



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Π.Μ.Σ. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ & ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

**ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ :
ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ**

ΘΕΟΔΩΡΑΤΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΜΥΤΙΛΗΝΗ 2005



**ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ :
ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ**



**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΛΕΚΚΑΣ ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ**

ΘΕΟΔΩΡΑΤΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΜΥΤΙΛΗΝΗ 2005

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτές τις πρώτες σελίδες της μεταπτυχιακής διατριβής μου θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Θεμιστοκλή Λέκκα για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, προσφέροντάς μου τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Ο κ. Λέκκας, μέσα από τη διδασκαλία, τα παραδείγματα και την μεγάλη αγάπη του για αυτό που επιτελεί, αλλά και για τα άτομα στα οποία απευθύνεται, μου προσέφερε τις βάσεις, κίνησε το ενδιαφέρον μου και με ώθησε να εμβαθύνω σε ένα σημαντικό θέμα, που απασχολεί τόσο την επιστημονική κοινότητα, όσο και το ευρύ κοινό.

Δεν θα παραλείψω να ευχαριστήσω τη λέκτορα του Τμήματος Επιστήμης της Θάλασσας Νικολάου Νατάσσα για την προθυμία και το ενδιαφέρον που έδειξε, προκειμένου να ολοκληρωθεί και να τελειοποιηθεί το παρόν κείμενο. Αυτές οι λίγες γραμμές δεν μπορούν να εκφράσουν την πραγματική ευγνωμοσύνη που τρέφω για το άτομό της, καθώς οι πολύτιμες υποδείξεις και παρατηρήσεις της, οι πληροφορίες όπως και ο χρόνος που μου διέθεσε, αποτέλεσαν βασικό στήριγμα για εμένα, ώστε να ολοκληρώσω τη συγκεκριμένη διατριβή. Ένα απλό ευχαριστώ, ίσως, είναι λίγο για τη βοήθεια που μου πρόσφερε απλόχερα καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που με στήριξαν, τόσο το χρονικό διάστημα που βρισκόμουν μακριά τους, όσο και στην προσπάθειά μου να ολοκληρώσω το παρόν κείμενο. Η αγάπη και η υποστήριξή τους ήταν, είναι και θα εξακολουθεί να είναι το όπλο μου για να συνεχίσω τον διαρκή αγώνα για γνώση. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον αδερφό μου και όσους με βοήθησαν με τις ιδέες τους στην επιμέλεια και τη διαμόρφωση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής.

Μυτιλήνη 2005

Θεοδωράτου Αγγελίνα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ΑΒSTRACT	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΡΟ	4
-----------------------------------	---

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
--------------------	---

1.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ	4
------------------------------	---

1.2.1 ΩΚΕΑΝΟΙ	6
---------------------	---

1.2.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ	6
----------------------	---

1.2.3 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ	7
-----------------------------	---

1.2.4 ΕΞΑΧΝΩΣΗ	7
----------------------	---

1.2.5 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	7
------------------------	---

1.2.6 ΚΑΤΑΚΡΗΝΙΣΜΑΤΑ	8
----------------------------	---

1.2.7 ΠΑΓΕΤΩΝΕΣ	8
-----------------------	---

1.2.8 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	8
---------------------------------	---

1.2.9 ΔΙΗΘΗΣΗ	9
---------------------	---

1.3 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΝΕΡΟΥ	9
------------------------------------	---

1.4 ΟΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	10
--------------------------------	----

1.4.1 ΑΣΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	11
--------------------------	----

1.4.2 ΧΡΗΣΗ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	11
----------------------------------	----

1.4.3 ΧΡΗΣΗ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ	12
-------------------------------	----

1.5 ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	13
---	----

1.5.1 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΑΙΤΙΕΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	13
---	----

1.5.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	14
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΔΑΤΟΣ	15
--------------------------	----

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
--------------------	----

2.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
--------------------------------	----

2.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
-------------------------------	----

2.3.1 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	17
----------------------------	----

2.3.1.1 ΕΣΧΑΡΩΣΗ	17
------------------------	----

2.3.1.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ	17
--------------------------	----

2.3.1.3 ΑΕΡΙΣΜΟΣ	18
------------------------	----

2.3.1.4 ΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	18
-------------------------------------	----

2.3.2 ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ	18
-----------------------	----

2.3.3 ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ	19
-------------------------	----

2.3.4 ΚΑΘΙΖΗΣΗ	19
----------------------	----

2.3.5 ΔΙΗΘΗΣΗ	19
---------------------	----

2.3.6 ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ	20
------------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ	21
------------------	----

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
--------------------	----

3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	22
-----------------------------	----

3.3 ΠΑΘΟΓΟΝΟΙ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ	23
-------------------------------------	----

3.3.1 ΙΟΙ	24
-----------------	----

3.3.2 ΒΑΚΤΗΡΙΑ	25
----------------------	----

3.3.2.1 ΛΕΓΙΟΝΕΛΛΑ	26
3.3.3 ΠΑΡΑΣΙΤΑ	27
3.3.4 ΜΥΚΗΤΕΣ	28
3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ	29
3.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ	29
3.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ ..	30
3.7 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	31
ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	
ΧΛΩΡΙΟ	32
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	32
4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	33
4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΝΑΤΡΙΟΥ	34
4.2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ	34
4.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	35
4.3.1 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	35
4.3.2 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΝΑΤΡΙΟΥ	35
4.3.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ	36
4.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ	36
4.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ	36
4.4.1.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	36
4.4.1.2 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΝΑΤΡΙΟΥ	37
4.4.1.3 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ	37
4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	37
4.5.1 pH	38
4.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	38
4.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	38
4.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	39
4.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	39
4.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	40
4.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ	41
4.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ	41
4.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ	41
4.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	
ΟΖΟΝ	43
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
5.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	44
5.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	44
5.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	46
5.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ	47
5.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ	47
5.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	48
5.5.1 pH	48
5.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	48
5.5.3 ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ	49
5.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	49
5.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ	51
5.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	51
5.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	52
5.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ	52
5.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ	53
5.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ	53
5.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	55
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	55
6.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	55
6.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	56
6.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	56
6.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ	57
6.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ	58
6.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ ..	58
6.5.1 pH	58
6.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	59
6.5.3 ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ	59
6.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	59
6.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	61
6.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	61
6.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	61
6.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ	62
6.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ	62
6.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ	62
6.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο	
ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟ ΚΑΛΙΟ	64
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	64
7.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ	64
7.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	66
7.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ	66
7.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ	66
7.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ	67
7.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ .	67
7.5.1 pH	67
7.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	68
7.5.3 ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ	68
7.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ	68
7.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ	68
7.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	69
7.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	69
7.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ	69
7.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ	69
7.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ	70
7.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο	
ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	71
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	71
8.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ	71
8.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	72
8.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ	74
8.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ	74
8.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ	75
8.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ	75
8.5.1 pH	75
8.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	76

8.5.3 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	76
8.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ	76
8.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ	77
8.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	77
8.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	78
8.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ	79
8.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ	79
8.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ	79
8.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο	
ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (UV)	81
9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	81
9.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	82
9.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	83
9.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	83
9.3.1.1 ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ	83
9.3.2.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ	84
9.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ	85
9.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ	86
9.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	87
9.5.1 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ	87
9.5.2 ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΘΟΛΟΤΗΤΑ	88
9.5.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΛΑΜΠΤΗΡΩΝ	88
9.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	88
9.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	89
9.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	89
9.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	90
9.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ	90
9.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ	90
9.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ	90
9.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο	
ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ	92
10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	92
10.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ	92
10.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	93
10.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ	94
10.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ	94
10.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ	94
10.5.1 ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΗ ΔΡΑΣΗ	95
10.5.2 ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΥΠΕΡΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ – ΟΖΟΝΤΟΣ	95
10.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ	95
10.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ	96
10.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	96
10.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	97
10.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^ο	
ΛΟΙΠΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ	98
11.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	98
11.2 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ	98

11.3 ΙΟΝΤΑ ΑΡΓΥΡΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΚΟΥ	99
11.4 ΙΩΔΙΟ	100
11.5 ΒΡΩΜΙΟ	101
11.6 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	101
11.7 ΒΡΑΣΜΟΣ	102
11.8 ΥΠΕΡΗΧΟΙ	103
11.9 ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗ	103
11.10 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ	104
11.11 ΥΠΕΡΟΞΕΙΚΟ ΟΞΥ	104
11.12 ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12^ο	
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΚΥΡΙΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	105
12.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	105
12.2 ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ	105
12.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	106
12.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ	108
12.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	109
12.5.1 pH	109
12.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	109
12.5.3 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ	109
12.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	110
12.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ	111
12.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	111
12.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	111
12.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ	112
12.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	112
12.8.1 Το ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	112
12.8.2 Το ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΙΟ	112
12.8.3 Το ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	113
12.8.4 Το ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΧΛΩΡΙΟ	
12.8.5 Το ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	113
12.8.6 Το ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	113
12.8.7 Το ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	114
12.8.8 Το ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13^ο	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
13.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	115
13.2 ΧΛΩΡΙΟ	116
13.3 ΟΖΟΝ	118
13.4 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	120
13.5 ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟ ΚΑΛΙΟ	121
13.6 ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	122
13.7 ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	124
13.8 ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	127

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη φύση το νερό περιέχει παθογόνους μικροοργανισμούς που αν δεν απομακρυνθούν πριν την κατανάλωση προκαλούν προβλήματα υγείας σε ανθρώπους και ζώα. Κατά την επεξεργασία του νερού η απολύμανση είναι η διεργασία που καταστρέφει ή αδρανοποιεί αυτούς τους μικροοργανισμούς. Η απολύμανση του νερού πραγματοποιείται κυρίως με την προσθήκη χλωρίου. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια λόγω των επιπτώσεων της χλωρίωσης υπάρχει ενδιαφέρον για τις εναλλακτικές του χλωρίου μεθόδους απολύμανσης, οι οποίες αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Οι κυριότερες εναλλακτικές μέθοδοι απολύμανσης του νερού είναι το όζον, το διοξείδιο του χλωρίου, το υπερμαγγανικό κάλιο, οι χλωραμίνες, η υπεριώδης ακτινοβολία καθώς και οι συνδυασμοί τους. Εκτός από αυτές τις μεθόδους υπάρχουν και λιγότερα διαδεδομένες όπως το διοξείδιο του τιτανίου, η ηλιακή ακτινοβολία και άλλες που περιγράφονται στις παρακάτω σελίδες.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μέχρι τα τέλη του 18^{ου} αιώνα, ο άνθρωπος συνυπάρχει με τη φύση, νιώθει δέος και σεβασμό προς τα φυσικά φαινόμενα και αγωνίζεται να προστατευθεί από τις φυσικές καταστροφές, (καταιγίδες, πλημμύρες, ξηρασίες, σεισμούς, ηφαίστεια κλπ). Ταυτόχρονα με τον αγώνα της επιβίωσης, ο άνθρωπος προσπαθεί να αξιοποιήσει τα περιβαλλοντικά αγαθά όπως το νερό, το έδαφος και τα υπόλοιπα φυσικά αποθέματα προς όφελός του, έχοντας κατανοήσει από πολύ νωρίς ότι η επιβίωση και η ανάπτυξη του στηρίζονται στο περιβάλλον. Η σκέψη και μόνο να δαμάσει τη φύση ή να επέμβει διορθωτικά σ' αυτήν θεωρείται σε όλους τους πολιτισμούς και τις θρησκείες ύβρις και αλαζονεία που επιφέρει τη θεϊκή μίση και την τιμωρία. Ο μύθος του Ηρακλή που καθάρισε την κόπρη του βασιλιά Αυγεία εκτρέποντας προσωρινά τον Αλφειό προκειμένου το ορμητικό νερό να περάσει από τους βασιλικούς στάβλους και να συμπαρασύρει τις τεράστιες ποσότητες των αποβλήτων και των ακαθαρσιών που είχαν γίνει αιτία αρρώστιας, θανάτου και δυστυχίας στο βασίλειο, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της σχέσης του ανθρώπου με τη φύση. Το γεγονός ότι ο μυθικός ήρωας φερόμενος συνετά μετά το πέρας της αποστολής κι αφού έχει εξυγιάνει το βασίλειο, επαναφέρει το ποτάμι στην αρχική του κοίτη επανορθώνοντας την περιβαλλοντική επέμβαση, αποτελεί θετικό παράδειγμα αξιοποίησης της φύσης χωρίς περιβαλλοντικές ή άλλες επιπτώσεις. Αντίθετα, η αλαζονεία του Ίκαρου, που ήθελε να παραβιάσει τους νόμους της φύσης και να πετάξει χωρίς να υπολογίσει τις επιπτώσεις της απόπειράς του, που στην προκειμένη περίπτωση ήταν το λιώσιμο των κέρινων φτερών από το πλησίασμα στον ήλιο και ο θάνατος στο Ικάριο πέλαγος, συμβολίζει την τιμωρία που συνοδεύει κάθε απόπειρα του ανθρώπου να υπερβεί τα όρια και τις δυνατότητες που του ορίζει η φύση. Σ' αυτήν την εποχή ο άνθρωπος λοιπόν συνυπάρχει αρμονικά με τη φύση, υφίσταται όμως τις συνέπειες των εκρήξεων και των ακραίων φαινομένων της, οι οποίες οριοθετούν την ανάπτυξη και την επέκτασή του. Είναι ακόμη η εποχή της αθωότητας.

Η ισορροπία αρχίζει να ανατρέπεται όταν μετά την εποχή του Διαφωτισμού, η επιστημονική γνώση και οι τεχνολογικές εξελίξεις που την ακολούθησαν οδήγησαν τον άνθρωπο σε μια νέα αναπτυξιακή τροχιά και τον πλανήτη σε μια νέα πραγματικότητα, που δεν είχε προηγούμενο στο ιστορικό παρελθόν. Η παραγωγή βιομηχανοποιείται, η τεχνολογία φέρνει επανάσταση στις επικοινωνίες και τις μεταφορές, οι αγροτικές καλλιέργειες μηχανοποιούνται και εντατικοποιούνται και οι φυσικές καταστροφές αρχίζουν να ελέγχονται και να περιορίζονται με την επιστράτευση τεχνολογικών επιτευγμάτων αδιανόητων μέχρι πρότινος, όπως μεγάλα φράγματα πολλαπλού σκοπού και αποστραγγιστικά και εξυγιαντικά έργα μεγάλης

κλίμακας. Η μαθηματική διατύπωση των νόμων της φύσης φέρνει τον άνθρωπο πιο κοντά στην εξήγηση ανεξήγητων φυσικών φαινομένων, ενώ η γνώση της προσομοίωσης της λειτουργίας των φυσικών συστημάτων εισάγει σε μια νέα εποχή, αυτή της δραστηκής επέμβασης στο περιβάλλον. Ότι επακολούθησε δεν είχε καμία σχέση με το παρελθόν καθώς ήταν επηρεασμένο από το τρίπτυχο: θεωρία της εξέλιξης, επιστημονική εξειδίκευση και οικονομική ανάπτυξη. Οι φυσικοί νόμοι ως εξωτερικά όρια και περιορισμοί αντιπαρατέθηκαν στην ανθρώπινη ευφυΐα, στο πνεύμα του μύθου του Προμηθέα. Όπως αποδείχτηκε όμως εκ των υστέρων, η κατανόηση των φυσικών διαδικασιών και μηχανισμών και η προσομοίωση της λειτουργίας των φυσικών συστημάτων δεν οδήγησαν υποχρεωτικά σε θετικά αποτελέσματα, καθώς δεν είχαν μεγάλη σχέση με την αποδοτική και συγχρόνως αποτελεσματική διαχείριση της φύσης.

Οι Ευρωπαίοι στοχαστές του Διαφωτισμού θεωρούσαν την ύπαρξη ενός σταθερού φυσικού περιβάλλοντος ως προϋπόθεση για κάθε είδους πρόοδο του ανθρώπου. Η γη κατά την άποψη της εποχής θα καλλιεργούνταν "σαν ένας κήπος" και η προοπτική της περιβαλλοντικής υποβάθμισης δεν φαίνεται να ήταν στην προβληματική της εποχής. Αυτό που συνέβη λοιπόν είναι ότι δεν εκτιμήθηκε σωστά ούτε το μέγεθος, ούτε και η έκταση των επερχόμενων αλλαγών και επεμβάσεων. Επιπλέον και λόγω έλλειψης προηγούμενης εμπειρίας, δεν εκτιμήθηκε ορθά το γεγονός ότι και ο πλανήτης αποτελεί κι αυτός, τηρουμένων των αναλογιών, ένα φυσικό σύστημα με περιορισμένα όρια και ικανότητες.

Στα τέλη του 20ού αιώνα, η σχέση του ανθρώπου και του πλανήτη που συντηρεί τη ζωή, φαίνεται να έχει υποστεί μεγάλες και συχνά μη αντιστρεπτές αλλαγές. Ουσιαστικά, ο κόσμος του 20^{ου} αιώνα χαρακτηρίζεται από δυναμικές αλλαγές. Ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει αυξηθεί σημαντικά ως αποτέλεσμα της προόδου της τεχνολογίας και της επιστήμης. Η πρόοδος, όμως, του ανθρώπου μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσα από την περιβαλλοντική υποβάθμιση και την καταστροφή όλων όσα στηρίζουν την ανάπτυξη (φυσικοί πόροι, φυσικά αποθέματα, κλίμα). Χαρακτηριστικό παράδειγμα της αλαζονικής αυτής συμπεριφοράς αποτελεί η ρύπανση και μόλυνση των επιφανειακών, των υπόγειων νερών και της θάλασσας.

Η συνηθέστερη και σοβαρότερη μορφή ρύπανσης είναι η οργανική, εξαιτίας της απόρριψης στο περιβάλλον πλήθους οργανικών ουσιών με δυσμενείς επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, όπως μολύνσεις, αποοξυγόνωση, ευτροφισμό, αλατότητα, τοξικές επιδράσεις, πρόκληση ασθενειών, που μεταφέρονται στον άνθρωπο άμεσα με το νερό, ή έμμεσα, όταν καταναλώνει μολυσμένους υδρόβιους οργανισμούς. Η μείωση της ρύπανσης, κατά τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας, είναι γνωστή σαν αυτοκαθαρισμός. Όταν, όμως, ο χρόνος για να πραγματοποιηθεί δεν είναι αρκετός,

τότε καθίσταται απαραίτητη η εφαρμογή μεθόδων επεξεργασίας, οι οποίες θα επιτρέψουν την ασφαλή χρήση του νερού.

Οι μέθοδοι επεξεργασίας ύδατος περιλαμβάνουν ορισμένα στάδια ανάλογα με την ποιότητα του προς επεξεργασία νερού και τη μετέπειτα χρήση του. Μέρος των διεργασιών αυτών είναι η απολύμανση του νερού που αποτελεί το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Ανεξάρτητα, όμως, από τη λήψη μέτρων σχετικά με την ποιότητα του νερού, αποτελεί επιτακτική ανάγκη η δημιουργία υδατικής ατομικής συνείδησης, η οποία θα υποδεικνύει ότι το νερό είναι κληρονομιά και όχι εμπορευματικό προϊόν και υποχρεούμαστε να το παραδώσουμε ποιοτικό στις επόμενες γενεές.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΡΟ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό είναι θεμελιώδες συστατικό της ζωής και ουσιαστικό συστατικό για οικονομικοκοινωνικές δραστηριότητες. Αποτελεί τη βάση για τη γεωργία και είναι πρωταρχικό στοιχείο για τη βιομηχανία, προϊόν κατανάλωσης για την ανθρωπότητα, μέθοδος παραγωγής ενέργειας, όμως είναι αποδέκτης τόσο της οικιακής όσο και της βιομηχανικής ρύπανσης (Quevauviller 2002; Young et al., 1994).

1.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της Γης, κάτω και πάνω απ' αυτή (Εικόνα 1). Το νερό της Γης είναι πάντα σε κίνηση και πάντα σε αλλαγή, από την υγρή μορφή στην αέρια ή σε πάγο ξανά και αντίστροφα. Ο κύκλος του νερού λειτουργεί εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια. Η ζωή στη Γη εξαρτάται απ' αυτόν. Η Γη θα ήταν πολύ αφιλόξενο μέρος για τη ζωή χωρίς τον υδρολογικό κύκλο.

Σαν κύκλος που είναι, ο υδρολογικός κύκλος δεν έχει αρχή, αλλά λαμβάνεται σαν αρχή του η θάλασσα. Ο ήλιος, που κινεί τον κύκλο του νερού, θερμαίνει το νερό στη θάλασσα (στους ωκεανούς) το οποίο εν μέρει εξατμίζεται και ανυψώνεται με τη μορφή ατμού στον αέρα. Νερό εξατμίζεται ακόμα από τις λίμνες, τα ποτάμια και το έδαφος. Η διαπνοή των φυτών είναι μια ακόμη λειτουργία που αποδίδει υδρατμούς στην ατμόσφαιρα. Η εξάτμιση και διαπνοή από την ξηρά συχνά δεν διακρίνονται και έτσι αναφερόμαστε στην εξατμισοδιαπνοή. Μια μικρή ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την εξάχνωση, μέσω της οποίας μόρια από πάγους και χιόνια μετατρέπονται απευθείας σε υδρατμούς χωρίς να περάσουν από την υγρή μορφή.

Ανοδικά ρεύματα αέρα ανεβάζουν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι μικρότερες πιέσεις που επικρατούν έχουν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας. Επειδή όμως σε χαμηλή θερμοκρασία ο αέρας δεν μπορεί πια να συγκρατεί όλη τη μάζα των υδρατμών, ένα μέρος τους συμπυκνώνεται και σχηματίζει τα σύννεφα. Τα ρεύματα του αέρα κινούν τα σύννεφα γύρω απ' την υδρόγειο. Παράλληλα τα σταγονίδια νερού που σχηματίζουν τα σύννεφα

συγκροούνται και μεγαλώνουν, και τελικά πέφτουν απ' τον ουρανό ως κατακρημνίσματα, η συχνότερη μορφή των οποίων είναι η βροχή. Μια μορφή κατακρημνίσματος είναι το χιόνι, το οποίο όταν συσσωρεύεται σχηματίζει πάγους και παγετώνες. Σε σχετικά θερμότερα κλίματα, όταν έρχεται η άνοιξη, το χιόνι λιώνει και το ξεπαγωμένο νερό ρέει, σχηματίζοντας την απορροή από λιώσιμο του χιονιού. Η μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνισμάτων πέφτει απευθείας στους ωκεανούς.



Εικόνα 1 : Υδρολογικός Κύκλος, Πηγή : www.usgs.gov

Από την ποσότητα που πέφτει στη στεριά, ένα σημαντικό μέρος καταλήγει και πάλι στους ωκεανούς ρέοντας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως επιφανειακή απορροή. Η μεγαλύτερη ποσότητα της επιφανειακής απορροής μεταφέρεται στους ωκεανούς από τα ποτάμια, με τη μορφή ροής σε υδατορεύματα. Η επιφανειακή απορροή μπορεί ακόμη να καταλήξει στις λίμνες, που αποτελούν, μαζί με τους ποταμούς, τις κυριότερες αποθήκες γλυκού νερού.

Ωστόσο, το νερό των κατακρημνισμάτων δεν ρέει αποκλειστικά μέσα στους ποταμούς. Κάποιες ποσότητες διαπερνούν το έδαφος με τη λειτουργία της διήθησης και σχηματίζουν το υπόγειο νερό. Μέρος του νερού αυτού μπορεί να ξαναβρεί το δρόμο του προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (και τους ωκεανούς) ως εκφόρτιση υπόγειου νερού. Όταν βρίσκει διόδους προς της επιφάνεια της γης εμφανίζεται με τη μορφή πηγών. Ένα άλλο μέρος του υπόγειου νερού πηγαίνει βαθύτερα και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν τεράστιες ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακόμα και το νερό αυτό όμως συνεχίζει να κινείται και με τη πάροδο του χρόνου μέρος του ξαναπαίρνει στους ωκεανούς όπου ο κύκλος του νερού "τελειώνει" και "ξεκινάει".

1.2.1 ΩΚΕΑΝΟΙ

Το περισσότερο νερό από αυτό που βρίσκεται σε κίνηση στον υδρολογικό κύκλο είναι αποθηκευμένο στη θάλασσα, κυρίως στους ωκεανούς. Από τα 1.386.000.000 κυβικά χιλιόμετρα του νερού στη Γη, περίπου 1.338.000.000 κυβικά χιλιόμετρα (το 96,5%) είναι αποθηκευμένα στους ωκεανούς. Οι ωκεανοί παρέχουν περίπου το 88% του εξατμιζόμενου νερού που μπαίνει στον υδρολογικό κύκλο.

Η ποσότητα του νερού στους ωκεανούς αλλάζει κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων. Κατά τη διάρκεια πιο ψυχρών κλιματικών περιόδων, σχηματίζονται περισσότερα παγόβουνα και παγετώνες με αποτέλεσμα να υπάρχει λιγότερο νερό στους ωκεανούς. Το αντίθετο συμβαίνει στις θερμές κλιματικές περιόδους. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας εποχής των παγετώνων, η στάθμη των ωκεανών ήταν περίπου 122 μέτρα χαμηλότερη της σημερινής. Πριν από περίπου τρία εκατομμύρια χρόνια, όταν η Γη ήταν πιο θερμή, η στάθμη των ωκεανών μπορεί να ήταν μέχρι και 50 μέτρα πιο ψηλά από ότι σήμερα.

1.2.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Η εξάτμιση από τη θάλασσα είναι ο κύριος τρόπος με τον οποίο το νερό περνά στην ατμόσφαιρα. Η μεγάλη επιφάνεια των ωκεανών (πάνω από το 70% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από ωκεανούς) επιτρέπει μεγάλης κλίμακας εξάτμιση. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ποσότητα νερού που εξατμίζεται είναι ίση με τη ποσότητα του νερού που επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης με τη μορφή κατακρημνισμάτων. Βέβαια, η κατανομή των ποσοτήτων που εξατμίζονται και ξαναπέφτουν μεταβάλλεται γεωγραφικά. Έτσι, στη θάλασσα η εξάτμιση υπερτερεί της βροχής ενώ στη στεριά συμβαίνει το αντίθετο. Το περισσότερο νερό που εξατμίζεται από τη θάλασσα, ξαναπέφτει σε αυτή και μόνο περίπου το 10% του νερού αυτού μεταφέρεται πάνω από τη στεριά και πέφτει με τη μορφή κατακρημνισμάτων. Από τη στιγμή που εξατμίζεται, ένα μόριο νερού μένει στην ατμόσφαιρα για 10 περίπου ημέρες κατά μέσο όρο.

1.2.3 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

Η εξατμοδιαπνοή ορίζεται ως το νερό που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα ως εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και ως διαπνοή από τα φύλλα των φυτών. Το νερό αυτό μπορεί να είναι υπόγειο που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους μέσω τριχοειδών εδαφικών σωληνίσκων και στα φύλλα των φυτών μέσω του τριχοειδούς αγγειακού συστήματος των φυτών.

1.2.4 ΕΞΑΧΝΩΣΗ

Η εξάχνωση είναι η μετατροπή του νερού από τη στερεά μορφή του χιονιού ή του πάγου σε υδρατμό χωρίς να μεσολαβήσει η υγρή μορφή, χωρίς δηλαδή να λιώσει προηγουμένως.

Η εξάχνωση πραγματοποιείται πιο εύκολα όταν υπάρχουν συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, όπως ξηρή ατμόσφαιρα και άνεμος. Περισσότερο συμβαίνει σε μεγάλα υψόμετρα, όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι σχετικά μικρή. Για να συμβεί εξάχνωση χρειάζεται να απορροφηθεί ενέργεια, όπως συμβαίνει και με την εξάτμιση, και έτσι το φαινόμενο ευνοείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι, θεωρείται ότι η νότια πλευρά του Έβερεστ, στην οποία κυριαρχούν η χαμηλή θερμοκρασία, οι ισχυροί άνεμοι και η χαμηλή πίεση είναι ιδανικό μέρος για την εκδήλωση του φαινομένου σε μια ηλιόλουστη μέρα.

1.2.5 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η ατμόσφαιρα δεν είναι η μεγαλύτερη αποθήκη για το νερό, αλλά μέσω αυτής το νερό μετακινείται σε παγκόσμια κλίμακα. Υπάρχει πάντα νερό στην ατμόσφαιρα. Τα σύννεφα είναι η πιο ορατή μορφή ατμοσφαιρικού νερού αλλά ακόμα και ο καθαρός αέρας περιέχει νερό – με τη μορφή υδρατμών που δεν είναι ορατοί. Αν όλο το νερό της ατμόσφαιρας ήταν σε υγρή μορφή τότε ο όγκος του στο σύνολο της ατμόσφαιρας, ανά πάσα στιγμή, θα ήταν περίπου 12.900 κυβικά χιλιόμετρα. Αν όλο το νερό της ατμόσφαιρας έπεφτε την ίδια στιγμή θα κάλυπτε το έδαφος με νερό σε ύψος 2,5 εκατοστών.

1.2.6 ΚΑΤΑΚΡΗΝΙΣΜΑΤΑ

Τα κατακρημνίσματα είναι η πτώση του νερού από τα σύννεφα, με τη μορφή βροχής, χιονόνερου, χιονιού ή χαλαζιού. Αποτελούν τον κύριο τρόπο με τον οποίο το νερό της ατμόσφαιρας επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης. Η συχνότερη μορφή κατακρημνισμάτων είναι η βροχή. Δεν πέφτουν οι ίδιες ποσότητες κατακρημνισμάτων παντού στο κόσμο, ούτε καν μέσα σε μια χώρα ή ακόμα και σε μια πόλη.

1.2.7 ΠΑΓΕΤΩΝΕΣ

Το νερό που βρίσκεται αποθηκευμένο για μεγάλες χρονικές περιόδους στον πάγο, το χιόνι και τους παγετώνες, αποτελεί και αυτό μέρος του υδρολογικού κύκλου. Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του πάγου στη Γη, περίπου το 90%, βρίσκεται στην Ανταρκτική, ενώ οι πάγοι της Γροιλανδίας περιέχουν το υπόλοιπο 10% της παγκόσμιας μάζας πάγου.

1.2.8 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ

Μέρος των κατακρημνισμάτων που πέφτουν πάνω στο έδαφος, κυλούν επιφανειακά προς τα ποτάμια, σχηματίζοντας την επιφανειακή απορροή. Στην πραγματικότητα τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα, καθώς τα ποτάμια κερδίζουν και χάνουν νερό μέσω του εδάφους.

Συνήθως, τμήμα της βροχής που πέφτει, ποτίζει το έδαφος, αλλά όταν το έδαφος είναι κορεσμένο ή αδιαπέρατο, το νερό αρχίζει να ρέει προς τα χαμηλά με τη μορφή απορροής.

Όπως συμβαίνει με όλα τα μέρη του υδρολογικού κύκλου, η σχέση μεταξύ των κατακρημνισμάτων και της επιφανειακής απορροής μεταβάλλεται στο χρόνο και το χώρο. Παρόμοιες καταιγίδες σε μια ζούγκλα και σε μια έρημο προκαλούν διαφορετικές μορφές επιφανειακής απορροής. Η απορροή εξαρτάται τόσο από μετεωρολογικούς παράγοντες, όσο και από τη γεωλογία και το ανάγλυφο της περιοχής. Μόνο το ένα τρίτο περίπου του όγκου των κατακρημνισμάτων που πέφτει πάνω στο έδαφος, απορρέει σε υδατορεύματα και γυρίζει στη θάλασσα. Τα υπόλοιπα δύο τρίτα, εξατμίζονται, ή διηθούνται προς τα υπόγεια νερά. Τμήμα της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιείται επίσης από τον άνθρωπο για δικές του χρήσεις.

1.2.9 ΔΙΗΘΗΣΗ

Παντού στον κόσμο, τμήμα του νερού που πέφτει ως βροχή ή χιόνι, διηθείται μέσα στο έδαφος. Η ποσότητα του νερού που διηθείται εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων.

Τμήμα του νερού που διηθείται μένει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μπορεί να καταλήξει τελικά σε ένα υδατόρευμα. Ένα άλλο τμήμα του νερού, μπορεί να διηθηθεί πιο βαθιά και να τροφοδοτήσει υπόγειους υδροφορείς. Αν οι υδροφορείς είναι κοντά στην επιφάνεια και αρκετά πορώδεις, ώστε να επιτρέπουν τη γρήγορη κίνηση του νερού, είναι δυνατή η κατασκευή πηγαδιών και η άντληση νερού για διάφορες ανάγκες. Το νερό μπορεί να ταξιδέψει μεγάλες αποστάσεις ή να μείνει αποθηκευμένο υπόγεια για μεγάλα χρονικά διαστήματα πριν επανέλθει στην επιφάνεια μπαίνοντας σε ποτάμια ή τη θάλασσα (www.usgs.gov).

1.3 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΝΕΡΟΥ

Το μεγαλύτερο μέρος της γης αποτελείται από νερό, υπάρχει πολύ περισσότερο νερό από ότι έδαφος. Περίπου 70% της γήινης επιφάνειας καλύπτεται από νερό. Η συνολική παροχή νερού στον κόσμο είναι 1.400.000.000 km³ (www.lennteth.com). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1) παρουσιάζεται η κατανομή του νερού της Γης. Παρατηρούμε πως από τα συνολικά 1.386 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα του νερού

στη Γη περισσότερο από 96% είναι αλμυρό. Επίσης, το 68% του γλυκού νερού είναι δεσμευμένο σε πάγο και παγετώνες. Ακόμα ένα 30% του γλυκού νερού βρίσκεται σε υπόγειους υδροφορείς. Το επιφανειακό γλυκό νερό που βρίσκεται σε ποτάμια και λίμνες είναι συνολικά 93.100 κυβικά χιλιόμετρα και αντιπροσωπεύει περίπου το 1/700 του 1% του συνολικού νερού στη Γη. Παρά ταύτα, τα ποτάμια και οι λίμνες είναι οι βασικές πηγές νερού για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών (www.usgs.gov).

Πίνακας 1.1: Παγκόσμια Κατανομή Νερού, Πηγή : www.usgs.gov

ΜΟΡΦΗ ΝΕΡΟΥ	ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ(km ³)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ
Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι	1.338.000.000	--	96,5
Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι	24.064.000	68,7	1,74
Υπόγειο Νερό	23.400.000	--	1,7
Γλυκό	10.530.000	30,1	0,76
Αλμυρό	12.870.000	--	0,94
Εδαφική Υγρασία	16.500	0,05	0,001
Εδαφικός πάγος & Μόνιμα παγωμένο έδαφος	300.000	0,86	0,022
Λίμνες	176.400	--	0,013
Γλυκές	91.000	0,26	0,007
Αλμυρές	85.400	--	0,006
Ατμόσφαιρα	12.900	0,04	0,001
Έλη	11.470	0,03	0,0008
Ποταμοί	2.120	0,006	0,0002
Βιολογικό Νερό	1.120	0,003	0,0001
Σύνολο	1.386.000.000		100

1.4 ΟΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Το νερό είναι ένα βασικό συστατικό του περιβάλλοντος. Μέσω του υδρολογικού κύκλου είναι απαραίτητο για την ύπαρξη και ανάπτυξη όλων των ζωντανών οργανισμών πάνω στη Γη. Οι συνθήκες διαβίωσης συνεχώς βελτιώνονται από τη στιγμή που ο κάθε άνθρωπος έχει εξασφαλίσει τις απαραίτητες ποσότητες ύδατος για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών του. Από την αρχή της ιστορίας, οι ανθρώπινες δραστηριότητες στηρίζονται στην ύπαρξη του νερού και με το πέρασμα των χρόνων γίνεται όλο και πιο απαραίτητο. Το φαγητό που τρώμε, η ενέργεια που καταναλώνουμε και άλλα πολλά προϊόντα και υπηρεσίες στηρίζονται σε αυτό το

πολύτιμο υγρό (Young et al., 1994). Οι βασικότερες χρήσεις του ύδατος περιγράφονται παρακάτω.

1.4.1 ΑΣΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ

Η αστική χρήση του ύδατος συσχετίζεται άμεσα με την ποσότητα ύδατος που χρησιμοποιείται από τους πληθυσμούς στις πόλεις, στις κωμοπόλεις, στα κτήματα και στις δημόσιες και ιδιωτικές επιχειρήσεις. Η ποσότητα αυτή περιλαμβάνει επίσης το νερό για τη βιομηχανία που καλύπτει άμεσα τις ανάγκες των αστικών πληθυσμών. Σε πολλές πόλεις, μια σημαντική ποσότητα ύδατος χρησιμοποιείται για το πότισμα των κήπων.

Ο όγκος του ύδατος που καταναλώνεται σε μια πόλη εξαρτάται από το μέγεθος του αστικού πληθυσμού και από άλλους παράγοντες, όπως η έκταση των δικτύων σωληνώσεων για τον ανεφοδιασμό και την αποχέτευση. Επίσης, εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες. Σε μεγάλες πόλεις, η κατανάλωση ύδατος ανέρχεται σε 300-600 λίτρα ανά ημέρα ανά άτομο.

Μέχρι το τέλος αυτού του αιώνα, η κατανάλωση ύδατος αναμένεται για να αυξηθεί σε 500-1000 λίτρα ανά ημέρα στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Σε αντίθεση με τις γεωργικές χώρες που βρίσκονται στην Ασία, την Αφρική και τη λατινική Αμερική, η αστική κατανάλωση ύδατος είναι μόνο 50-100 λίτρα ανά ημέρα ανά άτομο. Σε ορισμένες περιοχές με ανεπαρκείς υδάτινους πόρους, δεν είναι παραπάνω από 10-40 λίτρα ανά ημέρα ανά άτομο.

1.4.2 ΧΡΗΣΗ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Το νερό στη βιομηχανία χρησιμοποιείται για την ψύξη και την πλύση των βιομηχανικών εξοπλισμών και μερικές φορές ως πρώτη ύλη για τη σύνθεση ενός προϊόντος. Η θερμική και ατομική παραγωγή ενέργειας αποτελούν τους βασικούς 'χρήστες' ύδατος στη βιομηχανία. Ο όγκος του ύδατος που χρησιμοποιείται διαφοροποιείται ανάμεσα στους κλάδους της βιομηχανίας και επίσης ανάμεσα στα είδη παραγωγής και ανάλογα με την τεχνολογία της διαδικασίας κατασκευής. Εξακολουθεί να εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες δεδομένου ότι η ποσότητα ύδατος που προορίζεται για βιομηχανική χρήση φαίνεται να είναι αρκετά λιγότερη σε στις βόρειες απότι νότιες περιοχές όπου επικρατούν υψηλότερες θερμοκρασίες.

Εκτός από την παραγωγή ενέργειας, το νερό χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας πετρελαίου, στα μεταλλουργεία, στη βιομηχανία χαρτιού και στην κατασκευή μηχανημάτων. Το σύστημα παροχής νερού καθορίζει σε μεγάλη κλίμακα τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της χρήσης του ύδατος στη βιομηχανία.

Η χρήση του νερού στη βιομηχανία αποτελεί την κύρια αιτία ρύπανσης των υδάτων στον κόσμο. Αυτό εξηγείται από την ταχεία βιομηχανική ανάπτυξη διαφορετικών χωρών και επιδεινώνεται από το γεγονός ότι οι ποσότητες νερού που χρησιμοποιούνται αποβάλλονται ως υγρά απόβλητα στους φυσικούς πόρους, ως επί το πλείστον μη επεξεργασμένες ή μερικώς επεξεργασμένες. Για να αντιμετωπιστούν τέτοια προβλήματα ρύπανσης, πολλές χώρες έχουν λάβει μέτρα για να μειώσουν τη βιομηχανική χρήση ύδατος και τις αποθέσεις λυμάτων. Από τη δεκαετία του 1980, έχει παρατηρηθεί μία τάση για σταθεροποίηση και σε ορισμένες περιπτώσεις μείωση στις απαιτήσεις ύδατος για βιομηχανική χρήση.

1.4.3 ΧΡΗΣΗ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

Η άρδευση των εδαφών πραγματοποιείται εδώ και χιλιετίες, ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή τροφίμων για την ανθρωπότητα, αλλά η ραγδαία αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων πραγματοποιήθηκε κυρίως κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, όπου η άρδευση αποτελεί την κύρια χρήση ύδατος στις περισσότερες χώρες. Υπολογίζεται πως η γεωργία είναι τώρα ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού, αφού καλύπτει περίπου το 80% της συνολικής χρήσης ύδατος.

Αυτή τη στιγμή, περίπου 15% όλων των καλλιεργημένων εκτάσεων αρδεύονται. Η παραγωγή των τροφίμων από τις αρδευόμενες περιοχές αντιστοιχεί σχεδόν στη μισή συνολική συγκομιδή. Στο σύγχρονο κόσμο, η αύξηση του πληθυσμού προχωρά με γρήγορους ρυθμούς, ενώ συγχρόνως υπάρχει οξύ έλλειμμα τροφίμων στα δύο τρίτα του παγκόσμιου πληθυσμού. Η άρδευση, επομένως, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της αποδοτικότητας και της παραγωγής της καλλιέργειας. Η αρδευόμενη καλλιέργεια αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται εντατικά στο μέλλον, κυρίως σε εκείνες τις χώρες με εξαιρετικά ταχεία ανάπτυξη πληθυσμών (www.unesco.org).

Παρόλη τη μεγάλη σημασία του νερού για τον άνθρωπο, καθώς αποτελεί βασικό στοιχείο για την επιβίωσή του και την ευημερία του, οι υδάτινοι πόροι συχνά ρυπαίνονται ή μολύνονται από τον ίδιο τον άνθρωπο και τις δραστηριότητες του, χωρίς να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα.

