

Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΛΙΕΙΑΣ – ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Γεώργιος Ν. Χώτος
Καθηγητής

ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΙΧΘΥΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ
ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ
(θεμελιώδεις βιολογικές και τεχνικές γνώσεις)



Μεσολόγγι 2016

1. Εισαγωγή

Καθώς ο πληθυσμός της Γης αυξάνεται και ο μέσος όρος ποιότητας ζωής ανεβαίνει, η ανάγκη για ποιοτική τροφή αυξάνεται αναλόγως. Τα αλιεύματα στα οποία βασίζεται η ανθρωπότητα για παροχή κυρίως πρωτεϊνών υψηλής διατροφικής αξίας, βρίσκονται ολοένα και υπό μεγαλύτερη αλιευτική πίεση με μερικά από αυτά σε οριακή κατάσταση (τόνος, μπακαλιάρος, κ.ά.). Η αύξηση της αλιευτικής προσπάθειας για μεγαλύτερες «ψαριές» δεν θα κάνει πλέον τίποτα άλλο, παρά να αφαιρεί από τις επόμενες «γενιές» ψαριών ολοένα και περισσότερους απογόνους, δημιουργώντας έτσι μια απελπιστική περιδίνηση που αν αφεθεί ανεξέλεγκτη θα αφανίσει ίσως και για πάντα πολύτιμα ιχθυοαποθέματα. Εκτός αυτού του κινδύνου υπάρχει σήμερα και ένα άλλο πρόβλημα, αυτό της συσσώρευσης τοξικών ουσιών στα «άγρια» ψάρια, ουσιών όπως ο υδράργυρος και άλλα βαρέα μέταλλα, προερχόμενα από την υπερβολική βιομηχανική δραστηριότητα με τα παραπροϊόντα της που άμεσα ή έμμεσα καταλήγουν στη θάλασσα. Αποτέλεσμα αυτών, η βιοσυσσώρευσή τους διά της τροφικής «πυραμίδας-αλυσίδας» στους ανώτερους θηρευτές – ψάρια.

Η **υδατοκαλλιέργεια** και ειδικότερα η **ιχθυοκαλλιέργεια** «έρχεται» ως απάντηση σε αυτά τα προβλήματα και «φιλοδοξεί», αφενός να υποκαταστήσει την αλιευτική παραγωγή και αφετέρου να παράγει ψάρια καθαρά από τοξικές ουσίες. Όμως οι παραδοσιακού τύπου ιχθυοκαλλιέργειες σε δεξαμενές και κάθε τύπου υδατοσυλλογές, απαιτούν πολύ νερό το οποίο (ιδιαίτερα το γλυκό) δεν είναι ατελείωτο, τόσο λόγω των απαιτήσεων της γεωργίας, όσο και για τις ανάγκες του υπερπληθυσμού ο οποίος σε πολλά μέρη του πλανήτη το στερείται. Δηλαδή με άλλα λόγια, η ίδια ανθρώπινη πίεση για αύξηση των αλιευμάτων, στην περίπτωση της ιχθυοκαλλιέργειας μειώνει τα αποθέματα νερού. Το πρόβλημα αυτό έρχεται να το αντιμετωπίσει η ιχθυοκαλλιέργεια με **ανακύκλωση του νερού** ή όπως αλλιώς ονομάζεται: **«κλειστά συστήματα ή κυκλώματα»**, με τα οποία **μια μεγάλη ποσότητα ψαριών εκτρέφεται σε μια ελάχιστη ποσότητα νερού**.

Εχει επικρατήσει (κατά την «φιλολογία» επί των περιορισμένων πλέον αλιευτικών αποθεμάτων), η κοινή άποψη ότι με την ιχθυοκαλλιέργεια θα αυξήσουμε την παγκόσμια προσφορά σε ψάρια (Σχήμα 1). Βεβαίως και αυτό μπορεί να γίνει αλλά **το πως θα γίνει** πρέπει να ληφθεί υπόψη. Έτσι λοιπόν πρέπει να κατανοηθεί το εξής σημαντικό. Ενώ με την **κτηνοτροφία** ο άνθρωπος εκτρέφει **φυτοφάγα** ζώα, με την ιχθυοτροφία εκτρέφει **σαρκοφάγα** (στην πλειονότητά τους) ζώα. Ψάρια όπως σολομοί, πέστροφες, χέλια, τσιπούρες, λαβράκια κ.ά. είναι καθαρώς σαρκοφάγα και η τεχνητή τροφή με την οποία διατρέφονται προέρχεται κυρίως (πρωτεϊνικώς και λιπιδικώς) από άλλα ψάρια τα οποία μετατράπηκαν σε

ιχθυάλευρα. Και όχι μόνο αυτό, αλλά και η μετατροπή της τροφής σε παραγόμενη τελικώς σάρκα ψαριών με συντελεστή μετατροπής 2-3, σημαίνει ότι περί τα 2 κιλά ψαριών ως ιχθυάλευρα (σε ξηρή βάση) χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθεί 1 κιλό σολομός, λαβράκι κ.λπ. Και αυτό χωρίς να υπολογίσουμε και άλλες απώλειες ενέργειας κατά τη μακρά εκτροφή. Και δεν είναι βέβαια αντεπιχείρημα το ότι τα ιχθυάλευρα προέρχονται από «χαμηλής» ποιότητας ψάρια όπως γαύρος, σαρδέλα, κ.ά., για να παραχθούν τελικά ψάρια «υψηλής» ποιότητας όπως ο σολομός, το λαβράκι, κ.ά. Η «καθαρή» αλήθεια είναι ότι αυτού του τύπου η εντατική ιχθυοκαλλιέργεια «μειώνει» την παγκόσμια προμήθεια αλιευμάτων. Η οικολογική λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η ιχθυοκαλλιέργεια με ψάρια χαμηλά στην τροφική πυραμίδα (τιλάπια, κυπρίνος, κ.ά.) ή με ψάρια (κεφαλόπουλα, κ.ά.) που θα αναπτύσσονται εξίσου καλά με δίαιτες βασισμένες σε επεξεργασμένα προϊόντα κυρίως φυτικής προέλευσης, κάτι στο οποίο ήδη ερευνούν παγκοσμίως και όταν κατορθωθεί αυτό μπορούμε να είμαστε οικολογικώς σωστοί. Μέχρι όμως την απόλυτη επίτευξη κάτι τέτοιου, η ικανοποίηση των αναγκών του ανθρώπου σε «ποιοτικά» ψάρια, ας γίνει αποδοτικά (χωρίς σπατάλη τροφής) και ιδιαίτερα όταν αναφερόμαστε στα κλειστά συστήματα τα οποία έχουν οικολογικά πλεονεκτήματα (οικονομία νερού, αποφυγή περιβαλλοντικής ρύπανσης κ.ά.), ας τα χρησιμοποιήσουμε σωστά.



Σχήμα 1. Παγκόσμια παραγωγή υδρόβιων ζώων από ιχθυοκαλλιέργεια με % συμμετοχή της κάθε κατηγορίας στην ολική παραγωγή (περί τους 90 εκατομ. τόνους), (κατά J. Brengballe-2015, τροποποιημένο από Γ. Χώτο).

Σήμερα (2016) η μηχανική και η βιολογία που εμπλέκονται στη λειτουργία των κλειστών συστημάτων είναι καλά γνωστές και τα προβλήματα που υπήρχαν σε αυτόν τον καινοφανή για προ 30ετίας κλάδο έχουν ξεπεραστεί. Σήμερα ο παράγοντας που καθορίζει την επιτυχή εμπορική έκβαση οποιασδήποτε ιχθυοκαλλιέργειας κλειστού κυκλώματος είναι η οικονομία, δηλαδή ο συναγωνισμός της τιμής με την οποία μπορεί να πωληθεί το παραγόμενο ψάρι για να αφήσει κέρδος, με

την τιμή πώλησης των αλιευμένων κατά τα συνήθη ψαριών. Έτσι οι ρεαλιστικά λειτουργούσες ιχθυοκαλλιέργειες κλειστού κυκλώματος με την παραγωγή υψηλής ποιότητας και αξίας ψαριών (ή και άλλων ζώων, γαρίδες, κ.ά.), στοχεύουν πλέον σε ειδικώς απαιτητικό καταναλωτικό κοινό. Γενικό συμπέρασμα από τα παραπάνω: *Η ιχθυοκαλλιέργεια με ανακύκλωση του νερού δεν φιλοδοξεί ούτε μπορεί (ακόμα) να θρέψει την ανθρωπότητα. Όμως η ιχθυοκαλλιέργεια με ανακύκλωση του νερού μπορεί να παράγει ψάρια με οικονομία και βέλτιστη διαχείριση πόρων.*

2. Ορισμός - γενικά χαρακτηριστικά της ιχθυοκαλλιέργειας κλειστού συστήματος (ανακυκλούμενο νερό)

Εφεξής οι όροι: «ανακυκλούμενο νερό», «κλειστό σύστημα», «κλειστό κύκλωμα», «υπερεντατική ιχθυοκαλλιέργεια» όπου και όπως και αν χρησιμοποιούνται, θα αναφέρονται στην ίδια δραστηριότητα, αυτή της εκτροφής ψαριών σε ένα σύστημα υποστήριξης της ζωής των.



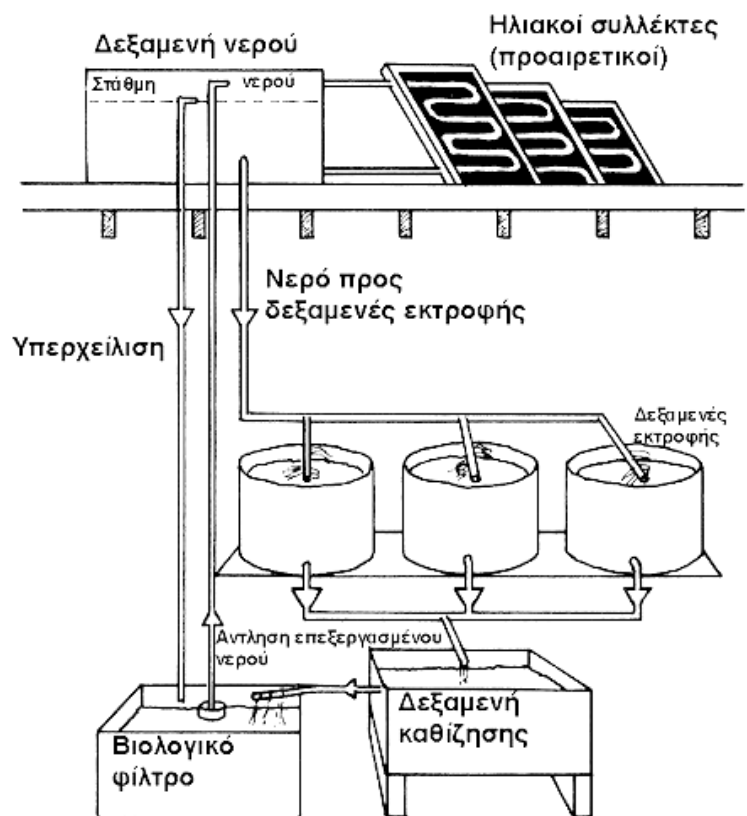
Σχήμα 2. Γενική θεωρητική απεικόνιση διεργασιών σε ένα σύστημα ιχθυοκαλλιέργειας με ανακυκλούμενο νερό.

Πιο αναλυτικά: Ένα κλειστό σύστημα υδατοκαλλιεργειών ορίζεται ως η κατασκευή εκείνη στην οποία το περιεχόμενο νερό συνεχώς επανακυκλοφορεί μέσα στο σύστημα, **επανα-ρυθμιζόμενο** συνεχώς και δεν ανανεώνεται με φρέσκο νερό παρά μόνο σε χαμηλό ποσοστό (όχι περισσότερο από 10% ημερησίως) (Σχήματα 2, 3 & 4). Με τον όρο «επανα-ρυθμιζόμενο» νοείται το σύνολο των διαδικασιών φυσικών ή

χημικών που καθιστούν το νερό κατάλληλο για τη διαβίωση των ψαριών. Δηλαδή, αφορά τόσο τις διαδικασίες εμπλουτισμού του νερού σε στοιχεία (οξυγόνωση), όσο και τις διαδικασίες καθαρισμού του (απαλλαγή από αμμωνία-νιτρώδη, διοξείδιο του άνθρακα), καθώς και ρυθμίσεις θερμοκρασίας, αλκαλικότητας, αλατότητας και pH, για να αναφερθούν τα κυρίαρχα από αυτά.



Σχήμα 3. Γενική σχηματική απεικόνιση των βασικών διακριτών μερών που αποτελούν ένα κλειστό σύστημα ιχθυοκαλλιέργειας (κατά J. Brengballe-2015, τροποποιημένο από Γ. Χώτο).



Σχήμα 4. Διαγραμματική αφαιρετική απεικόνιση ενός κλειστού συστήματος ιχθυοκαλλιέργειας με τα βασικά του συστατικά μέρη. Ηλιακοί συλλέκτες για τη θέρμανση του νερού (προαιρετικοί).

Για να μπορέσει η ιχθυοπαραγωγή ενός κλειστού συστήματος να αξιοποιήσει οικονομικά την κατά κανόνα ακριβή επένδυση που έγινε για τη κατασκευή-λειτουργία του, πρέπει να φθάσει στο μέγιστο δυνατό επίπεδο και αυτό σημαίνει **πολλά ψάρια σε περιορισμένο χώρο** (Σχήμα 5). Μια δυναμική αποτύπωση της έντασης της εκτροφής, είναι το βάρος (μάζα) των ψαριών σε γραμμάρια (g) ή κιλά (kg) ανά μονάδα ποσότητας νερού. Συνήθως (και αυτό είναι το σωστό), η μονάδα αυτή είναι ο όγκος του νερού εκφραζόμενος ως λίτρα (L) ή κυβικά μέτρα (m^3). Ετσι έχουμε συνήθως **ιχθυοπυκνότητες** ή **ιχθυοφορτίσεις** εκφραζόμενες ως g/L ή kg/m^3 . Ο όρος ιχθυοφόρτιση εκφράζει συχνά και τη μάζα (ή και μήκος ενίοτε) των ψαριών ανά ροή νερού (π.χ. $kg/L/min$), όμως αυτό είναι μια ιδιαίτερη κατάσταση και όπου χρησιμοποιείται με αυτή την έννοια, γίνεται σαφές από την περιγραφή και τις χρησιμοποιούμενες μονάδες.

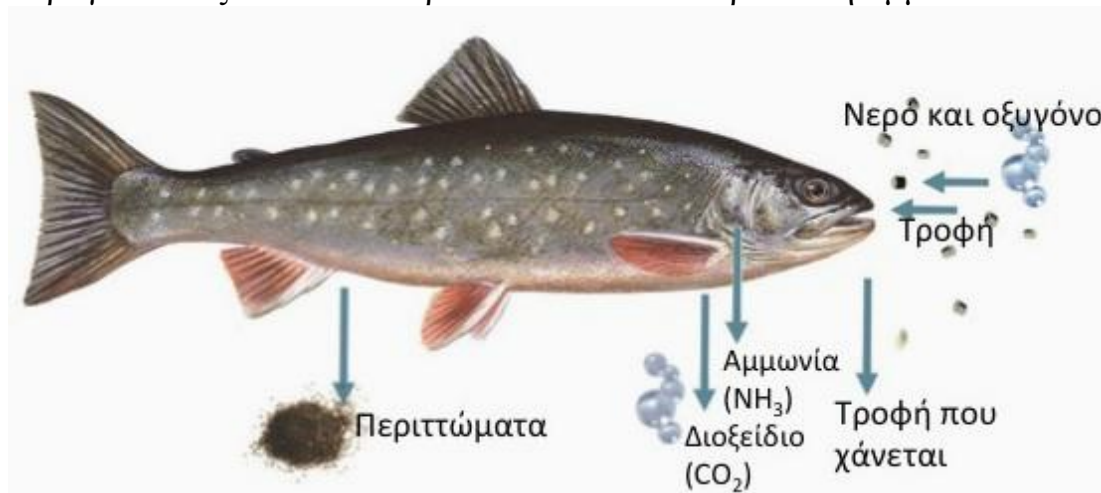


Σχήμα 5. Φωτογραφία (από το διαδίκτυο) ενδεικτική της μεγάλης ιχθυοπυκνότητας σε μια δεξαμενή εκτροφής κλειστού συστήματος.

Η ιχθυοπυκνότητα στα κλειστά συστήματα είναι πολύ μεγαλύτερη από τα ανοικτά (εκτατικά, ημιεντατικά ή εντατικά) για το ίδιο εκτρεφόμενο είδος. Βασικός, πρώτος και κύριος παράγοντας που καθορίζει το άνω όριο ιχθυοπυκνότητας, είναι το **διαθέσιμο διαλυμένο οξυγόνο**. Αν και είναι πολύ δύσκολο να διατυπωθεί ένας γενικός κανόνας άνω ορίου ιχθυοπυκνότητας, επειδή αυτό έχει να κάνει με το είδος και το στάδιο ανάπτυξης του ψαριού, τη θερμοκρασία, την αλατότητα, την τροφή κ.ά., μπορούμε να προσεγγίσουμε μια γενική πραγματικότητα αναφέροντας ότι με χρησιμοποίηση ατμοσφαιρικού αέρα το μέγιστο της ιχθυοπυκνότητας μπορεί να φτάσει περί τα $60 kg/m^3$ και αν

χρησιμοποιήσουμε καθαρό οξυγόνο μπορούμε να φτάσουμε και 100-200 kg/m³ (και περισσότερο, ανάλογα με το ψάρι). Για να εικονοποιηθεί και να κατανοηθεί καλύτερα αυτό, ας φανταστούμε ότι με μια ιχθυοπυκνότητα 100 kg/m³ είναι σαν να ζει ένα ψάρι 25 – 30 cm σε 4 L νερό!! Προφανώς για να διατηρηθούν ζωντανά τόσα πολλά ψάρια σε τόσο λίγο νερό, απαιτείται ένα προσεκτικά σχεδιασμένο σύστημα εκτροφής.

Τα ψάρια σε ένα υπερφορτωμένο σύστημα μπορεί να ψοφήσουν επειδή είτε: α) θα καταναλώσουν όλο το οξυγόνο και θα ασφυκτιούν μέχρι θανάτου, είτε: β) θα αυτοδηλητηριαστούν από τα αζωτούχα εκκρίματά τους. Τόσο η εξάντληση του οξυγόνου όσο και η αύξηση της συγκέντρωσης της αμμωνίας συμβαίνουν τόσο πιο γρήγορα όσο πιο υπερφορτωμένο είναι το σύστημα. Ένα κλειστό σύστημα φροντίζει να παρέχει συνεχώς οξυγόνο και να αφαιρεί αφενός το διοξείδιο του άνθρακα και αφετέρου την αμμωνία, την οποία τα ψάρια εκκρίνουν ως παραπροϊόν του καταβολισμού των πρωτεϊνών (Σχήμα 6). Για να μπορέσει να τα επιτύχει αυτά συνεχώς και απροβλημάτιστα, θα πρέπει να έχουν αφαιρεθεί από το ανακυκλούμενο νερό τα αιωρούμενα οργανικά στερεά (υπολείμματα τροφής, περιττώματα), τα οποία συνεχώς συσσωρεύονται και τα οποία πέραν του ότι μπορούν να ερεθίσουν τα βράγχια των ψαριών, αποικοδομούμενα καταναλώνουν οξυγόνο, παράγουν διοξείδιο του άνθρακα και επιπλέον πρόσθετη αμμωνία.



Σχήμα 6. Αφαιρετική απεικόνιση της ύλης που καταναλώνει και αυτής που εκκρίνει ένα ψάρι.

Ανακεφαλαιώνοντας συνοπτικώς, 3 πράγματα πρέπει οπωσδήποτε να γίνονται στο ανακυκλούμενο νερό με σκοπό την επανα-ρύθμισή του συνεχώς και τα οποία θεωρούνται «ζωής ή θανάτου»:

1. Να αφαιρούνται τα αιωρούμενα στερεά,
2. Να προστίθεται οξυγόνο και να αφαιρείται το διοξείδιο του άνθρακα,
3. Να αφαιρείται η αμμωνία.

Πρόκειται για τρεις διαδικασίες οι οποίες δεν μπορούν να επιτελεστούν αποτελεσματικά και στον ύψιστο βαθμό μέσα στις δεξαμενές εκτροφής ψαριών. Συνεπώς το νερό πρέπει να ανακυκλώνεται και να μεταφέρεται με αντλίες σε ξεχωριστά ιδιαίτερα τμήματα όπου εκεί θα γίνεται η συγκράτηση των στερεών, η ανταλλαγή των αερίων και η αφαίρεση της αμμωνίας.

Η περιορισμένη ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται στο κλειστό σύστημα προσφέρει τεράστια πλεονεκτήματα για την παραγωγή των ψαριών. Στις παραδοσιακού τύπου ιχθυοκαλλιέργειες η εκτροφή εξαρτάται ολοκληρωτικώς από τις εξωτερικές συνθήκες όπως: θερμοκρασία νερού (π.χ. του ποταμού), καθαρότητα του νερού (θολερότητα, πτώματα ζώων), επίπεδο οξυγόνου, φύλλα και κλαδιά που παρασυρόμενα μπορούν να φράξουν την υδροληψία κ.ά. Σε ένα κλειστό σύστημα όλοι αυτοί οι εξωτερικοί παράγοντες είτε εξαφανίζονται είτε ελαχιστοποιούνται, ανάλογα με το βαθμό της ανακύκλωσης και την ειδική κατασκευή της μονάδας (υπάρχουν και υπαίθριες μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας με ανακύκλωση).

Ο έλεγχος των παραμέτρων της εκτροφής όπως θερμοκρασία, οξυγόνο ή ακόμα και διάρκεια φωτισμού, δημιουργεί σταθερό και βέλτιστο περιβάλλον εκτροφής για τα ψάρια, το οποίο στρεσάρονται λιγότερο και συνεπώς παρουσιάζουν καλύτερη αύξηση. Οι σταθερές συνθήκες δίδουν επιπλέον τη δυνατότητα στον εκτροφέα να προβλέψει τον ρυθμό αύξησης και να υπολογίσει με καλή ακρίβεια πότε τα ψάρια του θα έχουν φθάσει σε μέγεθος πώλησης, κάτι που είναι από τα βασικότερα στοιχεία στην διαχείριση κάθε εμπορικής επιχείρησης.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα που προσφέρει η ιχθυοκαλλιέργεια με ανακυκλούμενο νερό, υπάρχουν και άλλα, με πιο σημαντικό αυτό που αφορά τις ασθένειες. Η πιθανότητα εισόδου παθογόνων παραγόντων μειώνεται σε ένα κλειστό σύστημα καθώς χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα νερού από τον φυσικό υδατοχώρο. Στις παραδοσιακές ιχθυοκαλλιέργειες η συνεχής λήψη νερού από λίμνες, ποτάμια ή θάλασσα αυξάνει την πιθανότητα εισαγωγής ασθενειών. Στα κλειστά συστήματα επειδή δεν απαιτείται πολύ νερό, η υδροληψία γίνεται συνήθως από γεώτρηση ή πηγές όπου η επικινδυνότητα για ύπαρξη παθογόνων είναι μειωμένη. Αν μάλιστα ληφθεί υπ' όψη ότι σε καλά εξοπλισμένες ιχθυοκαλλιέργειες με ανακύκλωση λειτουργεί συχνά και σύστημα απολύμανσης του νερού (υπεριώδης ακτινοβολήση ή/ και οζονισμός), τότε η κατάσταση γίνεται πολύ ασφαλής (απόλυτα σίγουρη ποτέ δεν μπορεί να είναι). Αυτό που συνήθως συμβαίνει, είναι ότι σε πολλά λειτουργούντα κλειστά συστήματα δεν παρουσιάζονται προβλήματα με ασθένειες και ως εξ αυτού η χρήση φαρμάκων είναι πολύ μειωμένη, γεγονός επωφελές και για την παραγωγή και για το περιβάλλον.

Για να φτάσει όμως ένας εκτροφέας με ένα τέτοιο σύστημα σε επίπεδα ασφάλειας και σιγουριάς σχετικά με τις ασθένειες, πρέπει να έχει προσέξει πολύ σχετικώς με τα αυγά ή τα ιχθύδια που εισήγαγε στην μονάδα του. Πολλές ασθένειες έχουν τη γενεσιουργό αιτία τους σε μολυσμένα αυγά ή μικρά ψαράκια που τοποθετήθηκαν στο σύστημα για να αρχίσει η εκτροφή. Η λύση είναι να μην τοποθετούνται απευθείας στο σύστημα ψάρια από μη ελεγμένες πηγές, αλλά αντιθέτως από όπου και αν προέρχονται (είτε αυγά είτε ιχθύδια), να απολυμαίνονται με την είσοδό τους στη μονάδα στο μέγιστο δυνατό βαθμό.

2.1. Θρέψη των ψαριών

Όπως όλα τα αιχμαλωτισμένα εκτρεφόμενα ζώα έτσι και τα ψάρια (ειδικά στο κλειστό σύστημα) δεν έχουν για τη θρέψη τους παρά μόνο την τροφή που τους παρέχεται. Τα γεύματα πρέπει να είναι πλήρη από άποψη θρεπτικών στοιχείων που χρειάζεται κάθε είδος ψαριού (γνωστά, παρέχονται από τους προμηθευτές των τροφών) για να ολοκληρώσει τον κύκλο ανάπτυξής του (ακόμα και από «αυγό» σε «αυγό»). Ο πιθανός υποσιτισμός τους θα καταλήξει σε φτωχή αύξηση, ασθενική κράση και παραμορφώσεις σώματος (π.χ. στραβή σπονδυλική στήλη), τύφλωση, ακόμη και θάνατο. Η σωστή σύνθεση της τροφής στα απαραίτητα συνθετικά της, κυρίως πρωτεΐνες (με τα απαραίτητα αμινοξέα) και λίπη (με τα απαραίτητα πολυακόρεστα λιπαρά οξέα), μαζί με βιταμίνες, ιχνοστοιχεία και ποσοστό υδατανθράκων, αποτελεί μέλημα των ερευνητικών κέντρων για τη διατροφή των ψαριών και δεν χρειάζεται να απασχολείται με αυτό ο εκτροφέας. Σήμερα οι εταιρείες προμήθειας ιχθυοτροφών παρασκευάζουν μια μεγάλη ποικιλία τροφών για κάθε είδους ιχθυοκαλλιέργεια και δεν υπάρχει λόγος να πειραματίζεται ο εκτροφέας με δικές του συνταγές (έστω και βάσει επιστημονικών οδηγιών) σε αυτοσχέδια εργαστήρια (αναμίξεις, αλέσματα, κιμαδοποίηση, τεμαχισμός, ξήρανση κ.λπ.) για παρασκευή πελετών (pellets). Η βιομηχανικώς ελεγμένη και κατάλληλη τροφή για κάθε είδος ψαριού, κυκλοφορεί σε ειδικές συσκευασίες, είναι αποκλειστικά ξηρού τύπου, σε διάφορα μεγέθη κόκκων (δίδονται οδηγίες για δοσολογίες, μέγεθος κ.λπ.) και το μόνο που έχει να κάνει ο εκτροφέας (ίσως το σημαντικότερο καθήκον) είναι να διαχειρίζεται αυτή την τροφή με τον αποδοτικότερο δυνατό τρόπο. Φυσικά δεν πρέπει καν να υπάρξει σκέψη για χρησιμοποίηση νωπής τροφής (π.χ. αλεσμένα ψάρια κ.ά.), καθώς αυτή αφενός μπορεί να είναι οξειδωμένη και αφετέρου (και το κυριότερο) θα ρυπάνει τόσο πολύ το νερό που τα φίλτρα δεν θα μπορέσουν να το καθαρίσουν. Αυτό θα εκτοξεύσει τα επίπεδα της αμμωνίας, θα μειώσει το οξυγόνο και (ας μην το ξεχνάμε), θα εισάγει στο νερό πλήθος παθογόνων μικροβίων.



Σχήμα 7. Η μετατροπή της τροφής σε σάρκα για τα εκτρεφόμενα ζώα συγκριτικά με τα ψάρια. Ομως να σημειωθεί ότι η δίαιτα των χερσαίων ζώων βασίζεται σε φυτική ύλη.

Η ποσότητα τροφής που ένα ψάρι μπορεί ωφέλιμα να καταναλώσει, εξαρτάται από το μέγεθός του και τη θερμοκρασία του νερού. Μικρότερα ψάρια και υψηλότερη θερμοκρασία σημαίνει και μεγαλύτερη απαίτηση για τροφή για ένα συγκεκριμένο μέγεθος (ως βάρος) ψαριού. Για κάθε είδος ψαριού σε κάθε συσκευασία τροφής υπάρχουν πίνακες που καθορίζουν την ποσότητα τροφής (ως ποσοστό του σωματικού βάρους) που πρέπει το ψάρι να καταναλώσει ημερησίως σε μια ορισμένη θερμοκρασία και σωματικό μέγεθος. Η ημερήσια ποσότητα τροφής σε γενικές γραμμές κυμαίνεται από λιγότερο του 1% έως περίπου 10 % του σωματικού βάρους ανά ημέρα. Γενικώς στα κλειστά συστήματα, για τη μεγαλύτερη περίοδο λειτουργίας που αφορά την πάχυνση, απαιτούνται ποσοστά 2-3 % ενώ για την προπάχυνση (ιχθύδια) άνω του 5 %. Καθώς η ποσότητα τροφής αποτελεί ποσοστό του σωματικού βάρους του ψαριού και επειδή το ψάρι συνεχώς μεγαλώνει, εξυπακούεται ότι και η ποσότητα τροφής που δίδεται καθημερινώς, σταδιακά θα αυξάνεται.

Ως «**Συντελεστής μετατροπής της τροφής**» (FCR-Food Conversion Ratio) ορίζεται ο λόγος της τροφής που κατανάλωσε συνολικά ένα ζώο (σε ξηρή βάση) προς το βάρος που κέρδισε (σε νωπή βάση). Δηλαδή:

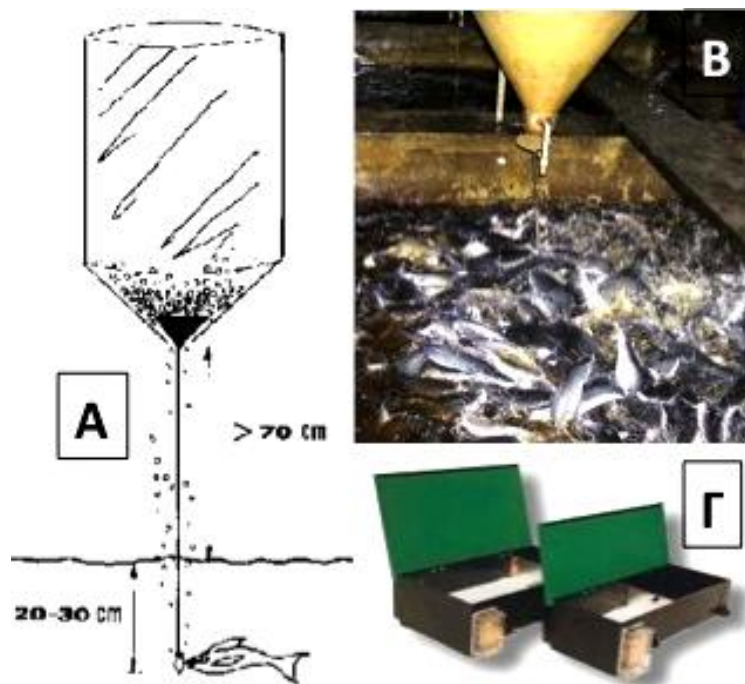
Συντελεστής	Βάρος	Βάρος ψαριού
Μετατροπής (FCR)	Τροφής	κερδισμένο
της Τροφής	(ξηρή)	(νωπό)

Προφανώς χαμηλά νούμερα FCR σημαίνουν καλύτερη εκμετάλλευση της τροφής. Τα μόνα εκτρεφόμενα ζώα που συναγωνίζονται σε ευνοϊκό FCR τα ψάρια, είναι τα κοτόπουλα που μπορεί να φτάσουν ακόμα και 2:1 (Σχήμα 7). Τα ψάρια μπορεί να έχουν ακόμα και (1,1):(1) αλλά μπορεί και υψηλότερο (χειρότερο) αν η διαχείριση δεν είναι σωστή. Το υπερτάϊσμα δεν κάνει καλό στην εκμετάλλευση της τροφής (αυξάνει το FCR), καθώς η τροφή δεν αφομοιώνεται ολοκληρωτικά και επιπλέον ρυπαίνει υπερβολικά το νερό και ρυπασμένο νερό (συνδυασμένο με τη

μεγάλη ιχθυοπυκνότητα), μειώνει την αποτελεσματικότητα μετατροπής της τροφής.

Τα σαρκοφάγα ψάρια όπως τα σαλμονιδή ή το λαβράκι, έχουν μεγάλο στόμαχο και μπορούν να ικανοποιηθούν γεμίζοντάς τον μόνο με ένα μεγάλο γεύμα την ημέρα, αν και το καλύτερο είναι αυτό να μοιραστεί σε δύο γεύματα. Τα κατά βάση «φυτοφάγα» ψάρια όπως η τιλάπια έχουν μικρό στόμαχο και είναι «βοσκητές» (grazers). Χρειάζονται συχνά γεύματα 2-3-4 φορές την ημέρα για να δώσουν τον καλύτερο ρυθμό αύξησης. Επίσης τα νεαρά ιχθύδια που μόλις απορρόφησαν τον λεκιθικό τους σάκο (σαλμονιδή) χρειάζεται να ταΐζονται κάθε 2 ώρες. Προφανώς αυτή η διαδικασία είναι εργατοβόρα και μπορεί να αντικατασταθεί από αυτόματες ταΐστρες ρυθμισμένες να διαμοιράζουν τροφή ανά τακτά διαστήματα. Διατίθενται ταΐστρες υπό τύπου διασκορπιστή, κοχλία, δονητή, ταινία κ.ά. Όλες έχουν χρονοδιακόπτη και με αυτόν καθορίζονται ο αριθμός και η συχνότητα των γευμάτων της τροφής που τοποθετείται στον κατάλληλο υποδοχέα τους. Υπάρχουν επίσης και οι «**ταΐστρες κατ' απαίτηση**» (**demand feeders**) στις οποίες στο κάτω μέρος του κωνικού δοχείου αποθήκευσης της τροφής, υπάρχει ένα διάφραγμα που μπορεί να μετακινείται και να αφήνει μικροποσότητα τροφής να πέφτει όταν ωθηθεί από μια ράβδο της οποίας το κάτω άκρο είναι βυθισμένο στο νερό της δεξαμενής εκτροφής (Σχήμα 8). Τα ψάρια με εκπληκτικό πραγματικά τρόπο μαθαίνουν γρήγορα ότι όταν κουνούν τη ράβδο πέφτει τροφή και έτσι κολυμπούν σε αυτό το σημείο και προκαλούν κατά βούληση την ενεργοποίηση του συστήματος. Οι ταΐστρες κατ' απαίτηση είναι ιδανικές για ιχθύδια που χρειάζονται να τρέφονται σχεδόν συνέχεια. Για τα μεγαλύτερα ψάρια υπάρχει σκεπτικισμός ανάμεσα στους εκτροφείς κατά πόσον υπάρχει κίνδυνος υπερταΐσματος που θα ρυπάνει το νερό.

Η παραγωγή αμμωνίας και η κατανάλωση οξυγόνου σχετίζονται άμεσα με την κατανάλωση της τροφής. Μετά το τάϊσμα η κατανάλωση οξυγόνου αυξάνεται άμεσα καθώς το ψάρι καταβολίζει την τροφή και συνεχίζει να αυξάνεται για μία ώρα περίπου. Με την κορύφωση της κατανάλωσης οξυγόνου αρχίζει και η παραγωγή αμμωνίας και συνεχίζεται για αρκετές ώρες καθώς συμβαίνει η απαμίνωση στο συκώτι του ψαριού. Επειδή η κατάλληλη ποιότητα νερού σε ένα κλειστό σύστημα συντηρείται με τον αερισμό (οξυγόνωση) και τη νιτροποίηση, η αυξημένη κατανάλωση οξυγόνου και παραγωγή αμμωνίας θα καταλήξει σε μειωμένο οξυγόνο και αυξημένη αμμωνία στο νερό. «Βγαίνοντας» αυτές οι παράμετροι έξω από τα αποδεκτά «στάνταρντς» θα προκληθεί στρες, ακόμα και θνησιμότητα στα ψάρια. Η κατανομή του ημερήσιου γεύματος σε περισσότερα ταΐσματα «απαλώνει» τις παραπάνω αρνητικές επιπτώσεις καθώς τις «απλώνει» στο χρόνο.



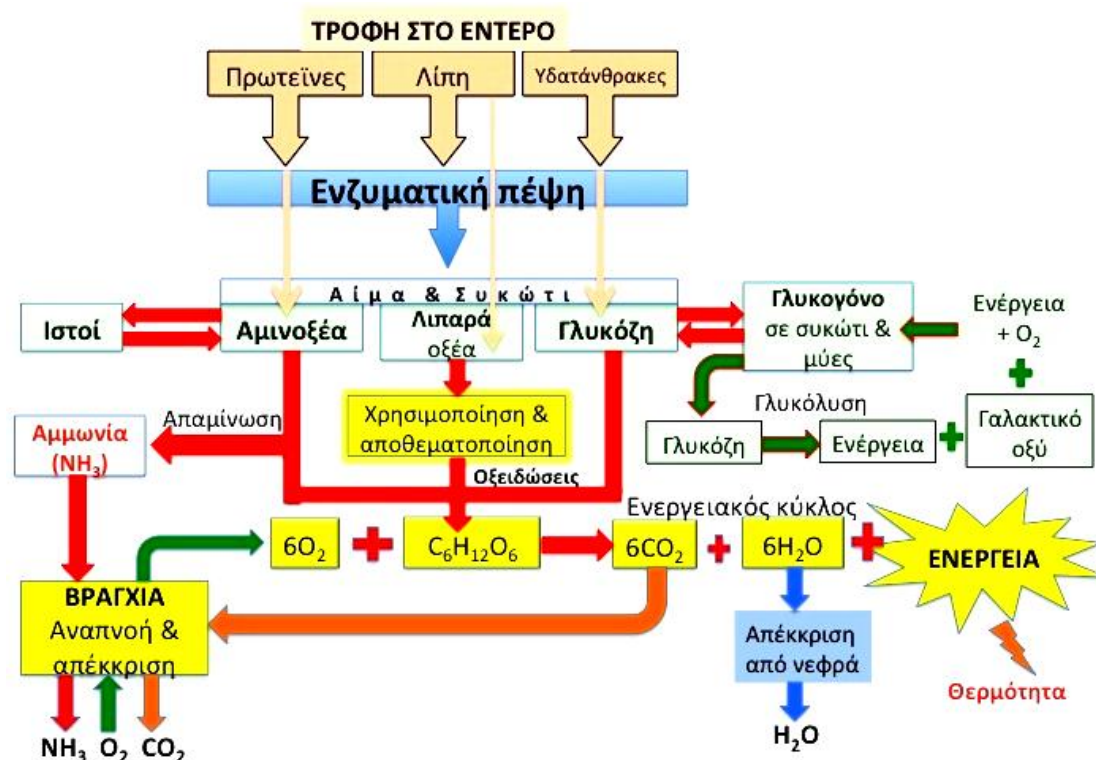
Σχήμα 8.
*A: διάγραμμα
 ταϊστρας κατ'
 απαίτηση (demand
 feeder).
 B: φωτογραφία
 παροχής τροφής από
 demand feeder.
 Γ: ταϊστρες κινούμενης
 ταινίας (belt feeders)
 ελεγχόμενης από
 χρονοδιακόπτη.*

2.2. Τα βασικά του μεταβολισμού των ψαριών

Ενα κλειστό σύστημα όσο πολύπλοκο και αν είναι, όσα μηχανικά και ηλεκτρονικά μέρη και αν έχει, όση επιδεξιότητα και αν έχει αποκτήσει κάποιος στη λειτουργία και συντήρησή τους, δεν πρόκειται να διατηρήσει ψάρια με ασφάλεια αν ο ιχθυολόγος (γενικώς ο εκτροφέας) δεν κατανοήσει τα ουσιώδη του μεταβολισμού των ψαριών. Ο μεταβολισμός των ψαριών, δηλαδή η μετατροπή της ενέργειας στον οργανισμό τους, είναι η κινητήρια δύναμη που θα μετατρέψει την τροφή σε σάρκα. Και κάτι πιο βασικό ακόμα, είναι η ζωοδόχος δύναμη για την ίδια την υγεία του ψαριού.

Οπως όλα τα ζώα, έτσι και τα ψάρια μετατρέπουν την τροφή σε ιστούς (και σάρκα). Η ενέργεια της τροφής δεν χρησιμοποιείται καθ' ολοκληρία για να παραχθεί ιστός, καθώς ένα μέρος της (το μεγαλύτερο) χρησιμοποιείται για να κρατιέται το ψάρι ζωντανό (συντήρηση), να κινηθεί και να αναπαραχθεί (ενεργός μεταβολισμός) και όλα αυτά μέσω βιοχημικών διεργασιών που συνεχώς καταναλώνουν ενέργεια και συνίστανται στην μετατροπή λιπών και πρωτεϊνών σε άλλα λίπη και πρωτεΐνες.

Συνοπτικώς, το όλο σκηνικό μπορεί να ιδωθεί ως ένας καταβολισμός της τροφής κατά τον οποίο καταναλώνονται τροφή και οξυγόνο και παράγονται παραπροϊόντα, διοξείδιο του άνθρακα από τον καταβολισμό των λιπών, πρωτεϊνών και υδατανθράκων και αμμωνία από τον καταβολισμό των πρωτεϊνών και των νουκλεϊκών οξέων (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Διαγραμματική απεικόνιση των «οδών» του μεταβολισμού στα ψάρια.

Σε ένα κλειστό σύστημα ιχθυοκαλλιέργειας παρέχονται τροφή και οξυγόνο και απομακρύνονται αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα για να καταλήξουμε σε αύξηση των ψαριών. Και όλα αυτά λαμβάνοντας υπόψη ότι πολύ περισσότερη τροφή από την αύξηση που θα επιτευχθεί πρέπει να δοθεί, επειδή το μεγαλύτερο μέρος της τροφής θα χαθεί ως θερμότητα κατά το μεταβολισμό. Αυτός είναι ο «φόρος» που πρέπει να πληρωθεί από ενεργειακή σκοπιά (Σχήμα 10).

Το καύσιμο του μεταβολισμού είναι το οξυγόνο το οποίο έχουν απόλυτη ανάγκη όλοι οι αερόβιοι ετερότροφοι οργανισμοί για να παράγεται ενέργεια στα κύτταρά τους (μόρια ATP, NADH) και να μπορούν έτσι να επιτελούν τις ποικίλες βιοχημικές διεργασίες καταβολισμού (διάσπαση ενώσεων), αναβολισμού (σύνθεση ενώσεων) και απέκκρισης των άχρηστων παραπροϊόντων (π.χ. NH_3).

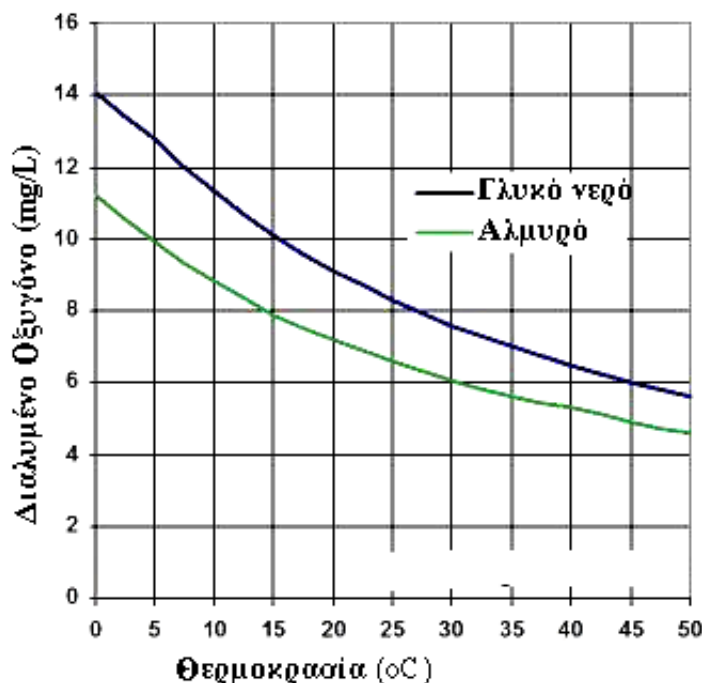
Το **διαλυμένο οξυγόνο** στο νερό (DO-Dissolved Oxygen) είναι αέριο και αυτό προσλαμβάνουν με την αναπνοή μέσω των βραγχίων τους τα ψάρια. Πρόκειται για το αέριο οξυγόνο (O_2) που έχει απλώς διαλυθεί στο νερό (Σχήμα 12) και όχι για το στοιχείο οξυγόνο (O) που είναι συνδεδεμένο με ομοιοπολικό δεσμό με τα υδρογόνα (H) στο μόριο του νερού (H_2O).



Σχήμα 10. Η πορεία της ενέργειας από την τροφή μέχρι την αύξηση του ψαριού. Τα νούμερα δηλώνουν το ποσοστό ενέργειας που απομένει κάθε φορά. Το μεγαλύτερο μέρος χάνεται και λίγο μετατρέπεται σε «σάρκα».

Καθώς το νερό υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν μπορεί να συγκρατήσει απεριόριστες ποσότητες οξυγόνου (π.χ. μέγιστο περί τα 13,7 mg/L-Σχήμα 11) συγκριτικά με την αφθονία του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα (240 mg/L), τα ψάρια εξελίχθηκαν να είναι (συγκριτικά με τα χερσαία ζώα) πολύ αποτελεσματικά στην πρόσληψή του από το νερό. Αυτή τους η αποτελεσματικότητα έχει να κάνει με την προς μία μόνο κατεύθυνση ροή του νερού μέσω των βραγχίων τους. Αντίθετα, στα χερσαία ζώα η ροή του αέρα ακολουθεί δύο κατευθύνσεις, αέρας που εισέρχεται διά της τραχείας κατά την εισπνοή αναμιγνύεται με τον αέρα που εξέρχεται κατά την εκπνοή. Στα ψάρια δεν υπάρχει τέτοια ανάμιξη. Επειδή τα ψάρια βρίσκονται σε μειονεκτικότερη θέση από τα χερσαία ζώα λόγω του ότι το νερό είναι πολύ φτωχότερο σε οξυγόνο, έχουν εξελίξει προσαρμογές μεγιστοποίησης της όσο το δυνατόν αποτελεσματικής αφαίρεσης οξυγόνου και μεταφοράς του στο αίμα. Αυτό επιτυγχάνεται με την **αντίθετη κίνηση νερού και αίματος**. Στα βραγχιακά ελάσματα το νερό ρέει προς μία κατεύθυνση και το αίμα προς την αντίθετη, κάτι που

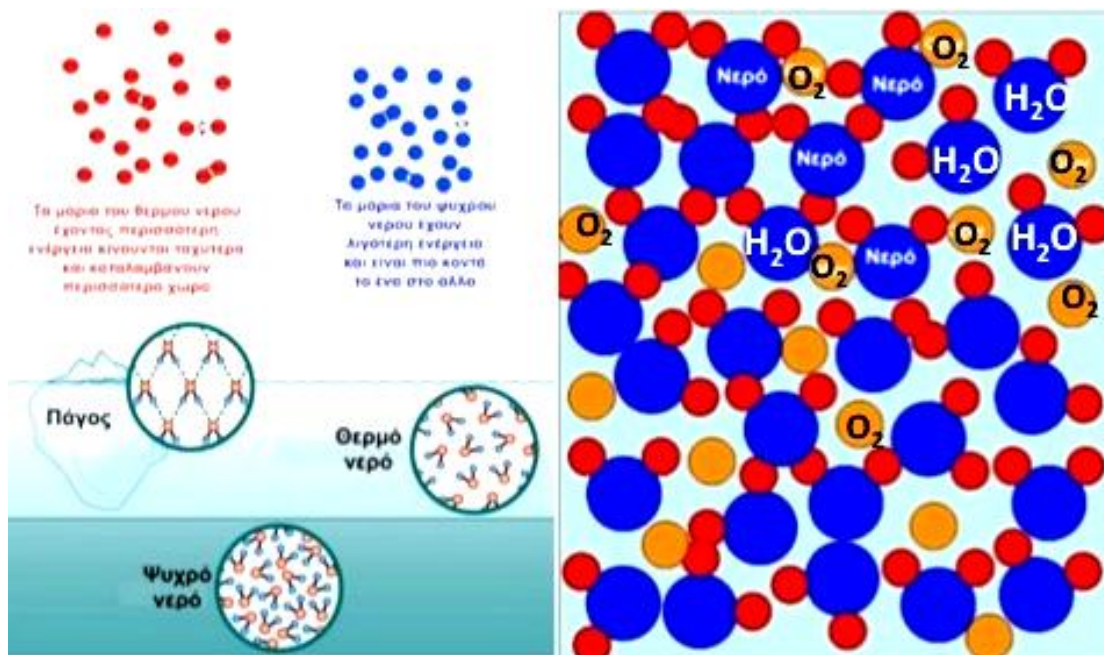
εξασφαλίζει τη μέγιστη ένταση **ανταλλαγής αερίων** (μην λησμονάται ότι παράλληλα με την πρόσληψη οξυγόνου – O_2 πρέπει να απαλλαχθούν και από το διοξείδιο του άνθρακα – CO_2). Αν νερό και αίμα έρρεαν παράλληλα μεταξύ τους τότε θα υπήρχε πολύ μικρότερη ανταλλαγή αερίων.



Σχήμα 11. Τιμές διαλυμένου οξυγόνου σε επίπεδο κορεσμού στο νερό, σε διάφορες θερμοκρασίες. Η **ιώδης** καμπύλη αντιστοιχεί σε γλυκά νερά, η **πράσινη** σε αλμυρά.

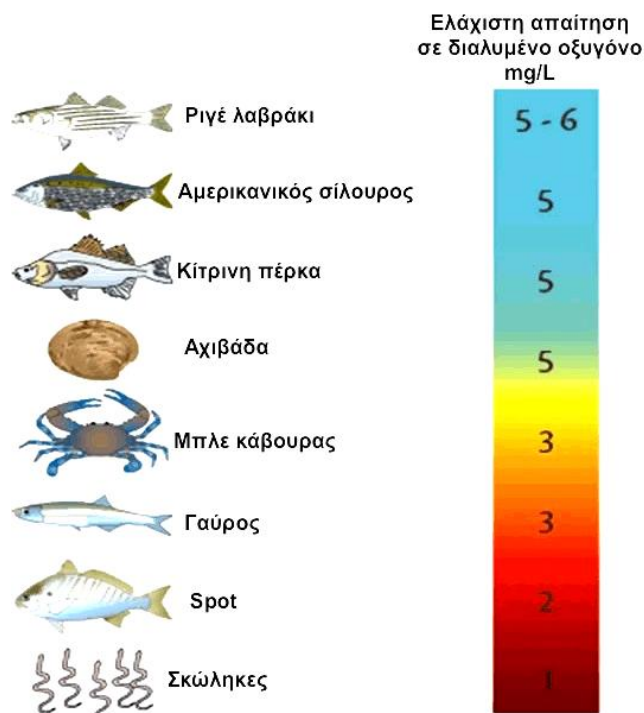
Αν και η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό είναι πολύ λιγότερη από ότι στον αέρα, η **μερική πίεση** του οξυγόνου (P_{O_2}) είναι ίδια και στα δύο μέσα. Υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση 1 Atm (760 mmHg) επειδή το οξυγόνο αποτελεί το 21 % περίπου του αέρα, η μερική του πίεση είναι $(21 \times 760)/100 = 160 \text{ mmHg} = 0,21 \text{ Atm}$. Συνεπώς το νερό μπορεί να κρατήσει ορισμένες μέγιστες ποσότητες οξυγόνου (υπό φυσιολογικές συνθήκες διάχυσής του από τον αέρα και διάλυσής του σε αυτό), με μερική πίεση 160 mmHg ανεξάρτητα με το ότι αυτή η μερική πίεση αντιστοιχεί κάθε φορά σε ποικίλες ποσότητες (συγκεντρώσεις σε mg/L) οι οποίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την αλατότητα του νερού.

Συγκέντρωση κορεσμού είναι εκείνη η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό (σε mg/L), η οποία αντιστοιχεί σε μερική πίεση 160 mmHg και ονομάζεται **100 % κορεσμός** ή απλώς κορεσμός. Από πίνακες δίδονται οι τιμές αυτές για διάφορες αλατότητες και θερμοκρασίες. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και η αλατότητα οι τιμές κορεσμού γίνονται όλο και μικρότερες.



Σχήμα 12. Η διάταξη των μορίων του νερού ανάλογα με τη θερμοκρασία (αριστερά) και πως αυτή επηρεάζει τη «συγκράτηση» ανάμεσά τους των μορίων του οξυγόνου (δεξιά). Αφαιρετική απεικόνιση. <http://worldoceanreview.com/en/wor-1/climate-system/great-ocean-currents/water-a-unique-molecule/> (τροποποιημένο από Γ. Χώτο).

Αυτό που πραγματικά συμβαίνει στο νερό της ιχθυοκαλλιέργειας είναι ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σχεδόν ποτέ δεν διατηρείται στην απόλυτη τιμή κορεσμού (100%). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι συνεχώς τα ψάρια και οι μικροοργανισμοί του νερού αναπνέουν και αφαιρούν διαλυμένο οξυγόνο, το οποίο δεν προλαβαίνει να αναπληρωθεί μέχρι τον κορεσμό από την ατμόσφαιρα, επειδή η διάχυσή του στο νερό είναι μια αργή διαδικασία. Έτσι λοιπόν όταν το διαλυμένο οξυγόνο μειωθεί στο νερό σε επίπεδα κάτω του 50 % της τιμής κορεσμού, θα μειωθεί αναλόγως και η μερική του πίεση. Τα ψάρια σε τέτοιες συνθήκες (ανάλογα και με το είδος τους) θα υποφέρουν διότι θα δυσκολεύονται όλο και περισσότερο να προσλαμβάνουν οξυγόνο και θα αρχίσουν να ασφυκτιούν. Το οξυγόνο χρειάζεται να βρίσκεται υπό ορισμένη μερική πίεση για να ωθηθεί επαρκώς να διαχυθεί στο αίμα. Αν π.χ. η συγκέντρωσή του είναι στο επίπεδο του 10 % κορεσμού, μπορεί μεν να υπάρχει ένα ελάχιστο επίπεδο συγκέντρωσής του στο νερό, όμως αυτό το ελάχιστο (με μερική πίεση μόλις 16 mmHg) δεν σημαίνει ότι τα ψάρια μπορούν να το χρησιμοποιήσουν ως «τελευταίο καταφύγιο», και δεν μπορούν επειδή η πολύ μικρή του μερική πίεση δεν μπορεί να το κάνει να διαχυθεί στο αίμα και τα ψάρια θα ψοφήσουν (αν δεν έχουν ήδη ψοφήσει πιο πριν και σε λίγο ανώτερες αυτού τιμές κορεσμού) (Σχήμα 13).



Σχήμα 13. Ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου διαλυμένου στο νερό σε (mg/L) για να μπορούν τα διάφορα είδη υδρόβιων οργανισμών να ζουν και να τρέφονται. Κάτω από αυτό υποφέρουν. Οι απαιτήσεις για ελάχιστο διαλυμένο οξυγόνο ποικίλουν ανάμεσα στα είδη.

(<https://www.uky.edu/WaterResources/FF/> τροποπ. από Γ. Χώτο).

Βέβαια, πολύ μικρά επίπεδα κορεσμού, σημαίνει ότι υπάρχει και μεγάλη διαφορά με την τιμή κορεσμού στην ατμόσφαιρα και ως εξ' αυτού εντονότερη διάχυσή του στο νερό προς αποκατάσταση ισορροπίας. Αυτό το φαινόμενο άλλωστε αποτελεί και τη βάση του αερισμού. Όμως όσο και αν επιταχύνεται η διάχυση από την ατμόσφαιρα στο νερό, οι μεγάλες απαιτήσεις για αναπνοή στο νερό του κλειστού συστήματος, καθιστούν τη φυσική διάχυση του οξυγόνου στο νερό ανεπαρκή. Την ανεπάρκεια αυτή έρχεται να διορθώσει η τεχνολογία με τις ποικίλες συσκευές και μεθόδους βεβιασμένου **αερισμού – οξυγόνωσης** του νερού, μεθόδους που σε ορισμένες περιπτώσεις όταν γίνεται χρήση καθαρού οξυγόνου οδηγούν ηθελημένα (ή αθέλητα) στον υπερκορεσμό του νερού σε οξυγόνο. Κατά τον υπερκορεσμό, διαδικασία η οποία αποτελεί υψηλών προδιαγραφών τεχνική, φροντίζουμε ώστε το παραπανίσιο από το κανονικό (ως προς τον κορεσμό) οξυγόνο να χρησιμοποιείται άμεσα από την πολύ μεγάλη βιομάζα που διατηρούμε, διότι υπερκορεσμός σε οξυγόνο σημαίνει και τάση για μεγαλύτερη διάχυση του οξυγόνου, η οποία σε αυτή την περίπτωση θα γίνει από το νερό προς την ατμόσφαιρα. Για κάθε μόριο οξυγόνου που χρησιμοποιείται στον μεταβολισμό παράγεται ένα μόριο διοξειδίου του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι πολύ πιο διαλυτό στο νερό (και στο αίμα) από το οξυγόνο, συνεπώς το αίμα μπορεί να συγκρατήσει διαλυμένο το πολύ διοξείδιο που παρήχθη με πολύ μικρή αύξηση στην μερική πίεση αυτού του αερίου. Για να κατανοηθεί αυτό δίδεται το εξής: Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε CO₂ είναι μόλις 0,035 %. Συνεπώς: «μερική πίεση CO₂ = (760 x

$0,035/100 = 0,27 \text{ mmHg}$ ”. Πρόκειται για πολύ μικρή πίεση και μόνο η μεγάλη τάση του διοξειδίου να **αντιδρά χημικώς με το νερό** μεγεθύνει τη διαλυτότητά του. Το ίδιο και στο αίμα. Μεγάλη περιεκτικότητα του αίματος σε διοξείδιο δεν μεταφράζεται παρά σε ελάχιστη (σε απόλυτο μέγεθος) αύξηση της μερικής του πίεσης στο αίμα. Κατάσταση που δεν είναι ικανή να οδηγήσει σε έντονη διάχυση του διοξειδίου προς το νερό. Για να απαλλαγούν αποτελεσματικά από το διοξείδιο τα ψάρια χρησιμοποιούν φυσιολογικά «τεχνάσματα» όπως το ένζυμο **ανθρακική ανυδράση** το οποίο καταλύει τη μετατροπή του CO_2 σε ιόντα όξινου ανθρακικού (διττανθρακικού) - HCO_3^- το οποίο οδηγείται έξω από τα ερυθρά αιμοσφαίρια με ενεργό μεταφορά (ιοντοανταλλαγή). Αν και σύμφωνα με τα παραπάνω η απαλλαγή από το διοξείδιο είναι μια «επίπονη» διαδικασία, τα ψάρια στα φυσικά νερά δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα για να το «ξεφορτωθούν». Η απέραντη ποσότητα του νερού και η χαμηλή ιχθυοπυκνότητα δεν αποτελούν οριακές καταστάσεις. Ομως στο περιβάλλον του κλειστού συστήματος, η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική και το διοξείδιο μπορεί να φτάσει σε ασυνήθιστα υψηλά επίπεδα, δυσμενή για τα ψάρια. Ο τεχνητός αερισμός του νερού είναι η λύση, καθώς επιτυγχάνει βεβιασμένα τη διάχυση – απομάκρυνση του διοξειδίου από το νερό στην ατμόσφαιρα (αφού πρώτα έχει διαχυθεί από το αίμα στο νερό). Ομως αν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο για την οξυγόνωση του νερού, δεν υπάρχει ανάδευση του νερού και μπορεί μεν το νερό να εμπλουτίζεται υπερβολικά σε οξυγόνο, αλλά το διοξείδιο δεν διαφεύγει γρήγορα στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη συσσώρευσή του στο νερό. Αρα, οπωσδήποτε θα πρέπει κάπου στο σύστημα να υπάρχει και μηχανισμός αερισμού του νερού.

3. Ποιότητα του νερού – Διαλυμένα αέρια – Οξυγόνο

Η έννοια της ατμοσφαιρικής πίεσης συνίσταται στο ότι στην επιφάνεια της θάλασσας η πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα είναι περί τα $1,05 \text{ kg/cm}^2$ (102 kPa) και ορίζεται ως 1 ατμόσφαιρα (Atm). Μία ατμόσφαιρα ισούται με 760 mmHg δηλαδή η πίεση της ατμόσφαιρας που ασκείται στην εκτεθειμένη επιφάνεια ενός δοχείου γεμάτο με υδράργυρο ωθεί το υγρό σε ύψος 760 mm μέσα σε ένα αντεστραμμένο και βυθισμένο στο δοχείο του λεπτό σωλήνα με ανοικτό το κάτω άκρο του και κλειστό το άνω. Φυσικά ο σωλήνας είναι κατάλληλης διαμέτρου όπως και το δοχείο με τον υδράργυρο είναι ειδικά κατασκευασμένο αλλά η περιγραφή τους δεν χρειάζεται να αναλυθεί εδώ. Η ατμοσφαιρική πίεση εξαρτάται από το υψόμετρο (μειώνεται όσο ανεβαίνουμε) και φυσικά από τις καιρικές συνθήκες.

Ο αέρας είναι μίγμα αερίων και αποτελείται από $\sim 78 \%$ άζωτο (N_2), $20,9 \%$ οξυγόνο (O_2), $0,035 \%$ διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και ελάχιστα ευγενή αέρια (το υπόλοιπο). Όλα μαζί εξασκούν ολική πίεση 760 mmHg .

Το καθένα από αυτά συμμετέχει με τη μερική του πίεση στη συνολική, ανάλογα με το ποσοστό που καταλαμβάνουν. Συνεπώς το οξυγόνο ασκεί **μερική πίεση** (P_{O_2}): $0,209 \times 760 = \sim 160 \text{ mmHg}$. Όταν δύο διαφορετικής πίεσης περιβάλλοντα έρχονται σε επαφή, η μερική πίεση ενός δεδομένου αερίου στο καθένα από αυτά θα καθορίσει προς ποια κατεύθυνση θα διαχυθεί το αέριο αυτό για να εξισωθούν οι μερικές πιέσεις. Τέτοια περίπτωση είναι και η επαφή αέρα-νερού. Όταν το νερό και ο αέρας έχουν την ίδια μερική πίεση π.χ. για το οξυγόνο, δηλαδή βρίσκονται σε **ισορροπία**, λέμε ότι το νερό είναι **κορεσμένο** σε οξυγόνο. Οι μερικές πιέσεις αυξάνονται και μειώνονται στη φύση εξαιτίας διαφόρων αιτιών. Για παράδειγμα, στα ορεινά η ατμοσφαιρική πίεση είναι μικρότερη άρα και η μερική πίεση του οξυγόνου ελαττώνεται, συνεπώς τα ορεινά υδάτινα συστήματα θα έχουν μικρότερη μερική πίεση οξυγόνου (P_{O_2}) στον κορεσμό συγκριτικά με τα πεδινά. Αν και το υψόμετρο στην περίπτωση της μερικής πίεσης του οξυγόνου, επιφέρει μικρής σημασίας αλλαγές (από άποψη πρακτικής εφαρμογής στις ιχθυοκαλλιέργειες) στη μερική του πίεση, υπάρχουν άλλες παράμετροι βιολογικής φύσεως που επιδρούν πολύ εντονότερα. Τα φύκη και τα υδρόβια φυτά όταν βρίσκονται σε άνθιση μπορεί και να προσθέσουν τόσο πολύ και τόσο γρήγορα οξυγόνο στο νερό, που να αυξήσουν τη μερική του πίεση ακόμα και κατά 80-150 mmHg. Αντίθετα όταν στο νερό υπάρχει πολύ αερόβια βιομάζα (π.χ. ψάρια, ασπόνδυλα, μικρόβια κ.ά.) τότε καταναλώνεται τόσο πολύ οξυγόνο που η μερική του πίεση μειώνεται δραματικά. Γενικώς, όταν η (P_{O_2}) πέφτει κάτω από 150 mmHg λέμε ότι το νερό είναι **υποξικό**. Σε υποξικές συνθήκες (και όσο πιο υποξικές τόσο εντονότερα), το οξυγόνο δεν έχει την ίδια έντονη τάση να «διαχυθεί» «μέσα» στο ψάρι διά των βραγχίων του, δηλαδή η αναπνοή δυσκολεύει και μπορεί σε ακραίες συνθήκες να επέλθει ασφυξία. Φυσικά σε $P_{O_2}=0$ έχουμε **ανοξία** και κάθε αερόβια διαδικασία σταματά.

Η διάχυση ενός αερίου, όπως το οξυγόνο, στο νερό, εξαρτάται από τη **διαλυτότητα** του αερίου η οποία επηρεάζεται: 1) από τη θερμοκρασία και τα διαλυμένα στερεά, 2) από τη διαφορά μεταξύ των μερικών πιέσεων αυτού του αερίου στον αέρα και στο νερό, 3) την έκταση της επιφάνειας επαφής αέρα-νερού και, 4) από το αντίστροφο του πάχους του **στάσιμου συνοριακού επιφανειακού στρώματος** (SBL – Stagnant Boundary Layer).

Διαλυτότητα vs Συγκέντρωση. Οι δύο αυτοί όροι χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία πολλές φορές με τρόπο που δημιουργεί σύγχυση. Αναφέρονται βέβαια στην κατάσταση διάλυσης ενός αερίου στο νερό (ας εστιαστούμε εδώ μόνο στο οξυγόνο) αλλά διαφέρουν εννοιολογικώς. Με τη διαλυτότητα εννοούμε την τάση (μικρή ή μεγάλη) που έχει ένα αέριο για να διαλυθεί στο νερό, ενώ με τη συγκέντρωση την ποσότητα του αερίου (σε μονάδες μάζας ή όγκου) που βρίσκεται διαλυμένη στο νερό

ανά μονάδα όγκου του νερού. Δηλαδή αυτό που απαντούμε συχνά ως τιμές συγκέντρωσης οξυγόνου υπό μορφή mg/L ή ml/L (**1 ml O₂ = 1,428 mg O₂**) είναι η μετρήσιμη συγκέντρωση οξυγόνου η οποία επήλθε λόγω επίδρασης διαφόρων παραγόντων, φυσικών (π.χ. θερμοκρασία, πίεση) ή τεχνητών (π.χ. αερισμός, ανάδευση). Κυρίαρχο ρόλο όμως στη συγκέντρωση του αερίου έχει διαδραματίσει η διαλυτότητά του η οποία εξαρτάται από την ίδια τη φύση του μορίου του αερίου και τον τρόπο με τον οποίο “συμπλέκεται” με τα μόρια του νερού. Έτσι, άλλη διαλυτότητα έχει το αέριο άζωτο (N₂) στο νερό, άλλη το οξυγόνο (O₂) και άλλη το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Οι συγκεντρώσεις μπορεί να μεταβάλλονται αλλά η διαλυτότητα του κάθε αερίου παραμένει σταθερό μέγεθος. Και οι συγκεντρώσεις μεταβάλλονται επειδή ακριβώς μεταβάλλεται η μερική πίεση του αερίου κάτι που γίνεται κατανοητό από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Συγκέντρωση αερίου (mg/L)} = (\text{Διαλυτότητα αερίου}) \times (P_{\text{αερίου}})$$

Από πρακτική και διαχειριστική άποψη, ο ιχθυολόγος-υδατοκαλλιεργητής, δεν χρειάζεται να εντρυφήσει στη διαλυτότητα και στον υπολογισμό της, το έχουν κάνει οι ειδικοί της χημείας και της φυσικής. Σήμερα υπάρχουν αναλυτικοί πίνακες οι οποίοι δίδουν τη **συγκέντρωση του οξυγόνου** σε κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και αλατότητας για κανονική ατμοσφαιρική πίεση (760 mmHg) και κανονική μερική πίεση οξυγόνου (160 mmHg), τιμές δηλαδή **κορεσμού**. Κάθε αλλαγή της πίεσης θα επιφέρει ανάλογες αυξομειώσεις στις τιμές κορεσμού.

Δίδεται επίσης παρακάτω και μια άλλη εξίσωση η οποία μπορεί μεν να μην χρησιμοποιείται στην πράξη επειδή δεν αντανακλά κάτι το άμεσα εφαρμοζόμενο (στη μονάδα εκτροφής), αλλά από νοσηματοδοτική άποψη έχει σημασία επειδή ευαισθητοποιεί δημιουργικά τον ιχθυολόγο σχετικά με τη σημασία της οξυγόνωσης του νερού.

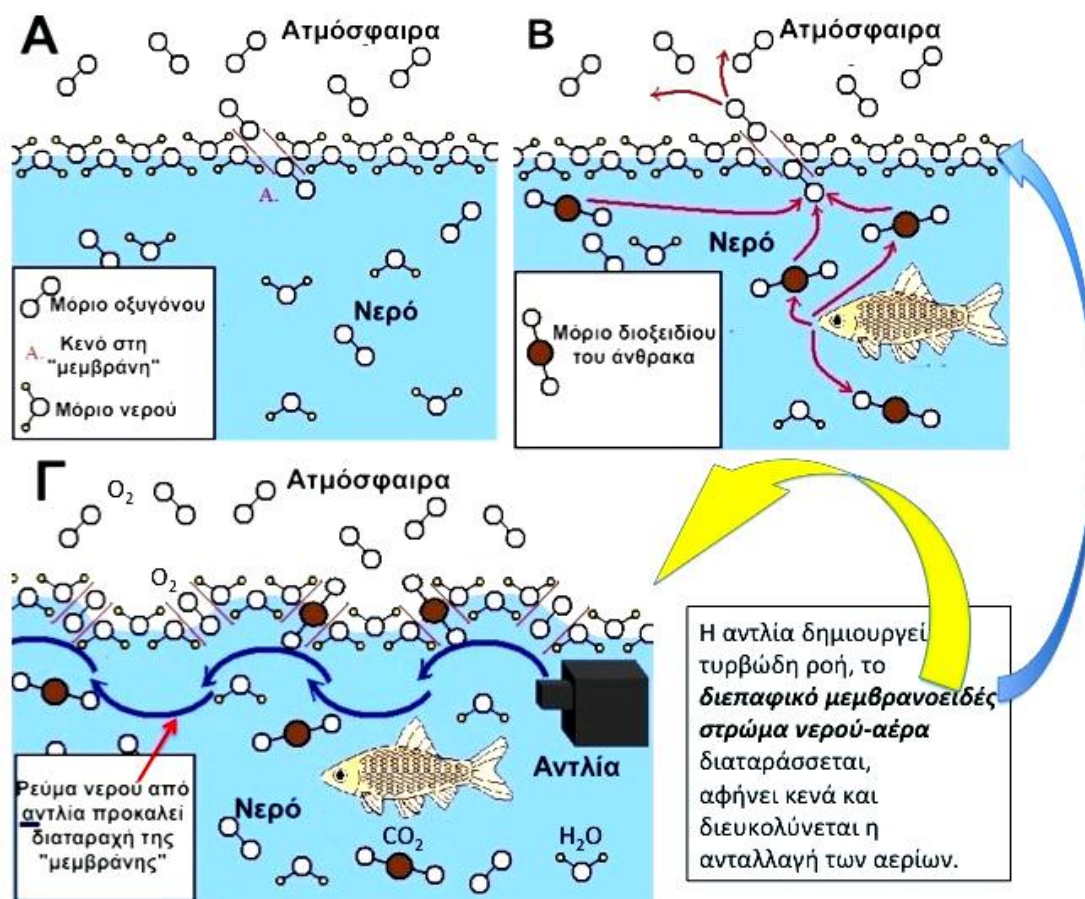
$$(\text{Διαλυτότητα}) \times (PO_2\text{αέρα} - PO_2\text{νερού}) \times (\text{επιφάνεια νερού m}^2) \times (1/SBL \text{ πάχος mm}) = \text{Ρυθμός διάχυσης}$$

Δηλαδή το πόσο γρήγορα ή έντονα θα διαχυθεί το οξυγόνο από την ατμόσφαιρα στο νερό προς επίτευξη ισορροπίας (κορεσμός του νερού σε οξυγόνο), είναι μια διαδικασία που εξαρτάται από τη διαφορά των μερικών πιέσεων του οξυγόνου στον αέρα και στο νερό, την εκτεθειμένη επιφάνεια του νερού και την κατάσταση του επιφανειακού στρώματος (στάσιμο-παχύ ή διαταραγμένο-λεπτό).

Όλα αυτά μπορεί να τα μεταβάλλει ο ιχθυοκαλλιεργητής αποβλέποντας στην αποτελεσματικότερη οξυγόνωση του νερού.

3.1. Πως οξυγονώνει το νερό ο αερισμός;

Ο αερισμός με χρήση ατμοσφαιρικού αέρα αυξάνει το ρυθμό (τάχος) με τον οποίο το οξυγόνο θα εισέλθει στο νερό αλλά, προσοχή!!, δεν επηρεάζει (δεν αλλάζει) τη διαφορά των μερικών πιέσεων του οξυγόνου στον αέρα και στο νερό. Και ναι μεν ο αερισμός επιταχύνει τη ροή του οξυγόνου προς το νερό εάν η μερική πίεση του οξυγόνου (P_{O_2}) στο νερό είναι μικρότερη του κορεσμού ($P_{O_2} < 160 \text{ mmHg}$), αλλά δεν μπορεί, όσο έντονος και αν είναι, να ανεβάσει τη συγκέντρωση του οξυγόνου και τη μερική του πίεση πέραν του επιπέδου κορεσμού.



Σχήμα 14. Αφαιρετική σχηματική απεικόνιση για την ανταλλαγή αερίων μεταξύ ατμόσφαιρας νερού (στην προκειμένη περίπτωση O_2 & CO_2) με το «εμπόδιο» του συνοριακού επιφανειακού στρώματος νερού. Η διατάραξη αυτού του συνοριακού διεπαφικού στρώματος-εμποδίου αποτελεί τη μεγαλύτερη «διευκόλυνση» για την ανταλλαγή των αερίων. https://sites.google.com/site/moashowmanyfish/_/rsrc/1250109470697/water-chemistry-for-new-aquarists (τροποποιημένο από Γ. Χώτο).

Ο αερισμός επιδρά σε δύο από τους 4 προαναφερόμενους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η διάχυση (ανταλλαγή αερίων) μεταξύ αέρα-νερού. Όσο πιο μεγάλη η επιφανειακή έκταση διά της οποίας γίνεται η διάχυση, τόσο πιο γρήγορα θα αυξηθεί η P_{O_2} . Όσο πιο λεπτό το πάχος

του στάσιμου συνοριακού επιφανειακού στρώματος τόσο διευκολύνεται η διάχυση (και φυσικά η επακόλουθη αύξηση του P_{O_2}). Εδώ χρειάζεται μια διευκρίνιση για το ρόλο του επιφανειακού στρώματος (Σχήμα 14).

Το στάσιμο συνοριακό επιφανειακό στρώμα είναι εκείνο το λεπτό στρώμα-υμένιο αποτελούμενο από «συνωστισμένα» μόρια νερού (επιφανειακή τάση-surface tension), διά του οποίου πρώτα θα πρέπει να διέλθουν τα μόρια του αερίου από την υπερκείμενη ατμόσφαιρα για να διαχυθούν κατόπιν σε όλη τη μάζα του νερού. Θα μπορούσε επίσης να ονομαστεί και **διεπαφή αέρα-νερού**. Δεν είναι σκοπός του παρόντος να αναλύσει φυσικοχημικώς την έννοια του επιφανειακού αυτού διεπαφικού στρώματος, αλλά να καταδείξει τη σημασία του για την διάχυση του αέρα (και του οξυγόνου που περιέχει) στο νερό. Σε στάσιμο νερό μιας δεξαμενής το επιφανειακό στρώμα έχει πάχος περί το 1 mm. Ακόμα και αυτή η πολύ λεπτή στρώση αποτελεί το μεγάλο εμπόδιο για την διάχυση του οξυγόνου στα πιο κάτω στρώματα του νερού. Όμως η διατάραξή του και η μείωση του πάχους του, όπως όταν το νερό αναταράσσεται με αερισμό ή κυματισμό, διευκολύνει και επιταχύνει τη διάχυση. Αυτόν ακριβώς το ρόλο διαδραματίζει ο αερισμός του νερού όποια μέθοδο και αν χρησιμοποιεί, φυσαλίδες αέρα από πωρόλιθο, πίδακες νερού, άφρισμα κ.ά. Όλα επιταχύνουν την ανταλλαγή των αερίων μεταξύ ατμόσφαιρας και νερού διά: 1) της αύξησης της επιφάνειας διά της οποίας θα γίνει η διάχυση (όλη η επιφάνεια της φυσαλίδας, όσο πιο μικρές και πολλές τόσο το καλύτερο) και, 2) της βίαιης ανάδευσης του νερού «σπάζοντας» έτσι το στάσιμο διεπαφικό μεμβρανοειδές επιφανειακό στρώμα.

