



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

**«Εγκατάσταση και λειτουργία πιλοτικής μονάδος διήθησης-
αμμοδιύλισης»**



Κατζουράκης Μιχαήλ

A.M 2000.05.0002

Εξεταστική επιτροπή: *Διαμαντόπουλος Ευάγγελος (επιβλέπων)*
Καρατζάς Γεώργιος
Μαντζαβίνος Διονύσιος

XANIA 2006

Περίληψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την εγκατάσταση και λειτουργία πιλοτικής μονάδας διήθησης (αμμοδιύλησης). Στόχος μας είναι η μείωση της θολότητας στην εκροή ενός βιολογικού καθαρισμού μέσω της διαδικασίας της διήθησης κόνισης και χρήση του μηχανισμού της κροκίδωσης.

Η κροκίδωση είναι μια διαδικασία με την οποία απομακρύνονται από το νερό τα αιωρούμενα κολλοειδή μόρια. Για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη η χρήση κάποιου κροκιδωτικού. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα κροκιδωτικά είναι τα άλατα αργιλίου και σιδήρου.

Στην πρώτη φάση της εργασίας σκοπός ήταν η εγκατάσταση της μονάδας. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί πολυστρωματική κλίνη αποτελούμενη από άμμο, λεπτόκοκκο χαλίκι και χονδρόκοκκο χαλίκι. Στη δεύτερη φάση προσομοιώθηκε η θολότητα ενός βιολογικού καθαρισμού με αιώρημα καολίνη και εν συνεχεία ακολούθησε διήθηση του αιωρήματος σε ρυθμούς 120 και 200 l/m² min με προσθήκη κροκιδωτικού (άλατα αργιλίου) 0, 0.1 και 0.5 mM

Από την πειραματική διαδικασία και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η μονάδα αποδίδει καλύτερα για συγκεντρώσεις κροκιδωτικού 0M και 0,1 mM για το ρυθμό διήθησης των 120 l/ m² min, ενώ για το ρυθμό των 200 l/ m² min η μονάδα αποδίδει βέλτιστα με χρήση 0,1 mM κροκιδωτικού

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Περιεχόμενα	3
Αντί Προλόγου	5
Κεφάλαιο 1— Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 2 — Θεωρητική Προσέγγιση	7
2.1 Αποσταθεροποίηση Αιωρημάτων (Κροκίδωση)	7
2.1.1 Σταθερότητα των κολλοειδών	9
2.1.2 Σταθεροποίηση των κολλοειδών	11
2.1.3 Αποσταθεροποίηση Κολλοειδών	16
2.1.3.1 Συμπίεση της διπλής στοιβάδας	17
2.1.3.2 Προσρόφηση και εξουδετέρωση των φορτίων	18
2.1.3.3 Παρασυρμός από ίζημα	20
2.1.3.4 Διασωματιδιακή γεφύρωση	22
2.2 Συσσωμάτωση	23
2.2.1 Μηχανισμοί Συσσωμάτωσης	24
2.3 Θολότητα	25
2.4 Διήθηση-Αμμοδιύλωση	26
2.4.1 Διαχωρισμός φίλτρων	26
2.4.2 Διηθητικά υλικά	27
2.4.3 Μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών	30
2.4.4 Υδραυλική του φίλτρου-Πτώση πίεσης	38
2.5 Αντικείμενο έρευνας	42
Κεφάλαιο 3— Πειραματικό Μέρος	43
3.1 Εξοπλισμός	43
3.1.1 Δοχείο δημιουργίας αιωρήματος	44
3.1.2 Ηλεκτρική αντλία	44
3.1.3 Ροόμετρο	45
3.1.4 Βαλβίδα ασφαλείας	45
3.1.5 Μανόμετρα	45
3.1.6 Κεφαλή μονάδος	45
3.1.7 Κύριο σώμα φίλτρου (φιάλη)	51
3.1.8 Σωληνώσεις	51
3.2 Εγκατάσταση	52
3.3 Επιλογή θολότητας αιωρήματος	53
3.4 Επιλογή παροχών διήθησης	53
3.5 Λειτουργία διήθησης	53
3.6 Λειτουργία αυτοκαθαρισμού	54
3.7 Εκτέλεση πειραμάτων	55

Κεφάλαιο 4 — Αποτελέσματα-Σύγκριση αποτελεσμάτων	56
4.1 Αποτελέσματα πτώσης πίεσης στο φίλτρο	56
4.2 Αποτελέσματα ρυθμού διήθησης 120 l/m ² min	58
4.2.1 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0 M	58
4.2.2 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,1 mM	60
4.2.3 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM	62
4.3 Αποτελέσματα ρυθμού διήθησης 200 l/m ² min	65
4.3.1 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0 M	65
4.3.2 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,1 mM	67
4.3.3 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM	71
4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	74
4.4.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων για ρυθμό διήθησης 120 l/m ² min.	74
4.4.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων για ρυθμό διήθησης 200 l/m ² min.	75
Κεφάλαιο 5— Συμπεράσματα και προτάσεις	76
5.1 Συμπεράσματα	76
5.2 Προτάσεις	77
Βιβλιογραφικές αναφορές	78
Παραρτήματα	80
Παράρτημα 1-Εργαστηριακή άσκηση διήθησης	80
Παράρτημα 2-Πίνακες πρωτογενών δεδομένων	83

Αντί Προλόγου

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα στη διπλωματική μου εργασία, καθηγητή κ. Διαμαντόπουλο Ευάγγελο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου τη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, καθώς και για την συμπαράσταση του καθ' όλη τη διάρκεια της.

Θέλω να ευχαριστήσω ακόμα την υπεύθυνη του εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Κουκουράκη Ελισάβετ, καθώς και όλους τους εργαζόμενους στο εργαστήριο, για την συμπαράσταση τους, το ευχάριστο και φιλικό κλίμα που δημιούργησαν.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την ηθική και οικονομική στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Κεφάλαιο 1— Εισαγωγή

Η ταχεία αύξηση του αστικού πληθυσμού που επήλθε μετά τη βιομηχανική επανάσταση οδήγησε στην εκτεταμένη ρύπανση του περιβάλλοντος και ειδικότερα των πόλεων. Η ρύπανση αυτή μπορεί να διαχωριστεί στη ρύπανση του εδάφους, του αέρα και των νερών. Για την αντιμετώπιση της είχαν και έχουν προταθεί παμπολλές μέθοδοι εξυγίανσης για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων και για την προστασία της δημόσιας υγείας.

Ειδικότερα στον τομέα των υγρών αποβλήτων ο άνθρωπος έχει εκδηλώσει τις ανησυχίες του από την αρχαιότητα με τα εκτεταμένα δίκτυα αποχέτευσης που είχε κατασκευάσει. Παρόλα αυτά η σύσταση των υγρών αποβλήτων έχει αλλάξει δραματικά.

Στα σημερινά υγρά απόβλητα μπορεί να υπάρχουν οργανικές ουσίες, πετρέλαιο, παθογενή μικροοργανισμοί, διάφορα άλατα, βαρέα μέταλλα, απορρίμματα και άλλα, τα οποία με χρήση των κατάλληλων μεθόδων μπορούν να απομακρυνθούν.

Υπάρχουν τόσο οργανοληπτικά όσο και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των νερών προκειμένου να περιγραφούν τα απόβλητα. Ορισμένα εκ των οποίων είναι : η θολότητα , η οσμή, το χρώμα, το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, οξύτητα και άλλα.

Από όλα τα παραπάνω οργανοληπτικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με την απομάκρυνση της θολότητας μέσω της αμμοδιύλησης κάνοντας και χρήση της διαδικασίας της κροκίδωσης.

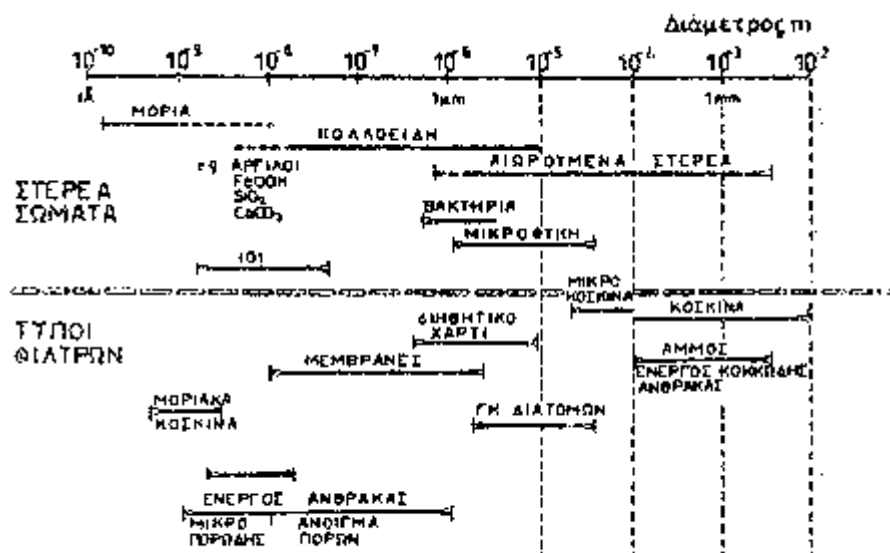
Κεφάλαιο 2 — Θεωρητική Προσέγγιση

2.1 Αποσταθεροποίηση Αιωρημάτων (Κροκίδωση)

Η αποσταθεροποίηση των αιωρημάτων είναι μια διεργασία που προηγείται της καθίζησης και της διήθησης κατά την επεξεργασία του νερού. Είναι απαραίτητη για να καταστεί δυνατή η συσσωμάτωση, που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μεγαλύτερων αιωρούμενων στερεών.

Οι διεργασίες απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών από το νερό βασίζονται κατά κύριο λόγο στη βαρύτητα και η απόδοσή τους αυξάνει με το μέγεθος των αιωρούμενων στερεών. Στη μεν καθίζηση υπάρχει άμεση σχέση της ταχύτητας καθίζησης με τη διάμετρο του αιωρούμενου στερεού, στη δε διήθηση οι περισσότεροι μηχανισμοί μεταφοράς εξαρτώνται επίσης από τη διάμετρο των αιωρούμενων στερεών.

Τα αιωρούμενα στερεά στο νερό έχουν μέγεθος από μερικά χιλιοστά έως περίπου 1 μm ($=10^{-6} \text{ m}$). Στο Σχήμα 2-1 παριστάνεται το μέγεθος των διαφόρων αιωρούμενων στερεών που είναι δυνατόν να παρατηρηθούν στο νερό μαζί με το μέγεθος των πόρων των διαφόρων φίλτρων. Τα αιωρούμενα στερεά πολλές φορές προσροφούν και τα μόρια οργανικών ενώσεων, που βρίσκονται διαλυμένες στο νερό και επομένως με την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών απομακρύνονται και οι ουσίες αυτές. Το είδος των αιωρούμενων στερεών που υπάρχει στο προς επεξεργασία νερό εξαρτάται από την προέλευσή του.



Σχήμα 2-1 Μεγέθη υδατογενών αιωρούμενων στερεών και πόρων των διάφορων μηχανισμών διήθησης (Πηγή : Διαμαντόπουλος, 2004).

Όταν τα στερεά σωματίδια είναι μικρότερα από 1μm, τότε τα σωματίδια αυτά δεν καθιζάνουν εύκολα. Ο λόγος είναι η ανάπτυξη ηλεκτρικών φορτίων στην επιφάνειά τους που της αποτρέπει την προσέγγιση και συσσωμάτωσή τους, ώστε να αποκτήσουν μέγεθος ικανό για καθίζηση. Τα σωματίδια αυτά ονομάζονται Κolloειδή (Colloids).

Στη σταθερότητα των κολλοειδών οφείλεται η θολότητα των επιφανειακών νερών και των υγρών αποβλήτων.

Με τον όρο ‘κολλοειδές’ εννοούμε τόσο το σωματίδιο, όσο και το αιώρημα. Αν αντί για σωματίδια έχουμε σταγονίδια, τότε ομιλούμε για γαλάκτωμα (ρύπανση από έλαια και υδρογονάνθρακες).

Για να μπορέσουμε να καταστρέψουμε ένα κολλοειδές πρέπει να γίνουν δύο πράγματα :

(1) Να εξουδετερώσουμε τα φορτία στην επιφάνεια των κολλοειδών σωματιδίων, και

(2) Να δώσουμε την ευκαιρία μετακίνησης των αποσταθεροποιημένων σωματιδίων, ώστε να συσσωματωθούν.

Η πρώτη διεργασία ονομάζεται ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ (Coagulation)

Η δεύτερη διεργασία ονομάζεται ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ (Flocculation)

Επειδή οι δύο αυτές διεργασίες απαντώνται μαζί (η κροκίδωση προηγείται και η συσσωμάτωση έπεται), συχνά ο όρος κροκίδωση περιλαμβάνει και τις δύο διεργασίες. Ακόμη, μερικές φορές ο όρος κροκίδωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποδηλώσει τη χρήση των κροκιδωτικών υλικών (π.χ. άλατα του Al και Fe), ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να λαμβάνει χώρα καθαρά χημική κατακρήμνιση (π.χ. απομάκρυνση P από λύματα).

2.1.1 Σταθερότητα των κολλοειδών

Ως σταθερότητα των κολλοειδών ορίζεται η αντίσταση που παρουσιάζουν στη συσσωμάτωση. Μερικά κολλοειδή αιωρούμενα στερεά είναι σταθερά για απεριόριστο χρόνο ενώ άλλα όχι. Η σταθερότητα ενός κολλοειδούς είναι μια πολύπλοκη υπόθεση. Πολλές δυνάμεις μπορούν να συνυπάρχουν και να επενεργούν μεταξύ δύο κολλοειδών. Επί πλέον οι δυνάμεις διαφοροποιούνται με την αλλαγή των συνθηκών όπως το pH, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση αλάτων κ.λ.π.

Οι δυνάμεις που συναντώνται συχνότερα μεταξύ των κολλοειδών είναι οι δυνάμεις Van der Waals, οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις και οι δυνάμεις που οφείλονται σε προσροφημένα μακρομόρια.

Οι δυνάμεις Van der Waals είναι πάντοτε παρούσες και σχεδόν το ίδιο ισχύει για τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Προσροφημένα πολυμερή παίζουν ρόλο όταν υπάρχουν στο σύστημα και προσροφηθούν από τα στερεά. Στο φυσικό νερό σχεδόν πάντα έχουμε τέτοια μόρια, όπως είναι οι χουμικές ουσίες.

Η σταθερότητα του κολλοειδούς προέρχεται από τις ηλεκτρικές απωθητικές δυνάμεις, όταν υπερσχύουν των άλλων δυνάμεων, ενώ η αποσταθεροποίηση επιτυγχάνεται με την προσθήκη κατάλληλων ηλεκτρολυτών.

Παραδείγματα απεριόριστα σταθερών ή θερμοδυναμικά ή ενεργειακά σταθερών κολλοειδών είναι οι σάπωνες και τα μόρια των απορρυπαντικών, οι πρωτεΐνες, τα άμυλα, τα μεγαλομόρια πολυμερών και οι χουμικές ουσίες.

Παραδείγματα κολλοειδών, που δεν είναι σταθερά για πάντα και συσσωματώνονται μετά από αποσταθεροποίηση, είναι η άργιλος, τα οξείδια των μετάλλων, οι μικροοργανισμοί, όλα δηλαδή τα αιωρούμενα στερεά που συναντάμε στο φυσικό νερό. Τα μη σταθερά κολλοειδή καλούνται και αντιστρέψιμα. Από τα μη σταθερά κολλοειδή άλλα συσσωματώνονται αργά και άλλα άμεσα. Πολλές φορές τα μη σταθερά κολλοειδή που συσσωματώνονται όμως πολύ αργά, ονομάζονται σταθερά και ο ορισμός του σταθερού σ' αυτήν την περίπτωση έχει κινητική σημασία και όχι θερμοδυναμική. Επομένως ένα κινητικά σταθερό κολλοειδές είναι ένα αντιστρέψιμο ή θερμοδυναμικά μη σταθερό αιώρημα, που συσσωματώνεται με πολύ αργή ταχύτητα. Ένα κινητικά μη σταθερό κολλοειδές είναι ένα αντιστρέψιμο κολλοειδές, που συσσωματώνεται άμεσα. Στην επεξεργασία του νερού χρησιμοποιείται η διεργασία της κροκίδωσης για την αύξηση της ταχύτητας με την οποία τα στερεά συσσωματώνονται δηλαδή για τη μετατροπή ενός κινητικά σταθερού κολλοειδούς σε ένα κινητικά μη σταθερό κολλοειδές.

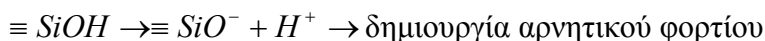
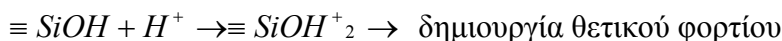
Αιωρούμενα στερεά, που υπάρχουν στους ταμιευτήρες νερού ή τις λίμνες για μήνες ή χρόνια, με την αποσταθεροποίηση συσσωματώνονται σε μια ώρα ή και λιγότερο.

2.1.2 Σταθεροποίηση των κολλοειδών

Τα ηλεκτρικά φορτία των αιωρούμενων στερεών οφείλονται στην ανισοκατανομή των ιόντων πάνω στο στερεό και στο περιβάλλον διάλυμα. Το φορτίο των σωματιδίων και το φορτίο του διαλύματος είναι ίσα σε μέγεθος και αντίθετου σημείου.

Η ανισοκατανομή αυτή των ιόντων μεταξύ του αιωρούμενου στερεού και του διαλύματος οφείλεται σε διάφορους μηχανισμούς που εξαρτώνται από τη σύσταση του αιωρούμενου στερεού. Μερικοί από τους μηχανισμούς δημιουργίας του σταθερού κολλοειδούς είναι οι ακόλουθοι :

(α) Ομάδες στην επιφάνεια των στερεών σωματιδίων μπορούν να αντιδρούν με το νερό και να ανταλλάσσουν πρωτόνια

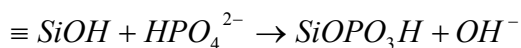
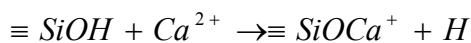


Το φορτίο στην περίπτωση αυτή εξαρτάται από το pH.

Για κάθε στερεό κολλοειδές, υπάρχει ένα pH που το φορτίο μηδενίζεται. Το pH αυτό λέγεται Σημείο Μηδενικού Φορτίου (zpc).

Στα φυσικά νερά, τα περισσότερα κολλοειδή φέρουν αρνητικά φορτία.

(β) Οι ομάδες στην επιφάνεια μπορούν να αντιδράσουν με άλλα ιόντα που υπάρχουν στο νερό



Και αυτές οι χημικές δράσεις εξαρτώνται από το pH και τη χημεία γενικότερα του διαλύματος. Το σημείο του μηδενικού φορτίου εξαρτάται από τη συγκέντρωση το Ca^{2+} και μπορεί να προσδιοριστεί το pCa^{2+} .

(γ) Αντικατάσταση ενός ατόμου της επιφανειακής δομής του στερεού με άλλο άτομο άλλου στοιχείου με διαφορετικό φορτίο, π.χ. ένα άτομο Al αντικαθιστά ένα άτομο Si σε κρυστάλλους SiO_2 , τότε αναπτύσσεται -1 φορτίο.

(δ) Αντίδραση με οργανικές ιοντικές ενώσεις που περιέχουν καρβοξυλικές και αμινο-ομάδες.

(ε) Προσρόφιση επιφανειακά ενεργών ουσιών από το νερό στην επιφάνεια των στερεών.

Ένα κολλοειδές αιώρημα δεν παρουσιάζει ηλεκτρικό φορτίο όταν εξετάζεται στο σύνολό του και το πρωτογενές φορτίο στο στερεό εξισορροπείται από τα φορτία του συστήματος. Αν απομονώσουμε όμως ένα κολλοειδές σωματίδιο στο νερό τότε αυτό έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

(α) Τα σταθερά φορτία (συνήθως αρνητικά) στην επιφάνεια του στερεού.

(β) Μία σταθερή στοιβάδα από κυρίως αντιθέτως φορτισμένα ιόντα (counter ions) κοντά στην επιφάνεια του στερεού.

(γ) Μία διάχυτη στοιβάδα από κυρίως αντίθετα φορτισμένα ιόντα που εκτείνεται ως “νέφος” γύρω από το σωματίδιο. Η σταθερή στοιβάδα (β) και η διάχυτη στοιβάδα (γ) αποτελούν τη λεγόμενη διπλή στοιβάδα. Αν το σωματίδιο κινηθεί στο διάλυμα, τότε μαζί του κινείται τόσο η σταθερή στοιβάδα των αντιθέτως φορτισμένων ιόντων, όσο και ένα μέρος της διάχυτης στοιβάδας. Το ηλεκτρικό δυναμικό στο επίπεδο διάτμησης της διάχυτης στοιβάδας κατά την κίνηση του κολλοειδούς ονομάζεται ζ-δυναμικό (ζ-potential) και είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει το βαθμό σταθερότητας των κολλοειδών.

Η τιμή του ζ-δυναμικού υπολογίζεται από τη σχέση: $\zeta = \frac{4\pi qd}{e}$

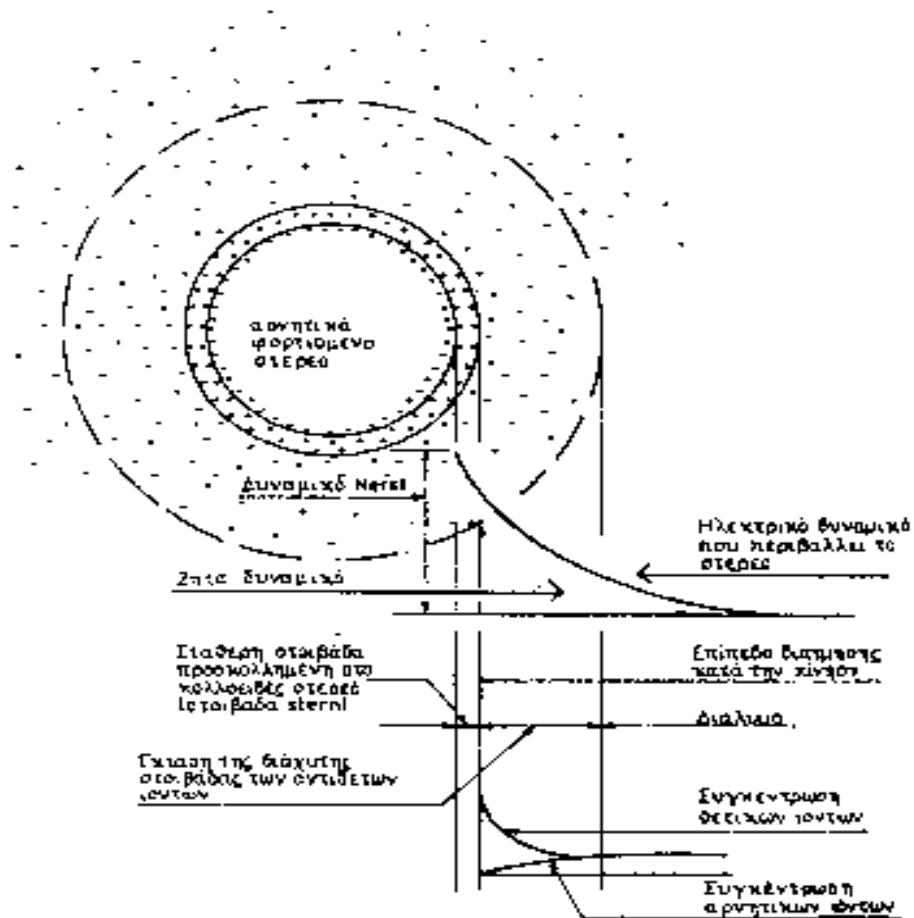
Όπου: ζ = ζ-δυναμικό

q = φορτίο ανά μονάδα επιφανείας

d = πάχος στοιβάδας που περιβάλλει τη διατμητική επιφάνεια

e = διηλεκτρική σταθερά του υγρού

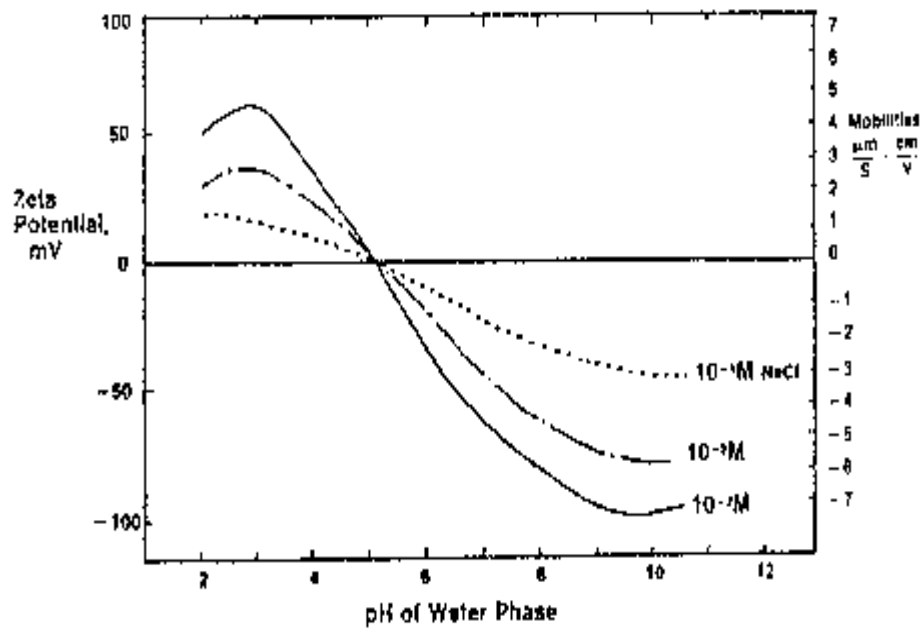
Το ζ-δυναμικό μπορεί να πάρει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές (εξαρτάται από τα ηλεκτρικά φορτία). Όσο μεγαλύτερο κατά απόλυτη τιμή είναι το ζ-δυναμικό τόσο πιο σταθερό είναι το κolloειδές. Αντίθετα όσο πιο κοντά στο μηδέν πλησιάζει το ζ-δυναμικό τόσο πιο εύκολη είναι η αποσταθεροποίηση του κolloειδούς.



Σχήμα 2-2 Αρνητικά φορτισμένο αιωρούμενο στερεό με τη διάχυτη στοιβάδα και το ζήτα δυναμικό (Πηγή : Διαμαντόπουλος, 2004).

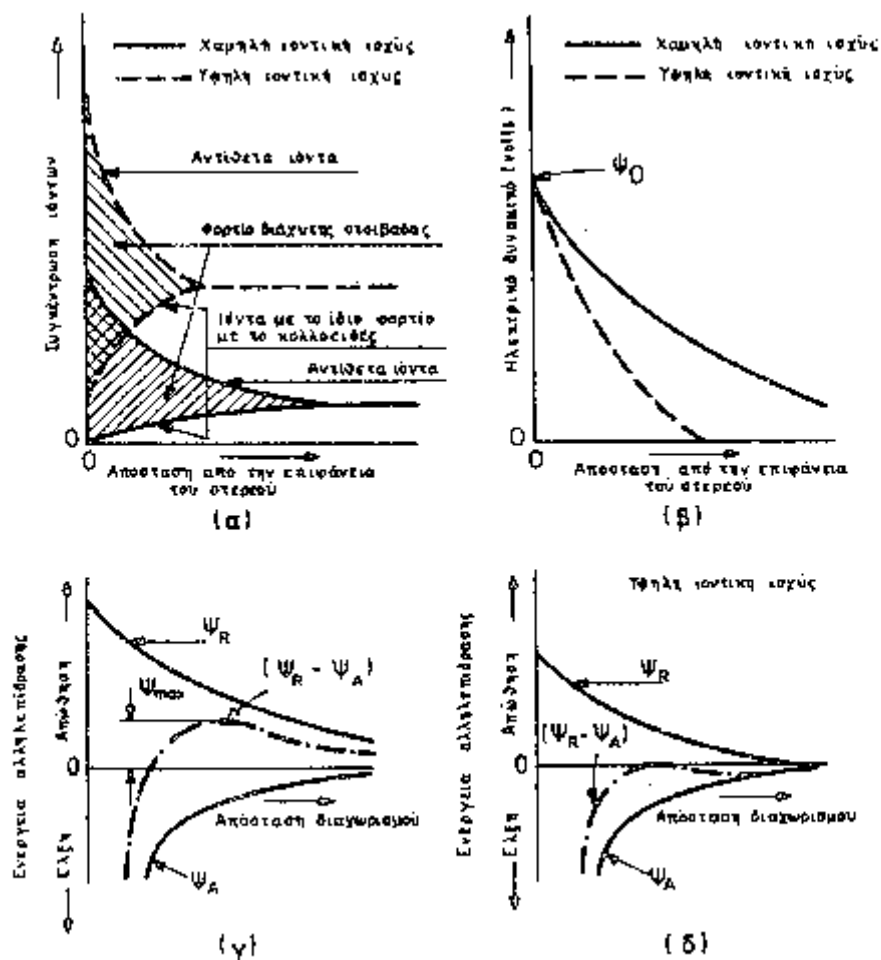
Το ζ-δυναμικό επηρεάζεται από τα εξής:

(α) Το pH, καθώς μεταβολή στο pH θα επηρεάσει μέσω των αντιδράσεων υδατικής ισορροπίας τα σταθερά φορτία στην επιφάνεια του κολλοειδούς.
(σχήμα 2-3)



Σχήμα 2-3 Επίδραση του ζ- δυναμικού από το pH (Πηγή : Διαμαντόπουλος, 2004).

