



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική εργασία
«Μαθαίνω για την επεξεργασία νερού»

ΑΓΓΕΛΗ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Κακάβας Κωνσταντίνος

ΛΑΡΙΣΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2025

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση και η επεξεργασία νερού και λυμάτων αποτελούν θεμελιώδεις πυλώνες των κοινωνικών υποδομών, διαδραματίζοντας ζωτικό ρόλο στη δημόσια υγεία και την προστασία του περιβάλλοντος. Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει αρχικά μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των τεχνολογιών και των μεθόδων που εφαρμόζονται στην επεξεργασία νερού, με έμφαση στη διασφάλιση της ποιότητας του νερού και στην αντιμετώπιση των τρεχουσών περιβαλλοντικών προκλήσεων. Εξετάζεται η προέλευση και τα χαρακτηριστικά του νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση και αναλύονται οι απαραίτητες διαδικασίες καθαρισμού τόσο για τα υπόγεια όσο και για τα επιφανειακά ύδατα. Δεύτερον, προτείνεται μια πιλοτική εκπαιδευτική προσέγγιση για μαθητές των μεγαλύτερων τάξεων του δημοτικού σχολείου, για να κατανοήσουν την επεξεργασία του πόσιμου νερού και τις χημικές του ιδιότητες μέσω ενός συνδυασμού διδασκαλίας και πειραμάτων. Η προτεινόμενη δραστηριότητα στοχεύει στην ενίσχυση της κατανόησής τους για τη χημεία και τη μικροβιολογία του νερού, προωθώντας την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και την ενεργό ενασχόληση με επιστημονικά ζητήματα.

Learning About Water Treatment

Abstract

Water and wastewater management and treatment are fundamental pillars of social infrastructure, playing a vital role in public health and environmental protection. This study first presents a comprehensive overview of the technologies and methods applied in water treatment, with an emphasis on ensuring water quality and addressing current environmental challenges. The origin and characteristics of water intended for human consumption are examined and the necessary purification processes for both groundwater and surface water are analyzed. Second, a pilot educational approach is proposed for students in the upper grades of primary school, to understand the treatment of drinking water and its chemical properties through a combination of teaching and experiments. The proposed activity aims to enhance their understanding of the chemistry and microbiology of water, promoting environmental awareness and active engagement with scientific issues.

Keywords:

Water treatment, Wastewater management, Environmental education, Water quality, Public health, Groundwater, Surface water, Microbiology, Chemistry, Sustainable development

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
A. ΤΟ ΝΕΡΟ.....	8
A.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
A.2. ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ – ΜΙΑ ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	8
A.2.1 ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗ ΓΗ.....	9
A.3. ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	11
A.3.1 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	12
A.3.2 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	13
A.4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	15
A.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
A.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΟΞΥΓΟΝΟ	16
A.4.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟ.....	17
A.4.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥΣ.....	17
A.4.5 ΕΙΔΗ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΤΟ ΝΕΡΟ.....	18
A.5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ	19
A.6. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ	20
A.7. ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ-ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ.....	23
A.7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
A.7.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ	23
A.7.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	29
A.8. ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΦΙΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑΣ.....	38
A.9. ΚΑΘΙΖΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΠΛΕΥΣΗ.....	39
A 9.1. ΚΑΘΙΖΗΣΗ.....	41
A.10. ΔΙΗΘΗΣΗ.....	49
A.10.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	49
A.10.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ ΜΕ ΔΙΗΘΗΣΗ	50
A.11. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΣΕ ΕΝΕΡΓΟ ΆΝΘΡΑΚΑ.....	52
A.12. ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ	54
A.13. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ.....	55

A.14. ΙΟΝΤΟΕΝΑΛΛΑΓΗ.....	56
A.15. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ ΜΕ ΑΕΡΑ	57
A.16. ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΙΣ.....	58
A.17. ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	60
A.18. ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ, ΔΙΑΤΡΟΦΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΑ.....	61
B. Αξιολόγηση μαθησιακών αποτελεσμάτων ενός πιλοτικού μαθήματος για την επεξεργασία του νερού σε μαθητές/τριες δημοτικού	63
B.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	63
β.2. Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα.....	63
β.3. Θεωρητικό Πλαίσιο	63
<i>B.3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ</i>	<i>63</i>
<i>B.3.2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ</i>	<i>64</i>
B.4. Μεθοδολογία.....	65
<i>B.4.2. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ</i>	<i>66</i>
B.5. Ανάλυση Δεδομένων	67
B.6. Συζήτηση.....	70
B.7. Αξιοπιστία - περιορισμοί	70
B.8. Συμπεράσματα	71
ΠαράρτημαΤΑ	72
Παράρτημα Α — Pre/Post Test.....	72
Παράρτημα Β — Καταγραφή Δεδομένων Excel.....	73
Βιβλιογραφία	74

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Κατανομή του νερού στον πλανήτη.....	11
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά καθίζησης αιωρούμενων σωματιδίων	29
Πίνακας 3: Τιμές του σημείου μηδενικού φορτίου διαφόρων ανόργανων και οργανικών συστατικών που απαντούν στα φυσικά νερά.....	31
Πίνακας 4: Συνοπτική περιγραφή διεργασίας θρόμβωσης.....	34
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων κροκίδωσης και συσσωμάτωσης	35
Πίνακας 6: Περιοχή τιμών ταχύτητας καθίζησης χαρακτηριστικών θρόμβων στους 15 βαθμούς κελσίου.....	47
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά σωματιδίων που απομακρύνονται με την διήθηση	52
Πίνακας 8: Συγκριτικά χαρακτηριστικά	56
Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία για τα ποσοστά επιτυχίας (%).....	68
Πίνακας 10: Ποσοστά επίδοσης πριν και μετά και οι διαφορές των.....	69
Πίνακας 11: Βασικά στατιστικά στοιχεία ανάλυσης των διαφορών	69
Πίνακας 12: 17ο ΔΣ Λάρισας, τάξη ΣΤ΄, συμμετοχή 15 μαθητές, Επίδοση Πριν (Pre Score)	73
Πίνακας 13: 17ο ΔΣ Λάρισας, τάξη ΣΤ΄, συμμετοχή 15 μαθητές, Επίδοση Μετά (Post Score)	73

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Μέγεθος των σωματιδίων που απαντούν στο νερό και το είδος του φίλτρου που μπορεί να συγκρατήσει.....	24
Σχήμα 2: Τυπική δομή χημικής ουσίας	25
Σχήμα 3: Διπλοστοιβάδα στην διεπιφάνεια στερεού-υγρού.....	28
Σχήμα 4: Σχηματική παράσταση κροκίδωσης και συσσωμάτωσης	35
Σχήμα 5: Παράδειγμα υπολογισμού βαθμίδας ταχύτητας G.....	37
Σχήμα 6: Διάγραμμα επιλογής της μεθόδου διαχωρισμού των σωματιδίων από το νερό (Kavanaugh, 1980)	39
Σχήμα 7: Τυπικές πειραματικές καμπύλες καθίζησης θρόμβων	47
Σχήμα 8: Συγκριτική επίδοση ανά ερώτηση	67
Σχήμα 9: Συγκριτική επίδοση μαθητών	68

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Υδάτινος Πόρος σε ορεινή περιοχή.....	10
Εικόνα 2: Μοριακή δομή του νερού σε στερεή (πάγος) και υγρή φάση.....	12
Εικόνα 3: Διάγραμμα ροής διεργασιών επεξεργασίας νερού	23

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δράση αυτή υλοποιήθηκε με τη συμμετοχή μαθητών Δημοτικού από την περιοχή της Λάρισας, με στόχο τη βελτίωση των γνώσεων τους στις επιστήμες της Χημείας και της Μικροβιολογίας του νερού, ενισχύοντας την ενεργή συμμετοχή τους σε θέματα επιστημονικού και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος.

Η διαχείριση και επεξεργασία του νερού και των υγρών αποβλήτων, συνιστά έναν από τους πιο θεμελιώδεις πυλώνες της κοινωνικής υποδομής, καθοριστικής σημασίας για τη δημόσια υγεία και την περιβαλλοντική προστασία. Η δυνατότητα παροχής καθαρού, ασφαλούς και υγιεινοοικονομικά κατάλληλου νερού προς τους πολίτες εξαρτάται άμεσα από την ύπαρξη ολοκληρωμένων και αποτελεσματικών έργων επεξεργασίας νερού. Παράλληλα, η ποιότητα των φυσικών υδάτινων σωμάτων – όπως οι ποταμοί, οι λίμνες και οι θαλάσσιες εκτάσεις – επηρεάζεται ουσιαστικά από τον τρόπο με τον οποίο συλλέγονται, διαχειρίζονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία τα αστικά, βιομηχανικά και γεωργικά απόβλητα.

Οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται στον τομέα της επεξεργασίας νερού βρίσκονται σε συνεχή εξέλιξη, με βασικό στόχο τη διασφάλιση της ποιότητας των υδάτινων πόρων και τη μακροπρόθεσμη προστασία του περιβάλλοντος. Το νερό που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση αντλείται, κατά κανόνα, είτε από υπόγειες πηγές (όπως γεωτρήσεις και φυσικά υδροφόρα στρώματα) είτε από επιφανειακά υδάτινα συστήματα (όπως ποτάμια και λίμνες). Αν και τα υπόγεια νερά παρουσιάζουν συχνά φυσική καθαρότητα που πληροί τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ποιότητα του πόσιμου νερού, δεν είναι σπάνιο να απαιτείται πρόσθετη επεξεργασία, κυρίως λόγω γεωχημικών παραγόντων ή επιφανειακής ρύπανσης.

Η παρούσα εργασία επιδιώκει αρχικά να προσφέρει στον αναγνώστη μία εμπεριστατωμένη επισκόπηση των βασικών εννοιών που σχετίζονται με την επεξεργασία του νερού, να αναλύσει τις μεθόδους καθαρισμού που εφαρμόζονται σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας και να αναδείξει την κρίσιμη σημασία της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης σε σχέση με το νερό, ως φυσικό αγαθό ανεκτίμητης αξίας. Δεύτερον, να αναπτύξει πιλοτικό μάθημα για μαθητές/τριες των δυο τελευταίων τάξεων δημοτικού σχολείου, το οποίο να περιλαμβάνει διδασκαλία και διεξαγωγή πειραμάτων σχετικά με τη κατανόηση της επεξεργασίας του πόσιμου νερού και των χημικών ιδιοτήτων του, και την αξιολόγηση του. Στην σχετική μικρής κλίμακας έρευνα που διεξάχθηκε συμμετείχαν οι μαθητές/τριες του 17^ο Δημοτικού σχολείου Λάρισας και η υλοποίηση έγινε στα πλαίσια της εκπαιδευτικής διαδικασίας του σχολείου σε συνεργασία με το Τμήμα Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

A. ΤΟ ΝΕΡΟ

A.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό υπήρξε καταλυτικός παράγοντας για την εμφάνιση και εξέλιξη των πρώτων ανθρώπινων κοινωνιών και πολιτισμών. Καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορικής του πορείας, ο άνθρωπος εξαρτήθηκε σε καθοριστικό βαθμό από τη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων στις περιοχές όπου εγκαθίστατο. Οι κλιματικές μεταβολές και ειδικότερα οι παρατεταμένες περίοδοι ξηρασίας που ακολούθησαν την τελευταία εποχή των παγετώνων, οδήγησαν την ανθρωπότητα στην ανάγκη αναζήτησης περιοχών με επαρκή αποθέματα νερού για την εξασφάλιση της επιβίωσης.

Αυτή η μεταβατική περίοδος αποτέλεσε σημείο καμπής για την ιστορία του ανθρώπου, καθώς σηματοδότησε την εγκατάλειψη της νομαδικής ζωής και την επιλογή μόνιμων οικισμών κοντά σε πηγές νερού, γεγονός που συνέβαλε καθοριστικά στην έναρξη της Νεολιθικής Εποχής. Ο διακεκριμένος Γερμανός ανθρωπολόγος Herbert Kuhn χαρακτήρισε τη συγκεκριμένη εποχή ως τη «μεγαλύτερη επανάσταση στην ιστορία της ανθρωπότητας», διότι αποτέλεσε το σημείο εκκίνησης της μετάβασης από την περιπλανώμενη επιβίωση στην οργανωμένη αγροτική παραγωγή και στη συγκρότηση των πρώτων κοινωνικών δομών.

Με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση των πληθυσμιακών και παραγωγικών αναγκών, ο άνθρωπος αντιλήφθηκε ότι η εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού απαιτούσε όχι μόνο την άμεση πρόσβαση σε υδάτινους πόρους, αλλά και την υιοθέτηση πρακτικών διαχείρισης, προστασίας και ορθολογικής χρήσης του νερού. Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής εκπαίδευσης και επιδιώκει να ευαισθητοποιήσει τον αναγνώστη σχετικά με την καθοριστική σημασία της ποιότητας και της διαχείρισης του νερού, αναδεικνύοντας την αναγκαιότητα συνειδητής στάσης απέναντι στο πιο πολύτιμο φυσικό αγαθό για τη ζωή στον πλανήτη.

A.2. ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ – ΜΙΑ ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το νερό αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την ύπαρξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη. Αναγνωρίζεται όχι απλώς ως ένα φυσικό αγαθό, αλλά ως το πλέον κρίσιμο στοιχείο για την επιβίωση του ανθρώπου, δεδομένου ότι συμμετέχει ουσιαστικά τόσο στην κάλυψη βασικών καθημερινών αναγκών (όπως η κατανάλωση και η υγιεινή), όσο και σε ποικίλες παραγωγικές δραστηριότητες, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η γεωργία, η βιομηχανία και η παραγωγή ενέργειας.

Ωστόσο, σε αντίθεση με άλλους πόρους που μπορεί να παραχθούν τεχνητά, το νερό είναι **μη ανανεώσιμος** υπό την έννοια ότι δεν μπορούμε να το δημιουργήσουμε κατά βούληση· η διαθεσιμότητά του εξαρτάται από φυσικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες. Οι βροχοπτώσεις, το γενικότερο κλιματικό καθεστώς, αλλά και παρεμβάσεις όπως τα έργα άρδευσης, η βιομηχανική ρύπανση ή η υπεράντληση, επηρεάζουν καθοριστικά τόσο την ποσότητα όσο και την ποιότητά του.

Κατά την ανθρώπινη χρήση του νερού, δύο κρίσιμες του ιδιότητες μεταβάλλονται άμεσα: η **ποιότητα** (που αναφέρεται στον βαθμό καθαρότητάς του και στην καταλληλότητα για χρήση) και η **ποσότητα** (δηλαδή η διαθέσιμη ποσότητα νερού για τις εκάστοτε ανάγκες). Δυστυχώς, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν επιφέρει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες εκδηλώνονται με διαφορετικούς τρόπους, όπως:

- Τεχνητές μεταβολές της φυσικής ροής ποταμών λόγω κατασκευής φραγμάτων.
- Ρύπανση των υδάτων από αστικά και βιομηχανικά απόβλητα που απορρίπτονται ανεξέλεγκτα.
- Κακή διαχείριση των αρδευτικών συστημάτων, με απώλεια μεγάλων ποσοτήτων νερού και υποβάθμιση εδαφών.

Τα προβλήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδάτινων πόρων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. **Φυσική ανισοκατανομή:** Το νερό δεν είναι ομοιόμορφα διαθέσιμο σε όλο τον πλανήτη, ούτε εντός των γεωγραφικών ορίων μιας χώρας. Ενδεικτικά, περιοχές πλήττονται ταυτόχρονα από πλημμύρες και από ξηρασία, αναλόγως των συνθηκών και των εποχών.
2. **Ελλιπής διαχείριση και απουσία συντονισμένης πολιτικής:** Συχνά παρατηρείται ανεπαρκής συνεργασία μεταξύ κρατικών και τοπικών φορέων ή εφαρμογή αποσπασματικών και μη συστηματικών πολιτικών, γεγονός που οδηγεί σε αλληλοεπικαλύψεις, συγκρούσεις και σπατάλη πόρων.
3. **Απουσία οικολογικής συνείδησης στους πολίτες:** Η ελλιπής ενημέρωση και η απουσία περιβαλλοντικής εκπαίδευσης καθιστούν πολλούς πολίτες αδιάφορους ή ανενημέρωτους ως προς τις συνέπειες της αλόγιστης κατανάλωσης νερού και την ανάγκη ορθολογικής του χρήσης.

Ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων προβλημάτων στην ελληνική πραγματικότητα αποτελούν οι συγκρούσεις μεταξύ δημοσίων φορέων ή τοπικών κοινωνιών σχετικά με τη χρήση των ίδιων υδάτινων πόρων, όπως συμβαίνει με τον ποταμό Αλιάκμονα και τον ταμιευτήρα του Μόρνου. Τέτοιες περιπτώσεις αναδεικνύουν την ανάγκη ύπαρξης ολοκληρωμένων και βιώσιμων στρατηγικών διαχείρισης των υδάτινων αποθεμάτων σε εθνικό και τοπικό επίπεδο.

A.2.1 ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗ ΓΗ

Το νερό αποτελεί ένα από τα αρχαιότερα και πιο θεμελιώδη φυσικά στοιχεία του πλανήτη μας, καθώς η παρουσία του χρονολογείται από τη στιγμή της γένεσης της ίδιας της Γης. Στα πρώτα στάδια της γεωλογικής ιστορίας, η γήινη ατμόσφαιρα κυριαρχούνταν από πρωτογενή αέρια, όπως το άζωτο (N_2), το οξυγόνο (O_2) και υδρατμούς. Με την πάροδο του χρόνου, καθώς η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης άρχισε σταδιακά να μειώνεται, οι υδρατμοί υπέστησαν συμπίκνωση, οδηγώντας στον σχηματισμό των πρώτων υδάτινων συστημάτων,

όπως των ωκεανών, των λιμνών και των ποταμών. Αυτή η διαδικασία αποτέλεσε καθοριστική συνθήκη για την εξέλιξη του κλίματος και της ζωής στον πλανήτη.

Σύμφωνα με γεωφυσικές εκτιμήσεις, η συνολική ποσότητα νερού που υπάρχει στη Γη — σε όλες τις φυσικές του καταστάσεις, δηλαδή υγρή, στερεά και αέρια — ανέρχεται περίπου στα **1.360 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα** ($1.360 \times 10^6 \text{ km}^3$). Αν και ο συνολικός αυτός όγκος μοιάζει τεράστιος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι μόνο ένα **πολύ μικρό ποσοστό** του νερού αυτού είναι **γλυκό** και κατάλληλο για ανθρώπινη κατανάλωση ή άλλες παραγωγικές χρήσεις.

Κατανομή του Νερού στον Πλανήτη

Το μεγαλύτερο μέρος του γήινου νερού — περίπου **97,25%** — βρίσκεται στους ωκεανούς και τις θάλασσες, σε μορφή **αλμυρού νερού**, το οποίο δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμο χωρίς προηγούμενη επεξεργασία (όπως αφαλάτωση). Μόλις το **2,75%** του συνολικού αποθέματος αποτελεί **γλυκό νερό**, από το οποίο όμως η συντριπτική πλειονότητα είναι δεσμευμένη σε **παγετώνες, παγοκαλύμματα και χιόνι**, κυρίως στους πόλους και σε ορεινές περιοχές.

Από το εναπομείναν ποσοστό του γλυκού νερού, μόνο ένα **εξαιρετικά μικρό κλάσμα** βρίσκεται σε **υπόγειες υδροφορίες** ή κυκλοφορεί ως **επιφανειακό νερό** (σε ποτάμια, λίμνες και ταμειντήρες), το οποίο είναι πρακτικά **προσβάσιμο** και αξιοποιήσιμο για τις ανθρώπινες ανάγκες — είτε για ύδρευση, άρδευση, βιομηχανική χρήση ή παραγωγή ενέργειας.

Εικόνα 1: Υδάτινος Πόρος σε ορεινή περιοχή



Η άνιση αυτή κατανομή του υδάτινου πλούτου, σε συνδυασμό με τις πιέσεις που δέχεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα και την κλιματική αλλαγή, καταδεικνύει την αναγκαιότητα για υπεύθυνη, επιστημονικά τεκμηριωμένη και βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στον Πίνακα 1 δίνεται μια ποσοτική κατανομή του νερού στον πλανήτη μας. Από τα στοιχεία αυτά γίνεται ξεκάθαρο πως η προσβάσιμη ποσότητα γλυκού νερού είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Για τον λόγο αυτό, η ορθή διαχείριση και η επεξεργασία του νερού είναι τόσο κρίσιμη για την επιβίωση και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων.

Πίνακας 1: Κατανομή του νερού στον πλανήτη

Μορφή νερού	Όγκος (σε χιλιάδες km ³)	Ποσοστό επί του συνόλου
Θάλασσες (αλμυρό νερό)	1.320.000	97,25%
Παγετώνες – Χιόνια	29.200	2,10%
Υπόγεια νερά	8.250	0,62%
Λίμνες	125	0,009%
Ποταμοί	1,25	0,0001%
Ατμόσφαιρα (υδρατμοί)	13	0,001%
Άλλες μορφές (αλμυρές λίμνες κ.ά.)	μικρές ποσότητες	~0,005%

Α.3. ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Το νερό, παρά το γεγονός ότι αποτελείται από ένα απλό και μικρό μόριο — δύο άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου (H₂O) — διαθέτει ένα σύνολο μοναδικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων που το καθιστούν απολύτως αναντικατάστατο για τη διατήρηση της ζωής και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων. Οι ιδιότητες αυτές οφείλονται κυρίως στη μοριακή του δομή και στις ισχυρές **υδρογονικές δεσμεύσεις** που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του, οι οποίες προσδίδουν στο νερό εξαιρετικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με άλλες χημικές ενώσεις.

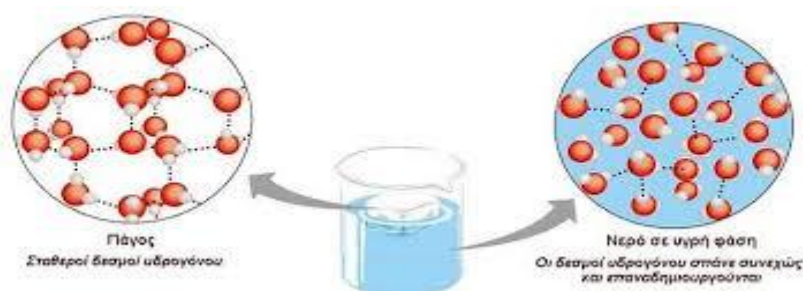
Η ικανότητα του νερού να λειτουργεί ως **πολύ καλός διαλύτης** είναι μία από τις πλέον σημαντικές φυσικοχημικές του ιδιότητες. Χάρη στην πολικότητα του μορίου του, το νερό έχει τη δυνατότητα να διαλύει ένα ευρύ φάσμα ιόντων και μορίων, γεγονός που εξηγεί τη συχνή αναφορά σε αυτό ως τον «καθολικό διαλύτη». Η ιδιότητα αυτή είναι καθοριστική για τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών, ρύπων και διαλυμένων αερίων τόσο στους φυσικούς οικοσυστημικούς κύκλους όσο και στις τεχνολογικές διαδικασίες επεξεργασίας νερού.

Επιπλέον, το νερό χαρακτηρίζεται από **υψηλή θερμοχωρητικότητα**, δηλαδή έχει την ικανότητα να απορροφά και να συγκρατεί θερμότητα χωρίς να μεταβάλλεται εύκολα η θερμοκρασία του. Αυτή η ιδιότητα το καθιστά ουσιαστικό ρυθμιστικό μέσο για το μικροκλίμα και το κλίμα της Γης, συμβάλλοντας στην εξισορρόπηση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων.

Άλλες αξιοσημείωτες φυσικές ιδιότητες του νερού περιλαμβάνουν:

- **Υψηλή πυκνότητα** σε υγρή μορφή, ιδιαίτερα κοντά στο σημείο πήξης.
- **Μεγάλη επιφανειακή τάση**, που ευνοεί φαινόμενα όπως η τριχοειδής ανύψωση και η δημιουργία σταγονιδίων.
- Ιδιαίτερη **συμπεριφορά κατά την αλλαγή θερμοκρασίας**, καθώς παρουσιάζει ανώμαλη διαστολή: η πυκνότητά του μεγιστοποιείται στους 4°C, ενώ παγώνει στους 0°C και βράζει στους 100°C υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση.

Εικόνα 2: Μοριακή δομή του νερού σε στερεή (πάγος) και υγρή φάση



Αυτά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά καθορίζουν όχι μόνο τον ρόλο του νερού στα φυσικά και βιολογικά συστήματα, αλλά επηρεάζουν και κρίσιμες παραμέτρους της ποιότητάς του, των διεργασιών επεξεργασίας και των εφαρμογών του σε ποικίλους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

A.3.1 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Το μόριο του νερού (H_2O) συγκροτείται από δύο άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου, σχηματίζοντας μία από τις πιο θεμελιώδεις ενώσεις στη φύση. Αν και η χημική του σύσταση είναι απλή, παρουσιάζει σημαντικό φάσμα παραλλαγών λόγω της ύπαρξης **ισοτόπων** στα άτομα υδρογόνου και οξυγόνου. Τα ισότοπα αυτά, όπως το δευτέριο (^2H) και το τρίτιο (^3H) στο υδρογόνο ή το οξυγόνο-18 (^{18}O), μπορούν να δημιουργήσουν διαφορετικές μορφές μορίων νερού, με ελαφρώς διαφοροποιημένες φυσικοχημικές ιδιότητες, οι οποίες είναι χρήσιμες σε εξειδικευμένες επιστημονικές εφαρμογές (π.χ. στην ισοτοπική υδρολογία).

Οι μοναδικές ιδιότητες του νερού, που καθορίζουν τη συμπεριφορά του σε φυσικά και τεχνητά περιβάλλοντα, προκύπτουν από τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- **Πολικότητα:** Το μόριο του νερού είναι ισχυρά πολικό, λόγω της άνισης κατανομής των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του. Το άτομο οξυγόνου φέρει μερικό αρνητικό φορτίο, ενώ τα άτομα υδρογόνου μερικό θετικό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διπόλου. Αυτή η δομή του επιτρέπει να σχηματίζει ισχυρούς **υδρογονικούς δεσμούς** με άλλα μόρια και να λειτουργεί ως **πολύ αποτελεσματικός διαλύτης** για ιοντικές ενώσεις και πολικές ουσίες.
- **Υψηλή θερμοχωρητικότητα:** Το νερό μπορεί να απορροφήσει ή να αποδώσει μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας χωρίς να παρουσιάζει σημαντική μεταβολή στη θερμοκρασία του. Αυτό το χαρακτηριστικό το καθιστά εξαιρετικό θερμικό ρυθμιστή σε φυσικά και βιομηχανικά συστήματα, συμβάλλοντας, για παράδειγμα, στη σταθεροποίηση του κλίματος.
- **Μεγάλη επιφανειακή τάση:** Η ισχυρή συνοχή μεταξύ των μορίων του νερού, λόγω των υδρογονικών δεσμών, έχει ως αποτέλεσμα υψηλή επιφανειακή τάση. Αυτό εξηγεί την ικανότητα σχηματισμού σταγονιδίων, την κίνηση του νερού μέσα σε

τριχοειδή σωληνάκια (π.χ. στους ιστούς των φυτών), καθώς και τη διατήρηση σταθερών επιφανειακών δομών σε μικρές ποσότητες υγρού.

- **Ιξώδες και αγωγιμότητα:** Το ιξώδες του νερού — δηλαδή η εσωτερική τριβή ή αντίσταση στη ροή — εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία, μειώνοντας καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Παράλληλα, το νερό εμφανίζει **ηλεκτρική αγωγιμότητα**, ιδιαίτερα όταν περιέχει διαλυμένα άλατα ή ιόντα, γεγονός που του επιτρέπει να μεταφέρει όχι μόνο μάζα, αλλά και ενέργεια. Αυτή η ιδιότητα είναι κρίσιμη για φυσικά και τεχνολογικά συστήματα, όπως τα υδάτινα οικοσυστήματα ή οι βιομηχανικές διεργασίες.

Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν το νερό ουσιώδες όχι μόνο για τη βιολογική λειτουργία των οργανισμών, αλλά και για ποικίλες φυσικοχημικές και περιβαλλοντικές διεργασίες, από τη διατήρηση της ζωής έως την τεχνολογική πρόοδο.

A.3.2 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού προσδιορίζουν το επίπεδο καθαρότητας και καταλληλότητάς του για κατανάλωση, υγειονομική χρήση ή εφαρμογή σε διάφορες παραγωγικές διαδικασίες. Η αξιολόγηση της ποιότητας του νερού βασίζεται σε έναν συνδυασμό παραμέτρων που διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- **Φυσικά χαρακτηριστικά:** Περιλαμβάνουν ιδιότητες όπως η θερμοκρασία, το χρώμα, η οσμή και η **θολότητα** του νερού, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την αισθητηριακή του αποδοχή και υποδεικνύουν ενδεχομένως την παρουσία ρύπων ή αιωρούμενων στερεών.
- **Χημικά χαρακτηριστικά:** Αφορούν τη συγκέντρωση διαφόρων **ανόργανων και οργανικών ενώσεων**, όπως μέταλλα, ιόντα και χημικά κατάλοιπα, που επηρεάζουν τόσο την υγεία του ανθρώπου όσο και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υδάτινου οικοσυστήματος.
- **Βιολογικά χαρακτηριστικά:** Περιλαμβάνουν την παρουσία **μικροοργανισμών**, όπως βακτήρια, ιοί, πρωτόζωα και φύκη, εκ των οποίων αρκετά μπορεί να είναι **παθογόνα** για τον άνθρωπο ή ενδεικτικά ρυπάνσεων.