3.2. Η έννοια του κορεσμού και του υπερκορεσμού

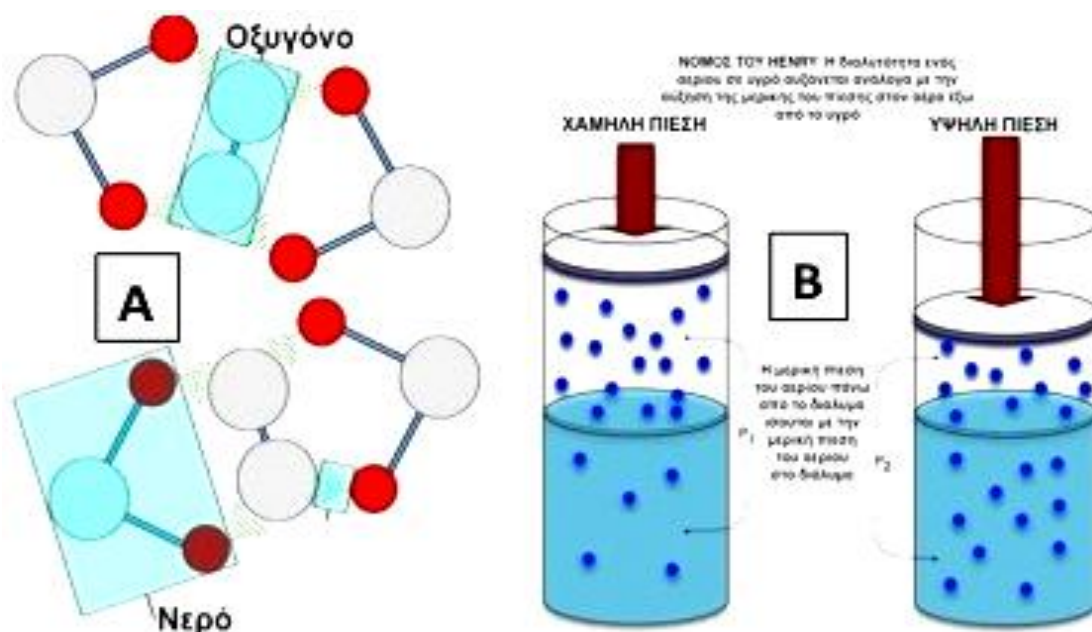
Ενα ανοιχτό δοχείο με γλυκό νερό στο οποίο το διαλυμένο οξυγόνο βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού, δηλαδή σε ισορροπία με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, αν τοποθετηθεί σε διαφορετικά υψόμετρα δεν θα περιέχει την ίδια ποσότητα οξυγόνου. Δηλαδή άλλη ποσότητα κορεσμού θα έχει στην επιφάνεια της θάλασσας, άλλη στη Νεκρά Θάλασσα όπου το βαθύτερο σημείο της γήινης επιφάνειας και άλλη στην κορυφή του Ολύμπου. Και αυτό επειδή στα τρία αυτά μέρη η ατμοσφαιρική πίεση διαφέρει και συνεπώς διαφέρει και η μερική πίεση του οξυγόνου.

Και ένα πρακτικότερο παράδειγμα. Ενα ποτήρι με νερό κορεσμένο σε οξυγόνο θα έχει $P_{O_2} = 160 \text{ mmHg}$ ή $0,2 \text{ Atm}$, το ίδιο και η ατμόσφαιρα με την οποία βρίσκεται σε ισορροπία. Όσο και αν ανακατέψουμε ή αερίσουμε το νερό, αυτή του η περιεκτικότητα σε οξυγόνο δεν θα αλλάξει. Αν όμως καλύψουμε το άνοιγμα του ποτηριού με μια αεροστεγή μεμβράνη και με κάποιο ειδικό ακροφύσιο εμπλουτίσουμε τον αέρα που βρίσκεται μεταξύ της επιφάνειας του νερού και της μεμβράνης (εξυπακούεται ότι το ποτήρι δεν είναι γεμάτο με νερό μέχρι το χείλος του) με καθαρό οξυγόνο σε περιεκτικότητα π.χ. 40 % αντί του κανονικού

20 %, τότε και η P_{O_2} θα αλλάξει και θα γίνει 320 mmHg. Θα αλλάξει ως εξ' αυτού και η P_{O_2} στο νερό και θα γίνει και αυτή ερχόμενη σε ισορροπία με τον υπερκείμενο αέρα επίσης 320 mmHg. Δηλαδή το νερό και σε αυτή την κατάσταση θα είναι κορεσμένο σε οξυγόνο αλλά σε διαφορετική ατμοσφαιρική κατάσταση.

Αν πάλι στο ίδιο ποτήρι με το παραπάνω σφραγίζονταν και επιχειρούσαμε με κάποια ειδική κατασκευή να συμπιέσουμε (Σχήμα 15) τον υπερκείμενο του νερού αέρα σε π.χ. 2 Atm (1520 mmHg), αυτό σύμφωνα με τα παραπάνω θα οδηγούσε το νερό στο ποτήρι να έχει $P_{O_2} = 320$ mmHg (διπλάσιο της κανονικής στη 1 Atm = 160 mmHg). Αν κατόπιν το ποτήρι αποσφραγιστεί το υπερκορεσμένο σε οξυγόνο νερό θα χάσει γρήγορα το παραπάνω οξυγόνο ερχόμενο σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα (ξανά $P_{O_2} = 160$ mmHg).

Και στα δύο παραπάνω παραδείγματα επήλθε υπερκορεσμός του νερού σε οξυγόνο. Και στα δύο ο υπερκορεσμός ήταν αποτέλεσμα της αύξησης της πίεσης μόνο που στην πρώτη περίπτωση αυξήθηκε η πίεση μόνο του οξυγόνου ενώ στη δεύτερη όλων των επιμέρους αερίων του ατμοσφαιρικού αέρα. Στην πρώτη περίπτωση το νερό αύξησε μόνο την μερική πίεση του διαλυμένου οξυγόνου. Στη δεύτερη περίπτωση εκτός από το οξυγόνο αυξήθηκαν και οι μερικές πιέσεις και των άλλων αερίων που διαλύονται στο νερό (άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα).



Σχήμα 15. **A:** Αφαιρετική απεικόνιση της «συγκράτησης» λόγω ελκτικών μοριακών δυνάμεων, του μορίου του οξυγόνου από τα μόρια του νερού (επισήμανση: το οξυγόνο δεν αντιδρά χημικώς με το νερό για να διαλυθεί σε αυτό) και **B:** Η επίδραση της πίεσης στη διάλυση του αερίου στο υγρό. Τροποποιημένο σχέδιο από Γ. Χώτος του από διαδικτύου: http://peer.tamu.edu/curriculum_modules/Water_Quality/.

3.3. Αναλυτικότερα περί υπερκορεσμού

Ας φανταστούμε ένα ανοικτό κύλινδρο με διάμετρο π.χ. 2 m βυθισμένο κατά 10 m στο νερό και εκτεινόμενο κατά το αντίθετο μέρος πολλά χιλιόμετρα ψηλά μέχρι το τέλος της ατμόσφαιρας. Αν μπορούσαμε να ζυγίσουμε το περιεχόμενο νερό στα 10 m του βυθισμένου μέρους του και τον περιεχόμενο αέρα στα πολλά χιλιόμετρα του υπερυψωμένου μέρους του θα διαπιστώναμε ότι έχουν το ίδιο βάρος. Εξ' αυτού λοιπόν γνωρίζουμε ότι κάθε 10 m βάθους η πίεση αυξάνεται κατά 1 Atm. Αν λοιπόν στέλναμε ατμοσφαιρικό αέρα με μία αεραντλία σε βάθος νερού 10 m οι φυσαλίδες αέρα που θα εξέρχονταν από το στόμιό του σε αυτό το βάθος θα είχαν ολική πίεση 2 Atm = 1520 mmHg και ανάλογες μερικές πιέσεις των περιεχομένων αερίων τους (π.χ. $P_{O_2} = 320$ mmHg). Σε αυτό το βάθος και από αυτές τις φυσαλίδες το περιεχόμενο οξυγόνο τους θα διαχυθεί στο νερό επιδιώκοντας ισορροπία, αυξάνοντας έτσι και τη μερική πίεση και την συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Ομιλούμε τότε για υπερκορεσμό του νερού. Βέβαια το παράδειγμα είναι θεωρητικό καθώς το φαινόμενο το εξετάζουμε σημειακά στο άμεσο περιβάλλον του νερού γύρω από τη φυσαλίδα και έχει πραγματική αντιστοιχία σε πολύ μικρούς όγκους νερού που είναι γεμάτοι από τέτοιες φυσαλίδες, όμως η αρχή της φυσικής αυτής διεργασίας είναι παντού ίδια.

Εάν ένα ψάρι κολυμπά σε τέτοιο βάθος με νερό υπερκορεσμένο κατά τα παραπάνω σε οξυγόνο, λόγω της τάσης για εξισορρόπηση των μερικών πιέσεων του οξυγόνου στο νερό και του οξυγόνου στο αίμα του ψαριού, η μερική πίεση του διαλυμένου οξυγόνου στο αίμα του ψαριού θα αυξηθεί. Και όσο το ψάρι παραμένει σε αυτό το βάθος δεν δημιουργείται πρόβλημα. Αν όμως κολυμπήσει και ανέβει υψηλότερα τότε η υδροστατική πίεση θα μειωθεί και επειδή η διαλυτότητα του οξυγόνου παραμένει σταθερή (ο όρος διαλυτότητα σχετίζεται με υπολογισμούς που εμπλέκουν γραμμομοριακή μάζα, δεν υπάρχει λόγος να αναλυθεί εδώ), ενώ η ποσότητα κορεσμού όχι, η ποσότητα οξυγόνου που μπορεί να κρατήσει διαλυμένη το αίμα μειώνεται και το πλεονάζον οξυγόνο θα απελευθερωθεί ως φυσαλίδες. Φυσαλίδες οι οποίες ανάλογα με την ποσότητα οξυγόνου που είχε συσσωρευθεί και με το πόσο γρήγορα αλλάζει βάθος το ψάρι, μπορεί να κατακλύσουν το αίμα καθώς δεν απελευθερώνονται όσο γρήγορα θα έπρεπε στα βράγχια έτσι ώστε να εκτονωθεί η κατάσταση, με τελικό αποτέλεσμα (ανάλογα και με την ένταση του φαινομένου) τον **εμβολισμό**. Σε αυτή την κατάσταση οφείλεται η επονομαζόμενη **ασθένεια των φυσαλίδων**. Και οι φυσαλίδες είναι επικίνδυνες και συχνά θανατηφόρες, επειδή διαρρηγνύουν τα μικρά αιμοφόρα αγγεία κατάσταση που στην εγκεφαλική περιοχή επιφέρει τα πλέον δραματικά αποτελέσματα.

Η ασθένεια της φυσαλίδας βρίσκει την απόλυτη έκφρασή της όταν το αέριο του υπερκορεσμού είναι το **άζωτο** (N_2) το οποίο δεν είναι

χρησιμοποιούμενο από τους ιστούς των ψαριών και έτσι παρόλο που έχει και αυτό όπως και το οξυγόνο αρκετή διαλυτότητα στο νερό, πρακτικά κυκλοφορεί στο αίμα αχρησιμοποίητο (ενώ το οξυγόνο χρησιμοποιείται). Κατά τον υπερκορεσμό του ο οποίος μπορεί να συμβεί βάσει της ανάλογης με το οξυγόνο φυσικής διεργασίας και αν το ψάρι βρεθεί απότομα σε μικρότερη υδροστατική πίεση, το υπερβολικό άζωτο θα δημιουργήσει πολύ πιο έντονα από το οξυγόνο φυσαλίδες, με δραματικά επίσης αποτελέσματα. Αυτή είναι και η περίπτωση των δυτών οι οποίοι αναπνέουν ατμοσφαιρικό αέρα υπό πίεση και αν δεν αναδυθούν σταδιακά, το πολύ άζωτο στο αίμα τους θα δημιουργήσει φυσαλίδες στις οποίες οφείλεται η συχνά θανατηφόρα ασθένεια των δυτών (παράλυση κ.ά., κακώσεις λόγω εγκεφαλικών βλαβών). Στις ιχθυοκαλλιέργειες υπερκορεσμός αζώτου μπορεί να δημιουργηθεί από κακώς λειτουργούσες αντλίες νερού (απαρατήρητες ρωγμές από τις οποίες ρουφούν αέρα και τον αναμιγνύουν βεβιασμένα με το νερό), ή από χρησιμοποίηση κακώς αερισμένων αρτεσιανών νερών.

Προσοχή - επισήμανση!! Ο υπερκορεσμός μπορεί να συμβεί μόνο όταν ένα αέριο διαλύεται στο νερό υπό πίεση ανώτερη της ατμοσφαιρικής (>1 Atm). Εάν το αέριο διαλυθεί στο νερό στην επιφάνεια, κατόπιν ακόμα και αν αυτή η μάζα νερού στην οποία διαλύθηκε το αέριο, με κάποιο τρόπο οδηγηθεί σε μεγάλα βάθη (μεγάλες υδροστατικές πιέσεις), η πίεση του αερίου στο νερό δεν θα αλλάξει, θα παραμείνει η ίδια με αυτή που είχε όταν πρωτοδιαλύθηκε.

Παράδειγμα υπερκορεσμού. Εάν μια φυσαλίδα εξέλθει από ένα σωλήνα παροχής ατμοσφαιρικού αέρα σε βάθος 30 m, τότε οι μερικές πιέσεις του περιεχομένου οξυγόνου και του αζώτου θα πολλαπλασιαστούν επί 3. Οι διαλυτότητές τους δεν αλλάζουν όμως τώρα το νερό σε επαφή με τη φυσαλίδα θα περιέχει 3 φορές την ποσότητα (σε mg/L) αερίου συγκριτικά με την κατάσταση κανονικής ατμοσφαιρικής πίεσης. Μπορούμε να το ονομάζουμε υπερκορεσμένο αλλά δεν «δείχνει διαφορετικό». Σε αυτό το βάθος και σε αυτή την πίεση το νερό (εννοείται η ποσότητα αυτή γύρω από τη φυσαλίδα που χρησιμοποιείται ως θεωρητικό μοντέλο) είναι κορεσμένο, όμως το νερό αυτό κυκλοφορούμενο και ανεβαίνοντας στην επιφάνεια συναντά μικρότερες πιέσεις και το ποσό του αερίου που μπορεί να κρατήσει σε διάλυση μειώνεται (τα αέρια διαφεύγουν «αναβράζοντα» όπως όταν ανοίγουμε μπουκάλια ανθρακούχων ποτών) και τότε αναγνωρίζεται ως υπερκορεσμένο. Πιο παραστατικά και με νούμερα: Στην επιφάνεια θα έχουμε διαλυτότητα αερίου οξυγόνου (από πίνακα), $0,06 \times (P_{O_2} = 160 \text{ mmHg}) = 9,6 \text{ mg/L}$. Σε βάθος 30 m θα έχουμε $0,06 \times 480 = 28,8 \text{ mg/L}$. Δηλαδή $28,8 - 9,6 = 19,2 \text{ mg/L}$ οξυγόνου διαλύονται παραπάνω στο νερό σε αυτό το βάθος και αυτή η ποσότητα θα απελευθερωθεί όταν η πίεση μειωθεί ξανά στην ατμοσφαιρική.

3.4. Η χρήση του καθαρού οξυγόνου

Οι μεγάλες απαιτήσεις σε οξυγόνο που επιβάλλονται για την αναπνοή από την «άπληστη» για οξυγόνο μεγάλη μάζα ψαριών που διατηρείται σε ένα περιορισμένο όγκο νερού, δεν ικανοποιούνται ενίοτε από τις διαδικασίες απλής διάχυσης οξυγόνου από τον ατμοσφαιρικό αέρα στο νερό, όσα μέσα αερισμού και αν χρησιμοποιήσουμε εκτός και αν ο αερισμός είναι τόσο βίαιος που πλέον διαταράσσει την ηρεμία κολύμβησης των ίδιων των ψαριών. Διότι μπορούμε να επιταχύνουμε το ρυθμό διάχυσης του οξυγόνου σε ιδανικά επίπεδα δημιουργώντας τέτοια ανάδευση του νερού σαν και αυτή που βλέπουμε στο σημείο πτώσης ενός καταρράχτη, αλλά τότε πλέον δεν θα έχουμε δεξαμενή εκτροφής αλλά μάλλον «κόλαση» εκτροφής. Και σε αυτή την περίπτωση ακόμα, η μέγιστη οξυγόνωση δεν θα μπορούσε να ξεπεράσει το επίπεδο κορεσμού το οποίο είναι η ανώτατη τιμή διαλυμένου οξυγόνου με διαδικασία διάχυσης από τον αέρα στο νερό (Σχήμα 16).

Διαλυμένο οξυγόνο (mg/L) με αερισμό έναντι πρόσθεσης καθαρού οξυγόνου				
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ (°C)	ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ		ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ	
	ΑΕΡΑΣ (κορεσμός)	ΚΑΘΑΡΟ O ₂	ΑΕΡΑΣ (κορεσμός)	ΚΑΘΑΡΟ O ₂
11	11,0	52,4	8,9	42,4
12	10,8	51,4	8,7	41,4
13	10,5	50,0	8,5	40,5
14	10,3	49,0	8,3	39,5
15	10,1	48,1	8,2	39,0
16	9,8	46,6	8,0	38,1
17	9,6	45,7	7,9	37,6
18	9,4	44,7	7,7	36,7
19	9,3	44,3	7,6	36,2
20	9,1	43,3	7,4	35,2
21	8,9	42,4	7,3	34,7
22	8,7	41,4	7,1	33,8
23	8,6	40,9	7,0	33,3
24	8,4	40,0	6,9	32,8
25	8,3	39,5	6,8	32,4
26	8,1	38,6	6,7	31,9
27	8,0	38,1	6,6	31,4
28	7,8	37,1	6,4	30,5
29	7,7	36,7	6,3	30,0
30	7,5	35,7	6,2	29,5

Σχήμα 16. Συγκεντρώσεις κορεσμού του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό για τις διάφορες θερμοκρασίες όταν χρησιμοποιείται αέρας (δεν μπορούν να ξεπεραστούν αυτές οι τιμές) και συγκεντρώσεις πολύ ανώτερες όταν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο.

Η λύση είναι η χρησιμοποίηση καθαρού οξυγόνου αγορασμένο και αποθηκευμένο υπό μεγάλη πίεση σε ειδικές εγκαταστάσεις σε υγρή

μορφή (Liquid Oxygen-LOX), ή η παραγωγή του από ειδικά μηχανήματα στη μονάδα και αποθήκευσή του σε αέρια μορφή. Και στις δύο περιπτώσεις διοχετεύεται στη δεξαμενή εκτροφής και εισέρχεται στο νερό σε αέρια μορφή μέσω σωληνώσεων και ακροφυσίων.

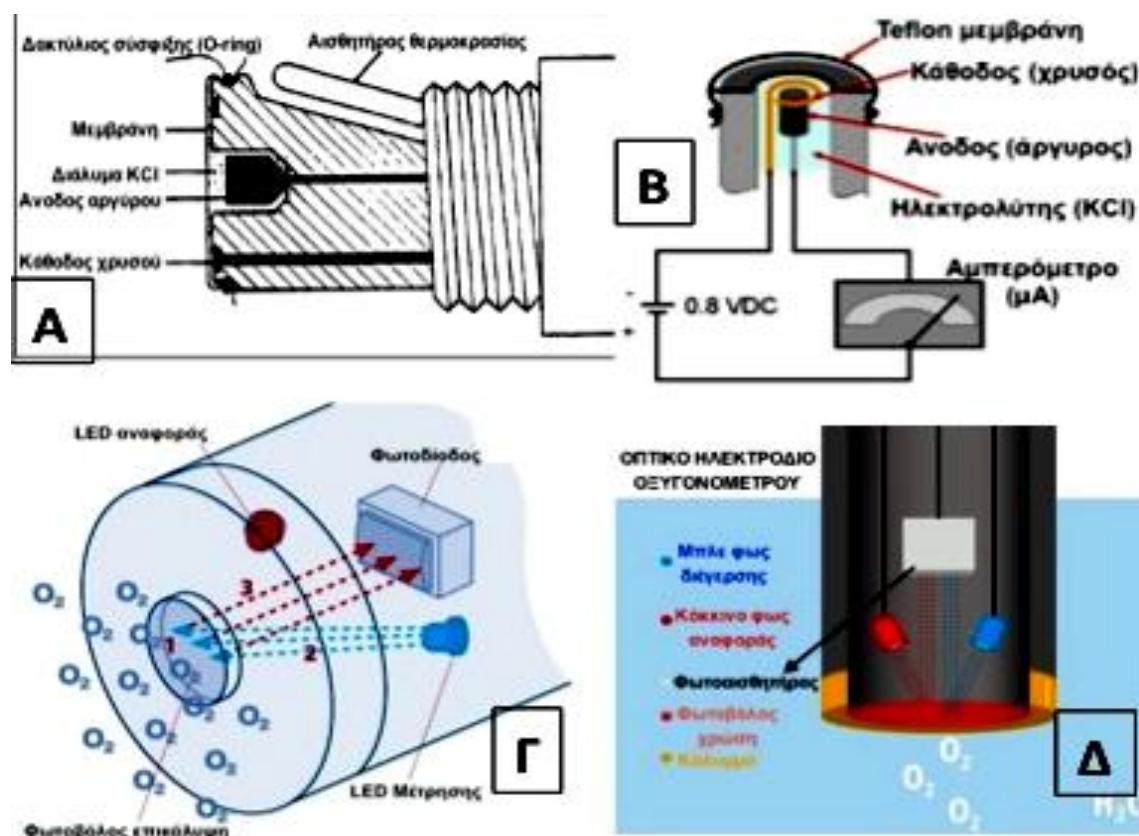
Η χρήση καθαρού οξυγόνου μπορεί να αυξήσει θεαματικά τη μεταφορά οξυγόνου στο νερό, διαμέσου της αύξησης της διαφοράς των μερικών πιέσεων του οξυγόνου που παρουσιάζεται στη διεπιφάνεια ανταλλαγής αερίου μεταξύ της φυσαλίδας οξυγόνου και του νερού. Μέσα στη φυσαλίδα, το οξυγόνο ως το μόνο αέριο πλέον, ασκεί από μόνο του την όλη πίεση των 760 mmHg (δηλαδή ταυτίζονται ολική και μερική πίεση) ενώ στο περιβάλλον νερό το πολύ να είναι αυτή του κανονικού κορεσμού (~160 mmHg). Η μεγάλη διαφορά στην πίεση ($760/160 = \sim 5$, δηλαδή πενταπλασιασμός του ρυθμού διάχυσης), θα προκαλέσει “ορμητική” διάλυση του οξυγόνου στο νερό, θα έχουμε λοιπόν υπερκορεσμό.

Ομως επειδή ακριβώς το νερό είναι υπερκορεσμένο σε οξυγόνο ερχόμενο σε επαφή με την ατμόσφαιρα το ίδιο εύκολα θα τείνει να χάνει το υπερβολικό οξυγόνο του. Αυτό επιθυμούμε να γίνει όσο το δυνατό πιο αργά έτσι ώστε τα ψάρια να επωφεληθούν από την αφθονία οξυγόνου στο νερό και να το χρησιμοποιούν για τις αυξημένες μεταβολικές τους ανάγκες. Τα συστήματα διάχυσης του καθαρού οξυγόνου στο νερό λαμβάνουν όλα αυτά υπόψη τους και δεν σπαταλούν οξυγόνο για υπερκορεσμούς παροδικούς, αλλά φροντίζουν να παραμείνει το πολύ οξυγόνο όσο το δυνατό πιο πολύ χρόνο κατανεμημένο στο σύνολο της μάζας του νερού και να συναντήσει την επιφάνεια του νερού όσο το δυνατό “αργότερα”. Η μηχανική της όλης διαδικασίας δεν χρειάζεται να αναλυθεί εδώ, αλλά μόνο να δοθεί έμφαση στη σπουδαιότητα της σωστής χρήσης του καθαρού οξυγόνου, το οποίο επειδή κοστίζει πρέπει να χρησιμοποιείται με τον οικονομικότερο και αποδοτικότερο τρόπο.

3.5. Η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου

Σε κάθε ιχθυοκαλλιέργεια αλλά ιδιαίτερα στα κλειστά συστήματα, η συχνή μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου είναι η βασική εργασία ελέγχου, πρόκειται για υπόθεση “ζωής ή θανάτου”. **“Πρώτα το οξυγόνο, τα άλλα έπονται”**. Σήμερα οι ιχθυολόγοι πρέπει να αισθάνονται τυχεροί καθώς η τεχνολογία τους προμηθεύει με πλήθος ηλεκτρονικών οργάνων απευθείας μέτρησης της συγκέντρωσης-κορεσμού-μερικής πίεσης του διαλυμένου οξυγόνου σε κάθε είδους νερά, σε οποιοδήποτε βάθος. Και όλα αυτά με την απλή βύθιση ενός ειδικού ηλεκτροδίου στο νερό. Κάποτε, όχι στο πολύ μακρινό παρελθόν, η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου ήταν μια επίπονη διαδικασία η οποία γίνονταν βέβαια με την απόλυτα ακριβή τιτλοδοτική χημική μέθοδο Winkler, αλλά ο χρόνος που χρειάζονταν για να ολοκληρωθεί μία μόνο μέτρηση καθιστούσε ουσιαστικά απαγορευτική την σύντομη επανάληψη. Σήμερα τα

ηλεκτρονικά οξυγονόμετρα έστω και αν η ακρίβειά τους (1 δεκαδικό) δεν φτάνει τα 2 δεκαδικά της Winkler θεωρούνται υπερεπαρκή για τις ανάγκες της μονάδας. Μπορούν να συνδεθούν μόνιμα με πολλά ηλεκτρόδια και να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση του διαλυμένου οξυγόνου. Μπορούν επίσης να συνδεθούν με σύστημα συναγερμού για την περίπτωση πτώσης του οξυγόνου κάτω από ορισμένα επίπεδα. Σήμερα η τιμή τους έχει φθηνώνει αλλά οπωσδήποτε η επένδυση που θα γίνει σε ένα αξιόπιστο όργανο θα αποζημιώσει για την πολύτιμη υπηρεσία που θα προσφέρει για πολλά χρόνια.



Σχήμα 17. *A & B:* Άκρα ηλεκτροδίων οξυγονόμετρων τύπου πολαρογραφικού με μεμβράνη, ηλεκτρολύτη και ακροδέκτες χρυσού-αργύρου και *Γ & Δ:* Άκρα ηλεκτροδίων οξυγονομέτρων τύπου “οπτικής φωτοανίχνευσης”.

Υπάρχουν διάφορων τύπων ηλεκτρονικά οξυγονόμετρα ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του ηλεκτροδίου-αισθητήρα (Σχήμα 17). Όλοι οι τύποι πάντως έχουν στο άκρο του ηλεκτροδίου ένα ειδικό κάλυμμα είτε από τέφλον είτε από φωτοευαίσθητο υλικό. Στα κλασικά τύπου οξυγονόμετρα τα μόρια του οξυγόνου και μόνο αυτά διέρχονται από τους πόρους της μεμβράνης – τέφλον και εισερχόμενα σε ένα μικροθάλαμο γεμάτο με ηλεκτρολύτη (KCl) επηρεάζουν τη ροή ηλεκτρονίων (ρεύμα) μεταξύ δύο μικροηλεκτροδίων χρυσού-κάθοδος, ασήμι-άνοδος. Στο ηλεκτρόδιο

καθόδου (χρυσού) δημιουργείται από το όργανο αρνητική τάση $(-0,6)-(-0,8)$ V σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς (άνοδος-αργύρου). Το οξυγόνο διαλυμένο στον ηλεκτρολύτη ανάγεται στην επιφάνεια του χρυσού αντιδρώντας ηλεκτροχημικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Ανάλογα με τον αριθμό των μορίων του οξυγόνου, η ένταση του ρεύματος μεταφράζεται από τον επεξεργαστή του οργάνου σε ένδειξη συγκέντρωσης του οξυγόνου. Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργούν σωστά, είναι η συνεχής σταθερή ανάδευση του βυθισμένου στο νερό ηλεκτροδίου για να ανανεώνονται συνέχεια τα μόρια του οξυγόνου στο χώρο του ηλεκτρολύτη (δεν χρειάζονται περισσότερες λεπτομέρειες εδώ). Αν το ηλεκτρόδιο αφηθεί ακίνητο μέσα στο νερό, η ένδειξη του οργάνου θα είναι πολύ μικρότερη από τη σωστή, δηλαδή λάθος. Αυτό είναι ένα σύνηθες φαινόμενο που γίνεται από άγνοια ή επιπολαιότητα και πρέπει να γίνει απόλυτα κατανοητό.

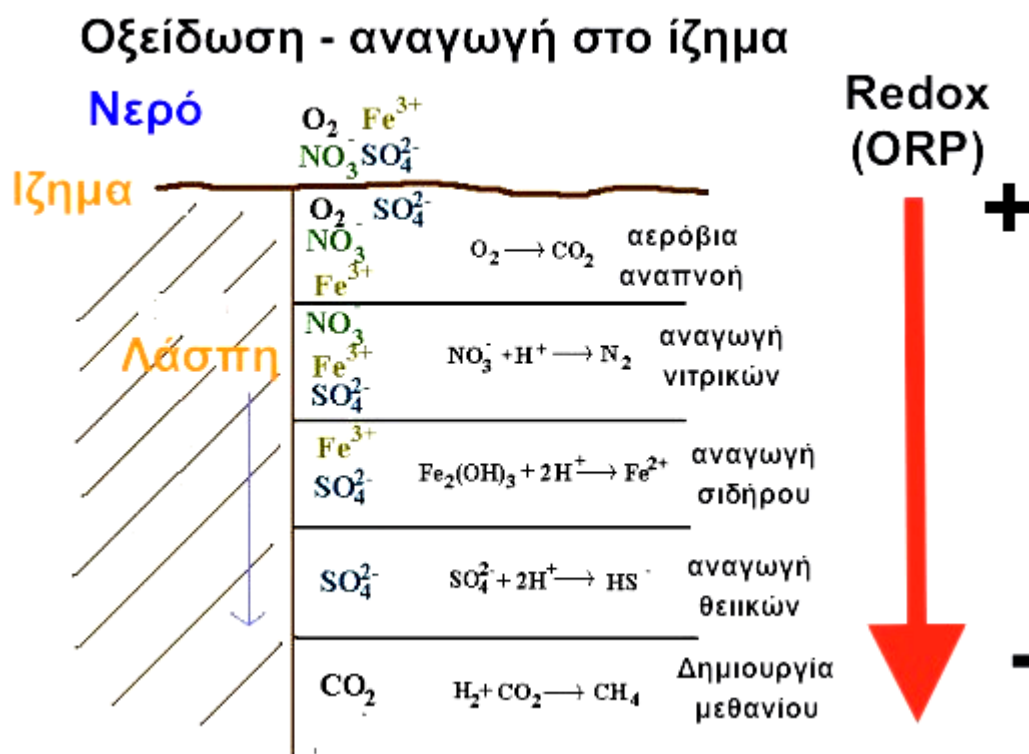
Τα ηλεκτρόδια οξυγόνου με ηλεκτρολύτη χρειάζονται συχνή συντήρηση για να λειτουργήσουν σωστά. Περιοδικώς πρέπει να αλλάζει η μεμβράνη τέφλον (η οποία βέβαια θα πρέπει να διατηρείται σε άριστη κατάσταση χωρίς τρυπήματα και εναποθέσεις), να ανανεώνεται ο ηλεκτρολύτης και να καθαρίζονται οι άκρες των μικροηλεκτροδίων χρυσού και αργύρου. Ευτυχώς τα ίδια τα όργανα με τις ενδείξεις τους προειδοποιούν έγκαιρα ότι φθάνει ο καιρός για συντήρηση, επειδή είτε οι ενδείξεις αρχίζουν να γίνονται ασταθείς, είτε αργούν να αποκριθούν, είτε τέλος κατά την θέση τους σε λειτουργία (on), όταν πραγματοποιούν κάποια προκαταρκτική αυτορύθμιση, δείχνουν ένα νούμερο-σταθερά ενδεικτικό της μειωμένης τους απόδοσης.

Τα οπτικού ηλεκτροδίου οξυγονόμετρα είναι μεν ακριβότερα αλλά χρησιμοποιούν εντελώς διαφορετική μέθοδο υπολογισμού της συγκέντρωσης του οξυγόνου, καθώς καταγράφουν την φωτοβολία που προκαλείται από τα μόρια του οξυγόνου επάνω σε μια φωτοευαίσθητη επιφάνεια. Η συντήρησή τους είναι πολύ πιο απλή από την μέθοδο με ηλεκτρολύτη. Επίσης δεν χρειάζεται ανάδευση στο ηλεκτρόδιο. Συνιστώνται ανεπιφύλακτα έστω και αν είναι ακριβή επένδυση.

3.6. Το οξειδοαναγωγικό δυναμικό και η σημασία του

Το δυναμικό οξείδωσης - αναγωγής ή οξειδοαναγωγικό δυναμικό που διεθνώς συμβολίζεται με τους όρους **redox** ή **ORP** (Oxidation - Reduction Potential), σημαίνει το λόγο των οξειδωτικών ουσιών προς τις αναγωγικές ουσίες σε ένα υδάτινο σύστημα. Η λέξη «δυναμικό» σημαίνει ότι εκφράζει την ικανότητά του να οξειδώνει ή να ανάγει ένα άλλο σύστημα. Με άλλα λόγια ένα σύστημα με ένα δεδομένο redox μπορεί να αναχθεί και να οξειδώσει ένα σύστημα με χαμηλότερο redox, ή να οξειδωθεί ανάγοντας ένα σύστημα με υψηλότερο redox.

Υπενθυμίζεται ότι **οξείδωση** σημαίνει **αφαίρεση ηλεκτρονίων** (από κάποιο στοιχείο, ένωση, ιόν) και **αναγωγή** ή **λήψη ηλεκτρονίων**. Δηλαδή «χάσιμο» ή «κέρδος» ηλεκτρονίων (ακριβέστερα σημαίνει και έλξη ηλεκτρονίων προς ηλεκτραρνητικότερα άτομα αλλά παρόλκει εδώ η επέκταση επ' αυτού). ORP συνεπώς είναι η ικανότητα κάποιου μέσου να δίδει ή να λαμβάνει ηλεκτρόνια σχετικά με ένα άλλο μέσο. Ακριβώς επειδή αφορά μεταφορά ηλεκτρονίων η μονάδα μέτρησης του ORP είναι Volts. Τα ηλεκτρονικά όργανα που μετρούν το pH (κοινώς πεχάμετρα) συνήθως έχουν τη δυνατότητα να μετρούν και το ORP και το κάνουν «ανιχνεύοντας» ηλεκτρόνια (τα οποία έχει το υδρίδιο H^- , όχι το υδροξύλιο OH^-). Επειδή οι τιμές του ORP επηρεάζονται από το pH, οι τιμές ORP σε ποικίλα pH πρέπει να διορθώνονται για τιμή αναφοράς σε pH 7, κάτι που γίνεται βάσει δεδομένων πινάκων. Το τι είναι το υδρίδιο και πως είναι δυνατόν να υφίσταται άτομο υδρογόνου με 2 ηλεκτρόνια που να συμπεριφέρεται ως αρνητικό ιόν, δεν θα μας απασχολήσει εδώ.



Σχήμα 18. Αφαιρετική απεικόνιση των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής στα διάφορα βάθη ιζήματος και μεταβολή της ένδειξης ενός οργάνου μέτρησης ORP. Όσο βαθύτερα στο ίζημα, τόσο επικρατούν αναγωγικές αναερόβιες συνθήκες και το ORP γίνεται αρνητικότερο. (Τροποποιημένο από Γ. Χώτο του διαδικτυακού: <http://www.esf.edu/efb/schulz/Limnology/redox.html>).

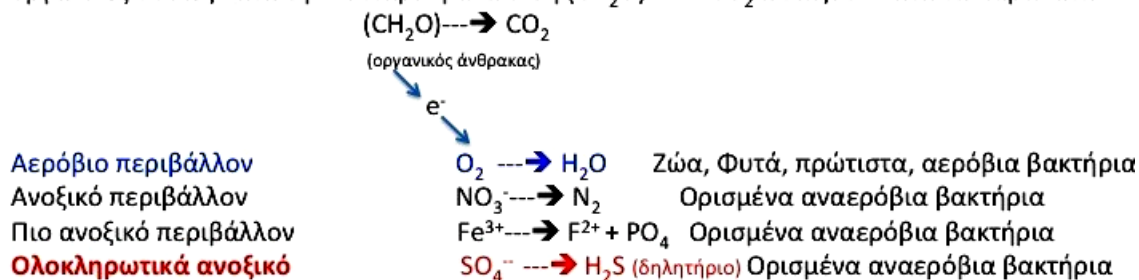
Η σημασία του ORP στη φύση και στην ιχθυοκαλλιέργεια συνίσταται στα παρακάτω:

Το οξειδοαναγωγικό δυναμικό (ORP) μετρά το πόσο ανηγμένο και συνεπώς αναερόβιο είναι το ίζημα (π.χ. στο φίλτρο του συστήματος) σε σχέση με το υπερκείμενο νερό. Στην επιφάνεια του ιζήματος εκεί που η «λάσπη» είναι σε επαφή με το οξυγονωμένο υπερκείμενο νερό, το ORP θα δώσει συνήθως τιμές μεταξύ 250 και 500 mVolts. Τέτοιες τιμές σημαίνει ότι επικρατούν αερόβιες συνθήκες και τα οργανικά του στρώματος αυτού οξειδώνονται. Πιο κάτω από το επιφανειακό στρώμα, μόλις ένα ή δύο εκατοστά (cm), το χρώμα του ιζήματος γίνεται σκουρότερο και οι αρνητικές τιμές του ORP σημαίνουν ότι γίνονται και αναερόβιες αντιδράσεις μέχρι που τιμή -400 mVolts σημαίνει ότι επικρατούν πλήρως αναερόβιες συνθήκες (Σχήμα 18). Επειδή γενικώς οι υποξικές συνθήκες δίνουν αρνητικές τιμές, ο λεγόμενος **δείκτης ORP** έχει καθιερωθεί ως «**δείκτης ρύπανσης**» καθώς τα φυσικά νερά που δέχονται οργανικούς ρυπαντές (π.χ. λύματα), τείνουν να γίνονται υποξικά. Βέβαια η θεώρηση αυτή είναι μια υπεραπλούστευση καθώς και στα καθαρά μη ρυπασμένα φυσικά νερά υφίστανται και υποξικές και αναερόβιες συνθήκες (κύκλοι στοιχείων) μη προκαλούμενες κατ' ανάγκη από εξωγενή ρύπανση.

Συμπέρασμα – πρακτικός κανόνας: Χαμηλές τιμές ORP στη στήλη του νερού της δεξαμενής δείχνουν αυξημένη ποσότητα αναγωγικών ουσιών που μπορεί να επιδρούν αρνητικά στα ψάρια. Αυτό διορθώνεται με την αύξηση των οξειδωτικών ουσιών, είτε με αύξηση του αερισμού ή με πρόσθεση ενός οξειδωτικού παράγοντα (π.χ. υπερμαγγανικό κάλιο KMnO_4) για να αυξηθεί το ORP.

Το **Δυναμικό Οξειδοαναγωγής** (Redox potential ή **ORP** ή **pE** ή ϵ ή E_h) εκφράζει το μέτρο της τάσης ενός στοιχείου ή μιας χημικής ένωσης να **αποκτά ηλεκτρόνια** και συνεπώς να **ανάγεται**. Δηλαδή δείχνει το **πόσο αναγωγικό** είναι ένα περιβάλλον. Όταν μετράμε τη μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ ενώσεων ως δυναμικό αναγωγής, είναι κάτι ανάλογο με τη μεταφορά των πρωτονίων υδρογόνου (H^+) στη μέτρηση του pH.

Το **Δυναμικό Οξειδοαναγωγής** δείχνει ποιες μεταβολικές διεργασίες συμβαίνουν κατά την κυτταρική αναπνοή (δηλ. ποια μόρια θα χρησιμοποιηθούν ως δέκτες ηλεκτρονίων) και ως εξ' αυτού, τι είδους οργανισμοί ζουν σε ένα ορισμένο βάθος στο νερό και στο ίζημα του βυθού. Ένα περιβάλλον που γίνεται **ανοξικό**, παρουσιάζει μεγάλη δραστηριότητα ηλεκτρονίων, το ORP γίνεται **αρνητικό** και οι μεταβολικές διεργασίες με τις οποίες λαμβάνεται η ενέργεια από τις οργανικές ουσίες κατά την κυτταρική αναπνοή (CH_2O) $\rightarrow$ CO_2 αλλάζουν κατά τα παρακάτω:



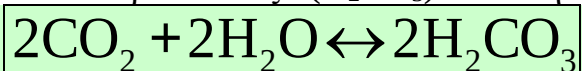
Το ORP μετράται από τη διαφορά ηλεκτρικής τάσης σε mVolts χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρόδιο ενός ηλεκτρονικού pH-μέτρου (το ίδιο ηλεκτρόδιο που μετρά το pH) στο **ίζημα**. Συνήθως με μικρή βύθιση από την επιφάνεια όπου θα δείξει υψηλό ORP, σε ένα αμέσως επόμενο βάθος, εάν επικρατούν **αναερόβιες συνθήκες** η τιμή θα γίνει αρνητική.

4. Ποιότητα νερού: Το σύστημα του CO₂ και η έννοια του ρυθμιστή (buffer)

Ο κύκλος του άνθρακα στη Γη είναι η αιτία δημιουργίας κάθε οργανικού μορίου που βρίσκεται σε κάθε οργανισμό, θαμμένο ως πετρέλαιο ή άνθρακας, κάθε είδους τροφής που καταναλώνεται και κάθε μορίου οξυγόνου που προήλθε από τη φωτοσύνθεση. Είναι η αιτία επίσης μεταξύ άλλων που ο πλανήτης μας έχει σήμερα τη σωστή θερμοκρασία, η αιτία που υπάρχουν τα ασβεστολιθικά πετρώματα και η αιτία βεβαίως για το “φαινόμενο του θερμοκηπίου”. Η οργανική χημεία είναι στην ουσία η χημεία του άνθρακα όπως και η ζωή είναι αυτή που είναι βασισμένη στον άνθρακα.

Όλα έχουν να κάνουν με το πρωταρχικό μόριο, το αέριο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Σε αυτή τη μορφή μιλάμε για τον ανόργανο άνθρακα. Η αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα με το νερό αποτελεί ένα θαυμαστό σύστημα ισορροπίας μεταξύ διαφόρων ενώσεων που σχηματίζονται, που η σημασία του είναι απαραίτητο να κατανοηθεί καλά. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι πολύ διαλυτό στο νερό, πολύ περισσότερο από το οξυγόνο και το άζωτο. Μια ασύλληπτη ποσότητα άνθρακα (έξι φορές όσο όλος ο άνθρακας που υπάρχει σε κάθε οργανισμό στη Γη μαζί και με τον άνθρακα στους απολιθωμένους υδρογονάνθρακες) βρίσκεται διαλυμένη στους ωκεανούς, λίμνες και ποτάμια σε μορφή ανθρακικών (ενώσεις άνθρακα-οξυγόνου και ενίοτε και υδρογόνου). Τα ανθρακικά αποτελούν τη βάση του συστήματος του διοξειδίου του άνθρακα ή κατά άλλη ονομασία του **ανθρακικού ρυθμιστικού συστήματος** (carbonate buffering system).

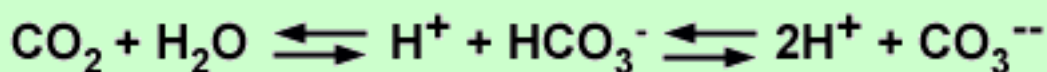
Ενώ η διάχυση του οξυγόνου (O₂) και του αζώτου (N₂) στο νερό “κυβερνάται” από τη διαφορά των μερικών πιέσεων αυτών των μορίων μεταξύ αέρα και νερού, για το διοξείδιο η κατάσταση αυτή ισχύει μεν αλλά υπάρχει και άλλος παράγοντας που στην περίπτωση του προκαλεί πολύ μεγαλύτερη διαλυτότητα. Έτσι ενώ εισερχόμενα τα μόρια του οξυγόνου και του αζώτου στο νερό κατανέμονται και συγκρατούνται μεταξύ των μορίων του νερού με ασθενείς ηλεκτροστατικές δυνάμεις, **τα μόρια του διοξειδίου αντιδρούν χημικώς με το νερό** παράγοντας προϊόντα με πρώτο το ανθρακικό οξύ (H₂CO₃) κατά την αντίδραση:



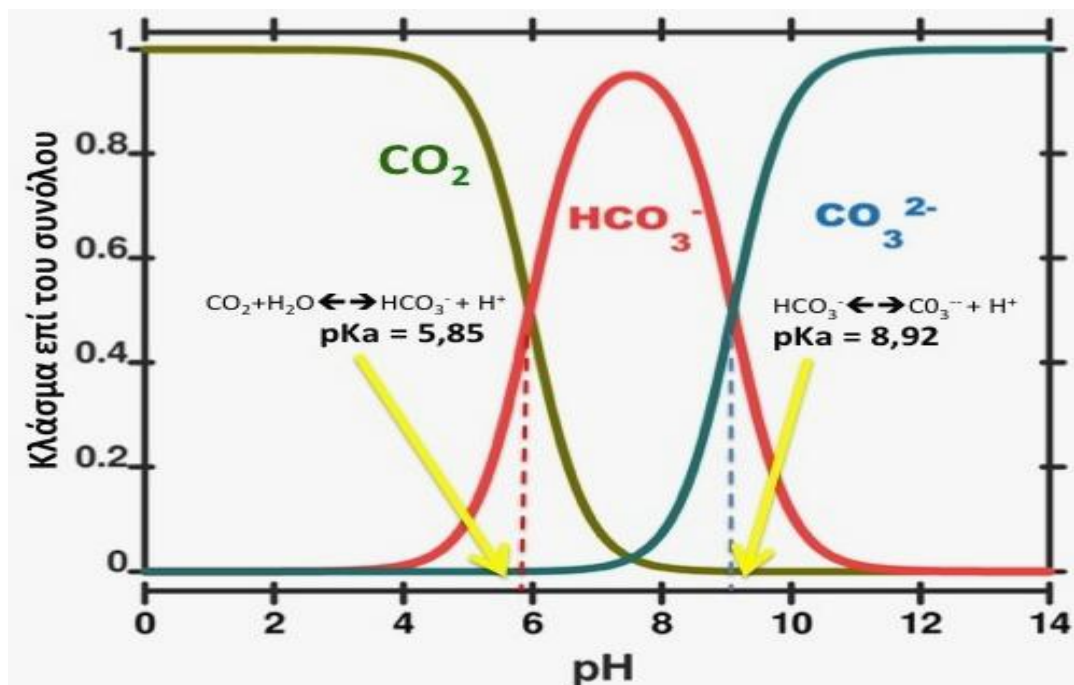
Ηδη κατά την παραπάνω αντίδραση, το διοξείδιο μεταμορφώθηκε σε άλλη ένωση και ανεξάρτητα από το τι άλλο θα προκύψει από το ανθρακικό οξύ (βλέπε παρακάτω), η μερική του πίεση στο νερό ξαναμειώθηκε και νέο διοξείδιο μπορεί να διαχυθεί από τον αέρα. Δηλαδή με άλλα λόγια, άπαξ και το διοξείδιο αντιδράσει με το νερό μεταμορφώνεται σε άλλη ένωση και δεν αποτελεί πλέον μέρος του

συστήματος των μερικών πιέσεων των αερίων που «κυβερνά» τη διάχυσή τους στο νερό. Αυτός είναι ο λόγος για τη μεγάλη διαλυτότητα του διοξειδίου στο νερό.

Το ανθρακικό οξύ είναι ασταθές και θα διασπαστεί σε **όξινα ανθρακικά ιόντα** (HCO_3^-) και πρωτόνια υδρογόνου (H^+). Πρόκειται για μια αμφίδρομη αντίδραση, η οποία έχει και επόμενο στάδιο με την παραγωγή ενός ακόμα πρωτονίου και **ανθρακικού** ιόντος (CO_3^{2-}). Το όλο σχήμα ονομάζεται **σύστημα του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό** και αποτυπώνεται στην παρακάτω αντίδραση:



Όπως γίνεται κατανοητό από τις παραπάνω αντιδράσεις, η μία μορφή μεταβάλλεται στην άλλη ($\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$) και το υπό ποια μορφή βρίσκεται σε μια δεδομένη στιγμή ο ανόργανος άνθρακας εξαρτάται από το pH. Είναι καλύτερα να ομιλούμε για “επικρατούσα” μορφή επειδή και οι τρεις μορφές σε εύρος pH 4-12 είναι παρούσες ανά δύο σε κάθε τιμή pH αλλά με διαφορετικές αναλογίες. Με την εξέταση του Σχήματος 19 αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό. Έτσι σε τιμές pH 4-8 υπάρχουν στο νερό μόνο CO_2 και HCO_3^- , ενώ σε pH 8-12 μόνο HCO_3^- και CO_3^{2-} . Σε τιμές pH κατώτερες του 4 και ανώτερες του 12 υπάρχουν μόνο CO_2 και CO_3^{2-} αντίστοιχα ενώ το HCO_3^- έχει μηδενιστεί.



Σχήμα 19. Καμπύλες εκατοστιαίας μεταβολής των τριών μορίων που συμμετέχουν στο “σύστημα του CO_2 ” στο νερό ($\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$) ανάλογα με το pH και την αλκαλικότητα.

Το pH δεν επηρεάζει μόνο την αναλογία των παραπάνω μορίων στο σύστημα αυτών των αμφίδρομων αντιδράσεων, αλλά και επηρεάζεται από αυτά. Πρόκειται για μια σχέση αλληλεξάρτησης επειδή αν αλλάξει το pH θα αλλάξει και το επικρατούν μόριο. Αν αλλάξει η αναλογία των μορίων (π.χ. είσοδος νέου CO_2 στο νερό) πρέπει να αλλάξει και το pH, κ.ο.κ. Αυτό ακριβώς είναι που κάνει την επικρατούσα μορφή του όξινου ανθρακικού ιόντος (HCO_3^-) να διαδραματίζει το ρόλο του **ρυθμιστή** ή **εξουδετερωτή** ή όπως διεθνώς έχει καθιερωθεί να ονομάζεται: **buffer** (αυτή τη λέξη θα χρησιμοποιούμε εφεξής). Στην υδρόσφαιρα της Γης υπολογίζεται ότι το 80% περίπου του CO_2 διαλυμένου στο νερό υφίσταται υπό τη μορφή του HCO_3^- .

Χρησιμοποιώντας τις καμπύλες του Σχήματος 19 μπορούμε να συντάξουμε κατάλληλους πίνακες όπως αυτόν του Σχήματος 20 στον οποίο δίδονται οι τιμές του διαλυμένου στο νερό CO_2 (σε mg/L) εφόσον γνωρίζουμε την τιμή του pH και της αλκαλικότητας.

Συγκεντρώσεις CO_2 σε mg/L

Αλκαλικότητα (Alkalinity)- KH°	pH											
	KH°	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0
1		30	19	12	8	5	3	2	1	0.8	0.5	0.3
2		60	38	24	15	10	6	4	2	1.5	1	0.6
3		90	57	36	23	14	9	6	4	2.3	1.4	0.9
4		120	76	48	30	19	12	8	5	3.0	1.9	1.2
5		150	95	60	38	24	15	9	6	3.8	2.4	1.5
6		180	114	72	45	29	18	11	7	4.5	2.9	1.8
7		210	133	84	53	33	21	13	8	5.3	3.3	2.1
8		240	151	96	60	38	24	15	9.6	6.0	3.8	2.4
9		270	170	107	68	43	27	17	11	6.8	4.3	2.7
10		300	189	119	75	48	30	19	12	7.5	4.8	3.0
11		330	208	131	83	52	33	21	13	8.3	5.2	3.3
12		360	227	143	90	57	36	23	14	9.0	5.7	3.6

1 $\text{KH}^\circ = 17,9 \text{ mg/L CaCO}_3$

Επικίνδυνες

Ασφαλείς

Χαμηλές

Σχήμα 20. Τιμές CO_2 (mg/L) στο νερό, για διάφορες τιμές pH και αλκαλικότητας (ως $\text{KH}^\circ = \text{dH}$, $1\text{KH} = 17,9 \text{ mg}$ αλκαλικότητας ως CaCO_3). Η **κίτρινη περιοχή** αντιπροσωπεύει επικίνδυνες τιμές διοξειδίου για τα ψάρια, η **πράσινη** ασφαλείς και η λευκή χαμηλές (ασφαλείς).

Ενα buffer είναι μια χημική ένωση διαλυμένη στο νερό η οποία δρα με τρόπο τέτοιο που να διατηρεί το pH του νερού εντός ορισμένων ορίων. Οξύτητα στο pH ονομάζουμε την παρουσία πρωτονίων δηλαδή θετικά φορτισμένων ατόμων **υδρογόνου** (H^+). Είναι δύσκολο να κατανοηθεί η

έννοια του πρωτονίου υδρογόνου χωρίς να κατανοηθεί η δομή του ατόμου του υδρογόνου. Το πλέον ιδιόμορφο στοιχείο του περιοδικού πίνακα είναι το άτομο του υδρογόνου. Ο πυρήνας του αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο και πέριξ αυτού βρίσκεται σε τροχιά (στοιβάδα) ένα μόνο ηλεκτρόνιο. Δεν υπάρχει άλλο στοιχείο στη φύση που να έχει μόνο μία στοιβάδα ηλεκτρονίων η οποία να έχει ένα μόνο ηλεκτρόνιο. Ολα έχουν στην πρώτη στοιβάδα ηλεκτρονίων 2 ηλεκτρόνια και ποτέ παραπάνω. Οι εξώτερες (μετά την πρώτη) στοιβάδες τους έχουν 8 τουλάχιστον ηλεκτρόνια, με την εξώτατη να έχει ποικίλο αριθμό ηλεκτρονίων (μικρότερο πάντως του 8) και την τάση να αποκτήσει 8 μέσω δεσμών με άλλα στοιχεία. Αυτή είναι η εξήγηση για τους χημικούς δεσμούς.

Το υδρογόνο, το πολυπληθέστερο στοιχείο στο σύμπαν, ο τροφοδότης μέσω πυρηνικών συντήξεων των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας που είναι τα άστρα, επηρεάζει και την υδρόβια ζωή στον πλανήτη μας. Και την επηρεάζει κυριότατα με αυτό που ονομάζουμε pH. Τα πρωτόνια που δημιουργούνται κατά τις χημικές αντιδράσεις οξειδοαναγωγής οφείλουν τη δημιουργία τους στην αφαίρεση του ηλεκτρονίου από το άτομο του υδρογόνου. Το ηλεκτρόνιο θα ανάγει κάποιο στοιχείο ή ένωση που θα το δεσμεύσει (δεν μας ενδιαφέρει εδώ να επεκταθούμε) και το πρωτόνιο θα μείνει γυμνό, φορτισμένο θετικώς και το συμβολίζουμε ως θετικό ιόν (H^+). Κατ' αναλογία η ένωση που κέρδισε το ηλεκτρόνιο φορτίζεται αρνητικώς και τη συμβολίζουμε ως αρνητικό ιόν με (-).

Τα πρωτόνια (θετικά ιόντα υδρογόνου) είναι πολύ δραστικά έχοντας την τάση να αφαιρούν ηλεκτρόνια από άλλες ενώσεις, «βλάπτοντας» με αυτό τον τρόπο τα μόριά τους. Τα οξέα είναι στην ουσία «σούπερ» πρωτονίων και στη μεγάλη τάση τους να αφαιρούν ηλεκτρόνια βρίσκεται και η εξήγηση π.χ. της καυστικότητάς των όταν αγγίζουν π.χ. το δέρμα. Πολλά πρωτόνια σημαίνει χαμηλό pH (όξινο) και χαμηλό pH σημαίνει πολλά πρωτόνια. Στο άλλο άκρο της κλίμακας του pH (0-14) έχουμε την παρουσία βάσεων και βάση σημαίνει ένωση που δίδει ηλεκτρόνια.

Βασικό είναι το διάλυμα όταν περιέχει ιόντα υδροξυλίου (OH^-) το οποίο σε αντίθεση με το πρωτόνιο είναι δότης ηλεκτρονίου. Τότε το διάλυμα γίνεται αλκαλικό και κατ' αναλογία με τα οξέα, οι βάσεις (ιδιαίτερα οι ισχυρές), είναι το ίδιο δραστικές (και καταστροφικές). Στην τιμή pH=7 το διάλυμα είναι ουδέτερο και το σύνολο των πρωτονίων «εξουδετερώνει» το σύνολο των υδροξυλίων. Σε τιμές pH γύρω από την ουδέτερη τιμή 7 είναι που έχει προσαρμοστεί η ζωή να λειτουργεί φυσιολογικά και αυτό συμβαίνει και στα υδάτινα οικοσυστήματα (και στις μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας).

Ολες σχεδόν οι βιολογικές δραστηριότητες συμβαίνουν σε pH 6-8. Απόκλιση από αυτές τις τιμές σε ολοένα μεγαλύτερο εύρος, σημαίνει και μεγαλύτερο αναλογικά κίνδυνο για την επιβίωση. Ιδιαίτερες περιπτώσεις

όπως η πέψη των τροφών στο στομάχι σε ακραίως όξινο pH (1-2), δεν ακυρώνουν τον κανόνα επειδή πρόκειται για διεργασία που γίνεται σε απόλυτα ελεγχόμενο περιβάλλον (περισσότερα στα βιβλία βιολογίας).

Από όλα τα παραπάνω γίνεται κατανοητή η ανάγκη να διατηρείται το pH του νερού εκτροφής σε ασφαλή σταθερά επίπεδα για το καλό των ψαριών. Και επειδή ακριβώς το pH μπορεί να μεταβληθεί στο νερό ανεξέλεγκτα αν δεν έχει ικανή ποσότητα buffer σε διάλυση, είναι που ενδιαφερόμαστε να μην του λείψει (το buffer). Ευτυχώς η φύση μας παρέχει τα μέσα για αυτό και είναι ακριβώς το **σύστημα των ανθρακικών buffer** (η αντίδραση του συστήματος του διοξειδίου του άνθρακα παραπάνω).

Η buffer ανθρακικότητα συμβαίνει με ποικίλη ένταση στα φυσικά νερά και προέρχεται κυρίως από εκπλύσεις ανθρακικών πετρωμάτων (π.χ. CaCO_3). Είναι ευρύτερα γνωστή υπό την ονομασία **αλκαλικότητα** και παρόλο που ο όρος μπορεί να νομιστεί ότι εκφράζει την έλλειψη οξύτητας, πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι με τον όρο αλκαλικότητα εννοείται η ύπαρξη ικανότητας buffer. Η αλκαλικότητα μετράται με **τιτλοδότηση**, δηλαδή με σταδιακή πρόσθεση (σταγόνα-σταγόνα) οξέος στο εξεταζόμενο δείγμα νερού παρουσία ενός δείκτη pH. Όσο το buffer δεν εξουδετερώνεται και παραμένει στο νερό, το pH δεν αλλάζει. Με το που εξαφανίζεται όμως και το τελευταίο ίχνος αλκαλικότητας, η επόμενη σταγόνα οξέος θα προκαλέσει απότομη μείωση του pH (οξονοποίηση).

Η αλκαλικότητα εκφράζεται (μετράται) σε mg/L CaCO_3 , ή σε Γερμανικούς βαθμούς KH° ή dH, ή σε meq. Στα φυσικά νερά η αλκαλικότητα ποικίλλει από 10 - 300 mg/L .

Σχέσεις μονάδων αλκαλικότητας:

$$1 \text{ dH (ή KH}^\circ) = 17,9 \text{ mg/L CaCO}_3 \quad 1 \text{ meq} = 50 \text{ mg/L CaCO}_3$$

4.1. Ο χειρισμός του pH στη δεξαμενή εκτροφής

Στις ιχθυοκαλλιέργειες και ιδιαίτερα στα κλειστά συστήματα, η επιδίωξη είναι να διατηρείται το pH μεταξύ 7 και 8. Αυτό θεωρείται ιδανικό εύρος για να ζουν υγιεινά τα ψάρια και να προχωρούν γρήγορα οι διάφορες βιολογικές διεργασίες (π.χ. νιτροποίηση στο βιολογικό φίλτρο). Επιτυγχάνεται εύκολα εάν ο υδατοκαλλιεργητής φροντίσει για την ύπαρξη αλκαλικότητας και απαλλαγής του νερού από το πλεονάζον CO_2 που συνεχώς παράγουν τα ψάρια.

Η αλκαλικότητα δεν παραμένει σταθερή σε ένα λειτουργούν σύστημα. Συνεχώς και προοδευτικώς τα όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3) «χάνονται» από το σύστημα καθώς αντιδρούν με οξέα και βάσεις και κάπως θα πρέπει να αναπληρώνονται για να διατηρεί η αλκαλικότητα τη δυναμικότητά της.

Για να προστεθεί αλκαλικότητα χρησιμοποιείται είτε ασβεστόλιθος (CaCO_3), που όμως διαλύεται πολύ αργά στο νερό είτε όξινο ανθρακικό

νάτριο (NaHCO_3), η κοινή μαγειρική σόδα που δίδει άμεσα αποτελέσματα με απελευθέρωση όσου όξινου ανθρακικού (HCO_3^-) απαιτείται από το σύστημα.

Το διοξείδιο του άνθρακα, το όξινο ανθρακικό ιόν και το ανθρακικό ιόν δεν αποτελούν παρά τρεις διαφορετικές μορφές του ανόργανου άνθρακα που έχει διαλυθεί στο νερό. Το ποια μορφή θα επικρατήσει καθορίζεται από το pH. Το διοξείδιο επικρατεί στο χαμηλό pH, το όξινο ανθρακικό στις περιοχές πέριξ του ουδέτερου και το ανθρακικό στο υψηλό pH. Εάν μετρηθεί η αλκαλικότητα του νερού με τα πρακτικά κιτ ανάλυσης, μετρηθεί και το pH με ένα κοινό πεχάμετρο, τότε μπορεί να υπολογισθεί (βλέπε Σχήμα 20) η ποσότητα του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα. Και αυτό έχει μεγάλη σημασία επειδή το διοξείδιο του άνθρακα είναι τοξικό για τα ψάρια με ανώτατες επιτρεπόμενες τιμές στην περιοχή των 15-30 mg/L (ανάλογα με το είδος).

Ως γενικός κανόνας ισχύει ότι **αλκαλικότητα-pH-CO₂** είναι μια «**τριάδα**» στην οποία όποια από τα δύο μεγέθη της μετρηθεί, μπορεί να υπολογιστεί το τρίτο.

Ειδικότερα, για να υπολογιστεί η συγκέντρωση του CO₂ εφόσον είναι γνωστά τα pH και η αλκαλικότητα (KH^ο), χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$[\text{CO}_2] = \frac{[\text{KH}^{\circ}]}{(3,2 \times 10^{-7}) \cdot 10^{\text{pH}}}$$

όπου:

pH = η τιμή του pH

KH^ο = η τιμή της αλκαλικότητας σε mg/L CaCO₃

CO₂ = η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα σε mg/L

Σημείωση: η σταθερά ($3,2 \times 10^{-7}$) αφορά θερμοκρασία 19,5 °C αλλά αυτό μικρή σημασία έχει, διότι και σε άλλες θερμοκρασίες η τιμή της σταθεράς αλλάζει λίγο χωρίς να επηρεάζει ουσιαστικά την επιθυμητή ακρίβεια στο επίπεδο τιμών του υπολογισμένου CO₂ σχετικά με τις επιτρεπόμενες τιμές του για τα ψάρια.

Σε ένα κλειστό σύστημα ανάλογα και με την ένταση λειτουργίας του, υπάρχει και η ανάλογη τάση για μείωση της αλκαλικότητας συν τω χρόνω καθώς επιτελεί τη λειτουργία buffer. Εάν η ικανότητα buffer μειωθεί πολύ, το παραγόμενο CO₂ από την αναπνοή των ψαριών και βακτηριδίων θα δημιουργήσει πτώση του pH. Όταν το pH μειώνεται κάτω από 7, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα. Τότε ο ιχθυολόγος πρέπει να προσθέσει όξινο ανθρακικό νάτριο (σόδα) για να ανεβάσει την αλκαλικότητα αναπληρώνοντας έτσι τη χαμένη ικανότητα buffer του συστήματος και επαναφέροντας την τιμή του pH στα επιθυμητά. Η

πρόσθεση της σόδας στο νερό είναι απόλυτα ασφαλής, μπορεί να γίνει και απευθείας στις δεξαμενές των ψαριών.

Κανόνας: Για κάθε **1 mg O₂** που μεταβολίζεται παράγονται **1,37 mg CO₂**

Η πρόσθεση της σόδας θα έχει πιο δυναμικά αποτελέσματα εάν συνοδεύεται και από **απαερισμό** του CO₂. Στην πραγματικότητα, όταν η οξυγόνωση του νερού γίνεται με αεραντλία, οι φυσαλίδες του αέρα πέρα από την πρόσδοση οξυγόνου επιτυγχάνουν και γρήγορη διαφυγή του διοξειδίου στην ατμόσφαιρα απαλλάσσοντας το νερό από υπερβολικές ποσότητες που συσσωρεύονται. Με τον αερισμό λοιπόν γίνεται και οξυγόνωση και απαερισμός του CO₂.

Ομως όταν για την οξυγόνωση χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο η τεχνική είναι διαφορετική και δεν έχουμε αποτελεσματικό απαερισμό. Τότε χρειάζεται ένα ξεχωριστό σύστημα αερισμού στοχεύοντας μόνο στον απαερισμό του CO₂. Ομως αυτό το σύστημα εάν δεν τοποθετηθεί εκεί που πρέπει θα απαερώσει και το πολύτιμο O₂ το οποίο προστέθηκε με τη χρησιμοποίηση του ακριβού υγρού οξυγόνου (LOX). Η λύση είναι το σύστημα απαερισμού να λειτουργεί σε τέτοιο σημείο της όλης διαδρομής του ανακυκλούμενου νερού, που να βρίσκεται πριν από το σημείο όπου προστίθεται το καθαρό οξυγόνο.

Η συσκευή απαερισμού είναι βασικά ένας κύλινδρος γεμισμένος με αδρανή υλικά (συνήθως ανάγλυφα πλαστικά) και με ένα ρεύμα αέρα από κάτω το οποίο συναντά το νερό που καταιονίζεται διαβρέχοντας τα πλαστικά. Τα πλαστικά «σπάνε» τη ροή του νερού απλώνοντάς τη σε μεγάλη επιφάνεια και σε συνδυασμό με το από αντίθετη κατεύθυνση ρεύμα αέρα, μεγιστοποιούν την ανταλλαγή των αερίων.

4.2. Αλκαλικότητα και σκληρότητα του νερού

Όπως προαναφέρθηκε η αλκαλικότητα μετράται σε mg/L CaCO_3 . Αυτό έχει την έννοια ότι ένα εξεταζόμενο δείγμα έχει ικανότητα buffer ισοδύναμη με αυτή των ανθρακικών που θα προκύψουν από τη διάλυση στο νερό ισοδύναμης ποσότητας ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3).

Η **σκληρότητα** του νερού, είναι μια παρόμοια με την αλκαλικότητα παράμετρος, αλλά όχι ακριβώς με το ίδιο “περιεχόμενο”. Η σκληρότητα αφορά τη μέτρηση των ιόντων μαγνησίου (Mg^{++}) και ασβεστίου (Ca^{++}) (και μερικών σχετικά σπάνιων μεταλλικών ιόντων όπως Al, Fe, Mn) στο νερό και σχετίζεται πρακτικώς με την κατανάλωση σαπουνιού (μεγάλη σκληρότητα, λίγη σαπουνάδα). Επειδή στη φύση το buffering προέρχεται κυρίως από ενώσεις ασβεστίου (Ca), σκληρότητα και buffer συχνά συσχετίζονται, αλλά αυτό δεν είναι ορθό. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας σόδα (NaHCO_3) για να αυξηθεί το buffer (όπως προαναφέρθηκε) δεν προκαλείται καμία αύξηση στη σκληρότητα (αύξηση Mg ή Ca).

Ενα άλλο σημείο σύγχυσης αφορά τη λεγόμενη “**ανθρακική σκληρότητα**” συμβολιζόμενη συχνά ως **KH**. Πρόκειται για το μέρος εκείνο της ολικής σκληρότητας που ισοδυναμεί με την ολική αλκαλικότητα (ονομάζεται και “παροδική σκληρότητα”). Εάν η σκληρότητα είναι μεγαλύτερη από την ολική αλκαλικότητα τότε το ποσό της σκληρότητας πάνω από την αλκαλικότητα αποτελεί την **μη ανθρακική σκληρότητα** (δηλαδή τη σκληρότητα που αφορά τα Ca και Mg και ονομάζεται και αλλιώς “μόνιμη σκληρότητα”).

Ολική Σκληρότητα = Ανθρακική Σκληρότητα + Μη Ανθρακική Σκληρότητα
το οποίο ισοδυναμεί με:

Ολική Σκληρότητα = Ολική Αλκαλικότητα + Μη Ανθρακική Σκληρότητα

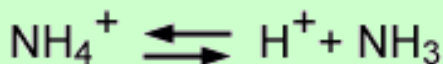
Εάν η ολική σκληρότητα είναι λιγότερη από την ολική αλκαλικότητα (π.χ. στην περίπτωση που χρησιμοποιείται NaHCO_3), τότε όλη η σκληρότητα είναι ανθρακική σκληρότητα και δεν υπάρχει μη ανθρακική σκληρότητα. Όλα αυτά μπορεί να δημιουργούν «κομφούζιο» και καλύτερα να αγνοείται ολωσδιόλου η σκληρότητα και να μετράται η ολική αλκαλικότητα.

Η ολική αλκαλικότητα αποτελείται από την **όξινη ανθρακική αλκαλικότητα** και την **ανθρακική αλκαλικότητα**. Η ανθρακική αλκαλικότητα αναφέρεται συχνά και ως αλκαλικότητα φαινολοφθαλείνης και αφορά τιτλοδότηση με οξύ μέχρι pH 8,3 αφορά δε τα ανθρακικά ιόντα (CO_3^{--}). Η όξινη ανθρακική αλκαλικότητα είναι που έχει τη σπουδαία σημασία καθώς αφορά τα όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-) που είναι τα πραγματικά buffer στο νερό σε τιμές pH < 8. Υπολογίζεται με τιτλοδότηση με βάση (NaOH) πρώτα και κατόπιν με οξύ (HCl) μέχρι pH 4,5.

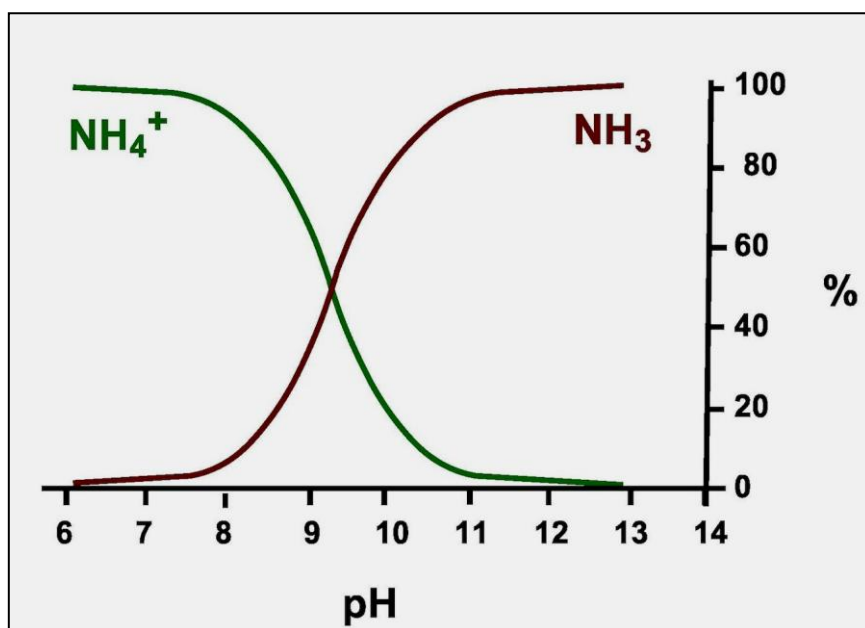
4.3. Ποιότητα νερού: Αμμωνία

Στο μεταβολισμό της τροφής από τα ψάρια, κατά τη φάση του καταβολισμού (δημιουργία απλούστερων ενώσεων από πιο σύνθετες) των πρωτεϊνών, δημιουργείται και αμμωνία ως παραπροϊόν, η οποία δεν πρέπει να συσσωρευτεί στο αίμα επειδή είναι τοξική και πρέπει γρήγορα να απεκκριθεί στο περιβάλλον νερό. Αν και ο μεταβολισμός των πρωτεϊνών είναι μια σύνθετη και πολύπλοκη διαδικασία, το σίγουρο αποτέλεσμα είναι η δημιουργία αμμωνίας. Όσο περισσότερη πρωτεΐνη στην τροφή, τόσο περισσότερη η αμμωνία που θα παραχθεί.

Η αμμωνία υφίσταται στο νερό σε δύο μορφές, την **μη ιονισμένη αμμωνία** (NH_3) και το ιονισμένο **αμμώνιο** (NH_4^+) κατά την αμφίδρομη αντίδραση:



Οι μορφές αυτές βρίσκονται σε ισορροπία, το σημείο της οποίας καθορίζεται πρωτίστως και κυρίαρχα από το pH του νερού και κατά μικρότερο βαθμό από τη θερμοκρασία. Δηλαδή το **σύνολο** της ποσότητάς τους στο νερό θεωρούμενο ως 100 %, περιέχει διαφορετικό ποσοστό μη ιονισμένης αμμωνίας (θα αναφέρεται συνοπτικώς “αμμωνία”) και διαφορετικό ποσοστό αμμωνίου, κάθε φορά ανάλογα με το pH που επικρατεί.



Σχήμα 21. Καμπύλες εκατοστιαίας συμμετοχής των δύο αλληλομεταβαλλόμενων μορφών της αμμωνίας (NH_3 και NH_4^+) στους 20 °C στο γλυκό νερό ανάλογα με το pH του νερού. Στο όξινο επικρατεί η NH_4^+ στο βασικό η NH_3 .

Σε χαμηλότερο pH (όπου υπάρχουν πολλά πρωτόνια – H^+) επικρατεί το αμμώνιο και σε υψηλότερο η αμμωνία (η άνοδος της θερμοκρασίας

δυναμώνει αυτή την τάση). Στο Σχήμα 21 γίνεται απόλυτα κατανοητή η επίδραση του pH στα ποσοστά παρουσίας των δύο μορφών της αμμωνίας στους 20 °C.

Η κατανόηση της επίδρασης του pH είναι υψίστης σημασίας για τον ιχθυολόγο, επειδή η τοξική μορφή είναι η NH_3 ενώ το αμμώνιο NH_4^+ πρακτικά είναι μη τοξικό. Συνεπώς μας ενδιαφέρει να επικρατεί pH τέτοιο που να ελαχιστοποιεί την παρουσία της μη ιονισμένης μορφής (NH_3). Και να την ελαχιστοποιεί τόσο που **να μην ξεπερνά τα 0,02 mg/L**, συγκέντρωση που αποτελεί τον «χρυσό κανόνα» για την ασφάλεια όλων των ειδών ψαριών, έστω και αν η αντοχή στην αμμωνία ποικίλλει από είδος σε είδος (π.χ. σαλμονιδή = πολύ ευαίσθητα, τιλάπια, κυπρίνοι = αρκετά ανθεκτικοί).

