

ΟΙΚΟΛΟΓΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Οικολογία → μελέτη φυτών και ζώων σε σχέση με το περιβάλλον τους

- *οικοσύστημα* → σύστημα οργανισμών που βιώνει σε συγκεκριμένο αβιοτικό περιβάλλον και επηρεάζεται από αυτό

Πραγματοποιείται ανταλλαγή ενέργειας

- Γη → Το μεγαλύτερο και άυταρκες οικοσύστημα, που φυσικά περιλαμβάνει όλα τα φυτά και τα ζώα

ΒΑΣΙΚΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- **Ορισμός.** Ένα σύστημα οργανισμών που λειτουργεί μαζί με το αβιοτικό του περιβάλλον ορίζεται ως *οικοσύστημα*. Η έννοια είναι πολύ ευρεία και ελαστική, έτσι που μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε κατάσταση όπου οργανισμοί λειτουργούν μαζί με το περιβάλλον τους με τρόπο που να συντελείται ανταλλαγή ύλης μεταξύ τους, ακόμη και αν αυτό συμβαίνει μόνο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.
- **Κλίμακα.** Το μεγαλύτερο και περισσότερο άυταρκες γνωστό οικοσύστημα που γνωρίζουμε είναι ο πλανήτης μας, που φυσικά περιλαμβάνει όλα τα φυτά και τα ζώα της Γης τα οποία και αλληλεπιδρούν με το φυσικό τους περιβάλλον. Το πλανητικό αυτό οικοσύστημα αναφέρεται συχνά ως «οικόσφαιρα» ή «βιόσφαιρα». Η έννοια του οικοσυστήματος είναι βεβαίως δυνατό να εφαρμοστεί και σε πολύ μικρότερες κλίμακες. Μπορούμε, για παράδειγμα, να θεωρήσουμε ως οικοσυστήματα ένα δάσος, μία λίμνη, ένα λιβάδι ή ακόμα και ένα νερόλακκο.
- **Όρια.** Σε ορισμένες περιπτώσεις οι βιοκατοικίες έχουν σαφή όρια, όπως, για παράδειγμα, τα νησιά ή τα δάση, και είναι συνεπώς εύκολο να τα οριοθετήσουμε και να τα μελετήσουμε ως οικοσυστήματα. Άλλες φορές όμως, όπως στην περίπτωση ενός δάσους ή μιας θαλάσσιας περιοχής, τα όρια του οικοσυστήματος καθορίζονται αυθαίρετα.
- **Βασικά χαρακτηριστικά.** Υπάρχουν ορισμένα βασικά δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά που είναι κοινά για όλα τα οικοσυστήματα, ανεξάρτητα από την κλίμακα στην οποία γίνεται η αναφορά ή από το αν τα όρια μπορούν επακριβώς να καθοριστούν. Το σημαντικότερο είναι ότι όλα τα οικοσυστήματα έχουν (α') *βιοτικά* και (β') *αβιοτικά* συστατικά στοιχεία, ανάμεσα στα οποία συντελείται ανταλλαγή ενέργειας και ύλης. Πριν τη λεπτομερή εξέταση αυτών των γνωρισμάτων θα ήταν

χρήσιμο να αναφερθούμε σε μερικά από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων εν γένει.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΓΕΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η Γενική Θεωρία των Συστημάτων. Η έννοια των συστημάτων χρησιμοποιείται σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους για να βοηθήσει στην κατανόηση ή την εξήγηση των αλληλεπιδράσεων. Η προσέγγιση αυτή, που βασίζεται στη Γενική Θεωρία των Συστημάτων διατυπώθηκε στις αρχές του αιώνα από τον L. von Bertalanffy και επηρέασε σημαντικά την ανάπτυξη της σκέψης σε θεωρητικά ζητήματα.

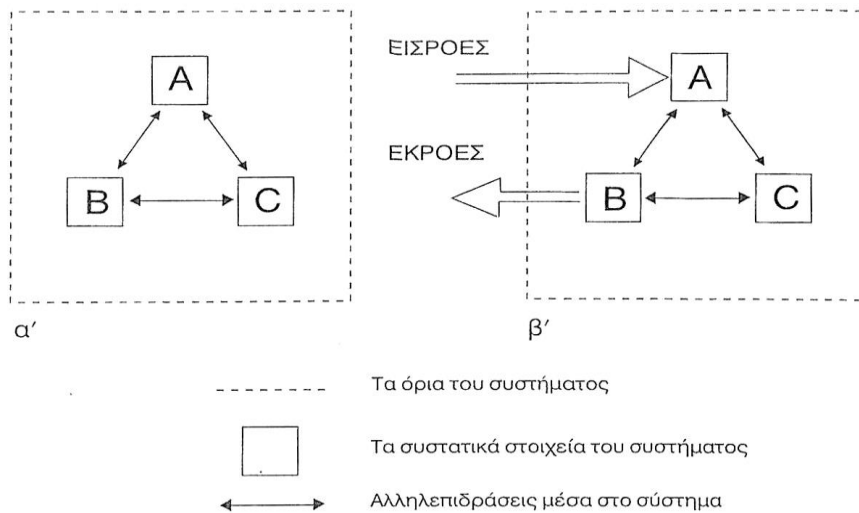
- (α') *Ορισμός.* Ως σύστημα μπορεί να οριστεί μια ομάδα αντικειμένων ή ιδιοτήτων (δηλαδή χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου όπως είναι το μέγεθος ή το σχήμα του), που συνδέονται με κάποια σχέση.
- (β') *Παραδείγματα συστημάτων.* Ο καθένας από μας είναι εξοικειωμένος με την ιδέα των συστημάτων στην καθημερινή ζωή. Παραδείγματα αποτελούν το σύστημα ύδρευσης σε ένα σπίτι ή το σιδηροδρομικό δίκτυο. Με παρόμοιο τρόπο και στη Βιολογία συνηθίζουμε να μιλάμε για πολλούς τύπους συστημάτων, όπως το κυκλοφοριακό, το ουροποιητικό, το αναπαραγωγικό σύστημα κ.α.

γ') *Η χρησιμότητα της μελέτης των συστημάτων.* Η μελέτη των συστημάτων μας δίνει τη δυνατότητα να εστιάσουμε την προσοχή μας περισσότερο στις αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν ανάμεσα στα αντικείμενα παρά στα αντικείμενα αυτά καθαυτά. Με αυτόν τον τρόπο, στα οικοσυστήματα μπορούμε να μελετήσουμε όχι τα μεμονωμένα άτομα των φυτών και των ζώων, αλλά τους οργανισμούς που λειτουργούν σε σχέση με το περιβάλλον τους. Η μελέτη των οικοσυστημάτων δε δίνει απλά και μόνο πληροφορίες για την κατανομή και τη λειτουργία των οργανισμών αυτών, αλλά επίσης αποτελεί και τη βάση για τη διαχείριση και τη διατήρηση του περιβάλλοντος.

Κλειστά και ανοιχτά συστήματα.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συστημάτων. Ο πρώτος τύπος είναι τα κλειστά συστήματα στα οποία δε συμβαίνει ανταλλαγή ύλης ή ενέργειας με το περιβάλλον. Ο δεύτερος τύπος είναι τα ανοιχτά συστήματα στα οποία η ενέργεια και η ύλη διαπερνούν τα όρια του συστήματος.