Για την εξασφάλιση κατάλληλης ποιότητας νερού, απαιτείται **συνδυασμένη επεξεργασία**, η οποία περιλαμβάνει:

- **Απολύμανση**, με στόχο την καταστροφή ή απενεργοποίηση παθογόνων μικροοργανισμών (συνήθως με χρήση χλωρίου, όζοντος ή υπεριώδους ακτινοβολίας).
- **Καθίζηση και διήθηση**, για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων και θολότητας.

- **Χημική επεξεργασία**, για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων χημικών ενώσεων, όπως βαρέα μέταλλα, νιτρικά ή οργανικοί ρύποι.

A 3.2.1 Ανόργανα Συστατικά

Το φυσικό νερό περιέχει ποικίλα **ανόργανα στοιχεία** και ιόντα, των οποίων η συγκέντρωση εξαρτάται από τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής προέλευσης. Κύρια συστατικά περιλαμβάνουν:

- **Ασβέστιο (Ca)**
- **Μαγνήσιο (Mg)**
- **Νάτριο (Na)**
- **Κάλιο (K)**
- **Χλωριούχα, νιτρικά, πυριτικά και άλλα ανόργανα ιόντα**

Η προέλευση αυτών των συστατικών σχετίζεται κυρίως με τη **διάβρωση των πετρωμάτων**, τη **φυσική αποσάθρωση** του εδάφους, καθώς και με **βιογεωχημικές διεργασίες**. Αν και ορισμένα από αυτά είναι απαραίτητα για τον ανθρώπινο οργανισμό σε χαμηλές συγκεντρώσεις, σε υψηλότερες ποσότητες ενδέχεται να υποβαθμίσουν την ποιότητα του πόσιμου νερού ή να επιβαρύνουν την υγεία.

A 3.2.2 Αιωρούμενα Στερεά

Ως **αιωρούμενα στερεά** χαρακτηρίζονται τα μικροσκοπικά σωματίδια που βρίσκονται διασκορπισμένα στο νερό και δεν διαλύονται, παραμένοντας σε αιώρηση. Η παρουσία τους μπορεί να οφείλεται σε:

- **Φυσικές διεργασίες**, όπως η **διάβρωση βραχωδών σχηματισμών** και η αποσύνθεση οργανικών υλικών.
- **Βιολογική δραστηριότητα**, όπως η παραγωγή οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς.
- **Ανθρωπογενείς παρεμβάσεις**, π.χ. **ρύπανση** από γεωργία, βιομηχανία ή αστικά απόβλητα.

Η αξιολόγηση των αιωρούμενων στερεών γίνεται με μεθόδους όπως:

- **Μέτρηση θολότητας**, που αποτελεί ένδειξη της συγκέντρωσης και φύσης των σωματιδίων.
- **Κατανομή μεγέθους σωματιδίων**, μέσω φασματομετρικών ή διηθητικών τεχνικών.

A 3.2.3 Οργανικά Συστατικά

Τα **οργανικά συστατικά** που ανιχνεύονται στο νερό προέρχονται από ευρύ φάσμα **φυσικών** αλλά και **ανθρωπογενών πηγών**, επηρεάζοντας άμεσα την ποιότητα και την καταλληλότητά του για χρήση. Οι κυριότερες πηγές εισόδου οργανικών ενώσεων στο υδάτινο περιβάλλον περιλαμβάνουν:

- Την **αποσύνθεση φυτικής και ζωικής ύλης**, είτε στο υπέδαφος είτε σε επιφανειακά υδάτινα σώματα, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση οργανικών καταλοίπων φυσικής προέλευσης.
- Την **αγροχημική ρύπανση**, κυρίως λόγω της εκτεταμένης χρήσης **λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών προϊόντων και ζωικών αποβλήτων**, τα οποία διεισδύουν στα υδάτινα αποθέματα μέσω επιφανειακής απορροής ή κατείσδυσης.
- Την **απόρριψη αστικών και βιομηχανικών λυμάτων**, τα οποία συχνά περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις **διαλυμένων οργανικών ενώσεων**, όπως **υδρογονάνθρακες, πετρελαιοειδή, φαρμακευτικά κατάλοιπα, οικιακά απορρυπαντικά** και άλλα συνθετικά χημικά.

Η γεωλογική προέλευση και η τύχη των οργανικών ενώσεων στο υδάτινο περιβάλλον εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του υδροφόρου συστήματος. Σε περιοχές με **καθαρά υπόγεια ύδατα**, η συγκέντρωση οργανικών ρύπων παραμένει **χαμηλή**, λόγω της φυσικής **διήθησης** που δρα ως φίλτρο, και της **βιοαποικοδόμησης**, η οποία μειώνει ή εξουδετερώνει τους οργανικούς ρύπους μέσω μικροβιακής δραστηριότητας.

Αντιθέτως, τα **επιφανειακά νερά** που δέχονται έντονη **ρύπανση** από ανθρώπινες δραστηριότητες, συχνά παρουσιάζουν **υψηλή συγκέντρωση οργανικών καταλοίπων**. Η παρουσία αυτών των ουσιών όχι μόνο **υποβαθμίζει δραστικά την ποιότητα** του νερού, αλλά καθιστά και την **επεξεργασία** του ιδιαίτερα απαιτητική και ενεργοβόρα, καθώς απαιτούνται εξειδικευμένες μέθοδοι απομάκρυνσης (π.χ. ενεργός άνθρακας, προχωρημένες οξειδωτικές διεργασίες).

A.4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

A.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι **μικροοργανισμοί**, όπως βακτήρια, ιοί, πρωτόζωα και άλλοι μονοκύτταροι οργανισμοί, αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την ποιότητα του νερού, τόσο θετικά όσο και αρνητικά. Από τη μία πλευρά, διαδραματίζουν **θεμελιώδη ρόλο στη βιολογική αποδόμηση** οργανικών ρύπων. Σε φυσικά υδάτινα συστήματα, όπως οι ποταμοί, ενεργοποιούνται **μηχανισμοί αυτοκαθαρισμού**, μέσω των οποίων οι μικροοργανισμοί αποδομούν τα οργανικά απόβλητα που καταλήγουν στο νερό, συμβάλλοντας στην **αποκατάσταση της ποιότητάς του**.

Από την άλλη πλευρά, αρκετοί μικροοργανισμοί είναι **δυσήκτα παθογόνοι** για τον άνθρωπο και η παρουσία τους στο πόσιμο νερό μπορεί να έχει σοβαρές **υγειονομικές επιπτώσεις**. Ορισμένα είδη προκαλούν **λοιμώξεις** όπως ο τυφοειδής πυρετός, ενώ άλλα προσδίδουν στο νερό **δυσάρεστη οσμή ή γεύση**, επηρεάζοντας την αποδοχή και καταλληλότητά του. Επιπλέον, μερικοί μικροοργανισμοί παράγουν **διαβρωτικά προϊόντα**, τα οποία επιτίθενται σε υλικά υποδομής, όπως σωληνώσεις και δεξαμενές αποθήκευσης.

Σε κλειστά υδάτινα σώματα, όπως οι **λίμνες**, η **υπερβολική ανάπτυξη μικροοργανισμών**, κυρίως φωτοσυνθετικών (π.χ. κυανοβακτήρια), μπορεί να οδηγήσει σε **ευτροφισμό** — ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζεται από ραγδαία αύξηση της βιομάζας, εξάντληση του διαλυμένου οξυγόνου και **διαταραχή της οικολογικής ισορροπίας** του οικοσυστήματος.

Η **κατανόηση της μικροβιολογίας του νερού** είναι, επομένως, κρίσιμη για κάθε ειδικό που εμπλέκεται στον **έλεγχο ποιότητας** και στην **επεξεργασία πόσιμου ή αποβλήτου νερού**. Αν και όλοι οι μικροοργανισμοί απαιτούν **υγρό περιβάλλον** για την επιβίωσή τους, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά τις **μεταβολικές τους ανάγκες**, τον **μηχανισμό παραγωγής ενέργειας** και τη **δομή των κυττάρων τους**. Αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται ως **κριτήρια ταξινόμησης**.

A.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΟΞΥΓΟΝΟ

Η δυνατότητα των μικροοργανισμών να χρησιμοποιούν ή να ανέχονται το **μοριακό οξυγόνο (O₂)** αποτελεί βασική παράμετρο για τη μεταβολική τους ταξινόμηση. Με βάση τη σχέση τους με το οξυγόνο, διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Υποχρεωτικά αερόβιοι μικροοργανισμοί:** Απαιτούν την παρουσία οξυγόνου για να επιβιώσουν και να εκτελέσουν τις βασικές μεταβολικές τους διεργασίες. Το οξυγόνο λειτουργεί ως **τελικός δέκτης ηλεκτρονίων** στην **αερόβια αναπνοή**, επιτρέποντάς τους να παράγουν ενέργεια μέσω της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης.
- **Υποχρεωτικά αναερόβιοι μικροοργανισμοί:** Δεν μπορούν να επιβιώσουν σε περιβάλλον που περιέχει οξυγόνο· το οξυγόνο είναι **τοξικό** για αυτούς, καθώς προκαλεί τη δημιουργία αντιδραστικών μορφών οξυγόνου (ROS), τις οποίες δεν μπορούν να εξουδετερώσουν. Αντ' αυτού, βασίζονται σε **αναερόβιες μεταβολικές διεργασίες**, όπως η ζύμωση ή η αναπνοή με χρήση άλλων αποδεκτών ηλεκτρονίων (π.χ. νιτρικά, θειικά).
- **Προαιρετικά αναερόβιοι μικροοργανισμοί:** Πρόκειται για ευπροσάρμοστους οργανισμούς που μπορούν να λειτουργούν **τόσο σε παρουσία όσο και σε απουσία οξυγόνου**. Όταν το οξυγόνο είναι διαθέσιμο, εκτελούν αερόβια αναπνοή. Σε αναερόβιες συνθήκες, μεταβαίνουν σε εναλλακτικές μεταβολικές οδούς, όπως η ζύμωση. Αυτή η προσαρμοστικότητα τούς καθιστά κοινούς σε μεταβατικά ή εναλλασσόμενα περιβάλλοντα, όπως τα απόβλητα ή τα ιζήματα.

A.4.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΜΕΤΑΒΟΛΙΣΜΟ

Οι μικροοργανισμοί διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τον **μεταβολισμό** τους, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο εξασφαλίζουν την ενέργεια και τις απαραίτητες πρώτες ύλες για την ανάπτυξη και επιβίωσή τους. Η ταξινόμησή τους σε μεταβολικές κατηγορίες βασίζεται σε δύο κύρια κριτήρια:

1. **Την πηγή ενέργειας** (φως ή χημικές ενώσεις).
2. **Την πηγή άνθρακα** (ανόργανη ή οργανική).

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτουν τέσσερις βασικές μεταβολικές κατηγορίες:

- **Φωτοαυτότροφοι μικροοργανισμοί:** Χρησιμοποιούν το **ηλιακό φως** ως πηγή ενέργειας μέσω της **φωτοσύνθεσης**, ενώ ο άνθρακας που απαιτείται για τη σύνθεση των οργανικών ενώσεων προέρχεται από **ανόργανες πηγές**, κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Τυπικοί εκπρόσωποι αυτής της κατηγορίας είναι τα **φύκη** και τα **κυανοβακτήρια**, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στους υδάτινους οικοσυστημικούς κύκλους, συμβάλλοντας και στην παραγωγή οξυγόνου.
- **Φωτοετερότροφοι μικροοργανισμοί:** Αξιοποιούν επίσης την **ηλιακή ακτινοβολία** για την παραγωγή ενέργειας, αλλά σε αντίθεση με τους φωτοαυτότροφους, δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν ανόργανες πηγές άνθρακα. Αντ' αυτού, απαιτούν την **πρόσληψη οργανικών ενώσεων** από το περιβάλλον τους για τη σύνθεση των κυτταρικών τους συστατικών. Αν και λιγότερο συχνοί, απαντώνται σε ορισμένα εξειδικευμένα μικροβιακά οικοσυστήματα.
- **Χημειοαυτότροφοι μικροοργανισμοί:** Αντλούν την απαραίτητη ενέργεια μέσω **οξειδοαναγωγικών χημικών αντιδράσεων**, οι οποίες βασίζονται σε **ανόργανες ενώσεις**, όπως το υδρόθειο (H_2S), το αμμώνιο (NH_4^+) ή ο σίδηρος (Fe^{2+}). Παράλληλα, χρησιμοποιούν **διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)** ως πηγή άνθρακα. Αυτοί οι οργανισμοί είναι κοινοί σε ακραία ή αναερόβια περιβάλλοντα και παίζουν κρίσιμο ρόλο σε **γεωχημικούς κύκλους**, όπως ο κύκλος του αζώτου και του θείου.
- **Χημειοετερότροφοι μικροοργανισμοί:** Πρόκειται για την **πιο διαδεδομένη** μεταβολική κατηγορία, η οποία περιλαμβάνει τους περισσότερους **βακτήρια** και **μύκητες**. Οι οργανισμοί αυτοί αντλούν ενέργεια από **χημικές ενώσεις οργανικής προέλευσης** και απαιτούν επίσης **οργανικές ενώσεις** ως πηγή άνθρακα. Συμμετέχουν ενεργά στη **βιοαποικοδόμηση**, την **επεξεργασία λυμάτων**, αλλά και σε παθογόνες αλληλεπιδράσεις με τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

A.4.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥΣ

Η ταξινόμηση των μικροοργανισμών μπορεί επίσης να βασιστεί στη **κυτταρική τους οργάνωση**, δηλαδή στη δομή και στη λειτουργική πολυπλοκότητα των κυττάρων τους. Με βάση αυτό το κριτήριο, διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- **Ιοί και ιοειδή:** Πρόκειται για **ακυτταρικές μορφές ζωής**, που δεν διαθέτουν κυτταρική δομή και δεν θεωρούνται πλήρως ζωντανοί οργανισμοί. Οι **ιοί** αποτελούνται από γενετικό υλικό (DNA ή RNA) που περιβάλλεται από ένα πρωτεϊνικό κάλυμμα (καψίδιο) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, από εξωτερικό λιπιδικό περίβλημα. Οι **ιοειδείς** είναι ακόμη απλούστερες μορφές, αποτελούμενες μόνο από RNA. Ούτε οι ιοί ούτε τα ιοειδή μπορούν να επιτελέσουν μεταβολικές λειτουργίες από μόνοι τους· για να πολλαπλασιαστούν, απαιτούν την **εισβολή σε ζωντανά κύτταρα-ξενιστές**, εκμεταλλευόμενοι τον μεταβολισμό τους.
- **Προκαρυωτικοί μικροοργανισμοί:** Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει οργανισμούς όπως τα **βακτήρια** και τα **αρχαία βακτήρια (αρχαία)**. Τα κύτταρά τους είναι **απλούστερα δομημένα**, καθώς δεν διαθέτουν **πυρηνική μεμβράνη**, με αποτέλεσμα το γενετικό υλικό να είναι ελεύθερο στο κυτταρόπλασμα. Οι προκαρυωτικοί οργανισμοί χαρακτηρίζονται από ταχεία αναπαραγωγή, υψηλή μεταβολική ευελιξία και ευρεία οικολογική κατανομή.
- **Ευκαρυωτικοί μικροοργανισμοί:** Σε αυτή την ομάδα ανήκουν οι **μύκητες**, τα **πρωτόζωα**, καθώς και ορισμένα **μικροσκοπικά φύκη**. Τα κύτταρά τους διαθέτουν **πυρήνα περιβαλλόμενο από μεμβράνη**, καθώς και **πολλαπλά οργάνδια** (π.χ. μιτοχόνδρια, ενδοπλασματικό δίκτυο), γεγονός που υποδηλώνει **πιο σύνθετη κυτταρική οργάνωση**. Οι ευκαρυωτικοί μικροοργανισμοί επιτελούν πολύπλοκες μεταβολικές λειτουργίες και παίζουν κρίσιμο ρόλο τόσο στα φυσικά οικοσυστήματα όσο και στην ανθρώπινη υγεία.

A.4.5 ΕΙΔΗ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Οι μικροοργανισμοί, παρά την τεράστια ποικιλομορφία τους, μπορούν να ταξινομηθούν σε ευρείες κατηγορίες με βάση βασικά μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Μια γενική και χρήσιμη προσέγγιση για την κατηγοριοποίησή τους, ειδικά σε σχέση με την **ποιότητα και επεξεργασία του νερού**, περιλαμβάνει τις εξής ομάδες:

- **Φυτικά είδη μικροοργανισμών:** Σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγονται **βακτήρια** και **μύκητες**, οι οποίοι εμφανίζουν μορφολογικά ή λειτουργικά χαρακτηριστικά που τους καθιστούν παρόμοιους με τα φυτά. Οι μύκητες, για παράδειγμα, παρουσιάζουν μορφές αποικοδομητών στο υδάτινο περιβάλλον, ενώ τα βακτήρια μπορούν να λειτουργούν φωτοσυνθετικά ή αποικοδομητικά, συμβάλλοντας στη διάσπαση οργανικών ρύπων.
- **Ζωικά είδη μικροοργανισμών:** Εδώ περιλαμβάνονται οργανισμοί όπως τα **πρωτόζωα** και το **πλασμώδιο** (παράσιτο υπεύθυνο για την ελονοσία), οι οποίοι εμφανίζουν **ενεργή κινητικότητα** μέσω βλεφαρίδων, μαστιγίων ή ψευδοποδιών. Χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη δομή και συχνά είναι ενδεικτικοί **μικροβιολογικής ρύπανσης** σε επιφανειακά νερά.

- **Ιοί:** Αν και δεν διαθέτουν κυτταρική δομή, οι ιοί αποτελούν σημαντική κατηγορία **παθογόνων παραγόντων**, καθώς μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές **λοιμώδεις νόσους** στον άνθρωπο (π.χ. ηπατίτιδα, γαστρεντερίτιδα) μέσω του νερού. Η παρουσία τους είναι συχνά δύσκολο να ανιχνευθεί και απαιτεί εξειδικευμένες μεθόδους απολύμανσης.
- **Πρώτιστα (Protista):** Αποτελούν **μονοκύτταρους** ή απλούς πολυκύτταρους οργανισμούς που παρουσιάζουν χαρακτηριστικά είτε **φυτικής** είτε **ζωικής φύσης**. Μερικά πρώτιστα είναι φωτοσυνθετικά, ενώ άλλα είναι ετερότροφα και τρέφονται με άλλους μικροοργανισμούς. Ο ρόλος τους στα υδάτινα οικοσυστήματα είναι πολυδιάστατος — συμμετέχουν τόσο σε **τροφικές αλυσίδες**, όσο και σε **βιολογικές διεργασίες καθαρισμού**.

Αυτή η ταξινόμηση συνεισφέρει σημαντικά στην **κατανόηση της επίδρασης των μικροοργανισμών στην ποιότητα του νερού**, και παράλληλα αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την **παρακολούθηση και τον έλεγχο της μικροβιολογικής επιβάρυνσης** κατά την επεξεργασία και διανομή του.

A.5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση εγκαταστάσεων επεξεργασίας νερού αποτελούν κρίσιμο στάδιο στη διαχείριση των υδάτινων πόρων, με βασικό στόχο την **παραγωγή καθαρού, ασφαλούς και ποιοτικού νερού**, το οποίο να ανταποκρίνεται στις **υγειονομικές και τεχνικές προδιαγραφές**, διατηρώντας παράλληλα ένα **βιώσιμο κόστος για τον τελικό χρήστη**. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, εφαρμόζεται συνδυασμός **φυσικών και χημικών διεργασιών**, που στοχεύουν στην **απομάκρυνση ή εξουδετέρωση ανεπιθύμητων ρύπων**, όπως αιωρούμενα στερεά, μικροοργανισμοί, οργανικές ενώσεις και ανόργανα άλατα.

Κατά τον **σχεδιασμό μιας μονάδας επεξεργασίας νερού**, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ποικίλες τεχνικές και οικονομικές παράμετροι, όπως:

- Το **κόστος κατασκευής**, που αφορά τα αρχικά έργα υποδομής, τον εξοπλισμό και τις τεχνικές εγκαταστάσεις.
- Το **λειτουργικό κόστος**, που σχετίζεται με την κατανάλωση ενέργειας, τη χρήση χημικών, το προσωπικό και τη συντήρηση.
- Η **απλότητα λειτουργίας**, ώστε η εγκατάσταση να είναι φιλική προς τον χειριστή και ευέλικτη στη χρήση.
- Οι **απαιτήσεις συντήρησης**, οι οποίες πρέπει να είναι ρεαλιστικές και προσαρμοσμένες στη διαθεσιμότητα τεχνικών μέσων.
- Το **προφίλ του τελικού χρήστη**, είτε πρόκειται για αστική, αγροτική ή βιομηχανική περιοχή, ώστε να διασφαλίζεται η καταλληλότητα της λύσης.

Αξιοσημείωτο είναι ότι, ενώ το **κόστος μελέτης και σχεδιασμού** αντιστοιχεί σε **ποσοστό μικρότερο του 15% του συνολικού κόστους επένδυσης**, ο ρόλος του είναι καίριος. Λανθασμένες επιλογές στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσουν σε **λειτουργικά προβλήματα**, **υψηλές οικονομικές απώλειες**, ή στην **ανάγκη επώδυνων και δαπανηρών επεμβάσεων στο μέλλον**.

Αρχές Διαχωρισμού

Κατά την πορεία του μέσα στο φυσικό περιβάλλον, το νερό αποκτά διάφορες **ανόργανες και οργανικές ουσίες**, όπως **άλατα, μέταλλα, παθογόνους μικροοργανισμούς**, αλλά και **συνθετικές ενώσεις**, κυρίως εξαιτίας της επαφής του με το έδαφος και την ατμόσφαιρα στο πλαίσιο του **υδρολογικού κύκλου**.

Η βασική επιδίωξη της επεξεργασίας νερού είναι να **αντιστρέψει** τη διαδικασία αυτή — δηλαδή να **αφαιρέσει** τις διαλυμένες ή αιωρούμενες ουσίες και να επαναφέρει το νερό σε μια **καθαρή και υγιεινή μορφή**, κατάλληλη για χρήση. Η αντίστροφη αυτή διαδικασία διαχωρισμού απαιτεί την **παροχή ενέργειας**, καθώς τα συστατικά που είναι διαλυμένα στο νερό πρέπει να αποσπαστούν από αυτό.

Η **ενεργειακή απαίτηση** αυτών των διεργασιών μπορεί να εκφραστεί θερμοδυναμικά μέσω της **ελεύθερης ενέργειας Gibbs** (ΔG). Για παράδειγμα, η απομάκρυνση ενός γραμμομορίου μαγειρικού αλάτος (NaCl) από το νερό απαιτεί κατ' ελάχιστον **11,5 kJ ενέργειας**, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη απώλειες ή μηχανικές αποδοτικότητες. Η εκτίμηση αυτής της ενέργειας είναι κρίσιμη στον σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων επεξεργασίας, όπως οι μονάδες **αντίστροφης όσμωσης ή απόσταξης**.

A.6. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ

Η επεξεργασία νερού περιλαμβάνει μια ευρεία γκάμα τεχνικών και μεθόδων, οι οποίες εφαρμόζονται αναλόγως της **φύσης των ρύπων**, της **ποιότητας του ακατέργαστου νερού** και των **τελικών προδιαγραφών καθαρότητας**. Οι κυριότερες από αυτές τις διεργασίες συνοψίζονται παρακάτω:

1. Θρόμβωση – Καθίζηση /Επίπλευση

Πρόκειται για διαδικασίες **μηχανικού διαχωρισμού**, οι οποίες βασίζονται στη **δράση της βαρύτητας**. Οι αιωρούμενοι ρύποι, όπως ιλύες, μικροοργανισμοί και φύκη, είτε **κατακάθονται** στον πυθμένα είτε **ανέρχονται** στην επιφάνεια, διευκολύνοντας έτσι την απομάκρυνσή τους.

2. Ιζηματοποίηση

Πρόκειται για **χημική διεργασία** κατά την οποία προστίθενται **αντιδραστήρια**, όπως ρυθμιστικά pH ή οξειδωτικοί παράγοντες, για να καταβυθιστούν ανεπιθύμητα ανόργανα

στοιχεία. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την απομάκρυνση μετάλλων, όπως:

- Ασβέστιο (Ca)
- Σίδηρος (Fe)
- Μόλυβδος (Pb)
- Χαλκός (Cu)
- Ψευδάργυρος (Zn)

3. Διήθηση

Το νερό διέρχεται μέσα από **πορώδη μέσα**, όπως **άμμος ή ανθρακούχα φίλτρα**, τα οποία παγιδεύουν σωματίδια και μικροοργανισμούς. Η διεργασία αυτή απομακρύνει:

- Αιωρούμενα σωματίδια
- Παθογόνους μικροοργανισμούς
- Κατάλοιπα προηγούμενων σταδίων επεξεργασίας

4. Απολύμανση

Αποσκοπεί στην **καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών** που επιβιώνουν μετά τη μηχανική και χημική επεξεργασία. Μπορεί να πραγματοποιηθεί με:

- **Οξειδωτικούς παράγοντες** (π.χ. χλώριο, υποχλωριώδες νάτριο, όζον)
- **Υπεριώδη (UV) ακτινοβολία**, χωρίς προσθήκη χημικών

5. Ιοντοανταλλαγή

Βασίζεται στη χρήση **στερεών ρητινών**, οι οποίες ανταλλάσσουν ανεπιθύμητα ιόντα του νερού με επιθυμητά. Ενδείκνυται για:

- **Αποσκλήρυνση** του νερού (αφαίρεση ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+})
- **Απιονισμό** (ολική απομάκρυνση ιόντων)
- **Αφαίρεση νιτρικών** (NO_3^-)

6. Αντίστροφη Ωσμωση (Reverse Osmosis)

Εφαρμόζεται **υψηλή πίεση** ώστε το νερό να περάσει μέσα από **ημιπερατές μεμβράνες**, οι οποίες κατακρατούν:

- Διαλυμένα άλατα
- Οργανικούς ρύπους
- Ιχνοστοιχεία και βαρέα μέταλλα

7. Προσρόφηση

Χρησιμοποιούνται υλικά όπως **ενεργός άνθρακας**, τα οποία "προσκολλούν" στην επιφάνειά τους οργανικές ενώσεις και μεταλλικά ίχνη. Χρησιμοποιείται για:

- **Απομάκρυνση δυσάρεστων οσμών και γεύσεων**
- **Αφαίρεση οργανικών ρυπαντών και τοξικών ουσιών**

8. Αφαίρεση Πτητικών Ουσιών (Stripping)

Με **διοχέτευση αέρα** στο νερό, απομακρύνονται διαλυμένα αέρια ή πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως:

- **Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)**
- **Οργανικές πτητικές ενώσεις (VOC)**

9. Απορρόφηση (Absorption)

Σε αντίθεση με την προσρόφηση, εδώ **εισάγονται ουσίες** στο νερό με σκοπό την τροποποίηση της χημικής του σύνθεσης, όπως:

- **Οξυγόνο (O_2)** για βιολογικές διεργασίες
- **Όζον (O_3)** για ισχυρή απολύμανση
- **Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)** για ρύθμιση του pH

10. Φυγοκέντρωση

Μέσω **φυγοκεντρικών δυνάμεων**, διαχωρίζονται τα στερεά από τα υγρά. Ιδανική για:

- **Αφυδάτωση ιλύος**, μετά από στάδια καθίζησης ή βιολογικής επεξεργασίας

11. Διήθηση με Μembrάνες Υπό Πίεση ή Κενό

Το νερό διέρχεται μέσα από **υφασμάτινα ή μεταλλικά φίλτρα**, με σκοπό την τελική απομάκρυνση στερεών ή μικροοργανισμών. Εφαρμόζεται συνήθως στο **τελικό στάδιο καθαρισμού ή αφυδάτωσης**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διεργασίες αυτές **δεν εφαρμόζονται πάντα μεμονωμένα**, αλλά **συνδυάζονται** ανάλογα με:

- **Την πηγή του νερού** (π.χ. υπόγειο, επιφανειακό, θαλασσινό)
- **Το είδος και το επίπεδο ρύπανσης**
- **Τις τελικές απαιτήσεις ποιότητας**

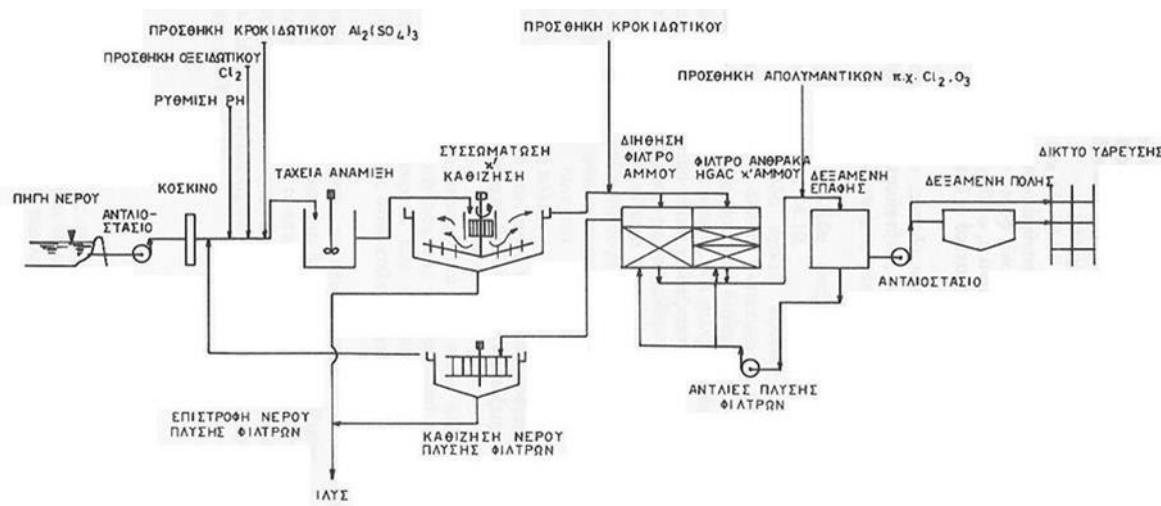
Έτσι, κάθε σύστημα επεξεργασίας σχεδιάζεται **κατά περίπτωση**, ώστε να εξασφαλίζει **αποτελεσματικότητα, ασφάλεια και οικονομική βιωσιμότητα**.