1.5 ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Τα περιστατικά ρύπανσης και μόλυνσης του πόσιμου νερού σήμερα δεν είναι ιδιαίτερος σπάνια, ωστόσο συνήθως δεν παρατηρούνται τόσο υψηλά επίπεδα ρύπανσης/μόλυνσης, ώστε να αποτελούν άμεσο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Εντούτοις, καθώς η ανάπτυξη των σύγχρονων κοινωνιών είναι έντονη, υπάρχει ένας

αριθμός δραστηριοτήτων που μπορούν να υποβαθμίσουν την ποιότητα του προς κατανάλωση νερού. Οι ρυπαντές μπορούν να εισέλθουν στο νερό ως αποτέλεσμα των ανθρώπινων και ζωικών δραστηριοτήτων, ή επειδή απλά αυτοί υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον (U.S EPA., 2003b). Ωστόσο, η ρύπανση που προκαλείται από φυσικά αίτια είναι περιορισμένη σε μέγεθος σε σχέση με εκείνη που προκαλείται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (Liu et al., 2000).

1.5.1 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΑΙΤΙΕΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι κυριότερες ανθρώπινες δραστηριότητες που προκαλούν ρύπανση ή/και μόλυνση των υδάτινων πόρων είναι οι απορρίψεις αποβλήτων, η μεταφορά και αποθήκευση εμπορικών προϊόντων, οι μεταλλευτικές και αγροτικές εργασίες και απλές καθημερινές λειτουργίες (Liu et al., 2000).

Οι απορρίψεις αποβλήτων, τόσο στερεών όσο και υγρών, είναι η κυριότερη πηγή μόλυνσης και ρύπανσης των υδάτινων πόρων (Liu et al., 2000). Βακτήρια, ιοί και νιτρικά άλατα από σηπτικές δεξαμενές και βόθρους που περιέχουν ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα, καθώς και χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια μηχανών, χρώματα, διαλυτικά χρωμάτων που προέρχονται από οικιακά απόβλητα, εισέρχονται στο νερό. Επίσης, οι απορρίψεις αποβλήτων βιομηχανικών εγκαταστάσεων, σταθμών φυσικού αερίου, εγκαταστάσεων επεξεργασίας ύδατος και η διαρροή υπόγειων δεξαμενών αποθήκευσης συμβάλλουν στην είσοδο χημικών ουσιών στους υδάτινους αποδέκτες (Liu et al., 2000; U.S EPA., 2003b). Ακόμη, η διάθεση στερεών αποβλήτων επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα του νερού, καθώς παρατηρούνται υψηλά επίπεδα νιτρικών, αλκαλικότητας και τοξικών ουσιών. Επίσης, μόλυβδος και χαλκός που προέρχονται από τα υλικά υδραυλικών εγκαταστάσεων εισέρχονται στο πόσιμο νερό (U.S EPA., 2003b). Τέλος, η απορροή που προέρχεται από το αστικό οδικό δίκτυο είναι βασικός παράγοντας μόλυνσης κυρίως των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων (Liu et al., 2000).

1.5.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε, η μόλυνση και η ρύπανση του νερού οφείλονται και σε φυσικά αίτια, σε μικρότερη όμως κλίμακα. Οι συνηθέστερες αιτίες είναι μικροοργανισμοί που προϋπάρχουν στη φύση και στο έδαφος, ραδιονουκλεΐδια που κατά κανόνα προέρχονται από υποκείμενους βράχους, νιτρικά και νιτρώδη άλατα και γενικότερα ενώσεις αζώτου που βρίσκονται μέσα στο χώμα, βαριά μέταλλα που προέρχονται από βράχους κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και περιέχουν αρσενικό, κάδμιο, χρώμιο, μόλυβδο, σελήνιο και φθορίδιο (U.S EPA., 2003b).

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΔΑΤΟΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής προμήθεια πόσιμου νερού είναι βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη των ανθρώπινων κοινωνιών. Ωστόσο στη φύση δεν υπάρχει φυσικά καθαρό νερό. Καθώς το νερό ρέει στα ποτάμια, αποθηκεύεται στις λίμνες και διέρχεται μέσα από το έδαφος εμπλουτίζεται με ουσίες που το καθιστούν ακατάλληλο για κατανάλωση (U.S EPA., 1999d). Ωστόσο, το νερό έχει την ιδιότητα να αυτοκαθαρίζεται. Οι ρυπαντικές ουσίες απομακρύνονται μέσω βιολογικών διεργασιών, όπως η διήθηση που πραγματοποιείται καθώς το νερό διέρχεται μέσα από στρώματα εδάφους. Εντούτοις, η ικανότητα αυτή του νερού δεν είναι αρκετά δυνατή, ώστε να παράγει νερό ασφαλές για κατανάλωση, καθώς ρυπαντικές ουσίες εισέρχονται στο νερό εδώ και δεκαετίες (www.lenntech.com).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 η διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων ήταν η βασική αιτία ρύπανσης του νερού. Παρόλο τα μέτρα που πάρθηκαν για την αποφυγή της ρύπανσης του νερού, η επεξεργασία ύδατος είναι επιτακτική ανάγκη, ώστε να διασφαλιστούν τα επίπεδα ποιότητας (www.lenntech.com).

2.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η επιλογή του συστήματος επεξεργασίας είναι πολύπλοκη διαδικασία. Τα στάδια διαφοροποιούνται από μονάδα σε μονάδα επεξεργασίας, καθώς η επιλογή τους εξαρτάται από τα νομικά πλαίσια για την ποιότητα νερού, τις απαιτήσεις των καταναλωτών και το κόστος. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των σταδίων επεξεργασίας του νερού είναι :

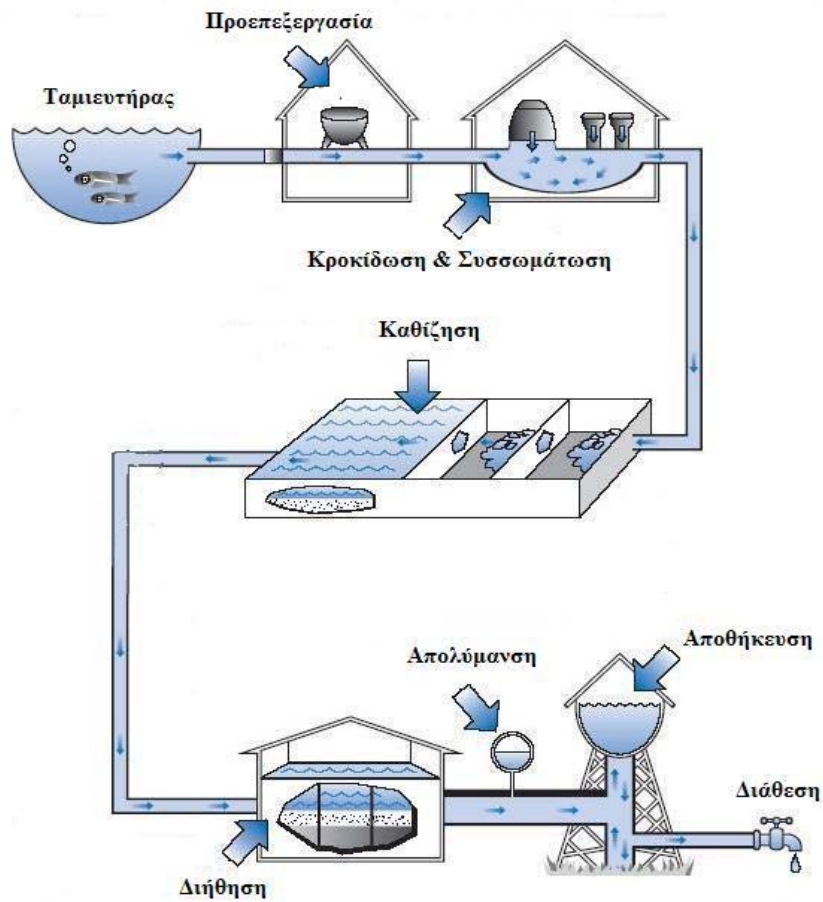
- η απομάκρυνση ρυπαντών
- η ποιότητα του προς επεξεργασία νερού
- η αξιοπιστία της μονάδας
- οι υπάρχουσες συνθήκες
- η συμβατότητα με το περιβάλλον
- το κόστος και
- η ευελιξία της μονάδας (AWWA, 1999).

2.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα στάδια επεξεργασίας του προς κατανάλωση νερού ποικίλουν ανάλογα την πηγή προέλευσης και την ποιότητά του. Γενικότερα τα επιφανειακά ύδατα απαιτούν

μεγαλύτερη επεξεργασία από τα υπόγεια ύδατα, καθώς εκτίθενται άμεσα στην ατμόσφαιρα και στις κατακρημνίσεις (U.S EPA., 2003b).

Κατά την επεξεργασία του νερού χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός διαδικασιών για την απομάκρυνση των ρυπαντών από αυτό. Οι πιο διαδεδομένες διαδικασίες επεξεργασίας είναι οι εξής : προεπεξεργασία, κροκίδωση, συσσωμάτωση, καθίζηση, διήθηση και απολύμανση, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Σε ορισμένες μονάδες επεξεργασίας νερού χρησιμοποιείται η ιοντοεναλλαγή και η προσρόφηση. Γενικότερα η επιλογή των διεργασιών εξαρτάται από την ποιότητα του προς επεξεργασία νερού (U.S EPA., 2003b).



Σχήμα 2.1 : Επεξεργασία Ύδατος, Πηγή : U.S EPA., 2003b

2.3.1 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Συνήθως κατά την επεξεργασία του νερού δεν απαιτείται προεπεξεργασία (Kiely, 1997). Ωστόσο, το ακατέργαστο επιφανειακό νερό που προέρχεται από ποταμούς ή από ταμιευτήρες περιέχει πολλές φορές αιωρούμενα ή επιπλέοντα στερεά που πρέπει να απομακρυνθούν πριν το νερό εισέλθει στην κύρια επεξεργασία (Λέκκας, 1996). Τα στάδια προεπεξεργασίας είναι κυρίως :

- ο εσχάρωση
- ο αποθήκευση
- ο αερισμός και
- ο χημική προεπεξεργασία (Kiely, 1997).

Οι διεργασίες αυτές πραγματοποιούνται κυρίως για την προστασία των αντλητικών συγκροτημάτων και του δικτύου παροχής και για την αποφυγή εμφράξεων (Λέκκας, 1996).

2.3.1.1 ΕΣΧΑΡΩΣΗ

Για την εσχάρωση χρησιμοποιούνται συνηθισμένες σχάρες με διάμετρο ράβδου 25mm και διάκενα μεταξύ τους 100mm. Κατά αυτόν τον τρόπο μεγάλου μεγέθους επιπλέοντα στερεά δεν εισέρχονται στη μονάδα επεξεργασίας. Η ταχύτητα ροής μέσω των εσχάρων είναι περίπου 0,5m/s. Οι εσχάρες είναι δυνατόν να καθαρίζονται μηχανικά είτε χειρονακτικά (Kiely, 1997).

Εκτός από τις εσχάρες σε ορισμένες μονάδες χρησιμοποιούνται μικροεσχάρες των οποίων το άνοιγμα κυμαίνεται μεταξύ 20 και 40 μm . Τέτοιες διατάξεις χρησιμοποιούνται κυρίως στην επεξεργασία μη ρυπασμένου και μερικώς χρωματισμένου νερού (Kiely, 1997).

2.3.1.2 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Όταν το νερό προέρχεται από ποτάμι, είναι συνετό να αποθηκεύεται. Οι δεξαμενές λειτουργούν και ως προστατευτικό μέτρο στην περίπτωση επεισοδίου μόλυνσης/ρύπανσης. Επίσης η ύπαρξη αποθεμάτων εξαλείφει την περίπτωση έλλειψης νερού σε περιόδους χαμηλών ροών. Τέλος η αποθήκευση πρέπει να διαρκεί 7 – 10 μέρες, ώστε να επιτυγχάνεται η θανάτωση των μικροοργανισμών από την ηλιακή ακτινοβολία (Kiely, 1997).

2.3.1.3 ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Αερισμός είναι η παροχή οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στο νερό για τη βελτίωση του πόσιμου νερού. η διεργασία αυτή πραγματοποιείται κυρίως στην επεξεργασία των υπογειών υδάτων. Ο αερισμός πραγματοποιείται κυρίως για :

- την αποδέσμευση του υδρόθειου (H_2S) που ενδεχομένως να δημιουργεί δυσάρεστη οσμή και γεύση
- την αποδέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) το οποίο προκαλεί διάβρωση σε επιφάνειες από οπλισμένο σκυρόδεμα
- την αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου (O_2) για την εξάλειψη γεύσεων λόγω των φωτοσυνθετικών αλγών και της ύπαρξης σιδήρου και μαγνησίου στο νερό (Kiely, 1997).

2.3.1.4 ΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η χημική προεπεξεργασία πραγματοποιείται κυρίως για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συστατικών που περιέχονται στο νερό, όπως άλγη και χρώματα. Η χημική προεπεξεργασία έχει μεγαλύτερο κόστος από την μετέπειτα χημική επεξεργασία. Στη χημική προεπεξεργασία απαιτούνται υψηλές συγκεντρώσεις χημικών, καθώς μέρος των χημικών καλύπτεται ή απορροφάται από τη θολότητα. Οι βασικότερες διεργασίες της χημικής προεπεξεργασίας είναι η προχλωρίωση και ο ενεργός άνθρακας (Kiely, 1997).

2.3.2 ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ

Μετά την εσχάρωση το νερό περιέχει ουσίες σε αιώρηση ή διάλυση. Λόγω του μικρού μεγέθους των αιωρούμενων στερεών, η ταχύτητα καθίζησης τους είναι πάρα πολύ μικρή. Αύξηση του μεγέθους τους συμβάλλει στην αύξηση της ταχύτητας καθίζησης. Ωστόσο λόγω του αρνητικού φορτίου τους δεν είναι δυνατόν να δημιουργήσουν συσσωματώματα (Kiely, 1997). Για αυτό το λόγο η αποσταθεροποίηση των αιωρημάτων είναι απαραίτητη για τη συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών. Ουσιαστικά η κροκιδωση είναι η μείωση των ηλεκτροστατικών δυνάμεων απώθησης μεταξύ των ομοιόμορφα φορτισμένων αιωρούμενων στερεών που περιέχονται στο νερό (Λέκκας, 1996).

Η αποσταθεροποίηση των αιωρημάτων επιτυγχάνεται με την προσθήκη κροκιδωτικών στο νερό. Οι πιο συνηθισμένες κροκιδωτικές ουσίες είναι :

- θειικό αργίλιο
- θειικός σίδηρος και
- χλωριούχος σίδηρος (Kiely, 1997).

2.3.3 ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ

Κατά την εξουδετέρωση των ηλεκτροστατικών δυνάμεων, τα αιωρούμενα στερεά σχηματίζουν συσσωματώματα. Κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η μάζα και το μέγεθος των αιωρούμενων στερεών με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας καθίζησης τους (Kiely, 1997).

2.3.4 ΚΑΘΙΖΗΣΗ

Ο διαχωρισμός των στερεών από το νερό με αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης των στερεών στο νερό καλείται καθίζηση. Η καθίζηση εφαρμόζεται για τη βελτίωση της ποιότητας του νερού από τη στιγμή που άνθρωποι συνέλλεγαν και αποθήκευαν το νερό. Κατά την αποθήκευσή του δεν αναμιγνυόταν και στη συνέχεια παροχετεύονταν. Η ίδια τεχνική εφαρμόζεται και σήμερα (AWWA, 1999).

2.3.5 ΔΙΗΘΗΣΗ

Διήθηση είναι η διεργασία κατά την οποία το νερό διέρχεται μέσα από διατάξεις που ονομάζονται φίλτρα και αποτελούνται από πορώδες υλικό. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι κυρίως άμμος. Η διήθηση χρησιμοποιείται από το 19^ο αιώνα, καθώς ήταν η μοναδική διεργασία επεξεργασίας του νερού. η διήθηση με άμμο βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα του νερού και απομακρύνει μέρος των παθογόνων μικροοργανισμών που περιέχονται στο νερό (Kiely, 1997). Ανάλογα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τα φίλτρα διακρίνονται σε :

- φίλτρα βαρύτητας και
- φίλτρα πίεσεως (Λέκκας, 1996).

2.3.6 ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ

Η απολύμανση είναι η διεργασία κατά την οποία θανατώνονται ή αδρανοποιούνται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που περιέχονται στο νερό. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι η χλωρίωση. Ωστόσο λόγω των μειονεκτημάτων της εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές του χλωρίου μέθοδοι απολύμανσης του νερού, οι οποίες παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής (Kiely, 1997).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Απολύμανση είναι η κύρια διεργασία κατά την οποία οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που περιέχονται στο νερό καταστρέφονται ή αδρανοποιούνται, χωρίς απαραίτητως το νερό να είναι αποστειρωμένο (AWWA, 1999; Droste, 1997). Ωστόσο, όλες οι διεργασίες επεξεργασίας του πόσιμου νερού επιτυγχάνουν σημαντική μείωση του αριθμού των παθογόνων μικροοργανισμών, παρόλο που δεν είναι πρωταρχικός τους στόχος (AWWA, 1999). Ουσιαστικά η απολύμανση είναι ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα του 20^{ου} αιώνα για τη διασφάλιση της ανθρώπινη υγείας (U.S EPA., 2003b).

Η ικανοποιητική παροχή ασφαλούς πόσιμου νερού είναι βασική προϋπόθεση για την ανθρώπινη υγεία. Η πρωταρχική σημασία του καθαρού νερού και η συσχέτιση μολυσμένου νερού και ασθενειών αναγνωρίστηκαν στο πρόσφατο παρελθόν. Ωστόσο, η πραγματική αιτία των ασθενειών έγινε αντιληπτή κατά το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα, οπότε η ανάγκη για απολύμανση του πόσιμου νερού έγινε εντονότερη (Harrison, 2001). Η προστασία της δημόσιας υγείας από τη μετάδοση παθογόνων μικροοργανισμών με το πόσιμο νερό είναι ένα διαδεδομένο πρόβλημα, το οποίο έχει επιπτώσεις όχι μόνο στις χώρες με χαμηλά πρότυπα υγιεινής αλλά και στις βιομηχανικές χώρες (Droste, 1997; Schoenen, 2002).

Δυστυχώς, παρόλο που η ανάπτυξη των προχωρημένων μεθόδων επεξεργασία ύδατος είναι ραγδαία, οι ασθένειες που μεταδίδονται μέσω του νερού αποτελούν βασική αιτία για το θάνατο πολλών ανθρώπων σε όλο τον πλανήτη (Harrison, 2001). Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (W.H.O.) υπολογίζει πως 1,1 δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον πλανήτη πίνουν ακατάλληλο νερό και το 90% των θανάτων που οφείλονται στην ποιότητα του νερού είναι θάνατοι παιδιών (W.H.O., 2003). Στις αναπτυγμένες χώρες έχουν γίνει τεράστιες αλλαγές στις μεθόδους επεξεργασίας και παροχής του νερού, καθώς η γνώση για τους παθογόνους μικροοργανισμούς είναι αυξημένη. Οι βασικότεροι κίνδυνοι που σχετίζονται με τη μικροβιολογική μόλυνση του νερού έχουν ξεπεραστεί με την επεξεργασία τόσο των λυμάτων όσο και των μεγάλων ποσοτήτων νερού (Harrison, 2001). Εντούτοις, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί πάντα θα αποτελούν ένα βασικό ζήτημα για την ανθρώπινη υγεία και είναι επιτακτική η ανάγκη συνεχούς επαγρύπνησης, καθώς βρισκόμαστε αντιμέτωποι όχι μόνο με τη διαρκή εξέλιξη των παθογόνων μικροοργανισμών (ιός

SARS), αλλά και με τη μείωση της ζώνης του όζοντος που έχει ως αποτέλεσμα μικροβιακές επιπλοκές στην υγεία μας (Ashbolt, 2004; Harrison, 2001).

3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η χρήση της τεχνολογίας επεξεργασίας του νερού δεν είναι νέα, αλλά χρονολογείται πίσω 6000 έτη, όταν οι Έλληνες χρησιμοποιούσαν φίλτρα, βρασμό, διήθηση και έκθεση στο φως του ήλιου για να βελτιωθεί η αισθητική ποιότητα του προς κατανάλωση ύδατος (WHO, 2003). Ο Ηρόδοτος (5^{ος} αιώνας π.Χ.) καταγράφει πως ο Σύριος ο Μέγας κουβαλούσε βρασμένο νερό σε ασημένια φλασκιά, όταν ταξίδευε. Η εφαρμογή της πρακτικής αυτής στηριζόταν στο γεγονός ότι ο βρασμός σκότωνε τους παθογόνους μικροοργανισμούς και τα ιόντα αργύρου λειτουργούσαν ως ανασταλτικός παράγοντας ανάπτυξης βακτηρίων.

Οι Ρωμαίοι είχαν αναπτύξει ένα σύνθετο δίκτυο ύδρευσης προμηθεύοντας τις πόλεις τους με καθαρό νερό από μη μολυσμένες πηγές και είχαν διαχωρίσει τη διάθεση των λυμάτων από το δίκτυο. Ο Ιούλιος ο Φροντίνιος ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την ύδρευση της Ρώμης τον 1^ο αιώνα μ.Χ. είναι γνωστός ως ο πρώτος μηχανικός υδραυλικών έργων. Γνώριζε ιδιαίτερα καλά τα προβλήματα που σχετίζονται με την παροχή καθαρού νερού σε ικανοποιητική ποσότητα για μία πόλη. Όμως, η περισσότερη γνώση των Ρωμαίων σχετικά με την ύδρευση χάθηκε μετά την πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας με εξαίρεση ορισμένα μοναστήρια που ακόμη διατηρούν τέτοια συστήματα (Harrison, 2001).

Με το πέρασμα των αιώνων καθώς μεγάλωναν οι πόλεις, αυξάνονταν και τα προβλήματα σχετικά με την παροχή νερού και το 19^ο αιώνα η εμφάνιση τύφου και χολέρας 'έφερε' φόβο στις μεγαλύτερες πόλεις της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής (Harrison, 2001). Ουσιαστικά η επεξεργασία του νερού άρχισε να εφαρμόζεται μετά την επιδημία χολέρας που χτύπησε το Αμβούργο το 1892, στην οποία 16.956 άνθρωποι αρρώστησαν ενώ 8605 πέθαναν, και το Λονδίνο το 1854 (Cheremisinoff, 1995; Schoenen, 2002). Ανακαλύφθηκε πως το νερό ήταν η πηγή μόλυνσης και πιο συγκεκριμένα ο John Snow αναγνώρισε την αντλία παροχής νερού στη Broadwick Street ως αιτία μετάδοσης της ασθένειας. Έγιναν τότε προσπάθειες για απολύμανση με χρήση υποχλωριώδους ασβεστίου (Cheremisinoff, 1995; Harrison, 2001). Την εποχή αυτή παράλληλα αναπτυσσόταν η θεωρία των μικροβιακών ασθενειών (germ theory of disease) από τους Pauster και Koch. Το 1881 ο Koch είχε αποδείξει πως το γλώριο μπορούσε να σκοτώσει βακτήρια, αλλά η χλωρίωση του πόσιμου νερού άρχισε να γίνεται συστηματική μετά τον τυφώδη πυρετό που ξέσπασε στο Λονδίνο το 1905 (Cheremisinoff, 1995). Στην Ευρώπη η πρώτη μεθοδική εφαρμογή απολύμανσης πόσιμου νερού πραγματοποιήθηκε στο Middelkerke στο

Βέλγιο το 1902, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες στο New Jersey και στο Chicago το 1908 (Cheremisinoff, 1995; Harrison, 2001).

Στη συνέχεια η χλωρίωση του πόσιμου νερού διαδόθηκε πολύ γρήγορα τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες, όσο και στην Ευρώπη, μέχρι τη δεκαετία του 1970, όπου η ανάπτυξη των αναλυτικών μεθόδων ελέγχου της ποιότητας του νερού, όπως αέρια χρωματογραφία, έφερε στο φως το κύριο μειονέκτημα της χλωρίωσης, που είναι ο σχηματισμός οργανικών παραπροϊόντων επιβλαβών για την υγεία. Το γεγονός αυτό έδωσε την ώθηση για την ανάπτυξη νέων μεθόδων απολύμανσης για την εξουδετέρωση των παθογόνων μικροοργανισμών που μεταδίδουν ασθένειες στο νερό, με στόχο παράλληλα την αποφυγή ή μείωση του σχηματισμού των οργανικών παραπροϊόντων της χλωρίωσης (Droste, 1997; Harrison, 2001). Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν ήταν κυρίως η απολύμανση με όζον (O_3), βρώμιο (Br_2), υπεροξείδιο του χλωρίου (ClO_2) και υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Ως απολυμαντικό έχει χρησιμοποιηθεί και ο άργυρος, ο οποίος είναι βακτηριοκτόνος (Droste, 1997).

3.3 ΠΑΘΟΓΟΝΟΙ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ

Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι βιολογικά είδη που προκαλούν ασθένειες στον ανθρώπινο ξενιστή οργανισμό. Οι μικροοργανισμοί αυτοί διακρίνονται στις εξής κατηγορίες :

- ο Ιοί
- ο Βακτήρια
- ο Παράσιτα
- ο Μύκητες

Οι μικροοργανισμοί συνήθως προέρχονται από αποθέσεις ανθρωπίνων αποβλήτων, αποβλήτων μονάδων εκτροφής ζώων, βιομηχανικών αποβλήτων επεξεργασίας τροφών, νοσοκομειακών αποβλήτων και από διαρροές σηπτικών δεξαμενών. Η μετάδοση των ασθενειών δεν γίνεται μόνο με την κατανάλωση πόσιμου νερού, αλλά και με την επαφή με άνθρωπο που έχει ήδη μολυνθεί (αλλαγή πάνας), την κολύμβηση σε ακατάλληλα νερά και την κατανάλωση τροφής (Cheremisinoff, 1995; www.epa.gov).

Μέχρι το 2001 είχαν καταγραφεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (W.H.O.) 1415 είδη μικροοργανισμών που είναι παθογόνοι για τον άνθρωπο (W.H.O., 2003).

3.3.1 Ιοι

Οι ιοί είναι παράσιτα που μπορούν να αναπαραχθούν μόνο κυριαρχώντας στις εσωτερικές διαδικασίες των κυττάρων του ξενιστή και χρησιμοποιώντας τα κύτταρα αυτά για την αναπαραγωγή τους. Οι ιοί είναι εξαιρετικά μικρά σωματίδια των οποίων

η επιφάνεια αποτελείται από πρωτεΐνες και αλλάζει σε μέγεθος και όγκο με αλλαγή του pH. Απορροφούν διάφορες ουσίες κάτω από συγκεκριμένες χημικές συνθήκες και έχουν ποικίλη αντίσταση σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως θερμοκρασία και υγρασία. Οι εντερικοί ιοί έχουν αντοχή τόσο στο όξινο περιβάλλον όσο και στη θερμοκρασία (60°C). Οι περισσότεροι ιοί που προκαλούν ασθένειες στον άνθρωπο εισέρχονται στο νερό από αποθέσεις αποβλήτων (Πίνακας 3.1) (Cheremisinoff, 1995).

Πίνακας 3.1: Παθογόνοι Ιοί, Πηγή : Ashbolt,2004; Cheremisinoff, 1995

ΟΝΟΜΑ ΙΟΥ	ΑΣΘΕΝΕΙΑ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ
Enteroviruses		
<i>Polio viruses (3 τύποι)</i>	Πολιομυελίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Coxsackie virus, group A</i>	Μηνιγγίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Coxsackie virus, group B</i>	Μηνιγγίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Echovirus (30 τύποι)</i>	Μηνιγγίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Άλλοι εντερικοί ιοί</i>	Εγκεφαλίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Rotavirus</i>	Γαστρεντερίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Adenovirus</i>	Αναπνευστικές ασθένειες	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Hepatitis virus A</i>	Λοιμώδης Ηπατίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Hepatitis virus E</i>	Λοιμώδης Ηπατίτιδα, Αποβολή και Θάνατος	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Reovirus</i>	Μόλυνση από τον ιό	Ανθρώπινα απόβλητα

Συνέχεια Πίνακα 3.1

ΟΝΟΜΑ ΙΟΥ	ΑΣΘΕΝΕΙΑ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ
<i>Norwalk agent</i>	Σποραδική Γαστρεντερίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Norovirus</i>	Γαστρεντερίτιδα	Νερό

3.3.2 ΒΑΚΤΗΡΙΑ

Τα βακτήρια είναι μονοκύτταροι μικροοργανισμοί με μέγεθος μικρότερο από 1μm και διάμετρο από 5-15μm. Σε αντίθεση με τους υπόλοιπους μικροοργανισμούς, μπορούν να αναπαραχθούν και χωρίς την παρουσία ξενιστή οργανισμού. Επίσης μπορούν να αναπτυχθούν και να αναπαραχθούν σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, ωστόσο διαρκής παραμονή σε χαμηλές θερμοκρασίες οδηγεί σε ύπωση, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες σε αδρανοποίηση. Παρόλα αυτά υπάρχουν ορισμένα βακτήρια που είναι ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα παθογόνα βακτήρια είναι ετερότροφοι μικροοργανισμοί και οι βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης είναι σε τιμές pH 6.5-7.5. Τα κυριότερα βακτήρια που προκαλούν ασθένειες στον άνθρωπο βρίσκονται στα ανθρώπινα απόβλητα (Πίνακας 2.3) (Cheremisinoff, 1995).

Πίνακας 3.2: Παθογόνα Βακτήρια, Πηγή : Ashbolt,2004; Cheremisinoff, 1995

ΟΝΟΜΑ ΒΑΚΤΗΡΙΟΥ	ΑΣΘΕΝΕΙΑ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ
<i>Arizon hinshawii</i>	Μόλυνση από το βακτήριο	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Bacillus Cereus</i>	Γαστρεντερίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Campylobacter jejuni</i>	Γαστρεντερίτιδα	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Vibrio Cholera</i>	Χολέρα	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Clostridium perfringens</i>	Γαστρεντερίτιδα	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Clostridium tetani</i>	Τέτανο	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα

<i>Escherichia coli</i>	Μόλυνση από το βακτήριο, Γαστρεντερίτιδα και Οξεία διάρροια	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Legionella pneumophila</i>	Λεγιονέλα (πνευμονία)	Ζεστό νερό
<i>Leptospira spp.</i>	Λεπτοσπίρωση	Ζωικά και ανθρώπινα απόβλητα
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Φυματίωση	
<i>Salmonella paratyphi</i>	Παρατυφώδης πυρετός	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Salmonella sendai</i>	Παρατυφώδης πυρετός	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Salmonella spp</i>	Σαλμονέλα και Οξεία διάρροια	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Salmonella typhi</i>	Τυφώδης πυρετός	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Shigella spp.</i>	Δυσεντερία και Οξεία διάρροια	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Yersinia enterocolitida</i>	Γαστρεντερίτιδα	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Yersinia pseudotuberculosis</i>	Περιτοναϊκή λεμφαδενίτιδα	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα

Συνέχεια Πίνακα 3.2

ΟΝΟΜΑ ΒΑΚΤΗΡΙΟΥ	ΑΣΘΕΝΕΙΑ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ
<i>Various mycobacteria</i>	Πνευμονικές ασθένειες	Έδαφος και νερό
<i>Opportunistic bacteria</i>	Διάφορες	Νερό

3.3.2.1 ΛΕΓΙΟΝΕΛΛΑ

Τα πιο πρόσφατα κρούσματα ασθνειών που μεταδίδονται από το νερό οφείλονται στο βακτήριο *Legionella*. Στις Ηνωμένες Πολιτείες μέχρι το 1994 υπήρχε έξαρση των περιστατικών που οφείλονταν σε αυτό το βακτήριο, ενώ σε 24 χώρες της Ευρώπης έχουν καταγραφεί κρούσματα λεγεονέλλωση με πιο πρόσφατο στην Ισπανία το 1996.

Τα βακτήρια *Legionella* ανακαλύφθηκαν μετά από ένα ξέσπασμα πνευμονίας στη Συνθήκη Λεγεώνων το 1976 στη Φιλαδέλφεια των Ηνωμένων Πολιτειών. Έχουν σχήμα ράβδου και φυσικές διαστάσεις 0,3 - 0,9μ πλάτος και 2 - 20μ μήκος. Τα περισσότερα από αυτά φέρουν μαστίγια. Τα κυτταρικά τους τοιχώματα είναι διαφορετικά από εκείνα των υπόλοιπων βακτηρίων και περιέχουν σημαντικές ποσότητες λιπαρών οξέων. Είναι αερόβια βακτήρια και ο μεταβολισμός τους στηρίζεται στην καταστροφή των αμινοξέων, πηγή ενέργειας.

Πειράματα έχουν δείξει ότι το βακτήριο *Legionella* στο αποστειρωμένο νερό βρύσης έχει μακροπρόθεσμη επιβίωση αλλά δεν πολλαπλασιάζεται, ενώ στο μη αποστειρωμένο νερό βρύσης επιζεί και πολλαπλασιάζεται. Επιπλέον το βακτήριο αυτό μπορεί να επιζήσει σε ποικίλες συνθήκες περιβάλλοντος, σε θερμοκρασίες 0-63°C, σε pH 5.0-8.5 και σε συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο νερό 0.2-15 ppm.

Τα πολυάριθμα ξεσπάσματα λεγεονέλλωσης έχουν συνδεθεί με μονάδες ανταλλαγής θερμότητας (πύργοι ψύξεως και συμπυκνωτές αέρα) στα νοσοκομεία, ξενοδοχεία, και δημόσια κτήρια, καθιερώνοντας σαφώς αυτές τις δεξαμενές ως βιότοπους για τα βακτήρια *Legionella*. Εντούτοις, δεδομένου ότι η γνώση και η συνειδητοποίηση της οικολογίας και της επιδημιολογίας για το βακτήριο αυτό έχουν αυξηθεί, η προσοχή

έχει μετατοπιστεί από τις μονάδες ανταλλαγής θερμότητας στα συστήματα διανομής πόσιμου ύδατος ως σημαντικότερες πηγές έκθεσης και μόλυνσης για τον άνθρωπο.

Οι ιαματικές πηγές αποτελούν επίσης ιδανικούς βιοτόπους για το βακτήριο *Legionella* επειδή διατηρούν το ιδανικό επίπεδο θερμοκρασίας για την αύξηση του αριθμού των βακτηρίων και επειδή οργανικές θρεπτικές ουσίες απαραίτητες για τη βακτηριακή αύξηση συσσωρεύονται συχνά σε αυτά τα ύδατα. Επιπλέον, οι ιαματικές πηγές μπορούν να παράγουν σταγονίδια ύδατος αναπνεύσιμου μεγέθους μέσω των οποίων το βακτήριο *Legionella* είναι δυνατό να μεταδοθεί στους ανθρώπους. Άλλες πηγές όπου έχει προσδιοριστεί το βακτήριο αυτό είναι οι σάουνες και πηγές νερού (U.S EPA.,2001).

3.3.3 ΠΑΡΑΣΙΤΑ

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα πρωτόζωα, τα νηματοειδή και τα παρασιτικά σκουλήκια (Cheremisinoff, 1995). Τα παθογόνα πρωτόζωα είναι ευκαρυωτικοί μονοκύτταροι μικροοργανισμοί με μέγεθος 8-25μm (U.S EPA, 1999a). Μεταφέρονται στον άνθρωπο σε μορφή κύστης (ανενεργή και απαθής μορφή του μικροοργανισμού) και ο κύκλος ζωής τους εξαρτάται από τον ξενιστή οργανισμό, καθώς τρέφονται από αυτόν. Στη συνέχεια η κύστη μετατρέπεται σε ενεργό οργανισμό και αναπαράγεται. Τα παθογόνα παράσιτα αναφέρονται στον Πίνακα 3.3 (Cheremisinoff, 1995). Το πιο διαδεδομένο ονομάζεται *Cryptosporidium parvum* και προκαλεί διάρροια για διάστημα 14 ημερών. Χαρακτηρίζεται από την ανθεκτικότητά του στο χλώριο και ο πιο συνηθισμένος τρόπος απομάκρυνσής του είναι η ανάμιξη, η συσσωμάτωση και η διήθηση (Harrison, 2001). Η πιο αποτελεσματική μέθοδος απομάκρυνσης του, ώστε να μην αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, είναι η UV ακτινοβολία, όπου καταστρέφεται το DNA (Rochelle et al., 2005). Το πιο πρόσφατο κρούσμα αναφέρεται στο Milwaukee των Ηνωμένων Πολιτειών και προκάλεσε αρκετούς θανάτους. Μεταφέρεται από άνθρωπο σε άνθρωπο, από την κατανάλωση μολυσμένου γάλακτος και από τις πισίνες (Harrison, 2001).

Τα νηματοειδή είναι σκουλήκια των οποίων το μέγεθος μπορεί να φτάσει μέχρι 36εκ. μέσα στο ανθρώπινο έντερο. Τα νηματοειδή δεν παραμένουν συνεχώς στο έντερο, αλλά μεταφέρονται και μέχρι τα μάτια. Δημιουργούν μία κύστη, παρόμοια με εκείνη των πρωτόζωων που προκαλεί ερεθισμό και αύξηση του νηματοειδούς ιστού στον ξενιστή οργανισμό. Τα παθογόνα νηματοειδή είναι δυνατόν να μεταδοθούν απευθείας από τον έναν άνθρωπο στον άλλον (Cheremisinoff, 1995).

Τα παρασιτικά σκουλήκια είναι ουσιαστικά ταινίες που μπορεί να έχουν μήκος πάνω από 30εκ. Τα πιο διαδομένα σχετίζονται με τα ζώα και κυρίως με τα βόδια, τα γουρούνια και τα ποντίκια. Μεταδίδονται κυρίως με το μη καλά μαγειρεμένο κρέας. Αναπτύσσονται στην πιο απλή τους μορφή στο έντερο και απελευθερώνουν αυγά.

Στις πιο σοβαρές περιπτώσεις εντοπίζονται στα μάτια, στα αυτιά, στην καρδιά και στο νευρικό σύστημα (Cheremisinoff, 1995). Το πιο επικίνδυνο ονομάζεται *Ascaris lumbricoides*, αναπτύσσεται κυρίως σε τροπικές και ημιτροπικές περιοχές και προκαλεί 60.000 θανάτους το χρόνο (Ashbolt,2004).

Πίνακας 3.3: Παθογόνα Παράσιτα, Πηγή : Ashbolt,2004; Cheremisinoff, 1995

ΟΝΟΜΑ ΠΑΡΑΣΙΤΟΥ	ΑΣΘΕΝΕΙΑ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ
Πρωτόζωα		
<i>Acanthamoeba castellani</i>	Μηνιγγοεγκεφαλίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Acanthamoeba spp</i>	Μηνιγγοεγκεφαλίτιδα	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Balantidium coli</i>	Δυσεντερία	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Cryptosporidium homonis</i> , <i>C. parvum</i>	Γαστρεντερίτιδα	Νερό, ανθρώπινα και άλλων θηλαστικών απόβλητα
<i>Dientamoeba fragilis</i>	Μόλυνση από το παράσιτο	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Entamoeba histolytica</i>	Δυσεντερία	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Gardia lambia</i>	Γαστρεντερίτιδα	Νερό και ζωικά απόβλητα
<i>Isosora bella</i>	Μυκητίαση	Ζωικά απόβλητα
<i>Naegleria fowleri</i>	Μηνιγγοεγκεφαλίτιδα	Ζεστό νερό
<i>Toxoplasmosis gondi</i>	Τοξοπλάσμωση	Νερό
Νηματοειδή		
<i>Ancylostoma dirodenale</i>	Νηματοσκωλίαση	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Ancylostoma spp</i>	Δερματικές παθήσεις	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Πνευμονία	Ανθρώπινα και ζωικά απόβλητα
<i>Enterobius vermicularis</i>	Ασθένεια από το νηματοειδές	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Necator americanus</i>	Νηματοσκωλίαση	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Νηματοσκωλίαση	Ανθρώπινα απόβλητα
<i>Toxocara canis</i>	Νηματοσκωλίαση	Ζωικά απόβλητα
<i>Toxocara trichiura</i>	Νηματοσκωλίαση	Ζωικά απόβλητα
<i>Trichuris trichiura</i>	Ασθένεια από το νηματοειδές	Ανθρώπινα απόβλητα
Παρασιτικά σκουλήκια		
<i>Diphyllobothrium latum</i>	Ταινία	Ζωικά απόβλητα
<i>Echinococcus granulosus</i>		Λαχανικά και ζωικά απόβλητα
<i>Echinococcus multilocularis</i>	Ασθένεια τύπου ηπατίτιδας	Λαχανικά και ζωικά απόβλητα
<i>Hymenolepis diminuta</i>	Ταινία	Ζωικά απόβλητα
<i>Hymenolepis nana</i>	Ταινία	Ζωικά απόβλητα
<i>Taenia saginata</i>	Ταινία	Ζωικά απόβλητα
<i>Taenia solium</i>	Ταινία	Ζωικά απόβλητα

3.3.4 ΜΥΚΗΤΕΣ

Οι μύκητες είναι μονοκύτταροι μη φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί, οι οποίοι αναπαράγονται με σπόρια δημιουργώντας αποικίες. Το μέγεθος των σπόρων κυμαίνεται από 10 έως 100μm. Συνήθως βρίσκονται στη βιολογική λάσπη και αναπτύσσονται ραγδαία, όταν βρίσκονται στο κομπόστ. Οι παθογόνοι μύκητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4 και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι οι σπόροι τους, όταν προέρχονται από ανθρώπους οι οποίοι έχουν ήδη προσβληθεί από κάποια αρρώστια, όπως διαβήτη ή κάνουν χρήση ναρκωτικών. Οι σπόροι του μύκητα *Aspergillus fumigatus* είναι ευρέως διαδεδομένοι στο περιβάλλον και έχουν βρεθεί σε βοσκοτόπους, σε κοπριές, σε σανό και στα υπόγεια των περισσότερων σπιτιών (Cheremisinoff, 1995).

