

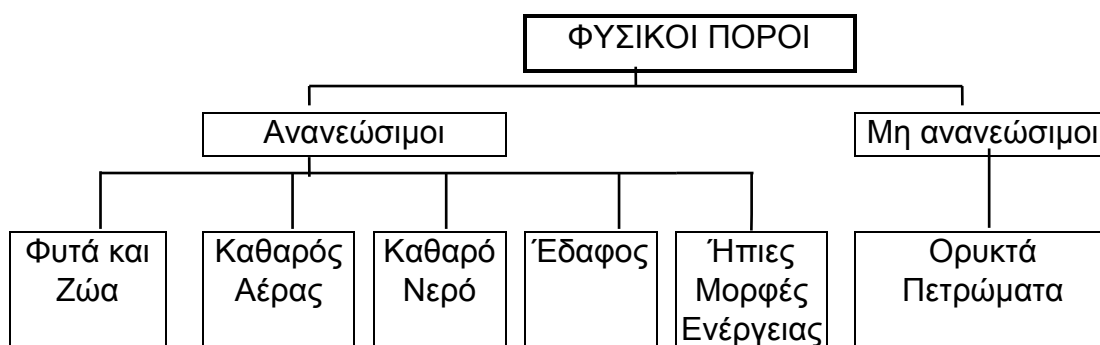
**ΕΔΑΦΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ: ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ, ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ,  
ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΤΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ

### 1.1 Το έδαφος ως φυσικός πόρος

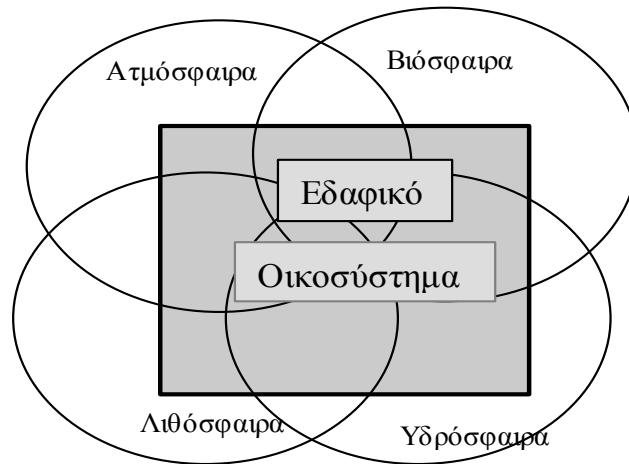
Σύμφωνα με τον Tilman (1982) “πόρος” ορίζεται οποιαδήποτε ουσία ή παράγοντας που είναι “αναλώσιμη” από τους οργανισμούς και της οποίας η αύξηση της διαθεσιμότητάς της αυξάνει την παραγωγικότητα (ρυθμός παραγωγής βιομάζας) των οργανισμών. Η λέξη “αναλώσιμη” αναφέρεται με την έννοια ότι η προμήθεια ή το απόθεμα του πόρου κάτω από ορισμένη διαχείριση είναι δυνατόν να μειώνεται. Οι πόροι γενικά διακρίνονται σε ανανεώσιμους και μη ανανεώσιμους (Σχήμα 1.1).



**Σχήμα 1.1.** Κύριοι τύποι φυσικών πόρων

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.1, το έδαφος θεωρητικά αποτελεί ανανεώσιμο πόρο, γιατί με σωστή διαχείριση ανανεώνεται διαρκώς με φυσικές και τεχνητές διεργασίες. Στην πράξη είναι δυνατόν, οι ανανεώσιμοι πόροι να μεταβληθούν σε μη ανανεώσιμους ως αποτέλεσμα της αλόγιστης εκμετάλλευσής τους σε σχέση με το ρυθμό ανανέωσής τους.

Ο ρόλος του εδάφους είναι σύνθετος. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται οι αλληλεπιδράσεις του εδαφικού οικοσυστήματος με τη βιόσφαιρα, υδρόσφαιρα, ατμόσφαιρα και λιθόσφαιρα (Szabolcs 1989).



**Σχήμα 1.2.** Διάγραμμα που δηλώνει τον πολλαπλό ρόλο του εδάφους (Szabolcs 1989)

Ειδικότερα, το έδαφος σε ότι αφορά την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών αποτελεί:

1. μέσο στήριξης του ριζικού συστήματος,
2. μέσο συσκότισης, απαραίτητο για την καλή διακλάδωση των ριζών,
3. μέσο εφοδιασμού των ριζών με οξυγόνο,
4. μέσο για τη διατήρηση των μικροοργανισμών που είναι απαραίτητοι για τις βιολογικές διεργασίες των φυτών, π.χ. ένζυμα, βακτήρια, κ.ά,
5. μέσο εφοδιασμού των φυτών με νερό,
6. πηγή εφοδιασμού των φυτών και όλων των ζωντανών οργανισμών με τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία.

Το “έδαφος” είναι οικοσύστημα γιατί σύμφωνα με τον Odum (1971), “οικοσύστημα θεωρείται οποιαδήποτε μονάδα που περιλαμβάνει όλους τους οργανισμούς μιας συγκεκριμένης περιοχής (βιοκοινότητα), οι οποίοι αλληλεπιδρούν τόσο μεταξύ τους όσο και με τους αβιοτικούς παράγοντες κατά τέτοιο τρόπο, ώστε μια ροή ενέργειας να οδηγεί σε σαφώς καθορισμένη τροφική δομή, βιοτική ποικιλότητα και ανακυκλώσεις της ύλης”.

Το έδαφος ως οικοσύστημα είναι αυτορυθμιζόμενο μέσω της ανακύκλωσης των θρεπτικών στοιχείων, αλλά δεν είναι ενεργειακά αυτοδύναμο επειδή εξαρτάται από τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών.

Στο έδαφος βρίσκουν ευνοϊκές συνθήκες ζωής πολλοί και ποικίλοι οργανισμοί. Το σύνολο των οργανισμών του εδάφους αποτελεί τη βιοκοινότητά του. Οι οργανισμοί αυτοί ανταγωνίζονται, συνεργάζονται και γενικώς αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σχηματίζοντας έτσι ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Σπουδαίος είναι ο ρόλος των οργανισμών του εδάφους στην αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας και την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων.

Το μέλλον του ανθρώπου εξαρτάται από την αειφορική χρήση (sustainable use) των εδαφικών, υδατικών και γενετικών πόρων καθώς και των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας και από την εξοικονόμηση των μη ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, υπό την προϋπόθεση πάντοτε ότι θα καταστεί δυνατόν να ελεγχθεί η πληθυσμιακή αύξηση. Αειφορική Χρήση είναι εκείνη που εξασφαλίζει την κάλυψη των σημερινών αναγκών χωρίς να διακυβεύεται η δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να καλύπτουν τις δικές τους ανάγκες.

*“Αειφορική Χρήση Γης”* (Sustainable Land Use) ορίζεται “ως το σύνολο των τεχνολογιών που συνδυάζουν οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές αρχές χρήσης γης. Η χρήση αυτή αφορά όλους τους τομείς ανθρώπινων δραστηριοτήτων και έχει σκοπό τη διατήρηση του εδάφους ως πόρου για τις μελλοντικές γενεές” (Eswaran 1992).

Η αρόσιμη γεωργική γη είναι περιορισμένη. Από τα 13,4 δισεκατομύρια ha της επιφάνειας της Γης, που δεν είναι καλυμμένα με πάγους, μόνο το 25% αυτών είναι δυνατόν να καλλιεργηθούν. Ακόμη, από το παραπάνω ποσοστό μόνο το 40% είναι κατάλληλο για παραγωγική γεωργία, ενώ οι υπόλοιπες περιοχές ιδιαίτερα στις τροπικές ζώνες, απαιτούν τεράστιες εισροές ενέργειας και μεθόδους σωστής διαχείρισης προκειμένου να διατηρήσουν την παραγωγικότητά τους. Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO 1989) αναφέρει ότι στις τροπικές περιοχές η καλλιεργήσιμη γη που αναλογεί σε κάθε άτομο έπεσε από 0,28 ha το 1971 σε 0,22 ha το 1986. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη γεωμετρική αύξηση του πληθυσμού της γης θα μεγεθύνει το πρόβλημα της διαθέσιμης γεωργικής γης στο μέλλον.

Γενικά, οι αιτίες που περιορίζουν τη χρήση γης για γεωργικούς σκοπούς σε πολλές χώρες είναι:

1. η έλλειψη νερού,

2. η οξίνιση των εδαφών,
3. η μείωση των διαθέσιμων θρεπτικών στοιχείων,
4. η συμπίεση των εδαφών και η μεταβολή του πορώδους τους λόγω της συχνής χρήσης των βαρέων γεωργικών μηχανημάτων,
5. η αλάτωση ή αλκαλίωση των εδαφών,
6. η μείωση της περιεκτικότητας των εδαφών σε οργανική ουσία,
7. η περίσσεια νερού (συνεχής κορεσμός του εδάφους ή κατάκλυση),
8. μείωση της παραγωγικής ικανότητας του εδάφους λόγω διάβρωσης ή αλόγιστης προηγούμενης χρήσης.

## **1.2 Βιοποικιλότητα και βιολογικές δραστηριότητες στο έδαφος**

Η πολυπλοκότητα της έννοιας της βιοποικιλότητας αντανακλάται στους διάφορους ορισμούς που έχουν υιοθετηθεί από διάφορους συγγραφείς. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των ορισμών είναι ότι όλοι αναφέρονται στα τρία κύρια επίπεδα της βιοποικιλότητας, δηλαδή οικοσυστήματα, είδη και γονίδια. Τα τρία επίπεδα αυτά αναγνωρίζονται και στον ορισμό που υιοθετήθηκε από τη Σύμβαση για τη Βιολογική Ποικιλότητα (ΣΒΠ). “Βιολογική ποικιλότητα σημαίνει την ποικιλία όλων των ζώντων οργανισμών απ’ όλα τα οικοσυστήματα όπου απαντούν (χερσαία, θαλάσσια και άλλα υδάτινα) και τα οικολογικά συμπλέγματα των οποίων αποτελούν μέρος. Περιλαμβάνει δε, την ποικιλότητα των ειδών, την ενδοειδική ποικιλότητα και την ποικιλότητα των οικοσυστημάτων” (άρθρο 2, ΣΒΠ).

Το έδαφος είναι βιολογικά ενεργό, επειδή μέσα στη μάζα του ζει πλήθος οργανισμών, από μικροσκοπικού μεγέθους βακτήρια έως μεγαλύτερα σε μέγεθος σπονδυλωτά (π.χ. τρωκτικά). Ο αριθμός αλλά και το είδος των οργανισμών μεταβάλλονται με το βάθος και άλλα γνωρίσματα του εδάφους. Οι οργανισμοί επιζούν και αναπτύσσονται ευκολότερα εκεί όπου υπάρχουν οι βέλτιστες αβιοτικές συνθήκες και κυρίως το κατάλληλο δυναμικό οξειδοαναγωγής, το pH, η αλατότητα, η θερμοκρασία, το φως και η υγρασία, για την επιβίωσή τους. Η πλειονότητα των οργανισμών του εδάφους ζει στα

πρώτα 10 cm, τα οποία συνήθως αντιστοιχούν στον οργανικό Α εδαφικό ορίζοντα. Μια μέση κατά βάρος ποσοστιαία κατανομή των οργανισμών στα εδάφη είναι η παρακάτω (Σακελλαριάδης 1990):

- μύκητες και φύκη, περίπου 40%,
- ακτινομύκητες και βακτήρια, 40%,
- γαιοσκώληκες και άλλοι οργανισμοί, 15%,
- μεγαλύτεροι σε μέγεθος οργανισμοί. 5%.

Από τους οργανισμούς του εδάφους, εκείνοι που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από την άποψη των βιολογικών διεργασιών είναι τα βακτήρια, οι ακτινομύκητες, οι μύκητες, τα πρωτόζωα, οι νηματώδεις, οι γαιοσκώληκες, τα μαλάκια και τα αρθρόποδα.

### 1.2.1 Βακτήρια

Τα βακτήρια είναι οι μικρότεροι σε μέγεθος μονοκύτταροι οργανισμοί που ζουν στο έδαφος. Έχουν διάφορα σχήματα και σε ορισμένες περιπτώσεις περιβάλλονται από τριχίδια που τους επιτρέπουν να αναπτύσσουν αυξημένη κινητικότητα, προϋπόθεση σημαντική για τη δραστηριότητά τους. Τα βακτήρια του εδάφους ανάλογα με τον μεταβολισμό τους διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Φωτοαυτότροφα:** Χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ήλιο και ως πηγή άνθρακα το CO<sub>2</sub>.
- **Φωτοετερότροφα:** Χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ήλιο και ως πηγή άνθρακα τις οργανικές ουσίες. Οι ουσίες αυτές συνήθως είναι αλκοόλες, οργανικά οξέα και υδατάνθρακες. Τα φωτοσυνθετικά βακτήρια (φωτοαυτότροφα και φωτοετερότροφα) δεν χρησιμοποιούν νερό για την αναγωγή του CO<sub>2</sub> και για τον λόγο αυτό δεν παράγουν οξυγόνο ως παραπροϊόν του μεταβολισμού τους.
- **Χημειοαυτότροφα:** Προμηθεύονται ενέργεια από την οξειδωση ανόργανων ενώσεων και χρησιμοποιούν ως πηγή άνθρακα το CO<sub>2</sub>. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα γένη *Nitrosomonas* και *Nitrobacter* που

οξειδώνουν τα αμμωνιακά σε νιτρικά, *Beggiatoa* που οξειδώνουν το H<sub>2</sub>S και *Thiobacillus* που οξειδώνουν το στοιχειακό θείο και Fe<sup>++</sup>.

- **Χημειοετερότροφα:** Ως πηγή ενέργειας και άνθρακα χρησιμοποιούν οργανικές ουσίες. Τα περισσότερα βακτήρια, όλοι οι μύκητες, τα πρωτόζωα και οι ανώτεροι οργανισμοί ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Η σημασία των βακτηρίων οφείλεται στην εξαιρετικά μεγάλη προσαρμοστικότητά τους σε μεγάλο εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών. Τα βακτήρια είναι δραστικά σε όλα τα είδη των οργανικών ουσιών εκτός της λιγνίνης. Επειδή ο ρυθμός αύξησης των βακτηρίων είναι πιο γρήγορος σε σχέση με αυτόν των μυκήτων, τα βακτήρια κυριαρχούν στην αποικοδόμηση υποστρωμάτων μικρού μοριακού βάρους. Τα βακτήρια αποτελούν τη μόνη ομάδα μικροοργανισμών της οποίας πολλά μέλη είναι ικανά για μεταβολισμό και σε αναερόβιες συνθήκες (Meyer 1994).

### 1.2.2 Ακτινομύκητες

Οι ακτινομύκητες μοιάζουν τόσο με τους μύκητες όσο και με τα βακτήρια. Έτσι, οι ακτινομύκητες ενώ είναι μονοκύτταροι μικροοργανισμοί όπως και τα βακτήρια, έχουν μυκηλιακές υφές, οι οποίες πολλές φορές διακλαδίζονται, όπως και οι μύκητες. Οι ακτινομύκητες είναι αερόβιοι μικροοργανισμοί, ετερότροφοι - σαπροφυτικοί, ευαίσθητοι σε χαμηλή εδαφική οξύτητα, αλλά αναπτύσσουν δραστηριότητα και σε εξαιρετικά ξηρές συνθήκες εδάφους.

Η σημασία των ακτινομυκήτων οφείλεται στα εξής (Burns και Martin 1986):

- έχουν την ικανότητα να διασπούν δύσκολα αποικοδομούμενα οργανικά συστατικά, όπως η λιγνίνη,
- έχουν ευεργετική επίδραση στη δομή και τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, μέσω της δημιουργίας οργανικών συμπλόκων,
- ελέγχουν την εξάπλωση των βακτηρίων, μέσω της παραγωγής αντιβιοτικών ουσιών και εξωκυτταρικών ενζύμων,

- ασκούν μεγάλη επίδραση στο σχηματισμό του χούμου, μέσω της παραγωγής αρωματικών υδρογονανθράκων,
- έχουν μεγάλη σημασία ως παθογόνα φυτών και ζώων.

### 1.2.3 Μύκητες

Οι περισσότεροι μύκητες είναι ετερότροφοι και διαθέτουν ποικιλία ενζύμων για την αποικοδόμηση των νεκρών οργανικών ουσιών στο έδαφος (σαπρόφιλα). Σε επαρκώς αεριζόμενα εδάφη, οι μύκητες αποτελούν το μεγαλύτερο τμήμα της μικροβιακής μάζας λόγω της εκτεταμένης αύξησης των μυκηλιακών τους υφών. Ο βιολογικός ρόλος των μυκήτων (Burns και Martin 1986) στο εδαφικό οικοσύστημα είναι σημαντικός γιατί:

1. προμηθεύονται τον άνθρακα για την αύξησή τους συνήθως από τις πηκτίνες, κυτταρίνες, ημικυτταρίνες και λιγότερο από τη λιγνίνη των φυτικών υπολειμμάτων που προστίθενται στο έδαφος,
2. ακινητοποιούν μεγάλες ποσότητες N, λόγω της μεγάλης τους βιομάζας και της αντοχής των μυκηλίων τους στην αποικοδόμηση.

Οι μύκητες πλεονεκτούν έναντι των άλλων μικροοργανισμών του εδάφους, διότι ορισμένα είδη επιβιώνουν και εξακολουθούν την αποικοδομητική τους δραστηριότητα και σε όξινες εδαφικές συνθήκες. Περιοριστικό παράγοντα για αυτήν τη δραστηριότητα των μυκήτων αποτελεί η έλλειψη οξυγόνου. Έτσι, οι μύκητες δεν μπορούν να αποικοδομούν σε εδάφη κατακλυζόμενα από νερά, καθώς και στους βαθύτερους εδαφικούς ορίζοντες, όπου η διάχυση του ατμοσφαιρικού αέρα, και άρα η ανανέωση του οξυγόνου, είναι πολύ μικρή.

Μερικοί μύκητες συμβιώνουν με τις ρίζες των φυτών. Οι μυκηλιακές τους υφές εισέρχονται στις ρίζες των φυτών από τις οποίες αντλούν οργανικά συστατικά, απαραίτητα για τις ανάγκες τους. Συγχρόνως όμως οι μύκητες αυτοί προμηθεύουν τα φυτά, μέσω της μυκηλιακής διασύνδεσης, με ανόργανα θρεπτικά σε ποσότητες πολλαπλάσιες από αυτές, που τα φυτά αντλούν από το έδαφος μόνα τους. Ο παραπάνω συνδυασμός των συμβιωτικών μυκήτων με τα φυτά είναι γνωστός ως “*μυκόρριζες*” και διακρίνονται από τον τρόπο



εισόδου των μυκηλιακών υφών στο ριζικό σύστημα των φυτών σε *εξωμυκόρριζες* και *ενδομυκόρριζες* (Σακελλαριάδης 1990).

#### 1.2.4 Πρωτόζωα

Τα πρωτόζωα ζουν ελεύθερα στο έδαφος και τρέφονται με διαλυτές οργανικές ουσίες και μικροοργανισμούς. Στο έδαφος, συνηθέστατα παρατηρείται σχέση άρπαγα - λείας μεταξύ πρωτόζωων και βακτηρίων, ιδιαίτερα κοντά στις ρίζες των φυτών, το οποίο συνεισφέρει πολύ στον ρυθμό επαναφοράς των βακτηριακών πληθυσμών. Η βοσκή των πρωτόζωων πάνω σε γερασμένες αποικίες βακτηρίων διατηρεί τους πληθυσμούς των βακτηρίων φυσιολογικά νεαρούς και άρα, πιο δραστήριους στην αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών και την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων. Επίσης, η μεγάλη κινητικότητα των πρωτόζωων στο νερό του εδάφους είναι πιθανό να προμηθεύει τα βακτήρια με αυξημένες ποσότητες διαλυτού οξυγόνου και θρεπτικών ουσιών (Burns και Martin 1986).

#### 1.2.5 Νηματώδεις

Οι νηματώδεις απαντούν συνηθέστερα γύρω από τη ριζόσφαιρα. Όπως και στην περίπτωση των πρωτόζωων, η παρουσία νερού στο έδαφος είναι απαραίτητη για την επιβίωσή τους. Οι νηματώδεις μπορούν να χωριστούν γενικά σε δύο οικολογικές κατηγορίες (Meyer 1994):

- i) στους *αρπακτικούς νηματώδεις*, οι οποίοι τρέφονται με πρωτόζωα, βακτήρια και μύκητες,
- ii) σε *παράσιτα των φυτών*.

Η χρήση εντομοκτόνων στα αγροοικοσυστήματα λέγεται ότι αυξάνει τους αριθμούς των νηματωδών, διότι μειώνονται δραστικά τα αρπακτικά ακάρεα που τρέφονται με τους νηματώδεις.

### 1.2.6 Γαιοσκώληκες (*Anneliolae*)

Η πιο γνωστή οικογένεια γαιοσκωλήκων η οποία απαντά συνηθέστερα στα εδάφη των βόρειων και εύκρατων κλιμάτων, είναι η *Lumbricidae*. Ο αριθμός τους στο έδαφος καθώς και το βάθος στο οποίο φθάνουν, ποικίλλει πολύ. Και οι δύο παράμετροι εξαρτώνται από την υγρασία και την οργανική ουσία του εδάφους, κυρίως τη μη αποικοδομημένη (Burns και Martin 1986).

Το ασβέστιο, που προέρχεται τόσο από το έδαφος όσο και από την οργανική ουσία, πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες βιολογικές ανάγκες των γαιοσκωλήκων λόγω των ειδικών εκκριτικών αδένων ασβεστίου που έχουν. Αυτός είναι πιθανόν και ένας από τους λόγους που οι γαιοσκώληκες είναι ευαίσθητοι σε χαμηλά pH. Επίσης, είναι χαρακτηριστική η αύξηση του πληθυσμού τους σε εδάφη που δέχονται κοπριά, έναντι των εδαφών που δεν δέχονται. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση ο αριθμός τους στο έδαφος μπορεί να είναι έως 1000 φορές μεγαλύτερος έναντι της δεύτερης.

Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των εδαφών συνίσταται στην κατεργασία ικανού όγκου ανόργανου εδάφους, το οποίο περνά από το πεπτικό τους σωλήνα μαζί με την οργανική ουσία. Έτσι, η οργανική ουσία ενσωματώνεται με το ανόργανο έδαφος, εμπλουτίζεται με διάφορα ιόντα, κυρίως ασβεστίου, αλλά και με διάφορα ένζυμα, απαραίτητα για τις αναγκαίες διεργασίες πέψης και αλλαγμένη εξέρχεται από το πεπτικό σωλήνα των γαιοσκωλήκων ως έκκριμα. Τα εκκρίματα αυτά περιέχουν ιόντα Ca και Mg, αλλά και αφομοιώσιμες πλέον μορφές αζώτου και φωσφόρου, καθώς και άλλα θρεπτικά για τα φυτά στοιχεία.

Η ευεργετική δράση των γαιοσκωλήκων οφείλεται επίσης και στη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων των εδαφών. Επειδή οι γαιοσκώληκες έχουν την ικανότητα να περνούν μέσα από το πεπτικό τους σωλήνα ικανές ποσότητες ανόργανου εδάφους, δημιουργούν ψυχαλωτή δομή, διανοίγουν στοές οι οποίες συμβάλλουν στον καλύτερο αερισμό και τη μεγαλύτερη διαπερατότητα των επιφανειακών οριζόντων, αλλά και μεταφέρουν οργανικά υλικά και άλλους μικροοργανισμούς προς τα κάτω.

### 1.2.7 Γαστερόποδα (μαλάκια)

Πολλά γαστερόποδα είναι φυτοφάγα και το πεπτικό τους σύστημα διαθέτει το ένζυμο της κυτταρινάσης, που διασπά την κυτταρίνη των φυτικών ιστών (Burns και Martin 1986).

### 1.2.8 Αρθρόποδα

Από τη μεγάλη κατηγορία των αρθροπόδων τα πιο σημαντικά μέλη (Burns και Martin 1986) είναι τα:

- **καρκινοειδή (Ισόποδα)**, τα οποία θρυμματίζουν τις οργανικές ύλες για περαιτέρω αποικοδόμηση από άλλα είδη ασπόνδυλων και μικροοργανισμών,
- **μικροαρθρόποδα (Ακάρεια και Κολλέμβολα)**, τα οποία παίζουν ρόλο στον θρυμματισμό των οργανικών υλών, την αύξηση του ρυθμού επαναφοράς των μικροβιακών πληθυσμών λόγω βοσκής, τη διασκόρπιση των μικροοργανισμών στο εδαφικό περιβάλλον, τη διαθεσιμότητα του αζώτου και την κοπροφαγία.

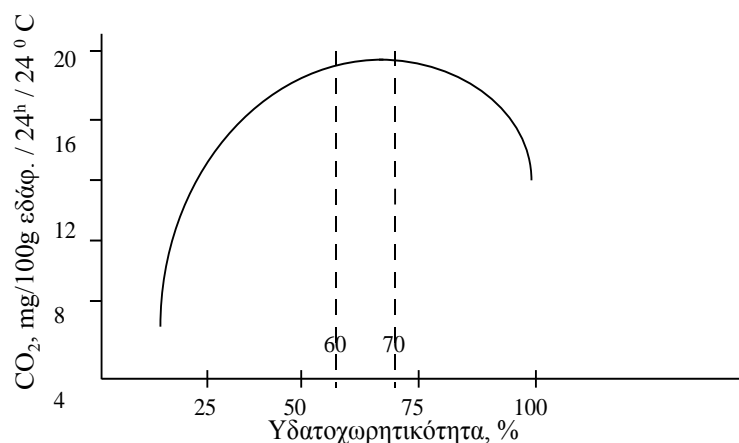
Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν έχει πλήρως διερευνηθεί ο ρόλος των αρθροπόδων στο εδαφικό οικοσύστημα.

## 1.3 Περιοριστικοί παράγοντες της δραστηριότητας των οργανισμών του εδάφους

Όπως σε κάθε οικοσύστημα έτσι και στο εδαφικό, υπάρχουν περιοριστικοί παράγοντες της δραστηριότητας των οργανισμών. Οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες των εδαφών μπορούν να ενεργήσουν ως περιοριστικοί παράγοντες στη χωροκατανομή, το μέγεθος και τη δραστηριότητα των πληθυσμών των οργανισμών που ζουν μέσα στο έδαφος και κατά συνέπεια μπορούν να επηρεάσουν πολύ τον ρυθμό των βιολογικών διεργασιών στο

έδαφος. Γενικά, οι περιοριστικοί αυτοί παράγοντες στο εδαφικό οικοσύστημα είναι (Burns και Martin 1986):

**1. Νερό:** Η περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους επηρεάζει τον αερισμό του, το ποσό και το είδος των διαλυμένων αλάτων στην υγρή φάση του εδάφους και επομένως επηρεάζει έμμεσα τη διαθεσιμότητά τους για τους οργανισμούς, την οσμωτική πίεση και το pH του. Γενικά, η διαλυτότητα των διαφόρων ουσιών στο εδαφικό νερό ποικίλλει πάρα πολύ, επηρεάζοντας έτσι τη βιολογική διαθεσιμότητά τους. Για παράδειγμα, τα νιτρικά άλατα έχουν μεγαλύτερη διαλυτότητα στο εδαφικό νερό σε σχέση με τα φωσφορικά και αυτό εξηγεί τη μικρότερη βιολογική διαθεσιμότητα των δεύτερων. Όταν η υγρασία του εδάφους κυμαίνεται μεταξύ 50 και 70% της υδατοϊκανότητάς του, θεωρείται πολύ ευνοϊκή για τις περισσότερες βιολογικές διεργασίες στο έδαφος. Ειδικά για τη νιτροποίηση, θεωρείται ότι η ευνοϊκότερη περιοχή περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό είναι το 60% της υδατοϊκανότητάς του, ενώ για την αμμωνιοποίηση το αντίστοιχο ποσοστό είναι 80% (Σχήμα 1.3).



**Σχήμα 1.3.** Επίδραση της εδαφικής υγρασίας στη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών (βάθος: 0-20 cm) (Σιδηράς 1992)

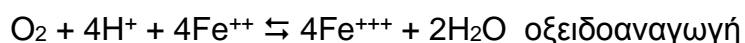
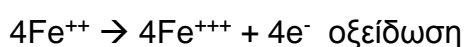
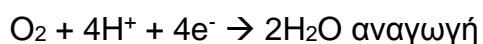
**2. Αερισμός:** Όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την παρουσία αέριας φάσης στο εδαφικό πορώδες, μειώνουν τις δυνατότητες πολλαπλασιασμού και δραστηριοποίησης των αερόβιων μικροοργανισμών στο έδαφος, γεγονός που τελικά δεν βοηθάει την αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών. Όταν στο έδαφος επικρατούν αναερόβιες συνθήκες τότε ευνοείται η απώλεια αζώτου με αέρια μορφή, αλλά και παράγονται διάφορα αέρια όπως μεθάνιο, υδρόθειο και αιθυλένιο, όπως για παράδειγμα συμβαίνει

σε βαριά αργιλλώδη εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, όπου η περιεκτικότητά τους σε CO<sub>2</sub> μπορεί να φθάσει και το 10%.

**3. Θερμοκρασία:** Η θερμοκρασία γενικά επηρεάζει τον ρυθμό των φυσιολογικών αντιδράσεων των κυττάρων των οργανισμών του εδάφους καθώς και τα φυσικοχημικά γνωρίσματά του, όπως για παράδειγμα το δυναμικό οξειδοαναγωγής, τη διάχυση, την πυκνότητα, τη δομή του νερού κ.ά. Αλλαγές στη θερμοκρασία του εδάφους έχουν σοβαρές επιδράσεις στη δραστηριότητα των οργανισμών. Ο κάθε οργανισμός έχει μια ελάχιστη, μια μέγιστη και μια άριστη τιμή θερμοκρασίας για αύξηση. Για τους περισσότερους μικροοργανισμούς η αύξηση σταματάει στους 0°C εκτός από μερικά ψυχρόφιλα βακτήρια.

**4. pH:** Οι πληθυσμοί ορισμένων μικροοργανισμών αυξάνουν περισσότερο σε ουδέτερο εδαφικό pH (6,5-7,5). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα βακτήρια, ενώ οι ακτινομύκητες ευνοούνται από αλκαλικό εδαφικό pH (8-9). Αντίθετα, η αύξηση των μυκήτων δεν παρεμποδίζεται σε όξινο εδαφικό περιβάλλον. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μύκητες αναπτύσσουν μεγαλύτερους πληθυσμούς σε εδάφη με χαμηλό pH (<6,0) σε σχέση με τα βακτήρια και τους ακτινομύκητες.

**5. Δυναμικό Οξειδοαναγωγής:** Οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις είναι μεγάλης σημασίας για την ερμηνεία των χημικών και βιολογικών φαινομένων που συμβαίνουν στο έδαφος. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας βιολογικής αντίδρασης είναι η αναπνοή, όπου δότης ηλεκτρονίων είναι η γλυκόζη, επειδή περιέχει πολλά άτομα H και τελικός δέκτης ηλεκτρονίων είναι το μοριακό οξυγόνο. Ένα άλλο παράδειγμα αντίδρασης οξειδοαναγωγής είναι αυτή που καταλήγει στην αναγωγή του οξυγόνου και στην οξείδωση του σιδήρου ως ακολούθως:



Την παραπάνω αντίδραση στο έδαφος μπορεί να την προωθήσει το βακτήριο *Thiobacillus ferrooxidans*.

**6. Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (C.E.C.):** Οι μικροοργανισμοί του εδάφους επηρεάζονται από τη C.E.C του εδάφους. Σε εδάφη με υψηλή C.E.C διεγείρεται ο μεταβολισμός των βακτηρίων λόγω της υψηλής ρυθμιστικής ικανότητας του εδαφικού διαλύματος. Σε εδάφη με μεγάλη C.E.C, τα οποία τυχαίνει να κατακλύζονται μόνιμα ή περιοδικά αναστέλλεται ο μεταβολισμός των αερόβιων πληθυσμών μυκήτων λόγω της περιοδικά περιορισμένης διάχυσης οξυγόνου.

**7. Φως:** Στην περίπτωση των φωτοσυνθετικών οργανισμών, η ένταση του φωτός μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα. Σε συνθήκες ανεπάρκειας φωτός, τα βακτήρια του γένους *Rhizobium* (τα οποία δεσμεύουν ατμοσφαιρικό άζωτο) δεν παράγουν αρκετούς υδατάνθρακες, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για τον μεταβολισμό τους. Σε συνθήκες όμως άφθονου φωτισμού αυξάνεται υπερβολικά η παραγωγή υδατανθράκων, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται συμπτώματα έλλειψης αζώτου στα βακτήρια αυτά, επειδή δεν μπορούν να αυξήσουν τον ρυθμό δέσμευσης ατμοσφαιρικού αζώτου.

**8. Θρεπτικά συστατικά:** Όταν στο έδαφος παρατηρείται έλλειψη θρεπτικών στοιχείων π.χ. N, P, Ca, ο αριθμός των οργανισμών και το μέγεθος των πληθυσμών τους μειώνεται. Για παράδειγμα, σε εδάφη όπου παρατηρείται έλλειψη Ca παρατηρείται εξαφάνιση των γαιοσκωλήκων και άλλων ειδών της μικροπανίδας. Στα παραπάνω εδάφη ο ρυθμός αποικοδόμησης της οργανικής ουσίας είναι βραδύς και έτσι η οργανική ουσία συσσωρεύεται στην επιφάνεια του εδάφους.

## 1.4 Βιοτικές αλληλεπιδράσεις και βιολογικές διεργασίες στο έδαφος

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων οργανισμών του εδάφους είναι δύσκολο να διερευνηθούν και έτσι παραμένουν ως επί το πλείστον άγνωστες. Πρόσφατα η έρευνα στράφηκε περισσότερο στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οργανισμών του εδάφους γύρω από τις ρίζες των φυτών (ριζόσφαιρα) και στην επίδραση των αλληλεπιδράσεων αυτών στην αύξηση των φυτών. Γενικά, οι μύκητες είναι οι χημικοί αποικοδομητές των οργανικών ουσιών στο έδαφος, ενώ τα μικροβιοφάγα πρωτόζωα, νηματώδεις και μικροαρθρόποδα επηρεάζουν τη δυναμική των μικροβιακών κοινωνιών και ελέγχουν τον ρυθμό αποικοδόμησης.

Οι θετικές επιδράσεις της βοσκής των ασπώνδουλων στις αποικίες των μικροοργανισμών περιλαμβάνουν τη μείωση των παθογόνων μικροβίων και την αύξηση της δραστηριότητας των ωφέλιμων βακτηρίων, την αύξηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων καθώς και της πρόσληψής τους από τα φυτά. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι τα Κολλέμβολα (αρθρόποδα) μειώνουν τους πληθυσμούς των παθογόνων για τα φυτά μυκήτων και ταυτόχρονα η κατανάλωση των μυκηλίων των μυκήτων αυτών αυξάνει τη διαθεσιμότητα του αζώτου για τα φυτά (Burns και Martin 1986).

Εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι ο αριθμός των βακτηρίων ήταν μεγαλύτερος με την παρουσία νηματωδών και ότι η αύξηση των φυτών ήταν γρηγορότερη με την παρουσία βακτηρίων και νηματωδών σε σύγκριση με την παρουσία μόνο βακτηρίων. Τα βακτηριοφάγα πρωτόζωα και οι νηματώδεις διεγείρουν το μεταβολισμό των βακτηρίων, λόγω της βοσκής τους στις γερασμένες αποικίες των βακτηρίων, αλλά και αυξάνουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών για τα φυτά στοιχείων. Επίσης, η βοσκή των πρωτόζωων σε αποικίες βακτηρίων οδηγεί σε αυξημένη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων στη ριζόσφαιρα (Elliot κ.ά. 1980, Coleman κ.ά. 1984, Ingham κ.ά. 1985).

Ένα άλλο παράδειγμα βιοτικών αλληλεπιδράσεων, που παρατηρείται συνήθως στο έδαφος είναι η αρπακτικότητα που δείχνουν τα πρωτόζωα και οι νηματώδεις εναντίον των βακτηρίων. Επίσης, οι νηματώδεις είναι άρπαγες των πρωτοζώων.

