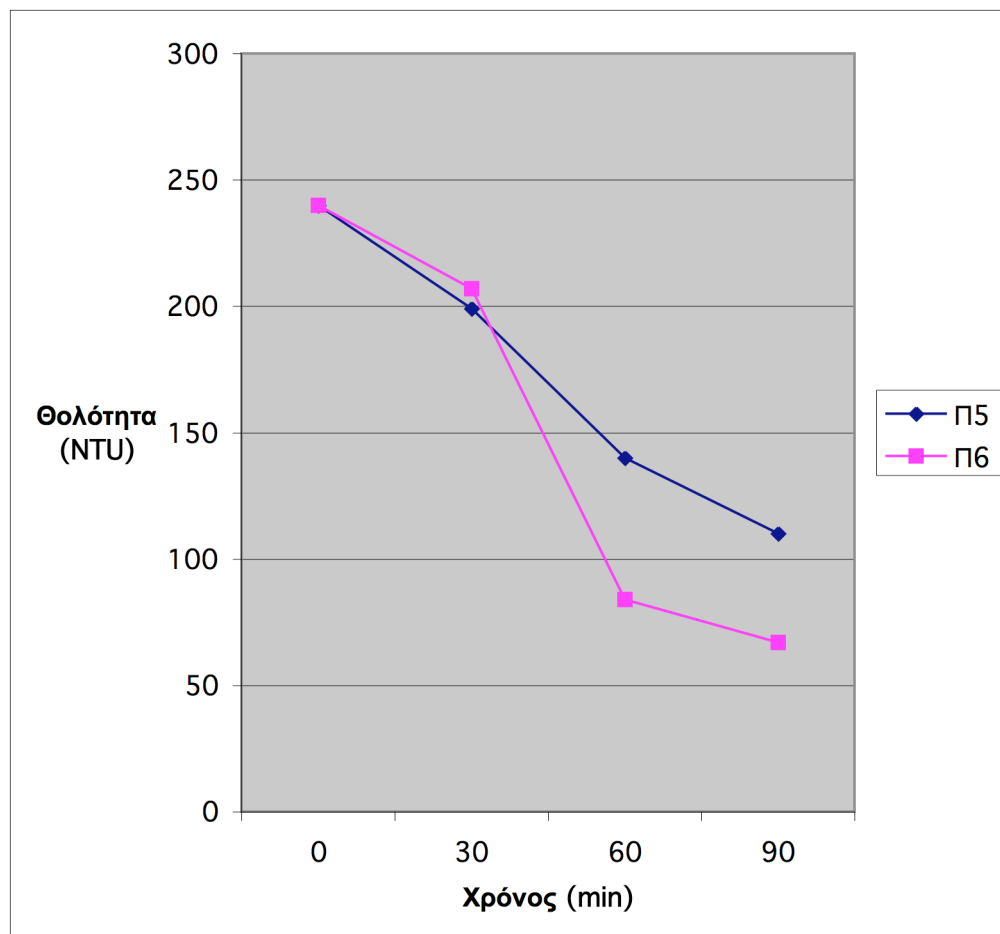
Η επόμενη σύγκριση πειραμάτων έχει ως σκοπό να διερευνήσουμε την παράμετρο του χρόνου και να δούμε αν και πόσο επηρεάζει το αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό κρατάμε σταθερό τον συνδυασμό συχνότητας – τάσεων και μεταβάλλουμε μόνο το χρόνο. Τα αντίστοιχα πειράματα είναι τα Π2, Π3, Π4. Είναι γνωστό ότι ο χρόνος επηρεάζει το αποτέλεσμα και πιο συγκεκριμένα όσο αυξάνεται ο χρόνος τόσο βελτιώνεται το αποτέλεσμα. Επίσης για σταθερό χρόνο για να οδηγηθούμε στη βέλτιστη λύση μοιράζουμε το χρόνο μεταξύ των δυο τάσεων δηλαδή 15 min στα 5,6 V και 15 min στα 0,5 V εάν αναφερόμαστε σε συνολικό χρόνο επιρροής ακουστικών 30 min.



Σχήμα 7.3 Γραφική παράσταση πειραμάτων Π2, Π3 και Π4

Παρατήρηση

Θέλοντας να μελετήσουμε τώρα τον πιο πολύπλοκο συνδυασμό όπου μεταβάλουμε και τις συχνότητες και τις τάσεις, διενεργούμε τα πειράματα Π5 και Π6. Παρατηρούμε ότι η επιβολή μιας μεγάλης συχνότητας στην αρχή του πειράματος βοηθά στον σχηματισμό θρόμβων με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη μείωση της τελικής θολότητας.



Σχήμα 7.4 Γραφική παράσταση πειραμάτων Π5 και Π6

8.ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΠΑΥΣΕΙΣ

8.1 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων

Πίνακας 8.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων μεταβλητής συχνότητας και πίεσης με ενδιάμεσες παύσεις.

	Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Θολότητα NTU			pH
		Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B		t=0	t=30	t=60	
Σ1	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	0-10 10-12	185	71	46	7,33
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	12-15				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	15-16,5				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	16,5-19				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	19-20,5				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	20,5-23				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	23-24,5				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	24,5-27				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	27-28,5				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	28,5-30				
Σ2	36,6 #####	5,6 #####	91 ###	113,97 #####	2,23 #####	0-5 5-10	195	108	58,5	7,25
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	10-15				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	15-20				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	20-25				
	36,6 #####	5,6 #####	91 #####	113,97 #####	2,23 #####	25-30				

Σ3	20	5,6	60	113,97	1,47	0-5	172	119	84	7,06
	#####	#####	#####	#####	#####	5-10				
	20	5,6	60	113,97	1,47	10-15				
	#####	#####	#####	#####	#####	15-20				
	20	5,6	60	113,97	1,47	20-25				
#####	#####	#####	#####	#####	25-30					
Σ4	36,6	5,6	91	113,97	2,23	0-5	181	110	67	7,08
	#####	#####	#####	#####	#####	5-10				
	36,6	5,6	91	113,97	2,23	10-15				
	#####	#####	#####	#####	#####	15-20				
	20	5,6	60	113,97	1,47	20-25				
#####	#####	#####	#####	#####	25-30					
Σ5	36,6	5,6	91	113,97	2,23	0-2	213	116	83	7,27
	#####	#####	###	#####	#####	2-9				
	36,6	5,6	91	113,97	2,23	9-12				
	#####	#####	#####	#####	#####	12-19				
	36,6	5,6	91	113,97	2,23	19-22				
	#####	#####	#####	#####	#####	22-27				
36,6	5,6	91	91	2,23	27-30					

