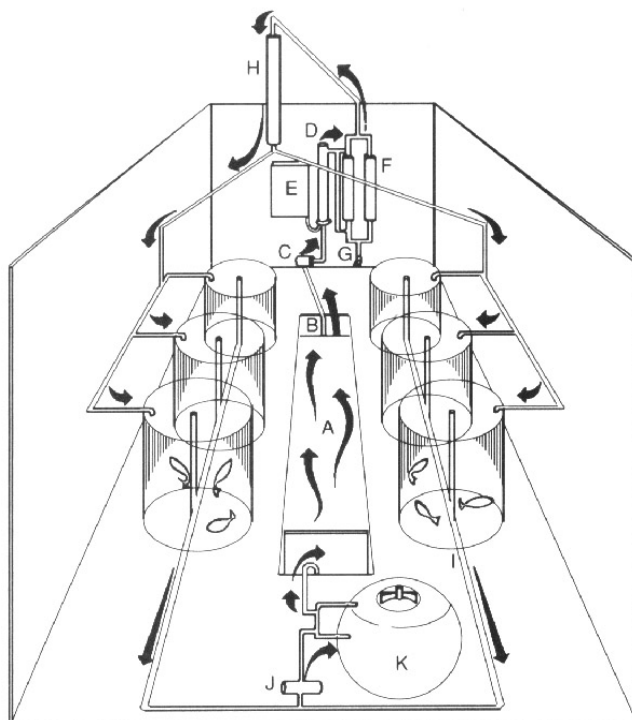


**Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΛΙΕΙΑΣ-
ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ**

**ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΣΕ
ΑΝΑΚΥΚΛΟΥΜΕΝΑ ΝΕΡΑ**

(Θεωρία και παραδείγματα)

Δρ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΩΤΟΣ
Βιολόγος - Ιχθυολόγος (MSc, PhD)
Καθηγητής



ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ



Το παρόν πόνημα αποτελούσε μόνιμη επιδίωξή μου από πολλά χρόνια. Όμως οι διάφορες και ποικίλες άλλες εργασιακές ασχολίες μου δεν επέτρεπαν την ολοκλήρωσή του. Δύο καταστάσεις συνέβαλλαν στην τελική του μορφή, αυτή που έχετε σήμερα. Η πρώτη είναι η διαρκώς αυξανόμενη σημασία των κλειστών συστημάτων, τόσο από οικολογική άποψη (οικονομία νερού, έλεγχος-επεξεργασία αποβλήτων), όσο και από οικονομική (εντατικοποίηση της παραγωγής) και η δεύτερη, η έκδοση ορισμένων ξενόγλωσσων πολύ σοβαρών και ρεαλιστικών συγγραμμάτων σχετικά με το θέμα των υδατοκαλλιεργειών σε κλειστά συστήματα (δηλαδή με ανακύκλωση του νερού). Αμφότερες

έδρασαν καταλυτικά και επιτάχυναν τη σύλληψη της δομής για ένα ελληνικό σύγγραμμα, που θα περιείχε όλα τα βασικά στοιχεία για να κατανοηθεί η αναγκαία ύλη για το τι είναι ένα κλειστό σύστημα εκτροφής, τις αρχές λειτουργίας του, τους υπολογισμούς που πρέπει να γίνονται για την κατασκευή και λειτουργία του και το θεωρητικό υπόβαθρο για τις βασικές μεταβολικές διεργασίες. Η πρώτη του έκδοση το 2004 βρήκε πολύ καλή αναπόκριση τόσο σε προπτυχιακό όσο (και ιδιαίτερα) σε μεταπτυχιακό επίπεδο διδασκαλίας. Στη σημερινή του μορφή έχοντας διορθώσει και ορισμένα λόγω αβλεψίας λάθη, εκτιμώ ότι εξακολουθεί να είναι χρήσιμο.

Τα δύο βασικά συγγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά το μεγαλύτερο μέρος στη συγγραφή του παρόντος, αυτά του Soderberg (1995) και των Timmons & Losordo (1994) (βλέπε βιβλιογραφία για λεπτομέρειες), θεωρώ ότι φώτισαν και «νοιοκοκύρεψαν» το θέμα σε βάθος, κάτι που προγενέστερα συγγράμματα δεν το έκαναν. Έχοντας λοιπόν αυτούς ως βάση και προτιμώντας την προσαρμοσμένη στα ελληνικά δεδομένα διδασκαλία μετάφρασή τους (επιλεγμένα κομμάτια), φτιάχτηκαν αυτές οι σημειώσεις στις οποίες εμβόλιμα στα αποσπάσματα των παραπάνω τοποθετήθηκαν και άλλα ποικίλης αλλά σχετικής ύλης, κεφάλαια.

Ο αναγνώστης θα παρατηρήσει ότι ορισμένα ιδιαίτερα θέματα (π.χ. τα περί αμμωνίας, τα περί νιτροποίησης κ.λπ.), επαναλαμβάνονται κατά κάποιο τρόπο σε ορισμένα κεφάλαια. Υπήρξε η σκέψη να μη γίνει αυτό, όμως τελικά προτιμήθηκε η προσαρμοσμένη σε κάθε κεφάλαιο επανάληψη αυτών, λόγω της κρίσιμης σημασίας των για την υγεία των ψαριών και, μακάρι οι αναγνώστες να τα εμπεδώσουν καλά, «ακόμα και πλήττοντας».

Παρακαλώ όσους το διαβάσουν να μου υποδείξουν τις κατά τη γνώμη τους πιθανές βελτιώσεις που θα μπορούσαν να γίνουν. Νομίζω ότι με βάση τη σημερινή έκδοση, μπορεί να γίνει και μελλοντική παραγωγική διόγκωση ή και αναμόρφωση της ύλης. Όλα αυτά θα τα υποδείξει η πράξη, δηλαδή η χρήση του βασικά από τους φοιτητές μας.

Μεσολόγγι, Σεπτέμβριος 2007 – Ιούνιος 2017

Γ. Χώτος

1. ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΕΚΤΡΟΦΗΣ.....	1
1.1. ΟΡΘΟΓΩΝΙΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ.....	1
1.2. ΣΤΡΟΓΓΥΛΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ.....	3
2. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΤΛΙΩΝ.....	5
2.1. ΕΙΔΗ ΑΝΤΛΙΩΝ.....	6
2.1.1. Παλινδρομικές αντλίες (Reciprocating pumps).....	6
2.1.2. Περιστροφικές αντλίες (Rotary pumps).....	6
2.1.3. Αναγεννητικές αντλίες (Regenerative pumps).....	7
2.1.4. Φυγοκεντρικές αντλίες (Centrifugal pumps).....	7
2.2. ΑΝΤΛΗΣΗ ΝΕΡΟΥ.....	10
2.3. Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΑΙ ΣΩΛΗΝΕΣ.....	11
2.3.1. Ροή σε ανοιχτούς αγωγούς (κανάλια).....	11
2.3.2. Ροή σε κλειστούς αγωγούς (σωλήνες).....	12
2.4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	14
2.4.1. Μετρήσεις ροής σε ανοιχτούς αγωγούς.....	15
3. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	17
3.1. ΣΤΑΤΙΚΑ ΥΓΡΑ.....	17
3.2. ΡΕΟΝΤΑ ΥΓΡΑ.....	17
4.1. ΒΑΣΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ.....	25
4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΤΗ ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΣΤΟ ΝΕΡΟ.....	26
4.3. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΓΙΑ ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ.....	29
4.3.1. Διόρθωση για πίεση.....	29
4.3.2. Διόρθωση για αλατότητα.....	29
4.4. ΤΟ ΔΙΑΛΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ (DO) ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	30
5. ΟΞΥΓΟΝΩΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	31
5.1. ΒΑΣΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	31
5.2. ΟΞΥΓΟΝΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ.....	31
5.3. ΟΞΥΓΟΝΩΣΗ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ.....	33
5.3.1. Μηχανές επιφανειακής ανάδευσης.....	33
5.3.2. Αεριστήρες διάχυσης αέρα.....	36
5.3.3. Οξυγόνωση με τη χρήση ατμοσφαιρικού αέρα.....	38
5.3.3.1. Αεριστήρες διάχυσης (diffuser aerators).....	38
5.3.3.2. Αεριστήρας πακεταρισμένης στήλης (Packed Column Aerator ή PCA).....	39
5.3.4. Οξυγόνωση με τη χρήση καθαρού οξυγόνου.....	40
5.3.4.1. Θάλαμος καθοδικής ροής φυσαλίδων (Down-flow bubble contactor) ή κώνος οξυγόνωσης.....	40
5.3.4.2. Διαχυτής U-σωλήνα.....	41
5.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕ ΥΠΕΡΚΟΡΕΣΜΟ ΑΖΩΤΟΥ.....	44
6. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ.....	47
6.1. ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ.....	47
6.2. ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ.....	47
6.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ.....	47
6.4. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΚΟΥ ΣΘΕΝΟΥΣ ΣΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΗΣ NH ₃	49
7. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΡΟΦΗΣ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΟΥΜΕΝΟ ΝΕΡΟ.....	52
7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	52
7.2. ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	53

7.2.1. Μεταβολίτες	53
7.2.2. Σωληνώσεις, Εφεδρεία ενέργειας.....	57
7.2.3. Το πρόβλημα των στερεών ρυπαντών.....	58
7.2.3.1. Έλεγχος των καθιζήσιμων στερεών.....	59
7.2.3.2. Έλεγχος των αιωρούμενων στερεών.....	59
7.2.3.3. Έλεγχος των πολύ λεπτών και διαλυμένων στερεών.....	59
7.2.4. Έλεγχος της θερμοκρασίας.....	60
7.2.5. Έλεγχος των αζωτούχων υποπροϊόντων.....	61
7.2.6. Χλωρίοντα (Cl ⁻).....	65
7.2.7. Ανανέωση νερού.....	66
7.2.8. pH και αλκαλικότητα.....	67
7.2.9. Διαλυμένα αέρια στο νερό.....	68
7.2.10. Γενικά περί οξυγόνωσης και απαερισμού.....	70
7.2.11. Εκχυση καθαρού οξυγόνου.....	71
7.3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	72
7.3.1. Εφοδιασμός (stocking).....	72
7.3.2. Τάϊσμα.....	72
7.3.2.1. Δεξιότητες του ταΐσματος.....	74
7.3.2.2. Δυσάρεστες μυρωδιές (off-flavor).....	75
7.4. Ο ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΣΤΡΕΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΣΘΕΝΕΙΩΝ.....	76
7.4.1. Ασθένειες.....	76
7.5. ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ.....	79
7.5.1. Καθιζήσιμα στερεά.....	79
7.5.2. Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών.....	84
7.5.2.1. Κοσκινόφιλτρα.....	85
7.5.3. Διογκούμενα φίλτρα κόκκων.....	88
7.5.3. Απομάκρυνση πολύ λεπτών αιωρούμενων στερεών και διαλυμένων στερεών ..	90
7.6. Ο ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΝΙΤΡΩΔΩΝ.....	92
7.6.1. Περιστρεφόμενοι βιολογικοί αντιδραστήρες.....	92
7.6.2. Φίλτρα καταιονισμού (Trickling filters).....	94
7.6.3. Φίλτρα διογκούμενων μέσων (Expandable media filters).....	95
7.6.4. Φίλτρα ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized bed filters).....	96
7.6.5. Βιοαντιδραστήρες ανάμικτης κλίνης (Mixed bed reactors).....	97
7.7. ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ.....	98
7.7.1. Υπεριώδης ακτινοβολία.....	98
7.7.2. Οζον.....	100
7.7.3. Χλωρίωση.....	102
8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΙΧΘΥΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΝΕΡΟΥ ..	105
ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΚΤΡΟΦΗΣ.....	105
8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	105
8.2. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ «ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ».....	105
8.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΡΥΘΜΩΝ ΡΟΗΣ.....	106
8.3.1. Υπολογισμοί ροών για τη διατήρηση του διαλυμένου οξυγόνου.....	106
8.3.2. Υπολογισμός ροής για τον έλεγχο αμμωνίας-αζώτου.....	109
8.3.3. Υπολογισμός των ρυθμών ροής για τον έλεγχο των νιτρικών.....	113

8.3.4. Απαιτήσεις ροής για τη διατήρηση του διαλυμένου οξυγόνου σε βυθισμένο βιολογικό φίλτρο	114
8.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΙΧΘΥΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	115
8.4.1. Υπολογισμός της ιχθυοχωρητικότητας συστημάτων σχετικά με το διαλυμένο οξυγόνο	115
8.4.2. Υπολογισμός της ιχθυοχωρητικότητας σχετικά με την TAN	116
8.5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	117
8.5.1. Υπολογισμοί ρυθμού ροής	117
8.5.2. Υπολογισμός ιχθυοχωρητικότητας συστημάτων	122
8.6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΠΟΨΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	125
8.7. ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΗΝ ΙΧΘΥΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΚΤΡΟΦΗΣ	125
8.7.1. Υπολογισμός ιχθυοχωρητικότητας της τμηματικής επαναχρησιμοποίησης νερού με οξυγόνωση	126
8.7.2. Διαλυμένο οξυγόνο	127
8.7.3. Αμμωνία	128
8.7.4. Διοξείδιο του άνθρακα	131
8.7.5. Αιωρούμενα στερεά	133
8.7.6. Πυκνότητα εκτροφής	133
8.8. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΕΚΤΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	134
8.8.1. Σχεδιασμός μονάδας και της παραγωγής της με οξυγόνωση του νερού μόνο ..	136
8.8.2. Σχεδιασμός μονάδας και παραγωγή με οξυγόνωση και βιολογικό φιλτράρισμα	139
8.8.3. Σχεδιασμός βιολογικού φίλτρου	141
8.8.4. Παραγωγική ικανότητα της συστήματος εκτροφής με ανακύκλωση του νερού	142
8.9. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ (ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΙ 8.7 ΚΑΙ 8.8)	144
9. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	146
9.1. ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ	146
9.2. ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ: ΧΗΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	149
9.2.1. pH	149
9.2.2. Αλκαλικότητα	149
9.2.3. Οξυγόνο	150
9.2.4. Συγκεντρώσεις αμμωνίας, νιτρωδών	150
9.2.5. Σωματιδιακές και διαλυμένες οργανικές ουσίες	151
9.2.6. Αλατότητα	152
9.2.7. Ρυθμοί διάχυσης αερίων	152
9.2.8. Η επίδραση άλλων μεταλλικών και χημικών στοιχείων	152
9.3. ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	153
9.3.1. Θερμοκρασία	153
9.3.2. Αριθμός Reynolds και περιστροφική ταχύτητα των φίλτρων RBC	153
9.3.3. Αναλογία κενού	154
9.3.4. Τύπος και μέγεθος των μέσων πλήρωσης	154
9.3.5. Ειδική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης	155
9.3.6. Υδραυλική φόρτιση και ιχθυοφόρτιση	155

9.3.7. Βάθος.....	156
9.3.8. Εγκάρσια επιφάνεια (επιφάνεια διατομής).....	156
9.3.9. Πάχος μεμβράνης	157
9.3.10. Φως.....	157
9.4. ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	157
9.4.1. Πυκνότητα βιομάζας	157
9.4.2. Παραγωγή κυττάρων	157
9.5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ.....	158
9.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	159
9.6.1. Παράδειγμα προβλήματος σχεδιασμού: βυθισμένο φίλτρο	160
9.6.2. Συζήτηση για το σχεδιασμό του βυθισμένου φίλτρου	165
9.7. ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΟ ΚΟΚΚΩΔΕΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ	165
9.7.1. Φίλτρο άμμου ανοδικής ροής.....	166
9.7.2. Φίλτρα χαντρών.....	169
9.7.3. Ρευστοποιημένες κλίνες (στρώματα)	171
9.8. ΦΙΛΤΡΑ ΚΑΤΑΙΟΝΙΣΜΟΥ (TRICKLING FILTERS)	174
9.8.1. Πρόβλημα σχεδίου για φίλτρο καταιονισμού (trickling filter).....	174
9.8.1.1. Σχεδιαστικοί υπολογισμοί	175
9.8.2. Συζήτηση για τα φίλτρα καταιονισμού	180
10. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙ ΑΜΜΩΝΙΑΣ ΣΕ ΝΕΡΑ ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ	181
10.1. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ	181
10.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ.....	184
10.2.1. Επίδραση της αμμωνίας στην αύξηση και επιβίωση των εκτρεφόμενων ψαριών	185
10.3. ΝΙΤΡΩΔΗ.....	188
10.3.1. Μηχανισμοί πρόσληψης νιτρώδων και τοξικότητάς των.....	188
10.3.2. Τοξικότητα έκθεσης σε νιτρώδη για χρόνο μέχρι 96 ώρες	192
10.3.3. Τοξικότητα έκθεσης σε νιτρώδη για χρόνο μεγαλύτερο από 96 ώρες.....	192
10.3.4. Θνησιμότητα.....	192
10.3.5. Μείωση της αύξησης.....	193
10.3.6. Καταστροφή ιστών	193
10.3.7. Περιβαλλοντικοί παράγοντες	193
10.3.7. 1. Ιόντα χλωρίου (Cl ⁻).....	193
10.3.7.2. Το pH του νερού.....	195
10.3.7.3. Επίδραση της θερμοκρασίας και του διαλυμένου οξυγόνου.....	195
10.3.7.4. Το μέγεθος των ψαριών.....	196
11. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ «ΗΜΙΣΕΩΣ ΒΑΘΟΥΣ» (HALF-DEPTH METHOD).....	199
12. ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ	205
12.1. ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	207
12.1.1. Τύπος του Hirayama.....	207
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	209

1. ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΕΚΤΡΟΦΗΣ

Η εκτροφή των ψαριών με τρέχοντα νερά, γίνεται γενικά σε έναν από δύο τύπους δεξαμενών οι οποίοι διαφέρουν ως προς τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους. Ο γραμμικός τύπος που αντιπροσωπεύεται από τις **ορθογώνιες δεξαμενές** ή **raceways**, χαρακτηρίζεται (από υδραυλική άποψη) από σχεδόν νηματική ροή (plug flow), κατά την οποία όλη η μάζα του νερού και ότι στοιχεία αυτό μεταφέρει, κινούνται με την ίδια οριζόντια ταχύτητα. Το φρέσκο νερό στην εισροή δεν έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό της εκροής, δηλαδή δεν επιτυγχάνεται εύκολα πλήρης ανάμιξη του νερού καθόλο το μήκος της δεξαμενής. Ο περιστρεφόμενος τύπος αντίθετα, που αντιπροσωπεύεται από τις **στρογγυλές δεξαμενές**, δεν παρουσιάζει ομοιόμορφη ταχύτητα σε όλη τη μάζα του νερού του.

Γενικά, οι ορθογώνιες δεξαμενές που περιέχουν ψάρια, παρουσιάζουν κλιμάκωση των χαρακτηριστικών ποιότητας του νερού τους από την είσοδο έως την έξοδο, ενώ οι στρογγυλές δεξαμενές παρουσιάζουν σχετικά ομοιόμορφα χαρακτηριστικά σε όλα τα σημεία τους.

1.1. ΟΡΘΟΓΩΝΙΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ

Η είσοδος και έξοδος του νερού σε δεξαμενές εκτροφής τύπου raceway, πρέπει να γίνεται καθόλο το πλάτος τους για να επιτευχθεί νηματική ροή νερού. Αν αντίθετα, η είσοδος και η έξοδος του νερού γίνονται μόνο με τη χρήση στομιών-στροφίγγων, τότε δημιουργούνται μέσα στη δεξαμενή «νεκρά σημεία», περιοχές δηλαδή με προβληματική κυκλοφορία νερού. Το αποτέλεσμα θα είναι ανεπαρκής ανάπτυξη των ψαριών, συγκριτικά με τις δεξαμενές όπου επικρατεί νηματική ροή.

Στις εκτροφές των σαλμονιδών ψαριών, οι συνήθως χρησιμοποιούμενες δεξαμενές raceway είναι κατασκευασμένες από χυτό ενισχυμένο μπετόν με αναλογία μήκους: πλάτους, 10:1 και ύψος στήλης νερού περί το 0,6 m. Συνιστάται η εναλλαγή του νερού (της δεξαμενής) να είναι τουλάχιστον 4 φορές ανά ώρα και με ταχύτητα (νηματικής) ροής τουλάχιστον **0,033 m/sec**. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ του απαιτούμενου μεγέθους δεξαμενής, της ταχύτητας ροής και της απομάκρυνσης των ρυπαντών. Αν η ταχύτητα είναι μικρότερη των 0,033 m/sec, τα αιωρούμενα στερεά θα καθιζάνουν μέσα στη δεξαμενή ανάμεσα στα ψάρια και η απομάκρυνσή τους θα γίνει μια δύσκολη υπόθεση. Αντίθετα, ταχύτητες μεγαλύτερες των 0,033 m/sec θα μεταφέρουν τα στερεά με το απορρέον νερό έξω από τη δεξαμενή για την όποια επεξεργασία.

Οι δεξαμενές raceway συνήθως κατασκευάζονται σε παράλληλες σειρές με πολλαπλά τμήματα και με ένα στόμιο εκροής σε κάθε τμήμα. Όλα τα στόμια εκροής συνδέονται με τον αποχετευτικό αγωγό ο οποίος καταλήγει στη δεξαμενή καθίζησης ή σε κάποια άλλη κατασκευή συλλογής των στερεών. Στο Σχήμα 1.1, φαίνεται διαγραμματικά η κατασκευή του τελικού τμήματος μια δεξαμενής raceway.

Ο αριθμός των επί μέρους δεξαμενών (τμημάτων) μιας σειράς raceways, καθορίζεται από τις δυνατότητες για αερισμό (οξυγόνωση) του νερού που υπάρχει μεταξύ αυτών, καθώς και από το ρυθμό συσσώρευσης των τοξικών μεταβολιτών (αμμωνία).

Στο παρακάτω παράδειγμα διασαφηνίζεται η διαδικασία σχεδιασμού μιας δεξαμενής raceway. Η δεξαμενή θα δέχεται παροχή νερού 20 L/sec. Ο λόγος μήκους :

πλάτους θα είναι 10 : 1, το επιθυμητό βάθος νερού 0,2 m, η ταχύτητα ροής 0,033 m/sec και ο ρυθμός αλλαγής νερού 4 αλλαγές / ώρα.

Ο συνολικός όγκος της δεξαμενής θα είναι:

$$\frac{20 \text{ L}}{\text{sec}} \cdot \frac{3600 \text{ sec}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{h}}{4 \text{ αλλαγές}} \cdot \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ L}} = \frac{18 \text{ m}^3}{\text{αλλαγή}}$$

Γνωρίζοντας την ταχύτητα και το βάθος, θα υπολογιστεί το πλάτος. Η απορροή (Q), η ταχύτητα (V) και η εγκάρσια διατομή (A) μιας raceway (πλάτος-W · βάθος-D), συνδέονται με τον τύπο Q = V·A. Η ροή έχει τεθεί στα 20 L/sec δηλαδή 0,020 m³/sec και το βάθος στα 0,2 m. Έτσι:

$$0,020 \text{ m}^3 = W \cdot 0,2 \cdot 0,03, \text{ συνεπώς: } W = \frac{0,020}{0,2 \cdot 0,03} = 3,0 \text{ m}$$

Ο συνολικός όγκος της δεξαμενής πρέπει να είναι 18 m³, το βάθος 0,2 m και το πλάτος 3,0 m. Συνεπώς το μήκος (L) θα είναι:

$$L = \frac{18}{3,0 \cdot 0,2} = 30 \text{ m}$$

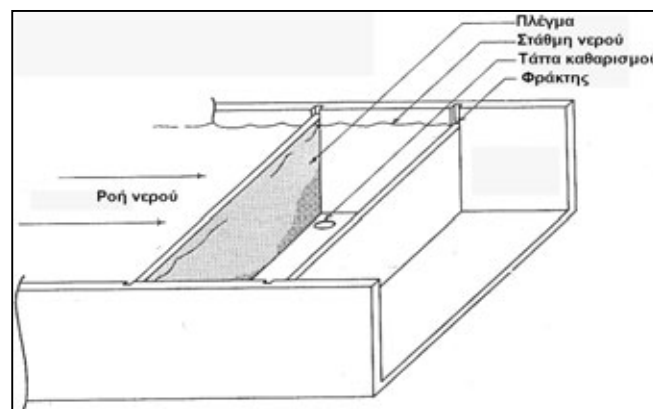
Παρατηρούμε ότι η απαίτηση 10:1 του λόγου μήκους: πλάτος, ικανοποιείται.

Ενα εναλλακτικό σενάριο σχεδιασμού μιας raceway, είναι καταρχάς να τεθούν οι διαστάσεις της raceway στα 30:3:1 (L:W:D). Εάν θέλουμε η ταχύτητα ροής να είναι 0,033 m/sec για παροχή 0,020 m³/sec, το βάθος D να είναι χ και το πλάτος W = 3χ (σύμφωνα με της επιθυμητές αναλογίες), τότε:

$$0,020 = 3\chi \cdot \chi \cdot 0,033, \text{ συνεπώς: } \chi^2 = \frac{0,020}{3 \cdot 0,033} = 0,45 \text{ m} = D \text{ και } W = 3\chi = 1,35 \text{ m}$$

Η αναλογία 10:1 για μήκος : πλάτος επιτυγχάνεται κάνοντας τη raceway 13,5 m σε μήκος. Ο συνολικός όγκος της δεξαμενής θα είναι σε αυτήν την περίπτωση 8 m³ και ο ρυθμός αλλαγής νερού 9 αλλαγές/h. Και αυτή η raceway έχει συνεπώς ικανοποιητικά χαρακτηριστικά.

Τα παραπάνω παραδείγματα δείχνουν τον τρόπο με τον οποίον, είτε το βάθος, είτε ο ρυθμός αλλαγής του νερού, είτε οι αναλογίες των διαστάσεων μπορούν να ρυθμιστούν κατά το σχεδιασμό μιας raceway, με δεδομένα την ταχύτητα του νερού και άλλες διαστάσεις.



Σχήμα 1.1. Λεπτομέρεια του τελικού τμήματος (απορροή) μιας τυπικής δεξαμενής raceway, εκτροφής σαλμονιδών ψαριών.

Εκτός από τις ορθογώνιες δεξαμενές raceway υπάρχουν και οι «κάθετες» raceway ή σιλό. Πρόκειται για κυλινδρικές δεξαμενές μεγάλου σχετικά ύψους (3 – 4 m) και ποικίλης διαμέτρου (2 – 3 m), στις οποίες το νερό εισέρχεται στον πυθμένα τους και εξέρχεται από την κορυφή τους. Ο ρυθμός εναλλαγής του νερού ποικίλλει και φθάνει τις 4 – 6 αλλαγές/h. Από την εμπειρία εκτροφής σαλμονιδών σε αυτές, βρέθηκε ότι συγκριτικά με τις ορθογώνιες raceways επιτρέπουν μεγαλύτερες φορτίσεις σε ψάρια και καλύτερη ανάπτυξη.

Και στα σιλό μπορεί το νερό να χρησιμοποιηθεί στη σειρά (το νερό από την έξοδο του ενός σιλό οδηγείται στην είσοδο του επόμενου), αρκεί να υπάρχει η απαιτούμενη υψομετρική διαφορά μεταξύ των. Η παροχή του νερού θα πρέπει να ρυθμιστεί με τρόπο τέτοιο, που να μην επιτρέπει τη συσσώρευση των αιωρούμενων στερεών μέσα στα σιλό, επειδή ο καθαρισμός τους είναι δύσκολος. Το κύριο μειονέκτημα των σιλό είναι οι δυσκολίες στην αφαίρεση (συλλογή) των ψαριών για δειγματοληψία, διαλογή ή πώληση.

1.2. ΣΤΡΟΓΓΥΛΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ

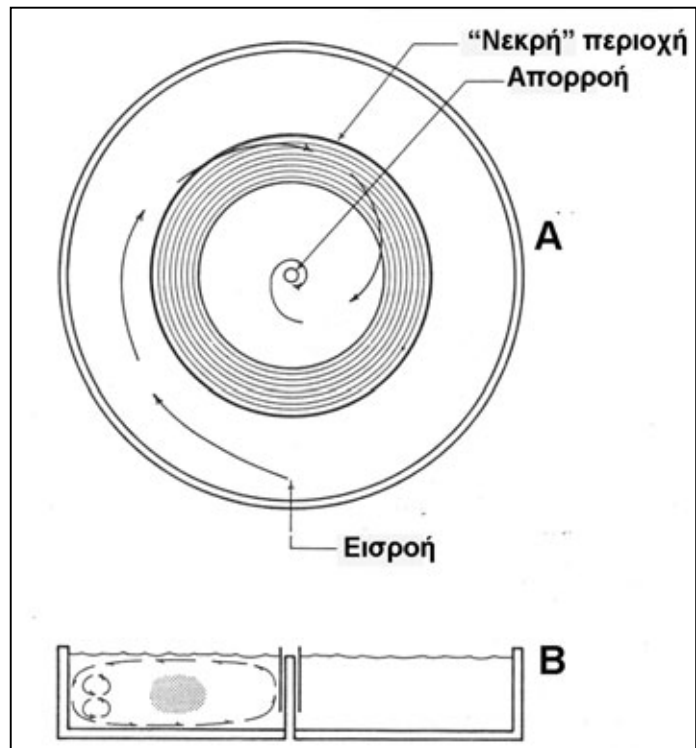
Οι στρογγυλές δεξαμενές έχουν ένα κεντρικό σημείο απορροής του νερού. Η είσοδος του νερού σε αυτές γίνεται συνήθως υπό πίεση από κάποιο σημείο της περιφέρειάς τους. Το βάθος των στρογγυλών δεξαμενών ποικίλλει από 0,6 έως 1,1 m και η διάμετρός τους από 1 έως 15 m.

Από μελέτες των υδραυλικών χαρακτηριστικών των στρογγυλών δεξαμενών, βρέθηκε ότι δημιουργείται μια δακτυλιοειδής «νεκρή ζώνη» στο κέντρο της δεξαμενής, στην οποία η κυκλοφορία του νερού είναι φτωχή (Σχήμα 1.2). Εξαιτίας της νεκρής ζώνης, η ταχύτητα του νερού στα στρώματα μεσαίου βάθους είναι μέγιστη στα περιφερειακά τμήματα, μέτρια κοντά στην απορροή και ελάχιστη στο κέντρο της δεξαμενής.

Το μέγεθος της νεκρής ζώνης και ο βαθμός της στασιμότητας του νερού μπορούν να μειωθούν, αυξάνοντας το βάθος της δεξαμενής ή αυξάνοντας την πίεση με την οποία διοχετεύεται το νερό στην είσοδο.

Οι στρογγυλές δεξαμενές είναι αυτοκαθαριζόμενες εξαιτίας της μείωσης της ταχύτητας του νερού από τα περιφερειακά τμήματα προς το κέντρο, φαινόμενο με το οποίο τα στερεά παρασύρονται στο κεντρικό σημείο της αποχέτευσης. Η δακτυλιοειδής νεκρή ζώνη βρίσκεται επάνω ακριβώς από μια περιοχή υψηλών ταχυτήτων με αποτέλεσμα, ότι στερεά καθιζάνουν εκεί να «ρουφιώνται» από το στόμιο της απορροής στο κέντρο της δεξαμενής.

Στις στρογγυλές δεξαμενές και σε γενικές γραμμές, η εναλλαγή του νερού είναι μικρότερη από αυτή των raceways και συνήθως δεν ξεπερνά τις 2 αλλαγές/h. Οι πυκνότητες των ψαριών στις στρογγυλές δεξαμενές είναι επίσης μικρότερες απ'ότι των raceways. Ομως από την άλλη μεριά, η ταχύτητα του νερού στις στρογγυλές δεξαμενές είναι 5-10 φορές ανώτερη της αντίστοιχης μιας raceway, με αποτέλεσμα καλύτερη φυσική κατάσταση των εκτρεφόμενων ψαριών (συνεχής εξάσκηση). Ομως, η μεγαλύτερη δραστηριότητα των ψαριών απαιτεί και περισσότερο οξυγόνο, πράγμα που δρα περιοριστικά στην ιχθυοχωρητικότητα της δεξαμενής και αυξάνει την απαιτούμενη τροφή, με αποτέλεσμα αύξηση στο κόστος παραγωγής.



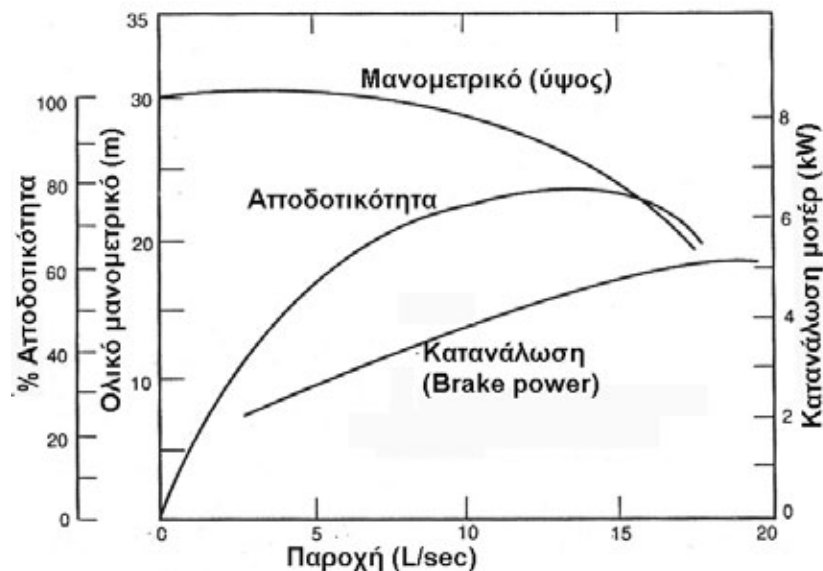
Σχήμα 1.2. Υδραυλικά χαρακτηριστικά μιας στρογγυλής δεξαμενής εκτροφής ψαριών.
Α: κάτοψη, Β: εγκάρσια τομή.

2. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΤΛΙΩΝ

Πολύ συχνά στις υδατοκαλλιέργειες το νερό μπορεί να μεταφερθεί με τη βαρύτητα, αλλά τις περισσότερες φορές αυτό δεν επαρκεί και αναγκαστικά χρησιμοποιούνται αντλίες. Οι αντλίες αποτελούν ίσως τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα μηχανήματα της υδατοκαλλιέργειας. Η χρησιμότητά τους δεν έγκειται μόνο στη μεταφορά του νερού προς και από τη μονάδα εκτροφής, αλλά και στην αποστράγγιση χερσαίων δεξαμενών, στην υπό πίεση παροχή νερού σε συστήματα φίλτρων, στην αύξηση της ροής του νερού για καλύτερη ανάμιξη κ.λπ..

Η λειτουργία των αντλιών βασίζεται στο γεγονός ότι μεταφέρουν **ενέργεια** (π.χ. από τον ηλεκτρικό της κινητήρα) στο υγρό (νερό). Το υγρό που περνά μέσα από μια αντλία, αποκτά επιπλέον διαθέσιμη ενέργεια ως **κινητική** (π.χ. αύξηση της ταχύτητάς του) ή **δυναμική** (π.χ. ανύψωσή του σε κάποιο ύψος για να ρεύσει κατόπιν με τη βαρύτητα).

Όταν πρόκειται να επιλεγεί μια αντλία για μια υδατοκαλλιεργητική μονάδα, θα πρέπει να έχουν αποφασισθεί με προσοχή οι απαιτήσεις του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά της αντλίας πρέπει να είναι αυτά που πραγματικά προσεγγίζουν τις απαιτήσεις της επιθυμητής εργασίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά δίδονται σε μορφή γραφήματος για τις διάφορες αντλίες από τον κατασκευαστή της (π.χ. Σχήμα 2.1). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι απόδοσης των γραφημάτων. Συνήθως σχετίζουν την **ποσότητα νερού** που μεταφέρει η αντλία με την **πίεση** (μανομετρικό ή ανύψωση του νερού) που μπορούν να επιτύχουν, τις απαιτήσεις σε **ενέργεια** (brake power) και την **απόδοση** (efficiency), η οποία αποτελεί το λόγο της ενέργειας που προσδίδεται στο υγρό προς την ενέργεια που παρέχεται στην αντλία από την κινητήρια πηγή (π.χ. ηλεκτρισμός). Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά διαφέρουν από αντλία σε αντλία και επιπλέον αλλάζουν με τη λειτουργία της αντλίας, καθώς τα διάφορα μέρη της υπόκεινται στη φθορά του χρόνου. Γενικά, αντλίες με παρόμοιο μέγεθος και παρόμοια κατασκευή, τείνουν να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά λειτουργίας.



Σχήμα 2.1. Γραφική απεικόνιση των χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας φυγοκεντρικής αντλίας. Η μέγιστη αποδοτικότητά της είναι 77% όταν η παροχή της είναι 13-14 L/sec, σε ολικό μανομετρικό ~25m και με απαιτούμενη ισχύ μοτέρ ~4,6 kW.

2.1. ΕΙΔΗ ΑΝΤΛΙΩΝ

2.1.1. Παλινδρομικές αντλίες (Reciprocating pumps)

Οι παλιές χειροκίνητες αντλίες (τουλούμπες) που χρησιμοποιούνταν για να αντληθεί νερό από πηγάδια (πριν την εξάπλωση του ηλεκτρισμού), αποτελούν κλασικό παράδειγμα παλινδρομικών αντλιών. Σήμερα υπάρχουν πολλοί τύποι σύγχρονων παλινδρομικών αντλιών οι οποίες λειτουργούν κυρίως με ηλεκτρισμό. Το ποσό του νερού που αντλούν εξαρτάται (και ελέγχεται) από το ρυθμό παλινδρόμησης του πιστονιού-εμβόλου και το μήκος της κίνησης του εμβόλου. Με κάθε κίνηση του εμβόλου μετακινείται ορισμένος όγκος νερού και η ταχύτητα του νερού εξαρτάται γραμμικά από την ταχύτητα του εμβόλου. Οι αντλίες αυτού του τύπου από κοινού με τις περιστροφικές αντλίες (rotary pumps), καλούνται αντλίες **θετικού εκτοπίσματος** (positive displacement pumps).

Οι παλινδρομικές αντλίες είναι αυτοεναυσματικές (self-priming), εάν οι βαλβίδες που είναι ενσωματωμένες μέσα τους και οι φλάντζες που στεγανοποιούν το έμβολο σε σχέση με το σωλήνα μέσα στον οποίο κινείται, βρίσκονται σε καλή κατάσταση. Βαλβίδες και φλάντζες χρειάζονται περιοδική αντικατάσταση, αν και αυτού του τύπου οι αντλίες, είναι ανθεκτικές και με μικρές απαιτήσεις σε συντήρηση.

Οι παλινδρομικές αντλίες μπορούν να αντλήσουν νερό ακόμα και με σημαντική περιεκτικότητα σε αιωρούμενα στερεά. Το νερό χύνεται υπό μορφή παλμών, αλλά το φαινόμενο αυτό μπορεί να μειωθεί αισθητά αν χρησιμοποιηθούν πολυκύλινδρες αντλίες, στις οποίες το έμβολο στον κάθε κύλινδρο βρίσκεται σε διαφορετική φάση λειτουργίας σε σχέση με τους άλλους.

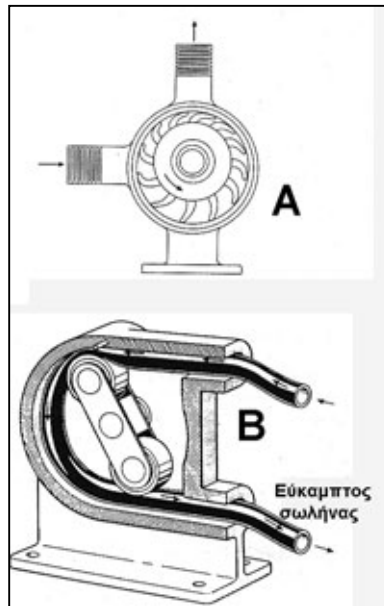
2.1.2. Περιστροφικές αντλίες (Rotary pumps)

Αποτελούνται από κάποια περιστρεφόμενα εξαρτήματα (έκκεντρα, πτερύγια, πιστόνια, κοχλίες, γρανάζια κ.ά.) μέσα σε ένα προστατευτικό κάλυμμα. Γενικά λειτουργούν με πολύ μικρή απόσταση (clearance) του περιστρεφόμενου εξαρτήματος από το προστατευτικό του κάλυμμα, με αποτέλεσμα κάθε περιστροφή να δημιουργεί θετικό εκτόπισμα στο νερό. Η ενέργεια που δημιουργείται από το περιστρεφόμενο εξάρτημα της αντλίας μετακινεί το νερό από τη μεριά της χαμηλότερης πίεσης στη μεριά με τη μεγαλύτερη πίεση. Υπάρχουν πολλές ποικιλίες περιστροφικών αντλιών και χαρακτηριστικά αναφέρονται οι **αντλίες εύκαμπτων πτερυγίων** (flexible vane pumps) και οι **περισταλτικές αντλίες**.

Μια αντλία εύκαμπτων πτερυγίων αποτελείται από ένα στροφέα (rotor) τοποθετημένο εκκεντρικά (μη κεντραρισμένο) σε ένα θάλαμο. Επάνω στον στροφέα είναι προσαρμοσμένα διάφορα πτερύγια κατασκευασμένα από εύκαμπτο υλικό. Στα σημεία που ο στροφέας απέχει περισσότερο από το τοίχωμα του θαλάμου, τα πτερύγια είναι λυγισμένα στο ελάχιστο και σε αυτό το σημείο το νερό εισέρχεται στο θάλαμο. Αντίθετα, στα σημεία που ο στροφέας απέχει λιγότερο από το τοίχωμα του θαλάμου, τα πτερύγια είναι λυγισμένα στο μέγιστο και σε αυτό το σημείο το νερό εξέρχεται βεβιασμένα από το θάλαμο. Το λύγισμα των πτερυγίων μειώνει το χώρο που καταλαμβάνει το υγρό και συνεπώς αυξάνει την πίεση σε αυτό, με αποτέλεσμα τη βεβιασμένη εκτόπισή του προς την έξοδο της αντλίας (Σχήμα 2.2, Α). Σε γενικές γραμμές πρόκειται για μικρές αντλίες με μέγιστη παροχή περί τα 500 L/min, αυτοεναυσματικές (self-priming) και σχετικά απλές στην επισκευή τους.

Μια περισταλτική αντλία, αν και δεν χρησιμοποιείται στις υδατοκαλλιέργειες για να μετακινήσει μεγάλο όγκο υγρών, μπορεί να είναι πολύτιμο εργαλείο επειδή μπορεί με

μεγάλη ακρίβεια να μεταφέρει μικρό όγκο υγρού σε σταθερό ρυθμό. Θα μπορούσε π.χ. να χρησιμοποιηθεί για να προσθέτει θρεπτικά σε μια καλλιέργεια φυτοπλαγκτού. Η αντλία εναυσματοποιείται (primed) με το γέμισμα του εύκαμπτου πλαστικού σωλήνα της με το προς μεταφορά υγρό. Ένας περιστρεφόμενος στροφέας πιέζει κατόπιν κατάλληλα το σωλήνα στα τοιχώματα, προκαλώντας έτσι το υγρό να κινηθεί προς την ίδια κατεύθυνση (Σχήμα 2.2., Β). Το μεγάλο πλεονέκτημα των περισταλτικών αντλιών είναι η αποφυγή της επαφής του υγρού με τα εξαρτήματα της αντλίας και για το λόγο αυτό είναι πολύ χρήσιμες σε περιπτώσεις μεταφοράς διαβρωτικών υλικών (π.χ. οξέα ή χλώριο) ή καθαρών καλλιεργειών (π.χ. άλγες). Είναι σχετικά φθηνές και πολύ αξιόπιστες.



Σχήμα 2.2. Περιστροφικές αντλίες. **A:** αντλία εύκαμπτων πτερυγίων (Flexible vane pump), **B:** περισταλτική αντλία (Peristaltic pump). Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση της ροής του υγρού.

2.1.3. Αναγεννητικές αντλίες (Regenerative pumps)

Συνήθως ονομάζονται αντλίες τουρμπίνας (turbine pumps), αντλίες δίνης (vortex pumps) και περιφερειακές αντλίες (peripheral pumps). Γενικά δημιουργούν αύξηση της ταχύτητας του υγρού και τελικά δημιουργία πίεσης. Λειτουργούν καλύτερα με υγρά μικρής περιεκτικότητας σε αιωρούμενα στερεά και ενώ μεταφέρουν μάλλον μικρούς όγκους (0,5 – 400 L/min) μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλη πίεση με αποτέλεσμα το μεγάλο τους μανομετρικό, δηλαδή την ικανότητα ανύψωσης του υγρού σε μεγάλα ύψη (της τάξεως των 150 m).

2.1.4. Φυγοκεντρικές αντλίες (Centrifugal pumps)

Για τις υδατοκαλλιέργειες ο πιο κατάλληλος τύπος αντλίας είναι αυτός της φυγοκεντρικής. Μια φυγοκεντρική αντλία σε γενικές γραμμές είναι ένας μεταλλικός θάλαμος (κοιλότητα) με ένα στόμιο εισόδου και ένα εξόδου του νερού και μέσα του μια φτερωτή (στροφέιο-προπέλα) που στριφογυρίζει και εξωθεί το νερό προς την έξοδο. Χρησιμοποιούν τη δύναμη της φυγοκέντρου για να «ανυψώσουν» το προς άντληση υγρό. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των φυγοκεντρικών αντλιών είναι η δυνατότητά τους για

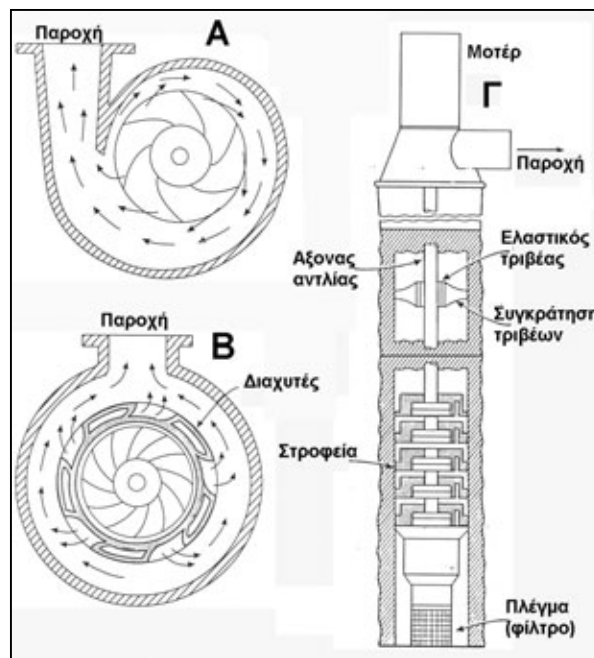
«στραγγαλισμό» (choked) της ροής, δηλαδή για κατά το δοκούν περιορισμό της ροής εξόδου, χωρίς αρνητική επίπτωση στη λειτουργία τους.

Το υγρό εισέρχεται στο θάλαμο από το κέντρο της φτερωτής και εξαναγκάζεται να κινηθεί προς τα έξω εξαιτίας της φυγοκέντρου. Καθώς αφήνει τη φτερωτή για να στροβιλισθεί γρήγορα στο θάλαμο, η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε πίεση και συγχρόνως δημιουργείται υποπίεση στο κέντρο της φτερωτής με αποτέλεσμα αναρρόφηση νέας ποσότητας.

Δύο είναι οι κύριοι τύποι φυγοκεντρικών αντλιών: ο **σπειροειδής τύπος** (volute centrifugal pump) και ο **διαχέοντας τύπος** (diffuser centrifugal pump). Στον σπειροειδή τύπο (Σχήμα 2.3, Α), η φτερωτή είναι τοποθετημένη στο θάλαμο με σπειροειδή τρόπο (με κέντρο το σημείο εισόδου του νερού). Καθώς ο όγκος του νερού στο θάλαμο αυξάνεται, η ταχύτητα του νερού που έχει αφήσει τη φτερωτή μειώνεται και η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική (πίεση).

Στον διαχέοντα τύπο η φτερωτή προκαλεί επιτάχυνση του υγρού προς τα έξω, δια μέσου ανοιγμάτων σε ειδικά ελάσματα-διαχυτές (Σχήμα 2.3, Β). Το νερό αποκτά μεγάλη δυναμική ενέργεια (πίεση). Γενικά αυτός ο τύπος δημιουργεί μεγάλη πίεση στο νερό και παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση απ'ότι ο σπειροειδής τύπος. Είναι όμως πιο ακριβός και δεν τα καταφέρνει τόσο καλά με τα αιωρούμενα στερεά.

Αμφότεροι οι παραπάνω τύποι φυγοκεντρικών αντλιών μπορούν να έχουν μία ή περισσότερες βαθμίδες (stages). Μια μονοβάθμια αντλία είναι αυτή που δημιουργεί τη δεδομένη μέγιστη πίεση (μανομετρικό) από μία φτερωτή. Εάν το επιθυμητό ολικό μανομετρικό είναι μεγαλύτερο απ'αυτό που παράγει η μία φτερωτή, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια πολυβάθμια αντλία (Σχήμα 2.3, Γ). Σε μια πολυβάθμια αντλία χρησιμοποιούνται δύο ή και περισσότερες φτερωτές, με την κάθε μία απ'αυτές να παραλαμβάνει το υγρό που μετακινήθηκε από την προηγούμενη προσθέτοντάς του περισσότερη ενέργεια.



Σχήμα 2.3. Φυγοκεντρικές αντλίες. **A:** σπειροειδής (volute) φυγοκεντρική αντλία, **B:** διαχέουσα (diffuser) φυγοκεντρική αντλία, **Γ:** πολυβάθμια φυγοκεντρική αντλία.

Σημείωση: Οι αντλίες που προορίζονται για να μετακινήσουν μικρές ποσότητες νερού σε μεγάλα ύψη έχουν μεγάλες φτερωτές και μικρές κοιλότητες, ενώ αυτές που μετακινούν μεγάλες ποσότητες σε μικρό ύψος, μικρές φτερωτές σε μεγάλες κοιλότητες.

Οι φυγοκεντρικές αντλίες δεν είναι αντλίες θετικού εκτοπίσματος, δηλαδή οι σχέσεις μεταξύ της ταχύτητας της φτερωτής, του όγκου του μετακινούμενου υγρού και του παραγόμενου μανομετρικού δεν είναι γραμμικές. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες σχέσεις μεταξύ τους. Οι σχέσεις αυτές ισχύουν για αντλίες με ποικίλες ταχύτητες περιστροφής και για αντλίες με ίδιο σχεδιασμό στη φτερωτή αλλά διαφορετικό μέγεθος σύμφωνα με τις παρακάτω ομαδοποιήσεις (set):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad \text{για αντλίες ίδιου μεγέθους και,}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3, \quad \frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \quad \text{για παρόμοιες αντλίες αλλά με διαφορετικό μέγεθος,}$$

όπου: **Q** = η παροχή, **N** = η ταχύτητα περιστροφής, **D** = η διάμετρος της φτερωτής, **h** = το μανομετρικό της αντλίας και **P** = οι απαιτήσεις σε ενέργεια.

Παράδειγμα: Μια φυγοκεντρική αντλία έχει διάμετρο φτερωτής 0,2 m και παρέχει 20 L/sec περιστρεφόμενη με 1000 rpm. Σε αυτές τις συνθήκες οι ενεργειακές της απαιτήσεις είναι 4000 watts και το μανομετρικό που μπορεί να επιτύχει 36 m. Ποια θα είναι η νέα παροχή, μανομετρικό και απαιτήσεις σε ενέργεια, εάν η ταχύτητα περιστροφής της φτερωτής αυξηθεί σε 1200 rpm;

$$\frac{20 \text{ L/sec}}{Q_2} = \frac{1000 \text{ rpm}}{1200 \text{ rpm}} \Rightarrow Q_2 = 24 \text{ L/sec}$$

$$\frac{36 \text{ m}}{h_2} = \left(\frac{1000 \text{ rpm}}{1200 \text{ rpm}}\right)^2 \Rightarrow h_2 = 51,8 \text{ m}$$

$$\frac{4000 \text{ watts}}{P_2} = \left(\frac{1000 \text{ rpm}}{1200 \text{ rpm}}\right)^3 \Rightarrow P_2 = 6912 \text{ watts}$$

Δηλαδή για να αυξηθεί η παροχή κατά 20% θα πρέπει να αυξηθεί η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία κατά 73% !

Εάν χρησιμοποιήσουμε παρόμοιο τύπο αντλίας αλλά με μεγαλύτερη φτερωτή (διάμετρο 0,4 m), ποια θα ήταν η νέα παροχή και η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία;

$$\frac{20 \text{ L/sec}}{Q_2} = \left(\frac{0,2 \text{ m}}{0,4 \text{ m}}\right)^3 \Rightarrow Q_2 = 160 \text{ L/sec}$$

$$\frac{4000 \text{ watts}}{P_2} = \left(\frac{0,2 \text{ m}}{0,4 \text{ m}}\right)^5 \Rightarrow P_2 = 128.000 \text{ watts}$$

Η επίδοση μιας αντλίας ποσοτικοποιείται με την παράμετρο «ειδική ταχύτητα» η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$n_s = \frac{\text{rpm} \sqrt{\text{gpm}}}{h^{0,75}} \quad \text{όπου: } n_s = \text{η ειδική ταχύτητα σε περιστροφές ανά λεπτό (rpm), rpm} =$$

η περιστροφική ταχύτητα του άξονα της φτερωτής, **gpm** = η παροχή της αντλίας σε gal/min και **h** = το μανομετρικό (ύψος – πίεση) της αντλίας σε (πόδια) ft.

Αντλίες με χαμηλές ειδικές ταχύτητες (500 – 2000 rpm) είναι σχεδιασμένες για μικρές παροχές και υψηλές πιέσεις (μεγάλα ύψη), ενώ αυτές που προορίζονται για μεγάλες παροχές σε μικρό ύψος έχουν υψηλό n_s (5000 – 15.000 rpm).

Παράδειγμα: Βρισκόμαστε στην ύπαιθρο χωρίς παροχή ηλεκτρικού. Διαθέτουμε όμως μηχανή καυσίμου με δυνατότητα να δίδει κίνηση σε άξονα με περιστροφή 1000 rpm. Θέλουμε να μεταφέρουμε νερό σε ύψος 4 ft και ποσότητα 1500 gpm. Τι είδους περιστροφική αντλία πρέπει να προσαρμόσουμε στον άξονα για να επιτύχουμε την παραπάνω άντληση, αν αγνοήσουμε όλες τις πιθανές απώλειες πίεσης σε σωληνώσεις και εξαρτήματα;

$$\text{Αντικαθιστώντας έχουμε: } n_s = \frac{1000 \sqrt{1500}}{4^{0,75}} = 13.693 \text{ rpm.}$$

Συνεπώς απαιτείται αντλία με ειδική ταχύτητα 13.693 rpm, τιμή εντός των ορίων για αντλίες μεταφοράς μεγάλης ποσότητας νερού σε μικρό ύψος. Γενικά, από τα διαγράμματα των κατασκευαστών των διάφορων αντλιών, δίδονται πληροφορίες για τις δυνατότητές τους. Εχοντας υπόψη αυτά και προσθέτοντας τις απώλειες πίεσης λόγω των τριβών στις σωληνώσεις και τα εξαρτήματα που τυχόν υπάρχουν (όπως περιγράφεται στα επόμενα εδάφια), καθορίζουμε τις τελικές απαιτήσεις που τίθενται για τη συγκεκριμένη μεταφορά νερού (πραγματικό μανομετρικό της αντλίας).

2.2. ΑΝΤΛΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

Το μέγεθος της αντλίας που απαιτείται για μια ορισμένη άντληση, υπολογίζεται από το συντελεστή μετατροπής: 33.000 ft · lb/min έργου ανά ίππο (HP).

Παράδειγμα: Υποθέτουμε ότι θέλουμε να αντλούμε μια μεγάλη ποσότητα νερού, 1500 gpm από βάθος 40 m. Μετατρέπουμε πρώτα τα μέτρα σε πόδια, 40 m = 131,2 ft. Η ζητούμενη ιπποδύναμη της αντλίας δίδεται από τον τύπο:

$$\frac{1500 \text{ gpm} \cdot 8,34 \text{ lb/gal} \cdot 131,2 \text{ ft}}{33.000 \text{ ft} \cdot \text{lb/min/HP}} = 50 \text{ HP}$$

Η αποδοτικότητα του μοτέρ της αντλίας περιγράφει τη σχέση μεταξύ της λεγόμενης HP (ιπποδύναμη) νερού (υπολογίστηκε παραπάνω) και της HP πέδησης την οποία πρέπει να αναπτύξει το μοτέρ της αντλίας. Εάν το μοτέρ είναι αποδοτικότητας 75% (τυπική τιμή των ηλεκτρικών κινητήρων), τότε $50/0,75 = 67 \text{ HP}$ η ιπποδύναμη που απαιτεί πραγματικά η αντλία για να επιτελέσει την παραπάνω άντληση.

Το κόστος της άντλησης υπολογίζεται δια της μετατροπής της HP σε kW (κιλοβάτ). Το κόστος του βιομηχανικού ρεύματος είναι 0,05 ευρώ/kWh (κιλοβατώρα), συνεπώς η ετήσια λειτουργική δαπάνη της αντλίας θα είναι:

$$67 \text{ HP} \cdot \frac{0,746 \text{ kW}}{\text{HP}} \cdot \frac{8760 \text{ hr}}{\text{έτος}} \cdot \frac{0,05 \text{ euro}}{\text{kWh}} = 21.892 \text{ ευρώ/έτος}$$

Αν αντί για ηλεκτρική χρησιμοποιηθεί πετρελαιοκίνητη αντλία, τότε με αποδοτικότητα μηχανής 50%, 110.000 BTU/gal πετρελαίου και 0,5 ευρώ/L, δηλαδή 0,5 euro/L · 3,78 L/gal = 2,25 ευρώ/gal, η ετήσια λειτουργική δαπάνη της αντλίας θα είναι:

$$\frac{50 \text{ HP}}{0,5} \cdot \frac{2545 \text{ BTU}}{\text{HPh}} \cdot \frac{\text{gal}}{110.000 \text{ BTU}} \cdot \frac{8760 \text{ hr}}{\text{έτος}} \cdot \frac{1,89 \text{ euro}}{\text{gal}} = 38.305 \text{ ευρώ/έτος}$$

2.3. Η ΡΟΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΑΙ ΣΩΛΗΝΕΣ

2.3.1. Ροή σε ανοιχτούς αγωγούς (κανάλια)

Το νερό αφού αντληθεί, για να φτάσει στη μονάδα εκτροφής πρέπει να μεταφερθεί μέσω καναλιών ή σωληνώσεων. Το μέγεθος της ροής στους ανοιχτούς αγωγούς υπολογίζεται ως εξής: Πρώτα υπολογίζεται η αναμενόμενη ταχύτητα του νερού και κατόπιν η παροχή του στο σημείο εκκένωσης από τον τύπο:

$Q = V \cdot A$, όπου: Q = παροχή σε μονάδες όγκου ανά μονάδα χρόνου, V = η ταχύτητα της ροής σε γραμμικές μονάδες στη μονάδα του χρόνου και A = η επιφάνεια της διατομής του αγωγού σε τετραγωνικές μονάδες.

Η ταχύτητα της ροής της ανοιχτούς αγωγούς υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο του **Manning**: $V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/3}$ όπου: V = η ταχύτητα σε m/sec, n = ο συντελεστής

τραχύτητας των τοιχωμάτων του αγωγού (αδιάστατο), R = η υδραυλική ακτίνα σε m και S = η κλίση του αγωγού σε μονάδες χαμηλώματος ανά μονάδα μήκους.

Η **υδραυλική ακτίνα (R)** αντιπροσωπεύει το μέτρο της γεωμετρικής απόδοσης της εγκάρσιας τομής του αγωγού και **ισούται με την επιφάνεια της διατομής διαιρούμενης με τη βρεχόμενη περιφέρειά του**.

Για παράδειγμα: για ένα ορθογώνιο αγωγό, $R = h \cdot b / (2h + b)$, όπου: h = το ύψος και b = το μήκος της βάσης. Για ένα τραπεζοειδή αγωγό, $R = hb / 2h \tan(\theta/2)$, όπου: \tan = εφαπτομένη και θ = η γωνία των πλευρών του τραπεζίου. Για το συντελεστή τραχύτητας (n) έχουν υπολογισθεί από πειραματικές προσπάθειες διάφορες τιμές και φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Παράδειγμα: Νερό ρέει δια μέσου ελικοειδούς χωμάτινου αγωγού, του οποίου η διατομή προσεγγίζει το ήμισυ κύκλου με ακτίνα 0,2 m. Συνεπώς η εγκάρσια διατομή του αγωγού είναι $\pi R^2 / 2 = \pi (0,2)^2 / 2 = 0,063 \text{ m}^2$ και η βρεχόμενη περίμετρος $(2\pi R / 2) = \pi (0,4) / 2 = 0,63 \text{ m}$. Η υδροληψία γίνεται 300 m μακριά από το σημείο εκκένωσης του αγωγού με υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο άκρων 0,5 m. Να υπολογισθεί η ποσότητα του νερού που μεταφέρεται από τον αγωγό αυτό στο τελικό του σημείο.

Η τιμή του n από τον Πίνακα 2.1 εκτιμάται σε 0,026, $R = 0,063 / 0,63 = 0,1$, συνεπώς με αντικατάσταση έχουμε:

$$V = \frac{1}{0,026} (0,1)^{2/3} \left(\frac{0,5}{300} \right)^{1/3} = 0,97 \text{ m/sec}$$

Εξ' αυτού η παροχή θα είναι: $Q = 0,97 \cdot 0,063 = 0,061 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Για χωμάτινους και χορταριασμένους αγωγούς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διάβρωση και η ελάττωση της κοίτης των από συσσώρευση φερτών υλικών. Υπερβολικές ταχύτητες νερού θα διαβρώνουν τον αγωγό και χαμηλές ταχύτητες θα επιτρέπουν στα στερεά που ενδεχόμενα μεταφέρει το νερό να τον μπαζώνουν. Για το λόγο αυτό οι ταχύτητες σε χωμάτινους αγωγούς πρέπει να βρίσκονται στο εύρος 0,5 –

1,5 m/sec. Αν ο αγωγός καλύπτεται από φυτά, μπορεί να μεταφέρει περισσότερο νερό συγκριτικά με ένα αμιγώς χωμάτινο.

Πίνακας 2.1. Τιμές του συντελεστή τραχύτητας (**n**) της εξίσωσης του Manning.

Τύποι αγωγών	Εύρος τιμών n
Χωμάτινοι αγωγοί	
Χώμα, ευθείς και ομοιόμορφοι	0,017 – 0,025
Χώμα, ελικοειδείς και αργοκίνητοι	0,022 – 0,030
Χωμάτινος πυθμένας, χαλικομένες πλευρές	0,028 – 0,033
Εκβαθυσμένοι χωμάτινοι αγωγοί	0,025 – 0,035
Πετρώδεις, ομαλοί και ομοιόμορφοι	0,025 – 0,035
Πετρώδεις, τραχείς και ακανόνιστοι	0,035 – 0,050
Χορταριασμένοι αγωγοί	
Πυκνή βλάστηση, ομοιόμορφη, μήκους >30cm	
Χορτάρι Bermuda	0,040 – 0,200
Kudzu	0,070 – 0,230
Lespedeza	0,047 – 0,095
Πυκνή βλάστηση, ομοιόμορφη, μήκους <10cm	
Χορτάρι Bermuda	0,034 – 0,110
Kudzu	0,045 – 0,160
Lespedeza	0,023 – 0,050
Φυσικά ρέματα	
Ευθείς όχθες, ομοιόμορφο βάθος	0,025 – 0,040
Ελικοειδές, λίγες λακκούβες, λίγες πέτρες ή φυτά	0,033 – 0,055
Αργοκίνητα με βαθιές λακκούβες, πέτρες ή φυτά	0,045 – 0,060
Πολύ χορταριασμένα ρυάκια	0,075 – 0,150
Επενδυμένοι αγωγοί	
Τσιμέντο	0,012 – 0,018
Λείο μέταλλο	0,011 – 0,015
Κυματοειδές μέταλλο	0,021 – 0,026
Εύλο	0,010 – 0,015

2.3.2. Ροή σε κλειστούς αγωγούς (σωλήνες)

Για να υπολογισθεί η παροχή και το απαιτούμενο μέγεθος των σωλήνων που χρησιμοποιούνται σε συστήματα σωληνώσεων νερού, χρησιμοποιείται η μέθοδος της μεταφοράς (conveyance method). Η μεταφορά ενός σωλήνα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$K = \left[6,304 \left(2 \log \frac{D}{e} + 1,14 \right) D^{2,5} \right] \text{ όπου:}$$

K = μεταφορά (conveyance) σε cfs, **D** = η διάμετρος του σωλήνα σε ft και **e** = ο συντελεστής τριβής που εξαρτάται από την αδρότητα του υλικού κατασκευής του σωλήνα. Οι τιμές του e για διάφορες επιφάνειες σωλήνων φαίνονται στον Πίνακα 2.2. Η παροχή, αφού πρώτα έχει υπολογισθεί η μεταφορά (conveyance), δίδεται από τον τύπο:

$$Q = K \sqrt{\frac{h_L}{L}} \text{ όπου:}$$

Q = η παροχή του σωλήνα σε κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο (cfs), **h_L** = η απώλεια πίεσης σε ft (head loss) και **L** = το μήκος του σωλήνα σε ft.

Η διαφορά υψομέτρου μεταξύ αρχικού σημείου (υδροληψία) και τελικού σημείου (εκκένωση) του σωλήνα, αντιπροσωπεύει την **απώλεια πίεσης** (head loss). Επίσης, κατά

τη ροή του νερού στο σωλήνα (ή στις σωληνώσεις), χάνεται επιπλέον ενέργεια λόγω των διαφόρων κάμψεων, διακλαδώσεων και βανών (ή βαλβίδων). Όλες αυτές οι απώλειες καλούνται «**τοπικές απώλειες**» (local losses) και χάριν διευκόλυνσης στους υπολογισμούς εκφράζονται σε **ισοδύναμο μήκος σωλήνα**. Στον Πίνακα 2.3 καταγράφονται τέτοιες τιμές.

Πίνακας 2.2. Συντελεστής αδρότητας (e) διάφορων τύπων σωλήνων για χρήση στην εξίσωση της μεταφοράς (conveyance).

Επιφάνεια σωλήνα	Συντελεστής αδρότητας (e)
Γυαλί, πλαστικό, κ.λπ.	Ομαλή επιφάνεια, ειδικά για την περίπτωση αυτή ο υπολογισμός γίνεται έχοντας υπόψη ότι: $e/D = 1 \cdot 10^{-6}$, $D = \eta$ διάμετρος του σωλήνα σε ft
Σφυρήλατος σίδηρος, ατσάλι	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Γαλβανισμένος σίδηρος	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Χυτοσίδηρος	$8,5 \cdot 10^{-4}$
Μπετόν	$1,1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$

Πίνακας 2.3. Ισοδύναμο μήκος σωλήνα (αδιάστατο) τοπικών απωλειών πίεσης σε εξαρτήματα και βάνες σωληνώσεων, εκφρασμένο σε διαμέτρους σωλήνων.

Εξαρτήματα ή βάνες	Ισοδύναμο μήκος (διάμετροι)
Ταυ - ∇ (μη τελικό)	20
Ταυ - ∇ (τελικό)	60
Γωνία 90° ∇ , χωρίς καμπυλότητα	32
Γωνία 90°, με καμπυλότητα	20
Γωνία 45°	15
Βάνα ball-valve (ανοιχτή)	17
Βάνα τύπου πεταλούδας (ανοιχτή)	40

Παράδειγμα: Ζητείται να υπολογισθεί η παροχή νερού από ένα ατσαλένιο σωλήνα διαμέτρου $\frac{3}{4}$ -in. (0,0625 ft) με μήκος 100 ft, ο οποίος έχει δύο γωνίες 90° και μια ανοιχτή βάνα ball-valve. Η υψομετρική διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου του νερού είναι 3 ft.

Η μεταφορά (conveyance) του σωλήνα είναι:

$$K = \left[6,304 \left(2 \log \frac{0,0625}{1,5 \times 10^{-4}} + 1,14 \right) 0,0625^{2,5} \right] = 0,039 \text{ cfs}$$

Οι τοπικές απώλειες σε διαμέτρους σωλήνα (Πίνακας 2.3), είναι 32 για κάθε γωνιά και 17 για τη βάνα. Συνεπώς, η ολική ισοδυναμία σε μήκος σωλήνα για αυτά τα εξαρτήματα είναι: $0,0625(32 + 32 + 17) = 5,1$ ft. Συνεπώς, ολικό μήκος σωλήνα = $100 + 5,1 = 105,1$ ft.

Η παροχή λοιπόν θα είναι:

$$Q = 0,039 \sqrt{\frac{3}{105,1}} = 0,00658 \text{ cfs} = 2,96 \text{ gpm.}$$

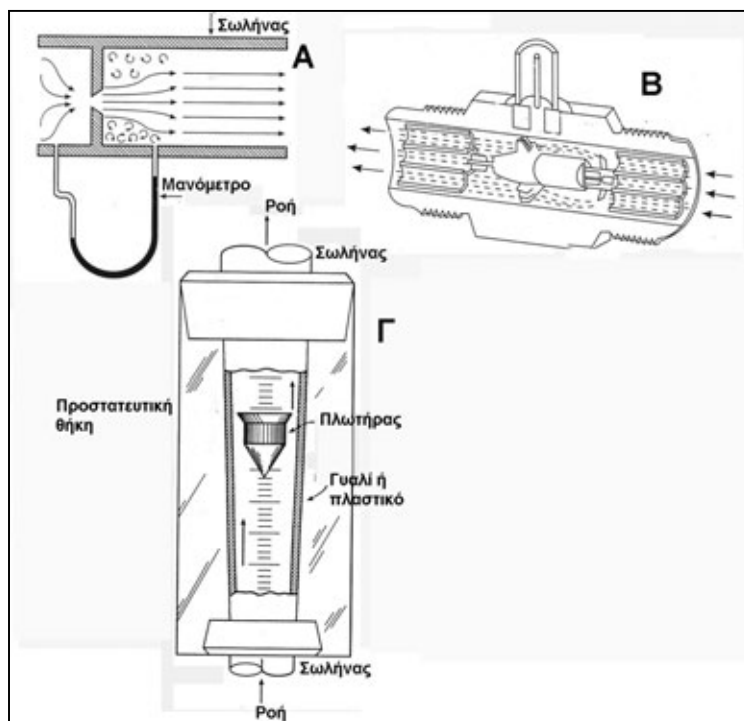
Οι παραπάνω υπολογισμοί δεν αποτελούν βεβαίως μια διεξοδική ανάλυση όλων των υδραυλικών μελετών που αφορούν το σχεδιασμό της ροής σε σωληνώσεις. Ομως για

τη βασική υπολογιστική πρακτική στις υδατοκαλλιέργειες, αποτελούν μια ορθολογιστική προσέγγιση, επάνω στην οποία μπορούν να «χτιστούν» πιο πολύπλοκοι υπολογισμοί.

2.4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Από μια καινούργια αντλία το νερό θα εκρέει με μια καθορισμένη τιμή ταχύτητας, όμως, με το πέρασμα του χρόνου λόγω «γήρανσης» της αντλίας, η ροή θα μειωθεί. Επιπρόσθετα καθώς η αντλία θα διοχετεύει τη ροή σε κάποιο σωλήνα, η ροή πάλι θα μειώνεται εξαιτίας τριβών και αναδεύσεων μέσα στο σωλήνα. Ο υδατοκαλλιεργητής πρέπει να γνωρίζει τη ροή μέσα στο σωλήνα και το κυριότερο, στην έξοδο του σωλήνα. Στις υδατοκαλλιέργειες ο πιο κοινός τρόπος μέτρησης της ροής είναι ο λεγόμενος του κουβά και του χρονομέτρου (bucket and stop-watch method). Ένα δοχείο γνωστής χωρητικότητας δέχεται τη ροή από ένα σωλήνα. Μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για να γεμίσει το δοχείο υπολογίζουμε τη ροή. Για παράδειγμα: Ένας κουβάς 7 λίτρων απαιτεί 12 sec για να γεμίσει. Συνεπώς η ροή είναι 35 L/min ή 2,1 m³/hr. Όσο πιο μεγάλος ο κουβάς και περισσότερες οι επαναλήψεις, τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια των υπολογισμών.

Με πιο εξεζητημένες μεθόδους επίσης, η ροή του νερού σε σωλήνες μπορεί εύκολα να μετρηθεί με ροόμετρα παρεμβαλλόμενα κάπου στη διαδρομή του σωλήνα. Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες ροόμετρων. Τα **υδροστατικά ροόμετρα** (head flowmeters), τα οποία είναι σχεδιασμένα έτσι που να προκαλούν διαφορά υδροστατικής πίεσης σε ένα σωλήνα μέτρησης η οποία θα σχετίζεται με τη ροή του νερού (Σχήμα 2.4, Α), και τα **μηχανικά ροόμετρα** (mechanical flowmeters) τα οποία έχουν κινούμενα μέρη (Σχήμα 2.4, Β & Γ).



Σχήμα 2.4. Διάφοροι τύποι ροόμετρων με τα βέλη να δείχνουν την κίνηση του νερού (επεξηγήσεις στο κείμενο).

Το **ροόμετρο στομίου** (orifice flow-meter) είναι ένα υδροστατικό ροό μετρο (Σχήμα 2.4, Α) και αποτελείται από ένα επίπεδο διάφραγμα με μια τρύπα στη μέση, τοποθετημένο κάθετα στη διεύθυνση της ροής στο σωλήνα. Το νερό που περνά μέσα από την τρύπα έχει αυξημένη ταχύτητα. Αυτό σημαίνει αύξηση της κινητικής του ενέργειας που καταλήγει σε μείωση της υδροστατικής πίεσης. Αυτή η αλλαγή στην πίεση μπορεί να μετρηθεί με μια συσκευή που καλείται διαφορικό μανόμετρο (differential manometer) και το οποίο σχετίζει τις διαφορές στην πίεση πριν και μετά την τρύπα. Το μανόμετρο είναι στην ουσία ένας σωλήνας σχήματος U μερικώς γεμάτος με ειδικό υγρό. Εάν η πίεση στα δύο άκρα του σωλήνα είναι η ίδια, τότε και η στάθμη του υγρού στα δύο σκέλη του σωλήνα U θα είναι η ίδια. Αν όμως η πίεση σε κάποια πλευρά είναι μεγαλύτερη από την πίεση στην άλλη πλευρά, τότε το υγρό θα πιεσθεί προς τα κάτω στην πλευρά του σωλήνα όπου η πίεση είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα διαφορετικά επίπεδα στάθμης στα δύο σκέλη του U. Η διαφορά μεταξύ των δύο σταθμών είναι ευθέως ανάλογη της διαφοράς των πιέσεων στις δύο πλευρές. Όλα αυτά τελικά κατάλληλα επεξεργασμένα δίδουν ένδειξη της ροής.

Το **rotameter** είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μηχανικό ροό μετρο (Σχήμα 2.4, Γ) κυρίως για σωλήνες μικρής διαμέτρου. Αποτελείται από ένα διαφανή πλαστικό ή γυάλινο σωλήνα, τοποθετημένο κάθετα στη σωλήνωση της οποίας τη ροή μετρά. Το σχήμα του είναι κόλουρου κώνου, με το νερό να εισέρχεται στο κάτω πιο στενό του μέρος και να εξέρχεται από το άνω πιο φαρδύ. Εξαιτίας της αύξησης στη διάμετρο του σωλήνα, το νερό στο κάτω και στενότερο μέρος του έχει μεγαλύτερη ταχύτητα απ'ότι στο άνω και φαρδύτερο. Μέσα στο σωλήνα βρίσκεται ένας ειδικός πλωτήρας σχήματος βλήματος ο οποίος είναι βαρύτερος από το νερό (βυθίζεται σε κατάσταση ηρεμίας). Με τη ροή του νερού, εξισορροπούνται η προς τα κάτω λόγω της βαρύτητας κίνηση του πλωτήρα με την προς τα άνω ώθηση που του προκαλεί η ροή. Ο πλωτήρας σε αυτό το σημείο ισορροπίας δεν μπορεί να ανυψωθεί περισσότερο, λόγω της μείωσης της ταχύτητας του νερού προς το άνω μέρος του σωλήνα. Εάν υπάρξει μείωση ή αύξηση της ροής, θα εξισορροπήσει σε διαφορετικό σημείο. Η ένδειξη στο σημείο ισορροπίας αντιπροσωπεύει τη δεδομένη ροή. Όμως, επειδή η κλίμακα των ενδείξεων συνήθως είναι αδιάστατη, θα πρέπει πρώτα να γίνει ρύθμιση (calibration) με τη μέθοδο του κουβά και χρονομέτρου (κατά τα προηγούμενα).

Τα **ροόμετρα τουρμπίνας** (turbine flow-meters), χρησιμοποιούνται για μετρήσεις της ροής τόσο σε ανοικτούς αγωγούς όσο και σε σωλήνες (Σχήμα 2.4, Β). Αποτελούνται από μία προπέλα (τουρμπίνα) η οποία στριφογυρίζει καθώς η ροή διέρχεται από τα πτερύγιά της. Ο αριθμός των περιστροφών ανά μονάδα χρόνου αυξάνει αναλογικά με τη ροή. Η τουρμπίνα είναι κατάλληλα συνδεδεμένη με ειδική συσκευή, που καταγράφει τον αριθμό των περιστροφών ανά μονάδα χρόνου και το μεταφράζει σε μονάδες ροής.

2.4.1. Μετρήσεις ροής σε ανοικτούς αγωγούς

Οι μετρήσεις στη ροή ενός ανοικτού αγωγού, συνήθως γίνονται αναγκάζοντας το νερό (όλη τη ροή) να περάσει από ένα φράκτη ορθογωνίου, τραπεζοειδούς ή 90^ο τριγωνικού σχήματος. Οι μικρές ροές μετρώνται καλύτερα με τριγωνικό φράκτη. Για να είναι σωστή η μέτρηση, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι όλη η ροή του νερού περνά ομαλά δια μέσου του φράκτη. Για ένα **ορθογώνιο** φράκτη θα έχουμε:

$$Q = 1,84L_w(h)^{0,67}$$

όπου: Q = η παροχή σε m^3/sec , L_w = το πλάτος του φράκτη στην επιφάνεια του νερού (σε m) και h = το ύψος του νερού μέσα στο φράκτη (σε m). Για μεγαλύτερη ακρίβεια, η διαφορά μεταξύ του πλάτους του αγωγού και του πλάτους του φράκτη, θα πρέπει να ξεπερνά κατά 4 φορές τουλάχιστον το ύψος του νερού στον φράκτη.

Για **τραπεζοειδή** φράκτη με κλίση πλευρών 4:1 θα έχουμε:

$$Q = 1,37L_w(h)^{0,67}$$

Και για **τριγωνικό** φράκτη: $Q = 1,374L_w(h)^{2,5}$

3. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

3.1. ΣΤΑΤΙΚΑ ΥΓΡΑ

Ο υδατοκαλλιεργητής θα αντιμετωπίσει ερωτήματα σχετικά με τη δύναμη που εξασκεί το νερό σε μια επιφάνεια. Μήπως ένα ανάχωμα ή οι πλευρές μιας δεξαμενής καταρρεύουν όταν εισέλθει νερό; Ποια είναι η πίεση που ασκείται σε μια βάνα που ρυθμίζει την εκροή του νερού μιας δεξαμενής; κ.λπ..

Ένα κοινό πρόβλημα στατικής είναι το σπάσιμο των σωλήνων λόγω εσωτερικής πίεσης. Ένας σωλήνας σπάει, επειδή η προς τα έξω δύναμη που ασκεί το νερό στις εσωτερικές του επιφάνειες, είναι μεγαλύτερη από την προς τα μέσα δύναμη που εξασκεί ο σωλήνας. Πως λοιπόν μπορεί να βρεθεί ποιοι σωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δεδομένες καταστάσεις; Τέτοιου τύπου προβλήματα μπορούν να λυθούν χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\sigma_w = \frac{D \cdot P}{2t_t}$$

όπου:

σ_w = η επιτρεπτή δύναμη (στρες) μετρημένη σε Pascals (Pa), για το υλικό κατασκευής του σωλήνα (τιμές που δίδονται από τους κατασκευαστές σωλήνων ή από βιβλία μηχανικής κ.λπ.).

D = η διάμετρος του σωλήνα σε m.

P = πίεση σε Pa που προκαλείται από το υγρό. Μπορεί να βρεθεί είτε μέσω υπολογισμών είτε να μετρηθεί με τη χρήση μανομέτρου.

t_t = το πάχος του σωλήνα σε m.

Παράδειγμα: Ποιο είναι το πάχος που πρέπει να έχουν τα τοιχώματα ενός σωλήνα από PVC για να μην σπάσουν, εάν ασκηθεί εσωτερική δύναμη από το νερό 0,15 Mpa (mega = 10^6), η διάμετρος του σωλήνα είναι 0,4 m και το επιτρεπτό στρες για το PVC είναι 48 Mpa;

$$2t_t = \frac{D \cdot P}{\sigma_w} \Rightarrow t_t = \frac{(0,4 \text{ m}) \cdot (0,15 \times 10^6 \text{ Pa})}{2(48 \cdot 10^6 \text{ Pa})} = 0,000625 \text{ m} = 0,625 \text{ mm}$$

Για την παραπάνω θεωρητική τιμή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ένας παράγοντας ασφάλειας. Για τους σωλήνες ο παράγοντας συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 2,5 φορές των θεωρητικών τιμών για την εκάστοτε υπολογισθείσα πίεση του νερού. Συνεπώς η παραπάνω υπολογισθείσα τιμή θα πρέπει να γίνει: $0,625 \cdot 1,5 = 0,9375$ ή $0,625 \cdot 2,5 = 1,56$. Δηλαδή το πάχος των τοιχωμάτων του σωλήνα θα πρέπει να είναι από 0,938 έως 1,56 mm.

3.2. ΡΕΟΝΤΑ ΥΓΡΑ

Τα προβλήματα με τα στατικά υγρά αφορούν το βάρος των υγρών σε ακινησία. Για υγρά σε κίνηση (ροή), η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη και συχνά δεν επιτρέπει ακριβείς υπολογισμούς, καθώς εμπλέκονται η αντίσταση, η ροή συμπιεστών υγρών, η ροή διαμέσου σωληνώσεων, ακροφυσίων, ανοικτών αγωγών και άλλων κατασκευών. Παρακάτω θα δοθούν τα βασικά στοιχεία περί των απαραίτητων υπολογισμών.

Στη δυναμική των ρευστών δύο είναι οι βασικές αρχές που πρέπει να έχουμε υπόψη: Ο νόμος της **διατήρησης της μάζας** (conservation of mass law) και ο νόμος της **διατήρησης της ενέργειας** (conservation of energy law).

Ο νόμος της **διατήρησης της μάζας** δηλώνει ότι σε ένα κλειστό σύστημα η μάζα του υγρού που ρέει σε ένα σημείο, είναι η ίδια με αυτή που ρέει δια μέσου ενός άλλου σημείου ανά μονάδα χρόνου, ανεξάρτητα από τις διαμέτρους του αγωγού σε αυτά τα σημεία. Τα προβλήματα που σχετίζονται με τη διατήρηση της μάζας, συχνά εμπλέκουν τη λεγόμενη **εξίσωση της συνέχειας** (continuity equation), μία από τις μορφές της οποίας είναι και η παρακάτω:

$$Q_1 = (\gamma_1)(u_1)(A_1)$$

Όπου: γ = το ειδικό βάρος του υγρού, u = η ταχύτητα του υγρού και A = η επιφάνεια της διατομής του σωλήνα ($=3,14 \cdot R^2$).

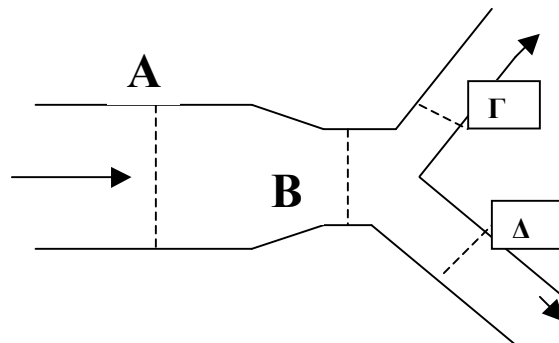
Για δύο διαφορετικά σημεία ενός σωλήνα ισχύει $Q_1 = Q_2$, συνεπώς:

$$(\gamma_1)(u_1)(A_1) = (\gamma_2)(u_2)(A_2)$$

Ομως για υγρά στην ουσία μη συμπιεστά όπως το νερό, $\gamma_1 = \gamma_2$, συνεπώς:

$$(u_1)(A_1) = (u_2)(A_2)$$

Παράδειγμα: Σε ένα διακλαδισμένο αγωγό κατά το παρακάτω σχήμα, η ροή στο σημείο **A** είναι $2 \text{ m}^3/\text{sec}$ και η ταχύτητα του νερού $0,5 \text{ m/sec}$. Στο σημείο **B** η διάμετρος (D) είναι 60 cm . Στο σημείο **Γ** η ροή είναι $0,75 \text{ m}^3/\text{sec}$ και στο σημείο **Δ** η ταχύτητα είναι 10 m/sec . Ποια είναι η ταχύτητα στο σημείο **B**; Ποια η διάμετρος του σωλήνα (D_Δ) στο σημείο **Δ**;



$$Q_1 = Q_2 = 2 \text{ m}^3/\text{sec} = (u_B)(A_B)$$

$$\frac{2 \text{ m}^3 / \text{sec}}{(3,14)(0,3 \text{ m})^2} = 7,08$$

$$u_B = 7,08 \text{ m/sec},$$

$$Q_\Delta = Q_A - Q_\Gamma, \quad Q_\Delta = 2 \text{ m}^3/\text{sec} - 0,75 \text{ m}^3/\text{sec} = 1,25 \text{ m}^3/\text{sec},$$

$$Q_\Delta = (A_\Delta)(u_\Delta), \quad 1,25 \text{ m}^3/\text{sec} = (3,14)(R_\Delta^2)(10 \text{ m/sec}),$$

$$0,04 \text{ m}^2 = R_\Delta^2, \quad \text{Συνεπώς: } R_\Delta = 0,2 \text{ m και } D_\Delta = 0,4 \text{ m.}$$

Κατά το νόμο της **διατήρησης της ενέργειας**, στα υγρά διακρίνονται τρεις συνιστώσες ενέργειας:

1. Δυναμική ενέργεια λόγω ύψους (**PE_e**): για παράδειγμα μια σταγόνα βροχής έχει δυναμική ενέργεια πριν πέσει.
2. Δυναμική ενέργεια λόγω πίεσης (**PE_p**): για παράδειγμα η ενέργεια του νερού σε ένα πυροσβεστικό αγωγό πριν αυτός ανοίξει.
3. Κινητική ενέργεια (**KE**) των υγρών σε κίνηση.

Σύμφωνα με το νόμο της διατήρησης της ενέργειας, σε ένα σύστημα χωρίς τριβές και σε δύο σημεία αυτού A και B ισχύει:

$$PE_{eA} + PE_{pA} + KE_A = PE_{eB} + PE_{pB} + KE_B$$

Ομως το παραπάνω αφορά ένα ιδεατό σύστημα. Στην πράξη μπορεί είτε να προστεθεί ενέργεια (π.χ. μια αντλία μεταξύ των σημείων A και B) είτε να χαθεί. Η απώλεια ενέργειας μπορεί να είναι υπό μορφή **δευτερευουσών απωλειών** (minor losses) και **απωλειών λόγω τριβών σωλήνα** (pipe friction losses).

Οι **δευτερεύουσες απώλειες** υπολογίζονται από τον τύπο: $\text{minor losses} = K \left(\frac{u^2}{2g} \right)$,

όπου το (**K**) αντιπροσωπεύει μια σταθερά που προκύπτει από την εσωτερική τριβή που γεννιέται όταν ένα υγρό περνά από κάποιο μέγεθος σωλήνα σε ένα άλλο, ή αλλάζει πορεία, ή η εσωτερική διαμόρφωση του σωλήνα αλλάζει, της για παράδειγμα λόγω κάμψης του σε κόμβους (tau-T), βάνες που παρεμβάλλονται, ακροφύσια κ.λπ.. Τιμές του K έχουν στανταρισθεί πειραματικά και μπορούν να βρεθούν σε εγχειρίδια μηχανικής.

Οι **απώλειες λόγω τριβών σωλήνα** εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες που είναι: η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα, η αδρότητα της εσωτερικής επιφάνειας του σωλήνα, η ταχύτητα με την οποία ρέει το νερό, η αλατότητα και η θερμοκρασία του νερού. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συμβάλλουν στην έννοια δύο αρχών.

Η πρώτη αρχή είναι η **σχετική αδρότητα** (relative roughness), η οποία είναι ο λόγος της απόλυτης αδρότητας (το μέγεθος των μικροσκοπικών εξογκωμάτων και οπών στο εσωτερικό του σωλήνα) προς τη διάμετρο του σωλήνα. Για παράδειγμα και σκεπτόμενοι χαλαρά και δαισθητικά, μπορούμε να πάρουμε μια γεύση για το πως επηρεάζει η σχετική αδρότητα τη ροή, αν σκεφθούμε ότι μικρά εξογκωμάτκια στο εσωτερικό των σωλήνων της τάξεως των 0,01 cm, μπορούν να επηρεάσουν πολύ πιο έντονα τη ροή σε σωλήνα διαμέτρου 1 cm, απ'ότι σε σωλήνα διαμέτρου 2 m.

Η δεύτερη αρχή είναι ο **αριθμός του Reynolds (RE)** ο οποίος είναι ο λόγος της δύναμης αδράνειας του νερού που ρέει δια μέσου του σωλήνα (πυκνότητα- ρ , ταχύτητα - u και διάμετρος σωλήνα-D), προς το ιξώδες (viscosity) του νερού- μ που επιβραδύνει τη ροή και δίδεται από τον τύπο:

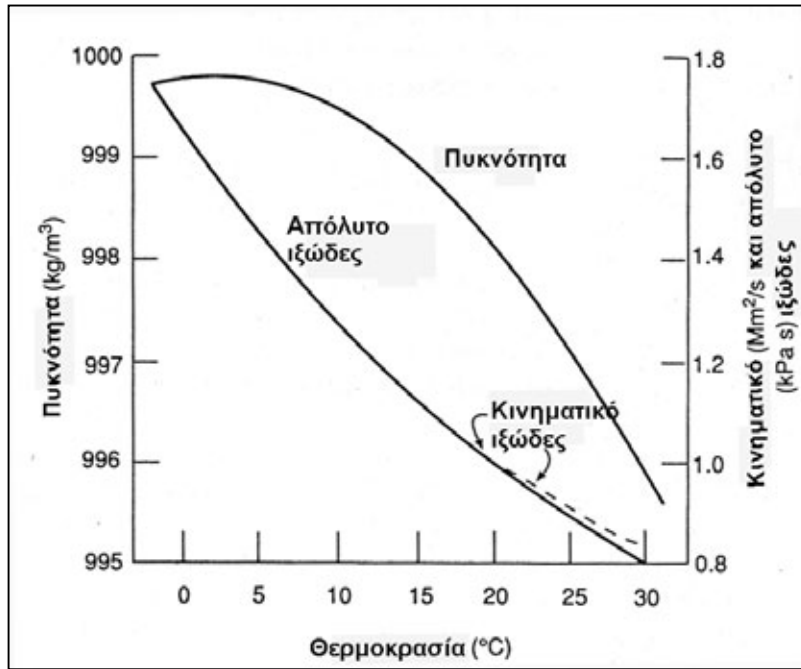
$$RE = \frac{(\rho)(u)(D)}{\mu} = \frac{(u)(D)}{\nu}$$

Στον Πίνακα 3.1 φαίνεται ο συμβολισμός για τα παραπάνω και στο Σχήμα 3.1 μπορούν να βρεθούν τιμές για ιξώδη. Έχοντας υπολογίσει τη σχετική αδρότητα και τον αριθμό του Reynolds, μπορεί πλέον να βρεθεί η **τιμή των απωλειών λόγω τριβής (f_f)** χρησιμοποιώντας το διάγραμμα του **Moody** (Σχήμα 3.2). Στο διάγραμμα του Moody, από την τιμή της σχετικής αδρότητας στον δεξιό κάθετο άξονα, ακολουθούμε τη σχετική γραμμή μέχρι να συναντήσει την κάθετη προέκταση του αριθμού του Reynolds από τον άξονα X. Από το σημείο τομής τέλος, εκτείνεται μια οριζόντια γραμμή η οποία θα συναντήσει τον αριστερό άξονα Y στη ζητούμενη τιμή του f_f .

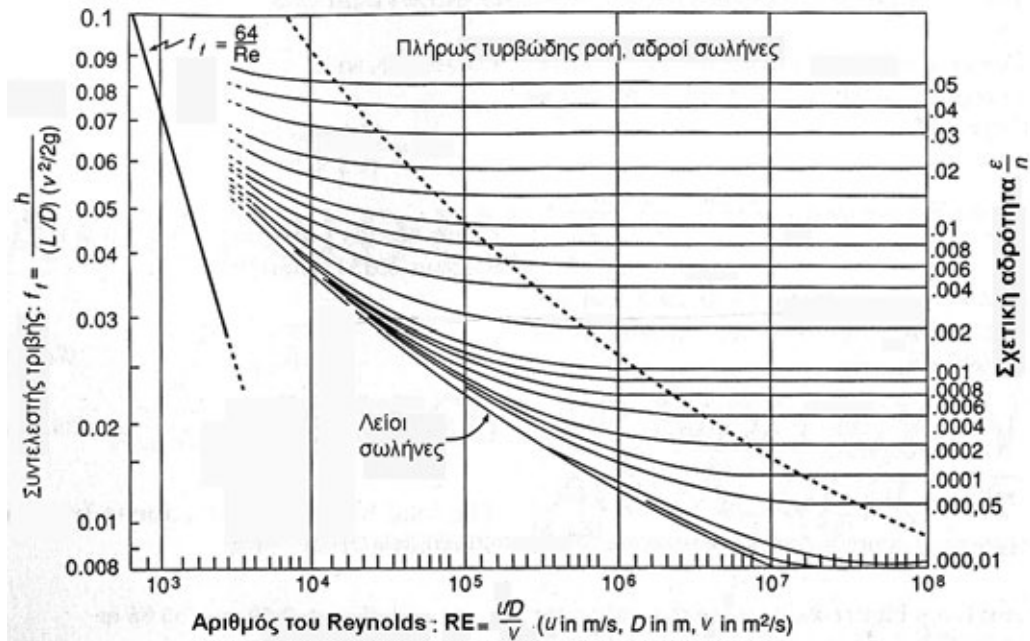
Η **απώλεια στην πίεση του υγρού (h)** λόγω των **τριβών του σωλήνα** υπολογίζεται από τον τύπο:

$$h = (f_f) \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{u^2}{2g} \right)$$

όπου: **L** το μήκος του σωλήνα και **g** η σταθερά επιτάχυνσης της βαρύτητας (9,8 m/s²).



Σχήμα 3.1. Μεταβολή των ιδιοτήτων του νερού ανάλογα με τη θερμοκρασία σε ατμοσφαιρική πίεση (από Wheaton, 1977 ελαφρά τροποποιημένο).



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα του Moody (Moody, 1944 ελαφρά τροποποιημένο).

Παράδειγμα: Να υπολογιστεί η απώλεια πίεσης, όταν νερό θερμοκρασίας 10 °C ρέει μέσα σε σωλήνα σφυρήλατου σιδήρου μήκους 200 m και με εσωτερική διάμετρο 2 cm. Ο σωλήνας έχει μια βαλβίδα μονής κατεύθυνσης (swing valve) και το νερό μέσα του ρέει με ταχύτητα 1,5 m/sec.

Πρώτα υπολογίζονται οι δευτερεύουσες απώλειες (minor losses):

$$\text{minor losses} = K \left(\frac{u^2}{2g} \right)$$

Από τον Πίνακα 3.2 βλέπουμε ότι η τιμή του **K** για αυτού του τύπου τη βάνα είναι 2,5, έτσι με αντικατάσταση έχουμε:

$$\text{minor losses} = 2,5 \left(\frac{(1,5 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} \right) = 0,29 \text{ m}$$

Για να υπολογισθεί το f_f , πρώτα βρίσκουμε την τιμή της σχετικής αδρότητας και την τιμή του αριθμού του Reynolds (RE), θα έχουμε λοιπόν:

$$\text{σχετική αδρότητα} = \frac{\text{απόλυτη αδρότητα}}{D}$$

Από τον Πίνακα 3.3 βρίσκουμε ότι για σωλήνα από σφυρήλατο σίδηρο η απόλυτη αδρότητα έχει τιμή 0,0046 cm, έτσι λοιπόν:

$$\text{σχετική αδρότητα} = \frac{0,000046 \text{ m}}{0,02 \text{ m}} = 0,0023$$

$$\text{και ο αριθμός του Reynolds: } RE = \frac{(u)(D)}{\nu}$$

Από το Σχήμα 3.1 βλέπουμε ότι για νερό 10 °C το ιζώδες είναι 1,3 Mm²/sec, έτσι με αντικατάσταση έχουμε:

$$RE = \frac{(1,5 \text{ m/sec})(0,02 \text{ m})}{(1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{sec})} = 2,3 \cdot 10^4$$

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα του Moody βλέπουμε ότι η τιμή της f_f είναι 0,031 περίπου. Συνεπώς:

$$h = (f_f) \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{u^2}{2g} \right) \text{ δηλαδή: } h = (0,031) \left(\frac{200 \text{ m}}{0,02 \text{ m}} \right) \left(\frac{(1,5 \text{ m/sec})^2}{2 \cdot 9,8 \text{ m/sec}^2} \right) = 35,6 \text{ m}$$

Τελικά, οι **ολικές απώλειες πίεσης**, θα είναι οι **απώλειες λόγω τριβής συν τις δευτερεύουσες απώλειες**:

$$35,6 \text{ m} + 0,29 \text{ m} = 35,89 \text{ m.}$$

Πίνακας 3.1. Οροι και μονάδες που χρησιμοποιούνται στη μηχανική των ρευστών.

Όνομασία	Μονάδες
1. Επιφάνεια (A)	1. m^2
2. Ταχύτητα (u)	2. m/sec ή m/s
3. Πυκνότητα (ρ)	3. Μάζα ανά μονάδα όγκου (kg/m^3)
4. Newtons (N)	4. Δύναμη που απαιτείται για να προκαλέσει επιτάχυνση σε 1 kg, $1 m/s^2$
5. Σταθερά επιτάχυνσης της βαρύτητας (g)	5. Επιτάχυνση πέπτοντος αντικειμένου στη γη = $9,8 m/s^2$
6. Ειδικό βάρος (γ)	6. Βάρος ανά μονάδα όγκου (N/m^3), το ειδικό βάρος του νερού = $9800 N/m^3$
7. Απόλυτο ιξώδες (μ)	7. Αντίσταση (δύναμη συνάφειας) στο στρες (Pa s)
8. Κινηματικό ιξώδες (ν)	8. μ/ρ
9. Πίεση (P)	9. Δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας (N/m^2)
10. Pascals (Pa)	10. Μονάδα πίεσης (N/m^2)

Πίνακας 3.2. Τιμές του **K** για τις δευτερεύουσες απώλειες σε διάφορα εξαρτήματα των σωληνώσεων.

Εξαρτήματα ή βάνες	K
Βάνα ball-valve (πλήρως ανοιχτή)	10,0
Γωνιακή βάνα (πλήρως ανοιχτή)	5,0
Βαλβίδα μονής κατεύθυνσης (πλήρως ανοιχτή)	2,5
Βάνα φράκτης (πλήρως ανοιχτή)	0,19
Κλειστή επιστρέφουσα καμπύλη	2,2
Ταυ	1,8
Γωνιά	0,9
Γωνία 90°, χωρίς καμπυλότητα	0,75
Γωνία 90°, με καμπυλότητα	0,60
Είσοδος (τετραγωνικής διατομής)	0,5
Είσοδος (ελαφρά καμπυλωτή)	0,2
Είσοδος (προέκταση προς τα μέσα)	0,8

Πίνακας 3.3. Τιμές απόλυτης αδρότητας για διάφορους τύπους υλικών σωλήνων.

Υλικό σωλήνα	Απόλυτη αδρότητα (cm)
Σφυρήλατο ατσάλι	0,091 – 0,91
Μπετόν	0,03 – 0,31
Ξύλο	0,018 – 0,091
Χυτοσίδηρος	0,026
Γαλβανισμένος σίδηρος	0,015
Ασφαλτωμένος χυτοσίδηρος	0,012
Σφυρήλατος σίδηρος	0,0046
Φυσητός σωλήνας	0,00015
PVC	~0,000005

4.1. ΒΑΣΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Τίποτα δεν είναι πιο πολύτιμο, από τα φυσικά στοιχεία στο νερό για τη ζωή των ψαριών, από το οξυγόνο. Το διαλυμένο οξυγόνο είναι για τα ψάρια ό,τι για της το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Αν της ο αέρας υπό κανονικές συνθήκες (αυτές της οποίες η ζωή κυλά) έχει σταθερή αναλογία σε οξυγόνο (~21%), αυτό δεν συμβαίνει στα νερά. Ανάλογα με την αλμυρότητα του νερού και με τη θερμοκρασία του (καθώς της και με την ατμοσφαιρική πίεση), η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου ποικίλλει.

Της υδατοκαλλιέργειας το πρώτο πράγμα που ενδιαφέρει, είναι να υπάρχει στο νερό αρκετό οξυγόνο για να μπορούν τα ψάρια (ή τα άλλα ζώα που εκτρέφουμε), να αναπνέουν απρόσκοπτα, είτε σε κατάσταση ηρεμίας, είτε μετά από ένα καλό γεύμα, είτε σε συνθήκες στρες. Της αυτά αναφέρονται για να μην ξεχνάμε ποτέ ότι το οξυγόνο είναι το «καύσιμο» για το μεταβολισμό της. Υψηλός μεταβολισμός και γενικά κατανάλωση ενέργειας, σημαίνει πρωτίστως αυξημένη κατανάλωση οξυγόνου. Αν το οξυγόνο δεν επαρκεί, η ασφυξία επέρχεται και αν η κατάσταση δεν διορθωθεί έγκαιρα από εμάς, ο θάνατος των ψαριών θα σημαίνει αποτυχία.

Οφείλουμε λοιπόν να κατανοήσουμε της μηχανισμούς με της οποίους το οξυγόνο της ατμόσφαιρας διαλύεται στο νερό. Αν της γνωρίζουμε μπορούμε να χειριστούμε την κατάσταση και να διασφαλίσουμε την αποφυγή της ασφυξίας. Τα παρακάτω πραγματεύονται τα του οξυγόνου.

Πρωτίστως θα πρέπει να διευκρινισθούν ορισμένες καταστάσεις σχετικά με της νόμους των αερίων. Ο παγκόσμιος νόμος των αερίων (συνδυασμός των **νόμων** του **Charles** και **Boyle**), σχετίζει τον όγκο της αερίου (**V**) με την πίεση (**P**) και την απόλυτη θερμοκρασία (**T**ης), σύμφωνα με την παρακάτω σχέση για δύο διαφορετικές καταστάσεις (συμβολίζονται με 1 ή 2 ως εκθέτες της μεταβλητές):

$$\frac{V_1 P_1}{T_1} = \frac{V_2 P_2}{T_2}$$

Δηλαδή, ο όγκος της αερίου είναι ανάλογος της θερμοκρασίας

και αντιστρόφως ανάλογος της πίεσης που εξασκείται σε αυτό.

Πίνακας 4.1. Σύνθεση του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα.

Αέριο του ατμοσφαιρικού αέρα	Ποσοστό στο συνολικό όγκο
Αζωτο (N ₂)	78,084
Οξυγόνο (O ₂)	20,946
Αργόν	0,934
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	0,033
Μεθάνιο (CH ₄)	0,0062
Ευγενή αέρια (Ξένον, Ηλιον, Νέον) και Οξείδια του αζώτου	0,0024

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι μίγμα αερίων της φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Σύμφωνα με το νόμο του **Dalton**, η συνολική πίεση της μίγματος αερίων ισούται με το άθροισμα των επιμέρους (μερικών) πιέσεων εκάστου των αερίων. Η τυπική (standard) ατμοσφαιρική πίεση ή της κοινώς καλείται 1,0 ατμόσφαιρα (1 atm), είναι 760 mm υδραργύρου (mm Hg). Συνεπώς, η **μερική πίεση του οξυγόνου (PO₂)** σε ατμοσφαιρική πίεση 1 atm σε αέρα χωρίς υγρασία θα είναι: 760 · 0,20946 = 159,2 mm Hg.

Της η ατμόσφαιρα εκτός από τα αέρια του Πίνακα 4.1, περιέχει και υδρατμούς οι οποίοι επιφέρουν και αυτοί μια μερική πίεση, καλούμενη **πίεση υδρατμών (Pw)**. Στον

Πίνακα 4.2 καταγράφονται οι πιέσεις υδρατμών σε κατάσταση κορεσμού (του αέρα σε υδρατμούς) για της διάφορες θερμοκρασίες. Η **πραγματική (Pw)** που υπάρχει σε κάποια κατάσταση, υπολογίζεται αν γνωρίζουμε τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα (με τη χρήση ειδικών ψυχομέτρων). Τότε, το γινόμενο της Pw σε κατάσταση κορεσμού (από τον Πίνακα 4.2), πολλαπλασιαζόμενο με τη σχετική υγρασία της δίδει την πραγματική Pw.

Η PO₂ σε υγρό αέρα με ατμοσφαιρική πίεση P και γνωστή την Pw, θα είναι:

$$PO_2 = (P - Pw) \cdot 0,20946$$

Παρατήρηση: Επειδή πολύ συχνά δεν γνωρίζουμε τη σχετική υγρασία, μπορούμε να αφαιρούμε από την ατμοσφαιρική πίεση την τιμή κορεσμού της Pw από τον Πίνακα 4.2 για την εκάστοτε θερμοκρασία, χωρίς να υποπίπτουμε σε σοβαρό σφάλμα, δεδομένου ότι της περισσότερες φορές η υγρασία της ατμόσφαιρας είναι υψηλή παρά χαμηλή. Για περαιτέρω απλοποιήσεις, της συνήθεις υδατοκαλλιεργητικές μετρήσεις, όταν δεν απαιτείται εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια, η χρησιμοποίηση της Pw στον παραπάνω τύπο μπορεί να παραληφθεί και έτσι:

$$PO_2 = P \cdot 0,20946$$

Πίνακας 4.2. Πίεση υδρατμών σε κατάσταση κορεσμού σε διάφορες θερμοκρασίες.