Σχετικά με τα μικροενδιαιτήματα στα οποία απαντούν οι παραπάνω μικροοργανισμοί του εδάφους, βρέθηκε στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των πληθυσμών των βακτηρίων και των εδαφικών πόρων μεγέθους 0,2 - 1,2 μm. Επίσης βρέθηκε και στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των πληθυσμών των νηματωδών και εδαφικών πόρων μεγέθους 30 - 90 μm, επειδή στις παραπάνω διαμέτρους εδαφικών πόρων βρίσκουν καταφύγιο οι αντίστοιχοι μικροοργανισμοί του εδάφους και έτσι μειώνεται η ένταση της αρπακτικότητας. Ωστόσο, δεν βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ πρωτοζώων και κάποιου μεγέθους εδαφικών πόρων, γεγονός που ίσως οφείλεται στο μεγάλο εύρος ειδών και μεγέθους μικροοργανισμών αυτών ή στην περιορισμένη αξιοπιστία των πειραματικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν (Hassinck κ.ά. 1993). Εξάλλου, διάφορες μελέτες έδειξαν ότι η αποικοδομητική δραστηριότητα των βακτηρίων αυξάνεται σε συνθήκες αρπακτικότητας με την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα των αρπάγων δεν είναι πολύ υψηλή (Anderson και Ineson 1984, Kuikman και Van Veen 1989, Brussaard κ.ά. 1994).

Σε σχέση με τη βακτηριακή δραστηριότητα στο έδαφος διάφορες μελέτες (π.χ. Hassinck κ.ά. 1993) έδειξαν ότι δε βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ της βιομάζας των βακτηρίων του εδάφους και του ρυθμού ανοργανοποίησης του άνθρακα σε διάφορους τύπους εδαφών. Αντίθετα ο ρυθμός ανοργανοποίησης του αζώτου σε σχέση με τον πληθυσμό των βακτηρίων στο έδαφος ήταν γενικά υψηλότερος σε ελαφράς κοκκομετρικής σύστασης εδάφη απ' ό,τι σε αργιλώδη και πηλώδη.

Η παραπάνω παρατήρηση οδήγησε στη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ της αρπακτικότητας των βακτηρίων του εδάφους από τρεις κατηγορίες αρπάγων [αμοιβάδες, μαστιγοφόρα (πρωτόζωα) και βακτηριοφάγοι νηματώδεις] και του ρυθμού ανοργανοποίησης του αζώτου. Έτσι, διαπιστώθηκε ότι οι λόγοι των πληθυσμών των μαστιγοφόρων (πρωτοζώων) και των βακτηριοφάγων νηματωδών προς τον πληθυσμό των βακτηρίων του εδάφους και συνεπώς η ένταση της αρπακτικότητας των οργανισμών αυτών κατά των βακτηρίων του εδάφους ήταν υψηλότερη στα ελαφράς κοκκομετρικής σύστασης εδάφη. Η αύξηση της αρπακτικότητας είχε ως αποτέλεσμα και την αύξηση της σχετικής αναλογίας των νεαρών ατόμων στον πληθυσμό των βακτηρίων και κατά συνέπεια και του ρυθμού



ανοργανοποίησης του αζώτου ανά μονάδα βακτηριακής βιομάζας. (Hassink κ.ά. 1993).

Η προσθήκη στο έδαφος οργανικών υπολειμμάτων επηρεάζει τη βιοποικιλότητα στο έδαφος και μέσω αυτής τον ρυθμό αποικοδόμησης της οργανικής ουσίας, την ανοργανοποίηση και την κινητοποίηση θρεπτικών και άλλων στοιχείων στο εδαφικό διάλυμα και άρα τη διαθεσιμότητά τους για τις καλλιέργειες (Brussaard 1994). Οι παράμετροι της ποιότητας των οργανικών υπολειμμάτων που προστίθενται στο έδαφος και επηρεάζουν τον ρυθμό αποικοδόμησής τους αλλά και την ανοργανοποίηση και την κινητοποίηση των θρεπτικών και άλλων στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα είναι (Tian κ.ά. 1992):

- α) η περιεκτικότητα των οργανικών υπολειμμάτων σε λιγνίνη,
- β) η περιεκτικότητα των οργανικών υπολειμμάτων σε πολυφαινόλες,
- γ) ο λόγος C/N.

Κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους επιδρά στον ρυθμό αποικοδόμησης της οργανικής ουσίας. Οι επιδράσεις αυτές μπορούν να αποδοθούν στις διαφορετικές προτιμήσεις που δείχνουν οι εδαφικοί μικροοργανισμοί στα οργανικά συστατικά. Επίσης, η οργανική ουσία ασκεί μεγάλη επίδραση στο μικροκλίμα του εδάφους και άρα στο μικροπεριβάλλον, στο οποίο αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί του εδάφους. Για παράδειγμα, η λιγνίνη είναι ένα συστατικό της οργανικής ουσίας το οποίο αποικοδομείται από τους οργανισμούς του εδάφους πολύ δύσκολα και έτσι προστατεύει από διάσπαση άλλα οργανικά συστατικά. Έτσι, όταν υπάρχει λιγνίνη στα οργανικά υπολείμματα, η διάσπαση της κυτταρίνης από τους μικροοργανισμούς του εδάφους επιβραδύνεται, ενώ αντίθετα όταν αυτή απουσιάζει η διάσπαση επιταχύνεται.

Η κοκκομετρική σύσταση του εδάφους επηρεάζει τη βιοποικιλότητα και πιο συγκεκριμένα επηρεάζει τους πληθυσμούς των βακτηρίων και των νηματωδών με αποτέλεσμα, αν και η βιομάζα των βακτηρίων του εδάφους είναι μικρότερη λόγω αρπακτικότητας, εντούτοις ο ρυθμός ανοργανοποίησης του αζώτου ανά μονάδα βακτηριακής βιομάζας είναι υψηλότερος σε ελαφράς κοκκομετρικής σύστασης (χονδρόκοκκα) απ' ό τι σε βαριάς κοκκομετρικής σύστασης εδάφη (λεπτόκοκκα) κάτω από τις ίδιες συνθήκες πειραματισμού (Brussaard 1994).

Οι βιοτικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οργανισμών του εδάφους είναι ποικίλες και πολύπλοκες και πρέπει να διερευνηθούν ακόμη περισσότερο, ώστε να εκτιμηθούν ακριβέστερα οι σχέσεις της εδαφικής βιοποικιλότητας και της ικανότητας ανάκαμψης του εδαφικού οικοσυστήματος (De Ruiter κ.ά.1993).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

---

### ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΓΕΙΑ

---

#### 2.1 Λειτουργίες και αξίες των εδαφικών οικοσυστημάτων

Το εδαφικό οικοσύστημα επιτελεί λειτουργίες, οι οποίες είναι βασικές για την αειφορική ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Οι λειτουργίες ενός οικοσυστήματος είναι αποτέλεσμα των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σ' αυτό. Οι εδαφικές λειτουργίες, όπως οι λειτουργίες κάθε άλλου οικοσυστήματος, δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά επηρεάζουν η μία την άλλη. Πρωταρχικός όμως παράγοντας που τις καθορίζει είναι η δράση των μικροοργανισμών και οι βιογεωχημικοί κύκλοι των στοιχείων. Από τις λειτουργίες απορρέουν οι αξίες των εδαφών για τον άνθρωπο. Από μία λειτουργία μπορεί να απορρέουν περισσότερες αξίες ή κάποια αξία να είναι αποτέλεσμα συνδυασμού λειτουργιών.

Παραδείγματα εδαφικών λειτουργιών είναι η στήριξη τροφικών πλεγμάτων, η μηχανική υποστήριξη φυτών και αντικειμένων, ο μετασχηματισμός θρεπτικών, η συγκράτηση τοξικών ουσιών και η παγίδευση ή έκλυση CO<sub>2</sub>. Ο συνδυασμός των λειτουργιών αυτών (σύνθετες λειτουργίες) έχει ως αποτέλεσμα την ικανότητα του εδάφους να αποικοδομεί ρύπους (αναφέρεται στις λειτουργίες στήριξης τροφικών πλεγμάτων και μετασχηματισμού θρεπτικών), να παρέχει στήριξη στα φυτά και τη βιοποικιλότητα (αναφέρεται στις λειτουργίες αποθήκευσης νερού, στήριξης τροφικών πλεγμάτων και μηχανικής υποστήριξης φυτών) και να αντέχει στη διάβρωση και άλλους παράγοντες υποβάθμισης.

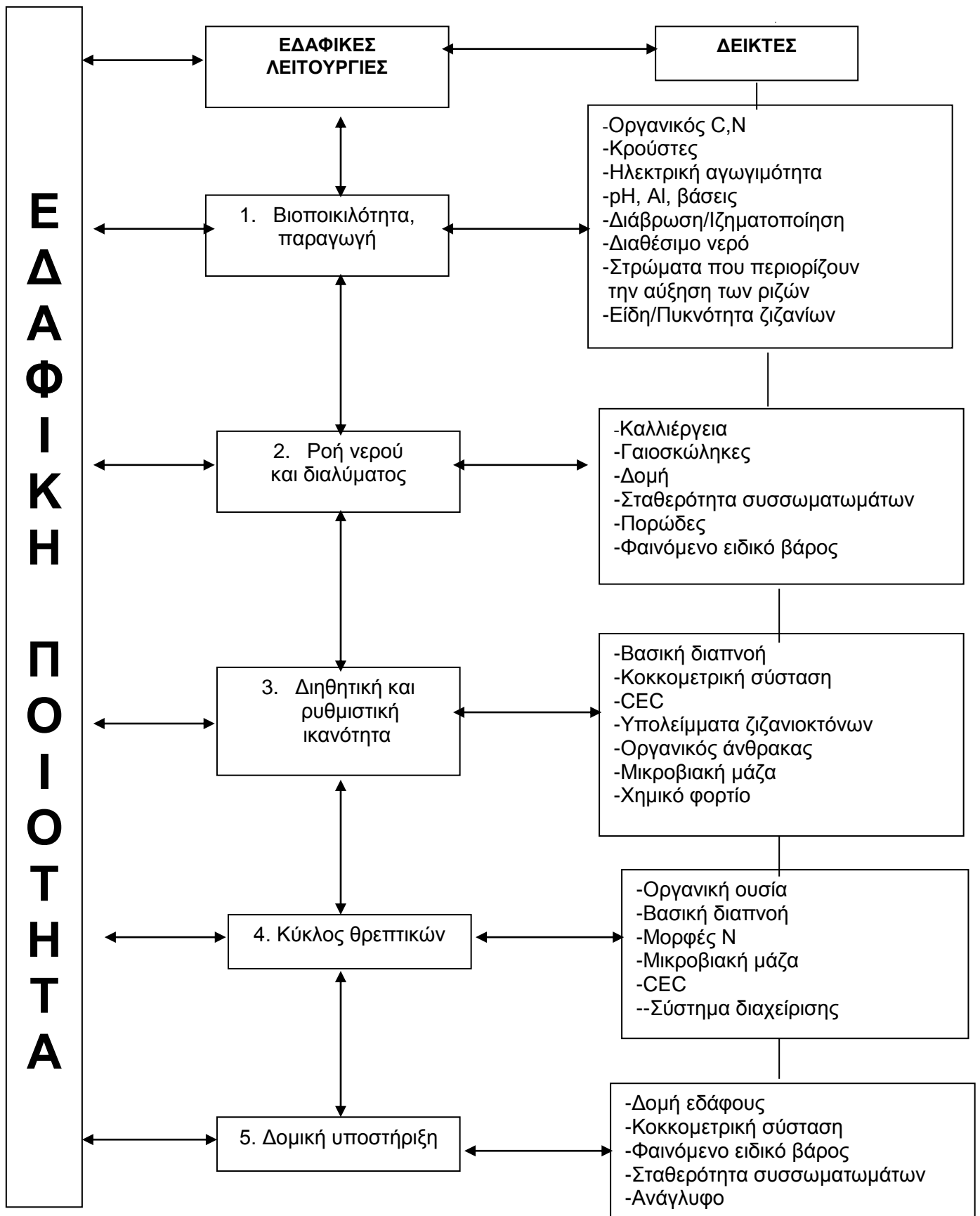
Από τις παραπάνω λειτουργίες προκύπτουν 14 αξίες του εδάφους για τον άνθρωπο: θεμελιωτική, εξορυκτική, αποικοδομητική, αποταμιευτική, αντιπλημμυρική, βιολογική, κλιματορυθμιστική, αγρονομική, αισθητική, εκπαιδευτική, αναψυχική, τουριστική, αρχαιολογική και πολιτιστική. Μια αξία ενός συγκεκριμένου εδάφους είναι δυνατό σήμερα να αποτελεί αντικείμενο κάποιων χρήσεων ή να μην χρησιμοποιείται καθόλου. Από τις εδαφικές αξίες,

αυτές που χρησιμοποιούνται ονομάζονται χρήσεις Ο βαθμός χρήσης μιας αξίας εξαρτάται από οικονομικούς παράγοντες, αλλά παράλληλα και από την ανάγκη να προστατευθεί το εδαφικό οικοσύστημα.

Οι εδαφικές αξίες μπορούν να παραλληλισθούν με τη δυναμική ενέργεια του εδαφικού συστήματος, οι οποίες από τη στιγμή που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο μετατρέπονται σε χρήσεις κατά παρόμοιο τρόπο με τον οποίο η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική. Η ορθολογική διαχείριση της κινητικής ενέργειας, δηλαδή των χρήσεων, είναι ο κύριος μηχανισμός που συντελεί στη διατήρηση της δυναμικής ενέργειας, δηλαδή στη διατήρηση των αξιών και άρα στην αειφορία, του εδαφικού οικοσυστήματος.

Η αξιολόγηση του βαθμού επιτέλεσης μιας λειτουργίας και του επιπέδου μιας αξίας είναι παλιό πρόβλημα και κίνητρο αλληπάλληλων δημιουργικών προσεγγίσεων. Η αξιολόγηση βασίζεται σε διάφορες εδαφικές ιδιότητες-δείκτες, μερικοί από τους οποίους έχουν ήδη καθιερωθεί και άλλοι βρίσκονται υπό διερεύνηση. Η γνώση των εδαφικών λειτουργιών είναι πρώτη ανάγκη, διότι οι λειτουργίες προσδιορίζουν τις αξίες για τον άνθρωπο και θέτουν τα πλαίσια για τη σωστή διαχείριση του οικοσυστήματος. Η ποιότητα των εδαφικών πόρων θέτει ακριβώς αυτό το πλαίσιο αξιολόγησης των εδαφικών λειτουργιών.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι δεν υπάρχει ενιαία προσέγγιση στον καθορισμό των εδαφικών λειτουργιών. Διάφοροι συγγραφείς έχουν προσεγγίσει με διαφορετικό τρόπο τον καθορισμό της εδαφικής ποιότητας, όπως αυτή ορίζεται από έναν αριθμό εδαφικών λειτουργιών. Για παράδειγμα, οι Nausbach και Tugel (1997) προτείνουν τις λειτουργίες του Σχήματος 2.1 ως τις βασικές εδαφικές λειτουργίες και μάλιστα σε κάθε λειτουργία αντιστοιχούν έναν αριθμό μετρήσιμων ιδιοτήτων-δεικτών για την αξιολόγηση της λειτουργίας σε μία δεδομένη χρονική στιγμή καθώς και την εκτίμηση της πορείας που θα ακολουθήσει η κάθε λειτουργία στον χρόνο.



**Σχήμα 2.1.** Γραφική παράσταση της βασικής ιδέας της εδαφικής ποιότητας (Πηγή: Mausbach and Tugel 1997)

## 2.2 Ποιότητα εδαφικών πόρων

Η θεώρηση του εδάφους ως πόρου, όπως ήδη αυτή αναπτύχθηκε, δεν είναι νέα (Lowdermilk 1953). Κατά καιρούς η έννοια της ποιότητας των εδαφών ήταν συνδεδεμένη με την ποσότητα και την ποιότητα της παραγόμενης φυτομάζας (Hornick 1992), ή τις επιπτώσεις που έχει στα υπάρχοντα ενδιαιτήματα και τη βιοκοινότητα που υποστηρίζει (Warkentin 1995). Η ποιότητα του εδάφους όμως δεν περιορίζεται στα παραπάνω, αλλά είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις λειτουργίες που επιτελεί το εδαφικό οικοσύστημα μέσα στα πλαίσια της παραγωγικότητας, της ποιότητας του περιβάλλοντος και της υγείας των ζωντανών οργανισμών (Larson και Pierce 1991). Η Εδαφολογική Εταιρεία των ΗΠΑ, ανταποκρινόμενη στη δημοσίευση του βιβλίου “Soil and water quality: An Agenda for Agriculture” (National Research Council 1993) από την Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ, όρισε επιτροπή με σκοπό την αναγνώριση εδαφολογικών και φυτικών ιδιοτήτων, οι οποίες θα ήταν χρήσιμες στον καθορισμό και την αξιολόγηση της ποιότητας του εδάφους. Οι Doran και Parkin (1994) όρισαν την ποιότητα του εδάφους “ως την ικανότητα ενός εδάφους να λειτουργεί μέσα στα πλαίσια του οικοσυστήματος και των διαφορετικών χρήσεων γης, έτσι ώστε να διατηρεί τη βιολογική παραγωγικότητα και την ποιότητα του περιβάλλοντος καθώς και να προστατεύει την υγεία των φυτών, ζώων και ανθρώπων”.

Οι Karlen κ.ά. (1997), αναφέρουν ότι υπάρχουν δύο τρόποι για να ορίσει κανείς την ποιότητα των εδαφών: 1) ως ενδογενές χαρακτηριστικό του εδάφους και 2) ως ικανή και αναγκαία συνθήκη της “υγείας” του εδάφους. Ως ενδογενές χαρακτηριστικό διέπεται από τις διεργασίες της εδαφογένεσης και επομένως κάθε έδαφος έχει μία φυσική ικανότητα να λειτουργεί. Στην περίπτωση αυτή, η ποιότητα του εδάφους προσδιορίζεται από τις τιμές των ιδιοτήτων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη μέγιστη δυνατή ικανότητα του εδάφους να λειτουργεί (its potential to function). Η αξιολόγηση της ποιότητας του εδάφους στη δεύτερη περίπτωση προϋποθέτει τον καθορισμό της χρήσης του εδάφους.

Για μια δεδομένη χρήση, το έδαφος θα έχει την ανώτερη δυνατή ποιότητα, όταν πραγματοποιεί τις σημαντικότερες για τη συγκεκριμένη χρήση

λειτουργίες στον μέγιστο δυνατό βαθμό. Αυτό σημαίνει ότι εφόσον έχουν κατανοηθεί οι λειτουργίες του εδαφικού οικοσυστήματος, είναι δυνατό να εφαρμοστούν οι διαχειριστικές εκείνες πρακτικές, οι οποίες αποσκοπούν στην αειφορική λειτουργία του. Για τον λόγο αυτό, η εκτίμηση της ποιότητας του εδάφους απαιτεί τη μέτρηση παραμέτρων-δεικτών της λειτουργίας στην παρούσα κατάσταση και τη σύγκριση των τιμών αυτών με γνωστές επιθυμητές τιμές αναφοράς, ώστε να διαγνωσθεί η τάση της. Η ίδια λογική ισχύει και σε μια ιατρική εξέταση όπου συγκεκριμένες μετρήσεις θεωρούνται βασικοί δείκτες της λειτουργίας του οργανισμού (Larson και Pierce 1991).

Η αξιολόγηση της ποιότητας του εδάφους γίνεται με βάση την αξιολόγηση των εδαφικών λειτουργιών, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζονται από μία σειρά φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων (Σχήμα 2.1). Η καλή λειτουργία του εδάφους προϋποθέτει: 1) τη στήριξη των φυτών, 2) τη ρύθμιση και κατανομή της κίνησης του νερού από το περιβάλλον και προς αυτό, 3) την ακινητοποίηση των τοξικών ουσιών και στη συνέχεια τη μείωση της συγκέντρωσης και τελικώς τη διάσπαση αυτών (Larson και Pierce 1991, αναφερόμενοι από Doran και Parkin 1994).

Η ποιότητα του εδάφους μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου λόγω φυσικών διεργασιών ή ανθρωπογενών επεμβάσεων. Οι διαχειριστικές πρακτικές και οι χρήσεις γης, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τις πολλαπλές λειτουργίες των εδαφών, διατηρούν την ποιότητα τους. Αντίθετα, χρήσεις των εδαφών οι οποίες έχουν ως σκοπό τη βελτιστοποίηση μιας μόνο εκ των εδαφικών λειτουργιών, π.χ. αύξηση της παραγωγικότητας, συντελούν στην υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών (Doran 1997). Όπως αναφέρθηκε, η εκτίμηση της ποιότητας ενός εδάφους γίνεται μέσω του υπολογισμού κάποιων δεικτών. Γι' αυτό πρέπει να καθορίζεται μία βασική ομάδα μετρούμενων εδαφικών ιδιοτήτων. Η μέτρηση αυτών των ιδιοτήτων προσδιορίζει τόσο την υφιστάμενη κατάσταση όσο την τάση των εδαφικών λειτουργιών. Οι ιδιότητες που επιλέγονται πληρούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

1. περιγράφουν τις διεργασίες του οικοσυστήματος και να τις προσεγγίζουν μέσω της χρήσης κάποιων ομοιομάτων,
2. είναι εκείνες οι φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες οι οποίες ρυθμίζουν τις σπουδαιότερες εδαφικές διεργασίες,

3. είναι προσιτές σε επιστήμονες και γεωργούς και εφαρμόσιμες σε συνθήκες αγρού,
4. είναι ευαίσθητες στις μεταβολές του κλίματος και της διαχειριστικής πρακτικής. Οι δείκτες θα πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητοι, ώστε να αντανακλούν τις επιδράσεις της διαχείρισης και του κλίματος στις μακροπρόθεσμες αλλαγές της εδαφικής ποιότητας, όχι όμως τόσο ευαίσθητοι, ώστε να επηρεάζονται από βραχυπρόθεσμα καιρικά φαινόμενα,
5. όπου είναι δυνατό, είναι στοιχεία ήδη υπαρχόντων βάσεων δεδομένων (Doran και Parkin 1994).

### **2.3 Δείκτες εδαφικής ποιότητας**

Όπως προαναφέρθηκε, η ποιότητα του εδάφους σχετίζεται με τρεις παραμέτρους: 1) Την παραγωγή φυτών και άλλων οργανισμών, 2) την ποιότητα του περιβάλλοντος και 3) την υγεία ανθρώπων και ζώων. Έτσι η χρήση μίας ομάδας εδαφικών ιδιοτήτων οι οποίες υπολογίζουν την ποιότητα του εδάφους, γίνεται με βάση τις τρεις αυτές παραμέτρους. Πρώτα όμως πρέπει να διευκρινισθούν οι παραπάνω παράμετροι. Όταν αναφερόμαστε στην παραγωγικότητα εννοούμε την ικανότητα του εδάφους να παράγει μεγάλα ποσά φυτομάζας και να αντιστέκεται στη διάβρωση. Ο όρος της ποιότητας του περιβάλλοντος περιλαμβάνει την ικανότητα του εδάφους να συμβάλλει στη διατήρηση της ποιότητας των υπογείων και επιφανειακών νερών καθώς και της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Με τον όρο υγεία ανθρώπων και ζώων αναφερόμαστε στην ικανότητα του εδάφους να διασφαλίζει τη διαβίωση αυτών μέσω της παραγωγής υγιεινής και θρεπτικής τροφής (Doran και Parkin 1994).

Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε την ποιότητα του εδάφους (SQ) ως συνάρτηση έξι παραμέτρων-κριτηρίων εδαφικής ποιότητας, (Doran και Parkin 1994) δηλαδή:

$SQ = f(SQE1, SQE2, SQE3, SQE4, SQE5, SQE6)$ , όπου:

SQE1: η παραγωγή φυτομάζας,



SQE2: η διαβρωσιμότητα,

SQE3: η ποιότητα των υπογείων νερών,

SQE4: η ποιότητα των επιφανειακών νερών,

SQE5: η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα,

SQE6: η ποιότητα της τροφής για ανθρώπους και ζώα.

Όμως η βαρύτητα των παραπάνω έξι κριτηρίων για τον υπολογισμό της ποιότητας του εδάφους μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με τις γεωγραφικές, κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και με τη δυνατότητα του εδάφους να υποστηρίξει κάθε μία από τις λειτουργίες αυτές. Η προσθήκη συντελεστών αναλογίας σε κάθε παράμετρο κάνει πιο ελαστική την παραπάνω εξίσωση, έτσι ώστε να προσαρμόζεται σε διαφορετικές συνθήκες:

$$SQ = (K1SQE1)(K2SQE2)(K3SQE3)(K4SQE4)(K5SQE5)(K6SQE6)$$

Το καθένα από τα παραπάνω έξι κριτήρια εδαφικής ποιότητας εκτιμάται αναφορικά με τις πέντε βασικές λειτουργίες του εδάφους οι οποίες καθορίζουν την ικανότητα του εδάφους: 1) να παρέχει το μέσο για την ανάπτυξη των φυτών, 2) να καθορίζει και να κατανέμει την κίνηση του νερού από το περιβάλλον και προς αυτό και 3) να λειτουργεί ως αποτελεσματικό περιβαλλοντικό φίλτρο (Larson και Pierce 1991 / αναφερόμενοι από Doran και Parkin 1994). Αυτές οι πέντε λειτουργίες είναι οι εξής :

SF1 = η ικανότητα του εδάφους να αποθηκεύει νερό και να ρυθμίζει την κίνηση του προς τα φυτά, το υπέδαφος και τα επιφανειακά νερά,

SF2 = η ικανότητα του εδάφους να αποθηκεύει θρεπτικές και άλλες ουσίες και να ρυθμίζει την κίνηση θρεπτικών και άλλων χημικών ουσιών,

SF3 = η ικανότητα του εδάφους να παρέχει στήριξη στο ριζικό σύστημα,

SF4 = η ικανότητα του εδάφους να διατηρεί το κατάλληλο βιοτικό περιβάλλον,

SF5 = η ικανότητα του εδάφους να ανταποκρίνεται στις διαχειριστικές πρακτικές και να αντιστέκεται στην υποβάθμιση (Doran και Parkin 1994).

Έτσι τώρα μπορούμε να εκτιμήσουμε το κάθε κριτήριο της εδαφικής ποιότητας ως συνάρτηση των πέντε λειτουργιών:

$$SQE1 = f(SF1, SF2, SF3, SF4, SF5)$$

$$SQE2 = f(SF1, SF2, SF3, SF4, SF5)$$

$$SQE3 = f(SF1, SF2, SF3, SF4, SF5)$$

$$\text{SQE4} = f(\text{SF1}, \text{SF2}, \text{SF3}, \text{SF4}, \text{SF5})$$

$$\text{SQE5} = f(\text{SF1}, \text{SF2}, \text{SF3}, \text{SF4}, \text{SF5})$$

$$\text{SQE6} = f(\text{SF1}, \text{SF2}, \text{SF3}, \text{SF4}, \text{SF5})$$

Η εκτίμηση της ποιότητας του εδάφους μέσω της χρήσης έξι κριτηρίων και μάλιστα με διαφορετική βαρύτητα ανάλογα με την περίπτωση, κρίνεται αναγκαία, καθώς η συμπεριφορά του εδάφους ερμηνεύεται με διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα, η ύπαρξη ενός αργιλλώδους ορίζοντα σ' ένα έδαφος εκτιμάται θετικά ως προς την παράμετρο SQE3 (προστασία της ποιότητας των υπογείων νερών), γιατί εμποδίζει την έκπλυση ρύπων προς τα υπόγεια νερά, αλλά εκτιμάται αρνητικά ως προς την παράμετρο SQE1 (παραγωγή φυτομάζας), γιατί η παρεμπόδιση της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος έχει ανάλογη επίδραση και στην υπέργεια φυτομάζα (Doran και Parkin 1994)

Για να έχει όμως πρακτική αξία ο παραπάνω τρόπος εκτίμησης της ποιότητας του εδάφους βασίζεται σε μετρήσιμες εδαφικές ιδιότητες. Η σπουδαιότητα της κάθε ιδιότητας καθορίζεται ανάλογα με τις συγκεκριμένες διαστάσεις του χώρου και του χρόνου (Doran 1997).

Μία προτεινόμενη ομάδα δεικτών εδαφικής ποιότητας δίνεται στον Πίνακα 2.1. Πρόκειται για μία ομάδα “*βασικών δεικτών*” για την αρχική εκτίμηση της εδαφικής ποιότητας. Πιθανόν να χρειασθούν και άλλες δευτερεύουσες μετρήσεις ανάλογα με τις υπάρχουσες βάσεις εδαφικών δεδομένων και τις ιδιαίτερες κλιματικές, γεωγραφικές, κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες ή τις εκτιμήσεις των βασικών δεικτών.

**Πίνακας 2.1.** Προτεινόμενη ελάχιστη ομάδα δεικτών της ποιότητας του εδάφους (πηγή: Mausbach και Tugel 1997)

<b>Δείκτες Ποιότητας</b>	<b>Εδαφικής</b>	<b>Σχέση δεικτών με εδαφικές διεργασίες</b>
<b>Φυσικοί Δείκτες</b>		
Κοκκομετρική σύσταση		Κατακράτηση και μεταφορά νερού και χημικών ουσιών Χρήση στα ομοιώματα, διάβρωση & εκτίμηση ποικιλότητας
Βάθος εδάφους, επιφανειακό στρώμα & ριζόστρωμα		Εκτίμηση του δυναμικού παραγωγής και της διάβρωσης Ομαλοποιεί το τοπίο & τη γεωγραφική ποικιλότητα
Διήθηση & ειδικό βάρος (SBD)	Φαινόμενο	Δυναμικό έκπλυσης, παραγωγικότητας και διάβρωσης Το SBD χρειάζεται στην προσαρμογή των αναλύσεων σε ογκομετρική βάση
Υδατοϊκανότητα		Συνδέεται με τη συγκράτηση και τη μεταφορά νερού και τη διάβρωση Διαθέσιμο H <sub>2</sub> O, υπολογισμός από SBD, κοκκομετρική σύσταση & OM
<b>Χημικοί Δείκτες</b>		
Οργανική ουσία (OM)		Καθορίζει τη γονιμότητα, τη σταθερότητα και το εύρος διάβρωσης Χρήση στα ομοιώματα και την ομαλοποίηση θέσης
pH		Ορίζει τα όρια φυτικής και μικροβιακής δραστηριότητας, Βασικό στα ομοιώματα
Ηλεκτρική αγωγιμότητα		Ορίζει τα όρια φυτικής και μικροβιακής δραστηριότητας Προς το παρόν απουσιάζει από τα ομοιώματα
Αφομοίωσιμο N, P και K		Διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία, και δυναμικό απώλειας N Δείκτες παραγωγικότητας και περιβαλλοντικής ποιότητας
<b>Βιολογικοί Δείκτες</b>		
Μικροβιακή βιομάζα C & N		Μικροβιακό καταλυτικό δυναμικό & απόθεμα C & N
Δυνητικά ανοργανοποιησιμο N		Γονιμότητα και δυναμικό εφοδιασμού N Χρήση στα ομοιώματα (αναπληρωματικός δείκτης βιομάζας)
Αναπνοή εδάφους, περιεχόμενο νερό και θερμοκρασία		Μέτρηση μικροβιακής δραστηριότητας Χρήση στα ομοιώματα, εκτίμηση της δραστηριότητας της βιομάζας

Οι ποσοτικές εκτιμήσεις της εδαφικής ποιότητας απαιτούν τον συνυπολογισμό των πολλαπλών εδαφικών λειτουργιών, των μεταβολών τους στον χρόνο και τον χώρο και των δυνατοτήτων προσαρμογής ή αλλαγής. Χρειάζονται επίσης κριτήρια για την εκτίμηση των επιπτώσεων των διαφόρων πρακτικών στην ποιότητα των φυσικών πόρων. Η εδαφική ποιότητα δεν καθορίζεται με απλούς αριθμούς, όπως π.χ. το όριο των 10 mg/lit NO<sub>3</sub>-N στο πόσιμο νερό, παρότι τέτοιες ποσοτικές σταθερές είναι πολύτιμες. Όπως τονίζεται από τους Janzen κ.ά.(1992) η σχέση ανάμεσα στους δείκτες εδαφικής υγείας και τις ποικίλες λειτουργίες του εδάφους δεν αποτελεί πάντα μία απλή σχέση που αυξάνεται γραμμικά με το μέγεθος του δείκτη. Με απλά λόγια, το περισσότερο δεν είναι απαραίτητα και το καλύτερο.

Οι εκτιμήσεις της εδαφικής ποιότητας και υγείας να ξεκινούν μέσα από το ευρύτερο πλαίσιο των κοινωνικών σκοπών για μία συγκεκριμένη περιοχή ή οικοσύστημα. Παραδείγματα αποτελούν ο καθορισμός στόχων όπως η βελτίωση της ποιότητας του νερού, η βελτίωση της παραγωγικότητας του εδάφους ή η αύξηση της βιοποικιλότητας. Αφού καθορισθούν οι συγκεκριμένοι σκοποί ως αποτέλεσμα των υφιστάμενων κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών δεδομένων στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, καθορίζονται οι εδαφικές ζώνες οι οποίες έχουν λόγω ενδογενών χαρακτηριστικών του εδάφους τη μέγιστη δυνατή ικανότητα να υποστηρίζουν κάποια συγκεκριμένη λειτουργία (Zalidis κ.ά. 1999). Ακολούθως προσδιορίζονται τα κριτήρια για την εκτίμηση της κάθε λειτουργίας σε σχέση με τις χρησιμοποιούμενες πρακτικές στη συγκεκριμένη εδαφική ζώνη. Οι περιοδικές εκτιμήσεις της εδαφικής ποιότητας με γνωστούς δείκτες, όρια και άλλα κριτήρια κάνει δυνατή την ποσοτικοποίησή της στην υφιστάμενη κατάσταση αλλά και διαγνώσκει τις τάσεις εξέλιξής της σε σχέση με τις χρησιμοποιούμενες πρακτικές.

Διάφορες προσεγγίσεις έχουν προταθεί για την εκτίμηση της εδαφικής ποιότητας (Acton και Padbury 1993, Doran και Parkin 1994, Karlen κ.ά. 1994, Larson και Pierce 1994). Κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των προσεγγίσεων είναι ότι η εδαφική ποιότητα εκτιμάται σε σχέση με συγκεκριμένες εδαφικές λειτουργίες. Οι Larson και Pierce (1994) πρότειναν μία δυναμική προσέγγιση εκτίμησης, στην οποία η δυναμική ή η αλλαγή της εδαφικής ποιότητας για ένα δεδομένο σύστημα διαχείρισης χρησιμοποιείται

ως μέτρο της αειφορικότητάς του. Έτσι πρότειναν την υιοθέτηση μιας ελάχιστης ομάδας δεδομένων (minimum data set) για τον προσδιορισμό της ποιότητας των εδαφών παγκοσμίως. Για τη μέτρηση των ιδιοτήτων αυτών πρέπει να καθιερωθούν συγκεκριμένες μέθοδοι, οι οποίες θα εκτιμούν τις μεταβολές στην ποιότητα των εδαφών.