Πίνακας 3.4: Παθογόνοι Μύκητες, Πηγή : Cheremisinoff, 1995

ΟΝΟΜΑ ΜΥΚΗΤΑ	ΑΣΘΕΝΕΙΑ
<i>Actinomyces spp</i>	Μυκητίαση

3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

Οι ουσίες που χρησιμοποιούνται για την απολύμανση του νερού είναι είτε χημικές είτε φυσικές (AWWA, 1999). Η επιλογή του απολυμαντικού μέσου καθορίζεται τόσο από την αποτελεσματικότητα του, όσο και από τους παράγοντες που περιγράφονται παρακάτω (Droste, 1997). Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα απολυμαντικό μέσο είναι τα εξής :

- Αποτελεσματικό στη καταστροφή ή αδρανοποίηση των μικροοργανισμών
- Μη τοξικό για τους ανθρώπους και τα ζώα
- Μη τοξικό για τα ψάρια και τα υδατικά οικοσυστήματα
- Εύκολη μεταφορά, αποθήκευση και διάθεση
- Χαμηλό κόστος
- Δράση σε μεγάλη κλίμακα θερμοκρασίας και pH
- Δράση ακόμη και στη διεργασία της ανάμιξης και
- Εύκολη παρακολούθηση κατά τη διάρκεια της απολύμανσης (Droste, 1997; Cheremisinoff, 1995).

3.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

Οι μηχανισμοί δράσης των απολυμαντικών ουσιών είναι οι εξής :

- Καταστροφή του κυτταρικού τοιχώματος
- Μεταβολή της διαπερατότητας του κυττάρου που επιτρέπει σε βασικά θρεπτικά (άζωτο και φώσφορο) να διαφύγουν από τη μεμβράνη
- Μεταβολή της κολλοειδούς φύσης του πρωτοκλάσματος που καταστρέφει τις πρωτεΐνες
- Παρεμπόδιση της σύνθεσης πρωτεϊνών, πυρηνικών οξέων και της κυτταρικής μεμβράνης και της δράσης των ενζύμων (Cheremisinoff, 1995; U.S EPA., 1999a).

Ο συνδυασμός των παραπάνω δράσεων εξαρτάται από το είδος του μικροοργανισμού και του απολυμαντικού. Οι πιο αποτελεσματικοί τρόποι δράσης είναι η καταστροφή της κυτταρικής μεμβράνης και η παρεμπόδιση των κυτταρικών λειτουργιών (U.S EPA., 1999a).

3.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

Η βιοκτόνος δράση των απολυμαντικών ουσιών εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- το είδος του απολυμαντικού
- το είδος των μικροοργανισμών
- τη συγκέντρωση του απολυμαντικού

- ο το χρόνο επαφής
- ο το pH
- ο τη θερμοκρασία
- ο τη θολότητα
- ο τη συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών και
- ο την αρχική απαίτηση οξειδωτικού.

Η δράση των απολυμαντικών ουσιών σε σχέση με το χρόνο επαφής εκφράζεται με το νόμο του Chick :

$$N_t = N_0 e^{-kt}$$

όπου

N_0 και N_t αριθμός μ/ο συγκεκριμένου είδους ανά μονάδα όγκου σε χρόνο μηδέν και ύστερα από χρόνο t αντίστοιχα

t χρόνος επαφής

k σταθερά δράσης (Νικολάου, 2001).

3.7 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Παρόλο που πρωταρχικός στόχος των απολυμαντικών ουσιών είναι η αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών που περιέχονται στο νερό, χρησιμοποιούνται και ως οξειδωτικά μέσα με στόχο :

- το μειωμένο σχηματισμό των παραπροϊόντων της απολύμανσης
- την οξείδωση σιδήρου και μαγγανίου
- τον περιορισμό ανάπτυξης αλγών στις δεξαμενές καθίζησης και στα φίλτρα
- τη διατήρηση της βιωσιμότητας του συστήματος επεξεργασίας του νερού
- την αύξηση της αποδοτικότητας της κροκίδωσης
- την απομάκρυνση χρωμάτων, οσμών και γεύσεων (U.S EPA., 1999a).

ΧΛΩΡΙΟ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το χλώριο είναι το πιο διαδεδομένο απολυμαντικό μέσο για το πόσιμο νερό και τα υγρά απόβλητα παγκοσμίως (Cheremisinoff, 1995). Επίσης χρησιμοποιείται για την αδρανοποίηση – απομάκρυνση των μικροβίων στα σπίτια, στα νοσοκομεία, στις πισίνες, στους χώρους εστίασης, στα ξενοδοχεία και σε άλλους δημοσίους χώρους (www.c3.org). Συγκεντρώνει όλα τα χαρακτηριστικά ενός ‘καλού’ και οικονομικού απολυμαντικού, ωστόσο πρόσφατες έρευνες έδειξαν πως τα παραπροϊόντα της χλωρίωσης είναι καρκινογόνα, συγκεκριμένα τα τριαλογονωμένα παράγωγα του μεθανίου (THMs). Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τα παραπροϊόντα της χλωρίωσης είναι μικροί όσον αφορά τις συγκεντρώσεις που παράγονται από μία τυπική μονάδα επεξεργασίας και οι νέοι τρόποι εφαρμογής της χλωρίωσης τείνουν να τους εξαλείψουν (Droste, 1997).

Το αέριο χλώριο ανακαλύφθηκε από το Σουηδό χημικό Scheele το 1774 κατά τη διάρκεια της αντίδρασης του διοξειδίου του μαγγανίου με το υδροχλωρικό οξύ, αλλά αναγνωρίστηκε ως χημικό στοιχείο το 1808 από το Sir Humphrey Davy, ο οποίος το ονόμασε χλώριο από την αντίστοιχη ελληνική λέξη *chloros* που σημαίνει πράσινο (AWWA, 1999; Cheremisinoff, 1995). Μέχρι να αναγνωριστεί ως στοιχείο, οι άνθρωποι θεωρούσαν πως το χλώριο ήταν συνθετικό του οξυγόνου (www.c3.org).

Η πρώτη χρήση του χλωρίου ως απολυμαντικού μέσου πραγματοποιήθηκε το 1825 στη Γαλλία, όπου αέριο χλώριο διαλυόταν σε αλκαλικό διάλυμα καλίου, ενώ το 1831 χρησιμοποιήθηκε σαν απολυμαντικό μέσο κατά της επιδημίας της χολέρας στην Ευρώπη (AWWA, 1999). Το 1846 με τη χρήση του χλωρίου αποτράπηκε η διάδοση ασθένειας σε μαιευτήριο της Αυστρίας (www.c3.org).

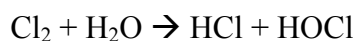
Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα η ηλεκτρολυτική παρασκευή του χλωρίου και του υποχλωριώδους οξέος είχε ως αποτέλεσμα την επέκταση της χρήσης του χλωρίου ως απολυμαντικού μέσου (AWWA, 1999). Το 1908 άρχισε η συστηματική απολύμανση του νερού με χλώριο στο Boonton, ενώ το 1909 ξεκίνησε η παρασκευή υγρού χλωρίου στη Νέα Υόρκη (AWWA, 1999; Cheremisinoff, 1995). Τα αποτελέσματα της απολύμανσης ήταν ιδιαίτερος ικανοποιητικά όχι μόνο μειώθηκε ο αριθμός των μικροοργανισμών, αλλά βελτιώθηκε σημαντικά η γεύση και το χρώμα του νερού. Όσο εξαπλωνόταν η χρήση του χλωρίου, τόσο μειώνονταν ο αριθμός των κρουσμάτων μεταδιδόμενων ασθενειών μέσω του νερού. Μέχρι το 1930 ο τύφος ενώ

ήταν ο δέκατος στη λίστα με τις πιο διαδεδομένες ασθένειες, βρέθηκε στην 26^η θέση (Cheremisinoff, 1995).

4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Το χλώριο (Cl₂) είναι ένα πυκνό και κιτρινοπράσινο αέριο με τάση να διαφύγει στην ατμόσφαιρα, καθώς είναι 2,5 φορές βαρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα και όταν ασκηθεί σε αυτό υπερβολική πίεση υγροποιείται απελευθερώνοντας θερμότητα και μειώνεται σημαντικά ο όγκος του (AWWWA, 1999; Cheremisinoff 1995; www.c3.org). Υγροποιείται στους -34°C, ενώ μετατρέπεται σε κίτρινο στερεό στους -103°C. Λόγω της δραστηρότητας του σχηματίζει ενώσεις με το νάτριο, το μαγνήσιο και ασβέστιο, οπότε δε βρίσκεται ποτέ ελεύθερο στη φύση. Το χλώριο έχει τη δυνατότητα να αντιδρά με διάφορα στοιχεία και να δημιουργεί ενώσεις με στοιχεία που δεν αντιδρούν μεταξύ τους (www.c3.org). Χρησιμοποιείται ως απολυμαντικό μέσο είτε ως αέριο, στερεό είτε ως υγρό με τη μορφή υποχλωριώδους νατρίου ή ασβεστίου (Cheremisinoff 1995).

Το αέριο χλώριο είναι ιδιαίτερα τοξικό και διαβρωτικό λόγω της οξειδωτικής του δράσης και πρέπει να φυλάσσεται με ιδιαίτερη προσοχή. Αντιδρά σχεδόν με όλες τις οργανικές ενώσεις που περιέχονται στο νερό, ιδιαίτερα με την αμμωνία και τις φαινόλες σχηματίζοντας χλωραμίνες και χλωροφαινόλες. Όταν διαλυθεί στο νερό σε θερμοκρασίες 40-212°F, παράγει υποχλωριώδες οξύ και υδροχλώριο, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση (Cheremisinoff, 1995; U.S EPA., 1999c).



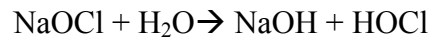
Το υποχλωριώδες οξύ διασπάται σχεδόν αμέσως σε υποχλωριώδη ιόντα και ιόντα υδρογόνου, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση. Το υποχλωριώδες οξύ είναι το πιο αποτελεσματικό απολυμαντικό από τα παράγωγα του χλωρίου και η δράση του οφείλεται στην ιδιότητα του να διεισδύει στα κυτταρικά τοιχώματα, όπως το νερό και είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Ο σχηματισμός του ευνοείται σε χαμηλές τιμές pH (Cheremisinoff, 1995).



4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΝΑΤΡΙΟΥ

Το υποχλωριώδες νάτριο (NaOCl) δεν είναι τόσο τοξικό όσο το αέριο χλώριο για αυτό μπορεί να αποθηκευτεί και να παρασκευαστεί επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας. Πρέπει όμως να φυλάσσεται σε αντιδιαβρωτικές δεξαμενές μακριά από μέταλλα ακόμη και από το χάλυβα και σε θερμοκρασία μικρότερη των 85°F (U.S EPA., 1999a). Περιέχει στην υγρή του μορφή 1-15% κατά βάρος χλώριο και ο χρόνος ημίσειας ζωής του κυμαίνεται μεταξύ 60-1700 ημερών ανάλογα της περιεκτικότητας του σε χλώριο (AWWA, 1999). Είναι η πιο ακριβή μορφή του χλωρίου, διασπάται σε

υπολειμματικό χλώριο και σχηματίζει χλωραμίνες και χλωροφαινόλες. Το διάλυμα του έχει pH κοντά στο 12. Κατά τη διάλυση του στο νερό διασπάται σε ιόντα υποχλωριώδη ιόντα και σε ιόντα νατρίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση (U.S EPA.,1999a).



4.2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ

Το υποχλωριώδες ασβέστιο (CaClO_2) είναι ιδιαίτερα οξειδωτικό και επικίνδυνο. Είναι ασταθές και πρέπει να φυλάσσεται σε αντιδιαβρωτικές δεξαμενές, ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός παραγώγων και η ανάφλεξη του. Περιέχει τουλάχιστον 70% χλώριο και είναι διαλυτό στο νερό (U.S EPA., 1999b). Διατίθεται σε σκόνη ή σε ταμπλέτες και συνήθως χρησιμοποιείται σε μικρές μονάδες επεξεργασίας, λόγω του υψηλού κόστους και των διαβρωτικών του ικανοτήτων (AWWWA, 1999; Cheremisinoff, 1995). Όπως το υποχλωριώδες νάτριο, διασπάται σε υπολειμματικό χλώριο και σχηματίζει χλωραμίνες και χλωροφαινόλες. Επίσης το υποχλωριώδες ασβέστιο κρυσταλλοποιείται με αποτέλεσμα την έμφραξη των σωληνώσεων, των αντλιών και των βαλβίδων. Κατά τη διάσπασή του παράγονται υποχλωριώδη ιόντα και ιόντα ασβεστίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση (U.S EPA., 1999c).



4.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

Ο τρόπος παρασκευής του χλωρίου και των υποχλωριωδών αλάτων επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας άρχισε να διαδίδεται πρόσφατα. Η παρασκευή γίνεται μόνο με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και αλατιού (U.S EPA.,1999a).

4.3.1 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Η παρασκευή του αερίου χλωρίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους όπως με ηλεκτρόλυση του υποχλωριώδους οξέος ή αλκαλικού αλατόνευρου ή με οξείδωση του υποχλωριώδους οξέος. Περίπου το 70% της ποσότητας που απαιτείται για χλωρίωση στις Ηνωμένες Πολιτείες προέρχεται από ηλεκτρόλυση αλατόνευρου και καυστικών αντιδράσεων. Το αέριο χλώριο επειδή είναι σταθερό είναι δυνατόν να παρασκευαστεί εκτός μονάδας επεξεργασίας και να μεταφερθεί σε αυτή (U.S EPA., 1999a).

Σε αρκετές μονάδες επεξεργασίας το χλώριο παρέχεται σε υγροποιημένη μορφή μέσα σε κυλίνδρους και παροχετεύεται μέσα στο νερό μέσω ειδικών συσκευών. Οι συσκευές αυτές μειώνουν την πίεση του αερίου, καθώς αυτό εξέρχεται από τον

κύλινδρο, ρυθμίζουν τη ροή του αερίου και τέλος αναμιγνύουν το αέριο με το νερό (Cheremisinoff, 1995).

4.3.2 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΝΑΤΡΙΟΥ

Το υποχλωριώδες νάτριο είναι δυνατόν να παραχθεί από υδροξείδιο του νατρίου και χλώριο είτε ηλεκτρολυτικά από το θαλασσινό νερό (U.S EPA., 1999a; U.S EPA., 1999c). Η παραγωγή του μπορεί να πραγματοποιηθεί και επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας (U.S EPA., 1999c). Η σταθερότητα του υποχλωριώδους νατρίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο αποθήκευσης, τη συγκέντρωση του υποχλωριώδους ιόντος και την έκθεση στο φως. Η διάσπαση του υποχλωριώδους νατρίου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δραστηριότητας του και το σχηματισμό ανεπιθύμητων παραπροϊόντων, όπως χλωρικά ιόντα. Λόγω των προβλημάτων που προκύπτουν στην αποθήκευση του, προτιμάται η επιτόπου παρασκευή του (U.S EPA., 1999a).

4.3.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ

Κατά την παρασκευή του υποχλωριώδους ασβεστίου, παρασκευάζεται πρώτα υποχλωριώδες οξύ με την προσθήκη υποχλωριώδους μονοξειδίου στο νερό, το οποίο εξουδετερώνεται με την προσθήκη διαλύματος ασβέστη. Στη συνέχεια απομακρύνεται το νερό και παραμένει το υποχλωριώδες ασβέστιο. Το τελικό προϊόν περιλαμβάνει περίπου 70% χλώριο και 4-6% ασβέστιο. Το υποχλωριώδες ασβέστιο πρέπει να φυλάσσεται σε δροσερά μέρη και μακριά από οργανική ύλη λόγω της οξειδωτικής του δράσης (U.S EPA., 1999a).

4.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Το χλώριο δρα δημιουργώντας προβλήματα κοντά ή πάνω στην κυτταρική μεμβράνη ή ακόμη επηρεάζει το DNA. Στα βακτήρια το χλώριο επηρεάζει την αναπνοή του κυττάρου και δημιουργεί προβλήματα στη δραστηριότητα του DNA. Έρευνες έχουν δείξει πως η χλωρίωση του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης οξυγόνου. Επίσης προκαλεί ζημιές στις κυτταρικές μεμβράνες, διαρροές από αυτές και χαμηλότερο ρυθμό σύνθεσης του DNA. Το χλώριο είναι ιδιαίτερα δραστικό επομένως η αδρανοποίηση του μικροοργανισμού είναι ραγδαία και δεν προλαβαίνει να αναπαραχθεί ή να αναπτυχθεί (U.S EPA., 1999a).

4.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ

Ανάλογα με τη μορφή του χλωρίου (χλώριο, υποχλωριώδες νάτριο ή υποχλωριώδες ασβέστιο) που χρησιμοποιείται για την απολύμανση του νερού εφαρμόζονται διαφορετικοί τρόποι επαφής με το νερό.

4.4.1.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Το υγροποιημένο αέριο χλώριο εξατμίζεται σε αέριο χλώριο πριν προστεθεί στο νερό. Η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση προέρχεται είτε από συσκευή εξάτμισης του χλωρίου είτε από άμεση θέρμανση του χλωρίου στο χώρο αποθήκευσης. Από τη στιγμή που το υγρό χλώριο εξατμίζεται, το αέριο χλώριο βρίσκεται υπό χαμηλή πίεση. Οι συνθήκες αυτές συνήθως δημιουργούνται από αναδευτήρα ή μέσω έγχυσης. Όταν πραγματοποιείται έγχυση, τότε μικρή ποσότητα νερού διέρχεται μέσω σωλήνα τύπου Venturi και αναμειγνύεται με το αέριο χλώριο δημιουργώντας διάλυμα χλωρίου, το οποίο στη συνέχεια αναμειγνύεται με την υπόλοιπη ποσότητα νερού μέσω μηχανικών αναμικτήρων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται αναδευτήρας, δημιουργούνται συνθήκες κενού και το αέριο χλώριο διοχετεύεται απευθείας στο προς επεξεργασία νερό (U.S EPA., 1999a).

4.4.1.2 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΝΑΤΡΙΟΥ

Συνήθως το υποχλωριώδες νάτριο διοχετεύεται απευθείας στο προς επεξεργασία νερό μέσω αντλίας (U.S EPA., 1999a). Η πιο διαδεδομένη μορφή του είναι υγροποιημένου αέριου, καθώς είναι και η πιο οικονομική λύση (AWWA, 1999). Αντίστοιχα με το χλώριο, το υποχλωριώδες νάτριο αναμειγνύεται με το νερό είτε με μηχανικούς αναδευτήρες είτε με έγχυση. Ουσιαστικά το υποχλωριώδες νάτριο δεν προστίθεται στο νερό πριν την ανάμιξη, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα διάβρωσης (U.S EPA., 1999a).

4.4.1.3 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ

Οι συνηθέστερες μορφές του υποχλωριώδους ασβεστίου είναι σκόνη, κόκκοι ή ταμπλέτες. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σκόνη ή κόκκοι το υποχλωριώδες ασβέστιο αρχικά αναμειγνύεται με μικρή ροή με το νερό και στη συνέχεια το διάλυμα που σχηματίζεται ενσωματώνεται με την υπόλοιπη ποσότητα του προς επεξεργασία νερού (U.S EPA., 1999a). Συνήθως χρησιμοποιείται σε νερά με αυξημένη σκληρότητα (AWWA, 1999).

4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Πολλοί περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του χλωρίου στην αδρανοποίηση των μικροοργανισμών όπως η θερμοκρασία νερού, το pH, ο χρόνος επαφής, η θολότητα, η συγκέντρωση διαλυμένων στερεών και η συγκέντρωση του διαθέσιμου χλωρίου. Γενικότερα υψηλά ποσοστά αδρανοποίησης μικροοργανισμών επιτυγχάνονται με υψηλή συγκέντρωση χλωρίου, μεγάλους χρόνους επαφής, χαμηλή τιμή pH, υψηλή θερμοκρασία νερού, χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένων στερεών και χαμηλή θολότητα. Ουσιαστικά η τιμή του pH και η

θερμοκρασία του νερού επηρεάζουν σημαντικά τη δραστηριότητα του χλωρίου (U.S EPA., 1999a).

4.5.1 pH

Η μικροβιοκτόνος ικανότητα του υποχλωριώδους οξέος (HOCl) είναι μεγαλύτερη από εκείνη του υποχλωριώδους ιόντος (OCl⁻). Η αναλογία μεταξύ υποχλωριώδους οξέος και υποχλωριώδους ιόντος καθορίζεται από το pH, καθώς το υποχλωριώδες οξύ σχηματίζεται σε χαμηλές τιμές pH ενώ το υποχλωριώδες ιόν κυριαρχεί σε υψηλές τιμές pH. Συνεπώς η αποτελεσματικότητα της χλωρίωσης είναι υψηλή σε χαμηλές τιμές pH (U.S EPA., 1999a).

Η αποτελεσματικότητα του αέριου χλωρίου και του υποχλωριώδους οξέος είναι η ίδια σε διάφορες τιμές του pH. Ωστόσο η προσθήκη αέριου χλωρίου μειώνει την τιμή του pH, ενώ η προσθήκη υποχλωριώδους οξέος αυξάνει το pH (U.S EPA., 1999a).

Έρευνες έχουν δείξει πως ο χρόνος επαφής που απαιτείται για την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών σε pH 7 είναι διπλάσιος από εκείνον σε pH 6. Επίσης έχει αποδειχθεί πως αύξηση του pH από 7 σε 8,8 ή 9 απαιτεί εξαπλασίους χρόνους επαφής από ότι σε pH 7. ουσιαστικά αύξηση του pH έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της χλωρίωσης. Ωστόσο σε πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί έχει αποδειχθεί πως η αδρανοποίηση των βακτηριών από το χλώριο είναι μεγαλύτερη σε υψηλές τιμές pH (U.S EPA., 1999a).

4.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

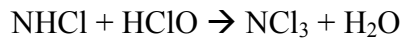
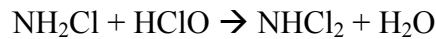
Η αδρανοποίηση των μικροοργανισμών αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας που επικρατεί στις μονάδες επεξεργασίας. Έρευνες έχουν δείξει πως απαιτείται αύξηση του χρόνου επαφής 2 ή 3 φορές, όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από 10°C ώστε να επιτυγχάνεται αδρανοποίηση των μικροοργανισμών αντίστοιχη με κείνη σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (U.S EPA., 1999a).

4.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Ο σχηματισμός παραπροϊόντων κατά τη διαδικασία της χλωρίωσης οφείλεται στις αντιδράσεις του χλωρίου και των χουμικών ενώσεων που περιέχονται στο προς επεξεργασία νερό. Τα πιο συχνά σχηματιζόμενα είναι τα τριαλογονωμένα παράγωγα του μεθανίου (THMs), τα αλογονοοξικά οξέα (HAAs), τα αλογονοακετονιτρίλια (HANs) και οι αλογονοκετόνες (Kim et al., 2002).

Αν το προς επεξεργασία νερό δεν περιείχε αζωτούχες ενώσεις, η χλωρίωση θα ήταν μία πολύ απλή διαδικασία. Ωστόσο, οργανικές και ανόργανες αζωτούχες ενώσεις περιέχονται στο νερό, οι οποίες αντιδρούν σε σύντομο χρονικό διάστημα με το χλώριο. Η αντίδραση του χλωρίου με ενώσεις που περιέχουν άζωτο και ένα ή

περισσότερα άτομα υδρογόνου έχει ως αποτέλεσμα στο σχηματισμό χλωραμινών, που αποτελούν ήπιες μορφές απολυμαντικών. Ο σχηματισμός τους περιγράφεται από τις παρακάτω αντιδράσεις.



Η αναλογία μεταξύ των τριών τύπων χλωραμινών εξαρτάται από το pH και την ποσότητα του αμμωνίου (NH_4) που υπάρχει στο νερό. Οι τριχλωραμίνες μπορούν να σχηματιστούν μόνο σε πολύ χαμηλές τιμές pH και ουσιαστικά οι άλλες δύο μορφές των χλωραμινών επικρατούν στην επεξεργασία νερού. Οι διχλωραμίνες έχουν ισχυρότερη βακτηριοκτόνο δράση σε σχέση με τις υπόλοιπες χλωραμίνες (Cheremisinoff, 1995).

4.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Το ασφαλές πόσιμο νερό είναι μία παγκόσμια ανάγκη και η υπολειμματική ποσότητα του χλωρίου στο νερό σε μικρές ποσότητες αποτρέπει την εξάπλωση των υδατογενών και την ανάπτυξη των παθογόνων μικροοργανισμών. Το χλώριο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό ως απολυμαντικό. Ωστόσο, η χρήση του χλωρίου ως απολυμαντικό έχει αρνητικά αποτελέσματα. Πολλές έρευνες έχουν δείξει πως το χλώριο και τα παραπροϊόντα του είναι τοξικά στα υδατικά οικοσυστήματα. Πιο συγκεκριμένα επειδή το χλώριο είναι πιο δραστικό από τις χλωραμίνες, η δράση του είναι πιο γρήγορη. Επίσης επειδή το χλώριο αντιδρά με την οργανική ύλη έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό τριαλογονομένων παραγώγων του μεθανίου που προκαλούν καρκίνο στον άνθρωπο (U.S EPA., 1999b).

4.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Το χλώριο είναι το πιο διαδεδομένο απολυμαντικό, ωστόσο ο σχηματισμός των διαφόρων παραπροϊόντων αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για τη χρήση του. Η θολότητα επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητά του (Cheremisinoff, 1995). Επίσης οι μεταβολές στην ποιότητα του νερού που συνήθως οφείλονται σε καταιγίδες, σε λιώσιμο των χιονιών, σε ανάπτυξη αλγών δημιουργούν μεταβολές στην ποσότητα του χλωρίου που απαιτείται για την απολύμανση με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιείται σε ικανοποιητικά επίπεδα η χλωρίωση (Codony et al., 2005). Οι μεταβολές στην προστιθέμενη ποσότητα του χλωρίου έχουν ως αποτέλεσμα στη δημιουργία οσμών και γεύσεων στο προς κατανάλωση νερό (Cheremisinoff, 1995).

Εκτός από τη χρήση ως απολυμαντικό το χλώριο έχει κι άλλες εφαρμογές στην επεξεργασία του νερού όπως απομάκρυνση οσμών και γεύσεων, οξείδωση σιδήρου

και μαγγανίου, απομάκρυνση χρωμάτων και βελτίωση της αποτελεσματικότητας της διήθησης και της καθίζησης (U.S EPA., 1999a).

4.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Το γεγονός ότι το χλώριο είναι ιδιαίτερα φτηνό και αποτελεσματικό το καθιστά το πιο δημοφιλές απολυμαντικό μέσο. Λόγω της οξειδωτικής του δράσης αντιδρά με την οργανική ύλη όπως πολυσακχαρίτες, αμινοξέα, πρωτεΐνες που περιέχονται στο νερό. Η οργανική αυτή ύλη αποτελεί συστατικό για το σχηματισμό των παραπροϊόντων της χλωρίωσης, πολλά από τα οποία προκαλούν προβλήματα υγείας στον άνθρωπο και στα ζώα (Πίνακας 4.1) (Freuze et al., 2005; Yang, 2004). Ακόμη η κατανάλωση χλωριωμένου νερού θεωρείται πως δημιουργεί προβλήματα στις γεννήσεις, όπως ελλιποβαρή νεογνά, μη φυσιολογικούς τοκετούς, αποβολές και γεννήσεις νεκρών παιδιών (Yang, 2004).

Πίνακας 4.1 : Παραπροϊόντα Χλωρίου, Πηγή : U.S EPA., 1999a

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ
Βρωμοδιχλωρομεθάνιο	Καρκίνο στα νεφρά, στο συκώτι και αναπαραγωγικές δυσκολίες
Βρωμοφόρμιο	Καρκίνο στα νεφρά, στο συκώτι και στο νευρικό σύστημα
Χλωριώδες Ιόν	Αναιμία
Χλωροφόρμιο	Καρκίνο στα νεφρά, στο συκώτι και αναπαραγωγικές δυσκολίες
Διβρωμοχλωρομεθάνιο	Προβλήματα στα νεφρά, στο συκώτι και στο νευρικό σύστημα
Διχλωροοξικό οξύ	Καρκίνο και άλλα προβλήματα

Συνέχεια Πίνακα 4.1

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ
Αλογονοοξικά οξέα	Καρκίνο και άλλα προβλήματα
Τριχλωροοξικό οξύ	Πιθανόν καρκίνο
Συνολικά τριαλογονομεθάνια	Καρκίνο και άλλα προβλήματα

4.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Το χλώριο είναι το πιο διαδεδομένο απολυμαντικό λόγω του μικρού κόστους διάθεσης του και της αποτελεσματικότητας έναντι διαφόρων παθογόνων μικροοργανισμών. Η ποσότητα του υπολειμματικού χλωρίου που παραμένει μετά τη χλωρίωση συμβάλλει στην αδρανοποίηση των μικροοργανισμών (Cheremisinoff, 1995).

4.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ

Η αποτελεσματικότητα του χλωρίου στην αδρανοποίηση των ιών είναι σημαντική. Σε πείραμα που έχει πραγματοποιηθεί σε 20 είδη ιών ο πιο ευαίσθητος ιός στο χλώριο είναι ένα είδος reovirus που αδρανοποιήθηκε κατά 99,99% μέσα σε 2,7 λεπτά, ενώ ο

πιο ανθεκτικός είναι είδους poliovirus που αδρανοποιήθηκε κατά 99,99% μετά από 60 λεπτά. Ουσιαστικά αδρανοποίηση κατά 99,99% των περισσότερων ιών πραγματοποιείται σε χρόνο επαφής 1,4 - 30 λεπτά (U.S EPA., 1999a). Έχει διαπιστωθεί πως οι ιοί είναι πιο ευαίσθητοι στο χλώριο σε υψηλές τιμές pH παρά σε χαμηλές (AWWA, 1999).

Σε αντίστοιχες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε συνθήκες pH 7 και θερμοκρασίας 5°C ανάμεσα σε είκοσι διαφορετικά είδη ιών έδειξαν πως μόνο δύο ιοί είδους poliovirus αδρανοποιούνται κατά 99,99% μετά από δέκα λεπτά χρόνου επαφής, έξι poliovirus αδρανοποιούνται κατά 99,99% μετά από εκατό λεπτά και έντεκα poliovirus και ο *Coxsackievirus* αδρανοποιούνται κατά 99,99% μετά από 1000 λεπτά (U.S EPA., 1999a).

4.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ

Αδρανοποίηση των πρωτόζωων με χλώριο δεν επιτυγχάνεται σε υψηλά ποσοστά. Πιο συγκεκριμένα το *Giardia cysts* είναι δύο φορές πιο ανθεκτικό στο χλώριο σε σχέση με τους ιούς και τρεις φορές σε σχέση με τα υπόλοιπα βακτήρια. Η δραστηριότητα του χλωρίου στην αδρανοποίηση του *Giardia cysts* καθορίζεται από το pH και τη θερμοκρασία (U.S EPA., 1999a).

Επίσης το χλώριο έχει μικρή επίδραση στην επιβίωση του *Cryptosporidium oocysts* όταν χρησιμοποιείται σε μικρές δόσεις. Ουσιαστικά επιτυγχάνεται αδρανοποίηση του *Cryptosporidium* κατά 40% με χρόνο επαφής και συγκέντρωση χλωρίου 30-3.600 mg*min/lit (U.S EPA., 1999a).

4.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ

Το χλώριο είναι αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση των βακτηρίων, ωστόσο η εκτεταμένη χρήση του έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή αντίσταση των βακτηριών σε αυτό καθώς πολλές καταστρέφονται μερικώς και απλά δε μπορούν να δημιουργήσουν αποικίες. Πολλά βακτήρια δεν αδρανοποιούνται όταν το νερό περιέχει μέχρι 1000ppm χλώριο (Howard et al., 2003).

Το βακτήριο *Burkholderia pseudomallei* που προκαλεί μόλυνση στον άνθρωπο με υψηλά επίπεδα θνησιμότητας επιζεί μετά από δέκα λεπτά παραμονής του σε νερό που περιέχει 1ppm χλώριο. Έχει αποδειχθεί πως το βακτήριο *Burkholderia pseudomallei* πεθαίνει μετά από δέκα έως είκοσι λεπτά έκθεσης στο χλώριο. Ακόμη και σε χαμηλές τιμές pH που κυριαρχεί το υποχλωριώδες οξύ, ισχυρό απολυμαντικό, η αδρανοποίηση του βακτηρίου αυτού δεν είναι εφικτή (Howard et al., 2003).

Πιο συγκεκριμένα το υποχλωριώδες οξύ είναι ιδιαίτερα δραστικό στην αδρανοποίηση των *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhi* και *Shigella dysenteriae* καθώς μειώνει σημαντικά το ρυθμό σύνθεσης του DNA και προκαλεί προβλήματα στις κυτταρικές λειτουργίες. Το υποχλωριώδες οξύ είναι περίπου 70 με 80 φορές πιο αποτελεσματικό από το υποχλωριώδες ιόν στην αδρανοποίηση των βακτηρίων (U.S EPA., 1999a).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΟΖΟΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το όζον (O_3) είναι μία αλλοτροπική μορφή του οξυγόνου με τρία άτομα οξυγόνου στο μόριο σε αντίθεση με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο που έχει δύο άτομα στο μόριο (Cheremisinoff, 1995). Έχει τη σημαντικότερη μικροβιοκτόνο δράση στα βακτήρια και τους ιούς σε σχέση με το χλώριο και είναι ουσιαστικά το πιο αποτελεσματικό απολυμαντικό στοιχείο (Cheremisinoff, 1995; Droste, 1997). Χρησιμοποιείται κυρίως για την αδρανοποίηση των πρωτόζωων (*Cryptosporidium parvum* oocysts) που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στις υπόλοιπες απολυμαντικές ουσίες. Ωστόσο, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες και για την αδρανοποίηση των εξής μικροοργανισμών *E. coli*, *Bacillus subtilis* spores, *Rotavirus*, *Giardia lamblia* cysts, *Giardia muris* cysts με τη χρήση όζοντος (Von Gunten, 2003). Μειώνει επίσης τη συγκέντρωση του σιδήρου, του μαγνησίου, του μολύβδου και του θείου που περιέχονται στο νερό και εξαλείφει δυσάρεστες γεύσεις και οσμές. Ακόμη λόγω της οξειδωτικής του δράσης απομακρύνει ικανοποιητικά φαινόλες, κυανιούχα άλατα και άλλα διαλυμένα τοξικά συστατικά του νερού. Η δραστηριότητά του δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από το pH, τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα του νερού σε αμμωνία (Cheremisinoff, 1995).

Το όζον ανακαλύφθηκε το 1783 από τον Van Marum και ονομάστηκε το 1840 από τον Schonbein. Το 1857 κατασκευάστηκε η πρώτη μονάδα αναγέννησης όζοντος από τη Siemens και η πρώτη εφαρμογή της συσκευής αυτής πραγματοποιήθηκε το 1893 στο Oudshoorn της Ολλανδίας (AWWA, 1999).

Το όζον χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην επεξεργασία του νερού το 1893 στο Oudshoorn της Ολλανδίας και το 1906 στη Νίκαια της Γαλλίας κατασκευάστηκε η πρώτη μονάδα επεξεργασίας ύδατος με χρήση όζοντος (Bryant et al., 1992). Η συγκεκριμένη μονάδα επεξεργασίας αποτελεί την παλαιότερη εγκατάσταση όζοντος στον κόσμο (AWWA, 1999). Μέχρι το 1916 υπήρχαν στην Ευρώπη 49 ολοκληρωμένες μονάδες επεξεργασίας ύδατος που χρησιμοποιούσαν όζον, ενώ το 1987 κατασκευάστηκε η πρώτη μονάδα επεξεργασίας νερού με χρήση όζοντος στο Λος Άντζελες των Ηνωμένων Πολιτειών (Bryant et al., 1992; U.S EPA., 1999a). Σήμερα, υπάρχουν παγκοσμίως πάνω από 2000 εγκαταστάσεις επεξεργασίας ύδατος που χρησιμοποιούν το όζον ως απολυμαντικό, από τις οποίες οι περισσότερες

βρίσκονται στην Ευρώπη και συγκεκριμένα στη Γαλλία υπάρχουν πάνω από 1000 (Bryant et al., 1992). Στις Ηνωμένες Πολιτείες υπάρχουν πάνω από 40 μονάδες επεξεργασίας, όπου χρησιμοποιούν το όζον κυρίως για την εξάλειψη οσμών και γεύσεων και για την απομάκρυνση τριαλογονομένων παραγώγων του μεθανίου και στον Καναδά πάνω από 50 (AWWA, 1999; Droste, 1997).

5.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

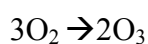
Ουσιαστικά το όζον είναι αέριος ρύπος που καταστρέφει οποιαδήποτε μορφή βλάστησης έρθει σε επαφή με αυτό και είναι τοξικό, αν γίνει εισπνοή σε σημαντικές συγκεντρώσεις. Χαρακτηρίζεται από ισχυρή οξειδωτική δράση και είναι ασταθές αέριο στις συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης και μετατρέπεται πολύ γρήγορα σε οξυγόνο σε θερμοκρασίες πάνω από 35°C. Γι'αυτό το λόγο δεν παραμένουν μόρια όζοντος στο νερό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος της ημίσειας ζωής του όζοντος είναι γύρω στα είκοσι λεπτά σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος. Συνεπώς, είναι αδύνατον να παρασκευαστεί και να μεταφερθεί από εργοστάσιο, παρά μόνο να παρασκευαστεί επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας (Bryant et al., 1992; Cheremisinoff, 1995). Αντιδρά με όλα σχεδόν τα οργανικά στοιχεία είτε ως μόριο είτε ως ελεύθερη καρβοξυλική ρίζα (OH[•]), η οποία σχηματίζεται κατά τη μετατροπή του όζοντος σε οξυγόνο κατά την οξείδωση οργανικών ουσιών (Bryant et al., 1992).

Έχει χαρακτηριστική οσμή, την οποία αντιλαμβάνονται οι περισσότεροι άνθρωποι σε χαμηλές συγκεντρώσεις (0,02 ppm), χαμηλότερα από τα όρια τοξικότητας και είναι άχρωμο σαν αέριο, ενώ σαν υγρό έχει μπλε χρώμα (Kiely, 1997; U.S EPA., 1999a). Είναι μέτρια διαλυτό στο νερό και η διαλυτότητά του εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νερού και τη συγκέντρωση του όζοντος σε αυτό (Bryant et al., 1992).

5.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

Λόγω της αστάθειας του μορίου του όζοντος (O₃) και της γρήγορης μετατροπής του σε κανονικό οξυγόνο (O₂), η παρασκευή του πραγματοποιείται επιτόπου στις μονάδες επεξεργασίας ύδατος (Cheremisinoff, 1995). Ο πιο διαδεδομένος τρόπος παρασκευής είναι η ηλεκτρική εκφόρτιση ενός αερίου που περιέχει οξυγόνο μέσω μιας στεφάνης εκφόρτισης, όπου εφαρμόζεται υψηλό δυναμικό από δύο ηλεκτρόδια που έχουν κενό αέρος μεταξύ τους (Cheremisinoff, 1995; Droste, 1997). Μία εναλλακτική μέθοδος είναι η εφαρμογή υπεριώδους ακτινοβολίας με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 200 nm σε αέριο που περιέχει οξυγόνο.

Η εξίσωση που περιγράφει την αναγέννηση του όζοντος είναι η εξής :



Η παραπάνω αντίδραση είναι ενδόθερμη και απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας (U.S EPA., 1999a).

Η συγκέντρωση του όζοντος είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση των συγκεντρώσεων οξυγόνου και άλλων στοιχείων, όπως σκόνη και της εξάτμισης του νερού μέσα στο αέριο (Droste, 1997).

Κατά τη διάρκεια παρασκευής του όζοντος πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους παρακάτω παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά τη δραστηριότητα του όζοντος :

- ο Πρέπει να διατηρείται και να προστατεύεται η ακεραιότητα των ηλεκτροδίων της συσκευής παρασκευής, ώστε η παρασκευή του όζοντος να είναι αποτελεσματική και να αποφεύγεται ζημιά στον εξοπλισμό. Η υγρασία έχει ως αποτέλεσμα θραύση των ηλεκτροδίων. Επίσης, η υγρασία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νιτρωδών οξέων που προκαλούν διάβρωση στη συσκευή (Bryant et al., 1992).
- ο Επίσης κατά τη διαδικασία αναγέννησης του όζοντος πρέπει να γίνεται ουσιαστικός έλεγχος της θερμοκρασίας. Υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας καταστρέφει τα ηλεκτρόδια, όπως επίσης μετατρέπεται το όζον σε οξυγόνο, με αποτέλεσμα τη μη ικανοποιητική απολύμανση του νερού (Bryant et al., 1992; U.S EPA., 1999a).

