

Η έννοια του οικοσυστήματος

Η οικολογία των οικοσυστημάτων μελετά τους δεσμούς μεταξύ των οργανισμών και του φυσικού τους περιβάλλοντος στο πλαίσιο της Γης ως σύστημα συστημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το εννοιολογικό και ιστορικό υπόβαθρο της επιστήμης της οικολογίας των οικοσυστημάτων.

Εισαγωγή

Η οικολογία των οικοσυστημάτων εξετάζει τις αλληλεπιδράσεις των οργανισμών και του περιβάλλοντός τους ως ένα ενιαίο σύστημα. Η οικοσυστημική προσέγγιση είναι θεμελιώδονς σημασίας για τη διαχείριση των πόρων της Γης, διότι μελετά τις αλληλεπιδράσεις που συνδέονται τα βιολογικά συστήματα, των οποίων ο άνθρωπος είναι αναπόσπαστο μέρος, με τα φυσικά συστήματα από τα οποία αυτά εξαρτώνται. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε ολόκληρο τον πλανήτη, στη λεκάνη του Αμαζονίου, ή στο χωράφι ενός αγρότη. Η οικοσυστημική προσέγγιση είναι πολύ σημαντική για την αειφορική διαχείριση και χρήση των φυσικών πόρων, σε μια εποχή που ο ανθρώπινος πληθυσμός και η κατανάλωση των φυσικών πόρων αυξάνονται διαρκώς και το περιβάλλον σε ολόκληρο τον πλανήτη διέρχεται ραγδαίες, μεγάλης κλίμακας αλλαγές.

Η οικοσυστημική προσέγγιση έχει αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία τα τελευταία χρόνια. Για παράδειγμα, η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για τη Βιοποικιλότητα του 1992, προώθησε μια οικοσυστημική προσέγγιση για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, συμπεριλαμβάνοντας και τον ανθρώπινο παράγοντα, αποστασιοποιούμενη από τις προσεγγίσεις που

έδιναν μεγαλύτερη έμφαση στη διατήρηση συγκεκριμένων ειδών, δύος γινόταν στο παρελθόν. Ο ρόλος της αλληλεπίδρασης των ειδών στη λειτουργία των οικοσυστημάτων αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο (Díaz et al. 2006). Έχουμε πλέον μια νέα αντίληψη για τους τρόπους με τους οποίους θα επιτύχουμε την πιο αειφορική διαχείριση των οικοσυστημάτων στα οποία στηριζόμαστε για τροφή και ίνες. Σήμερα καταγράφεται μείωση των θαλάσσιων αλιευμάτων, διότι η διαχείριση των ιχθυαποθεμάτων στηρίχθηκε σε εκτιμήσεις των αποθεμάτων συγκεκριμένων ειδών, οι οποίες δεν συνυπολόγισαν επαρκώς τους πόρους στους οποίους βασίζονται τα εμπορικά αλιεύματα (Walters και Martell 2004). Μια πιο ολιστική θεώρηση των διαχειρίζομενων συστημάτων μπορεί να εξηγήσει τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα ακόμη και στα πιο απλά οικοσυστήματα. Γίνεται επίσης σήμερα όλο και περισσότερο αντιληπτό ότι η εις βάθος κατανόηση της λειτουργίας των οικοσυστημάτων είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση της ποσότητας και της ποιότητας των υδάτινων αποθεμάτων, καθώς και για τη ρύθμιση της ατμοσφαιρικής σύστασης, η οποία καθορίζει το κλίμα του πλανήτη (Postel και Richter 2003).

Ένα κεντρικό ζήτημα

Η εκμετάλλευση των οικοσυστημάτων από τον άνθρωπο αυξήθηκε περισσότερο κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 χρόνων, παρά σε ολόκληρη την προηγούμενη ιστορία του πλανήτη (Steffen et al. 2004), συνχά με απρόβλεπτες καταστρεπτικές συνέπειες. Για παράδειγμα, η συγκομιδή δασικών προϊόντων παρέχει στον άνθρωπο την ξυλεία και τα προϊόντα χάρτου που



Εικόνα 1.1 Η τμηματική εκχέρσωση των δασικών εκτάσεων οδηγεί στη δημιουργία κατατυμάτων όπου φύεται ένα μόνο είδος δένδρου σε ένα μωσαϊκό αυτοφυών δασών ελάτης του Douglas, ηλικίας 100 έως 500 ετών, στις βορειοδυτικές Η.Π.Α. Η φύση και η έκταση της εκχέρσωσης των δασών επηρεάζει τις οικοσυστηματικές διεργασίες σε μια κλίμακα

