

## 6. Ευτροφισμός

Ο ευτροφισμός (eutrophication) μπορεί να ορισθεί ως ο εμπλουτισμός των υδάτων με θρεπτικά συστατικά, κυρίως άζωτο και φώσφορο, ο οποίος επιταχύνει την ανάπτυξη των αλγών και των ανωτέρων φυτών και προκαλεί ανεπιθύμητες παρενέργειες στην ισορροπία των οργανισμών μέσα στο νερό καθώς και στην ποιότητα του νερού. Ο ευτροφισμός αναφέρεται κυρίως σε λίμνες, αλλά μερικές φορές προβλήματα ευτροφισμού παρουσιάζονται και σε κλειστούς κόλπους (π.χ. Παγασητικός, Αμβρακικός).

Ο ευτροφισμός, ως όρος εκφράζει τη γήρανση της λίμνης. Ο ευτροφισμός μπορεί να γίνει και με φυσικά μέσα, αλλά αυτή η διαδικασία κρατάει αιώνες. Ανθρωπογενείς παράγοντες κατά τον τελευταίο αιώνα έχουν επιταχύνει τη διαδικασία του ευτροφισμού σε πολλές λίμνες.

Ως κύρια αιτία του ευτροφισμού θεωρείται η είσοδος στη λίμνη θρεπτικών συστατικών (κυρίως αζώτου και φωσφόρου). Η προέλευση των είναι τα λιπάσματα (νιτρικά και φωσφορικά), τα απορρυπαντικά (φωσφορικά), η ρύπανση από λύματα και υγρά απόβλητα τα οποία περιέχουν νιτρικά, αμμωνιακά και φωσφορικά άλατα κ.λ.π. Ο ευτροφισμός προκαλεί μεγάλη ανάπτυξη φυκών και αλγών, που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες  $O_2$ , κατά τη βιολογική αποικοδόμησή τους. Η έλλειψη οξυγόνου μπορεί να προκαλέσει μαζικούς θανάτους ψαριών.

Αν άλογα με το βαθμό κορεσμού του  $O_2$  στον πυθμένα της λίμνης, οι λίμνες διακρίνονται σε:

- ✪ Ολιγοτροφικές. Βαθμός κορεσμού μεγαλύτερος από 70 %.
- ✪ Μεσοτροφικές. Βαθμός κορεσμού 30- 70 %.
- ✪ Ευτροφικές. Βαθμός κορεσμού 0- 30 %.

Η μέγιστη συγκέντρωση του οξυγόνου που μπορεί να διαλυθεί στο νερό είναι γενικά μικρή (της τάξης των ολίγων mg/L) και εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες:

1. Θερμοκρασία. Ενώ για τα περισσότερα στερεά (π.χ. αλάτι, ζάχαρη) η διαλυτότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, η διαλυτότητα των αερίων στο νερό μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα αναφέρεται ότι σε γλυκό νερό και κάτω από πίεση 1 ατμόσφαιρας, στους  $0^\circ C$  η διαλυτότητα του  $O_2$  είναι 14.6 mg/L, ενώ στους  $25^\circ C$  είναι μόνο 8.24 mg/L.
2. Ατμοσφαιρική πίεση. Η αύξηση της πίεσης αυξάνει τη διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό, π.χ. σε γλυκό νερό, κάτω από πίεση 740 mm Hg, στους  $0^\circ C$  η διαλυτότητα του  $O_2$  είναι 14.22 mg/L, ενώ κάτω από πίεση 780 mm είναι 14.99 mg/L.
3. Από τις άλλες ουσίες που είναι διαλυμένες στο νερό. Το οξυγόνο έχει μικρότερη διαλυτότητα στο θαλασσινό νερό από ό,τι στο γλυκό νερό. Για παράδειγμα αναφέρεται ότι σε νερό μηδενικής αλατότητας και κάτω από πίεση 1 ατμόσφαιρας, στους  $0^\circ C$  η διαλυτότητα του  $O_2$  είναι 14.6 mg/L, ενώ σε νερό αλατότητας 3.5 ‰ είναι μόνο 11.5 mg/L.

Στην Ελλάδα έχουν αναφερθεί περιπτώσεις ευτροφισμού σε αρκετές λίμνες π.χ. στην Κορώνεια, στη λίμνη της Καστοριάς, στη λίμνη των Ιωαννίνων κ.λ.π.

Μέτρα αντιμετώπισης του ευτροφισμού είναι:

1. Περιορισμός ή αντικατάσταση των φωσφορικών στα απορρυπαντικά. Τα φωσφορικά υπάρχουν στα περισσότερα απορρυπαντικά και παίζουν το ρόλο του αποσκληρυντικού. Υπάρχουν απορρυπαντικά που χρησιμοποιούν άλλα αποσκληρυντικά, αντί για φώσφορο. Σε πολλές χώρες με ανεπτυγμένη οικολογική συνείδηση των καταναλωτών τα απορρυπαντικά χωρίς φώσφορο πουλιούνται ικανοποιητικά. Στην Ελλάδα, δυστυχώς, η ενημέρωση γύρω από αυτό το πρόβλημα είναι ελλιπής και τα απορρυπαντικά χωρίς φώσφορο είναι ελάχιστα διαδεδομένα. Τα σαπούνια (π.χ. "Αρκάδι") δεν περιέχουν φώσφορο.

2. Τριτογενής καθαρισμός των αποβλήτων για απομάκρυνση νιτρικών και φωσφορικών.
3. Χρήση λιπασμάτων με μέτρο. Πολλές φορές οι αγρότες οδηγούνται σε κατάχρηση λιπασμάτων, θεωρώντας ότι έτσι θα αυξηθεί η γεωργική παραγωγή. Από την άλλη, η καλλιέργεια με παραδοσιακούς τρόπους, η βιολογική δηλαδή γεωργία ( με χρήση κοπριάς και χωρίς λιπάσματα και φυτοφάρμακα) μπορεί να αυξήσει την τιμή των γεωργικών προϊόντων.
4. Η διαχείτευση των καναλιών αποστράγγισης από τα χωράφια σε ανοικτή θάλασσα, και όχι σε λίμνη ή σε κλειστή θάλασσα..
5. Η απομάκρυνση της ιλύος της λίμνης ώστε να μην επαναδιαλυθούν τα φωσφορικά που υπάρχουν σε αυτή. Τα φωσφορικά άλατα έχουν συνήθως χαμηλή διαλυτότητα στο νερό.
6. Ο τεχνητός αερισμός στο υπολίμνιο.
7. Η εκβάθυνση της λίμνης.
8. Η μείωση της βιομάζας με μηχανικά μέσα π.χ. η αφαίρεση των υδρόβιων φυτών ώστε να βιοαποικοδομηθούν έξω από τη λίμνη και να μην καταναλώσουν το πολύτιμο οξυγόνο της.
9. Η μείωση της βιομάζας με την πρόσθεση ειδικών φυτοφάγων ψαριών. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοσθεί στη λίμνη των Ιωαννίνων με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Υπήρξαν όμως και αρνητικές παρενέργειες, όπως η αλλαγή της σύνθεσης των υδρόβιων οργανισμών με τα εισαγόμενα ψάρια να επικρατούν σε βάρος των αυτοχθόνων.
10. Η πρόσθεση καθαρού νερού (φτωχού σε θρεπτικά συστατικά) στη λίμνη. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στην Κορώνεια μελετάται η μεταφορά νερού από τον Αξίο ή από το Στρυμόνα ποταμό. Η μέθοδος αυτή όμως, εκτός από το ότι έχει τεράστιο κόστος, μπορεί να οδηγήσει και σε αλλαγή της οικολογικής ισορροπίας σε άλλες περιοχές π.χ. στο δέλτα του ποταμού από όπου θα μεταφερθεί το νερό.

Από τα δέκα μέτρα που αναφέρονται παραπάνω για την αντιμετώπιση του ευτροφισμού, τα 4 πρώτα μέτρα βοηθούν στην πρόληψη του φαινομένου, ενώ τα υπόλοιπα 6 είναι μέτρα που χρησιμοποιούνται σε λίμνες που έχουν εκδηλώσει ήδη φαινόμενα ευτροφισμού, είναι δηλαδή μέτρα θεραπείας. Είναι αυτονόητο, ότι, όπως και σε όλα τα άλλα προβλήματα που σχετίζονται με την προστασία του περιβάλλοντος, η πρόληψη είναι προτιμότερη από τη θεραπεία.

### 6.1 Άσκηση

Σε θερμοκρασία 20° C, η διαλυτότητα του οξυγόνου σε νερό που δεν περιέχει χλωριούχα είναι 9.17 mg/L. Στην πυθμένα της λίμνης η συγκέντρωση του οξυγόνου που μετρήθηκε ήταν 2 mg/L. Να βρεθεί το είδος της λίμνης σε σχέση με τον ευτροφισμό.

## 6. Καμπύλη υποχώρησης οξυγόνου σε υδάτινα ρεύματα

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε ένα ποτάμι είναι δείκτης της συνολικής ισορροπίας του οικοσυστήματός του. Σε όλα τα ποτάμια υπάρχει ικανότητα «αυτοκαθαρισμού» η οποία ως ένα βαθμό βοηθάει στη διατήρηση των συνθηκών ισορροπίας. Σε περιπτώσεις που στο ποτάμι εκβάλλονται σε μεγάλες ποσότητες εκροές με υψηλή απαίτηση οξυγόνου (δηλαδή μεγάλο BOD), τότε το οικοσύστημα χάνει σταδιακά την παραπάνω ικανότητα διατήρησης της ισορροπίας του, προκαλώντας αλλαγές στη χλωρίδα και την πανίδα. Ως άμεσο αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου.

Όταν το διαλυμένο οξυγόνο στο ποτάμι φτάσει σε συγκέντρωση μικρότερη των 4-5 mg/L, θα υπάρξει πρόβλημα βιωσιμότητας των ψαριών του οικοσυστήματος και όλων των ανώτερων οργανισμών καθώς θα δημιουργηθούν συνθήκες που δεν θα καλύπτουν τις φυσιολογικές ανάγκες των οργανισμών (Metcalf & Eddy, 1991). Σε αυτές τις περιπτώσεις το νερό παίρνει μαύρες αποχρώσεις και δημιουργείται δυσάρεστη μυρωδιά λόγω των νεκρών οργανισμών που αποσυντίθενται κάτω από αναερόβιες συνθήκες.

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που εμπλέκονται στη ποιοτική διαχείριση ενός ποταμού είναι η διερεύνηση της ικανότητας του υδάτινου σώματος να απορροφά το οργανικό φορτίο. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό του προφίλ της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι από το σημείο που ενώνεται με την εκροή και προς τη φορά ροής του. Το προφίλ αυτό ονομάζεται **καμπύλη υποχώρησης οξυγόνου** (oxygen sag curve), καθώς η συγκέντρωση του οξυγόνου μειώνεται με την αύξηση της ποσότητας των υλικών – ουσιών που απαιτούν οξυγόνο για την οξείδωσή τους και μετά από τη δραστική του μείωση η συγκέντρωσή του ανακάμπτει με το χρόνο και την απόσταση, καθώς γίνεται εισαγωγή του οξυγόνου στο οικοσύστημα από την ατμόσφαιρα. Αυτές οι μεταβολές της συγκέντρωσης οξυγόνου έχουν επίδραση και στη βιοποικιλότητα των οργανισμών στα αντίστοιχα σημεία μεταβολής της συγκέντρωσης (Davis and Cornwell, 1998).

Οι πηγές οξυγόνου στο σύστημα και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωσή του πρέπει να προσδιοριστούν τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Οι σημαντικότερες πηγές εισροής οξυγόνου είναι οι ποσότητες που προέρχονται από την ατμόσφαιρα και οι ποσότητες που προέρχονται από τις διαδικασίες της φωτοσύνθεσης. Η μείωση του οξυγόνου μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, με πιο σημαντικό την βιολογική ανάγκη οξυγόνου (BOD) τόσο των εισροών στο σύστημα όσο και στο σύστημα καθεαυτό. Ένας επιπλέον παράγοντας εξίσου σημαντικός είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα λύματα που εισέρχονται, η οποία είναι μικρότερη από αυτή του οικοσυστήματος. Άλλοι παράγοντες είναι η αναπνοή των βενθικών οργανισμών και των υδάτινων φυτών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση που θα εφαρμοστεί για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου θα λαμβάνει υπόψη:

- α. την αρχική μείωση του διαλυμένου οξυγόνου  
 β. το BOD και  
 γ. της ανταλλαγής οξυγόνου με την ατμόσφαιρα.

$$D_t = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_0 e^{-k_2 t}$$

Έτσι εφαρμόζεται η εξίσωση Streeter - Phelps:

$$D = \frac{k_1 \cdot L_0}{k_2 - k_1} \cdot (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_0 \cdot e^{-k_2 t} \quad (6.25)$$

- όπου,  $D =$  το έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι μετά την ανάμιξη των αποβλήτων, σε χρόνο  $t$  (σε mg/L).  
 $D_0 =$  το έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι αμέσως μετά την ανάμιξη των αποβλήτων, σε χρόνο  $t = 0$  (mg/L).  
 $L_0 =$  το ολικό τελικό BOD, του ποταμού, αμέσως μετά την ανάμιξη των αποβλήτων.  
 $k_1 =$  σταθερά βιοοξείδωσης  
 $k_2 =$  σταθερά επαναερισμού

Διαφορίζοντας την παραπάνω εξίσωση και θέτοντάς την ίση με μηδέν, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος  $t_c$ , στον οποίο θα παρατηρηθεί το μέγιστο έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου.

$$t_c = \frac{1}{k_2 - k_1} \cdot \ln \left[ \frac{k_2}{k_1} \cdot \left( 1 - D_0 \cdot \frac{k_2 - k_1}{k_1 \cdot L_0} \right) \right] \quad (6.26)$$

### 6.1 Άσκηση

Τα επεξεργασμένα λύματα μιας μονάδας επεξεργασίας αστικών λυμάτων εκβάλλουν σε ένα ποτάμι. Το ολικό τελικό BOD, του ποταμού, αμέσως μετά την ανάμιξη των λυμάτων είναι 10 mg/L και το διαλυμένο οξυγόνο 7 mg/L. Να υπολογιστεί το διαλυμένο οξυγόνο στο ποτάμι μετά από 1 ημέρα, ο χρόνος στον οποίο θα παρατηρηθεί η ελάχιστη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου και η ελάχιστη τιμή διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι.