## **2.4 Οι μετρήσεις πεδίου ως μέσο εκτίμησης της ποιότητας των εδαφικών πόρων**

Έχει δειχθεί ότι η μέτρηση των δεικτών που αναφέρθηκαν στο επιφανειακό στρώμα, περίπου 10 cm, είναι μια αποτελεσματική μέθοδος αξιολόγησης της ποιότητας του εδάφους σε τοπική κλίμακα, διότι τα δεδομένα που παρέχει είναι σύμφωνα σε ακρίβεια και επαναληψιμότητα με εκείνα που λαμβάνονται με τις συνήθεις μεθόδους, οι οποίες γίνονται σε αεροξηραμένα δείγματα στο εργαστήριο για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών του εδάφους (Liebig κ.ά. 1996). Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα αυτών των μετρήσεων για τον προσδιορισμό των επιδράσεων της διαχείρισης του εδάφους, σε συνδυασμό με το σχετικά μικρό κόστος, τις γρήγορες και απλές τεχνικές που υιοθετούνται, δεν απαιτούν εξειδικευμένη γνώση. Επίσης, οι μετρήσεις πεδίου βοηθούν στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που προέρχονται, είτε από την αλλοίωση του δείγματος κατά τη μεταφορά του στο εργαστήριο είτε από τη μη ακριβή προσομοίωση συνθηκών πεδίου στο εργαστήριο. Η προσέγγιση βασίζεται στη μέτρηση επιλεγμένων φυσικών (περιεκτικότητα σε νερό, φαινόμενο ειδικό βάρος, πορώδες, ρυθμός διήθησης, υδατοϊκανότητα), χημικών (pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα, νιτρικό-N) και βιολογικών ιδιοτήτων (έκλυση CO<sub>2</sub>-C) του εδάφους στο πεδίο. Οι ιδιότητες αυτές έχουν αναγνωρισθεί ως απαραίτητα στοιχεία της ελάχιστης ομάδας δεδομένων για την εκτίμηση της ποιότητας των εδαφών (Larson και Pierce 1991).

Οι μετρήσεις πεδίου χωρίζονται σε τρία στάδια: α) τις αρχικές μετρήσεις, πριν από την διαβροχή του δείγματος, β) τις μετρήσεις διήθησης του νερού κατά τη διάρκεια διαβροχής του δείγματος και γ) τις μετρήσεις μετά τη διαβροχή, όταν το έδαφος βρίσκεται στην κατάσταση της υδατοϊκανότητας.

Οι αρχικές μετρήσεις αφορούν τη μέτρηση φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων του εδάφους σε συνθήκες, που επικρατούν τη στιγμή της δειγματοληψίας. Οι μετρήσεις 16-24 ώρες μετά τη διαβροχή του δείγματος αφορούν την υδατοϊκανότητα και τη βιολογική δραστηριότητα. Η αναλυτική περιγραφή των μεθόδων δίνεται από τους Sarrantonio κ.ά. (1996).

#### *Μετρήσεις πριν από τη διαβροχή του εδάφους:*

Τοποθετούνται κύλινδροι, (ύψους 12,7 cm και εσωτερικής διαμέτρου 14,9 cm), στο έδαφος σε βάθος 7,6 cm. Για την εκτίμηση της αναπνοής του εδάφους οι κύλινδροι καλύπτονται με καπάκι που διαθέτει τρία ελαστικά διαφράγματα (septums) και μετά από μισή ώρα λαμβάνονται, με μια απλή σύριγγα 100 ml δείγματος αέρα μέσα σε ένα σωληνίσκο Draeger 0,1% CO<sub>2</sub>, ενώ ταυτόχρονα σημειώνεται η θερμοκρασία του εδάφους. Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η μέθοδος της αέριας χρωματογραφίας για τον υπολογισμό του CO<sub>2</sub>-C. Κατά παρόμοιο τρόπο λαμβάνονται 100 ml δείγματος αέρα στη σύριγγα και στη συνέχεια διοχετεύονται 12 ml σε ειδικό αεροστεγές φιαλίδιο στο οποίο υπολογίζεται η ποσότητα του CO<sub>2</sub>-C.

Επίσης λαμβάνεται δείγμα εδάφους βάθους 7,6 cm, δίπλα από τον προεγκατεστημένο κύλινδρο χρησιμοποιώντας κύλινδρο δειγματοληψίας διαμέτρου 7,3 cm. Από το δείγμα αυτό υπολογίζεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, το φαινόμενο ειδικό βάρος (bulk density) και ο σχετικός υδατοκορεσμός (relative saturation ή water-filled pore space).

Οι μετρήσεις της αναπνοής ανάγονται σε θερμοκρασία 25°C και στο 60% του σχετικού υδατοκορεσμού (WFPS), στο οποίο έχει υπολογισθεί ότι συμπίπτει με το μέγιστο της μικροβιακής δραστηριότητας του εδάφους.

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και το pH μετρούνται σε αιώρημα 1:1 χρησιμοποιώντας φορητά όργανα. Το νιτρικό άζωτο (NO<sub>3</sub>-N) μετράται στο εκχύλισμα 1:1 χρησιμοποιώντας AquaChek test strips. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της EC και των νιτρικών διορθώνονται για την αραιώση από το εκχύλισμα 1:1 στον υδατοκορεσμό.

## *Ρυθμός διήθησης νερού*

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διήθησης του νερού στο έδαφος (infiltration rate), καλύπτεται η επιφάνεια του εδάφους μέσα στον κύλινδρο με πλαστική μεμβράνη, προστίθενται 444 ml απεσταγμένου νερού και στη συνέχεια αφαιρείται η μεμβράνη για να διηθηθεί το νερό στο έδαφος. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται ακόμα μια φορά, αμέσως μόλις ολοκληρωθεί η πρώτη και καταγράφεται ο χρόνος που απαιτείται για τη διήθηση του νερού στο έδαφος.

## *Μετρήσεις μετά τη διαβροχή του εδάφους*

Μετά από 16-24 ώρες, πραγματοποιείται μέτρηση του εκλυόμενου CO<sub>2</sub> με τη διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως και υπολογίζεται η αναπνοή του εδάφους. Με τον κυλινδρικό δειγματολήπτη διαμέτρου 7,3 cm λαμβάνεται δείγμα από το εσωτερικό του κυλίνδρου για τον προσδιορισμό του φαινόμενου ειδικού βάρους και της υδατοϊκανότητας, η οποία ισούται με την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό 16 με 24 ώρες μετά από τον κορεσμό του.

## **2.5 Εδαφική υγεία**

Ο όρος “υγεία του εδάφους” απαντάται στη διεθνή βιβλιογραφία ως συνώνυμος όρος της “ποιότητας του εδάφους”. Οι Harris κ.ά. (1996) προτείνουν οι δύο όροι να χρησιμοποιούνται ταυτόσημα και τονίζουν τον λειτουργικό ρόλο του εδάφους σε σχέση με την παραγωγικότητα, την ποιότητα του περιβάλλοντος και την υγεία ανθρώπων και ζώων, σε αντίθεση με την αντίληψη, η οποία θεωρεί το έδαφος πηγή ορυκτών, μεταλλευμάτων και υλικών για οικοδόμηση. Κάτω από αυτό το πρίσμα οι όροι “ποιότητα” και “υγεία” θα χρησιμοποιούνται και στο παρόν κείμενο ως ταυτόσημοι.

Αν και η έννοια της ποιότητας έχει επικρατήσει μεταξύ των επιστημόνων, εντούτοις, οι παραγωγοί προτιμούν την έννοια της υγείας του

εδάφους. (Harris και Bezdicsek 1994). Ερευνες των Romig κ.ά. (1995) έδειξαν ότι οι παραγωγοί δίνουν έμφαση στην οπτική αξιολόγηση του εδάφους και στη χρήση ποιοτικών δεικτών, βάσει των οποίων χαρακτηρίζουν τα εδάφη ως υγιή ή μη υγιή. Αντίθετα οι επιστήμονες δίνουν έμφαση στην αξιολόγηση των λειτουργιών του εδάφους με τη χρήση ποσοτικών δεικτών (Karlen κ.ά. 1997).

Ο όρος “υγεία του εδάφους” τονίζει ιδιαίτερα την παραγωγικότητα και την ικανότητα του εδάφους να υποστηρίζει την υγεία ανθρώπων και ζώων και κατά συνέπεια προτιμάται από τους παραγωγούς, οι οποίοι ενδιαφέρονται κυρίως για την παραγωγικότητα του εδάφους και για τη διαφύλαξη της υγείας τους, αλλά και των ζώων τα οποία εκτρέφουν.

Αντίθετα, η επιστημονική κοινότητα τονίζει ιδιαίτερα τη συσχέτιση της εδαφικής ποιότητας με την ποιότητα του νερού και του αέρα γιατί θέλει να υπογραμμίσει τα ακόλουθα:

1. την ανάγκη για εκτίμηση της ποιότητας του εδάφους με ποσοτικούς δείκτες, η οποία γινόταν μέχρι σήμερα στον ατμοσφαιρικό αέρα και το νερό, αλλά όχι στο έδαφος,
2. την ανάγκη για μία ολοκληρωμένη αντίληψη της ποιότητας του εδάφους ξεφεύγοντας από τη μονοδιάστατη αντίληψη που επικρατούσε έως σήμερα, σύμφωνα με την οποία “καλό” έδαφος είναι αυτό, που δίνει μεγάλη παραγωγή,
3. τον ρόλο που έχουν παίξει συγκεκριμένες γεωργικές πρακτικές στην υποβάθμιση του ατμοσφαιρικού αέρα και των υπογείων και επιφανειακών υδάτων.

## 2.6 Βιοδείκτες Εδαφικής υγείας

Οι βιοδείκτες της εδαφικής υγείας μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

1. **Βιοδείκτες εδαφικής παραγωγικότητας.** Αποτελούν θετικούς ή αρνητικούς δείκτες, που αντανakλούν τη φυτική αύξηση.
2. **Βιοδείκτες εδαφικής αειφορίας.** Αντανakλούν τη μακροχρόνια διαχείριση του εδαφικού πόρου.



3. **Βιοδείκτες εδαφικής ρύπανσης.** Αντανακλούν την ποιοτική και ποσοτική ρύπανση του εδαφικού πόρου.

Οι βιοδείκτες εδαφικής παραγωγικότητας και εδαφικής αειφορίας σχετίζονται στενά και επομένως δεν είναι σκόπιμος ο διαχωρισμός τους. Γι' αυτό και οι βιοδείκτες αυτοί εξετάζονται στη συνέχεια από κοινού (Pankhurst 1994).

## 2.6.1 Βιοδείκτες Εδαφικής Παραγωγικότητας και Αειφορίας

### 2.6.1.1 Οι οργανισμοί του εδάφους

Ο Πίνακας 2.2 αναφέρεται σε μία αντιπροσωπευτική σύνθεση της μάζας των εδαφικών οργανισμών (μικροχλωρίδα, μικροπανίδα, μεσοπανίδα και μακροπανίδα). Επίσης, στον πίνακα αυτό γίνεται σύγκριση της βιοποικιλότητας μεταξύ των εύκρατων και των τροπικών περιοχών.

**Πίνακας 2.2.** Αντιπροσωπευτική σύνθεση της εδαφικής βιομάζας ( $\text{kg ha}^{-1}$  ζώντος βάρους) σε εύκρατη και τροπική ζώνη (Lee 1991)

Κατηγορία οργανισμών	Εύκρατη ζώνη	Τροπική ζώνη
Μικροπανίδα (<2mm) (πρωτόζωα, νηματώδεις)	50	0,5
Μεσοπανίδα (2-10mm) (μικροαρθρόποδα)	20	20
Μακροπανίδα (>10mm) Γαιοσκώληκες, Τερμίτες	900	300
Μικροχλωρίδα (Βακτήρια, Μύκητες, κ.ά.)	-	15
	20000	-

#### *Μικροχλωρίδα (Βακτήρια και μύκητες)*

Οι συνολικοί πληθυσμοί των βακτηρίων και των μυκήτων στο έδαφος αποτελούν ευαίσθητους δείκτες, επειδή οι πληθυσμοί τους αντιδρούν διαφορετικά σε διάφορες διαχειριστικές πρακτικές του εδαφικού πόρου.

Έτσι, όταν η διαχειριστική πρακτική του εδαφικού πόρου περιλαμβάνει αμειψισπορά και μειωμένη κατεργασία του εδάφους, έχει ως αποτέλεσμα την

καλύτερη εδαφική δομή και την υψηλότερη περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία. Στην περίπτωση αυτή, ο μικροβιακός πληθυσμός του εδάφους (ιδιαίτερα στους επιφανειακούς ορίζοντες) κυριαρχείται από μύκητες (Hendrix κ.ά. 1986, Holland και Coleman 1987, Gupta και Germida 1988). Αντίθετα, σε εδάφη όπου η διαχειριστική πρακτική περιλαμβάνει ενσωμάτωση των υπολειμμάτων της καλλιέργειας στο έδαφος, δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των βακτηρίων, που έχει ως επακόλουθο την ταχύτερη αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας (Hendrix κ.ά. 1986).

Η αφθονία των μυκήτων σε εδάφη που έχουν υποστεί μειωμένη κατεργασία οφείλεται στην αντοχή τους σε χαμηλά pH, καθώς, και τη μη καταστροφή των μυκηλιακών τους υφών, οι οποίες αναπτύσσονται ελεύθερα και οδηγούν στη δημιουργία σταθερών εδαφικών συσσωματωμάτων. Σε έρευνα που έγινε σε έδαφος, το οποίο επί 69 έτη συνεχώς καλλιεργούνταν, βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ της μείωσης των μυκηλιακών υφών και της σταθερότητας των εδαφικών συσσωματωμάτων.

Τέλος, η παρουσία ή η απουσία στο έδαφος παθογόνων οργανισμών για τα φυτά αποτελεί, επίσης, δείκτη εδαφικής υγείας με άμεση επίδραση στη φυτική ανάπτυξη. Έτσι, βρέθηκε ότι η μειωμένη κατεργασία του εδάφους ευνόησε τον πολλαπλασιασμό του παθογόνου *Rhizoctonia solani* σε πολλά εδάφη της Αυστραλίας (Neate 1987). Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν διερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων πρακτικών διαχείρισης του εδαφικού πόρου σε πληθυσμούς άλλων βακτηρίων και μυκήτων με μεγάλη οικονομική σημασία.

#### *Μικροπανίδα (Πρωτόζωα και νηματώδεις)*

Τα πρωτόζωα και οι νηματώδεις, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παίζουν καίριο ρόλο στο εδαφικό οικοσύστημα ως άρπαγες. Συνήθως τα είδη και τα πληθυσμιακά τους μεγέθη στο έδαφος αντανακλούν και τους αντίστοιχους πληθυσμούς των βακτηρίων και των μυκήτων. Έτσι, εδάφη αδιατάρακτα με μικροχλωρίδα στην οποία κυριαρχούν οι μύκητες, παρουσιάζουν υψηλούς πληθυσμούς μυκητοφάγων νηματωδών, ενώ καλλιεργούμενα εδάφη, όπου κυριαρχούν τα βακτήρια παρουσιάζουν υψηλούς πληθυσμούς βακτηριοφάγων νηματωδών. Επίσης, πολλά πρωτόζωα και νηματώδεις περιορίζουν τους πληθυσμούς φυτοπαθογόνων μυκήτων και βακτηρίων στο

έδαφος, ενώ υπάρχουν και περίπου 500 είδη νηματωδών που είναι παράσιτα των φυτών (Hendrix κ.ά 1986, Pankhurst 1994).

#### *Μεσοπανίδα (Μικροαρθρόποδα)*

Η εδαφική μεσοπανίδα και κυρίως τα μικροαρθρόποδα (Κολλέμβολα και Ακάρεα) είναι ευαίσθητοι βιοδείκτες διαφόρων εδαφικών διαταραχών. Σε μία έρευνα της επίδρασης του γεωργικού φαρμάκου Aldicarb στους πληθυσμούς διαφόρων ειδών κολλέμβολων και ακάρεων στο έδαφος, διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές ως προς τον χρόνο επαναφοράς των αρχικών ειδών και ως προς την ποικιλότητα των ειδών των μικροαρθροπόδων αυτών στο έδαφος μετά από 3 έτη (Koechler 1992).

Επίσης έρευνες σχετικά με την επίδραση της μειωμένης κατεργασίας του εδάφους σε πληθυσμούς 51 ειδών αρθροπόδων επιζήμιων για τα φυτά, έδειξαν ότι οι ζημιές στις καλλιέργειες αυξήθηκαν για το 28% των αρθροπόδων, το 29% δεν επηρέασε το ποσοστό των ζημιών, ενώ το 43% προκάλεσε μειωμένες ζημιές στις καλλιέργειες (Pankhurst 1994). Όμως για λόγους που μέχρι σήμερα δεν έχουν διευκρινισθεί, η μειωμένη κατεργασία του εδάφους οδήγησε σε αύξηση των φυσικών εχθρών των αρθροπόδων, όπως είναι τα σκαθάρια και τα αραχνοειδή (Stinner και House 1990).

#### *Μακροπανίδα (Γαιοσκώληκες-Τερμίτες)*

Πιο σημαντικά μέλη της εδαφικής μακροπανίδας, θεωρούνται οι γαιοσκώληκες, οι τερμίτες και τα μυρμήγκια. Οι τερμίτες και τα μυρμήγκια απαντούν συνήθως σε πολύ μεγάλους πληθυσμούς στις τροπικές και υποτροπικές κλιματικές ζώνες.

Οι γαιοσκώληκες είναι πολύ ευαίσθητοι δείκτες των εδαφικών συνθηκών. Επειδή ευνοούνται σε συνθήκες μειωμένης κατεργασίας του εδάφους και δεν αντέχουν στα γεωργικά φάρμακα και το χαμηλό εδαφικό pH, χρησιμοποιούνται ως ένδειξη των επιπέδων του pH καθώς και των μεγάλων συγκεντρώσεων υπολειμμάτων γεωργικών φαρμάκων στο έδαφος. Οι γαιοσκώληκες λόγω της μεγάλης ευεργετικής επίδρασής τους επί των

ιδιοτήτων του εδάφους, θεωρούνται ως ένδειξη καλής εδαφικής υγείας και παραγωγικότητας του εδάφους (Lal 1988).

### **2.6.1.2 Η οργανική ουσία του εδάφους**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε καλλιεργούμενα εδάφη η οργανική ουσία μειώνεται λόγω αυξημένης μικροβιακής αποικοδόμησης, ενώ σε εδάφη που έχουν υποστεί μειωμένη κατεργασία τα επίπεδα του οργανικού C και N είναι πολύ αυξημένα στα πρώτα 5-15 cm του εδάφους, βάθος στο οποίο βρίσκεται και το μεγαλύτερο μέρος του ριζικού συστήματος των περισσότερων ετήσιων φυτών. Επομένως, η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία μπορεί να αποτελέσει έναν γενικό δείκτη εδαφικής υγείας, επειδή τα υψηλά επίπεδα οργανικής ουσίας συνδέονται με καλές εδαφικές ιδιότητες όπως είναι καλή εδαφική δομή, υψηλή βιοποικιλότητα κ.ά.

Διαγνωστική αξία δεν έχει μόνο η ποσότητα αλλά και η ποιότητα όμως της οργανικής ουσίας. Έτσι, σε μη καλλιεργούμενα εδάφη το ποσοστό των υδατανθράκων, των αμινοξέων και γενικότερα των αλειφατικών ενώσεων του άνθρακα (παραφίνες) είναι υψηλό, ενώ ταυτόχρονα είναι χαμηλό το ποσοστό σε αρωματικές ενώσεις του άνθρακα σε σχέση με τα αντίστοιχα ποσοστά των καλλιεργούμενων εδαφών (Arshad κ.ά. 1990).

Επίσης, οι ποσότητες του C και του N, που μπορούν να ανοργανοποιηθούν παρέχουν εκτιμήσεις για τις μεταβολές της οργανικής ουσίας στο έδαφος, οι οποίες προκαλούνται από τις διάφορες πρακτικές διαχείρισης του εδαφικού πόρου. Έτσι, σε καθεστώς μειωμένης κατεργασίας, υψηλές συγκεντρώσεις οργανικού C και N στα πρώτα 10 cm του εδάφους αντιστοιχούν σε υψηλότερους ρυθμούς αναπνοής (ανοργανοποίηση C) και ανοργανοποίησης του N. Σε βάθος κάτω από τα 10 cm σε εδάφη μειωμένης κατεργασίας, τα ετερότροφα βακτήρια εμφανίσθηκαν περισσότερο ελλειμματικά σε N απ' ότι σε εδάφη που είχαν υποστεί έντονη κατεργασία. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι σε εδάφη με μειωμένη κατεργασία το ποσοστό του N που μπορεί να ανοργανοποιηθεί, είναι πιο υψηλό σε σχέση με εδάφη με έντονη κατεργασία (Wood και Edwards 1992).

### 2.6.1.3 Τα ένζυμα του εδάφους

Τα εδαφικά ένζυμα είναι βιολογικοί καταλύτες πολυάριθμων αντιδράσεων που συμβαίνουν στο έδαφος. Από τα ένζυμα του εδάφους, ορισμένα (π.χ. αφυδρογονάση) βρίσκονται μόνο σε ζωντανά κύτταρα, ενώ τα περισσότερα μπορούν να υπάρχουν και ως εξωένζυμα εκκρινόμενα από διάφορους μικροοργανισμούς του εδάφους ή ως ένζυμα προερχόμενα από μικροβιακά και φυτικά υπολείμματα. Και στις δύο περιπτώσεις τα ένζυμα του εδάφους είναι σταθεροποιημένα σε μορφή συμπλόκων με τα ορυκτά της αργίλλου ή με τα κολλοειδή συστατικά της οργανικής ουσίας. Επειδή είναι δύσκολη η εξαγωγή των ενζύμων τους από το έδαφος, τα ένζυμα αυτά μελετώνται έμμεσα με μέτρηση της δραστηριότητάς τους *in vitro* σε αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες. Ωστόσο, η αναγωγή των συμπερασμάτων των μετρήσεων αυτών από την *in vitro* κατάσταση στην *in vivo* παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Γενικά, οι μετρήσεις της δραστηριότητας των ενζύμων του εδάφους, μας παρέχουν γνώσεις σχετικά με τις βιοχημικές διεργασίες, που πραγματοποιούνται στο έδαφος και έτσι αποτελούν χρήσιμους δείκτες της βιολογικής δραστηριότητας στο έδαφος (Dick 1992).

Τα εδαφικά ένζυμα ουρεάση, αμιδάση, φωσφατάση, άμυλο-σουλφατάση, πρωτεάση, αφυδρογονάση και ινβεργτάση βρέθηκαν σε αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις σε εδάφη με μειωμένη εδαφική κατεργασία, καθώς και σε εδάφη, στα οποία εφαρμόζονταν αμειψισπορά, σε σύγκριση με εδάφη συστημάτων μονοκαλλιέργειας (Doran 1980, Dick 1984, Gupta και Germida 1988). Το ίδιο παρατηρήθηκε και στην περίπτωση της ενσωμάτωσης φυτικών υπολειμμάτων στο έδαφος (Bolton κ.ά. 1985).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της δραστηριότητας των εδαφικών ενζύμων σε συνδυασμό με μετρήσεις της εδαφικής βιομάζας μεταβάλλονται κάτω από διαφορετικά συστήματα διαχείρισης του εδαφικού πόρου, κάτι που δεν έδειξαν οι μετρήσεις μόνο της εδαφικής βιομάζας. Επομένως, οι μετρήσεις της δραστηριότητας ορισμένων εδαφικών ενζύμων μπορούν να αποτελέσουν βιοδείκτη για την ανίχνευση μεταβολών της εδαφικής ποιότητας.

#### 2.6.1.4 Η φυτική αύξηση

Ο τελευταίος δείκτης καλής εδαφικής υγείας είναι η ικανότητα του εδάφους να υποστηρίζει τη φυτική αύξηση. Έτσι, η φυτική αύξηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιοδείκτης για :

1. την παρουσία υπολειμματικών συγκεντρώσεων ζιζανιοκτόνων στο έδαφος (Banin και Kafkafi 1980),
2. την παρουσία παθογόνων και ωφέλιμων εδαφικών οργανισμών (Rovira κ.ά. 1990),
3. την ύπαρξη τροφοπενιών στο έδαφος και την ανίχνευση τοξικών ουσιών και βαρέων μετάλλων.

Συμπερασματικά λοιπόν οι βιοδείκτες εδαφικής παραγωγικότητας και αειφορίας είναι:

- η υγιής και ανεμπόδιστη φυτική αύξηση,
- τα χαμηλά επίπεδα παθογόνων μικροοργανισμών για τα φυτά στο έδαφος,
- οι υψηλοί πληθυσμοί των ωφέλιμων εδαφικών οργανισμών (π.χ. γαιοσκώληκες, μυκόρριζες, βακτήρια, ετερότροφα πρωτόζωα και νηματώδεις, αρπακτικά αρθρόποδα κ.ά.),
- η υψηλή βιοποικιλότητα του εδάφους,
- η υψηλή περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία,
- τα υψηλά επίπεδα C και N στο έδαφος που μπορούν να ανοργανοποιηθούν,
- υψηλά επίπεδα υδρολάσεων και οξειδοοδουκτάσεων.

#### 2.6.2 Βιοδείκτες Εδαφικής Ρύπανσης

Τα υπολείμματα των γεωργικών φαρμάκων, καθώς και τα βαρέα μέταλλα επηρεάζουν πολύ τη σύνθεση, αλλά και τη δραστηριότητα της εδαφικής βιομάζας. Πλήθος μελετών έχουν γίνει σχετικά με τη δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφόρων εδαφικών οργανισμών ως βιοδεικτών τοξικών συγκεντρώσεων κάποιου ρύπου στο εδαφικό περιβάλλον. Οι Weiss και Larink

(1991) μελέτησαν την επίδραση των αποβλήτων σε καλλιεργούμενα εδάφη και βρήκαν ότι σε όλες τις μεταχειρίσεις ο συνολικός αριθμός των νηματώδων στο έδαφος αυξήθηκε. Αυτό οφείλεται στο ότι στα εδάφη που δέχτηκαν τα απόβλητα αυξήθηκαν τόσο οι βακτηριοφάγοι (π.χ. *Rhabditidae*), όσο και οι μυκητοφάγοι (π.χ. *Apelenchoides*) νηματώδεις. Αντίθετα, οι παμφάγοι νηματώδεις μειώθηκαν με την προσθήκη των αποβλήτων και απουσίαζαν εντελώς στην περίπτωση όπου μαζί με τα απόβλητα προστέθηκαν και βαρέα μέταλλα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι παμφάγοι νηματώδεις του είδους *Ecumenicus* βρέθηκαν σε ίση αφθονία σε όλα τα εδάφη εκτός από εκείνα που δέχθηκαν μόνο βαρέα μέταλλα, φανερώνοντας έτσι ότι το είδος αυτό του παμφάγου νηματώδους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας πολύ ευαίσθητος βιοδείκτης για την παρουσία βαρέων μετάλλων στο έδαφος.

Μια εναλλακτική στρατηγική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση βαρέων μετάλλων και υπολειμμάτων γεωργικών φαρμάκων στο έδαφος, είναι να ερευνηθεί αν είναι δυνατή η ανάπτυξη μικροβιακών πληθυσμών (βακτηρίων και μυκήτων) που είναι ανθεκτικοί σε έναν συγκεκριμένο ρύπο (Summers 1985). Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε με επιτυχία από τους Radford κ.ά. (1981), που έδειξαν ότι ο αριθμός των ανθεκτικών στον υδράργυρο βακτηρίων σε ρυπασμένα με υδράργυρο εδάφη ήταν σημαντικά υψηλότερος σε σχέση με τα μη ρυπασμένα με υδράργυρο εδάφη. Η ανεύρεση όμως ειδών βακτηρίων τα οποία θα είναι ανθεκτικά σε περισσότερα από ένα βαρέα μέταλλα (π.χ. αρσενικό, χρώμιο, μόλυβδο, νικέλιο κ.ά.), χρειάζεται περαιτέρω έρευνα.

Μια άλλη προσέγγιση είναι να μετρήσουμε τη βιοποικιλότητα του εδάφους, στηριζόμενοι είτε σε στατιστικές αναλύσεις των ταξινομικών ομάδων των μικροοργανισμών του εδάφους, οι οποίοι συλλέγονται τυχαία από το έδαφος είτε κάνοντας ανάλυση της γενετικής ποικιλότητας του DNA των μικροοργανισμών του εδάφους. Έτσι, οι Atlas κ.ά. (1991) βρήκαν ότι οι ταξινομικές και οι γενετικές ποικιλότητες των μικροοργανισμών του εδάφους σε εδάφη ρυπασμένα με χημικούς ρύπους (2,4,5-T, πετρέλαιο) ήταν χαμηλότερες σε σύγκριση με τα μη ρυπασμένα εδάφη.

Συμπερασματικά, λοιπόν, βιοδείκτες της εδαφικής ρύπανσης είναι (Pankhurst 1994):

- οι μικρές ποσότητες εδαφικής βιομάζας,

- η παρουσία ή απουσία ορισμένων εδαφικών μικροοργανισμών (π.χ. νηματωδών, ακαρέων, γαιοσκωλήκων),
- η παρουσία μικροβιακών πληθυσμών ανθεκτικών σε κάποιον ρύπο,
- η φυτική αύξηση και η παρουσία τοξικών ουσιών στους φυτικούς ιστούς.

Παρ' όλα αυτά απαιτείται περισσότερη έρευνα για να βρεθούν οι πιο σχετικοί και ευαίσθητοι βιοδείκτες της εδαφικής υγείας και αειφορίας και να καθορισθεί αν μπορούν αυτοί οι βιοδείκτες να αποτελέσουν και δείκτες της εδαφικής ανάκαμψης. Έτσι, σήμερα η έρευνα στρέφεται προς τις ακόλουθες κατευθύνσεις (Pankhurst 1994):

1. καθορισμός της σημασίας της εδαφικής βιοποικιλότητας σε αειφορικά γεωργικά συστήματα, με την ανάπτυξη νέων μεθόδων για γρήγορη μέτρηση της εδαφικής βιοποικιλότητας, όπως είναι η μέθοδος της αναγνώρισης του DNA των μικροοργανισμών του εδάφους,
2. χρησιμοποίηση των εδαφικών ενζύμων ως βιοδεικτών,
3. χρησιμοποίηση των μικροοργανισμών του εδάφους ως δεικτών εδαφικής ρύπανσης,
4. επίδραση των διαφόρων τακτικών διαχείρισης του εδαφικού πόρου στους πληθυσμούς των εδαφικών οργανισμών σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών για τη γρήγορη μέτρηση των πληθυσμών των ειδών “κλειδιών” του εδάφους.

Στο παρακάτω παράδειγμα φαίνονται καθαρά οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της εδαφικής βιοποικιλότητας, των ιδιοτήτων του εδάφους, της απόδοσης των καλλιεργειών και της αειφορικής χρήσης γης. Σε πειράματα που έγιναν στο Περού, το Μεξικό και την Ακτή του Ελεφαντοστού, επιλέχθηκαν τοποθεσίες στις οποίες ήταν εφικτή η εισαγωγή και εγκατάσταση γαιοσκωλήκων. Στις τοποθεσίες αυτές εγκαταστάθηκαν διάφορες καλλιέργειες και το σύστημα διαχείρισης του εδαφικού πόρου περιελάμβανε τη συγκομιδή και το κάψιμο των υπολειμμάτων της καλλιέργειας και όχι την ενσωμάτωσή τους στο έδαφος. Η έρευνα έδειξε ότι η εγκατάσταση στο έδαφος των γαιοσκωλήκων δεν ήταν πάντα επιτυχημένη, κυρίως λόγω της έλλειψης τροφής (οργανική ουσία). Όμως, κάποια είδη γαιοσκωλήκων κατάφεραν να προσαρμοστούν σ' αυτές τις συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας τροφής και ανέπτυξαν υψηλούς πληθυσμούς (Lavelle κ.ά. 1994).



Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών, έδειξαν ότι οι γαιοσκώληκες κατάφεραν να αυξήσουν την απόδοση, αλλά αυτή η θετική τους επίδραση στην απόδοση των καλλιεργειών δεν μπορεί να εξηγηθεί απλώς και μόνο με τη βελτίωση της παροχής των θρεπτικών στοιχείων στα φυτά, αφού η επίδραση των γαιοσκωλήκων ήταν το ίδιο σπουδαία και στις περιπτώσεις, που χρησιμοποιήθηκαν λιπάσματα για τη διόρθωση των τροφοπενιών. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός απώλειας της οργανικής ουσίας από το έδαφος, αλλά και ο ρυθμός απώλειας των αποθεμάτων του εδάφους σε θρεπτικά στοιχεία, δεν μειώθηκε με την εισαγωγή και εγκατάσταση στο έδαφος των γαιοσκωλήκων. Παρατηρήθηκαν όμως ποιοτικές διαφοροποιήσεις της οργανικής ουσίας και ευνοϊκότερες συνθήκες πρόσληψης των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά (Lavelle κ.ά. 1994).

Αν και η διάρκεια των πειραμάτων αυτών ήταν μικρή (μόλις δύο έτη), θεωρείται βέβαιο ότι μετά την εισαγωγή και εγκατάσταση των γαιοσκωλήκων στο έδαφος, οι δραστηριότητές τους αλλά και γενικότερα οι δραστηριότητες της εδαφικής πανίδας οδηγούν το εδαφικό οικοσύστημα μακροχρόνια σε μια νέα κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Αυτή χαρακτηρίζεται από μειωμένη περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία, αλλά και από μικρότερο χρόνο επαναφοράς των θρεπτικών στοιχείων λόγω της αυξημένης ανοργανοποίησής τους από τους γαιοσκώληκες (Lavelle κ.ά. 1994).

Το πειράματα αυτά επίσης έδειξαν ότι οι γαιοσκώληκες έχουν μεγάλη επίδραση επί των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους. Έτσι, στα πρώτα 10 cm δημιουργήθηκαν μεγάλου μεγέθους εδαφικά συσσωματώματα και κατά συνέπεια πόροι μεγάλης διαμέτρου, με αποτέλεσμα να αλλάξει το υγρασιακό καθεστώς του εδάφους (Lavelle κ.ά. 1994).

## **2.7 Μεταβολή της ποιότητας των εδαφών και ικανότητα ανάκαμψης του εδαφικού πόρου**

Το εδαφικό οικοσύστημα, υπό φυσικές συνθήκες, βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Στο σύστημα αυτό συμβαίνουν μεταβολές,

οι οποίες μπορεί να είναι μικρές και βραδείες υπό το πρίσμα της διάρκειας ζωής του ανθρώπου. Υπό την επίδραση όμως διαφόρων εξωγενών παραγόντων, π.χ. πλημμύρες, κατολισθήσεις, είναι δυνατόν να επέλθουν ριζικές και απότομες μεταβολές στη δομή και τις λειτουργίες του εδάφους με άμεσες επιπτώσεις στην ποιότητά του (Eswaran 1994).

Πολλά εδαφικά οικοσυστήματα έχουν υποστεί υποβάθμιση της ποιότητας τους λόγω φυσικών ή ανθρωπογενών αιτιών. Έτσι αν αρχικά ένα εδαφικό οικοσύστημα βρίσκεται από την άποψη της ποιότητας του εδάφους σε ένα αρχικό επίπεδο αναφοράς SQ1 και υποβαθμισθεί κατά ΔSQ, θα καταλήξει σε ένα νέο επίπεδο SQ2, δηλαδή:  $\Delta SQ = SQ1 - SQ2$ . Για να ανακάμψουν τα εδάφη αυτά πρέπει να εφαρμοσθούν αειφορικά συστήματα διαχείρισης. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να καθορισθεί ποια είναι η ικανότητα του εδαφικού πόρου να ανακάμπτει μετά από διαταραχή και να επανέρχεται στο αρχικό δομικό και λειτουργικό του επίπεδο SQ1. Έτσι γεννήθηκε η έννοια της *“ικανότητας ανάκαμψης”* (resiliense), η οποία ορίζεται ως *“η ικανότητα ενός συστήματος να επανέρχεται στο αρχικό ή περίπου στο αρχικό καθεστώς, από την άποψη των λειτουργικών και δομικών χαρακτηριστικών, στα οποία βρισκόταν πριν από τη δράση των δυνάμεων, που το απομάκρυναν από αυτό”* (Eswaran 1994).

Η κάθε λειτουργία εκτιμάται με την παραγωγικότητα, τη φέρουσα ικανότητα ή με κάποιο άλλο λειτουργικό γνώρισμα, όπως για παράδειγμα την ικανότητα του εδαφικού οικοσυστήματος να στηρίζει τη βιοποικιλότητα του εδάφους.

Τα δομικά χαρακτηριστικά σχετίζονται με την πεδολογική σύσταση του εδάφους, δηλαδή με τη σε βάθος διαστρωμάτωση των εδαφικών οριζόντων, τις αναλογίες των διάφορων εδαφικών συστατικών (οργανικό προς ανόργανο υλικό), τις φυσικοχημικές ιδιότητες κ.ά.