Πολλές αστοχίες κατά την παρασκευή του όζοντος οφείλονται σε παράλειψη των παραπάνω παραγόντων (Bryant et al., 1992).

Το μεγαλύτερο πόσο της ενέργειας περίπου το 85% που απαιτείται κατά την παρασκευή του όζοντος απελευθερώνεται στο περιβάλλον σε μορφή θερμότητας, λόγω της χρήσης ψυχτικών συσκευών (U.S EPA., 1999a).

5.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Οι συσκευές παρασκευής όζοντος διακρίνονται με βάση την τάση που δέχονται για να εφαρμόσουν τη διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια. Για τις συσκευές που λειτουργούν με χαμηλή συχνότητα ρεύματος (50 – 60Hz), αυτή διατίθεται από συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ρεύματος, ενώ για τις συσκευές που λειτουργούν με μεσαία ή υψηλή τάση χρειάζεται να γίνει μετατροπή της τάσης (Πίνακας 5.1) (U.S EPA., 1999a). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος συντήρησης και αγοράς. Ωστόσο, οι συσκευές με υψηλή τάση επιτυγχάνουν καλύτερη αναγέννηση του όζοντος με λιγότερο κόστος στην κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, χρειάζονται λιγότερο χώρο εγκατάστασης και είναι πιο ολοκληρωμένες, στοιχεία σημαντικά όταν αυξάνουν οι απαιτήσεις για χωρητικότητα (Bryant et al., 1992).

Πίνακας 5.1 : Είδη Συσκευών Παρασκευής Όζοντος, Πηγή : Bryant et al., 1992

ΤΥΠΟΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)	ΤΑΣΗ (kV)	ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ
-------	----------------	-----------	--------------

Χαμηλής συχνότητας	60	10 -20	>0,4
Μεσαίας συχνότητας	700 – 800	8 – 14	>0,8
Υψηλής συχνότητας	2.000 – 3.000	8 -10	αυτόνομος

Δεν υπάρχει κανόνας για την επιλογή της συσκευής παρασκευής του όζοντος στις μονάδες επεξεργασίας του νερού. Συνήθως, οι μικρές μονάδες επεξεργασίας επιλέγουν συσκευές χαμηλής συχνότητας λόγω έλλειψης χώρου και κονδυλίων σε αντίθεση με τις μεγάλες μονάδες (Bryant et al., 1992). Ανάμεσα στους συσκευές μεσαίας και υψηλής συχνότητας προτιμώνται της μεσαίας συχνότητας λόγω της οικονομικότερης παρασκευής όζοντος σε υψηλές συγκεντρώσεις και της πολυπλοκότητας των συσκευών υψηλής συχνότητας, αν και παρέχουν καλύτερη συντήρηση (Bryant et al., 1992; U.S EPA., 1999a). Στις νέες μονάδες επεξεργασίας νερού συνήθως χρησιμοποιούν μεσαίας ή υψηλής τάσης συσκευές (U.S EPA., 1999a).

Οι πιο διαδεδομένες συσκευές παρασκευής όζοντος είναι οριζόντιες και χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ρεύμα για την εφαρμογή τάσης μεταξύ δύο γυάλινων ή κεραμικών ηλεκτροδίων, τα οποία εσωτερικά είναι επικαλυμμένα με μέταλλο, ώστε να δημιουργείται μία επιφάνεια που να διανέμεται ομοίως το ηλεκτρικό ρεύμα (Bryant et al., 1992; Droste, 1997). Κατά αυτόν τον τρόπο το αέριο ξηραίνεται. Η ενέργεια που απαιτείται κυμαίνεται μεταξύ 15 – 20 W-h/gr όζοντος που παράγεται (Droste, 1997).

5.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Το όζον ουσιαστικά φθείρει και καταστρέφει βασικά συστατικά των παθογόνων μικροοργανισμών μέσω της οξειδωτικής του δράσης. Οξειδώνει τα οργανικά συστατικά των κυτταρικών μεμβρανών όπως γλυκοπρωτεΐνες ή αμινοξέα με αποτέλεσμα τη διάρρηξη τους επηρεάζοντας τη βιωσιμότητα των παθογόνων μικροοργανισμών (Jyoti et al., 2004; U.S EPA., 1999a). Εκτός από την επίδραση που έχει στην κυτταρική μεμβράνη, το όζον αντιδρά και με το υλικό του πυρήνα προκαλώντας προβλήματα στις κυτταρικές λειτουργίες, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μικροοργανισμών (ιοί) έχει επιδράσεις στο RNA (U.S EPA., 1999a).

Είναι αποτελεσματικό σε μεγάλη κλίμακα παθογόνων μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, πρωτόζωα και ιοί. Λόγω της αποτελεσματικής δράσης του όζοντος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί οζόνωση χωρίς την απαραίτητη χρήση φίλτρων (U.S EPA., 1999a). Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί όσο αυξάνεται ο χρόνος επεξεργασίας, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των μικροοργανισμών που αδρανοποιούνται. Τα πρώτα δεκαπέντε λεπτά της οζόνωσης αδρανοποιείται το 46% των μικροοργανισμών και στην πρώτη ώρα το 82%, όταν η συγκέντρωση του όζοντος

είναι 0.5 mg/l, ενώ όταν η συγκέντρωση του όζοντος είναι 4 mg/l τα πρώτα δεκαπέντε λεπτά αδρανοποιείται το 93% των μικροοργανισμών αντίστοιχα (Jyoti et al., 2004).

5.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ

Ο τρόπος επαφής του όζοντος με το νερό εξαρτάται από τη διαλυτότητα του όζοντος μέσα στο νερό και πρέπει να σχεδιάζεται με ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική μεταφορά. Για αυτό το λόγο τα συστήματα αυτά σχεδιάζονται όχι μόνο για την εξασφάλιση ικανοποιητικού χρόνου επαφής, αλλά και για τη μεταφορά επαρκούς ποσότητας (Bryant et al., 1992). Το όζον έρχεται σε επαφή με το νερό μέσω διάφορων τεχνολογιών και το πιο διαδεδομένο σύστημα είναι η διάχυση φυσαλίδων σε δεξαμενές (Droste, 1997).

Εναλλακτικοί τρόποι επαφής του όζοντος με το νερό είναι οι εξής :

- Έγχυση όζοντος στο ρεύμα νερού
- Διάχυση μέσω τουρμπίνας
- Συστήματα επαναδιάχυσης (Droste, 1997; U.S EPA., 1999a).

Λιγότεροι διαδεδομένοι τρόποι είναι ο ψεκασμός και οι πύργοι διανομής του όζοντος μέσα στο νερό (Bryant et al., 1992).

5.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Η μετατροπή του όζοντος σε οξυγόνο σχετίζεται με την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών και είναι συνάρτηση του pH, της θερμοκρασίας και των διαλυμένων στερεών. Η υψηλή συγκέντρωση όζοντος στο νερό είναι καθοριστικός παράγοντας για την αποτελεσματικότητα της απολύμανσης (U.S EPA., 1999a).

5.5.1 pH

Το pH παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της οζόνωσης. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της απολυμαντικής δράσης του όζοντος δε διαφοροποιείται ανάλογα με τη τιμή του pH, ιδιαίτερα σε τιμές πάνω από 9. Αν και πρέπει να καθορίζεται η απαιτούμενη δόση όζοντος για να επιτευχθεί η απολύμανση, καθώς σε τιμές pH πάνω από 8 αυξάνεται ο ρυθμός μετατροπής του όζοντος σε οξυγόνο. Όμως έχει βρεθεί πως σε συγκεκριμένους μικροοργανισμούς (*Cryptosporidium parvum*) το όζον είναι πιο δραστικό σε τιμές pH πάνω από 10, από ότι σε τιμές pH 6-8 (Larson et al., 2003). Ουσιαστικά απολύμανση πραγματοποιείται σε υψηλές τιμές του pH, καθώς η δράση του όζοντος είναι πολύ γρήγορη, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως η αποτελεσματικότητα του όζοντος δεν επηρεάζεται από τις διάφορες τιμές του pH (Bryant et al., 1992). Η παρουσία διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε συνδυασμό με

υψηλές τιμές αλκαλικότητας βελτιώνουν τη δράση του όζοντος σαν απολυμαντικό (Droste, 1997).

5.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Όσο αυξάνει η θερμοκρασία, το όζον γίνεται όλο και πιο αδιάλυτο και ασταθές στο νερό, ωστόσο η απόδοση της απολύμανσης παραμένει σχετικά σταθερή. Έρευνες έχουν δείξει πως αυξάνοντας τη θερμοκρασία από του 0°C στους 30°C, μειώνεται σημαντικά η διαλυτότητα του όζοντος στο νερό και αυξάνεται ο ρυθμός μετατροπής του σε οξυγόνο χωρίς όμως να επηρεάζεται η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης. Συμπερασματικά, η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει τη σταθερότητα και διαλυτότητα του όζοντος στο νερό, χωρίς όμως να μειώνεται η απόδοση της απολύμανσης (U.S EPA., 1999a).

5.5.3 ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ

Η αδρανοποίηση των βακτηρίων και των ιών από το όζον δεν επηρεάζεται, όταν η θολότητα κυμαίνεται από 1-5 NTU. Σε περιπτώσεις που το νερό είχε σημαντικές συγκεντρώσεις οργανικών στερεών, η απολύμανση με όζον είχε ως αποτέλεσμα τη διάσπαση των οργανικών μορίων σε μικρότερα στοιχεία που εύκολα καταναλώνονταν από τους μικροοργανισμούς. Η διάσπαση αυτή σχετίζεται με τη αδυναμία του όζοντος να δράσει ως απολυμαντικό (U.S EPA., 1999a).

5.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Η απολύμανση του νερού με χημικές μεθόδους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία παραπροϊόντων, τα οποία δεν είναι επιθυμητά λόγω της τοξικότητάς τους (Von Gunten, 2003). Επίσης, η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων παραπροϊόντων συμβάλλει στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών, με αποτέλεσμα την αστοχία του συστήματος επεξεργασίας ύδατος και τη μετάδοση ασθενειών στους καταναλωτές (Minear et al., 1996).

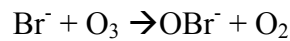
Το σημαντικότερο παραπροϊόν της χρήση του όζοντος στην επεξεργασία του νερού είναι η καρβοξυλική ρίζα (OH⁻), η οποία επίσης είναι ιδιαίτερα οξειδωτική και συμβάλλει στην οξείδωση ενώσεων που περιέχονται στο νερό κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (Bryant et al., 1992).

Το υπεροξείδιο του υδρογόνου (H₂O₂) είναι ενδιάμεσο παραπροϊόν της τελικής οξείδωσης των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στο νερό με το όζον ιδιαίτερα σε τιμές pH κάτω από 6. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, το υπεροξείδιο του υδρογόνου μπορεί να δράσει συνδυαστικά με το όζον σχηματίζοντας ρίζες του

υδροξυλίου, οι οποίες στη συνέχεια εξουδετερώνονται από διαδοχικές αντιδράσεις οξειδωσης από οξειδωτικά συστατικά του νερού (Bryant et al., 1992).

Τα καρβοξυλικά οξέα κυρίως το οξαλικό οξύ (HOOC-COOH) και το οξικό οξύ (CH₃-COOH) είναι επίσης παραπροϊόντα του όζοντος, τα οποία προκύπτουν από την οξείδωση αρωματικών, αλιφατικών και ετεροκυκλικών οργανικών ενώσεων. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται όζον για την απολύμανση του νερού έχουν βρεθεί αλδεϋδες. Στοιχεία που αποτελούν πηγή άνθρακα για τα βακτήρια και ενδεχομένως να οδηγήσουν σε περεταίρω ανάπτυξη τους, με αποτέλεσμα την δυσλειτουργία και αστοχία των μονάδων επεξεργασίας του νερού (Huang et al., 2005).

Ωστόσο, από τα παραπροϊόντα του όζοντος στην επεξεργασία του νερού, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μη αλογονωμένα παράγωγα οξειδωσης, τα οποία σχηματίζονται κατά την οξείδωση του ιόντος του βρωμίου (Br⁻) σε υποβρωμιώδες ιόν (OBr⁻) με βάση την παρακάτω αντίδραση :



Όταν το pH είναι χαμηλό, το υποβρωμιώδες ιόν αντιδρά με ιόντα υδρογόνου σχηματίζοντας υποβρωμιώδες οξύ, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση (Huang et al., 2005).



Ουσιαστικά το pH έχει σημαντική επίδραση στη μετατροπή των βρωμικών ιόντων. Αν υπάρχει σημαντική συγκέντρωση βρωμιδίων και το pH είναι χαμηλό, ευνοείται η δημιουργία υποβρωμιώδους οξέος που συνεπάγεται το σχηματισμό αλογονωμένων παραπροϊόντων, όπως βρωμοφόρμιο, τριαλογονωμένα παράγωγα του μεθανίου και διβρωμοοξικό οξύ. Στην περίπτωση που υπάρχει άζωτο δημιουργούνται επίσης βρωμοπικρίνη και κυανιούχο άζωτο. Επίσης η παρουσία αμμωνίας μειώνει τη μετατροπή των βρωμικών ιόντων (Bryant et al., 1992).

Υψηλή συγκέντρωση βρωμικών ιόντων μειώνει το βαθμό αποσύνθεσης του όζοντος (AWWA, 1999; Bryant et al., 1992). Η οξείδωση αυτή πραγματοποιείται όταν το προς επεξεργασία νερό περιέχει ιόντα βρώμιου. Έρευνες έχουν δείξει πως κρούσματα καρκίνου οφείλονται στην παρουσία βρωμικών ιόντων στο πόσιμο νερό (Minear et al., 1996).

Τέλος τα άλατα ιωδικού οξέος αποτελούν παραπροϊόν της χρήσης του όζοντος στην επεξεργασία του νερού καθώς οξειδώνονται, όταν περιέχονται ιωδιούχα ιόντα σε αυτό. Ωστόσο, θεωρούνται μη επικίνδυνα, καθώς μετατρέπονται σε ιωδιούχα ιόντα ενδογενώς (Von Gunten, 2003).

5.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

Η χρήση του όζοντος άρχισε να επεκτείνεται από τη στιγμή που οι απαιτήσεις του ανθρώπου για την ποιότητα του πόσιμου νερού άρχισαν να αυξάνονται (Minear et al., 1996). Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο απολυμαντικό λόγω της αποτελεσματικότητας σε διάφορους παθογόνους μικροοργανισμούς, αλλά και λόγω της μη σημαντικής δημιουργίας παραπροϊόντων ή τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου. Εντούτοις, η εκτεταμένη χρήση του όζοντος στην επεξεργασία του νερού οδήγησε στην επανεκτίμηση της χημικής διαδικασίας της απολύμανσης νερού που περιέχει βρωμίδια και οργανικές ενώσεις, καθώς προκαλούν καρκίνο στον άνθρωπο και στα ζώα (Huang et al., 2005).

5.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρόλο που το όζον έχει δυνατή μικροβιοκτόνο δράση και απομακρύνεται από το νερό χωρίς τη χρήση χημικών ουσιών και βελτιώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της κροκίδωσης, το κόστος αγοράς και συντήρησης είναι ανασταλτικός παράγοντας (Cheremisinoff, 1995; Thurston-Enriquez et al., 2005). Ωστόσο, έχουν πραγματοποιηθεί εφαρμογές με χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Η αυξημένη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στο νερό απαιτεί φιλτράρισμα πριν την οζόνωση, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους επεξεργασίας (Cheremisinoff, 1995). Τέλος ο ελάχιστος χρόνος ημίσειας ζωής γεγονός που προκαλεί κίνδυνο για επιμολύνσεις, η επιτόπου παρασκευή στη μονάδα επεξεργασίας, η τοξικότητα του αέριου όζοντος και η διαβρωτικότητα του όζοντος αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα της οζόνωσης (Thurston-Enriquez et al., 2005).

Το όζον εκτός από την απολυμαντική του δράση είναι αποτελεσματικό στην απομάκρυνση γεύσεων προερχόμενες από το έδαφος, τα υδατικά οικοσυστήματα και από μούχλα και οσμών λόγω χλωρίωσης, κροκίδωσης και φιλτραρίσματος μέσω άμμου. Σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται και απομάκρυνση χρώματος που περιέχεται στο νερό με την οζόνωση. Ωστόσο, το ίδιο το όζον δημιουργεί στο νερό έντονες οσμές. (Droste, 1997).

Είναι πολύ πιο αποτελεσματικό σε σχέση με το χλώριο και τα παράγωγά του ή σε σχέση με υπερμαγγανικά οξειδωτικά (Cheremisinoff, 1995; Droste, 1997).

Η συνδυαστική δράση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) και όζοντος έχει ως αποτέλεσμα την αδρανοποίηση μικροοργανισμών δέκα φορές πιο γρήγορα από ότι επιτυγχάνει το όζον. Επίσης, η χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας σε συνδυασμό με το όζον έχει ως αποτέλεσμα την αποσύνθεση χουμικών και άλλων οργανικών στοιχείων που περιέχονται στο νερό (Droste, 1997).

5.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Η επίδραση των παραπροϊόντων του όζοντος στην ανθρώπινη υγεία δεν έχουν καθοριστεί ακόμη. Έχει αποδειχθεί πως τα παραπροϊόντα αυτά είναι λιγότερο επικίνδυνα από εκείνα της χλωρίωσης και δεν είναι δυνατόν να απομακρυνθούν από το νερό με κοινές μεθόδους (Bryant et al., 1992; Jyoti et al., 2004). Αν και υπάρχει μία «διαμάχη» στην επιστημονική κοινότητα, καθώς μερικές φορές η χρήση όζοντος εγκυμονεί του ίδιους κινδύνους με τη χρήση χλωρίου (Droste, 1997). Σε περίπτωση όμως που γίνει συνδυασμός μεθόδων απολύμανσης, οι συγκεντρώσεις των παραπροϊόντων μειώνονται (Jyoti et al., 2004).

Κυρίως τα βρωμικά ιόντα είναι επικίνδυνα, καθώς προκαλούν καρκίνο στον άνθρωπο και δεν είναι βιοδιασπάσιμα στα βιολογικά φίλτρα που έπονται της διαδικασίας της απολύμανσης (Von Gunten, 2003). Πειράματα που έχουν γίνει σε ποντίκια έχουν δείξει πως τα βρωμικά ιόντα προκαλούν όγκο στα νεφρά, θυρεοειδή και περιτονίτιδα σε δόσεις 6mg/kg του οργανισμού (W.H.O., 2000).

5.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Το όζον χαρακτηρίζεται από τη δραστικότητα του και την αποτελεσματικότητα του στην αδρανοποίηση διαφόρων μικροοργανισμών. Η επίδραση των απολυμαντικών στοιχείων στον μικροοργανισμό δεν περιγράφεται με γραμμική σχέση σε ημιλογαριθμική κλίμακα (Haas et al., 2003). Θεωρείται το πιο αποτελεσματικό στοιχείο, καθώς είναι πιο δραστικό από το χλώριο και το διοξείδιο του χλωρίου κατά την απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών από το πόσιμο νερό (U.S EPA., 1999a).

5.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ

Έρευνες έχουν δείξει πως επιτυγχάνεται η αδρανοποίηση του *Poliomyelitis virus* κατά 99,9% για χρόνο επαφής 4 – 6 λεπτά και του *Giardia* κατά 99% σε νερό με χαμηλή θολότητα και απομάκρυνσή του κατά 90% σε νερό με υψηλή θολότητα (Bryant et al., 1992; Haas et al., 2003). Πειράματα που έχουν γίνει έδειξαν πως η αδρανοποίηση του *Gardia muris* αυξάνεται καθώς μειώνεται η συγκέντρωση του μικροοργανισμού σε συνθήκες pH 8 και θερμοκρασίας 15°C (Haas et al., 2003). Επίσης αδρανοποίηση του *Poliovirus 2* και του *Coxsackie virus* επιτυγχάνεται κατά 99.9% με συγκεντρώσεις όζοντος 0,8mg/l και 1,7mg/l αντίστοιχα και χρόνο επαφής πέντε λεπτά (U.S EPA., 1999a).

Μικροοργανισμοί ανθεκτικοί στην υπεριώδη ακτινοβολία και ευαίσθητοι στο χλώριο όπως *Enteric adenoviruses* που προκαλούν οξεία γαστρεντερίτιδα ειδικά σε παιδιά ηλικίας κάτω των τεσσάρων χρόνων, αδρανοποιούνται με την οζόνωση χωρίς να

ανιχνεύεται ποσότητα όζοντος μετά από 2 λεπτά σε συνθήκες pH 7 και θερμοκρασίας 5°C (Thurston-Enriquez et al., 2005).

5.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ

Η αδρανοποίηση του *Cryptosporidium parvum* αποτελεί σημαντική πρόκληση για όσους ασχολούνται με την επεξεργασία του νερού, καθώς οι μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι (χλωρίωση) είναι αναποτελεσματικές στην αδρανοποίηση του πρωτόζωου αυτού στις συνθήκες που επικρατούν στις περισσότερες μονάδες επεξεργασίας νερού (Clark et al., 2002; Corona-Vasquez et al., 2002). Χαρακτηριστικό παράδειγμα της μη αποτελεσματικής απολύμανσης του νερού με χλωρίωση είναι οι 400.000 άνθρωποι που μολύνθηκαν από το συγκεκριμένο βακτήριο στο Milwaukee το 1993 (Clark et al., 2002). Σε αντίθεση με το όζον που είναι ιδιαίτερα δραστικό, αν και απαιτούνται σημαντικές ποσότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε μονάδες επεξεργασίας που χρησιμοποιούν συνδυασμό χλωρίου με όζον η αδρανοποίηση του πρωτόζωου είναι πολύ πιο γρήγορη από ότι όταν σαν απολυμαντικό στοιχείο χρησιμοποιείται μόνο το χλώριο (Corona-Vasquez et al., 2002). Επίσης, έρευνες έχουν δείξει πως με τη χρήση όζοντος επιτυγχάνεται η αδρανοποίηση του *Cryptosporidium parvum* κατά 99% με χρόνο επαφής 20 έως 60 φορές μεγαλύτερο και σε θερμοκρασίες 25° C και 60°C αντίστοιχα σε σχέση με το *Giardia lamblia cysts* (Larson et al., 2003). Παρόλο τα υψηλά ποσοστά αδρανοποίησης του πρωτόζωου που επιτυγχάνονται με την οζόνωση σε περίπτωση που το νερό περιέχει ιόντα βρωμίου που οξειδώνονται σε βρωμικά, η αποτελεσματικότητα της μεθόδου μειώνεται σημαντικά (Clark et al., 2002).

5.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ

Το όζον είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση βακτηρίων. Έρευνες έχουν δείξει πως μικρές συγκεντρώσεις διαλυμένου όζοντος επιτυγχάνουν την αδρανοποίηση του *E.coli* και του *Legionella pneumophila*. Συγκεκριμένα επιτυγχάνεται απομάκρυνση του *E.coli* κατά 99,99% με χρόνο επαφής μικρότερο από ένα λεπτό με συγκέντρωση όζοντος 9 μg/l και θερμοκρασία 12°C, ενώ απομάκρυνση του *Legionella pneumophila* επιτυγχάνεται κατά 99% με συγκέντρωση όζοντος 0,21 mg/l και ελάχιστο χρόνο επαφής πέντε λεπτά. Αντίστοιχα αποτελέσματα με την απομάκρυνση του *E.coli* προκύπτουν με τα βακτήρια *Staphylococcus spp* και *Pseudomonas fluorescens*, ενώ το *Streptococcus faecalis* απαιτεί διπλάσιο χρόνο επαφής και συγκέντρωσης του όζοντος από το *E.coli*, ενώ το *Mycobacterium tuberculosis* εξαπλάσιο (U.S EPA., 1999a).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το διοξείδιο του χλωρίου (ClO_2) παράχθηκε για πρώτη φορά από την αντίδραση του χλωρικού νατρίου (potassium chlorate) με το υδροχλωρικό οξύ (HCl) από τον Sir Humphrey Davy το 1811. Οι μικροβιοκτόνες δυνατότητες του ήταν γνωστές από τις αρχές του 1900, ωστόσο η χρήση του διαδόθηκε από τη στιγμή που η παρασκευή του άρχισε να γίνεται βιομηχανικά (www.atsdr.cdc.gov; www.epa.gov). Χρησιμοποιείται στην επεξεργασία του νερού για την αδρανοποίηση ιών, βακτηριών και πρωτόζωων όπως *Gardia* και *Cryptosporidium*. Ο βασικός μηχανισμός αδρανοποίησης των παθογόνων μικροοργανισμών είναι η διακοπή της σύνθεσης των πρωτεϊνών (www.atsdr.cdc.gov).

Αρχικά χρησιμοποιόταν ως λευκαντικό στην παραγωγή χαρτιού και πολτού, παρόλο τις απολυμαντικές του ιδιότητες άρχισε να χρησιμοποιηθεί στην επεξεργασία του νερού και των λυμάτων (www.atsdr.cdc.gov). Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία του νερού το 1944 στη Νέα Υόρκη για την αντιμετώπιση οσμών και γεύσεων (www.clo2.com). Ουσιαστικά τα τελευταία είκοσι χρόνια έχει γίνει πιο εντατική η χρήση του στην επεξεργασία του νερού, καθώς το 1988 η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (E.P.A.) αναγνώρισε την απολυμαντική του δράση (www.atsdr.cdc.gov; www.epa.gov). Σήμερα το διοξείδιο του χλωρίου χρησιμοποιείται επίσης για τον έλεγχο των μικροβίων σε μεγάλο αριθμό βιομηχανιών όπως στη γαλακτοβιομηχανία, στην κονσερβοποίηση φαγητών, στην παραγωγή αναψυκτικών και στην επεξεργασία κρέατος και πουλερικών. Ακόμη έχει εφαρμογές στη βιομηχανία αερίου και λαδιού για τον εμπλουτισμό των προσθετικών. Τέλος η οικιακή χρήση του έχει πολλές εφαρμογές (www.clo2.com).

6.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

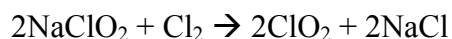
Το διοξείδιο του χλωρίου (ClO_2) είναι ουδέτερο παράγωγο του χλωρίου κατά το τρίτο οξειδωτικό στάδιο (AWWA, 1999). Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι ένα σκούρο κιτρινοπράσινο αέριο και είναι παρόμοιο με το χλώριο στη μορφή και στη γεύση (Junli et al., 1997). Έχει σημείο βρασμού στους 11°C και ως υγρό είναι πυκνότερο από το νερό, ενώ ως αέριο είναι πάλι πυκνότερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα (AWWA, 1999). Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και συγκεκριμένα σε νερό χαμηλής θερμοκρασίας. Ουσιαστικά είναι δέκα φορές πιο διαλυτό από το χλώριο. Σε αντίθεση με το χλώριο δεν

υδρολύεται στο νερό, αλλά παραμένει στο νερό ως διαλυμένο αέριο (U.S EPA., 1999a). Παρόλο της δομής του μορίου του σε μη κορεσμένη κατάσταση, στο νερό παραμένει σε μονομοριακή κατάσταση (Junli et al., 1997).

Χημικά, το διοξείδιο του χλωρίου είναι μία ελεύθερη και σταθερή ρίζα που σε μεγάλες συγκεντρώσεις αντιδρά με πολλά στοιχεία. Είναι εκρηκτικό σε υψηλές συγκεντρώσεις, όταν ξεπερνά το 10% κατά όγκο, για αυτό η σύνθεση του αερίου γίνεται με την παρασκευή ενός αραιού διαλύματος (AWWA, 1999). Η παρατεταμένη έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV) έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπασή του (Bergmann et al., 2005). Επίσης λόγω της εκρηκτικής του δράσης δεν είναι δυνατόν να αποθηκευτεί ή να συμπιεστεί και ποτέ δεν μεταφέρεται (U.S EPA., 1999a).

6.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

Το διοξείδιο του χλωρίου παρασκευάζεται από διαλύματα υποχλωριώδους νατρίου που αντιδρούν είτε με αέριο χλώριο (Cl_2), υποχλωριώδες οξύ (HOCl) είτε με υδροχλώριο (HCl), όπως φαίνεται στις παρακάτω αντιδράσεις.



Με βάση τις παραπάνω αντιδράσεις γίνεται και η διάκριση μεταξύ των συσκευών παρασκευής διοξειδίου του χλωρίου παρόλο που μπορεί να χρησιμοποιούν την ίδια πρώτη ύλη έχουν διαφορετικό τρόπο σύνθεσης του διοξειδίου του χλωρίου (U.S EPA., 1999a). Σε ορισμένες περιπτώσεις το διοξείδιο του χλωρίου παρασκευάζεται με ηλεκτρόλυση νερού που περιέχει χλωρίοντα (Bergmann et al., 2005).

6.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Οι περισσότερες συσκευές χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη για την παρασκευή του διοξειδίου του χλωρίου υποχλωριώδες νάτριο. Πρόσφατα άρχισε να χρησιμοποιείται επίσης διάλυμα χλωρικού νατρίου (NaClO_3), όπου προστίθεται υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) και θειικό οξύ (H_2SO_4).

Συνήθως η παρασκευή του διοξειδίου του χλωρίου πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο το αέριο χλώριο αντιδρά με το νερό σχηματίζοντας υποχλωριώδες οξύ και υδροχλωρικό οξύ. Στη συνέχεια τα δύο αυτά οξέα αντιδρούν με το υποχλωριώδες νάτριο σχηματίζοντας διοξείδιο του χλωρίου. Η αναλογία μεταξύ των οξέων του υποχλωριώδους νατρίου πρέπει να ελέγχεται συστηματικά (U.S EPA., 1999a).

6.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Το διοξειδίο του χλωρίου έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με το χλώριο και τα υπόλοιπα απολυμαντικά μέσα. Σε αντίθεση με το χλώριο, δε διασπάται το μόριό του στις διάφορες τιμές του pH. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών παρόλο που ο τρόπος δράσης του εξαρτάται από το είδος του μικροοργανισμού (U.S EPA., 1999a).

Ζημιές στην κυτταρική μεμβράνη ή στο κέλυφος των ιών δεν έχουν παρατηρηθεί κατά τη χρήση διοξειδίου του χλωρίου σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Ο μηχανισμός αδρανοποίησης των μικροοργανισμών περιλαμβάνει τις αντιδράσεις μεταξύ του διοξειδίου του χλωρίου και των κυτταρικών μορίων και τις επιπτώσεις του διοξειδίου του χλωρίου στις βιολογικές διεργασίες του κυττάρου (U.S EPA., 1999a).

Στην πρώτη περίπτωση το διοξειδίο του χλωρίου αντιδρά εύκολα με τα αμινοξέα, την τυροσίνη, αλλά όχι με το ριβονουκλεϊκό οξύ (RNA). Ουσιαστικά το διοξειδίο του χλωρίου αδρανοποιεί του ιούς αλλάζοντας τη σύνθεση των πρωτεϊνών. Ωστόσο το διοξειδίο του χλωρίου αντιδρά με το RNA των ρολιονίους και καταστρέφει τη σύνθεση του DNA. Επίσης αντιδρά με λιπαρά οξέα (U.S EPA., 1999a).

Ο δεύτερος μηχανισμός αδρανοποίησης αφορά τις επιπτώσεις του διοξειδίου του χλωρίου στις κυτταρικές λειτουργίες. Ο πρωταρχικός μηχανισμός αδρανοποίησης είναι η αναστολή σύνθεσης των πρωτεϊνών. Επίσης το διοξειδίο του χλωρίου μεταβάλλει τη διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης, καθώς έρευνες έχουν δείξει πως οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια της κυτταρικής μεμβράνης μεταβάλλονται κατά την προσθήκη διοξειδίου του χλωρίου (U.S EPA., 1999a).

6.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ

Ο τρόπος επαφής του διοξειδίου του χλωρίου είναι αντίστοιχος με τα υπόλοιπα απολυμαντικά μέσα, αν και έχει διαπιστωθεί ότι λόγω της πτητικότητάς του είναι πιο αποτελεσματικό όταν βρίσκεται σε κλειστούς αντιδραστήρες, όπως σωληνώσεις (U.S EPA., 1999a).

6.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Οι βασικότεροι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του διοξειδίου του χλωρίου είναι το pH, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών που περιέχονται στο προς επεξεργασία νερό (U.S EPA., 1999a).

6.5.1 pH

Σε αντίθεση με το χλώριο, η δραστηριότητα του διοξειδίου του χλωρίου δε μεταβάλλεται σημαντικά σε τιμές pH 6 – 10 (U.S EPA., 1999a). Έχει αποδειχθεί πως η αποτελεσματικότητα του δε διαφοροποιείται σε τιμές pH 2,0-10,5 (Radziminski et al., 2002). Ιδιαίτερα στην αδρανοποίηση των poliovirus η αύξηση του pH είναι ανασταλτικός παράγοντας (U.S EPA., 1999a). Γενικότερα επιτυγχάνεται αδρανοποίηση των βακτηριών σε ικανοποιητικά ποσοστά σε τιμές pH 3,0-9,0 (Junli et al., 1997).

Ωστόσο σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για την αδρανοποίηση του *E.coli* αύξηση του pH συμβάλλει θετικά στην αδρανοποίηση του, αν και η δραστηριότητα του διοξειδίου του χλωρίου δε μεταβάλλεται στις διάφορες τιμές pH (U.S EPA., 1999a). Επίσης η αδρανοποίηση του *Cryptosporidium* επιτυγχάνεται σε ποσοστά 90-99,9% σε τιμές pH 6-8, ενώ είναι περίπου κατά 20% χαμηλότερη pH 10. Ουσιαστικά η αποτελεσματικότητα του διοξειδίου του χλωρίου δε μεταβάλλεται σημαντικά σε τιμές pH 6-8, βασικά είναι η ίδια (Rufell et al., 2000). Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν κατά την αδρανοποίηση του *Gardia* (U.S EPA., 1999a).

6.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Ανάλογα με το χλώριο, η δραστηριότητα του διοξειδίου του χλωρίου μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Έχει αποδειχθεί ότι μείωση της θερμοκρασίας από τους 20°C στους 10°C μειώνει την αποτελεσματικότητα του διοξειδίου του χλωρίου κατά 40%, ενώ παράλληλα πρέπει να αυξηθεί ο χρόνος επαφής (U.S EPA., 1999a).

6.5.3 ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ

Τα διαλυμένα στερεά και η συσσώρευση των μικροοργανισμών δρουν ανασταλτικά στην απολύμανση του νερού με το διοξείδιο του χλωρίου. Ουσιαστικά με θολότητα μεταξύ 5 -17 NTU η αδρανοποίηση των μικροοργανισμών δεν επιτυγχάνεται, ενώ παράλληλα απαιτείται 2,7 φορές παραπάνω χρόνος επαφής για την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών όταν βρίσκονται συσσωρευμένοι (U.S EPA., 1999a).

6.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Τα παραπροϊόντα που σχηματίζονται κατά την χρήση διοξειδίου του χλωρίου είναι κυρίως το χλωριώδες και το χλωρικό ιόν και οργανικά παραπροϊόντα. Η χρήση του διοξειδίου του χλωρίου ως απολυμαντικό έχει μειώσει σημαντικά το σχηματισμό των τριαλογονομένων παραγώγων του μεθανίου και των αλογονοοξικών οξέων, καθώς μειώνεται η ποσότητα της οργανικής ύλης που περιέχεται στο νερό και οξειδώνονται οι ενώσεις που τα δημιουργούν (U.S EPA., 1999a). Επίσης ο μη σχηματισμός τριαλογονομένων παραγώγων μεθανίου οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό οξείδωσης, το διοξείδιο του χλωρίου δρα ως ελεύθερη ρίζα αφαιρώντας ηλεκτρόνια, ενώ το χλώριο αντικαθιστά (Gagnon et al., 2005). Οι κυριότεροι παράγοντες που

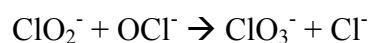
επιηρεάζουν τη δημιουργία των παραπροϊόντων είναι η συγκέντρωση και το είδος των ουσιών που περιέχονται στο νερό (Chang et al., 2001).

Το χλωριώδες και το χλωρικό ιόν παράγονται σε διάφορες αναλογίες ως τελικά προϊόντα της επεξεργασίας του νερού και της σταδιακής διάσπασης του διοξειδίου του χλωρίου, περίπου το 68% της ποσότητας του διοξειδίου του χλωρίου μετατρέπεται σε χλωριώδες ιόν, ενώ 9% σε χλωρικό ιόν χωρίς να συνυπολογίζονται οι επιδράσεις μετάλλων και μη οργανικών στοιχείων που περιέχονται στο νερό (Korn et al., 2002, U.S EPA., 1999a). Σε ορισμένες περιπτώσεις η μετατροπή του διοξειδίου του χλωρίου σε χλωριώδες ιόν κυμαίνεται μεταξύ 30% έως 70% της αρχικής του ποσότητας (Gagnon et al., 2005). Οι βασικότεροι παράγοντες που συμβάλλουν στο σχηματισμό τους είναι :

- ο η απαιτούμενη δόση διοξειδίου του χλωρίου
- ο η αναλογία μεταξύ του υποχλωριώδους νατρίου και του χλωρίου κατά την παρασκευή του διοξειδίου του χλωρίου
- ο η έκθεση του νερού στο ηλιακό φως
- ο οι αντιδράσεις μεταξύ του χλωρίου και το χλωριώδους ιόντος, όταν χρησιμοποιείται χλώριο για τη γενικότερη απολύμανση της μονάδας
- ο τα επίπεδα του χλωρικού ιόντος στο υποχλωριώδες νάτριο (U.S EPA., 1999a).

Μεγάλος αριθμός μη οργανικών και βιολογικών συστατικών που περιέχονται στο νερό αντιδρούν με το διοξείδιο του χλωρίου. Τα χλωριόντα (Cl^-) και χλωριώδη ιόντα (ClO_2^-) είναι αυτά που κυριαρχούν κατά τις διασπάσεις αυτές, αν και σε πολλές περιπτώσεις επίσης σχηματίζεται και χλωρικό ιόν (ClO_3^-). Οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται με το οργανικό υλικό παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάσπαση του διοξειδίου του χλωρίου σε χλωριώδες ιόν. Ουσιαστικά το χλωριώδες ιόν είναι το βασικό προϊόν της αναγωγής του διοξειδίου χλωρίου. Η αναλογία μεταξύ χλωριώδους και χλωρικού ιόντος εξαρτάται από την τιμή του pH και το ηλιακό φως (U.S EPA., 1999a).

Το χλωριώδες ιόν είναι γενικά σταθερό όταν περιέχεται στο νερό οργανική ύλη, αλλά οξειδώνεται προς χλωρικό ιόν αν προστεθεί χλώριο ως δεύτερο απολυμαντικό μέσο, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση.



Το χλωρικό ιόν ουσιαστικά σχηματίζεται από την αντίδραση μεταξύ του χλωριώδους ιόντος και του χλωρίου κατά την απολύμανση με χλώριο. Επίσης το διοξείδιο του χλωρίου διασπάται σε χλωριώδες και χλωρικό ιόν σε τιμές $\text{pH} > 9$ κατά την παρακάτω αντίδραση (Bergmann et al., 2005).



Το ηλιακό φως αυξάνει τη συγκέντρωση του χλωρικού ιόντος και η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία αλλάζει τις αντιδράσεις μεταξύ του διοξειδίου του χλωρίου και των βρωμιόντων (U.S EPA.,1999a).

Γενικότερα το διοξείδιο του χλωρίου σχηματίζει ελάχιστα οργανικά παραπροϊόντα. Δε σχηματίζονται τριαλογονομένα παράγωγα του μεθανίου, παρά μικρές ποσότητες ενώσεων αλογόνων, ενώ δεν πραγματοποιούνται αντιδράσεις με αμμώνιο (Bergmann et al., 2005; U.S EPA., 1999a).

6.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Η χρήση του διοξειδίου του χλωρίου άρχισε να εξαπλώνεται, καθώς δε δημιουργεί επικίνδυνα οργανικά παραπροϊόντα και είναι πιο αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών σε σχέση με το χλώριο (Veschetti et al., 2005). Ακόμη κι όταν παρατηρείται ο σχηματισμός τριαλογονομένων παραγώγων του μεθανίου είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα σε σχέση με το χλώριο, αποδεκτά από τη νομοθεσία και δεν προκαλούν προβλήματα υγείας στον άνθρωπο (Chang et al, 2000). Το διοξείδιο του χλωρίου μπορεί να χαρακτηριστεί, εκτός από απολυμαντικό μέσο, ως παραπροϊόν της ηλεκτροχημικής απολύμανσης στου νερού (Bergmann et al., 2005).