A.7. ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ-ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ

A.7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κροκίδωση και η συσσωμάτωση αποτελούν δύο εκ των πλέον θεμελιωδών διεργασιών στον τομέα της επεξεργασίας νερού, καθώς ενσωματώνουν τόσο φυσικούς όσο και χημικούς μηχανισμούς με στόχο την παραγωγή ύδατος που να πληροί τις απαιτήσεις ασφαλούς ανθρώπινης κατανάλωσης. Πρόκειται για τεχνικές που εφαρμόζονται για την απομάκρυνση λεπτόκοκκων αιωρούμενων στερεών, τα οποία φέρουν διάμετρο μικρότερη από 10 μικρόμετρα. Ο κύριος στόχος των διαδικασιών αυτών είναι η συγκόλληση ή συσσωμάτωση των μικροσκοπικών αυτών σωματιδίων σε μεγαλύτερες συσσωματώσεις, οι οποίες στη συνέχεια καθίστανται ευκολότερα απομακρύνσιμες μέσω καθίζησης, επίπλευσης ή διήθησης. Οι εν λόγω μέθοδοι συμβάλλουν ουσιαστικά στην αποτελεσματική αποκατάσταση της ποιότητας του νερού, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από χαμηλό λειτουργικό κόστος, γεγονός που ενισχύει τη βιωσιμότητά τους σε ευρεία κλίμακα εφαρμογών.

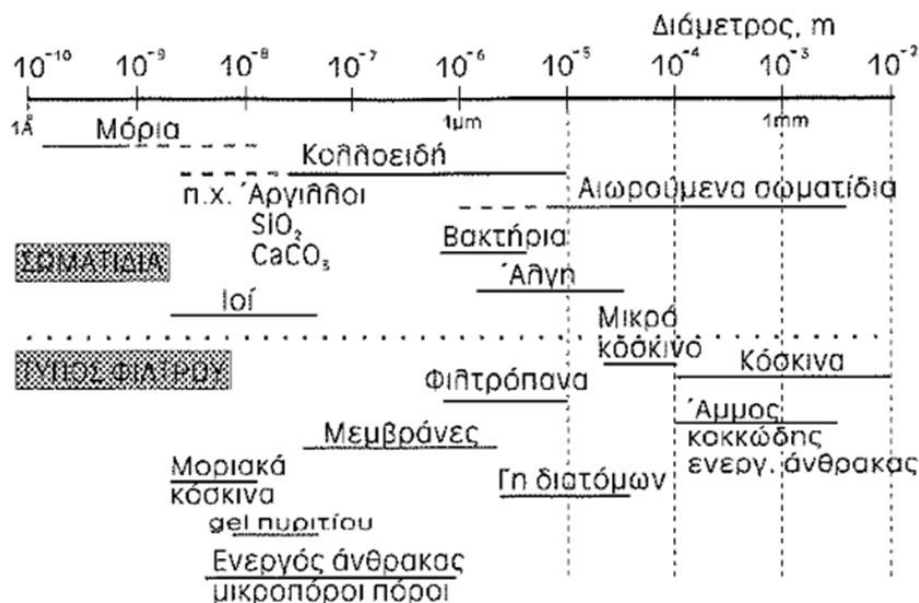
Εικόνα 3: Διάγραμμα ροής διεργασιών επεξεργασίας νερού



A.7.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Το νερό λειτουργεί ως το βασικό μέσο στο οποίο σχηματίζονται και διατηρούνται σταθερά συστήματα διασποράς, όπως είναι τα κolloειδή και τα αιωρήματα. Αυτά τα συστήματα χαρακτηρίζονται από την ομοιόμορφη κατανομή πολύ μικρών σωματιδίων μέσα στο υγρό μέσο, χωρίς να καθιζάνουν εύκολα με την πάροδο του χρόνου. Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης, εστιάζεται το ενδιαφέρον στην κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη σταθερότητα αυτών των συστημάτων, καθώς και στους μηχανισμούς και τις τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν για την αποσταθεροποίησή τους, με σκοπό τη διευκόλυνση της απομάκρυνσης των διασκορπισμένων φάσεων από το υδάτινο περιβάλλον.

Σχήμα 1: Μέγεθος των σωματιδίων που απαντούν στο νερό και το είδος του φίλτρου που μπορεί να συγκρατήσει.



A.7.2.1 Φύση και κατάσταση διασποράς των σωματιδίων στο νερό

Τα σωματίδια που απαντώνται στο φυσικό νερό εμφανίζουν αξιοσημείωτη ποικιλομορφία ως προς την προέλευσή τους, τη συγκέντρωσή τους στο υδάτινο περιβάλλον, καθώς και ως προς το μέγεθός τους. Σε γενικές γραμμές, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα κολλοειδή σωματίδια, με διαστάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 5 νανομέτρων (nm) και 1 μικρομέτρου (μm), και τα αιωρούμενα σωματίδια, των οποίων το μέγεθος υπερβαίνει τα 5 μικρόμετρα. Επιπλέον, σωματίδια με διαστάσεις μικρότερες των 5 nm θεωρούνται ότι ανήκουν στη φάση των διαλυμένων ουσιών, καθώς δεν μπορούν να απομακρυνθούν εύκολα με φυσικές μεθόδους καθίζησης ή διήθησης.

Η προέλευση των σωματιδίων μπορεί να είναι είτε φυσική είτε αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Ορισμένα εξ αυτών αποτελούν φυσικά συστατικά του εδάφους ή της ατμόσφαιρας, όπως οι άργιλοι, τα ιλυώδη υλικά, τα προϊόντα γεωλογικής αποσάθρωσης, καθώς και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και οι ίνες αμιάντου. Άλλα, αντιθέτως, παράγονται μέσω χημικών ή βιολογικών διεργασιών που συντελούνται εντός του ίδιου του υδάτινου περιβάλλοντος. Τέτοια παραδείγματα περιλαμβάνουν τη δημιουργία φυσικών ιζημάτων, όπως το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), το υδροξείδιο του σιδήρου [$\text{Fe}(\text{OH})_2$], καθώς και υπολείμματα υδρόβιας οργανικής ύλης.

Η διακύμανση στο μέγεθος αυτών των σωματιδίων είναι εξαιρετικά ευρεία: από μερικά νανόμετρα, όπως στην περίπτωση των ιόν, έως και αρκετές εκατοντάδες μικρόμετρα, όπως συμβαίνει με το ζωοπλαγκτόν. Πολλά από αυτά τα σωματίδια ενδέχεται να υφίστανται είτε ως αυτόνομες μονάδες (όπως οι παθογόνοι μικροοργανισμοί), είτε να βρίσκονται ενωμένα με άλλες ενώσεις (όπως τα βαρέα μέταλλα που συνδέονται με διαλυτές οργανικές ουσίες). Δεδομένου ότι αρκετά από αυτά σχετίζονται άμεσα με κινδύνους για τη δημόσια υγεία,

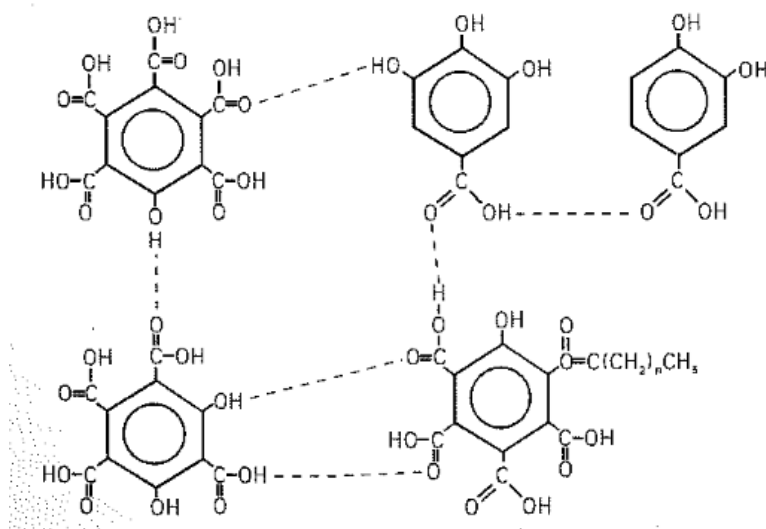
καθίσταται απολύτως αναγκαία η απομάκρυνσή τους από το νερό μέσω κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας.

Όσον αφορά τα οργανικά χημικά συστατικά που περιέχονται στα φυσικά νερά, αυτά αποτελούν βασικά συστατικά της οργανικής φάσης και συνήθως προέρχονται από το έδαφος, στο οποίο σχηματίζονται μέσω χημικών ή βιολογικών διεργασιών, όπως η αποδόμηση της φυτικής ύλης. Οι ενώσεις αυτές είναι κατά κύριο λόγο ανιονικοί πολυηλεκτρολύτες με χαμηλό έως μέτριο μοριακό βάρος. Το ηλεκτρικό τους φορτίο προκύπτει από την παρουσία καρβοξυλικών και φαινολικών ομάδων στη δομή τους, γεγονός που τους προσδίδει χαρακτηριστικά τόσο αλειφατικών όσο και αρωματικών ενώσεων.

Επιπλέον, λειτουργούν ως επιφανειοδραστικά σώματα και έχουν την ικανότητα να αντιδρούν με τα περισσότερα κοινά κροκιδωτικά μέσα. Η αλληλεπίδραση αυτή αποτελεί τη βάση για την απομάκρυνση του χρώματος από το νερό, κυρίως μέσω της χρήσης αλάτων αργιλίου και σιδήρου, τα οποία σχηματίζουν καθιζάνοντα σύμπλοκα με τις οργανικές ουσίες

Οι οργανικές ενώσεις αυτές, λόγω της χημικής τους σύστασης, σχηματίζουν σύμπλοκες ενώσεις με μέταλλα όπως ο σίδηρος και το αργίλιο, συμβάλλοντας στη διαδικασία της κροκίδωσης. Πέραν αυτού, έχει αποδειχθεί ότι λειτουργούν ως πρόδρομες ουσίες για τον σχηματισμό τριαλογονομεθανίων (THMs), ενώσεων που προκύπτουν κατά την αντίδρασή τους με χλώριο, όταν αυτό χρησιμοποιείται ως μέσο απολύμανσης του νερού. Τα παραγόμενα παραπροϊόντα απολύμανσης, όπως τα THMs, είναι δυνητικά επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία, και για τον λόγο αυτό η παρουσία των πρόδρομων ενώσεων αυτών στο νερό θεωρείται ιδιαίτερα ανεπιθύμητη. Συνεπώς, η απομάκρυνσή τους κρίνεται αναγκαία σε όλα τα στάδια της επεξεργασίας πόσιμου νερού, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η εξάλειψη του χρώματος δεν αποτελεί τον πρωτεύοντα στόχο της διαδικασίας.

Σχήμα 2: Τυπική δομή χημικής ουσίας



A.7.2.2 Σταθερότητα διασπορών σωματιδίων στο υδατικό περιβάλλον

Η σταθερότητα των διασπορών σωματιδίων στο νερό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας μεταξύ της στερεάς φάσης και του υγρού μέσου. Τα σωματίδια διακρίνονται, βάσει της αλληλεπίδρασής τους με το νερό, σε υδροφοβικά και υδρόφιλα.

Τα υδροφοβικά σωματίδια χαρακτηρίζονται από σαφώς καθορισμένη διεπιφάνεια μεταξύ του στερεού και του νερού και παρουσιάζουν περιορισμένη αλληλεπίδραση με τα μόρια του διαλύτη. Ως εκ τούτου, θεωρούνται θερμοδυναμικά και ενεργειακά ασταθή, με αποτέλεσμα να έχουν την τάση να υφίστανται μη αναστρέψιμη συσσωμάτωση ή θρόμβωση. Συνήθως είναι ανόργανης προέλευσης και περιλαμβάνουν ορυκτά υλικά, μη ενυδατωμένα μεταλλικά οξείδια, μικροοργανισμούς, καθώς και πληθώρα άλλων στερεών που εντοπίζονται στο φυσικό νερό.

Αντιθέτως, ορισμένα σωματίδια όπως τα ενυδατωμένα οξείδια σιδήρου και αργίλου, το διοξείδιο του πυριτίου και οι ίνες αμιάντου, εμφανίζουν υδρόφιλες ιδιότητες λόγω της προσρόφησης μορίων νερού στην επιφάνειά τους. Στο πλαίσιο της επεξεργασίας νερού, η διαδικασία της κροκίδωσης εφαρμόζεται για την ενίσχυση της συσσωμάτωσης των σωματιδίων, με στόχο τη μετατροπή ενός σταθερού αιωρήματος σε ασταθές, ώστε να καταστεί εφικτός ο διαχωρισμός του.

Αντιθέτως, τα **υδρόφιλα σωματίδια** στερούνται διακριτής διεπιφανειακής οριοθέτησης και εμφανίζουν **θερμοδυναμική και ενεργειακή σταθερότητα** εντός του υδάτινου μέσου. Προέρχονται κυρίως από **οργανικές πηγές**, περιλαμβάνοντας **μακρομοριακά διαλυτά συστατικά** όπως απορρυπαντικά, πολυσακχαρίτες, πολυμερή βιολογικής προέλευσης, **φουλβικά οξέα**, καθώς και **ιοί** και **αιωρούμενοι μικροοργανισμοί** (νεκροί ή ζωντανοί), όπως **βακτήρια** και **άλγη**.

Επιπλέον, επειδή τα **βιοκολλοειδή** συχνά προσροφώνται στις επιφάνειες ανόργανων σωματιδίων, τα τελικά σωματίδια που απαντώνται στο νερό παρουσιάζουν **ετερογενείς επιφανειακές ιδιότητες**, γεγονός που δυσχεραίνει τη συμπεριφορά τους κατά την επεξεργασία και απομάκρυνσή τους.

A.7.2.3 Μηχανισμοί σταθερότητας διασπορών σωματιδίων

Η σταθερότητα των κολλοειδών διασπορών, είτε πρόκειται για υδρόφιλα είτε για υδροφοβικά (υδροφόρα) σωματίδια, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από ηλεκτροστατικούς μηχανισμούς άπωσης. Η βασική αυτή διεργασία εμποδίζει τη φυσική προσέγγιση και συσσωμάτωση των σωματιδίων, διατηρώντας τα αιωρούμενα στο υδάτινο μέσο.

Στην περίπτωση των υδροφόρων κολλοειδών, παρατηρείται η προσρόφηση περίσσειας κατιόντων ή ανιόντων στην επιφάνειά τους. Το φαινόμενο αυτό δημιουργεί ένα ηλεκτρικό δυναμικό στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού, το οποίο δρα απωθητικά απέναντι σε άλλα σωματίδια με παρόμοιο φορτίο, παρεμποδίζοντας έτσι τη συνένωσή τους.

Αντίστοιχα, στα υδρόφιλα σωματίδια, τα επιφανειακά φορτία δεν οφείλονται σε προσροφημένα ιόντα, αλλά προκύπτουν από ιοντισμό ανόργανων ή οργανικών

λειτουργικών ομάδων, όπως οι καρβοξυλομάδες ή άλλες ομάδες οξέων που είναι ενσωματωμένες είτε στην επιφάνεια είτε στην άμεση διεπιφάνεια των σωματιδίων. Αυτές οι ομάδες αποδίδουν ηλεκτρικά φορτία μέσω της διάστασης στο υδατικό περιβάλλον, ενισχύοντας τη σταθερότητα του συστήματος.

Επιπροσθέτως, η παρουσία προσροφημένων μορίων νερού στην επιφάνεια των σωματιδίων μπορεί να ενισχύσει τη σταθερότητα της διασποράς, δημιουργώντας ένα φυσικό φράγμα που παρεμποδίζει τις αποτελεσματικές συγκρούσεις και, κατ' επέκταση, την τάση για συσσωμάτωση.

Τα ηλεκτρικά φορτία που εντοπίζονται στην επιφάνεια των σωματιδίων αποδίδονται, σύμφωνα με τον Stumm και τον Morgan (1981), στους ανωτέρω μηχανισμούς και αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη διατήρηση της σταθερότητας των κolloειδών συστημάτων στο υδάτινο περιβάλλον.

Κρυσταλλικές ατέλειες και μηχανισμοί γένεσης επιφανειακών φορτίων

Υπό ορισμένες γεωλογικές συνθήκες, τα άτομα πυριτίου που συγκροτούν τα κρυσταλλικά πλέγματα των ορυκτών είναι δυνατόν να αντικατασταθούν από άτομα με μικρότερο σθένος, όπως για παράδειγμα το αργίλιο. Η διεργασία αυτή, γνωστή ως ισόμορφη υποκατάσταση, μεταβάλλει την ηλεκτροστατική ισορροπία του πλέγματος, οδηγώντας σε πλεόνασμα αρνητικού φορτίου στην επιφάνεια του ορυκτού. Τα επιπλέον αρνητικά φορτία δεν παραμένουν μεμονωμένα αλλά συμμετέχουν σε ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις με το υδάτινο περιβάλλον και τα ιόντα που περιέχονται σε αυτό.

Ένας δεύτερος μηχανισμός σχετίζεται με την εκλεκτική προσρόφιση διαλυτών ιόντων ή πολυηλεκτρολυτών. Όταν λεπτά σωματίδια διασπείρονται στο νερό, μπορούν να προσροφήσουν στην επιφάνειά τους μόρια οργανικής ή ανόργανης προέλευσης. Ενδεικτικά, πολυανιόντα όπως το φουλβικό οξύ προσκολλώνται σε θετικά φορτισμένα σωματίδια – για παράδειγμα, σε κόκκους ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) – δημιουργώντας επιφανειακά φορτία που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των συστημάτων.

Τέλος, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι χημικές αντιδράσεις ιονισμού των επιφανειακών ομάδων. Πολλά ανόργανα και βιολογικά σωματίδια φέρουν λειτουργικές ομάδες, όπως οι καρβοξυλικές ή οι υδροξυλικές, οι οποίες μπορούν να ιονιστούν στο υδάτινο περιβάλλον. Η ιοντοποίηση αυτή εξαρτάται από το pH του διαλύματος και οδηγεί στην ανάπτυξη ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα υδρολυόμενα οξείδια μετάλλων, όπως τα οξείδια του σιδήρου, καθώς και οι καρβοξυλικές ομάδες που βρίσκονται στα κυτταρικά τοιχώματα των βακτηρίων.

Είναι, ωστόσο, ουσιώδες να υπογραμμιστεί ότι η χημεία της επιφάνειας των σωματιδίων είναι πολυσύνθετη, και συνεπώς η εμφάνιση και η φύση των επιφανειακών φορτίων δεν απορρέουν από έναν και μόνο μηχανισμό, αλλά από τη συνέργεια πολλών παραγόντων.

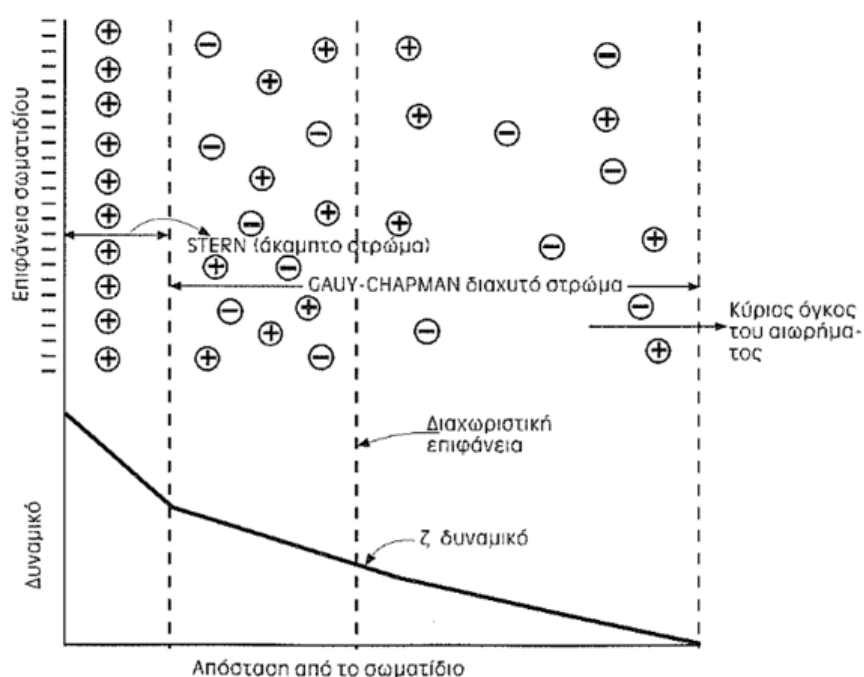
Προέλευση και δομή της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας

Όταν τα αιωρούμενα σωματίδια διασπείρονται σε ένα υδατικό μέσο, στην επιφάνειά τους προσροφώνται ιόντα με αντίθετο φορτίο σε σχέση με το ίδιο το σωματίδιο, με σκοπό τη

διατήρηση της ηλεκτρικής ουδετερότητας. Η συγκέντρωση αυτών των ιόντων στην άμεση γειτονία του σωματιδίου δημιουργεί μια τοπική ηλεκτρική ανισορροπία. Ωστόσο, η ηλεκτροστατική έλξη που τείνει να συγκρατήσει τα ιόντα αντισταθμίζεται από την τάση τους να διαχέονται προς το διάλυμα, σύμφωνα με τον νόμο του Fick.

Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο αντίρροπων διεργασιών οδηγεί στη δημιουργία ενός διαχεόμενου νέφους ιόντων γύρω από το σωματίδιο. Το νέφος αυτό εκτείνεται μέχρι αποστάσεις της τάξης των 200–300 nm από την επιφάνεια και αποτελεί τη λεγόμενη ηλεκτρική διπλοστοιβάδα.

Σχήμα 3: Διπλοστοιβάδα στην διεπιφάνεια στερεού-υγρού



Η ηλεκτρική διπλοστοιβάδα χαρακτηρίζεται από δύο κύριες ζώνες:

- Εσωτερική στοιβάδα (ή στοιβάδα Stern): Πρόκειται για την πρώτη στιβάδα ιόντων, που βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του σωματιδίου. Αποτελείται κυρίως από αντιιόντα, δηλαδή ιόντα με φορτίο αντίθετο από εκείνο της στερεής επιφάνειας, και έχει τυπικό πάχος περίπου 5 nm.
- Εξωτερική, διαχεόμενη στοιβάδα: Περιλαμβάνει ιόντα που συγκρατούνται με χαλαρότερους δεσμούς και εκτείνονται στο διάλυμα. Η συγκέντρωσή τους μειώνεται εκθετικά με την απόσταση από το σωματίδιο, δημιουργώντας σταδιακή εξασθένηση του ηλεκτρικού δυναμικού.

Ως αποτέλεσμα, στην άμεση επιφάνεια του σωματιδίου παρατηρείται μια μέγιστη ηλεκτροστατική διαφορά δυναμικού, η οποία μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε προς τον κύριο όγκο του διαλύματος. Στο όριο όπου η κίνηση του σωματιδίου σε ηλεκτρικό πεδίο δεν συμπαρασύρει πλέον τα προσροφημένα ιόντα, σχηματίζεται το λεγόμενο επίπεδο διάτμησης. Το ηλεκτροστατικό δυναμικό που μετριέται σε αυτό το επίπεδο καλείται

δυναμικό ζήτα (ζ-δυναμικό) και αποτελεί βασικό μέγεθος για την αξιολόγηση της σταθερότητας των κolloειδών διασπορών.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά καθίζησης αιωρούμενων σωματιδίων

Υλικό	Μέγεθος	Χρόνος καθίζησης, 1m
Χαλαζίας	10.000	1 δευτερόλεπτα
	1.000	10 δευτερόλεπτα
	100	125 δευτερόλεπτα
Ιλύς	10	108 λεπτά
Βακτήρια	1	180 ώρες
Κολλοειδή	0,1	755 ημέρες

A.7.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η απομάκρυνση κolloειδών και διασπαρμένων σωματιδίων από το υδατικό περιβάλλον δεν αποτελεί μια απλή φυσικοχημική διεργασία, αλλά μια περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτροστατικών, διαμοριακών και χημικών δυνάμεων που διέπουν τη σταθερότητα των διασπορών. Καθίσταται συνεπώς αναγκαία η μείωση ή ακόμη και η πλήρης ανατροπή της σωματιδιακής σταθερότητας, προκειμένου να διευκολυνθεί η συσσωμάτωση και η μετέπειτα καθίζηση των σωματιδίων. Οι μηχανισμοί που συμβάλλουν στην αποσταθεροποίηση και οδηγούν στην κροκίδωση κατατάσσονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: (α) συμπίεση της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας, (β) ηλεκτροστατικές ελκτικές αλληλεπιδράσεις, (γ) σχηματισμός ενδομοριακών ή πολυμερισμένων γεφυρώσεων, και (δ) μηχανική παγίδευση σωματιδίων ή συναίρεση θρόμβων.

Συμπίεση της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας

Η θεωρία της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας ερμηνεύει τον τρόπο με τον οποίο η παρουσία ιόντων στο διάλυμα επηρεάζει τη σταθερότητα των κolloειδών. Η αύξηση της ιονικής ισχύος οδηγεί σε συμπίεση της διπλοστοιβάδας, με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του πάχους της και, κατά συνέπεια, την εξασθένηση των απωστικών ηλεκτροστατικών δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων. Στο πλαίσιο αυτό, το ζ-δυναμικό αποτελεί κρίσιμο δείκτη της σωματιδιακής σταθερότητας. Όπως τεκμηρίωσε ο Kruyt (1952), όταν η τιμή του ζ-δυναμικού περιορίζεται εντός του εύρους ± 20 mV, η πιθανότητα ταχείας κροκίδωσης αυξάνεται δραστικά.

Η μείωση του ζ-δυναμικού επιτρέπει στα υδρόφοβα σωματίδια να πλησιάσουν επαρκώς, ώστε να καταστούν ενεργές οι διαμοριακές ελκτικές δυνάμεις, κυρίως οι δυνάμεις London–Van der Waals. Οι δυνάμεις αυτές, αν και ασθενείς σε μικροσκοπικό επίπεδο, γίνονται συλλογικά καθοριστικές, οδηγώντας σε ενεργειακά ευνοϊκές συγκρούσεις και τελικά σε συσσωμάτωση. Παρά ταύτα, το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας δεν είναι καθολικό αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με τη φύση του κolloειδούς συστήματος, τη χημική σύσταση του υδατικού μέσου και τις ειδικές αλληλεπιδράσεις σωματιδίου–διαλύτη.

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην **Κρίσιμη Συγκέντρωση Κροκίδωσης (ΚΣΚ)**, δηλαδή στη μικρότερη συγκέντρωση ηλεκτρολυτών που απαιτείται ώστε να προκληθεί ταχεία και

μη αναστρέψιμη κροκίδωση. Η τιμή της ΚΣΚ καθορίζεται από το είδος των σωματιδίων, αλλά και από το σθένος και το μέγεθος των ιόντων που συμμετέχουν. Η θεμελιώδης συνεισφορά του νόμου **Schulze–Hardy** έγκειται στο ότι προβλέπει πως η ΚΣΚ μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα προς την έκτη δύναμη του φορτίου του ιόντος. Αυτό συνεπάγεται πως τα πολυσθενή ιόντα παρουσιάζουν δυσανάλογα υψηλή ικανότητα αποσταθεροποίησης συγκριτικά με τα μονοσθενή.

Ενδεικτικά, ενώ απαιτούνται περίπου 3000 meq/L NaCl για να επιτευχθεί ταχεία κροκίδωση σε ένα υδρόφοβο κolloειδές σύστημα, η ίδια διεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με μόλις 44 meq/L CaCl₂, γεγονός που καταδεικνύει την ισχυρή επίδραση των δισθενών ιόντων στη σταθερότητα των σωματιδίων. Η παρατήρηση αυτή υπογραμμίζει τον καίριο ρόλο της ιονικής ισχύος και του σθένους των ηλεκτρολυτών στη ρύθμιση και τελικά στην ανατροπή της κolloειδούς σταθερότητας.

Ηλεκτροστατική Έλξη

Η αποσταθεροποίηση των κolloειδών σωματιδίων μπορεί να προκληθεί και μέσω μηχανισμών ηλεκτροστατικής έλξης, οι οποίοι ενεργοποιούνται όταν δύο επιφάνειες φέρουν αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Η διεργασία αυτή ενισχύεται περαιτέρω μέσω της εκλεκτικής προσρόφησης συγκεκριμένων ιόντων στην επιφάνεια των σωματιδίων, γεγονός που διαφοροποιεί το ηλεκτρικό τους δυναμικό και επηρεάζει τη διασπορά τους στο υδατικό μέσο.