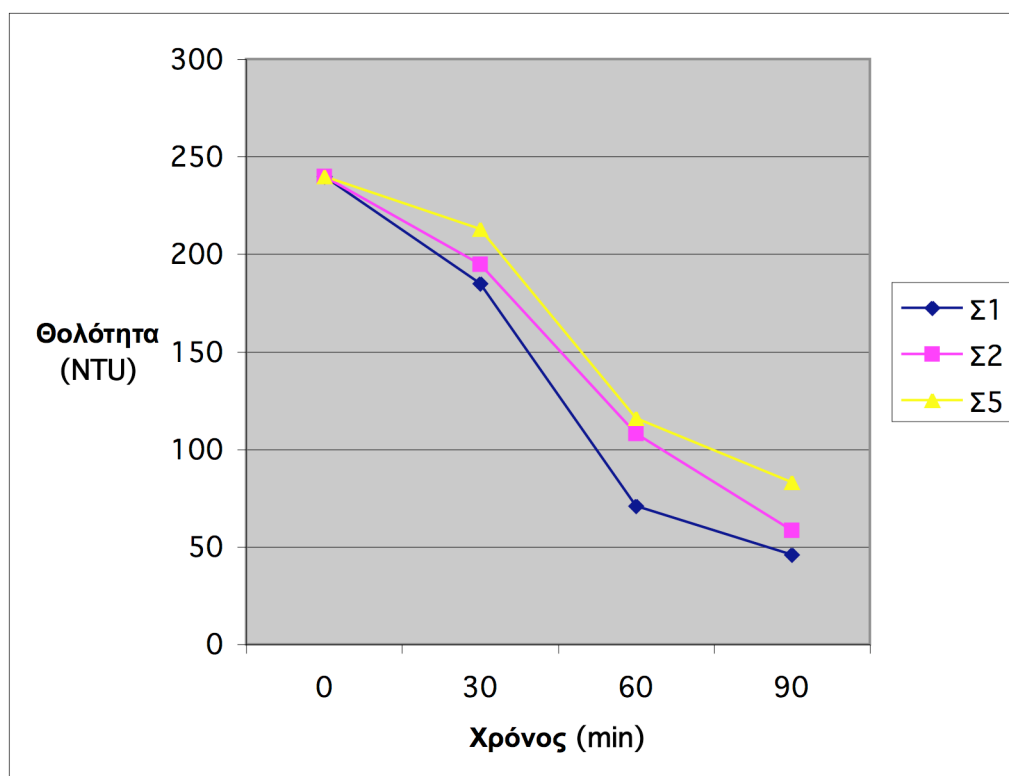
Σημείωση Με τον συμβολισμό «#####» απεικονίζουμε την παύση επιβολής ακουστικών κυμάτων.

8.2 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Παρατήρηση

Θέλοντας να μελετήσουμε την επιρροή του χρόνου των παύσεων διενεργούμε τα πειράματα Σ1, Σ2, Σ5. Στα πειράματα αυτά κρατάμε σταθερή την συχνότητα και την τάση επιλέγοντας την βέλτιστη λύση και μεταβάλλουμε μόνο το χρόνο. Στο πείραμα Σ1 αφήνουμε για ένα μεγάλο διάστημα να δράσουν τα ακουστικά κύματα και μετά εναλλάσσουμε την χρήση ακουστικών κυμάτων και τις παύσεις για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Στο πείραμα Σ2 εναλλάσσουμε την χρήση ακουστικών κυμάτων και παύσεων με σταθερό ρυθμό και για μεσαία χρονικά διαστήματα. Τέλος στο πείραμα Σ5 αφήνουμε για μικρά χρονικά διαστήματα την χρήση ακουστικών κυμάτων και για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάνουμε παύση στη συσκευή. Όπως παρατηρούμε από

τα αποτελέσματα αλλά και από την παρακάτω γραφική παράσταση το πείραμα Σ1 παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση, ενώ αρκετά καλά αποτελέσματα παρουσιάζει και το πείραμα Σ2. Αντίθετα το πείραμα Σ5 δηλαδή η χρήση μεγάλων παύσεων δεν έχει ιδιαίτερα αποτελέσματα στην βελτίωση της θολότητας. Παρατηρούμε επίσης ότι ο αντίστοιχος συνδυασμός συχνότητας και τάσης χωρίς ενδιάμεσες παύσεις έχει καλύτερα αποτελέσματα από το πείραμα Σ1, δηλαδή οι ενδιάμεσες παύσεις δεν βελτιώνουν περαιτέρω την θολότητα. Το ίδιο συμπέρασμα βγάζουμε και αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του πειράματος Σ3 με το αντίστοιχο πείραμα χωρίς παύσεις (20 Hz και 5,6 V).



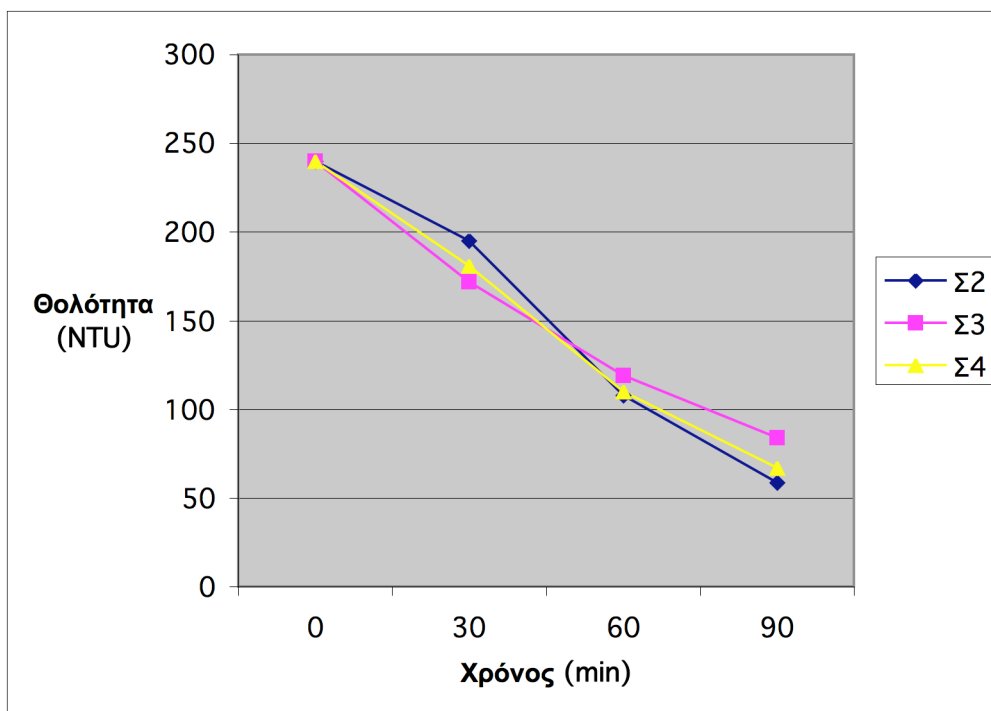
Σχήμα 8.1 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Σ1, Σ2 και Σ3

Παρατήρηση

Θέλοντας να διερευνήσουμε τώρα την επιρροή της συχνότητας στα πειράματα με ενδιάμεσες παύσεις διενεργούμε τα πειράματα Σ2, Σ3, Σ4, όπου

μεταβάλλουμε την παράμετρο της συχνότητας και κρατάμε σταθερό τον χρόνο ακουστικών κυμάτων όσο και των παύσεων καθώς και την τάση.