Δίδονται:  $k_1 = 0.1 \text{ ημ}^{-1}$  και  $k_2 = 0.3 \text{ ημ}^{-1}$ , διαλυμένο οξυγόνο κορεσμού  $DO_{(s)} = 9 \text{ mg/L}$

Το έλλειμμα του διαλυμένου οξυγόνου μετά από 1 ημέρα υπολογίζεται από την εξίσωση Streeter - Phelps, αντικαθιστώντας  $L_0 = 10 \text{ mg/L}$ ,  $D_0 = 9 - 7 = 2 \text{ mg/L}$  και  $t = 1 \text{ ημέρα}$ . Οπότε:

$$D = \frac{0.1 \cdot 10}{0.3 - 0.1} \cdot (e^{-0.1 \cdot 1} - e^{-0.3 \cdot 1}) + 2 \cdot e^{-0.3 \cdot 1} \Leftrightarrow D = 2.30 \text{ mg/L}$$

Η τιμή του διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι μετά από μία ημέρα θα είναι

$$DO = DO_{(s)} - D = 9 - 2.30 = 6.70 \text{ mg/L}$$

Ο χρόνος στον οποίο θα παρατηρηθεί η ελάχιστη τιμή διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι υπολογίζεται από τον τύπο:

$$t_c = \frac{1}{0.3 - 0.1} \cdot \ln \left[ \frac{0.3}{0.1} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{0.3 - 0.1}{0.1 \cdot 10} \right) \right] \Leftrightarrow t_c = 2.94 \text{ ημέρες}$$

Η ελάχιστη τιμή διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι υπολογίζεται από το μέγιστο έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου, αντικαθιστώντας στην εξίσωση Streeter Phelps  $t = 2.94$  ημέρες, οπότε:

Το μέγιστο έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου υπολογίζεται  $D_c = 2.48 \text{ mg/L}$

$$D_c = DO_{(s)} - DO_c \Leftrightarrow DO_c = 6.52 \text{ mg/L}$$

## 6.2 Άσκηση

Ένας σταθμός επεξεργασίας λυμάτων εξυπηρετεί πληθυσμό 50000 ατόμων. Ο σταθμός έχει σχεδιαστεί για φόρτιση 250 L ανά άτομο ανά ημέρα και  $BOD_5$  70 g ανά άτομο ανά ημέρα. Το διαλυμένο οξυγόνο (DO) της εκροής του σταθμού επεξεργασίας είναι 5 mg/L. Η εκροή εκβάλλει σε ένα ποτάμι που έχει παροχή 1 m<sup>3</sup>/s,  $BOD_5 = 2 \text{ mg/L}$  και συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου 9 mg/L. Το  $BOD_5$  του ποταμού μετά το σημείο εκβολής των επεξεργασμένων λυμάτων, δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 4 mg/L. Να υπολογιστούν τα παρακάτω:

- Η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση  $BOD_5$  στο σταθμό επεξεργασίας.
- Το ποσοστό απομάκρυνσης  $BOD_5$  (% απόδοση απομάκρυνσης  $BOD_5$  που επιτυγχάνεται από την επεξεργασία του σταθμού).
- Η συνολική συγκέντρωση οξυγόνου και η ελάχιστη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο ποτάμι (το ελάχιστο της καμπύλης υποχώρησης οξυγόνου).
- Το σημείο στο οποίο θα εμφανιστεί η ελάχιστη συγκέντρωση.

Θεωρούμε ότι  $k_1 = 0.1 \text{ ημ}^{-1}$  και  $k_2 = 0.3 \text{ ημ}^{-1}$ ,  $V_{\text{ποταμού}} = 0.1 \text{ m/s}$ , διαλυμένο οξυγόνο κορεσμού  $DO_{(s)} = 10 \text{ mg/L}$ .

Το σχηματικό διάγραμμα εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων στο ποτάμι, με βάση τα δεδομένα της άσκησης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2

α.

$$\text{Ογκομετρική παροχή εκροής} : Q_{(e)} = \frac{(50000 \text{ ατ.}) (0.250 \text{ m}^3 / \text{ατ.})}{(24 \text{ h} / \eta) (60 \text{ min} / \text{h}) (60 \text{ s} / \text{min})} = 0.145 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Το  $BOD_{5(i)}$  των λυμάτων στην εισροή του βιολογικού είναι:

$$BOD_{5(i)} = \frac{70 \text{ g/ ατ. ημ}}{250 \text{ L/ ατ. ημ}} = 0.280 \text{ g/L} = 280 \text{ mg/L}$$

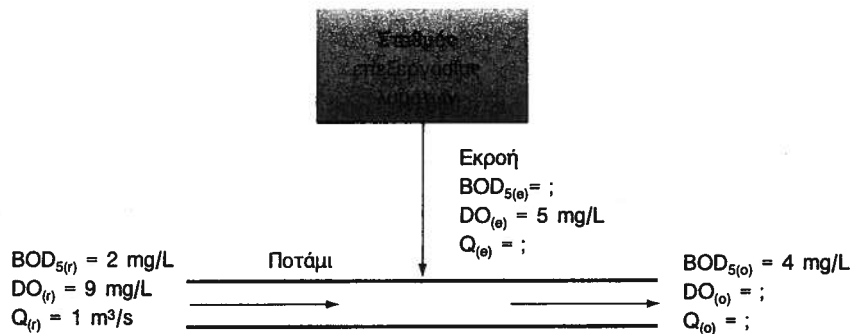
Ροή του ποταμού μετά το σημείο εκβολής των επεξεργασμένων λυμάτων θα είναι:

$$Q_{(o)} = Q_{(r)} + Q_{(e)} = 1 + 0.145 = 1.145 \text{ m}^3/\text{s}$$

Το ισοζύγιο μάζας του  $BOD_5$  είναι:

$$\begin{aligned} \text{Μάζα } BOD_{5(r)} + \text{Μάζα } BOD_{5(e)} &= \text{Μάζα } BOD_{5(o)} \Leftrightarrow \\ Q_{(r)} \cdot BOD_{5(r)} + Q_{(e)} \cdot BOD_{5(e)} &= Q_{(o)} \cdot BOD_{5(o)} \Leftrightarrow \\ BOD_{5(e)} &= \frac{Q_{(o)} \cdot BOD_{5(o)} - Q_{(r)} \cdot BOD_{5(r)}}{Q_{(e)}} \Leftrightarrow \\ BOD_{5(e)} &= \frac{(1.145 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 10^3 \text{ L m}^{-3} \cdot 4 \text{ mg L}^{-1}) - (1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 10^3 \text{ L m}^{-3} \cdot 2 \text{ mg L}^{-1})}{0.145 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 10^3 \text{ L m}^{-3}} \Leftrightarrow \\ BOD_{5(e)} &= 17.8 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

β. Συνεπώς η % απομάκρυνση  $BOD_5$  των λυμάτων μετά την επεξεργασία τους υπολογίζεται:



Σχήμα 6.2 Σχηματικό διάγραμμα εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων στο ποτάμι.

$$\% \text{απομάκρυνση} = \frac{BOD_{5(i)} - BOD_{5(e)}}{BOD_{5(i)}} \cdot 100 \Leftrightarrow$$

$$\% \text{απομάκρυνση} = \frac{280 - 17.8}{280} \cdot 100 = 93.6\%$$

γ. Για να υπολογιστεί το συνολικό διαλυμένο οξυγόνο στο σημείο μετά την εκβολή της εκροής, εφαρμόζουμε το ισοζύγιο μάζας του οξυγόνου:

$$\text{Μάζα } DO_{(r)} + \text{Μάζα } DO_{(e)} = \text{Μάζα } DO_{(o)}$$

$$Q_{(r)} \cdot DO_{(r)} + Q_{(e)} \cdot DO_{(e)} = Q_{(o)} \cdot DO_{(o)}$$

$$DO_{(o)} = \frac{Q_{(r)} \cdot DO_{(r)} + Q_{(e)} \cdot DO_{(e)}}{Q_{(o)}} \Leftrightarrow$$

$$DO_{(o)} = \frac{(1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 10^3 \cdot 9 \text{ mg L}^{-1}) + (0.145 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 10^3 \cdot 5 \text{ mg L}^{-1})}{1.145 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 10^3} = 8.49 \text{ mg L}$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Streeter – Phelps υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος στον οποίο θα παρατηρηθεί το μέγιστο έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου.

$$t_c = \frac{1}{k_2 - k_1} \cdot \ln \left[ \frac{k_2}{k_1} \cdot \left( 1 - D_o \cdot \frac{k_2 - k_1}{k_1 \cdot L_o} \right) \right]$$

όπου:

$$D_o = DO_{(s)} - DO_{(o)} = 10 - 8.49 = 1.51 \text{ mg/L}$$

και  $L_o$  το ολικό τελικό BOD του ποταμού μετά το σημείο εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων

$$L_o = \frac{BOD_{5(o)}}{1 - e^{-k_1 t}} \Leftrightarrow L_o = \frac{4}{1 - e^{-0.15}} \Leftrightarrow L_o = 10.16 \text{ mg/L}$$

Οπότε ο κρίσιμος χρόνος υπολογίζεται:

$$t_c = \frac{1}{0.3 - 0.1} \cdot \ln \left[ \frac{0.3}{0.1} \cdot \left( 1 - 1.51 \cdot \frac{0.3 - 0.1}{0.1 \cdot 10.16} \right) \right] \Leftrightarrow t_c = 3.73 \text{ ημέρες}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση Streeter Phelps τον κρίσιμο χρόνο  $t_c$ , υπολογίζεται το μέγιστο έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου  $D_c$ , το οποίο θα παρατηρηθεί μετά



από 3.73 ημέρες

$$D_c = \frac{k_1 \cdot L_0}{k_2 - k_1} \cdot (e_1^{-k_1 t} - e_2^{-k_2 t}) + D_0 \cdot e_2^{-k_2 t} \Leftrightarrow D_c = 2.33 \text{ mg/L}$$

Από το ελάχιστο έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου  $D_c$ , μπορούμε να υπολογίσουμε την ελάχιστη τιμή διαλυμένου οξυγόνου  $DO_c$ , αντικαθιστώντας στον τύπο:

$$D_c = DO_{(s)} - DO_c \Leftrightarrow DO_c = 7.67 \text{ mg/L}$$

δ. Αφού η παραπάνω συγκέντρωση επιτυγχάνεται σε χρονικό διάστημα 3.73 ημέρες και η ταχύτητα του ποταμού είναι 0.1 m/s, η απόσταση στην οποία θα εμφανιστεί η ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S = v \cdot t$$

## 3.1 Άσκηση

Να βρεθεί το πληθυσμιακό ισοδύναμο βιομηχανίας που παράγει απόβλητα  $50 \text{ m}^3/\text{ημ}$  με  $\text{BOD}_5$  ίσο προς  $1200 \text{ mg/L}$ .

Το συνολικό  $\text{BOD}_5$  που παράγει η βιομηχανία σε μια ημέρα ισούται προς  $(1200 \text{ mg/L}) \cdot (50000 \text{ L}) = 60 \cdot 10^6 \text{ mg} = 60000 \text{ gr}/\text{ημ}$ . Το νούμερο αυτό διαιρούμενο με την τιμή  $60 \text{ gr}/\text{άτ.ημ}$  δίνει ως πληθυσμιακό ισοδύναμο της βιομηχανίας τα 1000 άτομα.

## 4. Χημικές αντιδράσεις και αντιδραστήρες στην επεξεργασία αποβλήτων

Ο σχεδιασμός των μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων, απαιτεί τη γνώση διαφόρων μεγεθών που σχετίζονται με την κινητική των αντιδράσεων οι οποίες λαμβάνουν χώρα. Ταχύτητα μιας αντίδρασης  $r$  είναι ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης των ουσιών  $dC/dt$  που παίρνουν μέρος σ' αυτήν, ως αποτέλεσμα της αντίδρασης. Όταν η αντίδραση γίνεται σε αντιδραστήρα σταθερού όγκου, τότε η ταχύτητα της είναι:

$$r = \pm \frac{dC}{dt} \quad (6.6)$$

όπου  $C$  είναι η συγκέντρωση της ουσίας που μας ενδιαφέρει και  $t$  είναι ο χρόνος

Το πρόσημο (+) δείχνει αύξηση και το (-) μείωση της συγκέντρωσης της ουσίας που αντιδρά.

Οι χημικές αντιδράσεις έχουν ταχύτητες που είναι ανάλογες των συγκεντρώσεων των ουσιών που αντιδρούν. Έτσι διακρίνονται σε διάφορες τάξεις, που απλές μορφές τους δίνονται παρακάτω:

α. Μηδενικής τάξης:  $A \rightarrow B$ 

$$\frac{dC_A}{dt} = \pm k \quad \text{ή} \quad C_A = C_{A_0} - kt \quad (6.7)$$

όπου  $C_{A_0}$  η συγκέντρωση της ένωσης  $A$  σε χρόνο  $t = 0$ , και  $k$  η σταθερά της αντίδρασης που εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και το είδος των αποβλήτων

β. Πρώτης τάξης:  $A \rightarrow B$ 

$$\frac{dC_A}{dt} = \pm k C_A \quad \text{ή} \quad C_A = C_{A_0} e^{-kt} \quad (6.8)$$

γ. Δεύτερης τάξης:  $A + A \rightarrow \Gamma$

$$\frac{dC_A}{dt} = \pm k C_A^2 \quad \text{ή} \quad \frac{1}{C_A} = \frac{1}{C_{A_0}} + kt \quad (6.9)$$

$A + B \rightarrow \Gamma$

$$\frac{dC_A}{dt} = \pm k C_A C_B \quad (6.10)$$

όπου  $dC_A/dt$  = ταχύτητα αντίδρασης της ουσίας A  
 $C_A$  = συγκέντρωση της ουσίας A σε χρόνο t  
 $C_{A_0}$  = συγκέντρωση της ουσίας σε χρόνο  $t = 0$   
 $k$  = σταθερά της αντίδρασης.

Στις αντιδράσεις με βιολογικούς αντιδραστήρες, αντί για  $C_A$ , χρησιμοποιούμε το L, με το οποίο συμβολίζουμε το BOD.

Η σταθερά k εκφράζει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα της αντίδρασης, εκτός από τις συγκεντρώσεις των ουσιών που αντιδρούν.

Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται στις διάφορες διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων είναι:

- (i) Κλειστός αντιδραστήρας με πλήρη ανάμιξη (Batch Reactor, BR). Στο είδος αυτό δεν υπάρχει εισροή και εκροή και το περιεχόμενο του αναδεύεται πλήρως.
- (ii) Αντιδραστήρας σωληνοειδούς ροής (Plug-Flow Reactor, PFR). Σε αυτό το είδος τα στοιχειώδη σωματίδια του υγρού εισέρχονται ομοιόμορφα κατανεμημένα στη διατομή του αντιδραστήρα, διατηρούν σταθερές ταχύτητες κατά τη διέλευση τους μέσα από αυτόν και εξέρχονται επίσης ομοιόμορφα κατανεμημένα. Η μεταβολή στη συγκέντρωση λόγω της αντίδρασης γίνεται κατά μήκος του αντιδραστήρα.
- (iii) Αντιδραστήρας συνεχούς ροής με πλήρη ανάμιξη (Continuous Flow Stirred Tank Reactor, CSTR). Στο είδος αυτό τα στοιχειώδη σωματίδια του υγρού εισέρχονται στον αντιδραστήρα και διασπείρονται ομοιόμορφα, λόγω της ανάμιξης, σε όλο τον όγκο του. Η συγκέντρωση στον αντιδραστήρα θεωρείται ίδια με αυτή της εκροής.

#### 4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στη μέτρηση του οργανικού φορτίου

Η θερμοκρασία επηρεάζει την αποδόμηση των οργανικών ουσιών με δύο τρόπους:

- α. Επηρεάζει την τιμή του συντελεστή k. Ο συντελεστής k σε θερμοκρασία T, σε συνάρτηση με το συντελεστή  $k_{20}$  σε θερμοκρασία 20 °C, δίνεται από τη σχέση:  $k_T = k_{20} \cdot \Theta_2^{(T-20)}$ ,  $\Theta_2 = 1.135$  για  $T = 4-20^\circ\text{C}$  και  $\Theta_2 = 1.056$  για  $T = 20-30^\circ\text{C}$ .

β. Επηρεάζει την ίδια την τιμή του BOD. Είναι ευνόητο ότι σε μεγαλύτερη θερμοκρασία το  $BOD_L$  (τελικό BOD) είναι μεγαλύτερο. Το  $BOD_{L,T}$  σε θερμοκρασία  $T$ , σε συνάρτηση με το  $BOD_{L,20}$  σε θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$ , δίνεται από τη σχέση:

$$BOD_{L,T} = BOD_{L,20} \cdot \Theta_1^{(T-20)}$$

όπου  $\Theta_1 = 1.02$  στην περιοχή των  $20^\circ\text{C}$ . Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, πολλές φορές αντί για  $BOD_{L,T}$  συμβολίζουμε το τελικό BOD με  $L_T$ .