6.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Το διοξείδιο του χλωρίου είναι επίσης αποτελεσματικό στην απομάκρυνση γεύσεων και οσμών, οι οποίες προέρχονται από άλγη και φαινόλες. Ακόμη οξειδώνει το σίδηρο και το μαγγάνιο αντιδρώντας με τις διαλυτές μορφές τους και δημιουργώντας ιζήματα που απομακρύνονται στη συνέχεια με καθίζηση ή διήθηση (U.S EPA., 1999a).

6.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Παρόλο που το διοξείδιο του χλωρίου δε σχηματίζει οργανικά παραπροϊόντα, αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, καθώς ευνοεί το σχηματισμό μη οργανικών παραπροϊόντων, όπως χλωριώδες (ClO_2^-) και χλωρικό (ClO_3^-) ιόν. Η έκθεση στο χλωριώδες ιόν προκαλεί κυρίως προβλήματα στο αιμοποιητικό σύστημα. Σε μικρές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει αναιμία καταστρέφοντας την κυτταρική μεμβράνη των ερυθρών αιμοσφαιρίων, ενώ σε υψηλές συγκεντρώσεις αυξάνει τη μεθεμογλοβίνη. Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, έχει αποδειχθεί πως το χλωριώδες ιόν προκαλεί προβλήματα στο νευρικό σύστημα των εμβρύων και των μικρών παιδιών. Επίσης καθώς το διοξείδιο του χλωρίου και το χλωρικό ιόν μετατρέπονται ραγδαία σε χλωριώδη ιόντα ως αποτέλεσμα της αναγωγής των νιτρικών αλάτων, αυξάνονται τα επίπεδα τοξικότητας στον ανθρώπινο οργανισμό (Veschetti et al., 2005).

6.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Το διοξείδιο του χλωρίου είναι πιο δραστικό από το χλώριο στην αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών, ωστόσο το όζον είναι πιο αποτελεσματικό (U.S EPA., 1999a). Είναι αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση παθογόνων πρωτόζωων ανθεκτικών στο χλώριο, όπως *Cryptosporidium parvum* (Gagnon et al., 2005).

6.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ

Σε πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί το διοξείδιο του χλωρίου είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση των ιών, όταν δεν είναι συσσωρευμένοι (U.S EPA., 1999a). Δεν έχει καθοριστεί ακόμη ο ακριβής μηχανισμός αδρανοποίησης των ιών. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο ιός αδρανοποιείται με 'καταστροφή' του RNA, ενώ σε ελάχιστες περιπτώσεις το διοξείδιο του χλωρίου αντιδρά με τις πρωτεΐνες (Li et al., 2004).

Ο ιός *Hepatitis A* είναι από τους ιούς που μεταδίδονται με το νερό και είναι ιδιαίτερα ανθεκτικός στα απολυμαντικά στοιχεία, καθώς όταν η συγκέντρωση του διοξειδίου του χλωρίου είναι 5mg/l ο ιός δεν αδρανοποιείται ακόμη κι μετά από χρόνο επαφής εξήντα λεπτών. Ωστόσο με αύξηση της συγκέντρωσης κατά 2,5mg/l, ο ιός αδρανοποιείται ολοκληρωτικά μέσα σε δέκα λεπτά χρόνο επαφής (Li et al., 2004). Επίσης κατά την αδρανοποίηση των *Echovirus*, *Coxsackie virus* και *Sendaivirus* είναι καλύτερο από το χλώριο (U.S EPA., 1999a).

6.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ

Η αποτελεσματικότητα του διοξειδίου του χλωρίου στην αδρανοποίηση του *Gardia* είναι παρόμοια με εκείνη του χλωρίου. Για χρόνο επαφής εξήντα λεπτά απαιτείται 1,5–2 mg/l για την αδρανοποίηση του βακτηρίου σε θερμοκρασία 1°C–25°C και pH 6-9. Έχει βρεθεί πως το βακτήριο *Cryptosporidium* είναι περίπου 8 με 16 φορές πιο ανθεκτικό στο διοξείδιο του χλωρίου από το *Gardia* (U.S EPA., 1999a).

Ουσιαστικά το διοξείδιο του χλωρίου είναι πιο αποτελεσματικό απολυμαντικό στην αδρανοποίηση των κυστών από ότι το χλώριο και πιο δραστικό σε υψηλές τιμές pH (U.S EPA., 1999a).

6.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ

Γενικότερα το διοξείδιο του χλωρίου είναι πιο δραστικό από το χλώριο. Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί το διοξειδίου του χλωρίου είναι πιο αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση των κολοβακτηριδίων σε χρόνο επαφής πέντε λεπτά, ενώ στα τριάντα λεπτά τόσο το χλώριο όσο και το διοξείδιο του χλωρίου έχουν την ίδια δραστικότητα (U.S EPA., 1999a). Πιο συγκεκριμένα επιτυγχάνεται αδρανοποίηση του *E.coli* κατά

99,9% με απαιτούμενη ποσότητα διοξειδίου του χλωρίου 1,4mg/l, ενώ η απαιτούμενη ποσότητα του χλωρίου για το ίδιο ποσοστό αδρανοποίησης είναι 1,8mg/l (Junli et al., 1997). Επίσης με τη χρήση διοξειδίου του χλωρίου επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερα ποσοστά αδρανοποίηση του *Bacillus subtilis*, *Bacillus mesentericus*, *Bacillus megatherium spores*, ενώ έχει παρόμοια αποτελέσματα με το χλώριο στα βακτήρια *Salmonella typhosa* και *Salmonella Paratyphi* (U.S EPA., 1999a). Πιο συγκεκριμένα επιτυγχάνεται αδρανοποίηση του *Bacillus* σε τιμές pH 3-9. Ακόμη σε θερμοκρασία 19°C και χρόνο επαφής είκοσι λεπτά αδρανοποιούνται κατά 95% τα βακτήρια *Staphylococcus aureus* και *Chloropseudomonas* (Junli et al., 1997).

Ακόμη και στην παρουσία διαλυμένων στερεών είναι αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση του *E.coli* και του *Bacillus anthracoides* σε δόσεις 1-5 mg/l (U.S EPA., 1999a). Πολλές φορές χρησιμοποιείται για την απολύμανση των σωληνώσεων, μέρη στα οποία αναπτύσσεται το βακτήριο *Legionella* (Bergmann et al., 2005).

ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟ ΚΑΛΙΟ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υπερμαγγανικό κάλιο είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό που χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία του νερού. Παρόλο που δεν είναι βασικό απολυμαντικό μέσο, χρησιμοποιείται ως εναλλακτικό της προχλωρίωσης ή άλλων οξειδωτικών μέσων, όπου είναι απαραίτητη η χημική οξείδωση για την εξάλειψη οσμών, χρωμάτων και γεύσεων (U.S EPA., 1999a). Δευτερευόντως χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της δημιουργίας τριαλογονωμένων παραγώγων μεθανίου και για τη μείωση της απαραίτητης ποσότητας των απολυμαντικών (Bryant et al., 1992).

Το υπερμαγγανικό κάλιο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως απολυμαντικό στην Ευρώπη το 1862 και μέχρι το 1873 η χρήση του είχε διαδοθεί σημαντικά. Η αποτελεσματικότητά του διαπιστώθηκε κατά τον περιορισμό της επιδημίας χολέρας το 18^ο αιώνα. Εκτός από τη χρήση του σε νοσοκομεία και δημόσιους χώρους, χρησιμοποιήθηκε ως απολυμαντικό και στα σπίτια. Σταδιακά αντικαταστάθηκε από χημικά απολυμαντικά, όπως το χλώριο, ωστόσο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για συγκεκριμένες απολυμαντικές εφαρμογές ιατρικής και κτηνιατρικής (Bryant et al., 1992).

7.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ

Το υπερμαγγανικό κάλιο (KMnO_4) απαντάται συνήθως στη μορφή σκούρων μπλε σχεδόν μαύρων κρυστάλλων, οι οποίοι μπορεί να έχουν μπλε μεταλλική λάμψη σε αντανακλώμενο φως (Bryant et al., 1992). Οι κρύσταλλοι αυτοί προκαλούν σοβαρές ζημιές στα μάτια και προβλήματα στην αναπνοή, ερεθίζουν το δέρμα και σε περίπτωση κατάποσης είναι θανατηφόροι, γι'αυτό το λόγο πρέπει να λαμβάνονται όλα τα μέτρα ασφαλείας όπως μάσκες εισπνοής και αδιαπέραστα γάντια, στολές, μπότες και γυαλιά, ώστε να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος επαφής με το γυμνό δέρμα (U.S EPA., 1999a). Ανάλογα με τη μέθοδο κρυσταλλοποίησης κατά την παρασκευή, οι κρύσταλλοι μπορεί να έχουν τη μορφή οβελίσκου (ρομβικά πρίσματα) είτε να είναι ακανόνιστες σφαίρες. Το καθαρό υπερμαγγανικό κάλιο είναι μη υγροσκοπικό, αλλά οι μεμονωμένοι κρύσταλλοι έχουν την τάση να δημιουργούν συμπαγή μάζα ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλής υγρασίας (Bryant et al., 1992). Λόγω της ιδιότητας αυτής, στις μονάδες όπου παρασκευάζονται τα διαλύματα υπερμαγγανικού καλίου από την ξηρή μορφή του πρέπει να προστίθενται ουσίες, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία μαζών (U.S EPA., 1999a).

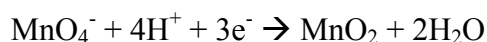
Η διαλυτότητα του υπερμαγγανικού καλίου στο νερό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία (Πίνακας 7.1). Το ποσοστό διάλυσης εξαρτάται επίσης και από μέγεθος των σωματιδίων, την 'ηρεμία' του νερού και τις συγκεντρώσεις άλλων αλάτων που περιέχονται ήδη στο νερό. Η άμεση διάλυση του στο νερό επιτυγχάνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, με μικρό μέγεθος σωματιδίων και έντονη ανάδευση.

Πίνακας 7.1 : Διαλυτότητα KMnO_4 στο νερό, Πηγή : Bryant et al., 1992

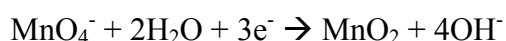
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ (%)
0	2,8
20	6,5
40	12,5
60	23,0

Το υπερμαγγανικό κάλιο είναι πολύ δραστικό ιδιαίτερα όταν είναι σε διάλυση και σχεδόν όλες οι αντιδράσεις είναι εξώθερμες. Εκτός από πολύ όξινες ή αλκαλικές συνθήκες, οι οξειδώσεις συνεπάγονται τη μείωση του σθένους του μαγγανίου από +7 που βρίσκεται στο υπερμαγγανικό σε +4 που βρίσκεται στο ένυδρο διοξείδιο του μαγγανίου, το οποίο καθιζάνει (Bryant et al., 1992).

Σε τιμές pH 4-9 το υπερμαγγανικό κάλιο οξειδώνει μεγάλο πλήθος οργανικών και μη οργανικών ουσιών. Σε όξινες συνθήκες η αντίδραση που πραγματοποιείται είναι η εξής :



Ενώ σε αλκαλικές συνθήκες η αντίδραση που πραγματοποιείται είναι :



Οι περισσότερες οξειδωτικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται γρηγορότερα σε αλκαλικές συνθήκες, καθώς ευνοείται ο σχηματισμός των οργανικών ανιόντων. Το υπερμαγγανικό κάλιο οξειδώνει οργανικά ανιόντα πιο εύκολα από ουδέτερα μόρια (Bryant et al., 1992).

7.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

Η συνηθέστερη μορφή που παρέχεται το υπερμαγγανικό κάλιο είναι η ξηρή. Τα διαλύματα υπερμαγγανικού καλίου με συγκέντρωση 1-4% παρασκευάζονται συνήθως επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας και έχουν μοβ ή ροζ χρώμα. Κατά την παρασκευή του δε δημιουργούνται παραπροϊόντα.

Το υπερμαγγανικό κάλιο είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό και η παρασκευή του πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή (U.S EPA., 1999a). Τέλος η αποθήκευση του πρέπει να γίνεται σε αντιδιαβρωτικές δεξαμενές (Bryant et al., 1992).

7.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ

Ανάλογα με τη ποσότητα του υπερμαγγανικού που απαιτείται, τα διαλύματα μπορούν να κατασκευαστούν σε παρτίδες μέσα σε δεξαμενές με αναμικτήρες και διοχετεύονται μέσω μικρών αντλιών. Τα μεγαλύτερα συστήματα περιλαμβάνουν χοάνη αποθήκευσης και συλλέκτη σκόνης, ώστε να σχηματίζεται αυτόματα και να μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης.

7.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Ο βασικός μηχανισμός αδρανοποίησης των παθογόνων μικροοργανισμών είναι η απευθείας οξείδωση του κυτταρικού υλικού ή καταστροφή συγκεκριμένων ενζύμων. Παρόμοια δρα το υπερμαγγανικό ιόν (MnO_4^-) όπου αντιδρά με αρκετούς μικροοργανισμούς όπως βακτήρια, ιοί, μύκητες και άλγη (U.S EPA., 1999a).

Η συνολική δράση του υπερμαγγανικού καλίου είναι αποτέλεσμα της καθίζησης του διοξειδίου του μαγγανίου. Η ιδιότητα αυτή αποτελεί μία συμπληρωματική μέθοδο απομάκρυνσης των μικροοργανισμών από το πόσιμο νερό (U.S EPA., 1999a). Το διοξείδιο του μαγγανίου περιέχει χημικό δεσμό με το νερό και έχει πολυμερική δομή (Bryant et al., 1992). Στην κolloειδή μορφή, το ίζημα του διοξειδίου του μαγγανίου φέρει μία εξωτερική στρώση που αποτελείται από εκτεθειμένες ομάδες υδροξυλίου OH. Οι ομάδες αυτές προσελκύουν φορτισμένα σωματίδια και όχι ουδέτερα μόρια. Κατά αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται συσσωματώματα, όπου προσροφούν τους μικροοργανισμούς και με καθίζηση απομακρύνονται. Η διαδικασία αυτή αποτελεί εναλλακτικό τρόπο απομάκρυνσης των μικροοργανισμών από το πόσιμο νερό (U.S EPA., 1999a).

7.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ

Στις συνηθισμένες μονάδες επεξεργασίας το υπερμαγγανικό κάλιο προστίθεται είτε κατά την είσοδο του νερού στη μονάδα, είτε στη δεξαμενή ανάμιξης μαζί με τα κροκιδωτικά είτε πριν από τη διήθηση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα οξειδωτικά προστίθενται κατά την είσοδο του νερού στη μονάδα ώστε να αυξηθεί ο χρόνος επαφής. Γενικότερα το υπερμαγγανικό κάλιο σε όλες τις περιπτώσεις προστίθεται πριν από τη διήθηση.

Το διάλυμα του υπερμαγγανικού καλίου αντλείται από τη δεξαμενή που περιέχεται στο σημείο προσθήκης. Επειδή είναι ιδιαίτερα δραστικό και γρήγορο οξειδωτικό δεν απαιτούνται συνθήκες ανάμιξης κατά την προσθήκη του (U.S EPA., 1999a).

7.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ

Η αποτελεσματικότητα του υπερμαγγανικού καλίου εξαρτάται από τη συγκέντρωση, το χρόνο επαφής, το pH, τη θερμοκρασία και την παρουσία άλλων οξειδωτικών στοιχείων (U.S EPA., 1999a).

7.5.1 pH

Οι αλκαλικές συνθήκες βελτιώνουν την ικανότητα του υπερμαγγανικού καλίου να οξειδώνει οργανικές ενώσεις, ενώ επηρεάζουν αρνητικά την απολυμαντική του δράση. Ουσιαστικά, το υπερμαγγανικό κάλιο είναι καλύτερο απολυμαντικό στοιχείο σε όξινες συνθήκες (Bryant et al., 1992; U.S EPA., 1999a). Σύμφωνα με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, η αδρανοποίηση του *E.coli* πραγματοποιείται σε μεγαλύτερα ποσοστά σε χαμηλές τιμές pH. Στην πραγματικότητα το pH επηρεάζει σημαντικά την απολυμαντική αποτελεσματικότητα του υπερμαγγανικού καλίου. Κατά αυτόν τον τρόπο νερό με pH 6,0 ή και χαμηλότερο συμβάλλει στη διαδικασία της απολύμανσης και δεν απαιτείται προχλωρίωση. Γενικότερα η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης με υπερμαγγανικό κάλιο αυξάνεται με μείωση του pH (U.S EPA., 1999a).

7.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Υψηλές θερμοκρασίες βελτιώνουν ελάχιστα την απόδοση του υπερμαγγανικού καλίου. Στην πραγματικότητα η απενεργοποίηση των μικροοργανισμών μέσω οξείδωσης είναι πιο αποτελεσματική σε υψηλές θερμοκρασίες (U.S EPA., 1999a).

7.5.3 ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ

Η παρουσία οξειδώσιμων οργανικών ή ανόργανων στοιχείων μειώνει την αποτελεσματικότητα του υπερμαγγανικού καλίου, καθώς μέρος της προστιθέμενης ποσότητας θα καταναλωθεί για την οξείδωση των ενώσεων αυτών. Το υπερμαγγανικό κάλιο οξειδώνει μεγάλο αριθμό οργανικών και ανόργανων ενώσεων σε pH 4-9. Σε κανονικές συνθήκες ο σίδηρος και το μαγγάνιο οξειδώνονται και καθιζάνουν καθώς και το μεγαλύτερο μέρος των μολυσματικών παραγόντων που προκαλούν γεύσεις και οσμές στο νερό, όπως φαινόλες και άλγη εξουδετερώνονται από το υπερμαγγανικό (U.S EPA., 1999a).

7.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ

Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πληροφορίες για το σχηματισμό παραπροϊόντων κατά την απολύμανση με υπερμαγγανικό κάλιο. Σε διάφορες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε μονάδες επεξεργασίας νερού η προχλωρίωση έχει αντικατασταθεί με προσθήκη υπερμαγγανικού καλίου και το σημείο προσθήκης του χλωρίου έχει αλλάξει. Η προεπεξεργασία με υπερμαγγανικό σε συνδυασμό με την προσθήκη χλωρίου μειώνει σημαντικά το σχηματισμό των παραπροϊόντων σε σχέση με εκείνα που θα σχηματιζόνταν με την προχλωρίωση. Κατά αυτόν τον τρόπο το

υπερμαγγανικό κάλιο είναι υποκατάστατο του χλωρίου και μειώνει σημαντικά την οργανική ύλη που περιέχεται στο νερό (U.S EPA., 1999a).

7.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟΥ ΚΑΛΙΟΥ

Το υπερμαγγανικό κάλιο είναι εξαιρετικά δραστικό και δυνατό οξειδωτικό που έχει τη δυνατότητα να οξειδώνει ακόμη και τα πιο βασικά στοιχεία των οργανικών μορίων (Lozinski et al., 2003). Παρόλο που δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία κατά την παρασκευή του, η χρήση του δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη λόγω της μειωμένης αποτελεσματικότητας στην αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών που περιέχονται στο νερό (U.S EPA., 1999a).

7.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρόλο που το υπερμαγγανικό κάλιο αδρανοποιεί τους παθογόνους μικροοργανισμούς κυρίως βακτήρια και ιούς που περιέχονται στο νερό, δε χρησιμοποιείται ως πρωταρχικό ή εναλλακτικό απολυμαντικό μέσο. Το κόστος για την απαιτούμενη ποσότητα ως απολυμαντικό είναι απαγορευτικό, όπως επίσης ο χρόνος επαφής είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Εντούτοις, χρησιμοποιείται στην επεξεργασία του πόσιμου νερού και για την οξείδωση του σιδήρου και του μαγγανίου, την απομάκρυνση οσμών και γεύσεων και τον έλεγχο του σχηματισμού παραπροϊόντων (U.S EPA., 1999a).

7.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Καθώς δε σχηματίζονται παραπροϊόντα με τη χρήση υπερμαγγανικού καλίου, οι κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία είναι ελάχιστοι. Η χρήση και η προσθήκη υπερβολικής ποσότητας υπερμαγγανικού καλίου είναι πηγές μαγγανίου στο προς κατανάλωση νερό. Σε περίπτωση που δεν απομακρυνθεί η επιπλέον ποσότητα του υπερμαγγανικού καλίου με τη διήθηση, τότε το παραμένον μαγγάνιο προσδίδει καφέ ή μαύρο χρώμα στο νερό και δημιουργεί ιζήματα σε επιφάνειες με διαφορά θερμοκρασίας, όπως θερμοσίφωνες και πλυντήρια πιάτων (U.S EPA., 1999a).

7.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Το υπερμαγγανικό κάλιο δε θεωρείται βασικό απολυμαντικό μέσο λόγω του υψηλού κόστους και του μεγάλου απαιτούμενου χρόνου επαφής, η οξειδωτική του όμως δράση συμβάλλει στην αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών που περιέχονται στο νερό (U.S EPA., 1999a).

7.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ

Το υπερμαγγανικό κάλιο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων ιών. Για την αδρανοποίηση poliovirus απαιτείται 5,0mg/l

υπερμαγγανικό κάλιο και χρόνος επαφής δύο ωρών (U.S EPA., 1999a). Καλύτερα ποσοστά αδρανοποίησης επιτυγχάνονται στους 23°C παρά στους 7°C, ενώ δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση για τιμές pH 6-8 (Bryant et al., 1992; U.S EPA., 1999a).

7.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ

Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πληροφορίες για την αδρανοποίηση των πρωτόζωων. Δεχόμενοι πως τα πρωτόζωα είναι πιο ανθεκτικά από του ιούς στην απολύμανση, οι δόσεις του υπερμαγγανικού και οι χρόνοι επαφής που απαιτούνται δεν έχουν πρακτική εφαρμογή (U.S EPA., 1999a).

7.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ

Για την αποτελεσματική αδρανοποίηση των βακτηρίων απαιτούνται μεγάλες δόσεις υπερμαγγανικού καλίου. Πιο συγκεκριμένα για την αδρανοποίηση των κολοβακτηριδίων η απαιτούμενη ποσότητα είναι 2,5mg/l. Για την απενεργοποίηση των *Vibrio cholerae* και *Salmonella typhi* απαιτείται 20mg/l υπερμαγγανικό και χρόνος επαφής 24 ώρες. Ωστόσο οι παραπάνω παράμετροι δε συμβάλλουν στην εξασφάλιση της πλήρους απομάκρυνσης των συγκεκριμένων βακτηρίων από το πόσιμο νερό, και η υψηλή συγκέντρωση υπερμαγγανικού προσδίδει ροζ χρώμα στο νερό (U.S EPA., 1999a).

ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι χλωραμίνες σχηματίζονται από την αντίδραση της αμμωνίας με υδάτινο(aqueous) χλώριο, κυρίως υδροχλωρικό οξύ. Αρχικά οι χλωραμίνες χρησιμοποιούνταν για την εξάλειψη οσμών και γεύσεων από το νερό. Ωστόσο σύντομα αποδείχθηκε πως οι χλωραμίνες είναι πιο σταθερές από το χλώριο και συνεπώς πιο αποτελεσματικές στην αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών. Το γεγονός αυτό συνέβαλε στη συστηματική χρήση τους ως απολυμαντικό μεταξύ 1930-1940, αν και η έλλειψη αμμωνίας που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της 'δημοτικότητας' τους (U.S EPA., 1999a).

8.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ

Οι χλωραμίνες είναι αμίνες που περιέχουν στο μόριο τους τουλάχιστον ένα άτομο χλωρίου το οποίο συνδέεται άμεσα με άτομο αζώτου. Οι ανόργανες χλωραμίνες σχηματίζονται όταν διαλυμένο χλώριο αντιδρά με αμμωνία (www.lenntech.com/water-disinfection). Είναι ιδιαίτερα ασταθείς και διασπώνται προς άζωτο και υποχλωριώδες οξύ (U.S ECAO., 1994). Κατά την αντίδραση αυτή σχηματίζονται τρεις μορφές ανόργανων χλωραμινών : η μονοχλωραμίνη (NH_2Cl), η διχλωραμίνη (NHCl_2) και η τριχλωραμίνη (NCl_3) (Πίνακας 8.1) (www.lenntech.com/water-disinfection).

Πίνακας 8.1 : Είδη και χαρακτηριστικά χλωραμινών, Πηγή :

www.lenntech.com/water-disinfection

ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΟΝΟΜΑ	ΜΟΡΙΑΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΕΥΝΟΙΚΗ ΤΙΜΗ ΡΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
NH_2Cl	μονοχλωραμίνη	52	>7	καλή
NHCl_2	διχλωραμίνη	85	4-7	ανεκτή
NCl_3	τριχλωραμίνη	119	1-3	μέση
RNCl	οργανικές χλωραμίνες	ποικίλο	άγνωστη	άσχημη

Υπό κανονικές συνθήκες στα διαλύματα των χλωραμινών κυριαρχεί η μονοχλωραμίνη, η οποία όταν βρίσκεται σε υγρή μορφή έχει κίτρινο χρώμα, ενώ σε αέρια μορφή είναι άχρωμη. Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι σε υγρή μορφή και είναι διαλυτή στο νερό. Στους -66°C στερεοποιείται, ενώ στους -50°C μετατρέπεται σε τριχλωραμίνη, χλώριο και άζωτο. Η τριχλωραμίνη είναι παχύρευστο υγρό κίτρινου χρώματος είτε κρύσταλλοι ρομβικού σχήματος. Είναι

γενικά αδιάλυτη σε κρύο νερό και διασπάται στο ζεστό νερό. Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας έχει τη μορφή κρυστάλλων (U.S ECAO., 1994).

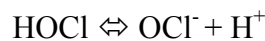
Το χλώριο και οι ανόργανες και οργανικές χλωραμίνες συνδέονται χημικά και μετατρέπονται μεταξύ τους σε διάφορες μορφές εύκολα. Ωστόσο ποτέ δεν υπάρχει μόνο η μία μορφή χλωραμίνης στα διαλύματα χλωραμινών. Ο χρόνος ημίσειας ζωής των ανόργανων χλωραμινών ποικίλει από λεπτά μέχρι εικοσιτρείς ημέρες ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν (www.lenntech.com/water-disinfection).

8.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

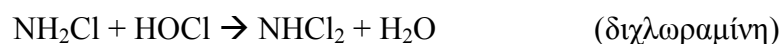
Οι χλωραμίνες ουσιαστικά σχηματίζονται από την αντίδραση της αμμωνίας με το υδροχλωρικό οξύ. Το διάλυμα που προκύπτει μπορεί να περιέχει μονοχλωραμίνες (NH_2Cl), διχλωραμίνες (NHCl_2) ή τριχλωραμίνη (NCl_3). Κατά τη διάλυση του χλωρίου στο νερό, το χλώριο υδρολύεται με γρήγορους ρυθμούς σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση.



Το υποχλωριώδες οξύ που σχηματίζεται είναι ασθενές οξύ και διασπάται όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση.

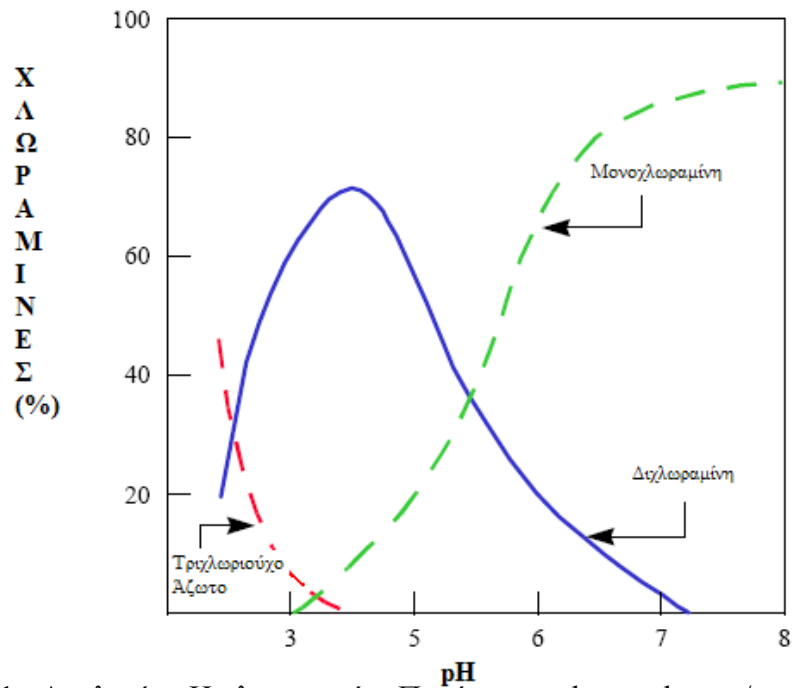


Η αναλογία μεταξύ υποχλωριώδους οξέος και υποχλωριώδους ιόντος εξαρτάται από το pH. Είναι ισχυρά οξειδωτικά, όπως το χλώριο και αντιδρούν με διάφορες ουσίες που περιέχονται στο νερό (U.S EPA., 1999a; www.lenntech.com/water-disinfection). Σε υδατικά διαλύματα με pH 7,0-8,5 το υποχλωριώδες οξύ αντιδρά με την αμμωνία σχηματίζοντας τις χλωραμίνες με μια σειρά από ανταγωνιστικές αντιδράσεις (U.S EPA., 1999a). Κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων αυτών σχηματίζονται και οργανικές χλωραμίνες, οι οποίες δε διαχωρίζονται εύκολα από τις ανόργανες με κλασσικές μεθόδους ανάλυσης (www.lenntech.com/water-disinfection). Η ιδανική τιμή pH για το σχηματισμό των χλωραμινών είναι 8,4 (www.lenntech.com/water-disinfection). Η απλούστερη στοιχειομετρία μεταξύ των αντιδρώντων περιγράφεται από τις παρακάτω αντιδράσεις (U.S EPA., 1999a).



Οι παραπάνω αντιδράσεις εξαρτώνται κυρίως από το pH και την αναλογία μεταξύ χλωρίου και αζώτου. Σε τιμές pH πάνω από 7 κυριαρχεί η μονοχλωραμίνη, ενώ σε χαμηλότερες τιμές pH κυριαρχεί η διχλωραμίνη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1. Σε τιμές pH 3-5 συνυπάρχουν και τα τρία είδη χλωραμινών, ενώ σε pH χαμηλότερο από 3 σχηματίζεται κυρίως τριχλωραμίνη (U.S EPA., 1999a; www.lenntech.com/water-disinfection). Στην περίπτωση που δεν υπάρχει μεταβολή του pH ή της αναλογίας χλωρίου – αζώτου για διάστημα παραπάνω από μία μέρα, η μονοχλωραμίνη

μετατρέπεται σταδιακά σε διχλωραμίνη με ποσοστό 57%. Επίσης η θερμοκρασία και ο χρόνος επαφής διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό των χλωραμινών (U.S EPA., 1999a).



Σχήμα 8.1 : Αναλογία pH-χλωραμινών, Πηγή : www.lenntech.com/water-disinfection

Μεταξύ των χλωραμινών προτιμάται η μονοχλωραμίνη για την απολύμανση του ύδατος, λόγω της αστάθειας του μορίου της διχλωραμίνης στην παρουσία υδροχλωρικού οξέος και των προβλημάτων γεύσεων και οσμών που σχετίζονται με τη διχλωραμίνη και την τριχλωραμίνη. Για να αποφευχθεί ο σχηματισμός αυτών των παραγώγων πρέπει να διατηρείται η αναλογία χλωρίου – αμμωνίας 3:1 (U.S EPA., 1999a). Η ιδανική αναλογία μεταξύ χλωρίου – αμμωνίας είναι 6:1, αν και συνήθως κατά το σχηματισμό των χλωραμινών είναι 3-5:1 (www.lenntech.com/water-disinfection). Η αναλογία μεταξύ χλωρίου και αμμωνίας για το σχηματισμό χλωραμινών περιγράφεται στον Πίνακα 8.2 (U.S EPA., 1999a).

Πίνακας 8.2 : Απαιτούμενη δόση χλωρίου – αμμωνίας, Πηγή : U.S EPA., 1999a

ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ		mg Cl ₂ /mg NH ₃
ΜΟΝΟΧΛΩΡΑΜΙΝΗ	(NH ₂ Cl)	4,2
ΔΙΧΛΩΡΑΜΙΝΗ	(NHCl ₂)	8,4
ΤΡΙΧΛΩΡΑΜΙΝΗ	(NCl ₃)	12,5
ΑΖΩΤΟ	(N ₂)	6,3
ΝΙΤΡΙΚΑ	(NO ₃)	16,7

8.3.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ

Καθώς οι χλωραμίνες παρασκευάζονται από το συνδυασμό δύο ουσιών, η παρασκευή τους περιλαμβάνει την παροχή χλωρίου και αμμωνίας στο σύστημα. Το χλώριο μεταφέρεται στη μονάδα επεξεργασίας και διοχετεύεται στο σύστημα είτε στην αέρια μορφή του που είναι και η πιο οικονομική είτε σαν υποχλωριώδες νάτριο. Η αμμωνία είναι δυνατόν να παρασκευαστεί επιτόπου ή να μεταφερθεί στη μονάδα επεξεργασίας. Οι περισσότερες μονάδες χρησιμοποιούν είτε αέρια (άνυδρη) αμμωνία

είτε υγρή αμμωνία. Η άνυδρη αμμωνία είναι αέριο σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος και ιδιαίτερα διαλυτή στο νερό (U.S EPA., 1999a).

8.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Ο μηχανισμός με τον οποίο αδρανοποιούν οι χλωραμίνες τους παθογόνους μικροοργανισμούς δεν έχει ερευνηθεί εκτενώς. Θεωρείται πως είναι παρόμοιος με τον τρόπο δράσης του υποχλωριώδους οξέος (U.S ECAO., 1994). Σε έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί για την αδρανοποίηση του *E.coli* από τις χλωραμίνες, η μονοχλωραμίνη αντιδρά με τα αμινοξέα, την κυστεΐνη και τη μεθιονίνη (U.S EPA., 1999a). Κατά αυτόν τον τρόπο ο μηχανισμός αδρανοποίησης θεωρείται πως περιλαμβάνει τη διακοπή της σύνθεσης των πρωτεϊνών και των κυτταρικών λειτουργιών, όπως η αναπνοή, και τη διάρρηξη της κυτταρικής μεμβράνης (U.S EPA., 1999a; www.lenntech.com/water-disinfection). Πιο συγκεκριμένα η μονοχλωραμίνη αντιδρά με το αμινοξέα που υπάρχουν στο DNA των βακτηριών, ενώ οι οργανικές χλωραμίνες προκαλούν ανωμαλίες στα χρωμοσώματα των ερυθρών κυττάρων (U.S ECAO., 1994; www.lenntech.com/water-disinfection). Σε ότι αφορά την αδρανοποίηση των ιών, όπως και με το χλώριο, ο μηχανισμός δράσης είναι πιο αργός και εξαρτάται από το είδος του ιού και τη συγκέντρωση του απολυμαντικού (U.S EPA., 1999a; www.lenntech.com/water-disinfection).

8.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ

Ο σχηματισμός της μονοχλωραμίνης περιλαμβάνει αρχικά την προσθήκη αμμωνίας και στη συνέχεια του χλωρίου ή αντιστρόφως. Η αμμωνία προστίθεται πρώτα όταν οι οσμές και οι γεύσεις λόγω της αντίδρασης μεταξύ χλωρίου και οργανικών ενώσεων αποτελούν σημαντικό πρόβλημα. Ωστόσο, στις περισσότερες μονάδες επεξεργασίας ύδατος αρχικά προστίθεται το χλώριο, ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη συγκέντρωση και χρόνος επαφής. Ουσιαστικά η προσθήκη της αμμωνίας πραγματοποιείται για τη μείωση της ποσότητας του υπολειμματικού χλωρίου μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα, ώστε να περιοριστεί ο σχηματισμός οργανικών παραπροϊόντων (U.S EPA., 1999a).

8.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ

Η δράση των χλωραμινών όπως και των υπόλοιπων απολυμαντικών μέσων εξαρτάται από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως το pH, η θερμοκρασία και η παρουσία οργανικών και ανόργανων συστατικών στο νερό (U.S EPA., 1999a).

8.5.1 pH

Η επίδραση του pH στην απολύμανση σχετίζεται περισσότερο με το είδος του μικροοργανισμού παρά με το απολυμαντικό μέσο, αν και στην προκειμένη περίπτωση

το pH επηρεάζει το είδος των χλωραμινών. Έχει αποδειχθεί πως η αποτελεσματικότητα της μονοχλωραμίνης και της διχλωραμίνης δεν είναι ίδια. Ορισμένες μελέτες δείχνουν πως η μονοχλωραμίνη είναι πιο δραστική από τη διχλωραμίνη, ενώ άλλες μελέτες δείχνουν το αντίθετο. Ωστόσο η χρήση διαλυμάτων που περιέχουν σχεδόν ίδια συγκέντρωση μονοχλωραμίνης και διχλωραμίνης είναι πιο αποτελεσματική από διαλύματα που περιέχουν μόνο ένα είδος χλωραμίνης (U.S EPA., 1999a).

8.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Όπως συμβαίνει και με τα υπόλοιπα απολυμαντικά μέσα, αντίστοιχα η αδρανοποίηση των βακτηρίων και των ιών από τις χλωραμίνες αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Όμως η αποτελεσματικότητα μειώνεται δραματικά σε περιβάλλον με υψηλό pH και χαμηλή θερμοκρασία. Για παράδειγμα η αδρανοποίηση του *E.coli* είναι εξήντα φορές πιο αργή σε pH 9,5 και θερμοκρασίες από 2 έως 6°C από ότι σε pH 7 και θερμοκρασίες από 20 έως 25°C.

8.5.3 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ

Σε αντίθεση με την αμμωνία, το χλώριο αντιδρά με οργανικά αζωτούχα συστατικά σχηματίζοντας πληθώρα οργανικών χλωραμινών. Οι οργανικές χλωραμίνες είναι ανεπιθύμητα παραπροϊόντα, καθώς συμβάλλουν ελάχιστα ή σχεδόν καθόλου στην αδρανοποίηση των μικροοργανισμών (U.S EPA., 1999a).

8.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ

Ο σχηματισμός παραπροϊόντων από τη χρήση χλωραμινών εξαρτάται από την αναλογία χλωρίου – αμμωνίας, το pH, το βαθμό ανάμιξης και το σημείο προσθήκης της αμμωνίας σε σχέση με το χλώριο.

Η μονοχλωραμίνη (NH_2Cl) δεν παράγει παραπροϊόντα σε μεγάλο βαθμό, αν και μπορεί να σχηματιστεί διχλωροοξικό οξύ. Επίσης ο σχηματισμός του χλωριούχου κυανίου (cyanogen chloride) ευνοείται περισσότερο από ότι με το χλώριο. Η μη ταυτόχρονη προσθήκη του χλωρίου και της αμμωνίας έχει ως αποτέλεσμα το χλώριο να αντιδρά με ουσίες που περιέχονται στο νερό πριν τον ολοκληρωτικό σχηματισμό των χλωραμινών. Επιπροσθέτως, σε υδατικά διαλύματα η μονοχλωραμίνη υδρολύεται αργά προς χλώριο. Κατά αυτόν τον τρόπο ο σχηματισμός των αλογόνων πραγματοποιείται ακόμη και όταν στο σύστημα έχει σχηματιστεί μονάχα η μονοχλωραμίνη.

Η χρήση των χλωραμινών έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό οργανικών χλωριούχων ενώσεων σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με το χλώριο. Ωστόσο ελάχιστα είναι γνωστά σχετικά με αυτά τα παραπροϊόντα εκτός από το ότι είναι υδροφιλικά και έχουν

μεγαλύτερο μοριακό βάρος από τις υπόλοιπες αλογονούχες ενώσεις που σχηματίζονται με τη χρήση χλωρίου (U.S EPA., 1999a).

8.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΧΛΩΡΑΜΙΝΩΝ

Λόγω του αυξημένου ενδιαφέροντος για τα οργανικά παράγωγα της χλωρίωσης κατά την επεξεργασία ύδατος τις τελευταίες δύο δεκαετίες, όλο και πιο πολύ διαδόθηκε η χρήση των χλωραμινών, καθώς σχηματίζουν λιγότερα παραπροϊόντα. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα απολυμαντικά μέσα δεν οξειδώνουν το σίδηρο, το μαγγάνιο ή τα σουλφίδια (U.S EPA., 1999a).

8.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Οι χλωραμίνες είναι λιγότερο δραστικές από το χλώριο, το όζον και το διοξείδιο του χλωρίου, ωστόσο είναι ιδιαίτερα οικονομική η παρασκευή τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην επεξεργασία του ύδατος ως δευτερεύον απολυμαντικό, καθώς δεν αντιδρούν με οργανικές ενώσεις όπως το χλώριο σχηματίζοντας οργανικά παραπροϊόντα. Ο μη σχηματισμός οργανικών παραπροϊόντων συμβάλλει στη μείωση οσμών και γεύσεων. Επίσης η μονοχλωραμίνη είναι πιο σταθερή από το χλώριο και το διοξείδιο του χλωρίου εξασφαλίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη προστασία από την ανάπτυξη των μικροοργανισμών σε συστήματα παροχής ύδατος με μεγάλα διαστήματα αποθήκευσης (U.S EPA., 1999a).