(β) Τη συνολική συγκέντρωση των ιόντων στο διάλυμα, δηλαδή την ιοντική ισχύ. Όταν η ιοντική ισχύς του διαλύματος είναι μεγάλη, δηλαδή υπάρχουν πολλά ιόντα αντιθέτως φορτισμένα, τότε δεν χρειάζεται η διάχυτη στοιβάδα να επεκτείνεται πολύ. (σχήμα 2-4)



Σχήμα 2-4 Σχηματική παράσταση (α) της διάχυτης διπλής στοιβάδας, (β) του δυναμικού της διάχυτης στοιβάδας και (γ) και (δ) της ενέργειας αποθήκευσης – έλξης δύο στερεών σε ηλεκτροστατικά σταθεροποιημένο κolloειδές (Πηγή: Διαμαντόπουλος, 2004).

Το Σχήμα 2-4 (γ) και (δ) δείχνει την ενέργεια αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση της απόστασης δύο κολλοειδών σωματιδίων. Η ενέργεια αλληλεπίδρασης είναι το άθροισμα των απωστικών δυνάμεων Coulomb και των ελκτικών δυνάμεων London-Van der Waals.

Η ενέργεια αλληλεπίδρασης σε ένα κολλοειδές με υψηλό ζ-δυναμικό (υψηλή σταθερότητα) χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση ενός ενεργειακού εμποδίου (barrier), το οποίο είναι δύσκολο να υπερπηδηθεί, και τα δύο σωματίδια να προσεγγίσουν αρκετά, ώστε να υπερσχύσουν οι ελκτικές δυνάμεις Van der Waals. Αντίθετα, η ύπαρξη υψηλής ιοντικής ισχύος μειώνει την ηλεκτρο-απωθητική δράση των διπλών στοιβάδων με αποτέλεσμα την υπερίσχυση των ελκτικών δυνάμεων Van der Waals.

2.1.3 Αποσταθεροποίηση Κολλοειδών

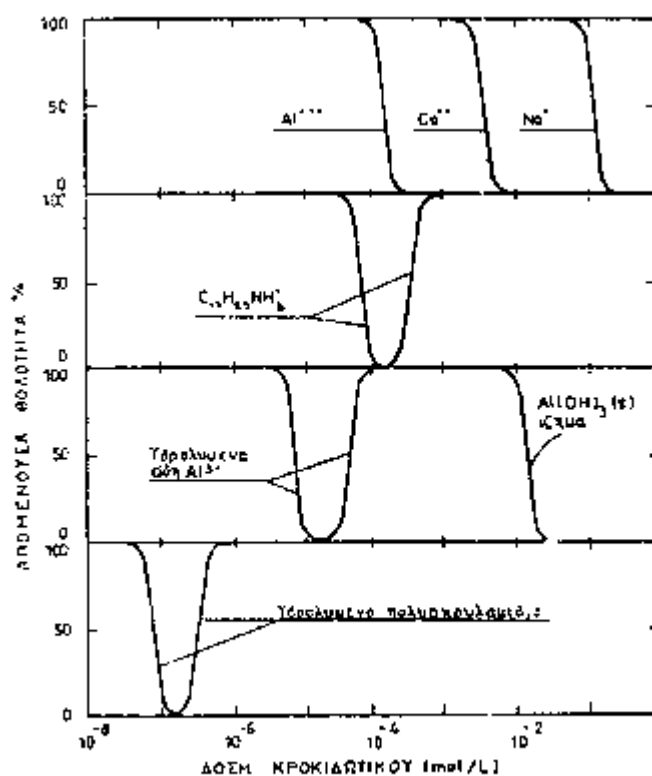
Η αποσταθεροποίηση αιωρημάτων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον στην περιβαλλοντική μηχανική, γιατί είναι μια διεργασία που επιτρέπει τη συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών και επομένως την ευκολότερη απομάκρυνσή τους.

Υπάρχουν οι εξής τέσσερις μηχανισμοί αποσταθεροποίησης των κολλοειδών :

- Συμπίεση διπλής στοιβάδας (Double Layer Compression)
- Προσρόφηση αντιθέτως φορτισμένων ιόντων στην επιφάνεια του σωματιδίου με αποτέλεσμα την τοπική εξουδετέρωση των φορτίων (Counter Ion Adsorption)
- Παρασυρμός από ίζημα (Sweep precipitation / coagulation)
- Διασωματιδιακή γεφύρωση (Interparticle bridging)

2.1.3.1 Συμπίεση της διπλής στοιβάδας

Η συμπίεση της διπλής στοιβάδας προκαλείται με την προσθήκη στο διάλυμα ιόντων αντίθετου φορτίου από το φορτίο των αιωρούμενων στερεών. Η αποτελεσματικότητα των ιόντων στην εξουδετέρωση των φορτίων αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του φορτίου του ιόντος. Η αποσταθεροποίηση του κολλοειδούς γίνεται όταν το ζ-δυναμικό προσεγγίζει την τιμή μηδέν.



Σχήμα 2-5 Παράσταση καμπυλών κροκίδωσης (jar test) για τέσσερις τύπους κροκιδωτικών (Πηγή : Διαμαντόπουλος, 2004).

Στο Σχήμα 2-5, φαίνεται ότι η αποτελεσματικότητα των ιόντων αυξάνει, όσο αυξάνει το φορτίο τους. Συγκεκριμένα, οι απαιτούμενες δόσεις των Na^+ , Ca^{2+} και Al^{3+} για αποτελεσματική κροκίδωση έχουν προσεγγιστικά την αναλογία $1:10^{-2}:10^{-3}$. Η αλληλεπίδραση τέτοιων κροκιδωτικών και κολλοειδών στερεών είναι καθαρά ηλεκτροστατική. Η αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων με αντίθετο φορτίο από εκείνο των κολλοειδών στερεών, έχει ως αποτέλεσμα την εξουδετέρωση των πρωτογενών φορτίων ευκολότερα και σε μικρότερη απόσταση από την επιφάνεια.

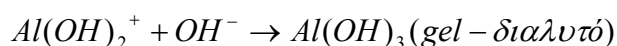
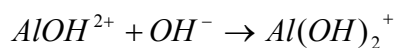
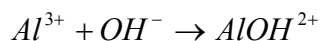
Ένα καλό παράδειγμα αποσταθεροποίησης των κολλοειδών είναι αυτό που λαμβάνει χώρα, όταν το νερό των ποταμών αναμιγνύεται με το θαλασσόνερο στις εκβολές. Τα αιωρούμενα κολλοειδή αποφορτίζονται, μόλις έρθουν σε επαφή με το υψηλής ιοντικής ισχύος νερό της θάλασσας, συσσωματώνονται και καθιζάνουν. Στο φαινόμενο αυτό οφείλεται ο σχηματισμός των δέλτα στις εκβολές των ποταμών.

2.1.3.2 Προσρόφηση και εξουδετέρωση των φορτίων

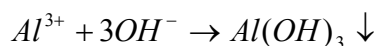
Η ενέργεια της προσρόφησης, όταν αυτή προκαλείται από χημικούς δεσμούς, είναι πολύ μεγαλύτερη από την ηλεκτροχημική ενέργεια. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου κροκιδωτικού είναι η δωδεκυλαμίνη ($C_{12}H_{25}NH_3^+$), που είναι και επιφανειακά ενεργή ουσία. Τα ιόντα αυτά στην πραγματικότητα προσροφώνται στο στερεό και εξέρχονται από το νερό, αφού δεν υπάρχει αντίδραση μεταξύ των μορίων του νερού και της αλειφατικής αλυσίδας. Στη βέλτιστη δόση εξουδετερώνονται τα φορτία, ενώ για υπερβολική δόση λαμβάνει χώρα επανασταθεροποίηση (restabilization), αλλά με θετικό ηλεκτρικό φορτίο τη φορά αυτή.

Στην πράξη χρησιμοποιούνται κυρίως άλατα Al^{3+} και Fe^{3+} (π.χ. $Al_2(SO_4)_3$, γνωστό ως Alum ή $FeCl_3$).

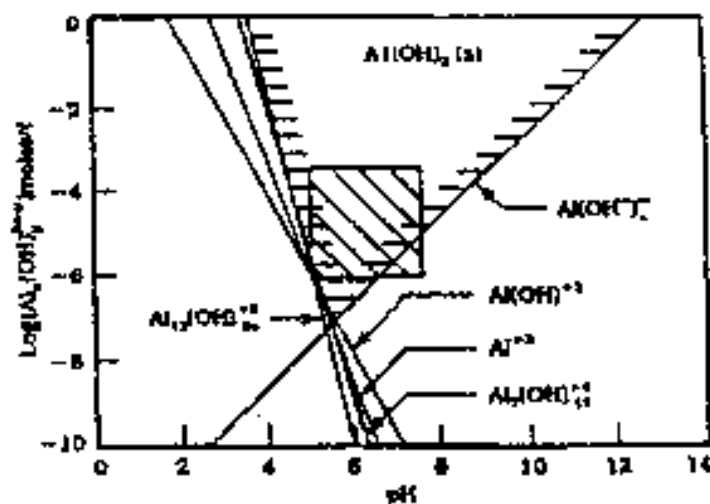
Οι αντιδράσεις υδρόλυσης έχουν ως εξής :



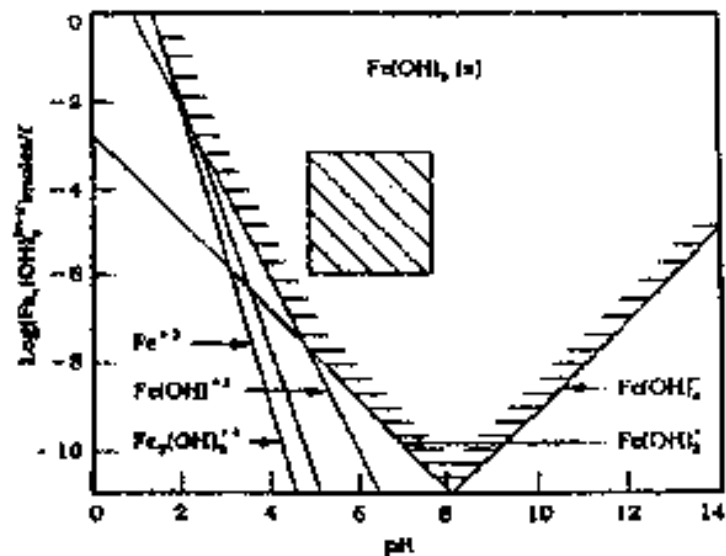
και η αντίδραση ιζηματοποίησης :



Λαμβάνουν επίσης χώρα σύμπλοκες αντιδράσεις υδρόλυσης που οδηγούν στο σχηματισμό ολιγομερών και πολυμερών συμπλόκων. Το διάγραμμα διαλυτότητας για το Fe^{3+} και του Al^{3+} παρουσιάζονται παρακάτω στα Σχήματα 2-6 και 2-7 αντίστοιχα.



Σχήμα 2-6 Διαλυτότητα υδροξειδίου του αργιλίου σαν συνάρτηση του pH. Το σκιαγραφημένο τμήμα είναι η περιοχή κροκιδώσεως που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία ύδατος (Πηγή : Διαμαντόπουλος, 2004).

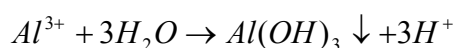


Σχήμα.2-7 Διαλυτότητα υδροξειδίου του σιδήρου σαν συνάρτηση του pH. Το σκιαγραφημένο τμήμα είναι η περιοχή κροκιδώσεως που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία ύδατος (Πηγή : Διαμαντόπουλος, 2004).

Τα σύμπλοκα της υδρόλυσης προσροφούνται στην επιφάνεια του κολλοειδούς και εξουδετερώνουν τα ηλεκτρικά φορτία. Υπερβολική δόση του φορτίου οδηγεί στην επανασταθεροποίηση με αντιστροφή του φορτίου. Ας σημειωθεί ότι λόγω συμπίεσης της διπλής στοιβάδας δεν είναι δυνατή η επανασταθεροποίηση των κολλοειδών με αντιστροφή του φορτίου. Επίσης, δεν είναι δυνατός ο θεωρητικός προσδιορισμός της βέλτιστης δόσης. Πρέπει να γίνει πειραματικός προσδιορισμός της βέλτιστης δόσης, γνωστός ως Jar Test.

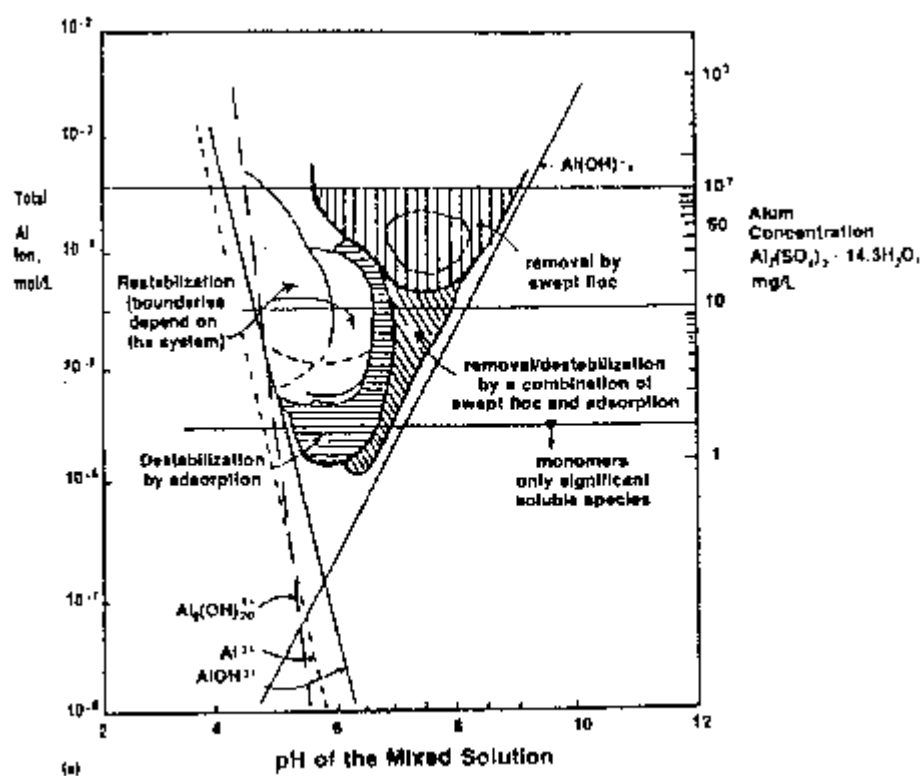
2.1.3.3 Παρασυρμός από ίζημα

Όταν προστίθενται στο νερό άλατα, όπως $Al_2(SO_4)_3$ και $FeCl_3$, σε συγκεντρώσεις που έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ιζημάτων των υδροξειδίων των μετάλλων αυτών, τα κολλοειδή στερεά μπορεί να εγκλωβίζονται στα ιζήματα και να καθιζάνουν.



Απαιτούνται υψηλότερες δόσεις σε σχέση με την προσρόφηση των ιόντων στην επιφάνεια (δεύτερος μηχανισμός), αλλά δεν υπάρχει κίνδυνος επανασταθεροποίησης.

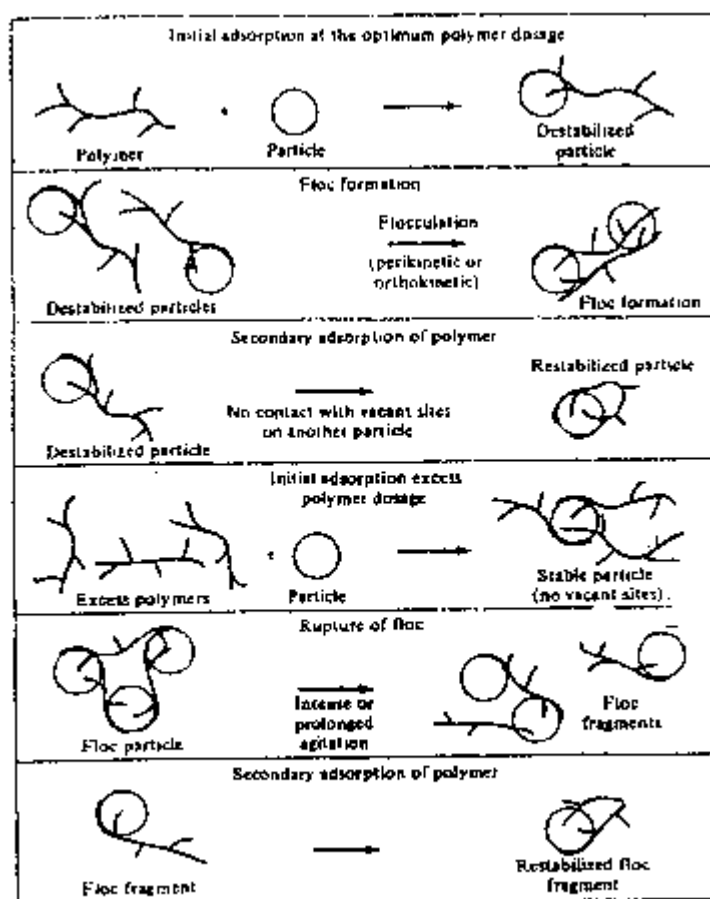
Στο λογαριθμικό διάγραμμα διαλυτότητας του Al οι περιοχές που υπερισχύουν οι διάφοροι μηχανισμοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-8.



Σχήμα 2-8 Διάγραμμα κροκίδωσης με αργίλιο. (Πηγή : Διαμαντόπουλος, 2004).

2.1.3.4 Διασωματιδιακή γεφύρωση

Τα υδατοδιαλυτά οργανικά πολυμερή μπορούν να φέρουν ενεργές ομάδες (π.χ. ιοντικές ομάδες), οι οποίες δύναται να αντιδράσουν με ενεργές ομάδες πάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων. Αν το υδατοδιαλυτό οργανικό πολυμερές φέρει φορτία θετικά, ονομάζεται κατιονικός πολυηλεκτρολύτης, αν αρνητικά, τότε λέγεται ανιονικός πολυηλεκτρολύτης. Οι μηχανισμοί γεφύρωσης που προκαλούν οι πολυηλεκτρολύτες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-9.



Σχήμα 2-9 Διασωματιδιακή γεφύρωση με πολυμερή (Πηγή : Διαμαντόπουλος, 2004).

Ο βασικός μηχανισμός αποσταθεροποίησης των κολλοειδών με τη χρήση των πολυηλεκτρολυτών είναι η διασωματιδιακή γεφύρωση. Είναι επίσης δυνατή η ανασταθεροποίηση των κολλοειδών λόγω υπερδοσολογίας.

Οι πολυηλεκτρολύτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνοι τους ή (συνηθέστερα) σε συνδυασμό με τα ανόργανα κροκιδωτικά. Το κόστος τους είναι πολύ υψηλότερο των κροκιδωτικών, αλλά χρησιμοποιούνται σε πολύ χαμηλότερες δόσεις (σε επίπεδα γύρω ή μικρότερα από 1 mg/l).

2.2 Συσσωμάτωση

Σε πολλά βιβλία η συσσωμάτωση, που στα αγγλικά αποδίδεται με τον όρο flocculation, συνεξετάζεται με την αποσταθεροποίηση των αιωρημάτων, δηλαδή την κροκίδωση.

Κατά την συσσωμάτωση τα αιωρούμενα στερεά συγκρούονται και συγκολλούνται (collide and coalesce) προς μεγαλύτερα στερεά. Η δημιουργία μεγαλύτερων στερεών βοηθά το διαχωρισμό τους με καθίζηση και διήθηση.

Η συσσωμάτωση εφαρμόζεται τόσο κατά την επεξεργασία του πόσιμου νερού όσο και κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Οι κύριες εφαρμογές της συσσωμάτωσης αναφέρονται παρακάτω :

Επεξεργασία πόσιμου νερού

- Συσσωμάτωση των αποσταθεροποιημένων αιωρημάτων, των στερεών που περιέχονται στο νερό, μετά την προσθήκη κροκιδωτικού.
- Συσσωμάτωση των ιζημάτων που σχηματίζονται κατά την αποσκλήρυνση του νερού, όπου προστίθενται χημικές ενώσεις,

- Συσσωμάτωση των αιωρημάτων που σχηματίζονται κατά την απομάκρυνση του σιδήρου και μαγγανίου.

Επεξεργασία αποβλήτων

- Συσσωμάτωση, φυσική και υποβοηθούμενη, των αιωρούμενων στερεών των υγρών αποβλήτων στις δεξαμενές καθίζησης.
- Συσσωμάτωση της ενεργού ιλύος.
- Συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών των υγρών αποβλήτων πάνω στην επιφανειακή στοιβάδα των βιολογικών φίλτρων.
- Συσσωμάτωση που ακολουθεί την προσθήκη χημικών στα ακατέργαστα υγρά απόβλητα ή στην ιλύ πριν τη διεργασία απονέρωσης, π.χ. φίλτρα κενού ή ταινιοφιλτρώπρεσες.

Της συσσωμάτωσης, στις περισσότερες εφαρμογές, προηγείται κροκίδωση για την αποσταθεροποίηση των κολλοειδών αιωρημάτων.

2.2.1 Μηχανισμοί Συσσωμάτωσης

Η συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών σε ένα υγρό εξαρτάται από τις συγκρούσεις μεταξύ των στερεών που προκαλούνται από την σχετική τους κίνηση. Αυτή η κίνηση των αιωρούμενων στερεών μπορεί να προκαλείται από την κίνηση Brown, από την κίνηση του ρευστού που δημιουργεί μία βαθμίδα ταχύτητας ή από την κίνηση των αιωρούμενων στερεών που προκαλείται από εξωτερικά αίτια, όπως π.χ. είναι η βαρύτητα.

Η ταχύτητα της συσσωμάτωσης υπολογίζεται από τη συχνότητα των συγκρούσεων που προκαλούνται από τη σχετική κίνηση των στερεών. Όταν οι συγκρούσεις προκαλούνται από την κίνηση Brown, έχουμε την περικινητική συσσωμάτωση (μικρά σωματίδια $< 1 \mu\text{m}$) και όταν οι συγκρούσεις αυτές προκαλούνται από τη βαθμίδα ταχύτητας, δηλαδή την διαφορική κίνηση τμημάτων του υγρού, έχουμε την ορθοκινητική συσσωμάτωση (μεγάλα σωματίδια $> 1 \mu\text{m}$). Η συσσωμάτωση που προκαλείται από εξωτερικές δυνάμεις είναι μια ειδική περίπτωση ορθοκινητικής συσσωμάτωσης, διότι η κίνηση των στερεών σχετικά με το υγρό δημιουργεί επίσης βαθμίδα ταχύτητας.

Όταν δεν υπάρχουν απωθητικές δυνάμεις μεταξύ των αιωρούμενων στερεών, τότε κάθε σύγκρουση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συσσωματώματος και η διεργασία καλείται άμεση συσσωμάτωση. Όταν υπάρχουν απωθητικές δυνάμεις, τότε μόνο ένας μικρός αριθμός συγκρούσεων προκαλεί συσσωμάτωση και η διεργασία καλείται αργή συσσωμάτωση.

Η κλασική θεωρία συσσωμάτωσης, δέχεται ότι έχουμε συνθήκες άμεσης συσσωμάτωσης, όπου κάθε σύγκρουση δημιουργεί ένα συσσωμάτωμα.

2.3 Θολότητα

Η θολότητα δημιουργείται λόγω της συσσώρευσης στερεών, κυρίως κολλοειδών, τα οποία διαχέουν το φως και προσδίδουν θολή όψη στο νερό. Επίσης η θολότητα παρεμποδίζει το φως να διέλθει στο νερό πράγμα που έχει επιπτώσεις στην υδρόβια βλάστηση και κατ' επέκταση στο υδάτινο οικοσύστημα. Επιπρόσθετα η ύπαρξη κολλοειδών παρεμποδίζει την απολύμανση του νερού λόγω της προσκόλλησης μικροοργανισμών σε αυτά.

Η θολότητα μετριέται με την νεφελομετρική μέθοδο σε μονάδες νεφελομετρικής θολότητας (nephelometric turbidity units) και το κατώτερο όριο για το πόσιμο νερό

έχει θεσπιστεί κατά μέσο όρο σε 1NTU και κανένα δείγμα να μην υπερβαίνει τα 5 NTU. WHO (1995).

Για τον προσδιορισμό της θολότητας χρησιμοποιήθηκε η συσκευή LOVIBOND TURBIDITY METER. Το μοντέλο αυτό μετράει την διαύγεια ή τη θολότητα κάθε άχρωμου υγρού. Είναι ένα πραγματικό νεφελόμετρο, που λειτουργεί στην επίσημα καθορισμένη γωνία των 90° μεταξύ του φωτοανιχνευτή και της προσπίπτουσας ακτίνας φωτός. Διαβάζει και δίνει τα αποτελέσματα σε NTUs (Nephelometric Turbidity Units) σε τρεις κλίμακες 0-20.00, 0-2000.0 και 0-1000. Η ανάλυση του τεστ είναι 0.01 NTU στη χαμηλότερη κλίμακα.

2.4 Διήθηση-Αμμοδιύλση

Η διήθηση είναι ένας μηχανικός διαχωρισμός απομάκρυνσης στερεών σωματιδίων από ένα ρευστό, περνώντας το ρευστό από ένα διηθητικό μέσο πάνω στο οποίο κατακρατούνται τα στερεά. Το ρευστό μπορεί να είναι υγρό ή αέριο. Στην παρούσα περίπτωση το ρευστό είναι υγρό και για την ακρίβεια υδατικό αιώρημα καολίνη, ενώ το διηθητικό μέσο είναι άμμος οπότε μιλάμε για αμμοδιύλση.

2.4.1 Διαχωρισμός φίλτρων

Η δρώσα δύναμη στη διεργασία της διήθησης είναι η διαφορά πίεσης ανάντι και κατάντι του διηθητικού μέσου ή δευτερευόντως η βαρύτητα, οπότε ένας πρώτος διαχωρισμός των φίλτρων μπορεί να γίνει βάση της πίεσης λειτουργίας τους. Δηλαδή αν λειτουργούν ή όχι με πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής στην ανάντι πλευρά του διηθητικού μέσου. Πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής μπορούν να δημιουργηθούν μέσω μιας αντλίας ή ενός φυσητήρα ή ακόμα και με χρήση φυγόκεντρου δύναμης. Ο βασικός όμως διαχωρισμός των φίλτρων γίνεται σε τρεις κύριες κατηγορίες. Στα φίλτρα πλακούντα, τα φίλτρα εγκάρσιας ροής και τα φίλτρα καθαρισμού

Στα φίλτρα πλακούνται στην αρχή της διήθησης μερικά σωματίδια εισέρχονται στους πόρους του διηθητικού μέσου και συγκρατούνται ενώ πολύ σύντομα κάποια άλλα συσσωρεύονται στην επιφάνεια του φίλτρου. Μετά τη σύντομη αυτή περίοδο ο πλακούντας είναι αυτός που κάνει τη διήθηση και όχι το φίλτρο.