T,°C	Pw,mmHg	T,°C	Pw,mmHg
0	4,6	18	15,5
1	4,9	19	16,6
2	5,3	20	17,5
3	5,7	21	18,6
4	6,1	22	19,8
5	6,5	23	21,1
6	7,0	24	22,4
7	7,5	25	23,8
8	8,0	26	25,2
9	8,6	27	26,7
10	9,2	28	28,3
11	9,8	29	30,0
12	10,5	30	31,8
13	11,2	31	33,7
14	12,0	32	35,7
15	12,8	33	37,7
16	13,6	34	39,9
17	14,5	35	42,2

4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΤΗ ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Η **διαλυτότητα των αερίων της ατμόσφαιρας στο νερό** περιγράφεται από το νόμο του **Henry**. Σύμφωνα με αυτόν και συνοπτικά, η συγκέντρωση ισορροπίας της αερίου διαλυμένου στο νερό, είναι ανάλογη (σχετίζεται) με τη μερική του πίεση στην ατμόσφαιρα (πάνω από το νερό). Έτσι λοιπόν, η μερική πίεση του διαλυμένου στο νερό αερίου, είναι η ατμοσφαιρική πίεση αυτού του αερίου η οποία απαιτείται για να το κρατήσει σε διάλυση.

Πρακτικά και για να υπολογίσουμε τη διαλυτότητα των διαλυμένων στο νερό αερίων, χρησιμοποιούμε της καλούμενες **τιμές σταθεράς (K) του νόμου του Henry**, οι οποίες είναι δεδομένες για της διάφορες θερμοκρασίες και ανευρίσκονται από σχετικούς πίνακες για κάθε αέριο. Στον Πίνακα 4.3 καταγράφονται οι τιμές της (K) για το οξυγόνο σε διάφορες θερμοκρασίες.

Πίνακας 4.3. Αντιπροσωπευτικές τιμές σταθεράς (K) του νόμου του Henry για το οξυγόνο.

T, °C	K · 10 ⁷
0	1,933
5	2,205
10	2,486
15	2,766
20	3,044
25	3,344
30	3,599

Καταρχάς υπολογίζουμε το συντελεστή του **Bunson** ο οποίος εξάγεται από τη διαίρεση της τιμής 946.000 με τη σταθερά του Henry (K).

Ο υπολογισμός της **περιεκτικότητας του νερού σε οξυγόνο (mg/L)** που βρίσκεται σε ισορροπία με ξηρό αέρα πίεσης 1 atm γίνεται ως εξής: Ο συντελεστής Bunson πολλαπλασιάζεται με την πυκνότητα του οξυγόνου (σε mg/L) και κατόπιν πολλαπλασιάζεται με 0,20946, το δεκαδικό ποσοστό συμμετοχής του οξυγόνου στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο υπολογισμός της **πυκνότητας του οξυγόνου** που απαιτείται γίνεται κατανοητός από το παρακάτω παράδειγμα:

Παράδειγμα: Να υπολογισθεί η διαλυτότητα του οξυγόνου σε νερό θερμοκρασίας 20 °C και σε ισορροπία με τον ξηρό αέρα ατμοσφαιρικής πίεσης 1 atm.

1. Βρίσκουμε την τιμή σταθεράς Henry (K). Από τον Πίνακα 4.3 και για 20 °C είναι $3,044 \cdot 10^7$. Υπολογίζουμε το συντελεστή Bunson: $= \frac{946.000}{3,044 \cdot 10^7} = 0,03107$.

2. Υπολογίζουμε τον **όγκο της γραμμομορίου (mole)** του οξυγόνου σύμφωνα με τον παγκόσμιο νόμο των αερίων. Αναλυτικότερα: Ο γραμμομοριακός όγκος του οξυγόνου (αλλά και κάθε άλλου αερίου) της 0 °C (που αντιστοιχεί σε απόλυτη θερμοκρασία 273,15 °K) είναι 22,4 L σύμφωνα με το νόμο του **Avogadro**. Ο γραμμομοριακός όγκος του οξυγόνου της 20 °C (293,15 °K) θα είναι: $22,4 \cdot \frac{293,15}{273,15} = 24,04L$. Η **πυκνότητα του οξυγόνου** που έχει μοριακό βάρος

(MB) 32 της 20 °C, θα είναι: **βάρος/όγκος**,

$$\text{δηλαδή: } \frac{32.000\text{mg}}{\text{mol}} \cdot \frac{\text{mol}}{24,04L} = 1331,1 \text{ mg/L.}$$

3. Συνεπώς η **διαλυτότητα του οξυγόνου** στο νερό, σε ισορροπία με ξηρό αέρα ατμοσφαιρικής πίεσης 1 atm και σε θερμοκρασία 20 °C, θα είναι:

$$\underline{0,03107 \cdot 1331,1 \cdot 0,20946 = 8,66 \text{ mg/L.}}$$

Πίνακας 4.4. Συγκέντρωση ισορροπίας (Ce σε mg/L) του οξυγόνου στο γλυκό νερό, για υγρό ατμοσφαιρικό αέρα πίεσης 1 atm της διάφορες θερμοκρασίες. Η δεύτερη στήλη είναι υπολογισμένη από την εξίσωση των Truesdale et al. Και η Τρίτη από την εξίσωση του Liao. Η τέταρτη στήλη δίδει την απόκλιση των δύο στηλών.

T, °C	Ce σε mg/L		Απόκλιση σε mg/L
0	14,16	14,43	0,27
1	13,77	13,95	0,18
2	13,40	13,50	0,10
3	13,05	13,09	0,04
4	12,70	12,71	0,01
5	12,37	12,36	-0,01
6	12,06	12,03	-0,03
7	11,76	11,73	-0,03
8	11,47	11,44	-0,03
9	11,19	11,17	-0,02
10	10,92	10,92	0,00
11	10,67	10,68	0,01
12	10,43	10,45	0,02
13	10,20	10,24	0,04
14	9,98	10,04	0,06
15	9,76	9,85	0,09
16	9,56	9,66	0,10
17	9,37	9,49	0,12
18	9,18	9,32	0,14
19	9,01	9,16	0,15
20	8,84	9,01	0,17
21	8,68	8,86	0,18
22	8,53	8,72	0,19
23	8,38	8,59	0,21
24	8,25	8,46	0,21
25	8,11	8,34	0,23
26	7,99	8,22	0,23
27	7,86	8,10	0,24
28	7,75	7,99	0,24
29	7,64	7,88	0,24
30	7,53	7,78	0,25
31	7,43	7,68	0,25
32	7,33	7,58	0,25
33	7,23	7,49	0,26
34	7,13	7,40	0,27
35	7,04	7,31	0,27

Η διαλυτότητα του οξυγόνου (ως συγκέντρωση ισορροπίας μεταξύ νερού και αέρα) στο νερό δίδεται από πίνακες που έχουν συντάξει διάφοροι ερευνητές (Πίνακας 4.4). Οι πίνακες αυτοί ισχύουν για **στάναρτ ατμοσφαιρική πίεση (1 atm)** και δίδουν τη διαλυτότητα στο γλυκό νερό του οξυγόνου σε ισορροπία με υγρό ατμοσφαιρικό αέρα, της διάφορες θερμοκρασίες.

Της, από διάφορους ερευνητές έχουν εξαχθεί εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης ισορροπίας του οξυγόνου στο νερό και της θερμοκρασίας. Η παρακάτω των Truesdale et al. (1955) (αναφέρεται στον Soderberg, 1995), επιτρέπει την εύρεση της συγκέντρωσης ισορροπίας (Ce σε mg/L) του οξυγόνου

στο γλυκό νερό για εύρος θερμοκρασίας (T) 0 – 36 °C, και υγρό ατμοσφαιρικό αέρα πίεσης 1 atm:

$$C_e = 14,161 - 0,3943T + 0,0077147T^2 - 0,0000646T^3$$

Της υπάρχει και άλλη μία σχέση που υπολογίζει τη C_e του οξυγόνου για της της παραπάνω συνθήκες και έχει βρεθεί από τον Liao (1971):

$C_e = \frac{125,9}{T^{0,625}}$, η οποία διαφέρει στο αποτέλεσμα από αυτή των Truesdale et al. Το πολύ κατά 0,27 mg/L (Πίνακας 4.4).

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να αποθηκευθούν σε H/Y χειρός ή PC και για τη δεδομένη θερμοκρασία που θα εισάγεται, να δίδουν ως αποτέλεσμα τη C_e του οξυγόνου στο γλυκό νερό.

4.3. ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΓΙΑ ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ

4.3.1. Διόρθωση για πίεση

Η διαλυτότητα της αερίου στο νερό εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση του αερίου σύμφωνα με το νόμο του Henry. Έτσι λοιπόν η υπολογιζόμενη C_e του οξυγόνου σε στάνταρτ ατμοσφαιρική πίεση (1 atm), πρέπει να διορθωθεί εάν η ατμοσφαιρική πίεση είναι διαφορετική από 1 atm. Η συνήθης διαδικασία για αυτό, είναι η λήψη της επικρατούσας πίεσης (σε mm Hg) με βαρόμετρο, για να υπολογισθεί ο συντελεστής διόρθωσης ως της την πίεση: **P/760** όπου **P** = η βαρομετρική πίεση σε mm Hg. Κατόπιν, η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με τη C_e του οξυγόνου που υπολογίστηκε για στάνταρτ ατμοσφαιρική πίεση, δηλαδή:

$$C_e (\text{διορθωμένη για πίεση}) = (P/760) \cdot C_e (\text{στάνταρτ πίεση})$$

Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμο βαρόμετρο, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο υπολογισμού της ατμοσφαιρικής πίεσης, το υψόμετρο του τόπου (σε m υπεράνω του επιπέδου της θάλασσας). Σε τέτοια περίπτωση ο συντελεστής διόρθωσης υπολογίζεται από τον τύπο: $\frac{1}{1 + \frac{E}{7600}}$ όπου: **E** = το υψόμετρο του τόπου σε μέτρα.

$$\text{Συνεπώς: } C_e (\text{διορθωμένη για πίεση}) = \frac{1}{1 + \frac{E}{7600}} \cdot C_e (\text{στάνταρτ πίεση}).$$

4.3.2. Διόρθωση για αλατότητα

Ως γνωστόν η διαλυτότητα του οξυγόνου επηρεάζεται από την αλατότητα του νερού. Αυξανόμενη της αλατότητας η συγκέντρωση του οξυγόνου στο νερό μειώνεται. Συνεπώς, η υπολογισθείσα C_e για γλυκά νερά πρέπει να μειωθεί κατά τι όταν η αλατότητα αυξάνεται (σε παρόμοια θερμοκρασία). Ο **συντελεστής διόρθωσης της C_e για την αλατότητα (Ds)**, βρίσκεται από τον παρακάτω τύπο των Truesdale et al. (1955):

$$D_s = S(0,0841 - 0,00256 T + 0,0000374 T^2)$$

όπου: **S** = αλατότητα σε ppm και **Tης** = θερμοκρασία σε °C.

$$\text{Συνεπώς: } C_e (\text{διορθωμένη για αλατότητα}) = C_e (\text{γλυκά νερά}) - D_s.$$

4.4. ΤΟ ΔΙΑΛΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ (DO) ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

Οι συνήθεις μετρήσεις του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό το εκφράζουν ως συγκέντρωση οξυγόνου σε mg/L. Της σε της περιπτώσεις, της αυτές κατά της πειραματισμούς στην αναπνοή των ψαριών, είναι προτιμότερο το διαλυμένο οξυγόνο να εκφράζεται ως πίεση σε mm Hg.

Η **πίεση του οξυγόνου στον αέρα (PO_{2a})** είναι η βαρομετρική πίεση (P) μείον την πίεση υδρατμών (P_w) και το αποτέλεσμα αυτό πολλαπλασιασμένο με 0,20946,

$$[PO_{2a} = (P - P_w) \cdot 0,20946].$$

Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμο βαρόμετρο για να υπολογισθεί άμεσα η βαρομετρική πίεση, τότε, ως υποκατάστατο της, χρησιμοποιείται το υψόμετρο κατά τον τύπο:

$$P = \frac{760}{1 + \frac{E}{7600}}, \text{ όπου: } E = \text{το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας σε m.}$$

Η **πίεση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) στο νερό (PO_{2w})**, είναι η μερική πίεση του οξυγόνου που απαιτείται για να κρατήσει διαλυμένη αυτή την ποσότητα του οξυγόνου (δηλαδή της DO). Ετσι, η PO_{2w} είναι το αποτέλεσμα της διαίρεσης του μετρούμενου διαλυμένου οξυγόνου (DO) με τη συγκέντρωσης ισορροπίας οξυγόνου στο νερό (C_e), πολλαπλασιασμένου με την PO_{2a} του αέρα.,

$$(PO_{2w} = \frac{DO}{C_e} \cdot PO_{2a}).$$

5. ΟΞΥΓΟΝΩΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Συχνά της υδατοκαλλιέργειας η εκτρεφόμενη βιομάζα δεν μπορεί να καλύψει της αναπνευστικές της ανάγκες με την ποσότητα του οξυγόνου που βρίσκεται διαλυμένο στο νερό από την ανταλλαγή αερίων μεταξύ νερού και ατμόσφαιρας. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρειάζεται να προσθέσουμε οξυγόνο με τεχνητά μέσα. Εφόσον της οι της συνθήκες (αμμωνία, άλλοι ρυπαντές κ.λπ.) του νερού βρίσκονται σε ασφαλή επίπεδα, τότε η τεχνητή οξυγόνωση θα αποκαταστήσει το επίπεδο του διαλυμένου οξυγόνου (DO) στα επιθυμητά επίπεδα και τη διασφάλιση της αναπνοής των ψαριών.

5.1. ΒΑΣΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η μεταφορά του οξυγόνου της ατμόσφαιρας στο νερό αποτελεί μια διεργασία τριών φάσεων. Κατά την πρώτη φάση το οξυγόνο εισέρχεται στο επιφανειακό φιλμ του νερού, κατά τη δεύτερη διαχέεται δια μέσου του επιφανειακού φιλμ και τέλος κατά την Τρίτη μετακινείται στην υποκείμενη μάζα του νερού δια της φυσικής μεταφοράς. Επειδή το ατμοσφαιρικό οξυγόνο διαχέεται στο νερό, ο ρυθμός της μεταφοράς του εξαρτάται από την επιφάνεια του νερού και από το έλλειμμα σε οξυγόνο που παρουσιάζει το νερό. Της κατά κανόνα περιορισμένης έκτασης υδατοκαλλιεργητικές δεξαμενές, όπου δεν υπάρχει κυματισμός ή τυρβώδης ροή και όπου το έλλειμμα του νερού σε οξυγόνο δεν είναι πολύ μεγάλο, η διάχυση του οξυγόνου δεν είναι τόσο έντονη που να επαρκεί για να καλύψει της αναπνευστικές ανάγκες των ψαριών, εκτός και αν μέσω της ανάδευσης του νερού αυξηθεί με τεχνητά μέσα η διεπιφάνεια νερού-αέρα.

Γενικά, ο τεχνητός αερισμός (οξυγόνωση) του νερού συνίσταται, είτε στην εκμετάλλευση της βαρύτητας μέσω της πτώσης του νερού από κάποιο ύψος, είτε στην οξυγόνωση του νερού που γίνεται μέσω αναδευτήρων που εκτοξεύουν το νερό στον αέρα ή προσθέτουν με φυσαλίδες αέρα (ή καθαρό οξυγόνο) στο νερό. Όλες οι περιπτώσεις τεχνητού αερισμού, αποτελούν στην ουσία διεργασίες αύξησης της διεπιφάνειας νερού-αέρα, γεγονός που μεγεθύνει τη διάχυση.

5.2. ΟΞΥΓΟΝΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Η πτώση του νερού από ένα επίπεδο σε ένα χαμηλότερο απελευθερώνει ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη διεπιφάνεια νερού-αέρα επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη διάχυση του οξυγόνου στο νερό.

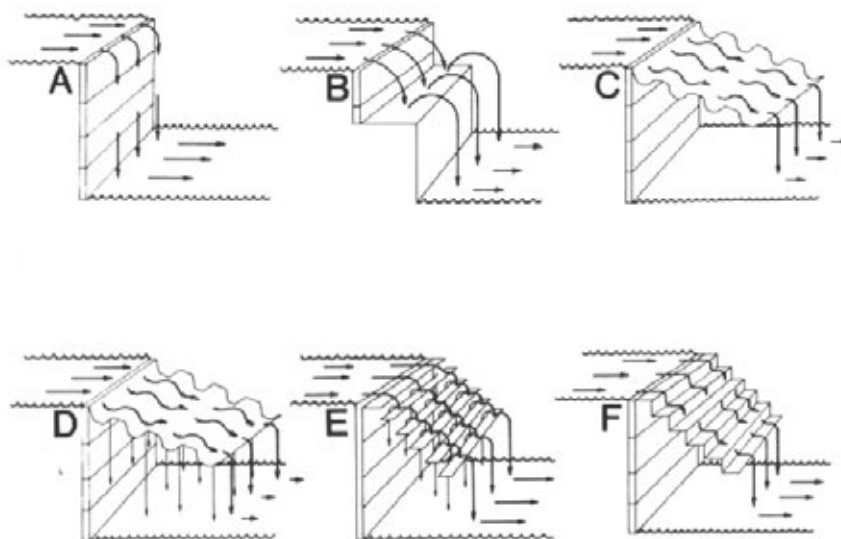
Εφόσον η κλίση του εδάφους της μονάδας εκτροφής το επιτρέπει, η «βαρυτική» οξυγόνωση του νερού μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ οικονομικό και αποτελεσματικό τρόπο. Στο Σχήμα 5.1 παριστάνονται διάφοροι τρόποι βαρυτικής οξυγόνωσης και διαμορφώσεις των κλιμάκων (σκαλοπατιών) που σκοπό έχουν τη μεγιστοποίηση της διεπιφάνειας νερού-αέρα.

Η **αποδοτικότητα** (efficiency) των μεθόδων ή συσκευών αερισμού του νερού υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E = 100 \cdot \frac{C_b - C_a}{C_e - C_a}$$

όπου: **E** = αποδοτικότητα της κατασκευής αερισμού, **C_b** = DO σε mg/L στο κάτω μέρος της κατασκευής (μετά την πτώση), **C_a** = DO σε mg/L στο άνω μέρος (πριν την πτώση), **C_e** = DO σε mg/L στην κατάσταση ισορροπίας.

Στον Πίνακα 5.1 καταγράφονται οι υπολογισθείσες αποδοτικότητες ορισμένων βαρυτικών αεριστήρων για διάφορα ύψη πτώσης.



Σχήμα 5.1. Διαγραμματική απεικόνιση βαρυτικών αεριστήρων. **A:** απλή πτώση, **B:** πτώση με πιτσιλιστήρα, **C:** επικλινής κυματοειδής επιφάνεια, **D:** επικλινής κυματοειδής επιφάνεια με τρύπες, **E:** βαθμιδωτή πτώση μέσω δικτυωτού, **F:** καταρράκτης. (Πηγή: Soderberg, R.W., *Flowing Water Fish Culture*, 1995).

Πίνακας 5.1. Επιλεγμένες τιμές αποδοτικότητας (E) % βαρυτικών κατασκευών οξυγόνωσης για ορισμένες υψομετρικές διαφορές πτώσης νερού. (Πηγή: Soderberg, R.W., *Progressive Fish Culturist*, 44, 91, 1982)

Κατασκευή	Υψος πτώσης (cm)	Αποδοτικότητα (E) (%)
Απλή πτώση	22,9	6,2
	30,52	9,3
	61,02	12,4
Επικλινής κυματοειδής επιφάνεια	30,5	25,3
	61,0	43,0
Επικλινής κυματοειδής επιφάνεια με τρύπες	30,5	30,1
	61,0	50,1
Πτώση με πιτσιλιστήρα	22,9	14,1
	30,52	24,7
	61,02	38,1
Βαθμιδωτή πτώση μέσω δικτυωτού	30,5	34,0
	61,0	56,2
Καταρράκτης	25,0	23,0
	50,0	33,4
	75,0	41,2
	100,0	52,4

Παράδειγμα υπολογισμών: Μεταξύ δύο δεξαμενών εκτροφής ψαριών υπάρχει υψομετρική διαφορά 60 cm και το νερό εξερχόμενο από την πρώτη δεξαμενή πέφτει στη δεύτερη με απλή πτώση. Η θερμοκρασία του νερού είναι 15 °C και η μονάδα βρίσκεται σε υψόμετρο 250 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Εάν στην πρώτη δεξαμενή υπάρχει τέτοια ιχθυοφόρτιση που το διαλυμένο οξυγόνο είναι 6 mg/L, πόσο θα αυξηθεί το διαλυμένο οξυγόνο στη δεύτερη δεξαμενή σε σχέση με την πρώτη; Της πόσο θα αυξηθεί αν χρησιμοποιηθεί βαθμιδωτή πτώση μέσω δικτυωτού;

Λύση: Πρώτα υπολογίζεται η διορθωμένη συγκέντρωση ισορροπίας (C_e) για το οξυγόνο στη συγκεκριμένη θερμοκρασία και υψόμετρο. Από τον Πίνακα 4.4 η στάνταρτ C_e (για 1 atm) για της 15 °C είναι 9,76 mg/L. Διορθώνοντας για το υψόμετρο έχουμε $9,76 \left(\frac{1}{1 + \frac{250}{7600}} \right) = 0,968$, συνεπώς η τελική $C_e = 9,76 \cdot 0,968 = 9,45$ mg/L.

Με μετασχηματισμό του τύπου της αποδοτικότητας (παραπάνω) και επειδή από τον Πίνακα 5.1 για υψομετρική διαφορά 60 cm η αποδοτικότητα (E) της απλής πτώσης είναι 12,4, έχουμε: $C_b = \frac{12,4(9,45 - 6)}{100} + 6 = 6,43$ mg/L. Συνεπώς, η πτώση του νερού θα δημιουργήσει διαλυμένο οξυγόνο (DO) 6,43 mg/L στη δεύτερη δεξαμενή (C_b), δηλαδή αύξηση κατά 0,43 mg/L.

Εάν αντί για απλή πτώση χρησιμοποιηθεί βαθμιδωτή πτώση μέσω δικτυωτού, η αποδοτικότητα (E) θα είναι 56,2 (Πίνακας 5.1).

Συνεπώς, $C_b = \frac{56,2(9,45 - 6)}{100} + 6 = 7,94$ mg/L, δηλαδή αύξηση κατά 1,94 mg/L, σχεδόν 5πλάσια σε σχέση με την απλή πτώση.

5.3. ΟΞΥΓΟΝΩΣΗ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

5.3.1. Μηχανές επιφανειακής ανάδευσης

Οι μηχανές επιφανειακής ανάδευσης του νερού με σκοπό την οξυγόνωσή του, είναι πολύ εύκολες στην εγκατάστασή της και στη χρήση της. Επιπλέον στο νερό με τη βοήθεια πλωτήρων και σταθεροποιούνται στα σημεία που επιθυμούμε. Οι διάφοροι τύποι αυτών των συσκευών αξιολογούνται και συγκρίνονται ως της την αποδοτικότητά της, στη βάση της ικανότητάς των να μεταφέρουν οξυγόνο στο νερό. Οι δοκιμές στη λειτουργία της γίνονται σε στάνταρτ ατμοσφαιρική πίεση (760 mm Hg), θερμοκρασία 20 °C, και μηδενικό περιεχόμενο οξυγόνου στο νερό που πρόκειται να αεριστεί. Μετριέται η ποσότητα του οξυγόνου που προστίθεται στο νερό σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και με μια ορισμένη χρησιμοποιούμενη ισχύ.

Οι κατασκευαστές που προμηθεύουν της μηχανές αυτές, δίνουν και στοιχεία της αποδοτικότητάς της στην πρόσθεση οξυγόνου στο νερό, ως κιλά οξυγόνου ανά κιλοβάτ ισχύος (στον άξονα της μηχανής) ανά ώρα (kg/kWh). Με βάση την τιμή αυτή μπορούμε να συγκρίνουμε τα προσφερόμενα μοντέλα. Της υδατοκαλλιέργειες τα ελάχιστα επίπεδα οξυγόνου στο νερό κυμαίνονται σε 3 – 7 mg/L. Ετσι λοιπόν στην πράξη, ο τεχνητός αερισμός του νερού γίνεται με ολοένα και μικρότερη αποδοτικότητα καθώς προσεγγίζονται τα επίπεδα κορεσμού, δηλαδή χρειάζεται όλο και περισσότερη ισχύς για κάθε μονάδα DO που προστίθεται στο νερό.

Η πραγματική οξυγόνωση του νερού σε επίπεδα άνω των 95% κορεσμού είναι αντιοικονομική λόγω της σπατάλης ισχύος. Κορεσμός 90% θεωρείται ικανοποιητικός για

την πλειονότητα των περιπτώσεων της υδατοκαλλιέργειας. Σε κάθε περίπτωση, η πραγματική μεταφορά οξυγόνου στο νερό από της μηχανικούς αεριστήρες (αποδοτικότητα), θα είναι μικρότερη από τη θεωρητική που της περιγράφηκε παραπάνω υπολογίζεται σε στάνταρτ συνθήκες.

Σε στάνταρτ συνθήκες οι επιφανειακοί αεριστήρες παρουσιάζουν αποδοτικότητες 1,8 – 2,3 kg/kWh (κιλά οξυγόνου ανά κιλοβατώρα μηχανής). Σε πραγματικές συνθήκες κατά πως αναφέρθηκε παραπάνω, έχουν μετρηθεί τιμές της 0,61 kg/kWh σε ρυπασμένα ποτάμια νερά ή 0,83 kg/kWh σε δεξαμενές πεστροφοκαλλιέργειας με ψάρια τρεφόμενα πολύ και με αερισμό που άρχισε να λειτουργεί όταν το επίπεδο του διαλυμένου οξυγόνου (DO σε μονάδες πίεσης) έπεσε στα 75 mm Hg. Γενικά, μια προσεγγιστική τιμή για της ανάγκες αερισμού της υδατοκαλλιέργειας μπορεί να θεωρηθεί η 0,6 kg/kWh, όταν δεν είναι πρακτικά εφικτή η δυνατότητα υπολογισμού με πιο εξειδικευμένες μεθόδους. Πάντως ο σωστός και ακριβής υπολογισμός των αναγκών αερισμού του νερού, προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$RT = RS \frac{(\beta C_{e_t} - C_a)(1,025^{T-20})(\alpha)}{C_{e_{20}}} \quad (5.1)$$

όπου: **RT** = πραγματική μεταφορά οξυγόνου στο νερό (kg/kWh)

RS = μεταφορά οξυγόνου σε στάνταρτ συνθήκες (760 mm Hg, 20 °C, 0 mg/L DO αρχικά)

C_{e_t} = συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου στον τόπο του αερισμού

C_a = η συγκέντρωση του οξυγόνου στο νερό που θα αεριστεί

T = θερμοκρασία του νερού σε °C

C_{e₂₀} = συγκέντρωση ισορροπίας του οξυγόνου σε στάνταρτ συνθήκες (760 mm Hg, 20 °C)

β = $\frac{\text{Διαλυτότητα DO στο αεριζόμενο νερό}}{\text{Διαλυτότητα DO στο καθαρό νερό}} = \sim 1,0$

α = $\frac{\text{Μεταφορά DO στο αεριζόμενο νερό}}{\text{Μεταφορά DO στο καθαρό νερό}} = \sim 0,85$

Της υδατοκαλλιέργειας και όπου το νερό δεν είναι υπερβολικά ρυπασμένο οι συντελεστές β και α λαμβάνουν τιμές 1,0 και 0,85 αντίστοιχα. Της η διαλυτότητα (συγκέντρωση κορεσμού) του οξυγόνου σε στάνταρτ συνθήκες (760 mm Hg, 20 °C) είναι 8,84 mg/L (Πίνακας 4.4). Συνεπώς η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στην παρακάτω μορφή, με σκοπό να είναι εύκολα χρησιμοποιήσιμη και συνάμα ακριβής της υπολογισμού.

$$RT = RS \frac{(C_{e_t} - C_a)(1,025^{T-20})(0,85)}{8,84}$$

Παράδειγμα: Χρησιμοποιούμε ένα επιφανειακό αναδευτήρα, του οποίου ο κατασκευαστής δίδει ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου 1,8 kg/kWh σε στάνταρτ συνθήκες (760 mm Hg, 20 °C, 0 mg/L DO). Θέλουμε να τον χρησιμοποιήσουμε σε μία υδατοκαλλιεργητική εγκατάσταση με νερό θερμοκρασίας 15 °C και όπου η βαρομετρική πίεση είναι 730 mm Hg. Το διαλυμένο οξυγόνο του νερού (DO) που θέλουμε να

αερίσουμε είναι 5,0 mg/L. Πόση θα είναι η πραγματική ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου της συγκεκριμένης συσκευής της παραπάνω συνθήκης της εγκατάστασης;

Απάντηση: Πρώτα υπολογίζουμε τη συγκέντρωση ισορροπίας (κορεσμού) του νερού σε οξυγόνο (C_e) για τη θερμοκρασία των 15 °C. Από τον Πίνακα 4.4 βρίσκουμε 9,76 mg/L. Επειδή αυτή η τιμή είναι για στάνταρτ πίεση 760 mm Hg (1 atm), διορθώνουμε για την πίεση των 730 mm Hg της περίπτωσης της, κατά πως επεξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή: $C_{e_t} = (730/760) \cdot 9,76 = 9,37$ mg/L.

Συνεπώς τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε έχουν ως εξής:

$$RS = 1,8 \text{ kg/kWh}$$

$$C_{e_t} = 9,37 \text{ mg/L}$$

$$C_a = 5,0 \text{ mg/L}$$

$$T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Αντικαθιστώντας στο σχετικό τύπο:

$$RT = 1,8 \frac{(9,37 - 5,0)(1,025^{15-20})(0,85)}{8,84} = 0,67 \text{ kg/kWh}$$

Εχοντας υπολογίσει την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου μιας ορισμένης συσκευής (RT) μπορούμε να υπολογίσουμε και άλλα μεγέθη. Για παράδειγμα της συνθήκης του παραπάνω παραδείγματος και με δεδομένη τη ροή νερού στα 3000 L/min θα υπολογίσουμε πόση θα είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό σε σημείο μετά τον αεριστήρα (C_b), εάν χρησιμοποιήσουμε έναν ισχυρότερο αεριστήρα της τάξεως του 1,3 kW. Θα έχουμε:

$$C_b = C_a + \frac{0,67 \text{ Kg}}{\text{kWh}} \cdot \frac{10^6 \text{ mg}}{\text{kg}} \cdot 1,3 \text{ kW} \cdot \frac{\text{min}}{3000 \text{ L}} \cdot \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}} = 4,84 \text{ mg/L}$$

Συνεπώς: $C_b = 5,0 + 4,84 = 9,84$ mg/L.

Παρομοίως μπορούμε να υπολογίσουμε και την αναγκαία ισχύ της αεριστήρα που απαιτείται για να επιτευχθεί ένα ορισμένο επίπεδο αερισμού. Για παράδειγμα σε συνθήκες της με την προηγούμενη κατάσταση, επιθυμούμε να εγκαταστήσουμε έναν αεριστήρα που θα επαναφέρει το επίπεδο του χρησιμοποιημένου νερού στο 90% του κορεσμού.

Ο ρυθμός πρόσθεσης οξυγόνου στο νερό θα υπολογισθεί της παρακάτω:

$$0,9(9,37) - 5,0 = 3,43 \text{ mg/L}, \quad 3,43 \text{ mg/L} \cdot \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ mg}} \cdot \frac{3000 \text{ L}}{\text{min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} = \frac{0,62 \text{ kg}}{\text{hr}}$$

προστίθενται 0,62 kg O₂/hr. Η αναγκαία ισχύς στον άξονα της απαιτούμενης συσκευής αερισμού για να επιτύχει αυτό το ρυθμό πρόσθεσης οξυγόνου στο νερό θα είναι:

$$\frac{0,62 \text{ kg}}{\text{hr}} \cdot \frac{\text{kWh}}{0,67 \text{ kg}} = 0,92 \text{ kW}.$$

Δηλαδή πρέπει να χρησιμοποιήσουμε αεριστήρα ισχύος 0,92 kW.

5.3.3. . Αεριστήρες διάχυσης αέρα

Οι αεριστήρες διάχυσης αέρα εισάγουν αέρα ή καθαρό οξυγόνο μέσα στη στήλη του νερού. Η αποτελεσματικότητά της ως της την οξυγόνωση του νερού εξαρτάται από:

- Το μέγεθος των φυσαλίδων που δημιουργούν, επειδή η κάθε φυσαλίδα ανάλογα με τον όγκο της προσφέρει και διαφορετικού μεγέθους επιφάνεια επαφής αέρα – νερού. Είναι προφανές ότι η διεπιφάνεια αέρα – νερού είναι η κρισιμότερη παράμετρος που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της οξυγόνωσης. Η διεπιφάνεια μπορεί να αυξηθεί με τη μείωση του μεγέθους των φυσαλίδων. Δηλαδή για μια ορισμένη παροχή αέρα (ή καθαρού οξυγόνου) στο νερό, η διασπορά σε πολύ μικρές φυσαλίδες συγκριτικά με μεγαλύτερες, για τον ορισμένο όγκο αέρα που εμφυσάται στο νερό, θα προσφέρει συνολικά μεγαλύτερη επιφάνεια (διεπιφάνεια) αέρα – νερού με αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάχυση του οξυγόνου στο νερό.
- Την πίεση του οξυγόνου στη φυσαλίδα, επειδή επηρεάζει τη μεταφορά του οξυγόνου από τον αέρα (ή το καθαρό οξυγόνο) της φυσαλίδας στο νερό. Η αποτελεσματικότητά της οξυγόνωσης εξαρτάται από τη διαφορά της πίεσης του οξυγόνου στη φυσαλίδα και στο νερό. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά τόσο αποτελεσματικότερη και η διάχυση (διάλυση) του οξυγόνου στο νερό. Χρησιμοποιώντας καθαρό οξυγόνο, συγκριτικά με απλό αέρα, η μερική πίεση του οξυγόνου στη φυσαλίδα αυξάνεται και διαλύεται αποτελεσματικότερα στο νερό. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε απλό ατμοσφαιρικό αέρα, η αύξηση της πίεσής του θα επιφέρει καλύτερη διάλυση του οξυγόνου του στο νερό, της πρόκειται για μια παρακινδυνευμένη ενέργεια επειδή ο αέρας εκτός από οξυγόνο περιέχει και άζωτο το οποίο μπορεί να προκαλέσει υπερκορεσμό αζώτου με καταστροφικά αποτελέσματα για τα ψάρια.
- Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο διατρέχει η φυσαλίδα τη στήλη του νερού, επειδή μεγαλύτερη διαδρομή σημαίνει και αποτελεσματικότερη διάχυση του οξυγόνου στο νερό.

Ανάλογα με το μέγεθος των φυσαλίδων και τη διαδρομή της στη στήλη του νερού, η ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου των αεριστήρων διάχυσης κυμαίνεται σε 0,6 – 2,0 kg/kWh. Της και με της επιφανειακούς αεριστήρες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και εδώ την εξίσωση 5.1 για να συνδυάσουμε της απαραίτητες μεταβλητές και να υπολογίσουμε την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου. Της η μεταβλητή C_{e1} της εξίσωσης 5.1 θα πρέπει να «διορθωθεί» ως της τη μερική πίεση του οξυγόνου στη φυσαλίδα (C_{e1}).

Για παράδειγμα: αν εγχύουμε καθαρό οξυγόνο με πίεση ίση της ατμοσφαιρικής (1 atm, ή 760 mm Hg) τότε:

$$C_{e1}' = C_{e1} \times \frac{760 \text{ mm Hg}}{159,2 \text{ mm Hg}}, \text{ όπου: } C_{e1}' = \text{η διαλυτότητα του οξυγόνου σε συνθήκες αερίου}$$

φυσαλίδας ως καθαρό οξυγόνο (100% οξυγόνο), C_{e1} = η διαλυτότητα του οξυγόνου σε συνθήκες αερίου φυσαλίδας ως ατμοσφαιρικός αέρας (21% οξυγόνο), 760 mm Hg = η μερική πίεση του οξυγόνου στην κατάσταση του καθαρού οξυγόνου σε πίεση αερίου φυσαλίδας 1 atm και 159,2 mm Hg = η μερική πίεση του οξυγόνου στον αέρα σε πίεση αερίου φυσαλίδας 1 atm.

Η διορθωμένη C_{e1}' για τα συστήματα διάχυσης αέρα όταν χρησιμοποιείται πεπιεσμένος αέρας (πίεση > 1 atm) είναι:

$$C_{e_t}' = C_{e_t} \times \frac{\text{πίεση του πεπιεσμένου αέρα}}{\text{ατμοσφαιρική πίεση}}$$

Συνήθως οι αεροσυμπιεστές που προμηθεύουν πεπιεσμένο αέρα δίδουν την πίεση σε pounds per square inch (psi). Η μετατροπή σε mm Hg γίνεται από τη σχέση:

$$1 \text{ mm Hg} = 0,0193 \text{ psi}$$

Το καθαρό οξυγόνο μπορούμε να το προμηθευτούμε σε τρεις μορφές. Ως αέριο οξυγόνο υπό μεγάλη πίεση σε μπουκάλες, ως υγρό οξυγόνο υπό εξαιρετικά μεγάλη πίεση σε μεγάλα δοχεία και ως αέριο οξυγόνο υπό μικρότερη πίεση από τα προηγούμενα το οποίο της παράγεται συνεχώς στον τόπο χρησιμοποίησής του από ειδικές μηχανές εναλλασσόμενης προσρόφησης δια πίεσεως (Pressure Swing Adsorption ή PSA). Οι μηχανές τύπου PSA διοχετεύουν ατμοσφαιρικό αέρα υπό πίεση ο οποίος παράγεται από αεροσυμπιεστή, σε ένα δίδυμο σύστημα δοχείων που περιέχουν ειδικές ρητίνες. Ο ατμοσφαιρικός αέρας που διοχετεύεται στα δοχεία αυτά είναι ως γνωστόν μίγμα δύο κυρίως αερίων, αζώτου και οξυγόνου. Το άζωτο δεσμεύεται δια προσροφήσεως στη ρητίνη του δοχείου, αφήνοντας μόνο του το οξυγόνο να διοχετευθεί σε δοχείο αποθήκευσης. Το άζωτο που προσροφήθηκε «απελευθερώνεται» κατόπιν. Δια της συνεχούς λειτουργίας του όλου συστήματος, τα δίδυμα δοχεία λειτουργούν εναλλάξ και όταν το ένα γεμίζει με άζωτο το άλλο απαλλάσσεται από το άζωτο, έτοιμο να δεχθεί κατόπιν ένα νέο φορτίο αζώτου. Καθαρό αποτέλεσμα αυτών των κυκλικών διεργασιών είναι η συνεχής παραγωγή οξυγόνου καθαρότητας άνω του 90%. Το οξυγόνο αποθηκεύεται σε δοχείο πίεσης συνήθως υπό πίεση περί τα 55 psi και είναι συνεχώς διαθέσιμο για διανομή και χρησιμοποίηση της δεξαμενής μέσω ρυθμιζόμενης βαλβίδας εκτόνωσης.

Οι μηχανές PSA αποτελούν μια πολύ καλή λύση συνεχούς προμήθειας καθαρού οξυγόνου και της απαλλάσσουν από την επαναλαμβανόμενη αγορά του από της εταιρείες προμήθειας. Της, θα πρέπει να διασφαλιστεί η συνεχής και απρόσκοπτη λειτουργία της, επειδή από αυτές θα καλύπτεται η ανάγκη για οξυγόνο της εκτρεφόμενης βιομάζας. Δεν επιτρέπεται να χαλάσουν και για το λόγο αυτό θα πρέπει να ακολουθούνται εξαιρετικά επιμελημένες πρακτικές συντήρησης. Η μεγίστη διασφάλιση επιτυγχάνεται με την αγορά και εφεδρικής μηχανής PSA.

Το ποιο σύστημα προμήθειας καθαρού οξυγόνου θα ακολουθήσει ο εκτροφέας είναι θέμα μελέτης του κόστους που θα επιβαρυνθεί. Το αν θα διαλέξει δηλαδή να προμηθεύεται τακτικά οξυγόνο από εταιρεία ή θα εγκαταστήσει μηχανή PSA στη μονάδα του, εξαρτάται από το κεφάλαιο που διαθέτει για εξοπλισμό, τη βιομάζα που θα εκθρέψει, τον κύκλο παραγωγής και τελικά την αποτελεσματική διαχείριση της εκτροφής που θα επιτύχει.

Οι μηχανές PSA παράγουν αέριο οξυγόνο σε ποσότητες 2,5 m³/hr (3,57 kg/hr) τα μικρότερα μοντέλα, έως 17 m³/hr (24,3 kg/hr) τα μεγαλύτερα (**0,7 ml O₂ = 1 mg O₂ ή 1,428 mg O₂ = 1 ml O₂**). Τα μεγαλύτερα μοντέλα κοστίζουν βέβαια περισσότερο, αλλά έχουν πολύ μικρότερο κόστος λειτουργίας για κάθε μονάδα καθαρού οξυγόνου που παράγουν. Της παράδειγμα (με τιμές κόστους αν όχι απόλυτα, τουλάχιστον ρεαλιστικά προσεγγιστικές) θα αναδείξει τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών.

Μια μεγάλη συσκευή PSA ικανή να παράγει καθαρό οξυγόνο με ρυθμό 17 m³/hr (25 Kg/hr) κοστίζει 20.000 ευρώ. Για τη λειτουργία της θα απαιτηθεί και η αγορά ηλεκτροκίνητου αεροσυμπιεστή ισχύος 40 Hp (για να προμηθεύει πεπιεσμένο αέρα) καθώς και πετρελαιοκίνητου ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/Z) για περιπτώσεις διακοπής του ηλεκτρικού. Αυτά θα κοστίσουν επιπλέον 20.000 ευρώ.

Εναλλακτικά, μια μικρή συσκευή PSA ικανή να παράγει καθαρό οξυγόνο 2,5 m³/hr (3,1 kg/hr) κοστίζει 4000 ευρώ. Για τη λειτουργία της θα απαιτηθεί και η αγορά ηλεκτροκίνητου αεροσυμπιεστή ισχύος 9,4 HP που μαζί με το πετρελαιοκίνητο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος θα κοστίσουν επιπλέον 8500 ευρώ.

Το κόστος του ηλεκτρικού εκτιμάται στα 0,05 ευρώ/kWh. Το ηλεκτρικό ρεύμα θα καταναλώνεται συνεχώς από τον αεροσυμπιεστή. Η κατανάλωση ηλεκτρικού από τη μονάδα PSA είναι ελάχιστη και πρακτικά, για της υπολογισμούς του κόστους, γίνεται αμελητέα αν υπολογίσουμε και το γεγονός ότι ο αεροσυμπιεστής δεν θα λειτουργεί συνεχώς αλλά με διακοπές, όταν αυτόματα θα τίθεται σε κατάσταση αναμονής μόλις η πίεση του αέρα φθάσει στο ανώτατο επίπεδο (συνήθως γύρω στα 150 psi). Με βάση τα παραπάνω, το κόστος του καθαρού οξυγόνου που θα παράγεται από τη μεγαλύτερη μονάδα PSA θα είναι:

$$40 \text{ HP} \cdot \frac{0,746 \text{ kW}}{\text{HP}} \cdot \frac{0,05 \text{ ευρώ}}{\text{kWh}} = \frac{1,492 \text{ ευρώ}}{\text{hr}} \cdot \frac{\text{hr}}{25 \text{ kg O}_2} = 0,06 \text{ ευρώ/kg O}_2$$

Παρόμοιος υπολογισμός για τη μικρότερη μηχανή δίδει κόστος **0,113 ευρώ/kg O₂** δηλαδή σχεδόν διπλάσιο κόστος απ'ότι η μεγαλύτερη συσκευή.

Στην περίπτωση της προμήθειας καθαρού οξυγόνου από εταιρεία παραγωγής, θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι η αποθήκευσή του ως υγρό, γίνεται σε ποικίλου μεγέθους ειδικά κρυογενικά δοχεία είτε μικρού (0,15 m³) είτε πολύ μεγάλου (40 m³) όγκου. Κάθε κυβικό μέτρο υγρού οξυγόνου εξαχνούμενο για να χρησιμοποιηθεί, παρέχει 1145 kg αέριο οξυγόνο (1 m³ O₂ = 1145 kg O₂).

Το υγρό οξυγόνο μεταφέρεται και παραδίδεται στη μονάδα με φορτηγά βυτία τα οποία γεμίζουν τα κρυογενικά δοχεία τα οποία είτε έχουν αγορασθεί είτε έχουν νοικιασθεί από την ίδια εταιρεία προμήθειας του οξυγόνου. Το κόστος προμήθειας υγρού οξυγόνου κυμαίνεται σε 0,15 – 0,3 ευρώ/kg, ανάλογα με την απόσταση από το εργοστάσιο παραγωγής έως τη μονάδα παράδοσής του.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι ανάλογα με της ανάγκες σε οξυγόνο του εκτρεφόμενου πληθυσμού, μπορεί να εκτιμηθεί το κόστος που θα αναλάβει ο παραγωγός της το συμφέρον της παραγωγής.

Η απόδοση ως της τη διάλυση του οξυγόνου στο νερό φθάνει μέχρι και 90% για τα συστήματα αερισμού διάχυσης που χρησιμοποιούν καθαρό οξυγόνο και μέχρι 40% όταν χρησιμοποιούν ατμοσφαιρικό αέρα. Συνεπώς συνιστάται θερμά η χρησιμοποίηση καθαρού οξυγόνου, ιδιαίτερα όταν η εκτρεφόμενη βιομάζα είναι πολύ πυκνή και μεγάλη και ως εκ τούτου απαιτεί και μεγάλες ποσότητες τροφής.

Η αξιοποίηση της του διατιθέμενου για διάλυση στο νερό καθαρού οξυγόνου, πρέπει να γίνει με της κατάλληλες συσκευές προκειμένου να αξιοποιηθεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Θα πρέπει να διαλυθεί όσο το δυνατό αποτελεσματικότερα στο νερό έτσι ώστε να πλησιάσει το μέγιστο της απόδοσης (διάλυσης), που από πολλά πειραματικά δεδομένα έχει βρεθεί γύρω στο 90%.

Παρακάτω θα δοθούν στοιχεία σχετικά με της συσκευές για την οξυγόνωση του νερού, είτε με τη χρήση ατμοσφαιρικού αέρα είτε με τη χρήση καθαρού οξυγόνου.

5.3.3. Οξυγόνωση με τη χρήση ατμοσφαιρικού αέρα

5.3.3.1. Αεριστήρες διάχυσης (diffuser aerators)

Της η υδατοκαλλιέργεια γίνεται σε συμπαγείς δεξαμενές της οποίες κατά κανόνα η ιχθυοπυκνότητα είναι μεγάλη (στα συστήματα ανακύκλωσης του νερού 40 – 50 kg

ψαριών/m³), τότε θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι ο αερισμός δεν θα πρέπει να προκαλεί αναστάτωση στη διαβίωση των ψαριών στη στήλη του νερού.

Πιο αναλυτικά: Ο αερισμός του νερού σε σημείο πριν αυτό εισέλθει στη δεξαμενή δεν μπορεί της περισσότερες περιπτώσεις να καλύψει το έλλειμμα σε οξυγόνο. Η ποσότητα οξυγόνου που μπορεί να προστεθεί στο νερό με αυτό τον τρόπο είναι συνάρτηση της παροχής του νερού και του επιπέδου του υπάρχοντος διαλυμένου οξυγόνου. Η παροχή του νερού της δεν μπορεί να αυξηθεί απεριόριστα και έτσι η ικανότητα μεταφοράς του οξυγόνου είναι οριακή. Συνεπώς ο αερισμός θα πρέπει να γίνει μέσα στη δεξαμενή εκτροφής. Οι πιο αποτελεσματικές συσκευές για τέτοιου είδους αερισμό είναι, είτε οι επιφανειακοί αναμοχλευτές (**paddle-wheels**), είτε οι προπελο-αερο-αναροφητήρες (**propeller-aspirators** – Σχήμα 5.2, Α, Γ), είτε οι αντλίες κάθετης ανύψωσης (**vertical-lift-pumps** – Σχήμα 5.2, Ζ). Της, της αυτές οι συσκευές δημιουργούν υπερβολική ανάδευση του νερού μέσα στη δεξαμενή. Εκτός και αν η επιφάνεια της δεξαμενής είναι πολύ μεγάλη, η μέθοδος αυτή θα στρεσάρει τα ψάρια. Ο πλέον αποδοτικός τρόπος αερισμού χωρίς το προηγούμενο μειονέκτημα επιτυγχάνεται με **αεριστήρες διάχυσης αέρα** δια φυσαλίδων (**diffuser aerators** – Σχήμα 5.2, Β).

Οι αεριστήρες διάχυσης παρέχουν αέρα με πίεση όμοια με την ατμόσφαιρα, μέσω της συνεχούς λειτουργίας του φυσητήρα της και τελικά μέσω σωληνώσεων ο αέρας απελευθερώνεται στο βυθό της δεξαμενής εκτροφής από ειδικές πορώδεις πέτρες ως μικρές φυσαλίδες. Οι φυσαλίδες ανυψούμενες στη στήλη του νερού μεταφέρουν το οξυγόνο του αέρα της στο νερό.

Από μελέτες που έχουν γίνει, βρέθηκε ότι με της αεριστήρες διάχυσης μπορούν να μεταφερθούν στο νερό περί τα 1,3 kg O₂/kWh σε σταθερές συνθήκες αναφοράς (760 mm Hg, 20 °C, 0 mg/L DO, καθαρό νερό). Της της πραγματικές συνθήκες υδατοκαλλιεργειών η απόδοση είναι μικρότερη. Για να αναπνέουν χωρίς στρες τα ψάρια, το διαλυμένο οξυγόνο πρέπει να είναι τουλάχιστον 5 mg/L ή περισσότερο. Επιπρόσθετα, σε συνθήκες υδατοκαλλιεργειών σε «θερμά νερά» (χέλι, τιλάπια, κυπρίνος, κεφαλοειδή κ.ά.), όπου η θερμοκρασία συνήθως κυμαίνεται σε εύρος 20-26 °C, η παραπάνω απόδοση σε οξυγόνο των αεριστήρων διάχυσης μόλις που φθάνει το 35% της απόδοσης των στάνταρτ συνθηκών (760 mm Hg, 20 °C, 0 mg/L DO, καθαρό νερό) δηλαδή 0,455 kg O₂/kWh.

Σε ένα σύστημα εκτροφής με ανακυκλούμενο νερό, όπου τα αιωρούμενα στερεά φιλτράρονται και απομακρύνονται από το νερό αποτελεσματικά, οι απαιτήσεις σε οξυγόνο στο όλο σύστημα εκτιμώνται σε 50% της ποσότητας της τροφής (δηλαδή 0,5 kg O₂ / kg τροφής). Για παράδειγμα: Σε ένα σύστημα εκτροφής παρέχονται 4,5 kg τροφής σε μια περίοδο 18 ωρών. Η εκτιμώμενη κατανάλωση οξυγόνου θα είναι 0,125 kg O₂ /hr (4,5/2/18). Η πραγματική απόδοση μεταφοράς οξυγόνου από τον αεριστήρα της συνθήκης του συστήματος είναι της προαναφέρθηκε 0,455 kg O₂/kWh, συνεπώς για να καλυφθούν οι παραπάνω απαιτήσεις σε οξυγόνο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αεριστήρας διάχυσης τύπου φυσητήρα (blower) ισχύος 0,275 kW (0,125/0,455).

5.3.3.2. Αεριστήρας πακεταρισμένης στήλης (Packed Column Aerator ή PCA)

Με τον αεριστήρα πακεταρισμένης στήλης (αναφερόμενος ως PCA εντεύθεν), ειδικά αν της είναι τοποθετημένος σε σημείο πριν από την είσοδο του νερού στη δεξαμενή εκτροφής, μπορεί να επιτευχθεί ταυτόχρονα οξυγόνωση και απαερισμός του νερού από βλαβερά αέρια (CO₂ και N₂).

Της σύστημα PCA αποτελείται από μια στήλη διαμέτρου 25 – 30 cm και ύψους περί το 1,5 m, γεμάτη με πλαστικά «δαχτυλίδια» διαμέτρου 3-4 cm, παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στα βιολογικά φίλτρα (Σχήμα 5.2, E). Το νερό εισέρχεται στο άνω μέρος και ο αέρας ή το καθαρό οξυγόνο στο κάτω μέρος. Με τον τρόπο αυτό και με τα εμπόδια στη ροή που προκαλούν τα πλαστικά δαχτυλίδια, μεγιστοποιείται ο χρόνος επαφής νερού-αερίου, με αποτέλεσμα την καλύτερη διάχυση του οξυγόνου στο νερό.

Η απόδοση του PCA στην οξυγόνωση του νερού είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τον αεριστήρα διάχυσης ανά μονάδα ενέργειας. Για νερό που παρουσιάζει DO 4 mg/L πριν εισέλθει στον PCA, η απόδοση φθάνει περί τα 0,75 kg O₂/kWh με τη χρήση ατμοσφαιρικού αέρα. Το νούμερο αυτό αναφέρεται στην κατανάλωση ενέργειας του φυσητήρα (blower) που παρέχει αέρα στο PCA. Της στο όλο σύστημα θα πρέπει να υπολογισθεί και η κατανάλωση ενέργειας για να ανυψωθεί το νερό και στο ύψος των 1,5 m περίπου που είναι το ύψος της στήλης του PCA. Εάν χρησιμοποιηθεί καθαρό οξυγόνο τότε η απόδοση μεγαλώνει κατά πολύ περισσότερο και μπορεί να επιτευχθεί συγκέντρωση οξυγόνου μεγαλύτερη των 40 mg/L. Ίσως λοιπόν η χρήση του PCA είναι πιο συμφέρουσα να γίνεται με καθαρό οξυγόνο.

5.3.4. Οξυγόνωση με τη χρήση καθαρού οξυγόνου

Το καθαρό οξυγόνο χρησιμοποιείται κυρίως στα συστήματα υδατοκαλλιεργειών με ανακυκλούμενο νερό (κλειστά συστήματα), όπου η εντατικοποίηση της παραγωγής δημιουργεί συνθήκες κατά της οποίες ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου από τα ψάρια αλλά και από τα αερόβια βακτηρίδια του φίλτρου, ξεπερνά τη μέγιστη δυνατή πρόσθεση οξυγόνου από τον (ή της) οξυγονωτήρες αερισμού διάχυσης.

Το να προσθέσουμε καθαρό οξυγόνο της δεξαμενής εκτροφής μέσω απλής διάχυσης με φυσαλίδες, δεν είναι ότι καλύτερο από άποψη απόδοσης, μια και στην καλύτερη των περιπτώσεων λιγότερο από 40% του παρεχόμενου οξυγόνου θα διαλυθεί στο νερό. Πρόκειται λοιπόν για σπατάλη. Για το λόγο αυτό έχουν εφευρεθεί διάφοροι τύποι αεριστήρων (Σχήμα 5.3) που χρησιμοποιούν πολύ αποδοτικότερα το της διάλυση παρεχόμενο καθαρό οξυγόνο. Αυτοί είναι:

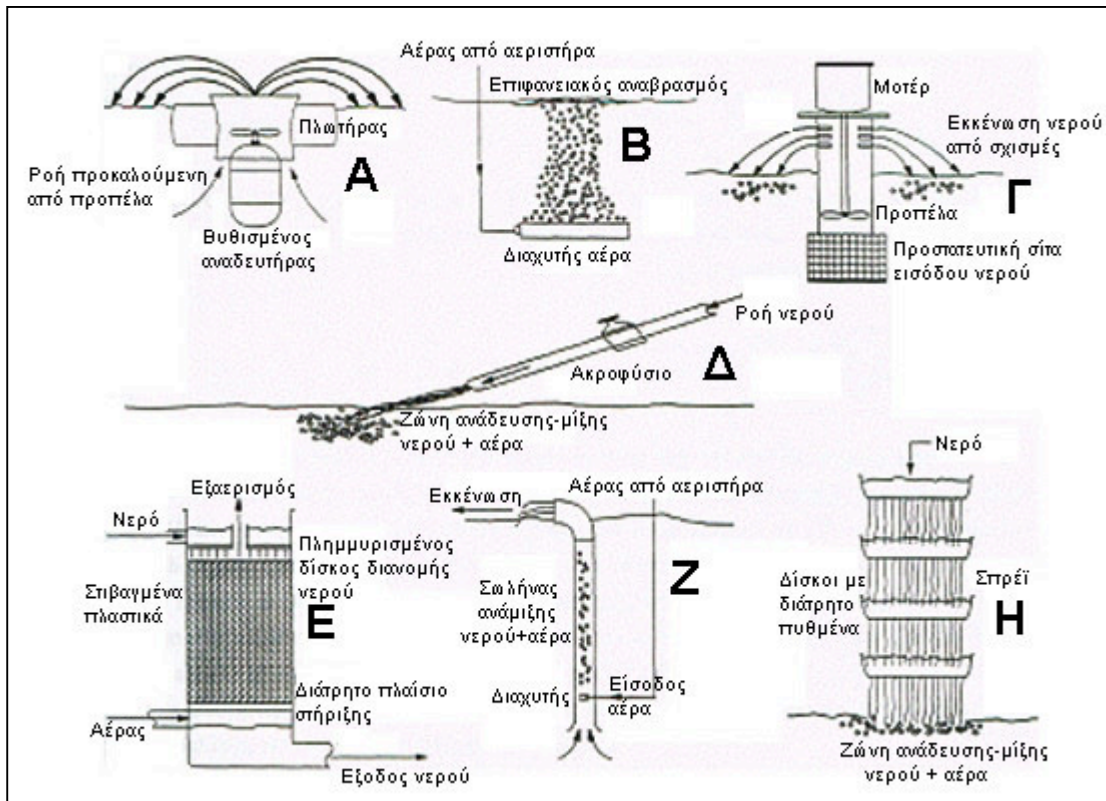
5.3.4.1. Θάλαμος καθοδικής ροής φυσαλίδων (Down-flow bubble contactor) ή κώνος οξυγόνωσης

Πρόκειται για μια κωνοειδή κατασκευή, στην οποία το νερό και το καθαρό οξυγόνο προστίθενται στο επάνω μέρος της (Σχήμα 5.3, Z). Η ταχύτητα του μίγματος νερού – οξυγόνου είναι μεγαλύτερη στο άνω μέρος και μειώνεται στο κάτω που είναι και η έξοδος της (της) δεξαμενής(ές). Τελικό αποτέλεσμα είναι ότι ο συνδυασμός της κίνησης της τα κάτω του νερού και της τα πάνω του αερίου εξισορροπεί την ανοδική κίνηση των φυσαλίδων, με αποτέλεσμα το μεγάλο χρόνο επαφής νερού οξυγόνου. Ως αποτέλεσμα έχουμε την πολύ ικανοποιητική διάχυση του οξυγόνου στο νερό με απόδοση που ξεπερνά το 90%. Έχουν αναφερθεί συγκεντρώσεις οξυγόνου άνω των 25 mg/L με πίεση εντός του κώνου μόλις 1 atm. Όσο πιο ψηλός είναι ο κώνος τόσο αποτελεσματικότερη η οξυγόνωση, της καθώς το ύψος των δεξαμενών είναι περιορισμένο, συνήθως χρησιμοποιείται από μία τέτοια συσκευή σε κάθε δεξαμενή. Η συσκευή μπορεί να βρίσκεται βυθισμένη μέσα στο νερό ή στηριγμένη άνωθεν της δεξαμενής.

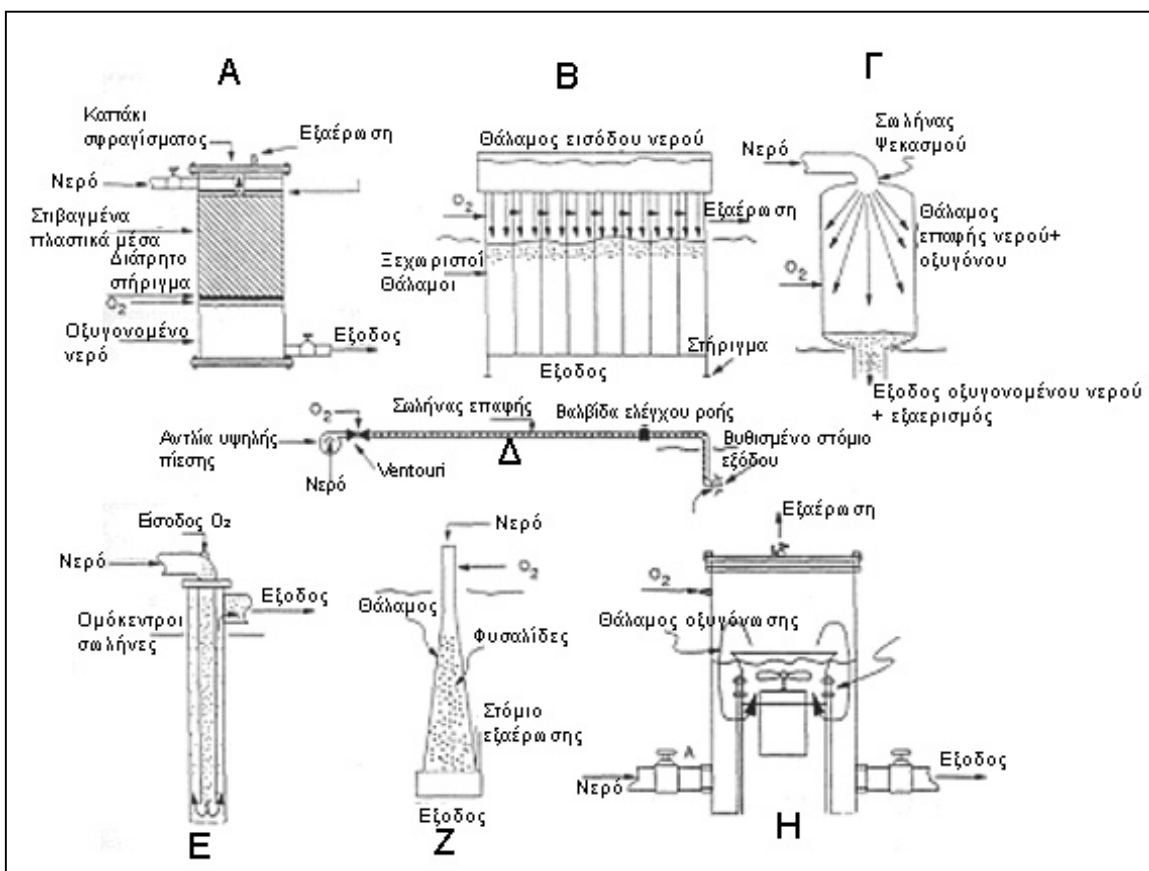
5.3.4.2. Διαχυτής U-σωλήνα

Εάν στο σύστημα οξυγόνωσης αυξηθεί η πίεση λειτουργίας του, τότε η απορρόφηση του οξυγόνου θα μεγιστοποιηθεί. Με το διαχυτή τύπου U-σωλήνα (Σχήματα 5.3, Ε και 5.4) επιτυγχάνεται εύκολα αύξηση της πίεσης του μίγματος νερού οξυγόνου που εισέρχεται στη συσκευή. Σε γενικές γραμμές πρόκειται για έναν επιμήκη κάθετο σωλήνα που στο επάνω μέρος του εισέρχεται το νερό και το καθαρό οξυγόνο με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να κυκλοφορήσει στο σωλήνα. Οι φυσαλίδες του οξυγόνου διατρέχουν βεβιασμένα μια μεγάλη διαδρομή με το νερό που της μεταφέρει και έτσι μεγιστοποιείται ο χρόνος επαφής αερίου-νερού. Η έξοδος του μίγματος αερίου – νερού στη δεξαμενή εκτροφής ποικίλλει ανάλογα με τη διαμόρφωση της συσκευής. Κατά την περίπτωση που ο σωλήνας καθόδου του μίγματος περιβάλλεται από εξωτερικό σωλήνα, τότε στο κάτω μέρος του ο εσωτερικός σωλήνας καθόδου είναι ανοικτός. Το μίγμα νερού και οξυγόνου θα εξέλθει από το κάτω ανοικτό μέρος του σωλήνα και θα ανέλθει στο χώρο που ορίζει ο εξωτερικός σωλήνας για να απελευθερωθεί στη δεξαμενή (Σχήμα 5.3, Ε). Κατά την περίπτωση που ο σωλήνας του μίγματος αερίου-νερού δεν περιβάλλεται από άλλο σωλήνα, διαμορφώνεται κατάλληλα στο κατώτατο σημείο του έτσι ώστε να σχηματίσει μια καμπύλη και ανέρχεται σχηματίζοντας κατασκευή τύπου U (εξ'ού και το όνομα). Στο άνω μέρος του σωλήνα ανόδου σχηματίζεται ορθή γωνία και ο σωλήνας καταλήγει να αδειάζει στη δεξαμενή. Της φαίνεται στο Σχήμα 5.4, στο σημείο αυτό υπάρχει θάλαμος συγκέντρωσης του μη διαλυθέντος οξυγόνου, το οποίο με την κατάλληλη παροχέτευση επανεισάγεται στο σύστημα με σκοπό τη μεγιστοποίηση της διαλυτότητάς του. Ανακύκλωση του μη διαλυθέντος οξυγόνου γίνεται και στον τύπο των ομόκεντρων σωλήνων.

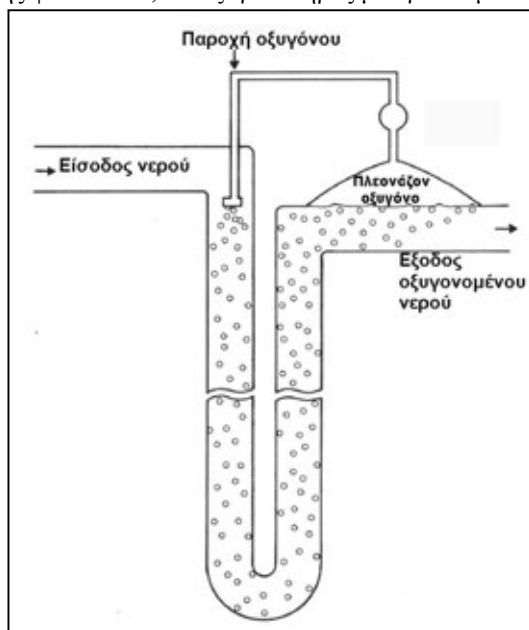
Για να είναι αποτελεσματικό το σύστημα του U-σωλήνα θα πρέπει το μήκος του σωλήνα να είναι μεγάλο. Είναι καλύτερα να είναι βυθισμένος στο έδαφος, σε βάθος τουλάχιστον 10 m, έτσι ώστε μόνο η είσοδος του νερού στο σωλήνα να βρίσκεται στο επίπεδο της επιφάνειας της δεξαμενής εκτροφής. Το οξυγόνο αναμιγνύεται με το νερό στην είσοδο του σωλήνα και «ταξιδεύει» με τη ροή του νερού για μια μεγάλη απόσταση μέχρι τον πυθμένα. Εξ'ατίας του μεγάλου βάθους λειτουργίας αυξάνεται η πίεση και επιταχύνεται η απορρόφηση του οξυγόνου. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι η χαμηλή απαίτηση σε ενέργεια για μια τέτοια μεγάλη διαδρομή του νερού με αύξηση της πίεσης (το νερό δεν υψώνεται στα 10 μέτρα αλλά ρέει της τα κάτω στα 10 μέτρα μέσα σε κλειστό σωλήνα). Επιπρόσθετα το σύστημα είναι ανθεκτικό στο βούλωμα του σωλήνα που μπορεί να προκύψει από την παγίδευση και συνεχή εναπόθεση των αιωρούμενων στερεών του νερού σε διάφορα σημεία. Ως κύριο μειονέκτημα της, αναγνωρίζεται η δυσκολία δημιουργίας τρύπας βάθους 10 μέτρων για να τοποθετηθεί το σύστημα. Της, άπαξ και γίνει και εάν έχει ληφθεί πρόνοια για πιθανή μελλοντική επισκευή, τότε το όλο εγχείρημα αξίζει τον κόπο. Η απορροφητικότητα του οξυγόνου στο νερό μπορεί και εδώ να φθάσει το 90%.



Σχήμα 5.2. Συσκευές που χρησιμοποιούνται για να φέρουν σε επαφή αέρα και νερό (αεριστήρες ή οξυγονωτήρες με χρήση ατμοσφαιρικού αέρα). **A:** επιπλέων επιφανειακός αναδευτήρας, **B:** βυθισμένος διαχυτής αέρα, **Γ:** επιφανειακός αναδευτήρας με σωλήνα μεταφοράς μίγματος αέρα-νερού, **Δ:** αεριστήρας ακροφυσίου, **Ε:** αεριστήρας πακεταρισμένης στήλης με αντίθετη ροή νερού – αέρα, **Ζ:** αεριστήρας τύπου air-lift, **Η:** καταρράκτης δια μέσου διάτρητων επιφανειών.



Σχήμα 5.3. Συσκευές που χρησιμοποιούνται για να φέρουν σε επαφή καθαρό οξυγόνο και νερό (οξυγονωτήρες με χρήση καθαρού οξυγόνου). **A:** οξυγονωτήρας πακεταρισμένης στήλης (packed column), **B:** ο ξυγονωτήρας πολλαπλών βαθμίδων χαμηλής πίεσης, **Γ:** οξυγονωτήρας με θάλαμο ψεκασμού, **Δ:** οξυγονωτήρας πλευρικής έγχυσης οξυγόνου, **Ε:** οξυγονωτήρας με διάχυση σε U-σωλήνα, **Ζ:** οξυγονωτήρας καθοδικής ροής φυσαλίδων, **Η:** οξυγονωτήρας με εγκλεισμένο επιφανειακό αναδευτήρα.



Σχήμα 5.4. Διαχυτής τύπου U-σωλήνα για την οξυγόνωση του νερού.

5.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕ ΥΠΕΡΚΟΡΕΣΜΟ ΑΖΩΤΟΥ

Της της υδατοκαλλιέργειας χρησιμοποιείται νερό κατευθείαν από υπόγειες πηγές, τότε ελλοχεύει ο κίνδυνος του διαλυμένου αερίου άζωτο. Δηλαδή το διαλυμένο στο νερό άζωτο (DN) βρίσκεται σε υπερκορεσμό. Πολύ συχνά το φαινόμενο αυτό συνοδεύεται από χαμηλά επίπεδα (υποκορεσμό) διαλυμένου οξυγόνου (DO), καθώς οι αερόβιοι μικροοργανισμοί του εδάφους έχουν καταναλώσει το υπάρχον οξυγόνο του νερού.

Η αιτία του παραπάνω φαινομένου βρίσκεται στην απότομη αλλαγή πίεσης και θερμοκρασίας του ψυχρού νερού (βροχής ή λιωμένου χιονιού) που εισέρχεται στον υπόγειο υδροφορέα του οποίου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη και η πίεση αυξημένη. Υπερκορεσμός μπορεί της να προκληθεί από ελαττωματική λειτουργία μηχανικών αεριστήρων, της π.χ. μια ελαττωματική αντλία νερού, στην οποία κάποια ανεπιθύμητη οπή ή ράγισμα επιτρέπει την αναρρόφηση αέρα και τη βεβιασμένη ανάμιξή του με το νερό, με αποτέλεσμα υπερκορεσμό σε άζωτο (N₂). Προσοχή της απαιτείται και στην ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού που γίνεται για να επιταχυνθεί η αύξηση των ψαριών. Η ανύψωση της θερμοκρασίας πρέπει να γίνει σταδιακά για να αποφευχθεί ο κίνδυνος υπερκορεσμού σε άζωτο.

Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι τιμές κορεσμού (Ce) σε mg/L του διαλυμένου στο νερό N₂ για στάνταρτ ατμοσφαιρική πίεση (1 atm ή 760 mmHg). Η αλλαγή στο επίπεδο κορεσμού από μία θερμοκρασία χαμηλότερη σε μία άλλη υψηλότερη, δίδεται από τον

τύπο: Κορεσμός (%) = $\frac{C_{e_{t_1}}}{C_{e_{t_2}}}$, όπου C_{e_{t₁}} και C_{e_{t₂}} οι συγκεντρώσεις κορεσμού

ισορροπίας του διαλυμένου αερίου στο νερό της αντίστοιχες θερμοκρασίες t₁ και t₂.

Για παράδειγμα: Γλυκό νερό θερμοκρασίας 15 °C και κορεσμένο σε ατμοσφαιρικά αέρια (οξυγόνο και άζωτο) θερμαίνεται της 25 °C. Ζητείται η μεταβολή στο επίπεδο κορεσμού για τα δύο αυτά αέρια.

Για το οξυγόνο οι συγκεντρώσεις ισορροπίας (Ce) της δύο θερμοκρασίες φαίνονται στον Πίνακα 4.4. Συνεπώς, 9,37/8,11 = 115,5 % κορεσμός για το διαλυμένο οξυγόνο. Για το άζωτο αντίστοιχα και από τον Πίνακα 5.2 προκύπτει: 16,36/13,64 = 120%. Δηλαδή ο προκύπτων υπερκορεσμός σε άζωτο είναι πιο μεγάλος.

Ο υπερκορεσμός σε διαλυμένα αέρια είναι επικίνδυνος για τα ψάρια, επειδή μπορεί να σχηματισθούν φυσαλίδες αέρα στα αιμοφόρα αγγεία της από αέρια που ευρισκόμενα σε περίσσεια δεν μεταβολίζονται. Για το οξυγόνο η κατάσταση αυτή δεν εγκυμονεί κινδύνους επειδή πρόκειται για μεταβολίσιμο αέριο, της όταν πρόκειται για το άζωτο που είναι αδρανές αέριο, η κατάσταση είναι επικίνδυνη.

Οι φυσαλίδες στο αίμα σχηματίζονται όταν η μερική πίεση του αερίου στο νερό ξεπερνά την ατμοσφαιρική και προκαλείται υπερκορεσμός. Αν για παράδειγμα η μερική πίεση της αερίου στο νερό είναι 850 mm Hg και η ατμοσφαιρική 760 mm Hg, τότε ο κορεσμός του αερίου στο νερό είναι 850/760 = 112%. Για κάθε 10 m βάθους η πίεση (υδροστατική) αυξάνεται κατά 1 atm (760 mm Hg). Οι φυσαλίδες μπορούν να σχηματιστούν εάν η διαφορά μεταξύ της ολικής πίεσης των διαλυμένων αερίων και της υδροστατικής είναι θετική (ΔP>0). Αν στο προηγούμενο παράδειγμα ένα ψάρι βρίσκεται σε βάθος 1 m, η υδροστατική πίεση είναι 76 mm Hg, και η ΔP = 850 – (760 + 76) = 14 mm Hg, δηλαδή μπορεί να σχηματιστούν φυσαλίδες. Εάν το ψάρι καταδυθεί στα 2 m τότε, ΔP= 850 – (760 + 152) = -62 mm Hg και δεν μπορούν να σχηματιστούν φυσαλίδες. Της της εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε, δεν μπορούμε να επαφιέμεθα για την

αποφυγή του κινδύνου των φυσαλίδων της κάθετες μετακινήσεις των ψαριών της δεξαμενής. Αυτό που πρέπει να γίνει είναι η εξάλειψη του υπερκορεσμού αν υπάρξει.

Από ερευνητικά δεδομένα η τιμή του 110% κορεσμού για το άζωτο θεωρείται η κρίσιμη ελάχιστη. Τα νερά στάδια των ψαριών είναι πιο ευαίσθητα και όσο αναπτύσσονται γίνονται πιο ανθεκτικά. Τα αυγά των ψαριών δεν φαίνεται να επηρεάζονται από τον υπερκορεσμό. Τα σαλμονιδή ψάρια (Salmonidae) είναι τα πιο ευαίσθητα στον υπερκορεσμό σε άζωτο από τα περισσότερα υπόλοιπα είδη ψαριών.

Ο υπερκορεσμός του νερού σε αέρια είναι μια ασταθής κατάσταση που παρουσιάζει την τάση να επιστρέψει στην κατάσταση ισορροπίας (Ce). Η αντιμετώπιση του υπερκορεσμού αζώτου μπορεί λοιπόν να γίνει με αερισμό (ή για να είμαστε ακριβείς με απαερισμό) του νερού, έτσι ώστε το πλεονάζον αέριο να διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Εξαιτίας των σχετικών της διαλυτοτήτων, το άζωτο (N₂) είναι μιάμιση περίπου φορές πιο εύκολα διαλυτό στο νερό από το οξυγόνο (O₂). Ετσι λοιπόν, η εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά του οξυγόνου στο νερό, μπορεί να μετατραπεί στην παρακάτω για να περιγράψει τον απαερισμό του διαλυμένου αζώτου (DN):

$$RT_{DN} = 1,5 RS_{DO} \frac{(C - Ce)(1,025^{T-20})(0,85)}{14,88} \text{ όπου:}$$

RT_{DN} = απομάκρυνση (απαερισμός) του DN της συνθήκης της υδατοκαλλιέργειας,

RS_{DO} = η μεταφορά του οξυγόνου για ένα συγκεκριμένο αεριστήρα σε στάνταρτ συνθήκες,

C = η συγκέντρωση του DN σε mg/L στην τοποθεσία της υδατοκαλλιέργειας,

Ce = η συγκέντρωση ισορροπίας του DN (κορεσμός 100%),

T_{ης} = η θερμοκρασία σε °C.

Η συγκέντρωση ισορροπίας του DN σε στάνταρτ συνθήκες (760 mm Hg, 20 °C) είναι 14,88 mg/L (Πίνακας 5.2).

Παράδειγμα: Υποθέτουμε ότι της μηχανικός αεριστήρας με ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου στο νερό 1,8 kg/kWh σε στ άνταρτ συνθήκες, χρησιμοποιείται για να απαερώσει το νερό από το ευρισκόμενο σε υπερκορεσμό DN. Η θερμοκρασία του νερού είναι 15 °C, η ολική πίεση των αερίων στα 120% του κορεσμού και η βαρομετρική πίεση 750 mm Hg. Εχουμε: RS_{DO} = 1,8 kg/kWh, Ce = 16,36 · (750/760) = 16,14 mg/L και C = 16,14 · 120% = 19,37 mg/L. Αντικαθιστώντας:

$$RT_{DN} = (1,5)(1,8) \frac{(19,37 - 16,36)(1,025^{-5})(0,85)}{14,88} = 0,41 \text{ kg DN/kWh που εκφράζει την}$$

ικανότητα μεταφοράς του διαλυμένου αζώτου (DN) στην ατμόσφαιρα του συγκεκριμένου αεριστήρα.

Χρησιμοποιούμε τον παραπάνω αεριστήρα για να απαερώσουμε το νερό που ρέει σε μια μονάδα υδατοκαλλιέργειας με ροή 600 gpm, υπερκορεσμό αζώτου 120% στην είσοδο του αεριστήρα και επιθυμητό αποτέλεσμα κορεσμού αζώτου 100%. Η ποσότητα του DN που πρέπει να απομακρυνθεί είναι: 19,37 – 16,14 = 3,23 mg/L. Κάνοντας της πράξεις:

$$\frac{3,23 \text{ mg}}{\text{L}} \cdot \frac{3,78 \text{ L}}{\text{gal}} \cdot \frac{600 \text{ gal}}{\text{min}} \cdot \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ mg}} \cdot \frac{\text{kWh}}{0,41 \text{ kg}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} \cdot \frac{\text{HP}}{0,746 \text{ kW}} = 1,43 \text{ HP}$$

Δηλαδή, απαιτείται αεριστήρας με μοτέρ ισχύος 1,43 HP.

Ο υπερκορεσμός με άζωτο παρουσιάζεται ως πρόβλημα συχνότερα σε εκτροφές ψαριών του «ψυχρού νερού» (σαλμονιδή κ.λπ.), παρά σε αυτές των ψαριών των «θερμών νερών» (κυπρίνοι, χέλια κ.λπ.). Στα κλειστά κυκλώματα και ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται ως σύστημα αερισμού το καθαρό οξυγόνο, η παρουσία διαλυμένου αζώτου θα είναι λιγότερη από 100% του επιπέδου κορεσμού του.

Πίνακας 5.2. Συγκεντρώσεις ισορροπίας (κορεσμού) σε mg/L (Ce) του διαλυμένου N₂ (DN), σε επιλεγμένες θερμοκρασίες και ατμοσφαιρική πίεση 1 atm.

Της °C	Ce N ₂	Της °C	Ce N ₂	Της °C	Ce N ₂
2	21,00	12	17,39	22	14,36
4	20,82	14	16,69	24	13,87
6	19,85	16	16,04	26	13,41
8	18,96	18	15,44	28	12,99
10	18,14	20	14,88	30	12,58

6. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

6.1. ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Η αμμωνία είναι το κύριο αζωτούχο υποπροϊόν του μεταβολισμού των ψαριών. Είναι μέγιστης σημασίας για της υδατοκαλλιέργειες επειδή είναι τοξική για τα ψάρια στη μη-ιονισμένη της μορφή (NH_3). Η αμμωνία του μεταβολισμού προέρχεται από την απαμίνωση των αμινοξέων που χρησιμοποιούνται για ενέργεια. Στην πλειονότητά της τα υδρόβια ζώα είναι *αμμωνιοτελικά*, αποβάλλοντας άνω του 50% του της απέκκριση αζώτου της ως αμμωνία, κυρίως δια μέσου των βραγχίων της.

Χρησιμοποιώντας υπολογισμούς στο μεταβολικό ισοζύγιο, μπορεί να υπολογιστεί η συμβολή της πρωτεΐνης των τροφών στη συσσώρευση της αμμωνίας στο νερό. Για κάθε 100 g πρωτεΐνης που ταΐζονται, 40 g θα μεταβολιστούν και θα αφομοιωθούν ως σάρκα ψαριών. Εάν (κατά ρεαλιστική προσέγγιση) από τα εναπομείναντα, τα 20 g δεν πεφθούν και τα 5 g δεν φαγωθούν, 35 g θα μεταβολισθούν ως ενέργεια.

Η πρωτεΐνη περιέχει περίπου 16 % άζωτο. Έτσι, ένα ψάρι που θα καταναλώσει 100 g πρωτεΐνης θα καταλήξει να εκκρίνει $35 \text{ g} \cdot 16 \% = 5,6 \text{ g}$ αμμωνίας.

Ο ρυθμός παραγωγής αμμωνίας μπορεί να εκφρασθεί ως: **A=56P**, όπου: **A**= ρυθμός παραγωγής αμμωνίας σε g ολικής αμμωνίας-άζωτο (TAN) ανά kg τροφής, **P** = δεκαδικό ποσοστό της πρωτεΐνης στην τροφή. Για παράδειγμα: Η διατροφή ψαριών με τροφή περιεκτικότητας 45% σε πρωτεΐνη, θα καταλήξει στην παραγωγή ($56 \cdot 0,45$) = 25,2 g αμμωνίας-αζώτου ανά kg τροφής.

Σημείωση: Οι εκφράσεις των συγκεντρώσεων ως αμμωνία-άζωτο ($\text{NH}_4\text{-N}$ ή $\text{NH}_3\text{-N}$) ή ως αμμωνία (στην NH_4^+ ή NH_3 μορφή της), συνδέονται μεταξύ των από τη σχέση (π.χ. για το παραπάνω παράδειγμα): $25,2 \text{ mg/L N} \cdot 18/14 = 32,4 \text{ mg/L NH}_4^+$, με 18 και 14 το μοριακό βάρος και ατομικό βάρος των NH_4^+ και N αντίστοιχα.

6.2. ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Στην υδατική φάση η αμμωνία υπάρχει σε δύο μοριακές μορφές και η ισορροπία μεταξύ των καθορίζεται από το pH και σε μικρότερο βαθμό από τη θερμοκρασία:



Η μη ιονισμένη μορφή NH_3 , είναι αέριο και μπορεί να περάσει ελεύθερα από της μεμβράνες του βραγχιακού επιθηλίου. Ο ρυθμός και η κατεύθυνση της διάβασης εξαρτώνται από τη διαβάθμιση της συγκέντρωσης της αμμωνίας μεταξύ του αίματος του ψαριού (εσωτερικά του επιθηλίου των βραγχίων) και του νερού (εξωτερικά του επιθηλίου). Η μη ιονισμένη αμμωνία είναι τοξική στα ψάρια ενώ η NH_4^+ είναι γενικά μη τοξική. Η χρόνια έκθεση στην αμμωνία βλάπτει τα βράγχια των ψαριών, μειώνοντας έτσι τη διαθέσιμη επιφάνεια του επιθηλίου για της ανταλλαγές των αερίων (οξυγόνο κ.λπ.). Οι βραγχιακές βλάβες από την έκθεση στην αμμωνία, μπορούν να προκαλέσουν μειωμένη αύξηση του ψαριού λόγω της μειωμένης κατανάλωσης οξυγόνου. Της αναστατώνουν την οσμωρυθμιστική του ικανότητα λόγω της υπερβολικής ενέργειας που διοχετεύεται στον βεβιασμένο «αερισμό» των βραγχίων, μια και η διαθέσιμη έκταση του επιθηλίου για πρόσληψη οξυγόνου έχει κατά πολύ μειωθεί.

6.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ.

Η μέση ημερήσια συγκέντρωση της TAN σε μια μονάδα εκτροφής, είναι η ολική ημερήσια παραγωγή αμμωνίας σε mg, διαιρούμενη με τη συνολική ημερήσια ροή νερού σε L.

Παράδειγμα: Διατηρούνται 500 kg ψαριών σε μια δεξαμενή δια της οποίας ρέει νερό 1000 Lpm. Στα ψάρια παρέχεται τροφή 1% επί του σωματικού της βάρους και με περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη 40%. Ο ρυθμός παραγωγής αμμωνίας είναι: $A = 56P = 56(0,4) = 22,4$ g/kg τροφής. Η καθημερινή ποσότητα τροφής είναι: $500 \text{ kg} \cdot 1\% = 5$ kg, και η καθημερινή παραγωγή αμμωνίας: $22,4 \text{ g/kg} \cdot 5 \text{ kg} = 112 \text{ g} = 112.000 \text{ mg}$. Η ολική ροή είναι: $1000 \text{ L/min} \cdot 1440 \text{ min/day} = 1.440.000 \text{ L/day}$. Συνεπώς η μέση ημερήσια συγκέντρωση TAN θα είναι $112.000 \text{ mg} / 1.440.000 \text{ L} = 0,077 \text{ mg/L}$.

Οι αναλυτικές διαδικασίες προσδιορισμού της συγκέντρωσης της αμμωνίας σε διάλυση στο νερό δεν ξεχωρίζουν της δύο μορφές της αμμωνίας (ιονισμένη και μη). Από υδατοκαλλιεργητική άποψη η μη ιονισμένη μορφή είναι η τοξική και αυτή ενδιαφέρει να γνωρίζουμε. Πρέπει λοιπόν να είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε το ποσοστό της τοξικής μη ιονισμένης μορφής στο μετρούμενο ποσό της TAN που της δίδει η όποια μέθοδος ανάλυσης. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση του pH και της θερμοκρασίας.

Η παρακάτω εξίσωση υπολογίζει τη σταθερά διάστασης οξέως (εκφρασμένη ως αρνητικός λογάριθμος) για την αμμωνία (Emerson et al., 1975 χρησιμοποιώντας τιμές από της Bates & Pinching, 1949).

$$pK_a = 0,09018 + \frac{2729,92}{T + 273,15}$$

Όπου: **pKa** = ο αρνητικός λογάριθμος της σταθεράς διαστάσεως του οξέως για την αμμωνία και **Tης** = θερμοκρασία σε °C.

Επιχειρώντας να υπολογίσουμε το ποσοστό της NH_3 , $[\text{NH}_3/(\text{TAN})]$, σε ένα διάλυμα αμμωνίας θα ενεργήσουμε ως εξής: Η σταθερά διαστάσεως για την αμμωνία μπορεί να εκφρασθεί ως $\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$, και η σταθερά ισορροπίας, K_a είναι:

$$K_a = \frac{(\text{NH}_3)(\text{H}^+)}{(\text{NH}_4^+)} = 10^{pK_a}$$

Λύνοντας για το λόγο $\text{NH}_3/(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+) = f$, έχουμε:

$$f = \frac{1}{10^{pK_a - \text{pH}} + 1}$$

Το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας, **f**, είναι το δεκαδικό ποσοστό της NH_3 σε ένα διάλυμα αμμωνίας. Δηλαδή: $\text{NH}_3\text{-N} = \text{TAN} \cdot f$.

Στο παρακάτω παράδειγμα θα υπολογιστεί το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας σε νερό θερμοκρασίας 10 °C και σε τρεις διαφορετικές τιμές pH, 6, 7 και 8. Έχουμε:

$$pK_a = 0,09018 + \frac{2729,92}{10 + 273,15} = 9,731$$

Αντικαθιστώντας την κάθε τιμή του pH στην εξίσωση του f, θα έχουμε:

$$f = \frac{1}{10^{9,731-6} + 1} = 0,000186$$

$$\frac{f}{\Pi} = \frac{1}{10^{9,731-7} + 1} = 0,00185$$

$$f = \frac{1}{10^{9,731-8} + 1} = 0,0182$$

Παρατηρούμε ότι για κάθε αύξηση του pH κατά μία μονάδα, το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας αυξάνει περί της 10 φορές. Συνεπώς για ένα δεδομένο επίπεδο συγκέντρωσης ολικής αμμωνίας (TAN), τα ψάρια σε χαμηλό pH θα εκτεθούν σε πολύ μικρότερη συγκέντρωση τοξικής NH₃ απ' ό τι τα ψάρια σε υψηλότερο pH.

6.4. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΚΟΥ ΣΘΕΝΟΥΣ ΣΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΗΣ NH₃

Εκτός από το pH και τη θερμοκρασία και το ιονικό σθένος επιδρά στον ιονισμό της αμμωνίας και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το ποσοστό της μη ιονισμένης μορφής στα υφάλμυρα και αλμυρά νερά. Η τοξικότητα της NH₃ στα αλμυρά νερά μειώνεται, επειδή όσο τα ιόντα στο νερό αυξάνονται, οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των ιόντων και των μορίων αυξάνουν την ένταση του ιονισμού.

Κατά της Soderberg & Meade (1991), η δύναμη του ηλεκτροστατικού πεδίου που επηρεάζει την ιονική ενεργότητα, επηρεάζεται από τη συγκέντρωση και το φορτίο των ιόντων στο διάλυμα και εκφράζεται ως ιονικό σθένος (I):

$$I = \sum \frac{(M_i)(z_i)^2}{2}$$

Οπου: **M** = μοριακή συγκέντρωση της δεδομένου ιόντος (**i**) και **z** = το φορτίο του. Για παράδειγμα: το ιονικό σθένος της διαλύματος που περιέχει 100 mg/L Na⁺ και 100 mg/L Cl⁻ θα υπολογιστεί ως εξής: Το ατομικό βάρος του νατρίου είναι 23 και του χλωρίου 35,5. Και τα δύο ιόντα είναι μονοσθενή, δηλαδή φορτίο =1.

$$\frac{100 \text{ mg Na}}{\text{L}} \cdot \frac{\text{mole}}{23000 \text{ mg}} = 0,0043 \text{ M Na}$$

$$\frac{100 \text{ mg Cl}}{\text{L}} \cdot \frac{\text{mole}}{35500 \text{ mg}} = 0,0028 \text{ M Cl}$$

$$I = \frac{(0,0043)(1)^2}{2} + \frac{(0,0028)(1)^2}{2} = 0,0036 \text{ M}$$

Για να υπολογισθεί το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας στο παραπάνω διάλυμα θα πρέπει να υπολογισθεί ο όρος «διόρθωση αλατότητας» (s) από τον τύπο:

$$s = -\frac{A' \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad \text{Οι τιμές για τον συντελεστή } A' \text{ δίδονται στον Πίνακα 6.1. Για το παρόν}$$

$$\text{παράδειγμα, εάν το pH είναι 7,5 και η θερμοκρασία } 10^\circ \text{C, } s = -\frac{0,498 \sqrt{0,0036}}{1 + \sqrt{0,0036}} = -0,028.$$

Η τιμή αυτή εισέρχεται στον τύπο της (f) κατά τον ακόλουθο τρόπο και της δίδει:

$$f = \frac{1}{10^{\text{pKa}-\text{pH}-s} + 1} \Rightarrow f = \frac{1}{10^{9,731-7,5+0,028} + 1} = 0,00547$$

$$f = \frac{1}{10^{9,731-7,5+0,028} + 1} = 0,00584$$

Εάν το f δεν διορθώνονταν για ιονικό σθένος τότε:

Δηλαδή το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας θα είχε υπερεκτιμηθεί κατά 6,3%.

Πίνακας 6.1. Τιμές για το συντελεστή Α' που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του ιονισμού της αμμωνίας για ιονικό σθένος. Από Soderberg, R. W. και Meade, J. W., *Progressive Fish-Culturist*, 53, 119, 1991.

T °C	A'	T °C	A'
0	0,492	18	0,506
1	0,492	19	0,506
2	0,493	20	0,507
3	0,494	21	0,508
4	0,495	22	0,509
5	0,495	23	0,510
6	0,496	24	0,511
7	0,497	25	0,512
8	0,497	26	0,513
9	0,498	27	0,514
10	0,498	28	0,515
11	0,500	29	0,515
12	0,501	30	0,516
13	0,501	31	0,517
14	0,502	32	0,518
15	0,503	33	0,519
16	0,504	34	0,520
17	0,505	35	0,521

Παράδειγμα υπολογισμού ιχθυοχωρητικότητας συστήματος υδατοκαλλιέργειας σχετικά με την αμμωνία.

Ο Αμερικανικός Φορέας Περιβαλλοντικής Προστασίας έχοντας υπόψη του πλήθος ιχθυολογικές μελέτες, έχει καταλήξει στη συγκέντρωση των 0,016 mg/L μη ιονισμένης αμμωνίας, ως ασφαλές όριο για της υδάτινους ζωικούς οργανισμούς.

Η μελέτη σχετικά με την αμμωνία στα ιχθοεκκολαπτήρια περιλαμβάνει κυρίως τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων επαναχρησιμοποιήσεων του νερού (ανακύκλωση) μέχρι που η συσσώρευση της NH₃ θα φθάσει το παραπάνω αναφερόμενο ανώτατο επίπεδο.

Πρώτα υπολογίζεται η φόρτιση του συστήματος (ιχθυοχωρητικότητα) με ψάρια σχετικά με το επίπεδο του οξυγόνου (δεδομένο, θα αναλυθεί σε επόμενα εδάφια).

Δίδονται τα παρακάτω δεδομένα: ιχθυοχωρητικότητα υπολογισμένη για το διαθέσιμο οξυγόνο: 10lb ψαριών/grm, ποσοστό παροχής τροφής (%BW) = 1,2% σωματικού βάρους/d, πρωτεΐνη τροφής (P) = 42 %, pH = 7,7, T = 12 °C, επιτρεπόμενη NH₃ = 0,016 mg/L.

Υπολογίζουμε την ιχθυοχωρητικότητα σχετικά με την αμμωνία, εφόσον προϋποθέτουμε ανεξάντλητη ικανότητα αερισμού. Υπολογίζουμε τη συγκέντρωση της TAN μετά από μία χρήση (ανακύκλωση) του νερού και με τον κατάλληλο υπολογισμό μετατροπής μονάδων από το αγγλοσαξονικό σύστημα στο μετρικό.

Παραγωγή και τοξικότητα της αμμωνίας

$$\text{TAN} = \frac{10 \text{ lb} \cdot 0,012 \cdot 56 (0,42) \text{ g/kg/day} \cdot \frac{\text{kg}}{2,2 \text{ lb}} \cdot \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}}}{\frac{1 \text{ gal}}{\text{min}} \cdot \frac{3,78 \text{ L}}{\text{gal}} \cdot \frac{1440 \text{ min}}{\text{day}}} = 0,24 \text{ mg/L}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το pKa και το f.

$$\text{pKa} = 0,09018 + \frac{2729,92}{12 + 273,15} = 9,664 \quad \text{Και} \quad f = \frac{1}{10^{9,664-7,7} + 1} = 0,0108$$

Η συγκέντρωση της NH₃ μετά από μία χρήση του νερού, είναι: 0,24 mg/L · 0,0108 = 0,00259 mg/L και ο αριθμός των επιτρεπόμενων ανακυκλώσεων του νερού είναι: 0,016/0,00259 = 6,18. Συνεπώς η ιχθυοχωρητικότητα σε σχέση με το επίπεδο της αμμωνίας είναι: 10 lb/gpm · 6,18 = 61,8 lb/gpm.

7. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΡΟΦΗΣ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΟΥΜΕΝΟ ΝΕΡΟ

7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε όλο τον κόσμο και ειδικά κατά την τελευταία 25ετία, έχει αναπτυχθεί ένα έντονο ενδιαφέρον για τα συστήματα υδατοκαλλιεργειών με τη χρήση ανακυκλούμενου νερού (κλειστά συστήματα ή κυκλώματα). Της τα είδη ψαριών που εκτρέφονται σε χωμάτινες δεξαμενές, ιχθυοκλωβούς ή raceways με ανοικτό σύστημα νερού, μπορούν της να εκτραφούν και σε κλειστά συστήματα αλλά με αρκετά μεγαλύτερη αβεβαιότητα οικονομικής βιωσιμότητας. Ιδιαίτερα κατά την τελευταία 15ετία παρουσιάζεται έντονη δραστηριότητα στην εμπορική εφαρμογή των γνώσεων που αποκτήθηκαν από τα πειραματικά κλειστά συστήματα. Το ενδιαφέρον για τα συστήματα αυτά έγκειται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, δηλαδή πολύ μικρές απαιτήσεις στην έκταση της εγκατάστασης και στην ποσότητα του χρησιμοποιούμενου νερού, μεγάλο βαθμό ελέγχου του περιβάλλοντος εκτροφής (κυρίως τη θερμοκρασία) που καταλήγει σε βέλτιστη αύξηση των εκτρεφόμενων ψαριών καθόλο το έτος και τέλος, στην ευκολία κατασκευής των, πρακτικά οπουδήποτε και μάλιστα κοντά στα κέντρα πώλησης των ψαριών.

Τα κλειστά συστήματα είναι γενικώς ακριβά στην κατασκευή της με αποτέλεσμα και αυξημένα λειτουργικά έξοδα. Αυτή ακριβώς είναι και η πρόκληση για της σχεδιαστές αυτών των συστημάτων, δηλαδή να μεγιστοποιήσουν την απόδοση της παραγωγής ανά νομισματική μονάδα που επενδύεται σε μια τέτοια επιχείρηση. Τα επιμέρους τμήματα της κλειστού συστήματος, θα πρέπει να σχεδιαστούν και να ενσωματωθούν στο ολοκληρωμένο σύστημα με το μικρότερο δυνατό κόστος, ενώ ταυτόχρονα η λειτουργία και αξιοπιστία της να βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα.

Δυστυχώς της, πολλά κλειστά συστήματα υδατοκαλλιεργειών έχουν αποτύχει εξαιτίας του ανεπαρκούς σχεδιασμού, ή της ανεπαρκούς τεχνικής και οικονομικής διαχείρισής των. Τα κλειστά συστήματα είναι μηχανικώς εξεζητημένα και βιολογικώς πολύπλοκα. Τα προβλήματα που συχνά ελλοχεύουν είναι οι μηχανικές δυσλειτουργίες ή αποτυχίες, η φτωχή ποιότητα του νερού, το στρες των ψαριών, οι ασθένειες και η δυσάρεστη μυρωδιά του προϊόντος. Για να αποφευχθούν όλα αυτά απαιτείται εκπαίδευση, ικανότητα και αφοσίωση.

Τα κλειστά συστήματα κατατάσσονται στα εντατικά συστήματα υδατοκαλλιεργειών. Τα εκτρεφόμενα ψάρια κολυμπούν σε αυτά σε μεγάλες πυκνότητες ($>40 \text{ kg/m}^3$), ακριβώς για να μπορεί το σύστημα να είναι οικονομικώς βιώσιμο και ανταγωνιστικό. Της χαρακτηριστικό παράδειγμα αναλογίας της δίνει μια ιδέα. Της συνήθους μεγέθους σπιτικό ενυδρείο με χωρητικότητα 80 L, που ουσιαστικά είναι μια μινιατούρα της κλειστού συστήματος, θα πρέπει να διατηρεί τουλάχιστον 3,5 kg ψαριών για να φθάσει την ένταση λειτουργίας της εμπορικού συστήματος. Και μόνο η σκέψη της τέτοιου αναλόγου (ιδιαίτερα της χομπίστες ενυδρείων που γνωρίζουν την κατάσταση), αρκεί για να βυθίσει σε απαισιόδοξες σκέψεις τον προσεκτικό μελλοντικό επενδυτή.

Η έρευνα στην ανάπτυξη των κλειστών συστημάτων έχει αρχίσει εδώ και πάνω από τρεις δεκαετίες. Υπάρχουν της και εναλλακτικές τεχνολογίες για την κατασκευή και λειτουργία της. Η επιλογή μιας ορισμένης τεχνολογίας εξαρτάται από το είδος που πρόκειται να καλλιεργηθεί, την τοποθεσία της μονάδας, το βαθμό του επιθυμητού ελέγχου των περιβαλλοντικών παραμέτρων της εκτροφής, την ικανότητα διαχείρισης του συστήματος και άλλα. Οι υποψήφιοι χρήστες των κλειστών συστημάτων υδατοκαλλιεργειών πρέπει να γνωρίζουν της απαιτήσεις για τον καθαρισμό του

επαναχρησιμοποιούμενου νερού, της συσκευές που υπάρχουν για κάθε στάδιο καθαρισμού και την τεχνολογία στην οποία βασίζεται η λειτουργία της.

Της κλειστό σύστημα που λειτουργεί στα βέλτιστα επίπεδα, διατηρεί ένα εξαιρετικό περιβάλλον εκτροφής, ενόσω παρέχει την επαρκή ποσότητα τροφής που απαιτείται για τη μέγιστη δυνατή αύξηση των ψαριών. Η διατήρηση της καλής ποιότητας του νερού είναι το πρώτιστο μέλημα της υδατοκαλλιέργειας. Η χαμηλή ποιότητα του νερού μπορεί και να μην είναι θνησιγόνος για τα ψάρια, της μακροπρόθεσμα θα μειώσει την αύξησή της και θα αποτελέσει ένα στρεσογόνο παράγοντα που θα αυξήσει της πιθανότητες εμφάνισης ασθενειών. Οι κρίσιμες παράμετροι της ποιότητας του νερού περιλαμβάνουν της συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved Oxygen ή DO), της ολικής αμμωνίας (Total Ammonia Nitrogen ή TAN), της μη ιονισμένης αμμωνίας (Unionized Ammonia Nitrogen, NH_3 ή UAN), των νιτρωδών ιόντων (NO_2^-) και του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Σημαντικές παράμετροι είναι της και οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων (NO_3^-), του pH της αλκαλικότητας και των χλωριόντων (Cl^-).

Τα υποπροϊόντα του μεταβολισμού των ψαριών περιλαμβάνουν το διοξείδιο του άνθρακα, την αμμωνία, τα διαλυμένα και τα αιωρούμενα στερεά, που ειδικότερα προέρχονται τόσο από τα περιττώματα των ψαριών όσο και από τα υπολείμματα της τροφής. Τα διάφορα τμήματα του κλειστού συστήματος εκτροφής πρέπει να είναι σχεδιασμένα κατάλληλα για να εξουδετερώσουν την επιβλαβή δράση όλων αυτών των υποπροϊόντων.

Της δεξαμενές των κλειστών συστημάτων η ασφαλής ποιότητα του νερού διασφαλίζεται δια της μεταφοράς και διέλευσης του νερού με αντλίες μέσω ειδικών συστημάτων διήθησης (φίλτρα) και κατόπιν της οξυγόνωσής του σε ειδικές συσκευές πριν επανέλθει της δεξαμενές των ψαριών. Κάθε επιμέρους συσκευή που πραγματοποιεί τα παραπάνω, πρέπει να έχει σχεδιαστεί με τρόπο που θα διασφαλίζει τη λειτουργία της σε μέγιστο βαθμό απόδοσης και αποτελεσματικότητας σε σύνδεση και με της υπόλοιπες.

7.2. ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

7.2.1. Μεταβολίτες

Της τα υδατοκαλλιεργητικά συστήματα παραγωγής οφείλουν να δημιουργήσουν το κατάλληλο περιβάλλον που θα ευνοήσει την αύξηση της εκτρεφόμενης βιομάζας. Παραπάνω αναφέρθηκαν οι κρίσιμες παράμετροι του νερού που τελικά μαζί και με τη θερμοκρασία καθορίζουν το υδάτινο περιβάλλον της εκτροφής. Για να παραχθούν ψάρια με συμφέρον κόστος παραγωγής, τα συστήματα εκτροφής θα πρέπει να διατηρούν καλή ποιότητα νερού κατά τη διάρκεια της ταχείας αύξησης των ψαριών.

Η ταχεία αύξηση διασφαλίζεται με την παροχή ιχθυοτροφών πλούσιων σε πρωτεΐνες και σε καθημερινές ποσότητες που ποικίλουν από 1,5 έως και 15% επί του συνόλου της μάζας των ψαριών ανάλογα με το μέγεθος και το είδος των εκτρεφόμενων ψαριών (15% για νεαρά ψάρια, 1,5% για μεγέθη κοντά στο τελικό εμπορεύσιμο βάρος).

Η συχνότητα παροχής της τροφής, ο ρυθμός του μεταβολισμού των ψαριών και η ποσότητα της τροφής που δεν καταναλώθηκε, επηρεάζουν την ποιότητα του νερού των δεξαμενών. Οι πελέτες της τροφής που δίδονται στα ψάρια είτε θα καταναλωθούν από αυτά, είτε θα αφεθούν και θα αποσυντίθενται μέσα στο σύστημα.