Ο έλεγχος της συγκέντρωσης της αμμωνίας στο νερό αποτελεί ένα από τα δύο κυρίαρχα ζητήματα «ζωής ή θανάτου» για κάθε ιχθυοκαλλιέργεια. Το πρώτο είναι η ύπαρξη επαρκούς οξυγόνου και το δεύτερο η απομάκρυνση της παραγόμενης αμμωνίας. Όλα τα άλλα έπονται. Η αμμωνία εκκρίνεται από τα «αμμωνιοτελικά» ψάρια άμεσα από τα βράγχιά τους (περί το 70% της παραγόμενης ποσότητας) και έμμεσα από τα περιττώματά τους, την λίγη ουρία των ούρων τους, και την αφάγωτη τροφή. Όλα αυτά είναι αζωτούχες ενώσεις οι οποίες αποικοδομούμενες από αερόβιους μικροοργανισμούς παράγουν και αμμωνία. Το μέγιστο της παραγωγής αμμωνίας είναι 90 λεπτά περίπου μετά το γεύμα των ψαριών. Το σύνολο της υπάρχουσας κάθε δεδομένης στιγμής αμμωνίας στο νερό το οποίο συνθέτουν τα εκάστοτε (ανάλογα με το pH) ποσά των δύο μορφών της ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$), ονομάζεται **ολική αμμωνία** ή **ολική αμμωνία-άζωτο (TAN-Total Ammonia Nitrogen)** και είναι αυτό που μετράται με κάθε χημική μέθοδο. Η χημική ανάλυση στο εργαστήριο γίνεται είτε με τη μέθοδο Nessler, είτε με τη μέθοδο του σαλικυλικού οξέος. Δεν χρειάζεται να αναλυθούν εδώ αλλά πρέπει να αναφερθεί ότι ευτυχώς υπάρχουν σήμερα στο εμπόριο εύχρηστα **κιτ ανάλυσης** και για τις δύο μεθόδους, με τα οποία ο ιχθυολόγος αναλύοντας το δείγμα νερού, παίρνει αποτέλεσμα συγκέντρωσης της αμμωνίας με πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικής (αυτής δηλαδή που θα έπαιρνε με την αυστηρή εργαστηριακή ανάλυση).

Τα τεστ κιτ αμμωνίας δουλεύουν **χρωματομετρικά** και μετρούν την ολική αμμωνία και όχι όπως ευρέως νομίζεται (απολύτως λανθασμένα) την μη ιονισμένη αμμωνία ή το αμμώνιο. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο για να έχει νόημα η μέτρηση, θα πρέπει παράλληλα με αυτή να μετράται και το pH (οπωσδήποτε), και η θερμοκρασία. Μόνο τότε το αποτέλεσμα της μέτρησης της ολικής αμμωνίας θα επιτρέψει συμβουλευόμενοι πίνακες ή σχεδιαγράμματα (σαν κι' αυτό του Σχήματος 21), να εξαχθεί συμπέρασμα για το ποσό της συγκέντρωσης της μη ιονισμένης αμμωνίας στο αναλυθέν δείγμα. Η μη ιονισμένη αμμωνία (NH_3) είναι το

δηλητήριο, αυτή ενδιαφερόμαστε να υπολογίσουμε για να δούμε αν όλα πάνε καλά ή να λάβουμε μέτρα.

Δυστυχώς όμως υπάρχει ένα σημείο το οποίο χρειάζεται διευκρίνιση και ταλαιπωρεί τους μη εξοικειωμένους (και όχι μόνο). Πέραν αυτού που προαναφέρθηκε, δηλαδή ότι όλα τα τεστ κιτ μετράνε ολική αμμωνία και όχι μόνο αμμώνιο ή μόνο μη ιονισμένη αμμωνία, υπάρχει και σύγχυση σχετικά με το περιεχόμενο-σημασία του όρου ολική αμμωνία (TAN). Έτσι, κάποια μέθοδος μπορεί να αναφέρεται σε **ολική αμμωνία** σκέτο, άλλη σε ολική αμμωνία ως TAN, άλλη σε **ολική αμμωνία-άζωτο** πάλι ως TAN, άλλη σε αμμωνία-άζωτο πάλι ως TAN και άλλη σε αμμώνιο-άζωτο πάλι ως TAN. Πολλές φορές (ίσως τις περισσότερες) τα κιτ δεν αναφέρουν καν τον όρο TAN παρόλο που το εννοούν. Πραγματικό κομφούζιο. Διευκρινίζεται λοιπόν το εξής:

Όταν μετράται η **ολική αμμωνία** μετράται η συγκέντρωσή της στο νερό ως μάζα-βάρος σε mg/L που αντιπροσωπεύει το βάρος του μορίου της αμμωνίας, δηλαδή του ατόμου του αζώτου και των τριών ατόμων του υδρογόνου που συμμετέχουν στην ένωση (NH_3) ή των τεσσάρων ατόμων υδρογόνου στο αμμώνιο (NH_4^+).

Όταν μετράται η ολική αμμωνία ως **ολική αμμωνία – άζωτο** τότε είναι που ο συμβολισμός **TAN** αντιπροσωπεύει στην κυριολεξία αυτό που εννοεί ο κατασκευαστής του δεδομένου κιτ εξέτασης. Σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα της εξέτασης του δείγματος σε mg/L αντιπροσωπεύει το βάρος μόνο του **ατόμου του αζώτου**.

Δηλαδή μετρώντας το ίδιο δείγμα νερού με δύο διαφορετικά κιτ, ένα που αναγράφεται ως «ολική αμμωνία» και ένα που αναγράφεται ως «ολική αμμωνία-άζωτο» εξάγονται διαφορετικά αποτελέσματα ενώ μετράται το ίδιο πράγμα. Δεν πρόκειται περί λάθους αλλά περί διαφορετικής παρουσίας της αλήθειας. Το μοριακό βάρος του μορίου της NH_3 είναι $14+3(1) = 17$, του NH_4 , $14 + 4(1) = 18$ και του ατόμου του αζώτου, $\text{N} = 14$. Για να μετατραπεί λοιπόν τυχόν μέτρηση που εξήχθη από τεστ που αναγράφεται «ολική αμμωνία-άζωτο» (TAN) σε ολική αμμωνία που είναι το ζητούμενο, θα πολλαπλασιαστεί το αποτέλεσμα με 1,29. Ο συντελεστής 1,29 εξάγεται από τη διαίρεση του μοριακού βάρους του αμμωνίου (18) με το ατομικό βάρος του αζώτου (14), $18/14 = 1,29$. Χρησιμοποιούμε το μοριακό βάρος του αμμωνίου (18) και όχι της αμμωνίας (17) επιτρέποντας στον εαυτό μας μια ασφαλή γενίκευση-συγκερασμό καθώς, αφενός δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά και αφετέρου στις φυσιολογικές τιμές pH των υδατοκαλλιεργειών το μεγαλύτερο ποσό της αμμωνίας βρίσκεται ως αμμώνιο.

Αναλόγως αν θέλουμε να μετατρέψουμε τη συγκέντρωση που βρήκαμε με ένα κιτ που αναγράφεται «ολική αμμωνία» σε «ολική αμμωνία-άζωτο» πολλαπλασιάζουμε με 0,777 ($14/18$). Στο παρόν θα

χρησιμοποιούνται μετρήσεις-τιμές που αφορούν πραγματικά μόνο την ολική αμμωνία.

Όπως προαναφέρθηκε, η επίδραση του pH στην τοξικότητα της αμμωνίας είναι «επιβλητική». Για παράδειγμα (Πίνακας 1), σε ένα νερό θερμοκρασίας 20 °C με μετρημένη ολική αμμωνία 5 mg/L και με pH 7,0, η μη ιονισμένη αμμωνία (NH₃) είναι 0,0195 mg/L, τιμή ασφαλής, κάτω από το όριο των 0,02 mg/L. Όμως αν το pH αλλάξει σε 8,0, τότε η μη ιονισμένη αμμωνία θα γίνει 0,19 mg/L, τιμή τοξική, πολύ πάνω από το όριο. Μία μόνο ακέραια μονάδα αύξησης του pH, επέφερε 10πλάσια!! αύξηση στην τοξική αμμωνία για το ίδιο ποσό ολικής αμμωνίας.

pH	Θερμοκρασία °C 								
	16	18	20	22	24	26	28	30	32
7.0	0.29	0.34	0.39	0.46	0.52	0.60	0.69	0.80	0.91
7.2	0.46	0.54	0.62	0.82	0.83	0.96	1.10	1.26	1.44
7.4	0.73	0.85	0.98	1.14	1.31	1.50	1.73	1.98	2.26
7.6	1.16	1.34	1.55	1.79	2.06	2.36	2.71	3.10	3.53
7.8	1.82	2.11	2.44	2.81	3.22	3.70	4.23	4.82	5.48
8.0	2.86	3.30	3.81	4.38	5.02	5.74	6.54	7.43	8.42
8.2	4.45	5.14	5.90	6.76	7.72	8.80	9.98	11.29	12.72
8.4	6.88	7.90	9.04	10.31	11.71	13.26	14.95	16.78	18.77
8.6	10.48	11.97	13.61	15.41	17.37	19.50	21.78	24.22	26.80
8.8	15.66	17.73	19.98	22.41	25.00	27.74	30.62	33.62	36.72
9.0	22.73	25.46	28.36	31.40	34.56	37.83	41.16	44.53	47.91
9.2	31.80	35.12	38.55	42.04	45.57	49.09	52.58	55.99	59.31
9.4	42.49	46.18	49.85	53.48	57.02	60.45	63.73	66.85	69.79
9.6	53.94	57.62	61.17	64.56	67.77	70.78	73.58	76.17	78.55
9.8	64.99	68.31	71.40	74.28	76.92	79.33	81.53	83.51	85.30
10.0	74.63	77.35	79.83	82.07	84.08	85.88	87.49	88.92	90.19
10.2	82.34	84.41	86.25	87.88	89.33	90.60	91.73	92.71	93.58

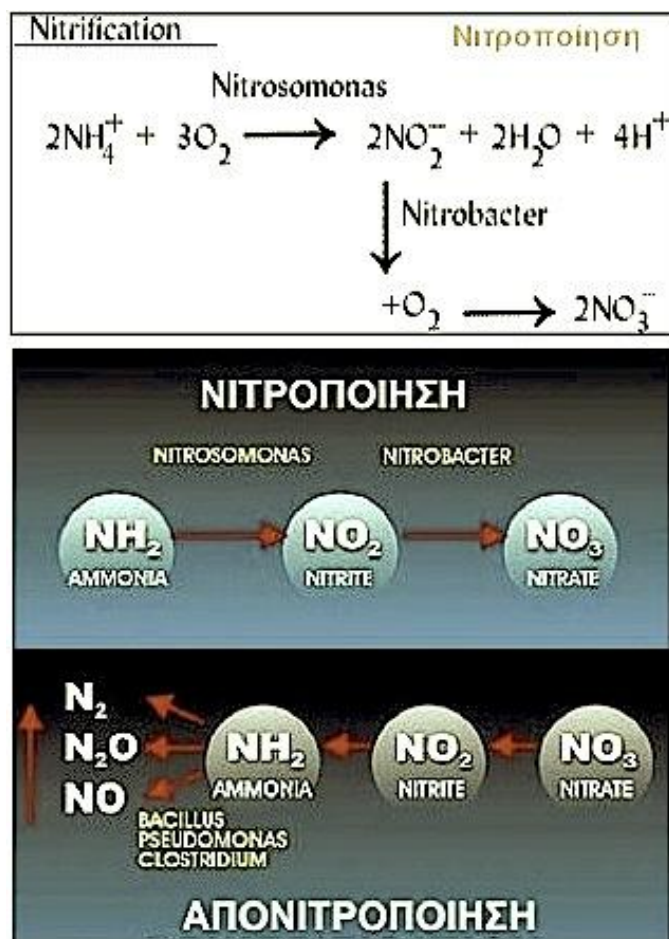
Πίνακας 1. Τιμές της τοξικής μορφής της αμμωνίας (NH₃) ως ποσοστό % επί της μετρηθείσας ολικής αμμωνίας (TAN) για διάφορες τιμές pH και θερμοκρασίας.

Η ιδιότητα του χαμηλού (όξινου) pH να μειώνει την τοξικότητα της αμμωνίας είναι «καλή τύχη» για την ιχθυοκαλλιέργεια κλειστού συστήματος. Κάτι τέτοιο οφείλεται στο CO₂ που συνεχώς παράγουν τα ψάρια και το οποίο όπως προαναφέρθηκε μειώνει το pH. Μειωμένο pH σημαίνει λιγότερη τοξική αμμωνία και μάλιστα κάτι τέτοιο αποκτά ιδιαίτερα μεγάλη σημασία κατά τις περιπτώσεις που για διάφορους χειρισμούς τα ψάρια έστω και για λίγο διάστημα συγκεντρώνονται σε περιορισμένο χώρο.

Η πτώση του pH λόγω αυξημένου CO₂ μπορεί μεν να είναι επωφελής λόγω της μείωσης της τοξικότητας της αμμωνίας, όμως σε νερά με μικρή ικανότητα buffer (έλλειψη επαρκούς HCO₃⁻) η πτώση του pH πολύ χαμηλά (<7) είναι ανεπιθύμητη επειδή βγαίνει έξω από τη ζώνη του ιδανικού pH (7,5 – 8,3) για την αποτελεσματική νιτροποιητική δραστηριότητα των νιτροποιητικών βακτηριδίων του βιολογικού φίλτρου.

5. Νιτροποίηση

Νιτροποίηση (nitrification) καλείται εκείνη η βιολογική διεργασία κατά την οποία ορισμένα είδη **αερόβιων χημειοαυτότροφων** βακτηριδίων χρησιμοποιούν ως θρεπτικό υπόστρωμα ανηγμένες ενώσεις του αζώτου, όπως η αμμωνία, οξειδώνοντάς τες (Σχήμα 22).



Σχήμα 22. Συνοπτική αποτύπωση των δύο «χημικών οδών» που αφορούν την οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά κατά τη νιτροποίηση και κατόπιν την αναγωγή αυτών σε αέριο άζωτο (N_2) κατά την απονιτροποίηση.

Ολες επιτελούνται από βακτηρίδια.

Nitrite = νιτρώδη,

Nitrate = νιτρικά.

Nitrosomonas &

Nitrobacter =

νιτροποιητικά βακτηρίδια.

Η διαδικασία της νιτροποίησης αποτελεί το σπουδαιότερο κομμάτι του **κύκλου του αζώτου** στη βιόσφαιρα. Στον κύκλο του αζώτου η αμμωνία προέρχεται από το άφθονο αέριο άζωτο (N_2) της ατμόσφαιρας, το οποίο μετατρέπουν σε αμμωνία διά της διαδικασίας της **αζωτοδέσμευσης** ορισμένα μόνο είδη βακτηριδίων, τα **αζωτοδεσμευτικά**, επειδή μόνο αυτά έχουν το ένζυμο νιτρογενάση που μετατρέπει το N_2 σε NH_3 . Φυσικά η αμμωνία της νιτροποίησης προέρχεται και από το μεταβολισμό των έμβιων όντων και φυσικά πρόκειται και για τη νιτροποίηση που συμβαίνει στο βιολογικό φίλτρο των κλειστών συστημάτων ιχθυοκαλλιέργειας (αλλά και των βιολογικών καθαρισμών λυμάτων).

Κατά το πρώτο στάδιο της νιτροποίησης, **βακτηρίδια** κυρίως του γένους **Nitrosomonas**, οξειδώνουν την αμμωνία (υπό τη μορφή του αμμωνίου- NH_4^+) σε μερικώς ανηγμένο νιτρώδες ιόν (NO_2^-), το οποίο είναι τοξικό για τα ψάρια αλλά πολύ λιγότερο συγκριτικά με την αμμωνία. Το νιτρώδες με τη δράση βακτηριδίων κυρίως του γένους **Nitrobacter**,

οξειδώνεται περαιτέρω σε νιτρικά ιόντα (NO_3^-) τα οποία δεν είναι τοξικά για τα ψάρια, παρά μόνο σε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις της τάξεως των 100δων mg/L (δεν υπάρχουν οριστικά στάνταρντ).

Τα νιτρικά συσσωρευόμενα στο νερό του κλειστού συστήματος αραιώνονται σε χαμηλά επίπεδα με τις εκάστοτε ανανεώσεις (μικρές ή μεγάλες) του νερού στο συστήματος και διατηρούνται σε ελεγχόμενα επίπεδα. Σε περίπτωση που η ανανέωση του νερού είναι πολύ μικρή ή (και το πιο σωστό) επιδιώκεται ο μηδενισμός της ύπαρξης νιτρικών στο νερό που θα αποχετευθεί από τη μονάδα στη φύση για περιβαλλοντικούς λόγους, (τα νιτρικά είναι παράγοντας ευτροφισμού), τότε ακολουθείται η διαδικασία της **απονιτροποίησης** (και αυτή μέρος του κύκλου του αζώτου). Με την απονιτροποίηση το νερό εισέρχεται σε ειδικό ξεχωριστό θάλαμο όπου επικρατούν αναερόβιες συνθήκες και σε κατάλληλο υπόστρωμα τα αναπτυχθέντα **ετερότροφα** βακτηρίδια μετατρέπουν τα νιτρικά σε αέριο άζωτο (N_2) το οποίο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα.

Η διαδικασία της νιτροποίησης εξελίσσεται σε ένταση ανάλογα με την πληθυσμιακή ανάπτυξη των νιτροποιητικών βακτηρίων στο υπόστρωμα ανάπτυξης των στο βιολογικό φίλτρο. Απαιτείται χρόνος για να πολλαπλασιαστούν και να φθάσουν σε τέτοιο πληθυσμό που θα βρίσκεται σε ισορροπία με την «τροφή» τους που είναι η αμμωνία. Απαξ όμως και φθάσουν στο μέγιστο αριθμό τους τότε η διαδικασία της νιτροποίησης προχωρά απρόσκοπτα. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι μόνο αφού τα νιτροποιητικά βακτηρίδια *Nitrosomonas* που μετατρέπουν την αμμωνία σε νιτρώδη φθάσουν σε ικανοποιητικό αριθμό και μεταβολισμό, θα αρχίσει να αναπτύσσεται και ο αριθμός των βακτηριδίων *Nitrobacter* που μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά. Αυτό οφείλεται στο ότι η παρουσία της αμμωνίας κατά τα πρώτα στάδια λειτουργίας του φίλτρου, δρα ανασταλτικά στην ανάπτυξη των *Nitrobacter*. Μόνο αφού η αμμωνία «καταλαγιάσει» θα μπορέσουν να αυξηθούν τα *Nitrobacter*.

Ενας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τα μέγιστα τη νιτροποίηση είναι το pH. Τα νιτροποιητικά βακτηρίδια δεν αναπτύσσονται καλά σε pH κάτω του 7 και θα πάψουν να νιτροποιούν αν το νερό γίνει όξινο. Εδώ πραγματικά ο ιχθυολόγος πρέπει να «συμβιβάσει τα ασυμβίβαστα». Εάν το pH ανέβει στο 8 ή παραπάνω, τότε ακόμα και μικρά ποσά αμμωνίας που δεν έχουν ακόμα μεταβολιστεί από τα βακτηρίδια θα γίνουν τοξικά για τα ψάρια. Αν το pH πέσει κάτω από 7 τότε η υπάρχουσα αμμωνία μπορεί μεν να μη βρίσκεται στην τοξική της μορφή όμως τα νιτροποιητικά βακτηρίδια θα πάψουν να λειτουργούν, θα συσσωρεύεται συνεχώς αμμωνία (η οποία δεν θα μετατρέπεται πλέον σε νιτρώδη) και η ολική αμμωνία (TAN) θα φθάσει σε τέτοια υψηλά επίπεδα, που ακόμα και σε pH χαμηλά και ασφαλή (ως προς την αμμωνία) θα περιέχει σωρευτικώς υψηλά επίπεδα τοξικής μη ιονισμένης αμμωνίας (NH_3).

Όπως εξηγήθηκε στα προηγούμενα, η διατήρηση επαρκούς ποσότητας buffer στο νερό υπό μορφή όξινων ανθρακικών (HCO_3^-), θα κάνει εύκολα το pH να διατηρείται στην ιδανική περιοχή 7-8 (χρυσός συμβιβασμός για χαμηλή τοξικότητα αμμωνίας και επαρκή ένταση νιτροποίησης).

5.1. Νιτρώδη (NO_2^-)

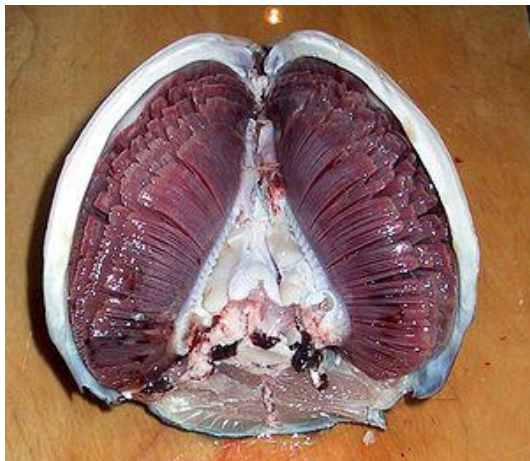
Τα νιτρώδη ιόντα, το πρώτο προϊόν μετατροπής της αμμωνίας στο πρώτο μέρος της διαδικασίας της νιτροποίησης είναι **τοξικά** (και αυτά όπως η αμμωνία) για τα ψάρια. Η τοξικότητά τους όμως, ποικίλλει ακόμα και για μια δεδομένη συγκέντρωσή τους από νερό σε νερό, ανάλογα με την αλατότητά του (προσοχή **αλατότητα** όχι σκληρότητα ή αλκαλικότητα). Ανάλογα με το πόσα ιόντα χλωρίου (Cl^-) υπάρχουν στο νερό, προερχόμενα από διάλυση άλατος (NaCl), η τοξικότητα των νιτρωδών μειώνεται ανάλογα. Δηλαδή:

Πολλά χλωρίοντα = μείωση της τοξικότητας των νιτρωδών.

Σε απόλυτα γλυκό νερό τα νιτρώδη γίνονται τοξικά σε συγκεντρώσεις ήδη από 0,5 mg/L. Αυτό το νούμερο αφορά τα πιο ευαίσθητα είδη ψαριών όπως οι πέστροφες και οι σολομοί, με τα πιο ανθεκτικά είδη όπως η τιλápια ή ο κυπρίνος, να ανέχονται πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Η συγκέντρωση των νιτρωδών στο νερό μετράται με ειδικά κιτ χρωματρομετρικής ανάλυσης και πρέπει πάντοτε να συνοδεύουν την εκάστοτε ανάλυση για την αμμωνία και τα νιτρικά.

Η τοξικότητα των νιτρωδών έγκειται στο εξής: Όταν υπάρχουν σημαντικές ποσότητες νιτρωδών ιόντων στο νερό της εκτροφής, τα ψάρια αναπτύσσουν την ασθένεια του αίματος την ονομαζόμενη **μεθαιμογλοβιναιμία** (methemoglobinemia). Η αιτία βρίσκεται στο ότι τα νιτρώδη ερχόμενα σε επαφή με την αιμογλοβίνη του αίματος, οξειδώνουν το άτομο σιδήρου στο μόριο της αιμογλοβίνης και ο σίδηρος (το σημείο δέσμευσης του οξυγόνου) μεταπίπτει από δισθενή (Fe^{++}) σε τρισθενή (Fe^{+++}) μη έχοντας πλέον ικανότητα δέσμευσης οξυγόνου. Τα «δηλητηριασμένα» με αυτό τον τρόπο μόρια της αιμογλοβίνης (με παρόμοιο τρόπο δηλητηριάζει και το μονοξείδιο του άνθρακα), δεν μπορούν πλέον να μεταφέρουν αρκετό οξυγόνο στους ιστούς οι οποίοι ασφυκτιούν και τα ψάρια πεθαίνουν.

Η μεθαιμογλοβιναιμία ονομάζεται και ασθένεια του «**καφέ αίματος**» επειδή η οξειδωμένη αιμογλοβίνη αντί για κόκκινη που είναι το φυσιολογικό της χρώμα, γίνεται καφετί-μπλε με αποτέλεσμα το αίμα γενικώς να αποκτά ένα χρώμα σαν «σκουριά» (Σχήμα 23). Συμβαίνει μερικές φορές σε συστήματα εκτροφής στα οποία υπάρχει επάρκεια διαλυμένου οξυγόνου τα ψάρια να παρουσιάζουν εικόνα «λαχανιάσματος» προσπαθώντας να αναπνεύσουν στη επιφάνεια.



Σχήμα 23. Εικόνα βραγχίων ψαριών σε νερό με μεγάλη συγκέντρωση νιτρώδων ιόντων (NO_2^-), η οποία προκάλεσε μεθαιμογλοβιναιμία με αποτέλεσμα το χρώμα της αιμοσφαιρίνης του αίματος από έντονο κόκκινο να γίνει σκούρο καφετι-μπλε.

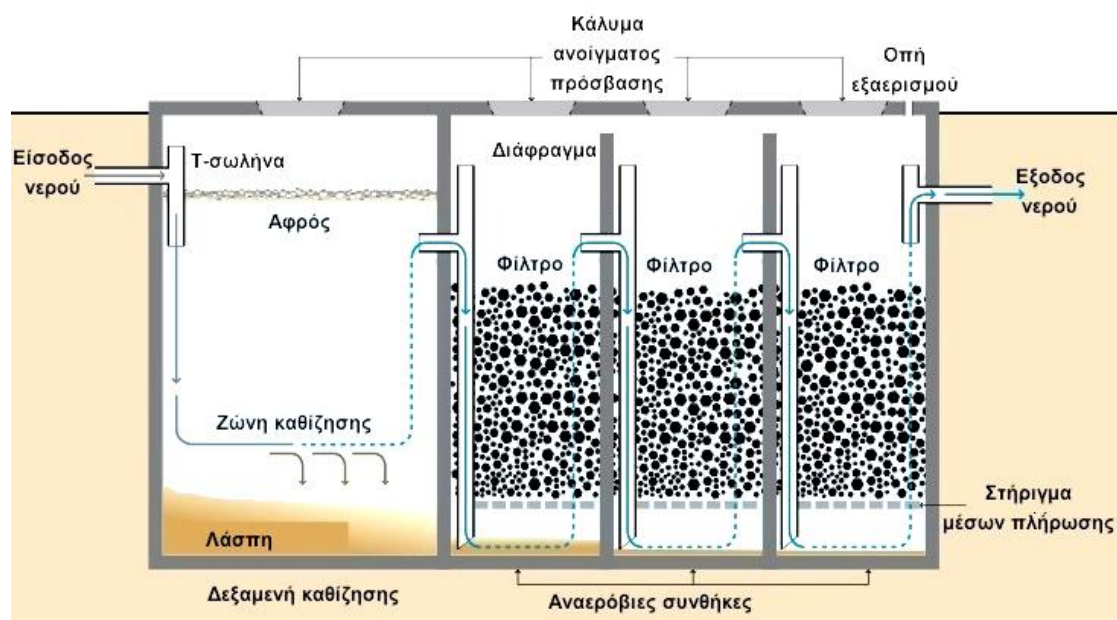
Η εξήγηση βρίσκεται στο ότι υπάρχουν νιτρώδη στο νερό που προκαλεί ανικανότητα της αιμογλοβίνης να δεσμεύσει οξυγόνο. Η «ειρωνική» παραδοξότητα του φαινομένου αυτού, βρίσκεται στον ίδιο τον φυσιολογικό μηχανισμό της ωσμωρύθμισης των ψαριών του γλυκού νερού, καθώς η ίδια η ωσμωρύθμιση προκαλεί αυτοδηλητηρίαση όταν υπάρχουν νιτρώδη. Χωρίς να επεκταθούμε στο μηχανισμό της ωσμωρύθμισης, θα αναφέρουμε ότι τα ψάρια του γλυκού νερού επειδή χάνουν ιόντα προς το νερό, έχουν αναπτύξει μηχανισμούς επαναπρόσληψης ιόντων με κύριο το ιόν χλωρίου (Cl^-).

Η μεταφορά του ιόντος χλωρίου από το νερό στο ψάρι γίνεται στα **κύτταρα χλωρίου** του επιθηλίου των βραγχίων, όπου με **ιοντοανταλλαγή** εξέρχεται ένα ιόν όξινου ανθρακικού (HCO_3^-), από την περίσσεια αυτών που διαθέτει το κύτταρο, για να εισέλθει στη θέση του ένα ιόν χλωρίου (Cl^-). Μονοσθενές αρνητικό εξέρχεται, μονοσθενές αρνητικό εισέρχεται, δηλαδή ισορροπία ιόντων. Ομως όταν υπάρχουν πολλά ιόντα νιτρώδων, μονοσθενή αρνητικά και αυτά όπως του χλωρίου, η αντλία [$\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$] αντιμετωπίζοντας με τον ίδιο τρόπο τα νιτρώδη και τα χλωριόντα, θα ανταλλάξει HCO_3^- για NO_2^- αντί για Cl^- , αντλώντας έτσι μέσα στο κύτταρο το τοξικό NO_2^- .

Η θεραπεία είναι απλή. Απλώς αυξάνεται η συγκέντρωση των χλωριόντων προσθέτοντας αλάτι στο νερό. Κάτι τέτοιο θα αυξήσει τόσο πολύ τη συγκέντρωση των χλωριόντων Cl^- συγκριτικά με την των νιτρώδων NO_2^- , που η αντλία ιοντοανταλλαγής θα προσλαμβάνει κατά συντριπτική πλειονότητα χλωριόντα. Στα αλμυρά νερά δεν υπάρχει πρόβλημα με τα νιτρώδη επειδή η παρουσία των χλωριόντων είναι «κατακλυσμιαία». Στα γλυκά νερά η συχνή πρόσθεση μικρής ποσότητας αλατος ώστε να αυξηθεί η συγκέντρωση των χλωριόντων σε 40 mg/L, θα μειώσει (βάσει της παραπάνω εξήγησης) την τοξικότητα των νιτρώδων κατά 30 περίπου φορές.

5.2. Νιτρικά (NO_3^-)

Τα νιτρικά ιόντα όπως προαναφέρθηκε πρακτικώς δεν παρουσιάζουν τοξικότητα για τα ψάρια στις συνήθεις συγκεντρώσεις τους σε ένα καλά λειτουργούν κλειστό σύστημα. Πάντως η διασφάλιση της συγκέντρωσής τους σε τιμές γύρω στα 50 mg/L είναι και ασφαλείς και εύκολο να επιτευχθούν. Η μέτρησή τους γίνεται και σε αυτά με κιτ χρωματομετρικής ανάλυσης τα οποία όμως λειτουργούν διά της αναγωγής πρώτα των νιτρικών σε νιτρώδη και κατόπιν προσδιορισμού των νιτρωδών. Για το λόγο αυτό, εάν προηγουμένως της ανάλυσης για νιτρικά έχει προηγηθεί ανάλυση για νιτρώδη η οποία έδωσε μετρήσιμη συγκέντρωση νιτρωδών, η τιμή αυτή θα πρέπει να αφαιρείται από αυτή των νιτρικών για να επιτευχθεί ακρίβεια στη μέτρηση. Βέβαια αν μετρηθεί υψηλή συγκέντρωση νιτρωδών, τότε αυτό είναι το κυρίαρχο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί, με τα νιτρικά να περνούν σε δεύτερη «μοίρα».



Σχήμα 24. Διαγραμματική απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος απονιτροποίησης. Δεν υπάρχει πουθενά πρόσθεση οξυγόνου, δημιουργείται θάλαμος κλειστός με μόνο μια μικρή οπή για εκτόνωση των παραγομένων αερίων (κυρίως αέριο άζωτο N_2). Τα απονιτροποιητικά βακτηρίδια έχουν αποικίσει τους κόκκους του μέσου πλήρωσης του φίλτρου. Από: Tilley et al-2014. Anaerobic Filter, SSWM-<http://www.sswm.info/content/anaerobic-filter/>, τροποποιημένο από Γ. Χώτος.

Για να κρατούνται τα νιτρικά υπό έλεγχο μέσω των ανανεώσεων μικρών ποσοτήτων νερού με φρέσκο, υπολογίζεται ότι ένα κλειστό σύστημα θα χρειαστεί για όλη την περίοδο εκτροφής και για όλη την ποσότητα τροφής που θα καταναλωθεί, περί τα 30 L φρέσκο νερό /kg τροφής. Αν η

διαθέσιμη ποσότητα φρέσκου νερού δεν μπορεί να καλύψει αυτή την ανανέωση, τότε χρησιμοποιείται σύστημα **απονιτροποίησης**.

Ως απονιτροποίηση καλείται εκείνη η αναερόβια βιολογική διεργασία κατά την οποία βακτηρίδια του γένους *Pseudomonas* ανάγουν τα νιτρικά σε αέριο άζωτο (N_2) το οποίο φυσικά κατόπιν διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Για να συμβεί η απονιτροποίηση απαιτείται μια οργανική πηγή άνθρακα (π.χ. μεθανόλη) η οποία θα προστίθεται στον ειδικό θάλαμο απονιτροποίησης. Πρόκειται για ειδικό χώρο, διακλάδωση του όλου συστήματος, όπου απουσία οξυγόνου το νερό εμπλουτισμένο με μεθανόλη (2,5 kg μεθανόλης για κάθε 1 kg NO_3^- που ανάγεται) προκαλεί την ανάπτυξη σε αδρανή πλαστικά υλικά πληθυσμού των χημειοετερότροφων απονιτροποιητικών βακτηριδίων *Pseudomonas* τα οποία θα χρησιμοποιήσουν τα νιτρικά για να παράγουν την ενέργειά τους. Για να είναι αποτελεσματικό το νιτροποιητικό φίλτρο το νερό πρέπει να έχει μακρό χρόνο παραμονής σε αυτό (μικρή ροή) της τάξεως των 2-4 ωρών. Επίσης έστω αν και η διαδικασία είναι αναερόβια, θα πρέπει η ροή του νερού να ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει κατά την έξοδο από το φίλτρο μια ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου περί το 1 mg/L. Εάν το οξυγόνο απουσιάσει ολοκληρωτικά θα δημιουργηθεί **υδρόθειο** (H_2S) το οποίο είναι τοξικότατο για τα ψάρια και χαρακτηρίζεται από μυρωδιά «σάπιου αυγού». Στον θάλαμο απονιτροποίησης (Σχήμα 24) παράγεται πολλή οργανική λάσπη και όλο το φίλτρο πρέπει να καθαρίζεται μία φορά την εβδομάδα με **αντιστροφή της ροής (backwashing)**.

6. Το νερό της εκτροφής

Η επαρκής παροχή του απαραίτητου νερού είναι προϋπόθεση για τη λειτουργία των κλειστών συστημάτων έστω και αν το ίδιο νερό κατά το μεγαλύτερο μέρος του συνεχώς ανακυκλώνεται.



Σχήμα 25. Χαρακτηριστική εικόνα από μεγάλες υπαίθριες δεξαμενές ιχθυοκαλλιέργειας ανοικτού τύπου. Προφανείς οι μεγάλες ανάγκες της μονάδας αυτής σε φρέσκο νερό (φυσικά μη ανακυκλούμενο).

Στα κλειστά συστήματα, πρακτικώς απελευθερωμένοι από την υποχρέωση της εύρεσης κατάλληλης συνεχούς παροχής νερού όπως στις εντατικές ιχθυοκαλλιέργειες ανοικτού τύπου (Σχήμα 25), μπορούμε αφού εξασφαλίσουμε την πολύ λιγότερη ποσότητα που απαιτείται να εστιάσουμε στη βελτιστοποίηση των άλλων φυσικοχημικών παραμέτρων. Στα κλειστά συστήματα υπάρχει προτίμηση για κάποιο τύπο νερού και αυτός αναμφισβήτητα είναι τα υπόγεια νερά επειδή συνήθως είναι απαλλαγμένα από παθογόνα και έχουν σταθερή θερμοκρασία. Από τα υπόγεια, τα νερά των πηγών ή τα αρτεσιανά είναι οι ιδανικές περιπτώσεις επειδή με αυτά εξοικονομούνται τα έξοδα λειτουργίας της αντλίας που θα υπήρχαν στην περίπτωση άντλησης από πηγάδι. Τα επιφανειακά νερά από ποτάμια ή λίμνες δεν είναι ιδανική περίπτωση καθώς αφενός μπορεί να μεταφέρουν ακόμα και ψάρια με παθογόνα στη μονάδα και αφετέρου μπορεί να είναι ρυπασμένα και η θερμοκρασία τους ποικίλλει με τις εποχές.

Μια τρίτη επιλογή, όχι ιδανική και αυτή, είναι το νερό του δικτύου ύδρευσης το οποίο έχει μεν ορισμένα θετικά όπως απουσία μικροβίων ή ρύπανσης και κατά κάποιο τρόπο σταθερή θερμοκρασία, αλλά δυστυχώς περιέχει **χλώριο**. Η τυπική του συγκέντρωση σε χλώριο της τάξεως του 1 mg/L είναι θανατηφόρα για τα ψάρια. Το χλώριο μπορεί να αφαιρεθεί από το νερό γρήγορα και με σχετικά χαμηλό κόστος, με φίλτρα που περιέχουν **ενεργό άνθρακα** και κατόπιν είναι απόλυτα κατάλληλο για υδατοκαλλιέργειες. Το μεγάλο πλεονέκτημα των κλειστών συστημάτων συγκριτικά με τα ανοικτά είναι η οικονομία νερού που επιτυγχάνουν (δεν υπάρχει απόλυτα κλειστό σύστημα, κάποια ποσότητα πάντα θα

ανανεώνεται). Για παράδειγμα, αν ένα κλειστό σύστημα μιας μεγάλης μονάδας 500 τόνων πέστροφας/έτος, χρειάζεται 400 m³/d (ημέρα) φρέσκο νερό για να καλύψει όλες τις ανάγκες του, μια ανάλογης δυναμικότητας μονάδα ανοικτού τύπου με καναλόμορφες δεξαμενές (raceways) θα χρειαζόνταν 41.080 m³/d (Σχήμα 26).

Ο βαθμός (ένταση) της ανακύκλωσης του νερού σε ένα κλειστό σύστημα δίδεται από τη σχέση:

(ανακυκλούμενος όγκος) x 100 / (ανακυκλ. όγκος + όγκος φρέσκου νερού)				
Τύπος εκτροφής	Κατανάλωση φρέσκου νερού/kg παραγόμενου ψαριού /έτος	Κατανάλωση φρέσκου νερού σε: m ³ /h (ώρα)	Κατανάλωση φρέσκου νερού/ημέρα (ως % του όλου όγκου νερού)	Βαθμός ανακύκλωσης όλου του νερού του συστήματος /h
Ανοικτό	30 m ³	1712 m ³ /h	1028 %	0 %
Κλειστό υβριδικό	3 m ³	171 m ³ /h	103 %	95,9 %
Κλειστό εντατικό	1 m ³	57 m ³ /h	34 %	98,6 %
Κλειστό υπερεντατικό	0,3 m ³	17 m ³ /h	6 %	99,6 %

Σχήμα 26. Η κατανάλωση νερού σε διάφορους τύπους ιχθυοκαλλιέργειας.

Η υδατοκαλλιέργεια με ανακυκλούμενο νερό (κλειστό σύστημα /κύκλωμα) είναι μια τεχνολογία για εκτροφή ψαριών ή άλλων υδρόβιων οργανισμών με επαναχρησιμοποίηση του νερού αφού αυτό καθαριστεί διερχόμενο από μηχανικά και βιολογικά φίλτρα.

Γνωστό πλέον στη διεθνή βιβλιογραφία ως RAS (Recirculation Aquaculture System), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για γαρίδες, όστρακα κ.ά. αλλά κυρίως εφαρμόζεται για ψάρια. Ψάρια των γλυκών και των αλμυρών νερών, των θερμών και των ψυχρών νερών.

Τα κλειστά συστήματα αναπτύσσονται τάχιστα σε πολλές περιοχές του πλανήτη μας και ποικίλουν από μεγάλες μονάδες παραγωγής εκατοντάδων και χιλιάδων τόνων ψαριών ανά έτος (Σχήμα 27), έως μικρά εξεζητημένα κλειστά συστήματα με σκοπό την παραγωγή ψαριών για φυσικούς εμπλουτισμούς ή για ενίσχυση απειλούμενων ειδών.



Σχήμα 27. Μεγάλη μονάδα κλειστού συστήματος εκτροφής.

Από οικολογικής απόψεως η **οικονομία νερού** που επιτυγχάνει η ανακύκλωση είναι ευεργετική επειδή το νερό αποτελεί περιορισμένο πόρο σε πολλές περιοχές. Επιπροσθέτως, ο μικρός όγκος νερού που χρησιμοποιείται κάνει πιο εύκολη και οικονομική την επιχείρηση της αφαίρεσης των ρυπαντών που δημιουργούν τα ψάρια, καθώς το απορριπτόμενο νερό από μια μονάδα κλειστού κυκλώματος είναι πολύ λιγότερο από το αντίστοιχο ενός ανοικτού.

Αυτές ακριβώς οι ιδιότητες είναι που κάνουν την ανακύκλωση την πλέον **περιβαλλοντικώς φιλική** μέθοδο για παραγωγή ψαριών σε εμπορικώς βιώσιμο επίπεδο. Τα «**θρεπτικά απόβλητα**» από μια τέτοια μονάδα ιχθυοκαλλιέργειας μπορούν να γίνουν **λίπασμα** σε αγροκαλλιέργειες, να στηρίξουν **υδροπονικά συστήματα** ή να μετατραπούν σε **βιοαέριο**.

6.1. Χλώριο και χλωραμίνες

Οι συγκέντρωση των ανθρώπων στις πόλεις και οι πρόοδοι της τεχνολογίας επιτρέπουν τη λειτουργία κλειστών συστημάτων ιχθυοκαλλιέργειας και μέσα ακόμα στον αστικό ιστό. Σε μια τέτοια περίπτωση (στο μέλλον μπορεί να το συνηθίσουμε) η χρησιμοποίηση νερού ύδρευσης θα γίνει συνήθης πρακτική. Το χλώριο είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα που πρέπει να ξεπεραστεί.

Με τη χλωρίωση σκοτώνονται τόσο τα παθογόνα βακτηρίδια όσο και τα άλλα που μπορούν να βρωμίσουν το νερό. Η παραδοσιακή πρακτική χρησιμοποιεί **ελεύθερο χλώριο** ή κατ' άλλη ονομασία **υποχλωρίτη** - (OCl^-). Η διαδικασία συνίσταται στην έκθεση του υπό κατεργασία νερού σε αέριο χλώριο (Cl_2) το οποίο δεν πρέπει να συγχέεται με το αβλαβές ιόν χλωρίου (Cl^-). Το αέριο χλώριο αντιδρώντας με το νερό θα δώσει ελεύθερο χλώριο (υποχλωρίτη) το οποίο ασκεί τη βακτηριοκτόνο δράση.

Ομως μετά την κατεργασία το **υπολειμματικό χλώριο** (περί το 1 mg/L) είναι τοξικό για τα ψάρια.

Μια άλλη μοντέρνα μέθοδος, που σκοπό έχει να εξαλείψει τη δημιουργία τριαλομεθανίων τα οποία είναι επιβλαβή για τον άνθρωπο και τα οποία δημιουργούνται σε ορισμένους τύπους νερών μετά από την κατεργασία με ελεύθερο χλώριο, χρησιμοποιεί για απολύμανση χλωραμίνες (NH_2Cl). Οι χλωραμίνες δημιουργούνται προσθέτοντας αμμωνία στο νερό το οποίο περιέχει ήδη ελεύθερο χλώριο. Οι χλωραμίνες όμως είναι λιγότερο βακτηριοκτόνες από το ελεύθερο χλώριο και γι' αυτό χρησιμοποιείται περισσότερο χλώριο έτσι που να δίνει υπολειμματική συγκέντρωση περί τα 3 mg/L. Με τις χλωραμίνες η κατάσταση γίνεται χειρότερη για τα ψάρια επειδή εκτός του ότι οι χλωραμίνες είναι τοξικές, υπάρχει και η αμμωνία που επαυξάνει την τοξικότητα.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, το νερό του δικτύου πριν χρησιμοποιηθεί για ιχθυοκαλλιέργεια πρέπει να απαλλαγεί από το ελεύθερο χλώριο. Η χρησιμοποίηση φίλτρων με **ενεργό άνθρακα** (activated carbon) είναι η λύση και μάλιστα διπλά επωφελής, διότι το νερό διερχόμενο μέσα από το πορώδες στρώμα του άνθρακα, απαλλάσσεται όχι μόνο από το χλώριο αλλά και από άλλα διαλυμένα χημικά. Προσοχή χρειάζεται μόνο στην παροχή του νερού μέσα από το φίλτρο του ενεργού άνθρακα καθώς για να δράσει αποτελεσματικά, η ροή δεν πρέπει να ξεπεράσει κάποια όρια (τα δίδει ο κατασκευαστής).

Για μικρούς όγκους νερού η αποχλωρίωση μπορεί να γίνει και με χημικό τρόπο με ειδικά χημικά του εμπορίου με βάση το φθινό θειοθειικό νάτριο ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). Το θειοθειικό νάτριο δεν είναι τοξικό και μάλιστα μπορεί να χρησιμοποιείται και με χονδροειδή τρόπο καθώς μόλις μια “μυτιά” του κουταλιού μπορεί να αποχλωρίώσει περί τα 20 L νερού.

Παρόλα τα παραπάνω, αν το νερό έχει επεξεργαστεί με χλωραμίνες, είναι πιο δύσκολο να απαλλαγεί από αυτές συγκριτικά με το ελεύθερο χλώριο, ακόμα και με τη χρήση φίλτρων ενεργού άνθρακα. Υπάρχουν λύσεις αλλά απαιτούν πιο πολύπλοκα συστήματα όπως χρήση καταλυτικού ενεργού άνθρακα σε συνδυασμό με θειοθειικό νάτριο, και πέρασμα μετά από ζεόλιθο (φυσικός ιοντοανταλλάκτης) για να συγκρατήσει την αμμωνία από τις χλωραμίνες. Υπάρχει και η δραστική λύση που ονομάζεται υδροξυμεθανοσουλφονικό νάτριο υπό τις εμπορικές ονομασίες «AmQuel» και “ChlorAmX” για να εξαφανίσει τις χλωραμίνες. Η ένωση αυτή αντιδρά με το ελεύθερο χλώριο και σχηματίζει το αβλαβές χλωροϊόν (Cl^-). Εκτός αυτού δεσμεύει επίσης και την αμμωνία σχηματίζοντας αμινομεθανοσουλφονικό το οποίο δεν είναι τοξικό και είναι βιοδιασπώμενο.

Επισήμανση: Όλα τα παραπάνω αφορούν τα γλυκά νερά. Στο αλμυρό νερό δεν έχουν νόημα διότι δεν γίνεται χλωρίωση.

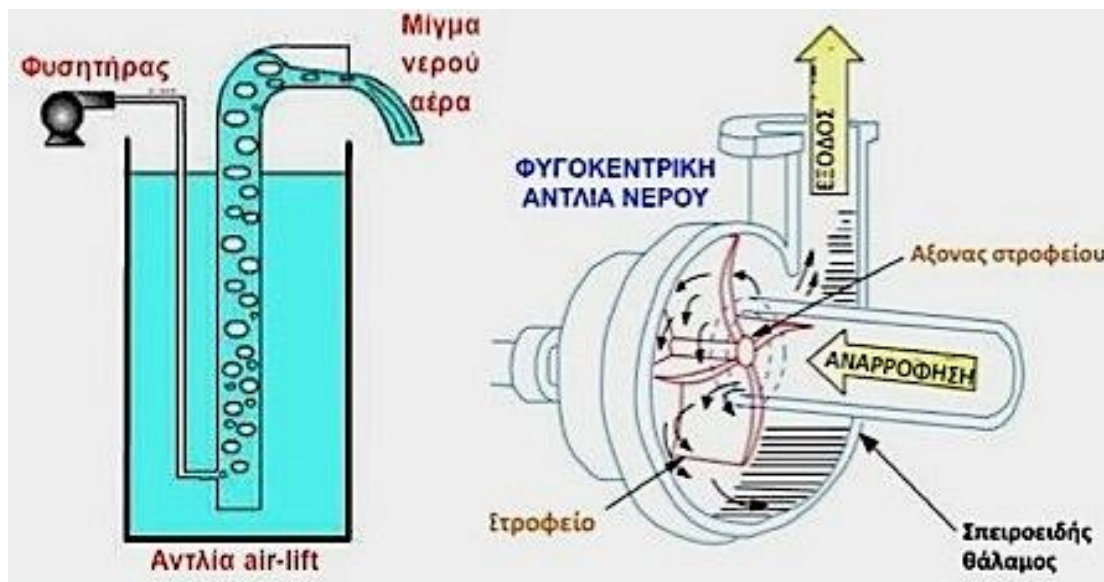
6.2. Αντλίες και μεταφορά του νερού

Σε ένα κλειστό σύστημα ιχθυοκαλλιέργειας το νερό βρίσκεται υπό συνεχή κυκλοφορία-κίνηση. Μπορεί να εισέρχεται και να διαμοιράζεται στις δεξαμενές εκτροφής με τη βαρύτητα, προερχόμενο από κάποιο υπερυψωμένο τεπόζιτο (Σχήμα 4), όμως κατόπιν, η έξοδός του από τις δεξαμενές για να περάσει από συστήματα καθαρισμού και υποχρεωτικά να ανυψωθεί ξανά στο υπερυψωμένο τεπόζιτο, απαιτεί ενεργή μεταφορά. Και η ενεργή μεταφορά χρησιμοποιεί υποχρεωτικώς αντλία. Αυτό είναι το απλοποιημένο σχήμα το οποίο συνήθως απαιτεί και παραπάνω από μία αντλίες.

Τρεις τύποι αντλιών χρησιμοποιούνται στις ιχθυοκαλλιέργειες: α) **φυγοκεντρικές ακτινωτής ροής** (centrifugal radial flow pump), β) **φυγοκεντρικές αξονικής ροής** (centrifugal axial flow pump), γ) **αεροανυψωτικές** (air lift pump).

Από αυτές η φυγοκεντρική αντλία ακτινωτής ροής είναι ο συνηθέστερος και πρακτικότερος τύπος. Χαρακτηρίζονται από ακτινωτή ροή (radial flow) και λειτουργούν (για να το θέσουμε παραστατικά) όπως η αντλία του ψυγείου αυτοκινήτου ή η αεραντλία στο «πιστολάκι» στεγνώματος μαλλιών. Δηλαδή μια περιστρεφόμενη προπέλα εξωθεί το νερό με πίεση έξω από το θάλαμο στέγασης (περιστροφής) (Σχήμα 28). Μια φυγοκεντρική αντλία χωρίζεται σε δύο μέρη – διαμερίσματα. Το θάλαμο με το ηλεκτρικό μοτέρ και το θάλαμο με την προπέλα. Είναι αυτονόητο ότι το μοτέρ θα δίνει την κίνηση στην προπέλα αλλά τα δύο μέρη είναι απομονωμένα επειδή το νερό δεν πρέπει να έλθει σε επαφή με το μοτέρ. Οι μικρότερες φυγοκεντρικές αντλίες έχουν τα δύο διαμερίσματα απολύτως απομονωμένα με την κίνηση να δίδεται από το μοτέρ στην προπέλα με μαγνητική διαδικασία. Οι μεγαλύτερες και οι συνήθειες στην ιχθυοκαλλιέργεια φυγοκεντρικές (όπως και στις πισίνες) έχουν τον άξονα περιστροφής που μεταφέρει την περιστροφική κίνηση από το μοτέρ στην προπέλα διερχόμενο από σφραγισμένο δακτύλιο (με τσιμούχες) που εμποδίζει την διαρροή του νερού στο μοτέρ. Η ισχύς τους κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 5 hp. Μέχρι 1,5 hp τροφοδοτούνται με οικιακό ρεύμα 220 V, οι μεγαλύτερης ισχύος με τριφασικό ρεύμα. Οι φυγοκεντρικές αντλίες ακτινωτής ροής μπορούν να μεταφέρουν νερό σε μεγάλο ύψος «θυσιάζοντας» όμως κάπως τον μεταφερόμενο όγκο.

Οι φυγοκεντρικές αντλίες αξονικής ροής διαθέτουν ένα μακρύ άξονα (σαν και τον άξονα της προπέλας στα πλοία) και συνηθίζονται σε περιπτώσεις που χρειάζεται να κινήσουν μεγάλο όγκο νερού σε μικρό ύψος.



Σχήμα 28. Αεροανυψωτική (air-lift) αντλία (αριστερά) και φυγοκεντρική με στροφείο (έλικας-προπέλα) οδηγούμενο από άξονα (δεξιά). Αριστερό σχήμα από: <http://www.mondomigliore.eu/>, δεξιό από: <http://www.globalspec.com/>, τροποποιημένα από Γ. Χώτο.

Οι αεροανυψωτικές αντλίες (air-lift pumps) (Σχήμα 28) λειτουργούν όπως και οι μικρότερες αντίστοιχες στα ενυδρεία με φίλτρο βυθού, όπου διοχετεύεται αέρας στο κάτω μέρος ενός κάθετου σωλήνα που διατρέχει το ύψος του ενυδρείου λίγο πάνω από τον πυθμένα έως λίγο πάνω από την επιφάνεια. Το μίγμα νερού και αέρα που δημιουργείται ανυψώνεται στο σωλήνα και υπερχειλίζει στο άνω άκρο δημιουργώντας έτσι μια συνεχή μεταφορά νερού από κάτω προς τα επάνω. Έχει το πλεονέκτημα ότι συγχρόνως οξυγονώνει και το νερό, αλλά ενάντια στη λανθασμένως διαδεδομένη αντίληψη ότι δεν ξοδεύει ενέργεια, η αλήθεια είναι ότι η μεγάλη μάζα αέρα παραγόμενη από αεραντλία που απαιτείται για να λειτουργήσει ως αντλία νερού πλέον και όχι απλώς αερισμού, απαιτεί και αυτή ηλεκτρική ενέργεια. Είναι χρήσιμη όταν δεν απαιτείται να κινηθεί μεγάλος όγκος νερού και επίσης όχι σε μεγάλο ύψος.

Οι αντλίες κινούν το νερό ασκώντας πίεση στη μάζα του. Η πίεση του νερού μετριέται σε σχέση με την ατμοσφαιρική και μπορεί να είναι είτε θετική (προώθηση νερού) είτε αρνητική (αναρρόφηση νερού). Η πίεση του νερού μπορεί να εκφραστεί ως kg/cm^2 ή kPa αλλά όταν αναφερόμαστε σε αντλίες αναφερόμαστε με πρακτική ορολογία με τον όρο **μανομετρικό** (head). Το μανομετρικό αντιπροσωπεύει το **ύψος**

(κάθετη απόσταση) που μπορεί να φτάσει το νερό υπό πίεση (που στην συγκεκριμένη περίπτωση τη δημιουργεί η αντλία). Η ροή του νερού και η διάμετρος του σωλήνα επηρεάζουν το μανομετρικό. Για μια δεδομένη ροή μικραίνοντας τη διάμετρο του σωλήνα θα αυξηθεί το μανομετρικό, μεγαλώνοντάς τη θα μειωθεί (σαν το λάστιχο ποτίσματος που όταν το χέρι μας συσφίξει το άκρο του, ο πίδακας θα φτάσει μακρύτερα). Για μια δεδομένη διάμετρο σωλήνα αυξάνοντας τη ροή θα αυξηθεί το μανομετρικό.

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα κατανοητό ότι οι ανάγκες μιας μονάδας εκτροφής σε κίνηση μαζών νερού λαμβάνοντας υπόψιν τα ύψη ανύψωσης, πρέπει να υπολογιστούν σωστά και με περιθώριο ασφαλείας τέτοιο που να επιλεγεί η κατάλληλη αντλία. Οχι οριακής δυναμικότητας αλλά και όχι πολύ περισσότερο ισχυρή απ' ότι απαιτείται, επειδή η υπερβολική ιπποδύναμη όταν δεν χρειάζεται, δημιουργεί σπατάλη κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος. Και είναι ακριβώς το ζήτημα της ενέργειας από τα πιο κρίσιμα για τη βιωσιμότητα μιας μονάδας. Οι αντλίες λειτουργούν επί 24ώρου βάσεως, και αν καταναλώνουν ρεύμα χωρίς να χρησιμοποιούν όλη τη δυναμικότητά τους, πρόκειται περί σπατάλης.

Σε ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα θα χρειαστεί μόνο μία ή το πολύ δύο αντλίες κατάλληλης δυναμικότητας για να κυκλοφορεί όλο το νερό. Το νερό φεύγοντας από τις δεξαμενές μπορεί να φθάσει στο σύστημα καθαρισμού με τη βαρύτητα, να περάσει το μηχανικό φίλτρο ή δυνατόν με τη βαρύτητα και κατόπιν να εισέλθει στο διαμέρισμα της αντλίας η οποία θα το οδηγήσει στο βιολογικό φίλτρο. Κατόπιν ανάλογα με τα υψόμετρα τοποθέτησης των συσκευών, μπορεί να χρειαστεί και μια δεύτερη αντλία για να το οδηγήσει στο υπερυψωμένο τεπόζιτο αποθήκευσης απ' όπου θα ξαναμοιραστεί στις δεξαμενές με τη βαρύτητα.

Προσοχή: Η αντλία πρέπει να τοποθετείται μετά το μηχανικό φίλτρο και όχι πριν από αυτό, επειδή το νερό έρχεται από τις δεξαμενές με συμπαγή σχετικώς στερεά απόβλητα τα οποία δεν πρέπει να διαλυθούν, διότι έτσι δεν θα συγκρατηθούν αποτελεσματικά στη σίτα του μηχανικού φίλτρου.

7. Βασικός σχεδιασμός κλειστού συστήματος, συνθέτοντα μέρη

Ενα κλειστό σύστημα ιχθυοκαλλιέργειας πρέπει να επιτελεί πέντε βασικές λειτουργίες οι οποίες εξυπηρετούν την επιβίωση και την αύξηση των ψαριών.

1. Να έχει περιορισμένα και υπό έλεγχο τα ψάρια σε δεξαμενές.
2. Να κινείται το νερό μέσω αντλίας(ών).
3. Να απομακρύνονται τα στερεά παραπροϊόντα της εκτροφής.
4. Να καθαρίζεται το νερό από την αμμωνία σε νιτροποιητικά φίλτρα.
5. Να προστίθεται οξυγόνο στο νερό και να αφαιρείται το CO₂.

Ολες οι άλλες λειτουργίες που μπορούν να γίνονται (απολύμανση, συλλογή ψαριών, ετοιμασία-παροχή τροφής κ.ά.), αποτελούν δραστηριότητες επαναλαμβανόμενες περιοδικώς μεν, αλλά δεν ανήκουν στον «σκληρό πυρήνα» των αδιαλείπτως λειτουργούντων 24ώρες το 24ωρο.

Κάθε μία από τις παραπάνω 5 λειτουργίες επιτελείται από ξεχωριστή κατασκευή αλλά κάποιες από αυτές (τις κατασκευές) μπορούν να επιτελούν και επικουρική λειτουργία μέρους των υπόλοιπων λειτουργιών. Για παράδειγμα, ένα φίλτρο κατακράτησης των στερεών που λειτουργεί με άμμο, μπορεί να έχει και νιτροποιητική λειτουργία. Επίσης μπορεί κάθε λειτουργία να μην εξυπηρετείται από μία μόνο κατασκευή αλλά να επιτελείται από κατασκευή σύνθετη αποτελούμενη από επιμέρους τμήματα. Για παράδειγμα, στην κατακράτηση των στερεών (μηχανικό φιλτράρισμα), κατά την οποία χρησιμοποιούνται ποικίλες μέθοδοι και συσκευές, μπορεί να υπάρχει κάποιο μηχάνημα για να κατακρατεί τα χονδροειδή και μέσου μεγέθους στερεά και ένας αφροποιητής για να απομακρύνει τα πολύ λεπτά και λιπαρά σωματίδια. Ενα άλλο παράδειγμα αφορά το σύστημα οξυγόνωσης, όπου μπορεί να υπάρχει μια κατασκευή που προσθέτει μόνο καθαρό οξυγόνο στο νερό και μια άλλη που κάνει αερισμό για να αποβάλλει το διοξείδιο του άνθρακα.

Ολα τα παραπάνω συστήματα πρέπει να είναι κατασκευασμένα με αδρανή και μη αντιδρώντα με το νερό υλικά. Ειδικά οι σωληνώσεις, δεν πρέπει να είναι γαλβανισμένες ή χάλκινες, επειδή σε συνθήκες μικρής σκληρότητας του νερού και χαμηλού pH, ο ψευδάργυρος ή ο χαλκός μπορεί να συσσωρεύονται στο νερό και να γίνουν τοξικοί για τα ψάρια. Οι σωλήνες από **PVC** ή άλλο αδρανές πλαστικό είναι η καλύτερη λύση καθώς συνδυάζουν ανθεκτικότητα, ευκαμπτότητα και είναι αδρανείς. Κάθε εξάρτημα προσαρτημένο σε αυτούς (βάνες, διακλαδωτές κ.λπ.) πρέπει και αυτό να είναι πλαστικό.

Οι δεξαμενές που αποτελούν την κύρια κατασκευή στο σύστημα μπορούν να είναι κατασκευασμένες από ποικίλα υλικά με πιο κοινά το **πλαστικό** και το **τσιμέντο**. Οι τσιμέντινες δεξαμενές ειδικά, αποτελούν

παραδοσιακώς την συνήθη επιλογή στην δημιουργία ιχθυοκαλλιεργητικών μονάδων ανοικτού τύπου, καθώς στην πλέον δημοφιλή κατασκευή, αυτή των **καναλόμορφων** δεξαμενών τύπου **raceway**, έχουν σχεδόν την αποκλειστικότητα. Στα κλειστά συστήματα όμως όπου δεν υπάρχει συνεχής ανανέωση με φρέσκο νερό, το τσιμέντο (ιδιαίτερα στις φρεσκοκατασκευασμένες δεξαμενές), μπορεί να απελευθερώνει ενώσεις που θα ανυψώσουν το pH του νερού σε πολύ αλκαλικές τιμές. Το μειονέκτημα αυτό εξαφανίζεται με το χρόνο, αλλά κάθε «χρόνος» στα κλειστά συστήματα «μετρά». Η απόλυτη λύση για αυτό το πρόβλημα και επιπροσθέτως πολύ καλή και από άλλες απόψεις, είναι η εσωτερική επίστρωση των τσιμέντινων δεξαμενών (αλλά και δεξαμενών κατασκευασμένων από ξύλο ή μέταλλο) με **εποξική** βαφή. Μπορεί η εποξική κάλυψη να κοστίζει, αλλά δημιουργεί μια λεία, ανθεκτικότερη, αδρανή επιφάνεια η οποία μπορεί να καθαρίζεται πολύ εύκολα και να απολυμαίνεται.

Η επέκταση μιας δεδομένης μονάδας κλειστού συστήματος σε μεγαλύτερη, με σκοπό την αύξηση της παραγωγής είναι ένα υπαρκτό ενδεχόμενο. Αυτό αντιμετωπίζεται είτε κατασκευάζοντας από την αρχή ένα σύστημα με μεγαλύτερα συνθέτοντα μέρη, είτε κατασκευάζοντας πολλαπλές μικρές μονάδες με ανεξάρτητα συνθέτοντα μέρη ή κοινά μερικά εξ' αυτών. Η πρώτη επιλογή της μεγάλης κλίμακας είναι επιλογή που δίδει άνεση στη διαχείριση και φθηνότερη, αναλογικώς με το νερό που θα κυκλοφορεί, αλλά υστερεί στην ευελιξία και τις ευκαιρίες για δοκιμή βελτιώσεων στη διαχείριση. Επιπροσθέτως και πολύ βασικώς, άπαξ και συμβεί κάποιο ατύχημα π.χ. βλάβη αντλιών ή ξέσπασμα ασθένειας, τότε αυτό θα επηρεάσει όλο το ζωϊκό κεφάλαιο με κίνδυνο ολικής απώλειας. Σε ένα πολλαπλό σύστημα ο κίνδυνος ολικής καταστροφής δεν υπάρχει και θα περιοριστεί μόνο σε ένα μέρος. Επίσης σε ένα πολλαπλό σύστημα μπορούν να τοποθετηθούν ανά επιμέρους μονάδα διάφορα είδη ψαριών, ή διάφορα μεγέθη ενός είδους, να συλλέγονται τα ψάρια πιο εύκολα, ή και να γίνει πειραματισμός σε διάφορες πρακτικές π.χ. διαφορετικές τροφές ή δόσεις τροφών με σκοπό τη βελτιστοποίηση της παραγωγής.

Σε ένα λειτουργικό κλειστό σύστημα πρέπει όλα τα συστήματά του να λειτουργούν σωστά. Δεν υπάρχει πλεονάζον σύστημα κατώτερης σημασίας. Το κλειστό σύστημα θα είναι «σφριγηλό» όταν δεν υπάρχει «αδύναμος κρίκος». Και για να είναι αποδοτικός ο σχεδιασμός του, πρέπει να φροντίσει τα συνθέτοντα μέρη του να έχουν περίπου την ίδια δυναμικότητα. Δεν υπάρχει λόγος να κατασκευαστεί π.χ. ένα σύστημα βιολογικού φιλτραρίσματος τόσο μεγάλο που να ξεπερνά τη δυναμικότητα του συστήματος αερισμού-οξυγόνωσης. Το πόσο οξυγόνο μπορεί να δοθεί στο σύστημα είναι ο περιοριστικός παράγοντας στην

προκειμένη περίπτωση και καθορίζει και τα όρια της δυναμικότητας του βιολογικού φίλτρου.

7.1. Υπολογισμός της δυναμικότητας

Πρέπει εξ' αρχής να ξεκαθαριστεί το γεγονός ότι ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός κλειστού συστήματος, με το πλήθος των μηχανημάτων που πρέπει να αποδίδουν σωστά, είναι μια υπόθεση πρωτίστως μηχανική. Από έρευνες στη μηχανική προήλθαν άλλωστε όλα τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται στα κλειστά συστήματα. Ο ιχθυολόγος μπορεί να γνωρίζει τις απαιτήσεις των ψαριών για να εκτραφούν υγιώς, όμως τις απαιτήσεις του θα τις μεταμορφώσει σε μηχανήματα εξυπηρέτησης ο μηχανικός.

Για το σχεδιασμό ενός κλειστού συστήματος ακολουθείται μια μηχανική διαδικασία, της οποίας τα στοιχεία των εμπλεκόμενων παραμέτρων τα παρέχει ο ιχθυολόγος. Η διαδικασία ονομάζεται «**ισορροπία της μάζας**» (mass balance) και καταλήγει στον υπολογισμό της δυναμικότητας που πρέπει να έχει το κάθε συνθετικό μέρος του κλειστού συστήματος, βασισμένη στο προβλεπόμενο φορτίο και στις γνωστές σχέσεις μεταξύ των βιολογικών παραμέτρων.

Η σειρά των επαγωγικών υπολογισμών ξεκινά με τον καθορισμό της επιθυμητής ποσότητας ψαριών που θα παραχθούν. Κατόπιν υπολογίζεται το πόση τροφή θα καταναλώνεται καθημερινώς και το πως θα κλιμακώνεται αυτή στη διάρκεια εκτροφής. Στη συνέχεια υπολογίζεται το πόσο οξυγόνο θα καταναλώσει αυτή η μεταβολιζόμενη τροφή. Παράλληλα υπολογίζεται το πόση αμμωνία θα παράγεται. Αυτό θα καθορίσει και το πόσο μεγάλα θα είναι τα βιολογικά φίλτρα.

Με βάση τα παραπάνω (και άλλα παρόμοια) καθορίζεται κατόπιν ο τύπος και η ισχύς των μηχανημάτων που θα χρησιμοποιηθούν (αντλίες, οξυγονωτήρες κ.ά.) δεδομένου ότι σήμερα υπάρχει πλήθος μοντέλων για κάθε ανάγκη, με τις αποδόσεις τους γνωστές.

Πάντως, σχετικά με τα βιολογικά στοιχεία όπως η κατανάλωση οξυγόνου από διάφορα είδη ψαριών, σε διάφορες συνθήκες κ.λπ., δεν είναι όλα απόλυτα γνωστά και συνεχώς προστίθενται ερευνητικά ευρήματα. Ως εξ 'αυτού χαράσσονται βέβαια κάποιες σταθερές γραμμές υπολογισμών, όμως χρειάζεται και συνεχής συσσώρευση πείρας και πρωτοβουλίες για αλλαγές και προσαρμογές στο σύστημα, από έναν ιχθυολόγο που δεν τα γνωρίζει όλα από την αρχή αλλά είναι σε επιφυλακή για να βελτιώνει καταστάσεις.



Σχήμα 29. Τύπος και βάθος δεξαμενών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκτρεφόμενου είδους ψαριού. Α & Β πελαγικά ψάρια καταλαμβάνουν τη στήλη του νερού. Γ & Δ ρηχές δεξαμενές με βενθικά ψάρια που καταλαμβάνουν μόνο την επιφάνεια του βυθού

7.2. Δεξαμενές εκτροφής

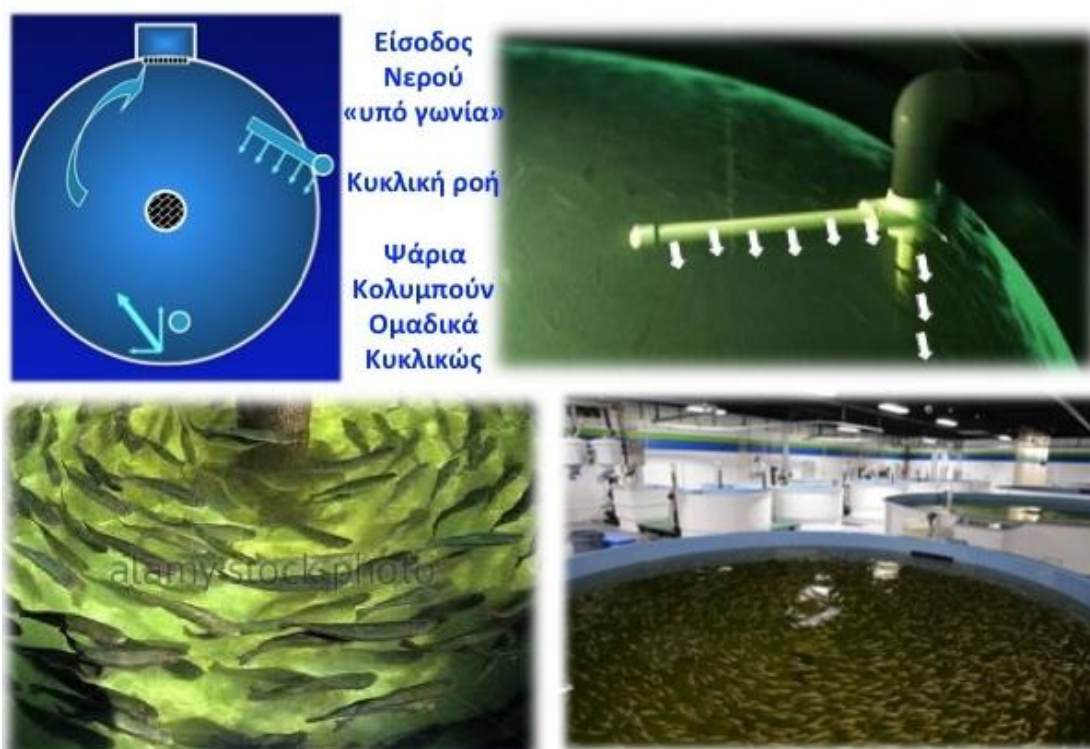
Το περιβάλλον στη δεξαμενή εκτροφής πρέπει να ικανοποιεί τις ανάγκες των ψαριών τόσο ως προς την ποιότητα του νερού όσο και ως προς την κινητικότητα τους μέσα σε αυτόν τον περιοριστικό χώρο. Ο σχεδιασμός της δεξαμενής ως προς το μέγεθος, το σχήμα, την ικανότητα αυτοκαθαρισμού κ.λπ. επηρεάζει (αν δεν καθορίζει κιόλας) την αύξηση του εκτρεφόμενου είδους. Για βενθικού τύπου ψάρια όπως το καλκάνι, η γλώσσα κ.ά. (Σχήμα 29) έχει περισσότερη σημασία η επιφάνεια της δεξαμενής παρά το βάθος (όγκος) και η ταχύτητα κυκλοφορίας του νερού, η οποία στην περίπτωση αυτών των ψαριών δεν χρειάζεται να είναι μεγάλη. Αντίθετα τα πελαγικού τύπου ψάρια όπως τα σαλμονιδή ωφελούνται από μεγαλύτερους όγκους νερού και αποδίδουν καλύτερα σε αυξημένες ταχύτητες κυκλοφορίας του νερού.

Στις **στρογγυλές** δεξαμενές καθώς και στις τετράγωνες με κομμένες γωνίες, (**οκταγωνικές**) (Σχήμα 30), το νερό κινείται σε κυκλική τροχιά έτσι που ολόκληρη η μάζα του νερού να περιστρέφεται γύρω από το κέντρο της δεξαμενής. Για να επιτευχθεί αυτή η κυκλική ροή, η είσοδος του νερού υπό πίεση στη δεξαμενή γίνεται υπό γωνία με την κατάλληλη διεύθυνση του στομίου παροχής ή ακόμα καλύτερα, από ένα κάθετο

διάτρητο σωλήνα παροχής του οποίου οι οπές κατευθύνουν το νερό περιφερειακά δημιουργώντας μια δυναμική κυκλική ροή (Σχήμα 31).



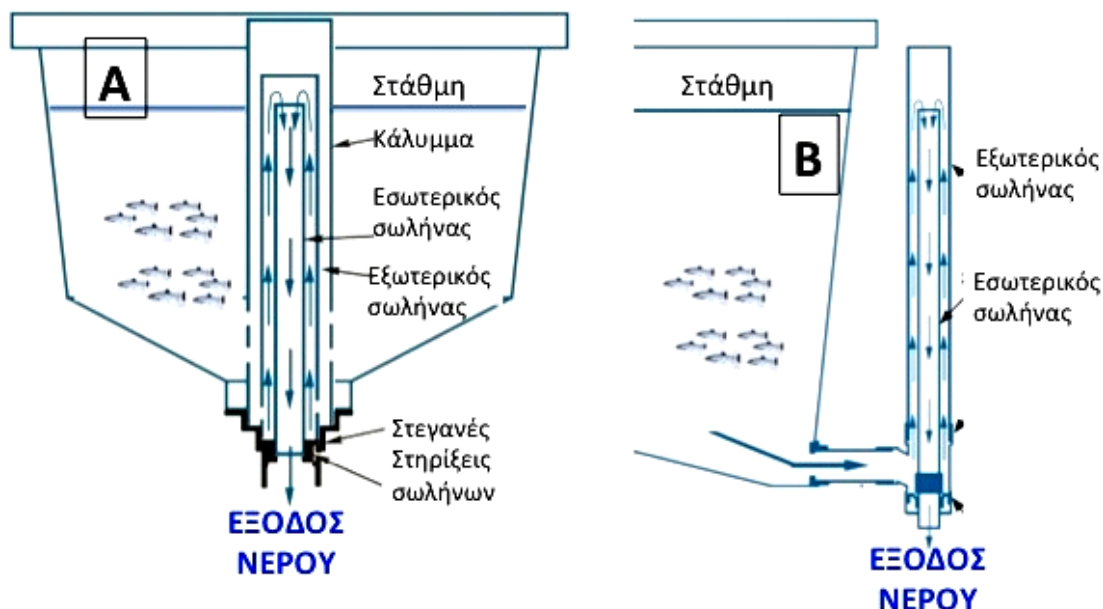
Σχήμα 30. Στρογγυλές πλαστικές δεξαμενές εκτροφής ποικίλων διαστάσεων αλλά με κενά ανάμεσά τους και οκταγωνικές (επάνω δεξιά) με πλήρη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου.



Σχήμα 31. Η είσοδος του νερού στη δεξαμενή κατάλληλα διευθετημένη για να προκαλεί περιστροφική κίνηση του νερού (επάνω σειρά) και η κυκλική κολυμβητική συμπεριφορά των ψαριών εξαιτίας της κίνησης του νερού.