Στα φίλτρα εγκάρσιας ροής το αιώρημα κινείται παράλληλα με το διηθητικό μέσο αφήνοντας ένα πυκνότερο αιώρημα από τη μια πλευρά ενώ παραλαμβάνεται το διήθημα από την άλλη. Η αρχή της διήθησης εγκάρσιας ροής μπορεί να εφαρμοστεί στη συμπύκνωση αιωρημάτων λεπτόκοκκων στερεών ή κολλοειδών υλικών ή στην κλασματοποίηση διαλυμάτων μακρομορίων.

Τέλος τα φίλτρα καθαρισμού απομακρύνουν μικρές ποσότητες στερεών ή σταγόνων υγρού από υγρά ή αέρια. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι πόροι του διηθητικού μέσου είναι μεγαλύτεροι, μερικές φορές πολύ μεγαλύτεροι, από τα σωματίδια που πρέπει να απομακρυνθούν. Τα σωματίδια συλλέγονται από επιφανειακές δυνάμεις και ακινητοποιούνται πάνω στις επιφάνειες ή μέσα στα κανάλια ροής, μειώνοντας την ενεργή διάμετρο τους, όμως συνήθως δεν τα φράζουν τελείως.

2.4.2 Διηθητικά υλικά

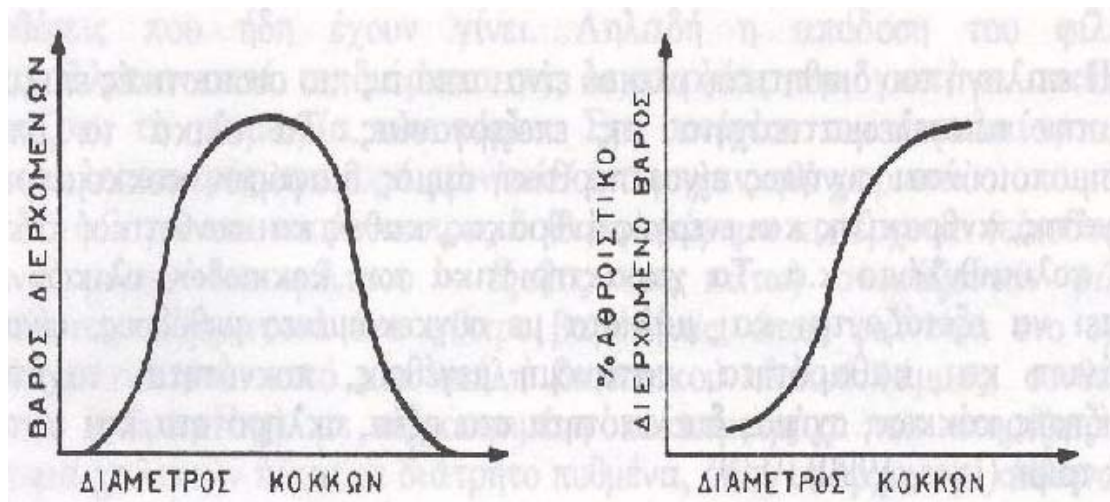
Η επιλογή του διηθητικού υλικού είναι από τις πιο ουσιαστικές επιλογές για την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι πυριτική άμμος διαφόρων κοκκομετριών, γρανάτης, ανθρακίτης και ενεργός άνθρακας, καθώς και συνθετικοί κόκκοι από πολυαιθυλένιο κ.α. Τα χαρακτηριστικά των κοκκωδών υλικών που πρέπει να εξετάζονται και μάλιστα με συγκεκριμένες μεθόδους είναι : εμφάνιση και καθαρότητα, κατανομή μεγέθους, πυκνότητα, ταχύτητα καθίζησης κόκκων, σχήμα, διαλυτότητα στα οξέα, σκληρότητα και αντοχή στην τριβή.

Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με τα τυπικά χαρακτηριστικά συνηθισμένων διηθητικών υλικών.

	<i>Πυκνότητα(gr/cm^3)</i>	<i>Πορώδες</i>	<i>Σφαιρικότητα</i>
Πυριτική άμμος	2,65	0,42-0,47	0,7-0,85
Ανθρακίτης	1,4-1,73	0,50-0,55	0,7-0,75
Υδροανθρακίτης	1,74		0,65
Άνθρακας	1,3-1,5	0,50	
Γρανάτης	3,6-4,2	0,45-0,55	0,75
Ιλμενίτης	4,2-4,6		0,60-0,65

Εικόνα 2-10. Πίνακας με τα τυπικά χαρακτηριστικά συνηθισμένων διηθητικών υλικών (Πηγή: Περιβαλλοντική μηχανική Ι. Διαχείριση Υδατικών πόρων. Λέκκας.)

- Το μέγεθος κόκκων και η κατανομή μεγέθους είναι τα πρώτα χαρακτηριστικά του διηθητικού μέσου, που πρέπει να προσδιοριστούν. Αυτό γίνεται με κοκκομετρική ανάλυση. Η κοκκομετρική ανάλυση γίνεται με κοσκίνιση προζυγισμένης ξηρής ποσότητας, π.χ. άμμου, σε σειρά κοσκίνων, με συγκεκριμένη μέθοδο, όπως ορίζουν οι πρότυπες μέθοδοι. Αν τα αποτελέσματα της μέτρησης εκφραστούν ως επί τοις εκατό βάρος που παραμένει σε κάθε κόσκινο σε σχέση με το άνοιγμα της βροχίδας του κόσκινου, προκύπτει καμπύλη που ακολουθεί την κανονική κατανομή. Αν τα αποτελέσματα αυτά αποδοθούν αθροιστικά η καμπύλη είναι σιγμοειδής. Αν σχεδιαστεί σε λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα (άνοιγμα βροχίδας) και σε κλίμακα κανονικής κατανομής στον οριζόντιο άξονα (%αθροιστικό διερχόμενο βάρος), η καμπύλη είναι ευθεία.



Εικόνα 2-11. Καμπύλες κοκκομετρικής ανάλυσης διηθητικού υλικού. (Πηγή: Περιβαλλοντική μηχανική Ι. Διαχείριση Υδατικών πόρων. Λέκκας.)

- Η σφαιρικότητα ορίζεται ως το πηλίκο της επιφάνειας σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με τον κόκκο προ της επιφάνεια του κόκκου. Επειδή είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η επιφάνεια αυτή, χρησιμοποιείται και ο ακόλουθος ορισμός: το πηλίκο της διαμέτρου που έχει σφαιρικό στερεό (D_e) προς τη μέση διάμετρο του στερεού (D_s), δηλαδή:

$$\psi = \frac{D_e}{D_s}$$

Αντί της διαμέτρου D_e για τον υπολογισμό της σφαιρικότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η διάμετρος D_h , που προσδιορίζεται με πειράματα καθίζησης κόκκων.

Η σφαιρικότητα έχει τιμές από 0-1. Τις υψηλότερες σφαιρικότητες παρουσιάζουν συνήθως οι αλλουβιακές άμμοι, ενώ τα υλικά που έχουν προέλθει από θρυμματισμό, όπως ο ανθρακίτης, ο ιλμενίτης και μερικοί γρανάτες, έχουν χαμηλές σφαιρικότητες.

- Η πυκνότητα ή το ειδικό βάρος των κόκκων επηρεάζουν επίσης σημαντικά την ταχύτητα του νερού για έκπλυση: αύξηση της πυκνότητας, με σταθερή διάμετρο κόκκων απαιτεί μεγαλύτερες παροχές για έκπλυση.

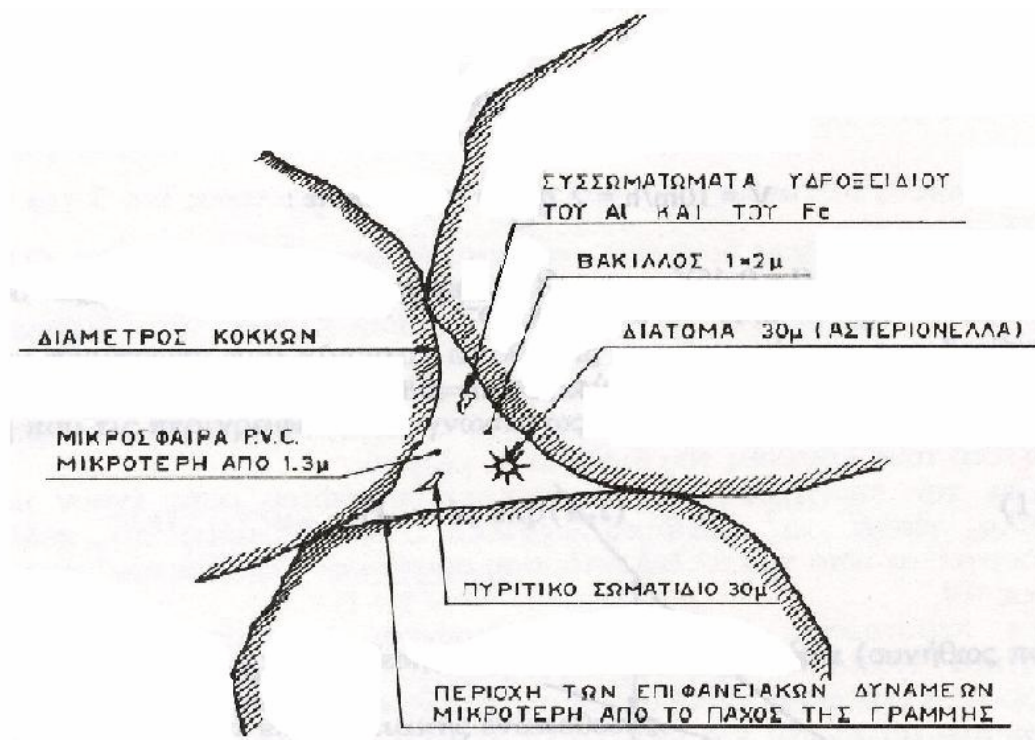
- Η σκληρότητα του διηθητικού υλικού είναι σημαντική για τη διάρκεια ζωής του υλικού. Οι πυριτικές άμμοι, ο γρανάτης και ο ιλμενίτης, που χρησιμοποιούνται ευρέως, είναι σκληρά υλικά και δεν δημιουργούν πρόβλημα. Για τον ανθρακίτη έχουν αναφερθεί τιμές 2.7-3 στην κλίμακα Mohs, ως ελάχιστες τιμές σκληρότητας για να μην καταστρέφεται το υλικό.

- Το πορώδες, που είναι πολύ σημαντική παράμετρος στη διήθηση, ορίζεται ως ο όγκος των κενών προ του συνολικό όγκο του διηθητικού υλικού. Επηρεάζεται σημαντικά από τη σφαιρικότητα (μείωση της σφαιρικότητας συνεπάγεται αύξηση του πορώδους), καθώς και από το βαθμό συμπίεσης που έχει υποστεί το στρώμα του υλικού μέσα στον κύλινδρο ή τη δεξαμενή που περιέχεται. Το μέγιστο πορώδες (αναφέρεται και ως πορώδες χαλαρού στρώματος loose-bed porosity), που μετράται όταν οι κόκκοι αφεθούν ελεύθερα να καθιζήσουν μέσα σε δοκιμαστικό κύλινδρο που περιέχει νερό, μπορεί να είναι μέχρι και 5% υψηλότερο από το πορώδες που μετρήθηκε μετά από συμπίεση του στρώματος (πορώδες σταθερού στρώματος fixed-bed porosity).

2.4.3 Μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών

Όπως φαίνεται και από το σχήμα που ακολουθεί, στα στρώματα κοκκωδών υλικών έχουμε απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών όπως είναι τα βακτήρια, τα μικροφύκη, τα ανόργανα στερεά, των οποίων το μέγεθος είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος των πόρων. Αυτό καθίσταται δυνατό μέσω των μηχανισμών μεταφοράς των αιωρούμενων στερεών προς την επιφάνεια των κόκκων, όπου τελικά συγκρατούνται.

Όταν οι αποθέσεις αυτές υπερβούν ένα ορισμένο όριο, το στρώμα δεν έχει τη δυνατότητα να συγκρατήσει άλλα στερεά, οπότε διακόπτεται η λειτουργία του φίλτρου, γίνεται έκπλυση του στρώματος για την απομάκρυνση των στερεών που έχουν συγκρατηθεί και αρχίζει νέος κύκλος διήθησης με καθαρό στρώμα.



Εικόνα 2-12. Σχηματικά μεγέθη κόκκων διηθητικού υλικού, πόρων και αιωρούμενων στερεών. (Πηγή: Περιβαλλοντική μηχανική Ι. Διαχείριση Υδατικών πόρων. Λέκκας.)

Μπορούμε να διακρίνουμε τρία στάδια στη διαδικασία απομάκρυνσης – συγκράτησης των αιωρούμενων στερεών στο φίλτρο:

1^ο Στάδιο: Μεταφορά των αιωρούμενων στερεών. Σε αυτό το στάδιο τα αιωρούμενα στερεά πλησιάζουν τους κόκκους του διηθητικού υλικού με τη δράση μηχανισμών όπως η καθίζηση λόγω βαρύτητας, η διάχυση, η ανάσχεση και οι υδροδυναμικές δυνάμεις.

- **Καθίζηση.**

Η καθίζηση είναι σημαντική όταν η ταχύτητα καταβύθισης των αιωρούμενων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ρευστού μέσα στους πόρους. Τα αιωρούμενα με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του νερού υφίστανται τη δύναμη της βαρύτητας, η οποία προκαλεί μια ταχύτητα καθίζησης (V_s) που δίνεται από το νόμο του Stokes.

$$V_s = \frac{1}{18} \frac{g}{\mu} (\rho_{s'} - \rho_w) d^2$$

Όπου ρ_w η πυκνότητα του νερού

ρ_s η πυκνότητα του στερεού

μ το ιξώδες του υγρού

d η διάμετρος του σφαιρικού στερεού

Η επίδραση της βαρύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$s = \frac{V_s}{V} = \frac{g (\rho_s - \rho) d^2}{18 \mu V}$$

Όπου V η ταχύτητα διήθησης

ρ_s η πυκνότητα αιωρούμενων

ρ η πυκνότητα νερού

Ο δείκτης S δίνει το κλάσμα των θετικών συγκρούσεων (δηλαδή εκείνων που οδηγούν σε συγκόλληση) προς το συνολικό αριθμό των πιθανών συγκρούσεων και παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1,4.

- **Αδράνεια**

Οι γραμμές ροής αποκλίνουν καθώς πλησιάζουν ένα κόκκο διηθητικού υλικού. Αν το αιωρούμενο στερεό έχει σημαντική αδράνεια ακολουθεί διαφορετική πορεία από αυτή της γραμμής ροής και συγκρούεται με την επιφάνεια του κόκκου. Ο συντελεστής σύγκρουσης E δίνει τον αριθμό των αιωρούμενων στερεών που συγκρούονται με έναν κόκκο προς τον αριθμό που πλησιάζει τον κόκκο σε μεγάλη απόσταση.

$$E = \frac{\rho_s d^2 V}{18 \mu D}$$

Όπου V η ταχύτητα με την οποία πλησιάζει το νερό τον κόκκο σε άπειρη απόσταση (σε σχέση με τον κόκκο)

D η διάμετρος του κόκκου

- **Ανάσχεση**

Αιωρούμενα στερεά που βρίσκονται σε γραμμές ροής αρκετά κοντά στην επιφάνεια των κόκκων, θα ακουμπήσουν σε αυτούς και θα συγκρατηθούν. Ουσιαστικά είναι το τελευταίο βήμα πριν την επαφή των αιωρούμενων στερεών με τους κόκκους σε όλες τις περιπτώσεις μεταφοράς και συγκόλλησης, γι' αυτό και δεν είναι εύκολο να γίνει η διάκριση από άλλους μηχανισμούς. Η δράση της ανάσχεσης είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των αιωρούμενων στερεών. Δείκτης του βαθμού ανάσχεσης είναι ο λόγος των ακτινών αιωρούμενων στερεών και κόκκων, αν αυτά ληφθούν σφαιρικά.

$$I = \frac{d}{D}$$

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του I τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του μηχανισμού αυτού. Τιμές κοντά στο 1 σημαίνουν ότι η ανάσχεση είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός.

- **Υδροδυναμικές δυνάμεις**

Στη γραμμική ροή σε μη ομοιόμορφο πεδίο, όπως είναι οι πόροι του φίλτρου, οι ταχύτητες του νερού μεταβάλλονται από μηδέν στα τοιχώματα των πόρων έως ένα μέγιστο στο μέσο τους. Οι μεταβολές αυτές προκαλούν περιστροφή των αιωρούμενων στερεών, παράγουν σφαιρικό πεδίο ροής και αναγκάζουν το στερεό να κινείται στην περιοχή με τις υψηλότερες ταχύτητες. Καθώς οι πόροι του διηθητικού υλικού έχουν διαφορετικά σχήματα και μεγέθη, οι υδροδυναμικές δυνάμεις είναι σύνθετες και χρονικά μεταβλητές. Αν τα αιωρούμενα στερεά δεν είναι σφαιρικά (όπως συμβαίνει στην πράξη) το κέντρο βάρους τους δεν ταυτίζεται με το υδροδυναμικό τους κέντρο, με αποτέλεσμα μη ομοιόμορφη και μη γεωμετρικά σταθερή περιστροφή.

Η πολυπλοκότητα των υδροδυναμικών δράσεων μπορεί να παρασταθεί από τον αριθμό Reynolds, οι μεταβολές του οποίου προκαλούν σημαντικές μεταβολές στην κατανομή των ταχυτήτων στους πόρους.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu}$$

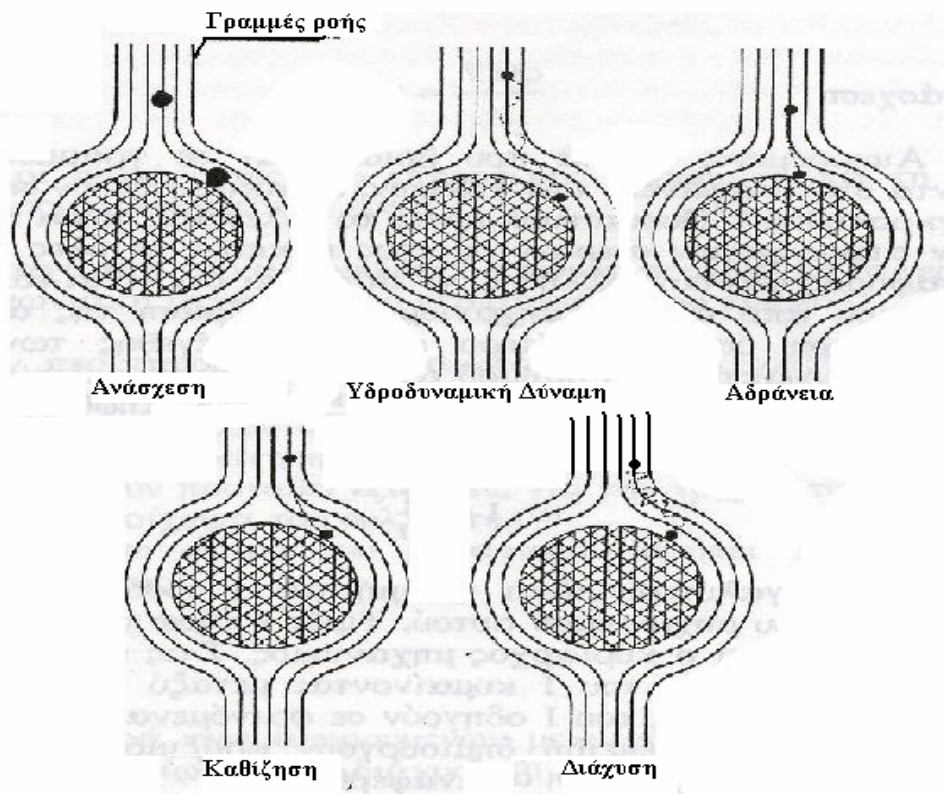
- **Διάχυση**

Η μεταφορά των αιωρούμενων με μέγεθος μικρότερο του 1μm ελέγχεται κυρίως από τη διάχυση λόγω κίνησης Brown. Η διάχυση οφείλεται στην κίνηση των αιωρούμενων εξαιτίας του βομβαρδισμού που υφίστανται από μόρια νερού που κινούνται τυχαία λόγω της θερμικής τους ενέργειας και έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση των αιωρούμενων στερεών από μία περιοχή με μεγάλη συγκέντρωση σε μία άλλη με μικρότερη. Για τα αιωρούμενα που έχουν τέτοια μεγέθη, η απομάκρυνση ελέγχεται περισσότερο από τη δυνατότητα προσκόλλησης, γι' αυτό η αποσταθεροποίηση και εξουδετέρωση των επιφανειακών φορτίων έχει πολύ μεγάλη επίδραση. Τα φαινόμενο αυτό είναι περισσότερο έντονο σε κολλοειδή εξαιτίας του μικρού μεγέθους και της χαμηλής μάζας τους.

$$B = \frac{K_b T}{3 \pi \mu d}$$

Όπου K_b η σταθερά Boltzmann

T η απόλυτη θερμοκρασία



Εικόνα 2-13. Μηχανισμοί μεταφοράς κατά τη διήθηση στρώματος. (Πηγή: Περιβαλλοντική μηχανική Ι. Διαχείριση Υδατικών πόρων. Λέκκας.)

2^ο Στάδιο: Προσκόλληση στην επιφάνεια των κόκκων ή σε στερεά που έχουν ήδη αποθεθεί. Οι δυνάμεις που δρουν έχουν πολύ μικρή ακτίνα δράσης και η επίδραση τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλεκτροχημεία των επιφανειών.

- **Προσκόλληση**

Όταν τα αιωρούμενα στερεά πλησιάζουν πολύ στην επιφάνεια ενός κόκκου του διηθητικού υλικού ή σε προηγούμενες αποθέσεις, το εάν θα προσκολληθούν ή όχι εξαρτάται από τις διεπιφανειακές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των επιφανειών των αιωρούμενων στερεών και του κόκκου. Οι δυνάμεις αυτές είναι ηλεκτρικής φύσεως, που προέρχονται από δυναμικά στις επιφάνειες, καθώς και μοριακής φύσεως (δυνάμεις Van der Waals). Η απόσταση δράσης των δυνάμεων αυτών είναι πολύ μικρή (μικρότερη από 0.1 μm).

Τα ηλεκτρικά δυναμικά των περισσότερων αιωρούμενων στερεών και κόκκων του διηθητικού υλικού είναι αρνητικά και συνήθως μικρότερα από 20 mV. Οι δυνάμεις απόθησης μεταξύ των επιφανειών δεν είναι σημαντικές, ιδιαίτερα όταν το νερό περιέχει αυξημένες ποσότητες αλάτων. Τα ηλεκτρικά δυναμικά μπορούν να μειωθούν ή και να αντιστραφούν, αν προστεθούν κατάλληλα ιόντα, όπως π.χ. προϊόντα υδρόλυσης του Al^{++} και του Fe^{++} . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προσέγγιση των αιωρούμενων στερεών στην επιφάνεια συλλογής σε απόσταση που δρουν οι δυνάμεις Van der Waals.

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται απευθείας διήθηση (contact filtration), η αποσταθεροποίηση και η συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών δε γίνονται στη δεξαμενή καθίζησης αλλά στο ίδιο το φίλτρο. Η ροή δια μέσου των πόρων προκαλεί περισσότερες συγκρούσεις που θα οδηγήσουν στη συσσωμάτωση και στη συνέχεια τα συσσωματώματα αυτά προσκολλώνται στους κόκκους του διηθητικού υλικού. Όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι του διηθητικού υλικού τόσο περισσότερες είναι οι πιθανότητες για συγκρούσεις των αιωρούμενων και τόσο γρηγορότερη είναι η απομάκρυνση τους από το νερό.

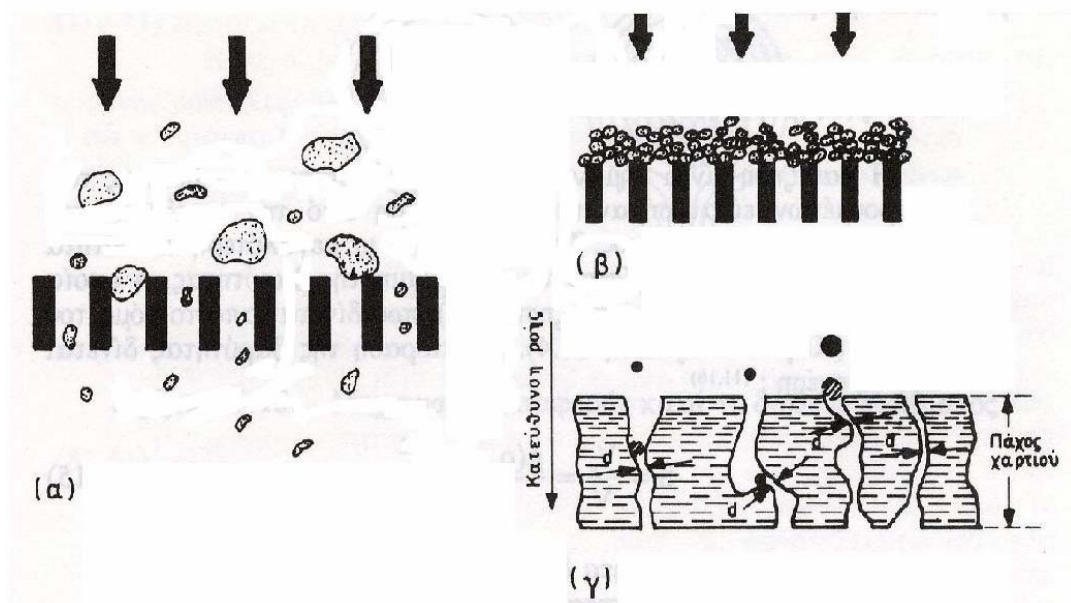
3^ο Στάδιο. Αποκόλληση στερεών και επαναισισαγωγή τους στο διήθημα. Εξαρτάται από την ταχύτητα διήθησης, τα φυσικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων και των κόκκων του διηθητικού υλικού, το χρόνο από την έναρξη της διεργασίας. Μαζική αποκόλληση μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο διαρροής των στερεών που έχουν ήδη εναποτεθεί οπότε ο κύκλος διήθησης πρέπει να τερματιστεί και να γίνει έκπλυση του φίλτρου.

- Το τρίτο στάδιο της διήθησης είναι η αποκόλληση μερικών από τα αιωρούμενα που έχουν ήδη αποτεθεί. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται όταν υπάρξει αύξηση της ταχύτητας ή απότομες μεταβολές της ροής, οπότε αυξάνεται η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια υγρού-ορίου απόθεσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα και όσο μικρότεροι οι πόροι, τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες για αποκόλληση, καθώς αυξάνεται η διατμητική τάση.

Η αποκόλληση είναι ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο, ανεπιθύμητο κατά τη διάρκεια της διήθησης και επιθυμητό κατά τη διάρκεια της έκπλυσης. Για να είναι αποτελεσματική η έκπλυση κατά αντιρροή, πρέπει να επιτευχθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερος βαθμός αποκόλλησης, ώστε οι αποθέσεις να απομακρυνθούν από το νερό έκπλυσής.

Εξαίρεση από τη διαδικασία αυτή έχουμε όταν τα προς απομάκρυνση αιωρούμενα στερεά είναι της ίδια τάξης μεγέθους με τα ανοίγματα των πόρων και ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης είναι το σούρωμα (straining). Ο μηχανισμός αυτός είναι κυρίαρχος όταν ο λόγος του μεγέθους των αιωρούμενων στερεών προς το μέγεθος των κόκκων του διηθητικού υλικού είναι μεγαλύτερος από 0,2.

Με τις αποθέσεις το άνοιγμα των πόρων γίνεται διαρκώς μικρότερο, οπότε αυξάνεται ο αριθμός των αιωρούμενων στερεών μικρού μεγέθους που αποτίθενται.