#### 4.2 Σχέση του $BOD_5$ με το $BOD_L$

Η αντίδραση κατανάλωσης του BOD, ή αλλιώς η αντίδραση οξειδωσης του οργανικού φορτίου των αποβλήτων προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό, έχει βρεθεί πειραματικά ότι ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης. Αν συμβολίσουμε λοιπόν με  $L$  το υπάρχον οργανικό φορτίο στα απόβλητα, η εξίσωση κατανάλωσης του οργανικού φορτίου παίρνει τη μορφή:

$$dL/dt = -kL \quad (6.11)$$

όπου  $L$  το υπάρχον οργανικό φορτίο σε χρόνο  $t$  και  
 $k$  η σταθερά της αντίδρασης

Για να λύσουμε την διαφορική εξίσωση (6.11), χωρίζουμε τις μεταβλητές  $L$  και  $t$  και μετά ολοκληρώνουμε:

$$f \, dL/L = -k f dt + C \quad (6.12)$$

όπου  $C$  η σταθερά της ολοκλήρωσης  
 Η (6.12) παίρνει τη μορφή:

$$\ln L = -kt + C \quad (6.13)$$

Για να βρούμε την τιμή της σταθεράς  $C$ , μηδενίζουμε το χρόνο και έτσι η (6.13) παίρνει τη μορφή:

$$\ln L = -kt + \ln L_0 \quad (6.14)$$

όπου  $L_0$  η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου σε χρονική στιγμή  $t = 0$ .  
 Λύνοντας την (4) έχουμε:

$$\ln(L/L_0) = -kt \quad (6.15)$$

Ή ισοδύναμα

$$L = L_0 \cdot e^{-kt} \quad (6.16)$$

Η σχέση (6.16) δείχνει την εξάρτηση του υπάρχοντος (εναπομείναντος) οργανικού φορτίου σε χρόνο  $t$  με το αρχικό οργανικό φορτίο  $L_0$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι το  $L_0$  είναι το αρχικά υπάρχον οργανικό φορτίο σε μηδενικό χρόνο, ή ισοδύναμα το

οργανικό φορτίο το οποίο θα βιοδιασπασθεί σε άπειρο χρόνο  $BOD_L$ . Από την άλλη το  $L(t)$  είναι το υπάρχον οργανικό φορτίο σε χρόνο  $t$ , δηλαδή με  $L(5)$  συμβολίζουμε το οργανικό φορτίο που έχει απομείνει στα λύματα μετά από βιοχημική διάσπαση 5 ημερών. Με το  $BOD_5$  συμβολίζουμε το οργανικό φορτίο το οποίο έχει διασπασθεί εντός 5 ημερών. Το άθροισμα του οργανικού φορτίου που έχει διασπασθεί εντός 5 ημερών  $BOD_5$  και του φορτίου που έχει μείνει μετά από 5 ημέρες  $L(5)$  μας δίνει το αρχικό οργανικό φορτίο  $L_0$ , το οποίο είναι ίσο με το οργανικό φορτίο το οποίο θα βιοδιασπασθεί σε άπειρο χρόνο  $BOD_L$ . Έτσι έχουμε τη σχέση:

$$L(5) + BOD_5 = L_0 = BOD_L \quad L_t + BOD_t = BOD_L = L_0 \quad (6.17)$$

Συνδυάζοντας τη σχέση (6.16) με τη σχέση (6.17) βρίσκουμε:

$$BOD_L - BOD_5 = BOD_L \cdot e^{-kt} \quad BOD_L - BOD_t = L_0 e^{-kt} \quad (6.18)$$

Η ισοδύναμη:

$$BOD_5 = BOD_L (1 - e^{-kt})$$

$$BOD_t = BOD_L (1 - e^{-kt}) \quad (6.19)$$

Η σχέση αυτή δίνει την εξάρτηση του  $BOD_5$  από το τελικό  $BOD_L$ . Ο χρόνος  $t$  εκφράζεται σε ημέρες, ενώ η σταθερά  $k$  εκφράζεται σε  $\text{ημ}^{-1}$ . Με τον ίδιο τρόπο εκφράζεται και η σχέση  $BOD_i$ , του  $BOD$  των  $i$  ημερών με το τελικό  $BOD_L$ :

$$BOD_i = BOD_L (1 - e^{-ki}) \quad (6.20)$$

### 4.3 Άσκηση

Έχουμε απόβλητα με  $BOD_1$ , σε θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$  ίσο προς  $215 \text{ mg/L}$ . Να βρεθούν: Το  $BOD_5$  και το τελικό  $BOD_L$  στις θερμοκρασίες των  $20^\circ\text{C}$ , των  $30^\circ\text{C}$  και των  $10^\circ\text{C}$ . Δεδομένα: Ο ρυθμός κατανάλωσης του  $BOD$  ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης.  $L_T = L_{20} \cdot \Theta_1^{(T-20)}$ ,  $K_T = K_{20} \cdot \Theta_2^{(T-20)}$ ,  $\Theta_1 = 1.02$ ,  $\Theta_2 = 1.135$  για  $T = 4-20^\circ\text{C}$  και  $\Theta_2 = 1.056$  για  $T = 20-30^\circ\text{C}$ ,  $K_{20} = 0.23 \text{ ημ}^{-1}$ .

Μας δίδεται το  $BOD_1$ , σε θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$ . Με βάση αυτό θα βρούμε το τελικό  $BOD_L$  ( $L_{20}$ ) στη θερμοκρασία των  $20^\circ\text{C}$ . Εφόσον ο ρυθμός κατανάλωσης του  $BOD$  ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης:

$$BOD_1 = BOD_L (1 - e^{-kt}) \Rightarrow BOD_L = 215 / [1 - e^{-(0.23 \times 1)}] \\ \Rightarrow BOD_L = 215 / (1 - 0.794) = 1043$$

Μετά θα βρούμε το  $BOD_5$  στη θερμοκρασία των  $20^\circ\text{C}$ .

$$BOD_5 = BOD_L (1 - e^{-kt}) \Rightarrow BOD_5 = 1043 [1 - e^{-(0.23 \times 5)}] = 713$$

Από το τελικό  $BOD$  στη θερμοκρασία των  $20^\circ\text{C}$ , μπορούμε να βρούμε το τελικό  $BOD$  στις θερμοκρασίες των  $10^\circ\text{C}$  και  $30^\circ\text{C}$ .

$$L_{10} = L_{20} \cdot \Theta_1^{(T-20)} \Rightarrow L_{10} = 1043 \cdot 1.02^{-10} = 1043 \cdot 0.82 = 855$$

$$L_{30} = L_{20} \cdot \Theta_1^{(T-20)} \Rightarrow L_{30} = 1043 \cdot 1.02^{+10} = 1043 \cdot 1.219 = 1271$$

Θα υπολογίσουμε τις τιμές του συντελεστή  $k$  στις θερμοκρασίες των  $10^\circ\text{C}$  και  $30^\circ\text{C}$ . Από το τελικό BOD στις θερμοκρασίες των  $10^\circ\text{C}$  και  $30^\circ\text{C}$  και τις τιμές του συντελεστή  $k$  στις ίδιες θερμοκρασίες, μπορούμε να υπολογίσουμε τα BOD<sub>5</sub> στις θερμοκρασίες αυτές.

$$k_{10} = k_{20} \Theta_2^{-10} = 0.065 \text{ ημ}^{-1}$$

$$k_{30} = k_{20} \Theta_2^{+10} = 0.4 \text{ ημ}^{-1}$$

Έτσι στη θερμοκρασία των  $10^\circ\text{C}$ , το BOD<sub>5</sub> είναι:

$$\text{BOD}_5 = \text{BOD}_L (1 - e^{-kt}) \Rightarrow \text{BOD}_5 = 855 [1 - e^{-(0.065 \cdot 5)}] = 237$$

Και στη θερμοκρασία των  $30^\circ\text{C}$ , το BOD<sub>5</sub> είναι:

$$\text{BOD}_5 = \text{BOD}_L (1 - e^{-kt}) \Rightarrow \text{BOD}_5 = 1271 [1 - e^{-(0.4 \cdot 5)}] = 1099$$

## 5. Ισοζύγια μάζας

Είναι γνωστό ότι η ύλη δεν καταστρέφεται ούτε δημιουργείται, αλλά αλλάζει μορφή ανάλογα με τα διάφορα στάδια τα οποία περνάει. Αυτή η αρχή ονομάζεται ισοζύγιο μάζας και είναι η βάση όλων των βιολογικών και χημικών διεργασιών. Αν βάλουμε σε μια μαθηματική μορφή την παραπάνω διατύπωση, σε σχέση με τα περιβαλλοντικά συστήματα θα έχουμε την παρακάτω σχέση:

$$\text{Συσσωρευση} = \text{Εισροή} - \text{Εκροή} \quad (6.21)$$

Μια χαρακτηριστική περίπτωση είναι αυτή της συγκέντρωσης του οξυγόνου σε ένα φυσικό σύστημα, π.χ. ποτάμι όταν σε αυτό εισέρχεται μια εκροή λυμάτων.

### 5.1 Ισοζύγιο μάζας συντηρητικού ρύπου

Ένα παράδειγμα που μπορούμε να εξετάσουμε είναι η συγκέντρωση του αλατιού (το NaCl όπως έχουμε αναφέρει στο Κεφάλαιο 2 θεωρείται συντηρητικός ρύπος) σε έναν αγωγό Γ όταν σε αυτόν πέφτουν οι εκροές δυο άλλων αγωγών με κάποια περιεκτικότητα αλατιού. Αν θεωρήσουμε ότι στον αγωγό Α περιέχονται  $100 \text{ mg/L}$  αλατιού και στον αγωγό Β  $20 \text{ mg/L}$ , ο ρυθμός ροής του αγωγού Α είναι  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$  ενώ του αγωγού Β είναι  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , μπορούμε να υπολογίσουμε ποια θα είναι η συγκέντρωση του αλατιού στον αγωγό Γ, ο οποίος συγκεντρώνει τα απόβλητα των δύο αγωγών.

Το ισοζύγιο μάζας του αλατιού στο σχήμα που περικλείεται με διακεκομμένες γραμμές (Σχήμα 6.1) ακολουθεί τη γενική σχέση

Συσώρευση = Εισροή – Εκροή

Στην περίπτωση του παραδείγματος που εξετάζουμε δεν υπάρχει συσώρευση στο σύστημα. Η μάζα του αλατιού σε κάθε μια από τις εισροές στο σύστημα είναι ίση με τη συγκέντρωση του αλατιού  $C_A$ ,  $C_B$  στον κάθε αγωγό (A και B αντίστοιχα) πολλαπλασιασμένη με την παροχή του κάθε αγωγού ( $Q_A$  και  $Q_B$  αντίστοιχα) συνεπώς η γενική σχέση Εισροή = Εκροή διαμορφώνεται ως:

$$C_A Q_A + C_B Q_B = C_\Gamma Q_\Gamma \quad (6.22)$$

Η συνολική παροχή  $Q_\Gamma$  του αγωγού  $\Gamma$  ισούται με το άθροισμα των παροχών των αγωγών A και B,  $Q_A$  και  $Q_B$  αντίστοιχα:

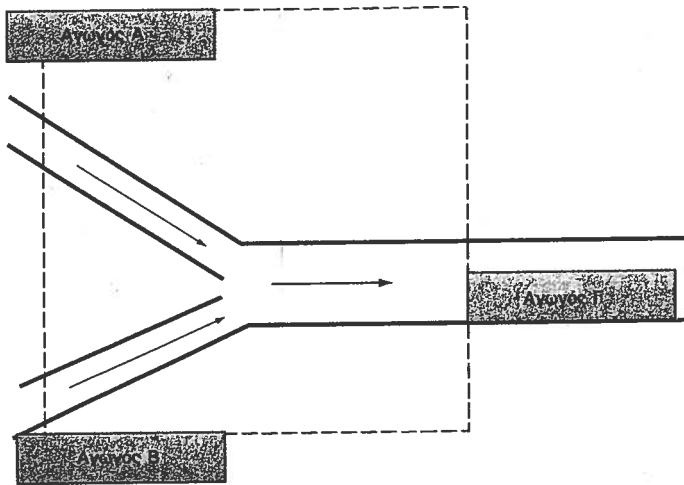
$$Q_A + Q_B = Q_\Gamma \quad (6.23)$$

Από τις σχέσεις (6.22) και (6.23) βρίσκουμε ότι

$$C_\Gamma = \frac{C_A Q_A + C_B Q_B}{Q_A + Q_B} \quad (6.24)$$

άρα

$$C_\Gamma = \frac{(100 \text{ mg/L})(4500 \text{ L/s}) + (20 \text{ mg/L})(2000 \text{ L/s})}{6500 \text{ L/s}} = 75.38 \text{ mg/L}$$



Σχήμα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση των αγωγών του παραδείγματος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΧΗΜΕΙΑΣ

Κατά το σχεδιασμό των μονάδων βιολογικής επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων απαιτείται γνώση της συμπεριφοράς των μικροοργανισμών (μ/ο) που αναπτύσσονται και διασπών τις οργανικές ενώσεις οι οποίες συνιστούν το οργανικό φορτίο.

Οι οργανισμοί κατατάσσονται σε τρία άθροισμα. Το άθροισμα των ζώων, το άθροισμα των φυτών και το άθροισμα των πρωτίστων.

Τα ζώα και τα φυτά είναι πολυκύτταροι οργανισμοί που χαρακτηρίζονται από διαφοροποίηση των ιστών που εκτελούν ειδικές λειτουργίες.

Τα πρώτιστα είναι μονοκύτταροι ή πολυκύτταροι οργανισμοί χωρίς κυτταρική διαφοροποίηση.

Τα πρώτιστα ταξινομούνται σε προκαρυωτικά και ευκαρυωτικά. Τα βακτήρια και τα κυανοφύκη (μπλε-πράσινα μικροφύκη) (μ/φ) ανήκουν στην κατηγορία των προκαρυωτικών πρωτίστων. Οι μύκητες, ορισμένες κατηγορίες μ/φ και τα πρωτόζωα ανήκουν στα ευκαρυωτικά πρώτιστα.

Στους προκαρυωτικούς μ/ο το γενετικό υλικό (χρωμοσώματα) βρίσκεται ελεύθερα στο κυτταρόπλασμα σε θέση γνωστή ως πυρηνοειδές (Σχήμα 3.1α), ενώ στους ευκαρυωτικούς μ/ο το γενετικό υλικό είναι οργανωμένο σε πυρήνα που περιβάλλεται από μεμβράνη (πυρηνική μεμβράνη) και διακρίνεται από το κυτταρόπλασμα (Σχήμα 3.1β).



Οι μ/ο πέρα από την ανωτέρω ταξινόμησή τους που στηρίζεται σε μορφολογικά χαρακτηριστικά του κυττάρου, ταξινομούνται και ως προς την πηγή του άνθρακα και της ενέργειας που χρησιμοποιούν. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται αυτή η ταξινόμηση που έχει ιδιαίτερη σημασία στην περιβαλλοντική μηχανική.

### ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1

Ταξινόμηση των μ/ο ανάλογα με την πηγή ενέργειας και άνθρακα

Κατηγορία οργανισμών	Πηγή Ενέργειας	Πηγή άνθρακα
<b>Αυτότροφοι</b>		
1. Φωτοσυνθετικοί	Φως	CO <sub>2</sub>
2. Χημειοσυνθετικοί	Ανόργανες οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις	CO <sub>2</sub>
<b>Ετερότροφοι</b>	Οργανικές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις	Οργανικός άνθρακας

### Κύτταρο

Και στα τρία αθροίσματα των ζώντων οργανισμών το κύτταρο είναι η βασική μορφή της ζωής.

Τα χαρακτηριστικά των κυττάρων παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1.

Τα κύτταρα των ευκαρυωτικών μικροοργανισμών έχουν μια περίπλοκη εσωτερική δομή που δεν την συναντάμε στους προκαρυωτικούς μ/ο. Το χαρακτηριστικό όργανο όλων των κυττάρων των μ/ο είναι ο πυρήνας που περιέχει τα χρωμοσώματα του κυττάρου. Συχνά υπάρχει ένας σχηματισμός που περιέχει RNA ως πυκνό σώμα και διακρίνεται από τον υπόλοιπο πυρήνα, γνωστός ως πυρηνίσκος. Στα ευκαρυωτικά κύτταρα ο πυρήνας χωρίζεται από το κυτταρόπλασμα με μία διπλή μεμβράνη που διακόπτεται από πόρους (πυρηνικούς πόρους) με τους οποίους εξασφαλίζεται η επικοινωνία πυρήνα/κυτταροπλάσματος.