Η **αποχέτευση** του νερού (Σχήμα 32) γίνεται από το κέντρο μέσω διαφόρων διαμορφώσεων. Ο πιο απλός τρόπος είναι αυτός του **διπλού σωλήνα**. Ο εσωτερικός σωλήνας εφαρμόζει στην κεντρική οπή και στο άνω μέρος είναι ανοικτός σε ύψος τέτοιο που καθορίζει και τη στάθμη του νερού της δεξαμενής. Ο εξωτερικός σωλήνας που τον περιβάλλει είναι αρκετά μεγαλύτερης διαμέτρου και διάτρητος στο κάτω μέρος έτσι που να περνά το νερό και κατόπιν ανυψούμενο να εξέρχεται από το άνω ανοικτό άκρο του εσωτερικού σωλήνα. Οι οπές του διάτρητου εξωτερικού σωλήνα επιτρέπουν στο νερό και στα αιωρούμενα να περνούν αλλά όχι στα ψάρια. Παρασυρόμενα τα αιωρούμενα τελικά θα συλλεχθούν έξω από τη δεξαμενή. Υπάρχει πάντως μια τάση για τα βαρύτερα στερεά να φράσσουν τον χώρο μεταξύ των δύο σωλήνων εμποδίζοντας έτσι την ροή και γι' αυτό το λόγο περιοδικώς το σύστημα των σωλήνων αφαιρείται για να «ξεμπουκώσει».

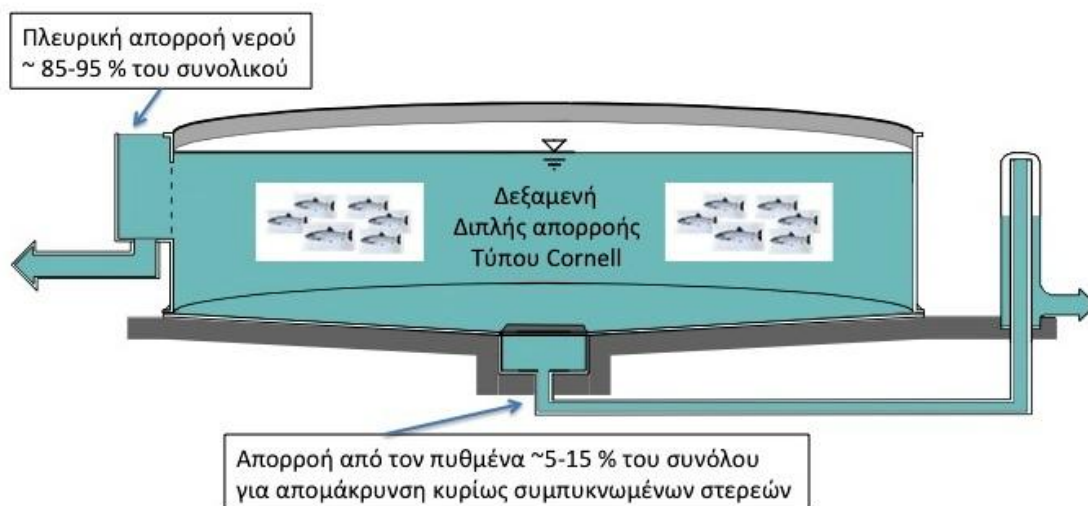
Εναλλακτικά στο παραπάνω σχήμα απορροής του νερού χρησιμοποιείται και το άλλο σύστημα αποχέτευσης χωρίς διπλό σωλήνα στο κέντρο αλλά μόνο ένα πλέγμα που καλύπτει την οπή. Τα ανοίγματα του πλέγματος εμποδίζουν τη διαφυγή των ψαριών ενώ επιτρέπουν στο νερό με τα αιωρούμενα στερεά να περάσουν. Η έξοδος του νερού και ο έλεγχος της στάθμης γίνονται με τη διαμόρφωση του σωλήνα απορροής σε σχήμα **αντεστραμμένου «Γ»** όπου μετά το ευθύγραμμο τμήμα του υψώνεται κάθετα, με το ανοικτό άνω άκρο του στο επιθυμητό επίπεδο στάθμης. Πολλές φορές ο σωλήνας είναι αρθρωτός έτσι που να τοποθετείται η έξοδος του νερού στο επιθυμητό ύψος στάθμης νερού.



Σχήμα 32. Η αποχέτευση του νερού από τον πυθμένα της δεξαμενής με κατάλληλη διαμόρφωση του σωλήνα απορροής που συγχρόνως καθορίζει και τη στάθμη. Α-Διπλός σωλήνας, Β-Αντεστραμμένο «Γ». Από: <http://www.aquamerik.com/>, τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

Ενας τρίτος τρόπος που βρίσκει ολοένα και μεγαλύτερη χρήση είναι η αποχέτευση **τύπου Cornell** (Σχήμα 33) όπου ένα μικρό μόνο μέρος του νερού (5 – 20%) αποχετεύεται μέσω της κεντρικής οπής του πυθμένα. Το μεγαλύτερο μέρος του νερού εξέρχεται μέσω υπερχείλισης από κατάλληλα διαμορφωμένο σημείο του τοιχώματος της δεξαμενής (που καθορίζει και τη στάθμη). Από την απορροή του πυθμένα παρ' όλη την μικρή εκροή μεταφέρεται εντούτοις η μεγαλύτερη μάζα των στερεών. Το σύστημα αυτό έχει το πλεονέκτημα της συγκέντρωσης των στερεών σε ένα μικρότερο όγκο νερού, διευκολύνοντας έτσι την τελική κατακράτηση των στερεών στο μηχανικό φίλτρο.

Αντίθετα με τις παραπάνω περιπτώσεις των στρογγυλών ή τετραγωνοκολοβών δεξαμενών, οι δεξαμενές τύπου **raceway** (ορθογώνιες και μακρόστενες) δεν ωφελούνται από την υδραυλική της ροής για να απομακρυνθούν τα αιωρούμενα στερεά. Σε αυτού του τύπου τις δεξαμενές ο αυτοκαθαρισμός επιτυγχάνεται από τη δραστηριότητα των σε μεγάλη πυκνότητα κολυμβούντων ψαριών που διατηρούν έτσι τα στερεά σε αιώρηση ώσπου να αποχετευθούν μαζί με το νερό. Δεν χρειάζεται να υπάρχει κεκλιμένος πυθμένας για να επιτευχθεί αποτελεσματικά η απομάκρυνση των στερεών (δεν βοηθά σε τίποτα), και αν υπάρχει, βοηθά μόνο στην πλήρη αποστράγγιση της δεξαμενής. Η κατασκευή δεξαμενών raceway έχει όμως το μεγάλο πλεονέκτημα της πλήρους εκμετάλλευσης του διαθέσιμου χώρου (παράλληλα και σε επαφή τοποθέτησή τους).

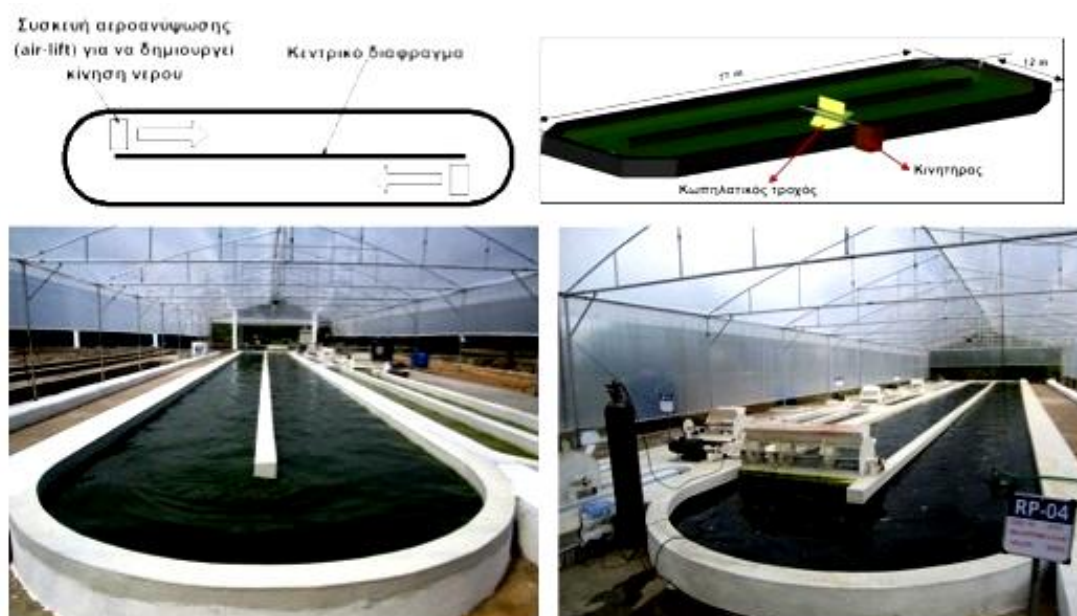


Σχήμα 33. Δεξαμενή εκτροφής τύπου Cornell κατά τον οποίο η κύρια μάζα του νερού απορρέει πλευρικός και η μικρότερη ποσότητα με την πλειονότητα της μάζας των στερεών ρυπαντών από τον πυθμένα.

Συγκριτικά με τις raceway, οι κυκλικές δεξαμενές καταλαμβάνουν πιο πολύ χώρο για τον ίδιο όγκο νερού με προφανείς οικονομικές επιπτώσεις στην κατασκευή. Το μειονέκτημα αυτό απαλύνεται αρκετά με τη χρήση

των τετραγωνοκολοβών δεξαμενών οι οποίες έχουν το σχήμα οκταγώνου και παρουσιάζουν το ίδιο καλά χαρακτηριστικά αυτοκαθαρισμού με τις στρογγυλές καταλαμβάνοντας αισθητά μικρότερο χώρο. Σε κάθε περίπτωση πάντως αν χρειάζεται να κατασκευαστούν μεγάλες δεξαμενές προτιμώνται οι στρογγυλές, καθώς είναι η ανθεκτικότερη κατασκευή από όλες και αναλογικώς οι φθηνότερες.

Υπάρχει και ένας άλλος τύπος δεξαμενής, ένα υβρίδιο μεταξύ στρογγυλής και raceway ο λεγόμενος **D-σχήματος raceway** (Σχήμα 34), ο οποίος συνδυάζει τον αποτελεσματικό αυτοκαθαρισμό των στρογγυλών με την εκμετάλλευση του χώρου των raceway. Πάντως λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων στην κατασκευή του και στη διαχείριση του νερού και των ψαριών (κίνηση νερού, εξαλίευση κ.ά.) χρησιμοποιείται σε λίγες μονάδες.



Σχήμα 34. Δεξαμενές εκτροφής τύπου D-raceway που συνδυάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα πλεονεκτήματα των στρογγυλών και τύπου raceway (ιχθυομαντρών) δεξαμενών.

Το διαλυμένο οξυγόνο όπως προαναφέρθηκε είναι το πρωταρχικό μέλημα. Φροντίζουμε η συγκέντρωσή του να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα μέσα στη δεξαμενή εισάγοντας νερό που έχει υψηλή περιεκτικότητα σε αυτό. Μπορεί επίσης να προστεθεί καθαρό οξυγόνο με πορώδη σώματα-διαχυτές μέσα στη δεξαμενή αλλά η απόδοση αυτής της μεθόδου είναι μικρή και είναι σπάταλη.

Στις στρογγυλές και στις οκταγωνικές δεξαμενές, ο έλεγχος και η ρύθμιση του επιπέδου του διαλυμένου οξυγόνου είναι σχετικά εύκολη υπόθεση επειδή λόγω της περιστροφικής κίνησης υπάρχει ομοιόμορφη ανάμιξη σε όλη τη στήλη του νερού. Ο έλεγχος γίνεται με την

τοποθέτηση ηλεκτροδίου μέτρησης διαλυμένου οξυγόνου σε κάποιο κατάλληλο σημείο της απορροής του νερού. Δεν είναι καλή πρακτική να μετράται το οξυγόνο σε σημεία όπου γίνεται είτε η έγχυσή του είτε η είσοδος του νερού στη δεξαμενή. Αυτό που πρέπει να ελέγχεται και αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα είναι το πόσο οξυγόνο απομένει αφού καταναλωθεί από τα ψάρια. Αυτό θα δείξει αν υπάρχουν οριακές – επικίνδυνες καταστάσεις.

Αντίθετα με τις στρογγυλές, στις μακρόστενες ορθογώνιες δεξαμενές raceway η κατάσταση ομοιόμορφης κατανομής του οξυγόνου στο νερό είναι εντελώς διαφορετική. Στην είσοδο του νερού στο ένα άκρο, η συγκέντρωση μπορεί μεν να είναι πολύ μεγάλη αλλά μειώνεται προοδευτικά προς την απορροή. Η κατάσταση περιπλέκεται ακόμα περισσότερο ανάλογα με την κατανομή των ψαριών καθ' όλο το μήκος. Ενώ στις στρογγυλές δεξαμενές μια οποιαδήποτε τεχνητή αύξηση του οξυγόνου μπορεί να καταγραφεί σχεδόν άμεσα από το ηλεκτρόδιο D.O. τοποθετημένο στην απορροή, στις raceway ένα ανάλογο ηλεκτρόδιο τοποθετημένο στην απορροή θα καταγράψει την οποιαδήποτε μεταβολή στο εισερχόμενο νερό μόνο μετά από μία ώρα περίπου. Όσο πιο επιμήκης η δεξαμενή τόσο καθυστερημένη η απόκριση. Συνεπώς γίνεται πολύ δύσκολη η ρύθμιση του διαλυμένου οξυγόνου και απαιτούνται ειδικοί αλγόριθμοι για να προσεγγιστεί η πραγματικότητα. Αυτό είναι ένα από τα ειδικά προβλήματα της διαχείρισης των δεξαμενών raceways.

Οι καλώς εξοπλισμένες μονάδες έχουν διάφορους αισθητήρες τοποθετημένους στις δεξαμενές (στάθμη νερού, διαλυμένο οξυγόνο, θερμοκρασία) με σκοπό τον πλήρη έλεγχο της εκτροφής. Επιπροσθέτως για περιπτώσεις ανάγκης έχουν στο βυθό κάθε δεξαμενής εφεδρικό διαχυτή από τον οποίο θα γίνει παροχή καθαρού οξυγόνου σε περίπτωση επείγουσας επέμβασης ή ατυχήματος.

Οι δεξαμενές εκτροφής μπορούν να κατασκευαστούν από ποικίλα υλικά αρκεί να είναι χημικώς αδρανή σε σχέση με το νερό και να μην απελευθερώνουν τοξικά για τα ψάρια. Εξυπακούεται επίσης το κόστος τους να μην είναι υπερβολικό. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι φάιμπεργκλάς, πολυαιθυλένιο, πλαστικός επενδύτης εσωτερικά οποιασδήποτε δεξαμενής, τσιμέντο και τσιμεντόπλινθοι. Το γαλβανισμένο ατσάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο αν είναι εξαιρετικής ποιότητας και ούτως ή άλλως δεν συνηθίζεται ευρέως παρά μόνο αν επενδυθεί εσωτερικά με πλαστικό, κάτι που προτιμάται σε περιπτώσεις γρήγορης και φθηνής κατασκευής (που μπορεί και να ξεμονταριστεί), μια και τα κυματοειδή φύλλα αυτού του μετάλλου πωλούνται καμπυλωμένα και συνενώνονται εύκολα για να δώσουν κυλίνδρους επιθυμητής διαμέτρου.

Χωμάτινες δεξαμενές τύπου raceway που χρησιμοποιούνται σε πολλές υπαίθριες εντατικές εκτροφές, δεν συνηθίζονται στα στεγασμένα – εσωτερικού χώρου κλειστά συστήματα.

Οι πλαστικές δεξαμενές (φαϊμπεργκλάς ή πολυαιθυλανίου) έχουν πολλά υπέρ όπως την χημική τους αδράνεια και την ευκολία καθαρισμού και αποστείρωσής των. Οι πολυαιθυλενικές δεξαμενές δεν είναι τόσο στιβαρές όσο οι φαϊμπεργκλάς και χρησιμοποιούνται μόνο μέχρι διαμέτρου 150 cm και μόνο με ενίσχυση λίγο μεγαλύτερη. Οι δεξαμενές από φαϊμπεργκλάς μπορεί να είναι και διαμέτρου μέχρι 450 cm και αν και δεν είναι οι φθηνότερες, είναι οι πιο δημοφιλείς από άποψη στιβαρότητας και διάρκειας.

Οι πλαστικώς επενδυμένες δεξαμενές, ιδίως αυτές από γαλβανισμένο ατσάλι το οποίο όταν πρωτοχρησιμοποιείται μπορεί να απελευθερώσει τοξικό για τα ψάρια ψευδάργυρο, είναι μια πολύ καλή λύση και σε περιπτώσεις χρησιμοποίησης ευκαιριακών κατασκευών. Αν και το πλαστικό «σεντόνι» που θα επενδύσει το εσωτερικού οποιουδήποτε κοιλώματος δεν είναι μεγάλης διάρκειας ζωής, σε περιπτώσεις όπως το γαλβανισμένο ατσάλι ή το τσιμέντο αποδεικνύεται καλή λύση. Το τσιμέντο (ιδίως το φρέσκο) είναι πολύ αλκαλικό και θα ανεβάσει πολύ το pH του νερού και επίσης επειδή είναι πορώδες είναι δύσκολο και στον καθαρισμό και στην απολύμανση. Η λύση για την αλκαλικότητα του τσιμέντου είναι να παραμείνουν για πολύ καιρό οι δεξαμενές γεμάτες με νερό (π.χ. ένα μήνα), για να «ξεπλυθεί» η περίσσεια αλκαλικότητα. Η απόλυτη λύση πάντως είναι η επικάλυψη με εποξική βαφή, λύση ακριβή μεν αλλά μόνιμη.

7.3. Η απομάκρυνση των στερεών αποβλήτων

Στα κλειστά συστήματα παράγεται μεγάλη μάζα αιωρούμενων στερεών οργανικών ρυπαντών προερχόμενων κυρίως από τα περιττώματα και την αφάγωτη τροφή. Το νερό ανακυκλώνεται και τα στερεά παραμένουν στο σύστημα και μόνο με τεχνητή κατακράτηση θα απομακρυνθούν. Το πρόβλημα με την απομάκρυνσή τους είναι ότι πρόκειται για χαλαρή ύλη που σπάζει σε μικρότερα κομμάτια στο νερό. Τα ποικίλα μεγέθη στερεών κόκκων που προκύπτουν (Σχήμα 39) συμπεριφέρονται διαφορετικά και η κατανόηση των ιδιοτήτων τους αποτελεί σημαντική υπόθεση για την μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της όποιας μεθόδου απομάκρυνσής των εφαρμοστεί.

Κατά ένα γενικό συγκερασμό στοιχείων από διάφορες μονάδες υπολογίζεται ότι παράγονται απόβλητα υπό μορφή **αιωρούμενων στερεών (SS-Suspended Solids)** σε ποσότητες:

130 – 500 g SS / kg τροφής ή 2000-6000 g SS /τόνο ψαριών/ημέρα

Τα μεγαλύτερα μεγέθη των αιωρούμενων στερεών (θεωρούμενα χάριν πρακτικότητας ως σφαίρες) με διάμετρο άνω των 100 μm (0,1 mm),

θεωρούνται **καθιζήσιμα**, δηλαδή σωματίδια ειδικής βαρύτητας περί το 1,19 που θα καθιζάνουν στο βυθό εφόσον η ταχύτητα του νερού μειωθεί καταλλήλως. Η καθίζηση επιτυγχάνεται σε **δεξαμενές καθίζησης** όπου η ροή του νερού έχει μειωθεί πολύ με αποτέλεσμα την συγκέντρωση αυτών των σωματιδίων σε στρώσεις στον πυθμένα. Μόνο εφόσον η ταχύτητα του νερού μειωθεί αρκετά και το νερό παραμείνει αρκετή ώρα (retention time περί τα 15-60 min) στη δεξαμενή καθίζησης, θα επέλθει καθίζηση. Αυτή η προϋπόθεση που δεν είναι κάτι πάντοτε εφικτό, ικανοποιείται είτε με μεγάλο όγκο δεξαμενής καθίζησης, είτε με τοποθέτηση κυλίνδρων (tube settlers) σε μια σχετικά μικρότερη δεξαμενή (Σχήμα 35), μέσα από τους οποίους περνά το νερό χωρίς την ανάγκη να μειώνεται η ταχύτητά του και λόγω φυσικών δυνάμεων επιταχύνεται η καθίζηση μέσα στην καθένα από αυτούς (**δεξαμενή επιταχυνόμενης καθίζησης**). Όλα τα στερεά που καθιζάνουν από όλους τους σωλήνες (που καταλαμβάνουν κεκλιμένως τοποθετημένοι τη στήλη του νερού) συγκεντρώνονται στον πυθμένα. Κατόπιν ακολουθεί η συλλογή και διάθεσή τους (μαζί και μια ποσότητα νερού) στον κατάλληλο αποδέκτη.

Η **καθίζηση** των σωματιδίων στο νερό εξαρτάται από τις φυσικές τους ιδιότητες. Η ταχύτητα με την οποία θα καθιζάνουν στο νερό είναι η παράμετρος που μας ενδιαφέρει. Θα καθορίσει εάν θα προλάβει το σωματίδιο κατά το χρόνο που το νερό βρίσκεται στη δεξαμενή να καθιζάνει και να κατακαθίσει στον πυθμένα.

Η **ταχύτητα καθίζησης ενός σωματιδίου** σε θεωρητικώς ιδανικές συνθήκες, δίδεται από τον τύπο:

$$u_p = \left(\frac{d^2 (\rho_s - \rho) g}{18 \mu_c} \right)$$

Όπου:

u_p = ταχύτητα καθίζησης σε m/sec

d = διάμετρος σωματιδίου σε m

ρ_s = πυκνότητα σωματιδίου σε kg/m³

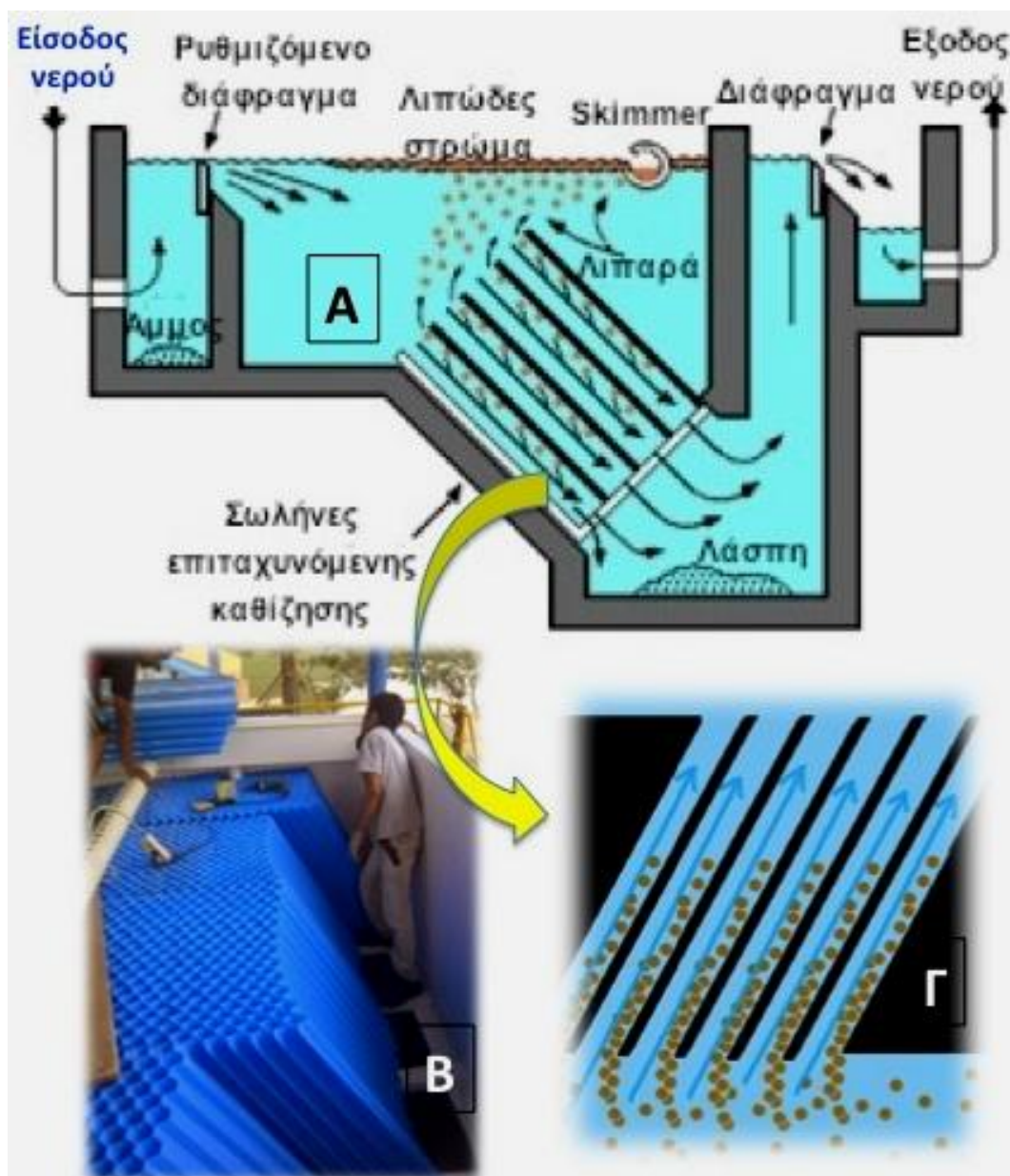
ρ = πυκνότητα του υγρού μέσου σε kg/m³ (καθαρό νερό = 1)

g = επιτάχυνση της βαρύτητας = 9,81 m/sec²

μ_c = το ιξώδες του όλου υγρού μέσου

Από τη μελέτη του τύπου κατανοείται εύκολα ότι η κυριότερη παράμετρος που καθορίζει την ταχύτητα καθίζησης είναι το μέγεθος των σωματιδίων (δηλαδή των αιωρούμενων στερεών). Όσο μεγαλύτερα τόσο γρηγορότερα καθιζάνουν.

Η καθίζηση είναι μια απλή και φθηνή λύση για απομάκρυνση των στερεών αλλά, δυστυχώς, όχι η απόλυτη λύση. Μόνο στερεά με διάμετρο άνω των 100 μm μπορούν να καθιζάνουν σε λογικό βαθμό και διαθέσιμο χρόνο ηρεμίας του νερού. Τα μικρότερης διαμέτρου σωματίδια θα παραμείνουν στο νερό. Συνεπώς η καθίζηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως μια πρωταρχική επεξεργασία απομάκρυνσης στερεών ρυπαντών και όχι ως το μόνο μέσο απαλλαγής από αυτά.

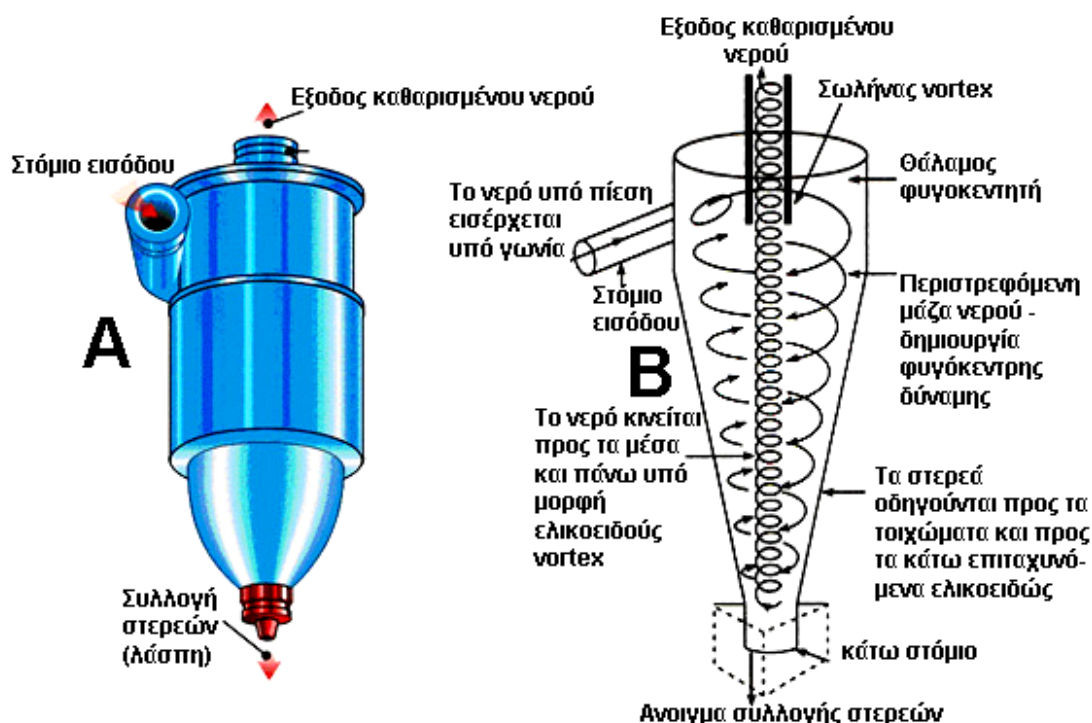


Σχήμα 35. Δεξαμενή επιταχυνόμενης καθίζησης μέσω πολλαπλών κεκλιμένων σωλήνων (σύστημα καθίζησης: tube-settler).

Η επόμενη κατηγορία μεγέθους στερεών ρυπαντών είναι αυτή με μεγέθη από 50 ή 70 μm (ανάλογα με τα εκτρεφόμενα ψάρια) έως 100 μm . Αυτά τα αιωρούμενα πρέπει να κατακρατηθούν με κάποιο τρόπο και να απομακρυνθούν από το κυκλοφορούν νερό. Αυτά που θα παραμείνουν

και είναι μικρότερα των 50 μm μπορεί μεν να προσδίδουν θολερότητα στο νερό αλλά δεν προκαλούν ιδιαίτερο πρόβλημα σε ένα κλειστό σύστημα (δεν έχουμε να κάνουμε εδώ με εκθεσιακού τύπου ενυδρείο) εφόσον οξυγόνωση και απομάκρυνση της αμμωνίας λειτουργούν σωστά. Τα πιο δημοφιλή και πρακτικά **μηχανικά φίλτρα** (Σχήμα 37) για την κατακράτηση στερεών αυτής της κατηγορίας μεγεθών είναι τα των **κοκκωδών μέσων** (granular media) και τα **μικροπλεγματικά** (μικροκόσκινα-microscreens).

Υπάρχει και η μέθοδος του **υδροκυκλониσμού** με την οποία απομακρύνονται όχι μόνο τα παραπάνω μεγέθη αλλά και άλλα πολύ μικρότερα μέχρι ακόμα και 10 μm . Χρησιμοποιεί ειδική κωνική κατασκευή τον **υδροκυκλώνα** (hydrocyclone) και ως μέθοδος αποτελεί μια ξεχωριστή ιδιαίτερη κατηγορία. Η αρχή λειτουργίας της συνίσταται στη δημιουργία μεγάλης ταχύτητας κίνησης νερού σε κυκλική τροχιά μέσα σε ένα κώνο (Σχήμα 36).



Σχήμα 36. Υδροκυκλώνας (hydrocyclone) ως μηχανικό φίλτρο.

Τα στερεά στο επιταχυνόμενο νερό, λόγω της φυγόκεντρου ωθούνται στα τοιχώματα του κώνου όπου η ταχύτητα είναι μικρότερη και τα στερεά καθιζάνουν στον βυθό του κώνου ενώ το καθαρό νερό εξέρχεται από την κορυφή. Πρόκειται για μια **βεβιασμένη καθίζηση** πολύ αποτελεσματική που όμως απαιτεί βεβιασμένη και έντονη παροχή νερού στον υδροκυκλώνα με ξεχωριστή αντλία. Αυτό είναι και το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, δηλαδή η κατανάλωση ενέργειας για τη συνεχή λειτουργία της αντλίας. Τα συλλεγόμενα στερεά στον πυθμένα απομακρύνονται είτε

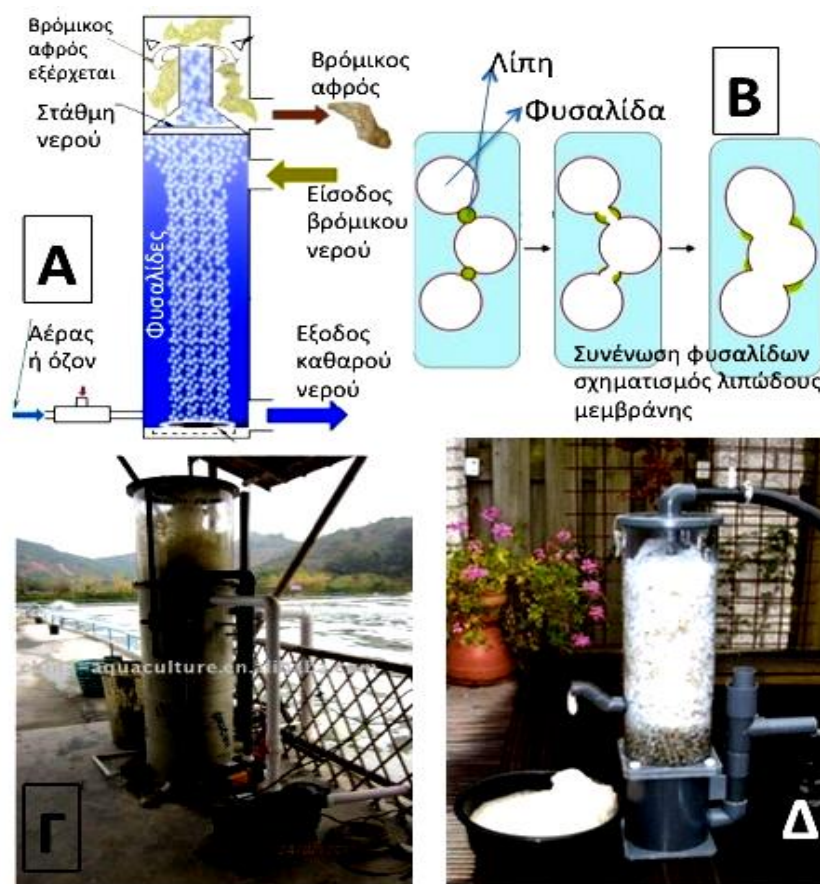
κατά διαστήματα είτε ακόμα και συνεχώς με ελάχιστη απώλεια νερού (είναι πολύ συμπυκνωμένα).

Στην επόμενη κατηγορία συσκευών που κατακρατούν ακόμα μικρότερα στερεά βρίσκονται τα **πορώδη μέσα** (porous media). Πρέπει να ξεκαθαριστεί όμως εξ' αρχής το γεγονός ότι αυτού του είδους τα φίλτρα προορίζονται κυρίως για ενυδρεία και η χρησιμοποίησή τους κάνει το νερό «κρυστάλλινα» καθαρό απαλλάσσοντάς το από κάθε είδους αιωρούμενο όσο μικρό και αν είναι (ακόμα και $0,1 \mu\text{m}$). Προφανώς δεν μπορούν να βρουν θέση σε ένα εμπορικό κλειστό σύστημα διότι λίγα λεπτά μόνο λειτουργίας των σε συνθήκες εντατικής εκτροφής θα τα φράξουν-στομώσουν. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε ειδικές οριακές καταστάσεις (ιδίως πειραματικές) και αφού πρώτα το νερό έχει απαλλαγεί από τα μεγαλύτερα αιωρούμενα, και γενικά δεν είναι απαραίτητα στα κλειστά συστήματα. Το υλικό πλήρωσης των ευρύτερα χρησιμοποιούμενων φίλτρων πορωδών μέσων (**φίλτρα διατομικής γης** -D.E. filter) είναι η “διατομική γη” ένα πυριτικό υλικό σαν λεπτότατη άμμος, που προέρχεται από ιζηματικές στρώσεις – εναποθέσεις των αρχαίων πυριτικών καλυμμάτων των διατόμων (φυτοπλαγκτόν).

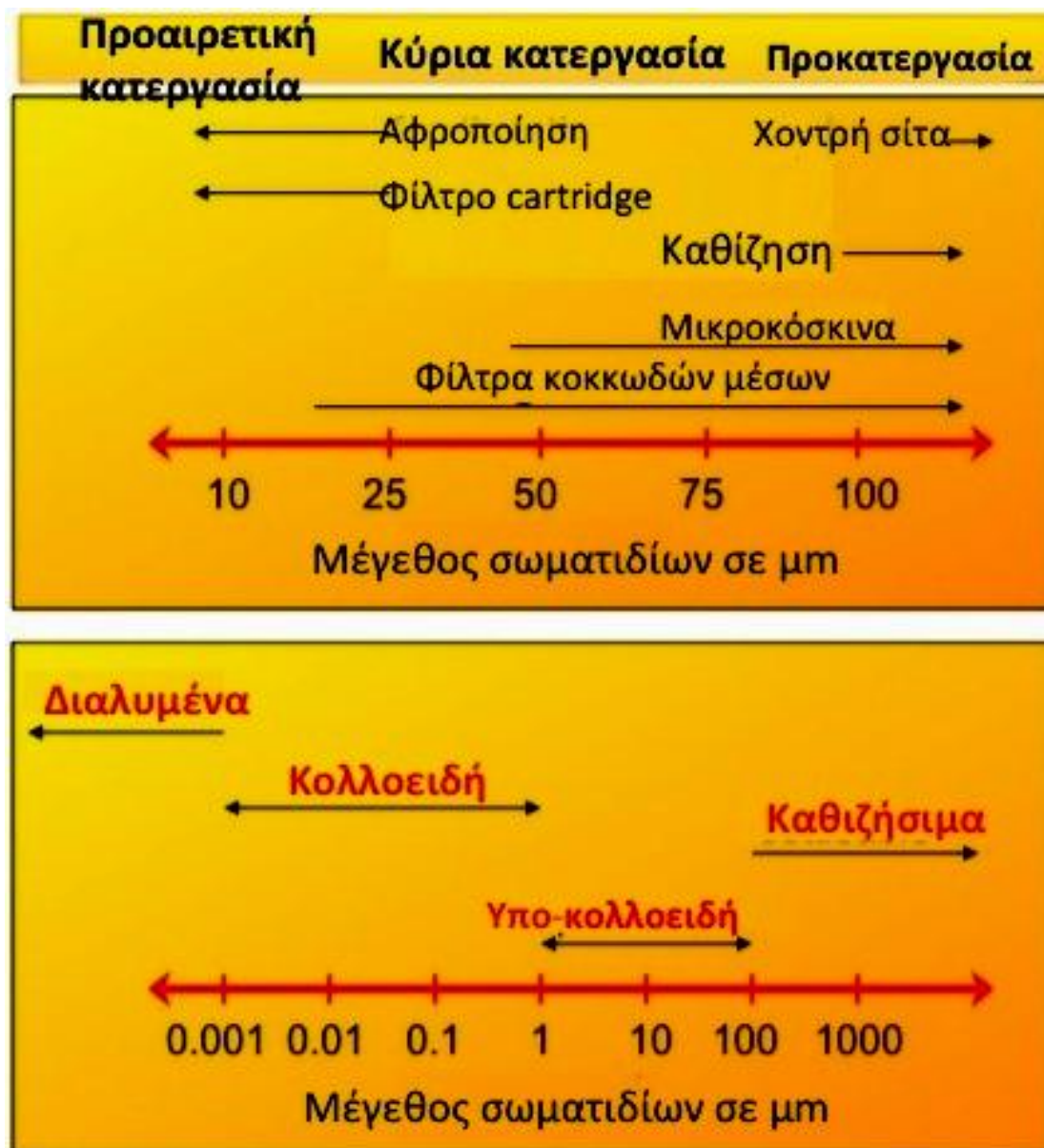


Σχήμα 37. Διαφόρων τύπων και υλικών πλήρωσης (μέσων) μηχανικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται στην κατακράτηση των στερεών στα κλειστά συστήματα ιχθυοκαλλιέργειας. Δίδονται τα εύρη των μεγεθών των σωματιδίων που μπορούν να συγκρατήσουν καθώς και η επίδρασή τους στη ροή του κυκλοφορούντος νερού ως απώλεια πίεσης εξαιτίας της αντίστασης διέλευσης ανάμεσα στους πόρους των μέσων πλήρωσης, (κατά R. Strange-2004, τροποποιημένο από Γ. Χώτο).

Στα συστήματα κατακράτησης αιωρούμενων στερεών, δηλαδή στη γενικώς οριζόμενη μέθοδο του μηχανικού φιλτραρίσματος, μπορούν να ενταχθούν και οι μηχανισμοί της **αφροποίησης (αφροσυσσωμάτωσης)**, της πρωτεϊνοξαφρίσματος (foam fractionation, protein skimming) και του οζονισμού. Με την αφροποίηση (Σχήμα 38) αφαιρούνται από το νερό με τη βοήθεια φυσαλίδων αέρα όλα τα μικρότερα από 30 μm στερεά καθώς και τα κολλοειδή. Όλα αυτά τα οργανικά συγκολλώνται και στην επιφάνεια του νερού σχηματίζουν ένα βρόμικο αφρό ο οποίος συλλέγεται και απομακρύνεται. Αντί για κανονικός αέρας στον **αφροποιητή** (foam fractionator ή protein skimmer) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέρας εμπλουτισμένος με **όζον** οπότε επιτυγχάνεται και βακτηριοκτόνος δράση. Από όλα τα παραπάνω γενικώς αναφερόμενα (αναλυτικότερα επί των φίλτρων παρακάτω), ξεκαθαρίζει το τι πρέπει να αναμένουμε από τη χρήση διαφόρων τύπων μηχανικής επεξεργασίας του νερού. Κατά γενική παραδοχή τα κλειστά συστήματα ιχθυοκαλλιέργειας μπορούν να λειτουργούν επιτυχώς αρκεί να απομακρύνουν τα αιωρούμενα στερεά μεγέθους άνω των 50 μm . Αυτό επιτυγχάνεται αρκετά εύκολα και χωρίς μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Αν όμως (όπως πολλοί προτείνουν) επιχειρούν έστω και με πιο πολύπλοκες και ενεργοβόρες μεθόδους να απαλλάξουν το νερό και από τα μικρότερα σωματίδια, αυτό θα είναι καλό για τον περιορισμό των πιθανών ασθενειών, καλό για την παραγωγή και καλό για την κατανάλωση του φρέσκου νερού (το νερό μπορεί να ανακυκλωθεί περισσότερο).



Σχήμα 38.
Αφροποίηση.
Αρχή
λειτουργίας
A&B.
Αφροποιητές
Γ&Δ.



Σχήμα 39. Διαγραμματική αποτύπωση της κλίμακας των μεγεθών των οργανικών στερεών ρυπαντικών σωματιδίων που παράγονται σε μια δεξαμενή ιχθυοκαλλιέργειας εντατικού τύπου με χρήση τεχνητής ξηράς τροφής. Επάνω: διάφοροι τύποι μηχανικού φιλτραρίσματος με το εύρος ικανότητάς των. Κάτω: Η ονομασία των αιωρούμενων σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθός των.

7.4. Η διάθεση των οργανικών αποβλήτων

Στις εντατικές ιχθυοκαλλιέργειες και ιδιαίτερα σε αυτές των κλειστών συστημάτων, δημιουργούνται σημαντικές μάζες οργανικής λάσπης από τα συσσωματωμένα στερεά απόβλητα. Τα στερεά απόβλητα των ψαριών διαφέρουν από τα αντίστοιχα των χερσαίων εκτρεφόμενων ζώων κατά το ότι είναι πολύ περισσότερο υδαρή μέχρι και 99%. Πρόκειται δηλαδή για βρόμικο νερό το οποίο μπορεί να αποχετευθεί στο ίδιο με τα ανθρώπινα

λύματα δίκτυο αποχέτευσης. Αυτή η επιλογή βέβαια αφορά τις μικρές μονάδες. Για τις μεγάλες μονάδες η αποχέτευση στο αστικό δίκτυο μπορεί είτε να είναι ακριβή, είτε (και το πιο συνηθισμένο), η μονάδα να είναι εκτός αστικού ιστού και να μην έχει πρόσβαση στο δίκτυο του βιολογικού καθαρισμού. Σε αυτή την περίπτωση η μονάδα αναλαμβάνει την ευθύνη απορρύπανσης των λυμάτων της. Συνήθως το βρόμικο νερό με τα συσσωρευμένα στερεά οδηγείται σε μια φυσική δεξαμενή καθίζησης και το πλεονάζον νερό της θα οδηγηθεί αναπόφευκτα κάποια στιγμή σε κάποιο φυσικό υδαταποδέκτη (Σχήμα 40). Οι κατά τόπους κανονισμοί των αρχών διαχείρισης του νερού θα καθορίσουν με τη σχετική αδειοδότηση τους όρους αυτής της διαδικασίας. Επειδή το περιεχόμενο του αποχετευόμενου νερού σε νιτρικά, είναι το κύριο πρόβλημα για την απελευθέρωσή τους στο περιβάλλον και επειδή οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί θέτουν ασφυκτικά χαμηλά όρια, ολόένα και πιο πολύ οι μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας κλειστού συστήματος χρησιμοποιούν και στάδιο απονιτροποίησης για να απαλλαγούν από τα νιτρικά έστω και αν αυτό προσθέτει στο λειτουργικό κόστος. Υπάρχει βέβαια και η εναλλακτική λύση (σε αυτή άλλωστε βασίζεται η υδροπονία), να διατίθεται το απόβλητο νερό για άρδευση καλλιεργειών εφόσον το έδαφος είναι αρκετά πορώδες και αποτρέπει τη λίμναση. Η παχυμένη λάσπη που συμπυκνώνεται με κάθε είδους τρόπο από τα απόβλητα νερά μετά από κατεργασία χώνευσης και ξήρανσης αποτελεί εξαιρετικό λίπασμα (περισσότερα στα επόμενα).



Σχήμα 40. Δεξαμενές εναπόθεσης των υγρών αποβλήτων μιας μονάδας ιχθυοκαλλιέργειας κλειστού συστήματος. Η συσσωρευμένη οργανική λάσπη «χωνεύεται» και μπορεί μετά από κατάλληλη επεξεργασία να μετατραπεί σε οργανικό λίπασμα για αγροκαλλιέργειες.

7.5. Μηχανικά φίλτρα – Κοκκώδη μέσα (Granular media)

7.5.1. Φίλτρο χαντρών (Bead filter)

Τα φίλτρα χαντρών περιέχουν σε ένα δοχείο μάζα αδρανούς υλικού υπό μορφή σφαιριδίων μικρού μεγέθους (συνήθως περί το 0,5 cm) το οποίο συγκρατείται με πλέγμα. Στο δοχείο υπάρχει είσοδος και έξοδος νερού κατάλληλα διευθετημένες (Σχήματα 41-42-43). Η ροή του νερού μπορεί

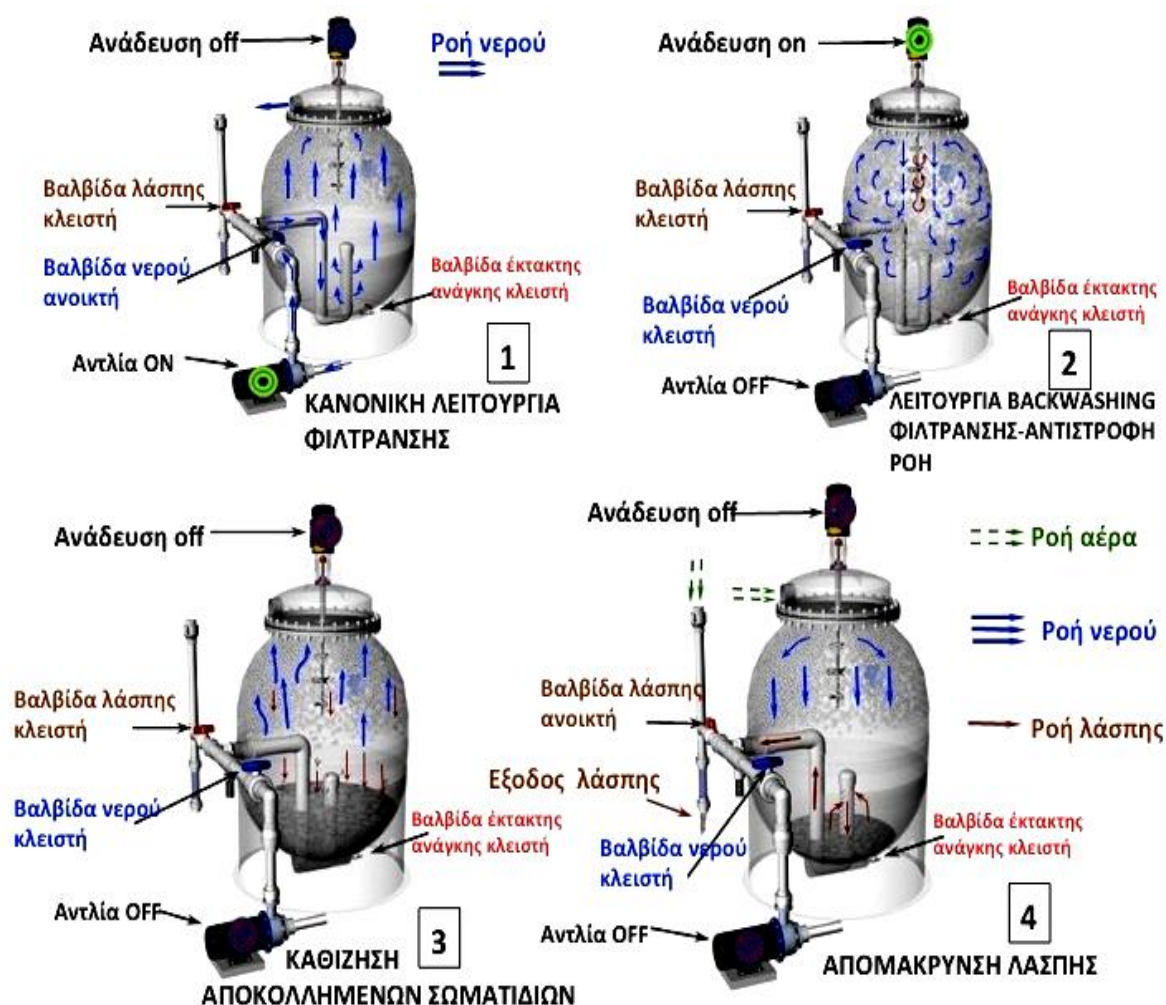
να είναι είτε από πάνω προς τα κάτω είτε το αντίστροφο. Τα σφαιρίδια (κόκκοι) του φιλτραντικού μέσου είναι κατασκευασμένα από αδρανές υλικό π.χ. πολυαιθυλένιο. Περνώντας ανάμεσα από τα μικρά κενά των χαντρών, τα στερεά που μεταφέρει το νερό παγιδεύονται και το νερό διατρέχει το στρώμα των υλικών αυτών εξερχόμενο καθαρό απαλλαγμένο από σωματίδια μεγέθους 50 μm και πάνω. Το φίλτρο χαντρών είναι πολύ αποτελεσματικό αλλά φράσσει σχετικά γρήγορα και χρειάζεται καθαρισμό ο οποίος γίνεται με **αντιστροφή της ροής (backwashing)**. Κατά την αντιστροφή, η μάζα των χαντρών αναδεύεται είτε με αέρα είτε με μηχανικό αναδευτήρα και τα παγιδευμένα στερεά αιωρούνται στο ρεύμα του νερού που έχει πλέον αντιστραφεί. Η ροή του νερού είναι τώρα πιο έντονη και ακόμα και οι χάντρες βρίσκονται σε ελαφρά αιώρηση όχι όμως τόσο έντονη ώστε να παρασυρθούν με το νερό. Τα στερεά όμως όντας ελαφρύτερα, αποκολλημένα από την παγίδευσή τους μεταξύ των χαντρών παρασύρονται μόνο αυτά με το εξερχόμενο νερό και απομακρύνονται (Σχήματα 41 και 42). Το φίλτρο έχει τώρα καθαρίσει και μπορεί να αρχίσει ένας νέος κύκλος καθαρισμού με τη ροή του νερού να έχει αντιστραφεί στο κανονικό. Ο τεχνικός καταλαβαίνει τότε το φίλτρο χαντρών αρχίζει να στομώνει και να απαιτεί καθαρισμό από τοποθετημένα ροόμετρα που μετρούν την ροή του νερού στην έξοδο. Πτώση της ένδειξης σημαίνει απόφραξη του φίλτρου από τα στερεά που παγίδευσε.



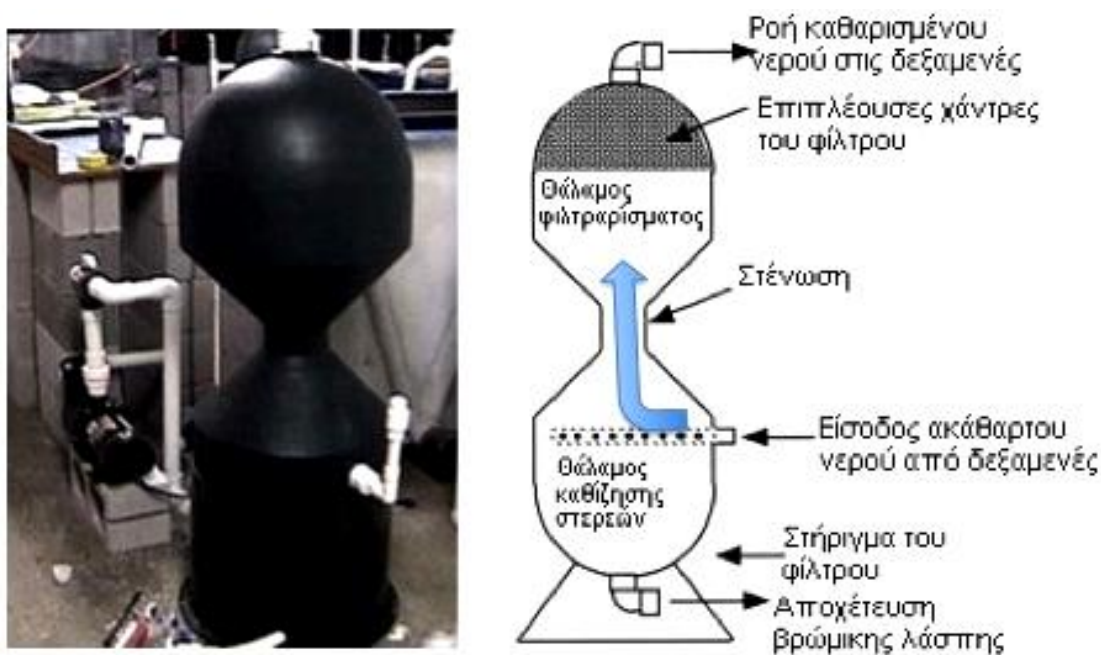
Σχήμα 41. Φίλτρο χαντρών καθοδικής ροής. A: Φιλτράρισμα, B: Backwashing.

Από: <http://www.koiphen.com/forums/showthread.php?401-Bead-Filter-Questions>, τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

Το φίλτρο χαντρών εκτός από μηχανική λειτουργία (κατακράτηση στερεών) έχει και νιτροποιητική, επειδή η μεγάλη επιφάνεια που προσφέρουν οι χάντρες του αποτελεί και έξοχο υπόστρωμα ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηριδίων. Ορισμένες μονάδες που χρησιμοποιούν μεγάλα φίλτρα χαντρών συνδυάζουν με μία μόνο συσκευή μηχανικό και βιολογικό φιλτράρισμα



Σχήμα 42. Μηχανικό φίλτρο χαντρών ανοδικής ροής σε 4 διαδοχικές φάσεις λειτουργίας του με επεξηγήσεις για τα διάφορα μέρη του και τις επιτελούμενες λειτουργίες. Σχήμα από: AST Aquaculture Systems Technologies, <https://astfilters.com/>, τροποποιημένο από Γ. Χώτο.



Σχήμα 43. Ειδικός τύπος μηχανικού φίλτρου χαντρών ανοδικής ροής νερού κατά τη φίλτρανση, με στένωση στο μέσο του δοχείου η οποία διευκολύνει την απελευθέρωση των παγιδευμένων στερεών κατά το διέλευση των χαντρών από εκεί όταν το φίλτρο καθαρίζεται.

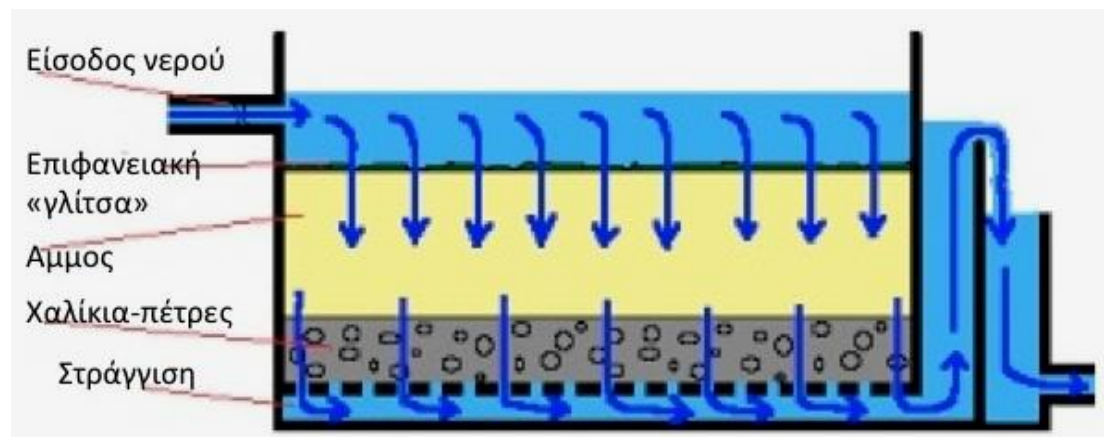
7.5.2. Μηχανικά φίλτρα – Κοκκώδη μέσα (Granular media), Φίλτρο άμμου (sand filter)

Τα φίλτρα άμμου είναι γνωστά από την εφαρμογή τους σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού και στις πισίνες. Η εφαρμογή του στις ιχθυοκαλλιέργειες αποτελούσε προ 30νταετίας μια συνηθη επιλογή η οποία όμως σήμερα έχει σχεδόν εξαφανιστεί. Ο λόγος είναι το γρήγορο φράξιμό τους επειδή το υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιούν είναι η άμμος η οποία πολύ γρήγορα θα στομάσει από τα στερεά που θα κατακρατηθούν αποτελεσματικότερα στα ενδιάμεσα κενά των κόκκων της.

Όσο πιο λεπτή η άμμος τόσο πιο αποτελεσματικό το φιλτράρισμα. Εξυπακούεται ότι όπως και με το φίλτρο χαντρών, ένα φίλτρο άμμου απαιτεί το ίδιο και συχνότερα ακόμη καθαρισμό με αντιστροφή της ροής (backwashing). Παρόλα αυτά αποτελεί μια εξαιρετική λύση για μικρές ή πειραματικές μονάδες με μεγάλες απαιτήσεις σε καθαρότητα νερού.

Η αρχή λειτουργίας του έγκειται στη δημιουργία στρώματος υλικών επάνω στον κατάλληλα διαμορφωμένο διάτρητο πυθμένα του κλειστού δοχείου (ή της ανοιχτής δεξαμενής), με το κάτω στρώμα πέτρες ποικίλης διαμέτρου και με στρώση ή στρώσεις πάνω από αυτές άμμου ποικίλης διαμέτρου, με την πιο χοντρόκοκκη κάτω και την πλέον λεπτή επιφανειακά. Τα φίλτρα άμμου (Σχήμα 44) δουλεύουν πάντοτε με

καθοδική ροή νερού, το οποίο διερχόμενο από το άνω στρώμα της λεπτής άμμου απαλλάσσεται από τα στερεά τα οποία παγιδεύονται σε αυτό το στρώμα.



Σχήμα 44. Φίλτρο άμμου ανοικτού τύπου χωρίς πίεση νερού. Τό άνω στρώμα είναι άμμος και το κάτω χαλίκια και πέτρες λειτουργούν ως απλό υπόβαθρο για την άμμο. Το φίλτρο αυτού του τύπου είναι μεγάλο σε όγκο και πολύ αποτελεσματικό στην κατακράτηση των στερεών αλλά η χρήση του περιορίζεται πλέον σε μονάδες επεξεργασία λυμάτων κατά τη φάση “εξενγενισμού” του νερού. Φράσσει εύκολα και δεν είναι τόσο πρακτικό για μονάδα κλειστού συστήματος.



Σχήμα 45. Μηχανικό φίλτρο άμμου τύπου “ταχείας άμμου” (rapid sand filter) καθοδικής ροής νερού. Λειτουργεί με ροή νερού υπό πίεση δημιουργούμενη από αντλία. Πολύ αποτελεσματικό στην κατακράτηση σωματιδίων, καθαρίζεται εύκολα με αντιστροφή της ροής μέσω κατάλληλων ενεργοποιούμενων βαλβίδων (βανών). Από εμπορική διαφήμιση διαδικτύου «alibaba.com» τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

Το νερό διέρχεται εύκολα διά μέσου των κατώτερων χοντρόκοκκων στρωμάτων, συλλέγεται στο βυθό και εξέρχεται στο σωλήνα εξόδου. Στην ουσία, τα κάτω αδρά στρώματα δεν είναι τίποτα άλλο παρά υπόστρωμα στήριξης του άνω λεπτόκοκκου στρώματος άμμου το οποίο επιτελεί όλο το φιλτράρισμα.

Στα **φίλτρα άμμου σε κλειστό δοχείο** δεν υπάρχουν διαφορετικών διαμέτρων κόκκων στρώματα άμμου παρά ένα μόνο μέγεθος υπολογισμένο να μην διαφεύγει από τους πόρους της διάτρητης “κρισάρας” στήριξης της μάζας της. Τα φίλτρα αυτά ονομάζονται **φίλτρα ταχείας άμμου** (rapid sand filter) (Σχήμα 45) και απαιτούν αντλία για να οδηγήσει με πίεση το νερό να διέλθει διαμέσου του στρώματος της άμμου.

7.6. Μηχανικά φίλτρα – Μικροπλεγματοκό φίλτρο (Microscreen filter)

Το μικροπλεγματοκό φίλτρο ή **κοσκινόφιλτρο** συνίσταται σε ένα περιστρεφόμενο «**τύμπανο**» (βαρέλι) το τοίχωμα του οποίου αποτελείται από ένα εύκαμπτο **πλέγμα** στερεωμένο στον κατάλληλο σκελετό. Το πλέγμα έχει πόρους 40-50 μm , είναι κατασκευασμένο από πλαστικό (σαν πλαγκτονικό δίχτυ) ή από μεταλλική σίτα (Σχήματα 46 & 48).

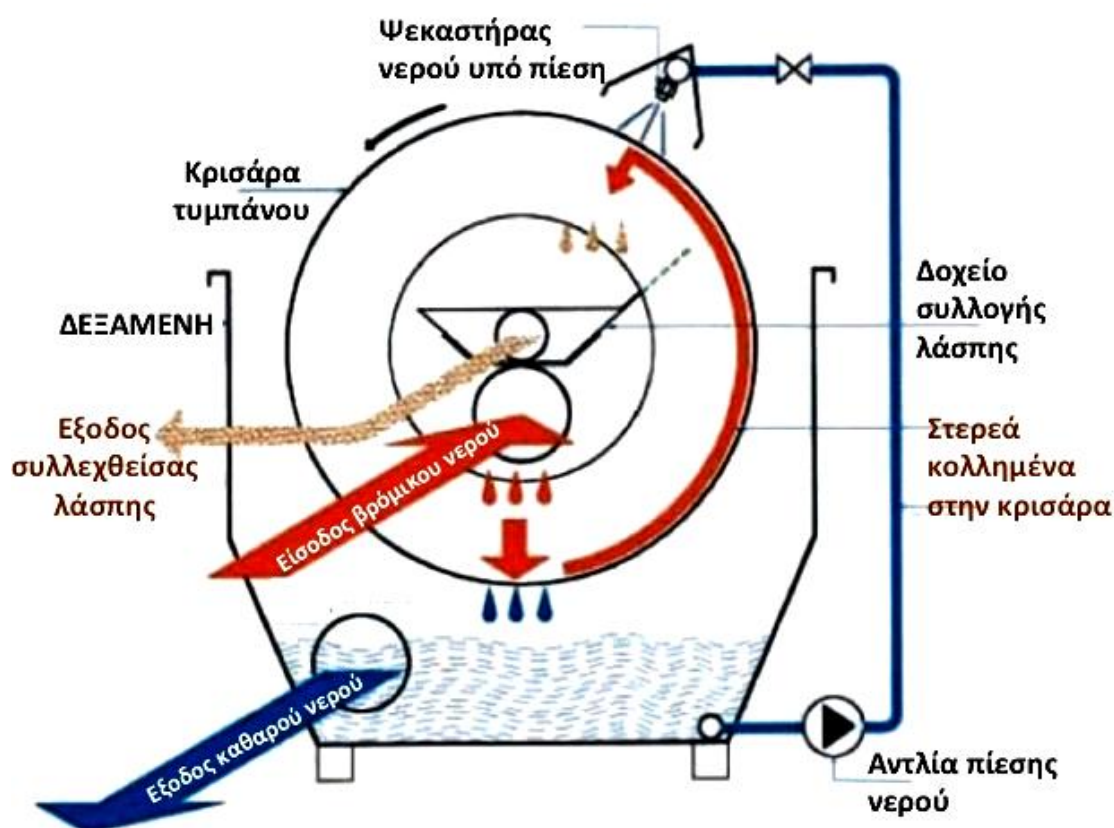


Σχήμα 46. Μηχανικά κοσκινόφιλτρα τύπου τυμπάνου (drum-filters, ή microscreen filters) σε σχετικά μικρά πρακτικά μεγέθη.

Το τύμπανο σε οριζόντια θέση είναι βυθισμένο κατά το ήμισυ στο νερό που λιμνάζει στην περιέχουσα την όλη κατασκευή ειδική δεξαμενή. Το προς κατεργασία νερό που μεταφέρει τα προς παρακράτηση στερεά απόβλητα, εισέρχεται με ειδική διαμόρφωση του σωλήνα εισόδου στο εσωτερικό του βαρελιού-πλέγματος οπότε αναγκαστικά θα εναποθέσει στο πλέγμα τα στερεά, ενώ το ίδιο θα διαπεράσει το πλέγμα και καθαρό πλέον θα λιμνάσει στην δεξαμενή και υπερχειλίζοντας θα εισέλθει στο σωλήνα εξόδου για να επανέλθει στην πορεία του για τις δεξαμενές

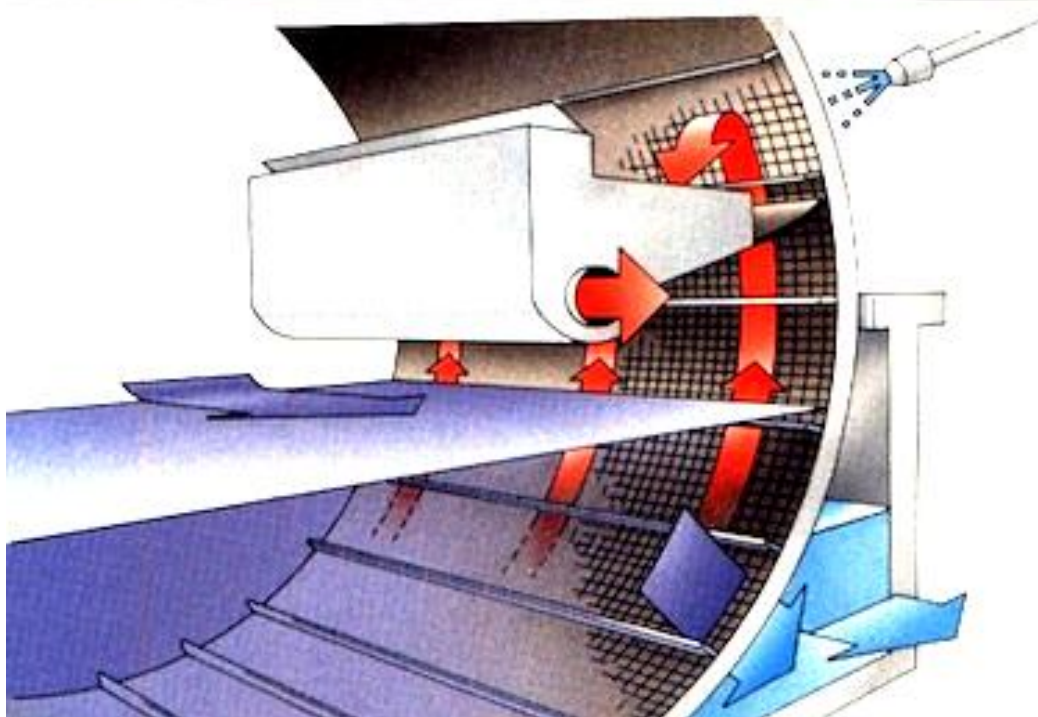
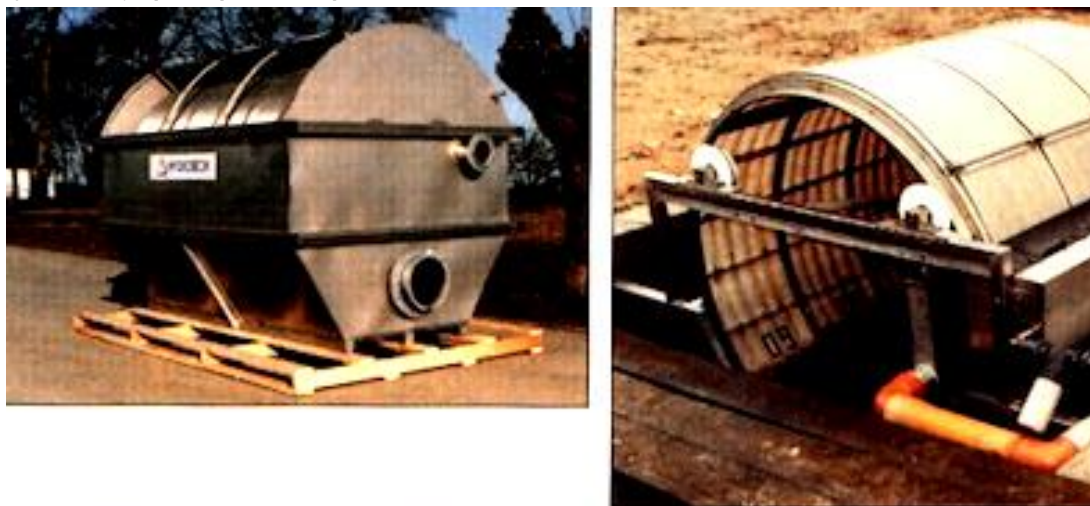
εκτροφής (αφού βέβαια περάσει και από άλλες συσκευές, οξυγόνωσης, βιολογικό φίλτρο κ.λπ.).

Τα συγκρατηθέντα στο πλέγμα στερεά με την περιστροφική κίνηση του τυμπάνου θα φθάσουν σε κάποιο σημείο όπου θα υπάρχει ψεκασμός νερού από αρκετά μπεκ στη σειρά, υπό πίεση επάνω στο πλέγμα. Τα στερεά θα ξεκολλήσουν και μαζί με το νερό που τα παρέσυρε θα μαζευτούν σε ένα επιμήκη συλλεκτήρα και από εκεί συνεχώς θα αποβάλλονται (Σχήματα 47 & 48). Συνεπώς θα υπάρχει συνεχώς με ένα τέτοιο φίλτρο ανάγκη παροχής νερού έστω και σε μικρή ποσότητα η οποία θα ξοδεύεται. Αυτό είναι μία από τις κύριες διαφορές του περιστρεφόμενου κοσκινόφιλτρου με τα φίλτρα χαντρών ή κόκκων στα οποία υπάρχει μόνο περιοδικώς ανάγκη για ξόδεμα νερού, τότε που γίνεται ο καθαρισμός τους με αντίστροφη ροή.



Σχήμα 47. Εγκάρσια τομή κοσκινόφιλτρου με επεξηγήσεις για το ρόλο που επιτελεί το κάθε συστατικό μέρος του. Η βάση της λειτουργίας του συνίσταται στο ότι καθώς το τύμπανο-σίτα περιστρέφεται το μεν νερό περνά από το πλέγμα ενώ τα στερεά που μεταφέρει παγιδεύονται στο εσωτερικό του τυμπάνου και όταν φτάνουν στον ψεκαστήρα νερού αποκολλώνται και πέφτουν στο δοχείο συλλογής ως λάσπη για να απορριφθούν κατόπιν ως βρόμικο υγρό. Από; SKE Solutions, <http://www.sk solutions.com/>, τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

Μια άλλη διαφορά μεταξύ των φίλτρων αυτών, είναι ότι το κοσκινόφιλτρο αποτελείται μόνο από μία στρώση, αυτή δηλαδή του πλέγματος αυτού καθαυτού η οποία φράσσει σχεδόν αμέσως. Γι' αυτό πρέπει να περιστρέφεται συνεχώς έτσι ώστε να καθαρίζεται συνεχώς στο σημείο ψεκασμού και να εισέρχεται στο νερό καθαρό, έτοιμο να ξανασυγκρατήσει στερεά.

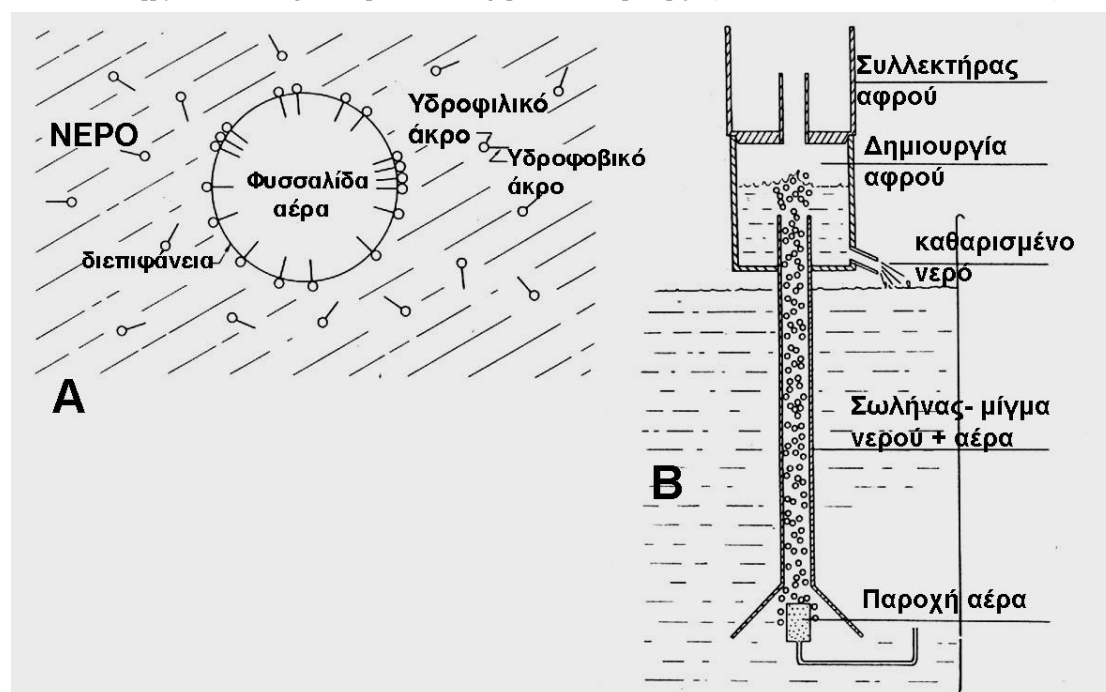


Σχήμα 48. Μεγάλα κοσκινόφιλτρα τύπου τυμπάνου (επάνω σειρά) και λεπτομέρεια (κάτω) του συστήματος ψεκασμού νερού υπό πίεση για αποκόλληση από τη σίτα των στερεών και συλλογή τους σε δοχείο από όπου μεταφέρονται για διάθεση αποβλήτων. **Ιώδες χρώμα**=νερό προς επεξεργασία, **μπλε χρώμα** = καθαρό νερό, **κόκκινο χρώμα**=βρόμικο νερό.