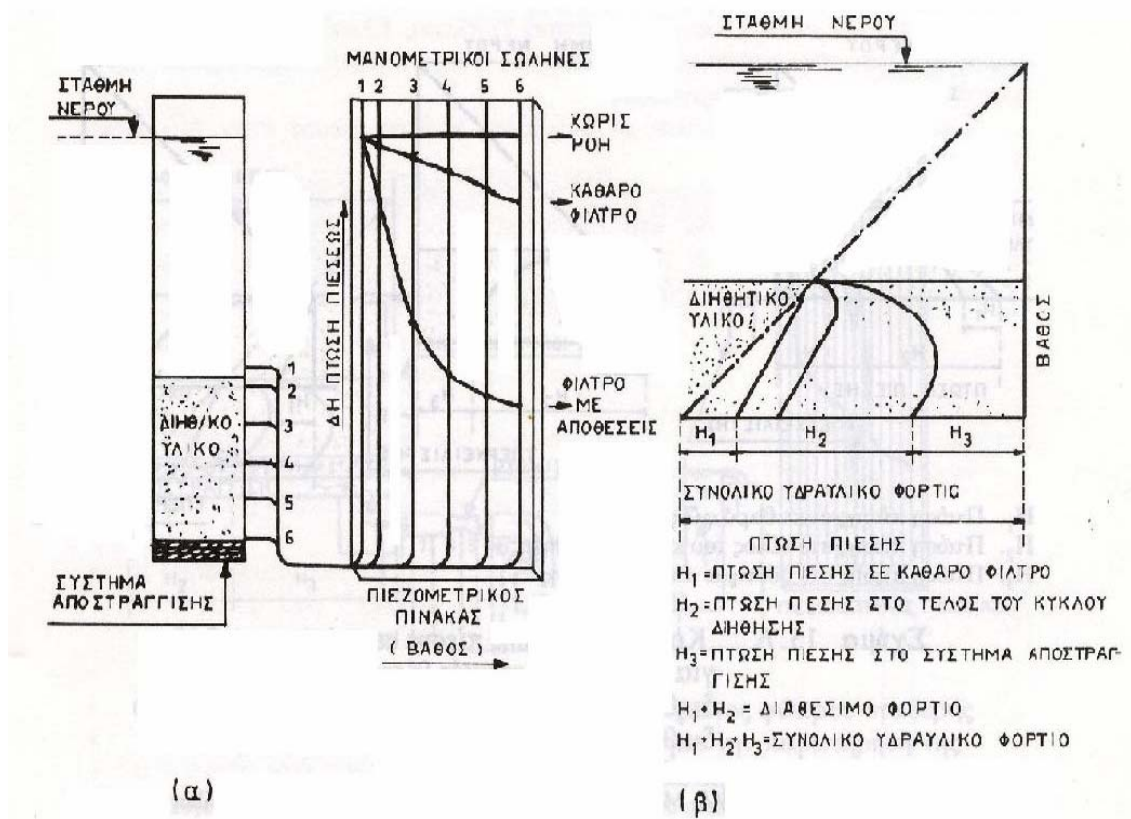


Εικόνα 2-14. Μηχανισμοί διήθησης (Σχηματικά). α) Επιφανειακό σούρωμα, β) Δημιουργία πλακούντα στην επιφάνεια, γ) Σούρωμα σε βάθος. (Πηγή: Περιβαλλοντική μηχανική Ι. Διαχείριση Υδατικών πόρων. Λέκκας.)

2.4.4 Υδραυλική του φίλτρου-Πτώση πίεσης

Τόσο για το σχεδιασμό όσο και για τη σωστή λειτουργία του φίλτρου είναι σημαντική η κατανόηση της υδραυλικής του. Η πτώση πίεσης μέσα στο φίλτρο μπορεί να παρατηρηθεί από τα επίπεδα νερού σε μανομετρικούς σωλήνες, οι οποίοι συνδέονται με το φίλτρο σε διάφορα βάθη του. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ροή, η πτώση πίεσης από ένα σημείο σε ένα άλλο σημείο του στρώματος είναι μηδέν. Η πίεση σε κάθε βάθος του στρώματος ισούται με τη στήλη του νερού πάνω από αυτό.

Όταν υπάρχει ροή προκαλείται πτώση πίεσης που οφείλεται στις αντιστάσεις λόγω τριβής κατά τη διέλευση του νερού μέσα από το στρώμα του κοκκώδους υλικού και στην έξοδο του νερού από το σύστημα αποστράγγισης. Αυτή η πτώση πίεσης αν εκφραστεί σε στήλη νερού είναι ίση με την κάθετη απόσταση μεταξύ της στάθμης του νερού πάνω από το φίλτρο και της στάθμης του νερού στους μανομετρικούς σωλήνες.



Εικόνα 2-15. Πτώση πίεσης σε φίλτρο στρώματος. α) Πτώση πίεσης όπως παρατηρείται σε μανόμετρα συνδεδεμένα με διάφορα βάθη του φίλτρου β) Συνηθισμένη παράσταση καμπυλών πτώσης πίεσης σε σχέση με το βάθος. (Πηγή: Περιβαλλοντική μηχανική Ι. Διαχείριση Υδατικών πόρων. Λέκκας.)

Όταν το φίλτρο είναι καθαρό, η καμπύλη της πτώσης πίεσης με το βάθος είναι ευθεία, όταν έχουμε ομοιομορφία μεγέθους του κοκκώδους υλικού με το βάθος του στρώματος. Όταν αρχίσουν να γίνονται αποθέσεις στο φίλτρο η καμπύλη παίρνει τη μορφή εκθετικής συνάρτησης. Το σχήμα των καμπυλών αυτών εξαρτάται από το σημείο που βρίσκεται ο υπερχειλιστής του διηθημένου νερού, σε σχέση με την επιφάνεια του διηθητικού μέσου.

Ως εκ τούτου για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης χρησιμοποιείται η εξίσωση Carman-Kozeny:

$$h = L \frac{k\mu(1-\varepsilon)^2}{\rho g \varepsilon^3} \left(\frac{\alpha}{u}\right)^2 U$$

Όπου

h = Πτώση πίεσης στο στρώμα

L = Ύψος Στρώματος

K = Σταθερά Kozeny

μ = Ιξώδες

ρ = Πυκνότητα

g = Επιτάχυνση της βαρύτητας

ε = Πορώδες

$\left(\frac{\alpha}{u}\right)^2 = S$ = Ειδική επιφάνεια = Επιφάνεια ανά όγκο κόκκου

U = Ρυθμός διήθησης στο SI

2.5 Αντικείμενο έρευνας

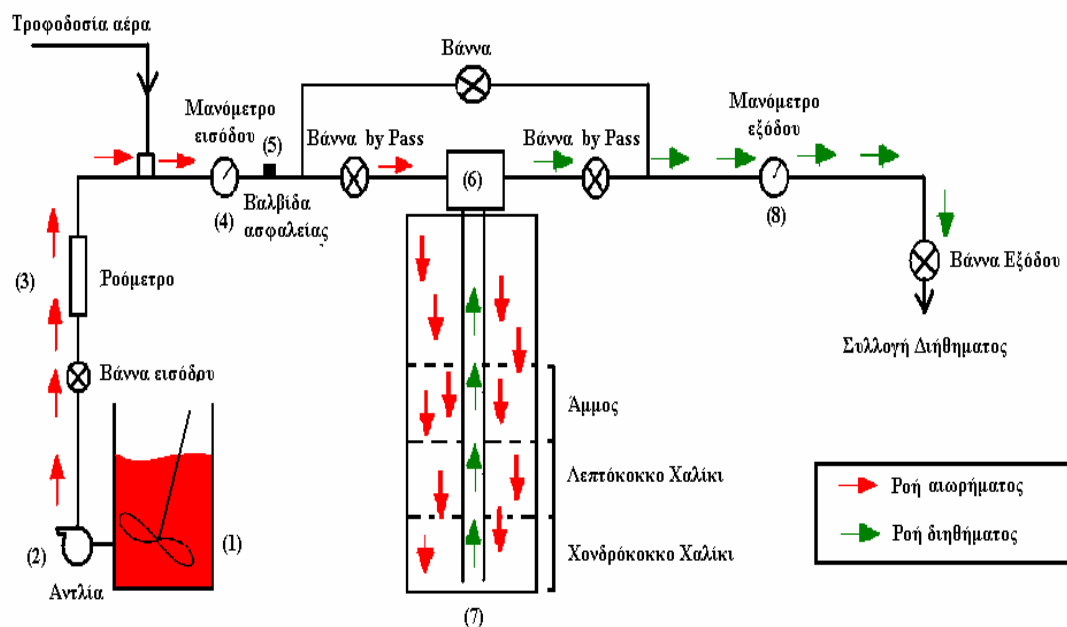
. Όπως φαίνεται και από τον τίτλο της, η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη.

- Κατά τη φάση της εγκατάστασης έπρεπε να επιλέγουν τα επιμέρους τμήματα και όργανα που θα αποτελούσαν την μονάδα ώστε αυτή να είναι λειτουργική και αποδοτική.
- Κατά τη φάση λειτουργίας προσομοιώσαμε την εκροή ενός βιολογικού καθαρισμού με ένα διάλυμα καολίνη το οποίο διηθήσαμε στη μονάδα. Για την αύξηση της απόδοσης της μονάδας κάναμε χρήση και αλάτων αργιλίου ως κροκιδωτικού. Μετά το πέρας της διήθησης ελέγχθηκε και καταγράφηκε η θολότητα της εκροής με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τόσο με την αρχική θολότητα όσο και η αύξηση ή όχι της απόδοσης της μονάδος με τη χρήση του κροκιδωτικού.

Κεφάλαιο 3— Πειραματικό Μέρος

3.1 Εξοπλισμός

Ακολουθώντας ένα θεωρητικό διάγραμμα ροής του αιωρήματος καταλήξαμε ότι θα χρειαζόμασταν για την δημιουργία της μονάδος:



Εικόνα 3-1. Διάγραμμα ροής φίλτρου

1^ο Ένα δοχείο στο οποίο θα γινόταν η δημιουργία του αιωρήματος

2^ο Κάποιο μέσο το οποίο θα τροφοδοτούσε το κυρίως σώμα της μονάδος με το αιώρημα, το οποίο επιλέχθηκε να είναι μία ηλεκτρική αντλία.

3^ο Ένα ροόμετρο για την μέτρηση της παροχής που επιθυμούσαμε.

4° Ένα μανόμετρο προκειμένου να μετριέται η πίεση εισόδου του αιωρήματος.

5° Μια βαλβίδα ασφαλείας για την περίπτωση που είχαμε μεγαλύτερες των επιθυμητών πιέσεις.

6° Μία κεφαλή η οποία θα ρύθμιζε τις λειτουργίες του φίλτρου.(λειτουργία διήθησης— λειτουργία αυτοκαθαρισμού)

7° Κυρίως σώμα του φίλτρου το οποίο θα έκανε την διήθηση (φιάλη)

8° Ένα μανόμετρο για την μέτρηση της πίεσης εξόδου του διηθήματος.

9° Σωληνώσεις για την σύνδεση των επιμέρους τμημάτων.

3.1.1 Δοχείο δημιουργίας αιωρήματος

Λαμβάνοντας υπόψη το χώρο επιλέχθηκε πλαστικό δοχείο όγκου 100 λίτρων στο οποίο έγινε προσθήκη 2,5 gr καολίνη για την δημιουργία αιωρήματος θολότητας 15—17 NTU δηλαδή κοντά στην θολότητα της εκροής ενός βιολογικού καθαρισμού. Η ανάδευση γίνεται είτε χειρωνακτικά είτε με χρήση μηχανικού αναδευτήρα.

3.1.2 Ηλεκτρική αντλία

Η ηλεκτρική αντλία που επιλέχθηκε ήταν της εταιρίας WILO και το μοντέλο WJ 201 X EM. Η συγκεκριμένη αντλία λειτουργεί με ηλεκτρική τάση 220 V και έχει συχνότητα 50—60 HZ. Λειτουργεί με μέγιστη ένταση 3,8 A και μέγιστη θερμοκρασία ρευστού 65°C. Παράγει μέγιστη πίεση της τάξης των 6 bar ενώ έχει αρχική πίεση 2,2 bar. Η ισχύς της φτάνει τα 8 KW και έχει ανυψωτική ικανότητα του ρευστού έως το ύψος των 42 μέτρων.

3.1.3 Ροόμετρο

Το ροόμετρο μετράει μέγιστη παροχή 1000 l/h και έχει ακρίβεια 20 l/h. Είναι βαθμονομημένο με νερό σε θερμοκρασία 20°C και πυκνότητας 1 kg/l. Το αιώρημα μας δεν διαφέρει κατά πολύ στην θερμοκρασία και την πυκνότητα οπότε το ροόμετρο κρίνεται αξιόπιστο.

3.1.4 Βαλβίδα ασφαλείας

Η βαλβίδα ασφαλείας που τοποθετήθηκε μεταξύ του μανομέτρου εισόδου και της κεφαλής έχει ως στόχο την προστασία της φιάλης από υδραυλικό πλήγμα. Σε περίπτωση πίεσης μεγαλύτερης των 3bar ή 50 kgf, η βαλβίδα ανοίγει αυτόματα για να μειωθεί η πίεση. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη βαλβίδα καθώς η εταιρία που προμήθευσε την φιάλη έχει δοκιμάσει την υδατοστεγανότητα της με πίεση εισόδου 3bar.

3.1.5 Μανόμετρα

Τα μανόμετρα εισόδου του αιωρήματος και εξόδου του διηθήματος είναι τα ίδια καθώς η πίεσεις που μετράνε είναι της ίδιας τάξης. Μπορούν να μετρήσουν μέγιστη πίεση 2,5 bar ή 36 PSI και έχουν ακρίβεια 0,1 bar.

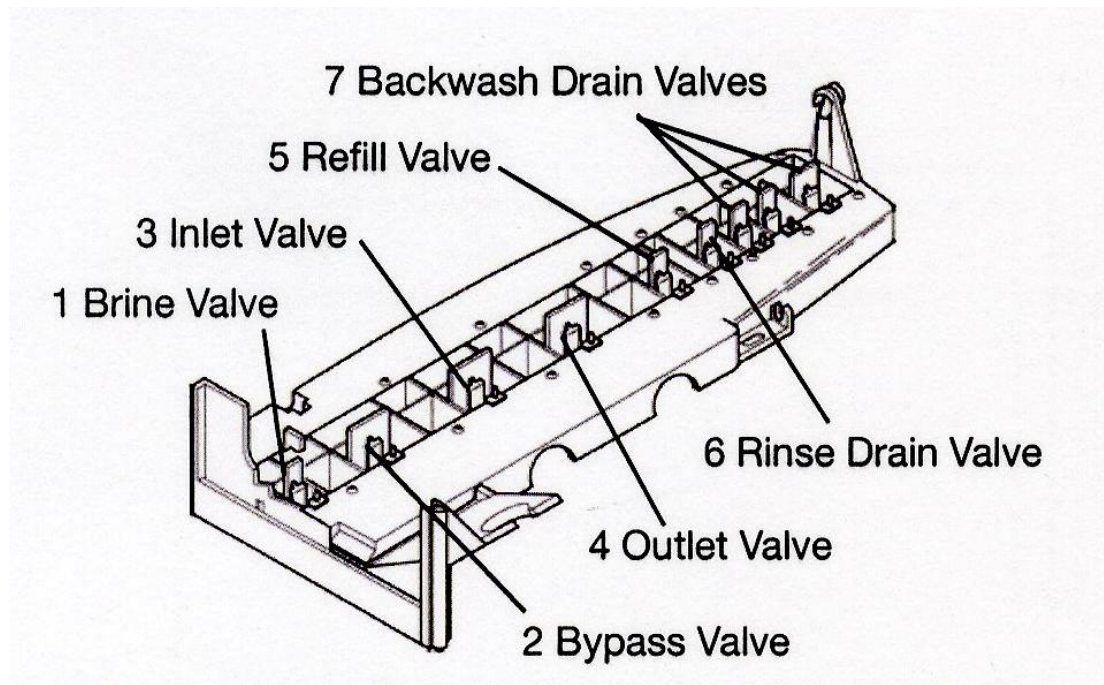
3.1.6 Κεφαλή μονάδος

Η κεφαλή της μονάδος επιλέχθηκε να είναι το μοντέλο 440i της εταιρίας Milwaukee, WL USA με ειδικά χαρακτηριστικά WO# 4244052 και σειριακό αριθμό 440304035841.

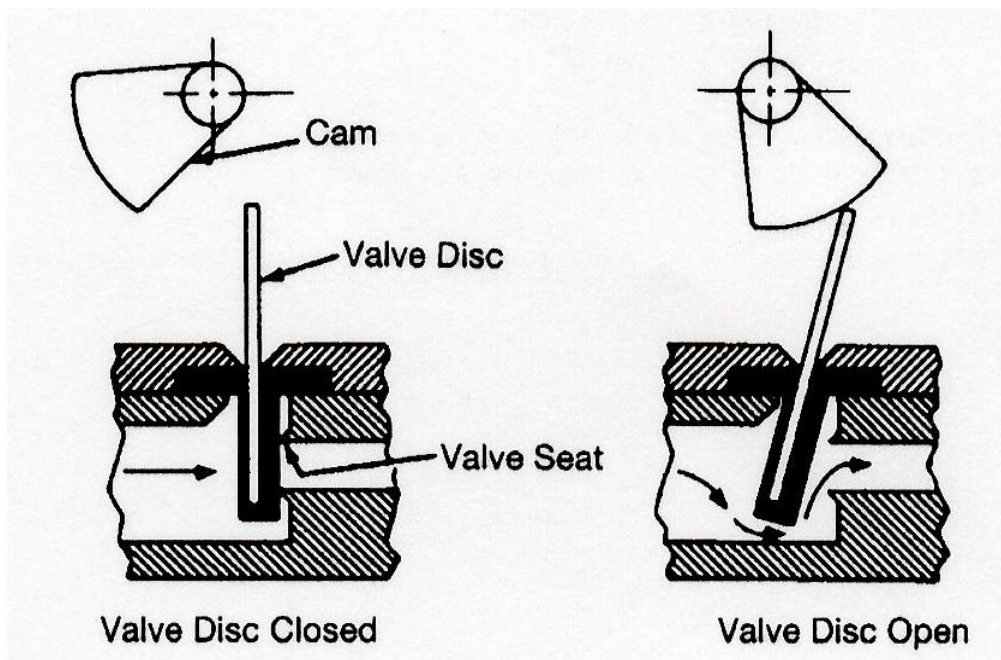
Έχει περιστροφικό επιλογέα φάσεων που μας επιτρέπει να ορίζουμε της λειτουργίες του φίλτρου δηλαδή λειτουργία διήθησης ή λειτουργία αυτοκαθαρισμού. Αυτό επιτυγχάνεται πιέζοντας τον επιλογέα προς τα μέσα με ένα κατσαβίδι και στρέφοντας τον αντίστροφα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού ώστε να δείχνει την επιθυμητή ένδειξη.

Η αρχή λειτουργίας της κεφαλής στηρίζεται σε ένα σύστημα βαλβίδων που ανοίγουν και κλείνουν με τη βοήθεια ενός άξονα. Ο άξονας έχει εξογκώματα και περιστρέφεται μαζί με τον επιλογέα φάσεων έτσι ώστε ανάλογα με τη λειτουργία να ανοίγει τις συγκεκριμένες βαλβίδες.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βαλβίδες, η λειτουργία της κάθε μίας καθώς και ο τρόπος με τον οποίο ανοίγουν.

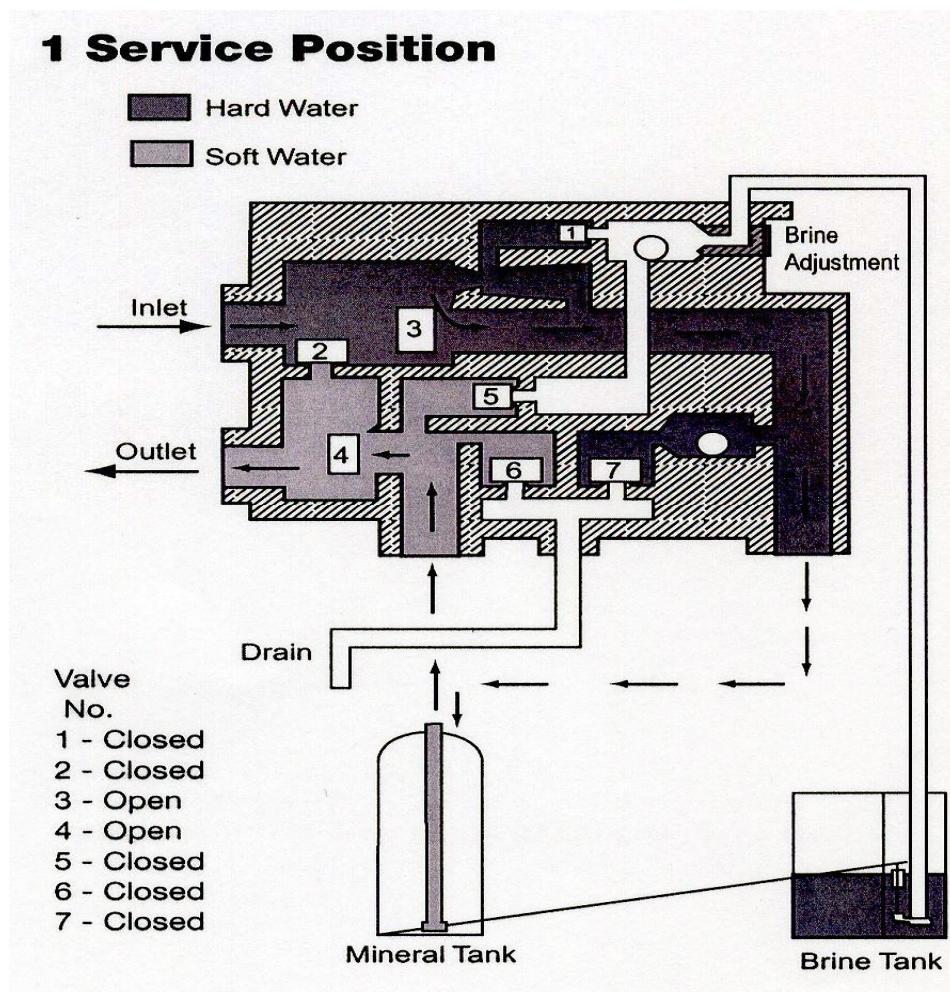


Σχήμα 3-2 Επεξήγηση λειτουργιών βαλβίδων εσωτερικά της κεφαλής (πηγή : Water conditioning control system Dealer installation, Operation and Maintenance Manual)



Σχήμα 3-3 Τρόπος λειτουργίας βαλβίδων κεφαλής (πηγή : Water conditioning control system Dealer installation, Operation and Maintenance Manual)

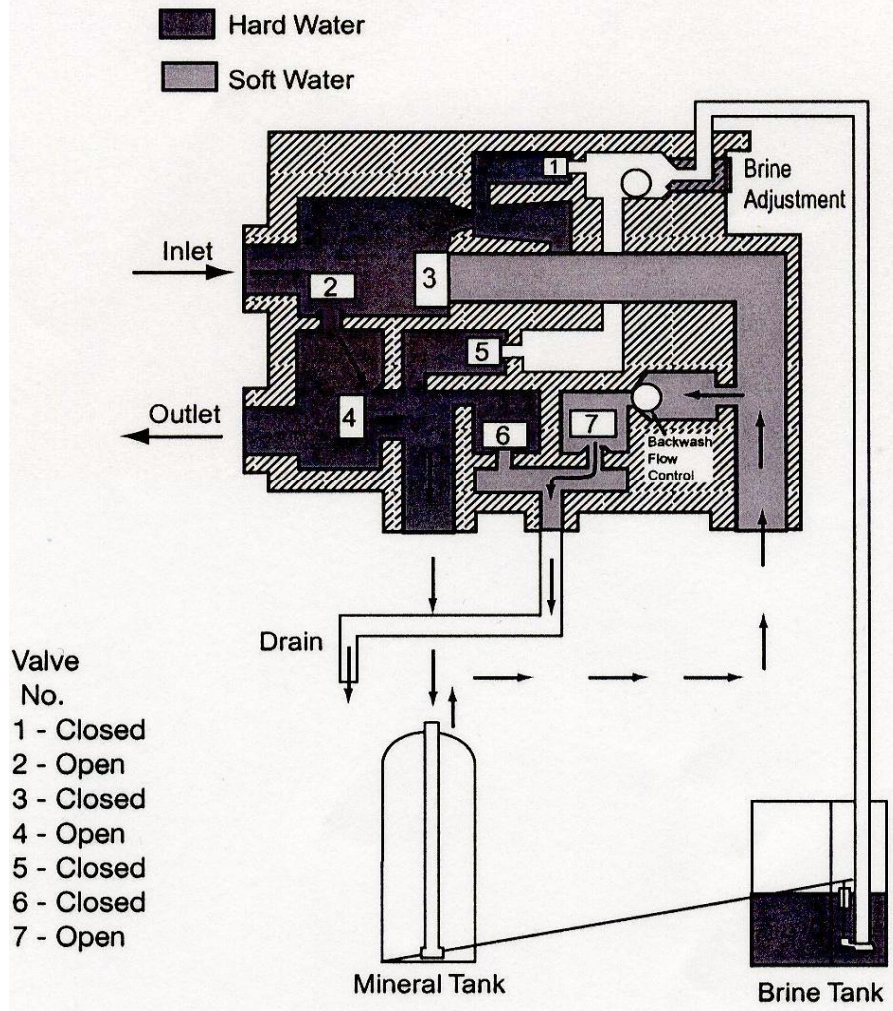
Κατά την φάση λειτουργίας οι βαλβίδες 3 και 4 παραμένουν ανοικτές ενώ όλες οι υπόλοιπες είναι κλειστές. Το αιώρημα εισέρχεται και περνώντας από τη βαλβίδα 3 καταλήγει στο κύριο σώμα του φίλτρου όπου διηθείται. Το διήθημα στη συνέχεια εξέρχεται της φιάλης περνάει από τη βαλβίδα 4 και καταλήγει στην έξοδο όπου συλλέγετε και αναλύεται. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής εσωτερικά της κεφαλής κατά τη φάση λειτουργίας.



Σχήμα 3-4 Διάγραμμα ροής εσωτερικά της κεφαλής κατά τη φάση λειτουργίας (πηγή: Water conditioning control system Dealer installation, Operation and Maintenance Manual)

Κατά τη φάση αυτοκαθαρισμού οι βαλβίδες που ανοίγουν είναι η 2, 4 και 7. Το νερό εισέρχεται και περνώντας από την βαλβίδα 2, ένα μέρος καταλήγει στην έξοδο ενώ ένα άλλο μέρος εισέρχεται στη μονάδα με αντίθετη ροή από αυτή της φάσης λειτουργίας. Η αντίθετη ροή του νερού προκαλεί ρευστοποίηση στην κλίνη και κατά την έξοδο του από αυτή συμπαρασύρει στερεά που είχαν κατακρατηθεί κατά τη φάση λειτουργίας. Τέλος το νερό μαζί με τα στερεά απομακρύνονται από την έξοδο των αποβλήτων και καταλήγουν στην αποχέτευση. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής κατά τη φάση αυτοκαθαρισμού εσωτερικά της κεφαλής.