Τα υποπροϊόντα του μεταβολισμού των ψαριών περιλαμβάνουν το διοξείδιο του άνθρακα, την αμμωνία και τα στερεά περιττώματα (Σχήμα 7.2). Εάν η μη καταναλωθείσα τροφή και τα υποπροϊόντα του μεταβολισμού αφεθούν στο σύστημα ως

έχουν, θα δημιουργήσουν και άλλο διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία, θα μειώσουν τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου και θα έχουν καταστροφικό αποτέλεσμα στην υγεία των εκτρεφόμενων ειδών.

Της χωμάτινες υδατοκαλλιεργητικές δεξαμενές, οι κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες διατηρούνται δια της εξισορρόπησης της ποσότητας τροφής που μπαίνει στο σύστημα με την αφομοιωτική ικανότητα της δεξαμενής. Η φυσική βιολογική παραγωγή της δεξαμενής (φύκη, ανώτερα φυτά, ζωοπλαγκτόν και βακτηρίδια) ενεργεί ως βιολογικό φίλτρο που επεξεργάζεται τα υποπροϊόντα. Εάν η παραγωγή εντατικοποιηθεί και συνεπώς η παρεχόμενη τροφή αυξηθεί, τότε θα χρειασθεί και συμπληρωματική οξυγόνωση του νερού. Σε ακόμα μεγαλύτερες ποσότητες τροφής, το νερό θα πρέπει να ανανεωθεί για να μπορέσει να διατηρήσει τα καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Η **φέρουσα ικανότητα** (carrying capacity) τέτοιων δεξαμενών με συμπληρωματικό αερισμό, κυμαίνεται γενικά στα 625 έως 875 kg ψαριών ανά στρέμμα (0,00065 έως 0,0009 kg ψαριών ανά λίτρο νερού της δεξαμενής).

Της συμπαγείς δεξαμενές τώρα, η φέρουσα ικανότητα πρέπει να είναι σημαντικά υψηλότερη από την αντίστοιχη των χωμάτινων, για να διασφαλίσει την οικονομικά ανταγωνιστική παραγωγή των ψαριών, λόγω των υψηλότερων οικονομικών εξόδων κατασκευής και λειτουργίας των συμπαγών δεξαμενών συγκριτικά με της χωμάτινες. Λόγω αυτών των οικονομικών επιβαρύνσεων και της περιορισμένης ή και ανύπαρκτης φυσικής βιολογικής παραγωγικότητας των συμπαγών δεξαμενών, ο παραγωγός πρέπει να βασίζεται στη συνεχή ανανέωση του νερού της για να απομακρύνει τα υποπροϊόντα του μεταβολισμού (ρυπαντές). Επιπρόσθετα, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό θα πρέπει να διατηρείται στα ιδανικά επίπεδα μέσω τεχνητού αερισμού είτε με χρήση ατμοσφαιρικού αέρα είτε με καθαρό οξυγόνο.

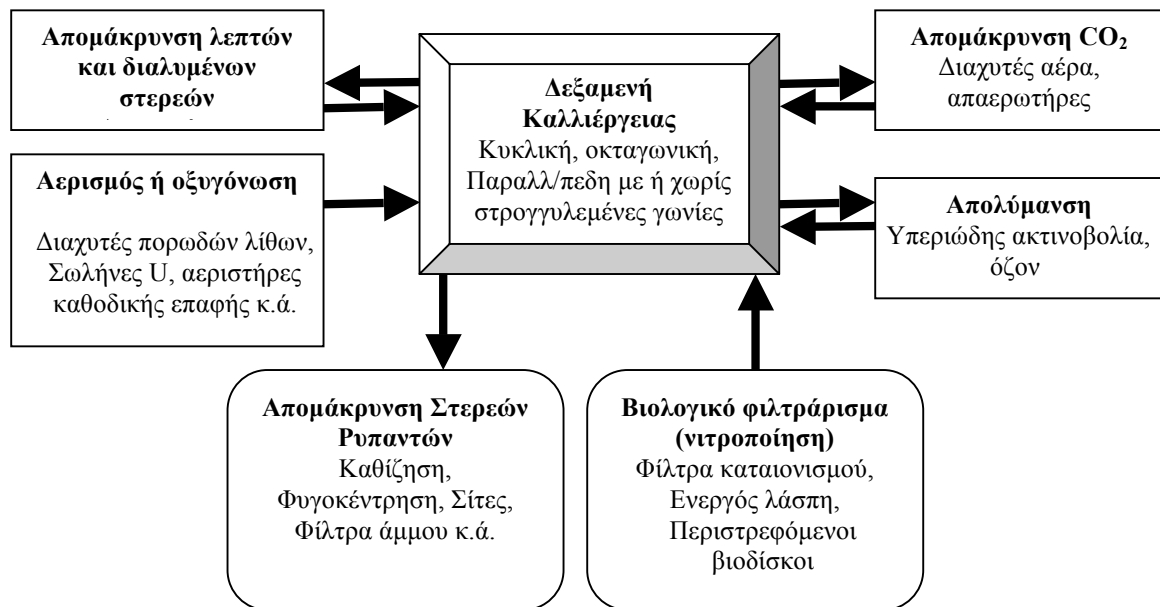
Ο ρυθμός ανανέωσης του νερού της συμπαγείς δεξαμενές πρέπει να είναι τέτοιος που να διατηρεί την καλή ποιότητα του νερού. Το παράδειγμα στη συνέχεια δίνει μια ιδέα επ'αυτού. Της υποθέσουμε ότι μια δεξαμενή με 19 m³ νερού πρόκειται να διατηρήσει ψάρια με πυκνότητα 60 kg/m³. Η συνολική εκτρεφόμενη βιομάζα θα είναι 1140 kg. Εάν στα ψάρια δίδεται καθημερινά τροφή με περιεκτικότητα πρωτεΐνης 32% και σε ποσοστό 1,5% επί του σωματικού βάρους, δηλαδή 17,1 kg τροφής/ημέρα και με δεδομένο ότι το 3% της τροφής μεταβολιζόμενο θα δώσει αμμωνία, θα παράγονται περί τα 0,513 kg αμμωνίας (TAN) καθημερινά. Περαιτέρω, εάν στο νερό της δεξαμενής η συγκέντρωση της αμμωνίας δεν πρέπει να ξεπερνά το 1 mg/L, από της κατάλληλους υπολογισμούς προκύπτει ότι η ανανέωση του νερού της δεξαμενής με φρέσκο νερό θα πρέπει να είναι 21,3 m³/ώρα(h) για να διατηρεί τη συγκέντρωση της αμμωνίας στα επίπεδα αυτά. Ακόμα της και με αυτή τη μεγάλη ανανέωση, το σύστημα θα χρειαστεί και επιπλέον τεχνητό αερισμό διότι το οξυγόνο που μεταφέρει το φρέσκο νερό δεν θα επαρκεί.

Τέτοιες μεγάλες ποσότητες νερού που απαιτούνται στα ανοικτά συστήματα, δεν μπορούν εύκολα να επιτευχθούν λόγω, είτε έλλειψης νερού είτε αποφυγής της της σπάταλης διαχείρισης των υδάτινων αποθεμάτων. Της τέτοιες ροές απαιτούνται για να ξεπλένουν τα μεταβολικά υποπροϊόντα των ψαριών. Με την ανακύκλωση (επαναχρησιμοποίηση) του νερού στα κλειστά συστήματα και αφού το νερό διέλθει από το σύστημα καθαρισμού που θα το απαλλάξει από την αμμωνία, επιτυγχάνεται παρόμοια ποιότητα νερού με τα ανοικτά συστήματα. Η ικανότητα (αποδοτικότητα) του συστήματος καθαρισμού για απομάκρυνση της αμμωνίας, ο ρυθμός παραγωγής

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

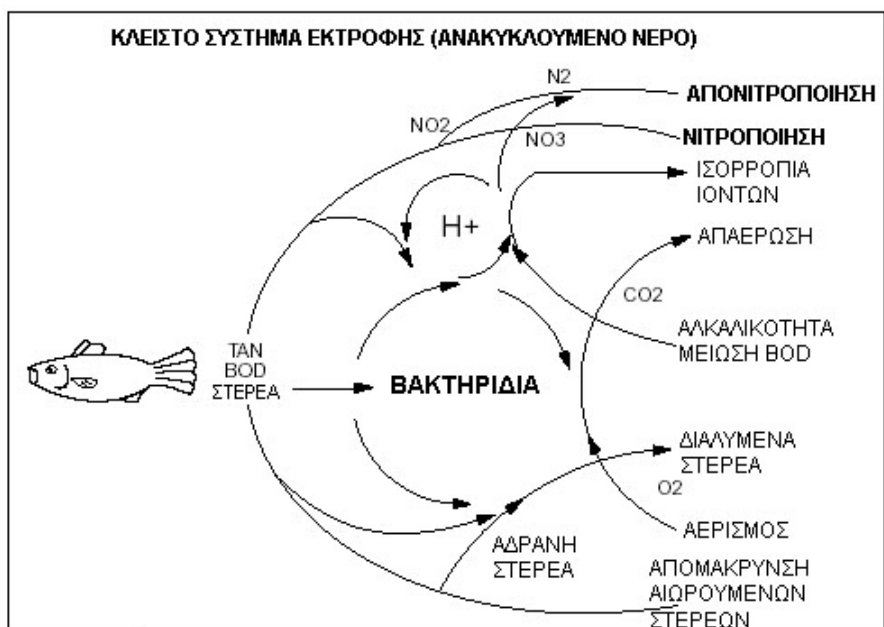
αμμωνίας από τα ψάρια, και το επιτρεπτό ανώτατο επίπεδο αμμωνίας στο νερό των δεξαμενών εκτροφής, καθορίζουν το ρυθμό ανακύκλωσης του δια μέσου της μονάδας καθαρισμού. Για να χρησιμοποιήσουμε το παραπάνω παράδειγμα αλλά τώρα σε κλειστό σύστημα, υποθέτουμε ότι το σύστημα καθαρισμού απομακρύνει το 50% της αμμωνίας του νερού με κάθε πέρασμα από αυτό (τυπική περίπτωση καλής λειτουργίας). Τότε η ροή του νερού δια μέσου του συστήματος καθαρισμού θα πρέπει να είναι 42,6 m³/h.

Το κλειδί της επιτυχίας των κλειστών συστημάτων είναι η οικονομική λειτουργία των συστημάτων καθαρισμού του νερού της. Της τα κλειστά συστήματα απομακρύνουν τα στερεά υποπροϊόντα της, οξειδώνουν την παραγόμενη αμμωνία και τα νιτρώδη, απομακρύνουν το διοξείδιο του άνθρακα και οξυγονώνουν το νερό κάθε φορά που αυτό επιστρέφει της δεξαμενές εκτροφής των ψαριών (Σχήμα 7.1). Επιπρόσθετα και ιδιαίτερα για τα συστήματα εκείνα που είναι πολύ εντατικά ή που εκτρέφουν πολύ ευαίσθητα είδη, μπορεί να χρειάζονται και ιδιαίτερο σχολαστικό καθαρισμό του νερού της, απομάκρυνση των πολύ μικρών στερεών σωματιδίων, απομάκρυνση των διαλυμένων οργανικών μορίων και (ή) κάποια μορφή απολύμανσης του νερού (υπεριώδη ακτινοβολία, όζον).



Σχήμα 7.1. Απαιτούμενες διαδικασίες στα κλειστά συστήματα.

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)



Σχήμα 7.2. Διάγραμμα των μεταβολικών υποπροϊόντων των ψαριών και των αλληλεπιδράσεών της στο μικροβιακό φορτίο και της χημικές παραμέτρους του νερού.

7.2.2. Σωληνώσεις, Εφεδρεία ενέργειας

Για να δημιουργήσουν κατάλληλο περιβάλλον εντατικής εκτροφής ψαριών, τα κλειστά συστήματα πρέπει να διατηρούν σταθερές ροές νερού και οξυγόνωσης, σταθερή στάθμη της δεξαμενής της και απρόσκοπτη λειτουργία .

Η κύρια αιτία για το πρόβλημα της μειωμένης ροής νερού και αέρα που συχνά παρουσιάζεται, είναι η μείωση της εσωτερικής διαμέτρου (φράξιμο) των σωλήνων και των διαχυτών αέρα (πορώδεις πέτρες) λόγω της υπερβολικής αύξησης μυκήτων, βακτηριδίων και μικροφυκών που πολλαπλασιάζονται επωφελούμενα από το εύτροφο περιβάλλον του νερού. Σε τέτοιες περιπτώσεις προκαλείται αύξηση ή μείωση στο επίπεδο του νερού των δεξαμενών, μείωση της έντασης του αερισμού και μείωση στη νιτροποιητική ικανότητα του βιολογικού φίλτρου.

Η ανεπιθύμητη αυτή μείωση της ροής του νερού μπορεί να αποφευχθεί ή να μειωθεί στο ελάχιστο εάν χρησιμοποιηθούν σωλήνες επαρκούς διαμέτρου και το σύστημα σχεδιαστεί έτσι που τα επιμέρους τμήματά του να συνδέονται με σωλήνες όσο το δυνατό μικρότερου μήκους. Το φράξιμο των σωλήνων που μεταφέρουν το νερό που φεύγει από της δεξαμενής (με τη βαρύτητα) γίνεται εύκολα αντιληπτό λόγω της παρατηρούμενης ανύψωσης της στάθμης της δεξαμενής. Της λοιπόν παρατηρείται σταδιακή μείωση της ροής θα πρέπει να γίνει καθαρισμός των σωλήνων. Για τη δουλειά αυτή υπάρχουν ειδικοί σπόγγοι και βούρτσες που προσαρμόζονται σε εύκαμπτες ράβδους (παρόμοιες με αυτές των υδραυλικών), οι οποίες οδηγούνται μέσα της σωληνώσεις. Οι πορώδεις φραγμένες πέτρες του αερισμού πρέπει να καθαρίζονται περιοδικά σε διαλύματα οξέων.

Πέρα από το φράξιμο των σωλήνων, η όποια παρατηρούμενη μείωση της ροής ή μεταβολή της επιλεγείσας στάθμης του νερού, μπορεί να οφείλεται και στο φράξιμο των προστατευτικών πλεγμάτων που έχουν τοποθετηθεί στα σημεία απορροής του, για να εμποδίζουν τα ψάρια να παρασυρθούν ή διαφύγουν από τα σημεία αυτά. Τα πλέγματα πρέπει να έχουν άνοιγμα ματιού όσο το δυνατό μεγαλύτερο αλλά που να μην επιτρέπει στα ψάρια να διαφύγουν. Τα πλέγματα στο σημείο εφαρμογής της στο σωλήνα, πρέπει της να είναι σε μέγεθος πολύ μεγαλύτερα από τη διάμετρο του σωλήνα επειδή πάντα υπάρχει ο κίνδυνος για κάποια (έστω και λίγα) νεκρά ψάρια να φράξουν το στόμιο. Συνήθως το σχήμα των πλεγμάτων διαμορφώνεται σε μακρύ κυλινδρικό ή κυβικό που προσαρμόζεται στο σωλήνα απορροής. Γενικά, η περιοχή του πλέγματος πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη επιφάνεια για να μειώσει τον κίνδυνο φραξίματός της. Το πλέγμα πρέπει να προσαρμόζεται σφιχτά και σταθερά στο σωλήνα έτσι που να μην φεύγει από τη θέση του κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων που γίνονται στη δεξαμενή (καθάρισμα, συλλογή ψαριών κ.ά.).

Της άλλο πολύ βασικό τμήμα της κλειστού συστήματος είναι το εφεδρικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα και μια μικρής διάρκειας διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος στα επί μέρους συστήματα μπορεί να είναι καταστροφική. Για παράδειγμα, εάν συμβεί διακοπή ρεύματος σε ένα σύστημα με θερμό γλυκό νερό (28 °C) με συγκέντρωση οξυγόνου στον κορεσμό (7,75 mg/L) και με ψάρια μέσου βάρους 220 g με ιχθυοπυκνότητα 30 kg/m³, τότε, σε περίπου 16 λεπτά το οξυγόνο θα μειωθεί στα 3 mg/L, επίπεδο που προκαλεί στρες στα ψάρια. Εάν το σύστημα αυτό περιείχε ψάρια 450 g με ιχθυοπυκνότητα 120 kg/m³ τότε, το οξυγόνο θα μειώνονταν στο παραπάνω στρεσογόνο επίπεδο σε μόλις 6 λεπτά. Τα παραπάνω σενάρια θα συμβούν επειδή, λόγω της έλλειψης

του ηλεκτρικού ρεύματος, δεν θα λειτουργεί το σύστημα οξυγόνωσης του νερού. Εάν η έλλειψη ρεύματος παραταθεί ο θάνατος των ψαριών θα είναι αναπόφευκτος.

Το σύστημα της εφεδρικής παροχής ρεύματος (συνήθως πετρελαιοκίνητο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ή H/Y), πρέπει να είναι αυτόματης εκκίνησης αμέσως με τη διακοπή του ρεύματος του δικτύου. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να εγκατασταθεί και σύστημα συναγερμού ή ειδοποίησης ανάγκης (alarm), με σκοπό να ειδοποιεί το προσωπικό σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος ή αλλαγής της στάθμης του νερού των δεξαμενών. Τα συστήματα αυτά διατίθενται ευρέως στο εμπόριο και σήμερα είναι αρκετά φθηνά. Ακόμα πιο καλές λύσεις στα προβλήματα αυτά, είναι και τα αυτόματα συστήματα τηλεφωνικής ειδοποίησης που επιτρέπουν της υπεύθυνους να πληροφορούνται από το δίκτυο την κατάσταση του συστήματος. Πέρα από τη διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος και της βλάβες των διαφόρων συστημάτων (αντλίες, οξυγονωτήρες κ.λπ.) μπορούν να προκαλέσουν καταστροφή σε πολύ σύντομο χρόνο. Για το λόγο αυτό θα πρέπει όλα τα συστήματα να έχουν σε κατάσταση αναμονής (stand-by) και τα εφεδρικά της, τα οποία σε περίπτωση βλάβης θα εκκινούν είτε αυτόματα είτε απλώς με το γύρισμα της διακόπτη. Τελικά και για το πιο βασικό από όλα τα συστήματα αυτό της οξυγόνωσης, η πιο απλή λύση είναι ένα εφεδρικό δοχείο οξυγόνου συνδεδεμένο με το σύστημα παροχής αέρα και το οποίο θα απελευθερώνει οξυγόνο με την ενεργοποίηση μιας ηλεκτροβάννας (solenoid valve), η οποία θα ανοίγει αυτόματα με τη διακοπή του ρεύματος. Το οξυγόνο αυτό θα μπορεί να κρατήσει τα ψάρια ζωντανά μέχρι την επισκευή.

Της από τα κύρια συστήματα του κλειστού κυκλώματος είναι και το βιολογικό φίλτρο. Το σύστημα αυτό που για να ρυθμιστεί στα βέλτιστα, δηλαδή να αναπτύξει την κατάλληλη νιτροποιητική χλωρίδα των χρήσιμων βακτηριδίων που αποικοδομούν την τοξική αμμωνία, παίρνει εβδομάδες ή και μήνες, θα πρέπει να παρακολουθείται με επιμέλεια. Τα νιτροποιητικά βακτηρίδια που αποικίζουν τα υλικά του φίλτρου «γερνάνε» και χάνονται συνεχώς, αναπληρούμενα από τα υπόλοιπα και συνεχώς πολλαπλασιαζόμενα της κατάλληλης συνθήκης που πρέπει να επικρατούν στο φίλτρο. Τα νιτροποιητικά βακτηρίδια επηρεάζονται αρνητικά από τις αλλαγές της παραμέτρους του νερού (χαμηλή περιεκτικότητα διαλυμένου οξυγόνου, χαμηλή αλκαλικότητα, χαμηλό ή υψηλό pH, υψηλό CO₂, κ.λπ.). Τα νιτροποιητικά βακτηρίδια μπορούν να προσαρμόζονται σε αλλαγές των παραπάνω παραμέτρων, εάν οι αλλαγές αυτές είναι σταδιακές και πάντα μέσα στα ασφαλή όρια. **Γενικός κανόνας: το βιολογικό φίλτρο δεν αντιδρά θετικά της απότομες αλλαγές και χρειάζεται χρόνο για να προσαρμοστεί.**

7.2.3. Το πρόβλημα των στερεών ρυπαντών

Οι πελέτες της τροφής που χρησιμοποιούνται της υδατοκαλλιεργητικές παραγωγές αποτελούνται από πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λίπη, ανόργανα στοιχεία και νερό. Το κομμάτι της τροφής που τελικά δεν αφομοιώνεται από τα ψάρια απεκκρίνεται ως ρυπαντής με υψηλό οργανικό φορτίο (στερεά περιττώματα). Της δράσουν τα αποικοδομητικά βακτηρίδια που υπάρχουν στο σύστημα, τότε, τόσο τα στερεά περιττώματα όσο και η αφάγωτη τροφή αφενός θα παράγουν αμμωνία και αφετέρου θα καταναλώσουν οξυγόνο. Για το λόγο αυτό αυτοί οι στερεοί ρυπαντές θα πρέπει να απομακρύνονται από το σύστημα όσο το δυνατό γρηγορότερα. Εχει βρεθεί ότι περίπου το 60% της τροφής που δίδεται σε μια εκτροφή καταλήγει σε στερεούς ρυπαντές. Η γρήγορη και αποτελεσματική απομάκρυνση των στερεών ρυπαντών από το νερό, μπορεί

να απαλλάξει το βιολογικό φίλτρο από το βιολογικό φορτίο που πρέπει να αποικοδομήσει, βελτιώνει την απόδοση του βιολογικού φίλτρου, μειώνει τον απαιτούμενο όγκο του φίλτρου και μειώνει την απαίτηση για οξυγόνο του συστήματος. Της η απομάκρυνσή της απαλλάσσει το σύστημα και από της δυσάρεστες μυρωδιές που προκαλούν. Τα φίλτρα κατακράτησης των στερεών (μηχανικά φίλτρα) θα πρέπει να καθαρίζονται συχνά και να διατηρούνται στη μέγιστη αποδοτικότητα. Πολλά από τα στερεά είναι πολύ μικρού μεγέθους για να συγκρατηθούν στα συμβατικά μηχανικά φίλτρα και είτε προκαλούν, είτε περιπλέκουν, άλλα προβλήματα που παρουσιάζονται στα κλειστά συστήματα. Τα στερεά ρυπαντικά σωματίδια μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις κατηγορίες: καθιζήσιμα, αιωρούμενα, πολύ λεπτά (fine) και διαλυμένα. Σε όλα τα κλειστά συστήματα τα καθιζήσιμα και τα αιωρούμενα χρειάζονται τη μεγαλύτερη προσοχή. Τα διαλυμένα οργανικά σωματίδια μπορούν να αποτελέσουν πρόβλημα σε συστήματα με πολύ μικρή ανανέωση του νερού.

7.2.3.1. Ελεγχος των καθιζήσιμων στερεών

Τα καθιζήσιμα στερεά είναι τα πλέον εύκολα αντιμετωπίσιμα και πρέπει να απομακρύνονται από το νερό και από τα φίλτρα όπου κατακρατούνται, όσο το δυνατό γρηγορότερα. Σε γενικές γραμμές ως καθιζήσιμα στερεά ορίζουμε εκείνους της στερεούς ρυπαντές οι οποίοι θα καθιζήσουν στο βυθό, μέσα σε μία περίπου ώρα σε στάσιμο νερό. Τα καθιζήσιμα στερεά μπορούν να απομακρυνθούν αφού (όσα από αυτά) κατακαθίσουν στο βυθό της δεξαμενής, μέσω κατάλληλα τοποθετημένου σωλήνα-συλλεκτήρα, να διατηρηθούν σε αιώρηση με συνεχή ανάδευση και να απομακρυνθούν όταν το νερό εισέλθει είτε σε ειδική δεξαμενή καθίζησης (διαυγαστήρας), είτε σε μηχανικά φίλτρα (άμμου ή σίτας) ή να απομακρυνθούν αφού το νερό οδηγηθεί σε φυγοκεντρικούς διαχωριστές (swirl separators ή hydrocyclones). Η αποτελεσματικότητα των δεξαμενών καθίζησης μπορεί να αυξηθεί, εάν προστεθούν στο εσωτερικό της λοξοί σωλήνες οι οποίοι θα μειώσουν την τυρβώδη ροή του νερού και θα αυξήσουν την ομοιόμορφη και ομαλή ροή σε όλο τον όγκο της δεξαμενής.

7.2.3.2. Ελεγχος των αιωρούμενων στερεών

Η διαφορά μεταξύ των καθιζήσιμων και αιωρούμενων στερεών είναι καθαρά πρακτική. Τα αιωρούμενα αντίθετα με τα καθιζήσιμα δεν θα κατακαθίσουν στο βυθό της δεξαμενής και δεν απομακρύνονται εύκολα της συνηθισμένες δεξαμενές καθίζησης. Τα αιωρούμενα στερεά πολύ συχνά δεν αντιμετωπίζονται με τη δέουσα προσοχή στα κλειστά συστήματα. Εάν δεν απομακρυνθούν, τα αιωρούμενα στερεά θα μειώσουν σημαντικά την ικανότητα του συστήματος για εκτροφή ψαριών και θα ερεθίζουν τα βράγχια των ψαριών. Η πιο κοινή μέθοδος για την απομάκρυνσή της είναι με τη χρήση μηχανικών φίλτρων, είτε με φίλτρα τύπου σίτας (screen) είτε με φίλτρα άμμου. Η συλλεγόμενη από τα φίλτρα ποσότητα των στερεών υπό μορφή βρώμικης λάσπης, θα πρέπει να διαχειρίζεται με βάση της περιβαλλοντικές οδηγίες και να εναποτίθεται σε υγειονομικούς χώρους ή να διατίθεται για λίπανση χωραφιών ή να υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία (κομποστοποίηση) για να διατεθεί ως ξηρό λίπασμα.

7.2.3.3. Ελεγχος των πολύ λεπτών και διαλυμένων στερεών

Εχει βρεθεί ότι τα πολύ λεπτά στερεά (μέση διάμετρος < 30 μm), αποτελούν περισσότερο από το 50% στο σύνολο των αιωρούμενων στερεών της κλειστού συστήματος. Τα λεπτά στερεά αποικοδομούμενα αυξάνουν την κατανάλωση του οξυγόνου στο σύστημα και προκαλούν ερεθισμό των βραγχίων και βλάβη στα ψάρια. Τα

διαλυμένα στερεά (πρωτεϊνικής φύσεως) συμμετέχουν και αυτά σε μεγάλο βαθμό στην κατανάλωση του οξυγόνου στο σύστημα.

Τα λεπτά και τα διαλυμένα στερεά δεν μπορούν ούτε εύκολα ούτε οικονομικά να απομακρυνθούν με καθίζηση ή μηχανικό φιλτράρισμα. Η μέθοδος της διάσπασης δια της αφροποίησης (foam fractionation ή protein skimming) είναι η μόνη αποτελεσματική για την απομάκρυνσή της από το νερό. Η αφροποίηση με τον τρόπο που εφαρμόζεται της υδατοκαλλιέργειες, είναι μια διαδικασία κατά την οποία εισάγεται αέρας υπό μορφή λεπτών φυσαλίδων, στο κάτω μέρος της σωλήνα με νερό που περιέχει της της ρυπαντές. Η άνοδος των φυσαλίδων στη στήλη του νερού δημιουργεί αφρό στο άνω μέρος του σωλήνα. Καθώς οι φυσαλίδες ανεβαίνουν στη στήλη του νερού, τα στερεά σωματίδια συγκολλούνται στην επιφάνειά της και καταλήγουν ως βρώμικος αφρός στο άνω μέρος του σωλήνα. Ο αφρός συλλέγεται σε ειδικό δοχείο και συνεχώς αποχετεύεται ως βρώμικο υγρό στο σύστημα συλλογής ακαθάρτων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι αυτό το βρώμικο υγρό μπορεί να περιέχει συγκέντρωση στερεών ακόμα και πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού των δεξαμενών. Αν και η αποτελεσματικότητα της αφροποίησης εξαρτάται από της χημικές ιδιότητες του νερού (αλατότητα, ιξώδες κ.ά.), η διαδικασία αυτή είναι πολύ αποτελεσματική στη μείωση της θολερότητας του νερού και στη μείωση των απαιτήσεων για οξυγόνο.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί και μια άλλη μη επιβλαβής δράση των λεπτών αιωρούμενων στερεών. Αν και τα λεπτά (κολλοειδή) στερεά αποικοδομούμενα καταναλίσκουν οξυγόνο και παράγουν αμμωνία, συνάμα προσφέρουν επιφάνειες προσκόλλησης των χρήσιμων νιτροποιητικών βακτηριδίων. Έτσι λοιπόν εάν διατηρούνται σε χαμηλές συγκεντρώσεις χωρίς να ερεθίζουν τα βράγγια των ψαριών, έχουν και ωφέλιμη δράση στο σύστημα. Εάν αφεθούν να συγκεντρωθούν σε μεγάλες πυκνότητες μέσα στο σύστημα, τότε θα ευνοήσουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών που παράγουν δυσώδεις ουσίες (μυρωδιές). Η ελάχιστη συγκέντρωση της των στερεών κατά την οποία προκαλείται η δημιουργία δυσάρεστων οσμών δεν είναι γνωστή. Παρόλα αυτά, στην πράξη, ο ιχθυολόγος δεν πρέπει να επιτρέψει την ανάπτυξη τέτοιων οσμών που μπορούν να επηρεάσουν ακόμα και τη μυρωδιά του τελικού προϊόντος, δηλαδή των ψαριών. Εάν παρόλα αυτά γίνει αντιληπτό κάτι τέτοιο, θα πρέπει να αυξηθεί ο ρυθμός αλλαγής του νερού με φρέσκο, να μειωθεί η παροχή της τροφής, να αυξηθεί το φιλτράρισμα των στερεών και/ή να αυξηθεί ο όγκος των βιολογικών φίλτρων.

7.2.4. Έλεγχος της θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία θα πρέπει να διατηρείται στο εύρος εκείνο που είναι απαραίτητο για τη βέλτιστη αύξηση των εκτρεφόμενων ψαριών. Στη βέλτιστη θερμοκρασία τα ψάρια μεγαλώνουν γρήγορα, μεταβολίζουν την τροφή αποδοτικότερα και παρουσιάζουν αντίσταση της πιο της ασθένειες. Η απόδοση του βιολογικού φίλτρου της, επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, καθώς γίνεται καλύτερη της υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό είναι και το πρόβλημα με τα κλειστά συστήματα που εκτρέφουν ψάρια των ψυχρών νερών. Σε μια θερμοκρασία 15 °C, το βιολογικό φίλτρο μπορεί μεν να προσαρμοστεί, αλλά συγκρινόμενο με τη λειτουργία του της 25 °C σε αντίστοιχη εκτροφή ψαριών των θερμών νερών, θα παρουσιάζει μειωμένη αποδοτικότητα. Η θερμοκρασία ρυθμίζεται με βυθισμένα στο νερό θερμαντικά σώματα, θερμάστρες ηλεκτρικές ή αερίου, εναλλάκτες θερμότητας, αντλίες θερμότητας ή ψύκτες. Ο κατάλληλος χειρισμός της θερμοκρασίας

του νερού μπορεί να μειώσει το στρες κατά τη διάρκεια χειρισμών των ψαριών και να ελέγξει ορισμένες ασθένειες (π.χ. Ich).

7.2.5. Ελεγχος των αζωτούχων υποπροϊόντων

Η ολική αμμωνία – άζωτο (TAN) αποτελεί το άθροισμα της μη ιονισμένης αμμωνίας (NH_3) και της ιονισμένης αμμωνίας (NH_4^+) και είναι υποπροϊόν του μεταβολισμού των πρωτεϊνών. Η αμμωνία εκκρίνεται κυρίως από τα βράγχια των ψαριών και από της εκκρίσεις αυτές προέρχεται το συντριπτικό ποσοστό της αμμωνίας που βρίσκεται διαλυμένη στο νερό κάθε εντατικής ιχθυοκαλλιέργειας, το υπόλοιπο προέρχεται από την αποσύνθεση των περιττωμάτων και των υπολειμμάτων της τροφής. Ανάλογα με την περιεκτικότητα της τροφής σε πρωτεΐνες, το 2-3% της θα καταλήξει ως αμμωνία. Τα χρήσιμα βακτηρίδια που αναπτύσσονται της επιφάνειες του υλικού πλήρωσης του βιολογικού φίλτρου (αλλά και σε κάθε άλλη στερεή επιφάνεια μέσα στο νερό του συστήματος), θα μεταβολίσουν την αμμωνία σε νιτρώδη ιόντα και τα νιτρώδη σε νιτρικά ιόντα, με μια βιολογική διαδικασία που ονομάζεται **νιτροποίηση**. Η αμμωνία και τα νιτρώδη είναι τοξικά για τα ψάρια και αποτελούν το κύριο πρόβλημα που απαιτεί αντιμετώπιση στα κλειστά συστήματα.

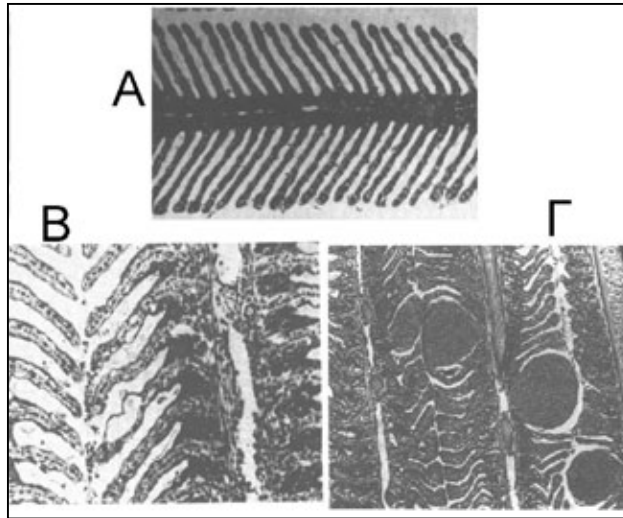
Η συνολική αμμωνία στο νερό (TAN) αποτελεί το άθροισμα των δύο μορφών της, της ιονισμένης και της μη ιονισμένης. Η μη ιονισμένη μορφή (NH_3) είναι η τοξική. Το ποσοστό της κάθε μορφής στο σύνολο της TAN εξαρτάται από το pH και τη θερμοκρασία του νερού (Πίνακας 7.1). Ενδεικτικά, σε pH 7,0 και θερμοκρασία 20 °C, η πλειονότητα της TAN βρίσκεται στην ιονισμένη μη τοξική μορφή, με την ιονισμένη σε ποσοστό μόλις 0,4%, ενώ σε pH 8,8 η ιονισμένη εκτινάσσεται στα 20%. Η αλλαγή λοιπόν του pH έστω και κατά λίγες μονάδες, μπορεί να έχει δραματική επίπτωση στην τοξικότητα της αμμωνίας.

Πίνακας 7.1. Ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας (NH_3) στο σύνολο της TAN, της διάφορες θερμοκρασίες και pH.

Θερμοκρασία (°C)									
pH	16	18	20	22	24	26	28	30	32
7,0	0,30	0,34	0,40	0,46	0,52	0,60	0,70	0,81	0,95
7,2	0,47	0,54	0,63	0,72	0,82	0,95	1,10	1,27	1,50
7,4	0,74	0,86	0,99	1,14	1,30	1,50	1,73	2,00	2,36
7,6	1,17	1,35	1,56	1,79	2,05	2,35	2,72	3,13	3,69
7,8	1,84	2,12	2,45	2,80	3,21	3,68	4,24	4,88	5,72
8,0	2,88	3,32	3,83	4,37	4,99	5,71	6,55	7,52	8,77
8,2	4,49	5,16	5,94	6,76	7,68	8,75	10,00	11,41	13,22
8,4	6,93	7,94	9,09	10,30	11,65	13,20	14,98	16,96	19,46
8,6	10,56	12,03	13,68	15,40	17,28	19,42	21,83	24,45	27,68
8,8	15,76	17,82	20,08	22,38	24,88	27,64	30,68	33,90	37,76
9,0	22,87	25,57	28,47	31,37	34,42	37,71	41,23	44,84	49,02
9,2	31,97	35,25	38,69	42,01	45,41	48,96	52,65	56,30	60,38
9,4	42,68	46,32	50,00	53,45	56,86	60,33	63,79	67,12	70,72
9,6	54,14	57,77	61,31	64,54	67,63	70,67	73,63	76,39	79,29
9,8	65,17	68,43	71,53	74,25	76,81	79,25	81,57	83,68	85,85
10,0	74,78	77,46	79,92	82,05	84,00	85,82	87,52	89,05	90,58
10,2	82,45	84,48	86,32	87,87	89,27	90,56	91,75	92,80	93,84

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

Από πολλά πειραματικά δεδομένα έχουν βρεθεί οι θνησιγόνες συγκεντρώσεις της μη ιονισμένης αμμωνίας για τα περισσότερα ψάρια. Της οι αντίστοιχες υποθνησιγόνες συγκεντρώσεις, εκείνες δηλαδή της οποίες τα ψάρια δεν ψοφούν άμεσα αλλά υποφέρουν, δεν είναι σαφώς καθορισμένες. Η μη ιονισμένη αμμωνία (NH_3) σε υποθνησιγόνες συγκεντρώσεις της τάξεως των 0,02 – 0,07 mg/L (ανάλογα με το είδος και το μέγεθος του ψαριού), προκαλεί μείωση της αύξησης σε όλα τα ψάρια και καταστροφή ιστών σε μερικά από αυτά (Σχήμα 7.3). Υπάρχουν είδη ψαριών (π.χ. τιλάπιες) που είναι περισσότερο και άλλα (π.χ. σαλμονίδες), που είναι λιγότερο ανθεκτικά στην αμμωνία. Γενικά πάντως, η συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας στο νερό των δεξαμενών δεν πρέπει ποτέ να ξεπεράσει τα 0,05 mg/L.



Σχήμα 7.3. **A:** φυσιολογική εμφάνιση βραγχίων ιριδίζουσας πέστροφας. **B:** έκθεση σε αμμωνία, επιθηλιακό οίδημα και υπερπλασία στη βάση των βραγχιακών νηματίων. **Γ:** έκθεση σε αμμωνία, παρουσία διάφορων ανευρυσμάτων γεμάτων με αίμα και συγκόλληση λόγω υπερπλασίας ορισμένων βραγχιακών νηματίων.

Η αμμωνία θα πρέπει να μετράται καθημερινά. Εάν παρατηρηθεί αύξηση της συγκέντρωσής της, τότε ίσως το βιολογικό φίλτρο να μην λειτουργεί αποδοτικά, ή ο λόγος παρεχόμενη τροφή/παραγόμενη αμμωνία να ξεπερνά τη σχεδιασθείσα ικανότητα του βιολογικού φίλτρου.

Τα βιολογικά φίλτρα αποτελούνται από δραστήριους βακτηριδιακούς πληθυσμούς προσκολλημένους σε στερεές επιφάνειες. Τα βιολογικά φίλτρα αποτυγχάνουν στη λειτουργία της εάν τα βακτηρίδια αυτά είτε ψοφήσουν είτε η δραστηριότητά της ανασταλεί από διάφορες αιτίες. Τέτοιες αιτίες μπορεί να είναι η φυσική γήρανση του πληθυσμού της, η τοξικότητα διάφορων χημικών ουσιών (σαν κι αυτές που μπαίνουν στο νερό για να καταπολεμήσουν ασθένειες των ψαριών, φορμόλη, χαλκός κ.ά.), έλλειψη οξυγόνου (τα βακτηρίδια αυτά είναι αερόβια), χαμηλό pH ή άλλοι λόγοι. Τα βιολογικά φίλτρα είναι έτσι σχεδιασμένα, που η γερασμένη νεκρή βακτηριδιακή μάζα να αποκολλάται και να αφήνει χώρο για να καταληφθεί από καινούργιο πληθυσμό. Πάντως σε της περιπτώσεις αδέξιών χειρισμών, μπορεί να χαθεί όλη η βακτηριδιακή μάζα (π.χ. βίαιος καθαρισμός του φίλτρου), με καταστροφικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του βιολογικού φίλτρου. Της, εάν λόγω κάποιας χημικής

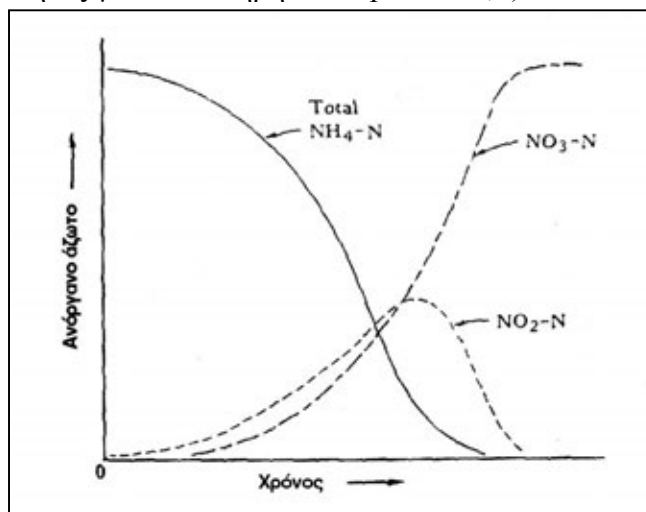
ουσίας στο νερό (π.χ. μετά από θεραπεία για ασθένειες των ψαριών) παρουσιαστεί δυσλειτουργία του φίλτρου, το νερό του συστήματος θα πρέπει να ανανεωθεί με φρέσκο. Σε μια τέτοια περίπτωση το βιολογικό φίλτρο θα πρέπει να ξαναενεργοποιηθεί, (μια αργή διαδικασία που παίρνει 3-4 εβδομάδες), και το pH να ρυθμιστεί στο βέλτιστο.

Κατά τη διάρκεια των όποιων δυσλειτουργιών του βιολογικού φίλτρου, θα πρέπει είτε να σταματά εντελώς η παροχή της τροφής, είτε να μειώνεται στο ελάχιστο. Ακόμα και μετά από μια ολοκληρωτική αλλαγή του νερού με φρέσκο, η παροχή τροφής μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνη αύξηση της συγκέντρωσης της αμμωνίας ή των νιτρωδών σε διάστημα ωρών, εάν το βιολογικό φίλτρο δεν λειτουργήσει σωστά.

Διαμερισματοποιώντας τα βιολογικά φίλτρα ή επιλέγοντας τη λύση περισσότερων από ένα βιολογικά φίλτρα στο σύστημα, μειώνουμε της κινδύνους μιας ολοκληρωτικής δυσλειτουργίας των και έχουμε τη δυνατότητα να «σπείρουμε» (μεταφέρουμε) ζωντανή βακτηριδιακή μάζα (υπό μορφή λάσπης) από ένα φίλτρο σε άλλο φίλτρο ή σύστημα.

Η **ενεργοποίηση ή ρύθμιση** (activation ή conditioning) της νέου βιολογικού φίλτρου, (δηλαδή η ανάπτυξη μιας υγιούς νιτροποιητικής βακτηριδιακής χλωρίδας ικανής να μεταβολίσει την αμμωνία και τα νιτρώδη που παράγονται από την προβλεπόμενη παροχή τροφής), απαιτεί χρονικό διάστημα τουλάχιστον της μηνός (Σχήμα 7.4). Κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης (ρύθμισης), η πυκνότητα των ψαριών και η παροχή της τροφής θα πρέπει να βρίσκονται στο ελάχιστο. Επιπλέον, πριν από την τοποθέτηση των ψαριών στο σύστημα είναι ωφέλιμο (αν και όχι απολύτως απαραίτητο), να γίνει η λεγόμενη **προενεργοποίηση** (pre-activation) του βιοφίλτρου.

Η προενεργοποίηση επιτυγχάνεται με την εισαγωγή (σπορά) στο υλικό πλήρωσης του βιολογικού φίλτρου, ποσότητας νιτροποιητικής βακτηριδιακής μάζας (διατίθενται και σε υγροποιημένη εμπορική συσκευασία), από κοινού με χημικά υλικά ανάπτυξης (Πίνακας 7.2), για μια περίοδο 2 εβδομάδων. Τα υλικά ανάπτυξης προσφέρουν στα βακτηρίδια μια πηγή αμμωνίας-αζώτου (10-20 mg/L), ιχνοστοιχεία και buffer (NaHCO_3 σε ποσότητες κατάλληλες για να διατηρήσει το pH στο 7,5).



Σχήμα 7.4. Θεωρητικό σχήμα της μεταβολής των αζωτούχων ενώσεων κατά τη διάρκεια της ρύθμισης της βιολογικού φίλτρου. Η ρύθμιση έχει επιτευχθεί όταν η αμμωνία και τα νιτρώδη παρουσιάζουν μηδενικές τιμές.

Πολλά από τα ψάρια ψοφούν κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης του φίλτρου. Υπάρχει μια τάση της εκτροφείς να ταΐζουν υπερβολικά τα ψάρια κατά τη διάρκεια της περιόδου, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία συγκέντρωσης αμμωνίας υψηλότερης από αυτή που μπορεί να αποικοδομήσει το βιολογικό φίλτρο σε αυτό το αρχικό στάδιο.

Πίνακας 7.2. Ποσότητες ανόργανων συστατικών για την αρχική ρύθμιση του βιολογικού φίλτρου.

Θρεπτικά στοιχεία	Συγκέντρωση σε mg/L
(NH ₄) ₂ HPO ₄	40
Na ₂ HPO ₄	40
Θαλασσινά άλατα (στερεά μορφή)	40
Θαλασσινά άλατα (υγρά μορφή)	0,5
Ανθρακικό ασβέστιο (CaCO ₃)	250

Στην αρχή της ενεργοποίησης, οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας αυξάνουν απότομα και τα ψάρια σταματούν να τρέφονται και προτιμούν να κολυμπούν κοντά στα σημεία παροχής αέρα. Αν δεν ληφθούν άμεσα μέτρα θα επακολουθήσουν θάνατοι. Με τα πρώτα σημάδια υψηλών συγκεντρώσεων αμμωνίας θα πρέπει να σταματήσει άμεσα η παροχή τροφής. Της τα παραπάνω συμβαίνουν αν το pH είναι υψηλότερο από 7,5. Εάν το pH είναι 7,0 ή γύρω στο 7,0, τα ψάρια δεν θα δείξουν σημάδια στρες, επειδή ελάχιστη από την υπάρχουσα αμμωνία θα βρίσκεται στη μη ιονισμένη μορφή (NH₃).

Καθώς τα νιτροποιητικά βακτηρίδια του γένους *Nitrosomonas* πολλαπλασιάζονται και αποικούν το βιολογικό φίλτρο, μεταβολίζουν με ταχύ ρυθμό την αμμωνία και την οξειδώνουν σε νιτρώδη. Αυτή η μετατροπή συμβαίνει με τη μέγιστη αποτελεσματικότητα, μετά 2 εβδομάδες περίπου από την έναρξη της ενεργοποίησης του βιολογικού φίλτρου και θα εξακολουθεί να συμβαίνει ακόμα και αν έχει σταματήσει η παροχή τροφής. Κατά τη διάρκεια της της περιόδου, τα ψάρια θα ζητούν συχνά καταφύγιο κοντά στα σημεία αερισμού και θα παρατηρηθούν και θνησιμότητες αν διαφύγουν της προσοχής της και δεν λάβουμε μέτρα. Καθώς θα περνά ο καιρός, θα παρατηρηθεί βαθμιαία μείωση της συγκέντρωσης της αμμωνίας και αύξηση των νιτρωδών. Τα νιτρώδη θα αρχίσουν να μειώνονται όταν μια δεύτερη κατηγορία νιτροποιητικών βακτηριδίων του γένους *Nitrobacter* θα εγκατασταθούν στο βιολογικό φίλτρο. Τα *Nitrobacter* οξειδώνουν τα νιτρώδη σε νιτρικά που αποτελούν και το επιθυμητό τελικό προϊόν αποικοδόμησης της αμμωνίας στα βιολογικά φίλτρα που δρουν μόνο δια της νιτροποίησης (υπάρχει και η απονιτροποίηση). Γενικά, η ενεργοποίηση του βιολογικού φίλτρου χρειάζεται υπομονή και μόνο έτσι μπορούν να αποφευχθούν οι θνησιμότητες των ψαριών που προκύπτουν από την τοποθέτηση πολλών ψαριών μέσα σε ένα κλειστό σύστημα με μη ενεργοποιημένο ακόμα βιολογικό φίλτρο.

Οι συγκεντρώσεις των νιτρωδών θα πρέπει να ελέγχονται καθημερινά. Η τοξικότητα των νιτρωδών ποικίλλει από είδος σε είδος ψαριού. Τα ψάρια με λέπια είναι γενικά πιο ανθεκτικά της υψηλής συγκεντρώσεις των νιτρωδών από τα ψάρια χωρίς λέπια της π.χ., το γατόψαρο *Ictalurus punctatus* που είναι πολύ ευαίσθητο στα νιτρώδη. Συγκέντρωση νιτρωδών ακόμη και 0,5 mg/L είναι στρεσογόνος για το γατόψαρο, ενώ για την τιλάπια το στρες αρχίζει από τα 5 mg/L και πάνω. Η τοξικότητα των νιτρωδών έγκειται στο ότι προκαλεί μια ασθένεια που ονομάζεται κοινώς «καφέ αίμα» (brown blood disease). Σε αυτή την κατάσταση το αίμα παίρνει χρώμα καφέ, το οποίο προκύπτει

όταν η κανονικού χρώματος και κατάστασης αιμογλοβίνη του αίματος έρχεται σε επαφή με τα νιτρώδη και σχηματίζει ένα σύμπλοκο που ονομάζεται **μεθαιμογλοβίνη**. Η μεθαιμογλοβίνη (χρώματος καφέ) δεν μπορεί να δεσμεύσει και να μεταφέρει με τον κανονικό τρόπο το οξυγόνο και ως εκ τούτου τα ψάρια στρεσάρονται από έλλειψη οξυγόνου. Τα ψάρια με **μεθαιμογλοβιναιμία** ανεβαίνουν στην επιφάνεια του νερού της και της περιπτώσεις ανοξίας, μειώνουν δραματικά ή σταματούν την πρόσληψη τροφής και εμφανίζονται ληθαργικά.

Η τοξικότητα των νιτρωδών διαφέρει από είδος σε είδος. Η τοξικότητά της μπορεί να μειωθεί ή να εμποδιστεί από τα ιόντα του χλωρίου (προσοχή! Χλωρίοντα – Cl^- όχι χλώριο Cl_2). Συνήθως, 6 έως 10 μέρη χλωριόντων για κάθε ένα μέρος νιτρωδών παρέχουν επαρκή προστασία. Αυξημένη και επίμονη παρουσία νιτρωδών στο σύστημα, αποτελεί ένδειξη ότι το βιολογικό φίλτρο είτε δεν λειτουργεί σωστά είτε δεν είναι αρκετά μεγάλο για να ανταπεξέλθει το οργανικό φορτίο των ρυπαντών που παράγεται στο σύστημα. Της και με την αμμωνία, σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να ελεγχθούν το pH, η αλκαλικότητα και η συγκέντρωση του οξυγόνου στο νερό του βιολογικού φίλτρου. Άμεσα μέτρα κατά της παρουσίας ανησυχητικά υψηλών συγκεντρώσεων νιτρωδών που επιμένουν, αποτελούν η μείωση ή το σταμάτημα της τροφής, η ετοιμότητα για ανανέωση του νερού του συστήματος με φρέσκο και η πρόσθεση κοινού αλατιού NaCl (ως πηγή χλωριόντων) εάν οι συγκεντρώσεις (των νιτρωδών) γίνουν τοξικές.

Της τα παραπάνω που αφορούν την τοξικότητα των νιτρωδών αναφέρονται βέβαια σε καταστάσεις όπου κάτι δεν πάει καλά στη λειτουργία του βιολογικού φίλτρου. Σε ένα καλώς λειτουργούν βιολογικό φίλτρο, οι αποικίες των νιτροποιητικών βακτηριδίων *Nitrobacter* μεταβολίζουν (οξειδώνουν) αμέσως την όποια ποσότητα νιτρωδών (NO_2^-) σχηματιστεί, σε νιτρικά ιόντα (NO_3^-). Σε ένα ρυθμισμένο βιολογικό φίλτρο η συγκέντρωση των νιτρωδών δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 10 mg/L για μεγάλο χρονικό διάστημα και η συνήθης συγκέντρωσή της πρέπει να είναι μικρότερη του 1 mg/L.

Τα νιτρικά είναι το τελικό προϊόν της νιτροποίησης και δεν αποτελούν γενικά κίνδυνο για τα ψάρια. Από μελέτες έχει βρεθεί ότι ακόμα και πολύ υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών (>300 mg/L) είναι ανεκτές από τα ψάρια. Στα κλειστά συστήματα συνήθως, τα νιτρικά δεν φθάνουν σε τέτοιες υψηλές συγκεντρώσεις επειδή αραιώνονται από της συνήθεις διαδικασίες αλλαγής νερού που συμβαίνει κατά τον καθαρισμό των φίλτρων, ή τη συνήθη καθημερινή ανανέωση (συνήθως 5-10% του συνολικού όγκου νερού). Επιπρόσθετα, σε μερικά κλειστά συστήματα διαμορφώνονται τμήματα παραπλεύρως του βιολογικού φίλτρου όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία της απονιτροποίησης. Δια της απονιτροποίησης, αποικίες αναερόβιων βακτηριδίων μεταβολίζουν τα νιτρικά, παράγοντας ως τελικό προϊόν αέριο άζωτο (N_2) που τελικώς διαφεύγει στην ατμόσφαιρα.

7.2.6. Χλωρίοντα (Cl^-)

Η πρόσθεση χλωριόντων στο σύστημα (με γλυκό νερό) είναι ωφέλιμη, όχι μόνο για την καταπολέμηση της τοξικότητας των νιτρωδών, αλλά και για το λόγο ότι τα ιόντα χλωρίου και νατρίου (Na^+) απαλύνουν το όποιο οσμωτικό στρες. Οσμωτικό στρες προκαλείται από την απώλεια ιόντων από τα σωματικά υγρά των ψαριών (συνήθως μέσω των βραγχίων), κατά της χειρισμούς των ψαριών (συλλογή, θεραπείες κ.λπ.) ή σε της καταστάσεις στρες (π.χ. κακή ποιότητα νερού). Με μια συγκέντρωση άλατος 0,02–0,2 %,

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

το οποίο οσμωτικό στρες θα απαλυνθεί σε όλα σχεδόν τα είδη ψαριών και ασπόνδυλων που εκτρέφονται σε γλυκό νερό. Θα πρέπει της να επισημανθεί ότι η απότομη πρόσθεση άλατος σε ένα κλειστό σύστημα μπορεί να μειώσει την απόδοση του βιολογικού φίλτρου, επειδή τα νιτροποιητικά βακτηρίδια δεν προσαρμόζονται αμέσως στην αλλαγή της αλατότητας. Το βιολογικό φίλτρο θα προσαρμοστεί στην πρόσθεση άλατος στο νερό αργά και σε διάστημα 3 – 4 εβδομάδων. Στον Πίνακα 7.3 αναφέρονται συνοπτικά τα γενικά χαρακτηριστικά των φυσικοχημικών παραμέτρων που απαιτούνται σε ένα κλειστό σύστημα.

Πίνακας 7.3. Συνιστώμενες τιμές των παραμέτρων του νερού στα κλειστά συστήματα με γλυκό νερό.

Παράμετρος	Συνιστώμενη τιμή ή εύρος τιμών
Θερμοκρασία	Ρύθμιση στο βέλτιστο για το εκτρεφόμενο είδος – απότομες αλλαγές μικρότερες από 3 °C
Διαλυμένο οξυγόνο (DO)	60% και περισσότερο της τιμής κορεσμού, συνήθως άνω των 5 mg/L για είδη των θερμών νερών και άνω των 2 mg/L για το νερό του βιολογικού φίλτρου
Διοξειδίο του άνθρακα (CO ₂)	Λιγότερο από 20 mg/L
pH	7,0 – 8,0
Ολική αλκαλικότητα	50 – 100 mg/L ως CaCO ₃
Ολική σκληρότητα	50 – 100 mg/L ως CaCO ₃
Μη ιονισμένη αμμωνία (NH ₃)	Λιγότερο από 0,05 mg/L
Νιτρώδη-N	Λιγότερο από 0,5 mg/L
Αλάτι	0,02 – 0,2 %

7.2.7. Ανανέωση νερού

Τα περισσότερα κλειστά συστήματα είναι σχεδιασμένα για να αναπληρώνουν σε καθημερινή βάση το 5 με 10 % του συνολικού όγκου του νερού της με φρέσκο. Το ποσοστό αυτό αποτρέπει την υπερβολική συσσώρευση των νιτρικών και άλλων διαλυμένων οργανικών ουσιών, που θα μπορούσαν να καταλήξουν στη δημιουργία προβλημάτων. Της, σε κάποια μέρη δεν είναι διαθέσιμη η καθημερινή αυτή ποσότητα φρέσκου νερού. Σε τέτοια περίπτωση η διαχείριση του συστήματος απαιτεί ύψιστο βαθμό ετοιμότητας και συνεχή άγνογη λειτουργία των συστημάτων καθαρισμού του νερού, η αλλαγή του νερού γίνεται σε ελάχιστο βαθμό και δημιουργείται μια εφεδρική μονάδα αποθήκευσης φρέσκου νερού χωρητικότητας ίσης με το συνολικό όγκο νερού του συστήματος. Αυτό το «ρεζερβουάρ» θα πρέπει να διατηρείται στην κατάλληλη θερμοκρασία και καθαρότητα.

Μετά από την ολοκλήρωση του κάθε κύκλου παραγωγής ψαριών, θα πρέπει να γίνεται ολοκληρωτική αλλαγή του νερού, απαλλάσσοντας το σύστημα από τα συσσωρευμένα νιτρικά και της οργανικούς ρυπαντές, καθώς και από πιθανούς παθογόνους παράγοντες που είχαν αρχίσει να συσσωρεύονται στο πολλαπλά χρησιμοποιημένο νερό.

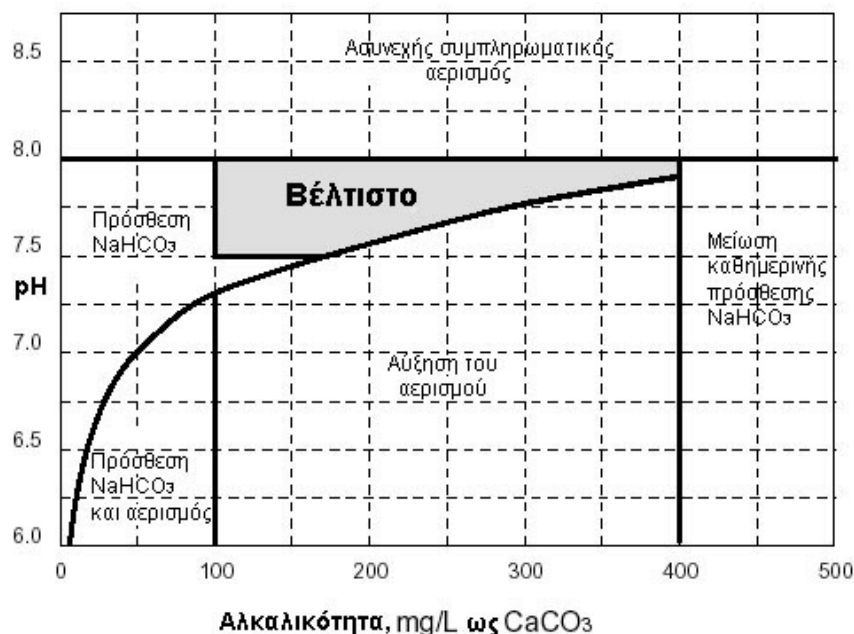
7.2.8. pH και αλκαλικότητα

Η συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου (H^+ ή pH) στο νερό καθορίζει το βαθμό οξύτητας ή βασικότητας του νερού. Το pH του νερού επηρεάζει της της παραμέτρους καθώς και το ρυθμό πολλών βιολογικών και χημικών διεργασιών. Για της λόγους της, το pH θεωρείται ως σημαντική παράμετρος για παρακολούθηση στα κλειστά συστήματα. Τα ψάρια γενικώς μπορούν να αντέξουν εύρος pH 6,0 – 9,5, αν και η απότομη αλλαγή του κατά δύο ή περισσότερες μονάδες είναι βλαβερή ιδιαίτερα στο γ όνο. Τα νιτροποιητικά βακτηρίδια του βιολογικού φίλτρου δεν είναι το ίδιο δραστήρια και αποδοτικά σε μεγάλο εύρος pH. Το βέλτιστο της απόδοσής των βρίσκεται στο εύρος 7 – 8.

Η αλκαλικότητα εκφράζει το μέτρο της ικανότητας του νερού να ουδετεροποιεί την οξύτητα (υδρογονοϊόντα). Τα διττανθρακικά (HCO_3^-) και τα ανθρακικά (CO_3^{2-}) ιόντα είναι οι κύριες βάσεις ή οι «πηγές» της αλκαλικότητας στα περισσότερα νερά. Τα νερά με υψηλή αλκαλικότητα είναι πιο ανθεκτικά (buffered) της αλλαγές του pH από τα λιγότερο αλκαλικά νερά.

Η νιτροποίηση είναι μια διαδικασία που οξονοποιεί το νερό. Καθώς η αμμωνία-άζωτο μετατρέπεται σε νιτρικά-άζωτο από τα νιτροποιητικά βακτηρίδια, παράγονται υδρογονοϊόντα. Τα υδρογονοϊόντα αντιδρούν με υδροξυλίοντα (OH^-), ανθρακικά και διττανθρακικά, με αποτέλεσμα την κατανάλωση αλκαλικότητας και τη μείωση του pH. Επιπλέον, το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από τα ψάρια και της μικροοργανισμούς, αντιδρά με το νερό και σχηματίζει ανθρακικό οξύ που και αυτό μειώνει το pH. Επίπεδα pH κάτω από 4,5 είναι άμεσα επικίνδυνα για τα ψάρια και κάτω από 7,0 μειώνουν τη μεταβολική ικανότητα των νιτροποιητικών βακτηριδίων. Εάν η πηγή που προμηθεύει νερό στο κλειστό σύστημα είναι χαμηλής αλκαλικότητας, θα πρέπει να παρακολουθούνται το pH και η αλκαλικότητα, η δε αλκαλικότητα να διατηρείται σε υψηλό επίπεδο με την προσθήκη βάσεων [$Ca(OH)_2$, CaO , $NaHCO_3$, $NaOH$] ή ανθρακικών αλάτων ($CaCO_3$). Το ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$) της διαλύεται πολύ αργά στο νερό για να μπορεί να εξουδετερώσει μια γρήγορη συσσώρευση οξέως στο νερό. Οι ασβέστες [$Ca(OH)_2$, CaO] και το καυστικό νάτριο ($NaOH$) αντίθετα, διαλύονται γρήγορα αλλά είναι πολύ καυστικά. Αυτές οι ενώσεις θα πρέπει να μην προστίθενται απευθείας της δεξαμενές των ψαριών επειδή μπορεί να βλάψουν τα ψάρια δημιουργώντας πρόσκαιρα στο νερό περιοχές πολύ υψηλού pH. Γενικά η χρήση του διττανθρακικού νατρίου $NaHCO_3$ θεωρείται η ασφαλέστερη όλων και ποσότητα 17-20% επί της καθημερινής ποσότητας τροφής που δίδεται στο σύστημα, επαρκεί για να διατηρεί το pH και την αλκαλικότητα στο επιθυμητό εύρος (Σχήμα 7.5). Για παράδειγμα, εάν η ποσότητα τροφής που δίδεται σε μία εκτροφή είναι 20 kg ανά ημέρα, τότε 3,4 – 4 kg $NaHCO_3$ θα πρέπει να προστίθενται στο σύστημα για να ρυθμίζουν το pH και την αλκαλικότητα.

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)



Σχήμα 7.5. Διάγραμμα διαχείρισης του pH και της αλκαλικότητας σε ένα κλειστό σύστημα με γλυκό νερό, βασισμένο της εξισώσεως της σταθεράς ιονισμού για το ανθρακικό οξύ της 25 °C.

7.2.9. Διαλυμένα αέρια στο νερό

Αν και η συσσώρευση της αμμωνίας στο νερό μπορεί να μειώσει δραματικά την ικανότητα ιχθυοχωρητικότητας της κλειστού συστήματος και αναγνωρίζεται ως το κύριο πρόβλημα, η διατήρηση επαρκούς ποσότητας διαλυμένου οξυγόνου (DO) της δεξαμενής των ψαριών και στο βιολογικό φίλτρο, αποτελεί εξίσου κύριο μέλημα για τον εκτροφέα. Αλλωστε, της περισσότερες περιπτώσεις, η ικανότητα της συστήματος να προσθέτει διαλυμένο οξυγόνο στο νερό αποτελεί τον πρώτο περιοριστικό παράγοντα στην ιχθυοχωρητικότητα (carrying capacity) του συστήματος.

Για να διατηρείται η επαρκής ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου της δεξαμενής, θα πρέπει ο ρυθμός εισαγωγής οξυγόνου στο νερό να είναι ίσος τουλάχιστον με το ρυθμό κατανάλωσής του από τα ψάρια και τα βακτηρίδια. Αν και ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου είναι δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια, μπορεί να γίνει μια καλή εκτίμηση που θα χρησιμεύσει και ως οδηγός λειτουργίας για τη σχεδίαση της κλειστού συστήματος. Ο συνολικός ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου σε κάθε σύστημα είναι το άθροισμα των αναπνευστικών απαιτήσεων των ψαριών, των απαιτήσεων σε οξυγόνο των βακτηριδίων που αποικοδομούν της οργανικούς ρυπαντές και τα υπολείμματα της τροφής (ή της είναι ευρέως γνωστό, Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο – BOD) και των απαιτήσεων για οξυγόνο των νιτροποιητικών βακτηριδίων του βιολογικού φίλτρου. Η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτεί κάποιο σύστημα, εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από τη διάρκεια παραμονής των οργανικών ρυπαντών στο νερό και από τη σχεδίαση του βιολογικού φίλτρου. Στα κλειστά συστήματα που δεν χρησιμοποιούν βυθισμένα βιολογικά φίλτρα (submerged biofilters), και όπου οι στερεοί ρυπαντές απομακρύνονται γρήγορα από το νερό (με μηχανικά φίλτρα), καταναλώνονται περί τα 30 g οξυγόνου για κάθε kg τροφής. Αντίθετα, σε συστήματα που χρησιμοποιούν βυθισμένα βιοφίλτρα, στα οποία τα στερεά διατηρούνται μέσα στο νερό καθόλο το διάστημα μεταξύ των κύκλων

καθαρισμού των φίλτρων, η κατανάλωση οξυγόνου εκτινάσσεται στα 75 g για κάθε kg τροφής. Δεν πρέπει βέβαια να δημιουργηθεί η εντύπωση ότι δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται βυθισμένα βιοφίλτρα, αυτό που πρέπει να καταλάβουμε είναι ότι όταν χρησιμοποιούμε τέτοιο τύπο βιοφίλτρων θα πρέπει να είμαστε προετοιμασμένοι για να προσθέτουμε πολύ περισσότερο οξυγόνο στο νερό.

Το επίπεδο του διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved oxygen – DO) στο νερό των δεξαμενών, θα πρέπει να διατηρείται σε επίπεδα άνω του 60% ή ανώτερα του απόλυτα ελάχιστου 5 mg/L, για να διασφαλίσει την καλή ανάπτυξη των ψαριών της περισσότερες των περιπτώσεων των εκτροφών που γίνονται στα θερμά νερά (>20 °C). Στο βιολογικό φίλτρο της, τα νιτροποιητικά βακτηρίδια δεν θα μεταβολίζουν την αμμωνία αν το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό του φίλτρου πέσει κάτω από τα 2 mg/L. Τα συστήματα αερισμού των κλειστών συστημάτων πρέπει να λειτουργούν συνέχεια για να καλύπτουν της πολύ μεγάλες απαιτήσεις σε οξυγόνο των ψαριών και των μικροοργανισμών του συστήματος. Καθώς τα ψάρια πλησιάζουν το εμπορεύσιμο μέγεθός της και ο ρυθμός παροχής τροφής φθάνει το μέγιστο, η απαίτηση για οξυγόνο μπορεί και να ξεπεράσει την ικανότητα οξυγόνωσης των μηχανών αερισμού για να διατηρήσουν έστω το απολύτως ελάχιστο των 5 mg/L. Τα ψάρια θα αρχίσουν να παρουσιάζουν σημάδια στρες, συγκεντρωμένα στην επιφάνεια και να κολυμπούν στο ρεύμα του νερού που σχηματίζεται από την όποια συσκευή αερισμού (όπου η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι υψηλότερη). Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, τότε επείγοντως θα χρησιμοποιηθεί επιπλέον αερισμός ή/και θα μειωθεί η ποσότητα της τροφής.

Κατά τη διάρκεια της εκτροφής και ιδιαίτερα όταν η παροχή της τροφής φθάνει τα μέγιστα, είναι καλύτερα να δίδονται πολλά και μικρά γεύματα σε διάρκεια 15 – 20 ωρών/24ωρο αντί για δύο ή τρία μεγάλα γεύματα. Τα ψάρια για να πέσουν την τροφή της αυξάνουν δραματικά το ρυθμό της αναπνοής της, προκαλώντας έτσι ταχύτατη μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Τρέφοντας λοιπόν τα ψάρια με της και μικρές ποσότητες τροφής, με τη χρήση αυτόματων ταϊστών ή ταϊστών απαίτησης (demand feeders), επιτρέπουμε στο διαλυμένο οξυγόνο να μειώνεται βαθμιαία χωρίς να φθάνει σε κρίσιμες ελάχιστες συγκεντρώσεις. Γενικά το οξυγόνο πρέπει να ελέγχεται συχνά με οξυγονόμετρο και ιδιαίτερα πριν και μετά τα γεύματα.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι ένα υποπροϊόν της αναπνοής των ψαριών και των βακτηριδίων και συσσωρεύεται στο νερό του κλειστού συστήματος. Τα ψάρια αρχίζουν να στρεσάρονται σε συγκεντρώσεις CO₂ άνω των 20 mg/L, επειδή το αέριο αυτό εμποδίζει την πρόσληψη του οξυγόνου από τα βράγχια. Τα συμπτώματα των ψαριών σε τέτοιες καταστάσεις είναι η άνοδος της στην επιφάνεια του νερού, η συγκέντρωσή της γύρω από τα σημεία αερισμού (αν υπάρχουν), η ληθαργική συμπεριφορά και η μειωμένη όρεξη για κατανάλωση της τροφής. Αν της υπάρχει αρκετό διαλυμένο οξυγόνο, οι ενδεχόμενες υψηλές συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό δεν είναι πολύ τοξικές για τα ψάρια. Γενικά, ως μέτρο ασφαλείας για τα περισσότερα είδη των καλλιεργούμενων ψαριών, το διοξείδιο του άνθρακα στο νερό των δεξαμενών θα πρέπει να διατηρείται σε επίπεδα μικρότερα των 20 mg/L αν είναι να διατηρούνται καλές συνθήκες αύξησης.

Το αέριο άζωτο (N₂) μπορεί της να αποτελέσει πρόβλημα. Η συσσώρευση αζώτου στο νερό στα συστήματα υδατοκαλλιεργειών με θερμό νερό (>20 °C) δεν αποτελεί σύνθητες πρόβλημα, επειδή της θερμοκρασίες αυτές δεν φθάνει εύκολα σε επίπεδα υπερκορεσμού. Το πρόβλημα του υπερκορεσμού σε άζωτο μπορεί να

παρουσιαστεί όταν χρησιμοποιούνται συστήματα οξυγόνωσης (αερισμού) του νερού υπό πίεση, επειδή σε περιπτώσεις ελαττωματικής λειτουργίας των αεριστήρων, μπορεί να γίνεται αναρρόφηση ατμοσφαιρικού αέρα από κάποια οπή ή ρωγμή σε της και το άζωτο να φθάσει σε επίπεδα υπερκορεσμού στο νερό που βγαίνει από τη συσκευή. Οι υδρόβιοι οργανισμοί που αναπνέουν σε νερό με μεγάλη συγκέντρωση διαλυμένου αζώτου, μπορεί να παρουσιάσουν φυσαλίδες αέρα (gas bubbles) στα αιμοφόρα αγγεία της και να ψοφήσουν.

Γενικά, η διατήρηση επαρκούς ποσότητας διαλυμένου οξυγόνου και ελαχιστοποίησης της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα και του αζώτου στο νερό των δεξαμενών στα κλειστά συστήματα, είναι καθήκον υψίστης σημασίας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι σε ένα εντατικά λειτουργούν κλειστό σύστημα (υψηλή ιχθυοπυκνότητα, πολλή τροφή), πιθανή βλάβη στο σύστημα οξυγόνωσης του νερού μπορεί να επιφέρει ολική απώλεια του εκτρεφόμενου πληθυσμού μέσα σε μισή ώρα αν δεν αποκατασταθεί άμεσα η βλάβη.

7.2.10. Γενικά περί οξυγόνωσης και απαερισμού

Η πρόσδωση ατμοσφαιρικού οξυγόνου στο νερό ή η αφαίρεση της περίσσειας του διοξειδίου του άνθρακα από αυτό, μπορούν να επιτευχθούν στα κλειστά συστήματα με μια ποικιλία συσκευών (διαχυτές αέρα, επιφανειακούς αναμοχλευτές και της λεγόμενες στοιβαγμένες στήλες: packed columns, λειτουργούσες υπό πίεση ή χωρίς πίεση). Ο αερισμός του νερού όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ατμοσφαιρικός αέρας, συνήθως πραγματοποιείται της δεξαμενές καλλιέργειας, ενώ όταν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο οι δεξαμενές καλλιέργειας δεν αποτελούν και το καλλίτερο μέρος για οξυγόνωση. Η αιτία για αυτό είναι η μείωση της απόδοσης των αεριστήρων ως της τη μεταφορά του οξυγόνου στο νερό, όσο η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου πλησιάζει το επίπεδο κορεσμού στο νερό της δεξαμενής. Στα κλειστά συστήματα επιζητούμε τη δημιουργία συγκεντρώσεων κορεσμού ή και υπερκορεσμού για το οξυγόνο, συνεπώς ο αερισμός μέσα της δεξαμενές εκτροφής είναι υπερβολικά αναποτελεσματικός.

Το καλλίτερο μέρος για να οξυγονώσουμε ή να απαερώσουμε το νερό είναι στο σύστημα κυκλοφορίας του, ακριβώς πριν το σημείο διανομής και επανεισόδου της δεξαμενές εκτροφής. Σε ένα τέτοιο σημείο το νερό έχει περάσει από τα φίλτρα (μηχανικά και βιολογικά) και παρουσιάζει την ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου (ιδιαίτερα αν το βιολογικό φίλτρο είναι του βυθισμένου τύπου) και τη μέγιστη διοξειδίου του άνθρακα. Από τα διαθέσιμα συστήματα αερισμού το σύστημα της στοιβαγμένης στήλης (Packed Column Aerator – PCA, Σχήμα 5.2, E) είναι ίσως το συμφερότερο, επειδή οξυγονώνει το νερό κατά τη διαδρομή του στο σύστημα κυκλοφορίας και επιπλέον είναι απλό και αποδοτικό. Στην PCA το φτωχό σε οξυγόνο νερό εισέρχεται σε ένα θάλαμο γεμάτο με μικρά πλαστικά υλικά. Μια διάτρητη πλάκα ή της διάτρητος βραχίονας διανέμει ομοιόμορφα το εισερχόμενο νερό στην επιφάνεια της στοιβάς των πλαστικών. Ο θάλαμος PCA δεν είναι πλημμυρισμένος με νερό (δηλαδή δεν δημιουργείται στάθμη νερού) και έτσι η ανταλλαγή των αερίων γίνεται μεταξύ νερού και ατμόσφαιρας, καθώς το νερό κυλά της τα κάτω και διαβρέχει την επιφάνεια των πλαστικών μέσων. Εάν η PCA χρησιμοποιείται για τον απαερισμό του νερού από το διοξείδιο του άνθρακα, η διαδικασία επιταχύνεται εισάγοντας μεγάλη ποσότητα αέρα χαμηλής πίεσης με τη λειτουργία φουσητήρα (blower).

Σε διάφορους τύπους κλειστών συστημάτων ανάλογα με το σχεδιασμό της, χρησιμοποιούνται αντλίες ανύψωσης δια αέρος (air-lift pumps), που αποτελούνται από κάθετους σωλήνες βυθισμένους στο νερό κατά το μεγαλύτερο μέρος της και της οποίους εισάγεται ατμοσφαιρικός αέρας στο κάτω μέρος της. Το μίγμα νερού-αέρα που προκύπτει, ανυψώνεται και εξέρχεται από το άνω ανοικτό μέρος του σωλήνα για να οδηγηθεί οπουδήποτε. Οι αντλίες air-lift αναδεδούν το νερό με φυσαλίδες αέρα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των και ως εκ τούτου απαλλάσσουν το νερό από το CO₂ και συνάμα του προσδίδουν οξυγόνο.

7.2.11. Εκχυση καθαρού οξυγόνου

Στην εντατική ιχθυοκαλλιέργεια και ιδιαίτερα σε αυτή που γίνεται στα κλειστά συστήματα, ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου από τα ψάρια και τα βακτηρίδια, μπορεί να ξεπεράσει την ικανότητα των συνηθισμένων συσκευών αερισμού που απλώς διαχέουν το οξυγόνο της ατμόσφαιρας στο νερό. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιείται καθαρό αέριο οξυγόνο, με σκοπό την αύξηση του ρυθμού πρόσθεσης οξυγόνου και την επίτευξη καλλίτερου βαθμού διάλυσής του στο νερό. Η συγκέντρωση κορεσμού του ατμοσφαιρικού οξυγόνου στα γλυκά θερμά νερά (>20 °C) σπάνια ξεπερνά τα 8,7 mg/L. Αν της στο σύστημα οξυγόνωσης χρησιμοποιηθεί καθαρό οξυγόνο, τότε η συγκέντρωση του οξυγόνου στο νερό μπορεί να αυξηθεί ακόμα και πέντε φορές από αυτή του κορεσμού και να φθάσει και γύρω στα 43 mg/L σε στάνταρτ ατμοσφαιρική πίεση (υπερκορεσμός). Η κατάσταση αυτή επιτρέπει την ανετότερη διάχυση του οξυγόνου στο σύνολο του νερού των δεξαμενών, καθώς το νερό φεύγοντας από τον αεριστήρα σε αυτές της υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου, διαμοιράζεται της δεξαμενές και σταθεροποιείται σε επίπεδα οξυγόνου γύρω στον κορεσμό, που σε κάθε περίπτωση της δεν πρέπει να είναι χαμηλότερα των 7 mg/L.

Της μέτρο σύγκρισης για την αποτελεσματικότητα της χρησιμοποίησης καθαρού οξυγόνου της υδατοκαλλιέργειας, είναι και η αποδοτικότητα απορρόφησης του οξυγόνου από το νερό του συστήματος έγχυσης ή διάχυσης. Ως αποδοτικότητα απορρόφησης ορίζεται το πηλίκο του βάρους του απορροφούμενου οξυγόνου από το νερό, της το βάρος του οξυγόνου που εκχύνεται ή διαχέεται από το σύστημα. Οι κατάλληλα σχεδιασμένες συσκευές διάχυσης καθαρού οξυγόνου, μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις απορρόφησης οξυγόνου περισσότερο και από 90%. Πάντως, της και στην περίπτωση του απλού αερισμού (με ατμοσφαιρικό αέρα) που γίνεται συνήθως της δεξαμενές εκτροφής, δεν συμφέρει να διαχέουμε καθαρό οξυγόνο της δεξαμενές με τη χρήση απλών πορωδών πετρών διάχυσης. Οι δεξαμενές έχουν μικρό βάθος, μικρότερο το 1,5 m, και οι φυσαλίδες κατά την ανύψωσή της στο νερό θα έχουν περιορισμένο χρόνο επαφής με αυτό, με αποτέλεσμα η αποδοτικότητα της οξυγόνωσης να μην ξεπερνά το 40%. Τα σωστά συστήματα οξυγόνωσης με καθαρό οξυγόνο είναι έτσι σχεδιασμένα που να μεγιστοποιούν τόσο το χρόνο όσο και την επιφάνεια επαφής νερού-οξυγόνου. Αυτό επιτυγχάνεται (Σχήμα 5.3) με τη χρήση σωλήνων αντίθετης ροής νερού-οξυγόνου, συσκευών PCA, σωλήνων τύπου U ή μεταφορείς καθοδικής ροής φυσαλίδων (down-flow bubble contactor). Το νερό που έχει υπερκορεσθεί με οξυγόνο θα πρέπει να εισάγεται της δεξαμενές εκτροφής σε σημείο κοντά στο βυθό και να αναμιγνύεται ομοιόμορφα με το νερό της δεξαμενής. Η σωστή ανάμιξη του υπερκορεσμένου σε οξυγόνο νερού, με το υπόλοιπο νερό της δεξαμενής είναι μια κρίσιμη διαδικασία. Το διαλυμένο οξυγόνο θα διαφύγει στην ατμόσφαιρα εάν το νερό αναδεδείται δυνατά.

7.3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

7.3.1. Εφοδιασμός (stocking)

Η διαχείριση της παραγωγής (management) αρχίζει πριν τα ψάρια τοποθετηθούν στο σύστημα. Της είναι το σύνθημα η εκτροφή αρχίζει με γόνου ψαριού. Ο γόνος θα πρέπει να είναι εξαιρετικής ποιότητας, να έχει αγοραστεί από αξιόπιστο προμηθευτή και να έχει φθάσει στη μονάδα χωρίς υπερβολικό στρες. Εάν η εκτροφή στο κλειστό σύστημα αρχίσει με ταλαιπωρημένο ή άρρωστο γόνου, θα καταλήξει σε αποτυχία.

Τα ψάρια πριν τοποθετηθούν της δεξαμενές εκτροφής θα πρέπει να ελεγχθούν για πιθανά παράσιτα ή συμπτώματα ασθενειών. Για το λόγο αυτό απαιτείται η διατήρησή της για ένα μικρό αρχικό διάστημα σε δεξαμενές καραντίνας. Της δείγμα αυτών να εξετασθεί σε ιχθυοπαθολογικό εργαστήριο και εφόσον αποδειχθούν εντάξει τότε να μπουν στο σύστημα. Σε αντίθετη περίπτωση και εφόσον αυτό είναι δυνατό να υποστούν θεραπεία. Αν στο σύστημα αφεθούν να εισαχθούν ασθένειες είναι πολύ δύσκολο να καταπολεμηθούν, επειδή οι θεραπείες μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργία του βιολογικού φίλτρου (που ως γνωστόν βασίζεται της αποικίες των νιτροποιητικών βακτηριδίων).

Σε ένα κλειστό σύστημα εκτροφής με θερμό νερό, είναι πολύ πιθανό να έχει επιλεγεί θερμοκρασία εκτροφής γύρω της 25 °C. Της, ο γόνος μεταφέρεται στη μονάδα σε δροσερό νερό (~20 °C). Πριν εισαχθεί στο νερό των δεξαμενών, θα πρέπει να εγκλιματιστεί στη θερμοκρασία και το pH που επικρατούν της δεξαμενές. Τα ψάρια γενικώς μπορούν να αντέξουν απότομη μεταβολή 3 °C χωρίς να παρουσιάσουν προβλήματα. Αλλαγές μεγαλύτερες των 3 °C θα πρέπει να γίνονται πολύ βαθμιαία σε βήματα των 0,3 °C κάθε 20-30 λεπτά. Ακόμα καλλίτερη μέθοδος εκκίνησης είναι όταν όλο το σύστημα έχει θερμοκρασία παρόμοια με αυτή του νερού μεταφοράς του γόνου και κατόπιν αυξάνεται βαθμιαία σε ένα διάστημα μερικών ωρών ή ημερών.

Τα κλειστά συστήματα πρέπει να λειτουργούν συνεχώς με τη μέγιστη δυνατή ιχθυοπυκνότητα (με ότι ρίσκα αυτό συνεπάγεται) για να είναι οικονομικώς αποδοτικά. Έτσι λοιπόν κατά την αρχική φάση λειτουργίας των, όταν είναι στοκαρισμένα με γόνου περίπου στο ένα δέκατο της ιχθυοχωρητικότητάς των, δεν είναι οικονομικά συμφέρον να δουλεύουν όλα τα συστήματα άντλησης και αερισμού. Η καλή οικονομική διαχείριση επιβάλλει το στοκάρισμα του γόνου σε εξαιρετικά υψηλές πυκνότητες (περί τα 1000 ιχθύδια / m³) σε λίγες μόνο δεξαμενές και με την πρόοδο της εκτροφής τη διαμοίρασή του σε περισσότερες δεξαμενές.

Η παροχή της τροφής θα πρέπει να είναι η βέλτιστη για την επίτευξη γρήγορου ρυθμού αύξησης και κοντά στην αντοχή του συστήματος, δηλαδή σε ποσότητες τέτοιες που δεν θα δημιουργούν πρόβλημα στην διατήρηση της καλής ποιότητας του νερού (αμμωνία, αιωρούμενα-διαλυμένα στερεά, κ.λπ.).

7.3.2. Τάϊσμα

Η εύρεση της μέγιστης ποσότητας της τροφής που μπορούμε να δώσουμε στα ψάρια χωρίς αυτή να σπαταληθεί, αποτελεί ένα κύριο πρόβλημα σε κάθε τύπο υδατοκαλλιέργειας. Η παροχή της τροφής εξαρτάται από το μέγεθος του ψαριού. Τα μικρότερου μεγέθους ψάρια σε σύγκριση με τα μεγαλύτερου μεγέθους, καταναλώνουν αναλογικά περισσότερη τροφή ως ποσοστό του σωματικού της βάρους ανά ημέρα (Πίνακας 7.4). Της χρησιμοποιούνται τροφές με υψηλό περιεχόμενο σε πρωτεΐνη (40-50%), στα νεαρά ιχθύδια (fingerlings) παρέχεται τροφή σε ποσοστό 3-4% του σωματικού

της βάρους ανά ημέρα. Από τα 100 περίπου g και μέχρι το τέλος της εκτροφής, το ποσοστό σταδιακά θα μειωθεί σε λιγότερο από 2 % / ΣΒ /ημέρα. Δυστυχώς, στα κλειστά συστήματα δεν μπορεί να εφαρμοσθεί ο πρακτικός κανόνας ταΐσματος που εφαρμόζεται της ιχθυοκαλλιέργειας σε χωμάτινες δεξαμενές, κατά τον οποίο τρέφουμε τα ψάρια με ποσότητες τέτοιες που θα της καταναλώσουν σε 5-10 λεπτά. Μια τέτοια πρακτική (με της αβεβαιότητες που ενέχει) στα κλειστά συστήματα, μπορεί να δημιουργήσει υπερβολικό οργανικό φορτίο και να προκαλέσει υποβάθμιση του νερού, ενώ συνάμα θα ξεπεράσει την ικανότητα καθαρισμού των βιολογικών φίλτρων.

Στον Πίνακα 7.5 καταγράφεται ένα τυπικό πρόγραμμα διατροφής για ψάρια των θερμών νερών (π.χ. τιλάπια), σε κλειστό σύστημα με θερμοκρασία εκτροφής 29 °C και τροφή χαμηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη (~30%). Τα ψάρια θα ξεκινήσουν την εκτροφή ως πολύ μικρός γόνος (~0,02 g) και θα συλλεχθούν στα 450 g μετά από περίπου 250 ημέρες. Ο συντελεστής απόδοσης (μετατρεψιμότητας) της τροφής εκτιμάται στα 1,5:1, δηλαδή 1,5 kg τροφής για να πάρουμε 1 kg ψαριών. Οι Πίνακες 7.4 και 7.5 πρέπει να ληφθούν υπόψη ως παραδειγματικές προσεγγίσεις στο θέμα της διατροφής που αναλύεται εδώ. Ανάλογα με το είδος του εκτρεφόμενου ψαριού και τη θερμοκρασία εκτροφής τα ποσοστά θα ποικίλλουν. Πάντως αξίζει να επισημανθεί το μεγαλύτερο ποσοστό της παρεχόμενης τροφής του Πίνακα 7.5, που αφορά τροφή με χαμηλό ποσοστό πρωτεΐνης (~30%), σε σύγκριση με το αντίστοιχο για παρόμοια βάρη ψαριών του Πίνακα 7.4, που αφορά τροφή με υψηλό ποσοστό πρωτεΐνης (45-50%).

Η **αύξηση** και ο **συντελεστής μετατροπής των τροφών** υπολογίζονται ζυγίζοντας ένα δείγμα ψαριών από την κάθε δεξαμενή. Κατόπιν υπολογίζεται ο συντελεστής μετατροπής και το νέο ποσοστό παροχής τροφής από το δείγμα. Για παράδειγμα, σε μια δεξαμενή, 1000 ψάρια κατανάλωναν 4,5 kg τροφής/ημέρα για της τελευταίες 10 ημέρες (συνολικά 45 kg τροφής). Δέκα ημέρες ενωρίτερα λήφθηκε δείγμα ψαριών και βρέθηκε ότι είχαν μέσο βάρος 0,15 kg, δηλαδή συνολικά 150 kg. Σήμερα έγινε καινούργια δειγματοληψία, συλλέχθηκαν τυχαία 25 ψάρια και ζυγίστηκαν. Τα 25 ψάρια ζυγίζουν συνολικά 4,5 kg δηλαδή μέσο βάρος ανά ψάρι 0,18 kg. Εάν το δείγμα αυτό θε ωρηθεί αντιπροσωπευτικό, τότε τα 1000 ψάρια θα ζυγίζουν 180 kg. Έτσι η αύξηση της συνολικής βιομάζας στη δεξαμενή αυτή θα είναι $180 - 150 = 30$ kg. Τα ψάρια της προαναφέρθηκε κατανάλωσαν συνολικά 45 Kg τροφής της τελευταίες 10 ημέρες και κέρδισαν 30 kg σε βάρος. Ο συντελεστής μετατροπής της τροφής θα είναι 1,5:1 (45:30). Με άλλα λόγια τα ψάρια κέρδισαν 1 kg βάρους για κάθε 1,5 kg τροφής που κατανάλωσαν. **Τώρα, το ποσοστό της παρεχόμενης τροφής θα πρέπει να ρυθμιστεί στο νέο βάρος των ψαριών.** Για να γίνει αυτό πολλαπλασιάζουμε το υπολογισθέν συνολικό βάρος ψαριών (180 kg) με το ποσοστό τροφής/σωματικό βάρος ψαριών για ψάρια βάρους 0,18 kg από τον Πίνακα 7.4 Από τον Πίνακα 7.4 προκύπτει ότι για ψάρια 0,18 kg το ποσοστό τροφής/σωματικό βάρος ψαριών/ημέρα πρέπει να είναι μεταξύ 2,75 και 3%. Εάν επιλέξουμε 3% τότε $180 \cdot 0,03 = 5,4$. Δηλαδή το νέο ποσοστό παροχής τροφής θα είναι 5,4 kg ανά ημέρα για της επόμενες 10 ημέρες. Συνολικά θα δοθούν 54 kg τροφής. Ακολουθώντας το παραπάνω πρόγραμμα δειγματοληψίας, ο εκτροφέας μπορεί να παρακολουθήσει με αρκετή ακρίβεια την αύξηση και το ρυθμό μετατροπής της τροφής και να βασιστεί σε αυτά για μελλοντικούς διαχειριστικούς χειρισμούς.

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

Πίνακας 7.4. Εκτιμώμενη παροχή τροφής υψηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη ανά μέγεθος ψαριών, για κατανάλωση από ψάρια των θερμών νερών στα κλειστά συστήματα (SRAC Publication No. 452, 1999).

Μέσο βάρος ψαριού (g)	% ποσότητα τροφής / σωματικό βάρος
9	5,0
18	4,0
27	3,3
113	3,0
227	2,75
340	2,5
454	2,2
681	1,8

Πίνακας 7.5. Συνιστώμενες τιμές ιχθυοπυκνότητας και παροχής τροφής χαμηλής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη ανά μέγεθος ψαριών, για κατανάλωση από την τιλάπια (ψάρι των θερμών νερών) στα κλειστά συστήματα. Καταγράφεται της ο ρυθμός αύξησης ανά μεγέθη και χρόνο εκτροφής (SRAC Publication No. 452, 1999).

Ιχθυοπυκνότητα (ψάρια / m ³)	Αρχικό μέσο βάρος (g)	Τελικό μέσο βάρος (g)	Ρυθμός αύξησης (g/day)	Περίοδος αύξησης (ημέρες)	% παροχή τροφής/ σωματικό βάρος
7950	0,02	0,5 – 1	-	30	20 – 15
3180	0,5 – 1	5	-	30	15 – 10
1590	5	20	0,5	30	10 – 7
989	20	50	1,0	30	7 – 4
494	50	100	1,5	30	4 – 3,5
194	100	250	2,5	30	3,5 – 1,5
106	250	450	3,0	70	1,5 – 1,0

7.3.2.1. Δεξιότητες του ταΐσματος

Το Τάϊσμα προσφέρει την καλλίτερη ευκαιρία για να διαπιστωθεί η γενική κατάσταση της ζωτικότητας των ψαριών. Μια νωχελική αντίδραση των ψαριών στο ερέθισμα της τροφής πρέπει να εκληφθεί ως σήμα συναγερμού. Σε μια τέτοια περίπτωση πρέπει να ελεγχθούν όλοι οι παράγοντες στο σύστημα και ιδιαίτερα αυτοί της ποιότητας του νερού. Αν η διάθεση των ψαριών για να τραφούν ξαφνικά εξαφανισθεί, θα πρέπει να ξεκινήσουν οι διαδικασίες διάγνωσης πιθανής ασθένειας.

Τα ψάρια της προαναφέρθηκε στα προηγούμενα, είναι καλύτερα να τρέφονται με περισσότερα από ένα γεύματα την ημέρα. Τα πολλαπλά γεύματα απαλύνουν την οργανική φόρτιση του βιολογικού φίλτρου και συμβάλλουν στην αποφυγή ξαφνικής μείωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Από ερευνητικά δεδομένα έχει βρεθεί της, ότι τα μικρά ψάρια μεγαλώνουν ταχύτερα εάν τρέφονται με πολλά γεύματα κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Της βρέθηκε ότι, τα πολλαπλά ημερήσια γεύματα μειώνουν τα προβλήματα που οφείλονται στην «καταπίεση» των ψαριών μεγαλύτερου μεγέθους στα μικρότερα, όσον αφορά τη διεκδίκηση της τροφής, λόγω δημιουργίας κάποιας μορφής «ιεραρχίας» στον εκτρεφόμενο πληθυσμό ορισμένων ειδών (π.χ. χέλια). Υπάρχουν εκτροφείς που

τρέφουν τα ψάρια με πολύ μεγάλη συχνότητα ακόμα και κάθε μισή ώρα. Της θα πρέπει να προσεχθεί το εξής. Εάν τα πολλαπλά γεύματα δίδονται σταθερά σε ένα ορισμένο μέρος της δεξαμενής, μπορεί να προκληθεί το φαινόμενο της επικράτησης ορισμένων ψαριών που θα φυλάσσουν το μέρος αυτό ως «ιδιοκτησία» της εμποδίζοντας τα υπόλοιπα να τραφούν αποτελεσματικά. Σε μια τέτοια περίπτωση συνιστάται η χρησιμοποίηση ταΐστρών που κατανέμουν την τροφή σε μια ευρεία περιοχή της δεξαμενής. Το ταΐσμα μπορεί να γίνει με το χέρι, με ταΐστρες κατ'απαίτηση (demand feeders), ή με αυτόματες ταΐστρες, αλλά οι δύο τελευταίοι τύποι μπορούν να δημιουργήσουν τα προαναφερόμενα φαινόμενα ιεραρχίας στα ψάρια. Οποια μέθοδος τελικά επιλεγεί, θα πρέπει να προσεχθεί η ομοιόμορφη κατανομή της τροφής και η αποφυγή της υπερβολικής παροχής τροφής (overfeeding).

Η τροφή θα πρέπει να αγοράζεται πάντοτε από αξιόπιστη εταιρεία και να είναι υψηλής ποιότητας. Θα πρέπει να φυλάσσεται σε δροσερό και ξηρό μέρος και να χρησιμοποιείται σε διάστημα το πολύ 60 ημερών από την ημερομηνία παραγωγής της. Εάν παρόλα αυτά παρατηρηθεί ότι η τροφή έχει μουχλιάσει, το χρώμα της είναι αλλαγμένο ή έχει δημιουργήσει σβώλους, θα πρέπει πάραυτα να καταστραφεί. Η **μούχλα** στην τροφή μπορεί να δημιουργήσει **αφλατοξίνες**, ουσίες οι οποίες στρεσάρουν ή και σκοτώνουν τα ψάρια. Η ποιότητα της τροφής χειροτερεύει με το πέρασμα του χρόνου ειδικά όταν είναι αποθηκευμένη σε υγρό και θερμό μέρος. Η ασθένεια η επιλεγόμενη «**έλλειψη αίματος**» (**no blood**), σχετίζεται με τροφές ελλειμματικές σε ορισμένες βιταμίνες. Τα συμπτώματά της συνίστανται σε χλωμά ψάρια με βράγχια λευκά και με αίμα ξεπλυμένου χρώματος (σχεδόν διαφανές υγρό και όχι κόκκινο). Μια άλλη διατροφική ασθένεια είναι γνωστή ως το **σύνδρομο της «σπασμένης ράχης» (broken back syndrome)** και προκαλείται από έλλειψη βιταμίνης C. Η αντιμετώπιση των παραπάνω ασθενειών συνίσταται στη διακοπή της διατροφής με τη χρησιμοποιούμενη τροφή και η άμεση αντικατάστασή της με άλλη φρέσκια ή άλλου τύπου (μάρκας).

Η σκόνη που συνήθως συνοδεύει της πελέτες της τροφής, γενικώς δεν καταναλώνεται από τα ψάρια και το μόνο αποτέλεσμα που έχει είναι να αυξάνει τα οργανικά σκουπίδια στο σύστημα, με αποτέλεσμα να επιβαρύνονται τα μηχανικά και βιολογικά φίλτρα. Για το λόγο αυτό στα κλειστά συστήματα συνιστάται το κρησάρισμα της τροφής πριν το ταΐσμα.

7.3.2.2. Δυσάρεστες μυρωδιές (off-flavor)

Η δημιουργία δυσάρεστων μυρωδιών στα κλειστά συστήματα αποτελεί κοινό και επιμέμον πρόβλημα. Πολύ συχνά και πριν τα ψάρια πωληθούν, απαιτείται η μεταφορά της σε ένα σύστημα εξυγίανσης με καθαρό διαυγές νερό απαλλαγμένο από οργανικό φορτίο, με σκοπό την εξαφάνιση της όποιας δυσάρεστης μυρωδιάς των. Ο καθαρισμός της μπορεί να διαρκέσει από λίγες ημέρες έως αρκετές εβδομάδες και εξαρτάται από τον τύπο και την ένταση της δυσάρεστης μυρωδιάς. Εάν τα ψάρια παραμείνουν στο σύστημα καθαρισμού για μεγάλο διάστημα, η παροχή της τροφής θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, αλλιώς μπορεί να δημιουργηθούν και στο χώρο αυτό δυσάρεστες μυρωδιές.

7.4. Ο ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΣΤΡΕΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΣΘΕΝΕΙΩΝ

Το κλειδί της επιτυχίας στη διαχείριση (management) της εκτροφής ψαριών είναι η διαχείριση του στρες. Τα ψάρια μπορούν να στρεσαριστούν από αλλαγές στη θερμοκρασία και την ποιότητα του νερού, από της χειρισμούς (δίχτυασμα, απόχιασμα), από διατροφικές ανεπάρκειες και από την έκθεσή της σε παράσιτα και ασθένειες. Το στρες αυξάνει την ευπάθεια των ψαριών της ασθένειες, οι οποίες με τη σειρά της μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφικές απώλειες αν δεν ανιχνευθούν και αντιμετωπισθούν άμεσα. Για να μειωθεί το στρες, τα ψάρια θα πρέπει να υφίστανται απαλούς χειρισμούς, να διατηρούνται σε σωστή ποιότητα νερού και να προστατεύονται από την έκθεσή της σε αλλαγές του νερού της το χειρότερο και από της ασθένειες. Ο ήχος και το φως μπορούν της να στρεσάρουν τα ψάρια. Ξαφνικοί ήχοι και θόρυβοι ή φλας φωτός, προκαλούν της χαρακτηριστικές αντιδράσεις ξαφνιάσματος και διαφυγής των ψαριών. Αυτή η αντίδραση στον περιορισμένο χώρο μιας δεξαμενής, μπορεί να οδηγήσει τα ψάρια σε χτυπήματα στα τοιχώματα και να προκαλέσει τραυματισμό. Τα ψάρια γενικώς είναι ευαίσθητα στο φως, ειδικά αν η έντασή του είναι μεγάλη ή ανάβει απότομα. Για το λόγο αυτό, σε πολλά κλειστά συστήματα, ο φωτισμός είναι διάχυτος και απαλός, ειδικά γύρω από της δεξαμενές των ψαριών.

7.4.1. Ασθένειες

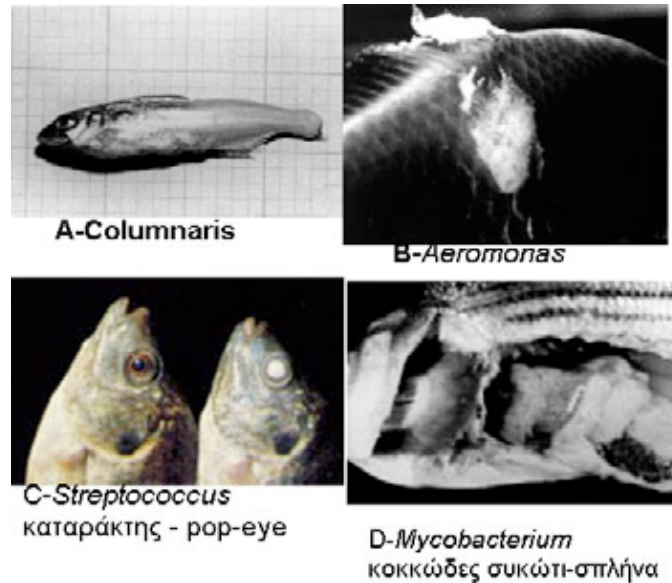
Υπάρχουν 100 και πλέον ασθένειες που προσβάλλουν αδιάκριτα τα περισσότερα είδη ψαριών. Ορισμένες πάλι εμφανίζονται μόνο σε ορισμένα είδη. Οργανισμοί που είτε παρασιτούν στα ψάρια είτε προκαλούν ασθένειες είναι οι ιοί, τα βακτηρίδια, οι μύκητες, τα πρωτόζωα, τα καρκινοειδή και οι διάφορες κατηγορίες σκωλήκων. Όλοι αυτοί μπορεί να είναι μεταδοτικοί. Ως μη μεταδοτικές ασθένειες αναφέρονται χαρακτηριστικά το «σοκολατί αίμα» (brown blood) που οφείλεται στα νιτρώδη, η «έλλειψη αίματος» και το σύνδρομο της «σπασμένης ράχης». Οποιαδήποτε από της παραπάνω ασθένειες μπορεί να αποτελέσει σοβαρό πρόβλημα στα κλειστά συστήματα. Οι ασθένειες μπορούν να εισαχθούν στο σύστημα από το νερό, από τα ψάρια και από της συσκευές του συστήματος. Ο πιθανότερος τρόπος εισαγωγής της είναι με το νερό της μεταφοράς των ψαριών και ειδικότερα δια μέσου των ψαριών, των δίχτυων-δοχείων-γαντιών-κ.λπ., τα οποία μετακινούνται μεταξύ των δεξαμενών. Για το λόγο αυτό, το νερό από τα δοχεία μεταφοράς δεν πρέπει να χύνεται στο νερό των δεξαμενών εκτροφής. Τα της εισαγωγή ψάρια θα πρέπει να μπαίνουν αρχικά σε καραντίνα, να ελέγχονται για ασθένειες και να κουράρονται κατάλληλα. Τα εργαλεία πρέπει να αποστειρώνονται (π.χ. με βρέξιμο σε διάλυμα χλωρίου) πριν έλθουν σε επαφή με το νερό των δεξαμενών. Τα κύρια σημάδια του στρες και των ασθενειών των ψαριών περιλαμβάνουν γενικά τα παρακάτω:

- Ευερεθιστικότητα
- Τινάγματα (flashing) ή στριφογυρίσματα
- Πληγές της επιδερμίδας ή των πτερυγίων
- Αλλαγή χρώματος, συνήθως της το σκούρο
- Παραμονή στην επιφάνεια
- Ανώμαλη κολύμβηση
- Μείωση της όρεξης για τροφή
- Κατάποση (gulping) στην επιφάνεια
- Σταμάτημα της διατροφής
- Θνησιμότητα

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

Αν εμφανιστεί οποιοδήποτε από τα παραπάνω συμπτώματα, ο εκτροφέας πρέπει να ελέγξει διεξοδικά την ποιότητα του νερού και να υποβάλλει για διάγνωση από ιχθυοπαθολόγο ένα δείγμα ψαριών που παρουσιάζουν τα όποια από τα παραπάνω συμπτώματα.

Οι πιο κοινές ασθένειες στα κλειστά συστήματα προκαλούνται από βακτηρίδια και πρωτόζωα. Ορισμένες από αυτές εμφανίζουν ιδιαίτερη συχνότητα και επιμονή της οι πρωτοζωικής φύσεως Ich (*Ichthyophthirius*) και *Trichodina* και οι βακτηριδιακής φύσεως *columnaris*, *Aeromonas*, *Streptococcus* και *Mycobacterium* (Σχήμα 7.6).



Σχήμα 7.6. Χαρακτηριστικά συμπτώματα ορισμένων ασθενειών στα ψάρια, (SRAC Publication No. 452).