του είναι απαραίτητα (Εικόνα 1.1). Ωστόσο, η ποσότητα και η τοποθεσία της συγκομιδής επηρεάζουν άλλα αγαθά που προσφέρουν τα δάση στην ανθρωπότητα, όπως την ποιότητα και την ποσότητα του νερού στις πηγές των ποταμών⁺ τα αισθητικά και ψυχαγωγικά οφέλη των δασών⁺ τις πιθανότητες εκδήλωσης κατοικήσεων, τα συμβάντα εκρηκτικής αύξησης του πληθυσμού των εντόμων και των δασικών πυρκαγών⁺ και το δυναμικό των δασών να απελευθερώνουν ή να δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το οποίο επηρεάζει την κλιματική αλλαγή. Πώς μπορούμε να διαχειριστούμε τα οικοσυστήματα, ώστε να ικανοποιήσουμε τις πολλαπλές (και συχνά αντικρουόμενες) αυτές ανάγκες; Για παράδειγμα, το τελευταίο μισό του εικοστού αιώνα, στις βορειοδυτικές πολιτείες της Αμερικής ο ρυθμός εκχέρσωσης των δασών ήταν ταχύτερος από το ρυθμό ανανέωσής τους. Η ανησυχία σχετικά με την απώλεια των αρχέγονων δασών, που αποτελούσαν ενδιαίτημα απειλούμενων ειδών, όπως η στικτή κουκουβάγια, οδήγησε στην ανάπτυξη πρακτικών διαχείρισης των οικοσυστημάτων κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, προκειμένου εξεταστούν οι πολλαπλές χρήσεις και λειτουργίες των

που κυμαίνεται από τα μεμονωμένα κατατμήματα (π.χ παραγωγικότητα και βιοποικιλότητα), σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές (π.χ δεξαμενές νερού και κίνδυνος πυρκαγιάς), ή ακόμη και σε ολόκληρο τον πλανήτη (κλιματική αλλαγή). Φωτογραφία από Al Levno, Δασική Υπηρεσία των Η.Π.Α.

δασών (Christensen et al. 1996, Szaro et al. 1999). Η οικολογία των οικοσυστημάτων χρησιμοποιεί τα μεθοδολογικά και εννοιολογικά εργαλεία πολλών άλλων επιστημονικών πεδίων, για να δώσει τις αρχές που θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε τις συνέπειες των επιλογών μας.

Επισκόπηση της οικολογίας οικοσυστημάτων

Η ροή της ενέργειας και των υλικών μέσω των ζωντανών οργανισμών και του φυσικού περιβάλλοντος, παρέχει το γενικό πλαίσιο για την κατανόηση της ποικιλομορφίας των φυσικών και βιοτικών διεργασιών. Για ποιο λόγο στα τροπικά βροχοδάση, όπου υπάρχουν πολύ μεγάλα δέντρα, συγκεντρώνεται ένα πολύ λεπτό στρώμα νεκρών φύλλων στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ στην τούνδρα, η οποία συντηρεί μικρά φυτά, υπάρχει αφθονία οργανικής ουσίας στο έδαφος; Γιατί η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μειώνεται το καλοκαίρι, αλλά αυξάνεται το χειμώνα; Που καταλήγει το αζωτούχο λίπασμα που

προσθέτουν οι αγρότες στις καλλιέργειές τους και δεν υπάρχει κατά τη συγκομιδή; Για ποι λόγο η εισαγωγή εξωτικών αγρωστώδων στα λιβαδικά οικοσυστήματα έχει καταστήσει τα γειτονικά δάση ευάλωτα στις πυρκαγιές; Αυτά είναι μερικά ερωτήματα που επιχειρεί να απαντήσει η επιστήμη της οικολογίας των οικοσυστημάτων. Για να το κάνει αυτό, πρέπει πρώτα να ερμηνεύσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οργανισμών και του φυσικού τους περιβάλλοντος – τόσο την απόκριση των οργανισμών στο περιβάλλον τους, όσο και τον αντίκτυπο που έχουν σε αυτό. Η απάντηση σε αυτά τα ερωτήματα προϋποθέτει επίσης την επικέντρωση της ερευνητικής προσπάθειας στα οικολογικά συστήματα, ως σύνολα αλληλεπιδρώντων βιολογικών και μη βιολογικών παραγόντων και όχι σε μεμονωμένα είδη ή συστατικά του φυσικού περιβάλλοντος.