Ένα μεγάλο ποσοστό σωματιδίων που απαντώνται σε φυσικά υδατικά περιβάλλοντα φέρει επιφανειακό φορτίο, του οποίου η φύση (θετική ή αρνητική) εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την τιμή του pH του διαλύματος. Υφίσταται, επομένως, μια κρίσιμη τιμή pH, η οποία αντιστοιχεί σε μηδενικό καθαρό φορτίο επιφάνειας· το σημείο αυτό είναι γνωστό ως Σημείο Μηδενικού Φορτίου (ΣΜΦ). Όταν το pH υπερβαίνει την τιμή του ΣΜΦ, το επιφανειακό φορτίο καθίσταται αρνητικό (ανιονικό), ενώ όταν το pH βρίσκεται χαμηλότερα του ΣΜΦ, το φορτίο μετατρέπεται σε θετικό (κατιονικό).

Σύμφωνα με ενδεικτικά δεδομένα (Πίνακας 3), ανόργανα υλικά όπως οι άργιλοι και η πυριτία, καθώς και πολλά οργανικά συστατικά, εμφανίζουν αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες υπό ουδέτερες συνθήκες pH. Κατά συνέπεια, η μείωση ή η τροποποίηση του επιφανειακού φορτίου μέσω ελεγχόμενης μεταβολής του pH ή μέσω προσρόφησης ιόντων μπορεί να οδηγήσει σε ουδετεροποίηση του φορτίου. Η διαδικασία αυτή καθιστά τα σωματίδια περισσότερο ευάλωτα σε ηλεκτροστατικές ελκτικές δυνάμεις και, τελικά, σε αποσταθεροποίηση και συσσωμάτωση.

Πίνακας 3: Τιμές του σημείου μηδενικού φορτίου διαφόρων ανόργανων και οργανικών συστατικών που απαντούν στα φυσικά νερά

Συστατικό	pHΣΜΦ
ΑΝΟΡΓΑΝΑ (Υδρόφοβα)	
Al(OH) ₃ (άμορφο)	7,5-8,5
Al ₂ O ₃	9,1
Fe(OH) ₃ (άμορφο)	8,5
MgO	12,4
MnO ₂	2-4,5
SiO ₂	2-3,5
Αργίλοι	
Καολίνη	3,3-4,6
Μοντοριλλονίτης	2,5
Αμύαντος (χρυσότιλης)	10-12
CaCO ₃	8-9
Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH	6-7
FePO ₄	3
AlPO ₄	4
ΟΡΓΑΝΙΚΑ (Υδρόφιλα)	
Άλγη	3-5
Βακτήρια	2-4
Χουμικά οξέα	3
Σταγόνες ελαίου	2-5

Σχηματισμός Εσωτερικών Μοριακών Γεφυρών: Ένας Εναλλακτικός Μηχανισμός Αποσταθεροποίησης Διασπορών

Παρότι το κλασικό ηλεκτροστατικό μοντέλο αιώρησης προσφέρει επαρκή περιγραφή της συμπεριφοράς πλήθους σωματιδιακών συστημάτων υπό την επίδραση διαφορικών επιφανειακών φορτίων, αδυνατεί να ερμηνεύσει ικανοποιητικά τη διεργασία αποσταθεροποίησης σε διασπορές βιοκολλοειδούς φύσεως, καθώς και σε άλλες πολυδιασπαρμένες φάσεις που φέρουν πανομοιότυπο ή ομοιογενές επιφανειακό φορτίο.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η φυσικοχημική παρέμβαση μέσω της προσθήκης πολυμερικών ενώσεων υψηλού μοριακού βάρους και μεγάλης αλυσίδας, με επικρατούντα ανιονικό χαρακτήρα, αναδεικνύεται ως αποτελεσματική προσέγγιση. Τα εν λόγω πολυμερή διαθέτουν τη δυνατότητα σχηματισμού διαμοριακών γεφυρών μεταξύ των διασκορπισμένων σωματιδίων, λειτουργώντας ως μακροσκοπικά δεσμευτικά στοιχεία που επιφέρουν τη σύγκλιση και τελικώς την αποσταθεροποίηση του συστήματος.

Η εν λόγω διεργασία, γνωστή ως "σχηματισμός εσωτερικών μοριακών γεφυρών", επιτελείται όταν διαφορετικά σημεία της πολυμερικής αλυσίδας προσροφώνται σε ξεχωριστές επιφάνειες σωματιδίων, επιτρέποντας έτσι τη γεφύρωση αυτών και προάγοντας τη συσσωμάτωσή τους σε μακροδομές με αυξημένη καθιζάνουσα τάση. Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι απλώς συμπληρωματικός των ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων αλλά, σε

πολλές περιπτώσεις, αναδεικνύεται ως κυρίαρχος παράγοντας θρόμβωσης σε βιολογικά συστήματα.

Πλήθος ερευνητικών ευρημάτων έχει τεκμηριώσει τη σημασία του μηχανισμού αυτού ως βασικού τρόπου αποσταθεροποίησης σε περιβάλλοντα όπου επικρατούν μικροοργανισμοί, όπως βακτήρια και φύκη, καθιστώντας τον θεμελιώδους σημασίας για εφαρμογές βιολογικής επεξεργασίας και απομάκρυνσης οργανικών ρύπων από το υδατικό περιβάλλον.

Παγίδευση Αιωρούμενων Σωματιδίων μέσω Σάθρωσης Θρόμβων: Ένας Μηχανισμός Αποσταθεροποίησης στη Σύγχρονη Τεχνολογία Επεξεργασίας Ύδατος

Στο πλαίσιο των προηγμένων τεχνολογιών καθαρισμού και επεξεργασίας υδατικών συστημάτων, η αποσταθεροποίηση κολλοειδών και αιωρούμενων σωματιδίων δεν επιτυγχάνεται μέσω της απλής προσθήκης μονοσθενών ή δισθενών κατιόντων, όπως τα ιόντα νατρίου (Na^+) και ασβεστίου (Ca^{2+}), τα οποία, εξαιτίας της χαμηλής τους πολυηλεκτρολυτικής ικανότητας, παρουσιάζουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα στην επίτευξη πηκτικής δράσης. Αντίθετα, υιοθετείται η χρήση πολυσθενών κατιόντων, κυρίως των ιόντων του τρισθενούς αργιλίου (Al^{3+}) και σιδήρου (Fe^{3+}), τα οποία υφίστανται εκτεταμένη υδρόλυση υπό συγκεκριμένες συνθήκες pH, οδηγώντας στο σχηματισμό πολυμερικών ή/και αμορφοποιημένων υδροξειδικών ιζημάτων.

Η διαδικασία αυτή προάγει έναν μηχανισμό γνωστό ως «παγίδευση μέσω σάθρωσης», σύμφωνα με τον οποίο τα αιωρούμενα σωματίδια εγκλωβίζονται εντός της δομής των παραγόμενων θρόμβων — ιζημάτων που παρουσιάζουν μη κρυσταλλική, άμορφη μορφολογία. Η εν λόγω ενσωμάτωση δεν είναι απλώς αποτέλεσμα φυσικοχημικής προσρόφησης ή επιφανειακής συγκόλλησης, αλλά φαίνεται να οφείλεται στη δημιουργία πυρήνων καθίζησης στην επιφάνεια των σωματιδίων, οι οποίοι με τη σειρά τους λειτουργούν ως εστίες ανάπτυξης του θρόμβου.

Παρόλο που οι μοριακοί μηχανισμοί που διέπουν τη διαδικασία δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως σε επίπεδο στοιχειομετρίας και διαμοριακής αλληλεπίδρασης, η επικρατούσα θεωρία υποστηρίζει ότι η σύμφυτη χημική δραστηριότητα των υδρολυόμενων κατιόντων πυροδοτεί την έναρξη ετερογενούς καθίζησης, με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό των σωματιδίων στο εσωτερικό του θρόμβου, με την ταυτόχρονη ενίσχυση της καθαριστικής ικανότητας του συστήματος.

Ο μηχανισμός αυτός αναγνωρίζεται ως θεμελιώδους σημασίας για την αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών καθίζησης και πηκτικής επεξεργασίας, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου εφαρμόζονται άλατα αργιλίου ή σιδήρου υπό ελεγχόμενες τιμές pH, κυμαινόμενες συνήθως μεταξύ 6,0 και 8,0, εύρος το οποίο έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι βελτιστοποιεί τη σταθερότητα και τη συσσωμάτωση του παραγόμενου ιζήματος.

A.7.3.2 Διακριτοποίηση των Όρων "Κροκίδωση" και "Συσσωμάτωση" στην Τεχνολογία Επεξεργασίας Υδάτος

Στο επιστημονικό πεδίο της επεξεργασίας υδατικών συστημάτων, οι όροι κροκίδωση και συσσωμάτωση χρησιμοποιούνται συχνά αδιακρίτως, γεγονός που οφείλεται στη συντρέχουσα και συχνά αλληλοεπικαλυπτόμενη εμφάνιση των δύο φαινομένων κατά τη λειτουργία φυσικοχημικών διεργασιών καθαρισμού. Η εννοιολογική σύγχυση που παρατηρείται στη βιβλιογραφία και την τεχνική πρακτική αποτυπώνει την πολυπλοκότητα της δυναμικής των κολλοειδών σωματιδίων υπό επεξεργασία.

Σύμφωνα με την κλασική, πλην όμως επιστημονικά τεκμηριωμένη διάκριση που προτείνει ο La Mer (1964), οι δύο αυτοί όροι δεν ταυτίζονται, αλλά αντιστοιχούν σε διαφορετικούς φυσικοχημικούς μηχανισμούς, οι οποίοι, είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά, συμβάλλουν στον τελικό σχηματισμό θρόμβων κατά την επεξεργασία του νερού. Η διαφορά τους δεν έγκειται στη φαινομενολογική συνύπαρξή τους, αλλά στην εσωτερική τους μηχανιστική δομή και στο είδος των κυρίαρχων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μοριακό και μακροσκοπικό επίπεδο.

Πιο συγκεκριμένα, ο όρος "κροκίδωση" (coagulation) χρησιμοποιείται για να περιγράψει το αρχικό στάδιο αποσταθεροποίησης των διασπαρμένων κολλοειδών σωματιδίων, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της ελάττωσης των ηλεκτροστατικών απωστικών δυνάμεων μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην προσέγγισή τους και θέτει τις προϋποθέσεις για επακόλουθες ενώσεις. Αντιθέτως, η "συσσωμάτωση" (flocculation) περιγράφει τη φάση κατά την οποία, μέσω φυσικών ή/και χημικών γεφυρώσεων, τα ήδη αποσταθεροποιημένα σωματίδια συνενώνονται σχηματίζοντας ορατούς θρόμβους (flocs) με αυξημένο βάρος και καθιζάνουσα ικανότητα.

Παρόλο που η διάκριση αυτή είναι επιστημονικά εύστοχη και ανταποκρίνεται τόσο σε φυσικοχημικά κριτήρια όσο και σε εργαστηριακές παρατηρήσεις, η πρακτική εφαρμογή της διαχωριστικής γραμμής που θέτει ο La Mer παραμένει δύσκολη έως και αδύνατη στο πεδίο, καθώς οι δύο μηχανισμοί εκδηλώνονται συγχρονισμένα και αλληλεξαρτώμενα στο ίδιο υδατικό περιβάλλον, καθιστώντας δυσδιάκριτο το όριο μεταξύ της φάσης αποσταθεροποίησης και της φάσης καθίζησης.

Η αμφισημία στη χρήση των δύο όρων δεν υπονομεύει τη σημασία της εννοιολογικής τους διάκρισης, αλλά αναδεικνύει την ανάγκη για λεπτομερή ανάλυση των συνθηκών λειτουργίας, των τύπων προστιθέμενων χημικών παραγόντων και της δυναμικής των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων, προκειμένου να επιτευχθεί επαρκής κατανόηση και βέλτιστη εφαρμογή των αντίστοιχων τεχνολογιών στην πράξη.

A.7.3.3 Θρόμβωση σωματιδίων

Η διαδικασία της θρόμβωσης των κολλοειδών σωματιδίων συνιστά ένα φαινόμενο που εξελίσσεται μέσω δύο διακριτών και αλληλένδετων σταδίων. Στο αρχικό στάδιο, επιδιώκεται η αποσταθεροποίηση των σωματιδίων, γεγονός που επιτυγχάνεται μέσω της εξασθένισης των ενδοσωματιδιακών δυνάμεων οι οποίες ευθύνονται για τη διατήρηση της

σταθερότητάς τους. Η αποσταθεροποίηση αυτή προωθείται με την εισαγωγή ειδικών χημικών παραγόντων, γνωστών ως κροκιδωτικά, τα οποία μεταβάλλουν τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες της επιφάνειας των σωματιδίων.

Ακολουθως, λαμβάνει χώρα το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας, το οποίο αφορά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ήδη αποσταθεροποιημένων σωματιδίων. Οι συγκρούσεις αυτές ενδέχεται να προκύπτουν είτε λόγω της αυθόρμητης μοριακής κίνησης (γνωστής και ως θερμικής ή Brownian κίνησης), είτε ως αποτέλεσμα μηχανικής ανάδευσης του συστήματος. Όταν οι συγκρούσεις είναι επαρκώς ενεργειακές και συχνές, ευνοείται ο σχηματισμός μεγαλύτερων συσσωματωμάτων, οδηγώντας έτσι στη θρόμβωση.

Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία θρόμβωσης, με έμφαση στα επιμέρους χαρακτηριστικά των φαινομένων της κροκίδωσης και της συσσωμάτωσης. Ειδικότερα, περιγράφονται:

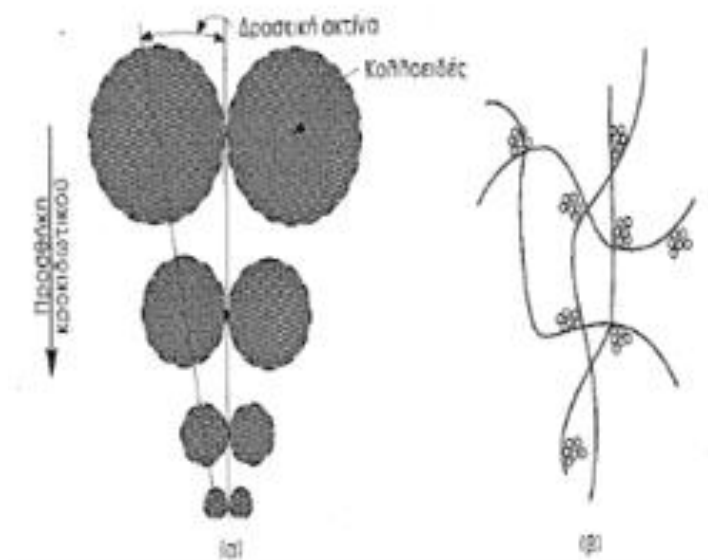
- το κυρίαρχο φυσικοχημικό φαινόμενο που εκδηλώνεται σε κάθε στάδιο,
- οι μηχανισμοί μέσω των οποίων εξελίσσεται η κάθε διεργασία,
- η αντίστοιχη ορολογία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των μηχανισμών αυτών, και
- ο απαιτούμενος εξοπλισμός και οι τεχνολογικές υποδομές που είναι απαραίτητες για την εφαρμογή τους.

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη σωστή προετοιμασία των κροκιδωτικών ουσιών πριν από την εισαγωγή τους στο σύστημα. Ο σχεδιασμός του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού οφείλει να διασφαλίζει τόσο την κατάλληλη ανάμειξη όσο και τις συνθήκες ενεργοποίησης των χημικών αυτών παραγόντων, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.

Πίνακας 4: Συνοπτική περιγραφή διεργασίας θρόμβωσης

Φαινόμενο	Μηχανισμός - Δράση	Ορολογία
Προσθήκη κροκιδωτικού	Αντίδραση κροκιδωτικού με υποκαταστάτες (OH ⁻ , SO ₄ ²⁻), υδρόλυση, πολυμερισμός, σχηματισμός συμπλόκων	Ταχεία ανάμειξη
Αποσταθεροποίηση σωματιδίων	Συμπίεση της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας με ουδέτερους ηλεκτρολύτες. Νουδετεροποίηση φορτίου με απορρόφηση φορτισμένων σωματιδίων. Ελάττωση δυναμικού επιφάνειας και σχηματισμός εσωτερικών μοριακών γεφυρών. Καθίζηση κροκιδωμάτων και παγίδευση (σάρωση θρόμβων) σωματιδίων	Κροκίδωση (Coagulation)
Συνένωση σωματιδίων	α) Τυχαίες συγκρούσεις εξαιτίας θερμικής κίνησης των μορίων του νερού και διάχυσης ($d < 1 \mu$). β) Συγκρούσεις εξαιτίας της διαφορετικής ταχύτητας των σωματιδίων που επιτυγχάνονται με ανάμειξη ($d > 1 \mu$).	Συσσωμάτωση (Flocculation) α) Περικινητική β) Ορθοκινητική

Σχήμα 4: Σχηματική παράσταση κροκίδωσης και συσσωμάτωσης



Πίνακας 5: Χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων κροκίδωσης και συσσωμάτωσης

	Κροκίδωση	Συσσωμάτωση
Φύση σωματιδίων	Αρκετά μικρά σωματίδια	Διάσπαρτα ιζήματα σε μορφή gel
Είδος προστιθέμενου χημικού	Χαμηλού μοριακού βάρους για εξουδετέρωση φορτίου	Υψηλού μοριακού βάρους ουσία για σύνδεση σωματιδίων
Απαιτήση ενέργειας	Ταχεία ανάμιξη	Αργή ανάδευση
Χρόνος διεργασίας	έως 5 min	10-30 min
Περιφερειακή ταχύτητα ανάδευσης	~ 5 m/sec	0,5-1,5 m/sec
Ισχύς ανάδευσης	50-200 W/m ³	10-30 W/m ³
Βαθμίδα ταχύτητας G	200-1000 s ⁻¹	20-100 s ⁻¹

Μετά την παρασκευή του, το κροκιδωτικό ενσωματώνεται στην παροχή του προς επεξεργασία ύδατος μέσω ειδικά σχεδιασμένης διάταξης ανάμιξης, η οποία οφείλει να διασφαλίζει την ταχεία και ομοιόμορφη διασπορά του αντιδραστήριου στο υδάτινο μέσο. Το αρχικό αυτό στάδιο ανάμιξης – συχνά αναφερόμενο ως «ταχεία ανάμειξη» – είναι ιδιαίτερα σύντομης διάρκειας, συνήθως μικρότερης του ενός λεπτού, και έχει καθοριστικό ρόλο στην ενεργοποίηση της διεργασίας αποσταθεροποίησης των κολλοειδών σωματιδίων. Η φυσικοχημική αυτή διαδικασία είναι γνωστή ως κροκίδωση.

Ακολουθεί το επόμενο στάδιο, που απαιτεί ανάμιξη με χαμηλότερη ένταση και παρατεταμένη διάρκεια. Σκοπός του σταδίου αυτού είναι η ενίσχυση της συχνότητας των συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων, χωρίς όμως να προκαλείται καταστροφή ή αποδόμηση των συσσωματωμάτων που έχουν ήδη αρχίσει να σχηματίζονται. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως συσσωμάτωση, και αποτελεί κρίσιμη φάση για τη μεγέθυνση και σταθεροποίηση των σωματιδιακών ενώσεων.

Η φύση της κίνησης των σωματιδίων καθορίζει τον επικρατέστερο μηχανισμό συσσωμάτωσης. Για κολλοειδή σωματίδια, η θερμική (Brownia) κίνηση αρκεί για να επιφέρει συγκρούσεις, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου της περικινητικής συσσωμάτωσης. Αντιθέτως, για μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια, όπου η επίδραση της θερμικής κίνησης είναι αμελητέα, απαιτείται η χρήση μηχανικών μέσων, όπως αναδευτήρες, οι οποίοι προκαλούν σύγκρουση λόγω της διαφοροποίησης των ταχυτήτων εντός του ρευστού. Η διεργασία αυτή είναι γνωστή ως ορθοκίνητική συσσωμάτωση.

Η αποτελεσματικότητα της συσσωμάτωσης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον σωστό σχεδιασμό τόσο της δεξαμενής ανάμιξης όσο και της δεξαμενής θρόμβωσης. Ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός εξασφαλίζει την επιθυμητή αλληλεπίδραση των σωματιδίων, γεγονός που ενισχύει την αποδοτικότητα της μετέπειτα διεργασίας διαχωρισμού στερεών και υγρών.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρατίθενται στον Πίνακα 7.4, η προσθήκη του κροκιδωτικού επιφέρει εξουδετέρωση των επιφανειακών φορτίων των κολλοειδών, διευκολύνοντας την προσέγγισή τους και εν τέλει τη συσσωρεύσή τους. Επιπλέον, η δράση του αντιδραστηρίου συσσωμάτωσης οδηγεί στο σχηματισμό μοριακών «γεφυρών» μεταξύ των αποσταθεροποιημένων σωματιδίων, οι οποίες ενισχύουν τη δημιουργία μεγάλων και πυκνών θρόμβων, ικανών να καθιζάνουν αποτελεσματικά.

Ο συγκριτικός πίνακας 7.4 παρέχει μια συνοπτική αποτύπωση των διαφορών ανάμεσα στα δύο διαδοχικά φαινόμενα – την κροκίδωση και τη συσσωμάτωση – τόσο ως προς τη φύση τους όσο και ως προς τους μηχανισμούς και τις απαιτήσεις λειτουργίας τους.

Η κινητικότητα των διεσπαρμένων σωματιδίων ενδέχεται να οδηγήσει σε συγκρούσεις που μπορεί να είναι είτε αποτελεσματικές, δηλαδή να συμβάλλουν στην περαιτέρω συσσωμάτωση, είτε ελαστικές, χωρίς ουσιαστικό αποτέλεσμα. Ο βαθμός στον οποίο επιτυγχάνεται η αποσταθεροποίηση του συστήματος διασποράς αποτελεί κρίσιμο δείκτη της αποτελεσματικότητας των συγκρούσεων. Η παράμετρος αυτή, γνωστή ως βαθμός αποτελεσματικότητας α , εκφράζει το ποσοστό των ενεργών συγκρούσεων που καταλήγουν πράγματι σε συσσωμάτωση. Το μέγεθος αυτό ενσωματώνει και αποτυπώνει το σύνολο των φυσικοχημικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συνολική διεργασία της θρόμβωσης.

Περικίνητική συσσωμάτωση (διάχυση Brown)

Η περικίνητική συσσωμάτωση συνδέεται άμεσα με την τυχαία και άτακτη κίνηση των σωματιδίων, η οποία προκύπτει από τον αδιάκοπο και στοχαστικό βομβαρδισμό τους από τα μόρια του διαλύτη, και συγκεκριμένα του νερού. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως κίνηση Brown, αποτελεί βασικό μηχανισμό προσέγγισης των σωματιδίων σε κολλοειδή συστήματα. Είναι ουσιώδες να επισημανθεί ότι η επίδραση της Brownιανής κίνησης περιορίζεται αυστηρά σε σωματίδια κολλοειδών διαστάσεων, ενώ η επίδρασή της καθίσταται πρακτικά αμελητέα για σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερης του 1 μm .

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αναφέρεται συχνά και ως **ταχεία κροκίδωση**, με την κινητήριό δύναμή του να ταυτίζεται με τη θερμική ενέργεια του υδάτινου μέσου. Η ένταση

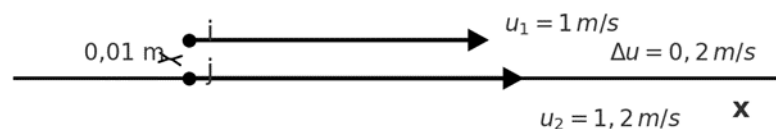
της συσσωμάτωσης καθορίζεται κυρίως από το γινόμενο της σταθεράς συσσωμάτωσης ΚΚΚ και της συγκέντρωσης των σωματιδίων t_{tt} . Για ένα αιώρημα αποτελούμενο από σφαιρικά σωματίδια, των οποίων η ολική συγκέντρωση αποδίδεται με τον συμβολισμό $N_d N_d$, ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης λόγω της περικινητικής συσσωμάτωσης περιγράφεται ποσοτικά από τη σχέση που προτάθηκε από τον Montgomery (1985).

Ορθοκινητική συσσωμάτωση

Σε αντίθεση με την περικινητική, η ορθοκινητική συσσωμάτωση απαιτεί εξωτερική μηχανική παρέμβαση για την επίτευξη αποτελεσματικής κροκίδωσης, κυρίως σε περιπτώσεις σωματιδίων μεγαλύτερης διαμέτρου ($>1 \mu m$). Η μηχανική ανάδευση του συστήματος δημιουργεί τοπικές και χρονικά μεταβαλλόμενες μεταβολές στην ταχύτητα του ρευστού, γεγονός που προκαλεί σχετική κίνηση ανάμεσα στα σωματίδια και αυξάνει την πιθανότητα αλληλεπιδράσεών τους.

Σχήμα 5: Παράδειγμα υπολογισμού βαθμίδας ταχύτητας G .

z



$$G = \frac{0.2 \text{ m/s}}{0.01 \text{ m}} = 200 \text{ s}^{-1}$$

Τα διασπαρμένα σωματίδια, συμβολιζόμενα ως i και j , εκτίθενται σε βαθμίδα ταχύτητας που εκφράζεται

$$\frac{dU}{dz} = G \text{ (s}^{-1}\text{)},$$

κατά την κίνησή τους μέσα στο ρευστό (βλ. Σχήμα 7.5).

Όταν η μεταξύ τους απόσταση R_{ij} γίνει ίση ή μικρότερη από το ήμισυ του αθροίσματος των διαμέτρων τους, δηλαδή

$$R_{ij} \leq \frac{d_i + d_j}{2},$$

τότε καθίσταται δυνατή η σύγκρουσή τους, η οποία δύναται να οδηγήσει σε συσσωμάτωση.

Η ορθοκινητική συσσωμάτωση διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη φύση της ροής:

- Συσσωμάτωση σε **στρωτή ροή**, όπου οι ροϊκές γραμμές παραμένουν παράλληλες και η κίνηση είναι ομαλή,
- Συσσωμάτωση σε **τυρβώδη ροή**, όπου επικρατεί αταξία και έντονη αναταραχή, αυξάνοντας σημαντικά τη συχνότητα των συγκρούσεων.

A.8. ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑΣ

Η **ιζηματοποίηση** συνιστά μία σύνθετη φυσικοχημική διεργασία μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η καθίζηση και, συνεπώς, η απομάκρυνση ανεπιθύμητων ή επικίνδυνων συστατικών από το νερό. Η διεργασία αυτή αφορά κυρίως ουσίες που βρίσκονται σε διαλυμένη μορφή και καθίστανται αδιάλυτες, προκειμένου να απομακρυνθούν αποτελεσματικά από το υδάτινο περιβάλλον.

Η ενεργοποίηση της ιζηματοποίησης επιτυγχάνεται είτε μέσω **προσθήκης κατάλληλων χημικών αντιδραστηρίων**, είτε μέσω **μεταβολής κρίσιμων παραμέτρων** όπως η τιμή του **pH** ή ο **αριθμός οξείδωσης** των παρόντων χημικών στοιχείων. Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από την ταυτόχρονη συνύπαρξη **φυσικών και χημικών φαινομένων**: η φυσική διάσταση περιλαμβάνει την **πυρηνογένεση** (δηλαδή τον σχηματισμό των αρχικών πυρήνων του ιζήματος) και την **ανάπτυξη των κρυσταλλικών δομών**, ενώ η χημική διάσταση συνίσταται στον σχηματισμό δυσδιάλυτων ενώσεων μέσω αντιδράσεων καθίζησης.

Η αποτελεσματικότητα της ιζηματοποίησης ενισχύεται μέσω της συνδυαστικής εφαρμογής με άλλες διεργασίες διαχωρισμού. Συγκεκριμένα:

- Όταν η συγκέντρωση του παραγόμενου ιζήματος είναι **μικρότερη των 50 mg/L**, προκρίνεται η **διήθηση** ως επακόλουθο στάδιο απομάκρυνσης.
- Σε περιπτώσεις υψηλότερης παραγωγής ιζήματος, εφαρμόζεται η **κροκίδωση-συσσωμάτωση**, προκειμένου να αυξηθεί το μέγεθος των σωματιδίων και να διευκολυνθεί η τελική απομάκρυνσή τους μέσω **καθίζησης ή επίπλευσης**.