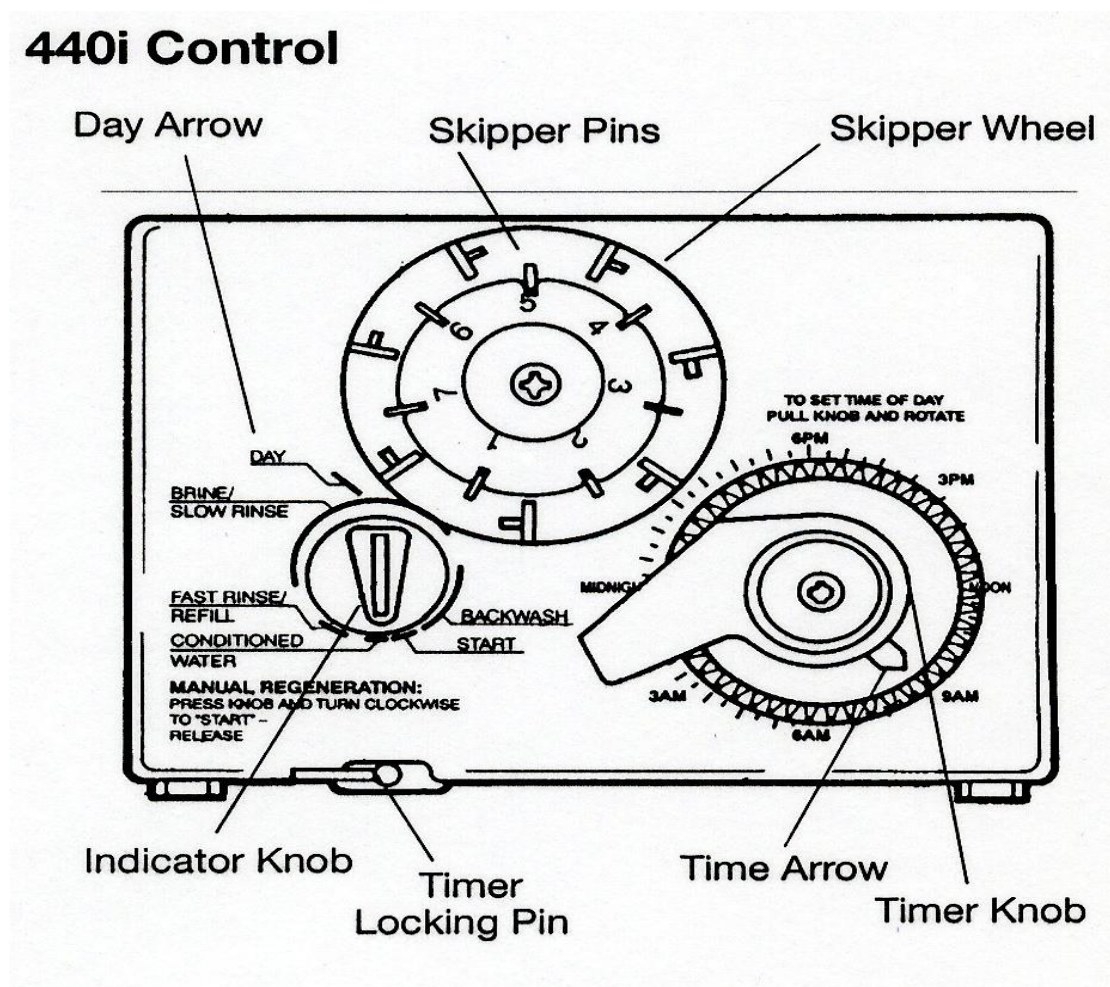
2 Backwash Position



Σχήμα 3-5 Διάγραμμα ροής εσωτερικά της κεφαλής κατά τη φάση αυτοκαθαρισμού (πηγή: Water conditioning control system Dealer installation, Operation and Maintenance Manual)

Για την λειτουργία αυτοκαθαρισμού έχουμε την δυνατότητα να ρυθμίσουμε την κεφαλή ώστε αυτή να γίνεται αυτόματα. Για να το επιτύχουμε αυτό συνδέουμε την κεφαλή με το ρεύμα.

Στη συνέχεια ρυθμίζουμε τις μέρες που θέλουμε να γίνεται ο αυτοκαθαρισμός, τραβώντας τον πίρο του επιλογέα ημερών προς τα έξω, περιστρέφουμε τον επιλογέα εωσότου αυτός να δείχνει την επιθυμητή ημέρα και τον απελευθερώνουμε. Για τη ρύθμιση της ώρας της ημέρας που θέλουμε να γίνεται η αναγέννηση ακολουθούμε την αντίστοιχη διαδικασία με παραπάνω, αλλά με τον επιλογέα ωρών.



Σχήμα 3-6 Επιλογείς ημερών, ωρών και λειτουργίας κεφαλής (πηγή: Water conditioning control system Dealer installation, Operation and Maintenance Manual)

3.1.7 Κύριο σώμα φίλτρου (φιάλη)

Το κυρίως σώμα του φίλτρου, το οποίο πραγματοποιεί και τη διήθηση, είναι κατασκευασμένο από plexy glass ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση της λειτουργίας και η κατανόηση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα.

Αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα τη άνω βάση, ένα κύλινδρο και την κάτω βάση. Η υδατοστεγανότητα του επιτυγχάνεται με την συγκόλληση των τμημάτων με σιλικόνη καθώς επίσης και με τη χρήση σφικτήρων που στηρίζονται στις δύο βάσεις αυτού. Από το γεγονός ότι το φίλτρο είναι κλειστό θεωρείται φίλτρο πίεσεως.

Ο κύλινδρος έχει ύψος $H=100cm$, διάμετρο $D=23.5cm$ και συνολικό όγκο $V = \frac{\pi D^2}{4} H = 43351.63cm^3$ εκ του οποίου τα 3/5 καταλαμβάνονται από το υλικό πλήρωσης. Αυτό αποτελείται από τρία στρώματα τα οποία κατά τη ροή του αιωρήματος στη φάση λειτουργίας εσωτερικά της φιάλης έχουν τη διάταξη άμμος, λεπτόκοκκο χαλίκι, χονδρόκοκκο χαλίκι καθένα εκ των οποίων έχει ύψος $h=20cm$. Η διήθηση λαμβάνει χώρα στο στρώμα της άμμου, καθώς αυτό είναι το πιο λεπτόκοκκο και συναντάται πρώτο από το αιώρημα.

3.1.8 Σωληνώσεις

Οι σωληνώσεις που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν για την σύνδεση των επιμέρους τμημάτων είναι ευνόητο ότι διαφέρουν στα μήκη και στις διατομές καθώς οι υποδοχείς και οι αποστάσεις των τμημάτων διαφοροποιούνται. Όλες οι σωληνώσεις παρά ταύτα επιλέχθηκαν να είναι πλαστικές ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν ευκολότερα στο χώρο, να είναι ελαφρύτερη η όλη διάταξη και να μειωθεί το κόστος. Η σωλήνωση της εισροής έχει μήκος περίπου 1.5 m και διάμετρο 32 mm ενώ αυτή της εκροής έχει μήκος περίπου 2.5 m και διάμετρο 25mm. Τέλος οι σωληνώσεις που συνδέουν τα όργανα πάνω στο φίλτρο έχουν διάφορα μήκη με διάμετρο 25 mm.

3.2 Εγκατάσταση

Αφού επιλέχθηκαν όλα τα επιμέρους τμήματα που θα χρησιμοποιούνταν, σειρά παίρνει τώρα η εγκατάσταση τους, ώστε το διάγραμμα ροής του αιωρήματος που θεωρήσαμε να πάρει σάρκα και οστά.

Πρώτα από όλα συνδέουμε το δοχείο παρασκευής του αιωρήματος με την ηλεκτρική αντλία για να καταφέρουμε το αιώρημα να φτάσει σε ύψος 1.30 m όπου βρίσκεται η είσοδος του φίλτρου.

Αμέσως μετά παρεμβάλλεται το ροόμετρο για την μέτρηση των παροχών εισόδου και ακολουθεί η βαλβίδα ασφαλείας των 3 bar. Στη συνέχεια το αιώρημα συναντά το μανόμετρο εισόδου και την είσοδο της κεφαλής όπου εισέρχεται και καταλήγει στο κύριο σώμα του φίλτρου για διήθηση.

Το διήθημα περνάει από το μανόμετρο εξόδου, καταλήγει στην εκροή και στη συνέχεια στην αποχέτευση. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα συλλέγουμε δείγμα και το αναλύουμε στο θολόμετρο για την εύρεση της θολότητας του.

Αξίζει να αναφερθεί ότι μεταξύ βαλβίδας ασφαλείας και μανόμετρου εισόδου παρεμβάλλεται μία σωλήνωση by pass οποία καταλήγει αμέσως μετά το μανόμετρο εξόδου. Ανοίγοντας δύο βάννες οδηγούμε το εισερχόμενο αιώρημα στην εκροή χωρίς αυτό να περάσει από τη φιάλη διήθησης. Χρήση του by pass γίνεται σε περιπτώσεις που το αιώρημα εάν εισέλθει στο φίλτρο μπορεί να προκαλέσει προβλήματα.

3.3 Επιλογή θολότητας αιωρήματος

Όπως προαναφέρθηκε κατά τη φάση λειτουργίας έπρεπε να προσομοιωθεί η εκροή ενός βιολογικού καθαρισμού με ένα διάλυμα καολίνη. Επειδή η εκροή έχει θολότητα μεταξύ 15-17 NTU καταλήξαμε στη χρήση 2.5 gr καολίνη ανά 100 l νερού ο οποίος

προσδίδει τέτοια θολότητα στο αιώρημα και έχει παρεμφερείς ιδιότητες με τα αιωρούμενα στερεά που συναντιούνται στην εκροή.

3.4 Επιλογή παροχών διήθησης

Επιπλέον έπρεπε να επιλεγθούν οι ρυθμοί διήθησης στο φίλτρο. Επειδή η κλίνη ήταν βαθειά και πολυστρωματική επιλέχθηκαν οι ρυθμοί των $120 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και των $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ οι οποίοι μεταφράζονται βάση των διαστάσεων του φίλτρου σε παροχές 312 και 520 l/h αντίστοιχα.

3.5 Λειτουργία διήθησης

Πριν την έναρξη της διαδικασίας διήθησης ελέγχουμε εάν ο επιλογέας φάσεων βρίσκεται στη θέση για τη λειτουργία διήθησης. Στη συνέχεια ελέγχουμε τη βάννα του δοχείου του αιωρήματος εάν είναι ανοικτή ώστε αυτό να μπορεί να φτάσει στην αντλία, τις βάννες εισόδου του φίλτρου και by pass ώστε αυτές να είναι κλειστές και τέλος ανοίγουμε τη βάννα εξόδου του φίλτρου.

Αφού έχουμε ελέγξει τα παραπάνω συνδέουμε την αντλία με το ρεύμα και ανοίγουμε τη βάννα εισόδου αργά, για να μην προκαλέσουμε υδραυλικό πλήγμα στο φίλτρο, εωσότου φτάσουμε στην επιθυμητή παροχή που ελέγχουμε από το ροόμετρο.

Το διήθημα που βγαίνει από την εκροή το συλλέγουμε και το οδηγούμε για μέτρηση της θολότητας στο θολόμετρο.

3.6 Λειτουργία αυτοκαθαρισμού

Κατά τον αυτοκαθαρισμό στρέφουμε τον επιλογέα φάσεων αριστερόστροφα στην θέση backwash position. Γεμίζουμε το δοχείο του αιωρήματος με νερό και κάνουμε τον ίδιο έλεγχο με αυτόν στη φάση διήθησης. Ανοίγουμε αργά την παροχή νερού στο μέγιστο δυνατό.

Επειδή μόνο ένα μέρος του νερού εισέρχεται στο εσωτερικό του φίλτρου η πίεση που δημιουργείται δεν είναι αρκετή για ρευστοποίηση της κλίνης. Μπορούμε όμως να αυξήσουμε την πίεση και να προκαλέσουμε ρευστοποίηση απλά κλείνοντας λίγο την βάννα εξόδου του φίλτρου προσέχοντας όμως την πίεση ώστε αυτή να μην υπερβεί τα 2 bar.

Κατά τη φάση καθαρισμού της μονάδος μετά τη χρήση κροκιδωτικού στο αιώρημα, ο πλακούντας που δημιουργείται από τα συσσωματώματα του καολίνη είναι πολύ δύσκολο να απομακρυνθεί. Για την απομάκρυνση του χρησιμοποιήθηκε αέρας υπό πίεση από την εγκατάσταση του εργαστηρίου ο οποίος κατά την είσοδο του στο φίλτρο προκαλεί απόξεση του πλακούντα. Η χρήση του αέρα γίνεται χωρίς την ταυτόχρονη χρήση νερού καθώς επέρχεται ταχεία αύξηση της πίεσης στο φίλτρο με φόβο θραύσης της φιάλης.

Τόσο κατά την διήθηση όσο και κατά τον αυτοκαθαρισμό πρέπει να ελέγχεται η στάθμη στο δοχείο ώστε να μην κατέβει χαμηλότερα από το ύψος της σωλήνωσης που το ενώνει με την αντλία καθώς σε μία τέτοια περίπτωση θα είχαμε εισροή αέρα στη φιάλη.

3.7 Εκτέλεση πειραμάτων

Όπως προαναφέρθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές ταχύτητες διήθησης $120 \text{ l/m}^2\text{min}$ και $200 \text{ l/m}^2\text{min}$. Για κάθε μία από τις ταχύτητες αυτές έγινε χρήση κροκιδωτικού σε συγκεντρώσεις των 0, 0,1 και 0,5 mM. Ως κροκιδωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε διάλυμα θεικού αργιλίου ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) το οποίο προστίθετο στο δοχείο του αιωρήματος και αναδεύονταν ήπια για 5 λεπτά.

Προκειμένου να επιτύχουμε αυτές τις συγκεντρώσεις φτιάξαμε ένα διάλυμα των 50 mM σε δοχείο όγκου 20 l από το οποίο προσθέταμε 1λίτρο για συγκέντρωση 0,5 mM και 200 ml για συγκέντρωση 0,1 mM.

Για την Παρασκευή του διαλύματος χρησιμοποιήσαμε 333 gr ανά 20 l νερού. Το μοριακό βάρος του $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ είναι 666.

Στη συνέχεια ακολουθεί η διήθηση κατά τη διάρκεια της οποίας ανά 2 λεπτά δείγματα του διηθήματος συλλέγονται, μετριέται η θολότητα τους και καταγράφονται. Κριτήριο για το πέρας της διαδικασίας είναι ή η πτώση πίεσης στο φίλτρο την οποία ο κατασκευαστής ορίζει ως μέγιστη στα 0,4 bar ή η ποιότητα της εκροής.

Κεφάλαιο 4 — Αποτελέσματα-Σύγκριση αποτελεσμάτων

Όπως προαναφέραμε για κάθε ένα από τους ρυθμούς διήθησης έγινε χρήση τριών διαφορετικών συγκεντρώσεων κροκιδωτικού 0 M , 0.1 mM και 0.5 mM. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για αυτούς του ρυθμούς και για την αναμενόμενη πτώση πίεσης στο φίλτρο.

4.1 Αποτελέσματα πτώσης πίεσης στο φίλτρο

Στο συγκεκριμένο φίλτρο η πτώση πίεσης για την αρχή της διήθησης και για τους ρυθμούς διήθησης των 120 και 200 l/ m² min είναι:

ιδιότητα	Άμμος
Σφαιρικότητα, Φ	0,82
Μέση διάμετρος κόκκων, mm	0,6
Πορώδες	0,35

Η ταχύτητες διήθησης στο SI είναι 120 l/m² min=2 10⁻³ m/s

200 l/m²min=3,3 10⁻³ m/s

A) Υπολογίζουμε τον αριθμό Reynolds για το στρώμα της άμμου για κάθε ένα από τους ρυθμούς διήθησης μέσω της εξίσωσης : $N_{Re} = \frac{\Phi d_i \rho U}{\mu}$

Όπου

N_{Re} = Αριθμός Reynolds

Φ = Σφαιρικότητα

D_i = Μέση διάμετρος κόκκων

ρ = Πυκνότητα

U = Ρυθμός διήθησης στο SI

μ = Ιξώδες

$$N_{Re120} = \frac{\Phi d_i \rho U}{\mu} = \frac{0,82(0,6 \times 10^{-3} m)(1000 kg / m^3)(2 \times 10^{-3} m / s)}{1,002 \times 10^{-3} N s / m^2} \Rightarrow N_{Re120} = 0,984$$

$$N_{Re200} = \frac{\Phi d_i \rho U}{\mu} = \frac{0,82(0,6 \times 10^{-3} m)(1000 kg / m^3)(3,3 \times 10^{-3} m / s)}{1,002 \times 10^{-3} N s / m^2} \Rightarrow N_{Re200} = 1,62$$

B) Επειδή ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από 6, χρησιμοποιούμε την εξίσωση Carman-Kozeny για να προσδιορίσουμε την πτώση πίεσης στο φίλτρο.

$$h = L \frac{k \mu (1 - \varepsilon)^2}{\rho g \varepsilon^3} \left(\frac{\alpha}{u} \right)^2 U$$

Όπου

h = Πτώση πίεσης στο στρώμα

L = Ύψος Στρώματος

K = Σταθερά Kozeny

μ = Ιξώδες

ρ = Πυκνότητα

g = Επιτάχυνση της βαρύτητας

ε = Πορώδες

$\left(\frac{\alpha}{u} \right)^2 = S = \text{Ειδική επιφάνεια} = \text{Επιφάνεια ανά όγκο κόκκου}$

U = Ρυθμός διήθησης στο SI

$$\left(\frac{\alpha}{u} \right)^2 = \frac{6}{0,82(0,6 \times 10^{-3} m)} = 12,195 m^{-1}$$

$$h_{120} = 0,20m \frac{5(10^{-3} \text{Ns} / \text{m}^2)}{(1000 \text{Kg} / \text{m}^3)(9,81 \text{m} / \text{s}^2)} \frac{(1-0,35)^2}{0,35^3} (12,195 \text{m}^{-1})^2 2 \times 10^{-3} \text{m} / \text{s} = 0,29 \text{m} \text{ ή } 29 \text{cm}$$

$$h_{200} = 0,20m \frac{5(10^{-3} \text{Ns} / \text{m}^2)}{(1000 \text{Kg} / \text{m}^3)(9,81 \text{m} / \text{s}^2)} \frac{(1-0,35)^2}{0,35^3} (12,195 \text{m}^{-1})^2 3,3 \times 10^{-3} \text{m} / \text{s} = 0,48 \text{m} \text{ ή } 48 \text{cm}$$

Άρα η πτώση πίεσης στην αρχή της διήθησης για το ρυθμό των 120 l/m² min είναι 29 cm και για το ρυθμό των 200 l/m²min είναι 48 cm.

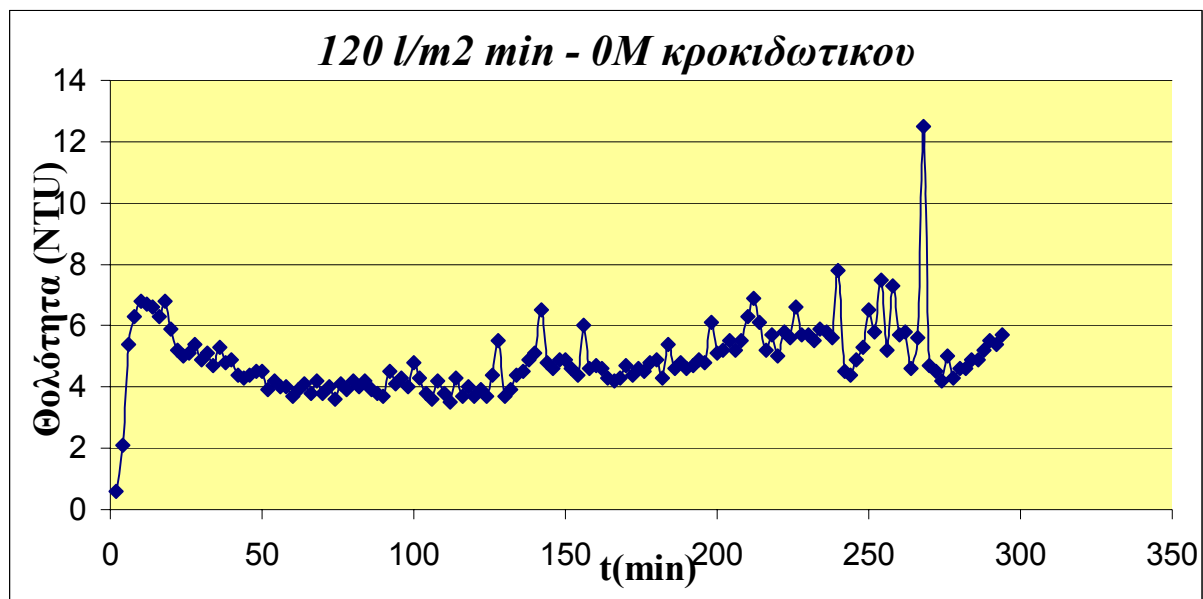
4.2 Αποτελέσματα ρυθμού διήθησης 120 l/m² min

4.2.1 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0 M

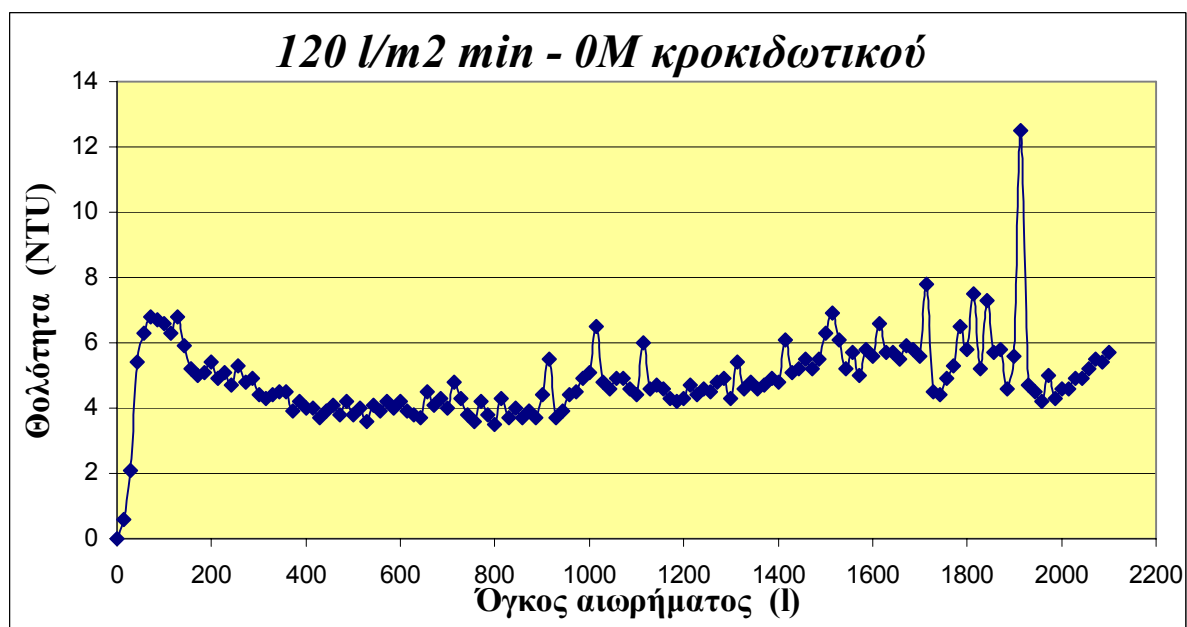
Στα σχήματα 4-1 και 4-2 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα θολότητας με χρόνο και θολότητας με όγκο αιωρήματος αντίστοιχα.

Στο σχήμα 4-1 παρατηρούμε ότι μετά τα πρώτα είκοσι λεπτά που το φίλτρο δέχεται ένα «σοκ» και η θολότητα αυξάνεται πολύ γρήγορα, επέρχεται μία σταθερότητα στην απόδοση του, της τάξης του 67% και η οποία και διατηρείται μέχρι το πέρας του πειράματος. Η πλειονότητα των μετρήσεων κυμαίνεται από 4-6 NTU με πολύ μικρό αριθμό τιμών να υπερβαίνουν τα 6 NTU.

Στο σχήμα 4-2 γίνεται αισθητή η σταθερότητα της απόδοσης της μονάδος σε σχέση με τον όγκο του αιωρήματος. Παρατηρούμε ότι μετά τα πρώτα 150 l του αιωρήματος και μέχρι όγκο 2 τόνων η θολότητα παραμένει σταθερή μεταξύ 4-6 NTU.



Σχήμα 4-1 Σχέση θολότητας με χρόνο για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0M.



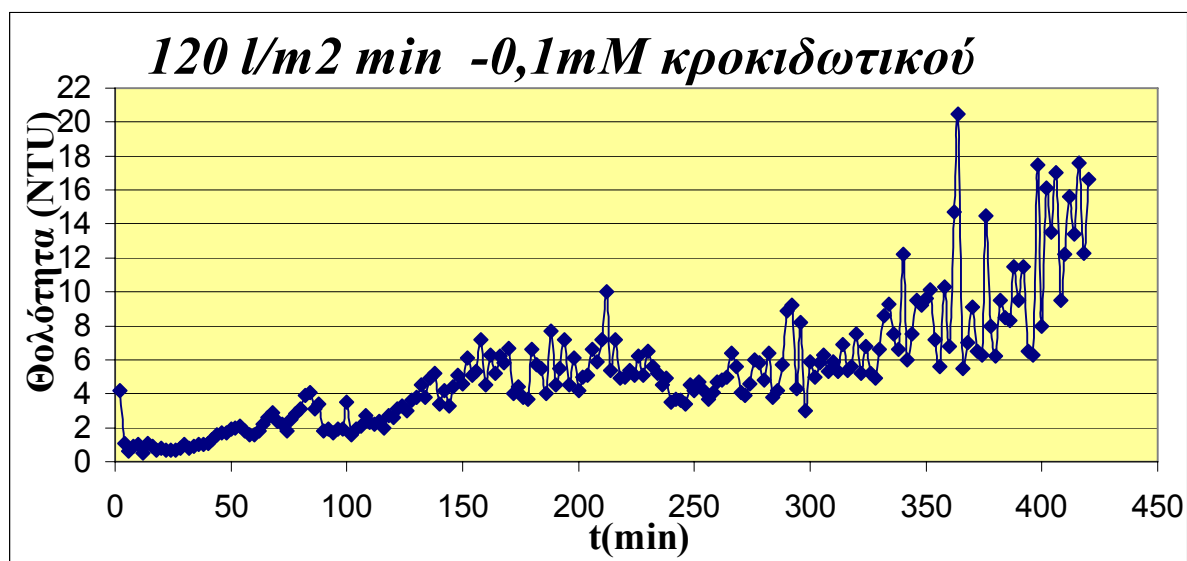
Σχήμα 4-2 Σχέση θολότητας με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0M.

4.2.2 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,1 mM

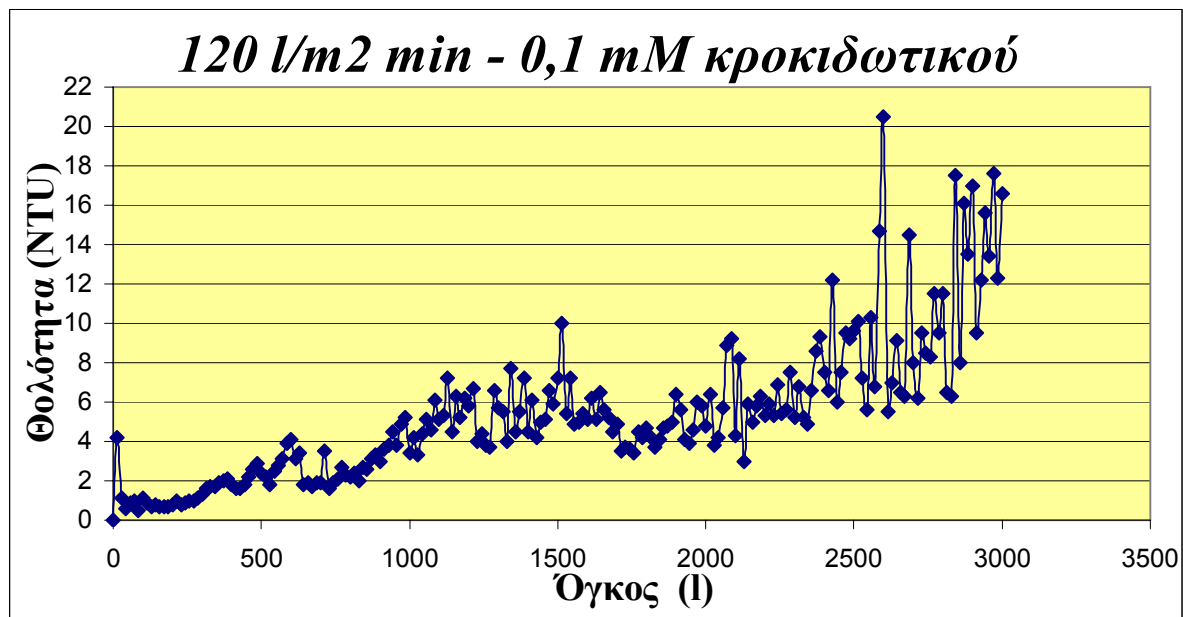
Στα σχήματα 4-3 και 4-4 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα θολότητας με χρόνο και θολότητας με όγκο αιωρήματος αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο πείραμα κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας ήταν η ποιότητα της εκροής. Αναλυτικότερα:

Στο σχήμα 4-3 παρατηρούμε ότι η απόδοση του φίλτρου είναι σταθερή για την πρώτη ώρα του πειράματος με ποσοστό απομάκρυνσης που φτάνει το 93% και θολότητα 0-2 NTU. Στην συνέχεια για τα επόμενα 90 λεπτά, η απόδοση πέφτει λίγο και φτάνει το 80% με θολότητα στην εκροή μεταξύ 2 και 4 NTU. Μετά την πάροδο των πρώτων 150 λεπτών η απόδοση της μονάδος πέφτει κι άλλο στο 60% μέχρι το χρόνο λειτουργίας των 350 λεπτών περίπου με την θολότητα της εκροής να κυμαίνεται από 4-8 NTU. Τέλος μετά τα 350 λεπτά λειτουργίας η μονάδα αρχίζει να χάνει την διηθητική της ικανότητα, η απόδοση πέφτει κάτω από το 50% και σε λιγότερα από 100 λεπτά αγγίζει το 0%.