Η εκτίμηση της ικανότητας ανάκαμψης του εδαφικού πόρου προϋποθέτει να ορισθούν οι δυνάμεις, οι οποίες είναι ικανές να επιφέρουν μεταβολές μάζας και ενέργειας στις διεργασίες, που κυριαρχούν στο έδαφος και καθορίζουν τη γενική συμπεριφορά του εδαφικού οικοσυστήματος. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες (Szabolcs 1994) ως εξής:

1. **ατμοσφαιρικές:** η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμότητα και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα,
2. **ενδογενείς:** η εδαφογένεση, η αποικοδόμηση των οργανικών υπολειμμάτων, η έκπλυση, η διάβρωση, οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, οι κύκλοι θρεπτικών στοιχείων κ.ά.,
3. **εξωγενείς:** οι διάφορες γεωργικές δραστηριότητες (όργωμα, άρδευση, στράγγιση, χρήση χημικών ουσιών, συγκομιδή, κ.ά.), η ρύπανση από βιομηχανικές δραστηριότητες, τα ραδιενεργά προϊόντα σχάσης, κ.ά.

Επομένως, η ικανότητα ανάκαμψης του εδαφικού πόρου είναι μία ποιοτική έννοια και περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες, οι οποίες καθιστούν το εδαφικό οικοσύστημα ικανό να αντέχει στις δράσεις όλων των παραπάνω δυνάμεων που προκαλούν τις μεταβολές και πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τις ρυθμιστικές ικανότητες του εδάφους σε σχέση με διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές επιδράσεις. Για παράδειγμα, η φυσική ρυθμιστική ικανότητα παίζει σπουδαίο ρόλο στη διάβρωση, ενώ η χημική ρυθμιστική ικανότητα παίζει σπουδαίο ρόλο στην οξίνιση ή στην αλκαλίωση των εδαφών. Η βιολογική όμως ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους είναι δύσκολο να καθορισθεί επειδή αφορά όλες τις βιολογικές δραστηριότητες αλλά και την εδαφική βιοποικιλότητα (Szabolcs 1994).

Όπως προαναφέρθηκε, η ικανότητα ανάκαμψης του εδαφικού πόρου εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί ορισμένα δομικά και λειτουργικά του γνωρίσματα ενάντια σε διαταραχές. Από τον ορισμό αυτόν προκύπτει η έννοια του “χρόνου επαναφοράς (return time)”, που ορίζεται ως “ο χρόνος που απαιτείται για να επανέλθει το σύστημα στην προηγούμενη κατάσταση ισορροπίας, στην οποία βρισκόταν πριν από τη διαταραχή ή κοντά σ’ αυτήν”. Ο χρόνος επαναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρηθεί η ικανότητα ανάκαμψης του εδαφικού πόρου, εφόσον οι διαταραχές είναι μικρές. Έτσι, μεταβολές του χρόνου επαναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέτρο εκτίμησης των μεταβολών της ικανότητας ανάκαμψης του εδαφικού πόρου ενός συστήματος (Pimm 1984, De Angelis 1992, Ludwig κ.ά. 1997).

Οι έννοιες “ικανότητα ανάκαμψης του εδαφικού πόρου” και “εντροπία του εδαφικού οικοσυστήματος” σχετίζονται μεταξύ τους. Ο όρος εντροπία βρίσκει εφαρμογή και στην Εδαφολογία, χαρακτηρίζοντας την απώλεια

εσωτερικής ενέργειας του εδαφικού οικοσυστήματος, που προκαλείται από διεργασίες όπως η αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας. Οι βιολογικές διεργασίες δρουν ενάντια στην αύξηση της εντροπίας του εδαφικού οικοσυστήματος, ενώ οι διεργασίες της εδαφογένεσης, οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις βιολογικές διεργασίες στο έδαφος, μειώνουν το επίπεδο της εντροπίας του εδαφικού οικοσυστήματος. Με άλλα λόγια, η ικανότητα ανάκαμψης του εδαφικού πόρου είναι αντιστρόφως ανάλογη με το επίπεδο της εντροπίας του εδαφικού οικοσυστήματος (Szabolcs 1994).

Η έννοια της ικανότητας ανάκαμψης του εδαφικού πόρου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση (Szabolcs 1994):

$$SR = BC_{ph} + BC_{ch} + BC_b + \int_{t_1}^{t_2} \frac{dPSF}{dt} + \int_{t_1}^{t_2} \frac{dAF}{dt} \quad \text{όπου:}$$

SR = ικανότητα ανάκαμψης του εδαφικού οικοσυστήματος,

BC<sub>ph</sub> = ρυθμιστική ικανότητα του εδαφικού οικοσυστήματος στις φυσικές επιδράσεις,

BC<sub>ch</sub> = ρυθμιστική ικανότητα του εδαφικού οικοσυστήματος στις χημικές επιδράσεις,

BC<sub>b</sub> = ρυθμιστική ικανότητα του εδαφικού οικοσυστήματος στις βιολογικές επιδράσεις,

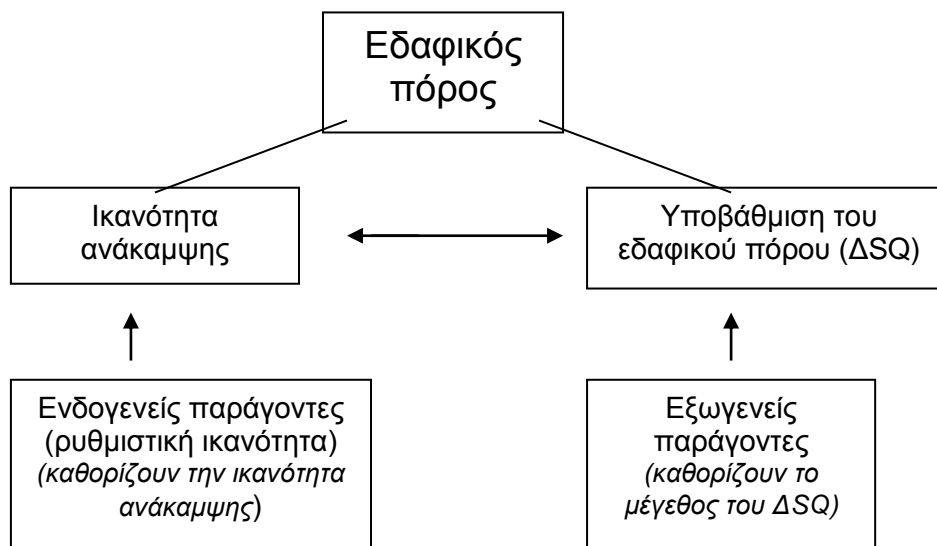
PSF = ενδογενείς επιδράσεις στο σύστημα,

AF = ανθρωπογενείς επιδράσεις στο σύστημα

Αναφέρθηκε πρωτίτερα ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα ανάκαμψης των εδαφικών πόρων διακρίνονται σε ενδογενείς και εξωγενείς. Οι ενδογενείς παράγοντες, που αναφέρονται στις ιδιότητες του εδάφους επηρεάζουν άμεσα την ικανότητα ανάκαμψης, αφού ουσιαστικά καθορίζουν τη ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους, δηλαδή την ικανότητά του να βελτιώσει την ποιότητα του κατά ΔSQ και να επανέλθει στο αρχικό επίπεδο αναφοράς SQ1. Είναι πολλές οι εδαφικές ιδιότητες που επηρεάζουν την ικανότητα ανάκαμψης των εδαφών σε σχέση με φυσικές, χημικές και βιολογικές επιδράσεις.

Οι εξωγενείς παράγοντες επηρεάζουν έμμεσα την ικανότητα ανάκαμψης, αφού αυτοί ουσιαστικά καθορίζουν το μέγεθος του ΔSQ. Οι σημαντικότεροι εξωγενείς παράγοντες, όπως αναφέρθηκε, είναι η χρήση γης

και το σύστημα διαχείρισης του εδαφικού πόρου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, οι ενδογενείς παράγοντες προσδίδουν στο έδαφος την ικανότητα (ικανότητα ανάκαμψης) να αντεπεξέλθει στην υποβάθμιση της ποιότητάς του, που προκαλείται από τους εξωγενείς παράγοντες.



**Σχήμα 2.2.** Σχέση μεταξύ ποιότητας και ανάκαμψης εδαφικού οικοσυστήματος

Έτσι, ουσιαστικά η αειφορική διαχείριση έχει σκοπό τη διατήρηση του ΔSQ σε επίπεδο που καθιστά εφικτή την ανάκαμψη του εδαφικού πόρου στο επιθυμητό επίπεδο ποιότητας.

## 2.8 Σχέση μεταξύ βιοποικιλότητας και ικανότητας ανάκαμψης του εδάφους

Το έδαφος, όπως έχει αναφερθεί εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί ενδιαίτημα ποικίλων κοινοτήτων μικροοργανισμών και ασπονδύλων, στο οποίο όλα τα έμβια όντα διαδραματίζουν κάποιο ρόλο στον καθορισμό της πρωτογενούς παραγωγικότητας των οικοσυστημάτων, όπου διαβιούν. Αυτοί οι διαφορετικοί ρόλοι των μικροοργανισμών του εδάφους (Swift 1994) μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες πέντε κατηγορίες:

1. διευκολύνουν την πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά μέσω των μυκορριζών και των αζωτοδεσμευτικών οργανισμών,
2. ρυθμίζουν τη δέσμευση και τη ροή των θρεπτικών στο σύστημα με τις διεργασίες της αποικοδόμησης, ανοργανοποίησης και ακινητοποίησης,
3. παρεμβαίνουν αποτελεσματικά στην αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας του εδάφους (κύκλος άνθρακα),
4. επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα του νερού στα φυτά διαμέσου της τροποποίησης της δομής και του υγρασιακού καθεστώτος του εδάφους,
5. επιδρούν στην υγεία των φυτών μέσω των διαφόρων παρασίτων και παθογόνων.

Η βιοποικιλότητα του εδάφους σε σχέση με την ικανότητα ανάκαμψης αναφέρεται στις διάφορες βιοτικές αλληλεπιδράσεις των μικροοργανισμών του εδάφους, οι οποίες επηρεάζουν τις εδαφικές ιδιότητες, αλλά και συντηρούν τις εδαφικές διεργασίες, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η φυτική παραγωγή, να μειώνεται ο κίνδυνος του εδάφους από τη διάβρωση και να ανθίσταται το εδαφικό οικοσύστημα στις διαταραχές του περιβάλλοντος (Elliott και Lynch 1994).

Οι διαχειριστικές πρακτικές σε σχέση με τη βιοποικιλότητα του εδάφους δεν απαιτούν τη μεγιστοποίηση του αριθμού των ειδών στο εδαφικό οικοσύστημα. Αντίθετα το ενδιαφέρον εστιάζεται στη συντήρηση των ήδη υπαρχόντων πληθυσμών μικροοργανισμών στο έδαφος, δίνοντας έμφαση στην υποστήριξη συγκεκριμένων ειδών μικροοργανισμών που συμμετέχουν στις εδαφικές διεργασίες. Άρα, ο αντικειμενικός σκοπός είναι να διαχειρισθούμε την εδαφική βιοποικιλότητα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να πετύχουμε τη μεγιστοποίηση της ικανότητας ανάκαμψης. Για τον σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η κατανόηση των διαφόρων συστατικών της ικανότητας ανάκαμψης, όπως είναι η αντοχή στη διάβρωση του εδάφους, η υποστήριξη των τροφικών πλεγμάτων στο έδαφος, κ.ά. (Elliott και Lynch 1994).

Ο αριθμός των ειδών των μικροοργανισμών του εδάφους δεν αποτελεί απαραίτητα αξιόπιστο δείκτη της ικανότητας ανάκαμψης. Συνδυατικό κρίκο μεταξύ της εδαφικής βιοποικιλότητας και της ικανότητας ανάκαμψης αποτελούν οι κυρίαρχες διεργασίες του εδαφικού οικοσυστήματος, ο αριθμός των ατόμων του κάθε είδους ο οποίος συνεισφέρει ουσιαστικά στις παραπάνω διεργασίες, η μεταξύ των ειδών αναλογία και η ευαισθησία των

διαφόρων ειδών των μικροοργανισμών σε καταστάσεις πίεσης του εδαφικού οικοσυστήματος (Carpenter και Cottingham 1997).

Η βιοποικιλότητα του εδάφους και η ικανότητα ανάκαμψης είναι ποιοτικοί όροι και για να οριστούν πλήρως θα πρέπει να συμπληρωθούν με ποσοτικές παραμέτρους. Οι ποσοτικές αυτές παράμετροι αφορούν μετρήσεις της μικροβιακής μάζας του εδάφους και των αντίστοιχων βιολογικών διεργασιών. Η βιοποικιλότητα του εδάφους σε συνδυασμό με τις εδαφικές ιδιότητες και διεργασίες, όπως αυτές επηρεάζονται από τα καλλιεργητικά συστήματα, τη διαχείριση των φυτικών υπολειμμάτων, το σύστημα αμειψισποράς, τις εισροές ρύπων στο έδαφος, τα εδαφοβελτιωτικά μέτρα και το κλίμα, καθορίζουν την ικανότητα ανάκαμψης του εδαφικού οικοσυστήματος. Οι παραπάνω παράγοντες θα πρέπει να ολοκληρωθούν ως προς τον χρόνο, ώστε να παρέχουν ομοιώματα, που να προβλέπουν, πώς ο εδαφικός πόρος μπορεί να διατηρηθεί και να βελτιωθεί (Elliott και Lynch 1994).

Για να μετατρέψουμε την έννοια της ικανότητας ανάκαμψης του εδάφους από ποιοτική σε ποσοτική και άρα μετρήσιμη, θα πρέπει να ποσοτικοποιήσουμε διάφορες παραμέτρους όπως τη βροχόπτωση, τη θερμοκρασία, τη μηχανική σύσταση του εδάφους, την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό, την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία και διάφορα ένζυμα, τη σύνθεση της μικροβιακής μάζας του εδάφους, τις αποδόσεις των καλλιεργειών, το pH, την αναπνοή, τη διάβρωση του εδάφους κ.ά. Με άλλα λόγια συμπεριλαμβάνεται κάθε δυνατή μέτρηση. Στη συνέχεια οι μετρήσεις αυτές ολοκληρώνονται ως προς τον χρόνο, και προκύπτουν συσχετίσεις με τους εδαφικούς μικροοργανισμούς και τις βιολογικές δραστηριότητες στο έδαφος. Η ολοκλήρωση αυτή στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να καθορίσει υψηλότερα επίπεδα ποιοτικών αλληλεπιδράσεων μέχρις ότου η βιοποικιλότητα στο έδαφος και η ικανότητα επανάκαμψης ορισθούν μέσα από το ομοίωμα αυτό ολοκλήρωσης. Η προσέγγιση αυτή καθορίζει τις πλεονάζουσες και μη κρίσιμες μετρήσεις, οι οποίες αποκλείονται (Elliott και Lynch 1994).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

---

### ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

---

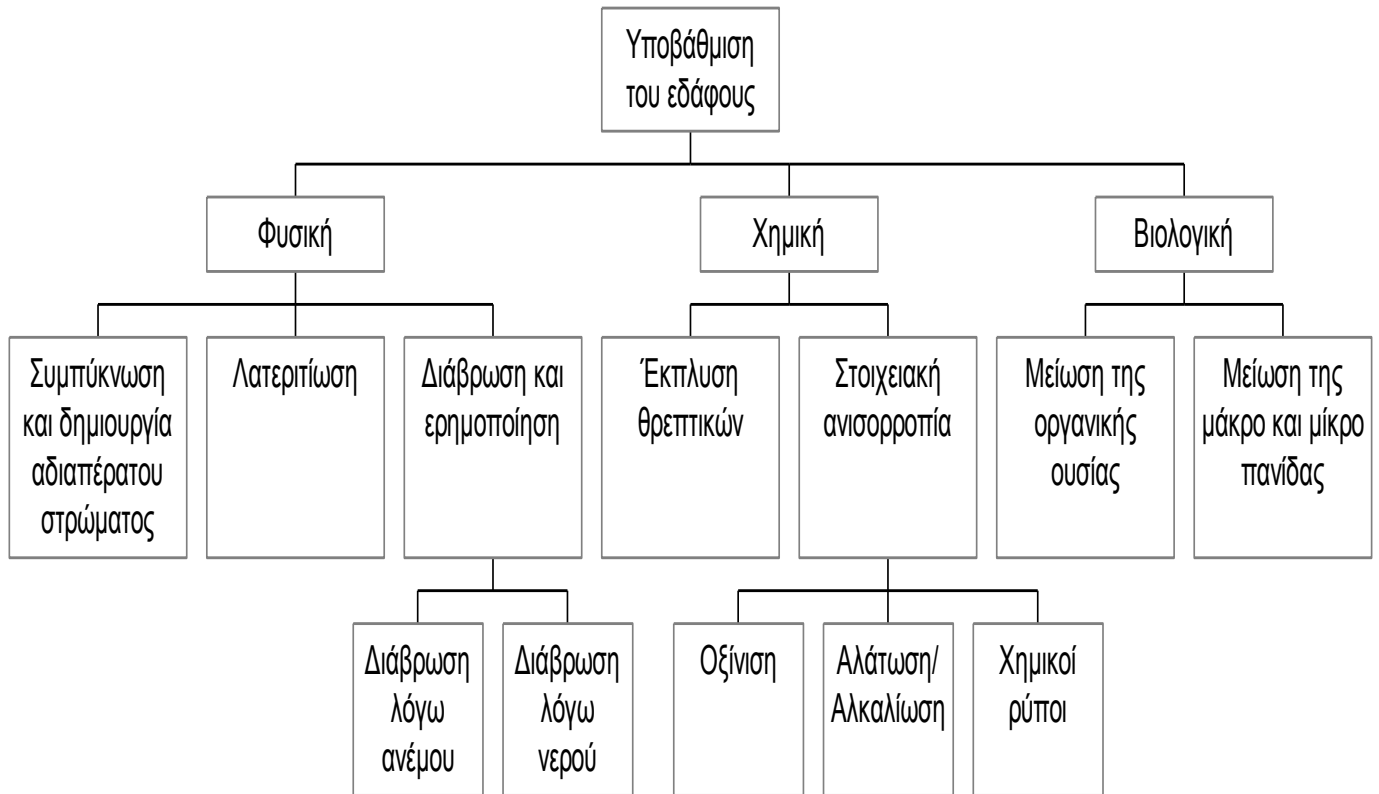
#### 3.1 Γενικά

Η έννοια της *υποβάθμισης του εδάφους* υποδηλώνει τη μειωμένη ικανότητα του εδάφους να υποστηρίζει με θρεπτικά στοιχεία τα φυτά, ως αποτέλεσμα της έκπλυσης και της διάβρωσης του, της ατελούς ανακύκλωσης των θρεπτικών στοιχείων, της μειωμένης εδαφικής βιοποικιλότητας, της μειωμένης περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανική ουσία, του κακού αερισμού, της ύπαρξης υψηλής υπεδάφιας στάθμης νερού κ.ά. (Oldeman 1994).

Η λανθασμένη διαχείριση των αγροοικοσυστημάτων στο παρελθόν έχει αναγνωρισθεί ως ο κύριος παράγοντας της σοβαρής υποβάθμισης της καλλιεργήσιμης γης (Oldeman 1994). Επίσης οι εφαρμοζόμενες γεωργικές πρακτικές, όπως η άροση, ο τρόπος συγκομιδής καθώς και η χρήση λιπασμάτων και γεωργικών φαρμάκων επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα και των υδάτων. Στις μέρες μας, η γεωργία θεωρείται ως η ευρύτερα διαδεδομένη μη-σημειακή πηγή ρύπανσης των υδάτων (National Research Council 1993), ενώ η ποιότητα της ατμόσφαιρας είναι επίσης δυνατό να επηρεασθεί από τις μεταβολές της ικανότητας του εδάφους να παράγει ή να καταναλώνει σημαντικές ποσότητες αερίων που παίζουν ρόλο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Rolston κ.ά. 1993). Σύμφωνα με τα σημερινά αποδεκτά πρότυπα διαβίωσης, η ανθρώπινη ευημερία θα κινδυνεύσει σοβαρά τον επόμενο αιώνα, δεδομένου ότι θα χρειασθεί να διπλασιασθεί η απόδοση των καλλιεργειών, λόγω της ύπαρξης ελάχιστων νέων εκτάσεων καλλιεργήσιμης γης, για να καλυφθούν οι ανάγκες ενός διπλάσιου σε μέγεθος πληθυσμού. Αν γι' αυτό τον σκοπό όμως, εφαρμοστούν οι παρούσες καλλιεργητικές πρακτικές, ο διπλασιασμός της απόδοσης θα προκαλέσει αύξηση των εισροών επικουρικής ενέργειας στα αγροοικοσυστήματα, με συνέπεια αυξημένες πιθανότητες ρύπανσης του περιβάλλοντος, υποβάθμισης και



απώλειας των μη-ανανεώσιμων φυσικών πόρων (Power 1996). Οι κυριότερες αιτίες υποβάθμισης των εδαφών φαίνονται στο Σχήμα 3.1 (Lal 1994):



**Σχήμα 3.1.** Οι κυριότερες αιτίες υποβάθμισης των εδαφικών πόρων (Lal 1994)

Οι λειτουργίες του εδάφους υποβαθμίζονται εξαιτίας της κακής του χρήσης από τον άνθρωπο. Το έδαφος υποβαθμίζεται, όταν ο άνθρωπος με τις πράξεις του υποθηκεύει την παρούσα ή/και τη μελλοντική ικανότητά του να υποστηρίζει την ανθρώπινη ζωή (Van Lynden 1994). Γενικά, το έδαφος παρουσιάζει μια ικανότητα ανάκαμψης, όμως αυτό ισχύει εντός κάποιων ορίων, πέρα από τα οποία το έδαφος δεν θα ανακάμψει χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, ακόμα και αν ο παράγοντας της υποβάθμισης πάψει να υφίσταται. Οι πιο σοβαρές διεργασίες υποβάθμισης είναι: η διάβρωση, η οξίνιση, η αλάτωση/αλκαλίωση, η συμπίεση του εδάφους, η απώλεια οργανικής ουσίας και η κατακράτηση νερού. Οι διεργασίες υποβάθμισης δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλά αλληλεπιδρούν συχνά, με αποτέλεσμα

ένας τύπος υποβάθμισης να οδηγεί σε άλλον. Το τελευταίο γίνεται αντιληπτό από την επίδραση του συνδυασμού διάβρωσης και ρύπανσης στη μεταφορά και απόθεση ρύπων από τις ανάντη στις κατόντη περιοχές.

### 3.2 Διάβρωση

Διάβρωση είναι η απομάκρυνση εδαφικού υλικού με το νερό ή σε μικρότερο βαθμό με τον άνεμο. Πρόκειται για έναν από τους πιο διαδεδομένους τύπους υποβάθμισης ανά τον κόσμο, ο ρυθμός του οποίου έχει επιταχυνθεί με τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Σε αντίθεση όμως με τις άλλες μορφές υποβάθμισης, η διάβρωση μετακινεί έδαφος από περιοχή σε περιοχή. Η διάβρωση προκαλείται από οποιαδήποτε ανθρώπινη δραστηριότητα εκθέτει το έδαφος στην επίδραση της βροχής ή του ανέμου ή αυξάνει την ποσότητα και την ταχύτητα της επιφανειακής απορροής. Μερικές γεωργικές εργασίες, όπως η άροση κάθετα στις ισούψεις καμπύλες σε επικλινείς περιοχές, η αφαίρεση της εδαφοκάλυψης ή και της βλάστησης στα περιθώρια των χωραφιών, η αύξηση της έκτασης των αγροτεμαχίων, η εγκατάλειψη της καλλιέργειας σε πεζούλες, η όψιμη σπορά των χειμερινών σιτηρών, οι άκαιρες γεωργικές επεμβάσεις και η συμπίεση από βαριά μηχανήματα αποτελούν αιτίες της διάβρωσης. Διάβρωση προκαλείται, επίσης, από ακατάλληλες πρακτικές διαχείρισης δασικών εκτάσεων. Στις Μεσογειακές περιοχές η αποψίλωση και η υπερβόσκηση του παρελθόντος, προκάλεσαν διάβρωση σε καλά στραγγιζόμενα πηλώδη εδάφη και υποβάθμισαν τα Μεσογειακού τύπου οικοσυστήματα (π.χ. φρύγανα κ.λπ.). Οι συχνές πυρκαγιές και οι μακρές περίοδοι ξηρασίας συντελούν στην απομάκρυνση της βλάστησης και συντελούν στη διάβρωση των εδαφών. Επίσης, άλλες πιθανές αιτίες διάβρωσης είναι ο τουρισμός, ο αθλητισμός και οι διάφορες ψυχαγωγικές δραστηριότητες της υπαίθρου (πεζοπορία, σκι, ποδηλασία, οχήματα εκτός δρόμου, κ.λπ), ιδιαίτερα σε ευαίσθητες περιοχές, που χρειάζονται προστασία, όπως ορεινές περιοχές, δάση και πάρκα.

Η διάβρωση εμφανίζεται κυρίως σε περιοχές, όπου η γη χρησιμοποιείται υπερεντατικά και οι απώλειές της είναι μη αναστρέψιμες για χρονικές περιόδους 10 ή ακόμη και 100 ετών. Στην Ευρώπη η διάβρωση του

εδάφους ακολουθεί αυξητικές τάσεις (Blum 1990), αλλά δεν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία για κάθε περιοχή ανά έτος. Ωστόσο έχουν αναπτυχθεί ομοιώματα για την πρόβλεψη περιοχών που κινδυνεύουν. Υπολογίζεται ότι 115 εκατομμύρια εκτάρια ή το 12% του συνόλου της ευρωπαϊκής χερσαίας έκτασης υπόκεινται σε διάβρωση από το νερό. Από τον άνεμο διαβρώνονται 42 εκατομμύρια εκτάρια εκ των οποίων το 2% σε εκτεταμένο βαθμό. Η διάβρωση παρουσιάζεται σε όλα σχεδόν τα επικλινή εδάφη της Ευρώπης, αλλά κυρίως στη Μεσόγειο, σε μέρη της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης και την Ισλανδία, όπου ευνοείται από το συνδυασμό των κλιματικών συνθηκών, των γνωρισμάτων του εδάφους και των πρακτικών βόσκησης.

Η διάβρωση από το νερό επηρεάζει συνήθως την παραγωγή με τη μείωση του βάθους του ριζικού συστήματος, την απώλεια θρεπτικών στοιχείων και οργανικής ουσίας, μερικές φορές με την εκρίζωση φυτών ή και δένδρων από τη χαράδρωση του εδάφους. Είναι δυνατό να προκαλέσει μεγάλες απώλειες του ανώτερου, γόνιμου στρώματος εδάφους με ρυθμό αρκετών χιλιοστών ανά έτος. Έτσι, τίθεται σε κίνδυνο η μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα του εδάφους, αφού ο ρυθμός ετήσιας απώλειας χούμου από τη διάβρωση ξεπερνά τον ρυθμό σχηματισμού του (Karavayeva κ.ά. 1991). Ακόμη, η διάβρωση μειώνει την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό. Οι απώλειες στην απόδοση μιας καλλιέργειας μπορεί να φτάσουν το 30% της κανονικής, αν και δεν είναι πάντα άμεσα ορατές (Follet και Stewart 1985). Το κόστος των λιπασμάτων και της οργανικής ύλης, που απαιτούνται για την αναπλήρωση των θρεπτικών στοιχείων, που χάθηκαν με τη διάβρωση υπολογίζεται δύσκολα, αλλά αποτελεί ενδεικτικό στοιχείο της ζημίας, που προκαλείται. Τα εδάφη, που διαβρώνονται δεν είναι τα μόνα που υποβαθίζονται, καθώς επιπτώσεις υπάρχουν και στα εδάφη, που δέχονται τα υλικά διαβρώσεως. Επίσης, η απώλεια της φυτοκάλυψης καταλήγει σε διάβρωση, η οποία σε συνδυασμό με έντονες βροχοπτώσεις μπορεί να προκαλέσει καταστροφές, ακόμη και θανάτους.

Μια άλλη επίδραση της διάβρωσης είναι η διατάραξη φυσικών οικοσυστημάτων από την απόθεση εδάφους, που αφαιρέθηκε από τις ανάντη καλλιεργούμενες εκτάσεις και πιθανότατα περιέχει ρύπους (γεωργικά φάρμακα, λιπάσματα, βαρέα μέταλλα). Στη Νότια Ευρώπη η διάβρωση αποτελεί τον κύριο τρόπο μεταφοράς εδαφικών ρύπων ενώ στη Βόρεια

Ευρώπη υπερισχύει η έκπλυση. Πέρα από την απόθεση εδαφικού υλικού σε χερσαία οικοσυστήματα, η απόθεση του σε υδάτινους αποδέκτες προκαλεί, επίσης, επιπτώσεις τόσο στην υδρόβια ζωή, όσο και στον άνθρωπο.

Όλα τα επικλινή εδάφη είναι ευαίσθητα στη διάβρωση, αλλά τα ελαφράς κοκκομετρικής σύστασης κινδυνεύουν περισσότερο. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της διάβρωσης είναι η οργανική ουσία, ο ρυθμός διήθησης, η δομή και η τραχύτητα της επιφάνειας, η τοπογραφία, το κλίμα, η βλάστηση και η διαχείριση των εδαφών.

### 3.3 Οξίνιση

Η οξίνιση είναι μία φυσική διεργασία, αλλά τελευταία έχει ενισχυθεί από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η χρήση ορισμένων τύπων λιπασμάτων, η στράγγιση των εδαφών και η έκλυση ενώσεων S και N από την καύση ορυκτών καυσίμων και τις βιομηχανικές δραστηριότητες, οι οποίες ενώσεις διασπείρονται σε μεγάλες αποστάσεις. Στην Κεντρική και Δυτική Ευρώπη οι όξινες αποθέσεις αποτελούν το πρωταρχικό αίτιο οξίνισης των εδαφών (de Vries και Breeusma 1986). Οι Σκανδιναβικές χώρες περιλαμβάνονται στις πιο έντονα πληγείσες περιοχές της Ευρώπης, ενώ οι Βορειοδυτικές και Κεντρικές χώρες αποτελούν τις κυριότερες πηγές όξινων εκλύσεων. Αυτό το γνωστό οξύμωρο φαινόμενο προκύπτει από τη συνήθη πορεία των χαμηλών βαρομετρικών συστημάτων πάνω από την Ευρώπη, η οποία συνοδεύεται από επικράτηση νοτιοδυτικών ανέμων στο βόρειο τμήμα της ηπείρου. Η οξίνιση του εδάφους είναι σοβαρός παράγοντας ελευθέρωσης κατιόντων στο εδαφικό διάλυμα, όπως ο σίδηρος, το αργίλιο, το μαγγάνιο και τα βαρέα μέταλλα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ρυθμιστικής ικανότητας του εδάφους, άρα και της ικανότητας ανάκαμψης. Τα εδάφη ποικίλλουν σε σχέση με την ικανότητά τους να εξουδετερώνουν την οξύτητα. Τα ελαφράς κοκκομετρικής σύστασης εδάφη έχουν μικρή ρυθμιστική ικανότητα, με συνέπεια μία μικρή μεταβολή του pH αρκεί να μετατρέψει το έδαφος από αποδέκτη ρύπων σε πηγή έκλυσης αυτών. Έξι μηχανισμοί συνεισφέρουν στην οξίνιση:

1. φυσικές διεργασίες, όπως η διάσπαση ανθρακικού και άλλων οργανικών οξέων, παράλληλα με την έκπλυση βάσεων από τις βροχές,
2. οι χρήσεις γης μέσω της αφαίρεσης βασικών κατιόντων με τη συγκομιδή καλλιεργειών,
3. η αλόγιστη χρήση λιπασμάτων,
4. η αναδάσωση με κωνοφόρα, και γενικά με είδη ξένα προς τη φυσική φυτοκοινωνία της περιοχής,
5. η στράγγιση υγροτοπικών εδαφών,
6. οι ατμοσφαιρικές αποθέσεις διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ), οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ), που προέρχονται κυρίως από την παραγωγή ενέργειας, τη βιομηχανία, τις μεταφορές και την κτηνοτροφία.

Η πιο σπουδαία επίπτωση της οξίνισης στο περιβάλλον είναι η έκπλυση ενώσεων, που προκαλούν οξίνιση στο επιφανειακό και το υπόγειο νερό. Η οξίνιση του εδάφους αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση της οξίνισης του νερού, ενώ η απευθείας οξίνιση από την ατμόσφαιρα απλώς συνεισφέρει στη διεργασία. Το νερό που στραγγίζει από οξινισμένα εδάφη περιέχει αυξημένα επίπεδα αργιλίου (Van Breemen και Verstraten 1991), γεγονός που μπορεί να έχει σπουδαίες επιπτώσεις στην ποιότητα των επιφανειακών (κυρίως στην υδρόβια ζωή) και των υπόγειων υδάτων (και πιθανόν στα αποθέματα πόσιμου νερού).

Τα εδάφη με μικρή ρυθμιστική ικανότητα, όπως τα όξινα και τα ελαφράς κοκκομετρικής σύστασης, είναι τα πιο επιρρεπή στην υποβάθμιση και συνεπώς παρουσιάζουν μικρή ικανότητα ανάκαμψης. Επίσης η οξίνιση μειώνει σοβαρά τη γονιμότητα, κυρίως επηρεάζοντας τους μικροοργανισμούς του εδάφους, με τη διάσπαση της οργανικής ουσίας, την απώλεια θρεπτικών και τη μετατροπή διαθέσιμων μορφών θρεπτικών στοιχείων σε μη διαθέσιμες. Ακόμη, σε χαμηλά pH εμφανίζεται ο κίνδυνος της απελευθέρωσης βαρέων μετάλλων. Σε μη γεωργική γη, όπου δεν εφαρμόζονται μέτρα αντιμετώπισης της οξίνισης, παρατηρείται αποχρωματισμός των φύλλων και φυλλόπτωση, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση δασικών εκτάσεων (Roberts κ.ά. 1989). Επιπλέον, η οξίνιση μπορεί να προκαλέσει μείωση της βιοποικιλότητας των φυτικών ειδών, με συνέπεια αλλαγές στους οργανισμούς του εδάφους, όπου ευνοούνται τα πιο ανθεκτικά στην οξίνιση είδη. Ωστόσο, μερικά είδη όξινων εδαφών αξίζει να προστατευθούν για λόγους βιοποικιλότητας.

### **3.4 Αλάτωση- Αλκαλίωση**

Η υποβάθμιση αυτή προκύπτει με ποικίλους τρόπους, όπως με άρδευση με ακατάλληλης ποιότητας νερό, με είσοδο αλατούχου νερού από τη θάλασσα και με την έντονη εξατμισοδιαπνοή αλατούχου εδαφικής υγρασίας. Η αλάτωση έχει άμεσες επιδράσεις στη βιολογία του εδάφους και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Επίσης, προκαλεί έμμεσες επιπτώσεις, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν την καταστροφή της δομής του εδάφους (αλκαλίωση). Στην Ευρώπη εκτιμάται ότι έχουν υποστεί την υποβάθμιση αυτή 3,8 εκατομμύρια εκτάρια.

Η αλάτωση εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανά θέση εδαφικές ιδιότητες και τις κλιματικές συνθήκες και γι' αυτό απαντάται αποκλειστικά στη Νοτιοανατολική Ευρώπη σε περιοχές με ημιξηρικές συνθήκες. Η άρδευση της Ουγγρικής πεδιάδας, για παράδειγμα, προκάλεσε την αλάτωση και την αλκαλίωση τουλάχιστον του 20% της περιοχής. Η αλάτωση είναι αντιστρεπτή, αλλά η επαναφορά αλατούχων/αλκαλιωμένων εδαφών είναι ακριβή, καθώς απαιτεί πολύπλοκες τεχνικές βελτίωσης.