Στο πείραμα Σ2 επιλέγουμε συχνότητα ίση με 36,6 Hz , στο πείραμα Σ3 συχνότητα ίση με 20 Hz, ενώ στο Σ4 επιλέγουμε 36,6 Hz για τις χρονικές περιόδους 0-5 min και 10-15 min ενώ στην περίοδο 20-25 min επιλέγουμε συχνότητα ίση με 20 Hz. Παρατηρούμε ότι η συχνότητα των 36,6 Hz φέρνει τα καλύτερα αποτελέσματα όπως άλλωστε συνέβη και στα πειράματα χωρίς παύσεις. Όσο περισσότερο χρησιμοποιούμε συχνότητα διαφορετική της βέλτιστης, τόσο λιγότερο αποδοτικά αποτελέσματα εμφανίζονται. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη συχνότητα που είχαμε υπολογίσει για πειράματα χωρίς παύσεις εξακολουθεί να είναι βέλτιστη και για τα πειράματα με ενδιάμεσες παύσεις.



Σχήμα 8.2 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων Σ1, Σ2 και Σ3

9. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΑΚΟΛΟΥΘΗ ΕΠΙΒΟΛΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ

9.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Με μια μάτια στα προηγούμενα πειράματα βλέπουμε ότι αν και έχουμε καταφέρει να μειώσουμε αρκετά την θολότητα δεν έχουμε φτάσει σε επιθυμητό σημείο ώστε να θεωρείται η μέθοδος μας επιτυχής. Για να είμαστε ακριβείς η χαμηλότερη θολότητα που έχουμε πετύχει με τη χρήση μόνο ακουστικών κυμάτων είναι 33 NTU ενώ με την χρήση ανάδευσης έχουμε φτάσει σε τιμή θολότητας ίσης με 2,75 NTU.

Η παραπάνω διαπίστωση μας οδήγησε στον σχεδιασμό μιας νέας σειράς πειραμάτων που θα καλύπτουν και την περίπτωση του συνδυασμού ακουστικών κυμάτων και ανάδευσης. Στα πειράματα αυτά κρατάμε σταθερές τις παραμέτρους της συχνότητας και της τάσης και μεταβάλλουμε τον χρόνο επιρροής ακουστικών κυμάτων για τον ίδιο χρόνο ανάδευσης. Δηλαδή για τις περιπτώσεις των 5, 10, 15 min ανάμιξης μεταβάλλουμε τον χρόνο ακουστικών κυμάτων σε 2, 5, 10, 15 min. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δείγμα παραμένει το ίδιο δηλαδή 1,1 L από το Δ.ΚΒ και 8,8 ml $Al_2(SO_4)_3$.

Μια σημαντική λεπτομέρεια που πρέπει να προσέξουμε είναι το ύψος στο οποίο πρέπει να τοποθετήσουμε του αναδευτήρα στην συσκευή μας ώστε να έχουμε ακριβώς τις ίδιες συνθήκες με το test γυάλας. Στο test γυάλας το ύψος υγρού στο ποτήρι ζέσεως ήταν 11,1 cm και ο αναδευτήρας απείχε από τον πυθμένα του ποτηριού 6,1 cm. Στη δικιά μας δεξαμενή το ύψος του υγρού είναι 10,5 cm οπότε για να έχουμε τις ίδιες συνθήκες ρυθμίζουμε τον αναδευτήρα σε ύψος 5,77 cm από τον πάτο της δεξαμενής μας ($11,1/6,1=10,5/5,77$).

Στον Πίνακα 9.1 εμφανίζονται οι συνθήκες των πειραμάτων καθώς και τα αποτελέσματά τους.

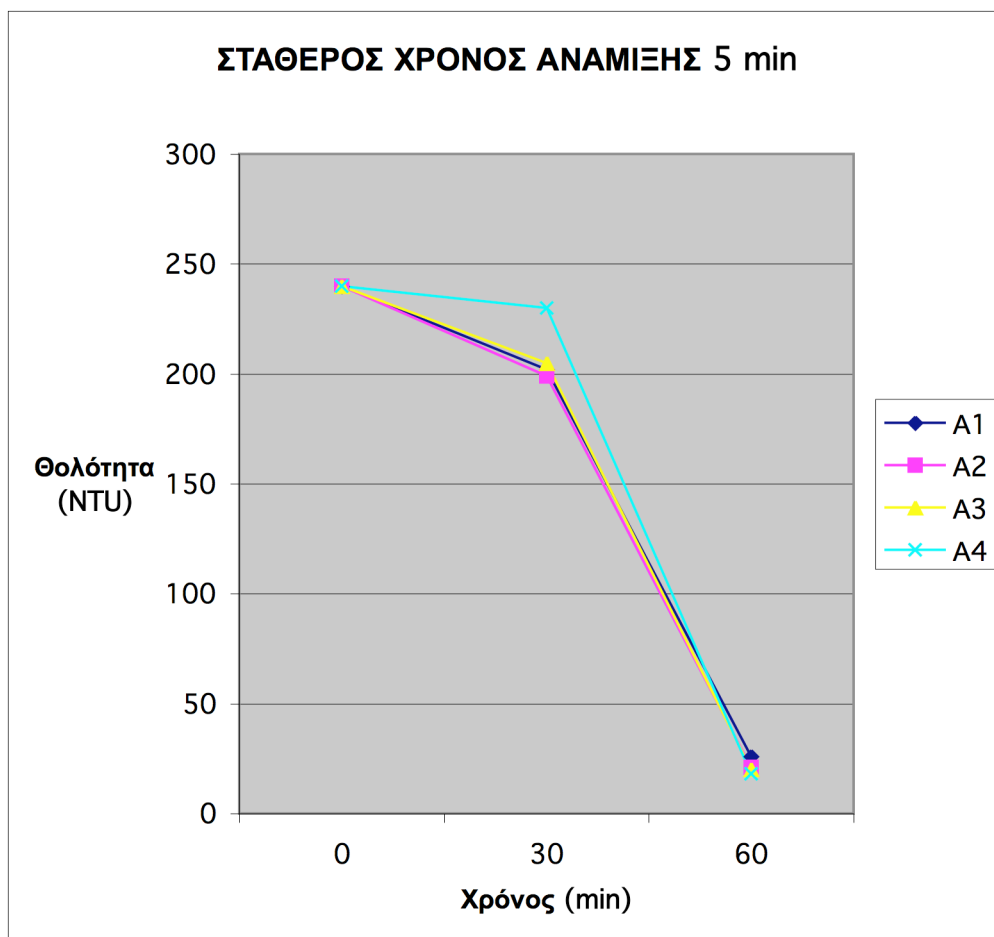
Πίνακας 9.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειράς πειραμάτων υπό επίδραση ακουστικών κυμάτων σταθερής συχνότητας και πίεσης και ακολούθως με επιβολή ανάδευσης.