Στο σχήμα 4-4 κατά αντιστοιχία με το σχήμα 4-3 παρατηρούμε την αύξηση της θολότητας σε σχέση με τον όγκο του αιωρήματος. Έτσι προκύπτει ότι για τα πρώτα 500 l αιωρήματος έχουμε μία απόδοση της τάξης του 93%, για τα επόμενα 500 l η απόδοση φτάνει το 80% ,στη συνέχεια και για τα επόμενα 1500 l περίπου έχουμε μία απόδοση που φτάνει το 60% και τέλος για τα τελευταία 500 l η απόδοση είναι κάτω από το 50% και προσεγγίζει το 0%.



Σχήμα 4-3 Σχέση θολότητας με χρόνο για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,1 mM.



Σχήμα 4-4 Σχέση θολότητας με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,1 mM.

4.2.3 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM

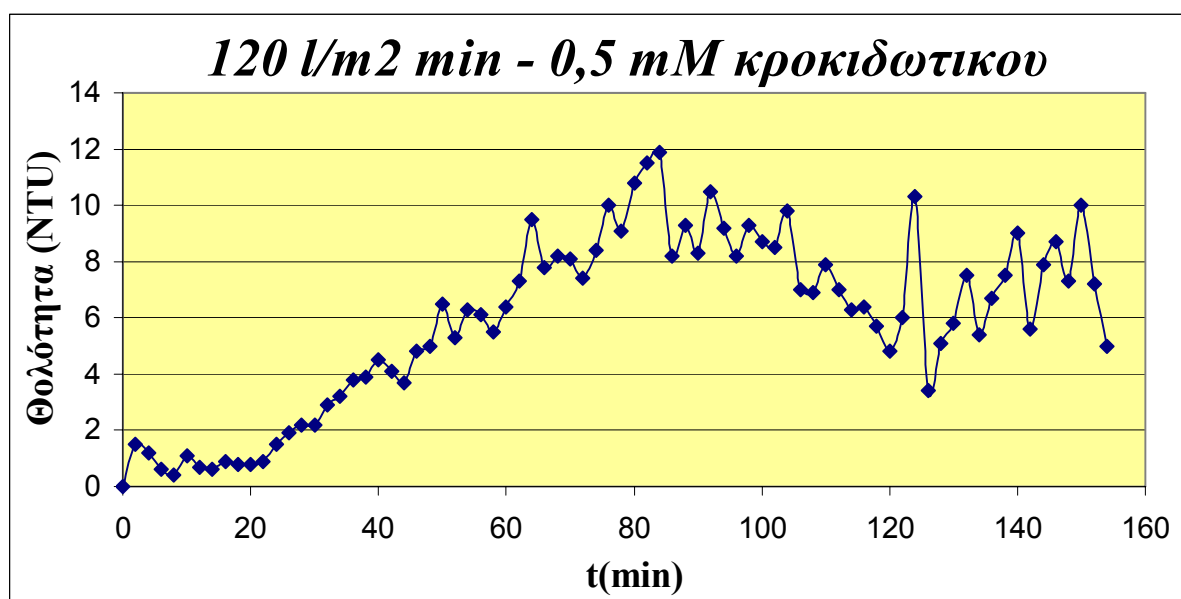
Στα σχήματα 4-5, 4-6, 4-7 και 4-8 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα θολότητας με χρόνο, διαφορικής πίεσης με χρόνο, θολότητας με όγκο αιωρήματος και διαφορικής πίεσης με όγκο αιωρήματος αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο πείραμα κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας ήταν η αύξηση της διαφορικής πίεσης σε επικίνδυνα για την φιάλη επίπεδα.

Στο σχήμα 4-5 παρατηρούμε ότι για τα πρώτα 30 λεπτά η απόδοση της μονάδας είναι σταθερή και φτάνει το 93% με θολότητα εκροής μεταξύ 0-2 NTU. Στα επόμενα 50 λεπτά παρατηρείται γραμμική πτώση της απόδοσης από το 93% στο 20% ενώ ακολουθεί μία αύξηση της απόδοσης σχεδόν γραμμική για τα επόμενα 40 λεπτά από το 20% στο 67%. Τέλος για τα τελευταία 30 λεπτά του πειράματος η θολότητα σταθεροποιείται κάπως μεταξύ 5-10 NTU με μέση απόδοση 50%.

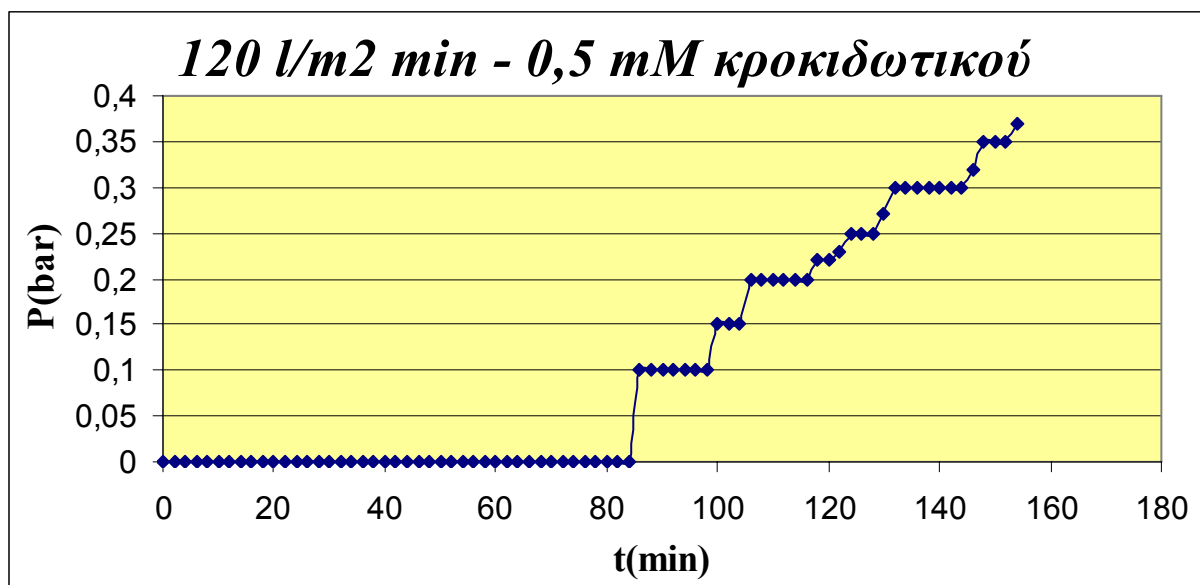
Στο σχήμα 4-6 παρατηρούμε ότι τα πρώτα 83 λεπτά της λειτουργίας η διαφορική πίεση παραμένει σταθερή και ίση με 0 bar. Στη συνέχεια η πίεση αυξάνεται απότομα στα 0.1 bar και διατηρείται για 15 λεπτά, για να αυξηθεί και πάλι στα 0.15 bar. Μετά από 106 λεπτά λειτουργίας της μονάδας η διαφορική πίεση έχει φτάσει στα 0.2 bar και μετά από στασιμότητα 10 λεπτών αρχίζει να αυξάνεται γραμμικά έως τα 0.3 bar. Τέλος μετά την πάροδο 144 λεπτών από την έναρξη της λειτουργίας, και ενώ η διαφορική πίεση είναι στα 0.3 bar, αυξάνεται και πάλι γραμμικά έως τα 0.37 bar που είναι και το ανώτατο επιτρεπτό όριο λειτουργίας της μονάδας, οπότε είμαστε υποχρεωμένοι να τερματίσουμε την διαδικασία.

Στο σχήμα 4-7 γίνεται κατανοητή η σχέση της θολότητας στην εκροή με τον όγκο του αιωρήματος που διηθείται. Έτσι παρατηρούμε ότι για τα πρώτα 200 l αιωρήματος η απόδοση της μονάδας είναι σταθερή στο 93% με θολότητα 0-2 NTU. Στα επόμενα 400 l παρατηρείται γραμμική πτώση της απόδοσης από το 93% στο 20% ενώ ακολουθεί μία αύξηση της απόδοσης σχεδόν γραμμική για τα επόμενα 250 l από το 20% στο 67%. Τέλος για τα τελευταία 250 l του αιωρήματος η θολότητα σταθεροποιείται κάπως, μεταξύ 5-10 NTU με μέση απόδοση 50%.

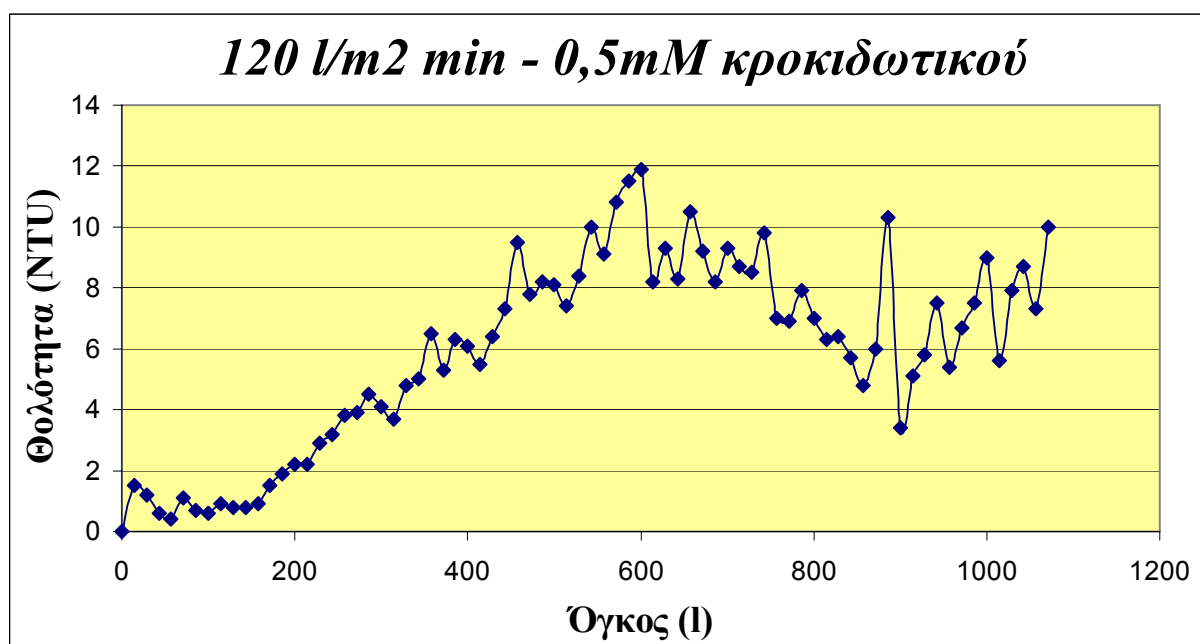
Στο σχήμα 4-8 κατά αντιστοιχία με το σχήμα 4-6 παρατηρούμε τη σχέση μεταξύ διαφορικής πίεση και όγκου αιωρήματος. Έτσι έχουμε για τα πρώτα 600 l του αιωρήματος, διαφορική πίεση σταθερή και ίση με 0 bar. Στη συνέχεια η πίεση αυξάνεται απότομα στα 0.1 bar και διατηρείται για 100 l, για να αυξηθεί και πάλι στα 0.15 bar. Μετά από 750 l αιωρήματος η διαφορική πίεση έχει φτάσει στα 0.2 bar και μετά από διήθηση 80 l αρχίζει να αυξάνεται γραμμικά έως τα 0.3 bar. Τέλος μετά τη διήθηση 1030 l αιωρήματος από την έναρξη της λειτουργίας, και ενώ η διαφορική πίεση είναι στα 0.3 bar, αυξάνεται και πάλι γραμμικά έως τα 0.37 bar που είναι και το ανώτατο επιτρεπτό όριο λειτουργίας της μονάδας, οπότε είμαστε υποχρεωμένοι να τερματίσουμε την διαδικασία, ενώ έχουν διηθηθεί 1100 l αιωρήματος.



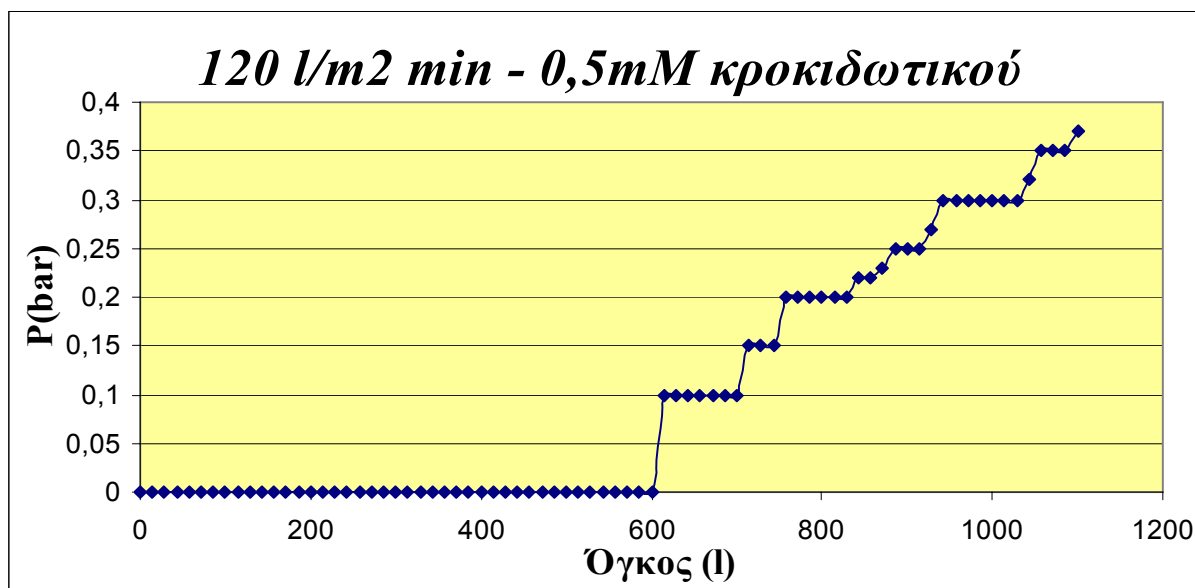
Σχήμα 4-5 Σχέση θολότητας με χρόνο για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM.



Σχήμα 4-6 Σχέση πτώσης πίεσης στο φίλτρο με χρόνο για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM.



Σχήμα 4-7 Σχέση θολότητας με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM.



Σχήμα 4-8 Σχέση πτώσης πίεσης στο φίλτρο με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM.

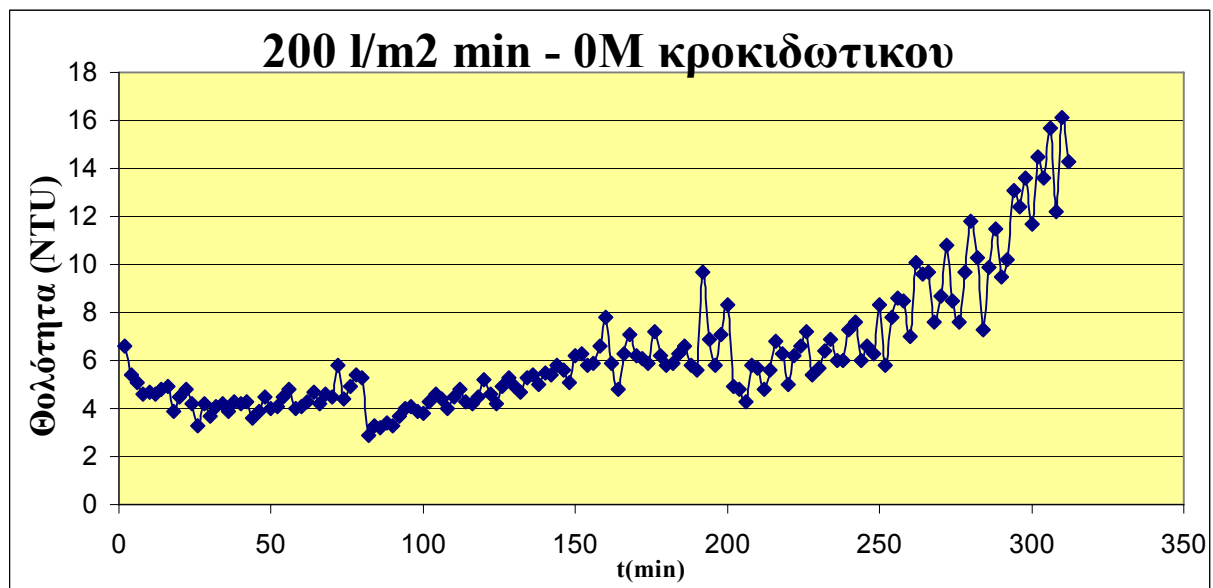
4.3 Αποτελέσματα ρυθμού διήθησης 200 l/m² min

4.3.1 Συγκέντρωση κροκιδωτικού 0 M

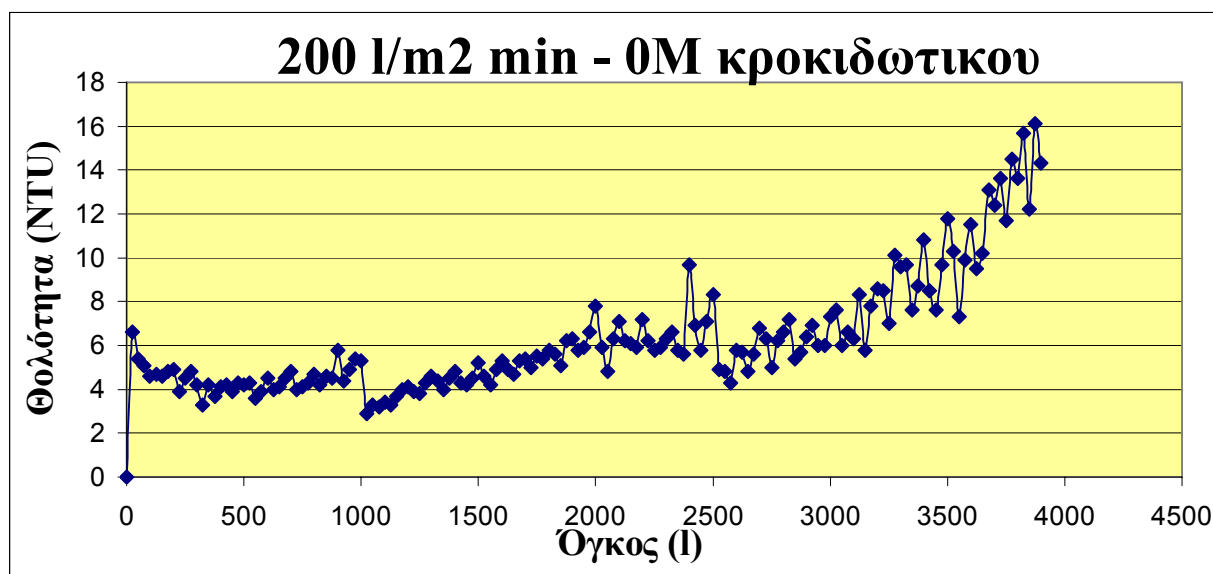
Στα σχήματα 4-9 και 4-10 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα θολότητας με χρόνο και θολότητας με όγκο αιωρήματος που διηθήθηκε αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο πείραμα κριτήριο τερματισμού ήταν η ποιότητα της εκροής.

Στο σχήμα 4-9 παρατηρούμε τη σταθερότητα με την οποία λειτουργεί η μονάδα κατά τα πρώτα 150 λεπτά. Η θολότητα στην εκροή είναι μεταξύ 4-6 NTU και η απόδοση της απομάκρυνσης της θολότητας είναι της τάξης του 67%. Στη συνέχεια για τα επόμενα 100 λεπτά η απόδοση σταθεροποιείται στο 53% με τις περισσότερες τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 6-8 NTU. Τέλος μετά το πέρας των 250 λεπτών η θολότητα στην εκροή αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και αγγίζει το 0% με θολότητες που φτάνουν τα 15 NTU.

Στο σχήμα 4-10 παρατηρούμε κατά αντιστοιχία με το σχήμα 4-9 ότι για τα πρώτα 1800 l αιωρήματος η μονάδα απομακρίνει το 67% της θολότητας, για τα επόμενα 700 l περίπου, το 53% αυτής ενώ στα τελευταία 1500 περίπου λίτρα έχουμε μια γραμμική πτώση της απόδοσης μέχρι και το 0%.



Σχήμα 4-9 Σχέση θολότητας με χρόνο για ρυθμό διήθησης 200 l/m² min και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0M.



Σχήμα 4-10. Σχέση θολότητας με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού 0M .

4.3.2 Συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,1 \text{ mM}$

Στα σχήματα 4-11, 4-12, 4-13 και 4-14 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα θολότητας με χρόνο, διαφορικής πίεσης με χρόνο, θολότητας με όγκο αιωρήματος και διαφορικής πίεσης με όγκο αιωρήματος αντίστοιχα. Σε αυτό το πείραμα κριτήριο τερματισμού ήταν η ποιότητα της εκροής.

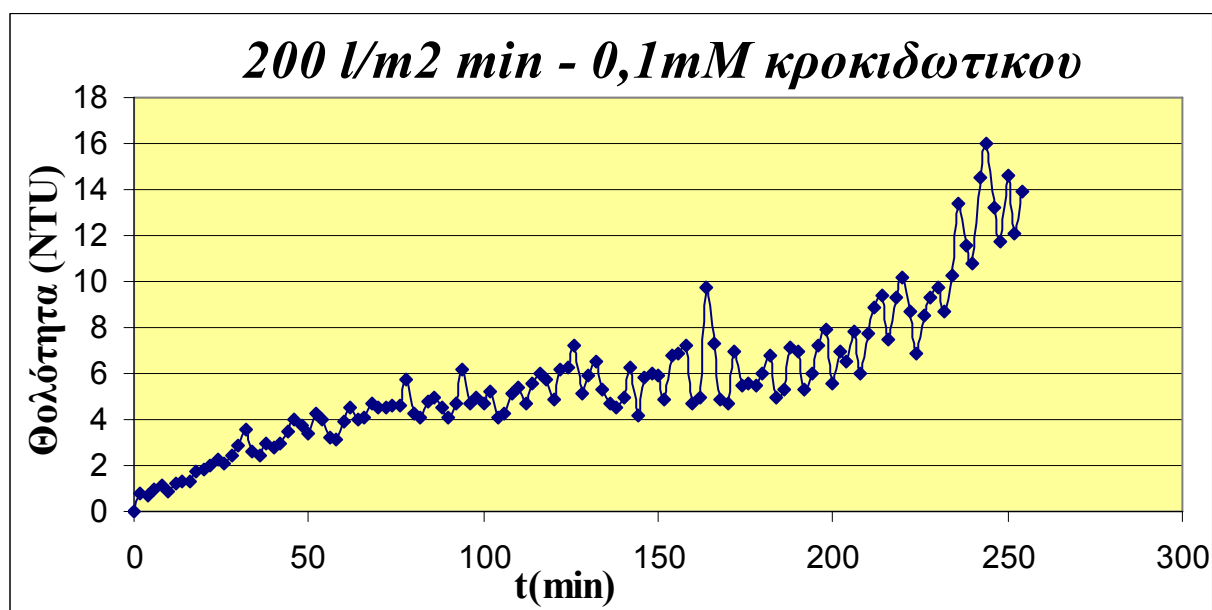
Στο σχήμα 4-11 παρατηρούμε ότι για την πρώτη περίπου ώρα της λειτουργίας της μονάδος η απόδοση πέφτει γραμμικά από το 93% στο 67% όπου και σταθεροποιείται για 90 λεπτά με θολότητες εκροής μεταξύ 4-6 NTU. Στη συνέχεια και για 50 λεπτά πέφτει κι άλλο 53% ενώ από αυτό το σημείο και μετά και μέχρι το τέλος του πειράματος η θολότητα στην εκροή αυξάνεται και η απόδοση από το 53% μηδενίζεται, έχοντας έτσι ένα συνολικό χρόνο λειτουργίας 250 λεπτών.

Στο σχήμα 4-12 παρατηρούμε ότι η διαφορική πίεση στο φίλτρο είναι μηδενική για τα πρώτα 75 λεπτά. Στη συνέχεια η πίεση αυξάνεται στα 0.1 bar και διατηρείται για 40 περίπου λεπτά. Μετά την πάροδο των 40 λεπτών ξανά αυξάνεται για να φτάσει τα 0.15

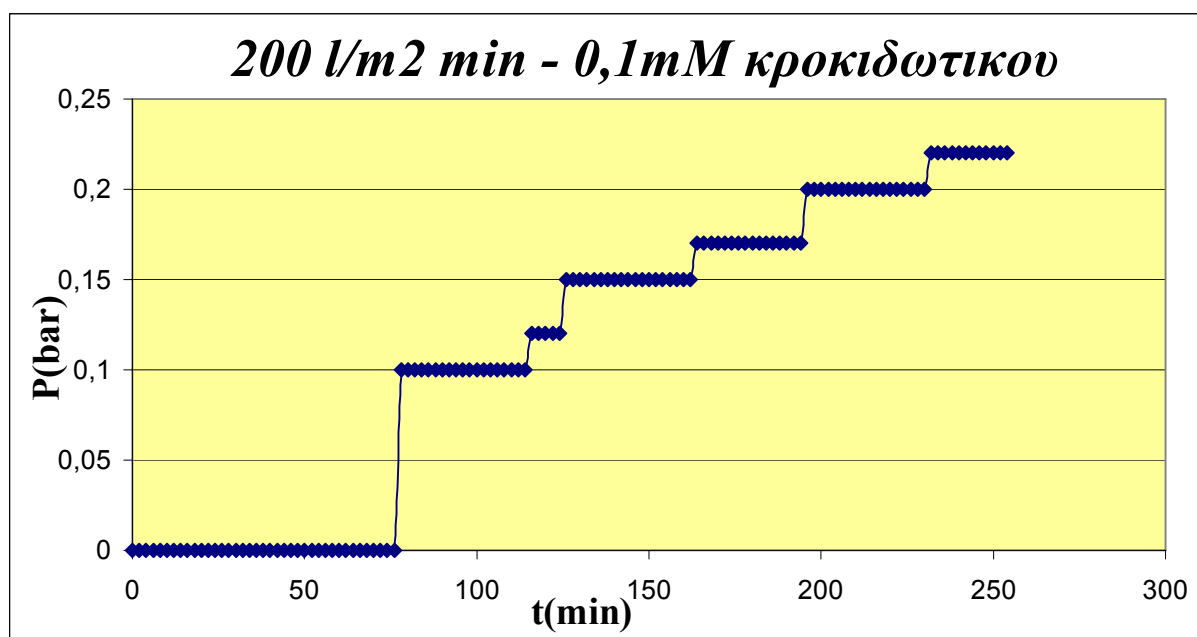
bar 130 λεπτά μετά την έναρξη λειτουργίας η οποία και διατηρείται για μισή ώρα περίπου. Από το σημείο αυτό και μετά ανά μισή ώρα περίπου η πίεση αυξάνεται κατά 0.02 bar για να φτάσει στο τέλος του πειράματος 250 λεπτά μετά την έναρξη της διήθησης να έχει την τιμή των 0.22 bar.