Η ιζηματοποίηση βρίσκει ευρύτατη εφαρμογή σε διάφορους τομείς της επεξεργασίας νερού, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται:

- η **μείωση της σκληρότητας** του νερού μέσω απομάκρυνσης ασβεστίου και μαγνησίου,
- η **εξουδετέρωση των όξινων ανθρακικών**,
- η **μείωση της περιεκτικότητας σε πυριτικά**,
- η **απομάκρυνση βαρέων μετάλλων**, τα οποία συχνά είναι τοξικά ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις,
- καθώς και η **καθίζηση ιόντων** όπως τα **φθοριούχα**, **φωσφορικά** και **θειούχα**, που ενδέχεται να προκαλέσουν ανεπιθύμητες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

A.9. ΚΑΘΙΖΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΠΛΕΥΣΗ

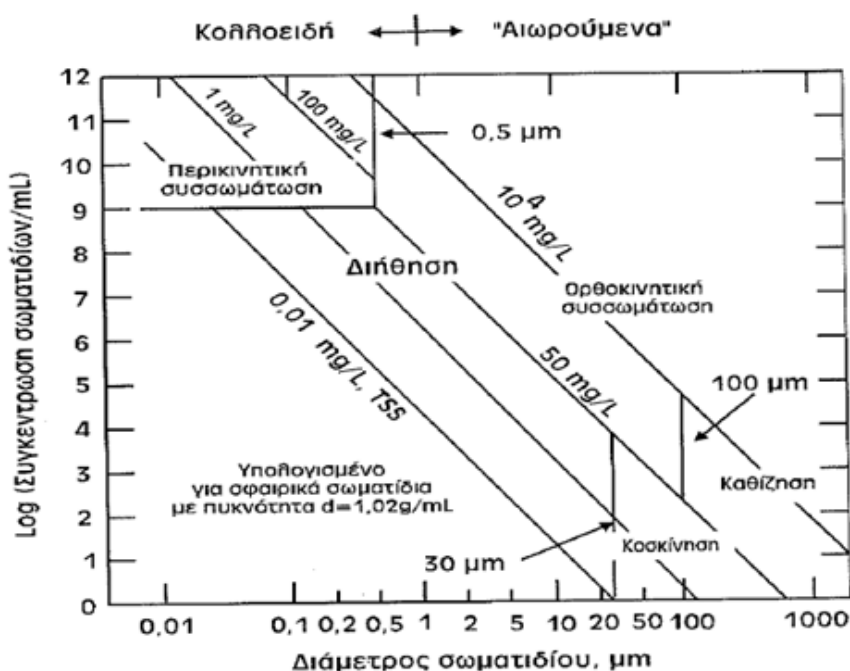
Οι διεργασίες της **καθίζησης** και της **επίπλευσης** αποτελούν βασικές φυσικοχημικές μεθόδους διαχωρισμού αιωρούμενων σωματιδίων από το νερό, βασιζόμενες στην αρχή της **διαφορετικής πυκνότητας** των σωματιδιακών φάσεων σε σχέση με το υγρό μέσο. Και οι δύο τεχνικές εκμεταλλεύονται τη **δράση της βαρύτητας**, είτε προς την κατεύθυνση της καθόδου είτε της ανόδου των σωματιδίων, ανάλογα με τη σχετική τους πυκνότητα.

Συγκεκριμένα, τα σωματίδια που εμφανίζουν **πυκνότητα μεγαλύτερη** από αυτή του νερού, υπόκεινται σε **καθίζηση**, καθώς οι δυνάμεις βαρύτητας υπερτερούν των δυνάμεων αντίστασης του υγρού. Αντιστρόφως, σωματίδια με **χαμηλότερη πυκνότητα** από το νερό έχουν την τάση να **ανέρχονται προς την επιφάνεια**, οδηγώντας στη διεργασία της επίπλευσης.

Η **καθίζηση** αποτελεί τη **συχνότερα εφαρμοζόμενη μέθοδο**, δεδομένου ότι η πλειονότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στο φυσικό και αστικό νερό παρουσιάζει υψηλότερη πυκνότητα από το διαλύτη, καθιστώντας δυνατή την απομάκρυνσή τους με την πάροδο του χρόνου.

Ωστόσο, η **τεχνολογία της επίπλευσης** βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή όταν απαιτείται η απομάκρυνση σωματιδίων χαμηλής πυκνότητας, ή όταν επιδιώκεται η **τεχνητή μείωση της πυκνότητας** των σωματιδίων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της **προσκόλλησης μικροσκοπικών φυσαλίδων αέρα** στην επιφάνειά τους, οι οποίες προσδίδουν στο σύστημα θετική άνωση. Η μέθοδος αυτή αποδεικνύεται εξαιρετικά αποτελεσματική για υδατικά συστήματα με οργανικές ύλες, έλαια ή άλλες ελαφρές ενώσεις.

Σχήμα 6: Διάγραμμα επιλογής της μεθόδου διαχωρισμού των σωματιδίων από το νερό (Kavanaugh, 1980)



Στο πλαίσιο της επεξεργασίας υδατικών ροών, ο **αποτελεσματικός διαχωρισμός των αιωρούμενων σωματιδίων** από τη ρευστή φάση συνιστά καθοριστικό στάδιο για την επίτευξη υψηλού βαθμού καθαρότητας, τόσο σε εφαρμογές ύδρευσης όσο και σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Οι φυσικοχημικές διεργασίες της **καθίζησης** και της **επίπλευσης** λειτουργούν, κατά κανόνα, ως **πρώτο στάδιο προκαταρκτικής επεξεργασίας**, επιτελώντας τον μαζικό διαχωρισμό των σωματιδίων βάσει των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών και της σχετικής πυκνότητάς τους ως προς το διαλυτικό μέσο.

Η **καθίζηση**, αξιοποιώντας τις **δυνάμεις βαρύτητας**, καθιστά εφικτή την καταβύθιση σωματιδίων που εμφανίζουν **πυκνότητα μεγαλύτερη** από αυτή του νερού, ενώ η **επίπλευση** εκμεταλλεύεται τη δημιουργία **θετικής άνωσης**, κυρίως μέσω της προσκόλλησης μικροφουσαλίδων αέρα, για την απομάκρυνση ελαφρύτερων σωματιδίων ή υδρόφοβων ενώσεων. Παρότι η καθίζηση είναι η επικρατέστερη σε πλήθος εφαρμογών λόγω της φυσικής υπεροχής της πυκνότητας των περισσότερων σωματιδίων έναντι του νερού, η επίπλευση προσφέρει κρίσιμα πλεονεκτήματα σε ειδικές περιπτώσεις, όπως στην επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων, σε ρεύματα υψηλής λιποπεριεκτικότητας ή σε συστήματα με χαμηλής πυκνότητας κolloειδή.

Η **τελική απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων**, η οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρως μέσω καθίζησης ή επίπλευσης, πραγματοποιείται με την εφαρμογή **διήθησης** μέσω φυσικών ή τεχνητών μέσων, όπως κοκκώδεις κλίνες, υφασμάτινα φίλτρα ή μεμβράνες. Η διήθηση λειτουργεί ως μηχανισμός **τελικού εξευγενισμού** του υδατικού ρεύματος, συγκρατώντας μικροσκοπικά σωματίδια και ενδεχομένως υπολειπόμενα κροκιδώματα ή μικρορρύπους.

Η **επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογικής λύσης** για κάθε εφαρμογή αποτελεί πολυπαραγοντικό πρόβλημα μηχανικής, το οποίο δεν υπακούει σε αυστηρά προκαθορισμένους κανόνες, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την **εμπειρία και τεχνογνωσία του μελετητή**. Η επιλογή πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τα **φυσικοχημικά χαρακτηριστικά** του εξεταζόμενου υγρού και της σωματιδιακής φάσης (π.χ. μέγεθος, πυκνότητα, συγκέντρωση, σταθερότητα διασποράς), αλλά και **παραμέτρους σχετικές με την οικονομική και λειτουργική βιωσιμότητα** του έργου, όπως:

- το **πάγιο και λειτουργικό κόστος** κάθε τεχνολογίας,
- το **επίπεδο συντήρησης** και αυτοματισμού που απαιτείται,
- η **διαθεσιμότητα χώρου και ενέργειας**,
- καθώς και η **αναμενόμενη απόδοση και σταθερότητα της διεργασίας** στο χρόνο.

Στο πλαίσιο επιστημονικών προσπαθειών για **συστηματοποίηση της διαδικασίας επιλογής**, έχουν προταθεί **διαγράμματα απόφασης** που βασίζονται σε χαρακτηριστικά όπως το **μέσο μέγεθος των σωματιδίων**, η **συγκέντρωση**, και η **πυκνότητα**. Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 9.1** παρουσιάζεται μια τέτοια μεθοδολογική προσέγγιση, μέσω της οποίας προσδιορίζονται **περιοχές βέλτιστης εφαρμογής** κάθε διεργασίας.

Για παράδειγμα:

- Σε συστήματα όπου η μέση διάμετρος των σωματιδίων υπερβαίνει τα **100 μm** και η συγκέντρωση είναι μεγαλύτερη των **50 mg/L**, η **καθίζηση** αποτελεί την ενδεδειγμένη επιλογή, λόγω της υψηλής αποδοτικότητας και της ενεργειακής οικονομίας που προσφέρει.
- Αντιθέτως, σε περιπτώσεις όπου τα σωματίδια εμφανίζουν **μεγάλο εύρος κατανομής μεγεθών** και η συγκέντρωση παραμένει **κάτω από 50 mg/L**, προκρίνεται η **άμεση διήθηση** μέσω **κλινών με κοκκώδη μέσα**, χωρίς προηγούμενη καθίζηση ή επίπλευση.
- Σε υδατικά ρεύματα με **υψηλές συγκεντρώσεις λεπτόκοκκων ή κολλοειδών σωματιδίων**, είναι αναγκαία η ενσωμάτωση **προκαταρκτικών σταδίων κροκίδωσης** σε συνδυασμό με **καθίζηση ή επίπλευση**, ώστε να ενισχυθεί η σωματιδιακή συνάθροιση και να εξασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα της επακόλουθης διήθησης.

Η ορθολογική επιλογή και ο κατάλληλος συνδυασμός αυτών των διεργασιών είναι θεμελιώδους σημασίας για τη **μακροχρόνια απόδοση, την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα** των μονάδων επεξεργασίας νερού και λυμάτων.

A 9.1. ΚΑΘΙΖΗΣΗ

Η καθίζηση είναι η διεργασία που χρησιμοποιείται περισσότερο για τον διαχωρισμό με βαρύτητα σωματιδίων από το νερό. Η ευρεία χρήση της οφείλεται στο χαμηλό πάγιο κόστος και στη μικρή κατανάλωση ενέργειας. Είναι μια εξαιρετικά απλή διεργασία, αν και ο σχεδιασμός των δεξαμενών καθίζησης παρουσιάζει πολλές περιπλοκές, ώστε να είναι αρκετά δύσκολος.

Για την περιγραφή του φαινομένου χρησιμοποιούνται διάφοροι όροι. Ο όρος κατακάθιση χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κάθοδο διαμέσου του νερού των σωματιδίων εξαιτίας της βαρύτητας. Ο όρος καθίζηση περιγράφει την κατακάθιση διακεκριμένων σωματιδίων ή θρόμβων, των οποίων η αιώρηση οφείλεται αποκλειστικά σε υδροδυναμικές δυνάμεις. Όταν τα διακεκριμένα σωματίδια ή οι θρόμβοι βρίσκονται σχεδόν ακινητοποιημένα κατά την μεταξύ τους επαφή, χρησιμοποιείται ο όρος πύκνωση.

Η καθίζηση αποτελεί μία από τις πλέον θεμελιώδεις και διαδεδομένες διεργασίες στην τεχνολογία επεξεργασίας νερού και λυμάτων, καθώς επιτελεί τον διαχωρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων με βάση τη δράση της βαρύτητας. Η ευρεία εφαρμογή της στην πράξη αποδίδεται κυρίως στα σημαντικά λειτουργικά της πλεονεκτήματα, τα οποία περιλαμβάνουν το χαμηλό πάγιο κόστος εγκατάστασης, τη μικρή απαίτηση σε ενέργεια, καθώς και τη σχετική απλότητα της λειτουργικής διαχείρισής της.

Παρά τη φαινομενική της απλότητα, ο σχεδιασμός των δεξαμενών καθίζησης ενέχει ιδιαίτερες τεχνικές προκλήσεις. Η επίτευξη της επιθυμητής αποδοτικότητας στη φάση του σχεδιασμού απαιτεί λεπτομερή κατανόηση της υδραυλικής συμπεριφοράς του ρευστού εντός της δεξαμενής, κατάλληλη γεωμετρία και βελτιστοποιημένη κατανομή ροής, ώστε να

αποφεύγονται φαινόμενα όπως η βραχυκυκλωμένη ροή, η εκτεταμένη αναμόχλευση ή η επαναιώρηση του κατακαθισμένου υλικού.

Για την ακριβέστερη περιγραφή του φαινομένου της καθίζησης, η βιβλιογραφία χρησιμοποιεί εξειδικευμένους όρους, οι οποίοι διαφοροποιούνται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά των σωματιδίων κατά την καθοδική τους πορεία:

- **Κατακάθιση (settling):** Περιγράφει τη γενική κάθοδο των σωματιδίων διαμέσου της υγρής φάσης υπό την επίδραση του πεδίου βαρύτητας. Η κίνηση αυτή αφορά τόσο διακριτά σωματίδια όσο και μικροσυσσωματώματα και συνιστά τη βασική φυσική διαδικασία της καθίζησης.
- **Καθίζηση (sedimentation):** Ειδικότερα, ο όρος αναφέρεται στην κάθοδο διακεκριμένων σωματιδίων ή θρόμβων, οι οποίοι διατηρούν τη χωρική τους αυτοτέλεια και των οποίων η παραμονή σε αιώρηση οφείλεται αποκλειστικά σε υδροδυναμικές δυνάμεις. Στην περίπτωση αυτή, δεν λαμβάνουν χώρα σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων, και κάθε σωματίδιο καθιζάνει μεμονωμένα, σύμφωνα με τις φυσικές του ιδιότητες.
- **Πύκνωση (compaction or thickening):** Χρησιμοποιείται όταν οι θρόμβοι ή τα σωματίδια έχουν κατακαθίσει σε τέτοιο βαθμό ώστε να βρίσκονται πλέον σε στενή μεταξύ τους επαφή και η καθοδική τους κίνηση επιβραδύνεται ή αναστέλλεται λόγω των μηχανικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Σε αυτό το στάδιο, η υδατική φάση διαχωρίζεται περαιτέρω από τη στερεή, ενώ το ίζημα συμπυκνώνεται στον πυθμένα της δεξαμενής.

Η κατανόηση και η ορθή χρήση των παραπάνω εννοιών είναι καθοριστικής σημασίας για την επιστημονική προσέγγιση του φαινομένου της καθίζησης, τον ορθολογικό σχεδιασμό των σχετικών μονάδων και τη βελτιστοποίηση της λειτουργικής τους απόδοσης.

A.9.1.1 Θεωρία της καθίζησης

Στον τομέα της επεξεργασίας νερού, η **καθίζηση** εφαρμόζεται ευρέως ως βασικός μηχανισμός **διαχωρισμού διασπορών**, οι οποίες ενδέχεται να παρουσιάζουν **σημαντική ετερογένεια** ως προς τη σύσταση, τη δομή και τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Το φάσμα των περιπτώσεων αυτών εκτείνεται από **συστήματα με χαμηλή συγκέντρωση σχεδόν διακριτών σωματιδίων** μέχρι **συσσωματώματα υψηλής συγκέντρωσης**, όπως είναι οι θρόμβοι που προκύπτουν από διεργασίες κροκίδωσης–συσσωμάτωσης.

Παρότι η καθίζηση αποτελεί θεμελιώδη διεργασία της φυσικοχημικής επεξεργασίας, η **θεωρητική περιγραφή του φαινομένου παρουσιάζει σημαντικές δυσχέρειες**, λόγω της **πολυπλοκότητας και της μη ομοιομορφίας** που χαρακτηρίζουν τα σωματιδιακά συστήματα. Συγκεκριμένα, τα αιωρούμενα σωματίδια που προκύπτουν από φυσικές ή τεχνητές διεργασίες **δεν εμφανίζουν κανονικό γεωμετρικό σχήμα, σταθερή πυκνότητα ή ομοιόμορφο μέγεθος**. Καθώς προχωρά η φάση της θρόμβωσης, οι σχηματιζόμενοι θρόμβοι είναι **δυσδιάκριτοι ως προς την εσωτερική τους δομή** και ασταθείς ως προς τη μηχανική

τους συμπεριφορά, γεγονός που δυσχεραίνει περαιτέρω τη μοντελοποίηση της καθοδικής τους κίνησης.

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η **συστηματική μελέτη και η κατηγοριοποίηση της κατακάθισης** των αιωρούμενων σωματιδίων, η διεθνής βιβλιογραφία προτείνει την **ταξινόμηση των διαφορετικών μηχανισμών καθίζησης σε τέσσερις χαρακτηριστικές κατηγορίες**, όπως ορίστηκαν από τους **Katz et al. (1962)**. Αυτή η προσέγγιση παρέχει ένα **πλαίσιο αναφοράς** που επιτρέπει την **προσέγγιση σύνθετων φαινομένων** μέσω της μελέτης **ιδανικών περιπτώσεων**, παρέχοντας κατευθυντήριες γραμμές για την ανάλυση και τον σχεδιασμό πρακτικών εφαρμογών καθίζησης.

Παρόλο που τα πραγματικά σωματιδιακά συστήματα αποκλίνουν σημαντικά από τις απλουστευμένες υποθέσεις των θεωρητικών μοντέλων (όπως σφαιρικό σχήμα, ομοιομορφία πυκνότητας, ανεξαρτησία σωματιδίων), η **μελέτη ιδανικών ή μοντελοποιημένων καταστάσεων** παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη **συμπεριφορά πολυσύνθετων και ετερογενών διασπορών**. Επιπλέον, προσφέρει τα **θεμελιώδη εργαλεία κατανόησης** των μηχανισμών που διέπουν τη μακροχρόνια σταθερότητα των δεξαμενών καθίζησης, τον ρυθμό κατακάθισης, και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων εντός του αιωρήματος.

Οι Τέσσερις Τύποι Καθίζησης κατά Katz et al. (1962)

Η **καθίζηση** των αιωρούμενων σωματιδίων ταξινομείται σε **τέσσερις διακριτές κατηγορίες**, ανάλογα με τη συμπεριφορά των σωματιδίων κατά την καθοδική τους κίνηση, τη συγκέντρωσή τους, και τη φύση των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η ταξινόμηση αυτή χρησιμοποιείται εκτενώς στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των δεξαμενών καθίζησης.

Τύπος Ι – Διακριτή ή Ανεξάρτητη Καθίζηση (Discrete Settling)

Χαρακτηριστικά:

- Παρατηρείται όταν τα σωματίδια είναι **αραιά κατανεμημένα** και **δεν αλληλεπιδρούν** μεταξύ τους.
- Τα σωματίδια διατηρούν **την αρχική τους μορφολογία** και **καθιζάνουν μεμονωμένα** υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Η **ταχύτητα καθίζησης** κάθε σωματιδίου εξαρτάται μόνο από το μέγεθος, τη μορφή και την πυκνότητά του, καθώς και από τις ιδιότητες του υγρού.

Παραδείγματα:

- Πρωτογενής καθίζηση σε νερά με **χαμηλή συγκέντρωση ιζημάτων**.
- Εργαστηριακές δοκιμές με μονά σωματίδια (π.χ. σφαιρικά γυάλινα σφαιρίδια σε νερό).

Τύπος ΙΙ – Καθίζηση με Συσσωμάτωση (Flocculent Settling)

Χαρακτηριστικά:

- Εμφανίζεται όταν τα σωματίδια **συσσωματώνονται κατά την καθίζηση**, με αποτέλεσμα **αύξηση του μεγέθους** και, συνεπώς, **μεταβολή της ταχύτητας καθίζησης** με το χρόνο.
- Η **πορεία καθίζησης δεν είναι γραμμική**, καθώς τα θρομβώδη συσσωματώματα μεταβάλλουν συνεχώς τις ιδιότητές τους.

Παραδείγματα:

- Δευτερογενής καθίζηση σε δεξαμενές επεξεργασίας αστικών λυμάτων μετά την κροκίδωση.
- Καθίζηση αργίλου ή οργανικών κολλοειδών μετά από χημική επεξεργασία.

Τύπος ΙΙΙ – Ζωνική ή Συμπυκνωτική Καθίζηση (Zone Settling)

Χαρακτηριστικά:

- Παρατηρείται σε συστήματα με **υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων**, τα οποία βρίσκονται σε **στενή αλληλεπίδραση** μεταξύ τους.
- Τα σωματίδια κινούνται **ομαδικά σαν συμπαγής μάζα**, σχηματίζοντας διακριτή διεπιφάνεια μεταξύ της καθαρισμένης υγρής φάσης και της φάσης του αιωρήματος.
- Καθώς τα σωματίδια είναι σε επαφή μεταξύ τους, η καθίζηση επηρεάζεται από τις **μηχανικές και δομικές ιδιότητες** του συσσωματώματος.

Παραδείγματα:

- Δεξαμενές καθίζησης σε μονάδες ενεργού ιλύος.
- Πύκνωση ιλύος σε εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας.

Τύπος ΙV – Πύκνωση ή Συμπίεση (Compression Settling)

Χαρακτηριστικά:

- Εμφανίζεται όταν η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι τόσο υψηλή που οι **συσσωματωμένες φάσεις αγγίζουν και ασκούν πίεση μεταξύ τους**.
- Η καθίζηση δεν πραγματοποιείται πλέον ελεύθερα αλλά μέσω **μηχανικής συμπίεσης** του κατώτερου στρώματος.
- Το νερό αποβάλλεται από τα διάκενα του πυκνού ιζήματος και το στερεό υλικό υφίσταται **συμπύκνωση**.

Παραδείγματα:

- Κατώτερη φάση σε δεξαμενές πύκνωσης ιλύος.
- Τελικό στάδιο καθίζησης σε συστήματα με μεγάλη συσσώρευση στερεών.

Αυτή η κατηγοριοποίηση προσφέρει ένα **θεμελιώδες εργαλείο** για την κατανόηση και τη **μηχανική ανάλυση του φαινομένου της καθίζησης**, επιτρέποντας την προσαρμογή των **σχεδιαστικών παραμέτρων** των δεξαμενών σε κάθε τύπο συμπεριφοράς των αιωρούμενων φάσεων.

A.9.1.2 Κατακάθιση διακεκριμένων σωματιδίων

Κατά τη μετακίνηση ενός σωματιδίου εντός ενός ρευστού, αυτό υπόκειται στην επίδραση τριών βασικών δυνάμεων που καθορίζουν την κινητική του συμπεριφορά:

1. Το βάρος του σωματιδίου, το οποίο δρα καθοδικά και προκύπτει από το γινόμενο της μάζας του με την επιτάχυνση της βαρύτητας.
2. Η άνωση, δηλαδή η κατακόρυφη δύναμη που ασκείται από το ρευστό προς τα επάνω, σύμφωνα με την αρχή του Αρχιμήδη.
3. Η οπισθέλκουσα δύναμη (αντίσταση του ρευστού), η οποία δρα προς την αντίθετη κατεύθυνση από την κίνηση και οφείλεται στις ιξώδεις δυνάμεις του ρευστού.

Στην αρχική φάση της καθόδου του, το σωματίδιο βρίσκεται υπό την επίδραση καθαρής θετικής δύναμης (βάρος μείον άνωση), με αποτέλεσμα να επιταχύνεται. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η ταχύτητά του, αυξάνεται αντιστοίχως και η οπισθέλκουσα δύναμη που το φρενάρει. Σταδιακά, το σύστημα φθάνει σε σημείο όπου η ολική αντίσταση του ρευστού ισούται με τη συνισταμένη των κινούσων δυνάμεων. Από τη χρονική αυτή στιγμή και εξής, η κίνηση γίνεται ευθύγραμμη ομαλή, δηλαδή με σταθερή ταχύτητα.

Αυτή η σταθερή ταχύτητα καθόδου ονομάζεται οριακή ταχύτητα κατακάθισης ή ταχύτητα καθίζησης και συμβολίζεται ως $V_{κV_κVκ}$. Αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό δεξαμενών καθίζησης, καθώς καθορίζει τον χρόνο παραμονής που απαιτείται για την αποτελεσματική απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Η τιμή της $V_{κV_κVκ}$ εξαρτάται από τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σωματιδίου (μέγεθος, σχήμα, πυκνότητα), καθώς και από τις ιδιότητες του ρευστού μέσου (πυκνότητα και ιξώδες). Σε ιδανικές συνθήκες, και υπό την προϋπόθεση ότι το σωματίδιο είναι σφαιρικό και η ροή είναι στρωτή (δηλαδή αριθμός Reynolds < 1), η οριακή ταχύτητα περιγράφεται από τον νόμο του Stokes, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_{κ} = \frac{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \mu}$$

όπου:

- $V_{κV_κVκ}$ = οριακή ταχύτητα κατακάθισης (m/s)
- ρ_{sp_sps} = πυκνότητα του σωματιδίου (kg/m³)
- ρ_{rrr} = πυκνότητα του ρευστού (kg/m³)
- g = επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²)
- d = διάμετρος του σωματιδίου (m)
- μ = δυναμικό ιξώδες του ρευστού (Pa·s)

A 9.1.3 Καθίζηση θρόμβων

Τα σωματίδια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία χαρακτηρίζονται από την τάση συσσωμάτωσης και συνένωσης σε μεγαλύτερες, περισσότερο συμπαγείς και βαρύτερες μονάδες, γεγονός που ευνοεί την καθίζησή τους. Η μετατροπή των αρχικά μικρών,

αστάθμητων σωματιδίων σε μεγαλύτερα και ευκολότερα καθιζάνοντα συσσωματώματα ενισχύει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας διαχωρισμού μέσω βαρύτητας.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό φαινόμενο που παρατηρείται σε τέτοια συστήματα είναι ο συμπαρασυρμός (drag or entrainment effect), κατά τον οποίο τα μεγαλύτερα σωματίδια, καθώς καθιζάνουν ταχύτερα λόγω της υψηλότερης μάζας και οριακής ταχύτητας, παρασύρουν μικρότερα σωματίδια που βρίσκονται στην τροχιά τους ή κοντά στο ιξώδες τους πεδίο επιρροής. Το αποτέλεσμα είναι μια αύξηση της μέσης ταχύτητας καθίζησης της διασποράς, η οποία υπερβαίνει την ταχύτητα που θα ανέμενε κανείς θεωρητικά για ανεξάρτητη καθίζηση.

Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε διασπορές με ευρεία κατανομή μεγέθους σωματιδίων, όπου η συνύπαρξη πολλαπλών κλιμάκων μεγέθους ενισχύει τη δυναμική των αλληλεπιδράσεων κατά την καθίζηση.

Στην πράξη, παρόμοιος συμπαρασυρμός μπορεί να παρατηρηθεί και λόγω υδραυλικών παραγόντων, όπως η παρουσία διαφορετικών οριζόντιων ταχυτήτων ροής εντός της δεξαμενής καθίζησης. Οι ταχύτητες αυτές δημιουργούν διατμητικά πεδία και ανομοιομορφίες στη ροή, οι οποίες δύνανται να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των σωματιδίων και να οδηγήσουν σε δευτερογενή ρεύματα που μεταβάλλουν την καθοδική τους πορεία. Έτσι, ακόμη και σωματίδια που από μόνα τους δεν θα καθιζάνονταν αποτελεσματικά, παρασύρονται προς τον πυθμένα υπό την επίδραση αυτών των μικρο-υδραυλικών μεταβολών.

Η κατανόηση και ο ποσοτικός προσδιορισμός του συμπαρασυρμού αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης στον σχεδιασμό και βελτιστοποίηση των δεξαμενών καθίζησης, καθώς επηρεάζει άμεσα τη διάσταση, τον χρόνο παραμονής και την τελική απόδοση απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών.

Η χαρακτηρισποίηση των φυσικών ιδιοτήτων των σωματιδίων καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη έως αδύνατη όταν αυτά βρίσκονται σε φάση **συσσωμάτωσης ή κροκίδωσης**. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα σωματίδια δεν παρουσιάζουν σταθερή ή προβλέψιμη γεωμετρία, ενώ οι ιδιότητες όπως η **πυκνότητα**, το **σχήμα**, και το **συνολικό μέγεθος** του θρόμβου μεταβάλλονται δυναμικά, καθιστώντας ανακριβή ή και αδύνατη τη μαθηματική προσέγγιση της ταχύτητας καθίζησης με συμβατικές εξισώσεις.

Λόγω αυτής της **μεταβλητότητας και φυσικής αταξίας**, η **εκτίμηση της καθίζησης** των αιωρούμενων σωματιδίων —ιδίως σε καταστάσεις μετά από χημική επεξεργασία (π.χ. κροκίδωση)— βασίζεται **όχι σε θεωρητικά μοντέλα αλλά σε πειραματικές διαδικασίες**. Τυπικά, οι ταχύτητες καθίζησης που παρατηρούνται σε χαρακτηριστικούς τύπους θρόμβων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε πίνακες, όπως στον **Πίνακα 9.3**, ο οποίος παρέχει **ενδεικτικά εύρη τιμών ταχυτήτων καθίζησης**.

Πίνακας 6: Περιοχή τιμών ταχύτητας καθίζησης χαρακτηριστικών θρόμβων στους 15 βαθμούς κελσίου.