	Συχνότητα Hz	Τάση		Πίεση kPa		Χρόνος εφαρμογής ακουστικών (min)	Χρόνος ανάδευσης (min)	Θολότητα (NTU)		pH
		Θέση A (V)	Θέση B (mV)	Θέση A	Θέση B			t=30	t=60	
A1	36,6	2,4	27	54,7	0,65	2	5	202	26	7,2
A2	36,6	2,4	27	54,7	0,65	5	5	199	21	7,2
A3	36,6	2,4	34	54,7	0,85	10	5	205	20	7,15
A4	36,6	2,4	40	54,7	0,97	15	5	230	18	7,13
A5	36,6	2,4	37	54,7	0,89	2	10	230	15,5	7,3
A6	36,6	2,4	35	54,7	0,85	5	10	230	17	7,35
A7	36,6	2,4	37	54,7	0,89	10	10	238	14	7,5
A8	36,6	2,4	37	54,7	0,89	15	10	238	11	7,5
A9	36,6	2,4	39	54,7	0,95	2	15	235	10	7,5
A10	36,6	2,4	39	54,7	0,95	5	15	238	11	7,3
A11	36,6	2,4	37	54,7	0,89	10	15	230	8	7,5
A12	36,6	2,4	37	54,7	0,89	15	15	239	6	7,6

9.2 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις με σταθερά αναφοράς την χρονική διάρκεια ανάμιξης

Παρατήρηση

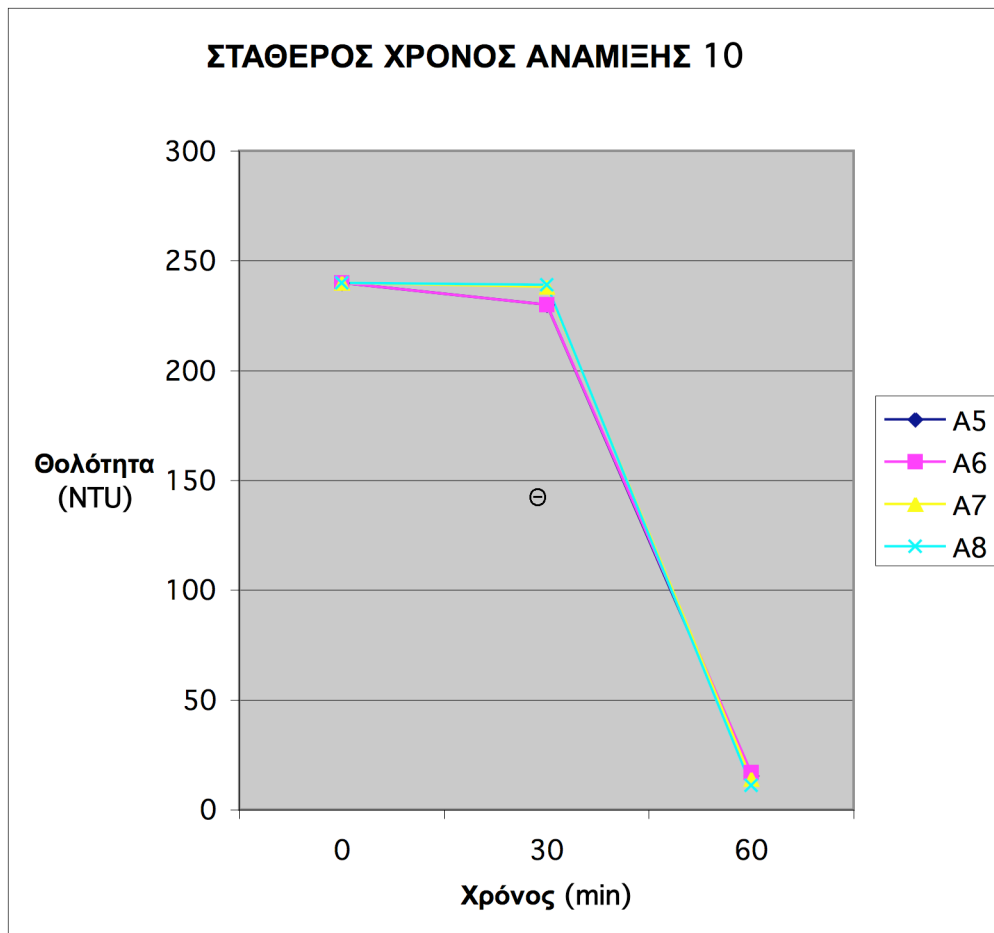
Παρατηρώντας την παρακάτω γραφική παράσταση βλέπουμε ότι για χρόνο ανάμιξης 5 min, ο βέλτιστος χρόνος ακουστικών είναι τα 15 min. Η θολότητα έχει πέσει στα 18 NTU και το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό. Αξιοσημείωτο είναι ότι ενώ τα 15 min είναι ο βέλτιστος χρόνος σε χρόνο 0-30 min δεν μειώνουν σχεδόν καθόλου την θολότητα.



Σχήμα 9.1 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων A1, A2, A3 και A4.

Παρατήρηση

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της παρακάτω γραφικής παράστασης βλέπουμε ότι για χρόνο ανάδευσης 10 min, ο βέλτιστος χρόνος επιρροής των ακουστικών κυμάτων είναι τα 15 min και μάλιστα η θολότητα έχει μειωθεί σε 11 NTU.

