

OZON

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 επεξεργασία 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).

2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ

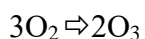
Ουσιαστικά το όζον είναι αέριος ρύπος που καταστρέφει οποιαδήποτε μορφή βλάστησης έρθει σε επαφή με αυτό και είναι τοξικό, αν γίνει εισπνοή σε σημαντικές συγκεντρώσεις. Χαρακτηρίζεται από ισχυρή οξειδωτική δράση και είναι ασταθές αέριο στις συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης και μετατρέπεται πολύ 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).

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 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 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).

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).

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 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).

5.1 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).

5.2 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).

5.3 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).

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 αλδεΐδες. 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 οξείδωσης, 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).

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).

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).

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).

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 στο 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).

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 *Poliiovirus 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).

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).

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).