Η καταπολέμηση των ασθενειών πρέπει να γίνεται μόνο με εγκεκριμένα φάρμακα. Πάντα της οι θεραπείες παρουσιάζουν προβλήματα. Στα κλειστά συστήματα οι θεραπείες με διάφορα χημικά μπορούν να καταστρέψουν τη λειτουργία του βιολογικού φίλτρου. Η δραστηριότητα των νιτροποιητικών βακτηριδίων του βιολογικού φίλτρου αναστέλλεται από τη φορμόλη, το θειικό χαλκό, το υπερμαγγανικό κάλιο (potassium permanganate) και ορισμένα αντιβιοτικά. Ακόμα και απότομες αλλαγές στην αλατότητα μπορούν να έχουν παρόμοια δράση. Για το λόγο αυτό, το κλειστό σύστημα θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί με τρόπο που να επιτρέπει την προσωρινή απομόνωση του βιολογικού φίλτρου από το κύκλωμα, τη θεραπεία των ψαριών της δεξαμενής της, το άδειασμα του νερού των δεξαμενών με τα υπολείμματα των χημικών, το γέμισμά της με καθαρό νερό και την επανασύνδεση του κυκλώματος με το βιολογικό φίλτρο. Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια των θεραπειών, πρέπει να ελέγχεται το οξυγόνο και ποτέ να μην αφήνεται να γίνει στρεσογόνος παράγοντας. Της μετά την όποια θεραπεία, τα ψάρια έχουν μειωμένη όρεξη για τροφή κάτι που είναι παροδικό. Της Πίνακες 7.6 και 7.7 καταγράφονται πιθανές αιτίες ανωμαλιών στην εκτροφή, βασισμένες της παρατηρήσεις των ψαριών και της χημικές αναλύσεις του νερού.

Πίνακας 7.6. Παρατηρήσεις ανωμαλιών στη συμπεριφορά των ψαριών, πιθανές αιτίες και κατάλληλες διαδικασίες αντιμετώπισής των.

Παρατήρηση	Πιθανή αιτία	Διαδικασία
Ψάρια: Ευερέθιστα, τινάζομενα, ανώμαλη κολύμβηση	<ul style="list-style-type: none"> Υπερβολικός ή απότομος ήχος/φως Παράσιτα Υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας 	Μείωση ήχου/φωτός Εξέταση ψαριών με συμπτώματα Ελεγχος συγκέντρωσης αμμωνίας
Λάμπεις / στριφογύρισμα	Παράσιτα	Εξέταση ψαριών με συμπτώματα
Αλλαγή χρωματισμού / πληγές	Παράσιτα / βακτηρίδια	Εξέταση ψαριών με συμπτώματα
Πρησμένα μάτια / φουσκωμένα	<ul style="list-style-type: none"> Ιοί ή βακτηρίδια Ασθένεια φυσαλίδων 	Εξέταση ψαριών με συμπτώματα Ελεγχος για υπερκορεσμό και εξέταση ψαριών με συμπτώματα
Παραμένουν στην επιφάνεια / δεν κολυμπούν απομακρυνόμενα αν κάτι τα πλησιάζει	<ul style="list-style-type: none"> Παράσιτα Χαμηλό οξυγόνο Υψηλή αμμωνία ή νιτρώδη Χαλασμένη τροφή Υψηλό CO₂ 	Εξέταση ψαριών με συμπτώματα Ελεγχος της συγκέντρωσης οξυγόνου Ελεγχος συγκέντρωσης αμμωνίας-νιτρώδων Ελεγχος χρώματος τροφής και ύπαρξης σβώλων / έλεγχος αίματος των ψαριών Ελεγχος επιπέδου CO ₂
Συγκεντρωμένα γύρω από σημεία εισόδου νερού / αέρα	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό οξυγόνο Παράσιτα / ασθένεια Υψηλή αμμωνία / νιτρώδη Χαλασμένη τροφή 	Ελεγχος της συγκέντρωσης οξυγόνου Εξέταση ψαριών με συμπτώματα Ελεγχος συγκέντρωσης αμμωνίας-νιτρώδων Ελεγχος χρώματος τροφής και ύπαρξης σβώλων / έλεγχος αίματος των ψαριών
«Καταπίνουν» στην επιφάνεια	<ul style="list-style-type: none"> Παράσιτα Χαμηλό οξυγόνο Υψηλή αμμωνία ή νιτρώδη Χαλασμένη τροφή Υψηλό CO₂ 	Εξέταση ψαριών με συμπτώματα Ελεγχος της συγκέντρωσης οξυγόνου Ελεγχος συγκ. Αμμωνίας-νιτρώδων Ελεγχος χρώματος τροφής και ύπαρξης σβώλων / έλεγχος αίματος των ψαριών Ελεγχος επιπέδου CO ₂
Μειωμένη κατανάλωση τροφής	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό οξυγόνο Παράσιτα / ασθένεια Υψηλή αμμωνία / νιτρώδη Χαλασμένη τροφή 	Ελεγχος της συγκέντρωσης οξυγόνου Εξέταση ψαριών με συμπτώματα Ελεγχος συγκ. Αμμωνίας-νιτρώδων Ελεγχος χρώματος τροφής και ύπαρξης σβώλων / έλεγχος αίματος των ψαριών
Σταματούν να τρέφονται	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό οξυγόνο Παράσιτα / ασθένεια Υψηλή αμμωνία / νιτρώδη 	Ελεγχος της συγκέντρωσης οξυγόνου Εξέταση ψαριών με συμπτώματα Ελεγχος συγκ. Αμμωνίας-νιτρώδων
Δυσχρωμία αίματος – Αίμα χρώματος καφέ	Υψηλά νιτρώδη	Εξέταση ψαριών με συμπτώματα: Πρόσθεση 5-6 ppm χλωριόντων για κάθε 1 ppm νιτρώδων, αγορά φρέσκιας τροφής / απόρριψη παλαιάς
Αίμα άχρωμο (έλλειψη αίματος)	Έλλειψη βιταμινών	Εξέταση ψαριών με συμπτώματα: Ελεγχος χρώματος τροφής και ύπαρξης σβώλων, αγορά φρέσκιας τροφής / απόρριψη παλαιάς
Σύνδρομο σπασμένης ράχης ή ραχοκοκαλιά σχήματος “S”	Έλλειψη βιταμίνης C	Εξέταση ψαριών με συμπτώματα: αγορά φρέσκιας τροφής / απόρριψη παλαιάς

Πίνακας 7.7. Πιθανές διαδικασίες αντιμετώπισης προβλημάτων που εντοπίζονται στην ποιότητα του νερού και της τροφής.

Παρατήρηση	Ενδεδειγμένη ενέργεια
Χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου (λιγότερο από 5 mg/L)	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση του αερισμού • Σταμάτημα παροχής τροφής μέχρι την επαναφορά της σωστής συγκέντρωσης • Έλεγχος για συμπτώματα παρασιτισμού ή ασθένειας
Υψηλή συγκέντρωση CO ₂ (άνω των 20 mg/L)	<ul style="list-style-type: none"> • Εγκατάσταση στήλης αερισμού • Αύξηση της έντασης του αερισμού • Έλεγχος για συμπτώματα παρασιτισμού ή ασθένειας
Χαμηλό pH (λιγότερο του 6,8)	<ul style="list-style-type: none"> • Πρόσθεση buffers (NaHCO₃ κ.λπ.) • Μείωση παροχής τροφής • Έλεγχος συγκέντρωσης αμμωνίας / νιτρωδών
Υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας (άνω του 0,05 mg/L ως NH ₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Αλλαγή (μερική) του νερού • Μείωση παροχής τροφής • Έλεγχος στο βιολογικό φίλτρο, pH, αλκαλικότητα, σκληρότητα και οξυγόνο στο βιολογικό φίλτρο
Υψηλή συγκέντρωση νιτρωδών (άνω του 0,5 mg/L)	<ul style="list-style-type: none"> • Αλλαγή (μερική) του νερού • Μείωση παροχής τροφής • Πρόσθεση 5-6 mg/L χλωριόντων (Cl⁻ ως NaCl) για κάθε 1 mg/L νιτρωδών • Έλεγχος στο βιολογικό φίλτρο, pH, αλκαλικότητα, σκληρότητα και οξυγόνο στο βιολογικό φίλτρο • Έλεγχος για συμπτώματα παρασίτων / ασθενειών
Χαμηλή αλκαλικότητα	<ul style="list-style-type: none"> • Πρόσθεση buffers (NaHCO₃ κ.λπ.)
Χαμηλή σκληρότητα	<ul style="list-style-type: none"> • Πρόσθεση ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃) ή χλωριούχου ασβεστίου
Αλλαγμένο χρώμα τροφής ή σβολιασμένη τροφή	<ul style="list-style-type: none"> • Αγορά καινούργιας τροφής, απόρριψη παλαιάς • Έλεγχος για συμπτώματα παρασίτων / ασθενειών

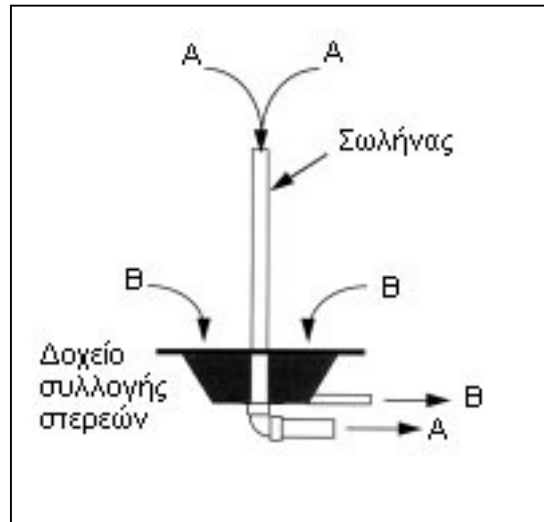
7.5. ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

7.5.1. Καθιζήσιμα στερεά

Τα καθιζήσιμα στερεά είναι γενικά εύκολα αντιμετωπίσιμα και θα πρέπει να απομακρύνονται από το νερό των δεξαμενών όσο το δυνατό γρηγορότερα. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα αν χρησιμοποιείται της δεξαμενές αποχέτευση από το βυθό της. Σε δεξαμενές με κυκλική κυκλοφορία νερού (στρογγυλές, οκταγωνικές, εξαγωνικές, τετράγωνες με αποστρογγυλεμένες γωνίες) και ελάχιστη ανάδευση, τα καθιζήσιμα στερεά καθώς συγκεντρώνονται στο κεντρικό σημείο του βυθού, μπορούν να

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

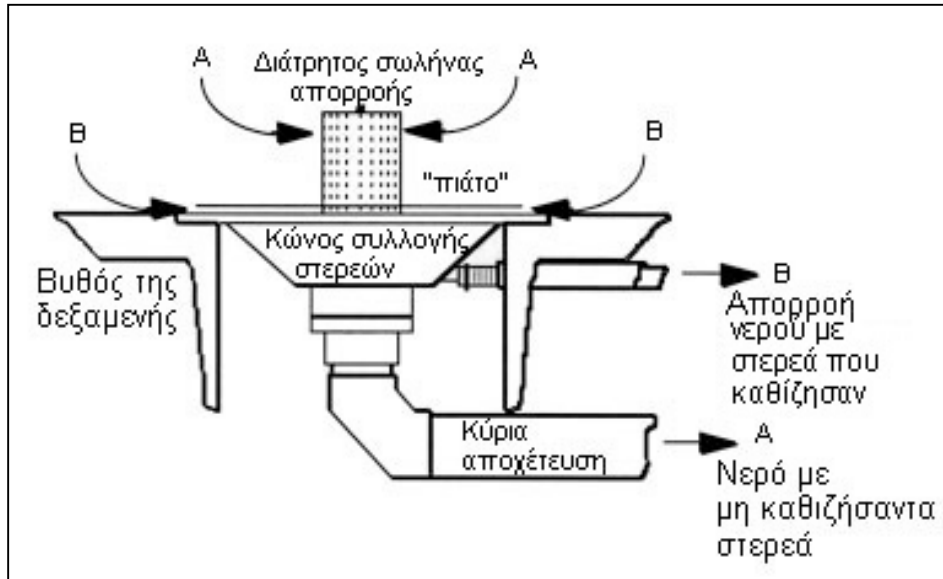
απομακρύνονται παρασυρόμενα από το νερό που αφήνει τη δεξαμενή ή από ένα άλλο μικρότερο ρεύμα νερού από κάποια άλλη έξοδο. Η τελευταία περίπτωση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κεντρική αποχέτευση με δύο εξόδους. Με τη μέθοδο της διπλής εξόδου (Σχήμα 7.7), η ροή του νερού από τη δεξαμενή διαιρείται σε δύο εξόδους, μία σε ένα μικρού διαμέτρου σωλήνα που μεταφέρει τα καθιζήσαντα στερεά και μία σε ένα μεγαλύτερο σωλήνα που μεταφέρει το υπερχειλίζον νερό από την επιφάνεια της στήλης του νερού (μαζί με αιωρούμενα στερεά και ορισμένη ποσότητα καθιζήσιμων στερεών που δεν πρόλαβαν να καθιζάνουν).



Σχήμα 7.7. Τυπική διάταξη αποχέτευσης νερού δεξαμενής εκτροφής ψαριών με διπλή έξοδο. **A** = ροή νερού με αιωρούμενα στερεά, **B** = ροή νερού με τα καθιζήσαντα στερεά.

Τα καθιζήσαντα στερεά πρέπει να απομακρύνονται από το δοχείο συλλογής των στο κέντρο του βυθού της δεξαμενής, σε συνεχή ή σε ημισυνεχή βάση. Το μέγεθος της ροής του νερού που αποχετεύει τα καθιζήσαντα στερεά, καθορίζει και τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή και συμπύκνωσή της, είτε για την περαιτέρω επεξεργασία της είτε για την απόρριψή της. Σε συστήματα εκτροφής με υψηλή ροή νερού που μεταφέρει τα καθιζήσαντα (20 – 50 % της συνολικής ροής της δεξαμενής), για τη συλλογή της χρησιμοποιούνται δεξαμενές καθίζησης, φυγοκεντρικοί διαχωριστές (swirl separators) ή φίλτρα τύπου τύμπανο-κρησάρα (drum screen filters). Σε συστήματα με μικρότερη ροή μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μικρότερα συστήματα καθίζησης. Για παράδειγμα αναφέρεται μια ειδική διαμόρφωση αποχέτευσης νερού με διπλή έξοδο. Κατ'αυτή, το νερό που μεταφέρει τα καθιζήσαντα στερεά (η έξοδος Β του Σχήματος 7.7), μεταφέρεται με αργή ροή μέσα από ένα σωλήνα (κάτω από το επίπεδο του βυθού της δεξαμενής) που τελικά καταλήγει σε ένα εξωτερικό όρθιο σωλήνα που ρυθμίζει και τη στάθμη της δεξαμενής. Επειδή η ροή του νερού είναι αρκετά αργή, τα στερεά που μεταφέρει καθιζάνουν στο χαμηλότερο μέρος του σωλήνα ενώ το απαλλαγμένο από τα στερεά νερό υπερχειλίζει. Ο όρθιος σωλήνας είναι της αφαιρούμενος. Περιοδικά ο σωλήνας αφαιρείται και η ταχύτητα του νερού αυξάνει απότομα, με αποτέλεσμα την παράσυρση και αποχέτευση των στερεών που είχαν καθιζάνει.

Μια άλλη διαμόρφωση διπλής εξόδου νερού απεικονίζεται στο Σχήμα 7.8. Στο σχεδιασμό αυτό το σύστημα της απορροής του νερού είναι παρόμοιο με αυτό του

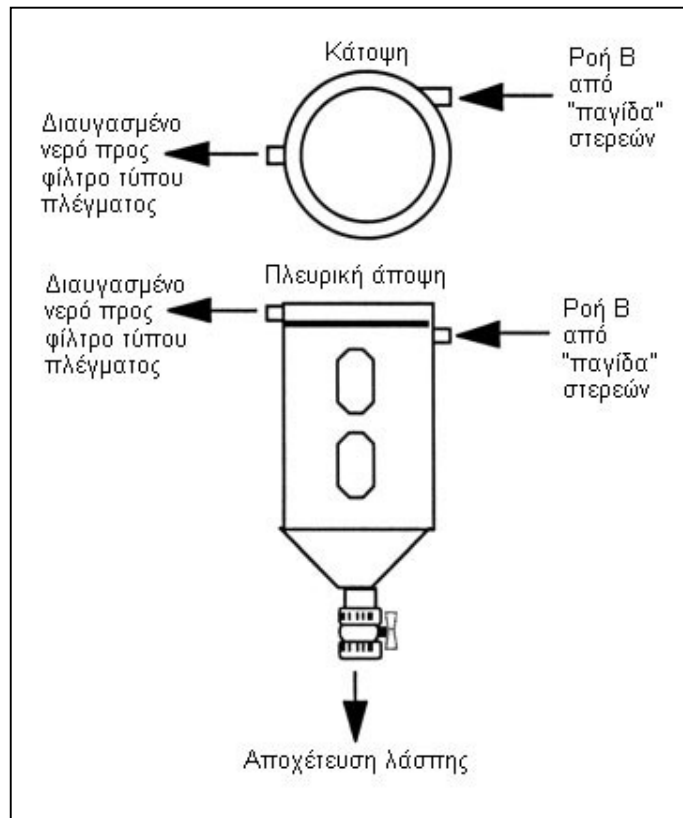


Σχήμα 7.8. Βελτιωμένη διάταξη αποχέτευσης νερού δεξαμενής εκτροφής ψαριών με διπλή έξοδο και «παγίδα στερεών». **A** = ροή νερού με διαφεύγοντα αιωρούμενα στερεά, **B** = ροή νερού με τα καθιζήσαντα στερεά.

Σχήματος 7.7, αλλά διαφέρει σε δύο σημεία. Το πρώτο, είναι ότι το νερό φεύγει από έναν της όρθιο αλλά πιο κοντό κεντρικό σωλήνα που είναι διάτρητος για να συγκρατεί τα περισσότερα αιωρούμενα στερεά και το δεύτερο, ότι στο βυθό της δεξαμενής και λίγο πιο πάνω απ' αυτόν έχει τοποθετηθεί ένα επίπεδο πλαίσιο (πιάτο). Το όλο σύστημα λειτουργεί ως παγίδα στερεών που καταλήγουν στον κώνο συλλογής από κάτω. Το 5% της απορροής του νερού της δεξαμενής φεύγει από την έξοδο **B**, μεταφέροντας το μεγαλύτερο μέρος των στερεών που καθιζάναν και συλλέχθηκαν εκεί. Το 95% φεύγει από την έξοδο **A** μεταφέροντας μικρότερο φορτίο από αιωρούμενα στερεά που πέρασαν από την κρησάρα του όρθιου σωλήνα (**A**). Εξω από τη δεξαμενή, η απορροή **B** που μεταφέρει τα καθιζήσαντα στερεά, χύνεται σε ένα δοχείο-συλλεκτήρα λάσπης (Σχήμα 7.9). Τα στερεά καθιζάνουν και συγκρατούνται εκεί, ενώ το διαυγασμένο νερό υπερχειλίζει και διοχετεύεται για περαιτέρω επεξεργασία. Η λάσπη (με μέσο ξηρό βάρος στερεών 6%) που συγκρατήθηκε στο συλλεκτήρα, αδειάζεται από τον πυθμένα και απορρίπτεται.

Της ορθογώνιες δεξαμενές τύπου raceway με ομαλή ροή νερού (plug flow – ροή νερού με κατεύθυνση παράλληλη του μεγάλου άξονα της δεξαμενής) συγκριτικά με της στρογγυλές δεξαμενές, τα στερεά είναι πολύ περισσότερο δύσκολο να απομακρυνθούν, επειδή η ταχύτητα ροής στον πυθμένα των raceways είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των στρογγυλών. Εάν η ταχύτητα ροής στον πυθμένα μπορούσε να αυξηθεί έτσι που να παρασύρει τα καθιζήσαντα στερεά, τότε αυτά θα μπορούσαν να συλλεχθούν σε μια ειδική «παγίδα στερεών» (sediment trap). Η παγίδα στερεών είναι μια απλή σχετικά διαμόρφωση της δεξαμενής και συνίσταται σε ένα μικρό φρεάτιο κοντά στο σημείο εξόδου νερού της δεξαμενής, κατά μήκος του μικρού άξονα της δεξαμενής και κάθετα στο μεγάλο άξονα. Τα στερεά παρασυρόμενα από το ρεύμα του βυθού συγκεντρώνονται στο φρεάτιο και αποχετεύονται κατάλληλα.

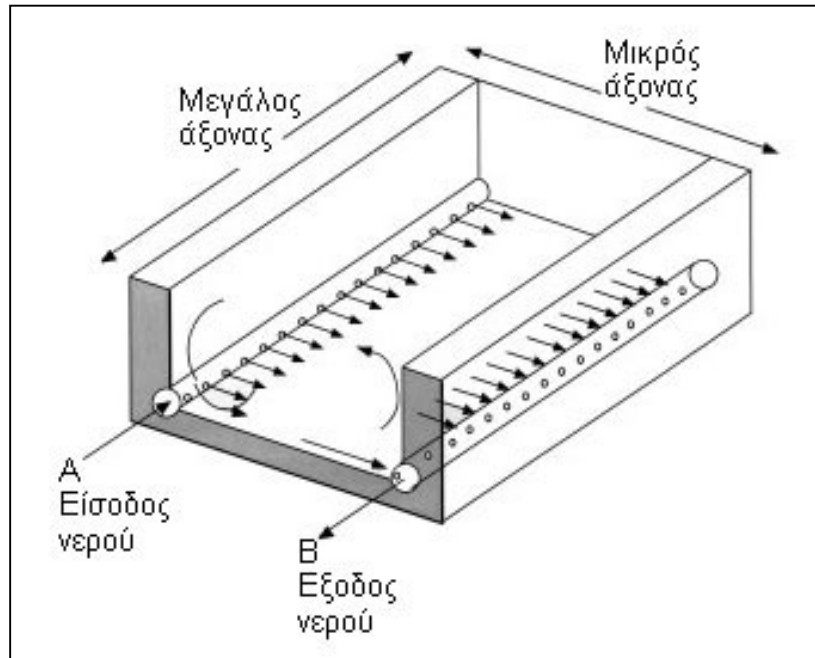
Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)



Σχήμα 7.9. Συλλεκτήρας λάσπης που δέχεται τη ροή Β από τη δεξαμενή εκτροφής (βλέπε Σχήμα 7.8.).

Σε γενικές γραμμές με τα παραπάνω, επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή καθίζηση των στερεών που δημιουργούνται μέσα στη δεξαμενή εκτροφής, σε κάποιο ειδικά διαμορφωμένο μέρος της στο βυθό (κώνος-παγίδα στερεών της στρογγυλής, φρεάτιο-παγίδα στερεών της raceways). Κατόπιν, αυτά διοχετεύονται στην κύρια δεξαμενή συλλογής στερεών. Εκτός της από αυτό το σύστημα υπάρχει και εναλλακτικό. Το εναλλακτικό σύστημα συνίσταται στην ολοσχερή παρεμπόδιση καθίζησης των στερεών στη δεξαμενή εκτροφής και της απομάκρυνσής των μαζί με το νερό της απορροής στη δεξαμενή συλλογής. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει το νερό στη δεξαμενή εκτροφής να αναδεύεται σταθερά σε όλο τον όγκο του. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται σε raceways με συνεχή ανάδευση του νερού (οριζόντια και κάθετα), τοποθετώντας ένα καθόλο το μήκος του διάτρητο σωλήνα παροχής στο βυθό της δεξαμενής και παράλληλα σε μία μακριά πλευρά του, ενώ ο σωλήνας απορροής βρίσκεται απέναντί του στην άλλη πλευρά της δεξαμενής (Σχήμα 7.10). Με τον τρόπο αυτό το νερό εισέρχεται ομοιόμορφα στη δεξαμενή από το σωλήνα παροχής στο βυθό και απορρέει από τον απέναντί του. Το νερό θα πρέπει να εισέρχεται με αρκετά μεγάλη ροή, για να προκαλεί μια περιστροφική κίνηση στον όγκο της δεξαμενής έτσι που τα στερεά να μη μπορούν να καθιζάνουν, με αποτέλεσμα να παρασύρονται από το νερό που απορρέει.

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

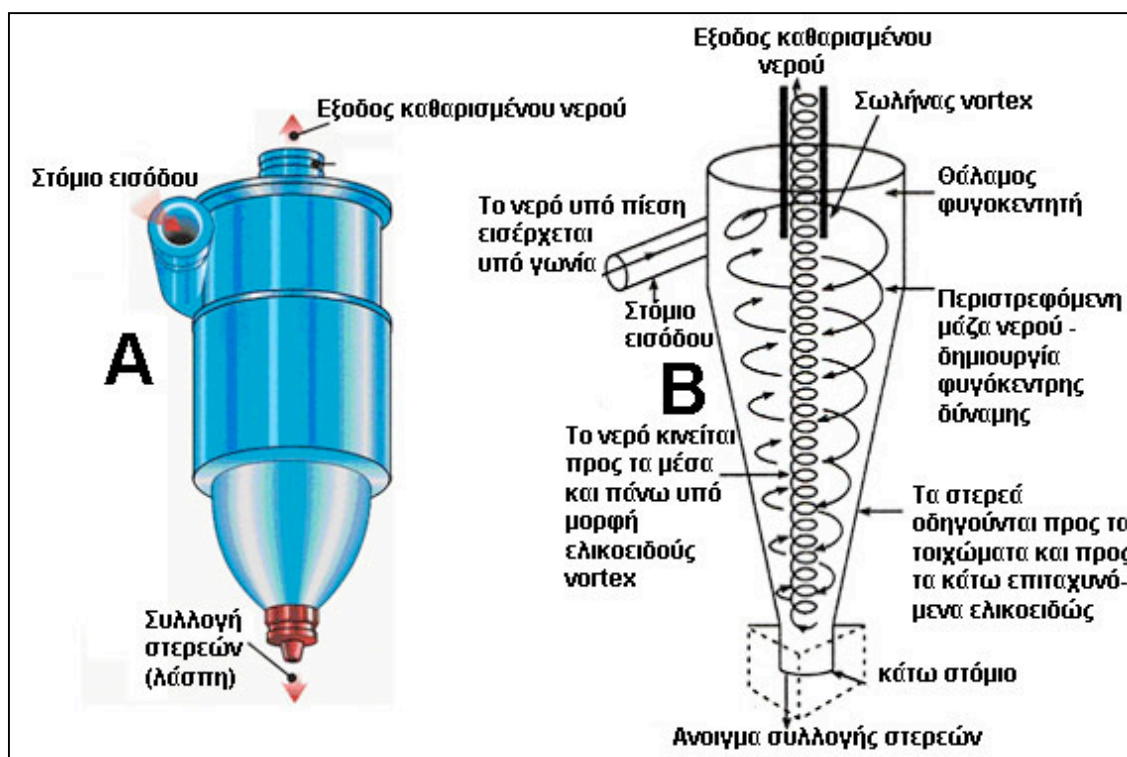


Σχήμα 7.10. Εγκάρσια τομή δεξαμενής εκτροφής τύπου raceway με αντιτιθέμενη ροή (cross-flow). Το νερό εισέρχεται στη δεξαμενή από τον διάτρητο σωλήνα **A** στο βυθό και συλλεγόμενο από τον της διάτρητο σωλήνα **B**, απορρέει. Τα στερεά λόγω της απουσίας ήρεμων ζωνών δεν μπορούν να καθιζάνουν και παρασύρονται με το νερό στο σωλήνα **B**.

Τελικά, όποια μέθοδος και αν ακολουθηθεί, τα καθιζήσαντα στερεά θα φύγουν από της δεξαμενής εκτροφής και θα καταλήξουν σε ειδική/ές δεξαμενή/ές καθίζησης. Της δεξαμενής καθίζησης η ροή του νερού είναι πολύ αργή και τα στερεά δια της βαρύτητας καθιζάνουν. Για την υποβοήθηση της καθίζησης μέσα της δεξαμενής καθίζησης μπορούν να τοποθετηθούν ειδικά πλαστικά φύλλα (lamellae) ή σωλήνες υποβοήθησης καθίζησης. Πολλά από αυτά, ενωμένα σε κατασκευές τύπου block, εμβαπτίζονται μέσα στο νερό της δεξαμενής καθίζησης και σχηματίζουν γωνία σε σχέση με την οριζόντιο (συνήθως 60°). Η διάταξη αυτή επιφέρει μείωση της ταχύτητας κυκλοφορίας του νερού στη δεξαμενή, καθώς και μείωση στην διαδρομή καθίζησης των στερεών μέχρι το βυθό. Χρησιμοποιώντας αυτό το σύστημα υποβοήθησης, μειώνονται οι απαιτήσεις ως της τον όγκο της δεξαμενής καθίζησης, με αποτέλεσμα εξοικονόμηση χώρου στη μονάδα. Το μειονέκτημά της της είναι ότι περιπλέκουν της συνήθεις εργασίες καθαρισμού της δεξαμενής καθίζησης.

Εάν οι δεξαμενής καθίζησης κατασκευαστούν σε χώρο εξωτερικό της κύριας μονάδας εκτροφής, υπάρχουν ορισμένα πλεονεκτήματα. Αυτά είναι: μικρό κόστος κατασκευής, απλότητα λειτουργίας και μικρές ενεργειακές απαιτήσεις. Υπάρχουν της και μειονεκτήματα: μεγάλο μέγεθος, περισσότερος χρόνος για το συνήθη καθαρισμό της και μεγάλη ποσότητα νερού που ξοδεύεται για τη λειτουργία της. Εάν οι δεξαμενής καθίζησης δεν καθαρίζονται τακτικά, τα συλλεχθέντα στερεά θα αποσυντίθενται μέσα στη δεξαμενή, δημιουργώντας αμμωνία και καταναλώνοντας οξυγόνο, επιβάλλοντας έτσι στο σύστημα εκτροφής καινούργια βάρη.

Ενας της τρόπος για την απομάκρυνση των καθιζήσιμων στερεών έξω από της δεξαμενές εκτροφής (και εναλλακτικό ως της της δεξαμενές καθίζησης), είναι και το σύστημα του **φυγοκεντρικού διαχωριστή** (swirl separator ή hydrocyclone). Στο σύστημα αυτό, το νερό με τα στερεά που μεταφέρει εισέρχεται στο κωνικό δοχείο του διαχωριστή υπό γωνία δημιουργώντας έτσι μια περιδινιτική ροή. Τα βαρύτερα στερεά λόγω της φυγοκέντρου κατευθύνονται στα τοιχώματα του δοχείου και καθιζάνουν στον πυθμένα του απ'όπου συνεχώς απομακρύνονται (Σχήμα 7.11). Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι το μικρό του μέγεθος. Το μειονέκτημά του είναι οι μεγάλες απαιτήσεις για νερό που δημιουργεί στο σύστημα εκτροφής, επειδή η απομάκρυνση των στερεών απαιτεί μεγάλη και συνεχή αποχέτευση του νερού.



Σχήμα 7.11. Διαγραμματική απεικόνιση φυγοκεντρικού διαχωριστή (A). Στο B φαίνεται διαγραμματικά η λειτουργία του.

7.5.2. Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών

Από μηχανική άποψη, η διαφορά μεταξύ αιωρούμενων στερεών και καθιζήσιμων στερεών είναι καθαρά πρακτική. Τα αιωρούμενα στερεά δεν καθιζάνουν εύκολα στο νερό των δεξαμενών εκτροφής των ψαριών και δεν αντιμετωπίζονται εύκολα στα κλειστά συστήματα. Οι μοντέρνες μέθοδοι απομάκρυνσής της συνίστανται σε κάποια μορφή μηχανικού φιλτραρίσματος. Οι κύριοι τύποι μηχανικών φίλτρων κατάλληλοι για

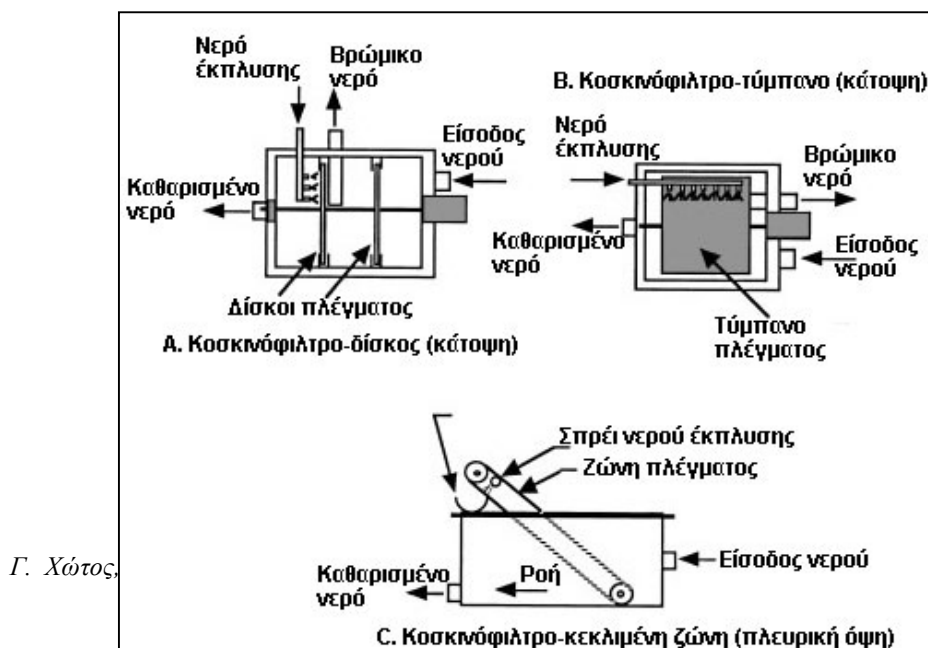
κλειστά συστήματα είναι τα **φίλτρα κόσκινο** ή **κοσκινόφιλτρα** (screen filtration) και τα **διογκούμενα φίλτρα κόκκων** (expandable granular media filtration).

7.5.2.1. Κοσκινόφιλτρα

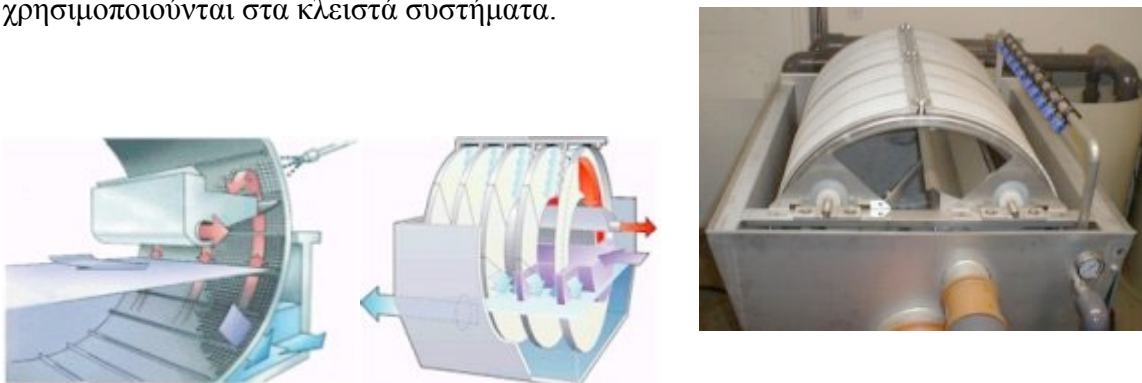
Τα κοσκινόφιλτρα δουλεύουν χρησιμοποιώντας κάποια επιφάνεια (μεταλλική ή πλαστική) ως πλέγμα με πολύ μικρές οπές, μέσα από την οποία διέρχεται το νερό, ενώ τα αιωρούμενα στερεά συγκρατούνται στο πλέγμα. Το πλέγμα βρίσκεται στερεωμένο σε περιστρεφόμενο δίσκο (disk) ή τύμπανο (drum) ή ζώνη μεταφοράς (belt). Η μάζα των στερεών που συσσωρεύεται στο πλέγμα απομακρύνεται μέσω έκπλυσης με νερό υπό πίεση. Το νερό έκπλυσης με τα στερεά που παρέσυρε απομακρύνονται ως βρώμικα. Η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για την έκπλυση είναι μικρή και αποτελεί πεδίο έρευνας για τη συνεχή βελτίωση της αποτελεσματικότητας των κοσκινόφιλτρων.

Τα κόσκινα ανάλογα με τη διαμόρφωσή της διακρίνονται σε δίσκο (Σχήμα 7.12, Α), τύμπανο (Σχήμα 7.12, Β) και κεκλιμένη ζώνη (Σχήμα 7.12, C). Το πλέγμα ανεξάρτητα από τη διαμόρφωσή του (δίσκος, τύμπανο, ζώνη) συνεχώς περιστρέφεται. Στα περιστρεφόμενα κοσκινόφιλτρα-δίσκους, το της καθαρισμό νερό εισέρχεται από σωλήνα τοποθετημένο στη μία άκρη της μονάδας του φίλτρου και υποχρεώνεται να περάσει από διαδοχικούς και τοποθετημένους κάθετα περιστρεφόμενους δίσκους-πλέγματα. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου είναι η μικρή σχετικά επιφάνεια πλέγματος που προσφέρει για την παγίδευση των στερεών. Σε συστήματα εκτροφής με μεγάλη παροχή τροφής, η δημιουργία υπερβολικής συγκέντρωσης στερεών στο νερό μπορεί να προκαλέσει τη γρήγορη συσσώρευσή της στον πρώτο δίσκο του φίλτρου, ο δίσκος θα φράξει μια και το σύστημα έκπλυσης δεν θα προλαβαίνει να τον καθαρίσει, με πιθανό αποτέλεσμα το σπάσιμο του πλέγματος από την πίεση του νερού.

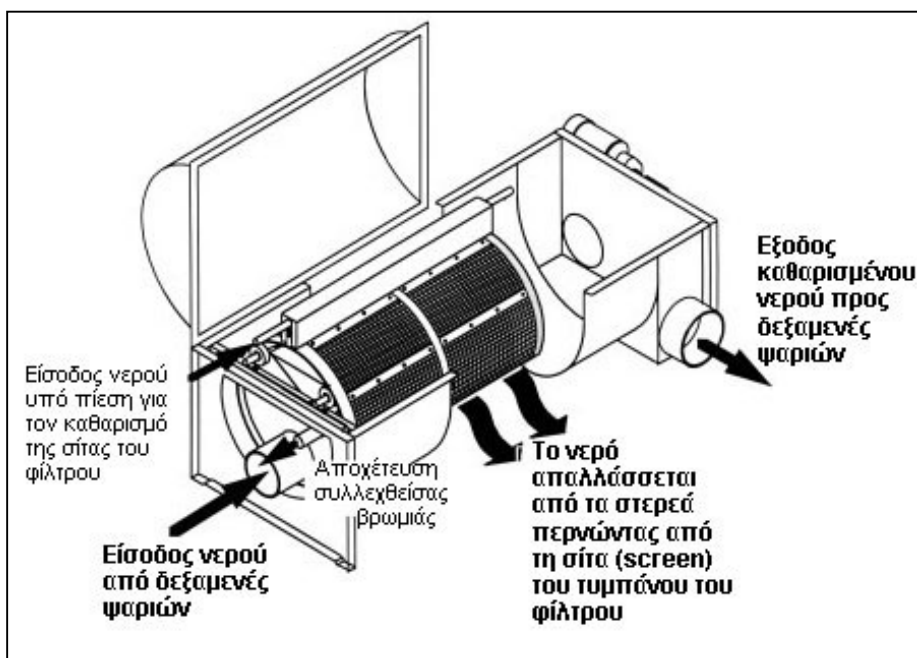
Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος κοσκινόφιλτρου είναι της του τύμπανου. Με τη διαμόρφωση αυτή, το νερό εισέρχεται από το ανοιχτό μέρος του κυλίνδρου (που αποτελεί το λεγόμενο τύμπανο) στο εσωτερικό του και περνά από το πλέγμα που έχει εφαρμοστεί στην επιφάνεια του κυλίνδρου, απαλλασσόμενο από τα στερεά του (Σχήματα 7.13 και 7.14).



Σχήμα 7.12. Διαγραμματική απεικόνιση των τριών τύπων κοσκινόφιλτρων που χρησιμοποιούνται στα κλειστά συστήματα.



Σχήμα 7.13. Λεπτομέρειες κοσκινόφιλτρου τύπου τύμπανου και δίσκου. Δεξιά, φαίνεται το κυλινδρικό περιστρεφόμενο τύμπανο με το πλέγμα που το επικαλύπτει. Τα μπεκ που εκτοξεύουν το νερό καθαρισμού του πλέγματος, φαίνονται στη δεξιά μεριά του. Αριστερά, φαίνεται διαγραμματικά ο τρόπος εκτόξευσης νερού από τα μπεκ και η συλλογή της βρωμιάς στη «σκάφη» συλλογής. Στο μέσον, φαίνεται διαγραμματικά η συστοιχία των δίσκων σε ένα κοσκινόφιλτρο με 5 δίσκους-φίλτρα και η ροή του νερού. Κατεύθυνση ροής του της καθαρισμό νερού-βέλος της τα αριστερά, συλλογή του βρώμικου νερού από τον καθαρισμό των πλεγμάτων και ροή του βρώμικου νερού-βέλος της τα δεξιά.



Σχήμα 7.14. Διαγραμματική απεικόνιση κοσκινόφιλτρου τύπου τύμπανου σε τομή, για να επιδειχθεί η ροή του νερού.

Της περισσότερες εφαρμογές, το τύμπανο του κοσκινόφιλτρου περιστρέφεται μόνο όταν το πλέγμα στομάσει με τα παγιδευμένα στερεά. Τότε εξαπολύονται πίδακες νερού υπό πίεση από τα μπεκ καθαρισμού και τα προσκολλημένα στο κόσκινο στερεά συλλέγονται στη σκάφη συλλογής και απομακρύνονται ως βρώμικο νερό. Το πλεονέκτημα των φίλτρων-τύμπανων σε σχέση με τα φίλτρα-δίσκων είναι η μεγαλύτερη επιφάνεια καθαρισμού που προσφέρουν.

Το κύριο πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης κοσκινόφιλτρων αντί για δεξαμενές καθίζησης ή φυγοκεντρικούς διαχωριστές, είναι το μικρό της μέγεθος και η μικρή σπατάλη νερού κατά τη διάρκεια καθαρισμού των κόσκινων. Έχει βρεθεί ότι σε κλειστό σύστημα εκτροφής τιλάπιας, για τη λειτουργία των κοσκινόφιλτρων, χρειάζεται μόνο το 14% του νερού που θα χρησιμοποιούνταν σε μια δεξαμενή καθίζησης για να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα απαλλαγής του νερού από τα αιωρούμενα στερεά.

Της από την άλλη μεριά τα κοσκινόφιλτρα έχουν υψηλότερο οικονομικό κόστος, ειδικά όταν εφαρμόζονται σε μικρές μονάδες εκτροφής. Οι μικρότερες μονάδες κοσκινόφιλτρων μπορούν να επεξεργαστούν περί τα 480 λίτρα νερού ανά λεπτό (L/min ή Lpm), νερό το οποίο περιέχει περί τα 25 mg/L αιωρούμενα στερεά και κοστίζουν περί τα 6000 ευρώ εκάστη. Κάθε διπλασιασμός της δυνατότητας επεξεργασίας νερού, σημαίνει περίπου 50% αύξηση της τιμής αγοράς (π.χ. ένα κοσκινόφιλτρο επεξεργασίας νερού 960 L/min κοστίζει 9000 ευρώ). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι μεγαλύτερες μονάδες είναι πιο οικονομικές.

Τα παραπάνω αφορούν κυρίως τα κοσκινόφιλτρα τύπου τύμπανου ή δίσκων. Τα κοσκινόφιλτρα με κεκλιμένη ζώνη (Σχήμα 7.12, C) εφαρμόζονται τελευταίως της υδατοκαλλιέργειας. Μια μονάδα αυτού του τύπου μοιάζει με μια κυλιόμενη ζώνη μεταφοράς τοποθετημένη με κλίση. Το νερό περνά μέσα από το κόσκινο της ζώνης και τα στερεά που συγκρατούνται επάνω της μεταφέρονται της τα πάνω και έξω από την

επιφάνεια του νερού και τελικά με τη χρήση μπεκ που ψεκάζουν νερό, συλλέγονται και απορρίπτονται της και της της δύο τύπους (τύμπανα, δίσκοι). Τα κοσκινόφιλτρα κεκλιμένης ζώνης έχουν δυνατότητα επεξεργασίας περί τα 7500 L/min, αλλά ακόμα δεν υπάρχουν πολλά λεπτομερή στοιχεία για της δυνατότητές της επειδή δεν έχουν εφαρμοστεί ευρέως.

7.5.3. Διογκούμενα φίλτρα κόκκων

Με τη χρήση αυτών των φίλτρων, δια της διέλευσης του νερού μέσα από ένα χώρο γεμάτο με κοκκώδη υλικά (άμμο ή πλαστικές χάντρες), τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται από το διερχόμενο νερό. Τα στερεά είτε προσκολλώνται στο υλικό πλήρωσης του φίλτρου, είτε παγιδεύονται μεταξύ των κόκκων του υλικού. Με τον καιρό, η συνεχής χρήση θα προκαλέσει φράξιμο του φίλτρου με τα συσσωρευμένα στερεά και θα απαιτείται καθαρισμός. Ο καθαρισμός γίνεται με **αντιστροφή της ροής** του νερού στο φίλτρο (**backwashing**). Για να έχει αποτέλεσμα η αντιστροφή της ροής, θα πρέπει ο χώρος που καταλαμβάνουν τα κοκκώδη υλικά να διογκωθεί (από ένα συμπαγή που καταλαμβάνουν κατά τη λειτουργία της), έτσι ώστε να απελευθερωθούν τα παγιδευμένα στερεά. Τα απελευθερωθέντα στερεά είτε αφήνονται για λίγο να καθιζάνουν και να απομακρυνθούν αμέσως μετά, είτε παρασύρονται με την αντίστροφη ροή του νερού.

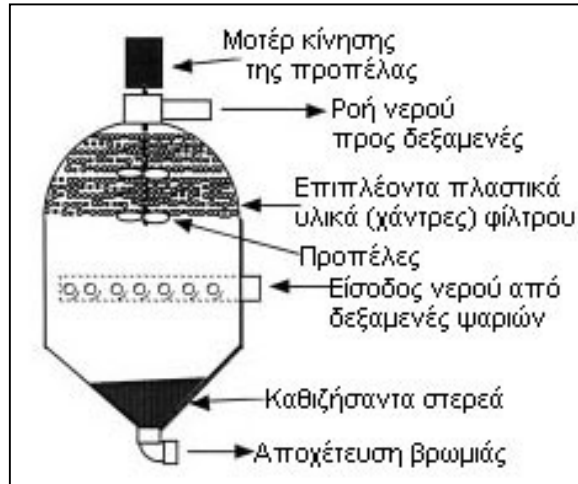
Της οικιακές πισίνες ή για το πόσιμο νερό χρησιμοποιούνται τέτοια φίλτρα με υλικό πλήρωσης την άμμο. Στα ιχθυοεκκολαπτήρια χρησιμοποιούνται ευρέως φίλτρα άμμου με καθοδική ροή νερού (pressurized down-flow sand filters). Τα φίλτρα αυτά είναι πολύ αποτελεσματικά επειδή απομακρύνουν μεγάλη ποσότητα από τα αιωρούμενα στερεά του διερχόμενου νερού, αλλά της περιπτώσεις που στο σύστημα δημιουργούνται πολλά αιωρούμενα (μεγάλη παροχή τροφής), φράσσουν (στομώνουν) γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρειάζονται συχνό καθαρισμό, γεγονός που σημαίνει μεγάλη σπατάλη νερού. Ο καθαρισμός της γίνεται με αντιστροφή της ροής του νερού (backwashing), έτσι που το υλικό πλήρωσης να διογκωθεί ή να «βράσει» (boiling). Η διαδικασία αυτή θα απελευθερώσει τα παγιδευμένα στερεά και θα αποξέσει την αναπτυσσόμενη μάζα των βακτηριδίων από της κόκκους της άμμου. Παρόλα αυτά, με τη συνεχή λειτουργία της, τα αναπτυσσόμενα βακτηρίδια θα δημιουργήσουν ζελατινώδεις μάζες στο υλικό πλήρωσης του φίλτρου, έτσι που θα είναι αδύνατο να καθαρισθούν με την αντιστροφή της ροής. Σε τέτοιες περιπτώσεις το φίλτρο θα πρέπει να ανοιχτεί και να καθαρισθεί με το χέρι. Της στομώνουν τα φίλτρα άμμου καθοδικής ροής, η ροή του νερού δια μέσου αυτών μειώνεται ή και σταματά εντελώς. Στα κλειστά συστήματα κάτι τέτοιο δεν μπορεί να γίνει αποδεκτό, επειδή και σύντομη έστω διακοπή μπορεί να σημαίνει καταστροφή.

Εναλλακτικά της την άμμο και τα φίλτρα που χρησιμοποιούν άμμο, χρησιμοποιούνται φίλτρα με πλαστικές χάντρες ως υλικό πλήρωσης. Οι πλαστικές χάντρες παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα και παγιδεύουν τα αιωρούμενα στερεά από τη μάζα του νερού που ρέει ανάμεσά της (Σχήμα 7.15).

Τα παγιδευμένα-συσσωρευμένα στερεά στο χώρο των πλαστικών υλικών (filter bed), απομακρύνονται με την ενεργοποίηση μιας προπέλας ανάδευσης που βρίσκεται στο χώρο αυτό. Η περιστροφή της προπέλας διογκώνει τον όγκο των υλικών και απελευθερώνει τα παγιδευμένα στερεά. Μετά τη διόγκωση, παρεμβάλλεται ένα μικρό διάστημα ηρεμίας, κατά το οποίο τα απελευθερωθέντα στερεά καθιζάνουν και οι πλαστικές χάντρες επανέρχονται στη θέση της εφόσον έχει σταματήσει η κίνηση της προπέλας (αναδευτήρας). Στο κάτω μέρος του θαλάμου του φίλτρου, τα συσσωρευμένα

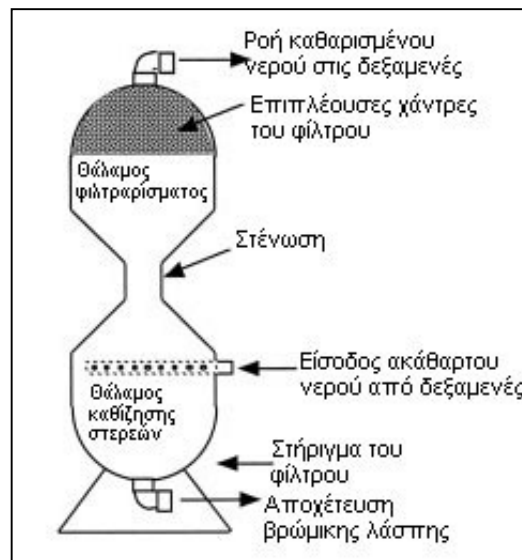
Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

στερεά απομακρύνονται με το άνοιγμα μιας βάνας. Ολη η παραπάνω διαδοχική σειρά λειτουργιών μπορεί να γίνεται και αυτόματα με το κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα και αυτόματες βαλβίδες.



Σχήμα 7.15. Διαγραμματική απεικόνιση διογκούμενου φίλτρου πλαστικών χαντρών.

Ενας της τύπος διογκούμενου φίλτρου πλαστικών χαντρών είναι και ο λεγόμενος “bubble washed” κατά τον οποίο δεν απαιτείται προπέλα για τον καθαρισμό των κόκκων. Η εξωτερική εμφάνιση του φίλτρου αυτού μοιάζει με κλεψύδρα, ήτοι, δύο θαλάμους συνδεδεμένους με ένα στενό λαιμό (Σχήμα 7.16).



Σχήμα 7.16. Διαγραμματική απεικόνιση διογκούμενου φίλτρου πλαστικών χαντρών τύπου bubble-washer.

Στο φίλτρο αυτού του τύπου, το νερό ακολουθεί ανοδική ροή και περνώντας μέσα από τον όγκο των πλαστικών χαντρών, απαλλάσσεται από τα αιωρούμενα στερεά που συγκρατούνται στον άνω θάλαμο της «κλεψύδρας». Της αρχίζει να φράσσει (μπουκώνει)

και χρειάζεται καθαρισμό, η ροή του νερού σταματά, το φίλτρο αδειάζει από το νερό σταδιακά και οι χάντρες πέφτουν στον κάτω θάλαμο αφού περάσουν μέσα από το στενό «λαιμό». Κατά τη διάρκεια της πτώσης των της τον κάτω θάλαμο περνούν μέσα από το στένωμα, υφίστανται απόξεση και τα παγιδευμένα στερεά απελευθερώνονται. Τα στερεά καθιζάνουν στον κάτω θάλαμο και απομακρύνονται κατάλληλα. Με την ενεργοποίηση ξανά της ροής του νερού, οι χάντρες επανέρχονται στη θέση της στον πάνω θάλαμο.

Τα πλεονεκτήματα του φιλτραρίσματος με χάντρες είναι, το συμπαγές μέγεθος της μονάδας που τα περιέχει και η μικρή κατανάλωση νερού κατά το backwashing. Με τη συνεχή λειτουργία της, οι χώροι ανάμεσα της χάντρες μειώνονται, καθώς αναπτύσσεται ένα παχύ βιολογικό κολλώδες φιλμ βακτηριδίων και τα φίλτρα αυτά γίνονται ακόμα πιο αποτελεσματικά, μπορώντας να παγιδεύσουν ακόμα και πολύ λεπτά αιωρούμενα υλικά. Η βακτηριδιακή μάζα που δημιουργεί το κολλώδες φιλμ (biofilm), αποτελείται από αυτότροφα και ετερότροφα βακτηρίδια. Τα αυτότροφα βακτηρίδια συμβάλλουν της στη νιτροποίηση (δηλαδή έξτρα ωφέλεια για το σύστημα). Τα ετερότροφα βακτηρίδια διασπών της οργανικές ενώσεις των παγιδευμένων στερεών και μπορεί να δημιουργήσουν το εξής πρόβλημα: Κατά το χρόνο λειτουργίας του φίλτρου (από μία έως 48 ώρες) μεταξύ των καθαρισμών του (backwashing), τα παγιδευμένα στερεά υφίστανται βιολογική αποσύνθεση, με αποτέλεσμα να καταναλίσκεται οξυγόνο και να απελευθερώνεται αμμωνία. Ως είναι φυσικό οι διεργασίες αυτές επιβαρύνουν το κλειστό σύστημα και θα πρέπει να προστεθεί περισσότερο οξυγόνο και να απομακρυνθεί περισσότερη αμμωνία.

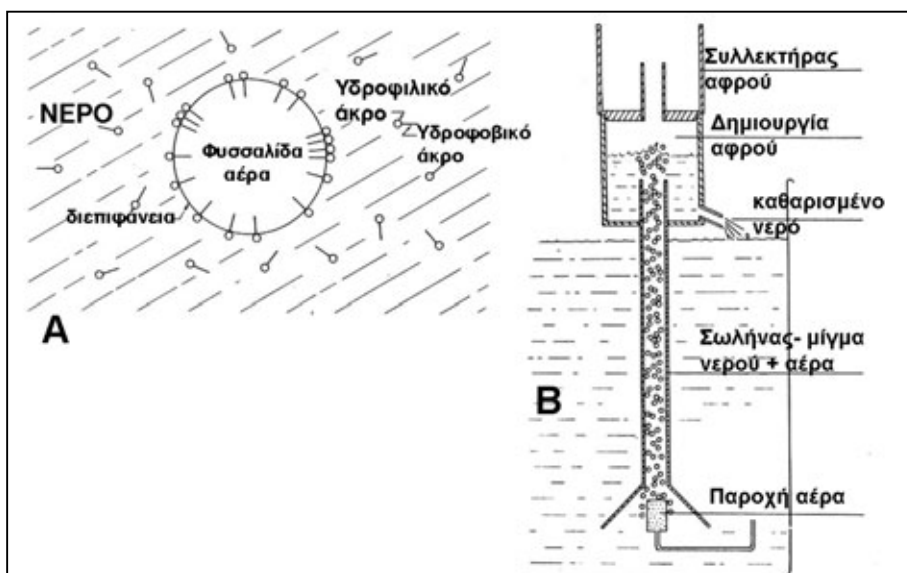
7.5.3. Απομάκρυνση πολύ λεπτών αιωρούμενων στερεών και διαλυμένων στερεών

Η μεγαλύτερη ποσότητα από τα πολύ λεπτά αιωρούμενα και τα διαλυμένα στερεά που δημιουργούνται στο νερό της κλειστού συστήματος, δεν μπορούν να απομακρυνθούν με της συνήθεις διαδικασίες μηχανικού φιλτραρίσματος. Για να απαλλάξουμε το σύστημα από αυτά, χρησιμοποιείται η διαδικασία του διαχωρισμού δια αφρού ή άλλως πως **αφροποίηση** (foam fractionation ή air-stripping ή **protein skimming**). Αν και με τη διαδικασία αυτή δεν απαλλάσσεται πλήρως το νερό από αυτά, η συνεχής λειτουργία της αφροποίησης τα διατηρεί σε χαμηλά επίπεδα.

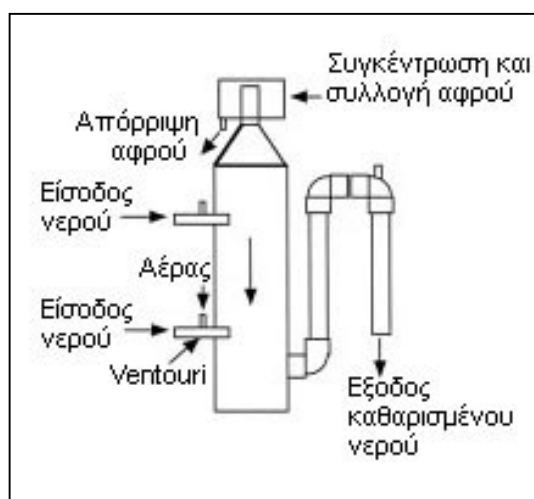
Ο όρος αφροποίηση γενικά σημαίνει τη διοχέτευση αέρα στο κάτω μέρος της κλειστού σωλήνα γεμάτο με νερό, με αποτέλεσμα το σχηματισμό αφρού στην επιφάνεια του σωλήνα. Η αφροποίηση απομακρύνει της διαλυμένες στο νερό οργανικές ενώσεις (Dissolved Organic Compounds – DOC) δια της φυσικής διαδικασίας της προσρόφησής των (προσοχή! Προσρόφηση όχι απορρόφηση) στην επιφάνεια των φυσαλίδων του αέρα. Τελικά, τόσο τα διαλυμένα οργανικά συστατικά όσο και τα λεπτά αιωρούμενα που παγιδεύονται στον αφρό της επιφάνειας, καταλήγουν ως μια βρώμικη υγρή μάζα που συλλέγεται σε ειδικά προσαρμοσμένο δοχείο και αποχετεύεται κατάλληλα (Σχήμα 7.17).

Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της αφροποίησης είναι, το μέγεθος των φυσαλίδων και ο χρόνος επαφής μεταξύ των φυσαλίδων και των οργανικών ενώσεων. Αν ο σχεδιασμός γίνει έτσι που το νερό να ρέει αντίθετα της την ανοδική κίνηση των φυσαλίδων, τότε ο χρόνος επαφής μεγιστοποιείται με αποτέλεσμα περισσότερη δημιουργία αφρού (Σχήμα 7.18).

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)



Σχήμα 7.17. Διαγραμματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της αεροποίησης. Δεξιά (B) απεικονίζεται η βασική και απλή κατασκευή της αεροποιητή. Στο κάτω μέρος του σωλήνα παρέχεται αέρας. Ο αέρας υπό μορφή φυσαλίδων αναμιγνύομενος με το νερό, δημιουργεί ανυψούμενο ρεύμα στη στήλη. Κατά την άνοδό της, οι φυσαλίδες έρχονται σε επαφή με τα οργανικά μόρια του νερού. Τα οργανικά μόρια (A) έχουν ένα υδρόφοβο και ένα υδρόφιλο άκρο. Στη φυσαλίδα του αέρα και στη διεπιφάνεια νερού-αέρα, τα οργανικά μόρια προσροφούνται και διατάσσονται κατάλληλα. Τελικά με το «σκάσιμο» των φυσαλίδων στην επιφάνεια δημιουργείται βρώμικος αφρός (B) ο οποίος συλλέγεται και απορρίπτεται.



Σχήμα 7.18. Διαγραμματική απεικόνιση εξελιγμένου τύπου αεροποιητή. Το νερό εισέρχεται στη στήλη βεβιασμένα με τη χρήση αντλίας. Κατά την είσοδό του υπάρχει ανοιχτή οπή από την οποία αναρροφάται ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος θα αναμιχθεί με το νερό (ventouri). Μέσα στη στήλη, νερό και αέρας ρέουν αντίθετα και αναμιγνύονται καλά με αποτέλεσμα μεγάλη παραγωγή αφρού. Ο σωλήνας εξόδου του νερού είναι σχήματος Π με σκοπό τη διατήρηση στάθμης νερού.

7.6. . Ο ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΝΙΤΡΩΔΩΝ

Το βασικότερο μέλημα σχεδιασμού της κλειστού συστήματος, είναι ο έλεγχος και η ελαχιστοποίηση της παραγόμενης αμμωνίας στο νερό. Η αμμωνία (υποπροϊόν του μεταβολισμού των πρωτεϊνών της τροφής), πρέπει να απομακρύνεται από το νερό των δεξαμενών εκτροφής με ρυθμό ίσο της το ρυθμό παραγωγής της για να διατηρείται σε σταθερά ασφαλή επίπεδα.

Στα κλειστά συστήματα που περιλαμβάνουν ειδική μονάδα απαλλαγής του νερού από την αμμωνία (φίλτρα), η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας καθαρισμού είναι αυτή που καθορίζει το ρυθμό ανακύκλωσης του νερού, (π.χ. εάν η αποτελεσματικότητα είναι μικρή τότε θα απαιτούνται περισσότερες ανακυκλώσεις του νερού των δεξαμενών μέσα από τα φίλτρα).

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι για την απομάκρυνση της αμμωνίας από το νερό, η **αφαίρεση με αερισμό** (air stripping), η **ιοντοανταλλαγή** (ion exchange) και το **βιολογικό φιλτράρισμα** (biological filtration).

Οι δύο πρώτες μέθοδοι είναι μάλλον πολύπλοκες και πολυέξοδες για να βρουν εφαρμογή της υδατοκαλλιέργειας. Κατά τη μέθοδο του air stripping, η αμμωνία στη μη ιονισμένη μορφή της (NH_3) είναι πτητική και συνεπώς με ισχυρό αερισμό του νερού τελικά διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Για να συμβεί της αυτό σε αποτελεσματικό βαθμό και ένταση, θα πρέπει το pH του νερού στη δεξαμενή αερισμού να ανυψωθεί σε τιμές άνω του 10, δεδομένου ότι για το σύνολο της αμμωνίας στο νερό ($\text{TAN} = \text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$), όσο πιο υψηλό είναι το pH τόσο μεγαλύτερο και το ποσοστό της πτητικής μορφής (NH_3). Μετά της τον αερισμό, το νερό θα πρέπει να ρυθμίζεται εκ νέου σε τιμές pH 7 – 8 ασφαλείς για τα ψάρια, πριν επανέλθει της δεξαμενές των ψαριών. Κατά τη μέθοδο της ιοντοανταλλαγής η αμμωνία στην ιονισμένη μορφή της (NH_4^+) ανταλλάσσεται με άλλα μη τοξικά μονοσθενή κατιόντα (π.χ. Na^+). Η διαδικασία αυτή συμβαίνει σε ειδικούς ιοντοανταλλάκτες (στήλες ρητίνης, ζεόλιθους) βυθισμένους στο νερό, οι οποίοι όταν «κορεστούν» δηλαδή έχουν χάσει όλα τα ιόντα της ανταλλάσσοντάς τα με αμμωνία, δεν μπορούν να δεσμεύσουν πλέον άλλη αμμωνία και χρειάζονται αναζωογόνηση. Η αναζωογόνηση γίνεται με την τοποθέτησή της σε κεκορεσμένα διαλύματα άλμης (NaCl) όπου η αμμωνία ανταλλάσσεται με Na^+ .

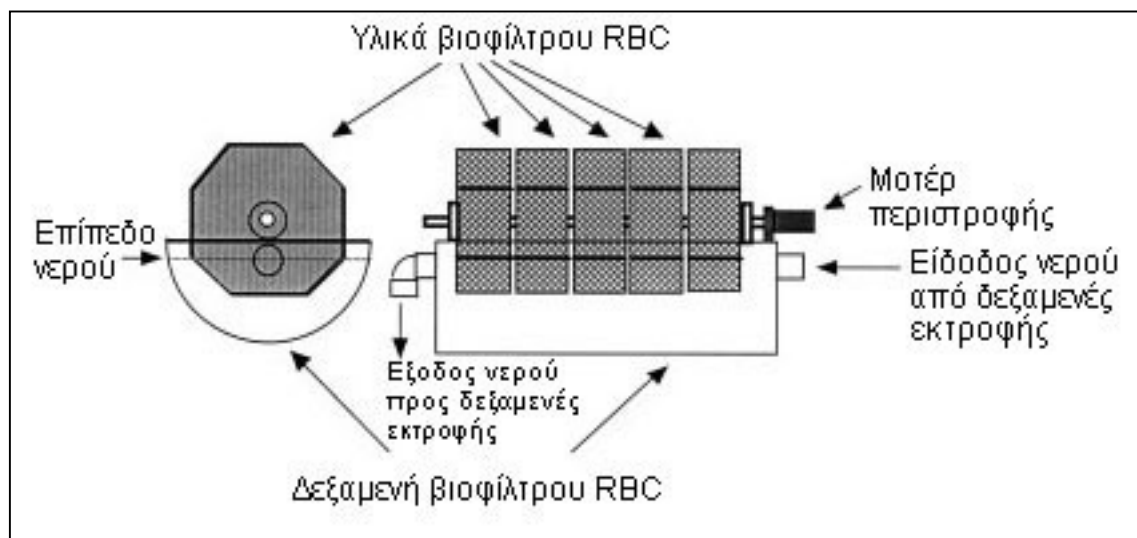
Το βιολογικό φιλτράρισμα είναι η πιο κοινή και αποτελεσματική μέθοδος απαλλαγής από την αμμωνία. Κατά τη μέθοδο αυτή δημιουργείται ένα υπόστρωμα με **μεγάλη ειδική επιφάνεια** (specific surface area – αναπτυγμένη συνολική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου του υποστρώματος), επάνω στην οποία τα νιτροποιητικά βακτηρίδια μπορούν να προσκολληθούν και να πολλαπλασιαστούν. Έτσι, η αμμωνία και τα νιτρώδη στο ανακυκλούμενο νερό οξειδώνονται (μετατρέπονται) σε νιτρικά από τα βακτηρίδια *Nitrosomonas* και *Nitrobacter* αντίστοιχα. Τα πιο κοινά υλικά υποστρώματος των βιολογικών φίλτρων περιλαμβάνουν χαλίκια, άμμο, πλαστικές χάντρες και πλαστικούς δίσκους. Παρακάτω αναφέρονται οι πιο κοινές μέθοδοι βιολογικού φιλτραρίσματος.

7.6.1. Περιστρεφόμενοι βιολογικοί αντιδραστήρες

Οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί αντιδραστήρες (Rotating Biological Contactors – **RBC**) έχουν χρησιμοποιηθεί από παλιά στην επεξεργασία των οικιακών αποβλήτων. Σήμερα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο ως βιολογικά φίλτρα νιτροποίησης στα κλειστά συστήματα υδατοκαλλιέργειών.

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

Η λειτουργία της έγκειται στην περιστροφική κίνηση του μέσου (υλικό) που αποτελεί τον βιολογικό αντιδραστήρα και το οποίο βρίσκεται στερεωμένο σε ένα άξονα. Ο άξονας περιστρέφεται είτε με τη βοήθεια ηλεκτρικού μοτέρ, είτε με κίνηση νερού, είτε με χρήση πεπιεσμένου αέρα. Το μέσο είναι μερικώς βυθισμένο (περί το 40%) στο ανακυκλούμενο νερό (Σχήμα 7.19).



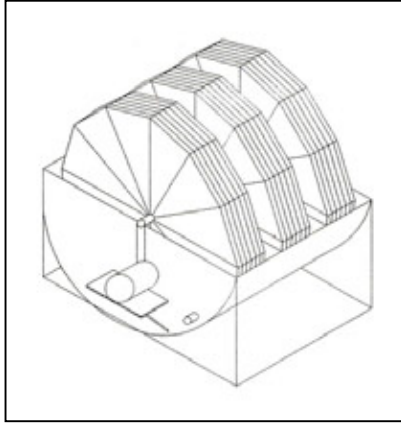
Σχήμα 7.19. Διαγραμματική απεικόνιση μονάδας Περιστρεφόμενου Βιολογικού Αντιδραστήρα (RBC) που περιστρέφεται με ηλεκτρικά οδηγούμενο άξονα.

Τα νιτροποιητικά βακτηρίδια αναπτύσσονται στο υλικό του βιοφίλτρου και καθώς αυτό περιστρέφεται έρχονται σε επαφή εναλλάξ με το πλούσιο σε άζωτο νερό και με τον αέρα. Κατά την επαφή με τον αέρα, το διοξείδιο του άνθρακα που δημιουργήθηκε από την αναπνοή των ψαριών και των βακτηριδίων διαφεύγει και το οξυγόνο προσλαμβάνεται. Κατά την επαφή με το νερό τα βακτηρίδια οξειδώνουν την αμμωνία σε νιτρώδη και τα νιτρώδη σε νιτρικά. Η ταχύτητα περιστροφής του RBC στην περιφέρεια του βιοφίλτρου ρυθμίζεται στα 11 – 15,5 m/min, π.χ. ένα RBC με διάμετρο 1,25 m θα πραγματοποιεί 3 – 4 πλήρεις περιστροφές το λεπτό (rpm).

Τα πλεονεκτήματα των RBC είναι η απλότητα της λειτουργίας των, η ικανότητά της για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα και την πρόσληψη του οξυγόνου και η ικανότητά της για αυτοκαθαρισμό. Τα μειονεκτήματά της, το σχετικά υψηλό κόστος της και η μηχανική αστάθεια. Ειδικά για το τελευταίο θα πρέπει να επισημανθεί ότι τυχόν αστοχίες στο σχεδιασμό ή στην κατασκευή της RBC, μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα το σπάσιμο του περιστρεφόμενου μέσου ή του άξονα περιστροφής, από το βάρος της τάχιστα αναπτυσσόμενης βιολογικής μάζας (βακτηρίδια κ.λπ.).

Της πρώτες εφαρμογές των RBC της υδατοκαλλιέργειας, χρησιμοποιήθηκαν απλοί δίσκοι κατασκευασμένοι από κομμάτια κυματοειδούς φάϊμπεργκλάς (Σχήμα 7.20). Σήμερα χρησιμοποιούνται υλικά με μεγάλη ειδική επιφάνεια της, πλαστικοί κύβοι και κύλινδροι από πολυαιθυλένιο (που μοιάζουν με τα μπικουτί για τα μαλλιά) με μεγαλύτερη ικανότητα απομάκρυνσης αμμωνίας, νιτρωδών και διοξειδίου του άνθρακα και σε μικρότερες αναλογικά μονάδες RBC απ' ότι τα παλαιότερα μοντέλα. Τα πλαστικά μέσα που χρησιμοποιούνται έχουν ειδική επιφάνεια περί τα 200 m²/m³. Για της υδατοκαλλιέργειας αυτό σημαίνει ικανότητα απομάκρυνσης 76 g TAN /m³/day. Γενικά,

χρησιμοποιώντας τα RBC στα κλειστά συστήματα ως βιολογικά φίλτρα και υποθέτοντας (με αρκετή ακρίβεια) ότι το 2,5% της τροφής μετατρέπεται σε TAN, τότε για το σχεδιασμό του φίλτρου θεωρούμε ότι η ικανότητά του (επεξεργασίας νερού) βρίσκεται στην περιοχή των 3 kg τροφής/ημέρα/m³ υλικού πλήρωσης. Τα υλικά των δίσκων αυξάνουν σε βάρος με τη συνεχή χρησιμοποίησή της ακόμα και 10 φορές (λόγω ανάπτυξης βιομάζας επάνω της). Συνεπώς ο φέρων μηχανισμός πρέπει να έχει προβλεφθεί για να αντέξει τέτοια βάρη.



Σχήμα 7.20. Βιολογικό φίλτρο RBC με τρία μπλοκ από πλαστικούς δίσκους.

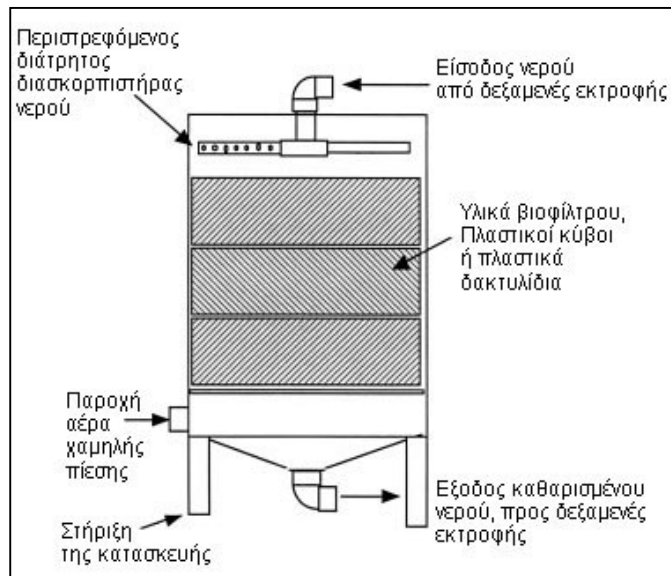
7.6.2. Φίλτρα καταιονισμού (Trickling filters)

Τα φίλτρα καταιονισμού που χρησιμοποιούνται της υδατοκαλλιέργειας, έχουν εξελιχθεί από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Της ο τύπος φίλτρου αποτελείται από ένα σύστημα διανομής νερού επάνω από ένα κύλινδρο (αντιδραστήρα), γεμάτο με αδρανή (συνήθως πλαστικά) υλικά τα οποία έχουν ειδική επιφάνεια λιγότερο από 330 m²/m³. Η όλη κατασκευή (Σχήμα 7.21), δημιουργεί μεγάλο όγκο κενού (**αναλογία κενού**) στον όγκο που καταλαμβάνει το υλικό πλήρωσης.

Τα φίλτρα καταιονισμού λειτουργούν χωρίς να βρίσκονται βυθισμένα στο νερό και εξ' αυτού του λόγου παρέχουν νιτροποίηση, αερισμό και σε ένα βαθμό απαερισμό του διοξειδίου του άνθρακα στην ίδια μονάδα ταυτόχρονα. Ο ρυθμός της ροής του νερού δια μέσου της φίλτρου καταιονισμού, περιορίζεται μόνο από τον κενό χώρο μέσα από τον οποίο μπορεί να περάσει το νερό. Σε γενικές γραμμές όσο πιο μεγάλο είναι το κενό (void fraction) των στοιβαγμένων πλαστικών μέσων πλήρωσης, τόσο πιο πολύ νερό μπορεί να διέλθει ανά m² εγκάρσιας επιφάνειας του φίλτρου. Το κύριο μειονέκτημα των φίλτρων καταιονισμού είναι ο σχετικά μεγάλος όγκος που καταλαμβάνουν και η μάλλον ακριβή τιμή των πλαστικών μέσων πλήρωσης. Επιπρόσθετα και πριν το της κατεργασία νερό εισέλθει σε αυτά, θα πρέπει να έχει πρώτα φιλτραριστεί καλά σε μηχανικό φίλτρο, έτσι ώστε να έχει απαλλαγεί από τα αιωρούμενα στερεά του. Νερό με μεγάλη περιεκτικότητα σε στερεά, σημαίνει γρήγορο στόμωμα (μπούκωμα) του φίλτρου καταιονισμού. Κατά παρόμοιο τρόπο με την περίπτωση των φίλτρων RBC παραπάνω, θα πρέπει να έχει ληφθεί υπόψη για το σχεδιασμό και την κατασκευή της στήριξης του φίλτρου καταιονισμού, το πρόσθετο βάρος που σταδιακά αποκτά λόγω της ανάπτυξης βιομάζας επάνω στα υλικά πλήρωσης.

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

Με τα φίλτρα καταιονισμού αναμένεται ικανότητα απομάκρυνσης 90g TAN/m³/day. Γενικά, χρησιμοποιώντας τα φίλτρα καταιονισμού στα κλειστά συστήματα ως βιολογικά φίλτρα και υποθέτοντας (με αρκετή ακρίβεια) ότι το 2,5% της τροφής μετατρέπεται σε TAN, τότε για το σχεδιασμό του φίλτρου θεωρούμε ότι η ικανότητά του βρίσκεται στην περιοχή των 3,6 kg τροφής/ημέρα/m³ υλικού πλήρωσης.



Σχήμα 7.21. Βιολογικό φίλτρο καταιονισμού (trickling filter). Πρόκειται για βιολογικό φίλτρο μη βυθισμένο στο νερό. Το νερό διασκορπίζεται ομοιόμορφα στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα.

7.6.3. Φίλτρα διογκούμενων μέσων (Expandable media filters)

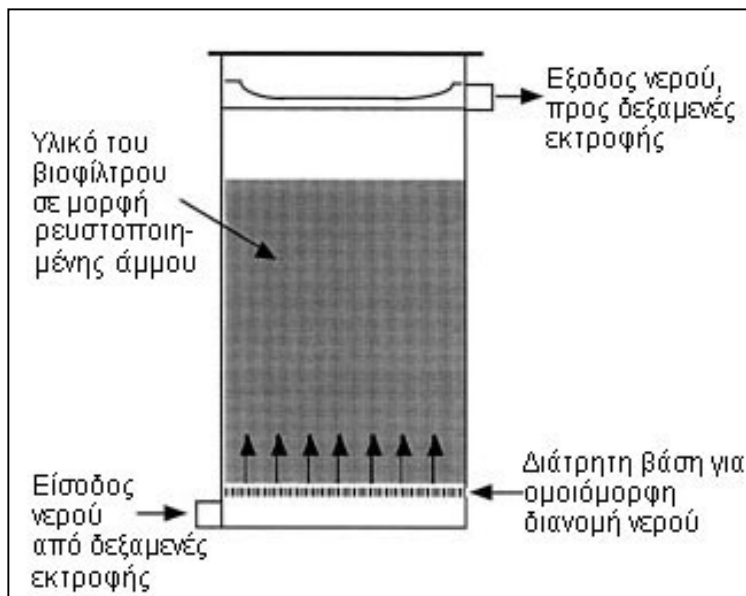
Τα φίλτρα διογκούμενων πλαστικών χαντρών που περιγράφηκαν στα προηγούμενα (Σχήματα 7.15 & 7.16), μπορούν της να χρησιμοποιηθούν και ως βιολογικά φίλτρα σε ορισμένες υδατοκαλλιεργητικές εφαρμογές. Οι χάντρες παρουσιάζουν μεγάλη ειδική επιφάνεια την οποία αποικίζουν νιτροποιητικά βακτηρίδια και σε γενικές γραμμές τα φίλτρα αυτού του τύπου θα λειτουργούν ως βιολογικά φίλτρα ανοδικής ροής νερού.

Το κύριο πλεονέκτημα της της τεχνολογίας είναι ο συνδυασμός της διαδικασίας της νιτροποίησης και της απομάκρυνσης των στερεών σε μία κατασκευή. Το μειονέκτημά της, η μη αποτελεσματική απομάκρυνση των στερεών, γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα του νερού του συστήματος. Γενικά η χρησιμοποίηση αυτών των συστημάτων, απαιτεί πρόβλεψη για κάλυψη μεγαλύτερων αναγκών σε οξυγόνο και απαιτούμενο χώρο.

Τα πλαστικά υλικά πλήρωσης αυτών των φίλτρων έχουν ειδική επιφάνεια μεταξύ 1150 και 1475 m²/m³. Με τα φίλτρα διογκούμενων μέσων αναμένεται ικανότητα απομάκρυνσης 325 g TAN /m³/day. Χρησιμοποιώντας τα στα κλειστά συστήματα ως βιολογικά και μηχανικά φίλτρα συγχρόνως και υποθέτοντας (με αρκετή ακρίβεια) ότι το 2,5% της τροφής μετατρέπεται σε TAN, τότε για το σχεδιασμό της θεωρούμε ότι η ικανότητά της βρίσκεται στην περιοχή των 13 kg τροφής/ημέρα/m³ υλικού πλήρωσης.

7.6.4. Φίλτρα ρευστοποιημένης κλίνης (Fluidized bed filters)

Τα φίλτρα ρευστοποιημένης κλίνης είναι στην ουσία φίλτρα άμμου τα οποία λειτουργούν συνεχώς στην κατάσταση διόγκωσης (δηλαδή διόγκωση του στρώματος της άμμου της κατά τον καθαρισμό του φίλτρου μέσω αντιστροφής της ροής του νερού-backwashing). Το νερό ρέει της τα άνω δια μέσου της κλίνης της άμμου, με ταχύτητα τέτοια που σηκώνει και διογκώνει (ρευστοποιεί) το στρώμα της άμμου και διατηρεί της κόκκους της σε κίνηση έτσι που πλέον δεν βρίσκονται σε σταθερή επαφή μεταξύ της (Σχήμα 7.22).



Σχήμα 7.22. Διαγραμματική και απλοποιημένη αναπαράσταση βιολογικού φίλτρου τύπου ρευστοποιημένης κλίνης άμμου.

Τα φίλτρα ρευστοποιημένης κλίνης, χρησιμοποιούν άμμο με μέση διάμετρο κόκκων μικρότερη από αυτή που χρησιμοποιείται της ανάλογες κατασκευές για την απομάκρυνση των στερεών. Της μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πλαστικές χάντρες με πυκνότητα ελαφρώς μεγαλύτερη από το νερό.

Η ρευστοποιημένη κλίνη αποτελεί εξαιρετικό μέσο για την ανάπτυξη των νιτροποιητικών βακτηριδίων, δημιουργώντας έτσι υψηλή νιτροποιητική ικανότητα σε μια εξαιρετικά συμπαγή (μικρών διαστάσεων) κατασκευή. Η τυρβώδης ροή του νερού που επικρατεί στο εσωτερικό του φίλτρου, αποτρέπει το σχηματισμό υπερβολικής βιομάζας και έτσι το φίλτρο είναι αυτοκαθαριζόμενο (self-cleaning).

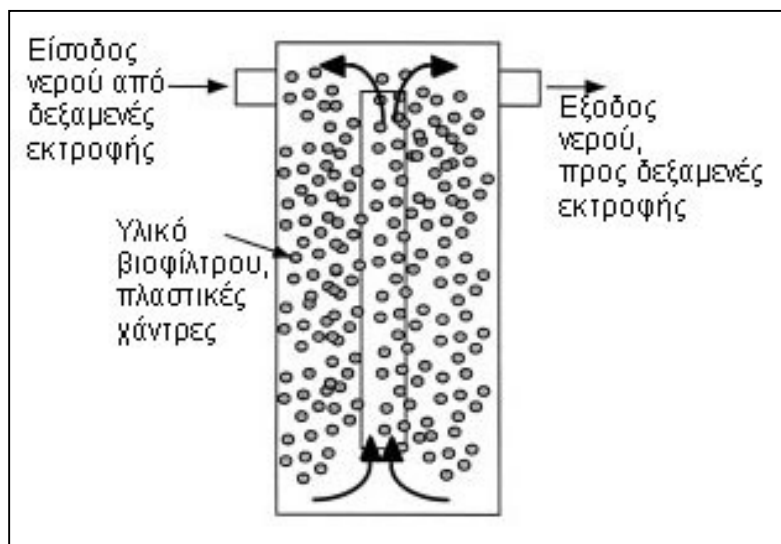
Η άμμος παρουσιάζει πολύ χαμηλό κόστος αγοράς. Η ρευστοποίηση προκαλείται από ειδική αντλία νερού της οποίας η ισχύς (και κατ'επέκταση το κόστος λειτουργίας), εξαρτάται από το μέγεθος της κατασκευής και το βάρος της της ρευστοποίηση κλίνης (άμμου, πλαστικών χαντρών). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πλευστότητα του μέσου της κλίνης εξαρτάται από τη βιολογική ανάπτυξη βιομάζας επάνω στο υλικό (άμμος ή πλαστικές χάντρες), διαδικασία που εξαρτάται με τη σειρά της από τη θερμοκρασία και το ρυπαντικό φορτίο του νερού. Μεγαλύτερη ανάπτυξη βιομάζας σημαίνει και μεγαλύτερη δυσκολία για να βρεθεί σε αιώρηση.

Για τα φίλτρα που χρησιμοποιούν άμμο, θα υπάρχει πάντοτε μια ποσότητα της (της άμμου) που θα διαφεύγει με το νερό που αφήνει το φίλτρο. Αν δεν υπάρχει σύστημα συγκράτησης και επανάκτησης της της παρασυρόμενης ποσότητας, τότε θα πρέπει να προβλεφθεί η συνεχής αντικατάστασή της με καινούργια.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση των ρυπαντών και το μέγεθος των υλικών πλήρωσης και υποθέτοντας (με αρκετή ακρίβεια) ότι το 2,5% της τροφής μετατρέπεται σε TAN, τότε για το σχεδιασμό της θεωρούμε ότι η ικανότητα των βιοφίλτρων ρευστοποιημένης κλίνης βρίσκεται στην περιοχή των 20-40 kg τροφής/ημέρα/m³ υλικού πλήρωσης.

7.6.5. Βιοαντιδραστήρες ανάμικτης κλίνης (Mixed bed reactors)

Οι βιοαντιδραστήρες ανάμικτης κλίνης αποτελούν μια καινούργια και ενδιαφέρουσα υβριδική κατάσταση μεταξύ των φίλτρων πλαστικών χαντρών ανοδικής ροής (upflow plastic bead filters) και των φίλτρων ρευστοποιημένης κλίνης. Τα φίλτρα ανάμικτης κλίνης χρησιμοποιούν πλαστικά μέσα πλήρωσης τα οποία διατηρούνται σε συνεχή κίνηση (Σχήμα 7.23).



Σχήμα 7.23. Διαγραμματική απλοποιημένη απεικόνιση βιολογικού φίλτρου ανάμικτης κλίνης.

Η διάμετρος των πλαστικών μέσων είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την άμμο και η ειδική της επιφάνεια από 800 έως 1150 m²/m³. Τα πλαστικά μέσα πλήρωσης παρουσιάζουν μικρή πλευστότητα ή είναι ελαφρώς βαρύτερα από το νερό. Μέσα στον αντιδραστήρα ανακατεύονται (αναδεύονται στο νερό) είτε με μηχανική υποβοήθηση είτε με την κατάλληλη υδραυλική διευθέτηση της εισόδου του νερού. Ανάλογα με τη διαδρομή του νερού που εισέρχεται στον αντιδραστήρα, χαρακτηρίζονται ως ανοδικής ή καθοδικής ροής. Της και στην περίπτωση των φίλτρων ρευστοποιημένης κλίνης, δημιουργείται στην επιφάνεια των πλαστικών μέσων βιομάζα αλλά δεν προκαλείται μπουκάμα του φίλτρου επειδή η συνεχής κίνηση αποτρέπει κάτι τέτοιο. Μέσα στο θάλαμο του αντιδραστήρα τα πλαστικά μέσα περνούν και μέσω της κατάλληλα και

κάθετα τοποθετημένου ανοικτού σωλήνα, μια διαδικασία που συντελεί στην ομοιόμορφη κατανομή της στο χώρο.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση των ρυπαντών και το μέγεθος των υλικών πλήρωσης και υποθέτοντας (με αρκετή ακρίβεια) ότι το 2,5% της τροφής μετατρέπεται σε TAN, τότε για το σχεδιασμό της θεωρούμε ότι η ικανότητα των βιοφίλτρων ανάμικτης κλίνης βρίσκεται στην περιοχή των 16-23 kg τροφής/ημέρα/m³ υλικού πλήρωσης.

7.7. ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗ

Ο όρος **απολύμανση** (disinfection), αναφέρεται στην καταστροφή της πλειονότητας των μικρών και μικροσκοπικών οργανισμών που μπορούν να εισαχθούν στο σύστημα καλλιέργειας με το νερό. Είναι μια πρακτική που αποτρέπει οργανισμούς που προκαλούν ασθένειες, θηρευτές και ανταγωνιστές να εγκατασταθούν στο σύστημα. Δεν σημαίνει **αποστείρωση** (sterilization) που είναι η εξαφάνιση κάθε είδους ζωής στο νερό, διαδικασία που δεν είναι ούτε πρακτική (σε οικονομικούς όρους) ούτε απαραίτητη.

Σε ένα κλειστό σύστημα οι ασθένειες εξαπλώνονται εύκολα λόγω της μεγάλης πυκνότητας των ψαριών. Ορισμένα χημικά που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της, μπορεί να έχουν καταστροφική δράση για τα νιτροποιητικά βακτηρίδια που έχουν αναπτυχθεί στο βιολογικό φίλτρο καθώς και σε οποιαδήποτε άλλη στερεή επιφάνεια μέσα στο σύστημα.

Ως εναλλακτική λύση (για τα χημικά ή αντιβιοτικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν), υπάρχει η συνεχής απολύμανση του ανακυκλούμενου νερού είτε με όζον (O₃) είτε με υπεριώδη ακτινοβολία (UV-sterilization), είτε με χλωρίωση (chlorination).

7.7.1. Υπεριώδης ακτινοβολία

Ο όρος υπεριώδης ακτινοβολία [Ultraviolet (UV) radiation] αναφέρεται στο τμήμα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας 10 – 390 nm, δηλαδή μεταξύ των μακρύτερων κυμάτων ακτίνων-X και των μικρότερων κυμάτων του ορατού φωτός.

Οι μικροοργανισμοί (περιλαμβανομένων και των βακτηριδίων που προκαλούν ασθένειες), καταστρέφονται όταν εκτεθούν σε κατάλληλη ένταση υπεριώδους ακτινοβολίας. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει η UV να «χτυπήσει» τον οργανισμό και να απορροφηθεί απ' αυτόν. Η βακτηριοκτόνος δράση της UV έχει καλώς αποδειχθεί, αν και ο ακριβής τρόπος λειτουργίας της αποτελεί ακόμα θέμα έρευνας. Η επικρατούσα άποψη θέλει της ακτίνες UV, με πιο αποτελεσματικές αυτές στο εύρος 250-260 nm, να απορροφώνται από τον πυρήνα του κυττάρου, καταλήγοντας στην διάσπαση των ακόρεστων χημικών δεσμών. Πρώτοι στόχοι στον πυρήνα πιστεύεται ότι είναι οι βάσεις πουρίνη και πυριμιδίνη. Σύμφωνα με τον Spotte (1979), η αποτελεσματικότητα της αποστείρωσης με UV εξαρτάται από το μέγεθος του οργανισμού, την ποσότητα της UV ακτινοβολίας και το βαθμό διείσδυσης της ακτινοβολίας στο νερό. Το καθαρό νερό δεν απορροφά σχεδόν καθόλου την ακτινοβολία στο φάσμα της UV, αφήνοντάς τη εξολοκλήρου διαθέσιμη για το απολυμαντικό της έργο. Για να υπάρξει αποτέλεσμα, οι μικροοργανισμοί θα πρέπει να βρεθούν πολύ κοντά (περί το 0,5 cm) στην πηγή της UV ακτινοβολίας. Η θολερότητα του νερού μειώνει την αποτελεσματικότητά της. Συνεπώς για να είναι ένα σύστημα UV ακτινοβολίας αποτελεσματικό, θα πρέπει το νερό πριν εισέλθει στο θάλαμο της UV να έχει πρώτα φιλτραριστεί πολύ καλά σε φίλτρο

συγκράτησης των πολύ λεπτών αιωρούμενων στερεών. Η θερμοκρασία και το pH δεν επιδρούν άμεσα και σοβαρά στη βακτηριοκτόνο δράση της UV, ενώ η ένταση της ακτινοβολίας και ο χρόνος έκθεσης σε αυτή φαίνεται να είναι οι καθοριστικοί παράγοντες.

Γενικά η UV χρησιμοποιείται περισσότερο για να σκοτώσει βακτηρίδια, μικροφύκη και της λάρβες των μικροσπόνδυλων, αλλά έχει της βρεθεί ότι είναι αποτελεσματική και για της ιούς (συμπεριλαμβανομένων των Coxsackie και Polio). Σύμφωνα με έρευνες, η UV δεν είναι αποτελεσματική για της κύστεις και μεγαλύτερους οργανισμούς, (πρακτικός κανόνας: ότι μπορεί να ειπωθεί με το μάτι δεν μπορεί να σκοτωθεί με τη UV).

Σήμερα, από της διάφορους κατασκευαστές, διατίθενται συστήματα UV για υδατοκαλλιεργητική χρήση. Η καρδιά του κάθε συστήματος UV είναι ο λαμπτήρας ατμών υδραργύρου (Hg). Το ηλεκτρικό ρεύμα περνώντας από τη λάμπα διεγείρει τον υδράργυρο και καθώς τα άτομα του υδράργυρου επιστρέφουν στην πρότερη χαμηλότερη ενεργειακή της κατάσταση εκπέμπουν ακτινοβολία UV. Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων UV που χρησιμοποιούνται της υδατοκαλλιέργειας: το αιωρούμενο (suspended) και το βυθισμένο (submerged).

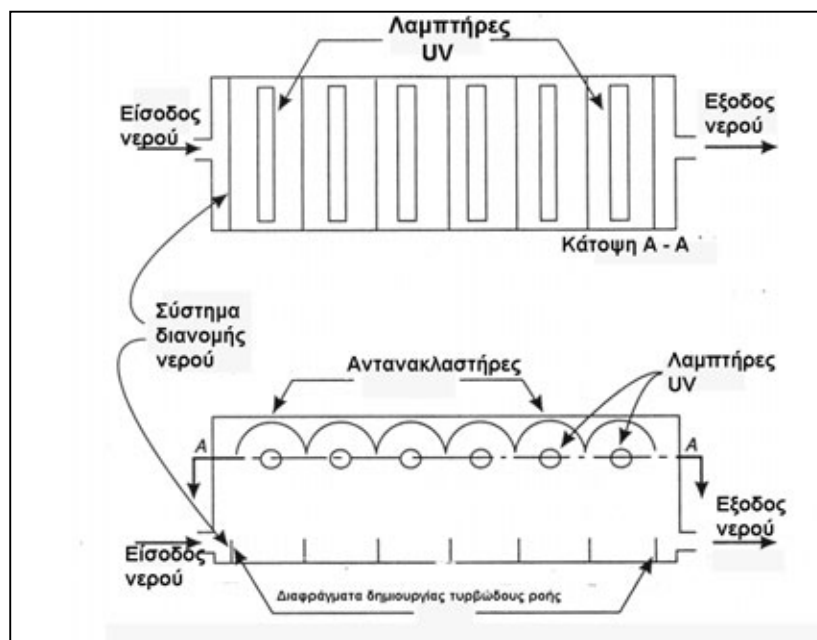
Τα αιωρούμενα UV συστήματα αποτελούνται από μια τράπεζα με λαμπτήρες UV και αντανακλαστήρες που κρέμονται 10 – 20 cm επάνω από μια αύλακα νερού. Η αύλακα μπορεί να έχει και διαχωριστικά διαφράγματα για να δημιουργεί ανακάτεμα στο νερό (Σχήμα 7.24). Το ύψος, ο αριθμός και η απόσταση μεταξύ των λαμπτήρων και των αντανακλαστήρων, πρέπει όλα να συμβάλλουν στην ανάκλαση του φωτός της το νερό. Ακτινοβολία που δεν εισέρχεται στο νερό θεωρείται χαμένη.

Το πιο αποτελεσματικό και ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα UV είναι αυτό που αποτελείται από μια μονάδα UV βυθισμένη στο νερό (βυθισμένο). Στον τύπο αυτό το ανακυκλούμενο νερό περνά μέσα από ένα επιμήκη σωλήνα με UV λάμπα (Σχήμα 7.25). Η λάμπα δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το νερό αλλά βρίσκεται αεροστεγώς προστατευμένη στο εσωτερικό θαλάμου από γυαλί quartz. Καθώς το νερό ρέει κατά μήκος του σωλήνα και περίξ της UV λάμπας, οι μικροοργανισμοί εκτίθενται στην UV ακτινοβολία. Το κάλυμμα quartz θα πρέπει να διατηρείται πάντοτε καθαρό για να μην εμποδίζεται η ακτινοβολία.

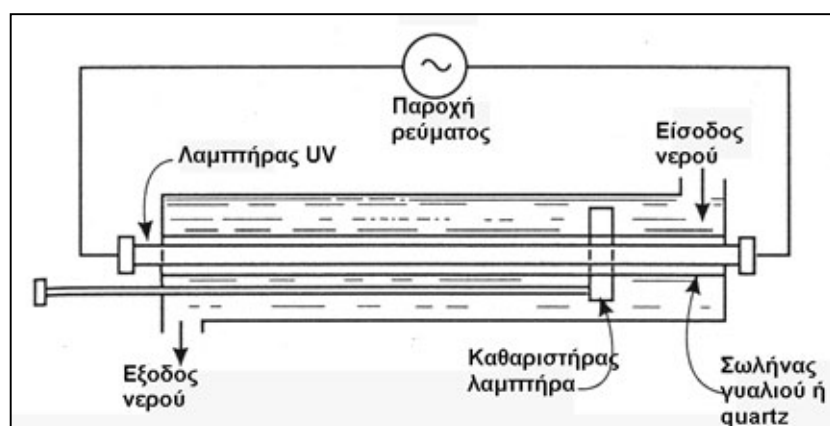
Οι κατασκευαστές των συστημάτων UV τα κατατάσσουν ανάλογα με τη δυναμικότητά της σε ποσότητα ροής νερού που μπορεί να εξυπηρετήσουν. Για μια δεδομένη μονάδα UV η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει μια ορισμένη μέγιστη ροή νερού, η ενδεχόμενη ρύθμιση της ροής νερού σε μικρότερα επίπεδα θα αυξήσει την αποτελεσματικότητα της αποστείρωσης.

Το κύριο μειονέκτημα της αποστείρωσης με UV είναι η απαίτηση για πολύ καθαρό νερό με πολύ μικρή περιεκτικότητα αιωρούμενων στερεών. Το καθαρό (διαυγές) νερό της, δεν είναι μια εύκολα επιτεύξιμη κατάσταση στα πολύ φορτισμένα νερά της κλειστού συστήματος. Επιπρόσθετα, η λάμπα UV πρέπει να αντικαθίσταται περιοδικά. Παρόλα αυτά, το κύριο πλεονέκτημα της αποστείρωσης με UV είναι η ασφάλεια στη λειτουργία της και η ανυπαρξία επιβλαβών επιδράσεων για τα εκτρεφόμενα είδη.

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)



Σχήμα 7.24. Διαγραμματική απεικόνιση της κρεμαστού συστήματος UV. Το νερό ρέει κάτω από την τράπεζα με της λαμπτήρες UV και της αντανακλαστήρες. Στη διαδρομή του νερού παρεμβάλλονται διαφράγματα με σκοπό την παραγωγή τυρβώδους ροής που θα επιτρέψει στη μάζα του νερού να βρεθεί κοντά στην περιοχή μέγιστης ακτινοβολήσης (Wheaton, 1977, ελαφρά τροποποιημένο).



Σχήμα 7.25. Διαγραμματική απεικόνιση της βυθισμένου συστήματος UV, (Wheaton, 1977, ελαφρά τροποποιημένο).

7.7.2. Οζον

Το αέριο όζον (O_3), μια αλλοτροπική μορφή του οξυγόνου, αποτελεί ένα πολύ ισχυρό οξειδωτικό μέσο στο νερό. Ηδη εδώ και πολλά χρόνια (περί τα 70), έχει χρησιμοποιηθεί για την απολύμανση του πόσιμου νερού και για να μειώνει το επίπεδο του χρώματος, της μυρωδιάς και της δυσάρεστης γεύσης του νερού. Πάντως, στα κλειστά συστήματα υδατοκαλλιεργειών, εξαιτίας των μεγάλων συγκεντρώσεων σε

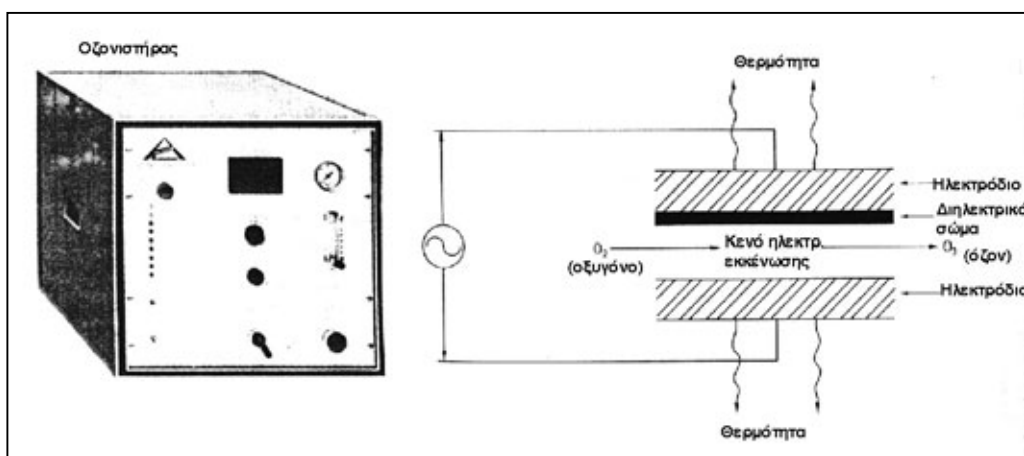
Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)

αιωρούμενα και διαλυμένα οργανικά συστατικά, η επίδραση του όζοντος στην εξολόθρευση των βακτηριδιακών πληθυσμών είναι αμφισβητούμενη.

Η αποτελεσματικότητα της απολυμαντικής του δράσης εξαρτάται από το χρόνο επαφής του με το νερό και την υπολειμματική συγκέντρωσή του (residual concentration) στο νερό που περιέχει της μικροοργανισμούς.

Το όζον είναι ένα ασταθές μπλε αέριο με χαρακτηριστική και αναγνωρίσιμη οσμή. Ο ρυθμός με τον οποίο το O_3 αποσυντίθεται ξανά σε O_2 αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Εξαιτίας της αστάθειάς του (διασπάται μέσα σε 10-20 λεπτά), παράγεται όταν και όπου απαιτείται και δεν μεταφέρεται της μονάδες υδατοκαλλιέργειας (της π.χ. γίνεται με το καθαρό οξυγόνο).

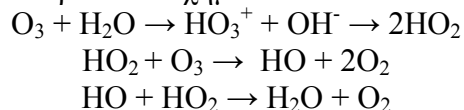
Το όζον παράγεται με κατάλληλες ηλεκτρικές εκκενώσεις (Σχήμα 7.26) υψηλού βολτάζ (4000 – 30.000 volts) ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια (corona), οι οποίες διασπούν το μόριο του οξυγόνου (O_2) σε άτομα οξυγόνου (O). Το οξυγόνο περνά μέσα από τον οζονιστήρα είτε στην καθαρή του μορφή είτε ως ατμοσφαιρικός αέρας. Της άτομο οξυγόνου (O) ενώνεται με ένα μόριο οξυγόνου (O_2) και σχηματίζουν όζον (O_3). Στο εμπόριο διατίθενται της, μικρές ή μεγάλες, γεννήτριες παραγωγής όζοντος.



Σχήμα 7.26. Οζονιστήρας αριστερά. Δεξιά απεικονίζεται διαγραμματικά η κατασκευή του ηλεκτρικού στοιχείου (corona) που δημιουργεί της εκκενώσεις που δημιουργούν το όζον.

Το όζον δρα ως απολυμαντής εξαιτίας της ισχυρής του οξειδωτικής ικανότητας, μόνο το φθόριο έχει μεγαλύτερη ηλεκτροαρνητική οξειδωτική ικανότητα απ' αυτό. Είναι εξαιρετικά διαβρωτικό και επικίνδυνο. Το όζον μπορεί να αντιδρά με ορισμένα πλαστικά, όχι της με το γυαλί και την πορσελάνη. Το όζον είναι ιοκτόνο και βακτηριοκτόνο δια της αποσύνθεσης των βακτηριδιακών κυτταρικών τοιχωμάτων.

Αν και το όζον είναι πιο διαλυτό στο νερό από το οξυγόνο, είναι λιγότερο διαλυτό από το χλώριο. Το επίπεδο κορεσμού του στο νερό της 20 °C είναι περί τα 570 mg/L. Αντιδρά με το νερό κατά το παρακάτω σχήμα:



Οι ελεύθερες ρίζες HO₂ και HO είναι ισχυρά οξειδωτικά και παρουσιάζουν το πλεονέκτημα να μετατρέπονται γρήγορα σε οξυγόνο. Οι οξειδωτικές αντιδράσεις των HO₂ και HO μπορεί να είναι:

1. Ανόργανες, οξείδωση των θειωδών σε θειικά, νιτρωδών σε νιτρικά, χλωριούχων σε χλώριο και ιόντων του σιδήρου και μαγγανίου της αδιάλυτες μορφές της, με αποτέλεσμα την κατακρήμνισή της στο νερό.
2. Οργανικές, διάσπαση των ακόρεστων δεσμών και καταστροφή των χουμικών οξέων, εντομοκτόνων, φαινολών και άλλων οργανικών ενώσεων.

Έχει αποδειχθεί ότι το οζονισμένο νερό, (ακόμη και με το γεγονός της γρήγορης διάσπασης του όζοντος σε οξυγόνο), μπορεί να είναι επικίνδυνο για κάποια ευαίσθητα καλλιεργούμενα είδη. Πάντως, αν το οζονισμένο νερό περάσει μέσα από μια στήλη με ενεργό άνθρακα, η τοξικότητά του εξαφανίζεται.

Της το όζον στον αέρα είναι τοξικό και για τον άνθρωπο. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να έχει ληφθεί πρόνοια για το σωστό αερισμό του χώρου όπου παράγεται το όζον. Γενικά τα συστήματα παραγωγής όζοντος θα πρέπει να εγκαθίστανται μόνο από ειδικευμένους τεχνικούς.