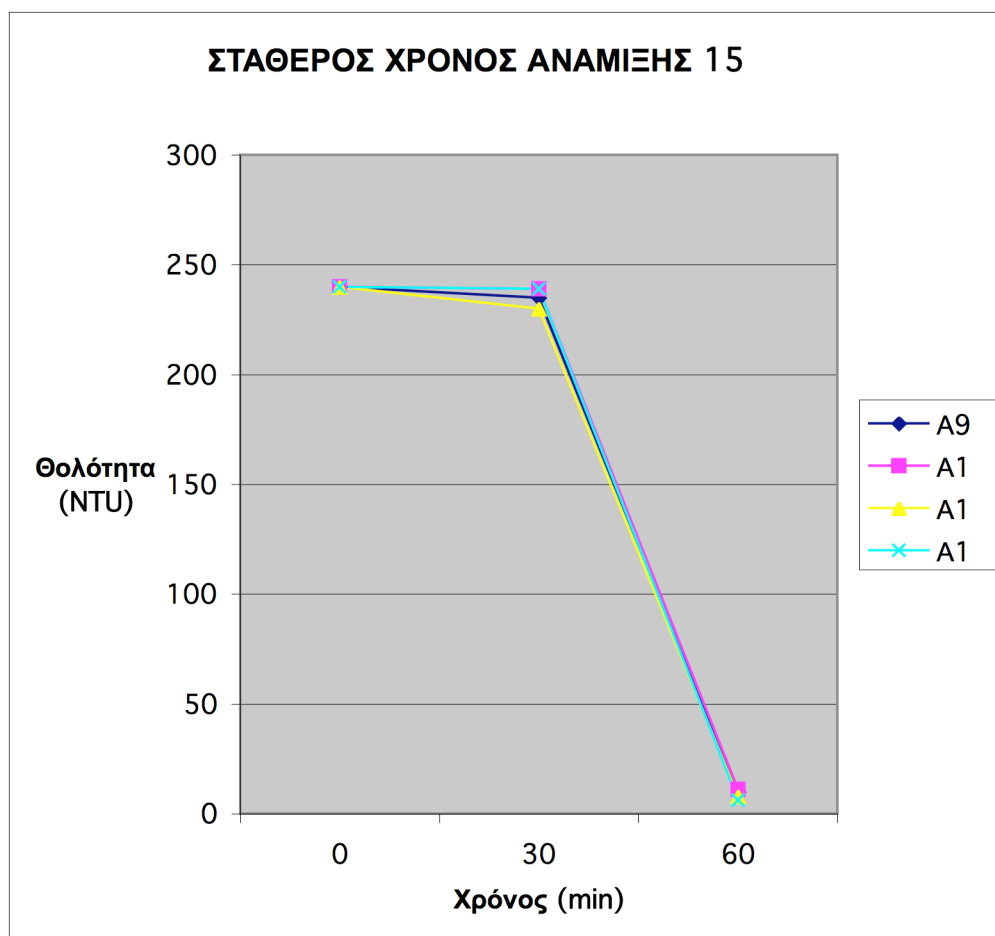


Σχήμα 9.2 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων A5, A6, A7 και A8.

Παρατήρηση

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της παρακάτω γραφικής παράστασης βλέπουμε ότι για χρόνο ανάμιξης 15 min, ο βέλτιστος χρόνος ακουστικών

κυμάτων είναι τα 15 min. Μάλιστα έχουμε μειώσει την θολότητα σε 6 NTU που πλησιάζει πολύ το όριο των 2,75 NTU που είχε τεθεί από το test γυάλας.



Σχήμα 9.3 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων A9, A10, A11 και A12

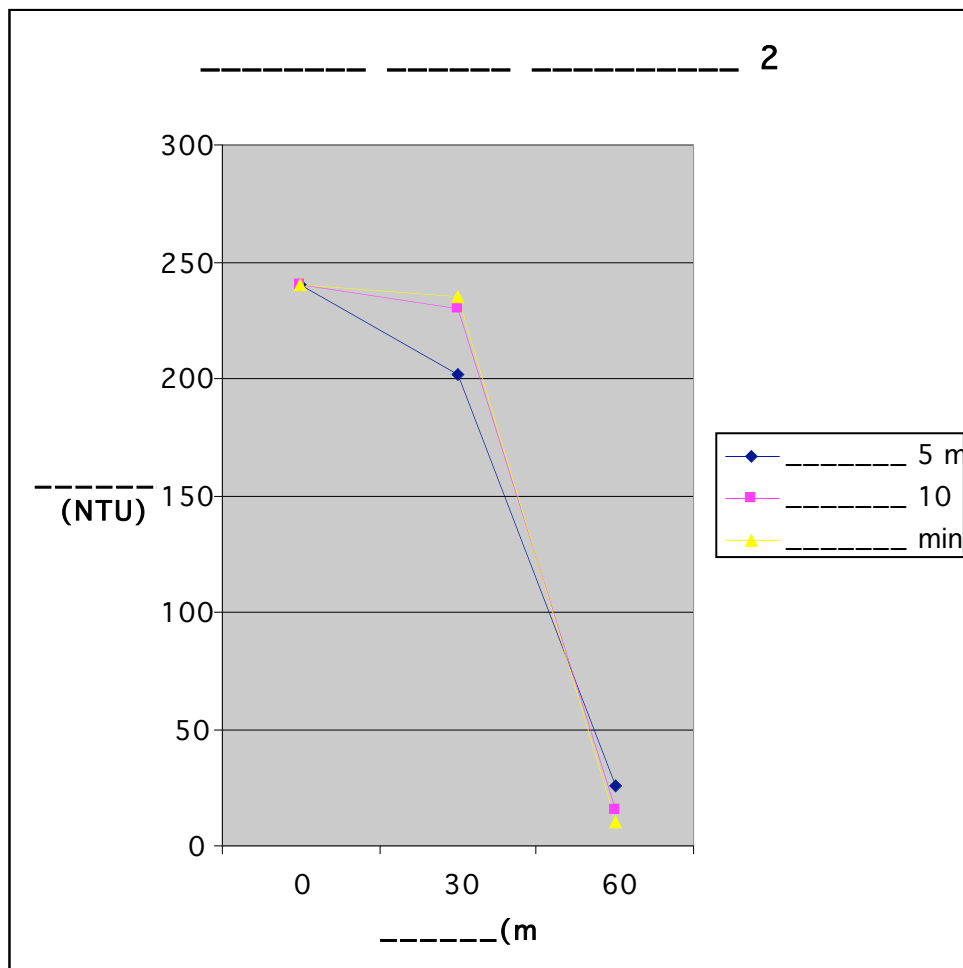
Συμπέρασμα

Βλέπουμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω, ο βέλτιστος χρόνος είναι τα 15 min. Όσο πιο μεγάλος δηλαδή ο χρόνος επιρροής ακουστικών κυμάτων τόσο πιο καλά αποτελέσματα παρατηρούμε.