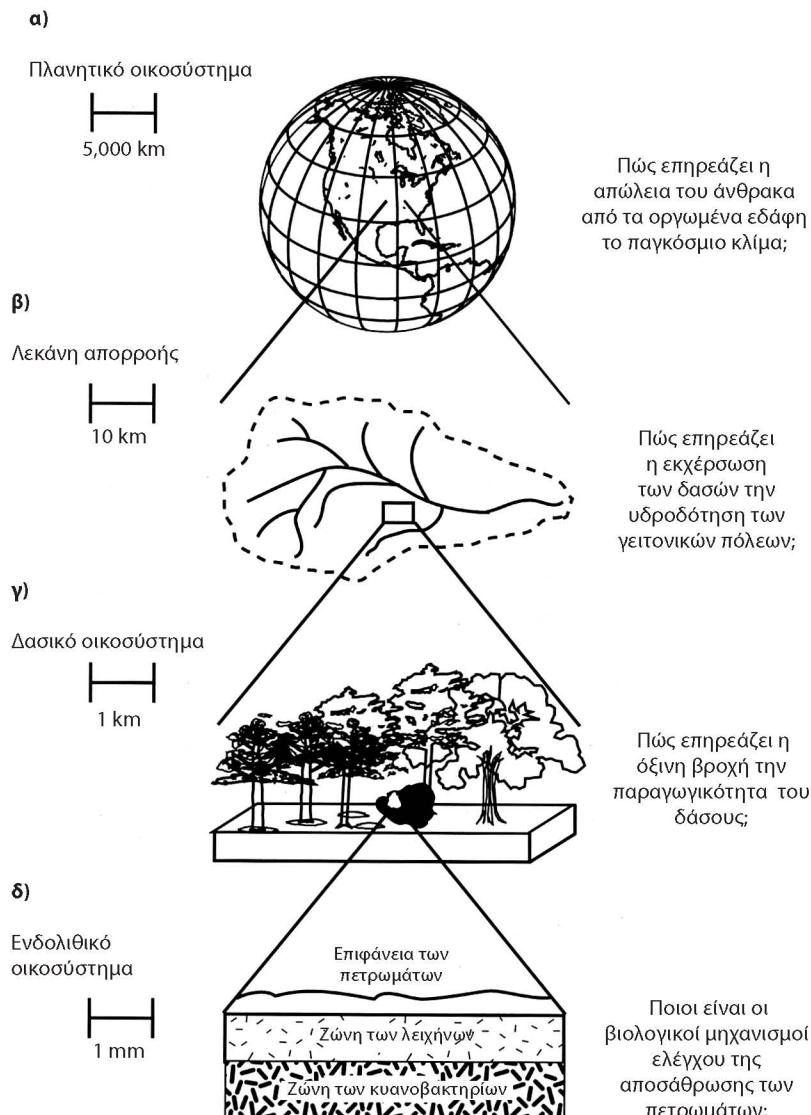
Η ανάλυση των οικοσυστημάτων επιχειρεί να καταστήσει κατανοητούς τους παράγοντες που ρυθμίζουν τις δεξαμενές (ποσότητα) και τη ροή των υλικών και της ενέργειας μέσα από τα οικολογικά συστήματα. Στα υλικά περιλαμβάνονται το νερό, ο άνθρακας, το άζωτο, χημικά στοιχεία των πετρωμάτων, όπως ο φώσφορος και νέες μορφές χημικών που έχουν εισαχθεί στο περιβάλλον από τον άνθρωπο, όπως τα παρασιτοκτόνα και τα ραδιονοικλίδια. Τα υλικά αυτά εντοπίζονται στις αβιοτικές (μη βιολογικές) δεξαμενές, όπως τα εδάφη, τα πετρώματα, το νερό και η ατμόσφαιρα και στις βιοτικές δεξαμενές, όπως τα φυτά, τα ζώα και οι μικροοργανισμοί των εδαφών (μικρόβια).