Το όζον συνήθως διαχέεται στο νερό της κλειστού συστήματος σε μία ξεχωριστή δεξαμενή ή σε μία παράκαμψη του σωλήνα μεταφοράς του νερού της μονάδας. Επειδή η αποτελεσματικότητα της οζονοθεραπείας είναι ευθέως ανάλογη με το χρόνο επαφής μεταξύ του αερίου και τον μικροοργανισμών, το νερό θα πρέπει να παραμένει αρκετά σε της της χώρους για να διασφαλιστούν αμφότερα ο θάνατος των μικροοργανισμών και η καταστροφή των μορίων του όζοντος.

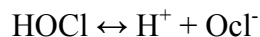
7.7.3. Χλωρίωση

Το χλώριο (αέριος μορφή – Cl₂) χρησιμοποιείται στην κατεργασία των αποβλήτων. Παράγεται εμπορικά δια της ηλεκτρόλυσης του χλωριούχου νατρίου (κοινό αλάτι – NaCl). Το αέριο χλώριο έχει πράσινο-κίτρινο χρώμα και δυνατή μυρωδιά. Πωλείται συνήθως ως υγροποιημένο αέριο υπό πίεση, ως ξηρή σκόνη [υποχλωριώδες ασβέστιο- Ca(OCl)₂], ή ως υγρό (υποχλωριώδες νάτριο – NaOCl). Το αέριο αναμιγνύεται εύκολα με το νερό σχηματίζοντας ένα διάλυμα 0,7 % της 20 °C. Της και τα υπόλοιπα αλογόνα, φθόριο, βρώμιο και ιώδιο, το χλώριο είναι δυνατό βακτηριοκτόνο και ισχυρό οξειδωτικό μέσο.

Της το χλώριο αναμιγνύεται με το νερό υδρολύεται ταχύτατα για να σχηματίσει υποχλωριώδες οξύ κατά την αντίδραση:



Το υποχλωριώδες οξύ είναι ασθενές και ως εκ τούτου υφίσταται μερική διάσταση:

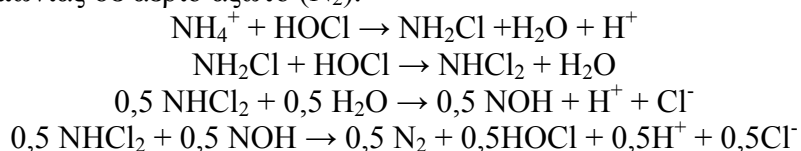


Η αντίδραση αυτή εξαρτάται από το pH, η αύξηση του pH συνεπάγεται αύξηση του ποσοστού του HOCl. Σε pH 4,0 όλο το χλώριο βρίσκεται στη μορφή HOCl, ενώ σε pH 11 μόνο το 0,03% βρίσκεται ως HOCl και το 99,97% ως Ocl⁻ (υποχλωριώδες ιόν). Της συνήθεις τιμές pH για της υδατοκαλλιέργειες, αμφότερα το οξύ και το υποχλωριώδες ιόν είναι παρόντα. Τα HOCl και Ocl⁻ κατά την κοινή ονομασία καλούνται **ελεύθερο χλώριο**. Το ελεύθερο χλώριο και όχι το μόριο του χλωρίου (Cl₂) είναι ο οξειδωτικός παράγοντας.

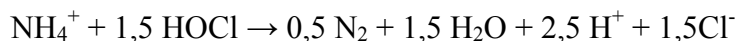
Ο μηχανισμός με τον οποίο το χλώριο σκοτώνει της μικροοργανισμούς δεν είναι ξεκάθαρος. Πιστεύεται ότι το χλώριο εισέρχεται στο κύτταρο και αντιδρά με ορισμένα ένζυμα. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το χλώριο αντιδρά με αζωτούχες ενώσεις (τα ένζυμα είναι πρωτεΐνες και ως εκ τούτου αποτελούνται από σειρές αμινοξέων τα οποία περιέχουν άζωτο). Όσο διευκολύνεται η είσοδος του χλωρίου στο κύτταρο τόσο γρηγορότερα σκοτώνεται ο μικροοργανισμός. Έχει βρεθεί ότι το υποχλωριώδες οξύ διαχέεται γρηγορότερα μέσα στο κύτταρο από το υποχλωριώδες ιόν. Της πιθανώς είναι και ο λόγος που η απολύμανση με χλώριο είναι πιο αποτελεσματική σε χαμηλά pH.

Στη χημεία του χλωρίου απαντώνται κάποιοι ειδικοί όροι. Η ποσότητα των αδέσμευτων HOCl και OCl⁻ καλούνται **ελεύθερο υπολειμματικό χλώριο** (free residual chlorine). Σε καθαρό νερό αποτελεί ισοδύναμη ποσότητα με το ποσό του χλωρίου που προστίθεται στο νερό. Η ποσότητα του χλωρίου που απαιτείται για να αντιδράσει με της διαλυμένες οργανικές και ανόργανες ενώσεις και επιπλέον με όλα τα βακτηρίδια στο νερό, καλείται **απαίτηση για χλώριο** (chlorine demand). Της το χλώριο αντιδρά με την αμμωνία (βλέπε παρακάτω αντίδραση), οι προκύπτουσες ενώσεις ονομάζονται **χλωραμίνες**. Οι χλωραμίνες έχουν απολυμαντικές ιδιότητες και γι' αυτό είναι σημαντικές. Η ποσότητα των χλωραμινών στο δείγμα του νερού αποτελεί το **συνδυασμένο διαθέσιμο χλώριο** (combined available chlorine). Οι χλωραμίνες αντιδρούν πιο αργά από το ελεύθερο χλώριο αλλά είναι πιο αποτελεσματικές σε υψηλά pH.

Για να κατανοηθεί η δράση του χλωρίου στην απολύμανση του νερού, θα πρέπει να αναλυθεί η λεγόμενη **αντίδραση σημείου ανακοπής** (breakpoint reaction). Αν και υπάρχουν ακόμα ορισμένα θολά σημεία για την όλη αντίδραση, πιστεύεται ότι η σειρά των αντιδράσεων είναι η παρακάτω. Σε γενικές γραμμές η αντίδραση σημείου ανακοπής επιτυγχάνεται όταν διαλυθεί αρκετό χλώριο στο νερό, τόσο που να προκαλέσει την οξείδωση της αμμωνίας σε αέριο άζωτο (N₂).

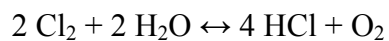


Ολες οι παραπάνω μπορούν να συνοψισθούν στη γενική εξίσωση στην οποία το τελικό προϊόν είναι Cl⁻, το οποίο μπορεί να ξανασυνδυαστεί με νερό και να σχηματίσει HOCl:



Το χλωριωμένο νερό είναι απρόσφορο για υδατοκαλλιέργειες και έτσι το χλώριο πρέπει να απομακρυνθεί από το νερό πριν αυτό χρησιμοποιηθεί για της εκτρεφόμενους οργανισμούς. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους. Η πιο κοινή από αυτές (χρησιμοποιείται στα πολύ χλωριωμένα πόσιμα νερά), είναι η πρόσθεση διοξειδίου του θείου στο νερό, με αποτέλεσμα τη μετατροπή του χλωρίου σε χλωρίον (Cl⁻) με ταυτόχρονη μετατροπή των θειωδών σε θειικά. Της, η μέθοδος αυτή θεωρείται μη πρακτική για της υδατοκαλλιέργειες τουλάχιστον της το παρόν. Της μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν τη χρήση ρητινών ιοντοανταλλαγής, αερισμό και αποθήκευση και χρήση ενεργού άνθρακα. Ο **ενεργός άνθρακας** απομακρύνει το χλώριο από το νερό δια της **καταλυτικής επαφής** (contact catalysis), κατά την οποία το χλώριο απορροφάται από τον άνθρακα και αντιδρά με το νερό:

Στοιχεία συστημάτων εκτροφής με ανακύκλωση του νερού (κλειστά συστήματα)



Η απομάκρυνση του χλωρίου είναι πιο αποτελεσματική στα χαμηλού pH διαλύματα (όξινα) απ'ότι στα υψηλού (βασικά). Οι χλωραμίνες δεν απομακρύνονται με τον ενεργό άνθρακα τόσο καλά όσο το χλώριο.

Εκτός από τη χρήση του για την απολύμανση του νερού της καλλιέργειας, το χλώριο μπορεί να ψεκασθεί της σωλήνες και στα τοιχώματα των αδειασμένων από το νερό δεξαμενών και raceways. Το διάλυμα του χλωρίου θα απολυμάνει της επιφάνειες εξολοθρεύοντας αποικίες βακτηριδίων και μικροαλγών.

8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΙΧΘΥΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΗΣ ΡΟΕΣ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΚΤΡΟΦΗΣ

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο σχεδιασμό οποιουδήποτε συστήματος υδατοκαλλιέργειας, είναι σημαντικό να υπολογιστεί η δυνατότητα ιχθυοχωρητικότητας και παραγωγής του. Λόγω της έντασης της παραγωγής στα συστήματα με επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση του νερού, αυτοί οι υπολογισμοί είναι πολύ κρίσιμοι.

Αν δεν γίνουν σωστά οι υπολογισμοί, μπορεί να ξεπερασθεί το επίπεδο της μέγιστης ιχθυοχωρητικότητας με συνέπεια μειωμένο ρυθμό αύξησης, αυξημένο συντελεστή μετατρεψιμότητας τροφών ή, ακόμα χειρότερα, φτωχή υγεία ψαριών, ασθένειες και υψηλές θνησιμότητες. Ακόμα, λάθος υπολογισμός στην ιχθυοχωρητικότητα της συστήματος, μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη δυνατότητα παραγωγής με σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις. Από μελέτες των παραγόντων που επηρεάζουν της δαπάνες παραγωγής των ψαριών στα συστήματα με επαναχρησιμοποίηση του νερού, διαπιστώθηκε ότι η εντατικοποίηση της παραγωγικής ικανότητας έχει μέγιστο θετικό αντίκτυπο στο κόστος της παραγωγής. Πάνω από 40% των δαπανών, που σχετίζονται με την παραγωγή των ψαριών, σχετίζονται άμεσα με το αρχικό κόστος επένδυσης του συστήματος. Λόγω των υψηλών δαπανών επένδυσης, που απαιτούνται για τα συστήματα επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης του νερού, η σύγχρονη τάση εκτροφής των ψαριών σε αυτά τα συστήματα εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με της υπόλοιπες βιομηχανίες παραγωγής ζωικών ειδών.

8.2. Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ «ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ»

Η μέθοδος επίλυσης προβλημάτων εφαρμοσμένης μηχανικής, γνωστή ως ανάλυση ισορροπίας της μάζας, βασίζεται στο φυσικό νόμο της διατήρησης της μάζας που δηλώνει ότι η μάζα δεν μπορεί να δημιουργηθεί ή να καταστραφεί αλλά μόνο να μετασχηματιστεί. Κατά τη μεθοδολογία αυτή ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- 1) Καθορισμός των ορίων του συστήματος.
- 2) Απομόνωση και προσδιορισμός των ροών που διασχίζουν τα όρια του συστήματος.
- 3) Προσδιορισμός του της εξισορρόπηση υλικού.
- 4) Προσδιορισμός των επεξεργασιών μετασχηματισμού που πραγματοποιούνται μέσα στα όρια του συστήματος και επηρεάζουν την ισορροπία της μάζας.

Κατόπιν, μπορεί να γραφτεί μια εξίσωση ισορροπίας της μάζας. Σε μη σταθερές συνθήκες ισορροπίας (non-steady state conditions), η εξίσωση σε απλουστευμένη μορφή μπορεί να γραφτεί:

$$\begin{array}{l} \text{Ρυθμός συσσώρευσης} \\ \text{της μάζας μέσα στα όρια} \\ \text{του συστήματος} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Ρυθμός} \\ \text{ροής της μάζας μέσα} \\ \text{στο σύστημα} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Ρυθμός} \\ \text{ροής της μάζας έξω} \\ \text{από το σύστημα} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Καθαρός ρυθμός} \\ \text{μετασχηματισμού της} \\ \text{μάζας μέσα στο σύστημα} \end{array}$$

Πιο συνοπτικά:

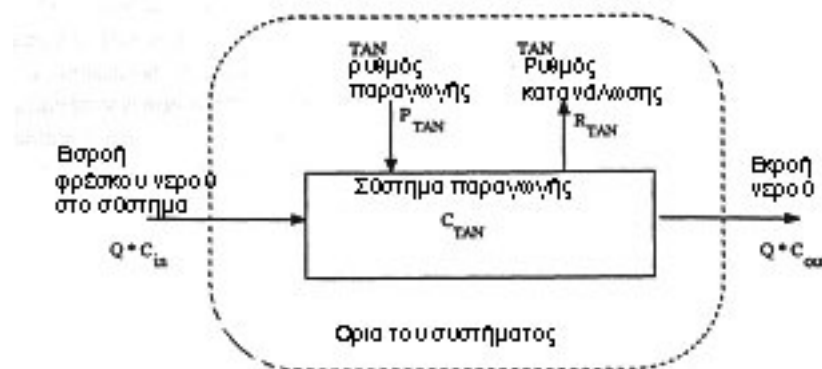
$$\text{Συσσώρευση} = \text{Εισροή} - \text{Εκροή} + \text{Παραγωγή} - \text{Κατανάλωση} \quad (8.1)$$

Υπό σταθερές συνθήκες (steady state) ισορροπίας, η επίλυση απλοποιείται πολύ επειδή δεν συμβαίνουν αλλαγές, δηλαδή μηδενική συσσώρευση. Έτσι η εξίσωση ισορροπίας της μάζας γίνεται:

$$0 = \text{Εισροή} - \text{Εκροή} + \text{Παραγωγή} - \text{Κατανάλωση} \quad (8.2)$$

$$\text{ή} \\ \text{Εισροή} + \text{Παραγωγή} = \text{Εκροή} + \text{Κατανάλωση} \quad (8.3)$$

Σε γενικές γραμμές υποθέτουμε ότι της δεξαμενές επικρατούν συνθήκες πλήρους ανάμιξης (η ποιότητα του νερού είναι παρόμοια σε όλα τα σημεία της δεξαμενής, καθώς και στο νερό που εκρέει από αυτήν). Με άλλα λόγια, η συγκέντρωση των διάφορων χημικών ενώσεων, στοιχείων ή ιόντων είναι η ίδια σε κάθε σημείο της δεξαμενής (π.χ. $C = C_0$). Στο Σχήμα 8.1 φαίνεται διαγραμματικά μια απλοποιημένη ισορροπία της μάζας για την αμμωνία σε ένα σύστημα υδατοκαλλιέργειας με ανακύκλωση του νερού.



Σχήμα 8.1. Θεωρητικό σχήμα ισορροπίας της μάζας για την αμμωνία σε ένα κλειστό σύστημα.

8.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΡΥΘΜΩΝ ΡΟΗΣ

Στα περισσότερα συστήματα επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης του νερού, η πρώτη περιοριστική παράμετρος της ποιότητας του νερού είναι το διαλυμένο οξυγόνο (DO). Εφόσον διασφαλιστεί η διατήρηση των ασφαλών επιπέδων για αυτή την παράμετρο, η επόμενη κρίσιμη παράμετρος είναι η αμμωνία και κατόπιν η συγκέντρωση των συσσωρευόμενων αιωρούμενων στερεών στην υδάτινη στήλη. Τελικά, όταν το σύστημα διαμορφωθεί έτσι που να διατηρεί της περισσότερες από της παραπάνω παραμέτρους ποιότητας νερού σε ασφαλή επίπεδα, ο έλεγχος της συγκέντρωσης των νιτρικών γίνεται το επόμενο μέλημα. Καταλήγοντας, η εντατικοποίηση της συστήματος στη μέγιστη πυκνότητα ψαριών περιορίζεται πρώτιστα από το μέγεθος και το είδος των εκτρεφόμενων ψαριών.

8.3.1. Υπολογισμοί ροών για τη διατήρηση του διαλυμένου οξυγόνου

Η εξίσωση ισορροπίας της μάζας για το DO, που περιγράφει το ρυθμό αλλαγής της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στη δεξαμενή της συστήματος παραγωγής, είναι:

$$\frac{dC_o}{dt} \cdot V = Q \cdot C_{oi} - Q \cdot C_o + P_o - R_o \quad (8.4)$$

Όπου:

Q	= Η ροή στο σύστημα	(όγκος/χρόνο)
V	= Ο όγκος του συστήματος	(όγκος)
C_o	= Συγκέντρωση DO στη δεξαμενή εκτροφής	(μάζα/όγκος)
C_{oi}	= Συγκέντρωση DO στην παροχή	(μάζα/όγκος)
P_o	= Ρυθμός παραγωγής DO	(μάζα/χρόνο)
R_o	= Ρυθμός κατανάλωσης DO	(μάζα/χρόνο)

Υπό σταθερές συνθήκες ισορροπίας (π.χ. καμία αλλαγή στη συγκέντρωση του οξυγόνου μέσα στη δεξαμενή καλλιέργειας, $dC_o/dt = 0$), και υποθέτοντας ότι η ροή της παροχής στο σύστημα είναι ίση με αυτήν της εκροής, η εξίσωση 8.4 μπορεί να απλοποιηθεί σε:

$$Q = \frac{R_o - P_o}{C_{oi} - C_o} \quad (8.5)$$

Στα κλειστά συστήματα, ο ρυθμός παραγωγής του οξυγόνου (P_o) στηρίζεται αποκλειστικά στο σύστημα οξυγόνωσης του συστήματος. Η προσθήκη οξυγόνου εξαρτάται από την πηγή του οξυγόνου (ατμοσφαιρικό ή καθαρό οξυγόνο), την πίεση εγχύσεως του και την αποδοτικότητα του συστήματος να διαλύσει και να κρατήσει το οξυγόνο στο νερό. Επισημαίνεται, ότι όσο η τιμή του P_o προσεγγίζει τη τιμή του R_o , ο ρυθμός ροής Q τείνει στο μηδέν. Με άλλα λόγια, όσον αφορά της απαιτήσεις οξυγόνου, το σύστημα δεν απαιτεί εισαγωγή οξυγόνου από το εισρέον νερό. Στα συστήματα τμηματικής επαναχρησιμοποίησης νερού χωρίς τεχνητή οξυγόνωση και αερισμό μεταξύ των χρήσεων του νερού, η τιμή του P_o είναι ίση με μηδέν (0).

Ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου (R_o), είναι της από της κρισιμότερους και δυσκολότερους να υπολογιστεί. Η συνολική κατανάλωση οξυγόνου στο σύστημα είναι το αποτέλεσμα του ρυθμού αναπνοής της εκτρεφόμενης βιομάζας, των απαιτήσεων για οξυγόνο των αφάγων τροφών (BOD) και των απαιτήσεων για οξυγόνο (NOD) της νιτροποίησης (στο βιολογικό φίλτρο). Η συνολική απαίτηση της κατανάλωσης διαλυμένου οξυγόνου (R_o) μπορεί λοιπόν να υπολογιστεί ως:

$$R_o = R_r + R_{BOD} + R_{NOD} \quad (8.6)$$

Όπου:

R_r	= κατανάλωση DO της εκτρεφόμενης βιομάζας	(μάζα/χρόνο)
R_{BOD}	= κατανάλωση DO των ανθρακούχων αποβλήτων	(μάζα/χρόνο)
R_{NOD}	= κατανάλωση DO λόγω της νιτροποίησης	(μάζα/χρόνο)

Κάθε ένα από τα παραπάνω είδη κατανάλωσης οξυγόνου, είναι λειτουργία πολλών φυσικών και βιολογικών μεταβλητών που σχετίζονται με την εκτρεφόμενη βιομάζα και τη διαμόρφωση του συστήματος. Ο αναπνευστικός ρυθμός της εκτρεφόμενης βιομάζας εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη μεταβολική δραστηριότητα (ποσότητα και συχνότητα

παροχής τροφής και χρόνος από την τελευταία σίτιση), το μέσο βάρος των ψαριών, τη συνολική βιομάζα και το είδος του ψαριού. Από διάφορες έρευνες έχουν βρεθεί εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της τιμής της της παραμέτρου για τα διάφορα καλλιεργούμενα είδη.

Το ανθρακούχο μέρος των αφάγων τροφών και των περιττωμάτων των ψαριών στο σύστημα παραγωγής απαιτεί μια ορισμένη ποσότητα οξυγόνου. Αυτή η απαίτηση οξυγόνου μπορεί να μειωθεί πολύ με τη γρήγορη αφαίρεση των αιωρούμενων και καθιζησάντων στερεών από το σύστημα.

Αυτά τα στερεά μπορούν να αφαιρεθούν αποτελεσματικά με κάποια μορφή μηχανικής διήθησης. Εάν η διαδικασία αφαίρεσης είναι μέρος της διαδικασίας βιολογικής διήθησης (βιολογικά φίλτρα βυθισμένου τύπου), το BOD θα εκφραστεί ως απαίτηση οξυγόνου μέσα στο φίλτρο. Ο συχνός καθαρισμός του φίλτρου (backwashing) έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την απαίτηση για οξυγόνο αυτών των οργανικών στερεών, περιορίζοντας την αποσύνθεσή της μέσα στο φίλτρο.

Εάν τα στερεά απόβλητα παραμείνουν στη δεξαμενή εκτροφής, το BOD θα «ασκηθεί» μέσα στη δεξαμενή. Η γρήγορη αφαίρεση των στερεών αποτελεί λοιπόν ένα ουσιαστικό βοήθημα στη μείωση των απαιτήσεων αερισμού του συστήματος.

Η άλλη σημαντική πηγή κατανάλωσης οξυγόνου είναι η διαδικασία της νιτροποίησης που πραγματοποιείται μέσα στο βιολογικό φίλτρο. Από βασική στοιχειομετρία διαπιστώνουμε ότι για την οξείδωση της γραμμαρίου TAN σε νιτρικά, χρειάζονται περί τα 4,13 – 4,57 g διαλυμένου οξυγόνου (ανάλογα με το ποια ένωση, NH₃ ή NH₄, χρησιμοποιούμε για της υπολογισμούς). Το NOD μπορεί να είναι ουσιώδες και πρέπει να υπολογιστεί μέσα στην εξίσωση ισορροπίας της μάζας για το οξυγόνο.

Η εξίσωση 8.5 μπορεί να ρυθμιστεί εκ νέου και να λυθεί ως της το ρυθμό παραγωγής οξυγόνου (P₀), για να υπολογιστεί ο ρυθμός προσθήκης οξυγόνου που απαιτείται από ολόκληρο το σύστημα. Γνωρίζοντας το επίπεδο του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό εισροής και με δεδομένη μια επιθυμητή τιμή για τη συγκέντρωση DO στο σύστημα (θέτοντας δηλαδή το C₀ σε μια επιθυμητή τιμή), ο απαραίτητος ρυθμός εισαγωγής DO στο σύστημα μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$P_0 = Q \cdot (C_0 - C_{0i}) + R_0 \quad (8.7)$$

Εάν η αναπνοή R₀ είναι μικρή, τότε ο όρος P₀ μπορεί να πάρει αρνητική τιμή, υποδεικνύοντας ως μη αναγκαία μια πρόσθετη πηγή οξυγόνου. Τα αποτελέσματα αυτού του υπολογισμού μπορούν να βοηθήσουν στον προσδιορισμό του τύπου του συστήματος αερισμού που απαιτείται, καθώς και της σχετικές δαπάνες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής ψαριών.

Στα ανοικτά συστήματα εκτροφής, το οξυγόνο προέρχεται (της περισσότερες φορές) μόνο από το νερό που εισέρχεται της δεξαμενής (P₀ = 0). Για την ισορροπία του οξυγόνου σε αυτά τα συστήματα και ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται δεξαμενές τύπου raceway, ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη ότι δεν είναι διαθέσιμο όλο το οξυγόνο του εισερχόμενου νερού, δεδομένου ότι το νερό που απορρέει πρέπει να περιέχει κάποιο κατώτατο επίπεδο συγκέντρωσης DO. Αυτό σημαίνει ότι το C₀ έχει κάποιο κατώτερο όριο.

Με την εξίσωση 8.5 μπορεί να υπολογιστεί η απαραίτητη ροή, με δεδομένο ένα σετ καταστάσεων φόρτισης, ενώ με την εξίσωση 8.7 μπορεί να υπολογιστεί ο απαιτούμενος ρυθμός αερισμού για ένα δεδομένο βιολογικό φορτίο και ένα δεδομένο ρυθμό ροής.

Της οι δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ροής (εξίσωση 8.5) ή του αερισμού (εξίσωση 8.7), ανάλογα με το ρυθμό παροχής τροφής. Για να γίνει της κάτι τέτοιο, ο όρος για το ρυθμό αναπνοής μέσα στο σύστημα (R_0), πρέπει να υπολογιστεί ως οξυγόνο που χρησιμοποιείται ανά μάζα τροφής που παρέχεται στο σύστημα. Συνεπώς οι μονάδες της ροής θα γίνονταν όγκος ανά χρόνο ανά μάζα της τροφής (λίτρα ανά λεπτό ανά kg τροφής). Ομοίως, ο απαιτούμενος ρυθμός αερισμού θα εκφραζόταν ως μάζα του οξυγόνου που προστίθεται στο σύστημα ανά μονάδα του χρόνου ανά μονάδα της μάζας της τροφής (kg O₂ ανά ώρα ανά kg τροφής).

8.3.2. Υπολογισμός ροής για τον έλεγχο αμμωνίας-αζώτου

Στα συστήματα παραγωγής όπου η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου δεν είναι περιοριστική, η ανάγκη να διατηρηθεί η συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας-αζώτου μέσα στη δεξαμενή εκτροφής σε αποδεκτό επίπεδο, θα καθορίσει το ρυθμό της ροής στα ανοικτά συστήματα με σειριακή επαναχρησιμοποίηση του νερού (η εκροή μιας δεξαμενής είναι η εισροή της επόμενης δεξαμενής).

Στα συστήματα εκτροφής με έναν υψηλό βαθμό ανακύκλωσης του νερού, ο ρυθμός ροής του ανακυκλούμενου νερού (δηλαδή ροή στο βιολογικό φίλτρο) υπαγορεύεται συνήθως από την ανάγκη να περιοριστεί η συγκέντρωση της αμμωνίας-αζώτου.

Η συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας-αζώτου (NH₃ – N) διαλυμένης στο νερό, εξαρτάται από το pH, τη θερμοκρασία του νερού και τη συνολική συγκέντρωση αμμωνίας-αζώτου (TAN = NH₃-N + NH₄⁺-N). Το γραμμομοριακό ποσοστό (α) της μη ιονισμένης αμμωνίας-αζώτου, ανάλογα με τη θερμοκρασία και το pH στα γλυκά νερά, μπορεί να βρεθεί στον Πίνακα 8.1.

Η συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας-αζώτου μπορεί να υπολογιστεί (Huguenin και Colt, 1989) ως:

$$\text{NH}_3 - \text{N} = \alpha \cdot \text{TAN} \quad (8.8)$$

όπου:

NH₃ – N	= συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας-αζώτου	(μάζα/όγκος)
α	= ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας-αζώτου	(δεκαδικό μέρος)
TAN	= συγκέντρωση της συνολικής αμμωνίας-αζώτου	(μάζα/όγκος)

Πίνακας 8.1. Ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας για το γλυκό νερό.

Θερμοκρασία (°C)	pH						
	7,0	7,8	7,9	8,0	8,1	8,3	9,0
5	0,0012	0,0078	0,0098	0,0123	0,0154	0,0242	0,1107
10	0,0019	0,0116	0,0145	0,0182	0,0229	0,0357	0,1567
15	0,0027	0,0169	0,0212	0,0266	0,0332	0,0516	0,2144
20	0,0039	0,0243	0,0304	0,0380	0,0474	0,0731	0,2833
25	0,0056	0,0346	0,0431	0,0537	0,0667	0,1017	0,3621
30	0,0080	0,0483	0,0600	0,0744	0,0919	0,1382	0,4455
35	0,0111	0,0663	0,0820	0,1011	0,1240	0,1833	0,5293

Κατά Huguenin και Colt, 1989

Η εξίσωση ισορροπίας της μάζας που περιγράφει το ρυθμό αλλαγής της συγκέντρωσης TAN μέσα σε ένα σύστημα μπορεί να γραφτεί ως:

$$\frac{dC_{TAN}}{dt} \cdot V = (Q \cdot C_{TANi}) - (Q \cdot C_{TAN}) + P_{TAN} - R_{TAN} \quad (8.9)$$

όπου:

C_{TAN}	= συγκέντρωση TAN στη δεξαμενή εκτροφής	(μάζα/όγκος)
dt	= χρονικό διάστημα	(χρόνος)
Q	= ρυθμός ροής μέσω του συστήματος	(όγκος/χρόνος)
C_{TANi}	= συγκέντρωση TAN του φρέσκου νερού	(μάζα/όγκος)
V	= όγκος του συστήματος	(όγκος)
P_{TAN}	= ρυθμός παραγωγής TAN	(μάζα/χρόνος)
R_{TAN}	= ρυθμός αφαίρεσης TAN	(μάζα/χρόνος)

Ο όρος παραγωγή αμμωνίας (P_{TAN}), αναφέρεται στο ρυθμό παραγωγής της TAN στο σύστημα, ως αποτέλεσμα του μεταβολισμού των ψαριών και της βιολογικής αποσύνθεσης της αφάγωτης τροφής. Ο ρυθμός παραγωγής της TAN μπορεί να υπολογιστεί ως λειτουργία του ρυθμού παροχής τροφής και του ποσοστού της πρωτεΐνης στην τροφή έτσι ώστε:

$$P_{TAN} = \frac{FA \cdot PC \cdot 0,102}{t} \quad (8.10)$$

όπου:

FA	= ποσότητα τροφής	(μάζα)
PC	= περιεκτικότητα της τροφής σε πρωτεΐνη	(δεκαδικός)
t	= χρονική περίοδος από το πρώτο έως το επόμενο γεύμα	(χρόνος)

Η εξίσωση 8.10 είναι βασισμένη της ακόλουθες προϋποθέσεις:

- 1) 16% της πρωτεΐνης των τροφών είναι άζωτο
- 2) 80% του αζώτου είναι αφομοιώσιμο
- 3) Το μη αφομοιωμένο άζωτο που υπάρχει στα περιττώματα αφαιρείται από τη δεξαμενή γρήγορα
- 4) 80% του αφομοιωμένου αζώτου απεκκρίνεται
- 5) Όλη η TAN εκκρίνεται κατά τη χρονική περίοδο t

Ο αριθμητικός συντελεστής (0,102) στην εξίσωση 8.10, εξάγεται από της παραπάνω προϋποθέσεις 1 – 4 για την εκτίμηση της TAN, που παράγεται από τη μεταβολική δραστηριότητα των υδρόβιων οργανισμών, οι οποίοι τρέφονται με τροφές υψηλής πρωτεϊνικής περιεκτικότητας, ($0,16 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 0,102$). Η εξίσωση 8.10 αντιπροσωπεύει μια γενικά υψηλή εκτίμηση του ποσοστού παραγωγής TAN. Η υπόθεση ότι όλη η TAN εκκρίνεται σε μια πεπερασμένη χρονική περίοδο (t) μεταξύ των γευμάτων, στηρίζεται στο γεγονός ότι η μεταβολική δραστηριότητα αυξάνεται κατά την περίοδο μετά από τα γεύματα. Αν και η τιμή του t εξαρτάται από της βιολογικές μεταβλητές, η εμπειρία έχει δείξει ότι η μεταβολική δραστηριότητα των ψαριών είναι μέγιστη 1 έως 4 ώρες μετά τη σίτιση. Πολλά και μικρά γεύματα ο μοιόμορφα διασκορπισμένα κατά τη διάρκεια της ημέρας ελαχιστοποιούν της υψηλές τιμές της P_{TAN} . Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των αυτόματων ταϊστών ή των ταϊστών τύπου «απαίτησης» (demand feeders).

Ο όρος «κατανάλωση» (R_{TAN}), αναφέρεται στο ρυθμό αφαίρεσης της αμμωνίας με τη διαδικασία της επεξεργασίας των αποβλήτων στο σύστημα. Για να διατηρηθούν σταθερές συνθήκες ισορροπίας, όσον αφορά τη συγκέντρωση TAN μέσα σε μια δεξαμενή εκτροφής, ο απαιτούμενος ρυθμός αφαίρεσης της αμμωνίας από το βιολογικό φίλτρο του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί με την μετατροπή της εξίσωσης 8.9 έτσι ώστε:

$$R_{TAN} = Q \cdot (C_{TANi} - C_{TAN}) + P_{TAN} \quad (8.11)$$

Της περισσότερες υδατοκαλλιεργητικές μονάδες, η διαδικασία της αφαίρεσης αμμωνίας πραγματοποιείται σε ένα τμήμα εξωτερικό της δεξαμενής εκτροφής (βιολογικό φίλτρο). Ο ρυθμός με τον οποίο η αμμωνία μεταφέρεται στο βιολογικό φίλτρο υπολογίζεται ως:

$$F_{TAN} = Q_f \cdot C_{TAN} \quad (8.12)$$

όπου:

$$F_{TAN} = \text{Ρυθμός ροής της TAN στο βιολογικό φίλτρο} \quad (\text{μάζα/χρόνο})$$

$$Q_f = \text{Ρυθμός ροής νερού στο φίλτρο} \quad (\text{όγκος/χρόνο})$$

Για να διατηρηθούν σταθερές συνθήκες ισορροπίας όσον αφορά την TAN σε μια δεξαμενή εκτροφής, ο ρυθμός ροής της TAN στο φίλτρο (F_{TAN}) δεν πρέπει να είναι μικρότερος από τον απαιτούμενο ρυθμό αφαίρεσης της TAN (R_{TAN}) που υπολογίζεται στην εξίσωση 8.11. Με την προϋπόθεση ότι ένα βιολογικό φίλτρο είναι 100% αποδοτικό

(δηλαδή 100% της TAN αφαιρείται με ένα πέρασμα από το φίλτρο), τότε ο θεωρητικά ελάχιστος ρυθμός ροής στο φίλτρο (Q_{fmin}) μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$Q_{fmin} = Q_f \cdot C_{TAN} \quad (8.13)$$

Ο υπολογισμός της αποδοτικότητας ΤΗΣ της βιολογικού φίλτρου είναι μια σύνθετη διεργασία, καθώς εξαρτάται από της λειτουργικές του μεταβλητές (συγκέντρωση TAN στην εισροή, υδραυλικό φορτίο, υδραυλικός χρόνος παραμονής, θερμοκρασία, εμβαδό επιφάνειας φίλτρων, υλικά πλήρωσης φίλτρων και τύπος των φίλτρων –RBC, Fluidized Bed, φίλτρο άμμου ανοδικής ροής, φίλτρο πλαστικών χαντρών, φίλτρο καταιονισμού).

Υποθέτοντας ότι η τιμή του E είναι γνωστή για έναν συγκεκριμένο τύπο φίλτρου και συνθηκών, τότε η ροή στο φίλτρο για να διατηρήσει σταθερές συνθήκες ισορροπίας όσον αφορά τη C_{TAN} μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$Q_f = \frac{Q \cdot (C_{TANi} - C_{TAN}) + P_{TAN}}{C_{TAN} \cdot E} \quad (8.14)$$

Αν απαιτείται υψηλότερη ροή (Q_f), τότε θα χρειαστεί ένα μεγαλύτερο φίλτρο για να διατηρήσει ένα σταθερό υδραυλικό φορτίο (hydraulic loading rate) και χρόνο παραμονής (hydraulic retention time).

Σύμφωνα με οδηγίες (EIFAC – FAO), η τιμή των 0,025 mg/L χρησιμοποιείται ως η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας (A_{NH3-N}), αν και σύμφωνα με τα ερευνητικά μέχρι τώρα αποτελέσματα:

- 1) Μια αληθινά ασφαλής, μέγιστη συγκέντρωση της μη ιονισμένης (NH_3) ή της συνολικής αμμωνίας (TAN) για τα συστήματα καλλιέργειας ψαριών, δεν είναι γνωστή.
- 2) Η φαινομενική τοξικότητα της αμμωνίας ποικίλλει εξαιρετικά.

Λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία νερού και το pH, η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση TAN (A_{TAN}) μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$A_{TAN} = \frac{A_{NH3-N}}{a} \quad (8.15)$$

Συνδυάζοντας της εξισώσεις 8.14 και 8.15 και χρησιμοποιώντας την υπολογιζόμενη μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση TAN, μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροή στο φίλτρο (Q_f) που απαιτείται για να διατηρήσει αποδεκτές της σταθερές συνθήκες ισορροπίας για τη συγκέντρωση της TAN στη δεξαμενή:

$$Q_f = \frac{Q \cdot (C_{TANi} - C_{TAN}) + P_{TAN}}{A_{TAN} \cdot E} \quad (8.16)$$

Προϋπόθεση για της εγκαταστάσεις των υδατοκαλλιεργειών, είναι η διαθεσιμότητα μιας πηγής ύδατος με πολύ χαμηλή συγκέντρωση TAN ($C_{TANi} \approx 0$). Σε τέτοια περίπτωση ο όρος ($Q \cdot C_{TANi}$) μπορεί να μηδενιστεί στην εξίσωση 8.16.

8.3.3. Υπολογισμός των ρυθμών ροής για τον έλεγχο των νιτρικών

Τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-) είναι το τελικό προϊόν της διαδικασίας της νιτροποίησης. Παρόλο που είναι σχετικά μη τοξικά για τα ψάρια, η συγκέντρωσή της πρέπει να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα στα συστήματα ιχθυοκαλλιέργειών. Πολλά συστήματα ανακύκλωσης του νερού χρησιμοποιούν τη διαδικασία της απονιτροποίησης για να αφαιρέσουν τα νιτρικά, ενώ άλλα τα απομακρύνουν (αραιώνουν) δια της ανανέωσης του νερού του συστήματος (φρέσκο νερό).

Σε αυτή τη περίπτωση, η ισορροπία της μάζας για τα νιτρικά, με δεδομένη μια μέγιστη συγκέντρωση NO_3 , καθορίζει τη ροή του φρέσκου νερού στο σύστημα. Η εξίσωση ισορροπίας της μάζας, που περιγράφει το ρυθμό αλλαγής της συγκέντρωσης των νιτρικών ($\text{NO}_3\text{-N}$) σε ένα σύστημα ανακύκλωσης του νερού, μπορεί να γραφτεί ως:

$$\frac{dC_{\text{NO}_3}}{dt} \cdot V = Q \cdot C_{\text{NO}_3i} - Q \cdot C_{\text{NO}_3} + P_{\text{NO}_3} - R_{\text{NO}_3} \quad (8.17)$$

όπου:

C_{NO_3}	= Συγκέντρωση των νιτρικών στο σύστημα	(μάζα /όγκο)
C_{NO_3i}	= Συγκέντρωση των νιτρικών στην παροχή	(μάζα /όγκο)
P_{NO_3}	= Ρυθμός παραγωγής νιτρικών	(μάζα /χρόνο)
R_{NO_3}	= Ρυθμός απομάκρυνσης των νιτρικών	(μάζα /χρόνο)

Με δεδομένες σταθερές συνθήκες ισορροπίας σχετικά με τα NO_3 και $C_{\text{NO}_3i} = 0$, ο ρυθμός ροής του νέου (φρέσκου) νερού μέσω του συστήματος υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q = \frac{P_{\text{NO}_3} - R_{\text{NO}_3}}{C_{\text{NO}_3}} \quad (8.18)$$

Ο ρυθμός παραγωγής των νιτρικών είναι ίσος με το ρυθμό της νιτροποίησης στο βιολογικό φίλτρο έτσι ώστε να ισχύει:

$$P_{\text{NO}_3} = R_{\text{TAN}} \quad (8.19)$$

Εντούτοις, με δεδομένες σταθερές συνθήκες ισορροπίας και υποθέτοντας ότι ο ρυθμός απώλειας της TAN δια της ροής μέσω του συστήματος είναι πολύ μικρός (δηλαδή $Q \cdot C_{\text{TAN}} \approx 0$), τότε $R_{\text{TAN}} \approx P_{\text{TAN}}$ και:

$$P_{\text{NO}_3} \approx P_{\text{TAN}} \quad (8.20)$$

Στην εξίσωση 8.17 ο δυσκολότερος όρος για να υπολογιστεί, είναι ο ρυθμός αφαίρεσης νιτρικών (R_{NO_3}). Ακόμα και στα συστήματα που δεν χρησιμοποιούν κάποια διαδικασία απονιτροποίησης, υφίσταται ένα ποσοστό «παθητικής» απονιτροποίησης. Κατά την απονιτροποίηση τα νιτρικά μεταβολίζονται από αναερόβια βακτηρίδια με τελικό προϊόν το αέριο N_2 , το οποίο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Με δεδομένες

υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών μέσα στο σύστημα και χαμηλές συγκεντρώσεις DO στα φίλτρα και ιδίως σε ορισμένες περιοχές συσσώρευσης ιζημάτων, της ορισμένου όγκος του νερού του συστήματος μπορεί να γίνει ανοξικός. Σε αυτές οι περιοχές μπορεί να συμβεί απονιτροποίηση, με αποτέλεσμα την μείωση των νιτρικών, γεγονός που χαμηλώνει της απαιτήσεις για φρέσκο νερό (αραιώσης).

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.18, μπορούμε να υπολογίσουμε την απαραίτητη ροή δια μέσου του συστήματος (φρέσκο νερό) Q και να ολοκληρώσουμε την ανάλυση για τον υπολογισμό του ρυθμού ανακύκλωσης του νερού (Q_f) με τη βοήθεια της εξίσωσης 8.16.

8.3.4. Απαιτήσεις ροής για τη διατήρηση του διαλυμένου οξυγόνου σε βυθισμένο βιολογικό φίλτρο

Η διαδικασία ισορροπίας της μάζας για το DO σε ένα βυθισμένο βιολογικό φίλτρο (όπου το υλικό πλήρωσης βρίσκεται συνεχώς και εντελώς μέσα στο νερό), πρέπει να εφαρμοσθεί για να διασφαλίσει ότι το βιολογικό φίλτρο θα έχει επαρκές DO για να διατηρήσει τον αερόβιο νιτροποιητικό βακτηριδιακό του πληθυσμό. Θεωρώντας το βιολογικό φίλτρο ως το υπό εξέταση σύστημα και οριοθετημένο, η εξίσωση ισορροπίας της μάζας για το DO στο φίλτρο υπό σταθερές συνθήκες μπορεί να γραφτεί ως:

$$0 = Q_f' \cdot (C_{O_{fi}} - C_{O_f}) - R_{BODf} - R_{NOD} \quad (8.21)$$

όπου:

Q_f'	= Ρυθμός ροής μέσω του φίλτρου βασισμένος στην ισορροπία της μάζας του DO	(όγκος/χρόνο)
C_{O_f}	= Συγκέντρωση DO στο φίλτρο και στην απορροή του	(μάζα/όγκο)
$C_{O_{fi}}$	= Συγκέντρωση DO στην εισαγωγή του φίλτρων	(μάζα/όγκο)
R_{BODf}	= Κατανάλωση DO λόγω δημιουργίας BOD μέσα στο φίλτρο	(μάζα/χρόνο)
R_{NOD}	= Κατανάλωση DO λόγω της νιτροποίησης	(μάζα/χρόνο)

Η συγκέντρωση του DO μέσα στο φίλτρο πρέπει να διατηρείται σε συγκεντρώσεις άνω των 2,0 mg/L για να διασφαλιστεί ότι η νιτροποίηση δεν θα μειωθεί λόγω έλλειψης οξυγόνου. Η εξίσωση 8.21 μπορεί να αναδιατυπωθεί και να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η απαραίτητη ροή μέσω του φίλτρου (Q_f') για μια δεδομένη εισροή και εκροή συγκέντρωσης DO στο φίλτρο, έτσι ώστε:

$$Q_f' = \frac{R_{BODf} + R_{NOD}}{C_{O_{fi}} - C_{O_f}} \quad (8.22)$$

Εάν η προκύπτουσα τιμή του Q_f' υπερβαίνει την υπολογισμένη τιμή του Q_f (εξίσωση 8.16), τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η μεγαλύτερη τιμή της ροής στο σχεδιασμό του συστήματος για να διασφαλιστεί ότι η νιτροποίηση δεν θα στερηθεί οξυγόνο. Εναλλακτικά, μπορεί είτε να αυξηθεί η συγκέντρωση DO στο φίλτρο ($C_{O_{fi}}$) είτε να μειωθεί το ποσοστό BOD μέσα στο φίλτρο με προ-διήθηση ή καθίζηση των στερεών.

8.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΙΧΘΥΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η αναλυτική προσέγγιση που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα, είχε σκοπό τον υπολογισμό του απαραίτητου ρυθμού ροής του νερού, για να διατηρήσει της κατάλληλες συνθήκες με δεδομένο ένα καθορισμένο επίπεδο εκτρεφόμενης βιομάζας. Σε πραγματικές της συνθήκες, απαιτείται να καθοριστεί η μέγιστη ιχθυοχωρητικότητα σε ένα υπάρχον σύστημα, με δεδομένες συνθήκες. Στα παρακάτω περιγράφεται η χρήση της μαζικής ισορροπίας για τον υπολογισμό της ιχθυοχωρητικότητας συστημάτων.

8.4.1. Υπολογισμός της ιχθυοχωρητικότητας συστημάτων σχετικά με το διαλυμένο οξυγόνο

Για να υπολογιστεί η ιχθυοχωρητικότητα της συστήματος σε ορισμένες συνθήκες, αρχίζουμε με την εξίσωση 8.5 και υποθέτουμε πάλι σταθερές συνθήκες ισορροπίας όσον αφορά το διαλυμένο οξυγόνο. Αναδιατάσσοντας την 8.5 μπορούμε να λύσουμε ως προς το γενικό ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου μέσα στο σύστημα (R_0) έτσι ώστε:

$$R_0 = Q \cdot (C_{0i} - C_0) + P_0 \quad (8.23)$$

Η εξίσωση 8.6 ($R_0 = R_r + R_{BOD} + R_{NOD}$), καθορίζει την τιμή του ρυθμού κατανάλωσης του οξυγόνου ως το σύνολο που περιλαμβάνει, την αναπνοή των ψαριών, την ανθρακούχα και την αζωτούχα απαίτηση για οξυγόνο. Στην πραγματικότητα, το επίπεδο κάθε μιας από αυτές της παραμέτρους (παραβλέποντας το βασικό αναπνευστικό ρυθμό της καλλιεργούμενης βιομάζας) σχετίζεται άμεσα με το ποσό της τροφής που εισάγεται στο σύστημα σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Μπορούμε έτσι να απλοποιήσουμε και να επαναπροσδιορίσουμε το ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου (R_0) ως:

$$R_0 = FOC \cdot FR \quad (8.24)$$

όπου:

FOC = Κατανάλωση οξυγόνου ανά μονάδα μάζας της τροφής (μάζα/μάζα)

FR = Ρυθμός παροχής της τροφής (μάζα/χρόνο)

Κατά συνέπεια, ο FR μπορεί να εκφραστεί ως:

$$FR = \frac{FA}{t} \quad (8.25)$$

όπου: **FA** = ποσότητα τροφής

Συνδυάζοντας της εξισώσεις 8.23 και 8.24 και λύνοντας ως προς το ρυθμό παροχής τροφής (FR) για ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών, μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγιστο ρυθμό παροχής τροφής βασισμένο στην ισορροπία της μάζας του διαλυμένου οξυγόνου (FR_{mo}) ως:

$$I = \frac{Q(C_{0i} - C_0) + P_0}{FOC} \quad (8.26)$$

Στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, για ένα δεδομένο μέγεθος ψαριών, ο ρυθμός παροχής τροφής δίδεται ως ποσοστό του σωματικού βάρους του εκτρεφόμενου πληθυσμού στη μονάδα του χρόνου. Κατά συνέπεια η τιμή της **FR** μπορεί να οριστεί ως:

$$FR = SBM \cdot \%BW \quad (8.27)$$

όπου:

SBM = Βιομάζα του καλλιεργημένου πληθυσμού μέσα στο σύστημα (μάζα)

%BW = Βάρος της παρεχόμενης τροφής ανά μονάδα βάρους ψαριών στη μονάδα του χρόνου (μάζα τροφής/μάζα ψαριών/χρόνο)

Συνδυάζοντας της εξισώσεις 8.26 και 8.27 και επιλύοντας ως της την καλλιεργούμενη βιομάζα του συστήματος (**SBM**), βρίσκουμε τη μέγιστη ιχθυοχωρητικότητα του συστήματος σχετικά με το διαλυμένο οξυγόνο (**SBM_{mo}**):

$$SBM_{mo} = \frac{FR_{mo}}{\%BW} \quad (8.28)$$

8.4.2. Υπολογισμός της ιχθυοχωρητικότητας σχετικά με την TAN

Για να καθορίσουμε την ιχθυοχωρητικότητα της συστήματος όσον αφορά την TAN, αρχίζουμε την ανάλυση με την βοήθεια της εξίσωσης 8.16, την αναδιατυπώνουμε και λύνουμε ως της το ρυθμό παραγωγής της ολικής αμμωνίας (**P_{TAN}**) έτσι ώστε:

$$P_{TAN} = (A_{TAN} \cdot Q_f \cdot E) + Q(C_{TAN} - C_{TANi}) \quad (8.29)$$

Δεδομένου ότι η εξίσωση 8.10 υπολογίζει το **P_{TAN}** ως λειτουργία της ποσότητας τροφής ανά γεύμα και της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη, και η εξίσωση 8.25 καθορίζει το ρυθμό παροχής τροφής ως $FR = FA / t$, τότε ο μέγιστος ρυθμός παροχής τροφής (**FR_{mTAN}**) που αντέχει το σύστημα όσον αφορά την TAN υπολογίζεται από τη σχέση:

$$FR_{mTAN} = \frac{(A_{TAN} \cdot Q_f \cdot E) + Q(C_{TAN} - C_{TANi})}{0,102PC} \quad (8.30)$$

Η εξίσωση 8.30 καθορίζει το μέγιστο ρυθμό παροχής τροφής (**FR_{mTAN}**) για της δεδομένες συνθήκες. Χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ του ρυθμού παροχής τροφής και της βιομάζας στην εξίσωση 8.27 ($FR = SBM \cdot \%BW$), υπολογίζεται η μέγιστη διατηρήσιμη βιομάζα (**SBM_{mTAN}**) για το σύστημα:

$$SBM_{mTAN} = \frac{FR_{mTAN}}{\%BW} \quad (8.31)$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών της εξίσωσης 8.30 και 8.31 πρέπει να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των υπολογισμών χρησιμοποιώντας της εξίσωσης 8.26 και 8.28. Η χαμηλότερη των δύο τιμών (εξίσωση 8.26 έναντι 8.30 και εξίσωση 8.28 έναντι 8.31), καθορίζει το μέγιστο ρυθμό παροχής τροφής και την ιχθυοχωρητικότητα του συστήματος αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από της εξίσωσης 8.30 και 8.31 είναι συντηρητικά, δηλαδή η ιχθυοχωρητικότητα του συστήματος υπολογίζεται υποτιμημένη. Από εμπειρικά στοιχεία κλειστών συστημάτων παραγωγής, έχει βρεθεί ότι 30-50% της νιτροποίησης μέσα στο σύστημα είναι «παθητική». Ο νιτροποιητικός βακτηριδιακός πληθυσμός στα τοιχώματα των δεξαμενών, σωλήνων και στην ίδια την υδάτινη στήλη, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ισορροπία της μάζας για την TAN μέσα στο σύστημα. Σε ακραία περίπτωση, οι εκτιμήσεις των εξισώσεων 8.30 και 8.31 θα μπορούσαν ακόμα και να διπλασιαστούν για να καθορίσουν την πραγματική ιχθυοχωρητικότητα των συστημάτων.

8.5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Παρακάτω θα δοθούν παραδείγματα υπολογισμού για ρυθμούς ροής και ικανότητες φόρτισης για συστήματα παραγωγής ψαριών με επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση νερού.

8.5.1. Υπολογισμοί ρυθμού ροής

Παράδειγμα 1) Υπολογισμός απαιτήσεων ροής για τη διατήρηση του οξυγόνου σε σύστημα επαναχρησιμοποίησης κρύου νερού (εκτροφή σολομών) χωρίς πρόσθετο αερισμό.

Αυτό το παράδειγμα υπολογίζει την απαιτούμενη ροή σε ένα σύστημα επαναχρησιμοποίησης κρύου νερού (10 °C), με τρεις δεξαμενές εκτροφής σε σειρά (η εκροή μιας δεξαμενής είναι εισροή της επόμενης), χωρίς τεχνητό σύστημα αερισμού μεταξύ των δεξαμενών.

Προϋποθέσεις: Το νερό εισάγεται στην πρώτη δεξαμενή κορεσμένο σε οξυγόνο ($DO = 11,3 \text{ mg/L}$). Οι δεξαμενές έχουν την ίδια ιχθυοφόρτιση. Το νερό που εκρέει από την τελευταία δεξαμενή, δεν πρέπει να έχει συγκέντρωση οξυγόνου μικρότερη από 5 mg/L .

Η συνολική μείωση του οξυγόνου μεταξύ της παροχής της πρώτης δεξαμενής και της αποχέτευσης της τρίτης δεξαμενής περιορίζεται σε $6,3 \text{ mg/L}$ ($11,3 - 5,0$). Κατά συνέπεια, η διαφορά μεταξύ του C_{0i} και του C_0 σε κάθε δεξαμενή δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από $2,1 \text{ mg/L}$ ($2,1 \text{ g/m}^3$). Για να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 8.5, προκειμένου να υπολογιστεί η απαραίτητη ροή, απαιτείται μια εκτίμηση του ποσού οξυγόνου που καταναλώνεται (R_0) μέσα στο σύστημα. Με δεδομένο ότι δεν υπάρχει τεχνητός αερισμός σε αυτό το σύστημα, ο όρος P_0 είναι ίσος με μηδέν. Οι σολομοί καταναλώνουν $200 - 250 \text{ g}$ οξυγόνου ανά kg τροφής. Υποθέτοντας ότι η τροφή διανέμεται 24 ώρες τη μέρα και ότι υπάρχουν σταθερές συνθήκες ισορροπίας, (δηλαδή ο καθημερινός ρυθμός παροχής τροφής είναι σταθερός· βλέπε παράγραφο 8.11.2 για λεπτομέρειες), τότε ο ρυθμός

κατανάλωσης οξυγόνου της τροφής πρέπει να κατανεμηθεί σε αυτή τη χρονική περίοδο (200-250 g O₂/kg τροφής/24 ώρες). Υποθέτουμε ότι η εκτίμηση του R₀ περιλαμβάνει την αναπνοή των ψαριών (R_r), την ανθρακούχο απαίτηση οξυγόνου (R_{BOD}) και την αζωτούχο απαίτηση οξυγόνου που αναπτύσσεται μέσα στη ροή του νερού διαμέσου του συστήματος. Δίνοντας μια μέση τιμή για το R₀ ως 225 g O₂/kg τροφής, η εξίσωση 8.5 μπορεί να λυθεί ως της Q έτσι ώστε:

$$Q = \frac{225 \text{ gO}_2/\text{Kg τροφή}}{2,1 \text{ g/m}^3} \cdot 24 \text{ h} = 4,5 \text{ m}^3/\text{h/kg τροφής} = 75 \text{ L/min/kg τροφής} \quad (8.32)$$

Με της δεδομένες υποθέσεις και περιορισμούς, απαιτείται της ρυθμός ροής μέσω του συστήματος περίπου 75 λίτρων φρέσκου νερού ανά λεπτό ανά kg χορηγούμενης τροφής, για να διατηρήσει μια επαρκή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στην Τρίτη κατά σειρά δεξαμενή στο σύστημα επαναχρησιμοποίησης του νερού.

Παράδειγμα 2) Απαιτήσεις ροής για ένα σύστημα εκτροφής ψαριών (γατόψαρα) με ανακύκλωση θερμού νερού.

Προϋποθέσεις: Μέγιστη βιομάζα εκτροφής (SBM) 1000 kg γατόψαρα με μέσο βάρος 567 g. Τα ψάρια ταΐζονται 4 φορές ημερησίως (κατά ίσα χρονικά διαστήματα) με ποσοστό παροχής τροφής 1,5% του σωματικού της βάρους (%BW) ανά ημέρα. Υποθέτουμε ότι 30% της TAN που παράγεται μέσα στο σύστημα, μετατρέπεται σε νιτρικά από την παθητική νιτροποίηση που λαμβάνει μέρος στο σύστημα. Της υποθέσεις και σχετικές πληροφορίες για την ανάπτυξη των κριτηρίων σχεδιασμού για αυτό το παραδειγματικό σύστημα δίδονται στον Πίνακα 8.2.

Βήμα 1: Υπολογίζεται το βάρος της τροφής ανά σίτιση:

$$FA = \frac{SMB \cdot \%BW}{F} = \frac{(1000 \text{ kg ψαριών} \cdot 0,015 \text{ kg τροφής/k ψαριών/ημέρα})}{4} = 3,75 \text{ kg τροφή/τάισμα} \quad (8.33)$$

όπου:

$$F = \text{αριθμός γευμάτων ανά ημέρα} = 4$$

Βήμα 2: Υπολογίζεται ο ρυθμός παραγωγής αμμωνίας χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.10:

$$P_{TAN} = \frac{FA \cdot 0,102PC}{t} \quad (8.34)$$

δίδονται:

$$FA = 3,75 \text{ g τροφή ανά γεύμα}$$

$$PC = 0,32, \text{ ποσοστό της πρωτεΐνης στην τροφή}$$

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

$t = 6 \text{ h}$ (ώρες),

Συνεπώς: $P_{\text{TAN}} = 0,0204 \text{ kg TAN/h} = 20.400 \text{ mg TAN/h}$

Βήμα 3: Υπολογίζεται ο ρυθμός ροής του φρέσκου νερού (Q) χρησιμοποιώντας της εξισώσεις 8.18, 8.19 και 8.20. Το σύστημα δεν διαθέτει σύστημα απονιτροποίησης, συνεπώς $R_{\text{NO}_3} = 0$.

$$Q = \frac{P_{\text{NO}_3}}{C_{\text{NO}_3}} \quad (8.35)$$

δίδονται:

$C_{\text{NO}_3} = 300 \text{ mg/L}$

$P_{\text{NO}_3} \approx P_{\text{TAN}} = 20.400 \text{ mg -N/L/h}$

Συνεπώς: $Q \approx 68 \text{ L/h}$ (1,13 L/min)

Βήμα 4: Υπολογίζεται ο ρυθμός ροής του ανακυκλούμενου νερού (Q_f) χρησιμοποιώντας της εξισώσεις 8.15 & 8.16.

Υποθέτοντας ως μέγιστη συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας στη δεξαμενή τα $0,025 \text{ mg/L}$, υπολογίζεται η αντίστοιχη μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση TAN (A_{TAN}). Από τον πίνακα 8.1, βλέπουμε ότι, για $\text{pH} = 7$ και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$, η τιμή του (α) είναι ίση με $0,0056$, συνεπώς:

$$A_{\text{TAN}} = \frac{A_{\text{NH}_3\text{-N}}}{\alpha} = \frac{0,025}{0,0056} = 4,46 \text{ mg/L} \quad (8.36)$$

Δεδομένου ότι 30% της TAN που παράγεται στο σύστημα μετατρέπεται σε νιτρικά με παθητική νιτροποίηση, τότε $P_{\text{TAN}} = (20.400 \text{ mg} \cdot 0,70) = 14.280 \text{ mg/h}$ και χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.16 προσδιορίζεται η απαραίτητη ροή στο φίλτρο ως:

$$Q_f = \frac{Q \cdot (C_{\text{TAN}_i} - C_{\text{TAN}}) + P_{\text{TAN}}}{A_{\text{TAN}} \cdot E} \quad (8.37)$$

δίδονται:

$C_{\text{TAN}_i} = 0$

$P_{\text{TAN}} = 14.280 \text{ mg/h}$

$C_{\text{TAN}} = 4,46 \text{ mg/L}$

$Q \cdot C_{\text{TAN}} = 68 \text{ L/h} \cdot 4,46 \text{ mg TAN/L} = 303 \text{ mg TAN/h}$

$E = 0,65$

Συνεπώς μετά της αντικαταστάσεις στην εξίσωση 8.37,

$Q_f = 4821 \text{ L/h}$ (80 L/min)

Βήμα 5: Καθορίζουμε το ρυθμό χρησιμοποίησης οξυγόνου για το σύστημα χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.6.

Οι Boyd et al. (1978) ανέπτυξαν την ακόλουθη εξίσωση παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της αναπνοής του γατόψαρου ως λειτουργία του σωματικού βάρους (BW) και της θερμοκρασίας (T):

$$\text{Log}_{10} (\text{αναπνοή ψαριών}) = -0,999 - (9,57 \cdot 10^{-4} \text{BW}) + (6,0 \cdot 10^{-7} \text{BW}^2) + (3,27 \cdot 10^{-2} \text{Tης}) - (8,7 \cdot 10^{-6} \text{T}^2) + (3,0 \cdot 10^{-7} \text{BW} \cdot \text{T}) \quad (8.38)$$

Στην εξίσωση 8.38 η αναπνοή των ψαριών μετριέται σε mg O₂/g ψαριών/h. Χρησιμοποιώντας της υποθέσεις του Πίνακα 8.2, η τιμή της αναπνοής των ψαριών προσδιορίζεται γύρω στα 0,294 mg O₂/g ψαριών/h. Για 1000 kg γατόψαρου η αναπνοή (R_r) υπολογίζεται να είναι 294.000 mg O₂/h.

Για σταθερές συνθήκες ισορροπίας όσον αφορά την TAN και γνωρίζοντας ότι για κάθε γραμμάριο TAN που οξειδώνεται σε νιτρικά, χρειάζονται περί τα 4,57 γραμμάρια διαλυμένου οξυγόνου, μπορεί να υπολογιστεί η κατανάλωση DO από τη νιτροποίηση ως:

$$R_{\text{NOD}} = 4,57 (P_{\text{TAN}} - Q \cdot C_{\text{TAN}}) = 91.843 \text{ mg O}_2/\text{h} \quad (8.39)$$

Σύμφωνα με τον Wimberly (1990), η απαίτηση σε οξυγόνο των βυθισμένων βιολογικών φίλτρων είναι περί της 2,3 φορές το BOD₅ που παράγεται από τα ψάρια. Για το παράδειγμα υιοθετείται μια συντηρητική μέθοδος υποθέτοντας ότι όλο το BOD₅ δημιουργείται (απαιτείται) στο φίλτρο. Συνεπώς:

$$R_{\text{BODf}} = 2,3 (\text{BOD}_5) \quad (8.40)$$

Από την ίδια μελέτη (Wimberly, 1990) βρέθηκε ότι η μέση τιμή έκκρισης μη φίλτραρισμένου BOD₅ για το γατόψαρο (που ταΐζεται με 1,5 % του σωματικού του βάρους ανά ημέρα) ήταν 2,30 mgO₂/g ψαριών/ημέρα. Λαμβάνοντας υπόψη της ανωτέρω υποθέσεις, η κατανάλωση οξυγόνου ως BOD στο σύστημα προσδιορίζεται ως:

$$R_{\text{BODf}} = \frac{2,3 \cdot (2300 \text{ mgO}_2)}{\text{kg ψαριών} \cdot \text{ημέρα}} \cdot \frac{1000 \text{ kg ψαριών}}{24\text{h}} = 220.417 \text{ mg O}_2/\text{h} \quad (8.41)$$

Πίνακας 8.2. Υποθέσεις και πληροφορίες σχεδιασμού για το παράδειγμα παραγωγής 1000 kg γατόψαρων

Συντόμευση	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
SM	Βιομάζα	1000	(kg)
BW	Βάρος Ψαριού	567	(g)
%BW	% Σωματικού Βάρους που ταΐζεται	1,5	(kg τροφή /kg ψαριών · d)
PC	Περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη	36	(%)
F	Ταΐσματα ανά ημέρα	4	
t	TAN χρόνος έκκρισης	6	(hours)
C _{oi}	DO στο φρέσκο νερό	7,8	(mg/L)
C _{TANi}	TAN στο φρέσκο νερό	0,0	(mg/L)
C _{NO3i}	NO ₃ στο φρέσκο νερό	0,0	(mg/L)
T	Θερμοκρασία νερού	25	(°C)
pH	pH νερού του συστήματος	7,0	

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

$A_{\text{NH}_3\text{-N}}$	Μέγιστη Συγκέντρωση μη ιονισμένης NH_3	0,03	(mg/L)
C_{NO_3}	Συγκέντρωση NO_3 στο σύστημα	300	(mg/L)
E	Αποδοτικότητα βιολογικών φίλτρων	65	(%)

Κατόπιν, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.6, η συνολική απαίτηση οξυγόνου του συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$R_0 = 294.000 + 220.417 + 91.843 = 606.260 \text{ mg O}_2/\text{h} \quad (8.42)$$

Βήμα 6: Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.7 υπολογίζουμε το ρυθμό παραγωγής οξυγόνου που απαιτείται για να διατηρείται στο σύστημα στα 7,0 mg O_2/L .

$$P_0 = Q \cdot (C_{0i} - C_0) + R_0 \quad (8.43)$$

δίδονται:

$$Q = 68 \text{ L/h}$$

$$C_{0i} = 7,8 \text{ mg O}_2/\text{L}$$

$$C_0 = 7,0 \text{ mg O}_2/\text{L}$$

$$R_0 = 606.260 \text{ mg O}_2/\text{h}$$

Συνεπώς μετά της αντικαταστάσεις στην εξίσωση 8.43 λαμβάνουμε:

$$P_0 = 606.206 \text{ mg O}_2/\text{h} (\sim 0,61 \text{ kg O}_2/\text{h})$$

Το αποτέλεσμα της εξίσωσης δείχνει ότι οι μεγαλύτερες απαιτήσεις για οξυγόνο στο σύστημα, εξασκούνται από τον όρο R_0 της αναπνοής. Η εισροή και η εκροή του νερού δεν συμβάλλουν σημαντικά στην ισορροπία οξυγόνου του συστήματος. Στο σχεδιασμό του συστήματος αερισμού, πρέπει να προβλεφθεί λοιπόν η προσθήκη περίπου 0,61 kg O_2/h .

Βήμα 7: Υπολογίζουμε τη ροή νερού στο βιολογικό φίλτρο που απαιτείται για τη διατήρηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στα 2,0 mg/L στην εκροή του, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.22. Θα χρησιμοποιήσουμε δύο περιπτώσεις: 1) Βυθισμένο βιολογικό φίλτρο που κατακρατεί τα στερεά απόβλητα στο νερό, π.χ. φίλτρο με διογκούμενα κοκκώδη μέσα, 2) Βιολογικό φίλτρο με βυθισμένα μέσα πλήρωσης χωρίς κατακράτηση στερεών, π.χ. ρευστοποιημένη κλίνη ή στοιβαγμένα μέσα.

1) Για ένα βυθισμένο φίλτρο που κατακρατεί τα στερεά, της ένα φίλτρο ανοδικής ροής με στερεωμένα ή διογκούμενα υλικά πλήρωσης, ο ρυθμός ροής που απαιτείται για να διατηρήσει επαρκές το DO μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$Q_f' = \frac{R_{\text{BODf}} + R_{\text{NOD}}}{C_{\text{ofi}} - C_{\text{of}}} = 62.452 \text{ L/h} (1040 \text{ L/min}) \quad (8.44)$$

δίδονται:

$$C_{\text{ofi}} = 7,0 \text{ mg O}_2/\text{L}$$

$$C_{\text{of}} = 2,0 \text{ mg O}_2/\text{L}$$

$$R_{\text{BODf}} = 220.417 \text{ mg O}_2/\text{h}$$

$$R_{\text{NOD}} = 91.843 \text{ mg O}_2/\text{h}$$

Τα αποτελέσματα αυτού του υπολογισμού δείχνουν ότι η ροή στο συγκεκριμένο φίλτρο (Q_f') για να διατηρήσει επαρκές επίπεδο οξυγόνο στο φίλτρο, πρέπει να είναι περίπου 13 φορές η ροή (Q_f) που απαιτείται για να διατηρήσει την επιθυμητή συγκέντρωση TAN στο σύστημα. Αυτό το παράδειγμα τονίζει τη σπουδαιότητα της γρήγορης αφαίρεσης των στερεών αποβλήτων από το σύστημα εκτροφής και/ή το σύστημα φίλτρων. Της αναφέρθηκε προηγουμένως, η απαίτηση σε οξυγόνο των ανθρακούχων ενώσεων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με το συχνό καθαρισμό του συστήματος φίλτρων. Εναλλακτικά, τα συστήματα που χρησιμοποιούν καθαρό οξυγόνο μπορούν να το εγχύσουν σε αέρια μορφή στην εισροή του φίλτρου.

2) Για ένα βυθισμένο βιολογικό φίλτρο που δεν κατακρατεί τα στερεά, ο όρος R_{BODf} μπορεί να μηδενιστεί και η ροή στο φίλτρο μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση 8.44 ως:

$$Q_f' = \frac{R_{NOD}}{C_{of} - C_{oi}} = 18.369 \text{ L/h (306 L/min)} \quad (8.45)$$

Της ο υπολογισμός υποδεικνύει ότι η απαίτηση ροής (Q_f') για ένα επαρκή ανεφοδιασμό οξυγόνου στο φίλτρο, είναι περίπου 4 φορές η ροή (Q_f) που απαιτείται για να διατηρήσει την επιθυμητή συγκέντρωση TAN στο σύστημα. Πάλι, η εναλλακτική λύση είναι να προστεθεί καθαρό οξυγόνο στην εισροή του φίλτρου.

Της ο υπολογισμός δεν απαιτείται για τα μη-βυθισμένα βιολογικά φίλτρα, της τα φίλτρα καταιονισμού ή τα RBC. Σε αυτά τα συστήματα, το οξυγόνο που απαιτείται από το φίλτρο προσλαμβάνεται μέσω της διάχυσης του οξυγόνου σε αέρια μορφή, από την ατμόσφαιρα που περιβάλλει το φίλτρο.

8.5.2. Υπολογισμός ιχθυοχωρητικότητας συστημάτων

Σε αυτό το παράδειγμα, υπάρχει ένα κλειστό σύστημα εκτροφής σολομών με περιορισμένη ανανέωση νερού. Οι δεδομένες λειτουργικές παράμετροι για το σύστημα δίδονται στον Πίνακα 8.3. Επίσης υποτίθεται ότι η πυκνότητα των ψαριών της δεξαμενής εκτροφής δεν έχει περιορισμούς.

Το αρχικό βήμα είναι ο καθορισμός της μέγιστης παροχής τροφής και η ιχθυοχωρητικότητα, ως βιομάζα ψαριών, βασισμένες στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Η μέση τιμή για το οξυγόνο που καταναλώνεται ανά kg τροφής που παρέχεται σε σολομούς είναι 225 g O_2 /kg τροφής (Westers, 1979). Το σύστημα οξυγόνωσης της μονάδας έχει την ικανότητα παροχής 0,453 kg οξυγόνου ανά ώρα (P_0 , βλέπε Πίνακα 8.3).

Βήμα 1: Υπολογίζεται η μέγιστη παροχή τροφής (FR_{mo}) στο σύστημα χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.26.

$$FR_{mo} = \frac{Q \cdot (C_{oi} - C_o) + P_0}{FOC} = \frac{39,4 \text{ L/h} \cdot (2,0 \cdot 10^{-6} \text{ kgO}_2/\text{L}) + 0,453 \text{ kgO}_2/\text{h}}{0,225 \text{ kgO}_2/\text{kg τροφή}} =$$

$$= 2,01 \text{ kg τροφή/h} \quad (8.46)$$

Η ποσότητα οξυγόνου που προέρχεται από το νερό που εισέρχεται στη δεξαμενή είναι αμελητέα. Το αποτέλεσμα από την εξίσωση 8.46 υποδεικνύει ότι για να διατηρηθούν σταθερές συνθήκες μέσα στη δεξαμενή όσον αφορά τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ($C_0 = 7,0 \text{ mg/L}$), η μέγιστη ποσότητα τροφής πρέπει να είναι το πολύ 2 kg ανά ώρα. Εάν στο σύστημα παρέχεται τροφή 24 ώρες την ημέρα, η μέγιστη ποσότητα τροφής ανά ημέρα θα είναι 48 kg.

Βήμα 2: Χρησιμοποιείται η εξίσωση 8.28 για να υπολογιστεί η μέγιστη βιομάζα (SMB_{mo}) που μπορεί να κρατηθεί στο σύστημα με βάση της περιορισμούς που τίθενται από το διαλυμένο οξυγόνο. Λαμβάνοντας υπόψη το αποτέλεσμα από την εξίσωση 8.46 και το ότι η καθημερινή ποσότητα τροφής είναι 1,5% του σωματικού βάρους (Πίνακας 8.3), η μέγιστη βιομάζα του συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SMB_{mo} = \frac{FR_{mo}}{\%BW} = \frac{48\text{kg τροφή/d}}{0,015\text{kg τροφή/kgψαριών/d}} = 3200 \text{ kg ψαριών} \quad (8.47)$$

Η εξίσωση 8.47 υπολογίζει ότι το σύστημα μπορεί να κρατήσει 3200 kg ψαριών χωρίς να υπάρξει μείωση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου κάτω από 7,0 mg/L.

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η ιχθυοχωρητικότητα όσον αφορά την ικανότητα του συστήματος για αφαίρεση της αμμωνίας. Της και με το διαλυμένο οξυγόνο, είναι μια διαδικασία δύο σταδίων χρησιμοποιώντας της εξισώσεις 8.15, 8.30 και 8.31.

Βήμα 3: Υπολογίζεται η μέγιστη παροχή τροφής που μπορεί να δοθεί όσον αφορά την επιτρεπόμενη συγκέντρωση προκύπτουσας αμμωνίας. Χρησιμοποιείται η εξίσωση 8.15 και ο Πίνακας 8.1 για να υπολογιστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση TAN (A_{TAN}) ως:

$$A_{TAN} = \frac{0,025}{0,0116} = 2,16 \text{ mg/L} \quad (8.48)$$

Το υποτιθέμενο pH του παραδείγματος είναι ίσο με 7,8. Αν και αυτή η τιμή είναι υψηλή για τη λειτουργία της τέτοιου συστήματος εκτροφής, το υψηλό pH επιτρέπει μια συντηρητική εκτίμηση της μέγιστης επιτρεπόμενης συγκέντρωσης TAN.

Υποθέτουμε πλήρη ανάμιξη του νερού της δεξαμενής οπότε $C_{TAN} = A_{TAN}$ και χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.30, η μέγιστη παροχή τροφής υπολογίζεται ως:

$$FR_{mTAN} = \frac{(A_{TAN} \cdot Q_f \cdot E) + Q \cdot (C_{TAN} - C_{TANi})}{0,102PC} \quad (8.49)$$

όπου:

$$Q = 39,4 \text{ L/h}$$

$$A_{TAN} = 2,16 \text{ mg/L}$$

$$C_{TANi} = 0$$

$$E = 0,50$$

$$Q_f = 15.897 \text{ L/h}$$

$$PC = 0,4$$

Συνεπώς:

$$FR_{mTAN} = \frac{(2,16 \text{ mg/L} \cdot 15.897 \text{ L/h} \cdot 0,50) + 39,4 \text{ L/h} \cdot (2,16 \text{ mg/L} - 0)}{0,102 \cdot 0,40} = 422.888 \text{ mg τροφής/h} \approx 0,42 \text{ kg τροφής/h}$$

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση ότι τα ψάρια ταΐζονται 24 ώρες την ημέρα, η μέγιστη εισαγωγή τροφών ανά ημέρα είναι 10,1 kg. Για να υπολογίσουμε τη μέγιστη βιομάζα που μπορεί να αντέξει το σύστημα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση 8.31 και την υπόθεση (Πίνακας 8.3) ότι τα ψάρια ταΐζονται σε ένα ποσοστό 1,5% του σωματικού της βάρους ανά ημέρα.

$$SBM_{\max TAN} = \frac{10,1 \text{ kg τροφή/d}}{0,015 \text{ kg τροφή / kg ψαριών/d}} = 673 \text{ kg ψαριών}$$

Συγκρίνοντας το αποτέλεσμα αυτού του υπολογισμού με αυτό της εξίσωσης 8.47 παρατηρείται μια ευρεία απόκλιση στην ιχθυοχωρητικότητα. Σε αυτό το παράδειγμα, το σύστημα οξυγόνωσης μπορεί να κάνει το σύστημα να κρατήσει περισσότερα ψάρια απ'ότι το σύστημα αφαίρεσης αμμωνίας. Στην πραγματικότητα, ο υπολογισμός της ιχθυοχωρητικότητας όσον αφορά την TAN είναι πολύ συντηρητικός. Σε ένα πιο χαμηλό pH από αυτό του παραδείγματος, η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση TAN είναι σημαντικά υψηλότερη. Επιπλέον, η παθητική νιτροποίηση μέσα στο σύστημα δεν λήφθηκε υπόψη. Της αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα 30 – 50% της νιτροποίησης μέσα στο σύστημα, που πραγματοποιείται στα τοιχώματα των δεξαμενών και στην υδάτινη στήλη (αιωρούμενα βακτηρίδια), δεν λήφθηκε υπόψη της υπολογισμούς. Σε αυτήν την περίπτωση, οι υπολογισμοί της τροφής και της ιχθυοχωρητικότητας θα μπορούσαν να διπλασιαστούν. Ακόμα κι έτσι, το σύστημα οξυγόνωσης θα είχε μια ιχθυοχωρητικότητα διπλάσια από αυτή του συστήματος νιτροποίησης.

Πίνακας 8.3. Προϋποθέσεις και πληροφορίες για το παράδειγμα υπολογισμού της ιχθυοχωρητικότητας.

Συνοτομογραφία	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
SBM	Βιομάζα	?	(kg)
BW	Βάρος ψαριών	750	(g)
%BW	% Σωματικού Βάρους τροφή	1,5	(kg τροφή/kg ψαριών ·d)
PC	Περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη	40	(%)
F	Γεύματα ανά ημέρα	4	
T	Χρόνος μεταξύ των γευμάτων	6	(hours)
Q	Ροή φρέσκου νερού	39,4	(L/h)
Q _f	Ροή στο φίλτρο	15.897	(L/h)
C _{oi}	DO στο φρέσκο νερό	9,0	(mg/L)
C _o	DO στην εκροή	7,0	(mg/L)
C _{TANi}	TAN στο φρέσκο νερό	0,0	(mg/L)
C _{NO3i}	NO ₃ στο φρέσκο νερό	0,0	(mg/L)
T	Θερμοκρασία νερού	10	(°C)
P _o	Ρυθμός παροχής οξυγόνου	0,453	(kg/h)
pH	pH νερού του συστήματος	7,8	
A _{NH3-N}	Μέγιστη Συγκέντρωση NH ₃	0,025	(mg/L)
C _{NO3}	Συγκέντρωση NO ₃ στο σύστημα	300	(mg/L)
E	Αποδοτικότητα βιολογικών φίλτρων	50	(%)

8.6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΠΟΨΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Γενικά, οι υπολογισμένες ροές και οι ιχθυοχωρητικότητες σε αυτά τα παραδείγματα είναι συντηρητικές. Δηλαδή, με άλλα λόγια, από μηχανικής απόψεως έχουν υπολογιστεί και με το παραπάνω περιθώρια ασφαλείας. Οι μεθοδολογίες σχεδιασμού που περιγράφονται, προορίζονται να παρέχουν στο χρήστη τα εργαλεία για να υπολογίσει τα κριτήρια σχεδιασμού για τα κλειστά κυκλώματα (ή συστήματα επαναχρησιμοποίησης του νερού). Ενώ η προσέγγιση ισορροπίας της μάζας είναι ως μέθοδος προτιμότερη από τη μέθοδο δοκιμής-λάθους (trial and error), οι υποθέσεις που γίνονται σε αυτήν μπορούν να οδηγήσουν σε λάθη σχεδιασμού. Η προσέγγιση ισορροπίας της μάζας πρέπει να χρησιμοποιείται για να αναπτύξει πρωτότυπα συστήματα ή τμήματα αυτών, που μπορούν να χρησιμεύσουν έτσι ώστε να παρέχουν λειτουργικά στοιχεία και πιο ακριβή κριτήρια για το σχεδιασμό των συστημάτων.

8.7. ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΗΝ ΙΧΘΥΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΚΤΡΟΦΗΣ

Ο ιχθυολόγος και ο μηχανικός πρέπει να συνεργαστούν για να διερευνήσουν τρόπους βελτίωσης των βιολογικών, περιβαλλοντικών (ποιότητα νερού) και σχεδιαστικών παραγόντων της εγκατάστασης, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν στην εντατικοποίηση του συστήματος χωρίς μεγάλο επιπλέον κόστος.

Η εκτροφή των ψαριών σε υψηλές πυκνότητες αυξάνει τον παράγοντα κινδύνου επειδή δεν υπάρχουν περιθώρια αδράνειας ή λαθών, σε περίπτωση διακοπής ή αποτυχίας των υποστηρικτικών συστημάτων (π.χ. οξυγόνωση, βιολογικό φίλτράρισμα). Ο εντατικός τύπος εκτροφής επιβάλλει μεγαλύτερη εξάρτηση από της ελεγχόμενες συνθήκες μέσω της μηχανοποίησης και της αυτοματοποίησης και λιγότερη από την ανθρώπινη δράση.

Η ιχθυοχωρητικότητα της συστήματος μπορεί να εκφραστεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα, μια ετήσια παραγωγή μπορεί να είναι δύο έως τέσσερις φορές η **μέγιστη διατηρήσιμη συγκομιδή** (maximum standing crop) ή η βιομάζα της συστήματος. Το εύρος εξαρτάται από το ρυθμό αύξησης και το εμπορεύσιμο μέγεθος του ψαριού, δεδομένου ότι αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν πόσοι κύκλοι παραγωγής μπορούν να υπάρξουν σε ένα έτος.

Η ιχθυοχωρητικότητα σχετίζεται με το νερό, το χώρο και το χρήμα που επενδύθηκε στη μονάδα. Μπορεί να εκφραστεί σε όρους είτε μέγιστης βιομάζας που μπορεί να παράγει ένα σύστημα, είτε ποσότητας τροφής που ένα σύστημα μπορεί να αφομοιώσει καθημερινά χωρίς παραβίαση των επιλεγμένων προτύπων (standards) ποιότητας νερού.

Θα εξεταστούν τρεις τύποι συστημάτων επαναχρησιμοποίησης του νερού:

- 1) Τμηματική επαναχρησιμοποίηση του νερού με οξυγόνωση μόνο.
- 2) Τμηματική επαναχρησιμοποίηση με οξυγόνωση και βιολογικό φίλτράρισμα.
- 3) Σύστημα ανακύκλωσης με 10% ανανέωση νερού ημερησίως.

Μόνο στο σύστημα ανακύκλωσης το νερό θα αντλείται (οδηγείται) πίσω στην είσοδο του συστήματος. Στα συστήματα τμηματικής επαναχρησιμοποίησης, το νερό θα κινείται σε μια κατεύθυνση μόνο, και η τοπογραφία της μονάδας θα επιτρέπει την μεταφορά του δια της βαρύτητας, αφού πρώτα το νερό θα έχει μεταφερθεί με αντλία στο κατάλληλο υψόμετρο.

8.7.1. Υπολογισμός ιχθυοχωρητικότητας της τμηματικής επαναχρησιμοποίησης νερού με οξυγόνωση

Πρώτα θα καθοριστεί η παραγωγική ικανότητα (ιχθυοχωρητικότητα) του συστήματος σχετικά με τη ροή και το χώρο. Ο όρος «φόρτιση» (**Ld**) θα χρησιμοποιηθεί για τη χωρητικότητα που εκφράζεται ως κιλά ψαριών ανά λίτρο ροής ανά λεπτό (kg/Lpm), ενώ ο όρος «πυκνότητα» (**D**) θα χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει τη χωρητικότητα σε κιλά ψαριών ανά κυβικό μέτρο δεξαμενής (kg/m³). Οι εξισώσεις 8.50 και 8.51 παρουσιάζουν τη σχέση της φόρτισης (**Ld**) και της πυκνότητας (**D**) της σχετίζονται με τον **αριθμό ανανεώσεων** του νερού ανά ώρα ΤΗΣ δια μέσου της μονάδας εκτροφής:

$$Ld = \frac{0,06D}{R} \quad (8.50)$$

$$D = \frac{Ld \cdot R}{0,06} \quad (8.51)$$

Η σταθερά 0,06 μετατρέπει τα Lpm σε m³/h (1,0 Lpm · 60 min ισούται με 60 L/h ή 0,06 m³/h). Η ικανότητα φόρτισης εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του νερού, το μέγεθος και το είδος των ψαριών.

Η πυκνότητα εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος, το είδος των ψαριών και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εκτροφής. Παραδείγματος χάριν, κάποτε υπήρχε η άποψη ότι ο σολομός του ατλαντικού δεν θα μπορούσε να «στοιβαχθεί». Δηλαδή δεν θα μπορούσαμε στην εκτροφή του να εκμεταλλευτούμε το χώρο και της τρεις του διαστάσεις. Εντούτοις, όταν παρέχεται αρκετό βάθος σε συνθήκες διάχυτου φωτός, αυτά τα ψάρια θα ανεχτούν το «στοίβαγμα». Αλλά ακόμη και υπό αυτές της συνθήκες, ο Needham (1988) προτείνει, οι μέγιστες πυκνότητες για το yearling smolt (ψαράκι της έτους) να μην υπερβαίνουν τα 30 kg/m³ και μόλις τα 15 έως 20 kg/m³ για το ηλικίας δύο ετών smolt.

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες ή ασφαλείς πυκνότητες είναι δυσκολότερο να υπολογιστούν από της μέγιστες φορτίσεις. Φαίνεται ακόμα να είναι μια πολύ υποκειμενική διαδικασία και υπάρχουν της επιστημονικές διαμάχες για μια τέτοια σημαντική παράμετρο, δεδομένου ότι η πυκνότητα καθορίζει της απαιτήσεις σε χώρο, που είναι το κυριότερο συστατικό της συστήματος παραγωγής ψαριών. Η μέγιστη ασφαλής φόρτιση μπορεί να καθορισθεί με βάση το διαλυμένο οξυγόνο που είναι διαθέσιμο για τα ψάρια, τη θερμοκρασία του νερού, το pH, το μέγεθος και το είδος των ψαριών, της αυτά σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του μεταβολισμού της και της ανοχής της της συγκεκριμένες παραμέτρους ποιότητας νερού. Ιδιαίτερα σημαντικά είναι η μη ιονισμένη αμμωνία, το διοξείδιο του άνθρακα, τα αιωρούμενα στερεά, και της οι περιβαλλοντικοί παράγοντες της η ένταση του φωτός, οι ταχύτητες νερού, και οι διαχειριστικές πρακτικές. **Ο στόχος (αντικειμενικός) είναι να ληφθεί η μέγιστη παραγωγή από το διαθέσιμο νερό σε όσο το δυνατόν μικρότερο χώρο**, διατηρώντας μια ευνοϊκή ποιότητα περιβάλλοντος, στην παραγωγή υγιών ψαριών που επιτυγχάνουν το μέγιστο ρυθμό αύξησης και της καλλίτερες τιμές μετατρεψιμότητας των τροφών.

8.7.2. Διαλυμένο οξυγόνο

Ο πρώτος σημαντικός και περιοριστικός παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί είναι το διαλυμένο οξυγόνο. Σε ένα ανοιχτό σύστημα ροής, της αυτό σε μια εγκατάσταση τμηματικής επαναχρησιμοποίησης, το οξυγόνο παρέχεται στα ψάρια με το εισερχόμενο νερό (O_{in}). Ολο της αυτό το οξυγόνο δεν είναι **διαθέσιμο οξυγόνο (AO)**, δεδομένου ότι το νερό που απορρέει πρέπει ακόμα να περιέχει κάποια ποσότητα οξυγόνου (O_{out}).

Για της σολομούς, ως χαρακτηριστική ομάδα μελέτης, στο νερό της εκροής από της μονάδες εκτροφής των, πρέπει να υπάρχουν 5,0 – 7,0 mg/L διαλυμένου οξυγόνου (DO). Αυτό το εύρος τιμών έχει να κάνει με το γεγονός ότι η μερική πίεση οξυγόνου (pO_2) είναι της εγκυρότερος τρόπος καθορισμού των χαμηλότερων ορίων. Μια pO_2 ίση με 90 mmHg φαίνεται να είναι ασφαλής τιμή-επιδίωξη για σολομούς. Η ατμόσφαιρα περιέχει 21 % οξυγόνο, και σε πίεση ίση με 760 mmHg, το ποσοστό αυτό αντιπροσωπεύει μια pO_2 ίση με $0,21 \cdot 760 = 159,6$ mmHg. Της ο κορεσμός του διαλυμένου οξυγόνου είναι 9,0 mg/L, 90 mmHg αντιπροσωπεύουν 5,1 mg/L, και όταν ο κορεσμός είναι 12,5 mg/L, η μερική πίεση pO_2 90 mmHg αντιπροσωπεύει 7,0 mg/L. Αυτές οι τιμές βρίσκονται σε θερμοκρασίες 20°C και 5°C αντίστοιχα και σε επίπεδο θαλάσσης (760 mmHg). Της παρατηρείται, όσο πιο ζεστό είναι το νερό τόσο λιγότερο DO σε mg/L υπάρχει στην εκροή, ενώ η pO_2 του παρόλα αυτά θα είναι 90 mmHg.

Το διαθέσιμο οξυγόνο (AO) της 5 °C θα είναι 5,5 mg/L ενώ της 20 °C θα είναι 3,9 mg/L. Κατά συνέπεια, λιγότερο οξυγόνο είναι διαθέσιμο της υψηλές θερμοκρασίες όπου ο ρυθμός μεταβολισμού των ψαριών είναι υψηλός, περιορίζοντας έτσι σημαντικά την παραγωγική ικανότητα του συστήματος βασισμένη στο οξυγόνο. Ευτυχώς, η τεχνολογία μπορεί να προσθέσει μεγάλα ποσά οξυγόνου στο νερό μέσω της έγχυσης με τεχνητά μέσα καθαρού οξυγόνου ή υψηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο αέρα.

Για τη δημιουργία μιας πρακτικής εξίσωσης φόρτισης για το οξυγόνο, χρησιμοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια:

- 1) Της κιλό τροφής απαιτεί ένα συγκεκριμένο ποσό οξυγόνου (**OF**). Για της σολομούς, αυτό κυμαίνεται από 200 έως 250 g. Για ψάρια esocids, της το tiger muskellunge, που είναι νωθρά ψάρια κρύου νερού, αυτό είναι 110 g και για τον κοινό κυπρίνο, που είναι τυπικό είδος των θερμών νερών, 230 g. Αν και πιθανώς μόνο το 30% των παραπάνω τιμών οξυγόνου χρησιμοποιείται ως «μεταβολισμός τροφής», το βέλτιστο επίπεδο σίτισης (από πρακτική άποψη), σχετίζεται άμεσα με το ρυθμό μεταβολισμού των ψαριών. Εντούτοις, αυτές οι τιμές, καθώς της και της που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, δεν είναι απόλυτες. Αυτό φυσικά, είναι χαρακτηριστικό των εν γένει βιολογικών λειτουργιών, σε αντίθεση με εκείνες των φυσικών επιστημών.
- 2) Το βέλτιστο επίπεδο σίτισης εκφράζεται σε ποσοστό σωματικού βάρους (%BW) ανά ημέρα και σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος των ψαριών και τη θερμοκρασία του νερού, της δύο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ιχθυοχωρητικότητα.
- 3) 16,7 ώρες αντί 24 ώρες ημερησίως χρησιμοποιούνται για την εξίσωση φόρτισης. Υποτίθεται ότι η μέγιστη μεταβολική δραστηριότητα πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια αυτών των 16 ωρών θεωρουμένης ως «ημερήσια σίτιση», και ακολουθεί μια περίοδος μειωμένης δραστηριότητας. Αυτό όχι μόνο απλοποιεί την εξίσωση, αλλά και την κάνει πιο συντηρητική (μεγαλύτερη ασφάλεια της υπολογισμούς). Αντί να πολλαπλασιάζεται με 1,44, πολλαπλασιάζεται με 1,0, επειδή για ροή 1,0 Lpm, 1,0 mg/L ισούται με 1,44 g/ημέρα* για 24 ώρες, ενώ ισούται με 1,0 g/ημέρα όταν πρόκειται για 16,7 ώρες (για οποιαδήποτε παράμετρο που εξετάζεται).

$$*1 \text{ Lpm} \cdot 1 \text{ mg/L} = 1 \text{ mg/min} = 0,001 \text{ g/0,00069 d} = 1,44 \text{ g/d}$$

Οι απαιτήσεις ροής ανά kg τροφής μπορούν να καθοριστούν με την εξίσωση 8.52:

$$\frac{\text{Lpm}}{\text{kg τροφή}} = \frac{\text{OF}}{\text{AO}} \quad (8.52)$$

Για να μετατραπεί αυτό σε ροή ανά kg ψαριών:

$$\frac{\text{Lpm}}{\text{kg ψαριών}} = \frac{\text{OF}}{\text{AO}} \cdot \frac{\% \text{BW}}{100} \quad (8.53)$$

Μετατρέποντας σε εξίσωση φόρτισης ($\text{Ld}_{\text{AO}} = \text{kg ψαριών/Lpm}$) προκύπτει η εξίσωση:

$$\text{Ld}_{\text{AO}} = \frac{\text{AO} \cdot 100}{\text{OF} \cdot \% \text{BW}} \quad (8.54)$$

Χρησιμοποιώντας το επί τοις εκατό του σωματικού βάρους επίπεδο σίτισης στην εξίσωση φόρτισης, λαμβάνονται υπόψη και η θερμοκρασία νερού και το μέγεθος των ψαριών, οι δύο κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου. Από την εξίσωση είναι προφανές ότι όσο περισσότερο **διαθέσιμο οξυγόνο** παρέχεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα παραγωγής. Εντούτοις, υπάρχει ένα **όριο**, που καλείται **επιτρεπόμενο συσσωρευτικό επίπεδο κατανάλωσης οξυγόνου (COC)**, προτού η ποιότητα του νερού χειροτερεύσει (λόγω άλλων υποπροϊόντων μεταβολισμού των ψαριών) και φτάσει σε ένα επίπεδο που να μην παρέχει πλέον ένα αποδεκτό περιβάλλον για τα ψάρια, ανεξάρτητα από το πόσο οξυγόνο είναι διαθέσιμο. Αυτό της οδηγεί, στον δεύτερο περιοριστικό παράγοντα, τη συγκέντρωση της αμμωνίας. Η αμμωνία, συγκεκριμένα η μη ιονισμένη αμμωνία (UA), είναι πολύ τοξική.

8.7.3. Αμμωνία

Αν και υπάρχουν ασυμφωνίες σχετικά με την επιτρεπόμενη τιμή της συγκέντρωσης αμμωνίας σε μια εγκατάσταση, η χρήση μιας κατάλληλα υπολογισμένης μέγιστης συγκέντρωσης NH_3 για τον καθορισμό της μέγιστης ή της βέλτιστης ασφαλούς παραγωγής, είναι πολύ προτιμότερη από καμία ποσοτική οδηγία. Στο παρόν θα χρησιμοποιηθεί η τιμή των 0,025 mg/L ως μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση μη ιονισμένης αμμωνίας (AUA), υπό τον όρο ότι τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου δεν μειώνονται κάτω από pO_2 των 90 mmHg, και η θερμοκρασία νερού είναι πάνω από 5 °C, με pH που δεν υπερβαίνει το 8,0.

Για την παραγωγή μιας πρακτικής εξίσωσης φόρτισης για την αμμωνία, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

- 1) Της κιλό τροφής απαιτεί ένα συγκεκριμένο ποσό οξυγόνου.
- 2) Της κιλό τροφής παράγει ένα συγκεκριμένο ποσό ολικής αμμωνίας (TAN). Αυτό εξαρτάται από τη σύνθεση των τροφών και το είδος του ψαριού. Συμβολίζεται με **TANF**.

- 3) Της συγκεκριμένο επίπεδο μη ιονισμένης αμμωνίας (UA) επιλέγεται ως ασφαλές μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο μη ιονισμένης αμμωνίας (AUA).

Η εξίσωση 8.55 καθορίζει την TAN που παράγεται σε mg/L:

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{TAN} = \frac{\text{AO}}{\text{OF}} \cdot \frac{\text{TANF}}{1,44} \quad (8.55)$$

Το πρώτο μισό της εξίσωσης αντιπροσωπεύει τα κιλά της τροφής που μπορούν να ταϊστούν ανά λίτρο ροής ανά λεπτό (είναι η αντιστροφή της εξίσωσης 8.52). Εντούτοις, επειδή μέλημά της είναι το επίπεδο της μη ιονισμένης αμμωνίας, προκύπτει η εξίσωση 8.56:

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{UA} = \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{TAN} \cdot \frac{\% \text{UA}}{100} \quad (8.56)$$

Συνδυάζοντας της εξισώσεις 8.55 και 8.56 προκύπτει:

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{UA} = \frac{\text{AO}}{\text{OF}} \cdot \frac{\text{TANF}}{1,44} \cdot \frac{\% \text{UA}}{100} \quad (8.57)$$

Και η εξίσωση φόρτισης βασισμένη στην επιτρεπόμενη μη ιονισμένη αμμωνία είναι:

$$\text{Ld}_{\text{AUA}} = \frac{(\text{mg/L})\text{AUA}}{(\text{mg/L})\text{UA}} \cdot \frac{\text{AO} \cdot 100}{\text{OF} \cdot \% \text{BW}} \quad (8.58)$$

Το δεύτερο μισό της εξίσωσης είναι η εξίσωση φόρτισης βασισμένη στο διαθέσιμο οξυγόνο (LD_{AO}) της φαίνεται στην εξίσωση 8.54.

Παραδείγματος χάριν, εάν το LD_{AO} είναι 1,33 kg/Lpm (AO=4,0, OF=200 και %BW=1,5), μια ροή ίση με 1000 Lpm μπορεί να υποστηρίξει 1330 kg ψαριών. Σε επίπεδο σίτισης 1,5% BW, 20 kg τροφής μπορούν να δοθούν ανά ημέρα. Προϋποτίθεται ότι 30 g TAN παράγονται ανά kg τροφής (TANF=30), 600 g TAN παράγονται καθημερινά και, εάν κατανεμηθούν ομοιόμορφα, ισοδυναμούν με 0,417 mg/L TAN [600: (1000 · 1,44)]. Εάν το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας (%UA) είναι 1,36 (12 °C, pH=7,8), η UA είναι 0,417 · 0,0136 = 0,00567 mg/L ή σύμφωνα με την εξίσωση 8.57:

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{UA} = \frac{4,0 \cdot 30 \cdot 1,36}{200 \cdot 1,44 \cdot 100} = 0,00567 \text{ mg/L}$$

Εάν τα ψάρια μπορούν, παραδείγματος χάριν, να ανεχτούν ένα μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο μη ιονισμένης αμμωνίας ίσο με 0,0200 mg/L, η μέγιστη παραγωγή ή η φόρτιση βασισμένη στην AUA είναι ο λόγος του 0,0200 της το 0,00567 το αποτέλεσμα του οποίου είναι 3,5 φορές η μέγιστη φόρτιση βασισμένη στο AO που καθορίστηκε σε 1,33 kg/Lpm. Με άλλα λόγια, το LD_{AUA} είναι 3,5 · 1,33 kg/Lpm = 4,65 kg/Lpm. Αυτό της σημαίνει ότι το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί 4,65 : 1,33 = 3,5 φορές **εάν κάθε φορά αποκαθίσταται το AO σε 4,0 mg/L.**

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

Για ένα σχεδιασμό επαναχρησιμοποίησης νερού τριών-περασμάτων, το ΑΟ για κάθε πέρασμα θα μπορούσε να γίνει 4,7 mg/L, [(3,5 · 4,0) : 3 = 4,7]. Της σχεδιασμός δύο-περασμάτων θα δημιουργήσει 7,0 mg/L ΑΟ και σε ένα σχεδιασμό της περάσματος, το ΑΟ θα γίνει ίσο με 14,0 mg/L, το οποίο είναι η επιτρεπόμενη συσσωρευτική κατανάλωση οξυγόνου (COC). Κατά συνέπεια, έχουμε διαθέσιμες της ακόλουθες χρήσιμες εξισώσεις σχεδιασμού και κατασκευής μιας εγκατάστασης:

$$Ld_{AUA} = \frac{AUA \cdot 100 \cdot 1,44 \cdot 100}{TANF \cdot \%UA \cdot \%BW} = \frac{AUA \cdot 14.400}{TANF \cdot \%UA \cdot \%BW} \quad (8.59)$$

Μια κατάλληλη εξίσωση, βασισμένη σε TANF ίσο με 28,8 (μια πολύ λογική τιμή που υπολογίζεται με βάση της πολυάριθμες μελέτες) είναι η εξίσωση 8.60:

$$Ld_{AUA} = \frac{500 \cdot AUA}{\%UA \cdot \%BW} \quad (\text{όπου } 14.400 : 28,8 = 500) \quad (8.60)$$

Η εξίσωση για COC είναι:

$$COC = \frac{AUA \cdot OF \cdot 1,44 \cdot 100}{TANF \cdot \%UA} \quad (8.61)$$

Και για TANF ίσο με 28,8 ισχύει:

$$COC = \frac{5 \cdot AUA \cdot OF}{\%UA} \quad (8.62)$$

Το επόμενο παράδειγμα περιλαμβάνει την καλλιέργεια του είδους x της παρακάτω παραμέτρους ποιότητας νερού, μεταβολικά χαρακτηριστικά και της περιορισμούς του σχεδιασμού.

- 1) ΑΟ = COC
- 2) Της = 12 °C
- 3) pH = 7,8
- 4) %UA = 1,36
- 5) %BW = 1,5
- 6) OF = 200
- 7) TANF = 28,8
- 8) AUA = 0,0200
- 9) O_{out} = 6,0
- 10) CO₂ = 4,0

Η μέγιστη φόρτιση ανά ΑΟ ίσο με 1,0 είναι (βλέπε εξίσωση 8.54):

$$Ld_{AO} = \frac{1,0 \cdot 100}{200 \cdot 1,5} = 0,33 \text{ kg/Lpm}$$

Η μέγιστη φόρτιση βασισμένη στο AUA είναι (βλέπε εξίσωση 8.60):

$$Ld_{AUA} = \frac{500 \cdot 0,020}{1,36 \cdot 1,5} = 4,9 \text{ kg/Lpm}$$

Η επιτρεπόμενη συσφρευτική κατανάλωση οξυγόνου είναι (βλ. την εξίσωση 8.62):

$$COC = \frac{5 \cdot 0,020 \cdot 200}{1,36} = 14,7 \text{ mg/L}$$

Ενας σχεδιασμός επαναχρησιμοποίησης νερού τριών-περασμάτων πρέπει να λειτουργήσει σε κάθε πέρασμα με AO ίσο με 4,9 mg/L DO (14,7 : 3 = 4,9), για ένα εισερχόμενο DO (O_{in}) 10,9 mg/L (4,9 + 6 = 10,9). Της σχέδιο δύο-περασμάτων θα δημιουργούσε ένα AO ίσο με 7,35 mg/L, για ένα O_{in} 13,35 mg/L και σε ένα σχέδιο της ενιαίου περάσματος, τα ψάρια μπορούν να χρησιμοποιήσουν μέχρι το μέγιστο COC των 14,7 mg/L, για ένα O_{in} 20,7 mg/L.

Η πρακτική χρησιμότητα των παραπάνω (με την επιφύλαξη της εξέτασης για το διοξείδιο του άνθρακα που θα δοθεί παρακάτω) έγκειται στα εξής: Για κάθε επιλεγόμενη τιμή AO που αντικαθίσταται στην εξίσωση του Ld_{AO} , βρίσκουμε και την ανάλογη φόρτιση. Την τιμή του Ld_{AUA} (η οποία δεν αλλάζει) τη διαιρούμε με την τιμή για το Ld_{AO} . Το πηλίκο της δείχνει πόσες φορές μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί το νερό του συστήματος.

8.7.4. Διοξείδιο του άνθρακα

Το επόμενο μεταβολικό υποπροϊόν που πρέπει να θεωρηθεί ως περιοριστικός παράγοντας στην παραγωγή, είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Στη διαδικασία της χρησιμοποίησης 14,7 mg/L διαλυμένου οξυγόνου, παράγεται CO_2 από 16 έως 20 mg/L (κάθε 1 mg/L χρησιμοποιούμενου DO παράγει 1,1 – 1,375 mg/L CO_2). Λόγω των πολλών και σύνθετων συσχετισμών του CO_2 με της παραμέτρους του νερού, της το pH και η αλκαλικότητα και των αντιδράσεων των ψαριών σε σχέση με τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου και το χρόνο εγκλιματισμού, είναι δύσκολο να καθοριστεί μια συγκεκριμένη τιμή ασφαλείας για τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα. Οι Alabaster et al. (1957), αναφέρουν ότι στο καλά αερισμένο νερό τα τοξικά επίπεδα του CO_2 για την πέστροφα είναι συνήθως πάνω από 100 mg/L. Της, 10 mg/L CO_2 προκαλούν θνησιμότητες σε pH 5,7 (Lloyd και Jordan, 1964). Οι Piper et al. (1982) υποστηρίζουν ότι 40mg/L CO_2 είχαν μικρή επίδραση στα νεαρά ψάρια σολομών coho, αλλά της αναφέρουν ότι συγκεντρώσεις CO_2 άνω των 20 mg/L μπορεί να είναι επιβλαβείς στα ψάρια και όπου τα επίπεδα του DO μειώνονται σε 3 – 5 mg/L, ακόμα και χαμηλότερες συγκεντρώσεις μπορεί να είναι καταστρεπτικές. Για μακροχρόνια έκθεση τα επίπεδα CO_2 δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 12 mg/L.