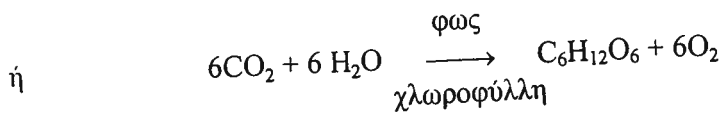
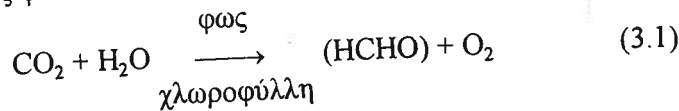
Η εξωτερική μεμβράνη του πυρήνα συνδέεται με σύστημα μεμβρανών με το ενδοπλασματικό δίκτυο, που σχηματίζει οδούς μεταφοράς σ' όλο το

### Μικροφύκη (μ/φ)

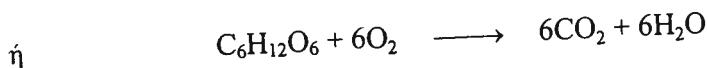
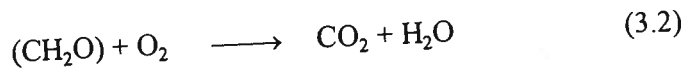
Τα μ/φ είναι μονοκύτταρα φωτοσυνθετικά αυτότροφα πρῶτιστα.

Τα μ/φ είναι ανεπιθύμητα στο νερό ύδρευσης επειδή δημιουργούν προβλήματα οσμής, προβλήματα στη μονάδα επεξεργασίας του καθαρού νερού, κυρίως λόγω πρόκλησης μικρών κύκλων διήθησης, και προβλήματα χλωριωμένων υδρογονανθράκων, όπως τα Τρι-Αλογονωμένα Μεθάνια (THM).

Αντίθετα στις δεξαμενές οξείδωσης των υγρών αποβλήτων τα μ/φ είναι επιθυμητά γιατί έχουν τη δυνατότητα να παράγουν οξυγόνο μέσω του μηχανισμού της φωτοσύνθεσης :



Κατά την αναπνοή χρησιμοποιούν οξυγόνο :



Κατά τη διάρκεια της ημέρας η φωτοσύνθεση υπερσχύει της αναπνοής και έτσι έχουμε αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου. Η φωτοσύνθεση επιδρά και στο pH, διότι χρησιμοποιεί το CO<sub>2</sub> και έτσι παρεμβαίνει στην ισορροπία των ανθρακικών. Η χρήση του CO<sub>2</sub> έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του pH. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, που δεν υπάρχει φως, έχουμε μόνο την αναπνοή με αποτέλεσμα να μειώνεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αλλά και το pH.

Η δραστηριότητα των μ/φ σ' ένα υδάτινο μέσο προκαλεί ημερήσια διακύμανση τόσο του διαλυμένου οξυγόνου, όσο και του pH.

Πάντως μεγάλη αύξηση στη συγκέντρωση των μ/φ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του pH του νερού.

Η δυνατότητα των μ/φ να παράγουν οξυγόνο, το οποίο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί από αερόβια ετερότροφα βακτήρια αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό και σ' αυτό βασίζεται ο σχεδιασμός των επαμφοτερίζοντων δεξαμενών οξείδωσης. Η συμβιωτική σχέση μ/φ και βακτηρίων είναι η βάση των δεξαμενών αυτών (Κεφ.7 του παρόντος).

Τα μονοκύτταρα μ/φ πολλές φορές έχουν μαστίγιο κίνησης.

Διάφορα μικροφύκη του καθαρού νερού αναφέρονται στο ΔΥΠ- Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Περιβαλλοντική Μηχανική Ι, Κεφ. 5. Τα μ/φ για την αύξηση και την αναπαραγωγή τους απαιτούν μία σειρά ανόργανων ουσιών. Τα κύρια στοιχεία εκτός του CO<sub>2</sub> είναι το άζωτο και ο φωσφόρος.

Άλλα στοιχεία που απαιτούνται είναι Ca, K, Na, Fe, Mo, Mn, S, Si.

Ο έλεγχος της υπερβολικής αύξησης των μ/φ στους ταμιευτήρες του νερού γίνεται με τον έλεγχο των θρεπτικών συστατικών δηλαδή του N και του P.

Υπάρχουν πολλές χιλιάδες μ/φ και έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες κατάταξης των :

- Χλωροφύκη (*Chlorophyta*). Εμφανίζονται στο καθαρό νερό. Το όνομα οφείλεται στη χλωροφύλλη που περιέχουν η οποία αποτελεί βασικό συστατικό για τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης. Πρόκειται για μονοκύτταρους οργανισμούς, που σπανίως συναντώνται σε αποικιακούς σχηματισμούς. Κοινό μ/φ της κατηγορίας αυτής είναι η *Chlorella* που συναντάται στις δεξαμενές σταθεροποίησης, η *Eudorina*, το *Pediastrum* κ.λ.π.
- Χρυσοφύκη (*Chrysophyta*). Το σημαντικότερο είδος των μ/φ αυτών είναι τα διάτομα. Τα διάτομα έχουν κελύφη που αποτελούνται κυρίως από άμορφο οξείδιο του πυριτίου. Αποθέσεις αυτών των μ/φ είναι γνωστές ως "γη διατόμων" ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως βοηθητικό των φίλτρων. Γνωστά διάτομα είναι η *Asterionella*, *Cyclotella* κ.α.

### Πρωτόζωα

Τα περισσότερα πρωτόζωα είναι μονοκύτταροι οργανισμοί παρ' όλο που συχνά παρουσιάζουν πολύπλοκη κυτταρική οργάνωση. Πολλά από αυτά επίσης έχουν πολύπλοκους κύκλους ζωής. Οι κύκλοι ζωής και οι τρόποι κίνησης χρησιμοποιούνται ως μέσο για την ταξινόμηση τους. Τα πρωτόζωα στη μεγάλη πλειοψηφία τους είναι αερόβιοι, ετερότροφοι μ/ο, αν και υπάρχουν μερικοί αναερόβιοι. Οι οργανισμοί αυτοί είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτεροι από τα βακτήρια και συχνά τρέφονται με βακτήρια και μ/φ. Τρέφονται με στερεά σωματίδια και όχι από διαλύματα, ενώ ο πολλαπλασιασμός τους γίνεται με κυτταροδιαίρεση, ή με σχηματισμό αμορίων.

ένα στερεό υπόστρωμα, οπότε συλλαμβάνουν την τροφή καθώς αυτή διέρχεται με την κίνηση του νερού.

- *Μυζητικά (Suctorioria)* Τα πρωτόζωα αυτά με τη βοήθεια προβοσκίδων απομυζούν το κυτταρόπλασμα από άλλα πρωτόζωα. Κατά τα αρχικά στάδια του κύκλου ζωής τους φέρουν βλεφαρίδες.

### Προκαρυωτικοί μικροοργανισμοί

Τα προκαρυωτικά κύτταρα είναι απλούστερα από τα ευκαρυωτικά και τα κύρια συστατικά τους είναι το κυτταρικό τοίχωμα, η κυτταροπλασματική μεμβράνη, ένα μόριο DNA, τα ριβοσώματα και το κυτταρόπλασμα.

Προκαρυωτικοί μ/ο είναι τα κυανοφύκη (μπλε-πράσινα μ/φ) και τα βακτήρια.

*Κυανοφύκη (Blue-green algae)* Τα κυανοφύκη είναι προκαρυωτικοί μ/ο και στη βιβλιογραφία συχνά αναφέρονται ως κυανο-πράσινα φύκη.

Οι μ/ο αυτοί εκτός από τη χλωροφύλλη περιέχουν και φυκοκυανίνη, με τη βοήθεια της οποίας δεσμεύουν το άζωτο της ατμόσφαιρας. Χαρακτηριστικά τέτοια μ/φ είναι η *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena* κ.α.

### Βακτήρια

#### Αύξηση βακτηρίων

Τα βακτήρια, που αποτελούν μία από τις απλούστερες μορφές ζωής, χρησιμοποιούν ουσίες διαλυμένες στο νερό για τροφή και είναι ικανά για αναπαραγωγή. Τα βακτήρια εκτελούν την βιοποδόμηση των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στα ΥΑ και επομένως αποτελούν τον πιο σημαντικό παράγοντα στην βιολογική επεξεργασία των ΥΑ. Τα μεμονωμένα κύτταρα των βακτηρίων έχουν μέγεθος κυμαινόμενο από 0.5 μέχρι 5 μm, σε μορφές ατράκτου (βάκιλλοι), σφαίρας (κόκκοι) και σπείρας (σπειρήλια). Μπορεί να απαντηθούν επίσης ως ζεύγη, πακέτα και αλυσσοί.

Η αύξηση των βακτηρίων εξαρτάται :

- Από την παρουσία σειράς χημικών στοιχείων.
- Από τη βιοχημική ενέργεια.
- Από τη θερμοκρασία.
- Από το pH.

### Χημικά στοιχεία

Τα βακτήρια όπως όλοι οι ζώντες οργανισμοί απαιτούν τα βασικά χημικά στοιχεία: O, H, N και C. Επί πλέον απαιτούν και άλλα στοιχεία όπως P, S, Na, Mg, K, Ca τα οποία είναι ουσιώδη για την αύξηση των βακτηρίων. Επιπρόσθετα υπάρχει ένας αριθμός άλλων στοιχείων που δεν είναι ουσιώδη, αλλά υποβοηθούν την αύξηση των βακτηρίων, ενώ η έλλειψή τους έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της αύξησης.

### Άνθρακας

Όταν ο άνθρακας απαιτείται σε οργανική μορφή (όπως συμβαίνει με τα περισσότερα βακτήρια) τα βακτήρια ονομάζονται ετερότροφα. Για τα βακτήρια αυτά είναι απαραίτητες οι πρωτεΐνες, τα αμινοξέα, τα πεπτίδια, οι βιταμίνες.

Τα βακτήρια που είναι σε θέση να πάρουν τον άνθρακα που χρειάζονται υπό μορφή CO<sub>2</sub> ονομάζονται αυτότροφα. Για τα αυτότροφα η οργανική ύλη μπορεί να είναι και επιβλαβής.

Ένας αριθμός αυτοτρόφων, που χρησιμοποιούν το διοξείδιο του άνθρακα, χρειάζεται και μικρές ποσότητες οργανικού άνθρακα (μέχρι 1%, ενώ ο ανόργανος είναι το 99%) για την επιβίωσή τους.

Υπάρχουν όμως και ορισμένα βακτήρια που λειτουργούν και ως αυτότροφα αλλά και ως ετερότροφα. Οι οργανισμοί αυτοί αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία των βακτηρίων που έχουν μελετηθεί.

Γενικώς μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα ετερότροφα είναι εξαρτώμενοι από οργανική ύλη οργανισμοί, ενώ τα αυτότροφα είναι ανεξάρτητοι οργανισμοί.

### Αερόβια - Αναερόβια βακτήρια

Τα περισσότερα βακτήρια είναι ικανά να επιβιώνουν παρουσία οξυγόνου. Τα βακτήρια αυτά ονομάζονται αερόβια.

Τα βακτήρια τα οποία δεν επιβιώνουν σε παρουσία οξυγόνου ονομάζονται αναερόβια.

Τέλος υπάρχει μια τρίτη ομάδα βακτηρίων για τα οποία η παρουσία ή η έλλειψη οξυγόνου δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την αύξησή τους και ονομάζονται επαμφοτερίζοντα (Facultative).

Άλλα πάλι επιβιώνουν κάτω από μειωμένη παρουσία οξυγόνου. Αυτά καλούνται μικροαερόφιλα.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι όταν ένα βακτήριο είναι αερόβιο, δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιεί οξυγόνο. Αυτό δικαιολογείται διότι η παραπάνω ορολογία δεν είναι απόλυτα σωστή, επειδή αναφέρεται στη χρήση και όχι στην ανοχή.

Ένας όρος όπως οξυβιοτικά πρέπει να χρησιμοποιείται για τους οργανισμούς που χρησιμοποιούν οξυγόνο και ο όρος ανοξυβιοτικά για εκείνους που δεν χρησιμοποιούν οξυγόνο.

Μερικά αναερόβια βακτήρια έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσονται παρά την παρουσία μικρής συγκέντρωσης οξυγόνου. Ονομάζονται οξυαννεκτικά (*aerotolerant*) π.χ *Clostridium tetani* που είναι αναερόβιο και ανοξυβιοτικό, *Streptococcus lactis* που είναι επαμφοτερίζον αναερόβιο, αλλά είναι και ανοξυβιοτικό.

### Ενέργεια

Η απαιτούμενη για τη ζωή ενέργεια αποκτάται, στην περίπτωση των ετεροτροφικών, με την οξείδωση μεγάλου αριθμού οργανικών ενώσεων.

Στην περίπτωση των αυτότροφων η ενέργεια αποκτάται είτε με την οξείδωση ανόργανων ενώσεων είτε από το φως.

### Ενέργεια για τα αυτότροφα

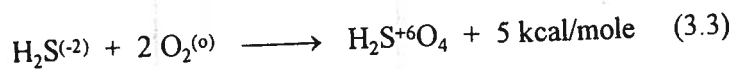
Τα βακτήρια που χρησιμοποιούν ανόργανες ενώσεις ονομάζονται χημειοσυνθετικά, ενώ εκείνα που χρησιμοποιούν φως φωτοσυνθετικά.

### Χημειοσυνθετικά Αυτότροφα

#### Παράδειγμα Χημειοσυνθετικών αυτότροφων

- Θειο-βακτήρια (*Sulphur-bacteria*)

Τα θειο-βακτήρια αποκτούν την ενέργεια τους με την οξείδωση του υδρόθειου, των θειοθειικών ή άλλων αναγωγικών ενώσεων του θείου. Τα βακτήρια αυτά οξειδώνουν το θείο στην υψηλότερη βαθμίδα που βρίσκεται στο  $\text{SO}_4^{-2}$  όπου  $\text{S}^{+6}$ .

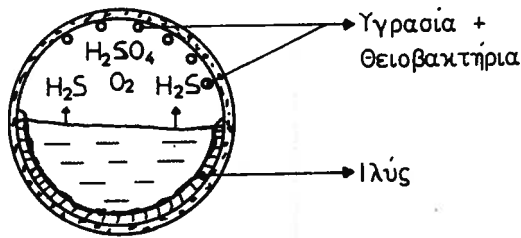


Στα θειο-βακτήρια ανήκει και ο *Thiobacillus*. Τα βακτήρια αυτά έχουν την ικανότητα να επιβιώνουν σε pH=1 ή και χαμηλότερο. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τα δίκτυα αποχέτευσης όπου τυχόν υδρόθειο στα απόβλητα οξειδώνεται προς H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Το υδρόθειο προέρχεται από την αναγωγή των θεικών από το *Desulphovibrio desulphuricas* :  
(επαμφο-τερίζοντα αναερόβια - Facultative anaerobic).



Στους αγωγούς αποχέτευσης το υδρόθειο περνάει στην αέρια φάση και συμπυκνώνεται στην οροφή των αγωγών, όπου με αερόβιο τρόπο μετατρέπεται σε θειικό οξύ. Εάν οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από μπετόν ή αμιαντοτσιμέντο υφίστανται φθορές, επειδή το μπετόν σε χαμηλά pH διαλύεται.

Οι δυο βαθμίδες για τη δημιουργία θεικού οξέος στους αγωγούς ΥΑ είναι οι ακόλουθες :



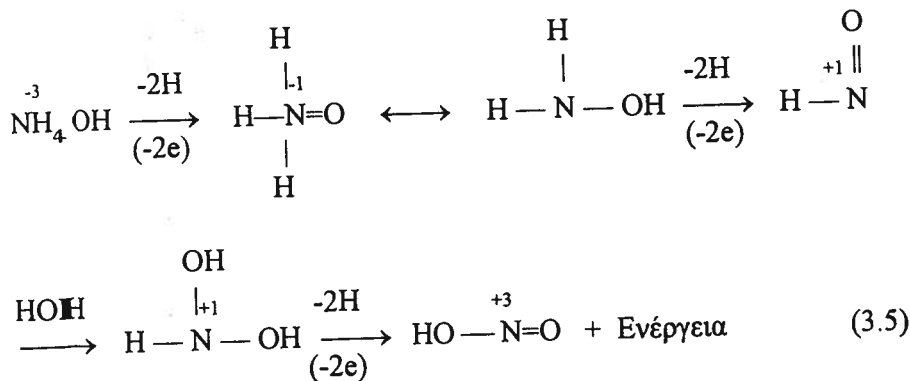
Σχήμα 3.12 Μετατροπή των SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> σε S<sup>-</sup> από το *Desulphovibrio desulphuricas*

Αναγωγή των θεικών, σχηματισμός και έκλυση του H<sub>2</sub>S σύμφωνα με την εξίσωση 3.4.