### **3.5 Συμπύεση του εδάφους**

Η συμπύεση του εδάφους προκαλείται από την επαναλαμβανόμενη και αθροιστική επίδραση βαρέων μηχανημάτων ή σε μικρότερη έκταση από τη διέλευση υπερβολικού αριθμού αγροτικών ζώων σε εδάφη με υψηλή εδαφική υγρασία. Ωστόσο, το φαινόμενο δεν περιορίζεται στη γεωργική γη, αλλά επεκτείνεται στα εδάφη των οικισμών και των περιοχών έντονης υπαίθριας ψυχαγωγίας. Η συμπύεση εμφανίζεται σε επιφανειακά ή σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα. Στα ανώτερα στρώματα είναι συνήθως αποτέλεσμα της προετοιμασίας της σποροκλίνης και της εφαρμογής λιπασμάτων και γεωργικών φαρμάκων. Η συμπύεση του υπεδάφους προέρχεται από τη διέλευση βαρέων μηχανημάτων από τα ίδια σημεία κατά την άροση με αποτέλεσμα τη δημιουργία αδιαπέρατου στρώματος. Η συμπύεση του εδάφους είναι μεγάλη δυνητική απειλή για τη γεωργική παραγωγικότητα.

Η συμπίεση μεταβάλλει το είδος και την ένταση των βιοχημικών και μικροβιολογικών λειτουργιών του εδάφους. Η κύρια φυσική επίδραση είναι η μείωση του εδαφικού πορώδους, με συνέπεια τον περιορισμό τόσο του διαθέσιμου εδαφικού νερού, όσο και του διαθέσιμου εδαφικού αέρα. Ταυτόχρονα, οι ρίζες δυσκολεύονται περισσότερο να διεισδύσουν στο έδαφος και έχουν μικρότερη δυνατότητα απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων. Η βιολογική δραστηριότητα μειώνεται δραστικά. Ακόμη, αυξάνεται η επιφανειακή απορροή, ως αποτέλεσμα της μικρότερης διήθησης του νερού της βροχής. Συνεπώς, αυξάνεται η διάβρωση και η απώλεια θρεπτικών στοιχείων και επιφανειακού εδάφους.

Σύμφωνα με πρόσφατους υπολογισμούς (Boels και Van der Akker 1999) η συμπίεση των επιφανειακών εδαφικών στρωμάτων μπορεί να προκαλέσει μείωση της παραγωγής μέχρι 13% (μέσος όρος 5%), ενώ η συμπίεση των βαθύτερων 5-35%. Στη Ρωσία έχει καταγραφεί μείωση της παραγωγής σε συμπίεμένο έδαφος πάνω από 50% (National Report of Russia 1992).

### **3.6 Απώλειες Οργανικής Ουσίας**

Η οργανική ουσία είναι σπουδαία για τη διατήρηση της εδαφικής δομής, τη συγκράτηση του νερού, την αποθήκευση θρεπτικών στοιχείων και τη χημική ρυθμιστική ικανότητα. Ορισμένες γεωργικές πρακτικές επηρεάζουν δυσμενώς την ποσότητα της οργανικής ουσίας στο έδαφος. Οι εντατικές αροτραίες καλλιέργειες, ιδιαίτερα στη Δυτική Ευρώπη, έχουν οδηγήσει σε ορισμένες περιπτώσεις στη μείωση της οργανικής ουσίας και της βιολογικής δραστηριότητας και ποικιλότητας. Η βαθιά άροση των λιβαδιών, η εγκατάλειψη της αμειψισποράς και η καύση των φυτικών υπολειμμάτων μειώνουν την ποσότητα της βλάστησης, που επιστρέφει στο έδαφος. Δυστυχώς δεν είναι εφικτός ο καθορισμός του άριστου επιπέδου οργανικής ουσίας ενός υγιούς εδάφους. Ωστόσο, υπάρχει ένα καθορισμένο επίπεδο, κάτω από το οποίο το έδαφος είναι λιγότερο ικανό να συγκρατήσει υγρασία, να αποθηκεύσει θρεπτικά στοιχεία και να δεσμεύσει ρύπους. Όταν μειώνεται η

βιολογική δραστηριότητα, το έδαφος γίνεται λιγότερο σταθερό και περισσότερο επιρρεπές στη διάβρωση, την έκπλυση και την επιφανειακή απορροή. Η απώλεια οργανικής ουσίας είναι ιδιαίτερα εμφανής σε περιοχές, όπου τυρφώδη εδάφη στραγγίστηκαν και καλλιεργήθηκαν εντατικά. Υπολογίζεται ότι 3,2 εκατομμύρια εκτάρια στην Ευρώπη έχουν χάσει οργανική ουσία.

Διάφορα μέτρα μπορούν να ληφθούν για την αύξηση της οργανικής ουσίας στο έδαφος. Αυτά περιλαμβάνουν την εισαγωγή φυτών χλωρής λίπανσης και την εισαγωγή της αγρανάπαυσης στο σύστημα αμειψισποράς, την απαγόρευση της καύσης των φυτικών υπολειμμάτων και την ενσωμάτωσή τους στο έδαφος. Επίσης, χρειάζεται παρακολούθηση του επιπέδου της οργανικής ουσίας στο έδαφος και του μεγέθους των απωλειών.

### **3.7 Κατακράτηση νερού**

Ο κορεσμός του εδάφους με νερό, ο οποίος οφείλεται σε τυχαία ή σκόπιμη πλημμύρα, σε αυξημένη επιφανειακή απορροή από υψηλότερες περιοχές (ως αποτέλεσμα μικρότερων ρυθμών διήθησης), ή άνοδο της στάθμης του επιφανειακού υδροφόρου στρώματος (ως αποτέλεσμα π.χ. της άρδευσης) μπορεί επίσης να επιδράσει αρνητικά στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Ο κορεσμός με νερό, οδηγώντας τον αέρα εκτός εδάφους, μειώνει το δυναμικό οξειδοαναγωγής και δημιουργεί αναγωγικές συνθήκες. Αυτό επιδρά σε πολλές βιοχημικές διεργασίες του εδάφους και μπορεί ακόμη και να προκαλέσει την ελευθέρωση επικίνδυνων, αποθηκευμένων στο έδαφος ενώσεων. Επιπλέον, ο κορεσμός αυξάνει τον κίνδυνο συμπίεσης και, σε ξηρότερες περιοχές, τον κίνδυνο αλάτωσης μέσω της τριχοειδούς ανόδου του αλατούχου, εδαφικού νερού.



### 3.8 Ερημοποίηση

Οι μορφές υποβάθμισης της ποιότητας των εδαφών που αναφέρθηκαν είναι δυνατό να οδηγήσουν μια περιοχή σε ερημοποίηση, δηλαδή σε ακραία μορφή υποβάθμισης του εδάφους που πολλές φορές είναι μη αναστρέψιμη. Ερημοποίηση λοιπόν είναι η διεργασία μετατροπής ενός παραγωγικού εδάφους σε μη παραγωγικό λόγω υποβάθμισης των λειτουργιών του και είναι αποτέλεσμα της λανθασμένης διαχείρισής του. Η διαδικασία αυτή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και προχωράει με ποικίλους ρυθμούς σε διάφορα κλίματα.

Ο όρος “desertification” (ερημοποίηση ή απερήμωση) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1949 από τον Γάλλο οικολόγο Aubreville, στην προσπάθειά του να περιγράψει τη διεργασία της απογύμνωσης και της υποβάθμισης των εδαφών στην περιοχή Sahel της Αφρικής, λόγω των μεταβολών που παρατηρούνταν στην κατάσταση της βλάστησης (πυκνότητα, σύνθεση, ποσοστό κάλυψης του εδάφους).

Από τότε έως σήμερα έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί του φαινομένου. Κοινό σημείο όλων αποτελεί η εστίασή τους στη διάβρωση και στην απώλεια της παραγωγικότητας του εδάφους, ως αποτέλεσμα κυρίως της έντονης ανάπτυξης των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, σε συνδυασμό με τις υφιστάμενες κλιματικές συνθήκες.

Η ερημοποίηση αναγνωρίστηκε ως παγκόσμιο πρόβλημα από το 1970, ωστόσο, ήρθε στο προσκήνιο της παγκόσμιας προσοχής λόγω των καταστροφικών επιδράσεων των επαναλαμβανόμενων ξηρασιών. Πρόσφατες επιστημονικές μελέτες δείχνουν ότι η υποβάθμιση και η διάβρωση των εδαφών έχουν την τάση να επεκτείνονται, απειλώντας όλο και περισσότερες περιοχές με ερημοποίηση. Μεταξύ αυτών, και η περιοχή της Μεσογείου, η οποία αποτελεί, μία από τις πλέον ευαίσθητες περιοχές του πλανήτη. Εδώ το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα οξύ καθώς η εποχιακή ανομβρία, οι ακανόνιστες αλλά έντονες βροχοπτώσεις και γενικώς τα συχνά ακραία κλιματικά φαινόμενα, τα οποία χαρακτηρίζουν το ξηροθερμικό κλίμα της Μεσογείου, αποτελούν, από μόνα τους ή σε συνδυασμό με τις ανθρωπίνες δραστηριότητες, τα κύρια αίτια της διάβρωσης, της αλάτωσης και της

απώλειας της παραγωγικότητας των εδαφών καθώς επίσης συμβάλλουν και στην καταστροφή της δομής του εδάφους και της βλάστησης. Το μέγεθος των προβλημάτων στις περιοχές αυτές αυξάνει δραστικά, αφού δυστυχώς, το φαινόμενο συνοδεύεται, πέραν από την περιβαλλοντική υποβάθμιση, και από πληθώρα δημογραφικών και κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων.

Στη χώρα μας εκτάσεις, κυρίως στη Ν. Ελλάδα και στα νησιά του Αιγαίου, έχουν πληγεί από το φαινόμενο αυτό. Ο λόγος είναι οι ιδιαίτερες κλιματικές, τοπογραφικές, γεωλογικές, εδαφολογικές και υδρολογικές συνθήκες οι οποίες καθιστούν τον Ελλαδικό χώρο ιδιαίτερα ευαίσθητο στο φαινόμενο της ερημοποίησης. Οι συνθήκες αυτές σε συνδυασμό με τις ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες συμβαίνουν στην περιοχή για περισσότερο από 2000 χρόνια, είχαν ως αποτέλεσμα την ερημοποίηση.

Το φαινόμενο της ερημοποίησης σχετίζεται άμεσα με ορισμένες φυσικοχημικές, βιολογικές και κοινωνικο-οικονομικές διεργασίες οι οποίες συνήθως συμβαίνουν ταυτόχρονα και αλληλοεπηρεάζονται. Κατά συνέπεια, οι διεργασίες αυτές είναι δυνατό να αποτελέσουν και δείκτη του βαθμού ή της τάσης που υπάρχει, όσον αφορά την έναρξη ή και την εξάπλωση του φαινομένου σε μία περιοχή.

Οι σπουδαιότερες από τις φυσικοχημικές διεργασίες, είναι εκείνες οι οποίες σχετίζονται με την υποβάθμιση της δομής του εδάφους, τη μείωση της διηθητικότητας και την αλάτωσή του. Οι διεργασίες αυτές συνήθως εμφανίζονται σε συνδυασμό με αυξημένους ρυθμούς διάβρωσης και με μεταβολή της ποιότητας των υπογείων και επιφανειακών υδάτων. Ακόμη οι υδρολογικές διεργασίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στην επέκταση της αλάτωσης των εδαφών, όσο και στη διάβρωσή τους. Για παράδειγμα, σε περιοχές όπου το ποσοστό φυτοκάλυψης μειώνεται και το έδαφος μένει εκτεθειμένο, οι έντονες βροχοπτώσεις προκαλούν μεγάλες απορροές και μεταφορά φερτών υλικών. Ως αποτέλεσμα, το βιολογικό δυναμικό του εδάφους μειώνεται δραστικά, οδηγώντας την περιοχή σε μη αντιστρεπτή κατάσταση.

Οι βιολογικές διεργασίες οι οποίες σχετίζονται με την ερημοποίηση είναι αυτές που επιδρούν άμεσα στη δυναμική των πληθυσμών των φυτών και των ζώων μιας περιοχής. Ο βαθμός υποβάθμισης του εδάφους έχει άμεση σχέση με το ποσοστό φυτοκάλυψής του. Η μείωση της φυτοκάλυψης αφήνει

το έδαφος εκτεθειμένο στις υψηλές θερμοκρασίες και στις ραγδαίες βροχοπτώσεις, γεγονός που οδηγεί σε μεταβολή της χωροδιάταξης των φυτών, απώλεια της δομής των φυτοκοινωνιών και μείωση της βιοποικιλότητας. Όσον αφορά τη σχέση των ζώων με την ερημοποίηση, αυτή είναι έμμεση και έχει να κάνει κυρίως με την επίδραση που ασκεί η βόσκηση στη βλάστηση. Σε μερικές περιπτώσεις η ελεγχόμενη βόσκηση επιδρά θετικά στη βλάστηση. Αυτό συμβαίνει σε φυτοκοινωνίες οι οποίες έχοντας συνεξελιχθεί με την βόσκηση, έχουν προσαρμόσει την αναπαραγωγική τους δραστηριότητα στην ασκούμενη πίεση. Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη βόσκηση (υπερβόσκηση) επιδρά αρνητικά στη δομή της βλάστησης και στη φυτοκάλυψη μίας περιοχής, με άμεσο αντίκτυπο στη φυσική κατάσταση του εδάφους. Η επίδραση αυτή γίνεται ακόμη εντονότερη όταν συνδυάζεται και με τις πυρκαγιές, οι οποίες είναι συχνές και επαναλαμβανόμενες σε αυτές τις περιοχές.

Οι κοινωνικο-οικονομικές διεργασίες οι οποίες συνδέονται με την εμφάνιση και την επέκταση της ερημοποίησης στη λεκάνη της Μεσογείου, αφορούν κυρίως τη μεταβολή και εντατικοποίηση των χρήσεων γης κατά τις τρεις τελευταίες δεκαετίες. Μεταξύ αυτών, εξέχουσα θέση λαμβάνουν η εντατικής μορφής άσκηση της γεωργίας και κτηνοτροφίας, οι εκχερσώσεις δασικών εκτάσεων και η τουριστική ανάπτυξη. Οι σύγχρονες μέθοδοι καλλιέργειας έχουν αναμφισβήτητα αυξήσει το εισόδημα των αγροτών, παράλληλα όμως έχουν επιπτώσεις στην ποιότητα των εδαφών. Όσον αφορά τον τουρισμό, σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή ξενοδοχειακών και λοιπών τουριστικών εγκαταστάσεων έχει οδηγήσει στην εγκατάλειψη της γεωργικής γης, δεδομένου ότι οι νέες θέσεις εργασίας που δημιουργούνται τυχάνουν μεγαλύτερης εκτίμησης από τους νέους. Η εγκατάλειψη της γεωργικής γης, κυρίως στις ημιορεινές και ορεινές περιοχές, αυξάνει τον κίνδυνο της διάβρωσης των εδαφών.

Στην Ελλάδα οι περιοχές οι οποίες έχουν ερημοποιηθεί ή βρίσκονται κάτω από άμεσο κίνδυνο ερημοποίησης διακρίνονται σε δύο κυρίως κατηγορίες με βάση το βιοκλίμα τους.

#### A. Περιοχές με ξηροθερμομεσογειακό και θερμομεσογειακό βιοκλίμα (σύστημα UNESCO-FAO)

Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από ακραίες κλιματολογικές συνθήκες και συχνή εμφάνιση ξηρασιών. Οι συνθήκες αυτές σε συνδυασμό με τη μη ορθολογική άσκηση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, οδηγούν στην καταστροφή της φυσικής βλάστησης, την εν συνεχεία διάβρωση και υποβάθμιση του εδάφους με τελικό στάδιο την ερημοποίηση.

Η ξηροθερμομεσογειακή περιοχή καταλαμβάνει περίπου το 1% της συνολικής εκτάσεως της χώρας (περίπου 120.000 ha) και εμφανίζεται στα ανατολικά παράλια της Κρήτης και στα νησιά Νάξο, Θήρα, Αμοργό, Ίο και Αστυπάλαια.

Η θερμομεσογειακή περιοχή καταλαμβάνει το 20% της συνολικής εκτάσεως της χώρας (περίπου 2.400.000 ha). Σ' αυτήν ανήκουν τα βόρεια και νότια παράλια της Κεντρικής και Ανατολικής Κρήτης, τα Δωδεκάνησα, οι Κυκλάδες, τα Κύθηρα, τα παράλια της Πελοποννήσου, η Ζάκυνθος, τα νότια παράλια της Κεφαλονιάς, τα νότια παράλια της Στερεάς Ελλάδας, τα παράλια και το εσωτερικό της Αττικής, της Εύβοιας, της Λέσβου, της Σάμου, της Χίου, της Λήμνου καθώς και μια στενή παραλιακή ζώνη του Έβρου (Δυτική Θράκη).

Στις παραπάνω περιοχές η έντονη υποβάθμιση λόγω ανθρωπογενών επιδράσεων, έχει ως συνέπεια την έντονη χαρακτηριστική υποβάθμιση των φυσικών διαπλάσεων που χαρακτηρίζουν τις περιοχές αυτές και την αντικατάστασή τους από τις διαπλάσεις των "φρύγανων" με χαρακτηριστικά είδη τα: *Phlomis fruticosa*, *Corydorthymus capitatus*, *Genista acanthoclada*, *Euphorbia acanthothamnus*, *Sarcopoterium spinosum*.

#### B. Περιοχές με μεσομεσογειακό βιοκλίμα

Χαρακτηριστική, στις περιοχές αυτές με την έντονη υποβάθμιση, είναι η αύξηση της ανομβρίας που εκφράζεται με την εμφάνιση ξηροθερμομεσογειακών και θερμομεσογειακών διαπλάσεων καθώς και υποβαθμισμένες διαπλάσεις των περιοχών αυτών όπως είναι των φρύγανων.

Οι περιοχές αυτές αποτελούν το 33% της συνολικής επιφάνειας της χώρας, δηλαδή 3.900.000 ha. Απαντούν στη χαμηλή εσωτερική ζώνη της Δυτικής και Κεντρικής Κρήτης, στην ορεινή ζώνη των νήσων Ρόδου, Σάμου, Λέσβου, στο εσωτερικό των παραλίων της Νότιας και Δυτικής Πελοποννήσου, στη χαμηλή ζώνη της Βόρειας και Κεντρικής Πελοποννήσου, στην παραλιακή και πεδινή ζώνη της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και Ηπείρου, στη λοφώδη ζώνη της Ζακύνθου, Κεφαλονιάς και Λευκάδας, στα βόρεια παράλια και στη χαμηλή ζώνη της Κεντρικής και Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, στα ανατολικά παράλια και εσωτερική ζώνη της Κεντρικής και Βορείου Ευβοίας, στη Θεσσαλική πεδιάδα και πεδιάδα Θεσσαλονίκης και Βέροιας, στα παράλια και χαμηλή ορεινή ζώνη της Χαλκιδικής, στα παράλια και πεδιάδες της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης.

Η ερημοποίηση μειώνει την ικανότητα του εδάφους να υποστηρίξει τη ζωή επηρεάζοντας τα άγρια και μη φυτικά και έμμεσα τα ζωικά είδη, και συνεπώς και τον άνθρωπο καθορίζοντας σε τελική ανάλυση την ύπαρξή του. Οι επιπτώσεις της ερημοποίησης διακρίνονται σε περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι οι εξής:

1. απογύμνωση αγρών και δημιουργία αποθέσεων άμμου,
2. δημιουργία αλατούχων εδαφών,
3. μείωση της περιεκτικότητας των εδαφών σε οργανική ουσία και θρεπτικά στοιχεία,
4. εναπόθεση φερτών υλικών σε υδατοσυλλογές, λόγω της διάβρωσης που προκαλείται από νερό και αέρα σε παρόχθιες περιοχές,
5. μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στη σύνθεση πολυετούς βλάστησης και τη στράγγιση,
6. εξαφάνιση ζωικών και φυτικών ειδών.

Οι οικονομικές επιπτώσεις είναι οι εξής:

1. μειωμένες πρόσοδοι από την κτηνοτροφία, γεωργία και δασοπονία,
2. μειωμένη διαθεσιμότητα καυσόξυλων και φυτών για ενεργειακούς, διατροφικούς και φαρμακευτικούς σκοπούς,
3. αυξανόμενη εξάρτηση από τις εισαγωγές και τη βοήθεια από ξένες χώρες.

Οι κοινωνικές επιπτώσεις είναι οι εξής:

1. μετακίνηση του πληθυσμού εξαιτίας έλλειψης τροφής. Ο Liebig, έγραψε ότι οι λαοί που αφήνουν τα έδαφός τους να οδηγείται στους ποταμούς και τη θάλασσα, σε λίγο θα το ακολουθήσουν μεταναστεύοντας,
2. κοινωνικές τάσεις μετανάστευσης σε διεθνές επίπεδο και εγκατάλειψη των περιοχών που κινδυνεύουν από την ερημοποίηση,
3. μειωμένη διαθεσιμότητα φυσικών υλικών, που χρησιμοποιούνται για εκπαιδευτικούς ή ψυχαγωγικούς σκοπούς,
4. εξαφάνιση της παράδοσης των περιοχών που εγκαταλείπονται.

Οι σοβαρές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις της ερημοποίησης οδήγησαν στη Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για την καταπολέμηση της ερημοποίησης. Η αντιμετώπιση του προβλήματος της ερημοποίησης είναι χρονοβόρα, δηλαδή τα πρώτα αποτελέσματα γίνονται ορατά μετά από πολλές γενιές. Επομένως το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε μέτρα πρόληψης, όπως είναι η διατήρηση της ποιότητας των εδαφών μέσω της σωστής διαχείρισης της γης σε ημιξηρικές περιοχές, και στη σωστή ενημέρωση.

Κάποια από τα μέτρα που θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν για την αντιμετώπιση ή την πρόληψη της ερημοποίησης είναι τα εξής:

1. άρση των αιτιών που προκάλεσαν την υποβάθμιση,
2. εξασφάλιση ευνοϊκών συνθηκών για την αύξηση των φυτών, όπως είναι η κάλυψη του εδάφους με φυτικά υλικά (π.χ. άχυρο, πριονίδι, ξερά φύλλα). Η κάλυψη αυτή μειώνει την εξάτμιση, καταστέλλει την ανάπτυξη των ζιζανίων, εμπλουτίζει το έδαφος με οργανική ουσία και εμποδίζει τη διάβρωση,
3. επανασπορά, πρακτική απαραίτητη σε υπερβολικά υποβαθμισμένες περιοχές,
4. φύτευση δένδρων ή και ποοδών φυτών σε απογυμνωμένες από βλάστηση περιοχές,
5. έργα ορεινής υδρονομίας για καταπολέμηση της διάβρωσης από το νερό,
6. φύτευση ανεμοφρακτών για καταπολέμηση της διάβρωσης από τον αέρα,
7. ανόρθωση δασών που υπέστησαν πυρκαγιές και λανθασμένη διαχείριση.

Άλλα μέτρα βελτίωσης των εδαφών των ξηρικών περιοχών και κατά συνέπεια πρόληψης της ερημοποίησης είναι η προσεκτική χρήση των διαθέσιμων πηγών νερού και ο έλεγχος της αλατότητας. Ερευνώνται νέοι

τρόποι αποθήκευσης του νερού και αποτελεσματικής άρδευσης ξηρικών και ημιξηρικών εδαφών. Επίσης, υπάρχει ενδιαφέρον για κατάλληλα συστήματα αμειψισποράς και στην επιλογή καταλληλότερων γενοτύπων φυτών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

---

### ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

---

#### 4.1 Γενικά

Ο όρος “ρύπανση” του εδάφους αναφέρεται στη δυσλειτουργία του εδαφικού οικοσυστήματος, ως αποτέλεσμα της εναπόθεσης σ’ αυτό οργανικών ή ανόργανων ουσιών. Η ρύπανση του εδάφους είναι μια ειδική περίπτωση της ευρύτερης έννοιας του όρου υποβάθμιση του εδάφους και αναφέρεται στη χημική υποβάθμισή του. Οι διάφορες χημικές ουσίες που προκαλούν τη ρύπανση του εδάφους μπορεί να προέρχονται είτε από διάφορες φυσικές διεργασίες (φυσικοί ρύποι), είτε να είναι αποτέλεσμα ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (ανθρωπογενείς ρύποι).

Οι πηγές των διαφόρων οργανικών και ανόργανων χημικών ουσιών που ρυπαίνουν το εδαφικό οικοσύστημα μπορεί να είναι σημειακές ή μη σημειακές. Παραδείγματα σημειακών πηγών ρύπων είναι τα βιομηχανικά και τα αστικά απόβλητα ενώ τα γεωργικά είναι παράδειγμα μη σημειακής ρύπανσης. Οι σπουδαιότερες πηγές ρύπων είναι τα αστικά λύματα, τα βιομηχανικά απόβλητα και αυτά που προέρχονται από τη γεωργία. Η ύπαρξη μόνο των διαφόρων χημικών ουσιών στο έδαφος δεν συνιστά από μόνη της ρύπανση. Οι χημικές αυτές οργανικές ή ανόργανες ουσίες για να χαρακτηρισθούν ως ρύποι και να προκαλέσουν ρύπανση στο εδαφικό οικοσύστημα, πρέπει να παρεμποδίζουν μία ή περισσότερες εδαφικές λειτουργίες. Έτσι, ενώ η ύπαρξη μικροποσοτήτων Cu είναι επιθυμητή στο έδαφος, αφού αποτελεί απαραίτητο ιχνοστοιχείο για τη θρέψη των φυτών, η ύπαρξη του σε μεγαλύτερες ποσότητες είναι τοξική για ορισμένους οργανισμούς του εδαφικού οικοσυστήματος, με αποτέλεσμα τη διατάραξη των βιογεωχημικών κύκλων των θρεπτικών και άρα επιπτώσεις στη λειτουργία στήριξης τροφικών πλεγμάτων.

Οι βασικές λειτουργίες που επιτελεί το έδαφος μπορούν να υποβαθμιστούν ή να σταματήσουν εντελώς εξαιτίας της παρουσίας



οργανικών και ανόργανων ρύπων στο έδαφος, της επίδρασης που έχουν οι ρύποι αυτοί στην ποιότητα και ποσότητα των οργανισμών του εδαφικού οικοσυστήματος και της παρεμβολής τους στα τροφικά πλέγματα, που το εδαφικό οικοσύστημα στηρίζει. Εξαιτίας της ποικιλίας ποιοτήτων και ποσοτήτων ρύπων που εναποτίθενται στο έδαφος είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις τους στην ποιότητα του εδαφικού οικοσυστήματος. Οι επιπτώσεις αυτές συχνά δεν περιορίζονται μόνο στη θέση απόθεσης αλλά μπορεί να επεκταθούν και σε μια ευρύτερη περιοχή. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο να γνωρίζει κανείς τις χημικές, φυσικές και βιολογικές διεργασίες οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη συγκράτηση, αποικοδόμηση και μεταφορά των ρύπων από τη στερεή φάση προς το εδαφικό διάλυμα και το αντίστροφο. Επίσης η μεταφορά των ρύπων μέσω της ακόρεστης και της κορεσμένης ροής στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη.

## **4.2 Ρύπανση εδαφικών πόρων από οργανικές ενώσεις**

Όπως κάθε οργανική ουσία έτσι και οι οργανικοί ρύποι από τη στιγμή που εναποτίθενται στο έδαφος υφίστανται μια σειρά από φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες, οι οποίες καθορίζουν τη δυναμική συμπεριφορά και τη χωροκατανομή τους.

Οι διεργασίες αυτές εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του ιδίου του εδάφους, τις φυσικοχημικές ιδιότητες των υπό εξέταση οργανικών ουσιών καθώς και την κατάσταση άλλων παραγόντων.

Το έδαφος βρίσκεται σε δυναμική κατάσταση ανταλλαγής ύλης και ενέργειας με όλα τα υπόλοιπα μέρη του περιβάλλοντος και μπορεί να μεταφέρει σ'αυτά ή να δεχθεί από αυτά διάφορους οργανικούς ρύπους.

Συνεπώς στη μαθηματική περιγραφή της κατανομής των οργανικών ρύπων στο έδαφος, πρέπει να περιληφθούν όχι μόνο οι διεργασίες που αυτοί υφίστανται στο έδαφος αλλά και οι διεργασίες μεταφοράς τους από και προς τα άλλα δομικά συστατικά του περιβάλλοντος.

#### **4.2.1 Συμπεριφορά των οργανικών ουσιών στο έδαφος**

Από τη στιγμή που μία οργανική ουσία βρίσκεται στο έδαφος, υπόκειται σε μια σειρά διεργασιών και η τύχη της ουσίας αυτής καθορίζεται από τη συνισταμένη δράση αυτών.

Οι διεργασίες που καθορίζουν την τύχη των οργανικών ουσιών στο έδαφος είναι η προσρόφησή τους στη στερεή φάση του εδάφους, η αποικοδόμηση και η μετακίνησή τους.

Η κατανόηση και μελέτη των παραπάνω μηχανισμών είναι απαραίτητη για να αποφανθούμε, εάν και κατά πόσο θα υπάρξει πρόβλημα ρύπανσης του εδάφους και με ποιον τρόπο θα πρέπει να αντιμετωπισθεί.

##### **4.2.1.1 Αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών στο έδαφος**

Η αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών στο έδαφος εξαρτάται από ορισμένες διεργασίες, οι οποίες διαχωρίζονται σε φυσικές, χημικές και βιολογικές. Η συνδυασμένη δράση τους έχει ως αποτέλεσμα την αποικοδόμηση των οργανικών μορίων σε χρονικό διάστημα, που μπορεί να κυμαίνεται από λίγες ώρες σε ημέρες, μήνες ή έτη.

Όσο αφορά τις φυσικές διεργασίες, οι σημαντικότεροι παράγοντες που επιδρούν είναι το φως και η θερμοκρασία. Η σημασία της φωτόλυσης είναι πολύ μεγάλη, όταν ακόμη η ουσία βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους ή, προκειμένου για τα γεωργικά φάρμακα, κατά την εφαρμογή τους. Η θερμική αποικοδόμηση συμβαίνει ταυτόχρονα με τη φωτόλυση, σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η υψηλή θερμοκρασία επιταχύνει τη φωτόλυση.

Η χημική αποικοδόμηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι σπουδαιότεροι των οποίων είναι: το εδαφικό διάλυμα, το εδαφικό pH, οι φυσικοχημικές ιδιότητες της ουσίας που διασπάται, η παρουσία μετάλλων (π.χ. Fe) που δρουν ως καταλύτες, η παρουσία οξειδωτικών ουσιών κ.ά.

Η βιολογική αποικοδόμηση, αφορά την αποικοδόμηση των οργανικών μορίων από τους διάφορους μικροοργανισμούς του εδάφους (μύκητες, βακτήρια, ακτινομύκητες) και γι'αυτό ονομάζεται και μικροβιακή

αποικοδόμηση. Οι μικροοργανισμοί αυτοί μπορεί να χρησιμοποιούν τις οργανικές ενώσεις ως αποκλειστική πηγή C, δηλαδή ενέργειας, οπότε διαθέτουν εξειδικευμένα ένζυμα για τη γρηγορότερη αποικοδόμηση τους. Μια άλλη περίπτωση είναι η αποικοδόμηση από μικροοργανισμούς, που έχουν άλλες πηγές ενέργειας και μεταβολίζουν “παρεπιπτόντος” τις οργανικές ουσίες (συν-μεταβολισμός). Ακόμη, η αποικοδόμηση μπορεί να συμβεί και από ελεύθερα ένζυμα, που εκκρίνουν οι μικροοργανισμοί, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία τους.

Το είδος και οι πληθυσμοί των μικροοργανισμών παίζουν σπουδαίο ρόλο στη μικροβιακή αποικοδόμηση. Στα ανώτερα εδαφικά στρώματα η αποικοδόμηση γίνεται κυρίως από μύκητες και είναι αερόβια, σε μεγαλύτερα όμως βάθη, όπου οι συνθήκες είναι αναερόβιες, ο σοβαρότερος ρόλος ανήκει στα βακτήρια.

Πολλές φορές κατά την εφαρμογή μιας οργανικής ουσίας στο έδαφος, παρατηρείται μία περίοδος μη αποικοδόμησής της, η οποία ακολουθείται από μία άλλη εντατικής αποικοδόμησης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη σύνθεση ενζύμων από τους μικροοργανισμούς. Ακόμη παρατηρείται ταχεία αποικοδόμηση συγκεκριμένων οργανικών ουσιών μετά από επαναλαμβανόμενες εφαρμογές τους στο ίδιο έδαφος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επιταχυνόμενη βιοαποικοδόμηση και οφείλεται κυρίως στην προσαρμογή των μικροοργανισμών του εδάφους στο να χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη ένωση ως πηγή άνθρακα και αζώτου.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη μικροβιακή αποικοδόμηση είναι η θερμοκρασία, η ύπαρξη άλλων πηγών ενέργειας, το ποσοστό της οργανικής ουσίας, που μπορεί κάποιες φορές να είναι τοξικό για τους μικροοργανισμούς, η ύπαρξη άλλων ουσιών που αναστέλλουν τη μικροβιακή δράση και, τέλος, το ποσοστό της ένωσης που προσροφάται.

#### **4.2.1.2 Προσρόφηση οργανικών ουσιών**

Η προσρόφηση αναφέρεται ως η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί μια οργανική ουσία και να εμποδίζει την περαιτέρω κίνησή της μέσω του

εδαφικού διαλύματος. Οι διεργασίες που υπεισέρχονται στην συγκράτηση είναι πολύπλοκες και αυτό οφείλεται κυρίως στην ετερογένεια του εδάφους, καθώς, τη γειτνίασή του με το νερό και την ατμόσφαιρα, καθώς και τη φύση των ίδιων οργανικών ρύπων.. Όπως είναι γνωστό το έδαφος αποτελείται από τρεις φάσεις, τη στερεή, που περιλαμβάνει την οργανική και την ανόργανη και καταλαμβάνει περίπου το 50%, την υγρή και την αέρια. Η υγρή και η αέρια φάση είναι οι κύριοι οδοί κίνησης των οργανικών ουσιών στο έδαφος. Τα οργανικά και τα ανόργανα στερεά συστατικά αποτελούν τις θέσεις προσρόφησης.

Στο έδαφος υπάρχουν οι ακόλουθες επιφάνειες προσρόφησης:

- 1. Ανόργανες επιφάνειες**, οι οποίες αποτελούνται από κρυσταλλικά και άμορφα υλικά. Οι κύριες ενεργοί ομάδες είναι φυλοπυριτικά ορυκτά της αργίλλου και ανόργανες -OH ομάδες κυρίως ενωμένες με μέταλλα και οξειδία.
- 2. Οργανικές επιφάνειες**, οι οποίες αποτελούνται από οργανικά πολυμερή, οργανισμούς και αποικοδομημένα υπολείμματα φυτών και ζώων. Οι ενεργοί ομάδες είναι κυρίως καρβοξύλια, καρβονύλια, φαινολικά υδροξύλια, άμινο, ιμιδάζολο, σουλφιδρυλο και σουλφονικές ομάδες. Πολλές από τις παραπάνω ομάδες βρίσκονται επάνω στα χουμικά οξέα, η ακριβής δομή των οποίων δεν είναι απολύτως γνωστή.

Όσον αφορά τους μηχανισμούς προσρόφησης, αυτοί είναι με σειρά αυξανόμενης ισχύος, οι εξής:

- **δεσμοί Van der Waals:** ασθενείς δεσμοί που αναπτύσσονται μεταξύ διπόλων,
- **δεσμοί υδρογόνου:** αναπτύσσονται μεταξύ του H του νερού και ενός άλλου ηλεκτροαρνητικού στοιχείου,
- **δέσμοι συμπλοκοποίησης ιόντος:** το μόριο του νερού, το οποίο ενώνεται με οποιοδήποτε ιόν ή ένωση βρίσκεται στο κέντρο της σφαίρας αντικαθίσταται από μια οργανική ενεργό ομάδα,
- **ανταλλαγή ανιόντος:** δεν είναι συχνό φαινόμενο λόγω των αρνητικών φορτίων της αργίλλου,
- **πρωτονίωση:** μιας οργανικής ενεργού ομάδας (άμινο ή καρβόνυλο ομάδα) της ουσίας (π.χ. ζιζανιοκτόνου) με ένα πρωτόνιο,
- **ανταλλαγή κατιόντος:** ανταλλαγή ενός κατιόντος από ένα άλλο,

- **ομοιοπολικός δεσμός:** σπουδαίος σχηματισμός προσρόφησης λόγω της μεγάλης ισχύος του και του σχηματισμού των “bound residues”, δηλαδή υπολειμμάτων στο έδαφος δεσμευμένων τόσο ισχυρά, ώστε είναι αδύνατον να εκχυλιστούν ακόμα και με τα πιο ισχυρά εκχυλιστικά,
- **δέσμευση:** είτε ενδοστοιβαδικά είτε μέσα στην οργανική ουσία του εδάφους. Δημιουργούνται και με αυτόν τον τρόπο “bound residues”.