Ένα οικοσύστημα αποτελείται από το σύνολο των ζωντανών οργανισμών και των αβιοτικών δεξαμενών με τις οποίες αλληλεπιδρούν. Οι οικοσυστημικές διεργασίες είναι η ροή της ενέργειας και των υλικών από τη μία δεξαμενή στην άλλη. Η ενέργεια εισέρχεται σε ένα οικοσύστημα όταν, κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, η ηλιακή ενέργεια προκαλεί τη μείωση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), προκειμένου να παραχθούν σάκχαρα. Η οργανική ουσία και η ενέργεια είναι στενά συνδεδεμένες καθώς διέρχονται τα οικοσυστήματα. Η ενέργεια χάνεται από το οικοσύστημα όταν η οργανική ύλη οξειδώνεται λαμβάνοντας πάλι τη μορφή CO_2 , μέσω της αναπνοής των φυτών, των ζώων και των μικροβίων, ή της καύσης. Τα υλικά διέρχονται τα αβιοτικά στοιχεία του οικοσυστήματος μέσω μιας ποικιλίας διεργασιών, όπως η αποσάθρωση των πετρωμάτων, η εξάτμιση του νερού και η διάλυση των υλικών στο νερό. Οι ροές που σχετίζονται με τις βιοτικές παραμέτρους του οικοσυστήματος περιλαμβάνουν την απο-

ρόφηση των μεταλλικών στοιχείων από τα φυτά, τη φθινοπωρινή φυλλόπτωση, την αποικοδόμηση της νεκρής οργανικής ύλης από τους μικροοργανισμούς των εδαφών, την κατανάλωση των φυτών από τα φυτοφάγα ζώα και την κατανάλωση των φυτοφάγων από τα σαρκοφάγα. Οι περισσότερες από αυτές τις ροές επηρεάζονται πολύ εύκολα από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, καθώς και από τους βιολογικούς παράγοντες που ρυθμίζουν την πληθυσμιακή δυναμική και την αλληλεπίδραση των ειδών στις κοινότητες. Η καινοτόμος συμβολή της οικολογίας οικοσυστημάτων είναι η εστίαση του ενδιαφέροντος στους βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες, ως αλληλεπιδρώντα στοιχεία ενός μοναδικού, ενοποιημένου συστήματος.

Οι οικοσυστημικές διεργασίες μπορούν να μελετηθούν σε πολλές χωρικές κλίμακες. Τι μέγεθος έχει ένα οικοσύστημα; Οι οικοσυστημικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα μέσα σε μια ευρεία χωρική κλίμακα, αλλά η κλίμακα που είναι κατάλληλη για κάθε έρευνα, εξαρτάται από το ερώτημα που επιχειρούμε να απαντήσουμε (Εικόνα 1.2). Ο αντίκτυπος του ζωοπλαγκτού στα φύκη που αποτελούν την τροφή του μπορεί να μελετηθεί σε μικρά δοχεία στο εργαστήριο. Οι παράγοντες που περιορίζουν την παραγωγικότητα του οικοσυστήματος μπορούν να μελετηθούν σε σχετικά ομοιογενή κατατμήματα μιας λίμνης, ενός δάσους ή ενός καλλιεργημένου αγροτεμαχίου. Τα ερωτήματα αναφορικά με ανταλλαγές ενέργειας και υλικών που καλύπτουν πολύ μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, είναι καλύτερα να διερευνώνται σε παγκόσμια κλίμακα. Για παράδειγμα, η συγκέντρωση του CO_2 στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από τα παγκόσμια πρότυπα της βιοτικής ανταλλαγής του CO_2 και της καύσης των ορυκτών καυσίμων, τα οποία διαφοροποιούνται από περιοχή σε περιοχή. Η ταχεία μίξη του CO_2 στην ατμόσφαιρα ακολουθεί κατά μέσο όρο αυτά τα πρότυπα, επιτρέποντας στους ερευνητές να κάνουν εκτιμήσεις για τις μακροπρόθεσμες αλλαγές της συνολικής παγκόσμιας ροής του άνθρακα μεταξύ της Γης και της ατμόσφαιρας (βλ. Κεφ. 14).