Ο Smart (1981) ισχυρίζεται ότι τα ψάρια είναι σε θέση να εγκλιματιστούν στα υψηλά επίπεδα του CO_2 . Τα στοιχεία του δείχνουν ότι η συμπεριφορά των πεστροφών ήταν παρόμοια όταν εκτέθηκαν σε επίπεδα 12 και 24 mg/L CO_2 , αλλά στα 55 mg/L ο ρυθμός αύξησης ήταν μικρός κατά τη διάρκεια των πρώτων 28 ημερών, της στη συνέχεια υπήρξε μια χαρακτηριστική βελτίωση. Αυτό που της παρατήρησε ήταν ότι οι αυξήσεις

της συγκεντρώσεις του CO₂ συσχετίστηκαν με την αύξηση των περιστατικών nephrocalcinosis, την παρουσία δηλαδή άσπρων ασβεστούχων εναποθεμάτων στο νεφρό. Η δριμύτητα της ανωμαλίας της εμφανίζεται να ποικίλλει αρκετά ανάλογα με τη διατροφή και της περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι πολύ διαλυτό στο νερό, αλλά δεδομένου ότι η συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα είναι μόνο 0,03 %, οι συγκεντρώσεις ισορροπίας στο νερό είναι μικρότερες από 1,0 mg/L για θερμοκρασίες άνω των 5 °C. Μόλις το CO₂ φθάσει σε κατάσταση υπερκορεσμού στο νερό, ένα μέρος του μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα με τη χρήση των συσκευών αερισμού, αλλά όχι μέσω της χρήσης καθαρού οξυγόνου λόγω του χαμηλού λόγου της αναλογίας αερίου/υγρό. Γενικά συστήνεται ένα ανώτατο όριο 20mg/L CO₂ σε συνθήκες με ευνοϊκά επίπεδα οξυγόνου.

Η χωρητικότητα της παραγωγής ή η φόρτιση η επιτρεπόμενη από το CO₂ μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$Ld_{CO} = \frac{20}{AO} \quad (8.63)$$

Όπου υπάρχει μια δεδομένη σταθερή συγκέντρωση CO₂ (ακόμα και στο φρέσκο νερό) η λεγόμενη βασικό επίπεδο (background level – BL) του CO₂, η εξίσωση γίνεται:

$$Ld_{CO} = \frac{(20 - BL)}{AO} \quad (8.64)$$

Εάν το 50 % του CO₂ μπορεί να εξαερωθεί, η μέγιστη φόρτιση μπορεί να είναι:

$$Ld_{CO} = \frac{2(20 - BL)}{AO} \quad (8.65)$$

Είναι προφανές ότι απαιτείται πρόσθετη έρευνα για να καθιερωθούν ασφαλή επίπεδα για το CO₂ στα εντατικά συστήματα παραγωγής ψαριών. Τα αποτελέσματα του στρες από CO₂ στα διάφορα είδη των ψαριών, στα διαφορετικά χημικά χαρακτηριστικά του νερού, της διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, για τα διάφορα συστήματα αερισμού/εξαέρωσης δεν είναι πλήρως γνωστά. Το διοξείδιο του άνθρακα, όταν δεν υπάρχει οποιαδήποτε βοήθεια εξαέρωσης, μπορεί εύκολα να γίνει ο δεύτερος περιοριστικός παράγοντας στα ιχθυοεκκολαπτήρια που έχουν σχετικά υψηλά βασικά επίπεδα CO₂, χαμηλές τιμές pH ή φτωχές ικανότητες αερισμού. Για το προηγούμενος συζητημένο σύστημα τμηματικής επαναχρησιμοποίησης νερού τριών-περασμάτων, υποτέθηκε ένα βασικό επίπεδο 4,0 mg/L CO₂ με αφαίρεση 50 % του CO₂. Συνεπώς, η ασφαλής μέγιστη φόρτιση για το CO₂ γίνεται:

$$Ld_{CO} = \frac{2(20 - 4)}{4,9} = 6,5 \text{ kg/Lpm}$$

Σε αυτό το παράδειγμα, η αμμωνία και όχι το CO₂ είναι ο δεύτερος περιοριστικός παράγοντας, που επιτρέπει ένα σχέδιο τμηματικής επαναχρησιμοποίησης νερού τριών-περασμάτων με το διαθέσιμο οξυγόνο (ΑΟ) στα 4,9 mg/L.

8.7.5. Αιωρούμενα στερεά

Για κάθε kg τροφής παράγονται 300 g στερεών αποβλήτων (ως ξηρό βάρος), είτε ως περιττώματα είτε ως υπολείμματα τροφής. Σε επίπεδο φόρτισης 44,4 Lpm/kg τροφής/ημέρα (βλ. εξίσωση 8.52, OF = 200, ΑΟ = 4,5), τα αιωρούμενα στερεά που παράγονται είναι 4,7 mg/L (44,4 Lpm με 1,0 mg/L είναι ίσο με $44,4 \cdot 1,0 \text{ mg} \cdot 60 \text{ min} \cdot 24 \text{ ώρες} = 64.000 \text{ mg} = 64 \text{ g}$ συνεπώς $300 : 64 = 4,7$). Πάντως, τα περισσότερα από τα στερεά θα καθιζάνουν και θα συσσωρευθούν στη μονάδα εκτροφής, από όπου πρέπει να αφαιρούνται συχνά, κατά προτίμηση συνεχώς, για να αποτραπεί η ρύπανση των δεξαμενών.

Για παράδειγμα, μια μονάδα εκτροφής με έναν όγκο εκτροφής 60 m³ και ένα ωριαίο ρυθμό αλλαγής νερού ΤΗΣ ίσο με 1,5, έχει ροή 1500 Lpm. Σε μια μέγιστη δυνατότητα σίτισης 1,0 kg ανά 44,4 Lpm ροής, 34 kg τροφής συνολικά θα μπορούσαν να προστεθούν στη μονάδα εκτροφής καθημερινά, που θα είχαν ως αποτέλεσμα την παραγωγή 10,2 kg στερεών αποβλήτων. Ακόμα κι αν τα μισά από αυτά παρέμεναν στη μονάδα, θα υπήρχε μεγάλη πιθανότητα ρύπανσης των δεξαμενών. Αυτή η ημερήσια συσσώρευση, εάν διανέμονταν ομοιόμορφα σε όλο το νερό της μονάδας εκτροφής, θα αντιπροσώπευε 85 mg/L αιωρούμενων στερεών. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την ανάγκη για αυτοκαθαριζόμενες μονάδες εκτροφής, αλλά και την ανάγκη να διαχωριστούν τα στερεά απόβλητα από την εκροή, έτσι ώστε να αποτραπεί η είσοδος των στην επόμενη δεξαμενή, (περιβαλλοντικά μια μη αποδεκτή πρακτική).

Η αποτελεσματική διαχείριση των στερεών επομένως έχει δύο σημαντικούς στόχους, αφενός να αποτραπεί μια υποβάθμιση της ποιότητας του νερού μέσα στην μονάδα εκτροφής και αφετέρου να αποτραπεί η ρύπανση (λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των αποβλήτων σε ευτροφικά στοιχεία, κυρίως φώσφορο) των φυσικών (δημόσιων) υδάτων, όπου καταλήγουν συνήθως τα απόβλητα της αποχέτευσης.

8.7.6. Πυκνότητα εκτροφής

Μετά τον υπολογισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης φόρτισης (kg ψαριών/Lpm) της συστήματος, είναι απαραίτητο να καθοριστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη πυκνότητα. Αυτό θα επηρεάσει το σχεδιασμό, τον τρόπο λειτουργίας και τη συνολική έκταση της μονάδας που απαιτείται. Για παράδειγμα, υποθέτουμε ότι το είδος x μπορεί να διατηρηθεί σε μια μέγιστη πυκνότητα $D=100 \text{ kg/m}^3$. Οι εξισώσεις 8.50 και 8.51 παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ της φόρτισης και της πυκνότητας με το ρυθμό αλλαγής νερού ΤΗΣ ως μεταβλητή. Εάν χρησιμοποιηθεί ένα σχέδιο τμηματικής επαναχρησιμοποίησης νερού τριών-περασμάτων (ΑΟ = 4,9 mg/L), οι δεξαμενές εκτροφής θα λειτουργούσαν με ένα ρυθμό αλλαγής νερού ίσο με 3,7 σύμφωνα με την εξίσωση 8.66.

$$R = \frac{D \cdot 0,06}{Ld_{AO}} = \frac{100 \cdot 0,06}{1,63} = 3,7, \quad (\text{επειδή: } Ld_{AO} = \frac{4,9 \cdot 100}{200 \cdot 1,5} = 1,63 \text{ kg/Lpm})$$

(8.66)

Εάν εφαρμόζονταν ένα σχέδιο τμηματικής επαναχρησιμοποίησης νερού δύο-περασμάτων (AO = 7,35 mg/L), ο ρυθμός αλλαγής του νερού θα ήταν 2,4 και, για ένα σχέδιο της ενιαίου περάσματος του νερού (AO = 14,7 mg/L), το R θα ήταν 1,2. Αν και κάθε μια από αυτές της προσεγγίσεις απαιτεί τον ίδιο συνολικό χώρο εκτροφής, το σχέδιο, η ρύθμιση, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά και οι τρόποι λειτουργίας διαφέρουν αρκετά, ανάλογα με την επιλογή του ρυθμού αλλαγής του νερού και του τύπου της μονάδας εκτροφής. Αυτό οδηγεί σε μια συζήτηση περί των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των διαφορετικών τύπων των μονάδων εκτροφής με ρέοντα νερά. Αν και τέτοιες μονάδες υπάρχουν σε της μορφές, διαστάσεις και βάθη, χρησιμοποιούνται συνήθως δύο βασικά σχέδια ροής, ευθύγραμμη ροή (plug-flow) και κυκλική ροή.

8.8. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΕΚΤΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Η επιμήκης, ορθογώνια δεξαμενή, πιο γνωστή ως raceway, θα χρησιμοποιηθεί ως αντιπροσωπευτική της ευθύγραμμης ροής (plug-flow) και η στρογγυλή δεξαμενή ως αντιπροσωπευτική της κυκλικής ροής. Οι κυκλικές δεξαμενές περικλείουν μεγαλύτερο όγκο νερού ανά μονάδα επιφάνειας. Οι δεξαμενές τύπου raceway ανάλογα με τις διαστάσεις τους, καταλαμβάνουν 1,5 έως 3,0 φορές περισσότερο χώρο για τον ίδιο όγκο νερού απ'ότι οι στρογγυλές δεξαμενές.

Οι δεξαμενές raceway παρουσιάζουν μια ευδιάκριτη διαβάθμιση στην ποιότητα νερού, από την εισροή έως την εκροή. Τα επίπεδα του οξυγόνου μειώνονται, ενώ τα διαλυμένα μεταβολικά υποπροϊόντα, όπως η αμμωνία και το διοξείδιο του άνθρακα, αυξάνονται. Οι ταχύτητες του νερού, γενικά, είναι πολύ χαμηλές, από 1,0 cm έως 3 cm ανά δευτερόλεπτο. Τα περιττώματα και τα υπολείμματα της τροφής καθιζάνουν γρήγορα και συσσωρεύονται στο βυθό της δεξαμενής.

Το γεγονός αυτό αποτελεί μειονέκτημα, δεδομένου ότι οι κινήσεις των ψαριών θα τα επαναιωρήσουν στην υδάτινη στήλη. Η διαρκής επαναιώρηση δημιουργεί ολόενα και μικρότερα σωματίδια, τα οποία απαιτούν πολύ περισσότερο χρόνο για να καθιζάνουν. Κατά συνέπεια, μερικά μόνο θα απορρεύσουν από τη δεξαμενή. Γενικά, οι δεξαμενές τύπου raceway δεν είναι αυτοκαθαριζόμενες και αυτό αποτελεί ένα σοβαρό μειονέκτημά τους.

Ενα φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί από όλους τους ιχθυολόγους που ασχολούνται με δεξαμενές raceway, είναι το γεγονός ότι τις περισσότερες φορές, τα ψάρια συγκεντρώνονται στο ανώτερο ένα τρίτο της δεξαμενής, καταλαμβάνοντας αραιά τα χαμηλότερα δύο τρίτα. Εκτός και αν η πυκνότητα φτάσει τα 80 kg/m³ (οπότε και θα εξαναγκασθούν τα ψάρια να διασκορπισθούν), ο χώρος της δεξαμενής raceway δεν χρησιμοποιείται σωστά. Οι υψηλότερες πυκνότητες όμως, απαιτούν υψηλότερο ρυθμό αλλαγής νερού ή την παροχή καθαρού οξυγόνου. Δεξαμενές raceway μήκους 20 m έως 40 m πρέπει να λειτουργούν με έξι έως τέσσερις αλλαγές νερού ανά ώρα αντίστοιχα, αλλά συχνά κάτι τέτοιο δεν επιτυγχάνεται. Ακόμη και σε τέτοιες σχετικά υψηλές τιμές R, οι ταχύτητες της ροής εξακολουθούν να είναι κάτω από 5,0 cm/sec όπως φαίνεται από την εξίσωση 8.67:

$$V = \frac{Lm \cdot R}{36} \quad (8.67)$$

όπου:

L_m είναι το μήκος της δεξαμενής raceway σε μέτρα (m) και **V** η ταχύτητα της ροής σε cm/sec. Η σταθερά 36 είναι ο αριθμός δευτερολέπτων ανά ώρα διαιρούμενος με το 100, για να μετατραπούν τα μέτρα (το μήκος το οποίο πρέπει να διανύσει το νερό), σε cm που είναι η μονάδα η οποία εκφράζει την ταχύτητα.

Τέτοιες ταχύτητες υπολείπονται των ταχυτήτων καθαρισμού (15 έως 30 cm/sec) ή των συνιστώμενων ταχυτήτων για την καλή φυσική κατάσταση των ψαριών, οι οποίες κυμαίνονται από 0,5 ως πάνω από 2,0 φορές το μήκος του σώματός των ανά δευτερόλεπτο.

Στην πράξη, οι δεξαμενές raceway διαχειρίζονται καλύτερα όσον αφορά στις απαιτήσεις τους για οξυγόνο απ' ότι στις απαιτήσεις τους για καθαρισμό. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα πρέπει να κατασκευαστούν, είτε μεγάλου μήκους δεξαμενές raceway είτε με πολύ μικρή εγκάρσια επιφάνεια. Καμία όμως από τις λύσεις αυτές δεν είναι πολύ πρακτική. Για να ξεπεραστεί εν μέρει αυτό το μειονέκτημα με συγκεκριμένου μήκους δεξαμενές τύπου raceway, προτείνεται η χρήση **διαφραγμάτων**. Αυτά τοποθετούνται κατά ίσα διαστήματα σε όλη τη δεξαμενή, σε αποστάσεις περίπου ίσες με το πλάτος της. Η απόσταση μεταξύ της χαμηλότερης άκρης του διαφράγματος και του βυθού της δεξαμενής καθορίζει την ταχύτητα της ροής ανάλογα βέβαια με το ρυθμό αλλαγής του νερού.

Η κύρια λειτουργία των διαφραγμάτων είναι να καταστήσουν τη δεξαμενή αυτοκαθαριζόμενη, αφαιρώντας τα στερεά απόβλητα αμέσως μόλις καθιζήσουν, αποτρέποντας κατά συνέπεια τη συγκέντρωση και την προκύπτουσα επαναιώρησή τους από τη δραστηριότητα των ψαριών. Τελικά τα στερεά θα καθιζάνουν γρήγορα σε ένα ειδικό χώρο της δεξαμενής, που διαχωρίζεται από το χώρο εκτροφής των ψαριών με ένα πλέγμα.

Παρόλα αυτά, τα διαφράγματα αυξάνουν τις ταχύτητες ροής μόνο σε τμήματα της δεξαμενής κοντά σε αυτά. Τα ψάρια θα προτιμήσουν αυτές της ζώνες με σχετικά υψηλή ταχύτητα ροής, αλλά δεδομένου ότι αυτές είναι περιορισμένες, υπάρχει χώρος μόνο για ένα μικρό ποσοστό του πληθυσμού. Ειδικά για τους σολομούς απαιτείται να εκτεθούν όλα τα ψάρια στις υψηλές ταχύτητες του νερού.

Σύμφωνα με τον Beamish (1978), η ασφαλής ταχύτητα ($V_{\text{safe}} = B_L/\text{sec}$) του νερού για τους σολομούς δίδεται από τον τύπο:

$$V_{\text{safe}} = 0,5 \cdot \frac{10,5}{B_L^{0,37}}, \text{ όπου: } B_L = \text{μήκος σώματος του ψαριού σε cm.} \quad (8.68)$$

Κατά συνέπεια για ένα ψάρι 10,0 cm η ασφαλής ταχύτητα του νερού δεν πρέπει να υπερβεί 2,2 φορές το μήκος του σώματός (B_L) του ανά δευτερόλεπτο, ενώ για ένα ψάρι 20,0 cm η ασφαλής ταχύτητα πρέπει να είναι 1,73 B_L/sec .

Οι στρογγυλές δεξαμενές, σε αντίθεση με τις δεξαμενές raceway, δεν παρουσιάζουν μια ευδιάκριτη διαβάθμιση ποιότητας νερού και το περιβάλλον εκτροφής σε αυτές θεωρείται ομοιογενές, όπου οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου αναμιγνύονται καλά με τις συγκεντρώσεις των μεταβολικών προϊόντων. Οι υψηλές συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου στην παροχή μιας στρογγυλής δεξαμενής, μειώνονται γρήγορα σε χαμηλές στο εσωτερικό της, λόγω της ταχύτατης και πλήρους ανάμιξης του νερού. Η αμμωνία και το διοξείδιο του άνθρακα αναμιγνύονται πλήρως στο

νερό, με συνέπεια τη συνεχή παρουσία κάποιου συγκεκριμένου επιπέδου, σε αντίθεση με τις δεξαμενές raceway.

Οι ταχύτητες του νερού στις στρογγυλές δεξαμενές είναι σε ένα μεγάλο βαθμό ελεγχόμενες, ανεξάρτητα από το ρυθμό εναλλαγής του νερού, σε αντίθεση με τις δεξαμενές raceway. Ο κρισιμότερος παράγοντας, είναι η διαμόρφωση της παροχής και της αποχέτευσης. Οι κατάλληλα διαμορφωμένες παροχές-αποχετεύσεις συμβάλλουν επίσης στα χαρακτηριστικά αυτοκαθαρισμού των δεξαμενών. Παρόλο που οι στρογγυλές δεξαμενές δεν είναι τόσο συμφέρουσες στην αξιοποίηση του εμβαδού της μονάδας και είναι δυσκολότερες στη διαχείριση των ψαριών (τα ψάρια δεν μπορούν να στριμωχτούν) από τις δεξαμενές τύπου raceway, έχουν διάφορα σημαντικά πλεονεκτήματα. Είναι γενικά πιο φτηνές στην κατασκευή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με χαμηλούς ρυθμούς αλλαγής του νερού ενόσω παρέχουν ακόμα τις επιθυμητές ταχύτητες ροής και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά αυτοκαθαρισμού. Μπορούν επίσης να λάβουν πολύ υψηλό DO στις παροχές, χωρίς τη δημιουργία «εστιών υπερσυγκέντρωσης» και μπορούν να εξοπλιστούν εύκολα με ταΐστρες, απαιτώντας ένα ή λίγα σημεία σίτισης. Με στρογγυλές δεξαμενές είναι δυνατή η επίτευξη της μέγιστης κατανάλωσης συσσωρευτικού οξυγόνου (COC) μέσα σε μια δεξαμενή. Με άλλα λόγια το νερό «χρησιμοποιείται» αφού περάσει από μια δεξαμενή, αντί μιας σειράς δύο ή τριών δεξαμενών. Όλες οι δεξαμενές μπορούν επομένως να τοποθετηθούν στο ίδιο επίπεδο.

8.8.1. Σχεδιασμός μονάδας και της παραγωγής της με οξυγόνωση του νερού μόνο

Θα αναπτυχθεί ο σχεδιασμός μιας εγκατάστασης τροφοδοτούμενης με 4000 Lpm οξυγονωμένο νερό. Οι παράμετροι ποιότητας του νερού είναι ίδιες με εκείνες του προηγούμενου παραδείγματος. Ο κύκλος παραγωγής περιλαμβάνει τρεις φάσεις εκτροφής:

- Φάση I, η φάση ψαριών Fingerlings, που παράγει ψάρια μέσου μήκους 15 cm και μέσου βάρους 35 g.
- Φάση II, η μέση φάση, που αναπτύσσει τα ψάρια έως μήκος 30 cm και βάρος 280 g.
- Φάση III, η τελευταία φάση ανάπτυξης, όπου τα ψάρια αναπτύσσονται έως 40 cm και ζυγίζουν 630 g.

Το επίπεδο σίτισης (%B.W.*) στο τέλος της φάσης I, είναι 3,0%,
στο τέλος της φάσης II είναι 1,5% και,
για τη φάση III είναι 1,0%.

*(μέσο σωματικό βάρος)

Κατά τη διάρκεια της φάσης I, τα ψάρια δεν πρέπει να εκτεθούν σε επίπεδο μη ιονισμένης αμμωνίας που υπερβαίνει τα 0,0125 mg/L (AUA),
κατά τη φάση II σε 0,020 mg/L (AUA) και,
κατά τη φάση III σε 0,025 mg/L (AUA).

Περαιτέρω, υποτίθεται ότι ψάρια της φάσης I μπορούν να εκτραφούν σε μια μέγιστη πυκνότητα 60 kg/m³,
της φάσης II έως 100 kg/m³
και της φάσης III έως 120 kg/m³.

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

Για κάθε 1,0 mg/L ΑΟ, η φάση I μπορεί να έχει μια μέγιστη φόρτιση 0,17 kg ψαριών/Lpm, (βλέπε εξίσωση $Ld_{AO} = \frac{AO \cdot 100}{OF \cdot \%BW}$)

η φάση II 0,33 kg/Lpm
και η φάση III 0,50 kg/Lpm

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις βασισμένες στα επιτρεπόμενα επίπεδα μη ιονισμένης αμμωνίας (Ld_{AUA}) (βλέπε εξίσωση $Ld_{AUA} = \frac{500 \cdot AUA}{\%UA \cdot \%BW}$):

Είναι: 1,53 kg/Lpm για τη φάση I,
4,9 kg/Lpm για τη φάση II
και 9,2 kg/Lpm για τη φάση III

Τα COC είναι: 9,2, 14,7 και 18,4 mg/L O₂ για τις φάσεις I, II και III αντίστοιχα (βλέπε εξίσωση $COC = \frac{5 \cdot AUA \cdot OF}{\%UA}$).

Οι αναλογίες των βαρών των ψαριών είναι: 1,0 – 8,0 – 18,0.

Εάν υπολογισθεί μια μείωση 10% (θνησιμότητα) κατά τη διάρκεια της φάσης II και μία 8% κατά τη διάρκεια της φάσης III, οι αναλογίες βάρους γίνονται: 1,0 – 7,2 – 14,9 g ή kg (δηλαδή από: 35 – 280 – 630 g/ψάρι, σε: 35 – 252 – 521,64 g/ψάρι).

Με άλλα λόγια, η φάση II τελειώνει με 10% λιγότερα ψάρια από ότι αρχίζει και η φάση III τελειώνει με 8% λιγότερο αριθμό ψαριών από το τέλος της φάσης II.

Οι αναλογίες φόρτισης είναι: 1,53 – 4,9 – 9,2 kg/Lpm ή 1,0 – 3,2 – 6,0 kg/Lpm και, συνεπώς, οι αναλογίες απαίτησης ροής γίνονται: **1,0**, **2,25** (7,2 kg : 3,2 kg/Lpm) και **2,48** (14,9 kg : 6,0 kg/Lpm) **Lpm**.

Συνεπώς, πρέπει να λάβουν: η φάση I 698 Lpm,
η φάση II 1570 Lpm και,
η φάση III 1731 Lpm.

Παράγοντας: 1,53 kg/Lpm x 698 Lpm = 1068 kg = 30.513 ψάρια (1068 : 0,035),
4,9 kg/Lpm x 1570 Lpm = 7693 kg = 27.475 ψάρια (7693 : 0,280) και,
9,2 kg/Lpm x 1731 Lpm = 15.925 kg = 25.278 ψάρια (15.925 : 0,630)
αντίστοιχα.

Σε μια μέγιστη πυκνότητα 60 kg/m³, τα ψάρια της φάσης I απαιτούν 17,8 m³ του χώρου εκτροφής, τα ψάρια της φάσης II μπορούν να εκτραφούν σε μια μέγιστη πυκνότητα 100 kg/m³, απαιτώντας κατά συνέπεια 77 m³ χώρου, ενώ τα ψάρια της φάσης III απαιτούν χώρο 113 m³, για μια πυκνότητα 120 kg/m³.

Οι ρυθμοί εναλλαγής του νερού (R, βλέπε εξίσωση: $R = \frac{D \cdot 0,06}{Ld_{AO}}$),

είναι: 2,35 για τη φάση I,
1,22 για τη φάση II και,
0,78 για τη φάση III.

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

Για την τελευταία φάση, το νερό αλλάζει μία φορά κάθε 77 λεπτά. Αυτό δεν είναι ιδανικό από υδραυλικής άποψης. Εκτός αυτού, το COC για τη φάση III είναι αρκετά υψηλό της τάξεως των 18,4 mg/L, το οποίο απαιτεί μια εισροή DO (O_{in}) 24,4 mg/L.

Είναι καλύτερα να χρησιμοποιηθεί μια ρύθμιση δύο-περασμάτων για αυτή την φάση (III), όπου κάθε πέραςμα λαμβάνει ολόκληρη τη ροή των 1731 Lpm. Αυτό θα ανεβάσει το ρυθμό αλλαγής του νερού (R) στο 1,56 και θα μειώσει την απαραίτητη εισροή DO σε 15,2 mg/L ανά σειρά $[\frac{COC}{n} = AO, \text{ συνεπώς } \frac{18,4}{2} = 9,2, \quad 9,2 + 6 \text{ (DO στην έξοδο)} = 15,2 \text{ mg/L}]$.

Η φάση III, ως τελική φάση, είναι επίσης η φάση συγκομιδής, με τα ψάρια να μεταφέρονται μέσα και έξω από το σύστημα σε λίγο-πολύ συνεχή βάση.

Στη μέγιστη βιομάζα μπορούν να κρατηθούν περίπου 16.000 kg ψαριών. Για ένα μέσο επίπεδο σίτισης 1,0% BW, 160 kg τροφής παρέχονται καθημερινά.

Με μια αποδοτικότητα τροφών (FE), για παράδειγμα 70 %, που είναι η ίδια με μια μετατροπή (FC) τροφών ίση με 1,43, το καθημερινό κέρδος σε βάρος είναι 112 kg, τα οποία πρέπει να αφαιρούνται καθημερινά για μια ετήσια παραγωγή 40.880 kg ($365 \cdot 112 \text{ kg}$).

Εάν η θερμοκρασία του νερού ήταν υψηλότερη, το επίπεδο σίτισης θα ήταν, επίσης, υψηλότερο και το ποσοστό αύξησης μεγαλύτερο. Ένα επίπεδο σίτισης 1,5% BW θα οδηγούσε σε ένα καθημερινό κέρδος 168 kg αντί 112 kg, για μια ετήσια παραγωγή 61.000 kg.

Γενικά, η τελική φάση αντιπροσωπεύει από 60 έως 70 % τη συνολική δυνατή μόνιμη βιομάζα (%TB). Η ετήσια δυνατότητα παραγωγής, όπως επισημαίνεται νωρίτερα, επηρεάζεται πολύ από το μήκος ενός κύκλου παραγωγής και το τελικό μέγεθος του προϊόντος. Αυτό, με τη σειρά του, εξαρτάται από το ρυθμό αύξησης, ο οποίος επηρεάζεται από το επίπεδο σίτισης και τη μετατρεψιμότητα ή την αποδοτικότητα της τροφής.

Η εξίσωση 8.69 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η ετήσια παραγωγική ικανότητα (AC) ενός συστήματος παραγωγής ψαριών.

$$AC = \frac{\%BW}{100} \cdot \frac{FE}{100} \cdot \frac{\%TB \cdot TB}{100} \cdot 365, \quad \text{όπου:}$$

(8.69)

TB = ολική βιομάζα του συστήματος (παραγωγή όλων των φάσεων)

%TB = βιομάζα της τελικής φάσης ως ποσοστό της TB

Παραδείγματος χάριν, εάν η φάση III μπορούσε να ταϊστεί με 2,0% BW με μια αποδοτικότητα τροφών 75 % και αυτή η φάση αντιπροσώπευε το 60 % της συνολικής μέγιστης βιομάζας, η ετήσια παραγωγική ικανότητα θα ήταν:

$$AC = \frac{2,0}{100} \cdot \frac{75}{100} \cdot \frac{60 \cdot 24.700}{100} \cdot 365 = 81.140 \text{ kg}$$

($TB=1068+7693+15.925 \approx 24.700 \text{ kg}$), $[\%TB = (15.925/24.700) \cdot 100 \approx 60\%]$

η όποια είναι περίπου 3,3 φορές η συνολική μέγιστη βιομάζα.

Είναι προφανές ότι τέτοια ενδυνάμωση παραγωγής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις των δαπανών παραγωγής, δεδομένου ότι μόνο οι μεταβλητές δαπάνες αυξάνονται. Η παραγωγική ικανότητα από την άποψη των απαιτήσεων νερού σε μια ετήσια παραγωγή 41.000 kg (1,0% BW), είναι 51.000 λίτρα ανά kg ετησίως*, αλλά αυτό θα μειωνόταν σε περίπου 30.000 λίτρα ανά kg ετησίως για ένα επίπεδο σίτισης 1,5% BW κατά τη διάρκεια της φάσης III.

*1 έτος = 525.600 min, $525.600 \text{ min} \cdot 4000 \text{ Lpm} = 2.102.400.000 \text{ l/year}$, $(2.102.400.000 \text{ l/year}) \div (41.000 \text{ kg}) = 51.000 \text{ l/kg/year}$.

8.8.2. Σχεδιασμός μονάδας και παραγωγή με οξυγόνωση και βιολογικό φίλτράρισμα

Το παράδειγμα αυτό περιλαμβάνει μια εγκατάσταση διαδοχικής επαναχρησιμοποίησης του νερού με οξυγόνωση και βιολογικό φίλτράρισμα.

Θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες παράμετροι όπως στο προηγούμενο παράδειγμα, συμπεριλαμβανομένων των τριών ευδιάκριτων φάσεων εκτροφής και παροχής νερού 4000 Lpm.

Κάθε μεμονωμένη φάση θα δουλεύει στο μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο μη ιονισμένης αμμωνίας των 0,0125, 0,020 και 0,025 mg/L για τις φάσεις I, II και III αντίστοιχα.

Επίσης υποτίθεται ότι το βιολογικό φίλτράρισμα είναι αποδοτικότητας 60 % και επιτυγχάνει αφαίρεση 0,2 g αμμωνίας ανά τετραγωνικό μέτρο ειδικής επιφάνειας (SSA) των μέσων πλήρωσης του φίλτρου ανά ημέρα.

Περαιτέρω, υποτίθεται ότι η τοπογραφία της περιοχής της εγκατάστασης επιτρέπει τη ροή του νερού με τη βαρύτητα, απαιτώντας ενέργεια μόνο για την άντληση 4000 Lpm νερού στο υψηλότερο απαιτούμενο επίπεδο. Η ικανοποιητική ανύψωση είναι διαθέσιμη για την οξυγόνωση, το βιολογικό φίλτράρισμα και την εξαέρωση του διοξειδίου του άνθρακα.

Οι αναλογίες ροής για τις τρεις φάσεις εκτροφής είναι: 1,0 – 2,25 – 2,4, όπως στην προηγούμενη άσκηση.

Για αυτήν την άσκηση υποτίθεται ότι το pH θα μειωθεί κατά 0,1 μονάδα για τη φάση II και άλλη 0,1 μονάδα για τη φάση III.

Τέτοιες μειώσεις αλλάζουν το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας (%UA) από 1,36 για τη φάση I, σε 1,08 για τη φάση II και 0,86 για τη φάση III.

Η φάση III σχεδιάστηκε ως σύστημα διαδοχικής επαναχρησιμοποίησης νερού δύο-περασμάτων. Για αυτή την άσκηση, για τη φάση III θα υπολογιστεί ροή 8000 Lpm (2 · 4000 Lpm διαθέσιμο), συνεπώς η φάση II θα απαιτήσει 7500 Lpm και η φάση I, 3333 Lpm.

Αυτές οι ροές υποστηρίζουν τις ακόλουθες μέγιστες μόνιμες συγκομιδές:

- Φάση I, $3333 \cdot 1,53 \text{ kg/Lpm}$ ή 5100 kg (145.685 ψάρια)
- Φάση II, $7500 \cdot 4,9 \text{ kg/Lpm}$ ή 36.750 kg (131.250 ψάρια)
- Φάση III, $8000 \cdot 9,2 \text{ kg/Lpm}$ ή 73.600 kg (116.825 ψάρια)

Τα ψάρια θα κινηθούν από τη μια φάση προς την άλλη, σε λίγο-πολύ συνεχή βάση, δεδομένου ότι ο ρυθμός αύξησης δεν είναι σταθερός για τους πληθυσμούς των ψαριών, ακόμη και μέσα στην ίδια εγκατάσταση υδατοκαλλιέργειας.

Οι συνολικές ετήσιες ικανότητες παραγωγής είναι ~170.000 kg για 1,0% BW και 290.000 kg για 1,5% BW. Αυτά τα ετήσια επίπεδα παραγωγής οδηγούν σε πολύ μειωμένες απαιτήσεις νερού ανά kg ετήσιας παραγωγής, των 12.000 λίτρων και 7.000 λίτρων αντίστοιχα.

Τέτοιες απαιτήσεις νερού πλησιάζουν εκείνες της καλλιέργειας σε χωμάτινες δεξαμενές, αλλά είναι πάνω από δέκα φορές μεγαλύτερες από εκείνες των κλειστών συστημάτων με ανακύκλωση του νερού.

Στο επίπεδο της μέγιστης βιομάζας, τα ψάρια της φάσης I, για ποσοστό παροχής τροφής 3,0% BW, θα λάβουν 153 kg τροφή ανά ημέρα.

Σε TANF ίσο με 28,8 g, παράγονται 4406 g TAN καθημερινά. Χωρίς βιοδιήθηση στη φάση I, αυτή η ποσότητα TAN μεταφέρεται προς τη φάση II που μπορεί να ανεχτεί 0,020 mg/L UA. Δεδομένου ότι το pH έχει μειωθεί σε 7,7, η UA είναι μόνο 1,08 % (από 1,35% σε pH 7,8), το οποίο σημαίνει ότι τα mg/L της TAN μπορούν να ανεβούν στα 1,85 mg/L TAN, ή 19.980 g TAN για 7500 Lpm.

Με ένα υπόβαθρο 4406 g TAN (από τη φάση I), η αύξηση μπορεί να είναι 15.574 g TAN. Αυτό, στη συνέχεια, επιτρέπει για ένα μέγιστο 541 kg τροφής. Σε 1,5% BW αυτό αντιπροσωπεύει 36.050 kg ψαριών, αρκετά κοντά στα προβλεπόμενο 36.750 kg (βλέπε προηγούμενο παράδειγμα). Επομένως, δεν απαιτείται βιολογικό φιλτράρισμα μεταξύ της φάσης I και II.

Το μέγιστο της TAN στο νερό της φάσης II θα είναι ~20.000 g ανά ημέρα. Με ένα ποσοστό αφαίρεσης 60 %, 8000 g θα μεταφερθούν προς τη φάση III.

Το νερό της φάσης III έχει pH ίσο με 7,6, η UA θα είναι 0,86 % που επιτρέπει μια μέγιστη TAN 2,9 mg/L για 0,025 mg/L UA.

Η μέγιστη φόρτιση για τη φάση III είναι 9,2 kg/Lpm, η οποία σε 8000 Lpm αντιπροσωπεύει 73.600 kg βιομάζας, που ταϊσμένη σε 1,0% BW είναι 736 kg τροφής ανά ημέρα, τα οποία παράγουν 21.200 g TAN.

Ομως, στο μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο TAN των 2,9 mg/L, ροή 8000 Lpm αντιπροσωπεύει 33.400 g TAN.

Επομένως, $33.400 - 21.200 = 12.200$ g TAN μπορούν να είναι το υπόβαθρο από το νερό της φάσης II.

Η φάση II παράγει 15.580 g TAN, επομένως, το βιολογικό φίλτρο πρέπει να είναι σε θέση να αφαιρέσει $15.580 - 12.200 = 3380$ g TAN. Με αποδοτικότητα 60% ο σχεδιασμός των φίλτρων πρέπει να προβλεφθεί για 5633 g TAN.

Συνοψίζοντας:

η φάση I θα φθάσει σε μια μέγιστη βιομάζα 5100 kg,

η φάση II σε 36.000 kg

και η φάση III σε 73.000 kg

που απαιτούν 85 m^3 , 360 m^3 και 600 m^3 αντίστοιχα χώρο εκτροφής.

Η φάση I μπορεί να σχεδιαστεί για ένα ενιαίο πέρασμα, δεδομένου ότι ο ρυθμός ανανέωσης (αλλαγής) του νερού (R) είναι 2,35 για 3333 Lpm, 2,8 για 4000 Lpm. Η φάση

II πρέπει να σχεδιαστεί ως σύστημα δύο-περασμάτων, με 4000 Lpm ροή ανά πέρασμα. Ο ρυθμός αλλαγής του νερού θα είναι 1,3. Η φάση III πρέπει να σχεδιαστεί ως ένα σύστημα τριών-περασμάτων με ρυθμό αλλαγής του νερού ίσο με 1,17.

Ο ρυθμός ανανέωσης του νερού (R) μπορεί να προσδιοριστεί και με την εξίσωση 8.70.

$$R = \frac{\text{Ροή} \cdot 0,06 \cdot \text{Αριθμός Περασμάτων}}{\text{volume m}^3} \quad (8.70)$$

Λόγω των σχετικά χαμηλών ρυθμών αλλαγής νερού (1,17 – 2,35), όλες οι φάσεις πρέπει να χρησιμοποιήσουν στρογγυλές δεξαμενές, εκτός κι'αν ο αριθμός περασμάτων του νερού αυξηθεί αρκετά. Όπως συζητήθηκε νωρίτερα, δεξαμενές εκτροφής raceway όγκου 60 m³ απαιτούν ρυθμούς αλλαγής νερού 4 ανά ώρα, ενώ οι δεξαμενές όγκου 30 m³ πρέπει να λειτουργούν με 6 – 8 αλλαγές νερού ανά ώρα, ανάλογα με το μήκος ή την εγκάρσια διατομή τους.

8.8.3. Σχεδιασμός βιολογικού φίλτρου

Το επιλέξιμο βιολογικό φίλτρο για να καλύψει τις ανάγκες του παρόντος παραδείγματος, είναι το φίλτρο ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed), το οποίο χρησιμοποιεί υλικά πλήρωσης ελαφρώς βαρύτερα από το νερό.

Τα υλικά πλήρωσης αποτελούνται από πλαστικές χάντρες, οι οποίες ζυγίζουν 660 kg/m³ με 40 % κενού χώρου (void fraction) και ειδική επιφάνεια (SSA) 920 m²/m³. Οι χάντρες μπορούν να κρατηθούν σε αιώρηση με μια υδραυλική φόρτιση 450 L/m²*/min (εγκάρσιας επιφάνειας του δοχείου) και με λιγότερο από 0,2 m υδροστατική πίεση.

Το φίλτρο, κάτω από τη φάση II πρέπει να σχεδιαστεί για 13.000 g TAN, και να επιτυγχάνει αφαίρεση 7800 g TAN τουλάχιστον. Για μια αφαίρεση 0,2 g TAN/m² SSA (κατά εξαιρετικά συντηρητική προσέγγιση), απαιτούνται 65.000 m² συνολικής επιφάνειας.

Για 920 m²/m³ απαιτούνται 70 m³ χαντρών. Μια ροή νερού 4000 Lpm απαιτεί επιφάνεια 8,9 m² για μια υδραυλική φόρτιση 450 L/m²/min.

Αυτό, απαιτεί στη συνέχεια ένα δοχείο φίλτρου με διάμετρο 3,36 m. Ο όγκος που καταλαμβάνουν οι χάντρες σε στατική κατάσταση είναι 70m³, αλλά όταν ρευστοποιηθούν, ο όγκος που καταλαμβάνουν είναι 1,32 φορές μεγαλύτερος του αρχικού όγκου και όταν φτάσουν σε σημείο που χρειάζονται καθάρισμα, ο όγκος τους επεκτείνεται κατά 1,80 φορές του στατικού τους όγκου. Η χωρητικότητα των δοχείων πρέπει να είναι περίπου 1,80 · 70 m³ = 126 m³.

Ένα και μόνο δοχείο διαμέτρου 3,36 m και ύψους 14 m (για να έχει όγκο 126 m³), δε θα ήταν πολύ πρακτικό. Είναι καλύτερο να τοποθετηθούν δοχεία σε σειρά και ακόμα καλύτερα, για την ευκολότερη διασπορά του νερού μέσω των δοχείων, να χωριστεί η ροή των 4000 Lpm σε δύο των 2000 Lpm. Αυτό μειώνει τις απαιτούμενες διαμέτρους των δοχείων σε 2,38 m.

Εάν προβλεφθούν έξι δοχεία, δύο παράλληλα και τρία σε σειρά, τα ύψη τους θα ήταν 4,7 m το κάθε ένα, και οκτώ δοχεία θα είχαν ύψη 3,5 m το κάθε ένα. Οι διαφορές στο ύψος μεταξύ των σειρών πρέπει να είναι 0,2 m για να παραχθεί η αναγκαία υδροστατική πίεση, έτσι ώστε να δουλέψουν ως fluidized bed.

Με δεδομένο ότι 1 g TAN για να οξειδωθεί σε νιτρικά, απαιτεί κατά πολύ συντηρητικούς υπολογισμούς 4,5 g O₂, τότε, τα 7800 g TAN απαιτούν 35.100 g οξυγόνο, ανά 4000 Lpm ροής.

Τα 35.100 g O₂ είναι για ημερήσια βάση. Για ένα λεπτό θα είναι 35.100 g O₂/d : 1440 min/d = 24,38 g O₂/min. Επειδή η ροή είναι 4000 Lpm, με αναγωγή στο λίτρο γίνεται: 24,38 g O₂/min : 4000 L/min = 0,0061 g O₂/L, δηλαδή συγκέντρωση 6,1 mg/L. Επειδή η συγκέντρωση του οξυγόνου στην απορροή του φίλτρου δεν θέλουμε να πέσει κάτω από 3,0 mg/L, η εισροή του πρέπει να είναι τουλάχιστον 9,1 mg/L O₂.

8.8.4. Παραγωγική ικανότητα της συστήματος εκτροφής με ανακύκλωση του νερού

Ο σχεδιασμός για αυτό το κλειστό σύστημα είναι βασισμένος σε 90% ανακύκλωση του νερού, δηλαδή 10% του όγκου εκτροφής αντικαθίσταται καθημερινά, με άλλα λόγια, πραγματοποιείται μια πλήρης αλλαγή νερού κάθε δέκα ημέρες.

Τα ψάρια θα εκτραφούν στη βέλτιστη θερμοκρασία αύξησης, η οποία τίθεται στους 18 °C.

Μόνο τα ψάρια των φάσεων II και III θα εκτραφούν σε σύστημα ανακύκλωσης. Μετά το τέλος της φάσης εκτροφής I, ψάρια μέσου βάρους 35 g εισάγονται στο σύστημα (φάση II). Αυτό μειώνει τον κύκλο παραγωγής σε μόνο 8 μήνες αντί ενός έτους.

Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών εκτροφής, τα επίπεδα σίτισης αλλάζουν σε 2,25% BW για τη φάση II και σε 1,5% BW για τη φάση III.

Αυτό επηρεάζει επίσης τις φορτίσεις, επειδή στη φάση II η φόρτιση είναι τώρα 0,22 kg/Lpm ανά 1,0 mg/L AO και για τη φάση III είναι 0,33 kg/Lpm (βλέπε εξίσωση 8.54).

Δεδομένου ότι το pH σε αυτό το σύστημα θα διατηρηθεί σε 7,5 ή λιγότερο, το σχέδιο θα είναι για 1,07% UA.

Συνεπώς, οι μέγιστες φορτίσεις για τη μη ιονισμένη αμμωνία (Ld_{AUA}) θα είναι 4,2 kg/Lpm και 7,8 kg/Lpm για τις φάσεις II και III αντίστοιχα (βλ. εξίσωση 8.60).

Οι ανοχές πυκνότητας παραμένουν ίδιες με πριν, 100 kg/m³ και 120 kg/m³.

Το μέγιστο Ld_{AUA} απαιτεί AOs 19,0 (4,2 : 0,22) και 23,6 (7,8 : 0,33) mg/L.

Για το νερό της εκροή που πρέπει να έχει διαλυμένο οξυγόνο (DO) τουλάχιστον 6,0 mg/L, το DO της εισροής πρέπει να είναι 24,9 και 29,4 mg/L για τις φάσεις II και III αντίστοιχα.

Όπως προαναφέρθηκε, τα βιολογικά φίλτρα δεν είναι ποτέ 100% αποδοτικά. Σε ένα σύστημα ανακύκλωσης επιτυγχάνεται μια ισορροπία, αφαιρώντας τόση TAN όσο παράγει το σύστημα, αλλά πάντοτε με διατήρηση της TAN σε χαμηλό επίπεδο για να μην έχει επιβλαβείς συνέπειες στα ψάρια.

Είναι σημαντικό να διατηρηθούν επίσης και οι άλλες παράμετροι ποιότητας νερού σε αποδεκτά επίπεδα, όπως το διαλυμένο οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, το pH, τα αιωρούμενα και τα διαλυμένα στερεά.

Σε αυτήν την άσκηση υποτίθεται ότι όλες αυτές οι παράμετροι διατηρούνται σε αποδεκτά επίπεδα.

Η φάση II, με μια μέγιστη φόρτιση 4,2 kg/Lpm και πυκνότητα 100 kg/m³, απαιτεί μια ροή των 24 Lpm για ένα ρυθμό αλλαγής νερού ίσο με 1,4.

Σε επίπεδο σίτισης 2,25% BW, 2,25 kg τροφή εισάγεται ανά κυβικό μέτρο του όγκου εκτροφής, παράγοντας 65 g TAN, το οποίο ισούται με 1,9 mg/L για 24 Lpm.

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

Με 60 % αποδοτικότητα, το βιολογικό φίλτρο πρέπει να σχεδιαστεί για 108 g TAN, αφήνοντας θεωρητικά μια συγκέντρωση TAN 1,24 mg/L (0,0086 mg/L UA).

Με ένα ρυθμό αφαίρεσης 0,2 g TAN/m²/ημέρα, 540 m² ειδικής επιφάνειας φίλτρου πρέπει να είναι διαθέσιμα ανά m³ του όγκου εκτροφής.

Η φάση III μπορεί να έχει μια μέγιστη φόρτιση 7,8 kg/Lpm και μια μέγιστη πυκνότητα 120 kg/m³.

Η απαιτούμενη ροή είναι 15 Lpm και ο ρυθμός αλλαγής νερού 0,9. Σε επίπεδο σίτισης 1,5% BW, 1,8 kg τροφή θα εισαχθεί ανά m³ όγκο εκτροφής, παράγοντας 52 g TAN που ισούται με 2,4 mg/L για 15 Lpm ροής.

Το βιολογικό φίλτρο πρέπει να σχεδιαστεί για 87 g TAN και, αναλόγως, πρέπει να διατεθούν 435 m²/m³ όγκου εκτροφής.

Για ένα μέσο τελικό βάρος ψαριών 280 g, η φάση II μπορεί να διατηρήσει ένα μέγιστο 357 ψαριών ανά m³ και η φάση III 190 ψάρια ανά m³ μέσου βάρους 630 g.

Για κάθε κυβικό μέτρο του όγκου εκτροφής για τη φάση II, η φάση III πρέπει να παρέχει 1,7 κυβικά μέτρα του όγκου εκτροφής λαμβάνοντας υπόψη μια θνησιμότητα 10% κατά τη διάρκεια της φάσης εκτροφής III.

Η ετήσια ικανότητα παραγωγής ανά 2,7 m³ όγκου εκτροφής είναι περίπου 912 kg (3 · 304 kg). Αυτό απαιτεί μια επιφάνεια biofilter 540 m² και 740 m² για τις φάσεις II και III αντίστοιχα.

Αυτό μεταφράζεται σε 1,4 m² ειδική επιφάνεια φίλτρων ανά kg ετήσιας παραγωγής.

Η επιλογή για τους υπολογισμούς του κατάλληλου ποσοστού αφαίρεσης είναι πιθανώς ένα τα δυσκολότερα διλήμματα για τα βιολογικά φίλτρα. Οι διάφορες μελέτες συντείνουν σε ποσοστά αφαίρεσης 0,26 g – 0,36 g TAN/m² επιφάνειας μέσων πλήρωσης του φίλτρου/ημέρα για τα βυθισμένα φίλτρα.

Το ποσοστό των 0,2 g TAN/m²/ημέρα που επιλέγεται για αυτήν την άσκηση μπορεί να είναι πάρα πολύ συντηρητικό.

Για το παράδειγμά μας σύμφωνα με τα προηγούμενα δεδομένα, η φάση II απαιτεί επιφάνεια 540 m² φίλτρου ανά m³ όγκου εκτροφής.

Η φάση III σε ισορροπία με τη φάση II, θα χρειαζόταν επιφάνεια 740 m² ανά 1,7 m³ όγκου εκτροφής, για μια ετήσια δυνατότητα παραγωγής 912 kg.

Οι απαραίτητες ροές είναι 24 Lpm για τη φάση II και 25,5 Lpm για τη φάση III.

Για μια αντικατάσταση νερού εκτροφής 10% ανά ημέρα (270 L), η ετήσια απαίτηση νερού είναι 98.550 λίτρα για μια παραγωγή 910 kg ή 108 λίτρα ανά kg ετήσιας παραγωγής.

Η καθημερινή απαίτηση οξυγόνου στη μέγιστη βιομάζα είναι: 19,0 mg/L DO · 24 Lpm · 1,44 g = 656 g O₂ για τα ψάρια της φάσης II και 337 g για το βιολογικό φίλτρο της φάσης II ανά m³ όγκου εκτροφής.

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

Για τα ψάρια της φάσης III αυτό είναι: $23,6 \text{ mg/L} \cdot 25,5 \text{ Lpm} \cdot 1,44 \text{ g} = 867 \text{ g O}_2$ και για το βιολογικό φίλτρο της φάσης III είναι: $52 \cdot 1,7 \cdot 5,18 = 458 \text{ g O}_2$ για συνολικά 2318 g ανά 5.31 kg τροφής, που είναι 437 g O₂ ανά kg τροφής που ταΐζεται.

Ο Πίνακας 8.4 συνοψίζει τις ικανότητες μεταφοράς των τριών συστημάτων παραγωγής που συζητήθηκαν.

Πίνακας 8.4. Παραγωγική ικανότητα τριών συστημάτων: 1) Τμηματική επαναχρησιμοποίηση με οξυγόνωση (SR + O), 2) Τμηματική επαναχρησιμοποίηση με οξυγόνωση και βιολογικό φίλτράρισμα (SR + O+ Bio), 3) 90% ανακύκλωση (90% Recirc.). Η ικανότητα εκφράζεται ως:

1. kg μέγιστη βιομάζα (MB)
2. kg ετήσιας ικανότητας (AC)
3. m³ απαιτούμενος όγκος εκτροφής (RV)
4. kg παραγωγή ανά όγκο εκτροφής (P/RV)
5. Λίτρα νερού που απαιτούνται ανά ετήσια ικανότητα (L/AC)

Παράμετρος	SR + O	SR+O+Bio	90% Recirc.
Ροή (lpm)	4.000	4.000	N/A
MB (kg)	25.000	115.000	25.000
AC (kg)	41.000	170.000	71.000
RV (m ³)	228	1.045	228
P/RV (kg)	180	160	310
L/AC (L)	51.000	12.000	120

8.9. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ (ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΙ 8.7 ΚΑΙ 8.8)

- Ld Φόρτιση σε kg ψαριών/Lpm
 B_L Μήκος σώματος του ψαριού, cm
 D Πυκνότητα σε kg ψαριών/m³
 R Ρυθμός αλλαγής νερού ως αλλαγές ανά ώρα
 O_{in} Επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου στην παροχή σε mg/L
 O_{out} Επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου στην εκροή σε mg/L
 AO Διαθέσιμο οξυγόνο στα ψάρια σε mg/L
 DO Το διαλυμένο οξυγόνο σε mg/L
 pO₂ Μερική πίεση οξυγόνου σε mmHg
 OF Το οξυγόνο που απαιτείται ανά kg τροφής σε g
 %BW Επίπεδο σίτισης σε ποσοστό του βάρους σώματος (βιομάζα)
 LD_{AO} Ικανότητα φόρτισης βασισμένη στο διαθέσιμο οξυγόνο
 COC Συσσωρευτική κατανάλωση οξυγόνου σε mg/L
 UA Μη ιονισμένη αμμωνία σε mg/L
 AUA Επιτρεπόμενη μη ιονισμένη αμμωνία σε mg/L
 TAN Συνολική αμμωνία-άζωτο σε mg/L
 TANF Συνολική αμμωνία-άζωτο που παράγεται ανά kg τροφής σε γραμμάρια
 Ld_{AUA} Ικανότητα φόρτισης βασισμένη στην επιτρεπόμενη μη ιονισμένη αμμωνία
 Ld_{CO} Ικανότητα φόρτισης βασισμένη στο διοξείδιο του άνθρακα σε mg/L
 Lm Μήκος σε m
 V Ταχύτητα σε cm/sec
 FC Μετατροπή τροφών ως κέρδος βάρους ψαριών ανά βάρος τροφής που ταΐζεται
 FE Αποδοτικότητα τροφών ως % κέρδος ανά τροφή που ταΐζεται
 AC Ετήσια παραγωγική ικανότητα σε kg

Υπολογισμοί ιχθυοχωρητικότητας και ροής νερού στα συστήματα εκτροφής

TB Συνολική βιομάζα σε kg
RBC Περιστροφικός βιολογικός διεπαφέας

9. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Η τεχνολογία της εκτροφής των ψαριών στα κλειστά συστήματα φροντίζει για την κάλυψη των παρακάτω περιβαλλοντικών απαιτήσεων των ψαριών:

1. Διατήρηση της τάσεως του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου για αποτελεσματική αναπνοή
2. Διατήρηση της συγκέντρωσης της μη-ιονισμένης αμμωνίας (NH_3) σε ασφαλή επίπεδα
3. Διατήρηση του νερού επαρκώς καθαρού από αιωρούμενα και διαλυμένα στερεά

Οι βασικές διεργασίες για τα παραπάνω έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Παρακάτω θα δοθούν περισσότερα και ειδικότερα στοιχεία για τη λειτουργία και το σχεδιασμό των βιολογικών φίλτρων.

9.1. ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ

Η αποσύνθεση των αζωτούχων ενώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική στην υδατοκαλλιέργεια, επειδή η αμμωνία, τα νιτρώδη και σε μια περιορισμένη έκταση τα νιτρικά, είναι τοξικά στον εκτρεφόμενο πληθυσμό. Το δεσμευμένο άζωτο διαχωρίζεται από τις σύνθετες οργανικές ενώσεις (στις οποίες υπάρχει), σε απλούστερες οργανικές μορφές μέσω της δράσης ετερότροφων βακτηριδίων και έπειτα σε αμμωνία η οποία είναι συνήθως το πρώτο ανόργανο προϊόν της αποσύνθεσης. Η αμμωνία οξειδώνεται περαιτέρω, από διάφορα γένη αυτότροφων βακτηριδίων, με σημαντικότερα τα *Nitrosomonas*, σε νιτρώδη (NO_2^-). Τα νιτρώδη κατόπιν, οξειδώνονται σε νιτρικά (NO_3^-), από διάφορα άλλα γένη βακτηριδίων, σημαντικότερα των οποίων είναι τα *Nitrobacter*.

Μέσα σε ένα βιολογικό βιολογικό φίλτρο, είναι επιθυμητό να περιοριστούν οι βακτηριδιακές μετατροπές στο κομμάτι εκείνο του κύκλου του αζώτου που αφορά στην μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά. Τα ετερότροφα βακτηρίδια βασίζονται στις ενώσεις του άνθρακα ως την ενεργειακή τους πηγή, σε αντίθεση με τα αυτότροφα βακτηρίδια που βασίζονται στο ανόργανο άζωτο ως πηγή ενέργειας. Η ποιότητα του νερού σε ένα υδατοκαλλιεργητικό σύστημα ως έκφραση της ανθρακούχου απαίτησης για οξυγόνο, θα επηρεάσει τα μέγιστα τη λειτουργία της νιτροποίησης του βιολογικού φίλτρου. Τα ετερότροφα βακτηρίδια αυξάνονται με σημαντικά μεγαλύτερους ρυθμούς από τα αυτότροφα *Nitrosomonas* και *Nitrobacter*. Κατά συνέπεια, η προσπάθεια να συνδυαστούν η μετατροπή των οργανικών ενώσεων και των ανόργανων μορφών αζώτου στο ίδιο βιολογικό φίλτρο, οδηγεί στον ανταγωνισμό για την κατάληψη του ίδιου χώρου μεταξύ των ετερότροφων και αυτότροφων βακτηριδίων.

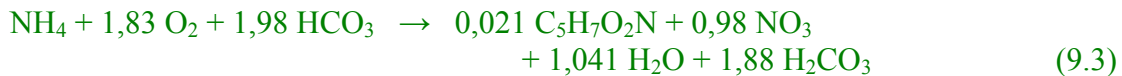
Οι διαδικασίες απονιτροποίησης των NO_3^- σε NO_2^- (νιτρικών σε νιτρώδη), των NO_2^- σε N_2O ή σε N_2 (νιτρωδών σε υποξείδιο του αζώτου ή σε αέριο άζωτο) και του N_2O σε N_2 εμφανίζονται μόνο υπό **αναερόβιες** συνθήκες. Κατά συνέπεια, αυτές οι αντιδράσεις δεν αναμένεται να εμφανιστούν σε ένα καλά οξυγονωμένο φίλτρο απονιτροποίησης. Η απονιτροποίηση μπορεί να είναι χρήσιμη για την αφαίρεση του αζώτου από το νερό, με τη μετατροπή του σε αέριο άζωτο που θα διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Εντούτοις, η απονιτροποίηση πρέπει να πραγματοποιηθεί σε έναν άλλο χώρο, σε ένα μέρος δηλαδή του συστήματος ανακύκλωσης, όπου η συγκέντρωση οξυγόνου μπορεί να μηδενιστεί χωρίς να κινδυνεύσει η παραγωγή.

Οι εξισώσεις 9.1 και 9.2 παρουσιάζουν τις βασικές χημικές μετατροπές που γίνονται σε ένα βιολογικό φίλτρο.



Η ενέργεια που απελευθερώνεται από τις μετατροπές που περιγράφονται στις εξισώσεις 9.1 και 9.2, χρησιμοποιείται από τα *Nitrosomonas* και *Nitrobacter* για να καλύψει τις ενεργειακές τους ανάγκες. Επιπλέον, είναι προφανές ότι αυτές οι αντιδράσεις απαιτούν οξυγόνο, παράγουν ιόντα υδρογόνου (μείωση pH) και παράγουν νιτρώδη ως ενδιάμεσο προϊόν.

Η αύξηση των κυττάρων των *Nitrosomonas* και *Nitrobacter* είναι μια σημαντική παράμετρος για έλεγχο στο σχεδιασμό των βιολογικών φίλτρων, επειδή η υπερβολική αύξηση της μάζας των κυττάρων μπορεί να φράξει τα φίλτρα. Η εξίσωση 9.3 περιγράφει την αύξηση των κυττάρων και την οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά.



Από την εξίσωση 9.3 μπορούν να υπολογιστούν οι απαιτήσεις οξυγόνου και αλκαλικότητας και η παραγωγή βιομάζας κυττάρων. Για κάθε γραμμάριο $\text{NH}_4 - \text{N}$ που οξειδώνεται σε $\text{NO}_3 - \text{N}$, χρησιμοποιούνται 4,18 g O_2 και 7,14 g αλκαλικότητας (ως CaCO_3) και παράγονται 8,59 g ανθρακικού οξέος και 0,17 g κυττάρων ($\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$).

Ο ρυθμός οξείδωσης της αμμωνίας σε ένα βιολογικό φίλτρο έχει περιγραφεί από την εξίσωση Monod, (εξίσωση 9.4). Η εξίσωση Monod προσεγγίζει την καμπύλη που περιγράφει τη σχέση μεταξύ του ειδικού ρυθμού αύξησης των βακτηριδίων και της συγκέντρωσης του θρεπτικού υποστρώματος.

$$M_n = \frac{\mu_n' \cdot S}{S + K_s} \quad (9.4)$$

όπου:

μ_n = ειδικός ρυθμός αύξησης των νιτροποιητικών βακτηριδίων (day^{-1})

μ_n' = μέγιστος ειδικός ρυθμός αύξησης των βακτηριδίων (day^{-1})

S = οριακή (περιοριστική) συγκέντρωση υποστρώματος (g/m^3)

K_s = μισή σταθερά κορεσμού (half saturation constant), που είναι ίση με την οριακή συγκέντρωση υποστρώματος που επιφέρει το ήμισυ του μέγιστου ρυθμού αύξησης (g/m^3 των $\text{NH}_4 - \text{N}$ ή $\text{NO}_2 - \text{N}$)

Υποθέτοντας ότι οι απαιτήσεις για ιχνοστοιχεία καλύπτονται, τα νιτρώδη είναι ο συνήθης περιοριστικός παράγοντας υποστρώματος για τα *Nitrobacter*, ενώ το αμμώνιο για τα *Nitrosomonas*. Επειδή ο ρυθμός αύξησης των *Nitrobacter* είναι μεγαλύτερος από αυτό των *Nitrosomonas*, η οξείδωση της αμμωνίας είναι ο περιοριστικός παράγοντας του ρυθμού μετατροπής της αμμωνίας σε νιτρικά. Κατά συνέπεια, στην εξίσωση 9.4 οι τιμές

για την αμμωνία και *Nitrosomonas* είναι οι περιοριστικές παράμετροι στην περιγραφή της νιτροποίησης. Στον Πίνακα 9.1 συνοψίζονται οι τιμές για τις μισές σταθερές κορεσμού και στον Πίνακα 9.2 οι μέγιστοι ρυθμοί αύξησης για τα νιτροποιητικά βακτηρίδια από τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 9.1. Μισές Σταθερές Κορεσμού (K_s) για *Nitrosomonas* (NS) και *Nitrobacter* (NB) σε διάφορες θερμοκρασίες.

Είδη	Θερμοκρασία (°C)	K_s ($\text{NH}_4 - \text{N g/m}^3$)	Πηγή
NS	5	0,13	Knowles, et al. 1965
NS	10	0,23	Knowles, et al. 1965
NS	15	0,40	Knowles, et al. 1965
NS	15	0,5	Water Pollution Control Fed., 1983
NS	20	0,73	Knowles, et al. 1965
NS	20	1,0	Loveless και Painter, 1968
NS	25	1,30	Knowles, et al. 1965
NS	25	3,5	Ulken, 1963
NS	30	10,0	Hofman και Lees, 1953
NB	25	5,0	Ulken, 1963
NB	28	5,0	Gould και Lees, 1960
NB	30	6,0	Lees και Simpson, 1957
NB	32	8,4	Laudelaut και Van Tichelen, 1960

Hochheimer, 1990

Πίνακας 9.2. Προσδιορισμοί του Μέγιστου Ρυθμού Αύξησης (μ_n) για τα *Nitrosomonas*.

Θερμοκρασία (°C)	μ_n (days^{-1})	Πηγή
5	0,18	Gujer και Boiler, 1986
10	0,29	Gujer και Boiler, 1986
10	0,30	Water Pollution Control Fed., 1983
15	0,47	Gujer και Boiler, 1986
15	1,12	Williamson και McCarty, 1976
20	0,77	Gujer και Boiler, 1986
20	0,65	Water Pollution Control Fed., 1983
20	2,0	Kissel, et al. 1984
20	2,0	Williamson και McCarty, 1976
25	1,25	Gujer και Boiler, 1986
30	1,20	Water Pollution Control Fed., 1983

Hochheimer, 1990

9.2. ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ: ΧΗΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

9.2.1. pH

Η βιβλιογραφία σχετικά με τις βέλτιστες τιμές του pH για την αύξηση των *Nitrosomonas* και *Nitrobacter* στα βιολογικά φίλτρα είναι αντιφατική (Πίνακας 9.3). Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι τα βακτηρίδια αυτά προσαρμόζονται (εγκλιματίζονται) στις συνθήκες του pH στις οποίες εκτίθενται. Τα βιολογικά φίλτρα μπορούν πιθανώς να λειτουργήσουν από χαμηλό pH της τάξεως του 5,0, έως υψηλό της τάξεως του 10, εάν τα βακτηρίδια αφεθούν να προσαρμοστούν σε αυτές τις συνθήκες και οι αλλαγές στο pH δεν είναι απότομες. Έχει παρατηρηθεί ότι οι απότομες αλλαγές του pH (δηλαδή σε διάρκεια λίγων λεπτών) για 0,5 έως 1,0 μονάδα, μειώνουν κατά πολύ την αποδοτικότητα φιλτραρίσματος των βακτηριδίων (και γενικά του φίλτρου), έως ότου προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες.

Σε γενικές γραμμές, το βέλτιστο pH για τα βιολογικά φίλτρα βρίσκεται μεταξύ 6 και 9. Δεδομένου ότι το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας (η τοξική μορφή για τα ψάρια), αυξάνεται καθώς αυξάνεται το pH, αποτελεί ορθή πρακτική να διατηρηθεί το pH κοντά στο χαμηλότερο όριο του βέλτιστου pH για τα νιτροποιητικά βακτηρίδια, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της αμμωνίας στα εκτρεφόμενα είδη ψαριών.

Πίνακας 9.3. Βέλιστα pH για την αύξηση των *Nitrosomonas* (NS) και *Nitrobacter* (NB).

Είδος	Εύρος	Βέλτιστο pH	Πηγή
NS		8.0 – 9.0	Hofman και Lees, 1953
NS	7.0 – 9.0	8.0	Engle και Alexander, 1958
NS		6.0 – 9.0	Winogradsky και Winogradsky, 1933
NS	5.0 – 10.0	9.0	Kawai, et al. 1965
NS		7.2 – 7.8	Loveless και Painter, 1968
NB		8.3 – 9.3	Meyerhof, 1917
NB	7.0 – 8.6	7.8	Boon και Laudelout, 1962
NB		6.3 – 9.4	Winogradsky και Winogradsky, 1933
NB	5.0 -10.0	9.0	Kawai, et al. 1965

Hochheimer, 1990

9.2.2. Αλκαλικότητα

Η μετατροπή του NH_4 σε νιτρικά καταναλώνει αλκαλικότητα όπως φαίνεται στην εξίσωση 9.3. Η νιτροποίηση μειώνει το pH του νερού δια της κατανάλωσης διττανθρακικών και παραγωγής υδρογονοιδόντων. Στοιχειομετρικώς απαιτούνται 7,14 g διττανθρακικών ως CaCO_3 για κάθε g αζώτου που οξειδώνεται από NH_4^+ σε NO_2^- . Η αλκαλικότητα διττανθρακικών μπορεί να είναι κρίσιμη για την αύξηση των νιτροποιητικών βακτηριδίων. Στην πραγματικότητα, η αλκαλικότητα υπό μορφή ανθρακικών και διττανθρακικών ιόντων, αποτελεί θρεπτικό στοιχείο για τα νιτροποιητικά βακτηρίδια. Είναι προφανές ότι η αλκαλικότητα είναι απαραίτητη για να

αποτρέψει τις αλλαγές του pH, λόγω της παραγωγής οξέος στη διαδικασία της νιτροποίησης, (εξίσωση 9.1). Οι Gujer και Boller (1986) έδειξαν ότι στη νιτροποίηση των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία λυμάτων, αλκαλικότητα τουλάχιστον 1,5 meq/L (75 mg/L CaCO₃), ήταν επαρκής για τη διατήρηση του μέγιστου ρυθμού νιτροποίησης.

9.2.3. Οξυγόνο

Ο ρυθμός νιτροποίησης στα βιολογικά φίλτρα μειώνεται όταν δεν παρέχεται επαρκής ποσότητα οξυγόνου στα νιτροποιητικά βακτηρίδια. Η οριακή (περιοριστική) συγκέντρωση του οξυγόνου εξαρτάται από διάφορες μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης των οργανικών ουσιών στο νερό και της υπάρχουσας βακτηριδιακής βιομάζας. Τα λειτουργούντα φίλτρα περιέχουν τόσο ετερότροφους όσο και νιτροποιητικούς οργανισμούς. Επειδή ο κύκλος του αζώτου λειτουργεί κατά τη σειρά: οργανικά συστατικά σε αμμωνία, σε νιτρώδη, σε νιτρικά, το βιολογικό φίλτρο που δέχεται το νερό της καλλιέργειας, τείνει αρχικά να έχει ένα υψηλό ποσοστό ετερότροφων οργανισμών. Κατόπιν ο πληθυσμός των *Nitrosomonas* στο φίλτρο τείνει να αυξηθεί για να αφομοιώσει την αμμωνία και κατόπιν, ο πληθυσμός *Nitrobacter* αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η διαθεσιμότητα των νιτρωδών. Στα φίλτρα, όπου μόνο το εισρέον νερό παρέχει όλο το οξυγόνο, τα *Nitrobacter* και *Nitrosomonas* συχνά «λιμοκτονούν» για οξυγόνο.

Τα επιστημονικά στοιχεία είναι πολύ περιορισμένα για να καθορίσουν το ασφαλές κατώτατο επίπεδο οξυγόνου που απαιτείται στα υδατοκαλλιεργητικά βιολογικά φίλτρα. Φαίνεται ότι συγκέντρωση 2 mg/L οξυγόνου στο φίλτρο (μετρούμενη στην έξοδο του νερού από το φίλτρο), είναι πιθανώς επαρκής για να διατηρήσει μέγιστους ρυθμούς νιτροποίησης. Για τα βιολογικά φίλτρα των υδατοκαλλιεργειών, οι πιο συχνοί περιοριστικοί παράγοντες είναι η αμμωνία ή τα νιτρώδη, παρά το οξυγόνο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα υψηλά επίπεδα οξυγόνου δεν θα έχουν παρά μικρή μόνο επίδραση στην απόδοση των φίλτρων, έως ότου το οξυγόνο γίνει αυτό ο περιοριστικός παράγοντας.

Από την άποψη του μικροπεριβάλλοντος, ένα νιτροποιητικό βακτηριδιακό κύτταρο περιβάλλεται από ένα γλοιώδες στρώμα. Εξω από αυτό το γλοιώδες στρώμα βρίσκεται ένα λεπτό στρώμα στάσιμου νερού. Το οξυγόνο, όπως και διάφορες άλλες χημικές ουσίες που απαιτούνται από τα κύτταρα, πρέπει πρώτα να διαχυθεί μέσω του στάσιμου στρώματος του νερού που εφάπτεται με το γλοιώδες στρώμα, κατόπιν δια μέσου του γλοιώδους στρώματος που περιβάλλει το κύτταρο και στη συνέχεια, είτε να διαχυθεί είτε να μεταφερθεί ενεργά μέσω της μεμβράνης των κυττάρων. Η ένταση της διάχυσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και άλλες μεταβλητές, αλλά γενικά, η όλη διαδικασία δεν είναι ακόμα απόλυτα γνωστή.

9.2.4. Συγκεντρώσεις αμμωνίας, νιτρωδών

Εχει αποδειχθεί, ότι οι υπερβολικά υψηλές συγκεντρώσεις της μη ιονισμένης αμμωνίας, ή/και των νιτρωδών, είναι τοξικές για τα νιτροποιητικά βακτηρίδια. Η μη ιονισμένη αμμωνία (NH₃), εμποδίζει τη δράση των *Nitrosomonas* σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από εκείνες που εμποδίζουν τα *Nitrobacter* (10 – 150 mg/L έναντι 0,1 – 1,0 mg/L αντίστοιχα). Το νιτρώδες οξύ (HNO₂), το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία με τα νιτρώδη (NO₂⁻) στα υδατικά διαλύματα, είναι τοξικό για τα νιτροποιητικά βακτηρίδια σε χαμηλές συγκεντρώσεις, περί τα 0,22 mg/L. Ομως, η σταθερά ισορροπίας μεταξύ HNO₂

και NO_2^- είναι τόσο υψηλή ($10^{-3,14}$), που πρακτικά δεν υπάρχει καθόλου HNO_2 σε pH άνω του 5,0. Συνεπώς, η τοξικότητα των νιτρωδών στα κλειστά κυκλώματα, στην πραγματικότητα αφορά τα ψάρια και πολύ λίγο τα νιτροποιητικά βακτηρίδια. Ο εγκλιματισμός στη μη ιονισμένη αμμωνία ή/και σε νιτρώδες οξύ στη θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς και ο αριθμός των δραστήριων νιτροποιητικών βακτηριδίων, μειώνουν τα ανασταλτικά αποτελέσματα της μη ιονισμένης αμμωνίας και του νιτρώδους οξέος.

Τα βιολογικά φίλτρα των υδατοκαλλιεργειών λειτουργούν σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας και νιτρωδών, έναντι των κοινών βιολογικών φίλτρων που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας ή/και των νιτρωδών, συχνά είναι τόσο χαμηλές που γίνονται περιοριστικός παράγοντας του ρυθμού νιτροποίησης των φίλτρων. Κατά συνέπεια, η διαθεσιμότητα της αμμωνίας ή/και των νιτρωδών, παρά το οξυγόνο, όπως συνήθως υποτίθεται, καθορίζει το ρυθμό νιτροποίησης σε ένα βιολογικό φίλτρο υδατοκαλλιέργειας.

9.2.5. Σωματιδιακές και διαλυμένες οργανικές ουσίες

Αποτελέσματα της παρουσίας σωματιδίων. Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν τρεις επιδράσεις στα βιολογικά φίλτρα: την απόφραξη, την παροχή πρόσθετης ειδικής επιφάνειας (για ανάπτυξη βακτηριδίων) και την προσθήκη οργανικού φορτίου. Σωματίδια μεγαλύτερα από το μέγεθος των πόρων του φίλτρου, θα φράξουν το φίλτρο. Αποτέλεσμα αυτού θα είναι η απώλεια πίεσης, δηλαδή μειωμένος ρυθμός ροής νερού και επιπλέον θα υπάρξει κίνδυνος δημιουργίας αναερόβιων θυλάκων στο φίλτρο, λόγω της έλλειψης ροής νερού ή αέρα.

Το πλέον επιθυμητό μέγεθος υλικών (μέσων) πλήρωσης των φίλτρων, εξαρτάται από τον τύπο του φίλτρου, τον οργανικό και υδραυλικό ρυθμό φόρτισης, τη συγκέντρωση αμμωνίας και νιτρωδών ή τον ρυθμό φόρτισης με αυτά, καθώς και από διάφορες άλλες μεταβλητές. Σε γενικές γραμμές, η ειδική επιφάνεια των φίλτρων αυξάνεται καθώς μειώνεται το μέγεθος των μέσων. Αντιθέτως, η απώλεια πίεσης για την ίδια ροή αυξάνεται καθώς μειώνεται το μέγεθος των μέσων. Κατά συνέπεια, η επιλογή των μέσων είναι συνήθως ένας συμβιβασμός μεταξύ της μεγιστοποίησης της ειδικής επιφάνειας και της ελαχιστοποίησης της απόφραξης.

Τα οργανικά μόρια παρέχουν επίσης υπόστρωμα για τα ετερότροφα βακτηρίδια που ανταγωνίζονται για το χώρο της ανάπτυξης των με τα νιτροποιητικά βακτηρίδια. Τα βιολογικά φίλτρα στην πράξη πρέπει να διαχειριστούν τα οργανικά φορτία καθώς επίσης και τα νιτροποιητικά φορτία. Τα μεγέθη των υλικών πλήρωσης των φίλτρων είναι περί τα 2 cm ή μεγαλύτερα, για να αποτρέπουν την απόφραξη, εκτός και αν πρόκειται για φίλτρα ρευστοποιημένης κλίνης ή φίλτρα χαντρών. Οι μεγάλοι όγκοι κενού είναι επιθυμητοί στις περισσότερες περιπτώσεις, για να μεγιστοποιήσουν την ειδική επιφάνεια και να μειώσουν την απόφραξη.

Αποτελέσματα διαλυμένων οργανικών. Από μελέτες στην επεξεργασία των αστικών λυμάτων και με χρήση βιολογικών φίλτρων τύπου RBC, διαπιστώθηκε ότι η αφαίρεση της αμμωνίας επηρεάστηκε από την οργανική φόρτιση, με τους ρυθμούς αφαίρεσής να μειώνονται καθώς η οργανική φόρτιση αυξάνεται. Γενικά, φορτία BOD άνω των 30 mg/L, εμποδίζουν την εγκατάσταση και λειτουργία των νιτροποιητικών βακτηριδίων. Φαίνεται ότι σε υψηλά φορτία BOD₅, οι οργανισμοί της νιτροποίησης δεν

μπορούν να ανταγωνιστούν με τους ταχύτερης ανάπτυξης άνθρακοξειδωτικούς οργανισμούς και τελικά, λόγω σχέσεων δυναμικής πληθυσμών, σχεδόν εξαφανίζονται.

9.2.6. Αλατότητα

Τα βιολογικά φίλτρα μπορούν να λειτουργήσουν σχεδόν σε οποιαδήποτε αλατότητα μεταξύ γλυκού νερού και υψηλότερης των 40 ppt (Hotos & Vlahos, 1998), υπό τον όρο ότι τα βακτηρίδια θα εγκλιματιστούν στις συνθήκες λειτουργίας. Οι νιτροποιητικοί οργανισμοί του γλυκού νερού εμποδίζονται έντονα από το νερό της θάλασσας και αντίστροφα. Γρήγορες (διάρκειας λίγων λεπτών), αλλαγές στην αλατότητα μεγαλύτερες των 5 ppt, μειώνουν σημαντικά το ρυθμό νιτροποίησης. Οι απότομες αλλαγές στην αλατότητα, προκαλούν σοκ της νιτροποιητικούς οργανισμούς και μειώνουν το ρυθμό νιτροποίησής της. Οι Kawai et al. (1965), διαπίστωσαν ότι η σταθερή αλατότητα οδηγούσε στο μέγιστο ρυθμό νιτροποίησης. Εξετάζοντας την επίδραση των γρήγορων αλλαγών της αλατότητας στο ρυθμό νιτροποίησης, οι Akai et al. (1983), διαπίστωσαν ότι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός αύξησης των βακτηριδίων που οξειδώνουν την αμμωνία, με την αύξηση της αλατότητας μειώθηκε από 0,04/h σε γλυκό νερό, σε 0,0028/h σε πλήρες θαλασσινό νερό.

9.2.7. Ρυθμοί διάχυσης αερίων

Τα υλικά πλήρωσης σε ένα ρυθμισμένο βιολογικό φίλτρο καλύπτονται από μια γλίτσα (biofilm), ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης βακτηριδίων. Τα βακτηριδιακά κύτταρα αυξάνονται μέσα στη μάζα του biofilm. Κατά συνέπεια, το οξυγόνο, η αμμωνία, και τα νιτρώδη πρέπει να διαχυθούν προς το εσωτερικό του και τα νιτρώδη, νιτρικά και το διοξείδιο του άνθρακα πρέπει να διαχυθούν προς το εξωτερικό του, δια μέσου αυτού του στρώματος. Επίσης υπάρχει ένα στάσιμο στρώμα νερού που σχηματίζεται σε άμεση γειννίαση με το biofilm, μέσω του οποίου τα διάφορα μόρια πρέπει να διαχυθούν για να εισέλθουν ή εξέλθουν από τα κύτταρα. Κατά συνέπεια, η διάχυση μπορεί, υπό ορισμένες συνθήκες, να καθορίσει το ρυθμό της νιτροποίησης. Ο ρυθμός διάχυσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

9.2.8. Η επίδραση άλλων μεταλλικών και χημικών στοιχείων

Η βιβλιογραφία σχετικά με τα ιχνοστοιχεία που είναι απαραίτητα (και συχνά περιοριστικά) και τις χημικές ουσίες που αναφέρονται ως ανασταλτικές στη νιτροποίηση, είναι εκτενής, αντιφατική και δημιουργούσα σύγχυση. Εντούτοις, υπάρχουν μερικοί τομείς γενικής συμφωνίας.

Τα υψηλά επίπεδα ασβεστίου είναι σύμφωνα με τις υπάρχουσες πληροφορίες, αναγκαία για το μεταβολισμό των *Nitrosomonas*, ενώ οι υψηλές συγκεντρώσεις μαγνησίου είναι απαραίτητα για τα *Nitrobacter*. Το φωσφορικά, το μαγνήσιο, το μολυβδαίνιο, ο σίδηρος, το ασβέστιο, ο χαλκός και το νάτριο θεωρούνται «διεγερτικά» της νιτροποίησης.

Αντιθέτως, στοιχεία ανασταλτικά της νιτροποίησης περιλαμβάνουν το χαλκό (άνω των 0,56 mg/L), το χρώμιο, το νικέλιο, τον ψευδάργυρο, τον υδράργυρο, το χρώμιο, το νικέλιο, τον άργυρο και το κυανικό οξύ ως ανόργανα ανασταλτικά, καθώς και αλκοόλες, ορισμένες βιταμίνες και άλλες οργανικές ουσίες.

Η επεξεργασία του νερού των συστημάτων εκτροφής ψαριών με θεραπευτικά (για τα ψάρια) επίπεδα φορμόλης, θειικού χαλκού, υπερμαγγανικού καλίου και χλωριούχου

νατρίου δεν επηρεάζει τη νιτροποίηση. Άλλες θεραπευτικές ουσίες εντούτοις, μπορεί να μειώσουν ή να προκαλέσουν διακοπή της νιτροποίησης.

9.3. ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

9.3.1. Θερμοκρασία

Η νιτροποίηση είναι πλέον αποδοτική σε θερμοκρασίες από 30 έως 35 °C, αν και νιτροποίηση μπορεί να συμβαίνει και σε εύρος από -5 έως 42 °C με τα νιτροποιητικά βακτηρίδια να προσαρμόζονται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Διάφορες μελέτες έχουν αποδείξει ότι υφίσταται μια γραμμική σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και νιτροποίησης. Παρακάτω θα δοθούν διάφορες εξισώσεις που συνδέουν τις δύο αυτές μεταβλητές.

Wortman (1990) για βιολογικό φίλτρο τύπου βιοδίσκου:

$$\text{AMR} = 140 + 8,5 T \quad (9.5)$$

$$\text{NRTP} = 63 + 9,9 T \quad (9.6)$$

όπου:

AMR = Ρυθμός αφαίρεσης αμμωνίας (mg NH₄⁺ – N ανά λίτρο του φίλτρου ανά ημέρα)

NRTP = Ρυθμός παραγωγής νιτρικών (mg NO₃⁻ – N ανά λίτρο του φίλτρου ανά ημέρα)

T = Θερμοκρασία (°C)

Haug και McCarty (1972) για βυθισμένο φίλτρο:

$$\text{ACR} = (0,11 T - 0,2)(S / 10) \quad (9.7)$$

όπου:

ACR = Ρυθμός κατανάλωσης αμμωνίας (mg/L/min)

S = Συγκέντρωση αμμωνίας (mg/L)

T = Θερμοκρασία νερού (°C)

Soderberg (1995) για κάθε είδους φίλτρο:

$$\text{Ρυθμός νιτροποίησης} = 0,000006T - 0,0002 \quad (9.8)$$

όπου:

Ρυθμός νιτροποίησης σε lb N/ft² επιφάνειας υλικών πλήρωσης φίλτρου/ημέρα

T = Θερμοκρασία σε °F.

9.3.2. Αριθμός Reynolds και περιστροφική ταχύτητα των φίλτρων RBC

Η ροή σε οποιοδήποτε τύπο βιολογικού φίλτρου, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί και να περιγραφεί ποσοτικά. Ο αριθμός Reynolds, ο λόγος της αδράνειας προς τις δυνάμεις ιξώδους, χρησιμοποιείται ευρέως για να χαρακτηρίσει την υδραυλική ροή. Ο αριθμός Reynolds περιέχει έναν χαρακτηριστικό όρο μήκους, που σήμερα δεν μπορεί να προσδιοριστεί καλά για ροή χαρακτηριστική των νιτροποιητικών φίλτρων. Η μοντελοποίηση της λειτουργίας των νιτροποιητικών φίλτρων, απαιτεί τον ακριβή καθορισμό του αριθμού Reynolds για τη ροή σε ένα φίλτρο.

Η περιστροφική ταχύτητα των RBC επηρεάζει την επαφή μεταξύ του biofilm και του υποστρώματος, καθώς και το βαθμό της δύναμης συνάφειας στο biofilm. Το BOD και ο ρυθμός αφαίρεσης της αμμωνίας, ενισχύονται με την αύξηση της περιστροφικής

επιτάχυνσης, μέχρι του σημείου όπου η περιφερειακή ταχύτητα του δίσκου RBC σχετικά με το νερό είναι 0,305 m/sec (1,0 ft/sec). Η αύξηση της ταχύτητας πάνω από αυτό το επίπεδο δεν βελτιώνει την απόδοση.

9.3.3. Αναλογία κενού

Η αναλογία κενού είναι ο όγκος που καταλαμβάνει ο αέρας ή το νερό, (εξαρτάται από το αν πρόκειται για βυθισμένο φίλτρο ή φίλτρο καταιονισμού), σε ένα φίλτρο αφού γεμίσει με μέσα πλήρωσης, διαιρούμενος με το συνολικό όγκο του κενού φίλτρου μέχρι το ίδιο επίπεδο που τα μέσα θα γέμιζαν. Ο κενός όγκος των φίλτρων πάνω από τα μέσα δεν λογίζεται στον υπολογισμό της αναλογίας κενού. Οι υψηλές αναλογίες κενού μειώνουν την απόφραξη. Μέσα πλήρωσης φίλτρων με υψηλές αναλογίες κενού, επιτρέπουν στα αιωρούμενα στερεά να διαπεράσουν εύκολα το φίλτρο.

9.3.4. Τύπος και μέγεθος των μέσων πλήρωσης

Τα μέσα πλήρωσης είναι στερεά υλικά που τοποθετούνται σε ένα βιολογικό φίλτρο για να παρέχουν επιφάνεια, επάνω στην οποία μπορεί να εμφανιστεί βακτηριδιακή αύξηση. Υπάρχει πλήθος τύπων μέσων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα βιολογικά φίλτρα, από άμμο και βράχους ως πλαστικά υλικά. Σχεδόν οποιοδήποτε στερεό υλικό που είναι μη τοξικό στους νιτροποιητικούς οργανισμούς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο πλήρωσης.

Ο τύπος των μέσων που επιλέγεται συνήθως εξαρτάται από την επιθυμητή διάμετρο των μέσων και της ειδικής των επιφάνειας (SSA), του κόστους, της διαθεσιμότητας και του βάρους των ανά μονάδα όγκου. Η άμμος και οι βράχοι είναι βαρείς ανά μονάδα όγκου, ένα σημαντικό πρόβλημα για τα φίλτρα τύπου βιοδίσκων (biodrums), καθώς και για τις εγκαταστάσεις όπου τα φίλτρα υφίστανται διάφορους χειρισμούς. Όμως, από την άλλη πλευρά, η άμμος και οι βράχοι είναι πολύ φτηνοί ανά μονάδα όγκου. Επίσης, και αυτό αναφέρεται ως πλεονέκτημα, οι ασβεστολιθικοί βράχοι και το μάρμαρο θα δράσουν και ως buffer στο σύστημα, τουλάχιστον έως ότου καλυφθούν από τα βακτηρίδια. Τα πλαστικά υλικά έχουν συχνά υψηλές αναλογίες κενού, είναι ελαφριά και θα διαρκέσουν σχεδόν για πάντα εάν δεν εκτεθούν στο φως του ήλιου, αλλά είναι ακριβά ανά μονάδα όγκου. Τα πλαστικά μέσα όμως δεν προσφέρουν καμία ικανότητα buffer.

Τα φίλτρα ρευστοποιημένης κλίνης, απαιτούν σχετικά μικρής διαμέτρου και βαριά μέσα πλήρωσης, αφενός για να παρέχουν υψηλή ειδική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου και αφετέρου να αποτρέπουν την παράσυρση των μέσων. Η άμμος είναι άριστο μέσο για αυτού του τύπου τα φίλτρα.

Τα φίλτρα τύπου biodrums και biodisks μπορούν να κατασκευαστούν σχεδόν από οποιοδήποτε στερεό υλικό. Το βάρος είναι μια σοβαρή παράμετρος σε αυτά τα φίλτρα, καθώς ο άξονας και τα ρουλεμάν πρέπει να σχεδιαστούν για να αντέξουν το φορτίο που επιβάλλεται από τα μέσα, τα βακτηρίδια και τον περιεχόμενο όγκο του νερού. Τα βαριά μέσα είναι δύσκολο να περιοριστούν σε ένα biodrum. Για τα biodrums χρησιμοποιούνται ειδικά πλαστικά δαχτυλίδια, σφαίρες ή άλλα πλαστικά υλικά, λόγω του χαμηλού τους βάρους ανά μονάδα όγκου. Τα biodisks συχνά κατασκευάζονται από πάνελ fiberglass, ξύλο, πλαστικά ή άλλα κατάλληλα υλικά.

Η αυξανόμενη με τη διάρκεια χρήσης απόφραξη και η απώλεια πίεσης νερού καθώς μικραίνει το μέγεθος των μέσων των φίλτρων, περιορίζουν την ελάχιστη επιτρεπόμενη διάμετρο των μέσων.

9.3.5. Ειδική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης

Η ειδική επιφάνεια των μέσων (SSA) είναι ο συνολική αναπτυγμένη επιφάνεια των μέσων ανά μονάδα όγκου. Επειδή κοστίζει περισσότερο να κατασκευαστεί ένα μεγάλο παρά ένα μικρό φίλτρο, η ειδική επιφάνεια των μέσων είναι μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού του φίλτρου. Το μέγεθος των μέσων, η αναλογία κενού και η ειδική επιφάνεια, συσχετίζονται συχνά το ένα με το άλλο. Τα μέσα μικρών διαμέτρων έχουν συνήθως μια μεγαλύτερη συνολική ειδική επιφάνεια και μικρότερη αναλογία κενού από τα μέσα μεγάλων διαμέτρων του ίδιου τύπου. Η ειδική επιφάνεια είναι συνήθως μια λειτουργία του τύπου των μέσων που επιλέγεται. Όσο μεγαλύτερη η ειδική επιφάνεια των μέσων, τόσο περισσότερα βακτηρίδια μπορούν να αυξηθούν ανά μονάδα όγκου των μέσων και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνολική αφαίρεση αμμωνίας ανά μονάδα όγκου του φίλτρου.

9.3.6. Υδραυλική φόρτιση και ιχθυοφόρτιση

Η υδραυλική φόρτιση σε ένα βυθισμένο φίλτρο, φίλτρο καταιονισμού ή ένα φίλτρο ρευστοποιημένης κλίνης, είναι ένα μέτρο της ποσότητας του αντλούμενου νερού προς το φίλτρο ανά μονάδα της άνω επιφάνειας του φίλτρου ανά μονάδα χρόνου, και εκφράζεται ως $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$. Ο ρυθμός φόρτισης για ένα biodrum ή ένα biodisk συχνότατα εκφράζεται, ως ο όγκος του νερού που διαπερνά το φίλτρο ανά μονάδα ειδικής επιφάνειας των μέσων. Η τελευταία έκφραση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για οποιοδήποτε άλλο τύπο βιολογικού φίλτρου, συμπεριλαμβανομένων των βυθισμένων, καταιονισμού και ρευστοποιημένης κλίνης.

Υπάρχει ένας ελάχιστος και ένας μέγιστος υδραυλικός ρυθμός φόρτισης για τα νιτροποιητικά φίλτρα. Η ελάχιστη φόρτιση καθορίζεται από την ελάχιστη ροή που κρατά όλο το φίλτρο υγρό. Ο χαμηλότερος περιοριστικός ρυθμός ροής (χαμηλότερος ρυθμός άρδευσης), είναι πιο περιοριστικός σε ένα φίλτρο καταιονισμού (trickling filter) ή σε ένα βυθισμένο φίλτρο απ' ό,τι σε ένα biodrum ή ένα biodisk. Σε ένα φίλτρο καταιονισμού τα μέσα πρέπει να είναι συνεχώς υγρά για να επιζήσουν τα βακτηρίδια. Στα βυθισμένα φίλτρα η ελάχιστη ροή του νερού, καθορίζεται από την ικανοποίηση της απαίτησης για οξυγόνο του φίλτρου. Η ελάχιστη ροή σε ένα biodisk ή ένα biodrum, είναι η ροή που παρέχει αρκετές θρεπτικές ουσίες για να κρατήσει της νιτροποιητικούς οργανισμούς ζωντανούς και υγρούς. Σε γενικές γραμμές για τα φίλτρα καταιονισμού με υλικό μέσο πλήρωσης τυχαία στοιβαγμένα πλαστικά δαχτυλίδια, συνιστάται ελάχιστη υδραυλική φόρτιση $29 - 55 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$.

Ο μέγιστος επιτρεπόμενος ρυθμός ροής (μέγιστος ρυθμός άρδευσης) σε όλους τους τύπους βιολογικών φίλτρων, καθορίζεται συνήθως από την ταχύτητα του νερού που απομακρύνει («ξεκολλάει») τα βακτηρίδια από τα μέσα ή παράγει υπερβολική απώλεια πίεσης (head loss). Η μέγιστη ταχύτητα του νερού, δηλαδή ο ρυθμός ροής, σε ένα φίλτρο ρευστοποιημένης κλίνης, καθορίζεται μερικές φορές από την ανάγκη να κρατηθούν τα μέσα πλήρωσης εντός του δοχείου του φίλτρου. Για τα φίλτρα καταιονισμού γεμάτα με τυχαία συσκευασμένα πλαστικά δαχτυλίδια, άλλοι ερευνητές συστήνουν μέγιστο ρυθμό ροής 72 έως $188 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$, ενώ άλλοι 234 έως $350 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$, ανάλογα με τον τύπο των πλαστικών μέσων πλήρωσης. Είναι προφανές ότι τόσο τα ανώτερα όσο και τα

χαμηλότερα όρια άρδευσης, ποικίλλουν αρκετά με το μέγεθος των μέσων, την κατασκευή, το υλικό και άλλες μεταβλητές. Οι συστάσεις των κατασκευαστών παρέχουν πιθανώς τις καλύτερες διαθέσιμες οδηγίες για τον καθορισμό των ορίων αυτών. Η απομάκρυνση των νιτροποιητικών οργανισμών από τα biodrums και τα biodisks, σχετίζεται τόσο με την υδραυλική φόρτιση όσο και με την ταχύτητα περιστροφής των.

Έχει παρατηρηθεί ότι για χαμηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας, μικρότεροι χρόνοι παραμονής του νερού στο φίλτρο (υψηλότεροι ρυθμοί ροής), παράγουν υψηλότερους ρυθμούς αφαίρεσης αμμωνίας. Φαίνεται ότι η αύξηση των νιτροποιητικών βακτηριδίων και ο ρυθμός νιτροποίησης, δεν εξαρτώνται τόσο από την οριακή συγκέντρωση του θρεπτικού υποστρώματος (αμμωνία), όσο από το σύνολο του φορτίου του υποστρώματος που περνάει από το φίλτρο σε ένα χρονικό διάστημα.

9.3.7. Βάθος

Το βάθος των φίλτρων αποτελεί μια εκτιμητική παράμετρο για τα βυθισμένα φίλτρα και τα φίλτρα καταιονισμού, ενώ για τα biodrums και biodisks χρησιμοποιείται το βάθος καταβύθισης των φίλτρων. Το βάθος καταβύθισης για τα biodrums και biodisks συνήθως είναι ελαφρώς μικρότερο από το μισό της διαμέτρου των τυμπάνων ή των δίσκων. Αυτό το βάθος διασφαλίζει ότι όλο το τύμπανο ή ο δίσκος εκτίθενται περιοδικώς στον αέρα και ότι ο άξονας και τα ρουλεμάν δεν θα λειτουργούν μέσα στο νερό. Τα επίπεδα καταβύθισης των δίσκων για τα RBC φίλτρα είναι περίπου 50 %. Από τη σχέση μεταξύ της αποδοτικότητας επεξεργασίας και της καταβύθισης, βρέθηκε ότι το βέλτιστο ποσοστό βύθισης βρίσκεται στα 35 – 50 %.

Το βάθος των βυθισμένων φίλτρων εξαρτάται από διάφορες μεταβλητές. Το φίλτρο πρέπει να έχει ικανοποιητικό βάθος, έτσι ώστε η αμμωνία να μετατρέπεται σε νιτρώδη από τα *Nitrosomonas* και να απελευθερώνονται νιτρώδη. Τα νιτρώδη μετατρέπονται έπειτα από τα *Nitrobacter* σε νιτρικά. Σε μερικά φίλτρα η οργανική οξειδωση από τους ετερότροφους οργανισμούς εμφανίζεται επίσης πριν από οποιαδήποτε νιτροποίηση. Το βάθος που απαιτείται για να γίνουν όλες αυτές οι μετατροπές, εξαρτάται από το μέγεθος των μέσων, την υδραυλική φόρτιση και φόρτιση σε αμμωνία, τον αριθμό Reynolds και άλλους παράγοντες. Δυστυχώς δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες σχεδιασμού, στις οποίες να βασίζεται η ρεαλιστική επιλογή του βάθους των φίλτρων. Τα βιολογικά φίλτρα που χρησιμοποιούν ως μέσο πλήρωσης άμμο, μπορούν να επιτελέσουν όλες αυτές τις μετατροπές σε μερικά εκατοστά βάθους, ενώ ένα φίλτρο καταιονισμού που χρησιμοποιεί πλαστικά δαχτυλίδια διαμέτρου 8 cm, μπορεί να απαιτήσει από 4 έως 5 m βάθους για να ολοκληρώσει τις ίδιες διαδικασίες. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει κανένα σταθερό βάθος που είναι το καλύτερο για όλα τα σχέδια. Ο μηχανικός πρέπει να χρησιμοποιήσει την κρίση του, ώστε να επιλέξει το κατάλληλο βάθος για ένα συγκεκριμένο σχέδιο. Εκτός και αν ένα φίλτρο περιέχει πολύ λεπτά μέσα όπως η άμμος, θα είναι τουλάχιστον βάθους ενός μέτρου. Τα φίλτρα που έχουν μεγάλα μέσα, δηλαδή διαμέτρου 7 – 10 cm και υψηλούς ρυθμούς ροής μπορούν να είναι βάθους 4 έως 5 m.

9.3.8. Εγκάρσια επιφάνεια (επιφάνεια διατομής)

Η εγκάρσια επιφάνεια αναφέρεται στην περιοχή της κορυφής του φίλτρου που δεν περιέχει μέσα πλήρωσης. Η περιοχή αυτή στην κορυφή του φίλτρου, είναι συνήθως μια από της τελευταίες παραμέτρους που εκτιμώνται στο σχεδιασμό των φίλτρων και συχνά επιλέγεται έτσι που να δώσει ένα επιθυμητό υδραυλικό ποσοστό φόρτισης, από την

άποψη των m^3 του νερού ανά m^2 περιοχής της κορυφής του φίλτρου ανά μονάδα χρόνου. Η εγκάρσια επιφάνεια είναι μικρής σημασίας όταν πρόκειται για biodisks και biodrums, εκτός ίσως μόνο για τη διευκρίνιση της διαμέτρου των τυμπάνων ή των δίσκων.

9.3.9. Πάχος μεμβράνης

Το πάχος της μεμβράνης αναφέρεται στο πάχος του στάσιμου στρώματος του νερού, που περιβάλλει το βακτηριδιακό στρώμα το οποίο αυξάνεται στην επιφάνεια των μέσων. Αυτό το πάχος εξαρτάται από την ταχύτητα του νερού που διαβρέχει τα μέσα, το ιξώδες του νερού και τη θερμοκρασία. Σύνθετες πάχος φιλμ σε ρυθμισμένα βιολογικά φίλτρα είναι τα 50 – 100 μm .

9.3.10. Φως

Τα βιολογικά φίλτρα φαίνεται να προτιμούν το σκοτάδι. Ελαφριές εντάσεις ακόμα και κάτω από το 1% του φωτός του ήλιου, εμποδίζουν τη νιτροποίηση των βακτηριδίων. Το φως θεωρείται ότι οξειδώνει το κυτόχρωμα C τόσο στα *Nitrosomonas* όσο και στα *Nitrobacter*. Τα *Nitrobacter* είναι πιο ευαίσθητα στο φως από τα *Nitrosomonas*, πιθανώς επειδή περιέχουν λιγότερο κυτόχρωμα C από τα *Nitrosomonas*. Το πλήρες σκότος είναι προτιμότερο από τον ημερήσιο κύκλο φωτισμού για τα νιτροποιητικά βακτηρίδια.

9.4. ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

9.4.1. Πυκνότητα βιομάζας

Η πυκνότητα της βιομάζας είναι ένα μέτρο της μάζας των βακτηριδιακών κυττάρων ανά μονάδα όγκου του biofilm. Η πυκνότητα της βιομάζας εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της τροφής, την ταχύτητα του νερού πάνω από τη βιολογική μεμβράνη (biofilm), των χαρακτηριστικών των κυττάρων και άλλων μεταβλητών. Στα εν χρήσει βιολογικά φίλτρα, η πυκνότητα της βιομάζας ποικίλλει αρκετά από θέση σε θέση μέσα στο ίδιο φίλτρο και ακόμα περισσότερο μεταξύ των φίλτρων. Ο Hochheimer (1990) χρησιμοποίησε 886 g κυττάρων/ m^3 σε εργασία του, ως μέσο όρο των τιμών που βρήκε σε διάφορες εφαρμογές.

9.4.2. Παραγωγή κυττάρων

Η παραγωγή κυττάρων είναι ένα μέτρο της μάζας των κυττάρων που παράγονται, ανά μονάδα μάζας της αμμωνίας που μετατρέπεται σε νιτρικά. Η εξίσωση 9.3 δείχνει ότι παράγονται 0,17 g κυττάρων ανά g αμμωνίας που οξειδώνεται σε νιτρικά. Η τιμή αυτή είναι σχετικά χαμηλή σχετικά με άλλα βακτηριδιακά συστήματα, π.χ. ετερότροφα. Πάντως η μικρή αύξηση είναι συμφέρουσα, επειδή υπάρχουν λιγότερα βακτηρίδια για να φράξουν το βιολογικό φίλτρο. Εντούτοις, η αργή αύξηση σημαίνει επίσης ότι οι περίοδοι επαναενεργοποίησης μετά από συντήρηση στο φίλτρο είναι μεγάλες και το φίλτρο ανταποκρίνεται αργά στις αλλαγές των φορτίσεων με αμμωνία.

9.5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Ο σχεδιασμός των βιολογικών φίλτρων είναι μια λογική διαδικασία που χρησιμοποιεί βιολογικές, χημικές και φυσικές πληροφορίες που χαρακτηρίζουν το μεταβολισμό των ψαριών και των βακτηριδίων, προκειμένου να καταλήξει σε μια φυσική μονάδα, π.χ. ένα φίλτρο, στο οποίο είναι δυνατόν να αναπτυχθούν βακτηρίδια σε επαρκείς ποσότητες, για να αφαιρέσουν τα αζωτούχα απόβλητα που παράγονται από μια συγκεκριμένη ποσότητα ψαριών ή οστρακόδερμων. Η διαδικασία του σχεδιασμού τους συνδυάζει στοιχεία όπως, πληροφορίες για την παραγωγή αποβλήτων, φαντασία, εμπειρία και δημιουργικό ταλέντο του σχεδιαστή αλλά και προδιαγραφές που απαιτούνται για να παράγουν μια συσκευή ή μια ιδέα που δεν έχει εμφανιστεί ποτέ στο παρελθόν, αλλά θα είναι ικανή να πραγματοποιήσει μια επιθυμητή δραστηριότητα ή μια λειτουργία. Κατά συνέπεια, το σχέδιο είναι εγγενώς μια δημιουργική διαδικασία. Το σχέδιο διαφέρει από την επιστημονική έρευνα, δεδομένου ότι στην επιστημονική έρευνα ο τελικός στόχος είναι συνήθως να γίνει κατανοητή ή να διευκρινιστεί μια αρχή ή μια έννοια που υπάρχει ήδη στο φυσικό κόσμο. Ο σχεδιασμός των βιολογικών φίλτρων απαιτεί λοιπόν τη δημιουργικότητα και την κατάρτιση σε διάφορα πεδία, συμπεριλαμβανομένων της εφαρμοσμένης μηχανικής, της βιολογίας και των οικονομικών. Παράλληλα με όλα αυτά, πρέπει να αναρωτηθούμε το κατά πόσο θα λειτουργεί σωστά η συσκευή, πόσο πρακτική θα είναι, αλλά και τα οικονομικά της οφέλη στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Αυτή η κρίση είναι γνωστή ως «κρίση εφαρμοσμένης μηχανικής».

Ο σχεδιασμός των βιολογικών φίλτρων απαιτεί ιδιαίτερη κρίση εφαρμοσμένης μηχανικής εκ μέρους του σχεδιαστή. Τα στοιχεία στα οποία μπορεί να βασιστεί ένα σχέδιο νιτροποίησης είναι περιορισμένα, ειδικά για εφαρμογές που αναφέρονται στις υδατοκαλλιέργειες. Παραδείγματος χάριν, η παράμετρος «παραγωγή αμμωνίας» που αναφέρεται στην επιστημονική βιβλιογραφία για ένα συγκεκριμένο είδος ψαριού, συχνά ποικίλλει κατά έναν παράγοντα του 10 ή περισσότερο. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, στοιχεία για την παραγωγή αμμωνίας μπορεί να μην υπάρχουν για ένα είδος που μας ενδιαφέρει ή για μια συγκεκριμένη περίοδο του κύκλου ζωής του είδους. Χωρίς αυτό το στοιχείο, ο σχεδιαστής πρέπει να χρησιμοποιήσει τα στοιχεία που αναφέρονται σε άλλα είδη ή κάποια άλλη πηγή και να υπολογίσει τα απαραίτητα στοιχεία όσο καλύτερα μπορεί. Σε περίπτωση που αυτά τα στοιχεία είναι ανακριβή, τότε υπάρχουν πολλές πιθανότητες να δημιουργηθούν λάθη κατά το σχεδιασμό.