Σπουδαίο ρόλο στην προσρόφηση παίζουν και οι ιδιότητες των οργανικών ουσιών.

**Ουσίες που ιονίζονται.** Οι ουσίες με θετικό φορτίο προσροφώνται στα κolloειδή της αργίλλου, η οποία έχει αρνητικά φορτία, ενώ οι ουσίες με αρνητικό φορτίο κατά κανόνα δεν προσροφώνται και έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εκπλυθούν. Ειδικότερα τα ασθενή οξέα σε υψηλό pH είναι κυρίως αρνητικώς φορτισμένα και απωθούνται από τα αρνητικά φορτία της αργίλλου, έτσι καταλήγουν στο εδαφικό διάλυμα με μεγάλη πιθανότητα έκπλυσης. Οι ασθενείς βάσεις σε υψηλό pH δεν ιονίζονται και προσροφώνται στην οργανική ουσία σε βαθμό ανάλογο με τις επιμέρους ιδιότητές τους. Σε χαμηλό pH είναι αρνητικά φορτισμένες και προσροφώνται στην άργιλλο.

**Ουσίες που δεν ιονίζονται.** Η προσρόφησή τους εξαρτάται από τη λιποφιλικότητα τους και κατά κανόνα προσροφώνται στη μη πολική οργανική ουσία του εδάφους. Φυσικά, υπάρχει ανά πάσα στιγμή ισορροπία μεταξύ της προσροφημένης ουσίας και αυτής που βρίσκεται στο εδαφικό διάλυμα.

#### 4.2.1.3 Μετακίνηση οργανικών ουσιών

Η μετακίνηση των οργανικών ενώσεων στο έδαφος μπορεί να συμβεί μέσω των ακόλουθων διεργασιών:

##### 1. **Επιφανειακή απορροή (surface runoff)**

Κατά την επιφανειακή μετακίνηση, η ουσία είτε είναι προσροφημένη στα σωματίδια του εδάφους και μετακινείται μαζί με αυτό, είτε βρίσκεται στην υδατική φάση και απορρέει με την επιφανειακή απορροή του νερού. Η

μετακίνηση στην επιφάνεια του εδάφους των οργανικών ενώσεων είναι δύσκολο να προβλεφθεί με διάφορα ομοιώματα, επειδή δεν έχει στενή συσχέτιση με τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.

Όταν η οργανική ουσία βρίσκεται στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους (1 cm) χωρίς να έχει ενσωματωθεί σε αυτό, τότε παρατηρείται επιφανειακή απορροή ακόμη και αν η κλίση είναι πολύ μικρή.

Η επιφανειακή απορροή αποτελεί εξαιρετικά σπουδαία περίπτωση μετακίνησης, διότι εμπεριέχει τον κίνδυνο ρύπανσης και άλλων εδαφών καθώς και των επιφανειακών υδάτων.

## **2. Εξαέρωση (Volatilization)**

Η εξαέρωση αποτελεί για ορισμένες οργανικές ουσίες σπουδαίο τρόπο διαφυγής από το έδαφος. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό εξαίτησης είναι η τάση ατμών της κάθε ουσίας (πτητικότητα), η προσρόφησή της στις ενεργούς θέσεις του εδάφους και η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία.

Η προσρόφηση μειώνει σοβαρά τον βαθμό εξαίτησης, ενώ αντίθετα η ύπαρξη υγρασίας επιταχύνει την εξαίτηση. Σπουδαίος είναι επίσης ο ρόλος της θερμοκρασίας του εδάφους.

## **3. Κατακόρυφη έκπλυση (vertical leaching)**

Εάν μία οργανική ένωση κατά την καθοδική της κίνηση κατορθώσει να περάσει από την ακόρεστη (vadoze zone) στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους, χωρίς να προσροφηθεί, ούτε να αποικοδομηθεί, τότε υπάρχει πολύ μεγάλη πιθανότητα ρύπανσης των υπογείων νερών. Το βάθος στο οποίο βρίσκεται η κορεσμένη ζώνη αποτελεί σπουδαία παράμετρο. Ένας μηχανισμός που δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς, αλλά παίζει σπουδαίο ρόλο στην κατακόρυφη έκπλυση είναι η μετακίνηση των προσροφημένων ρύπων στα κολλοειδή του εδάφους, με την μετακίνηση των κολλοειδών δια μέσου του εδαφικού διαλύματος.

Τα διάφορα ομοιώματα πρόβλεψης της κατακόρυφης μετακίνησης λαμβάνουν υπόψη τα εξής:

- την υδατοδιαλυτότητα της ουσίας ( $S_w > 30 \text{ mg/l}$  ) ↑πιθανότητα έκπλυσης),
- την προσρόφησή της ουσίας στην οργανική ουσία του εδάφους ( $K_o < 500$  ) ↑ πιθανότητα έκπλυσης),
- την ημιπερίοδο ζωής στο έδαφος σε σχέση με τη φωτόλυση. ( $DT_{50} > 4$  ημέρες ) ↑ πιθανότητα έκπλυσης),
- την τάση ατμών της ουσίας.

Τα ανωτέρω μεγέθη είναι απλώς ενδεικτικά. Υπάρχουν γεωργικά φάρμακα, που με βάση τα προαναφερθέντα δεν εκπλύνονται και όμως έχουν βρεθεί στα υπόγεια νερά, π.χ ατραζίνη. Επίσης, το έδαφος συνήθως δεν είναι ομοιόμορφο, αλλά έχει “μακροπόρους” ή ρωγμές που δρουν ως δίοδοι για τη γρήγορη μεταφορά του νερού και συνεπώς και των οργανικών ουσιών.

#### **4.2.2 Επιπτώσεις της οργανικής ρύπανσης στις λειτουργίες του εδάφους**

Η ρύπανση του εδάφους με οργανικές ουσίες έχει ως αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία του εδαφικού οικοσυστήματος, όπως αυτή εκφράζεται με την ολική ή μερική ανικανότητά του να επιτελέσει κάποιες από τις λειτουργίες του.

Οι λειτουργίες του εδάφους επηρεάζονται κυρίως από τις επιδράσεις των οργανικών ρύπων στους μικροοργανισμούς του εδάφους, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για πληθώρα διεργασιών στο έδαφος. Η λειτουργία του εδάφους που αναφέρεται στον μετασχηματισμό των θρεπτικών ουσιών, επηρεάζεται από τις οργανικές ενώσεις μέσω της επίδρασής τους στους μικροοργανισμούς, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή οργανικών και ανόργανων ουσιών. Ως παράδειγμα αναφέρεται η πιθανή επίδραση κάποιων οργανικών ρύπων στους μικροοργανισμούς νιτροποίησης ( $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}_3$ ). Η ικανότητα του εδάφους να στηρίζει τροφικά πλέγματα είναι δυνατόν να επηρεασθεί από τις επιπτώσεις ορισμένων οργανικών ρύπων στη χλωρίδα και την πανίδα του εδάφους. Ως παράδειγμα αναφέρεται η τοξική επίδραση ορισμένων παρασιτοκτόνων σε οργανισμούς του εδάφους. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα τη διατάραξη του τροφικού πλέγματος. Η ικανότητα του εδάφους να αποικοδομεί ρύπους επηρεάζεται από την κατάληψη ενεργών θέσεων του εδάφους από τους οργανικούς ρύπους. Κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι διαθέσιμες θέσεις και συνεπώς η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί και άρα να αποικοδομεί απόβλητα.

#### **4.2.3 Εκτίμηση των επιπτώσεων και καθορισμός του προβλήματος**

Για τον καθορισμό του προβλήματος πρέπει κανείς να αξιολογεί τα εξής δεδομένα:

- το είδος των οργανικών ενώσεων που προκαλούν το πρόβλημα,
- το επίπεδο αναφοράς των οργανικών ενώσεων που οδηγούν σε δυσλειτουργία του εδάφους,
- το κατώτερο όριο ανίχνευσης οργανικών ενώσεων στο έδαφος,
- την ακρίβεια και το επαναλήψιμο των μετρήσεων.

Τα παραπάνω στοιχεία αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για:

- τον σωστό προγραμματισμό και την επιλογή μεγέθους δείγματος,
- τον τρόπο επεξεργασίας του δείγματος,
- τον τρόπο συντήρησης του δείγματος μέχρι την ανάλυση,
- τη μέθοδο μέτρησης.

##### **4.2.3.1 Δειγματοληψία**

Η λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος εδάφους είναι το κρίσιμότερο στάδιο από το οποίο εξαρτάται η αξιοπιστία και η χρησιμότητα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Κατά τον σχεδιασμό μιας δειγματοληψίας εδάφους λαμβάνονται υπόψη:

- η έκταση της περιοχής δειγματοληψίας,
- η ανομοιογένεια του εδάφους και η μεταβολή της,



- η ακρίβεια της μεθόδου ανάλυσης και η επιδιωκόμενη ακρίβεια από μέρους του αναλυτή.

### **Οριζόντια ανομοιογένεια**

Η περιοχή δειγματοληψίας διακρίνεται σε:

- α. περιοχή μικρής έκτασης: η μεταβολή της ανομοιογένειας του εδάφους είναι μικρή, π.χ περιοχή με ίδιο εδαφικό τύπο,
- β. περιοχή μεγάλης έκτασης: η μεταβολή της ανομοιογένειας του εδάφους είναι μεγάλη. Σε αυτή την περίπτωση, χωρίζουμε την περιοχή σε επιμέρους τμήματα μικρότερης έκτασης, όπου η μεταβολή της ανομοιογένειας του εδάφους, τόσο από πλευράς εδαφικού τύπου όσο και ανάγλυφου, είναι περιορισμένη (χρήση εδαφολογικών χαρτών).

### **Κατακόρυφη ανομοιογένεια**

Στην περίπτωση αυτή το έδαφος χωρίζεται στους εδαφικούς οριζόντες και με τη βοήθεια κατάλληλων δειγματοληψιών λαμβάνονται επιμέρους δείγματα. Επειδή η ανάλυση δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί στο σύνολο του εδάφους λαμβάνεται ένας αριθμός δειγμάτων που ονομάζονται επιμέρους δείγματα.

Τα επιμέρους δείγματα πρέπει:

- α. να είναι στατιστικώς τυχαία (το έδαφος χωρίζεται σε τμήματα που αριθμούνται και επιλέγονται τα επιμέρους δείγματα, με βάση πίνακες τυχαιοποιημένων αριθμών,
- β. το μέγεθός τους να είναι ικανοποιητικό και να επαρκεί για την εκτέλεση του αριθμού των επαναλήψεων που απαιτούνται,
- γ. ο αριθμός των επιμέρους δειγμάτων να αυξάνει με την αύξηση της ανομοιογένειας του εδάφους.

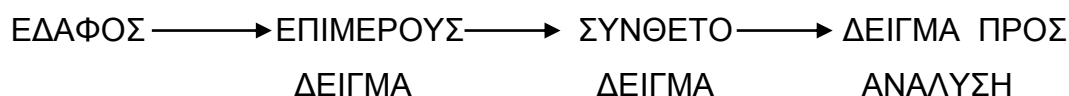
Συνένωση επιμέρους δειγμάτων δεν γίνεται όταν έχουμε δείγματα από διαφορετικούς εδαφικούς οριζόντες ή από περιοχές με διαφορετικούς εδαφικούς τύπους. Μόνο στα επιμέρους τμήματα μικρότερης έκτασης, όπου η

μεταβολή της ανομοιογένειας του εδάφους είναι περιορισμένη κάνουμε συνένωση των επιμέρους δειγμάτων.

Η συνένωση των επιμέρους δειγμάτων οδηγεί στο σύνθετο δείγμα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επιμέρους δειγμάτων τόσο πιο αντιπροσωπευτικό της κατάστασης του εδάφους είναι το σύνθετο δείγμα.

Στη συνέχεια, το σύνθετο δείγμα ομογενοποιείται και μειώνεται σε μέγεθος με τη μέθοδο του τεταρτημορίου, οπότε λαμβάνεται το δείγμα προς ανάλυση. Με αυτό τον τρόπο το τελικό δείγμα αποκτά το κατάλληλο μέγεθος για τις περαιτέρω επεξεργασίες, ενώ ταυτόχρονα παραμένει αντιπροσωπευτικό της περιοχής δειγματοληψίας.

#### **Σχέδιο δειγματοληψιών**



#### **4.2.3.2 Συντήρηση δειγμάτων**

Για αποφυγή απωλειών και μεταβολών των οργανικών ενώσεων του εδάφους, η συντήρηση των δειγμάτων γίνεται σε καταψύκτες. Αρχικά αποθηκεύονται σε πλαστικές σακούλες (χημικά ουδέτερο υλικό) και στη συνέχεια συντηρούνται σε βαθιά κατάψυξη.

Σε περίπτωση αποθήκευσης επεξεργασμένων δειγμάτων αυτά τοποθετούνται σε γυάλινα φιαλίδια, σφραγίζονται αεροστεγώς με καπάκια, που το εσωτερικό τους είναι επενδυμένο με Teflon (χημικά ουδέτερο υλικό) και συντηρούνται στην κατάψυξη.

#### **4.2.3.3 Επεξεργασία δείγματος**

Πριν από την τελική μέτρηση το αναλυτικό δείγμα υφίσταται ορισμένες επεξεργασίες που έχουν ως σκοπό:

- α. να μετατρέψουν τα συστατικά που πρόκειται να προσδιορισθούν σε κατάλληλη μορφή, συνήθως διαλυμένη στον κατάλληλο διαλύτη,
- β. να απομακρύνουν ουσίες που είναι δυνατό να παρεμποδίσουν την τελική μέτρηση (clean up),
- γ. να συμπυκνώσουν τα συστατικά (οργανικές ενώσεις) που θα προσδιορισθούν, όταν αυτά βρίσκονται σε μικρές ποσότητες.

#### **4.2.3.4. Εκτέλεση αναλύσεων, εξαγωγή και επεξεργασία αποτελεσμάτων**

Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των οργανικών ενώσεων στο έδαφος, χρησιμοποιούνται ενόργανες μέθοδοι ανάλυσης (αέριος χρωματογραφία GC, υγρή χρωματογραφία HPLC κ.ά).

Υπάρχει δυσκολία αναγωγής των σημειακών αποτελεσμάτων σε χωρικά, προκειμένου να βγάλουμε συμπέρασμα για μια περιοχή. Η χρήση της γεωστατιστικής, βοηθάει στη σωστή παρεμβολή άρα και στην πύκνωση των σημείων ώστε τελικά να γίνει αναγωγή των σημειακών αποτελεσμάτων σε χωρικά με την απεικόνισή τους με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ).

Κατά τη δειγματοληψία και ανάλυση είναι δυνατόν να παρατηρηθούν σφάλματα. Τα σφάλματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- α. χονδροειδή σφάλματα: οδηγούν σε αποτελέσματα εμφανώς λανθασμένα,
- β. τυχαία ή μη προσδιορίσιμα σφάλματα: οδηγούν σε μείωση της δυνατότητας επανάληψης. Αντιμετωπίζονται με αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων,
- γ. συστηματικά ή προσδιορίσιμα σφάλματα: επιδρούν δυσμενώς στην ακρίβεια. Οφείλονται σε ανακριβή όργανα και σκεύη, στον αναλυτή και τη μέθοδο ανάλυσης. Η διαπίστωση της ύπαρξης συστηματικών σφαλμάτων γίνεται με δύο τρόπους:
  - ανάλυση δείγματος γνωστής συγκέντρωσης,
  - δοκιμή ανάκτησης γνωστής ποσότητας προστιθέμενης ουσίας στο δείγμα.

Με τη δοκιμή ανάκτησης ελέγχονται επίσης πιθανές απώλειες στα διάφορα στάδια της ανάλυσης, καθώς και θετικές ή αρνητικές παρεμποδίσεις στην τελική μέτρηση.

### 4.3 Ρύπανση εδαφικών πόρων με βαρέα μέταλλα

Ο όρος "βαρέα μέταλλα" συνήθως αναφέρεται σε μέταλλα που έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από  $5 \text{ g/cm}^3$ . Μερικές φορές ο όρος αυτός είναι συνώνυμος του όρου "ιχνοστοιχεία", καθώς τα περισσότερα βαρέα μέταλλα απαντούν σε συγκεντρώσεις οι οποίες στα μεν γεωλογικά υλικά δεν ξεπερνούν το 0,1%, στους δε ζωντανούς οργανισμούς είναι μικρότερες του 0,01%. Στην εργασία αυτή, διατηρείται ο όρος βαρέα μέταλλα για να υπάρχει συμφωνία με άλλες εργασίες που έχουν όμοιο αντικείμενο μελέτης.

Στα "βαρέα μέταλλα" περιλαμβάνονται τα στοιχεία Cu, Zn, Fe, Mn, Mo, Co, Hg, Pb, Cd, Cr, Ni. Ορισμένα από αυτά είναι "απαραίτητα" θρεπτικά στοιχεία για τους οργανισμούς ενώ άλλα όχι. "Απαραίτητα" για τα φυτά είναι τα στοιχεία Cu, Zn, Fe, Mn, Mo και Co ενώ για τα ζώα τα στοιχεία Fe, Mo, Cu, Mn, Ni, Zn. Η περιεκτικότητα των "απαραιτήτων" αυτών στοιχείων στους ιστούς είναι πολύ χαμηλή σε σύγκριση με άλλα στοιχεία, όπως C, H, O, N, P, K, ώστε συχνά αποκαλούνται "ιχνοστοιχεία" ή "μικροθρεπτικά". Η παρουσία στους οργανισμούς των στοιχείων αυτών, όπως και όλων των άλλων θρεπτικών στοιχείων, σε ποσά κάτω ή πάνω από το άριστο προκαλεί λειτουργικές ανωμαλίες ή ακόμη και τον θάνατο του οργανισμού. Η άριστη συγκέντρωση διαφέρει ανάμεσα στα είδη και τις ποικιλίες ή φυλές του ίδιου είδους. Γενικές διαφορές υπάρχουν επίσης ως προς την ανοχή των οργανισμών στα υψηλά ή χαμηλά επίπεδά τους.

Τα μη απαραίτητα για τους οργανισμούς βαρέα μέταλλα μπορεί να εισέλθουν στους ιστούς και να προκαλέσουν διαταραχές στις φυσιολογικές λειτουργίες τους ανάλογα με το στοιχείο, την ποσότητα που εισήλθε και τη γενετική αντοχή ή ανοχή. Φαινόμενα τοξικότητας δεν είναι ασυνήθιστα και μπορεί να προκαλέσουν σοβαρότατες βλάβες στους οργανισμούς, ιδίως των ανωτέρων κρίκων της τροφικής αλυσίδας. Ιδιαίτερα για τον άνθρωπο πολύ

τοξικά σε υψηλές συγκεντρώσεις θεωρούνται τα στοιχεία Cu, Zn, Mn, Mo, Co, Hg, Pb, Cd, Cr, Ni.

Η ρύπανση του εδάφους με βαρέα μέταλλα μπορεί να προκληθεί από σημειακές ή και από μη σημειακές πηγές, οι οποίες μπορεί να είναι φυσικές ή ανθρωπογενείς. Οι φυσικές περιλαμβάνουν κυρίως την ελευθέρωση στο περιβάλλον βαρέων μετάλλων κατά την αποσάθρωση των πετρωμάτων. Οι ανθρωπογενείς προσθήκες περιλαμβάνουν ουσίες που περιέχουν διάφορες ποσότητες βαρέων μετάλλων όπως λιπάσματα, εδαφοβελτιωτικά, αστικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, γεωργικά φάρμακα, υπολείμματα καύσης άνθρακα, εκπομπές μεταλλουργείων και αυτοκινήτων κ.ά. Η βιβλιογραφία είναι πλούσια σε εκτενείς εκθέσεις για τις φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές βαρέων μετάλλων (π.χ. Adriano 1986). Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται ορισμένα στοιχεία με τη μορφή πινάκων (Πίνακας 4.1 έως Πίνακα 4.4), που αναφέρονται στα βαρέα μέταλλα και αφορούν: α) τις συγκεντρώσεις στα διάφορα γεωλογικά υλικά, εδάφη, απόβλητα, λιπάσματα, γαιάνθρακα και ιπτάμενη τέφρα διαφόρων προελεύσεων, β) τις πηγές εισόδου τους σε φυτά και ζώα, γ) τις επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό και δ) το απαραίτητο ή μη των στοιχείων αυτών για τα φυτά.

**Πίνακας 4.1.** Πηγές και εισόδοι βαρέων μετάλλων σε φυτά (Adriano 1986, με τροποποίηση)

	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Pd</b>	<b>Hg</b>	<b>Ni</b>	<b>Zn</b>
<b>Πρόσληψη από τις ρίζες</b>							
1. Έδαφος ή υπόγεια νερά	X	X	X	X	X	X	X
2. Έδαφος λόγω ρύπανσης του αέρα	X	X	X	X	X	X	X
3. Ιλύς αστικών αποβλήτων	X		X	X	X	X	X
4. Γεωργικά φάρμακα σπόρων ή εδάφους			X	X	X		X
5. Ρύπανση επιφανειακών νερών		X		X			
6. Λιπάσματα	X	X	X		X	X	X
7. Βιομηχανική ρύπανση	X	X	X		X	X	X
<b>Πρόσληψη από φύλλα και στελέχη</b>							
1. Από βιομηχανικές πηγές	X	X	X	X	X	X	X
2. Από εκπομπές αυτοκινήτων				X			X
3. Από εφαρμογές γεωργικών φαρμάκων	X		X	X	X		X
4. Από ρύπανση λόγω καύσης ορυκτών καυσίμων και απορριμμάτων	X	X	X	X	X	X	X

**Πίνακας 4.2.** Πηγές και εισοδοι βαρέων μετάλλων σε ζώα (Adriano 1986, με τροποποίηση)

	Cd	Cr	Cu	Pd	Hg	Ni	Zn
<b>Χερσαίες</b>							
1. Εισπνοή ρυπασμένου αέρα	X	X	X	X	X	X	X
2. Κατανάλωση ρυπασμένων φυτικών και ζωικών ιστών	X	X	X	X	X	X	X
3. Πόση ρυπασμένου νερού	X	X	X	X	X	X	X
<b>Υδάτινες</b>							
1. Μέταλλα στο νερό		X	X	X	X	X	X
2. Απορροή και προσθήκη από τον αέρα	X	X	X	X	X	X	X
3. Προσθήκες βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων	X	X	X	X	X	X	X
4. Παραπροϊόντα επεξεργασίας μεταλλευμάτων ή εκπλύματα χυτηρίων	X	X	X	X	X		X
5. Ρυπασμένα φυτά, ζώα ή ιζήματα	X	X	X	X	X	X	X

**Πίνακας 4.3.** Ανώτατες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις πόσιμων νερών και νερών άρδευσης για βαρέα μέταλλα (συγκέντρωση σε mg/l) (Adriano 1986, με τροποποίηση)

		<b>Νερά άρδευσης</b>		
		Συνεχής χρήση		Χρήση μικρής διάρκειας
Στοιχείο	Πόσιμα νερά	Οποιοδήποτε έδαφος	Χονδρόκοκο έδαφος	Λεπτόκοκο έδαφος
Cd	0,01	0,005	0,01	0,05
Cr	0,05	5,0	0,1	20,0
Cu	1,00	0,2	0,2	5,0
Pd	0,05	5,0	5,0	20,0
Ni	---	0,5	0,2	2,0
Zn	5,00	5,0	2,0	10,0

**Πίνακας 4.4.** Απαραίτητα και μη απαραίτητα για τη ζωή των φυτών και των ζώων βαρέα μέταλλα και τοξικές επιδράσεις τους (Adriano 1986, με τροποποίηση).

Στοιχείο	Απαραίτητο για		Πιθανώς τοξικό για		Σχόλια
	Φυτά	Ζώα	Φυτά	Ζώα	
Cd	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Συσσωρευση στην τροφική αλυσίδα, καρκινογόνο
Cr	Όχι	Όχι	Ναι	-	Με τη μορφή Cr <sup>+6</sup> πολύ τοξικό, διαφορετικά μη τοξικό, καρκινογόνο
Cu	Ναι	Ναι	Ναι	-	Εύκολη ακινητοποίηση με μορφή συμπλόκων
Hg	Όχι	Όχι	-	Ναι	Συσσωρευση στο τροφικό πλέγμα
Mn	Ναι	Ναι	Ναι, pH<5	-	Τοξικό στα φυτά σε όξινα εδάφη
Ni	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Πολύ ευκίνητο στα φυτά
Pd	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	-
Zn	Ναι	Ναι	-	-	Εύκολα ακινητοποιήσιμο στα εδάφη, σχετικά μη τοξικό

Ενδεικτικές ποσότητες βαρέων μετάλλων με τις οποίες επιβαρύνεται το περιβάλλον από φυσικές και ανθρωπογενείς εκπομπές κατ' έτος δίνονται στον Πίνακα 4.5.

**Πίνακας 4.5.** Εκπομπές βαρέων μετάλλων κατ' έτος παγκοσμίως (x10<sup>2</sup> τόνοι) (Nriagu 1979)

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Φυσικές	0,83	18	26	24	44
Ανθρωπογενείς	7,30	56	47	450	310

Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τις ανθρωπογενείς πηγές είναι πολύ μεγαλύτερη από τις φυσικές, με αποτέλεσμα να εικάζεται ότι πιθανόν έχουν μεταβληθεί οι βιογεωχημικοί κύκλοι των βαρέων μετάλλων σε παγκόσμια κλίμακα (Nriagu 1979).

### 4.3.1 Συμπεριφορά βαρέων μετάλλων στο οικοσύστημα

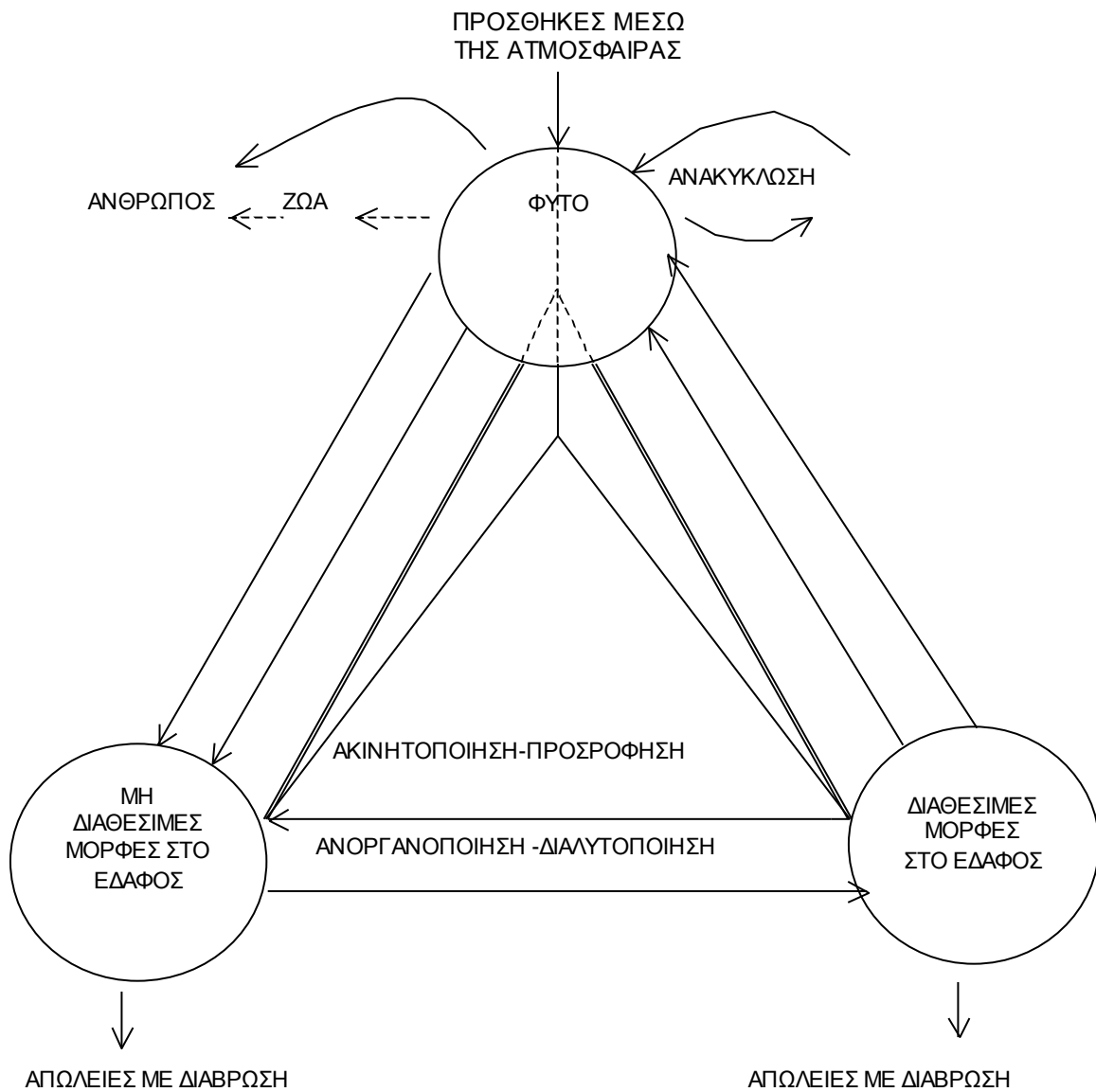
Η κύρια είσοδος βαρέων μετάλλων στους ζωικούς οργανισμούς είναι μέσω της τροφής. Τα φυτά θεωρούνται ως "διαμεσολαβητές" καθώς από την πρωταρχική πηγή, που είναι το έδαφος, μεταφέρουν τα βαρέα μέταλλα στους ζωικούς οργανισμούς.

Η μετακίνηση των μετάλλων στα διάφορα μέρη του φυτού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις ποσότητες που θα μεταφερθούν στο επόμενο τροφικό επίπεδο. Γενικά, το μεγαλύτερο μέρος των ποσοτήτων βαρέων μετάλλων που προσλαμβάνονται από τα φυτά μένει στη ρίζα και ελάχιστες ποσότητες πάνε στο υπέργειο τμήμα. Ειδικότερα, οι καρποί (π.χ. σπόροι σιτηρών) περιέχουν πολύ μικρότερα ποσά σε σχέση με τους βλαστούς, ενώ οι ρίζες πολύ περισσότερο από ό,τι οι βλαστοί. Η πιθανότερη εξήγηση της συσσώρευσης βαρέων μετάλλων σε διάφορα τμήματα των φυτών έχει σχέση με τη διάρκεια και το ρυθμό της διαπνοής.

Οι κυριότερες εδαφικές συνθήκες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των βαρέων μετάλλων είναι (Kabata-Pendias 1994): α) ετερογενής κατανομή τους στα εδάφη, β) εποχιακές μεταβολές και μεταβολές από περιοχή σε περιοχή των κύριων ιδιοτήτων του εδάφους, γ) μετατροπές που υφίστανται τα στοιχεία, δ) μεταφορά των στοιχείων μεταξύ των διαφόρων φάσεων (στερεά, υγρή και αέρια) και ε) βιοσυσσώρευση.

Οι βιογεωχημικοί κύκλοι των περισσοτέρων βαρέων μετάλλων θα μπορούσαν να ενταχθούν στη γενικευμένη μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.





**Σχήμα 4.1.** Γενική άποψη βιογεωχημικού κύκλου βαρέων μετάλλων σε αγροτικά οικοσυστήματα (Adriano 1986)

Η σχετική σπουδαιότητα των διαφόρων οδών μεταφοράς διαφέρουν για κάθε στοιχείο, φυτικό είδος, τύπο εδάφους και επηρεάζονται από το ανάγλυφο της περιοχής. Οι τεχνικές διαχείρισης του εδάφους και του φυτού είναι οι κύριοι παράγοντες που δίνουν διαφορετική βαρύτητα σε κάθε οδό μεταφοράς και διαμορφώνουν την ισορροπία μεταξύ διαθέσιμων και μη διαθέσιμων μορφών των μετάλλων στο έδαφος. Σ'ένα οικοσύστημα, ανάλογα με τον ρυθμό των εισροών-εκροών, που είναι αποτέλεσμα δεδομένης διαχείρισης, μπορεί να

παρατηρηθεί ρύπανση (υπερβολική διαθεσιμότητα) από ένα ή περισσότερα βαρέα μέταλλα ή έλλειψη (τροφοπενία) ενός η περισσότερων από τα μέταλλα που είναι απαραίτητα για τη ζωή των φυτών.

Το ενδιαφέρον για μελέτες που αφορούν τα βαρέα μέταλλα πηγάζει από την ανάγκη για: 1) αύξηση της παραγωγής προϊόντων διατροφής, ενέργειας και πρώτων υλών, 2) καθορισμό των απαιτήσεων φυτικών και ζωικών οργανισμών σε απαραίτητα ιχνοστοιχεία αλλά και των ορίων ανοχής ή αντοχής τους σε σχέση με την υγεία των ζώων και των ανθρώπων, 3) εκτίμηση της βιοσυγκέντρωσης και τοξικότητας των βαρέων μετάλλων, 4) πληρέστερη κατανόηση της ανακύκλωσης και της βιογεωχημείας των βαρέων μετάλλων, 5) εκτίμηση της συγκέντρωσης των διαφόρων μορφών βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον. Η γνώση του (5) διευκολύνει τη συνετότερη διαχείριση των αγροτικών και φυσικών οικοσυστημάτων.

#### **4.3.2 Εκτίμηση των επιπτώσεων της ρύπανσης με βαρέα μέταλλα στο εδαφικό οικοσύστημα**

Οι επιπτώσεις στο εδαφικό οικοσύστημα από τη ρύπανση με βαρέα μέταλλα οφείλεται κυρίως στην αυξημένη χρήση λιπασμάτων, νερού και αποβλήτων. Για την εκτίμηση των επιπτώσεων αυτών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες σε όλη τη λεκάνη απορροής, διότι οι δραστηριότητες αυτές καθορίζουν την τύχη των βαρέων μετάλλων όχι μόνο ως προς τη μεταφορά τους στο φυτό ή τη συγκράτησή τους από το έδαφος, αλλά και ως προς την έκπλυσή τους προς τους υπόγειους υδροφορείς. Η ακριβής γνώση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων, των μορφών με τις οποίες αυτά βρίσκονται αλλά και η εξάρτηση των συγκεντρώσεων και των μορφών από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφών, αποτελούν τη βάση μιας σωστής διαχείρισης για να αποφευχθούν ή έστω να μειωθούν οι αρνητικές επιδράσεις των μετάλλων αυτών. Γνωρίζοντας τα σημερινά επίπεδα ρύπανσης μιας λεκάνης απορροής με διάφορες μορφές βαρέων μετάλλων έχουμε σημείο αναφοράς για την εκτίμηση των επιπτώσεων από την αλόγιστη διαχείριση όλης της λεκάνης απορροής, ενώ συγχρόνως

μπορούμε να προβλέψουμε ευκολότερα τη μελλοντική εξέλιξη της ρύπανσης στη συγκεκριμένη περιοχή. Επίσης, τυχόν αλλαγές φυσικοχημικών ιδιοτήτων των εδαφών, αποτέλεσμα δεδομένης διαχείρισης, είναι δυνατό να κινητοποιήσουν μη διαθέσιμες μορφές βαρέων μετάλλων με αποτέλεσμα τα μέταλλα αυτά να περάσουν στην τροφική αλυσίδα.

Τα βαρέα μέταλλα στο έδαφος διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή τους (Kabata-Pendias 1994): α) **λιθογενή** τα οποία προέρχονται άμεσα από τη λιθόσφαιρα, β) **ανθρωπογενή** τα οποία εναποτίθενται άμεσα ή έμμεσα μέσω των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και γ) **πεδογενή** που είναι λιθογενούς ή ανθρωπογενούς προέλευσης, αλλά η κατανομή τους στους εδαφικούς ορίζοντες και τα εδαφικά τεμαχίδια μεταβάλλεται λόγω πεδογενών διεργασιών. Η διαθεσιμότητα των μικροθρεπτικών στα φυτά εξαρτάται από (Kabata-Pendias 1994) από πεδογενείς διεργασίες και τη διαχείριση εδαφικών πόρων.