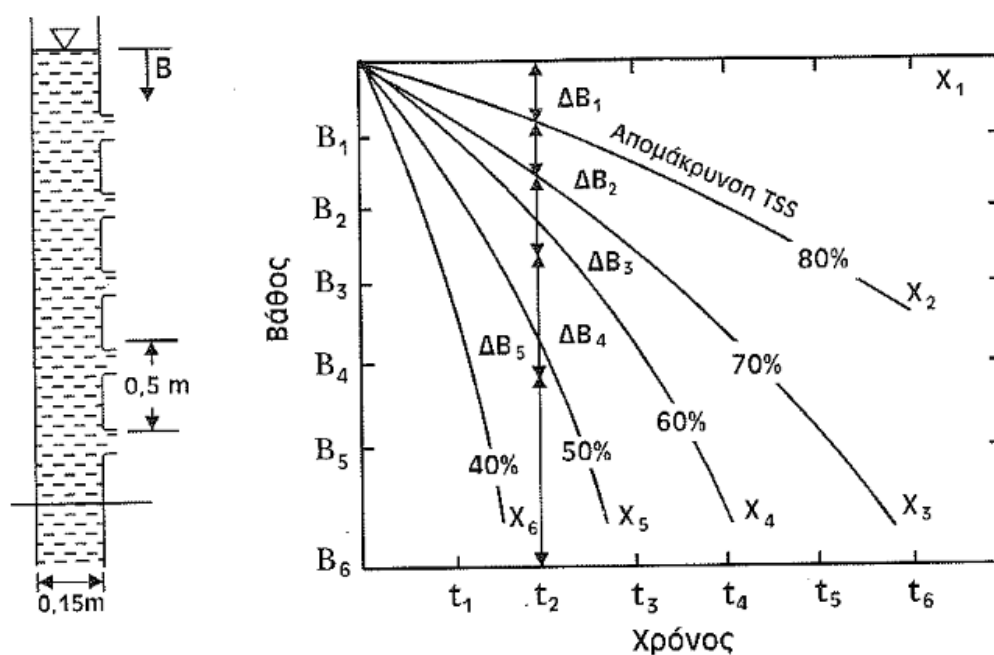
Χαρακτηριστικά θρόμβου	Ταχύτητα καθίζησης (m/h)
Αργίλου μικροί εύθραυστοι	2,2 - 4,5
Αργίλου μεγάλοι	4 - 5,5
Ανθρακικού ασβεστίου από χημική ιζηματοποίηση	4,5 - 6,5

Η πειραματική μελέτη πραγματοποιείται με τη χρήση διαφανούς κατακόρυφου σωλήνα (ή στήλης καθίζησης), ελάχιστης διαμέτρου 15 cm και ύψους που προσεγγίζει αυτό της προβλεπόμενης δεξαμενής καθίζησης, συνήθως 2 έως 3 μέτρα. Στη στήλη αυτή εισάγεται αντιπροσωπευτικό δείγμα του αιωρήματος, το οποίο παρακολουθείται κατά τη διάρκεια της καθίζησης.

Κατά μήκος της στήλης, προβλέπονται σημεία δειγματοληψίας ανά 50 cm, στα οποία πραγματοποιείται δειγματοληψία ανά 20 λεπτά, για συνολική χρονική διάρκεια δύο ωρών. Η επιλογή της συχνότητας και της διάρκειας δειγματοληψίας εξασφαλίζει την καταγραφή της δυναμικής εξέλιξης της καθίζησης.

Για κάθε δείγμα που λαμβάνεται, μετράται το ποσοστό απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων σε σχέση με το αρχικό φορτίο. Η ανάλυση αυτών των πειραματικών δεδομένων οδηγεί στη διαμόρφωση διαγραμμάτων καθίζησης (όπως το Σχήμα 9.4), τα οποία απεικονίζουν τη χρονική εξέλιξη της απόδοσης καθίζησης σε συνάρτηση με το βάθος και τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών.

Σχήμα 7: Τυπικές πειραματικές καμπύλες καθίζησης θρόμβων



Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν βασικό εργαλείο στον σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση δεξαμενών καθίζησης, επιτρέποντας την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου παραμονής, του ύψους λειτουργίας, και της αποτελεσματικότητας της στερεο-υγρής φάσης διαχωρισμού υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

A.9.1.4. Καθίζηση ζώνης ή παρεμποδιζόμενη καθίζηση

Όταν η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε μια διασπορά υπερβαίνει τα 500 mg/L, παρατηρείται σημαντική επιβράδυνση της ταχύτητας καθίζησης, φαινόμενο που αποδίδεται στην ενίσχυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων. Σε αυτό το πλαίσιο, τα σωματίδια δεν λειτουργούν πλέον ως ανεξάρτητες οντότητες αλλά βρίσκονται σε στενή επαφή, σχηματίζοντας εύθραυστα, χαλαρά συμπλέγματα.

Κατά την καθοδική τους πορεία, τα σωματιδιακά συμπλέγματα αυτά συμπιέζουν τον περιβάλλοντα υγρό όγκο, προκαλώντας αντίρροπη ροή νερού προς τα επάνω. Η υδραυλική αυτή ανάστροφη ροή εξισορροπεί μερικώς το βάρος των σωματιδίων, με αποτέλεσμα αυτά να εμφανίζονται σχεδόν ακίνητα, ενώ στην πραγματικότητα εξελίσσεται ένα φαινόμενο μαζικής, συλλογικής καθίζησης με πολύ χαμηλή ταχύτητα.

Καθ' όλη τη διάρκεια της καθίζησης, η στήλη του υγρού αποκτά **ευδιάκριτη στρωμάτωση** με βάση τη συγκέντρωση των σωματιδίων. Η **κατώτερη ζώνη**, κοντά στον πυθμένα, χαρακτηρίζεται από τη **μεγαλύτερη συγκέντρωση**, λόγω της συσσωρευμένης μάζας των σωματιδίων. Εκεί, η **πίεση που ασκείται από το υπερκείμενο ιζημα** οδηγεί σε **σταδιακή συμπίεση** και **αποβολή νερού** από τους θρόμβους, με συνέπεια την **αύξηση της στερεής φάσης** και τη **μείωση του συνολικού όγκου** του ιζήματος — φαινόμενο γνωστό ως **πύκνωση**.

Αυτός ο τύπος καθίζησης συναντάται κυρίως στις **δεξαμενές καθίζησης μονάδων βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων**, όπου οι συγκεντρώσεις στερεών είναι υψηλές και απαιτείται όχι μόνο η απομάκρυνση των αιωρούμενων, αλλά και η **προκαταρκτική αφυδάτωση της παραγόμενης λάσπης**.

Η **ταχύτητα καθίζησης** των σωματιδίων σε τέτοια περιβάλλοντα **δεν ακολουθεί γραμμική ή σταθερή εξάρτηση** από τις φυσικές παραμέτρους, αλλά εξαρτάται **πολυπαραμετρικά** από τη **συγκέντρωση της διασποράς**, τις **μηχανικές ιδιότητες των θρόμβων**, τη **δομή του συσσωματώματος**, και τις **υδραυλικές συνθήκες**. Εντούτοις, για σκοπούς μηχανικού σχεδιασμού, χρησιμοποιείται συχνά η **εμπειρική προσέγγιση** μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$V_{\kappa} = V_0 \left(1 - \frac{C}{C_m}\right)^n$$

όπου:

- $V_{\kappa}V_{\kappa}$ = ταχύτητα καθίζησης στη συγκέντρωση CCC (m/s)
- V_0V_0 = ταχύτητα καθίζησης σε πολύ αραιή διασπορά (m/s)
- CCC = πραγματική συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών (mg/L ή kg/m³)

- CmC_mCm = μέγιστη συγκέντρωση πέρα από την οποία δεν παρατηρείται καθίζηση (mg/L ή kg/m^3)
- nnn = εμπειρικός εκθέτης (συνήθως μεταξύ 4 και 10, ανάλογα με το σύστημα)

Η παραπάνω εξίσωση επιτρέπει τον **προσεγγιστικό υπολογισμό** της ταχύτητας καθίζησης, αλλά απαιτεί **πειραματικό προσδιορισμό των παραμέτρων $V0V_0V0$, CmC_mCm και nnn** για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση.

A.10. ΔΙΗΘΗΣΗ

A.10.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διήθηση αποτελεί μία από τις πλέον κρίσιμες και διαδεδομένες διεργασίες στην τεχνολογία επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων, με στόχο την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων από την υδατική φάση. Κατά τη λειτουργία της, το νερό διέρχεται μέσω ενός διηθητικού μέσου, το οποίο μπορεί να είναι φυσικό (π.χ. άμμος, χαλίκι) ή τεχνητό (π.χ. μεμβράνες, συνθετικά υλικά), και τα σωματίδια απομακρύνονται με δύο βασικούς μηχανισμούς:

1. **Συσσωρευση στην επιφάνεια του διηθητικού μέσου**, σχηματίζοντας ένα λεπτό φιλμ (φίλτρο-κέικ), που ενισχύει την αποδοτικότητα.
2. **Διείσδυση και συγκράτηση εντός της πορώδους μάζας** του μέσου, μέσω μηχανικής παγίδευσης, προσρόφησης ή και χημικών αλληλεπιδράσεων.

Η διήθηση είναι **ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν συνδυάζεται** με άλλες φυσικοχημικές διεργασίες, όπως:

- **Κροκίδωση – συσσωμάτωση** (flocculation), για τη δημιουργία μεγαλύτερων και ευκολότερα διαχωρίσιμων θρόμβων.
- **Ιζηματοποίηση και καθίζηση**, για την προκαταρκτική απομάκρυνση του μαζικού φορτίου αιωρούμενων στερεών.

Με την εφαρμογή αυτών των συνδυασμένων διεργασιών, καθίσταται δυνατή η **αποδοτική απομάκρυνση σωματιδίων κάθε τύπου και μεγέθους** – από μεγάλα ανόργανα αιωρήματα μέχρι λεπτόκοκκα οργανικά ή κολλοειδή.

Η διήθηση λειτουργεί ως **το τελικό στάδιο της συνολικής διαδικασίας καθαρισμού** του νερού πριν από την τελική **απολύμανση**, η οποία στοχεύει στην **αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών**. Με τον τρόπο αυτό, η διήθηση **συμπληρώνει και ενισχύει** τη συνολική υγειονομική ασφάλεια του επεξεργασμένου νερού.

Ενδεικτικοί Συνδυασμοί Διεργασιών Επεξεργασίας που Περιλαμβάνουν Διήθηση:

1. **Κροκίδωση – Συσσωμάτωση – Καθίζηση – Διήθηση – Απολύμανση**
 - Χρησιμοποιείται κυρίως για **πλήρως επιβαρυνμένα επιφανειακά ύδατα**.
 - Εξασφαλίζει **μέγιστο βαθμό απομάκρυνσης** αιωρούμενων και κολλοειδών.

2. **Κροκίδωση – Συσσωμάτωση – Διήθηση – Απολύμανση**
 - Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται καθίζηση, π.χ. σε **προκατασταλμένα ύδατα** με μέτρια θολότητα.
 - Επιτυγχάνει **συντομότερο χρόνο επεξεργασίας** με ικανοποιητική απόδοση.
3. **Διήθηση – Απολύμανση**
 - Χρησιμοποιείται για **πόσιμα υπόγεια νερά ή προεπεξεργασμένα υγρά**, όπου η συγκέντρωση αιωρημάτων είναι χαμηλή.
 - Η πιο **απλοποιημένη μορφή επεξεργασίας**, όταν οι υπόλοιπες διεργασίες κρίνονται μη απαραίτητες.

Η επιλογή του κατάλληλου **συνδυασμού διεργασιών** εξαρτάται από:

- Την **ποιοτική σύσταση του ακατέργαστου νερού**
- Τους **επιθυμητούς στόχους ποιότητας**
- Το **επιχειρησιακό κόστος** και τις **εγκαταστάσεις διαθέσιμων υποδομών**

Η διήθηση, ως κρίσιμος κρίκος στην αλυσίδα επεξεργασίας, αποτελεί **αναπόσπαστο μέρος** τόσο της **υδρευτικής** όσο και της **περιβαλλοντικής μηχανικής**.

A.10.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΠΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΟΝΤΑΙ ΜΕ ΔΙΗΘΗΣΗ

Η διήθηση αποτελεί μία εξαιρετικά ευέλικτη και αποτελεσματική διεργασία απομάκρυνσης ευρέος φάσματος σωματιδίων διαφόρου προέλευσης, είτε πρόκειται για φυσικά ανόργανα αιωρήματα, είτε για ανθρωπογενείς ρυπαντές που ενσωματώνονται στην υδατική φάση μέσω γεωργικών, βιομηχανικών ή αστικών δραστηριοτήτων.

Τα σωματίδια που αφαιρούνται κατά τη διήθηση παρουσιάζουν ευρύτατο φάσμα διαμέτρων, το οποίο, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 10.1, εκτείνεται από 0,1 έως και 1.000 μm . Το μέγεθος αυτό περιλαμβάνει από κολλοειδή και μικροσωματίδια, μέχρι μεγαλύτερα συσσωματώματα και ιζήματα, καθιστώντας τη διήθηση ικανή να λειτουργήσει τόσο ως τελική φάση καθαρισμού όσο και ως φάση προεπεξεργασίας σε προηγμένα συστήματα (π.χ. μεμβρανικά).

Εκτός από το μέγεθος, τα σωματίδια παρουσιάζουν και σημαντική ποικιλία ως προς το σχήμα και τη μορφολογία, από σφαιρικά ή ημισφαιρικά έως επιμηκυμένα, άμορφα ή δενδριτικά. Η γεωμετρική ποικιλομορφία αυτή επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά τους κατά τη διήθηση, ιδίως ως προς τον μηχανισμό παγίδευσης (μηχανική, προσρόφηση, αδράνεια, κ.λπ.).

Αναφορικά με την πυκνότητα, τα σωματίδια που συναντώνται κατά τη διαδικασία επεξεργασίας του νερού κυμαίνονται σε ευρύ φάσμα:

Για θρόμβους που σχηματίζονται κατά τη χρήση ανόργανων κροκιδωτικών (π.χ. θειικός σίδηρος ή θειικός αργίλιος), η πυκνότητα βρίσκεται συνήθως κοντά στο 1 g/mL , καθιστώντας τα σωματίδια ουδέτερα ή ελαφρώς καθιζάνοντα.

Αντιθέτως, σωματίδια που προέρχονται από διεργασίες ιζηματοποίησης, όπως οξείδια του σιδήρου ή ανθρακικά άλατα, εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερες πυκνότητες, που μπορούν να φθάσουν έως και 5 g/mL (βλ. Πίνακα 10.1). Αυτά τα σωματίδια είναι βαριά και ισχυρά καθιζάνοντα, επιτρέποντας τη συνδυασμένη απομάκρυνσή τους με προκαταρκτική καθίζηση και τελική διήθηση.

Η σχεδόν πλήρης απομάκρυνση των αιωρούμενων φάσεων, ανεξαρτήτως της φυσικής τους προέλευσης ή των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, καθιστά τη διήθηση αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης τεχνολογίας επεξεργασίας νερού, καθώς συμβάλλει καθοριστικά στην εξασφάλιση υψηλής καθαρότητας και υγειονομικής ασφάλειας του τελικού προϊόντος.

Κατά τη λειτουργία των **διηθητικών κλινών**, η **παγίδευση και συγκράτηση σωματιδίων** στηρίζεται τόσο σε μηχανικούς όσο και σε φυσικοχημικούς μηχανισμούς. Ωστόσο, η **σταθερότητα των συσσωματωμάτων** εντός του διηθητικού μέσου δεν είναι πάντα εξασφαλισμένη. Όσο αυξάνεται η ποσότητα των συγκρατούμενων σωματιδίων, **αναπτύσσονται ενδοσωματιδιακές διατμητικές δυνάμεις**, λόγω της ροής του νερού και της πίεσης στο στρώμα φίλτρανσης. Αυτές οι δυνάμεις είναι ικανές να προκαλέσουν **θραύση των θρόμβων** και **συμπαρασυρμό** ήδη παγιδευμένων σωματιδίων, μειώνοντας την αποδοτικότητα του φίλτρου.

Ο βαθμός **αντοχής των θρόμβων στις διατμητικές δυνάμεις** εκφράζεται ποιοτικά μέσω της παραμέτρου που ονομάζεται **ισχύς θρόμβου**. Η ισχύς θρόμβου αποτυπώνει την **μηχανική συνοχή** του σωματιδιακού συμπλέγματος και αποτελεί **κρίσιμο χαρακτηριστικό** για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των συσσωματωμάτων κατά τη διήθηση.

Στην περίπτωση των θρόμβων που σχηματίζονται με **ανόργανα κροκιδωτικά** όπως ο **σίδηρος** και το **αργίλιο**, η ισχύς θρόμβου είναι γνωστό ότι είναι **εξαιρετικά χαμηλή**. Αυτό συνεπάγεται **αυξημένη ευαισθησία σε διατμητικές δυνάμεις**, γεγονός που οδηγεί σε **μειωμένη ικανότητα συγκράτησης** αυτών των θρόμβων στις διηθητικές κλίνες. Η χαμηλή ισχύς θρόμβου αποτελεί έναν από τους κύριους λόγους για τους οποίους, στην πράξη, **προτάσσεται η καθίζηση** ως προκαταρκτικό στάδιο **πριν από τη διήθηση**, ώστε να απομακρυνθεί το μεγαλύτερο ποσοστό των θρόμβων **πριν φτάσουν στο φίλτρο**.

Η **προσθήκη πολυηλεκτρολυτών** κατά τη φάση της κροκίδωσης έχει αποδειχθεί ότι **ενισχύει σημαντικά την ισχύ θρόμβου**, καθώς δημιουργεί **γεφυρώσεις** μεταξύ των σωματιδίων και προάγει τη **χημική συνοχή των θρόμβων**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

- Τη **βελτίωση της μηχανικής σταθερότητας** των συσσωματωμάτων,
- Τη **μείωση του συμπαρασυρμού** εντός των διηθητικών μέσων,
- Και, συνολικά, τη **βελτίωση της απόδοσης συγκράτησης** και της διάρκειας ζωής του φίλτρου.

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι τα διακεκριμένα (μη συσσωματωμένα) σωματίδια, λόγω του συμπαγούς σχήματός τους και της προβλέψιμης κινητικής συμπεριφοράς, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα παγίδευσης στις διηθητικές κλίνες σε σχέση με τους θρόμβους. Αυτή

η διαφορά καθιστά τα φίλτρα περισσότερο αποτελεσματικά στην απομάκρυνση ανεξάρτητων μικροσωματιδίων από ό,τι στην απομάκρυνση εύθραυστων θρομβωδών σχηματισμών.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά σωματιδίων που απομακρύνονται με την διήθηση

Είδος	Εύρος Μεγέθους (μm)	Πυκνότητα (g/mL)	Ισχύς Θρόμβου
Θρόμβοι βακτηρίων	0,5 – 1.000	≈ 1,02	Μέση
Άλγη	1 – 200	≈ 1,05	Μέση
Fe(OH) ₃ – Al(OH) ₃	0,1 – 1.000	≈ 1,01	Χαμηλή
Fe ₂ O ₃	0,1 – 50	5,2	Χαμηλή
CaCO ₃	0,1 – 50	2,4	Χαμηλή

A.11. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΣΕ ΕΝΕΡΓΟ ΆΝΘΡΑΚΑ

Η προσρόφηση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και πιο ευέλικτες διεργασίες στην τεχνολογία καθαρισμού του πόσιμου νερού, με στόχο την απομάκρυνση ανεπιθύμητων ή επικίνδυνων συστατικών μέσω στερεών προσροφητικών υλικών. Αν και συγκριτικά πιο πρόσφατη από άλλες παραδοσιακές διεργασίες (όπως η καθίζηση, η διήθηση ή η απολύμανση), η προσρόφηση έχει αναδειχθεί σε κομβικής σημασίας τεχνική, ιδιαίτερα για την απομάκρυνση διαλυτών οργανικών ενώσεων και ουσιών ιχνοστοιχείων.

Η αρχή της προσρόφησης σε υδατικά διαλύματα καταγράφηκε για πρώτη φορά το 1875 από τον Lowitz, ο οποίος παρατήρησε τη δέσμευση συστατικών σε στερεά επιφάνεια. Στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα, οι πρώτες εφαρμογές σε συστήματα επεξεργασίας νερού στις Ηνωμένες Πολιτείες περιλάμβαναν τη χρήση μη ενεργού άνθρακα, κυρίως για την απομάκρυνση χρωμάτων και οσμών.

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας του ενεργού άνθρακα σημειώθηκε κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου, όταν κατασκευάστηκαν μεγάλες ποσότητες κοκκώδους ενεργού άνθρακα για την παραγωγή αντιασφυξιογόνων μασκών, γεγονός που επέσπευσε και την αξιοποίηση του υλικού αυτού σε πολιτικές εφαρμογές καθαρισμού νερού.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά βιομηχανικής κλίμακας εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού με χρήση ενεργού άνθρακα, με στόχο την αποτελεσματική απομάκρυνση οργανικών χρωστικών, οσμών και γεύσεων, οι οποίες δεν αντιμετωπίζονταν ικανοποιητικά με τις συμβατικές τεχνικές.

Καθοριστική υπήρξε η δεκαετία του 1970, κατά την οποία η διεθνής επιστημονική κοινότητα έστρεψε το ενδιαφέρον της στην προσρόφηση, κυρίως λόγω της ανάγκης απομάκρυνσης οργανικών ρυπαντών (π.χ. φυτοφάρμακα, διαλύτες, παραπροϊόντα χλωρίωσης) από το πόσιμο νερό. Κατά την περίοδο αυτή, ο ενεργός άνθρακας —τόσο σε κοκκώδη (GAC) όσο και σε σκόνη (PAC) μορφή— καθιερώθηκε ως σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας κάθε άλλης μεθόδου απορρύπανσης.

Η προσρόφηση με ενεργό άνθρακα εξακολουθεί να θεωρείται έως και σήμερα:

- **Εξαιρετικά αποτελεσματική** για ρυπαντές χαμηλής συγκέντρωσης,
- **Μη επιλεκτική** ως προς τον τύπο των οργανικών ενώσεων,
- **Εύκολα συνδυάσιμη** με άλλες διεργασίες (π.χ. βιολογική επεξεργασία, οξείδωση, μεμβράνες).

Η εξέλιξή της συνεχίζεται με την ανάπτυξη νέων προηγμένων προσροφητικών υλικών (π.χ. τροποποιημένοι άνθρακες, νανοϋλικά, συνθετικές ρητίνες), ενώ ο ενεργός άνθρακας παραμένει το **πρότυπο αναφοράς** για την απόδοση, το κόστος και την τεχνική αξιοπιστία των μεθόδων απομάκρυνσης οργανικών μικρορρύπων.

Ο ενεργός άνθρακας αποτελεί ένα από τα **πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα προσροφητικά υλικά** στη βιομηχανική πράξη, με εφαρμογές που εκτείνονται από την επεξεργασία νερού και αποβλήτων έως την **καθαρότερη παραγωγή και ανάκτηση πόρων**. Η εξαιρετικά ανεπτυγμένη πορώδης δομή του, σε συνδυασμό με τη μεγάλη ειδική επιφάνεια και τη χημική αδράνεια, τον καθιστούν ιδανικό μέσο για την **απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων μικρορρύπων**, ακόμη και σε εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις.

Στον βιομηχανικό τομέα, ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται σε **πλήθος κρίσιμων εφαρμογών επεξεργασίας νερού**, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται:

- **Αποχλωρίωση νερού πριν από βιομηχανική χρήση:** Ο ενεργός άνθρακας αφαιρεί υπολειμματικό χλώριο από το νερό, προστατεύοντας ευαίσθητα υλικά και συστήματα (π.χ. μεμβράνες, ρητίνες ανταλλαγής ιόντων) από οξειδωτική υποβάθμιση.
- **Απομάκρυνση ιχνών οργανικών ρυπαντών:** Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η προστασία των κλινών ρητίνης (π.χ. για αποσκλήρυνση ή αποϊονισμό), από την παρουσία οργανικών ενώσεων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν βιολογική ανάπτυξη ή επιφανειακή προσρόφηση, μειώνοντας έτσι την αποδοτικότητα και διάρκεια ζωής του συστήματος.
- **Κατεργασία συμπυκνωμάτων ατμού (condensate polishing):** Σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και βιομηχανίες με κυκλώματα ανακύκλωσης ατμού, ο ενεργός άνθρακας εφαρμόζεται για την απομάκρυνση οργανικών υπολειμμάτων από τα συμπυκνώματα, επιτρέποντας την επανεισαγωγή του νερού στο σύστημα χωρίς κινδύνους διάβρωσης ή εναποθέσεων.
- **Καθαρισμός επιφανειακών και υπόγειων υδάτων:** Πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν νερό από φυσικές πηγές (π.χ. ποτάμια, λίμνες, γεωτρήσεις) και απαιτείται η προσρόφηση φυσικών οργανικών ενώσεων (όπως χουμικά και φουλβικά οξέα), φυτοφαρμάκων, ή πτητικών οργανικών ρυπαντών (VOCs) πριν από την περαιτέρω χρήση ή επεξεργασία.

Πέρα από την επεξεργασία εισερχόμενων υδάτινων ροών, η προσρόφηση με ενεργό άνθρακα εντάσσεται και στην **τελική φάση κατεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων**, ειδικά όταν στόχος είναι η επαναχρησιμοποίηση του νερού ή η συμμόρφωση με περιβαλλοντικά όρια εκροής. Σε τέτοια σενάρια, η χρήση ενεργού άνθρακα είτε ως φίλτρο polishing, είτε ως ενδιάμεσο στάδιο μετά από βιολογική ή χημική κατεργασία, οδηγεί

σε ουσιαστική μείωση του οργανικού φορτίου (COD/BOD) και σε βελτιωμένη ποιότητα εκροής, κατάλληλη ακόμη και για επαναχρησιμοποίηση σε μη πόσιμες εφαρμογές (π.χ. ψύξη, άρδευση, πλύσεις).

Ο ενεργός άνθρακας, χάρη στην **προσροφητική του ευελιξία**, συνεχίζει να αποτελεί **στρατηγικό υλικό στην κυκλική διαχείριση του νερού**, ενσωματούμενος τόσο σε **παραδοσιακά συστήματα επεξεργασίας** όσο και σε **σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις**, όπως υβριδικά φίλτρα, αντιδραστήρες ροής και μονάδες ανάκτησης.

A.12. ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ

Η **παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών** στο νερό αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους για τη **δημόσια υγεία**, καθώς μπορεί να προκαλέσει την εξάπλωση **υδατογενών νοσημάτων** όπως χολέρα, δυσεντερία, ηπατίτιδα και γαστρεντερίτιδες. Η **ανάπτυξη και επιβίωση των μικροοργανισμών** σε υδατικά περιβάλλοντα ευνοείται από ορισμένες **φυσικοχημικές συνθήκες**, οι οποίες ενισχύουν τη βιολογική τους δραστηριότητα.

Συγκεκριμένα, οι βασικοί **παράγοντες που συμβάλλουν στην επιβίωση και πολλαπλασιασμό** τους στο νερό περιλαμβάνουν:

- **Ουδέτερο έως ελαφρώς αλκαλικό pH**, το οποίο παρέχει ιδανικό περιβάλλον για τη λειτουργία των ενζυμικών συστημάτων των περισσότερων βακτηρίων και ιών.
- **Παρουσία οργανικής ύλης**, η οποία λειτουργεί ως **πρώτη ύλη για μεταβολισμό και ανάπτυξη**, προσφέροντας πηγή άνθρακα και ενέργειας.
- **Θρεπτικά συστατικά**, όπως **άζωτο (N)** και **φώσφορος (P)**, τα οποία είναι **δομικά στοιχεία για τη βιοσύνθεση κυτταρικών συστατικών**, όπως νουκλεϊκά οξέα και πρωτεΐνες.

Λόγω του **πολύ μικρού μεγέθους** των παθογόνων (συνήθως $<1 \mu\text{m}$), η **πλήρης απομάκρυνσή τους** μέσω **φυσικοχημικών διεργασιών** όπως η **καθίζηση** και η **διήθηση**, είναι **τεχνικά δύσκολη**, ειδικά όταν δεν συνοδεύονται από προηγούμενη κροκίδωση ή όταν το νερό περιέχει κολλοειδή.

Για τον λόγο αυτό, η **απολύμανση** αποτελεί **απαραίτητο και αναπόσπαστο στάδιο** στην τελική φάση επεξεργασίας του νερού, διασφαλίζοντας:

- **Καταστροφή ή αδρανοποίηση των μικροοργανισμών,**
- **Πρόληψη επαναμόλυνσης** στο δίκτυο διανομής,
- **Εξασφάλιση υγειονομικής ασφάλειας** του πόσιμου νερού για τον τελικό καταναλωτή.

Η απολύμανση μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως η **χλωρίωση**, η **υπεριώδης ακτινοβολία (UV)** και η **οζόνωση**, ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας, τις ιδιότητες του νερού και τις υποδομές της εγκατάστασης.

A.13. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ

Οι μεμβρανικές τεχνολογίες αποτελούν ένα από τα πιο σύγχρονα και δυναμικά αναπτυσσόμενα πεδία στην επεξεργασία νερού, με δυνατότητα αποτελεσματικού διαχωρισμού των διαλυμένων συστατικών από την υδατική φάση. Ανάμεσα στις πιο διαδεδομένες τεχνικές αυτής της κατηγορίας συγκαταλέγονται η αντίστροφη όσμωση (RO – Reverse Osmosis) και η ηλεκτροδιάλυση (ED – Electrodialysis), οι οποίες βασίζονται σε διαφορετικούς μηχανισμούς μεταφοράς, αλλά χρησιμοποιούν και οι δύο εξειδικευμένες ημιπερατές μεμβράνες.

► Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis)

Η αντίστροφη όσμωση είναι μια μεμβρανική διεργασία με κινητήρια δύναμη την πίεση, η οποία χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση διαλυμένων αλάτων, οργανικών ενώσεων και μικρορρύπων από το νερό. Κατά τη λειτουργία της, στο υδατικό διάλυμα εφαρμόζεται πίεση μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση του συστήματος, με αποτέλεσμα να αντιστρέφεται η φυσική κατεύθυνση της όσμωσης.