- (α') Οι προσθήκες (τα κέρδη) της ύλης και της ενέργειας σε ένα ανοιχτό σύστημα ονομάζονται *εισροές*.
- (β') Οι απώλειες σε ύλη και ενέργεια ενός ανοιχτού συστήματος ονομάζονται *εκροές*.
- (γ') Η ανταλλαγή ύλης και ενέργειας ανάμεσα στα συστατικά στοιχεία του συστήματος είναι γνωστή ως *διαδρομές*.



Σχ. 1. Δύο τύποι συστημάτων. (α') Κλειστά, (β') Ανοιχτά.

Έτσι, στην περίπτωση του συστήματος ύδρευσης σε ένα σπίτι, το νερό που εισέρχεται από την κεντρική παροχή είναι η εισροή, ενώ το νερό που φεύγει από τις βρύσες αποτελεί την εκροή. Το νερό που κυκλοφορεί στις σωληνώσεις του σπιτιού θα είναι οι διαδρομές.

Με εξαίρεση το Σύμπαν, όλα τα άλλα φυσικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων και των οικοσυστημάτων, είναι ανοιχτά συστήματα. Ο βαθμός, ωστόσο, της αυτοτέλειας ποικίλλει σημαντικά. Για παράδειγμα, το οικοσύστημα ενός ποταμού μπορεί να θεωρηθεί πιο ανοιχτό από το οικοσύστημα μιας λίμνης, αφού στην πρώτη περίπτωση υπάρχει συνεχής ροή νερού με την οποία γίνεται μεταφορά ύλης.

Σταθερή κατάσταση. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των ανοιχτών φυσικών συστημάτων είναι το γεγονός ότι τείνουν προς μια κατάσταση ισορροπίας ή σταθερότητας, έτσι ώστε όλα τα συστατικά στοιχεία του συστήματος να βρίσκονται σε αρμονία το ένα με το άλλο. Η ισορροπία επιτυγχάνεται με μια διαδικασία αυτορρύθμισης μέσω της οποίας τα συστατικά αυτά στοιχεία προσαρμόζονται σε οιαδήποτε μεταβολή των εισροών και των διαδρομών της ύλης και της ενέργειας.

Ο αριθμός των ζώων, για παράδειγμα, που ζει σε μια συγκεκριμένη βιοκατοικία, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της τροφής σε αυτό το οικοσύστημα και τα δύο αυτά στοιχεία του συστήματος (αριθμός ζώων και διαθεσιμότητα τροφής) βρίσκονται σε ισορροπία. Στην περίπτωση που για κάποιο λόγο, όπως είναι η ελάττωση των βροχοπτώσεων, μειωθεί η διαθέσιμη ποσότητα τροφής για τα ζώα, τότε θα μειωθεί και ο αριθμός των ζώων που θα μπορούν να υποστηριχθούν. Τα δύο αυτά στοιχεία δε θα βρίσκονται πλέον σε ισορροπία.

Το μέγεθος του πληθυσμού των ζώων θα πρέπει να προσαρμοστεί στη νέα μειωμένη διαθεσιμότητα τροφής, και ορισμένα άτομα θα αναγκαστούν, είτε να μεταναστεύσουν είτε να πεθάνουν από αιτία. Ο αριθμός των ζώων ελαττώνεται μέχρι το επίπεδο που θα είναι δυνατό να υποστηριχτεί από τη δεδομένη διαθέσιμη τροφή. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια νέα ισορροπία ανάμεσα στα δύο αυτά στοιχεία του συστήματος.

Ανάδραση. Η ανάδραση παρατηρείται σε όλους τους τύπους των συστημάτων, όταν μια μεταβολή σε ένα από τα στοιχεία του συστήματος προκαλεί σειρά μεταβολών σε άλλα στοιχεία τα οποία τελικά «αναδρούν» για να επηρεάσουν εκ νέου το πρώτο στοιχείο. Υπάρχουν δύο τύποι ανάδρασης.

- (α') *Αρνητική ανάδραση.* Αποτελεί τον πιο κοινό και θεμελιώδη μηχανισμό για την επίτευξη και τη διατήρηση της ισορροπίας ή της σταθερής κατάστασης στα οικοσυστήματα. Η αρνητική ανάδραση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού της μεταβολής που συμβαίνει στο στοιχείο αυτό του συστήματος από το οποίο και ξεκίνησε η σειρά των μεταβολών. Η αρνητική ανάδραση οδηγεί το σύστημα σε ισορροπία ή σε σταθερή κατάσταση.

Ένα παράδειγμα αρνητικής ανάδρασης μπορεί να έχουμε σε ένα λειβαδικό οικοσύστημα στην περίπτωση που ο αριθμός των ζώων που βόσκουν αυξηθεί με εποικισμό από κάποια γειτονική περιοχή. Ως αποτέλεσμα θα έχουμε να μεταβληθεί το στοιχείο «ζώα που βόσκουν».

Εάν ο αριθμός των ζώων αυξηθεί υπέρμετρα, τότε θα επακολουθήσει υπερβόσκηση και διάβρωση του φυσικού υποδοχέα (λιβάδι). Με τον τρόπο αυτό προκαλείται νέα μεταβολή σε ένα άλλο στοιχείο του συστήματος, το στοιχείο «λιβάδι». Η ελαττωμένη διαθεσιμότητα της τροφής θα έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη μείωση στον αριθμό των ζώων που βόσκουν στο οικοσύστημα. Βλέπουμε, λοιπόν, να επιτυγχάνεται ένας περιορισμός στο ρυθμό αύξησης αυτού του στοιχείου του συστήματος (ζώα που βόσκουν), με τη δημιουργία αρνητικής ανάδρασης.

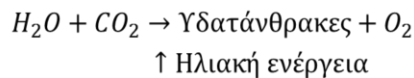
- (β') *Θετική ανάδραση.* Παρατηρείται πολύ σπανιότερα από την αρνητική ανάδραση. Στη θετική ανάδραση, τυχόν μεταβολή σε ένα στοιχείο του συστήματος προκαλεί σειρά μεταβολών μέσα στο σύστημα, οι οποίες βαθμιαία οδηγούν σε μία επιτάχυνση στο ρυθμό της αρχικής μεταβολής. Η θετική ανάδραση επιταχύνει τη μεταβολή και συνεπώς απομακρύνει το σύστημα από την κατάσταση ισορροπίας.

Στα φυσικά συστήματα παρατηρείται μικρός αριθμός περιπτώσεων θετικής ανάδρασης. Μπορεί να παρατηρηθεί, για παράδειγμα, στο οικοσύστημα μιας λίμνης όταν αυτή ρυπανθεί. Η ρύπανση προκαλεί το θάνατο μερικών ψαριών πράγμα που έχει ως επακόλουθο την ελάττωση του στοιχείου του οικοσυστήματος που είναι ο «πληθυσμός των ψαριών». Τα σώματα των νεκρών ψαριών που αποσυντίθενται είναι δυνατόν να συνεισφέρουν στη ρύπανση, πράγμα που με τη σειρά του θα προκαλέσει το θάνατο περισσότερων ψαριών. Με τον τρόπο αυτό, ο ρυθμός αποσύνθεσης των ψαριών μεγαλώνει και προκαλεί θετική ανάδραση. Όταν μια παρόμοια διαδικασία συμβεί σε φυσικό σύστημα, το φαινόμενο εμφανίζεται ως σύντομο ξέσπασμα καταστροφικής δραστηριότητας. Μακροπρόθεσμα, βέβαια, τείνει να επικρατήσει η αρνητική ανάδραση και η αυτορρύθμιση.

ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Υπάρχουν δύο βασικά συστατικά στοιχεία στα οικοσυστήματα: το αβιοτικό στοιχείο και το βιοτικό. Και τα δύο είναι εξίσου σημαντικά για το οικοσύστημα καθώς χωρίς το ένα από αυτά το σύστημα δεν μπορεί να λειτουργήσει.

- **Το αβιοτικό στοιχείο.** Περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες του αβιοτικού περιβάλλοντος όπως είναι το φως, το νερό, τα θρεπτικά στοιχεία και το έδαφος. Οι περιβαλλοντικοί αυτοί παράγοντες όχι μόνο παρέχουν την αναγκαία ύλη και ενέργεια, αλλά, επίσης, παίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των φυτικών και ζωικών ειδών που θα κατοικήσουν μια περιοχή.
- **Το βιοτικό στοιχείο.** Χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες στη βάση της λειτουργίας τους.
 - (α') Παραγωγοί.
 - (β') Καταναλωτές.
 - (γ') Αποδομητές ή αποσυνθέτες.
- **Παραγωγοί.** Είναι τα φυτά τα οποία είναι ικανά να παράγουν τα ίδια την τροφή τους. Για το λόγο αυτό είναι γνωστά και ως αυτότροφοι οργανισμοί. Τα φυτά έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την παρασκευή υδατανθράκων από απλά ανόργανα στοιχεία όπως ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται φωτοσύνθεση και μπορεί να παρασταθεί συνοπτικά με τον ακόλουθο τρόπο:



Οι υδατάνθρακες παρέχουν τα βασικά δομικά στοιχεία τα οποία όταν συνδυαστούν με άλλα κύρια θρεπτικά συστατικά όπως τα νιτρικά, ο φώσφορος και το κάλιο δίνουν άλλα υλικά θρέψης, όπως οι πρωτεΐνες και τα λίπη.

- **Καταναλωτές.** Είναι τα ζώα που τρέφονται από τα φυτά ή από άλλα ζώα. Οι οργανισμοί αυτοί ονομάζονται *ετερότροφοι* επειδή ακριβώς τρέφονται από άλλους οργανισμούς. Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι καταναλωτών:
 - (α') *φυτοφάγοι* οι οποίοι τρώνε μόνο φυτά,
 - (β') *σαρκοφάγοι* οι οποίοι τρώνε μόνο άλλα ζώα,
 - (γ') *παμφάγοι* οι οποίοι τρώνε και φυτά και ζώα και
 - (δ') *σαπροφάγοι* οι οποίοι τρώνε μόνο νεκρή ύλη φυτικής ή ζωικής προέλευσης.

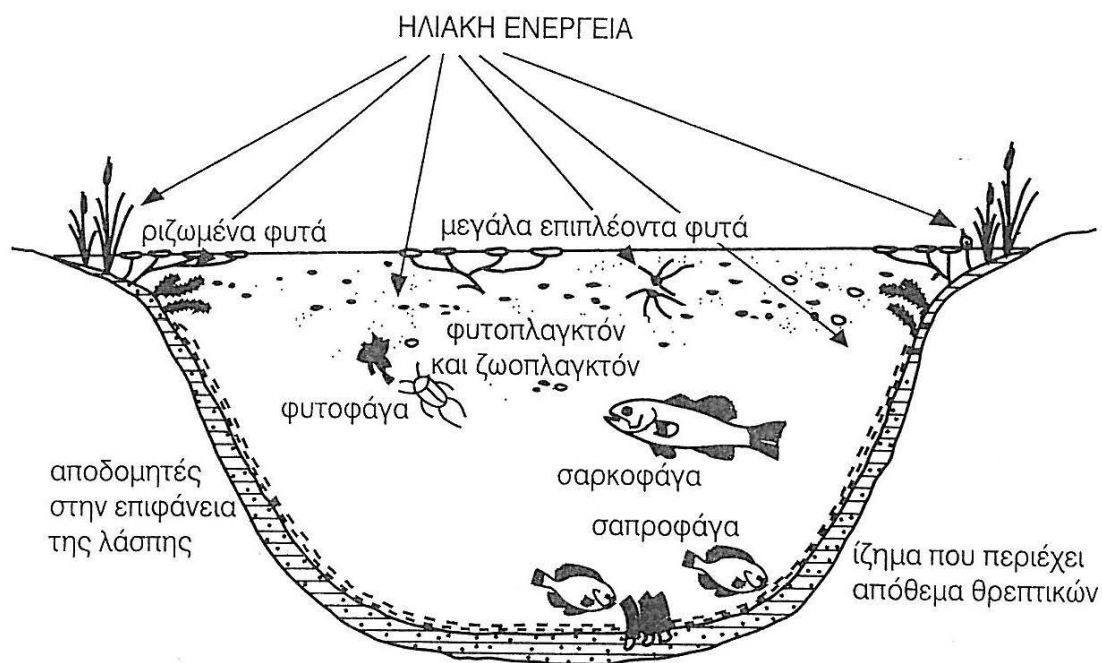
Αυτό που ουσιαστικά κάνουν οι καταναλωτές είναι η μετατροπή των συστατικών της φυτικής ύλης σε συστατικά ζωικής ύλης. Το σύνολο της ενέργειας, που μέσω της τροφής εξασφαλίζεται και χρησιμοποιείται από τους καταναλωτές προέρχεται από αυτήν που αρχικά παρασκευάστηκε από τα φυτά.

- ο **Αποδομητές**, Είναι οι οργανισμοί που υποβοηθούν την αποδόμηση. Η αποδόμηση συνήθως προκαλείται από μικροοργανισμούς όπως τα βακτήρια, μπορεί, όμως, να πραγματοποιηθεί και από μύκητες. Οι αποδομητές αποσυνθέτουν (ανοργανοποιούν) τα σύνθετα οργανικά μόρια που είχαν κατασκευαστεί από τα φυτά και τα ζώα. Με τον τρόπο αυτό απελευθερώνονται τα απλά ανόργανα στοιχεία και μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν από τα φυτά.

Οι αποσυνθέτες αποτελούν ουσιαστικό τμήμα των οικοσυστημάτων, αφού χωρίς αυτούς η βασική συστατική ύλη της ζωής θα εγκλωβιζόταν στα σύνθετα μόρια και κάθε περαιτέρω ανάπτυξη θα σταματούσε. Θεωρητικά, είναι δυνατή η ύπαρξη οικοσυστημάτων τα οποία περιέχουν μόνο παραγωγούς και αποδομητές. Η πλειονότητα, ωστόσο, των οικοσυστημάτων περιλαμβάνει και καταναλωτές.

Η ΛΙΜΝΗ ΩΣ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΛΟΥ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Τα βασικά συστατικά στοιχεία των οικοσυστημάτων μπορούν να αναγνωριστούν σε πολλούς διαφορετικούς τύπους βιοκατοικιών και θα ήταν χρήσιμο να εξετάσουμε έναν τέτοιο τύπο ως παράδειγμα. Η λίμνη του Σχήματος 2 είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μικρού οικοσυστήματος γιατί αποτελεί μια αναγνωρίσιμη ενότητα και δείχνει τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των βιοτικών και των αβιοτικών συστατικών στοιχείων του συστήματος. Η λίμνη δεν αποτελεί μόνο μια βιοκατοικία για τα φυτά και τα ζώα. Οι ίδιοι οι οργανισμοί καθιστούν τη λίμνη αυτό που είναι. Σε μια μικρή λίμνη τα βασικά στοιχεία του οικοσυστήματος είναι τα παρακάτω:



Σχ. 2. Η λίμνη ως απλό οικοσύστημα.