Με το μικροπλεγματικό φίλτρο (κοσκινόφιλτρο) συγκρατούνται στερεά όχι μεγαλύτερα των 40-50 μm και αυτό είναι αρκετό για τις περισσότερες ιχθυοκαλλιέργειες. Θα μπορούσε βέβαια το τύμπανο να επενδυθεί και με σίτα μικρότερων πόρων, αλλά τότε θα έφρασσε τόσο γρήγορα που θα εμπόδιζε το νερό να περάσει μέσα του.

Σήμερα το **μικροπλεγματικό φίλτρο περιστρεφόμενου τυμπάνου (Drum screen filter)** έχει σχεδόν την αποκλειστικότητα στα κλειστά συστήματα και είναι δημοφιλές λόγω της αξιοπιστίας του και της πρακτικότητάς του, έστω και αν απαιτεί ηλεκτρικό ρεύμα για να λειτουργεί τόσο το μοτέρ περιστροφής του τυμπάνου, όσο και η αντλία η οποία διοχετεύει συνεχώς νερό υπό πίεση στον ψεκαστήρα καθαρισμού.

7.7. Μηχανικά φίλτρα - Αφροποιητής (Foam fractionator)



Σχήμα 49. Διαγραμματική απεικόνιση της λειτουργίας του αφροποιητή. *A:* Τα διάφορα μακρομόρια στο νερό επειδή παρουσιάζουν διπολισμό με υδροφοβικό και υδροφιλικό άκρο διατάσσονται λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων με τον κατάλληλο τρόπο στη φυσαλίδα αέρα. *B:* Το μίγμα νερού-αέρα ανέρχεται στο σωλήνα και στην επιφάνεια εναποθέτει τη βρομιά που μετέφεραν οι φυσαλίδες κατά τη διαδρομή τους.

Με τον **αφροποιητή** μπορούν να αφαιρεθούν πολύ λεπτά στερεά $<30 \mu\text{m}$ καθώς και **κολλοειδή** μακρομόρια (λίπη, πρωτεΐνες). Η συσκευή αφροποίησης (Σχήματα 38 & 49) συνίσταται σε ένα σωλήνα όπου στο κάτω του μέρος εισέρχεται νερό και εγχύεται αέρας υπό τύπου μικρών φυσαλίδων (όσο πιο μικρές τόσο καλύτερα) και στην πορεία του «μίγματος» νερού-αέρα να εξέλθει από το άνω μέρος, καθώς οι

φυσαλίδες ανυψώνονται στη στήλη του νερού, παρασύρουν μαζί τους τα διάφορα μικροσωματίδια και μακρομόρια τα οποία απλώνονται στην επιφάνειά τους. Φθάνοντας στην επιφάνεια η κάθε φυσαλίδα «σκάει» και το φιλμ των οργανικών που μετέφερε απλώνεται στην επιφάνεια όπου σωρευτικά σχηματίζει ένα **βρόμικο αφρό** ο οποίος συλλέγεται με την κατάλληλη τοποθέτηση ενός δοχείου συλλογής. Μόλις το δοχείο αυτό γεμίσει με τη βρόμικη μάζα αυτών των οργανικών, αδειάζεται και ξανατοποθετείται. Εάν οι φυσαλίδες περιέχουν και αέριο όζον (O_3 -παραγόμενο από οξονιστήρες), ο καθαρισμός από τα οργανικά γίνεται πολύ αποτελεσματικότερος.

Από όλα τα συστήματα καθαρισμού του νερού, μόνο ο αφροποιητής μπορεί να το απαλλάξει από τέτοιους υπό κολλοειδή μορφή ρυπαντές κατεσπαρμένους στο νερό. Τα αποτελέσματα είναι ευεργετικά για το βιολογικό φίλτρο, τη μείωση της κατανάλωσης οξυγόνου και τη μείωση του μικροβιακού φορτίου όλου του συστήματος (τέτοιες ουσίες αποτελούν θρεπτικό υπόστρωμα για τους μικροοργανισμούς).

8. Βιολογικό φιλτράρισμα

8.1. Νιτροποίηση στο βιολογικό φίλτρο

Η νιτροποίηση είναι μια βιολογική διεργασία που συμβαίνει στη φύση και με την οποία ορισμένα γένη βακτηριδίων οξειδώνουν την ανηγμένη μορφή του αζώτου που είναι η αμμωνία (NH_3). Σε εφαρμογή από τον άνθρωπο αυτή η διεργασία εισήχθη στους βιολογικούς καθαρισμούς των αστικών λυμάτων, εκεί έγινε γνωστή και τελικώς ελαφρώς τροποποιημένη εφαρμόζεται στα κλειστά συστήματα ιχθυοκαλλιέργειών. Για να δουλέψει η νιτροποίηση απαιτούνται 4 πράγματα:

1. Αμμωνία, η οποία αποτελεί το καύσιμο και την πρωτεϊνούχα τροφή των βακτηριδίων.
2. Οξυγόνο με το οποίο τα βακτηρίδια θα οξειδώσουν την αμμωνία για να πάρουν ενέργεια.
3. pH ανώτερο του 7 κατάλληλο για τον αποτελεσματικό μεταβολισμό των βακτηριδίων.
4. Κατάλληλο υπόστρωμα επάνω στο οποίο τα βακτηρίδια θα αυξηθούν και θα φτάσουν σε μεγάλη πυκνότητα την οποία θα διατηρούν.

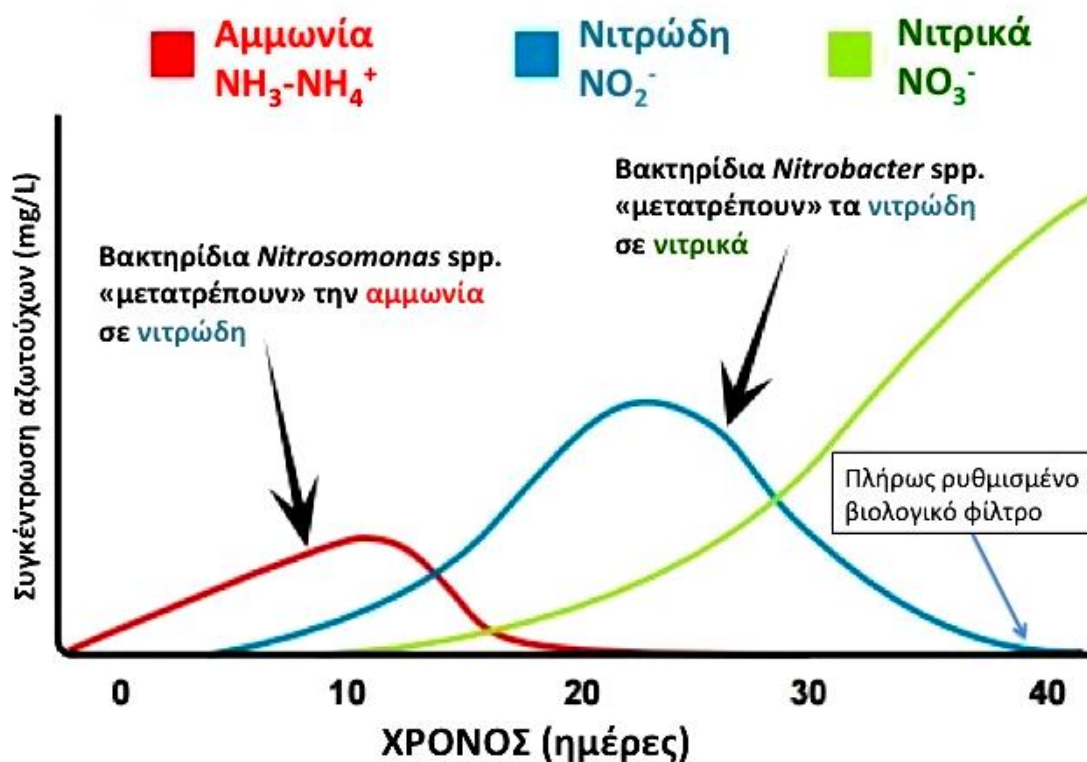
Απαξ και εγκατασταθεί η μέγιστη αποικία των νιτροποιητικών βακτηριδίων, η νιτροποίηση θα δρα στο κλειστό σύστημα χωρίς ανάγκη άλλων ενεργειών αρκεί οι 4 παραπάνω όροι να πληρούνται. Προσοχή χρειάζεται μόνο στο CO_2 που παράγεται στο σύστημα, καθώς με την αύξηση και πλήρη ένταση μεταβολισμού από τη νιτροποιητική αποικία, η παραγωγή του «εκτοξεύεται». Το CO_2 ως γνωστόν οξονοποιεί το νερό και σε συνδυασμό και με άλλα οργανικά οξέα που παράγονται από τα νιτροποιητικά βακτηρίδια, αντιδρούν με το σύστημα buffer του νερού «καταναλώνοντας» έτσι αλκαλικότητα. Η επίπτωση στο pH θα είναι έντονη και αν το pH πέσει κάτω από 7 θα μειωθεί έως και σταματήσει η νιτροποίηση, αυτό θα επιφέρει άνοδο της συγκέντρωσης της τοξικής αμμωνίας κ.ο.κ. Είναι απαραίτητο λοιπόν να παρακολουθείται η αλκαλικότητα του νερού και να μην αφήνεται να πέσει κάτω από 100 mg/L διορθώνοντάς τη με πρόσθεση όξινου ανθρακικού νατρίου (NaHCO_3). Η αποικία των νιτροποιητικών βακτηρίων υπόκειται και αυτή φυσικά στο νόμο της ζωής. Έτσι τα νεκρά βακτηριδιακά κύτταρα συσσωρεύονται στο στρώμα της μάζας της αποικίας που καλύπτει ως «φίλμ» τα αδρανή μέσα-υπόστρωμα του φίλτρου και κάποια στιγμή όταν φθάσουν σε κρίσιμη μάζα αποκολλώνται ως **συσσωμάτωμα νεκρής οργανικής ύλης** και είτε κυκλοφορούν στο νερό ως αιωρούμενα στερεά απόβλητα, είτε παγιδεύονται στα μεσοδιαστήματα των κόκκων του μέσου. Στη μεν πρώτη περίπτωση θα υποστούν την δεδομένη κατακράτηση, όπως και τα υπόλοιπα αιωρούμενα στερεά στο μηχανικό φίλτρο, στη δεύτερη περίπτωση όμως θα **φράσουν** προοδευτικώς έως

και φράζουν εντελώς τη δίοδο του νερού διαμέσου των κόκκων του φίλτρου. Σε αυτή την περίπτωση η νιτροποίηση θα εμποδιστεί και το βιολογικό φίλτρο πλέον χρειάζεται «απόφραξη». Αυτό γίνεται με ανάδευση των κόκκων είτε με αέρα είτε με αναδευτήρα με αποτέλεσμα την απελευθέρωση των νεκρών βακτηριδιακών μαζών και την απομάκρυνσή τους ως αιωρούμενα στερεά πλέον.

Ένα βιολογικό φίλτρο που έχει αναπτύξει πλήρως λειτουργικό πληθυσμό νιτροποιητικών βακτηριδίων (μέγιστος πληθυσμός, σταθερός έντονος μεταβολισμός), λειτουργεί **σταθερά** (steady state) και απαλλάσσει σχεδόν αμέσως το νερό από τη δημιουργούμενη αμμωνία. Εξυπακούεται βέβαια ότι μεταβολίζει τόση αμμωνία όση του επιτρέπει η δεδομένη δυναμικότητά του που περιορίζεται στα όρια χωρητικότητας σε επιφάνειες ανάπτυξης βακτηριδίων της όλης κατασκευής του φίλτρου (υπολογισμοί επ' αυτού στη συνέχεια). Αν για κάποιο λόγο τα βακτηρίδια στερηθούν την αμμωνία, π.χ. αφαίρεση των περισσότερων ψαριών από το σύστημα, άδειασμα και αποστείρωση του συστήματος, κ.λπ., τότε ο πληθυσμός τους θα λιμοκτονήσει και θα μειωθεί. Μετά από μια τέτοια εξέλιξη δεν είναι εύκολο να επαναλειτουργήσει αμέσως στην προηγούμενη δυναμικότητά του. Θα χρειαστεί αρκετό χρόνο για να αποκατασταθεί πάλι στο μέγιστο η βακτηριδιακή αποικία και εν τω μεταξύ η όποια αμμωνία εισέλθει στο σύστημα δεν θα μπορεί (ανάλογα βέβαια και με την ποσότητά της) να μεταβολιστεί σε νιτρικά. Συνεπώς και ως κανόνας, θα πρέπει να συνειδητοποιηθεί και εφαρμόζεται η μέθοδος της προοδευτικής εισαγωγής ψαριών στο σύστημα έτσι που να συμβαδίζει η ολοένα και περισσότερο παραγόμενη αμμωνία με το ρυθμό αύξησης της νιτροποιητικής βακτηριδιακής αποικίας. Διαφορετικά τα ψάρια θα εκτίθενται σε υπερβολικά μεγάλες συγκεντρώσεις αμμωνίας με αποτέλεσμα θνησιμότητα.

Τα παραπάνω ισχύουν σε απόλυτο βαθμό για ένα καθόλα καινούργιο και πρωτολειτουργούν κλειστό σύστημα όπου δεν υπάρχει καν βακτηριδιακή αποικία στο βιολογικό φίλτρο. Είναι η «κλασική» περίπτωση που αναφέρεται σε όλα τα σχετικά εγχειρίδια ως διαδικασία **ρύθμισης του φίλτρου** (conditioning of biological filter), κατά την οποία γίνεται σταδιακά με λίγα ψάρια κάθε φορά η φόρτιση του συστήματος. Τα νιτροποιητικά βακτηρίδια βρίσκονται σε κάθε είδους νερό και αρκεί να υπάρξει αμμωνία και στερεές επιφάνειες ως υπόστρωμα ανάπτυξής τους, για να αρχίσει η εγκατάσταση κάποιας αποικίας τους. Ενισχυτικώς, μπορεί να προστεθούν μικρές μάζες υποστρώματος (ως «σπορά») από ένα άλλο ώριμο φίλτρο, ή εμπορικά διαλύματα με έτοιμες καλλιέργειες τέτοιων βακτηριδίων. Συνεπώς ο ιχθυοκαλλιεργητής δεν έχει να κάνει τίποτα άλλο παρά να περιμένει. Αυτή η αναμονή απαιτεί αρκετό χρόνο (4-8 εβδομάδες) για να φτάσουν τα βακτηρίδια στο μέγιστο της απόδοσής τους. Εν τω μεταξύ οι μετρήσεις που γίνονται για αμμωνία-

νιτρώδη-νιτρικά θα αποδώσουν τυπικές καμπύλες μεταβολής αυτών των χημικών που θα μαρτυρούν έμμεσα την λειτουργική ικανότητα των νιτροποιητικών βακτηριδίων (Σχήμα 50). Σε ένα αρχικό στάδιο η αμμωνία θα κορυφωθεί σταδιακά, κατόπιν η συγκέντρωσή της θα ελαττώνεται ενώ θα αυξάνονται τα νιτρώδη και τέλος θα αρχίσουν να συσσωρεύονται τα νιτρικά ενώ αμμωνία και νιτρώδη θα διατηρούνται εφεξής σχεδόν μηδενικά. Η κατάσταση αυτή αντιπροσωπεύει μια βιολογική πραγματικότητα η οποία συνοπτικώς είναι η εξής: Πρώτα αναπτύσσονται τα βακτηρίδια του γένους *Nitrosomonas* τα οποία μεταβολίζουν την αμμωνία η ύπαρξη της οποίας τα προκαλεί να δράσουν έτσι. Βακτηρίδια του γένους *Nitrobacter* που να μεταβολίζουν τα νιτρώδη σε νιτρικά δεν μπορούν να υπάρξουν ακόμα σε μετρήσιμες ποσότητες, επειδή αφενός η πολύ αμμωνία αναστέλλει την αύξησή τους και αφετέρου και πολύ απλά δεν υπάρχουν αρκετά νιτρώδη. Μόνο μετά την πτώση της συγκέντρωσης της αμμωνίας και της ύπαρξης επάρκειας νιτρώδων θα μπορέσουν τα *Nitrobacter* να αυξηθούν και αυτά ικανοποιητικά.

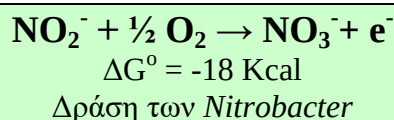
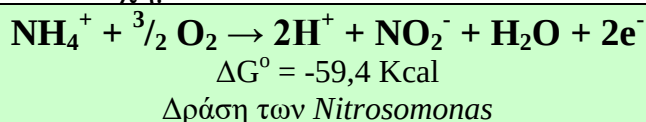


Σχήμα 50. Τυπική εικόνα μεταβολής των αζωτούχων ενώσεων στο νερό που επεξεργάζεται με βιολογικό φίλτρο.

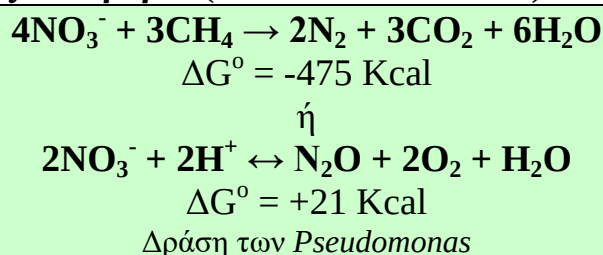
Σε ένα ρυθμισμένο βιολογικό φίλτρο δεν πρέπει κανονικά να υπάρχει μετρήσιμη αμμωνία (υπενθύμιση: όλα τα κιτ ανάλυσης μετρούν ολική αμμωνία). Ομως περιστασιακά και για πολύ λίγο θα υπάρχουν κορυφώσεις (spikes) αμμωνίας οι οποίες γρήγορα θα καταλαγιάζουν

«απορροφούμενες» από τα βακτηρίδια. Τέτοια περίπτωση είναι 2-3 ώρες μετά τα γεύματα των ψαριών, όταν η αμμωνία που παράγεται από το μεταβολισμό της τροφής κορυφώνεται.

Για να δράσει η νιτροποίηση απαιτείται οξυγόνο. Οι χημικές αντιδράσεις που εμπλέκονται στη νιτροποίηση χρησιμοποιούν οξυγόνο ως οξειδωτικό μέσο κατά το παρακάτω σχήμα:



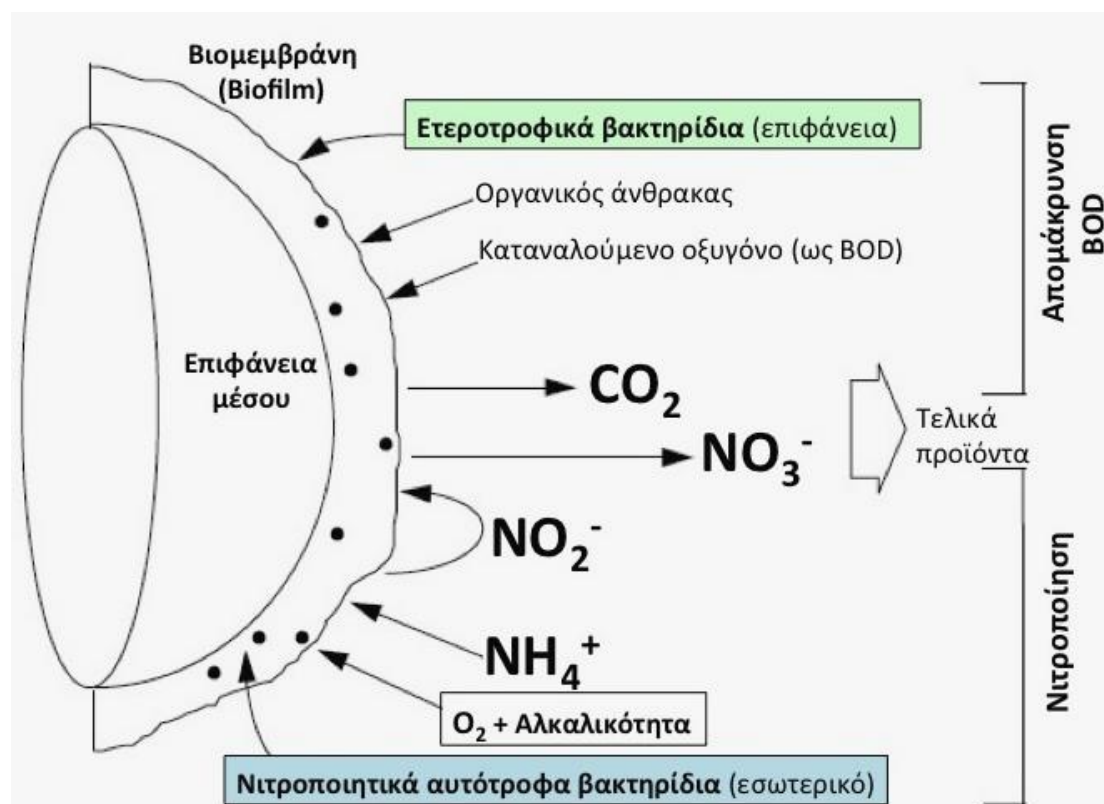
Τα αυτότροφα βακτηρίδια *Nitrosomonas* είναι **υποχρεωτικώς αερόβια** (obligate aerobes) ενώ τα αυτότροφα *Nitrobacter* δρουν μεν και αυτά αεροβίως αλλά είναι και **προαιρετικώς αναερόβια** (facultative anaerobes). Τα ετερότροφα *Pseudomonas* που πραγματοποιούν την απονιτροποίηση, δηλαδή τη μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο, είναι **υποχρεωτικώς αναερόβια** (facultative anaerobes).



Η επαρκής οξυγόνωση είναι προϋπόθεση υψίστης σημασίας για την ένταση της νιτροποίησης. Τα βιολογικά φίλτρα με την πυκνά δομημένη μάζα των αδρανών μέσων και της βακτηριδιακής αποικίας που αναπτύσσεται επάνω τους, δημιουργούν κυριολεκτικά ένα “διψασμένο” για οξυγόνο περιβάλλον. Υπάρχουν δύο τρόποι οξυγόνωσης ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του φίλτρου. Ο πρώτος τρόπος αφορά την περιοδική έκθεση των βιολογικών μέσων στον αέρα είτε μέσω της περιστροφής όλου του συστήματος έτσι που κάθε φορά το μισό να είναι βυθισμένο και το άλλο μισό, υγρό ακόμα να εκτίθεται στον αέρα, είτε μέσω του καταιονισμού του νερού επάνω στην επιφάνεια του φίλτρου με το νερό να διυλίζεται ανάμεσα στο πορώδες στρώμα των μέσων. Η συνολικώς τεράστια επιφάνεια της εκτεθειμένης υγρής αποικίας των βακτηριδίων, θα επιτύχει άριστη διάχυση του οξυγόνου στο βακτηριδιακό φιλμ. Ο δεύτερος τρόπος αφορά τα φίλτρα των οποίων τα μέσα είναι μονίμως βυθισμένα στο νερό και συνεπώς το απαιτούμενο οξυγόνο πρέπει να προσφέρεται από αυτό που μεταφέρει το νερό που τα διαβρέχει ρέοντας διαμέσου του φίλτρου. Ο πρώτος τρόπος αφορά τους **περιστρεφόμενους βιολογικούς αντιδραστήρες** (RBC-Rotating

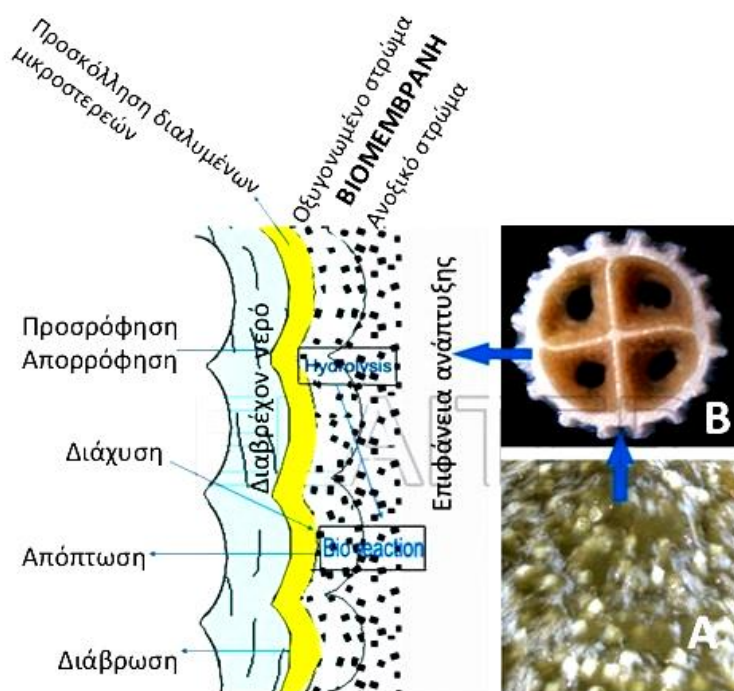
Biological Contactors) και τα **φίλτρα καταιονισμού** (Trickling Filters) και ο δεύτερος τα **φίλτρα βυθισμένων μέσων** (Submerged Media Filters). Προφανώς ο πρώτος τρόπος είναι συμφερότερος από ενεργειακή άποψη και συνάμα αποτελεσματικότερος, ενώ ο δεύτερος, αποτελεσματικός μεν και αυτός, αλλά με την ανάγκη για συνεχή επαγρύπνηση για αποφυγή αστοχιών στην οξυγόνωση.

Η ανάγκη για οξυγόνωση του βιολογικού φίλτρου δεν προκύπτει μόνο από την κάλυψη των αναπνευστικών αναγκών των αερόβιων βακτηριδίων αλλά και από τον ανταγωνισμό για αποικισμό του φίλτρου και από **αναερόβια ετερότροφα βακτηρίδια** τα οποία αν βρουν ευνοϊκές συνθήκες (έλλειψη οξυγόνου) θα πολλαπλασιαστούν και θα στερήσουν θέσεις ανάπτυξης στις επιφάνειες από τα αερόβια (Σχήμα 51). Βέβαια όσο οξυγόνο και αν υπάρχει, αυτό θα συμβαίνει σε κάποιο βαθμό, διότι στο στρώμα (φιλμ) των βακτηριδίων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των μέσων το άνω στρώμα θα αποτελείται από αερόβια νιτροποιητικά ενώ τα κατώτερα από αναερόβια τα οποία βέβαια θα επιτελούν και κάποιο βαθμό απονιτροποίησης (Σχήμα 52). Μια τέτοια κατάσταση δεν αποτελεί πρόβλημα διότι η ανάπτυξή τους σε ένα καλά οξυγονωμένο φίλτρο δεν τους επιτρέπει να επικρατήσουν.



Σχήμα 51. Αφαιρετική απεικόνιση των διαφόρων τύπων μικροοργανισμών, των πηγών ενέργειάς των και των προϊόντων του μεταβολισμού τους στη βιολογική μεμβράνη (βιομεμβράνη - Biofilm) που αναπτύσσεται στην επιφάνεια ενός κόκκου μέσου πλήρωσης ενός βιολογικού φίλτρου.

Ομως ακόμα και με καλή οξυγόνωση του φίλτρου θα υπάρχει πάντοτε ο **ανταγωνισμός** των αυτότροφων νιτροποιητικών βακτηριδίων με τα διάφορα **ετερότροφα** τα οποία θα χρησιμοποιούν το πλούσιο σε οργανικά νερό για να το μεταβολίζουν (Σχήμα 51) και να παράγουν CO_2 και φυσικά NH_3 . Ετσι λοιπόν, εκτός του ότι θα στερούν από τα νιτροποιητικά βακτηρίδια θέσεις αποικισμού, θα επιβαρύνουν το σύστημα με καινούργιο διοξείδιο και καινούργια αμμωνία. Η λύση είναι να στερηθούν στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό την τροφή τους (οργανικός άνθρακας) και αυτό γίνεται μόνο με ένα καλό σύστημα καθαρισμού των στερεών αποβλήτων (οργανική μάζα) στα μηχανικά φίλτρα και τους αφροποιητές.



Σχήμα 52. *A.* Πλαστικά μέσα σε ένα βιολογικό φίλτρο. *B.* Εικόνα ενός πλαστικού μέσου με ανάπτυξη στην επιφάνειά του βιομεμβράνης. *Γ.* Αφαιρετική απεικόνιση τομής βιομεμβράνης. Εταιρία ELAITER από ιστότοπο: Alibaba.com, τροποπ. Γ. Χώτος

Από ενεργειακής απόψεως συγκεράζοντας ερευνητικά ευρήματα, μπορούν να δοθούν οι παρακάτω ενεργειακές σχέσεις σχετικά με την κατανάλωση – παραγωγή των νιτροποιητικών βακτηριδίων για τις μεταβολικές τους ενώσεις.

Για κάθε 1 mg αμμωνίας (ως TAN) που οξειδώνεται-καταναλώνεται:

Καταναλώνονται: 4,5 mg O_2

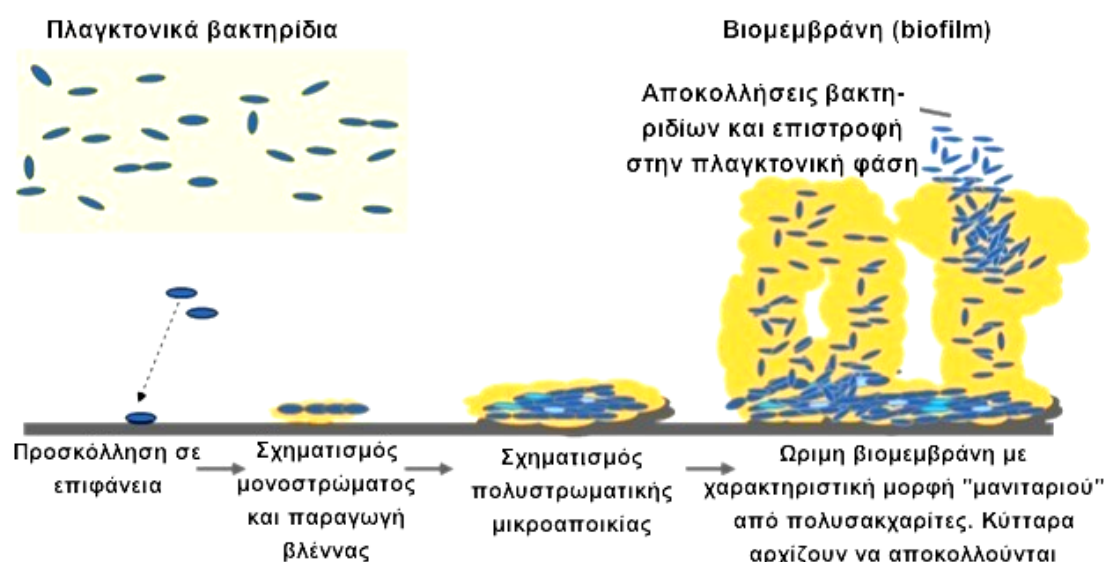
Παράγονται: 6 mg CO_2

Παραγωγή CO_2 από νιτροποίηση: ~ 37% του όλου CO_2 του συστήματος

Επειδή η νιτροποιητική δραστηριότητα παράγει πολύ CO_2 , ο αερισμός του νερού είτε μόνος του είτε συνδυασμένος με αφροποιητή, πρέπει να γίνεται σε σημείο μετά το βιολογικό φίλτρο για να διευκολύνει τη διάχυση του CO_2 στην ατμόσφαιρα και να μην το μεταφέρει στις δεξαμενές των ψαριών.

Ένα βιολογικό φίλτρο είναι στην ουσία ένας κατάλληλα διαρρυθμισμένος χώρος-δοχείο μέσα στο οποίο στοιβάζονται στον μέγιστο δυνατό βαθμό αδρανή υλικά που η επιφάνειά τους θα χρησιμοποιηθεί ως πεδίο αποικισμού και ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηριδίων.

Σε κάθε επιφάνεια τόσο τα νιτροποιητικά όσο και ένα πλήθος άλλων βακτηριδίων που βρίσκονται σε πλαγκτονική κατάσταση στο νερό θα προσκολληθούν αρχικά σε αυτή. Κατόπιν θα πολλαπλασιαστούν και ο αρχικός πυρήνας της αποικίας που δημιουργήθηκε θα αρχίσει να μεγαλώνει. Μαζί με παραγόμενες ουσίες από το μεταβολισμό τους οι οποίες συσσωρεύονται εξωκυτταρικά ανάμεσά τους (κυρίως πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, λίπη κ.λπ.) υπό μορφή βλέννας, η αποικία «στερεώνεται» γίνεται συμπαγής και διογκώνεται. Σχηματίζει αυτό που ονομάζεται **βιομεμβράνη (biofilm)**. Όταν μεγαλώσει («παχύνει») αρκετά θα «ξεκολλούν» τμήματά της ως οργανική ρυπαντική ύλη μαζί και με βακτηρίδια που πλεονάζουν τα οποία θα ξαναγυρίσουν έτσι στην πλαγκτονική τους κατάσταση (Σχήμα 53).



Σχήμα 53. Αφαιρετική εικονοποιημένη διαδικασία σταδιακής δημιουργίας αποικίας βακτηριδίων υπό μορφή βιομεμβράνης (biofilm) σε επιφάνεια, <http://medcraveonline.com/JMEN/>, τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

Στην πραγματικότητα τα νιτροποιητικά βακτηρίδια θα αναπτυχθούν σε κάθε είδους επιφάνεια μέσα στο νερό του κλειστού συστήματος, δηλαδή στις επιφάνειες των σωληνώσεων, της δεξαμενής, των γραμμών παροχής αέρα, των ψαριών, των αιωρούμενων στερεών, στα μηχανικά φίλτρα, παντού όπου υπάρχει νερό με ποσότητα αμμωνίας. Όμως όλες αυτές οι επιφάνειες θεωρητικώς αθροιζόμενες, δεν επαρκούν για μια αποτελεσματική νιτροποίηση. Την έλλειψη αυτή την καλύπτουν τα υλικά πλήρωσης του φίλτρου τα οποία υπό μορφή «κόκκων» προσφέρουν

συνολικά πολύ μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με τον όγκο που καταλαμβάνουν. Η παράμετρος «ειδική επιφάνεια» (SSA-Specific Surface Area) εκφραζόμενη σε m^2/m^3 αντιπροσωπεύει ακριβώς αυτό, δηλαδή το πόση συνολικά επιφάνεια προσφέρεται από ένα υλικό σώμα (αν θεωρητικώς απλωθεί) σε σχέση με τον όγκο που καταλαμβάνει όταν συσσωρευτεί σε δοχείο ενός κυβικού μέτρου.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών μέσων πλήρωσης του βιολογικού φίλτρου με πιο κοινά τα πλαστικά (Σχήμα 54) και τα πετρώδη ως προς το υλικό, σφαιρικά ή γωνιώδη ως προς το σχήμα, ανάγλυφα και αναδιπλωμένα ή λεία ως προς την επιφάνεια και (το σημαντικότερο), με μικρή ή μεγάλη ειδική επιφάνεια. Και είναι ακριβώς η ειδική επιφάνεια του μέσου πλήρωσης που θα καθορίσει και τη δυναμικότητα του φίλτρου. Υπάρχουν υλικά όπως τα βότσαλα που έχουν ειδική επιφάνεια $<100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ και άλλα όπως η άμμος με ειδική επιφάνεια $>2000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Προφανώς η άμμος είναι πολύ καλύτερο υλικό πλήρωσης αλλά οι κόκκοι της είναι τόσο κοντά ο ένας με τον άλλο που αφήνουν ελάχιστο κενό για να διέρχεται το νερό στο παχύ στρώμα που θα δημιουργήσουν. Επιπροσθέτως η βακτηριδιακή αποικία που θα καλύψει προοδευτικά την επιφάνεια των κόκκων της θα κάνει ακόμα πιο δύσκολη τη διέλευση του νερού. Εάν λοιπόν χρησιμοποιηθεί άμμος για το βιολογικό φίλτρο, θα πρέπει το νερό να έχει καθαριστεί πρώτα πολύ καλά από τα μηχανικά φίλτρα για να έχει απαλλαγεί από τα στερεά στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Προφανώς υπάρχουν κάποια όρια στη δυνατότητα χρησιμοποίησης τέτοιων λεπτόκοκκων υλικών διότι μπορεί να κερδίζουμε σε νιτροποίηση όμως χάνουμε σε υδραυλική “δύναμη” και επιπλέον κινδυνεύουμε να δημιουργηθούν νεκρές ζώνες σε φραγμένα τμήματα του αμμώδους στρώματος όπου θα επικρατήσουν αναερόβιες συνθήκες με απρόβλεπτες επιπτώσεις. Η λύση είναι ο συμβιβασμός απαιτήσεων-δυνατοτήτων και πρακτικά σήμερα χρησιμοποιούνται πλαστικά σφαιρίδια ως μέσα πλήρωσης με ειδική επιφάνεια $200-300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ τιμή ικανοποιητική και επαρκής για μια αποτελεσματική νιτροποίηση και εύκολη διέλευση του νερού διά μέσου αυτών των υλικών πλήρωσης του φίλτρου.



Σχήμα 54.

Πλαστικά μέσα πλήρωσης βιολογικών φίλτρων σε διάφορα σχήματα. Η μεγάλη επιφάνεια (ειδική επιφάνεια μέσων-SSA), που προσφέρουν για τον όγκο που καταλαμβάνουν, επιτρέπει μια μεγάλη ανάπτυξη της βιομεμβράνης (biofilm) των βακτηριδίων. Συνάμα αφήνουν και επαρκή κενά για να διέρχεται το νερό.

8.2. Βιολογικά φίλτρα «βρεγμένα» (Wet Biofilters)

8.2.1. Περιστρεφόμενοι Βιολογικοί Αντιδραστήρες (RBC)

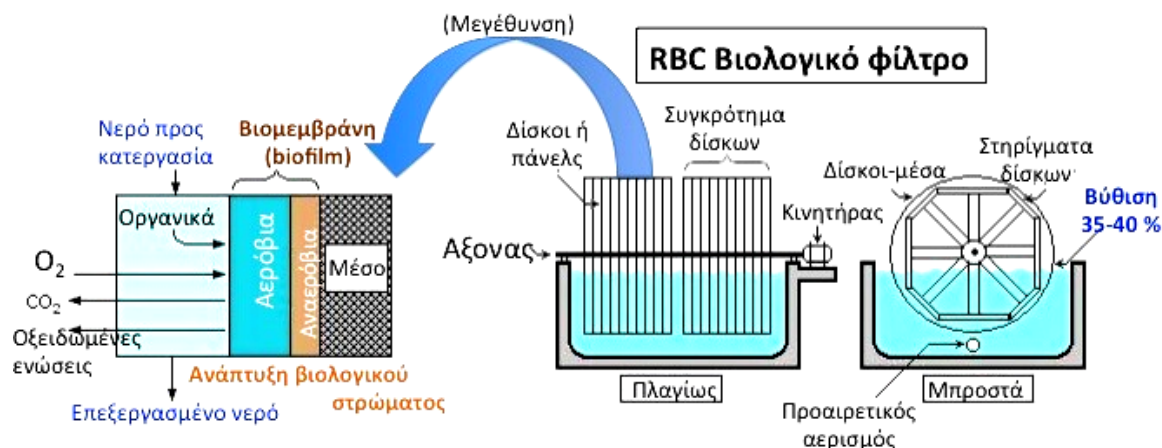
Οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί αντιδραστήρες (RBC-Rotating Biological Contactors) αποτελούνται από πυκνά τοποθετημένους ομόκεντρους άκαμπτους δίσκους κατασκευασμένους από ελαφρά (αλλά στιβαρά) ποικίλα αδρανή υλικά, οι οποίοι περιστρέφονται κινούμενοι από τον κεντρικό άξονα που τους συγκρατεί. Ανάμεσα στους δίσκους υπάρχει μικρό κενό. Ενίοτε απαντούν και ως διάτρητα περιστρεφόμενα τύμπανα γεμάτα με αδρανή πλαστικά υλικά διαφόρων διαμορφώσεων (χάντρες ή πλαστικά μπλοκ). Είναι περί το 35-45 % βυθισμένοι στο νερό και περιστρέφονται πολύ αργά με 1 περιστροφή περίπου ανά λεπτό (1 rpm). Οι δίσκοι ή τα μέσα πλήρωσης των τυμπάνων θα αποικισθούν από τα βακτηρίδια και θα λειτουργούν ως νιτροποιητικό υπόστρωμα βακτηριδίων (Σχήμα 55). Όταν βρίσκονται μέσα στο νερό τα βακτηρίδια προσλαμβάνουν την αμμωνία και όταν εκτίθενται στον αέρα προσλαμβάνουν οξυγόνο το οποίο εύκολα διαχέεται στην υγρή βακτηριδιακή μεμβράνη.

Τα RBC φίλτρα κυκλοφορούν σε πολλές εκδόσεις και διαμορφώσεις (Σχήμα 56). Οι δίσκοι στον άξονα μπορεί να είναι λίγοι ή πολλοί, μικρής ή μεγάλης διαμέτρου, πυκνά ή πιο αραιά τοποθετημένοι μεταξύ τους και με ποικίλη ειδική επιφάνεια του ανάγλυφου της επιφάνειάς των. Ανάγλυφο σημαίνει ότι δεν πρόκειται για λειασμένους δίσκους αλλά για δίσκους με αδρή επιφάνεια έτσι που να μεγιστοποιεί την έκταση της αποικίας των βακτηριδίων που θα αναπτυχθούν εκεί. Τα υλικά πλήρωσης του τυμπάνου μπορεί πάλι να είναι όπως προαναφέρθηκε ποικίλου σχήματος και διαμορφώσεως πλαστικά μέσα και κυκλοφορούν σήμερα στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία.

Η ανάπτυξη των βακτηριδίων όταν φθάσει στο μέγιστο, θα προσθέσει πολύ μάζα στους δίσκους και η όλη κατασκευή θα βαρύνει. Επειδή πρόκειται για κατασκευή που περιστρέφεται οδηγούμενη από ηλεκτρικό κινητήρα, αυτό σημαίνει μεγαλύτερη αντίσταση την οποία θα πρέπει να αντέχει το μοτέρ. Εκτός αυτού και από μηχανική άποψη, η όλη κατασκευή με έμφαση στον κεντρικό άξονα, θα πρέπει να είναι στιβαρή υπολογισμένη να αντέχει το μέγιστο του φορτίου.

Τα RBC φίλτρα μπορούν να τοποθετηθούν και ως ατομικές μικρές μονάδες νιτροποίησης και μέσα στις δεξαμενές εκτροφής. Συνήθως αυτό συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται μεγάλες δεξαμενές εκτροφής και ενώ είναι πρακτικό, έχει το μειονέκτημα ότι θα χρειάζεται ένα φίλτρο για κάθε δεξαμενή και αυτό σημαίνει από ένα μοτέρ για το καθένα με προφανείς επιπτώσεις στην κατανάλωση ρεύματος. Εναλλακτικώς έχουν αναπτυχθεί σήμερα και επιπλέοντα στο νερό RBC φίλτρα τα οποία περιστρέφουν τον άξονα με ειδική διαμόρφωση παροχής αέρα (αεροπεριστρεφόμενα), κάτι που μειώνει την κατανάλωση ρεύματος

επειδή χρησιμοποιεί την ήδη υπάρχουσα γραμμή παροχής αέρα του συστήματος εκτροφής.



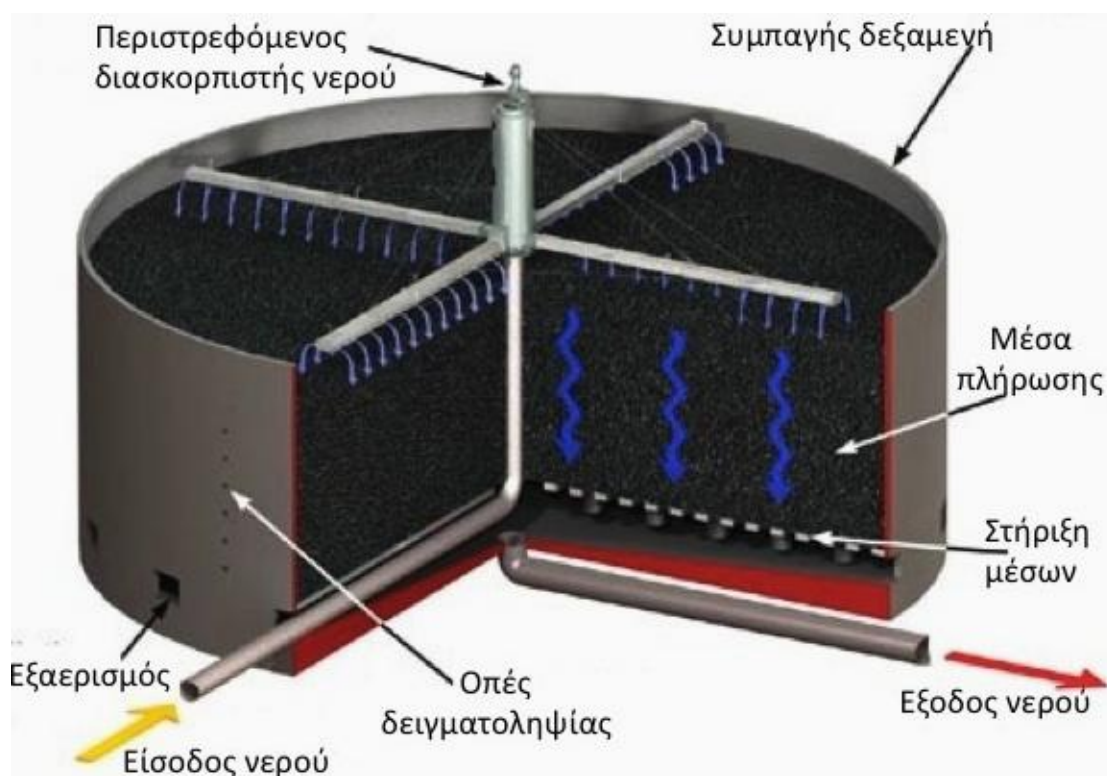
Σχήμα 55. Περιστρεφόμενος Βιολογικός Αντιδραστήρας (RBC) σε τομή κατά μήκος και εγκάρσιως και απεικόνιση της βιομεμβράνης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια των περιστρεφόμενων δίσκων, <http://www.thewatertreatments.com/> τροποποιημένο από Γ. Χώτο.



Σχήμα 56. Μηχανικά φίλτρα τύπου RBC. Α, Β, Γ & Δ: φωτογραφίες τους. Ε: Λειτουργική τομή. ΣΤ: Πυκνά τοποθετημένοι δίσκοι. Ζ: Επιφάνεια δίσκου με πλήρως αναπτυγμένη βιομεμβράνη. (Κολάζ από το διαδίκτυο).

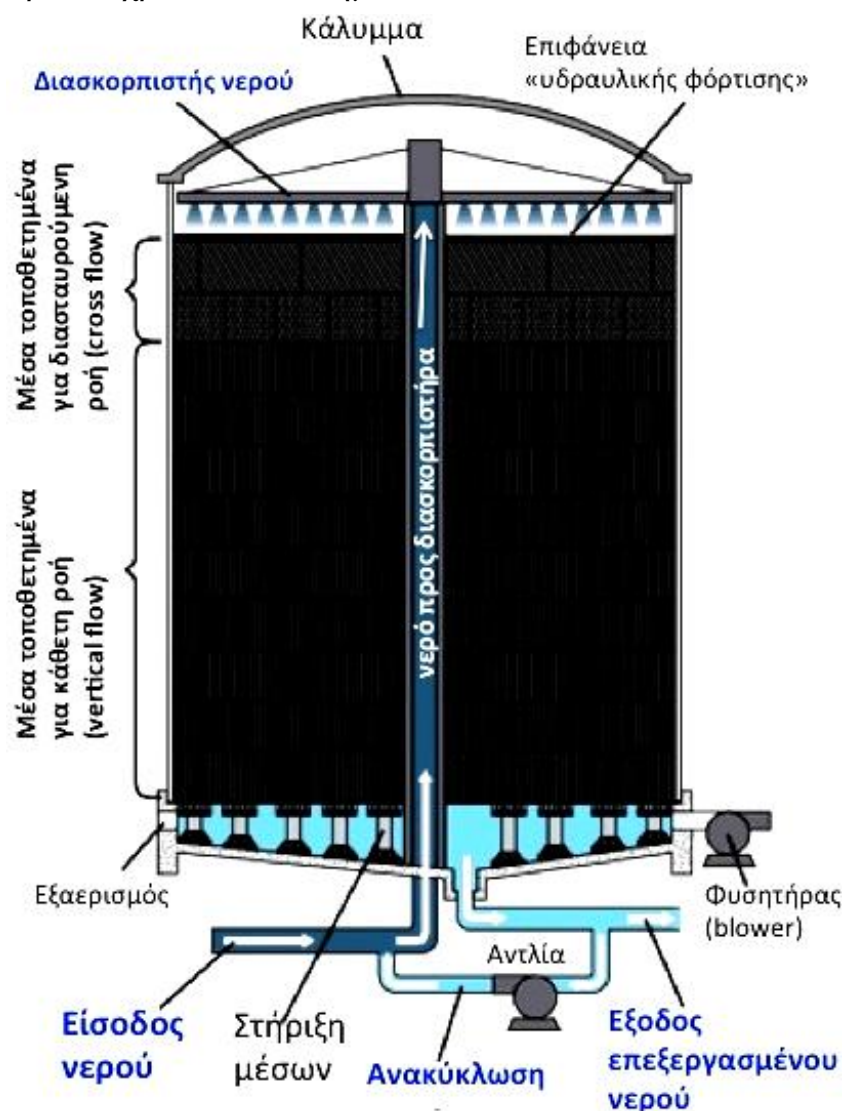
8.2.2. Φίλτρα καταιονισμού (Trickling Filters)

Πρόκειται για την πλέον συνήθη και δοκιμασμένη λύση στα επεξεργαζόμενα νερά (βιολογικοί καθαρισμοί). Στα κλειστά συστήματα αποτελεί μια αξιόπιστη λύση η οποία σπανίως προκαλεί προβλήματα καθώς είναι απλή, δεν έχει κινούμενα μέρη, δεν καταναλώνει πολύ ενέργεια, οξυγονώνεται από τον αέρα και μπορεί εύκολα να ελεγχθεί οπτικώς. Πρόκειται για ένα δοχείο συνήθως κυλινδρικού σχήματος γεμάτο με αδρανή υλικά ποικίλης διαμόρφωσης τα οποία δεν αναδεύονται. Όλη η μάζα των υλικών διαβρέχεται από νερό που διαμοιράζεται – ψεκάζεται στην κορυφή του κυλίνδρου από διάτρητους περιστρεφόμενους βραχίονες (Σχήματα 57, 58 & 59). Η μάζα του νερού γλιστρά και διαβρέχει την επιφάνεια των μέσων διυλιζόμενη ανάμεσα στα κενά τους και συλλέγεται στο κάτω μέρος σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο – συλλεκτήρα. Από εκεί με τη βαρύτητα (συνήθως το βιολογικό φίλτρο τοποθετείται στο υψηλότερο σημείο της μονάδας) επιστρέφει στις δεξαμενές εκτροφής. Τα μέσα πλήρωσης διατηρούνται υγρά με το νερό που κυλά επάνω τους και αναπτύσσουν τη βιολογική μεμβράνη της αποικίας των νιτροποιητικών βακτηριδίων και καθώς είναι εκτεθειμένα και στον αέρα λαμβάνουν πάντοτε επαρκή ποσότητα οξυγόνου.



Σχήμα 57. Εικονοποιημένη αποτύπωση τομής ενός βιολογικού φίλτρου καταιονισμού (trickling filter). Τροποποιημένο από Γ. Χώτο του διαδικτυακού: <http://www.dbsmfq.com/rotarydistributors.html>

Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν είναι η φραγή τους όταν η υπερβολική βιολογική μάζα τείνει να κλείσει τα κενά ανάμεσα στα μέσα εμποδίζοντας έτσι τη ροή του νερού. Ένα καλά σχεδιασμένο φίλτρο αρκετά πορώδες δεν θα αφήσει κάτι τέτοιο να συμβεί και μέχρι να αυτοαπορριφθεί η μάζα της βιολογικής μεμβράνης όταν φθάσει στο μέγιστο της ανάπτυξής της (και κατόπιν να παρασυρθεί από το νερό στο συλλεκτήρα), δεν θα εμποδιστεί η κίνηση του νερού. Για αυτό ακριβώς το λόγο δεν χρησιμοποιούνται στο φίλτρο καταιονισμού υλικά λεπτόκοκκα όπως η άμμος η οποία μπορεί μεν να δίδει εξαιρετικά μεγάλη ειδική επιφάνεια, αλλά στομώνει πολύ γρήγορα και δύσκολα καθαρίζεται σε ένα τέτοιο φίλτρο χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του για αρκετό χρονικό διάστημα.

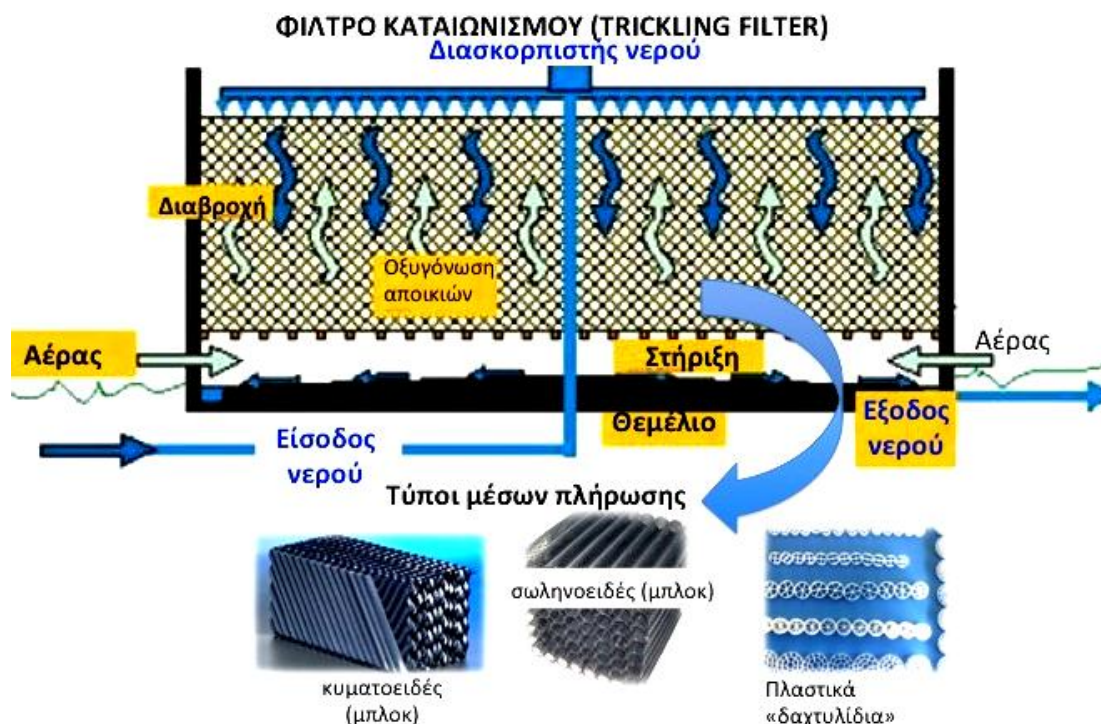


Σχήμα 58.
Εικονοποιημένη
αποτύπωση
τομής
βιολογικού
φίλτρου
καταιονισμού. Η
μακρά διαδρομή
του νερού προς
τα κάτω
διαβρέχει
αποτελεσματικά
την επιφάνεια
των υλικών
πλήρωσης με
αποτέλεσμα
καλή
νιτροποίηση,
DAS Group, Inc.

<http://www.dasgroupinc.com/>, τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

Ως υλικά πλήρωσης προτιμώνται πλαστικά μέσα με ειδική επιφάνεια περί τα $200-300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ συνήθως ως μπλοκ κυματοειδών φύλλων (Σχήμα 59) και ενίοτε υπό μορφή σφαιριδίων.

Ένα μειονέκτημα που έχουν τα φίλτρα καταιονισμού (πολύ περισσότερο από τα RBC) είναι ότι το νερό εκτεθειμένο στον αέρα σε μεγάλο βαθμό (Σχήμα 59) τείνει να αποκτήσει και τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Η τάση αυτή είναι αντίθετη με την όλη τεχνική-προσπάθεια που καταβλήθηκε στη μονάδα να ρυθμιστεί η θερμοκρασία του νερού στα επιθυμητά επίπεδα (με θέρμανση ή ψύξη).



Σχήμα 59. Βιολογικό φίλτρο καταιονισμού σε εικονοποιημένη αποτύπωση όπου φαίνεται η καλή οξυγόνωση από τις ανοδικές μάζες αέρα (άνω εικόνα). Διάφοροι τύποι πλαστικών μέσων πλήρωσης (κάτω σειρά). Από: <https://www.pollutionsolutions-online.com/>, τροποπ. από Γ. Χώτο.

8.3. Βιολογικά φίλτρα βυθισμένα (Submerged Filters)

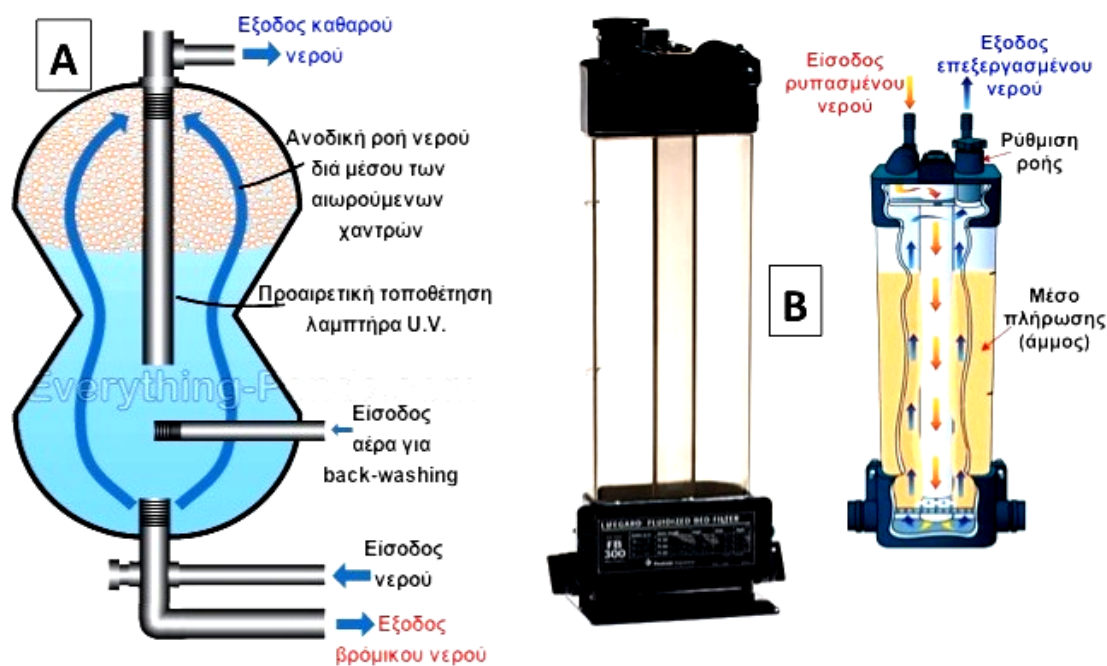
Όλα τα βιολογικά φίλτρα της κατηγορίας του “βυθισμένου” (στο νερό) απαιτούν μέριμνα οξυγόνωσης, έτσι που να διασφαλιστεί ότι το νερό που διαβρέχει τα μέσα πλήρωσής των περιέχει αρκετό οξυγόνο για να καλύψει τις αναπνευστικές ανάγκες των νιτροποιητικών βακτηριδίων. Συνεπώς η επάρκεια σε οξυγόνο είναι άμεση προτεραιότητα και δεν επιτρέπει αμέλειες.

Το πως θα διασφαλιστεί αυτή η επάρκεια είναι κάτι που επιτυγχάνεται είτε έμμεσα είτε άμεσα. Έμμεσα κατά την έννοια ότι το νερό πριν εισέλθει στο βιολογικό φίλτρο είχε ήδη πολύ οξυγόνο, τόσο που παρ’ όλη την αναπνοή των ψαριών που προηγήθηκε όταν φθάσει στο

βιολογικό φίλτρο περιέχει ακόμα αρκετό (>6 mg/L). Αμεσα κατά την έννοια ότι προστίθεται οξυγόνο (συνήθως καθαρό) στο νερό πριν εισέλθει στο φίλτρο ή κατά τη διάρκεια που είναι μέσα στο φίλτρο (όχι και τόσο πρακτικό).

8.3.1. Βυθισμένα φίλτρα κινούμενης κλίνης (Moving Bed Filters)

Τα φίλτρα αυτού του τύπου είναι παρόμοια με τα φίλτρα χαντρών ή άμμου που αναφέρθηκαν στην μηχανική επεξεργασία του νερού. Ο όρος «κινούμενης» σημαίνει ότι στο δοχείο όπου περιέχονται τα διάφορα μέσα του φίλτρου (άμμος ή πλαστικές χάντρες) η ροή του νερού από κάτω προς τα επάνω τα διατηρεί σε ένα είδος ελεγχόμενης αιώρησης (Σχήμα 60). Και είναι ακριβώς αυτή η αιώρηση η οποία επιτυγχάνεται με την κατάλληλη ροή νερού, που αποτελεί το πιο δύσκολο μέρος στην λειτουργία τους.

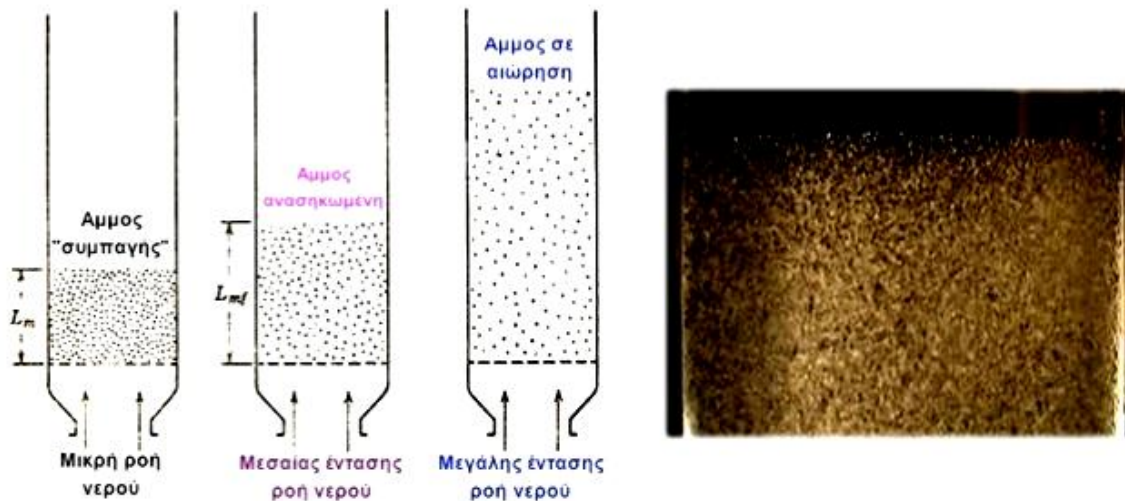


Σχήμα 60. *A*: Φίλτρο κινούμενης κλίνης σε δοχείο με στένωση στη μέση. *B*: Η κίνηση του νερού σε ένα φίλτρο κινούμενης κλίνης τύπου «στήλης». <http://www.everything-ponds.com/>, <http://www.captivereefs.com/forum/hardware/fluidized-sand-bed-filter-4227/#.WIIt-CN95aQ>, τροποποιημένα από Γ. Χώτο.

Η άμμος ως υλικό πλήρωσης αποτελεί εξαιρετική επιλογή τόσο για την πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια που προσφέρει (~ 2000 m²/m³) όσο και για τις παγιδευτικές της ικανότητες στα διερχόμενα μέσα από το στρώμα της στερεά. Και μπορεί μεν η παγίδευση των στερεών να αποτελεί μειονέκτημα για ένα βιολογικό φίλτρο, καθώς το φράσσει γρήγορα εμποδίζοντάς το πλέον να επιτελέσει το σκοπό του που είναι η αφαίρεση

της αμμωνίας από το συνεχώς διερχόμενο νερό, όμως η πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια κυριολεκτικά «εκτοξεύει» την νιτροποιητική δυναμικότητα.

Η λύση βρίσκεται στην **αιώρηση της άμμου** επειδή και η ανάπτυξη των βακτηριδιακών μεμβρανών (βιοφίλμ) επάνω στους κόκκους της άμμου θα επιτευχθεί, και η υπερβολική ανάπτυξη των αποικιών θα αυτορυθμίζεται μόνη της, με την περίσσεια των βιολογικών μεμβρανών που αποκολλώνται με το τρίψιμο των κόκκων να παρασύρονται από το εκρέον νερό (είναι πιο ελαφρά από την αιωρούμενη άμμο και απομακρύνονται με το νερό εξόδου). Ένα τέτοιο φίλτρο κινούμενης άμμου ονομάζεται **φίλτρο ρευστοποιημένης κλίνης** (fluidized bed filter) και χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο σε καλά μελετημένες μονάδες διότι συνδυάζει οικονομία χώρου και μέγιστη νιτροποίηση. Η άμμος βρίσκεται καταλλήλως περιορισμένη σε ένα κυλινδρικό ψηλό δοχείο, στο οποίο η είσοδος του νερού με αντλία στο κάτω μέρος γίνεται με κατάλληλη πίεση, έτσι που η άμμος να βρίσκεται σε συνεχή αιώρηση τέτοια που να μην εξέρχεται από το άνω μέρος όπου υπάρχει το στόμιο εξόδου του νερού (Σχήμα 61). Φυσικά στο κάτω μέρος υπάρχει βάνα ρύθμισης για να κανονίζει τη ροή του νερού και επιπλέον το όλο κυλινδρικό δοχείο (ή έστω το άνω μέρος του) μπορεί να είναι διαφανές για να ελέγχεται οπτικώς η αιώρηση της άμμου.



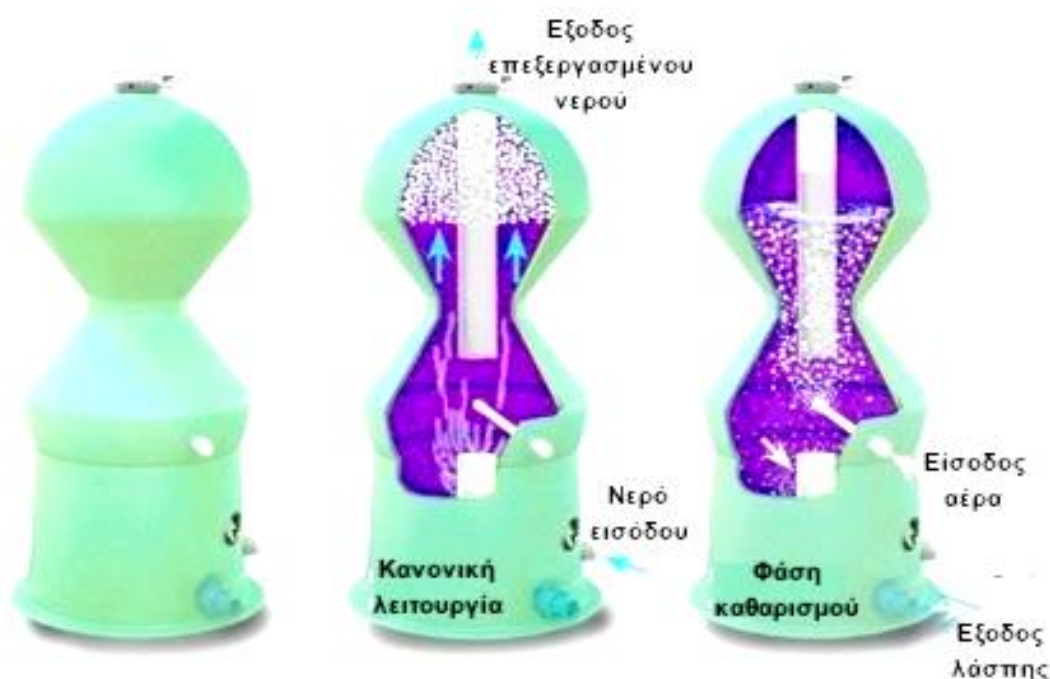
Σχήμα 61. Αριστερά: Η μεταβολή του στρώματος της άμμου μέσα στο φίλτρο τύπου «ρευστοποιημένης κλίνης» ανάλογα με την ένταση της ροής του νερού. Δεξιά: Εικόνα που παρουσιάζει το στρώμα της άμμου.

8.3.2. Βυθισμένα φίλτρα αιωρούμενων χαντρώων (Suspended Bead Filters)

Πρόκειται για φίλτρα με αρχή λειτουργίας παρόμοια με την παραπάνω περιγραφόμενη των φίλτρων ρευστοποιημένης κλίνης με άμμο. Απλώς στη θέση της άμμου υπάρχουν πλαστικές «χάντρες» και δεν υπάρχει

ανάγκη για ελεγχόμενη αιώρηση, μια και η όποια ροή του νερού τις διατηρεί όχι μόνο σε αιώρηση αλλά και τα άνω στρώματά τους μπορούν και να ακουμπούν το στόμιο εξόδου του νερού χωρίς να μπορούν όμως να διαφύγουν από εκεί, επειδή το στόμιο εξόδου έχει πλέγμα οι οπές του οποίου είναι μικρότερες από τη διάμετρο των χαντρών (Σχήμα 63). Προσφέρουν και αυτά εξαιρετικά χαρακτηριστικά νιτροποίησης με ειδική επιφάνεια $200-300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ικανή να υποστηρίξει μεγάλες αποικίες νιτροποιητικών πληθυσμών βακτηριδίων, των οποίων η βιολογική μεμβράνη θα αυτορυθμίζεται.

Σε αντίθεση με τα φίλτρα άμμου, τα φίλτρα με χάντρες χρειάζονται περιοδικό καθαρισμό από τα υλικά που θα συσσωρευτούν (απορριπτόμενες βιομεμβράνες, παγιδευμένα στερεά) και αυτό γίνεται με αντιστροφή της ροής (back-washing).

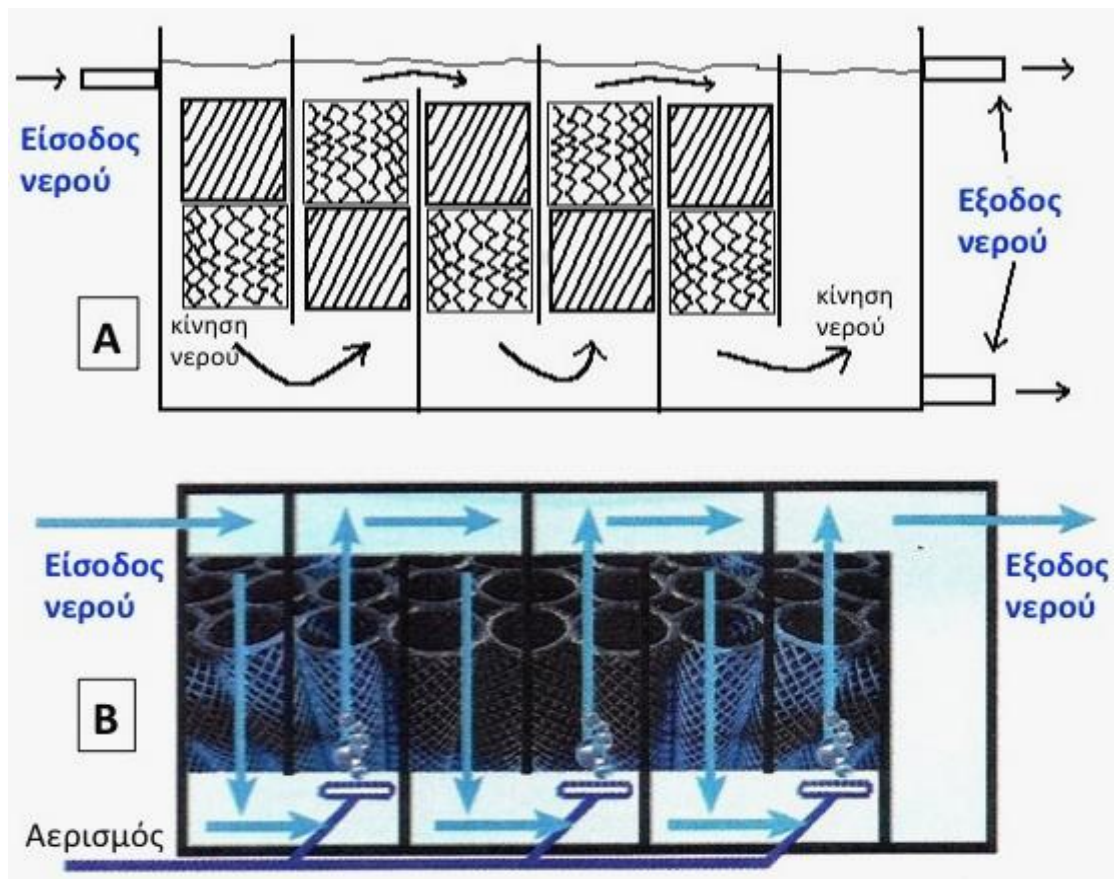


Σχήμα 63. Φίλτρο αιωρούμενων χαντρών. Κατά τη φάση καθαρισμού ο συνωστισμός και το τρίψιμο μεταξύ των χαντρών που θα επιφέρει το πέρασμά τους διά μέσου του στενού μεσαίου τμήματος, θα διευκολύνει την αποκόλληση των παγιδευμένων στερεών. Τροποποιημένο από Γ. Χώτο, του <http://www.blueecofiltration.com/>.

8.3.3. Βυθισμένα φίλτρα σταθερής κλίνης (Fixed Bed Biofilters)

Πρόκειται για φίλτρα με τα ίδια βιολογικά χαρακτηριστικά με τα παραπάνω, με τη διαφορά όμως να έγκειται στο ότι τα υλικά πλήρωσης (μέσα) δεν κινούνται. Τα μέσα είναι στατικά-τοποθετημένα-βυθισμένα στο νερό της επιμήκους ορθογώνιας δεξαμενής του φίλτρου και το νερό τα διαβρέχει καθώς κινείται διά μέσου του φίλτρου. Η διαδρομή του

νερού είναι οριζόντια κατά μήκος ενός μακρόστενου φίλτρου με διαμερίσματα γεμάτα με τα πλαστικά μέσα (συνήθως κυματοειδή πλαστικά σε μπλοκ) και με κατάλληλα ανοίγματα έτσι που το νερό να περνά μέσα από τα διαμερίσματα με εναλλάξ ανοδική και καθοδική ροή για να μεγιστοποιεί την καλή επαφή του με τα μέσα (Σχήμα 64). Το πρόβλημα της φραγής τους από οργανική ύλη μετά από συνεχή λειτουργία, αντιμετωπίζεται με έντονο αερισμό από ειδικές γραμμές παροχής αέρα κατά μήκος του βυθού της δεξαμενής, διαδικασία κατά την οποία θα αποκολληθεί η οργανική επικάλυψη των μέσων και θα συσσωρευτεί στην επιφάνεια του νερού (μην ξεχνάμε ότι είναι βυθισμένα στο νερό) απ' όπου θα απορριφθούν μαζί με μια μικρή ποσότητα νερού. Κατόπιν σταματά ο αερισμός και η λειτουργία του φίλτρου ξαναρχίζει. Τα βυθισμένα φίλτρα σταθερής κλίνης δεν χρειάζονται ξεχωριστή ενέργεια (π.χ. αντλία) για να λειτουργήσουν. Αρκεί να είναι τοποθετημένα χαμηλά και η ροή του νερού διά μέσου αυτών θα γίνει με τη βαρύτητα.



Σχήμα 64. Βυθισμένο φίλτρο σταθερής κλίνης. **A:** Η χαρακτηριστική κίνηση της μάζας του νερού (καθοδική-ανοδική-καθοδική κ.ο.κ.) κατά μήκος του μακρού άξονα του φίλτρου. **B:** Εικονοποιημένη αποτύπωση τομής με τις παροχές αέρα και τα πλαστικά μέσα πλήρωσης. **A** από: L. S. Enterprises, <http://biofilters.com/>, **B**, από: J. Brengballe - 2015, τροποποιημένα από Γ. Χώτο.