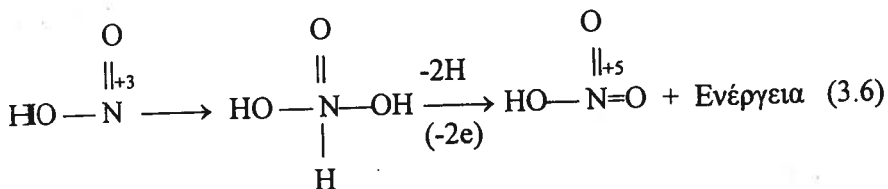
Οξείδωση του H<sub>2</sub>S, που βρίσκεται υπό διάλυση, προς H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> σύμφωνα με την εξίσωση 3.3. Η οξείδωση αυτή επιταχύνεται όταν το pH μειωθεί κάτω από το 6 με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας.

• Νιτροποιά βακτήρια (*Nitrifying bacteria*)

Έα βακτήρια νιτροποίησης έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την αμμωνία σε νιτρικά. Η αντίδραση λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο η οξείδωση γίνεται από το *nitrosomonas* :



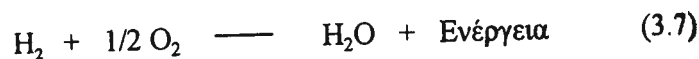
Στο δεύτερο στάδιο το *Nitrobacter* οξειδώνει τα νιτρώδη σε νιτρικά :



Η χαμηλή ενεργειακή απόδοση της οξείδωσης των νιτρώδων προς νιτρικά σε σύγκριση με την ενεργειακή απόδοση της οξείδωσης της αμμωνίας προς νιτρώδη απαιτεί τα νιτρο-βακτήρια να οξειδώσουν τρεις φορές περισσότερα νιτρώδη για να αποκτήσουν την ίδια ενέργεια με τα νιτρώδο-βακτήρια. Για το λόγο αυτό δεν ανιχνεύουμε ποτέ μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρώδων.

• Βακτήρια Υδρογόνου (*Hydrogen bacteria*) ή υδρογονομονάς (*Hydrogenomonas*).

Οξειδώνουν το υδρογόνο :

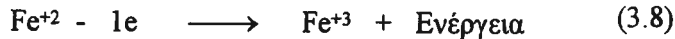




Μπορεί να είναι αυτότροφα ή και ετερότροφα. Η απλότητα αυτών των μικροοργανισμών είναι προφανής.

- Σιδηρο-βακτήρια (*Iron bacteria*)

Έχουν την δυνατότητα να αυξάνονται χρησιμοποιώντας την ενέργεια από την οξείδωση του διαθενούς σιδήρου ( $Fe^{+2}$ ) προς τρισθενή σίδηρο ( $Fe^{+3}$ ).



Το  $Fe^{+3}$  δημιουργεί ίζημα  $Fe(OH)_3$  που καλύπτει πολλές φορές τα σιδηροβακτήρια.

Ενεργειακή απόδοση των χημικών δράσεων που συνδέονται με τα αυτότροφα.

Νιτρωδο-βακτήρια	( αμμωνία $\longrightarrow$ νιτρώδη )	2.0 kcal/mole
Νιτρο-βακτήρια	( νιτρώδη $\longrightarrow$ νιτρικά )	0.3 kcal/mole
Θειοβάκιλλος	( θειούχα $\longrightarrow$ θειικά )	5.0 kcal/mole
Σιδηρο-βακτήρια	( $Fe^{+2}$ $\longrightarrow$ $Fe^{+3}$ )	0.2 kcal/mole
Υδρογονομονάς	( $H_2$ $\longrightarrow$ $H_2O$ )	28.0 kcal/mole

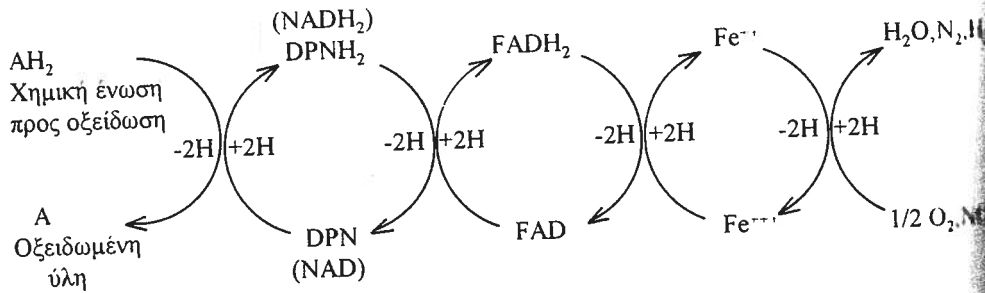
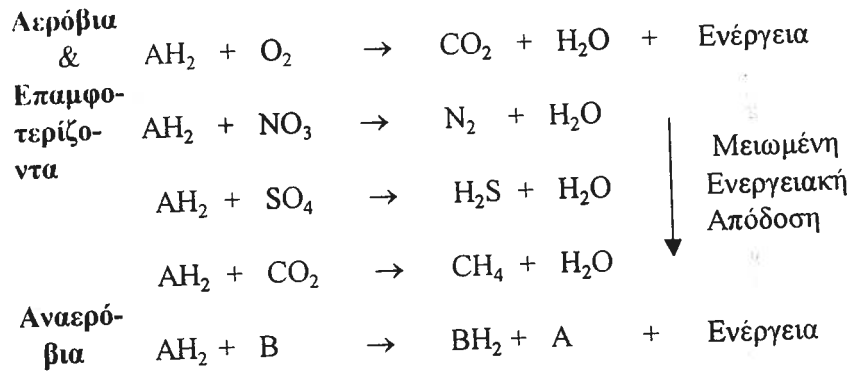
Τα αυτότροφα βακτήρια είναι αυστηρά αερόβια.

Φωτοσυνθετικά αυτότροφα (*Photosynthetic autotrophs*)

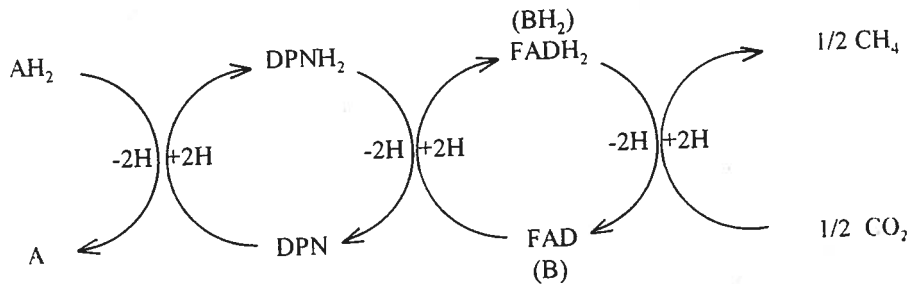
Οξειδώνουν ανόργανες ή και οργανικές ενώσεις με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός.

- Πράσινα ή ιώδη θειοβακτήρια (*Green or purple sulphur bacteria*).

Θείο ή ενώσεις του θείου οξειδώνονται με τον ίδιο τρόπο όπως και από τα χημειοσυνθετικά βακτήρια.



(α) Αερόβια επαμφοτερίζοντα βακτήρια



(β) Αναερόβια

**Σχήμα 3.13** Σχηματική παράσταση χρήσης υποστρώματος και οξειδοαναγωγικών δράσεων για απόκτηση ενέργειας, (α) αερόβια και επαμφοτερίζοντα βακτήρια, (β) αναερόβια.  
 DPN (Διφωσφοπυριδικό-νουκλεοτίδιο)  
 NAD (Νικοτιναμίδο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο)  
 FAD (Φλαβινο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο)

- Βακτήρια αζωτοδεσμευτικά  $N_2$  (*N<sub>2</sub> fixing bacteria*)  
π. χ Αζωτοβακτήριο (*Azotobacter Clostridium posterianum*)

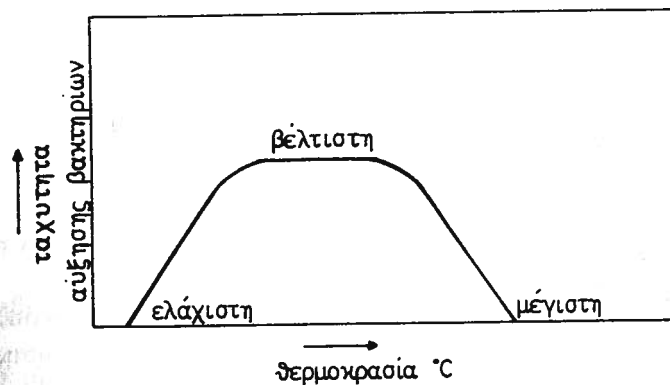
Αυτοί οι μ/ο δεσμεύουν το  $N_2$  της ατμόσφαιρας και μ' αυτόν τον τρόπο διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον εμπλουτισμό των εδαφών με άζωτο.

#### Ενέργεια για τα ετερότροφα

Οι βιοχημικές μεταβολικές διαδικασίες των ετεροτρόφων είναι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής που παράγουν ενέργεια. Σε αυτές οι χημικές ενώσεις δρουν ως δότες υδρογόνου, ενώ οι οξειδωμένες οργανικές ή ανόργανες ενώσεις ως δέκτες υδρογόνου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13.

#### Θερμοκρασία

Επίδραση της θερμοκρασίας στην αύξηση των βακτηρίων



Σχήμα 3.14

Για κάθε βακτήριο έχουμε μια μέγιστη, μια ελάχιστη και μια βέλτιστη θερμοκρασία αύξησης.

Τα βακτήρια ανάλογα με τη βέλτιστη θερμοκρασία αύξησης τα διακρίνουμε σε :

**Ψυχρόφιλα (Psychophils)** : Υπάρχουν πολλά βακτήρια με βέλτιστη θερμοκρασία αύξησης μικρότερη των 20 °C.

**Μεσόφιλα (Mesophils)** : Βέλτιστη θερμοκρασία αύξησης 20 – 45 °C  
Τα πιο κοινά βακτήρια εδάφους και ζώων π.χ *E. Coliform* - βέλτιστη θερμοκρασία 37 °C.

**Θερμόφιλα (Thermophils)** : Βέλτιστη θερμοκρασία 55 – 60 °C.  
Μερικά βακτήρια αναπτύσσονται μέχρι και τους 90 °C. Τέλος υπάρχουν ακόμη και μεσόφιλα που αντέχουν τις υψηλές θερμοκρασίες. Τα ονομάζουμε **Θερμο-ανθεκτικά (Thermoduric)**.

Μερικά επιβιώνουν μέσα σε ένα ευρύ θερμοκρασιακό φάσμα π.χ *E. Coliform* :

Ελάχιστη	10 °C
Βέλτιστη	37 °C
Μέγιστη	42 °C

Άλλα έχουν πολύ περιορισμένη περιοχή θερμοκρασίας π.χ. μυκοβακτήριο φυματίωσης *Micobacter tuberculosis* :

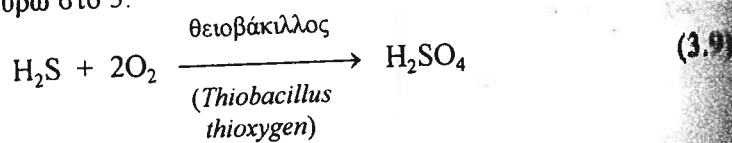
Ελάχιστη	30 °C
Βέλτιστη	37 °C
Μέγιστη	42 °C

### Επίδραση του pH στην αύξηση των βακτηρίων

Υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ βακτηρίων και μυκήτων όσον αφορά την επίδραση του pH στην αύξησή τους.

Το βέλτιστο pH για την πλειοψηφία των βακτηρίων είναι το ουδέτερο σημείο pH = 7, ενώ ένας τυπικός μύκητας έχει άριστο pH αύξησης στην όξινη περιοχή.

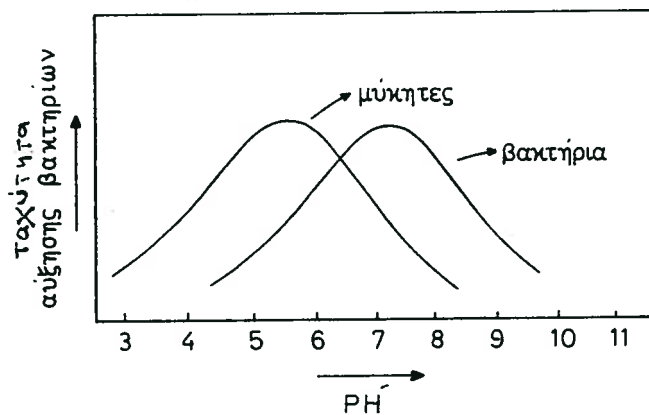
Υπάρχουν, βεβαίως, εξαιρέσεις π.χ. ο θειοβάκιλλος που έχει βέλτιστο pH γύρω στο 3.



Κατά την αύξησή του το pH μπορεί να μειωθεί και μέχρι το 0.6.

Μερικά βακτήρια έχουν βέλτιστο pH πάνω από 7 π.χ. τα νιτροποιά έχουν βέλτιστο pH αύξησης 8.6. Ο *Streptococcus* αναπτύσσεται επίσης σε υψηλό pH.

Είναι προφανές ότι το pH των υγρών αποβλήτων προς επεξεργασία θα καθορίσει το είδος των βακτηρίων που θα αναπτυχθούν. Πάντως για να είναι δυνατή η βιολογική αύξηση και επομένως η βιοποδόμηση του οργανικού φορτίου των ΥΑ, πρέπει το pH να είναι κοντά στο ουδέτερο και όταν τα ΥΑ είναι όξινα ή αλκαλικά πρέπει να εξουδετερώνονται πριν τη βιολογική επεξεργασία.



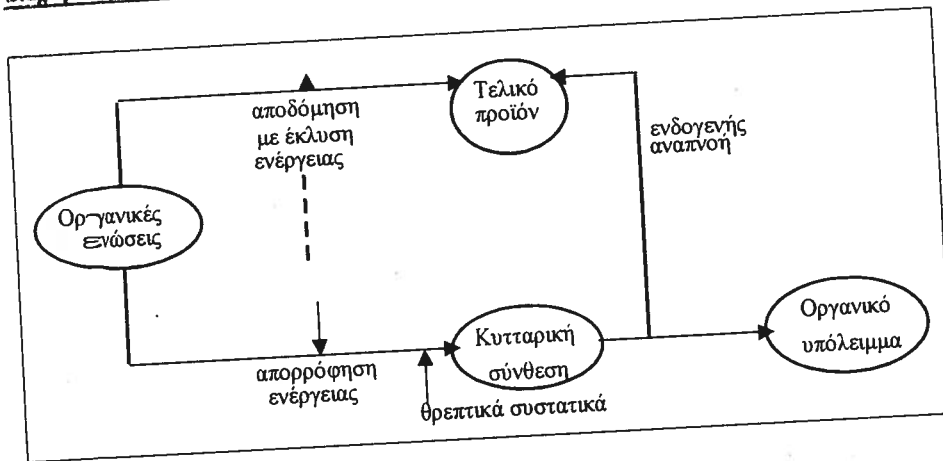
Σχήμα 3.15 Επίδραση του pH στην αύξηση των βακτηρίων και μυκήτων

### Μεταβολισμός

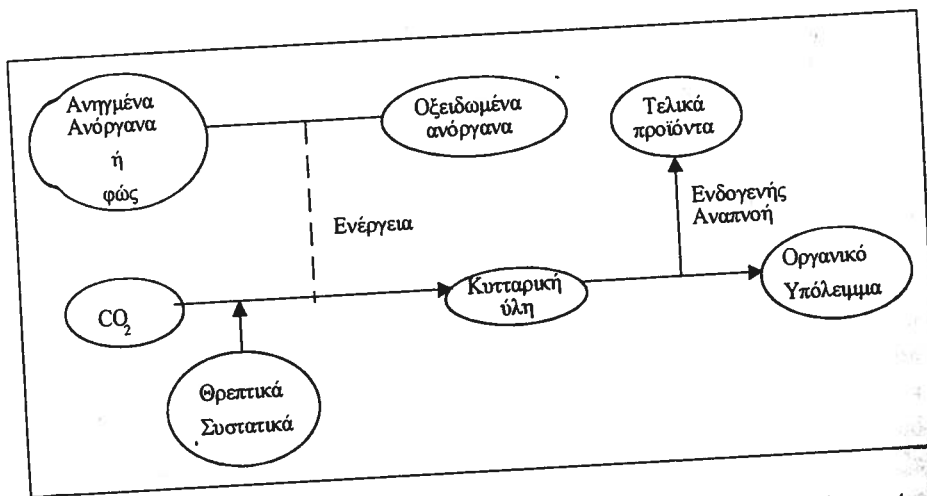
Ο όρος μεταβολισμός χρησιμοποιείται για να περιγράψει όλες τις ενεργειακές βιοχημικές αντιδράσεις που χρησιμοποιούν τα βακτήρια για να αυξάνονται και να συντηρούνται. Όλες οι χημικές αντιδράσεις μέσα στα βακτήρια ελέγχονται από ένζυμα.