Αβιοτικά υλικά. Είναι οι βασικές ανόργανες και οργανικές ενώσεις όπως το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο μαζί με τα λιγότερο άφθονα θρεπτικά συστατικά όπως το ασβέστιο και τα μεταλλικά άλατα. Ένα μικρό ποσοστό των βασικών αυτών θρεπτικών βρίσκεται διαλυμένο στο νερό της λίμνης και είναι άμεσα διαθέσιμο στα βιοτικά στοιχεία του συστήματος. Το μεγαλύτερο, ωστόσο, τμήμα τους βρίσκεται στα ιζήματα στο βυθό της λίμνης. Αυτά τα θρεπτικά της ιλύος αποτελούν για το οικοσύστημα ένα απόθεμα.

Παραγωγοί. Σε μια λίμνη υπάρχουν συνήθως δύο βασικοί τύποι παραγωγών οργανισμών:

- (α') *Μεγάλα φυτά που είτε επιπλέουν είτε έχουν ριζικό σύστημα, όπως, για παράδειγμα, τα αγριόχορτα της λίμνης ή οι κρίνοι του νερού.* Απαντώνται συνήθως στα ρηχά νερά.
- (β') *Μικροσκοπικά επιπλέοντα φυτά.* Είναι συνήθως μικροφύκη και ονομάζονται *φυτοπλαγκτόν*. Απλώνονται στα νερά της λίμνης, εκεί όπου υπάρχει αρκετή ηλιακή ενέργεια για φωτοσύνθεση.

Τα μικροσκοπικά αυτά φυτά δεν είναι ορατά με γυμνό μάτι, όταν, όμως, βρίσκονται σε αφθονία, προσδίδουν στο νερό ένα πρασινωπό χρώμα. Για τις περισσότερες λίμνες το φυτοπλαγκτόν παίζει πολύ σημαντικότερο ρόλο στην παραγωγή της βασικής τροφής από ότι τα μεγάλα φυτά.

Καταναλωτές. Σε ένα λιμναίο οικοσύστημα είναι δυνατόν να υπάρχουν πολλοί τύποι ζώων. Τα φυτοφάγα, για παράδειγμα, μπορεί να περιλαμβάνουν από το μικροσκοπικό *ζωοπλαγκτόν* που τρέφεται με το φυτοπλαγκτόν, μέχρι μεγάλα φυτοφάγα ψάρια που τρέφονται με τα αγριόχορτα της λίμνης. Παρόμοια, στα σαρκοφάγα εντάσσεται μια μεγάλη ποικιλία ζώων όπως τα σαρκοφάγα έντομα. Τα σαρκοφάγα μπορεί να τρέφονται είτε με τα φυτοφάγα ζώα είτε με άλλα σαρκοφάγα. Τα σαπροφάγα, όπως τα υδρόβια σκουλήκια, κατοικούν συνήθως στο βυθό της λίμνης και συντηρούνται με την οργανική νεκρή μάζα, που κατακρημνίζεται μέσα στο νερό.

Αποδομητές. Τα υδρόβια βακτήρια και οι μύκητες απαντώνται σε όλη τη μάζα του νερού, είναι, όμως, ιδιαίτερα παραγωγικοί στη διεπιφάνεια που σχηματίζεται από τη λάσπη του βυθού και το νερό και που αποτελεί την περιοχή όπου συσσωρεύονται η νεκρή ύλη των φυτών και των ζώων. Στις λίμνες, η νεκρή οργανική ύλη αποδομείται σχετικά γρήγορα, εν μέρει λόγω και της δράσης των αποσυνθετών. Όταν τα νεκρά σώματα αποσυντεθούν, τα θρεπτικά που βρίσκονται σε αυτά απελευθερώνονται για να ξαναχρησιμοποιηθούν στη συνέχεια από τα φυτά.

ΤΡΟΦΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τροφικές αλυσίδες. Η μεταφορά της ενέργειας που περικλείεται στην τροφή και που πραγματοποιείται με το πέρασμα της από μια σειρά οργανισμών, όπου ο ένας τρώει τον άλλο είναι γνωστή ως τροφική αλυσίδα. Στο παράδειγμα του λιμναίου οικοσυστήματος είδαμε την ύπαρξη μιας συγκεκριμένης διάταξης όπου τα βιοτικά στοιχεία του συστήματος σχηματίζουν σειρά επιπέδων κατανάλωσης. Οι τροφικές αλυσίδες μπορεί να έχουν απλή γραμμική μορφή όπως:

φυτά → φυτοφάγα → σαρκοφάγα → αποδομητές

Σε ένα θαλάσσιο οικοσύστημα η τροφική αλυσίδα μπορεί να είναι:

φυτοπλαγκτόν → ζωοπλαγκτόν → φάλαινες → βακτήρια

και σε ένα χορτολιβαδικό οικοσύστημα:

γρασίδι → αρουραίοι → νυφίτσες → βακτήρια

Συχνά, υπάρχουν περισσότερα από τέσσερα στάδια σε μια τροφική αλυσίδα. Ένα οικοσύστημα μπορεί, για παράδειγμα, να περιλαμβάνει μια σειρά τριών τύπων σαρκοφάγων που τρέφονται το ένα από το άλλο.

φυτά → φυτοφάγα → σαρκοφάγα (1) → σαρκοφάγα (2) → σαρκοφάγα (3) →→
→ αποδομητές

Είναι σπάνιο, ωστόσο, να βρει κανείς περισσότερα από έξι στάδια σε μια τροφική αλυσίδα. Οι τροφικές αλυσίδες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικούς τύπους (α') στις τροφικές αλυσίδες βόσκησης και (β') στις τροφικές αλυσίδες αποσύνθεσης.

- (α') *Τροφικές αλυσίδες βόσκησης.* Στα είδη αυτά της τροφικής αλυσίδας τα φυτά καταναλώνονται από τους φυτοφάγους οργανισμούς, ενώ είναι ακόμα ζωντανά. Αυτό συνεπάγεται μια αρκετά γρήγορη και άμεση μεταφορά ενέργειας από τα ζωντανά φυτά στα φυτοφάγα και στα σαρκοφάγα ζώα.
- (β') *Τροφικές αλυσίδες αποσύνθεσης.* Στην περίπτωση αυτή τα σαπροφάγα καταναλώνουν νεκρή φυτική ύλη (τριπτόν ή σαπρομάζα) όπως είναι τα νεκρά φύλλα. Σαπροφάγοι οργανισμοί των χερσαίων οικοσυστημάτων είναι μεταξύ άλλων τα άκαρι του εδάφους, τα χιλιόποδα και οι γαιοσκώληκες, ενώ στα θαλάσσια οικοσυστήματα σαπροφάγα είναι διάφορα σκουλήκια και μαλάκια. Στις τροφικές αλυσίδες αποσύνθεσης η ενέργεια μεταφέρεται στα άλλα στοιχεία του συστήματος με πιο αργούς ρυθμούς από ότι στις τροφικές αλυσίδες βόσκησης. Η νεκρή φυτική ύλη μπορεί να παραμείνει στο σύστημα για πολύ καιρό προτού καταναλωθεί, παρ' όλο που η δράση των σαπροφάγων συχνά υποβοηθείται από τους αποδομητές. Οι τροφικές αλυσίδες αποσύνθεσης είναι σε γενικές γραμμές πολυπλοκότερες από τις τροφικές αλυσίδες βόσκησης.