9.3 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις με σταθερά αναφοράς την χρονική διάρκεια επιβολής ακουστικών κυμάτων

Παρατήρηση

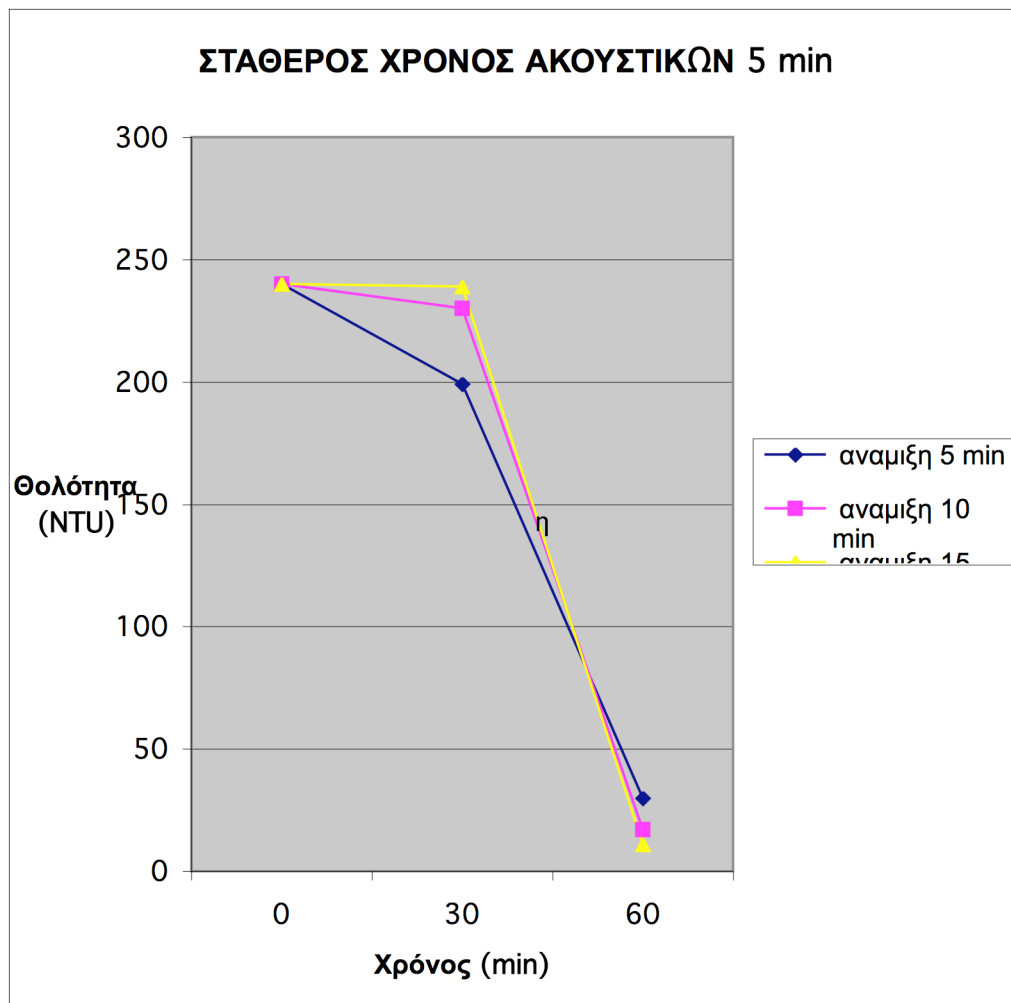
Αναλύοντας τα αποτελέσματα της παρακάτω γραφικής βλέπουμε ότι για χρόνο ακουστικών 2 min, ο βέλτιστος χρόνος ανάδευσης είναι τα 15 min.



Σχήμα 9.4 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων A1, A5 και A9

Παρατήρηση

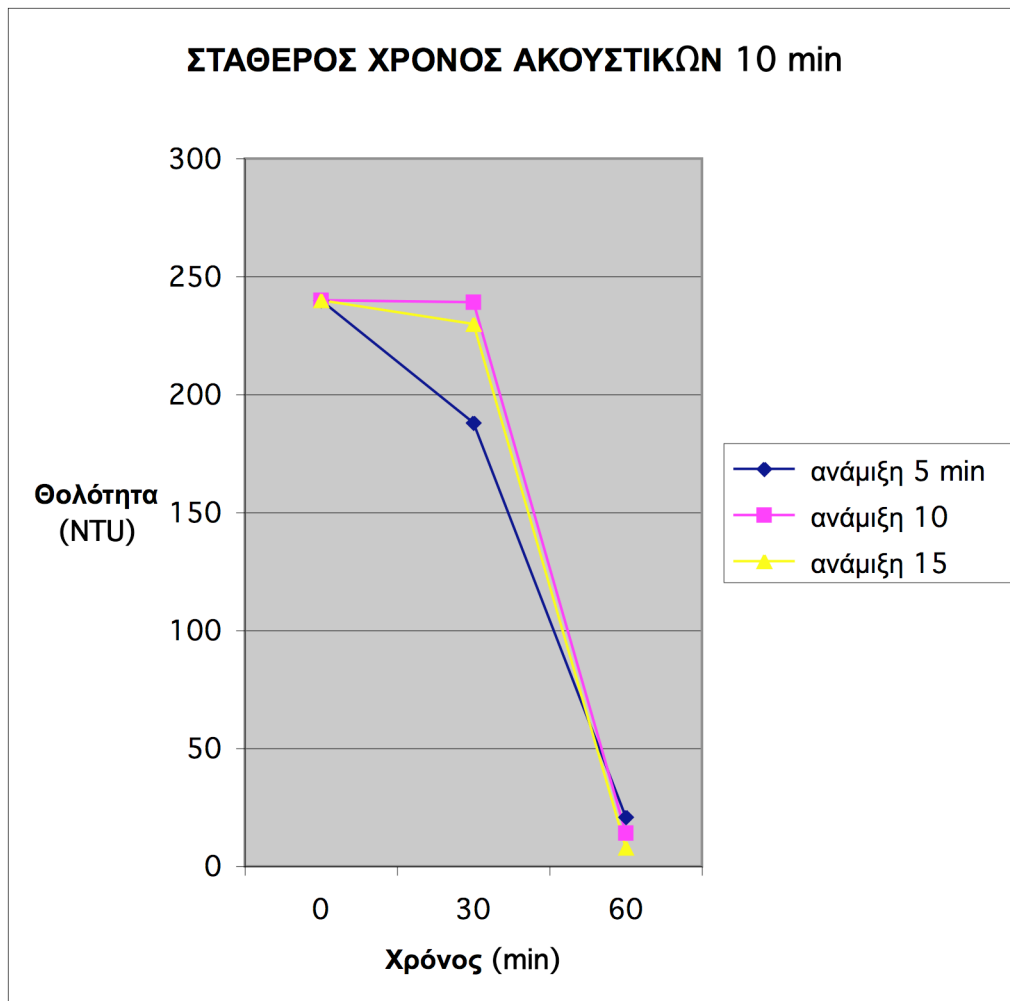
Βλέποντας τα αποτελέσματα της παρακάτω γραφικής παράστασης παρατηρούμε ότι για χρόνο ακουστικών 5 min, ο βέλτιστος χρόνος ανάδευσης είναι τα 15 min.