Στο έδαφος τα βαρέα μέταλλα είναι δυνατόν να απαντούν σε μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μορφές: α) διαλυτές (στο εδαφικό διάλυμα), β) ανταλλάξιμες (σε οργανικά και ανόργανα συστατικά), γ) δομικά συστατικά στο πλέγμα των ορυκτών του εδάφους, δ) ιζήματα με άλλα συστατικά του εδάφους. Οι δύο πρώτες μορφές είναι άμεσα διαθέσιμες στα φυτά ενώ οι υπόλοιπες είναι δυνατόν μακροπρόθεσμα να γίνουν διαθέσιμες. Η γνώση μας για τους μηχανισμούς και τους ρυθμούς μετατροπής ενός στοιχείου από μια μορφή σε άλλη, είναι προς το παρόν ατελής αλλά συνεχώς βελτιώνεται.

Η συγκέντρωση ενός στοιχείου στο εδαφικό διάλυμα θεωρείται ότι εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ εδαφικού διαλύματος και στερεάς φάσεως του εδάφους με κύριο ρυθμιστικό παράγοντα το pH (Lindsay 1979). Η ικανότητα του εδάφους να αδρανοποιεί βαρέα μέταλλα αυξάνει με την τιμή του pH και παίρνει τη μέγιστή του τιμή σε ελαφρά αλκαλικές συνθήκες. Η ευκινησία των μετάλλων σχετίζεται με τη δέσμευσή τους στη στερεή φάση του εδάφους ή την κατακρήμνισή τους. Ο Fuller (1977) συζητώντας τη σχετική ευκινησία των ιχνοστοιχείων σε σχέση με το pH σε γενικές γραμμές θεωρεί ότι: α) σε όξινα εδάφη (pH 4,2-6,6) τα στοιχεία Cd, Hg, Ni και Zn είναι "ευκίνητα", το Cr χαρακτηρίζονται ως "μετρίως ευκίνητα" και ο Cu και Pb πρακτικά θεωρούνται "ακίνητα", β) σε ουδέτερα - αλκαλικά εδάφη (pH 6,7 -

7,8) το Cr είναι "ευκίνητο", το Cd, Hg και Zn, είναι "μετρίως ευκίνητα", ενώ το Ni "ακίνητο".

Εκτός από το pH, και άλλες ιδιότητες του εδάφους όπως η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, η οργανική ουσία, το ποσό και ο τύπος των ορυκτών της αργίλλου, η περιεκτικότητα σε οξειδία Fe, Al και Mn και το δυναμικό οξειδοαναγωγής, καθορίζουν την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί και να ακινητοποιεί σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό τα βαρέα μέταλλα. Όταν η ικανότητα αυτή ξεπερασθεί, τότε οι ποσότητες που είναι διαθέσιμες για τα φυτά αυξάνουν, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται φαινόμενα τοξικότητας και να υπάρχει κίνδυνος ρύπανσης των υπογείων νερών.

Τα βαρέα μέταλλα έχουν την τάση σχηματισμού συμπλόκων με την οργανική ουσία του εδάφους (χουμικά και φουλβικά οξέα), η οποία είναι διαφορετική για κάθε μέταλλο (Stevenson 1982). Η οργανική ουσία παίζει σπουδαίο ρόλο όχι μόνο στη δημιουργία συμπλόκων αλλά και τη συγκράτηση βαρέων μετάλλων ως ανταλλάξιμων. Οι δύο αυτές ιδιότητες της οργανικής ουσίας επιδρούν διαφορετικά στα διάφορα βαρέα μέταλλα. Παράδειγμα είναι ο Cu, ο οποίος όταν δεσμεύεται από την οργανική ουσία και καθιστάται πρακτικά μη αφομοιώσιμος κυρίως μέσω του σχηματισμού συμπλόκων (Kirkham 1977), ενώ το Cd όταν συγκρατείται ως ανταλλάξιμο (Haghiri 1974) και είναι αφομοιώσιμο.

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) του εδάφους εξαρτάται από την περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλλο και οργανική ουσία. Γενικά όσο αυξάνεται η CEC, τόσο αυξάνεται και η ικανότητα συγκράτησης των βαρέων μετάλλων. Ο τύπος και το ποσό της αργίλλου καθορίζουν τη CEC η οποία αυξάνεται με την ποσότητα της αργίλλου και ιδιαίτερα όταν αυτή περιέχει σε μεγάλη αναλογία ορυκτά του τύπου 2:1 (π.χ. βερμικουλίτη). Σε άμεση σχέση με το ποσό και τον τύπο της αργίλλου είναι επίσης και η ειδική επιφάνεια του εδάφους. Οι Korte και συνεργάτες (1976) αναφέρουν ότι η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί βαρέα μέταλλα συσχετίζεται στενότερα με την ειδική επιφάνεια παρά με τη CEC του εδάφους.

Ο ρόλος των οξειδίων και υδροξειδίων Fe, Al και Mn στην προσρόφηση βαρέων μετάλλων είναι επαρκώς τεκμηριωμένος. Η ικανότητά

τους να συγκρατούν βαρέα μέταλλα είναι αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού κρυστάλλωσής τους (Chao 1972).

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη συγκράτηση βαρέων μετάλλων στο έδαφος είναι το δυναμικό οξειδοαναγωγής, το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία για εδάφη περιοδικώς ή μονίμως κατακλυζόμενα με νερό (υδρομορφικά εδάφη). Ενώ στα αεριζόμενα εδάφη το δυναμικό οξειδοαναγωγής κυμαίνεται από +400 ως +700 mV, στα υδρομορφικά εδάφη το δυναμικό κυμαίνεται από -400 ως +400 mV (Gambrell κ.ά. 1978).

Σε περιπτώσεις ρύπανσης των εδαφών με βαρέα μέταλλα πρέπει να γνωρίζουμε τόσο τις διαθέσιμες όσο και τις μη διαθέσιμες μορφές τους. Οι τελευταίες πρέπει να αναγνωρίζονται, ώστε η διαχείριση των εδαφών αυτών να μην τις μετατρέπει σε διαθέσιμες. Η συνηθέστερη και απλούστερη προσέγγιση στο πρόβλημα της "αναγνώρισης" των μορφών με την οποία βρίσκονται στο έδαφος τα βαρέα μέταλλα είναι η χρήση διαφόρων εκχυλιστικών ουσιών "διαδοχικά", όπου οι ήπιες εκχυλιστικές ουσίες προηγούνται και ακολουθούν οι περισσότερο ισχυρές.

Οι διάφορες μορφές των μετάλλων που εκχυλίζονται "διαδοχικά" χαρακτηρίζονται διαλυτές, ανταλλάξιμες, συνδεδεμένες με την οργανική ουσία ή με τα οξείδια του Fe και Al κ.λπ. Όπως υποστηρίζει ο Beckett (1989), ο διαχωρισμός σε διάφορες μορφές με βάση τη σειρά των εκχυλιστικών είναι μόνο επιχειρησιακός και δεν πρέπει να σημαίνει κάποιο συγκεκριμένο μηχανισμό καθώς δεν είναι καθόλου βέβαιο ότι μια εκχυλιστική ουσία δεν παραλαμβάνει και μικρότερα ποσά από κάποια άλλη μορφή ή γιατί πρέπει να διαλύει όμοιες μορφές (π.χ. ανθρακικά) δύο διαφορετικών μετάλλων. Παρόλα αυτά είναι χρήσιμο να αποδίδεται σε μία εκχυλιστική ουσία η παραλαβή κάποιου συγκεκριμένου κλάσματος. Έτσι, ουδέτερα άλατα όπως το  $\text{KNO}_3$  θεωρείται ότι παραλαμβάνουν "ανταλλάξιμες" μορφές μετάλλων, το  $\text{NaOH}$  παραλαμβάνει μορφές συνδεδεμένες με την οργανική ουσία, το  $\text{Na}_2\text{EDTA}$  μορφές συνδεδεμένες με τα ανθρακικά άλατα και τέλος ισχυρά οξέα, όπως το  $\text{HNO}_3$  παραλαμβάνουν κυρίως το κλάσμα των μετάλλων που αποτελεί μέρος του δομικού πλέγματος των ορυκτών.

Ο Beckett (1989), στην εκτενή ανασκόπησή του, προτείνει ότι είναι πιο σωστό να χρησιμοποιείται η εκχυλιστική ουσία για να χαρακτηριστεί ένα

μέταλλο π.χ. EDTA-εκχυλίσιμο και να περιγράφεται επακριβώς η πειραματική διαδικασία. Ο συγγραφέας τονίζει ότι αυτή η προσέγγιση παραβλέπει τον αρχικό σκοπό της χρήσης των διαδοχικών εκχυλίσεων, ο οποίος είναι η διερεύνηση της χημείας των διαφόρων μορφών των μετάλλων στο έδαφος και προτείνει να γίνει μεγαλύτερη προσπάθεια ώστε να βρεθούν εκχυλιστικές ουσίες, που πράγματι θα ξεχωρίζουν τις μορφές των διαφόρων μετάλλων με βάση τη χημεία τους.

Έτσι η συμπεριφορά των βαρέων μετάλλων στο έδαφος (κινητοποίηση-ακίνητοποίηση) εξαρτάται από τη μορφή στην οποία βρίσκονται (υδατοδιαλυτά, ανταλλάξιμα, οργανικά σύμπλοκα) και καθορίζεται από την προέλευσή τους και από τις υφιστάμενες εδαφικές συνθήκες.

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων που έχει στο εδαφικό οικοσύστημα η ρύπανση από βαρέα μέταλλα ακολουθείται δειγματοληψία όπως αυτή περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσής τους, μετά το στάδιο της προετοιμασίας του δείγματος και της εκχύλισης του με το κατάλληλο εκχυλιστικό χρησιμοποιούνται ανόργανοι μέθοδοι ανάλυσης (π.χ. Φασματοφωτομετρία Ατομικής Απορρόφησης (AAS), Φασματοφωτομετρία εκπομπής με επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP) κ.ά.). Οι επιπτώσεις στην εδαφική ποιότητα εξαρτώνται από τον βαθμό που η ρύπανση επηρεάζει τις διάφορες εδαφικές λειτουργίες. Η κυριότερη επίπτωση, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι στη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών που είναι ο κύριος μηχανισμός που ελέγχει όλες τις εδαφικές λειτουργίες.

#### **4.4 Ρύπανση του εδάφους με ραδιενεργά ισότοπα**

Η ρύπανση του εδάφους με ραδιοϊσότοπα βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος της κοινής γνώμης μετά από το ατύχημα του Τσέρνομπιλ. Το ραδιενεργό ισότοπο που προκαλεί το περισσότερο ενδιαφέρον σήμερα είναι το κάισιο-137(Cs-137), αν και άλλα ραδιενεργά στοιχεία ανιχνεύονται επίσης ενδιαφέρον (πχ το στρόντιο-90 και το πλουτώνιο) για κάποιες περιοχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Οι δοκιμές πυρηνικών όπλων και τα πυρηνικά ατυχήματα εμπεριέχουν μεγάλο κίνδυνο εκτεταμένης ρύπανσης από τη μεταφορά τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων με τον άνεμο ή το νερό. Η ραδιενεργός ρύπανση του εδάφους μπορεί επίσης να προκύψει από διαρροή στους χώρους απόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων ή κατά την παραγωγή, τη χρήση και τη μεταφορά των ραδιοϊσοτόπων. Αν και οι τελευταίοι τρόποι ρύπανσης δεν συνεπάγονται απαραίτητα επιπτώσεις σε εκτεταμένες περιοχές, σε τοπικό επίπεδο τα αποτελέσματα είναι καταστροφικά.

Τα ραδιενεργά ισότοπα στο έδαφος εκδηλώνουν χημική συμπεριφορά, όμοια με τις σταθερές μορφές τους. Η ημιπερίοδος ζωής των ραδιοϊσοτόπων και η ικανότητα κάθε εδάφους να τα συγκρατεί ποικίλλουν. Τα αργιλώδη εδάφη, για παράδειγμα, συγκρατούν τα ραδιενεργά ισότοπα, καθώς και άλλους ρύπους περισσότερο από τα αμμώδη. Εφόσον η πηγή της ρύπανσης συνήθως προέρχεται από την επιφάνεια, τα περισσότερα ραδιοϊσότοπα συγκεντρώνονται στα πρώτα εκατοστά της κατανομής των ανόργανων εδαφών. Στα οργανικά εδάφη, ωστόσο, παρατηρείται τάση συγκέντρωσης σε μεγαλύτερα βάθη.

Τα ραδιενεργά ισότοπα στα ανώτερα εδαφικά στρώματα μπορούν να εκθέσουν τα φυτά και τα ζώα σε ακτινοβολία και, σε ακραίες περιπτώσεις, τους ανθρώπους. Μπορούν, επίσης, να εισέλθουν από το έδαφος στο τροφικό πλέγμα και συνεπώς να ληφθούν από τους ανθρώπους και τα ζώα μέσω του πεπτικού συστήματος. Σε σπάνιες περιπτώσεις, η έκθεση σε ραδιοϊσότοπα μπορεί να γίνει με εισπνοή ρυπασμένων εδαφικών σωματιδίων. Μερικά φυτά συγκεντρώνουν ραδιενεργά ισότοπα και μπορούν να χρησιμεύσουν ως δείκτες εδαφικής ρύπανσης. Σε υψηλά επίπεδα έκθεσης οι καταστροφικές επιδράσεις εμφανίζονται ακόμη και στην πανίδα, όπως για παράδειγμα παρατηρήθηκε μετά το ατύχημα του Τσέρνομπιλ.

#### **4.5 Ρύπανση του εδάφους με άζωτο και φωσφόρο**

Το άζωτο και ο φωσφόρος είναι στοιχεία απαραίτητα για όλες τις μορφές ζωής. Η συμβολή τους στην θρέψη των φυτών είναι ουσιαστική, αλλά

η εφαρμογή υπερβολικών ποσοτήτων μπορεί να οδηγήσει στον κορεσμό του εδάφους, με αποτέλεσμα απώλειες με έκπλυση και επιβάρυνση του υπόγειου νερού. Η ρύπανση με νιτρικά και φωσφορικά προέρχεται κυρίως από μη σημειακές πηγές, όπως η υπερβολική οργανική ή ανόργανη λίπανση και η απόθεση ατμοσφαιρικών ρύπων σε δασικά και φυσικά οικοσυστήματα. Σε αντίθεση με τα νιτρικά, κύρια πηγή των οποίων είναι η γεωργία, ο φωσφόρος προέρχεται κυρίως από τα υγρά απόβλητα των πόλεων και των κτηνοτροφικών μονάδων.

Παράλληλα με τη γενικότερη τάση εντατικοποίησης των χρήσεων γης, οι κύριες επιπτώσεις της αλόγιστης εφαρμογής νιτρικών και φωσφόρου είναι η απώλεια ενδαιτημάτων μικρής γονιμότητας σε γεωργικές περιοχές σε όλη την Ευρώπη, η επιβάρυνση του επιφανειακού νερού με νιτρικά και φωσφόρο με την επιφανειακή απορροή και η έκπλυση αζώτου, κυρίως με τη μορφή νιτρικών προς το υπόγειο νερό.

Η εκπλυνόμενη ποσότητα εξαρτάται από το έδαφος, το κλίμα και τη διαχείριση του αγροοικοσυστήματος. Τα επαρκώς στραγγιζόμενα εδάφη, τα οποία αερίζονται ικανοποιητικά (οξειδωτικές συνθήκες), ευνοούν τη νιτροποίηση, με αποτέλεσμα την αύξηση του κινδύνου έκπλυσης νιτρικών. Στα εδάφη που νεροκρατούν, όπου επικρατούν αναγωγικές συνθήκες, όπως στα τυρφώδη και πολλά υγροτοπικά εδάφη, τα νιτρικά απονιτροποιούνται από βακτήρια και παράγεται άζωτο και οξείδιο του αζώτου ( $N_2O$ ), τα οποία εκλύονται στην ατμόσφαιρα (το  $N_2O$  συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου). Ωστόσο, με την απονιτροποίηση μειώνεται η ποσότητα των διαθέσιμων για έκπλυση νιτρικών. Στα συστήματα εντατικής καλλιέργειας, η αλληλεπίδραση μεταξύ της αλόγιστης λίπανσης και της άρδευσης αυξάνει την έκπλυση νιτρικών. Η έκπλυση νιτρικών πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο το φθινόπωρο, όταν οι αγροί δεν καλύπτονται με πλούσια βλάστηση.

Σε περιοχές με αναπτυγμένη κτηνοτροφία, μεγάλες ποσότητες φωσφόρου συσσωρεύονται στα ανώτερα εδαφικά στρώματα. Το φαινόμενο αυτό απαντά στην Ολλανδία και την κοιλάδα του Πο στην Ιταλία, δύο από τις πιο αναπτυγμένες κτηνοτροφικές περιοχές της Ευρώπης (Breewisma και Silva 1992). Σε εδάφη κορεσμένα με φωσφόρο, ιδιαίτερα όταν η υπόγεια στάθμη είναι υψηλή, παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις στους υπόγειους



υδροφορείς και τις επιφανειακές υδατοσυλλογές, όπου προκαλείται ευτροφισμός.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

---

### ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

---

#### 5.1 Διατήρηση και αποκατάσταση της εδαφικής υγείας

Σε προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε η έννοια της ποιότητας των εδαφικών πόρων, τα αίτια που συντελούν στην υποβάθμισή της, καθώς και οι πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Στο εδαφικό οικοσύστημα κατ' ανάλογο τρόπο με την αντιμετώπιση της υγείας του ανθρώπου πρέπει να προβαίνουμε σε όλες εκείνες τις ενέργειες που κατ' αρχάς διατηρούν (conserve) την υγεία του εδαφικού οικοσυστήματος σ' επιθυμητή κατάσταση, ενώ όταν παρατηρηθεί υποβάθμιση θα πρέπει αυτή να αποκατασταθεί (restored).

Η διατήρηση της υγείας των εδαφικών πόρων (προληπτική προσέγγιση) αναφέρεται στις αειφορικές διαχειριστικές πρακτικές που πρέπει να ακολουθούνται σε επίπεδο λεκάνης απορροής, ώστε να αποφευχθεί η υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών. Από τη στιγμή όμως που θα διαπιστωθεί υποβάθμιση της εδαφικής υγείας θα πρέπει να αποκατασταθούν οι λειτουργίες που υποβαθμίστηκαν (θεραπευτική προσέγγιση). Η υποβάθμιση των εδαφικών λειτουργιών μπορεί να είναι μερική και τότε αναφερόμαστε στην ανόρθωση (rehabilitation) των εδαφικών λειτουργιών, μπορεί να είναι πλήρης οπότε αναφερόμαστε στην αποκατάσταση (restoration) των λειτουργιών, ή μπορεί οι συνθήκες που οδήγησαν στην υποβάθμιση της εδαφικής ποιότητας να επιβάλλουν τη δημιουργία (creation) ορισμένων λειτουργιών. Έχει επικρατήσει όμως η αναφορά στην αναστροφή των υποβαθμισμένων εδαφικών λειτουργιών να καλείται αποκατάσταση της υγείας του εδαφικού οικοσυστήματος. Ο όρος εξυγίανση (remediation) αναφέρεται εναλλακτικά του όρου αποκατάσταση, αν και είναι συνδεδεμένος με τις τεχνικές εξυγίανσης που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση συγκεκριμένων εδαφικών λειτουργιών.

Για τους παραπάνω λόγους το ερώτημα διατήρηση ή αποκατάσταση των εδαφικών πόρων είναι τεχνητό, αφού οι δύο αυτές προσεγγίσεις (προληπτική και θεραπευτική) είναι συμπληρωματικές και ολοκληρώνονται από ένα σύστημα παρακολούθησης, με το οποίο αποτυπώνεται σε συνεχή χωρική και χρονική βάση η εδαφική υγεία. Ένα τέτοιο σύστημα, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο αυτό, καθορίζει το επίπεδο αναφοράς (base line) της εδαφικής υγείας, απαραίτητο για τη διατήρησή της, και μπορεί να διαγνώσει τυχόν υποβάθμισή της, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες αποκατάστασής της.

## **5.2 Διατήρηση εδαφικής υγείας**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διατήρηση της εδαφικής υγείας επιτυγχάνεται με την αειφορική διαχείριση της λεκάνης απορροής, η οποία σημαίνει όλες εκείνες τις διαχειριστικές πρακτικές οι οποίες αποσκοπούν στην εσαεί διατήρηση της καλής εδαφικής υγείας, δηλαδή στη διατήρηση όλων των λειτουργιών του οικοσυστήματος σε μια επιθυμητή και αυτοσυντηρούμενη κατάσταση (self sustained). Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει όχι μόνο να γίνει χρηστή διαχείριση των εδαφικών πόρων, αλλά όλων των φυσικών πόρων της λεκάνης απορροής, διότι, όπως έχει αναφερθεί, το εδαφικό οικοσύστημα είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ της λιθόσφαιρας, της ατμόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και της βιόσφαιρας. Έτσι για τη διατήρηση της καλής εδαφικής υγείας, απαιτείται κατ' αρχάς ο σχεδιασμός χρήσεων γης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στις εδαφικές λειτουργίες από τους διάφορους τομείς ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (γεωργία, βιομηχανία, μεταφορές, τουρισμός κ.λπ.). Έμφαση δίνεται στις γεωργικές δραστηριότητες διότι είναι ο κύριος χρήστης της γεωργικής γης, ενώ θα πρέπει να βρεθούν οι βέλτιστες γεωργικές πρακτικές για κάθε γεωργική χρήση γης. Επιπλέον, σε επίπεδο λεκάνης απορροής θα πρέπει να αναγνωρισθούν οι περιοχές εκείνες στις οποίες θα δοθεί έμφαση στην ανάδειξη συγκεκριμένων εδαφικών λειτουργιών οι οποίες θα συμβάλλουν επικουρικά στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο εδαφικό οικοσύστημα και συνεπώς στη διατήρηση της υγείας του. Έτσι, εδάφη, τα οποία λόγω της θέσης τους στη λεκάνη απορροής και

των συγκεκριμένων τους ιδιοτήτων μπορούν να επιτελέσουν τις λειτουργίες του μετασχηματισμού των θρεπτικών ουσιών, της τροποποίησης πλημμυρικών φαινομένων, του επαναφορτισμού υπόγειων υδροφορέων, της στήριξης της άγριας χλωρίδας και πανίδας μπορούν να συνεισφέρουν προληπτικά στη διατήρηση της εδαφικής υγείας. Για τους λόγους αυτούς εκτός από τις αρχές διαχείρισης στις οποίες θα αναφερθούμε στη συνέχεια, θα αναλυθούν επίσης ο σχεδιασμός χρήσεων γης, οι βέλτιστες γεωργικές πρακτικές και οι τεχνητοί υγρότοποι ως μέσα διατήρησης της εδαφικής υγείας.

### 5.2.1 Αρχές διαχείρισης εδαφικών πόρων

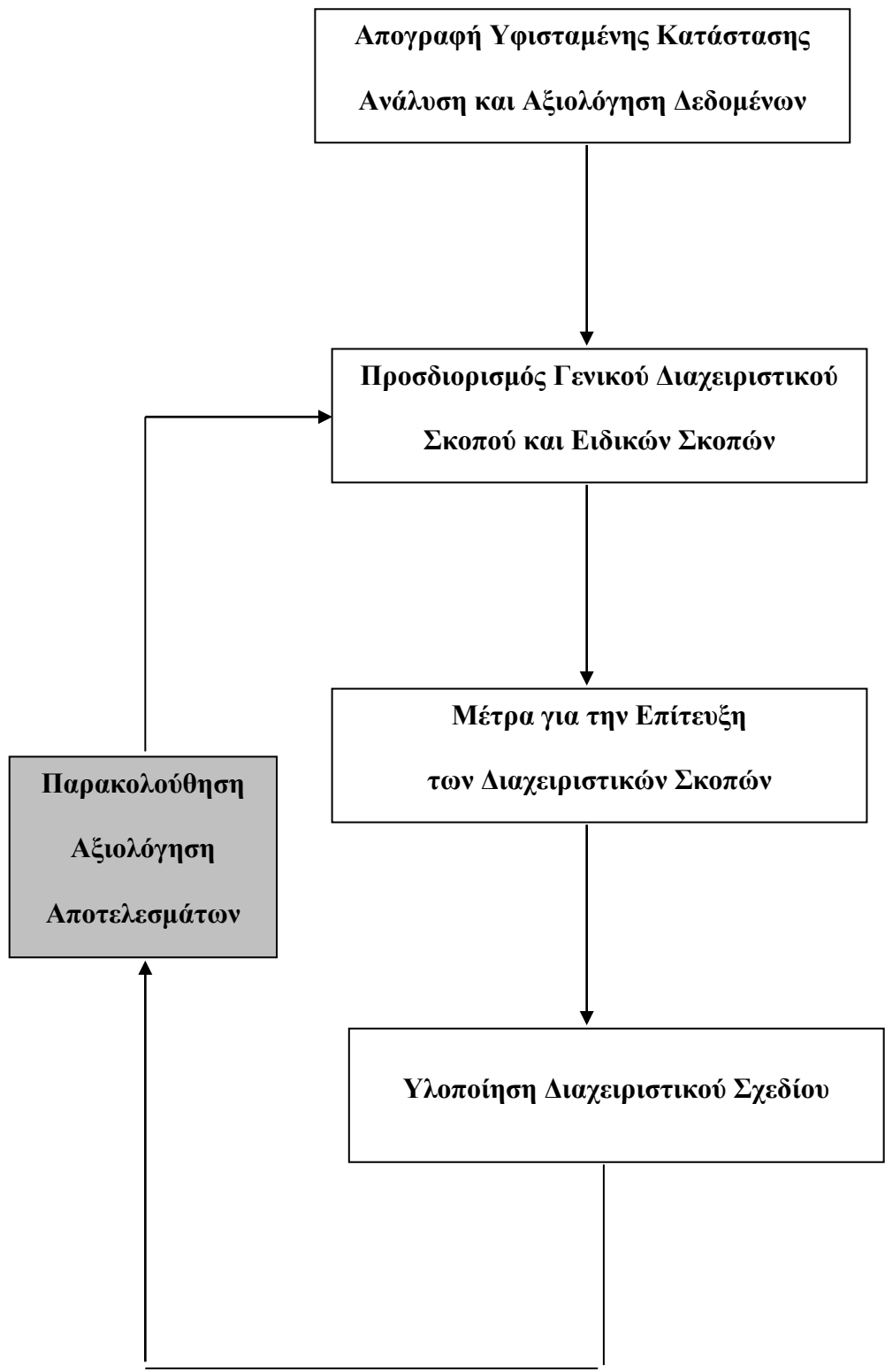
Λειτουργικά ως διαχείριση ορίζεται η διαδοχική σειρά ενεργειών με την οποία επιτυγχάνουμε τον διαχειριστικό μας σκοπό (ή σκοπούς). Σύμφωνα με τη θεωρία των συστημάτων του Elgerd (1967), υπάρχουν τρεις διαδικασίες προσομοίωσης φυσικών οικοσυστημάτων, όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

**Πίνακας 5.1.** Διαδικασίες προσομοίωσης φυσικών οικοσυστημάτων (Elgerd 1967)

<b>Διαδικασία προσομοίωσης</b>	<b>Είσοδος</b>	<b>Έξοδος</b>	<b>Δομή συστήματος</b>
Σχεδιασμός	Δεδομένη	Δεδομένη	Προσδιορίζεται
Διαχείριση	Προσδιορίζεται	Δεδομένη	Δεδομένη
Ανάλυση	Δεδομένη	Προσδιορίζεται	Δεδομένη

Στην περίπτωση της διαδικασίας διαχείρισης εδαφικών πόρων, με δεδομένη τη δομή του συστήματος και την έξοδο, προσδιορίζεται με ανάδραση (feedback) η είσοδος του συστήματος.

Η διαδοχή των ενεργειών, στις οποίες προβαίνουμε κατά τη φάση διαχείρισης των εδαφικών πόρων, φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Κατά τη φάση της απογραφής της υφιστάμενης κατάστασης θα πρέπει κανείς να συλλέξει μια σειρά δεδομένων, τα οποία θα πρέπει προσεκτικά να αναλύσει. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με το διαχειριστικό σχέδιο.



**Σχήμα 5.1.** Η διαδοχή των ενεργειών στις οποίες προβαίνει κανείς κατά τη διαχείριση των εδαφικών πόρων

Συνήθως όμως δεδομένα όπως κλίμα, τοπογραφία, ανάγλυφο, γεωλογικό υπόβαθρο, έδαφος, βλάστηση, υδατικοί πόροι, πανίδα, χλωρίδα, κοινωνικοοικονομικές συνθήκες, υφιστάμενες χρήσεις γης, γεωργικές πρακτικές, υποδομές κ.λπ, είναι απαραίτητα για την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης. Τα δεδομένα αυτά συγκεντρώνονται για τη γεωγραφική περιοχή της λεκάνης απορροής και αποτυπώνονται χωρικά. Η ανάλυσή τους, η οποία θα αναδείξει τυχόν αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, θα αποτυπώσει τα προβλήματα της περιοχής και θα συσχετίσει χωρικά τις υφιστάμενες πρακτικές με τις επιπτώσεις τους στο εδαφικό οικοσύστημα, αφού είναι γνωστό ότι οι πρακτικές που εφαρμόζονται στα ανάντη της λεκάνης απορροής έχουν επιπτώσεις στους εδαφικούς πόρους ευρισκόμενους κατόπιν της λεκάνης.

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση μπορεί κανείς να προσδιορίσει τόσο τον γενικό διαχειριστικό σκοπό όσο και τους ειδικούς διαχειριστικούς σκοπούς. Έτσι για παράδειγμα ο γενικός σκοπός ενός διαχειριστικού σχεδίου θα μπορούσε να είναι κατ' αρχάς η διατήρηση των λειτουργιών των εδαφικών πόρων κι όπου διαγνωσθεί υποβάθμιση να αποκατασταθεί η υποβαθμισθείσα λειτουργία. Κατά περίπτωση όμως θα πρέπει να ιεραρχηθούν οι λειτουργίες και οι χρήσεις γης για τους συγκεκριμένους τύπους εδαφών ώστε να προσδιοριστούν οι ειδικοί διαχειριστικοί σκοποί. Τα διαχειριστικά μέτρα προτείνονται για την επίτευξη των ειδικών σκοπών που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Έτσι, για παράδειγμα, αν η εδαφική λειτουργία που σχετίζεται με τη ρύθμιση της κίνησης, της κατανομής και αποθήκευσης ύδατος και εδαφικού διαλύματος είναι αυτή που αξιολογήθηκε ότι θα πρέπει να διατηρηθεί, τότε κάποια από τα διαχειριστικά μέτρα θα πρέπει να αποβλέπουν σ' εκείνες τις πρακτικές οι οποίες βοηθούν στη διατήρηση της συγκεκριμένης λειτουργίας.

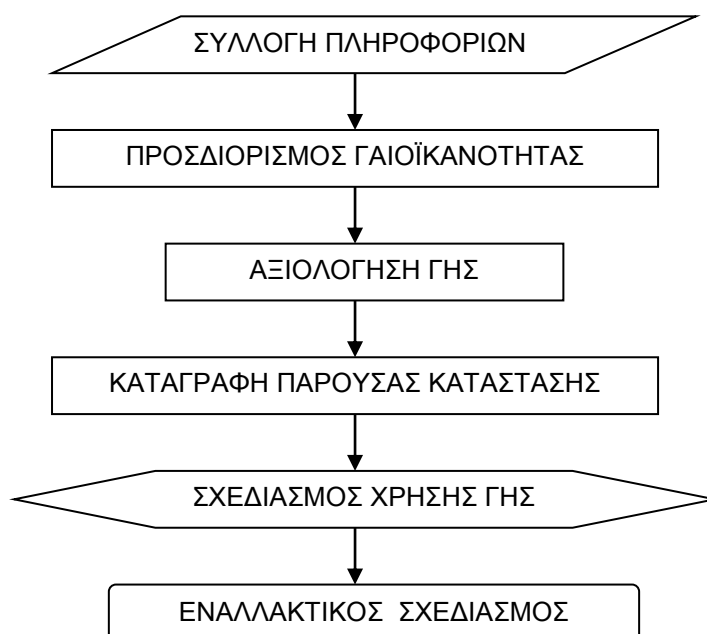
Η υλοποίηση των προτεινόμενων μέτρων σ' ένα διαχειριστικό σχέδιο απαιτεί συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα, προϋπολογισμό και κυρίως την ύπαρξη διαχειριστικού φορέα που θα φέρει σε πέρας. Τέλος, η διαδικασία ανάδρασης είναι απαραίτητη για να προσδιορίσει κανείς αν πέτυχε και σε ποιο βαθμό τους διαχειριστικούς του σκοπούς και να κάνει τις όποιες αναπροσαρμογές χρειαστούν για την επίτευξή τους, χρησιμοποιώντας ένα σχήμα παρακολούθησης, όπως αυτό αναλύεται σ' επόμενο κεφάλαιο.

## 5.2.2 Σχεδιασμός χρήσεων γης και διατήρηση της εδαφικής υγείας

Πολλές από τις υφιστάμενες χρήσεις γης συνδέονται άμεσα με τη φύση, την ποιότητα και την ποσότητα των φυσικών πόρων, ενώ άλλες με τις πολιτιστικές, κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες του παρελθόντος και την εξέλιξή τους μέσα στον χρόνο.

Προκειμένου να αποφευχθεί η υποβάθμιση του φυσικού πόρου που λέγεται “έδαφος” και να διατηρηθεί η ποιότητά του θα πρέπει να καθορισθεί η καταλληλότητα της γης για διάφορες χρήσεις, υπό ένα δεδομένο συνδυασμό περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών συνθηκών. Οι τύποι χρήσεων γης καθορίζονται σε συνάρτηση με το είδος και την ποσότητα των διαθέσιμων φυσικών πόρων. Αυτό σημαίνει ότι η καταγραφή των υφιστάμενων χρήσεων γης δεν πρέπει να έχει ένα απλό τεχνικό χαρακτήρα, ή να γίνεται με δεδομένο ότι θα προταθούν άλλες χρήσεις, αλλά να γίνεται προσπάθεια συλλογής τέτοιων δεδομένων, ώστε να μπορεί να δικαιολογηθεί ή να απορριφθεί η υφιστάμενη χρήση στην περιοχή.

Για τον σχεδιασμό χρήσεων γης ακολουθείται η διαδικασία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2:



**Σχήμα 5.2.** Διάγραμμα ροής ενεργειών για τον σχεδιασμό χρήσεων γης (Συλλαίος 1990)

Η απογραφή των εδαφικών πόρων γίνεται με μετρήσεις, οι οποίες στη συνέχεια αποτυπώνονται σε θεματικούς χάρτες ή σε χάρτες αξιολόγησης

(εξαρτάται αν υπάρχει ενδιαφέρον για τα ακατέργαστα δεδομένα ή για αξιολογημένα δεδομένα). Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη συμπληρωματικά δεδομένα π.χ. για το κλίμα, το ανάγλυφο, την υδρολογία και την υπάρχουσα βλάστηση.

Ως “**γαιοϊκανότητα**” θεωρείται η δυνατότητα (*potential*) της γης να στηρίζει χρήσεις κάτω από ένα δεδομένο καθεστώς περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών συνθηκών. Η χρήση γης πρέπει να καθορίζεται σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση των φυσικών πόρων της λεκάνης απορροής. Η χρήση γης πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με τον σωστό σχεδιασμό χρήσης των φυσικών πόρων. Εάν αυτό δεν γίνει, τότε αναμενόμενη συνέπεια είναι η υποβάθμιση των φυσικών πόρων.

Προϋπόθεση της σωστής χρήσης γης είναι η αξιολόγηση της γης και προϋπόθεση της αξιολόγησης είναι, όπως αναφέρθηκε, η απογραφή των εδαφικών πόρων και της παρούσας κοινωνικοοικονομικής κατάστασης.