Η απάντηση σε ορισμένα ερωτήματα απαιτεί προσεκτικές μετρήσεις της οριζόντιας μεταφοράς των υλικών. Η λεκάνη απορροής είναι η λογική χωρική μονάδα για τη μελέτη της επίδρασης των δασών στην ποιότητα και την ποσότητα του νερού που τροφοδοτεί τον ταμευτήρα νερού μιας πόλης. Η λεκάνη απορροής ή υδρολογική λεκάνη, αποτελείται από ένα χείμαρρο ή ένα ποταμό και διλές τις χερσαίες επιφάνειες που αποστραγ-



Εικόνα 1.2 Παραδείγματα οικοσυστημάτων που κυμαίνονται ως προς την έκταση κατά 10 τάξεις μεγέθους: ένα ενδολιθικό οικοσύστημα στα επιφανειακά στρώματα των πετρωμάτων (ύψους 1×10^{-3} m), ένα δάσος διαμέτρου 1×10^3 m, μια λεκάνη απορροής (μήκους 1×10^5 m) και η Γη (με περιφέρεια 1×10^7 m). Απεικονίζονται επίσης παραδείγματα των κατάλληλων για κάθε χωρική κλίμακα ερωτήσεων.

γίζουν σε αυτούς. Μελετώντας μια λεκάνη απορροής, μπορούμε να συγκρίνουμε την ποσότητα των υλικών που εισέρχονται μέσω της ατμόσφαιρας και των πετρωμάτων, με την ποσότητα των υλικών που διαφεύγουν μέσω του νερού του ποταμού. Οι μελέτες του ισοχύιου εισροών-εκροών των λεκανών απορροής έχουν συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της αποσάθρωσης των πετρωμάτων, η οποία

τροφοδοτεί το οικοσύστημα με θρεπτικά στοιχεία και της ανάπτυξης των φυτών και των μικροβίων, που δεσμεύει αυτά τα θρεπτικά στοιχεία (Vitousek and Reiners 1975, Bormann and Likens 1979, Driscoll et al. 2001, Falkenmark and Rockström 2004).

Ο ορισμός των ανώτερων και κατώτερων ορίων ενός οικοσυστήματος εξαρτάται και αυτός από το ερώτημα που θέτουμε, όπως επίσης και από τη χωρική

κλίμακα που ταιριάζει στο συγκεκριμένο ερώτημα. Για παράδειγμα, η γήινη ατμόσφαιρα εκτείνεται από τα αέρια μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων έως τις παρυφές του εξώτερου διαστήματος. Η ανταλλαγή CO_2 μεταξύ ενός δάσους και της ατμόσφαιρας μπορεί να μετρηθεί λίγα μέτρα πάνω από την κορυφή της κομοστέγης, όπου η διακύμανση της συγκέντρωσης του CO_2 αντικατοπτρίζει κατά κύριο λόγο τις διεργασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό του δάσους και λιγότερο στα γειτονικά οικοσυστήματα που βρίσκονται ενάντια στη φορά του ανέμου. Ωστόσο, η τοπική επίδραση των λιβαδιών στην ατμοσφαιρική περιεκτικότητα σε υγρασία, μπορεί να μετρηθεί σε ύψος αρκετών χιλιομέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, όπου η υγρασία που απελευθερώνεται από το οικοσύστημα συμπυκνώνεται και επιστρέφει ως νετός (βλ. Κεφ. 2). Όταν διερευνούμε την επίδραση των φυτών στον κύκλο των νερού και των θρεπτικών στοιχείων, το κατώτατο χωρικό όριο του οικοσυστήματος θα είναι το μέγιστο βάθος των ριζών, διότι το νερό και τα θρεπτικά που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος, είναι απροσπέλαστα για τα φυτά. Αντιθέτως, όταν μελετούμε τη μακροχρόνια διαμόρφωση των εδαφών, πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας τα πετρώματα που βρίσκονται βαθιά μέσα στο έδαφος και συνιστούν το μακροπρόθεσμο ταμιευτήρα πολλών θρεπτικών στοιχείων, τα οποία σταδιακά ενσωματώνονται στα επιφανειακά εδάφη (βλ. Κεφ. 3).