8.4. Γενική ανασκόπηση βιολογικών φίλτρων

Τα βιολογικά φίλτρα είναι κατασκευασμένα με τρόπο τέτοιο που να συνωστίζουν πλαστικά μέσα με τη μεγαλύτερη δυνατή συνολική επιφάνεια ανά m^3 (ειδική επιφάνεια), μέχρι του βαθμού εκείνου που η συσσώρευση των πλαστικών δεν δημιουργεί τόσο μεγάλη ανάπτυξη βιολογικής μεμβράνης (φίλμ) που μαζί με τα παγιδευόμενα στερεά να φράσσουν τη ροή του νερού ανάμεσά τους.

Είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει υψηλός βαθμός ελεύθερου χώρου (**συντελεστής κενού** – void ratio) για να ρέει το νερό ανεμπόδιστα διά μέσου του βιολογικού φίλτρου και συνάμα να υπάρχει η υποδομή (κατασκευή) για έναν αποτελεσματικό καθαρισμό με αντιστροφή της ροής του νερού (back-washing).

Η διαδικασία του καθαρισμού back-washing γίνεται κατά τακτά διαστήματα (ανά εβδομάδα ή μήνα) ανάλογα με τη φόρτιση με οργανικά στερεά στο φίλτρο. Χρησιμοποιείται αέρας υπό πίεση έτσι που να δημιουργηθεί «αναβρασμός» στο φίλτρο και να «ξεκολλήσουν» από τις επιφάνειες των μέσων τα οργανικά. Κατά τη διάρκεια του καθαρισμού (που διαρκεί μία περίπου ώρα) το βιολογικό φίλτρο δεν λειτουργεί, το βρόμικο νερό που δημιουργείται οδηγείται εκτός συστήματος και κατόπιν η λειτουργία του φίλτρου ξαναρχίζει.

Στα κλειστά συστήματα ιχθυοκαλλιέργειας, τα βιολογικά φίλτρα διακρίνονται σε αυτά που τα μέσα πλήρωσης κινούνται (αναδεύονται) και σε αυτά που τα μέσα πλήρωσης είναι σταθερά τοποθετημένα (ακίνητα). Δηλαδή **βιολογικά φίλτρα κινούμενων μέσων** (moving bed biofilters) και **βιολογικά φίλτρα σταθερών μέσων** (fixed bed biofilters). Όλα τα μέσα είναι **βυθισμένα** στο νερό (submerged) εκτός από την περίπτωση των φίλτρων καταιονισμού (trickling filter) όπου μόνο **διαβρέχονται** από το νερό.

Στα φίλτρα σταθερών μέσων αυτά είναι, είτε ανάκατα συσσωρευμένα στο φίλτρο (πλαστικά σφαιρίδια, χάντρες, κύλινδροι, γωνιώδη κ.λπ.), είτε σταθερά τοποθετημένα υπό μορφή πλαστικών μπλοκ κυβικού σχήματος και ποικίλων μεγεθών από συγκολλημένα κατάλληλα πλαστικά κυματοειδή φύλλα με κενά ανάμεσά τους. Το νερό κυλά ανάμεσα στα κενά σε στρωτή ροή (laminar flow) και ερχόμενο σε επαφή με τη βακτηριδιακή μεμβράνη της επιφάνειας των μέσων, υφίσταται την ευεργετική επίδραση των νιτροποιητικών βακτηριδίων.

Αντιθέτως, στα κινούμενα μέσα πλήρωσης, αυτά αναδεύονται μέσα στο θάλαμο του φίλτρου από τη συνδυασμένη δράση της ροής του νερού διά μέσου του θαλάμου και της παροχής αέρα από αεραντλία. Εξαιτίας της σταθερής και συνεχούς κίνησης των μέσων, τα φίλτρα κινούμενων μέσων μπορούν να γεμίσουν πιο πυκνά με πλαστικά μέσα και θεωρητικώς δίδουν μεγαλύτερο βαθμό «επεξεργασίας» νερού ανά m^3

βιοφίλτρου. Στην πράξη όμως, επειδή η αποδοτικότητα νιτροποίησης των βακτηριδιακών μεμβρανών παραμένει ίδια σε κάθε τύπο φίλτρου, η επεξεργασία του νερού ανά m^2 ειδικής επιφάνειας των μέσων δεν διαφέρει ανάμεσα στους δύο τύπους.

Το πλεονέκτημα των φίλτρων σταθερών μέσων είναι ότι κατά τη διαδρομή του νερού ανάμεσά τους, τα μικροσκοπικά οργανικά στερεά που μεταφέρει (και τα οποία δεν συγκρατήθηκαν στο μηχανικό φίλτρο), προσκολλώνται στη βιολογική μεμβράνη των μέσων. Έτσι το βιολογικό φίλτρο σταθερών μέσων λειτουργεί ως ένα βαθμό και ως μηχανικό φίλτρο λεπτών στερεών «ανακουφίζοντας» το σύστημα από οργανικό φορτίο και διαυγάζοντας το νερό. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβεί στα κινούμενα μέσα καθώς η συνεχής κίνηση και η τριβή ανάμεσα στα πλαστικά μέσα κάνει την προσκόλληση των αιωρούμενων λεπτών στερεών αδύνατη.

Τα βιολογικά φίλτρα τύπου περιστρεφόμενου βιολογικού αντιδραστήρα (RBC) αποτελούν ένα συγκερασμό των ιδιοτήτων των παραπάνω αναφερόμενων βιοφίλτρων σταθερών και βιοφίλτρων κινούμενων μέσων, των βρεγμένων βιοφίλτρων και των βυθισμένων βιοφίλτρων. Αυτό έχει την αιτία του στο ότι είναι σταθερά μεν ως προς την στερέωση των δίσκων στον άξονα, κινούμενα δε επειδή περιστρέφονται. Βυθισμένα μεν περιοδικώς στο νερό, διαβρεχόμενα δε από το νερό που ρέει στην επιφάνεια των δίσκων όταν αυτοί κατά την περιστροφή τους εκτίθενται στον αέρα.

Έχοντας λοιπόν «πάρει» από τον κάθε τύπο τα πλεονεκτήματά του ως προς τις βιολογικές δυνατότητες για νιτροποίηση και με ελάχιστα μειονεκτήματα κυρίως μηχανικής λειτουργίας, δεν αποτελεί έκπληξη το ότι κερδίζουν συνεχώς την προτίμηση των εκτροφέων με κλειστό σύστημα.

9. Η οξυγόνωση του νερού της εκτροφής

Τα ψάρια όπως άλλωστε όλα τα ζώα, χρειάζονται οξυγόνο για τον μεταβολισμό τους δηλαδή για να συντηρούνται εν ζωή, να επιτελούν κάθε ζωτική δραστηριότητα, να αυξάνονται και να αναπαράγονται. Ο μεταβολισμός τους τόσο αυξάνεται σε ένταση και καταναλώνει περισσότερο οξυγόνο όσο η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται. Και σε αυτό το σημείο είναι που η φύση «σαν από παραδοξότητα» τα δυσκολεύει, επειδή το οξυγόνο διαλύεται λιγότερο στο ζεστό νερό απ' ότι στο κρύο. Αυτή την «δυσκολία» καλείται να ξεπεράσει ο εκτροφέας πασχίζοντας να βάλει στο νερό συχνά περισσότερο οξυγόνο από αυτό που η φύση «ορίζει».



Σχήμα 65. Πολύ μικρές φυσαλίδες αέρα από διαχυτή. Όσο πιο μικρές οι φυσαλίδες τόσο πιο αποτελεσματική η απόδοση του οξυγόνου που μεταφέρουν προς το νερό. Αν οι φυσαλίδες προέρχονται από παροχή καθαρού οξυγόνου, η οξυγόνωση του νερού μεγιστοποιείται.

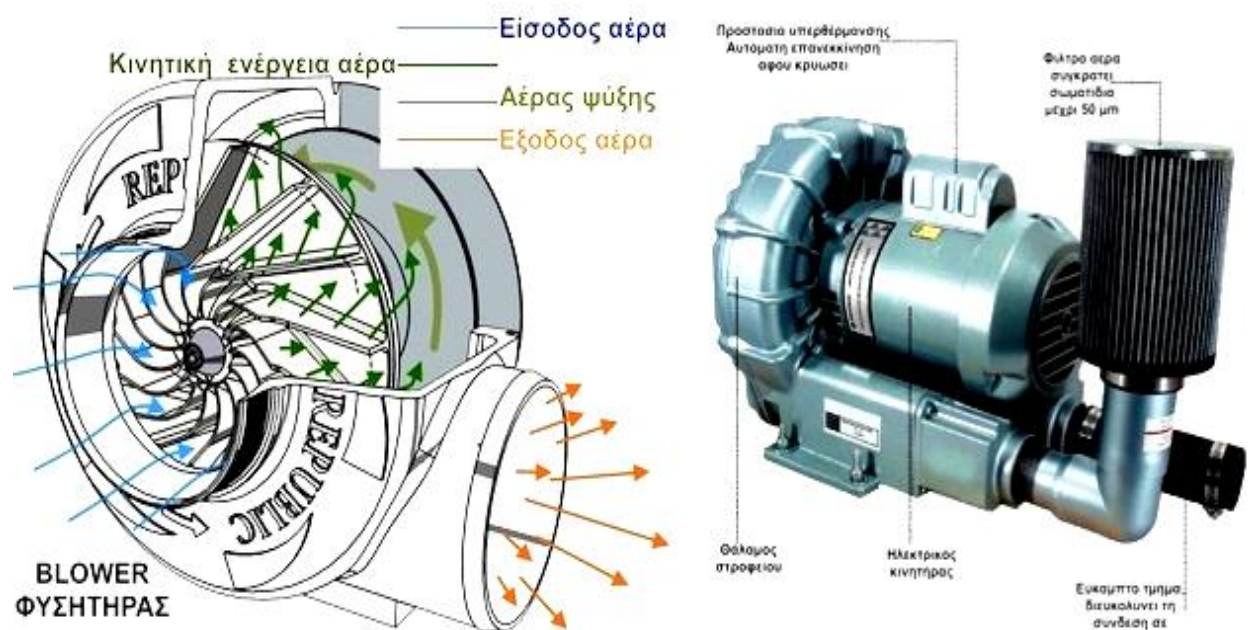
9.1. Αερισμός και οξυγόνωση

Μεταξύ των τριών ουσιωδών διεργασιών κατεργασίας του νερού, η βασικότερη είναι η διασφάλιση της επάρκειας του διαλυμένου οξυγόνου (DO-Dissolved Oxygen). Οι άλλες δύο είναι (κατά πως αναφέρθηκαν στα προηγούμενα) η απομάκρυνση των στερεών και η νιτροποίηση. Τα ψάρια (και τα βακτηρίδια) καταναλώνουν συνεχώς οξυγόνο και παράγουν διοξείδιο του άνθρακα.

Συνεπώς, ένα κλειστό σύστημα πρέπει να αναπληρώνει το οξυγόνο που χάνεται και να διώχνει το διοξείδιο που παράγεται. Σε μικρογραφία αυτού που συμβαίνει σε ένα κλειστό σύστημα εκτροφής, τον ρόλο αυτό σε ένα ενυδρείο τον επιτελούν οι φυσαλίδες αέρα (Σχήμα 65) που δημιουργούνται από ένα πωρόλιθο (αερόπετρα).

Η ανταλλαγή των αερίων μεταξύ νερού και αέρα γίνεται όπως έχει ήδη αναλυθεί, με διάχυση των αερίων μεταξύ των δύο μέσων, μια διαδικασία της οποίας η ένταση εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ των μερικών πιέσεων των αερίων, την επιφάνεια ανταλλαγής και το πάχος του επιφανειακού συνοριακού στρώματος.

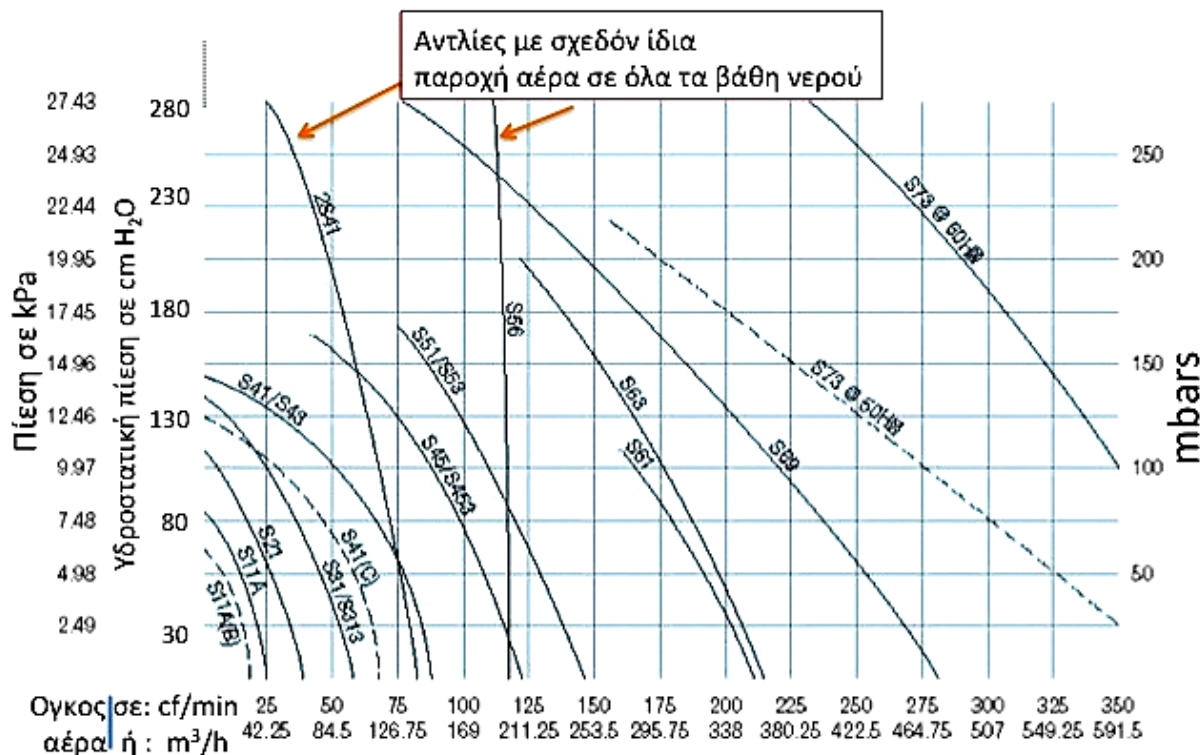
Κάθε μέθοδος που σκοπεύει στην ανταλλαγή των αερίων εκμεταλλεύεται τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Έτσι, είτε διοχετεύοντας στο νερό αέρα, είτε παρέχοντας νερό απλωμένο σε λεπτή επιφάνεια, είτε παρέχοντας νερό υπό μορφή ψεκασμού (σπρέι) δεν κάνουμε τίποτα άλλο από το να μεγιστοποιούμε την επιφάνεια διεπαφής αέρα-νερού, να μειώνουμε και να «σπάμε» το συνοριακό στρώμα και να εξισώνουμε τις μερικές πιέσεις. Η επιδίωξή μας σταθερή, να αναπληρώσουμε το οξυγόνο του νερού και να «εκβιάσουμε» το διοξείδιο του άνθρακα να φύγει από το νερό. Ειδικά όμως για το οξυγόνο, υπάρχει κάποιο όριο το οποίο δεν μπορεί να ξεπεραστεί με αυτή τη μέθοδο και αυτό το όριο είναι η συγκέντρωση κορεσμού του για τη δεδομένη θερμοκρασία (και σε μικρότερο βαθμό αλατότητα).



Σχήμα 66. Τομή φυσητήρα (blower) με απεικόνιση της κίνησης του μεταφερόμενου αέρα (αριστερά) και φωτογραφία φυσητήρα (δεξιά). Αριστερό σχήμα από: Republic manufacturing, <https://www.republic-mfg.com/>, δεξιά φωτογρ. από: Pentair AES.com, τροποπ. από Γ. Χώτο.

Συνεπώς η ποσότητα των ψαριών που μπορεί να κρατήσει το σύστημα δεν είναι απεριόριστη. Η ποσότητα αυτή στο μέγιστό της κατά χονδρική προσέγγιση κυμαίνεται σε 60 g ψάρι/L νερού όταν χρησιμοποιούμε αέρα και περίπου 100 g ψάρι/L νερού όταν χρησιμοποιούμε καθαρό οξυγόνο. Εφεξής όταν αναφέρεται «**αερισμός**» θα εννοείται η πρόσδοση οξυγόνου

με διοχέτευση ατμοσφαιρικού αέρα και όταν αναφέρεται «οξυγόνωση» θα εννοείται η πρόσδωσή του με διοχέτευση (υπό πίεση) καθαρού οξυγόνου. Συνάμα με τον όρο αερισμός θα εννοείται και η παράλληλη διαδικασία του **απαερισμού** του νερού από το διοξείδιο του άνθρακα (και ενίοτε και του αζώτου- N_2).



αέρα και τον διοχετεύουν μέσω σωληνώσεων και διακλαδώσεων όπου χρειάζεται. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι αεραντλιών. Ο **φυσητήρας** (blower) (Σχήμα 66) και ο αεροσυμπιεστής (compressor). Ένας φυσητήρας ισχύος 2 kw έχει ικανότητα μεταφοράς μεγάλου όγκου αέρα ανά μονάδα χρόνου π.χ. $4 \text{ m}^3/\text{min}$ με μικρή πίεση π.χ. 220 mmHg ($760 \text{ mmHg} = 1 \text{ bar} = 1000 \text{ mbar}$), ενώ ένας ίδιας ισχύος αεροσυμπιεστής, μικρό όγκο αέρα (π.χ. $0,15 \text{ m}^3/\text{min}$) με μεγάλη όμως πίεση (π.χ. 5 bar – 3800 mmHg).

Σημείωση: Οι παραπάνω τιμές πίεσης είναι επιπλέον της ατμοσφαιρικής ($760 \text{ mmHg} = 1 \text{ Atm}$). Οπου στο κείμενο αναφέρεται πίεση λειτουργίας κάποιου αερίου που προήλθε από οποιαδήποτε πηγή (αεραντλία, φυσητήρας, συμπιεστής, δοχείο οξυγόνου, μηχανή παραγωγής οξυγόνου) αυτή εννοείται ότι είναι επιπρόσθετη της δεδομένης ατμοσφαιρικής.

Υπενθύμιση: $1 \text{ Atm} = 760 \text{ mmHg} = 1 \text{ bar} = 14,7 \text{ PSI} = 101,3 \text{ kPa}$

Στις υδατοκαλλιέργειες χρήσιμος είναι μόνο ο τύπος του φυσητήρα (blower), επειδή απαιτείται μεγάλη παροχή αέρα και όχι πεπιεσμένου αέρα ο οποίος μπορεί να επιφέρει υπερκορεσμό σε αέριο άζωτο (N_2) με καταστροφικές συνέπειες για την επιβίωση των ψαριών. Ένας φυσητήρας είναι στην πραγματικότητα μια φυγοκεντρικού τύπου αντλία που μεταφέρει αέρα. Ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο της πολλαπλώς φτερωτής έλικας η οποία με την γρήγορη περιστροφή της δίδει λόγω της φυγοκέντρου μεγάλη κινητικότητα στη μάζα του αέρα. Η κινητική ενέργεια που απέκτησε ο αέρας μεταμορφώνεται σε δυναμική υπό μορφή πίεσης όταν αυτός διέρχεται από το στενό στόμιο εξόδου και σε συνδυασμό με τις καινούργιες μάζες που συνεχώς στέλνει η έλικα, ωθείται διά μέσου των σωληνώσεων.

Η πίεση που δημιουργεί η αντλία στον αέρα και που αναγράφεται στις προδιαγραφές της κάθε αεραντλίας, αντιπροσωπεύει αυτή που του προσδόθηκε από την αντλία (πέραν της ατμοσφαιρικής $1 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg}$ που θεωρείται δεδομένη). Οι φυσητήρες γενικώς δημιουργούν πίεση 0,1 – 0,5 bar πλέον της ατμοσφαιρικής. Στην ουσία απλώς σπρώχνουν τον αέρα να διοχετευθεί κατά μεγάλες μάζες μέσα από τις σωληνώσεις και να φθάσει να εξέλθει από τα στόμια εξόδου (διαχυτές, πορώδεις πέτρες κ.λπ.), υπερκεράζοντας την αντίσταση που θα συναντήσει εκεί από την υδροστατική πίεση της υπερκείμενης στήλης νερού ($10 \text{ m H}_2\text{O} = 1 \text{ Atm}$, $1 \text{ m} = 0,1 \text{ Atm}$).

Κατά την επιλογή του φυσητήρα χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που θέτει το βάθος του νερού, την πίεση του οποίου θα πρέπει να υπερκεράσει η πίεση του αέρα για να μπορέσουν οι φυσαλίδες να εξέλθουν από το σημείο εξόδου (Σχήμα 67). Συνήθως τα βάθη αυτά είναι περί το 1 m για τις δεξαμενές (άρα υδροστατική πίεση $\sim 0,1 \text{ bar}$), συνεπώς η αεραντλία θα πρέπει να έχει

προδιαγραφές για τουλάχιστον 20 % παραπάνω βάθος λειτουργίας (όλα αυτά αναγράφονται στα σχετικά έντυπα του προϊόντος). Αν απαιτείται να δώσει αέρα σε μεγαλύτερα βάθη, επιλέγεται αναλόγως ισχυρότερη αεραντλία (μεγαλύτερη κατανάλωση ρεύματος).

Κατά τους σχετικούς υπολογισμούς (παροχής, βάθους λειτουργίας, κατανάλωσης) λαμβάνονται υπ' όψη και οι απώλειες ροής αέρα και πίεσης που προκαλούνται από τις σωληνώσεις παροχής λόγω τριβών, συστροφών, διακλαδώσεων και συνολικού μήκους και επιπλέον από την αντίσταση των διαχυτών,. Αυτές οι απώλειες αν δεν υπολογιστούν μπορεί να καταλήξουν σε δραματική μείωση του βάθους λειτουργίας και συνεπώς σε αχρηστία της αντλίας.

Ολα είναι θέμα κατανόησης των αναγκών, υπάρχουσας διαμόρφωσης, και «χρυσού συμβιβασμού» μεταξύ της ελάχιστης αλλά επαρκούς ιπποδύναμης της αντλίας και της επαρκούς (κατά τα παραπάνω) παροχής για το λειτουργικό βάθος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι **διαχυτών** με ποικίλα υλικά κατασκευής. Ο πιο γνωστός και κοινός τύπος είναι οι γνωστές πέτρες (αερόπετρες-**πωρόλιθοι**) που χρησιμοποιούνται στα ενυδρεία. Δίδουν μικρές φυσαλίδες αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι χρειάζονται συχνό καθαρισμό (με οξύ) επειδή οι πόροι τους φράσσουν από οργανικές επικαλύψεις και άλατα. Εναλλακτικώς υπάρχουν διάτρητοι πλαστικοί σωλήνες και πορώδη λάστιχα. Όσο πιο πολλοί διαχυτές και όσο πιο δυνατή η παροχή τόσο το καλύτερο για την οξυγόνωση.

Ομως υπάρχει ένα όριο. Διότι θα μπορούσε να επιτευχθεί άριστος αερισμός με κυριολεκτικά «βράσιμο-άφρισμα» του νερού από παροχή μεγάλων ποσοτήτων αέρα από μια ισχυρή αεραντλία, όμως σε μια τέτοια περίπτωση, το στρες που θα εδημιουργείτο στα ψάρια, θα εμπόδιζε την κολυμβητική τους ικανότητα καθώς και τη λήψη τροφής και τελικώς την αύξησή τους.

Η απόδοση οξυγόνου από μια φυσαλίδα αέρα στο νερό είναι πολύ μικρή. Μόνο ένα 3-4 % του οξυγόνου που μεταφέρει θα διαλυθεί στο νερό σε μια διαδρομή ύψους 1 m στη στήλη του νερού. Αν όμως αυτή η φυσαλίδα περιείχε καθαρό οξυγόνο η μεταφορά-διάλυσή του στο νερό θα ανέρχονταν στο 30-40 %.

Για να κάνουμε πιο αποδοτική την οξυγόνωση όταν χρησιμοποιούμε αερισμό, φροντίζουμε να δημιουργούνται όσο το δυνατόν πιο μικρές φυσαλίδες αέρα για να αυξηθεί η επιφάνεια επαφής αέρα-νερού.

Για παράδειγμα:

Μια μεγάλη φυσαλίδα με **διάμετρο 20 mm** καταλαμβάνει όγκο **4,19 cm³** και έχει **επιφάνεια 12,6 cm²**.

Ο όγκος αυτής της φυσαλίδας μπορεί να κατανεμηθεί σε 995 μικρές φυσαλίδες των **2 mm** οι οποίες θα έχουν **συνολική επιφάνεια 126 cm²**.

Δηλαδή 10 φορές παραπάνω.

9.1.2. Οξυγόνωση

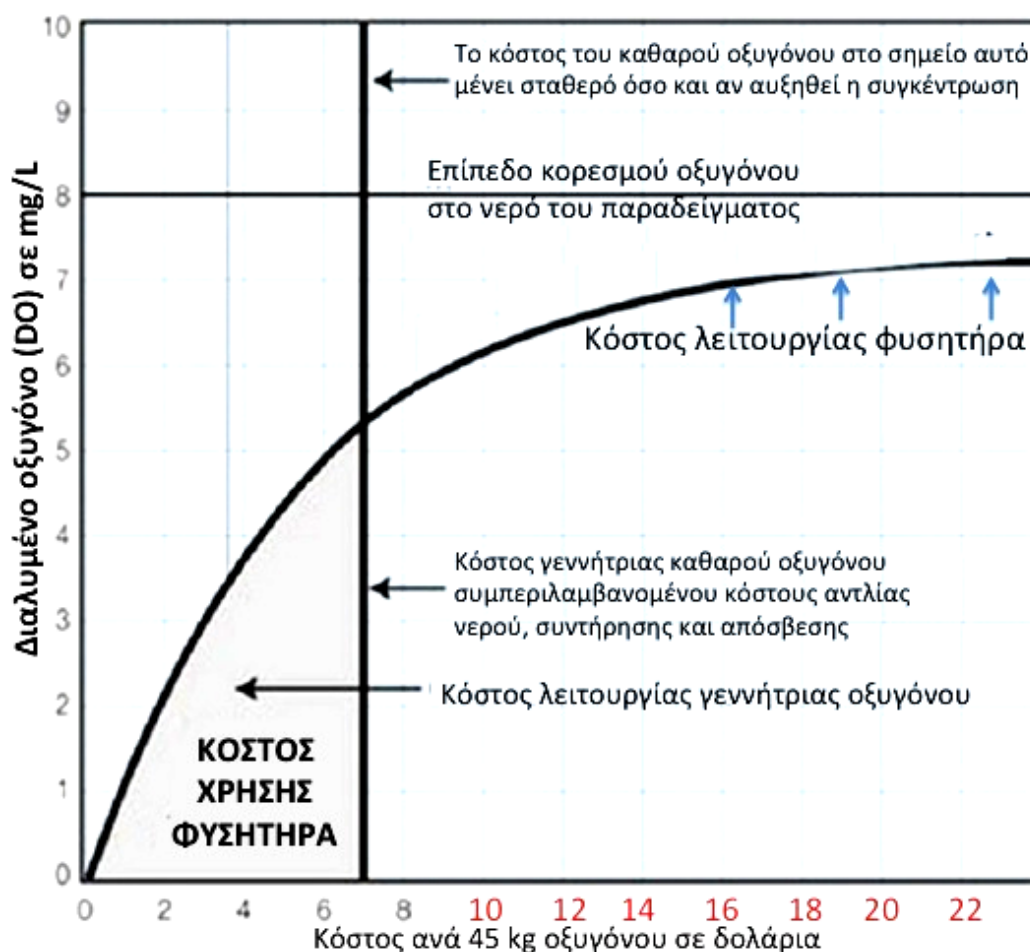
Με τον απλό αερισμό η συγκέντρωση του οξυγόνου στο νερό το πολύ να φτάσει την τιμή του 100% κορεσμού (και αυτό με δυσκολία). Καθώς το νερό κυλά διά μέσου των δεξαμενών εκτροφής, η συγκέντρωση του οξυγόνου θα μειώνεται γρήγορα και λιγότερο από 50% θα έχει απομείνει όταν το νερό φθάσει να εισέλθει στο βιολογικό φίλτρο. Μια τέτοια κατάσταση φυσικά δεν μπορεί να αποτελεί εχέγγυο επιτυχούς εκτροφής. Η λύση του αερισμού διορθώνει την κατάσταση αυτή με την παροχή αέρα στις δεξαμενές αλλά και πάλι το 100 % του κορεσμού δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί, οπότε συμβιβάζομαστε πολλές φορές με οριακές καταστάσεις συγκέντρωσης οξυγόνου.

Σε αυτές τις οριακές καταστάσεις εντάσσονται και οι περιπτώσεις της υψηλής ιχθυοφόρτισης που χαρακτηρίζει τα κλειστά συστήματα, ακριβώς επειδή πρέπει να είναι κερδοφόρα. Σε τέτοιες καταστάσεις υψηλής βιομάζας στο σύστημα είναι που το οξυγόνο δεν επιτρέπεται να είναι οριακό. Και δεν θα είναι οριακό μόνο εάν στο νερό διαλυθεί οξυγόνο εύκολα χωρίς τους περιορισμούς διάχυσης που συνοδεύουν τον απλό αερισμό. Η λύση είναι η χρήση του **καθαρού οξυγόνου** (pure oxygen) (Σχήμα 72 για ανασκόπηση των μεθόδων). Μπορεί το σύστημα αποθήκευσης και παροχής του καθαρού οξυγόνου να στοιχίζει περισσότερο από το αντίστοιχο του αερισμού, όμως η προστιθέμενη αξία της παραπάνω μάζας ψαριών που θα μπορούν να εκτραφούν θα το δικαιώσει (Σχήμα 68).

Το καθαρό οξυγόνο (pure oxygen) που χρησιμοποιείται στην εκτροφή μπορεί να προέρχεται από δύο πηγές. Η μία είναι η αγορά του από εταιρείες, οι οποίες το παραδίδουν στη μονάδα σε **υγρή μορφή** (LOX-Liquid Oxygen), γεμίζοντας περιοδικώς ένα ειδικό δοχείο που έχουν οι ίδιες τοποθετήσει στον χώρο του αγοραστή και η άλλη η παραγωγή του από ειδικό μηχάνημα συνεχούς παραγωγής καθαρού οξυγόνου από ατμοσφαιρικό αέρα, με τη μέθοδο της εναλλαγής προσρόφησης (swing adsorption).

Το υγρό οξυγόνο απαιτεί ειδικό δοχείο αποθήκευσης και ειδικούς εξατμιστές που θα το εξαερώνουν κατά τη διοχέτευσή του στη γραμμή τροφοδοσίας. Οι γεννήτριες παραγωγής οξυγόνου απαιτούν ένα αεροσυμπιεστή υψηλής παροχής που θα τροφοδοτεί την ειδική μηχανή με ατμοσφαιρικό αέρα υπό πίεση. Στο μηχάνημα υπάρχουν δύο θάλαμοι γεμάτοι με ειδικό αεροπροσροφητικό υλικό που κατακρατά το αέριο άζωτο από τον ατμοσφαιρικό αέρα αλλά όχι το οξυγόνο. Ετσι αυτό που εξέρχεται από τον θάλαμο που ενεργοποιήθηκε είναι αποκλειστικά οξυγόνο. Κατόπιν ο κύκλος επαναλαμβάνεται με τον άλλο θάλαμο ενώ ο προηγούμενος που είχε γεμίσει με άζωτο καθαρίζεται από αυτό (πάλι με ρεύμα αέρα) και είναι έτοιμος να το ξανα-δεσμεύσει. Με αυτό τον αέναο κύκλο εναλλάξ χρησιμοποίησης των δύο θαλάμων, συσσωρεύεται

καθαρό οξυγόνο σε ένα δοχείο υπό πίεση και από εκεί διοχετεύεται στη μονάδα.



Σχήμα 68. Σύγκριση του κόστους της οξυγόνωσης με χρήση ατμοσφαιρικού οξυγόνου με φουσητήρα και αυτής με χρήση καθαρού οξυγόνου από γεννήτρια παραγωγής του στη μονάδα. Οι κατασκευαστές τέτοιων μηχανών τις διαφημίζουν με το παραπάνω διάγραμμα όπου φαίνεται ότι μπορούν να επιτύχουν υπερκορεσμό σε οξυγόνο χωρίς επιπλέον κατανάλωση ενέργειας, συγκριτικά με την μέχρι κορεσμού (το μέγιστο) οξυγόνωση που επιτυγχάνουν οι φουσητήρες. Οι ισχυρισμοί τους είναι βάσιμοι.

Το υγρό οξυγόνο άπαξ και αγοραστεί δεν απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια, απεναντίας, η γεννήτρια οξυγόνου καταναλώνει αρκετό ρεύμα για να λειτουργεί ο αεροσυμπιεστής και η μηχανή διαχωρισμού των αερίων. Παρ' όλη την ευκολία και αυτονομία που προσφέρουν οι γεννήτριες οξυγόνου, υπόκεινται σε βλάβες (σπάνιες βέβαια αν το μοντέλο είναι αξιόπιστο) και το πιο βασικό, σε διακοπές ρεύματος. Όλα αυτά βέβαια δεν ανησυχούν ένα σωστά δομημένο σύστημα με εφεδρικά μηχανήματα, αυτόματες γεννήτριες ρεύματος και εφεδρικό σύστημα αερισμού το οποίο θα χρησιμοποιηθεί μέχρι το σύστημα καθαρού οξυγόνου να ξαναλειτουργήσει.

Όλες οι εγκαταστάσεις (αποθήκευση, ατμοποίηση, γραμμές διανομής κ.λπ.) πρέπει να γίνουν από πιστοποιημένους τεχνικούς διότι το οξυγόνο είναι αφενός εύφλεκτο και αφετέρου οι υψηλές πιέσεις απαιτούν άσπογες σφραγίσεις και αποφυγή διαρροών.

Ανεξάρτητα από την πηγή προμήθειας του καθαρού οξυγόνου, αυτό κοστίζει και θα πρέπει να χρησιμοποιείται πολύ πιο αποδοτικά από τον απλό αερισμό. Ο σκοπός είναι να επιτευχθεί όσο το δυνατόν 100 % διάλυσή του στο νερό. Δεν επιτρέπεται απλώς να διοχετεύεται καθαρό οξυγόνο υπό μορφή φυσαλίδων στο νερό των δεξαμενών εκτροφής, διότι έτσι μια μεγάλη ποσότητα οξυγόνου θα διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Χρησιμοποιούνται τεχνικές διάλυσης που επιτυγχάνουν το μέγιστο της μεταφοράς του στο νερό. Σε γενικές γραμμές διακρίνονται δύο βασικές τεχνικές οξυγόνωσης. Η οξυγόνωση όλης της μάζας του νερού που κυκλοφορεί και η οξυγόνωση μέρους του κυκλοφορούντος νερού (Σχήμα 72).

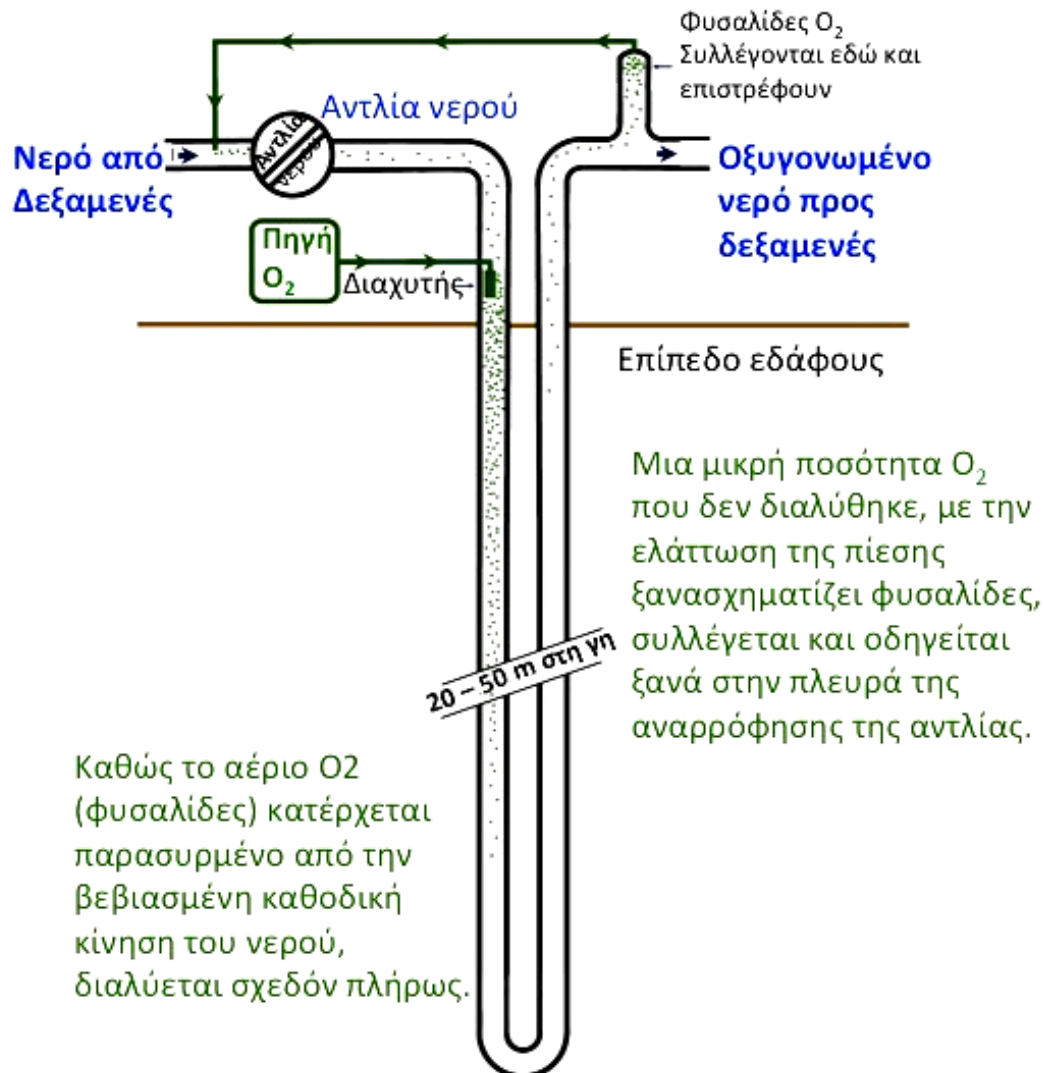
9.2. Οξυγόνωση όλης της μάζας του κυκλοφορούντος νερού

9.2.1. Οξυγονωτής τύπου «U»

Είναι το πιο αποτελεσματικό σύστημα οξυγόνωσης. Πρόκειται για ένα μακρύ σωλήνα θαμμένο στο έδαφος σχήματος U (Σχήμα 69), με την καμπύλη κάτω και με είσοδο νερού στο ένα άνω άκρο και έξοδο στο άλλο αφού το μίγμα νερού και οξυγόνου διατρέξει όλο το μήκος του, καθοδικώς στο ένα σκέλος και ανοδικώς στο άλλο.

Το μεγάλος βάθος (10-50 m) δημιουργεί μεγάλη υδροστατική πίεση και το καθαρό οξυγόνο που εγχύεται στο άνω μέρος, παρασυρόμενο από τη ροή του νερού φθάνει σε μεγάλο βάθος όπου η μεγάλη υδροστατική πίεση το διαλύει αποτελεσματικά στο νερό. Η κατάσταση διευκολύνεται καθώς στην περίπτωση του καθαρού οξυγόνου δεν υφίσταται θέμα μερικής του πίεσης στις φυσαλίδες, όλη η πίεση ανήκει σε ένα μόνο αέριο, το οξυγόνο. Το νερό εξέρχεται από το σωλήνα υπερκορεσμένο σε οξυγόνο χωρίς να έχει μείνει αδέσμευτο σχεδόν τίποτα. Κατά την διέλευση όμως στο ανώτερο σημείο και την είσοδο στο σωλήνα διανομής του οξυγονωμένου νερού υπάρχει ένας βαθμός αποσυμπίεσης και κάποια μικρή ποσότητα οξυγόνου εξέρχεται από το νερό ως πλεονάζον αέριο (off-gas). Αυτή η ποσότητα του οξυγόνου δεν αφήνεται να διαφύγει αλλά με ένα παρακαμπτήριο σωλήνα διοχετεύεται καταλλήλως να ξανα-αναμιχθεί με το καθοδικό τμήμα του μίγματος νερού-οξυγόνου.

Επειδή η κατασκευή και τοποθέτηση ενός τέτοιου μακριού σωλήνα και μάλιστα σε σχήμα U σε τέτοιο βάθος παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες, προτιμάται μερικές φορές μια κατασκευή με δύο σωλήνες τον ένα μέσα στον άλλο, με τον εξωτερικό να είναι κλειστός στο κάτω μέρος και με διοχέτευση του μίγματος νερού-οξυγόνου στον εσωτερικό. Το μίγμα εξέρχεται από το κάτω ανοικτό μέρος του εσωτερικού σωλήνα και ανέρχεται στο κενό μεταξύ των δύο σωλήνων και μετά διοχετεύεται κατάλληλα στο σωλήνα διανομής του υπερκορεσμένου (ακόμα και με 40 mg/L οξυγόνο-δηλαδή 200-300% κορεσμό) νερού.



Σχήμα 69. Οξυγόνωση του νερού με οξυγονωτήρα τύπου U βυθισμένο στο έδαφος. Το μίγμα νερού-καθαρού οξυγόνου οδηγείται βεβιασμένως σε μεγάλο βάθος όπου η μεγάλη υδροστατική πίεση επιτυγχάνει σχεδόν πλήρη διάλυση του οξυγόνου των φυσαλίδων στο νερό. Από: διαδικτυακή πηγή, <https://lakewaytilapia.com/>, τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

Τα ψάρια μπορούν να αντέξουν υπερκορεσμό σε οξυγόνο της τάξεως των 150 % και μερικά και παραπάνω, αλλά όσο πιο μεγάλος ο υπερκορεσμός

τόσο μεγαλύτερος και ο κίνδυνος για ανάπτυξη φυσαλίδων στο αίμα. Επιτυγχανόμενοι κορεσμοί επιπέδου 200-300 %, δεν σημαίνει ότι θα διατηρούνται σε αυτά τα επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια χρησιμοποίησης αυτού του νερού στις δεξαμενές εκτροφής. Πολύ σύντομα λόγω της κίνησης του νερού και της έντονης αναπνοής των ψαριών, τα επίπεδα θα πέσουν δραματικά αλλά όταν το νερό αφήσει τις δεξαμενές για να εισέλθει στα φίλτρα θα έχει ακόμα αρκετό οξυγόνο. Στην ουσία δηλαδή υπερκορένεται το νερό με οξυγόνο στην αρχή, ώστε κατόπιν να καλύπτει και με το παραπάνω τις ανάγκες αναπνοής πολύ μεγάλης μάζας ψαριών. Σε καμία περίπτωση δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί ατμοσφαιρικός αέρας σε ένα τέτοιο σύστημα, καθώς οι υπερβολικές πιέσεις που χρησιμοποιούνται θα προκαλέσουν υπερκορεσμό σε αέριο άζωτο (79 % του αέρα είναι άζωτο- N_2), το οποίο θα σκοτώσει σίγουρα και γρήγορα τα ψάρια λόγω της νόσου των φυσαλίδων.

9.2.2. Οξυγόνωση πακεταρισμένης στήλης και θαλάμου ψεκασμού

Πρόκειται για κλειστούς θαλάμους μέσα στους οποίους δημιουργείται «ατμόσφαιρα» καθαρού οξυγόνου και το νερό διωλίζεται γλιστρώντας ανάμεσα στις επιφάνειες στοιβαγμένων αδρανών μέσων (πλαστικά), όπως ακριβώς συμβαίνει στα φίλτρα καταιονισμού της νιτροποίησης. Δημιουργείται δηλαδή εδώ μεγάλη επιφάνεια διάχυσης νερού-αερίου. Στο σύστημα της «**πακεταρισμένης στήλης**» το νερό κυλά προς τα κάτω διαβρέχοντας τα μέσα ενώ από το κάτω μέρος διοχετεύεται **καθαρό οξυγόνο** μεγιστοποιώντας έτσι τη διάλυσή του στο νερό. Το επάνω μέρος του δοχείου καλό είναι να είναι κλειστό για να μην χάνεται οξυγόνο το οποίο μπορεί να οδηγηθεί ξανά στο σημείο διοχέτευσής του για να ξαναχρησιμοποιηθεί.

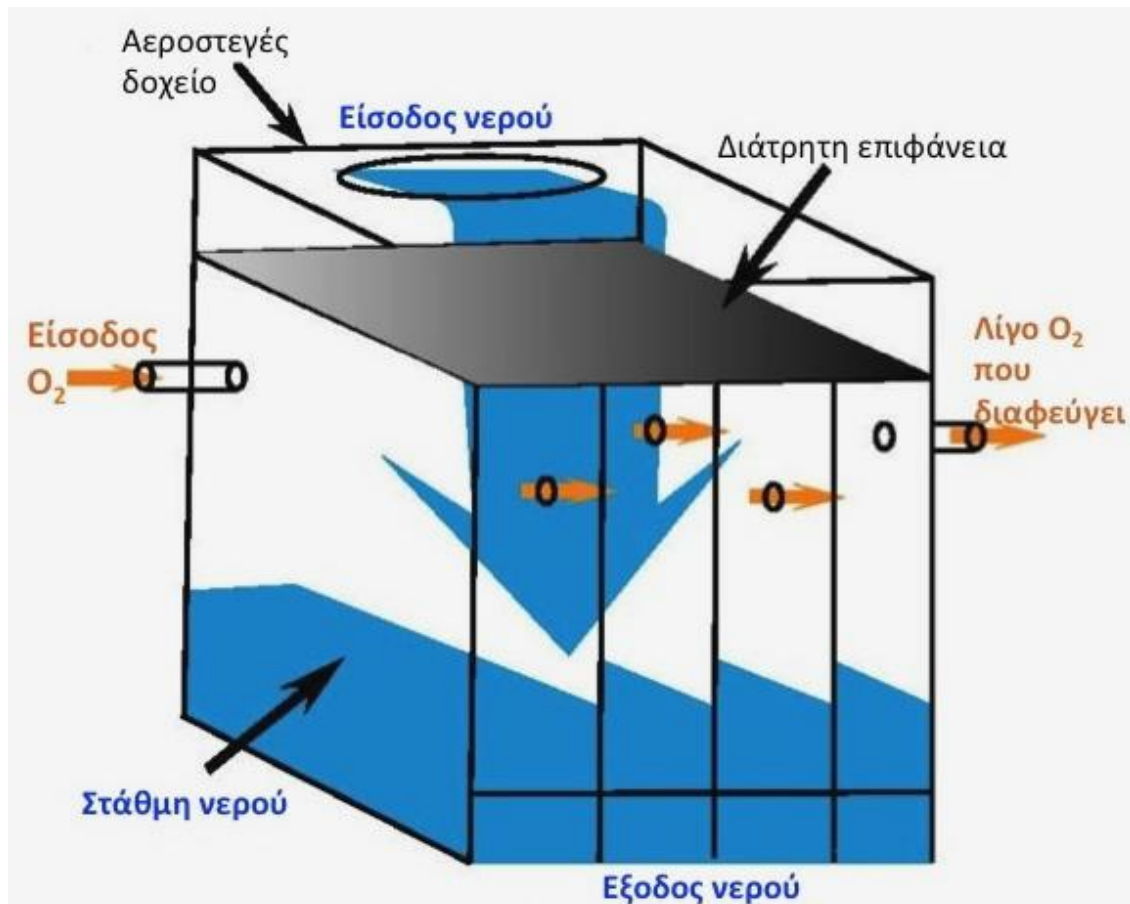
Στο σύστημα του «**θαλάμου ψεκασμού**» η διαφορά με την πακεταρισμένη στήλη έγκειται στο ότι ο καταιονισμός του νερού συμβαίνει σε ένα κλειστό θάλαμο ο οποίος περιέχει ατμόσφαιρα καθαρού οξυγόνου.

Μια μικρογραφία αυτού του συστήματος μπορεί να είναι και μια επιπλέον κατασκευή μέσα στη δεξαμενή εκτροφής, όπου σε ένα αντεστραμμένο ημιβυθισμένο πλαστικό δοχείο συνδεδεμένο με σωλήνα παροχής καθαρού οξυγόνου, το νερό αναδεύεται στο κάτω μέρος του με ειδικό αναδευτήρα επιταχύνοντας τη διάχυση του οξυγόνου σε αυτό.

9.2.3. Οξυγόνωση χαμηλής πίεσης (Low Head Oxygenation)

Πρόκειται για ένα σφραγισμένο δοχείο διαιρεμένο σε διαμερίσματα που επικοινωνούν με οπές (Σχήμα 70). Τα διαμερίσματα είναι γεμάτα με στοιβαγμένα πλαστικά μέσα. Το νερό πέφτει από το επάνω μέρος και

διαβρέχει τις επιφάνειες των πλαστικών, συλλεγόμενο στο κάτω μέρος. Εν τω μεταξύ από μια πλευρά του θαλάμου το εισερχόμενο καθαρό οξυγόνο διαχέεται στο νερό κατά τα γνωστά. Δεν θα διαχυθεί όλο στο πρώτο διαμέρισμα και το πλεονάζον θα περάσει στο δεύτερο διαμέρισμα από την οπή. Κατόπιν στο τρίτο κ.ο.κ. Σε κάθε διαμέρισμα θα εμπλουτίζει το καταιονιζόμενο νερό. Στο τέλος πολύ λίγο οξυγόνο θα εξέλθει ως πλεονάζον από την οπή στην απέναντι πλευρά του δοχείου και θα επαναδιοχετευθεί στην είσοδο για να ξαναχρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 70. Εικονοποιημένη αποτύπωση θαλάμου οξυγόνωσης χαμηλής πίεσης. Το νερό διαβρέχει τα μέσα πλήρωσης και συλλέγεται στο κάτω μέρος. Καθώς κατέρχεται συναντώντας ατμόσφαιρα καθαρού οξυγόνου οξυγονώνεται αποτελεσματικά. Απαραίτητη προϋπόθεση καλής λειτουργίας είναι η αεροστεγανοποίηση του δοχείου (εκτός της οπής εξόδου του πλεονάζοντος οξυγόνου). Κατά R. J. Strange, 2004-τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

9.3. Οξυγόνωση μέρους του κυκλοφορούντος νερού

9.3.1. Εγχυση οξυγόνου (Oxygen Injection)

Πρόκειται για την πιο απλή μέθοδο εμπλουτισμού του νερού σε οξυγόνο. Μια γραμμή παροχής οξυγόνου συνδέεται με το σωλήνα παροχής νερού και επειδή το νερό βρίσκεται συνήθως υπό αρκετή πίεση λόγω της

αντλίας που το κινεί, η διάχυση του οξυγόνου επιταχύνεται. Το μειονέκτημα που αντισταθμίζει την απλότητα αυτής της μεθόδου, είναι ότι αρκετό από το δοσμένο οξυγόνο δεν δεσμεύεται και θα χαθεί απελευθερούμενο στην ατμόσφαιρα μόλις το νερό εξέλθει από το σωλήνα.

9.3.2. Κώνος οξυγόνωσης (Oxygen Cone)

Ο κώνος οξυγόνωσης (Σχήμα 71), αποτελεί «ιστορικά» την πρώτη συσκευή οξυγόνωσης του νερού σε κλειστά συστήματα. Ονομάζεται και **διεπαφίας καθοδικών φυσαλίδων** (DBC - Down-flow Bubble Contactor) και ενώ βασίζεται σε ένα σύστημα απλό και έξυπνο, πολλοί στο παρελθόν νόμιζαν ότι επρόκειτο για κάποιο πολύπλοκο μηχανισμό. Η τεχνική οξυγόνωσης που χρησιμοποιεί, βασίζεται στην επιβράδυνση της ταχύτητας ροής του νερού που συμβαίνει όταν σε ένα σωλήνα το νερό προχωρεί (ρέει) από ένα στενό σε ένα ολοένα και φαρδύτερο τμήμα. Λειτουργεί ως εξής:

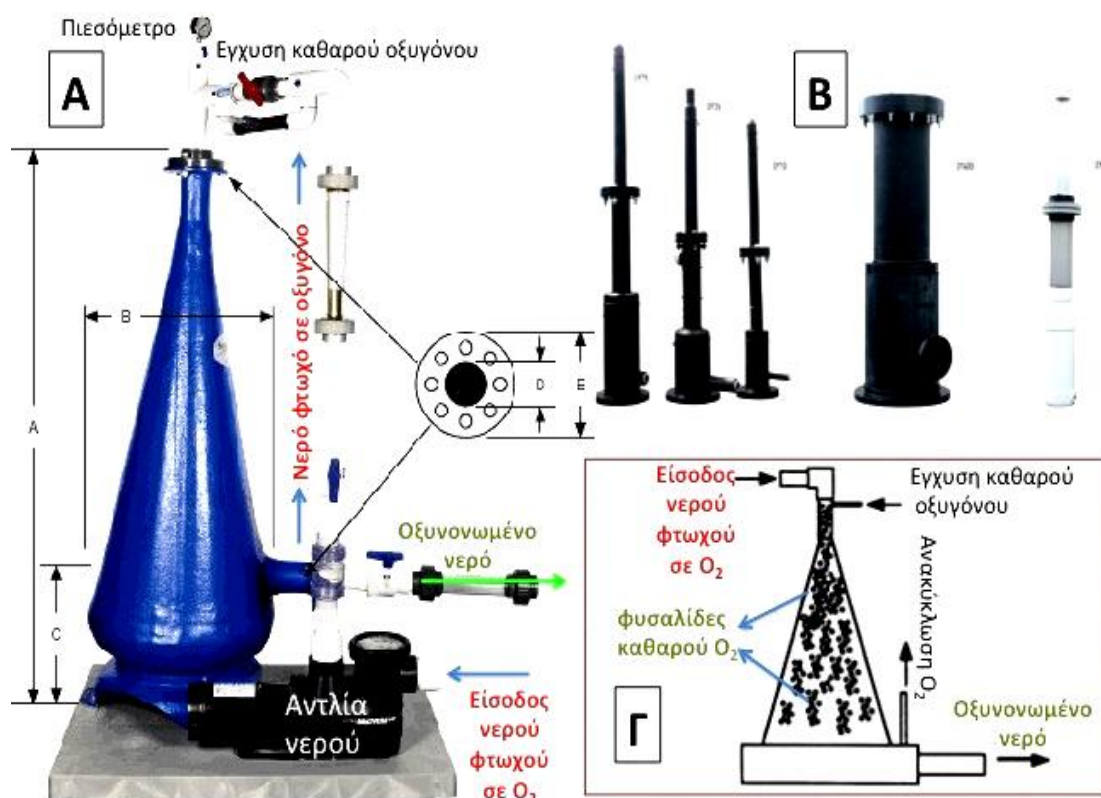
Στην κορυφή του κώνου εισέρχεται νερό υπό πίεση περί το 1,4 bar δημιουργούμενη από αντλία και εξέρχεται από κάποιο άνοιγμα στη βάση. Συνάμα εγχύνεται από ακροφύσιο καθαρό οξυγόνο του οποίου οι φυσαλίδες παρασύρονται βεβιασμένως από το ταχέως κινούμενο νερό υπό πίεση, προς το κάτω μέρος του κώνου όπου η ταχύτητα του νερού μειώνεται.

Οι φυσαλίδες του οξυγόνου έχουν την τάση να ανέρχονται, αλλά σε κάποιο ανώτερο σημείο η ταχύτητα του καθοδικά κινούμενου νερού είναι ίση με την ταχύτητα ανόδου των φυσαλίδων, κατάσταση τέτοια που ακινητοποιεί τις φυσαλίδες. Έτσι οι φυσαλίδες παραμένουν αιωρούμενες και έχουν αρκετό χρόνο για να αποδώσουν όλο το περιεχόμενό τους (οξυγόνο) στο νερό.

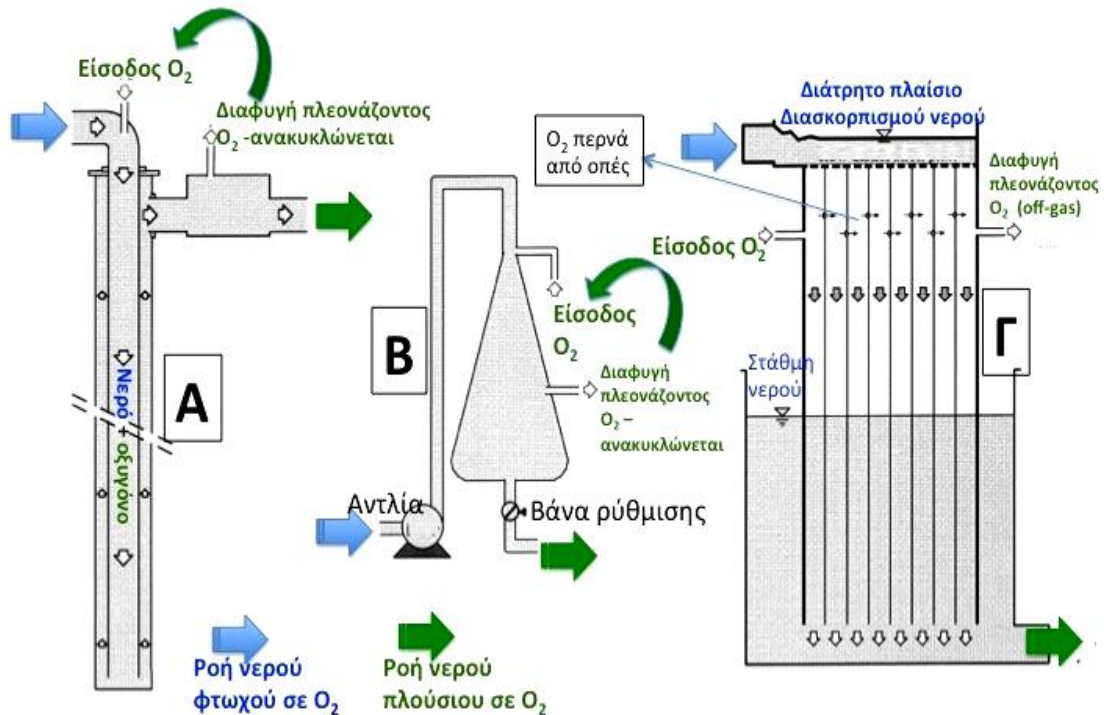
Μέθοδος πραγματικά έξυπνη με μηδενική απώλεια οξυγόνου. Το μόνο μειονέκτημά της είναι η ενέργεια που καταναλώνει η αντλία κυκλοφορίας του νερού η οποία λειτουργεί συνεχώς.

Θα μπορούσε βέβαια να κατασκευαστεί και ένας απλός κύλινδρος αντί για κώνο και να δημιουργηθεί η ίδια κατάσταση αιώρησης των φυσαλίδων οξυγόνου, αρκεί να ρυθμιστεί κατάλληλα η ταχύτητα της καθοδικής ροής του νερού. Πρακτικά όμως αυτό επιτυγχάνεται πολύ δύσκολα με πολύ λεπτούς χειρισμούς-ρυθμίσεις της παροχής νερού στο κύλινδρο. Αν δεν επιτευχθεί η κατάλληλη ισορροπία ροής νερού και ροής οξυγόνου, τότε οι φυσαλίδες είτε θα διαφύγουν προς τα άνω είτε θα παρασυρθούν με το νερό εξόδου. Αυτός είναι και ο λόγος που προτιμάται το κωνικό σχήμα του οξυγονωτήρα, ο οποίος από κατασκευής του και μόνο δημιουργεί μια κλιμάκωση της ταχύτητας του νερού, η οποία δεν επηρεάζεται από αυξομειώσεις της παροχής, μια και σε κάποιο σημείο μέσα στον κώνο θα επιτευχθεί τελικώς η αιώρηση.

Οι κώνοι είναι κατασκευασμένοι συνήθως από πλαστικό (φάιμπεργκλάς) ή και από ανοξείδωτο χάλυβα. Μπορούν όμως να κατασκευαστούν και πολύ φθηνά από συγκόλληση 3-4 τμημάτων πλαστικών σωλήνων διαφορετικής διαμέτρου, με τον στενότερο επάνω και τον φαρδύτερο κάτω, έτσι που να θυμίζουν ένα βαθμιδωτό κώνο. Μια πραγματικά έξυπνη και φθηνή λύση που ονομάζεται «οξυγονοκορεστής» η οποία στην πράξη έχει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά και θα λειτουργήσει όπως και ο κώνος οξυγόνωσης.



Σχήμα 71. Οξυγόνωση του νερού με χρήση καθαρού οξυγόνου σε «κώνο οξυγόνου» (A) και την παραλλαγή του τον «οξυγονοκορεστή», οι διάφορες παραλλαγές του οποίου φαίνονται στο B. Η βαθμιδωτή κλιμάκωση της διαμέτρου των ενωμένων σωλήνων στους οξυγονοκορεστές δημιουργεί το περιβάλλον της μειούμενης ταχύτητας του νερού κατά την κίνησή του μέσα σε αυτούς, από τον στενότερο προς τον φαρδύτερο σωλήνα, Συμβαίνει τότε ότι συμβαίνει και τον κώνο. Σε κάποιο σημείο προς τα κάτω, οι φουσαλίδες οξυγόνου αιωρούμενες παραμένουν για πολύ ώρα σε επαφή με το νερό και αποδίδουν πλήρως το οξυγόνο τους. Στο Γ αποτυπώνεται διαγραμματικά η αιώρηση των φουσαλίδων του οξυγόνου μέσα στον κώνο οξυγόνωσης. A, από: <http://www.amityaqua.com/>, B, από: Pentair S.A., τροποποιημένα από Γ. Χώτο.



Σχήμα 72. Συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων οξυγόνωσης του νερού με χρήση καθαρού οξυγόνου. **A:** Υπό υψηλή πίεση με σύστημα σωλήνα τύπου U για όλη τη μάζα του κυκλοφορούντος νερού. **B:** Υπό πίεση με σύστημα «κώνου οξυγόνου» για μέρος της μάζας του νερού (π.χ. εξυπηρέτηση μίας ή δύο δεξαμενών). **Γ:** Οξυγόνωση χαμηλής πίεσης σε ειδικό θάλαμο. Από: Steven T. Summerfelt, ResearchGate, τροποποιημένο από Γ. Χώτο.

10. Απολύμανση νερού με υπεριώδη ακτινοβολία και όζον

Οι ασθένειες συνήθως προκύπτουν όταν τα ψάρια βρίσκονται σε συνωστισμό και σε κατάσταση λίγο ή πολύ έντασης (στρες). Τέτοια είναι και η περίπτωση των κλειστών συστημάτων όπου η μεγάλη ιχθυοφόρτιση ευνοεί τη μετάδοση τυχόν νοσημάτων και η ανακύκλωση του νερού την υποβάθμιση της ποιότητάς του με το υψηλό οργανικό φορτίο του. Τα ψάρια σε υγιή κατάσταση αντιμετωπίζουν τους παθογόνους μικροοργανισμούς με το ανοσοποιητικό τους σύστημα, όμως το στρες μειώνει τη δυναμικότητά του. Για το λόγο αυτό επεμβαίνει ο άνθρωπος και σε αυτό το πεδίο και προσπαθεί να μειώσει τις πιθανότητες ξεσπάσματος κάποιας ασθένειας με τη μέθοδο της απολύμανσης του νερού με υπεριώδη ακτινοβολία ή με διοχέτευση όζοντος. Και οι δύο μέθοδοι, η καθεμία με τον τρόπο της, σκοτώνουν τους μικροοργανισμούς του νερού.

10.1. Υπεριώδης ακτινοβολία (UV radiation)

Η υπεριώδης ακτινοβολία με μήκος κύματος 10-390 nm, αποτελείται από τα βραχύτερα και με μεγαλύτερη ενέργεια τμήματα του φάσματος πέραν του ιώδους που αποτελεί το όριο του ορατού φωτός. Λόγω της υψηλής ενέργειας της υπεριώδους ακτινοβολίας, μπορεί να προκληθούν βλάβες στους ιστούς (π.χ. έγκαυμα) και αλλαγές στο DNA και άλλα μόρια. Αυτές ακριβώς τις δράσεις επιδιώκουμε να έχουμε για να σκοτώσουμε τους μικροοργανισμούς που θα εκτεθούν στην υπεριώδη ακτινοβολία. Για την απολύμανση του νερού (αποστείρωση είναι αδύνατον πρακτικά να γίνει), χρησιμοποιούνται λαμπτήρες υπεριώδους (λαμπτήρες UV) οι οποίοι «λούζουν» το νερό με το φως τους σκοτώνοντας και τα δυνητικώς και τα πραγματικώς παθογόνα. Η αποτελεσματικότητα της μονάδας υπεριώδους ακτινοβολίας εξαρτάται από την ισχύ του λαμπτήρα, την απόσταση του νερού από τον λαμπτήρα, τη ροή του νερού (δηλαδή το χρόνο έκθεσης) και από την διαύγεια του νερού. Το ίδιο το νερό απορροφά ένα μέρος της ακτινοβολίας, τα διαλυμένα μόρια ένα άλλο και αυτό που απομένει είναι αυτό που θα δράσει στα κύτταρα των μικροοργανισμών. Συνεπώς, το νερό που θα διοχετευθεί στον θάλαμο UV, θα πρέπει να έχει περάσει και καθαριστεί πρώτα πολύ καλά από τα μηχανικά φίλτρα και τον αφροποιητή, για να είναι όσο το δυνατόν διαυγέστερο.

Η «δόση» της υπεριώδους ακτινοβολίας εκφράζεται σε διάφορες μονάδες με πιο κοινή αυτή των μικρο-Watt/sec/cm² (μWs/cm²). Για να μειωθεί κατά 90 % ο αριθμός των βακτηριδίων και ιών σε μια ακτινοβολούμενη μάζα νερού, απαιτούνται γενικώς 2000 – 10.000 μWs/cm². Για τους μύκητες απαιτούνται 10.000 – 100.000 μWs/cm² και για μικρά παράσιτα

50.000 – 200.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Συνεπώς ένα οικονομικό σύστημα ισχύος $\sim 15.000 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ θα καλύψει τις βασικές ανάγκες μείωσης του ιικού και βακτηριδιακού πληθυσμού και ενός μέρους από τον μυκητιακό πληθυσμό του νερού.

Σήμερα κυκλοφορούν εξαιρετικά προϊόντα υπεριώδους ακτινοβολήσης, ειδικά για κλειστά συστήματα και κατά την επιλογή τους πρέπει να αγοράζεται το κατάλληλο με δυναμικότητα ροής νερού μεγαλύτερη από αυτή που θα υπάρχει στο σύστημα. Αυτό γίνεται για να αντισταθμίσει τη σταδιακή μείωση της ισχύος του λαμπτήρα με το χρόνο. Ο λαμπτήρας δεν είναι «αιώνιος» και χρειάζεται αλλαγή, στην καλύτερη των περιπτώσεων μία φορά το χρόνο. Και βέβαια για ένα σύστημα εκτροφής ομιλούμε για ολόκληρη συστοιχία λαμπτήρων. Παρ' όλα αυτά τα μειονεκτήματα, η υπεριώδης ακτινοβολήση αποτελεί ένα πολύτιμο απόκτημα για τη μονάδα, είναι ασφαλέστερη από το όζον, την απαλλάσσει από πολλούς κινδύνους και συνιστάται ανεπιφύλακτα.

10.2. Οζον

Το αέριο όζον (O_3) αποτελεί μια αλλοτροπική μορφή του οξυγόνου, το οποίο υπό τη συνήθη του μορφή ως αερίου (O_2), μπορεί να διασπαστεί σε δύο άτομα οξυγόνου αν απορροφήσει ενέργεια (κοσμικές ακτίνες στην άνω ατμόσφαιρα, ηλεκτρικές εκκενώσεις είτε στην ατμόσφαιρα είτε με μηχανήματα από τον άνθρωπο). Τότε, ένα άτομο οξυγόνου (O) ενώνεται με ένα μόριο οξυγόνου (O_2) και σχηματίζουν όζον (O_3). Το αέριο όζον είναι ασταθές με ημιπερίοδο ζωής περί τις 12 ώρες. Είναι έντονα δραστικό μόριο επειδή το τρίτο άτομο οξυγόνου του μπορεί να αποσπασθεί και να οξειδώσει διάφορες ενώσεις. Με αυτή του την ιδιότητα καταστρέφει τις κυτταρικές μεμβράνες των μικροοργανισμών εξολοθρεύοντάς τους και συνάμα είναι καταστροφικό και για το αναπνευστικό επιθήλιο των ανθρώπων (και γενικά των θηλαστικών) αλλά και για τα βράγχια των ψαριών.

Λόγω της επικινδυνότητάς του, πρέπει να παράγεται και να χρησιμοποιείται σε περιορισμένο χώρο επαφής με το νερό και όχι απευθείας στις δεξαμενές των ψαριών. Το όζον παράγεται διοχετεύοντας αέρα σε ένα ειδικό **οζονιστήρα**, ο οποίος γενικά περιέχει ένα σωλήνα με ένα ηλεκτρικό στοιχείο που ονομάζεται «κορώνα» (corona) το οποίο δημιουργεί τις ηλεκτρικές εκκενώσεις που διασπούν τα μόρια του οξυγόνου που διέρχονται από το σωλήνα. Το μίγμα που βγαίνει κατόπιν από το σωλήνα αποτελείται από λιγότερο οξυγόνο και περισσότερο όζον. Όσο πιο ισχυρές οι ηλεκτρικές εκκενώσεις τόσο πιο πολύ όζον παράγεται. Το όζον που δημιουργείται διοχετεύεται σε ένα περιορισμένο χώρο που μπορεί να είναι και ο αφροποιητής που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Μέσα στον αφροποιητή υπάρχει αρκετός χρόνος επαφής του νερού με το όζον, ικανός να σκοτώσει τα παθογόνα ($>0,1 \text{ mg/L O}_3$ για $>1 \text{ min}$).

Επίσης λόγω της οξειδωτικής του δράσης, αντιδρά με διαλυμένα στο νερό μακρομόρια και με διάφορους μηχανισμούς μεταμορφώνει διαλυτές ενώσεις σε αδιάλυτες, καταστρέφει διπλούς χημικούς δεσμούς, διασπά μακρομόρια σε μικρότερες πιο εύκολα βιοδιασπώμενες ενώσεις κ.λπ., με αποτέλεσμα τη συσσώματωση αυτών των μορίων σε βρόμικη μάζα που συλλέγεται στην επιφάνεια και απορρίπτεται. Υπό αυτές του τις ιδιότητες το όζον καταπολεμά και τις μυρωδιές και διαυγάζει το νερό.

Μετά τη «διαδρομή» του αερίου όζοντος στη στήλη του αφροποιητή, το υπολειμματικό όζον διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και επειδή είναι όπως προελέχθη ερεθιστικό για τον άνθρωπο, δεν πρέπει να συγκεντρώνεται στο χώρο, ο οποίος πρέπει να αερίζεται καλά. Λόγω όλων αυτών των περιορισμών στη χρήση του δεν είναι δυνατόν να κατεργαστεί όλη η μάζα του νερού της μονάδας. Περιοριζόμαστε σε ένα μικρό χώρο (αυτόν του αφροποιητή) και βασιζόμαστε στο ότι σιγά-σιγά θα περάσει από εκεί η μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα νερού και το δικό μας όφελος θα είναι όχι βέβαια η πλήρης απολύμανση του νερού, αλλά η ικανή μείωση του βακτηριδιακού (και των άλλων μικροοργανισμών) φορτίου. Σε κάθε περίπτωση πάντως το νερό που βγαίνει από τον αφροποιητή-οζονοαντιδραστήρα πρέπει να έχει απαλλαγεί από τη μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα όζοντος πριν διοχετευθεί στις δεξαμενές των ψαριών.

Υπάρχει και μια άλλη δράση του όζοντος η οποία είναι ευεργετική. Οξειδώνει απευθείας τα νιτρώδη σε νιτρικά χωρίς την ανάγκη δηλαδή να δράσουν τα βακτηρίδια *Nitrobacter* στο βιολογικό φίλτρο. Αν όμως κάτι τέτοιο συμβεί σε μεγάλο βαθμό, τότε τα *Nitrobacter* θα στερηθούν τα νιτρώδη, θα ατονήσουν και μπορεί να εκλείψουν, με αποτέλεσμα το δεύτερο στάδιο της νιτροποίησης (νιτρώδη σε νιτρικά) να υπολειπεται. Αν όμως κάτι συμβεί και σταματήσει η δράση του όζοντος (π.χ. βλάβη του οζονιστήρα), τα νιτρώδη θα συσσωρευτούν στο σύστημα μη έχοντας άμεσα ικανό αριθμό *Nitrobacter* για να τα μεταβολίσουν.

11. Η διαχείριση των αποβλήτων

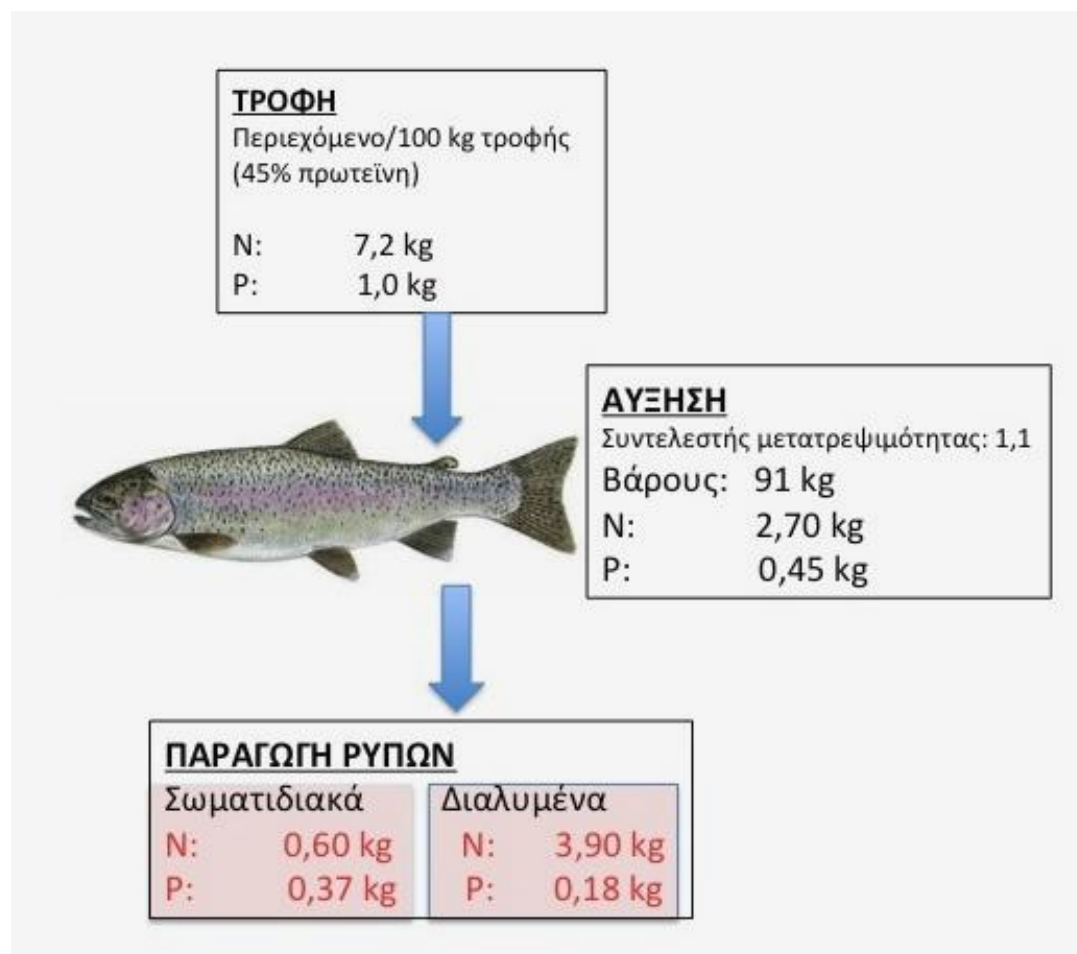
Όσο αποτελεσματικό και αν είναι το σύστημα καθαρισμού του νερού σε ένα κλειστό κύκλωμα ιχθυοκαλλιέργειας, τα ρυπαντικά προϊόντα στο νερό (στερεά και διαλυμένα) δεν εξαφανίζονται και τελικά κάπου θα εναποτεθούν. Και ως προς το νερό που πλεονάζει κάθε φορά όταν γίνεται η έστω μικρή ανανέωση του ανακυκλούμενου με φρέσκο, δεν υπάρχει σημαντικό πρόβλημα μεν διότι είναι ήδη κατεργασμένο και ασφαλές (άλλωστε ψάρια ζουν μέσα σε αυτό), όμως με τα συμπυκνωμένα στερεά που υπό μορφή λάσπης σωρεύονται από τα φίλτρα υπάρχει θέμα διάθεσης των.