Στο σχήμα 4-13 κατά αντιστοιχία με το σχήμα 4-11 παρατηρούμε ότι για τα πρώτα 700 l περίπου αιωρήματος που διηθήθηκαν η απόδοση πέφτει γραμμικά από το 93% στο 67%, όπου και σταθεροποιείται για τα επόμενα 1200 l με θολότητες εκροής μεταξύ 4-6 NTU. Στη συνέχεια και για τα επόμενα 500 l η απόδοση πέφτει στο 53% ενώ από αυτό το σημείο και μετά και μέχρι το τέλος του πειράματος, δηλαδή μέχρι τα 3200 l η θολότητα στην εκροή αυξάνεται και η απόδοση από το 53% μηδενίζεται.

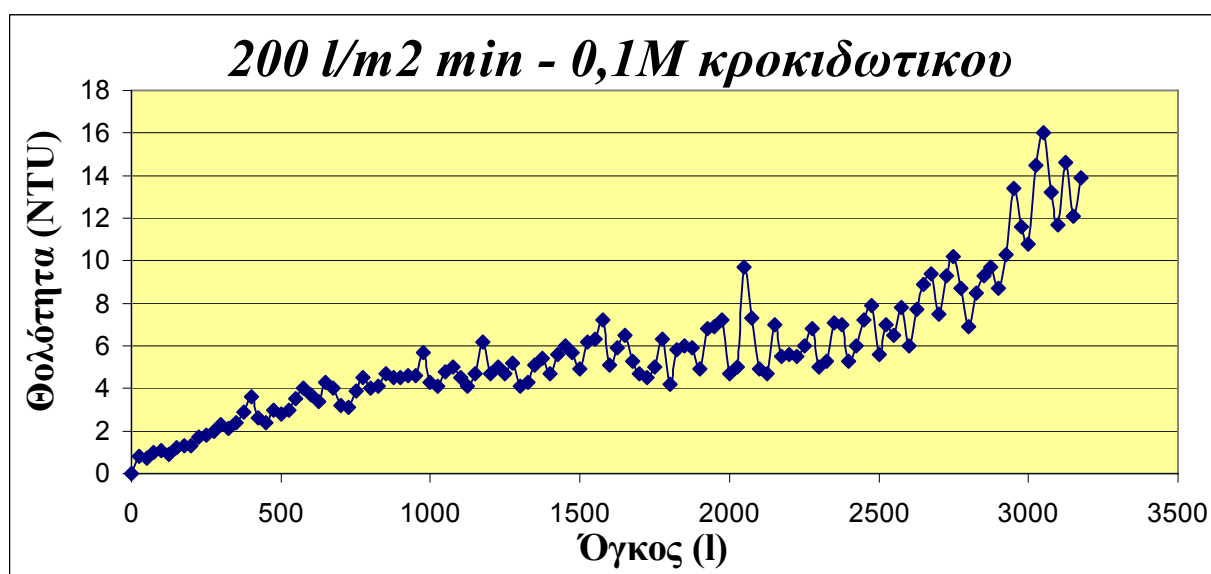
Στο σχήμα 4-14 αντίστοιχα με το σχήμα 4-12 παρατηρούμε ότι η διαφορική πίεση στο φίλτρο είναι μηδενική για τα πρώτα 950 l αιωρήματος. Στη συνέχεια η πίεση αυξάνεται στα 0.1 bar και διατηρείται για 500 l. Μετά τη διήθηση άλλων 200 l ξανά αυξάνεται για να φτάσει τα 0.15 bar στα οποία και διατηρείται για 500 l περίπου. Από το σημείο αυτό και μετά ανά περίπου 500 l αιωρήματος που διηθούνται η πίεση αυξάνεται κατά 0.025 bar για να φτάσει στο τέλος του πειράματος μετά από διήθηση 3200 l αιωρήματος να έχει την τιμή των 0.22 bar.



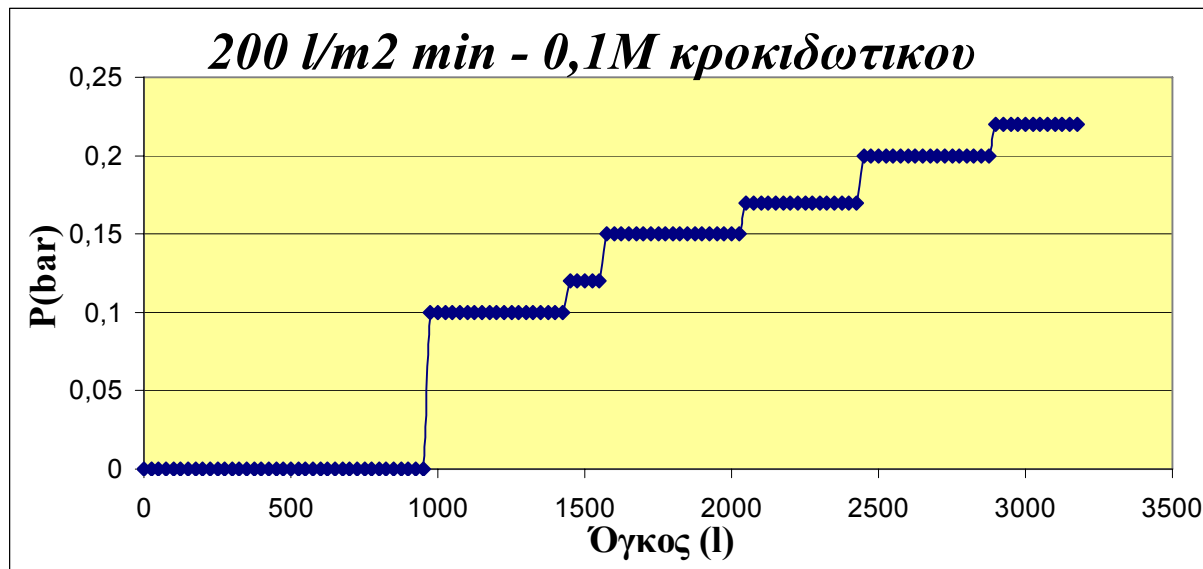
Σχήμα 4-11 Σχέση θολότητας με χρόνο για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,1 \text{ mM}$.



Σχήμα 4-12 Σχέση πτώσης πίεσης στο φίλτρο με χρόνο για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,1 \text{ mM}$.



Σχήμα 4-13. Σχέση θολότητας με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,1 \text{ mM}$.



Σχήμα 4-14 Σχέση πτώσης πίεσης στο φίλτρο με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,1 \text{ mM}$.

4.3.3 Συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,5 \text{ mM}$

Στα σχήματα 4-15, 4-16, 4-17 και 4-18 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα θολότητας με χρόνο, διαφορικής πίεσης με χρόνο, θολότητας με όγκο αιωρήματος και διαφορικής πίεσης με όγκο αιωρήματος αντίστοιχα. Σε αυτό το πείραμα κριτήριο τερματισμού ήταν τόσο η αύξησης της διαφορικής πίεσης στη μονάδα όσο και η ποιότητα της εκροής.

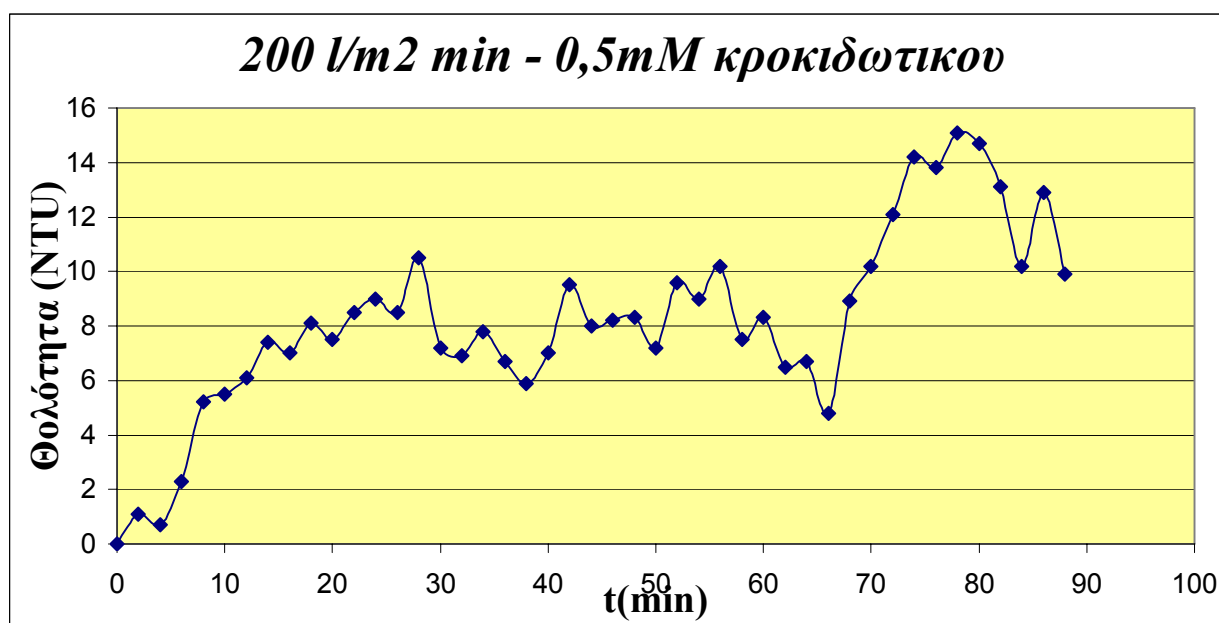
Στο σχήμα 4-15 παρατηρούμε ότι τα πρώτα 25 λεπτά του πειράματος η θολότητα της εκροής αυξάνεται γραμμικά με την απόδοση να πέφτει στο 40%. Στη συνέχεια σταθεροποιείται κάπως για 40 λεπτά με την θολότητα στην εκροή να κυμαίνεται μεταξύ 6-10 NTU και τη μέση απόδοση της μονάδος να βρίσκεται στο 47%. Τέλος τα

τελευταία 40 λεπτά του πειράματος η απόδοση της μονάδος πέφτει σταδιακά και φτάνει το 0 %.

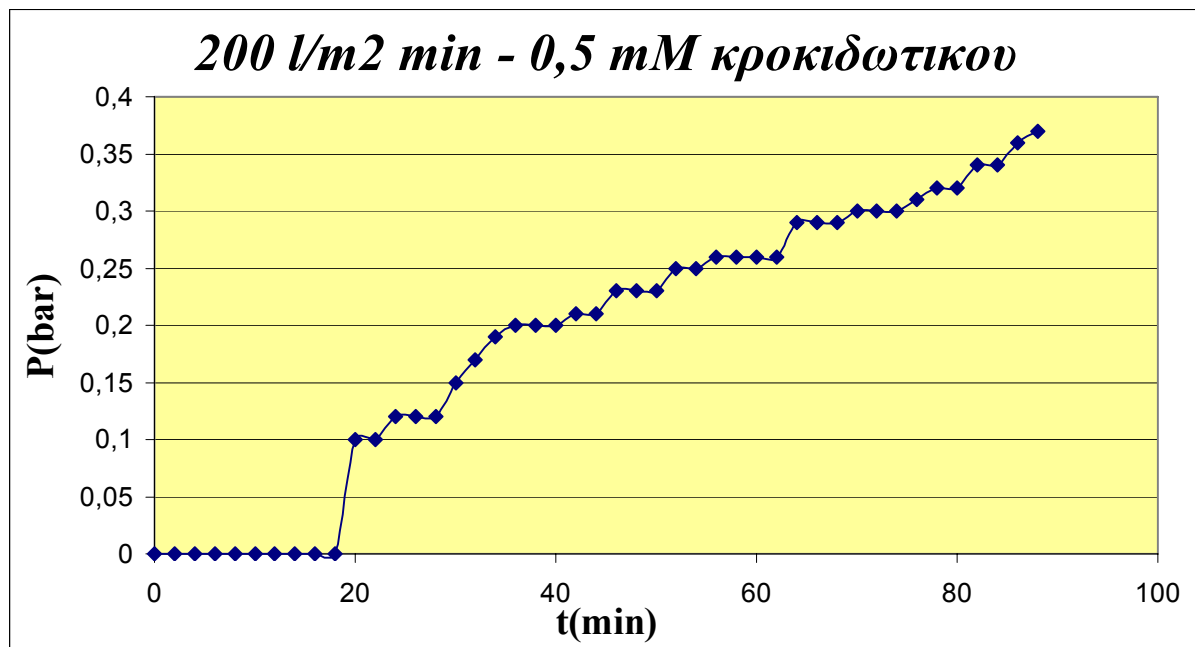
Στο σχήμα 4-16 παρατηρούμε ότι τα πρώτα 18 λεπτά του πειράματος η διαφορική πίεση στο φίλτρο είναι σταθερή και ίση με 0 bar. Για τα επόμενα 60 λεπτά του πειράματος η πίεση αυξάνεται γραμμικά με ρυθμό περίπου 0.05 NTU ανά 10 λεπτά, για να φτάσει τα 0.37 bar 90 λεπτά μετά την έναρξη του πειράματος.

Στο σχήμα 4-17 κατά αντιστοιχία με το σχήμα 4-15 παρατηρούμε ότι για τα πρώτα 350 l του αιωρήματος η θολότητα της εκροής αυξάνεται γραμμικά με την απόδοση να πέφτει στο 40%. Στη συνέχεια και για τα επόμενα 450 l σταθεροποιείται κάπως με την θολότητα στην εκροή να κυμαίνεται μεταξύ 6-10 NTU και τη μέση απόδοση της μονάδος να βρίσκεται στο 47%. Τέλος στα τελευταία 300 l η απόδοση της μονάδος πέφτει σταδιακά και φτάνει το 0 %.

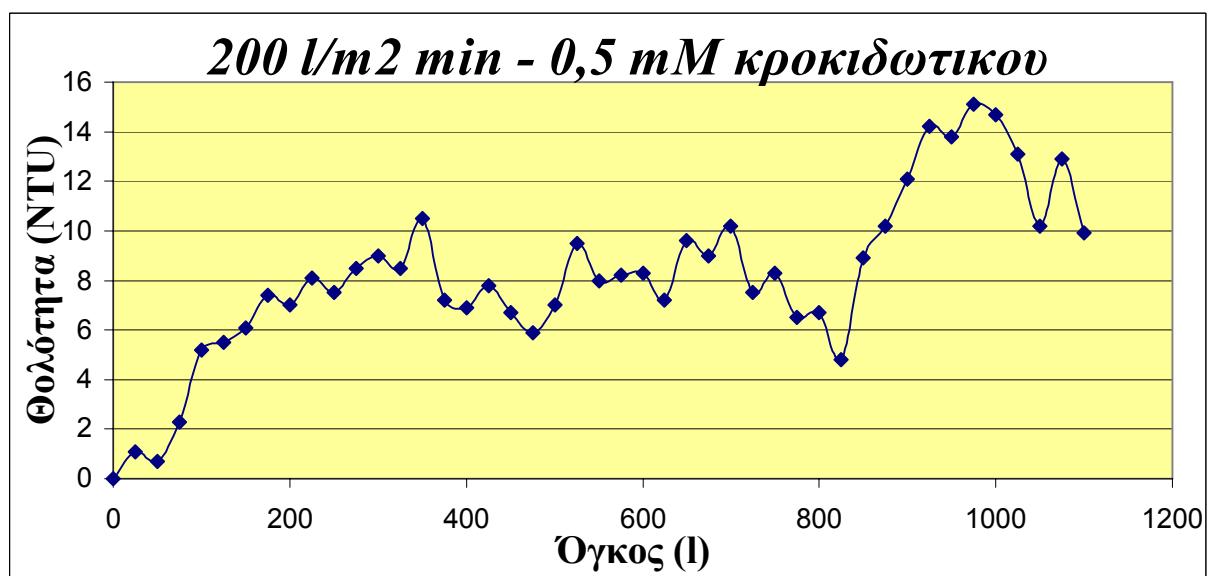
Στο σχήμα 4-18 αντίστοιχα με το σχήμα 4-16 παρατηρούμε ότι για τα πρώτα 230 l αιωρήματος η διαφορική πίεση στο φίλτρο είναι σταθερή και ίση με 0 bar. Για τα επόμενα 870 l αιωρήματος η πίεση αυξάνεται γραμμικά για να φτάσει τα 0.37 bar μετά τη διήθηση 1100 l αιωρήματος από την έναρξη του πειράματος.



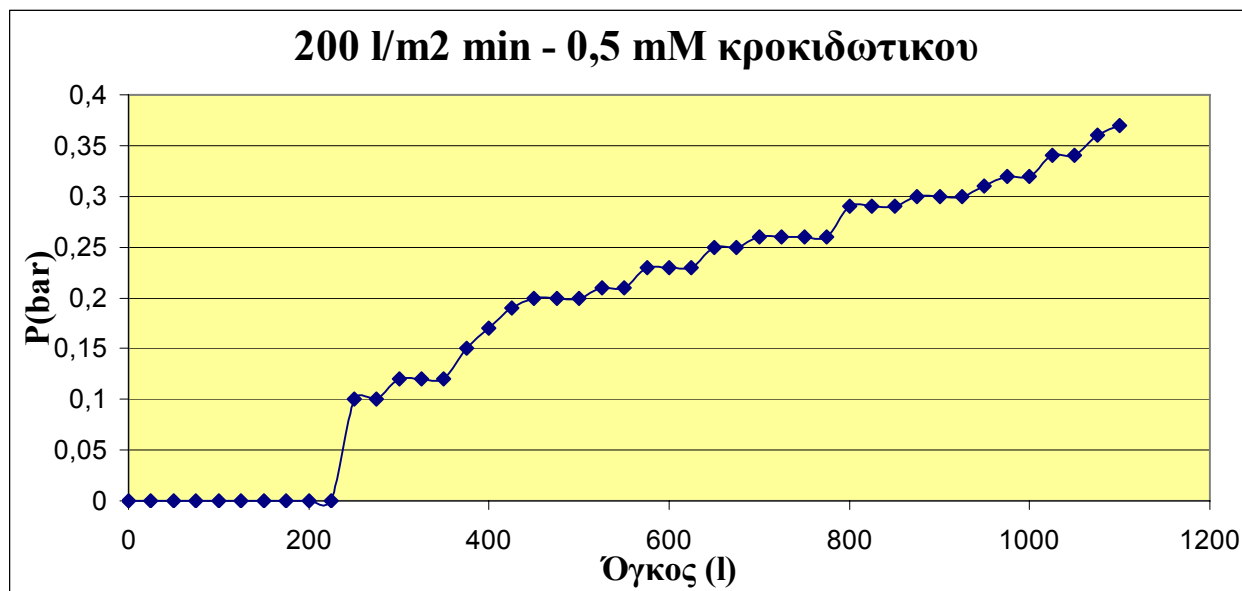
Σχήμα 4-15 Σχέση θολότητας με χρόνο για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,5 \text{ mM}$.



Σχήμα 4-16 Σχέση πτώσης πίεσης στο φίλτρο με χρόνο για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,5 \text{ mM}$.



Σχήμα 4-17. Σχέση θολότητας με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,5 \text{ mM}$.



Σχήμα 4-18 Σχέση πτώσης πίεσης στο φίλτρο με όγκο αιωρήματος για ρυθμό διήθησης $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ και συγκέντρωση κροκιδωτικού $0,5 \text{ mM}$.

4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

4.4.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων για ρυθμό διήθησης $120 \text{ l/m}^2 \text{ min}$.

Όπως γίνεται κατανοητό από όλα τα παραπάνω γραφήματα αλλά και με τα παρακάτω, για ρυθμό διήθησης $120 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ η μονάδα αποδίδει καλύτερα για συγκεντρώσεις κροκιδωτικού 0 και $0,1 \text{ mM}$.

- Για συγκέντρωση κροκιδωτικού 0M η μονάδα λειτουργεί σταθερά σε βάθος χρόνου 300 λεπτών και άνω, και όγκου 2100 l και άνω, με απόδοση που είναι σταθερή στο 67%.

- Για συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,1 mM η μονάδα έχει διηθητική ικανότητα για 300-350 λεπτά ή όγκο 2000-2200 l. Αποδίδει καλύτερα για τις πρώτες 2,5 ώρες με αποδόσεις που κυμαίνονται από 80-93% δηλαδή για τα πρώτα 1000 l αιωρήματος ενώ για τις επόμενες 2,5 ώρες ή 1000 l απομακρίνει το 60% της θολότητας. Έχουμε έτσι μια μέση απόδοση για όλη τη λειτουργία της τάξης του 73%.

- Για συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM η μονάδα έχει διηθητική ικανότητα για 30 μόνο λεπτά ή 200 l αιωρήματος. Η αύξηση στις τιμές της θολότητας της εξόδου οφείλονται στο γεγονός ότι το φίλτρο έχει αρχίσει να «μπουκώνει» από τα συσσωματώματα του καολίνι. Στα 80 λεπτά ή 600 l αιωρήματος έχει δημιουργηθεί στην επιφάνεια του φίλτρου ένας πλακούντας ο οποίος διηθεί το αιώρημα και αυτός είναι ο λόγος που παρατηρούμε μία περεταίρω απομάκρυνση της θολότητας αλλά και αύξηση της διαφορικής πίεσης στο φίλτρο.

4.4.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων για ρυθμό διήθησης 200 l/m² min.

Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω γραφήματα, για ρυθμό διήθησης 200 l/m² min η μονάδα αποδίδει καλύτερα για συγκεντρώσεις κροκιδωτικού 0 και 0,1 mM με καλύτερη λύση αυτή της μη χρήσης κροκιδωτικού

- Για συγκέντρωση κροκιδωτικού 0M η μονάδα λειτουργεί αποδοτικά σε βάθος χρόνου της τάξης των 250 λεπτών και όγκου της τάξης των 3000 l αιωρήματος, με μέση απόδοση λίγο πάνω από το 63,5 %. Τα πρώτα 150 λεπτά απομακρίνει το 67% της θολότητας, ενώ τα επόμενα 100 λεπτά το 53% αυτής.

- Για συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,1 mM η μονάδα τα πρώτα 150 λεπτά, 1900 l αιωρήματος περίπου, απομακρίνει περισσότερο από το 67% της θολότητας. Ενώ για τα επόμενα 50 λεπτά, 500 l αιωρήματος περίπου, απομακρίνει το 53% της αρχικής θολότητας αποδίδοντας έτσι κατά μέσο όρο για συνολικό χρόνο 200 λεπτών, 2500 l αιωρήματος, κάτι παραπάνω από 63,5%. Αξίζει να σημειωθεί ότι 76 λεπτά, 800 l, μετά την έναρξη λειτουργίας της μονάδας έχουμε δημιουργία «ψευδοπλακούντα» ο οποίος βοηθάει στη διήθηση και ο οποίος ευθύνεται για την αύξηση της διαφορικής πίεσης. Η διήθηση δεν γίνεται εξολοκλήρου από αυτόν καθώς κριτήριο τερματισμού δεν είναι η αύξηση της διαφορικής πίεσης αλλά η ποιότητα της εκροής.

- Για συγκέντρωση κροκιδωτικού 0,5 mM η μονάδα δεν αποδίδει καθόλου καλά. Έχουμε άμεσο «βούλωμα» του φίλτρου αλλά και άμεση δημιουργία πλακούντα στα πρώτα 18 λεπτά, 230 l αιωρήματος, με την απόδοση της μονάδας πέφτει στα πρώτα 20 λεπτά στο 40%. Στη συνέχεια ο πλακούντας αρχίζει να διηθεί για 40 λεπτά, 600 l αιωρήματος, με μέση απόδοση 47%. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η μονάδα έχει διηθητική ικανότητα για συνολικό χρόνο 65 λεπτών, 820 l αιωρήματος, και μέση απόδοση λίγο πάνω από 47%.

Κεφάλαιο 5— Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Όπως φάνηκε από την σύγκριση των αποτελεσμάτων που έγινε στο κεφάλαιο 6, η μονάδα αποδίδει καλύτερα για συγκεντρώσεις κροκιδωτικού 0M και 0,1 mM για το ρυθμό διήθησης των $120 \text{ l/m}^2 \text{ min}$, ενώ για το ρυθμό των $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ η μονάδα αποδίδει βέλτιστα με χρήση 0,1 mM κροκιδωτικού. Η απόφαση, για το ποιος ρυθμός διήθησης πρέπει να επιλεγεί καθώς και η χρήση ή όχι κροκιδωτικού, κατά τη διαδικασία διήθησης λυμάτων, πρέπει να λαμβάνεται ανάλογα με το πόσο χρόνο διαθέτουμε για τη διαδικασία.

- 1) Σε περιπτώσεις που ο χρόνος δεν είναι ρυθμιστικός παράγοντας χρησιμοποιούμε το ρυθμό διήθησης των $120 \text{ l/m}^2 \text{ min}$.
 - Εάν θέλουμε να διηθήσουμε λύμα συνολικού όγκου έως 2100 l χρησιμοποιούμε κροκιδωτικό σε συγκέντρωση 0,1 mM.
 - Εάν θέλουμε να διηθήσουμε λύμα συνολικού όγκου άνω των 2100 l δεν χρησιμοποιούμε κροκιδωτικό.
- 2) Σε περιπτώσεις που ο χρόνος είναι ρυθμιστικός παράγοντας χρησιμοποιούμε το ρυθμό διήθησης των $200 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ χωρίς χρήση κροκιδωτικού ανεξαρτήτως του όγκου των προς διήθηση λυμάτων.

5.2 Προτάσεις

- Μεταφορά της μονάδας στη θέση του βιολογικού καθαρισμού ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του φίλτρου με πραγματικό λύμα.
- Αλλαγή των υλικών πλήρωσης του φίλτρου για να μελετηθεί η αύξηση ή όχι της απόδοσης του.
- Χρησιμοποίηση διαφορετικών κροκιδωτικών (π.χ. φυτικών κροκιδωτικών) και μελέτη της συμπεριφοράς της μονάδας.
- Λειτουργία της μονάδας με ενδιάμεσους ρυθμούς διήθησης (μεταξύ 120-200 l/ m² min) ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αναστασάκης Κ. Παραγωγή φυσικών συσσωματωτικών από φυτά του Ελληνικού χώρου. Χανιά 2006.
- 2 Γκέκας Β. Χ., Πρωιμάκη Σ. Γ. *Φυσικοχημικές Διεργασίες Διαχωρισμού για μηχανικούς περιβάλλοντος*. Εκδόσεις Τζιόλα 2002.
- 3 Διαμαντόπουλος Ε. *Χημικές Διεργασίες στην επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων*. Πολυτεχνείο Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2004.
- 4 Λέκκας Θ. Δ. *Περιβαλλοντική Μηχανική Ι. Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Τμήμα Περιβάλλοντος, 1996.

Διεθνής Βιβλιογραφία

- 1 Adin A., Rebhum M., *A model to Predict Concentration and Head-Loss Profiles in Filtration*, 1977.
- 2 American water works association, *Water Quality and treatment*. McGraw-hill, 1990.