Οι δύο παραπάνω τύποι τροφικής αλυσίδας ενδέχεται να υπάρχουν ξεχωριστά ο ένας από τον άλλον, μπορεί, όμως, να λειτουργούν και σε συνδυασμό.

Στα διαφορετικών ειδών οικοσυστήματα οι δύο αυτές τροφικές αλυσίδες παρουσιάζουν διαφορετική σπουδαιότητα. Στα δάση, για παράδειγμα, οι τροφικές αλυσίδες αποσύνθεσης είναι συχνά πιο σημαντικές, ενώ στα θαλάσσια οικοσυστήματα συνήθως σημαντικότερες είναι οι τροφικές αλυσίδες βόσκησης. Η αντίθεση αυτή δεν είναι έμφυτη στα χερσαία και στα θαλάσσια οικοσυστήματα, αφού, για παράδειγμα, στα αλμυρά έλη κυριαρχούν οι πρώτες, στα χορτολιβαδικά συστήματα, όμως, οι δεύτερες είναι σημαντικότερες.

Τροφικά δίκτυα. Παρ' όλο που απλές τροφικές αλυσίδες απαντώνται σε πολλούς τύπους οικοσυστημάτων, οι τροφικές σχέσεις είναι συνήθως πολυπλοκότερες, καθώς η πλειοψηφία των ζώων καταναλώνουν μια μεγάλη ποικιλία τροφής. Τα περισσότερα φυτοφάγα τρώνε πολλούς τύπους φυτών, ενώ τα περισσότερα σαρκοφάγα τρώνε αρκετούς τύπους φυτοφάγων και άλλων σαρκοφάγων. Συνεπώς, οι γραμμικές τροφικές αλυσίδες αλληλοσυνδέονται για να σχηματίσουν τροφικά δίκτυα. Ένα παράδειγμα τροφικού δικτύου για τα λιβάδια της Ανατολικής Αφρικής παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (στο διάγραμμα αυτό δεν επιχειρείται να περιληφθούν όλα τα ζώα που εμπλέκονται στο δίκτυο, απλά παρουσιάζονται οι σημαντικότερες ομάδες).

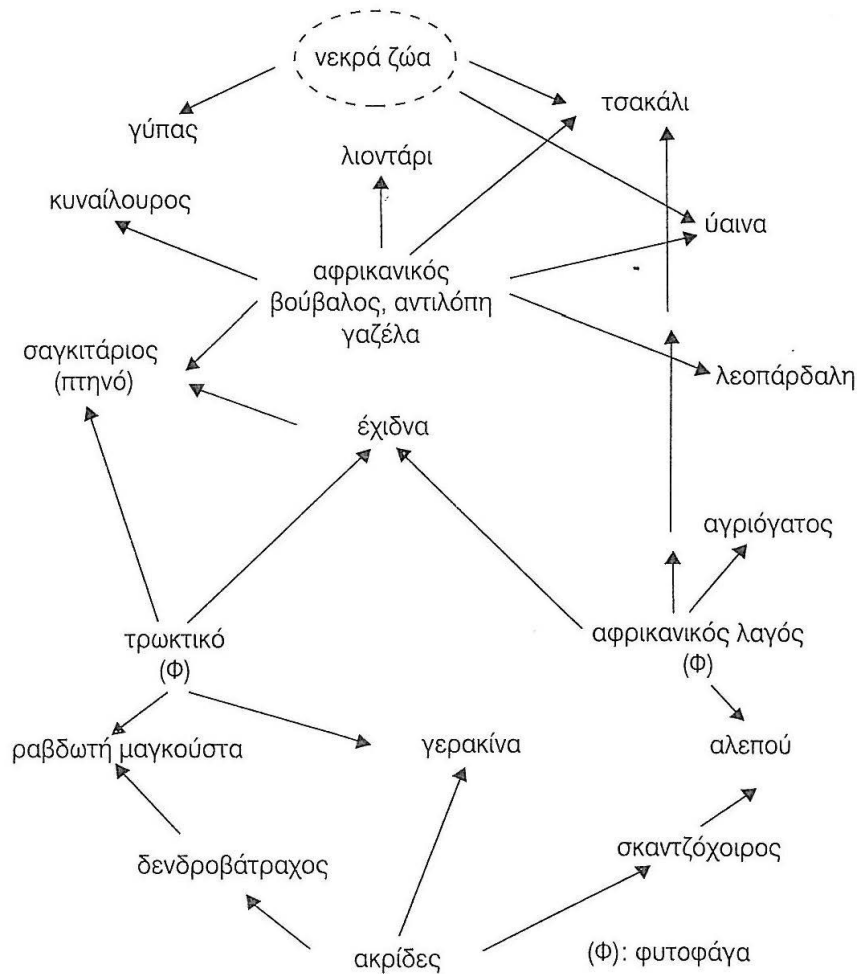
Οι τροφικές αλυσίδες βόσκησης και αποσύνθεσης συχνά συνδέονται σε τροφικά δίκτυα στο επίπεδο των σαρκοφάγων. Τα μορφώματα των τροφικών σχέσεων στις τροφικές αλυσίδες και στα τροφικά δίκτυα μπορούν να προσδιοριστούν με τη χρήση διάφορων τεχνικών όπως είναι η ανάλυση του περιεχομένου του πεπτικού συστήματος των ζώων ή η εισαγωγή ραδιενεργών ανιχνευτών στα φυτά και η παρακολούθηση στη συνέχεια της πορείας τους μέσα στο σύστημα.

Τροφικά επίπεδα. Οι οργανισμοί που τρέφονται μετά από τον ίδιο αριθμό βαθμίδων (ξεκινώντας από τους αυτότροφους) σε μια τροφική αλυσίδα ή ένα δίκτυο λέμε πως ανήκουν στο ίδιο τροφικό επίπεδο. Έτσι, τα φυτά απαρτίζουν το πρώτο τροφικό επίπεδο, οι φυτοφάγοι οργανισμοί το δεύτερο, οι σαρκοφάγοι που τρώνε τους φυτοφάγους το τρίτο κ.ο.κ. Οι καταναλωτές μπορούν, επίσης, να χαρακτηριστούν ως πρώτου βαθμού, δεύτερου βαθμού, τρίτου βαθμού, κ.λπ., ανάλογα με το τροφικό επίπεδο στο οποίο βρίσκονται. Για παράδειγμα, σε μια τροφική αλυσίδα με πέντε τροφικά επίπεδα θα υπάρχουν καταναλωτές πρώτου, δεύτερου, και τρίτου βαθμού:

φυτά → φυτοφάγα → σαρκοφάγα →
→ σαρκοφάγα (πρώτου βαθμού) (δεύτερου βαθμού) (τρίτου
βαθμού) → αποσυνθέτες

Είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ πως η έννοια του τροφικού επιπέδου έχει λειτουργική και όχι πληθυσμιακή σημασία. Ένα είδος μπορεί να καταλαμβάνει περισσότερα του ενός τροφικά επίπεδα. Στο τροφικό δίκτυο της εικόνας 3, για παράδειγμα, το ραβδωτό μαγκούστα βρίσκεται στο τρίτο

τροφικό επίπεδο όταν τρώει τους αρουραίους των αγρών και στο τέταρτο όταν τρώει τους δενδρόβιους βατράχους της ανατολικής Αφρικής. Τα βέλη υποδηλώνουν τη διεύθυνση της ενεργειακής ροής.