Το καθαρό νερό (ή διαπερατό, permeate) διέρχεται διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης, αφήνοντας πίσω του τα διαλυμένα άλατα και τους ρυπαντές που απορρίπτονται μέσω του συμπυκνώματος (reject). Η μεμβράνη επιτρέπει τη διέλευση μορίων νερού, αλλά παρεμποδίζει ιόντα και μεγάλα οργανικά μόρια, εξασφαλίζοντας πολύ υψηλό βαθμό καθαρισμού.

Η αντίστροφη όσμωση εφαρμόζεται ευρέως σε:

Αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού

Παραγωγή ultrapure water για φαρμακευτική ή ηλεκτρονική βιομηχανία

Απομάκρυνση νιτρικών, βαρέων μετάλλων, φυτοφαρμάκων κ.ά.

► Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis)

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια ηλεκτροκινητική μεμβρανική διεργασία, κατά την οποία τα διαλυμένα ιόντα μεταφέρονται από διάλυμα χαμηλής συγκέντρωσης σε διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. Το σύστημα αποτελείται από εναλλασσόμενες μεμβράνες κατιοντοεκλεκτικές και ανιοντοεκλεκτικές, τοποθετημένες μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (άνοδος – κάθοδος).

Το νερό ρέει παράλληλα προς τις μεμβράνες, ενώ τα ιόντα κινούνται κάθετα ως αποτέλεσμα του ηλεκτρικού δυναμικού που εφαρμόζεται. Οι ανιόντες κινούνται προς την άνοδο και οι κατιόντες προς την κάθοδο, διαμέσου των αντίστοιχων εκλεκτικών μεμβρανών. Έτσι, επιτυγχάνεται συγκέντρωση των ιόντων σε ορισμένα διαμερίσματα, ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν καθαρισμένα από ιόντα (diluate stream).

Η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιείται κυρίως σε:

- Αφαλάτωση υφάλμυρου νερού
- Αναγέννηση νερού σε βιομηχανικές διεργασίες
- Αφαίρεση συγκεκριμένων ιόντων, π.χ. φθοριδίων, νιτρικών, χλωριδίων

Πίνακας 8: Συγκριτικά χαρακτηριστικά

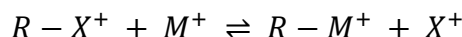
Παράμετρος	Αντίστροφη Όσμωση	Ηλεκτροδιάλυση
Μηχανισμός	Πίεση > Οσμωτική Πίεση	Ηλεκτρικό Ρεύμα
Κινούμενα συστατικά	Νερό	Ιόντα
Κατεύθυνση μεταφοράς	Μέσω της μεμβράνης	Κάθετα προς τη ροή
Ικανότητα απομάκρυνσης Υψηλή για άλατα, οργανικά Επιλεκτική για ανόργανα ιόντα		
Τύπος μεμβρανών	Ημιπερατές (non-porous) (cation/anion)	Ιοντοεκλεκτικές
Ενεργειακό κόστος	Υψηλότερο (λόγω πίεσης)	Συνήθως χαμηλότερο

A.14. ΙΟΝΤΟΕΝΑΛΛΑΓΗ

Η **ιοντοεναλλαγή** αποτελεί μια **φυσικοχημική διεργασία** μεταφοράς ιόντων, κατά την οποία λαμβάνει χώρα **ανταλλαγή ιοντικών ειδών** μεταξύ μιας **αδιάλυτης στερεής φάσης** και ενός **υδατικού διαλύματος**. Πρόκειται για μια **αντιστρεπτή διαδικασία**, κατά την οποία τα **κινητά ιόντα** που είναι προσδεδεμένα στην επιφάνεια ή στη δομή του στερεού υλικού αντικαθίστανται **στοιχειομετρικά από ιόντα ίδιου φορτίου** που βρίσκονται στο υγρό διάλυμα.

Το **στερεό μέσο** που συμμετέχει στη διεργασία είναι συνήθως μια **ιοντοανταλλακτική ρητίνη** ή φυσικό **ορυκτό υλικό** (όπως ο ζεόλιθος), το οποίο διαθέτει **φορτισμένες λειτουργικές ομάδες** (ανιοντοεκλεκτικές ή κατιοντοεκλεκτικές) και ικανότητα **επιλεκτικής προσρόφησης ιόντων** από ηλεκτρολυτικά διαλύματα.

Η γενική αντίδραση μπορεί να απεικονιστεί ως εξής:



όπου:

- **R-X⁺** είναι το αρχικό ιόν προσδεδεμένο στο ρητινώδες υλικό,
- **M⁺** είναι το ιόν από το διάλυμα,
- και η αντίδραση είναι **αντιστρεπτή** και **ισορροπιακή**, με δυνατότητα **αναγέννησης** του μέσου.

Καθώς τα ιόντα **μεταβαίνουν από μία φάση (διάλυμα) σε άλλη (στερεή ή το αντίστροφο)**, η ιοντοεναλλαγή εμπίπτει συχνά στην κατηγορία των **προσροφητικών διεργασιών**, σύμφωνα με την ταξινόμηση του **Weber (1972)**, παρά το γεγονός ότι διαφέρει από την απλή φυσική προσρόφηση λόγω της **χημικής φύσης της αλληλεπίδρασης** και της **ανταλλακτικής μηχανικής**.

Βασικά Χαρακτηριστικά της Ιοντοεναλλαγής:

- **Εκλεκτικότητα:** Η διεργασία παρουσιάζει **συγκεκριμένη εκλεκτικότητα** ως προς ορισμένα ιόντα, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος, το φορτίο, τη συγκέντρωση και την ενυδάτωσή τους.
- **Αναστρεψιμότητα:** Το μέσο ιοντοεναλλαγής **μπορεί να αναγεννηθεί** με χρήση κατάλληλου διαλύματος (π.χ. NaCl ή HCl), επιτρέποντας πολλαπλούς κύκλους λειτουργίας.
- **Στερεο-υγρή μεταφορά:** Τα εναλλασσόμενα ιόντα υπόκεινται σε **μεταφορά φάσης**, περνώντας από την υγρή στην στερεά φάση ή το αντίστροφο.
- **Χρήσεις:** Εφαρμόζεται ευρέως σε **αποσκλήρυνση νερού, αποϊονισμό, απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, καθαρισμό βιομηχανικών αποβλήτων και παραγωγή ultrapure water**.

Η ιοντοεναλλαγή διαδραματίζει **κεντρικό ρόλο** στη σύγχρονη τεχνολογία επεξεργασίας νερού και προσφέρει **υψηλό βαθμό εξειδίκευσης, επαναχρησιμοποίηση του μέσου και προβλεψιμότητα στην απόδοση**, καθιστώντας την ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές σε **βιομηχανίες, σταθμούς παραγωγής ενέργειας και μονάδες ύδρευσης υψηλών προδιαγραφών**.

A.15. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ ΜΕ ΑΕΡΑ

Το **νερό**, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί έναν **εξαιρετικά αποτελεσματικό φυσικό διαλύτη**, ικανό να διαλύει και να μεταφέρει τόσο **ανόργανες** όσο και **οργανικές ενώσεις**. Η ικανότητά του αυτή αποδίδεται στη **μοριακή πολικότητά του**, στη **δομή υδρογόνου** και στην **υψηλή διηλεκτρική του σταθερά**, χαρακτηριστικά που του επιτρέπουν να αλληλεπιδρά με ευρύ φάσμα χημικών ειδών.

Καθ' όλη τη διάρκεια του **υδρολογικού κύκλου**, καθώς το νερό διασχίζει την **ατμόσφαιρα, το έδαφος και τους υδάτινους αποδέκτες**, έρχεται σε επαφή με διάφορα περιβαλλοντικά μέσα, με αποτέλεσμα να **προσλαμβάνει διαλυμένες ουσίες** από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές.

Ανάμεσα στα συστατικά που **συχνότερα απαντώνται** στο φυσικό νερό συγκαταλέγονται:

Αέρια Συστατικά:

Πολλά αέρια περιβάλλοντος αέρα διαλύονται στο νερό, με συγκέντρωση που εξαρτάται από τη μερική πίεση, τη θερμοκρασία και τη χημική τους αντιδραστικότητα. Ενδεικτικά παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- **Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2):** Συμμετέχει στη ρύθμιση του pH μέσω σχηματισμού ανθρακικών και διττανθρακικών ιόντων.
- **Οξυγόνο (O_2):** Απαραίτητο για τη διατήρηση αερόβιων βιολογικών διεργασιών, αλλά ευάλωτο σε κατανάλωση από οργανική ρύπανση.
- **Διοξείδιο του θείου (SO_2) και υδρόθειο (H_2S):** Παρόντα κυρίως σε ρυπασμένα ή αναερόβια ύδατα, με σημαντική επίδραση στην ποιότητα και οσμή.
- **Αμμωνία (NH_3):** Προερχόμενη κυρίως από βιολογικές διασπάσεις, έχει ιδιαίτερη σημασία στην απολύμανση και τοξικότητα.

Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs):

Το νερό μπορεί επίσης να περιέχει πτητικές οργανικές ενώσεις, που προέρχονται είτε από βιολογικές διεργασίες, είτε από βιομηχανικές απορρίψεις και χημικά κατάλοιπα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα:

- **Χλωροφόρμιο (CHCl_3):** Παραπροϊόν της χλωρίωσης, με καρκινογόνο υπόβαθρο.
- **Τριχλωροαιθυλένιο (TCE):** Χρησιμοποιείται ως διαλύτης, συχνός ρυπαντής υπόγειων υδάτων.
- Άλλοι αλόγονο-οργανικοί ρυπαντές, που συχνά ανιχνεύονται σε ίχνη αλλά με σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Η πολυπλοκότητα της διαλυμένης φάσης του νερού καθιστά αναγκαία την κατάλληλη επιλογή επεξεργασίας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης. Η κατανόηση των τύπων και της προέλευσης των διαλυμένων ουσιών είναι κρίσιμη για:

- Την εκτίμηση της ποιότητας του νερού,
- Τον καθορισμό της κατάλληλης μεθόδου καθαρισμού (π.χ. αερισμός, προσρόφιση, μεμβρανικές διεργασίες),
- Την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος.

A.16. ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΙΣ

Οι επικαθήσεις (ή εναποθέσεις) ορίζονται ως η συσσώρευση ανεπιθύμητων υλικών σε οποιαδήποτε επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με ρευστό μέσο, ανεξαρτήτως του αν υπάρχει ή όχι διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού και επιφάνειας. Πρόκειται για φαινόμενο ευρύτατα διαδεδομένο σε πλήθος βιομηχανικών, φυσιολογικών και καθημερινών διεργασιών, το οποίο μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην αποδοτικότητα, ασφάλεια και διάρκεια ζωής των συστημάτων.

Παραδείγματα επικαθήσεων περιλαμβάνουν:

- **Αποθέσεις αλάτων (λέβητολιθος)** σε λέβητες και εναλλάκτες θερμότητας, λόγω κατακρήμνισης διαλυμένων ιόντων (π.χ. Ca^{2+} , Mg^{2+}) από θερμαινόμενο νερό.
- **Αρτηριοσκλήρωση**, δηλαδή συσσώρευση λιπιδίων και ασβεστίου στα τοιχώματα των αιμοφόρων αγγείων, με σοβαρές φυσιολογικές επιπτώσεις.
- **Φραγή μεμβρανών** σε μονάδες αφαλάτωσης ή υπερδιήθησης, μέσω μηχανικής παγίδευσης, προσρόφησης ή μικροβιακής ανάπτυξης.
- **Εναποθέσεις σε εξοπλισμό παραγωγής πετρελαίου**, από οργανικές ενώσεις (παραφίνες, ασφάλτοι) ή ανόργανες κλίμακες (scale).
- **Επικαθήσεις σε μονάδες παραγωγής και επεξεργασίας τροφίμων**, οι οποίες μειώνουν τη θερμική αγωγιμότητα και ευνοούν τη μικροβιακή επιμόλυνση.

Μορφές και Κατηγορίες Επικαθήσεων

Αν και το κύριο ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις **στερεές επικαθήσεις από υγρά ρευστά**, στην πράξη συναντώνται **διάφορες μορφές** εναποθέσεων, ανάλογα με τη **φάση του ρευστού** και τη **φυσικοχημική φύση των συστατικών** που καθιζάνουν.

Επικαθήσεις από υγρά:

- **Στερεές επικαθήσεις από διαλύματα** (π.χ. άλατα, οξείδια)
- **Βιολογικές επικαθήσεις** (biofouling), από ανάπτυξη μικροοργανισμών και σχηματισμό biofilm
- **Αποθέσεις οργανικών ενώσεων** (λιπαρές ουσίες, πολυμερή)

Επικαθήσεις από αέρια:

- **Υγρές επικαθήσεις**, όπως η **συμπύκνωση ατμών** σε ψυχρές επιφάνειες (π.χ. καπνοδόχοι, εναλλάκτες).
- **Στερεές επικαθήσεις από αέρια φάση**, οι οποίες αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε **υψηλές θερμοκρασίες**, όπου **πηκτικά συστατικά** (όπως άλατα μετάλλων ή αιθάλη) εναποτίθενται σε ψυχρότερες επιφάνειες.

Το τελευταίο είδος επικαθήσεων έχει αποκτήσει **ιδιαίτερη τεχνολογική σημασία** τα τελευταία χρόνια, στο πλαίσιο της **ανάκτησης θερμότητας από αέρια καύσης** σε μονάδες **καύσης απορριμμάτων, λιγνίτη, πετρελαίου (μαζούτ) και βιομάζας**. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι επικαθήσεις επηρεάζουν καθοριστικά την **απόδοση των εναλλακτών θερμότητας** και τη **συντήρηση των συστημάτων**, αυξάνοντας την **κατανάλωση καυσίμου** και μειώνοντας την **ενεργειακή αποδοτικότητα**.

Επιπτώσεις των Επικαθήσεων

Η παρουσία επικαθήσεων μπορεί να οδηγήσει σε:

- **Μείωση της θερμικής απόδοσης** συστημάτων (λόγω αυξημένης θερμικής αντίστασης)
- **Απόφραξη σωληνώσεων και καναλιών ροής**

- **Αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης και καθαρισμού**
- **Υγειονομικούς κινδύνους**, σε εφαρμογές επαφής με τρόφιμα ή πόσιμο νερό
- **Οικονομικές απώλειες**, λόγω ενεργειακών απωλειών, φθορών και μη προγραμματισμένων διακοπών λειτουργίας

Αντιμετώπιση και Πρόληψη

Η διαχείριση των επικαθήσεων απαιτεί κατάλληλο σχεδιασμό συστημάτων και την επιλογή προληπτικών ή κατασταλτικών μέτρων, όπως:

- Χρήση **αντικαθιστικών χημικών** (π.χ. αντιπηκτικά, αναστολείς καθίζησης)
- **Προεπεξεργασία νερού** (αφαίρεση ιόντων Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2)
- **Καθαρισμός μεμονωμένων μονάδων** με μηχανικά ή χημικά μέσα
- **Βελτιστοποίηση θερμοκρασιών λειτουργίας** και υδραυλικού σχεδιασμού

A.17. ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η διάβρωση ορίζεται ως κάθε αυθόρμητη και ανεπιθύμητη αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων, η οποία είναι χημικής, ηλεκτροχημικής ή μηχανικής φύσης και οδηγεί σε απώλεια υλικού από το μέταλλο ή το κράμα. Πρόκειται για φαινόμενο εκτεταμένο στη βιομηχανία και στο περιβάλλον, με σημαντικές τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς προκαλεί υποβάθμιση της μηχανικής αντοχής, φθορά εξοπλισμού, ρύπανση και κινδύνους ασφάλειας.

Η διάβρωση μπορεί να λάβει χώρα:

- Χημικά, μέσω άμεσης αντίδρασης του μετάλλου με οξειδωτικά μέσα, όπως το οξυγόνο, το νερό, ή όξινες/αλκαλικές ουσίες.
- Ηλεκτροχημικά, μέσω ανόδου και καθόδου ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του μετάλλου όταν αυτό έρχεται σε επαφή με αγωγίμο διάλυμα, σχηματίζοντας τοπικά γαλβανικά στοιχεία.
- Μηχανικά, μέσω διάβρωσης υπό τάση, κόπωσης ή τριβής, όπου η μηχανική καταπόνηση επιταχύνει τη φθορά του υλικού.

Τα παραπροϊόντα των αντιδράσεων διάβρωσης, δηλαδή οι χημικές ενώσεις που σχηματίζονται από την απώλεια υλικού της μεταλλικής επιφάνειας, ονομάζονται προϊόντα διάβρωσης. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Οξείδια (π.χ. Fe_2O_3 , Al_2O_3)
- Υδροξείδια (π.χ. $\text{Fe}(\text{OH})_3$)
- Άλατα (π.χ. θειικά, χλωρίδια, ανθρακικά)
- Σύνθετες ενώσεις, που εξαρτώνται από το περιβάλλον και τη χημική σύσταση του μετάλλου

Ενδεικτικά παραδείγματα προϊόντων διάβρωσης:

Μέταλλο	Περιβάλλον	Τυπικά προϊόντα διάβρωσης
Σίδηρος	Οξυγόνο + Νερό	$\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (σκουριά)
Χαλκός	Υγρή ατμόσφαιρα	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ (πατίνα)
Αλουμίνιο	Οξυγόνο	Al_2O_3 (προστατευτικό στρώμα)
Ψευδάργυρος	Όξινα διαλύματα	$\text{Zn}(\text{OH})_2$, ZnSO_4

Η κατανόηση των μηχανισμών διάβρωσης και των προϊόντων που παράγονται είναι καθοριστική για:

- Τον σχεδιασμό ανθεκτικών υλικών
- Την επιλογή κατάλληλης προστασίας (π.χ. επιστρώσεις, καθοδική προστασία)
- Την πρόληψη βλαβών σε κρίσιμες εφαρμογές (αγωγοί, λέβητες, συστήματα θέρμανσης)

A.18. ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ, ΔΙΑΤΡΟΦΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΑ

Η επιβίωση, ανάπτυξη και φυσιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού προϋποθέτει τη συνεχή πρόσληψη θρεπτικών συστατικών από το εξωτερικό περιβάλλον, κυρίως μέσω της διατροφής. Τα θρεπτικά στοιχεία που λαμβάνονται με την τροφή είναι απαραίτητα όχι μόνο για την κυτταρική και ιστική ανανέωση, αλλά και για τη ρύθμιση του μεταβολισμού και την παραγωγή ενέργειας που απαιτείται για όλες τις βιολογικές διεργασίες.

Η διατροφή πρέπει να καλύπτει τις εξής βασικές κατηγορίες ουσιών:

- Δομικά συστατικά, όπως τα αμινοξέα, που είναι απαραίτητα για τη σύνθεση πρωτεϊνών και τη διατήρηση της δομής και λειτουργίας των κυττάρων.
- Ρυθμιστικά συστατικά, όπως οι βιταμίνες και τα ανόργανα άλατα, που συμμετέχουν ως συνένζυμα ή συμπαράγοντες σε κρίσιμες μεταβολικές αντιδράσεις.
- Ενεργειακά υποστρώματα, κυρίως γλυκίδια, λιπίδια και πρωτεΐνες, που αποδίδουν χημική ενέργεια απαραίτητη για τις βιολογικές διεργασίες, τη θερμορρύθμιση και τη φυσική δραστηριότητα.

Ωστόσο, ανάμεσα σε όλα τα συστατικά της διατροφής, το νερό παραμένει το πιο απαραίτητο και αδιαπραγμάτευτο θρεπτικό στοιχείο. Όπως εύστοχα ανέφερε ο Αριστοτέλης: «Ζωτικότερον γης, ύδωρ», δηλώνοντας έτσι τη θεμελιώδη σημασία του νερού για τη ζωή.

Το νερό:

- Συμμετέχει ως διαλύτης σε όλες σχεδόν τις βιοχημικές αντιδράσεις,
- Εξασφαλίζει την οσμωτική ισορροπία και τη μεταφορά ουσιών μέσω των βιολογικών μεμβρανών,
- Λειτουργεί ως μέσο θερμορρύθμισης μέσω της εφίδρωσης και της κυκλοφορίας του αίματος,

- Αποτελεί το βασικό συστατικό του κυκλοφορικού συστήματος, το οποίο μεταφέρει θρεπτικά συστατικά, ορμόνες και απορρίμματα σε όλο το σώμα.

Το ανθρώπινο σώμα, λοιπόν, λειτουργεί μέσα από ένα πολύπλοκο και δυναμικό βιολογικό δίκτυο, με τον αιματολογικό και λεμφικό χείμαρρο να λειτουργεί ως φορέας μεταφοράς ουσιών, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη κατανομή των απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων και τη διατήρηση της ομοιόστασης.

Β. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΣΙΑΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΝΟΣ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΜΑΘΗΤΕΣ/ΤΡΙΕΣ ΔΗΜΟΤΙΚΟΥ

Β.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με βάση τη σύντομη αλλά περιεκτική περιγραφή για το νερό, την επεξεργασία του πόσιμου νερού και των ποιοτικών χαρακτηριστικών του που έγινε στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας, σχεδιάστηκε ένα πιλοτικό μάθημα για μαθητές επιπέδου των τελευταίων τάξεων δημοτικού σχολείου. Το πιλοτικό μάθημα περιλαμβάνει μια παρουσίαση και διεξαγωγή πειραμάτων για την επεξεργασία του πόσιμου νερού με στόχο την απόκτηση γνώσης με βιωματικό τρόπο.

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να αξιολογήσει εμπειρικά την αποτελεσματικότητα του πιλοτικού μαθήματος προσφέροντας ουσιαστικά συμπεράσματα για την παιδαγωγική αξιοποίησή του. Ειδικότερα, διερευνάται σε ποιο βαθμό η εμπλοκή των μαθητών με δραστηριότητες πειραματικού χαρακτήρα ενισχύει την κατανόησή τους για κρίσιμες περιβαλλοντικές έννοιες.

Η αξιολόγηση έγινε στη βάση μέτρησης πριν και μετά (Pre/Post tests) των γνώσεων μαθητών/τριών για το πόσιμο νερό. Στην έρευνα συμμετείχαν 15 μαθητές/τριες της ΣΤ΄ τάξης του 17ου Δημοτικού Σχολείου Λάρισας, οι οποίοι αποτέλεσαν ένα ομοιογενές δείγμα αναφορικά με το ηλικιακό και εκπαιδευτικό τους προφίλ.

Η έρευνα υλοποιήθηκε τον Δεκέμβριο του 2023.

Β.2. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν να εκτιμηθεί κατά πόσο το πιλοτικό μάθημα είχε επίδραση και βελτίωσε τα μαθησιακά αποτελέσματα των μαθητών/τριών δημοτικού σχολείου.

Τα ερευνητικά ερωτήματα ήταν:

1. Υπάρχει, στατιστικά σημαντική, βελτίωση στη γνωστική επίδοση;
2. Είναι η βελτίωση της επίδοσης καθολική;

Β.3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Β.3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η εκπαίδευση των μαθητών γύρω από τη σημασία του νερού αποτελεί θεμέλιο για τη διαμόρφωση ενεργών και υπεύθυνων πολιτών (Alsululi, 2021). Μέσα από την κατανόηση των πολλαπλών ρόλων που επιτελεί το νερό στη φύση, στην ανθρώπινη υγεία και στο κοινωνικό σύνολο, οι μαθητές αποκτούν την απαραίτητη γνώση ώστε να συμμετέχουν

συνειδητά στη διατήρηση και προστασία αυτού του ζωτικού πόρου, συμβάλλοντας στη διασφάλιση ενός βιώσιμου μέλλοντος. Η εξοικείωση με κρίσιμα προβλήματα, όπως η λειψυδρία, η ρύπανση των υδάτων και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, καθώς και η κατανόηση της αξίας του καθαρού και ασφαλούς νερού (Μήτρακας, 2001· Νταρακάς, 2010· Pakharuddin, 2021), κινητοποιεί τους μαθητές να αναλάβουν δράσεις για την υπεύθυνη διαχείριση των υδατικών πόρων. Οι επόμενες γενιές θα κληθούν να διαχειριστούν αυτά τα ζητήματα σε ακόμη πιο πιεστικό πλαίσιο, καθώς η αύξηση του πληθυσμού και η κλιματική κρίση εντείνουν τις ανάγκες.

Η εκπαίδευση για το νερό ενισχύει τις γνώσεις των μαθητών στις φυσικές επιστήμες, καθώς μέσω πειραμάτων και βιωματικών δραστηριοτήτων εξοικειώνονται με βασικές έννοιες της χημείας, της φυσικής και της βιολογίας. Η κατανόηση της αξίας του νερού δεν περιορίζεται μόνο σε φυσιολογικές ή περιβαλλοντικές πτυχές, αλλά επεκτείνεται και στον κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο που έχει η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων.

Για να είναι αποτελεσματική, η διδακτική διαδικασία πρέπει να αξιοποιεί μεθόδους που προωθούν την κατανόηση, τη συμμετοχή και την ενεργό δράση των μαθητών. Η πειραματική διδασκαλία αποτελεί ένα εργαλείο που καθιστά τη μάθηση πιο ενδιαφέρουσα και ευχάριστη (Soobrian, 2023). Μέσα από την πρακτική εφαρμογή, οι μαθητές έχουν τη δυνατότητα να δουν στην πράξη θεωρητικές έννοιες που συναντούν στα βιβλία, γεγονός που τις καθιστά πιο κατανοητές και λιγότερο αφηρημένες. Η ενεργή συμμετοχή οδηγεί σε μεγαλύτερο ενδιαφέρον και συμβάλλει σε μια πλούσια μαθησιακή εμπειρία, η οποία ενισχύει γνώσεις και δεξιότητες.

Η διεξαγωγή πειραμάτων συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της κριτικής σκέψης, της ικανότητας επίλυσης προβλημάτων και της εξοικείωσης με την επιστημονική μεθοδολογία, ενώ παράλληλα ενισχύει τη συνεργασία, τη δημιουργικότητα και τη σύνδεση της μάθησης με την καθημερινότητα (Anasse, 2019). Οι μαθητές τείνουν να θυμούνται πιο εύκολα όσα έχουν βιώσει πρακτικά (Ueno, 2024), καθώς η επαναλαμβανόμενη ενασχόληση εδραιώνει τις πληροφορίες στη μνήμη τους. Έτσι, η πειραματική διδασκαλία συμβάλλει καθοριστικά στη βαθύτερη κατανόηση αφηρημένων εννοιών και στη δυνατότητα εφαρμογής θεωρητικών γνώσεων σε πραγματικές καταστάσεις.

B.3.2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

Το πιλοτικό μάθημα περιλάμβανε θεωρητική παρουσίαση βασισμένη στο περιεχόμενο του πρώτου μέρους της παρούσης εργασίας και τη διεξαγωγή πειραμάτων στο Εργαστήριο Ποιότητας Νερού & Περιβάλλοντος στο Τμήμα Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η μεθοδολογική διάρθρωση της έρευνας εντάσσεται στη λογική της πειραματικής διδασκαλίας με διαμορφωτική αξιολόγηση και εξυπηρετεί τη σταδιακή οικοδόμηση γνώσης. Μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων αναμένεται να αναδειχθεί η συμβολή της βιωματικής προσέγγισης στη βελτίωση της περιβαλλοντικής εκπαίδευσης των μαθητών/τριών.

Ειδικότερα, το πιλοτικό μάθημα περιλαμβάνει:

1. **Παρουσίαση** που επικεντρώνεται στις ιδιότητες του νερού, στις μεθόδους επεξεργασίας του καθώς και στις χημικές και μικροβιολογικές του αναλύσεις. Η παρουσίαση γίνεται με χρήση πολυμέσων και συζήτηση με τους μαθητές/τριες.
2. **Πειραματικές δραστηριότητες** επίδειξης, στις οποίες συμμετείχαν όλοι οι μαθητές/τριες. Οι πειραματισμοί πραγματοποιήθηκαν με στόχο την κατανόηση κρίσιμων εννοιών που σχετίζονται με την ποιότητα του νερού. Ειδικότερα, περιλαμβάνει:
 - a. **Έλεγχος υπολειμματικού χλωρίου στο νερό.**
Περιλαμβάνει ποσοτικό προσδιορισμός του υπολειμματικού χλωρίου με τη χρήση χρωματομετρικής μεθόδου. Το πείραμα υλοποιήθηκε με φασματοφωτόμετρο τύπου Shimadzu και βασίστηκε στην ανάπτυξη ροζ απόχρωσης, η ένταση της οποίας συγκρίθηκε με πρότυπη καμπύλη για την εξαγωγή ακριβών μετρήσεων (βλ. Παπαϊωάννου, 2007).
 - b. **Μικροσκοπική παρατήρηση βακτηρίων στο νερό.**
Οι μαθητές/τριες παρακολούθησαν την εναπόθεση βακτηρίων σε αντικειμενοφόρο πλάκα, την οποία κάλυψαν με καλυπτρίδα. Ακολούθησε παρατήρηση μέσω μικροσκοπίου, με χρήση κατάλληλου προσοφθάλμιου φακού, για την αναγνώριση μικροοργανισμών (βλ. Παπαϊωάννου, 2006).

Ο σχεδιασμός προβλέπει υλοποίηση σε τρεις συνεδρίες εντός ενός χρονικού πλαισίου δύο εβδομάδων. Οι δραστηριότητες σχεδιάστηκαν με έμφαση στην ενεργό συμμετοχή των μαθητών/τριών και την καλλιέργεια επιστημονικής σκέψης.

B.4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η έρευνα σχεδιάστηκε ως μια pre-post διαδικασία με ομάδα παρέμβασης. Συγκεκριμένα, η διαδικασία υλοποιήθηκε σε τρία διακριτά στάδια (φάσεις), τα οποία δομήθηκαν με στόχο την αξιολόγηση, ενίσχυση και τελική αποτίμηση των γνώσεων των μαθητών/τριών σχετικά με τις χημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους του νερού.

Φάση Α: Η πρώτη φάση περιλάμβανε την προ-αξιολόγηση των μαθητών/τριών μέσω ερωτηματολογίου, το οποίο περιείχε 14 ερωτήσεις κλειστού τύπου. Η συμπλήρωση του πραγματοποιήθηκε στο σχολικό τους περιβάλλον, σε οικείο και ασφαλές πλαίσιο. Για την αποφυγή προκατάληψης στα αποτελέσματα, διασφαλίστηκε ότι οι μαθητές δεν είχαν λάβει οργανωμένη διδασκαλία σχετική με το αντικείμενο πριν στη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους. Η συλλογή και ανάλυση των απαντήσεων επέτρεψε την αποτύπωση του αρχικού γνωστικού επιπέδου του δείγματος ως προς τις βασικές έννοιες που σχετίζονται με το νερό. Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων παρείχε ποσοτικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς για τις επόμενες φάσεις.

Φάση Β: Η δεύτερη φάση περιελάμβανε διδασκαλία με ενεργητικές και βιωματικές μεθόδους μαθητές και υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ποιότητας Νερού & Περιβάλλοντος στο Τμήμα

Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Συγκεκριμένα, οι μαθητές/τριες παρακολούθησαν παρουσίαση μέσω βιντεοπροβολέα σχετικά με:

- Τα χημικά στοιχεία και τις ενώσεις του νερού
- Τις φυσικές ιδιότητες του νερού ως πολύτιμου φυσικού πόρου
- Τις διαδικασίες επεξεργασίας επιφανειακών υδάτων με σκοπό την παραγωγή πόσιμου νερού

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διαδικασία της χλωρίωσης, ως κρίσιμο στάδιο εξουδετέρωσης παθογόνων μικροοργανισμών. Η θεωρητική διδασκαλία συνοδεύτηκε από διαλογική συζήτηση και ερωτήσεις διασαφήνισης που ενίσχυσαν τη συμμετοχή και την κριτική σκέψη των μαθητών/τριών.

Στη συνέχεια, συμμετείχαν στη διεξαγωγή περαμάτων, τα οποία περιλάμβαναν:

- Προσδιορισμό υπολειμματικού χλωρίου μέσω χρωματομετρικής ανάλυσης
- Παρατήρηση μικροοργανισμών με χρήση πέντε εργαστηριακών μικροσκοπίων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τηρώντας αυστηρά τα αντίστοιχα πρωτόκολλα για τις χημικές και μικροβιολογικές αναλύσεις του νερού, ενισχύοντας τη σύνδεση θεωρίας και πράξης.

Η συνολική διάρκεια της διδασκαλίας ήταν τρεις ώρες, χρόνος επαρκής για την ολοκλήρωση των δραστηριοτήτων χωρίς να προκληθεί κόπωση στους μαθητές.

Φάση Γ: Στο τρίτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε τελική αξιολόγηση των μαθητών/τριών με τη χρήση του ίδιου ερωτηματολογίου που εφαρμόστηκε στην φάση Α. Η διαδικασία αυτή στόχευε στη συγκριτική αξιολόγηση των γνώσεων πριν και μετά τη διδασκαλία, ώστε να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της παρέμβασης.

B.4.2. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Για την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της εκπαιδευτικής παρέμβασης αξιοποιήθηκαν:

Δομημένα ερωτηματολόγια προ και μετά την υλοποίηση των μαθημάτων, με σκοπό τη διερεύνηση της προόδου των μαθητών/τριών ως προς τις γνώσεις τους σχετικά με το αντικείμενο.

Συστηματική παρατήρηση και καταγραφή από τους εκπαιδευτικούς κατά τη διάρκεια της διδακτικής διαδικασίας, με στόχο την αποτύπωση της συμμετοχικότητας και της κατανόησης των μαθητών/τριών.

B.5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

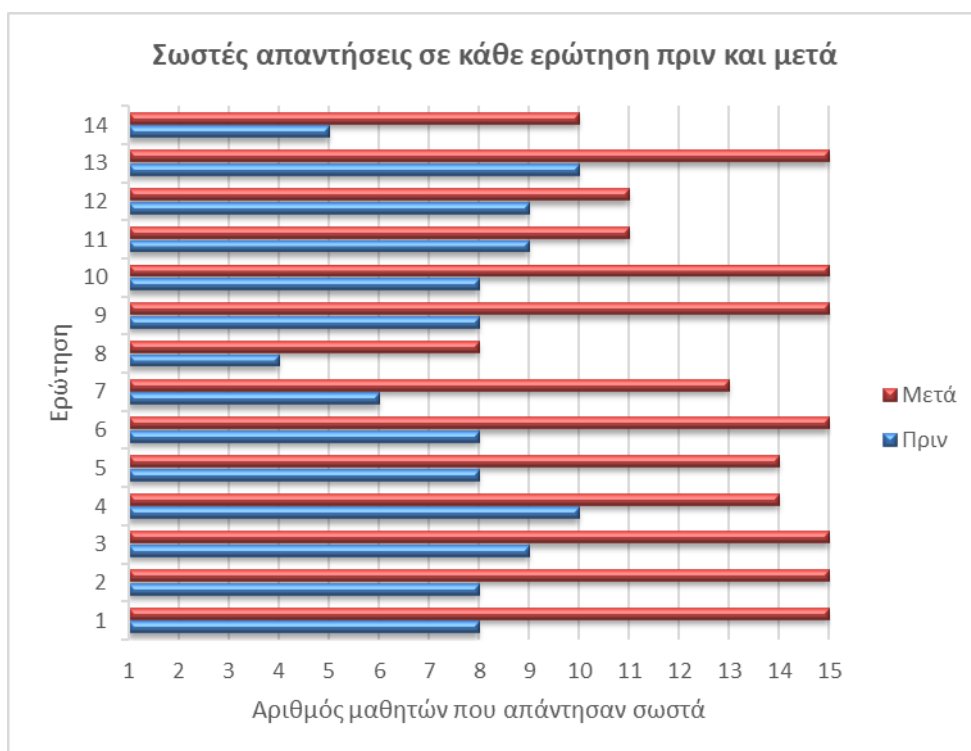
Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της διδακτικής παρέμβασης πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων των προ- και μετα-ερωτηματολογίων, με στόχο την καταγραφή ενδεχόμενης βελτίωσης του γνωστικού επιπέδου των μαθητών/τριών.

Η στατιστική επεξεργασία των συλλεχθέντων δεδομένων διενεργήθηκε μέσω του ευρέως διαδεδομένου λογισμικού Microsoft Excel, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την καταχώριση, οργάνωση και ανάλυση των απαντήσεων.

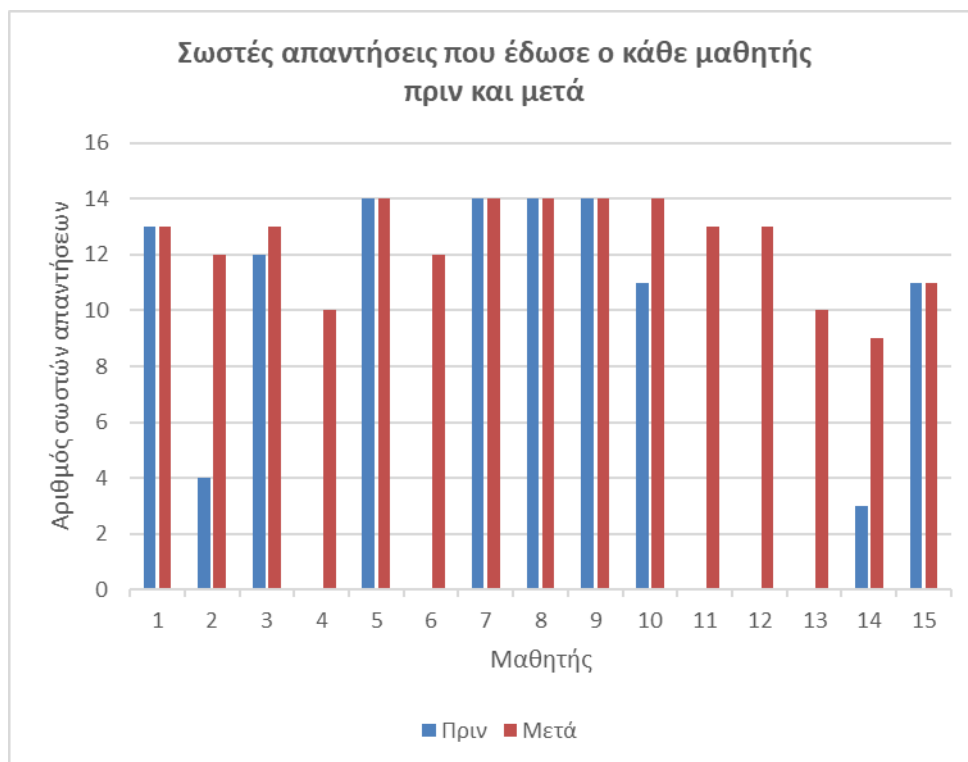
Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψαν συγκεντρωτικά ποσοτικά ευρήματα, τα οποία αντικατοπτρίζουν τη μαθησιακή πρόοδο και την ενίσχυση της κατανόησης των εκπαιδευόμενων στο πεδίο μελέτης.

Στο Σχήμα 8 φαίνεται η σημαντική αύξηση των σωστών απαντήσεων για κάθε ερώτηση μετά την παρακολούθηση του πιλοτικού μαθήματος. Στο Σχήμα 9 απεικονίζεται η βελτίωση της επίδοσης των μαθητών/τριών μετά την παρακολούθηση του πιλοτικού μαθήματος.

Σχήμα 8: Συγκριτική επίδοση ανά ερώτηση



Σχήμα 9: Συγκριτική επίδοση μαθητών



Στον Πίνακα 9 δίνονται στατιστικά στοιχεία για τα ποσοστά επιτυχίας των μαθητών/τριών για πριν και μετά την υλοποίηση του πιλοτικού μαθήματος. Από αυτά προκύπτει ότι υπήρξε σημαντική βελτίωση των επιδόσεων των μαθητών/τριών μετά την υλοποίηση της διδακτικής παρέμβασης. Συγκεκριμένα, παρατηρείται αύξηση του μέσου ποσοστού επιτυχίας από 52,38% πριν τη διδασκαλία σε 88,57% μετά από αυτήν.

Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία για τα ποσοστά επιτυχίας (%)

Συγκεντρωτικά στατιστικά στοιχεία για τα ποσοστά επιτυχίας (%)								
	Μέγεθος δείγματος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	1 ^ο Τεταρτημόριο (Q1)	Διάμεσος	3 ^ο Τεταρτημόριο (Q3)	Μέγιστη τιμή
Πριν	15	52,38	45,07	0	0	78,57	100	100
Μετά	15	88,57	12,01	64,29	78,57	92,86	100	100

Ιδιαίτερης σημασίας είναι και η μεταβολή της τυπικής απόκλισης, η οποία μειώθηκε από 45,07 σε 12,01. Η μείωση αυτή υποδηλώνει αύξηση της ομοιογένειας των μαθησιακών αποτελεσμάτων, γεγονός που αποδεικνύει πως η διδασκαλία συνέβαλε όχι μόνο στην ποιοτική ενίσχυση της γνώσης αλλά και στην εξομάλυνση των διαφορών μεταξύ των μαθητών/τριών.

Για να διερευνηθεί κατά πόσο η παρατηρούμενη διαφορά μπορεί να γενικευτεί στον ευρύτερο πληθυσμό, πραγματοποιήθηκε έλεγχος υποθέσεων με τη μέθοδο των ζευγαρωμένων παρατηρήσεων (paired samples t-test). Η επιλογή αυτή κρίθηκε κατάλληλη, δεδομένου ότι το ίδιο δείγμα μαθητών αξιολογήθηκε πριν και μετά τη διδακτική παρέμβαση.

Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 5\%$ με τις ακόλουθες υποθέσεις:

Μηδενική υπόθεση: Δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων ποσοστών επιτυχίας πριν και μετά τη διδασκαλία

$$H_0: \mu_x - \mu_y = 0$$

Εναλλακτική υπόθεση: Υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων ποσοστών επιτυχίας

$$H_1: \mu_x - \mu_y \neq 0$$

Όπου:

μ_x είναι η μέση τιμή του ποσοστού επιτυχίας πριν τη διδακτική παρέμβαση

μ_y είναι η μέση τιμή του ποσοστού επιτυχίας μετά τη διδακτική παρέμβαση

Στον Πίνακα 10 δίνονται τα ποσοστά επίδοσης πριν και μετά και οι διαφορές των. Η ανάλυση αυτών και η εξαγωγή βασικών στατιστικών στοιχείων παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 10: Ποσοστά επίδοσης πριν και μετά και οι διαφορές των

Αριθμός μαθητών που επιλέχθηκαν και ποσοστά επιτυχίας σωστών απαντήσεων															
Μαθητής	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ποσοστό επιτυχίας (%) πριν (X)	92,86	28,57	85,71	0	100	0	100	100	100	78,57	0	0	0	21,43	78,57
Ποσοστό επιτυχίας (%) μετά (Y)	92,86	85,71	92,86	71,43	100	85,71	100	100	100	100	92,86	92,86	71,43	64,29	78,57
Διαφορά	0	-57,1	-7,14	-71,4	0	-85,7	0	0	0	-21,4	-92,9	-92,9	-71,4	-42,9	0

Πίνακας 11: Βασικά στατιστικά στοιχεία ανάλυσης των διαφορών

Βασικά στατιστικά στοιχεία της ανάλυσης των διαφορών	
Mean	-36,2
Standard Error	9,943
Median	-21,4
Mode	0
Standard Deviation	38,51
Sample Variance	1483
Kurtosis	-1,72
Skewness	-0,39
Range	92,86
Minimum	-92,9
Maximum	0
Sum	-543
Count	15

Με βάση τα αποτελέσματα του ελέγχου υποθέσεων, η τιμή της στατιστικής συνάρτησης υπολογίστηκε ως $t = 3,64$, ενώ η κρίσιμη τιμή για 14 βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 5\%$ ήταν $t_{(14;0.025)} = 2,14$. Η περιοχή απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 ορίζεται ως $(-\infty, -2,14] \cup [2,14, +\infty)$. Δεδομένου ότι η υπολογισθείσα τιμή $t = 3,64$ ανήκει στην περιοχή απόρριψης, η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Αυτό σημαίνει ότι σε επίπεδο σημαντικότητας 5%, η μέση τιμή του ποσοστού επιτυχίας πριν από τη διδακτική παρέμβαση και μετά τη διδασκαλία διαφέρει σημαντικά.

B.6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο τρόπος παρακολούθησης πιλοτικής διδακτικής παρέμβασης ήταν η βιωματική συμμετοχή τους και η ενεργή δράση των μαθητών. Από την πρώτη διδασκαλία οι μαθητές έδειξαν τεράστιο ενδιαφέρον και συμμετείχαν ενεργά στην διαδικασία. Οι γνώσεις τους για το νερό έγιναν πιο σφαιρικές και ολοκληρωμένες στην ολοκλήρωση της διδασκαλίας.

Η στατιστική ανάλυση έγινε συγκρίνοντας τα ζεύγη των απαντήσεων των μαθητών πριν και μετά την πειραματική διδασκαλία, γεγονός που εξασφάλισε την μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (επίπεδο σημαντικότητας 5%). Από το Διάγραμμα 1 φαίνεται ότι καμία ερώτηση δεν απαντήθηκε σωστά από όλους τους μαθητές πριν την πειραματική διδασκαλία, ενώ μετά από αυτή, 7 ερωτήσεις απαντήθηκαν σωστά από όλους τους μαθητές. Από τον Πίνακα 1 παρατηρούμε ότι η μέση τιμή των σωστών απαντήσεων πριν την πειραματική διδασκαλία κυμάνθηκε στο 52,38%, ενώ μετά στο 88,57%. Επίσης η τυπική απόκλιση πριν ήταν 45,07% και μετά 12,01%. Αυτό σημαίνει πολύ μεγάλη ομοιογενοποίηση των γνώσεων των μαθητών μετά την πειραματική διδασκαλία. Επίσης η ελάχιστη επιτυχία των μαθητών πριν την πειραματική διαδικασία κυμάνθηκε στο μηδέν ενώ μετά στο 64,29. Τέλος, από το Διάγραμμα 1 προκύπτει ότι οι ερωτήσεις 1, 2, 6, 7, 9 και 10 που απαντήθηκαν σωστά από 6-8 μαθητές, μετά τη διδασκαλία κατανοήθηκαν περισσότερο και παρουσίασαν μεγάλα ποσοστά διαφορών στις σωστές απαντήσεις και απαντήθηκαν από το σύνολο των μαθητών.

B.7. ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Αξιοπιστία των συμπερασμάτων έγκειται στους περιορισμούς κάτω από τους οποίους διεξάχθηκε η έρευνα και στα στατιστικά εργαλεία και το επίπεδο σημαντικότητας που επιλέχθηκαν.

Ειδικότερα για του περιορισμούς θα πρέπει να τονιστεί το μικρό δείγμα που χρησιμοποιήθηκε, το γεγονός ότι αφορούσε μόνο μια τάξη και όχι μαθητές/τριες από πολλά διαφορετικά σχολεία με τυχαία επιλογή και φυσικά οι χρονικοί περιορισμοί και οι διαθέσιμοι πόροι που υπήρχαν για την διεξαγωγή της έρευνας στα πλαίσια εκπόνησης μιας διπλωματικής εργασίας.

B.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επεξεργασία και η στατιστική ανάλυση των δεδομένων του δείγματος, σε αντιστοιχία με τα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν, ανέδειξαν ότι:

1. Η διδακτική παρέμβαση είχε σαφή και στατιστικά τεκμηριωμένη βελτίωση στις μαθησιακές επιδόσεις των συμμετεχόντων/ουσών.
2. Η παρατηρούμενη βελτίωση στο ποσοστό επιτυχίας μετά την παρέμβαση, σε συνδυασμό με τη μείωση της διασποράς των αποτελεσμάτων, υποδηλώνει όχι μόνο ενίσχυση των γνώσεων, αλλά και ομοιογενοποίηση του γνωστικού επιπέδου μεταξύ των μαθητών/τριών.

Ειδικότερα, η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης πειραματικής διδακτικής παρέμβασης επιβεβαιώνεται από τη σημαντική αύξηση των επιδόσεων των μαθητών/τριών, με τη μέση τιμή των σωστών απαντήσεων να αγγίζει το 89% μετά την ολοκλήρωση του εκπαιδευτικού προγράμματος. Το εύρημα αυτό καταδεικνύει τη σαφή ενίσχυση των γνωστικών δεξιοτήτων που σχετίζονται με το υπό μελέτη αντικείμενο.

Επίσης, επιβεβαιώνεται η συγκέντρωση των επιδόσεων των μαθητών/τριών κοντά στο μέσο όρο (μείωση της τιμής της τυπικής απόκλισης) μετά την υλοποίηση του πιλοτικού μαθήματος, γεγονός το οποίο δηλώνει την καθολικότητα της επίδρασης στο σύνολο των μαθητών/τριών και την ομοιογενοποίηση.

Η έρευνα αναδεικνύει την παιδαγωγική αξία της ενεργούς μάθησης και ειδικότερα της πειραματικής διδασκαλίας ως στρατηγικής προσέγγισης για την κατανόηση σύνθετων εννοιών, όπως αυτές που αφορούν τις ιδιότητες και την ποιότητα του νερού. Η συμμετοχή των μαθητών σε βιωματικές δραστηριότητες συνέβαλε ουσιαστικά στην καλλιέργεια κριτικής σκέψης και επιστημονικής εγγραμματοσύνης.

Επιπλέον, επισημαίνεται η εκπαιδευτική σημασία της εισαγωγής χημικών και μικροβιολογικών αναλύσεων στην εκπαιδευτική διαδικασία. Μέσω της πρακτικής ενασχόλησης με πραγματικές μεθοδολογίες ανάλυσης νερού, οι μαθητές/τριες αντιλήφθηκαν τη σύνδεση της επιστήμης με την καθημερινή ζωή, ενισχύοντας παράλληλα την περιβαλλοντική τους ευαισθησία και υπευθυνότητα.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μιας μικρής κλίμακας έρευνα και η εξαγωγή συμπερασμάτων. Στο μέλλον, με βάση το περιεχόμενο του πρώτου μέρους και της εμπειρίας της που αποκτήθηκε από την διεξαγωγή της παρούσας έρευνας, θα μπορούσε να γίνει μια μεγαλύτερη έρευνα με τυχαίο δείγμα μαθητών/τριών από πολλά δημοτικά σχολεία της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Επίσης, από το υλικό του πρώτου μέρους θα μπορούσε να σχεδιαστεί ένα νέο μάθημα για άλλες κατηγορίες μαθητών/τριών ανωτέρου επιπέδου και να γίνει μια άλλη έρευνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α — PRE/POST TEST

Το ερωτηματολόγιο για μαθητές της ΣΤ΄ τάξης δημοτικού σχολείου.

1. Είναι σημαντικό το νερό για την υγεία μας;
Α. Πάρα πολύ Β. Καθόλου Γ. Λίγο
2. Τι είναι πόσιμο νερό;
Α. Το νερό που ποτίζουμε Β. Το καθαρό νερό που πίνουμε Γ. Το νερό της βροχής
3. Ποιες μορφές παίρνει το νερό;
Α. Υγρή Β. Υγρή & αέρια Γ. Υγρή & αέρια και στερεή
4. Το νερό που υπάρχει στη φύση μπορεί να καταναλωθεί απευθείας από τον άνθρωπο;
Α. Όχι Β. Ναι Γ. Μετά από επεξεργασία
5. Πιστεύετε ότι υπάρχουν άνθρωποι σε όλο τον κόσμο που πεθαίνουν από έλλειψη νερού κάθε χρόνο;
Α. Ναι - πάρα πολύ Β. Ναι - Λίγο Γ. Σχεδόν καθόλου
6. Που γίνεται η επεξεργασία του νερού;
Α. Σε εργοστάσια Β. Στην ΔΕΥΑΛ Γ. Στη ΔΕΗ
7. Πιστεύετε ότι ένα φίλτρο μπορεί να απομακρύνει τα αιωρούμενα σωματίδια από το νερό;
Α. Όχι Β. Ναι
8. Πιστεύετε ότι το νερό που πίνουμε από τη βρύση έχει μικρόβια;
Α. Ναι Β. Όχι
9. Μπορούμε να διακρίνουμε τα μικρόβια του νερού με γυμνό μάτι;
Α. Ναι Β. Όχι
10. Γνωρίζετε τι είναι το Χλώριο;
Α. Ναι Β. Όχι
11. Τι πιστεύετε ότι κάνει το Χλώριο στο νερό;
Α. Το θολώνει. Β. Το εξατμίζει. Γ. Σκοτώνει τα μικρόβια
12. Πιστεύετε ότι η χρήση του μικροσκοπίου είναι απαραίτητη για:
Α. Τη χημική ανάλυση του νερού Β. Τη μικροβιολογική ανάλυση του νερού
13. Ποιος είναι ο χημικός τύπος του νερού;
Α. H_2 Β. $NaOH$ Γ. H_2O
14. Όταν ένας επιστήμονας κάνει χημικές αναλύσεις στο νερό ελέγχει:
Α. Τα είδη των χημικών στοιχείων Β. Τα είδη και την ποσότητα των χημικών στοιχείων Γ. Τα είδη των μικροβίων

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β — ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ EXCEL

Πίνακας 12: 17ο ΔΣ Λάρισας, τάξη ΣΤ', συμμετοχή 15 μαθητές, Επίδοση Πριν (Pre Score)

ΕΡΩΤΗΣΗ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΑΘΗΤΩΝ ΠΡΙΝ														
	Σ: Σωστή απάντηση, Λ: Λάθος απάντηση														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Είναι σημαντικό το νερό για την υγεία μας	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ
Τι είναι το πόσιμο νερό	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ
Ποιες μορφές παίρνει το νερό	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Σ	Σ
Το νερό που υπάρχει στη φύση μπορεί να καταναλωθεί απευθείας από τον άνθρωπο	Σ	Σ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Σ	Σ
Πιστεύετε ότι υπάρχουν άνθρωποι σε όλο τον κόσμο που πεθαίνουν από έλλειψη νερού	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ
Που γίνεται η επεξεργασία νερού	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ
Πιστεύετε ότι ένα φίλτρο μπορεί να απομακρύνει τα αιωρούμενα σωματίδια από	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ
Πιστεύετε ότι το νερό που πίνουμε από τη βρύση έχει μικρόβια	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ
Μπορούμε να διακρίνουμε τα μικρόβια του νερού με γυμνό μάτι	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ
Γνωρίζετε τι είναι το χλώριο	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ
Τι πιστεύετε ότι κάνει το χλώριο στο νερό	Σ	Σ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ
Πιστεύετε ότι η χρήση του μικροσκοπίου είναι απαραίτητη για τη χημική ανάλυση του νερού	Σ	Σ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ
Ποιος είναι ο χημικός τύπος του νερού	Σ	Σ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Σ	Σ
Όταν ένας επιστήμονας κάνει χημικές αναλύσεις στο νερό ελέγχει	Σ	Λ	Λ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ

Πίνακας 13: 17ο ΔΣ Λάρισας, τάξη ΣΤ', συμμετοχή 15 μαθητές, Επίδοση Μετά (Post Score)

ΕΡΩΤΗΣΗ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΑΘΗΤΩΝ ΜΕΤΑ														
	Σ: Σωστή απάντηση, Λ: Λάθος απάντηση														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Είναι σημαντικό το νερό για την υγεία μας	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Τι είναι το πόσιμο νερό	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Ποιες μορφές παίρνει το νερό	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Το νερό που υπάρχει στη φύση μπορεί να καταναλωθεί απευθείας από τον άνθρωπο	Σ	Σ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Πιστεύετε ότι υπάρχουν άνθρωποι σε όλο τον κόσμο που πεθαίνουν από έλλειψη νερού	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Που γίνεται η επεξεργασία νερού	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Πιστεύετε ότι ένα φίλτρο μπορεί να απομακρύνει τα αιωρούμενα σωματίδια από	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ
Πιστεύετε ότι το νερό που πίνουμε από τη βρύση έχει μικρόβια	Λ	Λ	Λ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ
Μπορούμε να διακρίνουμε τα μικρόβια του νερού με γυμνό μάτι	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Γνωρίζετε τι είναι το χλώριο	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Τι πιστεύετε ότι κάνει το χλώριο στο νερό	Σ	Σ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Σ
Πιστεύετε ότι η χρήση του μικροσκοπίου είναι απαραίτητη για τη χημική ανάλυση του νερού	Σ	Σ	Σ	Λ	Σ	Λ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Σ
Ποιος είναι ο χημικός τύπος του νερού	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ
Όταν ένας επιστήμονας κάνει χημικές αναλύσεις στο νερό ελέγχει	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Alsaluli, A. (2021). Transferring UK experience of raising water awareness to the KSA. *Water Supply*, 21(2).
2. Anasse, H. et al. (2019). A comparative study of Augmented Reality SDKs to develop an educational application in chemical field. *Proceedings of the 2nd International Conference on Networking, Information Systems & Security*, Article No.: 53, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3320326.3320386>
3. Droste, R. L., & Gehr, R. (2018). *Theory and practice of water and wastewater treatment* (2nd ed.). Wiley.
4. EPA. (2023). *Water treatment process*. U.S. Environmental Protection Agency. Ανακτήθηκε από <https://www.epa.gov>
5. European Environment Agency. (n.d.). *Water topics for schools – Interactive tools*. Ανακτήθηκε από <https://www.eea.europa.eu>
6. Soobrian, B. et al. (2023). Toward a diverse next-generation energy workforce: Teaching Artificial Photosynthesis and Electrochemistry in Elementary Schools through Active Learning. *Journal of Chemical Education*, 100(7), 2686–2695. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00085>
7. Ueno, M. et al. (2024). Effectiveness of a continuous handwashing education program with multiple activities at a Japanese kindergarten school. *Health Promotion International*, 39(3).
8. UNESCO. (2020). *The United Nations world water development report: Water and climate change*. UNESCO Publishing.
9. Μήτρακας, Μ. (2001). *Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού*. Αθήνα: Τζιόλα.
10. Νταρακάς, Ε. (2010). *Ποιοτικά χαρακτηριστικά και διεργασίες επεξεργασίας νερού*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
11. Παπαϊωάννου, Α. et al. (2006). Quality control of drinking water and public health. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2(6), 845–850.
12. Παπαϊωάννου, Α. et al. (2007). Groundwater quality and location of productive activities in the region of Thessaly (Greece). *Desalination*, 213(1–3), 209–217.
13. ΕΥΔΑΠ. (2020). *Εκπαιδευτικό υλικό για το νερό – Δραστηριότητες για σχολεία*. Ανακτήθηκε από <https://www.eydap.gr>
14. Καρακάσης, Ι. (2009). *Περιβαλλοντική χημεία και τεχνολογία νερού*. Εκδόσεις Τζιόλα.
15. Μπαλαμπάνης, Π. (2002). *Διαχείριση υδατικών πόρων*. Εκδόσεις Συμμετρία.
16. Αναγνωστόπουλος, Β. (2015). *Ποιότητα και επεξεργασία νερού*. Σημειώσεις μαθήματος. Πανεπιστήμιο Πατρών.