Η δυναμική του οικοσυστήματος είναι προϊόν διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε πολλές χρονικές κλίμακες. Ο ρυθμός των οικοσυστηματικών διεργασιών μεταβάλλεται διαρκώς εξαιτίας των διακυμάνσεων των περιβαλλοντικών παραγόντων και της δραστηριότητας των οργανισμών σε μια χρονική κλίμακα που κυμαίνεται από τα μικροδευτερόλεπτα έως τα εκατομμύρια χρόνια (βλ. Κεφ. 12). Τα συστήματα δέσμευσης της ηλιακής ενέργειας κατά τη φωτοσύνθεση αντιδρούν σχεδόν ακαριαία στις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που εισχωρεί στο φύλλο. Στο αντίθετο άκρο, η εξέλιξη των φωτοσυνθετικών οργανισμών δύνο δισεκατομμύρια χρόνια πριν, υπήρξε η αιτία του εμπλούτισμού της ατμόσφαιρας με οξυγόνο. Η διαδικασία αυτή διήρκεσε εκατομμύρια χρόνια και είχε ως αποτέλεσμα να μεταβληθεί η γεωχημεία της επιφάνειας της Γης από τις αντιδράσεις χημικής αναγωγής στις αντιδράσεις χημικής οξείδωσης (Schlesinger 1997). Οι μικροοργανισμοί που ανήκουν στη βιολογική ομάδα των Αρχαίων εξελίχθηκαν στα πρώτα στάδια της μεταβολής της ατμοσφαιρικής σύστασης της Γης. Σήμερα

είναι οι μοναδικοί μικροοργανισμοί που εξακολουθούν να παράγουν μεθάνιο και απαντώνται σε αναερόβια περιβάλλοντα, όπως τα εδάφη υγροτόπων, το αναερόβιο εσωτερικό των εδαφικών συσσωματωμάτων ή ο πεπτικός σωλήνας των ζώων. Συμβάντα ορογένεσης ή διάβρωσης των ορέων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στα φυτά. Η χλωρίδα εξακολουθεί ακόμη και σήμερα να μεταναστεύει αποκρινόμενη στην υποχώρηση των πλειστοκανικών παγετώνων 10.000 έως 20.000 χρόνια πριν. Μετά από διαταραχές όπως η πυρκαγιά ή η πτώση δέντρων, οι φυτικές, ζωικές και μικροβιακές βιοκοινότητες μεταβάλλονται βαθιμαία, σε μια διαδικασία που διαρκεί από μερικά χρόνια έως μερικούς αιώνες. Ο ρυθμός της εισροής του άνθρακα σε ένα οικοσύστημα μέσω της φωτοσύνθεσης μεταβάλλεται σε μια χρονική κλίμακα που κυμαίνεται από τα δευτερόλεπτα έως τις δεκαετίες, εξαιτίας της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της φυλλικής επιφάνειας.

Πολλές από τις αρχικές έρευνες της οικολογίας οικοσυστημάτων έκαναν την απλοϊκή παραδοχή ότι ορισμένα οικοσυστήματα βρίσκονταν σε κατάσταση ισορροπίας με το περιβάλλον τους. Υπό αυτήν την οπτική, τα σχετικά αδιατάρακτα οικοσυστήματα θεωρούνταν ότι είχαν ιδιότητες χαρακτηριστικές (1) ως επί το πλείστον κλειστών, αυτορυθμιζόμενων συστημάτων, όπου κυριαρχούσε η εσωτερική ανακύκλωση των στοιχείων, (2) μιας νομοτελειακής δυναμικής (3) της ύπαρξης σταθερών κύκλων και (4) της απουσίας διαταραχές και ανθρώπινης δραστηριότητας (Picket et al. 1994, Turner et al. 2001). Μία από τις σημαντικότερες εννοιολογικές καινοτομίες των τελευταίων ετών στην οικολογία των οικοσυστημάτων, είναι η ολοένα μεγαλύτερη αναγνώριση του σημαντικού ρόλου των παρελθοντικών συμβάντων και των εξωγενών παραγόντων στη διαμόρφωση της λειτουργίας των οικοσυστημάτων. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, αποδεχόμαστε σήμερα ότι τα περισσότερα οικοσυστήματα δέχονται την επίδραση πολυάριθμων εξωγενών και ενδογενών παραγόντων δεν βρίσκονται σε μία σταθερή κατάσταση ισορροπίας· οι διαταραχές είναι μια φυσιολογική παράμετρος της δυναμικής τους· και οι επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι καταλυτικές. Η σημερινή θεωρηση λοιπόν των οικοσυστημάτων ως μη ισορροπημένα συστήματα, απαιτεί μία πιο δυναμική μεθοδολογική προσέγγιση των ελέγχων των οικοσυστηματικών διεργασιών, που θα δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στην έννοια της τυχαίας μεταβλητότητας.

Θεωρούμε ότι τα οικοσυστήματα βρίσκονται σε