Σχ. 3. Τμήμα τροφικού δικτύου στα χορτολίβαδα της ανατολικής Αφρικής.

ΒΑΣΙΚΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί τη θεμελιώδη κινητήρια δύναμη όλων των οικοσυστημάτων. Τα πράσινα φυτά απορροφούν θρεπτικά συστατικά από το έδαφος και αέριες ενώσεις από την ατμόσφαιρα για να παράγουν την τροφή τους, με τη χρήση ηλιακής ενέργειας. Η ενέργεια που αποκτάται από την τροφή κυκλοφορεί μέσα στο σύστημα, στις τροφικές αλυσίδες και στα δίκτυα, από το ένα τροφικό επίπεδο στο επόμενο.

Μορφές ενέργειας. Η διαθέσιμη προς χρήση ενέργεια στα οικοσυστήματα παρουσιάζεται με αρκετές διαφορετικές μορφές ή καταστάσεις. Τέσσερις από αυτές θεωρούνται σημαντικότερες.

- α') Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια..

- (β') *Χημική ενέργεια.* Είναι η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στις χημικές ενώσεις. Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, το φως (ηλεκτρομαγνητική ενέργεια) χρησιμοποιείται για την παρασκευή πολύπλοκων μορίων υδατανθράκων. Αυτά με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται για την παρασκευή άλλων συστατικών της φυτικής ύλης όπως είναι τα λίπη και οι πρωτεΐνες. Κατά το πέρασμά τους από τα διάφορα τροφικά επίπεδα του οικοσυστήματος, μετατρέπονται σε νέες πολύπλοκες ενώσεις για τη δημιουργία της ζωικής ύλης. Αυτή η μετατροπή απαιτεί ενέργεια. Όταν όλες οι ουσίες αποδομηθούν ξανά, πράγμα που συμβαίνει κατά τη διαδικασία της αναπνοής, απελευθερώνεται ενέργεια.
- (γ') *Θερμική ενέργεια.* Η θερμική ενέργεια προκύπτει από τη μετατροπή της μη-τυχαίας κίνησης των μορίων σε τυχαία. Το είδος αυτό της ενέργειας απελευθερώνεται σε κάθε περίπτωση παραγωγής έργου. Ως παραγωγή έργου θεωρούμε την περίπλοκη ανάπτυξη των οργανισμών.
- (δ') *Κινητική ενέργεια.*

Οι νόμοι της θερμοδυναμικής. Η ροή της ενέργειας μέσα σε ένα οικοσύστημα λειτουργεί με βάση θεμελιώδεις φυσικούς νόμους, τους νόμους της θερμοδυναμικής. Οι δύο πρώτοι από αυτούς είναι ιδιαίτερα σημαντικοί.

- (α') Ο *πρώτος νόμος* της θερμοδυναμικής δηλώνει πως η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί. Αυτό σημαίνει πως μπορεί μόνο να μετατραπεί από μία κατάσταση σε μία άλλη. Ένα παράδειγμα είναι η μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης.
- (β') Ο *δεύτερος νόμος* της θερμοδυναμικής δηλώνει πως καμιά μετατροπή ενέργειας από μια κατάσταση σε μια άλλη δε γίνεται με 100% απόδοση. Υπάρχει πάντα ενέργεια που χάνεται με τη μορφή θερμότητας. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι όταν οι φυτοφάγοι οργανισμοί τρώνε φυτά για να πάρουν τροφή για τη διατήρηση και την ανάπτυξή τους, δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλη την τροφική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στη φυτική ύλη. Κατά τη διάρκεια της μετατροπής υπάρχει πάντα κάποια απώλεια ενέργειας με τη μορφή θερμότητας.

Η απόληξη της ενέργειας που εισέρχεται στο οικοσύστημα. Ο πρώτος και ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής υπαγορεύουν πως το σύνολο της ηλιακής ενέργειας που δεσμεύεται από τα φυτά με τη μορφή τροφής πρέπει να κάνει ένα από τα τρία παρακάτω πράγματα:

- (α') μπορεί να κυκλοφορήσει στο οικοσύστημα διαμέσου των τροφικών αλυσίδων και δικτύων

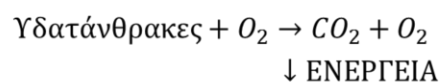
- (β') μπορεί να αποταμιευτεί στο σύστημα με τη μορφή χημικής ενέργειας στη φυτική ή ζωική ύλη,
- (γ') μπορεί να αποβληθεί από το σύστημα με τη μορφή θερμότητας ή άχρηστων υλικών.

Αποθήκευση της ενέργειας στο σύστημα. Το απόθεμα της ενέργειας μέσα στο σύστημα είναι το ποσό της φυτικής και ζωικής ύλης που βρίσκεται μέσα σε αυτό. Το πραγματικό ποσό ζωντανής ύλης που βρίσκεται μέσα στο οικοσύστημα ονομάζεται ιστάμενη μάζα. Μπορεί να εκφραστεί με αρκετούς τρόπους συνήθως, όμως, περιγράφεται ως βιομάζα ανά μονάδα επιφάνειας μετρούμενη ως ξηρό βάρος ή θερμοδική αξία. Οι οικολόγοι μελετούν συνήθως την ιστάμενη μάζα σε κάθε τροφικό επίπεδο καθώς αυτή αποτελεί ένδειξη του μορφώματος της ενεργειακής ροής μέσα στο σύστημα.

Πώς ορίζεται η ιστάμενη μάζα από το μόρφωμα της ενεργειακής ροής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όσο απομακρυνόμαστε από τα φυτά μέσα στην τροφική αλυσίδα, το ποσό της ιστάμενης μάζας που βρίσκεται στο κάθε τροφικό επίπεδο ελαττώνεται. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους.

- (α') Υπάρχουν απώλειες ενέργειας ανάμεσα στα τροφικά επίπεδα. Όπως έχουμε ήδη επισημάνει, η μετατροπή της ενέργειας από μια μορφή σε μια άλλη δε γίνεται ποτέ με 100% απόδοση. Κάθε φορά που η ενέργεια μεταφέρεται από το ένα επίπεδο στο άλλο και η ύλη ενός οργανισμού πρέπει να μετατραπεί για να σχηματιστεί η ύλη ενός άλλου οργανισμού, χάνεται ορισμένη ποσότητα ενέργειας. Η μεταφορά ενέργειας ανάμεσα στα τροφικά επίπεδα συνεπάγεται μεγάλες απώλειες ενέργειας.
- (β') Υπάρχουν απώλειες ενέργειας μέσα στα τροφικά επίπεδα. Όλοι οι οργανισμοί πρέπει να αναπνέουν για να διατηρηθούν στη ζωή. Η αναπνοή συνεπάγεται την οξείδωση των υδατανθράκων για την απελευθέρωση ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται μέσα στο σώμα του φυτού ή του ζώου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να παρασταθεί με τον ακόλουθο τρόπο:

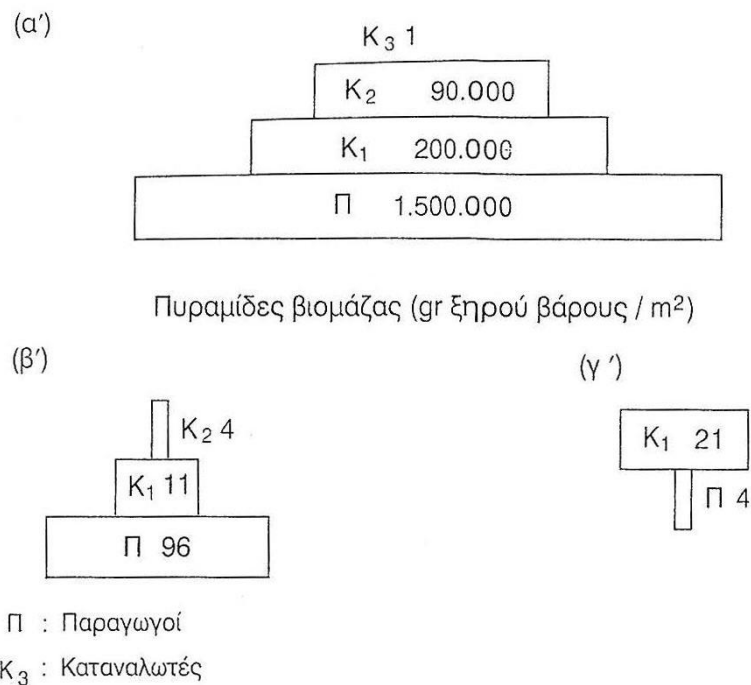


Με τον τρόπο αυτό, καταναλίσκεται η ενέργεια μέσα στο κάθε τροφικό επίπεδο.

Η συνδυασμένη δράση των δύο παραπάνω διαδικασιών έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της ενεργειακής ροής καθώς αυτή μεταφέρεται από το ένα τροφικό επίπεδο στο άλλο. Η διαθέσιμη προς χρήση ενέργεια είναι ελαττωμένη στους τελευταίους κρίκους της τροφικής αλυσίδας και συνεπώς η βιομάζα που υποστηρίζεται είναι και αυτή λιγότερη.

ΤΡΟΦΙΚΕΣ ΠΥΡΑΜΙΔΕΣ

Τα περισσότερα οικοσυστήματα περιέχουν μεγάλο αριθμό τροφικών αλυσίδων και περίπλοκα τροφικά δίκτυα. Η ξεχωριστή εξέταση των μορφωμάτων της ενεργειακής ροής είναι πολύ δύσκολη. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να γίνονται ορισμένες γενικεύσεις που βοηθούν στην ανάλυση. Οι οργανισμοί ομαδοποιούνται συνήθως με βάση το τροφικό επίπεδο στο οποίο βρίσκονται και τις σχέσεις ανάμεσα στις ιστάμενες μάζες του κάθε επιπέδου. Οι ποσότητες της ζωντανής ύλης στο κάθε επίπεδο μπορούν να παρασταθούν γραφικά ως τροφικές πυραμίδες. Στις πυραμίδες αυτές, η κάθε ράβδος αντιπροσωπεύει ένα τροφικό επίπεδο. Το μέγεθος της ράβδου είναι ανάλογο με την ποσότητα της ζωντανής ύλης που βρίσκεται σε αυτό το επίπεδο. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι τροφικών πυραμίδων.



Σχ. 4. Παραδείγματα τροφικών πυραμίδων. (α') Πυραμίδα αριθμών. Χορτολίβαδα το καλοκαίρι, (β') Λίμνη Wisconsin, (γ') Θάλασσα της Μάγχης.

- **Πυραμίδα αριθμών.** Σε αυτή, σημειώνονται οι αριθμοί των οργανισμών του κάθε επιπέδου. Πολλοί μικροί παραγωγοί υποστηρίζουν ένα σχετικά μεγάλο αριθμό φυτοφάγων και σαρκοφάγων ζώων [Σχ. 4 (α)]. Μερικές φορές ο αριθμός των παραγωγών είναι μικρός σε σύγκριση με αυτόν των καταναλωτών. Ένα ή δύο δέντρα, για παράδειγμα, μπορούν να υποστηρίξουν έναν τεράστιο αριθμό εντόμων. Οι πυραμίδες αριθμών έχουν το βασικό μειονέκτημα ότι δε λαμβάνουν υπόψη το μέγεθος των οργανισμών.

- **Πυραμίδα βιομάζας.** Σε αυτή σημειώνεται το βάρος των οργανισμών που βρίσκεται στο κάθε τροφικό επίπεδο. Στις συνήθεις περιπτώσεις, το βάρος των παραγωγών υπερβαίνει αυτό των φυτοφάγων οργανισμών, οι οποίοι με τη σειρά τους υπερβαίνουν σε βάρος τους σαρκοφάγους [Σχ. 4 (β)]. Μερικές φορές, ωστόσο, παρατηρείται και το αντίθετο φαινόμενο, γνωστό ως αναστροφή της πυραμίδας [Σχ. 4(γ)].

Το μόρφωμα αυτό συναντάται σε δύο περιπτώσεις: πρώτον όταν η μέτρηση γίνεται σε μια περιορισμένη περιοχή και δεύτερον όταν οι παραγωγοί είναι μικροί οργανισμοί με πολύ γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης.

Σε γενικές γραμμές, όσο μικρότερος είναι ο οργανισμός τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός του μεταβολισμού του ανά γραμμάριο βάρους σώματος. Η τάση αυτή αναφέρεται συχνά ως *νόμος της αντίστροφης σχέσης μεγέθους- μεταβολικού ρυθμού*. Στην περίπτωση που οι παραγωγοί ενός οικοσυστήματος είναι οργανισμοί πολύ μικρού μεγέθους και οι καταναλωτές πολύ μεγάλοι, η ιστάμενη μάζα των καταναλωτών είναι μεγαλύτερη από αυτήν των παραγωγών σε οιαδήποτε χρονική στιγμή. Η κατάσταση αυτή μπορεί φυσικά να διατηρηθεί μόνο εάν τα φυτά μπορούν να παράγουν βιομάζα με έναν πολύ γρήγορο ρυθμό γιατί η παραγωγή τους σε υδατάνθρακες πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέση ποσότητα που χρειάζονται οι καταναλωτές.

Οι πυραμίδες βιομάζας αποδεικνύονται χρήσιμες στη μέτρηση της ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στο κάθε τροφικό επίπεδο καθώς οι διαφορές στη θερμιδική αξία των μορφών ύλης ενός οικοσυστήματος δεν είναι συνήθως μεγάλες.