Σε κάθε χημική αντίδραση κάθε ιδιαίτερο βήμα ελέγχεται από διαφορετικό ένζυμο.



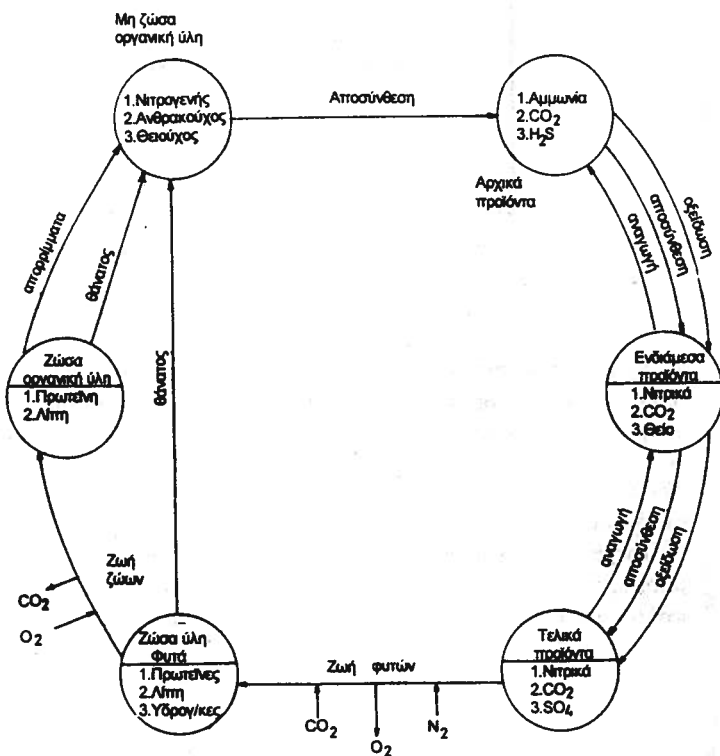


Σχήμα 3.18 Σχηματική παράσταση του μεταβολισμού των ετερότροφων βακτηρίων

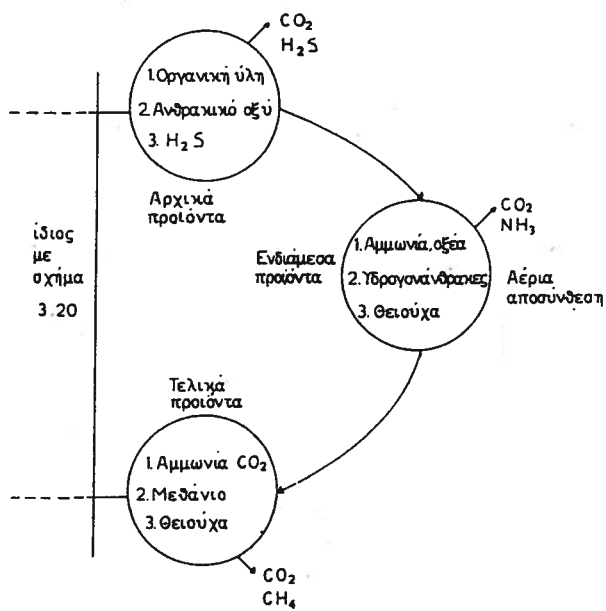


Σχήμα 3.19 Σχηματική παράσταση του βακτηριακού μεταβολισμού των χημειοσυνθετικών/φωτοσυνθετικών

Ο αναερόβιος κύκλος διαφέρει μόνο κατά το τμήμα που αφορά την αποδόμηση (αποσύνθεση) της οργανικής ύλης. Τόσο ο άνθρακας, όσο το άζωτο και το θείο δεν οξειδώνονται. Το άζωτο στην αμμωνία βρίσκεται στη -3 οξειδωτική βαθμίδα, ο άνθρακας στο μεθάνιο στη -4 και το θείο στο υδρόθειο στη -2. Οι αντίστοιχες οξειδωτικές βαθμίδες στον αερόβιο κύκλο είναι +5, +4 και +6.



Σχήμα 3.20 Αερόβιος κύκλος της ύλης



Σχήμα 3.21 Αναερόβιος κύκλος της ύλης

γές σε άλλα σημεία. Έτσι, η ύπαρξη των κύκλων δίνει στη Βιόσφαιρα μια αξιολογητέα ικανότητα αυτορρύθμισης. Αποτέλεσμα είναι η παρατηρούμενη μακρόχρονη σταθερότητα των διαφόρων οικοσυστημάτων και η διαρκής παρουσία των αναγκαίων ουσιών στα διάφορα περιβάλλοντα και σε σταθερές αναλογίες. Έτσι η ζωή, και κυρίως οι παραγωγικοί οργανισμοί, έχουν την δυνατότητα να προμηθευτούν τις ουσίες που χρειάζονται στο χώρο όπου ζουν.

Η ύλη που κινείται σε ένα βιογεωχημικό κύκλο συχνά αποθηκεύεται για ορισμένο χρονικό διάστημα σε κάποια βιοτική ή αβιοτική συνιστώσα του οικοσυστήματος, η οποία ονομάζεται ταμειυτή. Η αποθηκευμένη ποσότητα ύλης είναι το ταμείυμα, ενώ αυτή που μεταβιβάζεται μεταξύ των ταμειυτών ανά μονάδα χρόνου καλείται ταχύτητα ροής. Σε οικοσύστημα που βρίσκεται σε ισορροπία, ισχύει  $R_i = R_k$ , όπου  $R_i$  το άθροισμα των ταχυτήτων εισροής και  $R_k$  το άθροισμα των ταχυτήτων εκροής από ένα ταμειυτή. Χρόνος αντίκατάστασης (turnover time) ονομάζεται το μέγεθος  $t_0$  ίσο με  $M/R_i$  ή ίσο με  $M/R_k$ , όπου  $M$  το ταμείυμα. Το  $t_0$  μπορεί να θεωρηθεί ως ο μέσος χρόνος παραμονής της ύλης στον ταμειυτή. Χρησιμεύει έναντι των μεταβολών που προκαλεί η ανθρώπινη δραστηριότητα στους βιογεωχημικούς κύκλους. Μεγαλύτεροι χρόνοι  $t_0$  σημαίνουν μεγαλύτερη αντίσταση στις μεταβολές των ταχυτήτων ροής. Υπολογίζεται ότι ο χρόνος  $t_0$  στον ταμειυτή «ατμόσφαιρα» είναι για το  $N_2$   $64 \times 10^6$  έτη, για το  $O_2$  7500 έτη και για το  $CO_2$  5 έτη.

Σημαντικότεροι βιογεωχημικοί κύκλοι είναι οι κύκλοι του  $H_2O$ , του  $C$ , του  $O_2$ , του  $N_2$ , του  $P$  και του  $S$ . Σημειώνεται ότι η κυκλοφορία των χημικών ουσιών στα οικοσυστήματα, όπως και η ροή ενέργειας, είναι φαινόμενα που συνδέονται και με τη ρύπανση, π.χ. με τη συγκέντρωση τοξικών ουσιών στις τροφικές αλυσίδες.

#### 4.3.2 Ο κύκλος του νερού

Το νερό είναι η ανόργανη ένωση που βρίσκεται στη μεγαλύτερη αναλογία μέσα στη ζωντανή ύλη. Το ποσοστό του νερού κυμαίνεται από περίπου 10% στους σπόρους των φυτών μέχρι 98% σε μερικά υδρόβια ζώα, ενώ στο σώμα του ανθρώπου είναι περίπου 63%. Η σημασία του νερού για τη ζωή φαίνεται από το γεγονός ότι η



βιομάζα σε κάθε περιοχή της στεριάς είναι περίπου ανάλογη με τον όγκο των βροχοπτώσεων σ' αυτή την περιοχή.

Το νερό εμφανίζεται με τρεις φάσεις του (στερεή, υγρή, αέρια) σε όλα τα τμήματα της Βιόσφαιρας (ατμόσφαιρα, υδρόσφαιρα, λιθόσφαιρα). Η κατανομή του ωστόσο είναι πολύ άνιση. Αν το νερό των Θαλασσών μπορούσε να απλωθεί ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια της γης, θα σχημάτιζε ένα στρώμα πάχους 2.7 χιλιομέτρων. Αν συνέβαινε το ίδιο με το νερό των παγετώνων, το αντίστοιχο στρώμα θα είχε πάχος 100 μέτρα, ενώ με τα υπόγεια νερά το πάχος θα ήταν 15 μέτρα, με τα επιφανειακά γλυκά νερά θα ήταν 40 εκατοστά και με το νερό που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα ως υδρατμός θα ήταν μόλις 3 εκατοστά.

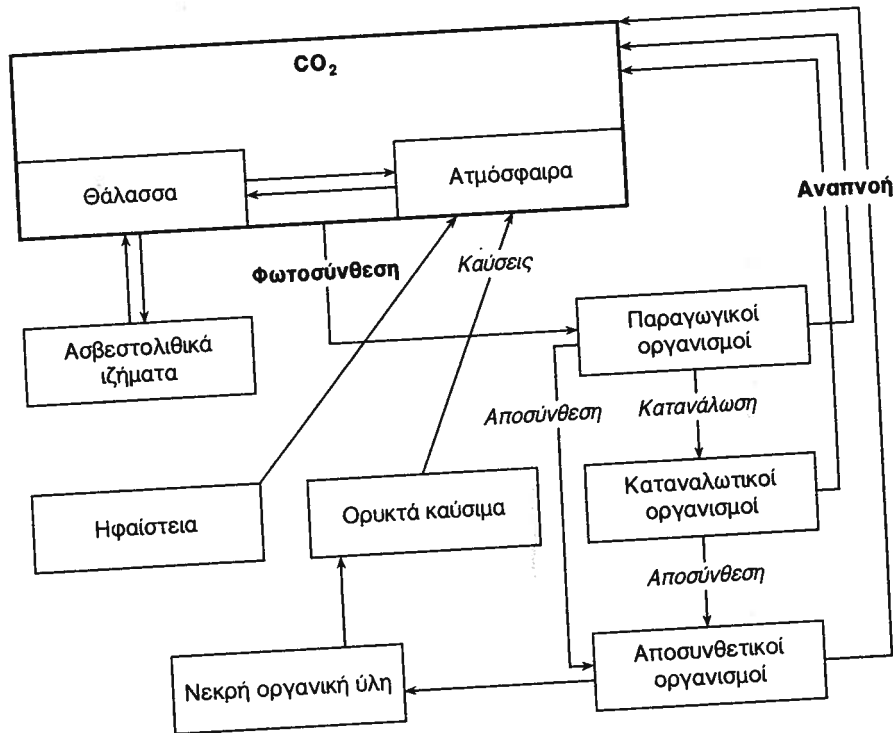
Το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου του νερού πραγματοποιείται ανάμεσα στη θάλασσα και στην ατμόσφαιρα. Οι υδρατμοί υγροποιούνται στα σύννεφα και η κάθοδος στην επιφάνεια της γης γίνεται με τη μορφή βροχής, χιονιού, χαλαζιού, δροσιάς ή πάχνης. Το νερό που φτάνει στην επιφάνεια της στεριάς μπορεί να ακολουθήσει τρεις δρόμους: τη διείσδυση στο έδαφος, την εξατμισοδιαπνοή ή την επιφανειακή ροή. Στην πρώτη περίπτωση εξασφαλίζεται η συγκράτηση και αποθήκευση του νερού στο έδαφος και σημαντικό ρόλο σ' αυτό παίζουν η βλάστηση και η οργανική ύλη του χώματος. Στη δεύτερη περίπτωση το νερό επιστρέφει γρήγορα στην ατμόσφαιρα, είτε με άμεση εξάτμιση είτε μέσω της διαπνοής των φυτών. Τα φυτά επιταχύνουν πολύ την επιστροφή του, διότι απορροφούν σημαντικές ποσότητες νερού με τις ρίζες τους και τις αποβάλλουν με τα φύλλα τους στην ατμόσφαιρα. Η τρίτη περίπτωση ευνοείται από την έλλειψη βλάστησης και αποτελεί τον κυριώτερο παράγοντα διάβρωσης των εδαφών. Τελικά, ένα μεγάλο μέρος των νερών της ξηράς καταλήγει στη θάλασσα με επιφανειακή ή υπόγεια ροή. Η εξάτμιση από την επιφάνεια των θαλασσών αποτελεί τη σπουδαιότερη οδό επιστροφής του νερού στην ατμόσφαιρα.

### **4.3.3 Ο κύκλος του άνθρακα**

#### **4.3.3.1 Κύρια χαρακτηριστικά του κύκλου**

Ο άνθρακας, το πρωταρχικό στοιχείο της ζωής, σχηματίζει τον τελειότερο από τους βιογεωχημικούς κύκλους και κυκλοφορεί με

σχετικά μεγάλη ταχύτητα στις βιοκοινωνίες, μέσα από τις τροφικές αλυσίδες. Οι κυριότερες ανόργανες μορφές παρουσίας του άνθρακα στη φύση είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ). Το μέρος του άνθρακα που κυκλοφορεί με φυσικό τρόπο στη Βιόσφαιρα περνά από τις ανταλλαγές μεταξύ ζωντανών οργανισμών και  $\text{CO}_2$ . Ολόκληρη η φυτική παραγωγή της ξηράς πραγματοποιείται καταλώνοντας το  $\text{CO}_2$  της ατμόσφαιρας, μέσω της φωτοσύνθεσης. Το αέριο αυτό επιστρέφει στην ατμόσφαιρα με την οξείδωση της οργανικής ύλης, που συντελείται με τη διαδικασία της αναπνοής.



Σχήμα 4.4: Κύκλος του άνθρακα.

Η θάλασσα περικλείει εν διαλύσει μία ποσότητα  $\text{CO}_2$  περίπου 50 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι η ατμόσφαιρα. Το διαλυμένο αέριο επιτρέπει τη φωτοσύνθεση στα άλγη και στα θαλασσινά φυτά, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί μία δεξαμενή που μπορεί να απορροφά ή να αποδίδει  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα, παίζοντας έτσι ρυθμιστικό ρόλο

στη λειτουργία του όλου συστήματος (Σχήμα 4.4). Το  $\text{CO}_2$  που είναι διαλυμένο στα υδατικά οικοσυστήματα βρίσκεται με την μορφή  $(\text{HCO}_3)^-$  κατά το μεγαλύτερο μέρος του. Γενικότερα, ο διαλυμένος άνθρακας στο νερό παρουσιάζεται με τις μορφές  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $(\text{HCO}_3)^-$ ,  $(\text{CO}_3)^=$  που βρίσκονται μεταξύ τους σε φυσικοχημική ισορροπία. Σημαντικές ποσότητες άνθρακα είναι επίσης αποθηκευμένες στη βιομάζα των ζωντανών οργανισμών, στο έδαφος και στα ορυκτά καύσιμα. Οι μεγαλύτερες ποσότητες άνθρακα είναι συσσωρευμένες στα ανθρακικά πετρώματα, κυρίως στο  $\text{CaCO}_3$ , που περιέχει ποσότητα  $\text{CO}_2$  περίπου 40000 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι η ατμόσφαιρα.

Η κατά κανόνα γρήγορη κυκλοφορία του άνθρακα μεταξύ οικοσυστημάτων, ατμόσφαιρας και υδρόσφαιρας επιβραδύνεται σε ορισμένες περιπτώσεις. Μια από αυτές είναι η συσσώρευση νεκρών ουσιών στο έδαφος, όπου σχηματίζουν μία σκουρόχρωμη μάζα που ονομάζεται χούμος και παίζει σημαντικό ρόλο στη συγκράτηση του νερού και των θρεπτικών ουσιών. Η μετατροπή του χούμου σε ανόργανα υλικά, με ταυτόχρονη έκλυση  $\text{CO}_2$  γίνεται κατά κανόνα με πολύ αργό τρόπο, ιδίως στις εύκρατες και στις πολικές ζώνες του πλανήτη. Αντίθετα στις τροπικές ζώνες είναι ταχύτερη, με αποτέλεσμα τα τροπικά εδάφη να έχουν συνήθως μικρό πάχος. Έτσι, όταν δεν προφυλάσσονται από πλούσια φυσική βλάστηση, είναι άγονα και ευαίσθητα στη διάβρωση.

Οι βασικοί ταμειυτές του κύκλου του άνθρακα και τα υπολογιζόμενα ταμειύματα είναι η ατμόσφαιρα ( $700 \times 10^9$  τόννοι), η θάλασσα ( $35000 \times 10^9$  τόννοι), οι οργανισμοί ( $470 \times 10^9$  τόννοι), η νεκρή οργανική ύλη ( $3700 \times 10^9$  τόννοι) και τα ορυκτά καύσιμα ( $10000 \times 10^9$  τόννοι).

#### 4.3.3.2 Διαταραχές του κύκλου του άνθρακα

Από την αρχή της Τεταρτογενούς περιόδου μέχρι την βιομηχανική επιοχή η ανακύκλωση του άνθρακα είναι σχεδόν τέλεια και ο κύκλος του σταθερός. Σε προηγούμενες όμως γεωλογικές περιόδους ο κύκλος του άνθρακα ήταν ατελής. Η φωτοσύνθεση υπερτερούσε της αναπνοής στη Βιόσφαιρα, με αποτέλεσμα το  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα να μειώνεται, το  $\text{O}_2$  να αυξάνεται και ο άνθρακας να απο-

θηκεύεται στο έδαφος και στα ιζήματα. Η συσσώρευση, κάτω από ειδικές συνθήκες, της οργανικής ύλης σε βαλτώδη εδάφη κατέληξε στην δημιουργία των ορυκτών καυσίμων. Κατ' αυτό τον τρόπο σχηματίστηκαν στην διάρκεια των γεωλογικών αιώνων ο λιθάνθρακας, ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Το φαινόμενο αυτό ήταν μεγάλης κλίμακας σε κάποιες γεωλογικές περιόδους, ενώ σήμερα συνεχίζεται μεν, αλλά είναι αμελητέο σε επίπεδο Βιοσφαιρας. Πολύ σημαντικό είναι το φαινόμενο της μετατροπής του διαλυμένου στο νερό  $\text{CO}_2$  σε  $\text{CaCO}_3$ . Οφείλεται σε χημική κατακρήμνιση, αλλά, περισσότερο, στη βιολογική δραστηριότητα διαφόρων θαλάσσιων ζώων που κατασκευάζουν το σκελετό τους από ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο, με το θάνατό τους, καταλήγει στο ιζημα του βυθού. Έτσι δημιουργήθηκαν τεράστια ιζηματογενή στρώματα ανθρακικού ασβεστίου στην διάρκεια των γεωλογικών περιόδων.

Η σημασία της σταθερότητας ή των διαταραχών του κύκλου του άνθρακα γίνεται αντιληπτή, αν εξεταστεί η ιστορία της ατμόσφαιρας της Γης. Η ατμόσφαιρα δεν ήταν πάντα όμοια με τη σημερινή. Στην αρχή περιείχε μεγάλες ποσότητες από υδρογόνο και ελαφρά αδρανή αέρια που χάθηκαν σύντομα, δηλαδή περίπου πριν 4-5 δισεκατομμύρια χρόνια. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε αναγωγική ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο, που περιείχε κυρίως τα αέρια άζωτο, μεθάνιο, αμμωνία, υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα. Μετά τη δημιουργία της ζωής άρχισε να παράγεται οξυγόνο με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Μέσα από ποικίλες χημικές αντιδράσεις, η ατμόσφαιρα οδηγήθηκε στη σημερινή της σύνθεση, που περιλαμβάνει κυρίως άζωτο, οξυγόνο και μικρές ποσότητες από αργό, υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα. Καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη και εξάπλωση των ζωντανών οργανισμών έπαιξε το στρώμα του όζοντος, το οποίο δημιουργήθηκε από το οξυγόνο και προστάτευσε τη ζωή από την ισχυρή υπεριώδη ακτινοβολία του ηλίου (Κεφ. 9). Χάρη σ' αυτή την προστασία, οι ζωντανοί οργανισμοί μπόρεσαν να επιβιώσουν έξω από το νερό, αναπτύχθηκαν άφθονα δάση και η φωτοσύνθεση κυριάρχησε. Υπολογίζεται ότι το συνολικό ποσό του οξυγόνου που έχει παραχθεί από τα φυτά στη διάρκεια της ιστορίας της Γης είναι δεκαπλάσιο απ' όσο υπάρχει σήμερα στην ατμόσφαιρα. Επομένως, αντίστοιχη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα έχει αφαιρεθεί από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης.

Όταν ο κύκλος του άνθρακα σταθεροποιήθηκε στην αρχή της Τεταρτογενούς περιόδου, η σύνθεση της ατμόσφαιρας ήταν περίπου όμοια με την σημερινή και παρέμεινε έκτοτε σταθερή. Επί εκατομμύρια χρόνια επικράτησε μια ισορροπία, κατά την οποία η παραγωγή των φυτών καταναλώνεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από την αναπνοή του συνόλου των ζωντανών οργανισμών. Ωστόσο, ήδη από τον 19ο αιώνα, η ισορροπία αυτή έχει ανατραπεί. Η εκτεταμένη αποψίλωση των δασών και η χρήση ορυκτών καυσίμων διοχετεύουν στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες άνθρακα, με μορφή  $\text{CO}_2$ , οι οποίες παρέμεναν αποθηκευμένες στην δασική βιομάζα ή στα καύσιμα αντίστοιχα. Σήμερα ο άνθρωπος, χρησιμοποιώντας εντατικά τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, καταναλώνει σ' ένα χρόνο τόσο  $\text{O}_2$ , όσο παρήγαγε η φωτοσύνθεση σε 1000 χρόνια. Ωστόσο, αυτή η αντιστροφή των φυσικών διεργασιών δεν δημιουργεί κίνδυνο έλλειψης  $\text{O}_2$ , διότι οι ποσότητές του στην ατμόσφαιρα είναι πολύ μεγάλες και η κατανάλωσή του αμελητέα σε σχέση μ' αυτές (Κεφ. 4.3.5). Δημιουργεί όμως κινδύνους η περίσσεια  $\text{CO}_2$ , διότι η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα είναι μικρή και έχει αυξηθεί πολύ σε ποσοστό (Κεφ. 9). Το  $\text{CO}_2$  του ατμοσφαιρικού αέρα εκτιμάται ότι βρισκόταν σε αναλογία περίπου 290 ppm στα μέσα του 19ου αιώνα, ενώ πέρασε τα 350 ppm στα τέλη του 20ου.

#### 4.3.4 Ο κύκλος του αζώτου

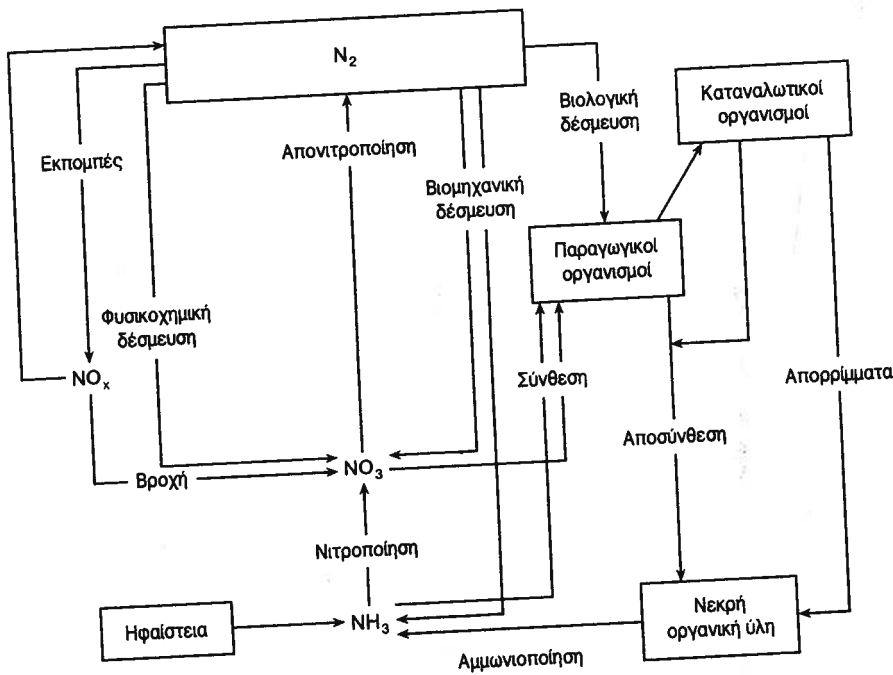
Το άζωτο είναι απαραίτητο για το σχηματισμό των πρωτεϊνών. Εντούτοις, αν και αφθονεί στην ατμόσφαιρα με τη μοριακή του μορφή, είναι χημικά αδρανές και δε μπορεί να διασπαστεί εύκολα από τους οργανισμούς. Οι περισσότεροι παραγωγικοί οργανισμοί μπορούν να απορροφήσουν μόνον τις δεσμευμένες μορφές του αμμωνιακού αζώτου ( $\text{NH}_4$ )<sup>+</sup> και του νιτρικού αζώτου ( $\text{NO}_3$ )<sup>-</sup>. Έτσι, αν και το ατμοσφαιρικό  $\text{N}_2$  αποτελεί τεράστιο ταμείωμα, ο κύκλος του  $\text{N}_2$  και μαζί με αυτόν η διαδικασία της ζωής στον πλανήτη περιορίζονται από την ταχύτητα μετατροπής του ατμοσφαιρικού  $\text{N}_2$  στις χρησιμοποιήσιμες δεσμευμένες μορφές του.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο δέσμευσης, οι παραγωγικοί οργανισμοί ενσωματώνουν το άζωτο στις παρασκευαζόμενες πρωτεΐνες. Απ'

αυτούς εφοδιάζονται με το αναγκαίο οργανικό άζωτο όλοι οι υπόλοιποι οργανισμοί, ενώ διάφοροι ειδικευμένοι αποσυνθέτες διασπούν τις αζωτούχες ενώσεις της νεκρής οργανικής ύλης. Το μεγαλύτερο μέρος απ' αυτό το άζωτο παραμένει στο έδαφος ή στο νερό με μορφή νιτρικών ή αμμωνιακών αλάτων και ξαναχρησιμοποιείται από τα φυτά. Ένα μικρότερο μέρος ελευθερώνεται ως αέριο  $N_2$  στην ατμόσφαιρα και κλείνει τον κύκλο. Τέλος, κάποιες ποσότητες  $N_2$  βγαίνουν από τον κύκλο, διότι καταλήγουν ως ιζήματα στο βυθό των ωκεανών. Υπάρχει εξ άλλου μικρός εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας με  $N_2$  από την ηφαιστειακή δραστηριότητα. Οι σημαντικότερες γραμμές του κύκλου του αζώτου φαίνονται στο Σχήμα 4.5.

Οι κύριες γραμμές ροής του  $N_2$  είναι η δέσμευση, η αμμωνιοποίηση, η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση.

Δέσμευση είναι η μετατροπή του μοριακού  $N_2$  στις χρησιμοποιήσιμες μορφές του αμμωνιακού αζώτου και των νιτρικών.



Σχήμα 4.5: Κύκλος του αζώτου.

Φυσική δέσμευση πραγματοποιείται είτε με φυσικοχημικές διεργασίες, κυρίως με την επίδραση ηλεκτρικών εκκενώσεων των καταιγίδων, είτε με βιολογικές διεργασίες. Κατά μία εκτίμηση, η ετήσια βιολογική δέσμευση είναι  $54 \times 10^6$  τόννοι ατμοσφαιρικού  $N_2$  και η αντίστοιχη φυσικοχημική είναι  $7.6 \times 10^6$  τόννοι. Άλλες εκτιμήσεις ανεβάζουν την βιολογική δέσμευση σε  $150 \times 10^6$  τόννους.

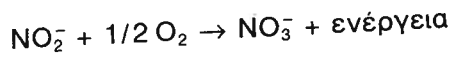
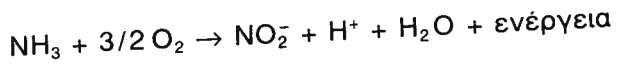
Η βιολογική δέσμευση πραγματοποιείται από ετεροτροφικούς, αλλά και κάποιους αυτοτροφικούς-φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του ριζόβιου που αναπτύσσεται στις ρίζες των ψυχανθών, όπως το τριφύλλι, το φασόλι ή το μπιζέλι. Το βακτήριο αυτό δεσμεύει  $N_2$  που χρησιμοποιείται από τα ψυχανθή, ενώ το ίδιο παίρνει από τα φυτά αυτά την απαιτούμενη ενέργεια (συμβίωση). Υπάρχουν επίσης μη συμβιωτικά βακτήρια που πραγματοποιούν δέσμευση, όπως το αερόβιο αζωτοβακτήριο και το αναερόβιο κλωστρίδιο. Δέσμευση  $N_2$  πραγματοποιούν επίσης μερικά είδη αλγών που υπάγονται στην κατηγορία των κυανοφυκών.

Η τεχνητή δέσμευση είναι εφεύρεση του 20ου αιώνα και πραγματοποιείται κυρίως με τη βιομηχανική παραγωγή τεχνητών λιπασμάτων, η οποία είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους με τη βιολογική δέσμευση. Η βιομηχανική δέσμευση  $N_2$  ήταν το 1968 ίση με  $30 \times 10^6$  τόννους. Σημαντική τεχνητή δέσμευση  $N_2$  προκαλείται επίσης ως παρενέργεια της λειτουργίας των κινητήρων εσωτερικής καύσης ή μερικών βιομηχανιών, που εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα διάφορα οξειδία του αζώτου ( $NO_x$ ). Αυτά, αφ' ενός μεν αποτελούν σοβαρό ατμοσφαιρικό ρύπο (Κεφ. 9), αφ' ετέρου δε οξειδώνονται προς νιτρικά και καταλήγουν στα νερά ή στο έδαφος.

Το άζωτο που ενσωματώνεται στους ζωντανούς οργανισμούς επιστρέφει στο περιβάλλον με ανόργανη μορφή, την αμμωνία  $NH_3$  ή το προϊόν ιονισμού της  $(NH_4)^+$ , ως αποτέλεσμα της αποσύνθεσης των νεκρών οργανισμών και των απορριμμάτων τους. Το φαινόμενο ονομάζεται αμμωνιοποίηση.

Μεγάλο ενδιαφέρον για την τεχνολογία ελέγχου της ρύπανσης εμφανίζουν τα αυτοτροφικά χημικοσυνθετικά βακτήρια νιτροσομονάδα και νιτροβακτήριο. Είναι αυστηρά αερόβια και παίρνουν την

απαιτούμενη ενέργεια οξειδώνοντας την αμμωνία σε νιτρώδη ( $\text{NO}_2^-$ ) και νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ), κατά τις αντιδράσεις:



Το φαινόμενο της βιολογικής μετατροπής της αμμωνίας σε νιτρικά ονομάζεται νιτροποίηση. Τα νιτρικά είναι, γενικά, πιο πρόσφορα για τις βιολογικές διεργασίες, αλλά αποτελούν και ρύπο των υδάτινων σωμάτων. Η νιτροποίηση είναι παράγων αποξυγόνωσης του νερού, εξ αιτίας της αερόβιας οξείδωσης. Υπάρχουν επίσης κάποιες άλλες κατηγορίες βακτηρίων που μετατρέπουν τα νιτρικά σε νιτρώδη και τα νιτρώδη σε αμμωνιακό άζωτο.

Η απονιτροποίηση είναι η αναγωγή των νιτρικών σε  $\text{N}_2$  και  $\text{N}_2\text{O}$  κατά την αναερόβια οξείδωση της οργανικής ύλης από επαμφοτερίζοντες μικροοργανισμούς. Το  $\text{N}_2\text{O}$  ανάγεται σε  $\text{N}_2$  με περαιτέρω βακτηριακή δράση ή με φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα. Το  $\text{N}_2$  επιστρέφει έτσι στην ατμόσφαιρα, κλείνοντας τον κύκλο. Χωρίς την απονιτροποίηση, όλο το άζωτο της ατμόσφαιρας θα είχε, μέσα στη μακρά ιστορία της Γης, δεσμευθεί στην ξηρά και στη θάλασσα, με τη μορφή νιτρικών.

Οι βασικοί ταμειυτές του κύκλου του αζώτου και τα υπολογιζόμενα ταμειύματα είναι η θάλασσα (διαλυμένο,  $20000 \times 10^9$  τόννοι), η ατμόσφαιρα ( $3800000 \times 10^9$  τόννοι), οι οργανισμοί ( $13 \times 10^9$  τόννοι), η νεκρή οργανική ύλη ( $1660 \times 10^9$  τόννοι) και οι αποθέσεις ( $4000000 \times 10^9$  τόννοι).

Η διαταραχή του κύκλου από τον άνθρωπο και η συσσώρευση αζώτου στη Βιόσφαιρα έχουν ως συνέπειες:

- Τον ευτροφισμό των υδατικών οικοσυστημάτων που έχουν ως περιοριστικό παράγοντα το άζωτο (Κεφ. 8).
- Την επιβάρυνση υδάτινων σωμάτων (ποτάμια, λίμνες, θάλασσες, υπόγεια νερά) με νιτρικά ή με αμμωνία (Κεφ. 8).
- Την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με οξειδία του αζώτου, τα οποία είναι τοξικά, συντελούν στη δημιουργία όξινης βροχής και εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Κεφ. 9).



Το πρόβλημα συνοψίζεται στο ότι η ταχύτητα της συνολικής δέσμευσης είναι σήμερα σημαντικά μεγαλύτερη από την ταχύτητα της συνολικής απονιτροποίησης. Έτσι το έδαφος και τα νερά, τουλάχιστο σε τοπική κλίμακα, συγκεντρώνουν κάθε χρόνο ένα περίσσειμα δεσμευμένου αζώτου. Η αντιμετώπιση αυτής της διαταραχής απαιτεί την αποκατάσταση μιας ομαλότερης λειτουργίας του κύκλου του αζώτου, δηλαδή τη μείωση της βιομηχανικής δέσμευσης και των εκπομπών οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα, καθώς και την προστασία ή ενίσχυση των διεργασιών απονιτροποίησης.

#### 4.3.5 Ο κύκλος του οξυγόνου

Το οξυγόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο τόσο στο φλοιό της Γης, όσο και στο σύνολο της ζωντανής ύλης, υπάρχει δε σε πάρα πολλές χημικές ενώσεις. Είναι πολύτιμο για τη ζωή, διότι επιτρέπει τη διεργασία της αερόβιας αναπνοής, αλλά σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι τοξικό για τους οργανισμούς και προκαλεί αυτόματη ανάφλεξη της ξερής βλάστησης ή της βιομάζας. Ο κύκλος του είναι πολύπλοκος και εμφανίζει ιδιαίτερα τμήματα στην ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη λιθόσφαιρα. Ωστόσο, πραγματοποιείται κατά το μεγαλύτερο μέρος ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και τη Βιόσφαιρα, μέσω της φωτοσύνθεσης που παράγει  $O_2$  και της αναπνοής που το καταναλώνει. Έτσι, αποτελεί ουσιαστικά την αντίστροφη εικόνα του κύκλου του άνθρακα, αφού οι κινήσεις του ενός γίνονται αντίθετα από τις κινήσεις του άλλου. Λόγω της μεγάλης ποσότητας  $O_2$  στην ατμόσφαιρα, η ολική ανακύκλωσή του από τα οικοσυστήματα χρειάζεται χιλιάδες χρόνια.

Το  $O_2$  της ατμόσφαιρας, καθώς και οι ενώσεις  $O_2$  των περισσότερων επιφανειακών πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι, οξειδία του σιδήρου κ.λπ.) έχουν βιογενή προέλευση. Το  $O_2$  δεν υπήρχε στην πρωτόγονη ατμόσφαιρα και δημιουργήθηκε αποκλειστικά από τη δράση των φυτικών οργανισμών. Η παραγωγή περίσσειας  $O_2$  έχει σταματήσει πριν από εκατομμύρια χρόνια, από τότε που η φωτοσύνθεση και η συνολική αναπνοή βρίσκονται σε ισορροπία, με αποτέλεσμα να μη συσσωρεύεται πλέον  $O_2$  στην ατμόσφαιρα.

Η ανθρώπινη δράση επεμβαίνει στον κύκλο του  $O_2$  μέσω της καταστροφής της φυσικής βλάστησης και της χρησιμοποίησης των ορυ-

κτών καυσίμων. Ωστόσο η παρέμβαση αυτή, ενώ επηρεάζει σημαντικά τον κύκλο του άνθρακα, λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης (350 ppm) CO<sub>2</sub>, δεν διαταράσσει τον κύκλο του O<sub>2</sub>, που βρίσκεται σε αφθονία (21%) στην ατμόσφαιρα. Σημαντικές διαταραχές όμως συμβαίνουν σε διάφορα παραρτήματα του κύκλου του O<sub>2</sub>, με σοβαρότερη τη μείωση του στρώματος του όζοντος (Κεφ. 9). Άλλες διαταραχές είναι τα προβλήματα αποξυγόνωσης, όταν το O<sub>2</sub> δεν έχει επαρκή συγκέντρωση στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα να γίνεται περιοριστικός παράγων για ορισμένους πληθυσμούς. Τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται συχνά στο υδάτινο περιβάλλον (Κεφ. 8), αλλά όχι στο χερσαίο, διότι ακόμα και στην ατμόσφαιρα της πόλης (Κεφ. 7) το O<sub>2</sub> έχει σταθερή συγκέντρωση.

#### 4.3.6 Ο κύκλος του φωσφόρου

Ο φωσφόρος (P) είναι σημαντικό συστατικό της ζωντανής ύλης και η σχετική σπανιότητά του τον κάνει συχνά περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των οργανισμών. Η παραγωγή πολλών οικοσυστημάτων ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από το P, γι' αυτό και θεωρείται ο μεγάλος ρυθμιστής των άλλων βιογεωχημικών κύκλων. Πολλοί επιστήμονες θεωρούν το P ως τον αδύνατο κρίκο στην αλυσίδα της ζωής πάνω στη Γη, διότι ο κύκλος του είναι σχετικά ατελής και ανοικτός.

Όλο το απόθεμα του φωσφόρου περιέχεται στη λιθόσφαιρα και εισέρχεται στην κυκλοφορία της Βιόσφαιρας με την απόπλυση της επιφάνειας του εδάφους. Μέσω της ροής του νερού φτάνει στα χερσαία και υδατικά οικοσυστήματα, απορροφάται από τα φυτά και στη συνέχεια περνά μέσα από τις τροφικές αλυσίδες. Όπως και στους άλλους κύκλους, οι διάφοροι αποσυνθέτες στο έδαφος ή στο νερό διασπούν τη νεκρή οργανική ύλη και παράγουν ανόργανο P διαθέσιμο για τα φυτά. Χρησιμοποιείται από τους παραγωγικούς οργανισμούς με την μορφή, κατά κανόνα, των διαλυτών ορθοφωσφορικών. Η μετατροπή αδιάλυτων ενώσεων του σε ορθοφωσφορικά πραγματοποιείται από μικροοργανισμούς. Η αποσύνθεση των νεκρών οργανισμών και των απορριμμάτων τους αποδίδει στο περιβάλλον το P με τη μορφή των ορθοφωσφορικών, τα οποία όμως εύκολα σχηματίζουν αδιάλυτες ενώσεις με ιόντα ασβεστίου και αργιλίου, πολύ συνηθισμένα στο έδαφος.

Η ανακύκλωση είναι σχεδόν πλήρης στα χερσαία οικοσυστήματα, όπου οι σκελετοί των νεκρών ζώων αποσυντίθενται και ο P που περιέχουν γίνεται εκ νέου εκμεταλλεύσιμος. Το ίδιο συμβαίνει και στα υλικά νερά ή στις ρηχές θάλασσες, όπου οι αποθέσεις δεσμευμένου P μπορούν σχετικά εύκολα να επανέλθουν στις τροφικές αλυσίδες. Αντίθετα στους ωκεανούς, που αντιπροσωπεύουν το 85% της θαλάσσιας επιφάνειας, υπάρχει μία διαρκής απώλεια P, που οφείλεται στη συσσώρευση οργανικής ύλης και κυρίως νεκρών σωματιδίων, οστών κ.λπ. στις αβύσσους και γενικά στα μεγάλα βάθη. Τα ανοδικά θαλάσσια ρεύματα που εμπλουτίζουν με θρεπτικά άλατα τα ρηχά νερά των υφαλοκρηπίδων, δε μπορούν να επαναφέρουν τις βαθειές αποθέσεις στο βιογεωχημικό κύκλο του P. Έτσι οι φωσφορικές ενώσεις που αποτίθενται στους βυθούς αποσύρονται από τη Βιόσφαιρα. Βέβαια η ανακύκλωσή τους μπορεί και πάλι να γίνει, μέσω των τεκτονικών ανοδικών κινήσεων των ιζημάτων, αλλά σε γεωλογική κλίμακα πλέον, δηλαδή σε δεκάδες ή σε εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Ο κύκλος λοιπόν του P παραμένει εν μέρει και βραχυπρόθεσμα ανοικτός.

Ένα σημαντικό μέρος του P επιστρέφει από τη θάλασσα στη στεριά μέσω των θαλάσσιων πουλιών που καταναλώνουν ψάρια και αφήνουν τα απόβλητά τους στις ακτές. Ωστόσο αυτές οι μετακινήσεις P είναι ανεπαρκείς για να αντισταθμίσουν τις απορροές από τη στεριά προς τη θάλασσα.

Η ανθρώπινη δραστηριότητα επιβαρύνει την ατέλεια του κύκλου του P. Μεγάλες ποσότητες φωσφορούχων ουσιών εξορύσσονται από τα φυσικά αποθέματα της λιθόσφαιρας, μετατρέπονται σε φωσφορικά άλατα από τη βιομηχανία λιπασμάτων ή απορρυπαντικών και τελικά καταλήγουν στην υδρόσφαιρα και εν μέρει στο βυθό των ωκεανών.

Ο φωσφόρος φαίνεται ότι αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα σε περισσότερες περιπτώσεις από κάθε άλλο στοιχείο. Μια αιτία είναι η ευκολία σχηματισμού αδιάλυτων ενώσεων, πράγμα που παρεμποδίζει την απόληψή του από τα φυτά και την μεταφορά του με τα επιφανειακά και υπόγεια νερά. Μια άλλη αιτία είναι ότι δεν σχηματίζει στο φυσικό περιβάλλον αέριες ενώσεις, πράγμα που του θτερεί την δυνατότητα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.



**Σχήμα 4.6:** Απλοποιημένο διάγραμμα του φυσικού και ανθρωπογενούς κύκλου του φωσφόρου.

Τα αστικά υγρά απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες P, εξ αιτίας κυρίως των χρησιμοποιούμενων απορρυπαντικών, το ίδιο δε συμβαίνει με μερικά βιομηχανικά απόβλητα. Ο P των αποβλήτων αυτών έχει γίνει αιτία προχωρημένων ευτροφικών καταστάσεων σε λίμνες και παράκτια ύδατα, όπου συχνά αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα. Μικρότερη είναι η συμβολή των φωσφορούχων λιπασμάτων, λόγω των αδιαλύτων ενώσεων που σχηματίζει ο P με στοιχεία του εδάφους.

#### 4.3.7 Ο κύκλος του θείου

Το θείο (S) είναι απαραίτητο συστατικό ορισμένων αμινοξέων. Ο κύκλος του πραγματοποιείται κυρίως στα νερά και το έδαφος ενώ οι αέριες θειϊκές ενώσεις όπως το διοξείδιο του θείου και το υδρό-

θειο παίζουν δευτερεύοντα ρόλο στην κυκλοφορία του στη Βιόσφαιρα. Η βασική πηγή S για τους οργανισμούς είναι τα θειικά άλατα που βρίσκονται διαλυμένα στα νερά. Απορροφώνται από τα φυτά που τα χρησιμοποιούν για την παρασκευή πρωτεϊνών. Οι οργανικές ενώσεις του S κυκλοφορούν όπως και οι άλλες ουσίες μέσα από τις τροφικές αλυσίδες και τελικά αποσυντίθενται από ειδικά βακτήρια που παράγουν υδρόθειο. Μέσα στη μαύρη λάσπη που υπάρχει στο βυθό ορισμένων θαλασσών ή λιμνών ζουν μικροοργανισμοί σε αναερόβιες συνθήκες. Πολλοί απ' αυτούς παράγουν την ενέργεια που τους χρειάζεται με τη αναγωγή των θειικών ενώσεων. Αντίστροφα, κάποια αυτότροφα βακτήρια οικοδομούν τις οργανικές ουσίες χάρη στην ενέργεια που παράγουν από την οξείδωση του υδρόθειου σε θειικές ενώσεις. Επίσης ένα μέρος του S που βρίσκεται στους βυθούς κατακάθεται μέσα στα ιζήματα με τη μορφή θειούχου σιδήρου, ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνεται από τα ιζήματα φωσφόρος ο οποίος περνά σε διαλυτή μορφή μέσα στο νερό. Αυτό είναι ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα συνδυασμού και αλληλεπίδρασης δύο διαφορετικών κύκλων. Τέλος η Βιόσφαιρα εμπλουτίζεται διαρκώς με αέριες ενώσεις του S από την ηφαιστειακή δραστηριότητα, καθώς και από ανθρωπογενείς δράσεις, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων, οι οποίες έχουν γίνει σημαντικές κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες.

#### 4.4 Συμπεριφορά των οικοσυστημάτων στο χρόνο

##### 4.4.1 Οικολογική διαδοχή

Τα οικοσυστήματα μεταβάλλονται συνεχώς, κάτω από την επίδραση εξωτερικών και εσωτερικών παραγόντων. Η κλίμακα χρόνου της μεταβολής είναι της τάξεως της διάρκειας ζωής των οργανισμών. Μια άλλη, μακροπρόθεσμη μεταβολή των οικοσυστημάτων, αντιστοιχεί σε κλίμακα εκατοντάδων, χιλιάδων και εκατομμυρίων ετών, ακολουθώντας την αλλαγή των γεωλογικών συνθηκών ή του κλίματος, αλλά και την εξέλιξη των ειδών. Επιπλέον, μια τρίτη μεταβολή παρατηρείται σε ορισμένα οικοσυστήματα, με τη μορφή σταδιακής ωρίμανσης των βιολογικών κοινοτήτων. Ολοκληρώνεται σε