Το απόβλητο νερό με την υψηλή περιεκτικότητά του σε στερεά, εισέρχεται πρώτα σε μια εξωτερική μονάδα καθίζησης από όπου η συλλεγόμενη λάσπη παχύνεται και στη συνέχεια αφυδατώνεται. Κατόπιν μπορεί να διατεθεί ως λίπασμα σε αγροκαλλιέργειες ή ως εδαφοενισχυτικό ή για παραγωγή βιοαερίου με σκοπό τη θέρμανση ή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το διαυγασμένο νερό από τη μονάδα επεξεργασίας της λάσπης έχει συνήθως υψηλή συγκέντρωση σε ενώσεις του άζωτου και χαμηλή σε φώσφορο ο οποίος έχει ήδη δεσμευτεί στη λάσπη. Αυτό το νερό που καλείται **νερό απόρριψης**, μαζί και με άλλο πλεονάζον νερό από την περιοδική ανανέωση που συμβαίνει στη μονάδα εκτροφής, οδηγείται σε κάποιο φυσικό υδαταποδέκτη (π.χ. ποταμός, θάλασσα) εφόσον τα περιεχόμενα θρεπτικά του είναι κάτω από τα όρια που έχουν θέσει οι αρχές (Σχήμα 75). Αν όχι, τότε οδηγείται σε μια υπαίθρια χωμάτινη λεκάνη όπου αφήνεται να αναπτυχθεί πλούσια βλάστηση από υδρόβια και υδροχαρή φυτά με σκοπό την μείωση του περιεχομένου διαλυμένου αζώτου και φωσφόρου.

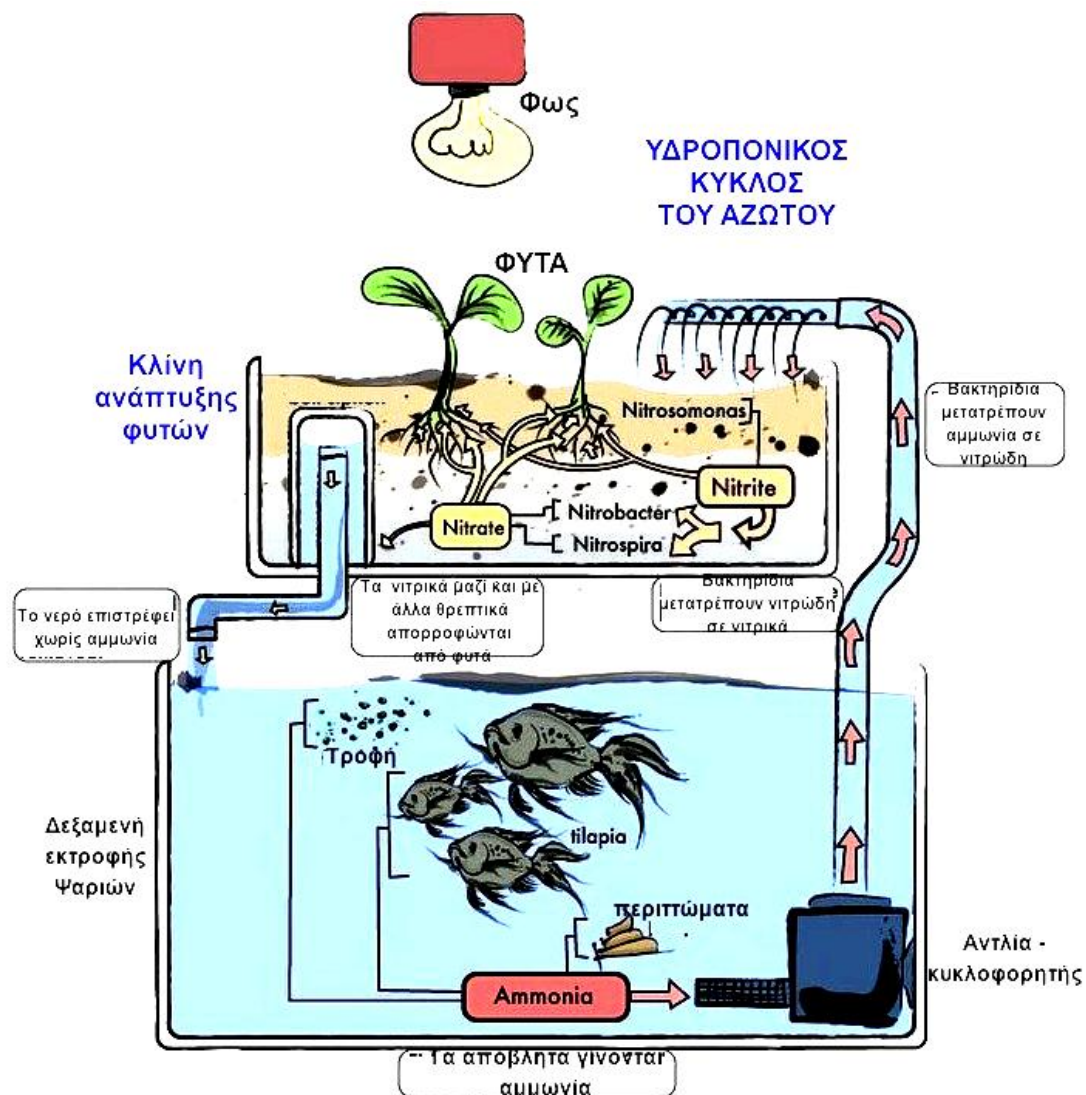
Τα ψάρια εκκρίνουν τα παραπροϊόντα του μεταβολισμού τους με διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα ζώα της χέρσου όπως οι χοίροι ή τα βοοειδή. Το άζωτο το εκκρίνουν ως αμμωνία απευθείας από τα βράγχιά τους (περί το 70 % της συνολικής ποσότητας N), με το υπόλοιπο στα μικρά ποσά ουρίας των ούρων και στα περιττώματα. Ο φώσφορος εκκρίνεται μέσω των κοπράνων τους μόνο. Ως εκ τούτων, το κύριο μέρος του απορριπτομένου αζώτου στα ψάρια βρίσκεται διαλυμένο στο νερό και δεν μπορεί να επηρεασθεί από την δράση των μηχανικών φίλτρων (Σχήμα 73). Τα μηχανικά φίλτρα θα συγκρατήσουν τα στερεά μεταξύ των οποίων και τα περιττώματα στα οποία περιέχεται λίγο μόνο από το απορριπτόμενο συνολικώς άζωτο, αλλά συνάμα το μεγαλύτερο μέρος του απορριπτομένου φωσφόρου. Τα περιττώματα από τις δεξαμενές των ψαριών πρέπει να κατευθύνονται όσο το δυνατόν πιο άθικτα (συμπαγή) στα μηχανικά φίλτρα χωρίς ενδιάμεσως να διαλύονται. Όσο πιο άθικτα και συμπαγή τα περιττώματα τόσο πιο αποτελεσματικά θα

απομακρυνθούν. Η αμμωνία ως γνωστόν θα οξειδωθεί στο βιολογικό φίλτρο σε νιτρικά και ως νιτρικά πλέον το άζωτο αποτελεί το αντικείμενο του τι μπορεί να γίνει για να μειωθεί η περιεκτικότητά του στο απορριπτόμενο νερό σε επιτρεπτά όρια.



Σχήμα 73. Διαγραμματική απεικόνιση των απεκκρίσεων των ψαριών ως προς τα στοιχεία άζωτο (N) και φώσφορο (P) ανά κατανάλωση 100 kg τροφής με 45 % πρωτεΐνη. Τα στοιχεία αφορούν την αρίστη εκμετάλλευση της τροφής με Συντελεστή Μετατροπής (FCR) = 1,1. Αν η τροφή δεν εκμεταλλεύεται σωστά οι εκκρίσεις θα είναι μεγαλύτερες, (κατά J. Brengballe-2015, τροποποιημένο από Γ. Χώτο).

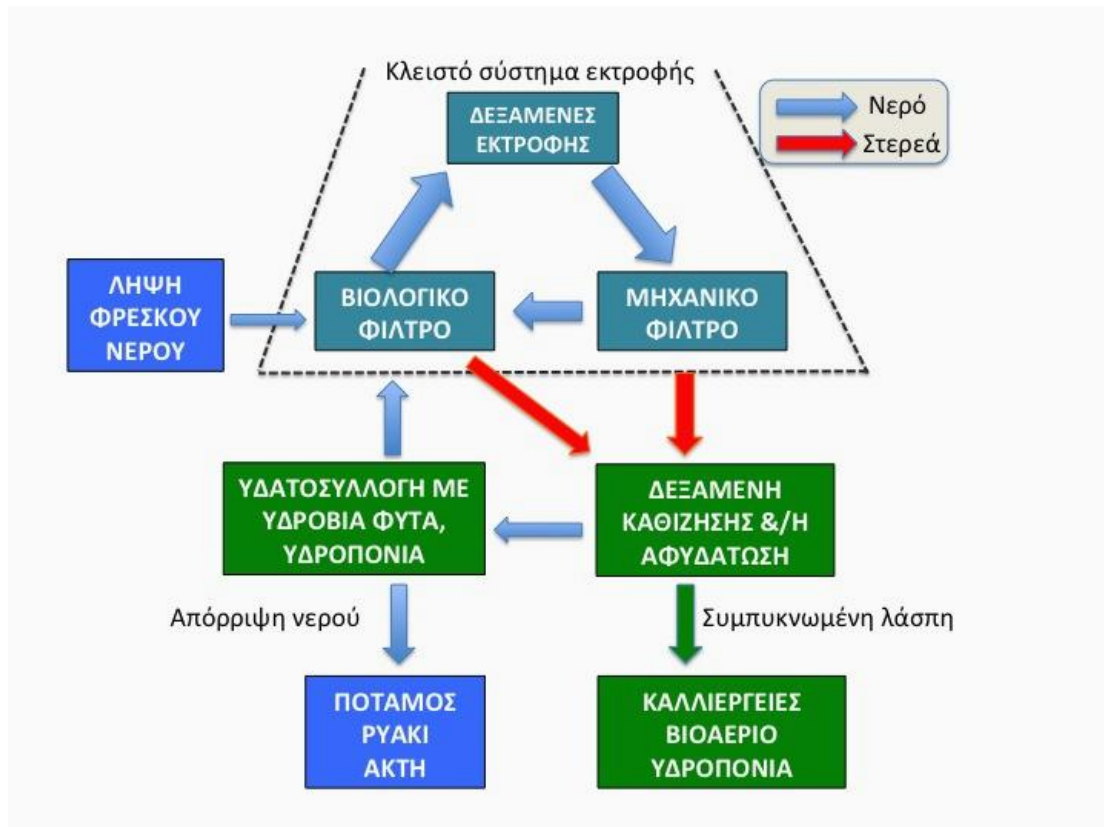
Σήμερα η συνήθης και συνάμα αποδοτική πρακτική για τη διάθεση του απορριπτόμενου νερού είναι η **υδροπονία**, τεχνική που διαδίδεται ταχύτατα ανά την υφήλιο. Υδροπονικά συστήματα είναι αυτά όπου οι ρύποι των ψαριών χρησιμοποιούνται ως λίπασμα για την καλλιέργεια λαχανικών, φρούτων ή βοτάνων συνήθως μέσα σε ένα θερμοκήπιο (Σχήμα 74).



Σχήμα 74. Η υδροπονία ως εναλλακτική μέθοδος κατανάλωσης του ενωμένου αζώτου (νιτρικά) που παράγεται στην ιχθυοκαλλιέργεια. Συνάμα και επιπρόσθετη παραγωγή λαχανικών. Η υδροπονία αποκτά νόημα μόνο σε κλειστά συστήματα. (Σχήμα από: http://www.oakhillshydroponics.com/τροποποιημένο_από_Γ._Χώτο).

Συνεπώς χρησιμοποιώντας νερό από ιχθυοκαλλιέργεια, όχι μόνο καλύπτουμε τις υδατικές ανάγκες των φυτών αλλά τους παρέχουμε και όλα τα βασικά αναγκαία θρεπτικά στοιχεία, δηλαδή άζωτο και φώσφορο. Ένας άλλος τρόπος για την απαλλαγή του νερού από τα νιτρικά είναι όπως έχει ήδη αναφερθεί η **απονιτροποίηση**. Στην αναερόβια διαδικασία της απονιτροποίησης χρησιμοποιείται μεθανόλη ως πηγή άνθρακα και το τελικό προϊόν της μετατροπής των νιτρικών είναι το αέριο άζωτο (N_2) το οποίο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Εάν η απονιτροποίηση συμβαίνει σε ξεχωριστό τμήμα της μονάδας, τότε με την μείωση των νιτρικών που επιτυγχάνεται μειώνεται και η ανάγκη για ανανέωση με φρέσκο νερό. Αν

η απονιτροποίηση γίνεται εκτός της μονάδας με σκοπό τη μείωση του περιεχομένου αζώτου στο νερό που θα απορριφθεί στον φυσικό **υδαταποδέκτη**, τότε εναλλακτικώς και με σκοπό την εξοικονόμηση της απαραίτητης μεθανόλης που απαιτεί η απονιτροποίηση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πλούσιο σε διαλυμένο άνθρακα νερό που απορρίπτεται από τη μονάδα επεξεργασία της λάσπης. Όλα αυτά πρέπει να σχεδιαστούν σωστά από ειδικούς τεχνικούς διότι η απονιτροποίηση είναι μεν μια διαδικασία αποτελεσματικότερη για την απαλλαγή από το διαλυμένο άζωτο όμως απαιτεί λεπτές ρυθμίσεις και διαχείριση.



Σχήμα 75. Διαγραμματική συνοπτική αποτύπωση διαχείρισης των αποβλήτων μιας μονάδας ιχθυοκαλλιέργειας με κλειστό σύστημα. Το πρόβλημα έγκειται κυρίως στην υγρή πυκνή μάζα με τα συμπυκνωμένα οργανικά στερεά τα οποία πρέπει με κάποια μέθοδο να «μεταλλοποιηθούν», να γίνουν δηλαδή θρεπτικά διαλυμένα στοιχεία.

Ακόμα και με τα καλύτερα συστήματα ανακύκλωσης και καθαρισμού του νερού από τους ρυπαντές, δεν μπορεί να υπάρξει σύστημα με μηδενική απόρριψη νερού (zero discharge). Κάτι τέτοιο θα ήταν οικονομικώς ανέφικτο αλλά και επιζήμιο επειδή στο ίδιο νερό τελικά θα συσσωρεύονταν και επιβλαβή μέταλλα και φωσφορικές ενώσεις.

Από οικολογική άποψη εκτός από την υδροπονία μπορεί να εφαρμοστεί και η ακόμα καλύτερη λύση του συνδυασμού εντατικής με εκτατική υδατοκαλλιέργεια. Μια τυπική περίπτωση είναι η διοχέτευση του

θρεπτικώς φορτισμένου απόβλητου νερού από ένα κλειστό σύστημα, σε υπαίθριες χωμάτινες δεξαμενές εκτατικής καλλιέργειας ψαριών όπως ο κυπρίνος ή η τιλάπια. Το νερό πλούσιο σε θρεπτικά θα προκαλέσει αύξηση της φυσικής παραγωγικότητας στις χωμάτινες δεξαμενές από την οποία θα ωφελούνται και θα αυξάνονται τα εκεί εκτρεφόμενα ψάρια. Η υπερβολική ανάπτυξη φυκών και υδρόβιας βλάστησης θα ελέγχεται μέσω της κατανάλωσής των από χορτοφάγους κυπρίνους (*Ctenopharyngodon idella*).

Τελικά ακόμα και νερό από τις δεξαμενές εκτατικής καλλιέργειας που θα έχει απαλλαγεί από μεγάλο μέρος των θρεπτικών του μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά από το κλειστό σύστημα.

12. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας του νερού

Η διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού στη βέλτιστη περιοχή για την αύξηση του εκτρεφόμενου είδους ψαριού είναι βασικότερη παράμετρος. Αλλά είδη είναι προσαρμοσμένα στη φύση σε χαμηλής θερμοκρασίας νερά και άλλα σε θερμά.

Υπάρχει ένα εύρος θερμοκρασίας μέσα στο οποίο διαβιούν. Τα σαλμονιδή για παράδειγμα δεν απαντώνται σε νερά με θερμοκρασία ανώτερη των 22-24 °C. Αντιθέτως, είδη όπως η τιλάπια αντέχουν και σε άνω των 35 °C ενώ πεθαίνουν σε θερμοκρασίες κάτω των 12 °C περίπου. Κατά μια γενική και αυθαίρετη κατηγοριοποίηση, τα διακρίνουμε σε «ψυχρά» και «θερμά» είδη ψαριών. Όλα όμως όπου και αν έχουν καταταχτεί, παρουσιάζουν το βέλτιστο του μεταβολισμού τους σε κάποια ανώτερη θερμοκρασία από το μέσον της κλίμακας του εύρους θερμοκρασίας όπου επιβιώνουν. Δηλαδή η πέστροφα επιβιώνει σε 4-25 °C με βέλτιστο μεταβολισμού τους 18 °C. Η τιλάπια επιβιώνει σε 12 – 40 °C με βέλτιστο τους 28 °C, το χέλι στο εύρος 5-32 °C έχει βέλτιστο τους 25 °C, κ.ο.κ.

Αυτή ακριβώς τη **βέλτιστη θερμοκρασία** επιδιώκουμε να επιτύχουμε ή έστω να προσεγγίσουμε στο κλειστό σύστημα, με σκοπό τη γρήγορη αύξηση, κάτι που δεν είναι εύκολο να γίνει χωρίς κατανάλωση ενέργειας. Στα ανοικτά συστήματα δεν μπορεί να γίνει ρύθμιση της θερμοκρασίας, είμαστε στο «έλεος» της φύσης, απλώς έχουμε δημιουργήσει την εκάστοτε ιχθυοκαλλιέργεια στο μέρος με τις κατάλληλες κλιματολογικές συνθήκες για το είδος ψαριού που αντέχει σε αυτές. Στα κλειστά συστήματα όμως επιδιώκουμε να φέρουμε και τη θερμοκρασία στα μέτρα των αναγκών μας. Συνήθως επιδιώκουμε την αύξησή της και σε αυτό μας βοηθά το ίδιο το σύστημα καθώς θα συσσωρεύει θερμότητα από τη θερμότητα που ο μεταβολισμός των ψαριών και των βακτηριδίων αποβάλλει, από την τριβή των περιστρεφόμενων μερών των αντλιών και από ποικίλες άλλες διεργασίες. Τελικά αυτό μπορεί να καταλήξει ακόμα και σε **υπερθέρμανση** και μόνο η είσοδος του φρέσκου νερού θα ελέγξει

τη θερμοκρασία του με επαναφορά του σε μια αποδεκτή τιμή. Αν αυτή η απλή διαδικασία αποδειχθεί ανεπαρκής και η θερμοκρασία του νερού έχει την τάση να ξεφεύγει και πάνω από το βέλτιστο, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί «αντλία θερμότητας» (heat pump). Η ίδια τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί και όταν το νερό παρ' όλη την θερμότητα που παράγεται από τις παραπάνω διεργασίες παραμένει πολύ κρύο και χρειάζεται επιπλέον θέρμανση.

Η αντλία θερμότητας χρησιμοποιεί την ενέργεια που παθητικά χάνεται από το απορριπτόμενο νερό ή διαφεύγει στον περιβάλλοντα αέρα. Αυτή η ενέργεια με τον κατάλληλο μετατροπέα χρησιμοποιείται για να δροσίξει το ανακυκλούμενο νερό στη μονάδα. Με ένα παρόμοιο τρόπο μπορούμε να εξοικονομήσουμε κόστος θέρμανσης ή ψύξης χρησιμοποιώντας μέθοδο ανάκτησης της ενέργειας με έναν εναλλάκτη θερμότητας (heat exchanger). Με αυτόν, η θερμότητα στο απορριπτόμενο από τη μονάδα νερό μεταφέρεται στο κρύο φρέσκο νερό ή και το αντίστροφο (από το κρύο στο ζεστό) ανάλογα με τον τύπο της εκτροφής («θερμών» ή «ψυχρών» ψαριών).

Ο μηχανισμός της μεταφοράς συνίσταται στην διοχέτευση και των δύο ρευμάτων νερού (εξερχόμενο-εισερχόμενο) στον εναλλάκτη, όπου χωρίς να αναμιγνύονται, οι σωλήνες μεταφοράς του ενός είναι σε επαφή με τους σωλήνες του άλλου (δημιουργώντας καταλλήλως μεγάλη επιφάνεια επαφής), έτσι που η ενέργεια (θερμότητα) θα ρεύσει από την υψηλότερη (θερμότερη) στη χαμηλότερη (ψυχρότερη) περιοχή. Παρόμοιος μηχανισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο σύστημα εξαερισμού, κατά τον οποίο ένας εναλλάκτης θερμότητας αέρος θα χρησιμοποιεί τον θερμότερο αέρα που δημιουργείται στο εσωτερικό της μονάδας όταν αυτός διαφεύγει προς τα έξω, για να θερμάνει τον ψυχρότερο που εισέρχεται. Με αυτή την τεχνική μπορεί να εξοικονομηθεί αρκετή ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των κλιματιστικών.

Συνήθως τα κλειστά κυκλώματα εκτρέφουν ψάρια των θερμών νερών και οι ανάγκες για υψηλές θερμοκρασίες νερού ιδιαίτερα σε ψυχρές περιοχές, δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από την παραγόμενη θερμότητα του συστήματος (μεταβολισμός, αντλίες κ.ά.). Ιδιαίτερα τους ψυχρούς μήνες του έτους πρέπει να χρησιμοποιηθούν θερμαντικά μέσα (καυστήρες, κλιματιστικά) μαζί και με τους παραπάνω αναφερόμενους εναλλάκτες θερμότητας. Σήμερα υπάρχουν αρκετές τεχνολογικές λύσεις τιθάσευσης της ενέργειας από τη φύση και συνεχώς βελτιώνονται. Υπάρχουν αντλίες θερμότητας γεωθερμίας, αιολική ενέργεια, φωτοβολταϊκά, ενέργεια των κυμάτων, των ρευμάτων, κ.ά. Σε τι βαθμό όλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αποτελεί το αντικείμενο έρευνας παγκοσμίως. Πάντως οι εξελίξεις είναι ραγδαίες και οι εφαρμογές ευχάριστα κλιμακούμενες.

13. Ασθένειες και καταπολέμηση

Η μεγάλη πυκνότητα των ψαριών στις δεξαμενές και οι συχνά οριακές καταστάσεις λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος, μπορεί να ευνοήσουν νοσήσεις οι οποίες στην οξεία τους μορφή να καταλήξουν σε θανατηφόρα μαζικά επεισόδια. Όλα τα είδη ψαριών σε όλα τα στάδια της ζωής τους μπορεί να νοσήσουν. Όμως αυτό δεν αποτελεί τη φυσιολογική τους κατάσταση και το ανοσοποιητικό τους σύστημα θα καταφέρνει να καταπολεμά τα παθογόνα αν η φυσιολογία τους είναι καλή. Και για να είναι καλή πρέπει να έχουν οξυγόνο και να κολυμπούν σε νερό με μη ανιχνεύσιμη αμμωνία. Όλα τα υπόλοιπα έπονται. Δηλαδή δεν χρειάζεται ιδιαίτερη μνεία για το αυτονόητο, ότι δεν νοείται μονάδα εκτροφής σε μέρη όπου το νερό της υδροληψίας είναι ακατάλληλο από άποψη φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, δηλαδή περιέχει βαρέα μέταλλα, υπολείμματα φυτοφαρμάκων, εντομοκτόνων και τα συναφή, είναι υπερκορεσμένο σε αέριο άζωτο κ.λπ. Με αυτά τα βασικά διασφαλισμένα, τα υπόλοιπα περί σωστής θερμοκρασίας, κατάλληλης και επαρκούς τροφής κ.λπ. είναι επίσης αυτονόητα και δεν χρειάζονται ανάλυση. Υγιές περιβάλλον λοιπόν θα δημιουργήσει υγιή ψάρια και θα αφήσει λίγες πιθανότητες για ξέσπασμα ασθένειας. Σε αντίθετη περίπτωση τα στρεσαρισμένα ψάρια είναι σίγουρο ότι θα νοσήσουν. Ένα σίγουρο οπτικό σημάδι ότι τα ψάρια υποφέρουν (εκτός των συχνά αναφερόμενων όπως ληθαργική κατάσταση, παραμονή στον πυθμένα, ασταθής κολύμβηση και τα συναφή), είναι και το χρώμα τους. Ψάρια σε καλή κατάσταση έχουν λαμπερό ανοιχτό χρώμα, κολυμπώντας ζωηρά ενώ τα στρεσαρισμένα, σκοτεινό χρώμα και νωθρή κολύμβηση.

Τα κλειστά συστήματα έχουν το πλεονέκτημα της απομόνωσης από το εξωτερικό περιβάλλον και της κατασκευής των από **μη πορώδη**, κατά την πλειονότητά τους, πλαστικά υλικά (π.χ. σωλήνες, δεξαμενές κ.λπ.). Επιπλέον, συνήθως αποτελούνται από ξεχωριστά λειτουργούντα τμήματα με εύκολη απομόνωση του ενός από το άλλο (εννοείται ως προς το κυκλοφορούν νερό). Έτσι λοιπόν μπορούμε να απομονώσουμε από τα υπόλοιπα το τμήμα που θα παρουσιάσει ασθένεια και να δράσουμε τοπικά με θεραπεία. Κάθε νέο ζώο που εισέρχεται για εκτροφή στο σύστημα, είτε πρόκειται για αυγά, είτε για ιχθύδια, είτε για μεγαλωμένα ψάρια, πρέπει να παραμένει πρώτα σε καραντίνα σε ξεχωριστή οξυγονωμένη δεξαμενή και να του γίνεται προληπτικό θεραπευτικό μπάνιο με κατάλληλα χημικά. Δεν υπάρχει αυτό που λένε «ελεύθερο ασθενειών», όλα είναι δυνητικοί μεταφορείς ασθενειών.

Τα διάφορα υλικά του συστήματος, είτε πρόκειται για σωληνώσεις, είτε για εργαλεία, είτε για συσκευές, πρέπει περιοδικώς να απολυμαίνονται και αυτό γίνεται πρακτικότερα στο τέλος κάποιου κύκλου εκτροφής. Πρόκειται για την ονομαζόμενη «all in – all out» πρακτική, η οποία συνίσταται στο ότι στο εκάστοτε τέλος της εκτροφής γίνεται πλήρες

άδειασμα του συστήματος και τα πάντα απολυμαίνονται πριν ξαναγεμίσει με νερό και ψάρια. Στον Πίνακα 2 αναφέρονται οι βασικές προφυλάξεις που μειώνουν τον κίνδυνο εμφάνισης ασθενειών.

Οποια μέθοδος και αν ακολουθείται, όσο μεγάλο ή μικρό και αν είναι το σύστημα, δεν είναι εύκολο σε ένα κλειστό κύκλωμα να μεταφερθεί όλο το ζωϊκό κεφάλαιο κάπου αλλού για να υποστεί θεραπεία. Είμαστε αναγκασμένοι να λαμβάνουμε θεραπευτικά ή προληπτικά μέτρα με τα ψάρια μέσα στις δεξαμενές. Το πολύ να σταματήσει το τάισμα. Συνεπώς τα όποια χημικά θα πρέπει να διαλυθούν μέσα στο νερό σε ικανή συγκέντρωση για να σκοτώσουν τα παθογόνα μεν, αλλά όχι και τα χρήσιμα βακτηρίδια του βιολογικού φίλτρου. Γι' αυτό το λόγο είναι που εφαρμόζεται το «δόγμα» «καλύτερα ασφαλής παρά λυπημένος», το οποίο μεταφραζόμενο σε δράσεις καλεί για προληπτικά μέτρα όπως η υπεριώδης ακτινοβολήση (βοηθά πάρα πολύ) και το «λουτρό» με απολυμαντικά καταπολέμησης εκτοπαρασίτων (κυρίως).

Πίνακας 2. Οι διάφορες ενέργειες πρόληψης και προφύλαξης από ασθένειες σε ένα κλειστό σύστημα

ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΤΡΟΠΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Καθαρότητα φρέσκου νερού	Κατά προτίμηση υπόγειο νερό. Απολύμανση με UV. Σε μερικές περιπτώσεις χρήση φίλτρου άμμου και όζοντος
Απολύμανση συστήματος	Γεμίζουμε το σύστημα με νερό και ρυθμίζουμε το pH σε 11-12, διαλύοντας υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ~ 1 kg/m ³ νερού.
Απολύμανση σκευών επιφανειών	- Βυθίζουμε σε, ή ψεκάζουμε με διάλυμα 1,5 % ιωδίου. Περιμένουμε 10 min πριν ξεπλύνουμε με καθαρό νερό.
Απολύμανση αυγών	Για αυγά «σταδίου ματιού» σαλμονιδών, τα αφήνουμε για 10 min σε διάλυμα 30 ml ιωδίου σε 50 L νερό. Αλλάζουμε το διάλυμα για κάθε 50 kg αυγών.
Προσωπικό	Αλλάζουμε ρούχα και υποδήματα εισερχόμενοι στη μονάδα. Πλένουμε με απολυμαντικό σαπούνι τα χέρια.
Επισκέπτες	Αλλάζουμε υποδήματα ή εμβαπτίζουμε τις πατούσες των υποδημάτων σε δοχείο με διάλυμα 2% ιωδίου. Πλένουμε τα χέρια. Πολιτική: «Δεν αγγίζουμε» για τους επισκέπτες.

Η θεραπεία κατά των **εκτοπαρασίτων** (παράσιτα προσκολλημένα στην επιδερμίδα και στα βράγχια των ψαριών), αποτελεί την πρωταρχική και απαραίτητη θεραπεία για κάθε είδους ψάρι, για κάθε είδους εντατική

εκτροφή. Είναι κατάλληλη θεραπεία και για τους **μύκητες** που μπορεί να προσβάλλουν τα ψάρια. Η θεραπεία γίνεται με διάλυση χημικών ουσιών στο νερό. Ειδικά για τα γλυκά νερά η χρήση απλού **μαγειρικού άλατος** (NaCl), είναι αποτελεσματική θεραπεία για τα περισσότερα εκτοπαράσιτα και για την βακτηριδιακή ασθένεια των βραγχίων. Εάν η θεραπεία με αλάτι δεν ωφελήσει, τότε χρησιμοποιούνται δραστικότερα χημικά όπως **φορμόλη** (HCHO) ή **υπεροξείδιο του υδρογόνου** (οξυζενέ – H₂O₂) που θα είναι σίγουρα δραστικά για κάθε παραμένονσα παρασιτική προσβολή.

Εάν γίνεται **εμβάπτιση** («μπάνιο απολύμανσης») των ψαριών σε ξεχωριστό δοχείο, τότε χρησιμοποιούνται είτε φορμόλη είτε έτοιμα σκευάσματα του εμπορίου όπως praziquantel και flubendazol.

Σημείωση: **Φορμαλδεΰδη** είναι η χημική ένωση HCHO ως **αέριο**. Διάλυμα 40 % φορμαλδεΰδης γίνεται 100 % υγρό **φορμόλης** (formalin). Με βάση τη φορμόλη δημιουργούνται τα εκάστοτε συνιστώμενα διαλύματα.

Η εμβάπτιση σε ξεχωριστό δοχείο είναι η ιδανικότερη μέθοδος αλλά τεχνικώς δύσκολη να εφαρμοστεί, καθώς ο όγκος των ψαριών που χρειάζεται θεραπεία είναι πολύ μεγάλος. Έτσι τα ψάρια δέχονται τη θεραπεία μέσα στις δεξαμενές εκτροφής με κλείσιμο της ροής εισόδου του νερού και ενεργοποίησης του αερισμού μέσα στη δεξαμενή. Η κατάλληλη ποσότητα χημικού υπό μορφή διαλύματος ρίχνεται στη δεξαμενή και τα ψάρια κολυμπούν σε αυτό το νερό για μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Κατόπιν ανοίγει ξανά η βάνα εισόδου και το μίγμα του χημικού αραιώνεται με την εναλλαγή του νερού της δεξαμενής. Το νερό που εξέρχεται από τη δεξαμενή θα αραιωθεί ακόμα περισσότερο, καθώς θα αναμιγνύεται με τον υπόλοιπο όγκο του συστήματος έτσι που όταν φθάσει στο βιολογικό φίλτρο, η συγκέντρωση του χημικού θα είναι πολύ μικρότερη από αυτή που είχε στη δεξαμενή. Με αυτό τον τρόπο η υψηλή συγκέντρωση του χημικού στη δεξαμενή σκοτώνει τα παράσιτα, ενώ στο βιολογικό φίλτρο η χαμηλή του συγκέντρωση έχει ελάχιστη αρνητική επίδραση. Τα ψάρια όπως και τα νιτροποιητικά βακτηρίδια μπορούν να προσαρμοζονται σε ολοένα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φορμόλης, οξυζενέ ή αλατιού, από τη μια θεραπεία στην άλλη, αρκεί η αύξηση της συγκέντρωσης να γίνεται βαθμιαία και βεβαίως μέχρι κάποιου ανωτάτου ορίου.

Η εμβάπτιση σε απολυμαντικό μπορεί εύκολα να γίνει σε αυγά ψαριών (π.χ. σαλμονιδών) όταν στη μονάδα λειτουργεί τμήμα ολοκληρωμένης καλλιέργειας. Εκατομμύρια αυγά μπορούν να απολυμανθούν ή να απαλλαγούν από μύκητες (*Saprolegnia* sp) σε σύντομο χρόνο εμβάπτισης είτε σε ιωδιούχο διάλυμα είτε σε διάλυμα 0,7 % αλατιού για 20 min.

Στα κλειστά συστήματα που λειτουργούν ως ιχθυοεκκολαπτήρια και όπου τα ψάρια παραμένουν για λίγο στις ειδικές δεξαμενές εκκόλαψης, η παραγόμενη από αυγά ή ιχθύδια αμμωνία είναι πολύ λίγη, ο συνολικώς

χρησιμοποιούμενος όγκος νερού είναι μικρός και η όποια θεραπεία μπορεί να γίνεται σε όλο το σύστημα εν είδη εμβάπτισης. Κατόπιν η σχετικά λίγη ποσότητα νερού από όλο το σύστημα μπορεί να αντικατασταθεί με φρέσκο νερό.

Στις μεγάλες μονάδες εκτροφής όμως η θεραπεία είναι μια πιο ευαίσθητη διαδικασία. Ο βασικός κανόνας είναι να διατηρούνται χαμηλές συγκεντρώσεις απολυμαντικού για μεγαλύτερο χρόνο, κάτι που απαιτεί πείρα και φροντίδα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται περισσότερες από μία φορές με τη δοσολογία να αυξάνεται σταδιακά, σε χρονική απόσταση μερικών ημερών κατά τις οποίες παρακολουθούνται η συμπεριφορά των ψαριών, τυχόν θνησιμότητες και η ποιότητα του νερού (κυρίως pH και αμμωνία). Κανονικά τα νιτροποιητικά βακτηρίδια θα προσαρμοστούν σε αυξανόμενες συγκεντρώσεις απολυμαντικού οι οποίες συνάμα θα σκοτώνουν τα εκτοπαράσιτα πιο αποτελεσματικά. Το αλάτι είναι εξαιρετικό για μακρές θεραπείες αρκετών ημερών. Η φορμόλη είναι αποτελεσματική και για διαστήματα ακόμα και 4 - 6 ωρών. Σε παλαιότερα εγχειρίδια ιχθυοκαλλιέργειας έβριθαν οι αναφορές περί της καταστροφικής επίδρασης της φορμόλης στα νιτροποιητικά βακτηρίδια. Σήμερα έχει πλέον ξεκαθαρίσει το θέμα και έχει αποδειχθεί ότι το βιοφίλτρο προσαρμόζεται σε «λογικά» επίπεδα φορμόλης (15 mg/L για 4-6 h) και την καταναλώνει ως «πηγή» άνθρακα όμοια με τις άλλες πηγές άνθρακα που προσφέρουν τα διάφορα οργανικά μόρια του συστήματος.

Η κατανάλωση της φορμόλης σε ένα ρυθμισμένο βιολογικό φίλτρο στους 15 °C είναι:

8 mg φορμόλης/ h /m² ειδικής επιφάνειας μέσω

Όμως κατά το διάστημα της κατανάλωσης της φορμόλης από τα βακτηρίδια, η απόδοση του βιολογικού φίλτρου θα είναι μειωμένη, κάτι που δεν μπορεί να αποφευχθεί μεν, αλλά καθώς τα ψάρια δεν τρέφονται, δεν υπάρχει πρόσθετη αμμωνία για να τα επιβαρύνει.

Σε ένα κλειστό σύστημα δεν μπορούν να δοθούν ακριβείς δοσολογίες για την χρήση των χημικών απολυμαντικών ουσιών, καθώς πρέπει να ληφθούν υπ' όψη παράμετροι όπως το είδος του ψαριού, το μέγεθός του, η θερμοκρασία, η σκληρότητα του νερού, η φόρτιση με οργανικές ουσίες, ο ρυθμός εναλλαγής, ο εγκλιματισμός κ.ά. Παρ' όλα αυτά μπορούν να δοθούν οι παρακάτω προσεγγίσεις.

Αλάτι (NaCl). Ασφαλές στη χρήση. Στο γλυκό νερό καταπολεμά το εκτοπαράσιτο της ιχθυοφθειρίωσης (Ich – *Ichthyophthirius multifiliis*) που προκαλεί την ασθένεια της «λευκής κηλίδας» (white spot disease) και τον κοινό μύκητα *Saprolegnia* sp. Τα ψάρια ήδη περιέχουν 0,8 % αλάτι στα σωματικά τους υγρά, οπότε εύκολα μπορούν να αντέξουν για αρκετές εβδομάδες 1 % και 1,5 % αλάτι στο νερό, συγκέντρωση που σκοτώνει τα ευρισκόμενα στη στήλη του νερού και στο βυθό άτομα του παρασίτου Ich. Συγκεντρώσεις 0,3 – 0,5 % αποτρέπουν μολύνσεις από μύκητες.

Φορμόλη (40 % HCHO). Χαμηλές συγκεντρώσεις φορμόλης (15 mg/L) για αρκετό χρόνο (4-6 ώρες) είναι αποτελεσματικές για την καταπολέμηση των εκτοπαρασίτων *Ichthyobodo necator* (Costia), *Trichodina* sp., *Gyrodactylus* sp., βλεφαριδωτών πρωτοζώων και του Ich. Αποσυντίθεται στο βιολογικό φίλτρο (βλ. παραπάνω).

Υπεροξείδιο του υδρογόνου (οξυζενέ – H₂O₂). Αν και δεν χρησιμοποιείται συχνά, πειραματικές εργασίες έχουν δώσει παρόμοια με τη φορμόλη δράση σε συγκεντρώσεις 8-15 mg/L για 4-6 ώρες. Ομως μετά τη χρήση του το βιοφίλτρο θα επηρεαστεί αρνητικά για 24 περίπου ώρες και θα επανέλθει σε μερικές ημέρες.

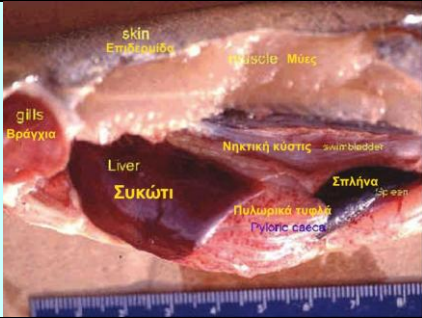
Αν αντί για τις παραπάνω ουσίες χρησιμοποιηθούν άλλες πολύ πιο δραστικές, όπως ο θεικός χαλκός (CuSO₄) ή η Τ-χλωραμίνη, παρόλο που είναι πολύ αποτελεσματικές εκτός από τα εκτοπαρασίτα και σε βακτηριδιακές μολύνσεις (π.χ. βακτηριδιακή ασθένεια των βραγχίων), δεν συνιστώνται επειδή είναι καταστροφικές για τα νιτροποιητικά βακτηρίδια του βιολογικού φίλτρου.

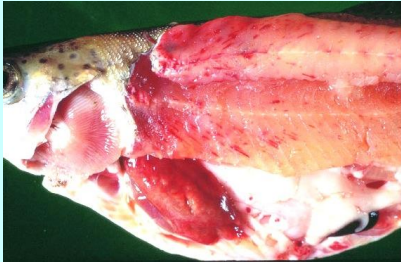
Για τη θεραπεία **βακτηριδιακών μολύνσεων**, όπως η δοθηνίωση (furunculosis), η βιβρίωση ή η νεφρική βακτηριδιακή ασθένεια, η χρήση **αντιβιοτικών** είναι μονόδρομος. Τα αντιβιοτικά επίσης είναι ο μόνος τρόπος για να σκοτωθούν και παράσιτα που ζουν στο εσωτερικό του ψαριού.

Τα αντιβιοτικά αναμιγνύονται με την τροφή και δίδονται καθημερινώς αρκετές φορές για μια περίοδο 7-10 ημερών. Τα αντιβιοτικά δίδονται σε δοσολογίες που έχουν οριστεί από ιχθυοπαθολόγο και το πρόγραμμα της θεραπείας τηρείται αυστηρά και δεν διακόπτεται έστω και αν εν τω μεταξύ παρατηρηθεί σταμάτημα της θνησιμότητας. Κάτι τέτοιο μπορεί να προκαλέσει επανεμφάνιση της ασθένειας.

Η θεραπεία με αντιβιοτικά σε ένα κλειστό σύστημα, παρόλο το γεγονός ότι η συγκέντρωσή τους στο νερό είναι μικρότερη από αυτή στο σώμα του ψαριού, θα έχουν κάποια μικρή αρνητική επίδραση στα βακτηρίδια του βιολογικού φίλτρου. Το πόσο αρνητική μπορεί να είναι αυτή η επίδραση θα φανεί από την προσεκτική παρακολούθηση της αμμωνίας η οποία αν αυξηθεί υπέρμετρα σημαίνει ότι έχει ψοφήσει σημαντική μάζα νιτροποιητικών βακτηριδίων. Αμεσα σε μια τέτοια περίπτωση πρέπει να μειωθεί ο ρυθμός παροχής τροφής και να ανανεωθεί περισσότερο το νερό. Για τις ασθένειες τις οφειλόμενες σε **ιούς** όπως η μολυσματική παγκρεατική νέκρωση (IPN), η ιική αιμορραγική σηψαιμία (VHS) κ.ά. δυστυχώς δεν υπάρχει θεραπεία. Η μόνη λύση για την απαλλαγή είναι το άδειασμα όλης της μονάδας, η γενική απολύμανση και η επανέναρξη.

ΟΙ ΚΥΡΙΩΤΕΡΕΣ ΑΣΘΕΝΕΙΕΣ ΤΩΝ ΨΑΡΙΩΝ		
Aeromonas		Προκαλείται από τα κινητικά βακτηρίδια του γένους <i>Aeromonas</i> . Προσβάλλει όλα τα είδη ψαριών χωρίς διαφορές στην εκδήλωση. Χαρακτηρίζεται από πληγές, έλκη και αιμορραγίες. Καταπολεμάται με μείωση του στρες και με υπερμαγγανικό κάλιο (KMnO_4) στο νερό.
Βακτηριδιακή Νεφρική Ασθένεια (Bacterial Kidney Disease)		Βακτηριδιακή μόλυνση προκαλούμενη από το μη κινητικό <i>Cotynebacterium</i> . Ασθένεια κυρίως των σαλμονιδών. Εξωτερικώς παρουσιάζει εξωφθαλμία και μικρά οζίδια ή ανοιχτές πληγές. Εσωτερικώς τα νεφρά είναι πρησμένα με κακώσεις και αιμορραγία. Καταπολεμάται με ερυθρομυκίνη στην τροφή.
Εντερική Σηψαιμία Γατόψαρων (Enteric Septicemia of Catfish)		Βακτηριδιακή μόλυνση από <i>Edwardsiella ictaluri</i> . Εξωτερικώς χαρακτηρίζεται από έλκη με χαρακτηριστική «τρύπα στο κεφάλι». Τα ψάρια κολυμπούν σε κύκλους. Θεραπεία με αντιβιοτικά Τεραμυκίνης, Romet B, Romet 30 στην τροφή.
Ιχθυοφθειρίωση (Ich)		Παρασιτική ασθένεια προκαλούμενη από το πρωτόζωο <i>Ichthyophthirius multifiliis</i> που προσβάλλει όλα τα είδη αλλά κυρίως αυτά των θερμών ή δροσερών νερών. Εξωτερικά χαρακτηρίζεται από λευκές μικρές κηλίδες στην επιδερμίδα και στα βράγχια. Η πλήρης θεραπεία απαιτεί την εξολόθρευση των διαφορετικών σταδίων ζωής του και γίνεται με φορμόλη, θειϊκό χαλκό (CuSO_4) και υπερμαγγανικό κάλιο.
Πολλαπλασιαστική Ασθένεια των Βραγχίων (Proliferative Gill Disease)		Προκαλείται από τον παρασιτικό ολιγόχαιτο σκώληκα <i>Aurantiacti-nomyxon</i> sp. και προσβάλλει όλα τα είδη. Το πρώτο σύμπτωμα είναι η μείωση της όρεξης. Τα ψάρια κολυμπούν νωθρά στην επιφάνεια. Προσβάλλει τα βράγχια τα οποία διογκώνονται και παρουσιάζονται διάστικτα με λευκές κηλίδες. Τελικά καταστρέφονται και επέρχεται θάνατος. Δυστυχώς δεν υπάρχει αποτελεσματική θεραπεία ή πρόληψη.

Βιβρίωση (Vibriosis Infection)		Μόλυνση προκαλούμενη από βακτηρίδια του γένους <i>Vibrio</i> που προσβάλλει κυρίως τα θαλασσινά ψάρια. Τα συμπτώματα είναι έλκη, ερυθροαιματώματα στη βάση των πτερυγίων και στο στόμα και εσωτερική αιμορραγία. Ευτυχώς υπάρχει και διατίθεται εμβόλιο. Η θεραπεία αν ξεσπάσει η ασθένεια γίνεται με αντιβιοτικά κυρίως σουλφαμεραζίνη ή τετραμυκίνη.
Βακτηριδιακή Ασθένεια των Βραγχίων (Bacterial Gill Disease)		Μόλυνση προκαλούμενη από το βακτηρίδιο <i>Flavobacterium branchiophila</i> που προσβάλλει όλα τα είδη. Με την πρόοδο της ασθένειας το επιθήλιο των βραγχίων πολλαπλασιάζεται με αποτέλεσμα συγκόλληση των βραγχιακών ελασμάτων. Τα ψάρια σταματούν να τρέφονται και κολυμπούν στην επιφάνεια. Θεραπεία με χλωριούχο βενζαλκόνιο, Hyamine 1622 & 3500 και Roccal.
Ασθένεια Columnaris		Μόλυνση προκαλούμενη από το βακτηρίδιο <i>Flavobacterium columnare</i> που προσβάλλει όλα τα είδη. Εξωτερικώς παρουσιάζει καφέ, κιτρινοκαφέ κακώσεις στα βράγχια, στην επιδερμίδα και/ή στα πτερύγια. Ευθύνεται για το λεγόμενο «σάπισμα πτερυγίων» (fin rot). Εσωτερικώς χαρακτηρίζεται από ανοιχτόχρωμο συκώτι και συσσώρευση αιματώδους υγρού στην κοιλότητα και στο έντερο. Καταπολεμάται με μείωση του στρες και υπερμαγγανικό κάλιο στο νερό.
Δοθηνίωση (Furunculosis)		Ασθένεια των σαλμονιδών προκαλούμενη από μόλυνση με το βακτηρίδιο <i>Aeromonas salmonicida</i> . Τα μολυσμένα ψάρια γίνονται ληθαργικά και κολυμπούν ανώμαλα. Το χρώμα τους σκουραίνει και παρουσιάζουν αιμορραγία στη βάση των πτερυγίων και στο στόμα. Τα χρονίως νοσούντα ψάρια παρουσιάζουν δοθίνες («καλόγηρους») στην επιδερμίδα με πηγές βαθιές μέχρι και το μυϊκό σύστημα. Θεραπεία με τετραμυκίνη, φουροζόνη ή σουλφαμεραζίνες.
Μολυσματική Αναιμία Σαλμονιδών (Infectious Salmon Anemia)		Υψηλώς μολυσματική ασθένεια των σαλμονιδών προκαλούμενη από ιό. Κλινικά συμπτώματα μετά από 2-4 εβδομάδες εμφανίζοντας χλωμά και συμπηγμένα βράγχια, συμπηγμένο συκώτι και πεπτικό σωλήνα, μεγεθυμένο σπλήνα και σοβαρή αναιμία. Η ασθένεια είναι οξύτατη και δεν υπάρχει θεραπεία. Ελπίδες γεννώνται από δοκιμαζόμενα εμβόλια.

Σαπρολεγκνίαση (Saprolegnia) Μύκητας		Μόλυνση προκαλούμενη από μύκητες κυρίως του γένους Saprolegnia. Προσβάλλει όλα τα είδη των γλυκών νερών ακόμα και τα αυγά τους. Είναι ένας καφετί μύκητας που εμφανίζεται σε νεκρά ή ημιθανή ψάρια καθώς και στα υπολείμματα της τροφής. Εξωτερικά συμπτώματα είναι οι καφετί κηλίδες από βαμβακώδους υφής μυκητιακές πληγές στην επιδερμίδα και στα βράγχια, ξηρή και αποχρωματισμένη επιδερμίδα και ενδοφθαλμία (βαθουλωμένα μάτια). Καταπολεμάται με φορμόλη, αλάτι, ξύδι.
Ιογενής Αιμορραγική Σηψαιμία (Viral Hemorrhagic Septicemia)		Μόλυνση προκαλούμενη από ραβδοϊό κυρίως στα σαλμονιδή. Εξωτερικά παρουσιάζονται αιμορραγίες στα μάτια, επιδερμίδα, βράγχια και στη βάση των πτερυγίων. Τα ψάρια σκουραίνουν και μπορεί να γίνουν ληθαργικά. Εσωτερικά παρουσιάζονται αιμορραγίες στα εντόσθια και στους σκελετικούς μύες. Διατίθεται εμβόλιο και γενικά η καλύτερη θεραπεία είναι η πρόληψη μέσω αυστηρών μέτρων υγιεινής-καθαριότητας στη μονάδα.

ΘΕΡΑΠΕΥΤΙΚΑ, ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΑ κ.λπ. ΜΕΣΑ	
Αντιβιοτικά	
Romet-30	Αντιβιοτικό χρησιμοποιούμενο για θεραπείες μολύνσεων από <i>Aeromonas</i> στα σαλμονιδή και εντερική σηψαιμία στο γατόψαρο. Προστίθεται στην τροφή σε ποσότητα 50mg/kg ψαριού/d για 5 ημέρες. Μετά τη θεραπεία απαιτούνται τουλάχιστον 42 ημέρες για τα σαλμονιδή και 5 ημέρες για τα γατόψαρα αποχής από το φάρμακο, πριν τα ψάρια δοθούν για κατανάλωση.
Τεραμυκίνη	Αντιβιοτικό καταπολέμησης μολύνσεων από <i>Aeromonas</i> , <i>Pseudomonas</i> και <i>Hemophilus</i> στα σαλμονιδή και στο γατόψαρο. Προστίθεται στη τροφή σε ποσότητα 2,5g/45kg ψαριών/d για 10 ημέρες. Απαιτούνται 21 ημέρες αποχής μετά τη λήξη πριν τα ψάρια δοθούν για κατανάλωση.
Αναισθητικά	
Γαρυφαλέλαιο	Αν και δεν έχει ακόμα πάρει έγκριση από την FDA των ΗΠΑ είναι πολύ αποτελεσματικό αναισθητικό ψαριών. Δεν είναι διαλυτό στο νερό και για να διασκορπιστεί απαιτείται δυνατή ανάμιξη για να γαλακτωματοποιηθεί. Διαφορετικά διαλύεται πρώτα σε αιθανόλη σε αναλογία 9:1 αιθανόλη/γαρυφ/λαιο. Η δραστική του συγκέντρωση είναι 40-80 mg/L ανάλογα με το είδος και το μέγεθος του ψαριού.
MS-222	Η μεθανοσουλφονική τρικαΐνη (MS-222) είναι εγκεκριμένο και το πιο αποτελεσματικό αναισθητικό χρησιμοποιούμενο σήμερα. Η δραστική του συγκέντρωση είναι 50-150 mg/L ανάλογα με το είδος και το μέγεθος του ψαριού. Απαιτούνται 21 ημέρες αποχής μετά την τελευταία θεραπεία πριν τα ψάρια δοθούν στην κατανάλωση.
Απολυμαντικά οργάνων-συσκευών	
Χλώριο (Cl₂) (υποχλωρίτης)	Το υποχλωριώδες ασβέστιο [Υποχλωρίτης - Ca(OCl) ₂] (65% χλώριο) είναι ένα αποτελεσματικό καθαριστικό-απολυμαντικό γενικής χρήσεως. Τα ψάρια απομακρύνονται από το μέσο που θα απολυμανθεί. Υποχλωρίτης με 200 ppm διαθέσιμο χλώριο χρησιμοποιείται σε συγκέντρωση 310 mg/L για απολύμανση. Μετά τη χρήση απαιτείται καλό ξέπλυμα με καθαρό νερό για να απομακρυνθεί το υπολειμματικό χλώριο, πριν ξανατοποθετηθούν ψάρια.
Εξωτερικά απολυμαντικά	
Ξίδι (οξικό οξύ – CH₃COOH)	Απλό και αποτελεσματικό μέσο για απαλλαγή των ψαριών από εκτοπαράσιτα. Το απλό μαγειρικό ξίδι σε συγκέντρωση 1-2 g/L χρησιμοποιείται για εμβάπτιση των ψαριών σε μικρά δοχεία για 1-10 min. Τα ψάρια πρέπει να παρακολουθούνται και να απομακρύνονται σε καθαρό νερό αν δείξουν σημάδια στρες.
Θεικός χαλκός (CuSO₄)	Χρησιμοποιείται εξωτερικώς για καταπολέμηση μυκήτων και εκτοπαράσιτων όπως το Ich. Οι δόσεις του ποικίλουν ανάλογα με την αλκαλικότητα (ALK) του νερού. Δεν χρησιμοποιείται όταν η αλκαλικότητα είναι λιγότερη από 20 mg/L. Δίδονται οι σχετικές του δοσολογίες (mg/L σε παρένθεση) για διάφορες αλκαλικότητες (ALK): ALK20-49ppm (0,25-0,5mg/L), ALK50-99ppm (0,6-0,75mg/L), ALK100-149ppm(0,75-1mg/L), ALK150-200ppm(1-2mg/L).

Φορμόλη	Εξαιρετικό εξωτερικό παρασιτοκτόνο και μυκητοκτόνο για όλα τα ψάρια και μυκητοκτόνο για τα αυγά των ψαριών (ιδίως σαλμονιδών). Κάθε 5 ppm (mg/L) φορμόλης αφαιρούν 1 ppm διαλυμένου οξυγόνου γι' αυτό χρειάζεται αερισμός κατά την εμφάνιση η οποία διαρκεί μισή με μία ώρα σε συγκεντρώσεις 125 - 250 mg/L. Παρακολουθούμε τα ψάρια και σε σημάδια στρες μεταφέρονται σε καθαρό νερό. Δεν χρησιμοποιείται σε αυγά κατά το 24ωρο πριν την εκκόλασή τους. Δεν πρέπει να ξεπερνιέται η συγκέντρωση των 170 mg/L όταν η θερμοκρασία νερού είναι άνω των 22 °C. Για σύντομες εμφάνισεις 15min χρησιμοποιείται σε συγκέντρωση 2000 mg/L (2g/L).
Υπερμαγγανικό Κάλιο (KMnO₄)	Χρησιμοποιείται εξωτερικώς σε συγκέντρωση 2mg/L για έλεγχο-καταπολέμηση βακτηριδιακών μολύνσεων (<i>Aeromonas</i>, <i>Columnaris</i>) και εκτοπαρασιτικών προσβολών (Ich). Συγκεντρώσεις άνω των 2mg/L μπορεί να γίνουν τοξικές για τα ψάρια αν το οργανικό φορτίο του νερού είναι χαμηλό. Αν το νερό χρωματιστεί κόκκινο και κατόπιν αλλάξει σε κίτρινο-καφετί σε λιγότερο από 12 ώρες τότε αυτό σημαίνει ότι το υπερμαγγανικό έχει διασπαστεί πολύ σύντομα και θα πρέπει να διαλύσουμε επιπρόσθετα 2 mg/L. Αποφεύγουμε την επαφή με μάτια και επιδερμίδα.
Χλωριούχο Κάλιο (NaCl)	Εξαιρετικό και απλό θεραπευτικό μέσο για τα ψάρια του γλυκού νερού. Αναστατώνει ελεγχόμενα τον ωσμωρυθμιστικό μηχανισμό τους αναγκάζοντάς τα να εκκρίνουν βλέννα η οποία παρασύρει (ή σκοτώνει σε υψηλή αλατότητα) εκτοπαράσιτα και μύκητες από την επιδερμίδα και τα βράγχια. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις μειώνει το ωσμωτικό στρες κατά τους χειρισμούς των ψαριών. Χρησιμοποιείται για εμφάνιση 10 - 30 min σε 10-30 g/L. Χρησιμοποιείται σε χαμηλή συγκέντρωση 0,2-0,5 g/L για απεριόριστο χρόνο καθώς βοηθά στην αντιμετώπιση ωσμωτικού στρες και ως προστατευτικό για την επιβλαβή δράση των νιτρωδών.

14. Η διαχείριση του συστήματος

Η γνώση των επί μέρους τμημάτων ενός κλειστού κυκλώματος με τα χαρακτηριστικά, τις δυνατότητες και τις αδυναμίες τους, αποτελεί οπωσδήποτε βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία. Ομως σωστή λειτουργία για το καλό των ψαριών (υγεία-αύξηση) που θα καταλήξει δικό μας «καλό» (κέρδος). Και ακριβώς επειδή αυτός είναι ο σκοπός, ο δρόμος προς την επίτευξή του περνά από την καλή διαχείριση όλων των συστατικών του συστήματος (έμβια, άβια). Διότι πως είναι δυνατόν να λειτουργήσουμε σωστά τα μηχανήματα όταν δεν γνωρίζουμε το τι απαιτούν από αυτά τα ψάρια; Και για να γνωρίζουμε τι χρειάζονται τα ψάρια, πρέπει να γνωρίζουμε τα βασικά της φυσιολογίας των. Και επειδή η φυσιολογία εξαρτάται από το περιβάλλον δεν είναι δυνατόν να μην γνωρίζουμε τα στοιχεία του περιβάλλοντος που καθορίζουν την επιβίωση και αύξηση των ψαριών. Δηλαδή, οξυγόνο, αμμωνία, διοξείδιο, θερμοκρασία, pH κ.λπ., όλα αυτά τα οποία εξαρτώνται από τη λειτουργία των μηχανημάτων, διότι μην το ξεχνάμε, λειτουργούμε ένα απόλυτα ελεγχόμενο κλειστό σύστημα με ανακύκλωση νερού. Ετσι λοιπόν σε μια αλυσίδα αλληλοεπίδρασης-αλληλοεξάρτησης, όλα συμπλέκονται αρμονικά και εμείς έχουμε τους κρίκους με μέλημα να φτιάξουμε την αλυσίδα. Ας φροντίσουμε οι κρίκοι της να είναι από «μέταλλο» για να αντέχει και όχι από «νήμα».

14.1. Αντικείμενο ενός κλειστού συστήματος

Η πρώτη ύλη που εισέρχεται σε ένα σύστημα ανακύκλωσης του νερού και πρέπει να μεταμορφωθεί κάποια στιγμή σε εμπορεύσιμο προϊόν, είναι ο γόνος των ψαριών. Εάν μπορούμε να παράγουμε γόνο σε ιδιαίτερο τμήμα της μονάδας, δηλαδή διατήρηση γεννητόρων-απελευθέρωση και γονιμοποίηση αυγών-εκκόλαψη-πρώτη διατροφή νεοεκκολαφθέντων-πρώτη ανάπτυξη ιχθυδίων, τότε είμαστε αυτόνομοι. Έχουμε παραγάγει τον αναγκαίο αριθμό δυναμωμένων ιχθυδίων (γόνος) που θα εισέλθει στο τμήμα κύριας εκτροφής και μετά από αρκετό διάστημα (~8-16 μήνες) θα καταλήξει σε εμπορεύσιμα ψάρια (συνήθως 350-800 g). Και όλα αυτά σε απόλυτα ελεγχόμενο περιβάλλον και με έλεγχο επί των πιθανών ασθενειών τους.

Ομως η κατάσταση πολύ απέχει από το να είναι τόσο απλή. Η παραγωγή γόνου απαιτεί ιδιαίτερες εγκαταστάσεις ιχθυοεκκολαπτηρίου (ή ιχθυογεννητικού σταθμού) με διαφορετική φιλοσοφία διαχείρισης. Είναι πολύ δύσκολο (όχι βέβαια αδύνατο) να συνυπάρξουν ιχθυοεκκολαπτήριο και εκτροφή σε μία μονάδα κλειστού συστήματος. Πέραν των διαφορετικών βιολογικών απαιτήσεων των διαφόρων σταδίων των ψαριών, υπάρχει και το πρόβλημα των διαφορετικών διαμορφώσεων του χώρου και των συσκευών. Το κόστος ενός τέτοιου συνδυασμού συνήθως

ξεφεύγει από τις δυνατότητες του μέσου επενδυτή και αφορά μεγάλους ολοκληρωμένους σταθμούς, κρατικούς ή μεγάλων εταιριών. Τα σαλμονιδή ψάρια αποτελούν μια κάποια εξαίρεση λόγω των μεγάλων ανθεκτικών αυγών που παράγουν και τα οποία μπορούν να διαχειριστούν σχετικά εύκολα και προσφέρονται για να αρχίσει από αυτά ο κύκλος εκτροφής, ακόμα και αγοράζοντάς τα μαζικά από κάποιο ιχθυογεννητικό σταθμό. Η τιλάπια πάλι είναι μια προσιτή περίπτωση καθώς αναπαράγεται εύκολα σε δεξαμενές, προστατεύει τα νεογνά στο στόμα της και εύκολα τρέφουμε τα ψαράκια της. Όμως αυτά τα δύο παραδείγματα είναι τα μόνα που μπορούν να δικαιώσουν την εκτροφή του τύπου: «**από αυγό σε αυγό**». Όλα τα άλλα είδη ψαριών για να γεννήσουν στη μονάδα απαιτούν μακρό χρόνο, ρύθμιση της φωτοπεριόδου, της θερμοκρασίας, ειδική ιχθυοπυκνότητα, διατροφή κ.λπ. Καταστάσεις που συνάδουν περισσότερο με ερευνητικό κέντρο παρά με μονάδα παραγωγής. Και εκτός αυτών, για άλλα είδη ψαριών όπως π.χ. το χέλι ή η Αμερικανική πέρκα, η κατάσταση είναι ακόμα πιο περίπλοκη, διότι ο γόνος πρέπει να συλλεχθεί αποκλειστικώς από τη φύση. Αρα τι απομένει για τον εκτροφέα με κλειστό σύστημα; Η απάντηση είναι: «πολλά». Η πρώτη επιλογή είναι να γίνει αποκλειστικώς παραγωγός γόνου για να τον πωλεί σε άλλους εκτροφείς. Πρόκειται για πολύ καλή επιλογή καθώς γίνεται σε μικρή μονάδα και παρ' όλο που απαιτεί κάποια εξειδίκευση, η επικέντρωση σε ένα στόχο (παραγωγή ιχθυδίων) ο οποίος απαιτεί λίγο χρόνο (συνήθως 2-3 μήνες), δίδει την ικανοποίηση της ολοκλήρωσης και διαρκούς επανάληψης (αρκετοί κύκλοι παραγωγής σε μικρό διάστημα). Η δεύτερη επιλογή και η πιο κοινή, είναι αυτή της συνήθους εκτροφής, αρχίζοντας με γόνο ο οποίος αγοράζεται από προμηθευτές και εισάγεται στη μονάδα. Εκεί πλέον θα εφαρμοστούν όλα όσα αναφέρθηκαν στο παρόν σύγγραμμα.

Επειδή η επιτυχία του εγχειρήματος της εκτροφής είναι μια οικονομική υπόθεση (δεν έχει νόημα να κοστίσει η εκτροφή περισσότερο απ' ό τι θα εισπράξει), απαιτείται το σύστημα να λειτουργεί στο μέγιστο της δυνατότητάς του. Είναι οικονομικώς ασύμφορο να λειτουργούν αντλίες, οξυγονωτήρες, θερμαντικά κ.λπ. (συνάμα με την απόσβεση αξίας που επιφέρουν), σε συνθήκες μικρότερης ιχθυοφόρτισης από αυτή που έχει ως δυνατότητα το κλειστό σύστημα. Απαιτείται λοιπόν προσεκτικός σχεδιασμός του προγράμματος παραγωγής.

Για παράδειγμα: Σε εκτροφή τιλάπιας τα ιχθύδια τοποθετούνται («στοκάρονται») αρχικώς σε ιχθυοπυκνότητα περί τα 30 g ψάρι/L. Καθώς μεγαλώνουν πρέπει να μεταφέρονται σε άλλες δεξαμενές μέχρι ιχθυοπυκνότητας 75 g ψάρι/L. Αυτό σημαίνει ότι κάποια ψάρια πρέπει εν τω μεταξύ να διατεθούν στο εμπόριο για να αδειάσουν χώρο για μικρότερα. Αυτό είναι μια καλή πρακτική διότι σημαίνει διαρκή παραγωγή με τις ευεργετικές συνέπειες της συνεχούς εισροής εσόδων.

Καθώς τα ψάρια μεγαλώνουν (και δεν μεγαλώνουν όλα με τον ίδιο ρυθμό), πρέπει να ομαδοποιούνται κατά ομάδες μεγεθών έτσι που σε κάθε δεξαμενή να υπάρχει ομοιομορφία. Σε διαφορετική περίπτωση τα μεγαλύτερα θα τρέφονται πολύ περισσότερο απ' ό,τι τα μικρότερα στη δεξαμενή, με αποτέλεσμα φτωχή αύξηση για τα μικρότερα και όχι τόσο καλή σχετικά με την περισσότερη ποσότητα φαγητού που κατανάλωσαν λόγω βουλιμίας τα μεγαλύτερα. Αυτό ανατρέπει το πρόγραμμα ταΐσματος, δεδομένου ότι η υπολογιζόμενη ημερησίως ποσότητα τροφής, βασίζεται στη συνολική βιομάζα της δεξαμενής η οποία πρέπει να αποτελείται από ισομεγέθη ψάρια και όχι ανισομεγέθη. Αποτέλεσμα της εκτροφής με ανάμικτα μεγέθη στην ίδια δεξαμενή, είναι η σπατάλη τροφής και μεγάλος συντελεστής μετατρεψιμότητας [$FCR = (\text{ποσότητα τροφής})/(\text{βάρος που κερδήθηκε})$].

Η κατάσταση της ύπαρξης ανομοιογενών μεγεθών ψαριών που αναπόφευκτα θα συμβεί, αντιμετωπίζεται με τη διαλογή τους. Όλα τα ψάρια μεταφέρονται από μια δεξαμενή γρήγορα σε ένα **διαλογέα μεγεθών** (fish grader) ο οποίος διαθέτει ανοξείδωτες στρογγυλές διατομής ράβδους, οι οποίες ρυθμίζονται να αφήνουν το επιθυμητό άνοιγμα μεταξύ τους. Τα ψάρια ρίχνονται στο ένα άκρο του συστήματος των ράβδων και «κυλώντας» προς τα κάτω, τα μικρότερα θα περάσουν από το κενό και θα πέσουν σε ένα δοχείο από κάτω. Τα μεγαλύτερα θα διασχίσουν όλο το διάδρομο των ράβδων και θα συλλεχθούν αλλού. Κατόπιν τα μεγέθη τοποθετούνται στις κατάλληλες δεξαμενές. Κατά τη διαλογή που οπωσδήποτε είναι μια διαδικασία αναστάτωσης μεν για τα ψάρια, απαραίτητη δε, μπορεί να γίνεται και η δειγματοληψία για μετρήσεις του βάρους των ώστε να παρακολουθείται και να αξιολογείται η αύξησή τους.

14.2. Παρακολούθηση, Συντήρηση, Συναγερμός

Η συνεχής παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού (θερμοκρασία, οξύγνο, pH, αλκαλικότητα, αμμωνία, νιτρώδη, νιτρικά) εξυπακούεται ότι θα γίνεται συνεχώς και με επιμέλεια. Χωρίς τέτοιες μετρήσεις είναι μεγίστη αφέλεια να νομίζει κάποιος ότι έχει τον έλεγχο της εκτροφής. Τα πάντα καταγράφονται σε ημερολόγιο το οποίο μπορεί να αποδειχθεί πολυτιμότεο όταν χρειαστεί να γίνει αναδρομική εξέταση για κάποιο πρόβλημα. Σήμερα κυκλοφορούν ηλεκτρονικά όργανα με επαρκέστατη ακρίβεια για τη δουλειά που πρέπει να κάνουν. Θερμοκρασία, οξύγνο και pH μετρώνται με ηλεκτρονικά όργανα, αμμωνία, νιτρώδη, νιτρικά και αλκαλικότητα με τεστ κιτ χρωματομετρικής σύγκρισης με κάποια σταθερή κλίμακα (παρέχεται από τον κατασκευαστή). Δεν υπάρχει λόγος για αυτές τις μετρήσεις να καταφύγουμε σε ανάλυση τύπου χημικού εργαστηρίου. Όμως με όλα τα παραπάνω όργανα και κιτ, πρέπει να έχουμε υπ' όψη την ανάγκη να

διατηρούνται σε άριστη κατάσταση, τα ηλεκτρονικά (ιδίως το οξυγονόμετρο) να ρυθμίζονται τακτικά σύμφωνα με τα προσπέκτους και να φυλάσσονται στις θήκες τους. Για τη μέτρηση της αλατότητας αρκεί ένα διαθλασίμετρο.

Οι διακοπές ρεύματος είναι συχνό φαινόμενο παντού και χωρίς ρεύμα τίποτα δεν λειτουργεί. Δεν είναι δυνατόν να γίνει αποδεκτή η απώλεια όλου του ζωικού κεφαλαίου επειδή σταμάτησε λόγω διακοπής, ο αεριστήρας, ή ο οξυγονωτής, ή η παροχή στο βιολογικό φίλτρο. Είναι απαραίτητο να υπάρχει αυτόματη ηλεκτρογεννήτρια η οποία θα ενεργοποιείται αυτόματα με τη διακοπή του ρεύματος.

Οι αντλίες του συστήματος είτε πρόκειται για αντλίες νερού είτε για αεραντλίες μπορεί να χαλάσουν. Όσο αξιόπιστες και αν είναι, βλάβη μπορεί να συμβεί. Μικρές οι πιθανότητες μεν αλλά υπαρκτές. Και αυτό δεν μπορεί να γίνει δεκτό ούτε για λίγο. Το σύστημα δεν επιτρέπει στασιμότητα. Πρέπει για κάθε τύπο αντλίας να υπάρχει η εφεδρική της σε αναμονή, η οποία θα ενεργοποιηθεί έστω και χειροκίνητα αν παραστεί ανάγκη. Και επειδή το «χειροκίνητο» απαιτεί την παρουσία ανθρώπου και επειδή υπάρχει πιθανότητα όταν συμβεί η βλάβη να μην υπάρχει άνθρωπος κοντά, γεννάται η ανάγκη για αισθητήρες παρακολούθησης (στάθμης νερού, οξυγόνου, θερμοκρασίας) οι οποίοι όταν κάποια παράμετρος τεθεί εκτός ορίων λόγω βλάβης κάποιας αντλίας (θα ανέβει η στάθμη νερού, θα μειωθεί το οξυγόνο κ.λπ.), θα ειδοποιήσει με ηλεκτρονικό μήνυμα (τηλεφώνου ή PC) τον υπεύθυνο να σπεύσει. Όλα αυτά τα ηλεκτρονικού τύπου βοηθητικά μέσα, που κατά τη δεκαετία του «80» έμοιαζαν «μελλοντική» φαντασία, σήμερα αποτελούν αντικείμενο κατασκευής και σύνδεσης του κάθε ηλεκτρονικού εργαστηρίου.

Σε υψηλών προδιαγραφών κλειστά συστήματα, το σύστημα συναγερμού μπορεί συνάμα και να δώσει αυτομάτως εντολή για μέτρα αποκατάστασης (π.χ. να ενεργοποιηθεί αντλία για να οξυγονώσει αν ανιχνευθεί πτώση του οξυγόνου). Σε κάθε περίπτωση όμως, η άφιξη και η αποκατάσταση της βλάβης από τον άνθρωπο είναι απαραίτητη.

Η αρχή «για κάθε ηλεκτρικό μοτέρ υπάρχει και εφεδρικό» μπορεί να επεκταθεί και σε άλλους τομείς, με πιο βασικό αυτόν των σωληνώσεων. Το εσωτερικό των σωληνώσεων δεν είναι ορατό και δύσκολα καθαρίζεται από την οργανική επικάλυψη που αναπόφευκτα θα αναπτυχθεί με τον καιρό και η οποία πέρα από το φράξιμο και την υδραυλική αντίσταση που θα δημιουργήσει, είναι και «φυτώριο» παθογόνων. Χρειάζεται λοιπόν και να καθαρίζονται και να απολυμαίνονται. Αυτό βέβαια μπορεί να γίνει με σύρσιμο μέσα τους εύκαμπτου πλαστικού σφουγγαριού δεμένου σε σύρμα, αλλά δεν είναι πάντοτε πρακτικό. Η καλύτερη λύση είναι όλο το σύστημα σωληνώσεων να είναι διπλό. Η μία γραμμή εργάζεται και η άλλη καθαρισμένη είναι σε αναμονή, απομονωμένη από την κύρια με τις κατάλληλες βάνες. Αυτή

που δεν εργάζεται μπορεί να είναι γεμάτη με νερό και απολυμαντικό ή με νερό ακραίου pH (π.χ. 13) έτσι ώστε να σκοτωθούν όλοι οι μικροοργανισμοί και συνάμα να αποπέσουν οι οργανικές επικαλύψεις. Κατόπιν αδειάζεται, ξεπλένεται και μπαίνει σε αναμονή. Όταν χρησιμοποιηθεί, η παράλληλή της που λειτουργούσε μέχρι τότε θα μπει αυτή τότε στη φάση καθαρισμού.

14.3. Εξαγνισμός και μεταποίηση

Ως γνωστόν τα ψάρια έχουν **μυρωδιά**. Ακόμα και τα αλιευμένα από τη φύση έχουν μια μυρωδιά (ευχάριστη ή βαριά, έντονη ή όχι, δεν έχει σημασία), το ίδιο και τα ψάρια από ιχθυοκαλλιέργεια. Άλλοι άνθρωποι είναι πιο ευαίσθητοι στην όσφρηση από άλλους και μπορούν να οσφρανθούν την «μυρωδιά» των ψαριών που για όλα τα ψάρια οφείλεται στην γρήγορη συσσώρευση διαφόρων αβλαβών χημικών στο σώμα τους. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στην εμπορία των ψαριών ιχθυοκαλλιέργειας, για να μην ενισχύεται η λανθασμένη και πολλές φορές επικρατούσα άποψη ότι τα ψάρια των ιχθυοκαλλιεργειών «μυρίζουν». Είναι γεγονός ότι όντως ψάρια που μόλις έχουν συλλεχθεί από κάποια δεξαμενή έχουν μια οσμή «δεξαμενής» ή «λάσπης». Αυτό οφείλεται σε χημικές ενώσεις που δημιουργήσαν βακτήρια και κυανοβακτήρια (blue green algae) που προσλήφθηκαν από τα ψάρια με την τροφή. Για να φύγει αυτή η μυρωδιά (που πολλούς βέβαια δεν ενοχλεί), η λύση είναι πολύ απλή και ακολουθείται για παρόμοιους λόγους στις μυδοκαλλιέργειες. Ονομάζεται «**εξυγίανση**» ή «**εξαγνισμός**» και συνίσταται στην παραμονή των συλλεχθέντων προς πώληση ψαριών, σε ξεχωριστή δεξαμενή με καθαρό νερό για 4-8 ημέρες χωρίς να τρέφονται καθόλου. Θα καθαρίσουν έτσι εντελώς τον εντερικό τους σωλήνα από κάθε υπόλειμμα οργανικής ύλης και θα χάσουν κάθε μυρωδιά πλην της φυσικής των.

Σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με τις τοπικές συνήθειες, η αγορά απαιτεί ζωντανά ψάρια στα σημεία πώλησης. Εάν ο στόχος μιας μονάδας είναι να κατακτήσει μια τέτοια αγορά, τα ψάρια θα μεταφέρονται ζωντανά και σε άριστη κατάσταση στο σημείο πώλησης. Άλλες πάλι φορές μπορεί να υπάρχει ζήτηση για επεξεργασμένο νωπό προϊόν οπότε η μονάδα μπορεί να διαθέτει είτε χώρο απεντέρωσης είτε και φιλετοποίησης. Όλα αυτά μπορούν να δώσουν υψηλή προστιθέμενη αξία στο προϊόν. Υπάρχει επίσης και η πολύ επικερδής προοπτική παραγωγής καπνιστού προϊόντος, διαδικασία με υψηλό προστιθέμενο κέρδος (χωρίς μεγάλη επένδυση) και με το πρόσθετο πλεονέκτημα της αποθεματοποίησης για μακρό χρονικό διάστημα μεγάλης ποσότητας διατηρούμενου επεξεργασμένου προϊόντος.

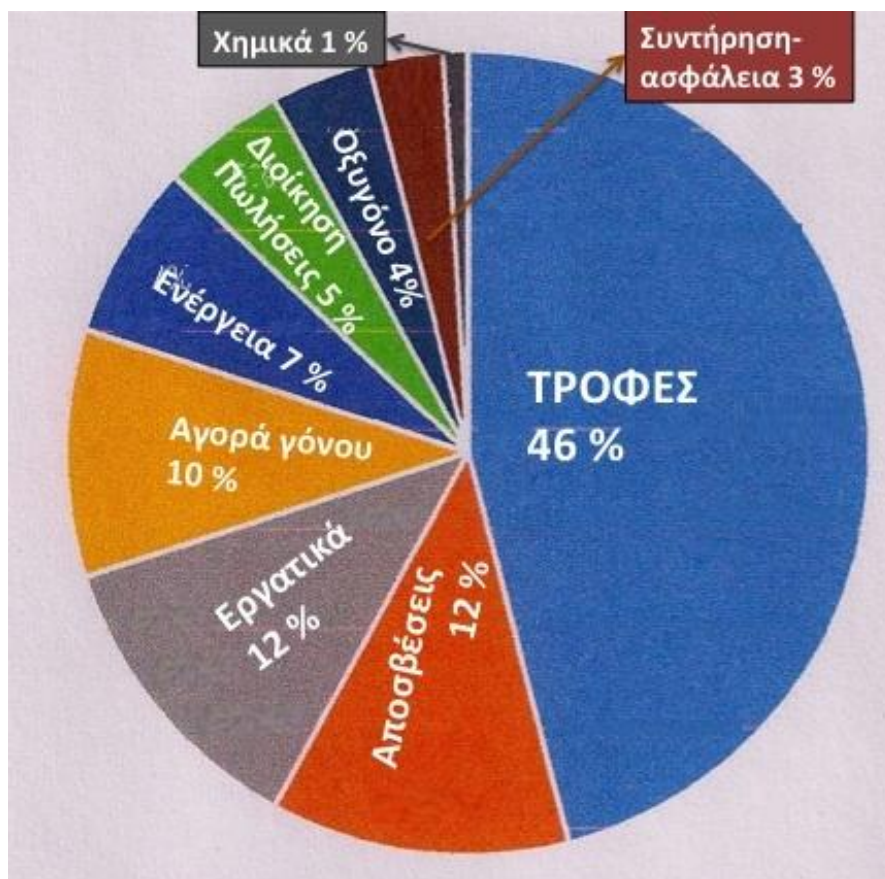
15. Βασικά οικονομικά στα κλειστά συστήματα

Πρέπει να καταστεί σαφές εξ' αρχής ότι η ιχθυοκαλλιέργεια γενικώς και τα κλειστά συστήματα ιδιαίτερα, δεν αποτελούν ευκαιρίες για γρήγορο πλουτισμό. Η ιχθυοκαλλιέργεια απαιτεί αφοσίωση και επιμέλεια και κάτι τέτοιο δεν γίνεται αν δεν «αγαπάς» το ψάρι. Μόνο αυτοί που θα νιώσουν τη μονάδα σεν δεύτερο σπίτι τους θα επιτύχουν και θα ωφεληθούν οικονομικώς. Με εξασφαλισμένη την αφοσίωση και την επιμέλεια μπορούν να καταστρωθούν ρεαλιστικές στρατηγικές και να αριστοποιηθεί η οικονομική διαχείριση. Και είναι γεγονός ότι όσο συσσωρεύεται πείρα τα πάντα θα γίνονται πιο εύκολα. Και βέβαια πριν από όλα δεν είναι δυνατόν να αρχίσει να λειτουργεί μια μονάδα χωρίς να έχει γίνει έρευνα αγοράς για το τι ψάρι και σε ποια κατάσταση το χρειάζεται η αγορά. Με βάση αυτό ξεκινά κάποιος και κατόπιν μπορεί ακόμα και να επιβάλλει νέα είδη με την κατάλληλη διαφήμιση. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα μπορεί να λειτουργήσει διότι έχει αγορά (και μάλιστα ακόρεστη εξαγωγική), μονάδα κλειστού συστήματος για το χέλι. Το ίδιο και για την πέστροφα ή το σολομό έστω και αν θα έχει να ανταγωνιστεί άλλους ήδη υπάρχοντες παραγωγούς και εισαγωγείς. Ομως υπάρχουν και ευκαιρίες και για άλλα είδη όπως η τιλάπια και το γατόψαρο που είναι ιδανικά για κλειστό σύστημα. Στην Αμερική ειδικά, για την τιλάπια υπήρχε πλήρης άγνοια προ εικοσαετίας. Σήμερα οι παραγωγοί τιλάπιας σε κλειστό σύστημα δεν προλαβαίνουν τις παραγγελίες. Το ίδιο και για το γατόψαρο το οποίο το διαφημίζουν ως γατόψαρο ιχθυοκαλλιέργειας υψηλής ποιότητας. Το ίδιο θα μπορούσε να συμβεί και στην Ελλάδα με τις εξαιρετικές κλιματολογικές συνθήκες. Σχετικά με την προοπτική κέρδους από μια τέτοια ιχθυοκαλλιέργεια και προκειμένου να οξυνθεί η αντίληψη του υποψήφιου επενδυτή σε αυτήν, προκειμένου να κατανοήσει την αξία του κάθε συστατικού της και να το διαχειριστεί με τον αποδοτικότερο τρόπο, δίδονται οι παρακάτω σχέσεις:

Κέρδος	= Εσοδα – Ολικά Εξοδα
Ολικά Εξοδα	= Σταθερά Κόστη + Μεταβαλλόμενα Κόστη
Μεταβαλλόμενα Κόστη	= Τροφή + Γόνο + Οξυγόνο + Επεξεργασία
Σταθερά Κόστη	= Λειτουργικά Εξοδα + Εξοδα Διαχείρισης
Λειτουργικά Εξοδα	= Ηλεκτρισμός + Θέρμανση + Εργατικά + Προμήθειες + Ασφάλιση + Φόρος
Εξοδα Διαχείρισης	= Διοικητικά Εξοδα + Νομικά κ.λπ.
Ετήσια Απόσβεση (κτίρια, συσκευές)	= (Αρχικό Κόστος – Υπολειμματική Αξία) / (Ετη)

Από όλα τα έξοδα (Σχήμα 76) το πιο σημαντικό είναι οι τροφές (περί το 46 %), με το γόνο να ακολουθεί (περί το 10 %). Γίνεται εύκολα

κατανοητό ότι η αξιοποίηση της τροφής πρέπει να γίνει στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Κάτι τέτοιο απαιτεί ζωντανά ψάρια (δηλαδή να υπάρχει οξυγόνο, να μην υπάρχει αμμωνία κ.λπ.), υγιή ψάρια (πρόληψη ασθενειών, καταπολέμηση), χορτασμένα ψάρια (κατάλληλη τροφή, τάισμα και τα προηγούμενα) και αυτό να διατηρείται συνεχώς μέχρι το τέλος της εκτροφής. Εάν συμβεί ατύχημα και χαθεί το ζωικό κεφάλαιο χάνεται μαζί του και η αξία της τροφής που καταναλώθηκε εν τω μεταξύ.



Σχήμα 76. Αποτύπωση της συμμετοχής κάθε κατηγορίας εξόδων στο συνολικό λειτουργικό κόστος μιας τυπικής μονάδας κλειστού συστήματος με μεσαία-μεγάλη παραγωγή (~1000 τον/έτος).

Η πλήρης αξιοποίηση της τροφής νοείται τελικώς ως η κατάσταση εκείνη που εκφράζεται με ένα χαμηλό Συντελεστή Μετατρεψιμότητας (FCR) και μια ελάχιστη θνησιμότητα.

Είναι πέραν του σκοπού του παρόντος πονήματος να αναλύσει οικονομικώς μια τέτοια ιχθυοκαλλιεργητική επιχείρηση. Ο σκοπός του είναι η μόρφωση σε θέματα άμεσα ή έμμεσα βιολογικής ουσίας. Ομως επειδή για κάθε μεγάλη επιχείρηση έχει προηγηθεί μια αντίστοιχη μικρής ή ακόμα και υποτυπώδους κλίμακας, είναι πραγματικά μεγάλο το όφελος που θα αποκόμιζε ένας εκτροφέας αν πρώτα δοκίμαζε να λειτουργήσει ένα μικρό κλειστό σύστημα. Τέτοιου είδους συστήματα τα λεγόμενα «ιχθυοκαλλιέργειες της πίσω αυλής» (back-yard fish farming)

προσφέρουν ανεκτίμητη πείρα στον επιχειρούντα και δεν διακινδυνεύουν παρά ελάχιστο κεφάλαιο. Το κέρδος όμως μπορεί να είναι εντυπωσιακό τόσο ως έσοδο όσο και ως βάση για μια ασφαλή κλιμάκωση της ιχθυοκαλλιέργειας σε μεγαλύτερη έκταση. Μια οικιακού τύπου μονάδα μπορεί να λειτουργήσει και με νερό του δικτύου που έχει πρώτα αποχλωριωθεί (απορρίπτοντάς το στην αποχέτευση), να γεμίσει λίγες μικρές δεξαμενές (π.χ. 3 του 1,5 m³ η κάθε μία), με ανθεκτικά ψάρια (π.χ. τιλάπια ή και λαβράκια γιατί όχι), να δημιουργήσει με δοχεία τα δικά του φίλτρα (μηχανικά και βιολογικά), να αερίζει το νερό με μια αεραντλία και να το κυκλοφορεί με μια κατάλληλη φυγοκεντρική αντλία μέσω μικρού δικτύου σωληνώσεων. Ένα τέτοιο σύστημα κατά προτίμηση σε στεγασμένο χώρο, είναι σίγουρο ότι με επιμελή διαχείριση θα δώσει ψάρια εμπορεύσιμου μεγέθους τόσο γρήγορα όσο η θερμοκρασία (που μπορεί ρυθμιστεί) το επιτρέψει. Η πείρα που θα αποκτηθεί θα επιτρέψει σκέψεις για επέκταση του συστήματος και δοκιμασία σε αυτό και άλλων ειδών. Τελικά μπορεί να καταλήξει και σε μονάδα παραγωγής ιχθυδίων ακόμα και αύξησης γόνου συλλεγόμενου από τη φύση. Όλα είναι θέμα απόφασης.

16. Τα κυριότερα εκτρεφόμενα σε κλειστό σύστημα ψάρια

ΕΙΔΗ ΨΑΡΙΩΝ ΓΙΑ ΕΚΤΡΟΦΗ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	
ΕΙΔΟΣ – °C βέλτιστο	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ - ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ
Τιλάπια, <i>Oreochromis nilotica</i> , 28°C 	Ψάρι που προέρχεται από την τροπική Αφρική, πολύ ανθεκτικό, αυξάνεται καλά και σε μεγάλη ιχθυοπυκνότητα σε κλειστό σύστημα. Σπάνια ασθενεί. Αναπαράγεται έντονα. Το θηλυκό εναποθέτει τα αυγά και το αρσενικό τα διαβρέχει-γονιμοποιεί με σπέρμα. Μετά, το θηλυκό τα προστατεύει στο στόμα του και συνεχίζει και με τα λεκιθοφόρα ιχθύδια. Η υπεραναπαραγωγή του οδηγεί σε υπερπληθυσμό στην ύπαιθρο αλλά αυτό ελέγχεται στις δεξαμενές. Πεθαίνει σε θερμοκρασίες κάτω των 10-12 °C. Μεγάλη αγορά στις ΗΠΑ από το 2002 και μετά. Μεγάλες προοπτικές αγοράς.
Ιριδίζουσα πέστροφα <i>Oncorhynchus mykiss</i> , 16-18 °C 	Το πιο καλά «εξημερωμένο» ψάρι καλλιεργούμενο από αιώνες και το πρώτο που δοκιμάστηκε σε κλειστό σύστημα. Αρκετά ανθεκτικό αντέχει στο συνωστισμό, με καλή αύξηση αλλά απαιτεί πολύ οξυγόνο και αντέχει σε πολύ λιγότερο αμμωνία από όλα τα άλλα. Είδος των ψυχρών-δροσερών νερών δεν μπορεί να εκτραφεί σε θερμοκρασίες άνω των 22 °C. Τα ενήλικα αντέχουν και αλμυρό νερό. Μεγάλη αγορά, καλή τιμή αλλά σκληρός ανταγωνισμός.
Χέλι, <i>Anguilla anguilla</i> , 25 °C 	Από τα πιο κατάλληλα είδη για εκτροφή σε κλειστό σύστημα. Ανθεκτικό σε συνωστισμό, και με καλή αύξηση μόνο σε μεγάλες ιθυοπυκνότητες και ζεστά νερά. Μεγάλο μειονέκτημα η ανάγκη συλλογής του γόνου του αποκλειστικά από τη φύση (υαλόχελα). Δυστυχώς θεωρείται απειλούμενο είδος και η συλλογή του γόνου του πρέπει να ελεγχθεί. Μεγάλη αγορά και ακόρεστη, ειδικά της Ιαπωνίας με πολύ καλές τιμές.
Σολομός του Ατλαντικού <i>Salmo salar</i> , 14 °C 	Οι μικροί σολομοί μέχρι 2 ετών ονομάζονται smolt και μπορούν να εκτραφούν σε γλυκό νερό και σε κλειστό σύστημα. Οι μεγαλύτεροι οδηγούνται σε κλωβούς στη θάλασσα για πάχυνση. Είδος των ψυχρών νερών δεν μπορεί να εκτραφεί σε θερμά κλίματα επειδή είναι οικονομικά ασύμφορη η επίτευξη χαμηλών θερμοκρασιών. Ευρεία αγορά και με καλή τιμή. Συμφέρουσα η μεταποίηση σε φιλέτα και καπνιστά.
Κυπρίνος, <i>Cyprinus carpio</i> , 26 °C 	Όλα τα κυπρινοειδή ψάρια αναπτύσσονται πολύ καλά στο κλειστό σύστημα. Είδος των θερμών νερών απαιτεί υψηλή θερμοκρασία. Πολύ ανθεκτικό σε χαμηλά επίπεδα οξυγόνου και υψηλότερα αμμωνίας συγκριτικά με τα σαλμονιδή. Ανέχεται υψηλές ιχθυοπυκνότητες. Αυξάνεται γρήγορα. Επειδή δεν «πιάνει» υψηλές τιμές σε ένα ούτως ή άλλως περιορισμένο καταναλωτικό κοινό, για να είναι συμφέρουσα η εκτροφή πρέπει να γίνεται οικονομικά.

Αφρικανικό γατόψαρο <i>Clarias gariepinus</i> 28°C 	Είδος του γλυκού νερού πολύ εύκολο στην εκτροφή. Μεγαλώνει γρήγορα και γίνεται πολύ εύρωστο σε κλειστό σύστημα. Όμως λόγω της μέτριας τιμής πώλησης η παραγωγή του πρέπει να γίνει με συμπίεση του κόστους. Συνήθως πωλείται ζωντανό. Απαιτείται μελετημένη προώθηση στην αγορά.
Στουργγιόνι, <i>Acipenser</i> spp., 22 °C 	Ομάδα ψαριών του γλυκού νερού αποτελούμενη από αρκετά είδη. Σχετικά εύκολο στην εκτροφή. Για την ολοκληρωμένη καλλιέργειά του απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις για τα διάφορα στάδιά του. Ολοένα και πιο δημοφιλές στα κλειστά συστήματα. Αρκετά καλή ζήτηση και τιμή. Η παραγωγή χαβιαριού αποτελεί επιπλέον στόχο.
Καλκάνι, <i>Scophthalmus maximus</i>, 17 °C 	Είδος αλμυρών νερών με ανάγκη για δροσερό-ψυχρό νερό. Η ολοκληρωμένη καλλιέργειά του απαιτεί ειδικές γνώσεις. Η εκτροφή του όμως είναι εύκολη σε κλειστό σύστημα. Η διάθεσή του δεν συναντά δυσκολίες, έχει καταναλωτικό κοινό και πιάνει καλή τιμή. Όμως υπάρχει σκληρός ανταγωνισμός από τα αλιευμένα άτομα σε όλες τις αγορές του κόσμου.
Γλώσσα (Lemon sole), <i>Microstomus kitt</i>, 17 °C 	Είδος αλμυρών νερών με ανάγκη για δροσερό-ψυχρό νερό. Δεν έχει ακόμα τελειοποιηθεί η ολοκληρωμένη καλλιέργειά του λόγω ελλειπών βιολογικών γνώσεων (διατροφή κ.ά.). Έχει προοπτική για εκτροφή σε κλειστό σύστημα. Η σάρκα του εκτιμάται πολύ και πιάνει πολύ καλή τιμή. Κανένα πρόβλημα στη διάθεσή του. Λαμπρή προοπτική αν γίνει δυνατή η απρόσκοπτη παραγωγή του.
Λαβράκι, <i>Dicentrarchus labrax</i>, 24 °C 	Θαλασσινό είδος που μπορεί να προσαρμοστεί και στο γλυκό νερό. Αποτελεί ένα από τα επιτυχέστερα καλλιεργούμενα είδη με πλήρη γνώση του βιολογικού του κύκλου. Η προμήθεια του γόνου του είναι άφθονη από ιχθυογεννητικούς σταθμούς. Σήμερα αποτελεί καθιερωμένο είδος εκτροφής με σταθερό καταναλωτικό κοινό σε όλη τη Μεσογειακή λεκάνη. Ταχέως αναπτυσσόμενο εμπόριο σε πολλές χώρες του κόσμου μεταξύ των οποίων και οι ΗΠΑ. Καλή τιμή, αντέχει στο συνωστισμό του κλειστού συστήματος και μεγαλώνει γρήγορα σε θερμά νερά.
Τσιπούρα, <i>Sparus aurata</i>, 24 °C 	Θαλασσινό είδος που όμως δεν μπορεί να προσαρμοστεί και στο γλυκό νερό. Σε υφάλμυρο ναι. Αποτελεί ένα από τα επιτυχέστερα καλλιεργούμενα είδη με πλήρη γνώση του βιολογικού του κύκλου. Η προμήθεια του γόνου του είναι άφθονη από ιχθυογεννητικούς σταθμούς. Σήμερα αποτελεί καθιερωμένο είδος εκτροφής με σταθερό καταναλωτικό κοινό σε όλη τη Μεσογειακή λεκάνη. Ταχέως αναπτυσσόμενο εμπόριο σε πολλές χώρες του κόσμου. Καλή τιμή αντέχει στο συνωστισμό του κλειστού συστήματος και μεγαλώνει γρήγορα σε θερμά νερά.
Αμερικανικό λαβράκι (υβρίδιο) <i>Morone saxatilis</i> x <i>Morone chrysops</i>, περίπ. 20 °C	Το είδος <i>Morone saxatilis</i> (ταινιωτό λαβράκι) των αλμυρών νερών είναι πολύ δημοφιλές στις Βορειοανατολικές πολιτείες των ΗΠΑ. Τα αλιευτικά αποθέματά του δεν μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση. Γι' αυτό διασταυρώνεται με το συγγενικό του των γλυκών νερών (άσπρο λαβράκι) <i>Morone chrysops</i> και το υβρίδιό τους αντέχει το γλυκό νερό και ευρύτερο θερμοκρασιακό εύρος από το θαλασσινό.

	Αντέχουν τον συνωστισμό του κλειστού συστήματος. Το πρόβλημα είναι η προμήθεια του γόνου καθώς οι γεννήτορες που θα αναπαραχθούν τεχνητός πρέπει να συλλεχθούν από τη θάλασσα. Πιάνει πολύ καλή τιμή.
Κίτρινη πέρκα, <i>Perca flavescens</i>, 17-18 °C 	Είδος των ψυχρών-δροσερών νερών, αναπαράγεται εύκολα στην αιχμαλωσία αλλά ο γόνος είναι δύσκολο να τραφεί με τεχνητές τροφές και παρουσιάζει μεγάλη θνησιμότητα (>30%). Όταν όμως το ψαράκι φθάσει περί τα 8 cm είναι πολύ εύκολη η εκτροφή του σε κλειστό σύστημα. Πολύ δημοφιλές ψάρι για τηγάνισμα στις Μεσοδυτικές πολιτείες των ΗΠΑ. Εκτρέφεται και για χρήση σε εμπλουτισμούς φυσικών νερών.
Γαρίδα λευκόποδη, <i>Penaeus vannamei</i>, 30 °C 	Η πιο κοινή γαρίδα στην υδατοκαλλιέργεια. Η τελική εκτροφή της σε κλειστό σύστημα έχει αποδειχθεί επιτυχής. Συνεχής βελτίωση στις τεχνικές παραγωγής. Σταθερό μεγάλο και παγκόσμιο καταναλωτικό κοινό. Πιάνει τιμές πολύ καλές και ανώτερες των ψαριών. Απαιτεί όμως υψηλές θερμοκρασίες για γρήγορη ανάπτυξη.

17. Η προέλευση των ρυπαντών του νερού

Σε ένα κλειστό σύστημα ιχθυοκαλλιέργειας τα εκτρεφόμενα ψάρια ζουν και μεγαλώνουν ανάλογα με την ποσότητα τροφής που καταναλώνουν και με τη διατήρηση της ποιότητας του νερού σε αποδεκτά επίπεδα. Όσο η ποιότητα του νερού από άποψη ρυπαντικού φορτίου παραμένει καλή, το νερό μπορεί να ανακυκλώνεται θεωρητικώς συνεχώς. Αυτό βέβαια επιτυγχάνεται επειδή λειτουργούν συνεχώς τα συστήματα καθαρισμού. Και είναι τα συστήματα καθαρισμού του νερού (μηχανικά, βιολογικά φίλτρα, κ.λπ.) που καθορίζουν το βαθμό ανακύκλωσης αλλά πριν από όλα και πρωταρχικώς, η όλη δομή του συστήματος καθαρισμού έχει από κατασκευής της μια ορισμένη δυναμικότητα. Δυναμικότητα με όρους ικανότητας απομάκρυνσης ρυπαντικού φορτίου ανάλογα με το μέγεθος του εκάστοτε συστήματος καθαρισμού (μεγάλο ή μικρό, ένα ή περισσότερα), ως έκφραση απορρύπανσης (απομάκρυνσης στερεών, οξειδωσης ρυπαντών κ.λπ.), ανά συστατική μονάδα (πόροι της κρισάρας, μέγεθος κόκκων, ποσότητα πλήρωσης κ.λπ.), της κάθε δομής καθαρισμού (μηχανικό, βιολογικό φίλτρο, αφροποιητής κ.λπ.).

Για παράδειγμα, ένα μηχανικό φίλτρο τύπου κοσκινόφιλτρου (δομή καθαρισμού) που συγκρατεί αιωρούμενα στερεά (ρυπαντές), διαμέτρου 100 μm και άνω (συστατική μονάδα σίτα με «μάτι» 100 μm), θα αφήσει να περνούν τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια και όταν αυτά συσσωρευτούν σε μεγάλο βαθμό, τέτοιο που να επηρεάζουν αρνητικά άλλες ζωτικής σημασίας παραμέτρους (αποικοδομούνται καταναλώνοντας πολύ οξυγόνο και παράγοντας πολύ αμμωνία), τότε έχουν ξεπεραστεί τα όρια του συγκεκριμένου μηχανικού φίλτρου και το νερό χρειάζεται ανανέωση με φρέσκο. Εάν πάλι ένα βιολογικό φίλτρο που μπορεί να οξειδώσει μια ορισμένη μέγιστη παραγόμενη ποσότητα αμμωνίας, βρεθεί να έχει να «αντιμετωπίσει» πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση, απλούστατα δεν θα την οξειδώσει και η αμμωνία θα συσσωρευτεί στο σύστημα.

Η **τροφή** είναι ο μόνος και αποκλειστικός γενεσιουργός παράγοντας για κάθε είδους ρύπανση στο νερό της εκτροφής. Είτε πρόκειται για **διαλυμένους ρυπαντές** (π.χ. αμμωνία, διοξείδιο του άνθρακα), είτε για **στερεά** (υπολείμματα τροφής, περιττώματα), όλα προέρχονται από την παρεχομένη τροφή. Εξυπακούεται ότι πριν ακόμα θεωρηθεί το πρόβλημα της ρύπανσης λόγω της τροφής, πρέπει να έχει λυθεί το πρόβλημα της εκμετάλλευσης της τροφής. Δηλαδή η τροφή να έχει αξιοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό από τα ψάρια για να δώσει τη μεγαλύτερη δυνατή μάζα ψαριών στο τέλος χωρίς σπατάλη της. Και στο σημείο αυτό βρίσκεται το κομβικό στοιχείο της επιτυχίας μιας ιχθυοκαλλιέργειας.

Τα ψάρια είναι **ποικιλόθερμοι** οργανισμοί και ο μεταβολισμός τους (άρα και η λήψη και αφομοίωση τροφής) αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας (μέχρι κάποιου ορίου βέβαια). Ο εκτροφέας μπορεί να ρυθμίσει την κατανάλωση της τροφής ρυθμίζοντας κατάλληλα τη θερμοκρασία. Έτσι η ίδια βιομάζα ενός ορισμένου είδους ψαριού, μπορεί να τρέφεται με ποσότητες τροφής 3-4 % επί του σωματικού βάρους των ψαριών ανά ημέρα, όταν η θερμοκρασία είναι καταλλήλως υψηλή και με 1-2 % όταν είναι χαμηλή. Δεν έχει νόημα στις χαμηλές θερμοκρασίες να παρέχεται πολύ τροφή διότι απλούστατα δεν θα καταναλωθεί με καταστροφικά οικονομικά αποτελέσματα για την επιχείρηση.

Η ποσότητα των ρυπαντών, που θα παραχθούν από τα ψάρια στις δύο παραπάνω περιπτώσεις θερμοκρασιών, επίσης θα είναι διαφορετική. Επειδή τα ψάρια τρώνε περισσότερο ή λιγότερο ανάλογα με τη θερμοκρασία (σε αντίθεση με τα ομοιόθερμα ζώα), έχει καθιερωθεί η ρύπανση που επιφέρουν να εκφράζεται ως **ρυπαντικές ουσίες ανά μονάδα τροφής**. Ειδικότερα δίδεται ως ποσοστό ρύπων ανά μονάδα τροφής ανά ημέρα (π.χ. παραγόμενη αμμωνία 2-3 % ανά kg τροφής ανά ημέρα). Αυτή η πρακτική έχει αποδειχθεί η χρησιμότερη και χρηστικότερη με δεδομένη τη μεταβλητότητα στην κατανάλωση και μεταβολισμό της τροφής από τα ψάρια στις διάφορες θερμοκρασίες. Εδώ πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι ακόμα και σήμερα (2016) δεν υπάρχουν οικουμενικώς αποδεκτές ακριβείς τιμές παραγωγής ρύπων για όλα τα είδη ψαριών, για την κάθε θερμοκρασία, τον τύπο της τροφής, τη συχνότητα των γευμάτων, την ποσότητα της τροφής και τα σχετικά. Συνεπώς οι παντός τύπου υπολογισμοί βασίζονται σε ορισμένες μέσες τυπικές τιμές που αποτελούν ένα «χρυσό συμβιβασμό». Ομως ακόμα και έτσι, οι τιμές αυτές χαρακτηρίζονται από ένα εύρος ασφάλειας ως προς την αντιπροσώπευση της πραγματικότητας και μπορούν να χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και τη διαχείριση ενός κλειστού συστήματος.

Οι ρύποι στην ιχθυοκαλλιέργεια απελευθερώνονται στο νερό και έχει καθιερωθεί η συγκέντρωσή τους να εκφράζεται σε **mg/L**. Σε τέτοιες μονάδες εκφράζονται επίσης και τα όρια αντοχής των ψαριών σε ρύπους και σε τέτοιες μονάδες και η συγκέντρωση του οξυγόνου στο νερό. Ομως απαιτείται προσοχή στο να υπάρχει σαφής αντίληψη για το τι πραγματικά εκφράζει η εκάστοτε συγκέντρωση ως mg/L. Δηλαδή αν είναι η συγκέντρωση που επικρατεί στο νερό των δεξαμενών εκτροφής, δηλαδή αυτή που απομένει στο νερό μετά από την όποια διαδικασία καθαρισμού ή αν είναι μια συγκέντρωση που παρουσιάζεται τοπικά και παροδικά σε κάποιο σημείο του συστήματος πριν το νερό περάσει από τα φίλτρα. Αν, για παράδειγμα, αμέσως μετά από ένα μεγάλο γεύμα σε μια δεξαμενή παρουσιαστεί υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας (ιδιαίτερα όταν ο ρυθμός ανακύκλωσης δεν είναι έντονος), αυτό είναι ένα φαινόμενο

παροδικό που θα εξαφανιστεί καθώς το νερό θα περάσει από τα φίλτρα και θα επανέλθει στη δεξαμενή «καθαρό». Με άλλα λόγια, η «διάλυση» είναι η «απάντηση στη ρύπανση». Αυτό ισχύει βεβαίως σε μεγάλο βαθμό όταν γίνεται ανανέωση του ανακυκλούμενου νερού με φρέσκο. Μεγάλες ποσότητες φρέσκου νερού μειώνουν πολύ τη συγκέντρωση των ρυπαντών. Το πόσο φρέσκο νερό όμως μπορεί να εισέλθει στο σύστημα (και αν υπάρχει τέτοια ποσότητα βέβαια), είναι κάτι που πρέπει να ιδωθεί από τη σκοπιά της ίδιας της φύσης του κλειστού κυκλώματος, διότι αν η ανανέωση με φρέσκο νερό είναι μεγάλη, τότε απλούστατα δεν υφίσταται κλειστό σύστημα αλλά ανοικτό.

Υπάρχει και η περίπτωση του να συγκρίνουμε δύο κλειστά συστήματα με το ίδιο είδος ψαριού, την ίδια ιχθυοφόρτιση και την ίδια ποσότητα τροφής και να θεωρήσουμε ότι δημιουργούν ίδιο ρυπαντικό φορτίο. Κάτι τέτοιο μπορεί να ισχύει μόνο στην περίπτωση που και στα δύο συστήματα υπάρχει ο ίδιος ρυθμός ανακυκλοφόρησης του νερού. Σε διαφορετική περίπτωση, αν π.χ. το ένα σύστημα έχει διπλάσια κυκλοφορία νερού από το άλλο, τότε το ρυπαντικό του φορτίο θα είναι το μισό του άλλου (περισσότερη ανακύκλωση, περισσότερες φορές διέλευση διά του βιολογικού φίλτρου, μεγαλύτερη αποικοδόμηση της αμμωνίας). Απαιτείται λοιπόν προσοχή ώστε όλες οι παράμετροι να εισέρχονται στις εξισώσεις υπολογισμού της δυναμικότητας καθαρισμού του νερού.

Τρεις είναι οι κατηγορίες βασικών στοιχείων που πρέπει πρώτα απ' όλα να υπολογίζονται όταν γίνονται υπολογισμοί δυναμικότητας απορρύπανσης στα κλειστά συστήματα.

1. Πόση αμμωνία παράγεται
2. Πόσο οξυγόνο καταναλώνεται (και πόσο διοξείδιο παράγεται)
3. Πόση επιφάνεια απαιτείται στο βιολογικό φίλτρο για την οξείδωση της αμμωνίας

Όλα τα παραπάνω σχετίζονται με το πρόβλημα απαλλαγής από την αμμωνία, τον σταθερά παραγόμενο δηλητηριώδη παράγοντα στο σύστημα. Στην ουσία ένα κλειστό σύστημα είναι ένα σύστημα «καταπολέμησης» της αμμωνίας. Αμμωνίας που προέρχεται από την έκκρισή της από τα βράγχια των ψαριών, από την αποσύνθεση της περισευούμενης τροφής (λίγη ή πολλή), και την αποσύνθεση των περιττωμάτων. Η έκκριση από τα βράγχια αφορά το 65-70 % της συνολικά παραγόμενης αμμωνίας (η οποία, υπενθυμίζεται, μετράται πρωταρχικώς ως ολική αμμωνία). Γίνεται σαφές λοιπόν το πόσο σημαντικό είναι να απομακρύνονται γρήγορα από το σύστημα (με τα μηχανικά φίλτρα) τα στερεά ρυπαντικά σωματίδια για να μην επιβαρύνουν με αμμωνία το νερό.

Το οξυγόνο αποτελεί το πλέον απαραίτητο στοιχείο για τη ζωή των ψαριών. Εκτός όμως από τις αναπνευστικές ανάγκες των ψαριών,

οξυγόνο απαιτούν (και μάλιστα πολύ) και τα αυτότροφα νιτροποιητικά βακτηρίδια του φίλτρου που μεταβολίζουν την αμμωνία. Επίσης οξυγόνο καταναλώνουν και τα ποικίλα ετερότροφα βακτηρίδια που αναπτύσσονται και αυτά στο βιολογικό φίλτρο αλλά και οπουδήποτε υπάρχουν οργανικά στερεά τα οποία μεταβολίζουν. Να γιατί τα υπολείμματα της τροφής και τα περιττώματα πρέπει να απομακρύνονται γρήγορα, διότι εκτός από παραγωγή αμμωνίας καταναλώνουν και οξυγόνο. Ως εκ των παραπάνω αμμωνία και οξυγόνο «συμπλέκονται» πολλαπλώς. Μεγάλα ποσά αμμωνίας, μεγάλη απαίτηση για οξυγόνο. Και φυσικά όσο περισσότερο οξυγόνο καταναλώνεται, τόσο περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα θα παράγεται και τόσο μεγαλύτερη η ανάγκη για καλό απαερισμό του νερού ώστε να διαφύγει στην ατμόσφαιρα.

17.1. Παραγωγή ρύπων

Δυστυχώς δεν υπάρχουν οριστικές τιμές που να αφορούν όλα τα ψάρια. Τα ποικίλα δεδομένα από τη βιβλιογραφία αφορούν ορισμένα είδη και μάλιστα παρουσιάζουν ποικιλότητα ανάλογα με τις συνθήκες (μέγεθος ψαριού, σύσταση τροφής, θερμοκρασία κ.λπ.). Η πιο καλά μελετημένη περίπτωση είναι αυτή της πέστροφας. Με δεδομένο τον σαρκοφάγο χαρακτήρα αυτού του ψαριού και την υψηλώς πρωτεϊνούχα τροφή του, καθώς και τις ιδιαίτερα αυστηρές απαιτήσεις του για χαμηλή συγκέντρωση αμμωνίας και την υψηλή του απαίτηση για οξυγόνο, οι τιμές που το αφορούν θεωρούνται ασφαλείας για τα υπόλοιπα είδη, έστω και αν ενίοτε μπορούν να θεωρηθούν αυστηρές. Καλύτερα να καταλήγουμε σε μεγαλύτερη δυναμικότητα συστήματος καθαρισμού απ' ότι πραγματικά απαιτείται, παρά σε μικρότερη.

Ετσι, για την πέστροφα στους 10-15 °C, οι παραγόμενοι ρύποι σε kg / kg τροφής /ημέρα είναι:

<u>Ρύποι (kg /d)</u>	
Ολική αμμωνία (TAN)	= 0,025 έως 0,030 x (kg τροφής/d)
Νιτρώδη (NO₂⁻)	= 0,025 x (kg τροφής/d)
Αιωρούμενα στερεά (SS)	= 0,52 x (kg τροφής/d)
Φωσφορικές ενώσεις	= 0,016 x (kg τροφής/d)
B.O.D.	= 0,60 x (kg τροφής/d)

Οι παραπάνω τιμές αποτελούν μια αξιόπιστη βάση υπολογισμών για κάθε είδους μελέτη-σχεδιασμό και παρέχουν ικανό περιθώριο ασφάλειας. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι, αν μηδενιστεί η κατανάλωση τροφής τότε θα μηδενιστούν οι ρύποι. Φυσικά κάτι τέτοιο δεν ισχύει διότι το ψάρι ακόμα και νηστικό παράγει ρύπους (έστω πολύ λιγότερους), καθώς ο μεταβολισμός του δεν παύει να λειτουργεί. Παρόλα αυτά, η περίπτωση αυτή αν και θεωρητικώς επισημαίνει μια ατέλεια στους υπολογισμούς, πρακτικώς δεν επηρεάζει

την κατάσταση που έχει να κάνει με ρυπαντικό φορτίο συνεχώς παραγόμενο από τρεφόμενα ψάρια.

Παράδειγμα υπολογισμού παραγωγής αμμωνίας.

Σε μια χελοκαλλιέργεια όπου διατηρούνται 20.000 kg χέλια τρεφόμενα με 2,5 % τροφή επί του σωματικού τους βάρους θα έχουμε:

$$(20.000 \text{ kg ψάρια}) \times (0,025 \text{ τροφή/d}) = 500 \text{ kg τροφή/d}$$

Θεωρούμε ότι παράγουν αμμωνία σε επίπεδο 3 % επί της καταναλωθείσας τροφής, συνεπώς:

$$(500 \text{ kg τροφή/d}) \times (0,03 \text{ TAN/τροφή}) = 15 \text{ kg TAN/d}$$

Αρα το βιολογικό φίλτρο σε αυτή την μονάδα εκτροφής πρέπει να είναι ικανό να απομακρύνει **15 kg αμμωνίας ανά ημέρα**.

17.2. Κατανάλωση οξυγόνου (και παραγωγή CO₂)

Τα θεμελιώδη μεγέθη της κυτταρικής αναπνοής είναι λίγο-πολύ τα ίδια ανεξάρτητα από το είδος των ζωϊκών οργανισμών και από το περιβάλλον από το οποίο αντλούν το οξυγόνο. Όλα οξειδώνουν οργανικές ενώσεις ξοδεύοντας οξυγόνο και παράγοντας ως υποπροϊόν διοξείδιο του άνθρακα. Όμως τα ζώα της χέρσου αναπνέοντας οξυγόνο από την ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις 210 ml/L (ή 294 mg/L, 1ml O₂ = 1,4 mg) βρίσκονται σε πολύ πλεονεκτικότερη θέση από τους υδρόβιους οργανισμούς όπου η συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου είναι 20-25 φορές μικρότερη (περί τα 11,0 mg/L στους 10 °C στο γλυκό νερό). Αυτός είναι και ο λόγος που η συγκέντρωση του οξυγόνου στο νερό είναι η κρίσιμότερη και περιοριστικότερη παράμετρος για την όποια αύξηση θα επιχειρηθεί σε μια εκτροφή.

Η κατάσταση γίνεται ακόμα κρίσιμότερη αν ληφθεί υπόψη ότι το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ συνάμα οι απαιτήσεις του μεταβολισμού για αυτό αυξάνονται πολλές φορές μάλιστα «εκρηκτικά» κατά τα γεύματα ή σε συνθήκες στρες.

Πρέπει να γίνει σαφές ότι το θέμα των αναγκών σε οξυγόνο σε ένα σύστημα εκτροφής πρέπει να χειριστεί γνωρίζοντας δύο παραμέτρους. Η πρώτη είναι η **συγκέντρωσή** του στο νερό εκφρασμένη σε mg/L και η δεύτερη ο **ρυθμός κατανάλωσής** του από τα ψάρια εκφρασμένος σε mg O₂ / kg ψαριού / μονάδα χρόνου (συνήθως min ή h). Η κατάσταση περιπλέκεται διότι, ιδιαίτερα σε ένα κλειστό σύστημα, πρέπει να υπολογιστεί και η κατανάλωσή του από τα αερόβια αυτότροφα και ετερότροφα βακτηρίδια του φίλτρου και όπου αλλού στο σύστημα υπάρχει οργανική ύλη (π.χ. περιττώματα).

Δυστυχώς, όπως και με την περίπτωση των ρυπαντών, δεν υπάρχει μια καθολικώς αποδεκτή εξίσωση που να δίδει την κατανάλωση οξυγόνου από τα ψάρια. Παρόλο το πλήθος των δημοσιεύσεων, οι τιμές ποικίλουν ανάλογα με το είδος, τη θερμοκρασία, το μέγεθος του ψαριού κ.λπ. Και στην περίπτωση του οξυγόνου οι πληρέστερες μελέτες αφορούν τα

σαλμονιδή και ως τέτοιες, επειδή τα σαλμονιδή αποτελούν ίσως τον απαιτητικότερο καταναλωτή οξυγόνου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια έστω και με την υπερεκτίμηση που προκύπτει όταν εφαρμόζονται σε είδη σαφώς λιγότερο απαιτητικά αναπνευστικώς (π.χ. τιλάπια, κυπρινοειδή κ.ά).

Οποια μέθοδος και αν χρησιμοποιηθεί και πάλι η υπολογισθείσα κατανάλωση οξυγόνου από τα ψάρια δεν θα αποτυπώσει πραγματικά την ασφαλή κατάσταση ως προς την επάρκεια του οξυγόνου αν δεν ξεκαθαριστεί το εξής.

Τα ψάρια μπορούν να χρησιμοποιήσουν το οξυγόνο αβίαστα και χωρίς στρες, μόνο όταν αυτό βρίσκεται στο νερό άνω μιας ορισμένης συγκέντρωσης. Δηλαδή ένα νερό με μια συγκέντρωση οξυγόνου 5 mg/L δεν σημαίνει ότι αυτή η ποσότητα είναι διαθέσιμη για να καλύψει τις ανάγκες των ψαριών ιδιαίτερα σε συνθήκες εκτροφής, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για σαλμονιδή. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, τα ψάρια δεν μπορούν να το αποσπάσουν εύκολα από το νερό καθώς η **μερική του πίεση** είναι μικρή για να το οδηγήσει να διαχυθεί επαρκώς μέσω των αναπνευστικών μεμβρανών των βραγχίων τους. Μόνο συγκεντρώσεις άνω του παραπάνω ορίου μπορούν να είναι χρήσιμες για τρεφόμενα ψάρια.

Κατά γενική προσέγγιση τα εκτρεφόμενα είδη ψαριών έχουν ανάγκη τη διασφάλιση μιας **ελάχιστης συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου** περί τα 4 – 5 mg/L και χρησιμοποιούν πρακτικά μόνο την ποσότητα που βρίσκεται σε περίσσεια αυτής.

Για παράδειγμα:

Σε μια ιχθυοκαλλιέργεια στους 10 °C το γλυκό νερό σε κορεσμό οξυγόνου μπορεί να έχει 10,92 mg/L διαλυμένο O₂ ενώ στους 20 °C, 8,84 mg/L.

Στην μεν πρώτη περίπτωση τα εκτρεφόμενα ψάρια (π.χ. πέστροφες) έχουν πρακτικώς στη διάθεσή τους για να χρησιμοποιήσουν:

$10,92 - 5 = 5,92 \text{ mg/L O}_2$,

ενώ στη δεύτερη:

$8,84 - 5 = 3,84 \text{ mg/L O}_2$.

Η αυξημένη θερμοκρασία αφενός μείωσε το διαθέσιμο οξυγόνο και αφετέρου και επιπλέον (να μη λησμονάται), ο αυξημένος μεταβολισμός των ψαριών λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας θα τα κάνει να απαιτούν οξυγόνο εντονότερα.

Η πραγματικότητα της εντατικής εκτροφής στις ιχθυοκαλλιέργειες κλειστών συστημάτων δεν μπορεί να επαφίεται μόνο στον κορεσμό του νερού σε οξυγόνο, παρόλο που αυτή η προϋπόθεση πρέπει να ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση. Η ένταση της εκτροφής και ο μεταβολισμός των μεγάλων ποσοτήτων τροφής από την υπερβολικά

μεγάλη ιχθυοφόρτιση, απαιτεί πρόσθετη οξυγόνωση, είτε με έντονο αερισμό είτε με καθαρό οξυγόνο.

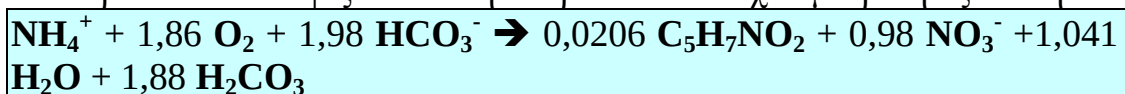
Συνεπώς οι διάφορες τιμές από τη βιβλιογραφία που συνήθως αναφέρονται στον βασικό μεταβολισμό του ψαριού (απουσία θρέψης, απουσία έντονης κολύμβησης) και οι οποίες προκύπτουν από ειδικές εξισώσεις, δεν αποτελούν παρά ένα πρώτο οδηγό για την εκτίμηση των αναγκών σε οξυγόνο ενός συστήματος εκτροφής. Χάριν όμως της προσέγγισης σε ένα πρώτο επίπεδο εκτίμησης των αναγκών των ψαριών σε οξυγόνο, μπορεί να δοθεί η γενικώς ασφαλής εκτίμηση ότι τα ψάρια καταναλώνουν: **200 – 300 mg O₂ / kg βάρους /h.**

Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από το μέγεθος (μικρότερα ψάρια-μεγαλύτερη κατανάλωση), τη θερμοκρασία (υψηλότερη-μεγαλύτερη), την κατανάλωση τροφής (πολλή-μεγαλύτερη) και τη φυσιολογική κατάσταση του ψαριού (κολύμβηση-μεγαλύτερη). Να σημειωθεί επίσης ότι αναφέρονται σε ποσότητες οξυγόνου επιπλέον της (κατά τα παραπάνω) ελάχιστης απαιτούμενης συγκέντρωσης οξυγόνου στο νερό.

Σε ένα κλειστό σύστημα υπάρχει όπως προαναφέρθηκε και η κατανάλωση οξυγόνου από τα βακτηρίδια του συστήματος. Προϋποθέτοντας μια αποτελεσματική απομάκρυνση των στερεών ρυπαντών από τα μηχανικά φίλτρα, μπορούμε από πρακτική άποψη, να θεωρήσουμε ότι η συνολική αποικία των βακτηριδίων (αυτότροφων και ετερότροφων) βρίσκεται στις επιφάνειες των μέσων πλήρωσης των βιολογικών φίλτρων (ή φίλτρου).

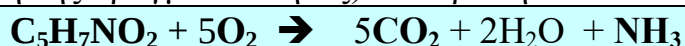
Καθώς το νερό διέρχεται διά μέσου του φίλτρου και διαβρέχει τις επιφάνειες των αποικιών, τα βακτηρίδια μεταβολίζουν την αμμωνία και τις υπόλοιπες βιοδιασπώμενες οργανικές ουσίες που αυτό μεταφέρει, καταναλώνοντας οξυγόνο, αλκαλικότητα και οξονοποιούν το νερό παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), νιτρώδη (NO₂⁻) νιτρικά (NO₃⁻) και φυσικά νέα κυτταρική μάζα (της γενικής χημικής μορφής C₅H₇NO₂).

Τα παραπάνω συνοψίζονται στην παρακάτω στοιχειομετρική εξίσωση:



Το ανθρακικό οξύ-H₂CO₃ βρίσκεται σε χημική ισορροπία με το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) (H₂CO₃+H₂O $\rightleftharpoons$ CO₂), η οποία όμως ευνοεί τη δημιουργία διοξειδίου, με αποτέλεσμα να υπάρχει κάθε φορά περί τις 600 φορές περισσότερο διοξείδιο απ' ό τι ανθρακικό οξύ.

Επιπλέον η κυτταρική βακτηριδιακή μάζα που παρήχθη μπορεί να υποστεί περαιτέρω αποικοδόμηση καταναλώνοντας πρόσθετο οξυγόνο και παράγοντας πρόσθετο διοξείδιο και αμμωνία κατά την παρακάτω (προσεγγιστική της πραγματικότητας) αντίδραση:



Από όλα τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

Για κάθε **1 mg TAN** που οξειδώνεται στο βιολογικό φίλτρο, καταναλώνονται **4,6 mg O₂** και παράγονται **5,98 mg CO₂**

Και με δεδομένο ότι τα ετερότροφα βακτηρίδια επίσης αναπνέουν και παράγουν και αυτά **1,38 mg CO₂** για κάθε **1 mg O₂** που χρησιμοποιούν, συνάγεται ότι:

1. Από το συνολικό ποσό διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται σε ένα κλειστό σύστημα, περί το **37 %** αυτού προέρχεται από το βιολογικό φίλτρο.
2. Οι συνολικές ανάγκες για οξυγόνο ενός κλειστού συστήματος (ψάρια και βακτηρίδια) είναι **1,5 φορές** αυτής που απαιτούν τα ψάρια από μόνα τους.

Ακριβώς αυτή η σύνθετη πραγματικότητα στην κατανάλωση ουσιών και στα προϊόντα που παράγονται σε ένα κλειστό σύστημα ιχθυοκαλλιέργειας, τόσο από τα ψάρια όσο και από τα βακτηρίδια, έχει καθιερώσει να λαμβάνεται υπόψη ως βάση υπολογισμού για τις συνολικές ανάγκες σε οξυγόνο, η **κατανάλωση οξυγόνου ανά kg τροφής**.

Ετσι με βάση τα ερευνητικά δεδομένα ένα κλειστό σύστημα απαιτεί:

0,20 – 0,25 kg οξυγόνου / kg τροφής

και σε συνδυασμό με το ότι:

1 kg τροφής δημιουργεί 25 – 30 g ολικής αμμωνίας (TAN)

δημιουργείται μια σταθερή βάση εκκίνησης για τους υπολογισμούς διαστασιοποίησης των φίλτρων, αναγκών σε οξυγόνο και απαερισμού για τη διαφυγή του CO₂,

18. Υδραυλική φόρτιση φίλτρου και ειδική επιφάνεια

Ο ρυθμός με τον οποίο το νερό διέρχεται διά του βιολογικού φίλτρου (**υδραυλική φόρτιση**) και η συνολική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης που διαβρέχεται από αυτό, είναι οι δύο παράμετροι που θα καθορίσουν την αποτελεσματικότητα του βιοφίλτρου να οξειδώνει την αμμωνία σε επίπεδα ασφαλή για τα ψάρια. Η συγκέντρωση της αμμωνίας και οι ανάγκες σε οξυγόνο έχουν υπολογιστεί κατά τα παραπάνω, οπότε αυτό που απομένει είναι να υπολογιστούν οι διαστάσεις του βιολογικού φίλτρου. Υπενθυμίζεται ότι **ειδική επιφάνεια-SSA** (Specific Surface Area) των μέσων πλήρωσης, καλείται η παράμετρος εκείνη που αφορά την συνολικώς προσφερόμενη επιφάνειά τους, προς τον όγκο που καταλαμβάνουν στοιβαγμένα σε ένα χώρο, δηλαδή κατά την πλέον χρησιμοποιούμενη έκφραση στο μετρικό σύστημα **m²/m³**, ή **ft²/ft³** στο αγγλοσαξωνικό, (**1 ft²/ft³ = 3,3 m²/m³**).

Θεωρητικώς, όσο μεγαλύτερη η υδραυλική φόρτιση και όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια των μέσων, τόσο ταχύτερη και αποτελεσματικότερη η οξείδωση της αμμωνίας, όμως υπάρχουν κάποια όρια. Η υδραυλική φόρτιση δεν επιτρέπεται να υπερβεί ορισμένη τιμή, διότι αφενός μπορεί να ξεπεράσει την χωρητικότητα του δοχείου του φίλτρου και αφετέρου η έντονη ροή του νερού μπορεί να δράσει αρνητικά στη στερέωση των βακτηριδιακών αποικιών που έχουν αναπτυχθεί στα διαβρεχόμενα μέσα. Επιπλέον, μια υπερβολικά μεγάλη ροή μπορεί να είναι μη συμφέρουσα από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας από την αντλία που θα μεταφέρει το νερό.

Η υδραυλική φόρτιση εκφράζεται σε:

m^3 νερού /μονάδα χρόνου / m^2 ελεύθερης επιφάνειας φίλτρου
 $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ ή $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ή $\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$ ή $\text{L}/\text{h}/\text{m}^2$

ή όπως συχνά απαντάται σε αγγλοσαξονικές μονάδες:

GPM/ft² δηλαδή, γαλόνια ανά λεπτό ανά τετραγωνικό πόδα και για μετατροπή στο μετρικό σύστημα:

1 GPM/ft² = 0,041 $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ (41 $\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$)

1 GPM/ft² = 2,4 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (2400 $\text{L}/\text{h}/\text{m}^2$)

Και η ειδική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης θέτει επίσης κάποιους περιορισμούς ως προς την ανώτερη τιμή της υδραυλικής φόρτισης, δεδομένου ότι μεγάλες τιμές SSA σημαίνει μικροσκοπικότερα μέσα πλήρωσης και συνεπώς μικρότερα και λιγότερα κενά για να διέλθει ανεμπόδιστα το νερό ανάμεσά τους όταν βρίσκονται στοιβαγμένα στο φίλτρο. Και ναι μεν η διέλευση του νερού από στενούς διαύλους τα διαβρέχει αποτελεσματικότερα με αποτέλεσμα την εντονότερη οξείδωση της αμμωνίας, όμως με την πρόοδο του χρόνου και την «πάχυνση» των βακτηριδιακών αποικιών επάνω στους κόκκους, οι διάυλοι θα φράξουν και το νερό δεν θα κυκλοφορεί σε αυτές τις περιοχές. Μια τέτοια κατάσταση σημαίνει κατ' ουσία το σταμάτημα της διαδικασίας (νιτροποίηση) για την οποία κατασκευάστηκε το βιολογικό φίλτρο.

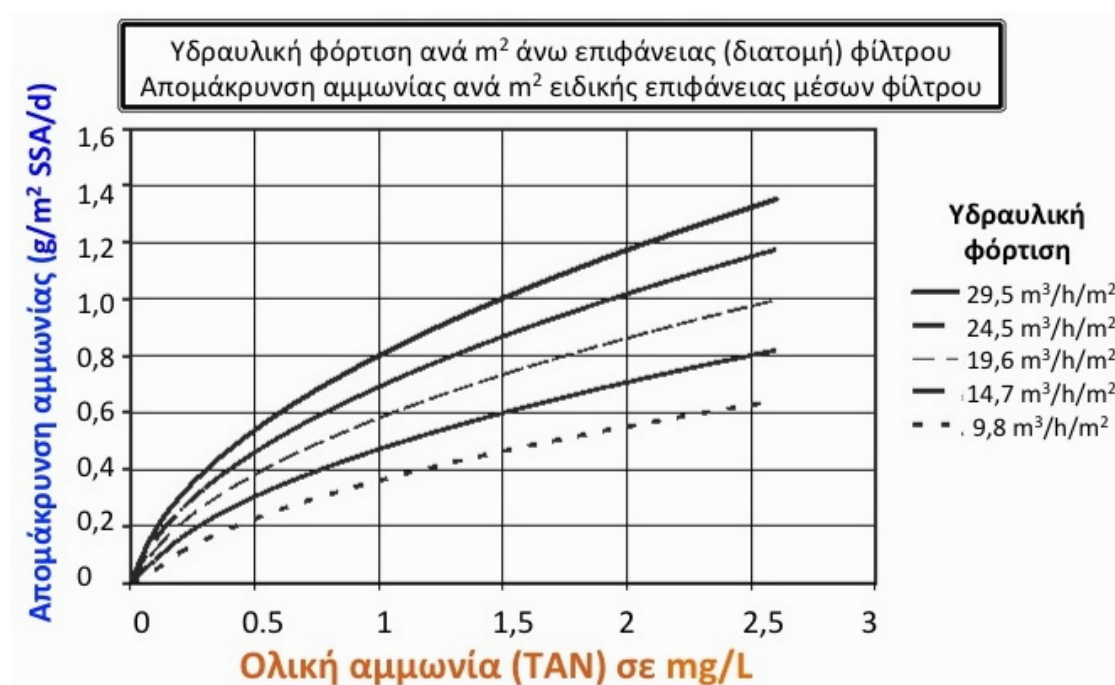
Οι διάφοροι τύποι των βιολογικών φίλτρων (RBC, κοκκωδών μέσων, καταιονισμού, ρευστοποιημένης κλίνης, κ.λπ.) από κατασκευής τους και ανάλογα με το μέσο πλήρωσης, έχουν ορισμένα όρια σχετικά με την υδραυλική φόρτιση και την ικανότητα οξείδωσης της αμμωνίας που επιφέρουν. Δυστυχώς και εδώ δεν υπάρχουν τυποποιημένες τιμές ακριβείας για τον κάθε τύπο φίλτρου, αλλά μάλλον περιοχές τιμών διάσπαρτες στη βιβλιογραφία, τις οποίες χρησιμοποιούν οι κατασκευαστές των κλειστών συστημάτων. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό την προϋπόθεση της από τα πριν γνωστής μέγιστης φόρτισης του συστήματος σε ρυπαντές και βεβαίως της οικονομικότερης κατά το δυνατόν κατασκευής από άποψη ενέργειας.

Η υδραυλική φόρτιση επηρεάζει την ένταση απομάκρυνσης της αμμωνίας από το βιολογικό φίλτρο όπως φαίνεται στο Σχήμα 77. Δηλαδή

μεγαλύτερες υδραυλικές φορτίσεις σημαίνει καλύτερη απομάκρυνση αμμωνίας.

Επιπροσθέτως υπάρχουν και **συνιστώμενες ελάχιστες τιμές υδραυλικής φόρτισης** ανάλογα με την ειδική επιφάνεια των μέσων που θα χρησιμοποιηθούν. Όσο πιο μεγάλη η ειδική επιφάνεια των μέσων σε ένα δεδομένο όγκο που καταλαμβάνουν, τόσο περισσότερο νερό απαιτείται για να διαβρέξει πλήρως όλες τις επιφάνειες.

Ειδική Επιφάνεια (SSA) m^2/m^3	Ελάχιστη Υδραυλική Φόρτιση $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$
100	7,4
165	9,8
230	12,3
400	17,2



Σχήμα 77. Η απομάκρυνση της αμμωνίας ανάλογα με την υδραυλική φόρτιση και τη συγκέντρωση της ολικής αμμωνίας στο νερό (κατά Kamstra, Van der Heul & Nijhof, *Performance and optimization of trickling filters on eel farms, Aquacultural Engineering*, 1998, τροποποιημένο από Γ. Χώτο).



Η απομάκρυνση της αμμωνίας που αποτυπώνεται στο Σχήμα 77, αφορά φίλτρο καταιονισμού σε γλυκό νερό, θερμοκρασίας άνω των 20 °C, με καλή διασπορά νερού και επαρκή συγκέντρωση σε οξυγόνο. Σε αλμυρό νερό ο ρυθμός απομάκρυνσης θα είναι μικρότερος και εάν το νερό είναι ψυχρότερο ακόμα πιο μικρός. Επίσης βιολογικά φίλτρα που δεν έχουν ρυθμιστεί θα παρουσιάζουν πολύ μικρότερους ρυθμούς απομάκρυνσης, όπως μικρότερους θα παρουσιάζουν και στην περίπτωση που στη μονάδα υπάρχουν μεγάλες αυξομειώσεις στη συγκέντρωση της αμμωνίας. Επίσης οι επιφάνειες των μέσων πρέπει να βρίσκονται σε **σκοτάδι** επειδή το φως αναστέλλει το μεταβολισμό των νιτροποιητικών βακτηριδίων.

Συνοπτικώς για τους διάφορους τύπους των βιολογικών φίλτρων η κατάσταση ως προς την ικανότητά τους να απομακρύνουν την αμμωνία, είναι η παρακάτω:

- **ΦΙΛΤΡΑ RBC. SSA υλικών πλήρωσης:** $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$, ικανότητα απομάκρυνσης 76 g TAN /m^3 μέσων πλήρωσης /day. Υποθέτοντας ότι περίπου το 2,5% της τροφής μετατρέπεται σε TAN, θεωρούμε ότι η ικανότητά του (επεξεργασίας νερού) βρίσκεται στην περιοχή των $3 \text{ kg τροφής/ημέρα/m}^3$ υλικού πλήρωσης.
- **ΦΙΛΤΡΑ ΚΑΤΑΙΟΝΙΣΜΟΥ-TRICKLING. SSA** $330 \text{ m}^2/\text{m}^3$, ικανότητα απομάκρυνσης $90 \text{ g TAN /m}^3/\text{d}$, με 2,5% της τροφής να μετατρέπεται σε TAN, η ικανότητά του είναι: $3,6 \text{ kg τροφής/ημέρα/m}^3$ υλικού πλήρωσης.
- **ΦΙΛΤΡΑ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ. SSA** $1150-1475 \text{ m}^2/\text{m}^3$, ικανότητα απομάκρυνσης $325 \text{ g TAN /m}^3/\text{d}$, με 2,5% της τροφής να μετατρέπεται σε TAN, η ικανότητά του είναι: $13 \text{ kg τροφής/ημέρα/m}^3$ υλικού πλήρωσης.
- **ΦΙΛΤΡΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ. SSA** $900 \text{ m}^2/\text{m}^3$, ικανότητα απομάκρυνσης $500-1000 \text{ g TAN /m}^3/\text{d}$, με 2,5% της τροφής να μετατρέπεται σε TAN, η ικανότητά του είναι: $20-40 \text{ kg τροφής/ημέρα/m}^3$ υλικού πλήρωσης.
- **ΦΙΛΤΡΑ – ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΑΝΑΜΙΚΤΗΣ ΚΛΙΝΗΣ. SSA** $800-1150 \text{ m}^2/\text{m}^3$, ικανότητα απομάκρυνσης $400-575 \text{ g TAN /m}^3/\text{d}$, με 2,5% της τροφής να μετατρέπεται σε TAN, η ικανότητά του είναι: $16-23 \text{ kg τροφής/ημέρα/m}^3$ υλικού πλήρωσης.

18.1. Υπόδειγμα υπολογισμών διαστασιοποίησης βιολογικού φίλτρου

Σχεδιάζοντας ένα βιολογικό φίλτρο για να εξυπηρετήσει μια ορισμένη εκτρεφόμενη βιομάζα ψαριών, το πρώτο που ενδιαφέρει είναι η χωρητικότητά του. Δηλαδή ποιες θα είναι οι διαστάσεις του για να χωρέσει τον απαιτούμενο όγκο από υλικά πλήρωσης στην επιφάνεια των οποίων θα αναπτυχθεί η αποικία των νιτροποιητικών βακτηριδίων.

Δεν υπάρχουν οδηγίες συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Πρέπει κάθε φορά να συνδυαστούν ποικίλα ερευνητικά δεδομένα και να προσαρμοστούν στις ιδιαίτερες ανάγκες της κάθε εκτροφής. Φυσικά αναφερόμαστε σε μια μικρή μονάδα κλειστού κυκλώματος η οποία θα αποτελέσει μια προσπάθεια χαμηλής έντασης για τον πρωτοεπιχειρούντα.

Οι μεγάλες βιομηχανικού τύπου μονάδες θα χρησιμοποιήσουν ολοκληρωμένα σχέδια από μελετητικούς οίκους, αλλά τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν επιχειρήσεις υψηλού κόστους.

Η σωστή διαστασιοποίηση του βιολογικού φίλτρου έχει πολύ μεγάλη σημασία διότι θα καθορίσει πόσο ψηλό θα είναι και πόσο πλατύ, δηλαδή τον όγκο που θα καταλάβει στο χώρο. Επίσης πόση ισχύς αντλίας θα απαιτηθεί για να ανεβάσει το νερό στην κορυφή του και όλα τα συναφή. Αρα οι διαστάσεις του έχουν και ενεργειακή σημασία.

Η πλέον κλασική, απλή, αξιόπιστη και εύκολα διαχειρίσιμη περίπτωση βιολογικού φίλτρου είναι το φίλτρο καταιονισμού (trickling filter), το οποίο εκτός από βιολογικό φιλτράρισμα επιτυγχάνει και οξυγόνωση του νερού και απαερισμό από το διοξείδιο του άνθρακα. Πρόκειται για κυλινδρική κατασκευή ικανού ύψους και ικανής χωρητικότητας (σε στοιβαγμένα εντός του) υλικών πλήρωσης, όπου το νερό διασπείρεται (ψεκάζεται) στην κορυφή και κατόπιν κυλά προς τα κάτω διαβρέχοντας τα μέσα πλήρωσης.

Ο παράγοντας που καθορίζει την αποτελεσματικότητά του είναι η διαβροχή όλων των επιφανειών των μέσων, διότι σε διαφορετική περίπτωση θα δημιουργούνται νεκρές ζώνες νιτροποίησης και συνεπώς μείωση της συνολικής νιτροποιητικής δραστηριότητας.

Κατά τους υπολογισμούς είναι καλύτερα να καταλήγουμε σε μεγαλύτερο φίλτρο απ' ό,τι θεωρητικώς χρειαζόμαστε (για τη δεδομένη μάζα ψαριών), παρά σε μικρότερο. *«Ποτέ δεν ψόφησαν ψάρια εξαιτίας ενός μεγαλύτερου απ' ό,τι απαιτείται φίλτρου. Από μικρότερο ψόφησαν πολλά σε πολλές μονάδες».*

Τα θεμελιώδη «βήματα» υπολογισμών για τον υπολογισμό των διαστάσεων ενός βιολογικού φίλτρου ιχθυοκαλλιέργειας είναι συνοπτικώς τα παρακάτω:

1. Υπολογίζεται η μέγιστη ποσότητα τροφής που θα εισέλθει στο σύστημα όταν τα ψάρια έχουν φτάσει στο μέγιστο μέγεθος.
2. Υπολογίζεται για το είδος που εκτρέφεται η ανώτατη επιτρεπόμενη ποσότητα μη ιονισμένης αμμωνίας (NH_3) που μπορούν να αντέξουν. Από αυτή θα υπολογιστεί η επιτρεπόμενη ολική αμμωνία (TAN).
3. Υπολογίζεται ο ρυθμός απομάκρυνσης της αμμωνίας ανάλογα με την υδραυλική φόρτιση που θα χρησιμοποιηθεί (Σχήμα 77). Υδραυλική φόρτιση σημαίνει και πόσες φορές ο συνολικός όγκος νερού (δεδομένος) ανακυκλώνεται περνώντας από το φίλτρο. Συνήθως είναι 1-2 φορές ανά ώρα.
4. Υπολογίζεται η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου που θα χρειαστεί το όλο σύστημα (ψάρια και φίλτρο). Ρυθμίζεται ανάλογα το σύστημα οξυγόνωσης ώστε να υπάρχει επάρκεια για όλους τους οργανισμούς (δεν θα επεκταθούμε στο παρόν, θεωρείται δεδομένη η επάρκεια οξυγόνου).
5. Με βάση την ποσότητα της τροφής και την (από το βήμα 3) απομάκρυνση της αμμωνίας υπολογίζεται η συνολική ειδική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης.
6. Επιλέγεται ο τύπος μέσων πλήρωσης με την επιθυμητή ειδική επιφάνεια (SSA) των μέσων (π.χ. 150, 200, 300 κ.λπ. m^2/m^3).
7. Διαιρώντας την συνολική ειδική επιφάνεια (βήμα 5) με τη ειδική επιφάνεια του επιλεγθέντος μέσου πλήρωσης (βήμα 6), καθορίζεται ο όγκος του βιολογικού φίλτρου.
8. Υπολογίζεται η τελική υδραυλική φόρτιση.

Παράδειγμα υπολογισμού

Σε ένα μικρό κλειστό κύκλωμα θα εκθρέψουμε λαβράκια κατάλληλα προσαρμοσμένα σε γλυκό νερό θερμοκρασίας 20 °C και με pH 7,5.

- Η μέγιστη μάζα ψαριών αναμένεται να είναι **1000 kg**.
- Παρέχεται τεχνητή τροφή σε ποσότητα **2,5 % /Σ.Β./ημέρα (d)**.
- Ποσότητα παρεχομένης τροφής: $2,5 \% \times 1000 \text{ kg} = \mathbf{25 \text{ kg/d}}$.
- Η τροφή αναμένεται να παράγει **3 % TAN / kg τροφής**
- Επιτρεπόμενη συγκέντρωση ολικής αμμωνίας (TAN) στο σύστημα για 20 °C και pH 7,5 = **2 mg/L TAN** (αντιστοιχεί σε 0,03 mg/L NH₃).
- Επιλεγόμενη υδραυλική φόρτιση: **18 m³/h/m²**.
- Ποσότητα TAN παραγόμενη ημερησίως: $0,03 \times 25 \text{ Kg τροφής} = 0,750 \text{ kg/d} = \mathbf{750 \text{ g/d}}$.
- Απομάκρυνση αμμωνίας για την παραπάνω υδραυλική φόρτιση και συγκέντρωση 2 mg/L TAN: **0,8 g TAN/m²/d** (από Σχήμα 77).
- Απαιτούμενη ειδική επιφάνεια (SSA): $(750\text{g/d}) / (0,8\text{g/m}^2/\text{d}) = \mathbf{938 \text{ m}^2}$.
- Ειδική επιφάνεια επιλεγόμενων πλαστικών μέσων πλήρωσης: **300 m²/m³**.
- Ογκος πλαστικών μέσων πλήρωσης: $(938 \text{ m}^2) / (300 \text{ m}^2/\text{m}^3) = \mathbf{3,13 \text{ m}^3}$.
- Επιλέγουμε το βιολογικό φίλτρο να είναι κυλινδρικού σχήματος ύψους 3 m. Συνεπώς η άνω επιφάνειά του έχει έκταση $3,13 \text{ m}^3 / 3 \text{ m} = \mathbf{1,04 \text{ m}^2}$, δηλαδή απόλυτα συμβατό με τις προδιαγραφές που δίδονται από το Σχήμα 77.

Θα μπορούσε το ύψος του φίλτρου να γίνει και μικρότερο π.χ. 2 m, με αποτέλεσμα να μεγαλώσει η επιφάνεια και να μειωθεί η υδραυλική φόρτιση, αλλά αυτό δεν θα βελτιώσει τη νιτροποίηση (μεγαλύτερες παροχές νερού - καλύτερη νιτροποίηση). Επιπροσθέτως επισημαίνεται ότι είναι προτιμότερο το νερό να ρέει καταιονιζόμενο για μεγαλύτερη απόσταση σε ένα στενότερο φίλτρο καθώς έτσι θα διαβρέχει πιο σίγουρα και για περισσότερη ώρα πιο εκτεταμένες επιφάνειες βακτηριδιακών αποικιών και επιπλέον θα οξυγονώνεται καλύτερα και θα αποβάλλει πιο αποτελεσματικά το διοξείδιο του άνθρακα (περισσότερη ώρα επαφής νερού-αέρα).

Παρατηρήσεις:

1. Η συνολική ποσότητα του νερού στο παραπάνω σύστημα είναι 18 m³ περίπου και αυτό για τη συνολική μάζα των ψαριών δίδει: $(1000 \text{ kg ψαριών}) / (18 \text{ m}^3) = 56 \text{ kg/m}^3$, ιχθυοπυκνότητα απόλυτα λογική για ένα εντατικό κλειστό κύκλωμα. Λειτουργική κατασκευή: 3 στρογγυλές δεξαμενές των 6 m³ η καθεμιά.
2. Υπάρχει ενίοτε η αντίληψη (ίσως και ευρύτατα) ότι το βιολογικό φίλτρο στις ιχθυοκαλλιέργειες είναι το αντίστοιχο του βιολογικού φίλτρου στους βιολογικούς καθαρισμούς των αστικών λυμάτων. Η αρχή λειτουργίας των είναι η ίδια όμως «απευθύνονται» σε διαφορετικές βακτηριδιακές αποικίες. Το βιολογικό φίλτρο των βιολογικών καθαρισμών πασχίζει να χαμηλώσει το BOD του νερού πρωτίστως διά της ανάπτυξης αποικιών από αερόβια ετερότροφα βακτηρίδια και συνάμα βεβαίως έχει και νιτροποιητική λειτουργία. Όμως το βιολογικό φίλτρο των ιχθυοκαλλιεργειών δεν έχει σκοπό τίποτα άλλο παρά να απομακρύνει την αμμωνία και η ιδανική του κατάσταση είναι να έχει αναπτυγμένες μόνο τις νιτροποιητικές βακτηριδιακές αποικίες. Οι ετερότροφες αποικίες υποτίθεται ότι δεν έχουν χώρο ούτε τροφή (το μεγάλο οργανικό φορτίο των στερεών το έχουν ήδη κατακρατήσει τα μηχανικά φίλτρα), για να αναπτυχθούν σε βαθμό τέτοιο που να εκτοπίσουν τους νιτροποιητές. Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί αυτό, είναι η σταθερή παροχή αμμωνίας στο φίλτρο. Η αμμωνία είναι η «τροφή» που συντηρεί τα νιτροποιητικά βακτηρίδια. Χωρίς αυτή οι αποικίες παρακμάζουν, τα ετερότροφα «εκτοπίζουν» τα αυτότροφα και όταν εμφανιστεί υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας δεν θα υπάρχουν νιτροποιητές για να την οξειδώσουν. Αρα, σταθερή παροχή αμμωνίας στο φίλτρο χωρίς «ανησυχία». Το ρυθμισμένο βιολογικό φίλτρο θα την απομακρύνει άμεσα, τα νιτροποιητικά θα ακμάζουν και η επιθυμητή ισορροπία θα διασφαλίζει την υγιεινή του νερού για τα ψάρια από την άποψη της αμμωνίας. Όλα γίνονται για την αμμωνία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αντί της εξαντλητικής παράθεσης του πλήθους των σχετικών πονημάτων στα κλειστά συστήματα ιχθυοκαλλιέργειας, προτιμήθηκε η παράθεση μόνο των σπουδαιότερων κατά τη γνώμη του συγγραφέα εκδόσεων που παρουσιάζουν με τον πλέον **χρηστικό** τρόπο τα βασικά στοιχεία στο θέμα αυτό. Η μελέτη τους από τον κάθε ενδιαφερόμενο θα δώσει απαντήσεις και γνώσεις σε όλα τα θεμελιώδη ζητήματα.

- Brengballe J., 2015. A Guide to Recirculation Aquaculture. FAO.
- Huguenin, J, E. & J. Colt, 1989. Design and operating guide for aquaculture seawater systems. Elsevier.
- Kamstra, A., Van der Heul, J. W. & M. Nijhof, 1998. Performance and optimization of trickling filters on eel farms. Aquacultural Engineering 17(3) pp 175-192.
- Spotte, S, 1991. Captive seawater fishes. John Wiley & Sons.
- Strange J. Richard, 2004. Recirculation Aquaculture. Internet Lessons. <http://web.utk.edu/~rstrange/wfs556/html-content/welcome.html>
- Timmons, M. B. & M.T. Losordo, 1994. Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering Design and Management. Elsevier Science B.V.
- Timmons, M.B., Ebeling, M.J., Wheaton, W. F., Summerfelt, T. S. & B. J. Vinci, 2001. Recirculating Aquaculture Systems. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, N.Y.
- Wheaton, W. F. 1993. Aquacultural Engineering. Krieger Publishing Co.
- Χώτος, Ν. Γ., 2006. Υδατοκαλλιέργειες σε Ανακυκλούμενα Νερά. Τ.Ε.Ι. Μεσολογγίου. Τμήμα Ιχθυοκομίας-Αλιείας.