Τα βιολογικά φίλτρα πρέπει να αφαιρούν τα απόβλητα που παράγονται στο σύστημα υδατοκαλλιέργειας με ένα επαρκή ρυθμό, για να διατηρηθεί η ποιότητα νερού σε τέτοιο επίπεδο, που να αποτρέπεται η εκδήλωση «stress» στα ψάρια. Η παραγωγή αποβλήτων οφείλεται στη βιολογική δραστηριότητα των ψαριών (μεταβολισμός) και η αφαίρεση των αποβλήτων οφείλεται στη βιολογική δραστηριότητα των νιτροποιητικών βακτηριδίων. Επειδή και η παραγωγή και η αφαίρεση των αποβλήτων είναι βιολογικές διαδικασίες, οι αλλαγές στις περιβαλλοντικές παραμέτρους έχουν επιπτώσεις στους ρυθμούς αυτών των μεταβολικών διαδικασιών. Υπάρχουν πολλές περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν τις βιολογικές διαδικασίες. Παραδείγματος χάριν, ο Hochheimer (1990) απαρίθμησε 35 μεταβλητές που έχουν επιπτώσεις στα βιολογικά φίλτρα. Τα στοιχεία και οι πληροφορίες που είναι διαθέσιμες, δεν είναι ικανά να βελτιστοποιήσουν, έστω και μερικές από αυτές της μεταβλητές, πόσο μάλλον όλες τους. Κατά συνέπεια, η «κρίση εφαρμοσμένης μηχανικής» πρέπει να ασκηθεί σε μία

προσπάθεια να δώσει απάντηση σε όσο το δυνατόν περισσότερες από τις μεταβλητές σε ένα σχέδιο. Πολλές διαφορετικές μορφές βιολογικών φίλτρων χρησιμοποιούνται στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας, φίλτρα καθοδικής ροής, περιστρεφόμενα βιολογικά τύμπανα, φίλτρα ρευστοποιημένης κλίνης, κ.λπ.. Οι διαδικασίες σχεδιασμού για αυτές τις διάφορες μορφές βιολογικών φίλτρων είναι διαφορετικές. Κατά συνέπεια, η κρίση εφαρμοσμένης μηχανικής είναι απαραίτητη για να εγκαταστήσει το σωστό φίλτρο σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή και να εφαρμόσει τη σωστή διαδικασία σχεδιασμού σε κάθε μορφή φίλτρου. Η διαδικασία σχεδιασμού, που περιγράφεται λεπτομερώς παρακάτω, είναι μια γενική μεθοδολογία που ισχύει σε ποικίλες διαμορφώσεις βιολογικών φίλτρων. Δεν είναι εντούτοις, μια καθολική μεθοδολογία και δεν πρέπει να ερμηνευθεί έτσι.

9.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο σχεδιασμός βιολογικών φίλτρων είναι με απλούς όρους, ένα θέμα εξισορρόπησης των αποβλήτων που παράγονται από την εκτρεφόμενη βιομάζα, προς τα απόβλητα που αφαιρούνται από το φίλτρο. Ένας σχεδιαστής πρέπει κατά πρώτον να καθορίσει το είδος των αποβλήτων που παράγονται, και κατά δεύτερον, το μέγεθος του φίλτρου, προκειμένου να αφαιρέσει αποτελεσματικά τα απόβλητα με τον ίδιο ή με μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν που παράγονται. Επειδή οι ρυθμοί παραγωγής και αφαίρεσης αποβλήτων εξαρτώνται από τη χρονική στιγμή της ημέρας, το ποσό σίτισης και τη συχνότητα σίτισης, καθώς και από διάφορες άλλες μεταβλητές, ο σχεδιασμός των βιολογικών φίλτρων δεν είναι τόσο απλός όπως μπορεί καταρχήν να φαίνεται.

Επειδή ο σχεδιασμός των βιολογικών φίλτρων εξετάζει την εξισορρόπηση δύο βιολογικών συστημάτων, δηλαδή την εκτρεφόμενη βιομάζα και το φίλτρο, γίνεται αντιληπτό ότι δεν είναι μια απόλυτα ακριβής διαδικασία. Επιπλέον, τα στοιχεία στα οποία βασίζεται ο σχεδιασμός των φίλτρων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλότητα. Κατά συνέπεια, οι διαδικασίες του σχεδιασμού που περιγράφονται με λεπτομέρεια παρακάτω, ισχύουν μεν γενικά, αλλά για μερικές εφαρμογές η διαδικασία σχεδιασμού των μπορεί να χρειαστεί σημαντική τροποποίηση, προκειμένου να παραχθεί ένα ικανοποιητικό σχέδιο. Τα βήματα στη διαδικασία σχεδιασμού είναι:

- (I) Καθορισμός της παραγωγής αποβλήτων, καθορισμός των ορίων ανοχής των ψαριών για: Αμμωνία, νιτρώδη, νιτρικά, στερεά
- (II) Υπολογισμός της αφαίρεσης της αμμωνίας από το φίλτρο
- (III) Υπολογισμός της απαιτούμενης ειδικής επιφάνειας (SSA) για ένα πέρασμα
- (IV) Υπολογισμός της κατανάλωσης οξυγόνου από τα ψάρια
- (V) Υπολογισμός της ιχθυοχωρητικότητας του συστήματος
- (VI) Υπολογισμός του ρυθμού ροής του νερού στο σύστημα
- (VII) Υπολογισμός της συγκέντρωσης αμμωνίας για ένα πέρασμα από το φίλτρο
- (VIII) Υπολογισμός του παράγοντα συγκέντρωσης αμμωνίας λόγω της ανακύκλωσης
- (IX) Υπολογισμός της αποδοτικότητας του φίλτρου στην αφαίρεση της αμμωνίας
- (X) Καθορισμός του συνολικού φορτίου αμμωνίας στο φίλτρο
- (XI) Υπολογισμός του αναγκαίου χρόνου διατήρησης του νερού στο φίλτρο
- (XII) Καθορισμός του όγκου του φίλτρου και της έκτασης της ειδικής επιφάνειάς του
- (XIII) Καθορισμός των διαστάσεων του φίλτρου
- (XIV) Έλεγχος του ανεφοδιασμού με οξυγόνο στο φίλτρο
- (XV) Αναθεώρηση του σχεδίου και επιδιόρθωση, εάν είναι αναγκαίο

Η παραπάνω διαδικασία εμφανίζεται μάλλον απλή. Τα πρώτα τρία βήματα είναι σχετικά εύκολα εάν οι πληροφορίες προϋπάρχουν. Πρακτικά όμως, επαρκή στοιχεία υπάρχουν για πολύ λίγα είδη. Σε μερικές περιπτώσεις τα στοιχεία μπορεί να είναι μεν διαθέσιμα για ένα στάδιο ζωής, αλλά όχι για όλα τα στάδια. Στοιχεία που αφορούν την παραγωγή αποβλήτων μπορεί να είναι διαθέσιμα, αλλά σε μια μορφή που είναι τελείως ακατάλληλη προς χρήση για το σχέδιο, π.χ. τιμές LD50 (συγκέντρωση που επιφέρει θνησιμότητα για το 50% του πληθυσμού) για την τοξικότητα της αμμωνίας. Τα στοιχεία αφαίρεσης της αμμωνίας που είναι διαθέσιμα, ποικίλλουν μεταξύ των διαφόρων πηγών.

Είναι γνωστό ότι οι ρυθμοί παραγωγής αποβλήτων ποικίλλουν ανάλογα με το μέγεθος των ψαριών, το ποσοστό σίτισης, τη θερμοκρασία και διάφορες άλλες μεταβλητές. Η αφαίρεση αποβλήτων είναι μια λειτουργία, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το ρυθμό ροής, τη φόρτιση αμμωνίας και άλλων μεταβλητών. Ο σχεδιαστής πρέπει να σχεδιάσει το φίλτρο, έτσι ώστε να αντέξει το μέγιστο φορτίο αποβλήτων που το σύστημα θα παρουσιάσει. Για τον υπολογισμό του μέγιστου φορτίου απαιτείται όχι μόνο το να γνωρίζουμε την παραγωγή αποβλήτων, αλλά και τις μεθόδους που χρησιμοποιεί ο διαχειριστής. Παραδείγματος χάριν, εάν ο διαχειριστής προσπαθήσει να διατηρήσει το ίδιο βάρος των ψαριών σε ένα σύστημα, ανεξάρτητα από το μέγεθος των ψαριών, το μέγιστο φορτίο θα εμφανιστεί πιθανώς όταν το σύστημα περιέχει μικρά ψάρια. Αλλα συστήματα διαχείρισης θα δημιουργήσουν μέγιστο φορτίο όταν τα ψάρια θα έχουν το μέγιστο βάρος τους ή ακόμα και κοντά σε αυτό.

Ο προσδιορισμός του ρυθμού παραγωγής αποβλήτων και του ρυθμού αφαίρεσής των στο φίλτρο, είναι το σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη δυσκολία, επειδή λείπουν έγκυρα στοιχεία. Οι Kaiser και Wheaton (1983), έδειξαν ότι βιολογικά φίλτρα υπό το ίδιο φορτίο και την ίδια λειτουργία σε συστήματα παραγωγής,, ποικίλλουν σε μέγεθος της τάξεως του 100. Αν και μερικές από αυτές της παραλλαγές οφείλονται στις διαφορές του σχεδιασμού των συστημάτων και της διαχείρισής των, οι περισσότερες οφείλονται στη διαφοροποίηση του σχεδιασμού. Ο αναγνώστης μπορεί να εκτιμήσει ότι ένα φίλτρο 100 φορές μεγαλύτερο από ένα άλλο που κάνει την ίδια εργασία φιλτραρίσματος, θα έχει σημαντικά υψηλότερο κόστος κατασκευής και θα απαιτήσει μεγαλύτερο πολύτιμο χώρο.

9.6.1. Παράδειγμα προβλήματος σχεδιασμού: βυθισμένο φίλτρο

Το παράδειγμα που δίδεται εδώ, είναι ενός βυθισμένου βιολογικού φίλτρου με καθοδική ροή νερού. Αν και αυτό το φίλτρο δεν είναι απαραίτητως το καλύτερο για πολλές εφαρμογές, έχει διάφορα οφέλη ως παράδειγμα σχεδιασμού. Το κύριο χαρακτηριστικό σπουδαιότητας εδώ, είναι ότι το οξυγόνο για όλο το φίλτρο πρέπει να παρέχεται μέσω του νερού, σε αντίθεση με άλλα φίλτρα (π.χ. βιοδίσκοι), όπου ένα μεγάλο μέρος του οξυγόνου προέρχεται από τον αέρα. Επειδή όλο το οξυγόνο που χρησιμοποιείται στο φίλτρο πρέπει να παρέχεται από το νερό που διατρέχει το φίλτρο, παρουσιάζεται ένας πρόσθετος περιορισμός σχεδιασμού που έχει σημαντικές επιπτώσεις στις λειτουργικές δαπάνες του φίλτρου.

Το πρόβλημα που αναλύεται παρακάτω έχει σκοπό να επισημάνει διάφορες απόψεις στη διαδικασία σχεδιασμού. Κατά συνέπεια, δεν περιγράφεται απαραίτητως η συνολική διαδικασία σχεδιασμού που ένας σχεδιαστής θα πραγματοποιήσει για ένα πραγματικό σχέδιο.

Παραδείγματος χάριν, κανονικά σε ένα πλήρες σχέδιο σχεδιάζονται διάφορα εναλλακτικά συστήματα φίλτρων και η απόφαση επιλογής μεταξύ των λαμβάνεται, όχι μόνο από τεχνικές, αλλά και από οικονομικές εκτιμήσεις.

Πρόβλημα: Να σχεδιαστεί ένα βιολογικό φίλτρο για να αφαιρεθεί η αμμωνία που παράγεται από 10.000 kg ιριδίζουσας πέστροφας, εκτρεφόμενες σε κλειστό σύστημα με 90 % ανακύκλωση του νερού. Οι πέστροφες έχουν μέσο ατομικό βάρος 1 kg (43 cm μήκος) κατά το χρόνο με τη μέγιστη ιχθυοφόρτιση που θα αντιμετωπίσει το φίλτρο. Υποτίθενται οι ακόλουθες συνθήκες:

Θερμοκρασία συστήματος	56 °F (12 °C)
Στοιχεία υλικών (μέσων) πλήρωσης του φίλτρου	
Τύπος υλικού:	Πλαστικά δαχτυλίδια
Διάμετρος υλικού:	2,5 cm
Αναλογία κενού:	0,90
Ειδική επιφάνεια μέσων:	160 m ² /m ³
Βάρος:	18,5 kg/m ³
Τροφή ψαριών:	2% του σωματικού βάρους ανά ημέρα, με pellets πεστροφών

Ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου στο νερό κατά την έξοδο από το φίλτρο: 5 mg/L.

Λύση:

I. Παραγωγή αμμωνίας (**AP**)
 Από Liao και Mayo (1974):

$$AP = 0,0289 \text{ (Τροφή που ταιΐζεται / ημέρα), συνεπώς:} \quad (9.9)$$

$$AP = (0,0289)(10.000 \text{ kg})(2\% \text{ σωματικό βάρος / ημέρα}) = 5,8 \text{ kg TAN/day}$$

II. Αφαίρεση αμμωνίας από το φίλτρο (**AR**)

Από πίνακες του Speece (1973):

$$\text{Στους } 12^{\circ}\text{C: αφαίρεση αμμωνίας} = 0,60 \text{ g/m}^2 \text{ ημέρα} \quad (9.10)$$

III. Συνολική ειδική επιφάνεια (**SSA**) που απαιτείται για ένα πέρασμα:

$$SSA = \frac{\text{παραγόμενη αμμωνία (g/d)}}{\text{αφαιρούμενη αμμωνία (g / m}^2 \cdot \text{d)}} \quad (9.11)$$

$$SSA = \frac{5800 \text{ g / d}}{0,60 \text{ g / m}^2 \cdot \text{d}} = 9667 \text{ m}^2$$

Σημειώνεται ότι αυτή η μέθοδος καθορισμού του SSA δεν λαμβάνει υπόψη την ανακύκλωση, το χρόνο παραμονής και άλλες μεταβλητές φίλτρων.

- IV. Υπολογισμός της κατανάλωσης οξυγόνου των ψαριών
Από Liao (1971):

$$O_c = K_2 T^a W^b \quad (9.12)$$

όπου:

O_c = Ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου (Ib O₂/100 Ib ψάρια ανά ημέρα)

K_2 = σταθερά του ρυθμού κατανάλωσης

T = θερμοκρασία (°F)

a, b = συντελεστές κλίσης της εξίσωσης

W = μέγεθος ψαριών (Ib/ ψάρι)

Οι παράμετροι K_2 , a , και b προέρχονται από πίνακες των Liao (1971) ή Wheaton (1977). Αυτές οι παράμετροι μπορούν να αλλάξουν ανάλογα το μέγεθος και το είδος του ψαριού. Για αυτές τις τιμές, η κατανάλωση οξυγόνου είναι:

$$O_c = 3,05 \cdot 10^{-4} (56)^{1,855} (2,2)^{-0,138} \quad (9.13)$$

$$O_c = (3,05 \cdot 10^{-4}) (1749) (0,9) = 0,478 \text{ Ib O}_2 \text{ ανά 100 Ib ψαριών ανά ημέρα}$$

- V. Σύμφωνα με τους Liao et al. (1972), η ιχθυοχωρητικότητα μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$L_C = \frac{0,14(C_e - C_m)}{O_c} \quad (9.14^a)$$

όπου:

L_C = ιχθυοχωρητικότητα (kg ψαριών/λίτρο · min)

C_e = συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σε θερμοκρασία T και υψόμετρο E_1 (mg/L)

C_m = ελάχιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση οξυγόνου στο φίλτρο (mg/L)

O_c = ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου (kg O₂/100 kg ψαριών) / d

Υποτίθεται ότι ο κορεσμός οξυγόνου είναι 10 mg/L (από πίνακες) και η ελάχιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση οξυγόνου είναι 5 mg/L (δίδεται), τότε:

$$L_C = \frac{(10-5) \text{ (mg / L)}}{0,478 \text{ (kg O}_2 \text{ / 100 kg ψαριων / day)}} = 1,46 \text{ kg ψάρια/L} \cdot \text{min} \quad (9.14\beta)$$

- VI. Απαιτούμενος ρυθμός ροής του νερού (Q):

$$Q = \frac{10.000 \text{ kg}}{1,46 \text{ kg ψαριών / L} \cdot \text{min}} = 6849 \text{ L/min} \quad (9.15)$$

- VII. Αρχική συγκέντρωση αμμωνίας στο σημείο απορροής του συστήματος:

$$C_i = \frac{\text{παραγόμενη αμμωνία / ημέρα}}{\text{ρυθμός ροής / ημέρα}} \quad (9.16)$$

$$C_i = \frac{5,8 \text{ kg αμμωνία / ημέρα}}{(6849 \text{ L νερό / min})(60 \text{ min / hr})(24 \text{ hr / ημέρα})} = 0,59 \text{ mg/L} \quad (9.17)$$

Η επιτρεπόμενη συγκέντρωση αμμωνίας (C_2) είναι 0,75 mg/L (Liao et al. 1972) με βάση την τοξικότητα αμμωνίας στα ψάρια.

VIII. Παράγοντας επιτρεπόμενης συγκέντρωσης αμμωνίας (C) λόγω της ανακύκλωσης:

$$C = \frac{C_2}{C_i} = \frac{0,75}{0,59} = 1,27 \quad (9.18)$$

C = συγκέντρωση του μεταβολίτη σε οποιοδήποτε σημείο απορροής από το σύστημα εκτροφής, διαιρούμενη δια της συγκέντρωσης που εμφανίζεται στην απορροή της μονάδας εκτροφής σε ένα πέρασμα.

IX. Η αποδοτικότητα (E) των φίλτρων που απαιτείται για να αφαιρέσει την παραχθείσα αμμωνία μπορεί να υπολογιστεί (από Liao και Mayo, 1974) ως:

$$E = \frac{1 + (C \cdot R) - C}{C \cdot R} \quad (9.19)$$

όπου:

E = ποσοστό (ως δεκαδικό) του μεταβολίτη που αφαιρείται από ένα πέρασμα από το φίλτρο

R = ποσοστό (ως δεκαδικό μέρος) του νερού που ανακυκλώνεται (στη δεδομένη άσκηση τίθεται στο 90%, δηλαδή 0,9)

Αντικαθιστώντας:

$$E = \frac{1 + 1,27(0,9) - 1,27}{1,27(0,9)} = 0,76$$

Επομένως, το φίλτρο πρέπει να είναι 76% αποδοτικό, μια μάλλον αυστηρή απαίτηση για ένα φίλτρο.

X. Συνολικό φορτίο αμμωνίας στο φίλτρο (W_A), λόγω της ανακύκλωσης (μέγιστη τιμή):

$$W_A = (\text{φορτίο αμμωνίας μετά από ένα πέρασμα}) \cdot (C) \Rightarrow \quad (9.20)$$

$$W_A = (5,8 \text{ kg αμμωνία/ημέρα}) \cdot (1,27) = 7,37 \text{ kg αμμωνία/ημέρα}$$

XI. Χρόνος παραμονής στο φίλτρο που απαιτείται για να επιτευχθεί αφαίρεση αμμωνίας E (Liao et al, 1972):

$$t_m = \frac{E}{9,8T - 21,7} \quad (9.21)$$

όπου:

t_m = χρόνος παραμονής στο φίλτρο, σε ώρες

T = θερμοκρασία νερού, °C

$$t_m = \frac{0,76}{(9,8)(12) - (21,7)} = 0,0079 \text{ ώρες, δηλαδή, } t_m = 0,48 \text{ min}$$

XII. Όγκος του φίλτρου (Vol) που απαιτείται:

$$\text{Vol} = \frac{Q_{t_m}}{\text{αναλογία κενού}} \quad (9.22)$$

$$\text{Vol} = \frac{(6849 \text{ L/min})(0,48 \text{ min})}{0,9} = 3653 \text{ L}$$

Η ειδική επιφάνεια (SSA) των μέσων πλήρωσης που απαιτείται:

$$\begin{aligned} \text{SSA} &= (\text{Vol}) \cdot (\text{επιφάνεια/μονάδα όγκου}) \\ \text{SSA} &= (3,653 \text{ m}^3) \cdot (160 \text{ m}^2/\text{m}^3) = 584 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (9.23)$$

Η ανωτέρω ειδική επιφάνεια (SSA) βρέθηκε χρησιμοποιώντας έναν υπολογισμένο χρόνο κατακράτησης και αποδοτικότητα των φίλτρων, κατά τη μέθοδο που αναπτύχθηκε από τους Liao και Mayo (1974). Συγκρινόμενη με την αντίστοιχη ειδική επιφάνεια (SSA) που υπολογίζεται στο βήμα III (υποθέτοντας ένα ρυθμό παραγωγής και ένα ρυθμό αφαίρεσης αμμωνίας) του προβλήματος, διαπιστώνονται διαφορές. Η παραγωγή υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από τους Liao et al. (1972) και η αφαίρεση αμμωνίας από στοιχεία του Sreece (1973). Οι δύο μέθοδοι υπολογισμού της SSA δίδουν 584 m^2 και 9667 m^2 . Μετατρέποντάς το σε όγκο (χρησιμοποιώντας $160 \text{ m}^2/\text{m}^3$) προκύπτουν όγκοι $9,90 \text{ m}^3$ και $60,4 \text{ m}^3$, διαφορά πολλαπλασίου της τάξεως του 6.

Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η τιμή που καθορίζεται στο βήμα XII περιλαμβάνει ανακύκλωση του νερού, ενώ η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στο βήμα III δεν περιλαμβάνει καμία διάταξη για ανακύκλωση. Η ύπαρξη της ανακύκλωσης εξηγεί τις περισσότερες από τις διαφορές στις υπολογισμένες τιμές για το μέγεθος των φίλτρων.

XIII. Υπολογίζονται οι διαστάσεις των φίλτρων.

Χρησιμοποιώντας βάθος 2 m για το φίλτρο:

$$\text{Vol} = (\text{βάθος}) \cdot (\text{μήκος}) \cdot (\text{πλάτος}) \quad (9.24)$$

$$3,653 \text{ m}^3 = 2 \text{ m} \cdot (\text{μήκος}) \cdot (\text{πλάτος})$$

$$1,826 \text{ m}^2 = (\text{μήκος}) \cdot (\text{πλάτος})$$

Εάν υποθέσουμε ένα μήκος 1,8 m, τότε: πλάτος = 1,01 m

XIV. Ελέγχεται η παροχή του οξυγόνου στο φίλτρο:

Η στοιχειομετρική απαίτηση οξυγόνου για τη μετατροπή από αμμωνία σε νιτρικά είναι 4,18 g οξυγόνο ανά g αμμωνίας (TAN) που μετατρέπεται σε νιτρικά (Hochheimer, 1990).

Υπάρχουν 5,8 kg αμμωνίας που πρέπει να μετατρέπονται καθημερινά. Επομένως, η απαίτηση οξυγόνου για το φίλτρο είναι:

$$\text{O}_2 = (5,8 \text{ kg αμμωνία/ημέρα}) \cdot (4,18 \text{ kg O}_2/\text{kg NH}_3) \quad (9.25)$$

$$\text{O}_2 = 24,24 \text{ kg O}_2/\text{day}$$

Το οξυγόνο που είναι διαθέσιμο κατά τη διαδρομή του νερού στο φίλτρο είναι:

$$\text{OA} = (\text{ρυθμός ροής νερού}) \cdot (\text{αλλαγή συγκέντ. Οξυγόνου κατά μήκος του φίλτρου})$$

$$\text{OA} = (6849 \text{ L/min}) \cdot (10 \text{ mg/L} - 5 \text{ mg/L}) = 34,24 \text{ gO}_2/\text{min} \text{ ή } 49,3 \text{ kgO}_2/\text{ημέρα} \quad (9.26)$$

Επομένως, στο ρυθμό ροής που χρησιμοποιείται (6849 L/min) υπάρχει αφθονία του διαθέσιμου οξυγόνου στο φίλτρο, εάν το νερό εισέρχεται στο φίλτρο με 10 mg/L και

εξέρχεται με 5 mg/L, δηλαδή 49,3 kg/ημέρα διαθέσιμο O₂ υπερκαλύπτοντας τα απαιτούμενα 24,24 kg O₂/ημέρα.

9.6.2. Συζήτηση για το σχεδιασμό του βυθισμένου φίλτρου

Το παραπάνω πρόβλημα λύθηκε με δύο τρόπους. Η συγκεκριμένη ειδική επιφάνεια (SSA) που υπολογίζεται στο βήμα III και ισούται με 9667 m², είναι περίπου 16 φορές τα 584 m² που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την τεχνική των Liao και Mayo (βήμα XII). Αυτοί οι δύο τρόποι δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα και εξαιτίας αυτών περιγράφουν διαφορετικούς τύπους συστημάτων. Για παράδειγμα, η SSA που υπολογίζεται στο βήμα III, δεν περιλαμβάνει την εκτίμηση του χρόνου επανακυκλοφορίας ή κατακράτησης (του νερού στο φίλτρο). Η SSA που υπολογίζεται στο βήμα XII περιλαμβάνει το χρόνο επανακυκλοφορίας και κατακράτησης. Επιπλέον, υπάρχουν σήμερα κάποιες αβεβαιότητες, ως προς το ποιες μεταβλητές είναι σημαντικότερες στο σχεδιασμό των βιολογικών φίλτρων.

Πρέπει επίσης να επισημανθεί, ότι εάν χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία του Wortman (1990) για τον υπολογισμό στο βήμα II, που αντιτίθενται στα στοιχεία του Sreece (1973), ο ρυθμός αφαίρεσης είναι 0,87 g/m² αντί των 0,6 g/m². Η μετατροπή αυτού σε SSA, οδηγεί στην αλλαγή της απαραίτητης SSA από 9667 m² σε 6667 m², μια μείωση της τάξεως του 45 % του μεγέθους του φίλτρου. Τα στοιχεία του Wortman (1990) αναπτύχθηκαν για ένα biodrum και όχι για ένα βυθισμένο φίλτρο. Η χρησιμοποίηση των στοιχείων που εξάγονται από μελέτες διαφορετικών τύπων φίλτρων, π.χ. βυθισμένα αντί για biodrum, μπορεί να οδηγήσει σε ουσιαστικές διαφορές στον υπολογισμό της SSA.

Η παραπάνω συζήτηση δείχνει ότι οι διαθέσιμες τεχνικές σχεδιασμού είναι στην καλύτερη περίπτωση, ανακριβείς. Τα διαθέσιμα στοιχεία σχεδιασμού είναι ιδιαίτερα περιορισμένα και όσα είναι διαθέσιμα, συχνά δεν συμφωνούν. Οι καλύτερες τεχνικές και τα καλύτερα στοιχεία σχεδιασμού πρέπει να είναι απόλυτα, εάν ο βασικός σκοπός είναι να παραχθούν βιολογικά φίλτρα που πλησιάζουν τη βέλτιστη λειτουργία.

Επειδή ο σχεδιασμός βιολογικών φίλτρων δεν είναι μια καλά αναπτυγμένη επιστήμη, ο σχεδιασμός τους συχνά βασίζεται σε δοκιμές πειραματικής ή εργαστηριακής κλίμακας, στις οποίες χρησιμοποιείται ένα μικρό βιολογικό φίλτρο. Παρατηρείται ότι η μεταφορά του συστήματος από τη μικρή κλίμακα στην πραγματική, δεν έχει πάντοτε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Κατά συνέπεια, ακόμη και η χρήση πειραματικών ή εργαστηριακών συστημάτων για την ανάπτυξη των στοιχείων σχεδιασμού, έχει περιορισμούς.

9.7. ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΟ ΚΟΚΚΩΔΕΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ

Ο όρος διογκούμενο κοκκώδες βιολογικό φίλτρο (Expandable Granular Biofilter – EGB) καλύπτει μια κατηγορία φίλτρων, που καθορίζεται τόσο από τη φυσική τους διαμόρφωση όσο και από τον τρόπο λειτουργίας των. Όπως δηλώνει και το όνομα τους, αυτά τα φίλτρα περιέχουν στρώματα διήθησης που αποτελούνται από κοκκώδες υλικό και είναι διαμορφωμένα έτσι ώστε να επιτρέπεται ο καθαρισμός των στρωμάτων με τη διόγκωσή τους και την αναταραχή του νερού και των κόκκων.

Η διαμόρφωσή τους επιτρέπει την ανάπτυξη νιτροποιητικού στρώματος στην πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια που προσφέρουν, αλλά και αποτελεσματικό μηχανισμό καθαρισμού του πλεονάζοντος biofilm. Επιπλέον, τα στρώματα με το κοκκώδες υλικό,

είναι και αποτελεσματικές συσκευές κατακράτησης των αιωρούμενων στερεών. Έτσι σε πολλές περιπτώσεις, ένα EGB φίλτρο εκτελεί δύο λειτουργίες, τη σύλληψη των στερεών και τη νιτροποίηση, γεγονός που μειώνει την πολυπλοκότητα του γενικού σχεδίου επεξεργασίας του νερού της συστήματος.

Η λειτουργία της περιοδικής διόγκωσης, για τον καθαρισμό των στρωμάτων από τη μεγάλη μάζα biofilm που παράγεται με φυσικό τρόπο (πράγμα που σημαίνει ότι το φίλτρο λειτουργεί καλά), είναι απαραίτητη. Οι Manthe et al., (1988) αντιμετώπισαν αυτήν την κατάσταση, λειτουργώντας βυθισμένα φίλτρα με υλικά πλήρωσης αμμοχάλικο, βράχο και κελύφη κογχυλιών. Αυτά τα φίλτρα λειτουργούν καλά, ενόσω υπάρχει οριακή συγκέντρωση υποστρώματος (αμμωνία ή/και BOD), έτσι ώστε να μην επιτρέπεται καμία καθαρή παραγωγή biofilm. Υπό αυτούς τους όρους, το biofilm καταναλώνεται με τον ίδιο ρυθμό που παράγεται, με συνέπεια τα κενά διαστήματα ανάμεσα στους κόκκους του μέσου να παραμένουν ανοικτά, επιτρέποντας την ελεύθερη κίνηση του νερού διαμέσου όλου του στρώματος. Εντούτοις και σε γενικές γραμμές, από οικονομική άποψη υπαγορεύονται μεγάλες φορτίσεις (οργανικό φορτίο) στο φίλτρο, με αποτέλεσμα να ξεπερνιέται η δυνατότητα των φίλτρων να αποσυνθέτουν με φυσικό τρόπο το οργανικό φίλμ (biofloc). Η υψηλή μάζα του biofloc γεμίζει το κενό διάστημα στο στρώμα. Το πορώδες του στρώματος χάνεται βαθμιαία, αποτρέποντας αρχικά την ομαλή διανομή των θρεπτικών ουσιών, ιδιαίτερα το οξυγόνο και μειώνοντας τελικά την υδραυλική αγωγιμότητα σε τέτοιο σημείο, που το στρώμα γίνεται άχρηστο.

Το πρόβλημα της οργανικής επίστρωσης (biofouling) που οφείλεται στην υψηλή οργανική φόρτιση, μπορεί να απαλυνθεί με τη χρησιμοποίηση ιδιαίτερα πορώδους τεχνητού μέσου (συντελεστής κενού 90 – 95%). Εντούτοις, αυτή η στρατηγική περιορίζει τη συλληπτική ικανότητα που έχει το στρώμα ως προς τα αιωρούμενα στερεά. Εναλλακτικά, το φίλτρο EGB προσπαθεί να διατηρήσει ικανοποιητικά επαρκή σύλληψη στερεών και μεγάλη ειδική επιφάνεια, αντισταθμίζοντας το μέτριο πορώδες (30 – 40%), με τον ενδιάμεσο καθαρισμό.

9.7.1. Φίλτρο άμμου ανοδικής ροής

Το φίλτρο άμμου ανοδικής ροής (Σχήμα 9.1), αποτελεί μια καλή εκδοχή ενός φίλτρου τύπου EGB. Αυτό το φίλτρο προσφέρει την ικανότητα σύλληψης στερεών ενός φίλτρου ταχείας άμμου (rapid sand filter), ενώ συνάμα παρέχει μεγάλη ειδική επιφάνεια για τη νιτροποίηση. Αποτελούμενο από ένα στρώμα χονδροειδούς άμμου, διαμέσου του οποίου το νερό περνάει κάθετα κατά τη διάρκεια της φάσης διήθησης, το στρώμα καθαρίζεται εύκολα με υδραυλική διόγκωση (backwashing). Λειτουργώντας με ρυθμό ροής τέτοιο που μόλις να διογκώνεται το στρώμα της άμμου, το φίλτρο άμμου ανοδικής ροής δεν υποφέρει από τα προβλήματα της συσσωμάτωσης και «λασποποίησης» του υλικού, που χαρακτηρίζουν τα φίλτρα άμμου υπό πίεση όταν εκτίθενται ακόμα και σε μέτριες οργανικές φορτίσεις.

Τα στρώματα της άμμου αναπτύσσουν γρήγορα ένα κολλώδες στρώμα biofilm, εξαιτίας του οποίου, η άμμος θα «μπούκωνε» και θα έμοιαζε με τσιμέντο εάν εφαρμόζονταν μέτριες πιέσεις (35 – 70 kPa). Συνεπώς απαιτούνται μεγαλύτερες πιέσεις νερού για να λειτουργεί στο όριο της διόγκωσης.

Τα φίλτρα άμμου ανοδικής ροής είναι ιδανικά για χρήση σε κλειστά συστήματα που υπόκεινται σε μέτρια οργανικά φορτία, π.χ. σε συστήματα παραγωγής καβουριών και αστακών ή συστήματα διατήρησης γόνου ή τροπικών ψαριών, όπου απαιτείται

εξαιρετική ποιότητα νερού. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις υποστρωμάτων ($TAN < 0,3 \text{ mg/L}$, $BOD_5 < 5 \text{ mg O}_2/\text{L}$) είναι συμβατές με τη μεγάλη ειδική επιφάνεια του φίλτρου και τη σχετικά μικρή ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου.

Ο σχεδιασμός των φίλτρων άμμου ανοδικής ροής, λαμβάνει υπόψη πρώτα απ'όλα τη χαμηλή ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου του φίλτρου. Το στρώμα της άμμου είναι βυθισμένο, με συνέπεια, όλο το οξυγόνο που προορίζεται για τα βακτηρίδια να πρέπει να μεταφερθεί από το νερό που χρησιμοποιείται. Η μεταφορά οξυγόνου επομένως περιορίζεται από το μέγιστο ρυθμό ροής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να ρευστοποιηθεί το στρώμα. Το οξυγόνο που απαιτείται από το biofilter μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 9.27:

$$OCF = Q(C_i - C_0) \quad (9.27)$$

όπου:

OCF = οξυγόνο που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της διήθησης ($\text{g O}_2 \cdot \text{day}^{-1}$)

Q = ροή στο φίλτρο ($\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$)

C_i = εισρέουσα συγκέντρωση οξυγόνου στο φίλτρο ($\text{mg O}_2/\text{L}$)

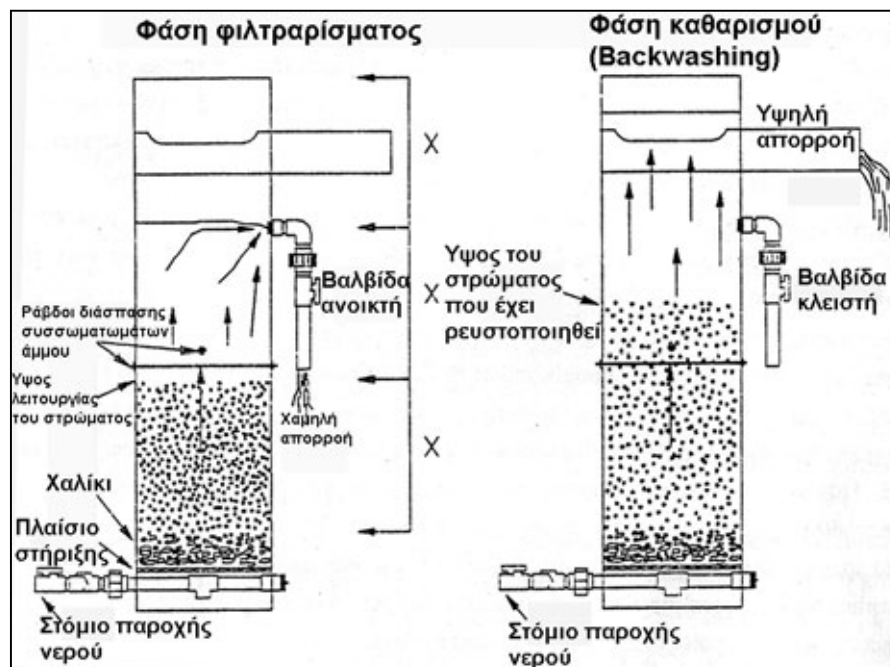
C₀ = συγκέντρωση οξυγόνου στην εκροή του φίλτρου ($\text{mg O}_2/\text{L}$)

Το ελάχιστο ποσό οξυγόνου που μπορεί να «παραδοθεί» στο φίλτρο χωρίς να εμποδίσει σοβαρά τη διαδικασία νιτροποίησης, μη επιτρέποντας στο διαλυμένο οξυγόνο να πέσει κάτω από τα $2 \text{ mg O}_2/\text{L}$, καθορίζεται από την εξίσωση 9.28:

$$OCC = Q(C_i - 2) \quad (9.28)$$

όπου:

OCC = «χωρητικότητα οξυγόνου» του φίλτρου ($\text{g O}_2 \cdot \text{day}^{-1}$)



Σχήμα 9.1. Τα φίλτρα άμμου ανοδικής ροής διογκώνονται περιοδικά για να αφαιρέσουν τις υπερβολικές συσσωρεύσεις λάσπης και biofloc

Η σχέση μεταξύ του ρυθμού παροχής τροφής και OCF, μπορεί να καθοριστεί εμπειρικά από τα λειτουργούντα φίλτρα:

$$\text{OLR} = \sum_{j=1}^n \frac{\text{OCF}_j / W_j}{n} \quad (9.29)$$

όπου:

- OLR** = ο μέσος ομαλοποιημένος ρυθμός απαίτησης οξυγόνου (g O₂ · kg⁻¹ τροφής)
W_j = η μάζα της τροφής που χορηγείται την j^η ημέρα της παρατήρησης (kg · day⁻¹)
n = ο αριθμός των παρατηρήσεων

Αυτή η διαδικασία είναι κάπως περίπλοκη, δεδομένου ότι η συχνότητα της αντιστροφής της ροής (backwashing), επηρεάζει το OLR μέσω των μειώσεων του χρόνου κατακράτησης της λάσπης. Ευτυχώς, η υψηλή απώλεια νερού που συνδέεται με τη διαδικασία καθαρισμού των στρωμάτων, περιορίζεται συνήθως σε μία ή δύο φορές την ημέρα. Οι ρυθμοί απαίτησης οξυγόνου για υδραυλικά καθαριζόμενα EGB είναι της τάξης των 350 έως 500 g O₂ · kg⁻¹ τροφής (περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, 35 %), για συχνότητες backwashing μία ή δύο φορές την ημέρα αντίστοιχα.

Στις οριακές συγκεντρώσεις οξυγόνου, το OCC και η απαίτηση οξυγόνου που δημιουργούνται από ένα δεδομένο ρυθμό παροχής τροφής, μπορούν να εξισωθούν, επιτρέποντας τον υπολογισμό της χωρητικότητας (ικανότητα επεξεργασίας) του φίλτρου ως:

$$\text{FCC} = \frac{\text{OCC}}{\text{OLR} + z \cdot s} \quad (9.30)$$

όπου:

- FCC** = χωρητικότητα του φίλτρου (kg τροφής · day⁻¹)
z = τυπική απόκλιση που αντιστοιχεί σε ένα επιλεγμένο βαθμό εμπιστοσύνης
s = τυπική απόκλιση που συνδέεται με τον εμπειρικό καθορισμό του OLR (g O₂ · kg⁻¹ τροφής)

Τιμές τυπικής απόκλισης της τάξεως του 1 ή 2 χρησιμοποιούνται συνήθως για να προσδιοριστεί το OLR. Η αντικατάσταση της εξίσωσης 9.28 στην 9.30 και οι κατάλληλες ρυθμίσεις, επιτρέπουν τον καθορισμό του ρυθμού ροής (Q) που απαιτείται για ένα συγκεκριμένο ρυθμό παροχής τροφής (W σε kg · day⁻¹):

$$Q = \frac{W (\text{OLR} + z \cdot s)}{(C_i - 2)} \quad (9.31)$$

Ο ρυθμός ροής που καθορίζεται από την εξίσωση 9.31, πρέπει να συγκριθεί με τον ελάχιστο ρυθμό ανακύκλωσης του νερού που υπολογίζεται από την εξίσωση ισορροπίας της μάζας για την αμμωνία στη δεξαμενή εκτροφής, για την αποφυγή πιθανών συγκεντρώσεων TAN λόγω ανεπαρκούς ανάμιξης. Η μεγαλύτερη των δύο ροών πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του μεγέθους του φίλτρου. Ο υπολογισμός του Q και η επιλογή του υλικού, επιτρέπουν τον προσδιορισμό της απαιτούμενης εγκάρσιας διατομής (A σε m²) για ένα μεμονωμένο φίλτρο:

$$A = Q (1,44 q \cdot m) \quad (9.32)$$

όπου:

m = ο αριθμός μεμονωμένων μονάδων διήθησης που χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπίσουν το φορτίο

q = ο υπολογιζόμενος ρυθμός ροής του νερού δια μέσου του στρώματος ($L \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$)

Ο αριθμός των απαιτούμενων μονάδων διήθησης, επιλέγεται συνήθως με την εξισορρόπηση του κόστους πολλαπλάσιων μονάδων με το κόστος μιας μεγάλης αντλίας, που θα ικανοποιήσει τη μέγιστη ζήτηση ροής ενός ενιαίου φίλτρου. Μια εφεδρική αντλία κυκλοφορίας χρησιμοποιείται μαζί με τη βασική αντλία, για να επιτύχει τη διανομή σε πολυάριθμα μικρότερα φίλτρα (3 – 4). Ο ρυθμός ροής ελέγχεται από το μέγεθος και την πυκνότητα της άμμου που χρησιμοποιείται στο στρώμα διήθησης. Παραδείγματος χάριν, χρησιμοποιώντας μια κοινή 8/16 άμμο ποταμών (διαμέτρου 1,19 έως 2,38 mm), ο μέγιστος ρυθμός ροής είναι περίπου $570 L \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$. Εάν ένα στρώμα με κανονική βιοσυσώρευση εμφανίσει δημιουργία λάσπης άμμου στο 70 % του μέγιστου ρυθμού ροής ή $400 L \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$, ο λειτουργικός ρυθμός ροής για το φίλτρο έχει καθοριστεί.

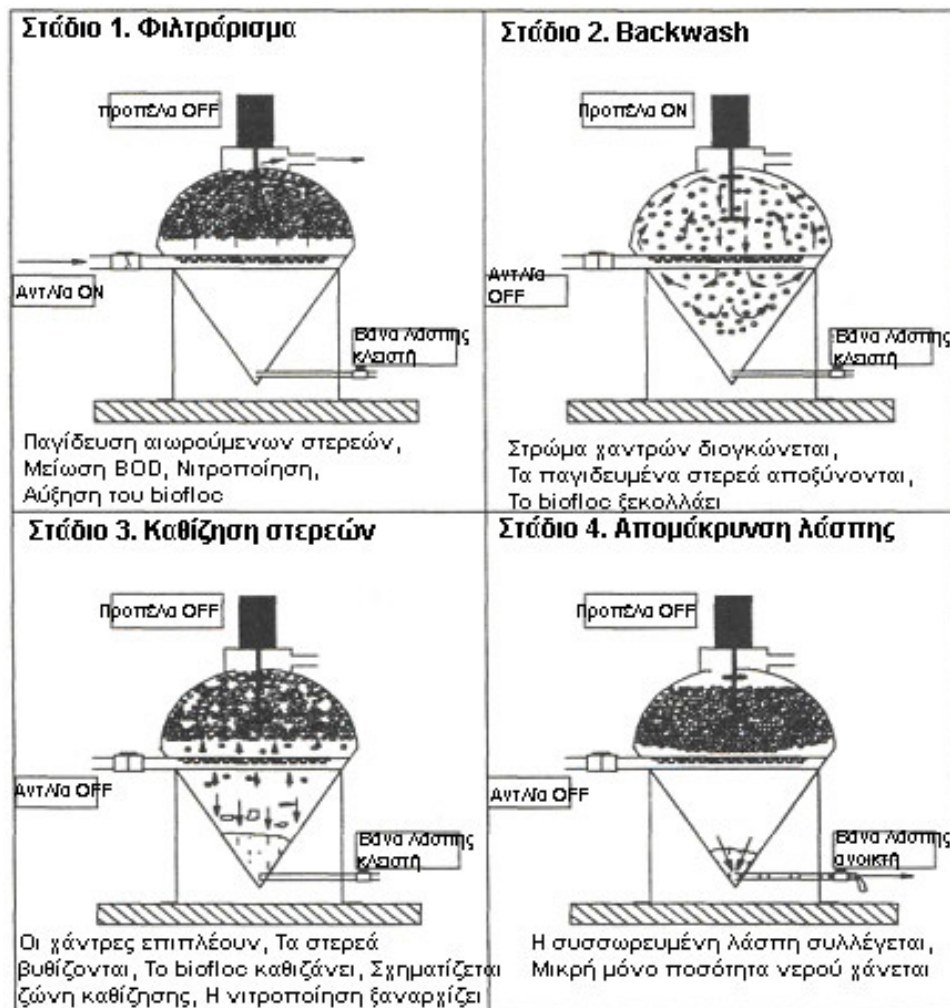
Τα βάθη των στρωμάτων συνήθως έχουν ένα εύρος της τάξης των 40 – 60 cm. Αυτό το εύρος παρέχει επαρκή περιοχή επιφάνειας για τη νιτροποίηση, με το φίλτρο να έχει συνολικό ύψος 1 έως 1,5 m.

9.7.2. Φίλτρα χαντρών

Τα φίλτρα που αποτελούνται από επιπλέοντα κοκκώδη υλικά, μπορούν να διαμορφωθούν έτσι ώστε να ανταπεξέρχονται τους δύο βασικούς περιορισμούς που δημιουργούνται στα φίλτρα άμμου ανοδικής ροής, δηλαδή τη μικρή διαθεσιμότητα οξυγόνου και τη μεγάλη απώλεια ύδατος, ενώ συνάμα θα διατηρούν την ικανότητά τους να συγκρατούν τα αιωρούμενα στερεά και να νιτροποιούν. Τα φίλτρα «χαντρών» χρησιμοποιούν πλαστικές χάντρες (πολυαιθυλενίου ή πολυπροπυλενίου) με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του νερού. Το νερό διαπερνά το στρώμα ανοδικά. Το μέγεθος των χαντρών (> 3mm) και οι μηχανισμοί καθαρισμού των, τροφοδοτούμενοι με αέρα, πίδακα νερού ή με άλλα μηχανικά μέσα, διασφαλίζουν ότι το πρόβλημα της συσσωμάτωσης των στερεών που χαρακτηρίζει τα φίλτρα άμμου ελαχιστοποιείται, επιτρέποντας τη χρήση μέτριων πιέσεων (420 – 840 kPa) και ρυθμών ροής ($410 - 1400 L \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$). Κατά συνέπεια, η ικανότητα παροχής του οξυγόνου στο στρώμα του φίλτρου αυξάνεται αισθητά. Συγχρόνως, οι μηχανισμοί καθαρισμού παρέχουν τη δυνατότητα για τη διόγκωση και τον καθαρισμό των στρωμάτων, σε έναν σχετικά μικρό όγκο νερού και με μικρή απώλεια ύδατος.

Το Σχήμα 9.2 επεξηγεί τη λειτουργική ακολουθία της φίλτρου χαντρών, με μηχανική υποβοήθηση καθαρισμού του με προπέλα («propeller-washed»). Κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της λειτουργίας του, το φίλτρο λειτουργεί με τέτοιο τρόπο (Σχήμα 9.2, Στάδιο 1), ώστε να κατακρατεί τα αιωρούμενα στερεά και να επιτελεί τη νιτροποίηση, καθώς το νερό μετακινείται προς τα πάνω διαμέσου του στρώματος και εξέρχεται διαμέσου ενός διαχωριστικού, το οποίο συγκρατεί της επιπλέουσες χάντρες. Ξεκινώντας τη λειτουργία του με ένα πορώδες περίπου 35 %, το στρώμα χάνει βαθμιαία την υδραυλική του αγωγιμότητα, καθώς τα κενά γεμίζουν με κατακρατημένα στερεά και biofloc. Η κατάσταση αυτή οδηγεί σε πτώση της ικανότητας νιτροποίησης του φίλτρου

και τελικά, σε υπερβολική αύξηση της πίεσης κάτω από το στρώμα. Η ενεργοποίηση του καθαρισμού (Σχήμα 9.2, Στάδιο 2), απαιτεί το σταμάτημα της ροής στο φίλτρο, καθώς ενεργοποιείται ο μηχανισμός καθαρισμού. Κατά τη διάρκεια των 30 – 60 sec του κύκλου καθαρισμού, οι προπέλες παρέχουν αρκετή υδραυλική ενέργεια για να διογκώσουν και να ανακατώσουν το στρώμα των χαντρών με το νερό μέσα στο φίλτρο. Μόλις επιτευχθεί η διόγκωση, η μηχανή καθαρισμού απενεργοποιείται, επιτρέποντας στις χάντρες να επιπλεύσουν και το στρώμα διήθησης επανασηματίζεται, ενώ τα απελευθερωμένα στερεά καθιζάνουν γρήγορα. Η φάση της καθίζησης (Σχήμα 9.2, Στάδιο 3), αφήνεται γενικά να διατηρηθεί για 3 – 5 λεπτά, ενώ η λάσπη συσσωρεύεται. Τέλος, ανοίγει η βαλβίδα λάσπης (Σχήμα 9.2, Στάδιο 4), που επιτρέπει την αφαίρεση 1 – 2 % του μίγματος νερού-στερεών (λάσπης), πριν από την επανέναρξη του επόμενου κύκλου διήθησης.



Σχήμα. 9.2. Λειτουργική ακολουθία για το μηχανικό-καθαρισμό σε επιπλέουσες χάντρες biofilter.

Η λειτουργία των φίλτρων χαντρών, πρέπει να εστιάζει κυρίως στην αύξηση της απόδοσης της νιτροποίησης και όχι τόσο στην κατακράτηση των αιωρούμενων στερεών.

Τα φίλτρα με χάντρες που χρησιμοποιούνται ως συσκευές κατακράτησης στερεών σε συνδυασμό με ένα βιολογικό φίλτρο, αποδείχθηκαν πολύ αποτελεσματικά στην κατακράτηση των στερεών σε ρυθμούς φόρτισης 80 kg τροφής/m³ χαντρών, (προϋποθέτοντας ότι όλη η τροφή καταναλώθηκε από τα ψάρια) και συχνό καθαρισμό (2 – 4 φορές ημερησίως) για την αποφυγή υπερβολικών απωλειών πίεσης. Όμως, η ανώτατη δυναμικότητα των φίλτρων για νιτροποίηση, κυμαίνεται σε φορτίσεις της τάξης των 24 έως 32 kg τροφής / m³ χαντρών.

Η ικανότητα νιτροποίησης, επηρεάζεται έντονα από το χρόνο διατήρησης της λάσπης (Sludge Retention Time – SRT) μέσα στο φίλτρο και την υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος των χαντρών. Κατά συνέπεια, η ένταση, η διάρκεια και το μεσοδιάστημα μεταξύ των καθαρισμών, πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα για να εξασφαλίσουν ένα SRT το πολύ 2 – 3 ημερών, ενώ συνάμα θα αποφύγουν την απώλεια πίεσης που θα δημιουργήσει προβληματική διανομή των κρίσιμων ουσιών (αμμωνία, νιτρώδη, οξυγόνο) μέσα στο στρώμα.

Αν και οι γενικεύσεις είναι δύσκολες, επειδή τα χαρακτηριστικά καθαρισμού διαφορετικών τύπων φίλτρων ποικίλλουν ευρέως, φαίνεται ότι τα μετρίως φορτισμένα φίλτρα (24 kg τροφής/m³ χαντρών), εμφανίζουν καλύτερη γενική απόδοση, με διαστήματα καθαρισμού μία φορά την ημέρα ή μία φορά κάθε δύο ημέρες.

Η εύρεση των διαστάσεων των φίλτρων χαντρών (όγκος V) βασίζεται σε ένα υποτιθέμενο ρυθμό νιτροποίησης, C_A (g TAN · m⁻² · day⁻¹) ως:

$$V = \frac{L_A}{C_A \cdot A_s} \quad (9.33)$$

όπου:

V = όγκος του στρώματος των χαντρών (m³)

L_A = προσδοκώμενο φορτίο TAN που υποβάλλεται σε επεξεργασία από το φίλτρο (g · day⁻¹)

A_s = η ειδική επιφάνεια των υλικών (m² · m⁻³)

Η ειδική επιφάνεια των χαντρών που χρησιμοποιούνται (διάμετρος 3 – 5 mm) κυμαίνεται σε 980 – 1300 m² · m⁻³. Ο ρυθμός νιτροποίησης που επιλέγεται πρέπει να λάβει υπ' όψιν το συγκεκριμένο υπόστρωμα που χρησιμοποιείται δεδομένου ότι, ο ρυθμός μετατροπής εξαρτάται από τη συγκέντρωση της TAN και από τα σχετικά φορτία BOD και αιωρούμενων στερεών (TSS). Για συστήματα διατήρησης γεννητόρων και γόνου (TAN < 0,3 mg/L), ένα C_A των 0,10 έως 0,15 g · m⁻² · day⁻¹ θεωρείται κατάλληλο, ενώ τιμές των 0,20 έως 0,25 g · m⁻² · day⁻¹ (TAN < 0,7 mg/L) είναι κατάλληλες για την εκτροφή μεγαλύτερων ψαριών. Για τα ανθεκτικά είδη (γατόψαρο, τιλápια, κυπρίνος), που μπορούν να ανεχτούν συγκεντρώσεις άνω του 1 mg/L TAN, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα C_A της τάξεως του 0,35 g · m⁻² · day⁻¹.

9.7.3. Ρευστοποιημένες κλίνες (στρώματα)

Οι ρευστοποιημένες κλίνες αποτελούνται από ένα στρώμα άμμου που διατηρείται σε μια σταθερή κατάσταση διόγκωσης ή ρευστοποίησης. Κάθε κόκκος άμμου καλύπτεται με biofilm, καθώς χρησιμοποιούνται οργανικές και άλλες θρεπτικές ουσίες από το ρέον και διαβρέχον νερό. Το όλο περιβάλλον είναι κατάλληλο για την ανάπτυξη

στο biofloc της νιτροποιητικής βακτηριδιακής χλωρίδας. Το βάρος των κόκκων της άμμου διατηρεί όλο αυτό το οργανικό σύμπλοκο «δεμένο» και λειτουργικό. Το υπερβολικό biofloc που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια των περιόδων υψηλού οργανικού φορτίου, τείνει να αποξενεται από τις συνεχείς συγκρούσεις μεταξύ των κόκκων της άμμου. Τα λεπτά biofilm και οι συνθήκες υψηλής ροής που περιβάλλουν κάθε κόκκο άμμου, ευνοούν τους υψηλούς ρυθμούς μαζικής μεταφοράς των θρεπτικών ουσιών, όπως της αμμωνίας και του οξυγόνου.

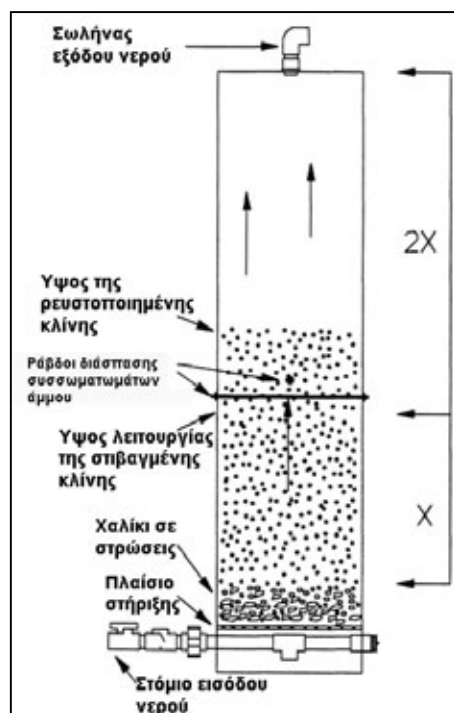
Το νερό διοχετεύεται προς τα άνω μέσω του στρώματος με κατάλληλο ρυθμό ροής, τέτοιο ώστε να υπερνικήσει το βάρος της άμμου. Το στρώμα της άμμου διογκώνεται, η ταχύτητα του νερού μειώνεται καθώς τα κενά ανάμεσα στους κόκκους της αυξάνονται, έως ότου επιτευχθεί ένα σημείο ισορροπίας μεταξύ της ανοδικής ροής του νερού και του ρυθμού βύθισης της άμμου. Θεωρητικά, σε αυτό το σημείο, κάθε κόκκος άμμου παραμένει στατικός και αιωρείται ελεύθερα στην υδάτινη στήλη. Στην πραγματικότητα όμως, το διογκωμένο ύψος του στρώματος της καθαρής άμμου παραμένει σταθερό, αλλά οι μεμονωμένοι κόκκοι της αναπηδούν αργά και στριφογυρίζουν καθώς η αναταραχή που προκαλείται από το σύστημα παροχής νερού διαχέεται σε όλο το στρώμα. Τα χαρακτηριστικά της διόγκωσης αλλάζουν καθώς αυξάνεται το biofilm, αυξάνοντας τις δυνάμεις έλξης, χωρίς αυτό να συμβάλλει σημαντικά στο βάρος των κόκκων. Κατά συνέπεια, το δημιουργούμενο ύψος του διογκωμένου στρώματος καταλήγει συχνά σε διπλάσιο ύψος από αυτό που αρχικά είχε προβλεφθεί για την καθαρή άμμο. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να είναι ιδιαίτερα οξύ για τους λεπτούς κόκκους άμμου, καθώς η διάμετρος της άμμου μπορεί να είναι μικρότερη από το πάχος του biofilm, με αποτέλεσμα να επιφέρονται δραματικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά της διόγκωσης και να οδηγούν συχνά στην παράσυρση (και την αποβολή) μέρους του στρώματος με το εκρέον νερό.

Στο Σχήμα 9.3 φαίνεται ένα απλουστευμένο σχέδιο ρευστοποιημένου στρώματος. Το φίλτρο αποτελείται από μια στήλη από fiberglass, ακρυλικό ή σωλήνα PVC, που είναι εξοπλισμένη με ένα διάτρητο δίσκο στήριξης του στρώματος στο βυθό. Τα υλικά αποτελούνται από ένα πρώτο κάτω στρώμα πάχους 8 – 15 cm από χαλίκια, το οποίο επικαλύπτεται από πάνω με ένα μέτρο στρώματος άμμου. Τα χαλίκια εμποδίζουν την προς τα κάτω μετακίνηση της άμμου διαμέσου του διάτρητου δίσκου και υποβοηθούν στην ομαλή διανομή του διοχετευομένου νερού. Το ύψος της στήλης επιλέγεται έτσι, που να επιτρέπει τη διόγκωση της άμμου κατά περίπου 200 % (τρεις φορές το αρχικό ύψος του στρώματος). Ακριβώς πάνω από το ύψος του στρώματος, τοποθετούνται συχνά διασταυρούμενοι ράβδοι για να βοηθήσουν στο σπάσιμο των συσσωματωμάτων της άμμου που πιθανόν να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια των διακοπών ροής.

Η κρισιμότερη παράμετρος κατά το σχεδιασμό ενός φίλτρου ρευστοποιημένης κλίνης, είναι η επιλογή του μεγέθους της άμμου, επιλογή που θα επηρεάσει την υδραυλική χωρητικότητα, το ρυθμό συγκομιδής του biofilm και την ειδική επιφάνεια διαθέσιμη για τη νιτροποίηση. Άμμος με κόκκους μεγάλου μεγέθους (1 – 2 mm), πρέπει να επιλέγεται για μεγάλες συγκεντρώσεις αμμωνίας ($TAN > 1 \text{ mg/L}$) και μικρού μεγέθους άμμος (0,1 – 0,2 mm), για μικρές ($TAN < 0,3 \text{ mg/L}$).

Τα στρώματα με λεπτή άμμο χαρακτηρίζονται από μεγάλες ειδικές επιφάνειες και άριστη νιτροποίηση, χαμηλούς ρυθμούς ροής, μικρή μεταφορά οξυγόνου και μικρή ικανότητα συγκομιδής biofilm. Εντούτοις, εάν το φίλτρο φορτιστεί πολύ, έτσι που να παρατηρείται μεγάλη αύξηση του biofilm, αντιμετωπίζονται σοβαρά προβλήματα

διαχείρισης του biofloc, εκτός αν στο σχέδιο έχει ενσωματωθεί και ένας μηχανισμός, που καθαρίζει και ανακυκλώνει την άμμο. Η επιλογή του μεγέθους των φίλτρων λεπτών κόκκων άμμου γίνεται καλύτερα σύμφωνα με τον ογκομετρικό OCF (βλέπε εξίσωση 9.27), που εκφράζει την οργανική φόρτιση (BOD) στο φίλτρο. Τα λεπτά ρευστοποιημένα στρώματα άμμου χρησιμοποιούνται σε ογκομετρικές φορτίσεις OCF της τάξεως των 500 έως $1000 \text{ g O}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$, για την αποφυγή προβλημάτων από υπερβολική παραγωγή biofloc. Με υδραυλικές ροές των 150 έως $400 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, μπορεί να απαιτηθεί συμπλήρωση οξυγόνου.



Σχήμα 9.3. Το ρευστοποιημένο στρώμα βρίσκεται σε συνεχή διάγνωση, επιτρέποντας την ταυτόχρονη αύξηση και αφαίρεση του biofloc.

Εναλλακτικά, τα ρευστοποιημένα στρώματα με αδρή άμμο, δημιουργούν έντονη απόξυση μεταξύ των κόκκων της και υψηλοί ρυθμοί αύξησης βακτηριδίων (που συνδέονται με υψηλές φορτίσεις σε θρεπτικό υπόστρωμα), είναι απαραίτητοι για τη διατήρηση ενός υγιούς biofilm. Τα φίλτρα αδρής άμμου είναι ανεπηρέαστα από τα περισσότερα προβλήματα biofouling. Αντ' αυτού, η απόδοσή τους περιορίζεται από τη διαθέσιμη επιφάνεια για την υποστήριξη ενός σχετικά λεπτού biofilm. Κατά συνέπεια, τα κριτήρια επιλογής του μεγέθους πρέπει να βασιστούν σε μια υποτιθέμενη ικανότητα μετατροπής φορτίων αμμωνίας (C_A), όπως περιγράφεται στις τιμές της εξίσωσης 9.33. Τιμές του C_A της τάξεως των $0,25 - 0,35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} / \text{day}$, μπορούν να επιτευχθούν ανάλογα με την επιλογή της άμμου και τις σχετικές συγκεντρώσεις των υποστρωμάτων. Ρευστοποιημένες κλίκες με αδρή άμμο, απαιτούν υψηλούς ρυθμούς ροής της τάξεως των 1800 έως $3200 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, αλλά έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν υποφέρουν συνήθως από έλλειψη οξυγόνου. Αποδίδουν καλύτερα σε συγκεντρώσεις TAN άνω του 1 mg/L . Η ακατέργαστη άμμος είναι ιδιαίτερα αποξυστική και οι στήλες πρέπει να κατασκευαστούν από υλικά ικανά να αντέξουν τις δυνάμεις τριβής.

Τα ρευστοποιημένα στρώματα που χρησιμοποιούν μεγέθη άμμου κατάλληλα επιλεγμένα για τη δεδομένη οργανική φόρτιση, δεν απαιτούν ουσιαστικά καμία συντήρηση. Το στρώμα είναι αυτοκαθαριζόμενο και η απόδοσή τους είναι σχετικά μη επηρεαζόμενη στο χρησιμοποιούμενο ποσοστό διόγκωσης. Οι ροές ρυθμίζονται συνήθως για περίπου 50 % διόγκωση, ποσοστό που δίνει το περιθώριο για περαιτέρω ρευστοποίηση-διόγκωση (με αύξηση της παροχής-πίεσης του νερού), εάν αναπτυχθεί ένα υπερβολικό (και βαρύ) φορτίο biofilm.

9.8. ΦΙΑΤΡΑ ΚΑΤΑΙΟΝΙΣΜΟΥ (TRICKLING FILTERS)

Η βασική λειτουργία των φίλτρων καταιονισμού, είναι να παρέχουν μια επιφάνεια για την ανάπτυξη της μικροβιακής χλωρίδας, την οποία το νερό που «ρέει αργά» διαβρέχει, με αποτέλεσμα την οξειδωση της αμμωνίας από τα βακτηρίδια (νιτροποίηση). Τα φίλτρα καταιονισμού απαντώνται σε πολλές διαμορφώσεις και μπορούν να περιέχουν διάφορους τύπους υλικών. Παραδοσιακά, αυτά τα φίλτρα χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των αστικών λυμάτων, χρησιμοποιώντας ως υλικό πλήρωσης πέτρες και από άποψη διαστάσεων είναι μικρά σε ύψος, μεγάλα σε διάμετρο και κυλινδρικής διαμορφωμένα. Τα φίλτρα καταιονισμού που προορίζονται για τις υδατοκαλλιέργειες, είναι κυρίως κυλινδρικά και με την επιλογή πλαστικών μέσων πλήρωσης μικρού βάρους, μπορούν να έχουν μεγάλο ύψος σχετικά με τη διάμετρό τους. Τα μέσα (υλικά) πλήρωσης μπορεί, είτε να στοιβαχτούν τυχαία μέσα στο φίλτρο είτε να τοποθετηθούν με τάξη. Τα τυχαία στοιβαγμένα μέσα έχουν συνήθως διαμόρφωση κυλίνδρων, σφαιρών ή άλλα ακανόνιστα σχήματα. Τα τοποθετημένα με τάξη μέσα μοιάζουν με το κυματοειδές fiberglass που χρησιμοποιείται στις στέγες και διατάσσονται κάθετα, οριζόντια ή υπό γωνία στη ροή του νερού μέσα στο φίλτρο.

Η στοιχειομετρική σχέση για την οξειδωση της αμμωνίας σε νιτρικά δείχνει ότι η οξειδωση 1 mg αμμωνίας παράγει 1,98 mg οξέος, 0,21 mg βακτηριδιακών κυττάρων, 4,43 mg νιτρικών, 3,73 mg νερού και 5,97 mg διοξειδίου του άνθρακα, καταναλώνοντας 4,34 mg οξυγόνου και 7,14 mg αλκαλικότητας. Αυτή η σχέση δείχνει ότι η νιτροποίηση είναι μια αυστηρά αερόβια αντίδραση και απαιτεί ένα σημαντικό ποσό οξυγόνου και αλκαλικότητας. Οι απαιτήσεις οξυγόνου μπορούν να καλυφθούν χρησιμοποιώντας ένα αποδοτικό σχέδιο φίλτρων και η αλκαλικότητα μπορεί να προστεθεί υπό μορφή διττανθρακικού νατρίου, το οποίο είναι σχετικά φθινό.

9.8.1. Πρόβλημα σχεδίου για φίλτρο καταιονισμού (trickling filter)

Θα σχεδιασθεί ένα φίλτρο καταιονισμού, για να αφαιρεθεί η αμμωνία που παράγεται από ένα σύστημα εκτροφής με 10 τόνους ιριδίζουσας πέστροφας (*Oncorhynchus mykiss*). Το σύστημα θα χρησιμοποιήσει τις ίδιες παραμέτρους σχεδίου, με εκείνες που δόθηκαν στο προηγούμενο παράδειγμα για το σχέδιο ενός βυθισμένου βιολογικού φίλτρου καθοδικής ροής.

Υποθέσεις. Οι ακόλουθες υποθέσεις γίνονται στο παράδειγμα σχεδίου για φίλτρο καταιονισμού:

1. Γίνεται 100% ανακύκλωση του νερού, με εβδομαδιαίες αλλαγές 20% του υδάτινου όγκου του συστήματος και καθημερινές προσθήκες νερού για να διατηρείται ο όγκος του συστήματος.

2. Η πέστροφα στο σύστημα, με μέσο βάρος 1 kg κάθε μια στο τέλος της περιόδου αύξησης, έχει κατά μέσο όρο μήκος 43 cm.
3. Η θερμοκρασία του συστήματος διατηρείται στους 12 °C.
4. Τα ψάρια ταΐζονται σε ποσοστό 2% του σωματικού τους βάρους σε καθημερινή βάση.
5. Η μέγιστη πυκνότητα των ψαριών στο σύστημα είναι 50 kg/m³ και ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης είναι 150.000 kg ψαριών ανά m³/s.

Στοιχεία υλικών. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο παράδειγμα βυθισμένου βιολογικού φίλτρου καθοδικής ροής, όπως περιγράφεται προηγουμένως. Τα στοιχεία, όσον αφορά τα υλικά, παρέχονται στον Πίνακα 9.4.

Απαιτήσεις ποιότητας νερού. Στον Πίνακα 9.5 αναφέρονται οι συνθήκες της ποιότητας του νερού, που είναι απαραίτητες για τη βέλτιστη αύξηση της ιριδίτσουσας πέστροφας (Piper et al., 1982).

9.8.1.1. Σχεδιαστικοί υπολογισμοί

Όγκος νερού. Με ιχθυοπυκνότητα 50 kg/m³, ο συνολικός όγκος του νερού που απαιτείται είναι:

$$\text{Volume}_{\text{Water}} = \frac{10.000 \text{ kg ψαριών}}{50 \text{ kg/m}^3} = 200 \text{ m}^3 \quad (9.34)$$

Ρυθμός ροής του νερού. Με ρυθμό φόρτισης ψαριών 150.000 kg ανά m³/s, ο απαραίτητος ρυθμός ροής του νερού (Q) είναι:

$$Q = \frac{10.000 \text{ kg ψαριών}}{150.000 \text{ kg ανά m}^3 / \text{s}} = 0,0667 \text{ m}^3/\text{s} = 5762 \text{ m}^3/\text{d} \quad (9.35)$$

Ημερήσια κατανάλωση τροφής στη μέγιστη παραγωγή. Το ποσό της τροφής που χορηγείται ανά ημέρα θα ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος των ψαριών. Στα αρχικά στάδια ζωής τους, τα ψάρια απαιτούν ποσότητα τροφής περί το 6% ή περισσότερο του σωματικού τους βάρους. Για τα ψάρια που πλησιάζουν το εμπορεύσιμο βάρος (όταν το σύστημα θα έχει τη μέγιστη φόρτιση αμμωνίας), τα ποσοστά κυμαίνονται από 0,75% έως 3,0% του σωματικού τους βάρους ανά ημέρα. Η μέγιστη συνολική μάζα της τροφής που θα χορηγηθεί στο σύστημα, θα είναι κατά την περίοδο που τα ψάρια θα έχουν φτάσει σε εμπορεύσιμο βάρος, όπου και θα έχουμε τη μέγιστη μάζα ψαριών στο σύστημα. Για αυτό το παράδειγμα υποτίθεται ένα ποσοστό σίτισης 2% του σωματικού τους βάρους. Κατά συνέπεια, για την παραγωγή 10.000 kg ψαριών:

$$\text{Μάζα}_{\text{τροφής}} = (10.000 \text{ kg ψαριών}) \cdot (0,02 \text{ kg τροφής/kg ψαριών}) = 200 \text{ kg} \quad (9.36)$$

Παραγωγή αποβλήτων και κατανάλωση οξυγόνου. Ο Colt (1986), πρότεινε μια προσέγγιση ισορροπίας της μάζας για τις απαιτήσεις οξυγόνου και την παραγωγή αποβλήτων. Αυτή η προσέγγιση καθορίζει τις απαιτήσεις οξυγόνου ενός συστήματος

ψαριών (συμπεριλαμβανομένου του βιολογικού φιλτραρίσματος), βασισμένου στη μάζα της τροφής που χορηγείται ημερησίως όπως παρακάτω:

1 kg τροφής απαιτεί:	0,21 kg οξυγόνο
1 kg τροφής παράγει:	0,28 kg διοξείδιο του άνθρακα και
	0,30 kg στερεά και
	0,03 kg ολική αμμωνία (TAN)

Πίνακας 9.4. Χαρακτηριστικά των υλικών πλήρωσης για το παράδειγμα φίλτρου καταιονισμού.

Παράμετρος	Τιμή
Τύπος	πλαστικοί δακτύλιοι
Διάμετρος	2,5 cm
Αναλογία κενού	0,92
Ειδική επιφάνεια υλικών (μέσων πλήρωσης)	220 m ² /m ³

Πίνακας 9.5. Παράμετροι ποιότητας νερού που χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη ανάπτυξη της ιριδίζουσας πέστροφας.

Παράμετροι	Όρια – Εύρη
Διαλυμένο οξυγόνο	> 5,0 mg/L
pH	6,5 – 8,0
Αλκαλικότητα (ως CaCO ₃)	10 – 400 mg/L
Θερμοκρασία (βέλτιστο εύρος)	10 °C – 15,6 °C
Μη ιονισμένη αμμωνία (ως NH ₃ -N)	0,0103 mg/L
Νιτρώδη (ως NO ₂ -N)	0,03 mg/L
Διοξείδιο του άνθρακα	< 10 mg/L
Αζωτο (αέριο)	< 110% συνολικός κορεσμός αερίου
Θολερότητα	< 80 mg/L

Απαιτήσεις σε οξυγόνο. Με 200 kg τροφής που χορηγούνται ημερησίως, υποθέτοντας ότι 0,25 kg οξυγόνου (0,21 kg οξυγόνου ανά kg τροφής συν ένα πρόσθετο 20% ως περιθώριο ασφάλειας) απαιτούνται από τα ψάρια του συστήματος για την αναπνοή τους, από τα νιτροποιητικά βακτηρίδια επίσης για αναπνοή και από την ανθρακούχο βιοχημική απαίτηση σε οξυγόνο (αερόβια αποσύνθεση οργανικών ενώσεων). Οι συνολικές απαιτήσεις σε οξυγόνο λοιπόν θα είναι:

$$\text{Οξυγόνο (oxygen)} = \left[\frac{0.25 \text{ kg O}_2}{\text{kg τροφή}} \right] \cdot 200 \frac{\text{kg τροφή}}{\text{ημέρα}} = 50 \frac{\text{kg O}_2}{\text{ημέρα}} \quad (9.37)$$

Οι συνήθεις αποδοτικότητες μεταφοράς οξυγόνου κυμαίνονται από 5% μέχρι και άνω του 90%. Η αποδοτικότητα μεταφοράς, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της συνολικής απαίτησης σε οξυγόνο του συστήματος. Για τους σκοπούς αυτού του παραδείγματος, θα πρέπει να φροντίσουμε για την εγκατάσταση ενός συστήματος που θα παρέχει τουλάχιστον 50 kg οξυγόνο ημερησίως.

Παραγωγή αμμωνίας. Η αμμωνία εμφανίζεται σε δύο μορφές μέσα στα υδάτινα συστήματα, την αμμωνία (που παρουσιάζεται συχνά ως NH_3 , $\text{NH}_3 - \text{N}$ ή μη ιονισμένη αμμωνία) και το αμμώνιο (που παρουσιάζεται συχνά ως NH_4^+ , $\text{NH}_4 - \text{N}$ ή ιονισμένη αμμωνία). Η αμμωνία και το αμμώνιο υπάρχουν σε χημική ισορροπία στο νερό. Η μη ιονισμένη αμμωνία είναι ιδιαίτερα τοξική στα υδρόβια ζώα και πρέπει να αφαιρεθεί από το σύστημα. Το pH του συστήματος καθορίζει τις σχετικές συγκεντρώσεις της ιονισμένης και μη ιονισμένης αμμωνίας σε ένα υδάτινο σύστημα. Σε χαμηλές τιμές pH, η ιονισμένη αμμωνία υπερισχύει και σε υψηλό pH υπερισχύει η μη-ιονισμένη αμμωνία. Η ολική αμμωνία άζωτο (TAN), αποτελεί τη μέτρηση της συνολικής συγκέντρωσης της μη ιονισμένης και της ιονισμένης αμμωνίας.

Η TAN που παράγεται στο σύστημα του παραδείγματος είναι:

$$\text{TAN} = \left[\frac{200 \text{ kg τροφή}}{\text{ημέρα}} \right] \cdot \left[\frac{0.03 \text{ kg TAN}}{\text{kg τροφή}} \right] = 6 \frac{\text{kg TAN}}{\text{ημέρα}} \quad (9.38)$$

Κατά συνέπεια, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός συστήματος βιολογικού φίλτρου προκειμένου να αφαιρέσει 6 kg TAN ημερησίως, ώστε να κρατηθούν τα ψάρια υγιή.

Η παραγωγή αμμωνίας δεν είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η παραγωγή αμμωνίας από τα ψάρια σε ένα κλειστό σύστημα παρουσιάζει διακυμάνσεις, με κορυφώσεις που εμφανίζονται αρκετές ώρες μετά από το τάϊσμα. Διάφοροι ερευνητές, Paulson, (1978), Brett και Zala, (1975), Poxton & Allouse, (1987), Gunther, Brune & Gall, (1981), έχουν μελετήσει την ημερήσια παραγωγή αμμωνίας σε ταϊσμένα και σε μη ταϊσμένα ψάρια και έχουν αναπτύξει πρότυπα και σχέσεις για να περιγράψουν την παραγωγή αμμωνίας κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 24 ωρών, βασισμένη σε διάφορα πρωτόκολλα σίτισης. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ένα μέσο ωριαίο φορτίο αμμωνίας, βασισμένο σε έναν ημερήσιο ρυθμό φόρτισης αμμωνίας, είναι επαρκές για να καθορίσει πιθανές συγκεντρώσεις της που μπορεί να είναι θανατηφόρες σε ένα κλειστό σύστημα.

Η συγκέντρωση της ολικής αμμωνίας (TAN) σε αυτό το παράδειγμα, είναι το ωριαίο φορτίο που διαιρείται με τον όγκο του κλειστού συστήματος και μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$[\text{TAN}] = \frac{\left[\frac{6 \text{ kg TAN} \cdot 1000 \text{ g}}{\text{ημέρα} \cdot \text{kg}} \right]}{\left[24 \frac{\text{h}}{\text{ημέρα}} \cdot 200 \text{ m}^3 \right]} = \frac{1,25 \text{ g}}{\text{m}^3} \text{ ή } \frac{\text{mg}}{\text{L}} \quad (9.39)$$

Δεδομένου ότι η αμμωνία είναι τοξική υπό τη μορφή της μη ιονισμένης ένωσης (NH_3) και η σχετική συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας εξαρτάται από το pH και τη θερμοκρασία, το μη ιονισμένο μέρος της TAN πρέπει να υπολογιστεί για διάφορες τιμές του pH. Η θερμοκρασία στο σύστημα υποτίθεται ότι παραμένει σταθερή στους 12

°C. Στον Πίνακα 9.6 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις της ιονισμένης και μη ιονισμένης αμμωνίας για διάφορα επίπεδα pH στους 12 °C.

Με βάση τις απαιτήσεις της πέστροφας, εάν το σύστημα λειτουργεί σε επίπεδα pH κάτω από 7,5, η μη ιονισμένη αμμωνία δεν πρέπει να υπερβεί το όριο των 0,0103 mg/L NH₃ – N. Σε pH ίσο με 8,0, η συγκέντρωση της NH₃ – N στο κλειστό σύστημα πρέπει να μειωθεί ακόμα πιο πολύ κάτω από το όριο των 0,0103 mg/L, μετά από ένα πέρασμα του νερού από το βιολογικό φίλτρο.

Πίνακας 9.6. Συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας στους 12 °C και σε αυξανόμενες τιμές του pH.

pH	Συγκέντρωση ιονισμένης αμμωνίας (g/m ³)	Συγκέντρωση μη ιονισμένης αμμωνίας (g/m ³)
6,0	1,2497	0,0003
6,5	1,2491	0,0009
7,0	1,2473	0,0027
7,5	1,2414	0,0086
8,0	1,2234	0,0266

Σχεδιασμός του φίλτρου. Οι φυσικές απαιτήσεις για το σχεδιασμό του φίλτρου καταιονισμού, μπορεί συχνά να απαιτήσουν μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία ελέγχου και βασίζονται στις απαιτήσεις ποιότητας του νερού και στα επίπεδα παραγωγής ψαριών.

Ρυθμός αφαίρεσης αμμωνίας. Σε θερμοκρασία 12 °C και με συγκέντρωση TAN περίπου 1,2 mg/L (εξίσωση 9.39), ο ρυθμός αφαίρεσης αμμωνίας υπολογίζεται (εκτίμηση) να είναι 0,75 g TAN/m² επιφάνειας μέσω /ημέρα.

Επιφάνεια του φίλτρου. Η συνολική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης του φίλτρου καταιονισμού, που απαιτείται για να αφαιρέσει την αμμωνία που παράγεται στο κλειστό σύστημα είναι:

$$\text{Επιφάνεια φίλτρου} = \frac{600 \text{ g TAN}}{0,75 \frac{\text{TAN}}{\text{m}^2 \cdot \text{ημέρα}}} = 8000 \text{ m}^2 \quad (9.40)$$

Όγκος του φίλτρου. Ο όγκος των υλικών πλήρωσης του φίλτρου που απαιτούνται, είναι μια συνάρτηση της επιφάνειας που απαιτείται και της ειδικής επιφάνειας των υλικών:

$$\text{Όγκος μέσων} = \frac{8000 \text{ m}^2}{220 \text{ m}^2 / \text{m}^3} = 36,4 \text{ m}^3 \quad (9.41)$$

Διαστάσεις του φίλτρου. Ο προσδιορισμός των διαστάσεων και του αριθμού των φίλτρων που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα, βασίζεται στις απαιτήσεις χώρου και τους περιορισμούς σε μια μονάδα φίλτρων. Δεδομένου ότι τα κλειστά συστήματα ιχθυοκαλλιέργειας είναι συχνά κατά τα αρχικά στάδια λειτουργίας των ελλειμματικά σε αμμωνία, η μαζική μεταφορά της αμμωνίας είναι ένας κρίσιμος παράγοντας της

απόδοσης των φίλτρων. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ροής του νερού διαμέσου ενός φίλτρου, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός αφαίρεσης της αμμωνίας.

Η ελάχιστη υδραυλική φόρτιση (ροή/διατομή επιφάνειας φίλτρου/ημέρα) σε ένα φίλτρο, διασφαλίζει ότι όλα τα υλικά στο φίλτρο διαβρέχονται συνεχώς, αποτρέποντας κατά συνέπεια τα βακτηρίδια από το να «στεγνώσουν». Ο μέγιστος υδραυλικός ρυθμός φόρτισης από την άλλη μεριά, είναι τέτοιος που δεν προκαλεί την απομάκρυνση (απόξυση) των βακτηριδίων από τα υλικά σε ένα φίλτρο. Για τα τυχαία τοποθετημένα υλικά σε ένα φίλτρο, μια ελάχιστη $30 \text{ m}^3/\text{m}^2 / \text{d}$ και μια μέγιστη υδραυλική φόρτιση $225 \text{ m}^3/\text{m}^2 / \text{d}$, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως όρια. Ο σχεδιασμός των φίλτρων απαιτεί ισορροπία μεταξύ του αριθμού των μονάδων των φίλτρων, της διαμέτρου και του ύψους κάθε μεμονωμένου φίλτρου και του συνολικού ρυθμού ροής του νερού διαμέσου του συστήματος.

Χρησιμοποιώντας μια διαμόρφωση για να φιλτράρει τη συνολική ροή του συστήματος, υποθέτουμε 8 φίλτρα και επομένως, ο ρυθμός ροής ανά φίλτρο είναι:

$$\text{Ρυθμός ροής φίλτρου} = \frac{5762 \frac{\text{m}^3}{\text{ημέρα}}}{8 \text{ φίλτρα}} = 720,3 \frac{\text{m}^3}{\text{ημέρα}} \quad (9.42)$$

Ο όγκος που απαιτείται για κάθε μονάδα φίλτρων είναι:

$$\text{Ογκος μονάδας} = \frac{36,4 \text{ m}^3}{8 \text{ φίλτρα}} = 4,55 \frac{\text{m}^3}{\text{φίλτρο}} \quad (9.43)$$

Οι διαστάσεις της κάθε μονάδας φίλτρου μπορούν να υπολογιστούν από το μέγιστο υδραυλικό ρυθμό φόρτισης. Για τον καθορισμό της εγκάρσιας επιφάνειας:

$$\text{Επιφάνεια}_{\text{διατομής}} \geq \frac{720,3 \text{ m}^3 / \text{d}}{225 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{ημέρα}}, \text{ συνεπώς:} \quad (9.44)$$

$$\text{Επιφάνεια}_{\text{διατομής}} \geq 3,2 \text{ m}^2$$

Εάν υποθέσουμε μια κυλινδρική μορφή φίλτρου, η διάμετρος του κυλίνδρου για κάθε μονάδα φίλτρου θα πρέπει να είναι:

$$\text{Διάμετρος}^2 \geq \left(\frac{4 \cdot \text{Επιφάνεια}_{\text{διατομής}}}{\pi} \right) \quad (9.45)$$

$$\text{Διάμετρος}^2 \geq \left(\frac{4 \cdot 3,2 \text{ m}^2}{\pi} \right), \text{ συνεπώς:} \quad \text{Διάμετρος} \geq 2,02 \text{ m}$$

Κατά συνέπεια, εάν η διάμετρος είναι 2,02 m, το ύψος ενός φίλτρου υπολογίζεται ότι είναι:

$$\text{Υψος} = \frac{\text{Ογκος μονάδας}}{\text{Επιφάνεια}_{\text{διατομής}}}, \text{ δηλαδή:} \quad \text{Υψος} = 4 \cdot \left(\frac{4,55 \text{ m}^3}{\pi(2,02 \text{ m})^2} \right) = 1,42 \text{ m} \quad (9.46)$$

Κατά συνέπεια, οι διαστάσεις του κάθε φίλτρου θα είναι:

Υψος	= 1,42m
Διάμετρος	= 2,02 m
Όγκος	= 4,56 m ³
Επιφάνεια διατομής	= 3,2 m ²
Αριθμός μονάδων φίλτρων	= 8

Εάν οι διαστάσεις των φίλτρων δεν είναι κατάλληλες για τις φυσικές διαστάσεις του κλειστού συστήματος, οι ανωτέρω υπολογισμοί μπορούν να επαναληφθούν με νέες τιμές για να προσαρμοστούν στη συγκεκριμένη περίπτωση.

9.8.2. Συζήτηση για τα φίλτρα καταιονισμού

Τα βιολογικά φίλτρα έχουν ως υλικά πλήρωσης τυχαία ριγμένα μέσα τους πλαστικά υλικά. Επιλέγεται αυτός ο τύπος υλικών επειδή παρέχει μεγάλη περιοχή ειδικής επιφάνειας με σχετικά μικρό οικονομικό κόστος. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά, αλλά θα πρέπει να δοθεί προσοχή στην επιφάνεια που θα είναι διαθέσιμη για την πλήρη αφαίρεση της αμμωνίας από το σύστημα. Το υλικό πλήρωσης που θα παρέχει μικρότερη περιοχή επιφάνειας ανά μονάδα όγκου, θα απαιτήσει και μεγαλύτερες μονάδες φίλτρων, κατά συνέπεια μεγαλύτερο χώρο.

Τα biofilter θα χρησιμοποιηθούν για να αφαιρέσουν την αμμωνία, τα νιτρώδη, μερικές οργανικές ενώσεις και το CO₂ από το νερό. Τα νιτρώδη είναι ένα ενδιάμεσο βήμα στην οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά. Τα νιτρώδη είναι τοξικά για τα ψαριά ακόμα και σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, αλλά αφαιρούνται από τα φίλτρα καταιονισμού κατά τρόπο παρόμοιο με την αμμωνία. Τα φίλτρα καταιονισμού από το σχεδιασμό τους, επιτρέπουν τη βέλτιστη ανταλλαγή αερίων μέσα στο φίλτρο. Το οξυγόνο μεταφέρεται εύκολα στο νερό και το CO₂ αφαιρείται εύκολα από το νερό. Μερικές οργανικές ενώσεις τείνουν να συσσωρευτούν στο νερό με την επαναχρησιμοποίηση του και μερικές από αυτές θα χρησιμοποιηθούν από τα βακτηρίδια των biofilter (συνεπώς θα μειωθεί η συγκέντρωσή τους).

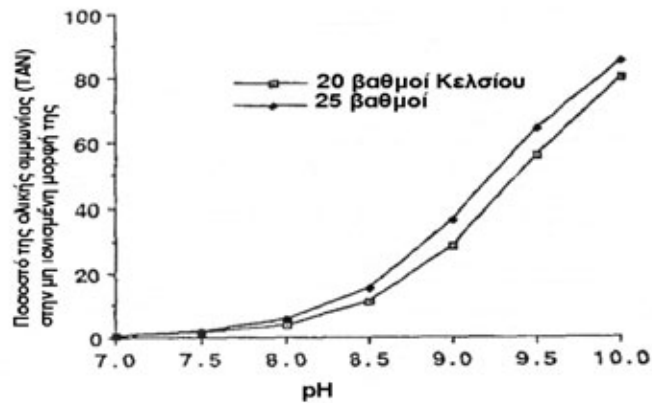
10. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙ ΑΜΜΩΝΙΑΣ ΣΕ ΝΕΡΑ ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ**10.1. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ**

Στο νερό ο όρος «αμμωνία» αντιστοιχεί σε δύο μορφές της, την του ιόντος αμμωνίου (NH_4^+) και τη μη ιονισμένη αμμωνία (NH_3). Επειδή η ονοματολογία επί της αμμωνίας έχει πολλές φορές δημιουργήσει προβλήματα για το τι ακριβώς εννοείται με τον όρο αμμωνία, έχει καθιερωθεί την τελευταία δεκαετία ο όρος TAN (Total Ammonia Nitrogen) ο οποίος αντιστοιχεί στο σύνολο των παραπάνω μορφών στο νερό, ενώ με τους όρους αμμώνιο και μη ιονισμένη αμμωνία, εννοούνται η καθεμιά από τις παραπάνω μορφές και μόνο. Οι δύο αυτές μορφές αμμωνίας συνυπάρχουν σε ισορροπία στο νερό. Το ποσοστό της κάθε μορφής εξαρτάται πρωτίστως από το pH και δευτερευόντως από τη θερμοκρασία του νερού (Emerson et al., 1975). Το pH επηρεάζει με δραματικό τρόπο την ισορροπία αυτή (Σχήμα 10.1). Η αύξησή του έστω και κατά λίγο, γέρνει την «πλάστιγγα» υπέρ του ποσοστού της μη ιονισμένης αμμωνίας κατά πολύ. Για παράδειγμα: Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι με αυστηρά κριτήρια η απόλυτα ασφαλής τιμή για τα ψάρια της μη ιονισμένης αμμωνίας είναι 0,01 mg/L, τότε στους 20 °C και σε περιβάλλον pH με τιμές 6, 7 και 8 η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της ολικής αμμωνίας (TAN) είναι 25,2, 2,53 και 0,26 mg/L αντίστοιχα (περίπου υποδεκαπλασιάζεται ανά μονάδα pH). Η επίδραση της θερμοκρασίας συγκριτικά με του pH, είναι πολύ μικρότερη. Σε pH 6 και 8, η αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ 18 και 24 °C θα μειώσει την συγκέντρωση της επιτρεπόμενης ολικής αμμωνίας από 29,2 σε 18,9 και από 0,3 σε 0,2 mg/L αντίστοιχα (Πίνακας 10.1).

Πίνακας 10.1. Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές ολικής αμμωνίας (TAN) σε mg/L.

pH	Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές ολικής αμμωνίας (TAN) σε mg/L										
	Θερμοκρασία (°C)										
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
6.0	73.5	62.9	53.8	45.9	39.4	33.9	29.2	25.2	21.8	18.9	16.6
6.2	46.5	39.7	33.9	29.0	24.9	21.4	18.4	15.9	13.8	11.9	10.3
6.4	29.4	25.0	21.4	18.3	15.7	13.5	11.6	10.0	8.70	7.52	6.54
6.6	18.6	15.8	13.5	11.5	9.90	8.55	7.35	6.33	5.46	4.74	4.13
6.8	11.7	10.0	8.55	7.30	6.25	5.38	4.63	4.00	3.46	3.00	2.60
7.0	7.4	6.29	5.38	4.61	3.95	3.40	2.92	2.53	2.19	1.90	1.65
7.2	4.7	3.97	3.40	2.91	2.49	2.15	1.85	1.60	1.38	1.20	1.04
7.4	2.9	2.51	2.15	1.84	1.58	1.36	1.17	1.01	0.88	0.76	0.66
7.6	1.86	1.59	1.36	1.16	1.00	0.86	0.74	0.64	0.56	0.48	0.42
7.8	1.18	1.01	0.86	0.74	0.63	0.55	0.47	0.41	0.35	0.31	0.27
8.0	0.75	0.64	0.55	0.47	0.40	0.35	0.30	0.26	0.23	0.20	0.17
8.2	0.48	0.41	0.35	0.30	0.26	0.22	0.19	0.17	0.15	0.13	0.11
8.4	0.30	0.26	0.22	0.19	0.17	0.14	0.13	0.11	0.097	0.085	0.075
8.6	0.20	0.17	0.14	0.13	0.11	0.095	0.083	0.073	0.065	0.057	0.051
8.8	0.13	0.11	0.095	0.083	0.072	0.064	0.056	0.050	0.044	0.040	0.036
9.0	0.084	0.073	0.064	0.056	0.050	0.044	0.039	0.035	0.032	0.029	0.026
9.2	0.056	0.050	0.044	0.039	0.035	0.031	0.028	0.026	0.024	0.022	0.020
9.4	0.039	0.035	0.031	0.028	0.026	0.023	0.022	0.020	0.019	0.018	0.017
9.6	0.028	0.026	0.023	0.022	0.020	0.019	0.017	0.016	0.015	0.015	0.014
9.8	0.022	0.020	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013
10.0	0.017	0.016	0.015	0.015	0.014	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012

Η αμμωνία και τα νιτρώδη - η δράση τους στα ψάρια



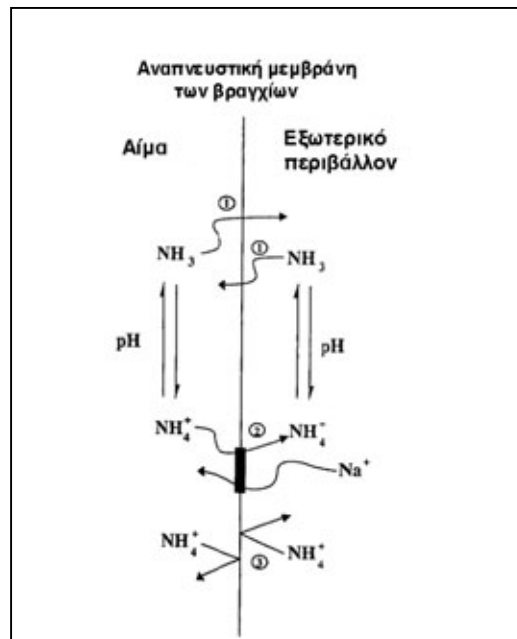
Σχήμα 10.1. Ποσοστό της ολικής αμμωνίας (TAN) που βρίσκεται στη μη ιονισμένη μορφή της (NH_3), συναρτήσει του pH και της θερμοκρασίας (χαρακτηριστικά απεικονίζονται δύο θερμοκρασίες 20 και 25 °C). Το σχήμα ελαφρά τροποποιημένο από Tomasso (1994).

Η τοξικότητα της αμμωνίας εξαρτάται από την ισορροπία του ιονισμού της και η κατανόηση των εμπλεκόμενων μηχανισμών είναι καθοριστικής σημασίας για την κατανόηση της τοξικότητας. Η μη ιονισμένη αμμωνιακή μορφή (NH_3) διαπερνά ανεμπόδιστα τις κυτταρικές μεμβράνες σε αντίθεση με το αμμώνιο (NH_4^+). Στους υδρόβιους οργανισμούς, η ανταλλαγή μορίων αμμωνίας στα κύτταρα είτε με διάχυση είτε με ενεργό μεταφορά, κατά μέγιστο ποσοστό γίνεται στα βράγχια (Σχήμα 10.2). Αν η συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας στο περιβάλλον νερό είναι μικρότερη της ενδοκυτταρικής, τότε αυτή διαχέεται προς τα έξω (και το ζώο απαλλάσσεται από αυτή). Αν συμβαίνει το αντίθετο, τότε διαχέεται (και εισέρχεται) στα κύτταρα (Evans & Cameron, 1986; Randall & Wright, 1987; Wise et al., 1989; Weirich et al., 1993; Chen & Kou, 1993). Η κατάσταση αυτή δεν είναι τόσο απλή όσο φαίνεται, καθώς όπως συμβαίνει συνήθως, το pH διαφέρει μεταξύ του περιβάλλοντος νερού και του αίματος των ψαριών ή της αιμολύμφης των ασπόνδυλων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται και περιπτώσεις όπου η TAN να βρίσκεται σε διαφορετικές συγκεντρώσεις στο εσωτερικό και στο εξωτερικό των κυττάρων, αλλά η μη ιονισμένη μορφή να βρίσκεται σε ίσες συγκεντρώσεις (με αποτέλεσμα όχι μόνο να μην μπορεί να βγει από τα βραγχιακά κύτταρα, αλλά η ενδοκυτταρική συγκέντρωσή της να αντιπροσωπεύει την επιπρόσθετη φόρτισή της από τα έξω). Το pH είναι ο καθοριστικός παράγοντας στη διαδικασία και μάλιστα παράγοντας δύσκολο να «παραμετροποιηθεί», καθώς το pH στην άμεση γειτνίαση των βραγχιών μπορεί να διαφέρει κατά πολύ από τον υπόλοιπο χώρο, λόγω της αλλαγής του από την αποβολή διοξειδίου του άνθρακα αλλά και αμμωνίας από τα βραγχιακά κύτταρα (Randal, 1991). Η κατάσταση περιπλέκεται περισσότερο με την ταυτοποίηση ενός μηχανισμού ενεργούς μεταφοράς στα βραγχιακά κύτταρα που αποβάλλει αμμώνιο (Evans, 1975; Evans & Cameron, 1986). Στις παλαιότερες εργασίες το σύστημα αυτό εθεωρείτο ο κύριος μηχανισμός για την αποβολή της αμμωνίας. Σήμερα όμως, οι σύγχρονες έρευνες δέχονται τον παθητικό μηχανισμό της διάχυσης της μη ιονισμένης αμμωνίας ως τον κύριο μηχανισμό, με το μηχανισμό της ενεργούς μεταφοράς να εντείνεται σε έντονα αλκαλικά περιβάλλοντα (Cameron & Heisler, 1983; Wright & Wood, 1985; Evans & Cameron, 1986; Evans & More, 1988; Avella & Bornancin, 1989; Evans et al., 1989). Συνοψίζοντας τα παραπάνω καταλήγουμε στο εξής:

Τα υδρόβια ζώα παράγουν συνεχώς αμμωνία ως καταβολικό προϊόν των πρωτεϊνών τους. Αν το περιβάλλον νερό έχει φορτιστεί πολύ με αμμωνία, τότε η κατάσταση αυτή γίνεται τοξική και απειλεί την υγεία των ζώων. Επιπρόσθετα, δυσκολεύει σημαντικά η αποβολή της ενδοκυτταρικά συσσωρευμένης αμμωνίας, επειδή η διαβάθμιση της συγκέντρωσής της στο όλο ενδο- και εξωκυτταρικό περιβάλλον, καθίσταται δυσμενής για την αποβολή της.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τοξικότητας της αμμωνίας που επηρεάζεται από το pH είναι το παρακάτω: Στο αμερικάνικο γατόψαρο (*Ictalurus punctatus*) και για τα νεαρά του άτομα, το LC50-24ώρες σε pH 9 ήταν 4,5 mg/L TAN. Σε ίδιες κατά τα άλλα συνθήκες αλλά σε pH 7, το LC50 ήταν 264 mg/L TAN (Tomasso et al., 1980).

Η κατάσταση όμως περιπλέκεται αν λάβουμε υπ' όψιν μας τα αποτελέσματα της επίδρασης του pH (Thurston et al., 1981) στην ιριδίζουσα πέστροφα (*Oncorhynchus mykiss*) και στο κυπρινοειδές *Pimephales promelas*. Το LC50-96 ώρες για αυτά μειώθηκε με την αύξηση του pH ως αναμενόταν, αλλά η μείωση αυτή δεν συμβάδιζε με την αύξηση στο ποσοστό της συγκέντρωσης της μη ιονισμένης αμμωνίας. Περαιτέρω, το LC50-96 ώρες για τη μη ιονισμένη αμμωνία και για τα δύο είδη, μειώθηκε στις χαμηλότερες τιμές του pH κάτι που είναι μη αναμενόμενο. Η εξήγηση που δόθηκε είναι ότι, στο χαμηλότερο pH υπάρχει περισσότερο αμμώνιο συγκριτικά με υψηλότερα pH και υποτέθηκε ότι και το αμμώνιο μπορεί να είναι τοξικό με κάποιο τρόπο όταν βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις.



Σχήμα 10.2. Διαγραμματική απεικόνιση του παραδεκτού σήμερα μηχανισμού της κίνησης της αμμωνίας κατά μήκος της κυτταρικής βραγχιακής μεμβράνης. Η μεμβράνη απεικονίζεται εδώ ως ένα απλό στρώμα, παρόλο που αποτελείται από την εσωτερική (serosal) και εξωτερική (mucosal) κυτταρική μεμβράνη των βραγχιακών επιθηλιακών κυττάρων. Η μη ιονισμένη αμμωνία διαχέεται ελεύθερα κατά την κατεύθυνση της χαμηλότερης συγκέντρωσης (1). Η κλιμάκωση της συγκέντρωσής της καθορίζεται από το συνδυασμό της συγκέντρωσης της ολικής αμμωνίας (TAN) και του pH σε κάθε πλευρά της μεμβράνης. Το αμμώνιο μπορεί να μεταφερθεί προς τα έξω με ένα μηχανισμό ενεργούς μεταφοράς σε ανταλλαγή για ίση ποσότητα ομοιοσθενών ιόντων νατρίου (2). Το αμμώνιο δεν μπορεί να διαπεράσει την κυτταρική μεμβράνη (3). Το σχήμα ελαφρά τροποποιημένο από Tomasso (1994).

10.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΣ

Από τις μέχρι τώρα μελέτες έχουν βρεθεί το τι βλάβες επιφέρει η αμμωνία στους υδρόβιους οργανισμούς, όμως ο κύριος μηχανισμός της τοξικότητάς της δεν έχει κατανοηθεί πλήρως (Tomasso et al., 1980). Ως βλάβες οφειλόμενες στην τοξική δράση της αμμωνίας έχουν αναγνωρισθεί οι παρακάτω:

- Ζημιά στα βράγχια (Smart, 1976)
- Μείωση του pH του αίματος οφειλόμενη στη συσσώρευση όξινων μεταβολιτών που προκύπτουν από την καταστολή στον κύκλο του κιτρικού οξέως (Sousa & Meade, 1977)
- Ανισορροπία στα ισοζύγια του νερού και των μεταλλικών στοιχείων (Lloyd & Orr, 1969; Tomasso et al., 1980)
- Επίδραση στα επίπεδα της τρανσαμινάσης του αίματος (στον κυπρίνο *Cyprinus carpio*; Jeney et al., 1992)
- Επίδραση στον καρδιακό ρυθμό (στο σαλμονιδές *Salvelinus fontinalis*; Bubien & Meade, 1986)
- Επίδραση στη δραστηριότητα της ρενίνης (στην ιριδίζουσα πέστροφα; Arillo et al., 1981)
- Επίδραση στη λειτουργία των λυσοσωματίων του ήπατος στην ιριδίζουσα πέστροφα και στα επίπεδα του ATP στον κυπρίνο (Jeney et al., 1992).

Σύμφωνα με τον Smart (1978), ο μηχανισμός της τοξικότητας της αμμωνίας στα ψάρια είναι πιθανό να μοιάζει με την ηπατική εγκεφαλοπάθεια των θηλαστικών. Σε αυτή την ασθένεια χαλάει η ικανότητα του ήπατος να απομακρύνει δια της σύνθεσης ουρίας την αμμωνία από την κυκλοφορία (του αίματος). Συνεπακόλουθα, η συγκέντρωση της αμμωνίας στο αίμα αυξάνει τόσο πολύ, που το ζώο πέφτει σε ηπατικό κόμα (Zieve, 1966). Η μεταβολική αιτία του ηπατικού κόματος είναι η εξάντληση των υψηλής ενέργειας μορίων όπως το ATP στον εγκέφαλο, λόγω της εκτροπής του «ρόλου» του α-κετογλουταρικού οξέως (ενδιάμεσο προϊόν του κύκλου του κιτρικού οξέως), από μετατροπέα ενέργειας σε αποτοξινωτή της αμμωνίας (Shenker et al., 1967). Συγκεκριμένα, 1 mol κετογλουταρικού οξέως μπορεί να συνδεθεί με 1 mol αμμωνίας για να σχηματίσει 1 mol γλουταμικό οξύ το οποίο στη συνέχεια με ένα επιπλέον mol αμμωνίας σχηματίζει γλουταμίνη. Η βιοχημική αυτή διαδικασία έχει διπλό (αρνητικό) αντίκτυπο στο ενεργειακό ισοζύγιο του ζώου. Κατά πρώτον, απαιτούνται 4 mol ATP για κάθε mol αμμωνίας που απομακρύνεται. Κατά δεύτερον, η χρήση του α-κετογλουταρικού ως ενεργειακού υποστρώματος εξαντλεί την ενδοκυτταρική συγκέντρωση αυτού του πολύτιμου ενδιάμεσου μορίου στον κύκλο του κιτρικού οξέως. Αποτέλεσμα, η δυνατότητα του κύκλου του κιτρικού οξέως να δημιουργεί και παράσχει NADH, το «καύσιμο» των οξειδωτικών φωσφορυλικών αντιδράσεων που παράγουν ATP, μειώνεται σημαντικά, περίπου 68%. Στο μυαλό των ψαριών έχει ανιχνευθεί δραστηριότητα γλουταμινικής συνθετάσης, η οποία είναι το ένζυμο που καταλύει το σχηματισμό της γλουταμίνης από το γλουταμικό (Wu, 1963; Wilson & Fowlkes, 1976). Αυξημένες συγκεντρώσεις γλουταμίνης έχουν βρεθεί στο μυαλό του χρυσόψαρου (*Carassius auratus*; Levi et al., 1974) και της ιριδίζουσας πέστροφας (Arillo et al., 1981) μετά από έκθεση σε αμμωνία, όχι όμως και στο μυαλό του αμερικάνικου γατόψαρου κατά τη μακροχρόνια έκθεσή του σε αμμωνία (Weirich, 1988), πιθανόν επειδή το μυαλό του γατόψαρου στερείται γλουταμική διυδρογονάση, το ένζυμο που καταλύει τη μετατροπή του α-κετογλουταρικού σε γλουταμικό οξύ (Wilson, 1973).