Σχήμα 9.5 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων A2, A6 και A10

Παρατήρηση

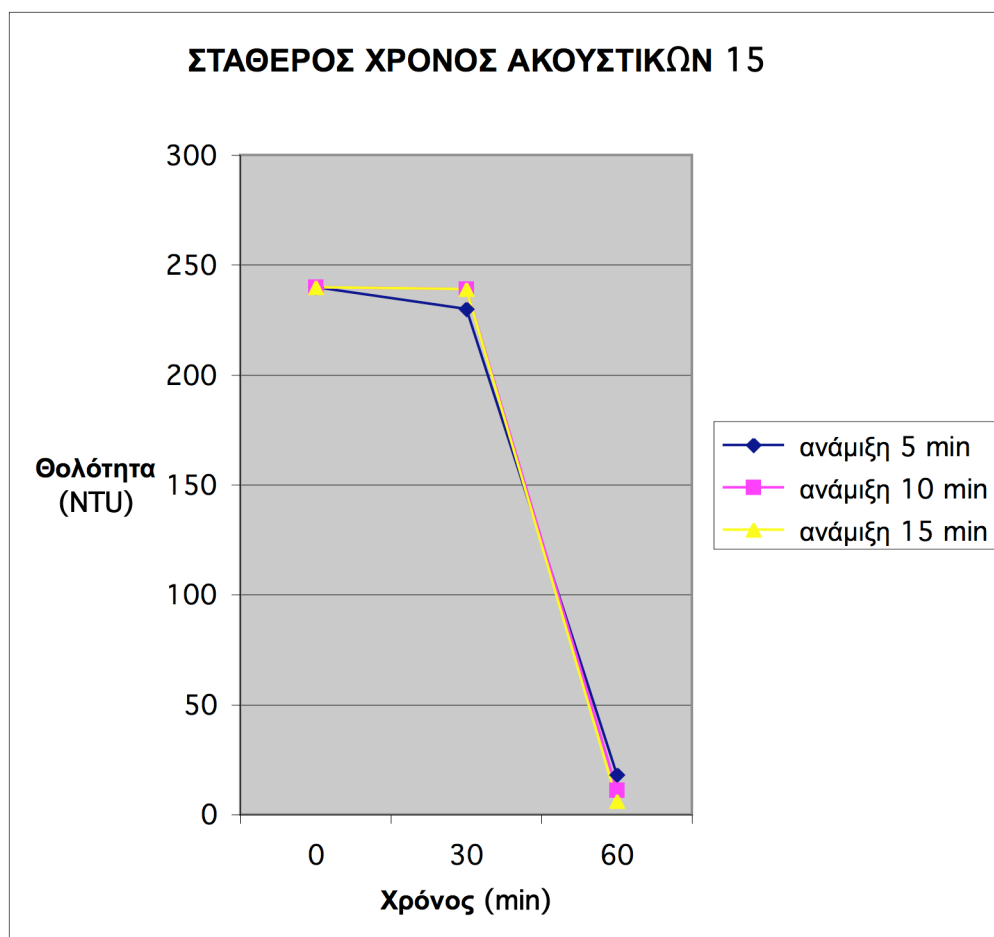
Βλέποντας τα αποτελέσματα της παρακάτω γραφικής παράστασης παρατηρούμε ότι για χρόνο ακουστικών 10 min, ο βέλτιστος χρόνος ανάδευσης είναι τα 15 min.



Σχήμα 9.6 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων A3, A7 και A11

Παρατήρηση

Βλέποντας τα αποτελέσματα της παρακάτω γραφικής παράστασης παρατηρούμε ότι για χρόνο ακουστικών 15 min, ο βέλτιστος χρόνος ανάδευσης είναι τα 15 min.



Σχήμα 9.7 Γραφικές παραστάσεις πειραμάτων A4, A8 και A12

Συμπέρασμα

Βλέπουμε ότι και στις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω, ο βέλτιστος χρόνος ανάδευσης είναι τα 15 min. Όσο πιο μεγάλος δηλαδή ο χρόνος ανάδευσης τόσο πιο καλά αποτελέσματα παρατηρούμε.

10.ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής προσπαθήσαμε να μελετήσουμε μια νέα μέθοδο για την βελτίωση της κροκίδωσης και τη μείωση της θολότητας. Η μέθοδος αυτή είναι η έκθεση του δείγματος σε ακουστικά κύματα. Η μέθοδος μας έχει να αντιπαρατεθεί με την κλασική μέθοδο της ανάδευσης που χρησιμοποιείται σήμερα.

Αρχικά προσπαθήσαμε να πειραματιστούμε κάνοντας χρήση ακουστικών κυμάτων χωρίς κροκιδωτικό. Τα αποτελέσματα όμως δεν ήταν ικανοποιητικά έτσι προσανατολιστήκαμε σε πειράματα κάνοντας χρήση κροκιδωτικού. Ο συνδυασμός ακουστικών και κροκιδωτικού είχε πολύ καλά αποτελέσματα και αυτό μας οδήγησε στο σχεδιασμό κάποιων νέων σειρών πειραμάτων με σκοπό να διερευνήσουμε τις διάφορες παραμέτρους που εμπλέκονται στα πειράματα μας. Οι παράμετροι αυτές είναι ο χρόνος, η συχνότητα και η τάση.

Συνδυάζοντας κάποιες αντιπροσωπευτικές συχνότητες με κάποιες αντιπροσωπευτικές τάσεις οδηγηθήκαμε στον βέλτιστο συνδυασμό δηλαδή τον συνδυασμό εκείνο που θα αποφέρει την μέγιστη μείωση της θολότητας. Ο συνδυασμός αυτός είναι συχνότητα 33,6 Hz και τάση 5,6 V, ο οποίος μετά από 30 min επιβολής ακουστικών κυμάτων και 60 min καθίζησης μειώνει την θολότητα από 240 NTU σε 33 NTU.

Αν και το αποτέλεσμα του παραπάνω συνδυασμού είναι πολύ ικανοποιητικό θέλαμε να εξαντλήσουμε κάθε πιθανό περιθώριο για περαιτέρω μείωση της θολότητας. Για τον σκοπό αυτό θα δοκιμάσουμε δυο νέες μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος αναφέρεται στον συνδυασμό διαφορετικών συχνοτήτων και τάσεων και η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται στο συνδυασμό ακουστικών κυμάτων και ενδιάμεσων παύσεων. Αν και οι δυο μέθοδοι είχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα καμία από τις δυο δεν κατάφερε να επιφέρει περαιτέρω μείωση της θολότητας κάτω από τα 33 NTU.