- 3 Anderson D.L., R.L. Siergist and R.J. Otis., Technology assessment of intermittent sand filters USEPA-Municipal Environ. Res. Lab. Cincinnati, OH, 1985.
- 4 APHA-AWWA-WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 1985.
- 5 Autotrol Performa Valve, *Dealer Installation, Operation and Maintenance Manual*.
- 6 Ball H., *Sand filters: State of the Art and Beyond. Proceedings of the 6th National Symposium Individual and Small Community Sewage Systems*, 1991.
- 7 Bauman E. R., *Water, its Quality and You!, Filtration and Separation*, 1989.
- 8 City of Austin, Texas, *Design Guidelines for water quality control Basins*, Environmental Criteria Manual, 1988.
- 9 Fair G. M., Geyer J.C., Okun D.A., *Water and Wastewater Engineering*, New York, 1968.
- 10 Loudon ,T. L. *Design of recirculating sand filters*, 8th Northwest On-Site Waste Treatment Short Course, Seattle, WA, 1996

Παραρτήματα

Παράρτημα 1-Εργαστηριακή άσκηση διήθησης

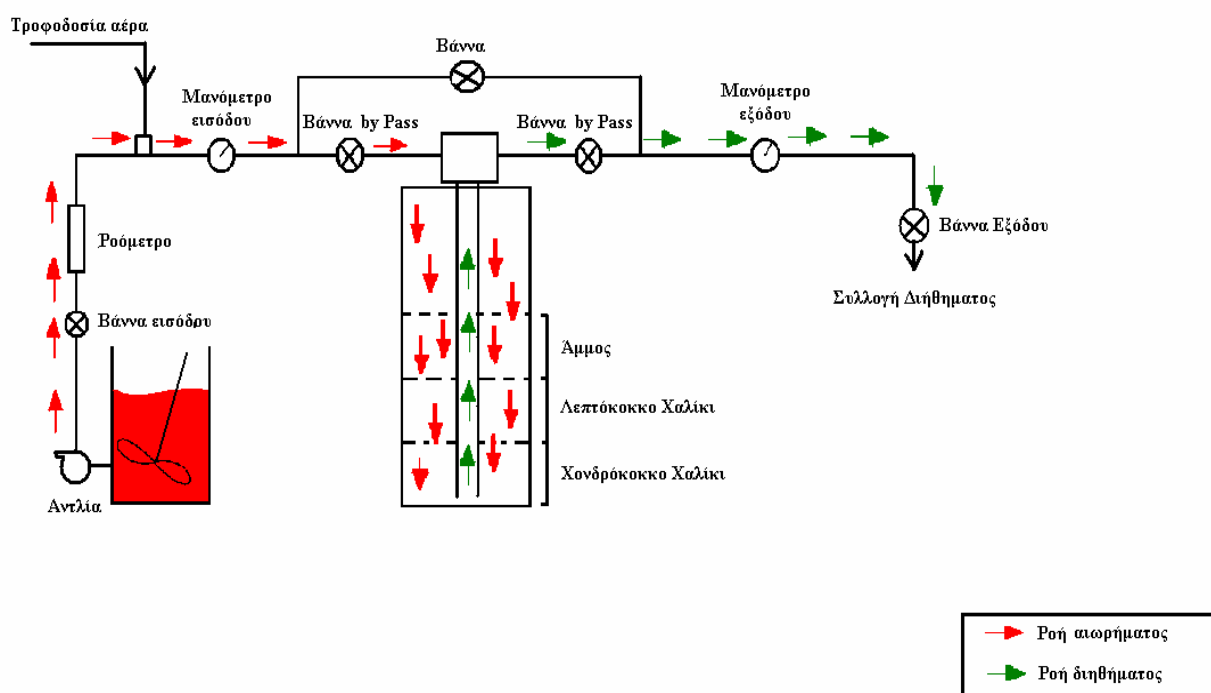
Διήθηση – Αμμοδιύλση

Σκοπός της διεργασίας

Διήθηση υδατικού αιωρήματος καολίνη.

Εξοπλισμός – Αντιδραστήρια

- Μονάδα αμμοδιύλσης με το ακόλουθο διάγραμμα ροής:



Το υδατικό αιώρημα καολίνη αντλείται από μία δεξαμενή μέσω αντλίας και αρχικά περνάει από το ροόμετρο όπου μετριέται η παροχή του, ώστε να είναι η επιθυμητή. Στη

συνέχεια περνάει από το μανόμετρο εισόδου όπου καταγράφεται η πίεση του για να καταλήξει στο φίλτρο όπου διηθείται.

Το διήθημα απαλλαγμένο από τα στερεά και τα κολλοειδή οδηγείται προς την έξοδο περνώντας πρώτα από το μανόμετρο εξόδου όπου καταγράφεται η πίεση του κατά την έξοδο. Το διήθημα συλλέγεται και μεταφέρεται προς μέτρηση της θολότητας του.

- Θολόμετρο: Όργανο που μετράει την θολότητα (σε NTU) ενός διαλύματος ή ενός αιωρήματος.
- Υδατικό αιώρημα καολίνη αρχικής θολότητας περίπου 15 NTU.

Πειραματική διαδικασία

Λειτουργία διήθησης

Αρχικά δημιουργούμε το αιώρημα στη δεξαμενή, γεμίζοντας την με νερό έως την χαραγή και προσθέτοντας 2,5 gr καολίνη. Κατόπιν μετράμε τη θολότητα του αιωρήματος.

Πριν την έναρξη της διαδικασίας διήθησης ελέγχουμε εάν ο επιλογέας φάσεων της κεφαλής βρίσκεται στη θέση για τη λειτουργία διήθησης. Στη συνέχεια ελέγχουμε τη βάννα του δοχείου του αιωρήματος εάν είναι ανοικτή ώστε αυτό να μπορεί να φτάσει στην αντλία, τη βάννα εισόδου του φίλτρου ώστε αυτή να είναι κλειστή, τις βάννες by pass να είναι ανοικτές, ενώ η βάννα πάνω στη γραμμή του by pass πρέπει να είναι κλειστή.

Αφού έχουμε ελέγξει τα παραπάνω συνδέουμε την αντλία με το ρεύμα και ανοίγουμε τη βάννα εισόδου αργά, για να μην προκαλέσουμε υδραυλικό πλήγμα στο φίλτρο, εωσώτου φτάσουμε στην επιθυμητή παροχή που ελέγχουμε από το ροόμετρο.

Οι παροχές εισόδου του αιωρήματος θα είναι των τάξεων των 120 και 200 l/m² min ή 312 και 520 l/h αντίστοιχα.

Το διήθημα που βγαίνει από την εκροή το συλλέγουμε ανά δύο λεπτά και το οδηγούμε για μέτρηση της θολότητας στο θολόμετρο.

Λειτουργία αυτοκαθαρισμού

Κατά τον αυτοκαθαρισμό στρέφουμε τον επιλογέα φάσεων αριστερόστροφα στην θέση backwash position. Γεμίζουμε το δοχείο του αιωρήματος με νερό και κάνουμε τον ίδιο έλεγχο με αυτόν στη φάση διήθησης. Ανοίγουμε αργά την παροχή νερού στο μέγιστο δυνατό.

Επειδή μόνο ένα μέρος του νερού εισέρχεται στο εσωτερικό του φίλτρου η πίεση που δημιουργείται δεν είναι αρκετή για ρευστοποίηση της κλίνης. Μπορούμε όμως να αυξήσουμε την πίεση και να προκαλέσουμε ρευστοποίηση απλά κλείνοντας λίγο την βάννα εξόδου του φίλτρου προσέχοντας όμως την πίεση ώστε αυτή να μην υπερβεί τα 2 bar.

Τόσο κατά την διήθηση όσο και κατά τον αυτοκαθαρισμό πρέπει να ελέγχεται η στάθμη στο δοχείο ώστε να μην κατέβει χαμηλότερα από το ύψος της σωλήνωσης που το ενώνει με την αντλία καθώς σε μία τέτοια περίπτωση θα είχαμε εισροή αέρα στη φιάλη.

Ζητούνται

- Υπολογισμός της απόδοσης της μονάδας σε σχέση με τον χρόνο και τον όγκο αιωρήματος που διηθείται. Γραφικές παραστάσεις και επεξήγηση.
- Υπολογισμός της αναμενόμενης πτώσης πίεσης στο φίλτρο για κάθε έναν από τους ρυθμούς διήθησης.
- Προτάσεις για αύξηση της απόδοσης της μονάδας.

Παράρτημα 2 – Πίνακες πρωτογενών δεδομένων

Πίνακας 1. Πρωτογενή δεδομένα για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και 0 Μ κροκιδωτικού.

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	όγκος (l)	χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	όγκος (l)
0	0	0	88	3,8	628,57
2	0,6	14,29	90	3,7	642,86
4	2,1	28,57	92	4,5	657,14
6	5,4	42,86	94	4,1	671,43
8	6,3	57,14	96	4,3	685,71
10	6,8	71,43	98	4	700
12	6,7	85,71	100	4,8	714,29
14	6,6	100	102	4,3	728,57
16	6,3	114,29	104	3,8	742,86
18	6,8	128,58	106	3,6	757,14
20	5,9	142,87	108	4,2	771,43
22	5,2	157,16	110	3,8	785,71
24	5	171,45	112	3,5	800
26	5,1	185,74	114	4,3	814,29
28	5,4	200	116	3,7	828,57
30	4,9	214,29	118	4	842,86
32	5,1	228,58	120	3,7	857,14
34	4,7	242,87	122	3,9	871,43
36	5,3	257,16	124	3,7	885,71
38	4,8	271,45	126	4,4	900
40	4,9	285,74	128	5,5	914,29
42	4,4	300	130	3,7	928,57
44	4,3	314,29	132	3,9	942,86
46	4,4	328,58	134	4,4	957,14
48	4,5	342,87	136	4,5	971,43
50	4,5	357,16	138	4,9	985,71
52	3,9	371,45	140	5,1	1000
54	4,2	385,74	142	6,5	1014,29
56	4	400	144	4,8	1028,57
58	4	414,29	146	4,6	1042,86
60	3,7	428,57	148	4,9	1057,14
62	3,9	442,86	150	4,9	1071,43
64	4,1	457,14	152	4,6	1085,71
66	3,8	471,43	154	4,4	1100
68	4,2	485,71	156	6	1114,29
70	3,8	500	158	4,6	1128,57
72	4	514,29	160	4,7	1142,86
74	3,6	528,57	162	4,6	1157,14
76	4,1	542,86	164	4,3	1171,43
78	3,9	557,14	166	4,2	1185,71
80	4,2	571,43	168	4,3	1200
82	4	585,71	170	4,7	1214,29
84	4,2	600	172	4,4	1228,57
86	3,9	614,29	174	4,6	1242,86

Πίνακας 1. Συνέχεια

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	όγκος (l)	χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	όγκος (l)
176	4,5	1257,14	236	5,8	1685,71
178	4,8	1271,43	238	5,6	1700
180	4,9	1285,71	240	7,8	1714,29
182	4,3	1300	242	4,5	1728,57
184	5,4	1314,29	244	4,4	1742,86
186	4,6	1328,57	246	4,9	1757,14
188	4,8	1342,86	248	5,3	1771,43
190	4,6	1357,14	250	6,5	1785,71
192	4,7	1371,43	252	5,8	1800
194	4,9	1385,71	254	7,5	1814,29
196	4,8	1400	256	5,2	1828,57
198	6,1	1414,29	258	7,3	1842,86
200	5,1	1428,57	260	5,7	1857,14
202	5,2	1442,86	262	5,8	1871,43
204	5,5	1457,14	264	4,6	1885,71
206	5,2	1471,43	266	5,6	1900
208	5,5	1485,71	268	12,5	1914,29
210	6,3	1500	270	4,7	1928,57
212	6,9	1514,29	272	4,5	1942,86
214	6,1	1528,57	274	4,2	1957,14
216	5,2	1542,86	276	5	1971,43
218	5,7	1557,14	278	4,3	1985,71
220	5	1571,43	280	4,6	2000
222	5,8	1585,71	282	4,6	2014,29
224	5,6	1600	284	4,9	2028,57
226	6,6	1614,29	286	4,9	2042,86
228	5,7	1628,57	288	5,2	2057,14
230	5,7	1642,86	290	5,5	2071,43
232	5,5	1657,14	292	5,4	2085,71
234	5,9	1671,43	294	5,7	2100

Πίνακας 2. Πρωτογενή δεδομένα για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και 0,5 Μ κροκιδωτικού.

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	Όγκος (l)	πίεση (bar)
0	0	0	0
2	1,5	14,29	0
4	1,2	28,57	0
6	0,6	42,86	0
8	0,4	57,14	0
10	1,1	71,43	0
12	0,7	85,71	0
14	0,6	100	0
16	0,9	114,29	0
18	0,8	128,58	0
20	0,8	142,87	0
22	0,9	157,16	0
24	1,5	171,45	0
26	1,9	185,74	0
28	2,2	200	0
30	2,2	214,29	0
32	2,9	228,58	0
34	3,2	242,87	0
36	3,8	257,16	0
38	3,9	271,45	0
40	4,5	285,74	0
42	4,1	300	0
44	3,7	314,29	0
46	4,8	328,58	0
48	5	342,87	0
50	6,5	357,16	0
52	5,3	371,45	0
54	6,3	385,74	0
56	6,1	400	0
58	5,5	414,29	0
60	6,4	428,57	0
62	7,3	442,86	0
64	9,5	457,14	0
66	7,8	471,43	0
68	8,2	485,71	0
70	8,1	500	0
72	7,4	514,29	0
74	8,4	528,57	0
76	10	542,86	0

Πίνακας 2. Συνέχεια

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	Όγκος (l)	πίεση (bar)
78	9,1	557,14	0
80	10,8	571,43	0
82	11,5	585,71	0
84	11,9	600	0
86	8,2	614,29	0,1
88	9,3	628,57	0,1
90	8,3	642,86	0,1
92	10,5	657,14	0,1
94	9,2	671,43	0,1
96	8,2	685,71	0,1
98	9,3	700	0,1
100	8,7	714,29	0,15
102	8,5	728,57	0,15
104	9,8	742,86	0,15
106	7	757,14	0,2
108	6,9	771,43	0,2
110	7,9	785,71	0,2
112	7	800	0,2
114	6,3	814,29	0,2
116	6,4	828,57	0,2
118	5,7	842,86	0,22
120	4,8	857,14	0,22
122	6	871,43	0,23
124	10,3	885,71	0,25
126	3,4	900	0,25
128	5,1	914,29	0,25
130	5,8	928,57	0,27
132	7,5	942,86	0,3
134	5,4	957,14	0,3
136	6,7	971,43	0,3
138	7,5	985,71	0,3
140	9	1000	0,3
142	5,6	1014,29	0,3
144	7,9	1028,57	0,3
146	8,7	1042,86	0,32
148	7,3	1057,14	0,35
150	10	1071,43	0,35
152	7,2	1085,71	0,35
154	5	1100	0,37

Πίνακας 3. Πρωτογενή δεδομένα για ρυθμό διήθησης 120 l/m² min και 0,1 Μ κροκιδωτικού.

χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)	χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)
0	0	0	88	3,4	628,57
2	4,2	14,29	90	1,8	642,86
4	1,1	28,57	92	1,9	657,14
6	0,6	42,86	94	1,7	671,43
8	0,9	57,14	96	1,9	685,71
10	1	71,43	98	1,9	700
12	0,5	85,71	100	3,5	714,29
14	1,1	100	102	1,6	728,57
16	0,9	114,29	104	1,9	742,86
18	0,7	128,58	106	2,1	757,14
20	0,8	142,87	108	2,7	771,43
22	0,7	157,16	110	2,3	785,71
24	0,7	171,45	112	2,2	800
26	0,7	185,74	114	2,4	814,29
28	0,8	200	116	2	828,57
30	1	214,29	118	2,7	842,86
32	0,8	228,58	120	2,6	857,14
34	0,9	242,87	122	3,1	871,43
36	1	257,16	124	3,3	885,71
38	1	271,45	126	3	900
40	1,1	285,74	128	3,6	914,29
42	1,3	300	130	3,8	928,57
44	1,6	314,29	132	4,5	942,86
46	1,7	328,58	134	3,8	957,14
48	1,7	342,87	136	4,9	971,43
50	1,9	357,16	138	5,2	985,71
52	2	371,45	140	3,4	1000
54	2,1	385,74	142	4,2	1014,29
56	1,8	400	144	3,3	1028,57
58	1,6	414,29	146	4,4	1042,86
60	1,6	428,57	148	5,1	1057,14
62	1,8	442,86	150	4,6	1071,43
64	2,2	457,14	152	6,1	1085,71
66	2,6	471,43	154	5,1	1100
68	2,9	485,71	156	5,3	1114,29
70	2,4	500	158	7,2	1128,57
72	2,2	514,29	160	4,5	1142,86
74	1,8	528,57	162	6,3	1157,14
76	2,5	542,86	164	5,2	1171,43
78	2,8	557,14	166	6,2	1185,71
80	3,1	571,43	168	5,8	1200
82	3,9	585,71	170	6,7	1214,29
84	4,1	600	172	4	1228,57
86	3,1	614,29	174	4,4	1242,86

Πίνακας 3. Συνέχεια

χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)	χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)
176	3,8	1257,14	272	3,9	1942,86
178	3,7	1271,43	274	4,6	1957,14
180	6,6	1285,71	276	6	1971,43
182	5,7	1300	278	5,8	1985,71
184	5,5	1314,29	280	4,8	2000
186	4	1328,57	282	6,4	2014,29
188	7,7	1342,86	284	3,8	2028,57
190	4,5	1357,14	286	4,2	2042,86
192	5,5	1371,43	288	5,7	2057,14
194	7,2	1385,71	290	8,9	2071,43
196	4,5	1400	292	9,2	2085,71
198	6,1	1414,29	294	4,3	2100
200	4,2	1428,57	296	8,2	2114,29
202	5	1442,86	298	3	2128,57
204	5,1	1457,14	300	5,9	2142,86
206	6,6	1471,43	302	5	2157,14
208	5,9	1485,71	304	5,8	2171,43
210	7,2	1500	306	6,3	2185,71
212	10	1514,29	308	5,3	2200
214	5,4	1528,57	310	5,9	2214,29
216	7,2	1542,86	312	5,3	2228,57
218	4,9	1557,14	314	6,9	2242,86
220	5	1571,43	316	5,4	2257,14
222	5,4	1585,71	318	5,6	2271,43
224	5,1	1600	320	7,5	2285,71
226	6,2	1614,29	322	5,2	2300
228	5,1	1628,57	324	6,8	2314,29
230	6,5	1642,86	326	5,2	2328,57
232	5,6	1657,14	328	4,9	2342,86
234	5,2	1671,43	330	6,6	2357,14
236	4,5	1685,71	332	8,6	2371,43
238	4,9	1700	334	9,3	2385,71
240	3,5	1714,29	336	7,5	2400
242	3,7	1728,57	338	6,6	2414,29
244	3,6	1742,86	340	12,2	2428,57
246	3,4	1757,14	342	6	2442,86
248	4,5	1771,43	344	7,5	2457,14
250	4,2	1785,71	346	9,5	2471,43
252	4,7	1800	348	9,2	2485,71
254	4,2	1814,29	350	9,6	2500
256	3,7	1828,57	352	10,1	2514,29
258	4,1	1842,86	354	7,2	2528,57
260	4,7	1857,14	356	5,6	2542,86
262	4,8	1871,43	358	10,3	2557,14
264	5	1885,71	360	6,8	2571,43
266	6,4	1900	362	14,7	2585,71
268	5,6	1914,29	364	20,5	2600
270	4,1	1928,57	366	5,5	2614,29

Πίνακας 3. Συνέχεια

χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)	χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)
368	7	2628,57	398	17,5	2842,86
370	9,1	2642,86	400	8	2857,14
372	6,5	2657,14	402	16,1	2871,43
374	6,3	2671,43	404	13,5	2885,71
376	14,5	2685,71	406	17	2900
378	8	2700	408	9,5	2914,29
380	6,2	2714,29	410	12,2	2928,57
382	9,5	2728,57	412	15,6	2942,86
384	8,5	2742,86	414	13,4	2957,14
386	8,3	2757,14	416	17,6	2971,43
388	11,5	2771,43	418	12,3	2985,71
390	9,5	2785,71	420	16,6	3000
392	11,5	2800	368	7	2628,57
394	6,5	2814,29	370	9,1	2642,86
396	6,3	2828,57	398	17,5	2842,86

Πίνακας 4. Πρωτογενή δεδομένα για ρυθμό διήθησης 200 l/m² min και 0 M κροκιδωτικού.

χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)	χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)
0	0	0	96	4,1	1200
2	6,6	25	98	3,9	1225
4	5,4	50	100	3,8	1250
6	5,1	75	102	4,3	1275
8	4,6	100	104	4,6	1300
10	4,7	125	106	4,4	1325
12	4,6	150	108	4	1350
14	4,8	175	110	4,5	1375
16	4,9	200	112	4,8	1400
18	3,9	225	114	4,3	1425
20	4,5	250	116	4,2	1450
22	4,8	275	118	4,5	1475
24	4,2	300	120	5,2	1500
26	3,3	325	122	4,6	1525
28	4,2	350	124	4,2	1550
30	3,7	375	126	4,9	1575
32	4,1	400	128	5,3	1600
34	4,2	425	130	4,9	1625
36	3,9	450	132	4,7	1650
38	4,3	475	134	5,3	1675
40	4,2	500	136	5,4	1700
42	4,3	525	138	5	1725
44	3,6	550	140	5,5	1750
46	3,9	575	142	5,4	1775
48	4,5	600	144	5,8	1800
50	4	625	146	5,6	1825
52	4,1	650	148	5,1	1850
54	4,5	675	150	6,2	1875
56	4,8	700	152	6,3	1900
58	4	725	154	5,8	1925
60	4,1	750	156	5,9	1950
62	4,3	775	158	6,6	1975
64	4,7	800	160	7,8	2000
66	4,2	825	162	5,9	2025
68	4,6	850	164	4,8	2050
70	4,5	875	166	6,3	2075
72	5,8	900	168	7,1	2100
74	4,4	925	170	6,2	2125
76	4,9	950	172	6,1	2150
78	5,4	975	174	5,9	2175
80	5,3	1000	176	7,2	2200
82	2,9	1025	178	6,2	2225
84	3,3	1050	180	5,8	2250
86	3,2	1075	182	5,9	2275
88	3,4	1100	184	6,3	2300
90	3,3	1125	186	6,6	2325
92	3,7	1150	188	5,8	2350
94	4	1175	190	5,6	2375

Πίνακας 4. Συνέχεια

χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)	χρόνος (min)	Θολότητα (NTU)	όγκος (l)
192	9,7	2400	254	7,8	3175
194	6,9	2425	256	8,6	3200
196	5,8	2450	258	8,5	3225
198	7,1	2475	260	7	3250
200	8,3	2500	262	10,1	3275
202	4,9	2525	264	9,6	3300
204	4,8	2550	266	9,7	3325
206	4,3	2575	268	7,6	3350
208	5,8	2600	270	8,7	3375
210	5,7	2625	272	10,8	3400
212	4,8	2650	274	8,5	3425
214	5,6	2675	276	7,6	3450
216	6,8	2700	278	9,7	3475
218	6,3	2725	280	11,8	3500
220	5	2750	282	10,3	3525
222	6,2	2775	284	7,3	3550
224	6,6	2800	286	9,9	3575
226	7,2	2825	288	11,5	3600
228	5,4	2850	290	9,5	3625
230	5,7	2875	292	10,2	3650
232	6,4	2900	294	13,1	3675
234	6,9	2925	296	12,4	3700
236	6	2950	298	13,6	3725
238	6	2975	300	11,7	3750
240	7,3	3000	302	14,5	3775
242	7,6	3025	304	13,6	3800
244	6	3050	306	15,7	3825
246	6,6	3075	308	12,2	3850
248	6,3	3100	310	16,1	3875
250	8,3	3125	312	14,3	3900
252	5,8	3150			

Πίνακας 5. Πρωτογενή δεδομένα για ρυθμό διήθησης 200 l/m² min και 0,5 Μ κροκιδωτικού.

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	Όγκος (l)	πίεση (bar)
0	0	0	0
2	1,1	25	0
4	0,7	50	0
6	2,3	75	0
8	5,2	100	0
10	5,5	125	0
12	6,1	150	0
14	7,4	175	0
16	7	200	0
18	8,1	225	0
20	7,5	250	0,1
22	8,5	275	0,1
24	9	300	0,12
26	8,5	325	0,12
28	10,5	350	0,12
30	7,2	375	0,15
32	6,9	400	0,17
34	7,8	425	0,19
36	6,7	450	0,2
38	5,9	475	0,2
40	7	500	0,2
42	9,5	525	0,21
44	8	550	0,21
46	8,2	575	0,23
48	8,3	600	0,23
50	7,2	625	0,23
52	9,6	650	0,25
54	9	675	0,25
56	10,2	700	0,26
58	7,5	725	0,26
60	8,3	750	0,26
62	6,5	775	0,26
64	6,7	800	0,29
66	4,8	825	0,29
68	8,9	850	0,29
70	10,2	875	0,3
72	12,1	900	0,3
74	14,2	925	0,3
76	13,8	950	0,31

Πίνακας 5. Συνέχεια

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	Όγκος (l)	πίεση (bar)
78	15,1	975	0,32
80	14,7	1000	0,32
82	13,1	1025	0,34
84	10,2	1050	0,34
86	12,9	1075	0,36
88	9,9	1100	0,37

Πίνακας 6. Πρωτογενή δεδομένα για ρυθμό διήθησης 200 l/m² min και 0,1 Μ κροκιδωτικού.

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	Όγκος (l)	πίεση (bar)
0	0	0	0
2	0,8	25	0
4	0,7	50	0
6	1	75	0
8	1,1	100	0
10	0,9	125	0
12	1,2	150	0
14	1,3	175	0
16	1,3	200	0
18	1,7	225	0
20	1,8	250	0
22	2	275	0
24	2,3	300	0
26	2,1	325	0
28	2,4	350	0
30	2,9	375	0
32	3,6	400	0
34	2,6	425	0
36	2,4	450	0
38	3	475	0
40	2,8	500	0
42	3	525	0
44	3,5	550	0
46	4	575	0
48	3,7	600	0
50	3,4	625	0
52	4,3	650	0
54	4	675	0
56	3,2	700	0
58	3,1	725	0
60	3,9	750	0
62	4,5	775	0
64	4	800	0
66	4,1	825	0
68	4,7	850	0
70	4,5	875	0
72	4,5	900	0
74	4,6	925	0
76	4,6	950	0

Πίνακας 6. Συνέχεια

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	Όγκος (l)	πίεση (bar)
78	5,7	975	0,1
80	4,3	1000	0,1
82	4,1	1025	0,1
84	4,8	1050	0,1
86	5	1075	0,1
88	4,5	1100	0,1
90	4,1	1125	0,1
92	4,7	1150	0,1
94	6,2	1175	0,1
96	4,7	1200	0,1
98	5	1225	0,1
100	4,7	1250	0,1
102	5,2	1275	0,1
104	4,1	1300	0,1
106	4,3	1325	0,1
108	5,1	1350	0,1
110	5,4	1375	0,1
112	4,7	1400	0,1
114	5,6	1425	0,1
116	6	1450	0,12
118	5,7	1475	0,12
120	4,9	1500	0,12
122	6,2	1525	0,12
124	6,3	1550	0,12
126	7,2	1575	0,15
128	5,1	1600	0,15
130	5,9	1625	0,15
132	6,5	1650	0,15
134	5,3	1675	0,15
136	4,7	1700	0,15
138	4,5	1725	0,15
140	5	1750	0,15
142	6,3	1775	0,15
144	4,2	1800	0,15
146	5,8	1825	0,15
148	6	1850	0,15
150	5,9	1875	0,15
152	4,9	1900	0,15

Πίνακας 6. Συνέχεια

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	Όγκος (l)	πίεση (bar)
154	6,8	1925	0,15
156	6,9	1950	0,15
158	7,2	1975	0,15
160	4,7	2000	0,15
162	5	2025	0,15
164	9,7	2050	0,17
166	7,3	2075	0,17
168	4,9	2100	0,17
170	4,7	2125	0,17
172	7	2150	0,17
174	5,5	2175	0,17
176	5,6	2200	0,17
178	5,5	2225	0,17
180	6	2250	0,17
182	6,8	2275	0,17
184	5	2300	0,17
186	5,3	2325	0,17
188	7,1	2350	0,17
190	7	2375	0,17
192	5,3	2400	0,17
194	6	2425	0,17
196	7,2	2450	0,2
198	7,9	2475	0,2
200	5,6	2500	0,2
202	7	2525	0,2
204	6,5	2550	0,2
206	7,8	2575	0,2
208	6	2600	0,2
210	7,7	2625	0,2
212	8,9	2650	0,2
214	9,4	2675	0,2
216	7,5	2700	0,2
218	9,3	2725	0,2
220	10,2	2750	0,2
222	8,7	2775	0,2
224	6,9	2800	0,2
226	8,5	2825	0,2
228	9,3	2850	0,2

Πίνακας 6. Συνέχεια

χρόνος (min)	θολότητα (NTU)	Όγκος (l)	πίεση (bar)
230	9,7	2875	0,2
232	8,7	2900	0,22
234	10,3	2925	0,22
236	13,4	2950	0,22
238	11,6	2975	0,22
240	10,8	3000	0,22
242	14,5	3025	0,22
244	16	3050	0,22
246	13,2	3075	0,22
248	11,7	3100	0,22
250	14,6	3125	0,22
252	12,1	3150	0,22
254	13,9	3175	0,22