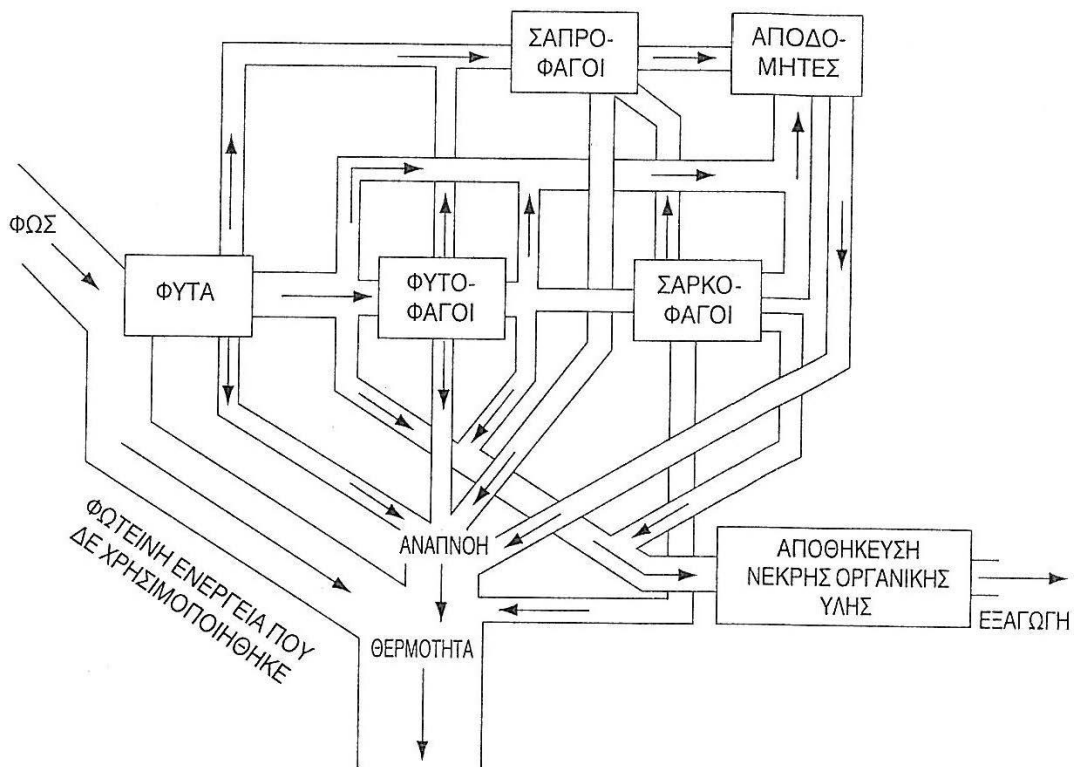
- **Πυραμίδες ενέργειας.** Στον τύπο αυτό της πυραμίδας, υπολογίζονται τα ποσά της ενέργειας που χρησιμοποιούνται από τους οργανισμούς του κάθε τροφικού επιπέδου σε δεδομένο χώρο και για δεδομένη χρονική περίοδο. Η μέθοδος αυτή συγκριτικά με τις άλλες δύο είναι περισσότερο εξελιγμένη και ακριβής. Η εφαρμογή της, ωστόσο, είναι αρκετά δύσκολη.

ΤΥΠΙΚΑ ΜΟΡΦΩΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕΣΑ ΣΤΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Παρ' όλο που η μελέτη των τροφικών πυραμίδων είναι χρήσιμη στο να μας δίνει ενδεικτικές πληροφορίες γύρω από τον τρόπο που αποθηκεύεται η ενέργεια στο σύστημα, πρέπει να προχωρήσουμε παραπέρα εξετάζοντας τον τρόπο που μεταφέρεται η ενέργεια ανάμεσα στα τροφικά επίπεδα όπως και τις απώλειες της ενέργειας από το σύστημα. Για να το πετύχουμε αυτό, χρειαζόμαστε μια μέθοδο με την οποία θα αναπαριστάται η ροή της ενέργειας ανάμεσα στα στοιχεία του συστήματος και διαμέσου των ορίων του. Οι οικολόγοι το κάνουν αυτό ομαδοποιώντας τους οργανισμούς ανάλογα με τα τροφικά τους επίπεδα.

Η ποσότητα βιομάζας που υπάρχει στο κάθε τροφικό επίπεδο μπορεί να παρασταθεί γραφικά σαν ένα κουτί. Οι ροές ενέργειας μέσα από το οικοσύστημα μπορούν να παρομοιαστούν με τη ροή του νερού μέσα από σωλήνες που συνδέουν τα διαφορετικά

στοιχεία του συστήματος. Το πλάτος του κάθε σωλήνα είναι ανάλογο με το ποσό της διερχόμενης ενέργειας. Η ιδέα αυτή, γνωστή ως *υδραυλικό ανάλογο*, μας δίνει τη δυνατότητα να παραστήσουμε τη ροή της ενέργειας μέσα σε ένα οικοσύστημα.



Σχ. 5. Το υδραυλικό ανάλογο της ενεργειακής ροής μέσα σε ένα οικοσύστημα.

Κύριες πορείες της ενεργειακής ροής. Είναι οι ακόλουθες.

- (α') Η ενέργεια εισέρχεται στο οικοσύστημα με τη μορφή ηλιακής ενέργειας που ένα μέρος της χρησιμοποιείται στη φωτοσύνθεση. Συγκεκριμένα, το μισό περίπου της προσπίπτουσας στα πράσινα φυτά ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από τους φωτοσυνθετικούς μηχανισμούς, και ένα μικρό μόνο μέρος της απορροφούμενης αυτής ενέργειας (από 1% έως 5% περίπου) μετατρέπεται σε τροφή (χημική ενέργεια). Η υπόλοιπη ενέργεια χάνεται από το σύστημα με τη μορφή θερμότητας. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο Σχ. 5 ως εκροή από το σύστημα. Ένα ποσό ενέργειας που έχει μετατραπεί σε τροφή από τα φυτά καταναλώνεται για την αναπνοή τους. Η διαδικασία αυτή απελευθερώνει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας η οποία χάνεται από το σύστημα.
- (β') Η ενέργεια που βρίσκεται με τη μορφή φυτικής ύλης μπορεί να περάσει στις τροφικές αλυσίδες διαμέσου των φυτοφάγων και των σαπροφάγων οργανισμών. Όπως ήδη επισημάνθηκε υπάρχουν πολύ μεγάλες απώλειες ενέργειας ανάμεσα στα τροφικά επίπεδα.

Η ροή, συνεπώς, της ενέργειας ελαττώνεται καθώς προχωράμε στα πιο απομακρυσμένα στάδια των τροφικών αλυσίδων. Σε γενικές γραμμές, οι φυτοφάγοι οργανισμοί αποθηκεύουν το 10% της ενέργειας που προμηθεύονται από τα φυτά. Ομοίως οι σαρκοφάγοι αποθηκεύουν το 10% της ενέργειας που προμηθεύονται από τα θηράματα.

- (γ') Εάν η φυτική ύλη δεν καταναλωθεί, μπορεί να αποταμιευτεί στο σύστημα, να περάσει στους αποσυνθέτες ή να αποβληθεί από το σύστημα με τη μορφή νεκρής οργανικής ύλης.
- (δ') Ενέργεια για την αναπνοή τους χρησιμοποιούν και άλλοι οργανισμοί - καταναλωτές και αποδομητές - εκτός από τα φυτά και απελευθερώνουν με τον τρόπο αυτό θερμότητα, που διαφεύγει από το οικοσύστημα.
- (ε') Καθώς το οικοσύστημα είναι ανοιχτό σύστημα, ποσότητα οργανικής ύλης είναι δυνατό να διαπεράσει τα όριά του.

Μειονεκτήματα του υδραυλικού ανάλογου. Το υδραυλικό ανάλογο παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα που και τα δύο προέρχονται από την απλότητα του :

(α') Είναι δύσκολο στην πραγματικότητα, να ομαδοποιήσουμε τους οργανισμούς σε τροφικά επίπεδα. Ένα είδος μπορεί να έχει πολλούς ρόλους μέσα στο οικοσύστημα και μπορεί να λειτουργεί σε αρκετά διαφορετικά τροφικά επίπεδα.

(β') Οι πορείες της ενέργειας στη φύση πολύ σπάνια είναι τόσο απλές. Η ενέργεια ρέει στο σύστημα μέσα από πολύπλοκες σχέσεις ανάμεσα στα είδη, που οδηγούν στις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα τροφικά επίπεδα. Πολύ συχνά, η ενέργεια, αντί για ευθεία πορεία, ακολουθεί βρόγχους.