Η αξιολόγηση διακρίνεται σε γενική και ειδική. **Γενική αξιολόγηση** σημαίνει ταξινόμηση της καταλληλότητας της γης για γεωργική χρήση, ενώ **ειδική αξιολόγηση** σημαίνει ταξινόμηση της καταλληλότητας της γης για συγκεκριμένη καλλιέργεια ή για κατηγορία καλλιεργειών. Η αξιολόγηση οδηγεί κατ’ αρχήν στην εκτίμηση των γαιοποιοτήτων. Η **Γαιοποιότητα** είναι σύνθετη εδαφική παράμετρος η οποία επηρεάζει κατά διαφορετικό τρόπο το κάθε συγκεκριμένο είδος χρήσης γης, όπως π.χ. η διαθεσιμότητα υγρασίας, η αντίσταση στη διάβρωση, ο κίνδυνος πλημμύρας, η επάρκεια θρεπτικών, κ.λπ.

### **Αρχές αξιολόγησης:**

1. *Η αξιολόγηση και η ταξινόμηση της καταλληλότητας γης πραγματοποιείται για κάθε χρήση χωριστά.* Αυτό σημαίνει ότι διαφορετικά είδη χρήσης γης έχουν διαφορετικές απαιτήσεις, δηλαδή προϋποθέτουν διαφορετικές γαιοποιότητες (π.χ. μια αλλουβιακή πεδιάδα με προβλήματα διηθητικότητας, μπορεί να είναι κατάλληλη για ρύζι, αλλά ακατάλληλη για άλλες γεωργικές χρήσεις ή για δάσος).
2. *Η αξιολόγηση απαιτεί σύγκριση των αναμενόμενων εσόδων και εξόδων, για κάθε τύπο γης.* Η εκτίμηση της καταλληλότητας για κάθε χρήση απαιτεί



σύγκριση των απαιτούμενων εξόδων (όπως εργατικών, λιπασμάτων, κ.λπ.) με τα παραγόμενα προϊόντα ή με άλλες αναμενόμενες ωφέλειες.

3. *Η αξιολόγηση προϋποθέτει πολυδιάστατη προσέγγιση.* Η εφαρμογή της αξιολόγησης απαιτεί τη συμβολή των φυσικών επιστημών, της τεχνολογίας χρήσης γης, της οικονομίας και της κοινωνιολογίας. Στην ποιοτική αξιολόγηση τα οικονομικά δεδομένα περιλαμβάνονται με γενική μόνο έννοια, χωρίς υπολογισμούς κόστους και ωφελειών. Στην ποσοτική αξιολόγηση η σύγκριση εσόδων και εξόδων, με οικονομική αξιολόγηση, παίζει σοβαρό ρόλο στον καθορισμό της καταλληλότητας της γης.

4. *Η αξιολόγηση λαμβάνει υπόψη τις φυσικές, οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες της περιοχής,* όπως το τοπικό κλίμα, τα γνωρίσματα του πληθυσμού, τη διαθεσιμότητα και το κόστος εργασίας, την ανάγκη για απασχόληση, τις συνθήκες της τοπικής αγοράς, τη δυνατότητα εξαγωγών, τα συστήματα ιδιοκτησίας και τη διαθεσιμότητα κεφαλαίων.

5. *Η καταλληλότητα αναφέρεται σε χρήση με συνεχή παραγωγή.* Το πρόβλημα της υποβάθμισης των φυσικών πόρων και ιδιαίτερα των εδαφικών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εκτίμηση της καταλληλότητας των γαιών. Δηλαδή, ορισμένες χρήσεις γης μπορεί να είναι ιδιαίτερα επικερδείς βραχυπρόθεσμα, αλλά να προκαλέσουν διαβρώσεις ή ρυπάνσεις των νερών με λιπάσματα ή γεωργικά φάρμακα. Παρόμοιες επιπτώσεις αντισταθμίζουν το βραχυπρόθεσμο κέρδος και έχουν ως συνέπεια την ταξινόμηση της γης ως ακατάλληλης για τη χρήση αυτή.

6. *Η αξιολόγηση περιλαμβάνει σύγκριση περισσότερων από ένα είδος χρήσεων γης.* Η σύγκριση αυτή μπορεί να γίνει μεταξύ γεωργίας και δασοπονίας, μεταξύ δύο ή περισσότερων συστημάτων εκμετάλλευσης, μεταξύ διαφόρων ειδών φυτών, κ.λπ. Συχνά περιλαμβάνει σύγκριση των υπάρχουσών χρήσεων με πιθανές αλλαγές, είτε για νέες χρήσεις, είτε για μεταβολές στις υπάρχουσες. Ακόμη είναι δυνατή και η σύγκριση κάποιας μορφής χρήσης με τη δυνατότητα μη χρήσης.

Η μελέτη της υφισταμένης χρήσης είναι καθοριστική πριν από το σχεδιασμό εναλλακτικών χρήσεων γης, γιατί δίνει τη δυνατότητα παροχής πληροφοριών και δεδομένων για τις δυνατότητες μιας χρήσης για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα και κάτω από γνωστό συνδυασμό κοινωνικών και οικονομικών δεδομένων, πολιτικής κατάστασης και παραδόσεων του τόπου. Η

προσεκτική έρευνα και αξιολόγηση της υφιστάμενης χρήσης γης είναι σημαντικό στάδιο τόσο της αξιολόγησης όσο και του σχεδιασμού χρήσης γης.

Η ανάγκη του σχεδιασμού της χρήσης γης έχει άμεση σχέση με τη βούληση του ανθρώπου να διαμορφώσει το μέλλον του. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για τον σχεδιασμό αυτό συνοψίζονται ως εξής:

1. ο σχεδιασμός χρήσης γης θεωρείται μια συνεχής “διαδικασία”. Η “διαδικασία” αναγνωρίζει ότι ο σχεδιασμός εκτελείται σε ένα σταθερά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Οι αξίες αλλάζουν, οι γνώσεις επεκτείνονται, η κατανόηση του πώς λειτουργεί το περιβάλλον αλλάζουν. Το γεγονός αυτό απαιτεί συνεχή αναθεώρηση των σκοπών και επανεξέταση των πόρων, παίρνοντας υπόψη τις νέες γνώσεις. Αυτό με τη σειρά του απαιτεί νέα αξιολόγηση των πληροφοριών και τροποποίηση των σχεδίων,
2. ο σχεδιασμός χρήσης περιλαμβάνει προετοιμασία εναλλακτικών σχεδίων,
3. ο σχεδιασμός χρήσης γης αποβλέπει στο μέλλον και κατευθύνεται στο να επιτύχει σκοπούς του σχεδιασμού,
4. ο σχεδιασμός χρήσης γης χρησιμοποιεί σε σημαντικό βαθμό ορθολογιστικές προσεγγίσεις για να φθάσει σε σχέδια, πολιτικές αποφάσεις, ή σε κάποια ροή δραστηριοτήτων. Αντικειμενικότητα, αιτιολογία και λογική είναι στοιχεία καθοριστικά σε αντίθεση με τα συναισθήματα ή προσωπικά συμφέροντα. Πληροφορίες και γνώσεις συστηματικά θεωρούμενες, αναλυόμενες και ολοκληρωμένες, είναι ο καταλληλότερος τρόπος για την αναθεώρηση σχεδίων, μέτρων πολιτικής και ροής δραστηριοτήτων.
5. ο σχεδιασμός χρήσης γης αναγνωρίζει, όπου είναι δυνατό, ότι «κάθε τι συνδέεται με κάθε τι άλλο». Π.χ. προτάσεις για ανάπτυξη χώρων αναψυχής σε μια περιοχή προϋποθέτουν και θεώρηση της κατάστασης από άποψη μεταφορικών μέσων, πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού, κ.λπ.

Το κυρίαρχο στοιχείο του σχεδιασμού χρήσεων γης είναι η μελέτη και αξιολόγηση των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων. Τα **στάδια** του σχεδιασμού χρήσεων γης είναι:

- συγκεκριμενοποίηση των στόχων,
- αναγνώριση και ανάλυση,
- καταγραφή και ανάπτυξη εναλλακτικών λύσεων,

- μελέτη και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων,
- εκλογή σχεδίου,
- δράση,
- ολοκλήρωση.

Ο σχεδιασμός μίας νέας χρήσης γης περιέχει πάντα ένα στοιχείο κινδύνου, γιατί παρά την προσεκτική εξέταση όλων των δεδομένων (φυσικών, κοινωνικών, οικονομικών), μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτα αποτελέσματα, είτε π.χ. λόγω της ρευστής κατάστασης του εμπορίου στην εποχή μας, είτε για κάποιο άλλο λόγο που δεν ήταν δυνατό να προβλεφθεί, όπως π.χ. η παράδοση του τόπου σε κάποια χρήση.

Η σημερινή χρήση γης πρέπει να ελέγχεται περιοδικά για άλλες πιθανές μεθόδους χρήσης γης, οι οποίες είναι δυνατό να καλύπτουν πληρέστερα τις ανθρώπινες ανάγκες ή και να δημιουργούν υγιέστερη βιόσφαιρα. Για τον προσδιορισμό εναλλακτικών λύσεων και τον καθορισμό της ενδεδειγμένης χρήσης γης είναι απαραίτητο να προϋπάρχουν τα εξής:

- α. η γνώση των παραμέτρων που επηρεάζουν τις εδαφικές λειτουργίες,
- β. η γνώση της συμπεριφοράς και λειτουργίας κάθε μονάδας γης σε σχέση με την επιδιωκόμενη χρήση γης,
- γ. η ταξινόμηση και η απογραφή των μονάδων γης,
- δ. η αξιολόγηση των μονάδων γης για συγκεκριμένες χρήσεις.

Η γεωργική χρήση όπως και κάθε άλλη χρήση, επιδρά με δυο τρόπους στη γη. Πρώτον, με την άμεση επίδρασή της στη χρησιμοποιούμενη γη και δεύτερον με την επίδρασή της στα γειτονικά εδάφη ή και σε εδάφη πολύ απομακρυσμένα. Πολλές γεωργικές χρήσεις έχουν ελάχιστη επίδραση στα εδάφη, ενώ άλλες μπορούν να προκαλέσουν θεαματικές αλλαγές (π.χ. κακή χρήση μιας λιβαδικής έκτασης με φυτική βλάστηση μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της φυτοκοινωνίας και διάβρωση).

Εντατικές μορφές γεωργίας μπορεί να προκαλέσουν επιπτώσεις στην εδαφική ποιότητα. Η ρύπανση του εδαφικού οικοσυστήματος από γεωργική χρήση σε συνδυασμό με τη ρύπανση από βιομηχανίες είναι αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα και πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη μετά τον σχεδιασμό χρήσης γης. Μια επικερδής καλλιέργεια δεν σημαίνει ότι είναι η προσφορότερη λύση, όταν τα αποτελέσματα από τη χρήση αυτή στη γη

μεσοπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα θα έχουν επιπτώσεις στην εδαφική ποιότητα.

Οι κυριότερες επιπτώσεις των χρήσεων γης στη βιοποικιλότητα οφείλονται κατά κύριο λόγο στην εντατικοποίηση της γεωργίας, την επέκταση των οικισμών, την κακή διαχείριση ορυκτών πόρων, τις μεταφορές και τον τουρισμό. Γενικά οι μεταβολές στη χρήση γης προκαλούν μεγάλες αλλαγές στη βιοποικιλότητα (μείωση ή και εξαφάνιση της ποικιλότητας στα φυσικά και ημιφυσικά ενδιαιτήματα), μέσω της υποβάθμισης των εδαφικών λειτουργιών και της εισαγωγής ξενικών ειδών κ.λπ.

### **5.2.3 Γεωργικές πρακτικές και διατήρηση της ποιότητας των εδαφών**

Η υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών πολύ συχνά σχετίζεται με την αλόγιστη χρήση των εδαφικών πόρων. Η υποβάθμιση όμως που συντελείται, δεν περιορίζεται μόνο στο εδαφικό οικοσύστημα, αλλά επιδρά τόσο στην ατμόσφαιρα με την έκλυση CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων όσο και στα υπόγεια και επιφανειακά νερά με τον συνεχή εμπλουτισμό τους με θρεπτικά στοιχεία και τοξικές ουσίες (Doran 1997).

Η χρήση αειφορικών μορφών καλλιέργειας συντελεί στον περιορισμό της υποβάθμισης εδαφών και υδάτων και τη βελτίωση της ποιότητας τους. Στον πίνακα 5.2 φαίνεται πώς επηρεάζουν οι διάφορες γεωργικές πρακτικές που εφαρμόζονται επί μακράς σειράς ετών τους εδαφικούς δείκτες οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με τις λειτουργίες και την ποιότητα των εδαφών.

Ωστόσο τα συγκεκριμένα αποτελέσματα της κατεργασίας του εδάφους, της διαχείρισης των μετασυλλεκτικών υπολειμμάτων κ. λπ. στην ποιότητα του εδάφους ποικίλλουν ανάλογα με το κλίμα, το ανάγλυφο και τον εδαφικό τύπο (Doran κ.ά. 1993)

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 5.3. οι διάφορες γεωργικές πρακτικές επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τους εδαφικούς δείκτες οι οποίοι ουσιαστικά καθορίζουν την ποιότητα του εδάφους. Έτσι παρατηρώντας τον ρυθμό μεταβολής της ποιότητας του εδάφους ως αποτέλεσμα μίας γεωργικής πρακτικής μπορούμε να καταλάβουμε τη συμβατότητα ή όχι της συγκεκριμένης πρακτικής με τις αρχές της αειφορικής γεωργίας. Όπως

φαίνεται και από τον πίνακα 5.4 (Acton και Geogorich 1995, Parr κ.ά. 1992) η ποιότητα του εδάφους είναι ο κύριος συνδετικός παράγοντας μεταξύ της στρατηγικής των ήπιων γεωργικών πρακτικών και του απώτερου σκοπού ο οποίος είναι η αειφορική γεωργία.

**Πίνακας 5.2.** Πώς επηρεάζονται οι διάφοροι εδαφικοί δείκτες από τις γεωργικές πρακτικές (Doran κ.ά. 1997 και Romig κ.ά. 1995)

Εδαφικός δείκτης	Γενική τάση ή μεταβολή	Γεωργικές πρακτικές οι οποίες επηρεάζουν τον δείκτη
Οργανική ουσία	Αύξηση	Σωστή διαχείριση των μετασυλλεκτικών υπολειμμάτων, ελάχιστη κατεργασία, αμειψισπορά και ενσωμάτωση στο έδαφος των φυτικών υπολειμμάτων
	Μείωση	Έντονη κατεργασία, θερινή αγρανάπαιυση, απομάκρυνση ή κάψιμο των φυτικών υπολειμμάτων
Μικροβιακή μάζα και βιοποικιλότητα	Αύξηση ή μείωση	Όπως και με την οργανική ουσία
Σταθερότητα εδαφικών συσσωματωμάτων	Αύξηση	Ελάχιστη κατεργασία, διατήρηση των φυτικών υπολειμμάτων, αμειψισπορά.
	Μείωση	Όπως και με την οργανική ουσία
Υδραυλική αγωγιμότητα	Αύξηση	Μειωμένη κατεργασία, διατήρηση των φυτικών υπολειμμάτων, αμειψισπορά. Ο βαθμός και η έκταση της μεταβολής ποικίλλει ανάλογα με τις διαφορετικές πρακτικές
	Μείωση	Όπως και με την οργανική ουσία
Βάθος εδάφους, όγκος ριζοστρώματος	Αύξηση	Μειωμένη κατεργασία και αμειψισπορά μειώνει τη διάβρωση και δημιουργεί συνθήκες για σχηματισμό νέου επιφανειακού εδάφους
	Μείωση	Έντονη κατεργασία, θερινή αγρανάπαιυση και απομάκρυνση ή κάψιμο των φυτικών υπολειμμάτων είναι οι κύριες γεωργικές πρακτικές οι οποίες αφήνουν το έδαφος ευάλωτο στη διάβρωση από τον αέρα ή το νερό με επακόλουθο την απώλεια του επιφανειακού ορίζοντα
Ποιότητα του νερού	Θετική ή αρνητική;	Ελάχιστη ή καθόλου κατεργασία, αμειψισπορά και διατήρηση των φυτικών υπολειμμάτων μειώνει την επιφανειακή απορροή και τη διάβρωση. Αναποτελεσματική διαχείριση χημικών ουσιών σε συνδυασμό με άρδευση μπορούν να οδηγήσουν στην υποβάθμιση της ποιότητας των νερών.

**Πίνακας 5.3.** Η ποιότητα εδάφους ως συνδετικός κρίκος μεταξύ των ήπιων γεωργικών πρακτικών και της αειφορικής γεωργίας (Doran 1997).

<b>ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ</b>	<i>Ποιότητα εδάφους</i>	<b>ΣΚΟΠΟΣ</b>
<b>Ήπιες γεωργικές πρακτικές</b>		<b>Αειφορική γεωργία</b>
Αμειψισπορά		Καλή ποιότητα τροφής
Διαχείριση φυτικών υπολειμμάτων		Ρεαλιστικές αποδόσεις καλλιεργειών
Ελάχιστη κατεργασία του εδάφους		Προστασία του περιβάλλοντος
Έλεγχος της διάβρωσης		Διατήρηση της ενέργειας
Μόνιμη φυτοκάλυψη		Διατήρηση των φυσικών πόρων
Μειωμένη αγρανάπαυση		
Ολοκληρωμένη διαχείριση των παρασίτων		Προστασία της υγείας ανθρώπων και ζώων
Διαχείριση του νερού		Προσαρμογή στις κλιματικές αλλαγές

Πέραν της χρήσης των δεικτών της ομάδας ελάχιστων δεδομένων προτείνεται και η χρήση κάποιων άλλων συμπληρωματικών δεικτών. Αυτοί είναι χρήσιμοι αφενός για τη γρήγορη διάγνωση της εδαφικής υγείας και αφετέρου για την επίτευξη των διαχειριστικών σκοπών με τη χρήση των κατάλληλων γεωργικών πρακτικών. Στον Πίνακα 5.4 φαίνονται οι δείκτες αυτοί οι οποίοι χρησιμεύουν στην επιλογή των κατάλληλων γεωργικών πρακτικών, ώστε να επιτευχθούν οι διαχειριστικοί σκοποί που τέθηκαν κατά τη φάση της εκπόνησης του διαχειριστικού σχεδίου.

**Πίνακας 5.4.** Επιλογή δεικτών για τον καθορισμό γεωργικών πρακτικών για την υλοποίηση των διαχειριστικών σκοπών (Doran 1997)

<b>Διαχειριστικοί στόχοι</b> <b>Γεωργικές πρακτικές</b>	<b>Δείκτες</b>
<b>Διατήρηση της οργανικής ουσίας</b> <i>με</i> Διατήρηση της ισορροπίας C και N, όπου εισροές $\geq$ εκροές	<b>Κατεύθυνση και αλλαγή της οργανικής ουσίας στο χρόνο</b> Οπτική εκτίμηση από το χρώμα ή χημική ανάλυση
<b>Ελαχιστοποίηση της διάβρωσης</b> <i>με</i> Κατεργασία διατήρησης και εδαφοκάλυψη	<b>Οπτικοί:</b> χαντάκια, σκόνη, κ.λπ. Ιδιότητες της εδαφικής επιφάνειας: Βάθος, οργ. ουσία, ρυθμός διήθησης και % κάλυψη
<b>Αντικατάσταση μη ανανεώσιμων με ανανεώσιμες πηγές</b> <i>με</i> Μικρότερη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και χρήση της φυσικής ισορροπίας και ποικιλότητας	<b>Χαρακτηριστικά καλλιέργειας:</b> Απόδοση, περιεχόμενο N, χρώμα, ανάπτυξη ριζών <b>Συμπύεση</b> <b>Νιτρικά στο έδαφος και το νερό</b> <b>Έπλυση-Οξίνιση</b> <b>Εισροές/εκροές</b>
<b>Διαχείριση συνυπάρχει και δεν κυριαρχεί στη φύση</b> <i>με</i> Συγχρονισμό διαθέσιμου N με τις ανάγκες της καλλιέργειας	<b>Χαρακτηριστικά καλλιέργειας:</b> Σοδειά, περιεχόμενο N, χρώμα, ευρωστία / Μακροσκοπική εκτίμηση βλάστησης/εδάφους <b>Νιτρικά στο έδαφος και το νερό</b> <b>Έπλυση-Οξίνιση</b>

### 5.2.3.1 Γεωργικές πρακτικές και βιολογική δραστηριότητα στο έδαφος

Αξίζει να αναφερθούν μερικά πειράματα που έγιναν με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση δύο εντελώς διαφορετικών καθεστώτων διαχείρισης του εδαφικού πόρου (ολοκληρωμένη και συμβατική μέθοδος διαχείρισης) σε σχέση με την ανοργανοποίηση του αζώτου από τους εδαφικούς μικροοργανισμούς αλλά και την επίδραση των διαφορετικών αυτών καθεστώτων διαχείρισης στο σύστημα έδαφος-φυτό. Γενικά, στα πειράματα αυτά το ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης του εδαφικού πόρου διέφερε από το συμβατικό ως προς τα εξής:

- α. ως προς το βάθος κατεργασίας του εδάφους (12-15 cm στο ολοκληρωμένο καθεστώς διαχείρισης του εδαφικού πόρου έναντι 20-25 cm στο συμβατικό),

- β. ως προς τη χρήση γεωργικών φαρμάκων (καθόλου εφαρμογή γεωργικών φαρμάκων στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης),
- γ. ως προς τη λίπανση. Στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης του εδαφικού πόρου έγινε προσθήκη κοπριάς σε συνδυασμό με προσθήκη ανόργανων λιπασμάτων και φυτικών υπολειμμάτων, ενώ στο συμβατικό σύστημα διαχείρισης έγινε μόνο προσθήκη ανόργανου λιπάσματος και φυτικών υπολειμμάτων. Στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης το ανόργανο λίπασμα αντιπροσώπευε το 50-65% της ποσότητας του ανόργανου λιπάσματος που εφαρμόστηκε στο συμβατικό σύστημα, ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας.

Τα δύο συστήματα διαχείρισης του εδαφικού πόρου δοκιμάθηκαν στην Ολλανδία σε τετραετή αμειψισπορά (σιτάρι, ζαχαρότευλα, πατάτες και ανοιξιάτικο κριθάρι). Παρατηρήθηκε ότι η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία του εδάφους αυξήθηκε στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης του εδαφικού πόρου, ενώ αντίθετα μειώθηκε στο συμβατικό (Brussaard κ.ά. 1988, Kooistra κ.ά. 1989).

Επίσης, έγιναν διάφορες μελέτες (Brussaard κ.ά. 1990, Moore κ.ά. 1990, Van Faassen και Lebbink 1990, Moore και De Ruiten 1991, De Ruiten κ.ά. 1993, Lebbink κ.ά. 1994, Van Faassen και Lebbink 1994) σχετικά με τα είδη των μικροοργανισμών του εδάφους και τις βιολογικές τους δραστηριότητες στο έδαφος, σε εδάφη τα οποία διέφεραν ως προς το καθεστώς διαχείρισής τους και κατά συνέπεια διέφεραν και ως προς την περιεκτικότητά τους σε οργανική ουσία. Οι μελέτες αυτές έδειξαν ότι:

- α) το ανόργανο άζωτο ήταν λιγότερο στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης,
- β) η ανοργανοποίηση του αζώτου στα εδάφη σχετίζεται με τον πληθυσμό και τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών του εδάφους άσχετα από το καθεστώς διαχείρισής τους,
- γ) η συνεισφορά των μικροοργανισμών του εδάφους (εκτός των γαιοσκωλήκων) στην ανοργανοποίηση του αζώτου ήταν 25-30%,
- δ) στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης του εδάφους, η παρουσία των γαιοσκωλήκων (γαιοσκώληκες δεν βρέθηκαν στα συμβατικώς καλλιεργούμενα τεμάχια αλλά μόνο στα καλλιεργούμενα με το



- ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης) οδήγησε σε αύξηση του ρυθμού ανοργανοποίησης του αζώτου κατά 40%,
- ε) η αποτελεσματικότητα δέσμευσης του αζώτου από τα φυτά είναι υψηλότερη στα ολοκληρωμένα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα διαχείρισης του εδαφικού πόρου (82 έναντι 72%),
- στ) οι αποδόσεις των καλλιεργούμενων φυτών στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης κυμαίνονταν μεταξύ 89 και 108% των αντιστοίχων ποσοστών στο συμβατικό σύστημα.

### 5.2.3.2 Λίπανση και διατήρηση της εδαφικής ποιότητας

Η απότομη γραμμική αύξηση της χρήσης χημικής λίπανσης τις τέσσερις τελευταίες δεκαετίες (Wild 1993), μαζί με άλλες πρακτικές διαχείρισης της συμβατικής γεωργίας, έχουν σκοπό την αύξηση της παραγωγικής ικανότητας του εδάφους χωρίς να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι συνέπειες που επιφέρουν αυτές οι πρακτικές στην υποβάθμιση των φυσικών πόρων.

Ο σκοπός της χημικής λίπανσης είναι η άρση του περιορισμού, που θέτει η ανεπαρκής παροχή θρεπτικών συστατικών του εδάφους για την αύξηση των φυτών. Τα θρεπτικά στοιχεία που περιέχονται στο έδαφος επαρκούν για μία καλή απόδοση των καλλιεργειών από ένα έως μερικά έτη, αλλά τελικώς η απώλεια τους είναι αναπόφευκτη. Οι ανάγκες λίπανσης αφορούν 14 βασικά στοιχεία, αλλά τα πιο κοινά είναι το άζωτο, ο φωσφόρος και το κάλιο. Τα λιπάσματα αζώτου παρέχονται υπό τη μορφή άνυδρης αμμωνίας, νιτρικής αμμωνίας, ουρίας και σύνθετων λιπασμάτων, που περιέχουν άζωτο και άλλα θρεπτικά στοιχεία (Wild 1993).

Η ύπαρξη των αμμωνιακών αλάτων ως αρχική ή ενδιάμεση ένωση στο έδαφος είναι επιθυμητή στις γεωργικές καλλιέργειες, διότι αρχικά δεσμεύονται στα σωματίδια του εδάφους λόγω του θετικού τους φορτίου και δεν απομακρύνονται εύκολα με έκπλυση. Η επακόλουθη μετατροπή των αμμωνιακών σε νιτρικά άλατα από μικροοργανισμούς του εδάφους ονομάζεται νιτροποίηση. Η νιτροποίηση αποτελεί μια διεργασία του εδάφους αναγκαία για τη θρέψη των φυτών, καθώς τα περισσότερα από αυτά προσλαμβάνουν το άζωτο υπό μορφή νιτρικών. Όταν η λίπανση γίνεται σε ποσότητες, που δεν υπερβαίνουν τις θρεπτικές ανάγκες των φυτών, στη σωστή χρονική στιγμή και

τη σωστή θέση του αγρού, τότε ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στο σύστημα. Αυτό γίνεται, διότι μιμούμαστε έτσι τις αρχές λειτουργίας των φυσικών οικοσυστημάτων, όπου η διεργασία της ανοργανοποίησης (μετατροπή του οργανικού σε ανόργανο άζωτο) συμβαδίζει με εκείνη της πρόσληψης του αζώτου από τα φυτά (Ulrich 1987). Κάτω από τέτοιες συνθήκες, ο κύκλος του αζώτου είναι ουδέτερος, δηλαδή δεν δημιουργείται πλεόνασμα ή έλλειμα κάποιας μορφής αζώτου στο εδαφικό διάλυμα (Helyar 1976).

Όταν αυτές οι δύο διεργασίες δεν είναι συντονισμένες ή συζευγμένες, τότε τα νιτρικά άλατα συσσωρεύονται και οι επακόλουθες χημικές αλλαγές έχουν επιπτώσεις στην ποιότητα του εδάφους. Αλλαγές στο εδαφικό pH προκαλούνται κυρίως από τον ρυθμό νιτροποίησης του αμμωνιακού αζώτου και τον ρυθμό πρόσληψης των νιτρικών από τα φυτά, καθώς επίσης και από την ποσότητα των νιτρικών που χάνονται με την έκπλυση (Patriquin κ.ά. 1993). Η παραγόμενη οξύτητα ( $H^+$ ) κατά τη διάρκεια του σχηματισμού των νιτρικών από αμμωνιακά λιπάσματα εξουδετερώνεται από τα υδροξύλια ( $OH^-$ ), που ελευθερώνονται, όταν τα νιτρικά προσλαμβάνονται από τα φυτά κατά τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο παράγονται. Όταν, όμως, τα νιτρικά χαθούν δια της έκπλυσης πριν προλάβουν τα φυτά να τα ανακτήσουν, τότε μπορεί να προκληθεί οξίνιση του εδάφους. Τα πρωτόνια ( $H^+$ ) που παράγονται κατά τη νιτροποίηση ανταλλάσσονται με κατιόντα βάσεων (Ca, Mg, K, Na) τα οποία γίνονται διαλυτά και χάνονται, διότι συμπαρασύρονται με τα εκπλυόμενα νιτρικά. Το αποτέλεσμα είναι οξίνιση του εδάφους (Ulrich 1987) και για αυτούς τους λόγους η έκπλυση των νιτρικών αναφέρεται από τους Coote κ.ά. (1989) ως ένας από τους κυριότερους παράγοντες, που συνεισφέρει στην οξίνιση του εδάφους σε τυπικά αγροοικοσυστήματα.

Οι περισσότερες από αυτές τις μεμονωμένες διεργασίες, που επηρεάζουν την οξίνιση του εδάφους, την έκπλυση των νιτρικών και των κατιόντων είναι γνωστές εδώ και αρκετά χρόνια. Όμως, οι αλληλεπιδράσεις αυτών των διεργασιών στον χώρο και τον χρόνο και η διασύνδεσή τους με τον κύκλο του αζώτου σε επίπεδο οικοσυστήματος, έχουν βοηθήσει στη βαθύτερη κατανόηση των διαχειριστικών πρακτικών και στην κατασκευή ομοιωμάτων για την επιτυχέστερη πρόβλεψη των επιδράσεων της όξινης βροχής και των αναγκών ασβέστωσης του εδάφους. Πολλές γεωργικές δραστηριότητες

αποσυντονίζουν το εδαφικό και το φυτικό τμήμα του κύκλου του αζώτου, ενώ άλλες βοηθούν στην επιτάχυνση της σύζευξης αυτών των δύο διεργασιών. Για παράδειγμα, η συγκομιδή των καλλιεργειών προκαλεί προσωρινές ανωμαλίες στον κύκλο του αζώτου, διότι σταματά την πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά. Καλλιέργειες αμέσως μετά τη συγκομιδή (relay cropping, catch cropping, cover cropping) λειτουργούν έτσι ώστε να επαναφέρουν τη σύζευξη του κύκλου του N μεταξύ του εδάφους και του φυτού και επομένως, προσδίδουν σταθερότητα στην ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους.

Ο κύκλος των θρεπτικών στοιχείων-πρωτονίων, η σύζευξη των κύκλων των θρεπτικών στοιχείων και η σταθερή κατάσταση του εδαφικού διαλύματος, εμφανίζονται σήμερα ως σημαντικές αρχές σε επίπεδο οικοσυστήματος, οι οποίες δεν έχουν ακόμη αναγνωρισθεί επαρκώς μέσω της βιβλιογραφίας. Έχουν όμως ήδη ενσωματωθεί ως αρχές για την εκτίμηση και ερμηνεία της ποιότητας του εδάφους (Σταματιάδης και Ζαλίδης 1999).

### **5.2.3.3 Δείκτες των συνεπειών της υπέρμετρης λίπανσης στην ποιότητα του εδάφους**

Η αποτελεσματικότητα των διαφόρων πρακτικών για τη διατήρηση και την παροχή N στο έδαφος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τοπικούς, περιβαλλοντικούς και διαχειριστικούς παράγοντες. Ο έλεγχος της σύζευξης του συστήματος εδάφους-φυτού σε επίπεδο εδαφικού διαλύματος γίνεται με απλές τεχνικές στον αγρό από αγρότες και ερευνητές με σκοπό να εξασφαλισθούν επαρκείς ποσότητες θρεπτικών στοιχείων για τις καλλιέργειες, όταν αυτές τα έχουν ανάγκη, ενώ ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες τους, η οξίνιση του εδάφους και η δαπάνη της εφαρμογής των λιπασμάτων. Αυτές οι τεχνικές είναι η μέτρηση του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των νιτρικών με φορητές και σχετικά φθηνές συσκευές. Οι ιδιότητες αυτές είναι δείκτες της χημικής κατάστασης του εδάφους και όταν προσδιορίζονται ταυτόχρονα μας δίνουν μια ένδειξη των επιδράσεων των διαχειριστικών πρακτικών και των συστημάτων καλλιέργειας στην ποιότητα του εδάφους. Με άλλα λόγια, αυτές οι μεταβλητές δίνουν πολύτιμη

πληροφόρηση για την κατάσταση του εδάφους να στηρίξει την αύξηση των φυτών και την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων σε σχέση με την παραγωγή τροφής και την ποιότητα του νερού και του αέρα.

Η οξύτητα του εδάφους ή pH είναι ένα μέτρο της ενεργότητας των ιόντων του υδρογόνου στο εδαφικό διάλυμα. Η τιμή του pH επηρεάζεται από παράγοντες σχηματισμού του εδάφους, την εποχή του έτους, τον τρόπο καλλιέργειας, τη χρήση αμμωνιακών λιπασμάτων, την όξινη βροχή, την προσθήκη κοπριάς και αστικών αποβλήτων, την οργανική ουσία και τη βιολογική δραστηριότητα του εδάφους. Το pH, σε εύρος τιμών από 4 έως 8, επηρεάζει τη διαθεσιμότητα και την τοξικότητα πολλών χημικών στοιχείων στα φυτά και τους μικροοργανισμούς. Η απόδοση των καλλιεργειών ποικίλλει πολύ ανάλογα με τις τιμές του pH. Επίσης, το pH επηρεάζει τη σχετική κυριαρχία και δραστηριότητα διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων, την αποικοδόμηση οργανικών ενώσεων και την έκλυση μετατροπή διαφόρων αερίων (Smith και Doran 1996). Η διεργασία νιτροποίησης στο έδαφος συντελείται κυρίως από αερόβια βακτήρια, τα οποία είναι δραστήρια μεταξύ pH 6,5 και 8. Σε τιμές pH κάτω από 5,5 με 6 η νιτροποίηση μειώνεται δραστικά στα περισσότερα εδάφη. Η προσθήκη μεγάλης ποσότητας αμμωνιακών λιπασμάτων σε ελαφρώς όξινα εδάφη μπορεί να μειώσει την τιμή του pH κατά μια μονάδα λόγω της νιτροποίησης σε μια περίοδο 3 έως 4 εβδομάδων. Μια τέτοια μείωση του pH μπορεί να επιδράσει αρνητικά στην απόδοση των καλλιεργειών, την αποτελεσματικότητα των ζιζανιοκτόνων και την αποικοδομητική ικανότητα του εδάφους. Το ίδιο μπορεί να συμβεί με την προσθήκη ουρίας, μετά όμως από μια αρχική ύψωση του pH τις πρώτες 10 ημέρες περίπου. Η υδρόλυση της ουρίας μπορεί να υψώσει το pH πάνω από το 8 σε ουδέτερα ή ελαφρώς αλκαλικά εδάφη και να περιορίσει την νιτροποίηση, να οδηγήσει σε απώλεια N με μορφή αμμωνίας και σε συσσώρευση νιτρικών ιόντων. Σε καλλιέργειες σιτηρών στον Καναδά, η προσθήκη μεγάλων ποσοτήτων άνυδρης αμμωνίας και ουρίας (90 έως 180 kg N/ha) επέφερε τελικά οξίνιση του εδάφους (Bouman κ.ά. 1995). Η οξίνιση αυτή, όμως, μειώθηκε κατά πολύ όταν συγχρονίσθηκε η λίπανση με τις ανάγκες αζώτου για την καλλιέργεια (45 kg N/ha).

Βεβαίως, τα πρωτόνια ( $H^+$ ) που παράγονται λόγω της νιτροποίησης, εξουδετερώνονται από τη ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους έως ότου αυτή

εξαντληθεί, οπότε το pH αρχίζει να πέφτει σταθερά. Στην περίπτωση καλλιεργειών σιτηρών στον Δ. