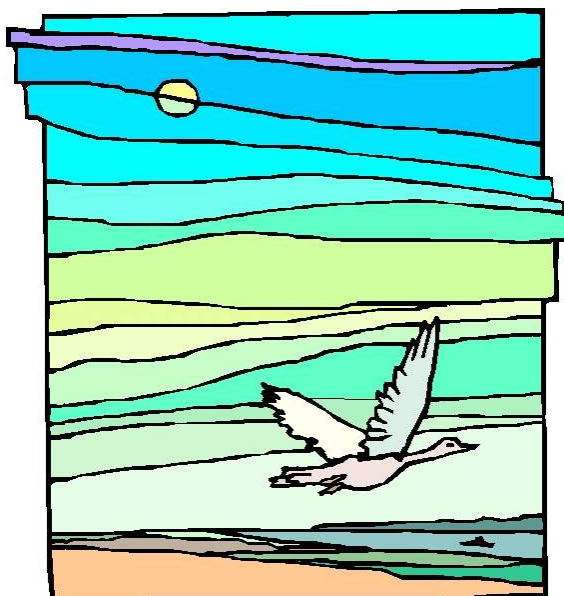


**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΔΗΜΟΣ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ
ΚΕΝΤΡΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ**

**ΕΘΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ
«ΛΙΜΝΕΣ :
ΠΗΓΕΣ ΕΜΠΝΕΥΣΗΣ
ΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ»**



**ΥΠΕΠΘ
ΔΗΜΟΣ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ**



**ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
Γ' ΚΠΣ, ΕΠΕΑΕΚ II**

**ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ : ΚΕΝΤΡΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ
ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ**

**ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ : ΚΕΝΤΡΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ
ΑΚΡΑΤΑΣ, ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗΣ, ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ – ΚΟΡΔΕΛΙΟΥ,
ΚΟΝΙΤΣΑΣ, ΜΑΚΡΙΝΙΤΣΑΣ, ΜΟΥΖΑΚΙΟΥ,
ΠΟΡΟΪΩΝ, ΣΟΥΦΛΙΟΥ, ΣΤΥΛΙΔΑΣ – ΥΠΑΤΗΣ**

**ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ : ΚΠΕ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ
Γ. ΠΑΛΑΙΟΛΟΓΟΥ 1
ΚΑΣΤΟΡΙΑ 52100
ΤΗΛ: 0467023069 ΦΑΞ: 0467028815
e-mail: kpekast1@otenet.gr**

Το πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και Εθνικούς πόρους



© copyright ΚΕΝΤΡΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ

Γ. Παλαιολόγου 1 52100 Καστοριά τηλ.: 0467023069 fax: 0467028815
e-mail: kpekast1@otenet.gr ή mail@kpe-kastor.kas.sch.gr
URL: <http://kpe-kastor.kas.sch.gr>

Αγαπητοί φίλοι,

η έκδοση που έχετε στα χέρια σας αποτελεί υποστηρικτικό υλικό για την υλοποίηση προγραμμάτων Π.Ε. στο πλαίσιο του Εθνικού Δικτύου:

« Λίμνες :

*Πηγές έμπνευσης για προγράμματα
Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης »*

*Το υλικό αυτό δημιουργήθηκε
από την Παιδαγωγική Ομάδα του ΚΠΕ Καστοριάς.*

Μέλη της είναι :

Δρ. Θ. Α. Μαρδίρης, Βιολόγος – Περιβαλλοντολόγος, Υπεύθυνος ΚΠΕ

Ν. Αντωνίου, Δάσκαλος, Αναπληρωτής Υπεύθυνος ΚΠΕ

Α. Καζταρίδου, Δασκάλα – Χημικός

Κ. Μηντζιαρίδης, Καθηγητής Αγγλικής Γλώσσας

Μ. Γρηγορίου, Βιολόγος, M.Sc.

Χ. Μιχαήλ, Μαθηματικός, M.Sc. στις Περιβ. Επιστήμες

Α. Ατζέμη, Δασκάλα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

A. ΕΘΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ «ΛΙΜΝΕΣ: ΠΗΓΕΣ ΕΜΠΝΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ» - ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. Εισαγωγή - Στόχοι Δικτύου - Παιδαγωγικοί Στόχοι

2. Πρωτόκολλο Εργασίας

B. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΙΜΝΟΛΟΓΙΑΣ

1. Λιμνολογία

2. Τι είναι λίμνη

3. Πώς σχηματίζονται οι λίμνες

3.1. Κατάταξη των λιμνών σε σχέση με την προέλευσή τους

3.1.1. Λίμνες τεκτονικής προέλευσης

3.1.2. Λίμνες ηφαιστειακής προέλευσης

3.1.3. Λίμνες παγετικής προέλευσης

3.1.4. Καρστικές λίμνες

3.1.5. Παράκτιες λίμνες

4. Βασικές συνιστώσες του λιμναίου οικοσυστήματος

4.1. Μορφομετρία της λίμνης

4.2. Λεκάνη απορροής της λίμνης

4.3. Κατανομή των φυσικών και χημικών παραμέτρων

4.3.1. Φυσικοχημικές ιδιότητες νερού

4.3.2. Φως

4.3.3. Χρώμα

4.3.4. Οσμή

4.3.5. Θερμοκρασία

4.3.6. Ηλεκτρική αγωγιμότητα

4.3.7. Διαλυμένο οξυγόνο

4.3.8. Βιοχημική αποδόμηση – B.O.D. (Biochemical Oxygen Demand)

4.3.9. Ενεργός οξύτητα

4.3.10. Θρεπτικά συστατικά

4.3.11. Τοξικές ουσίες

4.4. Κατανομή των βιολογικών παραμέτρων

Γ. Βιβλιογραφία

Α. ΕΘΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ «ΛΙΜΝΕΣ: ΠΗΓΕΣ ΕΜΠΝΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ»

1. Εισαγωγή

Τα οικοσυστήματα των εσωτερικών υδάτων (λίμνες, ποτάμια) είναι φυσικοί πόροι που καθορίζουν την ανάπτυξη των ανθρώπινων κοινωνιών και χαρακτηρίζουν άμεσα το τοπικό φυσικό περιβάλλον διαμορφώνοντας έμμεσα τη βιόσφαιρα.

Ειδικότερα οι λίμνες έπαιξαν πρωτεύοντα ρόλο στη ζωή από τα πολύ παλιά χρόνια επηρεάζοντας την εξέλιξη των περιοχών γύρω απ' αυτές και τις δραστηριότητες των κατοίκων τους. Οι λίμνες παρουσιάζουν ενδιαφέρον όχι μόνο εξαιτίας της φυσικής τους ομορφιάς, της ιδιαίτερης γεωμορφολογίας τους και της πλούσιας χλωρίδας και πανίδας που υποστηρίζουν, αλλά και γιατί αποτελούν υδάτινους παραγωγικούς πόρους με αξίες πολύτιμες για τον άνθρωπο.

Η Ελλάδα διαθέτει 56 φυσικές λίμνες και 25 τεχνητές που καλύπτουν έκταση 600 και 358 τετραγωνικών χιλιομέτρων αντίστοιχα ή αλλιώς το 47,29% του συνόλου της έκτασης των επιφανειακών εσωτερικών υδάτων της χώρας.

Το εθνικό θεματικό δίκτυο «Λίμνες: Πηγές Έμπνευσης για Προγράμματα Π.Ε.» φιλοδοξεί να συμβάλλει στην επιστημονικά και παιδαγωγικά τεκμηριωμένη στήριξη των προγραμμάτων Π.Ε. που εκπονούνται στα σχολεία της χώρας μας, στην παραγωγή κατάλληλου εκπαιδευτικού υλικού και στην ανάπτυξη της επικοινωνίας μεταξύ όλων των μελών του δικτύου. Κι ακόμη, φιλοδοξεί να αποτελέσει μοχλό ανάπτυξης σχέσεων και συνεργασίας με φορείς και σχολεία άλλων χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ευρώπης γενικότερα, στο πλαίσιο της ανάπτυξης διεθνών σχέσεων και συνεργασιών.

Στο δίκτυο μπορούν να συμμετέχουν Δημοτικά Σχολεία, Γυμνάσια, Ενιαία Λύκεια και Τεχνολογικά Επαγγελματικά Εκπαιδευτήρια της χώρας που εκπονούν ή προτίθενται να εκπονήσουν προγράμματα Π.Ε. για τις λίμνες για περίοδο δύο (2) χρόνων τουλάχιστον. Στο διάστημα αυτό τα σχολεία του δικτύου θα πρέπει να έχουν παρόμοιο τρόπο αντιμετώπισης των θεμάτων με βάση το προτεινόμενο από το δίκτυο

πρωτόκολλο εργασίας. Η ένταξη των σχολείων στο δίκτυο θα γίνεται ύστερα από πρόταση των Υπευθύνων Π.Ε. ή του ΚΠΕ της περιοχής του σχολείου προς τη συντονιστική ομάδα.

Στόχοι Δικτύου

- Επιστημονικά και Παιδαγωγικά τεκμηριωμένη στήριξη των προγραμμάτων Π.Ε. των σχολείων που συμμετέχουν στο δίκτυο, με παραγωγή εκπαιδευτικού υλικού.
- Επικοινωνία και διασύνδεση των σχολείων της χώρας σχετική με κοινά προγράμματα για τις λίμνες των περιοχών τους.
- Άνοιγμα στις τοπικές κοινωνίες με ανάπτυξη συνεργασιών με τοπικούς φορείς, Οργανισμούς Τοπικής Αυτοδιοίκησης, ενώσεις πολιτών και ομάδες νέων.
- Συνειδητοποίηση της οικολογικής και κοινωνικής διάστασης των περιβαλλοντικών προβλημάτων που αφορούν τις λίμνες και τις λεκάνες απορροής τους.
- Δημιουργία προϋποθέσεων κοινής αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι λίμνες και οι λεκάνες απορροής τους στο σύνολο του ελλαδικού χώρου, καθώς και καθιέρωση κοινού συστήματος ιεράρχησης και αξιών.

Παιδαγωγικοί Στόχοι

1. Να γνωρίσουν οι μαθητές την αξία του νερού, τη συμβολή του στη δημιουργία και στην εξέλιξη της ζωής και να συνειδητοποιήσουν ότι αποτελεί έναν κοινό παγκόσμια πόρο.
2. Να κατανοήσουν την αξία των υδροτοπικών οικοσυστημάτων και ιδιαίτερα των λιμνών και των λεκανών απορροής τους, τα δομικά τους στοιχεία και τις λειτουργίες τους.
3. Να προσεγγίσουν βιωματικά τη λίμνη και τη λεκάνη απορροής της, να παρατηρήσουν, να αγγίξουν, να συλλέξουν, να καταγράψουν, να συγκρίνουν και να γνωρίσουν τις σχέσεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στους οργανισμούς.
4. Να συσχετίσουν τις έννοιες που χαρακτηρίζουν τα λιμναία οικοσυστήματα με τις παρατηρήσεις τους, με γεγονότα που αφορούν την ιστορία της λίμνης, με

κείμενα και μαρτυρίες των κατοίκων της περιοχής και μέσω αυτής της συσχέτισης να διαπιστώσουν τη διαχρονική αλληλεξάρτηση ανάμεσα στους ανθρώπινους πολιτισμούς με τις λίμνες και τα υδατικά οικοσυστήματα γενικότερα.

5. Να εξασκηθούν στην ομαδική εργασία, στη συλλογή πληροφοριών, στην αξιοποίηση της σχετικής βιβλιογραφίας, σε μετρήσεις με τη χρήση διαφόρων οργάνων, καθώς και να μπορούν να ερμηνεύσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε σχέση με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους και τις ανθρώπινες δραστηριότητες.
6. Να ανιχνεύσουν τις στάσεις και τις συμπεριφορές των σημερινών ανθρώπων σε σχέση με το υδροτοπικό περιβάλλον, να προβληματιστούν και να κατανοήσουν τη σημασία της ευαισθητοποίησης των πολιτών και την ανάγκη σχεδιασμού αποτελεσματικών δράσεων για την προστασία του.
7. Να προτείνουν τρόπους ατομικής και συλλογικής δράσης για την προστασία του λιμναίου περιβάλλοντος.
8. Να συνειδητοποιήσουν τη σημασία της βιώσιμης ανάπτυξης στο ευρύτερο λιμναίο περιβάλλον και να αποκτήσουν αξίες, στάσεις και συμπεριφορές φιλικές προς αυτό.

2. Πρωτόκολλο εργασίας

Τα προγράμματα Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης που αφορούν τις λίμνες προτείνεται να συμπεριλαμβάνουν τρία (3) επίπεδα: 1. Προσέγγιση της λεκάνης απορροής, 2. Προσέγγιση της παραλίμνιας ζώνης, 3. Προσέγγιση του καθαυτού λιμναίου οικοσυστήματος.

Ειδικότερα, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι μια λίμνη είναι η απεικόνιση (το καθρέφτισμα) όλων των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής της. Λεκάνη απορροής και λίμνη αποτελούν ένα λειτουργικό σύστημα άμεσα και έμμεσα συνδεδεμένο με αλληλοσχετιζόμενα βιολογικά, φυσικά και χημικά στοιχεία που επηρεάζονται τόσο από τις φυσικές συνθήκες της περιοχής όσο και από την ανθρώπινη δραστηριότητα.

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος λεκάνη απορροής και λίμνη εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Παραμέτρους όπως, η σχέση της έκτασης της λεκάνης απορροής και της λίμνης, οι καλλιέργειες και οι άλλες χρήσεις γης στην περιοχή, οι κλιματικές συνθήκες, τα εδάφη και η γεωγραφία της περιοχής, όπως επίσης και τα εφαρμοζόμενα μέτρα προστασίας.

Η συσχέτιση μεταξύ αυτών και άλλων παραμέτρων ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή και ακόμη από λίμνη σε λίμνη. Γι' αυτό και κάθε λίμνη και η λεκάνη απορροής της είναι μοναδικά στον κόσμο συστήματα.

Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά χαρακτηριστικά στοιχεία που αφορούν τις λίμνες και μπορούν να βοηθήσουν την περιβαλλοντική ομάδα στην πρώτη της επαφή με το θέμα και είναι δυνατόν να αποτελέσουν τα βασικά σημεία προσέγγισης του θέματος.

Γενικά Στοιχεία

1. *Μέγεθος και σχήμα:* Η προέλευση των λιμνών καθορίζει το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά τους.
2. *Φυσικές λίμνες:* Είναι οι λίμνες που δημιουργήθηκαν από τη δράση γεωλογικών διεργασιών, όπως η υποχώρηση των παγετώνων, η ηφαιστειακή δράση και οι σεισμοί, η διάβρωση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων και η επίδραση των ποταμών.
3. *Τεχνητές λίμνες:* Συχνά αναφέρονται και σαν φραγμαλίμνες, ταμιευτήρες ή υδατοδεξαμενές. Σχηματίστηκαν με κατασκευή φραγμάτων σε ποταμούς ή αποστράγγιση ρεμάτων και χειμάρρων. Οι τεχνητές λίμνες ποικίλουν σε μέγεθος και σχήμα και περιλαμβάνουν το σύνολο της διαβάθμισης από τη μικρότερη υδατοδεξαμενή μέχρι τους μεγαλύτερους ταμιευτήρες και τις λίμνες που προήλθαν από τη δημιουργία φραγμάτων σε μεγάλους ποταμούς. Γενικά όμως όταν αναφερόμαστε είτε σε φυσικές είτε σε τεχνητές λίμνες, απλά τις αποκαλούμε λίμνες.

4. *Σχέση έκτασης λίμνης και λεκάνης απορροής*: Αν μια λίμνη έχει σχετικά μικρή έκταση αναλογικά με τη λεκάνη απορροής της, υπάρχουν πολύ περισσότερες πιθανότητες να γεμίσει από τα φερτά υλικά των χειμάρρων ή να επηρεασθεί από τα θρεπτικά που μεταφέρουν, απ' ό,τι μια μεγάλη λίμνη που διαθέτει αναλογικά σχετικά μικρή λεκάνη απορροής.
5. *Κλίμα και έδαφος*: Οι λίμνες σε περιοχές με υψηλή βροχόπτωση και επικλινή, ευδιάβρωτα και πλούσια σε θρεπτικά εδάφη έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να παρουσιάσουν επεισόδια «άνθισης ύδατος» ή εκρήξεων φυτοπλαγκτού και επέκτασης των υδροχαρών φυτών, απ' ό,τι οι λίμνες σε ξηρά κλίματα και άγονα εδάφη.
6. *Τοπογραφία*: Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση των εδαφών στη λεκάνη απορροής τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα οι διάφοροι ρυπαντές να καταλήξουν στη λίμνη.
7. *Υγρότοποι*: Οι παραλίμνιοι υγρότοποι (υγρολίβαδα, υγρόφιλα δάση κ.λπ.) συχνά συγκρατούν τους διάφορους ρυπαντές πριν εισέλθουν στη λίμνη, αποτρέπουν δηλαδή την είσοδό τους στη λίμνη βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των νερών των λιμνών. Τα υγρολίβαδα και τα παραλίμνια υγρόφιλα δάση προσφέρουν επίσης το κατάλληλο περιβάλλον για την υποστήριξη μεγάλης ποικιλίας χλωρίδας και πανίδας.
8. *Το εσωτερικό περιβάλλον των λιμνών (το υδάτινο σώμα)*: Η κατανόηση της συσχέτισης ανάμεσα στη λίμνη και τη λεκάνη απορροής της είναι μόνο η αρχή. Για να κατανοήσουμε πλήρως τα λιμναία οικοσυστήματα και να προτείνουμε τις κατάλληλες δράσεις προστασίας τους είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αντιληφθούμε τις διεργασίες που συμβαίνουν στο υδάτινο σώμα των λιμνών. Το εσωτερικό περιβάλλον των λιμνών καθορίζεται από μια σειρά παραμέτρων που περιλαμβάνουν:
 - Το ισοζύγιο του νερού της λίμνης: Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής έχουν μεγάλη επίδραση στο υδατικό ισοζύγιο μιας λίμνης. Ο όγκος των νερών που εισέρχεται στη λίμνη με απ' ευθείας βροχόπτωση, από υπόγειες πηγές και την επιφανειακή απορροή χειμάρρων και ρεμάτων σε σχέση με το νερό που εξέρχεται από τη λίμνη είτε με επιφανειακή εκροή είτε εξαιτίας της εξάτμισης, της

διαπνοής των φυτών και των υπόγειων (υπεδάφειων) διαρροών, καθορίζουν τη συγκέντρωση των θρεπτικών, των φερτών υλών και άλλων ουσιών, πιθανώς ρυπαντών στο εσωτερικό της λίμνης.

- Το χρόνο παραμονής ή το χρόνο ανανέωσης του νερού της λίμνης: Ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη ανανέωση του συνόλου του νερού μιας λίμνης είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας. Για παράδειγμα, αν ο όγκος των νερών μιας λίμνης είναι σχετικά μικρός και η απορροή σχετικά μεγάλη, τότε ο χρόνος παραμονής των νερών στη λίμνη θα είναι μικρός και συνεπώς, τα θρεπτικά που είναι δυνατόν να προκαλέσουν εκρήξεις του φυτοπλαγκτού, γρήγορα θα απομακρύνονται από το υδάτινο σώμα. Αντίθετα, αν ο χρόνος ανανέωσης των νερών είναι μεγάλος και οι συνθήκες θερμοκρασίας και θρεπτικών κατάλληλες η ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού ευνοείται.
- Τη θερμική στρωμάτωση της λίμνης: Στις περισσότερες λίμνες, οι εποχιακές διαφορές στη θερμοκρασία ανάμεσα στον αέρα και το νερό προκαλούν αναστροφή του νερού, ανάμιξη δηλαδή του επιφανειακού νερού με το νερό των βαθύτερων στρωμάτων της λίμνης. Ανάμιξη των νερών μπορεί να προκληθεί και από τον άνεμο. Το παραπάνω φαινόμενο, η αναστροφή του νερού, είναι σημαντικό καθώς τα θρεπτικά στοιχεία που είναι συχνά αποθηκευμένα στο ίζημα του πυθμένα, εμπλουτίζουν τα ανώτερα στρώματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς (φυτοπλαγκτόν, ανώτερα υδρόβια φυτά)
- Τον κύκλο των θρεπτικών στο εσωτερικό της λίμνης: Σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου στα στρώματα των νερών κοντά στον πυθμένα παρατηρείται απελευθέρωση φωσφόρου από το ίζημα. Ο εμπλουτισμός του νερού με φώσφορο ευνοεί την ανάπτυξη των φωτοσυνθετικών οργανισμών.
- Το υδατικό περιβάλλον ως ενδιαίτημα της χλωρίδας και της πανίδας: Το περιβάλλον της λίμνης είναι σημαντικό για πολλά φυτά, ψάρια, υδρόβια πουλιά και άλλα ζώα. Οι κύκλοι ζωής πολλών ειδών εξαρτώνται αποκλειστικά από το νερό της λίμνης. Συχνά βέβαια ο

άνθρωπος αντιμετωπίζει τις λίμνες αποκλειστικά σαν χώρους αναψυχής και όχι ως ζωντανά οικοσυστήματα με καθοριστικό για ποικιλία μορφών ζωής ρόλο.

9. *Παραγωγικότητα των λιμνών*: Οι συνθήκες στο εσωτερικό της υδάτινης μάζας της λίμνης και οι σχέσεις ανάμεσα στη λίμνη και τη λεκάνη απορροής καθορίζουν την παραγωγικότητα του συστήματος. Η βιολογική (πρωτογενής) παραγωγικότητα μιας λίμνης εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών (των απαραίτητων δηλαδή για την ανάπτυξη των φυτών ουσιών) και διαμορφώνει την τροφική κατάσταση της λίμνης. Ακραίες τιμές παραγωγικότητας (υψηλές ή χαμηλές) περιορίζουν συνήθως σημαντικά την υδρόβια ζωή. Υψηλή παραγωγικότητα ισοδυναμεί με υπέρμετρη αύξηση του φυτοπλαγκτού και της υπόλοιπης υδρόβιας βλάστησης. Αντίθετα η χαμηλή παραγωγικότητα περιορίζει την υδρόβια ζωή.

Ανάλογα με την τροφική τους κατάσταση, οι λίμνες διακρίνονται σε oligotroφες (λιγότερο παραγωγικές), mesotroφες (μέτρια παραγωγικές), eutroφες (πολύ παραγωγικές) και hypereutroφες (παραγωγικότερες όλων των άλλων). Η μετάβαση από την oligotroφική στην eutroφική κατάσταση είναι μια φυσική διεργασία που πραγματοποιείται σε διάστημα χιλιάδων ή και εκατομμυρίων χρόνων καθώς θρεπτικά υλικά από τη λεκάνη απορροής εισέρχονται σταδιακά (με αργούς ρυθμούς) στη λίμνη. Ωστόσο, ανθρωπογενείς επεμβάσεις στη λεκάνη απορροής είναι δυνατό να προκαλέσουν ραγδαίες αλλαγές στην τροφική κατάσταση σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση της τροφικής κατάστασης μιας λίμνης είναι επιθυμητή μέχρι ένα σημείο, αφού συνεπάγεται την αύξηση των αλιευμάτων. Η παγίωση όμως eutroφικών ή hypereutroφικών συνθηκών σε μια λίμνη αποτελεί ανεπιθύμητη κατάσταση αφού συχνά συμβάλλει στη διαμόρφωση ανοξικών συνθηκών στα βαθύτερα στρώματα διαφοροποιώντας σταδιακά τη σύνθεση των λιμναίων βιοκοινοτήτων.

10. *Παράγοντες που απειλούν τις λίμνες*: Η εφαρμογή κατάλληλων πρακτικών διαχείρισης στη λίμνη και τη λεκάνη απορροής της προϋποθέτει την κατανόηση των διεργασιών που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Κύριες απειλές για τις λίμνες είναι:

- Αφθονία θρεπτικών: Οδηγεί σε υπέρμετρη αύξηση του φυτοπλαγκτού (άνθιση του νερού) και των άλλων φυτικών μορφών με συνέπεια τη μείωση του διαθέσιμου στα ψάρια και στους άλλους οργανισμούς οξυγόνου.
- Οργανικά απόβλητα: Η αποικοδόμηση των οργανικών υλικών μπορεί να προκαλέσει ανεπάρκεια οξυγόνου στο νερό, γεγονός που δυσχεραίνει την επιβίωση των ψαριών και των υπόλοιπων υδρόβιων οργανισμών.
- Αύξηση του ιζήματος: Η εισροή στη λίμνη φερτών υλών από τη λεκάνη απορροής μειώνει το βάθος της, καταστρέφει πιθανώς το περιβάλλον αρκετών φυτικών και ζωικών οργανισμών και μπορεί να φράξει κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες τα βράχια των ψαριών και να προκαλέσει ασφυξία ή να καταστρέψει τα αυγά τους.
- Βαριά μέταλλα και οργανικές χημικές ενώσεις δηλητηριάζουν ψάρια και οστρακοειδή.
- Απότομες αυξομειώσεις της στάθμης του νερού εξαιτίας της εκμετάλλευσης της λίμνης για παραγωγή ενέργειας ή για άρδευση και άλλες χρήσεις: Οι απότομες αυξομειώσεις της στάθμης των νερών προκαλούν προβλήματα στην άγρια ζωή και στα υδρόβια και υδροχαρή φυτά των λιμνών.
- Πηγές ρύπανσης: Στο σύνολο της λεκάνης απορροής εντοπίζεται συχνά ποικιλία πρωτογενών πηγών ρύπανσης, όπως γεωργικές καλλιέργειες, που προκαλούν εισροές αζώτου, φωσφόρου, ιζημάτων, φυτοφαρμάκων και οργανικών υλικών στη λίμνη. Κι ακόμη, εκπτώσεις από αστικές περιοχές περιέχουν συνήθως υπολείμματα καυσίμων, μετάλλων, βακτηρίων, θρεπτικών στοιχείων κ.λπ. που μεταφέρονται στις λίμνες μέσω των αποχετευτικών δικτύων ή και μέσω του δικτύου όμβριων. Επίσης διαρροές από άλλα συστήματα αποχέτευσης (υπόνομοι, βόθροι), συντελούν στη ρύπανση ή και στη μόλυνση των λιμνών εξαιτίας των θρεπτικών, των βακτηρίων ή και άλλων οργανικών αποβλήτων που καταλήγουν στις λίμνες. Η καταστροφή της παρόχθιας βλάστησης εξαιτίας

κατασκευαστικών έργων στην περιοχή συνήθως επιφέρει προβλήματα στις λίμνες και υποβαθμίζει την ποιότητα των νερών τους. Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα συχνά περιέχουν ρύπους που μεταφέρονται στο έδαφος με τη βροχή και αποτελούν σημαντική απειλή για λίμνες που βρίσκονται σε περιοχές, όπου υπάρχει βαριά βιομηχανία. Τέλος, η αστικοποίηση γεωργικών και δασικών εκτάσεων δημιουργεί «σκληρές» επιφάνειες όπως αυτές των δρόμων, των χώρων στάθμευσης των οχημάτων, των στεγών, των πεζοδρομίων κ.ά. Το φαινόμενο αυτό αυξάνει την ταχύτητα των απορροών στις λίμνες και προκαλεί διάβρωση στις όχθες των ποταμών, θολερότητα στο νερό και υποβάθμιση του περιβάλλοντος της άγριας ζωής.