Θέλοντας να έχουμε μια εικόνα για το πόσο η μέθοδος μας είναι επιτυχημένη διενεργήσαμε πειράματα στα οποία το δείγμα αναδεύτηκε για διάφορους χρόνους και μετά το αφήσαμε να καθιζάνει για 30 min. Τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά και η θολότητα έφτασε στα 2,75 NTU. Με

σκοπό να πλησιάσουμε την παραπάνω θολότητα σχεδιάσαμε μια νέα σειρά πειραμάτων στην οποία τα ακουστικά κύματα συνδυάζονται με την μέθοδο της ανάδευσης. Μετά το πέρας των πειραμάτων αυτών εντοπίσαμε τον βέλτιστο συνδυασμό ο οποίος είναι 15 min ακουστικά κύματα και 15 min ανάδευσης με περαιτέρω καθίζηση 30 min. Παραπάνω συνδυασμός μειώνει την θολότητα σε 6 NTU και πλησιάζει την ιδανική τιμή των 2,75 NTU.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η επιβολή ακουστικών κυμάτων σε συνδυασμό με την ανάδευση έχει εντυπωσιακά αποτελέσματα στη μείωση της θολότητας.

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα που δημιουργείται είναι το πώς θα μπορούσαμε να βελτιώσουμε τα πειράματα ώστε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε ήταν ότι σε υψηλές συχνότητες και τάσεις τα πειράματα ήταν αδύνατο να εκτελεστούν λόγω πολύ μεγάλων δονήσεων που θέτανε σε σοβαρό κίνδυνο την πειραματική διάταξη και κυρίως την δεξαμενή πειραμάτων. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια μεταλλική δεξαμενή η οποία θα ήταν σαφώς πιο ανθεκτική στις δονήσεις με αποτέλεσμα να μπορέσουμε να επιβάλουμε μεγαλύτερες συχνότητες και τάσεις και να έχουμε μια εικόνα για το πώς συμπεριφέρεται το δείγμα μας σε τέτοιες συνθήκες. Δεν αποκλείεται η επιβολή μιας μεγάλης συχνότητας και τάσης να βοηθούσε στην δημιουργία θρόμβων οπότε να παρατηρούσαμε μεγαλύτερη μείωση της θολότητας.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που θα μπορούσαμε να αλλάξουμε ώστε να έχουμε πιο αξιόπιστα συμπεράσματα είναι το μέγεθος και το σχήμα της δεξαμενής. Εάν δηλαδή οι διαστάσεις ήταν μεγαλύτερες τότε σίγουρα θα είχαμε μεγαλύτερη απώλεια ακουστικού κύματος στο τέλος της δεξαμενής με πιθανή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Θα μπορούσαμε εάν κάποια από τις διαστάσεις ήταν αρκετά μεγάλη να τοποθετούσαμε και έναν ενδιάμεσο αισθητήρα ώστε να μελετούσαμε την απώλεια πίεσεως και σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο.

Ακόμα μια παράμετρος την οποία κρατήσαμε σταθερή σε όλα τα πειράματα είναι η γωνία επιβολής των ακουστικών κυμάτων. Είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος την οποία εάν αλλάζαμε θα μπορούσαμε να είχαμε εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα. Θα μπορούσαμε να επιβάλουμε

ακουστικά κύματα σε δύο κατευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους ή σε κατευθύνσεις που βρίσκονται υπό γωνία. Ίσως η ταυτόχρονη αυτή χρήση να επέφερε καλύτερα τελικά αποτελέσματα και μεγαλύτερη μείωση της θολότητας.

Στο συγκεκριμένο πείραμα πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί με την επιλογή του δείγματος. Το δείγμα πρέπει να δημιουργείται από απιονισμένο νερό και από κάποιο αργιλώδες υλικό ώστε να υπάρχει η δυνατότητα της δημιουργίας θρόμβων. Παρόλα αυτά θα μπορούσαμε να πειραματιστούμε και σε άλλα δείγματα αργιλικής σύστασης μεταβάλλοντας την περιεκτικότητα της αργίλου έτσι ώστε να έχουμε πιο αξιόπιστα συμπεράσματα.

Μεγάλη σημασία για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων έχει και η διατήρηση σταθερών κάποιων περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία του χώρου στον οποίο εκτελείται το πείραμα, η ελαχιστοποίηση τυχών θορύβων, η ελαχιστοποίηση των κραδασμών και ειδικά κατά την διάρκεια της καθίζησης καθώς και η υγρασία.

Η επίδραση των ακουστικών κυμάτων στη συσσωμάτωση και την ιζηματοποίηση των κολλοειδών είναι δεδομένη και αποδεικνύεται από τα πειράματα που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας. Για να φτάσουμε όμως στο επιθυμητό αποτέλεσμα απαιτείται ο σχεδιασμός νέων πειραμάτων τα οποία θα καλύπτουν μεταβολές στις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς και σε συνδυασμό αυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σκαρλάτος Δ., (2003), “*Εφαρμοσμένη Ακουστική*”, Φιλομάθεια
- Σκουλικίδης Θ., (1964), “*Φυσικοχημεία Ι₂*”, Αθήνα
- Τσώνης Σ.Π., (2003), “*Καθαρισμός Νερού*”, Παπασωτηρίου, Αθήνα
- Χρυσικόπουλος Κ.Β., (2005), “*Καθαρισμός Νερού*”, Τμήμα Εκτυπώσεων –
Τυπογραφείου Πανεπιστημίου Πατρών
- Κουζέλη – Κασίρη Α., (1996), “*Φυσικοχημική Επεξεργασία Αποβλήτων*”,
Σεμινάριο Επεξεργασίας και Διάθεσης Υγρών Βιομηχανικών
Αποβλήτων, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος
- American Water Works Association and Water Environment Federation,
(1999), “*Standard Methods for the Examination of Water and
Wastewater*”
- Chemical land 21, (2006), “*Kaolin*”
- Ohanian H., (1989); “*Μηχανική-Θερμοδυναμική (Τόμος Α)*”, Φιλλίπα, Α.,
Μετάφραση-Επιμέλεια, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991
- Rubio J. and Rosa J., (2005), “*The FF (flocculation-flotation) process*”,
Minerals Engineering 18, pp. 701-707
- Thomas J.M., (2005), “*Acoustically Enhanced Colloid Transport In Saturaded
Porous Media*”, Thesis, Civil Engineering, University of California
- Vogler E.T and Chrysikopoulos C.V., (2004), “*An Experimental Study of
Acoustically Enhanced NAPL Dissolution in Porous Media*”, AIChE
Journal Vol.50, No. 12