Ωστόσο ο σχηματισμός των χλωραμινών έχει αντίκτυπο στα υπόλοιπα στάδια της επεξεργασίας του νερού. Οι κυριότερες επιπτώσεις είναι :

- Η αμμωνία που προστίθεται για το σχηματισμό των χλωραμινών μπορεί να αποτελέσει θρεπτικό στοιχείο για τα νιτροποιά βακτήρια, με αποτέλεσμα την αύξηση των νιτρικών στο προς κατανάλωση νερό.
- Οι δυσαναλογίες στις συγκεντρώσεις χλωρίου και αμμωνίας (αναλογία μεγαλύτερη από 8:1) μπορεί να προκαλέσουν διακοπή των αντιδράσεων του χλωρίου.
- Η ανάμιξη χλωριωμένου νερού με νερό που περιέχει χλωραμίνες έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της υπολειμματικής ποσότητας των χλωραμινών και συνδυασμό της αμμωνίας με τη μονοχλωραμίνη παράγοντας διχλωραμίνη και τριχλωραμίνη. Στην περίπτωση του σχηματισμού τριχλωραμίνης απαιτείται αερισμός για την απομάκρυνσή της.
- Τέλος η προσθήκη της μονοχλωραμίνης πριν από τη διήθηση μειώνει την βιολογική ανάπτυξη στα φίλτρα. Το γεγονός αυτό έχει θετική επίπτωση, καθώς τα φίλτρα διατηρούνται καθαρά και μειώνεται η συχνότητα της έκπλυσης των φίλτρων. Επίσης όμως μειώνεται το ποσοστό απομάκρυνσης του βιοδιασπώμενου οργανικού άνθρακα (U.S EPA., 1999a).

Η απομάκρυνση των χλωραμινών από το νερό με χημικό τρόπο έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία αμμωνίας στο νερό, η οποία προκαλεί διάβρωση στο χαλκό και στο μόλυβδο, γεγονός που προκαλεί προβλήματα καθώς οι σωληνώσεις του νερού είναι κατασκευασμένες από χαλκό ή μόλυβδο. Για να αποφευχθούν προβλήματα διάβρωσης προστίθενται ορθοφωσφορικά στο σύστημα (www.lenntech.com/water-disinfection). Τέλος οι χλωραμίνες αντιδρούν με συγκεκριμένα είδη λάστιχων και μονωτικών υλικών που υπάρχουν στα πλυντήρια πιάτων και στους θερμοσίφωνες δημιουργώντας μαύρα ή γκρι σωματίδια, καθώς διαλύονται σταδιακά (www.epa.gov/chloramines).

8.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Η κατανάλωση νερού που περιέχει χλωραμίνες δε δημιουργεί προβλήματα υγείας, καθώς οι χλωραμίνες εξουδετερώνονται κατά το μεταβολισμό, εκτός αν γίνει εισπνοή των αερίων χλωραμινών που προκαλούν πνευμονία (U.S ECAO., 1994). Ωστόσο άνθρωποι με ασθενές ανοσοποιητικό σύστημα, όπως μικρά παιδιά, άνθρωποι μεγάλης ηλικίας, άνθρωποι με HIV και άνθρωποι που κάνουν χημειοθεραπεία πρέπει να μην καταναλώνουν νερό που περιέχει χλωραμίνες (www.lenntech.com/water-disinfection). Σύμφωνα με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, οι χλωραμίνες δεν προκαλούν αιματολογικές ανωμαλίες κατά την κατανάλωση νερού με περιεκτικότητα νερού 5mg/l για διάστημα 12 εβδομάδων. Είναι άγνωστο όμως αν έχει επιπτώσεις η έκθεση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (U.S ECAO., 1994).

Άνθρωποι με ανεπάρκεια νεφρών έχουν πρόβλημα από τη χρήση των χλωραμινών για την απολύμανση του νερού. Οι χλωραμίνες μπορεί να προκαλέσουν έλλειψη μεθεμογλοβίνης και προβλήματα υγείας στους ανθρώπους με ανεπάρκεια νεφρών, αν δεν απομακρυνθούν από το προς κατανάλωση νερό (U.S EPA., 1999a). Σε περίπτωση που το νερό έρθει σε επαφή με το σώμα, οι χλωραμίνες εισέρχονται στα αγγεία και είναι τοξικές για το αίμα (www.lenntech.com/water-disinfection). Οι χλωραμίνες είναι επίσης θανατηφόρες για τα ψάρια, καθώς καταστρέφουν τα βράγχια, εισέρχονται στα κύτταρα και προκαλούν διαταραχές στο αίμα (U.S EPA., 1999a).

8.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Οι χλωραμίνες είναι σχετικά μη δραστικές στην αδρανοποίηση των ιών και των πρωτόζωων και συνήθως δε χρησιμοποιούνται ως πρωτεύων απολυμαντικό για το πρωτόζωο *Gardia* και τους ιούς, καθώς απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι επαφής. Ωστόσο λόγω της σταθερότητας του μορίου των χλωραμινών χρησιμοποιούνται ως δευτερεύων απολυμαντικό για τον περιορισμό της ανάπτυξης των μικροβίων στο σύστημα (U.S EPA., 1999a).

8.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ

Σε αντίστοιχα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της απολυμαντικής δράσης των χλωραμινών, οι χρόνοι επαφής κυμαίνονται από δύο έως οχτώ ώρες, ενώ για το χλώριο από τέσσερα έως δεκαέξι λεπτά για τα ίδια επίπεδα αδρανοποίησης στις ίδιες συνθήκες (U.S EPA., 1999a).

8.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ

Σε σχέση με τους υπόλοιπους παθογόνους μικροοργανισμούς τα βακτήρια και συγκεκριμένα τα ζυγωτά βακτήρια είναι τα πιο ανθεκτικά στην απολύμανση. Σύμφωνα με πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί οι χλωραμίνες είναι λιγότερο αποτελεσματικές από το χλώριο. Επίσης για τα ίδια ποσοστά αδρανοποίησης του *Entamoeba histolytica* η συγκέντρωση των χλωραμινών που απαιτείται είναι 8mg/l, ενώ του χλωρίου 3mg/l για χρόνο επαφής και στις δύο περιπτώσεις δέκα λεπτά (U.S EPA., 1999a).

8.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ

Διάφορες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για τον καθορισμό της αποτελεσματικότητας των χλωραμινών σε ότι αφορά την αδρανοποίηση των βακτηρίων. Σύμφωνα με τις παραπάνω έρευνες το χλώριο φαίνεται να αδρανοποιεί πιο γρήγορα τα εντερικά βακτήρια από ότι οι χλωραμίνες. Πιο συγκεκριμένα η αδρανοποίηση του *E.coli* επιτυγχάνεται σε χρόνο επαφής 240 λεπτών με τη χρήση χλωραμινών, ενώ με το χλώριο απαιτούνται μονάχα πέντε λεπτά χρόνο επαφής στις ίδιες συνθήκες pH και θερμοκρασίας (U.S EPA., 1999a). Η αδρανοποίηση του *E.coli* δεν εξαρτάται μόνο από το pH, τη θερμοκρασία και το χρόνο επαφής, αλλά και από τον ίδιο το μικροοργανισμό (Dommermair et al., 2003).

Σε παρόμοιες έρευνες η χρήση των χλωραμινών στην απολύμανση του νερού έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή μέχρι 60% του πληθυσμού των βακτηρίων με χρόνο επαφής μικρότερο από δέκα λεπτά. Επίσης οι χλωραμίνες μειώνουν κατά 88% τα απομείναντα κολοβακτηρίδια πριν από τη διήθηση. Ουσιαστικά οι χλωραμίνες είναι αποτελεσματικές στην αδρανοποίηση διαφόρων ειδών βακτηρίων, όταν προστίθενται σε ικανοποιητικές ποσότητες (U.S ECAO., 1994).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (UV)

9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι μία μέθοδος απολύμανσης του πόσιμου νερού και των υγρών αποβλήτων (Bergmann et al., 2002). Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες απολυμαντικές μεθόδους η υπεριώδης ακτινοβολία δεν αδρανοποιεί τους παθογόνους μικροοργανισμούς με χημική αλληλεπίδραση (U.S EPA., 1999a). Αυτή η μέθοδος απολύμανσης χρησιμοποιείται κυρίως για την απολύμανση μεγάλων ποσοτήτων νερού και δε χρησιμοποιείται από μικρές μονάδες επεξεργασίας, καθώς η εγκατάσταση συστημάτων υπεριώδους ακτινοβολίας είναι πολύπλοκη και υψηλού κόστους (Cheremisinoff, 1995).

Η απολύμανση με την υπεριώδη ακτινοβολία είναι μία μέθοδος που εφαρμόζεται εδώ και χρόνια στην Νότιο Αμερική και στην Ευρώπη. Το 1887 ανακαλύφθηκε η μικροβιοκτόνος δράση του ηλιακού φωτός από τους Downes και Blunt, ενώ η ανάπτυξη των λαμπτήρων υπεριώδους ακτινοβολίας ολοκληρώθηκε το 1901 (AWWA, 1999; U.S EPA., 2003a). Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε η υπεριώδης ακτινοβολία ως απολυμαντική μέθοδος στη Γαλλία το 1910. Το 1929 ο Gates ανακάλυψε πως η απολυμαντική δράση της υπεριώδους ακτινοβολίας οφείλεται στην απορρόφηση της από τα νουκλεϊκά οξέα (U.S EPA., 2003a).

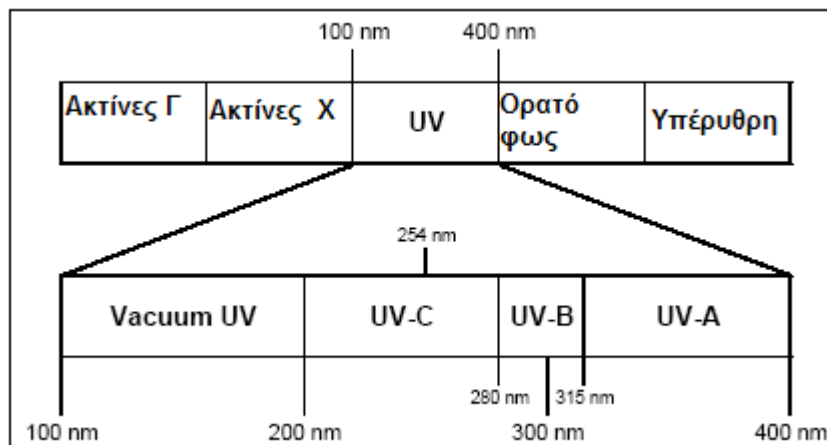
Παρότι μέχρι το πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα είχαν πραγματοποιηθεί σημαντικές έρευνες και μελέτες σχετικά με την απολυμαντική δράση της υπεριώδους ακτινοβολίας, το χαμηλό κόστος του χλωρίου και τα λειτουργικά προβλήματα των συστημάτων υπεριώδους ακτινοβολίας περιόρισαν σημαντικά την επέκταση της χρήσης της υπεριώδους ακτινοβολίας στην επεξεργασία του νερού. Ουσιαστικά το 1955 πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά απολύμανση του πόσιμου νερού με υπεριώδη ακτινοβολία σε Σουηδία και Αυστρία (U.S EPA., 2003a).

Μέχρι το 1985 ο αριθμός των μονάδων που χρησιμοποιούσαν ως μέθοδο απολύμανσης την υπεριώδη ακτινοβολία ήταν 500-600, ενώ ο σχηματισμός των παραπροϊόντων κατά τη χλωρίωση οδήγησε πολλές μονάδες σε Νορβηγία και Ολλανδία να χρησιμοποιούν την υπεριώδη ακτινοβολία για την απολύμανση του νερού (U.S EPA., 2003a). Σήμερα στην Ευρώπη πάνω από 2000 μονάδες επεξεργασίας χρησιμοποιούν την υπεριώδη ακτινοβολία για την απολύμανση του πόσιμου νερού, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες γύρω στις 1000 μονάδες επεξεργασίας

νερού και 600 μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων χρησιμοποιούν υπεριώδη ακτινοβολία ως μέθοδο απολύμανσης (AWWA, 1999; www.awwa.org/Advocacy).

9.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ των ακτίνων χ και του ορατού φωτός. Το φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας χωρίζεται σε τέσσερα πεδία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Η απολυμαντική δράση της υπεριώδους ακτινοβολίας οφείλεται στις UV-B και UV-C. Η αποτελεσματικότητα των UV-A είναι σχετικά μικρή σε σχέση με τις UV-B και UV-C και απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι επαφής για αποτελεσματική απολύμανση. Ακτινοβολία σε μήκος κύματος 100-200 nm έχει σημαντική απολυμαντική δράση, όμως δεν είναι ιδιαίτερα πρακτική η εφαρμογή της καθώς εξασθενεί η ένταση της πολύ γρήγορα μέσα στο νερό. Συνήθως για την απολύμανση του πόσιμου νερού χρησιμοποιείται ακτινοβολία μήκους κύματος 200-300 nm (U.S EPA., 200a).



Σχήμα 9.1 : Φάσμα Υπεριώδους Ακτινοβολίας, Πηγή : U.S EPA., 2003a

Η υπεριώδης ακτινοβολία διασκορπίζεται γρήγορα μέσα στο νερό, ώστε να απορροφηθεί ή να αντανακλαστεί από τα συστατικά που περιέχονται στο νερό με αποτέλεσμα να μην παραμένει υπολειμματική ποσότητα και να μη σχηματίζονται παραπροϊόντα. Ωστόσο πρέπει να συνδυάζεται η δράση της με χημικές απολυμαντικές ουσίες, ώστε να παραμένει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα για περαιτέρω απολύμανση του νερού (U.S EPA., 1999a).

9.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

Για την παραγωγή υπεριώδους ακτινοβολίας απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία λαμπτήρων υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται κατά την απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία αποτελούνται από έναν κύλινδρο που περιέχει αδρανές αέριο, όπως αργό, και μικρές ποσότητες υδραργύρου. Αντιστάσεις ρυθμίζουν την ένταση του ρεύματος στους λαμπτήρες (U.S EPA., 1999a).

9.3.1.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Οι λαμπτήρες υπεριώδους ακτινοβολίας λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο των λαμπτήρων φθορισμού. Η διαφορά μεταξύ των δύο λαμπτήρων είναι ότι οι λαμπτήρες φθορισμού είναι επικαλυμμένοι με φώσφορο, ο οποίος μετατρέπει την υπεριώδη ακτινοβολία σε ορατό φως, ενώ οι λαμπτήρες υπεριώδους ακτινοβολίας δεν είναι επικαλυμμένοι, ώστε να μεταδίδεται η υπεριώδης ακτινοβολία. Στις περισσότερες περιπτώσεις η υπεριώδης ακτινοβολία εκπέμπεται από δέσμη ηλεκτρονίων ιονίζοντας το υδροποιημένο αέριο υδραργύρου.

9.3.1.2 ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ

Οι λαμπτήρες υπεριώδους ακτινοβολίας διακρίνονται σε λαμπτήρες χαμηλής πίεσης που εκπέμπουν ενέργεια σε μήκος κύματος 253,7nm, σε λαμπτήρες μέσης πίεσης που εκπέμπουν ενέργεια σε μήκη κύματος από 180 -1370nm και σε λαμπτήρες που εκπέμπουν σε υψηλές συχνότητες (Πίνακας 9.1). Τόσο οι λαμπτήρες χαμηλής πίεσης όσο και μέσης πίεσης χρησιμοποιούνται για την απολύμανση του νερού. Η αποτελεσματικότητα των λαμπτήρων μέσης πίεσης είναι μεγαλύτερη από εκείνη των χαμηλής πίεσης. Για αυτό το λόγο απαιτείται μικρότερος αριθμός λαμπτήρων μέσης πίεσης για ισοδύναμες δόσεις. Σε μικρές μονάδες επεξεργασίας η χρήση ενός λαμπτήρα μέσης πίεσης έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αν και τα δύο είδη λαμπτήρων έχουν την ίδια αποτελεσματικότητα, στις μικρές μονάδες επεξεργασίας χρησιμοποιούνται κυρίως λαμπτήρες χαμηλής πίεσης λόγω της αξιοπιστίας τους σε σχέση με τη χρήση ενός λαμπτήρα μέσης πίεσης (U.S EPA., 1999a).

Πίνακας 9.1 : Χαρακτηριστικά Λαμπτήρων UV, Πηγή : U.S EPA., 2003a

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ
ΜΗΚΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	254	254	200-300
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (°C)	40	130-200	600-900
ΠΙΕΣΗ ΛΑΜΠΤΗΡΑ (TORR)	0,007	0,76	300-30.000
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (W/CM)	0,5	1,5-10	50-250
ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ ΛΑΜΠΤΗΡΩΝ (HR)	8.000-10.000	8.000-12.000	4.000-8.000

Ουσιαστικά οι λαμπτήρες χαμηλής πίεσης εσωκλείονται από φύλλο χαλαζία, ώστε να διαχωρίζεται το νερό από την επιφάνεια του λαμπτήρα. Η διαρρύθμιση αυτή είναι απαραίτητη, ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία των 40°C στο λαμπτήρα. Εκτός από

φύλλα χαλαζία είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί τεφλόν, αν και απορροφάει το 35% της ακτινοβολίας.

9.3.1.3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

Οι αντιστάσεις είναι μετατροπείς της ενέργειας που φτάνει στους λαμπτήρες υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι αντιστάσεις λειτουργούν σε θερμοκρασία μικρότερη των 60°C, ώστε να αποφεύγεται περίπτωση δυσλειτουργίας. Συνήθως οι αντιστάσεις κατά τη λειτουργία τους εκλύουν αρκετή θερμότητα, ώστε να κρίνεται απαραίτητη η παράλληλη λειτουργία ψυκτικών ανεμιστήρων (U.S EPA., 1999a)

Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται με τους λαμπτήρες υπεριώδους ακτινοβολίας διακρίνονται σε ηλεκτρονικές και ηλεκτρομαγνητικές. Οι ηλεκτρονικές λειτουργούν με υψηλότερη συχνότητα σε σχέση από τις ηλεκτρομαγνητικές με αποτέλεσμα χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, χαμηλότερη παραγωγή θερμότητας, χαμηλότερη απαίτηση και περισσότερος χρόνος λειτουργίας της αντίστασης (U.S EPA., 1999a).

9.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα απολυμαντικά μέσα, η υπεριώδης ακτινοβολία είναι φυσική διαδικασία απολύμανσης και απαιτούνται μερικά δευτερόλεπτα, ώστε να επιτευχθεί η αδρανοποίηση των μικροοργανισμών (U.S EPA., 1999a). Η απολύμανση του νερού με υπεριώδη ακτινοβολία πραγματοποιείται μέσα σε θάλαμο ακτινοβολίας. Η υπεριώδης ακτινοβολία αδρανοποιεί τους μικροοργανισμούς μέσω απορρόφησης του φωτός που προκαλεί φωτοχημικές αντιδράσεις μεταβάλλοντας τα συστατικά των μορίων που είναι απαραίτητα για τις κυτταρικές λειτουργίες (www.awwa.org/Advocacy). Καθώς οι ακτίνες της υπεριώδους ακτινοβολίας διαπερνούν την κυτταρική μεμβράνη των μικροοργανισμών, εισέρχονται στο εσωτερικό των κυττάρων και διασπούν το DNA, ενώ παράλληλα αποτρέπουν την αναπαραγωγή του μικροοργανισμού. Η επεξεργασία με υπεριώδη ακτινοβολία δε μεταβάλλει χημικά το νερό, ουσιαστικά προστίθεται ενέργεια σε αυτό (www.edstrom.com). Η ενέργεια αυτή αντιδρά με τα νουκλεϊκά οξέα και άλλα κυτταρικά συστατικά προκαλώντας ζημιές στα κύτταρα που έχουν εκτεθεί (U.S EPA., 1999a). Ο βαθμός αδρανοποίησης των μικροοργανισμών εξαρτάται άμεσα από τη δόση της υπεριώδους ακτινοβολίας που εφαρμόζεται στο προς επεξεργασία νερό (www.edstrom.com)

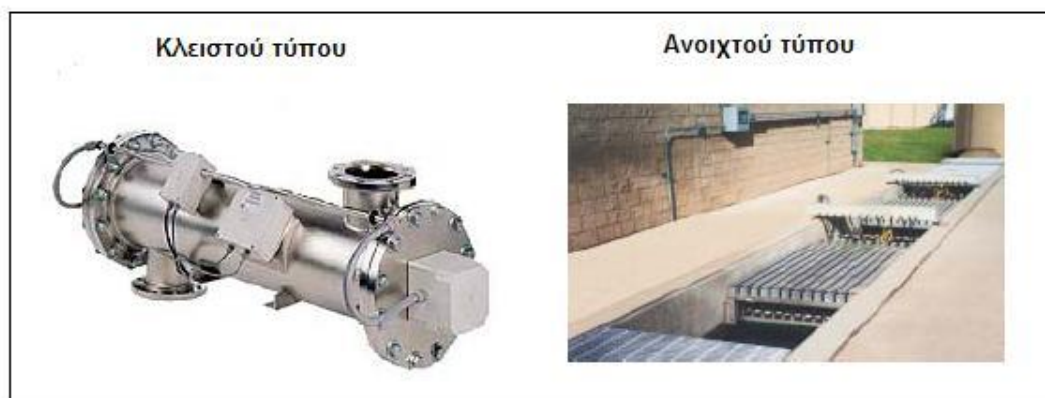
Τα μικροβιοκτόνα αποτελέσματα της υπεριώδους ακτινοβολίας περιλαμβάνουν φωτοχημική καταστροφή του DNA και του RNA των μικροοργανισμών. Τα νουκλεϊκά οξέα των μικροοργανισμών απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε μήκη κύματος 240-280nm. Το DNA και το RNA

περιέχουν γενετικές πληροφορίες απαραίτητες για την αναπαραγωγή, όποτε οποιαδήποτε ζημιά σε αυτά είτε στα συστατικά τους είναι δυνατόν να αποτρέψει την αναπαραγωγή των μικροοργανισμών. Οι ζημιές κυρίως προκύπτουν καθώς τα μόρια πυριμιδίνης διμερίζονται. Η κυστοσίνη (DNA και RNA) και η θυμίνη (DNA) είναι οι βασικότερες μορφές μορίων πυριμιδίνης. Η αντιγραφή των νουκλεϊκών οξέων είναι ιδιαίτερα δύσκολη, όταν τα μόρια πυριμιδίνης είναι ενωμένα μεταξύ τους λόγω της διαστρέβλωσης που έχει υποστεί το DNA από την υπεριώδη ακτινοβολία. Επιπροσθέτως, αν δεν πραγματοποιηθεί η αντιγραφή, θα αναπαραχθούν μεταλλαγμένα κύτταρα (U.S EPA., 1999a). Ουσιαστικά οι ζημιές που προκαλούνται στο DNA δε μεταβάλλουν τις κυτταρικές λειτουργίες των μικροοργανισμών, αλλά με την αδυναμία αναπαραγωγής τους δε μπορούν να μολύνουν τον ξενιστή (U.S EPA., 2003a).

Η υπεριώδης ακτινοβολία επιτυγχάνει ικανοποιητική αδρανοποίηση βλαστών και σπορίων βακτηρίων, ιών και άλλων παθογόνων μικροοργανισμών. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κύματος 240-280nm αδρανοποιεί ικανοποιητικά τους μικροοργανισμούς προκαλώντας ανεπανόρθωτες ζημιές στα νουκλεϊκά οξέα. Η πιο αποτελεσματική τιμή μήκους κύματος είναι 254nm, όπου καταστρέφεται το DNA. Σε άλλες τιμές μήκους κύματος, όπως 200nm, υπάρχουν μέγιστες τιμές απορρόφησης της ακτινοβολίας από το DNA. Ωστόσο σε χαμηλότερες τιμές από 200nm δεν είναι πρακτική η χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας για την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών (U.S EPA., 1999a).

9.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ

Οι συσκευές υπεριώδους ακτινοβολίας διακρίνονται σε ανοιχτού και κλειστού τύπου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Το νερό ρέει υπό πίεση στους αντιδραστήρες κλειστού τύπου. Στην επεξεργασία του πόσιμου νερού χρησιμοποιούνται μονάχα οι κλειστού τύπου, ενώ οι ανοιχτού τύπου αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται κυρίως στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Οι ανοιχτού τύπου αντιδραστήρες είναι δεξαμενές με κανάλια από λαμπτήρες υπεριώδους ακτινοβολίας (U.S EPA., 2003a).



Σχήμα 9.2 : Αντιδραστήρες Υπεριώδους Ακτινοβολίας, Πηγή : U.S EPA., 2003a

Οι αντιδραστήρες είναι σχεδιασμένοι, ώστε να βελτιστοποιούν την παροχή της υπεριώδους ακτινοβολίας. Το υδροδυναμικό σχήμα των αντιδραστήρων έχει μεγάλη σημασία στην απόδοση του συστήματος. Βελτίωση του υδροδυναμικού σχήματος εξασφαλίζεται με κόστος του headloss (U.S EPA., 2003a).

9.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Για να επιτευχθεί η αδρανοποίηση των μικροοργανισμών η υπεριώδης ακτινοβολία πρέπει να απορροφηθεί από το μικροοργανισμό. Συνεπώς οτιδήποτε παρεμποδίζει την υπεριώδη ακτινοβολία να επιδράσει με το μικροοργανισμό μειώνει την αποτελεσματικότητα της απολύμανσης. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες απολυμαντικές μεθόδους η δράση της υπεριώδους ακτινοβολίας δεν επηρεάζεται από το pH, αλλά από τους εξής παράγοντες :

- τις βιολογικές μεμβράνες που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των λαμπτήρων
- τα διαλυμένα οργανικά και ανόργανα συστατικά
- τη θολότητα
- τη συσσώρευση των μικροοργανισμών
- τη σύντομη ροή του νερού από τους λαμπτήρες και
- η γεωμετρία των λαμπτήρων (U.S EPA., 1999a).

9.5.1 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΛΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ

Η συσσώρευση των στερεών στην επιφάνεια των φύλλων προστασίας των λαμπτήρων υπεριώδους ακτινοβολίας μειώνει σημαντικά την ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας και συνεπώς την απόδοση της απολύμανσης. Επιπροσθέτως η δημιουργία στρωμάτων από ασβέστιο και μαγνήσιο στην επιφάνεια των λαμπτήρων μειώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Νερό που περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου, σουλφίδια υδρογόνου και έχει υψηλή σκληρότητα είναι δεκτικό στη δημιουργία επικαλύψεων, οι οποίες μειώνουν σημαντικά την ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων στερεών που δημιουργούν επικαλύψεις είναι :

- συγκέντρωση σιδήρου μεγαλύτερη από 0,1 mg/l
- συγκέντρωση σουλφιδίων υδρογόνου μεγαλύτερη από 0,2 mg/l
- και σκληρότητα μεγαλύτερη από 140 mg/l

Η μετάδοση της υπεριώδους ακτινοβολίας μπορεί να μειωθεί λόγω της παρουσίας ποικιλίας χημικών ουσιών, όπως χουμικά οξέα, φαινόλες, άλατα θειικού οξέος, και χημικών στοιχείων όπως χρώμιο, κοβάλτιο, χαλκός, σίδηρος και νικέλιο (U.S EPA., 1999a).

Η ύπαρξη σωματιδίων επηρεάζει την απόδοση της απολύμανσης με υπεριώδη ακτινοβολία, καθώς περικλείουν τους μικροοργανισμούς προστατεύοντάς τους από την υπεριώδη ακτινοβολία και μειώνοντας παράλληλα την έντασή της. Ουσιαστικά η χαμηλή θολότητα των υπογείων νερών επηρεάζει ελάχιστα την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Ωστόσο, η υψηλή θολότητα των επιφανειακών νερών μειώνει σημαντικά την απόδοση της απολύμανσης (U.S EPA., 1999a).

Αντίστοιχα με τη θολότητα, η συσσώρευση των μικροοργανισμών επηρεάζει την απόδοση της μεθόδου, καθώς μόνο ένα μέρος των μικροοργανισμών εκτίθεται στην υπεριώδη ακτινοβολία (U.S EPA., 1999a).

9.5.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΛΑΜΠΤΗΡΩΝ

Η λανθασμένη γεωμετρία των λαμπτήρων έχει ως αποτέλεσμα να μένουν περιοχές χωρίς να εκτίθενται στην υπεριώδη ακτινοβολία. Θα πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα, ώστε όλη η μάζα του προς επεξεργασία νερού να εκτίθεται στην υπεριώδη ακτινοβολία για την αποτελεσματική απολύμανσή του. Τέλος θα πρέπει να δημιουργούνται συνθήκες ανάμιξης για την καλύτερη απόδοση της μεθόδου (U.S EPA., 1999a).

9.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες απολυμαντικές μεθόδους η υπεριώδης ακτινοβολία δεν αδρανοποιεί τους μικροοργανισμούς μέσω χημικών αντιδράσεων, αλλά μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων στο DNA και RNA των μικροοργανισμών (U.S EPA., 1999a). Ο σχηματισμός των παραπροϊόντων οφείλεται είτε άμεσα στις φωτοχημικές αντιδράσεις είτε έμμεσα στα παράγωγα των φωτοχημικών αντιδράσεων. Οι φωτοχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται μόνο όταν η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφηθεί από χημικές ουσίες με αποτέλεσμα το σχηματισμό παραπροϊόντων (U.S EPA., 2003a).

Στο πόσιμο νερό που έχει υποστεί χλωρίωση η επεξεργασία με υπεριώδη ακτινοβολία έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή των οργανικών συστατικών σε πιο διασπώσιμες ουσίες. Στο υπόγειο νερό ή σε νερό που έχει διηθηθεί, η υπεριώδης ακτινοβολία δεν έχει καμία επιρροή στο σχηματισμό τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου ή των αλογονοοξικών οξέων (U.S EPA., 2003a).

9.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Γενικότερα η υπεριώδης ακτινοβολία θεωρείται ιδιαίτερα δραστική μέθοδος απολύμανσης του πόσιμου νερού, καθώς αδρανοποιεί βασικούς παθογόνους μικροοργανισμούς μεταδιδόμενους από το νερό (Rochelle et al., 2005).

9.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Όπως και για τα υπόλοιπα απολυμαντικά μέσα, η χρήση της υπεριώδους ακτινοβολίας έχει περιορισμούς. Καθώς είναι φυσική διαδικασία απολύμανσης και όχι χημική, δεν παραμένει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα για περαιτέρω έλεγχο της ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Κατά αυτόν τον τρόπο κρίνεται απαραίτητη η συνδυαστική χρήση με χημικό απολυμαντικό μέσο (U.S EPA., 1999a).

Κατά την απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία δύο φαινόμενα μεγάλης σημασίας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη: οι μηχανισμοί διόρθωσης των ζημιών και η ικανότητα ορισμένων μικροοργανισμών να επανενεργοποιούνται μετά από έκθεση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Κάτω από ορισμένες συνθήκες, ορισμένοι μικροοργανισμοί μπορούν αν επιδιορθώσουν τις ζημιές που έχουν προκληθεί στο DNA και είναι θέση να αναπαραχθούν και πάλι. Ουσιαστικά η επανενεργοποίηση πραγματοποιείται ως επακόλουθο της καταλυτικής δράσης του ηλιακού φωτός σε ορατά μήκη κύματος. Ο βαθμός της επανενεργοποίησης διαφοροποιείται από μικροοργανισμό σε μικροοργανισμό. Τα κολοβακτηρίδια και ορισμένα βακτήρια όπως *Shigella* επανενεργοποιούνται, ενώ οι ιοί και άλλα είδη βακτηριών δεν επανενεργοποιούνται. Επειδή οι ζημιές στο DNA είναι μη αναστρέψιμες με το πέρασμα του χρόνου, υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο όπου είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η επανενεργοποίηση. Για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα επανενεργοποίησης, οι λαμπτήρες πρέπει να είναι καλυμμένοι είτε να ελαχιστοποιείται η έκθεση του νερού στο ηλιακό φως αμέσως μετά την απολύμανση (U.S EPA., 1999a).

9.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Στην περίπτωση που η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται ως μοναδική μέθοδος απολύμανσης δεν υπάρχουν επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, καθώς δε σχηματίζονται παραπροϊόντα. Ωστόσο επειδή πραγματοποιείται συνδυαστική χρήση με άλλες απολυμαντικές μεθόδους, οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία είναι αντίστοιχες με εκείνες των απολυμαντικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται (U.S EPA., 1999a).

9.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Η χρήση της υπεριώδους ακτινοβολίας έχει αποδειχθεί πως είναι αποτελεσματική μέθοδος απολύμανσης του νερού, καθώς αδρανοποιούνται ιοί και βακτήρια με δόσεις

της τάξεως 2-6 mW*s/cm². Τα πρωτόζωα και συγκεκριμένα το *Gardia* και το *Cryptosporidium* είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία σε σχέση με τους υπόλοιπους μικροοργανισμούς, όμως επιτυγχάνονται ικανοποιητικά ποσοστά αδρανοποίησης τους (U.S EPA., 1999a).

9.7.3.1 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΙΩΝ

Η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται για την αδρανοποίηση των ιών είναι σχετικά χαμηλή. Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει αποδειχθεί πως η υπεριώδης είναι πιο αποτελεσματική από το χλώριο, όταν η συγκέντρωση του χλωρίου είναι 1,25mg/l και για χρόνο επαφής δεκαοχτώ λεπτά, ενώ η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι 25 mW*s/cm²(U.S EPA., 1999a).

9.7.3.2 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΖΩΩΝ

Παρόλο που τα πρωτόζωα είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί μικροοργανισμοί στην υπεριώδη ακτινοβολία, σε πρόσφατες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει αποδειχθεί πως το υπεριώδες φως είναι δυνατόν να αδρανοποιήσει τέτοιου είδους μικροοργανισμούς. Ωστόσο απαιτείται μεγαλύτερη δόση για την αδρανοποίησή τους (U.S EPA., 1999a). Η υπεριώδης ακτινοβολία στα πρωτόζωα έχει τις εξής επιδράσεις: μείωση της θερμοκρασίας του πρωτόζωου, ευαισθησία του μικροοργανισμού στη θερμοκρασία, μεταβολή στην κινητικότητα και στο σχήμα του, μείωση της αναπνοής και μεταβολή της αντοχής στην υδροστατική πίεση (Rochelle et al., 2005).

Συγκεκριμένα για ποσοστά αδρανοποίησης λιγότερο από 80% του *Gardia lambia* απαιτούνται 63 mW*s/cm², ενώ για αδρανοποίηση του *Gardia muris* κατά 90% απαιτούνται 82 mW*s/cm². Αδρανοποίηση του *Cryptosporidium parvum* επιτυγχάνεται με τη χρήση λαμπτήρων χαμηλής πίεσης θεωρητικής έντασης 14,58 mW*s/cm² και για χρόνο επαφής δέκα λεπτών (U.S EPA., 1999a).

9.7.3.3 ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ

Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην αδρανοποίηση των βακτηρίων. Οι δόσεις που απαιτούνται για την αδρανοποίηση των συγκεκριμένων μικροοργανισμών είναι αντίστοιχες με εκείνες που απαιτούνται για του ιούς (U.S EPA., 1999a).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο

ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ

10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

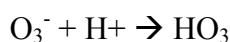
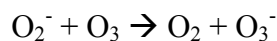
Οι προχωρημένες τεχνικές οξείδωσης (Advanced Oxidation Processes, AOPs) περιλαμβάνουν την επιτόπου παρασκευή ιδιαίτερα δραστικών οξειδωτικών παραγόντων, όπως ρίζες υδροξυλίου, οι οποίοι δρουν καταλυτικά στην οξείδωση και καταστροφή διαφόρων ρυπαντών που περιέχονται στο νερό και στον ατμοσφαιρικό αέρα (Martins, 1998). Οι ρίζες υδροξυλίου παράγονται κατά τη διάσπαση του όζοντος. Με αύξηση του ρυθμού διάσπασης του όζοντος, αυξάνεται η συγκέντρωση των ριζών υδροξυλίου οπότε αυξάνεται και το ποσοστό οξείδωσης (U.S EPA., 1999a).

Διάφορες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την αύξηση του ρυθμού διάσπασης του όζοντος. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η προσθήκη υπεροξειδίου του υδρογόνου (H₂O₂) και η υπεριώδης ακτινοβολία (U.S EPA., 1999a).

10.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ

Τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων μεθόδων είναι αντίστοιχα με εκείνα της οζόνωσης, καθώς το βασικότερο στοιχείο τους είναι το όζον. Η δράση των συγκεκριμένων μεθόδων στηρίζεται στην παρουσία ριζών υδροξυλίου και ιόντων υπεροξειδίου του υδρογόνου.

Οι ρίζες υδροξυλίου προκύπτουν κυρίως από τη διάσπαση του όζοντος κατά την προσθήκη υπεροξειδίου του υδρογόνου, όπως φαίνεται στις παρακάτω αντιδράσεις :



Η προσθήκη υπεροξειδίου του υδρογόνου επιτυγχάνει τη διάσπαση του όζοντος, καθώς το υπεροξείδιο διασπάται σε ιόντα υπεροξειδίου του υδρογόνου, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση :



Τα ιόντα του υπεροξειδίου του υδρογόνου αντιδρούν με τα μόρια του όζοντος σχηματίζοντας ιόντα O₂- και υδροξύλια.



Οι ρίζες υδροξυλίου είναι δυνατόν να παρασκευαστούν με απορρόφηση υπερϊώδους ακτινοβολίας από το υπεροξειδίο του υδρογόνου. Ωστόσο η μέθοδος αυτή δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, καθώς απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης αντίδρασης (AWWA, 1999).



10.3 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

Για την εφαρμογή των προχωρημένων μεθόδων οξείδωσης απαιτείται συσκευή παρασκευής του όζοντος και σύστημα προσθήκης του υπεροξειδίου του υδρογόνου. Η διαδικασία περιλαμβάνει δύο φάσεις : τη διάλυση του όζοντος στο νερό και την προσθήκη του υπεροξειδίου του υδρογόνου. Το υπεροξειδίο του υδρογόνου είναι δυνατόν να προστεθεί είτε μετά την προσθήκη του όζοντος στο νερό (κατά αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται πρώτα η απολύμανση από το όζον), είτε πριν την προσθήκη του όζοντος (οπότε το υπεροξειδίο του υδρογόνου χρησιμοποιείται ως προοξειδωτικό μέσο), είτε ταυτόχρονα. Ουσιαστικά η προσθήκη του υπεροξειδίου μετά το όζον είναι η βέλτιστη λύση (U.S EPA., 1999a).

Η οζόνωση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση το όζον καταστρέφει την αρχική ποσότητα οξυγόνου που περιέχεται στο νερό και με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η μετατροπή του όζοντος από υγρό σε αέριο. Σε αυτό το στάδιο η προσθήκη ριζών υδροξυλίου πρέπει να περιορίζεται, καθώς το υπεροξειδίο του υδρογόνου δρα ανταγωνιστικά με τα μόρια του όζοντος. Στη δεύτερη φάση το οργανικό υλικό οξειδώνεται. Η προσθήκη του υπεροξειδίου του υδρογόνου σε αυτή τη φάση αυξάνει ουσιαστικά την απόδοση της οξείδωσης, καθώς η αντίδραση μεταξύ υπεροξειδίου του υδρογόνου και όζοντος συμβάλλει στο σχηματισμό ριζών υδροξυλίου που αυξάνουν τη χημική δράση. Η προσθήκη του υπεροξειδίου του υδρογόνου στη δεύτερη φάση πραγματοποιείται με την έγχυσή του σε ένα δεύτερο θάλαμο της συσκευής παρασκευής του όζοντος (U.S EPA., 1999a).

Τα βασικότερα αποτελέσματα της ανάμιξης του όζοντος με το υπεροξειδίο του υδρογόνου είναι :

- αύξηση της αποτελεσματικότητας του όζοντος, καθώς τα μόρια του όζοντος μετατρέπονται σε ρίζες υδροξυλίου
- βελτίωση της μετατροπής του όζοντος από αέριο σε υγρό λόγω της αύξησης της δραστηριότητας του (U.S EPA., 1999a).

10.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Κατά τη συνδυαστική χρήση όζοντος και υπεροξειδίου του υδρογόνου η πρωταρχική αιτία αδρανοποίησης των μικροοργανισμών οφείλεται στο όζον, ενώ η οξείδωση των μικροοργανισμών είναι αποτέλεσμα της συνεργιστικής τους δράσης. Ουσιαστικά το

όζον μεταβάλλει τη σύνθεση των πρωτεϊνών και των λιπαρών οξέων της κυτταρικής μεμβράνης με αποτέλεσμα τη διάλυση του κυττάρου. Σε ορισμένες περιπτώσεις το όζον επηρεάζει το DNA του κυττάρου. Ωστόσο ο ακριβής μηχανισμός αδρανοποίησης των παθογόνων μικροοργανισμών δεν έχει καθοριστεί, καθώς υπάρχει συνδυαστική δράση του όζοντος και των ριζών υδροξυλίου (U.S EPA., 1999a).

10.4.1 ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΑΦΗΣ

Ο τρόπος εφαρμογής τους είναι αντίστοιχος με εκείνον του όζοντος. Ωστόσο η εφαρμογή τους πρέπει να πραγματοποιείται μετά τη διεργασία της καθίζησης και πριν τη διήθηση. Είναι σημαντικό η προσθήκη του υπεροξειδίου του υδρογόνου να πραγματοποιείται μετά την προσθήκη του όζοντος, ώστε να αποφεύγεται ο ανταγωνισμός μεταξύ των ριζών υδροξυλίου και των παραγόντων που οξειδώνονται από το όζον (U.S EPA., 1999a).

10.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ

Παρόλο που τα χημικά χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών δεν είναι ιδιαίτερα γνωστά, ο σχηματισμός των ριζών υδροξυλίου εξαρτάται από το pH, τη συγκέντρωση του όζοντος, την αναλογία όζοντος/υπεροξειδίου του υδρογόνου, το χρόνο επαφής και τη σύνθεση του νερού (U.S EPA., 1999a).

10.5.1 ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΗ ΔΡΑΣΗ

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι ότι οι ρίζες υδροξυλίου αντιδρούν με διάφορες ενώσεις που περιέχονται στο νερό με αποτέλεσμα τη μείωση της αποτελεσματικότητας της απολύμανσης. Η αλκαλικότητα και το pH επηρεάζουν σημαντικά τη δράση του υδροξυλίου. Η επίδραση αυτή οφείλεται κυρίως στην ανταγωνιστική δράση των θεικών αλάτων και του διοξειδίου του άνθρακα με τα υδροξύλια σε υψηλές τιμές αλκαλικότητας και pH αντίστοιχα. Μείωση της αλκαλικότητας κρίνεται απαραίτητη όταν το προς επεξεργασία νερό περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις θεικών αλάτων. Εκτός από τα θεικά άλατα και το διοξείδιο του άνθρακα, οργανικές ενώσεις όπως χουμικές ουσίες αντιδρούν επίσης με τις ρίζες υδροξυλίου (U.S EPA., 1999a).

10.5.2 ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΥΠΕΡΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ – ΟΖΟΝΤΟΣ

Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει αποδειχθεί πως η αποτελεσματικότητα των προχωρημένων τεχνικών οξείδωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία υπεροξειδίου του υδρογόνου και όζοντος. Μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα επιτυγχάνεται όταν η αναλογία είναι μικρότερη ή ίση με 0,3.

Αύξηση της αναλογίας μειώνει την απολυμαντική δράση της μεθόδου, καθώς μειώνεται η συγκέντρωση του όζοντος (U.S EPA., 1999a).

10.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ

Τα κυριότερα παραπροϊόντα που σχηματίζονται κατά την εφαρμογή των προχωρημένων τεχνικών οξείδωσης είναι αντίστοιχα με εκείνα που προκύπτουν από την οζόνωση. Επίσης παραπροϊόντα σχηματίζονται από τις αντιδράσεις των υδροξυλίων. Κατά την εφαρμογή των μεθόδων αυτών δε σχηματίζονται αλογονούχα παραπροϊόντα, όταν οξειδώνεται η οργανική ύλη που περιέχεται στο νερό. Ωστόσο αν υπάρχουν ιόντα βρωμίου στο προς επεξεργασία νερό είναι δυνατόν να σχηματιστούν αλογονούχα παραπροϊόντα. Για τον περιορισμό του σχηματισμού τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου, αντίστοιχα με την οζόνωση, πρέπει να μειωθούν οι συγκεντρώσεις χλωρίου και χλωραμινών στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ως δευτερεύουσες απολυμαντικές ουσίες και η ανάγκη για προχλωρίωση (U.S EPA., 1999a).

Γενικότερα η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό περισσότερων βρωμικών ιόντων από ότι η οζόνωση. Ωστόσο αν η συγκέντρωση του όζοντος διατηρείται σταθερή, τότε σχηματίζονται παρόμοιες συγκεντρώσεις βρωμικών ιόντων και στις δύο περιπτώσεις. Παρόλο που η εφαρμογή των προχωρημένων τεχνικών οξείδωσης ευνοεί το σχηματισμό βρωμικών ιόντων, το υπεροξειδίο του υδρογόνου μειώνει τη συγκέντρωση των υποβρωμιωδών ιόντων, καθώς μετατρέπονται σε ιόντα βρωμίου (U.S EPA., 1999a).

10.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ

Οι προχωρημένες τεχνικές οξείδωσης είναι πιο αποτελεσματικές και δραστικές στην οξείδωση αλογονούχων ενώσεων και στην αντιμετώπιση οσμών και γεύσεων σε σχέση με το όζον. Ωστόσο δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικές στην οξείδωση του σιδήρου και του μαγγανίου σε αντίθεση με το όζον. Η εφαρμογή τους πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς είναι ο συνδυασμός όζοντος – υπεροξειδίου του υδρογόνου είναι ιδιαίτερα τοξικός (U.S EPA., 1999a).

10.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Οι προχωρημένες τεχνικές οξείδωσης χρησιμοποιούνται για την οξείδωση ουσιών που προσδίδουν οσμή και γεύσεις στο νερό και γενικότερα συνθετικών οργανικών ουσιών. Επίσης χρησιμοποιούνται για τη διάσπαση μικροβιοκτόνων, φυτοφαρμάκων και πτητικών οργανικών ουσιών.

Οι προχωρημένες μέθοδοι οξειδωσης έχουν επιδράσεις στις υπόλοιπες διεργασίες της επεξεργασίας του νερού. Οι επιπτώσεις αυτές περιλαμβάνουν κυρίως :

- ο την ανάπτυξη βιολογικής δράσης στο σύστημα, καθώς η χρήση ριζών υπεροξειδίου του υδρογόνου ευνοεί το σχηματισμό βιοδιασπώμενων οργανικών ενώσεων
- ο τη συνεργιστική δράση του υπεροξειδίου με άλλα οξειδωτικά μέσα στην οξείδωση οργανικών ουσιών
- ο το σχηματισμό αδιάλυτων οξειδίων κυρίως σιδήρου και μαγγανίου που πρέπει να απομακρυνθούν με καθίζηση ή διήθηση. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου στα φίλτρα και την αύξηση της συχνότητας καθαρισμού τους (U.S EPA., 1999a).

10.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Οι επιπτώσεις των προχωρημένων τεχνικών οξειδωσης που προκύπτουν στην ανθρώπινη υγεία είναι αντίστοιχες με εκείνες της οζόνωσης, καθώς τα παραπροϊόντα των μεθόδων αυτών είναι παρόμοια. Η μόνη διαφορά είναι πως με τη χρήση των προχωρημένων τεχνικών οξειδωσης μειώνεται μέχρι 50% η οργανική ύλη που περιέχεται στο νερό σε σχέση με την οζόνωση (Chin et al., 2005).

10.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Οι προχωρημένες τεχνικές οξειδωσης έχει αποδειχθεί πως είναι πιο αποτελεσματικές από το όζον στην αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών. Σε πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί έχει αποδειχθεί πως απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι επαφής και υψηλές συγκεντρώσεις υπεροξειδίου του υδρογόνου για την αδρανοποίηση των βακτηρίων και των ιών. Για αδρανοποίηση poliovirus κατά 99% απαιτείται συγκέντρωση υπεροξειδίου 3.000mg/l για έξι ώρες είτε 15.000mg/l για είκοσι τέσσερα λεπτά (U.S EPA., 1999a).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^ο

ΛΟΙΠΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ

11.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εκτός από τις μεθόδους που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες στην επεξεργασία του νερού, υπάρχουν κι άλλες μέθοδοι απολύμανσης του νερού που δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες λόγω αυξημένου κόστους, μεγάλων χρόνων επαφής είτε δύσκολης εφαρμογής. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αυτές οι μέθοδοι και οι συνδυασμοί τους.

11.2 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Η χρήση του διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) ως φωτοκαταλυτικό στοιχείο στην επεξεργασία του νερού που περιέχει χημικές ρυπαντικές ουσίες έχει διαδοθεί τα τελευταία χρόνια. Το διοξείδιο του τιτανίου είναι κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί ως φωτοκαταλυτικό στοιχείο για την απολύμανση σε σχέση με άλλους ημιαγωγούς λόγω του χαμηλού κόστους, της μη τοξικότητας, της χημικής και βιολογικής αδράνειας, της φωτοσταθερότητας και τέλος λόγω της δραστηκότητάς του (Robertson et al., 2005). Όταν το διοξείδιο του τιτανίου σε μορφή σκόνης φωτολυθεί από μήκη κύματος μικρότερα από 380nm, τότε παράγονται, μέσω οξείδωσης, ρίζες υδροξυλίου και ιόντα υδρογόνου (Butterfield et al., 1997; Robertson et al., 2005). Τα είδη αυτά οξειδώνουν οργανικές ενώσεις όπως αρωματικές και αλειφατικές ενώσεις, χρώματα και φυτοφάρμακα προς ανόργανα συστατικά (διοξείδιο του άνθρακα και νερό) (Robertson et al., 2005).

Το διοξείδιο του τιτανίου είναι ημιαγωγός που μέσω της απορρόφησης φωτός προωθεί ηλεκτρόνια από τη στοιβάδα σθένους του υλικού (filled valence band) προς ελεύθερα αγώγιμο στοιχείο αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο το θετικό σθένος του στοιχείου. Η μεταφορά αυτή των ηλεκτρονίων παρεμποδίζεται κυρίως από την παρουσία αποβλήτων (πουρί) στα ηλεκτρόδια, ενώ παράλληλα κατά τη διάρκεια της φωτοκατάλυσης με τη μεταφορά ηλεκτρονίων ο ημιαγωγός φορτίζεται αρνητικά και καθώς οι μικροοργανισμοί είναι κι αυτοί φορτισμένοι αρνητικά πρέπει να ξεπεράσουν την ηλεκτρική απόθεση, ώστε να πλησιάσουν την επιφάνεια του διοξειδίου του τιτανίου (Butterfield et al., 1997).

Η φωτοκατάλυση του διοξειδίου του τιτανίου είναι πιο αποτελεσματική μέθοδος από την υπεριώδη ακτινοβολία στην αδρανοποίηση του *E. coli* και του *S. Enteritidis*, ενώ η υπεριώδης ακτινοβολία είναι πιο δραστική στην αδρανοποίηση του *Ps. aeruginosa* (Robertson et al., 2005).

Εκτός από το διοξείδιο του τιτανίου για την απολύμανση του νερού χρησιμοποιείται επίσης και το αζωτούχο τιτάνιο (TiN). Το αζωτούχο τιτάνιο είναι ανθεκτική βιοδιασπώμενη ένωση με σημαντική αντίσταση στη διάβρωση, το οποίο δεν απελευθερώνει τοξικές ουσίες, με αποτέλεσμα να είναι κατάλληλο για την επεξεργασία του πόσιμου νερού. Ουσιαστικά η αδρανοποίηση των μικροοργανισμών με τη συγκεκριμένη μέθοδο επιτυγχάνεται με ηλεκτροχημική οξείδωση των κυτταρικών μεμβρανών (Matsunaga et al., 2000).

11.3 ΙΟΝΤΑ ΑΡΓΥΡΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΚΟΥ

Ιόντα βαρέων μετάλλων όπως χαλκού και αργύρου έχουν βακτηριοκτόνες ιδιότητες. Ο ιονισμός τέτοιων ιόντων είναι πιο αποτελεσματική μέθοδος απολύμανσης του νερού από τη χλωρίωση που προκαλεί διάβρωση στις σωληνώσεις και παράγει καρκινογόνα παραπροϊόντα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στα νοσοκομεία για τον έλεγχο του βακτηρίου *Legionella*. Τα ιόντα χαλκού και αργύρου παράγονται από μεταλλικά ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από χαλκό και άργυρο σε αναλογία 90:10 και εισέρχονται στο ζεστό νερό επανακυκλοφορίας (Lin et al., 1996).

Ο ιονισμός των ιόντων χαλκού και αργύρου έχει αρκετά προτερήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους απολύμανσης, καθώς έχει χαμηλό κόστος (πολλές φορές πιο χαμηλό από τη χλωρίωση), άμεση εγκατάσταση, εύκολη συντήρηση και παραμένουσα υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα (Goetz et al., 1997; Lin et al., 1996). Τα ιόντα παράγονται από ηλεκτρόδια των αντίστοιχων μετάλλων και η συγκέντρωσή τους στο νερό εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση στα ηλεκτρόδια (Σαραντόπουλος, 2004). Η υπολειμματική ποσότητα των ιόντων παραμένει ακόμη και σε νερό θερμοκρασίας 50°C σε αντίθεση με το όζον που είναι ιδιαίτερα δραστικό απολυμαντικό (Blanc et al., 2005). Τέλος απαιτούνται πολύ υψηλές συγκεντρώσεις χλωρίου σε σχέση με τα ιόντα χαλκού και αργύρου για τα ίδια ποσοστά αδρανοποίησης μικροοργανισμών (Goetz et al., 1997). Ωστόσο η μέθοδος αυτή είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε νερό με υψηλή σκληρότητα και θολότητα, καθώς τα ιόντα αργύρου είναι δύσκολο να διατηρηθούν λόγω της επικάλυψης των ηλεκτροδίων (Σαραντόπουλος, 2004).

Ο μηχανισμός δράσης της συγκεκριμένης μεθόδου για τη μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών αποδίδεται στα θετικά φορτισμένα ιόντα που έχουν μικροβιοκτόνο δράση. Τα ιόντα αυτά προσκολλώνται σε αρνητικά φορτισμένες κυτταρικές μεμβράνες και καταστρέφουν τη διαπερατότητά τους. Η διαδικασία αυτή σε συνδυασμό με τη διακοπή της σύνθεσης πρωτεϊνών συμβάλλουν στην καταστροφή του κυττάρου του μικροοργανισμού (Lin et al., 1996).

11.4 ΙΩΔΙΟ

Σε σύγκριση με το χλώριο, το ιώδιο δεν είναι τόσο δραστικό απολυμαντικό μέσο. Πιο συγκεκριμένα, 45mg/l ιωδίου απαιτούνται για τα ίδια ποσοστά αδρανοποίησης που επιτυγχάνονται με 8mg/l χλωρίου. Ωστόσο το ιώδιο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί όπου η εφαρμογή οποιαδήποτε άλλης μεθόδου δεν είναι δυνατή. Η πιο διαδεδομένη μορφή είναι οι ταμπλέτες ή το βάμμα ιωδίου που χρησιμοποιούνται κυρίως για έκτακτη απολύμανση. Αυτό το είδος απολύμανσης έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό και αξιόπιστο, καθώς :

- ο η μικροβιοκτόνος δράση του ιωδίου δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το pH σε χαμηλές θερμοκρασίες
- ο η αμμωνία και οι οργανικές αζωτούχες ενώσεις δεν επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου
- ο η δράση του εξαρτάται λιγότερο από το χρόνο επαφής και τη θερμοκρασία, σε σχέση με το χλώριο.

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι το κόστος και το γεγονός πως δεν είναι εύκολα διαθέσιμο. Τέλος η αβεβαιότητα για τις επιπτώσεις από τη μακρόχρονη χρήση του ιωδίου στην ανθρώπινη υγεία καθιστούν το ιώδιο μη διαδεδομένο απολυμαντικό μέσο (Cheremisinoff, 1995).

Επίσης, ανησυχίες υπάρχουν σχετικά με τη δημιουργία ιωδιωμένων τριαλογονοπαραγώγων του μεθανίου, κατά αντίστοιχο τρόπο με αυτόν της δημιουργίας τριαλογονοπαραγώγων του μεθανίου κατά τη χλωρίωση, επειδή το υποιωδιώδες οξύ στο νερό δίνει αντίστοιχες αντιδράσεις με το υποχλωριώδες οξύ. Πρόκειται για τις ενώσεις ιωδοφόρμιο, διωδοχλωρομεθάνιο, διωδοβρωμομεθάνιο, διχλωροιωδομεθάνιο, διβρωμοιωδομεθάνιο και βρωμοχλωρο-ιωδομεθάνιο (Cancho et al, 2000). Οι ενώσεις αυτές ευθύνονται για προβλήματα γεύσης και οσμής του νερού (Bichsel et al., 2000).

11.5 ΒΡΩΜΙΟ

Όλες οι ενώσεις του βρωμίου που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία του νερού και των υγρών αποβλήτων μετατρέπονται σε βρωμικά ιόντα μετά την οξείδωση. Όταν στο πόσιμο νερό που περιέχει βρωμιόντα προστεθεί χλώριο, τότε μετατρέπονται σε υποβρωμιώδες οξύ και βρωμαμίνες, αν περιέχεται αμμωνία στο νερό. Οι ενώσεις αυτές αντιδρούν με συστατικά του νερού σχηματίζοντας τριαλογονωμένα παράγωγα του μεθανίου που είναι καρκινογόνα. Για αυτό το λόγο η χρήση του βρωμίου ως εναλλακτική μέθοδος της χλωρίωσης δεν έχει επεκταθεί (Cheremisinoff, 1995).

11.6 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επεξεργασία του νερού άρχισε να εξετάζεται την δεκαετία του 1990, καθώς τα τελευταία χρόνια υπάρχει ενδιαφέρον για

περιβαλλοντικά φιλικές και οικονομικές μεθόδους επεξεργασίας του νερού (McLoughlin et al., 2004; Ljubas, 2004). Ουσιαστικά η ηλιακή ακτινοβολία άρχισε να χρησιμοποιείται για την απολύμανση του νερού λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μηχανισμό αδρανοποίησης των μικροοργανισμών που προκαλείται από την υπεριώδη ακτινοβολία. Η συνεργατική δράση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας παρατηρείται κυρίως σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 45-50°C (Rincon et al., 2004). Για την εξασφάλιση ικανοποιητικών ποσοστών αδρανοποίησης θα πρέπει το νερό να είναι εκτεθειμένο για 3-5 ώρες σε ακτινοβολία ισχύος 500W/m² και να έχει χαμηλή θολότητα (Oates et al., 2003). Σε πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί έχει αποδειχθεί πως επιτυγχάνονται υψηλά ποσοστά αδρανοποίησης των μικροοργανισμών κυρίως του *E.coli* με τη χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση φωτοκαταλύτη. Αυτή η μέθοδος απολύμανσης αποτελεί ιδανική λύση για μικρές μονάδες επεξεργασίας σε αναπτυγμένες χώρες, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι αστείρευτη πηγή ενέργειας (McLoughlin et al., 2004; Rincon et al., 2004).

Η υπεριώδης και υπέρυθη ακτινοβολία του ηλιακού φωτός αδρανοποιούν τους μικροοργανισμούς μέσω τριών μηχανισμών. Η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας από το DNA ευνοεί τη δημιουργία ομοιοπολικών δεσμών θυμίνης, οπότε σχηματίζονται διμερή θυμίνης, τα οποία σταματούν πρόωρα την αντιγραφή του DNA. Επιπροσθέτως ο σχηματισμός των διμερών της θυμίνης δημιουργεί μεταλλάξεις. Η διαλυμένη οργανική ύλη απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία με αποτέλεσμα να ευνοούνται φωτοχημικές αντιδράσεις που σχηματίζουν υπεροξειδία (O₂⁻) και υπεροξειδία του υδρογόνου (H₂O₂), τα οποία καταστρέφουν τους μικροοργανισμούς οξειδώνοντας τα κυτταρικά συστατικά. Τέλος η απορρόφηση τόσο της υπεριώδους όσο και της υπέρυθρης ακτινοβολίας αυξάνει τη θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το φυσιολογικό δημιουργεί επιπλοκές στη σύνθεση των πρωτεϊνών (Oates et al., 2003).

Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις παρόλο που η ηλιακή ακτινοβολία αδρανοποιεί τους μικροοργανισμούς, παρατηρείται αύξηση του πληθυσμού τους, οπότε κρίνεται απαραίτητος ο συνδυασμός με ετερογενείς καταλύτες, όπως το διοξείδιο του τιτανίου, ώστε να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου (Fernandez et al., 2005; Ljubas, 2004). Τέλος η συνδυαστική δράση της ηλιακής ακτινοβολίας με διοξείδιο του τιτανίου αυξάνει τα ποσοστά αδρανοποίησης των μικροοργανισμών περίπου κατά 20-25% (Duffy et al., 2004).

11.7 ΒΡΑΣΜΟΣ

Ο βρασμός είναι μία διαδεδομένη μέθοδος εκτάκτου απολύμανσης του νερού στις αναπτυγμένες χώρες (McLennan, 2000). Είναι ουσιαστικά η πιο απλή μέθοδος

απολύμανσης, καθώς ζεσταίνοντας το νερό σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 100°C σκοτώνονται οι περισσότεροι παθογόνοι μικροοργανισμοί και κυρίως ιοί και βακτήρια. Για να είναι αποτελεσματική η απολύμανση πρέπει ο βρασμός να έχει διάρκεια τουλάχιστον είκοσι λεπτά, ενώ σε περιοχές με υψόμετρο μεγαλύτερο από 1600m απαιτείται βρασμός μόνο για τρία λεπτά (www.oas.org; www.epa.gov/safewater). Προσθέτοντας μία κουταλιά αλάτι ή μεταφέροντας το από δοχείο σε δοχείο βελτιώνεται σημαντικά η απόδοση της μεθόδου (www.epa.gov/safewater). Ωστόσο, είναι μη περιβαλλοντική λύση, καθώς απαιτείται κόψιμο των δέντρων για την εξασφάλιση της απαραίτητης ενέργειας (Rincon et al., 2004). Τέλος η αύξηση της θερμοκρασίας όχι απαραίτητα μέχρι το σημείο βρασμού σε χλωριωμένο νερό αυξάνει τη συγκέντρωση των τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου (Krasner et al., 2005).

11.8 ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Οι υπέρηχοι είναι δυνατόν να θανατώσουν βακτήρια, όταν παρέχεται η απαραίτητη ενέργεια, ενώ σε χαμηλότερα ποσά ενέργειας βελτιώνουν την απόδοση του απολυμαντικού μέσου. Σε συχνότητες 20kHz απλά βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα του απολυμαντικού μέσου, ενώ σε συχνότητες 850 kHz αδρανοποιούνται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί. Πιο συγκεκριμένα η έκθεση για ένα λεπτό σε συχνότητα 850 kHz είναι αρκετή για την αδρανοποίηση του *E.coli*. (Duckhouse et al., 2004).

11.9 ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ

Η σπηλαιώση (cavitation) είναι το φαινόμενο δημιουργίας, ανάπτυξης και διάλυσης μικροφουσαλίδων μέσα σε υγρό. Η σπηλαιώση που δημιουργείται λόγω του περάσματος κυμάτων ήχων υψηλής συχνότητας καλείται ακουστική, ενώ όταν δημιουργείται λόγω της μεταβολής της πίεσης που συμβαίνει λόγω της αλλαγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συστήματος ροής καλείται υδροδυναμική. Η τελευταία έχει βρεθεί πως έχει απολυμαντικές ιδιότητες (Jyoti et al., 2001).

Στην υδροδυναμική σπηλαιώση οι μικροφουσαλίδες δημιουργούνται όταν η πίεση μειωθεί σημαντικά. Αύξηση της ταχύτητας του νερού οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της πίεσης και σε αύξηση του ρυθμού δημιουργίας των μικροφουσαλίδων. Το αέριο που περιέχεται στις μικροφουσαλίδες βρίσκεται υπό υψηλή πίεση αρκετή, ώστε να προκαλέσει ρήξη των κυτταρικών μεμβρανών (Jyoti et al., 2001).

Η σπηλαιώση είναι μία αποτελεσματική μη χημική μέθοδος απολύμανσης του νερού, καθώς δε δημιουργούνται τοξικά παραπροϊόντα και δεν απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας. Ωστόσο για τη μείωση της πίεσης του νερού απαιτείται εξοπλισμός

υψηλού οικονομικού κόστους, γεγονός που καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο μη δημοφιλή (Jyoti et al., 2001).

11.10 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

Μία δέσμη ηλεκτρονίων με υψηλή ενέργεια εισέρχεται μέσω μίας λεπτής μεμβράνης στο νερό. Τα ηλεκτρόνια διασπούν τα μόρια του νερού παράγοντας υψηλά ενεργά χημικά είδη. Για την εφαρμογή της μεθόδου δεν απαιτείται προσθήκη χημικών ουσιών, τα παραπροϊόντα που προκύπτουν δεν είναι τοξικά και ο χρόνος επαφής είναι σύντομος. Ωστόσο το υψηλό κόστος της εγκατάστασης και οι κίνδυνοι της χρήσης υψηλής τάσης είναι ανασταλτικοί παράγοντες για τη συστηματική εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου (U.S EPA., 1999b).

11.11 ΥΠΕΡΟΞΙΚΟ ΟΞΥ

Το υπεροξικό οξύ (peracetic acid) (CH_3COOOH), γνωστό επίσης ως υπεροξοοξικό οξύ (peroxyacetic acid), είναι ένα ισχυρά οξειδωτικό μέσο. Λόγω της αστάθειας του μορίου πρέπει να παράγεται επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας και διασπάται σε οξικό οξύ, υπεροξείδιο του υδρογόνου και οξυγόνο. Τα παραπροϊόντα που προκύπτουν δεν είναι τοξικά και είναι βιοδιασπώμενα (U.S EPA., 1999b).

11.12 ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ

Η συνδυαστική δράση υπεριώδους ακτινοβολίας με άμεση ηλεκτρόλυση είναι μία αποτελεσματική εναλλακτική μέθοδος απολύμανσης του πόσιμου νερού. Προς το παρόν η συγκεκριμένη μέθοδος δε μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα λόγω του υψηλού κόστους σε σχέση με την υπεριώδη ακτινοβολία. Ωστόσο η ηλεκτρόλυση με χαμηλές συγκεντρώσεις χλωρίου είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος (Bergmann et al., 2002).

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΚΥΡΙΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**12.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η διαδοχική ή ταυτόχρονη χρήση δύο ή περισσότερων απολυμαντικών έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως :

- Λιγότερο δραστικά απολυμαντικά μέσα, όπως οι χλωραμίνες, συμβάλλουν στη μείωση του σχηματισμού παραπροϊόντων και είναι πιο αποτελεσματικά στον έλεγχο των βιομεμβρανών (biofilms) στο σύστημα.
- Η απαίτηση για καλύτερη ποιότητα ύδατος οδήγησε στην αύξηση των δόσεων των απολυμαντικών μέσων με αποτέλεσμα το σχηματισμό παραπροϊόντων. Εντούτοις ο συνδυασμός απολυμαντικών μέσων είναι αποτελεσματική λύση για την καλύτερη απολύμανση του νερού.
- Έρευνες έχουν δείξει πως η διαδοχική χρήση απολυμαντικών είναι πιο αποτελεσματική από τη χρήση ενός μόνο απολυμαντικού. Η διαδικασία αυτή όπου δύο ή περισσότερα απολυμαντικά προστίθενται στο νερό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεργατική δράση για την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών. Αναφέρεται η διεργασία αυτή στη βιβλιογραφία ως συνδυαστική απολύμανση (U.S EPA. 1999a).

12.2 ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ

Κατά την απολύμανση πραγματοποιείται η αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών και η παραμονή υπολειμματικής ποσότητας στο σύστημα. Συνεπώς ο συνδυασμός των απολυμαντικών μεθόδων συνήθως χαρακτηρίζεται από πρωτεύουσα και δευτερεύουσα απολύμανση.

- Πρωτεύουσα απολύμανση είναι η αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών σε τέτοιο επίπεδο, ώστε το νερό να είναι ασφαλές για κατανάλωση. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με προσθήκη συγκεκριμένης ποσότητας απολυμαντικού και για δεδομένο χρόνο επαφής.
- Δευτερεύουσα απολύμανση είναι η παραμονή υπολειμματικής ποσότητας του απολυμαντικού στο σύστημα, ώστε να περιοριστεί η ανάπτυξη μικροοργανισμών.

Ανάλογα με το είδος του μικροοργανισμού που πρέπει να αδρανοποιηθεί χρησιμοποιείται και ο κατάλληλος συνδυασμός απολυμαντικών, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12.1) (U.S EPA. 1999a).

Πίνακας 12.1 : Πρωτεύοντα Απολυμαντικά, Πηγή : U.S EPA., 1999a

ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ	ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΑ	
	ΜΕ ΔΙΗΘΗΣΗ	ΧΩΡΙΣ ΔΙΗΘΗΣΗ
ΚΟΛΟΒΑΚΤΗΡΙΔΙΑ	ΧΛΩΡΙΟ	ΧΛΩΡΙΟ

	ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ
	ΟΖΟΝ	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ
	UV	
	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ	
GARDIA CYSTS	ΧΛΩΡΙΟ	ΧΛΩΡΙΟ
	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ
	ΟΖΟΝ	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ
	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ	
ΙΟΙ	ΧΛΩΡΙΟ	ΧΛΩΡΙΟ
	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ
	ΟΖΟΝ	UV
	UV	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ
	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ	
CRYPTOSPORIDIUM OOCYSTS	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	ΧΛΩΡΙΟ
	ΟΖΟΝ	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ
	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ	

12.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Κατά το συνδυασμό των απολυμαντικών μεθόδων πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος απολυμαντικού, ώστε να αποφεύγονται οι μεγάλοι χρόνοι επαφής, οι υψηλές συγκεντρώσεις των απολυμαντικών και ο σχηματισμός παραπροϊόντων. Ωστόσο το είδος των παραπροϊόντων εξαρτάται από την ποιότητα του προς επεξεργασία ύδατος, το είδος και την ποσότητα του απολυμαντικού. Τέλος ο συνδυασμός απολυμαντικών μεθόδων μπορεί να μειώσει τα ποσοστά αδρανοποίησης των μικροοργανισμών.

Για το συνδυασμό των απολυμαντικών στοιχείων υπάρχουν πολλές επιλογές και εξαρτάται κυρίως από το είδος του μικροοργανισμού. Επίσης για ορισμένα απολυμαντικά στοιχεία παρόλο που είναι ιδιαίτερα δραστικά, η υπολειμματική ποσότητα δεν παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα. Γι' αυτό το λόγο η δευτερεύουσα απολύμανση είναι περιορισμένη, ώστε να διατηρηθεί η σταθερότητα του συστήματος. Στον Πίνακα 12.2 αναφέρονται οι διάφοροι συνδυασμοί απολυμαντικών μεθόδων (U.S EPA. 1999a).

Πίνακας 12.2 : Συνδυασμοί Απολυμαντικών Μεθόδων, Πηγή : U.S EPA., 1999a

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΣΧΟΛΙΟ
ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ	Περιορισμένος σχηματισμός ΤΗΜ, μειωμένη οργανική ύλη, τυπικό σύστημα επεξεργασίας	Ο πιο συνήθης και αποτελεσματικός συνδυασμός
ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	Τυπικό σύστημα επεξεργασίας	Το χλώριο χρησιμοποιείται για την απολύμανση, ενώ οι χλωραμίνες για τον περιορισμό του σχηματισμού παραπροϊόντων
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ	Αυξημένος σχηματισμός παραπροϊόντων, απαραίτητη	Μειωμένη προσθήκη διοξειδίου του χλωρίου για μείωση των

ΧΛΩΡΙΟΥ	διήθηση για την απομάκρυνση του <i>Cryptosporidium</i> , χαμηλή συγκέντρωση διοξειδίου του χλωρίου στο νερό.	ιόντων χλωρίου.
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	Αυξημένος σχηματισμός παραπροϊόντων, απαραίτητη διήθηση για την απομάκρυνση του <i>Cryptosporidium</i> .	Προσθήκη του διοξειδίου του χλωρίου για μείωση των ιόντων χλωρίου.
ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΙΟ	Περιορισμένος σχηματισμός παραπροϊόντων, άμεση ή μη απαραίτητη χλωρίωση	Ιδιαίτερα αποτελεσματική απολύμανση.
ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	Περιορισμένος σχηματισμός παραπροϊόντων, άμεση ή μη απαραίτητη χλωρίωση	Ιδιαίτερα αποτελεσματική απολύμανση.
UV/ΧΛΩΡΙΟ	Απαιτείται απομάκρυνση του <i>Gardia</i> και <i>Cryptosporidium</i> με μεμβράνες. Απολύμανση υπόγειων υδάτων. Αδρανοποίηση μόνο των ιών με UV.	Σπάνια εφαρμόζεται. Μερική αδρανοποίηση <i>Gardia</i> και <i>Cryptosporidium</i> .
UV/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	Απαιτείται απομάκρυνση του <i>Gardia</i> και <i>Cryptosporidium</i> με μεμβράνες. Απολύμανση υπόγειων υδάτων. Αδρανοποίηση μόνο των ιών με UV.	Σπάνια εφαρμόζεται. Μη αδρανοποίηση <i>Gardia</i> και <i>Cryptosporidium</i> .

12.4 ΤΡΟΠΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Ο τρόπος δράσης των συνδυασμένων απολυμαντικών μεθόδων άρχισε να ερευνάται από το 1988. Πιο συγκεκριμένα έχει ερευνηθεί ο τρόπος δράσης των πιο σημαντικών συνδυασμών απολυμαντικών στοιχείων όπως :

- χλώριο με χλωραμίνες
- διοξείδιο του χλωρίου με χλώριο
- διοξείδιο του χλωρίου με διοξείδιο του χλωρίου
- διοξείδιο του χλωρίου με χλωραμίνες
- όζον με χλώριο
- όζον με διοξείδιο του χλωρίου και
- όζον με χλωραμίνες

Η συνεργατική δράση των απολυμαντικών μέσων είναι δυνατόν να περιγραφεί από μαθηματικά μοντέλα, τα οποία καθορίζουν την κινητική της απολύμανσης. Η βασική αρχή αυτών των μοντέλων είναι ότι, αν τα απολυμαντικά μέσα δεν αντιδρούν μεταξύ τους, τότε ανεξαρτήτως από το αποτέλεσμα, ικανοποιείται η παρακάτω σχέση :

$$\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i} = 1$$

όπου :

x_i συγκέντρωση κάθε απολυμαντικού μέσου

y_i	συγκέντρωση κάθε απολυμαντικού μέσου που προσκαλεί τα ίδια αποτελέσματα με το συνδυασμό
i	μεμονωμένο απολυμαντικό μέσο
n	συνολικός αριθμός απολυμαντικών μέσων

Ανάλογα με την τιμή που έχει το παραπάνω άθροισμα προκύπτει ότι :

- αν $\Sigma < 1$, τότε υπάρχει συνεργατική δράση
- αν $\Sigma > 1$, τότε υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των απολυμαντικών στοιχείων
- αν $\Sigma = 1$, τότε δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση (U.S EPA. 1999a).

12.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Αντίστοιχα με τα περισσότερα χημικά απολυμαντικά, η συνεργατική δράση απολυμαντικών σε ότι αφορά την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών επηρεάζεται από το pH και τη θερμοκρασία (U.S EPA. 1999a).

12.5.1 pH

Γενικότερα το ποσοστό αδρανοποίησης των μικροοργανισμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το pH. Σε μεγάλες τιμές pH (pH=11) η συνεργατική δράση των απολυμαντικών είναι χαμηλή, ενώ σε ουδέτερο pH η αποτελεσματικότητα των συνδυασμών αυξάνεται σημαντικά με μοναδική εξαίρεση το συνδυασμό όζοντος-διοξειδίου του χλωρίου, όπου είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε χαμηλές τιμές pH (U.S EPA. 1999a).

12.5.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η χαμηλή θερμοκρασία επηρεάζει τη δραστηριότητα των συνδυασμένων απολυμαντικών. Αυτό κυρίως συμβαίνει καθώς υπό αυτές τις συνθήκες οι κυτταρικές μεμβράνες είναι δύσκολο να διαπεραστούν. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως η αδρανοποίηση του *Cryptosporidium* oocysts, μείωση τη θερμοκρασίας με ταυτόχρονη αύξηση του pH ευνοεί το μηχανισμό αδρανοποίησης (U.S EPA. 1999a).

12.5.3 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ

Η αποτελεσματικότητα των συνδυασμένων απολυμαντικών εξαρτάται επίσης από το είδος του μικροοργανισμού. Σε αντίθεση με τα βακτήρια που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στη συνεργατική δράση απολυμαντικών, η αδρανοποίηση των

Cryptosporidium oocysts και του *Gardia* cyst επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερα ποσοστά με τους παρακάτω συνδυασμούς :

- ο όζον με χλώριο
- ο όζον με χλωραμίνες
- ο διοξειδίο του χλωρίου με χλώριο
- ο διοξειδίο του χλωρίου με χλωραμίνες και
- ο χλώριο με χλωραμίνες

Επίσης η θολότητα του προς επεξεργασία νερού επηρεάζει τη δραστηριότητα των συνδυασμών, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τα μεμονωμένα απολυμαντικά (U.S EPA. 1999a).

12.6 ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Σε γενικές γραμμές η συνδυαστική χρήση απολυμαντικών μεθόδων συμβάλλει στη μείωση των παραπροϊόντων. Ο σχηματισμός των παραπροϊόντων εξαρτάται από το συνδυασμό των απολυμαντικών που χρησιμοποιούνται για την πρωτεύουσα και δευτερεύουσα απολύμανση και την ποιότητα του νερού. Υπό συνήθεις συνθήκες ποιότητας νερού, ο συνδυασμός όζον/χλωραμίνες σχηματίζει λιγότερα τριαλογονωμένα παράγωγα του μεθανίου σε σχέση με τον συνδυασμό χλώριο/χλωραμίνες. Ωστόσο, το όζον σε συνδυασμό με τις χλωραμίνες συμβάλλει στην αύξηση του σχηματισμού παραπροϊόντων απολύμανσης όπως αλδεύδες και βιοδιασπώμενο οργανικό υλικό. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα παραπροϊόντα που προκύπτουν από τους διάφορους συνδυασμούς απολυμαντικών στοιχείων (Πίνακας 12.3) (U.S EPA. 1999a).

Πίνακας 12.3 : Παραπροϊόντα συνδυαστικής δράσης, Πηγή : U.S EPA., 1999a

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ	ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ	ΑΛΟΓΟΝΟΥΧΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
	ΑΛΔΕΥΔΕΣ
ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	ΑΛΟΓΟΝΟΥΧΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
	ΧΛΩΡΟΚΥΑΝΙΟ
	ΒΡΩΜΟΚΥΑΝΙΟ
	ΑΛΔΕΥΔΕΣ
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΧΛΩΡΙΟ	ΑΛΟΓΟΝΟΥΧΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
	ΑΛΔΕΥΔΕΣ
	ΚΑΡΒΟΞΥΛΙΚΑ ΟΞΕΑ
	ΧΛΩΡΙΩΔΗ ΚΑΙ ΧΛΩΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ
ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	ΑΛΟΓΟΝΟΥΧΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
	ΑΛΔΕΥΔΕΣ
	ΚΑΡΒΟΞΥΛΙΚΑ ΟΞΕΑ
	ΧΛΩΡΙΩΔΗ ΚΑΙ ΧΛΩΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ
ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΙΟ	ΑΛΟΓΟΝΟΥΧΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
	ΚΑΡΒΟΞΥΛΙΚΑ ΟΞΕΑ

Συνέχεια Πίνακα 12.3

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ	ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
OZON/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	ΑΛΟΓΟΝΟΥΧΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
	ΧΛΩΡΟΚΥΑΝΙΟ
	ΒΡΩΜΟΚΥΑΝΙΟ
	ΑΛΔΕΥΔΕΣ
	ΚΑΡΒΟΞΥΛΙΚΑ ΟΞΕΑ
	ΒΡΩΜΙΚΑ ΙΟΝΤΑ
UV/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ	ΑΛΟΓΟΝΟΥΧΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ
	ΧΛΩΡΟΚΥΑΝΙΟ
	ΒΡΩΜΟΚΥΑΝΙΟ
	ΑΛΔΕΥΔΕΣ

12.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ

Η συνεργατική δράση των απολυμαντικών μέσων είναι αποτελεσματική ανεξάρτητα αν είναι ταυτόχρονη ή διαδοχική η χρήση τους. Ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις που προκύπτουν αρνητικά αποτελέσματα από τη χρήση δύο ή περισσότερων απολυμαντικών στοιχείων, καθώς δρουν ανταγωνιστικά (U.S EPA. 1999a).

12.7.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η εφαρμογή δύο ή περισσότερων απολυμαντικών μεθόδων είναι σε γενικές γραμμές πιο αποτελεσματική από την εφαρμογή μίας μεμονωμένης μεθόδου. Η δραστηκότητά τους όμως επηρεάζεται από τους παράγοντες και τους περιορισμούς του κάθε απολυμαντικού ξεχωριστά. Η συνδυαστική δράση συμβάλλει στη μείωση του σχηματισμού παραπροϊόντων, ιδιαίτερα όταν το χλώριο συνδυάζεται με κάποιο άλλο απολυμαντικό. Τέλος καθώς η χρήση τους μέχρι τώρα είναι κυρίως εργαστηριακή και δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια εφαρμογή μεγάλης κλίμακας, δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες για τη δράση τους (U.S EPA. 1999a).

12.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Από τη στιγμή που ο σχηματισμός των παραπροϊόντων είναι περιορισμένος, οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία είναι ελάχιστες και αντίστοιχες με εκείνες που προκύπτουν από τη χρήση μεμονωμένων απολυμαντικών (U.S EPA. 1999a).

12.7.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΘΟΓΟΝΟΥΣ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Η αποτελεσματικότητα των συνδυασμένων απολυμαντικών διαφοροποιείται από μικροοργανισμό σε μικροοργανισμό. Γενικότερα για κανονικές συνθήκες pH παρατηρείται:

- αύξηση του ποσοστού αδρανοποίησης των κολοβακτηριδίων
- αύξηση του ποσοστού αδρανοποίησης του *Gardia cyst*

- μείωση του ποσοστού αδρανοποίησης του *Hepatitis A*
- αύξηση του ποσοστού αδρανοποίησης του Poliovirous 1
- αύξηση του ποσοστού αδρανοποίησης του *Cryptosporidium oocyst*
- σταθερά ποσοστά αδρανοποίησης των σπορίων (U.S EPA. 1999a).

12.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

12.8.1 ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ

Η χρήση των χλωραμινών ως δευτερεύον απολυμαντικό μειώνει το χρόνο επαφής του χλωρίου, οπότε μειώνεται και ο σχηματισμός των παραπροϊόντων και κυρίως των τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου. Επίσης η έκθεση στις χλωραμίνες έχει διαφορετικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από ότι το χλώριο. Για καλύτερα αποτελέσματα σε ότι αφορά τη μείωση των αλογόνων, η αναλογία μεταξύ αμμωνίας και χλωρίου πρέπει να βελτιστοποιείται γρήγορα και να απομακρύνεται η περισευόμενη ποσότητα χλωρίου. Ουσιαστικά η χρήση των χλωραμινών μειώνει το σχηματισμό των τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου κατά την απολύμανση (U.S EPA. 1999a).

12.8.2 ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΙΟ

Η χρήση του όζοντος ως βασικό απολυμαντικό έχει ως αποτέλεσμα το μειωμένο σχηματισμό παραπροϊόντων σε σχέση με το χλώριο. Ωστόσο το όζον αντιδρά με οργανικά στοιχεία που περιέχονται στο νερό σχηματίζοντας αλδεύδες, οργανικά οξέα και κετόνες. Επιπροσθέτως όταν το νερό περιέχει σε σημαντική ποσότητα ιόντα βρωμίου, σχηματίζονται οργανικά παραπροϊόντα βρωμίου. Η οζόνωση επομένως πρέπει να γίνεται σε νερά με χαμηλή συγκέντρωση ιόντων βρωμίου. Τέλος η χλωρίωση μετά από οζόνωση αυξάνει τη συγκέντρωση της χλωροπικρίνης και του χλωροκυανίου σε σχέση με τη χλωρίωση (U.S EPA. 1999a).

12.8.3 ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ

Με τη χρήση όζοντος και χλωραμινών για την απολύμανση του νερού αυξάνεται σημαντικά η συγκέντρωση της χλωροπικρίνης, του χλωροκυανίου, της φορμαλδεύδης και των αλδεύδων γενικότερα. Ωστόσο η συγκέντρωση των τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου, των αλογονοοξικών οξέων, των αλογονοακετονιτριλίων, των αλογονοκετονών και του υδρίτη της χλωράλης είναι μικρότερες σε σχέση με τη χρήση χλωρίου τόσο ως πρωτεύοντος όσο και ως δευτερεύοντος απολυμαντικού. Τέλος αύξηση του υδρίτη της χλωράλης δεν παρατηρείται όταν προστίθεται μονοχλωραμίνη στο σύστημα (U.S EPA. 1999a).

12.8.4 ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΧΛΩΡΙΟ

Όπως και το όζον, το διοξείδιο του χλωρίου αλλάζει τη φύση των μορίων της οργανική ύλης και ενδεχομένως αυξάνεται η συγκέντρωση των παραγόντων που συμβάλλουν στο σχηματισμό ορισμένων παραπροϊόντων και μειώνονται οι συγκεντρώσεις κάποιων άλλων παραγόντων. Το διοξείδιο του χλωρίου σε συνδυασμό με το χλώριο είναι πιο αποτελεσματικό στη μείωση των παραπροϊόντων που προκύπτουν από τη χλωρίωση (U.S EPA. 1999a).

12.8.5 ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

Η εφαρμογή του διοξειδίου του χλωρίου ως πρωτεύοντος και ως δευτερεύοντος απολυμαντικού είναι περιορισμένη, καθώς :

- ο Το διοξείδιο του χλωρίου είναι ισχυρό οξειδωτικό και ‘διασκορπίζεται’ εύκολα στο νερό
- ο Περίπου 50-70% της ποσότητας του διοξειδίου του χλωρίου μετατρέπεται σε ανόργανα παραπροϊόντα χλωρικών αλάτων.

Ωστόσο η χρήση διοξειδίου του χλωρίου μειώνει σημαντικά το σχηματισμό οργανικών παραπροϊόντων.

12.8.6 ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ

Σε αντίθεση με τη χρήση όζοντος/χλωρίου ή χλωρίου/χλωραμινών, ο συνδυασμός του όζοντος με τις χλωραμίνες μειώνει σημαντικά το σχηματισμό αλογονούχων παραπροϊόντων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον περιορισμένο χρόνο επαφής του χλωρίου. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις αυξήθηκε η συγκέντρωση του διχλωροπροπανίου (U.S EPA. 1999a).

12.8.7 ΤΟ ΧΛΩΡΙΟ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ

Με τη χρήση του διοξειδίου του χλωρίου σε συνδυασμό με τις χλωραμίνες είναι δυνατόν να περιοριστεί ο σχηματισμός των τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου. Επίσης μειώνεται ο αριθμός των κολοβακτηριδίων στην περίπτωση που χρησιμοποιείται διοξείδιο του χλωρίου (U.S EPA. 1999a).

12.8.8 ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΙΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΟΖΟΝ/ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ

Κατά τη χρήση όζοντος και χλωραμινών παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης του χλωροκυανίου. Εντούτοις η συγκέντρωση των τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου, των αλογονοοξικών οξέων, των αλογονοακετονιτριλίων και των αλογονοκετονών μειώνεται σημαντικά. Επίσης ο συνδυασμός όζοντος/χλωραμινών ευνοεί το σχηματισμό ορισμένων παραπροϊόντων σε σχέση με το συνδυασμό

όζοντος/χλωρίου, ενώ περιορίζει το σχηματισμό άλλων οργανικών παραπροϊόντων (U.S EPA. 1999a).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

13.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απολύμανση του πόσιμου νερού ίσως είναι η πιο βασική διεργασία της επεξεργασίας του νερού, καθώς η ικανοποιητική παροχή ασφαλούς πόσιμου νερού είναι βασική προϋπόθεση για την ανθρώπινη υγεία. Ουσιαστικά η απολύμανση είναι ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα του 20^{ου} αιώνα για τη διασφάλιση της ανθρώπινης υγείας. Δυστυχώς, παρόλο που η ανάπτυξη των προχωρημένων μεθόδων επεξεργασία ύδατος είναι ραγδαία, οι ασθένειες που μεταδίδονται μέσω του νερού αποτελούν βασική αιτία για το θάνατο πολλών ανθρώπων σε όλο τον πλανήτη, όχι μόνο στις χώρες με χαμηλά πρότυπα υγιεινής αλλά και στις βιομηχανικές χώρες.

Απολύμανση είναι η κύρια διεργασία κατά την οποία οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που περιέχονται στο νερό καταστρέφονται ή αδρανοποιούνται, χωρίς απαραίτητως το νερό να είναι αποστειρωμένο. Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι βιολογικά είδη που προκαλούν ασθένειες στον ανθρώπινο ξενιστή οργανισμό. Οι μικροοργανισμοί αυτοί διακρίνονται στις εξής κατηγορίες :

- ο Ιοί
- ο Βακτήρια
- ο Παράσιτα
- ο Μύκητες

Οι μικροοργανισμοί συνήθως προέρχονται από αποθέσεις ανθρωπίνων αποβλήτων, αποβλήτων μονάδων εκτροφής ζώων, βιομηχανικών αποβλήτων επεξεργασίας τροφών, νοσοκομειακών αποβλήτων και από διαρροές σηπτικών δεξαμενών. Μέχρι το 2001 είχαν καταγραφεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (W.H.O.) 1415 είδη μικροοργανισμών που είναι παθογόνοι για τον άνθρωπο.

Οι μέθοδοι απολύμανσης του νερού διακρίνονται σε χημικές και φυσικές. Σήμερα εφαρμόζονται κυρίως χημικές μέθοδοι και η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η χλωρίωση. Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι οι προχωρημένες εναλλακτικές του χλωρίου μέθοδοι απολύμανσης. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα των σημαντικότερων μεθόδων απολύμανσης.

13.2 ΧΛΩΡΙΟ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Οξειδώνει το σίδηρο, το μαγγάνιο και τα σουλφίδια
- Επιτείνει την απομάκρυνση χρωμάτων

- Βελτιώνει τη γεύση και την οσμή
- Βελτιώνει την κροκίδωση και τη διήθηση ορισμένων ρυπαντών
- Είναι αποτελεσματικό βιοκτόνο
- Είναι ιδιαίτερα εύκολα εφαρμόσιμη και οικονομική μέθοδος ανεξάρτητα από το μέγεθος της μονάδας
- Είναι η πιο ευρ χρησιμοποιούμενη μέθοδος
- Είναι διαθέσιμο επίσης με τη μορφή υποχλωριώδους νατρίου και ασβεστίου. Διαλύματα που χρησιμοποιούνται σε μικρά συστήματα, καθώς απαιτείται λιγότερος εξοπλισμός σε σχέση με το χλώριο
- Παραμένει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Δημιουργεί περιορισμούς στην κροκίδωση και διήθηση των διαλυμένων οργανικών ουσιών
- Κατά την εφαρμογή του σχηματίζονται τριαλογονωμένα παράγωγα του μεθανίου και άλλα οργανικά παραπροϊόντα, ύποπτα για καρκίνο στον άνθρωπο
- Σε αέρια μορφή έχει έντονες διαβρωτικές ικανότητες
- Δημιουργούνται προβλήματα γεύσης και οσμών στο επεξεργασμένο νερό, ανάλογα με την ποιότητα του νερού και τη δόση του χλωρίου
- Το υποχλωριώδες νάτριο και ασβέστιο έχουν μεγαλύτερο κόστος από το αέριο χλώριο
- Το υποχλωριώδες νάτριο διασπάται με την πάροδο του χρόνου και την έκθεση στο φως
- Το υποχλωριώδες νάτριο είναι διαβρωτική ουσία
- Το υποχλωριώδες ασβέστιο πρέπει να φυλάσσεται σε ξηρό μέρος λόγω της ευαισθησίας του σε υγρασία και ζέστη
- Υψηλές συγκεντρώσεις υποχλωριώδους νατρίου και ασβεστίου σχηματίζουν χλωρικά ιόντα ως παραπροϊόντα
- Είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε υψηλές τιμές pH
- Σχηματίζει οξυγονούχα παραπροϊόντα, τα οποία είναι βιοδιασπώμενα και ευνοούν τη βιολογική ανάπτυξη αν δεν παραμείνει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά του χλωρίου ως απολυμαντικού.

Πίνακας 13.1 : Χλώριο

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	Η χλωρίωση πραγματοποιείται είτε με το αέριο χλώριο είτε με την προσθήκη ενώσεων του χλωρίου σε υγρή ή στερεά μορφή. Το αέριο χλώριο παρασκευάζεται

κυρίως με ηλεκτρόλυση αλκαλικού άλατος ή υποχλωριώδους οξέος. Οι ενώσεις χλωρίου δεν παρασκευάζονται επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας.

ΒΑΣΙΚΗ ΧΡΗΣΗ Το χλώριο χρησιμοποιείται κυρίως για την απολύμανση του νερού. Ωστόσο χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό στοιχείο για την εξάλειψη οσμών και γεύσεων, τον περιορισμό της ανάπτυξης αλγών στο σύστημα, την απομάκρυνση σιδήρου και μαγγανίου, τη διατήρηση της ποιότητας του νερού και για την απομάκρυνση χρωμάτων.

ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ Το χλώριο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση βακτηριών και ιών. Ωστόσο είναι αναποτελεσματικό στην αδρανοποίηση των *Gardia cysts* και *Cryptosporidium oocyst*.

ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ Αντιδρά με την οργανική ύλη και το βρώμιο σχηματίζοντας ποικιλία οργανικών παραπροϊόντων, με κυριότερα τα τριαλογονωμένα παράγωγα του μεθανίου (THMs) και τα αλογονοοξικά οξέα (HAAs)

Συνέχεια Πίνακα 13.1

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΣΗΜΕΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	Η προσθήκη του χλωρίου μπορεί να πραγματοποιηθεί πριν από οποιοδήποτε στάδιο επεξεργασίας του νερού.
ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ	Επειδή το χλώριο είναι ισχυρό οξειδωτικό και ιδιαίτερα διαβρωτικό πρέπει να φυλάσσεται με προσοχή. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δίνεται στη χρήση λόγω των προβλημάτων υγείας που προκύπτουν.

13.3 ΟΖΟΝ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Είναι πιο αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση των ιών και των *Gardia cysts* και *Cryptosporidium oocyst* από το χλώριο, τις χλωραμίνες και το διοξείδιο του χλωρίου
- Οξειδώνει το σίδηρο, το μαγγάνιο και τα σουλφίδια
- Εξαιλείει οσμές και γεύσεις, ενώ παράλληλα απομακρύνει χρώματα
- Λόγω της αποτελεσματικότητας του ο χρόνος επαφής του είναι μόλις τριάντα λεπτά
- Ενισχύει την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών
- Κατά τη διάσπασή του μόνο διαλυμένο οξυγόνο παράγεται

- Κατά την απουσία ιόντων βρωμίων δε σχηματίζονται αλογονούχα παραπροϊόντα
- Η βιοκτόνος δράση του δεν επηρεάζεται από το pH.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Σχηματίζονται αλδεϋδες και κετόνες, καθώς και βρωμικά ιόντα παρουσία βρωμίου
- Το κόστος εξοπλισμού για την οζόνωση είναι αρκετά υψηλό
- Απαιτείται μεγάλο ποσό ενέργειας για την παρασκευή του, η οποία πραγματοποιείται επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας
- Είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό και τοξικό
- Απαιτούνται βιολογικά φίλτρα για την απομάκρυνση του αφομοιώσιμου οργανικού άνθρακα και των βιοδιασπώμενων παραπροϊόντων
- Διασπάται σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές τιμές pH
- Δεν παραμένει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα.

Πίνακας 13.2 : Όζον

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	Λόγω της αστάθειας του μορίου του, το όζον πρέπει να παρασκευάζεται επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας. Συνήθως παρασκευάζεται από ατμοσφαιρικό οξυγόνο.
ΒΑΣΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	Το όζον χρησιμοποιείται τόσο κατά την απολύμανση όσο και κατά τη χημική οξειδωση. Ως οξειδωτικός παράγοντας επιταχύνει τη διάσπαση των οργανικών ενώσεων, απομακρύνει γεύσεις και οσμές και μειώνει τις συγκεντρώσεις των παραπροϊόντων του χλωρίου.
ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ	Η οζόνωση είναι η πιο δραστική και αποτελεσματική μικροβιοκτόνος μέθοδος για την απολύμανση του νερού. Είναι αποτελεσματική στην αδρανοποίηση ιών, βακτηρίων και πρωτόζωων. Η δράση του όζοντος ενάντια στα βακτήρια και τους ιούς δεν επηρεάζεται από το pH (6-9). Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, τόσο μειώνεται η απόδοση της μεθόδου.
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ	Σχηματίζονται οργανικά οξέα και αλδεϋδες. Αν στο νερό περιέχονται βρωμιόντα ή αν προστεθεί χλώριο ως δευτερεύον απολυμαντικό, τότε σχηματίζονται βρωμικά ιόντα καθώς και αλογονούχα παραπροϊόντα.
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως δευτερεύουσα απολυμαντική μέθοδος, καθώς δεν παραμένει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα.
ΣΗΜΕΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	Αν χρησιμοποιείται ως απολυμαντικό, πρέπει να προστίθεται πριν τη διήθηση και μετά τη καθίζηση, ενώ ως οξειδωτικό μπορεί να

προστεθεί πριν την κροκίδωση, την καθίζηση και τη διήθηση.

ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Το όζον είναι ιδιαίτερα τοξικό, γι' αυτό οι εγκαταστάσεις παρασκευής και εφαρμογής πρέπει να είναι ασφαλείς για το προσωπικό.

13.4 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΛΩΡΙΟΥ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Είναι πιο αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση των ιών και των *Gardia cysts* και *Cryptosporidium* oocyst από το χλώριο και τις χλωραμίνες
- Οξειδώνει το σίδηρο, το μαγγάνιο και τα σουλφίδια
- Οσμές και γεύσεις που δημιουργούνται από τα άλγη και τις φαινόλες απομακρύνονται με τη χρήση του διοξειδίου του χλωρίου
- Είναι εύκολο να παρασκευαστεί
- Η βιοκτόνος δράση του δεν επηρεάζεται από το pH
- Παραμένει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Η χρήση του ευνοεί το σχηματισμό συγκεκριμένων παραπροϊόντων, όπως χλωρικών και χλωριωδών ιόντων
- Το κόστος του υποχλωριώδους νατρίου είναι υψηλό
- Διασπάται κατά την έκθεση στο ηλιακό φως
- Πρέπει να παρασκευάζεται επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας
- Περίσσεια χλωρίου ευνοεί το σχηματισμό αλογονούχων παραπροϊόντων
- Το κόστος δειγματοληψίας και εργαστηριακού ελέγχου των παραπάνω παραπροϊόντων είναι ιδιαίτερα υψηλό
- Σε ορισμένες περιπτώσεις παράγονται επικίνδυνες οσμές.

Πίνακας 13.3 : Διοξείδιο του Χλωρίου

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	Το διοξείδιο του χλωρίου πρέπει να παρασκευάζεται επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας. Συνήθως παρασκευάζεται από αέριο χλώριο ή υποχλωριώδες νάτριο και πιο σπάνια από υποχλωριώδες οξύ.
ΒΑΣΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	Χρησιμοποιείται κυρίως ως πρωτεύον ή δευτερεύον απολυμαντικό, για τον έλεγχο των τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου, οσμών και γεύσεων, την απομάκρυνση χρωμάτων και την καταστροφή σουλφιδίων και φαινολών.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ	Το διοξείδιο του χλωρίου αδρανοποιεί τους περισσότερους μικροοργανισμούς ανεξάρτητα από την τιμή του pH. Είναι πιο αποτελεσματικό από το χλώριο, αλλά λιγότερο από το όζον.
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ	Όταν προστίθεται στο νερό, αντιδρά με τα περισσότερα οργανικά και ανόργανα συστατικά του νερού. Συνήθως σχηματίζονται χλωρικά ιόντα, ενώ δε σχηματίζονται τριαλογονωμένα παράγωγα του μεθανίου.
ΣΗΜΕΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	Στις περισσότερες μονάδες επεξεργασίας όταν χρησιμοποιείται ως οξειδωτικός παράγοντας προστίθεται πριν ή μετά την καθίζηση.
ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ	Το αέριο διοξείδιο του χλωρίου είναι εκρηκτικό σε επίπεδα μεγαλύτερα από 10% στην ατμόσφαιρα.

13.5 ΥΠΕΡΜΑΓΓΑΝΙΚΟ ΚΑΛΙΟ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Οξειδώνει το σίδηρο και το μαγγάνιο
- Είναι εύκολο στη μεταφορά, στη φύλαξη και στην εφαρμογή
- Οξειδώνει ουσίες που προσδίδουν γεύσεις και οσμές στο νερό
- Χρησιμοποιείται για τον περιορισμό του σχηματισμού τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου
- Η χρήση του έχει ελάχιστη επιρροή στις υπόλοιπες διεργασίες επεξεργασίας του νερού
- Είναι αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση συγκεκριμένων ιών.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Απαιτείται μεγάλος χρόνος επαφής
- Προσδίδει χρώμα ροζ στο νερό
- Είναι τοξικό και ερεθίζει το δέρμα
- Παρόλο που δε σχηματίζονται παραπροϊόντα, οι σκούροι μπλε κρύσταλλοι προκαλούν ζημιές στα μάτια και προβλήματα στην αναπνοή, ερεθίζουν το δέρμα και αν καταποθούν είναι θανατηφόροι.

Πίνακας 13.4 : Υπερμαγγανικό Κάλιο

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	Η επιτόπου παρασκευή απαιτεί χημική ανάμιξη και εξοπλισμό.
ΒΑΣΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	Χρησιμοποιείται για την εξάλειψη γεύσεων και οσμών,

την απομάκρυνση χρωμάτων, σιδήρου και μαγγανίου.

ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ	Δεν είναι αποτελεσματικό απολυμαντικό μέσο, ενώ δρα ικανοποιητικά ως οξειδωτικός παράγοντας.
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ	Δε σχηματίζονται παραπροϊόντα κατά την εφαρμογή του, εκτός αν γίνει συνδυαστική χρήση με χλώριο. Ακόμη και τότε ο σχηματισμός τριαλογονωμένων παραγώγων του μεθανίου είναι περιορισμένος.
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	Χρησιμοποιείται κυρίως στην προεπεξεργασία για τη μείωση της απαιτούμενη ποσότητας χλωρίου και τον περιορισμό του σχηματισμού παραπροϊόντων.
ΣΗΜΕΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	Συνήθως προστίθεται κατά την κροκίδωση. Πάντοτε πρέπει να προστίθεται πριν από τη διήθηση.
ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ	Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε περίπτωση υπερβολικής δόσης.

13.6 ΧΛΩΡΑΜΙΝΕΣ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Δεν αντιδρούν με οργανικές ουσίες όπως το χλώριο για το σχηματισμό παραπροϊόντων
- Η μονοχλωραμίνη είναι πιο σταθερή και παραμένει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από το χλώριο ή το διοξείδιο του χλωρίου με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο περιορισμό της βιολογικής ανάπτυξης στο σύστημα
- Είναι εύκολο να παρασκευαστούν
- Είναι οικονομικές
- Καθώς δεν αντιδρούν με οργανικές ουσίες δεν υπάρχουν προβλήματα οσμών και γεύσεων.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Δεν οξειδώνουν το σίδηρο, το μαγγάνιο και τα σουλφίδια
- Είναι λιγότερο αποτελεσματικές σε σχέση το χλώριο, το όζον και το διοξείδιο του χλωρίου
- Πρέπει να παρασκευάζονται επιτόπου στη μονάδα επεξεργασίας
- Η δράση της μονοχλωραμίνης μειώνεται με αύξηση του pH
- Η παρουσία αμμωνίας στο σύστημα δημιουργεί προβλήματα νιτροποίησης
- Υπάρχουν προβλήματα εφαρμογής λόγω των διχλωραμινών.

Πίνακας 13.5 : Χλωραμίνες

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	Οι χλωραμίνες παρασκευάζονται κυρίως με τη διαδοχική προσθήκη χλωρίου και αμμωνίας σε αναλογία 3:1 – 5:1.

ΒΑΣΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	Η μονοχλωραμίνη χρησιμοποιείται κυρίως ως δευτερεύον απολυμαντικό. Είναι πιο αποτελεσματική από το χλώριο στην αδρανοποίηση κολοβακτηριδίων σε συστήματα με μεγάλο χρόνο επαφής.
ΑΠΟΔΟΣΗ	Σε pH χαμηλότερο από 7, το χλώριο είναι πιο αποτελεσματικό στην αδρανοποίηση ιών, βακτηρίων και πρωτόζωων σε σχέση με τις χλωραμίνες.
ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ	
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ	Μειώνουν σημαντικά το σχηματισμό παραπροϊόντων.
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην περίπτωση που η μονοχλωραμίνη προστίθεται μετά τη χλωρίωση, καθώς σχηματίζονται διχλωραμίνες και τριχλωραμίνη που προσδίδουν γεύση και οσμή στο νερό.
ΣΗΜΕΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	Συνήθως η αμμωνία προστίθεται σε ήδη χλωριωμένο νερό. Σε ορισμένες περιπτώσεις προστίθεται αρκετά νωρίτερα για τον περιορισμό των παραπροϊόντων.
ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ	Η χαμηλή αναλογία χλωρίου – αμμωνίας ευνοεί την ανάπτυξη νιτροποιών βακτηρίων στο σύστημα.

13.7 ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Δε σχηματίζονται παραπροϊόντα
- Φυσική μέθοδος
- Αποτελεσματική μέθοδος στην αδρανοποίηση ιών και βακτηρίων
- Δεν υπάρχουν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από την εφαρμογή αυτής της μεθόδου επεξεργασίας.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Η βιοκτόνος δράση επηρεάζεται από τη θολότητα και τα διαλυμένα ανόργανα και οργανικά στερεά
- Χρησιμοποιείται κυρίως για την απολύμανση υπογείων υδάτων
- Ανάπτυξη μεμβρανών στην επιφάνεια των λαμπτήρων
- Ενδεχομένως μόνο ένα μέρος των μικροοργανισμών να εκτίθεται στην υπεριώδη ακτινοβολία σε ύδατα με υψηλή θολότητα
- Υψηλό κόστος εγκατάστασης
- Απαραίτητη η συνδυαστική χρήση με χημική απολυμαντική μέθοδο, καθώς δεν υπάρχει απολυμαντική δράση μετά την απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Πίνακας 13.6 : Υπεριώδης Ακτινοβολία

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	Παρασκευάζονται από λαμπτήρες χαμηλής ή μέσης πίεσης.
ΒΑΣΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	Είναι φυσική μέθοδος απολύμανσης και απαιτείται δευτερεύουσα χημική απολυμαντική μέθοδος.
ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ	Αποτελεσματική μέθοδος για την αδρανοποίηση ιών και βακτηρίων σε χαμηλές δόσεις, ενώ απαιτούνται υψηλές δόσεις για την αδρανοποίηση των <i>Gardia cysts</i> και <i>Cryptosporidium oocyst</i> .
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ	Ελάχιστος σχηματισμός παραπροϊόντων.
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	Σε νερό με υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου, ασβεστίου και φαινολών και δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μέθοδος.

Συνέχεια Πίνακα 13.6

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΣΗΜΕΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	Πριν από την είσοδο του νερού στη μονάδα επεξεργασίας.
ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ	Υψηλές δόσεις υπερϊόδους ακτινοβολίας για την αδρανοποίηση των <i>Gardia cysts</i> και <i>Cryptosporidium oocyst</i> καθιστά τη μέθοδο αυτή μη εφαρμόσιμη για την επεξεργασία του νερού. συνήθως χρησιμοποιείται για την απολύμανση υπόγειου νερού.

13.8 ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Η οξείδωση με την εφαρμογή αυτών των μεθόδων είναι πιο γρήγορη σε σχέση με το όζον
- Οξειδώνουν αλογονούχα παραπροϊόντα
- Οξειδώνουν ενώσεις που προσδίδουν γεύση και οσμή στο νερό
- Δεν απαιτείται μεγάλος χώρος αποθήκευσης
- Ευνοούν τη μετατροπή των οργανικών ενώσεων σε πιο εύκολα βιοδιασπώμενη μορφή.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Δεν παραμένει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα
- Είναι λιγότερο αποτελεσματικές στην οξείδωση σιδήρου και μαγγανίου σε σχέση με το όζον
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού για την παρασκευή του όζοντος

Λόγω της μεγάλης δραστικότητάς τους πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή κατά την εφαρμογή τους από το προσωπικό.

Πίνακας 13.7 : Προχωρημένες Τεχνικές Οξείδωσης

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	Λόγω της αστάθειας του μορίου του όζοντος πρέπει να παρασκευάζεται επιτόπου στη μονάδα, ενώ το υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι δυνατόν να αποθηκευτεί στη μονάδα.

Συνέχεια Πίνακα 13.7

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΒΑΣΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	Κυρίως χρησιμοποιούνται για τη χημική οξείδωση. Σαν απολυμαντικές μέθοδοι είναι αποτελεσματικές, αλλά δεν παραμένει υπολειμματική ποσότητα στο σύστημα λόγω της δραστηρότητας τους.
ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ	Οι μέθοδοι αυτές είναι ελάχιστα πιο αποτελεσματικές στην αδρανοποίηση των ιών, βακτηρίων και πρωτοζώων από το όζον.
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ	Σχηματίζονται παραπροϊόντα όμοια με αυτά της χρήσης όζοντος. Αν περιέχονται βρωμιούχα ή προστεθεί χλώριο ως δευτερεύουσα απολυμαντική μέθοδος, τότε σχηματίζονται βρωμικά ιόντα καθώς και αλογονούχα παραπροϊόντα.
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	Σε περίπτωση συνδυαστικής χρήσης με την οζόνωση πρέπει να πραγματοποιείται πρώτη.
ΣΗΜΕΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	Όταν χρησιμοποιούνται ως μέθοδοι απολύμανσης εφαρμόζονται πριν την οζόνωση, ενώ ως μέθοδοι οξείδωσης είναι δυνατόν να εφαρμοστούν πριν την κροκίδωση, την καθίζηση ή τη διήθηση ανάλογα με το σύστημα επεξεργασίας.
ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ	Το υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο υλικό και απαιτείται προσοχή κατά την αποθήκευσή του.

- Ashbolt N.J. (2004) Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. *Toxicology* ,198, 229–238.
- AWWA, “Water quality and Treatment”, McGraw Hill Inc., Fifth Edition, New York 1999, ISBN 0-07-001659-3.
- Bichsel, Y., Von Gunten, U., (2000) Formation of iodo-trihalomethanes during disinfection and oxidation of iodide-containing waters, *Environmental Science and Technology*., 34, 13, 2784-2791.
- Bergmann H., Koparal S. (2005) The formation of chlorine dioxide in the electrochemical treatment of drinking water for disinfection. *Electrochimica Acta*, in press.
- Bergmann H., Iourtchouk T., Schops K., Bouzek K. (2002) New UV irradiation and direct electrolysis – promising methods for water disinfection. *Chemical Engineering Journal*, 85, 111-117.
- Blanc D.S., Carraba Ph., Zanetti G., Francioli P. (2005) Water disinfection with ozone, copper and silver, and temperature increase to control *Legionella* : seven years of experience in a university teaching hospital. *Journal of Hospital Infection*, 60, 69-72.
- Bryant E. A., Fulton G. P., Budd G. C., “Disinfection Alternatives for Safe Drinking Water”, Van Nostrand Reinhold, New York 1992, ISBN 0-442-31841-3.
- Butterfield I.M., Christensen P.A., Curtis T.P., Gunlazuardi J. (1997) Water Disinfection using an immobilized titanium dioxide film in a photochemical reactor with electric field enhancement. *Water Research*, 31, 675-677.
- Cancho, B., Ventura, F., Galceran, M., Diaz, A., Ricart, S. (2000) Determination, synthesis and survey of iodinated trihalomethanes in water treatment processes, *Water Research*, 34, 13, 3380-3390.
- Chang C.-Y., Hsieh Y.-H., Hsu S.-S., Hu P.-Y., Wang K.-H. (2000) The formation of disinfection by-products in water treated with chlorine dioxide. *Journal of Hazardous Materials*, B79, 89-102.

- Chang C.-Y., Hsieh Y.-H., Lin Y.-M., Hu P.-Y., Liu C.-C., Wang K.-H. (2001) The organic precursors affecting the formation of disinfection by-products with chlorine dioxide. *Chemosphere*, 44, 1153-1158.
- Chin A., Berube P.R. (2005) Removal of disinfection by-product precursors with ozone-UV advanced oxidation process. *Water Research*, 39, 2136-2144.
- Clark R.M., Sivagenesan M., Rice E.W., Chen J., (2002) Development of a Ct equation for the inactivation of *Cryptosporidium* oocysts with ozone. *Water Research*, 36, 3141–3149.
- Codony F., Morato J., Mas J. (2005) Role of discontinuous chlorination on microbial production by drinking water biofilms. *Water Research*, 39, 1896–1906.
- Corona-Vasquez B., Samuelson A., Rennecker J. L., Marinas B.J., (2002) Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone and free chlorine. *Water Research*, 36, 4053–4063.
- Cheremisinoff P.N., “Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology”, Marcel Dekker Inc., New York 1995, ISBN 0-8247-9277-7.
- Donnermair M.M., Blatchley E.R.III, (2003) Disinfection efficacy of organic chloramines. *Water Research*, 37, 1557-1570.
- Droste R. L., “Theory and Practise of Water and Wastewater Treatment”, John Willey and Sons Inc., U.S.A. 1997, ISBN 0-471-12444-3.
- Duckhouse H., Mason T.J., Phull S.S., Lorimer J.P. (2004) The effect of sonication on microbial disinfection using hypochlorite. *Ultrasonic Sonochemistry*, 11, 173-176.
- Duffy E.F., Touati F.AI., Kehoe S.C., McLoughlin O.A., Gill L.W., Gernjak W., Oller I., Maldonado M.I., Malato S., Cassidy J., Reed R.H., McGuigan K.G. (2004) A novel TiO₂-assisted solar photocatalytic batch-process disinfection reactor for the treatment of biological and chemical contaminants in domestic drinking water in developing countries. *Solar Energy*, 77, 649-655.
- Fernadaz P., Blanco J., Sichel C., Malato S. (2005) Water disinfection by solar photocatalysis usong compound parabolic collectors. *Catalysis today*, 101, 345-352.

- Freuze I., Brosillon S., Laplanche A., Tozza D., Cavard J., (2005) Effect of chlorination on the formation of odorous disinfection by-products. *Water Research*, 39, 2636–2642.
- Gagnon G.A., Rand J.L., O’Leary K.C., Rygel A.C., Chauret C., Andrews R.C. (2005) Disinfectant efficacy of chlorite and chlorine dioxide in drinking water biofilms. *Water Research*, 39, 1809-1817.
- Goetz A., Yu V.L. (1997) copper-silver ionization : Cautious optimism for *Legionella* disinfection and implications for environmental culturing. *American Journal of Infection Control*, 25, 6.
- Haas C.N., Kaymak B. (2003) Effect of initial microbial density on inactivation of *Giardia muris* by ozone. *Water Research*, 37, 2980–2988.
- Harrison B.M., “Pollution – Causes, Effects and Control”, University of Birmingham, Fourth Edition, UK 2001, ISBN 0-85404-621-6.
- Howard K., Inglis T.J.J. (2003) The effect of free chlorine on *Burkholderia pseudomallei* in potable water. *Water Research*, 37, 4425–4432.
- Huang W., Fang G., Wang C. (2005) The determination and fate of disinfection by-products from ozonation of polluted raw water. *Science of the Total Environment*, 345, 261– 272.
- Junli H., Li W., Nanqi R., Fang M. (1997) Disinfection effect of chloride dioxide on bacteria in water. *Water Research*, 31, 607-613.
- Jyoti K.K., Pandit A.B. (2004) Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochemical Engineering Journal*, 18, 9–19.
- Jyoti K.K., Pandit A.B. (2001) Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*, 7, 201-212.
- Kiely G., “Environmental Engineering”, McGraw Hill Inc., New York 1997, ISBN 0-07-709127-2.
- Kim J, Chung Y., Shin D., Kim M., Lee Y., Lim Y., Lee D., (2002) Chlorination by-products in surface water treatment process. *Desalination*, 151,1-9.

- Korn C., Andrews R.C., Escobar M.D. (2002) Development of chlorine dioxide-related by-products models for drinking water treatment. *Water Research*, 36, 330-342.
- Krasner S.W., Wright J.M. (2005) The effect of boiling water on disinfection by-product exposure. *Water Research*, 39, 855-864.
- Larson M.A., Marinas B.J. (2003) Inactivation of *Bacillus subtilis* spores with ozone and monochloramine. *Water Research*, 37, 833–844.
- Li J.W., Tao Z.X., Wang X.W., Zheng J.L., Chao F.H. (2004) Mechanisms of inactivation of *Hepatitis A* virus in water by chlorine dioxide. *Water Research*, 38, 1514–1519.
- Lin Y.-S. E., Vidic R.D., Stout J.E., Yu V.L. (1996) Individual and combined effects of copper and silver ions on inactivation of *Legionella Pneumophilla*. *Water Research*, 30, 1905- 1913.
- Ljubas D. (2004) Solar photocatalysis – a possible step in drinking water treatment. *Energy*, 30, 1699-1710.
- Lui D.H.F., Liptak B.G., “Environmental Engineers’ Handbook”, Lewis Publishers, Second Edition, New York 2000, ISBN 0-8493-998718.
- Lozinski T., Wierzchowski K.L. (2003) Inactivation and destruction by KMnO₄ of *Escherichia coli* RNA polymerase open transcription complex : recommendations for footprinting experiments. *Analytical Biochemistry*, 320, 239-251.
- Martins F. A. (1998) Advanced oxidation processes applied to effluent streams from an agrochemical industry. *Pure & Applied Chemistry*, 70, 2271-2279.
- Matsunaga T., Okochi M., Takahashi M., Nakayama T., Wake H., Nakamura M. (2000) TiN electrode reactor for disinfection of drinking water. *Water Research*, 34, 3117-3122.
- McLennan J.D. (2000) To boil or not : drinking water for children in a periurban barrio. *Social Science & Medicine*, 51, 1211-1220.
- McLoughlin O.A., Kehoe S.C., McGuigan K.G., Duffy E.F., Touati F. Al, Gernjak W., Alberola I.O., Rodríguez S.M., Gill L.W. (2004) Solar disinfection of

contaminated water : a comparison of three small-scale reactors. *Solar Energy*, 77, 657-664.

Minear R.A., Amy G.L., "Disinfection By-Products in Water Treatment", Lewis Publishers, Florida 1996, ISBN 1-56670-136-8.

Oates P.M., Shanahan P., Polz M.F. (2003) Solar disinfection (SODIS) : simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti. *Water Research*, 37, 47-54.

Quevauviller P., "Quality Assurance for Water Analysis", John Wiley and Sons, West Sussex 2002, ISBN 0-471-89962-3.

Radziminski C., Ballantyne L., Hodson J., Creason R., Andrews R.C., Chauret C. (2002) Disinfection of *Bacillus subtilis* spores with chlorine dioxide : a bench-scale and pilot-scale study. *Water Research*, 36, 1629-1639.

Rincon A.-G., Pulgarin C. (2004) Field solar *E. coli* inactivation in the absence and presence of TiO₂: is UV solar dose an appropriate parameter for standardization of water solar disinfection? *Solar Energy*, 77, 635-648.

Robertson J.M.C., Robertson P.K.J., Lawton L.A. (2005) A comparison of the effectiveness of TiO₂ photocatalysis and UVA photolysis for the destruction of the three pathogenic micro-organisms. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, in press.

Rochelle P.A., Upton S.J., Montelone B.A., Woods K. (2005) The response of *Cryptosporidium parvum* to UV light. Review, *Trends in Parasitology*, Vol.21, No.2.

Ruffell K.M., Rennecker J.L., Marinas B.J. (2000) Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with chlorine dioxide. *Water Research*, 34, 868-876.

Schoenen D. (2002) Role of disinfection in suppressing the spread of pathogens with drinking water: possibilities and limitations, *Water Research*, 36, 3874-3888.

Thurston-Enriquez J.A., Haas C.N., Jacangelo J., Gerba C.P. (2005) Inactivation of enteric adenovirus and feline calicivirus by ozone. *Water Research*, in press.

U.S. ECAO. 1994. *Drinking Water Criteria Document for Chloramines*. ECAO-CIN-D002., Cincinnati, Health and Ecological Criteria Division, Office of Science and Technology, Office of Water.

U.S. EPA. 1999a. *Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual*. EPA 815-R-99-014. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.

U.S. EPA. 1999b. *Combined Sewer Overflow Technology Fact Sheet. Alternative Disinfection Methods*. EPA 832-F-99-033. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.

U.S. EPA. 1999c. *Combined Sewer Overflow Technology Fact Sheet. Chlorine Disinfection*. EPA 832-F-99-034. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.

U.S. EPA. 1999d. *Drinking Water and Health. What You Need to Know*. EPA 816-K-99-001. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.

U.S. EPA. 2001. *Legionella: Drinking Water Health Advisory*. EPA-822-B-01-005. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.

U.S. EPA. 2003a. *Ultraviolet Disinfection Guidance Manual*. EPA-815-D-03-007. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.

U.S. EPA. 2003b. *Water On Tap, what you need to know*. EPA-816-K-03-007. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.

Veschetti E., Cittadini B., Maresca D., Citti G., Ottaviani M. (2005) Inorganic by-products in waters disinfected with chlorine dioxide. *Microchemical Journal*, 79, 165– 170.

Von Gunten U. (2003) Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. Review, *Water Research*, 37, 1469-1487.

W.H.O., “Disinfectats and Disinfectants by-products”. World Health Organization, Geneva 2000, ISBN 92-4-157216-7.

W.H.O., “Emerging Issues in Water and Infectious Disease”. World Health Organization, Geneva 2003.

Yang C.Y. (2004) Drinking water chlorination and adverse birth outcomes in Taiwan. *Toxicology*, 198, 249–254.

Young G.J, Dooge J.C.I., Rodda J.C., “Global Water Resources Issues”, Cambridge University Press, Cambridge 1994, ISBN 0-521-46153-7.

www.awwa.org

www.atsdr.cdc.gov

www.c3.org

www.clo2.com

www.edstrom.com

www.epa.gov

www.lennteth.com

www.oas.org

www.usgs.gov

www.unesco.org

Λέκκας Θ., “Περιβαλλοντική Μηχανική Ι. Διαχείριση Υδατικών πόρων”. Κόσμος ΠΕΜΕΡ Ε.Π.Ε, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη 1996, ISBN 960-85905-0-7.

Νικολάου Α., “Οργανικά Παραπροϊόντα Χλωρίωσης στο πόσιμο νερό”. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη 2001.

Σαραντόπουλος Α., “Μέθοδοι απολύμανσης ύδατος από τα Παθογόνα & τη *Legionella*”. Σημειώσεις. Εθνική Σχολή Δημόσιας Υγείας, Αθηνά 2004.