11. *Δραστηριότητες που απειλούν τις λίμνες:* Θεωρητικά στις μέρες μας σε αρκετές από τις δραστηριότητες που παραδοσιακά αποτελούσαν πηγές ρύπανσης έχουν τεθεί περιβαλλοντικοί όροι π.χ. στην κατασκευή κτιρίων και δρόμων, στη διάθεση αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων κ.λπ. Γι' αυτό και το ενδιαφέρον επικεντρώνεται πια σε δραστηριότητες μικρότερης κλίμακας που μπορεί να αποτελούν απειλή για τις λίμνες. Για παράδειγμα, διαρροές αστικών αποβλήτων μπορούν να συμβάλλουν στη ρύπανση των λιμνών και στον υπερεμπλουτισμό των νερών τους με θρεπτικά, με τελική κατάληξη την παρουσία φαινομένων «άνθισης» του νερού της.

Κι ακόμη, η χρήση απορρυπαντικών που περιέχουν φώσφορο ή η υπερβολική χρήση λιπασμάτων σε κήπους και πάρκα στις αστικές ή ημιαστικές παραλίμνιες εκτάσεις συμβάλλουν επίσης στον εμπλουτισμό των λιμνών με θρεπτικά, παράλληλα η αφαίρεση της βλάστησης από τις παράχθιες και παραλίμνιες περιοχές με σκοπό τη δημιουργία παραλιών ή χώρων αναψυχής αναστέλλει τη λειτουργία του φυσικού συστήματος ρύθμισης των εισροών στη λίμνη. Παράχθιες και παραλίμνιες περιοχές με βλάστηση απορροφούν, συγκρατούν στα εδάφη τους θρεπτικά και άλλα φερτά υλικά, εμποδίζοντας τη διοχέτευσή τους στη λίμνη. Επιπλέον, η χρήση πλωτών μέσων με ισχυρές εξωλέμβιες μηχανές σε ρηχές περιοχές των λιμνών επιδρά στα εμπλουτισμένα με θρεπτικά ιζήματα του πυθμένα και καταστρέφει την υδρόβια ζωή. Παράλληλα, διαρροές

από τις μη κατάλληλα συντηρημένες μηχανές των πλωτών μέσων επιβαρύνουν περισσότερο την ποιότητα του νερού των λιμνών.

Τέλος, οι γεωργικές δραστηριότητες ακόμα και μικρής κλίμακας σε παραλίμνιες εκτάσεις αποτελούν ισχυρότατο παράγοντα επιβάρυνσης των νερών εξαιτίας της απόπλυσης φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων ή και εξαιτίας της διείσδυσής τους στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Γενικά θα πρέπει να ξέρουμε ότι κάθε δραστηριότητα που γίνεται στη λεκάνη απορροής των λιμνών επηρεάζει και την ίδια τη λίμνη.

Φυσικοχημικές Παράμετροι

Η ποιότητα του νερού έχει καθοριστική επίδραση στη λειτουργία του λιμναίου οικοσυστήματος και κάθε επιβάρυνσή του με ύλη, ενέργεια ή μικροοργανισμούς οδηγεί στην υποβάθμισή του. Η αξιολόγηση της ποιότητάς του μπορεί να γίνει με τη μελέτη και τη μέτρηση ορισμένων βασικών φυσικών και χημικών παραμέτρων.

1. Φως

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας αφού αποτελεί την κύρια πηγή θερμότητας και συνδέεται με τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των αυτότροφων οργανισμών για την παραγωγή οργανικής ύλης. Το ίδιο το νερό, οι διαλυμένες σε αυτό ουσίες και τα αιωρούμενα σωματίδια διαθλούν και απορροφούν το φως και μειώνουν τη διαφάνεια του νερού. Η διαφάνεια των νερών μιας λίμνης μπορεί να μετρηθεί με το δίσκο του Secchi.

2. Χρώμα

Το χρώμα μιας λίμνης καθορίζεται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εισχωρεί στο νερό, από το είδος των σωματιδίων που αιωρούνται, από τις διαλυμένες ανόργανες ή οργανικές ουσίες, από το είδος των πλαγκτονικών οργανισμών, από το χρώμα του ιζήματος, ακόμη και από το γεωλογικό υπόστρωμα της περιοχής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες διαχέουν και απορροφούν το φως και προσδίδουν στο νερό συγκεκριμένο χρώμα που μπορεί να είναι από πράσινο – γαλάζιο έως σκούρο καφετί.

3. Οσμή

Η οσμή των νερών στη λίμνη μπορεί να οφείλεται σε φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια. Σε μία ευτροφική λίμνη, όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες, τα προϊόντα της διάσπασης της οργανικής ύλης προσδίδουν οσμή στη λίμνη. Επίσης η χημική κατεργασία με χλώριο λυμάτων και αποβλήτων δίνει στο νερό χαρακτηριστική οσμή χλωρίου ή χλωροφαινόλης.

4. Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία επηρεάζει τη διαλυτότητα του οξυγόνου και άλλων συστατικών, το μεταβολισμό των υδρόβιων οργανισμών, τη διαδικασία διάσπασης των οργανικών ουσιών που υπάρχουν και είναι υπεύθυνη για τη θερμική στρωμάτωση και την αναστροφή των νερών.

5. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αναφέρεται στην ικανότητά του να μεταφέρει – άγει ηλεκτρικά φορτία. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία ιόντων, από τη συγκέντρωσή τους, την ευκινησία, το σθένος και τη θερμοκρασία. Απόβλητα και ρύποι που εισέρχονται στη λίμνη αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

6. Διαλυμένο Οξυγόνο

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό σχετίζεται με την ανάπτυξη των περισσότερων μορφών ζωής. Ο εμπλουτισμός της λίμνης σε οξυγόνο γίνεται μέσω διάχυσης του ατμοσφαιρικού οξυγόνου στο νερό της λίμνης και μέσω φωτοσυνθετικής παραγωγής. Η διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, τον κυματισμό, την περιεκτικότητα σε ανόργανα άλατα και οργανικές ουσίες, το περιεχόμενο σε μικροοργανισμούς κ.ά. Όταν εξαιτίας φυσικών ή ανθρωπίνων δραστηριοτήτων εισέλθει στη λίμνη άφθονο θρεπτικό υλικό προκαλείται μείωση ή ακόμα και έλλειψη οξυγόνου.

7. Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο – B.O.D. (Biochemical Oxygen Demand)

Το οξυγόνο που χρειάζεται για τη βιοχημική αποδόμηση των οργανικών ουσιών του υδάτινου αποδέκτη από αερόβιους μικροοργανισμούς ονομάζεται βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (B.O.D).

8. Ενεργός Οξύτητα (pH)

Το σύνολο των βιοχημικών αντιδράσεων στο εσωτερικό των κυττάρων πραγματοποιείται σε ουδέτερο pH. Η ενεργός οξύτητα του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την αλατότητα, τις συγκεντρώσεις του CO₂ και του οξυγόνου στο νερό, τη μεταβολική δραστηριότητα των υδρόβιων οργανισμών (φωτοσύνθεση, αναπνοή), τη χημική αποσύνθεση των οργανικών ουσιών και την επίδραση εξωγενών παραγόντων.

9. Θρεπτικά συστατικά

Βασικά θρεπτικά συστατικά των φυτικών οργανισμών μιας λίμνης είναι τα νιτρικά, τα νιτρώδη, τα αμμωνιακά ιόντα και τα φωσφορικά ιόντα που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης, οι τιμές τους δηλαδή είναι ενδεικτικές για τις συνθήκες (ολιγότροφες, μεσότροφες, εύτροφες) που επικρατούν σε αυτή.

10. Τοξικές Ουσίες

Φυσικές ή συνθετικές ουσίες (μόλυβδος, υδράργυρος, φθόριο, κάδμιο, ραδιενεργά ισότοπα, εντομοκτόνα κ.ά.) είναι δυνατό να έχουν τοξική επίδραση στους οργανισμούς που τις προσλαμβάνουν. Η μεταβίβαση τοξικών ουσιών από ένα τροφικό επίπεδο σε κάποιο ανώτερο προκαλεί το φαινόμενο της βιοσυσσωρευσης.

Σχέδιο Προσέγγισης

Στόχος μας δεν είναι να κάνουμε μια πλήρη επιστημονική μελέτη για τη λίμνη, αλλά να γνωρίσουν οι μαθητές τις λειτουργίες των λιμναίων οικοσυστημάτων, να προσεγγίσουν τις σχέσεις αλληλεξάρτησης που υπάρχουν, να εκτιμήσουν την αξία των λιμνών και να αναγνωρίσουν τις επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας στη λεκάνη απορροής και στις ίδιες τις λίμνες. Στο πλαίσιο αυτό τα προγράμματα Π.Ε. για

τις λίμνες είναι σκόπιμο να συμπεριλάβουν δραστηριότητες που αφορούν τόσο την οικολογική διάσταση των θεμάτων, όσο και την κοινωνική.

Ένα πρώτο σχέδιο είναι και το παρακάτω:

I) Καταγραφή φυσικών και χημικών παραμέτρων

Γενικά είναι γνωστό ότι η ακριβής (επιστημονική) μελέτη των φυσικοχημικών παραμέτρων μιας λίμνης απαιτεί μακρόχρονες επαναλαμβανόμενες δειγματοληψίες με σχέδιο που να καλύπτει το σύνολο του υδάτινου όγκου. Στο επίπεδο όμως της δικιάς μας δουλειάς δεν είναι απαραίτητη η εξαντλητική δειγματοληψία.

Προτείνεται λοιπόν η επιλογή 4 χαρακτηριστικών σταθμών για δειγματοληψίες στην επιφάνεια της λίμνης, σε μέσο βάθος και στον πυθμένα.

Αν υπάρχει η δυνατότητα, καλό θα ήταν οι μετρήσεις να γίνονται σε μηνιαία βάση, αν όμως αυτό είναι δύσκολο, οι δειγματοληψίες μπορούν να γίνονται 4 φορές το χρόνο με προτεινόμενες χρονικές περιόδους τις εξής: 1. το 2^ο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου ή το 1^ο δεκαπενθήμερο του Οκτωβρίου, 2. το 2^ο δεκαπενθήμερο του Ιανουαρίου, 3. το 2^ο δεκαπενθήμερο του Απριλίου ή το 1^ο δεκαπενθήμερο του Μαΐου, 4. το 1^ο δεκαπενθήμερο του Ιουνίου.

Μετρήσεις μπορούν να γίνουν και σε τρεις θέσεις των ρεμάτων που καταλήγουν στη λίμνη και ειδικότερα στο ψηλότερο σημείο της λεκάνης απορροής, στο μέσο περίπου του μήκους του ρέματος και στο σημείο που το ρέμα εκβάλλει στη λίμνη.

Ποιες μετρήσεις μπορούμε να κάνουμε:

i) Στις λίμνες:

1. Θερμοκρασία νερού
2. Χρώμα νερού - Οσμή
3. Διαφάνεια
4. pH
5. Αγωγιμότητα
6. Φωσφορικά (PO_4^{-3})
7. Νιτρικά (NO_3^{-1})

ii) Στα ρέματα μπορούν να γίνουν οι ίδιες μετρήσεις κι ακόμη:

1. εκτίμηση φερτών υλών (ποσοτική και ποιοτική)

2. εκτίμηση παροχής με μέτρηση της ταχύτητας ροής

II) Βιολογικές παράμετροι

1. Αναφορά στα είδη των μακροασπόνδυλων που συνήθως παρατηρούνται
2. Αναφορά στα είδη των ψαριών (συνεργασία με τους ψαράδες της περιοχής)
3. Εκτίμηση της ιχθυοπαραγωγής
4. Παρατήρηση των ειδών των πουλιών ανά εποχή και εκτίμηση μεγέθους πληθυσμών
5. Παρατήρηση της παρόχθιας βλάστησης και καταγραφή των επικρατέστερων ειδών
6. Εκτίμηση της τροφικής κατάστασης της λίμνης

III) Περιγραφή της λεκάνης απορροής

1. Έκταση, μέσο υψόμετρο, υψόμετρο λίμνης
2. Φυτοκάλυψη (είδη που επικρατούν – ποσοστό κάλυψης) και αναφορά στις ανθρώπινες παρεμβάσεις
3. Χρήσεις γης και είδη καλλιεργειών
4. Αναφορά στα πετρώματα της λεκάνης απορροής και στη διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών
5. Μετεωρολογικά δεδομένα της λεκάνης απορροής

IV) Ανθρωπογενές περιβάλλον

1. Ιστορικές αναφορές για την περιοχή και τη λίμνη
2. Ήθη και έθιμα των κατοίκων που σχετίζονται με τη λίμνη
3. Διαχείριση της λίμνης σήμερα
4. Νομικό καθεστώς προστασίας της λίμνης
5. Εκτίμηση επιπτώσεων από τις ανθρώπινες δραστηριότητες

V) Προτάσεις

1. Διατύπωση προτάσεων για εφαρμογή κατάλληλων πρακτικών διαχείρισης
2. Διατύπωση προτάσεων για ενδεχόμενη οικότουριστική ανάπτυξη της περιοχής

Ωστόσο η παραπάνω πρόταση δεν είναι δεσμευτική για τον τρόπο προσέγγισης του θέματος που θα επιλέξει η περιβαλλοντική ομάδα, αλλά έχει μόνο υποβοηθητικό ρόλο.

Στη συνέχεια αναλύονται εκτενώς οι βασικές συνιστώσες του λιμναίου οικοσυστήματος ώστε να αποτελέσουν ένα βοηθητικό θεωρητικό υπόβαθρο για τους συναδέλφους που θα ενταχθούν στο εθνικό δίκτυο «Λίμνες: Πηγές Έμπνευσης για Προγράμματα Π.Ε.».

B. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΙΜΝΟΛΟΓΙΑΣ

1. Λιμνολογία

Λιμνολογία είναι η μελέτη των γλυκών και αλμυρών νερών που περιβάλλονται από χερσαίες εκτάσεις. Αντικείμενό της δηλαδή είναι οι λίμνες, φυσικές και τεχνητές, οι χείμαρροι, τα ποτάμια, οι υγρότοποι και οι εκβολές των ποταμών.

Η Λιμνολογία εξελίχθηκε σε ξεχωριστή επιστήμη κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων αιώνων και σ' αυτό συνετέλεσαν οι βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα μικροσκόπια, στα θερμόμετρα, ακόμη και η εφεύρεση των λεπτών δικτύων συλλογής του φυτοπλαγκτού, τα οποία μας φανέρωσαν ότι οι λίμνες αποτελούν ένα μικρόκοσμο με χαρακτηριστική δομή.

Πατέρας της Λιμνολογίας θεωρείται ο F.A. Forel, καθηγητής του Πανεπιστημίου της Λωζάννης, ο οποίος για πρώτη φορά το 1892 εισάγει τον όρο *λιμνολογία* (*limnologie*) στην εργασία του "*Le Léman: Monographie Limnologique*", που αφορά τη μελέτη της γεωλογίας, φυσικής και χημείας της λίμνης της Γενεύης Ελβετίας, γνωστή και με το γαλλικό της όνομα Lac Léman. Αξίζει να αναφερθεί ότι και η λέξη *πλαγκτόν* (*plankton*) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Hensen το 1887, για να περιγράψει τους πλανόμενους μικροοργανισμούς των γλυκών και αλμυρών νερών και διαδόθηκε από τον Γερμανό βιολόγο Ernst Haeckel που συμπεριέλαβε στον όρο *πλαγκτόν* και τους μεγαλύτερους πελαγικούς οργανισμούς.

Σχετική με την καταγραφή της ιστορικής εξέλιξης των λιμνών είναι και η Παλαιολιμνολογία που είναι η μελέτη των λιμναίων ιζημάτων.

2. Τι είναι λίμνη;

Ως λίμνη ορίζεται η μικρή ή μεγάλη υδάτινη μάζα με γλυκό, υφάλμυρο ή και αλμυρό νερό, που βρίσκεται συνήθως σε μία κλειστή γεωλογική λεκάνη στην επιφάνεια της γης, χωρίς να έχει άμεση επικοινωνία με τη θάλασσα. Η ελεύθερη

επιφάνεια των λιμνών δεν παρουσιάζει μια μέση σταθερή στάθμη γιατί αυτή εξαρτάται από την έκταση και τη χωρητικότητα της λίμνης, από τις παροχές των ποταμών και των πηγών και κυρίως από τις κλιματικές συνθήκες.

Η λίμνη βέβαια δεν είναι μόνο μια συλλογή νερού, αλλά ένα οικοσύστημα, μια κοινότητα με αλληλεπιδράσεις μεταξύ ζώων, φυτών, μικροοργανισμών και του φυσικού και χημικού περιβάλλοντος στο οποίο ζουν. Η ποικιλία και η ετερογένεια αποτελούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των λιμναίων οικοσυστημάτων. Οι λίμνες διαφέρουν μεταξύ τους λόγω φυσικών αιτιών, όπως είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία ή η κίνηση των νερών, διαφέρουν λόγω χημικών αιτιών (διαφοροποίηση στα θρεπτικά συστατικά, τα κυρίαρχα ιόντα, τους ρυπαντές), διαφέρουν ακόμη λόγω βιολογικών αιτιών, όπως η βιομάζα, οι αριθμοί πληθυσμών, οι ρυθμοί ανάπτυξης κ.ά.

Η λεκάνη απορροής της κάθε λίμνης αποτελεί επίσης ένα σημαντικό παράγοντα για κάθε λιμναίο οικοσύστημα, γιατί αφενός μεν υδροδοτεί τη λίμνη με τις απορροές και τις υπολίμνιες πηγές της, αφετέρου μια αλλαγή στη λεκάνη απορροής, όπως μια οικιστική επέκταση, ένα αποστραγγιστικό έργο ή μια φωτιά σε δασική έκτασή της μπορούν να τροποποιήσουν την ευαίσθητη ισορροπία του λιμναίου οικοσυστήματος.

3. Πώς σχηματίζονται οι λίμνες;

Η δημιουργία των λιμνών σχετίζεται με γεωλογικά φαινόμενα που συνέβησαν κατά την περίοδο των παγετώνων ή τις περιόδους των ισχυρών τεκτονικών και ηφαιστειακών δράσεων, με αποτέλεσμα η κατανομή τους στην επιφάνεια της γης να είναι ανομοιομορφη. Αν και οι λίμνες εμφανίζονται σε μας ως μόνιμοι σχηματισμοί της επιφάνειας της γης, στην ουσία είναι γεωλογικά προσωρινοί.

Κάθε λίμνη, ακόμη και αν ανήκει γεωγραφικά σε μια «ομάδα» λιμνών, παρουσιάζει τα δικά της σύνθετα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά τα οποία σχετίζονται με την προέλευση και την εξέλιξή της.

Γενικά οι διαδικασίες που εμπλέκονται στο σχηματισμό μιας λίμνης έχουν σχέση με φαινόμενα τα οποία:

α) δημιουργούν σιγά–σιγά μια λίμνη

β) προκαλούν βίαια το σχηματισμό μιας λίμνης

γ) επιδρούν σε μια προϋπάρχουσα κοιλότητα έτσι ώστε να μετατραπεί σε λίμνη

Είναι προφανές ότι η μετέπειτα εξέλιξη του λιμναίου οικοσυστήματος σχετίζεται άμεσα με τη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών της λίμνης.

Κάποιες από τις παλαιότερες και βαθύτερες λίμνες έχουν τεκτονική προέλευση (π.χ. η λίμνη Βαϊκάλη της Σιβηρίας), κάποιες από τις καθαρότερες και πιο πρόσφατες είναι ηφαιστειακές (π.χ. η λίμνη Crater Lake του Όρεγκον), αλλά οι περισσότερες από τις υπάρχουσες σήμερα λίμνες έχουν σχηματισθεί κατά την περίοδο των παγετώνων (π.χ. οι μεγάλες λίμνες της Β. Αμερικής).

3.1. Κατάταξη των λιμνών σε σχέση με την προέλευσή τους

3.1.1. Λίμνες τεκτονικής προέλευσης

Οι λίμνες αυτές οφείλουν τη δημιουργία τους σε μετακινήσεις και διαρρήξεις του στερεού φλοιού της γης τα αίτιά τους δηλαδή είναι τεκτονικά. Οι περισσότερες από αυτές προέκυψαν από κάποιο ρήγμα (μοναδικό) ή από πολλαπλά γειτονικά ρήγματα.

Η λεκάνη των λιμνών τεκτονικής προέλευσης σχηματίστηκε από κάποια καταβύθιση του εδάφους, λόγω της δράσης ενός ρήγματος ή από βύθισμα μιας ευρύτερης περιοχής που βρίσκεται μεταξύ δύο γειτονικών ρηγμάτων.

Οι μεγαλύτερες και βαθύτερες λίμνες, όπως η Βαϊκάλη στη Σιβηρία, οι μεγάλες λίμνες της Ανατολικής Αφρικής, όπως οι λίμνες Μαλάουι, Τανγκανίκα, Έντουαρτ, Αλβέρτου και Τουρκάνα ακόμη και η Ερυθρά θάλασσα, έχουν τεκτονική προέλευση και σχηματίστηκαν κατά μήκος του μεγάλου ρήγματος κατά τη διάρκεια του Πλειόκαινου πριν από 1 έως 10 εκατομμύρια χρόνια.

Ένας δεύτερος βασικός τύπος τεκτονικών λιμνών προέκυψε από την ανύψωση τμημάτων του θαλάσσιου βυθού. Έτσι σχηματίστηκαν οι ρηχές λίμνες της Φλόριδας, η Κασπία θάλασσα και η Αράλη, ενώ ένας τρίτος τύπος τεκτονικών λιμνών είναι αυτές όπου η κλίση, η ανύψωση ή η βύθιση του φλοιού της γης αντέστρεψαν το υπάρχον αποστραγγιστικό σύστημα της περιοχής. Η λίμνη Μεγάλη Βικτόρια, η Άφρিকা, η λίμνη Τιτικάκα ψηλά στις Άνδεις είναι παραδείγματα λιμνών που σχηματίστηκαν από την ανύψωση των γύρω περιοχών τους.

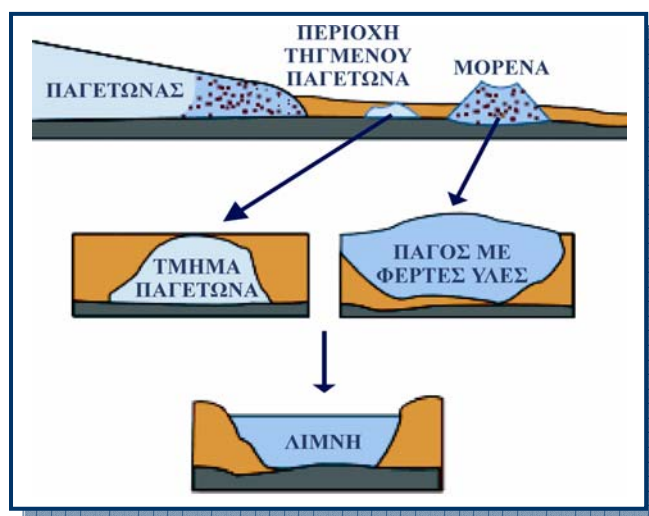
3.1.2. Λίμνες ηφαιστειακής προέλευσης

Οι πλέον γνωστές λίμνες ηφαιστειακής προέλευσης είναι αυτές που καταλαμβάνουν τους κρατήρες των σβησμένων ηφαιστείων, όπως οι λίμνες Crater Lake στο Oregon με διάμετρο 10 χιλ. και βάθος 600 μέτρων, Crater Butte Lake στη California και η ρηχή λίμνη Mahega στην Ουγκάντα με αλκαλικά νερά και διαφάνεια μερικών εκατοστών.

Στις ηφαιστειακές λίμνες συμπεριλαμβάνονται και αυτές που σχηματίστηκαν όταν η λάβα έφραξε την έξοδο ενός ποταμού ή μιας κοιλάδας, όπως συνέβη σε πολλές λίμνες της Ιαπωνίας.

3.1.3. Λίμνες παγετικής προέλευσης

Οι περισσότερες λεκάνες απορροής των λιμνών του πλανήτη μας σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια του Πλειστόκαινου (Τεταρτογενές), όταν οι παγετώνες κάλυπταν μεγάλο τμήμα της γης. Η περίοδος αυτή δημιούργησε τις προϋποθέσεις για τη δημιουργία των λιμνών παγετικής προέλευσης (εικ. 1) που είναι συνήθως επιμήκεις και ο αρχικός τους σχηματισμός οφείλεται στη διέλευση των παγετώνων κατά μήκος της παλαιάς ποτάμιας κοιλάδας, η οποία υποσκάπτεται και διευρύνεται, ενώ το κατώτερο τμήμα της φράσσεται κατά κύριο λόγο από φερτά υλικά και πετρώματα (Μορένες). Ο σχηματισμός των φιορδ με τα μεγάλα βάθη και τις απότομες ακτές, είναι επίσης παγετικής προέλευσης. Οι λεκάνες αυτές καλύφθηκαν με



Εικόνα 1. Στάδια σχηματισμού λίμνης από παγετώνα

νερά όταν έλιωσαν και υποχώρησαν οι πάγοι και έτσι σχηματίστηκαν οι μεγάλες λίμνες της Β. Αμερικής αλλά και της Β. Ευρώπης.

3.1.4. Καρστικές λίμνες

Είναι οι λίμνες που συναντούμε συνήθως σε ασβεστολιθικές περιοχές όπου παρατηρούνται καρστικά φαινόμενα (διάσπαρτα έγκοιλα όπως κοιλότητες, σπές, βάραθρα, που προέρχονται από τη διάβρωση των ασβεστόλιθων). Η δημιουργία τους οφείλεται στη διάλυση των ασβεστολιθικών ή δολομιτικών πετρωμάτων από υπόγεια ή επιφανειακά τρεχούμενα νερά, τα οποία στη συνέχεια τροφοδοτούν τις λίμνες αυτές. Κλασσικές περιπτώσεις καρστικών λιμνών στη χώρα μας, που καλύπτεται σε μεγάλο ποσοστό από ασβεστόλιθους, είναι η λίμνη των Πρεσπών, της Βεγορίτιδας, της Καστοριάς, των Ιωαννίνων και η αποξηραθείσα λίμνη της Κωπαΐδας.

3.1.5. Παράκτιες λίμνες

Ο σχηματισμός τους οφείλεται κατά κύριο λόγο στην επίδραση θαλάσσιων ρευμάτων πολύ κοντά στις ακτές με αποτέλεσμα να παρασύρουν την άμμο, να την αποθέτουν στην εκβολή του ποταμού και να δημιουργούν το αποφρακτικό ανάχωμα. Όταν ο αποκλεισμός της θάλασσας είναι τέλειος σχηματίζεται παράκτια λίμνη, όπως η

λίμνη της Αγουλινίτσας, όταν όμως δεν είναι τέλειος και επιτρέπει την επικοινωνία της λίμνης με τη θάλασσα, τότε σχηματίζεται *λιμνοθάλασσα* όπως του Μεσολογγίου, του Πόρτο Λάγος της Ξάνθης κ.τ.λ.

4. Βασικές συνιστώσες του λιμναίου οικοσυστήματος

Η δομή κάθε λιμναίου οικοσυστήματος προσδιορίζεται από ορισμένες βασικές παραμέτρους οι οποίες είναι:

α) Η μορφομετρία ή γεωμορφολογία της λίμνης

β) Η λεκάνη απορροής της λίμνης

γ) Η κατανομή των φυσικών και χημικών παραμέτρων στη λίμνη

δ) Η κατανομή των βιολογικών παραμέτρων στη λίμνη

Στη συνέχεια αναλύονται οι πιο πάνω παράμετροι.

4.1. Μορφομετρία της λίμνης

Πολλά λιμνολογικά φαινόμενα, όπως η κατανομή των βιοκοινωνιών και η παραγωγικότητα σχετίζονται άμεσα με τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης. Ακόμη και το σχήμα μιας λίμνης μπορεί να καθορίσει την παραγωγικότητά της. Για παράδειγμα, οι ρηχές λίμνες με αναλογικά μεγαλύτερο ποσοστό νερού σε επαφή με το ίζημα, είναι πιο παραγωγικές από τις λίμνες που είναι βαθιές και που έχουν απότομες ακτές.

Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά μιας λίμνης μπορούν να περιγραφούν και να υπολογιστούν από ένα λεπτομερή βυθομετρικό χάρτη, εξαρτώνται από το σχήμα της και τη γεωλογική της προέλευση και είναι οι παράμετροι που αναφέρονται παρακάτω:

- 1. Η έκταση (A)**, είναι το εμβαδόν της επιφάνειας μιας λίμνης
- 2. Το μέγιστο βάθος (z_{\max}) και το μέσο βάθος (\bar{z}) της λίμνης**
- 3. Το μήκος (L) και το πλάτος της**
- 4. Ο όγκος (V) του νερού της**
- 5. Το μήκος της ακτογραμμής**

Η εκτίμηση των πιο πάνω παραμέτρων θεωρείται απαραίτητη για τη μελέτη κάθε λιμναίου οικοσυστήματος.

Το **μέγιστο βάθος** μετριέται με ειδικά όργανα, τα **βυθόμετρα** και βέβαια μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου εξαιτίας της εναπόθεσης ιζημάτων ή της διάβρωσης.

Σαν **μέγιστο μήκος (L)** μιας λίμνης ορίζεται η απόσταση των δυο πιο απομακρυσμένων σημείων της, ενώ **μέγιστο πλάτος** είναι η απόσταση των πιο απομακρυσμένων σημείων της ακτής (χωρίς να παρεμβάλλεται στεριά), που είναι όμως κάθετη προς τον άξονα του μέγιστου μήκους. Αντίστοιχα **μέσο πλάτος (B)** είναι ο λόγος της επιφάνειας (**A**) της λίμνης προς το μέγιστο μήκος της, δηλαδή: $B = A/L$.

Ο **όγκος (V)** του νερού μιας λίμνης μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση των ισοβαθών καμπυλών, αθροίζοντας τον όγκο που περιέχεται μεταξύ των διάφορων επιφανειών (στρωμάτων) όλων των ισοβαθών. Δηλαδή:

$$\text{Όγκος λίμνης} = \sum \text{όγκων στρωμάτων}$$

$$\text{όπου όγκος στρώματος} = h / 3 \cdot (a_1 + a_2 + \sqrt{a_1 a_2})$$

και **h** = ύψος στρώματος

a₁ = έκταση επιφανειακού στρώματος

a₂ = έκταση στρώματος πυθμένα

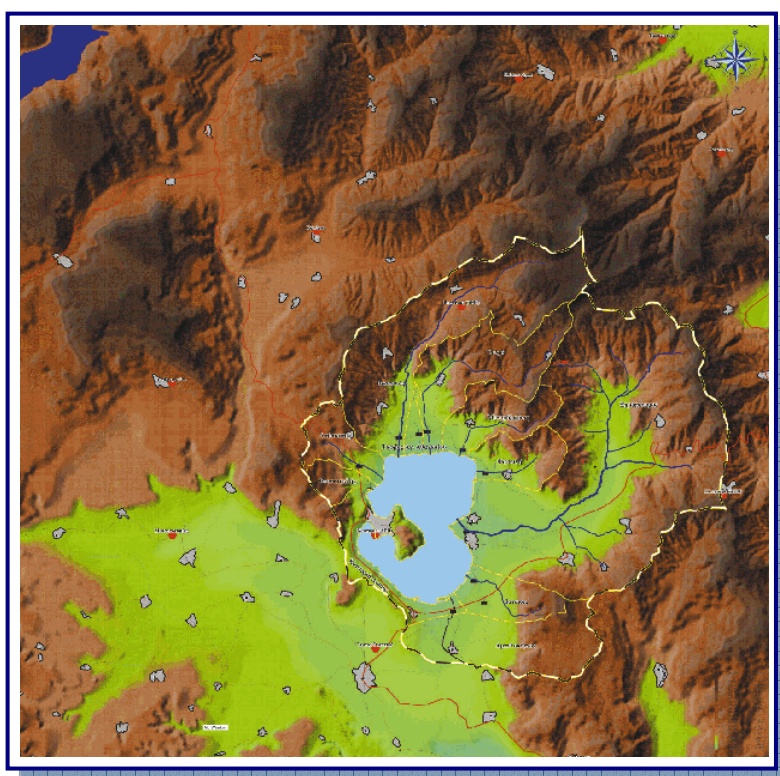
Το **μήκος**, η **επιφάνεια** και ο **όγκος** μιας λίμνης υπολογίζονται με τους υδρογραφικούς χάρτες.

Το **μέσο βάθος (\bar{z})** μιας λίμνης υπολογίζεται από το λόγο του όγκου του νερού προς την επιφάνειά του, δηλαδή:

$$\bar{z} = \frac{\text{όγκος νερού (V) σε m}^3}{\text{επιφάνεια (A) σε m}^2}$$

4.2. Λεκάνη απορροής της λίμνης

Ονομάζεται η χερσαία έκταση που περιβάλλει τη λίμνη και από την οποία συγκεντρώνεται όλη η επιφανειακή απορροή που υδροδοτεί τη λίμνη (εικ. 2). Οριοθετείται συνήθως από την κορυφογραμμή (υδροκρίτη) της περιβάλλουσας ορεινής έκτασης και περιέχει τα εδάφη που η κλίση τους επιτρέπει το νερό των κατακρημνισμάτων να διοχετεύεται στη λίμνη μέσω ποταμών, χειμάρρων ή ρεμάτων. Η λίμνη αποτελεί αντανάκλαση της λεκάνης απορροής της.



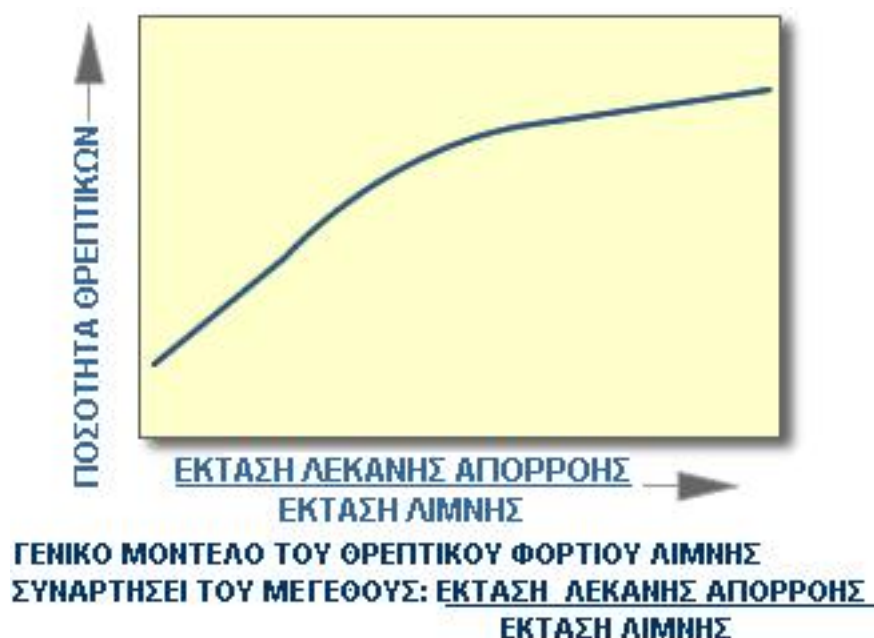
Εικόνα 2. Όρια λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς

Η γεωλογική σύσταση, το μέγεθος, η κλίση του εδάφους, το κλίμα και η χρήση γης στη λεκάνη απορροής επηρεάζουν το είδος και την ποσότητα των χημικών στοιχείων που αιωρούνται ή είναι διαλυμένα στο νερό αλλά και που υπάρχουν στο ίζημα της λίμνης.

Για παράδειγμα, οι γρανιτικές λεκάνες σε περιοχές του Καναδά, της Σκανδιναβίας και της Σκοτίας είναι άγονες, γεγονός που έχει άμεση επίδραση και στις γειτονικές λίμνες και το οποίο γνωρίζουν καλά οι αγρότες των περιοχών αυτών.

Αντίθετα, λίμνες αρκετά νότια, σε περιοχές με παγετώδεις προσχώσεις και ιζηματογενή πετρώματα, είναι παραγωγικές σε άλγη και σε ψάρια.

Εξάλλου, το μέγεθος της λεκάνης απορροής σε σχέση με την επιφάνεια της λίμνης είναι σημαντικός παράγοντας και καθορίζει την ποσότητα των φερτών υλών που καταλήγει στη λίμνη. Μεγάλες λεκάνες απορροής συνδέονται με αυξημένες ποσότητες φερτών υλών και αντίστροφα (εικ. 3).



Εικόνα 3. Στο διάγραμμα φαίνεται η αύξηση της ποσότητας των θρεπτικών με την αύξηση της έκτασης της λεκάνης απορροής σε σχέση με την έκταση της λίμνης

Οι υδρογεωλογικές και μετεωρολογικές παράμετροι της λεκάνης απορροής είναι πολύ σημαντικές για κάθε υδάτινο οικοσύστημα, άρα και για κάθε λίμνη.

Έτσι, λεκάνες απορροής με πετρώματα σχιστολιθικά, ψαμμιτικά, κροκαλοπαγή, που θεωρούνται αδιαπέραστοι σχηματισμοί, έχουν μεγάλο συντελεστή επιφανειακής

απορροής (>35% των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων) και μικρή κατείδυση (3-7% της ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης). Αντίθετα τα ανθρακικά πετρώματα με διαρρήξεις και «κάρστ» παρουσιάζουν μικρή επιφανειακή απορροή (0-7%), ενώ η κατείδυσή του νερού είναι μεγάλη (>50% των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων). Προσχώσεις, τεταρτογενείς και σχηματισμοί νεότερης ηλικίας έχουν ποικίλο συντελεστή επιφανειακής απορροής.

Η **χρήση της γης** στη λεκάνη απορροής μιας λίμνης έχει επίσης σημαντική επίδραση στην ποιότητα και στην ποσότητα του νερού που εισέρχεται σε αυτή. Έτσι όπως φαίνεται στην εικόνα 4 ο ρυθμός εκφόρτισης στη λίμνη μιας υδάτινης μάζας διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη χρήση της γης στη λεκάνη απορροής της. Σε αστικές περιοχές, η μεγάλη συμμετοχή αδιάβροχων επιφανειών, π.χ. δρόμοι, σπία κ.ά. στη διαμόρφωση του εδάφους, έχει σαν συνέπεια τη μικρή απορρόφηση των υδάτινων κατακρημνισμάτων και τη δημιουργία αυξημένης επιφανειακής απορροής, που με τη σειρά της προκαλεί σημαντική διάβρωση στις όχθες των ρεμάτων και μεταφορά σημαντικής ποσότητας υλών στη λίμνη.



Εικόνα 4. Οι επιφανειακές απορροές των αστικών περιοχών είναι πολύ μεγαλύτερες σε όγκο από τις αντίστοιχες των δασικών και εμφανίζονται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, σε αντίθεση με τις δασικές εκτάσεις όπου η απορροή συμβαίνει με βραδύτερους ρυθμούς.

Επιπρόσθετα η ροή του νερού πάνω από δρόμους, στέγες και πάρκινγκ, συγκεντρώνει ρυπαντές και θρεπτικά συστατικά σε διαλυμένη και σωματιδιακή μορφή. Το περιεχόμενο σε φώσφορο του υδάτινου φορτίου που καταλήγει στη λίμνη είναι ιδιαίτερα σημαντικό, γιατί ως γνωστό ελέγχει σε μεγάλο βαθμό τη βιομάζα των αλγών και τη συνολικότερη παραγωγικότητα της λίμνης.

Στον παρακάτω πίνακα (πίν. 1) παρατίθενται ενδεικτικές τιμές για τις ποσότητες φωσφόρου που καταλήγουν σε μια λίμνη από 10 εκτάρια (100 στρέμματα) γης της λεκάνης απορροής της ανάλογα με τη χρήση τους.

Δασική έκταση	4,5 Kgr φωσφόρου
Αγροτική / καλλιεργήσιμη έκταση	30 Kgr φωσφόρου
Αστική έκταση	50 Kgr φωσφόρου

Πίνακας 1. Η χρήση της γης στη λεκάνη απορροής μιας λίμνης καθορίζει, σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες (σύσταση, κλίση εδάφους, κλιματικές συνθήκες στην περιοχή κ.ά.), την ετήσια ποσότητα φωσφόρου που καταλήγει στη λίμνη

Συμπερασματικά, ο ρυθμός και ο όγκος των εισροών σε μια λίμνη επηρεάζει και την ποιότητα του νερού της.

Το **κλίμα** επίσης επηρεάζει την ιζηματογένεση και τη μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων. Στα εύκρατα κλίματα οι βροχοπτώσεις διατηρούν μια κανονική περίπου κατανομή στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους και οι καταρρακτώδεις βροχές είναι σπάνιες. Αυτό έχει σαν συνέπεια να δημιουργείται μια μόνιμη φυτική κάλυψη, οπότε η φυσική διάβρωση του εδάφους είναι περιορισμένη. Αντίθετα, σε ημιάνυδρα κλίματα παρατηρούνται λίγες και έντονες καταιγίδες που σε συνδυασμό με την εποχιακή φυτοκάλυψη, έχουν σαν αποτέλεσμα η διάβρωση του εδάφους να είναι εκτεταμένη και οι φερτές ύλες να μεταφέρονται ευκολότερα από τη λεκάνη στη λίμνη.

Παράμετροι λοιπόν όπως:

- ο όγκος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στη συνολική λεκάνη της λίμνης
- ο όγκος των επιφανειακών απορροών της λεκάνης και των υπόγειων εισροών

- ο όγκος του νερού που εξατμίζεται από την επιφάνεια της λίμνης
 - ο όγκος του νερού που απάγεται από τη λίμνη
 - η σχετική υγρασία του εδάφους και η εξατμισοδιαπνοή της εδαφικής λεκάνης
- είναι καθοριστικές για το υδρολογικό καθεστώς της λίμνης, όπως καθοριστικός παράγοντας είναι και ο **υδραυλικός χρόνος παραμονής του νερού της λίμνης**.

Υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ξαναγεμίσει μια άδεια λίμνη, μέσω της φυσικής ροής των νερών που την τροφοδοτεί. Αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τη μελέτη της ρύπανσης, αλλά και για υπολογισμούς που αφορούν τη δυναμική των θρεπτικών στοιχείων. Σχετίζεται άμεσα με την παροχή των εισροών της λίμνης και τη μορφολογία της λεκάνης της και υπολογίζεται με τη διαίρεση του όγκου της με την παροχή των εισροών και εκροών.

Σε λίμνες με μεγάλη έκταση και βάθος, όπως η Tahoe στην Καλιφόρνια (έκταση 499Km² και μέσο βάθος 313m), ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι 700 χρόνια περίπου, οπότε τα εισερχόμενα θρεπτικά παραμένουν σχεδόν μόνιμα στη λίμνη, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις των λιμνών οι χρόνοι παραμονής κυμαίνονται από 1-10 χρόνια.

Τα θρεπτικά συστατικά, όπως ο **φώσφορος** ή ο **σίδηρος**, μεταφέρονται σαν άλατα ενσωματωμένα σε τμήματα εδάφους, οπότε μετακινούνται πιο εύκολα σε ημιάνυδρα κλίματα. Αντίθετα το **άζωτο**, το **πυρίτιο** ή το **θείο** είναι συνήθως παρόντα σε χημικές ενώσεις διαλυτές στο νερό, οπότε μεταφέρονται εξίσου εύκολα σε καθαρά ή λασπώδη νερά. Η κύρια πηγή του αζώτου σε όλες τις λεκάνες απορροής είναι οι **βροχές**, ενώ για το φώσφορο είναι η **διάβρωση του εδάφους**.

Επόμενο λοιπόν είναι ότι οι λίμνες σε ημιάνυδρα κλίματα τείνουν να έχουν αυξημένες συγκεντρώσεις φωσφορικών και χαμηλές συγκεντρώσεις νιτρικών, ενώ σε λίμνες των εύκρατων κλιμάτων συμβαίνει το αντίθετο.

Η επίδραση της λεκάνης απορροής στη λίμνη γίνεται εμφανής αν εκτιμηθεί η παράμετρος που εκφράζεται με το πηλίκο: έκταση της λεκάνης απορροής / έκταση της

λίμνης (εικ. 3). Λογικό είναι να αναμένει κανείς ότι όσο η τιμή του κλάσματος αυτού μεγαλώνει, τόσο υποβαθμίζεται η ποιότητα του νερού. Αυτό γιατί όσο αυξάνεται η έκταση λεκάνης απορροής σε σχέση με την έκταση της λίμνης, επιπλέον πηγές και όγκοι φερτών υλών καταλήγουν στη λίμνη. Βέβαια αυξάνεται και η πιθανότητα να συγκρατηθούν και να απορροφηθούν από το έδαφος τα ανόργανα στοιχεία πριν καταλήξουν στη λίμνη.

Αντίθετα όταν η λεκάνη απορροής είναι μικρή, οι λίμνες τροφοδοτούνται κυρίως από τον υπόγειο υδροφορέα και προφανώς είναι πιο φτωχές σε θρεπτικά συστατικά, έχουν καλύτερη ποιότητα νερού, είναι όμως πιο ευαίσθητες στην οξίνιση των νερών τους καθώς η εξουδετέρωση της οξύτητας των κατακρημνισμάτων είναι ανάλογη με το μέγεθος της λεκάνης απορροής τους.

Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της Crater Lake του Όρεγκον που είναι μια από τις πλέον ολιγοτροφικές λίμνες του κόσμου, αφού η λεκάνη απορροής της περιλαμβάνει μόνο τον κρατήρα του ηφαιστείου.

Το **κλίμα** ευθύνεται επίσης και για το μέγεθος της επίδρασης της όξινης βροχής στη λίμνη. Έτσι οι λίμνες που βρίσκονται σε κρύα κλίματα είναι πιθανό να έχουν πιο όξινα νερά - **χαμηλό pH** -, επειδή το λιωμένο χιόνι έχει χαμηλότερο pH σε σχέση με το νερό της βροχής.

Η μορφολογία της λεκάνης απορροής επηρεάζει την ποιότητα του νερού και με άλλο τρόπο. Έτσι, λίμνες που στερούνται **φυσικών υπερχειλίσεων** καταλήγουν να γίνουν αλμυρές λόγω της εξάτμισης του νερού. Τέτοιες λίμνες συναντούμε βόρεια των Ιμαλαΐων, στην ανατολική Αυστραλία, στον κεντρικό Καναδά, στη Νεβάδα, και στις δυτικές ερήμους της Β. Αμερικής.

Σημαντικότερη βέβαια όλων των προαναφερθέντων είναι η **επίδραση του ανθρώπου**, ο οποίος συνήθως χρησιμοποιεί εκτάσεις της λεκάνης απορροής με τέτοιο τρόπο ώστε τελικά να ρυπαίνει, είτε με αποθέσεις τοξικών χημικών είτε με τα λύματα κατοικημένων περιοχών είτε ακόμη με τα χημικά των καλλιεργειών τα οποία

καταλήγουν στις παρακείμενες λίμνες, δημιουργώντας τα γνωστά προβλήματα του ευτροφισμού και της ρύπανσης.

4.3 Κατανομή των φυσικών και χημικών παραμέτρων

4.3.1. Φυσικοχημικές ιδιότητες νερού

Το νερό είναι ανόργανη χημική ένωση και συναντάται σε όλα τα τμήματα της βιόσφαιρας (ατμόσφαιρα, υδρόσφαιρα και λιθόσφαιρα) και με τις τρεις μορφές της ύλης (στερεή, υγρή και αέρια) – εικ. 5. Το νερό είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο και σε θερμοκρασία δωματίου (20°C) υγρό.

πρόσληψη θερμότητας

αποβολή θερμότητας

τήξη
πήξη

εξάτμιση
συμπύκνωση

στερεό υγρό αέριο

- άχρωμο, άοσμο, άγευστο
- άριστος διαλύτης - προκαλεί διάβρωση
- μεγάλη θερμοχωρητικότητα - ρυθμιστής κλίματος
- μεγάλη θερμότητα εξαέρωσης
- μέγιστη πυκνότητα στους 4°C

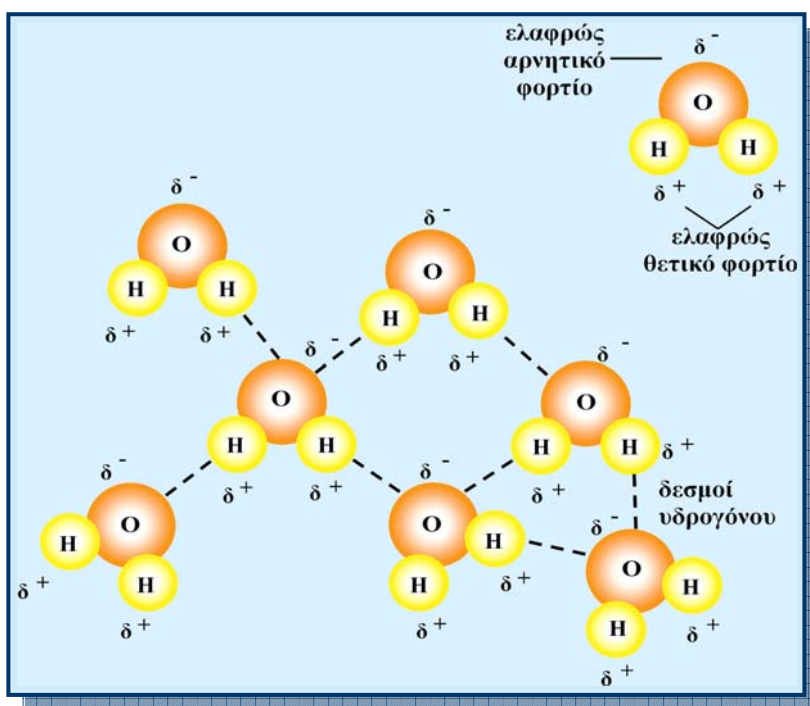
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$

1/2 O₂ + 2H

2 άτομα οξυγόνου + 2 άτομα υδρογόνου → νερό (H₂O)

Εικόνα 5. Ιδιότητες του νερού

Στην αρχαιότητα το νερό θεωρούνταν στοιχείο· αργότερα ανακαλύφθηκε ότι είναι η χημική ένωση υδρογόνου και οξυγόνου. Η σύνθεσή του προσδιορίστηκε από τους Λαβουαζιέ, Λαπλάς και Μενιέ, των οποίων οι εργασίες συμπληρώθηκαν από τους Καρλάιλ και Νίκολσον (ηλεκτρολυτική ανάλυση του νερού, 1800), τους Γκάνι Λυσάκ και Χούμπολτ (ευδιομετρική σύνθεση, 1805) και τις εργασίες του Ντυμά (σύνθεση κατά βάρος, 1843). Ο χημικός τύπος του νερού είναι H_2O . Σχηματίζεται δηλαδή από την ένωση δύο ατόμων υδρογόνου με ένα άτομο οξυγόνου. Το μόριο του νερού είναι ασύμμετρο και το ηλεκτρικό του φορτίο ασταθές (εικ. 6). Ανάμεσα στα άτομα οξυγόνου και υδρογόνου σχηματίζεται απλός ομοιοπολικός δεσμός (κάθε άτομο



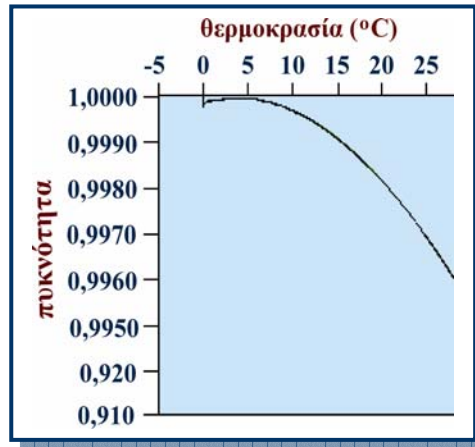
Εικόνα 6. Οι δεσμοί υδρογόνου μεταξύ των μορίων του νερού ευθύνονται για πολλές μοναδικές ιδιότητές του.

προσφέρει ένα ηλεκτρόνιο, σχηματίζοντας ένα κοινό ζεύγος ηλεκτρονίων). Το άτομο του οξυγόνου έλκει περισσότερο το ζεύγος ηλεκτρονίων από το άτομο υδρογόνου και έτσι ο δεσμός H-O και κατ' επέκταση τα μόρια του νερού σχηματίζουν ηλεκτρικά δίπολα.

Η έλξη που αναπτύσσεται ανάμεσα στα δίπολα μόρια του νερού (**δεσμός υδρογόνου**) είναι η αιτία που το νερό είναι υγρό σε θερμοκρασία δωματίου (20°C) σε αντίθεση με άλλες χημικές ενώσεις, όπως το υδρόθειο, που στην ίδια θερμοκρασία είναι αέριες. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί εξασθένηση των παραπάνω δεσμών. Το σημείο τήξης (0°C) και ζέσεως (100°C) σε σχέση με τα υδρογονίδια (H₂S, H₂Se, H₂Te) άλλων στοιχείων είναι πολύ αυξημένα. Αν δεν υπήρχαν οι δεσμοί υδρογόνου το σημείο ζέσεως του νερού θα ήταν μικρότερο από -100°C. Λόγω πολικότητας τα μόρια του νερού μπορούν εύκολα να εισχωρούν ανάμεσα σε άτομα άλλων μορίων, γεγονός που καθιστά το νερό **«παγκόσμιο διαλύτη»**. Το νερό διαλύει μικρές τουλάχιστον ποσότητες όλων σχεδόν των ουσιών.

Η μεγάλη διαλυτική ικανότητα του νερού συνδέεται με τη διαβρωτική του ιδιότητα – το νερό διαβρώνει το υπόστρωμα ροής του και εμπλουτίζεται με φερτά υλικά. Ωστόσο **το φαινόμενο της διάβρωσης** δεν οφείλεται αποκλειστικά στη διαλυτική ικανότητα του νερού. Τόσο το νερό της βροχής, όσο και τα επιφανειακά και υπόγεια νερά δεν είναι ποτέ απόλυτα καθαρά κατά τη διαδρομή τους στον υδρολογικό κύκλο εμπλουτίζονται με αέριους βιομηχανικούς και αστικούς ρύπους (διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου κ.ά.), οργανικές ενώσεις από εκτάσεις της ξηράς, ενώσεις αζώτου και θείου από τις βιομηχανικές δραστηριότητες και τις γεωργικές εφαρμογές, άλατα όπως το όξινο ανθρακικό ασβέστιο, το χλωριούχο μαγνήσιο, το θειικό ασβέστιο κ.ά. Οι παραπάνω προσμίξεις εντείνουν τη διαβρωτική ικανότητα του νερού.

Μία ακόμα ιδιαίτερα σημαντική ιδιότητα του νερού είναι η **μεγιστοποίηση της πυκνότητάς του στους 4°C** (εικ. 7). Μείωση της θερμοκρασίας του νερού μέχρι τους 4°C προκαλεί αύξηση της πυκνότητας και του βάρους του. Τα βαρύτερα αυτά στρώματα νερού βυθίζονται, προκαλώντας ανάμιξη των επιφανειακών στρωμάτων με τα βαθύτερα και εξισώνοντας έτσι τη θερμοκρασία στο σύνολο του όγκου μιας υδάτινης λεκάνης. Κάτω από τους 4°C η πυκνότητα του νερού μειώνεται (η πυκνότητα του νερού στην υγρή του μορφή είναι 0,99987g/cm³, ενώ στη στερεή μορφή - πάγος - είναι 0,9164g/cm³) με αποτέλεσμα μεγάλοι όγκοι νερού να μην παγώνουν ολοσχερώς, όταν η θερμοκρασία είναι ίση με μηδέν ή μικρότερη, αλλά μόνο επιφανειακά. Τα μόρια του πάγου έχουν κρυσταλλική διάταξη, με αποτέλεσμα ο πάγος να είναι λιγότερο



Εικόνα 7. Το νερό έχει μέγιστη πυκνότητα στους 4°C

πυκνός από το νερό κι έτσι να επιπλέει. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει τη ζωή σε λίμνες, θάλασσες και ποτάμια που παγώνουν κατά τη διάρκεια των ψυχρών εποχών του έτους. Αν το νερό δεν παρουσίαζε την παραπάνω ιδιαιτερότητα, τα παγωμένα στρώματα της επιφάνειας θα βυθίζονταν και τα νέα επιφανειακά στρώματα θα πάγωναν και θα βυθίζονταν επίσης. Σύντομα όλη η υδάτινη έκταση θα αποτελούσε ένα συμπαγές στρώμα πάγου όπου καμιά μορφή ζωής δεν θα μπορούσε να επιβιώσει.

Το νερό χαρακτηρίζεται επίσης από **μεγάλη θερμοχωρητικότητα**, οι μεταβολές δηλαδή στη θερμοκρασία του συντελούνται με σχετικά αργούς ρυθμούς. Η παραπάνω ιδιότητα του νερού οφείλεται στην υψηλή ειδική του θερμότητα (για να ανέβει η θερμοκρασία 1g νερού κατά 1°C απαιτείται 1cal). Συνεπώς στο νερό αποθηκεύονται τεράστια ποσά θερμότητας σε σχέση με τα περισσότερα γνωστά υλικά χωρίς να αυξάνεται σημαντικά η θερμοκρασία του. Έτσι μπορούν να επιβιώνουν οι οργανισμοί των λιμνών στον ισημερινό, παρόλη την έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Βέβαια η θερμοκρασία του νερού μειώνεται και λόγω εξάτμισης. Ακριβώς γι' αυτό το λόγο οι θάλασσες, οι ωκεανοί, οι λίμνες και άλλες υδατοσυλλογές λειτουργούν σαν τεράστιοι θερμοσυσσωρευτές: απορροφούν δηλαδή θερμότητα, όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι υψηλή και αποδίδουν θερμότητα στην ατμόσφαιρα, όταν ο καιρός είναι ψυχρός. Έτσι οι περιοχές που γειτνιάζουν με το νερό δεν έχουν απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές με αποτέλεσμα το κλίμα να είναι ηπιότερο και η μετάβαση από εποχή σε εποχή πιο ομαλή.

Το **ιξώδες** του νερού είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει το σχήμα των ψαριών και των λαρβών των εντόμων, που ζουν σε ποτάμια και λίμνες.

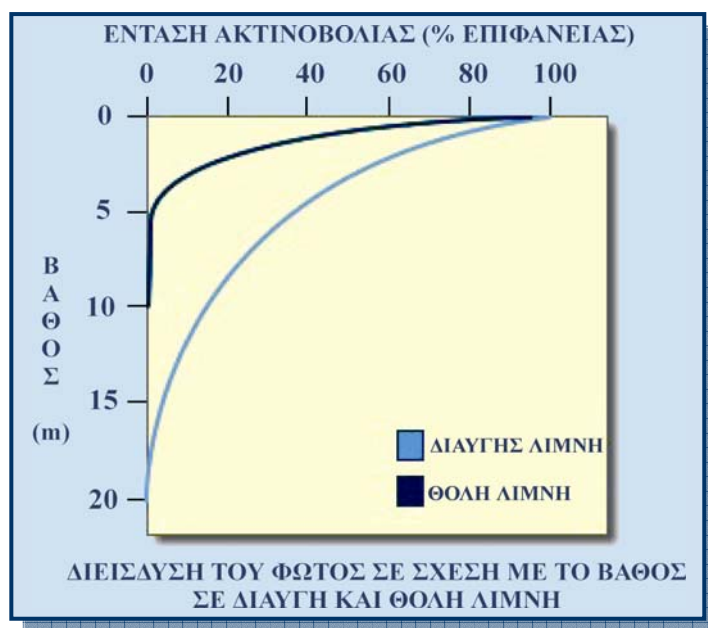
Τέλος, το νερό έχει **μεγάλη θερμότητα εξαέρωσης** (540cal/g) για την εξάτμιση μιας μικρής ποσότητας νερού απαιτείται μεγάλη ποσότητα θερμότητας. Το γεγονός αυτό έχει μεγάλη σημασία για τους ζωντανούς οργανισμούς αλλά και για τα οικοσυστήματα γενικότερα. Για παράδειγμα, οι οργανισμοί μπορούν να αποβάλλουν, μέσω εφίδρωσης, μεγάλες ποσότητες θερμότητας με περιορισμένες απώλειες νερού.

4.3.1 Φως

Για τα λιμναία και γενικότερα τα υδάτινα οικοσυστήματα, η ηλιακή ακτινοβολία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας αφού αποτελεί την κύρια πηγή θερμότητας για το νερό και καθορίζει τις μετεωρολογικές συνθήκες στη λεκάνη απορροής της λίμνης και τον κυματισμό του νερού. Παράλληλα, η ηλιακή ακτινοβολία συνδέεται με την πρωτογενή και τη δευτερογενή παραγωγή οργανικής ύλης μέσω της φωτοσύνθεσης, που μετατρέπει τη φωτεινή ενέργεια του ήλιου σε χημική. Η φωτοσύνθεση παράγει βιομάζα (οργανική ύλη) είτε μέσα στο υδάτινο οικοσύστημα (αυτόχθονη) είτε στη λεκάνη απορροής (αλλόχθονη) η οποία μεταφέρεται στο λιμναίο οικοσύστημα είτε ως διαλυμένη είτε ως σωματιδιακή οργανική ύλη εξασφαλίζοντας έτσι τροφή σε ένα μεγάλο αριθμό των οργανισμών της λίμνης. Η ένταση του φωτός που δέχεται στιγμιαία κάθε φυτοπλαγκτονικός οργανισμός εξαρτάται από τη θέση του μέσα στην υδάτινη στήλη και την κατανομή του φωτός στο νερό. Όσο πιο βαθιά μπορεί να διεισδύσει το φως στο νερό τόσο πιο βαθιά μπορούν να αναπτυχθούν φωτοσυνθετικές δραστηριότητες. Οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί μιας λίμνης περιλαμβάνουν το *φυτοπλαγκτόν*, που αιωρείται στο νερό, το *περίφυτον* που προσκολλάται σε επιφάνειες και τα αγγειώδη υδρόβια φυτά, τα *μακρόφυτα*. Οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί που αναφέραμε συνθέτουν - με τη βοήθεια των φωτονίων, μορίων νερού και διοξειδίου του άνθρακα - υδατάνθρακες ($6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$) μετατρέποντας τη φωτεινή ενέργεια σε χημική, η οποία μέσω τροφικών πλεγμάτων μεταφέρεται στους ανώτερους καταναλωτές.

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια μιας λίμνης εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής, την εποχή και την ώρα της ημέρας αλλά και τις ατμοσφαιρικές και μετεωρολογικές συνθήκες.

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισχωρεί στη λίμνη ελαττώνεται με την αύξηση του βάθους της (εικ. 8). Το ίδιο το νερό, οι διαλυμένες σε αυτό ουσίες και τα αιωρούμενα σωματίδια διαθλούν και απορροφούν το φως και μειώνουν τη διαπερατότητά του. Επίσης, καθώς διαδίδεται η ηλιακή ακτινοβολία στο νερό, η έντασή της μειώνεται κι εξαιτίας της μετατροπής της σε θερμότητα. Σε βάθος ενός μέτρου το 53% της συνολικής φωτεινής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα (Rutner, 1963). Αναφέρεται ότι μέσα στο νερό η φωτεινή ενέργεια που χρειάζεται για τη φωτοσύνθεση θα πρέπει ν' αντιστοιχεί στο 1% του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια του νερού.



Εικόνα 8. Το βάθος μέχρι το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί η φωτοσύνθεση (ευφωτική ζώνη) σε μια διαυγή λίμνη μπορεί να φθάσει τα 20 μέτρα, ενώ σε θολή (εύτροφη) λίμνη συνήθως δεν ξεπερνά τα 4-5 μέτρα.

Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις όπου η φωτοσύνθεση είναι δυνατή και όταν η ένταση του φωτός είναι κάτω από το 1% αυτής που προσπίπτει στην επιφάνεια του νερού. Η στήλη του νερού μέσα στην οποία η φωτεινή ενέργεια είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατή η φωτοσύνθεση καλείται **ευφωτική ή φωτική ζώνη**. Όλη η παράλια ζώνη

και το ανώτερο τμήμα της πελαγικής ζώνης μιας λίμνης ανήκουν στην ευφωτική ζώνη. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η ευφωτική ζώνη αποτελεί ένα μέσο παραγωγής οξυγόνου, ενώ τη νύχτα η φωτοσύνθεση σταματά και λόγω της αναπνοής των ζωικών και φυτικών οργανισμών το διαλυμένο οξυγόνο μειώνεται.

Η **αφωτική ζώνη** εκτείνεται κάτω από την ευφωτική έως το βυθό και αποτελεί περιοχή όπου δεν παράγεται οξυγόνο. Το όριο μεταξύ φωτικής και αφωτικής ζώνης μεταβάλλεται καθημερινά και εποχιακά, ανάλογα με την μεταβολή της ηλιακής έντασης και της διαφάνειας του νερού.

Τελικά, αφού η φωτοσύνθεση σε μια λίμνη εξαρτάται από το φως, οτιδήποτε περιορίζει την διεισδυτικότητά του θα επηρεάζει σημαντικά τις βιολογικές και χημικές διαδικασίες που συντελούνται στο νερό. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες στη λεκάνη απορροής της λίμνης προκαλούν σημαντικές αλλαγές στη διαφάνεια του νερού. Ενδείξεις για την κατάσταση που επικρατεί στη λίμνη μπορούμε να έχουμε μετρώντας τη θολερότητα ή τη διαφάνεια του νερού.

ΘΟΛΕΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ

Η θολερότητα του νερού μιας λίμνης οφείλεται στην παρουσία αιωρούμενων στερεών και μικροοργανισμών αλλά και στο χρωματισμό του νερού, επειδή λόγω διάθλασης ή απορρόφησης των φωτεινών ακτινών μειώνεται η μετάδοσή τους. Έτσι η διαφάνεια του νερού αποτελεί ένδειξη για το πόσο βαθιά μπορεί να διεισδύσει το φως και είναι αντιστρόφως ανάλογη της συνολικής απορρόφησης του φωτός από το νερό, της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών και των αιωρούμενων σωματιδίων. Π.χ. η σύνθεση και η αφθονία του φυτοπλαγκτού επηρεάζει τη διείσδυση του φωτός: ακόμη και μικρές μεταβολές στην αφθονία και στο μέγεθος των πληθυσμών του πλαγκτού μπορούν να επιδράσουν και να αλλάξουν το βάθος της εύφωτης ζώνης. Η διαφάνεια των νερών μιας λίμνης μπορεί να μετρηθεί πολύ απλά με **το δίσκο του Secchi** (εικ. 9) που είναι ένα εύχρηστο εργαλείο για την εκτίμηση του ευτροφισμού. Ανάλογα με τη διαφάνεια έχουμε την παρακάτω κατάταξη των λιμνών (πίν. 2):

Τροφικό επίπεδο	Μέση ετήσια διαφάνεια	Ελάχιστη ετήσια διαφάνεια (σε m δίσκου Secchi)
Υπερολιγότροφη:	>12	>6
Ολιγότροφη:	>6	>3
Μεσότροφη:	6 - 3	3 – 1,5
Εύτροφη:	3 – 1,5	1,5 – 0,7
Υπερευτροφική:	<1,5	<0,7

Πίνακας 2. Κατάταξη λιμνών ανάλογα με τη μέση και την ελάχιστη ετήσια διαφάνεια τους

Πώς γίνεται η μέτρηση: Βυθίζουμε το δίσκο του Secchi, κρατώντας τον από το βαθμονομημένο σχοινάκι, κατακόρυφα μέσα στο νερό ωσότου δεν είναι ορατός. Τη στιγμή που δε διακρίνεται μετράμε το βάθος του νερού. Στη συνέχεια, ο δίσκος ανελκύεται και τη στιγμή που ξαναγίνεται ορατός μετράμε πάλι το βάθος. Ο μέσος όρος των δυο μετρήσεων υποδεικνύει τη διαφάνεια του νερού κι εκφράζεται με μέτρα και εκατοστά. Είναι καλό η μέτρηση να γίνεται σε σκιερό μέρος όταν ο κυματισμός είναι μειωμένος και υπάρχει καλός φωτισμός, με ουρανό καθαρό και κάθετη πρόσπτωση των ηλιακών ακτίνων. Επίσης, φροντίζουμε η απόσταση του παρατηρητή πάνω από το νερό να μη μεταβάλλεται.



Εικόνα 9. Δίσκος Secchi

Η διαφάνεια του νερού μεταβάλλεται σημαντικά εποχιακά και τοπικά, επειδή μεταβάλλονται οι συνθήκες του περιβάλλοντος. Δεν πρέπει όμως να παραβλέπουμε και τον υποκειμενικό παράγοντα της μέτρησης.

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης της διαφάνειας είναι ο χημικός και μετράει τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης α.

4.3.2 Χρώμα

Το χρώμα που βλέπουμε σε μια λίμνη καθορίζεται από το μήκος κύματος της μονοχρωματικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο νερό, από το είδος των σωματιδίων που αιωρούνται, από το χρώμα του ιζήματος, από την παρουσία ανόργανων ή οργανικών ουσιών, από το είδος των πλαγκτονικών οργανισμών και τη βιολογική τους δραστηριότητα, ακόμη και από το γεωλογικό υπόστρωμα της περιοχής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την απορρόφηση του φωτός στο νερό και του προσδίδουν συγκεκριμένο χρώμα που μπορεί να είναι από πράσινο – γαλάζιο έως σκούρο καφετί. Η απορρόφηση του φωτός υπολογίζεται με το συντελεστή απορρόφησης (ϵ_l), ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε λίμνη αλλά και για κάθε μήκος κύματος του φωτός. Έτσι οι διαφανείς λίμνες έχουν μικρό συντελεστή απορρόφησης, ενώ οι εύτροφες και θολές μεγάλο.

Η διέλευση μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας στο νερό (οπτικό μέσο) εξαρτάται από το μήκος κύματος της και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκτροπής. Η ακτινοβολία του ορατού φωτός στην περιοχή του πράσινου-μπλε είναι αυτή που διεισδύει βαθύτερα στη λίμνη, ενώ του κόκκινου-βιολετί απορροφάται ταχύτερα. Το μπλε φως είναι αυτό που υφίσταται εντονότερο διασκεδασμό (διάχυση και ανάκλαση) από τα μόρια του νερού με αποτέλεσμα να δίνει το χαρακτηριστικό μπλε χρώμα στις διαφανείς ορεινές λίμνες. Παράλληλα τα αιωρούμενα σωματίδια και οι διαλυμένες ουσίες αντανακλούν μια ποικιλία χρωμάτων, προσδίδοντας έτσι τις ιδιαίτερες αποχρώσεις της λίμνης. Σύμφωνα με το Forel ο σημαντικότερος παράγοντας προσδιορισμού του χρώματος είναι η παρουσία διαλυμένου οργανικού υλικού. Λίμνες με έντονη βιολογική δραστηριότητα έχουν χρώμα πράσινο, ενώ λίμνες με ασθενέστερη βιολογική δραστηριότητα έχουν χρώμα πράσινο – γαλάζιο. Ο χρωματισμός πάλι αποτελεί ένδειξη για την παρουσία συγκεκριμένων χημικών ουσιών π.χ η παρουσία θείου (S) προσδίδει στο νερό κιτρινωπό χρώμα ενώ η παρουσία ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) πράσινο χρώμα.

Το χρώμα του νερού της λίμνης μπορεί ν' αλλάζει εποχιακά, όταν εξαιτίας της διάχυσης του ιζήματος κατά τη φθινοπωρινή και εαρινή αναστροφή αναπτύσσεται

υπερβολικά το φυτοπλαγκτόν εντείνοντας το πράσινο χρώμα ή με τη μεταφορά φερτών υλών από τη λεκάνη απορροής που προσδίδουν στη λίμνη φαιό χρώμα.

4.3.3 Οσμή

Η οσμή όπως και το χρώμα είναι ένα οργανοληπτικό χαρακτηριστικό και γι' αυτό υποκειμενικό, που μπορεί ωστόσο να αποτελέσει κριτήριο για την ταξινόμηση των νερών σε κατηγορίες χρήσεων (πόση, αναψυχή, διαβίωση ψαριών κ.λπ.). Η οσμή των νερών στη λίμνη μπορεί να οφείλεται σε φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια. Σε μία ευτροφική λίμνη, όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες, τα προϊόντα της διάσπασης της οργανικής ύλης είναι το υδρόθειο, η αμμωνία, το μεθάνιο, αέρια δύσσομα, τοξικά και εκρηκτικά. Επίσης η χημική κατεργασία λυμάτων και αποβλήτων με χλώριο δίνει στο νερό χαρακτηριστική οσμή χλωρίου ή χλωροφαινόλης. Βέβαια η ένταση των οσμών δεν εξαρτάται πάντα από τη συγκέντρωση των ουσιών που την προκαλούν. Αν και το όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της οσμής είναι η ανθρώπινη μύτη, υπάρχουν συγκεκριμένες τεχνικές με τις οποίες προσδιορίζεται ποιοτικά και ποσοτικά. Η ποιοτική κατάταξη γίνεται με βάση κατηγορίες αντιπροσωπευτικών ουσιών με χαρακτηριστική οσμή (πίν. 3) π.χ. τα βιομηχανικά απόβλητα, το χλώριο, τα απόβλητα διυλιστηρίων, το υδρόθειο, η αμμωνία αντιστοιχίζονται στην κατηγορία της οσμής

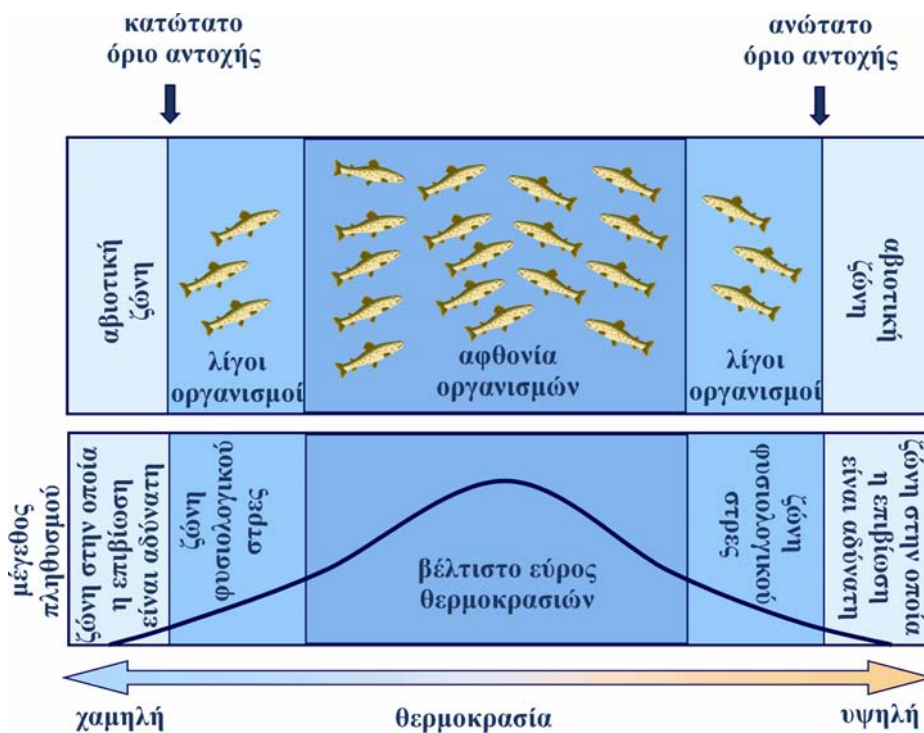
<i>ΕΙΔΟΣ ΟΣΜΗΣ</i>	<i>ΟΣΜΗ ΟΜΟΙΑ ΜΕ</i>
οσμή αρώματος	καμφορά, γαρύφαλλα, λεβάντα, λεμόνι
οσμή φαρμάκων	βιομηχανικά απόβλητα, χλώριο, απόβλητα διυλιστηρίων, υδρόθειο, αμμωνία
οσμή μούχλας	φυτά σε αποσύνθεση
οσμή χώματος	λάσπη, βρεγμένο χώμα

Πίνακας 3. Ποιοτική κατάταξη των οσμών

φαρμάκων, φυτά σε αποσύνθεση στην κατηγορία της οσμής μούχλας κ.λπ. Ποσοτικά η οσμή προσδιορίζεται με τη μέθοδο των διαδοχικών αραιώσεων. Το δείγμα αραιώνεται σταδιακά και κρατάμε αυτό στο οποίο η οσμή είναι ελάχιστα αντιληπτή. Στο δείγμα αυτό η αραιώση χαρακτηρίζεται ως «κατώφλι οσμής» .

4.3.4 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι καθοριστικός παράγοντας στη λειτουργία του οικοσυστήματος της λίμνης επειδή επηρεάζει τη διαλυτότητα του οξυγόνου και άλλων συστατικών, το μεταβολισμό των υδρόβιων οργανισμών αλλά και τη διαδικασία διάσπασης των οργανικών ουσιών που υπάρχουν. Οι τιμές των βέλτιστων θερμοκρασιών για τους υδρόβιους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς ποικίλουν (εικ. 10). Οι υδρόβιοι πληθυσμοί μπορούν να διακριθούν γενικά σε θερμοανθεκτικούς με



Εικόνα 10. Η θερμοκρασία επηρεάζει τους υδρόβιους πληθυσμούς.

αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και σε ψυχροανθεκτικούς με αντοχή στις χαμηλές θερμοκρασίες. Όσον αφορά το εύρος των θερμοκρασιών μέσα στο οποίο είναι δυνατή η επιβίωση των υδρόβιων πληθυσμών, οι διάφοροι οργανισμοί μπορούν να διακριθούν σε

ευρύθερμους, με ανθεκτικότητα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και σε στενόθερμους, με ανθεκτικότητα σε μικρές μόνο μεταβολές της θερμοκρασίας. Όσο η θερμοκρασία του νερού πλησιάζει τη βέλτιστη τιμή για κάποιους υδρόβιους οργανισμούς, τόσο οι οργανισμοί αυτοί γίνονται περισσότερο δραστήριοι, καταναλώνουν περισσότερη τροφή και χρησιμοποιούν περισσότερο οξυγόνο.

Συνεπώς, η θερμοκρασία του νερού όχι μόνο διαμορφώνει τη σύνθεση των βιοκοινοτήτων, αλλά επιδρά και στη συμπεριφορά τους και στο μέγεθος κατ' επέκταση των πληθυσμών τους.

Ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής και το βάθος τους οι λίμνες διακρίνονται σε:

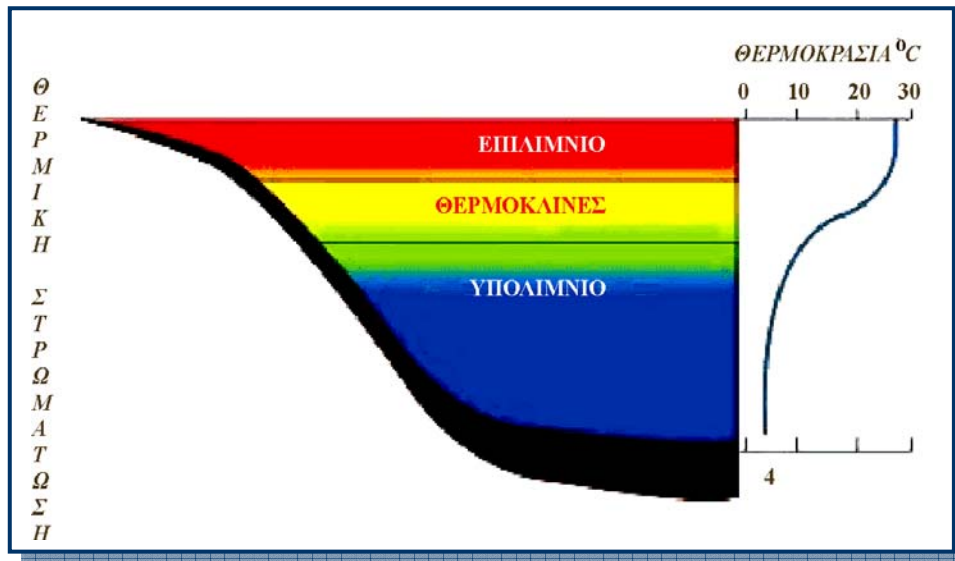
Τροπικές: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών μεγαλύτερη από 4°C

Εύκρατες: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών και κάτω από 4°C

Πολικές: θερμοκρασία των επιφανειακών νερών μικρότερη από 4°C όλη τη διάρκεια του έτους (στον πυθμένα όμως η θερμοκρασία σταθεροποιείται στους 4°C)

Στα εύκρατα γεωγραφικά πλάτη και σε βαθιές λίμνες, καθώς ο ήλιος θερμαίνει τη λίμνη, δημιουργεί ένα θερμό και λιγότερο πυκνό επιφανειακό στρώμα με σχετικά ομοιόμορφη θερμοκρασία και δική του κυκλοφορία, το **επιλίμνιο**. Πρόκειται για το επιφανειακό νερό (και αυτό που βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια) που δέχεται άμεσα τις επιδράσεις από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα (εποχιακές διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας) και τον άνεμο και περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Το νερό στο επιλίμνιο είναι συνήθως θερμότερο από αυτό των υποκείμενων στρωμάτων. Κατά τη χειμερινή ωστόσο περίοδο και όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας πλησιάζει το μηδέν, το επιλίμνιο μπορεί να είναι ψυχρότερο από τα υποκείμενα στρώματα, των οποίων η θερμοκρασία παραμένει σταθερή (4°C) – εικ. 11.

Το επιλίμνιο βρίσκεται πάνω σε ένα πυκνότερο, ψυχρότερο και «αδιατάραχτο» στρώμα, το **υπολίμνιο**. Πρόκειται για το κατώτερο, βαρύτερο και ψυχρότερο στο



Εικόνα 11. Θερμική στρωμάτωση βαθιάς λίμνης στη διάρκεια του καλοκαιριού

μεγαλύτερο διάστημα του έτους στρώμα της λίμνης που χαρακτηρίζεται συνήθως από χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Λόγω ανώμαλης διαστολής και μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού, κατά τους ψυχρούς μήνες του έτους (θερμοκρασία ατμόσφαιρας κοντά ή υπό του μηδενός), η θερμοκρασία στο υπολίμνιο παραμένει σταθερή (4°C) και υψηλότερη από αυτή του επιλίμνιου.

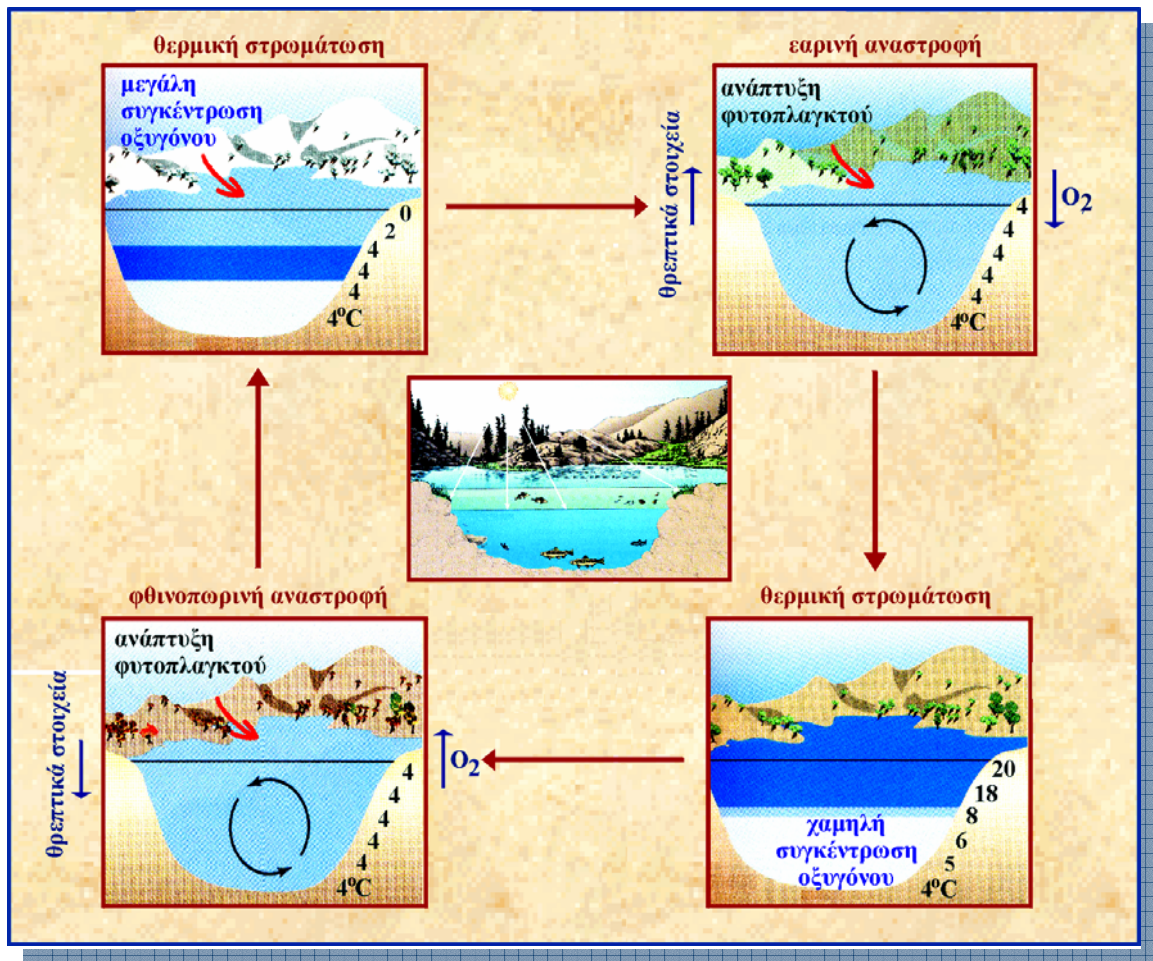
Στην ανώτερη περιοχή του υπολίμνιου, εκεί όπου διαχωρίζεται το επιλίμνιο από το υπολίμνιο και μέσα σε μια υδάτινη περιοχή ελάττωσης της θερμοκρασίας με το βάθος (**μεταλίμνιο**), υπάρχει ένα στρώμα έντονης ασυνέχειας, το **θερμοκλινές**. Πρόκειται για το λεπτό στρώμα νερού που χαρακτηρίζεται από σημαντική ελάττωση της θερμοκρασίας όσο αυξάνεται το βάθος. Αν και ο όρος θερμοκλινές συχνά χρησιμοποιείται ως συνώνυμο του μεταλιμνίου, στην πραγματικότητα αντιστοιχεί στην επιφάνεια με το μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος. Συνεπώς το θερμοκλινές είναι το σημείο της μεγαλύτερης μείωσης της θερμοκρασίας μέσα στο μεταλίμνιο και εκφράζεται μαθηματικά με τον παρακάτω τύπο:

$$\theta'' = d^2 \theta / d^2 z = 0, \text{ όπου } \theta = \text{θερμοκρασία και } z = \text{βάθος}$$

Η αλλαγή της πυκνότητας του νερού στο μεταλίμνιο λειτουργεί σαν ένας φυσικός φραγμός που εμποδίζει την ανάμιξη του νερού των ανώτερων και των

βαθύτερων στρωμάτων για αρκετούς μήνες κι εμποδίζει τη μεταφορά του διαλυμένου οξυγόνου και των θρεπτικών συστατικών από το επιλίμνιο στο υπολίμνιο.

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η θερμική στρωμάτωση δεν είναι έντονη, γιατί η ελάττωση της θερμοκρασίας στο επιλίμνιο επηρεάζει ελάχιστα το υπολίμνιο και γενικά θεωρείται ότι η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή (εικ. 12).



Εικόνα 12. Θερμική στρωμάτωση και αναστροφή

Το καλοκαίρι όμως τα νερά θερμαίνονται και σαν ελαφρύτερα παραμένουν στην επιφάνεια, οπότε δεν γίνεται ανάμιξη των επιφανειακών με τα βαθύτερα στρώματα, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται σαφώς το φαινόμενο της θερμικής στρωμάτωσης.

Το φθινόπωρο, λόγω της μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας και της αυξημένης νυχτερινής απώλειας θερμότητας, η θερμοκρασία του επιλίμνιου ελαττώνεται

πλησιάζοντας τη θερμοκρασία του υπολίμνιου οπότε είναι δυνατή η πλήρης ανάμιξη των νερών της λίμνης με τη βοήθεια του ανέμου. Συμβαίνει δηλαδή η **φθινοπωρινή αναστροφή**.

Την *άνοιξη*, εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας, τα παγωμένα επιφανειακά νερά θερμαίνονται και εξισώνονται θερμοκρασιακά με τα νερά του υπολίμνιου, οπότε είναι πάλι δυνατή η ανάμιξη των νερών. Συμβαίνει δηλαδή η **εαρινή αναστροφή**.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα υδάτινα οικοσυστήματα ένα μεγάλο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού. Ωστόσο συνεισφορά θερμότητας στο νερό, σε μικρότερα όμως μεγέθη, μπορεί να γίνει και από τον αέρα, το ίζημα και τις γειτονικές χερσαίες εκτάσεις. Το βάθος μέχρι το οποίο γίνεται η ανάμιξη του νερού εξαρτάται εν μέρει από την έκθεση της λίμνης στον άνεμο (πιο συγκεκριμένα από την απόσταση από την οποία φυσάει ο άνεμος στη λίμνη χωρίς σημαντική αλλαγή στη διεύθυνσή του), αλλά κυρίως από το μέγεθος της λίμνης.

Η ανάμιξη των νερών έχει σαν συνέπεια την κυκλοφορία των θρεπτικών στοιχείων που υπάρχουν στον πυθμένα της λίμνης (άλατα φωσφόρου, αζώτου και οργανικές ενώσεις) σε όλη τη μάζα του νερού, ενισχύοντας έτσι τον ευτροφισμό της λίμνης, αλλάζοντας το χρώμα της και επηρεάζοντας την οξυγόνωση των νερών του πυθμένα.

Επειδή όλες οι λίμνες αναμειγνύονται ως ένα βαθμό, ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατάταξη ή κατηγοριοποίησή τους βασίζεται στο πόσο πλήρης είναι η ανάμιξη των νερών σε κατακόρυφο άξονα κατά τη διάρκεια των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της μεγαλύτερης θολερότητας. Έτσι:

- 1) οι λίμνες που παγώνουν κατά τη διάρκεια του χειμώνα ονομάζονται **διμικτικές**, αφού αναμειγνύονται πλήρως δυο φορές το χρόνο - το φθινόπωρο πριν παγώσει η επιφάνεια και την άνοιξη αφού λιώσουν οι πάγοι. Οι περισσότερες εύκρατες λίμνες είναι διμικτικές (εικ. 13).



Εικόνα 13. Φάσεις της θερμικής στρωμάτωσης του νερού μιας διμικτικής λίμνης, από αρχές καλοκαιριού μέχρι αρχές φθινοπώρου και οι αναστροφές, φθινοπωρινή και εαρινή.

- 2) οι λίμνες που ποτέ δεν καλύπτονται πλήρως από πάγο και κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης αναμιγνύονται συνεχώς από τον αέρα, ονομάζονται **μονομικτικές**.
- 3) εάν η λίμνη είναι ρηχή και εκτεθειμένη σε ανέμους, η θερμική στρωμάτωση μπορεί να διαρκεί μία ή δυο εβδομάδες, στη συνέχεια να αναμιγνύεται πλήρως εξαιτίας καταιγίδων και το φαινόμενο αυτό να επαναλαμβάνεται τακτικά. Αυτός ο τύπος των λιμνών είναι μάλλον κοινός και ονομάζονται **πολυμικτικές**. (Η λίμνη της Καστοριάς, λόγω της παρουσίας απότομων διαβαθμίσεων στη στήλη του νερού, χωρίς όμως το σχηματισμό καθορισμένου υπολίμνιου - πιθανότατα λόγω του μικρού βάθους - μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολυμικτική.)
- 4) αν κατά τη διάρκεια του κύκλου της ετήσιας ανάμιξης, η λίμνη αναμιγνύεται από την επιφάνεια ως τον πυθμένα, η λίμνη ονομάζεται **ολομικτική**, ενώ όταν είναι τόσο βαθιά ώστε δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια για να διαταραχθεί η στρωμάτωση και να επέλθει πλήρης ανάμιξη, η λίμνη ονομάζεται **μερομικτική**. (Μερικές από τις βαθύτερες λίμνες είναι μερομικτικές, όπως η Τανγκανίκα στην Αφρική με μόνιμο θερμοκλινές στα 400 περίπου μέτρα).

Οι λίμνες με μόνιμη κάλυψη πάγου στις πολικές περιοχές ονομάζονται **αμικτικές**.

4.3.5 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα* του νερού αναφέρεται στην ικανότητά του να μεταφέρει – άγει ηλεκτρικά φορτία. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία ιόντων, από τη συγκέντρωσή τους, την ευκινησία, το σθένος και τη θερμοκρασία. Οι τιμές της αγωγιμότητας είναι ενδεικτικές για την ποιότητα του νερού της λίμνης (εικ. 14). Απόβλητα και ρύποι που εισέρχονται στη λίμνη τροποποιούν την αγωγιμότητα, ειδικότερα αν οι ρύποι περιλαμβάνουν ιόντα όπως ανθρακικά, θειικά, χλωρίου, μαγνησίου, νατρίου, καλίου και φωσφόρου. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται με το βάθος στη διάρκεια του καλοκαιριού σε λίμνες που εμφανίζουν στρωμάτωση, εξαιτίας της αναπνοής στο υπολίμνιο κατά την οποία παράγονται ανθρακικά ιόντα. Μετά το καλοκαίρι, όταν συμβεί αναστροφή στη λίμνη και το νερό της αναμιχθεί σε όλο τον όγκο του, η αγωγιμότητα των επιφανειακών νερών θα αυξηθεί συγκριτικά με το καλοκαίρι. Η αγωγιμότητα στο υπολίμνιο θα μειωθεί εξαιτίας της ανάμιξης του νερού του με το νερό της επιφάνειας. Στη διάρκεια του καλοκαιριού η αγωγιμότητα στο επιλίμνιο μπορεί να αυξηθεί εξαιτίας της εξάτμισης, αλλά μπορεί επίσης να επηρεαστεί και από την άμεση κατακρήμνιση νερού στη λίμνη ή από υπόγειες εισροές νερού στη λίμνη.



Εικόνα 14. Ηλεκτρικό αγωγιμόμετρο

Απότομη αύξηση της αγωγιμότητας του νερού της λίμνης αποτελεί ένδειξη ρύπανσης. Η αύξηση της αγωγιμότητας συνδέεται με την ενηλικίωση (παλαίωση) μιας υδάτινης μάζας εξαιτίας της αύξησης των θρεπτικών συστατικών της (ευτροφισμός). Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα στα γλυκά νερά τόσο μεγαλύτερη είναι η βιολογική παραγωγικότητα. Συνήθως στα φυσικά γλυκά νερά η ηλεκτρική αγωγιμότητα κυμαίνεται από 50 – 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (μονάδα αγωγιμότητας είναι το mho/cm , δηλαδή το αντίστροφο της αντίστασης (ohm) ή το Siemens/m).

Σε μερικά βιομηχανικά απόβλητα η τιμή υπερβαίνει τα 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Η λίμνη Τριγωνίδα ως ολιγο – μεσότροφη λίμνη εμφανίζει τιμές από 40 - 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$, η μικρή Πρέσπα από 60 - 520 $\mu\text{S}/\text{cm}$, η Κορώνεια από 1150 - 1660 $\mu\text{S}/\text{cm}$, η λίμνη Καστοριάς 300 - 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει θετικά την τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Αυτό συμβαίνει επειδή η αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει τη διάσταση των ηλεκτρολυτών (υδατικά διαλύματα οξέων – βάσεων – αλάτων). Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, ανεξάρτητα από την εποχή και το βάθος που γίνεται η μέτρηση, είναι καλό η τιμή της αγωγιμότητας ν' ανάγεται σε θερμοκρασία 25°C.

$$\text{EC (σε θερμοκρασία } 25^{\circ}\text{C)} = \text{EC}(t) / [1+0,019(t - 25)]$$

4.3.6 Διαλυμένο οξυγόνο

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό αποτελεί αναμφισβήτητο δείκτη της κατάστασης και της βιωσιμότητας του λιμναίου οικοσυστήματος. Η ανάπτυξη των περισσότερων μορφών ζωής (ζωικών, φυτικών, μυκήτων, πρωτίστων και βακτηρίων) προϋποθέτει την παρουσία οξυγόνου. Η καύση οργανικών ουσιών (κυρίως σακχάρων και λιπαρών οξέων), **κυτταρική αναπνοή**, εξασφαλίζει την απαραίτητη για την επιβίωση, ανάπτυξη και αναπαραγωγή ενέργεια στην πλειονότητα του έμβιου κόσμου. Η παρακάτω αντίδραση περιγράφει συνοπτικά την καύση της γλυκόζης, της πιο άμεσης πηγής ενέργειας:



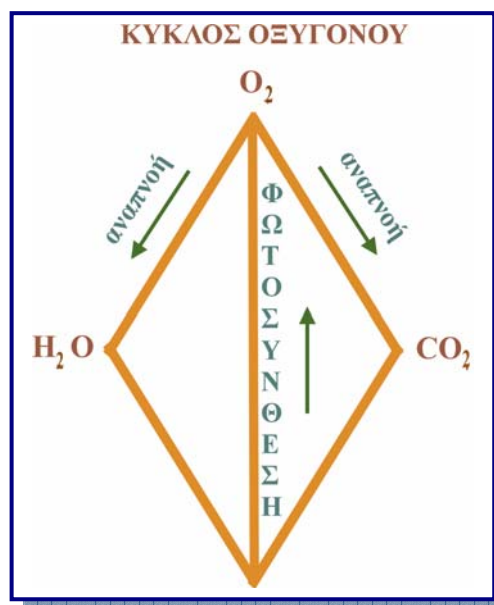
Ο εμπλουτισμός της λίμνης σε οξυγόνο γίνεται μέσω:

- διάχυσης του ατμοσφαιρικού οξυγόνου στο νερό της λίμνης
- φωτοσυνθετικής παραγωγής οξυγόνου από τα ανώτερα υδρόβια φυτά, το φυτοπλαγκτόν και το περίφυτον



Το μεγαλύτερο ποσοστό του οξυγόνου που υπάρχει στον αέρα και στο νερό σχηματίστηκε στο πέρασμα των γεωλογικών αιώνων από τους αυτότροφους οργανισμούς μέσω της φωτοσύνθεσης.

Όλοι οι αερόβιοι οργανισμοί χρησιμοποιούν το οξυγόνο στη διαδικασία της αναπνοής. Το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό που παράγονται αποτελούν τα υλικά της φωτοσύνθεσης η οποία γίνεται στους αυτότροφους οργανισμούς και προϊόν της είναι το οξυγόνο. Ο κύκλος αυτός συμβαίνει και στα χερσαία και στα υδάτινα οικοσυστήματα και γενικά υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στην παραγωγή και την κατανάλωση του οξυγόνου, όταν οι συνθήκες είναι κανονικές και δεν εμποδίζονται οι διαδικασίες της αναπνοής και της φωτοσύνθεσης (π.χ όταν μια λίμνη ρυπανθεί προκαλείται μείωση ή ακόμα και έλλειψη οξυγόνου) – εικ. 15.



Εικόνα 15. Ο κύκλος του οξυγόνου σε κανονικές συνθήκες διατηρείται σταθερός.

Όταν εξαιτίας φυσικών ή ανθρώπινων δραστηριοτήτων εισέλθει στη λίμνη άφθονο θρεπτικό υλικό προκαλείται υπερβολική ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού (άνθιση του νερού) με αποτέλεσμα το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο να μειώνεται σε περιοχές κοντά στην ακτή και στον πυθμένα όπου καταλήγουν μεγάλες ποσότητες νεκρής υδρόβιας βλάστησης και αποσυντίθενται από τα αερόβια βακτήρια, τα οποία χρησιμοποιούν το διαλυμένο οξυγόνο.

Η μείωση οξυγόνου που θα προκύψει μπορεί να οδηγήσει σε θάνατο μεγάλο μέρος της ιχθυοπανίδας κι αν συνεχιστεί η αύξηση των θρεπτικών συστατικών που εισρέουν στη λίμνη θα δημιουργηθούν ανοξικές συνθήκες. Αναερόβια βακτήρια θα κατακλύσουν την περιοχή τα οποία θα δημιουργήσουν αέρια προϊόντα αποσύνθεσης όπως το ιδιαίτερα δύσοσμο αλλά και τοξικό υδρόθειο και το εύφλεκτο μεθάνιο. Όταν υπάρχει έλλειψη οξυγόνου ο αριθμός των ειδών μειώνεται, αλλά αυξάνονται οι

ανθεκτικοί σε αυτές τις συνθήκες οργανισμοί. Η κατάσταση αυτή μπορεί να παρατηρηθεί σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και σε ένα συγκεκριμένο σημείο της λίμνης και δεν είναι οριστική. Όταν οι συνθήκες με την πάροδο του χρόνου ξαναγίνουν «κανονικές» οι αλλαγές εξαφανίζονται.

Σε γενικές γραμμές το οξυγόνο διαλύεται εύκολα στο νερό. Τα δίπολα του νερού μετατρέπουν τα μη πολικά μόρια του οξυγόνου σε ηλεκτρικά δίπολα. Η διάλυση του οξυγόνου στο νερό συντελείται με την ανάπτυξη ασθενών ελκτικών δυνάμεων ανάμεσα στα πολικά μόρια του νερού και στα σχηματιζόμενα πολικά μόρια του οξυγόνου.

Ωστόσο τόσο η διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό όσο και η κατανομή του σε μια υδάτινη μάζα εξαρτώνται από ποικιλία παραγόντων:

- **κλίμα – μετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή**
- **θερμοκρασία νερού και θερμική στρωμάτωση της υδάτινης στήλης**
- **ατμοσφαιρική πίεση (υψόμετρο)**
- **ρεύματα αέρα - κυματισμός**
- **αφθονία φωτοσυνθετικών οργανισμών**
- **αφθονία αερόβιων οργανισμών**
- **αφθονία οργανικού και ανόργανου υλικού (που παράγεται στο εσωτερικό της λίμνης ή που εισέρχεται στη λίμνη)**
- **περιεκτικότητα των εισερχόμενων στη λίμνη νερών σε οξυγόνο (υπολίμνιες πηγές, επιφανειακά ρεύματα που απορρέουν στη λίμνη)**
- **σχήμα και μέγεθος της λεκάνης απορροής**

Θερμοκρασία: Αύξηση της θερμοκρασίας του νερού συνεπάγεται μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (αρχή Le Chatelier). Καθώς η θερμοκρασία ενός διαλύματος αυξάνεται, το περιεχόμενο αέριο εκδιώχνεται μέχρι να συμβεί πλήρης εξαέρωση του διαλύτη στο σημείο βρασμού.

Κατά τη φθινοπωρινή και την εαρινή αναστροφή, η ανάμιξη του νερού διαμορφώνει ομοιόμορφες σχεδόν συνθήκες ως προς τη συγκέντρωση του οξυγόνου σε

όλο τον όγκο της υδάτινης μάζας. Ο συνδυασμός της θερμικής στρωμάτωσης και των βιολογικών δραστηριοτήτων επηρεάζει σημαντικά τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου.

Εαρινή στρωμάτωση: Στις εύκρατες περιοχές και στη διάρκεια του καλοκαιριού, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο **επιλίμνιο** παραμένει υψηλή εξαιτίας της έντονης φωτοσυνθετικής δραστηριότητας που αναπτύσσεται (το καλοκαίρι είναι ευνοϊκή περίοδος για την ανάπτυξη των φωτοσυνθετικών οργανισμών – η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη και επιταχύνει τους φωτοσυνθετικούς ρυθμούς) και της διάχυσής του από την ατμόσφαιρα.

Ωστόσο, στη διάρκεια της συγκεκριμένης περιόδου, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο **υπολίμνιο** εξαρτάται από την τροφική κατάσταση της λίμνης. Σε εύτροφες (περισσότερο παραγωγικές) λίμνες, το διαλυμένο οξυγόνο του υπολίμνιου μειώνεται καθώς το διαχεόμενο από την ατμόσφαιρα και το παραγόμενο από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς των ανώτερων στρωμάτων οξυγόνο δεν εισέρχεται στην υδάτινη αυτή ζώνη (λόγω θερμικής στρωμάτωσης). Παράλληλα οι αερόβιοι οργανισμοί του υπολίμνιου (καταναλωτές, αποικοδομητές) μειώνουν σταδιακά την ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου. Σε ακραίες περιπτώσεις τα βαθύτερα στρώματα της λίμνης γίνονται ανοξικά (απουσία οξυγόνου).

Σε ολιγότροφες λίμνες, η μικρή σχετικά βιομάζα του φυτοπλαγκτού επιτρέπει τη διείσδυση του φωτός σε μεγαλύτερα βάθη και συνεπώς φωτοσυνθετικοί οργανισμοί – παραγωγοί οξυγόνου - εμπλουτίζουν με οξυγόνο βαθύτερα στρώματα του νερού. Σε ολιγότροφες λίμνες και κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μπορεί να αυξάνεται με το βάθος, στις υδάτινες ζώνες κάτω από το θερμοκλινές, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες στο υπολίμνιο αυξάνουν τη διαλυτότητα του οξυγόνου.

Χειμερινή στρωμάτωση: Σε εύτροφες λίμνες και κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η κάλυψη των επιφανειακών νερών με πάγο προκαλεί στρωμάτωση της λίμνης ως προς τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα διάφορα βάθη.

Περιορισμένη κάλυψη της επιφάνειας με πάγο επιτρέπει τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας και την ανάπτυξη φωτοσυνθετικής δραστηριότητας. Στις παραπάνω συνθήκες η συγκέντρωση του οξυγόνου παρουσιάζεται αυξημένη στα στρώματα κοντά στην επιφάνεια και μειώνεται με το βάθος εξαιτίας της κατανάλωσης οξυγόνου από τους ετερότροφους οργανισμούς.

Σε περιπτώσεις όπου η λίμνη καλύπτεται από πάγο σε όλη την έκταση της επιφάνειάς της, η διάχυση οξυγόνου από την ατμόσφαιρα παρεμποδίζεται και το διαθέσιμο οξυγόνο στο εσωτερικό της σταδιακά μειώνεται. Η παραπάνω κατάσταση (ανεπάρκεια οξυγόνου) επιδεινώνεται σε περιπτώσεις όπου χιόνι καλύπτει τα επιφανειακά στρώματα του πάγου. Η έλλειψη φωτός καταστέλλει τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα διαμορφώνοντας πιθανά ανοξικές συνθήκες στο εσωτερικό της λίμνης.

Ατμοσφαιρική πίεση: Η διαλυτότητα του οξυγόνου μπορεί να περιγραφεί από το γενικό τύπο του νόμου του Henry που αναφέρεται στη διαλυτότητα των αερίων:

$$P = K * N$$

Όπου P= πίεση του αερίου

N=το μοριακό κλάσμα του αερίου

K= συντελεστής Henry που εξαρτάται από τη φύση του αερίου, το διαλύτη και τη θερμοκρασία

Σε σταθερή θερμοκρασία, η πίεση που ασκεί το ατμοσφαιρικό οξυγόνο στην επιφάνεια του νερού της λίμνης είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο νερό. Συνεπώς, αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης αυξάνει τη διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό και αντίστροφα.

Οι υδρόβιοι οργανισμοί χρειάζονται διαφορετικά ποσά διαλυμένου οξυγόνου. Όταν τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου βρίσκονται κάτω από **3ppm**, προκαλούν στρες στους περισσότερους υδρόβιους οργανισμούς, ενώ επίπεδα κάτω από **2** ή **1ppm** δεν ευνοούν τη ζωή των ψαριών. Επίπεδα **5** ή **6ppm** είναι συνήθως τα χαμηλότερα όρια για την ανάπτυξη και τις δραστηριότητες των υδρόβιων οργανισμών.

4.3.8. Βιοχημική αποδόμηση – B.O.D (Biochemical Oxygen Demand)

Το οργανικό φορτίο που βρίσκεται σ' ένα φυσικό υδάτινο οικοσύστημα, μαζί με ορισμένα ανόργανα συστατικά αποτελεί κατάλληλο θρεπτικό υλικό για μια ποικιλία μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί αυτοί για να εξασφαλίσουν την ενέργεια που τους χρειάζεται, αφομοιώνουν τις οργανικές αυτές ουσίες μ' έναν πολύπλοκο μηχανισμό. Ο μηχανισμός αυτός καταλήγει τελικά στη διάσπαση των οργανικών ουσιών και στη μετατροπή τους στην πιο σταθερή μορφή που είναι ανόργανα άλατα, ενώ ταυτόχρονα εκλύονται διάφορα αέρια. Η αποικοδόμηση είναι αερόβια όταν υπάρχει διαλυμένο στο νερό οξυγόνο και γίνεται από αερόβιους μικροοργανισμούς με τελικά προϊόντα NO_3^- , CO_2 , SO_3^- , SO_4^{--} , H_2O και αναερόβια όταν δεν υπάρχει διαλυμένο ελεύθερο οξυγόνο και γίνεται από αναερόβιους οργανισμούς με τελικά προϊόντα H_2S , NH_3 , CH_4 , που είναι δύσοσμα, τοξικά κι εκρηκτικά κι επηρεάζουν την υγεία φυτών και ζώων. Γι' αυτό μας ενδιαφέρει να επικρατούν στο περιβάλλον αερόβιες συνθήκες αποδόμησης.

Το οξυγόνο που χρειάζεται για τη βιοχημική αποδόμηση των οργανικών ουσιών του υδάτινου αποδέκτη από αερόβιους μικροοργανισμούς ονομάζεται βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand).

Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο αποτελεί σήμερα μια σημαντική παράμετρο όσον αφορά την ποιότητα του νερού. Αποτελεί ένδειξη για το βαθμό της οργανικής ρύπανσης που προκαλεί το αποσυντιθέμενο οργανικό υλικό. Το B.O.D. μετρά το ποσό του οξυγόνου που καταναλώνουν οι μικροοργανισμοί όχι μόνο για την αποικοδόμηση μιας ρυπαντικής ουσίας αλλά όλου του υπάρχοντος οργανικού υλικού.

Το οργανικό υλικό στα νερά προέρχεται από αστικά λύματα, γεωργοκτηνοτροφικά και βιομηχανικά απόβλητα, καθώς και υπολείμματα σοδειάς, λιπάσματα, φυτοφάρμακα, όπως επίσης και από τη φυσική βλάστηση της περιοχής που όταν αποξηραίνεται εμπλουτίζει τους αποδέκτες. Επειδή η αποσύνθεση του οργανικού αυτού υλικού απαιτεί οξυγόνο, η μέτρηση του B.O.D. μας διευκολύνει να εκτιμήσουμε

τα επίπεδα της ρύπανσης. Τα ρυπασμένα νερά αυτοκαθαρίζονται βιολογικά με τους αερόβιους αποικοδομητές – βακτήρια χρησιμοποιώντας το διαλυμένο οξυγόνο.

B.O.D 20mg/l σημαίνει ότι 20mg οξυγόνου καταναλώνονται σε ένα λίτρο ακάθαρτων νερών σε 5 ημέρες και στους 20°C. Ο χρόνος των 5 ημερών είναι συμβατικός και χρησιμοποιείται διεθνώς γιατί μετρήθηκε ότι οι οργανικές ουσίες που υπάρχουν στα αστικά λύματα διασπώνται κατά 70 – 80% μέσα σε 5 ημέρες. Υδάτινες περιοχές με μικρή επιβάρυνση από τον άνθρωπο έχουν γενικά B.O.D. > 2mg/l ενώ όταν είναι πάνω από 5mg/l θα πρέπει να αναζητηθεί η πηγή ρύπανσης.

Υπάρχει και το C.O.D. (χημικά απαιτούμενο οξυγόνο) σε περιπτώσεις που η βιολογική διάσπαση είναι βραδεία (π.χ. ξερά καλάμια αργούν να αποικοδομηθούν βιολογικά), οπότε το B.O.D. σε 5 ημέρες δεν μπορεί να δείξει το πραγματικό οργανικό φορτίο. Στις παραπάνω περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ισχυρά οξειδωτικά μέσα όπου οξειδώνεται ολόκληρο το οργανικό περιεχόμενο του νερού. Ανάμεσα σε C.O.D. και B.O.D. δεν υπάρχει υποχρεωτικά συσχέτιση.

Υποστηρίζεται ότι ο προσδιορισμός του B.O.D. είναι σημαντικότερος ακόμη και από τον προσδιορισμό του διαλυμένου οξυγόνου επειδή, μειωμένη κατανάλωση οξυγόνου μπορεί να σημαίνει ότι το νερό είναι απαλλαγμένο από μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών ή ότι οι υπάρχοντες μικροοργανισμοί δεν «ενδιαφέρονται» για τη διάσπαση της οργανικής ύλης ή ακόμα ότι ένας μεγάλος αριθμός μικροοργανισμών από εκείνους που αρχικά υπήρχαν έχει αποβιώσει.

4.3.9. Ενεργός οξύτητα

Η ενεργός οξύτητα εκφράζει τη συγκέντρωση των κατιόντων υδρογόνου (υδρογονιόντων) ενός δείγματος. Το pH ενός δείγματος ισούται με την αρνητική λογαριθμική συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου στο δείγμα ($-\log[H^+]$). Η κλίμακα μέτρησης του pH είναι από 0 ως 14. Η τιμή 7 αντιστοιχεί σε ουδέτερα δείγματα. Τιμές μικρότερες του 7 υποδεικνύουν υπεροχή υδρογονιόντων (οξύτητα) στο δείγμα, ενώ τιμές μεγαλύτερες από 7 αντιστοιχούν σε αλκαλικά δείγματα (υπεροχή υδροξυλίωντων) - εικ 16.

ΕΝΕΡΓΟΣ ΟΞΥΤΗΤΑ (pH)

...εκφράζει τη συγκέντρωση των κατιόντων υδρογόνου (υδρογονιόντων) ενός δείγματος

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

Στο καθαρό νερό και σε κατάσταση ισορροπίας, η συγκέντρωση των υδρογονιόντων και των υδροξυλιόντων διέπεται από τη σχέση (στους 25°C):

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$$

και

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$$

$[\text{H}^+]$ = συγκέντρωση υδρογονιόντων (moles/lit)
 $[\text{OH}^-]$ = συγκέντρωση υδροξυλιόντων (moles/lit)



Εικόνα 16. Ενεργός οξύτητα – Παραδείγματα ουσιών με διαφορετικές τιμές pH

Το σύνολο των βιοχημικών αντιδράσεων στο εσωτερικό των κυττάρων πραγματοποιείται σε ουδέτερο pH. Όξινα ή αλκαλικά περιβάλλοντα δυσχεραίνουν την πορεία των παραπάνω αντιδράσεων ή αναστέλλουν την πραγματοποίησή τους.

Τα φυσικά νερά έχουν τιμές pH που κυμαίνονται μεταξύ των 4-9 μονάδων, ενώ τιμές 6,5-8,5 είναι στις περισσότερες περιπτώσεις οι καταλληλότερες για τους υδρόβιους οργανισμούς. Η ενεργός οξύτητα του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την αλατότητα (παρουσία ανιόντων θείου, χλωρίου κ.ά., μεταλλικών κατιόντων ασβεστίου, μαγνησίου κ.ά.), τις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα και του οξυγόνου, καθώς και από τη μεταβολική δραστηριότητα των υδρόβιων οργανισμών (φωτοσύνθεση, αναπνοή) και τη χημική αποσύνθεση των οργανικών ουσιών (εικ. 17).

Η ενεργός οξύτητα του νερού εξαρτάται από:

- τη θερμοκρασία
- την αλατότητα (ανιόντα θείου, χλωρίου κ.ά., μεταλλικά κατιόντα ασβεστίου, μαγνησίου κ.ά.)
- τη συγκέντρωση του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα
- τη μεταβολική δραστηριότητα των υδρόβιων οργανισμών (φωτοσύνθεση, αναπνοή)
- τη χημική αποσύνθεση οργανικών ουσιών

Ανάμεσα στους εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν το pH του νερού μιας λίμνης είναι:



- η σύσταση των πετρωμάτων της λεκάνης απορροής (π.χ. ασβεστολιθικά πετρώματα αυξάνουν το pH του νερού, πετρώματα τύρφης μειώνουν το pH του νερού)
- τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα - όξινη βροχή
- αστικά, βιομηχανικά κ.ά. απόβλητα

Εικόνα 17. Παράγοντες που επηρεάζουν το pH του νερού μιας λίμνης– Όργανα μέτρησης του pH.

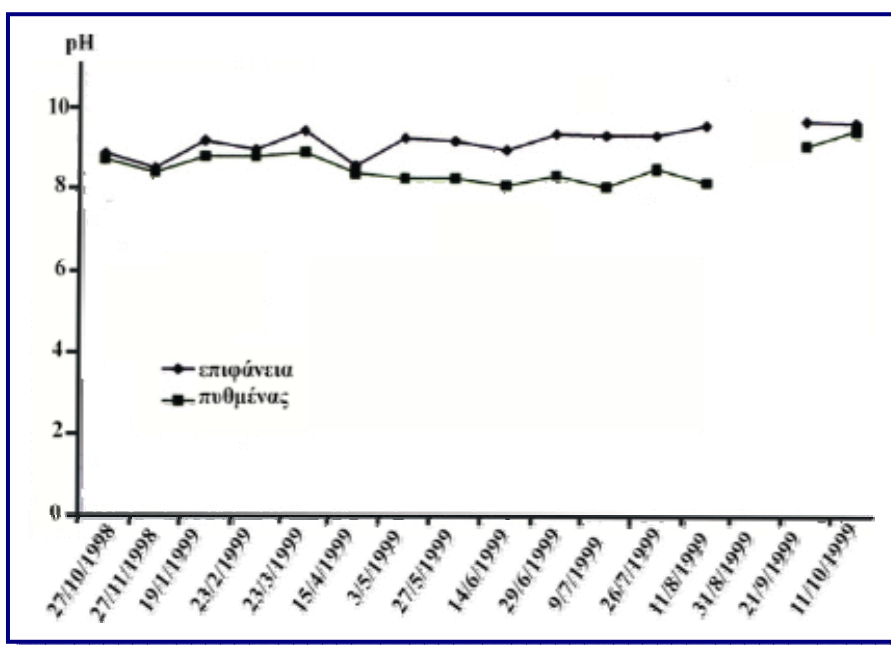
Το CO₂ διαλύεται εύκολα στο νερό συμβάλλοντας στη διαμόρφωση ενός περιβάλλοντος κατάλληλου για τη ζωή, δεδομένου ότι συμμετέχει στις διαδικασίες φωτοσύνθεσης και αναπνοής και αποτελεί ουσιαστική πηγή άνθρακα, άμεσα ή έμμεσα, για τις ενεργειακές απαιτήσεις των οργανισμών. Η διαλυτότητα του CO₂ στο νερό προσδιορίζεται από τις παρακάτω αντιδράσεις:



και στη συνέχεια:



Αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ προκαλεί μείωση του pH και αντίστροφα. Η κατακόρυφη κατανομή του pH καθορίζεται από τη δέσμευση του CO₂ (στα στρώματα όπου συναντώνται οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί) και την απελευθέρωσή του κατά την αναπνοή σε όλα τα βάθη της υδάτινης στήλης. Κατά τις περιόδους στρωμάτωσης μιας λίμνης, παρατηρούνται προοδευτικές μεταβολές στις τιμές του pH. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται συνήθως στην κατανάλωση CO₂ (συνεπώς αύξηση του pH) στο επιλίμνιο, εξαιτίας της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, και στην απελευθέρωσή του στο υπολίμνιο (συνεπώς μείωση του pH), κατά την αποσύνθεση κυρίως νεκρών πλαγκτονικών οργανισμών και οργανικού υλικού του πυθμένα (εικ. 18).



Εικόνα 18. Αυξομειώσεις στο pH του νερού της λίμνης της Καστοριάς στη διάρκεια ενός έτους

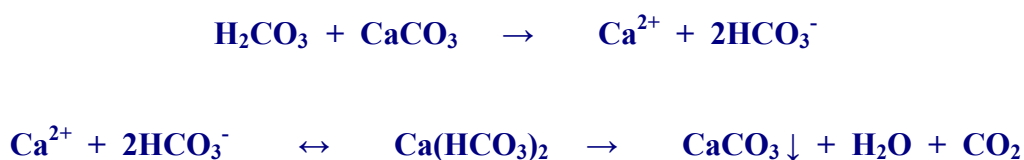
Οι περισσότερες λίμνες παρουσιάζουν μεγάλη ρυθμιστική ικανότητα, ανθίστανται δηλαδή, μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους, σε απότομες μεταβολές του pH.

Σημαντικές και σχετικά μόνιμες μεταβολές στο pH παρατηρούνται συνήθως κάτω από την επίδραση εξωγενών παραγόντων. Χαμηλές τιμές του pH οφείλονται συχνά στην εισαγωγή οξέων στη λίμνη (όξινη βροχή, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα κ.ά.). Εμπλουτισμός της λίμνης με θειικά οξέα συμβαίνει με τη βροχή (το

νερό της βροχής περιέχει, μεταξύ άλλων ανιόντων, SO_4^{2-}) ή μπορεί να οφείλεται στη σύσταση του υπεδάφους της λεκάνης απορροής. Η έκθεση στον ατμοσφαιρικό αέρα πετρωμάτων τύρφης του υπεδάφους (λόγω διάβρωσης του εδάφους) αυξάνει τη συγκέντρωση του θειικού οξέος στο νερό της λίμνης. Η οξείδωση του πυρίτη (FeS_2), συστατικό των πετρωμάτων τύρφης, καταλήγει στο σχηματισμό θειικού οξέος.

Αλκαλικές τιμές pH συναντάμε σε περιπτώσεις έντονης φωτοσυνθετικής δραστηριότητας – ευτροφισμός (κατά τη φωτοσύνθεση το φυτοπλαγκτόν μειώνει τη συγκέντρωση του CO_2 του νερού), σε περιπτώσεις ρύπανσης της λίμνης με αλκαλικές ουσίες (απορρυπαντικά κ.ά. από αστικά και βιομηχανικά απόβλητα) και σε αυξημένες συγκεντρώσεις ασβεστίου, νατρίου και μαγνησίου.

Εμπλουτισμός της λίμνης με ιόντα ασβεστίου παρατηρείται σε περιοχές όπου στη λεκάνη απορροής επικρατούν ασβεστολιθικά πετρώματα. Το νερό της βροχής μεταφέρει στη λίμνη ιόντα ασβεστίου, που δεσμεύει κατά τη ροή του πάνω από τα ασβεστολιθικά πετρώματα, τα οποία αντιδρούν με τα όξινα ανθρακικά ιόντα HCO_3^- του νερού της λίμνης σχηματίζοντας αδιάλυτο ανθρακικό ασβέστιο που κατακρημνίζεται. Η απομάκρυνση HCO_3^- από το νερό αυξάνει το pH του νερού. Οι παρακάτω αντιδράσεις περιγράφουν το φαινόμενο:



Μέτρηση pH

Η μέτρηση του pH είναι μία από τις σημαντικότερες μετρήσεις κατά την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού ενός λιμναίου οικοσυστήματος. Το pH μπορεί να μετρηθεί ηλεκτρομετρικά (πεχάμετρο), χρωματομετρικά (χρησιμοποίηση δεικτών που αλλάζουν χρώμα σε διαφορετικές τιμές pH), με χρήση φασματοφωτόμετρου κ.ά.

4.3.10. Θρεπτικά στοιχεία

Στα θρεπτικά στοιχεία περιλαμβάνονται όλες οι απαραίτητες για την επιβίωση ουσίες που προσλαμβάνονται από τους οργανισμούς.

Εκτός από τον άνθρακα, το οξυγόνο και το υδρογόνο, βασικά θρεπτικά συστατικά (**μακροθρεπτικά**, στοιχεία απαραίτητα σε μεγάλες σχετικά ποσότητες - >1000ppm) των φυτικών οργανισμών μιας λίμνης είναι τα νιτρικά, τα νιτρώδη και τα αμμωνιακά ιόντα, τα φωσφορικά ιόντα, το πυρίτιο (απαραίτητο στα διάτομα και σε κάποια άλλα πλαγκτικά είδη), τα κατιόντα ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου, τα ανιόντα θείου κ.ά. Μεταξύ άλλων τα κατιόντα των μετάλλων σιδήρου, μαγγανίου, χαλκού και ψευδαργύρου αποτελούν τα **μικροθρεπτικά** στοιχεία – **ιχνοστοιχεία** - καθώς είναι απαραίτητα σε μικρές σχετικά ποσότητες (<100ppm, με εξαίρεση το σίδηρο που απαιτείται σε ποσότητες <1000ppm και >100ppm) από τους οργανισμούς (εικ. 19).

Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών στο νερό διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιοτική και την ποσοτική αφθονία των οργανισμών. Για παράδειγμα, ο εποικισμός διαφόρων ειδών φυτοπλαγκτού σε ένα λιμναίο οικοσύστημα σχετίζεται με τη συγκέντρωση ορισμένων ιόντων (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ κ.ά.), ενώ η αύξηση των πληθυσμών τους συνδέεται συνήθως με τη σχετική αφθονία κάποιων άλλων (νιτρώδη, νιτρικά, αμμωνιακά, φωσφορικά, πυριτικά ιόντα).

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, των νιτρωδών, των αμμωνιακών και των φωσφορικών ιόντων παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της τροφικής κατάστασης της λίμνης, οι τιμές τους δηλαδή είναι ενδεικτικές για τις συνθήκες (ολιγότροφες, μεσότροφες, εύτροφες) που επικρατούν σε αυτή.

Άζωτο:

Το άζωτο είναι ένα από τα κυριότερα συστατικά του ζωντανού πρωτοπλάσματος (αποτελεί το 1-10% του βάρους των φυτών και περισσότερο από 20-30% του βάρους των ζώων) και επηρεάζει σημαντικά την παραγωγικότητα των υδατικών οικοσυστημάτων (εικ. 20). Το άζωτο υπάρχει στο νερό ως (εικ. 21):

Θρεπτικά στοιχεία

...οι απαραίτητες για την επιβίωση ουσίες, που προσλαμβάνονται από τους οργανισμούς

Βασικά θρεπτικά στοιχεία των φυτικών οργανισμών μιας λίμνης

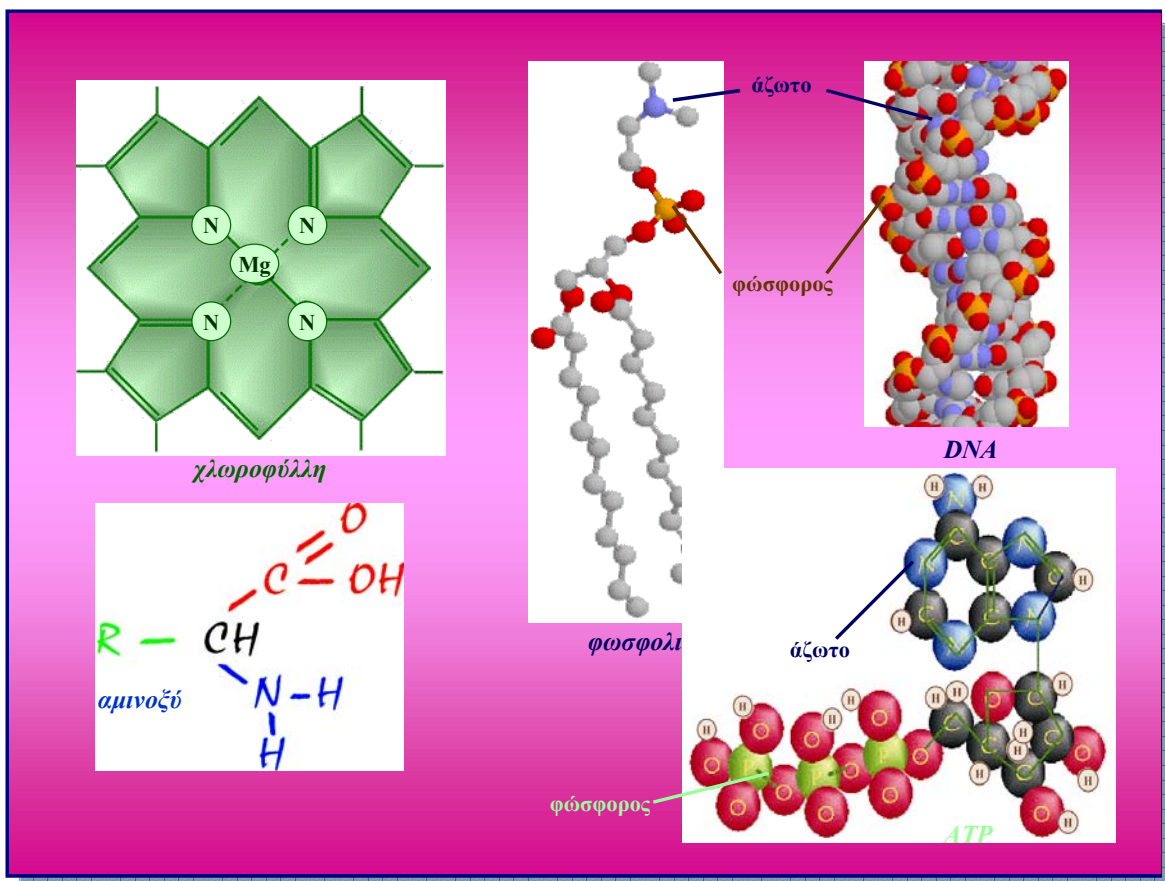
Ο άνθρακας, το οξυγόνο και το υδρογόνο αποτελούν τα βασικότερα στοιχεία των οργανικών ουσιών.

Τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία των φωτοσυνθετικών οργανισμών μπορούν να διακριθούν σε:



στοιχείο	ενδεικτικές λειτουργίες
C	βασικό συστατικό οργανικών ενώσεων
O	βασικό συστατικό οργανικών ενώσεων
H	βασικό συστατικό οργανικών ενώσεων
N	συστατικό αμινοξέων, νουκλεοτιδίων, χλωροφύλλης
K	ενεργοποιητής πολλών ενζύμων, άνοιγμα και κλείσιμο των στομάτων
Ca	ρυθμιστής διαπερατότητας κυττάρου
P	συστατικό νουκλεοτιδίων, ATP, φωσφολιπιδίων
Mg	ενεργοποιητής ενζύμων, συστατικό χλωροφύλλης
S	συστατικό αμινοξέων (π.χ. μεθειονίνης)
Fe	σύνθεση χλωροφύλλης
Cu	ενεργοποιητής μερικών ενζύμων
Mn	ενεργοποιητής μερικών ενζύμων
Zn	ενεργοποιητής μερικών ενζύμων

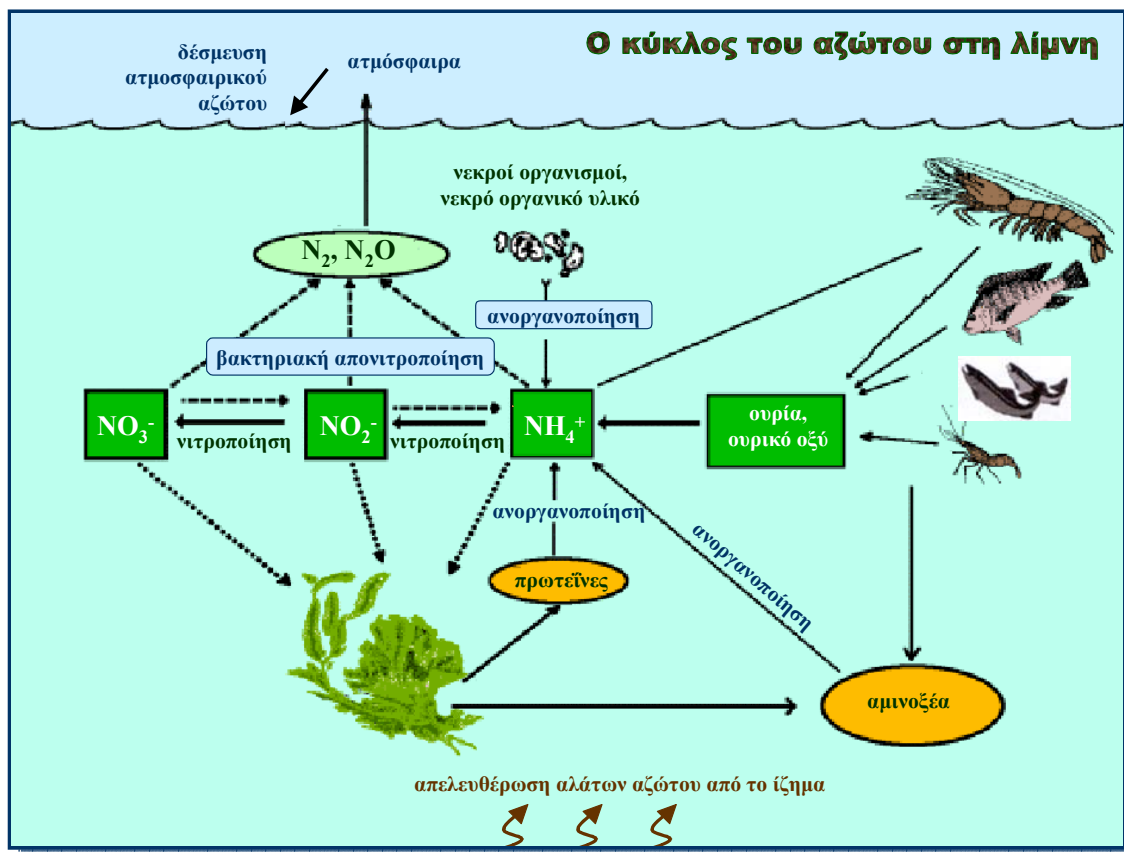
Εικόνα 19. Θρεπτικά στοιχεία και ενδεικτικές λειτουργίες τους στο φυτικό οργανισμό



Εικόνα 20. Παρουσία αζώτου και φωσφόρου σε κύρια βιομόρια

- διαλυμένο αέριο άζωτο
- άζωτο δεσμευμένο σε οργανικές ενώσεις, όπως πρωτεΐνες, αμινοξέα, ουρία κ.ά.
- αμμωνία, κυρίως ως αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+ και NH_4OH^-)
- νιτρώδη ιόντα
- νιτρικά ιόντα

Αρκετές είναι οι ενώσεις του αζώτου που συμπεριλαμβάνονται στα θρεπτικά στοιχεία του φυτοπλαγκτού (νιτρικά, τα πιο εύληπτα από τα φυτά άλατα, νιτρώδη, αμμωνιακά ιόντα). Τα άλατα του αζώτου προέρχονται συνήθως από το ίζημα και απελευθερώνονται ως αμμωνία σε ανοξικές συνθήκες και ως νιτρικά στις περιόδους κυκλοφορίας του νερού, όπου το διαλυμένο οξυγόνο βρίσκεται σε αφθονία. Μερικά είδη κυανοφυκών – κυανοβακτηρίων μπορούν να δεσμεύουν το διαλυμένο στο νερό ατμοσφαιρικό άζωτο ($\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$).



Εικόνα 21. Απλοποιημένη απεικόνιση του κύκλου του αζώτου σε μια λίμνη

Συγκεκριμένα βακτήρια οξειδώνουν τα αμμωνιακά και τα νιτρώδη άλατα σε νιτρικά (βακτηριακή νιτροποίηση).

(*Nitrosomonas*):



(*Nitrobacter*):



Ανάμεσα στους παράγοντες που επιδρούν στην πορεία της βακτηριακής νιτροποίησης είναι το pH του νερού, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, η θερμοκρασία κ.ά.

Η διαδικασία της νιτροποίησης ευνοείται σε ουδέτερες ως ελαφρά αλκαλικές τιμές του pH. Σε τιμές pH μικρότερες από το 7 η νιτροποίηση καθυστερεί ή αναστέλλεται καθώς οι όξινες συνθήκες δυσχεραίνουν τη λειτουργία των *Nitrosomonas*

και *Nitrobacter*. Σε τιμές του pH μεγαλύτερες του 8, τα άτομα *Nitrobacter* παύουν να μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά και συνεπώς η διαδικασία της νιτροποίησης αναστέλλεται επίσης.

Είναι προφανές ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό παίζει καθοριστικό ρόλο στη νιτροποίηση, στην οξείδωση δηλαδή της αμμωνίας σε νιτρώδη και νιτρικά ιόντα. Σε μια υδάτινη συλλογή ο ρυθμός νιτροποίησης μειώνεται με το βάθος.

Όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό βακτηριακής νιτροποίησης, χαμηλές θερμοκρασίες είναι δυσμενείς για την ανάπτυξη των συγκεκριμένων βακτηρίων. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της ψυχρής εποχής του έτους, παρατηρείται συσσώρευση νιτρικών ιόντων.

Αντίθετη της βακτηριακής νιτροποίησης διαδικασία είναι η **βακτηριακή απονιτροποίηση**. Μια μεγάλη ποικιλία βακτηριακών οργανισμών (*Esherichia coli*, *Serratia marcesu* κ.ά) συμμετέχουν στην αναγωγή των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων, χρησιμοποιώντας οξυγόνο ανιόντων (π.χ. NO_3^- , NO_2^- , $\text{SO}_4^{=}$) για την οξείδωση οργανικού υλικού ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$). Αναερόβιες συνθήκες ευνοούν τη βακτηριακή απονιτροποίηση.

Οι συγκεντρώσεις των ενώσεων του αζώτου στις λίμνες ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες. Οι ρυθμοί παραγωγικότητας και οι παράγοντες που ελέγχουν μέχρι ένα βαθμό τις βακτηριακές δραστηριότητες, επηρεάζουν τη συγκέντρωση των ενώσεων του αζώτου. Κατά τη θερινή στρωμάτωση μιας λίμνης τα νιτρικά μπορεί ακόμα και να εξαφανιστούν στο επιφανειακό στρώμα του νερού, ως αποτέλεσμα της χρησιμοποίησής τους, όπως επίσης και στα βαθύτερα στρώματα, εξαιτίας της χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου στα στρώματα αυτά.

Εμπλουτισμός των νερών με αζωτούχες ενώσεις προέρχεται από (εικ.22):

- ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα στην επιφάνεια μιας λίμνης

- τη δέσμευση ατμοσφαιρικού αζώτου στο νερό (ηλεκτρική ή φωτοχημική δέσμευση με κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις).
- από τους μηχανικούς διάβρωσης και απόπλυσης των εδαφών της λεκάνης απορροής, με τα υπόγεια και τα επιφανειακά νερά.
- παντός είδους απόβλητα που εισρέουν στη λίμνη

Χωρίς τέτοιους εμπλουτισμούς σε άζωτο, οι μέγιστες συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 10 ως 1000μg/l.

Απώλειες αζώτου από μια υδατοσυλλογή μπορεί να προέλθουν από:

- πλημμυρική εκροή από μια υδάτινη μάζα
- αναγωγή των νιτρικών σε άζωτο με βακτηριακή απονιτροποίηση και στη συνέχεια διαφυγή του αζώτου στην ατμόσφαιρα
- μόνιμη καθίζηση στο ίζημα της υδατοσυλλογής ανόργανων και οργανικών συστατικών που περιέχουν άζωτο

Το άζωτο υπάρχει στο νερό ως:

- διαλυμένο αέριο άζωτο
- άζωτο δεσμευμένο σε οργανικές ενώσεις (πρωτεΐνες, αμινοξέα κ.ά.)
- αμμωνία, κυρίως ως αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+ και NH_4OH^-)
- νιτρώδη ιόντα (NO_2^-)
- νιτρικά ιόντα (NO_3^-)

**Α
Ζ
Ω
Τ
Ο**

Εμπλουτισμός των νερών με αζωτούχες ενώσεις μπορεί να οφείλεται σε:

- ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα στην επιφάνεια της λίμνης
- ηλεκτροφωτοχημική δέσμευση του ατμοσφαιρικού αζώτου στο νερό
- μηχανισμούς διάβρωσης και απόπλυσης των εδαφών της λεκάνης απορροής (μεταφορά αζώτου με τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά)
- παντός είδους απόβλητα που εισρέουν στη λίμνη

Απώλειες αζώτου από μια υδατοσυλλογή μπορεί να οφείλονται σε:

- πλημμυρική εκροή από μια υδάτινη μάζα
- βακτηριακή αναγωγή των νιτρικών σε άζωτο (βακτηριακή απονιτροποίηση) και διαφυγή του αζώτου στην ατμόσφαιρα
- μόνιμη καθίζηση ανόργανων και οργανικών ενώσεων αζώτου στο ίζημα

βακτηριακή νιτροποίηση:

$$\text{NH}_4^+ + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{NO}_2^- + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$$

βακτηριακή απονιτροποίηση:

$$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$$

Εικόνα 22. Εμπλουτισμός και απώλειες αζώτου μιας υδατοσυλλογής – Βακτηριακές μετατροπές αζωτούχων ενώσεων

Φώσφορος:

Ο φώσφορος, με τη μορφή φωσφορικών κυρίως ιόντων (PO_4^{3-} και HPO_4^{2-}) αποτελεί ένα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά τόσο των ζωικών όσο και των φυτικών οργανισμών. Φώσφορος υπάρχει στο μόριο του DNA, του ATP, στην κυτταρική μεμβράνη (φωσφολιπίδια) και αλλού (εικ. 20).

Ο φώσφορος αποτελεί συνήθως περιοριστικό παράγοντα της πρωτογενούς παραγωγής και ως εκ τούτου έχει καθοριστική σημασία για την αποκατάσταση της οικολογικής ισορροπίας στη λίμνη. Αν και είναι ένα από τα έξι κύρια κυτταρικά στοιχεία (C, H, O, N, P, S) και η αναλογία του στη νωπή βιομάζα του κυτοπλάσματος μπορεί να ξεπερνάει το 0,5%, η παρουσία του στο φλοιό της γης είναι σπανιότερη από αυτή των άλλων πέντε στοιχείων.

Οι ενώσεις του φωσφόρου στο νερό διακρίνονται σε οργανικές ή ανόργανες, διαλυμένες ή σωματιδιακές. Φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στο υδάτινο περιβάλλον μεταβάλλουν διαρκώς την αναλογία των παραπάνω μορφών.

Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό είναι η θερμοκρασία, το pH και η συγκέντρωση των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων. Υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τους ρυθμούς αποικοδόμησης των οργανικών ουσιών και συνεπώς την απελευθέρωση φωσφόρου. Παράλληλα βέβαια υψηλές θερμοκρασίες εντείνουν την πρόσληψη φωσφόρου από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Συνήθως όμως ο ρυθμός της πρώτης διαδικασίας (απελευθέρωση φωσφόρου) είναι μεγαλύτερος από αυτόν της δεύτερης (δέσμευση φωσφόρου), με αποτέλεσμα υψηλές θερμοκρασίες να επιφέρουν αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο νερό.

Το pH σχετίζεται με την εσωτερική τροφοδοσία του νερού σε φώσφορο, την επαναιώρηση δηλαδή του φωσφόρου του πυθμένα. Σε υψηλές τιμές pH συμβαίνει ανταλλαγή των ιόντων υδροξυλίου του νερού με φώσφορο από ενώσεις σιδήρου και

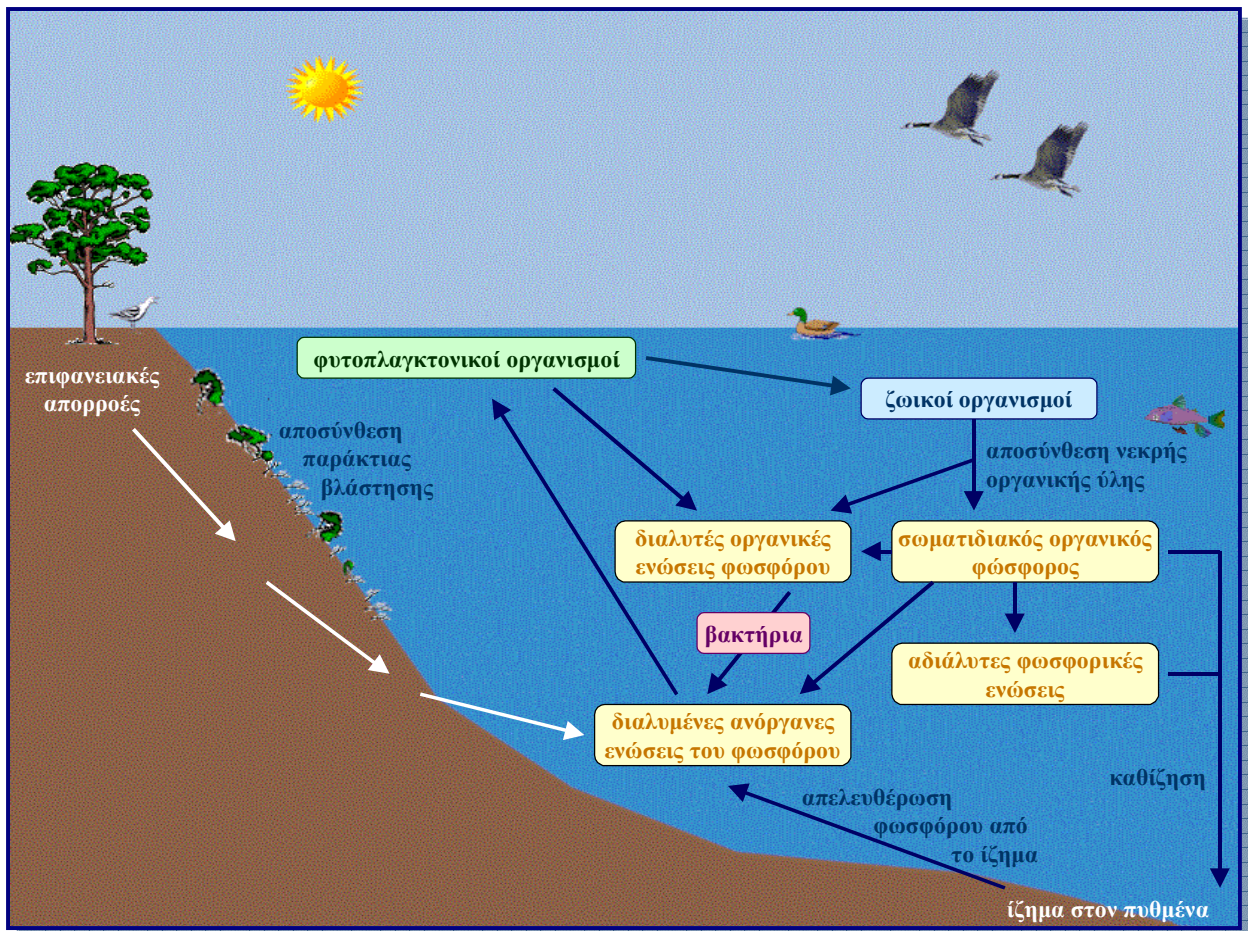
αργιλίου του πυθμένα. Συνεπώς αύξηση του pH επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο νερό.

Ανοξικές συνθήκες ευνοούν τη διάχυση του φωσφόρου από τον πυθμένα στο νερό. Αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων μειώνει το ρυθμό απελευθέρωσης του φωσφόρου από τον πυθμένα (και συνεπώς τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό) εξαιτίας της οξειδωτικής τους δράσης.

Παράλληλα, η παρουσία υδρόβιας μακροφυτικής βλάστησης σε μια υδάτινη συλλογή αυξάνει τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό. Οι παραπάνω φυτικοί οργανισμοί προσλαμβάνουν φώσφορο κυρίως από το υπόστρωμα, ενώ κατά την ανάπτυξή τους απελευθερώνουν μεγάλα ποσά φωσφόρου στο νερό, διαδικασία που συνεχίζεται και κατά την ξήρανσή τους. Η παραμονή ξηρών φυτικών τμημάτων στο νερό διευκολύνει την αποσύνθεσή τους, εμπλουτίζοντας το νερό με φωσφορικές ενώσεις.

Ο φώσφορος διαλύεται σχετικά δύσκολα στο νερό και η ένωση του με σίδηρο, αργίλιο και ασβέστιο προκαλεί την καθίζησή του. Η τυπική διαδικασία ανακύκλωσης του φωσφόρου σε μια λίμνη περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω (εικ. 23): Ο φώσφορος απελευθερώνεται από το επιλίμνιο κατά την αποσύνθεση οργανικών ουσιών και προσλαμβάνεται από το φυτοπλαγκτόν και την υπόλοιπη υδρόβια βλάστηση. Ο θάνατος και η αποικοδόμηση των οργανισμών εμπλουτίζει το νερό με φωσφορικές ενώσεις που καθιζάνουν στον πυθμένα, ενώ παράλληλα συμβαίνει διάχυση του φωσφόρου από το ίζημα στο νερό (εσωτερική τροφοδοσία του νερού της λίμνης σε φώσφορο).

Στα περισσότερα φυσικά νερά οι συγκεντρώσεις του ολικού φωσφόρου (το σύνολο του ανόργανου και οργανικού, διαλυμένου και σωματιδιακού φωσφόρου) κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10 και 50μg/l. Ωστόσο σε μη παραγωγικά, oligότροφα νερά η συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου μπορεί να είναι μικρότερη από 5μg/l, ενώ σε πολύ εύτροφες συνθήκες μπορεί να υπερβαίνει τα 100 μg/l.



Εικόνα 23. Εμπλουτισμός και απώλειες φωσφόρου μιας υδατοσυλλογής

Στις εξωτερικές πηγές φωσφόρου συμπεριλαμβάνονται οι επιφανειακές απορροές, τα λιπάσματα, κτηνοτροφικά απόβλητα, οι εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων, βιομηχανικά απόβλητα κ.ά. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η εντατική χρήση λιπασμάτων και απορρυπαντικών έχει αυξήσει τη συγκέντρωση του φωσφόρου στις λίμνες πολλών περιοχών.

Θείο:

Οι αυτότροφοι οργανισμοί και πολλοί ετερότροφοι μικροοργανισμοί προσλαμβάνουν θείο από τα θειικά ιόντα (SO_4^-) του νερού. Κύρια πηγή των θεικών ιόντων στο νερό των λιμνών είναι το νερό της βροχής. Άλλες πιθανές πηγές θεικών ιόντων είναι ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν θεικό ασβέστιο ή θειικό πυρίτιο.

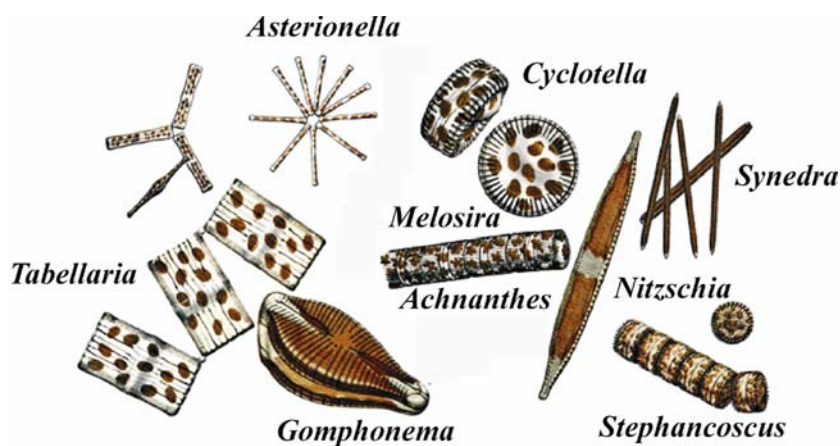
Σε κλειστές λίμνες όπου υπάρχουν αποθέσεις κρυστάλλων θειικού νατρίου η συγκέντρωση των θειικών ιόντων μπορεί να φτάνει τα 60,3g/l.

Στο υπολίμνιο των περισσότερων λιμνών και κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου προκαλεί μείωση των πληθυσμών των αερόβιων αποικοδομητικών οργανισμών. Στις παραπάνω συνθήκες η ανοργανοποίηση των οργανικών ουσιών με τη συμμετοχή αναερόβιων βακτηρίων δεν οδηγεί στο σχηματισμό νερού και διοξειδίου του άνθρακα, αλλά ενώσεων όπως το υδρόθειο.

Συμπερασματικά, όσον αφορά την κατακόρυφη κατανομή του θείου, αναμένεται να παρατηρείται αύξηση της σε συνάρτηση με την αύξηση του βάθους.

Πυρίτιο:

Το πυρίτιο εμφανίζεται συνήθως, ως διαλυτό πυριτικό οξύ και ως σωματιδιακό πυρίτιο, σε επαρκείς συγκεντρώσεις στα εσωτερικά νερά. Το ορθοπυριτικό οξύ ($\text{Si}(\text{OH})_4$) είναι πιθανόν η μόνη ένωση πυριτίου διαθέσιμη στα διάτομα και σε άλλα πλαγκτικά φύκη (εικ. 24).



Εικόνα 24. Είδη διατόμων

Στην πλειοψηφία των εύκρατων λιμνών η συγκέντρωση του πυριτίου κυμαίνεται μεταξύ 560 και 5600μg/l. Λίγες είναι οι περιπτώσεις λιμνών στις οποίες το

πυρίτιο βρίσκεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις σε όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ σε αρκετές μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των διατόμων μόνο για σύντομες χρονικές περιόδους, μετά από τη βιολογική κατανάλωσή του από τους παραπάνω οργανισμούς.

Μεγάλες συγκεντρώσεις πυριτίου παρατηρούνται κατά τη χειμερινή περίοδο και στην αρχή της άνοιξης, ενώ σταδιακά μειώνονται εξαιτίας της βιολογικής κατανάλωσής τους κατά την εαρινή και τη θερινή περίοδο. Περιορισμένες συγκεντρώσεις πυριτίου παρατηρούνται στην εύρωτη ζώνη των εύτροφων λιμνών, ενώ στις oligότροφες λίμνες παρατηρούνται διαφορές συγκεντρώσεων, ανάμεσα στο υπολίμνιο και στο επιλίμνιο, κατά τη θερμική στρωμάτωση των νερών.

Η τροφοδοσία μιας λίμνης σε πυρίτιο μπορεί να είναι εξωτερική (μέσω εισροών) ή εσωτερική (διάθεση πυριτίου από το ίζημα, αποσύνθεση διατόμων).

Ιχνοστοιχεία μετάλλων:

Στο νερό των λιμνών υπάρχουν διάφορα μέταλλα τα οποία συμμετέχουν σε μικρές ποσότητες (ιχνοστοιχεία) στις μεταβολικές διεργασίες των οργανισμών.

Το **μαγγάνιο** βρίσκεται σε ανιχνεύσιμες ποσότητες σε όλα σχεδόν τα επιφανειακά νερά και χρησιμοποιείται από φυτοπλακτονικούς οργανισμούς της λίμνης σε ποσότητα που ποικίλει ανάλογα με το είδος του οργανισμού. Αποθέματα μαγγανίου στον πυθμένα που επαναδιαλύονται τροφοδοτούν συνήθως τον υδάτινο όγκο με το συγκεκριμένο μέταλλο. Ως εκ τούτου μεγαλύτερες ποσότητες ιόντων μαγγανίου αναμένεται να παρατηρηθούν στο υπολίμνιο και στο μεταλίμνιο.

Οι συγκεντρώσεις του **χαλκού** στο νερό των λιμνών κυμαίνονται από πρακτικά μη ανιχνεύσιμα επίπεδα μέχρι μερικές εκατοντάδες mg/m^3 . Σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του χαλκού παρατηρείται κατά τη φθινοπωρινή αναστροφή. Η παρουσία υδρόθειου στον πυθμένα δυσχεραίνει τη διάλυση του χαλκού και την απελευθέρωσή του στο υπολίμνιο. Ο εμπλουτισμός του νερού των βαθύτερων στρωμάτων με οξυγόνο

προκαλεί την οξειδωση του υδρόθειου στον πυθμένα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο χαλκός ανιχνεύεται σε συγκεντρώσεις τοξικές για την υδρόβια ζωή.

Τέλος στα νερά των λιμνών ανιχνεύονται συχνά και άλλα μέταλλα (**σίδηρος, ψευδάργυρος, κοβάλτιο, βόριο**, κ.ά.).

4.3.11. Τοξικές ουσίες

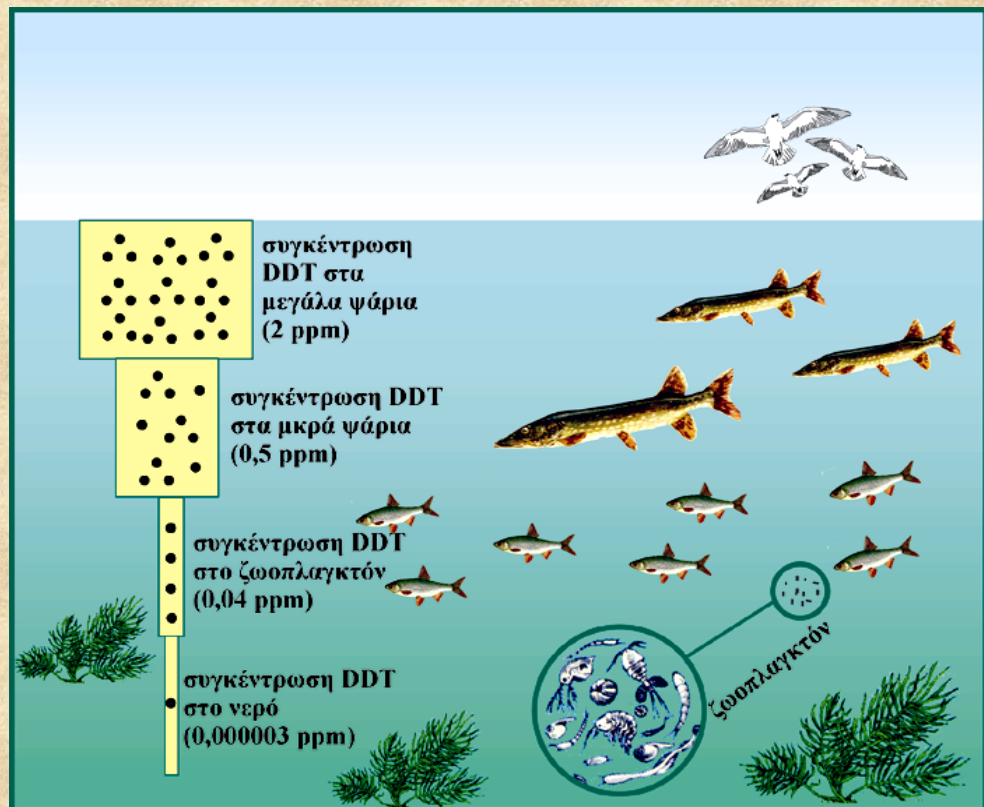
Φυσικές ή συνθετικές ουσίες είναι δυνατό να έχουν τοξική επίδραση στους οργανισμούς που τις προσλαμβάνουν. Το τοξικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τη συγκέντρωση της ουσίας, τη φύση της και τη χημική σύσταση του περιβάλλοντός της (την παρουσία δηλαδή άλλων χημικών ουσιών στο εσωτερικό του οργανισμού), καθώς και από τα γενετικά χαρακτηριστικά, το στάδιο ανάπτυξης και τη φυσιολογία του ατόμου.

Υδατοδιαλυτές τοξικές ουσίες μεταφέρονται εύκολα σε μεγάλο αριθμό κυττάρων των οργανισμών αλλά συχνά ο χρόνος παραμονής τους σε αυτά είναι σύντομος εξαιτίας της επακόλουθης απέκκρισής τους. Αντίθετα οι λιποδιαλυτές χημικές ουσίες συσσωρεύονται σε ορισμένα σημεία του οργανισμού (σε ιστούς ή σε όργανα), όπου μπορούν να παραμείνουν για χρόνια. Η μεταβίβαση των τοξικών αυτών ουσιών από ένα τροφικό επίπεδο σε κάποιο ανώτερο δημιουργεί το φαινόμενο της **βιοσυσσώρευσης**, της σταδιακής δηλαδή αύξησης της συγκέντρωσης της τοξικής ουσίας στους ανώτερους καταναλωτές (εικ. 25).

Στις τοξικές ουσίες συμπεριλαμβάνονται τα εντομοκτόνα, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το φθόριο, το κάδμιο και ραδιενεργά ισότοπα (π.χ. στρόντιο-90).

4. 4. Κατανομή των βιολογικών παραμέτρων

Σε μια τυπική λίμνη συναντώνται διακριτές βιοκοινότητες οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της λίμνης, αλλά και τις φυσικοχημικές



Εικόνα 25. Βιοσυσώρευση: Σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης τοξικών ουσιών στους ανώτερους καταναλωτές.

παραμέτρους του χώρου εξάπλωσής τους, που μπορεί να είναι το νερό, ο πυθμένας ή η ακτή.

Έτσι οι οργανισμοί της λίμνης μπορούν να διακριθούν σε:

α) Οργανισμούς που ζουν στον πυθμένα της λίμνης και είναι:

- **Φυτά:** ανώτερα φυτά (μακρόφυτα) και προσκολλημένα μικροφύκη (περίφυτον)
- **Βακτήρια και μύκητες**
- **Βενθικοί οργανισμοί:** υδρόβια έντομα, μαλάκια (μύδια, σαλιγκάρια), άλλα ασπόνδυλα (καραβίδες, σκώληκες)

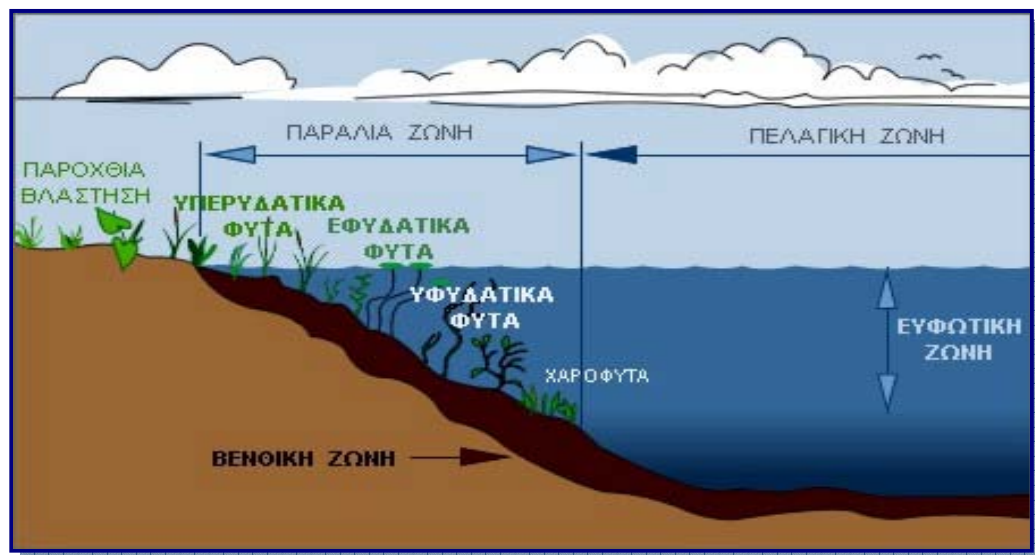
β) Οργανισμούς που παρασύρονται από το νερό

- *Φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, βακτήρια*

γ) Οργανισμούς που μετακινούνται ελεύθερα

- *Τα μεγαλύτερα είδη του ζωοπλαγκτού*
- *Αμφίβια*
- *Ψάρια*

Στην **παράκτια ζώνη**, στα ρηχά νερά δηλαδή κατά μήκος της παραλίας, το φως διεισδύει μέχρι τον πυθμένα επιτρέποντας την ανάπτυξη υδρόβιων φυτών - **μακρόφυτων**. Τα φυτά αυτά μπορεί να είναι **υπερυδατικά** (περιοδικά βρίσκονται μέσα στο νερό, αλλά μπορούν να επιβιώσουν και εκτός νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα - συνήθως αποτελούνται από βούρλα, καλάμια και ψαθιά), **εφυδατικά** (μακρόφυτα με επιπλέοντα φύλλα και άνθη, όπως νούφαρα, λέμνες) ή **υφυδατικά** (μακρόφυτα με βυθισμένα φύλλα, όπως μυριόφυλλα και ποταμογείτονες, που βρίσκονται έξω από το νερό, μέσα στο νερό ή στην επιφάνεια του νερού ή ακόμη είναι βυθισμένα εξ ολοκλήρου στο νερό) - εικ. 26.



Εικόνα 26. Στην ευφωτική ζώνη μπορούν να αναπτυχθούν όλα τα είδη που φωτοσυνθέτουν, όπως η υδρόβια βλάστηση στην παράλια ζώνη και το φυτοπλαγκτόν στην πελαγική αλλά και την παράλια

Η παράκτια ζώνη εξαπλώνεται από τις όχθες της λίμνης έως το βάθος όπου η ένταση του φωτός είναι περίπου το 1% της επιφανειακής, δηλαδή στην ευφωτική ζώνη όπου μπορεί να γίνει η φωτοσύνθεση.

Στις περισσότερες λίμνες η ευφωτική ζώνη συμπίπτει με το επιλίμνιο και μόνο σε λίμνες με μεγάλη διαφάνεια η φωτοσυνθετική δραστηριότητα μπορεί να παρατηρηθεί και στο θερμοκλινές.

Τα φυτά της παράκτιας ζώνης εκτός από τροφή για τους φυτοφάγους οργανισμούς της περιοχής, αποτελούν το υπόστρωμα ανάπτυξης για μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών φυκών και ασπόνδυλων και παρέχουν μια φυσική κατοικία για ψάρια και άλλους οργανισμούς διαφορετική από αυτή της πελαγικής ζώνης.

Πελαγική ζώνη είναι η περιοχή στα ανοιχτά της λίμνης, όπου το φως δεν φθάνει συνήθως μέχρι τον πυθμένα. Το ιζήμα του πυθμένα αποτελεί την **βενθική ζώνη**, στην επιφάνεια της οποίας (πάχος 2-5cm) συναντάται μια μεγάλη ποικιλία οργανισμών, οι λεγόμενοι βενθικοί οργανισμοί που είναι ασπόνδυλα, νύμφες δίπτερον εντόμων (σκνίπες, κουνούπια, μύγες κ.λπ.) και μικρά καρκινοειδή. Η ζώνη αυτή είναι πλούσια σε οργανική ύλη και η παραγωγικότητά της εξαρτάται από το οργανικό περιεχόμενο, τις φυσικές συνθήκες του ιζήματος και από τους ρυθμούς θήρευσης των ψαριών.

Τα αμμώδη ιζήματα είναι ασταθή και περιέχουν συνήθως μειωμένες ποσότητες θρεπτικών, γι' αυτό και οι φυτικοί οργανισμοί είναι σπάνιοι, ενώ στους βραχώδεις πυθμένες εμφανίζεται μεγάλη ποικιλία ζωής αφού προσφέρουν καταφύγιο στους οργανισμούς από τους θηρευτές τους, υπόστρωμα για να προσκολλούνται τα μικροφύκη (περίφυτον) αλλά και τροφή (οργανική λάσπη) στους διάφορους βενθικούς οργανισμούς.

Τροφικό πλέγμα

Για να καταλάβουμε πώς λειτουργεί το οικοσύστημα της λίμνης, μπορούμε να οργανώσουμε τις βιολογικές κοινότητες σε **τροφικές αλυσίδες** και **τροφικά πλέγματα**.

Η απλούστερη παρουσίαση του «ρόλου» ενός οργανισμού σε ένα οικοσύστημα είναι η απεικόνιση της **οικολογικής πυραμίδας** (εικ. 27). Στην πλατιά βάση των **παραγωγών** ανήκουν οι **φωτοσυνθετικοί οργανισμοί** και τα **κυανοβακτήρια**. Οι παραγωγοί υποστηρίζουν τα ανώτερα τροφικά επίπεδα της πυραμίδας, δηλαδή τους **φυτοφάγους οργανισμούς** (ζωοπλαγκτόν), τους **πλαγκτοφάγους οργανισμούς** και τους πολύ μικρότερους πληθυσμούς των **σαρκοφάγων** (θηρευτών).



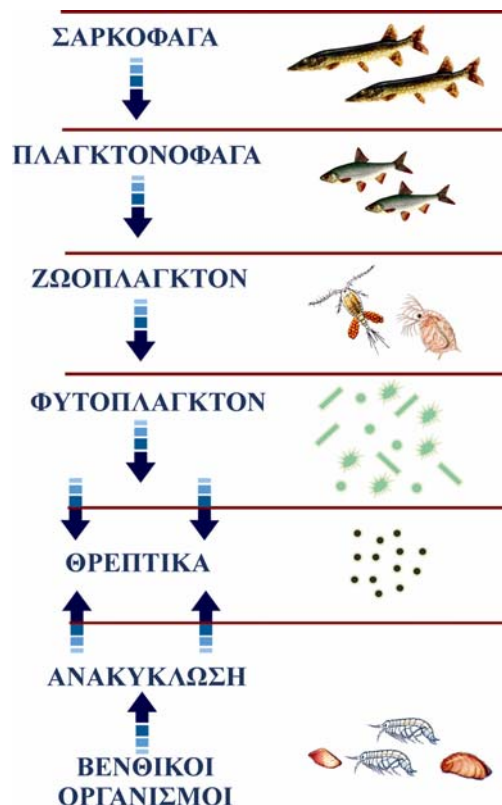
Εικόνα 27. Απλοποιημένη παρουσίαση της τροφικής πυραμίδας, της ροής ενέργειας και της ανακύκλωσης των θρεπτικών στοιχείων σε μια λίμνη

Τα φυτά αποτελούν τροφή των καταναλωτών πρώτης τάξης και όταν ολοκληρώσουν τον κύκλο της ζωής τους και νεκρωθούν, γίνονται τροφή των αποικοδομητών. Οι πρωτογενείς καταναλωτές, όπως το ζωοπλαγκτόν και η ποικιλία ασπόνδυλων αποτελούν τροφή για τους καταναλωτές δεύτερης τάξης, που είναι τα μικρά ψάρια και κάποια είδη της ορνιθοπανίδας. Οι μεγαλύτεροι ζωικοί οργανισμοί, όπως τα μεγάλα ψάρια, τα ψαροφάγα πουλιά, οι ψαραετοί, αλλά και ο άνθρωπος είναι καταναλωτές τρίτης τάξης (4^ο τροφικό επίπεδο).

Τα πιο πάνω ανεξάρτητα τροφικά επίπεδα μπορούν να απεικονιστούν με τροφικές αλυσίδες, αλλά στην πραγματικότητα πολλοί οργανισμοί είναι **παμφάγοι** και συνεπώς δεν αντιπροσωπεύονται πάντα μόνο από ένα από τα παραπάνω τροφικά επίπεδα. Παράλληλα, οι καταναλωτές πολύ συχνά αλλάζουν τροφικό επίπεδο στη διάρκεια του κύκλου της ζωής τους. Για παράδειγμα ένα ψάρι μπορεί στα πρώτα στάδια της ζωής του να τρέφεται από μικροφύκη, βακτήρια και τρίμματα νεκρής ή αποικοδομούμενης οργανικής ύλης, στη συνέχεια από ζωοπλαγκτόν και στα ώριμα στάδια της ζωής του από άλλα ψάρια.

Τα τροφικά πλέγματα είναι συνήθως πολύ σύνθετα και στο οικοσύστημα της λίμνης εκατοντάδες οργανισμοί μπορεί να συμμετέχουν σ' αυτά. Επειδή όμως η διαθέσιμη ενέργεια μειώνεται όσο προχωράμε στα ανώτερα τροφικά επίπεδα, είναι απαραίτητη μια μεγάλη βάση παραγωγών, ώστε να μπορεί να συντηρήσει τα λιγότερα σε αριθμό μεγάλα ψάρια.

Τα τροφικά πλέγματα επίσης απεικονίζουν τη ροή ενέργειας και θρεπτικών (άνθρακας, άζωτο, φώσφορος) – εικ. 28. Η ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του οικοσυστήματος.



Εικόνα 28. Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση τροφικού πλέγματος λιμναίου οικοσυστήματος

Όπως και στα χερσαία οικοσυστήματα, δύο είναι οι βασικές λειτουργίες για τη διατήρηση της ζωής στη λίμνη: η **φωτοσύνθεση** και η **αναπνοή**. Τα πράσινα τμήματα των φυτών δεσμεύουν ενέργεια από τον ήλιο και μετατρέπουν τις αβιοτικές ανόργανες χημικές ουσίες (CO₂, νερό, ανόργανα άλατα) σε οργανικές.

Στους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς της λίμνης περιλαμβάνονται το φυτοπλαγκτόν, το περίφυτον και τα μακρόφυτα. Είναι οι παραγωγοί του συστήματος που παράγουν τις οργανικές ενώσεις που απαιτούνται για τη θρέψη, την πρόσληψη δηλαδή ενέργειας από τους υπόλοιπους οργανισμούς. Το οξυγόνο, παραπροϊόν της φωτοσύνθεσης, προστίθεται στο οξυγόνο της λίμνης που προέρχεται από την ατμόσφαιρα.

Στα υδάτινα στρώματα που ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης είναι πολύ υψηλός, όπως στις περιπτώσεις της άνθισης του νερού, το νερό μπορεί να υπερκορεσθεί σε οξυγόνο. Το σημείο κορεσμού του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Το σημείο κορεσμού του νερού σε οξυγόνο αυξάνεται όσο μειώνεται η θερμοκρασία του. Σε περιόδους στρωμάτωσης της λίμνης, η μοναδική πηγή οξυγόνου για τις βαθύτερες ζώνες είναι οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί. Αυτό συμβαίνει όμως μόνο αν το φως μπορεί να διεισδύσει κάτω από το θερμοκλινές.

Εκτός από φως, το φυτοπλαγκτόν και τα ανώτερα φυτά χρειάζονται οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα και θρεπτικά για να αναπτυχθούν και να επιζήσουν. Εκτός από ελάχιστα είδη κυανοπράσινων μικροφυκών, τα υπόλοιπα δεν μπορούν να επιζήσουν σε ανοξικό περιβάλλον.

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι πρακτικά πάντα διαθέσιμο, αφού προέρχεται από τη χημική και μηχανική διάβρωση, τη διάλυση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων της λεκάνης απορροής, τη διάχυσή του από την ατμόσφαιρα και από τη λειτουργία της κυτταρικής αναπνοής των οργανισμών της λίμνης.

Τα βασικά θρεπτικά συστατικά, που είναι το άζωτο και ο φώσφορος, βρίσκονται διαλυμένα στο νερό ή στο ίζημα του πυθμένα και απορροφούνται από τους

μικροφυτικούς οργανισμούς και τα ανώτερα φυτά αντίστοιχα. Η χαμηλή συγκέντρωσή τους στο νερό αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των φυτών.

Άλλα στοιχεία απαραίτητα για τη ζωή είναι τα κύρια ιόντα: ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο και κάλιο, τα ιχνοστοιχεία σίδηρος, κοβάλτιο, μολυβδαίνιο, μαγγάνιο, βόριο, ψευδάργυρος και είναι συνήθως παρόντα σε επαρκείς συγκεντρώσεις. Το θείο που επίσης χρειάζονται οι ζωντανοί οργανισμοί υπάρχει συνήθως στις λίμνες με τη μορφή θεικών αλάτων.

Η αναπνοή και η οξείδωση του οργανικού υλικού απελευθερώνει μέρος της ενέργειας που αρχικά δεσμεύτηκε για τη φωτοσύνθεση. Οι μικροοργανισμοί (βακτήρια και μύκητες) καταναλώνουν ένα μεγάλο μέρος του διαθέσιμου οξυγόνου κατά την αποικοδόμηση του νεκρού οργανικού υλικού που αποβάλλεται από τους οργανισμούς, ενώ παράλληλα ανακυκλώνουν τα θρεπτικά που είναι απαραίτητα για τη φωτοσύνθεση.

Ευτροφισμός

Ο όρος **ευτροφισμός** αναφέρεται στην υπέρμετρη αύξηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας, στην υπέρμετρη δηλαδή αύξηση της φυτικής βιομάζας (φυτοπλαγκτόν, υδρόβια, υδροχαρής βλάστηση) μιας «κλειστής» υδάτινης μάζας (εικ. 29). Ο ευτροφισμός των λιμνών οφείλεται στη διοχέτευση, στην υδάτινη μάζα, μεγάλης



Εικόνα 29. Σε εύτροφες λίμνες και κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου (περίοδοι ανάμιξης των νερών) εμφανίζεται το φαινόμενο της «άνθισης του νερού».

ποσότητας θρεπτικών αλάτων, κυρίως αζώτου και φωσφόρου και μπορεί να οφείλεται σε φυσικούς παράγοντες (γεωγραφικά, γεωμορφολογικά, κλιματολογικά, μορφομετρικά, υδροδυναμικά, και άλλα χαρακτηριστικά της λίμνης) ή σε ανθρωπογενείς επιδράσεις (αστικά λύματα, κτηνοτροφικά και βιομηχανικά απόβλητα, αποπλύσεις γεωγραφικών εδαφών). Τα αποτελέσματα του ευτροφισμού είναι δυσμενή για τα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του νερού.

Ο ευτροφισμός επιφέρει σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο επιφανειακό στρώμα του νερού κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της έντονης φωτοσύνθεσης, ενώ παράλληλα προκαλεί μείωση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου στα βαθύτερα υδάτινα στρώματα, λόγω αυξημένων αναπνευστικών αναγκών των βακτηρίων που αποικοδομούν τις οργανικές ουσίες και μπορεί να διαμορφώσει ανοξικές συνθήκες.

Σε εύτροφες λίμνες και κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου (περίοδοι ανάμιξης των νερών) εμφανίζεται το φαινόμενο της «**άνθισης του νερού**». Η συσσώρευση θρεπτικών αλάτων κατά τη διάρκεια του χειμώνα (εποχή κατά την οποία η αύξηση του φυτοπλαγκτού παρεμποδίζεται λόγω χαμηλών θερμοκρασιών) προκαλεί την ταχεία ανάπτυξη των φωτοσυνθετικών οργανισμών κατά τη διάρκεια της άνοιξης (εποχή κατά την οποία η θερμοκρασία είναι ευνοϊκή για την αύξησή τους).

Η εξάντληση των θρεπτικών ουσιών στο επιλίμνιο, που παρουσιάζεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω της θερμικής στρωμάτωσης που έχει ως αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της ανάμιξης των νερών, περιορίζει το μέγεθος των φυτοπλαγκτονικών πληθυσμών, γιατί τα θρεπτικά άλατα συσσωρεύονται στα κατώτερα στρώματα.

Η φθινοπωρινή ψύξη των νερών προκαλεί ομοιοθερμία και ανάμιξη του νερού, με αποτέλεσμα να επανέρχονται τα θρεπτικά άλατα στα επιφανειακά στρώματα, γεγονός που συντελεί στην ταχεία αύξηση του φυτοπλαγκτού (φθινοπωρινή άνθιση του νερού).

Η αναλογία αζώτου – φωσφόρου παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των τροφικών συνθηκών μιας λίμνης. Στους φυτοπλακτονικούς και στους υδρόβιους φυτικούς οργανισμούς γενικότερα η σχέση φωσφόρου / αζώτου είναι 1 άτομο φωσφόρου προς 16 άτομα αζώτου. Αν ο λόγος N/P στο νερό είναι μεγαλύτερος από 16, τότε ο φώσφορος είναι ανεπαρκής για την ανάπτυξη των φωτοσυνθετικών οργανισμών, η έλλειψη δηλαδή του φωσφόρου λειτουργεί ως περιοριστικός παράγοντας για την αύξηση των πληθυσμών τους.

Ενδεικτικά για την ανάπτυξη ευτροφισμού σε μία λίμνη είναι τα παρακάτω στοιχεία:

Βιολογικοί δείκτες

- Μείωση της ποικιλίας των βενθικών και φυτοπλακτονικών ειδών
- Αύξηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας (μεγαλύτερη από 200g C/m³ ανά έτος) – αύξηση της βιομάζας των φυκών, της νηρητικής υδρόβιας και χερσαίας βλάστησης
- Αύξηση της βακτηριακής πυκνότητας
- Αύξηση του αριθμού εκείνων των βενθικών και των πλακτονικών ειδών, που αποτελούν δείκτες ρύπανσης

Χημικοί δείκτες

- Έλλειμμα οξυγόνου στον πυθμένα
- Υπερκορεσμός του επιλίμνιου σε οξυγόνο
- Αύξηση του ανόργανου αζώτου και φωσφόρου και του ολικού αζώτου και φωσφόρου
- Αύξηση του λόγου N/P του νερού
- Μεταβολή του pH του νερού
- Μεταβολή της σύστασης του ιζήματος του πυθμένα

Φυσικοί δείκτες

- Μείωση του μέσου βάθους της λίμνης
- Μείωση της διαφάνειας της λίμνης

Γ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ζανάκη Κ., 1996: «Έλεγχος Ποιότητας Νερού» Εκδ. «ΙΩΝ» Αθήνα, ISBN 960-405-501-1

Κάγκαλου Ι., 1997: «Σημειώσεις Λιμνολογίας» ΤΕΙ Ηπείρου, Ηγουμενίτσα

Καράταγλης Στ., 1992: «Φυσιολογία Φυτών» Εκδ. *ART of TEXT*, Θεσσαλονίκη, ISBN 960-312-009-X

Κουσουρής Θ., 1998: «Μονογραφίες Θαλάσσιων Επιστημών – Το Νερό στη Φύση, στην Ανάπτυξη, στην Προστασία του Περιβάλλοντος» Εκδ. Εθνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, Αθήνα

MILLER TYLER G., 1998: “Living in the Environment: Principles, Connections and Solutions” Wadsworth Publishing Company, 10thed., USA, ISBN 0-534-51912-1

Μουστάκα – Γούνη Μ., 2000: «Διερεύνηση Υδροβιολογικών Παραμέτρων στη Λίμνη Καστοριάς – Επιλογή βέλτιστης μεθόδου αποκατάστασης της οικολογικής ισορροπίας» Ερευνητικό Πρόγραμμα 7468 της επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Πολυεταιρική Σχολική Σύμπραξη (Καστοριά – Αθήνα – Ιεράπετρα: 1997-1999) / Δράση III (0280), 1999: «Το νερό ως παράγοντας ύπαρξης» Εθνικό Ίδρυμα Νεότητας – ΥΠ.Ε.Π.Θ. – Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Κατάρτισης (Ε.Π.Ε.Α.Ε.Κ.)

Horne, A.J., C.R. Goldman, 1994: “Understanding Lake Ecology” – Lake Ecology Overview – Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA, <http://wow.nrri.umn.edu/wow/under/primer/>

Εικόνες:

Εικόνα 1, 3, 4, 8, 11, 26: “Understanding Lake Ecology” – Lake Ecology Overview – Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA, <http://wow.nrri.umn.edu/wow/under/primer/> - Προσαρμογή από το ΚΠΕ Καστοριάς

Εικόνα 2: «Παροχές, φερτές ύλες και ποιότητα νερών χειμάρρων λεκάνης απορροής», ΔΗΜΟΣ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ, 2000, Επιστ. Υπεύθυνος Αν. Καθηγητής Γιάννης Μυλόπουλος

Εικόνα 9: <http://www.acornnaturalists.com/98-220.jpg>

Εικόνα 12: Miller G. T., 1998 - “Living in the Environment: Principles, Connections and Solutions - 10th edition”, WADSWORTH PUBLISHING COMPANY – A Division of International Thomson Publishing Inc., USA, ISBN 0-534-51912-1, σελ. 198-9 - Προσαρμογή από το ΚΠΕ Καστοριάς

Εικόνα 18: Μουστάκα – Γούνη Μ., 2000 - «Διερεύνηση Υδροβιολογικών Παραμέτρων στη Λίμνη Καστοριάς – Επιλογή βέλτιστης μεθόδου αποκατάστασης της οικολογικής ισορροπίας» Ερευνητικό Πρόγραμμα 7468 της επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Τεύχος Α, σελ. 35

Εικόνα 21: www.alken-murray.com/BIO-INFO.HTM - Προσαρμογή στα ελληνικά από το ΚΠΕ Καστοριάς

Εικόνα 23: www.cst.cmich.edu/centers/mwrc/phosphorus%20cycle.htm - Προσαρμογή στα ελληνικά από το ΚΠΕ Καστοριάς

Εικόνα 24.: biology.smsu.edu/phycology/frsh_wat_poll.htm

biology.smsu.edu/phycology/algall.htm

www.botany.hawaii.edu/BOT201/Algae/Phytoplankton%20lect.

biology.smsu.edu/phycology/filter.htm

biology.smsu.edu/phycology/plank_algae.htm - Προσαρμογή από το ΚΠΕ Καστοριάς

Εικόνα 29: www.ecy.wa.gov/programs/eap/fw_lakes/bloom.html

Πίνακες:

Πίνακας 1: “Understanding Lake Ecology” – Lake Ecology Overview – Chapter 1, 2nd edition, McGraw-Hill Co, New York, USA, <http://wow.nrri.umn.edu/wow/under/primer/> - Προσαρμογή στα ελληνικά από το ΚΠΕ Καστοριάς

Πίνακας 2: Ζανάκη Κ., 1996 - «Έλεγχος Ποιότητας Νερού» Εκδ. «ΙΩΝ» Αθήνα, ISBN 960-405-501-1, σελ. 22 (Πηγή: OECD, Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control, Paris 1982)

Πίνακας 3: Ζανάκη Κ., 1996 - «Έλεγχος Ποιότητας Νερού» Εκδ. «ΙΩΝ» Αθήνα, ISBN 960-405-501-1, σελ. 101