Οι Schenone et al., 1982 πρότειναν μια πιθανή εξήγηση για τις διαφορές που παρουσιάζονται ανάμεσα στα είδη των ψαριών αναφορικά με την ανθεκτικότητά τους στην αμμωνία. Παρατήρησαν καταρχήν ό τι τα χρυσόψαρα ήταν πιο ανθεκτικά στην αμμωνία συγκριτικά με την ιριδίζουσα πέστροφα, σύμφωνα με τα σχετικά στοιχεία για αυτή από τη μελέτη των Alabaster & Boyd (1980). Περαιτέρω παρατήρησαν, ότι κατά τη διάρκεια έκθεσης στην αμμωνία, τα επίπεδα της αμμωνίας στον εγκέφαλο των χρυσόψαρων αυξήθηκαν πολύ λίγο, ενώ στην ιριδίζουσα πέστροφα για παρόμοιες συγκεντρώσεις αμμωνίας η αύξηση ήταν σημαντική (Arillo et al., 1981). Οι παρατηρηθείσες διαφορές μεταξύ άλλων, αποδόθηκαν σε ένα καλύτερα προσαρμοσμένο σύστημα αποτοξίνωσης της αμίνωσης του α-κετογλουταρικού στο χρυσόψαρο συγκριτικά με την ιριδίζουσα πέστροφα.

10.2.1. Επίδραση της αμμωνίας στην αύξηση και επιβίωση των εκτρεφόμενων ψαριών

Μέχρι τώρα έχουν καταγραφεί για αρκετά είδη που παρουσιάζουν υδατοκαλλιεργητικό ενδιαφέρον, οι τιμές συγκέντρωσης αμμωνίας που επιφέρουν το θάνατο στο 50% του εκτιθέμενου πληθυσμού (LC50). Ομως, σχετικά με τη σχέση που συνδέει την αύξηση και τα επίπεδα της συγκέντρωσης της περιβαλλοντικής αμμωνίας, τα στοιχεία αφορούν λίγα είδη. Από τη συσσωρευμένη γνώση δια μέσου αυτών των μελετών, έγινε σαφές ότι η τοξικότητα της αμμωνίας επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τον ιονισμό της, όπως πρωτίστως οι προαναφερθέντες pH και θερμοκρασία, και δευτερευόντως η αλατότητα. Επιπλέον, η τοξικότητα επηρεάζεται και από την προγενέστερη έκθεση των ψαριών σε αμμωνία, δηλαδή ζώα που προσαρμόστηκαν να ζουν σε λίγο ανεβασμένες συγκεντρώσεις αμμωνίας (οπωσδήποτε όμως μη θανατηφόρες), παρουσιάζονται πιο ανθεκτικά σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις της. Επιπλέον η τοξικότητα της αμμωνίας αυξάνεται σε περιβάλλοντα με χαμηλή περιεκτικότητα διαλυμένου οξυγόνου (Thurston et al., 1981). Η αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων ιόντων, μέσω των αλάτων χλωριούχου νατρίου και ασβεστίου, βρέθηκε επίσης να μειώνει την τοξικότητα της αμμωνίας (Tomasso et al., 1980; Russo et al., 1988), το ίδιο και η αύξηση της αλατότητας (Alabaster et al., 1979). Σχετικά με τη θερμοκρασία, εκτός από τη δράση της στον ιονισμό της αμμωνίας, δεν βρέθηκε κάποια άλλη ξεκάθαρη δράση της στον επηρεασμό της τοξικότητάς της (Russo & Thurston, 1991).

Σε πραγματικές συνθήκες εκτροφής, η συγκέντρωση της αμμωνίας στο νερό παρουσιάζει διακυμάνσεις, με πιο χαρακτηριστική περίπτωση την περίοδο αμέσως μετά το τσίγμα. Ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων ιχθυοπυκνοτήτων και ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες εκτροφής, τα ψάρια μεταβολίζουν την τροφή εκκρίνουν πολύ αμμωνία και η συγκέντρωσή της κορυφώνεται. Ακόμη όμως και σε υδατοστάσια με μικρές κατά κανόνα ιχθυοπυκνότητες, υπάρχουν περιπτώσεις έντονης διακύμανσης σε αμμωνία. Αυτές συμβαίνουν όταν τα νερά είναι εύτροφα και η περιογή παρουσιάζει ηλιοφάνεια και ζέστη. Σε τέτοια περίπτωση η αύξηση του φυτοπλαγκτού είναι έντονη και το pH διακυμαίνεται έντονα στη διάρκεια του 24ώρου (Boyd, 1979). Το πρωί μπορεί να είναι λιγότερο από 7 και αργά το απόγευμα υψηλότερο και του 9. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το επίπεδο της μη ιονισμένης αμμωνίας (NH₃), σε ποσοστό της συνολικής δυναμικά σταθερής ποσότητας της ολικής αμμωνίας στο νερό (TAN), θα αυξομειώνεται κατά ένα συντελεστή της τάξεως του 50!!

Στον Πίνακα 10.2 φαίνονται τιμές του LC50 καθώς και τιμές συγκεντρώσεων μη ιονισμένης αμμωνίας (επίπεδο προσαρμογής), που δεν επηρεάζουν αρνητικά την αύξηση των ειδών που αναφέρονται. Ο λόγος του LC50/επίπεδο προσαρμογής είναι χαρακτηριστικός και μπορεί να χρησιμοποιείται (όπου είναι διαθέσιμος από πειραματικά στοιχεία), για να δώσει μια εικόνα της ανθεκτικότητας του είδους. Όσο πιο μεγάλος, τόσο ανθεκτικότερο το είδος στην αμμωνία.

Η μόνη διαθέσιμη μέθοδος θεραπείας της τοξικότητας της αμμωνίας, συνίσταται είτε στην απομάκρυνσή της, είτε στην απομάκρυνση των ζώων από το περιβάλλον της αμμωνίας. Σε συστήματα εκτροφής με τη μέθοδο της ανακύκλωσης νερού (κλειστά συστήματα), η αμμωνία μπορεί και πρέπει να απομακρύνεται μέσω του καθαρισμού του νερού (βιολογικό φιλτράρισμα, Spotte, 1979). Σε συστήματα εκτροφής ανοικτής ροής (raceways κ.λπ.), όπου παρουσιάζεται πρόβλημα υπερβολικής συγκέντρωσης αμμωνίας, σημαίνει, είτε ότι υπάρχει υπερβολική ιχθυοφόρτιση, είτε ότι η ποσότητα της τροφής είναι υπερβολική, είτε και τα δύο. Η αντιμετώπιση έγκειται στην αύξηση της ροής του νερού, ή στη μείωση της παροχής τροφής, ή σε συνδυασμό και των δύο.

Η αντιμετώπιση της αμμωνίας στις κατά κανόνα μεγάλες υπαίθριες και χωμάτινες δεξαμενές (υδατοστάσια) είναι πιο δύσκολη, επειδή δεν υπάρχει συνήθως δυνατότητα για μεγάλη ανανέωση του νερού σε εύλογο χρονικό διάστημα και έτσι η πιο προφανής και εύκολη αντιμετώπιση της αμμωνίας μέσω της διάλυσης καθίσταται ανέφικτη. Οι διαθέσιμες μέθοδοι αντιμετώπισης είναι η μείωση του επιπέδου παρεχόμενης τροφής με σκοπό να μειωθεί η μεταβολιζόμενη σε αμμωνία βιομάζα και η δια της ασβεστοποίησης (διάλυση ασβέστη στο νερό) μείωση του pH, όπου και όταν αυτό κατά τις πρώτες βραδινές ώρες λόγω της φωτοσύνθεσης αυξάνει υπερβολικά, (υψηλό pH σημαίνει μεγαλύτερα ποσοστά της τοξικής μη ιονισμένης αμμωνίας).

Σε κάθε περίπτωση όμως, είτε πρόκειται για υπαρκτό είτε για υποπτευόμενο πρόβλημα αμμωνίας, θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στο επίπεδο του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό. Ο συνδυασμός υψηλών συγκεντρώσεων αμμωνίας και χαμηλών επιπέδων οξυγόνου είναι πολλαπλάσια θανατηφόρος. Μια επαρκής ποσότητα οξυγόνου βοηθά τα ψάρια να αντιμετωπίσουν για πολύ περισσότερο χρόνο μια δεδομένη αύξηση της αμμωνίας.

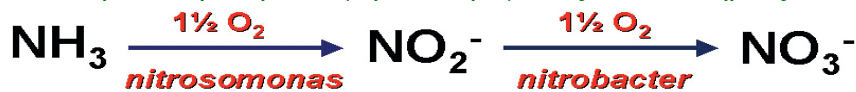
Πίνακας 10.2. Συγκεντρώσεις σε mg/L της μη ιονισμένης αμμωνίας ως **LC50** (η συκέντρωση που επιφέρει το θάνατο στο 50% του εκτιθέμενου πληθυσμού), του **επίπεδου προσαρμογής** (σε mg/L) που δεν επιφέρει μείωση της αύξησης και του λόγου αυτών (**LC50: Επίπεδο Προσαρμογής**).

Είδος	LC50	Επίπεδο προσαρμογής	LC50:Ε.Π.
Γαρίδα <i>Penaeus monodon</i>	1,3	0,11	12
Αμερικάνικο γατόψαρο <i>Ictalurus punctatus</i>	2,4	0,06 – 0,12	20 - 39
Αμερικάνικο γατόψαρο	2,9	0,05 – 0,22	13 - 58
Κυπρινοειδές <i>Pimephales promelas</i>	2,6	0,36 – 0,75	3 - 7
Ιριδίζουσα πέστροφα <i>Oncorhynchus mykiss</i>	0,6	>0,06	<10
Κινέζικη Γαρίδα <i>Penaeus chinensis</i>	2,5 για νεαρά άτομα, 25 °C, 30ppt		
Αμερικάνικο λαβράκι <i>Morone chrysops</i> x <i>M. saxatilis</i>	0,3-0,6 0,7	σε 25 °C, και 5-80 mg/L ασβέστιο σε 25 °C και 1 – 24 ppt	
<i>Sciaenops ocellatus</i>	0,8	σε 20 °C και 4 ppt	
Γαρίδα γλυκού νερού <i>Macrobrachium rosenbergii</i>	2,2 2,0	για μετανύμφες σε 29 °C και pH 8,5 για νεαρά σε 29 °C και pH 9,0	
Γαρίδα Kuruma <i>Penaeus japonicus</i>	3,0	για νεαρά σε 27 - 28 °C και 34 ppt	

10.3. ΝΙΤΡΩΔΗ

Τα νιτρώδη ιόντα (NO_2^-), τα οποία από οξειδωτική άποψη είναι ενδιάμεσα μεταξύ του αμμωνίου (NH_4^+) και των νιτρικών (NO_3^-), υπάρχουν σε φυσική κατάσταση τόσο στα αλμυρά όσο και στα γλυκά νερά, σε τυπικές συγκεντρώσεις μικρότερες των 0,005 mg/L. Σε ορισμένες όμως συνθήκες, η συγκέντρωσή τους μπορεί να αυξηθεί τόσο, που να επιδράσει και επιφέρει αλλαγές στην αιμογλοβίνη του αίματος. Σε τέτοια κατάσταση θεωρούνται τοξικά για τους υδρόβιους οργανισμούς.

Η μετατροπή (οξείδωση) της αμμωνίας σε τελικό προϊόν-νιτρικά, γίνεται με ενδιάμεσο τα νιτρώδη. Το ιδανικό από την άποψη της τοξικότητας, θα ήταν η μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά να γίνεται τάχιστα χωρίς συσσώρευση νιτρωδών. Όμως, καθώς τα γένη βακτηριδίων *Nitrosomonas* και *Nitrobacter* εμπλέκονται στην παρακάτω συνοπτική αντίδραση, διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη δυναμική ή το



μεταβολισμό τους, τελικά μπορεί να καταλήξουν σε συσσώρευση νιτρωδών. Για παράδειγμα, τα είδη του γένους *Nitrobacter* που μεταβολίζουν τα νιτρώδη σε νιτρικά, είναι πολύ πιο ευαίσθητα στην παρουσία της μη ιονισμένης αμμωνίας (NH_3), συγκριτικά με τα είδη του *Nitrosomonas*. Επειδή το pH επηρεάζει δραματικά το ποσοστό της μη ιονισμένης αμμωνίας, τότε σε περιβάλλον που γίνεται αλκαλικό και παρουσιάζει μεγάλη ποσότητα ολικής αμμωνίας (TAN), η μη ιονισμένη αμμωνία υπερισχύει, τα *Nitrobacter* υπολειπούνται και η μετατροπή των νιτρωδών σε νιτρικά σχεδόν σταματά, με αποτέλεσμα τη συσσώρευσή τους.

Νιτρώδη, μπορεί επίσης να συσσωρευτούν στο υπολίμνιο των λιμνών που παρουσιάζουν θερμική διαστρωμάτωση και στη συνέχεια να εμφανισθούν και στα επιφανειακά τους στρώματα, ύστερα από μίξη της στήλης του νερού λόγω εξαφάνισης του θερμοκλινούς (Infante et al., 1979). Τέλος, οι διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες (αποχετεύσεις ποικίλων βιομηχανιών), μπορεί να εμπλουτίσουν τους υδαταποδέκτες σε νιτρώδη. Οι υδατοκαλλιεργητικές δραστηριότητες και ειδικά αυτές που γίνονται σε ανακυκλούμενα νερά, μπορεί να αυξήσουν την περιεκτικότητα του νερού σε νιτρώδη, αν ο βιολογικός καθαρισμός που εφαρμόζουν είτε δεν έχει ρυθμιστεί κατάλληλα, είτε δεν έχει την αναγκαία δυναμικότητα να αντιμετωπίσει την παραγόμενη από τους εκτρεφόμενους οργανισμούς αμμωνία.

10.3.1. Μηχανισμοί πρόσληψης νιτρωδών και τοξικότητάς των

Τα νιτρώδη ιόντα μπορεί να προσληφθούν από τα ψάρια είτε μέσω της διαίτας των, είτε μέσω της απορρόφησής των από τα κύτταρα χλωρίου (chloride cells) του επιθηλίου των βραγχίων τους. Τα κύτταρα χλωρίου των βραγχίων ανάλογα με τη θέση τους και τη λειτουργία τους, διακρίνονται σε νηματοειδή και ελασματοειδή. Τα νηματοειδή κύτταρα χλωρίου εκκρίνουν ανεπιθύμητα ιόντα στο θαλασσινό νερό και τα ελασματοειδή προσλαμβάνουν ιόντα σε αραιά διαλύματα. Στο γλυκό νερό τα ελασματοειδή κύτταρα χλωρίου εκκρίνουν ιόντα αμμωνίου και υδρογονοϊόντα, ανταλλάσσοντάς τα με ίσο αριθμό ιόντων νατρίου. Επίσης εκκρίνουν διττανθρακικά ιόντα ανταλλάσσοντάς τα με ισοδύναμο αριθμό ιόντων χλωρίου (Love, 1980).

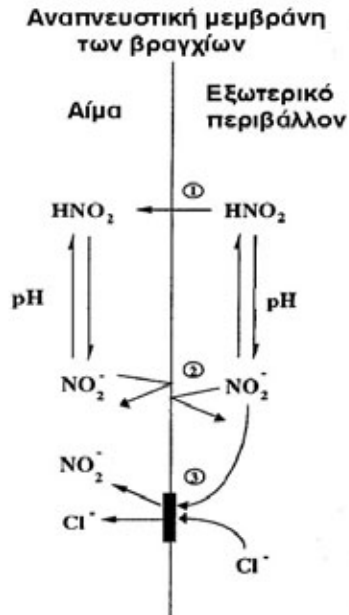
Τα νιτρώδη ιόντα προσλαμβάνονται ενεργά από τα κύτταρα χλωρίου των περισσότερων από τα είδη ψαριών του γλυκού νερού (Bath & Eddy, 1980). Ως εκ τούτου η συγκέντρωση των νιτρωδών στο πλάσμα του αίματος, μπορεί ακόμη και να

δεκαπλασιαστεί συγκριτικά με τη συγκέντρωση στο περιβάλλον νερό (Eddy et al., 1983). Ο ρυθμός της ενεργούς απορρόφησης των νιτρωδών φαίνεται να είναι παρόμοιος με τον αντίστοιχο για τα χλωρίοντα (Eddy et al., 1983). Η παρουσία νιτρωδών στο γλυκό νερό, προκαλεί μεγέθυνση και ταχεία αντικατάσταση των κυττάρων χλωρίου (Gaino et al., 1984). Φαίνεται ότι τα ψάρια διατηρούν μια σταθερή ενδοκυτταρική συγκέντρωση χλωρίωντων, ακόμα και όταν η συγκέντρωση των νιτρωδών είναι πολύ μεγάλη, προκαλώντας έτσι τα κύτταρα χλωρίου να λειτουργούν εντονότερα.

Κατά τους Colt & Tsobanoglous (1976) και Wedemeyer & Yasutake (1978), η ενεργός απορρόφηση των νιτρωδών ιόντων γίνεται και κατά τον παρακάτω τρόπο:

Ένα μέρος των νιτρωδών στο νερό συνδυάζεται με ιόντα υδρογόνου και σχηματίζει νιτρώδες οξύ (HNO_2). Στο σύννηθες εύρος του pH των φυσικών νερών, τα νιτρώδη ιόντα είναι περί τις 4 – 5 φορές περισσότερα από το νιτρώδες οξύ με το οποίο βρίσκονται σε ισορροπία. Το νιτρώδες οξύ δεν διαθέτει ηλεκτρικό φορτίο και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να προσληφθεί με ενεργητικό τρόπο από τα κύτταρα χλωρίου και να εισέλθει στα σωματικά υγρά, είναι όμως ευδιάλυτο στα λίπη (Hunn & Allen, 1974) και γι'αυτό μπορεί να εισέλθει στα βράγχια δια των επιθηλιακών τους κυττάρων. Αφού εισέλθει στο σώμα, το νιτρώδες οξύ μπορεί να υποστεί διάσπαση και τα προκύπτοντα νιτρώδη ιόντα μπορούν να διατηρηθούν στα σωματικά υγρά, μέσω φυσιολογικών μηχανισμών οι οποίοι αποτρέπουν την απώλεια ιόντων (Σχήμα 10.3). Σύμφωνα με τον παραπάνω μηχανισμό, η συσσώρευση των νιτρωδών μπορεί να εντατικοποιηθεί αν το pH του σώματος των ψαριών (περί το 8,0 στα βράγχια), είναι υψηλότερο από αυτό του περιβάλλοντος νερού. Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι η δράση του pH είναι καθοριστική και ρυθμιστική στην τοξικότητα των νιτρωδών. Αν τα νιτρώδη εισέρχονται στο σώμα του ψαριού ως νιτρώδες οξύ, τότε η σχετική τιμή του pH μέσα και έξω από το ψάρι είναι μεγίστης σημασίας. Αν όμως εισέρχονται ως ιόντα δια μέσου των κυττάρων χλωρίου, τότε η σημασία του pH είναι μικρότερη.

Ότι και να ισχύει όμως, είναι γεγονός αδιαμφισβήτητο ότι τα νιτρώδη εισέρχονται δια μέσου των κυττάρων χλωρίου των βραγχίων (Tomasso et al., 1980; Krous et al., 1982).



Σχήμα 10.3. Μηχανισμός μεταφοράς των νιτρώδων και του νιτρώδους οξέος κατά μήκος της κυτταρικής μεμβράνης των κυττάρων των βραγχίων. Η μεμβράνη απεικονίζεται εδώ ως ένα απλό στρώμα, παρόλο που αποτελείται από την εσωτερική (serosal) και εξωτερική (mucosal) κυτταρική μεμβράνη των βραγχιακών επιθηλιακών και κυττάρων χλωρίου. Το νιτρώδες οξύ (HNO_2) διαχέεται ελεύθερα κατά μήκος της μεμβράνης προς την περιοχή της χαμηλότερης συγκέντρωσης (1). Πάντως, σε φυσιολογικές συνθήκες καταστάσεις pH (και στις υδατοκαλλιέργειες), η συγκέντρωση του νιτρώδους οξέος είναι πολύ μικρή. Αντιθέτως, τα νιτρώδη ιόντα δεν διαχέονται ελεύθερα (2), αλλά μπορούν να μεταφερθούν στο εσωτερικό των κυττάρων χλωρίου (3) με ενεργό μεταφορά, το ίδιο και τα χλωριόντα. Το σχήμα ελαφρά τροποποιημένο από Tomasso (1994).

Από το πλάσμα του αίματος τα νιτρώδη διαχέονται στα ερυθρά αιμοσφαίρια, στα οποία οξειδώνουν το σίδηρο της αιμογλοβίνης σε κατάσταση Fe^{+++} . Η αιμογλοβίνη που περιέχει αυτή την κατάσταση σιδήρου, είναι πλέον διαφορετική και ονομάζεται **μεθαιμογλοβίνη** και στερείται της ικανότητας που είχε πριν την οξείδωση του σιδήρου της, να δεσμεύει και να αποδεσμεύει το οξυγόνο εύκολα (Bodansky, 1951). Συνεπώς η αυξημένη συγκέντρωση νιτρώδων μειώνει την ολική ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου στο αίμα. Οπτικά, το αίμα των ψαριών με υψηλά ποσοστά μεθαιμογλοβίνης γίνεται χρώματος **καφέ** και τα βράγχιά τους **σοκολατί-καφέ**. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι η μεθαιμογλοβίνη σχηματίζεται και αυθόρμητα, αν και πολύ αργά, και σε απουσία νιτρώδων. Το αίμα δηλαδή των ψαριών, σε κανονική κατάσταση περιέχει μια μικρή και μετρήσιμη ποσότητα μεθαιμογλοβίνης, ακόμη και σε απουσία νιτρώδων. Η ποσότητα αυτή σε ποσοστό ποικίλλει ανάλογα με το είδος, από 0,9-3,6% για το *Oncorhynchus mykiss*, σε 10,9% για τον ροζ σολομό *Oncorhynchus gorbusha* και έως 17,2% για το αμερικάνικο γατόψαρο *Ictalurus punctatus*. Έτσι λοιπόν σε αντίθεση με τα θηλαστικά

στο αίμα των οποίων η μεθαιμογλοβίνη σπάνια ξεπερνά το 1%, στα ψάρια το αντίστοιχο ποσοστό μπορεί και να ξεπεράσει το 10% σε φυσιολογική κατάσταση.

Τα περισσότερα είδη των ψαριών σχηματίζουν εύκολα μεθαιμογλοβίνη εάν βρεθούν σε νερά χαμηλής περιεκτικότητας σε χλωριόντα αλλά με νιτρώδη.

Όταν το ποσοστό της μεθαιμογλοβίνης στο αίμα ξεπεράσει το 70 – 80% της συνολικής αιμογλοβίνης, το ψάρι περιέρχεται σε κατάσταση ατονίας. Καθώς το ποσοστό πλησιάζει το 100%, το ψάρι παρουσιάζει αποπροσανατολισμό και αδυναμία αντίδρασης στα ερεθίσματα. Τα είδη ψαριών που σε φυσιολογική κατάσταση χαρακτηρίζονται ως «νωχελικά», έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις σε οξυγόνο και απειλούνται λιγότερο από την έντονη **μεθαιμογλοβιναιμία** (Crawford & Allen, 1977). Ακόμα όμως και αυτά τα είδη σε μια τέτοια κατάσταση, αν εξαναγκασθούν σε έντονη δραστηριότητα, τότε μπορεί να υποκύψουν λόγω ανοξίας (Huey et al., 1980).

Η ποσότητα της μεθαιμογλοβίνης που απαιτείται για να σκοτώσει, ή για να μειώσει την αύξηση, ή για να εμποδίσει τη φυσιολογική συμπεριφορά των ψαριών, διαφέρει από είδος σε είδος και ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Κατά γενικό κανόνα, όταν το ποσοστό της μεθαιμογλοβίνης ξεπερνά το 50%, τότε θεωρείται απειλή για τα ψάρια (Bowser et al., 1983), αν και υπάρχουν περιπτώσεις που βρέθηκαν υγιή ψάρια από φυσικά νερά με ποσοστό μεθαιμογλοβίνης άνω του 50% (Schwedler & Tucker, 1983). Σύμφωνα με τους Tomasso et al. (1979), το αμερικάνικο γατόψαρο *Ictalurus punctatus* άντεξε, έστω και σε κατάσταση αδράνειας, για 2 ημέρες σε θερμοκρασία 25 °C με 100% ποσοστό μεθαιμογλοβίνης στο αίμα του. Γενικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι συγκεντρώσεις μεθαιμογλοβίνης κάτω του 50% στο αίμα των ψαριών, θεωρούνται ως μη προκαλούσες θνησιμότητα.

Τα ερυθρά αιμοσφαίρια του αίματος των ψαριών περιέχουν μια ρεδουκτάση (ένζυμο) η οποία επαναφέρει τη μεθαιμογλοβίνη στην κανονική της κατάσταση, αυτή δηλαδή της αιμογλοβίνης (Huey & Beitinger, 1982). Η μετατροπή αυτή συμβαίνει αυθόρμητα και σε γενικές γραμμές επαναφέρει το φυσιολογικό ποσοστό αιμογλοβίνης σε 24 – 48 ώρες, εάν το ψάρι μεταφερθεί σε νερό ελεύθερο νιτρωδών (Huey et al., 1980). Αν το νερό περιέχει νιτρώδη, τότε το ποσοστό της μεθαιμογλοβίνης στο αίμα, θα αποτελεί την κατάσταση εκείνη που θα προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ της τάσης για δημιουργία μεθαιμογλοβίνης και της μετατροπής της πίσω σε αιμογλοβίνη από τη ρεδουκτάση.

Παρόλο που η μεθαιμογλοβιναιμία αποτελεί την καλύτερα μελετημένη κατάσταση της τοξικής δράσης των νιτρωδών, υπάρχουν αρκετά ερωτήματα για το αν αποτελεί τον πρωτεύοντα μηχανισμό της τοξικότητας των νιτρωδών. Αρκετοί ερευνητές (Smith & Williams, 1974; Brown & McLeay, 1975; Crawford & Allen, 1977; Margiocco et al., 1983), αναδεικνύουν αφενός το γεγονός της ικανότητας πολλών ειδών ψαριών να επιβιώνουν με μεγάλα ποσοστά μεθαιμογλοβίνης στο αίμα τους και αφετέρου της ποικιλίας των παρατηρήσεων σχετικά με τα ποσοστά παρουσίας μεθαιμογλοβίνης στο αίμα τους στις διάφορες φυσιολογικές τους καταστάσεις. Επιπλέον, διάφορα καρκινοειδή τα οποία δεν διαθέτουν αιμοσφαιρίνη, παρουσιάζουν παρόμοιες τάσεις θνησιμότητας με τα ψάρια για παρόμοιες συγκεντρώσεις νιτρωδών.

Η αναιμία που παρουσιάζεται στα ψάρια μετά από έκθεση σε νιτρώδη (Brown & McLeay, 1975; Scarano & Saroglia, 1984, για την ιριδίζουσα πέστροφα, Urrutia & Tomasso, 1987; Tucker et al., 1989, για το αμερικάνικο γατόψαρο) είναι ήπια και μείωσε την αιμογλοβίνη του αίματός των σε λιγότερο από το μισό του φυσιολογικού. Φαίνεται

ότι η αναιμία μάλλον δεν είναι ένας πρωτεύοντας και κύριος μηχανισμός τοξικότητας των νιτρωδών, παρόλο που πιθανόν να συμβάλλει στην τοξικότητά τους.

Αντίθετα, η ηπατοτοξικότητα που παρουσιάζεται μετά από έκθεση σε νιτρώδη, φαίνεται να αποτελεί ένα πρωτεύοντα μηχανισμό τοξικότητας (Mensi et al., 1982; Arillo et al., 1984). Σύμφωνα με αυτούς τους ερευνητές, στην ιριδίζουσα πέστροφα που είχε εκτεθεί σε νιτρώδη, οι μεμβράνες των λυσοσωματίων των ηπατικών τους κυττάρων ήταν πιο εύθραυστες από αυτές των ψαριών control και αυτή η ευθραυστότητα σχετιζόταν με τη φυσιολογική κατάσταση των ψαριών. Το ήπαρ των ψαριών αργότερα έγινε υποξικό βάσει των ενδείξεων του μειωμένου επιπέδου του γλυκογόνου και ATP και αυξημένων επιπέδων λακτικού, α-γλυκεροφωσφορικού και σουξινικού οξέος. Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, οι ερευνητές συμπεράναν ότι η υποξία η οφειλόμενη στη μεθαιμογλοβιναιμία, ήταν σε ανεπαρκές επίπεδο για να προκαλέσει το θάνατο των ψαριών, αλλά η υποξία στο συκώτι, μπορεί να είναι μέρος του πρωτεύοντος μηχανισμού της τοξικότητας των νιτρωδών, δια μέσου της δημιουργίας συνθηκών εμφάνισης διαφόρων ηπατικών δυσλειτουργιών.

10.3.2. Τοξικότητα έκθεσης σε νιτρώδη για χρόνο μέχρι 96 ώρες

Αν και η θνησιμότητα των ψαριών λόγω της έκθεσής των σε εξαιρετικά μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρωδών, μπορεί να μεγιστοποιηθεί σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 24 ωρών, το διάστημα ενός 24ώρου θεωρείται ικανοποιητικό από πειραματική άποψη, διότι θεωρείται επαρκής πειραματικός χρόνος για τη μέγιστη συσσώρευση νιτρωδών στο σώμα του ψαριού (Huey et al., 1980; Eddy et al., 1983). Η παράμετρος LC50, που αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση του τοξικού παράγοντα που επιφέρει το θάνατο του 50% του πειραματικού πληθυσμού, σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα επίδρασης (24 – 96 ώρες ανάλογα με την επιλεγθείσα τακτική), αποτελεί μια γενικά αποδεκτή τεχνική. Ως είναι αναμενόμενο το LC50 μειώνεται με το χρόνο έκθεσης. Το LC50 για 96 ώρες σε καθορισμένες πειραματικές συνθήκες, αποτελεί την πιο συντηρητική εκτίμηση τοξικότητας των νιτρωδών. Αν και στη βιβλιογραφία το LC50 υπολογίσθηκε για ποικίλους χρόνους έκθεσης, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί και για διάρκεια 96 ωρών (σε περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε μικρότερη διάρκεια), απλώς με τη χρήση μιας κατάλληλης σχέσης μετατροπής, υπό την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιπες πειραματικές συνθήκες (θερμοκρασία, αλατότητα κ.ά.) είναι οι ίδιες.

10.3.3. Τοξικότητα έκθεσης σε νιτρώδη για χρόνο μεγαλύτερο από 96 ώρες

Η τοξικότητα των νιτρωδών στα ψάρια, για μεγαλύτερη διάρκεια από 96 ώρες, έχει ταυτοποιηθεί από μελέτες για διάφορα είδη, αναφορικά σε σχέση με τη θνησιμότητά τους, τη μείωση της αύξησής των και την ποικίλη καταστροφή των διαφόρων ιστών του σώματός των. Ενδεικτικά, παρατίθενται μερικά στοιχεία επ' αυτών στον Πίνακα 10.3.

10.3.4. Θνησιμότητα

Σε μικρούς (1-11 g) σολομούς chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*), το LC50 των νιτρωδών για 7 ημέρες έκθεσης, ήταν περί τα 2/3 του αντίστοιχου για 96 ώρες έκθεσης (Westin, 1974). Από διάφορα άλλα πειράματα και για άλλα σαλμονιδή (ψάρια ψυχρών νερών), βρέθηκαν λίγο ή πολύ παρόμοιες καταστάσεις (Russo et al., 1974; Thurston et al., 1978). Για το αμερικάνικο γατόψαρο (τυπικός εκπρόσωπος των ειδών που ζουν σε θερμότερα ύδατα), και για περιόδους έκθεσης σε νιτρώδη μεγαλύτερες των

96 ωρών, από την εξέταση των επιπέδων μεθαιμογλοβίνης, διαπιστώθηκε μια τάση εγκλιματισμού των ψαριών στα νιτρώδη (Tucker & Schwedler, 1983). Το γεγονός αυτό, συνδυαζόμενο και με τα ευρήματα από άλλα παρόμοια πειράματα βιοδοκιμών στα σαλμονιδή, φαίνεται να καταδεικνύει ότι σχετικά με την επίδραση των νιτρωδών στα ψάρια, δεν επέρχονται σημαντικές αλλαγές στη θνησιμότητα μετά τις 5 – 7 ημέρες έκθεσης. Φαίνεται ότι μετά από μια τέτοια περίοδο έκθεσης στα νιτρώδη, τα ψάρια αναπτύσσουν ανθεκτικότητα στα ιόντα αυτά, πιθανώς οφειλόμενη στην προσαρμογή και βελτίωση της αποτελεσματικότητας της ρεδουκτάσης των (η οποία επαναφέρει τη μεθαιμογλοβίνη στη φυσιολογική της κατάσταση της αιμογλοβίνης).

10.3.5. Μείωση της αύξησης

Σχετικά με την επίδραση των νιτρωδών στην αύξηση των ψαριών, η κατάσταση είναι μάλλον θολή. Στην ιριδίζουσα πέστροφα *Oncorhynchus mykiss* δεν παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της αύξησης, για περίοδο έκθεσης 6 μηνών σε επίπεδο νιτρωδών 10% του LC50-96 ωρών (Wedemeyer & Yasutake, 1978). Για το αμερικάνικο γατόψαρο υπολογίστηκε ότι η συγκέντρωση των νιτρωδών που επιφέρει μετρήσιμη μείωση της αύξησης είναι της τάξης του 1/5 του LC50-96 ωρών (Bowser et al., 1983).

10.3.6. Καταστροφή ιστών

Η μακροχρόνια (28 εβδομάδων) επίδραση της μη τοξικής συγκέντρωσης νιτρωδών στην ιριδίζουσα πέστροφα, δεν επέφερε αναγνωρίσιμες αλλαγές στα νεφρά, στο αίμα και στον θύμο αδέν, ενώ στα βράγχια παρουσιάστηκαν ελαφρές μόνο αλλαγές οι οποίες εξαφανίστηκαν μετά την πάροδο επτά εβδομάδων. Το ίδιο βρέθηκε και για το αμερικάνικο γατόψαρο (Colt et al., 1981). Γενικά από τη βιβλιογραφία φαίνεται ότι για τα ψάρια τόσο των ψυχρών όσο και των θερμών νερών, το LC50-96 ώρες είναι μόνο μερικές φορές μεγαλύτερο από τη συγκέντρωση εκείνη των νιτρωδών, που επιφέρει ανεπαίσθητα αρνητικά αποτελέσματα στην υγεία των ψαριών. Γενικά το 10% του LC50-96 ωρών της συγκέντρωσης των νιτρωδών θεωρείται ασφαλές.

10.3.7. Περιβαλλοντικοί παράγοντες

10.3.7. 1. Ιόντα χλωρίου (Cl⁻)

Μέχρι το 1977 οι εργασίες σχετικά με την επίδραση των νιτρωδών στα ψάρια, έδιδαν ποικίλα αποτελέσματα ακόμα και για το ίδιο εξεταζόμενο είδος ψαριού. Από την εργασία όμως των Crawford & Allen (1977) σε μικρούς σολομούς Chinook, ταυτοποιήθηκε ότι η αιτία για αυτή τη σύγχυση ήταν η συγκέντρωση των χλωριόντων (Cl⁻) στο νερό. Η θνησιμότητα η προκαλούμενη από τα νιτρώδη ήταν 50 – 100 φορές μικρότερη στο θαλασσινό νερό (που περιέχει φυσικά πολύ μεγάλη ποσότητα χλωριόντων), συγκριτικά με το γλυκό νερό για παρόμοια συγκέντρωση νιτρωδών. Επιπλέον οι Perrone & Meade (1977) πειραματιζόμενοι με το σολομό coho, βρήκαν ότι τα χλωριόντα προστάτευαν τα ψάρια από την τοξικότητα των νιτρωδών και πρότειναν ότι η αιτία αυτής της προστασίας, είναι η ανταγωνιστικότητα των χλωριόντων απέναντι στα νιτρώδη ιόντα για την κατάληψη των θέσεων μεταφοράς στο εσωτερικό των κυττάρων στα βράγχια των ψαριών. Σήμερα, η σημασία των χλωριόντων στην προστασία απέναντι στα νιτρώδη είναι τόσο ξεκάθαρα ταυτοποιημένη, που οι σχετικές εργασίες για να είναι έγκυρες πρέπει οπωσδήποτε να αναφέρουν την αλατότητα (ή τη συγκέντρωση των χλωριόντων) στην οποία εκτελούνται. Δυστυχώς όμως, οι εργασίες που εξετάζουν

την τοξικότητα των νιτρωδών για αρκετές συγκεντρώσεις χλωριόντων είναι ελάχιστες. Σε μία από αυτές (Russo & Thurston, 1977) για την ιριδιζουσα πέστροφα, χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικές συγκεντρώσεις χλωριόντων. Η σχέση μεταξύ του LC50-96 ωρών των νιτρωδών (σε mg/L) και της συγκέντρωσης των χλωριόντων (σε mg/L), βρέθηκε να είναι γραμμική της μορφής Y (νιτρώδη) = $0,53 + 0,29 X$ (χλωριόντα).

Οι Tomasso et al. (1979) συνέκριναν τα επίπεδα της μεθαιμογλοβίνης στο αμερικάνικο γατόψαρο, για όλη την κλίμακα των συγκεντρώσεων χλωριόντων και νιτρωδών που εξέτασαν. Φάνηκε καθαρά ότι τα χλωριόντα επηρεάζουν τη δημιουργία της μεθαιμογλοβίνης. Για παράδειγμα, τα γατόψαρα σε νερά που περιέχουν 3,54 mg/L χλωριόντα, ανέπτυξαν 77% μεθαιμογλοβίνη για συγκέντρωση νιτρωδών 1,5 mg/L, ενώ σε χλωριόντα 60 mg/L για την ίδια συγκέντρωση νιτρωδών, μόνο 8,8%. Σε μία παρόμοια μελέτη (Schwedler & Tucker, 1983), βρέθηκε ότι η σχέση που συνδέει το ποσοστό της μεθαιμογλοβίνης (Y) και το λόγο της συγκέντρωσης νιτρωδών/χλωριόντων (X) ήταν:

$$Y = 7,33 + 78,17X$$

Γενικά, συμπεραίνοντας και από άλλες μελέτες στα ψάρια των γλυκών νερών, η επίδραση των χλωριόντων φαίνεται να είναι καταλυτική στη μείωση της τοξικότητας των νιτρωδών, 1 mg/L χλωριόντων φαίνεται να εξουδετερώνει την τοξική δράση 2mg/L νιτρωδών, ή κατά μια άλλη προσέγγιση, 35 mg/L χλωριόντων αυξάνουν το LC50-96 ωρών των νιτρωδών κατά 13 mg/L το λιγότερο, έως και 70 mg/L το περισσότερο, (σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία).

Ο μηχανισμός μέσω του οποίου τα χλωριόντα προστατεύουν τα ψάρια από τα νιτρώδη, φαίνεται να είναι ο ανταγωνιστικός αποκλεισμός των νιτρωδών από την ενεργό μεταφορά τους από τα κύτταρα χλωρίου των μεμβρανών των βραγχίων. Η συγκέντρωση του πλάσματος σε νιτρώδη έχει βρεθεί να είναι λιγότερη στην ιριδιζουσα πέστροφα (Bath & Eddy, 1980), στο αμερικάνικο γατόψαρο (Palachek & Tomasso, 1984), στην *Tilapia aurea* (Palachek & Tomasso, 1984), στο χρυσόψαρο (*Carassius auratus*, Tomasso, 1986), στο αμερικάνικο λαβράκι (*Morone saxatilis*, Mazik et al., 1991), στο sunshine bass (*Morone chrysops* x *Morone saxatilis*; Weirich et al., 1993) και στην караβίδα *Procambarus clarkii* (Gutzmer & Tomasso, 1985), όταν εκτέθηκαν ταυτόχρονα σε περιβάλλον χλωριόντων και νιτρωδών, συγκριτικά με το πλάσμα των αντίστοιχων ειδών που εκτέθηκαν σε παρόμοιες συγκεντρώσεις νιτρωδών αλλά με μικρή ή καθόλου συγκέντρωση χλωριόντων. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος της συγκέντρωσης χλωριόντων/νιτρωδών, τόσο μικρότερη η συγκέντρωση των νιτρωδών στο πλάσμα του αίματος. Επ' αυτού, σε ένα ενδιαφέρον πείραμα (Krous et al., 1982) στην ιριδιζουσα πέστροφα, αποδείχθηκε μια σχέση μεταξύ του αριθμού των κυττάρων χλωρίου στις μεμβράνες των βραγχίων (όπου εστιάζεται η ενεργός μεταφορά των χλωριόντων) και της μεταφοράς των χλωριόντων. Στο πείραμα αυτό, οι ερευνητές μετέφεραν τα ψάρια από ισοτονικό θαλασσίνο νερό σε γλυκό νερό και τα εξέθεσαν κατά ομάδες σε περιβάλλον με νιτρώδη για 96 ώρες. Καθώς τα ψάρια εγκλιματίζονταν στο γλυκό νερό, ο αριθμός των κυττάρων χλωρίου αυξήθηκε, προφανώς οφειλόμενος στην ανάγκη να μεταφέρουν χλωριόντα στο εσωτερικό του σώματος των ψαριών με ενεργή μεταφορά, ακόμη και αν το γλυκό νερό έχει πολύ μικρή φυσική συγκέντρωση χλωριόντων. Ετσι λοιπόν καθώς αυξήθηκε ο αριθμός των κυττάρων χλωρίου, αυξήθηκε και η ενεργός μεταφορά των νιτρωδών.

Εχει βρεθεί επίσης σε πειράματα που έγιναν στην ιριδιζουσα πέστροφα (Wedemeyer & Yasutake, 1978) και στο αμερικάνικο λαβράκι (Mazik et al., 1991;

Weirich et al., 1993), ότι τα χλωρίοντα σε μορφή χλωριούχου ασβεστίου (CaCl_2), είναι αποτελεσματικότερα της μορφής χλωριούχου νατρίου (NaCl) στην ανταγωνιστική αποτροπή της πρόσληψης νιτρωδών από τα βράγχια. Πιθανολογείται ότι η προστατευτική δράση του ασβεστίου, οφείλεται στην παρεμπόδιση της κίνησης των νιτρωδών κατά μήκος των βραγχιακών μεμβρανών (Weirich et al., 1993).

Με δεδομένη την προστατευτική δράση των χλωριόντων απέναντι στην τοξική δράση των νιτρωδών στα ψάρια του γλυκού νερού, θα ήταν λογικό τα νιτρώδη να μην αποτελούν πρόβλημα για ψάρια σε υφάλμυρα ή αλμυρά νερά. Όμως η κατάσταση δεν είναι τόσο ιδανική. Στον Πίνακα 10.4 όπου φαίνονται οι τιμές του LC_{50} για είδη του αλμυρών ή υφάλμυρων νερών, καταγράφονται και εδώ επίσης μετρήσιμες συγκεντρώσεις νιτρωδών, όμως αυτές οι συγκεντρώσεις είναι εμφανώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για τα είδη των γλυκών νερών όπου τα πειράματα έγιναν σε απουσία ή ελάχιστη συγκέντρωση χλωριόντων. Αξιοσημείωτη επίσης είναι η αντοχή των καρκινοειδών (Πίνακας 10.3), δεδομένου ότι τα νιτρώδη συσσωρεύονται ελάχιστα στην αιμόλυμφη των πεναϊδών γαρίδων (Chen & Chen, 1992).

10.3.7.2. Το pH του νερού

Το περιβαλλοντικό pH έχει αναφερθεί συχνά στη βιβλιογραφία ως επηρεαστής της τοξικότητας των νιτρωδών. Το αυξημένο ποσοστό των νιτρωδών στη μη ιονισμένη μορφή (ως HNO_2), στη συνολική ποσότητα των ολικών νιτρωδών στις χαμηλές τιμές του pH, θεωρείται γενικά ως η αιτία για την τοξικότητα των νιτρωδών (η προσεκτική μελέτη του Σχήματος 10.3 καταδεικνύει το γιατί). Όμως, σύμφωνα με την ανασκόπηση (review) των πειραματικών δεδομένων από τους Lewis & Morris (1986), συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει μια καθαρή άποψη για το αν το χαμηλό pH αυξάνει την τοξικότητα των νιτρωδών. Η «μετάφραση» των αποτελεσμάτων από τις σχετικές μελέτες που ανασκόπησαν, περιπλέκεται από διαφορές στη συγκέντρωση των ιόντων που δημιούργησαν οι ερευνητές στο νερό των ενυδρείων που χρησιμοποίησαν, ή από πειράματα σε τιμές pH έξω από αυτές στις οποίες τα χρησιμοποιηθέντα ψάρια αναμένεται να μπορούν να εγκλιματιστούν ή αντέξουν.

10.3.7.3. Επίδραση της θερμοκρασίας και του διαλυμένου οξυγόνου

Το οξυγόνο μπορεί να επηρεάσει την τοξικότητα των νιτρωδών επειδή τα νιτρώδη μειώνουν την μεταφορική ικανότητα σε οξυγόνο του αίματος. Έτσι, μια ενδεχόμενη μείωση του οξυγόνου στο νερό θα χειροτερέψει την ήδη βεβαρημένη λόγω των νιτρωδών ικανότητα οξυγόνωσης των ψαριών. Ένα χαρακτηριστικό πείραμα επ' αυτού (Bowser et al., 1983) στο αμερικάνικο γατόψαρο, το οποίο κανονικά αντέχει σε συγκεντρώσεις οξυγόνου μικρότερες των 5 mg/L, έδειξε ότι όταν εκτέθηκε σε νιτρώδη η παραπάνω συγκέντρωση οξυγόνου δεν του ήταν αρκετή.

Η θερμοκρασία, καθώς επηρεάζει τις αναπνευστικές ανάγκες των ψαριών, θα μπορούσε επίσης να θεωρηθεί ότι επηρεάζει και την τοξικότητα των νιτρωδών. Και για αυτή την παράμετρο επίσης, πειράματα έχουν γίνει μόνο για το αμερικάνικο γατόψαρο. Για το εύρος θερμοκρασιών 22 – 30 °C οι Colt & Tchobanoglous (1976) δεν βρήκαν κάποια σημαντική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της τοξικότητας των νιτρωδών. Οι Huey et al. (1984) για γατόψαρα που διατηρήθηκαν στους 30 °C και σε 0,91 mg/L νιτρώδη για 24 ώρες, βρήκαν ότι αυτά ανέπτυξαν μεθαιμογλοβίνη σε συγκέντρωση σχεδόν διπλάσια απ' αυτή για ψάρια που διατηρήθηκαν στους 10 °C. Οι Watenpaugh et

al. (1985), βρήκαν ότι η κρίσιμη μέγιστη θερμοκρασία ήταν ελαφρώς χαμηλότερη (35,9 °C) για τα γατόψαρα που εκτέθηκαν σε 0,43 mg/L νιτρώδη, συγκριτικά με τα control που διατηρήθηκαν στους 38 °C. Τα ευρήματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με τη γενική ιδέα του ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν το LC50 για νιτρώδη, μέσω της αυξημένης ανάγκης των ιστών για οξυγόνο.

Γενικά, το υψηλότερο ποσοστό διαλυμένου οξυγόνου στα νερά με χαμηλότερες θερμοκρασίες, καθώς και ο χαμηλότερος μεταβολισμός των ψαριών στις θερμοκρασίες αυτές, μπορούν να καθιστούν τα νιτρώδη μια λιγότερο ισχυρή τοξίνη σε νερά χαμηλής θερμοκρασίας. Όμως, καθώς οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν επίσης την ικανότητα των διαφόρων φυσιολογικών μηχανισμών αποτοξίνωσης στα ψάρια, θα πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί πριν βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας στην τοξικότητα των νιτρωδών.

10.3.7.4. Το μέγεθος των ψαριών

Από πειράματα στην ιριδίζουσα πέστροφα, βρέθηκε ότι τα μικρότερα άτομα ήταν λιγότερο ευαίσθητα στην 24ωρη έκθεση σε νιτρώδη συγκριτικά με τα μεγαλύτερα (Smith & Williams, 1974). Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν και από τις εργασίες των Russo et al., 1974 (σύγκριση λαρβών και μεγάλων ατόμων) και Russo & Thurston, 1977. Για το σολομό coho, οι Perrone & Meade (1977) βρήκαν ότι τα πολύ μικρά άτομα (0,65 g) ήταν λιγότερο ευαίσθητα στα νιτρώδη συγκριτικά με τα μεγαλύτερα (yearlings-22 g).

Για ψάρια των γλυκών θερμών νερών η μόνη εργασία για το είδος *Pimephales promelas* (Palachek & Tomasso, 1984), έδειξε ότι τα μικρά ψάρια (0,3 – 0,8 g), ήταν περισσότερο ανθεκτικά στα νιτρώδη από τα μεγαλύτερα (0,9 – 3,3 g), καθώς το LC50-96 ωρών των πρώτων ήταν περίπου 50% μεγαλύτερο των δεύτερων. Από τα παραπάνω, αν και τα σχετικά πειράματα που υπάρχουν πολύ απέχουν από το να χαρακτηρισθούν επαρκή, φαίνεται ότι τα μικρότερα ψάρια (ακόμα και οι λάρβες) των ψαριών του κάθε είδους είναι ανθεκτικότερα στα νιτρώδη από τα μεγαλύτερα.

Όπου στο κείμενο αυτού του κεφαλαίου παρατίθεται βιβλιογραφική πηγή και δεν αναφέρεται στη γενική βιβλιογραφία που υπάρχει στο τέλος, υπονοείται ότι οι πηγές αυτές αναφέρονται στις εργασίες review των Lewis & Morris (1986) και Tomasso (1994).

Πίνακας 10.3. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για την τοξικότητα των νιτρωδών (NO₂⁻) στα διάφορα είδη ψαριών σε ποικίλες αλατότητες. (Βασικές πηγές: Spotte, 1992; Tomasso, 1994, με τους αναφερόμενους σε αυτούς ερευνητές).

Είδος ψαριού	Συγκέντρωση NO ₂ ⁻ (mg/L)	Χρόνος έκθεσης σε ώρες	Θνησιμότητα (%)	Νερό (αλατότητα)
Ιριδίζουσα πέστροφα <i>Oncorhynchus mykiss</i> (1 έτους)	0,55	24	55	Γλυκό
<i>Oncorhynchus thawytscha</i> (32 g)	0,50	24	40	Γλυκό
<i>Oncorhynchus thawytscha</i> (fingerlings)	0,88	96	50	Γλυκό
<i>Oncorhynchus thawytscha</i>	5,8	48	50	Γλυκό
<i>Oncorhynchus thawytscha</i>	>325	48	50	Θαλασσινό
<i>Oncorhynchus mykiss</i> (12 g)	0,19	96	50	Γλυκό
<i>Oncorhynchus mykiss</i> (9,1 g)	0,23	96	50	Γλυκό
Σολομός coho <i>Oncorhynchus kisutch</i> (1 έτους)	3,8	12	58,3	Γλυκό
<i>Oncorhynchus thawytscha</i> (fingerlings)	19	48	50	Γλυκό
<i>Oncorhynchus thawytscha</i> (fingerlings)	1070	48	10	Θαλασσινό
<i>Crassostrea virginica</i>	798	96	50	Θαλασσινό
<i>Sciaenops ocellatus</i>	85,7	48	50	Θαλασσινό
<i>Sciaenops ocellatus</i>	2,8	48	50	Υφάλμυρο 0,6 ppt
<i>Dicentrarchus labrax</i>	220	96	50	Θαλασσινό
<i>Anguilla anguilla</i>	84	96	50	Γλυκό
<i>Anguilla anguilla</i>	812	96	50	Θαλασσινό
<i>Anguilla anguilla</i> (elvers)	503	96	50	Θαλασσινό
<i>Morone saxatilis</i>	163	24	50	Θαλασσινό
<i>Morone Chrysops</i> x <i>M. saxatilis</i>	12,8	96	50	Υφάλμυρο 6 ppt
<i>Morone Chrysops</i> x <i>M. saxatilis</i>	35	96	50	Υφάλμυρο 1 ppt
<i>Morone Chrysops</i> x <i>M. saxatilis</i>	>100	96	50	Υφάλμυρο 8 ppt
<i>Metapenaeus ensis</i>	21-70	24-48	50	Θαλασσινό
<i>Penaeus monodon</i>	13,6	96	50	Θαλασσινό
<i>Macrobrachium rosenbergii</i>	8,6	96	50	Υφάλμυρο 12 ppt
<i>Procambarus clarkii</i>	8,5	96	50	Υφάλμυρο 22 ppt
<i>Procambarus simulans</i>	1,9	96	50	Υφάλμυρο 3 ppt
<i>Chanos chanos</i>	12	48	50	Γλυκό
<i>Chanos chanos</i>	675	48	50	Υφάλμυρο 16 ppt

Η αμμωνία και τα νιτρώδη - η δράση τους στα ψάρια

Πίνακας 10.4. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για την τοξικότητα των νιτρωδών (NO₂⁻) στα διάφορα είδη ψαριών σε ποικίλες αλατότητες. (Βασική πηγή: Lewis & Morris, 1986, με τους αναφερόμενους σε αυτούς ερευνητές).

Είδος	Πηγή	Cl (mg/L)	Ca ⁺⁺ (mg/L)	(CaCO ₃ , mg/L)	°C	pH	LC50 Nitrite-N	Χρόνος (h)για LC50	LC50 Ρυθμισμένο για 96 h	LC50 ρυθμισμένο σε 96 h, 20 mg/L Cl ⁻
<i>Lepomis macrochirus</i>	(18)	60			30	4.0	4.4	24	2.4	
		60			30	7.2	211.3	24	108	108
		5			30	4.0	4.6	24	2.4	
		5			30	7.2	282.0	24	144	144
<i>Gambusia affinis</i>	(19)			<100	22	7.3	1.5	96	1.5	
<i>Tilapia aurea</i>	(15)	22	80	190	23	7.9	16.0	96	16.0	15
<i>Percina caprodes</i>	(14)	10					<5	24	<3	<9
<i>Culaea inconstans</i>	(14)	10					<5	24	<3	<9
<i>Cottus bairdi</i>	(3)	0.35	53	177	13	8.1	>67	154	>67	>106
^a (1) Russo et al. (1974); (2) Russo et al. (1981); (3) Russo and Thurston (1977); (4) Eddy et al. (1983). [†] (5) Smith and Williams (1974). (6) Wedemeyer and Yasutake (1978). (7) Westin (1974). (8) Peronne and Meade (1977). (9) Crawford and Allen (1977). (10) Thurston et al. (1978). (11) Konikoff (1975). (12) Colt and Tchobanoglous (1976). (13) Palacheck and Tomasso (1984b). (14) McCoy (1972). (15) Palacheck and Tomasso (1984a). (16) Klingler (1957). (17) Gillette et al. (1952). (18) Huey et al. (1982). (19) Wallen et al. (1957).										
<i>Ictalurus punctatus</i>	(11)			65	23	7.5	7.6	96	7.6	
				220	22	8.7	12.8	96	12.8	
				190	32	7.9	7.1	96	7.1	6.4
<i>Ictalurus melas</i>	(14)	10					>40	>48	>32	>52
Κυπρινοειδή										
<i>Pimephales promelas</i>	(3)	0.35	53	177	13	8.0	2.99	96	2.99	42
		0.35	53	177	13	8.0	2.30	96	2.30	41
		22	80	190	23	7.9	70	96	70	66
	(15)	22	80	190	23	7.9	45	96	45	41
<i>Phoxinus laevis</i>	(16)				20		28	96	28	
<i>Semotilus atromaculatus</i>	(17)	9	27	98	18	8.3	81	24	>41	>63
<i>Cyprinus carpio</i>	(14)	10					>40	48	>32	>52
<i>Catostomus commersoni</i>	(14)	10					>100	48	>80	>100
<i>Carpiodes cyprinus</i>	(14)	10					>100	24	>80	>100
<i>Micropterus salmoides</i>	(15)	22	80	190	23	7.9	140	96	140	140

11. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ «ΗΜΙΣΕΩΣ ΒΑΘΟΥΣ» (HALF-DEPTH METHOD)

Η μέθοδος του «**Ημίσεως Βάθους**», αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο υπολογισμού της ικανότητας φόρτισης ενός ενυδρείου με υδρόβιους οργανισμούς. Μπορεί να εφαρμόζεται συμπληρωματικά στη **μέθοδο** του **Hirayama** (βλέπε επόμενο κεφάλαιο), ή και αυτόνομα και μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών, να ισχυροποιεί τη θέση του φροντίζοντος το/τα ενυδρείο/α ως προς την ικανότητα φόρτισης του συστήματος.

Η μέθοδος του Hirayama αποτελείται από μια εξίσωση, της οποίας το αριστερό μέρος υπολογίζει την ικανότητα «καθαρισμού» του συστήματος (ενυδρείου) και το δεξί το ρυθμό «ρύπανσης» του συστήματος από μεταβολίτες που παράγονται από τους υδρόβιους οργανισμούς. Η εφαρμογή της είναι αρκετά απλή, αρκεί να εισαχθούν στις μεταβλητές της οι κατάλληλες επιλεγείσες τιμές. Είναι βασισμένη σε πειραματικά ευρήματα και για να διασφαλίζεται η επιβίωση των ψαριών (ή άλλων υδρόβιων οργανισμών) στο ενυδρείο, θα πρέπει η τιμή του αριστερού της σκέλους να είναι ανώτερη (ή έστω οριακά ίση) από την τιμή του δευτέρου σκέλους. Κατά γενική θεώρηση σύμφωνα με τον τύπο του Hirayama, όσο πιο μεγάλη είναι η επιφάνεια του φίλτρου πυθμένα, όσο πιο μεγάλη η ταχύτητα διέλευσης του νερού μέσα από αυτό, όσο πιο παχύ το στρώμα του φίλτρου πυθμένα και όσο πιο λεπτοί οι κόκκοι που το αποτελούν, τόσο πιο αποτελεσματικό το φιλτράρισμα και συνεπώς τόσο πιο μεγάλη η βιομάζα οργανισμών και η ποσότητα τροφής που μπορεί το σύστημα να κρατήσει.

Συνεπώς η στρατηγική της μεγιστοποίησης της ικανότητας φόρτισης ενός ενυδρείου από κάποιον ειδικό, μπορεί να επικεντρωθεί είτε στην τροποποίηση των παραπάνω χαρακτηριστικών του ενυδρείου, είτε στην επιλογή της κατάλληλης ιχθυοφόρτισης του ενυδρείου από κοινού με την ποσότητα της τροφής που αυτό θα δεχθεί. Σκοπός πάντοτε είναι τα ψάρια που θα υπάρχουν στο ενυδρείο να ζήσουν και να αισθάνονται άνετα τρεφόμενα απρόσκοπτα.

Οι έμπειροι «ενυδρειάδες» μπορούν ενστικτωδώς να προβλέψουν αρκετά καλά πόση βιομάζα μπορεί να ζήσει σε ένα συγκεκριμένο ενυδρείο, στη βάση της ποσότητας τροφής που παρέχεται κάθε ημέρα.

Η τροφή θα μεταβολισθεί από τα ψάρια και ένα μέρος των πρωτεϊνών της θα καταλήξει να απεκκριθεί ως αμμωνία. Συνεπώς, πολύ τροφή σημαίνει πολύ αμμωνία. Κατά τα γνωστά η αμμωνία αποτελεί τον συνεχή και τοξικότερο παράγοντα επικινδυνότητας για τα ψάρια. Ευτυχώς όμως, με τη νιτροποίηση που συμβαίνει συνεχώς στο ρυθμισμένο βιολογικό φίλτρο, η τοξική αμμωνία μετατρέπεται σε ακίνδυνα νιτρικά.

Τόσο η μέθοδος του Hirayama όσο και η μέθοδος «ημίσεως βάθους» προσπαθούν ακριβώς να βελτιστοποιήσουν τη νιτροποιητική ικανότητα του βιολογικού φίλτρου, δια της κατάλληλης διαμόρφωσης των μηχανικών του χαρακτηριστικών. Η προσέγγιση είναι λίγο διαφορετική για την κάθε μία, αλλά ο στόχος είναι ο ίδιος: ένα αποτελεσματικό βιολογικό φίλτρο πυθμένα που θα «τα καταφέρνει» με μια ορισμένη φόρτιση του νερού με αμμωνία.

«**Ημισυ βάθους**» ως ονομασία της συγκεκριμένης μεθόδου (Spotte, 1992), σημαίνει: *εκείνο το βάθος ενός φίλτρου πυθμένα, με το οποίο το ήμισυ της ποσότητας αμμωνίας που παράγεται από το μεταβολισμό της τροφής, εξουδετερώνεται (οξειδώνεται σε νιτρικά) με ένα πέρασμα από το φίλτρο (δηλαδή με μια ανακύκλωση όλου του όγκου νερού του ενυδρείου μέσω του φίλτρου πυθμένα).*

Η υπολογιζόμενη τιμή του βάθους του φίλτρου που γίνεται με τους υπολογισμούς της μεθόδου παρακάτω, είναι εκείνη που θα ικανοποιήσει τις ανάγκες φόρτισης ενός συγκεκριμένου ενυδρείου.

Ο Spotte (1991) αναφέρει ότι η μέθοδος δεν έχει δοκιμαστεί επαρκώς (σε αντίθεση με αυτή του Hirayama), όμως ο γράφων το παρόν, θεωρεί ότι είναι ικανοποιητική και μπορεί να εφαρμοσθεί, καθώς από πολυάριθμα λειτουργούντα ενυδρεία στο T.E.I. Μεσολογγίου επί αρκετά χρόνια, μια έστω και μικρή αύξηση του βάθους του φίλτρου πυθμένα, επιφέρει πάντοτε θεαματικά αποτελέσματα στην ικανότητα φόρτισης του ενυδρείου.

Για την εφαρμογή της μεθόδου «ημίσεως βάθους» προϋποθέτουμε τα εξής:

1. Ολο το άζωτο που προσλαμβάνουν τα ψάρια με την τροφή τους (πρωτεΐνες), απεκκρίνεται και δεν κατακρατείται στους ιστούς των (αναληθές βέβαια αλλά εξυπηρετεί για λόγους ασφάλειας τους συντηρητικούς υπολογισμούς της συγκεκριμένης μεθόδου).
2. Το άζωτο απεκκρίνεται συνεχώς με σταθερό ρυθμό, ανεξαρτήτως του πόσο συχνά τρέφονται τα ψάρια.

Στον Πίνακα 11.1 παρακάτω, καταγράφονται οι παράγοντες που αποτελούν τις μεταβλητές του συστήματος και οι πληροφορίες που απαιτούνται για να υπολογισθεί η ικανότητα φόρτισης με τη μέθοδο του «ημίσεως βάθους». Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις μεταβλητές του σχεδιασμού του συστήματος και τις άγνωστες πληροφορίες τις οποίες θα υπολογίσουμε με τις μαθηματικές πράξεις.

Πριν γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί σε ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφοράς παρακάτω, για να επιδειχθεί η μεθοδολογία υπολογισμού του ημίσεως βάθους, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι για να αξιοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό η ικανότητα ενός φίλτρου βυθού στη νιτροποιητική του λειτουργία, απαιτείται η ικανοποίηση των παρακάτω κριτηρίων:

1. Το ελάχιστο βάθος ενός φίλτρου πυθμένα δεν μπορεί να είναι μικρότερο των 7 cm, ανεξάρτητα του πόσο μικρό είναι το ενυδρείο.
2. Η επιφάνεια του φίλτρου πυθμένα πρέπει να είναι ίση με αυτή του ενυδρείου.
3. Η ταχύτητα ροής του νερού (F) δια μέσου του φίλτρου πυθμένα δεν μπορεί να είναι μικρότερη των 0,00068 m/s.

Η παραπάνω τιμή του F μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τιμή αναφοράς σε μελέτες υπολογισμού του ημίσεως βάθους. Εάν όμως (όπως και συμβαίνει τις περισσότερες φορές), η ταχύτητα ροής (F) είναι διαφορετική, τότε υπολογίζεται ως εξής:

Η παροχή νερού δια μέσου ενός φίλτρου πυθμένα (Q σε m³/s) δίδεται από τον τύπο:

$$Q = (F) \cdot (S) \text{ όπου: } F = \text{ταχύτητα της ροής σε m/s και } S = \text{επιφάνεια του φίλτρου σε m}^2.$$

Συνεπώς: $F = \frac{Q}{S}$, όμως ισχύει ότι: $S = \frac{V}{H}$ όπου: V = όγκος του νερού του ενυδρείου σε m³ και H = ύψος της στήλης του νερού σε m.

$$\text{Με αντικατάσταση συνεπώς λαμβάνουμε: } F = \frac{Q \cdot H}{V}.$$

Μετρώντας το ύψος της στήλης του νερού (H) στο ενυδρείο και υπολογίζοντας τον όγκο του νερού (V), δεν μένει παρά να υπολογίσουμε την παροχή (Q) δια μέσου του

φίλτρου πυθμένα. Αυτό γίνεται εύκολα, μετρώντας την εκροή του νερού από τους σωλήνες της αντλίας αέρα που μεταφέρει το νερό από το κάτω μέρος του φίλτρου στην επιφάνεια του ενυδρείου, σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (χρήση χρονομέτρου) και ανάγοντάς τη κατόπιν σε m^3/s .

Ο χρόνος ανακύκλωσης του νερού (**T** σε s), δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για ένα πέρασμα διαμέσου του φίλτρου δίδεται από τον τύπο: $T = \frac{\text{βάθος}}{F}$ όπου:

Βάθος= το ύψος της στήλης του νερού (συμπεριλαμβανομένου και του ύψους του φίλτρου πυθμένα) σε m,

F = η ταχύτητα ροής που υπολογίζεται κατά τα προηγούμενα.

Η μάζα της ολικής αμμωνίας (TAN) που προστίθεται ανά χρόνο ανακύκλωσης (**r** σε g) υπολογίζεται από τον τύπο:

r = (παρεχόμενη τροφή) x (ποσοστό αμμωνίας στην τροφή) x (χρόνος ανακύκλωσης νερού) όπου:

Παρεχόμενη τροφή = η ποσότητα τροφής που δίδεται καθημερινά [g/day ή g/(86.400sec), επειδή το 24ωρο έχει 86.400 sec].

Ποσοστό αμμωνίας στην τροφή = η % παραγόμενη ποσότητα ολικής αμμωνίας (TAN) ανά kg μεταβολιζόμενης τροφής.

Χρόνος ανακύκλωσης νερού = η παραπάνω αναφερόμενη τιμή του **T** σε sec.

Ως προς την παραγόμενη αμμωνία, έχει βρεθεί από μελέτες ότι κάθε κιλό τροφής (1000 g) που μεταβολίζεται από τα ψάρια, καταλήγει στην παραγωγή 30-32 g ολικής αμμωνίας (TAN) η οποία εκκρίνεται στο νερό του ενυδρείου. Συνεπώς το ποσοστό της αμμωνίας για τον παραπάνω τύπο θα είναι 3% - 3,2%. Επιλέγουμε να χρησιμοποιούμε την τιμή 3,2 % για να είμαστε σε επίπεδα ασφαλείας στους υπολογισμούς μας.

Η προστιθέμενη συγκέντρωση ολικής αμμωνίας (TAN) ανά όγκο ανά μία ανακύκλωση (**c** σε g/m^3 ή mg/L) υπολογίζεται από τον τύπο: $c = \frac{r}{V}$

Ο συντελεστής μείωσης της συγκέντρωσης αμμωνίας (**R**) υπολογίζεται από τον τύπο: $R = \frac{c - U}{U \cdot \ln 2}$, η μεταβλητή (**U**) αντιπροσωπεύει την επιτρεπτή συγκέντρωση της ολικής αμμωνίας (TAN) στο νερό (σε mg/L), για την οποία συναρτήσει του pH και της θερμοκρασίας του νερού (και κατά μικρότερο βαθμό και της αλατότητας), η συγκέντρωση της τοξικής μορφής της αμμωνίας (NH_3) δεν ξεπερνά ένα ορισμένο επίπεδο ασφαλείας (τοξικότητας για τα ψάρια).

Η τιμή αυτή για την NH_3 υπολογίζεται από πίνακες, αφού πρώτα μετρηθεί η συγκέντρωση της ολικής αμμωνίας (TAN) στο νερό και κατόπιν πολλαπλασιασθεί με το συντελεστή που αναφέρεται στους διαθέσιμους πίνακες για το pH, θερμοκρασία και αλατότητα που επικρατούν στο νερό.

Προσοχή !!. Η τιμή του (**U**) στον παραπάνω τύπο θα είναι αυτή που θα προκύπτει από την καθορισμένη-επιλέξιμη τιμή της TAN, διαιρεμένη δια του αριθμού των ανακυκλώσεων του νερού σε μία ημέρα. Αυτό γίνεται επειδή η τιμή του (**c**) κατά τα

παραπάνω, αντιπροσωπεύει την ποσότητα ολικής αμμωνίας (TAN) που προστίθεται στο νερό ανά μία ανακύκλωση.

Συνεπώς, και επειδή καταρχήν εμείς υπολογίζουμε την ανώτατη επιτρεπτή τιμή της TAN ως μια σταθερή συνολική τιμή στο νερό του ενυδρείου, την τιμή αυτή πρέπει να τη διαιρέσουμε με το σύνολο των ανακυκλώσεων του νερού κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Αλλωστε η TAN θα προέλθει από το μεταβολισμό της τροφής και την τροφή την υπολογίζουμε ως kg/ημέρα (βλέπε παραπάνω τύπο υπολογισμού του r). Έχοντας υπολογίσει το χρόνο ανακύκλωσης (T σε sec) κατά τα παραπάνω, εύκολα υπολογίζουμε πόσες ανακυκλώσεις θα έχουμε εντός του 24ώρου δηλαδή $\frac{86.400}{T}$.

Για την ανώτατη επιτρεπτή τιμή της NH_3 , υπάρχουν πολλές αναφορές στη βιβλιογραφία που δίδουν διαφορετικές τιμές ακόμα και για το ίδιο είδος ψαριού (βλέπε προηγούμενα κεφάλαια). Επίσης, τα διάφορα είδη ψαριών παρουσιάζουν εντυπωσιακές διαφορές ως προς το ανώτατο αποδεκτό επίπεδο της συγκέντρωσης της NH_3 . Για παράδειγμα, για τα σαλμονιδή η τιμή της NH_3 δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0,01mg/L, ενώ άλλα πιο ανθεκτικά είδη όπως η τιλάπια ή το χέλι, αντέχουν και 0,05 mg/L (ίσως και περισσότερο ανάλογα με τις συνθήκες). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επειδή πραγματευόμαστε κυρίως είδη ενυδρείου, θα επιλέξουμε ως ανώτατη επιτρεπτή τιμή της NH_3 την τιμή ασφαλείας 0,01 mg/L.

Η τιμή $\ln 2 = 0,6931$ στον παραπάνω τύπο υπολογισμού του (R), αντιπροσωπεύει μια σταθερά συνεχούς διάλυσης της αμμωνίας στο νερό. Είναι απαραίτητη για τους υπολογισμούς, επειδή καθώς το νερό ανακυκλώνεται διαμέσου του φίλτρου βυθού, η συγκέντρωση της αμμωνίας θα έχει αραιωθεί (σε ένα μέρος τουλάχιστον του νερού), μόλις αυτό διέλθει από το βιολογικό φίλτρο βυθού (θα έχει μετατραπεί μέσω της νιτροποίησης σε νιτρικά).

Κατόπιν (με τη χρήση του διαγράμματος του σχήματος 11.1), βρίσκουμε το βάθος του φίλτρου (ήμισυ βάθους, H), με το οποίο το ήμισυ της ολικής αμμωνίας θα εξουδετερωθεί για το συγκεκριμένο υπόστρωμα υλικών πλήρωσης του φίλτρου που χρησιμοποιούμε και το οποίο έχει ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθους κόκκων, ειδική επιφάνεια αυτών (SSA) και συντελεστή (αναλογία) κενού (P).

Χαρακτηριστικός, όπως προκύπτει από το Σχήμα 11.1, για υλικό φίλτρο, άμμο μέσης διαμέτρου 0,49 mm, $SSA=12.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ και $P=0,4$, η προκύπτουσα τιμή ημίσεως βάθους από τον άξονα Y είναι: $H=0,01 \text{ m}$.

Επισημαίνεται ότι το διάγραμμα του Σχήματος 11.1 είναι πρότυπο διάγραμμα αναφοράς για θερμοκρασία 20 °C. Εάν στο ενυδρείο μας επικρατεί διαφορετική θερμοκρασία, τότε θα συμβουλευτούμε το διάγραμμα του Σχήματος 11.2 για τη θερμοκρασία αυτή (άξονας X) και θα βρούμε στον άξονα Y το συντελεστή διόρθωσης που αντιστοιχεί σε αυτή τη θερμοκρασία.

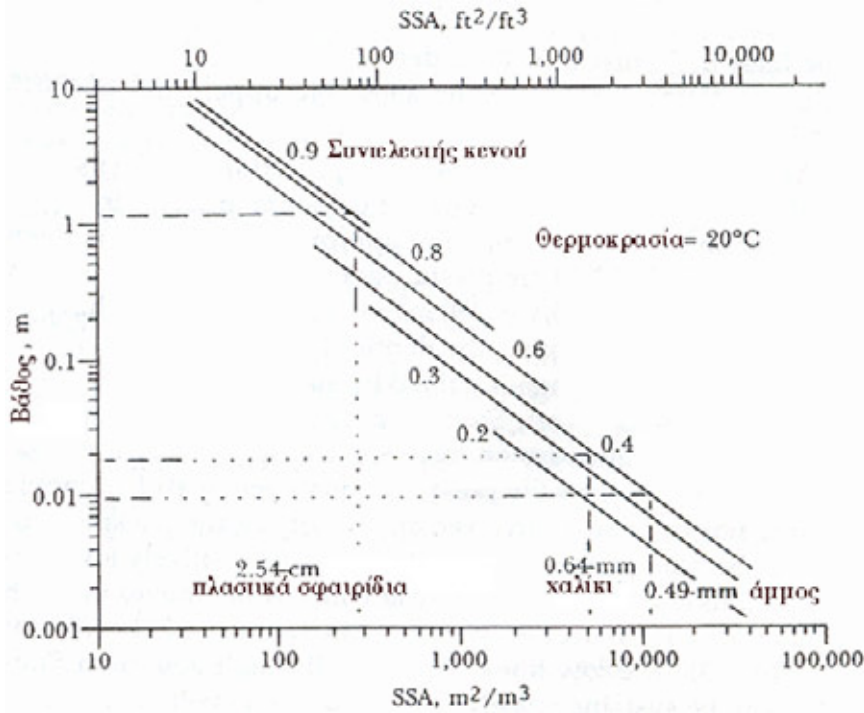
Κατόπιν πολλαπλασιάζουμε την παραπάνω τιμή του H με το συντελεστή διόρθωσης για να βρούμε τη διορθωμένη τιμή του ημίσεως-βάθους (H_c σε m), δηλαδή: $H_c = (H) \cdot (\text{συντελεστής διόρθωσης})$

Τελικά το λειτουργικό βάθος του φίλτρου (D σε m) θα είναι: $D = (H_c) \cdot (R)$

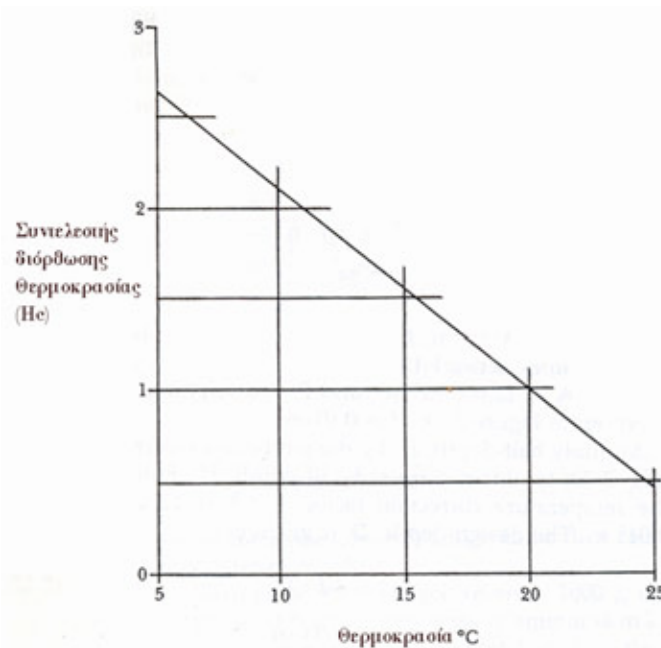
Πίνακας 11.1. Παράγοντες και μεταβλητές του συστήματος ενυδρείου μελέτης.

Παράγοντες	Μονάδες
Μεταβλητές Σχεδιασμού	
Επιφάνεια του φίλτρου βυθού (S)	m ²
Όγκος του ενυδρείου (V)	m ³
Θερμοκρασία νερού	°C
Γραμμική ταχύτητα ροής νερού δια μέσου του φίλτρου (F)	m/s
Ποσότητα τροφής παρεχόμενη καθημερινά	g
Ποσότητα αμμωνίας που αντιστοιχεί στην παρεχόμενη τροφή	%
Μάζα ολικής αμμωνίας (TAN) που προστίθεται ανά χρόνο ανακύκλωσης (r)	g
Προστιθέμενη συγκέντρωση ολικής αμμωνίας (TAN) ανά όγκο ανά χρόνο ανακύκλωσης (c)	g/m ³ ή mg/L
Επιτρεπτή ανώτατη συγκέντρωση ολικής αμμωνίας -TAN, (U)	mg/L
Ειδική επιφάνεια του υλικού του φίλτρου (SSA)	m ² /m ³ ή ft ² /ft ³
Συντελεστής κενού ή πορώδες του υλικού του φίλτρου (P)	αδιάστατο
Αγνωστες πληροφορίες	
Χρόνος ανακύκλωσης νερού, δηλαδή χρόνος που απαιτείται για ένα πέρασμα διαμέσου του φίλτρου (T) = $\frac{\text{βάθος}}{\text{F}}$	s (seconds)
Συντελεστής μείωσης της συγκέντρωσης αμμωνίας (R), $R = \frac{\text{TAN} - U}{U \cdot \ln 2}$	αδιάστατο
Ημισυ βάθους (H)	m
Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας (από Σχήμα 11.2)	αδιάστατο
Ημισυ βάθους διορθωμένο για θερμοκρασία (Hc), (Hc) = (H) · (Συντελεστής διόρθωσης)	m
Τελικό λειτουργικό βάθος του φίλτρου (D), D=(Hc) · (R)	m

Ιχθυοχωρητικότητα ενυδρείων - Η μέθοδος "Half-Depth"



Σχήμα 11.1. Συντελεστής κενού διάφορων τύπων υλικού, που αποτελούν το φίλτρο πυθμένα και σε συνάρτηση με την ειδική επιφάνεια αυτών (SSA) και το αντιστοιχούν βάθος του φίλτρου (H) με το οποίο το ήμισυ της αμμωνίας του νερού θα εξουδετερωθεί με ένα πέρασμα του συνολικού όγκου νερού από το φίλτρο. Τα παραπάνω ισχύουν για θερμοκρασία αναφοράς 20 °C.



Σχήμα 11.2. Συντελεστής διόρθωσης ως προς τη θερμοκρασία, της τιμής βάθους του φίλτρου που υπολογίστηκε από το Σχήμα 11.1. Το διορθωμένο H θα είναι το Hc κατά την πράξη: $H_c = (H) \cdot (\text{Συντελεστής διόρθωσης})$.

12. ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ

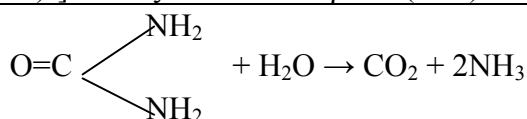
Τρεις τύποι φιλτραρίσματος χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα ενυδρεία και γενικά στα κλειστά συστήματα ή συστήματα με επανακυκλοφόρηση του νερού: μηχανικός, χημικός και βιολογικός. Ο **βιολογικός** είναι ο πιο σημαντικός. Ο μηχανικός και ο χημικός μπορεί και αυτοί να υπάρχουν και να υποβοηθούν το έργο καθαρισμού του νερού, αλλά χωρίς βιολογικό φίλτρο δεν νοείται κλειστό σύστημα.

Ως βιολογικό φιλτράρισμα αναγνωρίζεται η παρακάτω αλληλουχία διεργασιών:

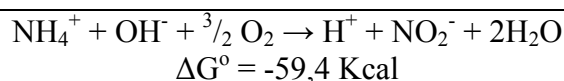
1. Μετατροπή των οργανικών αζωτούχων ενώσεων σε αμμωνία
2. Νιτροποίηση
3. Απονιτροποίηση

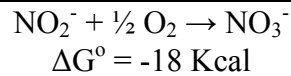
Όλες αυτές οι χημικές διεργασίες εκτελούνται από βακτηρίδια που υπάρχουν μέσα στο κάθε σύστημα ενυδρείων. Υπάρχουν είτε ελεύθερα σε όλη τη στήλη του νερού, είτε προσκολλημένα σε κάθε στερεό σώμα ή επιφάνεια που βρέχεται από το νερό. Η πυκνότητά τους είναι μεγαλύτερη σε στερεά σώματα με μεγάλο λόγο επιφάνειας/όγκου και ως εκ τούτου, το κύριο μέρος της συγκέντρωσής των βρίσκεται στους κόκκους του φίλτρου (βυθού ή εξωτερικό) που εξυπηρετεί το ενυδρείο ή το κλειστό σύστημα. Υπάρχουν βακτηρίδια από όλες τις κατηγορίες δηλαδή αερόβια, αναερόβια, αυτότροφα και ετερότροφα.

Η πρώτη χημική διεργασία στο βιολογικό φίλτρο γίνεται σε δύο φάσεις, τη λεγόμενη **αμμωνοποίηση** και την **απαμμωνοποίηση**. Η αμμωνοποίηση γίνεται δια μέσου ετερότροφων βακτηριδίων. Τα ετερότροφα χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας οργανικές αζωτούχες ενώσεις που απεκκρίνονται από τα ψάρια (ή άλλους υδρόβιους οργανισμούς) και τις οποίες μετατρέπουν σε απλές ενώσεις όπως η αμμωνία (NH₃). Κατά την αμμωνοποίηση οι πρωτεΐνες και τα νουκλεϊκά οξέα των οργανικών ουσιών, μετατρέπονται σε αμινοξέα και οργανικές αζωτοβάσεις. Κατά την απαμμωνοποίηση, αυτά τα προϊόντα μετατρέπονται μαζί και με ένα άλλο μέρος των πρωτεϊνών και νουκλεϊκών οξέων σε αμμωνία. Ένα παράδειγμα είναι η διάσπαση της ουρίας [CO(NH₂)₂] σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και αμμωνία κατά την αντίδραση:



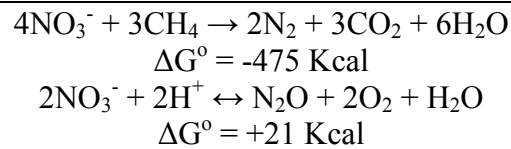
Με τη μετατροπή των αζωτοβάσεων σε αμμωνία, ενεργοποιείται και η δεύτερη διεργασία του βιολογικού φιλτραρίσματος, η νιτροποίηση. Ως νιτροποίηση αναγνωρίζεται η βιολογική οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη (NO₂⁻) και νιτρικά (NO₃⁻) ιόντα. Οι οξειδώσεις αυτές πραγματοποιούνται από αυτότροφα βακτηρίδια. Τα αυτότροφα νιτροποιητικά βακτηρίδια, χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας ανόργανο αζωτούχο υπόστρωμα (αμμωνία) και ως πηγή άνθρακα διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Τα βακτηρίδια αυτά ανήκουν κυρίως στα γένη *Nitrosomonas* και *Nitrobacter*. Τα βακτηρίδια *Nitrosomonas* spp. οξειδώνουν την αμμωνία σε νιτρώδη. Τα *Nitrobacter* spp. οξειδώνουν τα νιτρώδη σε νιτρικά, κατά τις παρακάτω αντιδράσεις:



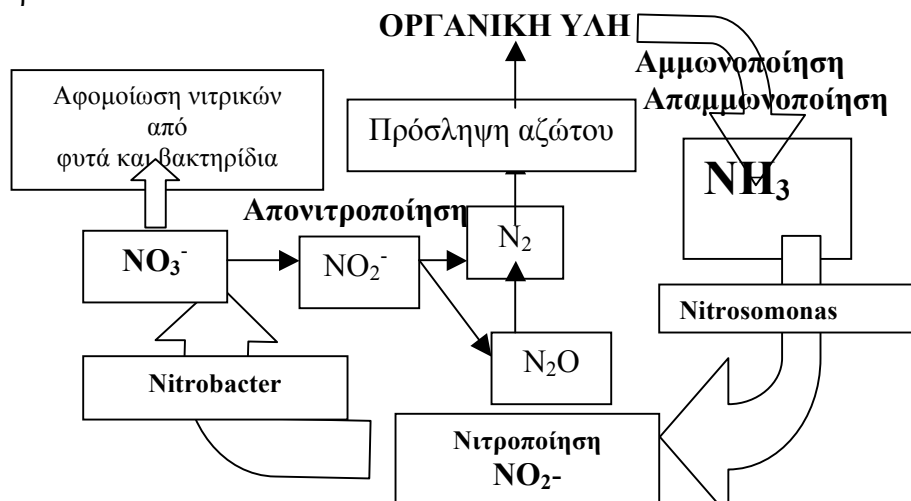


Καθώς φαίνεται από τις παραπάνω αντιδράσεις οι οξειδώσεις αυτές παρουσιάζουν μια πτώση της ελεύθερης ενέργειάς τους (ΔG°). Η σπουδαιότητα αυτών των αντιδράσεων για το βιολογικό φιλτράρισμα, έγκειται στο ότι μετατρέπουν την τοξική αμμωνία σε μη τοξικά νιτρικά.

Η τρίτη και τελευταία διεργασία στο βιολογικό φιλτράρισμα είναι η απονιτροποίηση. Ως απονιτροποίηση ορίζεται η βιολογική αναγωγή των νιτρικών ή των νιτρωδών ιόντων, είτε σε υποξείδιο του αζώτου (N_2O), είτε σε αέριο άζωτο (N_2). Η απονιτροποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί από αμφότερα ετερότροφα και αυτότροφα βακτηρίδια. Μπορεί επίσης να γίνει και σε αερόβιες και σε αναερόβιες συνθήκες. Οι χημικές αντιδράσεις που γίνονται είναι οι παρακάτω:



Όπως φαίνεται από τις παραπάνω αντιδράσεις, όταν το υδρογόνο (H) το απαιτούμενο για την αναγωγή προέρχεται από οργανική ένωση (π.χ. CH_4), τότε υπάρχει μείωση της ελεύθερης ενέργειας. Αντίθετα, όταν προέρχεται από ιονισμό (H^+), τότε υπάρχει αύξηση της ελεύθερης ενέργειας. Η απονιτροποίηση διχάζει τους ειδικούς. Άλλοι υποστηρίζουν ότι πρέπει να ενθαρρύνεται στα κλειστά συστήματα επειδή μετατρέπει τα νιτρικά σε αέριο άζωτο που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και άλλοι ότι πρέπει να αποφεύγεται επειδή ανεξάρτητα από το τελικό προϊόν της (N_2 ή N_2O), ενδιάμεσως δημιουργούνται νιτρώδη (NO_2^-) τα οποία είναι τοξικά για τα ψάρια. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα νιτρώδη μπορεί να σταθεροποιηθούν σε υψηλά τοξικά επίπεδα και ότι κερδίστηκε με τη νιτροποίηση (οξείδωση των τοξικών νιτρωδών σε ακίνδυνα νιτρικά), να ξαναχαθεί δια της επανεμφάνισης των νιτρωδών δια μέσου μιας ατελώς λειτουργούσας απονιτροποίησης. Όλες οι παραπάνω διεργασίες που αναφέρθηκαν είναι μέρη του κύκλου του αζώτου, (παρακάτω διάγραμμα). Οι μηχανισμοί είναι οι ίδιοι στη φύση και στην αιχμαλωσία, τα αποτελέσματα όμως όχι. Η διασπορά των ζώων στη φύση ως μέτρο αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών πιέσεων, δεν μπορεί να αντιγραφεί στην αιχμαλωσία. Τα αιχμαλωτισμένα ζώα βρίσκονται στο «έλεος» του περιορισμένου χώρου και η επιβίωσή τους εξαρτάται από το ρυθμό των ζωτικών μετατροπών που αναφέρθηκαν παραπάνω.



12.1. ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Ως ικανότητα φόρτισης ορίζεται το ζωικό φορτίο (ψάρια) που κάποιο υδάτινο σύστημα μπορεί να διατηρήσει με ασφάλεια. Δηλαδή, η ικανότητα του συστήματος να απαλλάσσεται από τους ρυπαντές με τους οποίους συνεχώς φορτίζεται εξαιτίας του μεταβολισμού των ψαριών του. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλώνει η βιομάζα των ψαριών σε ένα σύστημα, τόσο ο συνολικός μεταβολισμός τους επιβάλλει πρόσθετο φορτίο ρύπανσης στο σύστημα.

Η ικανότητα φόρτισης ενός ενυδρείου (για να μιλήσουμε για ένα αυτόνομο μικρό σύστημα), μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους. Μία εξ' αυτών, δια του τύπου του Hirayama, υπολογίζει την ικανότητα φόρτισης σε αλμυρά νερά, αλλά μπορεί να εφαρμοσθεί και σε γλυκά νερά (και μάλιστα με περισσότερη ανοχή).

12.1.1. Τύπος του Hirayama

$$\sum_{i=1}^p \frac{10W_i}{\left(\frac{0,7}{V_i} + \frac{950}{G_i \cdot D_i}\right)} \geq \sum_{j=1}^q (B_j^{0,544} \cdot 0,01) + 0,051F$$

Το **αριστερό σκέλος της σχέσης** αντιπροσωπεύει την **οξειδωτική ικανότητα του βιολογικού φίλτρου** (OCF = Oxygen Consumed during Filtration), εκφρασμένη σε mg O₂ που καταναλίσκονται ανά λεπτό, δηλαδή την ικανότητα του φίλτρου να οξειδώνει και απενεργοποιεί τους τοξικούς μεταβολίτες που παράγονται στο σύστημα όπου:

W = η έκταση της επιφάνειας του κάθε φίλτρου σε m²

V = η ταχύτητα ροής του νερού διαμέσου του φίλτρου (cm/min)

D = βάθος (ή πάχος) του στρώματος του φίλτρου (cm)

p = ο αριθμός των φίλτρων που εξυπηρετούν το σύστημα

G = παράμετρος που εκφράζει το συντελεστή μεγέθους των κόκκων των υλικών που αποτελούν το φίλτρο και εκφράζεται ως:

$$G = \frac{1}{R_1} \cdot X_1 + \frac{1}{R_2} \cdot X_2 + \dots + \frac{1}{R_n} \cdot X_n$$

όπου:

R = το μέσο μέγεθος των σωματιδίων (κόκκων) σε mm που αποτελούν το κάθε στρώμα (τμήμα) του φίλτρου.

X = το ποσοστό βάρους που καταλαμβάνει το κάθε στρώμα στο όλο βάρος του φίλτρου.

Το **δεξιό μέρος της σχέσης** του Hirayama αντιπροσωπεύει το **ρυθμό ρύπανσης του νερού** από τα ζώα και εκφράζεται και αυτό σε mg O₂ ανά λεπτό.

B = σωματικό βάρος κάθε ψαριού σε g

F = ποσότητα τροφής που παρέχεται στο σύστημα καθημερινά σε g

q = ο αριθμός των ψαριών στο σύστημα.

Καθώς φαίνεται από τον τύπο του Hirayama, η οξειδωτική ικανότητα (OCF) του βιολογικού φίλτρου πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή τουλάχιστον ίση προς το ρυθμό ρύπανσης από τα ψάρια, αν είναι το σύστημα να δουλέψει καλά.

Ιχθυοχωρητικότητα ενυδρείων – Ο τύπος του Hirayama

Από τον τύπο φαίνεται επίσης, ότι για ένα δεδομένο αριθμό ψαριών με ένα συγκεκριμένο συνολικό βάρος, όσο το βάρος αυτό καταμερίζεται σε μεγαλύτερο αριθμό ψαριών, η ικανότητα φόρτισης του συστήματος μειώνεται. Για παράδειγμα: Ένα σύστημα που μπορεί να «κρατήσει» ένα ψάρι των 10 g, δεν μπορεί απαραίτητα να κρατήσει 10 ψάρια του 1 g το καθένα.

Παράδειγμα: Ένα σύστημα αποτελείται από ένα βιολογικό φίλτρο επιφάνειας 0,3 m², πάχους 20 cm, ταχύτητα ροής νερού 8,5 cm/min και του οποίου το φίλτρο αποτελείται από δύο στρώσεις, μία με κόκκους άμμου διαμέτρου 5 mm η οποία αποτελεί το 60% του φίλτρου και μία με κόκκους 2 mm η οποία αποτελεί το 40% του φίλτρου. Στο σύστημα αυτό θέλουμε να διατηρήσουμε 3 ψάρια των 100 g το καθένα και να τα ταΐσουμε με ποσότητα τροφής σε ποσοστό 5% επί της συνολικής τους βιομάζας (δηλαδή 15 g συνολικά). Να βρεθεί αν το συγκεκριμένο βιολογικό φίλτρο του συστήματος μπορεί να αντέξει (κρατήσει) το παραπάνω ζωικό φορτίο.

Επίλυση:

Με αντικατάσταση στο αριστερό σκέλος του τύπου του Hirayama, θα υπολογίσουμε την οξειδωτική ικανότητα του φίλτρου:

Καταρχήν υπολογίζουμε το G,

$$G = \frac{1}{5} \cdot 60 + \frac{1}{2} \cdot 40 = 32$$

Αντικαθιστώντας την τιμή G = 32 στον τύπο, έχουμε:

$$\frac{10 \cdot 0,3}{0,7 + \frac{950}{8,5}} = 1,91$$

Με αντικατάσταση στο δεξιό μέρος του τύπου του Hirayama, υπολογίζουμε το βαθμό ρύπανσης του συστήματος:

$$[(100^{0,544} \cdot 0,01) \cdot 3] + 0,051 \cdot 15 = 1,13$$

Συνεπώς επειδή 1,91 > 1,13, το σύστημα μπορεί να κρατήσει 3 ψάρια των 100 g το καθένα, δηλαδή συνολική βιομάζα ψαριών 300 g δίδοντας 15 g τροφής ημερησίως.

Ας δούμε τώρα αν το ίδιο φίλτρο μπορεί να κρατήσει την ίδια βιομάζα των 300 g με την ίδια ποσότητα τροφής, αν υποθέσουμε ότι έχουμε 100 ψάρια των 3 g το καθένα.

Εργαζόμενοι με τον ίδιο τρόπο στο φίλτρο, το μεν αριστερό σκέλος του φίλτρου δεν αλλάζει και μας δίνει τιμή 1,91.

Το δεξί σκέλος όμως γίνεται:

$$[(3^{0,544} \cdot 0,01) \cdot 100] + 0,051 \cdot 15 = 2,58$$

Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση επειδή 1,91 < 2,58, η συνθήκη του Hirayama παραβιάζεται και το φίλτρο δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τη συγκεκριμένη βιομάζα ψαριών.

Συμπέρασμα: Όσο το μέγεθος των ψαριών είναι μικρότερο, τόσο ο ρυθμός ρύπανσης του συστήματος από αυτά αυξάνει. Η εξήγηση αυτού του φαινομένου έγκειται στον υψηλότερο μεταβολισμό των ψαριών μικρών μεγεθών συγκριτικά με τα μεγαλύτερα ψάρια (για την ίδια συνολική βιομάζα ψαριών).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Akai, D., Miki, O. and S. Ohgaki, 1983. Nitrification model with inhibitory effect of sea water. *Ecological Modeling*, 19: 189-198.
- Boyd, C. E., Romaire, R. P. και E. Johnston, 1978. Predicting early morning dissolved oxygen concentration in channel catfish ponds. *Transactions of the American Fisheries Society*, 107: 484 – 492.
- Boyd, C. E. and B., J., Watten, 1989. Aeration systems in aquaculture. *CRC Critical Reviews in Aquatic Sciences*, 1: 425 – 472.
- Boyd, C. E., 1991. Types of aeration and design considerations. In: L. Swann (editor), *Proceedings of the Second Annual Workshop: Commercial Aquaculture Using Water Recirculating Systems*. Illinois State University, Normal, Illinois. Nov. 15-16, 1991. pp. 39-47.
- Brazil, B. L., Summerfelt, S. T. and G. S. Libey, 1996. Applications of ozone to recirculating aquaculture systems. In: G.S. Libey and M.B. Timmons (editors), *Successes and Failures in Commercial Recirculating Aquaculture*. Proceeding from the Successes and Failures in Commercial Recirculating Aquaculture Conference. Roanoke, VA. July 19-21, 1996. NRAES-98. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, 152 Riley- Robb Hall, Ithaca, NY. Pp. 373-389.
- Brett, J. R. and C. A. Zala, 1975. Daily pattern of nitrogen excretion and oxygen consumption of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) under controlled conditions. *J. Fish. Res. Board Can.*, 32: 2479-2486.
- Burley, R. and A. Klapsis, 1988. Making the most of your flow (in fish rearing tanks). In: *Proceedings of the Conference: Aquaculture Engineering: Technologies for the Future*, Sterling Scotland. Icheme Symposium Series #111, EFCE Publications Series # 66, Rugby, UK. Pp. 211-239.
- Colt, J. E. and G. Tchobanoglous, 1979. Design of aeration systems for aquaculture. Department of Civil Engineering, University of California, Davis, CA.
- Colt, J. and Westers H., 1982. Production of gas supersaturation by aeration. *Trans. Am. Fish Soc.*, 111: 342-60.
- Colt, J., 1984. Computation of dissolved gas concentrations in water as functions of temperature, salinity, and pressure. *Am. Fish. Soc.*, Bethesda, Maryland, Special Publ., No. 14.
- Colt, J. and B. Watten, 1988. Applications of pure oxygen in fish culture. *Aquacultural Engineering*, 7:397-441.
- Grace, G. R. and R. H. Piedrahita, 1989. Carbon dioxide removal in a packed column aerator. Presented paper at the International Summer Meeting of Am. Soc. Ag. Eng. And Can. Soc. Ag. Eng., June 25-28, 1989, Quebec, PQ, Canada.
- Gunther D. C., Brune, D. E. and G. A. E. Gall, 1981. Ammonia production and removal in a trout rearing facility. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 24(5): 1376-1385.
- Gujer W. and M. Boller, 1986. Design of a nitrifying tertiary trickling filter based on theoretical concepts. *Water Resources*, 20(1): 1353-1362.
- Haug, R. T. and P. L. McCarty, 1972. Nitrification with submerged filters. *Journal Water Pollution Control Federation*, 44(11): 2086-2102.

- Hobbs, A., Losordo, T., DeLong, D., Regan, J., Bennett, S., Gron, R. and B. Foster, 1997. A commercial, public demonstration of recirculating aquaculture technology: The CP&L/EPRI Fish Barn at North Carolina State University. In: M.B. Timmons and T. M. Losordo (editors). *Advances in aquacultural engineering. Proceedings from the aquacultural engineering society technical sessions at the fourth international symposium on tilapia in aquaculture. NRAES-105. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, 152 Riley- Robb Hall, Ithaca, NY. Pp. 151-158.*
- Hochheimer J. N., 1990. Trickle filter model for closed system aquaculture. Unpublished Ph.D. Dissertation. University of Maryland. College Park, Maryland.
- Hotos, G. N. & Vlahos, N., 1999. Observations on the conditioning of filter bed in hypersaline aquaria. *Aquacultural Engineering*, 19: 215-222.
- Huguenin, J. E. and J. Colt, 1989. Design and operating guide for aquaculture seawater systems. Elsevier Scientific Publishers, Amsterdam, The Netherlands.
- Kaiser G. E. and F. W. Wheaton, 1983. Nitrification filters for aquatic culture systems: state of the art. *Journal of the World Mariculture Society*, 14: 302-324.
- Kawai, A., Yoshida, Y. and M. Kimata, 1965. Biochemical studies on the bacteria in the aquarium with a circulation system - II. Nitrifying activity of the filter sand. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 31(1): 65-71.
- Landau, M., 1991. Introduction to aquaculture. J. Wiley & Sons. 440 p.
- Lewis, M. W. & D.P. Morris, 1986. Toxicity of nitrite to fish: A review. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 115:183-195.
- Liao, P. B., 1971. Water requirements of salmonids. *Progressive Fish Culturist*, 33(4): 210 - 224.
- Liao, P. B., Mayo, R. D. and Williams, S. W., 1972. A study for development of fish hatchery water treatment systems. Report prepared for U.S. Department of Army Corps of Engineers, Walla Walla District, Walla Walla, Washington.
- Liao P. B. and Mayo R. D., 1974. Intensified fish culture combining water reconditioning with pollution abatement. *Aquaculture*, 3: 61 - 85.
- Libey, G. S., 1993. Evaluation of a drum filter for removal of solids from a recirculating aquaculture system. In: J.K. Wang (editor), *Techniques for Modern Aquaculture. Proceedings of an Aquacultural Engineering Conference. Spokane, WA, June 1993. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI. Pp. 519-532.*
- Losordo, T. M., 1997. Tilapia culture in intensive recirculating systems. In: Costa-Pierce, B. and Rakocy, J. (editors), *Tilapia Aquaculture in the Americas, Volume 1. World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA. Pp. 185-208.*
- Losordo, T. M., Masser, P. M. & J. E. Rakocy, 1998. Recirculating aquaculture tank production systems. An overview of critical considerations. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) publication No. 451.
- Losordo, T. M., Masser, P. M. & J. E. Rakocy, 1999. Recirculating aquaculture tank production systems. A review of component options. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) publication No. 453.
- Manthe, D. P., Malone, R. F. and S. Kumar, 1988. Submerged rock filter evaluation using an oxygen consumption criterion for closed recirculating systems. *Aquacultural Eng.*, 7: 97 - 111.

- Masser, P. M., Rakocy, J. E. & Losordo, T. M., 1999. Recirculating aquaculture tank production systems. Management of recirculating systems. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) publication No. 452.
- Malone, R. F. and D. G. Burden, 1988. Design of recirculating soft crawfish shedding systems. Louisiana Sea Grant College Program, Louisiana State University, Baton Rouge, LA.
- Paulson, L. J., 1978. Models of ammonia excretion for brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 37(9): 1421 - 1425.
- Piper, R. G., McElwain, I. B., Orme, L. E., McCraren, J. P., Fowler, L. G. and J. R. Leonard, 1982. Fish hatchery management. United States Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, D.C.
- Poxton, M. G. and S. B. Alouse, 1987. Cyclical fluctuations in ammonia and nitrite-nitrogen resulting from the feeding of turbot (*Scophthalmus maximus*) in recirculating systems. Aquacultural Engineering, 6: 301 - 322.
- Soderberg, W. R., 1995. Flowing water fish culture. Lewis Publishers (CRC Press, Inc.). 147 p.
- Speece, R. E., 1973. Trout metabolism characteristics and the rational design of nitrification facilities for water reuse in hatcheries. Transactions of the American Fisheries Societies, 102(2): 223 - 234.
- Spotte, S., 1979. Fish and invertebrate culture: Water management in closed systems. John Wiley & Sons, New York.
- Spotte, S., 1991. Captive seawater fishes. Science and technology. John Wiley & Sons. 588 p.
- Timmons, M. B. and T. M. Losordo (editors), 1994. Aquaculture water reuse systems: Engineering, design and management. Developments in Fisheries Sciences 27. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.
- Tomasso, J. R., 1994. Toxicity of nitrogenous wastes to aquaculture animals. Rev. Fish. Sci., 2(4): 291-314.
- Tvinnereim, K., 1988. Design of water inlets for closed fish farms. In: Proceedings of the Conference: Aquaculture Engineering: Technologies for the Future. Sterling Scotland. Icheme Symposium Series #111, EFCE Publications Series # 66, Rugby, UK. Pp. 241-249.
- Watten, B. J., 1994. Aeration and oxygenation. In: M.B. Timmons and T.M. Losordo (editors), Aquaculture water reuse systems: Engineering, design and management. Developments in Fisheries Sciences 27. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.
- Westers H. and Pratt K. M., 1977. Rational design of hatcheries for intensive salmonid culture, based on metabolite characteristics. Prog. Fish-Cult., 39: 157-65.
- Westers, H., 1979. Principles of intensive fish culture. Michigan Department of Natural Resources, Lansing, MI. 108 p.
- Wheaton, F. W., 1977. Aquaculture engineering. New York, John Wiley and Sons.
- Wheaton, F. W., Hochheimer, J.N., Kaiser, G.E., Malone, R.F., Krones, M.J., Libey, G.S. and C.C. Estes, 1994. Nitrification filter design methods. In: Timmons, M.B. and T. M. Losordo (editors), Aquaculture water reuse systems: Engineering, design

- and management. Developments in Fisheries Sciences 27. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands. Pp. 125-171.
- Wimberly, D. M., 1990. Development and evaluation of a low-density media biofiltration unit for use in recirculating fish culture systems. Master's Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- Wortman, B., 1990. Effect of temperature on biofilm nitrification. M.S. Thesis. University of Maryland. College Park, Maryland.