



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία

«Απομάκρυνση Αρσενικού από το Πόσιμο Νερό»

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΠΟΥΛΟΥ Γ. ΕΡΜΙΟΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΙΩΑΝΝΗΣ Δ. ΜΑΝΤΖΙΑΡΑΣ

ΕΔΙΠ - Διδάκτορας

Αθήνα, Απρίλιος 2023

---

© Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2023

Η παρούσα Εργασία καθώς και τα αποτελέσματα αυτής, αποτελούν συνιδιοκτησία του Ε.Μ.Π. και του φοιτητή/ -τριας, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης, αναπαραγωγής και αναδιανομής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το/τη συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του Ε.Μ.Π. όπου εκπονήθηκε.



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

«Απομάκρυνση Αρσενικού από το Πόσιμο Νερό»

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΠΟΥΛΟΥ Γ. ΕΡΜΙΟΝΗ

Επιβλέπων:

ΙΩΑΝΝΗΣ Δ. ΜΑΝΤΖΙΑΡΑΣ

ΕΔΙΠ - Διδάκτορας

Αθήνα, Απρίλιος 2023

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Είναι δύσκολο, αλλά ταυτόχρονα πολύ όμορφο να ισορροπείς μεταξύ πολλών δραστηριοτήτων. Ακόμα πιο δύσκολο είναι όταν είσαι άνθρωπος που προσπαθείς σε όλες αυτές τις δραστηριότητες να είσαι καλός και συνεπής. Ένας τέτοιος άνθρωπος είμαι εγώ. Για μένα η παρουσίαση της διπλωματικής αυτής σηματοδοτεί το τέλος των προπτυχιακών σπουδών μου, έστω και λίγο καθυστερημένα, αλλά και την επίτευξη ενός στόχου ζωής: να πάρω το πτυχίο μου, χωρίς να σταματήσω τίποτα από αυτά που θα έκανα αν δεν σπούδαζα, κυρίως τον αθλητισμό που για μένα είναι ζωτικής σημασίας από πολύ νεαρή ηλικία.

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω, εκτός από όλους τους καθηγητές που είχα στην κατεύθυνση μου, που μου κέντρισαν το ενδιαφέρον από τα μαθήματα του κορμού και με έκανα να αγαπήσω ένα ένα τα μαθήματα που επέλεξα στην κατεύθυνση του υδραυλικού και εν τέλει να θελήσω να ασχοληθώ, να εμβαθύνω και να εκπονήσω την διπλωματική μου στον τομέα αυτόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους δασκάλους & καθηγητές που είχα στα μαθητικά μου χρόνια, οι οποίοι αποτέλεσαν αρωγούς στον στόχο μου να μπω στο πολυτεχνείο. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να αφιερώσω μερικές παραπάνω γραμμές στον κύριο Ιωάννη Μαντζιάρρα, με τον οποίο συνέπραξα για τη συγγραφή της διπλωματικής μου. Ένας ξεχωριστός καθηγητής και άνθρωπος που το «ευχαριστώ» είναι το ελάχιστο που μπορώ να πω για την άψογη και πέραν του δέοντος ευχάριστη συνεργασία, την κατανόηση, την υπομονή και την υποστήριξη που μου προσέφερε αυτόν τον ένα χρόνο που περίμενε υπομονετικά να φτάσουμε στην παρουσίαση της διπλωματικής.

Επίσης, πολλές ευχαριστίες οφείλω στους φίλους/ες μου, συναδέλφους/-φισσες και μη, και στον σύντροφο μου, οι οποίοι με στήριξαν ειδικά τα τελευταία έτη των σπουδών μου, που λόγω ειδικών συνθηκών για μένα ήταν πολύ δύσκολα. Παρόλα αυτά άντεξαν τις ιδιοτροπίες μου, τις κρίσεις μου, τα παράπονα μου, που ελπίζω να τα ξεχνάνε όλα αυτά με την αγάπη που τους δείχνω καθημερινά. Είμαι τυχερή που τους γνώρισα όλους και τους έχω στη ζωή μου.

Τελευταίους στις ευχαριστίες αφήνω την οικογένεια μου. Ότι και να πω γι' αυτούς τους ανθρώπους είναι λίγο. Η αμέριστη αγάπη, υπομονή, κατανόηση, στήριξη ακόμα κι όταν τα πράγματα δεν πήγαιναν όπως ήθελα, όταν τα προβλήματα περίσσευαν και προσπαθούσαν να μη με φορτώνουν, όταν κόντευα να τους τρελάνω που έκανα δέκα πράγματα ταυτόχρονα και αγχώνονταν για το πότε θα τελειώσω τη σχολή μου. Θα ήθελα να επισημάνω, πως αναφέρομαι σχεδόν σε ΟΛΗ μου την οικογένεια, εκτός από τον αδερφό μου, γιατί ο αδερφός μου ήξερε... Γι' αυτό, ειδικά θα ήθελα να πω «Μπαμπά, Μαμά, Βασίλη...ΤΑ ΚΑΤΑΦΕΡΑ!».

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω αυτή τη διπλωματική σε 2 δασκάλους μου που δυστυχώς δε βρίσκονται ανάμεσα μας. Στον Κύριο Ιωάννη Τσουρουνάκη, ο οποίος ήταν ο πρώτος μου δάσκαλος στο δημοτικό και αδιαμφισβήτητα ήταν αυτός που με έκανε να αγαπήσω το περιβάλλον, να ευαισθητοποιηθώ απέναντι στα προβλήματα που το αφορούν και να προσπαθώ να βοηθάω για τη λύση τους με κάθε τρόπο. Και στον Βασίλειο Χαραλαμπόπουλο, τον παππού μου, που για λίγες μέρες δεν πρόλαβε την παρουσίαση της διπλωματικής μου. Ήταν δάσκαλος στα μαθήματα, αλλά και στη ζωή. Δεν τον είχα πότε δάσκαλο μέσα στην τάξη, αλλά στο σπίτι ήταν πάντα εκεί να μαθαίνει σε μένα και τον αδερφό μου όλα τα μαθηματικά «κόλπα» και τα «μυστήρια» της ελληνικής γλώσσας που ήξερε. Μακάρι όλοι οι παππούδες να μάθουν στα εγγόνια τους έστω και τα μισά από αυτά που έμαθες εσύ σε εμάς.

*«Όταν πιστεύουμε σε κάτι ανύπαρκτο με πάθος, τελικά το δημιουργούμε.*

*Ότι δε συνέβη ποτέ, είναι ότι δεν ποθήσαμε αρκετά»*

*N. Καζαντζάκης*

*«Στον παππού μου»*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αρσενικό είναι ένα σύνηθες στοιχείο της φύσης, το οποίο εμφανίζεται παγκοσμίως και σε επιφανειακά και σε υπόγεια ύδατα. Το πόσιμο νερό αποτελεί μία από τις κυριότερες πηγές πρόσληψης αρσενικού για τον άνθρωπο. Η έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού μπορεί να προκαλέσει αγγειακά, νευρικά και γαστρεντερικά προβλήματα, καρκίνο του δέρματος και διαφόρων εσωτερικών οργάνων, ακόμη και θάνατο. Νερά με συγκέντρωση αρσενικού άνω των 10μg/L είναι απαραίτητο να υποβάλλονται σε επεξεργασία για τη μείωση της συγκέντρωσης αυτής. Με σκοπό την επίτευξη αυτού του ορίου, παρουσιάζονται διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας νερού για τη μείωση του αρσενικού. Γενικά, οι περισσότερες από αυτές τις διεργασίες είναι ικανές να παρέχουν αποδεκτά επίπεδα As υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις. Οι τεχνολογίες που θα αναλυθούν αφορούν διεργασίες ιζηματοποίησης, προσρόφησης, ανταλλαγής ιόντων, μεμβρανών, αλλά και εναλλακτικές διεργασίες που δεν έχουν ακόμη ευρεία εφαρμογή. Η απόφαση της επιλογής της αποτελεσματικότερης τεχνικής απομάκρυνσης προκύπτει από ένα συνονθύλευμα της ποιότητας και της ποσότητας του επεξεργαζόμενου νερού. Παράγοντες που κάνουν με την σειρά τους πιο πολύπλοκο αυτό το συνονθύλευμα είναι το κόστος της διεργασίας, καθώς επίσης και η διαχείριση των υπολειμμάτων που προκύπτουν από αυτές.

### Λέξεις – Κλειδιά

Αρσενικό, νερό, απομάκρυνση, αφαίρεση, διαδικασίες απομάκρυνσης, διεργασίες απομάκρυνσης, τεχνολογίες απομάκρυνσης, κόστος, MCL

## **ABSTRACT**

Arsenic is a common element in nature, occurring worldwide in both surface and groundwater. Drinking water is one of the main sources of arsenic intake for humans. Exposure of the human body to high concentrations of arsenic can cause vascular, nervous and gastrointestinal problems, skin cancer, cancer at various internal organs, and even death. Waters with arsenic concentration above 10µg/L must be treated to reduce it. In order to achieve this limit, various water treatment technologies are presented to reduce arsenic. In general, most of these processes are capable of providing acceptable levels of As under proper conditions. The technologies that will be analyzed concern processes of sedimentation, adsorption, ion exchange, membranes, but also alternative processes that are not widely used yet. The decision to choose the most effective removal technique results from an assemblage of the quality and quantity of treated water. Factors that in turn make this assemblage more complex are the cost of the process, as well as the management of the residues resulting from them.

### **Keywords**

Arsenic, water, water treatment, technologies, cost, water treatment processes, MCL



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	IV
ABSTRACT .....	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	XVI
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	XVIII
<b>1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2 ΔΟΜΗ .....	2
<b>2 ΑΡΣΕΝΙΚΟ .....</b>	<b>3</b>
2.1 ΠΗΓΕΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΣΤΗ ΦΥΣΗ.....	4
2.1.1 Αρσενικό στο Νερό .....	4
2.1.1.1 Βρόχινο νερό.....	5
2.1.1.2 Θαλάσσιο νερό.....	5
2.1.1.3 Λίμνες-Ποτάμια .....	6
2.1.1.4 Γεωθερμικά νερά.....	6
2.1.1.5 Υπόγεια νερά.....	7
2.1.2 Οξειδωτικές καταστάσεις του Αρσενικού.....	7
2.1.3 Συγκέντρωση αρσενικού στα φυσικά (μη-ρυπασμένα) πετρώματα-εδάφη.....	8
2.1.4 Αλλουβιακές Αποθέσεις – Αλλούβια.....	10
2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ.....	13
2.3 ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ .....	14
2.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ.....	15
2.4.1 Αγγειακές Παθήσεις.....	18
2.4.1.1 Παθήσεις του περιφερειακού αγγειακού συστήματος.....	18
2.4.1.2 Καρδιο- αγγειακές παθήσεις.....	18
2.4.1.3 Υπέρταση.....	19
2.4.2 Καρκίνος.....	19
2.4.2.1 Εμφάνιση καρκίνου εξαιτίας έκθεσης μέσω του πόσιμου νερού.....	19
2.4.2.2 Έκθεση μέσω της αναπνευστικής οδού.....	19
2.4.2.3 Καρκίνος του δέρματος.....	20
2.4.2.4 Διαβήτης.....	20
2.4.3 Νευρολογικές Επιπλοκές.....	20
2.4.4 Επιπτώσεις στο Αναπαραγωγικό Σύστημα.....	21
2.5 ΑΡΣΕΝΙΚΟ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ.....	21
2.6 ΑΡΣΕΝΙΚΟ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ .....	21
<b>3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ.....</b>	<b>23</b>
3.1 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ.....	23
3.2 ΧΙΛΗ .....	26
3.3 ΜΠΑΓΚΛΑΝΤΕΣ – ΔΥΤΙΚΗ ΒΕΓΓΑΛΗ.....	28
3.4 ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΧΩΡΕΣ.....	31
3.4.1 Ρουμανία.....	32
3.4.2 Κροατία.....	32
3.4.3 Σερβία.....	32

3.5	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ .....	33
3.5.1	Απελευθέρωση αρσενικού ως αποτέλεσμα γεωθερμικών δραστηριοτήτων .....	35
3.5.2	Απελευθέρωση αρσενικού στις περιοχές των αλλουβιακών αποθέσεων λόγω μειωμένων συνθηκών.....	36
3.5.3	Απελευθέρωση αρσενικού ως αποτέλεσμα εξορυκτικών δραστηριοτήτων.....	37
<b>4</b>	<b>ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ .....</b>	<b>42</b>
4.1	ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ Π.Ο.Υ.....	42
4.1.1	Ιστορία της εξέλιξης των κατευθυντήριων γραμμών .....	43
4.2	ΥΠΕΡΒΑΣΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ .....	43
4.2.1	Αποδοχή Πόσιμου Νερού .....	44
4.3	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ Ε.Ρ.Α.....	47
4.3.1	Οδηγία της Ε.Ρ.Α. για το αρσενικό.....	47
4.3.2	Ιστορική Αναδρομή κατευθυντήριων γραμμών της Ε.Ρ.Α.....	50
4.4	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΖΟΥΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΑΡΣΕΝΙΚΟ.....	54
4.4.1	Νομοθεσία για το πόσιμο νερό στη Χιλή .....	54
4.4.2	Νομοθεσία για το πόσιμο νερό στο Μπαγκλαντές.....	57
4.5	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΚΡΑΤΗ ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΈΝΩΣΗΣ (Ε.Ε.) .....	61
4.6	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ .....	63
4.7	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΩΝ: ΟΔΗΓΙΑΣ 98/83/ΕΕ ΜΕ Π.Ο.Υ. & Ε.Ρ.Α .....	65
<b>5</b>	<b>ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ.....</b>	<b>68</b>
5.1	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΣΩ ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	69
5.1.1	Κροκίδωση - Καθίζηση - Διήθηση/Δύλιση.....	69
5.1.1.1	Επίδραση Τύπου Κροκιδωτικού.....	70
	Άλατα Αργιλίου.....	70
	Άλατα Σιδήρου.....	71
5.1.1.2	Επίδραση Δόσης Κροκιδωτικού.....	72
	Άλατα Αργιλίου.....	72
	Άλατα Σιδήρου.....	73
5.1.1.3	Επίδραση pH στην Κροκίδωση και Μορφές Αρσενικού .....	73
	Άλατα Αργιλίου.....	73
	Άλατα Σιδήρου.....	74
5.1.1.4	Επίδραση της αρχικής συγκέντρωσης As(III)/As(V).....	75
5.1.1.5	Επίδραση Συνυπαρχουσών Ανόργανων Ενώσεων .....	76
5.1.1.6	Μελέτες πεδίου.....	76
5.1.1.7	Συμπεράσματα.....	77
5.1.2	Ενισχυμένη Κροκίδωση .....	77
5.1.3	Έμμεση Απομάκρυνση Αρσενικού μέσω Αποσκλήρυνσης Ασβεστίου (LS).....	78
5.1.3.1	Επίδραση της αρχικής συγκέντρωσης As(V)/As(III).....	79
5.1.3.2	Επίδραση της κατάστασης οξειδωσης του αρσενικού.....	79
5.1.3.3	Επίδραση pH.....	80
5.1.3.4	Μελέτες πεδίου.....	81
5.1.3.5	Συμπεράσματα.....	82
5.1.4	Έμμεση Απομάκρυνση Αρσενικού μέσω Οξειδωσης Σιδήρου/Μαγγανίου.....	82
5.1.4.1	Επίδραση Συνυπαρχουσών Ανόργανων Ενώσεων .....	83
5.1.4.2	Μελέτες Πεδίου .....	84
5.2	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ .....	85
5.2.1	Ενεργοποιημένη Αλουμίνα (ΕΑ) .....	86
5.2.1.1	Επίδραση pH.....	87

5.2.1.2	Επίδραση της κατάστασης οξείδωσης του αρσενικού.....	88
5.2.1.3	Επίδραση ανταγωνιστικών ιόντων.....	88
5.2.1.4	Επίδραση Χρόνου Επαφής Κενής Κλίνης (Empty Bed Contact Time) .....	89
5.2.1.5	Αναγέννηση.....	89
5.2.1.6	Μελέτες πεδίου.....	90
5.2.1.7	Έμφραξη του μέσου .....	91
5.2.1.8	Λειτουργικές Θεωρήσεις.....	92
5.2.1.9	Δευτερεύουσες Επιδράσεις.....	93
5.2.2	Κοκκώδες Υδροξείδιο του Σιδήρου (GFH) .....	93
5.2.2.1	Επίδραση pH.....	95
5.2.2.2	Μελέτες πεδίου.....	95
5.2.3	Ενεργός Άνθρακας (GAC) εμποτισμένος με Σίδηρο .....	96
5.2.3.1	Μελέτες - δοκιμές.....	98
5.2.3.2	Επίδραση pH.....	99
5.3	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΣΩ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΙΟΝΤΩΝ (AI).....	100
5.3.1	Επίδραση pH.....	102
5.3.2	Επίδραση ανταγωνιστικών ιόντων.....	102
5.3.3	Τύπος ρητίνης.....	104
5.3.4	Διαμόρφωση διεργασίας.....	105
5.3.5	Δευτερεύουσες Επιδράσεις.....	105
5.3.6	Έμφραξη ρητίνης.....	106
5.3.7	Αναγέννηση.....	106
5.3.8	Επεξεργασία και Επαναχρησιμοποίηση του αναγεννητικού υλικού.....	106
5.3.9	EBCT.....	107
5.3.10	Μελέτες πεδίου .....	108
5.3.11	Τυπικές παράμετροι σχεδίασης .....	108
5.4	ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕ MEMBRANES.....	110
5.4.1	Μικροδιήθηση (MF: Microfiltration) .....	115
5.4.2	Υπερδιήθηση (UF: Ultrafiltration) .....	116
5.4.3	Νανοδιήθηση (NF: Nanofiltration).....	119
5.4.3.1	Μελέτες.....	121
5.4.4	Αντίστροφη ώσμωση (RO: Reverse Osmosis).....	124
5.4.4.1	Μελέτες.....	127
5.4.5	Ηλεκτροδιάλυση (ED: Electrodialysis) - Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (EDR: Electrodialysis Reversal).....	131
5.4.5.1	Μελέτες.....	133
5.5	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ.....	136
5.5.1	Άμμος επικαλυμμένη με οξείδιο του σιδήρου (IOCS: Iron Oxide Coated Sand).....	136
5.5.2	Πράσινη Άμμος (Greensand).....	137
5.5.3	Παραλλαγές Έμμεσης Απομάκρυνσης Αρσενικού μέσω Οξείδωσης Σιδήρου/Μαγγανίου .....	139
5.5.4	Τροποποιημένος με θείο Σίδηρος (SMI: Sulfur-Modified Iron) .....	139
5.5.5	Άμμος Εμπλουτισμένη με Σίδηρο .....	140
5.5.6	Φωτο-οξείδωση .....	141
<b>6</b>	<b>ΚΟΣΤΟΣ.....</b>	<b>143</b>
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	143
6.2	ΠΡΟΞΕΙΔΩΣΗ.....	143
6.2.1	Υπερμαγγανικό Κάλιο .....	144
6.2.2	Χλωρίωση .....	145
6.3	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	147

6.3.1	Κροκίδωση – Καθίζηση - Διύλιση (C/F) .....	147
6.3.1.1	Κόστη κατασκευής επιμέρους διεργασιών .....	148
6.3.1.2	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης O&M συμβατικού συστήματος κροκίδωσης – καθίζησης – διύλισης.....	150
6.3.2	Ενισχυμένη κροκίδωση.....	151
6.3.3	Αποσκλήρυνση με Ασβέστη.....	153
6.4	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ .....	154
6.4.1	Ενεργοποιημένη αλουμίνα .....	154
6.4.1.1	Κεφαλαιακό κόστος .....	154
6.4.1.2	Κόστος O&M με και χωρίς προσαρμογή pH .....	155
6.4.2	Granular Ferric Hydroxide .....	158
6.5	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΙΟΝΤΩΝ .....	159
6.5.1	Ανταλλαγή ανιόντων .....	159
6.5.1.1	Κεφαλαιακό κόστος .....	160
6.5.1.2	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M) .....	160
6.6	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ.....	163
6.6.1	Νανοδιήθηση.....	163
6.6.2	Αντίστροφη ώσμωση .....	163
6.6.2.1	Παραδείγματα Κόστους Εγκαταστάσεων RO στην Ελλάδα .....	165
6.7	ΦΙΛΤΡΑΝΣΗ ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΗ ΑΜΜΟ.....	167
<b>7</b>	<b>ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΣΟΥ- CASE STUDY ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ .....</b>	<b>169</b>
7.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	169
7.2	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ .....	169
7.2.1	Ειδικές απαιτήσεις δειγματοληψίας για προσδιορισμό φυσικοχημικών παραμέτρων 170	
7.2.2	Ειδικές απαιτήσεις δειγματοληψίας για προσδιορισμό μικροβιολογικών παραμέτρων.....	170
7.3	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	170
7.3.1	Ειδικές απαιτήσεις Αποτελέσματα Δοκιμών Απομάκρυνσης Αρσενικού με τη Μέθοδο της Προσρόφησης .....	176
7.3.1	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Αναλύσεων .....	177
7.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΚΑΣΟΥ .....	178
7.4.1	Περίπτωση 1 <sup>η</sup> – Απομάκρυνση μόνο του Αρσενικού .....	179
7.4.2	Περίπτωση 2 <sup>η</sup> – Μονάδα αντίστροφης ώσμωσης για απομάκρυνση και αρσενικού και αλατότητας.....	182
7.4.2.1	Ενεργειακές απαιτήσεις RO .....	184
7.4.2.2	Προσωπικό και τεχνική υποστήριξη.....	184
7.4.2.3	Διαχείριση της άλμης .....	185
7.4.2.4	Προσθήκη χημικών που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της διεργασίας αφαλάτωσης .....	186
7.4.2.5	Διάβρωση σωληνώσεων .....	186
7.4.2.6	Κόστος παραγόμενου νερού.....	187
7.4.2.7	Περιβαλλοντικό κόστος.....	188
7.4.2.8	Κόστος Πόρου (διαθεσιμότητας).....	188
<b>8</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>189</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ: .....</b>	<b>191</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>204</b>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑΣ .....	204
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑΣ .....	215
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑΣ ΕΡΑ.....	220

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Περιοδικός Πίνακας Χημικών Στοιχείων Πηγή Σχήματος: (DePier, 2022).....	3
Σχήμα 2.2: Μεταλλική τροποποίηση – Γκρίζο Αρσενικό Πηγή Σχήματος: (Γαλδαδάς Αλκης, 2013) .....	4
Σχήμα 2.3: Μη μεταλλική τροποποίηση – Κίτρινο Αρσενικό (Κίτρινη σανδαράχη) Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική σελίδα (Γεωλογική έρευνα των ΗΠΑ, 2020).....	4
Σχήμα 2.4: Ορυκτό ερυθράς σανδαράχης Πηγή Σχήματος: (Wikipedia, 2022) .....	4
Σχήμα 2.5: Κύκλος αρσενικού στο περιβάλλον Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) .....	5
Σχήμα 2.6: Αριστερά: Κατανομές των ιοντικών μορφών του αρσενικώδους οξέος (με τη μορφή As[III ]) Δεξιά: Κατανομές των ιοντικών μορφών του αρσενικικού οξέος (με τη μορφή As[V ]) Πηγή Σχήματος: (Μαλαμής, et al., 2021) .....	8
Σχήμα 2.7: Μορφές αρσενικού που συναντάμε στη φύση Πηγή Σχήματος: (Minerals Education Coalition, 2012).....	10
Σχήμα 2.8: Αλλουβιακές αποθέσεις ποταμών στη λεκάνη του Αμαζονίου, κοντά στο Autazes, AM - Βραζιλία. Τα εποχιακά κοιτάσματα είναι εξαιρετικά γόνιμα και ζωτικής σημασίας για τη γεωργία επιβίωσης στη λεκάνη του Αμαζονίου κατά μήκος των όχθων του ποταμού Πηγή Σχήματος: (Thadani, 14 Δεκεμβρίου 2011).....	12
Σχήμα 2.9: Αλλουβιακές αποθέσεις στο Badwater, Death Valley, CA Πηγή Σχήματος: (Miller, 20 December 2011). .....	12
Σχήμα 2.10: Δερματικές βλάβες λόγω δηλητηρίασης με αρσενικό Πηγή Σχήματος: (Smith, et al., 2000).....	17
Σχήμα 2.11: Επιπτώσεις του As στην ανθρώπινη υγεία (BFD) – Μπαγκλαντές Πηγή Σχήματος: (Νικολαΐδης, 2001).....	18
Σχήμα 3.1: Μοντελοποιημένος κίνδυνος Αρσενικού στο πόσιμο νερό σε παγκόσμιο επίπεδο Πηγή Σχήματος: (Schwarzenbach, και συν., 2010) (Amini, et al., 2008).....	23
Σχήμα 3.2: Εκτίμηση της μέσης περιεκτικότητας As (μg/L) σε υπόγεια ύδατα βάθους 16-100 m στην Καμπότζη με παλινδρόμηση-kriging Πηγή Σχήματος: (Lado, et al., 2008) (Sovann, et al., 2014).....	24
Σχήμα 3.3: Μοντελοποιημένη πιθανότητα συγκέντρωσης αρσενικού άνω των 10 μg/L σε διαφορετικά βάθη στο Δέλτα του Κόκκινου Ποταμού, Βιετνάμ Πηγή Σχήματος: (Winkel, et al., 2011).....	24
Σχήμα 3.4: Γεωλογικός Χάρτης Χιλής όπου με γκρι χρώμα φαίνονται τα ηφαιστειακά πετρώματα Πηγή Σχήματος: (mapsChile).....	26
Σχήμα 3.5: Συγκεντρώσεις αρσενικού πόσιμο νερού στην Antofagasta της Χιλής, 1950-2010. Νέες πηγές νερού με υψηλά επίπεδα αρσενικού χρησιμοποιήθηκαν από το 1958 και μετά, και ένα εργοστάσιο επεξεργασίας νερού για αφαίρεση αρσενικού εγκαταστάθηκε το 1970, με βελτιωμένη απόδοση αφαίρεσης μετά. Πηγή Σχήματος: (Taehyun , και συν., 2018).....	26
Σχήμα 3.6: Έκθεση σε αρσενικό και θνησιμότητα ανδρικού καρκίνου του πνεύμονα στη Χιλή Πηγή Σχήματος: (UNICEF, et al., 2018).....	27
Σχήμα 3.7: Αριστερά: Με τη μπλε γραμμή φαίνεται ο ποταμός Loa Δεξιά: Η λεκάνη απορροής ποταμού Loa και δεξιά στο χάρτη ο ποταμός Toconce Πηγή Σχήματος: (Generic Mapping Tools, 2012),.....	27
Σχήμα 3.8: Αριστερά: Πολιτικός Χάρτης Μπαγκλαντές Πηγή Σχήματος: (Nations Online Project) Δεξιά: Διανομή αρσενικού σε πηγάδια βάθους μικρότερης των 150 μέτρων στο Μπαγκλαντές. Πηγή Σχήματος: (UNICEF, και συν., 2018).....	28
Σχήμα 3.9: Επισημασμένες σημαντικές περιπτώσεις αρσενικού στον Ελλαδικό χώρο Πηγή Σχήματος: (Katsoyiannis, και συν., 2014) .....	35
Σχήμα 3.10: Ελληνικό Ηφαιστειακό τόξο νοτίου Αιγαίου στη γραμμή Μέθανα, Μήλος, Γυαλί, Σαντορίνη, Νίσυρος, Κως Πηγή Σχήματος: (Encyclo...παιδεία, 2011) .....	36

Σχήμα 3.11: Χρυσά αντικείμενα που εκθέτονται στο Αρχαιολογικό Μουσείο Βεργίνας από τους βασιλικούς τάφους Πηγή Σχήματος: (Αρχαιολογικό Μουσείο Βεργίνας – Βασιλικοί Τάφοι).....	37
Σχήμα 3.12: Κομμάτι Ορυκτού Γιαροσίτη Πηγή Σχήματος: (Lavinsky, 2010).....	38
Σχήμα 3.13: Χαλκός στη μητρική του μορφή Πηγή Σχήματος: (Grimm) .....	38
Σχήμα 3.14: Έργο ορυχείου στην περιοχή των Σκουριών Χαλκιδικής Πηγή Σχήματος: <a href="https://www.hellas-gold.com/images-gallery/">https://www.hellas-gold.com/images-gallery/</a> .....	39
Σχήμα 3.15: Έργο ορυχείου στην περιοχή του Στρατωνίου Χαλκιδικής Πηγή Σχήματος: <a href="https://www.hellas-gold.com/images-gallery/">https://www.hellas-gold.com/images-gallery/</a> .....	39
Σχήμα 3.16: Έργο ορυχείου στην περιοχή της Ολυμπιάδας, Χαλκιδικής Πηγή Σχήματος: <a href="https://www.hellas-gold.com/images-gallery/">https://www.hellas-gold.com/images-gallery/</a> .....	39
Σχήμα 3.17: Αρχαία Μεταλλευτική Στοά, δυτικά και δίπλα στο αρχαίο θέατρο Θορικού περί το 3000 π.Χ. όπου θεωρείται ότι έγινε έναρξη της εκμετάλλευσης μεταλλείων αργυρούχου μόλυβδου στο Λαύριο Πηγή Σχήματος: (Τζεφέρης, 2015).....	40
Σχήμα 3.18: Γεωχημικός χάρτης κατανομής του αρσενικού (As) στο επιφανειακό έδαφος (0-10cm) στη Λαυρεωτική Χερσόνησο Πηγή Σχήματος: (Δημητριάδης, και συν., 2002).....	41
Σχήμα 4.1: Περιοχές μολυσμένες με αρσενικό πάνω στον τεκτονικό χάρτη του κόσμου. Δείτε ότι οι περιοχές που έχουν πληγεί από το αρσενικό περιορίζονται ως επί το πλείστον στις ιζηματογενείς λεκάνες κοντά στις σύγχρονες ορεινές ζώνες και τις περιοχές των δελταϊκών. Πηγή Σχήματος: (Shaji, et al., 2021).....	42
Σχήμα 4.2: Ποσοστό των Κοινοτικών Υδατικών Συστημάτων στις ΗΠΑ που αναμένεται να έχουν συγκεντρώσεις αρσενικού στο νερό που χρησιμοποιούν ως πηγή τους πάνω από το αναθεωρημένο MCL αρσενικού των 0,010 mg/L. Πηγή Σχήματος: (USEPA, 2015) .....	48
Σχήμα 4.3: Χάρτης των ΗΠΑ που δείχνει διαθέσιμα δεδομένα για τις συγκεντρώσεις αρσενικού (μg/L ή ppb) από το 2001 από δείγματα υπόγειων υδάτων. Σημείωση: Οι πορτοκαλί και οι κόκκινες κουκκίδες υποδηλώνουν συγκεντρώσεις υψηλότερες από αυτές που επιτρέπονται στο πόσιμο νερό από τους κανονισμούς της US EPA. Πηγή Σχήματος: (InTeGrate, 2022).....	49
Σχήμα 4.4: Χρονογραμμή Ιστορικού Ρύθμισης Ορίων Αρσενικού για την EPA.....	51
Σχήμα 5.1: Διαδικασία αποσταθεροποίησης κολλοειδών με προσθήκη κροκιδωτικών Πηγή Σχήματος: (Ανδρεαδάκης, 2008).....	70
Σχήμα 5.2: Απομάκρυνση αρσενικού με αλουμίνιο Πηγή Σχήματος: (Kartinen, et al., 1995).....	74
Σχήμα 5.3: Απομάκρυνση αρσενικού με σίδηρο (Kartinen, et al., 1995).....	75
Σχήμα 5.4: Απομάκρυνση αρσενικού με αποσκλήρυνση ασβεστίου (Kartinen, et al., 1995) .....	81
Σχήμα 5.5: Η ενεργοποιημένη αλουμίνα/ενεργό οξείδιο του αργιλίου, χρησιμοποιείται ως αφυγραντικό, προσροφητικό στην επεξεργασία νερού. Έχει υψηλή πορώδη δομή, υψηλή επιφάνεια, υψηλό απορροφητικό ποσοστό κτλ. Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική σελίδα <a href="http://gr.aluminaadsorbent.com/activated-alumina-adsorbent/activated-alumina.html">http://gr.aluminaadsorbent.com/activated-alumina-adsorbent/activated-alumina.html</a> .....	85
Σχήμα 5.6: Το κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου κρυσταλλώνεται σε οξύ-υδροξείδια του σιδήρου γαιθίτη (α-FeOOH). Καθώς δεν περιλαμβάνεται διαδικασία ξήρανσης στην προετοιμασία του, όλοι οι πόροι γεμίζουν πλήρως με νερό, οδηγώντας σε υψηλή πυκνότητα διαθέσιμων θέσεων προσρόφησης και συνεπώς σε υψηλή ικανότητα προσρόφησης. Πηγή Σχήματος: (Pal, 2001) .....	85
Σχήμα 5.7: Ενεργός Άνθρακας που χρησιμοποιείται σε φίλτρα για καθαρισμό του πόσιμου νερού Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική Σελίδα <a href="https://www.primato.gr/ta-nea-mas/ti-einai-o-energος-anthrakas-sta-filtra-nerou/">https://www.primato.gr/ta-nea-mas/ti-einai-o-energος-anthrakas-sta-filtra-nerou/</a> .....	86
Σχήμα 5.8: Συγκέντρωση αρσενικού στα λύματα ως συνάρτηση του όγκου κενού κλίνης. Πηγή Σχήματος: (Deng, et al., 2005) .....	98
Σχήμα 5.9: Επίδραση του pH στην προσρόφηση αρσενικού μέσω GAC όσο και στον εμποτισμένο με σίδηρο GAC (GAC-Fe). Για τα παραπάνω αποτελέσματα παράμετροι όπως η συγκέντρωση αρσενικού και ο χρόνος επαφής ορίστηκαν στα 40 mg/L και στις 6 ώρες. Πηγή Σχήματος: (Kalaruban, et al., 2019) .....	99

Σχήμα 5.10: Μοντέλο ανταλλαγής ιόντων μέσω ρητινών Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://umaine.edu/arsenic/treatment-options-and-technologies/">https://umaine.edu/arsenic/treatment-options-and-technologies/</a> .....	101
Σχήμα 5.11: Σύστημα απομεταλλωτών, για απομάκρυνση αρσενικού, με ρητίνες ανταλλαγής ιόντων Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.saitaimpianti.com/en/demineralizers/">https://www.saitaimpianti.com/en/demineralizers/</a> .....	109
Σχήμα 5.12: Ταξινόμηση διεργασίας μεμβράνης που κινείται με πίεση Πηγή Σχήματος: (Westerhoff, et al., 1996) .....	110
Σχήμα 5.13: Εξέλιξη απόδοσης εγκαταστάσεων αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο Πηγή Σχήματος: (Diawara, 2008) .....	111
Σχήμα 5.14: Δυνατότητες διαχωρισμού μεμβρανών υπό πίεση Πηγή Σχήματος: (Van der Bruggen, et al., 1999) .....	111
Σχήμα 5.15: Δυνατότητες συγκράτησης σωματιδίων από τις μεμβράνες Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/microfiltration">https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/microfiltration</a> .....	113
Σχήμα 5.16: Συγκράτηση σωματιδίων από τις μεμβράνες μικροδιήθησης Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.hydrogroup.biz/areas-of-use/water-treatment/membrane-processes.html">https://www.hydrogroup.biz/areas-of-use/water-treatment/membrane- processes.html</a> .....	115
Σχήμα 5.17: Συστήματα κλινών με μεμβράνες μικροδιήθησης σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://fctwater.com/membrane-filtration-microfiltration/">https://fctwater.com/membrane-filtration- microfiltration/</a> .....	116
Σχήμα 5.18: Συστήματα κλινών με μεμβράνες υπερδιήθησης σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.westech-inc.com/products/ultrafiltration-membrane-system">https://www.westech- inc.com/products/ultrafiltration-membrane-system</a> .....	118
Σχήμα 5.19: Λειτουργία μεμβράνης Νανοδιήθησης Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.waterprofessionals.com/learning-center/nanofiltration/">https://www.waterprofessionals.com/learning-center/nanofiltration/</a> .....	119
Σχήμα 5.20: Σύστημα Premium NF πλήρως αυτοματοποιημένο με σήματα οργάνων που ρυθμίζουν τη λειτουργία και τη δοσολογία του συστήματος, καθώς και μια ανεξάρτητη αντλία CIP και ανακυκλοφορία για πειραματική χρήση. Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://synderfiltration.com/nanofiltration/systems/">https://synderfiltration.com/nanofiltration/systems/</a> .....	121
Σχήμα 5.21: Διεργασίες Ώσμωσης και Αντίστροφης Ώσμωσης Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/ultrafiltrationnanoandro#">https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/ultrafiltrationnanoandro#</a> .....	124
Σχήμα 5.22: Δομή μεμβράνης φυσιγγίου αντίστροφης ώσμωσης Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική Πηγή <a href="https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/B9780081025659000030?token=50AF1166FAA626A301454687C5AAE5028E93EC7FD951784E63E3F5A1568A358AE0831DCDA6BF10F3C7100B9768F9564F&amp;originRegion=eu-west-1&amp;originCreation=20230327092748">https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/B9780081025659000030?token=50AF1166FAA626 A301454687C5AAE5028E93EC7FD951784E63E3F5A1568A358AE0831DCDA6BF10F3C7100B9 768F9564F&amp;originRegion=eu-west-1&amp;originCreation=20230327092748</a> .....	125
Σχήμα 5.23: :Συστήματα κλινών με μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης για επεξεργασία νερού Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική Πηγή <a href="https://www.prab.com/water-and-wastewater-solutions/reverse-osmosis/">https://www.prab.com/water-and-wastewater- solutions/reverse-osmosis/</a> .....	126
Σχήμα 5.24: Διεργασία αντίστροφης ώσμωσης σε μεγέθυνση. Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.freshwatersystems.com/blogs/blog/what-is-reverse-osmosis">https://www.freshwatersystems.com/blogs/blog/what-is-reverse-osmosis</a> .....	126
Σχήμα 5.25: Τρόπος λειτουργίας μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης και αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης. Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-electrodialysis-ED-and-reverse-electrodialysis-RED-Note-that-the_fig1_297751628">https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-electrodialysis-ED-and-reverse- electrodialysis-RED-Note-that-the_fig1_297751628</a> .....	131
Σχήμα 5.26: Σχηματική Στοίβα Ηλεκτροδιάλυσης για Αφαλάτωση Νερού. Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/electrodialysis">https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/electrodialysis</a> .....	132
Σχήμα 5.27: Σύστημα δοκιμών ηλεκτροδιάλυσης εργαστηριακής κλίμακας Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.con-vergence.com/product/electrodialysis-pilot/">https://www.con-vergence.com/product/electrodialysis-pilot/</a> .....	133



Σχήμα 5.28: Κόκκοι άμμου επικαλυμμένοι με οξειδίο του σιδήρου Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://northsearegion.eu/nuredrain/filter-materials/iron-oxide-coated-sand-iocs-iron-rich-sludge-pellets-for-phosphate-adsorption/">https://northsearegion.eu/nuredrain/filter-materials/iron-oxide-coated-sand-iocs-iron-rich-sludge-pellets-for-phosphate-adsorption/</a> .....	136
Σχήμα 5.29: Προσομοίωση απομάκρυνσης αρσενικού μέσω της άμμου επικαλυμμένη με οξειδίο του σιδήρου Πηγή Σχήματος: (Chaudhry, et al., 2017) .....	137
Σχήμα 5.30: Πράσινη άμμος – γλαυκονιτική άμμος διαμέτρου 20 mm (αριστερά) και σε σκόνη (δεξιά) Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://www.sandatlas.org/greensand-and-green-sand/">https://www.sandatlas.org/greensand-and-green-sand/</a> Πηγή Σχήματος: (The Delaware Geological Survey, 2020) .....	137
Σχήμα 5.31: Τροποποιημένος με θείο Σίδηρος (SMI: Sulfur-Modified Iron) Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <a href="https://primaenvironmental.com/wp-content/uploads/2019/05/Sulfur-Modified-Iron-A-Versatile-Media-for-Ex-Situ-Water-Treatment.pdf">https://primaenvironmental.com/wp-content/uploads/2019/05/Sulfur-Modified-Iron-A-Versatile-Media-for-Ex-Situ-Water-Treatment.pdf</a> .....	140
Σχήμα 5.32: Άμμος εμπλουτισμένη με σίδηρο όπου τα ρινίσματα σιδήρου αναμειγνύονται με την άμμο. Πηγή Σχήματος: (Silverman, 2002).....	141
Σχήμα 5.33: Διάγραμμα λειτουργείας φωτο-οξειδωσης Πηγή Σχήματος: (Gosh, 2018) .....	142
Σχήμα 6.1: Τροφοδοσία Υπερμαγγανικού Καλίου Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008).....	144
Σχήμα 6.2: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για την προοξειδωση με δόση χλωρίου 1,5 mg/L Πηγή Σχήματος:(EPA, 2000) .....	146
Σχήμα 6.3: Καμπύλη κόστους O&M για την προοξειδωση με δόση χλωρίου 1,5 mg/L Πηγή Σχήματος:(EPA, 2000) .....	146
Σχήμα 6.4: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους τροφοδοσία σκόνης θεικού αργιλίου Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008).....	148
Σχήμα 6.5: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους Ταχείας Μίξης με κλίση ταχύτητας G = 900 Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008).....	148
Σχήμα 6.6: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους Συσσωμάτωσης με κλίση ταχύτητας G = 900 Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008).....	149
Σχήμα 6.7: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για Κυκλική Δεξαμενή με πλευρικό βάθος νερού 10 Ft Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008) .....	149
Σχήμα 6.8: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για Διστρωματικό Φίλτρο Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008) .....	150
Σχήμα 6.9: Καμπύλη κόστους O&M για εγκατάσταση με Συμβατική Διεργασία Απομάκρυνσης Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008) .....	150
Σχήμα 6.10: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για την ενισχυμένη κροκίδωση Πηγή Σχήματος:(EPA, 2000) .....	152
Σχήμα 6.11: Καμπύλη κόστους O&M για την ενισχυμένη κροκίδωση Πηγή Σχήματος:(EPA, 2000) .....	152
Σχήμα 6.12: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους τροφοδοσίας ασβεστίου Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008) .....	153
Σχήμα 6.13: Καμπύλη κόστους O&M τροφοδοσίας ασβέστη Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008).....	154
Σχήμα 6.14: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους ΕΑ Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000).....	155
Σχήμα 6.15: Καμπύλη κόστους O&M ΕΑ για pH=7-8 Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) .....	156
Σχήμα 6.16: Καμπύλη κόστους O&M ΕΑ για pH=8-8,3 Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) .....	156
Σχήμα 6.17: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους ΕΑ για pH=6 Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) .....	157
Σχήμα 6.18: Καμπύλη κόστους O&M ΕΑ για pH=6 & 23.100BV Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) ....	157
Σχήμα 6.19: Καμπύλη κόστους O&M ΕΑ για pH=6 & 15.400BV Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) ....	158
Σχήμα 6.20: Όγκοι κλίνης ως συνάρτηση της συγκέντρωσης θεικών Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000).....	159
Σχήμα 6.21: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για AI ( < 20 mg/ L SO4) Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000).....	161
Σχήμα 6.22: Καμπύλη κόστους O&M για AI ( < 20 mg/ L SO4) Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000).....	161

Σχήμα 6.23: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για AI ( 20 – 50 mg/ L SO4) Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) .....	162
Σχήμα 6.24: Καμπύλη κόστους O&M για AI ( 20 – 50 mg/ L SO4) Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) .....	162
Σχήμα 6.25: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για RO Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008) .....	164
Σχήμα 6.26: Καμπύλη κόστους O&M για RO Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008).....	165
Σχήμα 6.27: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους Greensand Filtration Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000).....	168
Σχήμα 6.28: Καμπύλη κόστους O&M Greensand Filtration Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000) .....	168
Σχήμα 7.1: Χάρτης Ύδρευσης για τη Νήσο Κάσο .....	171
Σχήμα 7.2: Υπολειπόμενη συγκέντρωση αρσενικού σε δείγματα νερού μετά την απομάκρυνση του με τη χρήση του υλικού GFH .....	177
Σχήμα 7.3: Κοκκώδες Υδροξείδιο του σιδήρου (GFH) .....	180
Σχήμα 7.4: Setup κλίνης προσρόφησης με GFH .....	182

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Λίστα με τις χώρες που έχουν εντοπιστεί με υψηλή συγκέντρωση αρσενικό στους υδάτινους πόρους τους (University of Maine), (Ahoulé, et al., 2015). .....	25
Πίνακας 3.2: Ποσοστό υπόγειων υδάτων που εξετάστηκε το 1998 από τη βρετανική γεωλογική έρευνα με επίπεδα αρσενικού άνω των 50 µg/l (Smith, et al., 2000). .....	30
Πίνακας 3.3: Μέγεθος της δηλητηρίασης από αρσενικό στο Μπαγκλαντές (Smith, et al., 2000) ..	31
Πίνακας 3.4: Μέγιστες συγκεντρώσεις αρσενικού σε ευρωπαϊκές χώρες / περιοχές (Katsoyiannis, et al., 2014).....	32
Πίνακας 3.5: Συγκέντρωση αρσενικού στα ελληνικά υπόγεια ύδατα (Katsoyiannis, et al., 2014)	34
Πίνακας 4.1: Πίνακας με τις μεταβολές της κατευθυντήριας τιμής για τη μέγιστη συγκέντρωση του αρσενικού σύμφωνα με τον Π.Ο.Υ. ανά έτος (World Health Organization, March 2022). .....	43
Πίνακας 4.2: Κατευθυντήριες τιμές για χημικές ουσίες που έχουν σημασία για την υγεία στο πόσιμο νερό (World Health Organization, 2008). .....	44
Πίνακας 4.3: Θεσμοθετημένα όρια που αφορούν τους μικροοργανισμούς στο πόσιμο νερό σύμφωνα με την EPA (USEPA, 2009).....	52
Πίνακας 4.4: Μέγιστη συγκέντρωση παραμέτρων σύμφωνα με τα πρότυπα της Χιλής για να καθίσταται πόσιμο (Ministerio de Salud Publica, 1969, 2010).....	55
Πίνακας 4.5: Παράμετροι ποιότητας νερού σύμφωνα με τα πρότυπα του Μπαγκλαντές και τις οδηγίες του Π.Ο.Υ. ....	59
Πίνακας 5.1: Αντιδράσεις Οξειδωσης για τον σίδηρο με διάφορα οξειδωτικά (ASCE, AWWA, 1990).....	83
Πίνακας 5.2: Αντιδράσεις οξειδωσης για το μαγγάνιο με διάφορα οξειδωτικά (ASCE, AWWA, 1990).....	83
Πίνακας 5.3: Αποτελεσμάτων για προσροφητικό ΕΑ σε σταθερές κλίνες στην απομάκρυνση του αρσενικού από το νερό (Crittenden, et al., 2012).....	91
Πίνακας 5.4: Δοκιμές προσρόφησης σε GFH (EPA, 2000) .....	94
Πίνακας 5.5: Αποτελεσμάτων για προσροφητικό GFH σε σταθερές κλίνες στην απομάκρυνση του αρσενικού από το νερό (Crittenden, et al., 2012).....	96
Πίνακας 5.6: Τυπικές Ρητίνες ΑΙ για Αφαίρεση Αρσενικού (EPA, 2000) .....	104
Πίνακας 5.7: Τυπικές παράμετροι και επιλογές λειτουργίας για ΑΙ (EPA, 2000) .....	109
Πίνακας 5.8: Τυπικά εύρη πίεσης για διεργασίες μεμβρανών (EPA, 2000).....	111
Πίνακας 5.9: Τυπική ανάκτηση για διεργασίες μεμβρανών (EPA, 2000).....	113
Πίνακας 5.10: Αφαίρεση As(V) και As(III) με μεμβράνες UF (EPA, 2000) .....	116
Πίνακας 5.11: Απομάκρυνση αρσενικού με UF σε πιλοτική κλίμακα (EPA, 2000).....	118
Πίνακας 5.12: Αφαίρεση As(V) και As(III) με μεμβράνες NF (EPA, 2000) .....	122
Πίνακας 5.13: Αφαίρεση αρσενικού με NF σε πιλοτική κλίμακα (EPA, 2000) .....	122
Πίνακας 5.14: Απομάκρυνση Αρσενικού με αντίστροφη ώσμωση (Kartinen, et al., 1995) .....	128
Πίνακας 5.15: Απομάκρυνση Αρσενικού με αντίστροφη ώσμωση με εργαστηριακές δοκιμές (Kartinen, et al., 1995) .....	128
Πίνακας 5.16: Περίληψη Αφαίρεσης Αρσενικού με μεμβράνες RO (EPA, 2000) .....	129
Πίνακας 5.17: Αφαίρεση αρσενικού με RO σε εργαστηριακή κλίμακα (EPA, 2000) .....	129
Πίνακας 5.18: Αφαίρεση αρσενικού με RO σε πιλοτική κλίμακα (EPA, 2000) .....	130
Πίνακας 5.19: Μελέτη EDR για την ποιότητα του νερού εισροής για το San Ysidro (EPA, 2000) .....	134
Πίνακας 5.20: Ποιότητα Ακατέργαστου Νερού για Μελέτη Bluewater EDR (EPA, 2000).....	135
Πίνακας 6.1: Κριτήρια σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν στις καμπύλες κόστους (EPA, 2000) .....	151
Πίνακας 6.2: Κόστος λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης στην Ελλάδα (2013).....	166
Πίνακας 7.1: Ονομασία γεωτρήσεων και ημερομηνίες δειγματοληψιών .....	172

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα αναλύσεων υδάτων 1ης δειγματοληψίας.....	172
Πίνακας 7.3: Αποτελέσματα αναλύσεων υδάτων 2ης δειγματοληψίας.....	173
Πίνακας 7.4: Αναλύσεις δειγμάτων για αρσενικό, και σύγκριση με τα αποτελέσματα των Αθηναϊκών Εργαστηρίων, από δείγματα που συλλέχθηκαν στις 21 Μαΐου και 26 Ιουνίου 2021 .....	175
Πίνακας 7.5: Μέτρηση δειγμάτων 1 <sup>ης</sup> δειγματοληψίας για αρσενικό και αποτελέσματα εσωτερικού ελέγχου με σταθερή προσθήκη γνωστής συγκέντρωσης αρσενικού.....	175
Πίνακας 7.6: Πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου λόγω χρόνιας κατανάλωσης πόσιμου νερού με αρσενικό σε σχέση με τη συγκέντρωση του (πηγή: National Academy of Sciences' 1999 risk estimates. <a href="http://www.nrdc.org/water/drinking/qarsenic.asp#health">http://www.nrdc.org/water/drinking/qarsenic.asp#health</a> .....	176
Πίνακας 7.7: Παραμετρικές τιμές της ΚΥΑ Γ1(δ)/ΓΠ οικ. 67322/2017.....	178
Πίνακας 7.8: Σταθμισμένοι μέσοι όροι συγκεντρώσεων αγωγιμότητας και αρσενικού, ανάλογα με την χρονική περίοδο, τις λειτουργούσες γεωτρήσεις, και τις παροχές. ....	179
Πίνακας 7.9: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του κοκκώδους υδροξειδίου του σιδήρου (GFH).181	
Πίνακας 7.10: Λειτουργικές συνθήκες του συστήματος επεξεργασία με φίλτρα προσρόφησης GFH. ....	182
Πίνακας 7.11 : Χρήση εμπορικών αντικαθαλωτικών τύπου Genesys σε μονάδα αντίστροφης ώσμωσης.....	186
Πίνακας 7.12: Κόστος αφαλάτωσης ανάλογα με την τεχνολογία .....	187

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

As	Αρσενικό
AAS:	Atomic Absortion Spectrophotometer (Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης)
Ag	Άργυρος
As (III)	Τρισθενές Αρσενικό
As (V)	Πεντασθενές Αρσενικό
ATSDR:	Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Οργανισμός Τοξικών Ουσιών και Μητρώου Νοσημάτων)
BFD:	Blackfoot Disease (Ασθένεια των Μαύρων Ποδιών)
BV:	Bed Volumes (Όγκοι Κλίνης)
C/F	Coagulation / Filtration
DBP:	Disinfection By-Product (Υποπροϊόν Απολύμανσης)
DI:	Deionzed (απιονισμένος)
DMAA:	DiMethylArsinic Acid (Διμεθυλαρσινικό Οξύ)
EBCT:	Empty-Bed Contact Time (Χρόνος Επαφής Κενής Κλίνης)
GFH:	Granular Ferric Hydroxide (Κοκκώδες Υδροξείδιο του Σιδήρου)
IARC:	International Agency for Research on Cancer (Διεθνής Οργανισμός Έρευνας για τον Καρκίνο)
IOCS:	Iron Oxide Coated Sand (Άμμος επικαλυμμένη με οξείδιο του σιδήρου)
JECFA:	Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (Μεικτή Επιτροπή Εμπειρογνομόνων ΔΟΤΓ/ΠΟΥ για τα Πρόσθετα Τροφίμων)
LS	Lime Softening
M	Molarity (= mole διαλυμένης ουσίας/λίτρο διαλύματος)
MAA:	MethylArsonic Acid (Μεθυλαρσονικό Οξύ)
MCL:	Maximum Contaminant Level (Μέγιστο Επίπεδο Μόλυνσης)
MF:	Microfiltration (Μικροδιήθηση)
MWCO:	Molecular Weight Cut-Off (μέγεθος των πόρων )
N	Normality (=Ισοδύναμα Διαλυμένης ουσίας / Λίτρα διαλύματος) Οι μονάδες κανονικότητας είναι ισοδύναμα γραμμαρίων ανά λίτρο (eq/L) ή ισοδύναμο χλιοστόγραμμα ανά λίτρο (meq/L). <b>Κανονικότητα(N)</b> = (Μάζα της διαλυμένης ουσίας) / (Ισοδύναμη μάζα της διαλυμένης ουσίας(E) × Όγκος του διαλύματος(V) )
NF:	Nanofiltration (Νανοδιήθηση)
NOM:	Natural Organic Matter (Φυσικές Οργανικές Ύλες)
NOM:	Natural Organic Matter (Φυσική Οργανική Ύλη)
O&M cost:	Operation and Maintenance cost (Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης)
ORP:	Oxidation-Reduction Potential (Δυνατότητα Οξειδωσης-Μείωσης)
PASS:	Polymeric Aluminum Silicate Sulfate (Πολυμερικό Πυριτικό Θεικό Αργίλιο)
Pb	Μόλυβδος
POTW:	Publicly-Owned Treatment Works (Δημόσια Έργα Επεξεργασίας)
PTWI:	Provisional Tolerable Weekly Intake (Προσωρινή Ανεκτή Εβδομαδιαία Πρόσληψη)
RO:	Reverse Osmosis (Αντίστροφη Ώσμωση)

SISS:	Superintendencia de Servicios Sanitarios (Εποπτεία Υγειονομικών Υπηρεσιών)
TCLP:	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
TDS:	Total Dissolved Solids (Ολικά Διαλυμένα Στερεά)
TOC:	Total Organic Carbon
UF:	Ultrafiltration (Υπερδιήθηση)
UNICEF:	United Nations International Children's Emergency Fund
USEPA:	United States Environmental Protection Agency (Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών)
UV-VIS:	UV-Visible Spectrophotometer Φασματοφωτόμετρο UV-Visible
VSS	Very Small Systems
W.H.O. :	World Health Organization
WTP:	Water Treatment Plants
Zn	Ψευδάργυρος
AI	Ανταλλαγή Ιόντων
Δ.Ο.Τ.Γ.:	Διεθνής Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας
EA	Ενεργοποιημένη Αλουμίνα
Π.Ο.Υ :	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας ή
PbS	Γαληνίτης

# 1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αρσενικό είναι το 20ο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της Γης και το 12ο πιο άφθονο στοιχείο στο ανθρώπινο σώμα. Η χρήση του αναφέρεται σε πηγές από τα αρχαία χρόνια και η ανησυχία για την εμφάνιση αρσενικού (As) στο πόσιμο νερό έχει μακρά ιστορία. Οι μορφές που απαντάται το αρσενικό στο νερό είναι το πεντασθενές As(V) και το τρισθενές As(III) , με το τρισθενές να είναι σε μεγαλύτερο βαθμό πιο τοξικό. Το αρσενικό, σε μικρές ποσότητες είναι απαραίτητο ως θρεπτικό συστατικό για τον άνθρωπο, όμως είναι, επίσης, ευρέως γνωστό δηλητήριο εάν καταποθεί σε πολύ μεγάλη δόση. Οι κύριες πηγές πρόσληψης αρσενικού για τον άνθρωπο είναι τα τρόφιμα αλλά κυρίως το νερό. Όταν αυτό λαμβάνεται σε μικρότερες ποσότητες για μεγάλο χρονικό διάστημα, δημιουργεί πλήθος προβλημάτων στην ανθρώπινη υγεία και αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ.) ορίζει μία ανώτατη συγκέντρωση αρσενικού (M.C.L.) στο πόσιμο νερό, της τάξης των 10 µg/L πλέον, ώστε αυτό να καθίσταται ασφαλές. Οι δύο μεγαλύτερες μαζικές δηλητηριάσεις ανθρώπινου πληθυσμού από αρσενικό είναι αυτές στο Μπαγκλαντές και στη Χιλή.

Κατανοώντας το πρόβλημα της ύπαρξης αρσενικού στο νερό, παρακάτω παρουσιάζονται διαθέσιμες τεχνολογίες επεξεργασίας που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση του αρσενικού από το νερό, ώστε να επιτευχθεί το M.C.L, ύστερα από τη συλλογή πλήθους βιβλιογραφικών δεδομένων που αφορούν τις διεργασίες επεξεργασίας του νερού ανά τα χρόνια. Οι διεργασίες που θα αναλυθούν παρακάτω αφορούν απομάκρυνση As μέσω:

- ✚ Ιζηματοποίησης
- ✚ Προσρόφησης
- ✚ Ανταλλαγής Ιόντων
- ✚ Μεμβρανών
- ✚ Εναλλακτικών διεργασιών

Για την κάθε μία τεχνολογία γίνεται περιγραφή του τρόπου λειτουργίας, πως απομακρύνεται το αρσενικό μέσω αυτής, παράγοντες που τις επηρεάζουν (π.χ. pH), αλλά και παραθέτονται πραγματικά δεδομένα μελετών που έχουν γίνει είτε σε πραγματικές εγκαταστάσεις, είτε σε εργαστηριακής ή πιλοτικής κλίμακας πειράματα. Παράλληλα, παραθέτονται και ενδεικτικές καμπύλες κόστους κάποιων διεργασιών για πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση και απορροφή συμπερασμάτων.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει μια ευρεία επισκόπηση των διεργασιών αφαίρεσης αρσενικού που χρησιμοποιούνται σήμερα με βάση την

αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία. Η κατανόηση των διαθέσιμων διεργασιών είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη οικονομικών, αποτελεσματικών μεθόδων για την απομάκρυνση του αρσενικού για την κάλυψη του αναμενόμενου M.C.L.

## 1.2 ΔΟΜΗ

Εκτός του παρόντος κεφαλαίου, πιο αναλυτικά στην παρούσα εργασία:

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται αναφορά στο στοιχείο του αρσενικού, για το που το συναντάμε στη φύση, που χρησιμοποιείται, πως ερχόμαστε σε επαφή με αυτό, η βιολογική και φυσιολογική του σημασία, αλλά και οι επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία.

Στο Κεφάλαιο 3, θίγεται το πρόβλημα του αρσενικού στο πόσιμο νερό ανά τον κόσμο, με έμφαση στις χώρες που αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα λόγω του αρσενικού στο νερό τους, όπως η Χιλή και το Μπαγκλαντές. Επίσης, αναλύεται και η ύπαρξη του στον Ελλαδικό χώρο.

Στο Κεφάλαιο 4, παραθέτονται οι νομοθεσίες για το πόσιμο νερό και τα όρια του αρσενικού σύμφωνα με τον Π.Ο.Υ., την Ε.Ρ.Α. και της Ε.Ε. Επιπλέον, υπάρχουν και οι νομοθεσίες της Χιλής, του Μπαγκλαντές, αλλά και της Ελληνικής Δημοκρατίας.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται εστίαση στις διεργασίες απομάκρυνσης αρσενικού από το πόσιμο νερό για να επιτευχθεί το M.C.L του Π.Ο.Υ.

Στο Κεφάλαιο 6, προβάλλονται οι καμπύλες κόστους για κάποιες από τις τεχνολογίες του Κεφαλαίου 5.

Στο Κεφάλαιο 7, γίνεται αναφορά στην περίπτωση του προβλήματος με το αρσενικό στην Κάσο (Case Study).

Στο Κεφάλαιο 8, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την βιβλιογραφική αυτή έρευνα.

Τέλος, επισυνάπτονται οι βιβλιογραφικές αναφορές και τα παραρτήματα.



## 2 ΑΡΣΕΝΙΚΟ

Το αρσενικό είναι ένα μεταλλοειδές, που σημαίνει ότι μπορεί να συμπεριφέρεται ως μέταλλο ή ως μη μέταλλο, με σύμβολο As, ατομικό αριθμό 33 και ατομικό βάρος 74,9216 *gr/mol*. Ανήκει στη VA ομάδα του περιοδικού συστήματος (ομάδα αζώτου). Το στοιχείο αυτό είναι το 20ο πιο άφθονο συστατικό του φλοιού της Γης και διανέμεται ευρέως σε βράχους και έδαφος, σε φυσικά νερά και σε μικρές ποσότητες στα περισσότερα έμβια όντα (Wang, et al., 2006). Από τις ενώσεις του αρσενικού, εκείνες που αναφέρονται για πρώτη φορά στην ιστορία είναι οι θειούχες.

Ομάδα →	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
Περίοδος ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

Λανθάνιδες	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Ακτινίδες	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Σειρές του περιοδικού πίνακα

Αλκαλιμέταλλα	Αλκαλικές γαίες	Λανθάνιδες	Ακτινίδες	Στοιχεία μετάπτωσης
Φτωχά μέταλλα	Μεταλλοειδή	Αμέταλλα	Αλογόνα	Ευγενή Αέρια

Σχήμα 2.1: Περιοδικός Πίνακας Χημικών Στοιχείων  
*Πηγή Σχήματος: (DePiep, 2022)*

Η χρήση του αρσενικού χρονολογείται από το 3000 π.Χ. όταν χρησιμοποιήθηκαν οι ενώσεις αρσενικού στα κράματα χαλκού και στα φάρμακα. Κατά τον 4<sup>ο</sup> αιώνα π. Χ., ο Αριστοτέλης αναφέρθηκε σε μια ουσία, την οποία ονόμασε σανδαράχη, και ήταν πιθανώς το ορυκτό που χαρακτηρίζουμε σήμερα ως ερυθρή σανδαράχη. Μεταγενέστεροι συγγραφείς θεωρούν το αρσενικό ως ημιμέταλλο. Το αρσενικό ομαδοποιείται συχνά μεταξύ των τοξικών μετάλλων, ανήκει σε μια κατηγορία στοιχείων γνωστών ως μεταλλοειδή, υπάρχει ως μια μεταλλική τροποποίηση (γκρίζο αρσενικό), καθώς επίσης και ως μη μεταλλική τροποποίηση (κίτρινο αρσενικό), δηλαδή, έχει μερικά χαρακτηριστικά των μετάλλων και μερικά χαρακτηριστικά των αμέταλλων (Fournier, et al., 2006).



**Σχήμα 2.2:** Μεταλλική τροποποίηση – Γκρίζο Αρσενικό  
*Πηγή Σχήματος:* (Γαλδαδάς Άλκης, 2013)



**Σχήμα 2.3:**  
Μη μεταλλική τροποποίηση – Κίτρινο Αρσενικό (Κίτρινη σανδαράχη)  
*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική σελίδα (Γεωλογική έρευνα των ΗΠΑ, 2020)



**Σχήμα 2.4:** Ορυκτό ερυθράς σανδαράχης  
*Πηγή Σχήματος:* (Wikipedia, 2022)

## 2.1 ΠΗΓΕΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΣΤΗ ΦΥΣΗ

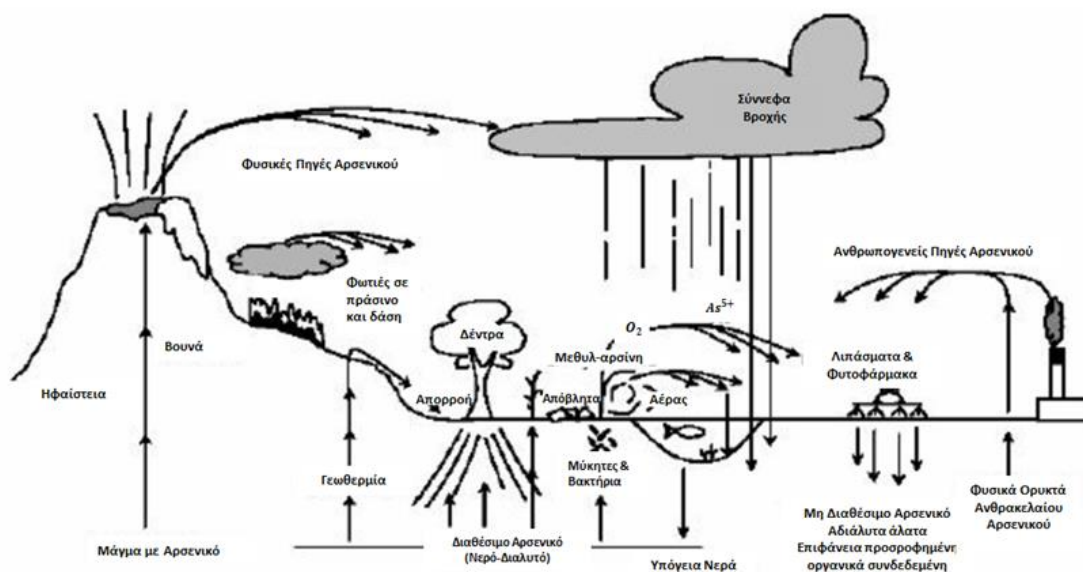
### 2.1.1 Αρσενικό στο Νερό

Υπάρχουν δύο μορφές ανόργανου αρσενικού που εμφανίζεται στο υπόγειο νερό:

- το αρσενικό ιόν ( $AsO_4^{3-}$ ) του πεντασθενούς αρσενικού (που καλείται επίσης ως As(V), ως (+5), και αρσενικό άλας) και
- το αρσενικό ιόν ( $AsO_3^{3-}$ ) του τρισθενούς αρσενικού (που καλείται επίσης όπως και τρισθενές αρσενικό, As(III), ως (+3), και arsenite).

Στο φυσικό υπόγειο νερό, το αρσενικό μπορεί να υπάρξει ως τρισθενές αρσενικό, πεντασθενές αρσενικό ή σε συνδυασμό και των δύο. Σε καλά οξυγονωμένα νερά κυριαρχεί το πεντασθενές αρσενικό, ενώ η απουσία οξυγόνου ευνοεί την ύπαρξη

τρισθενούς αρσενικού. Αμφότερες και οι δύο μορφές αρσενικού είναι ενδεχομένως επιβλαβείς στην ανθρώπινη υγεία, με το τρισθενές αρσενικό να θεωρείται επιβλαβέστερο από το πεντασθενές. Το τρισθενές αρσενικό είναι γενικά δυσκολότερο να αφαιρεθεί από το πόσιμο νερό, απ' ό,τι το πεντασθενές, και μπορεί να μετατραπεί σε πεντασθενές με την παρουσία ενός αποτελεσματικού οξειδωτικού, όπως το ελεύθερο χλώριο (Μήτρακας, et al., 2002).



**Σχήμα 2.5:** Κύκλος αρσενικού στο περιβάλλον  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*

### 2.1.1.1 Βρόχινο νερό

Στο βρόχινο νερό, οι οξειδωτικές καταστάσεις του αρσενικού διαφοροποιούνται ανάλογα με την πηγή. Είναι πιθανόν να κυριαρχεί το  $As(III)_2O_3$ , όταν αυτό προέρχεται από καύση του άνθρακα και ηφαιστειακές πηγές, παρόλο που οργανικά είδη μπορεί να προέρχονται από την εξάτμιση εδαφών, όπως η τύρφη, και αρσενικό μπορεί να προέρχεται από θαλάσσια αερολύματα (αεροζόλ). Τα αναγόμενα είδη θα υποστούν οξείδωση από το ατμοσφαιρικό  $O_2$ , ενώ αντιδράσεις με τα ατμοσφαιρικά διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ) και όζον ( $O_3$ ) είναι πιθανές ( Smedley, et al., 2001).

### 2.1.1.2 Θαλάσσιο νερό

Σε όξινα θαλάσσια νερά, το κυρίαρχο είδος του αρσενικού είναι τυπικά το  $As(V)$ , παρόλο που είναι πάντοτε παρούσα ορισμένη ποσότητα  $As(III)$ , η οποία αποκτά αυξημένες συγκεντρώσεις σε ανοξικά νερά κοντά στο βυθό. Η αναλογία των  $As(V)/As(III)$  κυμαίνεται συνήθως από 10-100 στην ανοιχτή θάλασσα. Το  $As(V)$  είναι παρόν, κυρίως, ως  $HAsO_4^{2-}$  και  $H_2AsO_4^-$  στις τυπικές τιμές του pH των

θαλασσίων νερών (pH~8,2) και το As(III) κυρίως ως το ουδέτερο είδος  $H_3AsO_3$  ( Smedley, et al., 2001).

#### 2.1.1.3 Λίμνες-Ποτάμια

Σε νερά λιμνών και ποταμών το As(V) είναι γενικά το κυρίαρχο είδος, παρόλο που σημαντικές ποιοτικές και ποσοτικές εποχιακές διαφοροποιήσεις έχουν εντοπιστεί. Οι συγκεντρώσεις και η σχετική αναλογία των As(III) και As(V) ποικίλει ανάλογα με τις αλλαγές στην πηγή των φορτίων εισόδου, τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες και τη βιολογική δραστηριότητα. Η παρουσία As(III) μπορεί να διατηρηθεί σε όξινα νερά από τη βιολογική αναγωγή του As(V), ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Υψηλότερες συγκεντρώσεις As(III) έχουν βρεθεί σε περιοχές ποταμών πλησίον εισροών βιομηχανικών αποβλήτων, που περιέχουν κάποιες ποσότητες As(III) και σε νερά των οποίων ένα ποσοστό προέρχεται από γεωθερμικές πηγές.

Η αναλογία των As(III) και As(V) είναι ιδιαίτερα διαφοροποιημένη σε στρωματοποιημένες λίμνες, όπου οι οξειδοαναγωγικές συνθήκες μπορεί να μεταβάλλονται με το βάθος ή εποχιακά μέσα στο χρόνο. Η αναλογία των ειδών του As μπορεί να ποικίλει και ανάλογα με τη διαθεσιμότητα οξειδίων του σιδήρου και του μαγγανίου.

Οι οργανικές μορφές του αρσενικού απαντώνται συνήθως σε μικρές ποσότητες στα επιφανειακά νερά. Παρόλα αυτά, η ποσότητα των οργανικών ειδών του αρσενικού μπορεί να αυξηθεί ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων μεθυλίωσης που καταλύονται από τη μικροβιακή δραστηριότητα. Τα κυρίαρχα οργανικά είδη που απαντώνται είναι το Διμεθυλαρσινικό Οξύ  $CH_3AsO(OH)$  (DMAA) και το Μεθυλαρσονικό Οξύ  $CH_3AsO(OH)_2$  (MAA), όπου το αρσενικό είναι παρόν και στις δύο περιπτώσεις με την πεντασθενή μορφή του. Οι ποσότητες των δύο αυτών ειδών αυξάνουν συνήθως το καλοκαίρι, εξαιτίας της αυξημένης μικροβιακής δραστηριότητας. Τα οργανικά είδη μπορεί, επίσης να είναι επικρατέστερα κοντά στη διεπιφάνεια ιζήματος-νερού ( Smedley, et al., 2001).

#### 2.1.1.4 Γεωθερμικά νερά

Η χημική συμπεριφορά του αρσενικού σε γεωθερμικά ρευστά πλούσια σε περιεκτικότητα θείου, έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης και αντιπαράθεσης για πάρα πολλά χρόνια, καθώς εμφανίζονται αρκετά εμπόδια στην ακριβή πρόβλεψη της μορφής του αρσενικού. Εν μέρει, αυτό αντανάκλα την έλλειψη μιας ολοκληρωμένης θερμοδυναμικής βάσης δεδομένων για τα είδη του αρσενικού.

Έχει υποστηριχθεί από αρκετούς μελετητές, ότι από θερμοδυναμικής άποψης, σε αναγωγικά ρευστά με χαμηλές συγκεντρώσεις σουλφιδίων, το αρσενικό είναι περισσότερο πιθανόν να μεταφερθεί στα υδροθερμικά διαλύματα ως οξύ του As(III)  $H_3As(III)O_3^0$  (αρσενικό οξύ), παρά ως σύμπλοκο του θείου. Το  $H_3AsO_3$  θεωρείται προϊόν της διάλυσης τόσο των οξειδίων του αρσενικού ( $As_4O_6$ ), όσο

και του τρισουλφιδίου του αρσενικού ( $As_2S_3$ ) σε αναγωγικά ρευστά, σε όξινο έως ουδέτερο pH και σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών συνθηκών. Η διαλυτότητα του  $As_2S_3$  αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ είναι ανεξάρτητη από την τιμή του pH σε όξινες συνθήκες. Καθώς, όμως, αυξάνει η απελευθέρωση σουλφιδίων από το τρισουλφίδιο του αρσενικού, η διαλυτότητά του μειώνεται.

Σε αναγωγικά υδροθερμικά διαλύματα πλούσια σε συγκεντρώσεις σουλφιδίων, η διαλυτότητα του  $As_2S_3$  ως  $H_3AsO_3$  περιορίζεται, ενώ αυξάνει η διαλυτοποίηση ως σύμπλοκα θείου-αρσενικών.

Γενικά, το αρσενικό κυριαρχεί στις περισσότερες θερμές πηγές και στους θερμοπίδακες που σχηματίζονται από την άμεση εκφόρτωση της υπόγειας γεωθερμικής πηγής.

Η οξείδωση του αρσενικών σε αρσενικό ευνοείται θερμοδυναμικά όταν οι οξειδοαναγωγικές συνθήκες σε ρευστά με χαμηλές συγκεντρώσεις θείου, γίνουν εξαιρετικά οξειδωτικές. Η οξείδωση λαμβάνει χώρα όταν το ανερχόμενο γεωθερμικό ρευστό εκτεθεί σε ατμοσφαιρικό οξυγόνο, ή αναμιχθεί με κάποιο άλλο οξειδωτικό ρευστό, όπως το υπόγειο νερό. Τα αρσενικά ιόντα σχηματίζονται με μεγάλη ταχύτητα σε υπερχειλίσσεις θερμών πηγών, καθώς και στους επιφανειακούς αποδέκτες (Webster, et al., 2003).

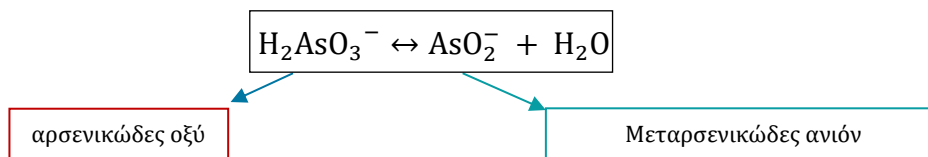
#### 2.1.1.5 Υπόγεια νερά

Στα υπόγεια νερά η αναλογία των  $As(III)$  και  $As(V)$  μπορεί να ποικίλει σε μεγάλο βαθμό, ως αποτέλεσμα των διαφοροποιήσεων στην αφθονία οξειδοαναγωγικών ενεργών στερεών, ιδιαίτερα οργανικού άνθρακα, στη δραστηριότητα των μικροοργανισμών και στο βαθμό της συμμεταφοράς και διάχυσης του  $O_2$  από την ατμόσφαιρα. Σε ισχυρά αναγωγικούς υδροφορείς το  $As(III)$  τυπικά κυριαρχεί. Αναγωγικά, πλούσια σε αρσενικό υπόγεια νερά από το Μπαγκλαντές έχουν αναλογίες  $As(III)/As_T$  που κυμαίνονται από 0,1 – 0,9 και τυπικά βρίσκονται στο εύρος 0,5 – 0,6. Οι αναλογίες σε αναγωγικά υπόγεια νερά στη Μογγολία είναι συνήθως από 0,6 – 0,9. Οι συγκεντρώσεις των οργανικών ειδών είναι γενικά μικρές ή αμελητέες στα υπόγεια νερά ( Smedley, et al., 2001).

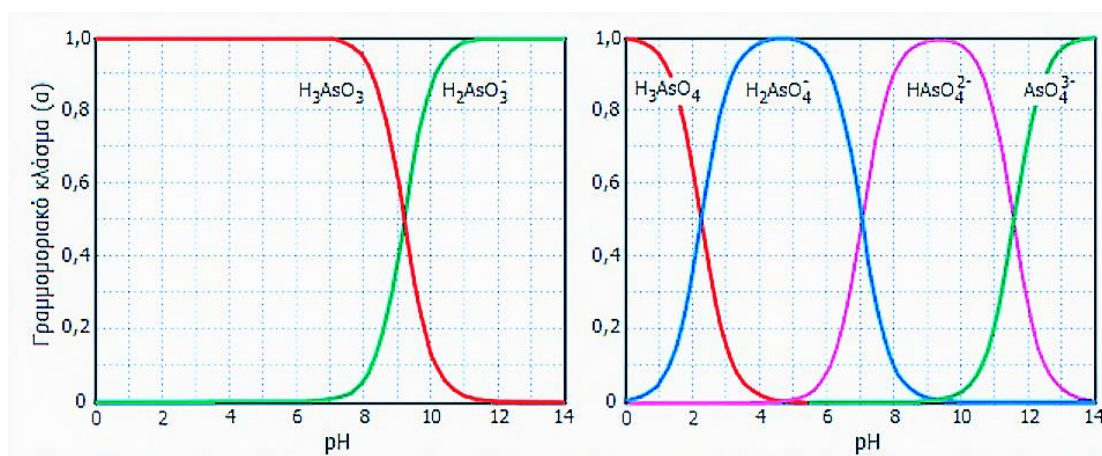
#### 2.1.2 Οξειδωτικές καταστάσεις του Αρσενικού

Όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω παράγραφο, το αρσενικό στις ενώσεις του εμφανίζεται με δύο εξίσου σταθερές οξειδωτικές καταστάσεις: ως  $As[III]$  και ως  $As[V]$ . Στα διαλύματά του δεν υφίστανται κατιόντα  $As^{3+}$  και  $As^{5+}$ , αλλά με τις μορφές  $H_3AsO_3$  (arsenous acid – αρσενικών οξέος) και  $H_3AsO_4$  (arsenic acid - αρσενικού οξέος) αντίστοιχα ή τις διστάμενες μορφές του, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6. Η πλέον συνηθισμένη μορφή του  $As[III]$  είναι το ασθενέστατο αρσενικών οξύ  $H_3AsO_3$  ( $K_a = 6 \cdot 10^{-10}$ ), του οποίου η ισχύς είναι ανάλογη εκείνου του βορικού οξέος  $H_3BO_3$ . Μια συνηθισμένη μορφή

αρσενικώδους ανιόντος (ιδιαίτερα στα στερεά άλατά του) είναι το μεταρσενικώδες ανιόν,  $\text{AsO}_2^-$ :



Η πλέον συνηθισμένη μορφή του As[V] είναι το κατά πολύ ισχυρότερο αρσενικό οξύ  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  ( $K_{\alpha,1} = 6 \cdot 10^{-3}$ ), του οποίου η ισχύς είναι ανάλογη του φωσφορικού οξέος,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .



**Σχήμα 2.6:**

Αριστερά: Κατανομές των ιοντικών μορφών του αρσενικώδους οξέος (με τη μορφή As[III])

Δεξιά: Κατανομές των ιοντικών μορφών του αρσενικού οξέος (με τη μορφή As[V])

*Πηγή Σχήματος: (Μαλαμής, et al., 2021)*

Τα δύο αυτά είδη του αρσενικού είναι και αυτά που απαντώνται κυρίως στα υπόγεια ύδατα. Το πεντασθενές αρσενικό με την μορφή του αρσενικού οξέος είναι λιγότερο κινητικό και μπορεί να προσροφηθεί στα διάφορα ορυκτά κατά την κίνηση του υπόγειου νερού. Αντίθετα, το τρισθενές αρσενικό το οποίο παρουσιάζεται με την αδιάστατη μορφή του αρσενικώδους οξέος, είναι πολύ κινητικό και δεν μπορεί να προσροφηθεί αποτελεσματικά στα διάφορα ορυκτά (Μαλαμής, et al., 2021).

### 2.1.3 Συγκέντρωση αρσενικού στα φυσικά (μη-ρυπασμένα) πετρώματα-εδάφη

Η περιεκτικότητα του αρσενικού στον φλοιό της Γης είναι περίπου 5 γραμμάρια ανά τόνο, ενώ η περιεκτικότητα του στη φύση, υπολογίζεται ότι είναι περίπου 4 άτομα ανά 1.000.000 ατόμων πυριτίου. Το στοιχείο είναι πλατιά κατανομημένο. Ένα μικρό ποσό υπάρχει στη φυσική του κατάσταση σε καθαρότητα 90-98%. Το μεγαλύτερο μέρος, όμως, βρίσκεται ενωμένο με περισσότερα από 150 διαφορετικά ορυκτά, όπως τα θειούχα, τα αρσενικούχα, τα θειοαρσενικούχα και τα αρσενικά. Το αρσενικό σπάνια απαντάται ως καθαρό μέταλλο, αλλά συχνά

αποτελεί συστατικό των ορυκτών που περιέχουν θείο, το πιο κοινό από τα οποία είναι ο αρσеноπυρίτης ( $FeAsS$ ) (Society for Mining, 2015). Μερικά άλλα είναι η ερυθρά σανδαράχη ( $As_4S_4$ ), η κίτρινη σανδαράχη ( $As_2S_3$ ), ο λευκοπυρίτης ( $FeAs_2$ ) και ο εναργίτης ( $Cu_3AsS_4$ ) (Fournier, et al., 2006 p. 89). Επιπλέον, το αρσενικό βρίσκεται σε αφθονία σε πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα. Μερικά από τα πιο γνωστά είναι για τα πυριγενή ο γρανίτης, ο ρυόλιθος, ο γάββρος, ο βασάλτης, ο γρανοδιορίτης και για τα ιζηματογενή τα κροκαλοπαγή, ο ψαμμίτης, η άργιλος, η μάργα, ο φλύσχης, ο βωξίτης, ο ασβεστόλιθος, η κρητίς (κιμωλία), ο δολομίτης (Σαπουντζής, et al., 1985).

Από έρευνες που έχουν διεξαχθεί, τυπικές συγκεντρώσεις αρσενικού στα φυσικά μη-ρυπασμένα εδάφη ποικίλουν, παραδείγματος χάρη, από 5 – 6  $mg/kg$  στην Αυστρία και πάνω από 11  $mg/kg$  στην Ολλανδία και τον Καναδά. Παρόλα αυτά, η διαφορά μεταξύ των εδαφών μπορεί να είναι μεγάλη όσον αφορά τις τιμές συγκέντρωσης του αρσενικού. Για παράδειγμα, στα εδάφη της Χιλής παρατηρήθηκαν από 21 έως 231  $mg/kg$  αρσενικό. Πολλές από αυτές τις διαφορές στις τιμές, έχουν να κάνουν με το είδος των πετρωμάτων στο έδαφος. Έτσι, τα ασβεστολιθικά εδάφη παρουσιάζουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αρσενικού. Το αρσενικό ασβέστιο, αν και δεν είναι άφθονο στα εδάφη, είναι άμεσα διαλυτό και μπορεί να αποτελέσει αιτία για τις υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού. Επιπλέον, έχει βρεθεί ότι κάποιες εποχιακές μεταβολές στο αρσενικό σχετίζονται με την υγρασία του εδάφους. Έτσι, κάτω από συνθήκες πλημμύρας, βρέθηκε ότι το αρσενικό  $As[III]$  κυριαρχεί, ενώ σε αερόβιες συνθήκες ευνοείται η οξείδωση του από  $As[III]$  σε  $As[V]$ .

Σε μετρήσεις μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί, παρατηρήθηκε πως τα εδάφη που προέρχονται από σχιστόλιθο και γρανίτη ότι έχουν υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού, και συγκεκριμένα ξεπερνούν την τιμή των 250  $mg/kg$ . Επιπροσθέτως, από έρευνες στα Αυστραλιανά εδάφη που προέρχονται από χαλαζία έχουν παρατηρηθεί συγκεντρώσεις από 100 έως 200  $mg/kg$ , γεγονός που επέδρασε αρνητικά στις καλλιέργειες μπανάνας, όπου βρέθηκαν τοξικά συμπτώματα στα φύλλα των δέντρων τους. Τέλος, τα εδάφη σε περιοχές με γεωθερμική δραστηριότητα έχουν τόσο υψηλές συγκεντρώσεις σε αρσενικό, έτσι ώστε η υγεία των ζώων ελευθέρως βοσκής να επηρεάζεται σοβαρά.



**Σχήμα 2.7:**

Μορφές αρσενικού που συναντάμε στη φύση  
Πηγή Σχήματος: (Minerals Education Coalition, 2012)

#### **2.1.4 Αλλουβιακές Αποθέσεις – Αλλούβια**

Τα υλικά τα οποία αποτίθενται από τους ποταμούς ονομάζονται αλλούβια και είναι συνήθως περισσότερο εκτεταμένα στα χαμηλότερα τμήματα της διαδρομής ενός ποταμού, όπου και σχηματίζουν αλλουβιακά πεδία και δέλτα. Επίσης, μπορούν να σχηματιστούν σε σημεία όπου πλημμυρίζει ένα ποτάμι ή όταν η ταχύτητα του νερού ελέγχεται, π.χ. όταν ένα ποτάμι εκβάλλει σε μια λίμνη. Τα αλλούβια αποτελούνται κυρίως από πηλό, άμμο, άργιλο και χαλίκια, ενώ συχνά περιέχουν και μεγάλη ποσότητα οργανικής ύλης. Με τον τρόπο αυτό, σχηματίζεται ένα εύφορο έδαφος, όπως εκείνο των δέλτα του Μισισσιπή, του Νείλου, του Γάγγη κ.α.

Τα μικρά τεμάχια των πετρωμάτων που συνθέτουν τα αλλούβια έχουν υποστεί διάφορες τροποποιήσεις, κυρίως ως προς την πετρολογική σύνθεσή τους. Οι αναλογίες, δηλαδή, των διάφορων υλικών, τα οποία αποτελούν τα αλλούβια μεταβάλλονται και η μεταβολή αυτή είναι συνάρτηση αφενός της ανθεκτικότητας τους στη διάβρωση, και αφετέρου της συμπεριφοράς τους κατά τη μεταφορά. Εμφανίσεις εύθρυπτων πετρωμάτων, οι οποίες δεν προφυλάσσονται καλά από τη βλάστηση, ώστε να μη διαβρώνονται, μπορούν να προσφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό αλλουβίων, τα οποία μεταφέρονται από τους χειμάρρους ή τους ποταμούς. Η ένταση της αποσύνθεσης των διάφορων πετρωμάτων από τα οποία προέρχονται τα αλλούβια, εξαρτάται αμέσως από το κλίμα και από την ποσότητα των οργανικών οξέων που προέρχονται από τα φυτά. Σε υγρές περιοχές δε συναντώνται ασβεστολιθικές ή γρανιτικές κροκάλες μέσα στα αλλούβια. Ακόμη και χαλαζιακές κροκάλες είναι σπάνιες. Τα υλικά των πετρωμάτων, τα οποία συνιστούν τα αλλούβια, έχουν υποστεί επιπλέον τροποποίηση της μορφής τους. Τα θραύσματα, δηλαδή, των πετρωμάτων, τα οποία μεταφέρονται από το νερό, υφίστανται συνδυασμένες μηχανικές και χημικές επιδράσεις, οι οποίες τα αλλοιώνουν δίνοντάς τους διάφορες μορφές. Η στατιστική μελέτη αυτών των μορφών δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τις συνθήκες σχηματισμού τους. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να προσδιοριστεί η δυναμικότητα των σημερινών ποταμών και να καθοριστεί ο τρόπος κατά τον



οποίο σχηματίστηκαν οι παλαιότερες αλλουβιακές αποθέσεις, γεγονός που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για τη μεταλλευτική έρευνα.

Τα αλλούβια χαρακτηρίζονται και από τον τρόπο διάταξης των υλικών τους. Τα τεμάχια των πετρωμάτων, τα οποία αποθέτονται από τα ρέοντα ύδατα, δεν διατάσσονται με τυχαίο τρόπο. Οι κροκάλες κατά την απόθεσή τους διατάσσονται κυρίως κάθετα προς τη διεύθυνση του ρεύματος. Το γεγονός αυτό, επιτρέπει να αναπαραστήσουμε τη διεύθυνση την οποία είχε το ρεύμα κατά την απόθεση ενός αλλουβιακού στρώματος. Άμμοι και χαλίκια συσσωρεύονται σε φακοειδείς σχηματισμούς που αντιστοιχούν στην πρόσκωση αυλακώσεων του εδάφους κατά την υποχώρηση των πλημμυρών. Οι φακοί αυτοί αποθέτονται σε διαδοχικές στρώσεις, οι οποίες κλίνουν προς τη φορά του ρεύματος. Οι διαστάσεις και οι κλίσεις των στρώσεων αυτών μας δίνουν πληροφορίες για την παροχή του ρεύματος το οποίο τις απέθεσε.

Τα αλλούβια, ακόμη, παρουσιάζουν και χαρακτηριστικό διαχωρισμό των υλικών τους ανάλογα με τις διαστάσεις τους. Το μέγεθος των τεμαχίων, τα οποία αποθέτονται εξαρτάται από την ταχύτητα του ρεύματος, γεγονός το οποίο προκαλεί τον σχηματισμό, μέσα στα αλλούβια, στρωμάτων από κλαστικά υλικά με ποικίλες διαστάσεις. Κατά τις πλημμύρες, επειδή το ρεύμα του νερού είναι πολύ ισχυρό μέσα στην κοίτη του, αποθέτονται σ' αυτήν χονδρόκοκκα υλικά (κροκάλες, άμμοι), συσσωρευμένα κατά τράπεζες. Μέσα στα λιβάδια της πλημμυρισμένης πεδιάδας ή στα βαλτώδη δάση το ρεύμα είναι ασθενέστερο, λόγω του μικρού πάχους του υδάτινου στρώματος και της ανασχετικής επίδρασης την οποία προβάλλει η βλάστηση. Στους τόπους αυτούς αποθέτονται λεπτομερέστερα υλικά (ιλύς, άργιλος), τα οποία χαρακτηρίζονται ως «ιλύες υπερχειλίσης».

Τα χαρακτηριστικά των αλλουβίων εξαρτώνται στενά από τους διάφορους τρόπους με τους οποίους γίνεται από τα ρεύματα η μεταφορά και η συσσώρευσή τους. Η συστηματική τους μελέτη από γεωμορφολόγους μπορεί να προσφέρει μεγάλες υπηρεσίες στους υδρολόγους, καθώς επίσης και στους μηχανικούς που είναι επιφορτισμένοι με την κατασκευή τεχνικών έργων ή συστημάτων άρδευσης.



**Σχήμα 2.8:**

Αλλουβιακές αποθέσεις ποταμών στη λεκάνη του Αμαζονίου, κοντά στο Autazes, AM - Βραζιλία. Τα εποχιακά κοιτάσματα είναι εξαιρετικά γόνιμα και ζωτικής σημασίας για τη γεωργία επιβίωσης στη λεκάνη του Αμαζονίου κατά μήκος των όχθων του ποταμού

*Πηγή Σχήματος: (Thadani, 14 Δεκεμβρίου 2011)*

Τα αλλούβια, πρόσφατα ή παλαιότερα, μπορούν να υποστούν εκμετάλλευση, αν περιέχουν βαρέα ορυκτά ή πολύτιμους λίθους σε αξιόλογες ποσότητες. Κατά τη μεταφορά και την απόθεση από τα ρέοντα ύδατα άμμων που προέρχονται από τη διάβρωση και την αποσάθρωση πετρωμάτων που περιέχουν διάφορους τύπους μεταλλευμάτων ή πολύτιμων λίθων, δημιουργείται πολλές φορές τοπική συγκέντρωση από θραύσματα βαρέων ορυκτών ή πολύτιμων λίθων, εφόσον βέβαια αυτά κατά τη διαδρομή παραμένουν αμετάβλητα.



**Σχήμα 2.9:**

Αλλουβιακές αποθέσεις στο Badwater, Death Valley, CA

*Πηγή Σχήματος: (Miller, 20 December 2011).*

Από τις διαδικασίες της αποσάθρωσης και της διάβρωσης των πετρωμάτων, αλλά και από το φαινόμενο των κατακρημνίσεων προκύπτει και η σύνδεση μεταξύ των αλλουβιακών αποθέσεων και της παρουσίας αρσενικού στο νερό. Στην περίπτωση των αλλουβίων, μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις με τις οποίες το αρσενικό μπορεί να περάσει στο νερό. Αρχικά, με την επαφή του

πετρώματος που παρουσιάζεται το αρσενικό και του νερού του ποταμού, το στοιχείο μπορεί να περάσει απευθείας σε αυτό, το οποίο πιθανόν να τροφοδοτεί άμεσα κάποια εγκατάσταση επεξεργασίας νερού. Επιπλέον, από τη στιγμή που το αρσενικό περάσει στο νερό που ρέει, μέσω της διήθησης, μπορεί εύκολα να διεισδύσει και στα υπόγεια ύδατα. Από την άλλη, στα δέλτα των ποταμών, όπου βρίσκονται τα αλλούβια και αποτίθενται τα υλικά με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται μεγάλες ποσότητες αρσενικού, το αρσενικό είναι δυνατόν να εισχωρήσει στα υπόγεια νερά. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και μέσω των κατακρημνίσεων κατά τη διάρκεια των οποίων τα πετρώματα «ξεπλένονται». Τέλος, να σημειωθεί ότι καθώς τα δέλτα των ποταμών, όπως προαναφέρθηκε, αποτελούν εύφορες περιοχές και επομένως πιθανόν εκμεταλλεύσιμες για καλλιέργειες, το αρσενικό με μεγάλη ευχέρεια μπορεί να μεταφερθεί και στα προϊόντα που καλλιεργούνται και διατίθενται προς κατανάλωση.

## 2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ

Όταν ο αρσеноπυρίτης θερμανθεί στους 650-700 °C, σε απουσία αέρα, σχηματίζεται μεταλλικό αρσενικό. Η παγκόσμια κατανάλωση του μεταλλικού αρσενικού είναι σχετικά μικρή, και ανέρχεται σε μερικές εκατοντάδες τόνους περίπου το χρόνο. Το περισσότερο από το αρσενικό που καταναλώνεται προέρχεται από τη Σουηδία, λόγω των ημιμεταλλικών του ιδιοτήτων έχει μεταλλουργικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται κράμα περιεκτικότητας σε αρσενικό 1% περίπου για την κατασκευή μολύβδινων σφαιρών, επειδή βελτιώνει τη σφαιρικότητα των σταγόνων του τήγματος, ή ένα μικρό ποσό αρσενικού στα κράματα μολύβδου τα σκληραίνει για τη χρήση τους σε μπαταρίες και ως επικαλύμματα καλωδίων. Μικρές ποσότητες αρσενικού, επίσης, βελτιώνουν την ανθεκτικότητα στην διάβρωση και τις θερμικές ιδιότητες του χαλκού και του ορείχαλκου (Fournier, et al., 2006).

Σε αντίθεση με την περιορισμένη χρήση του μεταλλικού (στοιχειακού) αρσενικού, δεκάδες χιλιάδες τόνοι του στοιχείου καταναλώνονται κάθε χρόνο με τη μορφή των ενώσεών του. Οι ενώσεις αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως στη γεωργία. Το αρσενικό ασβέστιο  $\text{Ca}(\text{AsO}_4)_2$  αυξάνει την παραγωγή του βαμβακιού περιορίζοντας τον πολλαπλασιασμό του Ανθονόμου (*Anthonomus grandis*), και χρησιμοποιείται ακόμη και για την εξόντωση αγριόχορτων. Ο αρσενικός μολύβδος ( $\text{PbHAsO}_4$ ) καταπολεμά τα έντομα των φρούτων και ιδιαίτερα του *Laspeyresia pomonella*, του οποίου οι κάμπιες είναι καταστρεπτικές για τα μήλα. Το αρσενικό νάτριο εμποδίζει τη σήψη των φύλλων της πατάτας. Επίσης, αποφλοιώνει τα δέντρα και εξοντώνει τα υδρόβια φυτά των λιμνών και των ποταμών. Ως συστατικό του υγρού με το οποίο ψεκάζουν τα πρόβατα και τις αγελάδες, βοηθά στην καταπολέμηση των ψειρών και άλλων παρασίτων. Ακόμη, ο θειρισμός του βαμβακιού διευκολύνεται με τη χρήση του αρσενικού οξέος, , και του κακοδυλικού οξέος, , τα οποία χρησιμοποιούνται ως ξηραντικά. Οι παραπάνω ενώσεις επίσης χρησιμοποιούνται για την απολύμανση του εδάφους. Μερικές

άλλες αρσενικικές ενώσεις χρησιμοποιούνται ως ειδικά παρασιτοκτόνα και ως πρόσθετα στις τροφές των χοίρων και των πουλερικών (Fournier, et al., 2006).

### 2.3 ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ

Οι απόψεις σχετικά με το αν το αρσενικό ανήκει στα θρεπτικά για τον ανθρώπινο οργανισμό στοιχεία δίστανται. Η τοξικότητα του αρσενικού και των ενώσεων του ποικίλει πολύ και κλιμακώνεται από την υπερβολικά δηλητηριώδη αρσίνη και τα οργανικά της παράγωγα μέχρι το στοιχειακό αρσενικό που είναι σχετικά αδρανές. Γενικά, οι ενώσεις του αρσενικού είναι ερεθιστικές για το δέρμα και προκαλούν εύκολα δερματίτιδες.

Συνιστάται προστασία για την αποφυγή της εισπνοής σκόνης που περιέχει αρσενικό, αλλά οι περισσότερες δηλητηριάσεις φαίνεται ότι προέρχονται λόγω λήψης του από το στόμα. Η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση αρσενικού στη σκόνη για αναπνοή σε οκτάωρη εργασία είναι 0,5 χιλιοστόγραμμα ανά κυβικό μέτρο (0,5 mg/m<sup>3</sup>). Για την αρσίνη, έκθεση παρόμοιας διάρκειας απαιτεί συγκέντρωση στον αέρα μικρότερο από 0,05 μέρη στο εκατομμύριο. Εκτός από τη χρήση των αρσενικικών ενώσεων ως εντομοκτόνων και ζιζανιοκτόνων, έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλά έτη για ιατρικούς λόγους (Fournier, et al., 2006). Χρησιμοποιήθηκε ως θεραπεία για τις ασθένειες, όπως τη σύφιλη, και έχει αποδειχθεί ότι βοηθάει στη θεραπεία λευχαιμίας. Σε πολύ χαμηλά επίπεδα πιθανόν να έχει και ευεργετικά αποτελέσματα. (Ζήκου, 2007). Το πρώτο επιτυχές αντισυφιλιδικό, για παράδειγμα, ήταν μια ένωση του αρσενικού, η «Σαλβαρσάνη» ή «606» ή Διυδροχλωρικό 3,3'- διάμινο - 4,4' - διυδροξυαρσενοβενζόλιο (Fournier, et al., 2006).

Το αρσενικό μπορεί να υπάρξει σε ανόργανη ή οργανική μορφή. Το αρσενικό που συνδυάζεται με άλλα στοιχεία όπως το οξυγόνο, το χλώριο και το θείο καλείται ανόργανο αρσενικό. Το αρσενικό που συνδυάζεται με τον άνθρακα και το υδρογόνο αναφέρεται ως οργανικό αρσενικό. Το οργανικό αρσενικό μπορεί να βρεθεί στο νερό, στον αέρα, στο χώμα, στον ηφαιστειακό βράχο, στα φυτά και στα ζώα. Οι ανόργανες ενώσεις αρσενικού χρησιμοποιούνται κυρίως για να συντηρήσουν το ξύλο, ενώ οι οργανικές ενώσεις αρσενικού χρησιμοποιούνται ως φυτοφάρμακα. Η κατανόηση της διαφοράς μεταξύ του ανόργανου και οργανικού αρσενικού είναι σημαντική, επειδή οι οργανικές μορφές είναι συνήθως λιγότερο επιβλαβείς από τις ανόργανες. Ακόμη και τα τρόφιμα μπορούν να περιέχουν και ανόργανες και οργανικές μορφές αρσενικού, όμως οι πρώτιστα ανόργανες είναι παρούσες στο νερό. Οι περισσότερες ενώσεις αρσενικού είναι μη ανιχνεύσιμες στις αισθήσεις, δεδομένου ότι δεν έχουν καμία μυρωδιά, γεύση ή χρώμα όταν διαλύονται στο νερό, ακόμη και στις υψηλές συγκεντρώσεις. Επομένως, μόνο η εργαστηριακή ανάλυση μπορεί να καθορίσει την παρουσία και τη συγκέντρωση του αρσενικού στο νερό. Μόνο στην περίπτωση που το αρσενικό θερμομανθεί από

το φως του ήλιου ή σ' ένα εργαστηριακό πείραμα, περνά άμεσα από στερεά κατάσταση σε αέρια και εκπέμπει μια διακριτική μυρωδιά σκόρδου (Ζήκου, 2007)

#### 2.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ

Το αρσενικό είναι ο σημαντικότερος ρύπος που κάνει απαγορευτική τη χρήση υπόγειων νερών ως ποσίμων, ιδιαίτερα σε χώρες της Ασίας. Το μεταλλοειδές αυτό, προκαλεί ισχυρή τοξική αντίδραση στον οργανισμό μετά από κατάποση μέσω επιμολυσμένης τροφής και ιδιαίτερα νερού. Τα άμεσα συμπτώματα της οξείας δηλητηρίασης από αρσενικό περιλαμβάνουν έμετο, κοιλιακό άλγος και διάρροια. Ακολουθούν μούδιασμα και μυρμήγκιασμα των άκρων, μυϊκές κράμπες και θάνατος, σε ακραίες περιπτώσεις με μεγαλύτερες δόσεις (World Health Organization, 2020) (Θεοδωρίδης, et al., 2015). Πιο συγκεκριμένα, η κατάποση υψηλών δόσεων αρσενικού συνήθως προκαλεί συμπτώματα που εκδηλώνονται εντός 30 έως 60 λεπτών, τα οποία, όμως, μπορεί να καθυστερήσουν εφόσον η κατάποση γίνεται μέσω της τροφής. Η οξεία δηλητηρίαση με αρσενικό ξεκινά με μια μεταλλική γεύση ή γεύση σκόρδου, κάψιμο στα χείλη και δυσφαγία, ενώ μπορεί να επακολουθήσουν βίαιες κρίσεις εμετού. Αυτά τα γαστροεντερικά συμπτώματα είναι το αποτέλεσμα εντερικών τραυματισμών που προκαλούνται από την διαστολή των σπλαγχνικών αγγείων. Θανατηφόρες δηλητηριάσεις με αρσενικό έχουν καταγραφεί μετά από στοματική λήψη σε ποσότητες των 2,8 και 21 g. Μη θανατηφόρες δηλητηριάσεις έχουν παρατηρηθεί μετά από στοματικές δόσεις των 1 – 4 g, αλλά και των 8 – 16 g. Για τα παιδιά, μη θανατηφόρα, αλλά πολύ επικίνδυνη άμεση δηλητηρίαση έχει παρατηρηθεί σε πολύ μικρότερη συγκέντρωση, της τάξης των 0,7 mg As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Abernathy, et al., 2001).

Περιστατικά με συνεχή ή επαναλαμβανόμενη έκθεση σε υψηλά επίπεδα αρσενικού για ένα σύντομο χρονικό διάστημα έχουν επίσης καταγραφεί και συσχετισθεί με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι επιζώντες από οξεία δηλητηρίαση με αρσενικό, παρουσιάζουν μακροχρόνια ή μόνιμα προβλήματα υγείας (Abernathy, et al., 2001). Επιπλέον, όταν γίνει έκθεση σε υψηλά επίπεδα ανόργανου αρσενικού με κατάποσή του μέσω της τροφής ή του νερού, τα πρώτα συμπτώματα παρατηρούνται συνήθως στο δέρμα και περιλαμβάνουν αλλαγές μελάγχρωσης, δερματικές αλλοιώσεις και σκληρά μπαλώματα στις παλάμες και τα πέλματα των ποδιών (υπερκεράτωση). Αυτά συμβαίνουν μετά από μια ελάχιστη έκθεση περίπου πέντε ετών και ίσως είναι πρόδρομος καρκίνος του δέρματος. Ο Διεθνής Οργανισμός Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC) έχει ταξινομήσει το αρσενικό και τις ενώσεις του αρσενικού ως καρκινογόνες για τον άνθρωπο και έχει επίσης δηλώσει ότι το αρσενικό στο πόσιμο νερό είναι καρκινογόνο για τον άνθρωπο. Το στοιχείο ενοχοποιείται για καρκίνο του δέρματος, του ήπατος, ίσως και των νεφρών, και κυρίως για καρκίνο της ουροδόχου κύστεως και των πνευμόνων. Κατηγορείται ακόμη για ηπατοπάθειες, προβλήματα στο πεπτικό σύστημα και πάχυνση του δέρματος. Σε

ό,τι αφορά το νευρικό σύστημα, μπορεί να επιδράσει στην ακοή και να οδηγήσει σε απώλεια της αίσθησης στα μέλη. Άλλες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία που μπορεί να σχετίζονται με τη μακροχρόνια κατάποση ανόργανου αρσενικού περιλαμβάνουν αναπτυξιακές επιδράσεις, διαβήτη, πνευμονική νόσο και καρδιαγγειακή νόσο. Το έμφραγμα του μυοκαρδίου που προκαλείται από αρσενικό, ειδικότερα, μπορεί να είναι σημαντική αιτία υπερβολικής θνησιμότητας. Από τις παλαιότερες καταγεγραμμένες περιπτώσεις χρόνιας δηλητηρίασης με αρσενικό είναι στην Κίνα (επαρχία της Ταϊβάν) από τη δεκαετία του '20, έχει συνδεθεί με τη «νόσος του μαύρου ποδιού» ή αλλιώς BFD (Blackfoot disease), η οποία ίσως να είναι και η πιο γνωστή και είναι μια σοβαρή ασθένεια των αιμοφόρων αγγείων που οδηγεί σε γάγγραινα (World Health Organization, 2020). Αυτή η αγγειακή ασθένεια, που οδηγεί σε σταδιακά αναπτυσσόμενη γάγγραινα στα πόδια ( Smedley, et al., 2001). Το αρσενικό σχετίζεται επίσης με δυσμενή έκβαση της εγκυμοσύνης και τη βρεφική θνησιμότητα, με επιπτώσεις στην υγεία του παιδιού (Quansah, et al., 2015), και η έκθεση στη μήτρα και στην πρώιμη παιδική ηλικία έχει συνδεθεί με αυξήσεις στη θνησιμότητα σε νεαρούς ενήλικες λόγω πολλαπλών καρκίνων, πνευμονικών ασθενειών, καρδιακών προσβολών, και νεφρική ανεπάρκεια (Farzan, et al., 2013). Πολυάριθμες μελέτες έχουν δείξει αρνητικές επιπτώσεις της έκθεσης σε αρσενικό στη γνωστική ανάπτυξη, τη νοημοσύνη και τη μνήμη (Tolins, et al., 2014). Σε ό,τι αφορά την εισπνοή ενώσεων αρσενικού, αυτή έχει συνδεθεί με καρκίνο του πνεύμονα – περιστατικά έχουν καταγραφεί σε εργάτες σε χυτήρια χαλκού, σε ορυχεία χρυσού, αλλά και σε εργοστάσια παραγωγής παρασιτοκτόνων (Smith, et al., 2000).

Πως τα επιτυγχάνει όλα αυτά το στοιχείο; Ο μηχανισμός εμφάνισης ασθενειών εξαιτίας της έκθεσης σε αρσενικό δεν είναι με ακρίβεια γνωστός. Έχει δειχθεί ότι η βιομεθυλίωση είναι το κύριο μεταβολικό μονοπάτι για το ανόργανο αρσενικό στον άνθρωπο και σε πολλά είδη ζώων. Σύμφωνα μ' αυτό το μεταβολικό μονοπάτι, το αρσενικό υποβάλλεται αρχικά σε μετατροπή από πεντασθενές αρσενικό άλας (As[V]) στο τρισθενές αρσενικό άλας (As[III]), και με την επακόλουθη μεθυλίωση παράγονται διμεθυλιωμένοι και μεθυλιωμένοι μεταβολίτες. Μια προτεινόμενη σειρά είναι η ακόλουθη (Θεοδωρίδης, et al., 2015):

*AsV* → *AsIII* → *Methylarsonic οξύ (MA, AsV)* → *methylarsonous οξύ (As III)* → *dimethylarsinic οξύ (DMA, AsV)* και *dimethylarsinous οξύ (AsIII)*

Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι παρεμποδίζει τη λειτουργία ενδοκρινών αδένων, είτε επειδή διακόπτει, είτε επειδή μιμείται τη δράση των γλυκοκορτικοειδών κυττάρων, τα οποία ενεργοποιούν τα γονίδια που καταπολεμούν τον καρκίνο και ρυθμίζουν το επίπεδο του σακχάρου στο αίμα (Μήτρακας, et al., 2002). Πιο απλά, αποτελεί ουσιαστικά ένα «δηλητήριο» των κυττάρων που εμποδίζει την οξειδωτική ικανότητά τους. Δεδομένης της τοξικότητας του αρσενικού για τον

οργανισμό, πριν από μερικά χρόνια ίσχυσε στην Ε.Ε. νέο ανώτατο επιτρεπόμενο όριο ύπαρξης αρσενικού στο πόσιμο νερό, το οποίο ορίστηκε στα 10  $\mu\text{g}/\text{l}$  (Οδηγία 98/83/ΕΚ) – το όριο αυτό έχει ορίσει και ο Π.Ο.Υ. Το προηγούμενο όριο που ίσχυε ως τότε ήταν της τάξεως των 50  $\mu\text{g}/\text{l}$  (Smith, et al., 2000).

Βέβαια, εκτός από τις παραπάνω μορφές αρσενικού, υπάρχουν στον οργανισμό και άλλες λιγότερο επικίνδυνες έως και ακίνδυνες μορφές, όπως τα αρσενοσάκχαρα, αρσενοβεταΐνες, καθώς και οι αρσενοχολίνες. Πάνω από 20 διαφορετικές οργανοαρσενικές ενώσεις έχουν ενδιαφέρον από την βιοαναλυτική οπτική. Το μεθυλαρσενικό (methylarsonous) οξύ και το διμεθυλαρσενικό (dimethylarsinous) οξύ έχει ανιχνευθεί στα ούρα των υγιών ατόμων τα οποία έχουν καταναλώσει νερό που περιέχει ανόργανο αρσενικό, σε ασθενείς με προμυελοκυτταρική λευχαιμία που υποβάλλονται σε θεραπεία με τριοξείδιο του αρσενικού  $\text{As}_2\text{O}_3$ , και σε ανθρώπινα ηπατικά κύτταρα (HepG2) που εκτίθενται σε  $\text{As}[\text{III}]$ . Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι οι μεθυλιωμένοι μεταβολίτες αρσενικού ελέγχουν τη δράση ενάντια στα κύτταρα λευχαιμίας και λεμφώματος, και ίσως υφίσταται θεραπευτική επίδραση π.χ. του  $\text{As}_2\text{O}_3$  σε ασθενείς. Επομένως, η διευκρίνιση του μεταβολισμού του αρσενικού είναι πολύ σημαντική για καλύτερα θεραπευτικά αποτελέσματα, και είναι κρίσιμη στη μείωση των παρενεργειών του τριοξειδίου του αρσενικού  $\text{As}_2\text{O}_3$  (Θεοδωρίδης, et al., 2015).

Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται στις παρακάτω παραγράφους οι πιο συνηθισμένες παθήσεις που έχουν παρατηρηθεί εξαιτίας του αρσενικού.



**Σχήμα 2.10:**  
Δερματικές βλάβες λόγω δηλητηρίασης με αρσενικό  
*Πηγή Σχήματος: (Smith, et al., 2000)*



**Σχήμα 2.11:**  
Επιπτώσεις του As στην ανθρώπινη υγεία (BFD) – Μπαγκλαντές  
*Πηγή Σχήματος: (Νικολαΐδης, 2001)*

#### 2.4.1 Αγγειακές Παθήσεις

Η έκθεση σε αρσενικό έχει συνδεθεί με διάφορες αγγειακές παθήσεις, που επηρεάζουν τόσο τα μικρά όσο και τα μεγάλα αιμοφόρα αγγεία. Οι παλαιότερες έρευνες για το αρσενικό και τις αγγειακές παθήσεις επικεντρωνόταν μόνο στα μικρά αγγεία (π.χ., BFD), ενώ οι πιο πρόσφατες εστιάζονται κυρίως στις επιπτώσεις στα μεγαλύτερα αγγεία (π.χ., καρδιαγγειακές παθήσεις) ( Smedley, et al., 2001).

##### 2.4.1.1 Παθήσεις του περιφερειακού αγγειακού συστήματος

Όπως προαναφέρθηκε, το αρσενικό έχει συνδεθεί με την εμφάνιση της ασθένειας BFD, η οποία είναι ενδημική σε κάποιες περιοχές της Ταϊβάν. Τα συμπτώματά της χαρακτηρίζονται από κρυάδες και μούδιασμα στα πόδια, που ακολουθούνται από εξέλκωση και μαύρο χρωματισμό και συνεπακόλουθα οδηγούν σε γάγγραινα στα προσβαλλόμενα μέρη. Μελέτες στην Ταϊβάν έχουν δείξει καθαρά ότι η έκθεση σε αρσενικό μέσω του πόσιμου νερού συνδέεται με την BFD, με σημαντικές σχέσεις έκθεσης-απόκρισης, που συσχετίζονται με τη διάρκεια και το επίπεδο της έκθεσης. Η ακραία μορφή και η μεγάλη εξάπλωση που παρουσιάζεται στην Ταϊβάν δεν έχει παρατηρηθεί σε άλλες περιοχές. Είναι πιθανό, επομένως, και άλλοι παράγοντες, όπως υποσιτισμός ή η ταυτόχρονη έκθεση σε άλλες επικίνδυνες ουσίες να παίζουν κάποιο ρόλο στη μορφή της πάθησης ( Smedley, et al., 2001).

##### 2.4.1.2 Καρδιο- αγγειακές παθήσεις

Έρευνα που διεξήχθη (Engel, et al., 1994), στην οποία η θνησιμότητα που σχετίζεται με καρδιαγγειακές παθήσεις σε 30 επαρχίες των Η.Π.Α. συγκρίθηκε με τον αναμενόμενο αριθμό θανάτων, όπως αυτός προέκυπτε από τον εκτιμώμενο ρυθμό θνησιμότητας στις Η.Π.Α. Τα αποτελέσματα έδειξαν υπέρβαση



του ρυθμού θνησιμότητας για αρτηριακές παθήσεις και ανωμαλίες του κυκλοφοριακού συστήματος ( Smedley, et al., 2001).

#### **2.4.1.3 Υπέρταση**

Υπάρχουν περιορισμένα στοιχεία ότι χρόνια έκθεση σε αρσενικό σχετίζεται με την υπέρταση. Προς το παρόν έχουν διεξαχθεί μόνο τρεις μελέτες, δύο εκ των οποίων αφορούν περιβαλλοντική έκθεση ενώ η τρίτη αφορά έκθεση σε εργασιακό χώρο, οι οποίες συνδέουν την αυξημένη πίεση του αίματος με την έκθεση του οργανισμού στο αρσενικό ( Smedley, et al., 2001).

### **2.4.2 Καρκίνος**

Οι πρώτες ενδείξεις ότι η έκθεση σε αρσενικό και ο καρκίνος συνδέονται, χρονολογούνται στα τέλη της δεκαετίας του 1930. Το 1948 είχε παρατηρηθεί μια αύξηση του ρυθμού θνησιμότητας από καρκίνο των πνευμόνων ή του δέρματος σε άτομα που απασχολούνταν σε ένα εργοστάσιο παραγωγής αρσενικών νατρίου. Άλλες κατηγορίες εργαζομένων οι οποίοι εμφάνισαν σημάδια δηλητηρίασης από αρσενικό και καρκίνο του δέρματος ή των πνευμόνων, στα τέλη της δεκαετίας του 1950, ήταν οι οινοπαραγωγοί και οι εργάτες σε ορυχεία χρυσού ( Smedley, et al., 2001).

#### **2.4.2.1 Εμφάνιση καρκίνου εξαιτίας έκθεσης μέσω του πόσιμου νερού**

Τα τελευταία 20-30 χρόνια, η ερευνητική προσπάθεια έχει επικεντρωθεί στην πιθανή σχέση μεταξύ διάφορων μορφών καρκίνου και της έκθεσης σε αρσενικό μέσω της κατανάλωσης πόσιμου νερού. Αρκετή από αυτή τη δουλειά έχει εστιαστεί σε περιοχές της Ταϊβάν, όπου εμφανίζεται και η αγγειακή πάθηση BFD, αλλά υπάρχουν στοιχεία και για άλλες περιοχές στον κόσμο που παρουσιάζουν έκθεση του πληθυσμού σε αρσενικό, όπως η Ιαπωνία και η Αργεντινή. Τα στοιχεία που προέκυψαν δείχνουν μια αύξηση στην εμφάνιση καρκίνου κυρίως του πνεύμονα, της ουροδόχου κύστης, του νεφρού και του ήπατος. Από αυτές τις μελέτες, επίσης, προέκυψε ότι ο κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου αυξάνει, όσο αυξάνει και ο χρόνος και η συγκέντρωση έκθεσης. Τέλος, ο κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα και της ουροδόχου κύστης είναι σημαντικός, ανεξάρτητα από την ηλικία, το φύλλο και τις διατροφικές συνήθειες των εξεταζόμενων ατόμων.

#### **2.4.2.2 Έκθεση μέσω της αναπνευστικής οδού**

Μελέτες σε πληθυσμούς που εκτίθενται σε αρσενικό στον εργασιακό τους χώρο, όπως οι εργαζόμενοι σε βιομηχανίες παρασκευής παρασιτοκτόνων και οι μεταλλωρύχοι, έχουν επιδείξει μια σταθερή αύξηση στον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα. Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί δείχνουν μια στατιστικά σημαντική αύξηση του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα σε επίπεδα έκθεσης σε αρσενικό περίπου  $> 75 \text{ mg/m}^3/\text{έτος}$ . Ο κίνδυνος φαίνεται να αυξάνει ταχύτερα με την πρόσληψη αρσενικού σε μικρές αθροιστικές δόσεις και όχι με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις έκθεσης. Παρόλο που αυτές οι

ομάδες των εργατών έχουν εκτεθεί και σε άλλα χημικά, εκτός του αρσενικού, θεωρείται σχεδόν απίθανο να έχουν επηρεάσει με κάποιον επιπλέον παράγοντα τα αποτελέσματα. Ο ρόλος του καπνίσματος έχει μελετηθεί, επίσης, αλλά δε βρέθηκε ότι αποτελεί την αιτία για την αύξηση στα κρούσματα καρκίνου του πνεύμονα. Βρέθηκε, πάντως, ότι αποτελεί συνεργατικό παράγοντα του αρσενικού στην αύξηση του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα. Τέλος, ο κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου του νεφρού ή της ουροδόχου κύστης δε φαίνεται να αυξάνει σταθερά σε άτομα που εκτίθενται στο αρσενικό στον εργασιακό τους χώρο.

#### **2.4.2.3 Καρκίνος του δέρματος**

Κάποιες πρώτες μελέτες έχουν δείξει ότι το αρσενικό από τη φαρμακευτική χρήση, το πόσιμο νερό και την έκθεση σε χώρους εργασίας, μπορεί να σχετίζεται με δερματικές παθήσεις, συμπεριλαμβανομένου και του καρκίνου του δέρματος. Έκτοτε, η έκθεση σε αρσενικό μέσω του πόσιμου νερού έχει συνδεθεί με την αύξηση του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου καθώς και άλλων ασθενειών στο δέρμα. Ο καρκίνος του δέρματος συχνά προκαλείται από μια κερωτική αλλαγή, οι ανεπτυγμένες μορφές της οποίας χαρακτηρίζονται ως "Bowen's disease". Η κεράτωση μπορεί να προκληθεί από διαταραχές στη φυσική χρωμάτωση των ιστών του δέρματος. Ο καρκίνος του δέρματος που προκαλείται από το αρσενικό είναι συνήθως λεπιδωτός και εμφανίζεται πρωταρχικά σε μη εκτεθειμένα μέρη του σώματος, όπως τα πόδια ή οι παλάμες.

#### **2.4.2.4 Διαβήτης**

Από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στην Ταϊβάν, στο Μπαγκλαντές και στη Σουηδία προέκυψε ότι η έκθεση σε αρσενικό μέσω του πόσιμου νερού ή στον εργασιακό χώρο μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο εμφάνισης μιας μορφής διαβήτη («diabetes mellitus»). Παρόλα αυτά χρειάζεται να γίνουν περισσότερες μελέτες ώστε να μπορέσουν να διεξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα ( Smedley, et al., 2001).

#### **2.4.3 Νευρολογικές Επιπλοκές**

Είναι γενικά παραδεκτό ότι η άμεση δηλητηρίαση από αρσενικό προκαλεί αρνητικές νευρολογικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα στο περιφερειακό νευρικό σύστημα. Εντούτοις, δεν έχει ερευνηθεί σε βάθος το ενδεχόμενο ότι η μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλότερα επίπεδα αρσενικού μπορεί επίσης να προκαλέσει νευρολογικά προβλήματα. Από τις περιορισμένες αριθμητικά μελέτες πάνω σε αυτό το θέμα, έχει περιγραφεί η εκδήλωση διαφόρων νευρολογικών συμπτωμάτων σε άτομα που είχαν εκτεθεί σε αρσενικό. Για παράδειγμα, έχει εξεταστεί η συσχέτιση της έκθεσης σε τριοξειδίο του αρσενικού με την εμφάνιση νευροπάθειας του περιφερειακού συστήματος. Από τα δεδομένα έχει προκύψει ότι η έκθεση στο αρσενικό συνδέεται με μια αύξηση σε νευροπαθολογικές δυσλειτουργίες (αισθητήρια και κινητική νευροπάθεια) και με ανωμαλίες όπως π.χ., μειωμένη ταχύτητα μετάδοσης νευρικών ρευμάτων. Από την άλλη πλευρά, οι

αποδείξεις για μια σχέση μεταξύ της έκθεσης σε αρσενικό και στις επιπτώσεις στο νευρικό σύστημα είναι προς το παρόν περιορισμένες.

#### **2.4.4 Επιπτώσεις στο Αναπαραγωγικό Σύστημα**

Εκτός από τις προαναφερόμενες επιπτώσεις στην υγεία, η έκθεση σε αρσενικό έχει επίσης συνδεθεί με δυσμενείς επιπτώσεις στο αναπαραγωγικό σύστημα. Ένας αριθμός μελετών έχει προσπαθήσει να ερευνήσει αυτήν την πιθανή συσχέτιση, τα αποτελέσματα των οποίων προτείνουν μια αύξηση στην εμφάνιση εμβρυϊκής, θνησιμότητας καθώς και σε αποβολές και εκ γενετής δυσμορφίες. Παρόλα αυτά, οι μελέτες που έχουν εκπονηθεί συνολικά παρουσιάζουν αντιφατικά αποτελέσματα. Επομένως, προς το παρόν είναι γενικά αποδεκτό ότι δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι το αρσενικό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αναπαραγωγικότητας στον άνθρωπο.

### **2.5 ΑΡΣΕΝΙΚΟ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ**

Πολλά λιπάσματα περιέχουν τοξικά πρόσθετα, τα οποία κυρίως για οικονομικούς λόγους δεν έχει γίνει δυνατό να απομακρυνθούν κατά τη διάρκεια παρασκευής τους (Office of Solid Waste, 1999). Ορισμένα ανόργανα φυσικά λιπάσματα, όπως τα φωσφορικά περιέχουν κάδμιο, ενώ κάποια πρόσθετα λιπασμάτων που παράγονται από παραπροϊόντα της βιομηχανίας του χάλυβα περιέχουν μεν για το φυτό το χρήσιμο ψευδάργυρο αλλά και κάδμιο, αρσενικό, χρώμιο, νικέλιο, υδράργυρο (Syers, et al., 1986). Συνεπώς, με τη χρήση λιπασμάτων μπορεί να υπάρξει υπερσυσσώρευση αυτών των τοξικών μετάλλων στο έδαφος και κατ' επέκταση ρύπανση των υπόγειων νερών από αυτά. Ακόμη, η υπέρχρηση ζιζανιοκτόνων (atrazine, metolachlor, Alachlor, και Cyanazine) στις αγροτικές περιοχές μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εκτεταμένη εμφάνιση των ζιζανιοκτόνων στα γεωργικά ρέματα και τα ρηχά υπόγεια ύδατα. Εντομοκτόνα εντοπίζονται συχνά σε ορισμένες περιπτώσεις στην αποστράγγιση λεκανών απορροής, όπου γίνεται υψηλή χρήση αυτών. Παρατηρούνται λιγότερο συχνά στα ρηχά υπόγεια ύδατα, διότι τα περισσότερα εντομοκτόνα τείνουν να προσροφώνται στο έδαφος ή διασπώνται γρήγορα μετά το ψεκάσμο (Μάτζαρη, 2013).

### **2.6 ΑΡΣΕΝΙΚΟ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ**

Το αρσενικό μέταλλο πολύ σπάνια εμφανίζεται στην καθαρή του μορφή στη φύση. Το πιο συνηθισμένο ορυκτό αρσενικού είναι ο αρσеноπυρίτης, μια ένωση σιδήρου, αρσενικού και θείου. Αρκετά άλλα, λιγότερο συνηθισμένα ορυκτά περιέχουν αρσενικό, συμπεριλαμβανομένου της κίτρινης σανδαράχης, κόκκινη σανδαράχη και του εναργίτη, τα οποία είναι σουλφίδια αρσενικού. Το μεγαλύτερο μέρος του αρσενικού δεν λαμβάνεται από ορυκτό αρσενικού, αλλά ως υποπροϊόν στην επεξεργασία χρυσού, αργύρου, χαλκού και άλλων μεταλλευμάτων. Δεδομένου ότι πολύτιμα μέταλλα όπως ο χαλκός και ο χρυσός μπορούν επίσης να βρεθούν σε αποθέματα ορυκτών σουλφιδίων (θειούχων ενώσεων), οι εταιρείες

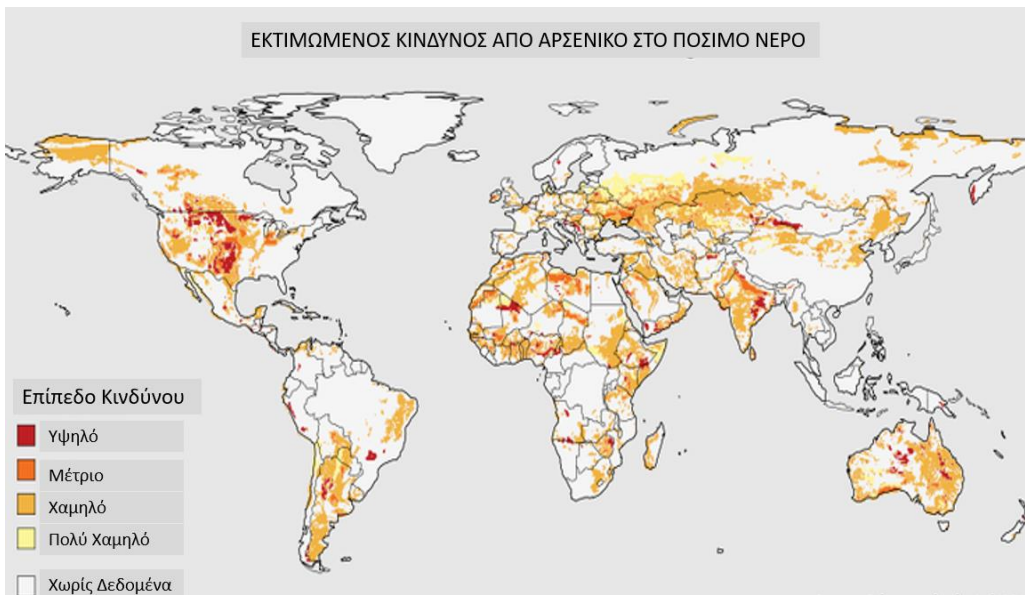
εξερεύνησης ορυχείων συχνά αναζητούν έδαφος και νερό με φυσικά υψηλή περιεκτικότητα σε αρσενικό ως μέσο εντοπισμού σώματος μεταλλεύματος (Society for Mining, 2015).

Το αρσενικό απελευθερώνεται φυσικά στο περιβάλλον μέσω των καιρικών συνθηκών, της οξείδωσης και της διάβρωσης των μεταλλικών σουλφιδίων. Ο ρυθμός απελευθέρωσης αρσενικού από θειούχα ορυκτά μπορεί να επιταχυνθεί με δραστηριότητες εξόρυξης, οι οποίες εκθέτουν τα ορυκτά σε καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της ανασκαφής (Wang, και συν., 2006). Επομένως, οι περιβαλλοντικοί νόμοι απαιτούν την απομάκρυνση του αρσενικού από τα μεταλλεύματα, έτσι ώστε να μην εισέρχεται στο περιβάλλον σε αέρια, υγρά ή στερεά απόβλητα. Σημαντικές ποσότητες αρσενικού σχετίζονται με τα κοιτάσματα χαλκού-χρυσού στη Χιλή, τις Φιλιππίνες και πολλές άλλες χώρες. Ωστόσο, πολλές χώρες παράγουν αρσενικό υποπροϊόν από την τήξη μεταλλευμάτων. Οι ατμοσφαιρικές εκπομπές αρσενικού από τη τήξη χαλκού αντιπροσωπεύουν τη μεγαλύτερη συμβολή του αρσενικού από τη βιομηχανία εξόρυξης και μετάλλων και έχουν αποτελέσει το επίκεντρο των τεχνολογιών ελέγχου της ρύπανσης και των όλο και πιο αυστηρών κανονισμών (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007). Η Κίνα είναι μακράν ο μεγαλύτερος παραγωγός, με τη Χιλή και το Μαρόκο να παρέχουν σημαντικά ποσά, και μικρότερη παραγωγή από περίπου δώδεκα άλλες χώρες με μεταλλουργεία. Οι Ηνωμένες Πολιτείες δεν εξορύσσουν αρσενικό από το 1985 και εισάγουν όλο το μεταλλικό αρσενικό και τις ενώσεις αρσενικού που καταναλώνουν. Πολύ λίγα ανακυκλώνονται, εκτός από τα απόβλητα από εργοστάσια που παράγουν ενώσεις αρσενικού και περιορισμένες ποσότητες μετάλλου αρσενικού έχουν ανακτηθεί από θραύσματα ημιαγωγών που έχουν κατασκευαστεί από αρσενίδιο του γαλλίου (*GaAs*) (Minerals Education Coalition, 2012). Το αρσενικό μπορεί, επίσης, να εκπλυθεί από κάποια μεταλλικά μεταλλεύματα με αποστράγγιση κυανιούχων ή όξινων πετρωμάτων, αλλά μπορεί να συλληφθεί και να απομακρυνθεί από τα λύματα πριν απελευθερωθεί στο περιβάλλον.

### 3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

#### 3.1 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ

Το αρσενικό είναι ένα φυσικό συστατικό του φλοιού της γης και είναι ευρέως καταναμημένο σε όλο το περιβάλλον στον αέρα, το νερό και τη γη. Είναι πολύ τοξικό στην ανόργανη μορφή του. Η μεγαλύτερη απειλή για τη δημόσια υγεία από το αρσενικό προέρχεται από τα μολυσμένα υπόγεια ύδατα. Το ανόργανο αρσενικό υπάρχει φυσικά σε υψηλά επίπεδα στα υπόγεια ύδατα πολλών χωρών, όπως η Αργεντινή, το Μπαγκλαντές, η Καμπότζη, η Χιλή, η Κίνα, η Ινδία, το Μεξικό, το Πακιστάν, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και το Βιετνάμ.

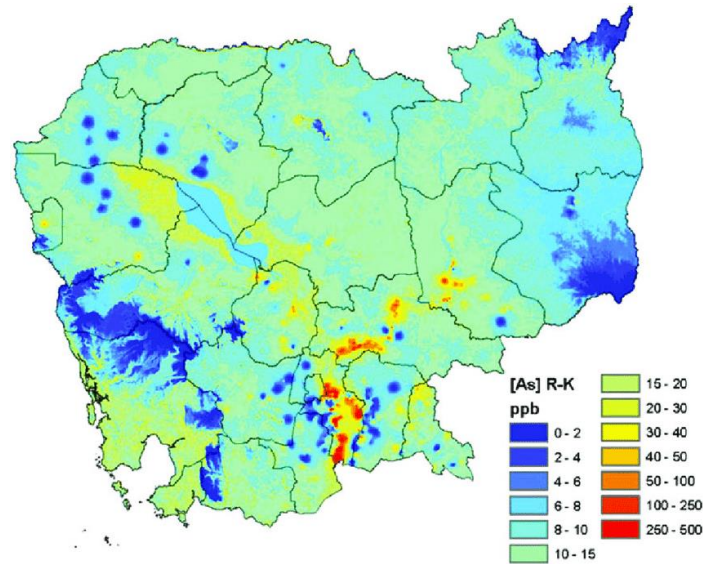


**Σχήμα 3.1:**

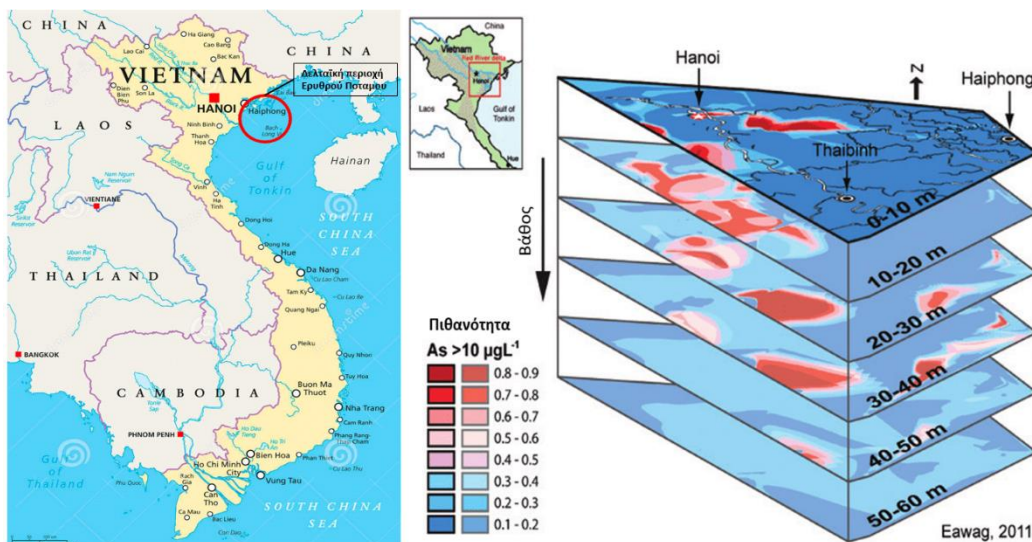
Μοντελοποιημένος κίνδυνος Αρσενικού στο πόσιμο νερό σε παγκόσμιο επίπεδο  
*Πηγή Σχήματος:* (Schwarzenbach, και συν., 2010) (Amini, et al., 2008)

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η εκτιμώμενη μέση περιεκτικότητα As (μg/L) σε υπόγεια ύδατα βάθους 16-100 m στην Καμπότζη (Bretzler, et al., 2017). Όπως διακρίνεται, στο μεγαλύτερο μέρος της χώρα η μέση περιεκτικότητα κυμαίνεται από 10 – 15 μg/L, σε άλλα επίσης αρκετά σημεία ανεβαίνει στα 20 – 30 μg/L και 30 – 40 μg/L, ενώ τοπικά όπου οι αποχρώσεις γίνονται πορτοκαλί και κόκκινες αναφερόμαστε σε επίπεδα 40 – 500 μg/L. Επιπλέον, στο γειτονικό της Καμπότζη Βιετνάμ, στο οποίο αναφέρεται το Σχήμα 14, μελετήθηκε η δελταϊκή περιοχή του Ερυθρού ποταμού στα βόρεια της χώρας, ως προς τις συγκεντρώσεις σε αρσενικό και είναι ευκρινές πως και εκεί υπάρχει πρόβλημα, αφού και επιφανειακά αλλά και σε βάθος έως 50 μέτρα υπάρχουν συγκεντρώσεις αρσενικού άνω των 10 μg/L που ορίζεται ως το επιτρεπτό όριο για το πόσιμο νερό από τον ΠΟΥ. Πηγές έκθεσης είναι το πόσιμο νερό, οι καλλιέργειες που αρδεύονται με μολυσμένο νερό και τα τρόφιμα που παρασκευάζονται με μολυσμένο νερό. Η μόλυνση των υπόγειων υδάτων από αρσενικό είναι ευρέως διαδεδομένη και υπάρχουν ορισμένες περιοχές όπου η μόλυνση του πόσιμου

νερού από αρσενικό είναι σημαντική. Υπολογίζεται ότι 140 εκατομμύρια άνθρωποι σε τουλάχιστον 70 χώρες έχουν πει νερό που περιέχει αρσενικό σε επίπεδα πάνω από την προσωρινή κατευθυντήρια τιμή του ΠΟΥ των 10  $\mu\text{g/L}$  (UNICEF, et al., 2018), (Ravenscroft, et al., 2009). Αυτό είναι σύμφωνο με την πρόσφατη στατιστική μοντελοποίηση που υποδηλώνει ότι μεταξύ 94 και 220 εκατομμύρια άνθρωποι κινδυνεύουν να εκτεθούν σε υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού στα υπόγεια ύδατα (WHO, 2022) (Podgorski, et al., 2020).



**Σχήμα 3.2:** Εκτίμηση της μέσης περιεκτικότητας As ( $\mu\text{g/L}$ ) σε υπόγεια ύδατα βάθους 16-100 m στην Καμπότζη με παλινδρόμηση-kriging  
*Πηγή Σχήματος:* (Lado, et al., 2008) (Sovann, et al., 2014)



**Σχήμα 3.3:** Μοντελοποιημένη πιθανότητα συγκέντρωσης αρσενικού άνω των 10  $\mu\text{g/L}$  σε διαφορετικά βάθη στο Δέλτα του Κόκκινου Ποταμού, Βιετνάμ  
*Πηγή Σχήματος:* (Winkel, et al., 2011)

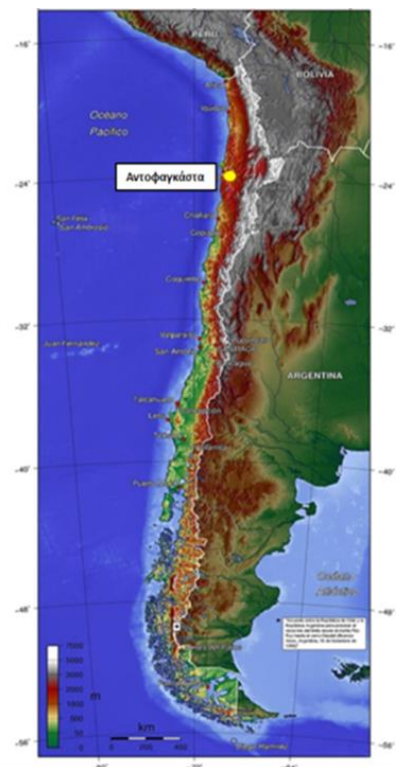
Ακολουθεί μια λίστα, που δημοσιεύτηκε στο πανεπιστήμιο του Μείν (University of Maine) σε συνδυασμό με μία έρευνα για το αρσενικό στα νερά της Αφρικής (Ahoulé, et al., 2015), με τις χώρες που έχουν εντοπιστεί με υψηλή συγκέντρωση αρσενικό στους υδάτινους πόρους τους. Μερικά απαντώνται φυσικά στα υπόγεια ύδατα, άλλα προέρχονται από γεωθερμικές πηγές (όπως θερμές πηγές) και μερικά επηρεάζονται από την εξόρυξη.

**Πίνακας 3.1:** Λίστα με τις χώρες που έχουν εντοπιστεί με υψηλή συγκέντρωση αρσενικό στους υδάτινους πόρους τους (**University of Maine**), (**Ahoulé, et al., 2015**).

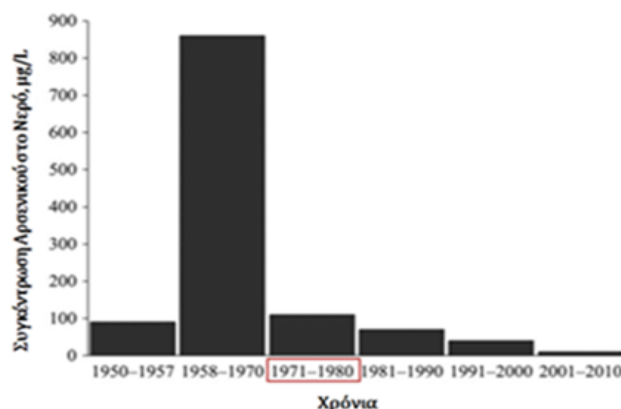
ΗΠΕΙΡΟΣ	ΧΩΡΕΣ
Ευρώπη	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Αυστρία</li> <li>➤ Φινλανδία</li> <li>➤ Γερμανία</li> <li>➤ Ελλάδα</li> <li>➤ Ουγγαρία</li> <li>➤ Σουηδία</li> <li>➤ Ηνωμένο Βασίλειο</li> <li>➤ Πολωνία</li> </ul>
Αμερική	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Αργεντινή</li> <li>➤ Καναδάς</li> <li>➤ Χιλή</li> <li>➤ Τζαμάικα</li> <li>➤ Μεξικό</li> <li>➤ Περού</li> <li>➤ ΗΠΑ</li> </ul>
Αφρική	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Μπουρκίνα Φάσο</li> <li>➤ Γκάνα</li> <li>➤ Αίγυπτο</li> <li>➤ Μαρόκο</li> <li>➤ Αιθιοπία</li> <li>➤ Τόγκο</li> <li>➤ Ζιμπάμπουε</li> <li>➤ Τανζανία</li> <li>➤ Νότιος Αφρική</li> <li>➤ Μποτσουάνα</li> <li>➤ Νιγηρία</li> <li>➤ Μπενίν</li> </ul>
Ασία	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Μπαγκλαντές</li> <li>➤ Καμπότζη</li> <li>➤ Ινδία</li> <li>➤ Ενδοχώρα της Μογγολίας</li> <li>➤ Ιράν</li> <li>➤ Ιαπωνία</li> <li>➤ Λάος</li> <li>➤ Μυανμάρ</li> <li>➤ Νεπάλ</li> <li>➤ Πακιστάν</li> <li>➤ Φιλιππίνες</li> <li>➤ Ταϊβάν</li> <li>➤ Ταϊλάνδη</li> <li>➤ Βιετνάμ</li> </ul>
Ωκεανία	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Αυστραλία</li> <li>➤ Νέα Ζηλανδία</li> </ul>

### 3.2 ΧΙΛΗ

Το αρσενικό είναι ένα φυσικό στοιχείο στο φλοιό της γης και συχνά ανιχνεύεται στο πόσιμο νερό. Εκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο εκτίθενται σε αρσενικό μέσω πόσιμου νερού. Η Βόρεια Χιλή είναι το ξηρότερο κατοικήσιμο μέρος στη γη, και σχεδόν ολόκληρος ο πληθυσμός εκεί βασίζεται αποκλειστικά σε δημόσια συστήματα νερού, χωρίς άλλες σημαντικές πηγές νερού, όπως εμφιαλωμένο νερό ή ιδιωτικά πηγάδια. Η Αντοφαγκάστα είναι η μεγαλύτερη πόλη στη βόρεια Χιλή με πληθυσμό 388.545 το 2017. Πριν το 1958, η συγκέντρωση του αρσενικού στο νερό της Αντοφαγκάστα ανερχόταν στα 90 μg/L. Το 1958, όμως, λόγω της αύξησης του πληθυσμού, οι πηγές νερού της πόλης άλλαξαν και πλέον η άντληση του νερού γινόταν από τους ποταμούς Τοσονσε και Ηοjαλαr, οι οποίοι μεταφέρουν γεωθερμικό νερό, καθώς πηγάζουν από τις Άνδεις, πιο συγκεκριμένα από το ηφαίστριο Τοσονσε, και εκβάλλουν στον ποταμό Loa. (Niemeyer, 1980) (Taehyun, et al., 2018). Αυτό το νερό περιέχει υψηλά επίπεδα αρσενικού, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις αρσενικού νερού πόλης να φτάνουν περίπου 860 μg/L, όταν το όριο από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.) είναι σήμερα λιγότερο από 10 μg/L (Borgono, et al., 1977 pp. 103,105) (WHO, Geneva 2008). Το 1970 τέθηκε σε λειτουργία μια εγκατάσταση επεξεργασίας νερού για την απομάκρυνση του αρσενικού από το νερό με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις να μειωθούν εξαιρετικά στα 100 μg/L, ενώ σήμερα έχουν φτάσει επίπεδα χαμηλότερα των 10 μg/L, όπως ορίζει ο Π.Ο.Υ.



**Σχήμα 3.4:** Γεωλογικός Χάρτης Χιλής όπου με γκρι χρώμα φαίνονται τα ηφαιστειακά πετρώματα Πηγή Σχήματος: (mapsChile).

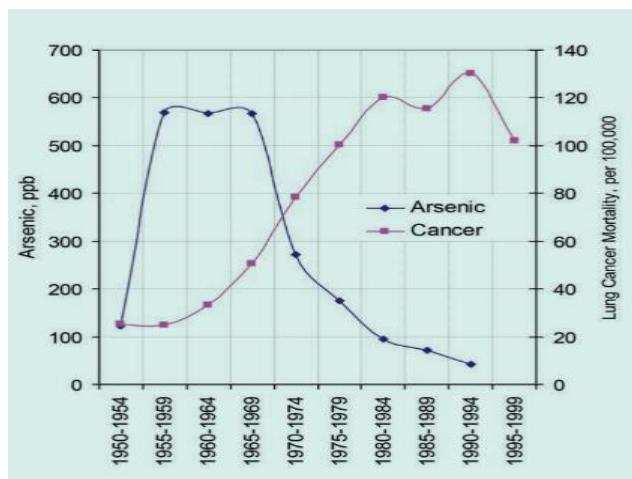


**Σχήμα 3.5:**

Συγκεντρώσεις αρσενικού πόσιμου νερού στην Antofagasta της Χιλής, 1950-2010. Νέες πηγές νερού με υψηλά επίπεδα αρσενικού χρησιμοποιήθηκαν από το 1958 και μετά, και ένα εργοστάσιο επεξεργασίας νερού για αφαίρεση αρσενικού εγκαταστάθηκε το 1970, με βελτιωμένη απόδοση αφαίρεσης μετά.

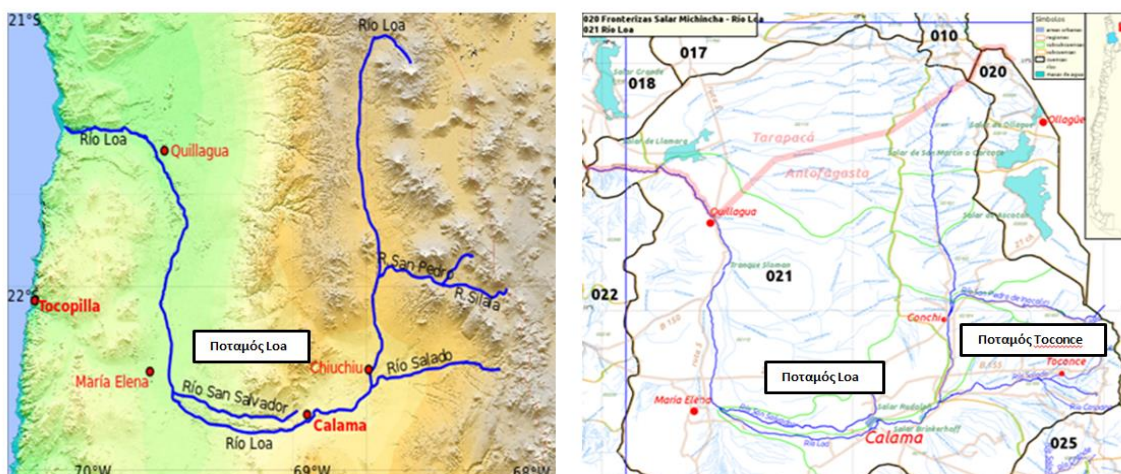
Πηγή Σχήματος: (Taehyun, και συν., 2018).





**Σχήμα 3.6:**

Έκθεση σε αρσενικό και θνησιμότητα ανδρικού καρκίνου του πνεύμονα στη Χιλή  
*Πηγή Σχήματος:* (UNICEF, et al., 2018)



**Σχήμα 3.7:**

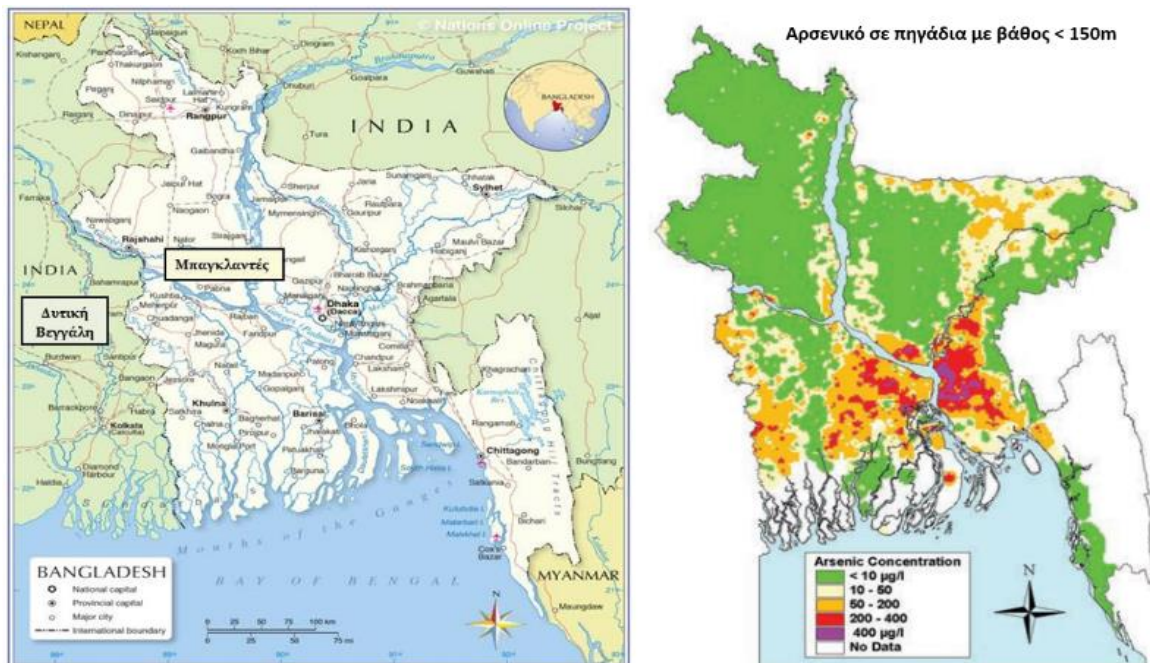
Αριστερά: Με τη μπλε γραμμή φαίνεται ο ποταμός Loa  
 Δεξιά: Η λεκάνη απορροής ποταμού Loa και δεξιά στο χάρτη ο ποταμός Τοκονσε  
*Πηγή Σχήματος:* (Generic Mapping Tools, 2012).

Σε άλλες μελέτες, σχετικά λίγοι είναι οι άνθρωποι που έχουν εκτεθεί σε συγκεντρώσεις αρσενικού άνω των 500  $\mu\text{g}/\text{L}$ . Για παράδειγμα, στη νοτιοδυτική Ταϊβάν 8.251 άτομα εκτέθηκαν σε 600  $\mu\text{g}/\text{L}$ , στη βορειοανατολική Ταϊβάν 698 άτομα σε επίπεδα άνω των 300  $\mu\text{g}/\text{L}$ , στη δυτική Βεγγάλη 902 σε πάνω από 500  $\mu\text{g}/\text{L}$ , με αποκορύφωμα μια περιοχή στο Μπανγκλαντές, όπου 10.430 κάτοικοι εκτέθηκαν σε επίπεδα αρσενικού άνω των 300  $\mu\text{g}/\text{L}$ . Στην περίπτωση, όμως της Αντοφαγκάστα, περίπου 125.000 κάτοικοι, κατά την περίοδο 1958 – 1970, ήρθαν σε επαφή με συγκεντρώσεις που ανέρχονται στα 860  $\mu\text{g}/\text{L}$ . Τα αποτελέσματα στην υγεία που παρατηρήθηκαν από αυτή τη χρόνια έκθεση ήταν υψηλές αναλογίες θνησιμότητας για καρκίνο του πνεύμονα, της ουροδόχου κύστης, του ήπατος και του λάρυγγα, χρόνια νεφρική νόσο και βρογχεκτασία στην ενηλικίωση, ακόμη και πριν από την ηλικία των 50 ετών (TaeHyun, και συν., 2018).

### 3.3 ΜΠΑΓΚΛΑΝΤΕΣ - ΔΥΤΙΚΗ ΒΕΓΓΑΛΗ

Το Μπαγκλαντές αντιμετωπίζει τη μεγαλύτερη μαζική δηλητηρίαση πληθυσμού στην ιστορία, εξαιτίας του γεγονότος πως τα υπόγεια ύδατα που χρησιμοποιούνταν για πόσιμο νερό, ήταν μολυσμένα με φυσικό ανόργανο αρσενικό. Η κλίμακα αυτής της περιβαλλοντικής καταστροφής είναι μεγαλύτερη από οποιαδήποτε προηγούμενη, ξεπερνά ακόμα και τα ατυχήματα στο Bhopal της Ινδίας το 1984 και στο Chernobyl της Ουκρανίας το 1986.

Οι πρώτοι ασθενείς που παρατηρήθηκαν με δερματολογικά προβλήματα, λόγω μόλυνσης από αρσενικό, ήταν στη Σχολή Τροπικής Ιατρικής της Καλκούτα στην Ινδία το 1983 και προέρχονταν από τη Δυτική Βεγγάλη, αλλά μέχρι το 1987 είχαν ήδη εντοπιστεί πολλοί που προέρχονταν από το γειτονικό Μπαγκλαντές. Οι χαρακτηριστικές δερματικές αλλοιώσεις περιλάμβαναν αλλαγές στη μελάγχρωση, κυρίως στο άνω στήθος, τα χέρια και τα πόδια και την κεράτωση των παλαμών των χεριών και των πέλματος των ποδιών (Σχήμα 2.10 & Σχήμα 2.11). Αφού αποκλείστηκαν άλλες αιτίες, αναλύθηκαν οι πηγές νερού που χρησιμοποίησαν οι ασθενείς και η διάγνωση της νόσου που προκλήθηκε από αρσενικό επιβεβαιώθηκε. Οι κύριες πηγές πόσιμου νερού για τους ασθενείς ήταν τα φρεάτια, τα οποία αντλούσαν νερό από υπόγειους υδροφορείς. Βλέποντας και το Σχήμα 3.8, στα δεξιά είναι εμφανές ότι στα υπόγεια νερά ενός σημαντικού τμήματος της χώρας (περίπου στο μισό), το αρσενικό κυμαίνεται σε επίπεδα από 10 – 400  $\mu\text{g}/\text{L}$ , ενώ τοπικά ξεπερνιούνται ακόμα και τα 400  $\mu\text{g}/\text{L}$ .



Σχήμα 3.8:

Αριστερά: Πολιτικός Χάρτης Μπαγκλαντές

Πηγή Σχήματος: (Nations Online Project)

Δεξιά: Διανομή αρσενικού σε πηγάδια βάθους μικρότερης των 150 μέτρων στο Μπαγκλαντές.

Πηγή Σχήματος: (UNICEF, και συν., 2018)

Παρόλο που στο Μπαγκλαντές χρησιμοποιούνταν φρεάτια από 1940, το πρόβλημα με την μόλυνση από αρσενικό ήρθε στην επιφάνεια, λόγω του αυξημένου αριθμού νέων φρεατίων που διανοίχθηκαν τα τελευταία 20 χρόνια και της επακόλουθης αύξησης του αριθμού των ατόμων που πίνουν νερό από αυτά. Ιστορικά, οι πηγές επιφανειακών υδάτων στο Μπαγκλαντές έχουν μολυνθεί με μικροοργανισμούς, προκαλώντας σημαντικό βάρος ασθενειών και θνησιμότητας. Γι' αυτό το λόγο, κατά τη δεκαετία του 1970, με πρωτοβουλία της UNICEF (United Nations International Children's Emergency Fund) εγκαταστάθηκαν φρεάτια – πηγάδια με σκοπό την παροχή μιας ασφαλούς πηγής πόσιμου νερού για τον πληθυσμό. Στόχος της ήταν μέχρι το 2000 το 80% να έχει πρόσβαση σε «ασφαλές» πόσιμο νερό. Μέχρι και την περίοδο που εγκαταστάθηκαν τα πηγάδια το αρσενικό δεν είχε αναγνωριστεί ως πρόβλημα στις παροχές νερού και κατά συνέπεια οι τυπικές διαδικασίες ελέγχου του νερού να μην περιλαμβάνουν δοκιμές για αρσενικό.

Στο Μπαγκλαντές, επιβεβαιώθηκε η μόλυνση του νερού από το αρσενικό σε φρεάτια σωλήνων το 1993 στην περιοχή Nawabganj. Περαιτέρω έλεγχοι έγιναν τα ακόλουθα χρόνια. Παρουσιάστηκαν 400 μετρήσεις, εκ των οποίων στις μισές η συγκέντρωση του αρσενικού ήταν πάνω από 50  $\mu\text{g}/\text{l}$ , το οποίο είναι προφανώς μεγαλύτερο και από το όριο του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (Π.Ο.Υ.) που είναι 10  $\mu\text{g}/\text{l}$ , αλλά και μεγαλύτερο από το ανώτερο επιτρεπτό όριο στο Μπαγκλαντές που είναι 50  $\mu\text{g}/\text{l}$ . Επιπλέον, μια έρευνα στα χωριά Rajarampur και Sampta σε διαφορετικές περιοχές, βρέθηκε ότι το 29% από τα 294 πηγάδια και το 91% από τα 295 πηγάδια αντιστοίχως, να έχουν συγκέντρωση αρσενικού στο νερό πάνω από 50  $\mu\text{g}/\text{l}$ . Το 1998, σε μια Βρετανική γεωλογική έρευνα για 41 περιοχές από τις οποίες συλλέχθηκαν 2022 δείγματα νερού, το 35% βρέθηκε να έχει συγκεντρώσεις αρσενικού πάνω από 50  $\mu\text{g}/\text{l}$  (Πίνακας 3.2) και 8,4% ήταν πάνω από 300  $\mu\text{g}/\text{l}$ . Από το Κοινοτικό Νοσοκομείο της Ντάκα και τη Σχολή Περιβαλλοντικών Μελετών, μια ομάδα έρευνας επισκέφτηκε 18 πληγείσες περιοχές, στις οποίες βρέθηκε ότι από τους 1.630 ενήλικες και παιδιά που εξετάστηκαν, το 57,5% από αυτούς είχαν δερματικές αλλοιώσεις λόγω δηλητηρίασης από αρσενικό, ενώ σε μία πιο γενική μελέτη για τις 42 προσβεβλημένες περιοχές διαπιστώθηκε ότι ο πληθυσμός που βρέθηκε μολυσμένος με αρσενικό ήταν 76,9 εκατομμύρια. Τέλος, στη Δυτική Βεγγάλη ο αριθμός των ατόμων που εκτίθενται σε αρσενικό είναι 1,5 εκατομμύριο και μια εκτίμηση του αριθμού των ασθενών με αρσενίκωση υπερβαίνει τους 200.000 (Smith, et al., 2000).

**Πίνακας 3.2:** Ποσοστό υπόγειων υδάτων που εξετάστηκε το 1998 από τη βρετανική γεωλογική έρευνα με επίπεδα αρσενικού άνω των 50  $\mu\text{g}/\text{l}$  (Smith, et al., 2000).

Περιοχή	% υπόγειων υδάτων που ερευνήθηκαν
Bagerhat	66
Barisal	63
Brahmanbaria	38
Chandpur	96
Chittagong	20
Chuadanga	44
Comilla	65
Cox's Bazar	3
Dhaka	37
Faridpur	66
Feni	39
Gopalganj	94
Jessore	51
Jhalakati	14
Jhenaidah	26
Khulna	32
Kushtia	28
Lakshmipur	68
Madaripur	93
Magura	19
Manikganj	15
Meherpur	60
Moulvibazar	12
Munshiganj	83
Narail	43
Narayanganj	24
Nawabganj	4
Noakhali	75
Pabna	17
Pirojpur	24
Rajbari	24
Rajshashi	6
Satkhira	73
Shariatpur	80
Sylhet	19

**Πίνακας 3.3:** Μέγεθος της δηλητηρίασης από αρσενικό στο Μπαγκλαντές (Smith, et al., 2000)

Πληθυσμός του Μπαγκλαντές:	125 εκατομμύρια
Συνολικός πληθυσμός σε περιοχές όπου μερικά πηγάδια που είναι γνωστά ως μολυσμένα:	35 – 77 εκατομμύρια
Συντεινόμενη μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση αρσενικού σε πόσιμο νερό σύμφωνα με τον Π.Ο.Υ. :	10 $\mu\text{g/l}$
Μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση αρσενικού σε πόσιμο νερό στο Μπαγκλαντές:	50 $\mu\text{g/l}$
Αριθμός πηγαδιών που πάρθηκε δείγμα από τη βρετανική γεωλογική έρευνα (1998):	2022
-Ποσοστό πηγαδιών με συγκέντρωση > 50 $\mu\text{g/l}$	35%
-Ποσοστό πηγαδιών με συγκέντρωση > 300 $\mu\text{g/l}$	8,4%

### 3.4 ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΧΩΡΕΣ

Ορισμένες μεγάλες περιοχές της Ευρώπης επηρεάζονται από υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού. Οι πιο αξιοσημείωτες είναι οι περιπτώσεις της Ουγγαρίας και της Ρουμανίας, στη λεκάνη Παννόνια (Ουγγαρία, Ρουμανία, Κροατία και Σερβία), όπου περίπου 600.000 άνθρωποι εκτίθενται σε κίνδυνο λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων αρσενικού στις πηγές υπόγειων υδάτων. Οι δημοσιευμένες εκτιμήσεις υποδηλώνουν ότι περισσότερα από ένα εκατομμύριο άτομα εκτίθενται σε επίπεδα μεγαλύτερα από τη μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση των 10  $\mu\text{g/L}$  στο πόσιμο νερό τους, καθιστώντας την τη μεγαλύτερη περιοχή που επηρεάζεται τόσο στην Ευρώπη (Katsoyiannis, et al., 2014). Στην Ουγγαρία, περίπου 500.000 άτομα επηρεάζονται από πόσιμο νερό με συγκεντρώσεις As που υπερβαίνουν τα 10  $\mu\text{g/L}$ . Η συγκέντρωση αρσενικού φτάνει τιμές έως 225  $\mu\text{g/L}$ , οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις ελέγχονται με αναγωγική διάλυση οξυ-υδροξειδίων του σιδήρου. Το πρόβλημα του αρσενικού βρίσκεται κυρίως στο νότιο τμήμα της Μεγάλης Πεδιάδας της Ουγγαρίας – Περιοχή Κσονγκράντ- που καλύπτει 4.263  $\text{km}^2$ . Ο πληγέντος πληθυσμός κατανέμεται σε πέντε πόλεις και 54 χωριά.

Άλλες περιοχές, όπου έχουν μετρηθεί υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού είναι η πεδιάδα Κιουτάχειας στην Τουρκία και η περιοχή της Χαλκιδικής στην Κεντρική Μακεδονία στη Βόρεια Ελλάδα. Ωστόσο, το αρσενικό έχει επίσης εντοπιστεί σε αρκετούς ευρωπαϊκούς πόρους υπόγειων υδάτων. Μια περίληψη των πρόσφατων ευρημάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4.

**Πίνακας 3.4: Μέγιστες συγκεντρώσεις αρσενικού σε ευρωπαϊκές χώρες / περιοχές (Katsoyiannis, et al., 2014)**

Χώρα / Περιοχή	μg As/L	Χρήση υπόγειων υδάτων
Βέλγιο / Αμβέρσα και Λίμπεργκ	50	Πόσιμο νερό
Τσεχία / Μόκρσκο	1690	Πόσιμο νερό
Κροατία	610	Πόσιμο νερό
Δανία	30	Πόσιμο νερό
Φινλανδία	1040	Πόσιμο νερό
Γαλλία	40	Πόσιμο νερό
Γερμανία / Βόρεια Βαυαρία και Βισμπάντεν	150	Πόσιμο νερό
Ουγγαρία	800	Πόσιμο νερό
Ισλανδία	310	Όχι πόσιμο νερό
Ιταλία / Ηφαιστειακές περιοχές Ισκίας, Βεζουβίου, Αίτνας, Στρόμπολης	1558	Πόσιμο νερό (Αίτνα)
Ρουμανία / Τρανσυλβανία και δυτική πεδιάδα	200	Πόσιμο νερό
Σερβία / Βοϊβοντίνια	150	Πόσιμο νερό
Ισπανία / Λεκάνη Duero, κοιλάδα Ambles στην Άβιλα, Caldes de Malavella	615	Πόσιμο νερό
Σουηδία	300	
Ελβετία / Τίτσιο, Βαλαί	370	Πόσιμο νερό (Βαλαί)
Τουρκία / πεδιάδα Κιουτάχειας	10700	Πόσιμο νερό

### 3.4.1 Ρουμανία

Στη Ρουμανία, το αρσενικό βρίσκεται κυρίως στην περιοχή των Δυτικών Πεδιάδων της Ρουμανίας, όπου η έρευνα για 40 πηγάδια αποκάλυψε αυξημένες συγκεντρώσεις As από 13 έως 200 μg / L. Περίπου, 50.000 άτομα εκτίθενται σε αυξημένες συγκεντρώσεις αρσενικού, επειδή οι δυτικές πεδιάδες της Ρουμανίας βρίσκονται στην περιοχή της λεκάνης Παννόνια, η οποία συνδέεται με την Ουγγαρία. Μπορεί να υποτεθεί ότι ο λόγος για τις αυξημένες συγκεντρώσεις As στα υπόγεια ύδατα της Δυτικής Ρουμανίας είναι η αναγωγική διάλυση των οξέων-υδροξειδίων του σιδήρου (Katsoyiannis, et al., 2014).

### 3.4.2 Κροατία

Στην Ανατολική Κροατία, συγκεντρώσεις αρσενικού έως 610 μg / L προσδιορίστηκαν στα υπόγεια ύδατα, τα οποία ενδεχομένως επηρεάζουν το πόσιμο νερό περίπου 200.000 ατόμων. Η περιοχή ανήκει επίσης στη λεκάνη Παννόνια, όπου η αναγωγική διάλυση οξυ-υδροξειδίων του σιδήρου προκαλεί υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού στα υπόγεια ύδατα (Katsoyiannis, et al., 2014).

### 3.4.3 Σερβία

Στην περιοχή Βοϊβοντίνια της Βόρειας Σερβίας, μετρήθηκαν συγκεντρώσεις αρσενικού στα υπόγεια ύδατα άνω των 150 μg / L. Αυτή η περιοχή ανήκει στη λεκάνη του South Pannonian. Τα υπόγεια ύδατα χαρακτηρίζονται από την παρουσία διαλυμένου σιδήρου, μαγγανίου και αμμωνίας, ισχυρούς δείκτες

μείωσης των συνθηκών, που προκαλούν κινητοποίηση αρσενικού στους υδροφορείς. Περισσότερα από 600.000 άτομα (40% του πληθυσμού της λεκάνης του Νότιου Παννονίου) λαμβάνουν πόσιμο νερό με συγκέντρωση αρσενικού μεγαλύτερη από 10  $\mu\text{g} / \text{L}$  (Katsoyiannis, et al., 2014).

### 3.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Οι περιοχές που πλήττονται από αρσενικό στην Ελλάδα κατατάσσονται κυρίως σε τρεις κατηγορίες, συγκεκριμένα, αυτές που έχουν γεωθερμικά νερά, αυτές που βρίσκονται κοντά σε αλλουβιακά κοιτάσματα ποταμών και υδροφορέων, και εκείνες που επηρεάζονται από την εξόρυξη και συνήθως γειτνιάζουν με εξορυκτικές δραστηριότητες.

Στην Ελλάδα, οι συγκεντρώσεις αρσενικού στα γεωθερμικά ύδατα κυμαίνονται από 30 έως 4.500  $\mu\text{g} / \text{L}$ , σε περιοχές κοντά σε αλλουβιακές αποθέσεις από 15 έως 100  $\mu\text{g} / \text{L}$  και σε περιοχές που επηρεάζονται από εξορυκτικές δραστηριότητες από 20 έως 60  $\mu\text{g} / \text{L}$ .

Η συγκέντρωση αρσενικού στα επιφανειακά νερά είναι σχετικά χαμηλή (συνήθως 0,1-2  $\mu\text{g} / \text{L}$ ). Λόγω των οξειδωτικών συνθηκών που επικρατούν στο υπέδαφος, το αρσενικό προσροφάται κυρίως σε σωματίδια, γεγονός που μειώνει σημαντικά τη συγκέντρωση αρσενικού στο υδάτινο σώμα.

Αυξημένες συγκεντρώσεις αρσενικού στα υπόγεια ύδατα έχουν αναφερθεί για πολλές περιοχές στην Ελλάδα. Οι περιοχές όπου το αρσενικό βρίσκεται σε πηγές υπόγειων υδάτων κατατάσσονται όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Οι γεωθερμικές περιοχές, όπως στη Χαλκιδική και στην περιοχή της Αριδαίας της Βόρειας Ελλάδας, οι αλλουβιακές εναποθέσεις των ποταμών, όπως αυτές στις λεκάνες του Αξιού, του Νέστου και του Στρυμόνα, και οι υδροφορείς, επηρεασμένοι από την ορυκτοποίηση, με αποτέλεσμα την κινητοποίηση του αρσενικού κατά τη διάρκεια των αιώνων. Μια μικρή περίπτωση είναι αυτή της λίμνης Βόλβη, που μολύνει τους κοντινούς υδροφορείς. Ο Πίνακας 4 περιέχει τις πιο αξιόλογες περιπτώσεις αρσενικού που βρέθηκαν στα ελληνικά υπόγεια ύδατα κάτω από τις περιγραφόμενες ταξινομήσεις, που απεικονίζονται στον χάρτη της Ελλάδας ως σημεία αρσενικού στο Σχήμα 14 . Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλα τα εμφανιζόμενα νερά βρέθηκε πολύ κάτω από το πόσιμο όριο ρύθμισης του νερού.

**Πίνακας 3.5:** Συγκέντρωση αρσενικού στα ελληνικά υπόγεια ύδατα (Katsoyiannis, et al., 2014)

Περιοχή	Συγκέντρωση μg As/L	Περιβαλλοντικές Συνθήκες	Σχόλια
Χαλκιδική / Αγία Παρασκευή	4500	Γεωθερμικές	Σπα / As[III ]
Χαλκιδική / Πετράλωνα	1500-2000	Γεωθερμικές	Πηγάδια άρδευσης
Χαλκιδική / Τρίγλια	200-400	Γεωθερμικές	Πηγάδια άρδευσης / As[V ]
Ιαματικά νερά Νιγρίτας	1000-1200	Γεωθερμικές	Σπα
Καβάλα / Ελεύθερες	800	Γεωθερμικές	Σπα
Λουτράκι Αριδαίας	350-450	Γεωθερμικές	Σπα
Θερμοπύλες	200-300	Γεωθερμικές	Σπα
Ήπειρος / Καβάσιλα	120-160	Γεωθερμικές	Σπα
Κως / Κέφαλος	5-35	Γεωθερμικές	Πόσιμο Νερό / As[III ]
Πεδιάδα Αριδαίας	5-30	Γεωθερμικές	Πόσιμο Νερό
Δέλτα Αξιού / Χαλάστρα	35-40	Αλλουβιακές Αποθέσεις	Πόσιμο Νερό / As[III ]
Δέλτα Αξιού / Κουμίνα	35-45	Αλλουβιακές Αποθέσεις	Πόσιμο Νερό / As[III ]
Δέλτα Αξιού / Μάλγαρα	20-27	Αλλουβιακές Αποθέσεις	Πόσιμο Νερό / As[III ]
Δέλτα Αξιού / Πλατύ	20-30	Αλλουβιακές Αποθέσεις	Πόσιμο Νερό / As[III ]
Δέλτα Αξιού / Κεραμωτή	15-20	Αλλουβιακές Αποθέσεις	Πόσιμο Νερό / As[III ]
	20-35	Εξόρυξη	Υπόγεια Ύδατα
	40-60	Εξόρυξη	Ιαματικό Νερό As[V ]
Καβάλα / Νικισιανή	25-30	Εξόρυξη	Πόσιμο / Ιαματικό Νερό
Πολύκαστρο Κιλκίς	20-40	Εξόρυξη	Πόσιμο / Ιαματικό Νερό





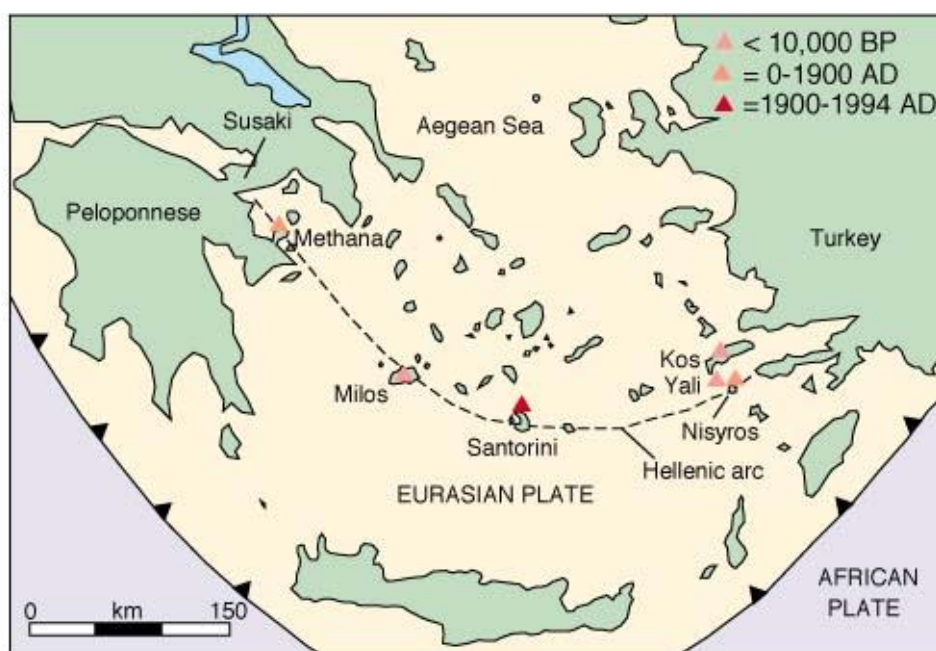
Σχήμα 3.9:

Επισημασμένες σημαντικές περιπτώσεις αρσενικού στον Ελλαδικό χώρο  
*Πηγή Σχήματος: (Katsoyiannis, και συν., 2014)*

### 3.5.1 Απελευθέρωση αρσενικού ως αποτέλεσμα γεωθερμικών δραστηριοτήτων

Το αρσενικό στα υπόγεια ύδατα και τα εδάφη, επηρεασμένα από τη γεωθερμική δραστηριότητα, παρατηρείται εντατικά στη Βόρεια Ελλάδα (Πίνακας 4), και συγκεκριμένα στην περιοχή της Δυτικής Χαλκιδικής. Αυτή η περιοχή έχει πολύ περιορισμένους υδάτινους πόρους και, στη συνέχεια, τα μολυσμένα υπόγεια ύδατα έχουν ελαχιστοποιήσει το δυναμικό παροχής νερού για ανθρώπους, ζώα και γεωργία. Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων είναι πραγματικά σοβαρή στη Δυτική Χαλκιδική κοντά στην πόλη των Νέων Τριγλών, όπου καταγράφηκαν συγκεντρώσεις έως  $2.000 \mu\text{g} / \text{L}$ . Οι πηγές του As, που απελευθερώνονται στην επιφάνεια από γεωθερμικά υγρά, μπορεί να σχετίζονται με πυριγενείς βράχους που βρίσκονται κάτω από παχιά ιζήματα. Αυτή η υπόθεση υποστηρίζεται, επίσης, από το ότι το As σε συσχέτιση με τα κάλιο (K), μαγγάνιο (Mn) και σίδηρο (Fe), που δείχνει τη γεωλογική προέλευση, ενώ η παρουσία υδροθερμικών συνθηκών είχε ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της κινητικότητάς τους. Αξιοσημείωτες είναι οι υψηλές συγκεντρώσεις αρσενικού στα ιαματικά θαλάσσια νερά της Αγίας Παρασκευής (χερσόνησος Κασσάνδρας, Δυτική Χαλκιδική), που αποδίδονται στη διάλυση της σανδαράχης ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), με περιεκτικότητα σε αρσενικό κοντά στο 61% κ.β. Η απελευθέρωση αρσενικού λόγω γεωθερμικών δραστηριοτήτων βρίσκεται, επίσης, σε περιοχές ηφαιστειακής δραστηριότητας στο ενεργό ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου. Αυτό το τόξο ξεκινά από το νησί των Μεθάνων και περνάει κοντά στο νησί της Μήλου και η Σαντορίνη τελειώνει στο νησί της Κω.

Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων As σε διαφορετικούς τύπους ιζημάτων στα νησιά των Μεθάνων, της Μήλου, της Σαντορίνης και της Κω αποκάλυψαν αυξημένες συγκεντρώσεις αρσενικού στα ιζήματα, σε συγκεντρώσεις έως και 20,5 mg / kg στο νησί των Μεθάνων, 108 mg / kg στη νήσο Μήλο, 356 mg / kg στο νησί Γυαλί, 493 mg / kg στο νησί της Σαντορίνης και 56 mg / kg στο νησί της Κω στη θέση Κέφαλος, όπου έχει εγκατασταθεί μονάδα επεξεργασίας αφαίρεσης αρσενικού.



**Σχήμα 3.10:** Ελληνικό Ηφαιστειακό τόξο νοτίου Αιγαίου στη γραμμή Μέθανα, Μήλος, Γυαλί, Σαντορίνη, Νίσυρος, Κως

*Πηγή Σχήματος:* (Encyclo...παιδεία, 2011)

### 3.5.2 Απελευθέρωση αρσενικού στις περιοχές των αλλουβιακών αποθέσεων λόγω μειωμένων συνθηκών

Οι συγκεντρώσεις αρσενικού στα υπόγεια ύδατα σε αλλουβιακές αποθέσεις είναι υψηλές στις περιοχές των ποταμών Αξιού, Στρυμόνα και Νέστου στη Βόρεια Ελλάδα (Πίνακας 4). Στα χαρακτηριστικά των υπόγειων υδάτων κυριαρχούν οι συνθήκες μείωσης με αρνητικές τιμές δυναμικού οξειδοαναγωγής, υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου και μαγγανίου και συγκεντρώσεις αμμωνίας (Katsoyiannis, et al., 2006). Τα χαρακτηριστικά των υπόγειων υδάτων κυριαρχούνται από τη μείωση συνθηκών με αρνητικές πιθανές τιμές οξειδοαναγωγής, υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου και μαγγανίου και συγκεντρώσεις αμμωνίας. Ο μηχανισμός απελευθέρωσης αρσενικού σε αυτά τα νερά, επομένως, ελέγχεται από τη λεγόμενη αναγωγική διάλυση των οξειδίων του σιδήρου και του μαγγανίου. Πιο συγκεκριμένα, το προσροφημένο αρσενικό στα οξείδια του σιδήρου και του μαγγανίου των ιζημάτων μαζί με το σίδηρο και το μαγγάνιο κινητοποιείται στην υδατική φάση, μολύνοντας τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, όταν επικρατούν συνθήκες μείωσης. Αυτός ο μηχανισμός είναι γενικά



την Παλαιά Καβάλα και τη Θάσο. Τα εμπλουτισμένα μεταλλεύματα γιαροσίτης περιέχουν έως και  $4,6 \text{ g/t Ag}$  και  $8,5 \text{ g/t Au}$ . Τα στοιχεία πλατίνα, παλλάδιο, χρυσός, τελλούριο και αρσενικό έχουν εντοπιστεί σε πορφυρίτη χαλκού στο Κιλκίς και στη Χαλκιδική (Tsirambides, et al., 2012).



**Σχήμα 3.12:** Κομμάτι Ορυκτού Γιαροσίτη  
*Πηγή Σχήματος:* (Lavinsky, 2010)



**Σχήμα 3.13:** Χαλκός στη μητρική του μορφή  
*Πηγή Σχήματος:* (Grimm)

Η περιοχή της Χαλκιδικής είναι από τα σημαντικότερα κέντρα για την ελληνική εξορυκτική δραστηριότητα, με τον εξορυκτικό τομέα να συμβάλει καθοριστικά στην τοπική οικονομία. Η εταιρία «ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΧΡΥΣΟΣ» δραστηριοποιείται στην εξόρυξη και παραγωγή χρυσού, αργύρου, χαλκού, μόλυβδου, ψευδαργύρου και άλλων ορυκτών, στην Ολυμπιάδα, το Στρατώνι και τις Σκουριές Χαλκιδικής. Παρά το γεγονός ότι η «ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΧΡΥΣΟΣ» έχει εγκεκριμένη από το 2011 μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων και παρότι η σχετική απόφαση έγκρισης περιβαλλοντικών όρων προβλέπει πολλές και σημαντικές υποχρεώσεις της εταιρείας για την προστασία του περιβάλλοντος, οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δραστηριοτήτων παραγωγής χρυσού της εταιρίας έχουν αποτελέσει αντικείμενο έντονης αντιπαράθεσης στον δημόσιο διάλογο (Μουστάκα, et al., 2016).

Το πρόβλημα έγκειται σε μια τεχνική παραγωγής μετάλλων που χρησιμοποιείται στα συγκεκριμένα ορυχεία, γνωστή ως «flash smelting – ταχεία τήξη». Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την απόκτηση καθαρού χρυσού από την παραγόμενη πρώτη ύλη, η οποία όμως περιέχει αρσενικό. Η ταχεία τήξη ενδείκνυται μόνο για πρώτη ύλη με χαμηλή περιεκτικότητα σε αρσενικό, αλλά στην περίπτωση των δύο ορυχείων στις Σκουριές και στην Ολυμπιάδα, η συγκέντρωση αρσενικού είναι πάνω από 9 %. Κατά τη διαδικασία της ταχείας τήξης, σύμφωνα με μελέτη που ανέθεσε το Υπουργείο Περιβάλλοντος, η σκόνη αρσενικού που απελευθερώνεται στον αέρα μπορεί να φτάσει έως και τους 20.000 τόνους ετησίως, όταν το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο είναι τα 20 κιλά και δεν υπάρχουν εγκατεστημένες τεχνολογίες, οι οποίες να αναλαμβάνουν τον καθαρισμό του αέρα. Τέλος, για να λειτουργήσει ένα ορυχείο όπως αυτό χρειάζεστε ένα στεγνό περιβάλλον, γεγονός

που υποχρεωτικά θα υποβάλλει τα υπόγεια ύδατα σε ταπείνωση, τη στιγμή που το εν λόγω βουνό είναι η πιο σημαντική πηγή νερού στην κατά τα άλλα άνυδρη Χαλκιδική (Καδόγλου, 2017).



**Σχήμα 3.14:** Έργο ορυχείου στην περιοχή των Σκουριών Χαλκιδικής

*Πηγή Σχήματος:* <https://www.hellas-gold.com/images-gallery/>



**Σχήμα 3.15:** Έργο ορυχείου στην περιοχή του Στρατωνίου Χαλκιδικής

*Πηγή Σχήματος:* <https://www.hellas-gold.com/images-gallery/>



**Σχήμα 3.16:** Έργο ορυχείου στην περιοχή της Ολυμπιάδας, Χαλκιδικής

*Πηγή Σχήματος:* <https://www.hellas-gold.com/images-gallery/>

Άλλες περιοχές στον ελλαδικό χώρο που έχουν ανιχνευθεί με υψηλά επίπεδα αρσενικού (As) είναι η λεκάνη Ωρωπού-Καλάμου, το λεκανοπέδιο του Βαρνάβα, οι Κυκλάδες, το Λαύριο κ.α. (Alexakis, et al., 2014).

Στη λεκάνη Ωρωπού-Καλάμου αυξημένα επίπεδα αρσενικού έχουν βρεθεί σε σχηματισμούς μαργαίων και κοιτάσματα λιγνίτη. Η περιεκτικότητα σε αρσενικό, στα υπόγεια ύδατα της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής, κυμαινόταν από 0,5 – 246,5  $\mu\text{g/L}$  και αποδίδεται στις δραστηριότητες εξόρυξης λιγνίτη (έχουν σταματήσει από το 1966), στα απόβλητα πασσάλων στη γύρω περιοχή και στα εγκαταλεημένα λιγνιτωρυχεία. Στο λεκανοπέδιο του Βαρνάβα (περιφέρεια Αττικής, Ελλάδα) η παρουσία του αρσενικού στα υπόγεια νερά, οφείλεται στα λατομεία ασβεστόλιθου που βρίσκονται στην περιοχή (Kamrouroglou, et al., 2017).

Το Λαύριο είναι γνωστό από την κλασσική αρχαιότητα για την εξόρυξη ασημιού. Οι συγκεντρώσεις του As στα εδάφη κήπων κατοικιών (garden soils) ( $\geq 14.800$  mg/Kg) και οικιακής σκόνης (house dust) ( $\geq 3.800$  mg/Kg), λόγω της πολυμεταλλικής σουλφιδικής ανοργανοποίησης που αποτελείται από μεικτό θειούχο γαληνίτη, θείο και μόλυβδο (PbS) που φέρει Ag και των δραστηριοτήτων εξόρυξης και τήξης που παρήγαγε μια τεράστια ποσότητα τοξικών αποβλήτων από τα αρχαία χρόνια . Καταγράφηκε, μάλιστα, αυξημένη περιεκτικότητα As σε ιζήματα ρευμάτων της περιοχής της Ανατολικής Αττικής η οποία αποδίδεται κυρίως στη μαζική θειούχα μεταλλοποίηση Pb–Ag–Zn της ευρύτερης περιοχής του Λαυρίου (Ελλάδα) (Golfinopoulos, et al., 2021).

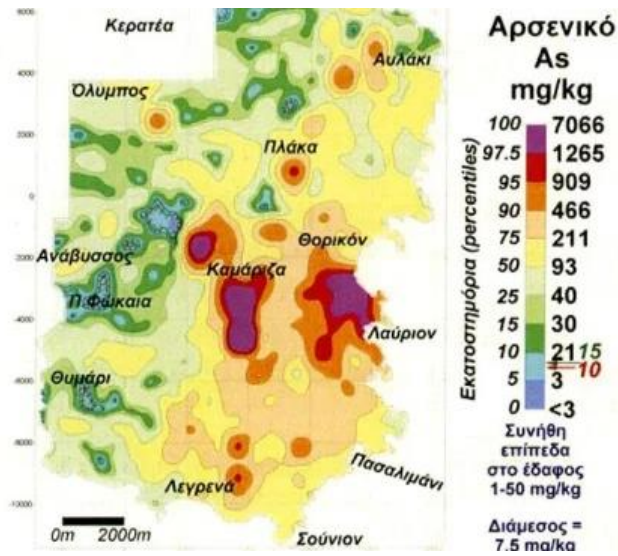


**Σχήμα 3.17:**

Αρχαία Μεταλλευτική Στοά, δυτικά και δίπλα στο αρχαίο θέατρο Θορικού περί το 3000 π.Χ. όπου θεωρείται ότι έγινε έναρξη της εκμετάλλευσης μεταλλείων αργυρούχου μόλυβδου στο Λαύριο

*Πηγή Σχήματος: (Τζεφέρης, 2015).*

Ο αρχαίος τρόπος εξόρυξης του μεταλλεύματος πραγματοποιείτο με την διάνοιξη στοών και φρεάτων. Η επεξεργασία του μεταλλεύματος γινόταν με εμπλουτισμό σε επίπεδα και κυκλικά (ελικοειδή) "πλυντήρια", ενώ ακολουθούσε η εκκαμίνευση σε κτιστούς φούρνους (Τζεφέρης, 2017) (Τσάιμου, 2015). Εκτός από τα μεταλλεία στην περιοχή του Λαυρίου λειτούργησαν και αρχαία λατομεία μαρμάρου από τα οποία εξορύχθηκε υλικό τόσο για τον Ναό του Ποσειδώνα Σουνίου όσο και για το αρχαίο θέατρο του Θορικού. Η μεταλλουργική δραστηριότητα επανεκκίνησε στην περιοχή της Λαυρεωτικής το 1864 και λειτούργησε μέχρι το 1992. Όσον αφορά τα πετρώματα, το αρσενικό προσδιορίστηκε μόνο σε 48 δείγματα πετρωμάτων από τα 140 που συλλέχθηκαν. Από αυτά, το μάρμαρο έχει τη μεγάλη διακύμανση με τιμές που κυμαίνονται από  $< 5$  έως  $1.032$  mg/Kg As. Εστίες μόλυνσης και αποδέσμευσης αρσενικού αποτελούν κι εδώ τα μεταλλευτικά απορρίμματα, οι σωροί από «σκωρίες», δηλαδή απορρίμματα της τήξης των μεταλλευμάτων, ( $684$ –  $15.907$  mg/Kg As), από πυρίτες (τα απορρίμματα εμπλουτισμού του μεταλλεύματος) και τα απορρίμματα επίπλευσης ή εμπλουτισμού ( $2.470$ –  $26.063$  mg/Kg As) (Selinus, et al., 2010).



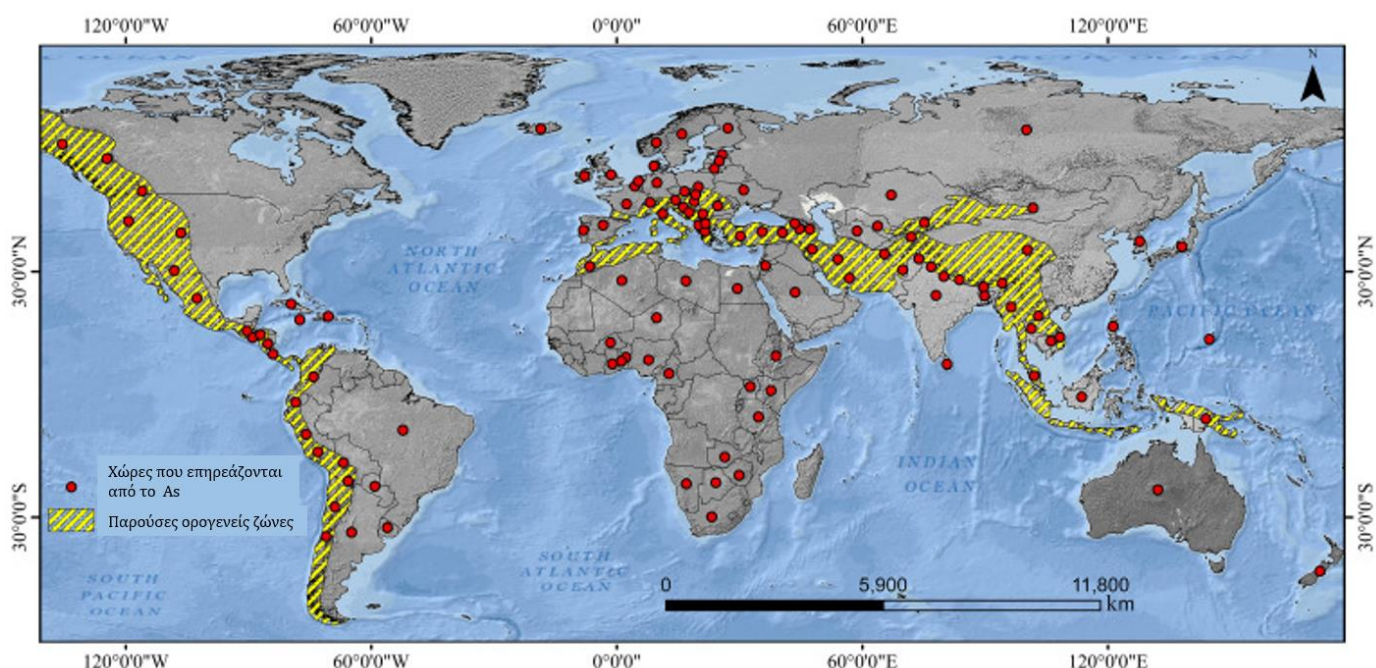
**Σχήμα 3.18:**  
Γεωχημικός χάρτης κατανομής του αρσενικού (As) στο επιφανειακό έδαφος (0-10cm) στη Λαυρεωτική Χερσόνησο  
*Πηγή Σχήματος: (Δημητριάδης, και συν., 2002).*

## 4 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ

### 4.1 ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ Π.Ο.Υ.

Το αρσενικό είναι μία από τις 10 χημικές ουσίες του Π.Ο.Υ. που προκαλούν μεγάλη ανησυχία για τη δημόσια υγεία. Το έργο του Π.Ο.Υ. για τη μείωση της έκθεσης στο αρσενικό, περιλαμβάνει τον καθορισμό κατευθυντήριων τιμών, την επανεξέταση στοιχείων και την παροχή συστάσεων διαχείρισης κινδύνου. Ο Π.Ο.Υ. δημοσιεύει μια κατευθυντήρια τιμή για το αρσενικό στις αντίστοιχες Κατευθυντήριες Οδηγίες του για την ποιότητα του πόσιμου νερού. Οι Οδηγίες χρησιμεύουν ως βάση για κανονισμούς και καθορισμό προτύπων παγκοσμίως.

Το τρέχον συνιστώμενο όριο αρσενικού στο πόσιμο νερό είναι  $10 \mu\text{g}/\text{L}$ , αν και αυτή η τιμή ορίζεται ως ενδεικτική λόγω πρακτικών δυσκολιών στην απομάκρυνση του αρσενικού από το πόσιμο νερό. Θα πρέπει επομένως να καταβληθεί κάθε προσπάθεια, ώστε οι συγκεντρώσεις να διατηρούνται όσο το δυνατόν χαμηλότερες και κάτω από την κατευθυντήρια τιμή όταν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι (World Health Organization, 2018).



**Σχήμα 4.1:**

Περιοχές μολυσμένες με αρσενικό πάνω στον τεκτονικό χάρτη του κόσμου. Δείτε ότι οι περιοχές που έχουν πληγεί από το αρσενικό περιορίζονται ως επί το πλείστον στις ιζηματογενείς λεκάνες κοντά στις σύγχρονες ορεινές ζώνες και τις περιοχές των δελταϊκών.

*Πηγή Σχήματος:* (Shaji, et al., 2021)



### 4.1.1 Ιστορία της εξέλιξης των κατευθυντήριων γραμμών

Τα Διεθνή Πρότυπα του Π.Ο.Υ. για το πόσιμο νερό του 1958 συνιστούσαν μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση 0,2 mg/L για το αρσενικό, βάσει ανησυχιών για την υγεία. Στα Διεθνή Πρότυπα του 1963, αυτή η τιμή μειώθηκε στα 0,05 mg/L, η οποία διατηρήθηκε ως δοκιμαστικό ανώτερο όριο συγκέντρωσης και στα Διεθνή Πρότυπα του 1971. Η κατευθυντήρια τιμή των 0,05 mg/L διατηρήθηκε, επίσης, και στην πρώτη έκδοση των κατευθυντήριων γραμμών για την ποιότητα του πόσιμου νερού, που δημοσιεύθηκε το 1984. Στις κατευθυντήριες γραμμές του 1993 καθορίστηκε μια προσωρινή τιμή για το αρσενικό στο πρακτικό όριο των 0,01 mg/L, με βάση την ανησυχία σχετικά με την καρκινογένειά του στον άνθρωπο. Στη δεύτερη προσθήκη στην τρίτη έκδοση, που δημοσιεύθηκε το 2008, η παραπάνω τιμή των 0,01 mg/L ορίστηκε ως προσωρινή, βάσει επιστημονικών αβεβαιοτήτων από τη Μεικτή Επιτροπή Εμπειρογνομόνων ΔΟΤΓ/ΠΟΥ (JECFA) για τα πρόσθετα τροφίμων. Στην τέταρτη έκδοση των κατευθυντήριων γραμμών, που δημοσιεύθηκε το 2011 η τιμή των 0,01 mg/L παρέμεινε ως προσωρινή με βάση, όμως, τόσο την απόδοση της επεξεργασίας, όσο και την αναλυτική δυνατότητα επίτευξης του ορίου αυτού, με την προϋπόθεση ότι σε κάθε προσπάθεια πρέπει να διατηρούνται οι συγκεντρώσεις όσο το δυνατόν χαμηλότερες (World Health Organization, March 2022).

**Πίνακας 4.1:** Πίνακας με τις μεταβολές της κατευθυντήριας τιμής για τη μέγιστη συγκέντρωση του αρσενικού σύμφωνα με τον Π.Ο.Υ. ανά έτος (**World Health Organization, March 2022**).

Έτος Πρότασης	Κατευθυντήρια τιμή συγκέντρωσης (mg/L)
1958	0,2
1963	0,05 (δοκιμαστικά)
1971	0,05 (δοκιμαστικά)
1984	0,05
1993	0,01 (προσωρινή)
2008	0,01 (προσωρινή)
2011	0,01 (προσωρινή)

## 4.2 ΥΠΕΡΒΑΣΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ

Είναι δύσκολο να δοθεί ολοκληρωμένη καθοδήγηση σχετικά με καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, στις οποίες οι χημικές ουσίες προκαλούν μαζική μόλυνση της παροχής πόσιμου νερού, που προκαλείται είτε από ατύχημα είτε από σκόπιμη ενέργεια. Οι περισσότερες από τις κατευθυντήριες τιμές που συνιστώνται σε αυτές τις οδηγίες (.

Πίνακας 4.2) σχετίζονται με ένα επίπεδο έκθεσης που θεωρείται ανεκτό καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής. Οι οξείες τοξικές επιδράσεις λαμβάνονται υπόψη για περιορισμένο αριθμό χημικών ουσιών. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η έκθεση σε μια χημική ουσία, η οποία έχει τιμή πολύ μεγαλύτερη από την κατευθυντήρια, θα είχε δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία θα εξαρτηθεί από παράγοντες που διαφέρουν από τον ένα μολυσματικό παράγοντα στον άλλο.

Η υπέρβαση μιας κατευθυντήριας τιμής δεν μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό ή αυξημένο κίνδυνο για την υγεία. Επομένως, οι αποκλίσεις πάνω από τις κατευθυντήριες τιμές είτε βραχυπρόθεσμα είτε μακροπρόθεσμα μπορεί να μην σημαίνουν ότι το νερό είναι ακατάλληλο για κατανάλωση. Το ποσό κατά το οποίο και η περίοδος για την οποία μπορεί να ξεπεραστεί οποιαδήποτε κατευθυντήρια τιμή χωρίς να επηρεαστεί η δημόσια υγεία εξαρτάται από τη συγκεκριμένη ουσία (World Health Organization, 2008).

Ο πρωταρχικός στόχος όσον αφορά τους χημικούς ρύπους όταν γίνεται υπέρβαση μιας κατευθυντήριας γραμμής ή σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης είναι η πρόληψη της έκθεσης του πληθυσμού σε τοξικές συγκεντρώσεις ρύπων. Ωστόσο, κατά την εφαρμογή των κατευθυντήριων γραμμών υπό τέτοιες συνθήκες, ένα σημαντικό στοιχείο είναι η διατήρηση επαρκών ποσοτήτων νερού, εκτός εάν υπάρχουν διαθέσιμες κατάλληλες εναλλακτικές παροχές πόσιμου νερού (World Health Organization, 2008).

#### 4.2.1 Αποδοχή Πόσιμου Νερού

Είναι σημαντικό να εξεταστεί εάν οι υπάρχουσες ή προτεινόμενες πρακτικές επεξεργασίας και διανομής νερού μπορούν να επηρεάσουν την αποδοχή του πόσιμου νερού. Για παράδειγμα, μια αλλαγή στην πρακτική απολύμανσης μπορεί να δημιουργήσει μια ένωση με οσμή, όπως η τριχλωραμίνη, στο επεξεργασμένο νερό. Άλλες επιδράσεις μπορεί να είναι έμμεσες, όπως η διαταραχή των εσωτερικών εναποθέσεων σωλήνων και των βιοφίλμ κατά την εναλλαγή μεταξύ ή την ανάμειξη υδάτων από διαφορετικές πηγές στα συστήματα διανομής.

Η αποδοχή του πόσιμου νερού από τους καταναλωτές είναι υποκειμενική και μπορεί να επηρεαστεί από πολλά διαφορετικά συστατικά. Το όριο συγκέντρωσης των συστατικών που είναι αποδεκτό από τους καταναλωτές ποικίλλει και εξαρτάται από μεμονωμένους και τοπικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας του νερού στο οποίο έχει συνηθίσει η κοινότητα, καθώς και ποικίλων κοινωνικών, περιβαλλοντικών και πολιτιστικών εκτιμήσεων.

Αυτές οι ουσίες μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω μιας γενικής απαίτησης ότι το νερό είναι αποδεκτό από την πλειονότητα των καταναλωτών. Η παρακολούθηση τέτοιων ουσιών θα πρέπει να πραγματοποιείται κατόπιν καταγγελιών των καταναλωτών (World Health Organization, 2008).

**Πίνακας 4.2:** Κατευθυντήριες τιμές για χημικές ουσίες που έχουν σημασία για την υγεία στο πόσιμο νερό (World Health Organization, 2008).

Χημικό	Κατευθυντήρια τιμή (mg/L)	Σημειώσεις
Ακρυλαμίδιο	0,0005 <sup>b</sup>	
Alachlor (ζιζανιοκτόνο χλωροακετανιλιδίου)	0,02 <sup>b</sup>	
Aldicarb (καρβαμιδικό εντομοκτόνο)	0,01	Ισχύει για το σουλφοξειδίο aldicarb και aldicarb σουλφόνη

Aldrin & dieldrin (Εντομοκτόνο από ναφθαλίνη & διελδρίνη)	0,00003	Για συνδυασμένο aldrin συν dieldrin
Αντιμόνιο	0,02	
<b>Αρσενικό</b>	<b>0,01 (P)</b>	
Ατραζίνη	0,002	
Βάριο	0,7	
Βενζόλιο	0,01 <sup>b</sup>	
Βενζο(α)πυρένιο	0,0007 <sup>b</sup>	
Βόριο	0,5 (T)	
Βρωμικό άλας	0,01 <sup>b</sup> (A, T)	
Βρωμοδιχλωρομεθάνιο	0,06 <sup>b</sup>	
Βρωμοφόρμιο	0,1	
Κάδμιο	0,003	
Καρβαμιδικό φυτοφάρμακο	0,007	
Τετραχλωράνθρακας	0,004	
Χλωρικό άλας	0,7 (D)	
Χλωριωμένος πολυκυκλικός υδρογονάνθρακας	0,0002	
Χλώριο	5 (C)	Για αποτελεσματική απολύμανση, θα πρέπει να υπάρχει υπολειπόμενη συγκέντρωση ελεύθερου χλωρίου ≥0,5 mg/λίτρο μετά από τουλάχιστον 30 λεπτά χρόνο επαφής σε pH <8,0
Χλωριώδη	0,7 (D)	
Χλωροφόρμιο	0,3	
Chlorotoluron (κατηγορία φαινυλουρίας ζιζανιοκτόνων)	0,03	
Χλωροπυριφός	0,03	
Χρώμιο	0,05 (P)	Για ολικό χρώμιο
Χαλκός	2	Μπορεί να προκύψουν λεκέδες ρούχων και ειδών υγιεινής κάτω από την κατευθυντήρια τιμή
Κυαναζίνη	0,0006	
Κυανιούχο άλας	0,07	
Χλωριούχο κυάνιο	0,07	Για το κυάνιο ως ολικές κυανογόνες ενώσεις
2,4-D (2,4-διχλωροφαινοξυοξικό οξύ)	0,03	Ισχύει για το ελεύθερο οξύ
(2,4-διχλωροφαινοξυ)βουτυρικό οξύ - 2,4-DB	0,09	
DDT (Διχλωροδιφαινυλοτριχλωροαιθάνιο) & μεταβολίτες	0,001	
Δι(2-αιθυλεξυλ)φθαλικός εστέρας	0,008	
Διβρωμοακετονιτρίλιο	0,07	
Διβρωμοχλωρομεθάνιο	0,1	
1,2-Διβρωμο-3-χλωροπροπάνιο	0,001 <sup>b</sup>	
1,2-Διβρωμοαιθάνιο	0,0004 <sup>b</sup> (P)	
Διχλωροξικό	0,05 <sup>b</sup> (T, D)	
Διχλωροακετονιτρίλιο	0,02 (P)	
Διχλωροβενζόλιο, 1,2-	1 (C)	
Διχλωροβενζόλιο, 1,4-	0,3 (C)	
Διχλωροαιθάνιο, 1,2-	0,03 <sup>b</sup>	
Διχλωροαιθάνιο, 1,2-	0,05	
Διχλωρομεθάνιο	0,02	
1,2-Διχλωροπροπάνιο (1,2-DCP)	0,04 (P)	
1,3-Διχλωροπροπένιο	0,02 <sup>b</sup>	
Dichlorprop (χλωροφαινοξυ ζιζανιοκτόνο)	0,1	
Διμεθοϊκό	0,006	
Διοξάνη, 1,4-	0,05 <sup>b</sup>	
Εδετικό οξύ (EDTA)	0,6	Ισχύει για το ελεύθερο οξύ
Endrin (οργανοχλωρίδιο)	0,0006	
Επιχλωροϋδρίνη	0,0004 (P)	

Αιθυλοβενζόλιο	0,3 (C)	
Fenoprop (οργανική ένωση)	0,009	
Φθόριο	1,5	Ο όγκος του νερού που καταναλώνεται και η πρόσληψη από άλλες πηγές θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον καθορισμό των εθνικών προτύπων
Εξαχλωροβουταδιένιο	0,0006	
Isoproturon	0,009	
Μόλυβδος	0,01	
Λινδάνιο	0,002	
Μαγγάνιο	0,4 (C)	
MCPA (ζιζανιοκτόνο φαινοξυ)	0,002	
Mecoprop (κοινό ζιζανιοκτόνο γενικής χρήσης)	0,01	
Υδράργυρος	0,006	Για ανόργανο υδράργυρο
Methoxychlor (συνθετικό εντομοκτόνο οργανοχλωριδίου)	0,02	
Metolachlor (οργανική ένωση – ζιζανιοκτόνο)	0,01	
Μικροκυστίνη – LR	0,001 (P)	Για ολική μικροκυστίνη-LR
Μολινάτη	0,006	
Μολυβδαίνιο	0,07	
Μονοχλωραμίνη	3	
Μονοχλωροοξικό	0,02	
Νικέλιο	0,07	
Νιτρικό άλας (as NO3-)	50	Βραχυπρόθεσμη έκθεση
Νιτριλοτριοξικό οξύ (NTA)	0,2 (P)	
Νιτρώδες αλάτι (as NO2-)	3	Βραχυπρόθεσμη έκθεση
	0,2	Μακροχρόνια έκθεση
N-νιτροσοδιμεθυλαμίνη	0,1	
Πεντιμεθαλίνη	0,02	
Πενταχλωροφαινόλη	0,009 <sup>b</sup> (P)	
Περμεθρίνη	0,3	Μόνο όταν χρησιμοποιείται ως προνυμφοκτόνο για σκοπούς δημόσιας υγείας
Πυριπροξυφένη	0,3	
Πυριπροξυφένη	0,3	Αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως κατευθυντήρια τιμή όταν η πυριπροξυφένη προστίθεται στο νερό για λόγους δημόσιας υγείας.
Σελήνιο	0,01	
Simazine (ζιζανιοκτόνο κατηγορίας τριαζινών)	0,002	
Διχλωροϊσοκυανουρικό νάτριο	50	Ως διχλωροϊσοκυανουρικό νάτριο
	40	Ως κυανουρικό οξύ
Στυρένιο	0,02 (C)	
2,4,5-T (τριχλωροφαινοξυοξικό οξύ)	0,009	
Τερβουθυλαζίνη	0,007	
Τετραχλωροαιθέριο	0,04	
Τολουΐνη	0,7 (C)	
Τριχλωροξικό	0,2	
Τριχλωροαιθέριο	0,02 (P)	
Τριχλωροφαινόλη, 2,4,6-	0,2 <sup>b</sup> (C)	
Τριφλουραλίνη	0,02	
Τριαλομεθάνια		Το άθροισμα του λόγου της συγκέντρωσης καθενός προς την αντίστοιχη ενδεικτική τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1

Ουράνιο	0,015(P, T)	Εξετάστηκαν μόνο οι χημικές πτυχές του ουρανίου
Βινυλοχλωρίδιο	0,0003 <sup>b</sup>	
Ευλόλη	0,5 (C)	

- P*: προσωρινή κατευθυντήρια τιμή, καθώς υπάρχουν ενδείξεις κινδύνου, αλλά οι διαθέσιμες πληροφορίες για τις επιπτώσεις στην υγεία είναι περιορισμένες.
- T*: προσωρινή κατευθυντήρια τιμή επειδή η υπολογιζόμενη κατευθυντήρια τιμή είναι χαμηλότερη από το επίπεδο που μπορεί να επιτευχθεί μέσω πρακτικών μεθόδων επεξεργασίας, προστασίας πηγής κ.λπ.
- A*: προσωρινή κατευθυντήρια τιμή επειδή η υπολογιζόμενη κατευθυντήρια τιμή είναι κάτω από το επίπεδο που μπορεί να επιτευχθεί.
- D*: προσωρινή κατευθυντήρια τιμή επειδή η απολύμανση είναι πιθανό να οδηγήσει σε υπέρβαση της κατευθυντήριας τιμής.
- C*: συγκεντρώσεις της ουσίας σε ή κάτω από την κατευθυντήρια τιμή για την υγεία μπορεί να επηρεάσουν την εμφάνιση, τη γεύση ή την οσμή του νερού, οδηγώντας σε παράπονα των καταναλωτών.
- b*: Για ουσίες που θεωρούνται καρκινογόνες, η κατευθυντήρια τιμή είναι η συγκέντρωση στο πόσιμο νερό που σχετίζεται με υπερβολικό κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου κατά τη διάρκεια ζωής της τάξης των 10-5 (έναν επιπλέον καρκίνο ανά 100.000 του πληθυσμού που καταναλώνει πόσιμο νερό που περιέχει την ουσία στην κατευθυντήρια τιμή για 70 χρόνια). Οι συγκεντρώσεις που σχετίζονται με τα ανώτερα όρια εκτιμώμενους επιπλέον κινδύνους καρκίνου κατά τη διάρκεια της ζωής 10-4 και 10-6 μπορούν να υπολογιστούν πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας, αντίστοιχα, την κατευθυντήρια τιμή με το 10.

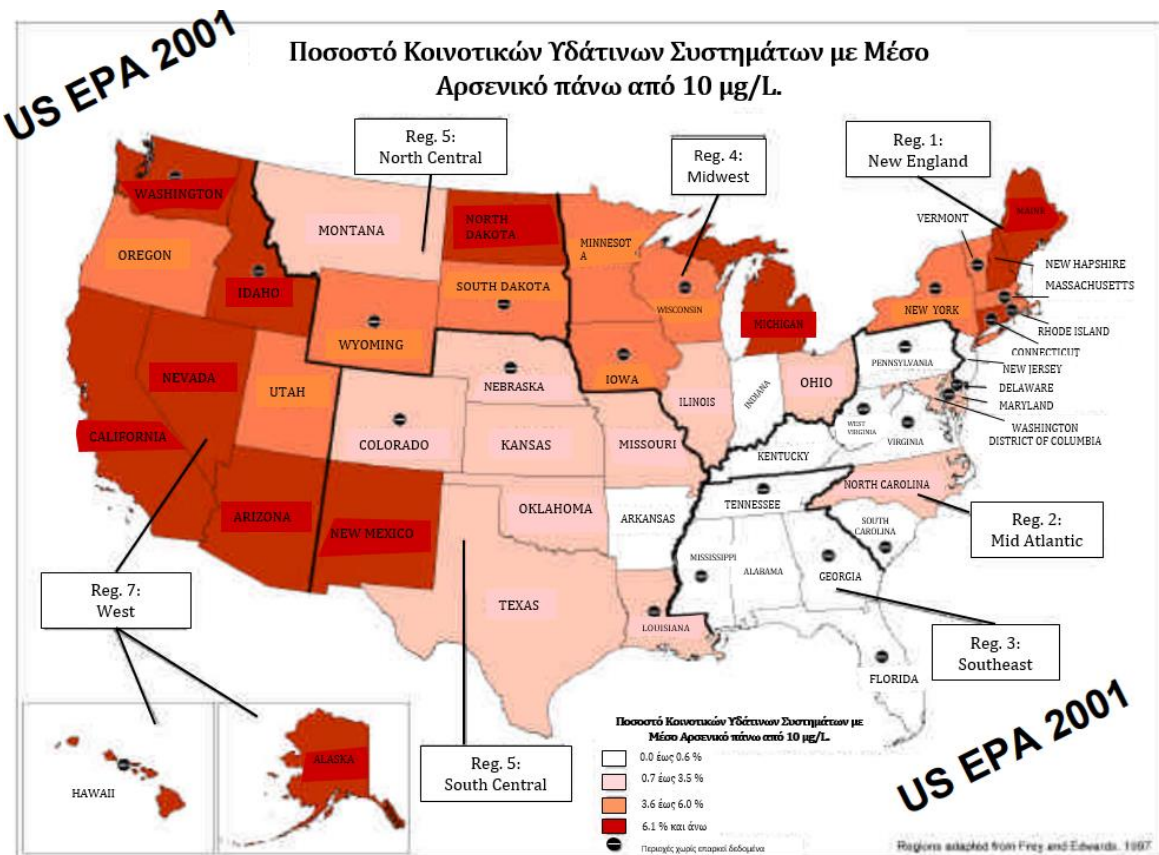
### 4.3 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ Ε.Ρ.Α.

#### 4.3.1 Οδηγία της Ε.Ρ.Α. για το αρσενικό

Η ΕΡΑ θέτει νομικά όρια σε πάνω από 90 ρύπους στο πόσιμο νερό. Το νόμιμο όριο για έναν ρύπο αντανακλά το επίπεδο που προστατεύει την ανθρώπινη υγεία και που μπορούν να επιτύχουν οι ΕΕΝ χρησιμοποιώντας την καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία. Ο νόμος για το ασφαλές πόσιμο νερό (SDWA) δίνει στην κάθε πολιτεία της Αμερικής την ευκαιρία να ορίσει και να επιβάλει τα δικά της πρότυπα για το πόσιμο νερό, εάν τα πρότυπα είναι τουλάχιστον τόσο αυστηρά όσο τα εθνικά πρότυπα της ΕΡΑ.

Σύμφωνα με την ΕΡΑ, το εφαρμοστέο πρότυπο για το αρσενικό είναι το μέγιστο επίπεδο μόλυνσης (MCL) και ορίζεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στους στόχους υγείας, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος, τα οφέλη και την ικανότητα των δημόσιων συστημάτων ύδρευσης να ανιχνεύουν και να απομακρύνουν ρύπους χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνολογίες επεξεργασίας. Σε συνδυασμό με την ΕΡΑ, το USGS (United States Geological Survey) διαδραματίζει ενεργό ρόλο στην προστασία της ανθρώπινης υγείας από πιθανά ζητήματα που σχετίζονται με τους φυσικούς πόρους των Η.Π.Α. Μια ζωτικής σημασίας πτυχή είναι η αξιολόγηση της ποιότητας του νερού των αποθεμάτων υπόγειων υδάτων. Το USGS βοηθά στη μέτρηση και την παρακολούθηση των αποθεμάτων πόσιμου νερού για προσμείξεις όπως το αρσενικό. Για παράδειγμα, επικίνδυνα υψηλά επίπεδα αρσενικού έχουν βρεθεί σε πηγάδια πόσιμου νερού σε περισσότερες από 25 πολιτείες στις Ηνωμένες Πολιτείες, εκθέτοντας δυνητικά 2,1 εκατομμύρια ανθρώπους σε πόσιμο νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε αρσενικό. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, οι πιο σκούρες αποχρώσεις δείχνουν υψηλότερο

ποσοστό συστημάτων με ανεβασμένα τα επίπεδα αρσενικού στο νερό της πηγής τους. Μεγάλο πρόβλημα με το αρσενικό αντιμετωπίζουν κυρίως τα Κοινοτικά Υδατικά Συστήματα των Πολιτειών, στην Περιοχή 7 στη Δύση, η Βόρεια Ντακότα, το Μίσιγκαν, το Μείν, το Νιου Χάμσαϊρ, το Ρόουντ Άιλαντ και το Κονέκτικατ, όπου πάνω από το 6.1% των Συστημάτων εμπεριέχουν αρσενικό πάνω από το ανώτατο επιτρεπτό όριο των 10  $\mu\text{g/L}$ . Η EPA συνέταξε αυτόν τον χάρτη από τα διαθέσιμα δεδομένα συμμόρφωσης. Όπως σημειώνεται στον χάρτη, σχεδόν οι μισές πολιτείες δεν παρείχαν δεδομένα συμμόρφωσης, δηλαδή δεν έχουν διαθέσιμα δεδομένα ώστε να τα συγκρίνουν με τα όρια του κανονισμού της EPA, οπότε δε γνωρίζουν αν συμμορφώνονται με τον κανονισμό ή όχι.

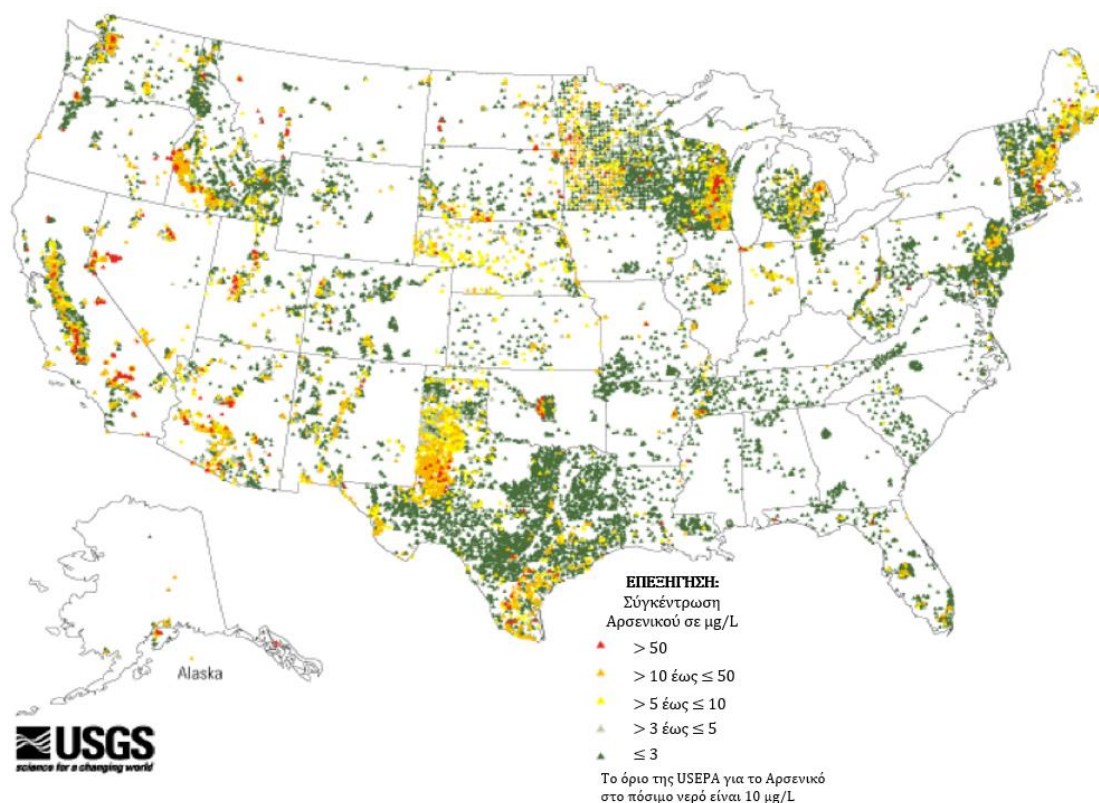


**Σχήμα 4.2:**

Ποσοστό των Κοινοτικών Υδατικών Συστημάτων στις ΗΠΑ που αναμένεται να έχουν συγκεντρώσεις αρσενικού στο νερό που χρησιμοποιούν ως πηγή τους πάνω από το αναθεωρημένο MCL αρσενικού των 0,010  $\text{mg/L}$ .

Πηγή Σχήματος: (USEPA, 2015)

Όπως έχει προαναφερθεί, το αρσενικό εμφανίζεται φυσικά ως ιχνοστοιχείο σε πολλά πετρώματα και ιζημάτα. Το αν το αρσενικό απελευθερώνεται από αυτές τις γεωλογικές πηγές στα υπόγεια ύδατα εξαρτάται από τη χημική μορφή του αρσενικού, τις γεωχημικές συνθήκες στον υδροφόρο ορίζοντα και τις βιογεωχημικές διεργασίες που συμβαίνουν. Το αρσενικό μπορεί επίσης να απελευθερωθεί στα υπόγεια ύδατα ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων, όπως η εξόρυξη, και από τις διάφορες χρήσεις του στη βιομηχανία, στις ζωοτροφές, ως συντηρητικό ξύλου και ως φυτοφάρμακο ή ως υποπροϊόν ορισμένων γεωργικών δραστηριοτήτων και μπορεί να εισέλθει στο πόσιμο νερό μέσω του εδάφους ή ως απορροή σε πηγές επιφανειακών υδάτων. Στο Σχήμα 4.3, διακρίνεται πως τέτοιες δραστηριότητες, αλλά και τα υπάρχοντα γεωλογικά δεδομένα, προβληματίζουν τις Η.Π.Α., καθώς οι ίδιες Πολιτείες με δυσμενείς μετρήσεις στα Κοινοτικά Υδατικά Συστήματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.2, όντως φαίνεται να αντιμετωπίζουν πρόβλημα με το αρσενικό, το οποίο εμπεριέχεται σε συγκεντρώσεις άνω των 10  $\mu\text{g}/\text{L}$  στο νερό πηγής τους. Για να προστατεύσει τους καταναλωτές από τις επιπτώσεις στην υγεία λόγω μακροχρόνιας (χρόνιας) έκθεσης σε αρσενικό από όλα αυτά, η EPA μείωσε το 2001 το MCL αρσενικού από 50  $\mu\text{g}/\text{L}$  σε 10  $\mu\text{g}/\text{L}$  (USEPA, 2007).



**Σχήμα 4.3:**

Χάρτης των ΗΠΑ που δείχνει διαθέσιμα δεδομένα για τις συγκεντρώσεις αρσενικού ( $\mu\text{g}/\text{L}$  ή ppb) από το 2001 από δείγματα υπόγειων υδάτων.

**Σημείωση:** Οι πορτοκαλί και οι κόκκινες κουκκίδες υποδηλώνουν συγκεντρώσεις υψηλότερες από αυτές που επιτρέπονται στο πόσιμο νερό από τους κανονισμούς της US EPA.

**Πηγή Σχήματος:** (InTeGrate, 2022)

### 4.3.2 Ιστορική Αναδρομή κατευθυντήριων γραμμών της E.P.A.

Η ομοσπονδιακή κυβέρνηση αναγνώρισε τις αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία από την κατάποση αρσενικού εδώ και πολύ καιρό και έχει επανεξετάσει με συνέπεια το πρότυπο για το αρσενικό στο πόσιμο νερό.

Το 1942, η Υπηρεσία Δημόσιας Υγείας των ΗΠΑ καθιέρωσε ένα πρότυπο αρσενικού για πόσιμο νερό για διακρατικούς φορείς νερού στα 50 µg/L. Οι πρώτες μελέτες που ανέφεραν δοσοεξαρτώμενες επιδράσεις προήλθαν από μελέτες που δημοσιεύθηκαν το 1968 και το 1977, οι οποίες αφορούσαν τον επιπολασμό του καρκίνου του δέρματος σε μια ενδημική περιοχή στην Ταϊβάν μετά από χρόνια κατανάλωση ύδατος με αρσενικό, αλλά και επιδράσεις και σχέσεις δόσης-απόκρισης του καρκίνου του δέρματος και της νόσου του μαύρου ποδιού με αρσενικό (Tseng, et al., 1968) (Tseng, 1977). Οι έρευνες αυτές προβλημάτισαν ακόμη περισσότερο για το μέγιστο όριο συγκέντρωσης του αρσενικού στο πόσιμο νερό, κι έτσι αποτέλεσε έναν από τους πρώτους ελεγχόμενους ρύπους του πόσιμου νερού. Στις 24 Δεκεμβρίου 1975, υπό την επιρροή του νόμου για το ασφαλές πόσιμο νερό (SDWA) του 1974, η EPA εξέδωσε έναν Εθνικό Προσωρινό Πρωτογενή Κανονισμό για το Πόσιμο Νερό (NIPDWR) για το αρσενικό στα 0,05 mg/L (50 µg/L).

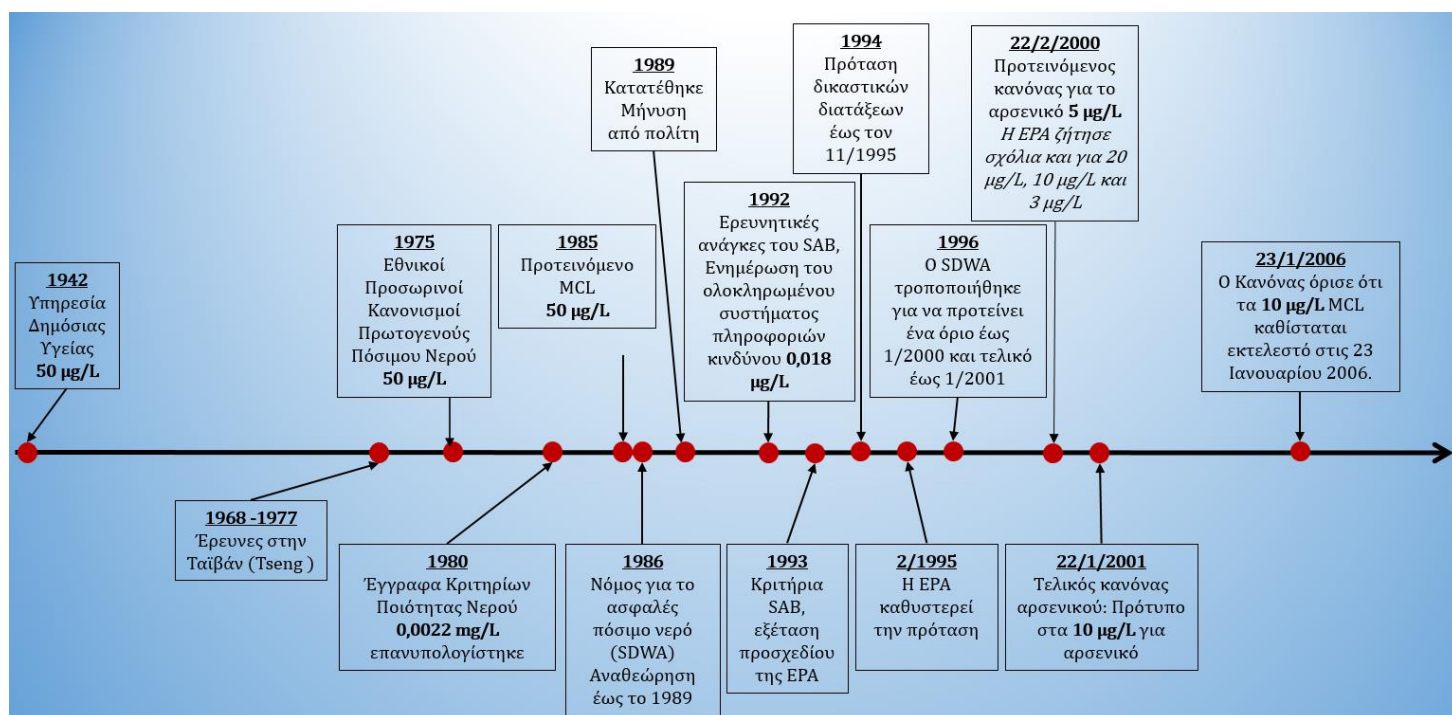
Το 1980, η EPA εξέδωσε Έγγραφα Κριτηρίων Ποιότητας Νερού βάσει του Νόμου για το Καθαρό Νερό (45 FR 79318). Περιλάμβαναν κριτήρια 0,0022 mg/L για το αρσενικό για την προστασία της ανθρώπινης υγείας από την κατάποση μολυσμένου νερού και υδρόβιων οργανισμών. Στις 13 Νοεμβρίου 1985 η EPA πρότεινε ένα MCLG 50 µg/L με βάση το συμπέρασμα της Εθνικής Ακαδημίας Επιστημών (NAS) ότι τα 50 µg/L εξισορροπούσαν την τοξικότητα με τη ρεαλιστική πιθανότητα (50 FR 46936). Το 1986 έγιναν τροποποιήσεις του SDWA, οι οποίες μετέτρεψαν τον NIPDWR του 1975 σε Εθνικό Πρωτογενή Κανονισμό για το Πόσιμο Νερό (NPDWR). Κατά συνέπεια ζητήθηκε από την EPA να αναθεωρήσει τα NPDWR έως το 1989. Η EPA έχασε την προθεσμία του 1989 που επιβλήθηκε από τις τροποποιήσεις SDWA του 1986 για την πρόταση αναθεωρημένου NPDWR, και αφού κατατέθηκαν μηνύσεις πολιτών, η EPA υπέγραψε ένα σύμφωνο που παρείχε προθεσμίες για την έκδοση νέου κανονισμού για το αρσενικό.

Το 1992, η Επιστημονική Συμβουλευτική Επιτροπή (SAB) εξέτασε τις συστάσεις της EPA του 1991 για το αρσενικό και συνέστησε ερευνητικά προγράμματα (EPA-SAB-DWC-92-018) που θα αξιολογούσαν τον κίνδυνο μετά από 3 με 5 χρόνια έκθεσης σε αυτό. Το 1992, τα κριτήρια υπολογίστηκαν εκ νέου με ενημερωμένα δεδομένα για να δώσουν 0,018 mg/L για το αρσενικό (57 FR 60848). Το 1993, η SAB εξέτασε το προσχέδιο της EPA "Drinking Water Criteria Document on Inorganic Arsenic" και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα τρέχοντα δεδομένα υποστηρίζουν μια συσχέτιση μεταξύ υψηλών επιπέδων αρσενικού και καρκίνου



στον άνθρωπο (EPA-SABDWC-34-005). Το 1994, το σύμφωνο που είχε υπογράψει η EPA τροποποιήθηκε και έπρεπε να προτείνει έναν κανονισμό έως τον Νοέμβριο του 1995. Το 1995, η EPA αποφάσισε να καθυστερήσει την πρόταση του κανονισμού προκειμένου να εξετάσει καλύτερα τις επιπτώσεις στην υγεία και να αξιολογήσει τις οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες απομάκρυνσης για μικρές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Οι τροποποιήσεις του 1996 στον SDWA περιλάμβαναν νέες θεσμοθετημένες προθεσμίες, απαιτώντας από την EPA να προτείνει έναν αναθεωρημένο κανονισμό για το αρσενικό έως την 1η Ιανουαρίου 2000 και να εκδώσει έναν τελικό κανονισμό έως την 1η Ιανουαρίου 2001.

Στον προτεινόμενο κανονισμό αρσενικού που δημοσιεύτηκε στο Ομοσπονδιακό Μητρώο στις 22 Ιουνίου 2000 (65 FR 38888), η EPA αναθεώρησε τον υφιστάμενο NPDWR για το αρσενικό σε 5 µg/L, ενώ ταυτόχρονα προτάθηκε η διερεύνηση σχετικά με τον καθορισμό του προτύπου στα 20 µg/L, 10 µg/L και 3 µg/L και ένα MCLG των 0 µg/L. Τελικά, στις 22 Ιανουαρίου 2001, η EPA καθιέρωσε το MCL στα 10 µg/L που επρόκειτο να τεθεί σε ισχύ στις 23 Μαρτίου 2001. Ο κανονισμός όρισε ότι το MCL των 0,010 mg/L (10 µg/L) καθίσταται εκτελεστό στις 23 Ιανουαρίου 2006.



**Σχήμα 4.4:**  
Χρονογραμμή Ιστορικού Ρύθμισης Ορίων Αρσενικού για την EPA.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.3) παρουσιάζονται τα όρια που έχει θεσπίσει η EPA για τους Μικροοργανισμούς στο πόσιμο νερό, ο οποίος ισχύει μέχρι και σήμερα, πίνακας που αναφέρεται και στο αρσενικό. Για τις υπόλοιπες ουσίες, τα όρια παραθέτονται στο παράρτημα που αφορά τη νομοθεσία για την EPA.

**Πίνακας 4.3:** Θεσμοθετημένα όρια που αφορούν τους μικροοργανισμούς στο πόσιμο νερό σύμφωνα με την EPA (USEPA, 2009)

Μολυσματικός Παράγοντας	MCLG (mg/L)	MCL or TT (mg/L)	Πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από τη μακροπρόθεσμη έκθεση πάνω από το MCL (εκτός εάν ορίζεται ως βραχυπρόθεσμη)	Πηγές ρύπων στο πόσιμο νερό
Αντιμόνιο	0,006	0,006	Αύξηση της χοληστερόλης στο αίμα. μείωση του σακχάρου στο αίμα	Απόρριψη από διυλιστήρια πετρελαίου. επιβραδυντικά πυρκαγιές? κεραμικά; ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΙΔΗ; κόλλα μετάλλων
Αρσενικό	0	0,01 από 23/01/06	Δερματική βλάβη ή προβλήματα με το κυκλοφορικό σύστημα και μπορεί να έχει αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου	Διάβρωση φυσικών κοιτασμάτων; απορροές από οπωρώνες, απορροές από απόβλητα παραγωγής γυαλιού και ηλεκτρονικών ειδών
Αμίαντος (ίνες > 10 μικρόμετρα)	7 εκατομμύρια ίνες ανά λίτρο (MFL)	7 MFL	Αυξημένος κίνδυνος ανάπτυξης καλοηθών εντερικών πολύποδων	Αποσύνθεση αμιαντοσιμέντου σε δίκτυο ύδρευσης, διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Βάριο	2	2	Αύξηση της αρτηριακής πίεσης	Απόρριψη απορριμμάτων γεωτρήσεων. απόρριψη από διυλιστήρια μετάλλων· διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Βηρύλλιο	0,004	0,004	Εντερικές βλάβες	Απόρριψη από διυλιστήρια μετάλλων και εργοστάσια καύσης άνθρακα. απόρριψη από την ηλεκτρική, την αεροδιαστημική και την αμυντική βιομηχανία
Κάδμιο	0,005	0,005	Βλάβη στα νεφρά	Διάβρωση γαλβανισμένων σωλήνων. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων· απόρριψη από διυλιστήρια μετάλλων· απορροή από άχρηστες μπαταρίες και χρώματα
Χρώμιο (ολικό)	0,1	0,1	Αλλεργική δερματίτιδα	Απόρριψη από εργοστάσια χάλυβα και χαρτοπολτού. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Χαλκός	1,3	TT: Επίπεδο δράσης = 1,3	Βραχυπρόθεσμη έκθεση: Γαστρεντερική δυσφορία Μακροχρόνια έκθεση: Ηπατική ή νεφρική βλάβη Τα άτομα με νόσο του Wilson θα πρέπει να συμβουλευόνται τον προσωπικό τους γιατρό εάν η ποσότητα χαλκού στο νερό τους υπερβαίνει το επίπεδο δράσης	Διάβρωση οικιακών υδραυλικών συστημάτων. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Κυάνιο (ως ελεύθερο κυάνιο)	0,2	0,2	Νευρική βλάβη ή προβλήματα θυρεοειδούς	Απόρριψη από εργοστάσια χάλυβα/μετάλλων. απόρριψη από εργοστάσια πλαστικών και λιπασμάτων
Φθόριο	4	4	Νόσος των οστών (πόνος και ευαισθησία των οστών). Τα παιδιά μπορεί	Πρόσθετο νερού που προάγει γερά δόντια. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων·

			να εμφανίσουν στίγματα στα δόντια	απόρριψη από εργοστάσια λιπασμάτων και αλουμινίου
Μόλυβδος	0	ΤΤ: Επίπεδο δράσης =0,015	Βρέφη και παιδιά: Καθυστερήσεις στη σωματική ή πνευματική ανάπτυξη. Τα παιδιά θα μπορούσαν να παρουσιάσουν ελαφρά ελλείμματα στο εύρος της προσοχής και στις μαθησιακές ικανότητες  Ενήλικες: Νεφρικά προβλήματα. υψηλή πίεση του αίματος	Διάβρωση οικιακών υδραυλικών συστημάτων. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Υδράργυρος (ανόργανος)	0,002	0,002	Βλάβη στα νεφρά	Διάβρωση φυσικών κοιτασμάτων; απόρριψη από διυλιστήρια και εργοστάσια· απορροή από χωματερές και καλλιεργήσιμες εκτάσεις
Νιτρικά (μετρούμενα ως άζωτο)	10	10	Βρέφη ηλικίας κάτω των έξι μηνών που πίνουν νερό που περιέχει νιτρικά άλατα σε περίσσεια του MCL μπορεί να αρρωστήσουν σοβαρά και, εάν δεν αντιμετωπιστούν, μπορεί να πεθάνουν. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν δύσπνοια και σύνδρομο μπλε-μωρού.	Απορροή από τη χρήση λιπασμάτων. διαρροή από σηπτικές δεξαμενές, λύματα. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Νιτρώδες (μετρούμενο ως άζωτο)	1	1	Βρέφη ηλικίας κάτω των έξι μηνών που πίνουν νερό που περιέχει νιτρώδη άλατα σε περίσσεια του MCL μπορεί να αρρωστήσουν σοβαρά και, εάν δεν αντιμετωπιστούν, μπορεί να πεθάνουν. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν δύσπνοια και σύνδρομο μπλε-μωρού.	Απορροή από τη χρήση λιπασμάτων. διαρροή από σηπτικές δεξαμενές, λύματα. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Σελήνιο	0,05	0,05	Απώλεια μαλλιών ή νυχιών. μούδιασμα στα δάχτυλα των χεριών ή των ποδιών: κυκλοφορικά προβλήματα	Απόρριψη από διυλιστήρια πετρελαίου. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων· απόρριψη από ορυχεία
Θάλλιο	0,0005	0,002	Απώλεια μαλλιών, αλλαγές στο αίμα, προβλήματα στα νεφρά, το έντερο ή το συκώτι	Έκπλυση από τοποθεσίες επεξεργασίας μεταλλευμάτων. απόρριψη από εργοστάσια ηλεκτρονικών, γυαλιού και φαρμάκων

## 4.4 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ ΣΕ ΧΩΡΕΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΖΟΥΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΑΡΣΕΝΙΚΟ

### 4.4.1 Νομοθεσία για το πόσιμο νερό στη Χιλή

Από τα μέσα του 19ου αιώνα, όταν ιδρύθηκαν οι πρώτες εταιρείες εξόρυξης στην περιοχή της Antofagasta για την εξόρυξη άλατος, οι διαχειριστές ορυχείων και οι δημόσιες αρχές είχαν πάντα να αντιμετωπίσουν μια σειρά προβλημάτων για να εξασφαλίσουν επαρκή παροχή νερού για την ανάπτυξη βιομηχανικών δραστηριοτήτων και κοινωνία. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά της περιοχής, δηλαδή η έλλειψη βροχοπτώσεων, η υψηλή συγκέντρωση αρσενικού στα γλυκά νερά και η αυξανόμενη πίεση του μεταλλευτικού τομέα, έχουν καταστήσει την παροχή πόσιμου νερού για τις τοπικές κοινωνίες πρόκληση. Στη δεκαετία του 1950, η πόλη Antofagasta γνώρισε μια σοβαρή κρίση πόσιμου νερού. Το μήκος 300 km υδραγωγείο που ξεκινά από τη λεκάνη απορροής Tococonce, που άνοιξε το 1958, τερμάτισε προσωρινά αυτή την έλλειψη πόσιμου νερού, αλλά δημιούργησε ένα ακόμη πιο δραματικό πρόβλημα. Η συγκέντρωση του αρσενικού στο νερό που καταναλώνει ο πληθυσμός είχε αυξηθεί κατά περίπου δέκα φορές, φτάνοντας την τιμή των 0,860 mg/L και επηρεάζοντας σοβαρά την υγεία των ανθρώπων. Οι μονάδες επεξεργασίας νερού (WTP) που εγκαταστάθηκαν από τη δεκαετία του 1970 στην περιοχή, δηλαδή το Old (παλιό) και New (νέο) Salar del Carmen στην Antofagasta και το Cerro Topater στην Calama, καθώς και οι δύο πρόσφατες μονάδες αφαλάτωσης στην Antofagasta και την Tocopilla, έχουν εξασφαλίσει, από το 2014, ότι η κάλυψη με πόσιμο νερό στις αστικές περιοχές ήταν πρακτικά καθολική (> 99,9%) (Ruffino, et al., 2022).

Οι απαιτήσεις ποιότητας για το πόσιμο νερό και άλλες χρήσεις ορίζονται σε δύο πρότυπα: το Χιλιανό πρότυπο NCh 409/2005 και ποιότητα νερού για διάφορες χρήσεις και το Χιλιανό πρότυπο NCh 1333/1987. Το διάταγμα 1199/2005 καθιερώνει κατώτατη ποιότητα πόσιμου νερού, όπως ορίζεται από το NCh 409/2005 (παράμετροι και τιμές δημοσιεύονται επίσης στο διάταγμα 735/1969). Επί του παρόντος, το πόσιμο νερό στην επικράτεια πρέπει να συμμορφώνεται με 43 παραμέτρους και τις μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις τους σε τέσσερις κατηγορίες, συμπεριλαμβανομένων των χημικών και μετάλλων, της θολότητας και των μικροοργανισμών, των φυσικών οργανοληπτικών χαρακτηριστικών και της απολύμανσης. Σύμφωνα με τον κανονισμό, η συχνότητα παρακολούθησης εξαρτάται από τους τύπους των παραμέτρων, τα χαρακτηριστικά της πηγής νερού και την παρεχόμενη υπηρεσία (Carvajal, et al., 2021).

Αυτές οι παράμετροι και οι συγκεντρώσεις τους προσαρμόστηκαν στις κατευθυντήριες γραμμές του Π.Ο.Υ. για την ποιότητα του πόσιμου νερού λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα των τοπικών πηγών νερού και τις διαθέσιμες τεχνολογίες. Οι απαιτούμενες παράμετροι από το NCh 409/2005 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Ο ισχύων κανονισμός χαρακτηρίζεται από το ότι απαιτεί

παρακολούθηση συμμόρφωσης των εκροών σε σχέση με τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια συγκέντρωσης. Στη Χιλή, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας (εκ των οποίων οι περισσότερες είναι ιδιωτικές) είναι υπεύθυνες για την αυτοπαρακολούθηση των παραμέτρων τους με μια συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ το SISS λαμβάνει δείγματα και μετρά την ποιότητα του νερού σποραδικά ή όταν παρατηρείται ένα συμβάν ρύπανσης. Η μη συμμόρφωση με αυτά τα ανώτατα όρια συγκέντρωσης μπορεί να προκαλέσει απάντηση από το SISS για επιβολή χρηματικών κυρώσεων στην εταιρεία κοινής ωφέλειας που είναι υπεύθυνη για τέτοια γεγονότα όπως ορίζονται από το Νόμο για τη δημιουργία της Εποπτείας Υπηρεσιών Υγειονομικής Υπηρεσίας (N. 18902/1990). Η διαφάνεια και οι πληροφορίες σχετικά με τις επιδόσεις, την ποιότητα των υπηρεσιών, τις κυρώσεις, τα αναπτυξιακά σχέδια, τα τιμολόγια, τη λίστα των σχετικών προτύπων για τον τομέα, οι κανονισμοί μεταξύ άλλων είναι ζωτικής σημασίας στο πλαίσιο του καθεστώτος διαχείρισης των υδάτων της Χιλή, επομένως αυτά τα δεδομένα είναι άμεσα διαθέσιμα μέσω του ιστότοπου SISS, ο οποίος είναι επιφορτισμένη με την ενημέρωση των πελατών για τις παρεχόμενες υπηρεσίες και τη διατήρηση ενημερωμένων βάσεων δεδομένων.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι παρόλο που ο Π.Ο.Υ. παρουσιάζει κατευθυντήριες γραμμές με συνιστώμενες τιμές συγκέντρωσης για πολλές χώρες, η εστίαση σε αυτές τις κατευθυντήριες γραμμές είναι η προώθηση της διαχείρισης κινδύνου αντί των μέγιστων συγκεντρώσεων. Ο ΠΟΥ έχει απομακρυνθεί από το να εστιάζει σε μεγάλο βαθμό στις μέγιστες συγκεντρώσεις, επειδή δεν προστατεύει πλήρως τους καταναλωτές ή το περιβάλλον από την πιθανότητα επικίνδυνων συμβάντων που οδηγούν σε κακή ποιότητα του νερού.

**Πίνακας 4.4:** Μέγιστη συγκέντρωση παραμέτρων σύμφωνα με τα πρότυπα της Χιλή για να καθίσταται πόσιμο (**Ministerio de Salud Publica, 1969, 2010**).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ	ΜΟΝΑΔΑ
2,4-D	30	µg/L
Αμμώνιο	1.5	mg/L
<b>Αρσενικό</b>	<b>0.01</b>	<b>mg/L</b>
Βενζόλιο	10	µg/L
Βρωμοδιχλωρομεθάνιο	0.06	mg/L
Κάδμιο	0.01	mg/L
Χλώριο	400	mg/L
Χαλκός	2	mg/L
Κυάνιο	0.05	mg/L
DDT+DDD+DDE	2	µg/L
Διβρωμοχλωρομεθάνιο	0.1	mg/L
E. coli (MPN) α	Απουσία	
Φθόριο	1.5	mg/L
Ελεύθερο υπολειμματικό χλώριο	0.2-2.0	mg/L
Σίδηρος	0.3	mg/L
Μόλυβδος	0.05	mg/L
Λινδάνιο	2	mg/L
Μαγνήσιο	125	mg/L
Μαγγάνιο	0.1	mg/L
Υδράργυρος	0.001	mg/L

Μεθοξυχλωρίδιο	20	µg/L
Μονοχλωραμίνη	3	mg/L
Νιτρικό (άλας) NO-3	50	mg/L
Νιτρώδες (άλας) NO-2	3	mg/L
Νιτρώδη + νιτρικά (αναλογία) β	1	
Οσμή	Άοσμο	
Πενταχλωροφαινόλη	9	µg/L
Ph	6.5-8.5	
Φαινολικές ενώσεις	2	µg/L
Σελήνιο	0.01	mg/L
Θειικό άλας	500	mg/L
Γεύση	Άγευστο	
Τετραχλωροαιθέριο	40	µg/L
Τολουΐνη	700	µg/L
Ολικό Χρώμιο	0.05	mg/L
Ολικά Διαλυμένα Στερεά	1500	mg/L
Τριβρωμομεθάνιο	0.1	mg/L
Τριχλωρομεθάνιο	0.2	mg/L
Τριαλομεθάνια (αναλογία) β	1	
Αληθινό χρώμα (Pt-Co)	20	
Θολότητα (NTU)	2	
Ευλένια	500	µg/L
Ψευδάργυρος	3	mg/L

α: όλα τα δείγματα πρέπει να είναι απαλλαγμένα από *E. coli*. Τα δείγματα μπορεί να περιέχουν ολικά κολοβακτηρίδια σύμφωνα με συγκεκριμένους ποσοστιαίους κανόνες ανάλογα με τον αριθμό των δειγμάτων που λαμβάνονται. Ωστόσο, όποτε υπάρχουν ολικά κολοβακτηρίδια, απαιτείται πρόσθετη επιβεβαίωση για απουσία *E. coli*.

β: άθροισμα των αναλογιών μεταξύ της μετρούμενης συγκέντρωσης καθενός και του αντίστοιχου μέγιστου ορίου της.

Ο υφιστάμενος Κώδικας Υδάτων που δημοσιεύθηκε το 1981, ο οποίος αντιμετώπιζε το νερό ως οικονομικό αγαθό, αναθεωρήθηκε πρόσφατα (Μάρτιος 2022). Η μεταρρύθμιση είχε «παγώσει» για μια δεκαετία και η πρόσφατη σοβαρή δεκαετής ξηρασία και οι μαζικές διαμαρτυρίες το φθινόπωρο του 2019 ανάγκασαν τους νομοθέτες να επισπεύσουν το έργο που καθυστερούσε πολύ. Οι κύριες τροποποιήσεις στον Κώδικα Υδάτων αφορούν τα άρθρα 5 και 6 και αποσκοπούν στην ιεράρχηση της ανθρώπινης κατανάλωσης και του περιβάλλοντος. Οι αλλαγές που έγιναν στο άρθρο 5 ενίσχυσαν τον χαρακτήρα του νερού ως δημόσιου αγαθού και δήλωσαν ότι ο τομέας και η χρήση του ανήκουν σε όλους τους Χιλιανούς, δίνοντάς του χαρακτήρα δημόσιου συμφέροντος για την προστασία της ανθρώπινης κατανάλωσης και της υγιεινής. Στο άρθρο 6, αναφερόταν ότι το δικαίωμα χρήσης νερού θα χορηγείται με προσωρινές παραχωρήσεις, επιπλέον ότι θα επιτρέπεται η ανανέωσή του μόνο εάν πληρούνται οι απαιτήσεις διαθεσιμότητας και βιωσιμότητας της πηγής τροφοδοσίας. Η αλλαγή του υφιστάμενου νόμου τροποποιεί την έννοια των δικαιωμάτων χρήσης νερού προκειμένου να τους προσδώσει προσωρινό χαρακτήρα, δίνοντας προτεραιότητα στην ανθρώπινη κατανάλωση έναντι άλλων χρήσεων (Ministerio de Salud Publica, 1969, 2010).

#### 4.4.2 Νομοθεσία για το πόσιμο νερό στο Μπαγκλαντές

Ο λαός του Μπαγκλαντές δηλητηριάζεται σιγά σιγά. Αν και ο κόσμος το γνωρίζει αυτό από το 1998, οι πλήρεις συνέπειες άρχισαν να συνειδητοποιούνται αρκετά αργότερα. Έως και 57 εκατομμύρια από τους 130 εκατομμύρια κατοίκους του Μπαγκλαντές πίνουν νερό που περιέχει επιβλαβείς συγκεντρώσεις αρσενικού. Η τραγωδία είναι διπλή καθώς η εύρεση λύσεων για την παροχή πόσιμου νερού στον πληθυσμό ήταν ένα καλοπροαίρετο μέτρο δημόσιας υγείας που προκάλεσε το πρόβλημα εξαρχής, και στην προκειμένη περίπτωση δεν υπάρχουν εύκολες λύσεις. Η συζήτηση σε μια συνάντηση τον Ιανουάριο μεταξύ του Υπουργείου Διεθνούς Ανάπτυξης, του Βρετανικού Γεωλογικού Ινστιτούτου και μη κυβερνητικών οργανώσεων τόνισε τις δυσκολίες επίτευξης μιας εφαρμόσιμης μακροπρόθεσμης λύσης (MacDonald, 2001).

Η προσωρινή οδηγία του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας είναι ότι το πόσιμο νερό δεν πρέπει να περιέχει περισσότερο από 10  $\mu\text{g/l}$  αρσενικό, αν και το πρότυπο του Μπαγκλαντές είναι 50  $\mu\text{g/l}$ . Τα δείγματα νερού, όμως, από πολλές γεωτρήσεις του Μπαγκλαντές έχουν συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν αυτές τις τιμές, με ακραίες συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 500  $\mu\text{g/l}$  (MacDonald, 2001).

Τα πρότυπα ποιότητας του πόσιμου νερού του Μπαγκλαντές έχουν αναθεωρηθεί και αναλυθεί κριτικά για να προσδιορίσουν τις παραμέτρους προτεραιότητας για το Μπαγκλαντές λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες για την υγεία. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων και η ιεράρχηση οριστικοποιήθηκαν σε επίσημη συνάντηση που πραγματοποιήθηκε στις 5-6 Αυγούστου 2010 υπό την Προεδρία του LGD, MoLGRD&C. Η έρευνα αποκάλυψε ότι υπάρχουν 5 παράμετροι και στόχοι που εμπίπτουν στην πρώτη κατηγορία προτεραιότητας και 35 παράμετροι και στόχοι υπάγονται στη δεύτερη κατηγορία προτεραιότητας (Government of the People's Republic of Bangladesh, 2011).

Παράμετροι και στόχοι πρώτης προτεραιότητας με βάση την υγεία θεωρούνται τα:

- 1) Αρσενικό
- 2) Θερμοανεκτικό κολοβακτηρίδιο
- 3) Υπολειμματικό Χλώριο
- 4) Νιτρικό άλας

Πρώτης προτεραιότητας στόχος που δεν βασίζεται στην υγεία (αποδεκτότητα)

- 5) Θολότητα

Παράμετροι και στόχοι δευτερεύουσας προτεραιότητας με βάση την υγεία θεωρούνται τα:

- 6) Κάδμιο
- 7) Κουανιούχο

- 8) Φθοριούχος
- 9) Μόλυβδος
- 10) Μαγγάνιο
- 11) Υδράργυρος
- 12) Συνολική ακτινοβολία άλφα
- 13) Συνολική ακτινοβολία βήτα
- 14) Βενζόλιο
- 15) Τετραχλωράνθρακα
- 16) 1,1-διχλωρομεθάνιο
- 17) 1,2-διχλωρομεθάνιο
- 18) Τετραχλωρομεθάνιο
- 19) Τριχλωρομεθυλένιο
- 20) Χλωροφόρμιο
- 21) Βάριο
- 22) Βόριο
- 23) Χαλκός
- 24) Νικέλιο
- 25) Σελήνιο
- 26) Θεϊκό άλας
- 27) Φαινολική ένωση
- 28) Πενταχλωροφαινόλη
- 29) 2,4,6-τριχλωροφαινόλη
- 30) Άλδριν και ντιελτρίν
- 31) Χρώμιο (ολικό)

Δευτερεύουσας προτεραιότητας στόχοι που δεν βασίζονται στην υγεία (αποδεκτότητα)

- 32) Χρώμα
- 33) Οσμή
- 34) pH
- 35) Σκληρότητα ως CaCO<sub>3</sub>
- 36) Πλήρως διαλυθέντα στερεά
- 37) Αλουμίνιο
- 38) Αμμωνία
- 39) Χλωριούχο
- 40) Σίδηρος (αστικό)
- 41) Σίδηρος (αγροτικός)

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι παράμετροι που καθορίζει η νομοθεσία του Μπαγκλαντές με την αντίστοιχη ανώτατη τιμή τους, αλλά και την τιμή του Π.Ο.Υ., ώστε το πόσιμο νερό να καθίσταται ασφαλές:



**Πίνακας 4.5:** Παράμετροι ποιότητας νερού σύμφωνα με τα πρότυπα του Μπαγκλαντές και τις οδηγίες του Π.Ο.Υ.

A/A	Παράμετροι Ποιότητας Νερού	Πρότυπα Μπαγκλαντές (mg/L)	Κατευθυντήρια Γραμμή ΠΟΥ (mg/L)	Μέθοδοι/ Εξοπλισμοί
1	Αλουμίνιο	0.2	-	Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης (AAS)
2	Αμμωνία	0.5		UV-VIS
<b>3</b>	<b>Αρσενικό</b>	<b>0.05</b>	<b>0.01</b>	<b>AAS</b>
4	Βάριο	0.01	0.7	AAS
5	Βενζόλιο	0.01	0.01	Χρωματογράφος Αερίων
6	BOD (5 <sup>ης</sup> μέρας), 200C	0.2	-	Επώαση 5 ημερών
7	Βόριο	1.0	-	UV-VIS
8	Κάδμιο	0.005	0.003	AAS
9	Ασβέστιο	75	-	AAS
10	Χλωρίδιο	150-600	-	Τιτρομετρική
11	Χλωριωμένα Αλκένια			
11.1	Τετραχλωράνθρακα	0.01	0.004	Χρωματογράφος Αερίων
11.2	1.1 Διχλωροαιθυλένιο	0.001	0.03	Χρωματογράφος Αερίων
11.3	1.2 Διχλωροαιθυλένιο	0.03	0.03	Χρωματογράφος Αερίων
11.4	Τετραχλωροαιθυλένιο	0.03	0.04	Χρωματογράφος Αερίων
11.5	Τριχλωροαιθυλένιο	0.09	0.07	Χρωματογράφος Αερίων
12.1	Πενταχλωροφαινόλη	0.03	0.009	Χρωματογράφος Αερίων
12.2	2,4,6- Τριχλωροφαινόλη	0.03	0.2	Χρωματογράφος Αερίων
13	Χλώριο (Υπολειπόμενο)	0.2	-	Τιτρομετρική
14	Χλωροφόρμιο	0.09	0.2	Χρωματογράφος Αερίων
15	Χρώμιο (Εξασθενές)	0.05	-	Χρωματογράφος Σιδήρου
16	Χρώμιο (Ολικό)	0.05	0.05(P)	AAS
17	COD	4	-	Μέθοδος κλειστής παλινδρόμησης
18	Μορφή Coli (κοπράνων)	0 CFU (N/100mL)	0	Μέθοδος φιλτραρίσματος με μεμβράνη
19	Μορφή Coli (ολικό)	0 CFU (N/100mL)	0	Μέθοδος φιλτραρίσματος με μεμβράνη
20	Χρώμα	15 Hazen	-	Συγκριτής χρωμάτων
21	Χαλκός	1	2	AAS
22	Κυανίδιο	0.1	0.07	UV-VIS/ Ειδικό ηλεκτρόδιο ιόντων
23	Απορρυπαντικά (Τασιενεργά)	0.2	-	UV-VIS
24	DO	6	-	Πολύμετρο
25	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	-us/cm	-	Πολύμετρο
26	Φθόριο	1	1.5	UV-VIS
27	Σκληρότητα ως CaCO <sub>3</sub>	200-500	-	Τιτρομετρική
28	Ιώδιο	200-500	-	Τιτρομετρική
29	Σίδηρος	0.3-1.0	-	AAS

30	Άζωτο μέσω μεθόδου Κιέλνταλ (Ολικό)	1	-	UV-VIS/ Χώνευση
31	Μόλυβδος	0.05	0.01	AAS
32	Μαγνήσιο	30-35	-	AAS
33	Μαγγάνιο	0.1	-	AAS
34	Υδράργυρος	0.001	0.001	Αναλυτής υδραργύρου
35	Νικέλιο	0.1	0.02(P)	AAS
36	Νιτρικό άλας	10	50.0 ως N	UV-VIS
37	Νιτρώδες άλας	<1	3.0(0.2)	UV-VIS
38	Οσμή	Άγευστο	-	Μέθοδος Κατωφλίου
39	Δυναμικό Μείωσης Οξειδωσης - ORP (Eh) Oxidation-Reduction Potential	-	-	Μέτρο ORP
40	Λάδι και Γράσο	0.01	-	Μετρητής λαδιού και γράσου
41	pH		6.5-8.5	pH-μετρο
42	Φαινολικές Ενώσεις	0.002	-	Χρωματογράφος Αερίων
43	Φωσφορικό άλας	6	-	UV-VIS
44	Φώσφορος	0	-	Χώνευση
45	Κάλιο	12	-	AAS
46	Ραδιενεργά υλικά (Ακαθάριστη Δραστηριότητα Άλφα)	0.01 Bq/L	0.5 Bq/L	-
47	Ραδιενεργά υλικά (Ακαθάριστη δραστηριότητα βήτα)	0.1 Bq/L	1.0 Bq/L	-
48	Αλμυρότητα	-%0	-	Πολύμετρο
49	Σελήνιο	0.01	0.01	AAS
50	Άργυρος	0.02	-	AAS
51	Νάτριο	200	-	AAS
52	Νάτριο	10	-	Διήθηση και Ξήρανση
53	Σουλφίδιο	0	-	UV-VIS
54	Θειικό άλας	400	-	UV-VIS
55	Γεύση	-	-	Threshold Method
56	Ολική αλκαλικότητα	-	-	Τιτρομετρική
57	Ολικά διαλυμένο στερεό	1000	-	Πολύμετρο
58	Θερμοκρασία	20-30C		Θερμόμετρο
59	Κασσίτερος	2	-	AAS
60	Θολότητα	10 NTU (αγροτικές περιοχές) 5 NTU (αστικές περιοχές)	-	Θολόμετρο
61	Ψευδάργυρος	5	-	AAS

UV-VIS : Φασματοφωτόμετρο UV-Visible  
AAS : Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης  
ORP Δυνατότητα Οξειδωσης-Μείωσης

#### 4.5 **ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΚΡΑΤΗ ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΈΝΩΣΗΣ (Ε.Ε.)**

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία που αφορά την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης βασίζεται στις οδηγίες 98/83/ΕΚ και 2020/2184 και έχει ως στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας, μέσω της εξασφάλισης ότι είναι υγιεινό και καθαρό (Άρθρο 1). Η παρούσα οδηγία θεωρεί ως «νερό ανθρώπινης κατανάλωσης» (Άρθρο 2, παράγραφος 1):

α) το νερό που είτε στη φυσική του κατάσταση είτε μετά από επεξεργασία, που προορίζεται για πόση, μαγείρεμα, προπαρασκευασμένη τροφή ή άλλες οικιακές χρήσεις, ανεξάρτητα από την προέλευση του και από το εάν παρέχεται από δίκτυο διανομής, από βυτίο ή σε φιάλες ή δοχεία.

β) το νερό που χρησιμοποιείται στις επιχειρήσεις παραγωγής τροφίμων για την παρασκευή, επεξεργασία, συντήρηση ή εμπορία προϊόντων ή ουσιών που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση, εκτός αν οι αρμόδιες εθνικές αρχές κρίνουν ότι η ποιότητα του νερού δεν μπορεί να επηρεάσει την υγιεινή των τροφίμων στην τελική τους μορφή.

Τα κράτη μέλη λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης είναι υγιεινό και καθαρό, δηλαδή εφόσον (Άρθρο 4, παράγραφος 1):

α) είναι απαλλαγμένο μικροοργανισμών και παρασίτων και οποιωνδήποτε ουσιών, σε αριθμούς και συγκεντρώσεις, που αποτελούν ενδεχόμενο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και

β) πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις του παραρτήματος Ι μέρη Α και Β,

και σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις των άρθρων 5 έως 8 και 10, τα οποία θα αναφερθούν περιληπτικά παρακάτω, τα κράτη μέλη λαμβάνουν όλα τα αναγκαία μέτρα προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης συμμορφούται προς τις απαιτήσεις της οδηγίας (Άρθρο 4, παράγραφος 1).

Επιπλέον, τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι τα μέτρα που λαμβάνονται δεν οδηγούν, σε καμία περίπτωση, σε άμεση ή έμμεση υποβάθμιση της σημερινής ποιότητας του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, στο μέτρο που αυτό αφορά την προστασία της ανθρώπινης υγείας, ούτε σε αύξηση της ρύπανσης του νερού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πόσιμου νερού (Άρθρο 4, παράγραφος 2).

Σύμφωνα με τη νομοθεσία τα κράτη μέλη καθορίζουν τιμές για τις παραμέτρους του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης οι οποίες αναφέρονται στο παράρτημα Ι, οι οποίες τιμές δεν πρέπει να είναι λιγότερο αυστηρές από αυτές του παραρτήματος Ι (Άρθρο 5, παράγραφος 1). Στο παράρτημα Ι, όπως φαίνεται, δίνεται και η ανώτατη τιμή που επιτρέπεται από την οδηγία της Ε.Ε. για τη συγκέντρωση του

αρσενικού στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης, η οποία ανέρχεται στα 10  $\mu\text{g}/\text{l}$ . Επιπροσθέτως, τα κράτη μέλη καθορίζουν τιμές για πρόσθετες παραμέτρους που δεν περιλαμβάνονται

στο παράρτημα I όταν το επιβάλλει η προστασία της δημόσιας υγείας στο εθνικό του έδαφος ή σε μέρος αυτού. Οι καθορισμένες τιμές θα πρέπει να πληρούν, τουλάχιστον, τις απαιτήσεις του άρθρου 4 παράγραφος 1 στοιχείο α. Οι τιμές αυτές είναι υποχρεωτικό να τηρούνται (Άρθρο 6, παράγραφος 1) :

A) Για το νερό που παρέχεται από το δίκτυο διανομής, στο σημείο, εντός του κτιρίου ή της κτιριακής εγκατάστασης, στο οποίο βγαίνει από τις βρύσες που χρησιμοποιούνται συνήθως για ανθρώπινη κατανάλωση

B) Για το νερό που παρέχεται από δίκτυο διανομής, στο σημείο, εντός του κτιρίου ή της κτιριακής εγκατάστασης, στο οποίο βγαίνει από τις βρύσες που χρησιμοποιούνται συνήθως για ανθρώπινη κατανάλωση.

Γ) Για το νερό που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία προς πώληση, στο σημείο στο οποίο το νερό τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία

Δ) Για το νερό που χρησιμοποιείται σε επιχείρηση παραγωγής τροφίμων, στο σημείο όπου το νερό χρησιμοποιείται στην επιχείρηση.

Όσον αφορά την παρακολούθηση των παραμετρικών τιμών του άρθρου 5, τα κράτη μέλη είναι υποχρεωμένα να παρακολουθούν την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι το διατιθέμενο νερό στους καταναλωτές πληροί τις απαιτήσεις της παρούσας οδηγίας. Γι' αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται αντιπροσωπευτικά δείγματα της ποιότητας του νερού που καταναλίσκεται καθόλη τη διάρκεια του έτους. Επιπλέον, μέσω κατάλληλων προγραμμάτων παρακολούθησης τα οποία πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις του παραρτήματος II (Άρθρο 7, παράγραφος 2), κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος της αποτελεσματικής απολύμανσης του νερού, όταν αυτή αποτελεί μέρος της διαδικασίας επεξεργασίας/διανομής του νερού, ώστε να εξασφαλίζεται και ο έλεγχος για οποιαδήποτε επιμόλυνση από υποπροϊόντα της απολύμανσης (Άρθρο 7, παράγραφος 1).

Τα κράτη μέλη μεριμνούν ώστε να διερευνάται αμέσως κάθε παράληψη της τήρησης των παραμετρικών τιμών που καθορίζονται σύμφωνα με το άρθρο 5, ώστε να εντοπίζονται τα αίτια (Άρθρο 8, παράγραφος 1). Ανεξαρτήτως του αν έχει σημειωθεί ή όχι μη τήρηση των παραμετρικών τιμών, τα κράτη εξασφαλίζουν ότι απαγορεύεται η παροχή ή περιορίζει τη χρήση του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης όταν αυτό αποτελεί ενδεχόμενο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία (Άρθρο 8, παράγραφος 3).

#### 4.6 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ

Ομοίως με την ευρωπαϊκή οδηγία που αφορά την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης έτσι κι η ελληνική νομοθεσία, έχει ως στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας, μέσω της εξασφάλισης ότι είναι υγιεινό και καθαρό (Άρθρο 1). Ακολουθώντας την ευρωπαϊκή οδηγία και η ελληνική νομοθεσία θεωρεί ως «νερό ανθρώπινης κατανάλωσης» (Άρθρο 2, παράγραφος 1):

α) το νερό που είτε στη φυσική του κατάσταση είτε μετά από επεξεργασία, που προορίζεται για πόση, μαγείρεμα, προπαρασκευή τροφής ή άλλες οικιακές χρήσεις, ανεξάρτητα από την προέλευση του και από το εάν παρέχεται από δίκτυο διανομής, από βυτίο ή σε φιάλες ή δοχεία.

β) το νερό που χρησιμοποιείται στις επιχειρήσεις παραγωγής τροφίμων για την παρασκευή, επεξεργασία, συντήρηση ή εμπορία προϊόντων ή ουσιών που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση.

Το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης δεν εντάσσεται στην έννοια του τρόφιμου, παρέχεται με υποχρέωση της Πολιτείας σε όλους τους πολίτες της επικράτειας ως δημόσιο αγαθό, μη υπαγόμενο στους κανόνες της αγοράς και διέπεται από τους νόμους της υγειονομικής μηχανικής.

Επιπλέον, κατά την ελληνική νομοθεσία ορίζεται και το νερό για «οικιακές χρήσεις» ως χρήσεις του νερού, κατά τρόπο που να έρχεται σε άμεση ή έμμεση επαφή με τον ανθρώπινο οργανισμό (Άρθρο 2, παράγραφος 2).

Με την επιφύλαξη των υποχρεώσεων τους δυνάμει άλλων κοινοτικών ή εθνικών διατάξεων, οι υπεύθυνοι σε συνεργασία με τις αρμόδιες Αρχές λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα ώστε να εξασφαλιστεί ότι το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης είναι υγιεινό και καθαρό, δηλαδή:

α) ότι είναι απαλλαγμένο μικροοργανισμών και παρασίτων, και οποιωνδήποτε ουσιών, σε αριθμούς και συγκεντρώσεις, που αποτελούν ενδεχόμενο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και

β) ότι πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις του Παραρτήματος I μέρη Α και Β, και εφόσον σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις των άρθρων 5 έως 9, που αφορούν ποιοτικές προδιαγραφές, σημεία τήρησης, παρακολούθηση, επανορθωτικές ενέργειες και περιορισμούς χρήσεως, εξασφάλιση ποιότητας, επεξεργασίας, εξοπλισμού και υλικών, οι υπεύθυνοι σε συνεργασία με τις αρμόδιες Αρχές λαμβάνουν όλα τα αναγκαία μέτρα προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι, το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης συμμορφώνεται προς τις απαιτήσεις της παρούσας διάταξης (Άρθρο 4, παράγραφος 1).

Όσον αφορά τις ποιοτικές προδιαγραφές οι τιμές των παραμέτρων του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης καθορίζονται στο Παράρτημα I.

Οι παραμετρικές τιμές που καθορίζονται σύμφωνα με το άρθρο 5, πρέπει να τηρούνται:

α) για το νερό που παρέχεται από το δίκτυο διανομής, στο σημείο, εντός του κτιρίου ή της κτιριακής εγκατάστασης, στο οποίο βγαίνει από τη βρύση, που χρησιμοποιείται συνήθως για παροχή νερού ανθρώπινης κατανάλωσης

β) για το νερό που παρέχεται από βυτίο, στο σημείο όπου το νερό εξέρχεται από το βυτίο

γ) για νερό που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία προς πώληση, στο σημείο στο οποίο το νερό τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία

δ) για το νερό που χρησιμοποιείται σε επιχείρηση παραγωγής τροφίμων, στο σημείο όπου το νερό χρησιμοποιείται στην επιχείρηση (Άρθρο 6, παράγραφος 1).

Οι υπεύθυνοι σε συνεργασία με τις αρμόδιες Αρχές, λαμβάνουν όλα τα αναγκαία μέτρα ώστε να εξασφαλίσουν ότι παρακολουθείται τακτικά η ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, προκειμένου να ελέγχεται αν το διατιθέμενο στους καταναλωτές νερό πληροί τις απαιτήσεις της παρούσας διάταξης πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται κυρίως με την λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων (Άρθρο 7, παράγραφος 1).

Οι Υπηρεσίες Περιβαλλοντικής Υγιεινής και Υγειονομικού Ελέγχου των Περιφερειακών Ενοτήτων παρακολουθούν συστηματικά την κατάσταση των συστημάτων ύδρευσης στην περιοχή αρμοδιότητάς τους. Για το σκοπό αυτό διενεργούν υγειονομικούς ελέγχους με συχνότητα σύμφωνα με τον Πίνακα που ακολουθεί (Άρθρο 7, παράγραφος 5):

Όγκος νερού (V) που διανέμεται ή παράγεται ημερησίως εντός της ζώνης παροχής (Βλέπε σημειώσεις 1 και 2) $m^3$	Αριθμός ελέγχων
$\leq 100$	Κατά την κρίση της Υπηρεσίας και τουλάχιστον μία φορά ανά τριετία
$100 < V \leq 1.000$	1 ανά έτος
$1.000 < V \leq 10.000$	2 ανά έτος
$10.000 < V \leq 100.000$	3 ανά έτος
$> 100.000$	4 ανά έτος

*Σημείωση 1:* Ως ζώνη παροχής νοείται μια γεωγραφικά καθορισμένη περιοχή εντός της οποίας το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης εισέρχεται από μία ή περισσότερες πηγές και η ποιότητα του νερού μπορεί να θεωρηθεί ως περίπου ομοιόμορφη.

*Σημείωση 2:* Οι όγκοι υπολογίζονται ως μέσες τιμές για ένα ημερολογιακό έτος. Για τον καθορισμό της ελάχιστης συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αριθμός κατοίκων μιας ζώνης παροχής αντί για τον όγκο του νερού, με την παραδοχή ότι η κατά κεφαλήν κατανάλωση νερού είναι 200 L/ημέρα.

Ο υγειονομικός έλεγχος περιλαμβάνει:

- υγειονομική αναγνώριση των διαφόρων τμημάτων των συστημάτων ύδρευσης (από την πηγή έως το σημείο τήρησης του άρθρου 6) και του τρόπου λειτουργίας τους

- δειγματοληψία νερού για εργαστηριακές εξετάσεις όλων των παραμέτρων του Παραρτήματος Ι.

- έλεγχο του υπολειμματικού χλωρίου,

Τα αποτελέσματα αποστέλλονται άμεσα στο Υπουργείο Υγείας (Άρθρο 7, παράγραφος 5).

Τα παραρτήματα που παραθέτονται στο ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο είναι όμοια με αυτά που έχει η νομοθεσία για το πόσιμο νερό της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με μικρές διαφοροποιήσεις που αναφέρονται παρακάτω:

- Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι η ελληνική νομοθεσία εκτός από τις μικροβιολογικές παραμέτρους και για το νερό σε φιάλες συμπεριλαμβάνει και τιμές για το νερό που κυκλοφορεί στο εσωτερικό δίκτυο ύδρευσης νοσοκομείων, κλινικών, κέντρων υγείας, οίκων ευγηρίας, τουριστικών εγκαταστάσεων, ξενοδοχείων, φυλακών και στρατοπέδων.
- Το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ που αφορά τις προδιαγραφές ανάλυσης παραμέτρων ισχύει και για την ελληνική νομοθεσία, αλλά παρατίθενται ως ΜΕΡΟΣ Β και ΜΕΡΟΣ Γ στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι για χημικές και ενδεικτικές παραμέτρους.

#### 4.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΩΝ: ΟΔΗΓΙΑΣ 98/83/ΕΕ με Π.Ο.Υ. & Ε.Ρ.Α.

Κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ των κανονισμών του Π.Ο.Υ., της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α (Ε.Ρ.Α.), και της οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Οδηγία 88/93/ΕΕ) καταλήγουμε στις παρακάτω διαπιστώσεις.

- ✚ Ο κανονισμός του ΠΟΥ, βασίζεται σε πιο πρόσφατα τοξικολογικά, επιδημιολογικά και γενικότερα επιστημονικά δεδομένα και γι' αυτό αποτελεί το υπόβαθρο για τη διαμόρφωση της Οδηγίας της ΕΕ, αλλά και του κανονισμού της ΕΡΑ. Ο ΠΟΥ ενδιαφέρεται κυρίως για τις παραμέτρους που αποδεδειγμένα έχουν επίπτωση στην υγεία, και δεν καθορίζει όρια για παραμέτρους που δεν είναι αυτής της κατηγορίας (π.χ. πολλές από τις ενδεικτικές παραμέτρους του Πίνακα 3 της Οδηγίας 98/83/ΕΕ).

- ✚ Και στους τρεις κανονισμούς γίνεται διάκριση μεταξύ παραμέτρων για τις οποίες υπάρχει βάσιμη ένδειξη επίδρασης στην ανθρώπινη υγεία και παραμέτρων για τις οποίες δεν υπάρχουν ανάλογες ενδείξεις. Για τις πρώτες η τήρηση των ορίων είναι υποχρεωτική, ενώ για τις δεύτερες η απόφαση για επιβολή ορίων εξαρτάται από ενδεχόμενα νέα στοιχεία, από την επιθυμία διατήρησης της αισθητικής του νερού και την αποφυγή παραπόνων από τους καταναλωτές (Ανδρεαδάκης, 2008). Επισημαίνεται πάντως ότι ο επιμερισμός των παραμέτρων στις δύο αυτές κατηγορίες δεν γίνεται με τον ίδιο τρόπο στους τρεις κανονισμούς. Η διαφορά των κριτηρίων με την οποία γίνεται η κατηγοριοποίηση των παραμέτρων είναι εμφανής στην περίπτωση της Οδηγίας της ΕΕ, όπου η έλλειψη βάσιμων αποδεικτικών στοιχείων για δυσμενή επίδραση στη δημόσια υγεία ή η

πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης του προβλήματος αποτελούν τα κύρια κριτήρια για την κατάταξη μίας παραμέτρου στην κατηγορία 2. Έτσι για παράδειγμα σε σύγκριση με την EPA, οι παράμετροι που σχετίζονται με παθογόνα πρωτόζωα (*Clostridium perfringens*) καθώς και τα ραδιοϊσότοπα ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία στην Οδηγία της ΕΕ, ενώ στον κανονισμό της EPA στην πρώτη.

- ✚ Ενώ στον κανονισμό της EPA για κάθε παράμετρο διατηρούνται δύο όρια, ένα όριο οδηγός (MCLG) και ένα ανώτατο επιτρεπτό (MCL), του οποίου η υπέρβαση είναι απαγορευτική (κάτι που ίσχυε και στην παλαιότερη Οδηγία 80/778/EOK), στη νέα Οδηγία της ΕΕ 98/83, υπάρχει ένα μόνο όριο οριζόμενο ως παραμετρική τιμή, το οποίο είναι υποχρεωτικό στο βαθμό που αναφέρεται σε παράμετρο της πρώτης κατηγορίας όπως αυτή ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο (Ανδρεαδάκης, 2008).
  
- ✚ Στον κανονισμό του ΠΟΥ, όλα τα όρια εμφανίζονται ως τιμές οδηγοί και όχι ως όρια απαγόρευσης. Αυτό συμβαίνει, διότι από τη φύση του ο ΠΟΥ δεν μπορεί να εκδίδει κανονισμούς που να έχουν χαρακτήρα δεσμευτικής νομοθεσίας, παρά μόνο με τη μορφή υποδείξεων.
  
- ✚ Συγκρίνοντας τη νέα Οδηγία της ΕΕ με τους άλλους δύο κανονισμούς, του ΠΟΥ και της EPA, μπορούν να προκύψουν τα ακόλουθα κυριότερα συμπεράσματα:
  - Ως προς τις οργανικές χημικές παραμέτρους οι κανονισμοί του ΠΟΥ και της EPA παρουσιάζουν έναν εκτενή κατάλογο με αντίστοιχα όρια για κάθε ένωση. Η Οδηγία της ΕΕ παρουσιάζει μεν έναν μικρότερο κατάλογο ενώσεων, άλλα έχει δε όρια που είναι συνήθως αυστηρότερα από τα αντίστοιχα όρια των άλλων δύο κανονισμών, κυρίως για τις εν δυνάμει καρκινογόνες ενώσεις.
  - Η Οδηγία 98/83/ΕΕ αποτελεί τον βασικό πυρήνα των επί μέρους εθνικών νομοθεσιών, οι οποίες μπορεί επιμέρους να είναι πιο διευρυμένες με βάση το κεντρικό σκεπτικό της αρχής της επικουρικότητας.
  - Όσον αφορά τα παρασιτοκτόνα, η νέα Οδηγία της ΕΕ διατηρεί τα παλαιότερα αυστηρότερα όρια (0,5 μg/l για το σύνολο και 0,1 μg/l για κάθε ένα χωριστά), που ίσχυαν στον προηγούμενο κανονισμό του ΠΟΥ. Να σημειωθεί ότι ο νέος κανονισμός του ΠΟΥ και ο κανονισμός της EPA, είναι λιγότερο αυστηροί και κάνουν αναφορά σε όρια επιμέρους παρασιτοκτόνων, που συνήθως είναι μεγαλύτερα του 0,1 μg/l. Για το λόγο αυτό η Οδηγία της ΕΕ έχει δεχθεί κριτική για μη αιτιολογημένη αυστηρότητα από άλλες χώρες όπως η Μεγάλη Βρετανία.
  - Η νέα Οδηγία της ΕΕ θεσπίζει πλέον όρια για τα παράγωγα των μεθόδων απολύμανσης, όπως τα τριαλογονομεθάνια (THM's) και τα βρωμικά, σε αντιστοιχία με τα όρια που αναφέρονται στην EPA



και σε συμφωνία με τις υποδείξεις του κανονισμού του ΠΟΥ, ο οποίος να σημειωθεί όμως, ότι κάνει εκτενέστερη αναφορά και σε άλλα παραπροϊόντα.

- Η νέα Οδηγία της ΕΕ θεσπίζει όρια και για τα ραδιοϊσότοπα για τα οποία δεν γινόταν αναφορά στην προηγούμενη Οδηγία. Παρόλα αυτά τα ραδιοϊσότοπα κατατάσσονται στην δεύτερη κατηγορία των μη επιτακτικών παραμέτρων.
- Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα μπορούσε να προκύψει σαν γενικό συμπέρασμα, ότι η νέα Οδηγία της ΕΕ είναι εξίσου αυστηρή με τους κανονισμούς της ΕΡΑ και του ΠΟΥ, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις είναι και αυστηρότερη από αυτούς.

✚ Μία σημαντική διαφορά μεταξύ της Οδηγίας της ΕΕ και του κανονισμού της ΕΡΑ, είναι ότι η ΕΡΑ συσχετίζει την επίτευξη των ορίων αυτών και με αντίστοιχες κατάλληλες μεθόδους επεξεργασίας, ενώ η Οδηγία της ΕΕ όχι. Σε κάποιες δε περιπτώσεις, όπως π.χ. σε αυτήν των παθογόνων πρωτόζωων, ο κανονισμός της ΕΡΑ περιορίζεται μόνο στις μεθόδους επεξεργασίας, λόγω δυσκολίας ποσοτικού προσδιορισμού των συγκεκριμένων παραμέτρων.

## 5 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΝΕΡΟ

Η αναγνώριση ότι η πρόσληψη αρσενικού σε συγκεντρώσεις άνω ενός επιτρεπτού ορίου, προκαλεί σοβαρές επιπλοκές στην υγεία (βλ. ΕΝΟΤΗΤΑ 2.4), οδήγησε στην εύρεση μεθόδων για την απομάκρυνσή του από το νερό, το οποίο μαζί με τα τρόφιμα θεωρείται ως η κυριότερη πηγή έκθεσης. Όπως έχει προαναφερθεί στο ΚΕΦ. 2, το αρσενικό εμφανίζεται σε δύο πρωτογενείς μορφές: οργανική και ανόργανη. Τα οργανικά είδη αρσενικού βρίσκονται κυρίως σε τρόφιμα, όπως τα οστρακοειδή, και περιλαμβάνουν μορφές όπως το μονομεθυλαρσενικό οξύ (MMAA: monomethyl arsenic acid), το διμεθυλαρσενικό οξύ (DMAA: dimethyl arsenic acid) και τα αρσено-σάκχαρα. Το ανόργανο αρσενικό εμφανίζεται σε δύο καταστάσεις σθένους, τον αρσενίτη As (III) και το αρσενικό As (V). Τα είδη As(III) αποτελούνται κυρίως από αρσενικό οξύ ( $H_3AsO_3$ ) στα φυσικά νερά. Τα είδη As(V) αποτελούνται κυρίως από  $H_2AsO_4$  - και  $HAso_4^{2-}$  σε φυσικά νερά (Clifford, et al., 1995). Τα περισσότερα φυσικά νερά περιέχουν συνήθως τις πιο τοξικές ανόργανες μορφές αρσενικού. Έρευνα στα συστήματα επιφανειακών και υπόγειων υδάτων έδειξε ότι υψηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων αρσενικού As (III) παρουσιάζουν τα συστήματα υπόγειων υδάτων (Pontius, et al., 1994), γεγονός λογικό από τη στιγμή που στα φυσικά υπόγεια ύδατα επικρατούν αναγωγικές συνθήκες. Μια κοινότητα που τροφοδοτείται με νερό που περιέχει ένα ανόργανο τοξικό στοιχείο, όπως το αρσενικό, σε υψηλότερο από το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο ρύπων (MCL: Maximum Contaminant Level) έχει δύο πιθανές λύσεις: αλλαγή σε νέα πηγή νερού ή ενσωμάτωση μεθόδων επεξεργασίας για να αντιμετωπίσει το MCL (Fox, et al., 1987) (Rozelle, 1987). Σε πολλές περιπτώσεις, η επεξεργασία του νερού της πηγής μπορεί να είναι η μόνη διαθέσιμη επιλογή. Διάφορες μέθοδοι, συμβατικές και προηγμένες, έχουν προταθεί για την απομάκρυνση του As από το νερό.

Οι τεχνολογίες αφαίρεσης αρσενικού για το πόσιμο νερό περιλαμβάνουν (EPA, 2000):

- ✚ Διεργασίες κατακρήμνισης – ιζηματοποίησης (π.χ. κροκίδωση – καθίζηση – διήθηση, ενισχυμένης κροκίδωση, έμμεσα κατά την αποσκλήρυνση ασβέστη όπως και κατά την οξειδωση ιόντων σιδήρου / μαγγανίου).
- ✚ Διεργασίες προσρόφησης, ειδικά ενεργοποιημένη αλουμίνα (EA) και κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου.
- ✚ Διεργασίες ανταλλαγής ιόντων, συγκεκριμένα ανταλλαγή ανιόντων.
- ✚ Διήθηση μεμβράνης, όπως η υποβοηθούμενη μικροδιήθηση από κροκίδωση, η αντίστροφη ώσμωση (RO) και η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (EDR),
- ✚ Εναλλακτικές διεργασίες επεξεργασίας, όπως η διήθηση με πράσινη άμμο (greensand filtration), με άμμο επικαλυμμένη με οξείδιο του σιδήρου και

με άμμο εμπλουτισμένη με σίδηρο, ο τροποποιημένος με θείο σίδηρος και η φωτο-οξειδωση.

Επιπλέον, γνωρίζοντας ότι στο νερό το αρσενικό εμφανίζεται συνήθως σε μία από τις δύο ανόργανες μορφές: το πεντασθενές αρσενικό, As [V] και τον τρισθενή αρσενίτη, As[III], συνιστάται να προηγηθεί η οξειδωση του As[III] σε As [V], καθώς η αποτελεσματικότητα αφαίρεσης για το As [V] είναι πολύ καλύτερη από την αφαίρεση για το As[III], και στη συνέχεια να γίνει η εφαρμογή των παραπάνω διεργασιών. Το χλώριο, το υπερμαγγανικό κάλλιο, το όζον και το διοξείδιο του μαγγανίου είναι αποτελεσματικοί οξειδωτικοί παράγοντες για αυτή τη διαδικασία, σε αντίθεση με τον αερισμό (δηλαδή την παροχή οξυγόνου), ο οποίος δεν αποτελεί τελέσφορη μέθοδο για την οξειδωση του As[III]. Πρέπει να σημειωθεί ότι το σημείο της εφαρμογής των οξειδωτικών στο ροϊκό διάγραμμα επεξεργασίας επηρεάζει τη βελτιστοποίηση της απομάκρυνσης (Jekel, 1994), (USEPA, 2001).

Η επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας επεξεργασίας θα πρέπει να βασίζεται στην ποιότητα του νερού, τις επιλογές διάθεσης υπολειμμάτων και το κόστος (USEPA, 2001). Οι απαιτήσεις για μια αποδεκτή τεχνολογία αφαίρεσης αρσενικού από το πόσιμο νερό είναι (Pal, 2001):

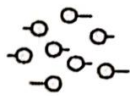
- ✚ Υψηλή απόδοση
- ✚ Διασφάλιση της διατήρησης του μέγιστου επιπέδου ρύπων,
- ✚ Απλή λειτουργία
- ✚ Ελαχιστοποίηση παραπροϊόντων και υπολειμμάτων
- ✚ Αποδεκτό κόστος.

## 5.1 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΣΩ ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 5.1.1 Κροκίδωση - Καθίζηση - Διήθηση/Δύλιση

Κροκίδωση είναι η συσσωμάτωση των αιωρούμενων και κολλοειδών στερεών ώστε αυτά στη συνέχεια να καθιζάνουν στον πυθμένα της δεξαμενής και να απομακρυνθούν έτσι από την υγρή φάση με τη μορφή υδαρούς ιλύος. Με τα στερεά αυτά συμπαρασύρεται και το αρσενικό. Το καθαρισμένο νερό υπερχειλίζει σε περιμετρική διώρυγα της δεξαμενής και από εκεί οδηγείται για δύλιση ή διήθηση.

Η κροκίδωση, γενικά περιλαμβάνει δύο διεργασίες, μία χημική και μία μηχανική. Η χημική διεργασία περιλαμβάνει την προσθήκη κατάλληλης κροκιδωτικής ύλης, η οποία συνήθως είναι θειικό αργίλιο. Η μηχανική διεργασία συνίσταται στη δημιουργία κλίσεων ταχύτητας στο νερό ώστε τα στερεά να έρχονται σε επαφή και να συσσωματώνονται. Οι κροκίδες που τελικά σχηματίζονται έχουν μεγαλύτερο βάρος και καθιζάνουν πιο εύκολα στον πυθμένα της δεξαμενής.



### Φυσικό νερό

Προσθήκη κροκιδωτικών( εξουδετέρωση φορτίου)-Ανάδευση



### Μικροκροκίδες

Ανάδευση-Προσθήκη πολυηλεκτρολύτη  
(δεσμοί μεταξύ μικροκροκίδων)



### Κροκίδες

**Σχήμα 5.1:** Διαδικασία αποσταθεροποίησης κολλοειδών με προσθήκη κροκιδωτικών  
*Πηγή Σχήματος: (Ανδρεαδάκης, 2008)*

Ακόλουθη της διεργασίας της κροκίδωσης – καθίζησης είναι η διήθηση ή η διύλιση. Διήθηση ή φιλτράρισμα είναι η μέθοδος κατά την οποία απομονώνονται τα στερεά σωματίδια που περιέχονται στο νερό. Με τη μέθοδο αυτή το νερό διοχετεύεται σε ένα φίλτρο, το οποίο είναι υλικό που φέρει πολύ μικρές οπές. Έτσι το νερό διέρχεται από τις οπές αυτές οι οποίες όμως κατακρατούν τα στερεά σωματίδια. Η διύλιση είναι επίσης μια διεργασία η οποία απομακρύνει από το νερό αιωρούμενα και κολλοειδή στερεά κατά τη διέλευσή του από ένα πορώδες μέσο που μπορεί να είναι ένα στρώμα άμμου ή άλλου κοκκώδους υλικού (Ανδρεαδάκης, 2008).

#### 5.1.1.1 Επίδραση Τύπου Κροκιδωτικού

##### Άλατα Αργιλίου

Έχει αποδειχθεί ότι η κροκίδωση με αργίλιο αφαιρεί στερεά και διαλυμένα μέταλλα. Για τη διερεύνηση ποσοστών απομάκρυνσης αρσενικού, το ακατέργαστο νερό εμβολιάστηκε με αρσενικό για να ληφθεί αρχική συγκέντρωση 50  $\mu\text{g/L}$  As(V) (Gulledge, et al., 1973). Ως κροκιδωτικό σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το αργίλιο. Το pH κυμαινόταν μεταξύ 5 και 8, το οποίο είναι υψηλότερο από το βέλτιστο εύρος pH από 5 έως 7 για την κροκίδωση με στυπτηρία. Πάνω από το 90% του As(V) αφαιρέθηκε με συσσωμάτωση αλουμινίου αλλά μόνο σε δόσεις μεγαλύτερες από 30 mg/L.

Όσον αφορά την απομάκρυνση του αρσενίτη As(III), μία πρώτη έρευνα (Logsdon, et al., 1974), έδειξε ότι για μια συγκέντρωση εισροής 300  $\mu\text{g/L}$  As(III), οι αφαιρέσεις κυμαίνονταν από 5 έως 15% με συσσωμάτωση αλουμινίου. Υψηλότερες αφαιρέσεις As(III) επιτεύχθηκαν στην περιοχή όπου η διακύμανση pH ήταν μεταξύ 5 και 7. Όταν, όμως, το As(III) οξειδώθηκε με 2 mg/L χλωρίου, τότε οι αφαιρέσεις αυξήθηκαν. Πάνω από το 95% του οξειδωμένου As(III) αφαιρέθηκε σε ποσοστά μεταξύ 83 και 90% με τη χρήση θεικού αργιλίου. Σε

μελέτη πλήρους κλίμακας που διεξάχθηκε στη Metropolitan Water District of Southern California (MWDSC) η συγκέντρωση αρσενικού στο νερό της πηγής ήταν 2,1 μg/L. Όταν το νερό της πηγής υποβλήθηκε σε επεξεργασία με 6, 10 και 20 mg/L στυπτηρίας, η απομάκρυνση του αρσενικού ήταν 23 έως 71 % (Scott, et al., 1995).

Επίσης, σημαντικό είναι να σημειωθεί πως και η διαλυτότητα του κροκιδωτικού του μετάλλου παίζει σπουδαίο ρόλο στην απομάκρυνση του αρσενικού. Σκοπός είναι να μετατραπεί όσο το δυνατό περισσότερο κροκιδωτικό σε υδροξείδιο του μετάλλου, το οποίο συμπαρασύρει το αρσενικό. Στην κροκίδωση με αργίλιο, ένα σημαντικό μέρος του προστιθέμενου αλουμινίου παραμένει ως διαλυτά σύμπλοκα, τα οποία μπορούν να περάσουν μέσα από τα φίλτρα και να μειώσουν την απόδοση της διεργασίας αφαίρεσης του αρσενικού. Επομένως, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού που χρησιμοποιούν κροκίδωση αργιλίου πρέπει να εξετάζουν προσεκτικά τη διαλυτότητα του αργιλίου όταν απαιτείται αφαίρεση αρσενικού.

#### Άλατα Σιδήρου

Έχει, επίσης, αποδειχθεί ότι το αρσενικό μπορεί να καθιζάνει χρησιμοποιώντας σίδηρο. Σε αυτή τη διαδικασία, μια ένωση σιδήρου, όπως για παράδειγμα ο θεικός σίδηρος  $Fe_2(SO_4)_3$  ή ο τρισθενής ( $FeCl_3$ ) ή ο δισθενής ( $FeCl_2$ ) χλωριούχος σίδηρος, προστίθεται στο μη επεξεργασμένο νερό (Crittenden, et al., 2012). Το αρσενικό συνδυάζεται με το σίδηρο για να σχηματίσει ένα ίζημα που κατακάθεται στην δεξαμενή καθίζησης. Μετά τη δεξαμενή καθίζησης, χρησιμοποιείται φίλτρο το οποίο αφαιρεί σωματίδια σιδήρου/αρσενικού που δεν έχουν απομακρυνθεί στην καθίζηση (Kartinen, et al., 1995).

Οι παρατηρούμενες αφαιρέσεις με χρήση χλωριούχου σιδήρου κυμαίνονται από 81 έως 100 % χρησιμοποιώντας δόσεις κροκιδωτικού από 5 έως 304 mg/L. Οι τυπικές δόσεις για τα άλατα σιδήρου είναι 5 έως 30 mg/L και το pH είναι συνήθως κάτω από 8 (McNeil, et al., 1997) (Crittenden, et al., 2012).

Στην ίδια έρευνα που αναφέρθηκε και στο αργίλιο (Gulledge, et al., 1973), όπου στο ανεπεξέργαστο νερό προστέθηκε αρσενικό για να επιτευχθεί μία αρχική συγκέντρωση As(V) ίση με 50 μg/L, χρησιμοποιήθηκε ως κροκιδωτικό και θεικός σίδηρος σε διάφορες δόσεις. Το pH κυμαινόταν πάλι μεταξύ 5,0 και 8,0, δηλαδή εντός του βέλτιστου εύρους pH για την κροκίδωση με θειικό σίδηρο. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών καταδεικνύουν ότι η κροκίδωση θειικού σιδήρου εντός του βέλτιστου εύρους pH πέτυχε καλύτερες αφαιρέσεις από το αργίλιο σε ένα μεγαλύτερο εύρος δοσολογίας κροκιδωτικού. Με την κροκίδωση με θειικό σίδηρο, πάνω από το 95 % του As(V) αφαιρέθηκε εντός του εύρους pH από 5,0 έως 7,5 για δόσεις μεταξύ 10 και 50 mg/L.

Σε άλλο πείραμα (Logsdon, et al., 1974) για την απομάκρυνση του As(III), με συγκέντρωση εισροής 300 µg/L As(III), πραγματοποιώντας συσσωμάτωση με θειικό σίδηρο οι αφαιρέσεις κυμαίνονταν από 40 έως 60%. Υψηλότερες αφαιρέσεις As(III) επιτεύχθηκαν στην περιοχή pH από 5,0 έως 8,5. Όταν, όμως, το As(III) οξειδώθηκε με 2 mg/L χλωρίου, οι αφαιρέσεις αυξήθηκαν. Πάνω από το 95% του οξειδωμένου As(III) αφαιρέθηκε με τη χρήση θειικού σιδήρου.

Στην μελέτη πλήρους κλίμακας του Metropolitan Water District of Southern California (MWDSC) για να προσδιοριστούν αφαιρέσεις αρσενικού χρησιμοποιώντας χλωριούχο σίδηρο, η μέση συγκέντρωση αρσενικού στο νερό της πηγής ήταν ξανά 2,1 µg/L. Όταν το νερό της πηγής υποβλήθηκε σε επεξεργασία με 3 έως 10 mg/L χλωριούχου σιδήρου, η απομάκρυνση του αρσενικού ήταν 81 έως 96 % (Scott, et al., 1995).

Τέλος, όσον αφορά τη διαλυτότητα και τη σταθερότητα των κροκίδων του μετάλλου, στην περίπτωση που προστεθεί άλας σιδήρου, το μεγαλύτερο μέρος του καταλήγει ως υδροξείδιο του σιδήρου, πράγμα που σημαίνει ότι θα συμπαρασυρθεί και περισσότερο αρσενικό.

#### **5.1.1.2 Επίδραση Δόσης Κροκιδωτικού**

##### Άλατα Αργιλίου

Γενικά, υψηλότερη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης μπορεί να επιτευχθεί με αυξημένες δόσεις κροκιδωτικού (Edwards, 1994) (Cheng, et al., 1994) (Gulledge, et al., 1973). Η συσσωμάτωση με αλουμίνιο μπορεί να οδηγήσει σε αφαιρέσεις που πλησιάζουν ακόμη και το 100 % με δόσεις αλουμινίου άνω των 40 mg/L και το pH να είναι συνήθως μεταξύ 6 και 7, μέσα στα όρια δηλαδή του βέλτιστου pH για το αλουμίνιο (Crittenden, et al., 2012).

Σύμφωνα με δεδομένα και με τη χρήση ενός μοντέλου διάχυτου στρώματος φάνηκε ότι οι αφαιρέσεις του As(III) με κροκίδωση ελέγχονταν κυρίως από τη δόση του κροκιδωτικού, ενώ το αντίστροφο ίσχυε για το As(V) (Edwards, 1994). Μια βάση δεδομένων (Edwards, 1994) που περιείχε πολλές προηγούμενες δημοσιευμένες εργασίες/έρευνες για την αφαίρεση του αρσενικού με κροκίδωση απέδειξε ότι, σε όλες τις δόσεις μεγαλύτερες από 40 mg/L αλουμινίου, πάντα επιτυγχάνονταν αφαίρεση του As(V) μεγαλύτερη από 90%. Σε χαμηλότερες δόσεις κροκιδωτικού, υπήρξε σημαντική διασπορά στα δεδομένα που αποδίδονται σε κακή απομάκρυνση σωματιδίων, υψηλές αρχικές συγκεντρώσεις As(V) και πιθανές παρεμβολές από άλλα ανιόντα στα διαφορετικά νερά που επεξεργάστηκαν.

### Άλατα Σιδήρου

Το ίδιο σχετικά με την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης χρησιμοποιώντας υψηλότερες δόσεις κροκιδωτικού ισχύει και για τον σίδηρο (Cheng, et al., 1994) (Edwards, 1994) (Gulledge, et al., 1973). Οι (Hering, et al., 1996) απέδειξαν σε πειράματα κροκίδωσης με χλωριούχο σίδηρο σε pH 7,0 ότι η απομάκρυνση τόσο του As(III) όσο και του As(V) εξαρτώνται από τη δόση του κροκιδωτικού. Παρατηρήθηκε «πλήρης» απομάκρυνση του As(V) για δόσεις κροκιδωτικού πάνω από 5 mg/L χλωριούχου σιδήρου, ενώ από την άλλη δεν παρατηρήθηκε η ίδια αφαίρεση του As(III) υπό το εύρος των συνθηκών που εξετάστηκαν.

Η ίδια βάση δεδομένων (Edwards, 1994) για την κροκίδωση με χλωριούχο σίδηρο έδειξε ότι, σε όλες τις δόσεις μεγαλύτερες από 20 mg/L, πάντα επιτυγχάνονταν αφαίρεση του As(V) μεγαλύτερη από 90%. Σε χαμηλότερες δόσεις κροκιδωτικού, όπως και με το αργίλιο, υπήρξε σημαντική διασπορά στα δεδομένα για τους ίδιους λόγους με παραπάνω.

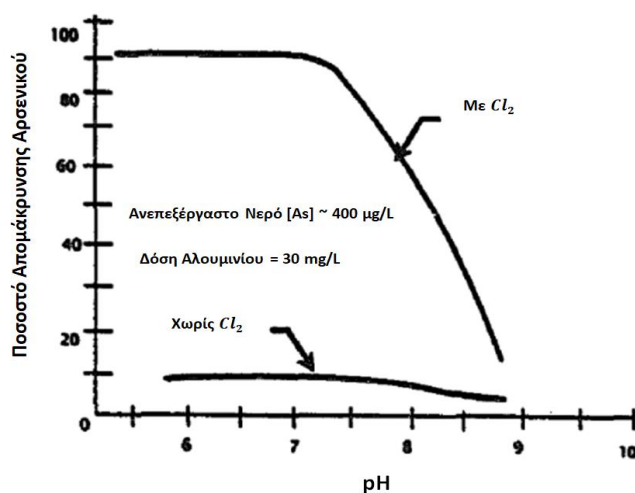
#### **5.1.1.3 Επίδραση pH στην Κροκίδωση και Μορφές Αρσενικού**

Τα κροκιδωτικά λειτουργούν βέλτιστα σε ένα συγκεκριμένο εύρος pH, που διαφέρει αναλόγως το κροκιδωτικό. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται πως η απομάκρυνση του αρσενικού με κροκίδωση αλουμινίου είναι πιο αποτελεσματική σε pH από 5 έως 7 και η κροκίδωση με σίδηρο είναι πιο αποτελεσματική σε pH από 5 έως 8 (Kartinen, et al., 1995). Να επισημανθεί εδώ, όπως έχει ήδη αναφερθεί και προηγουμένως, ότι η επιτυχία της απομάκρυνσης διαφέρει ανάλογα με τη μορφή που βρίσκεται το αρσενικό, As(III) ή As(V). Στην περίπτωση του As(III) συνιστάται οξειδωση με κάποιο οξειδωτικό παράγοντα πριν την κροκίδωση, ώστε το As(III) να μετατραπεί σε As(V). Αναλύοντας προηγουμένως συγκεντρωμένα ερευνητικά δεδομένα για την απομάκρυνση του As(III) με κροκίδωση σιδήρου και αλουμινίου, ο (Edwards, 1994) έδειξε ότι η απομάκρυνση του As (III) είναι πολύ υψηλότερη κατά τη διάρκεια της κροκίδωσης με σίδηρο σε σύγκριση με αυτή του αργιλίου, ενώ παράλληλα συνόψισε ότι για σημαντικές δόσεις κροκιδωτικού, η απομάκρυνση του As(V) ήταν παρόμοια για τα κροκιδωτικά αλουμινίου και σιδήρου σε pH 7,6 ή χαμηλότερο.

### Άλατα Αργιλίου

Η απομάκρυνση με αργίλιο γίνεται πιο αποτελεσματική, εάν ένας οξειδωτικός παράγοντας (π.χ. το χλώριο ή το θειικό οξύ), προστεθεί πριν από την κροκίδωση για τη ρύθμιση του pH (Kartinen, et al., 1995). Η συσσωμάτωση με αλουμίνιο έχει οδηγήσει σε αφαιρέσεις που κυμαίνονται από 23 έως 100 % με τις δόσεις αλουμινίου να κυμαίνονται από 10 έως 50 mg/L και το pH να είναι συνήθως μεταξύ 6 και 7 (Crittenden, et al., 2012). Σε τιμές pH μεγαλύτερες από 7,6, ωστόσο, οι μέσες αφαιρέσεις ήταν μόνο 67% για 20 mg/L αλουμινίου (Sorg, et al., 1978). Η απομάκρυνση του As(III) με κροκίδωση αργιλίου μειώνεται σημαντικά όταν το pH ξεπεράσει την τιμή 8,0. Το Σχήμα 5.2 απεικονίζει τις επιδράσεις του pH και του

χλωρίου στην αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του αρσενικού χρησιμοποιώντας αλουμίνιο (Kartinen, et al., 1995).



**Σχήμα 5.2:** Απομάκρυνση αρσενικού με αλουμίνιο  
*Πηγή Σχήματος:* (Kartinen, et al., 1995)

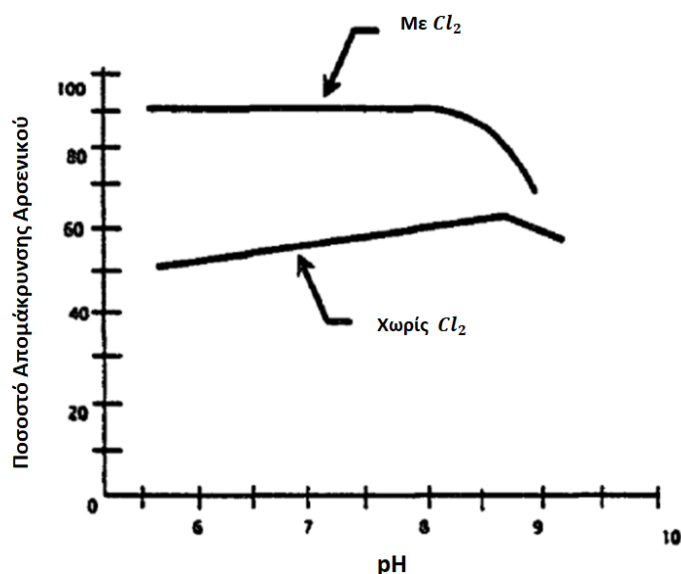
Το πείραμα στο Σχήμα 5.2 αναφέρεται σε νερό που περιείχε **400 µg/L** αρσενικού χρησιμοποιώντας μία σταθερή δόση αλουμινίου **30 mg/L**. Χωρίς προ-οξείδωση με χλώριο, μόνο περίπου το **10%** του αρσενικού απομακρύνθηκε στη βέλτιστη περιοχή του **pH**. Όταν χρησιμοποιήθηκε χλώριο, με την ίδια δόση κροκιδωτικού, και το **pH** μειώθηκε σε περίπου 7 ή λιγότερο, ο ρυθμός απομάκρυνσης του αρσενικού αυξήθηκε σε περίπου **90%**. Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η διεργασία στον καθαρισμό του πόσιμου νερού, θα ήταν πιθανώς απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια σειρά χημικών. Στην κεφαλή της εγκατάστασης επεξεργασίας, θα χρειαζόταν χλώριο για την οξείδωση του αρσενικού. Θα πρέπει να προστεθεί ένα οξύ για να μειωθεί το **pH** και, φυσικά, θα χρειαστεί αλουμίνιο. Η μετεπεξεργασία του διαυγασμένου νερού π.χ. με καυστικό (**NaOH**), θα χρειαζόταν για να επανέλθει το **pH** στα προ επεξεργασίας επίπεδα. Το αρσενικό που θα απομακρυνθεί από το νερό θα εμπεριέχεται στη λάσπη αλουμινίου από τη δεξαμενή καθίζησης (Kartinen, et al., 1995).

#### Άλατα Σιδήρου

Στην περίπτωση που γίνει χρήση χλωριούχου σιδήρου με συγκέντρωση 10 mg/L, στις τιμές pH μεγαλύτερες από 7,6, οι μέσες αφαιρέσεις είναι 87% (Sorg, et al., 1978). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3, το οποίο αναφέρεται σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε νερό που περιείχε 300 µg/l αρσενικού χρησιμοποιώντας 30 mg/L θεικού σιδήρου Fe<sub>2</sub> (SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, ακόμη και χωρίς τη χρήση οξειδωτικού (π.χ. χλωρίου), περίπου το 50%, ή και περισσότερο, του αρσενικού απομακρύνθηκε. Εάν προηγηθεί οξείδωση, το ποσοστό απομάκρυνσης του αρσενικού μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 95%. Στην απομάκρυνση με άλατα σιδήρου, η ρύθμιση του pH δεν φαίνεται να είναι τόσο σημαντική όσο με το αλουμίνιο. Όπως



παρατηρείται στο Σχήμα 5.3 οι καλύτεροι ρυθμοί απομάκρυνσης του αρσενικού επιτυγχάνονται σε pH μικρότερο από 8,5 με ή χωρίς χλώριο.



Σχήμα 5.3: Απομάκρυνση αρσενικού με σίδηρο (Kartinen, et al., 1995)

Όπως και με τη διεργασία με το αργίλιο, το αρσενικό απομακρύνεται από το νερό βγαίνοντας στη λάσπη που καθιζάνει στην δεξαμενή καθίζησης, καθώς το αρσενικό συνδυάζεται με το ίζημα υδροξειδίου του σιδήρου που προκύπτει από τη χρήση  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  (Kartinen, et al., 1995).

#### 5.1.1.4 Επίδραση της αρχικής συγκέντρωσης As(III)/As(V)

Για να αναλυθεί η αρχική συγκέντρωση και η μορφή του αρσενικού, ώστε να προσδιοριστεί ο βέλτιστος τύπος κροκιδωτικού για την απομάκρυνση του αρσενικού, διεξήχθησαν αρκετές δοκιμές «jar tests» σε νερό πηγαδιών εμβολιασμένο με αρσενικό. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η αρχική συγκέντρωση αρσενικού είχε σημαντική επίδραση στις αφαιρέσεις (Logsdon, et al., 1974).

Για αρχικές συγκεντρώσεις As(V) μεταξύ 0,1 και 1,0 mg/L, μια δόση 30 mg/L είτε στυπτηρίας είτε θεικού σιδήρου στη βέλτιστη περιοχή pH αφαιρέθηκε πάνω από 95% As(V). Πάνω από μια αρχική συγκέντρωση 1,0 mg/L, οι αφαιρέσεις μειώνονται με την αύξηση των συγκεντρώσεων. Για συγκεντρώσεις As(III) μεγαλύτερες από 0,1 mg/L, ούτε η στυπτηρία ούτε ο θεικός σίδηρος σε δόση 30 mg/L θα μπορούσαν να αφαιρέσουν το As(III) ώστε να επιτύχουν συγκεντρώσεις κάτω από 0,05 mg/L (50 µg/L). Και στις δύο περιπτώσεις, υψηλότερες δόσεις κροκιδωτικού (60 έως 100 mg/L) είχαν ως αποτέλεσμα υψηλότερες αφαιρέσεις (Logsdon, et al., 1974).

Σε νεότερα πειράματα κροκιδώσης (Cheng, et al., 1994) καταδείχθηκε ότι η απομάκρυνση του As(V) ήταν ανεξάρτητη από την αρχική συγκέντρωση όταν υποβλήθηκε σε επεξεργασία με 20 mg/L στυπτηρίας και 30 mg/L χλωριούχου

σιδήρου, ενώ η αρχική συγκέντρωση του As(V) διαφοροποιούνταν από 2,2 έως 128 µg/L. Ομοίως και σε λίγο μεταγενέστερα πειράματα φάνηκε πως με δόση χλωριούχου σιδήρου 4,9 mg/L σε pH 7,0 και μεταβλητή αρχική συγκέντρωση αρσενικού από 2 έως 100 µg/L, η αφαίρεση τόσο του As(III) όσο και του As(V) ήταν ανεξάρτητη από την αρχική συγκέντρωση (Hering, et al., 1996).

#### 5.1.1.5 Επίδραση Συνυπαρχουσών Ανόργανων Ενώσεων

Οι συνυπάρχουσες ανόργανες διαλυμένες ενώσεις, όπως τα θειικά και το ασβέστιο, μπορεί να ανταγωνίζονται για θέσεις επιφανειακής δέσμευσης στις επιφάνειες των σωματιδίων του υδροξειδίου του μετάλλου και να επηρεάζουν την δέσμευση ιχνοστοιχείων, όπως το αρσενικό. Οι (Hering, et al., 1996) ερεύνησαν τις επιδράσεις της ύπαρξης θεικών και ασβεστίου στην αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης των As(III) και As(V) κατά την κροκίδωση με 4,9 mg/L χλωριούχου σιδήρου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε pH κάτω από 7,0, η απομάκρυνση του As(III) μειώθηκε σημαντικά παρουσία θεικών. Ωστόσο, παρατηρήθηκε μόνο μια ελαφρά μείωση στο As(V). Τέλος, σε υψηλότερο pH, η απομάκρυνση του As(V) αυξήθηκε παρουσία ασβεστίου.

#### 5.1.1.6 Μελέτες πεδίου

Δύο παραδείγματα λειτουργίας μονάδων κροκίδωσης - διήθησης μελετήθηκαν από το Battelle Memorial Institute (EPA, June 2000). Η μία εγκατάσταση επεξεργασίας νερού (EEN A) κάνει χρήση οζονισμού σε συνδυασμό με κροκίδωση - διήθηση για την επεξεργασία έως και 600 mgd (= 2.727.654 m<sup>3</sup>/d). Το άλλο σύστημα νερού (EEN B) βασίζεται στην κροκίδωση, την καθίζηση και τη διήθηση και σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίζει πολύ χαμηλότερη ημερήσια ροή, δηλαδή 62,5 mgd (= 284.130,6 m<sup>3</sup>/d), περίπου το ένα δέκατο από αυτό που επεξεργάζεται η πρώτη.

Και οι δύο εγκαταστάσεις επέδειξαν την ικανότητα να μειώνουν σταθερά τις μέτρια υψηλές μέσες συγκεντρώσεις αρσενικού εισροής (7,5 και 19,1 µg/L) σε λιγότερο από 5 µg/L. Η τελική συγκέντρωση αρσενικού στο νερό από την EEN A είναι 3,5 µg/L, ενώ από την EEN B 4,0 µg/L. Και οι δύο τιμές είναι αρκετά κάτω από το όριο που θεσπίζει η νομοθεσία του Π.Ο.Υ., της EPA, της Ε.Ε. και της ελληνικής νομοθεσίας των 10,0 µg/L. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι εγκαταστάσεις δεν χρησιμοποιούσαν βέλτιστες δόσεις κροκιδωτικού ή/και πολυμερούς και δεν λειτουργούσαν στο ιδανικό pH για την αφαίρεση του αρσενικού.

Με βάση την παρατήρηση της λειτουργίας πεδίου αυτών των συστημάτων, η προσρόφηση και η συμπαράσυρση του As(V) με κροκίδες σιδήρου και αλουμινίου φαίνεται να είναι ο κύριος μηχανισμός για την απομάκρυνση του αρσενικού σε αυτές τις εγκαταστάσεις. Ως μέρος αυτής της μελέτης, συλλέχθηκαν δείγματα ύψους τόσο από την EEN A όσο και από την EEN B και υποβλήθηκαν σε δοκιμή TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure). Ωστόσο, με βάση τα

αποτελέσματα του TCLP, αυτές οι λάσπες δεν θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως επικίνδυνα απόβλητα.

#### **5.1.1.7 Συμπεράσματα**

Το αρσενικό στην πεντασθενή μορφή του απομακρύνεται πιο εύκολα από την τρισθενή μορφή τον αρσενίτη. Γενικά, υψηλότερες αποδόσεις απομάκρυνσης αρσενικού επιτυγχάνονται με αυξημένες δόσεις κροκιδωτικών.

Η τεχνολογία κροκίδωσης μπορεί με επιτυχία να αφαιρέσει As(V) πάνω από 90%. Όπως φάνηκε και στις μελέτες πεδίου που παρατέθηκαν παραπάνω, οι μονάδες κροκίδωσης- καθίζησης - διήθησης έχουν αποδείξει την ικανότητα να μειώνουν τα επίπεδα του As(V) κάτω από 5 μg/L. Επιπλέον, εάν υιοθετηθούν και βέλτιστες πρακτικές λειτουργίας που αφορούν το pH και τις δόσεις των κροκιδωτικών, αναμένεται ότι θα επιτευχθούν επίπεδα εκροής κάτω των 3 μg/L. Σε pH 7,6 ή χαμηλότερο, τα κροκιδωτικά σιδήρου και αλουμινίου έχουν την ίδια αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση του As(V).

Ωστόσο, τα κροκιδωτικά του σιδήρου έχουν πλεονέκτημα εάν το pH είναι πάνω από 7,6 ή εάν υπάρχει As(III) στο ακατέργαστο νερό, με δεδομένο ότι η ιζηματοποίησή τους είναι καλύτερη σε σχέση με το αργίλιο, παράγοντας μεγαλύτερη ποσότητα ιζήματος που προκαλεί και μεγαλύτερη συμπαράσυρση αρσενικού. Η αποτελεσματικότητα των κροκιδωτικών σιδήρου στην απομάκρυνση του As(III) μειώνεται όταν το pH πλησιάζει την τιμή 6,0. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις για το ρόλο της αρχικής συγκέντρωσης του αρσενικού στην τελική απομάκρυνση, με τις νεότερες πάντως μελέτες να δείχνουν ότι η τελική απομάκρυνση του αρσενικού είναι ανεξάρτητη από την αρχική συγκέντρωσή του στο ανεπεξέργαστο νερό.

Τέλος, σε pH κάτω από 7,0, η απομάκρυνση του As(III) φαίνεται να μειώνεται σημαντικά παρουσία θεικών, ενώ παρατηρήθηκε μόνο μια ελαφρά μείωση στο ποσοστό απομάκρυνσης του As(V). Σε υψηλότερο pH, η απομάκρυνση του As(V) αυξάνεται παρουσία ασβεστίου.

#### **5.1.2 Ενισχυμένη Κροκίδωση**

Σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται η χρήση ενισχυμένης κροκίδωσης (π.χ. για την αποφυγή παραπροϊόντων απολύμανσης (DBP: disinfection byproducts). Η ενισχυμένη κροκίδωση αναφέρεται στην αύξηση της δόσης του κροκιδωτικού και τον έλεγχο της τιμής του pH ή και τα δύο παράλληλα, υπό την προϋπόθεση της εξασφάλισης της απομάκρυνσης της θολότητας κατά τη συμβατική επεξεργασία του νερού.

Οι (Cheng, et al., 1994) εξέτασαν τις αφαιρέσεις As(V) κατά τη διάρκεια ενισχυμένης κροκίδωσης. Η ενισχυμένη κροκίδωση σε αυτές τις μελέτες

περιλάμβανε αύξηση της δόσης κροκιδωτικού θεικού αργιλίου και χλωριούχου σιδήρου από 10 σε 30 mg/L, μείωση του pH από 7 σε 5,5 ή και τα δύο. Τα αποτελέσματα από αυτές τις μελέτες έδειξαν τα ακόλουθα:

- ✚ Αφαιρέσεις As(V) μεγαλύτερες από 90% επιτεύχθηκαν εύκολα υπό συνθήκες ενισχυμένης κροκιδώσης, ειδικότερα όταν χρησιμοποιήθηκε χλωριούχος σίδηρος.
- ✚ Η ενισχυμένη κροκιδώση με χρήση αλάτων σιδήρου είναι πιο αποτελεσματική για την απομάκρυνση του αρσενικού από αυτήν με θεικό αργίλιο. Με εισερχόμενη συγκέντρωση αρσενικού 5 µg/L, ο χλωριούχος σίδηρος πέτυχε 96% απομάκρυνση As(V) χωρίς προσθήκη οξέος. Όταν χρησιμοποιήθηκε θεικό αργίλιο, η αφαίρεση κατά 90% As(V) δεν μπορούσε να επιτευχθεί χωρίς μείωση του pH.
- ✚ Η μείωση του pH κατά τη διάρκεια της ενισχυμένης κροκιδώσης βελτίωσε την απομάκρυνση του αρσενικού όταν αυτή γινόταν με θεικό αργίλιο. Με την χρήση κροκιδωτικού του σιδήρου το pH δεν έχει σημαντική επίδραση μεταξύ 5,5 και 7,0.

Να σημειωθεί ότι μπορεί να απαιτείται αναπροσαρμογή του pH μετά την επεξεργασία, για τον έλεγχο της διάβρωσης των σωληνώσεων όταν η διαδικασία λειτουργεί σε χαμηλό pH.

### 5.1.3 Έμμεση Απομάκρυνση Αρσενικού μέσω Αποσκλήρυνσης Ασβεστίου (LS)

Για ύδατα πηγής που περιέχουν υψηλά επίπεδα φωσφορικών ή πυριτικών αλάτων, η συσσωμάτωση μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματική για την απομάκρυνση του αρσενικού (Crittenden, et al., 2012). Είναι γνωστό ότι η αποσκλήρυνση του ασβέστη αφαιρεί και άλλες ουσίες από το νερό, εκτός από τη σκληρότητα (ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου). Το αρσενικό, είναι μία από τις ουσίες αυτές που είναι δυνατό να αφαιρεθεί μέσω της αποσκλήρυνσης με ασβέστη.

Η σκληρότητα προκαλείται κυρίως από ενώσεις ασβεστίου και μαγνησίου στο διάλυμα. Η διεργασία της αποσκλήρυνσης ασβεστίου (LS) αφαιρεί αυτή τη σκληρότητα δημιουργώντας μια μετατόπιση στην ανθρακική ισορροπία. Η προσθήκη ασβέστη στο νερό αυξάνει το pH. Το διττανθρακικό ασβέστιο μετατρέπεται σε ανθρακικό καθώς αυξάνεται το pH, και ως αποτέλεσμα, το ασβέστιο κατακρημνίζεται ως ανθρακικό ασβέστιο. Εάν υπάρχει ανεπαρκές διττανθρακικό στο νερό, τότε προστίθεται ανθρακικό νάτριο για να αφαιρεθεί η σκληρότητα στο επιθυμητό επίπεδο. Η αποσκλήρυνση για την απομάκρυνση του ασβεστίου συνήθως επιτυγχάνεται σε περιοχή pH από 9 έως 9,5. Για την απομάκρυνση του μαγνησίου, προστίθεται περίσσεια ασβέστη πέρα από το σημείο καθίζησης ανθρακικού ασβεστίου. Το υδροξείδιο του μαγνησίου καθιζάνει

σε επίπεδα pH μεγαλύτερα από 10,5. Απαιτείται εξουδετέρωση εάν το pH του αποσκληρυμένου νερού είναι υπερβολικά υψηλό (πάνω από 9,5) για πόσιμο. Η πιο κοινή μορφή ρύθμισης του pH στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού για την αποσκλήρυνση είναι η επανανθρακοποίηση με διοξείδιο του άνθρακα.

Οι μέθοδοι αποσκλήρυνσης του νερού είναι αποτελεσματικές και στη μείωση του αρσενικού. Ο μηχανισμός της απομάκρυνσης του αρσενικού μπορεί να είναι προσρόφηση στο ανθρακικό ασβέστιο που δημιουργείται, ή απευθείας καθίζηση ως αρσενικό ασβέστιο, με παρόμοιο μηχανισμό με την καθίζηση του φωσφόρου, δηλαδή με τη μορφή  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_3)_2$ . Η απομάκρυνση του As(III) ή του As(V) μέσω του LS εξαρτάται από το pH. Η οξειδωση του As(III) σε As(V) πριν από την επεξεργασία με LS θα αυξήσει την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης εάν το As(III) είναι η κυρίαρχη μορφή.

Σε ένα σύστημα LS παράγονται σημαντικές ποσότητες λάσπης και η απόρριψή της είναι ακριβή. Τα συστήματα μεγάλης χωρητικότητας μπορεί να θεωρήσουν ότι είναι οικονομικά εφικτή η εγκατάσταση εξοπλισμού για την ανάκτηση και την επαναχρησιμοποίηση της λύσης ασβέστη και τη μείωση των προβλημάτων διάθεσης. Η κατασκευή μιας νέας μονάδας LS δεν συνιστάται γενικά για την αφαίρεση του αρσενικού, παρά μόνο εάν πρέπει να μειωθεί η σκληρότητα.

#### 5.1.3.1 Επίδραση της αρχικής συγκέντρωσης As(V)/As(III)

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε (Logsdon, et al., 1974) διαπιστώθηκε ότι η απομάκρυνση του αρσενικού είναι εξαρτώμενη από την αρχική συγκέντρωση αρσενικού. Στο βέλτιστο εύρος pH, το As(V) ή το οξειδωμένο As(III) μειώθηκε σε 0,05 mg/L όταν η αρχική συγκέντρωση ήταν 0,35 mg/L ή χαμηλότερη, ενώ όταν η αρχική συγκέντρωση του As(III) ήταν μικρότερη από 0,1 mg/L, εν τέλει μετά την επεξεργασία μειώθηκε σε 0,05 mg/L.

Όμως, αποτελέσματα νεότερων μελετών, έδειξαν ότι το ποσοστό της απομάκρυνσης του As(V) από το ανθρακικό ασβέστιο και το υδροξείδιο του μαγνησίου είναι σταθερό ανεξάρτητα από την αρχική συγκέντρωση As(V), γεγονός που έρχεται σε αντίφαση με τις προγενέστερες έρευνες. Σε pH 10,5-12, η απομάκρυνση του As(V) ήταν  $23 \pm 4\%$  για την απομάκρυνση με ανθρακικό ασβέστιο στο εύρος των συγκεντρώσεων As(V) 5-75  $\mu\text{g/L}$ . Σε pH 11, η απομάκρυνση του As(V) ήταν  $37 \pm 5\%$  για την απομάκρυνση με υδροξείδιο του μαγνησίου στο εύρος των συγκεντρώσεων As(V) από 5-160  $\mu\text{g/L}$ . Επίσης, βρέθηκε ότι η απομάκρυνση του As(V) από στερεά υδροξειδίου του μαγνησίου είναι ευαίσθητη στις αρχικές συγκεντρώσεις As(V). Σε pH 10,5, υπήρχε περίπου 80% (McNeil, et al., 1997).

#### 5.1.3.2 Επίδραση της κατάστασης οξείδωσης του αρσενικού

Το As(V) αφαιρέθηκε γενικά πιο αποτελεσματικά μέσω του LS από το As(III). Σε μελέτη διεξήχθησαν αρκετές εργαστηριακές μελέτες για την αφαίρεση τόσο του

As(III) όσο και του As(V) μέσω αποσκήρυνσης ασβεστίου. Δύο από τις δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε pH 9,5 και 11,3.

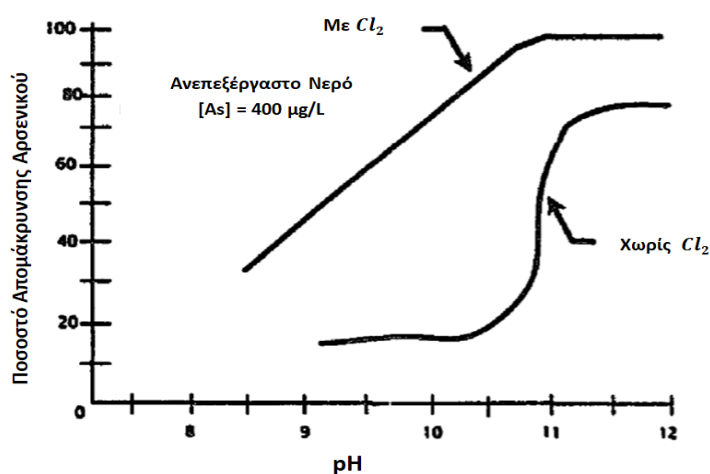
Σε pH 11,3, αφαιρέθηκε το 99% της αρχικής συγκέντρωσης As(V) 0,58 mg/L, ενώ αφαιρέθηκε μόνο το 71% αρχικής συγκέντρωσης As(III) 0,34 mg/L. Σε pH 9,5, αφαιρέθηκε το 53% της αρχικής συγκέντρωσης As(V) 0,42 mg/L, ενώ αφαιρέθηκε μόνο το 24% αρχικής συγκέντρωσης As(III) 0,24 mg/L (Sorg, et al., 1978). Τα αποτελέσματα αυτά εκτός του ότι κάνουν εμφανές το γεγονός πως το αρσενικό αφαιρείται πιο εύκολα και σε μεγαλύτερα ποσοστά όταν βρίσκεται στην πεντασθενή του κατάσταση, δείχνουν πως και το pH παίζει σημαντικό ρόλο.

### 5.1.3.3 Επίδραση pH

Η αποτελεσματικότητα αφαίρεσης του αρσενικού με τη διεργασία αποσκήρυνσης ασβεστίου, επηρεάζεται σημαντικά από το pH και την παρουσία (ή απουσία) χλωρίου. Το βέλτιστο pH για την απομάκρυνση του As(V) από το LS είναι περίπου 10,5 και το βέλτιστο pH για την αφαίρεση του As(III) είναι περίπου 11 (Logsdon, et al., 1974) (Sorg, et al., 1978). Οι (Logsdon, et al., 1974) μελέτησαν την αποτελεσματικότητα της περίσσειας από την αποσκήρυνση ασβεστίου στην απομάκρυνση του αρσενικού σε «jar tests». Το νερό της δοκιμής ήταν ένα νερό από φρέαρ που περιείχε 300 mg/L σκληρότητα καθώς το CaCO<sub>3</sub> εμπλουτίστηκε με 0,4 mg/L As(V). Το pH κυμαινόταν μεταξύ 8,5 και 11,5. Σε pH 10,5 και άνω, επετεύχθη σχεδόν 100% αφαίρεση αρσενικού. Κάτω από το βέλτιστο pH, οι αφαιρέσεις μειώθηκαν με τη μείωση του pH. Όταν το νερό είχε εμβολιαστεί με As(III), οι αφαιρέσεις ήταν μόνο περίπου 75% στο βέλτιστο εύρος pH. Κάτω από το βέλτιστο εύρος pH, οι αφαιρέσεις μειώθηκαν απότομα σε λιγότερο από 20%. Οι αφαιρέσεις του οξειδωμένου As(III), ωστόσο, ήταν σχεδόν ταυτόσημες με τις αφαιρέσεις του As(V).

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε (Kartinen, et al., 1995) αργότερα, μελετήθηκε ένα νερό που περιέχει περίπου 400 μg/L αρσενικού. Διατηρώντας αυτή τη συγκέντρωση σταθερή και μεταβάλλοντας το pH και προσθέτοντας χλώριο ή όχι προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα. Χωρίς χλώριο, μόνο το 15% περίπου του αρσενικού απομακρύνθηκε μέχρι το pH = 10,5. Σε pH > 10,5, ο ρυθμός απομάκρυνσης του αρσενικού αυξήθηκε σε σχεδόν 80% σε pH = 11 χωρίς χλώριο. Με τη χρήση χλωρίου, ο ρυθμός απομάκρυνσης του αρσενικού είναι πάντα υψηλότερος από ότι χωρίς χλώριο. Αλλά, ο ρυθμός απομάκρυνσης του αρσενικού, ακόμη και με το χλώριο, εξαρτάται από το pH. Στο «σύνηθες» πόσιμο νερό, με pH όχι περισσότερο από περίπου 8, ο ρυθμός απομάκρυνσης του αρσενικού είναι μικρότερος από 30%. Καθώς το pH αυξάνεται, ο ρυθμός απομάκρυνσης του αρσενικού αυξάνεται έως ότου σε pH = 11, αφαιρέθηκε περίπου το 95% του αρσενικού. Το αρσενικό που αφαιρείται από το νερό βγαίνει στην καθίζηση με τη λάσπη ασβέστη που παράγεται από τη διεργασία. Το Σχήμα 5.4 απεικονίζει την

αποτελεσματικότητα αφαίρεσης αρσενικού για αυτή τη διαδικασία με  $Cl_2$ , αλλά και χωρίς, με τις εναλλαγές του pH.



Σχήμα 5.4: Απομάκρυνση αρσενικού με αποσκλήρυνση ασβεστίου (Kartinen, et al., 1995)

#### 5.1.3.4 Μελέτες πεδίου

Έρευνες από εγκαταστάσεις που πραγματοποιούν αποσκλήρυνση με ασβέστη από την AWWARF (:αμερικανικό ερευνητικό ίδρυμα υδάτινων έργων) (AWWARF, 2000) δείχνουν ότι η τεχνολογία αυτή μπορεί να παράγει νερό με λιγότερο από 3  $\mu g/L$ . Και οι πέντε από τις ερευνώμενες εγκαταστάσεις που λειτουργούσαν σε pH 10,2 ή υψηλότερο θα μπορούσαν να επιτύχουν αυτά τα χαμηλά επίπεδα αρσενικού. Ωστόσο, αν και οι διεργασίες αποσκλήρυνσης ασβέστη είναι αρκετά αποτελεσματικές για την απομάκρυνση του αρσενικού όταν λειτουργούν σε υψηλό pH, μπορεί να μην αφαιρούν αποτελεσματικά το αρσενικό όταν λειτουργούν σε  $pH < 10$ . Για παράδειγμα, μια μελέτη πεδίου που διεξήχθη από το Battelle Memorial Institute διαπίστωσε ότι μια μονάδα αποσκλήρυνσης ασβέστη 10 mgd (37,85  $m^3/d$ ) μείωσε τις μέσες συνολικές εισερχόμενες συγκεντρώσεις αρσενικού ύψους 32,0  $\mu g/L$  μόνο κατά περίπου 45% σε μέσο όρο 16,6  $\mu g/L$  στο τελικό νερό, παρόλο που η σειρά επεξεργασίας περιλάμβανε οξείδωση πριν την αποσκλήρυνση και διήθηση μετά την αποσκλήρυνση (EPA, June 2000). Κανένα από τα δείγματα λάσπης που συλλέχθηκαν ως μέρος αυτής της μελέτης δεν χαρακτηρίστηκε ως επικίνδυνο απόβλητο με βάση τη δοκιμή TCLP (EPA, 2000). Να σημειωθεί ότι η δοκιμή TCLP προσομοιώνει τις συνθήκες μέσα σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής και προσδιορίζει τους ρύπους που υπάρχουν στα στραγγίσματα καθώς και τις συγκεντρώσεις τους. Η διαδικασία έκπλυσης χαρακτηριστικών τοξικότητας είναι μια διαδικασία χημικής ανάλυσης που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί εάν υπάρχουν επικίνδυνα στοιχεία σε ένα απόβλητο. Η δοκιμή μπορεί να παρέχει μια βαθμολογία που μπορεί να αποδείξει εάν τα απόβλητα είναι επικίνδυνα για το περιβάλλον ή όχι.

### 5.1.3.5 Συμπεράσματα

Η τεχνολογία αποσκλήρυνσης μπορεί να εφαρμοστεί από συστήματα νερού για να επιτευχθεί μεγαλύτερη από 90% αφαίρεση του As(V). Όπως συζητήθηκε παραπάνω, έρευνα σε εγκαταστάσεις αποσκλήρυνσης από την AWWARF διαπίστωσε ότι αυτές οι εγκαταστάσεις που ερευνήθηκαν και που λειτουργούσαν σε pH 10,2 ή υψηλότερο, θα μπορούσαν να μειώσουν πρακτικά τις συγκεντρώσεις αρσενικού στο επεξεργασμένο νερό κάτω από 3 μg/L.

Το αρσενικό στην πεντασθενή μορφή του απομακρύνεται πιο εύκολα με αυτή τη διεργασία επεξεργασίας απ' ό,τι με τη μορφή τρισθενούς αρσενίτη. Το βέλτιστο pH για την απομάκρυνση του As(V) με αποσκλήρυνση είναι περίπου 10,5 και το βέλτιστο pH για την αφαίρεση του As(III) είναι περίπου 11,0. Η απομάκρυνση του As(III) φαίνεται να εξαρτάται από την αρχική συγκέντρωση του ρύπου. Τα αρχικά ευρήματα έδειξαν ότι η απομάκρυνση του As(V) ήταν επίσης συνάρτηση της συγκέντρωσής του στην εισροή. Ωστόσο, πιο πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η αφαίρεση του As(V) είναι στην πραγματικότητα ανεξάρτητη από την αρχική του συγκέντρωση. Η παρουσία θειικού και ανθρακικού στο ακατέργαστο νερό δεν παρεμποδίζει την απομάκρυνση του As(V) σε pH 11. Η απομάκρυνση του As(V), ωστόσο, μειώνεται παρουσία ανθρακικού σε pH 10 με 10,5 και η παρουσία ορθοφωσφορικών σε pH μικρότερο από 12,0.

### 5.1.4 Έμμεση Απομάκρυνση Αρσενικού μέσω Οξειδωσης Σιδήρου/Μαγγανίου

Υπάρχουν διάφορες διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του σιδήρου και/ή του μαγγανίου από το νερό με οξείδωση του σιδήρου και/ή του μαγγανίου από τη διαλυτή τους κατάσταση (σθένος 2<sup>+</sup>) σε υψηλότερο σθένος για να σχηματίσουν ιζήματα σιδήρου και/ή μαγγανίου. Η διεργασία οξείδωσης που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του σιδήρου και του μαγγανίου οδηγεί στο σχηματισμό υδροξειδίων που απομακρύνουν το διαλυτό αρσενικό με αντιδράσεις καθίζησης ή προσρόφησης.

Το κεντρικό σκεπτικό που σχετίζεται με την απομάκρυνση του διαλυτού σιδήρου και του μαγγανίου είναι παρόμοιο, αφού αυτά τα δύο συχνά συνυπάρχουν στο ανεπεξέργαστο νερό. Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση επεξεργασίας είναι η κατακρήμνιση όλων των διαλυτών μορφών σιδήρου και μαγγανίου έτσι ώστε αυτά να μπορούν να απομακρυνθούν σε άλλες διεργασίες όπως η καθίζηση και η διήθηση. Εκτός από τον έλεγχο των διαλυτών μορφών, ο κολλοειδής και/ή ο σωματιδιακός σίδηρος και το μαγγάνιο είναι επίσης σημαντικοί και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη συνολική απομάκρυνση. Οι αντιδράσεις και οι ποσότητες ιλύος που προκύπτουν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5.1, Πίνακας 5.2). Τα ιζήματα που προκύπτουν είναι το υδροξείδιο του σιδήρου (Fe(OH)<sub>3</sub>) και το διοξείδιο του μαγγανίου (MnO<sub>2</sub>) (Μαντζιάρας, 2022).



**Πίνακας 5.1:** Αντιδράσεις Οξειδωσης για τον σίδηρο με διάφορα οξειδωτικά (ASCE, AWWA, 1990)

Οξειδωτικό	Αντίδραση	Απαιτούμενο Οξειδωτικό mg/mg Fe <sup>2+</sup>	Καταναλισκόμενη Αλκαλικότητα mg/mg Fe <sup>2+</sup>	Παραγόμενη Λάσπη kg/kg Fe <sup>2+</sup>
Οξυγόνο	$4Fe(HCO_3)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8CO_2$	0,14	1,80	1,9
Χλώριο	$2Fe(HCO_3)_2 + Ca(HCO_3)_2 + Cl_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + CaCl_2 + 6CO_2$	0,64	2,70	1,9
Διοξείδιο του Χλωρίου	$Fe(HCO_3)_2 + NaHCO_3 + ClO_2 \rightarrow Fe(OH)_3 + NaClO_2 + 3CO_2$	1,21	2,70	1,9
Υπερμαγγανικό Κάλιο	$3Fe(HCO_3)_2 + KMnO_4 + 2H_2O \rightarrow 3Fe(OH)_3 + MnO_2 + KHCO_3 + 5CO_2$	0,94	1,50	2,43

**Πίνακας 5.2:** Αντιδράσεις οξείδωσης για το μαγγάνιο με διάφορα οξειδωτικά (ASCE, AWWA, 1990)

Οξειδωτικό	Αντίδραση	Απαιτούμενο Οξειδωτικό mg/mg Fe <sup>2+</sup>	Καταναλισκόμενη Αλκαλικότητα mg/mg Fe <sup>2+</sup>	Παραγόμενη Λάσπη kg/kg Fe <sup>2+</sup>
Οξυγόνο	$2MnSO_4 + 2Ca(HCO_3)_2 + O_2 \rightarrow 2MnO_2 + 2CaSO_4 + 2H_2O + 4CO_2$	0,29	1,80	1,58
Χλώριο	$Mn(HCO_3)_2 + Ca(HCO_3)_2 + Cl_2 \rightarrow MnO_2 + CaCl_2 + 2H_2O + 4CO_2$	1,29	3,64	1,58
Διοξείδιο του Χλωρίου	$Mn(HCO_3)_2 + 2NaHCO_3 + 2ClO_2 \rightarrow MnO_2 + 2NaClO_2 + 2H_2O + 4CO_2$	2,46	3,64	1,58
Υπερμαγγανικό Κάλιο	$3Mn(HCO_3)_2 + 2KMnO_4 + 5MnO_2 \rightarrow 5MnO_2 + 2KHCO_3 + 2H_2O + 4CO_2$	1,92	1,21	2,64

Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν (Edwards, 1994) φάνηκε πως η απομάκρυνση του αρσενικού κατά τη διάρκεια της καθίζησης σιδήρου είναι αρκετά αποτελεσματική. Η αφαίρεση 2 mg/L σιδήρου πέτυχε 92,5% απομάκρυνση του As(V) από μια αρχική συγκέντρωση 10 µg/L As(V). Ακόμη και η αφαίρεση 1 mg/L σιδήρου είχε ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση του 83% του εισερχόμενου αρσενικού As(V) από μια πηγή με 22 µg/L As(V). Πράγματι, μελέτες πεδίου σε εγκαταστάσεις αφαίρεσης σιδήρου έχουν δείξει ότι αυτή η επεξεργασία μπορεί να επιτύχει συγκεντρώσεις εξόδου της τάξης των 3 µg/L As(V).

Η απομάκρυνση του αρσενικού κατά τη διάρκεια της κατακρήμνισης μαγγανίου είναι σχετικά αναποτελεσματική σε σύγκριση με τον σίδηρο, ακόμη και όταν εξετάζεται η απομάκρυνση τόσο με προσρόφηση όσο και με συγκαταβύθιση. Για παράδειγμα, αποδείχθηκε ότι η κατακρήμνιση 3 mg/L μαγγανίου αφαίρεσε μόνο το 69% του As(V) μιας συγκέντρωσης εισροής 12,5 µg/L As(V).

#### 5.1.4.1 Επίδραση Συνυπαρχουσών Ανόργανων Ενώσεων

Οι (McNeill, et al., 1995) έδειξαν ότι μια εγκατάσταση Fe-Mn με 400 mg/L θειικό και 5,2 µg/L αρσενικό στο ακατέργαστο νερό πέτυχε την απομάκρυνση του αρσενικού κατά 83%. Τα αποτελέσματα από δύο άλλες εγκαταστάσεις Fe-Mn με

10 mg/L θειικού άλατος στο ακατέργαστο νερό έδειξαν αφαιρέσεις αρσενικού 87 και 93%. Αυτή η ανάλυση υποδηλώνει ότι το θειικό άλας παρεμβαίνει ελάχιστα στην προσρόφηση του αρσενικού στα ιζήματα του σιδήρου.

#### 5.1.4.2 Μελέτες Πεδίου

Η επιτόπια λειτουργία δύο μονάδων αφαίρεσης σιδήρου, και κατ' επέκταση αρσενικού, μελετήθηκε από το Battelle Memorial Institute. Μία εγκατάσταση επεξεργασίας (EEN A) χρησιμοποίησε μια διεργασία αφαίρεσης σιδήρου ακολουθούμενη από αποσκλήρυνση νερού μέσω ζεόλιθου, ενώ μία δεύτερη (EEN B) χρησιμοποίησε αποκλειστικά διεργασία αφαίρεσης σιδήρου. Και οι δύο EEN επεξεργάστηκαν παρόμοιο όγκο νερού, συγκεκριμένα 1,6 mgd (= 7273,7 m<sup>3</sup>/d) και 1,4 mgd (6364,5 m<sup>3</sup>/d) αντίστοιχα, ωστόσο, το νερό πηγής της πρώτης περιείχε μέση συγκέντρωση σιδήρου 2.284 μg/L, ενώ το νερό πηγής της δεύτερης χαρακτηριζόταν από περίπου τη μισή συγκέντρωση (1.137 μg/L). Δεδομένου ότι η απομάκρυνση του αρσενικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα σιδήρου στην εισροή, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι η EEN B δεν ήταν τόσο αποτελεσματική στην απομάκρυνση του αρσενικού – ενώ η EEN A μείωσε σταθερά τα επίπεδα αρσενικού κατά 87% (από 20,3 μg/L σε 3,0 μg/L), η EEN B μείωσε τις συγκεντρώσεις αρσενικού κατά 74% (από 48,5 μg/L σε 11,3 μg/L). Με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης και την πρόσθετη εμπειρία, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η αποτελεσματικότητα αφαίρεσης της EEN B θα μπορούσε να βελτιωθεί με την προσθήκη ενός κροκιδωτικού όπως ο χλωριούχος σίδηρος (EPA, 2000).

Ως μέρος της ίδιας μελέτης, ελήφθησαν δείγματα ιλύος από την EEN A και υποβλήθηκαν σε δοκιμή TCLP. Με βάση τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών, τα απόβλητα δεν θα χαρακτηρίζονταν ως επικίνδυνα, ακόμη και σύμφωνα με τους αυστηρούς κανονισμούς για τα επικίνδυνα απόβλητα της Καλιφόρνια. Παρόλο που δεν συλλέχθηκαν δείγματα ιλύος από την EEN B κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης, ένα προηγούμενο αποτέλεσμα δοκιμής είχε ως αποτέλεσμα την υπέρβαση του ορίου της Καλιφόρνια για το συνολικό αρσενικό για τα μη επικίνδυνα απόβλητα (EPA, 2000).

## 5.2 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

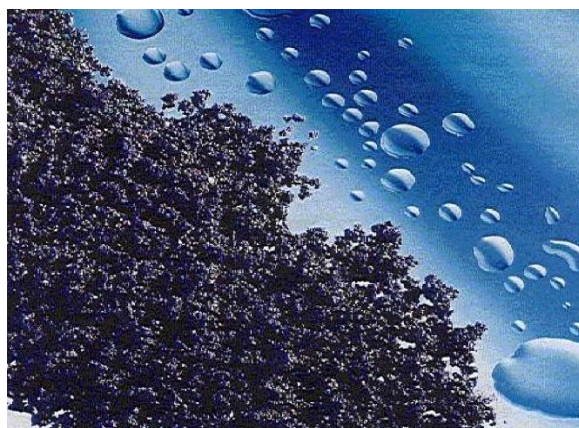
Η απομάκρυνση με προσρόφηση – συμπαράσυρση – συγκαταβύθιση σε ιζήματα αλουμινίου, σιδήρου και ασβέστη είναι ένας σημαντικός μηχανισμός αφαίρεσης αρσενικού. Παράλληλα, υπάρχουν υλικά που έχουν ιδιότητες επιφανειακής προσρόφησης έχουν δοκιμαστεί και έχει βρεθεί ότι είναι πολλά υποσχόμενα για την αφαίρεση του αρσενικού. Δύο από αυτά, είναι κοκκώδη προσροφητικά και είναι η ενεργοποιημένη αλουμίνα και το κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου (GFH: Granular Ferric Hydroxide) (Crittenden, et al., 2012). Επίσης, ο ενεργός άνθρακας, που είναι ένα πολύ γνωστό προσροφητικό υλικό, παρόλο που από μόνος του δεν απομακρύνει σε σημαντικό βαθμό το αρσενικό, όταν εμπλουτίζεται με σίδηρο επιτυγχάνει αξιόλογη αφαίρεση του αρσενικού.



**Σχήμα 5.5:**

Η ενεργοποιημένη αλουμίνα/ενεργό οξείδιο του αργιλίου, χρησιμοποιείται ως αφυγραντικό, προσροφητικό στην επεξεργασία νερού. Έχει υψηλή πορώδη δομή, υψηλή επιφάνεια, υψηλό απορροφητικό ποσοστό κτλ.

*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική σελίδα <http://gr.aluminaadsorbent.com/activated-alumina-adsorbent/activated-alumina.html>



**Σχήμα 5.6:**

Το κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου κρυσταλλώνεται σε οξύ-υδροξείδια του σιδήρου γαιθίτη ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ). Καθώς δεν περιλαμβάνεται διαδικασία ξήρανσης στην προετοιμασία του, όλοι οι πόροι γεμίζουν πλήρως με νερό, οδηγώντας σε υψηλή πυκνότητα διαθέσιμων θέσεων προσρόφησης και συνεπώς σε υψηλή ικανότητα προσρόφησης.

*Πηγή Σχήματος:* (Pal, 2001)



**Σχήμα 5.7:** Ενεργός Άνθρακας που χρησιμοποιείται σε φίλτρα για καθαρισμό του πόσιμου νερού  
*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική Σελίδα <https://www.primato.gr/ta-nea-mas/ti-einai-o-energos-anthrakas-sta-filtra-nerou/>

### 5.2.1 Ενεργοποιημένη Αλουμίνα (EA)

Η απομάκρυνση με ενεργοποιημένη αλουμίνα (EA) ( $Al_2O_3$ ) είναι μια φυσική/χημική διεργασία προσρόφησης που χρησιμοποιεί πορώδες, κοκκώδες υλικό με ιδιότητες ανταλλαγής ιόντων, κατά την οποία ιόντα στο νερό τροφοδοσίας απορροφώνται στην οξειδωμένη επιφάνεια της EA. Η εν λόγω διεργασία θεωρείται μια διαδικασία προσρόφησης, αν και οι χημικές αντιδράσεις που εμπλέκονται είναι στην πραγματικότητα μια ανταλλαγή ιόντων (AWWA, 1990). Η ενεργοποιημένη αλουμίνα παρασκευάζεται μέσω αφυδάτωσης του υδροξειδίου του αργιλίου  $Al(OH)_3$  σε υψηλές θερμοκρασίες με τρόπο που παράγει ένα εξαιρετικά πορώδες υλικό (Clifford, et al., 1995). Η EA χρησιμοποιείται σε σταθερές κλίνες για την αφαίρεση ρύπων όπως το φθόριο, το αρσενικό, το σελήνιο, το πυρίτιο και τη φυσική οργανική ύλη (NOM). Στην επεξεργασία πόσιμου νερού, η προσρόφηση με ενεργοποιημένη αλουμίνα σε σταθερή κλίνη χρησιμοποιείται συνήθως για την απομάκρυνση της φυσικής οργανικής μάζας και του φθορίου. Η απομάκρυνση του  $As[V]$  με προσρόφηση μπορεί να επιτευχθεί με συνεχή διέλευση νερού υπό πίεση μέσα από μία ή περισσότερες κλίνες. Τα ιόντα αρσενικού ανταλλάσσονται με τα επιφανειακά υδροξείδια στην αλουμίνα. Όταν οι θέσεις προσρόφησης στην επιφάνεια της EA καταστούν επαρκώς κορεσμένες με αρσενικό με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται πλέον η επαρκής αφαίρεσή του, τότε το υλικό της κλίνης πρέπει είτε να αναγεννηθεί, είτε να απορριφθεί και να αντικατασταθεί με νέο υλικό. Η αναγέννηση επιτυγχάνεται μέσω μιας σειράς ξεπλύματος με καυστικό διάλυμα αναγέννησης, νερό εξουδετέρωσης (χαμηλού pH) και νερό έκπλυσης. Πρώτα το αλουμίνιο υποβάλλεται σε ένα καυστικό λουτρό, το οποίο φαίνεται να αφαιρεί το επιφανειακό στρώμα αλουμινίου, το οποίο έχει προσροφήσει το αρσενικό. Το αναγεννητικό είναι μια ισχυρή βάση, τυπικά υδροξείδιο του νατρίου. Στη συνέχεια, ουδετεροποιείται με ένα ξέβγαλμα

με ισχυρό οξύ, το οποίο τυπικά μπορεί να είναι θειικό οξύ και τοποθετείται πίσω σε λειτουργία. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αναγέννηση του αλουμινίου δεν είναι πλήρης: το αλουμίνιο χάνει περίπου το 30 – 40% της ικανότητάς του με κάθε αναγέννηση, με αποτέλεσμα να πρέπει να αντικατασταθεί μετά από μόνο τρεις ή τέσσερις αναγεννήσεις. Ωστόσο, το χαμηλό κόστος για την προμήθεια της αλουμίνιας και η σχετικά υψηλή χωρητικότητα για αρσενικό διατηρούν το κόστος σε αποδεκτά επίπεδα (Kartinen, et al., 1995). Όσον αφορά το νερό έκπλυσης της αλουμίνιας, πιθανότατα θα περιέχει υψηλά επίπεδα αρσενικού που το καθιστούν επικίνδυνο απόβλητο που πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία πριν από την απόρριψή του.

Γενικά, όπως και με τις διεργασίες απομάκρυνσης του αρσενικού που συζητήθηκαν προηγουμένως, οι καλύτερες αποδόσεις απομάκρυνσης και η οικονομία του συστήματος εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες:

- ✚ προοξειδωση του As[III] σε As[V],
- ✚ παρεμβολή συστατικών στη διεργασία προσρόφησης και
- ✚ ανάγκη προσαρμογής του pH σε < 6,5, πιο συγκεκριμένα η διεργασία είναι πιο αποτελεσματική εάν το pH του νερού τροφοδοσίας βρίσκεται στην περιοχή 5,5 έως 6,0 (USEPA, 2001).

#### 5.2.1.1 Επίδραση pH

Ένας παράγοντας που μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απομάκρυνση του αρσενικού με EA είναι το pH. Το pH 8,2 είναι σημαντικό επειδή είναι αυτό που ορίζει τη «φόρτιση μηδενικού σημείου» για την EA, δηλαδή είναι το pH στο οποίο το καθαρό φορτίο στην επιφάνεια ενός αδιάλυτου οξειδίου/υδροξειδίου είναι μηδέν και παίζει σημαντικό ρόλο στον χαρακτηρισμό της επιφάνειας των οξειδίων/υδροξειδίων μετάλλων. Κάτω από αυτό το pH, η EA έχει ένα καθαρό θετικό φορτίο με αποτέλεσμα την προτίμηση για προσρόφηση ανιόντων, συμπεριλαμβανομένου του αρσενικού (AWWA, 1990). Τα επίπεδα όξινου pH θεωρούνται γενικά βέλτιστα για την απομάκρυνση του αρσενικού με EA, ωστόσο, ορισμένες μελέτες έχουν παρουσιάσει αντικρουόμενες επιδράσεις του pH.

Αρκετές έρευνες έχουν δείξει ότι το βέλτιστο pH για την απομάκρυνση του αρσενικού κυμαίνεται από 5,5 έως 6,0 για δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε συνθετικά νερά (Rosenblum, et al., 1984). Άλλες έχουν επίσης βρει βελτιωμένη απόδοση σε χαμηλότερα επίπεδα pH. Ερευνητές όπως οι (Simms, et al., 1997) βρήκαν ότι η σταδιακή μείωση του pH από 7,5 σε 6,0 αύξησε τον αριθμό των όγκων κλίνης που μπορούσαν να αντιμετωπιστούν κατά 2 έως 12 φορές. Οι (Hathaway, et al., 1987) ανέφεραν ότι η απόδοση της EA για την αφαίρεση του As(V) επιδεινώνεται καθώς το pH αυξάνεται από 6,0 σε 9,0. Λειτουργώντας με αφαίρεση As(V) 50% και σε pH 5,5, μια στήλη επεξεργάστηκε 15.500 όγκους κλίνης (BV). Για το ίδιο επίπεδο αφαίρεσης As(V), μια στήλη που λειτουργεί σε pH

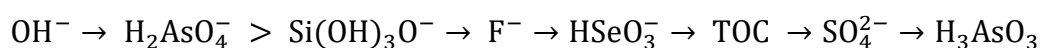
6,0 επεξεργάστηκε 13.391 BV και μια στήλη που λειτουργεί σε pH 9,0 επεξεργάστηκε μόνο 800 BV. Μελέτες στηλών EA που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν επίσης αυτή την τάση (Clifford, et al., 1985). Για συγκέντρωση αρσενικού 50 µg/L, μια στήλη που λειτουργεί σε pH 6,0 επεξεργάστηκε 8.760 BVs νερού, αλλά σε pH 7,3 η στήλη επεξεργάστηκε μόνο 1.944 BVs. Σε αντίθεση με αυτά τα αποτελέσματα, οι (Benjamin, et al., 1998) δεν βρήκαν σχεδόν καμία εξάρτηση από το επίπεδο του pH. Οι συγγραφείς διεξήγαγαν μελέτες με ισόθερμες καμπύλες και στήλης με EA για να διερευνήσουν τις αφαιρέσεις του As(V) σε pH 5,5, , 7,0 και 8,5. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του pH από 5,5 σε 8,5 δεν είχε σχεδόν καμία επίδραση στην προσρόφηση του As(V) από την EA.

#### 5.2.1.2 Επίδραση της κατάστασης οξειδωσης του αρσενικού

Όπως όλες σχεδόν οι άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας, η κατάσταση οξειδωσης του αρσενικού παίζει μεγάλο ρόλο στην απομάκρυνσή του. Το As(V) απορροφάται πολύ πιο εύκολα σε σύγκριση με το As(III). Οι (Frank, et al., 1986) διεξήγαγαν δύο δοκιμές στήλης σε pH 6. Η εισροή στη μία δοκιμή ήταν 100 µg/L As(V), και στην άλλη 100 µg/L As(III). Η στήλη επεξεργασίας νερού που περιέχει As(V) επεξεργάστηκε περίπου 23.400 BVs πριν τα επίπεδα εκροής φτάσουν τα 50 µg/L. Η άλλη στήλη με το As(III) και επεξεργάστηκε μόνο 300 BVs πριν η εκροή φτάσει τη συγκέντρωση των 50 µg/L, που εκείνη την περίοδο ήταν το MCL για το αρσενικό. Σε μεταγενέστερα πειράματα διαπιστώθηκε ότι η προσρόφηση του As(V) ήταν πολύ ταχύτερη από την προσρόφηση του As(III) (Benjamin, et al., 1998). Φάνηκε, επίσης, ότι η προσρόφηση στην EA ήταν σχετικά γρήγορη κατά τις πρώτες λίγες ώρες επαφής και πιο αργή στη συνέχεια.

#### 5.2.1.3 Επίδραση ανταγωνιστικών ιόντων

Όπως όλες οι διεργασία ανταλλαγής ιόντων, η ενεργοποιημένη αλουμίνα εμφανίζει προτίμηση για ορισμένα ιόντα. Είναι ενδιαφέρον ότι η EA τείνει να έχει αυξημένη προτίμηση για ιόντα που οι συνήθεις διεργασία ανταλλαγής ιόντων δεν έχουν. Η EA, ωστόσο, τείνει να είναι ειδική για το αρσενικό και δεν επηρεάζεται τόσο πολύ από τα ανταγωνιστικά ιόντα (AWWA, 1990). Όπως υποδεικνύεται από τη γενική αλληλουχία επιλεκτικότητας που φαίνεται παρακάτω (Clifford, et al., 1995), η EA προσροφά κατά προτίμηση το  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  [As(V)] έναντι του  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  [As(III)]:



Αρκετές μελέτες έχουν απεικονίσει την επίδραση αυτής της επιλεκτικότητας, ιδιαίτερα σε ότι σχετίζεται με την παρουσία θεικών και τα χλωριούχα. Οι (Benjamin, et al., 1998) βρήκαν μικρή επίδραση από θειικά είτε από χλωριούχα. Η αύξηση των θεικών από 0 σε 100 mg/L είχε μόνο μικρή επίδραση στην απορρόφηση του As(V). Η παρουσία χλωρίου επίσης δεν επηρέασε την απομάκρυνση του As(V). Η προσθήκη οργανικών, όμως, είχε πολύ μεγαλύτερη

επίδραση. Η προσθήκη 4 mg/L DOC (2,5-Διμεθοξυ-4-χλωροαμφεταμίνη) μείωσε την προσρόφηση του As(V) στην EA κατά περίπου 50%.

Επίσης, σε έρευνες βρέθηκαν σημαντικές επιδράσεις των θεικών και των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS) στην προσρόφηση (Clifford, et al., 1986). Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη 360 mg/L θεικού και σχεδόν 1.000 mg/L TDS μείωσε την απομάκρυνση του As(V) με EA επίσης κατά περίπου 50% σε σύγκριση με την απομάκρυνση σε απιονισμένο νερό που περιείχε μόνο αρσενικό. Οι (Rosenblum, et al., 1984) ανέφεραν επίσης ότι το θεικό άλας και τα χλωριούχα μείωσαν σημαντικά την απομάκρυνση του αρσενικού στα συστήματα EA. Η απομάκρυνση του αρσενικού σε νερό που περιείχε περίπου 530 mg/L χλωριούχων ήταν 16% μικρότερη από αυτή που επιτεύχθηκε σε ένα απιονισμένο νερό μόνο με αρσενικό και η παρουσία 720 mg/L θεικού είχε ως αποτέλεσμα άνω του 50% λιγότερη απομάκρυνση αρσενικού από αυτή που επιτυγχάνεται σε απιονισμένο νερό που περιείχε μόνο αρσενικό.

#### 5.2.1.4 Επίδραση Χρόνου Επαφής Κενής Κλίνης (Empty Bed Contact Time)

Η λειτουργία των κλινών EA και ειδικότερα ο EBCT (Empty Bed Contact Time) μπορεί επίσης να παίζει ρόλο στην απομάκρυνση του αρσενικού. Ο EBCT αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το νερό τροφοδοσίας έρχεται σε επαφή με το μέσο της EA. Σε δοκιμές με στήλες EA που διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας νερό με αρσενικό από τη λίμνη Ουάσιγκτον, ο EBCT κυμάνθηκε από 2,5 έως 15 λεπτά. Χαμηλές συγκεντρώσεις αρσενικού (δηλαδή <5 μg/L) επιτεύχθηκαν για περισσότερες από 2.000 ώρες λειτουργίας. Συγκρίνοντας τα EBCT, τα δεδομένα δείχνουν ότι η προσρόφηση αυξήθηκε ελαφρά με την αύξηση του EBCT (Benjamin, et al., 1998).

#### 5.2.1.5 Αναγέννηση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αναγέννηση των κλινών EA συνήθως επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα διάλυμα ισχυρής βάσης, συνήθως συμπυκνωμένο υδροξείδιο του νατρίου (NaOH). Απαιτούνται σχετικά λίγοι BV αναγεννητικού. Μετά την αναγέννηση με ισχυρή βάση, το μέσο της EA πρέπει να εξουδετερωθεί χρησιμοποιώντας ένα ισχυρό οξύ, το οποίο τυπικά μπορεί να είναι 2% θεικό οξύ. Το αρσενικό είναι πιο δύσκολο να αφαιρεθεί κατά τη διαδικασία της αναγέννησης σε σχέση με άλλα ιόντα όπως το φθόριο (Clifford, et al., 1995). Εξαιτίας αυτού, χρησιμοποιούνται ελαφρώς υψηλότερες συγκεντρώσεις βάσης, δηλαδή τυπικά 4% NaOH. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτή την αυξημένη συγκέντρωση, υπάρχει περίπτωση να μην εκπλυθεί όλο το αρσενικό από την επιφάνεια της EA. Σε πειράματα βρέθηκε ότι μόνο το 50 έως 70% του αρσενικού αφαιρέθηκε από τις στήλες EA κατά τη διάρκεια της αναγέννησης (Clifford, et al., 1986).

Σε έρευνες που διεξήχθησαν την επόμενη δεκαετία, επίσης τεκμηριώθηκε η δύσκολη αναγέννηση της EA για το αρσενικό. Οι δοκιμές αναγέννησης αυτών των

ερευνών έδειξαν ότι η έκθεση του μέσου EA σε 0,1 N χλωριούχου νατρίου NaCl ή 0,2 N υδροξειδίου του νατρίου NaOH δεν αναγέννησε την EA σε σημαντικό βαθμό. Η ανάκτηση αρσενικού ήταν περιορισμένη και στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν λιγότερο από το 50% του προσροφημένου αρσενικού (Benjamin, et al., 1998). Ωστόσο, σε προγενέστερες μελέτες έχουν αναφερθεί υψηλότερες ανακάμψεις. Οι (Hathaway, et al., 1987) βρήκαν ότι το 80% του προσροφημένου αρσενικού εκπλύθηκε χρησιμοποιώντας διάλυμα NaOH 1,0 έως 1,25 M και οι (Simms, et al., 1997) βρήκαν ότι έως και το 85% της χωρητικότητας μίας κλίνης EA μπορούσε να ανακτηθεί χρησιμοποιώντας NaOH.

Η αναγέννηση επηρεάζει επίσης την διάρκεια ζωής της κλίνης και την αποτελεσματικότητα. Όταν μειώνεται η διάρκεια ζωής της κλίνης μειώνεται και η αποτελεσματικότητά της προσρόφησης της αναγέννηση.

#### 5.2.1.6 Μελέτες πεδίου

Αρκετές μελέτες πεδίου έχουν δείξει ότι το αρσενικό μπορεί να μειωθεί κάτω από 3 μg/L χρησιμοποιώντας διήθηση ενεργοποιημένης αλουμίνας. Για παράδειγμα, ο (Stewart, et al., 1991) αναφέρει την επιτυχία μιας μικρής εταιρείας νερού στην επεξεργασία αρσενικού, η οποία εξυπηρετεί 89 νοικοκυριά στο Μπόου του Νιου Χάμσαϊρ και βασίζεται σε 2 πηγάδια για το νερό της πηγής του. Κάθε ένα από τα φρεάτια χαρακτηρίζεται από υψηλό επίπεδο μόλυνσης από αρσενικό με μέσες συγκεντρώσεις αρσενικού 62 μg/L και 57 μg/L αντίστοιχα. Ωστόσο, ο οργανισμός κοινής ωφελείας ήταν σε θέση να μειώσει τα επίπεδα αρσενικού κάτω από το τότε MCL που είχε οριστεί στα 50 μg/L, ενώ παράγαγε μια μέση επεξεργασμένη ροή 13.730 gpd (= 52 m<sup>3</sup>/d). Στην πραγματικότητα, όμως, τα δεδομένα δείχνουν ότι αυτό το σύστημα θα μπορούσε να μειώσει τις συγκεντρώσεις αρσενικού σε επεξεργασμένο νερό κάτω από 5 ή 10 μg/L, δηλαδή κάτω του παρόντος αυστηρότερου MCL.

Σε μια άλλη μελέτη (Wang, et al., 2000), το Battelle Memorial Institute, εξέτασε δύο εργοστάσια ενεργοποιημένης αλουμίνας σχεδιασμένα για επεξεργασία αρσενικού. Η αλληλουχία και για τα δύο αυτά εργοστάσια αποτελούνταν από δύο παράλληλα ζευγάρια δεξαμενών σε σειρά. Το προσροφητικό μέσο (EA) στην πρώτη δεξαμενή του κάθε ζευγαριού, αντικαταστάθηκε όταν είχε κορεστεί από αρσενικό (περίπου κάθε 1,5 χρόνο). Τη στιγμή της αντικατάστασης, η δεύτερη δεξαμενή της σειράς μετακινήθηκε στη θέση της πρώτης ή της «ακατέργαστης» θέσης. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις, η δεύτερη δεξαμενή περιείχε καινούριο καθαρό υλικό.

Τα δύο συστήματα κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν συγκεντρώσεις αρσενικού που κυμαίνονταν από 53 έως 87 μg/L (μέση συγκέντρωση 62 μg/L) και από 21 έως 76 μg/L (μέση συγκέντρωση 49 μg/L). Και τα δύο συστήματα μείωσαν τις συγκεντρώσεις του εισερχόμενου αρσενικού κατά περισσότερο από 92% κατά μέσο όρο, διατηρώντας σταθερά τις συγκεντρώσεις αρσενικού εκροής κάτω από



5 µg/L. Πράγματι, παρά τις τόσο υψηλές συγκεντρώσεις εισροής, και τα δύο αυτά συστήματα ήταν σε θέση να παράγουν τελικό νερό με συγκέντρωση αρσενικού κάτω από 3 µg/L για παρατεταμένη χρονική περίοδο (40 και 10 εβδομάδες, αντίστοιχα). Δείγματα από τα αναλωμένα μέσα συλλέχθηκαν από ένα από τα δοχεία επεξεργασίας και υποβλήθηκαν στη δοκιμή TCLP. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα χρησιμοποιημένα μέσα πέρασαν εύκολα τη δοκιμή TCLP για τοξικότητα.

Επιπλέον, αποτελέσματα μελετών απομάκρυνσης αρσενικού με προσροφητικό την ΕΑ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.3). Οι συγκεντρώσεις του αρσενικού που επεξεργάστηκαν με ενεργοποιημένη αλουμίνα κυμαίνονται από 21 – 100 µg/L, ενώ οι όγκοι κλινών που τελικά επιτεύχθηκε ο στόχος των 10 µg/L, που ορίζει η νομοθεσία ως MCL για το αρσενικό, με χρήση ενεργής αλουμίνας έφτασαν έως και τις 110.550 (Crittenden, et al., 2012).

**Πίνακας 5.3:** Αποτελεσμάτων για προσροφητικό ΕΑ σε σταθερές κλίνες στην απομάκρυνση του αρσενικού από το νερό (Crittenden, et al., 2012)

Προσροφητικό	Επίδραση στη Συγκέντρωση του Αρσενικού (µg/L)	Στόχος Συγκέντρωσης Αρσενικού (µg/L)	Ποσοστό Απομάκρυνσης Αρσενικού (%)	Επεξεργασμένοι Όγκοι Κλινών	Βιβλιογραφία - Πηγές
Ενεργοποιημένη Αλουμίνα	70	10	86	1.000	(Benjamin, et al., 2000)
	50	10	80	10.000	(Benjamin, et al., 2000)
	21	10	53	13.000	(Clifford, 1999)
	23	10	57	110.500	(Simms, et al., 1997)
	98	10	~90	16.000	(Clifford, 1999)
	22	10	~55	15.600	(Clifford, 1999)
	100	10	90	9.000	(Rubel, et al., 1985)

### 5.2.1.7 Έμφραξη του μέσου

Όπως και οι ρητίνες ανταλλαγής ιόντων, η ΕΑ μπορεί να βουλώσει. Η έμφραξη μειώνει τον αριθμό των θέσεων προσρόφησης μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης.

Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη οι υδραυλικοί παράγοντες. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, η ΕΑ μπορεί να φράξει με αιωρούμενα στερεά που υπάρχουν στο νερό τροφοδοσίας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πτώση πίεσης σε όλη την κλίνη. Εάν η πτώση πίεσης είναι σημαντική, τότε τα μέσα πρέπει να πλυθούν ξανά για να αφαιρεθούν τα στερεά. Οι (Simms, et al., 1997) βρήκαν ότι η πτώση πίεσης κατά μήκος της κλίνης μετά από επεξεργασία 75.000 BV ήταν ελάχιστη για υπόγεια ύδατα με 2 mg/L αιωρούμενα στερεά, τα οποία επίσης δεν είχαν προφιλτραριστεί.

Εκτός από τα αιωρούμενα στερεά, πρέπει να σημειωθεί ότι και το πυρίτιο και η μαρμαρυγία δημιουργούν προβλήματα φραξίματος στις κλίνες, όπως φάνηκε σε μια μελέτη που διεξήχθη στο Hanford της Καλιφόρνια (Clifford, et al., 1986).

#### 5.2.1.8 Λειτουργικές Θεωρήσεις

Μελέτες πεδίου που περιλαμβάνουν ΕΑ δείχνουν ότι αυτή η τεχνολογία μπορεί να επιτύχει την απομάκρυνση του αρσενικού στα 3 μg/L. Οι επιχειρησιακές εμπειρίες που έχουν αναπτυχθεί παρέχουν σημαντικές πληροφορίες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τις διεργασίες ΕΑ, αυτές συζητούνται εδώ.

Οι κλίνες ΕΑ μπορούν να λειτουργούν σε σειρά ή παράλληλα. Η λειτουργία της σειράς αυξάνει την απομάκρυνση και βοηθά στην αποφυγή διαρροής, δηλαδή αυξημένα επίπεδα αρσενικού στα απόβλητα, αλλά περιορίζει την απόδοση (AWWA, 1990). Όταν το σύστημα λειτουργεί σε σειρά, χρησιμοποιείται συχνά μια διαμόρφωση, η οποία χρησιμοποιεί τρία κρεβάτια: δύο σε παραγωγή και ένα σε λειτουργία αναγέννησης σε μια δεδομένη στιγμή. Όταν εξαντληθεί η ικανότητα ανταλλαγής της πρώτης κλίνης στη σειρά, η πρώτη κλίνη αφαιρείται από τη λειτουργία για να αναγεννηθεί. Η δεύτερη κλίνη που ήταν στη σειρά γίνεται πρώτη και μία φρέσκια αναγεννημένη κλίνη συνδέεται για να γίνει η δεύτερη. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της μέγιστης ικανότητας ανταλλαγής των κλινών και αποτρέπει τη διαρροή, καθώς μία νέα κλίνη είναι πάντα τελευταία στη σειρά. Επίσης, αυτό βοηθά στην ελαχιστοποίηση της συχνότητας αναγέννησης. Τα συστήματα που λειτουργούν με ενεργοποιημένη αλουμίνα χωρίς αναγέννηση θα επωφεληθούν κι αυτά από τη λειτουργία σε σειρά. Μια τέτοια προσέγγιση θα προσφέρει μεγαλύτερη χρήση των μέσων πριν από την απόρριψή τους. Η παράλληλη λειτουργία από την άλλη πλευρά αυξάνει την απόδοση, αλλά δεν βελτιώνει την ποιότητα των λυμάτων (AWWA, 1990).

Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η υποβάθμιση των μέσων ΕΑ. Η αλουμίνα τείνει να διαλύεται σε διαδοχικούς κύκλους λόγω του κύκλου ισχυρής βάσης/ισχυρού οξέος κατά την αναγέννηση. Ως αποτέλεσμα αυτού, οι κλίνες αλουμίνας μπορεί να «τσιμεντωθούν» εάν δεν δοθεί προσεκτική φροντίδα (EPA, 1994). Η αντίστροφη πλήση των μέσων ΕΑ μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη της τσιμεντοποίησης.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι η συμμετοχή των χειριστών. Ισχυρό οξύ και ισχυρή βάση αντιμετωπίζονται σε συχνή βάση και μπορεί να παρουσιάσουν κίνδυνο για την ασφάλεια. Ένας χειριστής πρέπει να είναι ικανός να χειρίζεται αυτές τις χημικές ουσίες και πρέπει να έχει καλή κατανόηση των πρακτικών προεπεξεργασίας, μετεπεξεργασίας και αναγέννησης, εάν η διεργασία πρόκειται να λειτουργήσει αποτελεσματικά. Αυτό αποτελεί πρόβλημα ιδιαίτερα για μικρά συστήματα. Για αυτούς τους λόγους, συνιστάται τα συστήματα να χρησιμοποιούν ενεργοποιημένη αλουμίνα μιας χρήσης αντί να λειτουργούν τη διαδικασία με αναγέννηση.

### 5.2.1.9 Δευτερεύουσες Επιδράσεις

Οι διεργασίες ΕΑ μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στην ποιότητα του νερού εκροής (EPA, 1994). Όταν χρησιμοποιείται προεπεξεργασία για τη μείωση του pH σε χαμηλά επίπεδα (λιγότερο από 6,0) για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας, το pH των εκροών θα είναι μικρότερο από το τυπικά επιθυμητό στο σύστημα διανομής. Για το λόγο αυτό, ο έλεγχος διάβρωσης μετά την επεξεργασία για την αύξηση του pH θα ήταν απαραίτητος για αυτά τα συστήματα.

### 5.2.2 Κοκκώδες Υδροξείδιο του Σιδήρου (GFH)

Μια νέα τεχνική αφαίρεσης αρσενικού, αναπτύχθηκε περίπου στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου (Γερμανία), στο Τμήμα Ελέγχου Ποιότητας Νερού. Η τεχνική αυτή αφορούσε το Κοκκώδες Υδροξείδιο του Σιδήρου (GFH: Granular Ferric Hydroxide). Το GFH είναι ένα προσροφητικό, που αναπτύχθηκε για την απομάκρυνση του αρσενικού από το φυσικό νερό, σε αντιδραστήρες σταθερής κλίνης (EPA, 2000), (Driehaus, et al., 1998). Το κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου είναι φτωχά κρυσταλλωμένο οξυριζείδιο του σιδήρου (III) ή το οξυυδροξείδιο του σιδήρου που κατασκευάζεται από διάλυμα χλωριούχου σιδήρου με εξουδετέρωση και κατακρήμνιση με υδροξείδιο του νατρίου. Καθώς δεν περιλαμβάνεται διαδικασία ξήρανσης στην προετοιμασία του, όλοι οι πόροι είναι πλήρως γεμάτοι με νερό, οδηγώντας σε υψηλή πυκνότητα των διαθέσιμων θέσεων προσρόφησης και επομένως σε υψηλή ικανότητα προσρόφησης (Driehaus, et al., 1998). Η κύρια εφαρμογή του GFH είναι η προσροφητική απομάκρυνση του αρσενικού, του αρσενίτη και του φωσφορικού άλατος από το φυσικό νερό καθώς και τα λύματα. Ωστόσο, μπορεί να εφαρμοστεί και για την απομάκρυνση διαφόρων άλλων διαλυμένων ουσιών στο νερό, π.χ. φθορίου, μολυβδαινίου, σεληνίου, αντιμόνιο κ.λπ.

Μπορεί να εφαρμοστεί σε αντιδραστήρες απλής σταθερής κλίνης, παρόμοιους με αυτούς της ενεργού αλουμίνας ή του ενεργού άνθρακα. Μελέτες σχετικά με την προσρόφηση και των δύο μορφών του αρσενικού, As[V] και As[III], σε άμορφο υδροξείδιο του σιδήρου είχαν αποδείξει ότι ένα τέτοιο υλικό θα πρέπει να έχει 5 έως 10 φορές υψηλότερη απόδοση από την ενεργοποιημένη αλουμίνα (Pierce, et al., 1982). Επίσης, στη διεργασία κροκίδωσης - καθίζησης - διύλιση, τα άλατα σιδήρου, όπως προαναφέρθηκε, δείχνουν καλύτερη απόδοση απομάκρυνσης από τη στυπτηρία σε ίση δοσολογία. Επομένως, αναμένεται ότι ένα κοκκώδες ενεργοποιημένο οξείδιο σιδήρου ή υδροξείδιο του σιδήρου θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα για την προσρόφηση του αρσενικού από την ενεργοποιημένη αλουμίνα σε ένα σύστημα σταθερής κλίνης (Crittenden, et al., 2012).

Το GFH έχει υψηλή ικανότητα προσρόφησης σε μοντέλα συστημάτων και σε φυσικά νερά. Η τεχνική απομάκρυνσης με GFH συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της διεργασίας κροκίδωσης-διύλισης (την αποτελεσματικότητα και τη μικρή

υπολειμματική μάζα) με την προσρόφηση σταθερής κλίνης σε ενεργοποιημένη αλουμίνα και την απλή επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, τα σημαντικότερα οφέλη του GFH έγκεινται στο πόσο απλό και ασφαλές είναι να λειτουργούν τα φίλτρα προσρόφησης και να απομακρύνουν το αρσενικό σε επίπεδο κάτω από το όριο ανίχνευσης. Επιπλέον, δεν δημιουργούνται σημαντικά υπολείμματα ή μολυσμένη λάσπη κατά τη λειτουργία. Η απομάκρυνση του αρσενικού με τη χρήση κοκκώδους υδροξειδίου του σιδήρου γίνεται επιλεκτικά – αφήνοντας τη φυσική σύνθεση του νερού αμετάβλητη. Η εφαρμογή GFH σε πειράματα έδειξε υψηλή ικανότητα επεξεργασίας 30.000-40.000 όγκων κλινών, έως ότου ξεπεραστεί το όριο εκροής των 10 μg/L για το πόσιμο νερό που ορίζει ο ΠΟΥ για το αρσενικό. Το υπόλειμμα αυτής της τεχνικής είναι ένα στερεό απόβλητο, εμπλουτισμένο με αρσενικό με περιεκτικότητά 1 – 10 g/kg. Η τυπική υπολειμματική μάζα κυμαίνεται από 5 – 25 g/m<sup>3</sup> επεξεργασμένου νερού. Αυτή η νέα τεχνική για την αφαίρεση του αρσενικού παρέχει μια απλή και αποτελεσματική μέθοδο ιδιαίτερα για μικρές εγκαταστάσεις νερού (Driehaus, et al., 1998). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα δεδομένα των προσροφητικών δοκιμών.

**Πίνακας 5.4:** Δοκιμές προσρόφησης σε GFH (EPA, 2000)

	<b>Μονάδα Μέτρησης</b>	<b>Test 1</b>	<b>Test 2</b>	<b>Test 3</b>	<b>Test 4</b>
<b>Παράμετροι Ανεπεξέργαστου Νερού</b>					
pH		7,8	7,8	8,2	7,6
Συγκέντρωση Αρσενικού	μg/L	100-800	21	16	15-20
Συγκέντρωση Φωσφορικών	μg/L	0,7	0,22	0,15	0,3
Αγωγιμότητα	μS/cm	780	480	200	460
Προσοφητική Ικανότητα για το As	g/kg	8,5	4,5	3,2	N/D
<b>Προσοφητικό Μέσο</b>					
Βάθος Κλίνης	m	0,24	0,16	0,15	0,82
Ταχύτητα Διύλισης	m/h	6-10	7,6	5,7	15
Ικανότητα Επεξεργασίας	BV	34.000	37.000	32.000	85.000
Μέγιστη συγκέντρωση αποβλήτων	μg/L	10	10	10	7
Περιεχόμενο Αρσενικού στο GFH	g/kg	8,5	1,4	0,8	1,7
Μάζα αναλωμένου GFH (ξηρό βάρος)	g/m <sup>3</sup>	205	12	18	8,6

N/D: Non Determined

Μια επεξεργασία για την έκπλυση αρσενικού από το προσροφητικό υλικό για να καταστεί δυνατή η αναγέννηση του GFH φαίνεται εφικτή, αλλά έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αλκαλικού διαλύματος με υψηλά επίπεδα αρσενικού που απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία για τη λήψη στερεών αποβλήτων. Ως εκ τούτου, επί του παρόντος, το προσροφητικό GFH χρησιμοποιείται και

απορρίπτεται σε χώρο υγειονομικής ταφής όταν κορεστεί. Τεχνικές αναγέννησης για GFH μπορεί να είναι απαραίτητες για να γίνει μια οικονομικά βιώσιμη διεργασία για μεγάλα συστήματα (Crittenden, et al., 2012).

#### 5.2.2.1 Επίδραση pH

Η προσρόφηση του αρσενικού μειώνεται με το pH, το οποίο είναι χαρακτηριστικό για την προσρόφηση ανιόντων. Σε υψηλές τιμές pH, το GFH υπερτερεί έναντι της αλουμίνας στην απομάκρυνση του αρσενικού. Κάτω από ένα pH 7,6 η απόδοση είναι συγκρίσιμη.

Στην περιοχή pH από 4 έως 10, η μορφή του αρσενικού As(III) είναι ουδέτερα φορτισμένη, ενώ οι ενώσεις As(V) είναι αρνητικά. Η αποδοτικότητα απομάκρυνσης για το As(III) είναι χειρότερη σε σύγκριση με εκείνη του As(V) από οποιαδήποτε από τις συμβατικές τεχνολογίες για την εξάλειψη του αρσενικού από το νερό. Για την αποτελεσματική απομάκρυνση του αρσενικού από το νερό, απαιτείται πλήρης οξείδωση του As(III) στο As(V). Το προσροφητικό GFH μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε pH που κυμαίνεται μεταξύ 5,5 έως 9. Ωστόσο, η προσρόφηση αρσενικού μειώνεται ελαφρώς με το pH, το οποίο είναι χαρακτηριστικό για την προσρόφηση ανιόντων.

Μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε φυσικά υπόγεια ύδατα στο νότιο τμήμα της Κάτω Σαξονίας της Γερμανίας, που το ακατέργαστο νερό είχε pH 7,8 και συγκέντρωση αρσενικού 21 mg/L. Το όριο των 10 µg/L (MCL) στην εκροή επιτεύχθηκε μετά την επεξεργασία 60.000 όγκων κλίνης (BV) (Pal, 2001).

#### 5.2.2.2 Μελέτες πεδίου

Μια μελέτη πεδίου (Simms, et al., 2000) επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα του GFH για την απομάκρυνση του αρσενικού. Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, μια μονάδα GFH που επεξεργάζεται 20 m<sup>3</sup>/d βρέθηκε ότι μειώνει αξιόπιστα και σταθερά τις μέσες συγκεντρώσεις εισροής αρσενικού των 20 µg/L σε λιγότερο από 10 µg/L για 200.000 BV, οι οποίοι αντιστοιχούν σε πάνω από ένα χρόνο λειτουργίας, σε EBCT 3 λεπτών. Παρά τις ασήμαντες υδραυλικές απώλειες, η τακτική έκπλυση διενεργήθηκε σε μηνιαία βάση για να διατηρηθεί η καλή κατάσταση του προσροφητικού μέσου και να μειωθεί η πιθανότητα ανάπτυξης βακτηριδίων. Τα νερά της αντίστροφης πλύσης δεν ήταν επιβλαβή και μπορούσαν να ανακυκλωθούν ή να απορριφθούν σε αποχέτευση. Κατά τη στιγμή της αντικατάστασης, η φόρτιση αρσενικού στο προσροφητικό μέσο ήταν 2,3%. Οι δοκιμές στραγγισμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο χρησιμοποιημένο προσροφητικό GFH, έδειξαν ότι το αρσενικό δεν εκπλύθηκε από αυτό, ώστε να βρεθεί στα στραγγίδια.

Επίσης, στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα αποτελέσματα μελετών απομάκρυνσης αρσενικού με προσροφητικό το GFH. Όπως φαίνεται, οι συγκεντρώσεις του αρσενικού που επεξεργάστηκαν με κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου κυμαίνονται από 15 – 180 (µg/L). Οι όγκοι κλινών που τελικά

επιτεύχθηκε ο στόχος των 10 (μg/L) που ορίζει η νομοθεσία ως MCL για αρσενικό, με χρήση GFH έφτασαν έως και τις 85.000 (Crittenden, et al., 2012).

**Πίνακας 5.5:** Αποτελεσμάτων για προσροφητικό GFH σε σταθερές κλίνες στην απομάκρυνση του αρσενικού από το νερό (Crittenden, et al., 2012).

Προσροφητικό	Επίδραση στη Συγκέντρωση του Αρσενικού (μg/L)	Στόχος Συγκέντρωσης Αρσενικού (μg/L)	Ποσοστό Απομάκρυνσης Αρσενικού (%)	Επεξεργασμένοι Όγκοι Κλινών	Βιβλιογραφία - Πηγές
GFH (προσροφητικό)	15-20	10	33-50	85.000	(Driehaus, et al., 1998)
	100	10	90	25.000	(Driehaus, et al., 1998)
	100-180	10	90-95	34.000	(Driehaus, et al., 1998)
	21	-		37.000	(Driehaus, et al., 1998)
	16	-		32.000	(Driehaus, et al., 1998)

### 5.2.3 Ενεργός Άνθρακας (GAC) εμποτισμένος με Σίδηρο

Ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο της οσμής/γεύσης και την απομάκρυνση των ρύπων στις διαδικασίες επεξεργασίας νερού λόγω της τεράστιας ειδικής επιφάνειας και της καλά ανεπτυγμένης δομής των πόρων του. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του κοκκώδους ενεργού άνθρακα (GAC: Granular Active Carbon) είναι η πορώδης δομή του με υψηλές ειδικές επιφάνειες που κυμαίνονται από αρκετές εκατοντάδες έως  $\approx 2.000 \text{ m}^2/\text{g}$  (Montgomery, 1985), καθιστώντας τον εξαιρετικό προσροφητικό (Deng, et al., 2005).

Για να ελεγχθεί η ικανότητα του ενεργού άνθρακα να απομακρύνει το αρσενικό από το νερό, μια μελέτη στο Νέο Μεξικό χρησιμοποίησε οκτώ διαφορετικούς τύπους και μάρκες οικιακών συστημάτων φιλτραρίσματος με βάση τον ενεργό άνθρακα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απομάκρυνση του αρσενικού από τον ενεργό άνθρακα σε αυτά τα οικιακά συστήματα φιλτραρίσματος ήταν ελάχιστη. Το νερό εμπλουτίστηκε με αρσενικό σε αρχική συγκέντρωση 518 μg/L. Για την πλήρωση της στήλης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 3,60 g προσροφητικού GAC. Ο EBCT ρυθμίστηκε στα 10 λεπτά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε καμία περίπτωση, η ποσότητα αρσενικού που ανιχνεύθηκε δεν ήταν μικρότερη από 10 μg/L.

Όπως φάνηκε παραπάνω, ο ενεργός άνθρακας αν και είναι ο πλέον κατάλληλος για εφαρμογή σε σταθερή κλίνη λόγω των καλών μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων του, από μόνος του δεν είναι ικανός να απομακρύνει το αρσενικό σε ικανοποιητικό βαθμό.

Με εμποτισμό του κοκκώδη ενεργού άνθρακα με σίδηρο, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα της υψηλής συγγένειας του σιδήρου με το αρσενικό και την εξαιρετικά πορώδη δομή του άνθρακα και να αναπτύξουμε ένα

προσοφητικό αποτελεσματικό για την απομάκρυνση του αρσενικού από το πόσιμο νερό (Reed, et al., 2000), (Deng, et al., 2005).

Η προσρόφηση αρσενικού στο σίδηρο είναι μια επιφανειακή αντίδραση κατά την οποία το αρσενικό σχηματίζει επιφανειακά σύμπλοκα σιδήρου στους κόκκους του άνθρακα (Manning, et al., 2002), (Goldberg, et al., 2001), (Sherman, et al., 2003), (Kanel, et al., 2005), (Vaughan, et al., 2005), (Chang, et al., 2010).

Ο ενεργός άνθρακας οξειδώνεται χημικά συνήθως με  $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  ή με  $\text{HNO}_3/\text{KMnO}_4$  και στη συνέχεια εμποτίζεται με σίδηρο. Ο εμποτισμός του ενεργού άνθρακα με σίδηρο ενισχύει σημαντικά την ικανότητα προσρόφησης του υλικού ως προς το αρσενικό. Το αρσενικό προσροφάται στην επιφάνεια του οξυυδροξειδίου του σιδήρου σχηματίζοντας σύμπλοκα με τις επιφανειακές θέσεις. Η επιφανειακή οξείδωση του άνθρακα με  $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  ή με  $\text{HNO}_3/\text{KMnO}_4$  αυξάνει την ποσότητα σιδήρου που θα μπορούσε να κατακρατηθεί στους πόρους του υλικού.

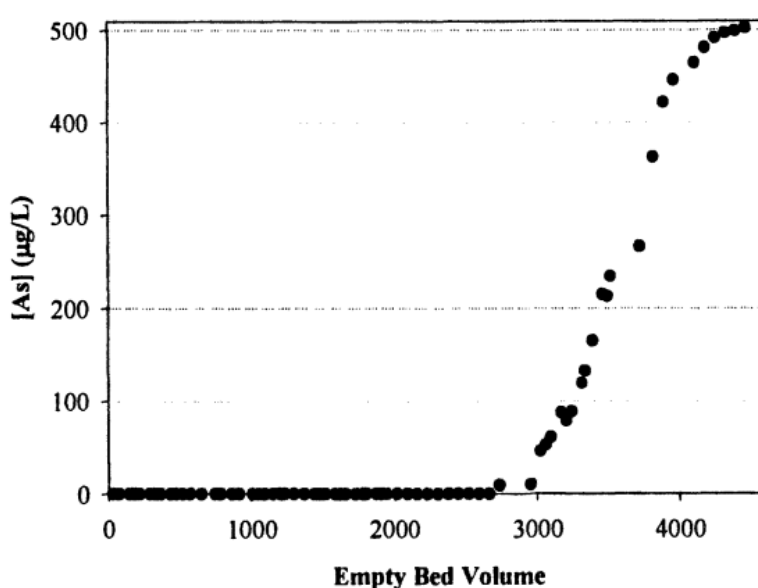
Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τον εμποτισμό του GAC με περισσότερο σίδηρο έτσι ώστε να αυξηθεί η ικανότητα προσρόφησης αρσενικού. Μια απλή μέθοδος ήταν η χρήση διαλύματος σιδήρου  $\text{Fe}^{3+}$  (π.χ. τριχλωριούχος σίδηρος) και η ιζηματοποίηση του  $\text{Fe}^{3+}$  σιδήρου στο GAC με ρύθμιση του pH (Payne, et al., 2005), (Chen, et al., 2007), (Jang, et al., 2008), (Zhang, et al., 2007), (Chang, et al., 2010). Υψηλή ποσότητα σιδήρου σε GAC, έως και 33,6%, επιτεύχθηκε με αυτήν τη μέθοδο (Chen, et al., 2007). Ωστόσο, ο εμποτισμένος σίδηρος εναποτέθηκε κυρίως στην εξωτερική επιφάνεια του GAC και όχι στην εσωτερική επιφάνεια επειδή τα ιζήματα του σιδήρου ήταν πολύ μεγάλα για να εισέλθουν στους πόρους του GAC (Gu, et al., 2005). Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης GAC λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειάς του σε σχέση με άλλα υλικά δεν χρησιμοποιήθηκε σωστά (Chen, et al., 2007), (Zhang, et al., 2007). Επιπλέον, ο εμποτισμένος σίδηρος στην εξωτερική επιφάνεια ήταν ευαίσθητος σε προβλήματα σταθερότητας και έχασε την ικανότητα προσρόφησης σε δοκιμές με στήλες (Chen, et al., 2007), (Thirunavukkarasu, et al., 2003), (Chang, et al., 2010).

Για να επιτευχθεί καλύτερη κατανομή σιδήρου μέσα στο GAC, μια άλλη μέθοδος πρότεινε τη χρήση δισθενούς σιδήρου ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ως πρόδρομου και ακολουθούμενη από μια *in situ* οξείδωση του  $\text{Fe}^{2+}$  σε  $\text{Fe}^{3+}$  (Gu, et al., 2005), (Hristovski, et al., 2009). Αυτή η προσέγγιση ήταν σε θέση να εμποτίσει το σίδηρο μέσα στο GAC. Ωστόσο, όταν η περιεκτικότητα σε σίδηρο ήταν 7% ή μεγαλύτερη, σχηματίστηκε ένας συμπυκνωμένος δακτύλιος σιδήρου στο εξωτερικό των σωματιδίων GAC (Gu, et al., 2005). Μέχρι σήμερα, παραμένει μια πρόκληση ο εμποτισμός του GAC με υψηλή ποσότητα σιδήρου που να είναι σταθερά και ομοιόμορφα κατανεμημένη στο εσωτερικό του GAC.

Επιπλέον, καθώς οι περισσότερες έρευνες επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη μεθόδων εμποτισμού, υπάρχει έλλειψη κατανόησης για το πώς τα χαρακτηριστικά του σιδήρου, όπως η ποσότητα, η μορφολογία, η κατανομή και το είδος, επηρεάζουν τη συμπεριφορά προσρόφησης αρσενικού σε GAC εμποτισμένο με σίδηρο (Fe -GAC) (Chang, et al., 2010).

### 5.2.3.1 Μελέτες - δοκιμές

Η αποτελεσματικότητα του GAC εμπλουτισμένου με σίδηρο για την επεξεργασία με αρσενικό διερευνήθηκε σε μια μελέτη στήλης που διήρκεσε συνολικά 31 ημέρες. Σε αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε μια σχετικά υψηλή συγκέντρωση εισροής αρσενικού (518  $\mu\text{g/L}$ ) στο νερό με σκληρότητα 260,3  $\text{mg/L}$  (ως  $\text{CaCO}_3$ ), αλκαλικότητα 110  $\text{mg/L}$  (ως  $\text{CaCO}_3$ ) και pH 7,85. Όπως αποδείχθηκε, το αρσενικό μπορούσε να αφαιρεθεί σε επίπεδα κάτω από 10  $\mu\text{g/L}$  για 2.950 BV μέχρι τον κορεσμό και η συνολική ποσότητα αρσενικού που αφαιρέθηκε έφτασε τα 3,92 mg ανά g προσροφητικού. Όπως φαίνεται από την «break-through» καμπύλη του αρσενικού (Σχήμα 5.8) η εμφάνιση αρσενικού στην εκροή ξεκίνησε μετά τα 2.950 EBV. Σε εκείνο το χρονικό σημείο, η συνολική ποσότητα αρσενικού που είχε προσροφηθεί ήταν 3,10 mg As/g προσροφητικού. Η συγκέντρωση αρσενικού στην εκροή αυξήθηκε στα 500  $\mu\text{g/L}$  σε περίπου 4.500 EBV.



**Σχήμα 5.8:** Συγκέντρωση αρσενικού στα λύματα ως συνάρτηση του όγκου κενού κλίνης.  
*Πηγή Σχήματος:* (Deng, et al., 2005)

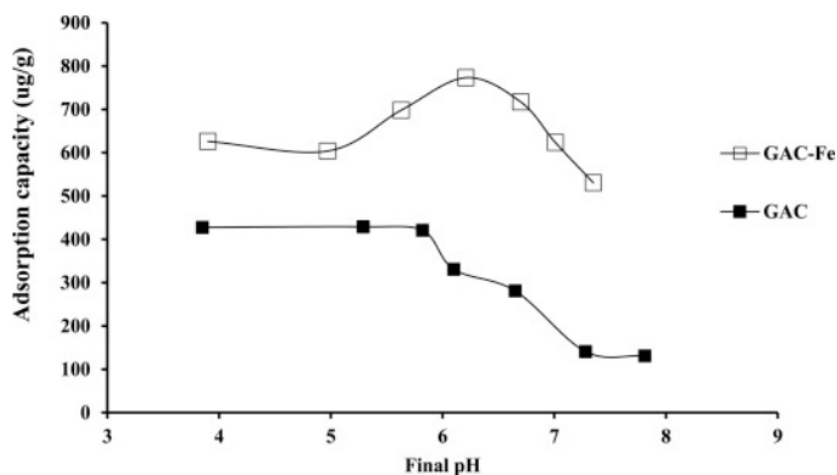
Αυτό το αποτέλεσμα έδειξε ξεκάθαρα ότι ο ενεργός άνθρακας εμποτισμένος με σίδηρο που εξετάστηκε σε αυτή τη μελέτη είχε πολύ υψηλότερη ικανότητα προσρόφησης από τον αντίστοιχο σκέτο ενεργό άνθρακα που δοκιμάστηκε (Deng, et al., 2005).



Σε άλλη μελέτη, με GAC εμπλουτισμένο με σίδηρο, το αρσενικό παρέμεινε κάτω από 10  $\mu\text{g/L}$  έως ότου φτάσει τους 12.000 όγκους κλίνης κατά τη διάρκεια δοκιμών μικρής κλίμακας χρησιμοποιώντας υπόγεια ύδατα (40-60  $\mu\text{g/L}$  αρσενικό και pH 7,6-8,0). Οι τιτλοδοτήσεις Boehm έδειξαν ότι η επιφανειακή οξείδωση αύξησε πολύ τη συγκέντρωση καρβοξυλικών και φαινολικών επιφανειακών ομάδων. Αυτοί οι εμποτισμένοι με σίδηρο άνθρακες έφτασαν τους 25.000–34.000 όγκους κλίνης μέχρι να ξεπεραστεί το όριο των 10  $\mu\text{g/L}$  αρσενικού (Chen, et al., 2007).

### 5.2.3.2 Επίδραση pH

Όσον αφορά την επίδραση του pH, η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι η χημική αντίδραση ήταν η κύρια κινητήρια δύναμη για την προσρόφηση και η αύξηση του pH οδήγησε σε αύξηση των αρνητικών φορτίων στην επιφάνεια, τα οποία με τη σειρά τους προώθησαν την απώθηση των αρσενικών ιόντων από την επιφάνεια του προσροφητικού μέσου και τελικά μείωσε την προσρόφηση του με την αύξηση του pH.



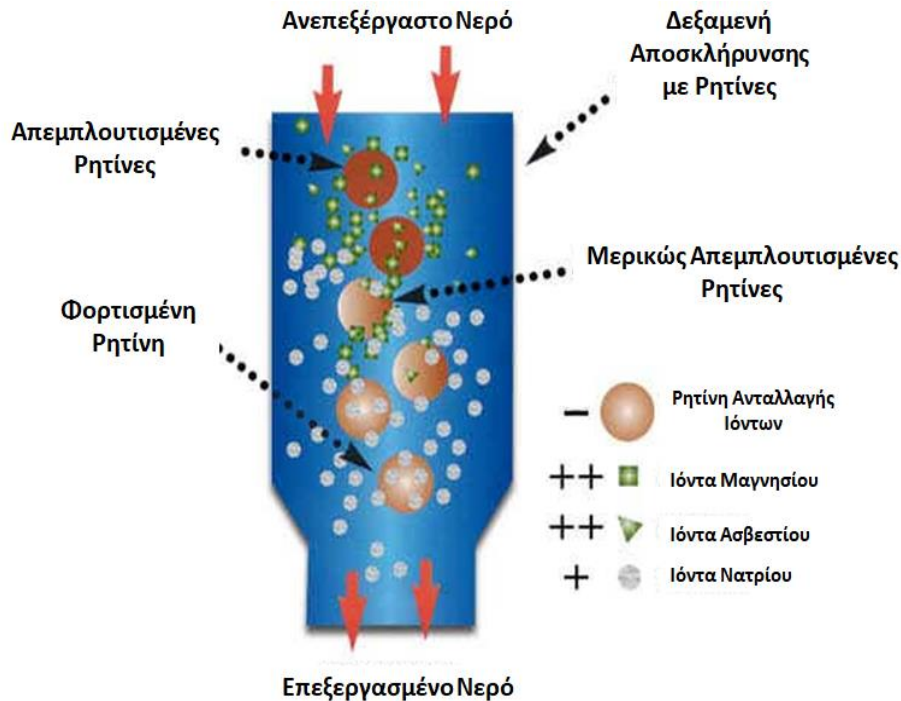
**Σχήμα 5.9:** Επίδραση του pH στην προσρόφηση αρσενικού μέσω GAC όσο και στον εμποτισμένο με σίδηρο GAC (GAC-Fe). Για τα παραπάνω αποτελέσματα παράμετροι όπως η συγκέντρωση αρσενικού και ο χρόνος επαφής ορίστηκαν στα 40  $\text{mg/L}$  και στις 6 ώρες.

*Πηγή Σχήματος: (Kalaruban, et al., 2019)*

### 5.3 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΣΩ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΙΟΝΤΩΝ (ΑΙ)

Η ανταλλαγή ιόντων είναι μια φυσική/χημική διεργασία με την οποία ένα ιόν στη στερεά φάση ανταλλάσσεται με ένα ιόν στο νερό τροφοδοσίας. Αυτή η στερεά φάση είναι τυπικά μια συνθετική ρητίνη η οποία έχει επιλεγεί για να προσροφήσει κατά προτίμηση τον ρύπο ενδιαφέροντος. Για να επιτευχθεί αυτή η ανταλλαγή ιόντων, το νερό τροφοδοσίας διέρχεται συνεχώς μέσω μιας κλίνης σφαιριδίων ιοντοανταλλακτικής ρητίνης σε λειτουργία καθοδικής ή ανοδικής ροής μέχρι να εξαντληθεί η ρητίνη. Η εξάντληση συμβαίνει όταν όλες οι θέσεις στα σφαιρίδια ρητίνης έχουν γεμίσει με ιόντα ρύπανσης. Σε αυτό το σημείο, η κλίνη αναγεννιέται με έκπλυση της στήλης με ένα αναγεννητικό - ένα συμπυκνωμένο διάλυμα ιόντων που ανταλλάσσονται αρχικά από τη ρητίνη. Ο αριθμός των όγκων κλίνης που μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία πριν από την εξάντληση ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο της ρητίνης και την ποιότητα του εισερχόμενου νερού. Τυπικά, από 300 έως 60.000 BV μπορούν να επεξεργαστούν πριν απαιτηθεί αναγέννηση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αναγέννηση της κλίνης μπορεί να επιτευχθεί με μόνο 1 έως 5 BV αναγεννητικού και 2 έως 20 BV νερού έκπλυσης.

Η ανταλλαγή ιόντων έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και πολλά χρόνια για την αποσκλήρυνση του οικιακού νερού (ανταλλαγή κατιόντων), να αφαιρώσει το νερό, να αφαιρέσει νιτρικά άλατα (ανταλλαγή ανιόντων) και για άλλες εφαρμογές επεξεργασίας νερού (Kartinen, και συν., 1995), (USEPA, 2001). Η ανταλλαγή ιόντων μπορεί να είναι μια βιώσιμη διεργασία και για την απομάκρυνση του αρσενικού από τα φυσικά νερά. Πειραματική εργασία που έγινε, έδειξε ότι η ανταλλαγή ιόντων μπορεί να επιτύχει μειώσεις αρσενικού άνω του 95% και μπορεί να παράγει επεξεργασμένο νερό με συγκέντρωση αρσενικού μικρότερη από 2 µg/L (Kartinen, et al., 1995). Για την αφαίρεση του αρσενικού, τοποθετείται σε δοχεία μια ιοντοανταλλακτική ρητίνη, συνήθως φορτωμένη με ιόντα χλωρίου στις «θέσεις ανταλλαγής». Το αρσενικό που εμπεριέχεται στο νερό περνά μέσα από τα δοχεία και «ανταλλάσσεται» με τα ιόντα χλωρίου. Το νερό που εξέρχεται από το δοχείο είναι χαμηλότερο σε αρσενικό αλλά υψηλότερο σε χλωριόντα από το νερό που εισέρχεται στο δοχείο. Τελικά, η ρητίνη "εξαντλείται" (Crittenden, et al., 2012) (Kartinen, et al., 1995). Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.10), δίνεται ένα παράδειγμα ανταλλαγής ιόντων μέσω ρητινών με ιόντα μαγνησίου, ασβεστίου, νατρίου αντίστοιχα του χλωρίου και του αρσενικού.



**Σχήμα 5.10:** Μοντέλο ανταλλαγής ιόντων μέσω ρητινών

*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://umaine.edu/arsenic/treatment-options-and-technologies/>

Όπως και με τις άλλες διεργασίες αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι σημαντικό το αρσενικό να έχει κατάσταση οξείδωσης ( $5^+$ ) και το pH να είναι τουλάχιστον 7,5 προκειμένου να επιτευχθούν οι καλύτεροι ρυθμοί απομάκρυνσης. Δεδομένου ότι η ανταλλαγή ιόντων είναι αποτελεσματική μόνο στην απομάκρυνση ιόντων από το νερό, μόνο το αρσενικό που είναι σε ιοντική μορφή (έχει ηλεκτρικό φορτίο - αρνητικό στην περίπτωση αυτή, καθώς οι ιονισμένες μορφές του αρσενικού είναι ανιόντα) μπορεί να ανταλλάσσεται με χλωρίδιο σε αυτή τη διαδικασία. Η χλωρίωση του νερού τροφοδοσίας θα αναγκάσει το αρσενικό να πάρει μια ( $5^+$ ) κατάσταση οξείδωσης. Σε pH πάνω από περίπου 7,5, το μεγαλύτερο μέρος του αρσενικού αναμένεται να είναι παρόν είτε ως  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  είτε ως  $\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$ , και επομένως είναι ευαίσθητο στην απομάκρυνση με ανταλλαγή ιόντων. Μια ανησυχία σχετικά με την ανάγκη χλωρίωσης ή οξείδωσης του αρσενικού για την επίτευξη κατάστασης οξείδωσης ( $5^+$ ) είναι ότι οι ρητίνες ανταλλαγής ιόντων, κατά κανόνα, υπόκεινται σε αποικοδόμηση από οξειδωτικά μέσα. Έτσι, η ανάγκη οξείδωσης του αρσενικού θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφή της ρητίνης (Kartinen, et al., 1995).

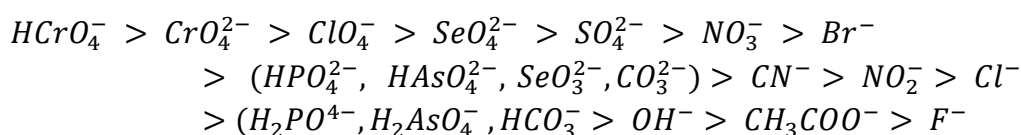
Τα ζητήματα σχεδιασμού για την απομάκρυνση του αρσενικού με ανταλλαγή ιόντων περιλαμβάνουν το pH, την κατάσταση οξείδωσης του αρσενικού, τον τύπο ρητίνης, τα ανταγωνιστικά ιόντα, την ισχύ και τον χρόνο επαφής κενής κλίνης για αναγέννηση (EBCT: Empty-Bed Contact Time), την αλκαλικότητα και τη συγκέντρωση αρσενικού που εισέρχεται καθώς και τις απαιτήσεις αναγέννησης και διάθεσης ρητίνης (Crittenden, et al., 2012), (EPA, 2000).

### 5.3.1 Επίδραση pH

Η χημική αντίδραση ανταλλαγής χλωρίου-αρσενικού τυπικά συμβαίνει στην περιοχή από pH 8 έως 9 όταν χρησιμοποιούνται χλωριούχου-μορφής, ισχυρής βάσης ρητίνες (Clifford, et al., 1995). Ωστόσο, οι αφαιρέσεις αρσενικού με ρητίνες ισχυρής βάσης, τυπικά δεν είναι ευαίσθητες σε pH στην περιοχή από 6,5 έως 9,0 (Clifford, et al., 1998). Εκτός αυτού του εύρους, η αφαίρεση του αρσενικού μειώνεται γρήγορα. Τα υπόγεια ύδατα που είναι φυσικά ρυπασμένα με αρσενικό παρουσιάζουν συνήθως αρκετά υψηλό pH, δίνοντας στην ΑΙ ένα μικρό πλεονέκτημα για τους τύπους πηγής νερού. Η ρύθμιση του pH πριν από την ΑΙ για την απομάκρυνση του αρσενικού γενικά δεν είναι απαραίτητη, αλλά για νερά που έχουν υψηλό pH και αλκαλικότητα, καθώς και χαμηλή συγκέντρωση θεικών, το As[V] μπορεί να υποστεί αποτελεσματική επεξεργασία με ρητίνη ανταλλαγής ανιόντων χλωρίου (Crittenden, et al., 2012).

### 5.3.2 Επίδραση ανταγωνιστικών ιόντων

Ο ανταγωνισμός από ήδη υπάρχοντα ιόντα στο ανεπεξέργαστο νερό (ιόντα υποβάθρου) για θέσεις ανταλλαγής μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα, καθώς και την οικονομία, των συστημάτων ΑΙ. Το επίπεδο αυτών των ρύπων υποβάθρου μπορεί να καθορίσει τη δυνατότητα εφαρμογής της επεξεργασίας με ΑΙ σε όποια περίπτωση. Τυπικά, οι ρητίνες ανταλλαγής ανιόντων ισχυρής βάσης χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του αρσενικού. Οι ρητίνες αυτές τείνουν να είναι πιο αποτελεσματικές σε μεγαλύτερο εύρος pH από τις ρητίνες ασθενούς βάσης. Η σειρά ανταλλαγής για τις περισσότερες ρητίνες ισχυρής βάσης δίνεται παρακάτω, με την προτίμηση προσρόφησης να είναι μεγαλύτερη για τα συστατικά από τα αριστερά προς τα δεξιά.



Αυτές οι ρητίνες έχουν σχετικά υψηλή συγγένεια με το αρσενικό όταν η μορφή του αρσενικού είναι  $HAsO_4^{2-}$ , ωστόσο, προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι τα υψηλά επίπεδα TDS και θεικών αλάτων ανταγωνίζονται με το αρσενικό και μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης (AWWA, 1990). Τα υψηλά επίπεδα TDS (Total Dissolved Solids: Ολικά Διαλυμένα Στερεά), σεληνίου, θεικού, φθορίου και νιτρικών που περιέχονται στο νερό μπορούν να επηρεάσουν τη διάρκεια ζωής της ρητίνης, η οποία χρησιμοποιείται κατά τη διεργασία της ΑΙ. Η απόρριψη αναλωμένου αναγεννητικού υψηλής συγκέντρωσης σε αρσενικό, είναι ένα σοβαρό πρόβλημα (Pal, 2001). Επομένως, για νερά που περιέχουν υψηλά επίπεδα θεικών και TDS, η ανταλλαγή ιόντων μπορεί να μην είναι βιώσιμη μια διεργασία (Clifford, et al., 1998). Για νερά με συγκεντρώσεις ολικών διαλυμένων στερεών (TDS) μικρότερες από περίπου 500 mg/L και συγκεντρώσεις θεικών ιόντων μικρότερες από περίπου 120 mg/L,

η ανταλλαγή ανιόντων μπορεί να είναι μια οικονομικά ελκυστική διεργασία για την απομάκρυνση του αρσενικού (Frey, et al., 1997). Γενικά, έχει τεκμηριωθεί από μελέτες ότι η ανταλλαγή ιόντων για την απομάκρυνση του αρσενικού ισχύει μόνο για νερά με χαμηλή περιεκτικότητα σε TDS και χαμηλή περιεκτικότητα σε θειικά άλατα (EPA, 2000). Σε χαμηλές συγκεντρώσεις TDS και θεικών ο ανταγωνισμός για θέσεις ανταλλαγής ρητίνης με αρσενικό είναι χαμηλός και μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική ανταλλαγή για το αρσενικό. Μελέτη στο Hanford, CA έδειξε ότι όταν το νερό πηγής είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε θειικά/ TDS είναι επιδεκτικό στην επεξεργασία με AI, ενώ μια μελέτη στο San Ysidro, NM απέδειξε ότι όταν το νερό πηγής είναι υψηλής περιεκτικότητας σε θειικά/ TDS χαρακτηρίζεται ως ακατάλληλο για επεξεργασία με AI (Clifford, et al., 1986), (Clifford, et al., 1995).

Εάν γίνεται απομάκρυνση νιτρικών ταυτόχρονα με την αφαίρεση του αρσενικού, το επίπεδο θεικών μπορεί επίσης να είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην απομάκρυνση του αρσενικού. Οι (Clifford, et al., 1998) έδειξαν ότι όταν τα επίπεδα θεικών αλάτων είναι χαμηλά (περίπου 40 mg/L), ο αριθμός των BV μέχρι εξάντλησης της ρητίνης περιορίζεται από την εμφάνιση νιτρικών. Εάν το επίπεδο θεικού άλατος είναι υψηλό (περίπου 100 mg/L), ο αριθμός των BV μέχρι εξάντλησης της κλίνης περιορίζεται από την παρουσία αρσενικού. Με άλλα λόγια, το θεικό ανταγωνίζεται τόσο τα νιτρικά όσο και το αρσενικό, αλλά ανταγωνίζεται πιο επιθετικά το αρσενικό από τα νιτρικά.

Η παρουσία σιδήρου, Fe(III), στο νερό τροφοδοσίας μπορεί επίσης να επηρεάσει την απομάκρυνση του αρσενικού. Όταν υπάρχει Fe(III), το αρσενικό μπορεί να σχηματίσει σύμπλοκα με σίδηρο. Αυτά τα σύμπλοκα δεν αφαιρούνται από τις ρητίνες της AI και επομένως το αρσενικό δεν απομακρύνεται. Οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας με ύδατα πηγής υψηλής περιεκτικότητας σε Fe(III) μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπίσουν αυτό το ζήτημα πριν τη χρήση AI ή να αξιολογήσουν άλλες τεχνικές επεξεργασίας για την αφαίρεση του αρσενικού (Clifford, et al., 1998).





Όταν ένα άλλο ιόν προτιμάται αντί για το αρσενικό ιόν ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ), τότε μπορεί να εμφανιστούν υψηλότερα επίπεδα αρσενικού στο τελικό επεξεργασμένο νερό από αυτά που υπάρχουν στο ανεπεξέργαστο νερό. Για παράδειγμα, εάν μια ρητίνη προτιμά τα θειικά έναντι του αρσενικού, τα θειικά ιόντα μπορεί να εκτοπίσουν τα προηγουμένως απορροφημένα αρσενικά ιόντα, με αποτέλεσμα τα επίπεδα αρσενικού στην εκροή να είναι μεγαλύτερα από αυτά του αρσενικού στην εισροή. Αυτό αναφέρεται συχνά ως χρωματογραφική αιχμή. Ως αποτέλεσμα, η κλίση πρέπει να παρακολουθείται και να αναγεννάται πριν από την έναρξη αυτής της κορύφωσης. Οι (Clifford, et al., 1995) προτείνουν τη λειτουργία της κλίνης AI σε δεδομένο σημείο ρύθμισης BV για να αποφευχθεί αυτή η αιχμή.

### 5.3.3 Τύπος ρητίνης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ρητίνες ισχυρής βάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στην αφαίρεση αρσενικού με ΑΙ. Αυτές οι ρητίνες, ωστόσο, τείνουν να προτιμούν ορισμένα ιόντα, πιο συγκεκριμένα θειικά και χλωριούχα, έναντι του αρσενικού. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε χρωματογραφική αιχμή εάν οι κλίνες δεν παρακολουθούνται επαρκώς. Πρόσφατες μελέτες έχουν επίσης βρει ότι οι επιλεκτικές σε θειικά ρητίνες (sulfate-selective) τείνουν να είναι ανώτερες από τις επιλεκτικές σε νιτρικά ρητίνες (nitrate-selective) για την αφαίρεση του αρσενικού (Clifford, et al., 1998), (EPA, 2000).

Πολλές ρητίνες είναι διαθέσιμες για αφαίρεση αρσενικού. Μερικές από τις εμπορικά διαθέσιμες ρητίνες που έχουν χρησιμοποιηθεί σε σχετικές μελέτες ΑΙ συνοψίζονται στον Πίνακα 5.6. Τα δεδομένα στον Πίνακα 5.6 αντιπροσωπεύουν ΒV μέχρι εξάντλησης χρησιμοποιώντας καθαρές ρητίνες. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η χωρητικότητα της κλίνης μπορεί να μειωθεί ελαφρώς με την πάροδο του χρόνου. Η επιλογή της ρητίνης θα είναι τελικά συγκεκριμένη για την κάθε περίπτωση, καθιστώντας τις προκαταρκτικές μελέτες αναγκαιότητα για τον προσδιορισμό του βέλτιστου τύπου ρητίνης.

**Πίνακας 5.6:** Τυπικές Ρητίνες ΑΙ για Αφαίρεση Αρσενικού (EPA, 2000)

Ρητίνη	Τύπος	Παράμετροι λειτουργίας	ΒV μέχρι την εξάντληση	Αναφορά
Dowex 11	2	Όγκος κλίνης: 0.8 cu ft Ρυθμός ροής: 1 gpm EBCT: 5.6 min Βάθος: 2.5 - 5 ft Αναλογία Θεικό/As: 60:1 Αναλογία TDS/As: 2500:1	4.200	Clifford and Lin (1986)
Ionac ASB-2	2	Όγκος κλίνης: 0.8 cu ft Ρυθμός ροής: 1 gpm EBCT: 5.6 min Βάθος: 2.5 - 5 ft Αναλογία Θεικό/As: 60:1 Αναλογία TDS/As: 2500:1	4.940	
Dowex SBR-1	1	Όγκος κλίνης: 1 cu ft Ρυθμός ροής: 1 gpm EBCT: 7.5 min Βάθος: 3.8 ft Αναλογία Θεικό/As: NR Αναλογία TDS/As: NR	2.800	Hathaway and Rubel (1987) Fox (1989)
Ionac ASB-1 - and - Dowex 11	1	Όγκος κλίνης: 0.014 cu ft Ρυθμός ροής: NR EBCT: NR Βάθος: NR Αναλογία Θεικό/As: 420:1 Αναλογία TDS/As: 9.200:1	200 400-500 προβάλλεται εάν το As(III) οξειδωθεί σε As(V)	Clifford and Lin (1985)
 A-300E (bench-scale)  A-300E (full-scale)	2	Όγκος κλίνης: 0.0018 cu ft Ρυθμός ροής: 0.035 gpm EBCT: NR Βάθος: 1.33 ft Αναλογία Θεικό/As: 420:1 Αναλογία TDS/As: 9.200:1	 1.340-1.640  5.000-7.000	Malcolm Pirnie (1992)

NR: Non Reported

### 5.3.4 Διαμόρφωση διεργασίας

Η σωστή διαμόρφωση των στηλών ΑΙ μπορεί να βελτιώσει την αφαίρεση του αρσενικού και να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση της συχνότητας αναγέννησης. Αυτό συμβαίνει επειδή η «διαρροή» αρσενικού εμφανίζεται συχνά σε στήλες ΑΙ. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να χρειαστεί σειριακή λειτουργία ή εφαρμογή ορισμένων μεθόδων λειτουργίας για την επίτευξη χαμηλών επιπέδων αρσενικού.

Η λειτουργία σε σειρά, χρησιμοποιεί τρεις κλίνες: δύο σε λειτουργία παραγωγής και ένα σε λειτουργία αναγέννησης στη δεδομένη στιγμή. Όταν εξαντληθεί η ικανότητα ανταλλαγής της πρώτης κλίνης στη σειρά, η πρώτη κλίνη αφαιρείται από τη λειτουργία για να αναγεννηθεί. Στη συνέχεια, η δεύτερη κλίνη στη σειρά γίνεται πρώτη και η πρόσφατα αναγεννημένη κλίνη τίθεται σε λειτουργία και γίνεται πλέον δεύτερη σε σειρά. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της μέγιστης ικανότητας ανταλλαγής των κλινών και αποτρέπει τη διαρροή, καθώς μια φρέσκια κλίνη είναι πάντα τελευταία στη σειρά. Αυτό βοηθά επίσης στην ελαχιστοποίηση της συχνότητας αναγέννησης (EPA, 1995).

Μια άλλη προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση των επιπέδων εκροής είναι η λειτουργία των στηλών ΑΙ με τέτοιο τρόπο, που το νερό τροφοδοσίας να εφαρμόζεται προς μία κατεύθυνση (π.χ. προς τα κάτω) και το αναγεννητικό μέσο να εφαρμόζεται στην αντίθετη κατεύθυνση (π.χ. προς τα πάνω) (μέθοδος αντίθετων ροών). Αυτό ελαχιστοποιεί τη διαρροή από τη στήλη. Συνήθως οι στήλες σχεδιάζονται για λειτουργία όπου το νερό τροφοδοσίας και το αναγεννητικό υλικό εφαρμόζονται στην ίδια κατεύθυνση (μέθοδος συντρεχουσών ροών). Ωστόσο, αυτή η λειτουργία αυξάνει τις πιθανότητες διαρροής, καθώς η αναγέννηση με αυτόν τον τρόπο λειτουργίας συγκεντρώνει τη ρύπανση στο άκρο εκροής της στήλης. Η χρήση της μεθόδου αντίθετων ροών ελαχιστοποιεί επίσης τις απαιτήσεις αναγέννησης, δηλαδή τον όγκο και τη συγκέντρωση (EPA, 1995).

### 5.3.5 Δευτερεύουσες Επιδράσεις

Οι ρητίνες με χλωριόντα χρησιμοποιούνται συχνά για την αφαίρεση του αρσενικού. Τα ιόντα χλωρίου μετατοπίζονται από τη στήλη καθώς οι προσμείξεις αρσενικού απορροφώνται στη στήλη. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει η δυνατότητα για αυξήσεις στη συγκέντρωση χλωριόντων του νερού εκροής. Αυξήσεις στα χλωριόντα μπορούν να προκαλέσουν και σημαντικές αυξήσεις στη διαβρωτική ικανότητα του νερού που προκύπτει ως προϊόν. Τα χλωριόντα αυξάνουν το δυναμικό διάβρωσης του σιδήρου και ως αποτέλεσμα αυξάνουν τη δυνατότητα για προβλήματα «κόκκινου νερού» (EPA, 1995). Τα προβλήματα διάβρωσης επιδεινώνονται όταν τα υψηλά επίπεδα χλωρίου είναι διακοπτόμενα. Σε περιπτώσεις όπου τα χλωρίδια δημιουργούν πρόβλημα, μπορεί να απαιτούνται τεχνικές ελέγχου διάβρωσης μετά την επεξεργασία.

Επίσης, το pH των εκροών μπορεί να μειωθεί ως αποτέλεσμα της επεξεργασίας με ΑΙ. Το pH του νερού του προϊόντος μπορεί να είναι μικρότερο από 7. Και πάλι, οι μειώσεις του pH μπορεί να αυξήσουν τη διαβρωτική ικανότητα του νερού εκροής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η επανασταθεροποίηση του pH μπορεί να είναι απαραίτητη για την αποφυγή διαταραχών στο σύστημα διανομής.

### 5.3.6 Έμφραξη ρητίνης

Τα σφαιρίδια ρητίνης ΑΙ μπορεί να φράξουν εάν δεν εφαρμοστεί η κατάλληλη προεπεξεργασία. Γενικά, το φράξιμο των ρητινών προκαλείται από επικαθίσεις αλάτων (π.χ. Ca) ή από στερεά στο ανεπεξέργαστο νερό εισροής. Τα ιζήματα σιδήρου είναι επίσης γνωστό ότι προκαλούν φράξιμο της ρητίνης (Malcolm Pirnie, 1993). Εάν οι επικαθίσεις είναι το πρόβλημα, μπορεί να χρειαστεί προσθήκη χημικού για να μειωθεί το δυναμικό σχηματισμού αλάτων του νερού τροφοδοσίας. Εάν βρεθούν αιωρούμενα στερεά στο νερό τροφοδοσίας, μπορεί να είναι απαραίτητη η διύλιση πριν από τις στήλες ΑΙ. Μια μελέτη που διεξήχθη στο Χάνφορντ της Καλιφόρνια διαπίστωσε ότι η ρητίνη ΑΙ ήταν σημαντικά φραγμένη από τη σκόνη μαρμαρυγίας που υπήρχε στο νερό της πηγής. Αυτό υποδεικνύεται από μια μείωση 3-5 % του συνολικού όγκου κλίνης μέχρι εξάντλησης μετά από διαδοχικούς κύκλους και από μια μαύρη επιστρωση στην εξαντλημένη ρητίνη. Το μεγαλύτερο μέρος, αλλά όχι όλο, της μαύρης επικάλυψης θα μπορούσε να αφαιρεθεί από τα σφαιρίδια της ρητίνης κατά τη διάρκεια του κύκλου αναγέννησης με NaCl (Clifford, et al., 1986).

### 5.3.7 Αναγέννηση

Στις ρητίνες χλωριούχου τύπου, χρησιμοποιείται συνήθως ως αναγεννητικό το πυκνό διάλυμα NaCl. Μόνο ένας μικρός αριθμός BV αναγεννητικού συνήθως απαιτείται για την αναγέννηση της ρητίνης, ανάλογα με την ισχύ του διαλύματος. Το αρσενικό ξεπλένεται εύκολα από τις στήλες, ανεξάρτητα από τον τύπο της ρητίνης, κυρίως επειδή είναι δισθενές ιόν και ως τέτοιο υπόκειται σε αντίστροφη επιλεκτικότητα σε διάλυμα υψηλής ιοντικής ισχύος (> 1M). Επίσης, τα αραιωμένα αναγεννητικά τείνουν να είναι πιο αποτελεσματικά από τα συμπυκνωμένα αναγεννητικά όσον αφορά την αναλογία των ισοδυνάμων αναγέννησης προς τα ισοδύναμα ρητίνης (Clifford, et al., 1995). Για παράδειγμα, βρήκαν ότι δύο ρητίνες (Dowex-11 και Ionac ASB-2) θα μπορούσαν να αναγεννηθούν ισοδύναμα χρησιμοποιώντας είτε 2 BV 1,0 N NaCl είτε 5 BV 0,25 N NaCl σε λειτουργία «συντρέχουσας ροής». Επίσης, απαιτείται κύκλος ξεβγάλματος μετά την αναγέννηση. Συνήθως απαιτούνται μόνο λίγα BV για το ξέπλυμα.

### 5.3.8 Επεξεργασία και Επαναχρησιμοποίηση του αναγεννητικού υλικού

Το διάλυμα χρησιμοποιημένου αναγεννητικού, το οποίο παράγεται κατά την αναγέννηση μιας κλίνης ΑΙ, πιθανότατα θα περιέχει υψηλά επίπεδα αρσενικού και άλλων προσροφημένων ρύπων που τα καθιστούν επικίνδυνα απόβλητα και που πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία πριν από την κατάλληλη απόρριψή τους



(USEPA, 2001). Το υλικό αυτό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί πολλές φορές. Οι (Clifford, et al., 1998) εκτιμούν ότι τα αναγεννητικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν 25 φορές ή περισσότερες προτού απαιτηθεί επεξεργασία και απόρριψη. Τα αναγεννητικά δεν χρειάζονται επεξεργασία πριν από την επαναχρησιμοποίηση, εκτός από την αναπλήρωση της συγκέντρωσης χλωριούχων για τη διατήρηση ενός διαλύματος 1 M. Μόλις η συγκέντρωση ρύπων γίνει πολύ υψηλή στο αναγεννητικό, το αναλωμένο διάλυμα πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία και να απορριφθεί.

Το χρησιμοποιημένο διάλυμα μπορεί να αντιμετωπιστεί με ιζηματοποίηση και καθίζηση. Οι (Clifford, et al., 1995) έχουν δείξει ότι τα επίπεδα αρσενικού μπορούν να μειωθούν σημαντικά χρησιμοποιώντας κροκιδωτικά σιδήρου και αλουμινίου καθώς και ασβέστη. Ωστόσο, στην πράξη απαιτούνται πολύ μεγαλύτερες από τις στοιχειομετρικές ποσότητες από αυτές των στοιχειομετρικών αντιδράσεων (έως και 20 φορές περισσότερες), για να μειωθεί το αρσενικό σε χαμηλά επίπεδα. Επιπλέον, μπορεί να είναι απαραίτητη η ρύθμιση του pH για να διασφαλιστούν οι βέλτιστες συνθήκες ιζηματοποίησης. Μειώσεις από 90 mg As(V)/L σε λιγότερο από 1,5 mg As(V)/L έχουν παρατηρηθεί χρησιμοποιώντας άλατα μετάλλων σιδήρου και αλουμινίου (Clifford, et al., 1995). Και οι δύο τύποι κροκιδωτικών φαίνεται να λειτουργούν καλά, ωστόσο, τα ιζήματα σιδήρου τείνουν να καθιζάνουν καλύτερα λόγω του βάρους τους. Αποξηραμένη ιλύς από υπόλειμμα που μειώθηκε σε 1,5 mg As(V)/L χρησιμοποιώντας κατακρήμνιση πέρασε σε δοκιμή τοξικότητας EP με μόνο 1,5 mg/L As(V) στα στραγγίδια. Σε αυτήν την περίπτωση, η αποξηραμένη ιλύς θα μπορούσε να είχε απορριφθεί σε χώρο υγειονομικής ταφής. Το πρόβλημα με αυτήν την επιλογή είναι ότι το υπόλειμμα πριν από τη χημική κατακρήμνιση θα μπορούσε να θεωρηθεί επικίνδυνο απόβλητο. Τα υπολείμματα με συγκεντρώσεις αρσενικού μεγαλύτερες από 5 mg/L μπορούν να θεωρηθούν επικίνδυνα απόβλητα. Δεδομένου ότι το αρσενικό θα συγκεντρωθεί ακόμη περισσότερο στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης του υπολείμματος, καλό είναι να μην χρησιμοποιηθεί εκτός εάν το υπόλειμμα μπορεί να περάσει από περαιτέρω επεξεργασία POTW (Publicly-Owned Treatment Works). Το περιεχόμενο TDS της άλμης μπορεί να περιορίσει αυτήν την επιλογή.

### 5.3.9 EBCT

Για να ελεγχθεί η επίδραση του EBCT στην απόδοση της AI έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες μελέτες. Οι (Clifford, et al., 1986) μείωσαν το EBCT από 5 σε 1,4 λεπτά και δεν βρήκαν σημαντική μείωση στην απόδοση αφαίρεσης αρσενικού. Σε άλλη μελέτη της AWWARF, εκτελέστηκαν δοκιμές σε τέσσερις στήλες AI με EBCT που κυμαίνονταν μεταξύ 2,5 και 15 λεπτών. Τα δεδομένα από αυτή τη μελέτη δείχνουν ότι όσο πιο σύντομο είναι το EBCT, τόσο περισσότεροι όγκοι κλινών μπορούσαν να καθαριστούν πριν από τον κορεσμό της κλίνης. Το μειονέκτημα για το μικρότερο EBCT, ωστόσο, είναι η αυξημένη συχνότητα

αναγέννησης. Με βάση αυτά τα δεδομένα, τα μικρότερα EBCT μπορεί να προτιμώνται για τη μείωση του κόστους κεφαλαίου (AWWARF, 1998).

### 5.3.10 Μελέτες πεδίου

Οι διεργασίες ανταλλαγής ανιόντων έχουν δείξει την ικανότητα να μειώνουν σταθερά τις συγκεντρώσεις αρσενικού κάτω από 3  $\mu\text{g/L}$ . Το Battelle Memorial Institute, μελέτησε δύο μονάδες ανταλλαγής ιόντων που βρίσκονται στη Νέα Αγγλία (Wang, et al., 2000). Το «τρένο» επεξεργασίας της μίας εγκατάστασης αποτελούνταν από φίλτρο «πράσινης άμμου» οξειδωμένης με υπερμαγγανικό κάλιο, ακολουθούμενο από μία κλίνη ανταλλαγής ιόντων. Αυτό το σύστημα αναγεννιόταν κάθε 6 ημέρες και μείωνε σταθερά τις εισερχόμενες συγκεντρώσεις αρσενικού των 40 έως 65  $\mu\text{g/L}$  σε κάτω από 5  $\mu\text{g/L}$ . Πράγματι, αυτό το σύστημα ήταν σε θέση να παράγει τελικό νερό με συγκεντρώσεις αρσενικού κάτω από 3  $\mu\text{g/L}$  για περίπου 30 εβδομάδες.

Η σειρά επεξεργασίας της δεύτερης εγκατάστασης επεξεργασίας νερού ενσωμάτωσε επίσης προοξειδωση, αποτελούμενη από ένα φίλτρο οξειδωτικών μέσων ακολουθούμενο από ένα σύστημα ανταλλαγής ανιόντων. Ωστόσο, αν και οι εισερχόμενες συγκεντρώσεις αρσενικού που αντιμετώπιζε αυτό το σύστημα δεν ήταν το ίδιο μεγάλες, δηλαδή κυμαίνονταν από 19 έως 55  $\mu\text{g/L}$ , όσο αυτές που χειριζόταν το πρώτο σύστημα ανταλλαγής ιόντων που αναφέρθηκε πριν, οι συγκεντρώσεις αρσενικού εκροής για αυτήν την εγκατάσταση δεν διατηρήθηκαν σε σταθερά χαμηλά επίπεδα και κυμαίνονταν από κάτω από 5  $\mu\text{g/L}$  έως περισσότερα από 80  $\mu\text{g/L}$ . Παρόλα αυτά, με βάση όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης, το δεύτερο σύστημα θα μπορούσε πρακτικά να επιτύχει επίπεδα αρσενικού στο νερό 5  $\mu\text{g/L}$  ή ακόμα και 3  $\mu\text{g/L}$ , εάν η αναγέννηση της κλίνης AI γινόταν με μεγαλύτερη συχνότητα (δηλαδή, κάθε 3 έως 4 εβδομάδες).

Αυτή η μελέτη έδειξε επίσης ότι η ανταλλαγή ιόντων έχει ελάχιστη επίδραση στο pH του νερού όταν χρησιμοποιείται για την επεξεργασία αρσενικού. Μετά την επεξεργασία, το μέσο pH μιας από τις δύο εγκαταστάσεις ήταν πανομοιότυπο με το μέσο pH εισροής (pH 7,5), ενώ το μέσο pH των εκροών από τη δεύτερη μονάδα ήταν μόνο ελαφρώς χαμηλότερο από αυτό της εισροής (pH 7,3 και pH 8,3, αντίστοιχα). Η ανάμειξη μέρους επεξεργασμένου νερού με ένα μέρος ανεπεξέργαστου νερού θα μειώσει τυχόν επιπτώσεις στο pH του τελικού νερού.

### 5.3.11 Τυπικές παράμετροι σχεδίασης

Μετά από εκτεταμένη έρευνα, οι (Clifford, et al., 1998) συγκέντρωσαν τυπικές παραμέτρους λειτουργίας και πρότειναν επιλογές για διεργασίες ανταλλαγής ιόντων. Αν και πολλές παράμετροι σχεδιασμού πρέπει να προσαρμόζονται στην εκάστοτε περίπτωση επεξεργασίας, ο Σχήμα 5.7 δίνει τυπικές τιμές και επιλογές.

**Πίνακας 5.7:** Τυπικές παράμετροι και επιλογές λειτουργίας για ΑΙ (EPA, 2000)

1,5 λεπτό EBCT (15 gpm/ft <sup>2</sup> at 3 ft/day)
0.5 - 1.0 M NaCl (1-2 eq Cl <sup>-</sup> /eq ρητίνη)
Λειτουργία στήλης σε ένα σταθερό τελικό σημείο BV (για την αποφυγή διαρροής)
Η ταχύτητα φόρτωσης της επιφάνειας αναγέννησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2 cm/min
Το αναγεννητικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί 25 φορές ή περισσότερες (με διατήρηση της συγκέντρωσης του Cl <sup>-</sup> σε 1 M)
Το πηκτικό σιδήρου πρέπει να χρησιμοποιείται για Fe(OH) <sub>3</sub> • As από αναγεννητικά απόβλητα



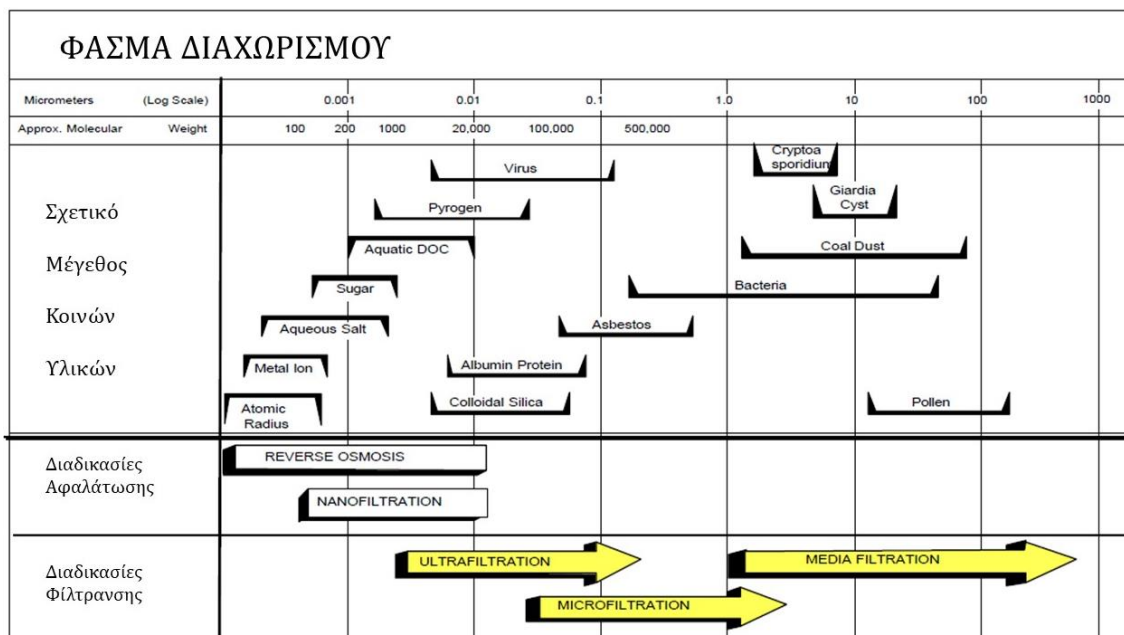
**Σχήμα 5.11:**

Σύστημα απομεταλλωτών, για απομάκρυνση αρσενικού, με ρητίνες ανταλλαγής ιόντων  
Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <https://www.saitaimpianti.com/en/demineralizers/>

## 5.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ

Οι μεμβράνες είναι ένα επιλεκτικό φράγμα, που επιτρέπει σε ορισμένα συστατικά να περάσουν ενώ εμποδίζουν τη διέλευση άλλων. Μπορούν να αντιμετωπίσουν πολλά προβλήματα ποιότητας του νερού, διατηρώντας παράλληλα την απλότητα και την ευκολία λειτουργίας. Η κίνηση των συστατικών κατά μήκος μιας μεμβράνης απαιτεί μια κινητήρια δύναμη, δηλαδή μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης. Οι διεργασίες μεμβράνης ταξινομούνται συχνά ανάλογα με τον τύπο της κινητήριας δύναμης, που κυρίως είναι η πίεση και το ηλεκτρικό δυναμικό.

Οι διεργασίες μεμβράνης που οδηγούνται από την πίεση συχνά ταξινομούνται ανάλογα με το μέγεθος των πόρων σε τέσσερις κατηγορίες: μικροδιήθηση (MF), υπερδιήθηση (UF), νανοδιήθηση (NF) και αντίστροφη ώσμωση (RO). Στις δύο πρώτες (MF και UF) απαιτείται μικρότερη πίεση, ενώ στις δύο δεύτερες (NF και RO) απαιτείται υψηλή πίεση λειτουργίας. Τα τυπικά εύρη ταξινόμησης μεγέθους πόρων δίνονται στο Σχήμα 5.12. Οι διεργασίες υψηλής πίεσης (NF και RO) έχουν σχετικά μικρό μέγεθος πόρων σε σύγκριση με τις διαδικασίες χαμηλής πίεσης (MF και UF). Τυπικές περιοχές πίεσης για αυτές τις διεργασίες δίνονται στον Πίνακα 5.8. Η NF και η RO αφαιρούν κυρίως τα συστατικά μέσω χημικής διάχυσης (Aptel, et al., 1996). Η MF και η UF αφαιρούν κυρίως τα συστατικά μέσω φυσικού κοσκινίσματος. Ένα πλεονέκτημα των διεργασιών υψηλής πίεσης είναι ότι τείνουν να αφαιρούν ένα ευρύτερο φάσμα συστατικών από τις διεργασίες χαμηλής πίεσης. Ωστόσο, το μειονέκτημα στην ευρύτερη αφαίρεση είναι η αύξηση της ενέργειας που απαιτείται για διεργασίες υψηλής πίεσης.

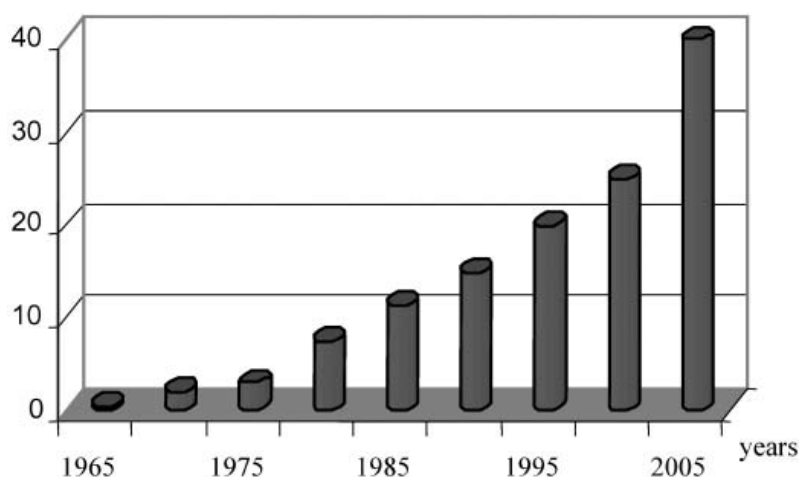


**Σχήμα 5.12:**  
Ταξινόμηση διεργασίας μεμβράνης που κινείται με πίεση  
*Πηγή Σχήματος: (Westerhoff, et al., 1996)*

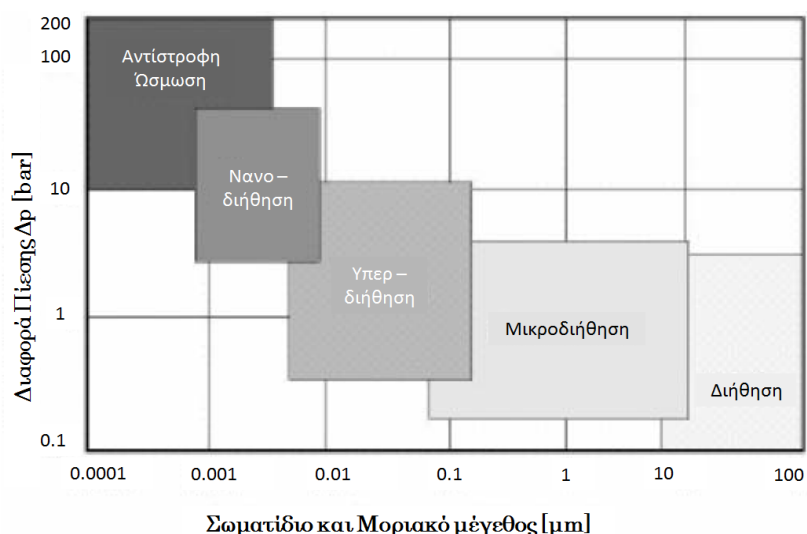
**Πίνακας 5.8:** Τυπικά εύρη πίεσης για διεργασίες μεμβρανών (EPA, 2000)

Διεργασία μεμβράνης	Εύρος πίεσης
MF	5 - 45 psi
UF	7 - 100 psi
NF	50 - 150 psi
RO	100 - 150 psi

Η επιστήμη και η τεχνολογία των μεμβρανών είναι πλέον η κυρίαρχη τεχνολογία στην αφαλάτωση του νερού για την επίλυση του προβλήματος της έλλειψης πόσιμου νερού σε διάφορα μέρη του κόσμου (Dioli, et al., 1999). Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, περισσότερες από 12.000 μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν σε όλο τον κόσμο το 2005, παράγοντας περίπου 40 εκατομμύρια  $m^3$  νερού την ημέρα.



**Σχήμα 5.13:** Εξέλιξη απόδοσης εγκαταστάσεων αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο  
*Πηγή Σχήματος: (Diawara, 2008)*



**Σχήμα 5.14:** Δυνατότητες διαχωρισμού μεμβρανών υπό πίεση  
*Πηγή Σχήματος: (Van der Bruggen, et al., 1999)*

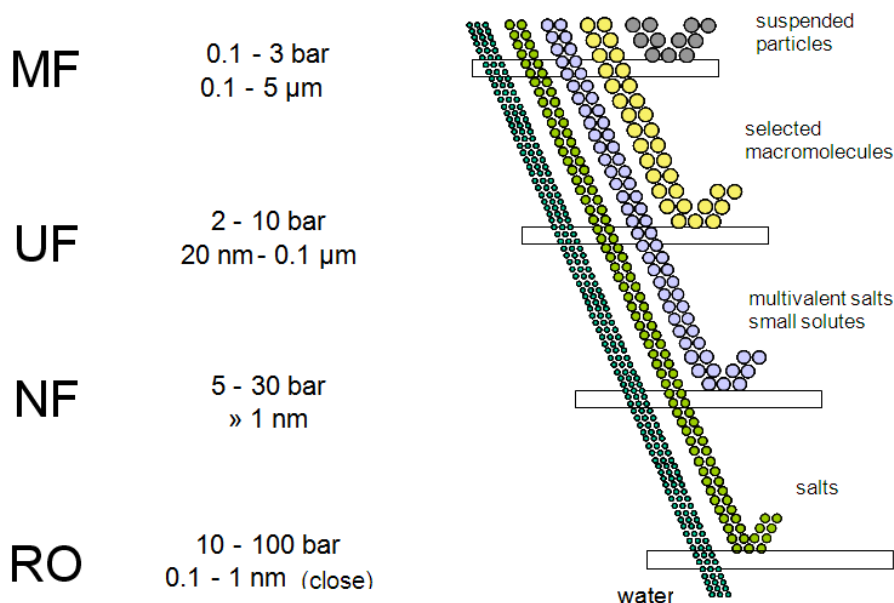
Οι χρησιμοποιούμενες μεμβράνες δημιουργούνται κυρίως από λεπτές μεμβράνες πολυμερούς (Yagnaseni, et al., 2017). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως περιλαμβάνουν τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο ή μέταλλα όπως το αλουμίνιο (Vo-Dinh, et al., 2017). Οι διαστάσεις των πόρων ελέγχονται από το  $pH$ , τη θερμοκρασία και τον χρόνο κατά την ανάπτυξη με πυκνότητες πόρων που κυμαίνονται από 1 έως 106 πόρους ανά  $cm^2$ . Οι μεμβράνες που κατασκευάζονται από τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο και άλλα παρόμοια υλικά, αναφέρονται ως μεμβράνες "track-etched", που ονομάζονται από τον τρόπο κατασκευής των πόρων στις μεμβράνες (ApeI, et al., 2006). Το "track-etched" περιλαμβάνει βομβαρδισμό της λεπτής μεμβράνης πολυμερούς με σωματίδια υψηλής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ιχνών που «χαράσσονται» στη μεμβράνη, δημιουργώντας τους πόρους. Οι μεμβράνες που δημιουργούνται από μέταλλο, όπως οι μεμβράνες αλουμίνιας, κατασκευάζονται με ηλεκτροχημική ανάπτυξη ενός λεπτού στρώματος οξειδίου του αλουμινίου από μέταλλο αλουμινίου σε όξινο μέσο.

#### Σημαντικοί παράγοντες για την απόδοση της μεμβράνης

Οι εμπορικές μεμβράνες με πίεση είναι διαθέσιμες σε πολλούς τύπους υλικών και σε διάφορες διαμορφώσεις. Η χημεία του υλικού της μεμβράνης, ιδιαίτερα το επιφανειακό φορτίο και η υδροφοβία, παίζουν σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά απόρριψης, καθώς οι μεμβράνες μπορούν επίσης να απομακρύνουν τους ρύπους μέσω της προσρόφησης. Η διαμόρφωση της μεμβράνης και το μέγεθος των πόρων (MWCO: Molecular Weight Cut-Off), δηλαδή, επηρεάζουν επίσης τις ιδιότητες απομάκρυνσης, καθώς και τις λειτουργικές ιδιότητες, σε μεγάλο βαθμό. Αυτές οι παράμετροι πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του νερού πηγής και τις απαιτήσεις απομάκρυνσης.

Η ποιότητα του νερού της πηγής είναι επίσης σημαντική για την επιλογή μιας διεργασίας μεμβράνης. Η ποιότητα του νερού μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία και την απόρριψη της μεμβράνης. Επίσης, η θερμοκρασία του νερού είναι πολύ σημαντική για όλες τις διεργασίες της μεμβρανών. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες νερού, λόγω της αύξησης της πυκνότητας του, θα μειώσουν τη ροή σε οποιαδήποτε δεδομένη πίεση. Για να αντισταθμιστεί, πρέπει να παρέχεται πρόσθετη επιφάνεια μεμβράνης και/ή υψηλότερες πιέσεις τροφοδοσίας για να διατηρηθεί η ισοδύναμη. Ανάλογα με την ποιότητα του ανεπεξέργαστου νερού, είναι συχνά απαραίτητη μία προεπεξεργασία, ιδιαίτερα με τις διαδικασίες υψηλής πίεσης. Το μικρό μέγεθος πόρων των μεμβρανών NF και RO τις καθιστά πιο επιρρεπείς στο φράξιμο από τις μεμβράνες UF ή MF. Η εφαρμογή NF και RO για επεξεργασία επιφανειακών υδάτων γενικά δεν επιτυγχάνεται χωρίς εκτεταμένη προεπεξεργασία για την

αφαίρεση σωματιδίων και πιθανώς προεπεξεργασία και για διαλυμένα συστατικά (στερεά). Η απόρριψη ιόντων που προκαλούν άλατα, όπως το ασβέστιο, μπορεί να οδηγήσει σε καθίζηση στην επιφάνεια της μεμβράνης. Οργανικές ενώσεις και μεταλλικές ενώσεις, όπως ο σίδηρος και το μαγγάνιο, μπορούν επίσης να υποβοηθήσουν το φράξιμο των μεμβρανών. Η καθίζηση μπορεί να οδηγήσει σε μη αναστρέψιμο φράξιμο και πρέπει να αποφευχθεί με κατάλληλη προεπεξεργασία, συμπεριλαμβανομένης της προσθήκης χημικής ουσίας κατά των αλάτων ή/και οξέος στο νερό τροφοδοσίας.



**Σχήμα 5.15:** Δυνατότητες συγκράτησης σωματιδίων από τις μεμβράνες  
*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/microfiltration>

Το ποσοστό του νερού προϊόντος που μπορεί να παραχθεί από το νερό τροφοδοσίας είναι γνωστό ως «ανάκτηση». Η ανάκτηση για MF και UF είναι συνήθως υψηλότερη από την ανάκτηση για RO και NF και περιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας και τις ιδιότητες της μεμβράνης. Τυπικές ανακτήσεις για διεργασίες μεμβράνης δίνονται στον Πίνακα 5.9.

**Πίνακας 5.9:** Τυπική ανάκτηση για διεργασίες μεμβρανών (EPA, 2000)

Διεργασία μεμβράνης	Ανάκτηση
MF	έως 99%
UF	έως 95%
NF	έως 85%
RO	30-85%

### Αφαίρεση αρσενικού με διεργασίες μεμβρανών

Οι μεμβράνες μπορούν να αφαιρέσουν το αρσενικό μέσω διήθησης, ηλεκτρικής απώθησης και προσρόφησης ενώσεων που φέρουν αρσενικό. Εάν οι σωματιδιακές ενώσεις αρσενικού είναι μεγαλύτερες από ένα δεδομένο μέγεθος πόρων μεμβράνης, θα απορριφθούν λόγω αποκλεισμού του μεγέθους τους. Το μέγεθος, ωστόσο, είναι μόνο ένας παράγοντας που επηρεάζει την απομάκρυνση. Μελέτες έχουν δείξει ότι ορισμένες μεμβράνες μπορούν να αφαιρέσουν ενώσεις αρσενικού που είναι κατά μία έως δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες από το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης, υποδεικνύοντας μηχανισμούς απομάκρυνσης εκτός από τη φυσική κατακράτηση (AWWARF, 1998). Το σχήμα και τα χημικά χαρακτηριστικά των ενώσεων αρσενικού παίζουν σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνσή του. Οι μεμβράνες μπορούν επίσης να απομακρύνουν ενώσεις αρσενικού μέσω απώθησης ή προσρόφησης στην επιφάνεια της μεμβράνης. Αυτά εξαρτώνται από τα χημικά χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα το φορτίο και την υδροφοβικότητα, τόσο του υλικού της μεμβράνης όσο και των συστατικών του νερού τροφοδοσίας. Έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες που αξιολόγησαν διάφορες διεργασίες μεμβράνης για την απομάκρυνση του αρσενικού, οι οποίες συζητούνται στο υπόλοιπο αυτής της ενότητας.

Από τις διαθέσιμες τεχνολογίες που εφαρμόζονται ως μέθοδοι καθαρισμού για το πόσιμο νερό, οι διεργασίες μεμβράνης είναι γνωστό ότι αφαιρούν με επιτυχία κυρίως δύο τύπους ρύπων, το αρσενικό και τα φυτοφάρμακα. Από αυτές τις διεργασίες κυρίως δύο τύποι έχουν αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικές στην απομάκρυνση του αρσενικού από το νερό: αντίστροφη ώσμωση και ηλεκτροδιάλυση. Και οι δύο αυτές διεργασίες θα συζητηθούν παρακάτω εν συντομία σε αυτή τη μελέτη, όσον αφορά τις ικανότητές τους να αφαιρούν το αρσενικό (USEPA, 2001), (Kartinen, et al., 1995).

Η αντίστροφη ώσμωση είναι αυτή που έχει αναγνωριστεί ως η μέθοδος με την καλύτερη αποτελεσματικότητα για την απομάκρυνση του αρσενικού από το πόσιμο νερό (EPA, 2000). Ωστόσο, οικονομικά είναι μάλλον δαπανηρή. Ως εκ τούτου, σε διάφορες εφαρμογές η αντίστροφη ώσμωση αντικαταστάθηκε με νανοδιήθηση (NF: nanofiltration), η οποία είναι πιο οικονομική λόγω της χαμηλότερης πίεσης λειτουργίας που χρησιμοποιείται και των υψηλότερων ρυθμών ροής στις μεμβράνες.

Οι διεργασίες μεμβρανών με ηλεκτρικό δυναμικό μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση του αρσενικού. Αυτές οι διεργασίες περιλαμβάνουν μόνο την αναστροφή ηλεκτροδιάλυσης (EDR). Όσον αφορά την εφικτή αφαίρεση ρύπων, το EDR είναι συγκρίσιμο με τη RO. Η διαδικασία διαχωρισμού που χρησιμοποιείται στην EDR, ωστόσο, είναι η ανταλλαγή ιόντων (Aptel, et al., 1996).

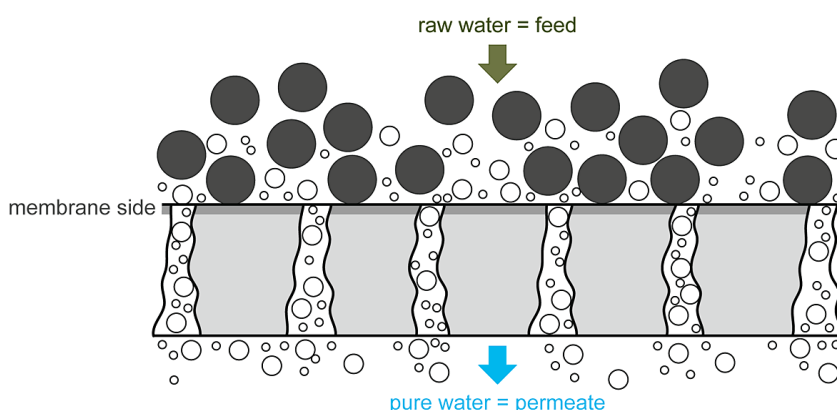


Παρόλο που αναφέρθηκε και πριν, οι δύο πιο αποτελεσματικές μέθοδοι μεμβρανών είναι η αντίστροφη ώσμωση και η ηλεκτροδιάλυση, παρακάτω θα συζητηθεί εν συντομία η ικανότητα απομάκρυνσης του αρσενικού, όλων των κύριων διεργασιών μεμβρανών.

#### 5.4.1 Μικροδιήθηση (MF: Microfiltration)

Η βιωσιμότητα της μικροδιήθησης ως τεχνικής αφαίρεσης αρσενικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που φέρουν αρσενικό στο νερό της πηγής. Το μέγεθος των πόρων της MF είναι πολύ μεγάλο για να αφαιρεθεί ουσιαστικά το διαλυμένο ή κolloειδές αρσενικό. Αν και οι μεμβράνες MF μπορούν να αφαιρέσουν σωματιδιακές μορφές αρσενικού, αυτό από μόνο του δεν καθιστά τη διεργασία αποτελεσματική για την απομάκρυνσή του, εκτός εάν βρεθεί μεγάλο ποσοστό αρσενικού σε αυτή τη μορφή. Το αρσενικό που βρίσκεται στα υπόγεια ύδατα είναι συνήθως λιγότερο από 10% σωματιδιακό ενώ το αρσενικό που βρίσκεται στα επιφανειακά ύδατα μπορεί να ποικίλλει από 0 – 70% ως σωματιδιακό (AWWARF, 1998), (McNeill, et al., 1997). Δυστυχώς, το ποσοστό του σωματιδιακού αρσενικού δεν φαίνεται να σχετίζεται με συγκεκριμένους τύπους νερού. Σε μια μελέτη, ο (AWWARF, 1998) δεν βρήκε την κατανομή του μεγέθους του αρσενικού να συσχετίζεται με τη θολότητα ή το οργανικό περιεχόμενο, υποδεικνύοντας ότι η κατανομή μεγέθους αρσενικού ήταν συγκεκριμένη για μεμονωμένα νερά.

Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης σε νερά πηγής με χαμηλό ποσοστό σωματιδιακής περιεκτικότητας σε αρσενικό, το MF μπορεί να συνδυαστεί με διεργασίες κροκίδωσης.



**Σχήμα 5.16:** Συγκράτηση σωματιδίων από τις μεμβράνες μικροδιήθησης  
*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://www.hydrogroup.biz/areas-of-use/water-treatment/membrane-processes.html>



**Σχήμα 5.17:**

Συστήματα κλινών με μεμβράνες μικροδιήθησης σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού  
*Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <https://fctwater.com/membrane-filtration-microfiltration/>*

#### 5.4.2 Υπερδιήθηση (UF: Ultrafiltration)

Οι διεργασίες υπερδιήθησης είναι γενικά ικανές να αφαιρέσουν ορισμένα κolloειδή και σωματιδιακά συστατικά (στοιχεία), όπως το σωματιδιακό αρσενικό. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, η UF μόνο, όπως και η MF, μπορεί να μην είναι μια βιώσιμη τεχνική για την αφαίρεση αρσενικού για τα υπόγεια ύδατα. Ωστόσο, η UF μπορεί να είναι κατάλληλη για επιφανειακά ύδατα με υψηλές συγκεντρώσεις κolloειδούς και σωματιδιακού αρσενικού.

Πρόσφατη έρευνα ανακάλυψε ότι η ηλεκτρική απώθηση της UF μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην απόρριψη του αρσενικού και να αυξήσει την απόρριψη πέρα από αυτό που μπορεί να επιτευχθεί από το φιλτράρισμα μόνο λόγω μεγέθους των πόρων. Ο (AWWARF, 1998) πραγματοποίησε δοκιμές σε εργαστηριακή κλίμακα σε μεμβράνες UF (Desal GM και FV UF). Δεδομένου ότι τα δείγματα ήταν εμβολιασμένα, δεν υπήρχε σωματιδιακό ή κolloειδές αρσενικό. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δίνονται στον Πίνακα 5.10.

**Πίνακας 5.10: Αφαίρεση As(V) και As(III) με μεμβράνες UF (EPA, 2000)**

Τύπος μεμβράνης	MWCO	Φόρτιση μεμβράνης	Είδος Αρσενικού	pH	Ολική Απομάκρυνση Αρσενικού (%)
<b>Μονολιθική Μεμβράνη</b>					
GM2540F	8.000	-	V	6.9	63
GM2540F	8.000	-	V	2.0	8
GM2540F	8.000	-	III	7.2	1
GM2540F	8.000	-	III	10.8	53
FV2540F	10.000	Κανένα	V	6.9	3
FV2540F	10.000	Κανένα	III	6.8	5
<b>Επίπεδων φύλλων</b>					
GM	8.000	-	V		52
FV	10.000	Κανένα	V		NA
PW	10.000	Κανένα	V		5

NA: Not Available

Για την αρνητικά φορτισμένη μεμβράνη GM2540F, η απόρριψη As(V) ήταν υψηλή σε ουδέτερο pH αλλά πολύ χαμηλή σε όξινο pH. Από την άλλη πλευρά, με την ίδια μεμβράνη, η απόρριψη As(III) ήταν υψηλή σε βασικό pH και αμελητέα σε ουδέτερο pH. Η μη φορτισμένη μεμβράνη FV2540F έδειξε ελάχιστη απομάκρυνση τόσο του As(V) όσο και του As(III) σε ουδέτερο pH. Παρατηρήθηκαν υψηλά ποσοστά αφαίρεσης παρόλο που το MWCΟ των μεμβρανών ήταν δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από τις ενώσεις αρσενικού (AWWARF, 1998). Στην έρευνα αυτή θεωρήθηκε ότι τα υψηλά ποσοστά αφαίρεσης που παρατηρήθηκαν οφείλονταν στην ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση μεταξύ της αρνητικά φορτισμένης επιφάνειας της μεμβράνης και των ιόντων αρσενικού. Αυτό θα εξαρτάται από το pH αφού το ανιονικό As(V) και το μη ιονικό As(III) θα φορτιστούν (πρωτονιωθούν/αποπρωτονιωθούν) σε διαφορετικά επίπεδα pH. Σαν αποτέλεσμα, το φορτίο της μεμβράνης και το pH μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση του αρσενικού, καθώς ύστερα από πειράματα διαπιστώθηκε ότι η ηλεκτροστατική απώθηση γίνεται ολοένα και πιο σημαντική μεταβαίνοντας από RO σε NF και τέλος σε UF, ενώ ο αποκλεισμός μεγέθους γίνεται όλο και πιο σημαντικός μεταβαίνοντας από UF σε NF και από NF σε RO. Γενικά, όπως αποδείχθηκε μέσω δοκιμών, η αρνητικά φορτισμένη μεμβράνη είναι πιο αποτελεσματική για την απομάκρυνση αρσενικού από την ουδέτερα φορτισμένη μεμβράνη.

Ο (AWWARF, 1998) πραγματοποίησε επίσης δοκιμές πιλοτικής κλίμακας UF. Πιλοτικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δύο υπόγεια ύδατα, ένα με συγκέντρωση DOC 11 mg/L και ένα με επίπεδο DOC 1 mg/L, και ένα επεξεργασμένο επιφανειακό νερό, εμβολιασμένο με αρσενικό.

Η απομάκρυνση του αρσενικού ποίκιλε ανάλογα με τα επίπεδα DOC, όντας πολύ υψηλότερη στα υπόγεια ύδατα με υψηλό DOC (70%) από ό,τι στα υπόγεια ύδατα με χαμηλό DOC (30%). Υποτέθηκε ότι αυτή η διαφορά οφειλόταν στη μείωση των ηλεκτροστατικών δυνάμεων που προκαλείται από την προσρόφηση της NOM στην επιφάνεια της μεμβράνης. Η προσρόφηση της NOM θα μείωνε το επιφανειακό φορτίο της μεμβράνης και, σαν αποτέλεσμα, θα αύξανε την απώθηση προς τις αρνητικά φορτισμένες ενώσεις αρσενικού. Αυξήσεις στο φαινομενικό μέγεθος των μορίων αρσενικού μέσω «γεφύρωσης» με χουμικές ουσίες αποκλείστηκαν για λόγους που περιγράφονται αναλυτικά στην μελέτη. Σε αντίθεση με τα επίπεδα DOC, οι αλλαγές στη ροή μάζας και στην ανάκτηση δεν φάνηκε να επηρεάζουν το ποσοστό απόρριψης αρσενικού. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-6, η δοκιμή στο τελικό επιφανειακό νερό έδειξε αρκετά αποτελεσματική αφαίρεση του As(V), αλλά φτωχή αφαίρεση του As(III). Λαμβάνοντας υπόψη το MWCΟ, ωστόσο, αυτές οι αφαιρέσεις ήταν αναμενόμενες.

**Πίνακας 5.11:** Απομάκρυνση αρσενικού με UF σε πιλοτική κλίμακα (EPA, 2000)

Μεμβράνη	MWCO	Τύπος νερού	Είδος Αρσενικού	Απομάκρυνση Αρσενικού
Desal GM2540F	8.000	Υψηλής περιεκτικότητας σε DOC	Συνολικό Αρσενικό	70%
Desal GM2540F	8.000	Χαμηλής περιεκτικότητας σε DOC	Συνολικό Αρσενικό	30%
		Finished SW	V	47%
			III	10%



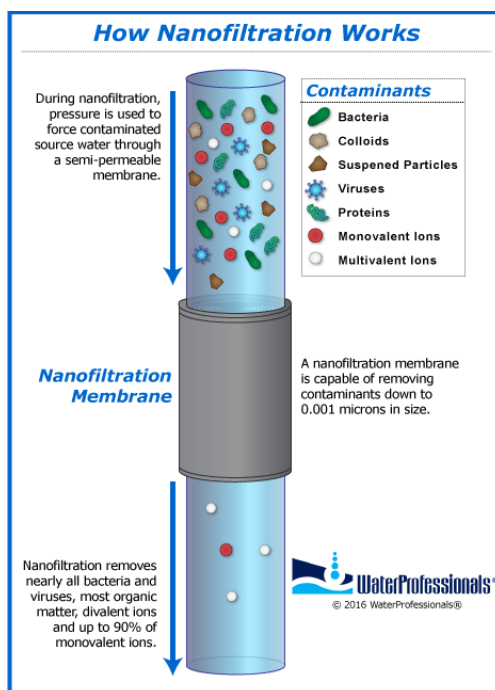
**Σχήμα 5.18:** Συστήματα κλινών με μεμβράνες υπερδιήθησης σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού

*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://www.westech-inc.com/products/ultrafiltration-membrane-system>

### 5.4.3 Νανοδιήθηση (NF: Nanofiltration)

Η νανοδιήθηση είναι μια μέθοδος μεμβράνης που χρησιμοποιεί διαμπερείς πόρους μεγέθους μερικών νανομέτρων. Οι μεμβράνες νανοδιήθησης έχουν μεγέθη πόρων από 1-10 νανόμετρα, μικρότερο από αυτό που χρησιμοποιείται στη μικροδιήθηση και την υπερδιήθηση, αλλά λίγο μεγαλύτερο από αυτό στην αντίστροφη ώσμωση (Yagnaseni, et al., 2017).

Οι μεμβράνες νανοδιήθησης είναι ικανές να απομακρύνουν σημαντικά τμήματα των διαλυμένων ενώσεων αρσενικού στα φυσικά νερά λόγω του μικρού μεγέθους πόρων τους. Αφαιρούν κυρίως δισθενή ιόντα (π.χ. Ca, Mg), αλλά και μονοσθενή διαλυμένα στερεά σε μικρότερες, όμως, ποσότητες (π.χ. Na, Cl). Αυτό αποτελεί και ένα από τα πλεονεκτήματα αυτών των μεμβρανών καθώς κατά τη διέλευση μικρότερων ενυδατωμένων μονοσθενών ιόντων, η διήθηση πραγματοποιείται χωρίς προσθήκη επιπλέον ιόντων νατρίου, όπως χρησιμοποιείται στους ιοντοανταλλάκτες (Labban, et al., 2016). Η νανοδιήθηση αφαιρεί και το θειικό άλας. Η NF μπορεί να αφαιρέσει το διαλυμένο As(V) και το As(III). Αυτό καθιστά την NF μια αξιόπιστη διεργασία αφαίρεσης αρσενικού για υπόγεια ύδατα που περιέχουν έως και 90% διαλυμένο αρσενικό (AWWARF, 1998). Ωστόσο, το μικρό μέγεθος των πόρων, κάνει τις μεμβράνες NF πιο επιρρεπείς στην έμφραξη από τις μεμβράνες UF ή MF. Η εφαρμογή της NF για επεξεργασία επιφανειακών υδάτων τυπικά δεν επιτυγχάνεται χωρίς εκτεταμένη προεπεξεργασία για την αφαίρεση σωματιδίων και πιθανώς και για διαλυμένα συστατικά για την αποφυγή έμφραξης.



**Σχήμα 5.19:** Λειτουργία μεμβράνης Νανοδιήθησης

*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://www.waterprofessionals.com/learning-center/nanofiltration/>

Επιπλέον, ένα ακόμη θετικό της χρήσης μεμβράνης νανοδιήθησης, είναι πως λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου σε αντίθεση με πολλές άλλες διεργασίες διαχωρισμού (π.χ. απόσταξη), γεγονός που μειώνει σημαντικά το κόστος της διεργασίας εφόσον δεν εφαρμόζεται συνεχής θέρμανση ή ψύξη. Η εκτέλεση ήπιου μοριακού διαχωρισμού, που επίσης συνδέεται με τη νανοδιήθηση, συχνά δεν περιλαμβάνεται σε άλλες μορφές διεργασιών διαχωρισμού (φυγοκέντρηση). Ακόμη, η νανοδιήθηση προσφέρει κι άλλα πλεονεκτήματα όπως: υψηλή ροή, υψηλή κατακράτηση αλάτων πολυσθενών ανιόντων και οργανικής ύλης, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα οι παγκόσμιες εφαρμογές της να έχουν αυξηθεί (Xiaofeng, et al., 2002) (Diawara, 2008).

Ένα βασικό μειονέκτημα, όπως με όλες τις τεχνολογίες φίλτρων μεμβράνης, είναι το κόστος και η συντήρηση των μεμβρανών που χρησιμοποιούνται. Οι μεμβράνες νανοδιήθησης είναι ένα ακριβό μέρος της διαδικασίας. Η συντήρηση και η αντικατάσταση των μεμβρανών εξαρτώνται από τα συνολικά διαλυμένα στερεά, την παροχή και τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας. Με τη νανοδιήθηση που χρησιμοποιείται κυρίως σε διάφορες βιομηχανίες, μπορεί να γίνει μόνο μια εκτίμηση της συχνότητας αντικατάστασης των μεμβρανών (Mohammad, et al., 2007).

Οι τεχνολογίες νανοδιήθησης (NF) χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή ασφαλούς πόσιμου νερού και για την ανάκτηση επαναχρησιμοποιημένου νερού από διάφορα κυρίως βιομηχανικά ρεύματα αποβλήτων. Επιπροσθέτως, προσφέρει συχνά μια πολύτιμη εναλλακτική λύση στην αντίστροφη ώσμωση (RO: Reverse Osmosis), η οποία απαιτεί υψηλότερη πίεση λειτουργίας και αντιστοίχως υψηλότερο κόστος ενέργειας (Diawara, 2008).

Η κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς με νανοδιήθηση είναι απαραίτητη για την επίτευξη προόδου στη βελτιστοποίηση της τεχνολογίας διαχωρισμού μεμβράνης (Van der Bruggen, et al., 1999). Η πολυπλοκότητα των μηχανισμών μεταφοράς καθιστά την πρόβλεψη της απόδοσης της μεμβράνης εξαιρετικά δύσκολη σε φορτισμένες νανοπορώδεις μεμβράνες.



**Σχήμα 5.20:** Σύστημα Premium NF πλήρως αυτοματοποιημένο με σήματα οργάνων που ρυθμίζουν τη λειτουργία και τη δοσολογία του συστήματος, καθώς και μια ανεξάρτητη αντλία CIP και ανακυκλοφορία για πειραματική χρήση.

*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://synderfiltration.com/nanofiltration/systems/>

#### 5.4.3.1 Μελέτες

Αρκετές μελέτες εξέτασαν την κατακράτηση αρσενικού από το πόσιμο νερό μέσω μεμβρανών νανοδιήθησης και τις επιδράσεις διαφορετικών πειραματικών παραμέτρων στη διεργασία κατακράτησης. Οι μεμβράνες νανοδιήθησης έχουν δείξει αρκετά υψηλή εκλεκτικότητα για ανιόντα As(V) (Waypa, et al., 1997) (Brandhube, et al., 2001), (Urase, et al., 1998), (Kang, et al., 2000), (Vrijenhoek, et al., 2000).

Σε μελέτες NF που έχουν πραγματοποιηθεί, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι διεργασίες NF είναι αποτελεσματικές για την απομάκρυνση του αρσενικού. Ωστόσο, η αφαίρεση εξαρτάται από τις λειτουργικές παραμέτρους, τις ιδιότητες της μεμβράνης και τη μορφή του αρσενικού. Σε έρευνα για την απομάκρυνση του αρσενικού μέσω NF του (AWWARF, 1998) μελετήθηκαν εμβολιασμένο με αρσενικό απιονισμένο νερό και νερό λίμνης. Χρησιμοποιήθηκαν μεμβράνες ενός στοιχείου (μονολιθικές) και μεμβράνες επίπεδες με πολλαπλά φύλλα, αρνητικά φορτισμένες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακας 5.12.

Όπως φαίνεται στον Πίνακας 5.12, σε μονολιθική μεμβράνη η αφαίρεση του As(III) ήταν χαμηλή (μόλις 12%). Ωστόσο, η απόρριψη As(V) για την αρνητικά φορτισμένη μεμβράνη ήταν υψηλή γύρω στο 89% και 85% για το νερό της λίμνης και το απιονισμένο νερό, αντίστοιχα. Η δοκιμή σε μεμβράνη επίπεδων φύλλων παρήγαγε συγκρίσιμη απόρριψη As(V) 90%.

**Πίνακας 5.12:** Αφαίρεση As(V) και As(III) με μεμβράνες NF (EPA, 2000)

Τύπος μεμβράνης	MWCO	Φόρτιση μεμβράνης	Τύπος Νερού	Είδος Αρσενικού	pH	Ολική Απομάκρυνση Αρσενικού (%)
<b>Μονολιθικό Στοιχείο</b>						
NF 45-2540	300	(-)	DI	V	6,7	85
NF 45-2540	300	(-)	Λίμνης	V	6,9	89
NF 45-2540	300	(-)	DI	III	6,9	12
<b>Επίπεδων Φύλλων</b>						
NF 45-2540	300	(-)	DI	V	NA	90

Το AWWARF πραγματοποίησε επίσης αρκετές πιλοτικές δοκιμές NF ενός στοιχείου και συστοιχίας. Δύο από αυτές τις δοκιμές διεξήχθησαν σε υπόγεια ύδατα, μία με υψηλή συγκέντρωση DOC (11 mg/L) και μία με χαμηλή συγκέντρωση DOC (1 mg/L). Μια άλλη δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε εμβολιασμένο με αρσενικό υπόγειο νερό υψηλού DOC και άλλη μία σε εμβολιασμένο με αρσενικό επιφανειακό νερό. Αυτές οι δοκιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 5.13.

**Πίνακας 5.13:** Αφαίρεση αρσενικού με NF σε πιλοτική κλίμακα (EPA, 2000)

Τύπος μεμβράνης	MWCO	Τύπος Νερού	Φορτίο	Είδος Αρσενικού	Ολική Απομάκρυνση Αρσενικού (%)
<b>Μονολιθικό Στοιχείο</b>					
Accumem	400	Υψηλής περιεκτικότητας σε DOC	-	Συνολικό Αρσενικό	80%
		Χαμηλής περιεκτικότητας σε DOC	-	Συνολικό Αρσενικό	60%
NF 1	NA	Finished SW	NA	V	>95%
				III	52%
NF 2	NA	Finished SW	NA	V	>95%
				III	20%
NF 3	NA	Finished SW	NA	V	>95%
				III	30%
<b>Συστοιχία</b>					
Accumem	400	Υψηλής περιεκτικότητας σε DOC	-	Συνολικό Αρσενικό	75% (αρχικό) 3-16% (τελικό)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.13, κατά τη διάρκεια των δοκιμών στα υπόγεια ύδατα οι μεμβράνες έδειξαν σημαντική αφαίρεση αρσενικού. Ωστόσο, η αφαίρεση στο νερό με χαμηλή DOC ήταν μόνο 60% σε σύγκριση με πάνω από 80% στο νερό με υψηλό DOC. Αυτό προφανώς οφείλεται σε αλλαγές στην ηλεκτροστατική απώθηση στην επιφάνεια της μεμβράνης μέσω της προσρόφησης της NOM. Όπως και στην εργαστηριακή μελέτη που έγινε για τις μεμβράνες UF, το ποσοστό απόρριψης αρσενικού μέσω αυτών φάνηκε να επηρεάζεται από αλλαγές στη ροή ή την ανάκτηση.

Οι δοκιμές σε μεμβράνη ενός στοιχείου που πραγματοποιήθηκαν στο εμβολιασμένο με αρσενικό επιφανειακό νερό, έδειξαν σημαντική απομάκρυνση



As(V) (>95 %). Ωστόσο, η απομάκρυνση του As(III) μειώθηκε με μέσο όρο και για τις τρεις μεμβράνες μόνο 40%. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι αυτά τα αποτελέσματα πιστοποιούν την επίδραση της διάχυσης και της ηλεκτροστατικής απώθησης στην απομάκρυνση του As(III). Τα ιόντα As(III) είναι μικρά και μπορούν πιο εύκολα να διαχέονται μέσω των πολύ μικρών πόρων της NF. Το As(III), επίσης, δεν απωθείται τόσο από το επιφανειακό φορτίο όσο το As(V). Ο συνδυασμός NF με μια διαδικασία οξειδωσης για τη μετατροπή του As(III) σε As(V) θα ήταν πιθανώς η πιο αποτελεσματική επιλογή για την αφαίρεσή του.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής συστοιχίας έδειξαν πως το ποσοστό αφαίρεσης αρσενικού μειώθηκε με την πάροδο του χρόνου. Η απόρριψη στην αρχή της δοκιμής ήταν περίπου 75%, αλλά συνέχισε να μειώνεται στο 11%. Η απόρριψη παρέμεινε μεταξύ 3% και 16% για το υπόλοιπο της περιόδου. Αυτό αποτέλεσε έκπληξη για τους ερευνητές δεδομένου του γεγονότος ότι η μεμβράνη έδειξε υψηλή αφαίρεση αρσενικού σε δοκιμές ενός στοιχείου. Τα δείγματα που λαμβάνονταν υπέδειξαν ότι μια αλλαγή μορφής του αρσενικού από As(V) σε As(III) λάμβανε χώρα εντός του φίλτρου. Δεδομένου ότι το As(III) είναι πιο δύσκολο να αφαιρεθεί από το As(V), η συνολική αφαίρεση του αρσενικού έπεσε. Αυτή η μείωση στην απόρριψη με την πάροδο του χρόνου υποδηλώνει ότι μια αρνητικά φορτισμένη μεμβράνη δεν θα μπορούσε να διατηρήσει υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης As (V) για μεγάλες διάρκειες χωρίς να διατηρεί το αρσενικό στη μορφή As(V).

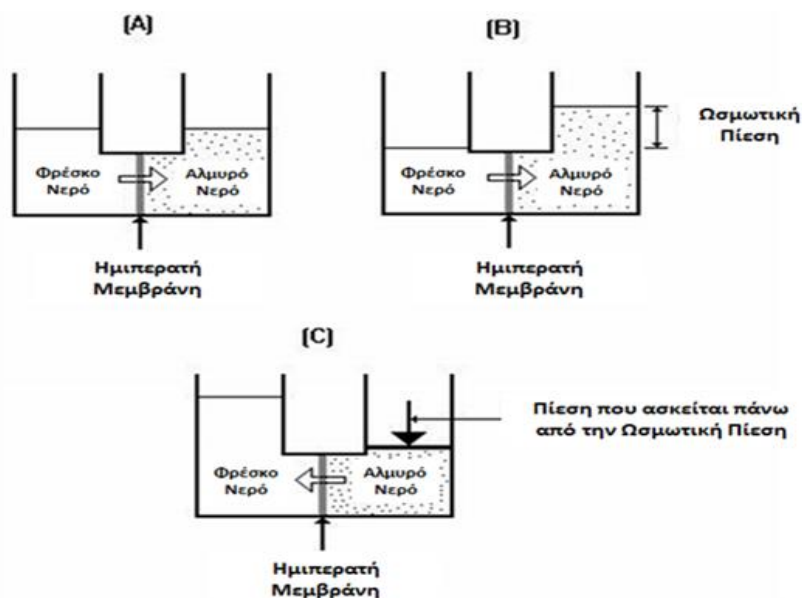
Μια εργαστηριακή μελέτη για τη NF για τον προσδιορισμό των αφαιρέσεων αρσενικού με μεμβράνες NF διεξήχθη στο Tarrytown, NY (Malcolm, 1992). Δοκιμάστηκαν δύο μεμβράνες NF: (1) NF70 που κατασκευάζεται από την Dow Chemical Company (FilmTec) και (2) TFCS που κατασκευάζεται από την UOP Fluid Systems. Οι μεμβράνες NF λειτουργούσαν με ροή που κυμαινόταν μεταξύ 17 gfd (28,9 lmh) και 21 gfd (35,7 lmh) και σε ανάκτηση 15%. Η αγωγιμότητα του νερού τροφοδοσίας κυμαινόταν από 460 έως 950  $\mu\text{S}$ , το pH κυμαινόταν από 7,7 έως 8,3 και το αρσενικό του νερού τροφοδοσίας κυμαινόταν από 38 - 154  $\mu\text{g/L}$ . Ένα δεύτερο διάλυμα τροφοδοσίας φτιάχτηκε, που είχε περίπου τα διπλάσια επίπεδα TDS και αρσενικού, σε σχέση με το αρχικό διάλυμα δοκιμής για την προσομοίωση των απορρίψεων αρσενικού από το τελευταίο στοιχείο σε ένα σύστημα μεμβράνης NF που λειτουργεί με ανάκτηση 50%. Η απόρριψη αρσενικού ήταν πολύ υψηλή με μόνο ένα από τα οκτώ δείγματα διηθήματος από τις μεμβράνες NF να υπερβαίνει το όριο ανίχνευσης με επίπεδο 2,5  $\mu\text{g/L}$ , που αντιστοιχεί σε απόρριψη 95%.

Μια άλλη μελέτη (Chang, et al., 1992) αποκάλυψε ότι η αποτελεσματικότητα αφαίρεσης μειώθηκε σημαντικά κατά τη διάρκεια δοκιμών εργαστηριακής κλίμακας όπου η διεργασία λειτουργούσε σε πιο ρεαλιστικές ανακτήσεις. Όταν η μονάδα μεμβράνης λειτουργούσε με ανάκτηση 65%, η απόδοση αφαίρεσης

αρσενικού μειώθηκε στο 65% και όταν η ανάκτηση αυξήθηκε στο 90%, η απόδοση αφαίρεσης αρσενικού μειώθηκε στο 16%.

#### 5.4.4 Αντίστροφη ώσμωση (RO: Reverse Osmosis)

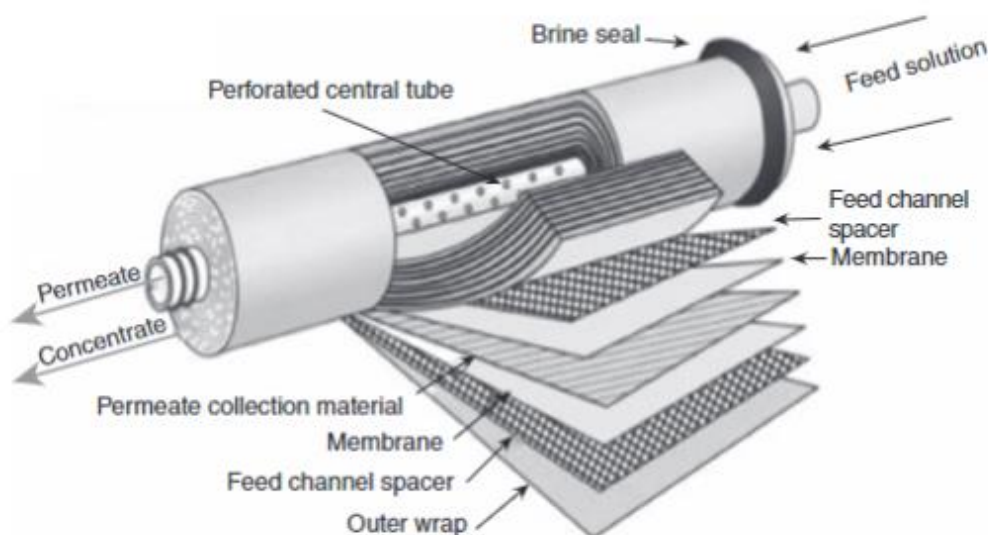
Η ώσμωση συμβαίνει όταν μια ημιπερατή μεμβράνη διαχωρίζει δύο διαλύματα αλάτων διαφορετικών συγκεντρώσεων. Το νερό θα μεταβεί από το ασθενέστερης συγκέντρωσης διάλυμα στο ισχυρότερης συγκέντρωσης διάλυμα, έως ότου τα δύο διαλύματα ισορροπήσουν, επειδή η ημιπερατή μεμβράνη επιτρέπει στο νερό να περάσει, αλλά όχι στο αλάτι. Στην αντίστροφη ώσμωση, τα δύο διαλύματα εξακολουθούν να χωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη, αλλά εφαρμόζεται πίεση για να αντιστραφεί η φυσική ροή του νερού. Αυτό αναγκάζει το νερό να μετακινηθεί από το πιο συμπυκνωμένο διάλυμα στο ασθενέστερο. Έτσι, οι ρύποι καταλήγουν στη μία πλευρά της ημιπερατής μεμβράνης και το καθαρό νερό βρίσκεται στην άλλη πλευρά. Στο παρακάτω σχήμα, τα (A) και (B) απεικονίζουν τη διεργασία της ώσμωσης, ενώ η αντίστροφη ώσμωση απεικονίζεται στο (C).



Σχήμα 5.21: Διεργασίες Ώσμωσης και Αντίστροφης Ώσμωσης  
Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/ultrafiltrationnanoandro#>

Η αντίστροφη ώσμωση (RO: Reverse Osmosis) είναι η παλαιότερη τεχνολογία μεμβρανών, που χρησιμοποιείται παραδοσιακά για την αφαλάτωση υφάλμυρου και θαλασσινού νερού, ενώ παράλληλα αφαιρεί και τις περισσότερες ακαθαρσίες από το νερό, όπως τον οργανικό άνθρακα, τα άλατα, τα διαλυμένα ορυκτά και τα χρώματα. Πρόκειται για μια διεργασία διαχωρισμού μεμβράνης που καθοδηγείται από την πίεση, και καθίσταται ικανή να απομακρύνει το αρσενικό από το νερό μέσω του μεγέθους των σωματιδίων, των διηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της υδροφιλικότητας/ υδροφοβίας. Η RO παράγει σχεδόν καθαρό νερό διατηρώντας μια κλίση πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση του νερού τροφοδοσίας. Η ωσμωτική πίεση

γίνεται μεγάλη στα συστήματα RO σε σύγκριση με άλλες διεργασίες μεμβράνης λόγω της συγκέντρωσης αλάτων στην πλευρά τροφοδοσίας της μεμβράνης. Το μεγαλύτερο μέρος του νερού τροφοδοσίας διέρχεται από τη μεμβράνη, ωστόσο, το υπόλοιπο αποβάλλεται μαζί με τα απορριπτόμενα άλατα ως συμπυκνωμένο υγρό. Τα περιεχόμενα του νερού, συμπεριλαμβανομένου του αρσενικού, κατακρατούνται από τη μεμβράνη, ενώ το επεξεργασμένο νερό διέρχεται. Το γλυκό νερό που παράγεται ονομάζεται διήθημα. Το συμπυκνωμένο νερό που περισσεύει ονομάζεται απόβλητο ή άλμη και γενικά έχει υψηλή περιεκτικότητα σε ολικά διαλυμένα στερεά (TDS). Το απόβλητο πιθανότατα περιέχει υψηλά επίπεδα αρσενικού και άλλων συστατικών που το καθιστούν επικίνδυνο και πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία πριν από την απόρριψή του, και μπορεί να αποτελεί σημαντικό ποσοστό της παροχής εισροής, δηλαδή μεταξύ 10 και 50%, ανάλογα με την ποιότητα του εισερχόμενου νερού και τις ιδιότητες της μεμβράνης.



**Σχήμα 5.22:** Δομή μεμβράνης φυσιγγίου αντίστροφης ώσμωσης

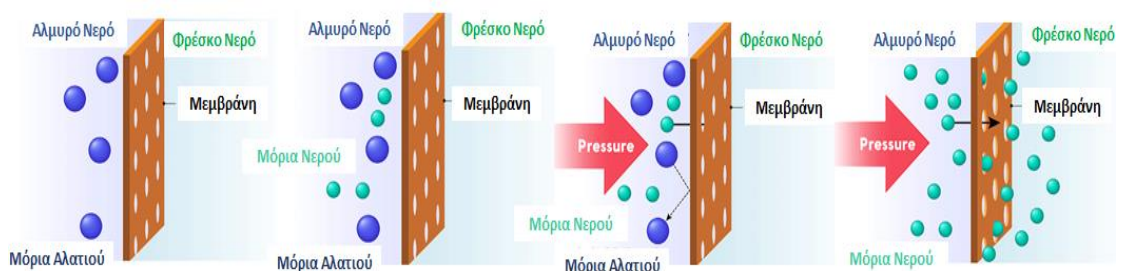
*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική Πηγή

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/B9780081025659000030?token=50AF1166FAA626A301454687C5AAE5028E93EC7FD951784E63E3F5A1568A358AE0831DCDA6BF10F3C7100B9768F9564F&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230327092748>



**Σχήμα 5.23:** Συστήματα κλινών με μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης για επεξεργασία νερού  
*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική Πηγή <https://www.prab.com/water-and-wastewater-solutions/reverse-osmosis/>

Η απόδοση των μεμβρανών RO επηρεάζεται αρνητικά από την παρουσία θολότητας, σιδήρου, μαγγανίου, πυριτίου, ενώσεων που παράγουν άλατα και άλλων συστατικών. Όπως και η NF, η RO απαιτεί εκτεταμένη προεπεξεργασία για την αφαίρεση σωματιδίων και συχνά προεπεξεργασία και για διαλυμένα συστατικά. Επομένως, στα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης συνήθως χρησιμοποιείται ένα προ-φίλτρο προτού εισέλθει το νερό στην ημιπερατή μεμβράνη για να αφαιρέσει αυτά τα διαλυμένα στερεά.



**Σχήμα 5.24:** Διεργασία αντίστροφης ώσμωσης σε μεγέθυνση.  
*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://www.freshwatersystems.com/blogs/blog/what-is-reverse-osmosis>

Η RO απαιτεί συχνά προεπεξεργασία ακόμη και για υψηλής ποιότητας νερά πηγής. Η προεπεξεργασία μπορεί να κάνει τις διεργασίες RO δαπανηρές. Τα επεξεργασμένα νερά από συστήματα RO έχουν συνήθως εξαιρετικά υψηλή ποιότητα. Κάποιες φορές, ανάμειξη επεξεργασμένου νερού και ακατέργαστου

νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τελικού νερού αποδεκτής ποιότητας. Αυτό μπορεί να μειώσει το κόστος σε κάποιο βαθμό.

Μετά την έξοδο του νερού από τη μεμβράνη RO, αυτό περνά μέσα από ένα μετα-φίλτρο για να διαυγάσει το πόσιμο νερό πριν φτάσει στη βρύση. Τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης έχουν διάφορα στάδια ανάλογα με τον αριθμό των προ-φίλτρων και των μετα-φίλτρων τους. Η μεμβράνη RO είναι το κεντρικό σημείο ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης, αλλά ένα σύστημα RO περιλαμβάνει επίσης και άλλους τύπους διήθησης. Τα συστήματα RO αποτελούνται από 3, 4 ή 5 στάδια φιλτραρίσματος. Κάθε σύστημα νερού αντίστροφης ώσμωσης περιέχει ένα φίλτρο ιζήματος και ένα φίλτρο άνθρακα εκτός από τη μεμβράνη RO. Τα φίλτρα ονομάζονται είτε προ-φίλτρα είτε μετα-φίλτρα ανάλογα με το αν το νερό περνά μέσα από αυτά πριν ή αφού περάσει από τη μεμβράνη. Ένα τέτοιο σύστημα περιέχει ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- ✚ Ημιπερατή μεμβράνη (RO): Αφαιρεί έως και 98% των συνολικών διαλυμένων στερεών (TDS)
- ✚ Φίλτρο ιζήματος: Μειώνει σωματίδια όπως βρωμιά, σκόνη και σκουριά
- ✚ Φίλτρο άνθρακα: Μειώνει τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), το χλώριο και άλλους ρύπους που δίνουν στο νερό άσχημη γεύση ή οσμή

Όταν το νερό εισέρχεται για πρώτη φορά σε ένα σύστημα RO, περνάει από προφιλτράρισμα. Η προδιήθηση περιλαμβάνει συνήθως ένα φίλτρο ιζήματος και ένα φίλτρο άνθρακα για την απομάκρυνση των ιζημάτων και του χλωρίου που θα μπορούσαν να φράξουν ή να καταστρέψουν τη μεμβράνη RO. Μερικές μεμβράνες μπορούν να αντέξουν μικρές συγκεντρώσεις οξειδωτικού παράγοντα σε μη συχνή βάση και υπάρχει, μάλιστα, τουλάχιστον μία νεότερη μεμβράνη που μπορεί να αντέξει μια μικρή συγκέντρωση χλωρίου σε συνεχή βάση. Γενικά, ωστόσο, η διάρκεια ζωής των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν ένας οξειδωτικός παράγοντας εγχυθεί στο νερό τροφοδοσίας (Kartinen, et al., 1995). Στη συνέχεια, το νερό περνά μέσα από τη μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης όπου αφαιρούνται διαλυμένα σωματίδια, ακόμη και πολύ μικρά για να φαίνονται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Μετά τη διήθηση, το νερό εισέρχεται στη δεξαμενή αποθήκευσης, όπου διατηρείται μέχρι να χρειαστεί. Το σύστημα συνεχίζει να φιλτράρει το νερό μέχρι να γεμίσει η δεξαμενή αποθήκευσης και στη συνέχεια σταματά.

#### 5.4.4.1 Μελέτες

Η RO είναι μια αποτελεσματική τεχνολογία αφαίρεσης αρσενικού που έχει αποδειχθεί μέσω πολλών μελετών σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα και είναι πολύ αποτελεσματική και στην αφαίρεση διαλυμένων συστατικών. Δεδομένου ότι το αρσενικό που βρίσκεται στα υπόγεια ύδατα είναι συνήθως 80 έως 90% διαλυμένο, η RO είναι μια κατάλληλη τεχνολογία για την αφαίρεση αρσενικού στα υπόγεια ύδατα. Όπως και για άλλες τεχνολογίες απομάκρυνσης, η

βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι η αντίστροφη ώσμωση είναι πιο αποτελεσματική στην απομάκρυνση του As [V] από του As [III]. Έχουν αναφερθεί ποσοστά αφαίρεσης As [III] με αντίστροφη ώσμωση της τάξης του 40 – 80%. Για το As [V], έχουν αναφερθεί ποσοστά απομάκρυνσης μεγαλύτερα από 97%. Έτσι, για να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα, το νερό τροφοδοσίας πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία με ένα οξειδωτικό παράγοντα για να μετατραπεί από As [III] σε As [V]. Οι (Kartinen, et al., 1995) αναφέρουν σχετικά με την αφαίρεση του αρσενικού κατά την επεξεργασία νερού με αντίστροφη ώσμωση τα ακόλουθα αποτελέσματα (Πίνακας 5.14).

**Πίνακας 5.14:** Απομάκρυνση Αρσενικού με αντίστροφη ώσμωση (Kartinen, et al., 1995)

	RO
Αρσενικό στο νερό τροφοδοσίας, μg/L	39-154
Πίεση τροφοδοσίας, psi	38-86
Διαπερνών αρσενικό	< 2

Σύμφωνα με την ίδια εργασία, το συμπύκνωμα από την αντίστροφη ώσμωση ήταν κάτι περισσότερο από το 10% του νερού τροφοδοσίας. Το αρσενικό που αφαιρέθηκε μεταφέρθηκε στο συμπύκνωμα. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε πιλοτική κλίμακα για την αφαίρεση του αρσενικού από το νερό χρησιμοποιώντας αντίστροφη ώσμωση. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 5.15. Στις εργαστηριακές δοκιμές που αναφέρονται στον Πίνακα 5.15, χρησιμοποιήθηκε χλώριο για την οξείδωση του As [III] σε As [V].

**Πίνακας 5.15:** Απομάκρυνση Αρσενικού με αντίστροφη ώσμωση με εργαστηριακές δοκιμές (Kartinen, et al., 1995)

TDS στο νερό τροφοδοσίας	250 mg/L
Αρσενικό στο νερό τροφοδοσίας	50 μg/L
Διαπερνόντα TDS	10 mg/L
Διαπερνόν αρσενικό	< 1 μg/L

Αρκετές προηγούμενες μελέτες RO για την αφαίρεση αρσενικού συνοψίζονται στον Πίνακα 5.16. Αυτές οι μελέτες υποδεικνύουν ότι η RO μπορεί να είναι μια αποτελεσματική διεργασία για την αφαίρεση του αρσενικού, ωστόσο, ο τύπος της μεμβράνης και οι συνθήκες λειτουργίας θα επηρεάσουν την απομάκρυνση και πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα. Η διατήρηση των συνθηκών οξείδωσης, από As(III) σε As(V), μπορεί να είναι σημαντική για τη διεργασία αυτή.

**Πίνακας 5.16:** Περίληψη Αφαίρεσης Αρσενικού με μεμβράνες RO (EPA, 2000)

Περιοχή	Τύπος Επεξεργασίας	Λειτουργικές Παράμετροι	Απομάκρυνση Αρσενικού	Πηγή
Eugene, OR	POU	3-5 gpd 90% ανάκτηση 20-100 psi	50%	(Fox, 1989) (Fox, et al., 1987)
Eugene, OR	POU	3-5 gpd 67% ανάκτηση 195 psi	κάτω από το MDL	(Fox, 1989) (Fox, et al., 1987)
Fairbanks, AL	POU	Χαμηλή Πίεση (<100 psi)	50%	(Fox, 1989) (Fox, et al., 1987)
San Ysidro, NM	Πιλοτική (μεμβράνη κοίλων ινών, οξική κυτταρίνη)	50% ανάκτηση Ρύθμιση pH στο 6,3 Προσθήκη αντικαθαλατωτικού	93-99%	(Clifford, et al., 1991)
San Ysidro, NM	Πιλοτική (μεμβράνη κοίλων ινών, πολυαμίδιο)	50% ανάκτηση Ρύθμιση pH στο 6,3 Προσθήκη αντικαθαλατωτικού	99%	(Clifford, et al., 1991)
San Ysidro, NM	POU	10-15% ανάκτηση	91%	(Fox, 1989) (Fox, et al., 1987)
Tarrytown, NY	Πιλοτική (FilmTec BW30, Hydranautics NCM1, Fluid Systems TCFL)	15 gfd 10% ανάκτηση	κάτω από το MDL	(Malcolm, 1992)
Tarrytown, NY	POU	Not Available	86%	(Rogers, 1989)
Charlotte Harbor, FL	POU	1000 gpd 10-60% ανάκτηση	As(V) 96-99% As(III) 46-84%	(Huxstep, et al., 1987)
Cincinnati, OH	POU	Not Available	As(III) 73%	(Fox, et al., 1987)
Hudson, NH	POU	Not Available	40%	(USEPA, 1982)

Ο (AWWARF, 1998) πραγματοποίησε δοκιμές RO σε εργαστήριο και πιλοτικά. Πραγματοποιήθηκαν βραχυπρόθεσμες δοκιμές σε μεμβράνη ενός στοιχείου και σε μεμβράνη επίπεδων φύλλων (DK2540F) σε νερό λίμνης και σε απιονισμένο νερό. Τα αποτελέσματα από αυτή τη δοκιμή φαίνονται στον Πίνακα 5.17.

**Πίνακας 5.17:** Αφαίρεση αρσενικού με RO σε εργαστηριακή κλίμακα (EPA, 2000)

Τύπος μεμβράνης	MWCO	Πηγή Νερού	Είδος Αρσενικού	pH	Απομάκρυνση Αρσενικού (%)
Μονολιθικό Στοιχείο					
DK2540F	180	Απιονισμένο	V	6,8	96%
DK2540F	180	Νερό Λίμνης	V	6,9	96%
DK2540F	180	Απιονισμένο	III	6,8	5%
DK2540F	180	Νερό Λίμνης	III	6,8	5%
Επίπεδων Φύλλων					
DK2540F	180	Απιονισμένο	V		88%

Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πολύ υψηλή απόρριψη για As(V) αλλά πολύ χαμηλή απόρριψη για As(III) σε ουδέτερο pH. Και πάλι, αυτό δείχνει το γεγονός ότι οι συνθήκες οξείδωσης θα ήταν επιθυμητές και ότι η επιφανειακή φόρτιση/ηλεκτροστατική απώθηση πιθανώς παίζει ρόλο στην απόρριψη του αρσενικού. Επίσης, η μεμβράνη επίπεδων φύλλων παρήγαγε ένα ποσοστό απόρριψης συγκρίσιμο και ελαφρώς μικρότερο με το ποσοστό απόρριψης ενός στοιχείου.

Πραγματοποιήθηκαν επίσης αρκετές δοκιμές πιλοτικής κλίμακας RO (AWWARF, 1998). Δύο δοκιμές από αυτές ήταν σε υπόγεια ύδατα υψηλού και χαμηλού DOC και ένα άλλο σύνολο δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε εμβολιασμένα με αρσενικό επιφανειακά ύδατα. Τα αποτελέσματα από αυτές τις πιλοτικές δοκιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 5.18.

Ο Πίνακας 5.18 δείχνει ουσιαστική αφαίρεση τόσο για τα ύδατα χαμηλής όσο και για υψηλής συγκέντρωσης σε DOC. Η αφαίρεση ήταν ελαφρώς υψηλότερη με το νερό που περιείχε υψηλά επίπεδα DOC. Όπως και με την UF και τη NF, οι αλλαγές ροής και ανάκτησης δεν φάνηκε να επηρεάζουν την απομάκρυνση του αρσενικού. Τα αποτελέσματα για τις τέσσερις μεμβράνες που δοκιμάστηκαν σε εμβολιασμένο με αρσενικό νερό, έδειξαν επίσης σημαντική αφαίρεση. Για όλες τις μεμβράνες κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής, το As(V) ξεπέρασε το 95%, ωστόσο, η απόρριψη του As (III) ήταν κατά μέσο όρο μόνο 74%.

**Πίνακας 5.18:** Αφαίρεση αρσενικού με RO σε πιλοτική κλίμακα (EPA, 2000)

Μεμβράνη	Τύπος Νερού	Φόρτιση	Είδη Αρσενικού	Απομάκρυνση Αρσενικού
Μονολιθικό Στοιχείο				
TFCL-HR	Υψηλής Συγκέντρωσης DOC GW	-	Συνολικό Αρσενικό	>90%
	Χαμηλής Συγκέντρωσης DOC GW	-	Συνολικό Αρσενικό	>80%
RO 1	Finished SW	NA	V	>95%
			III	60%
RO 2	Finished SW	NA	V	>95%
			III	75%
RO 3	Finished SW	NA	V	>95%
			III	68%
RO 4	Finished SW	NA	V	>95%
			III	85%

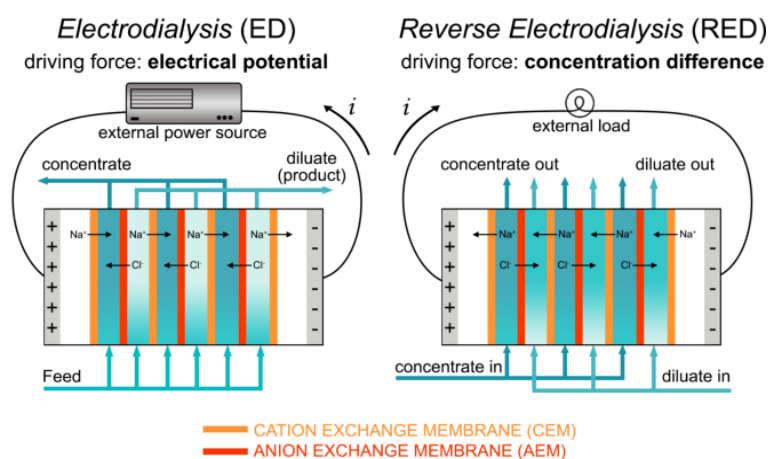
NA: Not Available

Συνολικά, η RO είναι ικανή να επιτύχει συγκεντρώσεις αρσενικού τελικού νερού κάτω από 2 µg/L όταν το αρσενικό υπάρχει ως As(V). Η απόρριψη του As(III) δεν είναι τόσο σημαντική, ωστόσο, μπορεί να οξειδωθεί σε As(V) πριν περάσει το νερό που το περιέχει από τις μεμβράνες RO, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερο ποσοστό απομάκρυνσης.



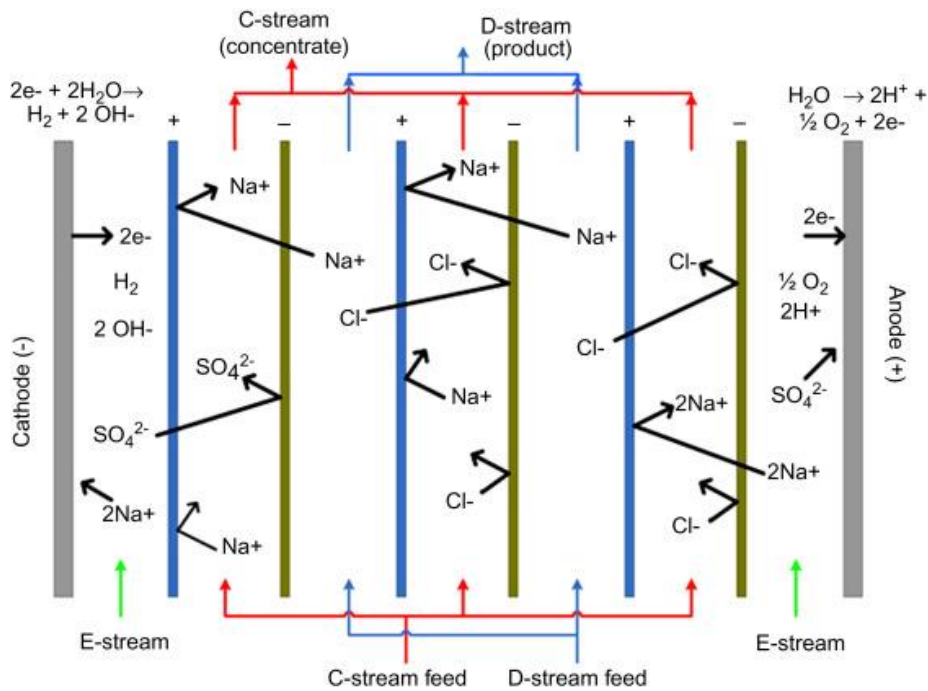
### 5.4.5 Ηλεκτροδιάλυση (ED: Electrodialysis) - Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (EDR: Electrodialysis Reversal)

Η ηλεκτροδιάλυση (ED: Electrodialysis) ή ηλεκτροδιαπίδυση είναι μια ηλεκτροχημική διεργασία απομάκρυνσης ιόντων ή ιοντογενών ουσιών από το νερό, κατά την οποία τα επιλεκτικά διαπερατά ιόντα μεταφέρονται μέσω μεμβρανών (ηλεκτρικά αγωγίμων μεμβρανών) προς κατιόντα ή ανιόντα υπό την επίδραση συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος. Ο μηχανισμός διαχωρισμού είναι στην πραγματικότητα μια διαδικασία ανταλλαγής ιόντων. Οι χρησιμοποιούμενες κατιοντοδιαπερατές (K) μεμβράνες αποτελούνται από αδιάλυτα πολυανιόντα, φέρουν αρνητικό φορτίο και επιτρέπουν τη δίοδο μέσω της μάζας τους μόνο των ιόντων αντιθέτου φορτίου, δηλ. των κατιόντων, ενώ αποκλείουν τη δίοδο των ανιόντων. Οι ανιοντοδιαπερατές (A) μεμβράνες αποτελούνται από αδιάλυτα πολυκατιόντα, φέρουν θετικό φορτίο και επιτρέπουν τη δίοδο των ανιόντων, ενώ αποκλείουν τη δίοδο των κατιόντων. Ενώ στην αντίστροφη ώσμωση ασκείται πίεση στην "αλμυρή" πλευρά μιας μεμβράνης για να πιέσει "καθαρό" νερό να περάσει μέσα από τη μεμβράνη συγκεντρώνοντας έτσι τα διαλυμένα στερεά στην "αλμυρή" πλευρά, στην ηλεκτροδιύλιση εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό ρεύμα για να τραβήξει τα ιόντα (διαλυμένα στερεά) μέσω των μεμβρανών αφήνοντας πίσω το «καθαρό» νερό. Δεδομένου ότι τα διαλυμένα στερεά υπάρχουν ως κατιόντα (θετικά φορτισμένα ιόντα όπως ασβέστιο και μαγνήσιο) και ανιόντα (αρνητικά φορτισμένα ιόντα όπως θειικό και αρσενικό), τα κατιόντα έλκονται από ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και τα ανιόντα προσελκύονται από ένα ηλεκτρόδιο με θετικά φορτία. Οι μεμβράνες της μονάδας ηλεκτροδιύλισης αποτελούνται από ρητίνες κατιόντος και ανιοντοανταλλαγής. Η ηλεκτροδιαπίδυση διαφέρει από τον ηλεκτροαπιονισμό (ιοντοανταλλαγή) στο ότι δεν χρησιμοποιούνται ιοντοανταλλακτικές ρητίνες στα διαμερίσματα αραίωσης.



**Σχήμα 5.25:** Τρόπος λειτουργίας μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης και αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης.

*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή [https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-electrodialysis-ED-and-reverse-electrodialysis-RED-Note-that-the\\_fig1\\_297751628](https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-electrodialysis-ED-and-reverse-electrodialysis-RED-Note-that-the_fig1_297751628)



**Σχήμα 5.26:** Σχηματική Στοίβα Ηλεκτροδιάλυσης για Αφαλάτωση Νερού.  
 Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/electrodialysis>

Σε αυτή τη διεργασία, οι μεμβράνες διατάσσονται σε μια συστοιχία ή στοίβα τοποθετημένη μεταξύ απέναντι ηλεκτροδίων, με εναλλασσόμενες μεμβράνες ανταλλαγής κατιόντων και ανιόντων. Η κινητικότητα των κατιόντων ή των ανιόντων περιορίζεται στην κατεύθυνση των ηλεκτροδίων έλξης, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα εναλλασσόμενα σύνολα διαμερισμάτων που περιέχουν νερό με χαμηλές και υψηλές συγκεντρώσεις των ιόντων. Τα ιόντα μεταφέρονται από το μικρότερης στο υψηλότερης συγκέντρωσης διάλυμα.

Η διεργασία της αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης (EDR) είναι μια διαδικασία ED με περιοδική αντιστροφή της κατεύθυνσης διαδρομής των ιόντων που προκαλείται από την αντιστροφή της πολικότητας των ηλεκτροδίων. Το πλεονέκτημα της αντιστροφής της πολικότητας είναι η μειωμένη πιθανότητα έμφραξης των μεμβρανών, γεγονός που ελαχιστοποιεί επίσης τις απαιτήσεις προεπεξεργασίας αυτής της διεργασίας.

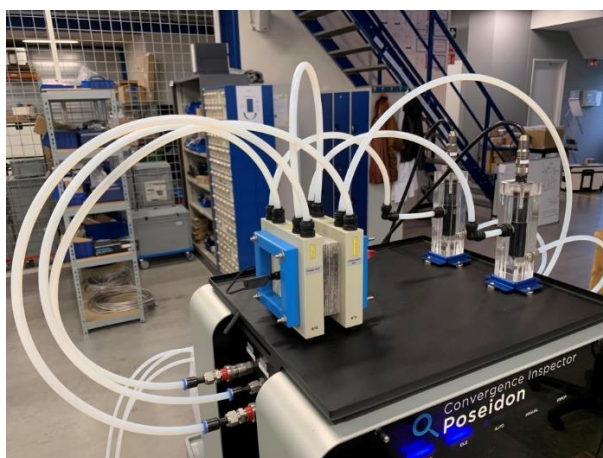
Η EDR έχει σχεδιαστεί ειδικά για κάθε εφαρμογή με βάση την επιθυμητή ποσότητα και ποιότητα νερού προϊόντος. Ο εξοπλισμός σε μια μονάδα EDR, εκτός από την ίδια τη συστοιχία μεμβρανών, περιλαμβάνει αντλίες τροφοδοτικού νερού, αντλίες ανακύκλωσης, βαλβίδες, μεταγωγή ρεύματος, οδήγηση νερού εκροής, ρύθμιση πίεσης και έλεγχο ροής ηλεκτροδίων. Τα συστήματα EDR είναι πλήρως αυτοματοποιημένα και απαιτούν λίγη προσοχή από τον χειριστή, με εξαίρεση τη συλλογή δεδομένων και την τακτική συντήρηση. Η τακτική συντήρηση συνίσταται στην αλλαγή των φυσιγγίων - φίλτρων, τη βαθμονόμηση και τη συντήρηση οργάνων, την αντικατάσταση μεμβρανών, τη συντήρηση

αντλιών και βαλβίδων και την αντικατάσταση ηλεκτροδίων. Τα συστήματα EDR είναι επίσης ελκυστικά καθώς δεν απαιτούν προσθήκη χημικών (EPA, 1994). Τα συστήματα EDR, ωστόσο, είναι συνήθως πιο ακριβά από τα συστήματα NF και RO (EPA, 1994). Τα συστήματα EDR χρησιμοποιούνται συχνά για την επεξεργασία υφάλμυρου νερού ώστε να είναι κατάλληλο για πόσιμο. Όσον αφορά την ποιότητα του νερού εκροής, το EDR έχει συγκριθεί με το RO (AWWARF, 1996) (Robinson, 1998). Οι διαδικασίες EDR έχουν επίσης εφαρμοστεί στη βιομηχανία για την ανάκτηση λυμάτων.

#### 5.4.5.1 Μελέτες

Όπως και με τις άλλες διεργασίες αφαίρεσης αρσενικού που συζητήθηκαν προηγουμένως, τα δεδομένα στη βιβλιογραφία είναι κάπως περιορισμένα, αλλά δείχνουν ότι η ηλεκτροδιάλυση είναι πιο αποτελεσματική στην αφαίρεση του As [V] παρά του As [III]. Επομένως, για να επιτευχθούν υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης του αρσενικού με ηλεκτροδιάλυση, ένας οξειδωτικός παράγοντας πρέπει να εγχυθεί στο νερό τροφοδοσίας. Αυτοί οι οξειδωτικοί παράγοντες όμως είναι επιβλαβείς για τις συμβατικές ρητίνες ανταλλαγής ιόντων, από τις οποίες κατασκευάζονται οι μεμβράνες, όπως ακριβώς συμβαίνει στις περισσότερες μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης.

Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί μειώσεις αρσενικού άνω του 95%. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι έχουν γίνει λίγες αναφερόμενες εργασίες για την απομάκρυνση του αρσενικού με χρήση ηλεκτροδιάλυσης. Το "συμπύκνωμα" από το σύστημα ηλεκτροδιάλυσης περιέχει το αρσενικό που αφαιρείται από το νερό τροφοδοσίας. Η "ανάκτηση" εξαρτάται από τη συγκεκριμένη κατάσταση, ιδιαίτερα τη χημεία του νερού και την επιθυμητή ποιότητα νερού στην έξοδο, αλλά το 10% ή περισσότερο του νερού τροφοδοσίας αναμένεται να απορριφθεί ως μη ανακτήσιμο. Και, όπως με την αντίστροφη ώσμωση, η ηλεκτροδιάλυση τείνει να απομακρύνει πολύ περισσότερα από το νερό, εκτός του αρσενικού (Kartinen, et al., 1995).



**Σχήμα 5.27:** Σύστημα δοκιμών ηλεκτροδιάλυσης εργαστηριακής κλίμακας  
*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://www.con-vergence.com/product/electrodialysis-pilot/>

Το EDR μπορεί να επιτύχει υψηλές αφαιρέσεις TDS από το νερό και τυπικά λειτουργεί με ανάκτηση 70 έως 80% (Kemric, 1994). Πολύ λίγες μελέτες έχουν διεξαχθεί για την αποκλειστική αξιολόγηση αυτής της διεργασίας για την αφαίρεση του αρσενικού. Μία από τις μελέτες διεξήχθη χρησιμοποιώντας EDR για την επεξεργασία του νερού από το San Ysidro, Νέο Μεξικό, το οποίο ήταν χώρος για πολλές άλλες μελέτες αφαίρεσης αρσενικού (Clifford, et al., 1985). Μελέτες από κορυφαίο κατασκευαστή εξοπλισμού EDR παρέχουν επίσης δεδομένα για την αφαίρεση του αρσενικού (Ionics, 1989-1990). Αυτά συζητούνται παρακάτω.

Στη μελέτη San Ysidro EDR, επιτεύχθηκε ανάκτηση 85% με τη χρήση ενός εσωτερικού συστήματος ανακύκλωσης άλμης. Η προεπεξεργασία για τη μονάδα αποτελούνταν από ένα τυπικό φίλτρο φυσιγγίου 10 micron και μια κοκκώδη στήλη ενεργού άνθρακα (GAC) που αποτελούσαν μέρος του συστήματος που παρείχε ο κατασκευαστής. Η μονάδα δοκιμάστηκε για δύο διαφορετικά νερά, ένα νερό πόλης που περιείχε ένα μείγμα As(III) και As(V) και ένα υπόγειο νερό που περιείχε κυρίως As(III). Το υπόγειο νερό περιείχε 188 µg/L αρσενικό σχεδόν όλο σε μορφή As(III). Οι αφαιρέσεις αρσενικού με EDR ήταν χαμηλές, μόνο στο 28%, και οι συγκεντρώσεις εκροής ήταν υψηλές στα 136 µg/L.

Η ποιότητα του νερού της πόλης φαίνεται στον Πίνακα 5.19. Η μονάδα λειτούργησε για 5 ημέρες με ανάκτηση 81%. Η συνολική απομάκρυνση του αρσενικού υπολογίστηκε σε 73%. Περίπου το 60% του As(III) αφαιρέθηκε, το οποίο ήταν υψηλότερο από το αναμενόμενο.

**Πίνακας 5.19:** Μελέτη EDR για την ποιότητα του νερού εισροής για το San Ysidro (EPA, 2000)

Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/L)
pH	7,1
TDS	810
As(ολικό)	0,085
Φθόριο	2,4
Θειικά Άλατα	36
Διττανθρακικό	552
Χλωριούχα	142

Μια άλλη κινητή μονάδα εξοπλισμένη με συστήματα RO, ED και EDR, μαζί με τον απαραίτητο εξοπλισμό προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας, χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή υδάτων από οκτώ κοινότητες του Νέου Μεξικού (New Mexico State University, 1979). Σε μία από τις μελέτες που διεξήχθησαν στο Bluewater του Νέου Μεξικού, η EDR μείωσε το επίπεδο αρσενικού στο επεξεργασμένο νερό στα 3 µg/L, από ένα επίπεδο εισροής που ανερχόταν στα 21 µg/L. Αυτό αντιστοιχεί σε αφαίρεση περίπου 86%. Το νερό τροφοδοσίας στη μονάδα EDR αντλήθηκε από ένα σημείο πριν από τη χλωρίωση του δημοτικού νερού. Ο ρυθμός ροής δοκιμής ήταν 4,8 gpm (1,1 m<sup>3</sup>/h) και ελήφθη 80% ανάκτηση. Η ποιότητα του ακατέργαστου νερού για το κοινοτικό νερό φαίνεται στον Πίνακα 5.20.

**Πίνακας 5.20: Ποιότητα Ακατέργαστου Νερού για Μελέτη Bluewater EDR (EPA, 2000)**

<b>Παράμετρος</b>	<b>Συγκέντρωση (mg/L)</b>
pH	7,1
TDS	908
Na	78
Θειικά Άλατα	398
Πυρίτιο	16
Χλωριούχα	52

Σε μια άλλη μελέτη, το νερό επεξεργασίας από την επιτόπια εξόρυξη υποβλήθηκε σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας μονάδα EDR 30.000 gpd (113,5 m<sup>3</sup>/h) (Garling, 1981). Η μονάδα αφαίρεσε περίπου το 59% των 22 μg/L αρσενικού στο νερό τροφοδοσίας που λειτουργεί με ανάκτηση περίπου 81%.

## 5.5 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ

### 5.5.1 Άμμος επικαλυμμένη με οξείδιο του σιδήρου (IOCS: Iron Oxide Coated Sand)

Η άμμος επικαλυμμένη με οξείδιο του σιδήρου (IOCS) είναι μια σπάνια διεργασία που έχει δείξει κάποιο ποσοστό αφαίρεσης αρσενικού. Η IOCS αποτελείται από κόκκους άμμου επικαλυμμένους με υδροξείδιο του σιδήρου που χρησιμοποιούνται σε αντιδραστήρες σταθερής κλίνης για την απομάκρυνση διαφόρων διαλυμένων μετάλλων. Τα μεταλλικά ιόντα ανταλλάσσονται με τα επιφανειακά υδροξείδια στην IOCS. Η άμμος αυτή παρουσιάζει επιλεκτικότητα στην προσρόφηση και ανταλλαγή ιόντων που υπάρχουν στο νερό. Όπως και άλλες διεργασίες, όταν η κλίνη εξαντληθεί, πρέπει να αναγεννηθεί με μια ακολουθία εργασιών που αποτελείται από έκπλυση με αναγεννητικό, έκπλυση με νερό και εξουδετέρωση (ουδετεροποίηση) με ισχυρό οξύ. Το υδροξείδιο του νατρίου είναι το πιο κοινό αναγεννητικό και το θειικό οξύ ο πιο κοινός εξουδετερωτής.



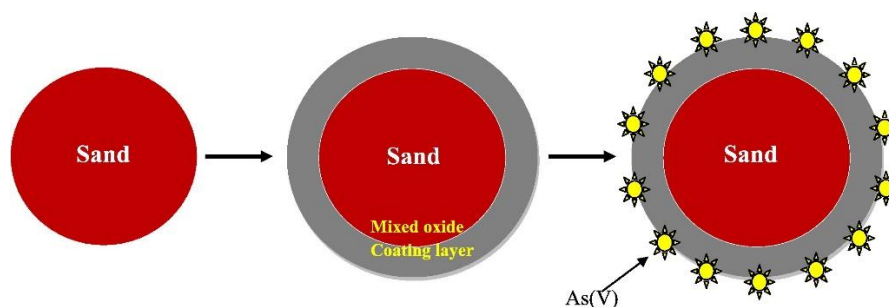
**Σχήμα 5.28:**

Κόκκοι άμμου επικαλυμμένοι με οξείδιο του σιδήρου

*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://northsearegion.eu/nuredrain/filter-materials/iron-oxide-coated-sand-iocs-iron-rich-sludge-pellets-for-phosphate-adsorption/>

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η άμμος επικαλυμμένη με οξείδιο του σιδήρου είναι αποτελεσματική για την αφαίρεση του αρσενικού. Παράγοντες όπως το pH, η κατάσταση οξείδωσης του αρσενικού, τα ανταγωνιστικά ιόντα, το EBCT και η αναγέννηση έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις αφαιρέσεις που επιτυγχάνονται με την IOCS. Όσον αφορά το pH, έρευνες έδειξαν ότι η αύξηση του pH από 5,5 σε 8,5 μείωσε την απορρόφηση του As(V) κατά περίπου 30%. Επιπλέον, και σε αυτή τη διεργασία ισχύει πως απομακρύνεται πιο εύκολα η πεντασθενής μορφή του αρσενικού, καθώς προσροφάται ταχύτερα στην IOCS. Πειράματα που έγινα απέδειξαν πως ο λόγος της προσρόφησης As(V) στις 2 και 24 ώρες ήταν περίπου 60%, ενώ για το As(III) ήταν μόνο περίπου 50%. Για τα ανταγωνιστικά ιόντα, η επίδραση θειικών και χλωριόντων φάνηκε πως είχε μικρή επίδραση στην προσρόφηση και την απομάκρυνση του As(V). Εν αντιθέσει, η παρουσία

οργανικής ύλης (DOC) μείωσε την ρόφηση  $As(V)$  κατά περίπου 50% (Benjamin, et al., 1998). Για την επιρροή του EBCT, διεξήχθησαν πειράματα στα οποία ο EBCT κυμαίνονται από 2,5 έως 15 λεπτά και επιτεύχθηκαν χαμηλές συγκεντρώσεις αρσενικού (δηλαδή  $<5 \mu g/L$ ) για περισσότερες από 2.000 ώρες λειτουργίας, ενώ η προσρόφηση φάνηκε να αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση του EBCT. Τέλος, η αναγέννηση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια ισχυρή βάση, τυπικά υδροξείδιο του νατρίου και η επακόλουθη εξουδετέρωση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ισχυρό οξύ, τυπικά θειικό οξύ.



**Σχήμα 5.29:**

Προσομοίωση απομάκρυνσης αρσενικού μέσω της άμμου επικαλυμμένη με οξείδιο του σιδήρου  
*Πηγή Σχήματος: (Chaudhry, et al., 2017)*

### 5.5.2 Πράσινη Άμμος (Greensand)

Οι τεχνολογίες οξείδωσης-διήθησης μπορεί να είναι αποτελεσματικές για την αφαίρεση αρσενικού. Η έρευνα των τεχνολογιών οξείδωσης-διήθησης έχει επικεντρωθεί κατά κύριο λόγο στη διήθηση πράσινης άμμου, ή όπως ονομάζεται αλλιώς "Manganese Greensand", με τη χρήση της οποίας έχουν παρατηρηθεί σημαντικές απομακρύνσεις αρσενικού και αποτελούν ένα συνδυασμό των διαδικασιών οξείδωσης, ιοντοανταλλαγής και προσρόφησης (Subramanian, et al., 1997). Ως αποτέλεσμα, παρακάτω αναλύεται η αποτελεσματικότητα του φιλτραρίσματος πράσινης άμμου ως τεχνολογίας αφαίρεσης αρσενικού.



**Σχήμα 5.30:**

Πράσινη άμμος – γλαυκονιτική άμμος διαμέτρου 20 mm (αριστερά) και σε σκόνη (δεξιά)  
*Πηγή Σχήματος: Ηλεκτρονική πηγή <https://www.sandatlas.org/greensand-and-green-sand/>*  
*Πηγή Σχήματος: (The Delaware Geological Survey, 2020)*

Το ενεργό υλικό της «πράσινης άμμου» είναι ο γλαυκονίτης, ένα πράσινο, πλούσιο σε σίδηρο ορυκτό που μοιάζει με άργιλο και έχει ιδιότητες ανταλλαγής ιόντων. Ο γλαυκονίτης εμφανίζεται συχνά στη φύση ως μικρά σφαιρίδια αναμειγμένα με άλλα σωματίδια άμμου, δίνοντας ένα πράσινο χρώμα στην άμμο. Η γλαυκονιτική άμμος τίθεται σε επεξεργασία με υπερμαγγανικό κάλιο ( $\text{KMnO}_4$ ) έως ότου οι κόκκοι της άμμου επικαλυφθούν με ένα στρώμα οξειδίων μαγγανίου, ιδιαίτερα διοξείδιο του μαγγανίου. Η αρχή πίσω από αυτήν την επεξεργασία αφαίρεσης αρσενικού είναι πολύπλευρη και περιλαμβάνει οξείδωση, ανταλλαγή ιόντων και προσρόφηση. Οι ενώσεις του αρσενικού εκτοπίζουν τα ιόντα του οξειδίου του μαγγανίου (πιθανώς  $\text{OH}^-$  και  $\text{H}_2\text{O}$ ) και δεσμεύονται στην επιφάνεια της πράσινης άμμου - στην πραγματικότητα διενεργείται μια ανταλλαγή ιόντων. Η οξειδωτική φύση της επιφάνειας του μαγγανίου μετατρέπει το  $\text{As(III)}$  σε  $\text{As(V)}$  και το  $\text{As(V)}$  προσροφάται στην επιφάνεια του. Ως αποτέλεσμα της μεταφοράς ηλεκτρονίων και της προσρόφησης του  $\text{As(V)}$ , το αναγόμενο μαγγάνιο απελευθερώνεται από την επιφάνεια. Το αρσενικό, επίσης, απομακρύνεται ως ίζημα μαζί με το σίδηρο και/ή το μαγγάνιο και κατακρατείται από το φίλτρο (Kartinen, et al., 1995).

Η αποτελεσματικότητα της πράσινης άμμου για την αφαίρεση του αρσενικού εξαρτάται από την ποιότητα του εισερχόμενου νερού. Η έρευνα των (Subramanian, et al., 1997) έδειξε μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης εισερχόμενου  $\text{Fe(II)}$  και του ποσοστού αφαίρεσης αρσενικού. Η αφαίρεση αυξήθηκε από 41% σε περισσότερο από 80% καθώς η αναλογία  $\text{Fe/As}$  αυξήθηκε από 0 σε 20/1 όταν επεξεργάστηκε ένα νερό βρύσης εμβολιασμένο με 200 mg/L  $\text{As(III)}$ . Το νερό της βρύσης περιείχε 366 mg/L θειικά και 321 mg/L TDS. Κανένα από αυτά τα συστατικά δεν φάνηκε να επηρεάζει την απομάκρυνση του αρσενικού. Η εισερχόμενη συγκέντρωση  $\text{Mn(IV)}$  μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο. Τα δισθενή ιόντα, όπως το ασβέστιο, μπορούν επίσης να ανταγωνιστούν το αρσενικό για θέσεις προσρόφησης. Η ποιότητα του νερού θα πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά πριν την εφαρμογή της επεξεργασίας με πράσινη άμμο (EPA, 2000). Σημαντική αφαίρεση αρσενικού επιτυγχάνεται, επίσης, χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία, για την επεξεργασία των υπόγειων υδάτων με ποσοστά αφαίρεσης αρσενικού άνω του 90% (Subramanian, et al., 1997).

Όπως και με άλλα μέσα επεξεργασίας, η πράσινη άμμος πρέπει να αναγεννηθεί όταν εξαντληθεί η οξειδωτική και προσροφητική της ικανότητα. Τα φίλτρα Greensand αναγεννώνται χρησιμοποιώντας ένα διάλυμα περίσσειας υπερμαγγανικού καλίου ( $\text{KMnO}_4$ ). Η συχνότητα αναγέννησης θα εξαρτηθεί από την ποιότητα του εισερχόμενου νερού.



### 5.5.3 Παραλλαγές Έμμεσης Απομάκρυνσης Αρσενικού μέσω Οξειδωσης Σιδήρου/Μαγγανίου

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφονται και δύο παραλλαγές της διεργασίας οξειδωσης (Kartinen, et al., 1995). Μία από τις διεργασίες περιλαμβάνει εμπορικά - πατενταρισμένο υλικό φίλτρου. Σε μια παραλλαγή αυτής της διαδικασίας, χλώριο εγχέεται στο ακατέργαστο νερό που περιέχει σίδηρο και/ή μαγγάνιο και αφήνεται να αντιδράσει με το σίδηρο και/ή το μαγγάνιο σε μία δεξαμενή αντίδρασης για σύντομο χρονικό διάστημα - ένα ή δύο λεπτά. Μετά, μέσα στην ίδια δεξαμενή που γίνεται η αντίδραση με το χλώριο, μπορεί επίσης να εγχυθεί διοξείδιο του θείου στο νερό και να αφεθεί να αντιδράσει κι αυτό για μικρό χρονικό διάστημα. Το νερό στη συνέχεια απορρίπτεται σε ένα ή περισσότερα δοχεία φίλτρου (φίλτρανης) που περιέχουν το υλικό φίλτρου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί, μείωση αρσενικού έως και 50%. Το αρσενικό προφανώς απομακρύνεται ως ίζημα σιδήρου/αρσενικού ή μαγγανίου/αρσενικού το οποίο κατακρατείται από το φίλτρο (Kartinen, et al., 1995).

Μια άλλη παραλλαγή αυτής της διεργασίας, περιλαμβάνει τη χρήση τριών πρόσθετων χημικών. Εκτός από τα δύο δοχεία αντίδρασης και φίλτρα που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιούνται επίσης δεξαμενή κροκιδωσης-καθίζησης. Ενώ το χλώριο ήταν η μόνη χημική ουσία που προστέθηκε πριν από το πρώτο δοχείο αντίδρασης, στην παραλλαγή αυτής της διεργασίας, προστίθεται ακόμη χλωριούχος σίδηρος ( $\text{FeCl}_3$ ). Μετά το πρώτο δοχείο αντίδρασης, ένα πρόσθετο κροκιδωτικό (PASS: Polymeric Aluminum Silicate Sulfate) προστίθεται ακόμη στο  $\text{SO}_2$  (διοξείδιο του θείου). Το νερό στη συνέχεια περνά μέσα από το δεύτερο δοχείο αντίδρασης. Τέλος, ένα οργανικό πολυμερές προστίθεται στο νερό καθώς εκκενώνεται από το δεύτερο δοχείο αντίδρασης και το νερό εισέρχεται σε μία δεξαμενή κροκιδωσης-καθίζησης πριν φιλτραριστεί. Με αυτή τη δεύτερη παραλλαγή, μπορεί να ληφθούν ποσοστά απομάκρυνσης του αρσενικού άνω του 90% (Kartinen, et al., 1995).

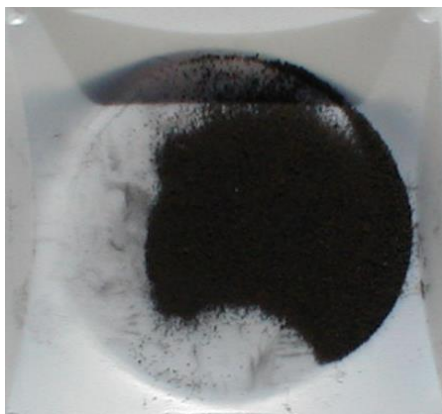
### 5.5.4 Τροποποιημένος με θείο Σίδηρος (SMI: Sulfur-Modified Iron)

Η διεργασία αυτή (SMI) αποτελείται από τρία συστατικά:

- ✚ λεπτώς διαιρεμένος μεταλλικός σίδηρος
- ✚ στοιχειακό θείο σε σκόνη ή άλλες ενώσεις θείου και
- ✚ ένα οξειδωτικό μέσο.

Ο κονιοποιημένος σίδηρος, το θείο σε σκόνη και ο οξειδωτικός παράγοντας (υπεροξείδιο του υδρογόνου  $\text{H}_2\text{O}_2$  σε προκαταρκτικές δοκιμές), που χρησιμεύει για τη μετατροπή του  $\text{As(III)}$  σε  $\text{As(V)}$ , αναμειγνύονται επιμελώς και στη συνέχεια προστίθενται στο νερό που πρόκειται να υποβληθεί σε επεξεργασία.

Αρσενικό, χαλκός, άλλα μέταλλα αφαιρούνται μέσω προσρόφησης στο υλικό αυτό. Το διάλυμα στη συνέχεια αναμειγνύεται και καθιζάνει.



**Σχήμα 5.31:** Τροποποιημένος με θείο Σίδηρος (SMI: Sulfur-Modified Iron)

*Πηγή Σχήματος:* Ηλεκτρονική πηγή <https://primaenvironmental.com/wp-content/uploads/2019/05/Sulfur-Modified-Iron-A-Versatile-Media-for-Ex-Situ-Water-Treatment.pdf>

Χρησιμοποιώντας τη διεργασία σε διάφορους τύπους νερού, ελήφθησαν υψηλές απορροφητικές ικανότητες με τελική συγκέντρωση αρσενικού 0,050 mg/L. Η απομάκρυνση του αρσενικού επηρεάστηκε από το pH και φάνηκε να παρουσιάζει μεγάλη εξάρτηση με την αναλογία σιδήρου προς αρσενικό. Για παράδειγμα, περίπου 20 mg/g Fe αφαιρέθηκαν σε pH 8 και 50 mg/g Fe αφαιρέθηκαν σε pH 7.

Οι δοκιμές στήλης συσκευασμένης κλίνης με το υλικό έδειξαν SMI σημαντική αφαίρεση αρσενικού σε χρόνους παραμονής από 5 έως 15 λεπτά. Μετρήθηκε σημαντική απομάκρυνση τόσο του αρσενικού όσο και του αρσενίτη. Η υψηλότερη ικανότητα προσρόφησης που μετρήθηκε ήταν 11 mg/g Fe. Το προβλεπόμενο λειτουργικό κόστος για το SMI, όταν η διεργασία λειτουργεί κάτω από ένα pH 8, είναι πολύ χαμηλότερο από τις εναλλακτικές τεχνολογίες αφαίρεσης αρσενικού, όπως η προσθήκη χλωριούχου σιδήρου, η αντίστροφη ώσμωση και η ενεργοποιημένη αλουμίνα. Η εξοικονόμηση κόστους θα αυξηθεί αναλογικά με την αύξηση των ρυθμών ροής και τις αυξημένες συγκεντρώσεις αρσενικού.

Πιθανά συστήματα επεξεργασίας που χρησιμοποιούν SMI περιλαμβάνουν αντιδραστήρες συνεχούς ανάδευσης δεξαμενών, αντιδραστήρες συσκευασμένης κλίνης, αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης και παθητικούς επί τόπου αντιδραστήρες. Οι αντιδραστήρες συσκευασμένης κλίνης και ρευστοποιημένης κλίνης φαίνεται να είναι οι πιο υποσχόμενοι για την επιτυχή απομάκρυνση του αρσενικού.

#### 5.5.5 Άμμος Εμπλουτισμένη με Σίδηρο

Η άμμος εμπλουτισμένη με σίδηρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγωγή των ανόργανων ειδών αρσενικού σε συν-ιζήματα σιδήρου, μικτά ιζήματα και, σε συνδυασμό με θειικά, σε αρσеноπυρίτες. Αυτός ο τύπος διεργασία είναι

ουσιαστικά μια τεχνολογία φίλτρου, όπου το νερό της πηγής φιλτράρεται μέσα από ένα στρώμα άμμου και ρινίσματα σιδήρου, παρόμοιο με το φιλτράρισμα με πράσινη άμμο. Σε αντίθεση με ορισμένες τεχνολογίες, για παράδειγμα την ανταλλαγή ιόντων, το θειικό άλας εισάγεται στην πραγματικότητα σε αυτή τη διαδικασία για να βοηθάει την καθίζηση του αρσενιοπυρίτη.

Αυτή η μέθοδος αφαίρεσης αρσενικού αναπτύχθηκε αρχικά ως τεχνολογία αποκατάστασης αρσενικού και φαίνεται να είναι αρκετά αποτελεσματική για αυτή τη χρήση. Οι δοκιμές σε εργαστηριακή κλίμακα δείχνουν μέση απόδοση αφαίρεσης 81% με πολύ υψηλότερες αφαιρέσεις σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις εισροής. Αυτή η μέθοδος δοκιμάστηκε σε επίπεδα αρσενικού 20.000 µg/L και στα 2.000 µg/L μείωσε σταθερά τα επίπεδα αρσενικού σε λιγότερο από 50 µg/L (άνω του τρέχοντος MCL). Σε συνθήκες ροής, παρόλο που οι αφαιρέσεις ήταν κατά μέσο όρο 81% και έφτασαν πάνω από 95% σε 2.000 µg/L αρσενικό, δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι αυτή η τεχνολογία μπορεί να μειώσει τα επίπεδα αρσενικού κάτω από περίπου 25 µg/L και δεν υπάρχουν δεδομένα που να δείχνουν πώς λειτουργεί η τεχνολογία σε κανονικές συνθήκες και επίπεδα αρσενικού νερού πηγής, επομένως δεν μπορεί να προταθεί με βεβαιότητα ως διεργασία απομάκρυνσης αρσενικού σε πλήρους κλίμακα εγκαταστάσεις.



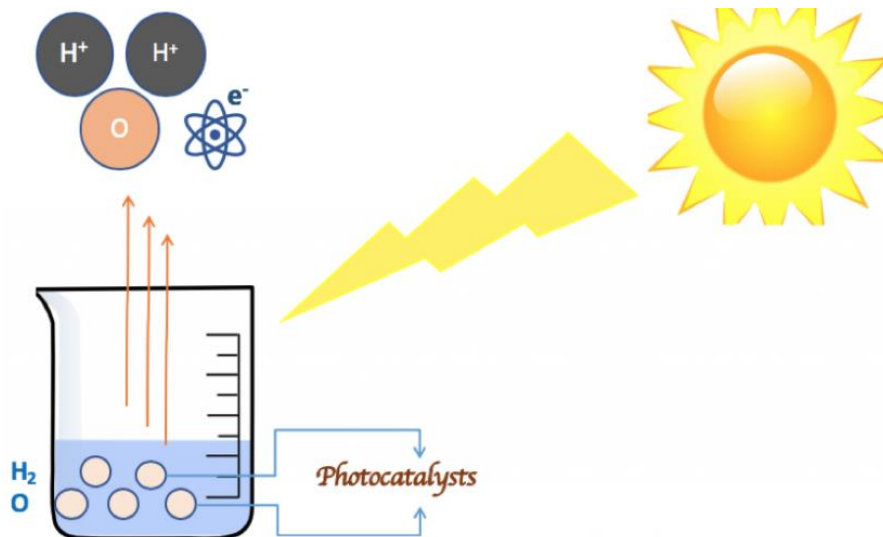
**Σχήμα 5.32:**

Άμμος εμπλουτισμένη με σίδηρο όπου τα ρινίσματα σιδήρου αναμειγνύονται με την άμμο.

*Πηγή Σχήματος: (Silverman, 2002)*

#### **5.5.6 Φωτο-οξειδωση**

Ερευνητές στον Οργανισμό Πυρηνικής Επιστήμης και Τεχνολογίας της Αυστραλίας (ANSTO: Australian Nuclear Science and Technology Organisation) ανακάλυψαν ότι ο ρυθμός οξειδωσης του As(III) από το οξυγόνο μπορεί να αυξηθεί κατά δέκα χιλιάδες φορές παρουσία φωτός και υλικών που απορροφούν το φως (Cooperative Research Centres for Waste Management, 1999). Το οξειδωμένο αρσενικό, As(V), μπορεί στη συνέχεια να αφαιρεθεί αποτελεσματικά με συγκαταβύθιση.



**Σχήμα 5.33:** Διάγραμμα λειτουργίας φωτο-οξειδωσης  
*Πηγή Σχήματος: (Gosh, 2018)*

Η ANSTO αξιολόγησε τόσο τους αντιδραστήρες λαμπτήρων υπεριώδους ακτινοβολίας UV όσο και τη φωτο-οξείδωση με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός χρησιμοποιώντας όξινο νερό που περιέχει μέταλλα από ένα εγκαταλελειμμένο ορυχείο χρυσού, αργύρου και μόλυβδου. Απαιτήθηκε διάχυση αέρα για οξείδωση υποβοηθούμενη από το φως του ήλιου, λόγω της υψηλής αρχικής συγκέντρωσης As(III) (12 mg/L). Δοκιμές έδειξαν ότι σχεδόν πλήρης οξείδωση του As(III) μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τη φωτοχημική διεργασία. Η ανάλυση των υδάτων διεργασίας έδειξε ότι το 97% του αρσενικού στο ρεύμα διεργασίας ήταν παρόν ως As(V) (CRC-WMPC, 1999).

Η φωτο-οξείδωση του νερού του ορυχείου ακολουθούμενη από συγκαταβύθιση μπόρεσε να μειώσει τις συγκεντρώσεις αρσενικού έως και 17 μg/L. Οι αρχικές συγκεντρώσεις ολικού αρσενικού ήταν άγνωστες, αν και η συγκέντρωση As(III) δόθηκε περίπου στα 12 mg/L, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από τις τυπικές συγκεντρώσεις αρσενικού σε ακατέργαστο νερό. Η ANSTO ανέφερε ότι τα υπολείμματα αυτής της διεργασίας είναι περιβαλλοντικά σταθερά και πέρασαν τη δοκιμή Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) που είναι απαραίτητη για να δηλωθούν τα απόβλητα ως μη επικίνδυνα και κατάλληλα για διάθεση σε ΧΥΤΑ.

Με βάση τις αφαιρέσεις που επιτεύχθηκαν και τα χαρακτηριστικά των υπολειμμάτων, αναμένεται ότι η φωτο-οξείδωση ακολουθούμενη από συγκαταβύθιση θα είναι μια αποτελεσματική τεχνολογία αφαίρεσης αρσενικού. Ωστόσο, θα πρέπει να αξιολογηθεί περαιτέρω πριν από τη σύσταση ως εγκεκριμένη τεχνολογία αφαίρεσης αρσενικού για πόσιμο νερό.

## 6 ΚΟΣΤΟΣ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο προσδιορισμός του κόστους μιας διεργασίας απομάκρυνσης αρσενικού από το νερό, περιλαμβάνει τις εκτιμώμενες δαπάνες κεφαλαίου και τη δαπάνη λειτουργίας και συντήρησης (O&M) αυτής. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κόστη των διεργασιών και ο τρόπος με τον οποίο εκτιμάται το κόστος κάθε τεχνολογίας, όπως αναλύονται σε τρεις πηγές της διεθνούς βιβλιογραφίας:

- ✚ *COST ESTIMATING MANUAL FOR WATER TREATMENT FACILITIES* (McGivney, et al., 2008)
- ✚ *Technologies and Costs for removal of arsenic from drinking water* (EPA, 2000)  
Το συγκεκριμένο εγχειρίδιο χρησιμοποιεί για την εκτίμηση του κόστους τρία μοντέλα: το VSS (Very Small Systems) (Malcolm Pirnie, 1993), το W/W Cost Model (Culp/Wesner/Culp, 1984) και το Water Model (Culp/Wesner/Culp, 1994)
- ✚ *Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems* (EPA, 2003)

Κατά την ανάλυση του κόστους κάθε τεχνολογίας περιλαμβάνεται και μια σύντομη περιγραφή αυτής, των κριτηρίων σχεδιασμού και των καμπυλών κόστους κεφαλαίου και O&M για συστήματα με διάφορες παροχές σχεδιασμού και για τις ακόλουθες τεχνολογίες αφαίρεσης αρσενικού:

- ✚ Προοξείδωση
- ✚ Ιζηματοποίηση
- ✚ Προσρόφηση, κυρίως ενεργοποιημένη αλουμίνα.
- ✚ Ανταλλαγή ιόντων, συγκεκριμένα ανταλλαγή ανιόντων.

### 6.2 ΠΡΟΟΞΕΙΔΩΣΗ

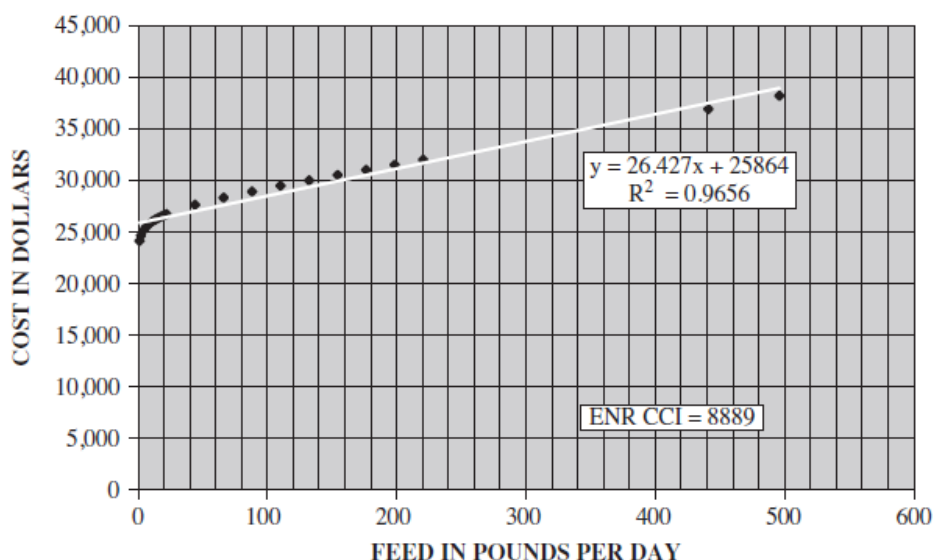
Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, το ανόργανο αρσενικό εμφανίζεται σε δύο πρωτεύουσες καταστάσεις σθένους, τον αρσενίτη As (III) και το αρσενικό As (V). Τα επιφανειακά ύδατα συνήθως περιέχουν As(V), ενώ το As(III) απαντάται στα υπόγεια, και κάθε μία από τις τεχνολογίες επεξεργασίας αφαιρεί το As(V) πιο εύκολα από το As(III). Ως αποτέλεσμα, στις περισσότερες από αυτές μπορεί να είναι απαραίτητη η προοξείδωση.

Η προσθήκη υπερμαγγανικού καλίου και η χλωρίωση είναι δύο τεχνολογίες οξείδωσης που έχουν αξιολογηθεί και κριθεί αποτελεσματικές για τη μετατροπή του αρσενίτη As(III) σε αρσενικό As(V). Να επισημανθεί, όμως, πως η χλωρίωση μπορεί να προκαλέσει σχηματισμό υποπροϊόντων απολύμανσης (DBP:

Disinfection By-Product) στο νερό εισροής με υψηλές συγκεντρώσεις TOC. Επιπλέον, η χλωρίωση μπορεί να προκαλέσει βλάβες σε ορισμένες από τις διεργασίες μεμβρανών. Τα χαρακτηριστικά του νερού εισροής θα πρέπει να αξιολογούνται διεξοδικά όταν εξετάζονται οι τεχνολογίες προοξειδωσης. Πρόσθετες τεχνολογίες οξειδωσης, όπως ο οζονισμός και το υπεροξείδιο του υδρογόνου, μπορεί να είναι αποτελεσματικές, αλλά χρειάζονται περαιτέρω αξιολόγηση.

### 6.2.1 Υπερμαγγανικό Κάλιο

Το υπερμαγγανικό κάλιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία προοξειδωσης για τη μετατροπή του As(III) σε As(V). Είναι μια ξηρή χημική ουσία και αποθηκεύεται και τροφοδοτείται όπως το ξηρό θειικό αργίλιο και περιλαμβάνει: αποθήκευση και τροφοδοσία, δεξαμενή διάλυσης και ανάμειξης, όργανα μέτρησης και παρακολούθησης, σωληνώσεις και βαλβίδες και έναν υδραυλικό εγχυτήρα για το υγρό προϊόν. Το υπερμαγγανικό κάλιο είναι πιο ακριβό από τη χλωρίωση. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη χλωρίωση, το υπερμαγγανικό κάλιο είναι γνωστό ότι δεν σχηματίζει μετρήσιμα DBPs και δεν προκαλεί βλάβες στις μεμβράνες. Το ανεπεξέργαστο νερό και η κατάντη διεργασία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή μιας τεχνολογίας προοξειδωσης. Στο βιβλίο «COST ESTIMATING MANUAL FOR WATER TREATMENT FACILITIES» (McGivney, et al., 2008) παρουσιάζεται καμπύλη κόστους κατασκευής του συστήματος τροφοδοσίας με υπερμαγγανικό κάλιο σε όρους του 2007 (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Τροφοδοσία Υπερμαγγανικού Καλίου  
Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)

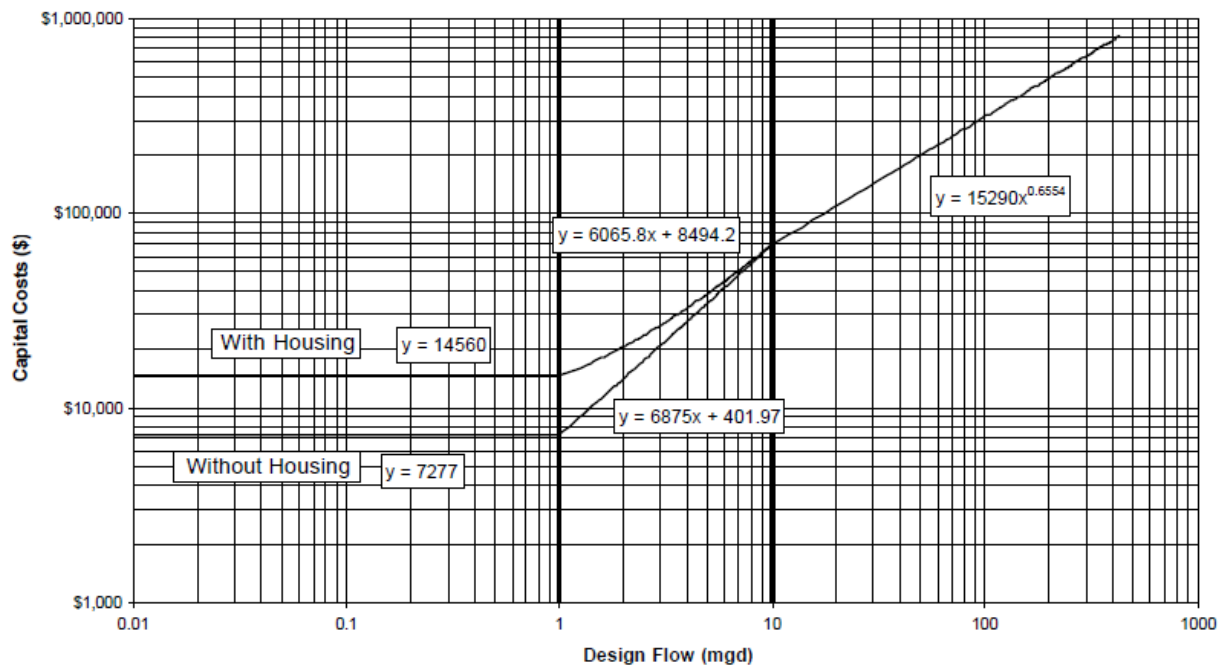
Η EPA (EPA, 2000) χρησιμοποιεί για την εκτίμηση του κόστους χρήσης υπερμαγγανικού καλίου ως μέσου οξειδωσης σε παροχές κάτω των 4.500 m<sup>3</sup>/d το μοντέλο VSS (Malcolm Pirnie, 1993). Για παροχές μεγαλύτερες από 45.500 m<sup>3</sup>/

δ μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο W/W Cost για την εκτίμηση του κεφαλαίου και του κόστους O&M. Η γραμμική παρεμβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του κόστους στις μεταβατικές περιοχές μεταξύ των δύο μοντέλων, δηλαδή από 4.500 – 45.500 m<sup>3</sup>/d. Στις καμπύλες κόστους της EPA για τις διεργασίες απομάκρυνσης που παρατίθενται παρακάτω, το κόστος της προσθήκης υπερμαγγανικού καλίου συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό του κόστους όλης της διεργασίας. Το κόστος κεφαλαίου και O&M υπερμαγγανικού καλίου αναπτύχθηκε για δόσεις 10 mg/L.

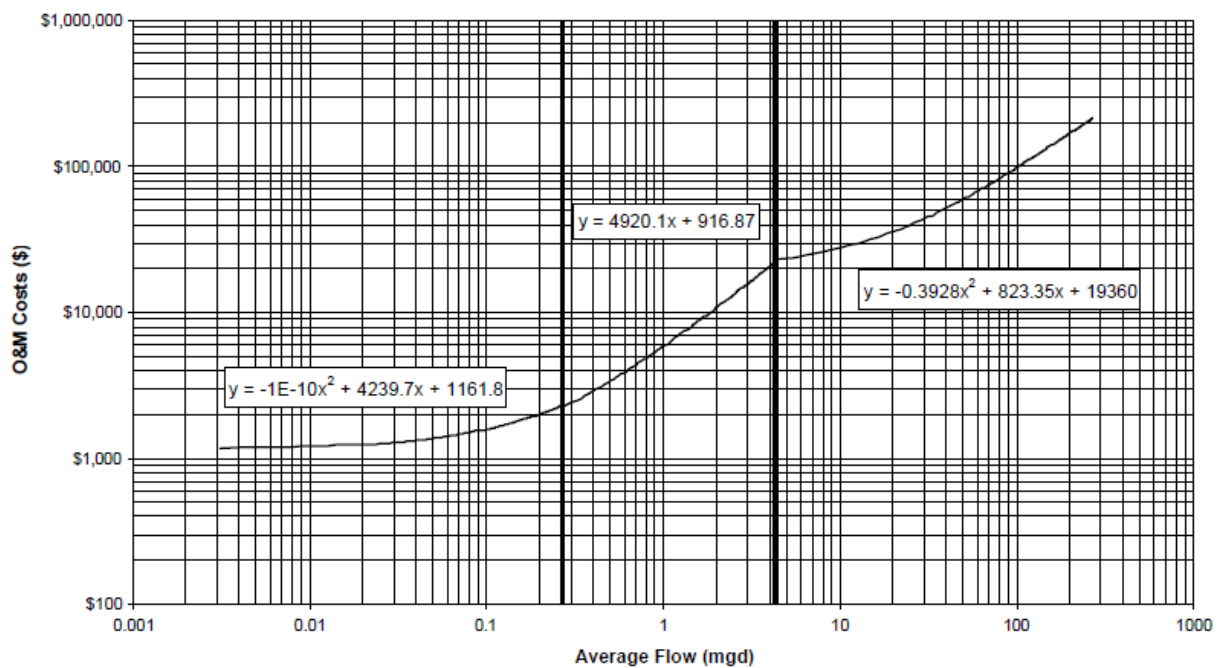
### 6.2.2 Χλωρίωση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η χλωρίωση μπορεί να προκαλέσει σχηματισμό DBP στο νερό παροχής με υψηλές συγκεντρώσεις TOC. Η χλωρίωση έχει επίσης αποδειχθεί ότι προκαλεί βλάβες σε ορισμένες από τις διεργασίες μεμβρανών. Ως αποτέλεσμα, τα χαρακτηριστικά του νερού πηγής και οι ανάγκες των κατάντη διεργασιών θα πρέπει να αξιολογούνται διεξοδικά όταν εξετάζεται η χλωρίωση ως τεχνολογία οξειδωσης. Το κόστος κεφαλαίου και O&M αναπτύχθηκε για συστήματα χλωρίωσης σε δόσεις 1,5 mg/L. Ομοίως με τα συστήματα υπερμαγγανικού καλίου, η EPA (EPA, 2000) χρησιμοποιεί το μοντέλο VSS για τον υπολογισμό του κόστους για τις παροχές κάτω από 4.500 m<sup>3</sup>/d και το μοντέλο W/W Cost για την εκτίμηση του κεφαλαίου και του κόστους O&M για παροχές μεγαλύτερες από 45.500 m<sup>3</sup>/d. Γραμμική παρεμβολή χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του κόστους στις μεταβατικές περιοχές μεταξύ 4.500 – 45.500 m<sup>3</sup>/d.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ορισμένα συστήματα που χρησιμοποιούν επί του παρόντος χλώριο για απολύμανση ενδέχεται να είναι σε θέση να τροποποιήσουν τα υπάρχοντα συστήματα τροφοδοσίας χλωρίου για να χρησιμοποιούν το χλώριο και ως προοξειδωτικό με σημαντική εξοικονόμηση κεφαλαίου. Οι καμπύλες και οι εξισώσεις κόστους κεφαλαίου και O&M παρουσιάζονται στα Σχήματα (Σχήμα 6.2, Σχήμα 6.3)



**Σχήμα 6.2:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για την προοξειδωση με δόση χλωρίου 1,5 mg/L  
*Πηγή Σχήματος:* (EPA, 2000)



**Σχήμα 6.3:** Καμπύλη κόστους O&M για την προοξειδωση με δόση χλωρίου 1,5 mg/L  
*Πηγή Σχήματος:* (EPA, 2000)



### 6.3 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

#### 6.3.1 Κροκίδωση – Καθίζηση - Διύλιση (C/F)

Η κροκίδωση – καθίζηση - διύλιση (C/F) είναι μια επεξεργασία που μεταβάλλει τις φυσικές ή χημικές ιδιότητες των κολλοειδών ή αιωρούμενων στερεών, ενισχύοντας τη συσσωμάτωση και επιτρέποντας σε αυτά τα στερεά να καθιζάνουν εκτός διαλύματος λόγω της βαρύτητας ή να αφαιρεθούν με διύλιση. Μια τυπική διεργασία C/F περιλαμβάνει προσθήκη κροκιδωτικού, η οποία μπορεί να ακολουθείται από προσθήκη πολυμερούς για να βοηθήσει τη συσσωμάτωση, την κροκίδωση, την καθίζηση και τέλος τη διύλιση.

Η κροκίδωση/διήθηση χρησιμοποιείται ευρέως ως επεξεργασία για την αφαίρεση αιωρούμενων στερεών από τα επιφανειακά ύδατα. Τα περισσότερα υπόγεια ύδατα έχουν χαμηλή θολότητα και δεν απαιτούν τέτοιου είδους επεξεργασία. Η C/F είναι απίθανο να εγκατασταθεί αποκλειστικά για αφαίρεση αρσενικού. Τα συστήματα που εξετάζουν την εγκατάσταση αυτής της τεχνολογίας θα πρέπει να σχεδιάσουν τη διεργασία ώστε να λειτουργεί στο βέλτιστο εύρος pH εάν απαιτείται υψηλή απόδοση. Τα νερά εισροής που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις As(III) μπορούν να υποστούν οξειδωση ως προεπεξεργασία για C/F.

Παρακάτω στα Σχήματα 6.4 έως 6.9 παρουσιάζονται οι καμπύλες κόστους κατασκευής των επιμέρους διεργασιών ενός συμβατικού συστήματος επεξεργασίας κροκίδωσης – καθίζησης – διύλισης, καθώς και το κόστος O&M ενός τέτοιου συμβατικού συστήματος (Kawamura & , 2008). Να σημειωθεί ότι στο κόστος O&M του συστήματος περιλαμβάνεται και η τελική απολύμανση με χλώριο. Επίσης, για τα κόστη κατασκευής έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

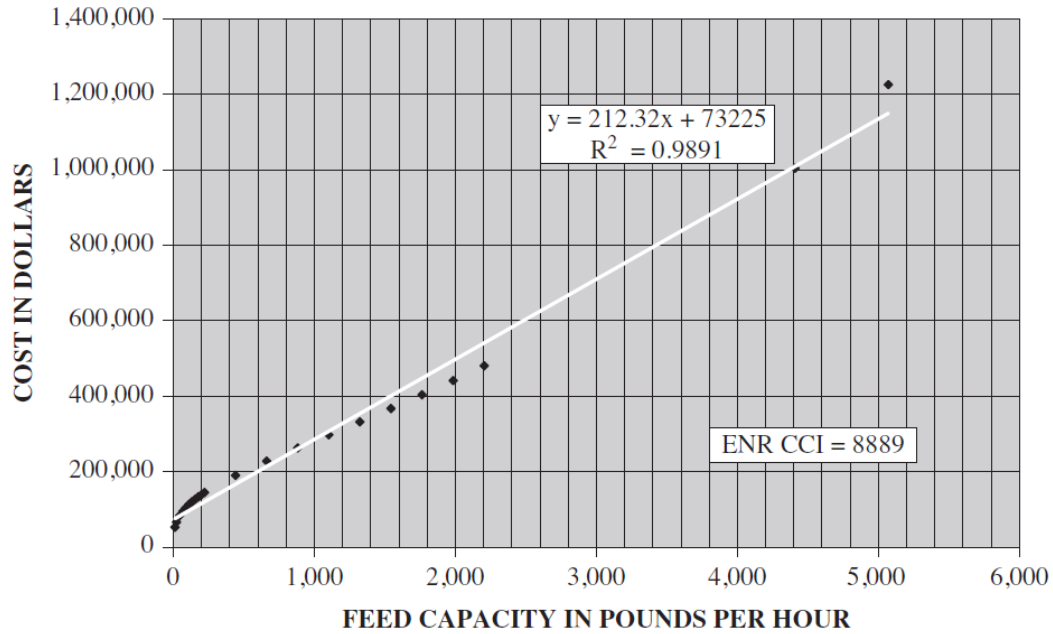
Παράμετρος	Τιμή
Τροφοδοσία σκόνης θειικού αργιλίου	-
Ταχεία Μίξη	G = 900
Συσσωμάτωση	G = 50
Κυκλική Δεξαμενή με βάθος νερού	10 Ft (= 3m)
Διστρωματικό Φίλτρο	-

Όλα τα κόστη αναφέρονται σε μονάδες:

- mgd - \$
- p/h - \$
- Gallons - \$
- mG - \$
- sf - \$

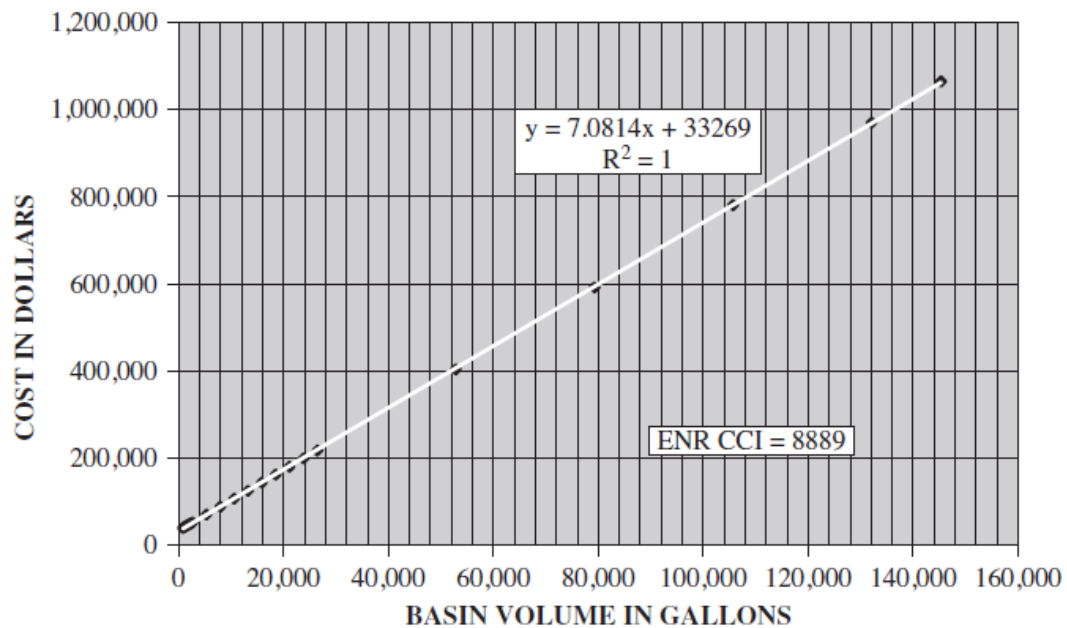
### 6.3.1.1 Κόστη κατασκευής επιμέρους διεργασιών

#### Τροφοδοσία σκόνης θειικού αργιλίου



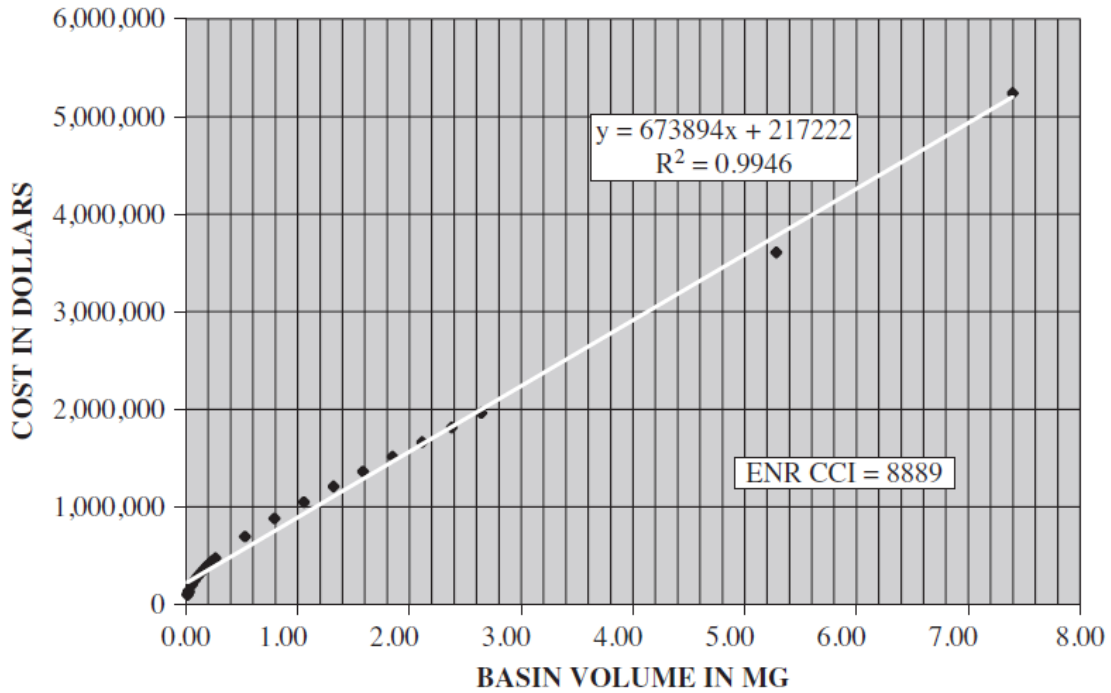
Σχήμα 6.4: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους τροφοδοσία σκόνης θειικού αργιλίου  
Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)

#### Ταχεία Μίξη $G = 900$



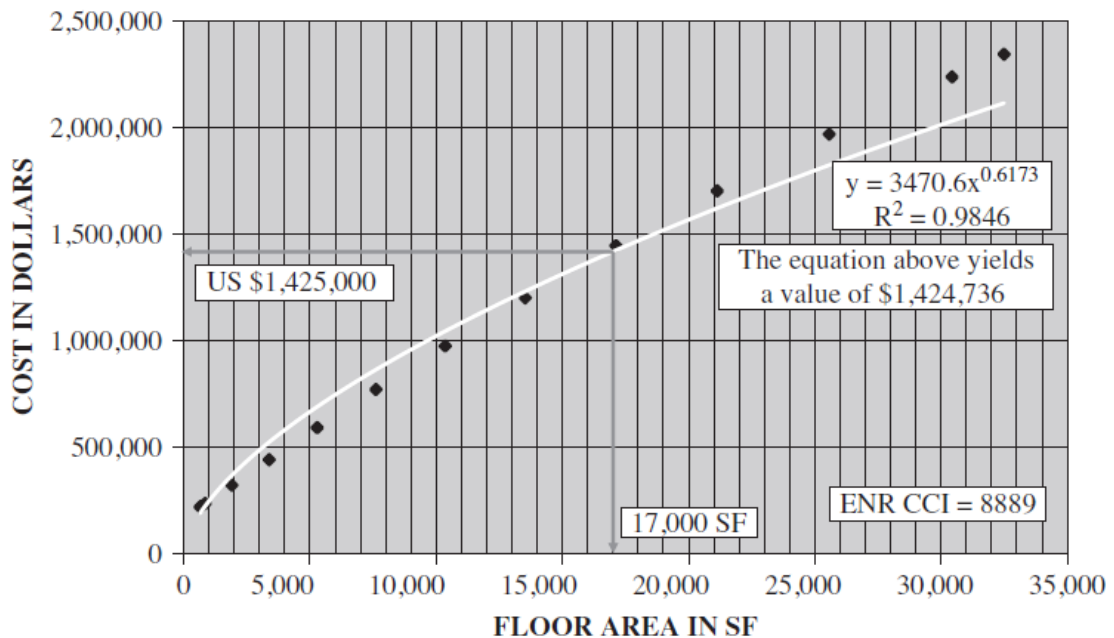
Σχήμα 6.5: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους Ταχείας Μίξης με κλίση ταχύτητας  $G = 900$   
Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)

Συσσωμάτωση  $G = 50$



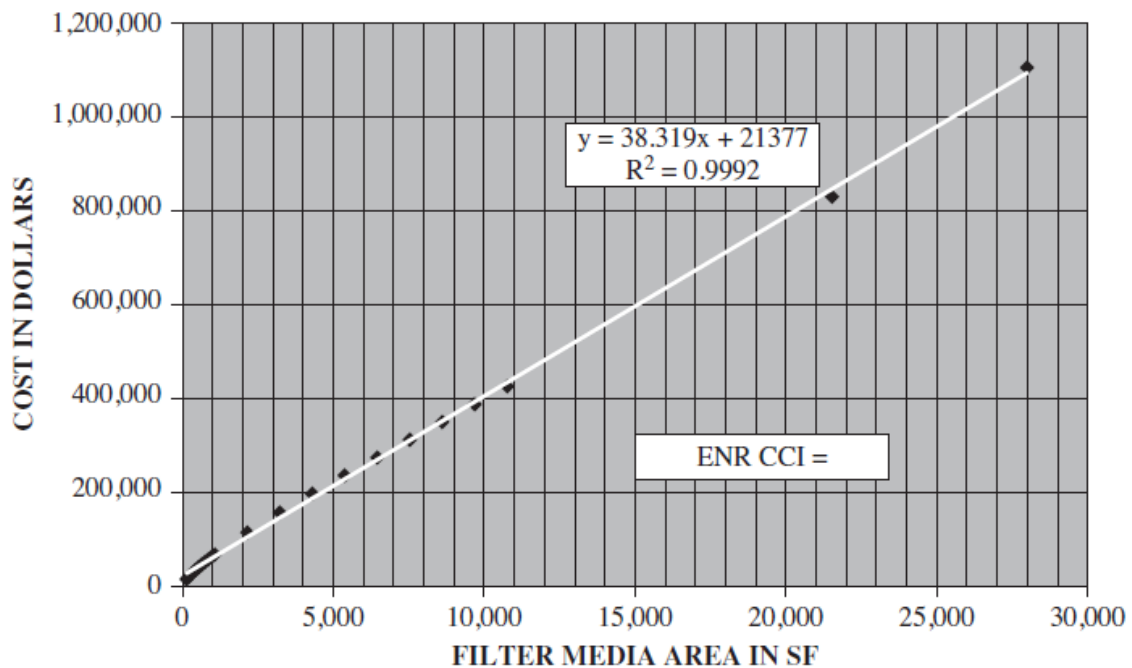
Σχήμα 6.6: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους Συσσωμάτωσης με κλίση ταχύτητας  $G = 900$   
 Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)

Κυκλική Δεξαμενή με πλευρικό βάθος νερού 10 Ft (= 3m)



Σχήμα 6.7: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για Κυκλική Δεξαμενή με πλευρικό βάθος νερού 10 Ft  
 Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)

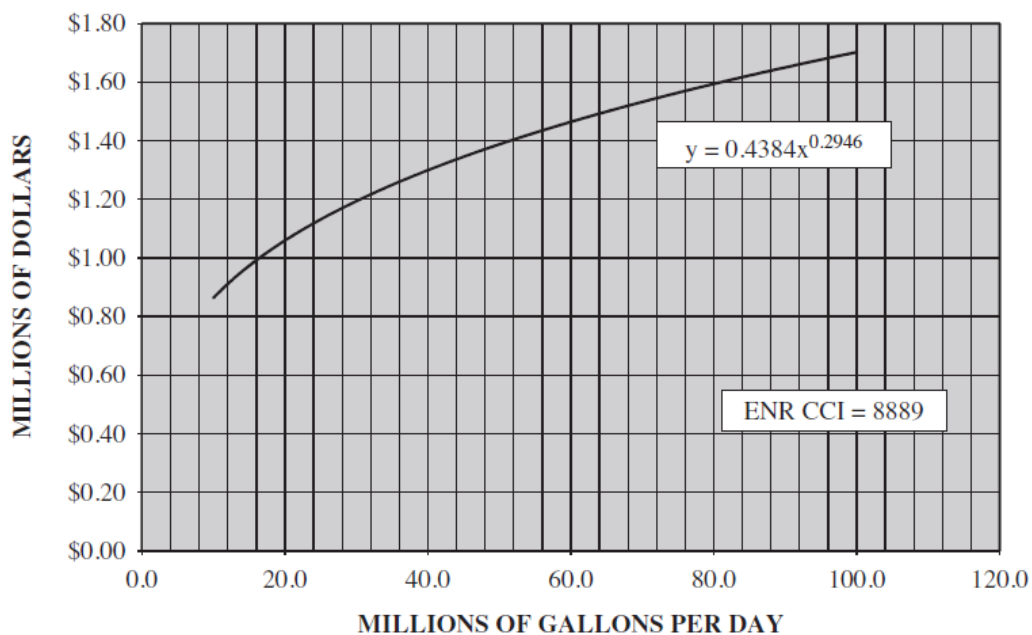
### Διστρωματικό Φίλτρο



Σχήμα 6.8: Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για Διστρωματικό Φίλτρο  
*Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)*

### 6.3.1.2 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης O&M συμβατικού συστήματος κροκίδωσης – καθίζησης – διύλισης

#### Συμβατική Διεργασία Απομάκρυνσης



Σχήμα 6.9: Καμπύλη κόστους O&M για εγκατάσταση με Συμβατική Διεργασία Απομάκρυνσης  
*Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)*

### 6.3.2 Ενισχυμένη κροκίδωση

Η ενισχυμένη κροκίδωση περιλαμβάνει τροποποιήσεις στην τυπική διεργασία κροκίδωσης/διήθησης, όπως αύξηση της δόσης του κροκιδωτικού, μείωση του pH ή και των δύο. Η διαδικασία είναι σχεδόν πανομοιότυπη με αυτή της συμβατικής C/F με αυτές τις δύο εξαιρέσεις.

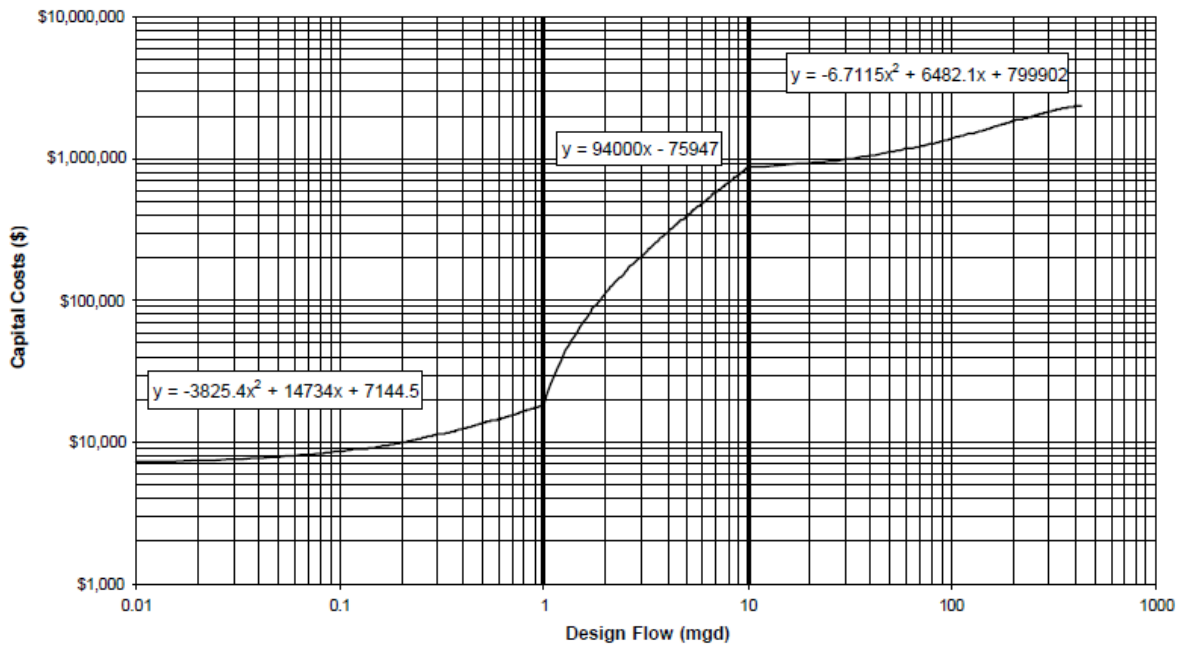
Για τον σκοπό της αξιολόγησης του κόστους, υποτέθηκε ότι μια συμβατική μονάδα επεξεργασίας C/F θα μπορούσε να αφαιρέσει το 50% του εισερχόμενου αρσενικού πριν τη ενίσχυση. Η μόνη επιπρόσθετη επιβάρυνση O&M θα προκύψει από το κόστος ενέργειας και υλικών, και θεωρείται ότι δεν απαιτείται καμία πρόσθετη εργασία. Τα κόστη που παρουσιάζονται αφορούν μόνο τα κόστη που προέρχονται από την αύξηση της δόσης του κροκιδωτικού, τη μείωση του pH ή και των δύο για να επιτευχθεί η ενισχυμένη κροκίδωση.

Για μικρά συστήματα λιγότερο από 1 mgd (4.500 m<sup>3</sup>/d) η EPA (EPA, 2000) χρησιμοποιεί το Water Model για την εκτίμηση του κόστους κεφαλαίου και O&M, ενώ για τα μεγάλα συστήματα Μεγαλύτερα από 1 mgd (4.500 m<sup>3</sup>/d) το μοντέλο W/W Cost. Τα κριτήρια σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν στις καμπύλες κόστους ήταν:

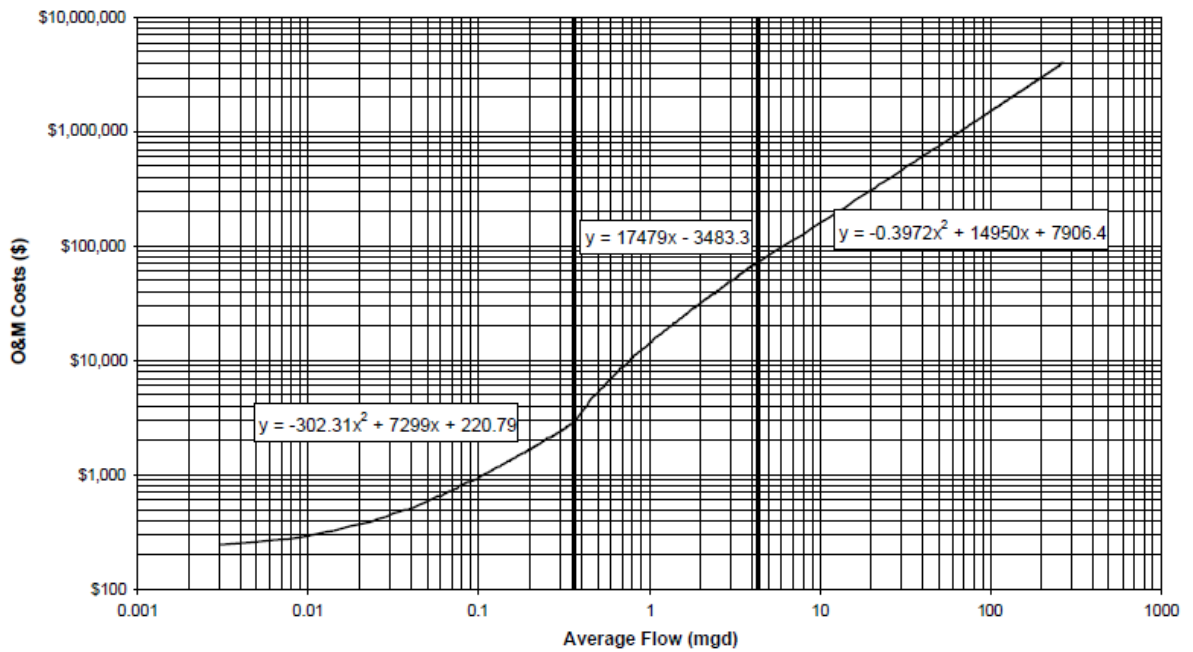
**Πίνακας 6.1:** Κριτήρια σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν στις καμπύλες κόστους (EPA, 2000)

Παράμετρος	Ποσότητα	Μονάδα Μέτρησης
Πρόσθετη δόση χλωριούχου σιδήρου	10	mg/L
Πρόσθετο σύστημα τροφοδοσίας για αυξημένη δόση χλωριούχου σιδήρου		
Πρόσθετη δόση ασβέστη (για ρύθμιση pH)	10	mg/L
Πρόσθετο σύστημα τροφοδοσίας για αυξημένη δόση ασβέστη		

Τα σχήματα 6.10 και 6.11 παρουσιάζουν καμπύλες κόστους κεφαλαίου και O&M και εξισώσεις για ενισχυμένη κροκίδωση για το έτος 2000 (EPA, 2000).



**Σχήμα 6.10:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για την ενισχυμένη κροκίδωση  
*Πηγή Σχήματος:* (EPA, 2000)

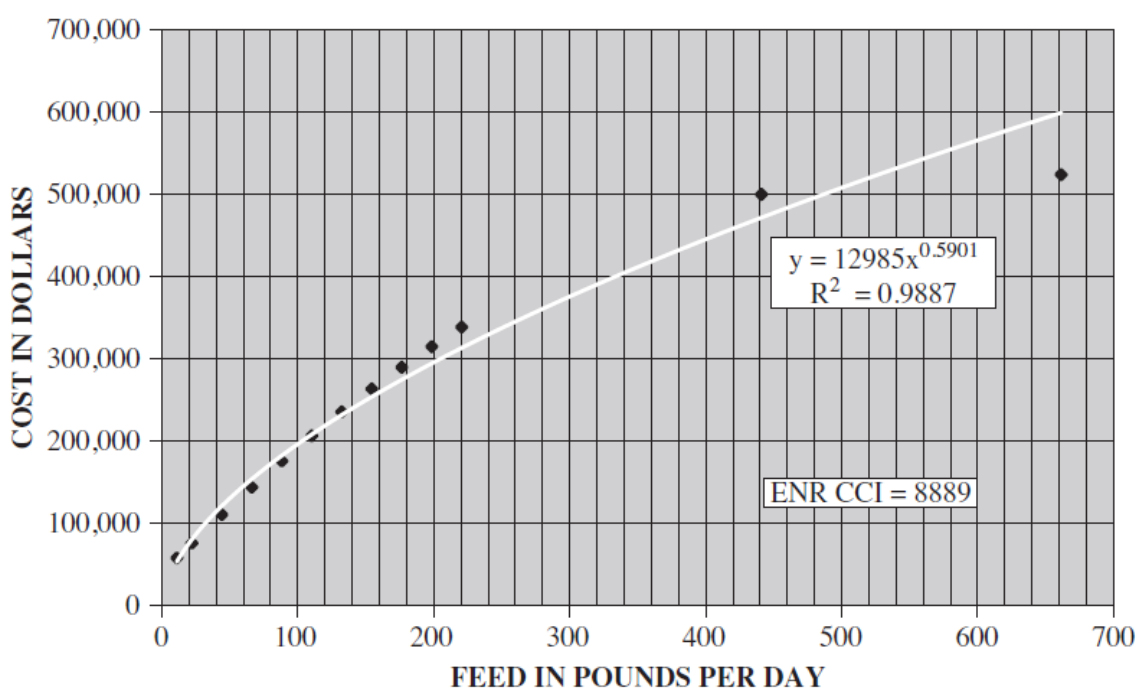


**Σχήμα 6.11:** Καμπύλη κόστους O&M για την ενισχυμένη κροκίδωση  
*Πηγή Σχήματος:* (EPA, 2000)

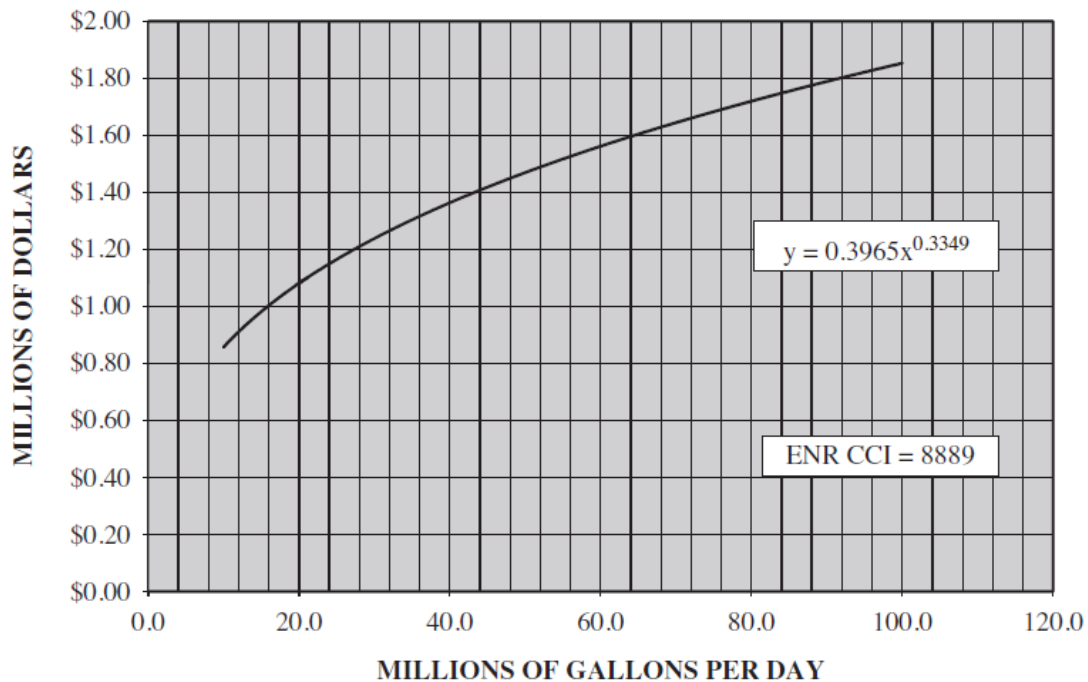
### 6.3.3 Αποσκλήρυνση με Ασβέστη

Η αποσκλήρυνση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μείωση της σκληρότητας σε μεγάλα συστήματα επεξεργασίας νερού. Η απομάκρυνση του As(III) ή του As(V) μέσω της LS εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το pH και την προοξειδωση του αρσενίτη σε αρσενικό, η οποία θα βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του αρσενικού. Αποσκλήρυνση με ασβέστη είναι απίθανο να εγκατασταθεί αποκλειστικά για την αφαίρεση αρσενικού. Τα συστήματα που εξετάζουν την εγκατάσταση αυτής της τεχνολογίας, θα πρέπει να σχεδιαστούν ώστε η διεργασία να λειτουργεί σε  $\text{pH} > 10,5$ , εάν απαιτείται υψηλή απόδοση αφαίρεσης αρσενικού. Τα κόστη δεν αφορούν αυτήν την επιλογή.

Παρακάτω στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται το κόστος κατασκευής του συστήματος τροφοδοσίας ασβεστίου που περιλαμβάνει σιλό ασβέστη, βαρυμετρικό ξηρό χημικό τροφοδότη, σύστημα προετοιμασίας του πολτού ασβέστη και όλες τις άλλες σωληνώσεις, βαλβίδες και μετρητές (McGivney, et al., 2008). Το σχήμα απεικονίζει το κόστος κατασκευής αυτής της εγκατάστασης σε ένα εύρος από 10 έως 700 λίβρες (= 4,5 – 317,5 kg) την ημέρα. Επίσης, στο Σχήμα 6.13 φαίνεται το κόστος O&M για την διεργασία αποσκλήρυνσης με ασβέστη.



**Σχήμα 6.12:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους τροφοδοσίας ασβεστίου  
*Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)*



Σχήμα 6.13: Καμπύλη κόστους O&M τροφοδοσίας ασβέστη  
 Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)

## 6.4 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

### 6.4.1 Ενεργοποιημένη αλουμίνα

Η επεξεργασία με ενεργοποιημένη αλουμίνα (ΕΑ) είναι μια φυσική/χημική διεργασία με την οποία ιόντα στο νερό τροφοδοσίας απορροφώνται στην οξειδωμένη επιφάνεια της ΕΑ. Το νερό εισροής περνά συνεχώς μέσα από την κλίνη για την απομάκρυνση των ρύπων. Τα ρυπαντικά ιόντα ανταλλάσσονται με τα επιφανειακά υδροξείδια στην αλουμίνα. Η ΕΡΑ (2000), εκτίμησε το κόστος χρήσης ενεργοποιημένης αλουμίνας (χωρίς αναγέννηση) υιοθετώντας την ακόλουθη προσέγγιση. Αναπτύχθηκαν 2 σενάρια κόστους - για φυσικό pH ανεπεξέργαστου νερού και για pH που έχει προσαρμοστεί στο βέλτιστο pH 6.

#### 6.4.1.1 Κεφαλαιακό κόστος

Οι παραδοχές που έγιναν για να εκτιμηθεί το κεφαλαιακό κόστος της ενεργοποιημένης αλουμίνας είναι οι ακόλουθες:

- ✚ σε φυσικό pH του ανεπεξέργαστου νερού, δύο περιοχές pH εξετάστηκαν,  $7,0 < \text{pH} < 8,0$  και  $8,0 < \text{pH} < 8,3$ , ενώ ο χρόνος επαφής κενής κλίνης (ΕΒCΤ) ήταν 5 λεπτά ανά στήλη και το βάθος της κλίνης μεταξύ 3 έως 6 πόδια (= 0,90 m - 1,8 m), ανάλογα με τη ροή σχεδιασμού. Η μέγιστη διάμετρος ανά στήλη ήταν 12 πόδια (= 3,65 m). Η πυκνότητα των υλικού της ΕΑ θεωρήθηκε  $47 \text{ lb/ft}^3$  (=  $753 \text{ kg/m}^3$ ). Το κόστος κεφαλαίου έχει υπολογιστεί από το συνολικό κόστος διεργασίας χρησιμοποιώντας συντελεστή 2,5 για μικρά συστήματα και 3,33 για μεγάλα συστήματα.

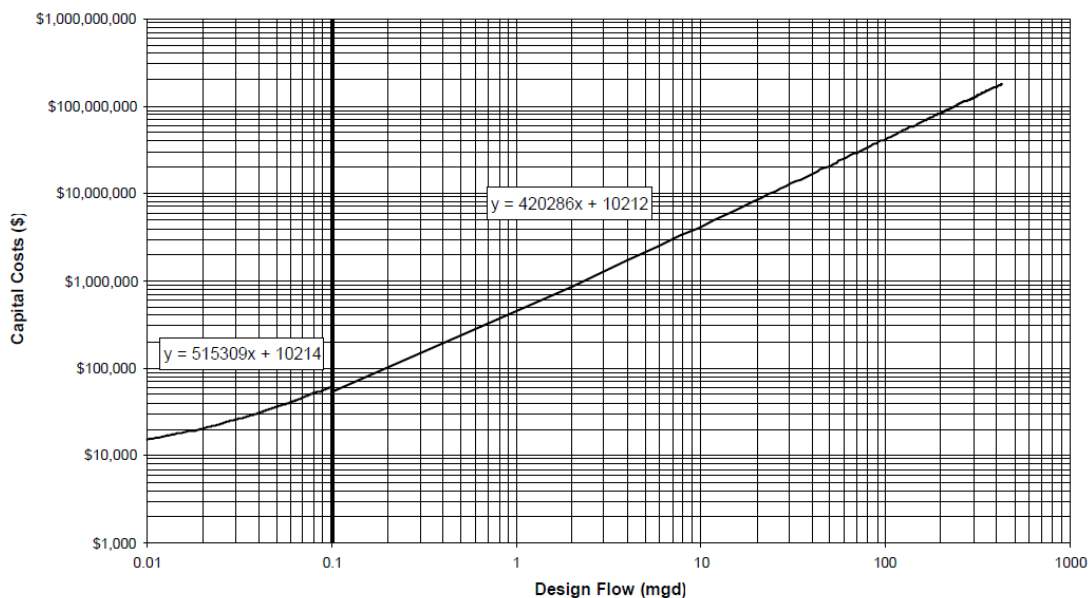


- σε pH του νερού που προσαρμόζεται στο βέλτιστο pH = 6. Η εξίσωση κεφαλαιακού κόστους για τη μονάδα ρύθμισης pH, η οποία περιλαμβάνει έλεγχο διάβρωσης μετά την επεξεργασία, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση: Κόστος κεφαλαίου = 40517 \* Ροή σχεδίασης + 31889

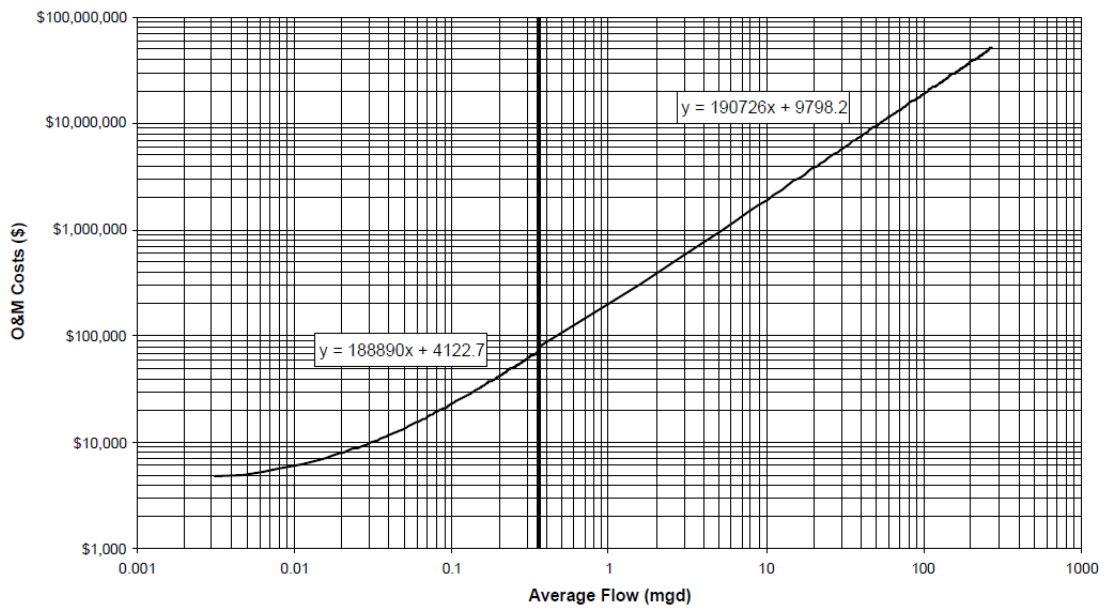
#### 6.4.1.2 Κόστος O&M με και χωρίς προσαρμογή pH

Υπάρχουν τρία κύρια στοιχεία στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M) - αντικατάσταση του υλικού (ΕΑ), ενέργεια και εργασία.

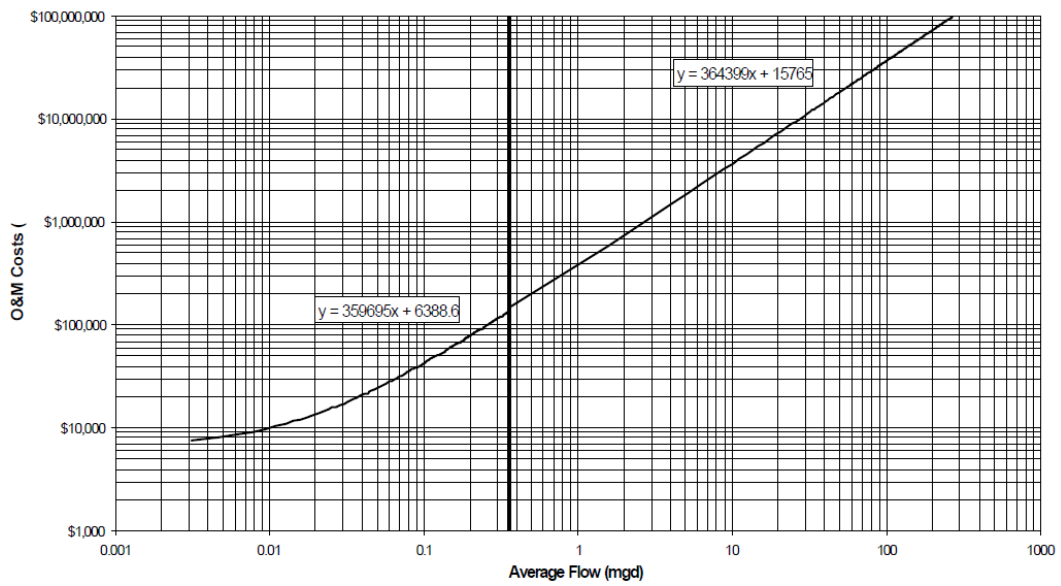
Η κρίσιμη μεταβλητή για τον υπολογισμό του κόστους της αντικατάστασης του υλικού είναι ο αριθμός των όγκων κλίνης έως ότου η συγκέντρωση της εκροής υπερβεί μια συγκεκριμένη συγκέντρωση. Εκτιμήθηκε επίσης το χημικό κόστος για τη ρύθμιση του pH. Η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιήθηκε για το κόστος ρύθμισης του pH: Χημικό κόστος (ρύθμιση pH) = 81361\* Μέση ροή + 151,7. Το δεύτερο σημαντικό στοιχείο στο κόστος O&M είναι το κόστος εργασίας. Το τρίτο στοιχείο στο κόστος O&M είναι το ενεργειακό κόστος τόσο για το κτίριο όσο και για τη διεργασία. Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας των κτιρίων βασίζεται σε ετήσια χρήση και περιλαμβάνει φωτισμό, εξαερισμό και θέρμανση. Οι καμπύλες κόστους κεφαλαίου και O&M για την ενεργοποιημένη αλουμίνα φαίνονται στα σχήματα 6.14 έως 6.19.



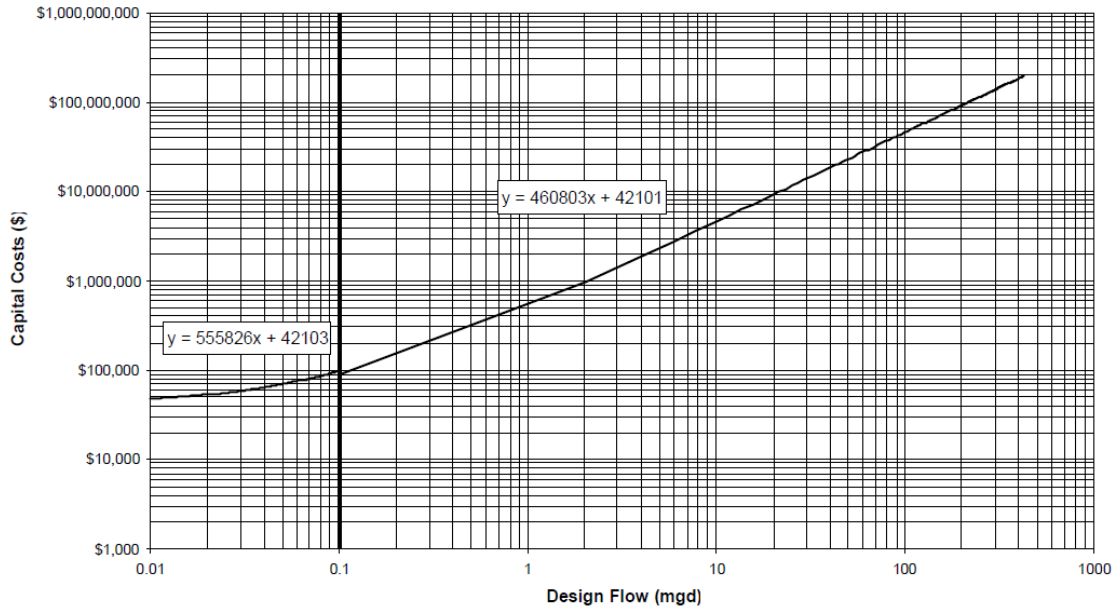
**Σχήμα 6.14:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους ΕΑ  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



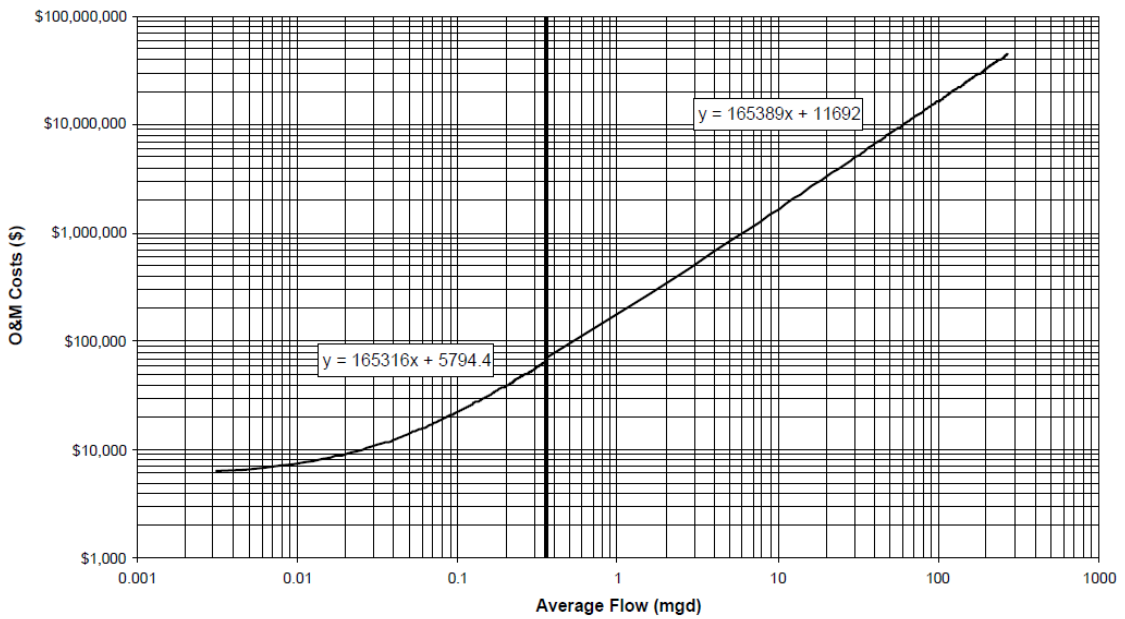
**Σχήμα 6.15:** Καμπύλη κόστους O&M ΕΑ για pH=7-8  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



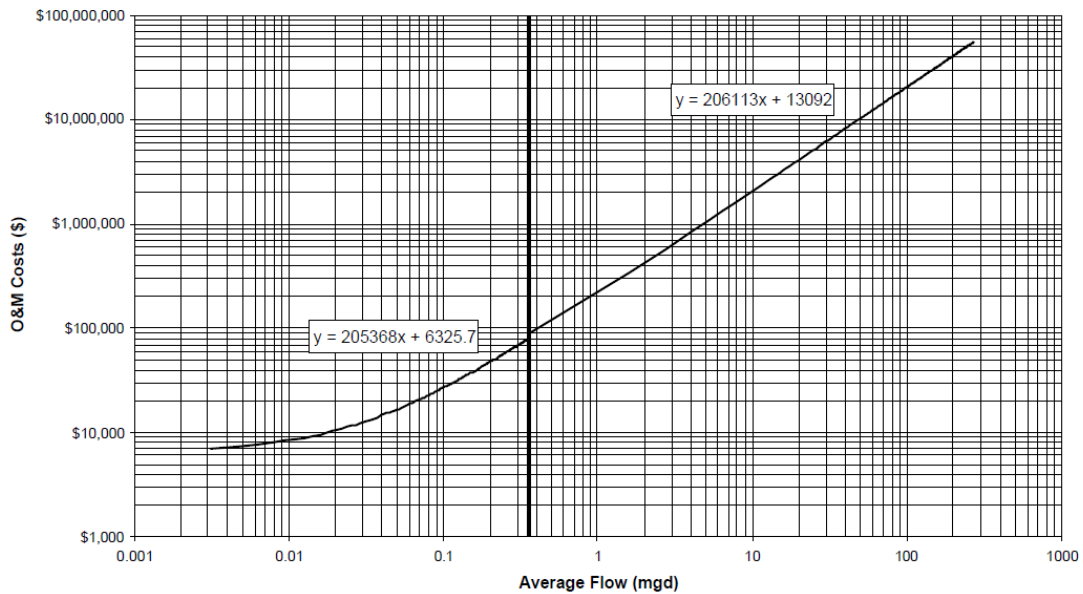
**Σχήμα 6.16:** Καμπύλη κόστους O&M ΕΑ για pH=8-8,3  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



**Σχήμα 6.17:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους ΕΑ για pH=6  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



**Σχήμα 6.18:** Καμπύλη κόστους O&M ΕΑ για pH=6 & 23.100BV  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



**Σχήμα 6.19:** Καμπύλη κόστους O&M EA για pH=6 & 15.400BV  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*

#### 6.4.2 Granular Ferric Hydroxide

Το κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου είναι μια τεχνολογία που μπορεί να επιτρέψει πολύ μεγάλη διάρκεια λειτουργίας χωρίς την ανάγκη ρύθμισης του pH ή προοξείδωσης. Φαίνεται ότι επιτυγχάνει ικανοποιητικότερη απομάκρυνση αρσενικού (Simms, et al., 2000). Η πιο σημαντική αδυναμία αυτής της τεχνολογίας φαίνεται να είναι το κόστος της. Επί του παρόντος, τα μέσα GFH κοστίζουν περίπου 4.000 \$ ανά τόνο. Ωστόσο, εάν μία κλίση GFH μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές περισσότερο από μία κλίση αλουμίνας για παράδειγμα, μπορεί να αποδειχθεί ως πιο οικονομική τεχνολογία. Όπως έχει αναφερθεί και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, το GFH ήταν αρκετά πιο αποτελεσματικό από την ενεργή αλουμίνα (EA) ώστε μικρότερες κλίσεις και λιγότερο προσροφητικό υλικό θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο απομάκρυνσης αρσενικού (μείωση κόστους). Επιπλέον, σε αντίθεση με την EA, το GFH δεν απαιτεί προοξείδωση (άρα μείωση χημικών). Ωστόσο, αυτή τη στιγμή το κόστος είναι μάλλον απαγορευτικό για μεγάλου μεγέθους συστήματα. Η χωρητικότητά του θα εξαρτηθεί από παραμέτρους ποιότητας του νερού όπως η θερμοκρασία, το pH και τα ανταγωνιστικά συστατικά στο νερό, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν φυσικές οργανικές ύλες (NOM: Natural Organic Matter) και ανταγωνιστικά ιόντα (π.χ. φωσφορικά, πυριτικά, θειικά) (Crittenden, et al., 2012).

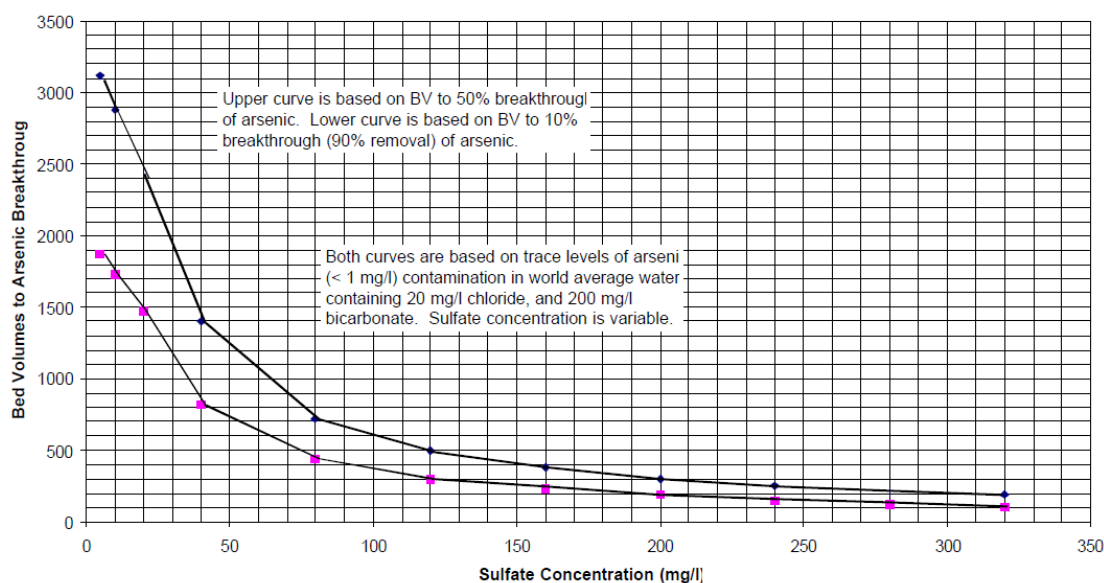
## 6.5 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΙΟΝΤΩΝ

### 6.5.1 Ανταλλαγή ανιόντων

Η ανταλλαγή ιόντων (ΙΑ) είναι μια φυσική/χημική διεργασία επεξεργασίας κατά την οποία ένα ιόν στη στερεά φάση (ρητίνη ΙΧ) ανταλλάσσεται με ένα ιόν στο νερό εισροής, απομακρύνοντας έτσι τους ρύπους από το νερό εισροής. Τα ανεπεξέργαστα νερά υψηλής συγκέντρωσης As(III) ενδέχεται να απαιτούν προοξειδωση για τη μετατροπή του αρσενίτη σε αρσενικό. Η προοξειδωση δεν θεωρήθηκε ως μέρος του κόστους που αναπτύσσεται σε αυτό το τμήμα. Θεωρείται επίσης ότι δεν απαιτούνται μέτρα ελέγχου της διάβρωσης επειδή το pH δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη διεργασία.

Οι συγκεντρώσεις θεικών στο εισερχόμενο νερό επηρεάζουν σημαντικά την ικανότητα της ρητίνης ΙΑ σε σχέση με την απομάκρυνση του αρσενικού. Ο (Clifford, et al., 1995) υπολόγισε τους όγκους κλίνης για 10% και 50% απομάκρυνση του εισερχόμενου αρσενικού ως συνάρτηση της εισροής συγκέντρωσης θεικού άλατος. Το Σχήμα 6.20 δείχνει τη σχέση όγκου κλίνης και θεικού άλατος που εκτιμήθηκε από τον (Clifford, et al., 1995). Χρησιμοποιώντας αυτό το σχήμα, η συχνότητα αναγέννησης για μια στήλη ΙΑ μπορεί να εκτιμηθεί για ολόκληρο το εύρος συγκέντρωσης θεικών. Η διάρκεια λειτουργίας μέχρι την αναγέννηση είναι ο κρίσιμος παράγοντας για την εκτίμηση του κόστους Ο&Μ. Το κόστος κεφαλαίου θα επηρεαστεί οριακά από τις αλλαγές στον όγκο της κλίνης έως την αναγέννηση.

Figure 3-15  
Bed Volumes to Arsenic Breakthrough as a Function  
of Sulfate Concentration (Clifford, 1995)



Σχήμα 6.20: Όγκοι κλίνης ως συνάρτηση της συγκέντρωσης θεικών  
Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)

#### 6.5.1.1 Κεφαλαιακό κόστος

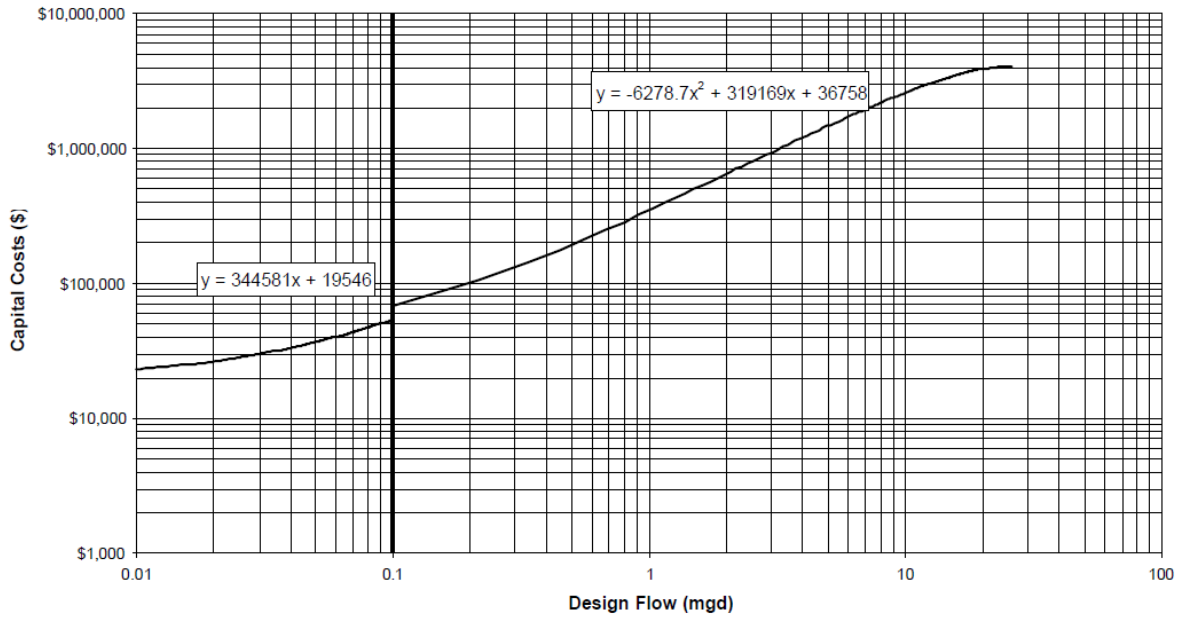
Οι ακόλουθες παραδοχές έγιναν για την εκτίμηση του κόστους κεφαλαίου της ανταλλαγής ανιόντων.

1. Empty Bed Contact Time (EBCT) = 2.5 minutes per column
2. Το βάθος κλίνης κυμαινόταν από 3 πόδια έως 6 πόδια ανάλογα με την παροχή σχεδιασμού. Η μέγιστη διάμετρος ανά στήλη ήταν 12 πόδια.
3. Το κόστος της κλίνης βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση: Κόστος =  $63.288 * (\text{Όγκος κλίνης σε γαλόνια}) ^{0.679}$
4. Το κόστος κεφαλαίου περιλαμβάνει και μια εφεδρική στήλη.
5. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα περιλαμβάνουν σκυρόδεμα, σωλήνες και βαλβίδες και ηλεκτρολογικά και όργανα.
6. Το κόστος κεφαλαίου έχει υπολογιστεί από το συνολικό κόστος διεργασίας χρησιμοποιώντας συντελεστή 2,5 για μικρά συστήματα και 3,33 για μεγάλα συστήματα.

#### 6.5.1.2 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M)

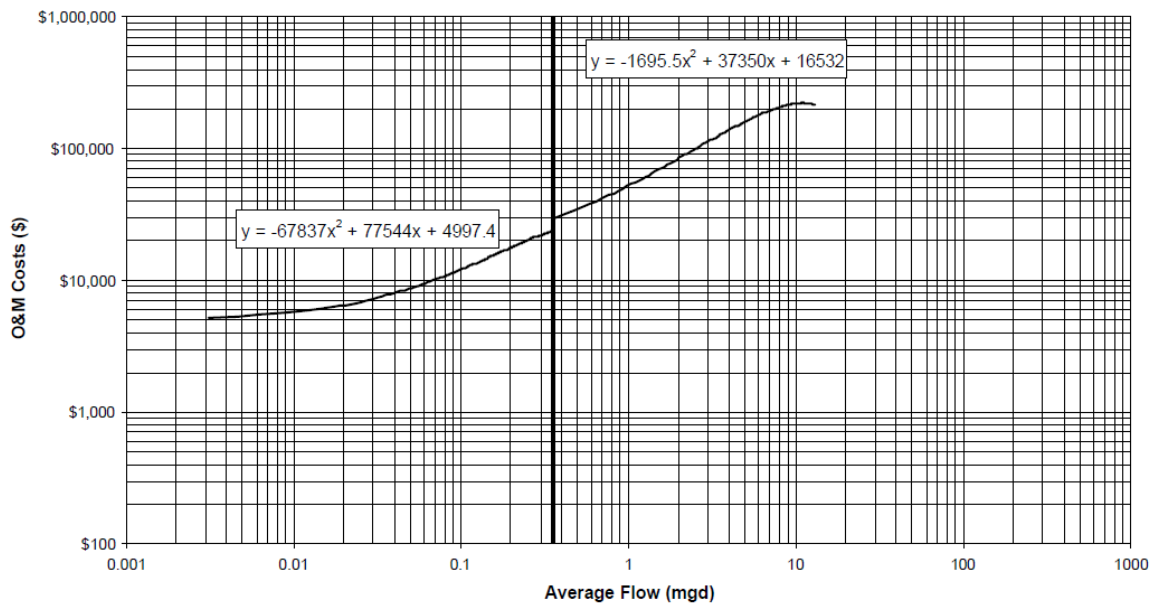
Υπάρχουν σημαντικά στοιχεία στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M) όπως η συχνότητα αναγέννησης, η δόση αναγέννησης και η εργασία. Τα κόστη O&M υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για τη δόση αναγέννησης, τη συχνότητα αναγέννησης, τις ώρες εργασίας την εβδομάδα και η ωριαία αποζημίωση. Η κρίσιμη μεταβλητή για τον υπολογισμό της συχνότητας αναγέννησης είναι ο αριθμός των όγκων κλίνης έως ότου η συγκέντρωση της εκροής υπερβεί μια συγκεκριμένη συγκέντρωση. Όταν τα θειικά ήταν κάτω από 20 mg/L χρειάστηκαν 1500 όγκοι κλίνης (BV). Ενώ όταν τα θειικά ήταν μεταξύ 20 και 50 mg/L χρειάστηκαν 700 BV. Η δόση αναγέννησης είναι επίσης ένα κρίσιμο στοιχείο για το κόστος O&M. Η δόση αναγεννητικού για την αναγέννηση ήταν 10,2 lb/ft<sup>3</sup>. Οι παραδοχές για το κόστος εργασίας είναι παρόμοιες με αυτές που έγιναν για την ενεργοποιημένη αλουμίνα.

Οι καμπύλες κόστους κεφαλαίου και O&M για ανταλλαγή ανιόντων παρουσιάζονται στα σχήματα 6.21 έως 6.24.

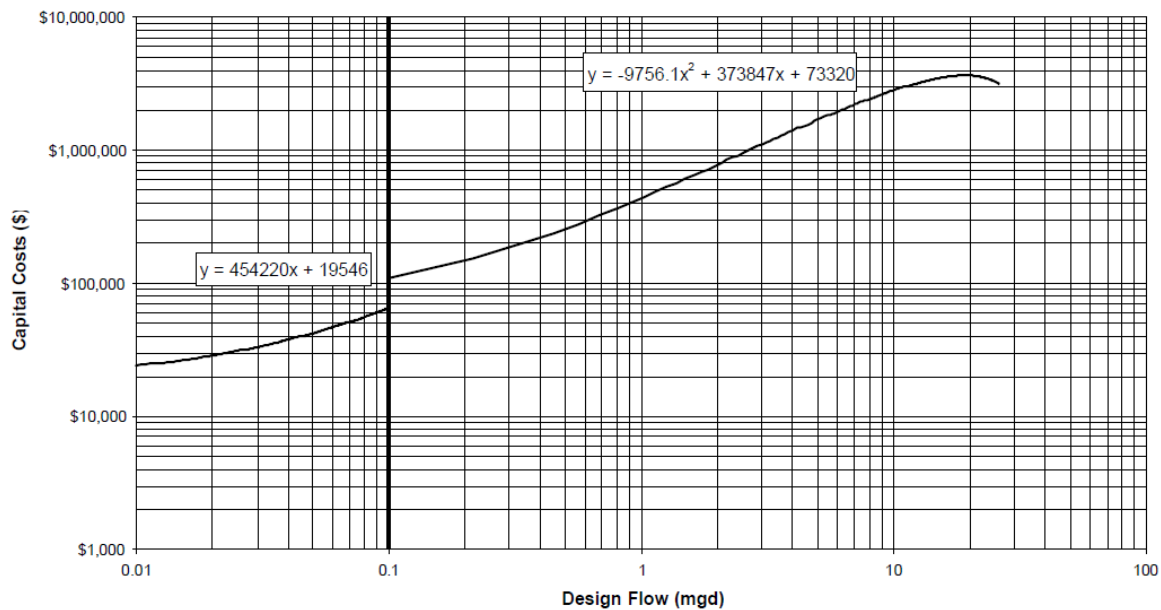


**Σχήμα 6.21:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για ΑΙ (< 20 mg/ L SO<sub>4</sub>)  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*

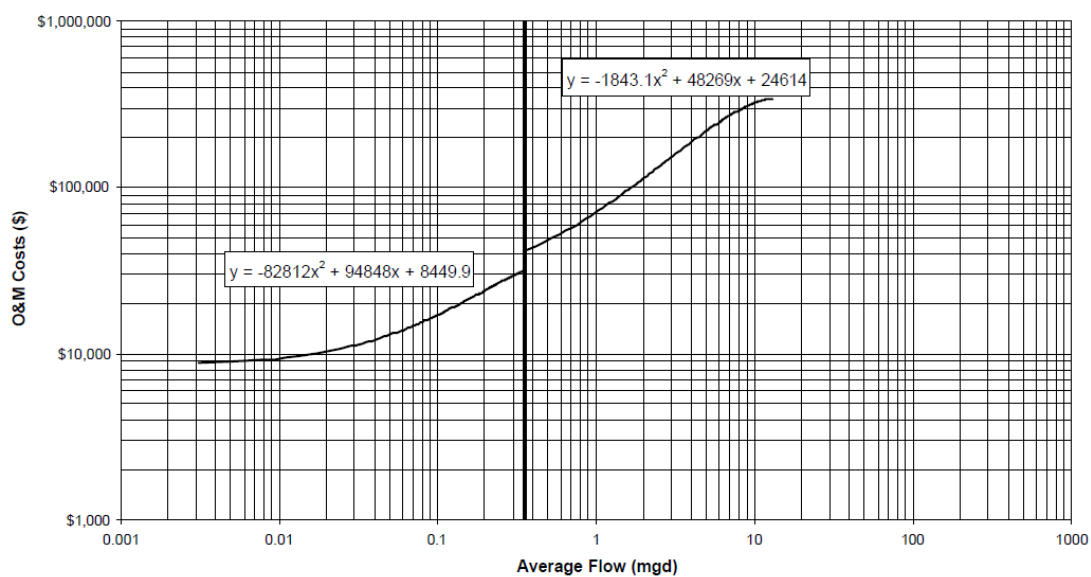
**Figure 3-17**  
**Anion Exchange (< 20 mg/L SO<sub>4</sub>)**  
**O&M Costs**



**Σχήμα 6.22:** Καμπύλη κόστους O&M για ΑΙ (< 20 mg/ L SO<sub>4</sub>)  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



**Σχήμα 6.23:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για ΑΙ ( 20 – 50 mg/ L SO<sub>4</sub>)  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



**Σχήμα 6.24:** Καμπύλη κόστους Ο&Μ για ΑΙ ( 20 – 50 mg/ L SO<sub>4</sub>)  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



## 6.6 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

Οι διεργασίες της μικροδιήθησης και της υπερδιήθησης δεν έχουν αξιόλογες αποδόσεις στην απομάκρυνση του αρσενικού και επομένως δεν κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια προσπάθεια εκτίμησης κόστους γι' αυτές τις διεργασίες. Η NF παρόλο που επιτυγχάνει αξιόλογες απομακρύνσεις αρσενικού σε σχέση με τις διεργασίες μεμβράνης χαμηλής πίεσης, το κόστος κεφαλαίου και O&M για τη NF είναι συνήθως μεγαλύτερο από το ισοδύναμο κόστος για διεργασίες χαμηλής πίεσης και αρκετά κοντά σε αυτό της αντίστροφης ώσμωσης. Γι' αυτό το λόγο η εφαρμογή της αντίστροφης ώσμωσης, που επιτυγχάνει τις πιο αξιόλογες απομακρύνσεις αρσενικού, προτιμάται παγκοσμίως έναντι της NF.

Αντιθέτως, η αντίστροφη ώσμωση είναι διεργασία με σημαντική απομάκρυνση αρσενικού και έτσι γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης κόστους σε αυτό το κεφάλαιο.

### 6.6.1 Νανοδιήθηση

Η νανοδιήθηση είναι μια διεργασία μεμβράνης υψηλής πίεσης ικανή για σημαντική αφαίρεση του αρσενικού. Το NF αφαιρεί τους ρύπους από ένα ρεύμα τροφοδοσίας κυρίως μέσω ενός συνδυασμού μηχανισμών διάχυσης και κοσκίνισης. Τυπικά, το NF απαιτεί προεπεξεργασία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και άλλων ρύπων από το ρεύμα τροφοδοσίας. Λόγω της μειωμένης αποτελεσματικότητας αφαίρεσης όταν χρησιμοποιείται σε υψηλότερες ανακτήσεις, . Επειδή το NF δεν είναι μια αποτελεσματική αυτόνομη τεχνολογία για την αφαίρεση του αρσενικού, οι εκτιμήσεις κόστους κεφαλαίου και O&M για το NF δεν παρέχονται σε αυτό το κεφάλαιο.

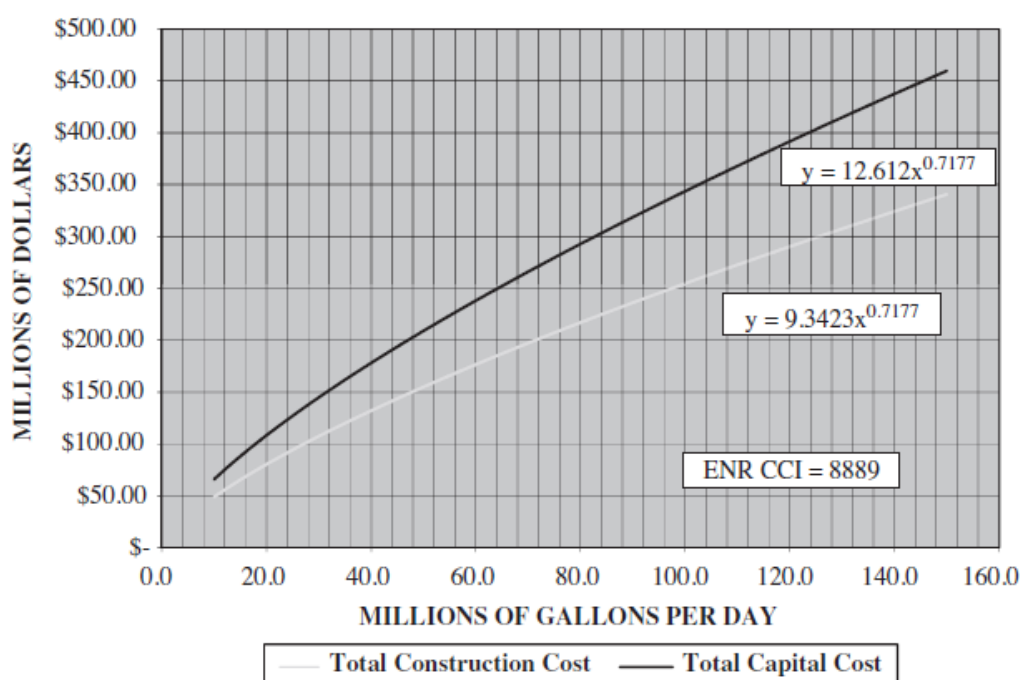
Οι μεμβράνες νανο-φιλτραρίσματος είναι ακόμη μικρότερες (μεταξύ 0,001 και 0,002 mm) με πίεση 75 έως 150 psig. Κάπου μεταξύ του μεγέθους υπερδιήθησης και του RO του (<1 nm) του οποίου η πίεση είναι μεγαλύτερη από 200 psig. Ο τρέχων προτιμώμενος σχεδιασμός είναι μια σειρά φίλτρων UF/RO ή NF/RO με άλλα στοιχεία διεργασίας που παρέχουν την απαιτούμενη επεξεργασία νερού και χειρισμό στερεών που απαιτούνται από τους ρυθμιστές. Το κόστος κεφαλαίου αυτών των εγκαταστάσεων ποικίλλει σημαντικά με το κόστος του NF περίπου 1,5 φορές αυτό του RO. Το κόστος για το UF είναι συνήθως στο ανώτερο τρίτο της διαφοράς μεταξύ συμβατικής θεραπείας και RO.

### 6.6.2 Αντίστροφη ώσμωση

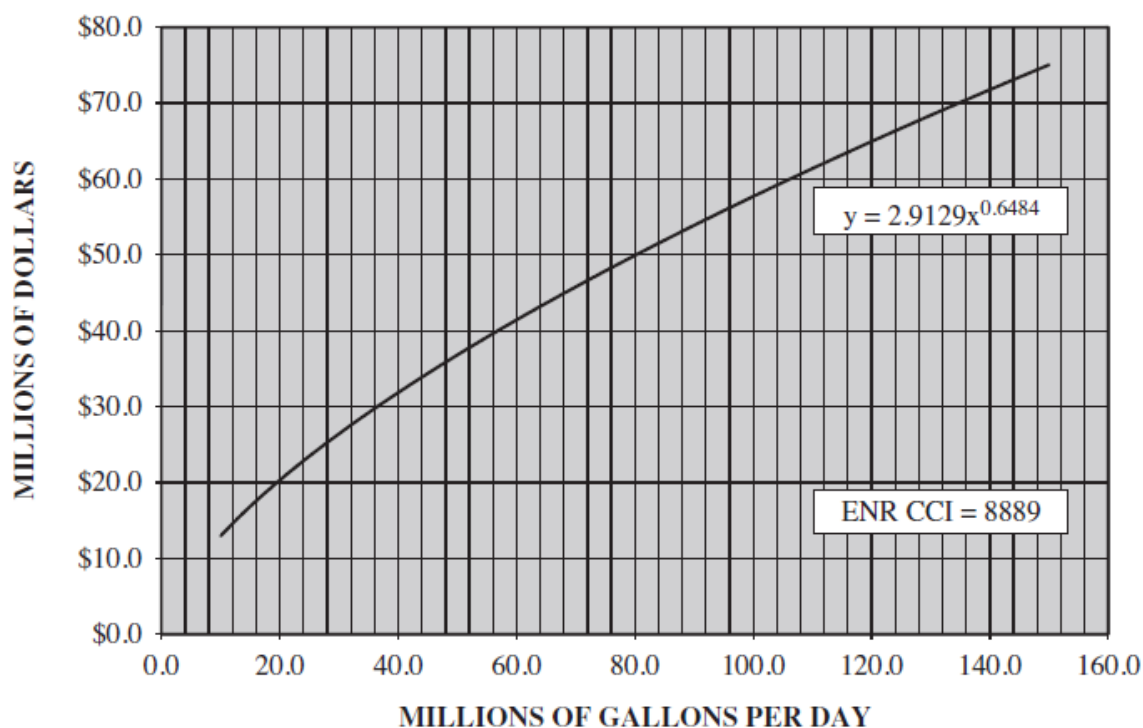
Η αντίστροφη ώσμωση λειτουργεί σε υψηλή πίεση και απαιτεί υψηλής ποιότητας νερό τροφοδοσίας και συχνά απαιτεί ουσιαστική προεπεξεργασία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και άλλων ρύπων. Η RO απαιτεί επίσης συχνά ρύθμιση του pH μετά τη διεργασία της μεμβράνης και απαιτεί συνήθως την προσθήκη ενός αντικαθαλωτικού πριν από τη διεργασία της μεμβράνης. Η RO έχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης αφαίρεσης αρσενικού σε σύγκριση με τις διεργασίες μεμβράνης χαμηλής πίεσης, αλλά συνήθως σχετίζεται με υψηλότερο

κόστος κεφαλαίου και O&M. Η RO μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικότερη εάν απαιτείται αφαίρεση και άλλων ρύπων και η ποσότητα του νερού δεν αποτελεί ανησυχία. Συστήματα πλύσης νερού και αέρα περιλαμβάνονται για τη διατήρηση της καθαρότητας των φίλτρων.

Μετά την προεπεξεργασία, η πίεση αυξάνεται σε περίπου 1.000 psig, τροφοδοτείται νερό στις μεμβράνες και παράγεται το καθαρό νερό. Στη συνέχεια, το ρεύμα του συμπυκνώματος τροφοδοτείται σε μια συσκευή ανάκτησης ενέργειας. Αυτό μειώνει τη συνολική χρήση ενέργειας διεργασίας κατά περίπου 30% - 40%. Οι αναλογίες ανάκτησης είναι μεταξύ 40% και 50%. Τα σχήματα 6.25 και 6.26 απεικονίζουν το κόστος κατασκευής και O&M αντίστοιχα, μιας μονάδας επεξεργασίας σε μια περιοχή παροχής από 10 MGD έως 150 MGD..



**Σχήμα 6.25:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους για RO  
*Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)*



**Σχήμα 6.26:** Καμπύλη κόστους O&M για RO  
*Πηγή Σχήματος: (McGivney, et al., 2008)*

#### 6.6.2.1 Παραδείγματα Κόστους Εγκαταστάσεων RO στην Ελλάδα

Πολλές φορές, όπως έχει προαναφερθεί, η απομάκρυνση του αρσενικού γίνεται παράλληλα με την αφαλάτωση υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού. Στη συνέχεια παρατίθενται (Αγγελάκης, et al., 2015), (Μπούτσικου, et al., 2019) ενδεικτικά παραδείγματα νησιωτικών μονάδων RO που έχουν κατασκευασθεί στην Ελλάδα με τα αντίστοιχά τους κόστη, ώστε να συγκριθούν και με τα αντίστοιχα παραπάνω κόστη της βιβλιογραφίας.

##### **Πάτμος**

Η μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού που εγκαταστάθηκε έχει δυναμικότητα 1.200 m<sup>3</sup>/ημ. Η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης είναι 6,45 χρόνια. Λαμβάνοντας συντελεστή εσωτερικής ανταποδοτικότητας (IRR) 16%, το κόστος της μονάδας RO προσδιορίζεται σε 1,5 - 1,6 €/m<sup>3</sup>.

##### **Λειψοί**

Η μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού έχει δυναμικότητα 600 m<sup>3</sup>/ημ. Λαμβάνοντας και πάλι περίοδο αποπληρωμής 6,45 χρόνια και συντελεστή

εσωτερικής ανταποδοτικότητας (IRR) 16%, το κόστος της μονάδας αφαλάτωσης προσδιορίζεται σε 1,88 €/m<sup>3</sup>, στην περίπτωση συνδυασμού με υβριδική εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας, αλλά σε 1,66 €/m<sup>3</sup>, στην περίπτωση που εγκαθίσταται μόνο ανεμογεννήτρια.

### **Θηρασιά**

Η μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού που κατασκευάστηκε έχει δυναμικότητα 140 m<sup>3</sup>/ημ. Με παραδοχή περιόδου αποπληρωμής 6,45 χρόνια και συντελεστή εσωτερικής ανταποδοτικότητας (IRR) 16%, το κόστος της μονάδας RO προσδιορίζεται σε 2,57 €/m<sup>3</sup>, στην περίπτωση συνδυασμού με εγκατάσταση τροφοδοσίας ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία.

**Πίνακας 6.2: Κόστος λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης στην Ελλάδα (2013)**

Τοποθεσία (αριθμός μονάδων)	Έτος κατασκευής	Τύπος	Δυναμικό- τητα (m <sup>3</sup> /ημ)	Λειτουργικό κόστος (€/m <sup>3</sup> )
Γάζι, Ηρακλείου (1)	2014	RO & UF	2400	0,24
Ερμούπολη, Σύρος (9)	1992 - 2007	RO (PD)	4700	1,50 - 2,10
Ποσειδωνία, Σύρου (3)	2000 - 2006	RO	1000	0,70
Βάρη, Σύρου (2)	2003 - 2006	RO	750	0,70
Γαλησσάς, Σύρου (2)	2007	RO	1000	0,70
Κίτι, Σύρου (2)	2000 - 2007	RO	750	0,70
Νάξος και μικρές Κυκλάδες (4)	2004 - 2014	RO	1250	0,70
Μύκονος (3)	2001 - 2014	RO	9.000	1,50
Πάρος (2)	2001 / 2015	RO, υφ. / PO	1200 / 2400	0,50 / 0,50
Τήνος (2)	2001 - 2005	RO	1000	0,70
Σαντορίνη (3)	1994 - 2002	RO	700	1,50
Σίφνος	2002	RO, υφ.	500	2,20
Ομηρούπολη Χίου	2000 - 2009	RO, υφ.	5200	0,60
Νίσυρος (3)	2002 - 2012	RO	950	0,70
Ιθάκη (3)	1990 - 2007	RO	1320	0,80

Λέρος	2001	RO	200	0,50
Κέρκυρα (>20)		RO	100	0,50
Παξοί (2)	2005	RO	500	0,60

\* Τιμές κάτω του 1,00 € αναφέρονται προφανώς μόνο στην ενέργεια, τα χημικά και αλλαγή μεμβρανών

## 6.7 ΦΙΛΤΡΑΝΣΗ ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΗ ΑΜΜΟ

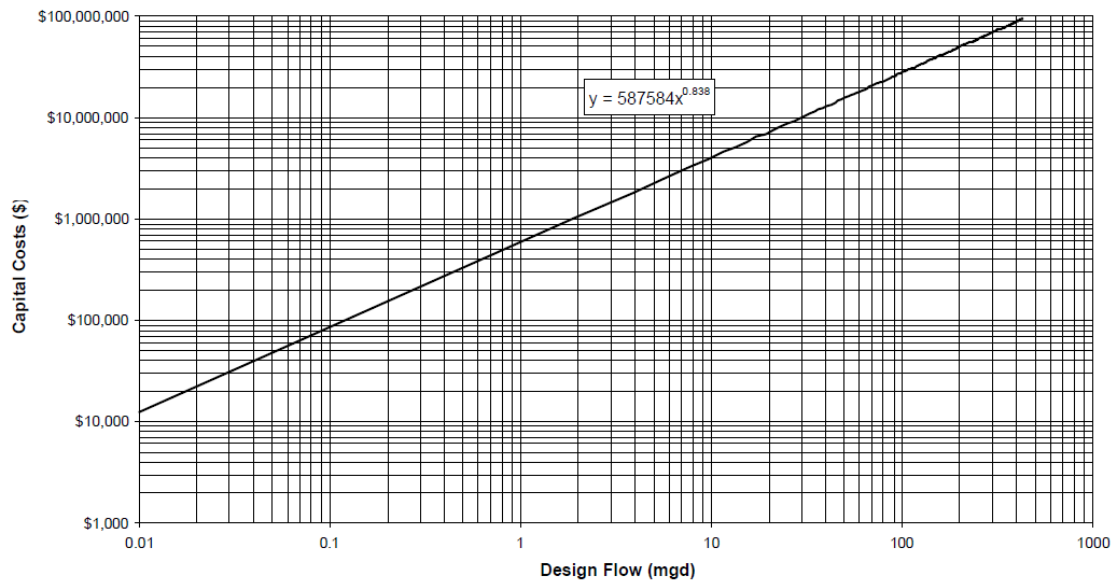
Το φιλτράρισμα με πράσινη άμμο είναι μια διεργασία διήθησης οξειδωσης που έχει αποδείξει αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση του αρσενικού.

Η EPA (2000) χρησιμοποίησε το μοντέλο VSS για την εκτίμηση του κεφαλαιακού κόστους και του κόστους O&M. Αυτή η τεχνολογία θεωρείται ότι είναι μια τεχνολογία μικρών συστημάτων και ως εκ τούτου το κόστος δεν υπολογίστηκε για μεγαλύτερα συστήματα. Αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε μεγαλύτερα συστήματα, αλλά τα δεδομένα κόστους δεν είναι άμεσα διαθέσιμα. Η βασική παράμετρος είναι η αναλογία νερού πηγής, σιδήρου και αρσενικού. Εάν χρειάζονται μεγάλες αφαιρέσεις, η αναλογία πρέπει να είναι τουλάχιστον 20:1 σίδηρος προς αρσενικό. Το κόστος βασίζεται στα ακόλουθα κριτήρια σχεδιασμού και λειτουργίας:

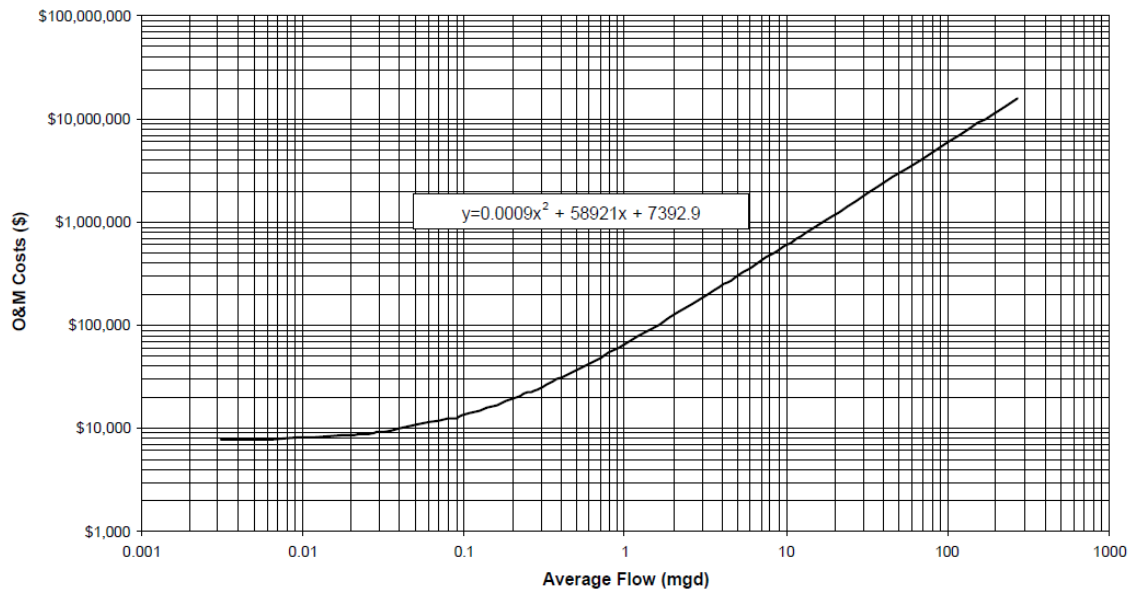
- ✚ Τροφοδοσία με υπερμαγγανικό κάλιο, 10 mg/L;
- ✚ Το μέσο φίλτρου περιέχεται σε δεξαμενή φίλτρου συνεχούς αναγέννησης σιδήρου, εξοπλισμένη με υπόστρωμα.
- ✚ Ρυθμός φιλτραρίσματος, 4 gpm/ft<sup>2</sup>; Και
- ✚ Το backwash είναι αρκετό για 40% επέκταση του κρεβατιού.

Θεωρείται περαιτέρω ότι δεν απαιτούνται μέτρα ελέγχου της διάβρωσης επειδή το pH δεν επηρεάζεται από τη διεργασία.

Τα σχήματα 6.27 και 6.28 παρουσιάζουν εκτιμήσεις κόστους για την απομάκρυνση του αρσενικού με διύλιση σε πράσινη άμμο.



**Σχήμα 6.27:** Καμπύλη κεφαλαιουχικού κόστους Greensand Filtration  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*



**Σχήμα 6.28:** Καμπύλη κόστους O&M Greensand Filtration  
*Πηγή Σχήματος: (EPA, 2000)*

## 7 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΣΟΥ- CASE STUDY ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

### 7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η μελέτη της περίπτωσης της Κάσου έγινε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου «Διερεύνηση της ποιότητας υπόγειων υδάτων της Νήσου Κάσου και σχεδιασμός βέλτιστης λύσης για τις ανάγκες της τοπικής κοινωνίας». Η ερευνητική αυτή εργασία, ανατέθηκε από τον Δήμο της Νήσου Κάσου σε ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας του Τομέα Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Συμεών Μαλαμή.

Σε συμφωνία με τα οριζόμενα στην σύμβαση, το ερευνητικό έργο ξεκίνησε το Μάρτιο του 2021 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2021. Ο στόχος του έργου ήταν η διερεύνηση της ποιότητας του υπόγειου νερού των γεωτρήσεων του Δήμου που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση, καθώς αναφέρονταν προβλήματα υποβάθμισης της ποιότητας που συνδέονται κυρίως με αυξημένη συγκέντρωση αρσενικού. Επιπλέον, ο στόχος του έργου ήταν να γίνουν προτάσεις για επίλυση των προβλημάτων, ώστε να καταστεί το νερό ασφαλές για χρήση από τον άνθρωπο.

### 7.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές δειγματοληψιών από το νερό των γεωτρήσεων. Η πρώτη δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στις 2 Ιουλίου 2021 και η δεύτερη στις 5 Αυγούστου 2021. Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν, με βάση το πρωτόκολλο του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας. Τα δείγματα απεστάλησαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να παραληφθούν και να πραγματοποιηθούν οι μικροβιολογικές αναλύσεις εντός 24 ωρών από τη στιγμή της δειγματοληψίας.

Η μεθοδολογική προσέγγιση περιελάβανε:

1. Χημικές και μικροβιολογικές αναλύσεις και συγκεκριμένα προσδιορισμός:
  - Φυσικοχημικών παραμέτρων (pH, αλκαλικότητα, αγωγιμότητα, σκληρότητα),
  - Ιόντων (νιτρικά, φθοριούχα, φωσφορικά, θειικά),
  - Βαρέων μετάλλων/μεταλλοειδών (ολικό αρσενικό, ολικός και δισθενής σίδηρος, εξασθενές χρώμιο και μαγγάνιο),
  - Μικροβιολογικών δεικτών (Ολικά Κολοβακτηρίδια, *E. coli*, εντερόκοκκοι)
2. Δοκιμές απομάκρυνσης αρσενικού με τη μέθοδο της προσρόφησης, χρησιμοποιώντας ως προσροφητικό υλικό το Κοκκώδες Υδροξείδιο του Σιδήρου - Granular Ferric Hydroxide.

### **7.2.1 Ειδικές απαιτήσεις δειγματοληψίας για προσδιορισμό φυσικοχημικών παραμέτρων**

Η δειγματοληψία κατά κανόνα γίνεται σε καθαρά μπουκάλια πολυαιθυλενίου (PE) ή πολυπροπυλενίου (PP) ελάχιστου όγκου 1 λίτρου το καθένα (σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τύπου PET), τα οποία ξεπλένονται 3 φορές με νερό της γεώτρησης, προτού πληρωθούν με το δείγμα προς ανάλυση. Πριν τη δειγματοληψία, πρέπει απαραίτητως η γεώτρηση να είναι σε λειτουργία για ορισμένο χρονικό διάστημα (τουλάχιστον μισή ώρα) έως ότου σταθεροποιηθούν οι τιμές του pH, αγωγιμότητας και θερμοκρασίας (πρακτικά ένα διάστημα τουλάχιστον μισής ώρας είναι ικανοποιητικό), ώστε να ληφθεί αντιπροσωπευτικό δείγμα. Από κάθε γεώτρηση λαμβάνονται δύο (2) δείγματα πληρωμένα μέχρι το στόμιο (πλήρως), εκ των οποίων το 1 οξυνίζεται με νιτρικό οξύ 0,1 M (pH<2). Στη συνέχεια τα δείγματα αποστέλλονται αμέσως στα εργαστήρια, ώστε να αποφευχθούν αλλαγές στην υδατική χημεία των δειγμάτων.

### **7.2.2 Ειδικές απαιτήσεις δειγματοληψίας για προσδιορισμό μικροβιολογικών παραμέτρων**

Η συλλογή των δειγμάτων για μικροβιολογική ανάλυση γίνεται σε καθαρούς και αποστειρωμένους περιέκτες γυάλινους (borosilicate) ή πλαστικούς (PE, PP). Στην περίπτωση που δεν υπάρχει δυνατότητα αποστείρωσης, η συλλογή των δειγμάτων μπορεί να γίνει σε δοχεία (π.χ. ουροσυλλέκτες), τα οποία παραλαμβάνονται αποστειρωμένα από τον προμηθευτή. Για κάθε θέση δειγματοληψίας απαιτείται η λήψη 300-500 ml (π.χ. 3 αποστειρωμένοι ουροσυλλέκτες). Το δοχείο πληρώνεται αφήνοντας ένα κενό της τάξης του ενός cm (για να μπορεί να ανακινηθεί) χωρίς να ξεπλυθεί και σφραγίζεται αμέσως.

## **7.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

Για τις ανάγκες διεκπεραίωσης των στόχων του συγκεκριμένου ερευνητικού έργου, πραγματοποιήθηκαν 2 δειγματοληψίες από διαφορετικές γεωτρήσεις στο Δήμο Ηρωικής Νήσου Κάσου. Στην παρουσιάζεται ο χάρτης με τις θέσεις των γεωτρήσεων και οι αγωγοί μεταφοράς του νερού. Οι θέσεις και οι αντίστοιχες ημερομηνίες δειγματοληψιών παρουσιάζονται στον Πίνακας 7.1.





Σχήμα 7.1: Χάρτης Υδρευσης για τη Νήσο Κάσο

**Πίνακας 7.1:** Ονομασία γεωτρήσεων και ημερομηνίες δειγματοληψιών

Ονομασία γεώτρησης	Ημερομηνίες δειγματοληψίας
Αγ. Μηνάς	2 Ιουλίου 2021 5 Αυγούστου 2021
Αντιπέρατος	2 Ιουλίου 2021 5 Αυγούστου 2021
Γρες	2 Ιουλίου 2021 5 Αυγούστου 2021
Γεφύρι	2 Ιουλίου 2021 5 Αυγούστου 2021
Καμπούρης	2 Ιουλίου 2021 5 Αυγούστου 2021
Mutin	2 Ιουλίου 2021 5 Αυγούστου 2021
Φράγμα	2 Ιουλίου 2021 5 Αυγούστου 2021
Παροχή στο Φρυ	5 Αυγούστου 2021

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται στους πίνακες: Πίνακας 7.2, Πίνακας 7.3

**Πίνακας 7.2:** Αποτελέσματα αναλύσεων υδάτων 1ης δειγματοληψίας

Δείγμα (A/A)	Ονομασία πηγής	pH	Αγωγιμότητα (μS/cm)	Αλκαλικότητα (CaCO <sub>3</sub> mg/L)	Σκληρότητα (CaCO <sub>3</sub> mg/L)
1	Αγ. Μηνάς	7,96	1721	165	323,3
2	Αντιπέρατος	7,98	2150	155	339,51
3	Γρες	7,99	2290	165	614,18
4	Γεφύρι	7,8	6260	180	1121,48
5	Καμπούρης	7,88	3990	205	853,81
6	Mutin	7,89	1675	140	527,44
7	Φράγμα	7,58	4230	150	765,76

Ονομασία πηγής	Αρσενικό ολικό (μg/L)	Χρώμο (VI) (μg/L)	Σίδηρος (II) (μg/L)	Ολικός Σίδηρος (μg/L)	Μαγγάνιο (μg/L)
Αγ. Μηνάς	11,55	0	56,93	57,89	1
Αντιπέρατος	12,3	0,83	30,8	33,6	1
Γρες	6,78	0	33,97	41,52	6
Γεφύρι	5,52	1,27	72,4	74,42	59
Καμπούρης	4,57	0	40,6	41,95	0
Mutin	2,4	0	35,72	61,83	0
Φράγμα	4,26	0	33,5	35,17	0

Όνομασία πηγής	Νιτρικά (mg/L)	Φθόριο (mg/L)	Φωσφορικά (mg/L)	Θειικά (mg/L)
Αγ. Μηνάς	50,1	0,48	0,08	90
Αντιπέρατος	12,5	0,49	0,1	85
Γρες	3,5	0,46	0,08	85
Γεφύρι	14,2	0,75	0,05	380
Καμπούρης	23,2	0,61	0,08	360
Mutin	19,3	0,44	0,03	65
Φράγμα	8,9	0,57	0,08	260

Όνομασία πηγής	Ολικά Κολοβακτηρίδια (cfu/100ml)	Escherichia coli (cfu/100ml)	Εντερόκοκκοι (cfu/100ml)
Αγ. Μηνάς	*4	0	0
Αντιπέρατος	**2	0	**2
Γρες	0	0	0
Γεφύρι	0	0	0
Καμπούρης	0	0	0
Mutin	11	0	0
Φράγμα	0	0	0

**Πίνακας 7.3:** Αποτελέσματα αναλύσεων υδάτων 2ης δειγματοληψίας

Δείγμα (A/A)	Όνομασία πηγής	pH	Αγωγιμότητα (μS/cm)	Αλκαλικότητα (CaCO <sub>3</sub> mg/L)	Σκληρότητα (CaCO <sub>3</sub> mg/L)
1	Αντιπέρατος	7,77	2130	150	489,33
2	Αγ. Μηνάς	7,86	1666	165	418,8
3	Γρες	7,76	2210	160	559,86
4	Γεφύρι	7,55	8020	165	1472,82
5	Καμπούρης	7,77	4400	205	1006,7
6	Mutin	7,8	1940	135	543,65
7	Φράγμα	7,7	4470	145	802,56
8	Παροχή στο Φρυ	7,92	3160	155	687,78

Όνομασία πηγής	Αρσενικό ολικό (μg/L)	Χρώμιο (VI) (μg/L)	Σίδηρος (II) (μg/L)	Ολικός Σίδηρος (μg/L)	Μαγγάνιο (μg/L)
Αντιπέρατος	11,33	0,12	21,07	50,95	13
Αγ. Μηνάς	13,22	0	16,59	50,35	6
Γρες	7,2	0,14	26,79	30,96	16
Γεφύρι	5	1,3	56,7	70,76	21
Καμπούρης	4,4	0,83	35,96	46,88	0

Mutin	3,7	0	20,46	70,22	9
Φράγμα	5,72	2,98	16,53	64,83	1
Παροχή στο Φρυ	7,32	2,52	37,67	61,76	8

Όνομασία πηγής	Νιτρικά (mg/L)	Φθόριο (mg/L)	Φωσφορικά (mg/L)	Θειικά (mg/L)
Αντιπέρατος	10,7	0,33	0,11	90
Αγ. Μηνάς	11,3	0,29	0,07	90
Γρες	7,8	0,26	0,18	90
Γεφύρι	15,1	0,64	0,09	450
Καμπούρης	25,3	0,53	0,15	320
Mutin	11,1	0,32	0,08	80
Φράγμα	8,9	0,39	0,12	200
Παροχή στο Φρυ	10,8	0,35	0,05	180

Όνομασία πηγής	Ολικά Κολοβακτηρίδια (cfu/100ml)	<i>Escherichia coli</i> (cfu/100ml)	Εντερόκοκκοι (cfu/100ml)
Αντιπέρατος	0	0	0
Αγ. Μηνάς	0	0	0
Γρες	*3	0	0
Γεφύρι	*3	0	0
Καμπούρης	0	0	0
Mutin	0	0	0
Φράγμα	0	0	0
Παροχή στο Φρυ	10	**2	*4

Τα δείγματα από τις γεωτρήσεις Γεφύρι, Καμπούρης, φράγμα καθώς και το δείγμα παροχής από Φρυ, ξεπερνούν τα όρια της νομοθεσίας στις τιμές της αγωγιμότητας. Επίσης στα δείγματα Γεφύρι, Καμπούρης και Φράγμα ξεπερνούν τα όρια της νομοθεσίας στη συγκέντρωση των θεικών ανιόντων. Γενικά οι παρατηρούμενες υψηλές τιμές στην αγωγιμότητα σε όλα τα δείγματα που αναλύθηκαν και των θεικών σε επιμέρους θέσεις πιθανόν συνδέονται με διείσδυση θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς, με αποτέλεσμα το νερό να χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει ότι τα δείγματα από τις γεωτρήσεις Αγ. Μηνάς και Αντιπέρατος, και στις 2 δειγματοληψίες ξεπερνούσαν τα όρια της νομοθεσίας για το Πόσιμο Νερό για την παράμετρο του Αρσενικού (δηλαδή τα 10 µg/L).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αναλύσεων αρσενικού σε σχέση με αναλύσεις που έγιναν σε προηγούμενες δειγματοληψίες σε διαπιστευμένο εργαστήριο έδειξε μεγάλη συμφωνία στα αποτελέσματα κάτι που επιβεβαιώνει το έγκυρο των αναλύσεων μας. Τα συγκριτικά αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακας 7.4.

**Πίνακας 7.4:** Αναλύσεις δειγμάτων για αρσενικό, και σύγκριση με τα αποτελέσματα των Αθηναϊκών Εργαστηρίων, από δείγματα που συλλέχθηκαν στις 21 Μαΐου και 26 Ιουνίου 2021

Δείγμα	1 <sup>η</sup> δειγματοληψία Συνολικό Αρσενικό (μg/L)	2 <sup>η</sup> δειγματοληψία Συνολικό Αρσενικό (μg/L)	Μέτρηση Εξωτερικό εργαστήριο 21-05-2021	Μέτρηση Εξωτερικό εργαστήριο 26-06-2021
Αγ. Μηνάς	11,55	13,22	13	13
Αντιπέρατος	12,3	11,33	12	12
Γρες	6,78	7,2	6,8	5,6
Καμπούρης	4,57	4,4		2,4
Φράγμα	4,26	5,72	5,4	5,4
Mutin	2,4	3,7	17	0,1

Τα αποτελέσματα συμφωνούν σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από τη γεώτρηση Mutin, για την οποία τα αποτελέσματα από τις δυο αναλύσεις του διαπιστευμένου εργαστηρίου απέχουν πολύ, αλλά οι 2 αναλύσεις του δικού μας εργαστηρίου είναι παρόμοιες, απέχουν όμως από τις τιμές του εργαστηρίου αναφοράς. Στην έρευνα που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριό μας, διενεργήσαμε και εσωτερικό έλεγχο αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της σταθερής προσθήκης. Μετρήθηκαν δηλαδή τα δείγματα κανονικά και στη συνέχεια στα ίδια δείγματα προσθέσαμε γνωστή ποσότητα αρσενικού (30 μg/L), και ξαναμετρήθηκαν. Με αυτό τον τρόπο, αν για παράδειγμα η συγκέντρωση στο Mutin ήταν 19, θα έπρεπε μετά την προσθήκη 30 μg/L αρσενικού, να μετρούνταν το δείγμα περίπου στα 49 με 50 μg/L. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εσωτερικού ελέγχου με τη μέθοδο της προσθήκης φαίνονται στον πίνακα 5. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν τις μετρήσεις του αρσενικού στα αρχικά δείγματα, και εξασφαλίζουν την τάξη μεγέθους των συγκεντρώσεων.

**Πίνακας 7.5:** Μέτρηση δειγμάτων 1<sup>ης</sup> δειγματοληψίας για αρσενικό και αποτελέσματα εσωτερικού ελέγχου με σταθερή προσθήκη γνωστής συγκέντρωσης αρσενικού.

Τοποθεσία	Ολικό Αρσενικό (μg/L)	Ολικό Αρσενικό με σταθερή προσθήκη 40 μg/L (μg/L)
Αγ. Μηνάς	11,55	51,76
Αντιπέρατος	12,3	52,22
Γρες	6,78	47,22
Γεφύρι	5,52	43,86
Καμπούρης	4,57	44,5
Mutin	2,4	43,05
Φράγμα	4,26	45,4

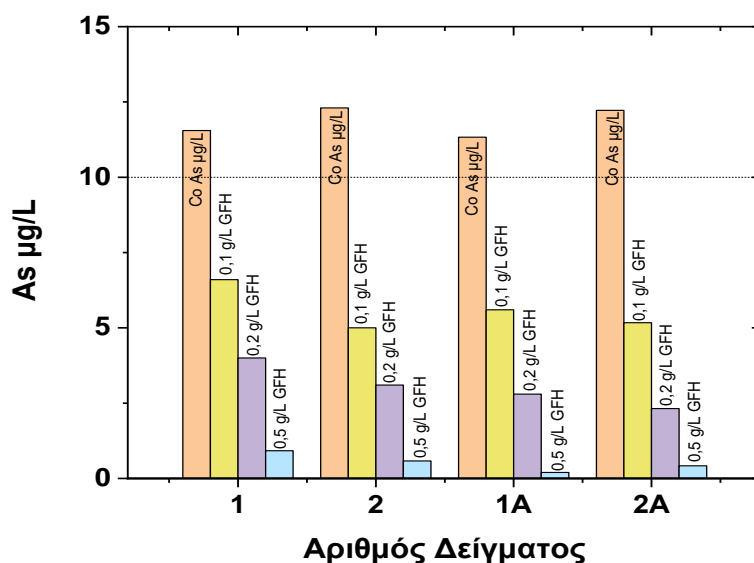
Η ισχυρή τοξικότητα του αρσενικού φαίνεται και στον Πίνακα 7.6, ο οποίος δείχνει τις πιθανότητες καρκινογένεσης από αρσενικό, σε σχέση με τη συγκέντρωσή του στο νερό, στην περίπτωση που οι κάτοικοι εκτίθενται χρόνια σε πόσιμο νερό ρυπασμένο με αρσενικό.

**Πίνακας 7.6:** Πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου λόγω χρόνιας κατανάλωσης πόσιμου νερού με αρσενικό σε σχέση με τη συγκέντρωσή του (πηγή: National Academy of Sciences' 1999 risk estimates. <http://www.nrdc.org/water/drinking/qarsenic.asp#health>)

Συγκέντρωση αρσενικού στο πόσιμο νερό (μg/L)	Πιθανότητα καρκινογένεσης (θεωρώντας κατανάλωση 2 λίτρα ανά ημέρα)
0,5	1 in 10000
1	1 in 5000
3	1 in 1667
4	1 in 1250
5	1 in 1000
10	1 in 500
25	1 in 200
50	1 in 100

### 7.3.1 Ειδικές απαιτήσεις Αποτελέσματα Δοκιμών Απομάκρυνσης Αρσενικού με τη Μέθοδο της Προσρόφησης

Στα δείγματα νερού (1, 2, 1A, 2A) όπου η συγκέντρωση του αρσενικού είναι υψηλότερη της παραμετρικής τιμής των 10 μg/L πραγματοποιήθηκαν δοκιμές απομάκρυνσης αρσενικού με τη χρήση υδροξειδίου του σιδήρου σε κόκκους (Granular Ferric Hydroxide - GFH) σε συγκεντρώσεις 0,1, 0,2 και 0,5 g/L. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκέντρωση 0,1 g/L του υλικού GFH είναι αρκετή για την μείωση της συγκέντρωσης του αρσενικού σε τιμή χαμηλότερη του ορίου των 10 μg/L, ενώ με συγκέντρωση 0,5 g/L του υλικού η απομάκρυνση του αρσενικού είναι σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% και η συγκέντρωση τείνει στο μηδέν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.2 που ακολουθεί.



**Σχήμα 7.2:** Υπολειπόμενη συγκέντρωση αρσενικού σε δείγματα νερού μετά την απομάκρυνση του με τη χρήση του υλικού GFH

### 7.3.1 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Αναλύσεων

Συνοψίζοντας, οι αναλύσεις των δειγμάτων υπογείων νερών από το δήμο Κάσου καταδεικνύουν ότι υπάρχουν 3 προβλήματα στην ποιότητα του νερού. Πρώτον, σε όλα τα νερά, η αγωγιμότητα είναι πολύ υψηλή και σε 3 περιπτώσεις στην πρώτη δειγματοληψία και 4 στη δεύτερη που ξεπερνούν τα όρια της νομοθεσίας (98/83/ΕΚ) για την κατανάλωση πόσιμου νερού. Δεύτερον, όλες οι πηγές που ελέγχθηκαν περιείχαν το τοξικό στοιχείο αρσενικό. Σε δυο από αυτές τις περιπτώσεις, η συγκέντρωση του αρσενικού είναι μεγαλύτερη από τα νομοθετικά όρια.

Και τρίτον, με εξαίρεση τις γεωτρήσεις Φράγμα και Καμπούρης, στις υπόλοιπες θέσεις στα δείγματα που λήφθηκαν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις της νομοθεσίας σε μικροβιολογικό φορτίο. Σημειώνεται βέβαια ότι οι τιμές ήταν στα όρια ποσοτικοποίησης και παρουσιάζουν τυχαία εμφάνιση. Αξιολογώντας τα ευρήματα των μικροβιολογικών υπερβάσεων, η παρουσία *Escherichia coli* και εντερόκοκκων σε ορισμένα από τα παραπάνω δείγματα, αποτελεί ένδειξη μόλυνσης κοπρανώδους προέλευσης (ανθρωπογενούς ή ζωικής) των υδάτων αυτών και δυνητικής παθογένειας κατά την ανθρώπινη κατανάλωσή τους. Αντίθετα, στις περιπτώσεις όπου ανιχνεύτηκε μόνο η παρουσία ολικών κολοβακτηριδίων χωρίς την ταυτόχρονη εμφάνιση *Escherichia coli* και εντερόκοκκων, είναι πιθανό η μόλυνση να είναι περιβαλλοντικής και όχι κοπρανώδους προέλευσης (π.χ. επαφή του νερού με βλάστηση, χώμα κλπ.).

Η επεξεργασία με χρήση του προσροφητικού Granular Ferric Hydroxide, θα μπορούσε να αποτελέσει μια λύση για τη μείωση της συγκέντρωσης του αρσενικού στα νερά από τις πηγές Αγ. Μηνάς και Αντιπέρατος, στα οποία οι τιμές

της αγωγιμότητας δεν ξεπερνούν το νομοθετικό όριο των 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Για τα υπόλοιπα νερά, τα οποία έχουν τιμές αγωγιμότητας μεγαλύτερες από τα 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , οι τιμές αγωγιμότητας μπορούν να μειωθούν με χρήση τεχνολογιών αφαλάτωσης, καθώς το νερό είναι υφάλμυρο.

#### 7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΚΑΣΟΥ

Η Ευρωπαϊκή και Εθνική νομοθεσία για το πόσιμο νερό καθορίζεται με βάση την Οδηγία της 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως τροποποιήθηκε με την Οδηγία (ΕΕ) 2015/1787 και εντάχθηκε στο εθνικό δίκαιο μέσω της ΚΥΑ Γ1(δ)/ΓΠ οικ. 67322/2017 που αναφέρεται στην ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Στον Πίνακα 7.7 δίνονται οι παραμετρικές τιμές για διάφορες παραμέτρους που είναι σχετικές με την παρούσα έρευνα.

**Πίνακας 7.7:** Παραμετρικές τιμές της ΚΥΑ Γ1(δ)/ΓΠ οικ. 67322/2017

Παράμετρος	Ανώτερη παραμετρική τιμή	Μονάδα
pH	$\geq 6,5$ και $\leq 9,5$	μονάδες pH
Αγωγιμότητα	2500	$\mu\text{S}/\text{cm}$ στους 20 °C
Αρσενικό	10	$\mu\text{g}/\text{L}$
Θειικά	250	$\text{mg}/\text{L}$
Νιτρικά	50	$\text{mg}/\text{L}$
Σίδηρος	200	$\mu\text{g}/\text{L}$
Μαγγάνιο	50	$\mu\text{g}/\text{L}$
Κολοβακτηριοειδή	0	cfu/100mL
<i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> )	0	cfu/100mL
Εντερόκοκκοι	0	cfu/100mL

Με δεδομένο ότι στα ληφθέντα δείγματα παρατηρήθηκαν υπερβάσεις της νομοθεσίας -εκτός από το Αρσενικό- και σε μικροβιολογικό φορτίο, συνιστάται η λήψη μιας σειράς μέτρων για τη διασφάλιση της ποιότητας του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων προστασίας των πηγών υδροληψίας (επιφανειακά και υπόγεια ύδατα), των υδροσυλλογών, των δεξαμενών αποθήκευσης και των δικτύων διανομής από ενδεχόμενους κινδύνους υποβάθμισης της ποιότητας του νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση, με περίφραξη των χώρων των πηγών υδροληψίας, την απομάκρυνση πιθανών στάβλων και την αποφυγή γεωργικών δραστηριοτήτων κοντά σε αυτές, τη στεγανοποίηση των υδροσυλλογών, των δεξαμενών αποθήκευσης και των δικτύων διανομής, όπως επίσης και ο συστηματικός καθαρισμός και η απολύμανση όλων ανεξαιρέτως των δεξαμενών πόσιμου νερού (τουλάχιστον μία φορά ετησίως). Επιπλέον κρίνεται σκόπιμη η εγκατάσταση κατάλληλων συστημάτων απολύμανσης (π.χ. ροοαναλογικά συστήματα



χλωρίωσης, ή συστήματα ελεγχόμενης χλωρίωσης) και ο συστηματικός έλεγχος ορθής λειτουργίας τους. Ως εκ τούτου η εγκατάσταση των νέων χλωριωτών ακριβείας που έχουν ήδη παραληφθεί από τον Δήμο, κρίνεται απαραίτητη, τόσο στις Κεντρικές δεξαμενές όσο και στις επί μέρους δεξαμενές των χωριών.

Παρακάτω αναλύονται οι δύο περιπτώσεις βελτίωσης της ποιότητας του νερού της νήσου Κάσου που προτάθηκαν, προκειμένου ο Δήμος να αποφασίσει την κατάλληλη επεξεργασία ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις δυνατότητες (λειτουργικές και οικονομικές) της περιοχής.

#### 7.4.1 Περίπτωση 1<sup>η</sup> – Απομάκρυνση μόνο του Αρσενικού

Στην περίπτωση που ο Δήμος αποφάσιζε την απομάκρυνση μόνο του αρσενικού και δεν ήταν επιθυμητή η απομάκρυνση των αλάτων με μονάδα αντίστροφης ώσμωσης (RO) και με δεδομένο και τον Πίνακα 7.8, προτάθηκε μετά το συνολικό μίγμα νερού να τοποθετηθεί ένα φίλτρο με GFH ώστε να επεξεργάζεται το νερό ύδρευσης. Σύμφωνα με τον πιο κάτω πίνακα οι σταθμισμένες μέσες συγκεντρώσεις αρσενικού είναι κοντά στο όριο των 10 μg/L ή λίγο κάτω από αυτό. Αυτό σημαίνει ότι πολλές μεμονωμένες τιμές συγκεντρώσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα θα ξεπερνούν το όριο των 10 mg/L της νομοθεσίας για την παροχή πόσιμου νερού. Εξάλλου, σύμφωνα με τα στοιχεία που παρείχε ο Δήμος, φαίνεται ότι η χρήση φίλτρου προσρόφησης του αρσενικού που εγκαταστάθηκε μετά την γεώτρηση Mutin, μείωσε την συγκέντρωση αρσενικού από 17 μg/L σε 0,1 μg/l. Η συγκέντρωση GFH που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί εύκολα να αποφασιστεί, με βάση και τα αποτελέσματα προσρόφησης που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

**Πίνακας 7.8:** Σταθμισμένοι μέσοι όροι συγκεντρώσεων αγωγιμότητας και αρσενικού, ανάλογα με την χρονική περίοδο, τις λειτουργούσες γεωτρήσεις, και τις παροχές.

	Περίοδος	Λειτουργία	Παροχή (m <sup>3</sup> /h)	Αγωγιμότητα (μS/cm)	Αρσενικό ολικό (μg/L)
	Οκτώβριος-Απρίλιος	Λειτουργούν σε 24ωρη βάση οι γεωτρήσεις Mutin, Αντιπέρατος και Άγιος Μηνάς	16,3	1913	9,4
	Μάιος και Ιούνιος	Λειτουργούν σε 24ωρη βάση οι γεωτρήσεις Mutin, Αντιπέρατος και Άγιος Μηνάς, Γρες και Φράγμα	21,5	2482	8,1
	Ιούλιος και Αύγουστος	Λειτουργούν σε 24ωρη βάση λειτουργούν και οι 7 γεωτρήσεις	27,7	3079	7,7

Μελλοντική λειτουργία	Οκτώβριος-Απρίλιος	Λειτουργούν σε 24ωρη βάση οι γεωτρήσεις Mutin, Αντιπέρατος και Άγιος Μηνάς	22,5	1860	10
	Μάιος και Ιούνιος	Λειτουργούν σε 24ωρη βάση οι γεωτρήσεις Mutin, Αντιπέρατος και Άγιος Μηνάς, Γρες και Φράγμα	27	2847	7
	Ιούλιος και Αύγουστος	Λειτουργούν σε 24ωρη βάση και οι 7 γεωτρήσεις	33	2797	8,4

Το κοκκώδες υδροξείδιο του σιδήρου (GFH) είναι ένα προσροφητικό, που αναπτύχθηκε για την απομάκρυνση του αρσενικού από το φυσικό νερό. Μπορεί να εφαρμοστεί σε αντιδραστήρες απλής σταθερής κλίσης, παρόμοιους με αυτούς του ενεργού άνθρακα. Το GFH έχει υψηλή ικανότητα προσρόφησης αρσενικού. Η εφαρμογή του GFH σε πολλές μονάδες επεξεργασίας νερού έδειξε υψηλή ικανότητα επεξεργασίας 40000 - 60000 όγκων κλινών, έως ότου ξεπεραστεί το όριο πόσιμου νερού για το αρσενικό στην Ευρωπαϊκή Ένωση (τα 10 µg/L). Το υπόλειμμα αυτής της τεχνικής είναι ένα στερεό απόβλητο, εμπλουτισμένο με αρσενικό. Η τυπική υπολειμματική μάζα κυμαίνεται από 5-25 g As/m<sup>3</sup> επεξεργασμένου νερού. Αυτή η τεχνική για την αφαίρεση του αρσενικού παρέχει μια απλή και αποτελεσματική μέθοδο, ιδιαίτερα για μικρές εγκαταστάσεις νερού. Το GFH είναι οξείδιο του σιδήρου με την μορφή του ακαγκανείτη, με ειδική επιφάνεια 250-300 m<sup>2</sup>/g και πορώδες 75-80%, όπως φαίνεται στην Σχήμα 7.3.



**Σχήμα 7.3:** Κοκκώδες Υδροξείδιο του σιδήρου (GFH)

Στον Πίνακα 7.9 δίνονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υλικού GFH.

**Πίνακας 7.9:** Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του κοκκώδους υδροξειδίου του σιδήρου (GFH)

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Χημική σύσταση	B-FeOOH και Fe(OH) <sub>3</sub>
Περιεκτικότητα ξηρών στερεών	58% (± 10%)
Περιεκτικότητά σιδήρου, σχετιζόμενη με τα ξηρά στερεά	600 g/kg (± 10%)
Εύρος μεγέθους σωματιδίων	0.2 – 2.0 mm
Ποσοστό μικρότερο του εύρους μεγέθους	<10%
Συνολικό ποσοστό μικρότερο και μεγαλύτερο του εύρους μεγέθους	< 20%
Πυκνότητα χύδην υλικού	1150 kg/m <sup>3</sup> ((± 10%)
Ειδική επιφάνεια (μέθοδος BET)	Περίπου 300 m <sup>2</sup> /g

Το GFH μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς κανένα πρόβλημα ως φίλτρο αφαίρεσης αρσενικού σε φίλτρα προσρόφησης, όπως τυπικά δοχεία φίλτρων (standard filter containers) ή συμβατικά cartridge systems.

Στην Εικόνα 6 φαίνονται οι τύποι των δοχείων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, στην τυπική περίπτωση διέλευσης του νερού από κλίνη προσρόφησης. Το υπό επεξεργασία νερό τροφοδοτείται υπό πίεση σε κλειστό δοχείο το οποίο είναι κατασκευασμένο είτε από πλαστικό τύπου FRB (Fibre-reinforced Plastic), είτε από ανοξείδωτο ατσάλι είτε από ατσάλι με καουτσούκ. Μέσα στο κλειστό δοχείο είναι τοποθετημένο το προσροφητικό υλικό (GFH). Το νερό έρχεται σε επαφή με το GFH με αποτέλεσμα το αρσενικό να μεταφερθεί από την υγρή φάση στη στερεή (στο υλικό προσρόφησης) και να απομακρυνθεί από το νερό. Σταδιακά κατά τη λειτουργία της μονάδας επέρχεται κορεσμός του προσροφητικού υλικού. Όταν η τιμή του αρσενικού στο επεξεργασμένο νερό ανέβει πάνω από το όριο των 10 µg/L σημαίνει ότι το GFH δεν μπορεί να απομακρύνει πλέον επαρκώς το αρσενικό. Επομένως, το υλικό αφαιρείται και τοποθετείται νέο GFH. Το χρησιμοποιημένο GFH το παραλαμβάνει συνήθως ο προμηθευτής του υλικού ο οποίος και το αναγεννά.



Σχήμα 7.4: Setup κλίνης προσρόφησης με GFH

Στον Πίνακα 7.10 δίνονται οι προτεινόμενες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος των φίλτρων προσρόφησης.

**Πίνακας 7.10:** Λειτουργικές συνθήκες του συστήματος επεξεργασία με φίλτρα προσρόφησης GFH.

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Βάθος στρώματος προσροφητικού υλικού	0.8 – 1.6 m
Ελεύθερο ύψος δεξαμενής πάνω από το στρώμα υλικού	50% του βάθους στρώματος
Ταχύτητα διύλισης	≤ 20 m/h
Χρόνος επαφής κενής κλίνης	≥ 3 min
Αποδεκτή πτώση πίεσης	Max. 0.5 bar (7 psi)
Ταχύτητα έκπλυσης	26 m/h (με νερό μόνο)
Χρόνος έκπλυσης	Μέχρι το εξερχόμενο νερό να είναι καθαρό

Από οικονομικά στοιχεία που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, εκτιμάται ότι το συνολικό λειτουργικό κόστος για προσρόφηση αρσενικού με τη χρήση υδροξειδίου του σιδήρου σε κόκκους (GFH) είναι περίπου  $0,16 \pm 0,02 \text{ €/m}^3$ . Το κόστος του ίδιου του υλικού GFH, είναι περίπου  $0,09 \pm 0,02 \text{ €/m}^3$  συμβάλλοντας έτσι, με περισσότερο από 50% στο λειτουργικό κόστος.

#### 7.4.2 Περίπτωση 2<sup>η</sup> – Μονάδα αντίστροφης ώσμωσης για απομάκρυνση και αρσενικού και αλατότητας

Οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης απομακρύνουν τόσο τα άλατα όσο και το αρσενικό από το νερό. Συνεπώς, μπορούν να εφαρμοστούν στο Δήμο Κάσου, είτε σε κεντρικό επίπεδο, είτε σε οικιακό επίπεδο από τους καταναλωτές. Με τον

τρόπο αυτό το νερό καθίσταται πόσιμο ικανοποιώντας πλήρως τα κριτήρια της νομοθεσίας για την παροχή νερού ύδρευσης.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η απομάκρυνση του τρισθενούς As(III) με επεξεργασία μονάδας RO είναι 50 έως 80%, ενώ το πεντασθενές As(V) αφαιρείται περισσότερο από 98% καθώς τα διασπασμένα αρσενικά ιόντα επιδέχονται απομάκρυνση με RO. Επομένως, η οξείδωση As(III) σε As(V) μπορεί να βελτιώσει την απομάκρυνση του αρσενικού από τις μεμβράνες RO. Επιπλέον, επιτυγχάνει πολύ υψηλή απομάκρυνση αλάτων και επομένως μπορεί να μειώσει την υψηλή αγωγιμότητα του νερού σε επιθυμητά επίπεδα.

Στην Κάσο το μεγαλύτερο μέρος του ολικού αρσενικού είναι σε τρισθενή μορφή As(III). Ωστόσο, επειδή οι συγκεντρώσεις είναι λίγο πάνω από το όριο των 10 μg/L, δεν απαιτείται επιπλέον επεξεργασία, αφού μόνο η RO αρκεί για να μειώσει την συγκέντρωση αρκετά κάτω από το όριο των 10μg/L της νομοθεσίας.

Η αφαλάτωση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού με μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης (RO\_ περιλαμβάνει 3 στάδια:

- το στάδιο της προεπεξεργασίας,
- το στάδιο της αντίστροφης ώσμωσης,
- το τελικό στάδιο της επεξεργασίας.

Το στάδιο της **προεπεξεργασίας** είναι σημαντικό καθώς στοχεύει στην προστασία των μεμβρανών από τα άλατα και τους μικροοργανισμούς. Περιλαμβάνει συνήθως (ανάλογα το μέγεθος της εγκατάστασης και ανά περίπτωση):

- ένα προ-φίλτρο εισόδου (με τοποθέτηση σχάρας για να μην εισέρχονται ανεπιθύμητες ουσίες κατά την αναρρόφηση νερού),
- την προχλωρίωση του υφάλμυρου νερού, την προσθήκη οξέων (για αποφυγή απόθεσης αλάτων),
- τα φίλτρα για κατακράτηση των στερεών ουσιών με μέγεθος μέχρι και 1-5 μm, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν φθορά στις μεμβράνες,
- την αποχλωρίωση

Το **στάδιο της αντίστροφης ώσμωσης** περιλαμβάνει τη συμπίεση κατά την οποία η αντλία τροφοδοσίας αυξάνει την πίεση του νερού τροφοδοσίας, σε μια πίεση λειτουργίας κατάλληλη για τις μεμβράνες αντίστροφης και την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας και τον διαχωρισμό κατά τον οποίο οι διαπερατές μεμβράνες παρεμποδίζουν την διέλευση των διαλυμένων αλάτων, ενώ επιτρέπουν στο αφαλατωμένο νερό να περάσει μέσα.

Στο **στάδιο της τελικής επεξεργασίας** πραγματοποιείται η προετοιμασία του παραγόμενου νερού ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η διανομή του. Αυτή η προετοιμασία περιλαμβάνει:

- τη ρύθμιση του pH,
- την αύξηση της σκληρότητας του νερού,
- και την τελική χλωρίωση.

Η αντίστροφη ώσμωση (RO) χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις στην Ελλάδα και μια τυπική μονάδα έχει μέση παραγωγή 1200 m<sup>3</sup>/ημέρα. Στην Κάσο σύμφωνα με τα στοιχεία του Δήμου, μετά την ολοκλήρωση του νέου αγωγού Αγ. Μηνά-Δεξαμενών η μελλοντική μετά την ολοκλήρωση του, υπό ένταξη στο πρόγραμμα Αντ. Τρίτσης, έργου θα είναι 33 m<sup>3</sup>/h ή 792 m<sup>3</sup>/ημέρα (η σημερινή συνολική μέγιστη παροχή είναι 27,7m<sup>3</sup>/h ή 665 m<sup>3</sup>/ημέρα). Επομένως, οι παροχές είναι κατάλληλες για μια διεργασία αντίστροφης ώσμωσης.

#### 7.4.2.1 **Ενεργειακές απαιτήσεις RO**

Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης είναι αρκετά ενεργοβόρες. Για αυτό είναι σημαντικό οι μονάδες να χωροθετούνται και να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη την διαθεσιμότητα σε ενέργεια. Η ενέργεια που απαιτείται ποικίλει ανάλογα με την δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης και από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. **Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για μια μονάδα RO για θαλασσινό νερό σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι 3 - 16.9 kWh/m<sup>3</sup>, ενώ ειδικότερα για υφάλμυρο νερό κυμαίνεται στα 1 - 2.5 kWh/m<sup>3</sup> (Assimacopoulos, 2001).**

Επίσης κανείς θα μπορούσε να εξετάσει και την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αφαλάτωση και καθαρισμό του νερού, που γίνεται ολοένα και πιο ελκυστική δεδομένου ότι οι περιοχές με έλλειψη πόσιμου νερού έχουν στη χώρα μας την αφθονία της ηλιακής ή/και αιολικής ενέργειας, μαζί με το γεγονός ότι οι τεχνολογίες αυτές έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

#### 7.4.2.2 **Προσωπικό και τεχνική υποστήριξη**

Είναι γνωστό ότι σε απομακρυσμένες περιοχές και μικρά νησιά όπως η Κάσος, η ύπαρξη εξειδικευμένου προσωπικού λειτουργίας είναι περιορισμένη. Επομένως, θα πρέπει να υπάρχει η βεβαιότητα έγκαιρης διάθεσης ανταλλακτικών και τεχνικής υποστήριξης από εξειδικευμένα συνεργεία (του Δήμου ή και ιδιωτικά) για τη συντήρηση και τη λειτουργία. Η ορθή λειτουργία μιας μονάδας RO αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή και αξιόπιστη παραγωγή καθαρού νερού σε βάθος χρόνου. Το προσωπικό του Δήμου ή του εξωτερικού συνεργείου πρέπει να φροντίζει για τα ακόλουθα:

- διαρκής έλεγχος της ποιότητας του παραγόμενου νερού, σύμφωνα με την

- νομοθεσία και τους κάθε φορά περιβαλλοντικούς όρους,
- συστηματικός έλεγχος των ποιοτικών χαρακτηριστικών του θαλάσσιου περιβάλλοντος στην περιοχή του σημείου εκβολής της άλμης,
  - συστηματική και σχολαστική συντήρηση των μονάδων αφαλάτωσης, σύμφωνα τις απαιτήσεις των κατασκευαστών,
  - συστηματική και σχολαστική επιτήρηση της λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης, ώστε να αντιμετωπίζονται έγκαιρα τυχόν βλάβες.

### 7.4.2.3 Διαχείριση της άλμης

Η άλμη προέρχεται από την επεξεργασία του υφάλμυρου νερού, και είναι ένα μείγμα με υψηλή αλατότητα. Ωστόσο στην επεξεργασία υφάλμυρου νερού η παραγόμενη άλμη έχει πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις αλάτων σε σχέση με την άλμη που παράγεται από την επεξεργασία θαλασσινού νερού.

Οι επικρατέστερες λύσεις για τη διαχείριση της παραγόμενης άλμης είναι σήμερα:

- η ταφή στη γη,
- η διοχέτευση στη θάλασσα.

Η πρώτη περίπτωση - της υπεδάφιας ταφής της άλμης - δεν είναι περιβαλλοντικά ορθή καθώς η άλμη αποτελεί απόβλητο ειδικής κατηγορίας με μεγάλη διαβρωτική ικανότητα αλλά αυτό είναι κάτι που θέλει περαιτέρω διερεύνηση για την κάθε περίπτωση.

Η συνήθης επικρατούσα λύση είναι αυτή της διάθεσης της άλμης στη θάλασσα, η οποία όμως και αυτή έχει «κατηγορηθεί» ότι επιφέρει περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πάντως, σε υφιστάμενες αφαλατώσεις έχουν γίνει μετρήσεις, οι οποίες έχουν δείξει ότι για τα σχετικά μικρά μεγέθη μονάδων, η άλμη διαχέεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, χωρίς σημαντικές συνέπειες στο θαλάσσιο περιβάλλον. Θα πρέπει, όμως, να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε στην περιοχή απόρριψης να επικρατούν θαλάσσια ρεύματα που βοηθούν στη διάχυση και η θέση απόρριψης να μην είναι ίδια με τη θέση υδροληψίας. Τα πράγματα είναι πολύ καλύτερα για την περίπτωση υφάλμυρου νερού, όπως της Κάσου καθώς η αλατότητά του είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή της άλμης που παράγεται από θαλασσινό νερό.

Ειδικότερα, ενδείκνυται η διάθεση της άλμης στην θάλασσα να γίνεται με την χρήση υποθαλάσσιου αγωγού, ύστερα από μελέτη που θα υποδεικνύει το σημείο εκβολής (βάθος της θάλασσας, απόσταση από την ακτή, τοπογραφία του σημείου περιοχής) και τον υπολογισμό των ρευμάτων που επικρατούν στην περιοχή, ώστε να έχουμε γρήγορη ανάμιξη της άλμης με το θαλασσινό νερό. Η σωστή διαχείριση της άλμης μπορεί να αυξάνει το κόστος του έργου, αλλά είναι απαραίτητη για την προστασία του περιβάλλοντος.

#### 7.4.2.4 Προσθήκη χημικών που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της διεργασίας αφαλάτωσης

Οι μεμβράνες της RO θα πρέπει να ξεπλυθούν σωστά πριν την εγκατάστασή τους και πριν τεθεί το σύστημα σε λειτουργία. Το νερό πλύσης θα πρέπει να απορρίπτεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκλείεται η πιθανότητα ρύπανσης άλλων πηγών νερού, ή νερών που ενδεχομένως θα χρησιμοποιηθούν για την επακόλουθη ανάμειξη με το αφαλατωμένο νερό.

Για τον περιορισμό των επικαθίσεων στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούνται χημικές ουσίες που ονομάζονται **αντικαθαλωτικά**, τα οποία παρεμποδίζουν την καταβύθιση. Τα αντικαθαλωτικά προστίθενται στο νερό τροφοδοσίας πριν από την είσοδό του στη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης. Η επιλογή του αντικαθαλωτικού που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τη σύνθεση του νερού τροφοδοσίας. Πολλά αντικαθαλωτικά είναι εμπορικώς διαθέσιμα και έχουν σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσουν συγκεκριμένα προβλήματα καθίζησης. Οι ουσίες αυτές μπορούν να αποτελέσουν ρύπους, αν χρησιμοποιηθούν σε υπερβολικές συγκεντρώσεις. Στον Πίνακα 7.11 παρουσιάζονται διάφορα αντικαθαλωτικά και οι χρήσεις τους.

**Πίνακας 7.11 :** Χρήση εμπορικών αντικαθαλωτικών τύπου Genesys σε μονάδα αντίστροφης ώσμωσης

Προϊόν	LF	RC	SI	CAS	SW
Νερό	Όλα	Υφάλμυρο	Υφάλμυρο	Υφάλμυρο	Θαλασσινό
Εφαρμογή	Ευρέως φάσματος	Ευρέως φάσματος	Υψηλά Πυριτικά	Ευρέως φάσματος	Ευρέως φάσματος
Έγκριση για πόσιμο νερό	Ναι		Ναι		Ναι
CaCO <sub>3</sub>	B	B	E	B	B
CaSO <sub>4</sub>	E	E	E	B	X
BaSO <sub>4</sub>	E	E	E	E	X
SiO <sub>2</sub>	E	X	B	E	E
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	E	E	E	E	E
Mg(OH) <sub>2</sub>	E	E	E	E	X
Fe / Mn	B	B	E	E	X

**όπου:** B = Η καλύτερη επιλογή, E = αποτελεσματικό, X = δεν συνιστάται

(Πηγή:

[www.temak.gr/site/gr/products/chemical-additives/antiscalants-reverse-osmosis-desalination/](http://www.temak.gr/site/gr/products/chemical-additives/antiscalants-reverse-osmosis-desalination/))

#### 7.4.2.5 Διάβρωση σωληνώσεων

Το παραγόμενο νερό από τη μονάδα αφαλάτωσης είναι αρκετά διαβρωτικό και για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να έχει σταθεροποιηθεί για να ελαχιστοποιηθεί



η διάβρωση των μεταλλικών σωλήνων και εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα διανομής και στα κτίρια.

#### 7.4.2.6 Κόστος παραγόμενου νερού

Το συνολικό κόστος του παραγόμενου νερού σύμφωνα και με τις ευρωπαϊκές οδηγίες υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη όλα τα επιμέρους κόστη: χρηματοοικονομικό, περιβαλλοντικό και κόστος πόρου.

##### Χρηματοοικονομικό κόστος

Στο χρηματοοικονομικό κόστος περιλαμβάνεται:

- το κόστος της αρχικής επένδυσης (κεφάλαιο),
- το λειτουργικό κόστος, που αφορά το κόστος για την σωστή λειτουργία του, (π.χ. ηλεκτρική ενέργεια, αναλώσιμα και εργασία),
- το κόστος συντήρησης, δηλαδή τις δαπάνες για ανταλλακτικά, έκτακτες εργασίες,
- το κόστος διοικητικού και τεχνικού προσωπικού,
- το κόστος διοίκησης και άλλα κόστη (π.χ. κόστος, γραφείων, κ.λπ.).

Εκτός από το κόστος κεφαλαίου οι υπόλοιπες δαπάνες διακρίνονται σε σταθερές και μεταβλητές.

Οι σταθερές δαπάνες περιλαμβάνουν τα ασφάλιστρα και τα έξοδα χρεολυσίων. Οι μεταβλητές δαπάνες συμπεριλαμβάνουν το κόστος εργασίας, ενέργειας, αναλώσιμων (χημικών ουσιών και αντιδραστηρίων) και συντήρησης.

Σύμφωνα με στοιχεία από την βιβλιογραφία (Younos, 2005) προσδιορίστηκαν οι μέσες τιμές για το κόστος αφαλάτωσης για τις περιπτώσεις διαφόρων τεχνολογιών. Αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.12 που ακολουθεί.

**Πίνακας 7.12:** Κόστος αφαλάτωσης ανάλογα με την τεχνολογία

Διεργασία	Νερό τροφοδοσίας	Κόστος (€/m <sup>3</sup> )
MSF (Πολυβάθμια εκτόνωση)	Θαλασσινό	0,6 – 1,7 *
MED (Πολυβάθμια εξάτμιση)	Θαλασσινό	0,2 – 1,3 *
TVC (Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών)	Θαλασσινό	0,4 – 1,1 *
RO (Αντίστροφη ώσμωση)	Θαλασσινό	0,4 – 2,5 **
RO (Αντίστροφη ώσμωση)	Υφάλμυρο	0,2 – 0,8 **
ED (Ηλεκτροδιάλυση)	Υφάλμυρο	0,5

\* Οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται κυρίως σε μεγάλες μονάδες με υψηλές παροχές.

\*\* Ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας. Μεγαλύτερη μονάδα συνεπάγεται μικρότερο κόστος.

#### **7.4.2.7 Περιβαλλοντικό κόστος**

Στο περιβαλλοντικό κόστος συμπεριλαμβάνονται όλα τα κόστη που απαιτούνται ώστε να μην υπάρξει περιβαλλοντική επιβάρυνση, αφορούν δε τόσο την αρχική επένδυση όσο και τα λειτουργικά έξοδα. Σύμφωνα με το ΣΔΛΑΠ νήσων Αιγαίου, το περιβαλλοντικό κόστος για την ύδρευση είναι ίσο με 0,0003 €/m<sup>3</sup> σε όλες τις λεκάνες απορροής του Υδατικού Διαμερίσματος.

#### **7.4.2.8 Κόστος Πόρου (διαθεσιμότητας)**

Ο ποσοτικός του προσδιορισμός εξαρτάται από ένα σύνολο κοινωνικοοικονομικών και πολιτικών συνθηκών. Στο Άρθρο 3, παράγραφος 5 της ΚΥΑ αριθ. οικ. 135275/2017 ορίζεται ότι:

«Κόστος πόρου" είναι το κόστος άλλων εναλλακτικών χρήσεων του ύδατος, οι οποίες είναι αναγκαίες σε περίπτωση που το Υδατικό Σύστημα χρησιμοποιείται πέραν του ρυθμού της φυσικής του αναπλήρωσης.»

Το Κόστος Πόρου εκτιμάται σε επίπεδο υδατικού διαμερίσματος (ΥΔ) ή συστήματος (ΥΣ). Σύμφωνα με το ΣΔΛΑΠ νήσων Αιγαίου, το μοναδιαίο ετήσιο κόστος Πόρου σε επίπεδο ΥΔ εκτιμάται σε 0,0014 €/m<sup>3</sup>.

## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, κατανοώντας την ανάγκη της αφαίρεσης του αρσενικού από το πόσιμο νερό, παρουσιάστηκε μια ευρεία επισκόπηση των διεργασιών αφαίρεσης αρσενικού που χρησιμοποιούνται σήμερα με βάση την αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία. Η κατανόηση των διαθέσιμων διεργασιών βοηθά στην ανάπτυξη οικονομικών, αποτελεσματικών μεθόδων για την απομάκρυνση του αρσενικού για την κάλυψη του επιθυμητού M.C.L.

Συλλέγοντας όλα τα παραπάνω δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία απορρέουν κάποια συμπεράσματα για τις διεργασίες απομάκρυνσης αρσενικού από το πόσιμο νερό. Αρχικά κοινός παρονομαστής σε όλες τις διεργασίες είναι η προοξείδωση του αρσενικού. Όλες οι τεχνολογίες επιτυγχάνουν πάντα υψηλότερες αποδόσεις όταν το αρσενικό βρίσκεται στην πεντασθενή As(V) και όχι στην τρισθενή του μορφή As(III).

Στις διεργασίες ιζηματοποίησης, τα ινία για την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση, διατηρεί η συμβατική διεργασία κροκίδωσης – καθίζησης – διύλισης/διήθησης, η οποία με τις σωστές δόσεις κροκιδωτικού και ρύθμισης του pH μπορεί να επιτύχει αποδόσεις που αγγίζουν το 100%.

Όσον αφορά την απομάκρυνση του αρσενικού μέσω προσρόφησης, προφανώς η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται με το GFH που ούτως ή άλλως είναι ένα υλικό που δημιουργήθηκε γι' αυτόν ακριβώς το σκοπό, την απομάκρυνση του αρσενικού. Είναι 5-10 φορές πιο αποτελεσματικό από την EA, και τα ποσοστά απομάκρυνσης που πετυχαίνει ξεπερνούν το 95%. Βέβαια, αν μια εγκατάσταση επιλέξει αυτή την τεχνολογία θα πρέπει να ρυθμίσει το pH μεταξύ του 7,6 και του 9 για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Από την άλλη η ανταλλαγή ιόντων έχει τη δυνατότητα να φτάσει εξαιρετικά υψηλά ποσοστά αφαίρεσης αρσενικού, ύψους 95%, υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Η διαμόρφωση όμως των συνθηκών αυτών μπορεί να αυξήσει το κόστος της εγκατάστασης.

Στις διεργασίες μεμβρανών, αξίζει να συγκριθούν μόνο οι υψηλής πίεσης διαδικασίες: η νανοδιήθηση και η αντίστροφη ώσμωση. Η μικροδιήθηση και η υπερδιήθηση, επειδή έχουν συνήθεις απομακρύνσεις κυμαίνονται από 30 – 50 %, με ελάχιστες αναφορές να κάνουν λόγο για 70%, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οικονομία στην περίπτωση που αρχική συγκέντρωση του αρσενικού δεν ξεπερνά τα 20 µg/L και πάλι με επιφύλαξη. Η αντίστροφη ώσμωση είναι η κατεξοχήν αποτελεσματικότερη διεργασία για την απομάκρυνση του αρσενικού, αφού αφαιρεί ΟΛΑ τα διαλυμένα στερεά, όμως παρουσιάζει θέματα κόστους. Έναντι αυτής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η νανοδιήθηση η οποία αποτελεί μια ελαφρώς οικονομικότερη λύση και επιτυγχάνει ικανοποιητικές απομακρύνσεις της τάξης του 90%.

Τέλος, στις εναλλακτικές διεργασίες απομάκρυνσης, γίνεται απλή αναφορά καθώς είτε χρησιμοποιούνται σπανίως, είτε δεν υπάρχουν επαρκεί δεδομένα απομακρύνσεων, είτε είναι αναπτυσσόμενες μέχρι αυτή τη στιγμή.

Συγκρίνοντας όλες τις διεργασίες ταυτόχρονα η αντίστροφη ώσμωση φαίνεται να παράγει το πιο καθαρό νερό, απαλλαγμένο από όλους τους ρύπου όμως το κόστος είναι ένας σοβαρός παράγοντας που προβληματίζει για την εφαρμογή της. Γενικά, η βιβλιογραφία για τις καμπύλες κόστους των διεργασιών δεν έχει μεγάλη ποικιλία. Προτείνεται, επομένως, εκτός από την εκτενέστερη μελέτη των εναλλακτικών διεργασιών απομάκρυνσης, και η διερεύνηση μοντέλων για την ανάπτυξη καμπυλών κόστους για περισσότερες διεργασίες απομάκρυνσης και η αναγωγή του σε ευρωπαϊκές μονάδες μέτρησης και σημερινά δεδομένα τιμών .

## Βιβλιογραφία:

**Abernathy Ch. and Morgan A.** United Nations Synthesis Report Arsenic in Drinking Water-Chapter 3: 'Exposure and Health Effects' [Report]. - [s.l.] : United Nations Synthesis Report, 2001.

**Ahoulé Dompé Ghislain [et al.]** Arsenic in African Waters: A Review [Report]. - [s.l.] : Springer, 2015.

**Alexakis D. and Gamvroula D.** Arsenic, Chromium, and Other Potentially Toxic Elements in the Rocks and Sediments of Oropos-Kalamos Basin, Attica, Greece [Report]. - [s.l.] : Hindawi, 2014.

**Amini Manouchehr [et al.]** Statistical Modeling of Global Geogenic Arsenic Contamination in Groundwater [Report]. - [s.l.] : National Library of Medicine, 2008.

**Apel P.Yu. [et al.]** Structure of polycarbonate track-etch membranes: Origin of the "paradoxical" pore shape [Report]. - Dubna, Russia & Warsaw, Poland : ELSEVIER, 2006.

**Aptel P. and Buckley C. A.** Categories of Membrane Operations [Book Section] // Water Treatment Membrane Processes / book auth. McGraw Hill. - [s.l.] : American Water Works Research Foundation, Lyonnaise des Eaux Water Research Commision of South Africa, 1996.

**ASCE, AWWA** Water Treatment Plant Design [Book] / ed. Edward E Baruth, Technical Editor. - [s.l.] : American Water Works Association American Society of Civil Engineers, 1990. - Fourth.

**Assimacopoulos D.** Water, water everywhere. Desalination Powered by Renewable Energy Sources. - [s.l.] : RE FOCUS, July/August 2001.

**AWWA** Water Quality and Treatment - A Handbook of Community Water Systems [Report]. - New York : McGraw-Hill Publishing Company, 1990.

**AWWARF** Arsenic Treatability Options and Evaluation of Residuals Management Issues / ed. Amy G. L. [et al.]. - Denver, CO : AWWARF, 2000.

**AWWARF** Arsenic Treatability Options and Evaluation of Residuals Management Issues / ed. Amy G. L. [et al.]. - [s.l.] : AWWARF, 1998.

**AWWARF** Water Treatment Membrane Processes [Report]. - New York : McGraw-Hill Publishing Company, 1996.

**Benjamin M. [et al.]** Arsenic Treatability Options and Evaluation of Residuals Handling [Report]. - [s.l.] : AWWARF Final Report,, American Water Works Association Denver, CO, 2000.

**Benjamin M. M. [et al.]** Sorption of Arsenic by Various Adsorbents. - San Antonio, TX : AWWA Inorganic Contaminants Workshop, 1998.

**Borgono Jose Manuel [et al.]** Arsenic in the Drinking Water of the City of Antofagasta: Epidemiological and Clinical Study before and after the Installation of a Treatment Plant [Article] // Environmental Health Perspectives. - [s.l.] : Environmental Health Perspectives, 1977. - 19.

**Brandhuber Philip and Amy Gary** Arsenic removal by a charged ultrafiltration membrane - influences of membrane operating conditions and water quality on arsenic rejection [Report]. - Denver & Boulder : ELSEVIER, 2001.

**Bretzler Anja [et al.]** Geostatistical modelling of arsenic hazard in groundwater [Report]. - [s.l.] : ResearchGate, 2017.

**Canadian Council of Ministers of the Environment** Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health: Arsenic (Inorganic)(1997) [Report]. - [s.l.] : Canadian Council of Ministers of the Environment: Winnipeg, 2007.

**Carvajal Guido [et al.]** Management of water quality in Chile: key aspects for improvement [Report]. - [s.l.] : Urban Water Journal, Taylor & Francis Group, 2021.

**Chang Qigang, Lin Wei and Ying Wei-chi** Preparation of iron-impregnated granular activated carbon for arsenic removal from drinking water [Book Section] // Journal of Hazardous Materials. - [s.l.] : ELSEVIER, 2010. - Vol. 184.

**Chang S. D., Bellamy W. D. and Ruiz H.** Removal of Arsenic by Enhanced Coagulation and Membrane Technology [Conference] // AWWA Annual Conference. - New York : [s.n.], 1992.

**Chaudhry Saif Ali, Zaidi Zakiullah and Siddiqui Sharf Ilahi** Isotherm, kinetic and thermodynamics of arsenic adsorption onto Iron-Zirconium Binary Oxide-Coated Sand (IZBOCS): Modelling and process optimization [Book Section] // Journal of Molecular Liquids. - 2017. - Vol. 229.

**Chen W. F. [et al.]** Arsenic removal by iron-modified activated carbon. - [s.l.] : Journal Water Research, 2007. - Vol. 41.

**Cheng R. C. [et al.]** Enhanced Coagulation for Arsenic [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1994.

**Chengzhi Hu [et al.]** Separation and Purification Technology - Effect of aluminum speciation on arsenic removal during coagulation process [Book]. - [s.l.] : ELSEVIER, 2012. - Vol. 86 : pp. 35-40.

**Clifford D. A. and Ghurye G.** Final Report: Phase 3, City of Albuquerque Arsenic Study [Report]. - Houston, TX : University of Houston, Department of Civil and Environmental Engineering, 1998.

**Clifford D. A.** Ion Exchange and Inorganic Adsorption [Article] // Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies / ed. Hill McGraw. - New York : American Water Works Association, 1999. - R. D. Letterman. - Vol. 5th.

**Clifford D. and Lin C. C.** Arsenic (III) and Arsenic (V) Removal From Drinking Water in San Ysidro, New Mexico [Report]. - Houston, Texas : University of Houston, 1985.

**Clifford D. and Lin C. C.** Arsenic Removal From Groundwater in Hanford, California - A Preliminary Report [Report] / Department of Civil/Environmental Engineering. - Houston : University of Houston, 1986.

**Clifford D. and Lin C. C.** Ion Exchange, Activated Alumina, and Membrane Processes for [Conference] // 45th Annual Environmental Engineering Conference. - [s.l.] : University of Kansas, 1995.

**Clifford Dennis and Lin Chieh-Chien** Arsenic (+ 3) and Arsenic (+ 5) removal from Drinking water in San Ysidro, New Mexico [Report]. - Houston, Texas : Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, EPA, 1991.

**Cooperative Research Centres for Waste Management** Photo-Oxidation and Removal of Arsenic from Acid Mine Water: A Pilot Demonstration of CRC Process in Montana, USA //

- Cooperative Research Centres for Waste Management and Pollution Control Limited. - Kensington, NSW 2033, Australia : CRC for Waste Management and Pollution Control Ltd, 1999.
- Crittenden John C. [et al.]** MWH's Water Treatment: Principles and Design, Third Edition: Principles and Design, Third Edition [Book]. - [s.l.] : MWH, 2012. - p. 1549.
- Crittenden John C. [et al.]** MWH's Water Treatment: Principles and Design, Third Edition: Principles and Design, Third Edition [Book]. - [s.l.] : MWH, 2012.
- Culp/Wesner/Culp** Estimation of Small System Water Treatment Costs [Report]. - San Clemente, California : CWC Engineering Software (for USEPA), 1984.
- Culp/Wesner/Culp** WATERCO\$T Model - A Computer Program for Estimating Water and Wastewater Treatment Costs (Version 2.0) [Report]. - San Clemente, California : CWC Engineering Software, 1994.
- Deng Baolin, Caviness Mendy and Gu Zhimang** Arsenic Removal by Activated Carbon-Based Materials [Book Section] // Advances in Arsenic Research. - Washington, DC : University of Michigan, 2005.
- DePiep** Περιοδικός Πίνακας Χημικών Στοιχείων [Art]. - [s.l.] : Βικιπαίδεια.
- Diawara Courfia K.** Nanofiltration Process Efficiency in Water Desalination [Report]. - Dakar, Senegal : Taylor & Francis, 2008.
- Driehaus W., Jekel M. and Hildebrandt U.** Granular Ferric Hydroxide - A New Adsorbent for Removal of Arsenic from Natural Water [Article] // Water Science & Technology. - 1998. - pp. 30-35.
- Drioli E. [et al.]** Integrated [Report]. - 1999.
- Edwards M. A.** Chemistry of Arsenic Removal During Coagulation and Fe-Mn Oxidation [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1994. - pp. 64-77.
- Encyclo...παίδεια** Ελληνικό Ηφαιστειακό Τόξο [Online] // Encyclo...παίδεια. - Μαΐου 10, 2011. - [http://encyclo-paideia.blogspot.com/2011/05/blog-post\\_10.html](http://encyclo-paideia.blogspot.com/2011/05/blog-post_10.html).
- Engel Robert R. and Smith Allan H.** Arsenic in Drinking Water and Mortality from Vascular Disease: An Ecologic Analysis in 30 Counties in the US [Report]. - London : Routledge, 1994.
- EPA** An SAB Report: Review of Issues Related to the Regulation of Arsenic in Drinking Water [Report]. - [s.l.] : EPA, 1995.
- EPA** Arsenic Occurrence in Public Drinking Water Supplies [Report]. - Washington : United States - Environmental Protection Agency, 2000. - EPA-8 15-R-00-028.
- EPA** Arsenic Removal from Drinking Water by Coagulation/Filtration and Lime Softening Plants. - [s.l.] : Prepared by Battelle under contract 68-C7-0008 for EPA ORD, June 2000.
- EPA** Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems [Book]. - [s.l.] : EPA, Office of Water, 2003.
- EPA** Review of the Draft Drinking Water Criteria Document on Inorganic Arsenic [Report]. - [s.l.] : EPA, 1994.

**EPA Technologies and Costs for Removal of Arsenic from Drinking Water** [Report]. - Dayton, Ohio , Phoenix, Arizona & Waltham, Massachusetts : United States Environmental Protection Agency, 2000.

**Farzan Shohreh F, Karagas Margaret R and Chen Yu** In utero and early life arsenic exposure in relation to long-term health and disease [Report]. - [s.l.] : National Library of Medicine, 2013.

**Fournier Etienne and Soultanis Panagiotis** ΠΑΠΥΡΟΣ LAROUSSE BRITANICA - ΤΟΜΟΣ 9 [Book]. - Αθήνα : ΠΑΠΥΡΟΣ, 2006. - Vol. 9. - 9.

**Fox K R and Sorg T J** Controlling arsenic, fluoride, and uranium by point-of-use treatment [Report]. - United States : Jnl. of American Water Works Association, Vol. 79, 1987.

**Fox K. R. and Sorg T. J.** Controlling Arsenic, Fluoride, and Uranium by Point-of-Use Treatment [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1987.

**Fox K. R.** Field Experience with Point-of-Use Treatment Systems for Arsenic Removal [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1989.

**Frank Phyllis and Clifford Dennis A.** Arsenic (III) Oxidation and Removal from Drinking Water. - Houston, Texas : University of Houston, 1986.

**Frey M. M. and Edwards M. A.** Surveying Arsenic Occurrence [Report]. - [s.l.] : Journal American Water Works Association, 1997. - pp. 105-117.

**Gamaletsos Platon N. [et al.]** Geological sources of as in the environment of Greece: A review [Report]. - [s.l.] : ResearchGate, 2016.

**Garling R. A.** Evaluation of Electrodialysis for Process Water Treatment for In-Situ Mining [Conference] // Presented at Fifth Annual Uranium Seminar. - Albuquerque, NM : [s.n.], 1981.

**Generic Mapping Tools** Rivers Loa, San Salvador, Silala, Salado and San Pedro in the Antofagasta Region of Chile [Art]. - [s.l.] : Generic Mapping Tools: <https://www.generic-mapping-tools.org/>.

**Goldberg S. and Johnston C.** Mechanisms of arsenic adsorption on amorphous oxides evaluated using macroscopic measurements, vibrational spectroscopy, and surface complexation modeling. - [s.l.] : Journal of Colloid and Interface Science, 2001. - Vol. 234.

**Golfinopoulos Spyros K., Varnavas Soterios P. and Alexakis Dimitrios E.** The Status of Arsenic Pollution in the Greek and Cyprus Environment: An Overview [Report]. - [s.l.] : Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2021.

**Gosh Malini** The Future of Water Treatment: Advanced Oxidation Process [Report]. - [s.l.] : International Water Association, 2018.

**Government of the People's Republic of Bangladesh** Water Safety Framework (WSF) IN BANGLADESH [Report]. - Dhaka : Policy Support Unit (PSU), Government of the People's Republic of Bangladesh, Local Government Division, Ministry of Local Government, Rural Development & Cooperatives, 2011.

**Grimm Sandy** Χαλκός στη μητρική του μορφή, από το Keweenaw, Houghton County, Michigan [Art]. - Τέξας : Μουσείο Φυσικών Επιστημών του Χιούστον.

**Gu Z. M., Fang J. and Deng B. L.** Preparation, Evaluation of GAC-based ironcontaining adsorbents for arsenic removal. - [s.l.] : Environmental Science & Technology, 2005. - Vol. 39.



- Gulledge J. H. and O'Connor J. T.** Removal of Arsenic (V) From Water by Adsorption on [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1973.
- Hathaway S. W. and Rubel F. Jr.** Removing Arsenic From Drinking Water [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1987.
- Hering J. G. [et al.]** Arsenic Removal by Ferric Chloride [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1996.
- Hristovski K. D. [et al.]** Effect of synthesis conditions on nano-iron (hydro)oxide impregnated granular activated carbon. - [s.l.] : Chemical Engineering Journal, 2009. - Vol. 146.
- Huxstep M. R. and Sorg T. J.** Reverse osmosis treatment to remove inorganic contaminants from drinking water [Report]. - United States : EPA, 1987.
- Huxstep** Several membrane types, 1000 gpd, 10 to [Report]. - Charlotte Harbor, Florida : EPA, 1987.
- InTeGrate** Contaminant Example: Arsenic in Groundwater [Report]. - [s.l.] : Interdisciplinary Teaching about Earth for a Sustainable Future, National Science Foundation, Directorates for Education and Human Resources and Geosciences, 2022.
- Ionics Inc.** Comments on the USEPA National Primary and Secondary Drinking Water Regulations - Proposed Rule. - [s.l.] : Submitted to USEPA, 1989, Addendum to the Comments, 1990, 1989-1990. - Vols. 54, No. 97.
- Jang M., Chen W. F. and Cannon F. S.** Preloading hydrous ferric oxide into granular activated carbon for arsenic removal. - [s.l.] : Environmental Science & Technology, 2008. - Vol. 42.
- Jekel M.R.** Removal of arsenic in drinking water treatment. In Arsenic in the Environment: Part I Cycling and Characterization [Report]. - New York : John Wiley & Sons (Wiley), 1994.
- Kalaruban Mahatheva [et al.]** Iron-impregnated granular activated carbon for arsenic removal: Application to practical column filters [Report]. - [s.l.] : Journal of Environmental Management, 2019.
- Kampouroglou Evdokia E. and Economou-Eliopoulos Maria** Assessment of arsenic and associated metals in the soil-plant-water system in Neogene basins of Attica, Greece [Article] // ELSEVIER. - Athens : ELSEVIER, 2017.
- Kanel S. [et al.]** Removal of arsenic(III) from groundwater by nanoscale zero-valent iron. - [s.l.] : Environmental Science & Technology, 2005. - Vol. 39.
- Kang Meea [et al.]** Effect of pH on the removal of arsenic and antimony using reverse osmosis membranes [Report]. - Kita-ku, Sapporo : ELSEVIER, 2000.
- Kartinen Ernest O. and Martin Jr. and Christopher J.** An overview of arsenic removal processes [Report]. - USA : Elsevier BV, 1995.
- Kartinen Ernest O., Martin Jr. and Christopher J.** An overview of arsenic removal processes [Report]. - USA : Elsevier BV, 1995.
- Katsoyiannis I. A. , Zikoudi A. and Hug S. J.** Arsenic removal from groundwaters containing iron, ammonium, manganese and phosphate: A case study from a treatment unit in Northern Greece [Report]. - [s.l.] : Desalination 224, 2008.

- Katsoyiannis Ioannis A. [et al.]** Arsenic speciation and uranium concentrations in drinking water supply wells in Northern Greece: Correlations with redox indicative parameters and implications for groundwater treatment [Report]. - [s.l.] : ELSEVIER, 2006.
- Katsoyiannis Ioannis A. and Zouboulis Anastasios I.** Comparative Evaluation of Conventional and Alternative Methods for the Removal of Arsenic from Contaminated Groundwaters [Report]. - [s.l.] : REVIEWS ON ENVIRONMENTAL HEALTH, 2006.
- Katsoyiannis Ioannis, Zouboulis Anastasios and Mitrakas Manasis** Arsenic occurrence in Europe: emphasis in Greece and description of the applied full-scale treatment plants [Article] // Desalination and Water Treatment. - Thessaloniki : Taylor & Francis, 2014.
- Katsoylannis I. A. and Zouboulis A. I.** Use of iron- and manganese-oxidizing bacteria for the combined removal of iron, manganese and arsenic from contaminated groundwater [Report]. - London : U.S. Environmental Protection Agency, International Water Association, 2006. - Water Quality Research Journal of Canada, ISSN: 1201-3080 .
- Kempic J. B.** Arsenic Removal Technologies: An Evaluation of Cost and Performance [Report] : Published in: Arsenic: Exposure and Health Effects. - [s.l.] : Chapman and Hall Publishing Company, 1994. - pp. 393-405.
- Labban Omar [et al.]** Fundamentals of Low-Pressure Nanofiltration: Membrane Characterization, Modeling, and Understanding the Multi-Ionic Interactions in Water Softening [Report]. - Massachusetts & Singapore : Elsevier, 2016.
- Lado Luis Rodriguez [et al.]** Modelling arsenic hazard in Cambodia: A geostatistical approach using ancillary data [Report]. - [s.l.] : ResearchGate, 2008.
- Lavinsky Robert M.** Jarosite A sparkling specimen completely covered by microcrystallized jarosite and another white mineral, probably calcite [Art]. - Lavrion : [s.n.].
- Logsdon G. S., Sorg T. J. and Symons J. M.** Removal of Heavy Metals by Conventional Treatment [Conference] // 16th Water Quality Conference - Trace Metals in Water Supplies. - U. of Illinois : University Bulletin, 1974. - Vol. No. 71.
- MacDonald Rhona** Providing clean water: lessons from Bangladesh [Report]. - [s.l.] : PubMed Central (PMC), National Institutes of Health (NIH), National Library of Medicine (NLM), 2001.
- Malcolm Pirnie** Arsenic Removal Pilot-Scale Studies [Report]. - [s.l.] : Prepared for USEPA Office of Ground Water and Drinking Water, 1992.
- Malcolm Pirnie** Arsenic Removal Pilot-Scale Studies [Report]. - [s.l.] : USEPA Office of Ground Water and Drinking Water, 1992.
- Malcolm Pirnie Inc.** Treatment and Occurrence of Arsenic in Potable Water Supplies [Report]. - [s.l.] : USEPA, 1993.
- Manning B. A. [et al.]** Arsenic(III) and arsenic(V) reactions with zerovalent iron corrosion products. - [s.l.] : Environmental Science & Technology, 2002. - Vol. 36.
- mapsChile** maps Chile [Online] // Φυσικός Χάρτης Χιλής. - <https://el.maps-chile.com/%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CF%87%CE%AC%CF%81%CF%84%CE%B7-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%A7%CE%B9%CE%BB%CE%AE%CF%82>.

- McGivney William and Kawamura Susumu** COST ESTIMATING MANUAL FOR WATER TREATMENT FACILITIES [Book]. - New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- McNeil L. S. and Edwards M.** Predicting Arsenic Removal During Metal Hydroxide Precipitation [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1997.
- McNeill L. S. and Edwards M. A.** Soluble Arsenic Removal at Water Treatment Plants [Report]. - [s.l.] : J.AWWA, 1995. - pp. 105-113.
- McNeill L. S. and Edwards M.** Arsenic Removal During Precipitative Softening [Report]. - [s.l.] : ASCE Journal of Environmental Engineering, 1997.
- Medunić Gordana, Fiket Željka and Ivanić Maja** Arsenic in Drinking Water and Food - Arsenic Contamination Status in Europe, Australia, and Other Parts of the World [Book]. - Singapore : Springer, 2019.
- Miller Marli** Alluvial Fan at Badwater, Death Valley, CA [Art]. - Oregon : University of Oregon.
- Minerals Education Coalition** Minerals Database [Online] // Minerals Education Coalition. - Minerals Education Coalition, May 18, 2012. - <https://mineralseducationcoalition.org/minerals-database/arsenic/>.
- Ministerio de Salud Publica** Reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano [Report]. - Santiago : MINISTERIO DE SALUD PÚBLICA, 1969, 2010.
- Mohammad A.W. [et al.]** Modelling the effects of nanofiltration membrane properties on system cost assessment for desalination applications [Report]. - Kebangsaan, Nottingham & Abu Dhabi : ELSEVIER, 2007.
- Montgomery J. M.** Water treatment principles & design / ed. Consulting Engineers Inc.. - New York : John Wiley & Sons, 1985. - pp. 237-261.
- Nations Online Project** Political Map of Bangladesh [Art]. - [s.l.] : Nations Online Project - <https://www.nationsonline.org/oneworld/map/Political-Map-of-Bangladesh.htm>.
- New Mexico State University** Water Treatment for Small Public Supplies - Report of Operation: Cuba, Carrizozo, La luz, San Jon, San Ysidro, Bluewater, Moriarty, Hagerman, La. - 1979.
- Niemeyer Hans Fernández** HOYAS HIDROGRÁFICAS DE CHILE: SEGUNDA REGIÓN [Book]. - 1980.
- Ning Robert Y.** Arsenic removal by reverse osmosis [Report]. - San Diego : ELSEVIER, 2002.
- Office of Solid Waste U.S. Environmental Protection Agency** Estimating Risk From Contaminants Contained in Agricultural Fertilizers [Report]. - Washington : United States Environmental Protection Agency, 1999.
- Pal B. N.** Granular Ferric Hydroxide for Elimination of Arsenic from Drinking Water [Report]. - Calcutta : SEMANTIC SCHOLAR, 2001.
- Payne K. and Abdel-Fattah T.** Adsorption of arsenate and arsenite by iron-treated activated carbon and zeolites: effects of pH, temperature, and ionic strength. - [s.l.] : Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2005. - Vol. 40.

- Pierce M. L. and Moore C. B.** Adsorption of Arsenite and arsenate [Report]. - [s.l.] : Water Res. 16, 1982. - pp. 1247 – 1253.
- Podgorski Joel and Berg Michael** Global threat of arsenic in groundwater [Report]. - [s.l.] : Science, 2020.
- Pontius Frederick W., Brown Kenneth G. and Chen Chien-Jen** Health implications of arsenic in drinking water [Report]. - [s.l.] : Journal American Water Work Association, 1994.
- Quansah Reginald [et al.]** Association of Arsenic with Adverse Pregnancy Outcomes/Infant Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis [Article] // Environmental Health Perspectives. - 2015.
- Ravenscroft Peter, Brammer Hugh and Richards Keith** Arsenic Pollution: A Global Synthesis [Report]. - [s.l.] : Royal Geographical Society with IGB, 2009.
- Reed Brian E., Vaughan Ronald and Jiang Liqiang** As(III), As(V), Hg, and Pb removal by Fe-oxide impregnated Activated Carbon [Report]. - [s.l.] : Journal of Environmental Engineering - ASCE (American Society of Civil Engineers), 2000.
- Robinson J.** Arsenic Removal - Case Study of Full Scale Coagulation/Filtration Plant [Report]. - San Antonio, TX : AWWA Inorganic Contaminants Workshop, 1998.
- Rosenblum E. R. and Clifford D. A.** The Equilibrium Arsenic Capacity of Activated Alumina [Report]. - [s.l.] : Springfield, 1984.
- Rosenblum E. R. and Clifford D. A.** The Equilibrium Arsenic Capacity of Activated Alumina [Report]. - Springfield : NTIS, 1984.
- Rozelle Lee T.** Point-of-Use and Point-of-Entry Drinking Water Treatment [Report]. - [s.l.] : Journal American Water Works Association Vol. 79, No. 10, Home Treatment, 1987.
- Rubel F. R. and Hathaway S. W.** Pilot Study for Removal of Arsenic from Drinking Water, Fallon, NV Naval Air Station [Report]. - Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, 1985.
- Ruffino Barbara [et al.]** Drinking Water Supply in the Region of Antofagasta (Chile): A Challenge between Past, Present and Future [Report]. - Torino - Italy, Santiago - Chile, Antofagasta - Chile : International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022.
- Schwarzenbach Rene P. [et al.]** Global Water Pollution and Human Health [Report]. - [s.l.] : Annual Review of Environment and Resources, 2010.
- Scott K. [et al.]** Arsenic Removal by Coagulation [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1995.
- Selinus Olle [et al.]** Medical Geology [Book]. - [s.l.] : Springer, 2010.
- Smedley P. L. and Kinniburgh D. G.** A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters [Report]. - Wallingford, Oxon : Applied Geochemistry 17, 2001.
- Shaji E. [et al.]** Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula [Report]. - [s.l.] : ELSEVIER, 2021.
- Sherman D. M. and Randall S. R.** Surface complexation of arsenic(V) to iron(III) (hydr)oxides: structural mechanism from ab initio molecular geometries and EXAFS spectroscopy. - [s.l.] : Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003. - Vol. 67.

**Silverman Paul** MAGNET ATTRACTS IRON FILINGS MIXED IN SAND - Iron Filings Are Mixed With Sand [Art]. - [s.l.] : Fundamental Photographs.

**Simms J., Upton J. and Barnes J.** Arsenic Removal Studies and the Design of a 20,000 m<sup>3</sup> Per Day Plant in the UK [Report]. - Albuquerque, New Mexico : AWWA Inorganic Contaminants Workshop, 2000.

**Simms J. and Azizian F.** Pilot Plant Trials on Removal of Arsenic from Potable Water Using Activated Alumina [Conference] // AWWA Water Quality Technology Conference. - Denver, CO : AWWA, 1997.

**Smith Allan H., Lingas Elena O. and Rahman Mahfuzar** Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency [Report]. - U.S. : World Health Organization: International Journal of Public Health, 2000.

**Society for Mining Metallurgy and Exploration** The Role of Arsenic in the Mining Industry [Report]. - East Adam Aircraft Circle, Englewood : Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015.

**Sorg T. J. and Logsdon G. S.** Treatment Technology to Meet the Interim Primary Drinking Water Regulations for Inorganics: Part 2 [Report]. - [s.l.] : J. AWWA, 1978.

**Sovann C. and Polya D. A.** Improved groundwater geogenic arsenic hazard map for Cambodia [Report]. - [s.l.] : Environmental Chemistry, 2014.

**Stewart H. T. and Kessler K. J.** Evaluation of Arsenic Removal by Activated Alumina Filtration at a Small Community Public Water Supply [Report]. - [s.l.] : Journal of New England Water Works Association, 1991.

**Subramanian K. S. [et al.]** Manganese Greensand for Removal of Arsenic in Drinking Water [Report]. - [s.l.] : Water Quality Research Journal Canada, 1997.

**Syers Keith J. [et al.]** Chemical and Physical Characteristics of Phosphate Rock Materials of Varying Reactivity [Report]. - New Zealand : J. Sci. Food Agric., 1986.

**Taehyun Roh [et al.]** Age at Exposure to Arsenic in Water and Mortality 30–40 Years After Exposure Cessation [Article] // American Journal of Epidemiology. - Oxford : Oxford University, 2018.

**Thadani Ramesh** Αλλούβιες αποθέσεις στο Λεκανοπέδιο του Αμαζονίου κοντά στο Αουτάζες της Βραζιλίας [Art]. - [s.l.] : Wikipedia.

**The Delaware Geological Survey** Glauconite (Greensand) // Geologic and hydrologic research and exploration for Delaware. - [s.l.] : The Delaware Geological Survey, 2020.

**Thirunavukkarasu O., Viraraghavan T. and Subrama K.** Arsenic removal from drinking water using iron oxide-coated sand. - [s.l.] : Journal Water, Air, & Soil Pollution, 2003. - Vol. 142.

**Tolins Molly, Ruchirawat Mathuros and Landrigan Philip** The developmental neurotoxicity of arsenic: cognitive and behavioral consequences of early life exposure [Report]. - [s.l.] : National Library of Medicine, 2014.

**Tresintsi S. [et al.]** Comparative study of As(V) removal by ferric coagulation and oxy-hydroxides adsorption: Laboratory and full-scale case studies [Report]. - [s.l.] : Desalin. Water Treat. 51, 2013.

**Tresintsi S. [et al.]** Kilogram-scale synthesis of iron oxy-hydroxides with improved arsenic removal capacity: Study of Fe(II) oxidation–precipitation parameters [Report]. - [s.l.] : Water Res. 46, 2012.

**Tresintsi S. [et al.]** Tetravalent manganese feroxyhyte: A novel nanoadsorbent equally selective for As(III) and As(V) removal from drinking water [Report]. - [s.l.] : Environ. Sci. Technol. 47, 2013.

**Tresintsi Sofia [et al.]** Kilogram-scale synthesis of iron oxy-hydroxides with improved arsenic removal capacity: Study of Fe(II) oxidation-precipitation parameters [Book Section] // Water Research / book auth. Professor Eberhard Morgenroth. - Thessaloniki, Greece : ELSEVIER, 2012.

**Tresintsi Sofia [et al.]** Tetravalent Manganese Feroxyhyte: A Novel Nanoadsorbent Equally Selective for As(III) and As(V) Removal from Drinking Water [Book Section]. - [s.l.] : Environmental Science and Technology, 2013. - Vol. 47.

**Tseng W P [et al.]** Prevalence of skin cancer in an endemic area of chronic arsenicism in Taiwan [Report]. - [s.l.] : National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information, 1968.

**Tseng W P [et al.]** Prevalence of skin cancer in an endemic area of chronic arsenicism in Taiwan [Report]. - [s.l.] : National Library of Medicine - National Center for Biotechnology Information, 1968.

**Tseng Wen Ping** Effects and dose-response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic [Report]. - [s.l.] : National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information, 1977.

**Tseng Wen Ping** Effects and dose-response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic [Report]. - [s.l.] : National Library of Medicine - National Center for Biotechnology Information, 1977.

**Tsirambides Ananias and Filippidis Anestis** Metallic Mineral Resources of Greece [Article] // VERSITA. - Thessaloniki : Central European Journal of Geosciences, 2012. - 4.

**UNICEF and WHO** Arsenic Primer: Guidance on the Investigation & Mitigation of Arsenic Contamination [Report]. - New York : United Nations Children's Fund and the World Health Organization, 2018.

**University of Maine** Arsenic: Where is arsenic a problem? [Online] // University of Maine. - <https://umaine.edu/arsenic/where-is-arsenic-a-problem/>.

**Urase Taro, Oh Jeong-ik and Yamamoto Kazuo** Effect of pH on rejection of different species of arsenic by nanofiltration [Report]. - Tokyo : ELSEVIER, 1998.

**USEPA** Arsenic in your drinking water [Report]. - [s.l.] : United States Environmental Protection Agency, 2007.

**USEPA** National Primary Drinking Water Regulation Table - Ground Water and Drinking Water [Report]. - [s.l.] : United States Environmental Protection Agency, 2009.

**USEPA** The Arsenic Rule: Background and Rule Provisions [Report]. - [s.l.] : United States' Environmental Protection Agency, 2015.

**USEPA Treatment Technologies for Arsenic Removal [Report].** - [s.l.] : Environmental Protection Agency (EPA), 2001.

**Van der Bruggen B. [et al.]** Influence of molecular size, polarity and charge on the retention of organic molecules by nanofiltration [Report]. - Leuven Willem de Croylaan, Belgium : ELSEVIER, 1999.

**Vaughan R. J. and Reed B.** Modeling As(V) removal by a iron oxide impregnated activated carbon using the surface complexation approach. - [s.l.] : Journal Water Research, 2005. - Vol. 6.

**Vo-Dinh Tuan, Baker Lane A. and Martin Charles R.** Nanotechnology in Biology and Medicine: Methods, Devices, and Applications, Second Edition [Book]. - [s.l.] : CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.

**Vrijenhoek Eric M. and Waypa John J.** Arsenic removal from drinking water by a “loose” nanofiltration membrane [Report]. - New Haven, Connecticut : ELSEVIER, 2000.

**Wang L., Sorg T. and Chen A.** Arsenic Removal by Full Scale Ion Exchange and Activated Alumina Treatment Systems [Report]. - Albuquerque, New Mexico : AWWA Inorganic Contaminants Workshop, 2000.

**Wang Suiling and Mulligan Catherine N** Occurrence of Arsenic Contamination in Canada: Sources, Behavior and Distribution [Article] // Science of the Total Environment. - Montreal, QC, Canada : Elsevier BV, 2006.

**Waypa John J., Elimelech Menachem and Hering Janet G.** Arsenic removal by RO and NF membranes [Report]. - [s.l.] : American Water Works Association (AWWA), VOLUME 8 9 , ISSUE 1 0, 1997.

**Webster Jenny G. and Nordstrom Kirk D.** Arsenic in Groundwater-Geochemistry and Occurrence by Welch A. and Stollenwerk K. [Report]. - Auckland, New Zealand & Boulder, CO, USA : Kluwer Academic Publishers, 2003.

**Westerhoff G. and Chowdhury Z. K.** Water Treatment Systems [Book Section] // Water Resources Handbook / book auth. McGraw Hill / ed. Mays L. M.. - New York : [s.n.], 1996.

**WHO Arsenic [Report].** - [s.l.] : World Health Organization, 2022.

**WHO Guidelines for Drinking-water Quality [Online]** // WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. - World Health Organisation, Geneva 2008. -  
[https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/fulltext.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf).

**Wikipedia Wikipedia [Online]** // Wikipedia. - February 23, 2022. - February 23, 2022. -  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%B1%CE%BD%CE%B4%CE%B1%CF%81%CE%AC%CF%87%CE%B7\\_\(%CE%B5%CF%81%CF%85%CE%B8%CF%81%CE%AC\)](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%B1%CE%BD%CE%B4%CE%B1%CF%81%CE%AC%CF%87%CE%B7_(%CE%B5%CF%81%CF%85%CE%B8%CF%81%CE%AC)).

**Winkel Lenny H. E. [et al.]** Arsenic pollution of groundwater in Vietnam exacerbated by deep aquifer exploitation for more than a century [Report]. - [s.l.] : Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 2011.

**World Health Organization Arsenic [Article]** // World Health Organization, Newsroom/Fact sheets/Detail/Arsenic. - [s.l.] : World Health Organization, 2020.

**World Health Organization Arsenic [Article]** // World Health Organization, Newsroom/Fact sheets/Detail/Arsenic. - February 18, 2018.

**World Health Organization** Guidelines for Drinking-water Quality, THIRD EDITION INCORPORATING THE FIRST AND SECOND ADDENDA [Article] // WHO. - 2008. - pp. 196, 211, 491-493.

**World Health Organization** HISTORIES OF GUIDELINE DEVELOPMENT FOR THE FOURTH EDITION [Conference] // Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. - [s.l.] : WHO, March 2022. - p. 12. Chemical fact sheets.

**Xiaofeng Lu, Xiaokai Bian and Liuqing Shi** Preparation and characterization of NF composite membrane [Report]. - Shanghai : ELSEVIER, 2002.

**Yagnaseni Roy, Warsinger David M. and Lienhard V John H.** Effect of temperature on ion transport in nanofiltration membranes: Diffusion, convection and electromigration [Report]. - Cambridge : ELSEVIER, 2017.

**Yanli Kong [et al.]** Chemical Engineering Journal - Application of iron-based materials for removal of antimony and arsenic from water: Sorption properties and mechanism insights [Book]. - [s.l.] : ELSEVIER, 2022. - Vol. 431.

**Younos T.** The economics of desalination [Report]. - [s.l.] : Journal of contemporary water research and education., 2005.

**Zhang Q. [et al.]** A method for preparing ferric activated carbon composites adsorbents to remove arsenic from drinking water [Book Section] // Journal of Hazardous Materials. - 2007. - Vol. 148.

**Αγγελάκης Ανδρέας [et al.]** Δυνατότητες παραγωγής πόσιμου νερού με τεχνολογίες αφαλάτωσης στην Ελλάδα. - [s.l.] : ΕΥΔΑΠ, 2015. - Vol. 73.

**Ανδρεαδάκης Ανδρέας Δ.** Επεξεργασία Νερού - Βασικές Αρχές και Διεργασίες [Book]. - Αθήνα : ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 2008. - Α'.

**Αρχαιολογικό Μουσείο Βεργίνας – Βασιλικοί Τάφοι** Χρυσά αντικείμενα που εκτίθενται στο Αρχαιολογικό Μουσείο Βεργίνας από τους βασιλικούς τάφους [Art]. - [s.l.] : Αρχαιολογικό Μουσείο Βεργίνας.

**Γαλδαδάς Άλκης** Αρσενικό: απαλά σκοτώνει... [Online] // ΤΟ ΒΗΜΑ. - Ιούνιος 1, 2013. - Ιούνιος 2, 2013. - <https://www.tovima.gr/2013/06/01/science/arseniko-apala-skotwnei/>.

**Γεωλογική έρευνα των ΗΠΑ** Delphipages [Online]. - Γεωλογική έρευνα των ΗΠΑ, June 10, 2020. - June 10, 2020. - <https://delphipages.live/el/%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%86%CE%BF%CF%81%CE%B1/opriment>.

**Δημητριάδης Αλ. [et al.]** Η ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ [Report]. - Καλύβια Θορικού Αττικής : Εταιρεία Μελετών Νοτιοανατολικής Αττικής, 2002.

**Ζήκου Αριστέα** Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ [Report]. - ΧΑΝΙΑ : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, 2007.

**Θεοδωρίδης Γ. [et al.]** Βιοαναλυτική Χημεία [Book]. - [s.l.] : ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, 2015.



**Καδόγλου Μαρία** Σκουριές, ένα «χρυσό» ψέμα [Report]. - [s.l.] : ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΩΝ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ, 2017.

**Μαλαμής Συμεών and Μοροπούλου Αντωνία** Διερεύνηση της ποιότητας υπόγειων υδάτων της Ηρωικής Νήσου Κάσου και σχεδιασμός βέλτιστης λύσης για τις ανάγκες της τοπικής κοινωνίας [Report]. - Αθήνα : Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, 2021.

**Μαντζιάρας Γιάννης** Παραγωγή Πόσιμου και Ανακτημένου Νερού και Ανάκτηση Πόρων από Λύματα - Υπολογισμός ποσοτήτων Ιλύων και Υπολειμμάτων από ΕΕΝ // Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων ΔΠΜΣ. - [s.l.] : Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Υ.Π.ΠΕΡ Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας, 2022.

**Μάτζαρη Χριστίνα** ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΑΠΟ ΑΡΣΕΝΙΚΟ- ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ, ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΣΠΡΟΥ Ν. ΚΙΑΚΙΣ [Report]. - Θεσσαλονίκη : ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, 2013.

**Μήτρακας Μ., Μπουγιουκλής Γ. and Στοϊλίδου Μ.** ΑΡΣΕΝΙΚΟ ΣΤΟ ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ : ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ [Report]. - Θεσσαλονίκη : Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2002.

**Μουστάκα Α. [et al.]** Η συμβολή της εξορυκτικής βιομηχανίας στην ελληνική οικονομία [Report]. - Αθήνα : Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών, 2016.

**Μπούτσικου Ελένη Ειρήνη and Δραγανίγο Αντώνη** Αφαλάτωση και συνοδά έργα. - [s.l.] : ΜΟΔ Α.Ε., 2019.

**Νικολαΐδης Νικόλαος** Επιπτώσεις του As στην ανθρώπινη υγεία (BFD) – Μπαγκλαντές [Art]. - Μπαγκλαντές : [s.n.].

**Σαπουντζής Η. and Χριστοφίδης Γ.** ΟΡΥΚΤΟΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ [Book]. - [s.l.] : University Studio Press, 1985.

**Τζεφέρης Πέτρος** Αρχαία Μεταλλευτική Στοά [Art]. - Λαύριο : [s.n.].

**Τζεφέρης Πέτρος** Τα «πλυντήρια» του αρχαίου Λαυρίου [Journal]. - [s.l.] : Huffpost, 2017.

**Τσάιμου Κωνσταντίνα Γ.** Λόγος και Εικόνα - Η αρχαία μεταλλευτική και μεταλλουργία [Book]. - Αθήνα : ΣΤΑΜΟΥΛΗ Α.Ε., 2015.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑΣ

#### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

#### ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

#### ΜΕΡΟΣ Α

#### Μικροβιολογικές Παράμετροι

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή (αριθμός/100 ml)
<i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> )	0
Εντερόκοκκοι	0

Για το νερό που πωλείται σε φιάλες ή δοχεία, ισχύουν τα ακόλουθα:

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή (αριθμός/100 ml)
<i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> )	0/250 ml
Εντερόκοκκοι	0/250 ml
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0/250 ml
Αριθμός αποικιών σε 22 °C	100/ml
Αριθμός αποικιών 37 °C	20/ml

ΜΕΡΟΣ Β

Χημικές Παράμετροι

Παράμετρος	Παραμετρική Τιμή	Μονάδα	Σημειώσεις
Ακρυλαμίδιο	0,1	μg/l	Σημείωση 1
Αντιμόνιο	5	μg/l	
<b>Αρσενικό</b>	<b>10</b>	<b>μg/l</b>	
Βενζόλιο	1	μg/l	
Βενζο-α-πυρένιο	0,01	μg/l	
Βόριο	1	mg/l	
Βρωμικά Άλατα	10	μg/l	Σημείωση 2
Κάδμιο	5	μg/l	
Χρώμιο	50	μg/l	Σημείωση 3
Χαλκός	2	mg/l	Σημείωση 3
Κυανιούχα Άλατα	50	μg/l	
1,2-διχλωροαιθάνιο	3	μg/l	
Επιχλωρυδρίνη	0,1	μg/l	Σημείωση 1
Φθοριούχα άλατα	1,5	mg/l	
Μόλυβδος	10	μg/l	Σημειώσεις 3 & 4
Υδράργυρος	1	μg/l	
Νικέλιο	20	μg/l	Σημείωση 3
Νιτρικά άλατα	50	mg/l	Σημείωση 5
Νιτρώδη άλατα	0,5	mg/l	Σημείωση 5
Παρασιτοκτόνα	0,1	μg/l	Σημείωση 6 & 7
Σύνολο παρασιτοκτόνων	0,5	μg/l	Σημείωση 6 & 8
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	0,1	μg/l	Άθροισμα συγκεντρώσεων συγκεκριμένων ενώσεων – σημείωση 9
Σελήνιο	10	μg/l	
Τετραχλωροαιθέριο και Τριχλωροαιθέριο	10	μg/l	Άθροισμα συγκεντρώσεων συγκεκριμένων παραμέτρων
Ολικά τριαλογονομεθάνια	100	μg/l	Άθροισμα συγκεντρώσεων συγκεκριμένων ενώσεων – σημείωση 10
Βινυλοχλωρίδιο	0,5	μg/l	Σημείωση 1

**Σημείωση 1:** Η παραμετρική τιμή αναφέρεται στην συγκέντρωση καταλοίπων μονομερούς στο νερό όπως υπολογίζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές περί μέγιστης μετανάστευσης εκ του αντιστοίχου πολυμερούς όταν βρίσκεται σε επαφή με το νερό.

**Σημείωση 2:** Ει δυνατόν (εάν είναι δυνατόν), τα κράτη μέλη πρέπει να επιδιώκουν χαμηλότερη τιμή χωρίς να θίγεται η απολύμανση.

Για το νερό που αναφέρεται στο άρθρο 6 παράγραφος 1 στοιχεία α & β & δ η τιμή πρέπει να έχει επιτευχθεί το αργότερο, δέκα ημερολογιακά έτη μετά την ημερομηνία έναρξης ισχύος της παρούσας οδηγίας. Η παραμετρική τιμή για τα βρωμικά άλατα πέντε έτη μετά την έναρξη ισχύος την παρούσας οδηγίας και μέχρι δέκα έτη μετά την έναρξη ισχύος της, είναι 25 μg/l.

**Σημείωση 3:** Η τιμή ισχύει για δείγμα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης που λαμβάνεται με κατάλληλη μέθοδο δειγματοληψίας (1) στη βρύση και κατά τρόπον τέτοιο ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό του εβδομαδιαίου μέσου όρου που πίνουν οι καταναλωτές. Εφόσον ενδείκνυται, οι μέθοδοι δειγματοληψίας και παρακολούθησης να εφαρμόζονται κατά εναρμονισμένο τρόπο που καθορίζεται σύμφωνα με το άρθρο 7 παράγραφος 4 για τον καθορισμό κοινοτικών κατευθυντήριων γραμμών. Τα κράτη μέλη λαμβάνουν υπόψη τα περιστατικά μεγίστων επιπέδων που ενδέχεται να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

**Σημείωση 4:** Για το νερό που αναφέρεται στο άρθρο 6 παράγραφος 1 στοιχεία α & β & δ, η τιμή πρέπει να έχει επιτευχθεί το αργότερο 15 ημερολογιακά έτη μετά την ημερομηνία έναρξης ισχύος της

παρούσας οδηγίας. Η παραμετρική τιμή για το μόλυβδο πέντε έτη μετά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας και μέχρι 15 έτη μετά την έναρξη ισχύος της είναι τα 25  $\mu\text{g}/\text{l}$ .

Τα κράτη μέλη μεριμνούν ώστε να λαμβάνονται όλα τα δέοντα μέτρα για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση της συγκέντρωσης του μόλυβδου στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης κατά την περίοδο που απαιτείται για να επιτευχθεί η τήρηση της παραμετρικής τιμής.

Όταν εφαρμόζουν μέτρα για την επίτευξη της τήρησης της τιμής αυτής, τα κράτη μέλη δίνουν προοδευτικά την προτεραιότητα όπου υπάρχουν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις μόλυβδου στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης.

- Σημείωση 5:* Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι τηρείται ο όρος  $[\text{νιτρικά άλατα}]/50 + [\text{νιτρώδη άλατα}]/3 \leq 1$ , οι αγκύλες υποδηλώνουν συγκέντρωση σε  $\text{mg}/\text{l}$  για τα νιτρικά άλατα ( $\text{NO}_3$ ) και για τα νιτρώδη άλατα ( $\text{NO}_2$ ), καθώς και ότι η τιμή 0,1  $\text{mg}/\text{l}$  για τα νιτρικά άλατα τηρείται για το νερό που προέρχεται από εγκαταστάσεις επεξεργασίας.
- Σημείωση 6:* Ελέγχονται μόνον τα παρασιτοκτόνα των οποίων πιθανολογείται η παρουσία σε μία δεδομένη παροχή νερού.
- Σημείωση 7:* Η παραμετρική τιμή ισχύει για κάθε επιμέρους παρασιτοκτόνο. Για το αλντρίν, το ντιρλντίν, το επταχλώρ και το εποξικό επταχλώρ, η παραμετρική τιμή είναι 0,03  $\mu\text{g}/\text{l}$ .
- Σημείωση 8:* Ως «συνολικά παρασιτοκτόνα» νοείται το άθροισμα όλων των επιμέρους παρασιτοκτόνων που ανιχνεύονται και προσδιορίζονται ποσοτικώς κατά τη διαδικασία παρακολούθησης.
- Σημείωση 9:* Οι συγκεκριμένες ενώσεις είναι:
- Βενζο(β)φθορανθένιο
  - Βενζο(λ)φθορανθένιο
  - Βενζο(ηθι)περυλένιο
  - Ινδανο(1,2,3-γδ)πυρένιο.
- Σημείωση 10:* Ει δυνατόν, τα κράτη μέλη πρέπει να επιδιώκουν χαμηλότερη τιμή χωρίς να θίγεται η απολύμανση.
- Ει δυνατόν, τα κράτη μέλη πρέπει να επιδιώκουν χαμηλότερη τιμή χωρίς να θίγεται η απολύμανση.
- Οι συγκεκριμένες ενώσεις είναι: Χλωροφόρμιο, βρωμοφόρμιο, διβρωμοχλωρομεθάνιο, βρωμοδιχλωρομεθάνιο.
- Για το νερό που αναφέρεται στο άρθρο 6 παράγραφος 1 στοιχεία α & β & δ, η τιμή πρέπει να έχει επιτευχθεί το αργότερο, δέκα ημερολογιακά έτη μετά την ημερομηνία έναρξης ισχύος της παρούσας οδηγίας. Η παραμετρική τιμή για ολικά τριαλογονομεθάνια πέντε έτη μετά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας και μέχρι δέκα έτη μετά την έναρξη ισχύος της, είναι 150  $\mu\text{g}/\text{l}$ .
- Τα κράτη μέλη μεριμνούν ώστε να λαμβάνονται όλα τα δέοντα μέτρα για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση της συγκέντρωσης των τριαλογονομεθανίων στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης.
- Όταν εφαρμόζουν μέτρα για την επίτευξη της τιμής αυτής, τα κράτη μέλη δίνουν προοδευτικά την προτεραιότητα στις περιοχές με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις τριαλογονομεθανίων στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης.

(1) Θα προστεθεί ανάλογα με τα αποτελέσματά της προς το παρόν διεξαγόμενης μελέτης

ΜΕΡΟΣ Γ

Ενδεικτικές παράμετροι

Παράμετρος	Παραμετρική Τιμή	Μονάδα	Σημειώσεις
Αργίλιο	200	μg/l	
Αμμώνιο	0,5	mg/l	
Χλωριούχα άλατα	250	mg/l	Σημείωση 1
Clostridium perfringens (συμπεριλαμβανομένων των σποριών)	0	Αριθμός/100 ml	Σημείωση 2
Χρώμα	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής		
Αγωγιμότητα	2500	μS cm <sup>-1</sup> στον 20 °C	Σημείωση 1
Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου	≥ 6,5 και ≤ 9,5	Μονάδες pH	Σημείωση 1 & 3
Σίδηρος	200	μg/l	
Μαγγάνιο	50	μg/l	
Οσμή	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής		
Οξειδωσιμότητα	5	mg/l O <sub>2</sub>	Σημείωση 4
Θειικά άλατα	250	mg/l	
Νάτριο	200	mg/l	
Γεύση	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής		
Αριθμός αποικιών σε 22 °C	Άνευ ασυνήθους μεταβολής		
Κολοβακτηριοειδή	0	Αριθμός/100 ml	Σημείωση 5
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	Άνευ ασυνήθους μεταβολής		Σημείωση 6
Θολότητα	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής		Σημείωση 7
Τρίτιο	100	Becquerel/l	Σημειώσεις 8 & 9
Ολική ενδεικτική δόση	0,1	mSv/έτος	Σημειώσεις 9 & 10

Σημείωση 1: Το νερό δεν πρέπει να είναι διαβρωτικό.

Σημείωση 2: Η παράμετρος αυτή χρειάζεται να μετράται μόνον όταν το νερό προέρχεται ή επηρεάζεται από επιφανειακό νερό. Σε περίπτωση μη τήρησης της παραμετρικής αυτής τιμής οι αρμόδιες Αρχές εξετάζουν την παροχή νερού για να εξασφαλίσουν ότι δεν υπάρχει ενδεχόμενος κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία λόγω της παρουσίας παθογόνων μικροοργανισμών, όπως π.χ. Cryptosporidium. Τα κράτη μέλη περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών στην έκθεση που υποβάλλουν σύμφωνα με το άρθρο 13 παράγραφος 2.

Σημείωση 3: Για το στάσιμο νερό που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία, η κατώτατη τιμή μπορεί να μειώνεται σε 4,5 μονάδες pH.

Για το νερό που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία και έχει φυσική περιεκτικότητα σε ή είναι τεχνητά εμπλουτισμένο με διοξείδιο του άνθρακα, η κατώτατη τιμή μπορεί να είναι μικρότερη.

Σημείωση 4: Η παράμετρος αυτή δεν χρειάζεται να μετράται εφόσον αναλύεται η παράμετρος ολικού οργανικού άνθρακα.

Σημείωση 5: Για νερό που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία, η μονάδα είναι: αριθμός /250 ml.

Σημείωση 6: Η παράμετρος αυτή δεν χρειάζεται να μετράται για παροχές κάτω των 10.000 m<sup>3</sup> ημερησίως.

- Σημείωση 7:* Σε περίπτωση επεξεργασίας επιφανειακών υδάτων, τα κράτη μέλη επιδιώκουν παραμετρική τιμή που δεν υπερβαίνει την 1,0 NTU (νεφελομετρική μονάδα θολότητας) στο νερό που προέρχεται από εγκαταστάσεις επεξεργασίας.
- Σημείωση 8:* Οι συχνότητες ελέγχου θα περιληφθούν αργότερα στο παράρτημα II.
- Σημείωση 9:* Εξαιρουμένου του τριτίου, του καλίου -40, του ραδονίου και των προϊόντων διάσπασης του ραδονίου. Οι συχνότητες ελέγχου, οι μέθοδοι παρακολούθησης και οι πλέον κατάλληλες θέσεις για τα σημεία παρακολούθησης θα καθοριστούν αργότερα στο παράρτημα II.
- Σημείωση 10:*
1. Οι απαιτούμενες από τη σημείωση 8 προτάσεις για τις συχνότητες ελέγχου και η σημείωση 9 για τις συχνότητες, οι μέθοδοι παρακολούθησης και οι πλέον κατάλληλες θέσεις για τα σημεία παρακολούθησης στο παράρτημα II εγκρίνονται σύμφωνα με τη διαδικασία που προβλέπεται στο άρθρο 12. Κατά την κατάρτιση των προτάσεων αυτών, Η επιτροπή θα λάβει υπόψη της, μεταξύ άλλων, τις σχετικές διατάξεις δυνάμει της υφιστάμενης νομοθεσίας ή τα κατάλληλα προγράμματα παρακολούθησης συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων παρακολούθησης που προκύπτουν από αυτό. Η επιτροπή θα υποβάλλει τις προτάσεις αυτές το αργότερο εντός δεκαοκτώ μηνών μετά την ημερομηνία που προβλέπεται στο άρθρο 18 της οδηγίας.
  2. Δεν απαιτείται ένα κράτος μέλος να ελέγχει το πόσιμο ύδωρ για τρίτιο ή ραδιενέργεια για να καθορίσει ολική ενδεικτική δόση, εφόσον, βάσει άλλης παρακολούθησης, είναι ικανοποιημένο από το γεγονός ότι τα επίπεδα του τριτίου ή ολική ενδεικτική δόση στο νερό είναι αρκετά κάτω από την παραμετρική τιμή. Στην περίπτωση αυτή, ανακοινώνει τους λόγους της απόφασής του στην Επιτροπή, συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων αυτής της άλλης παρακολούθησης.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

### ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ

#### ΠΙΝΑΚΑΣ Α

#### Αναλυόμενες Παράμετροι

##### 1. Δοκιμαστική παρακολούθηση

Σκοπός της δοκιμαστικής παρακολούθησης είναι να παρέχονται, σε τακτική βάση, στοιχεία για την οργανοληπτική και μικροβιολογική ποιότητα του νερού που διατίθεται για ανθρώπινη κατανάλωση καθώς και πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας του ποσίμου ύδατος (ιδίως της απολύμανσης) εφόσον γίνεται, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσον το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης τηρεί τις σχετικές παραμετρικές τιμές της παρούσας οδηγίας.

Οι ακόλουθες παράμετροι υπόκεινται σε δοκιμαστική παρακολούθηση. Τα κράτη μέλη μπορούν να προσθέτουν και άλλες παραμέτρους στον πίνακα αυτόν εάν το κρίνουν σκόπιμο.

Αργίλιο (σημείωση 1)

Αμμώνιο

Χρώμα

Αγωγιμότητα

*Clostridium Perfringens* (συμπεριλαμβανομένων των σπορίων) (σημείωση 2)

*Escherichia coli* (*E. coli*)

Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου

Σίδηρος (σημείωση 1)

Νιτρώδη άλατα (σημείωση 3)

Οσμή

*Pseudomonas aeruginosa* (σημείωση 4)

Γεύση

Αριθμός αποικιών σε 22 °C και 37 °C (σημείωση 4)

Κολοβακτηριοειδή

Θολότητα

Σημείωση 1: Απαιτείται μόνον όταν χρησιμοποιείται ως κροκιδωτικό (\*).

Σημείωση 2: Απαιτείται μόνον όταν το νερό προέρχεται ή επηρεάζεται από επιφανειακό νερό (\*).

Σημείωση 3: Απαιτείται μόνον όταν για την απολύμανση γίνεται χλωραμίνωση (\*).

Σημείωση 4: Απαιτείται μόνον για νερό που διατίθεται προς πώληση σε φιάλες ή σε δοχεία.

(\*) Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, οι παράμετροι περιλαμβάνονται στον πίνακα της ελεγκτικής παρακολούθησης.

### 1. Ελεγκτική παρακολούθηση

Σκοπός της ελεγκτικής παρακολούθησης είναι να παρέχονται τα στοιχεία που απαιτούνται για να διαπιστωθεί κατά πόσον τηρούνται όλες οι παραμετρικές τιμές της παρούσας οδηγίας. Όλες οι παράμετροι που καθορίζονται σύμφωνα με το άρθρο 5 παράγραφοι 2 και 3, υπόκεινται σε ελεγκτική παρακολούθηση, εκτός αν οι αρμόδιες αρχές αποφανθούν, για χρονική περίοδο που καθορίζουν οι ίδιες, ότι μια παράμετρος δεν υπάρχει πιθανότητας να εμφανισθεί σε μία δεδομένη παροχή νερού σε συγκεντρώσεις οι οποίες θα δημιουργούσαν κίνδυνο παραβίασης της αντίστοιχης παραμετρικής τιμής. Η παράγραφος αυτή δεν ισχύει για τις παραμέτρους σχετικά με τη ραδιενέργεια, οι οποίες, υπό τους όρους των σημειώσεων 8, 9 και 10 του παραρτήματος Ι μέρος Γ, παρακολουθούνται σύμφωνα με τις απαιτήσεις παρακολούθησης που θεσπίζονται δυνάμει του άρθρου 12 για την διαδικασία επιτροπής.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ Β1

**Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας και αναλύσεων του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης που παρέχεται από δίκτυο διανομής ή από βυτίο ή χρησιμοποιείται σε επιχείρηση παραγωγής τροφίμων.**

Τα κράτη μέλη λαμβάνουν δείγματα από τα σημεία τήρησης που καθορίζονται στο άρθρο 6 παράγραφος 1 ώστε να εξασφαλίζουν ότι το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης ανταποκρίνεται προς τις απαιτήσεις της οδηγίας. Ωστόσο, σε περίπτωση δικτύου διανομής, τα κράτη μέλη μπορούν να λαμβάνουν δείγματα εντός της ζώνης παροχής ή στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας για συγκεκριμένες παραμέτρους εφόσον είναι δυνατόν να αποδειχθεί ότι δεν θα υπήρχε δυσμενής μεταβολή της μετρούμενης τιμής της συγκεκριμένης παραμέτρου.

Όγκος διανεμόμενου ή παραγόμενου νερού ημερησίως σε μια ζώνη παροχής $m^3$ (Σημειώσεις 1& 2)	Δοκιμαστική Παρακολούθηση Αριθμός δειγμάτων ετησίως (Σημειώσεις 3,4 & 5)	Ελεγκτική παρακολούθηση Αριθμός δειγμάτων ετησίως (Σημειώσεις 3& 5)
$\leq 100$	Σημείωση 6	Σημείωση 6
$> 100$ $\leq 1.000$	4	1
$> 1.000$ $\leq 10.000$		1 +1 ανά $3.300 m^3$ και άνω/ημερησίως του συνολικού όγκου
$> 10.000$ $\leq 100.000$		3 +1 ανά $10.000 m^3$ και άνω/ημερησίως του συνολικού όγκου
$> 100.000$		10 +1 ανά $25.000 m^3$ και άνω/ημερησίως του συνολικού όγκου

**Σημείωση 1:** Ως ζώνη παροχής νοείται μια γεωγραφικά καθορισμένη περιοχή εντός της οποίας το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης εισέρχεται από μία ή περισσότερες πηγές και εντός της οποίας η ποιότητα του νερού μπορεί να θεωρηθεί ως περίπου ομοιομορφη.

**Σημείωση 2:** Οι όγκοι υπολογίζονται ως μέσες τιμές για ένα ημερολογιακό έτος. Για τον καθορισμό της ελάχιστης συχνότητας, τα κράτη μέλη μπορούν να χρησιμοποιούν τον αριθμό κατοίκων μιας ζώνης παροχής αντί του όγκου του νερού, θεωρώντας ότι κάθε άτομο καταναλώνει  $200 l$ /ημερησίως.

**Σημείωση 3:** Στην περίπτωση περιοδικής παροχής, βραχείας διάρκειας, η συχνότητα παρακολούθησης του νερού που διανέμεται με βυτία αποφασίζεται από τα ενδιαφερόμενα κράτη μέλη.



- Σημείωση 4:** Για τις διάφορες παραμέτρους του παραρτήματος Ι, τα κράτη μέλη δύνανται να μειώνουν τον αριθμό δειγμάτων που αναφέρονται στον πίνακα εάν:  
 α) οι τιμές των αποτελεσμάτων που επιτυγχάνονται από δείγματα λαμβανόμενα επί περίοδο τουλάχιστον δύο συνεχών ετών είναι σταθερές και σημαντικώς καλύτερες από τις οριακές τιμές του παραρτήματος Ι και  
 β) δεν υπάρχει κάποιος παράγων που ενδέχεται να υποβιβάσει την ποιότητα του νερού.  
 Η κατώτατη συχνότητα δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 50 % του αριθμού των δειγμάτων που αναφέρονται στον πίνακα εκτός της ειδικής περιπτώσεως της σημείωσης 6.
- Σημείωση 5:** Στο μέτρο του δυνατού, ο αριθμός των δειγμάτων πρέπει να κατανέμεται ομοιόμορφα στο χρόνο και το χώρο.
- Σημείωση 6:** Η συχνότητα πρέπει να αποφασίζεται από τα ενδιαφερόμενα κράτη μέλη.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ Β2

**Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας και ανάλυσης του νερού που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία προς πώληση**

Όγκος ημερησίως παραγόμενου νερού προς πώληση σε φιάλες ή δοχεία (*) $m^3$	Δοκιμαστική Παρακολούθηση Αριθμός δειγμάτων ετησίως	Ελεγκτική παρακολούθηση Αριθμός δειγμάτων ετησίως
$\leq 10$	1	1
$> 10$ $\leq 60$	12	1
$> 60$	1 ανά $5 m^3$ και άνω/ημερησίως του συνολικού όγκου	1 ανά $100 m^3$ και άνω/ημερησίως του συνολικού όγκου

(\*) Οι όγκοι υπολογίζονται ως μέσες τιμές για ένα ημερολογιακό έτος

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

#### ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Τα κράτη μέλη διασφαλίζουν ότι κάθε εργαστήριο στο οποίο αναλύονται δείγματα διαθέτει σύστημα αναλυτικού ποιοτικού ελέγχου το οποίο, από καιρού εις καιρόν, υποβάλλεται σε έλεγχο από πρόσωπο μη ελεγχόμενο από το εργαστήριο και το οποίο έχει εγκρίνει η αρμόδια αρχή προς το σκοπό αυτό.

##### 1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΚΑΘΟΡΙΖΕΤΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Οι κατωτέρω αρχές που διέπουν τις μεθόδους ανάλυσης μικροβιολογικών παραμέτρων δίδονται είτε ως αναφορά όταν δίδεται μέθοδος ISO GEN ή προς καθοδήγηση, εν αναμονή της ενδεχόμενης μελλοντικής θέσπισης σύμφωνα με τη διαδικασία του άρθρου 12 για τη διαδικασία επιτροπής, νέων διεθνών μεθόδων CEN/ISO για τις παραμέτρους αυτές. Τα κράτη μέλη μπορούν να χρησιμοποιούν εναλλακτικές μεθόδους, εφόσον τηρούνται οι διατάξεις του άρθρου 7 παράγραφος 5, που αφορά την τήρηση των προδιαγραφών αναλύσεως παραμέτρων.

Κολοβακτηριοειδή και *Escherichia coli* (*E.coli*) (ISO 9308-1)

Εντερόκοκκοι (ISO 7899-2)

*Pseudomonas aeruginosa* (prEN ISO 12780)

Απαρίθμηση καλλιεργήσιμων μικροοργανισμών - Αριθμός αποικιών σε 22 °C (prEN ISO 6222)

Απαρίθμηση καλλιεργήσιμων μικροοργανισμών - Αριθμός αποικιών σε 37 °C (prEN ISO 6222)

*Clostridium perfringens* (συμπεριλαμβανομένων των σπορίων)

Διήθηση από μεμβράνη και στη συνέχεια επώαση της μεμβράνης υπό αναερόβιες συνθήκες σε θρεπτικό υλικό *Clostridium perfringens* (σημείωση 1) σε 44 ± 1 °C επί 21 ± 3 ώρες. Μέτρηση των σκοτεινών κίτρινων αποικιών που μετατρέπονται σε ροζ ή κόκκινες μετά από έκθεση σε ατμούς υδροξειδίου του αμμωνίου επί 20 έως 30 δευτερόλεπτα.

Σημείωση 1: Το «θρεπτικό υλικό *Clostridium perfringens*» περιέχει:

Βασικό θρεπτικό υλικό

Τρυπτόζη	30g
Εκχύλισμα μυκήτων	20g
Σακχαρόζη	5g
Υδροχλωριούχος L - κυστεΐνη	1g
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.1g
Ιώδες βρωμοκρεζόλης	40g
Άγαρ	15g
Υδωρ	1000ml

Τα συστατικά του βασικού θρεπτικού υλικού διαλύονται και το pH προσαρμόζεται σε 7,6. Το υλικό αποστειρώνεται σε αυτόκλειστο στους 121 °C επί 15 λεπτά. το θρεπτικό υλικό ψύχεται και προστίθενται:

D-κυκλοστερίνη	400mg
B-θειική πολυξεμίνη	25mg
Ινδοξυλο-β-D-γλυκοζίδιο διαλυμένο σε 8 αποστειρωμένου νερού πριν την προσθήκη	60mg
Διάλυμα 0,5% διφωσφορικής φαινολοφθαλεΐνης αποστειρωμένο με διήθηση	20ml
Διάλυμα 4,5% διφωσφορικού $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	2ml

## 2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΚΑΘΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ

2.1. Για τις ακόλουθες παραμέτρους, τα καθοριζόμενα χαρακτηριστικά επιδόσεων είναι τέτοια ώστε με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανάλυσης να είναι, τουλάχιστον, δυνατόν να μετρώνται συγκεντρώσεις ίσες προς την παραμετρική τιμή με την οριζόμενη πιστότητα, ακρίβεια και τα οριζόμενα όρια ανίχνευσης. Όποια και να είναι η ευαισθησία της χρησιμοποιούμενης μεθόδου ανάλυσης, το αποτέλεσμα εκφράζεται χρησιμοποιώντας τουλάχιστον τον ίδιο αριθμό δεκαδικών ψηφίων με την παραμετρική τιμή του παραρτήματος Ι μέρη Β και Γ.

Παράμετροι	Πιστότητα % της παραμετρικής τιμής (Σημείωση 1)	Ακρίβεια % της παραμετρικής τιμής (Σημείωση 2)	Όριο ανίχνευσης % της παραμετρικής τιμής (Σημείωση 3)	Συνθήκες	Σημειώσεις
Ακρυλαμίδιο				Ελέγχεται με βάση τις προδιαγραφές του προϊόντος	
Αργίλιο	10	10	10		
Αμμώνιο	10	10	10		
Αντιμόνιο	25	25	25		
<b>Αρσενικό</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>		
Βενζο-α-πυρένιο	25	25	25		
Βενζόλιο	25	25	25		
Βόριο	10	10	10		
Βρωμικά άλατα	25	25	25		
Κάδμιο	10	10	10		
Χλωριούχα άλατα	10	10	10		
Χρώμιο	10	10	10		
Αγωγιμότητα	10	10	10		
Χαλκός	10	10	10		
Κυανιούχα άλατα	10	10	10		Σημείωση 4
1,2-διχλωροαιθιοάνιο	25	25	25		
Επιχλωρυδρίνη				Ελέγχεται με βάση τις προδιαγραφές του προϊόντος	
Φθοριούχα άλατα	10	10	10		
Σίδηρος	10	10	10		
Μόλυβδος	10	10	10		
Μαγγάνιο	10	10	10		
Υδράργυρος	20	20	20		
Νικέλιο	10	10	10		
Νιτρικά άλατα	10	10	10		
Νιτρώδη άλατα	10	10	10		
Οξειδωσιμότητα	25	25	25		Σημείωση 5
Παρασιτοκτόνα	25	25	25		Σημείωση 6
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	25	25	25		Σημείωση 7

Σελήνιο	10	10	10		
Νάτριο	10	10	10		
Θειικά άλατα	10	10	10		
Τετραχλωροαιθέριο	25	25	10		Σημείωση 8
Τριχλωροαιθέριο	25	25	10		Σημείωση 8
Ολικά τριαλογονομεθάνια	25	25	10		Σημείωση 7
Βινυλοχλωρίδιο				Ελέγχεται με βάση τις προδιαγραφές του προϊόντος	

2.2. Για τη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου, τα οριζόμενα χαρακτηριστικά επιδόσεων είναι τέτοια ώστε με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανάλυσης να είναι δυνατόν να μετρώνται συγκεντρώσεις ίσες προς την παραμετρική τιμή με πιστότητα 0,2 μονάδων pH και ακρίβεια 0,2 μονάδων pH.

Σημείωση 1 (\*): Πιστότητα είναι το συστηματικό σφάλμα και είναι η διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής μεγάλου αριθμού επαναλαμβανόμενων μετρήσεων και της πραγματικής τιμής.

Σημείωση 2 (\*): Ακρίβεια είναι το τυχαίο σφάλμα και εκφράζεται συνήθως ως η κανονική απόκλιση (εντός και μεταξύ μιας ομάδας) του φάσματος αποτελεσμάτων γύρω από το μέσο όρο. Αποδεκτή ακρίβεια είναι η διπλάσια σχετική συνήθης απόκλιση.

(\*) Οι όροι αυτοί προσδιορίζονται περαιτέρω στο πρότυπο ISO 5725.

Σημείωση 3: Όριο ανίχνευσης είναι:  
- η τριπλάσια σχετική συνήθης απόκλιση, εντός μιας ομάδας, ενός φυσικού δείγματος που περιέχει μικρή συγκέντρωση της παραμέτρου ή  
- η πενταπλάσια σχετική συνήθης απόκλιση, εντός μιας ομάδας, ενός τυφλού δείγματος.

Σημείωση 4: Η μέθοδος προσδιορίζει ολικά κυανιούχα άλατα κάθε μορφής.

Σημείωση 5: Η οξείδωση πραγματοποιείται για 10 λεπτά σε 100 °C με τη χρησιμοποίηση υπερμαγγανικών αλάτων, σε όξινο περιβάλλον.

Σημείωση 6: Τα χαρακτηριστικά επιδόσεων ισχύουν για κάθε επιμέρους παρασιτοκτόνο και εξαρτώνται από το συγκεκριμένο παρασιτοκτόνο. Προς το παρόν, ενδέχεται να μην είναι δυνατόν να επιτευχθεί το όριο ανίχνευσης για όλα τα παρασιτοκτόνα, αλλά τα κράτη μέλη πρέπει να επιδιώκουν την επίτευξη του στόχου αυτού.

Σημείωση 7: Τα χαρακτηριστικά επιδόσεων ισχύουν για τις επιμέρους ουσίες που ορίζονται στο 25 % της παραμετρικής τιμής του παραρτήματος I.

Σημείωση 8: Τα χαρακτηριστικά επιδόσεων ισχύουν για τις επιμέρους ουσίες που ορίζονται στο 50 % της παραμετρικής τιμής του παραρτήματος I.

### 3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΔΕΝ ΚΑΘΟΡΙΖΕΤΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Χρώμα

Οσμή

Γεύση

Συνολικός οργανικός άνθρακας

Θολότητα (σημείωση 1)

Σημείωση 1: Για την παρακολούθηση της θολότητας του επεξεργασμένου επιφανειακού νερού τα οριζόμενα χαρακτηριστικά επιδόσεων οφείλουν να παρέχουν τουλάχιστον τη δυνατότητα μέτρησης συγκεντρώσεων ίσων προς την παραμετρική τιμή με πιστότητα 25 %, ακρίβεια 25 % και όριο ανίχνευσης 25 %.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑΣ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

#### ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

##### ΜΕΡΟΣ Α΄

###### 1. Μικροβιολογικές παράμετροι

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή (αριθμός/100 ml)
Escherichia coli (E. coli)	0
Εντερόκοκκοι	0

###### 2. Για το νερό που πωλείται σε φιάλες ή δοχεία, ισχύουν τα ακόλουθα:

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή	Σημειώσεις
Escherichia coli (E. coli)	0/250 mL	
Εντερόκοκκοι	0/250 mL	
Pseudomonas aeruginosa	0/250 mL	
Αριθμός αποικιών σε 22 °C	100/mL	Σημείωση 1
Αριθμός αποικιών σε 37 °C	20/mL	Σημείωση 1

Σημείωση 1: Οι τιμές της ανώτατης συγκέντρωσης πρέπει να μετρώνται μέσα στις 12 ώρες που ακολουθούν τη συσκευασία, ενώ το νερό των δειγμάτων θα πρέπει να διατηρείται σε θερμοκρασία 5±3°C κατά τη διάρκεια των 12 ωρών.

###### 3. Για το νερό που κυκλοφορεί στο εσωτερικό δίκτυο ύδρευσης νοσοκομείων, κλινικών, κέντρων υγείας, οίκων ευγηρίας, καθορίζονται επιπλέον οι ακόλουθες παράμετροι:

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή
Pseudomonas aeruginosa	0 cfu/100mL
Legionella	1000 cfu /1L

###### 4. Για το νερό που κυκλοφορεί στο εσωτερικό δίκτυο ύδρευσης τουριστικών εγκαταστάσεων, ξενοδοχείων, φυλακών, στρατοπέδων καθορίζεται επιπλέον η ακόλουθη παράμετρος:

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή
Legionella	1000 cfu /1L

ΜΕΡΟΣ Β΄

Χημικές παράμετροι

Παράμετρος	Παραμετρική Τιμή	Μονάδα	Σημειώσεις
Ακρυλαμίδιο	0,1	μg/l	Σημείωση 1
Αντιμόνιο	5	μg/l	
<b>Αρσενικό</b>	<b>10</b>	<b>μg/l</b>	
Βενζόλιο	1	μg/l	
Βενζο-α-πυρένιο	0,01	μg/l	
Βόριο	1	mg/l	
Βρωμικά	10	μg/l	Σημείωση 2
Κάδμιο	5	μg/l	
Χρώμιο	50	μg/l	Σημείωση 3
Χαλκός	2	mg/l	Σημείωση 3
Κυανιούχα	50	μg/l	
1,2-διχλωροαιθάνιο	3	μg/l	
Επιχλωρυδρίνη	0,1	μg/l	Σημείωση 1
Φθοριούχα	1,5	mg/l	
Μόλυβδος	10	μg/l	Σημειώσεις 3 & 4
Υδράργυρος	1	μg/l	
Νικέλιο	20	μg/l	Σημείωση 3
Νικτρικά	50	mg/l	Σημείωση 5
Νιτρώδη	0,5	mg/l	Σημείωση 5
Παρασιτοκτόνα	0,1	μg/l	Σημείωση 6 & 7
Σύνολο παρασιτοκτόνων	0,5	μg/l	Σημείωση 6 & 8
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	0,1	μg/l	Άθροισμα συγκεντρώσεων συγκεκριμένων ενώσεων – σημείωση 9
Σελήνιο	10	μg/l	
Τετραχλωροαιθέριο και Τριχλωροαιθέριο	10	μg/l	Άθροισμα συγκεντρώσεων συγκεκριμένων παραμέτρων
Ολικά τριαλογονομεθάνια	100	μg/l	Άθροισμα συγκεντρώσεων συγκεκριμένων ενώσεων – σημείωση 10
Βινυλοχλωρίδιο	0,5	μg/l	Σημείωση 1

- Σημείωση 1:** Η παραμετρική τιμή αναφέρεται στην συγκέντρωση καταλοίπων μονομερούς στο νερό όπως υπολογίζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές περί μεγίστης μετανάστευσης εκ του αντιστοίχου πολυμερούς όταν βρίσκεται σε επαφή με το νερό.
- Σημείωση 2:** Εάν είναι δυνατόν, οι Αρμόδιες Αρχές, πρέπει να επιδιώκουν χαμηλότερη τιμή χωρίς να θίγεται η απολύμανση.
- Σημείωση 3:** Η τιμή ισχύει για δείγμα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης που λαμβάνεται στη βρύση με μέθοδο δειγματοληψίας που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της παρ. 2α του Μέρους Δ του Παραρτήματος II. Οι υπεύθυνοι σε συνεργασία με τις αρμόδιες Αρχές λαμβάνουν υπόψη τα περιστατικά μεγίστων επιπέδων που ενδέχεται να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.
- Σημείωση 4:** Οι αρμόδιες Αρχές εξασφαλίζουν ότι τηρείται ο όρος  $\frac{[\text{νιτρικά}]/50 + [\text{νιτρώδη}]/3}{\text{ολικά}} < 1$ , οι αγκύλες υποδηλούν συγκέντρωση σε mg/l για νιτρικά (NO3) και για τα νιτρώδη άλατα (NO2), καθώς και ότι η τιμή 0,10 mg/l για τα νιτρώδη τηρείται για το νερό που προέρχεται από εγκαταστάσεις επεξεργασίας.
- Σημείωση 5:** Ως «παρασιτοκτόνα» νοούνται:  
 -οργανικά εντομοκτόνα,  
 -οργανικά ζιζανιοκτόνα,  
 -οργανικά μυκητοκτόνα,  
 -οργανικά νηματωδοκτόνα,  
 -οργανικά ακαριοκτόνα,

-οργανικά φυκοκτόνα,  
- οργανικά τρωκτικοκτόνα,  
- οργανικά γλινοκτόνα,  
- συναφή προϊόντα (μεταξύ άλλων, οι ρυθμιστές αύξησης) και οι σχετικοί μεταβολίτες αυτών, προϊόντα αποικοδόμησης και αντίδρασης. Ελέγχονται μόνον τα παρασιτοκτόνα των οποίων πιθανολογείται η παρουσία σε μία δεδομένη παροχή νερού.

Σημείωση 6:

Η παραμετρική τιμή ισχύει για κάθε επιμέρους παρασιτοκτόνο. Για τα aldrine, dieldrine, heptachlor, eroxi-heptachlor, η παραμετρική τιμή είναι 0,030 μg/l.

Σημείωση 7:

Ως «συνολικά παρασιτοκτόνα» νοείται το άθροισμα όλων των επιμέρους παρασιτοκτόνων που ανιχνεύονται και προσδιορίζονται ποσοτικώς κατά τη διαδικασία παρακολούθησης.

Σημείωση 8:

Οι συγκεκριμένες ενώσεις είναι:

- βενζο(β)φθορανθένιο,  
- βενζο(λ)φθορανθένιο,  
- βενζο(η,θ,ι)περυλένιο,  
- ινδανο(1,2,3-γ,δ)πυρένιο.

Σημείωση 9:

Εάν είναι δυνατόν, οι αρμόδιες Αρχές να επιδιώκουν χαμηλότερη τιμή χωρίς να θίγεται η απολύμανση. Οι συγκεκριμένες ενώσεις είναι: χλωροφόρμιο, βρωμοφόρμιο, διβρωμοχλωρομεθάνιο, βρωμοδιχλωρομεθάνιο.

Μέρος Γ΄

Ενδεικτικές παράμετροι

Παράμετρος	Παραμετρική Τιμή	Μονάδα	Σημειώσεις
Αργίλιο	200	μg/l	
Αμμώνιο	0,5	mg/l	
Χλωριούχα	250	mg/l	Σημείωση 1
Clostridium perfringens (συμπεριλαμβανομένων των σποριών)	0	Αριθμός/100 ml	Σημείωση 2
Χρώμα	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής		
Αγωγιμότητα	2500	μS cm <sup>-1</sup> στο 20 °C	Σημείωση 1
Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου	≥ 6,5 και ≤ 9,5	Μονάδες pH	Σημείωση 1 & 3
Σίδηρος	200	μg/l	
Μαγγάνιο	50	μg/l	
Οσμή	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής		
Οξειδωσιμότητα	5	mg/l O <sub>2</sub>	Σημείωση 4
Θειικά	250	mg/l	Σημείωση 1
Νάτριο	200	mg/l	
Γεύση	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής		
Αριθμός αποικιών σε 22 °C	Άνευ ασυνήθους μεταβολής		
Κολοβακτηριοειδή	0	Αριθμός/100 ml	Σημείωση 5
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	Άνευ ασυνήθους μεταβολής		Σημείωση 6
Υπολειμματικό χλώριο		mg/L	Σημείωση 8
Θολότητα	Αποδεκτό για τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής		Σημείωση 7

Σημείωση 1:

Σημείωση 2:

Το νερό δεν πρέπει να είναι διαβρωτικό.

Η παράμετρος αυτή χρειάζεται να μετράται μόνον όταν το νερό προέρχεται ή επηρεάζεται από επιφανειακό νερό. Σε περίπτωση μη τήρησης της παραμετρικής αυτής τιμής οι αρμόδιες Αρχές εξετάζουν την παροχή νερού για να εξασφαλίσουν ότι δεν υπάρχει ενδεχόμενος κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία λόγω της παρουσίας παθογόνων μικροοργανισμών, όπως π.χ. Cryptosporidium. Οι υπεύθυνοι σε συνεργασία με τις αρμόδιες Αρχές περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών στην έκθεση που υποβάλλουν σύμφωνα με το άρθρο 12 παράγραφος 2.

Σημείωση 3:

Για το μη ανθρακούχο νερό που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία, η κατώτατη τιμή μπορεί να μειώνεται σε 4,5 μονάδες pH. Για το νερό που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία και έχει φυσική περιεκτικότητα σε ή είναι τεχνητά εμπλουτισμένο με διοξείδιο του άνθρακα, η κατώτατη τιμή μπορεί να είναι μικρότερη.

Σημείωση 4:

Η παράμετρος αυτή δεν χρειάζεται να μετράται εφόσον αναλύεται η παράμετρος ολικού οργανικού άνθρακα.

Σημείωση 5:

Για νερό που τοποθετείται σε φιάλες ή δοχεία, η μονάδα είναι: αριθμός /250 mL.



- Σημείωση 6:* Η παράμετρος αυτή δεν χρειάζεται να μετράται για παροχές κάτω των 10.000 m<sup>3</sup> ημερησίως.
- Σημείωση 7:* Σε περίπτωση επεξεργασίας επιφανειακών υδάτων, οι υπεύθυνοι σε συνεργασία με τις αρμόδιες Αρχές επιδιώκουν παραμετρική τιμή που δεν υπερβαίνει την 1,0 NTU (νεφελομετρική μονάδα θολότητας) στο νερό που προέρχεται από εγκαταστάσεις επεξεργασίας.
- Σημείωση 8:* Σύμφωνα με την παρ. 1 του άρθρου 9 της παρούσας και την Υ.Μ.5673/4.12.57 (ΦΕΚ 5/Β/1958)

## Υγειονομική Διάταξη

### ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Για τον έλεγχο των παραμέτρων της ραδιενέργειας εφαρμόζεται η Π/112/1057/2016/1-2-2016 κοινή υπουργική απόφαση (ΦΕΚ 241/Β/9-2-2016) «Θέσπιση απαιτήσεων προστασίας της υγείας του πληθυσμού από ραδιενεργές ουσίες που περιέχονται στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης, σε συμμόρφωση προς την Οδηγία 2013/51/ΕΥΡΑΤΟΜ του Συμβουλίου, της 22ας Οκτωβρίου 2013».

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑΣ ΕΡΑ

### Μικροοργανισμοί

Μολυσματικός Παράγοντας	MCLG (mg/L)	MCL or TT (mg/L)	Πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από τη μακροπρόθεσμη έκθεση πάνω από το MCL (εκτός εάν ορίζεται ως βραχυπρόθεσμη)	Πηγές ρύπων στο πόσιμο νερό
Κρυπτοσπορίδιο	0	TT	Γαστρεντερικές παθήσεις (όπως διάρροια, έμετος και κράμπες)	Απόβλητα κοπράνων ανθρώπων και ζώων
Giardia lamblia	0	TT	Γαστρεντερικές παθήσεις (όπως διάρροια, έμετος και κράμπες)	Απόβλητα κοπράνων ανθρώπων και ζώων
Αριθμός ετερότροφων πλακών (HPC)	n/a	TT	Το HPC δεν έχει επιπτώσεις στην υγεία. είναι μια αναλυτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ποικιλίας των βακτηρίων που είναι κοινά στο νερό. Όσο χαμηλότερη είναι η συγκέντρωση βακτηρίων στο πόσιμο νερό, τόσο καλύτερα διατηρημένο είναι το σύστημα νερού.	Το HPC μετρά μια σειρά από βακτήρια που υπάρχουν φυσικά στο περιβάλλον
Λεγεωνέλα	0	TT	Νόσος των Λεγεωνάριων, ένας τύπος πνευμονίας	Βρίσκεται φυσικά στο νερό. πολλαπλασιάζεται στα συστήματα θέρμανσης
Ολικά κολοβακτηρίδια (συμπεριλαμβανομένων των κολοβακτηριδίων κοπράνων και του E. Coli)	0	5%	Δεν αποτελεί απειλή για την υγεία από μόνη της: χρησιμοποιείται για να δείξει εάν μπορεί να υπάρχουν άλλα δυνητικά επιβλαβή βακτήρια	Τα κολοβακτηρίδια είναι φυσικά παρόντα στο περιβάλλον: καθώς και περιτώματα? τα κολοβακτηρίδια κοπράνων και το E. coli προέρχονται μόνο από ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα κοπράνων.
Θολότητα	n/a	TT	Η θολότητα είναι ένα μέτρο της θολότητας του νερού. Χρησιμοποιείται για να υποδείξει την ποιότητα του νερού και την αποτελεσματικότητα του φιλτραρίσματος (όπως εάν υπάρχουν οργανισμοί που προκαλούν ασθένειες). Τα υψηλότερα επίπεδα θολότητας συχνά συνδέονται με υψηλότερα επίπεδα μικροοργανισμών που προκαλούν ασθένειες, όπως ιοί, παράσιτα και ορισμένα	Εδαφική απορροή

			βακτήρια. Αυτοί οι οργανισμοί μπορούν να προκαλέσουν συμπτώματα όπως ναυτία, κράμπες, διάρροια και συναφείς πονοκεφάλους.	
Ιοί (εντερικοί)	0	TT	Γαστρεντερικές παθήσεις (όπως διάρροια, έμετος και κράμπες)	Απόβλητα κοπράνων ανθρώπων και ζώων

#### Υποπροϊόντα απολύμανσης

Μολυσματικός Παράγοντας	MCLG (mg/L)	MCL or TT (mg/L)	Πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από τη μακροπρόθεσμη έκθεση πάνω από το MCL (εκτός εάν ορίζεται ως βραχυπρόθεσμη)	Πηγές ρύπων στο πόσιμο νερό
Βρωμικό αλάτι	0	0,01	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου	Υποπροϊόν της απολύμανσης του πόσιμου νερού
Χλωρίτης	0,8	1	Αναιμία βρέφη και μικρά παιδιά: επιπτώσεις στο νευρικό σύστημα	Υποπροϊόν της απολύμανσης του πόσιμου νερού
Αλογονοοξικά οξέα (HAA5)	n/a	0,06	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου	Υποπροϊόν της απολύμανσης του πόσιμου νερού
Ολικά τριαλομεθάνια (THMs)	n/a	>0,08	Προβλήματα με το ήπαρ, τους νεφρούς ή το κεντρικό νευρικό σύστημα. αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Υποπροϊόν της απολύμανσης του πόσιμου νερού

n/a: Αν και δεν υπάρχει συλλογικό MCLG για αυτήν την ομάδα ρύπων, υπάρχουν μεμονωμένα MCLG για ορισμένους από τους επιμέρους μολυσματικούς παράγοντες:

- Τριαλομεθάνια: βρωμοδιχλωρομεθάνιο (μηδέν), βρωμοφόρμιο (μηδέν), διβρωμοχλωρομεθάνιο (0,06 mg/L): χλωροφόρμιο (0,07 mg/L).
- Αλογονοοξικά οξέα: διχλωροξικό οξύ (μηδέν), τριχλωροξικό οξύ (0,02 mg/L), μονοχλωροξικό οξύ (0,07 mg/L). Το βρωμοοξικό οξύ και το διβρωμοοξικό οξύ ρυθμίζονται με αυτήν την ομάδα αλλά δεν έχουν MCLG.

#### Απολυμαντικά

Μολυσματικός Παράγοντας	MCLG (mg/L)	MCL or TT (mg/L)	Πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από τη μακροπρόθεσμη έκθεση πάνω από το MCL (εκτός εάν ορίζεται ως βραχυπρόθεσμη)	Πηγές ρύπων στο πόσιμο νερό
Χλωραμίνες	MRDLG=4	MRDLG=4	Ερεθισμός ματιών/μύτης: δυσφορία στο στομάχι, αναιμία	Πρόσθετο νερού που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των μικροβίων

Χλώριο	MRDLG=4	MRDLG=4	Ερεθισμός ματιών/μύτης: δυσφορία στο στομάχι	Πρόσθετο νερού που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των μικροβίων
Διοξείδιο του χλωρίου	MRDLG=0.8	MRDLG=0.8	Αναιμία βρέφη και μικρά παιδιά: επιπτώσεις στο νευρικό σύστημα	Πρόσθετο νερού που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των μικροβίων

Ανόργανες χημικές ουσίες

Μολυσματικός Παράγοντας	MCLG (mg/L)	MCL or TT (mg/L)	Πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από τη μακροπρόθεσμη έκθεση πάνω από το MCL (εκτός εάν ορίζεται ως βραχυπρόθεσμη)	Πηγές ρύπων στο πόσιμο νερό
Αντιμόνιο	0,006	0,006	Αύξηση της χοληστερόλης στο αίμα. μείωση του σακχάρου στο αίμα	Απόρριψη από διυλιστήρια πετρελαίου. επιβραδυντικά πυρκαγιάς? κεραμικά; ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΙΔΗ; κόλλα μετάλλων
Αρσενικό	0	0,01 από 23/01/06	Δερματική βλάβη ή προβλήματα με το κυκλοφορικό σύστημα και μπορεί να έχει αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου	Διάβρωση φυσικών κοιτασμάτων; απορροές από οπωρώνες, απορροές από απόβλητα παραγωγής γυαλιού και ηλεκτρονικών ειδών
Αμίαντος (ίνες > 10 μικρόμετρα)	7 εκατομμύρια ίνες ανά λίτρο (MFL)	7 MFL	Αυξημένος κίνδυνος ανάπτυξης καλοηθών εντερικών πολύποδων	Αποσύνθεση αμιαντοσιμέντου σε δίκτυο ύδρευσης. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Βάριο	2	2	Αύξηση της αρτηριακής πίεσης	Απόρριψη απορριμμάτων γεωτρήσεων. απόρριψη από διυλιστήρια μετάλλων· διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Βηρύλλιο	0,004	0,004	Εντερικές βλάβες	Απόρριψη από διυλιστήρια μετάλλων και εργοστάσια καύσης άνθρακα. απόρριψη από την ηλεκτρική, την αεροδιαστημική και την αμυντική βιομηχανία
Κάδμιο	0,005	0,005	Βλάβη στα νεφρά	Διάβρωση γαλβανισμένων σωλήνων. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων· απόρριψη από διυλιστήρια μετάλλων· απορροή από άχρηστες μπαταρίες και χρώματα
Χρώμιο (ολικό)	0,1	0,1	Αλλεργική δερματίτιδα	Απόρριψη από εργοστάσια χάλυβα και χαρτοπολτού. διάβρωση

				των φυσικών κοιτασμάτων
Χαλκός	1,3	ΤΤ: Επίπεδο δράσης=1,3	Βραχυπρόθεσμη έκθεση: Γαστρεντερική δυσφορία Μακροχρόνια έκθεση: Ηπατική ή νεφρική βλάβη Τα άτομα με νόσο του Wilson θα πρέπει να συμβουλευούνται τον προσωπικό τους γιατρό εάν η ποσότητα χαλκού στο νερό τους υπερβαίνει το επίπεδο δράσης	Διάβρωση οικιακών υδραυλικών συστημάτων. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Κυάνιο (ως ελεύθερο κυάνιο)	0,2	0,2	Νευρική βλάβη ή προβλήματα θυρεοειδούς	Απόρριψη από εργοστάσια χάλυβα/μετάλλων. απόρριψη από εργοστάσια πλαστικών και λιπασμάτων
Φθόριο	4	4	Νόσος των οστών (πόνος και ευαισθησία των οστών). Τα παιδιά μπορεί να εμφανίσουν στίγματα στα δόντια	Πρόσθετο νερού που προάγει γερά δόντια. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων. απόρριψη από εργοστάσια λιπασμάτων και αλουμινίου
Μόλυβδος	0	ΤΤ: Επίπεδο δράσης=0,015	Βρέφη και παιδιά: Καθυστερήσεις στη σωματική ή πνευματική ανάπτυξη. Τα παιδιά θα μπορούσαν να παρουσιάσουν ελαφρά ελλείμματα στο εύρος της προσοχής και στις μαθησιακές ικανότητες  Ενήλικες: Νεφρικά προβλήματα. υψηλή πίεση του αίματος	Διάβρωση οικιακών υδραυλικών συστημάτων. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Υδράργυρος (ανόργανος)	0,002	0,002	Βλάβη στα νεφρά	Διάβρωση φυσικών κοιτασμάτων; απόρριψη από διυλιστήρια και εργοστάσια. απορροή από χωματερές και καλλιεργήσιμες εκτάσεις
Νιτρικά (μετρούμενα ως άζωτο)	10	10	Βρέφη ηλικίας κάτω των έξι μηνών που πίνουν νερό που περιέχει νιτρικά άλατα σε περίσσεια του MCL μπορεί να αρρωστήσουν σοβαρά και, εάν δεν αντιμετωπιστούν, μπορεί να πεθάνουν. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν δύσπνοια και σύνδρομο μπλε-μωρού.	Απορροή από τη χρήση λιπασμάτων. διαρροή από σηπτικές δεξαμενές, λύματα. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων
Νιτρώδες (μετρούμενο ως άζωτο)	1	1	Βρέφη ηλικίας κάτω των έξι μηνών που πίνουν νερό που περιέχει νιτρώδη άλατα σε περίσσεια του MCL μπορεί να αρρωστήσουν σοβαρά και, εάν δεν αντιμετωπιστούν,	Απορροή από τη χρήση λιπασμάτων. διαρροή από σηπτικές δεξαμενές, λύματα. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων

			μπορεί να πεθάνουν. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν δύσπνοια και σύνδρομο μπλε-μωρού.	
Σελήνιο	0,05	0,05	Απώλεια μαλλιών ή νυχιών. μούδιασμα στα δάχτυλα των χεριών ή των ποδιών: κυκλοφορικά προβλήματα	Απόρριψη από διυλιστήρια πετρελαίου. διάβρωση των φυσικών κοιτασμάτων· απόρριψη από ορυχεία
Θάλλιο	0,0005	0,002	Απώλεια μαλλιών; αλλαγές στο αίμα? προβλήματα στα νεφρά, το έντερο ή το συκώτι	Έκπλυση από τοποθεσίες επεξεργασίας μεταλλευμάτων. απόρριψη από εργοστάσια ηλεκτρονικών, γυαλιού και φαρμάκων

#### Οργανικά Χημικά

Μολυσματικός Παράγοντας	MCLG (mg/L)	MCL or TT (mg/L)	Πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από τη μακροπρόθεσμη έκθεση πάνω από το MCL (εκτός εάν ορίζεται ως βραχυπρόθεσμη)	Πηγές ρύπων στο πόσιμο νερό
Ακρυλαμίδιο	0	TT	Προβλήματα νευρικού συστήματος ή αίματος. αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Προστίθεται στο νερό κατά την επεξεργασία λυμάτων/λυμάτων
Alachlor	0	0,002	Προβλήματα με τα μάτια, το συκώτι, τα νεφρά ή τη σπλήνα. αναιμία; αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απορροή από ζιζανιοκτόνο που χρησιμοποιείται σε καλλιέργειες σε σειρά
Ατραζίνη	0,003	0,003	Προβλήματα του καρδιαγγειακού συστήματος ή της αναπαραγωγής	Απορροή από ζιζανιοκτόνο που χρησιμοποιείται σε καλλιέργειες σε σειρά
Βενζόλιο	0	0,005	Αναιμία; μείωση των αιμοπεταλίων? αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από εργοστάσια. έκπλυση από δεξαμενές αποθήκευσης αερίου και χλωματερές
Βενζο[α]πυρένιο (PAHs)	0	0,0002	Αναπαραγωγικές δυσκολίες; αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Έκπλυση από επενδύσεις δεξαμενών αποθήκευσης νερού και γραμμές διανομής
Καρβοφουράνιο	0,04	0,04	Προβλήματα με το αίμα, το νευρικό σύστημα ή το αναπαραγωγικό σύστημα	Έκπλυση του υποκαπνιστικού εδάφους που χρησιμοποιείται σε ρύζι και μηδική
Τετραχλωράνθρακας	0	0,005	Ηπατικά προβλήματα; αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από χημικά εργοστάσια και άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες
Chlordane	0	0,002	Προβλήματα με το ήπαρ ή το νευρικό σύστημα; αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Υπολείμματα απαγορευμένου τερμιτοκτόνου

Χλωροβενζόλιο	0,1	0,1	Προβλήματα στο συκώτι ή στα νεφρά	Απόρριψη από χημικά και γεωργικά χημικά εργοστάσια
2,4-D	0,07	0,07	Προβλήματα με τα νεφρά, το συκώτι ή τα επινεφρίδια	Απορροή από ζιζανιοκτόνο που χρησιμοποιείται σε καλλιέργειες σε σειρά
2,2-Διχλωροπροπιονικό οξύ	0,2	0,2	Μικρές αλλαγές στα νεφρά	Απορροή από ζιζανιοκτόνο που χρησιμοποιείται στο δικαίωμα διέλευσης
1,2-Διβρωμο-3-χλωροπροπάνιο (DBCP)	0	0,0002	Αναπαραγωγικές δυσκολίες: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απορροή/έκπλυση από υποκαπνιστικό εδάφους που χρησιμοποιείται σε σόγια, βαμβάκι, ανανάδες και οπωρώνες
ο-Διχλωροβενζόλιο	0,6	0,6	Προβλήματα με το ήπαρ, τα νεφρά ή το κυκλοφορικό σύστημα	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια
p-Διχλωροβενζόλιο	0,075	0,075	Αναιμία: βλάβη του ήπατος, των νεφρών ή του σπλήνα. αλλαγές στο αίμα	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια
1,2-Διχλωροαιθάνιο	0	0,005	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια
1,1-Διχλωροαιθυλένιο	0,007	0,007	Ηπατικά προβλήματα	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια
cis-1,2-Διχλωροαιθυλένιο	0,07	0,07	Ηπατικά προβλήματα	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια
trans-1,2-Διχλωροαιθυλένιο	0,1	0,1	Ηπατικά προβλήματα	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια
Διχλωρομεθάνιο	0	0,005	Ηπατικά προβλήματα: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από εργοστάσια φαρμάκων και χημικών
1,2-Διχλωροπροπάνιο	0	0,005	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια
Αδιπικό δις(2-αιθυλεξυλ)	0,4	0,4	Απώλεια βάρους, ηπατικά προβλήματα ή πιθανές αναπαραγωγικές δυσκολίες.	Απόρριψη από χημικά εργοστάσια
Δις(2-αιθυλεξυλ) φθαλικός εστέρας	0	0,006	Αναπαραγωγικές δυσκολίες: ηπατικά προβλήματα, αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από εργοστάσια καουτσούκ και χημικών
Dinoseb	0,007	0,007	Αναπαραγωγικές δυσκολίες	Απορροή από ζιζανιοκτόνο που χρησιμοποιείται σε σόγια και λαχανικά
Διοξίνη (2,3,7,8-TCDD)	0	0,00000003	Αναπαραγωγικές δυσκολίες: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Εκπομπές από την αποτέφρωση απορριμμάτων και άλλες καύσεις: απόρριψη από χημικά εργοστάσια
Diquat	0,02	0,02	Καταρράκτης	Απορροή από χρήση ζιζανιοκτόνου
Endothall	0,1	0,1	Προβλήματα στομάχου και εντέρου	Απορροή από χρήση ζιζανιοκτόνου

Endrin	0,002	0,002	Ηπατικά προβλήματα	Υπολείμματα απαγορευμένου εντομοκτόνου
Επιχλωροϋδρίνη	0	TT	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου και για μεγάλο χρονικό διάστημα, προβλήματα στο στομάχι	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια: ακαθαρσία ορισμένων χημικών ουσιών επεξεργασίας νερού
Αιθυλοβενζόλιο	0,7	0,7	Προβλήματα στο συκώτι ή στα νεφρά	Απόρριψη από διυλιστήρια πετρελαίου
Διβρωμιούχο αιθυλένιο	0	0,00005	Προβλήματα με το ήπαρ, το στομάχι, το αναπαραγωγικό σύστημα ή τα νεφρά: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από διυλιστήρια πετρελαίου
Γλυφοσάτη	0,7	0,7	Προβλήματα στα νεφρά: αναπαραγωγικές δυσκολίες	Απορροή από χρήση ζιζανιοκτόνου
Επτάχλωρο	0	0,0004	Ηπατική βλάβη: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Υπολείμματα απαγορευμένου τερμιτοκτόνου
Επταχλωρικό εποξειδίο	0	0,0002	Ηπατική βλάβη: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Διάσπαση επταχλωρίου
Εξαχλωροβενζόλιο	0	0,001	Ηπατικά ή νεφρικά προβλήματα. αναπαραγωγικές δυσκολίες: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από διυλιστήρια μετάλλων και εργοστάσια γεωργικών χημικών
Εξαχλωροκυκλοπενταδιένιο	0,05	0,05	Προβλήματα στα νεφρά ή στο στομάχι	Απόρριψη από χημικά εργοστάσια
Λινδάνιο	0,0002	0,0002	Προβλήματα στο συκώτι ή στα νεφρά	Απορροή/έκπλυση από εντομοκτόνο που χρησιμοποιείται σε βοοειδή, ξυλεία, κήπους
Methoxychlor	0,04	0,04	Αναπαραγωγικές δυσκολίες	Απορροή/έκπλυση από εντομοκτόνο που χρησιμοποιείται σε φρούτα, λαχανικά, μηδική, ζώα
Oxamyl (Vydate)	0,2	0,2	Ελαφρές επιδράσεις στο νευρικό σύστημα	Απορροή/έκπλυση από εντομοκτόνο που χρησιμοποιείται σε μήλα, πατάτες και ντομάτες
Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB)	0	0,0005	Αλλαγές δέρματος: προβλήματα θύμου αδένος? Ανοσολογική ανεπάρκεια? δυσκολίες στο αναπαραγωγικό ή το νευρικό σύστημα, αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απορροή από χωματερές. απόρριψη χημικών αποβλήτων
Πενταχλωροφαινόλη	0	0,001	Ηπατικά ή νεφρικά προβλήματα. αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από εργοστάσια συντήρησης ξύλου
Picloram	0,5	0,5	Ηπατικά προβλήματα	Απορροή ζιζανιοκτόνων
Simazine	0,004	0,004	Προβλήματα με το αίμα	Απορροή ζιζανιοκτόνων
Στυρένιο	0,1	0,1	Προβλήματα με το ήπαρ, τα νεφρά ή το κυκλοφορικό σύστημα	Απόρριψη από εργοστάσια καουτσούκ και πλαστικών: έκπλυση από χωματερές



Τετραχλωροαιθυλ ένιο	0	0,005	Ηπατικά προβλήματα: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από εργοστάσια και στεγνοκαθαριστήρια
Τολουόλιο	1	1	Προβλήματα του νευρικού συστήματος, των νεφρών ή του ήπατος	Απόρριψη από εργοστάσια πετρελαίου
Τοξαφαίνη	0	0,003	Προβλήματα με τα νεφρά, το συκώτι ή τον θυρεοειδή. αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απορροή/έκπλυση από εντομοκτόνο που χρησιμοποιείται σε βαμβάκι και βοοειδή
2,4,5-TP (Silvex)	0,05	0,05	Ηπατικά προβλήματα	Υπολείμματα απαγορευμένου ζιζανιοκτόνου
1,2,4- Τριχλωροβενζόλιο	0,07	0,07	Αλλαγές στα επινεφρίδια	Απόρριψη από εργοστάσια φινιρίσματος κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων
1,1,1- Τριχλωροαιθάνιο	0,2	0,2	Προβλήματα με το ήπαρ, το νευρικό σύστημα ή το κυκλοφορικό	Απόρριψη από εγκαταστάσεις απολίπανσης μετάλλων και άλλα εργοστάσια
1,1,2- Τριχλωροαιθάνιο	0,003	0,005	Προβλήματα με το ήπαρ, τα νεφρά ή το ανοσοποιητικό σύστημα	Απόρριψη από βιομηχανικά χημικά εργοστάσια
Τριχλωροαιθυλένι ο	0	0,005	Ηπατικά προβλήματα: αυξημένο κίνδυνο καρκίνου	Απόρριψη από εγκαταστάσεις απολίπανσης μετάλλων και άλλα εργοστάσια
Βινυλοχλωρίδιο	0	0,002	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου	Έκπλυση από σωλήνες PVC. απόρριψη από εργοστάσια πλαστικών
Ξυλένια (ολικό)	10	10	Βλάβη του νευρικού συστήματος	Απόρριψη από εργοστάσια πετρελαίου: απόρριψη από χημικά εργοστάσια

#### Ραδιονουκείδια

Μολυσματικός Παράγοντας	MCLG (mg/L)	MCL or TT (mg/L)	Πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από τη μακροπρόθεσμη έκθεση πάνω από το MCL (εκτός εάν ορίζεται ως βραχυπρόθεσμη)	Πηγές ρύπων στο πόσιμο νερό
Σωματίδια άλφα	0	15 πικοκουρίες ανά λίτρο (pCi/L)	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου	Διάβρωση φυσικών κοιτασμάτων ορισμένων ορυκτών που είναι ραδιενεργά και μπορεί να εκπέμπουν μια μορφή ακτινοβολίας γνωστή ως ακτινοβολία άλφα
Σωματίδια βήτα και εκπομποί φωτονίων	0	4 millirems το χρόνο	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου	Διάσπαση φυσικών και ανθρωπογενών κοιτασμάτων ορισμένων ορυκτών που είναι ραδιενεργά και μπορεί να εκπέμπουν μορφές ακτινοβολίας γνωστές ως

				φωτόνια και ακτινοβολία βήτα
Ράδιο 226 & Ράδιο 228 (σε συνδυασμό)	0	5 pCi/L	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου	Διάβρωση φυσικών κοιτασμάτων
Ουράνιο	0	30 ug/L από 12/08/03	Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου, νεφρική τοξικότητα	Διάβρωση φυσικών κοιτασμάτων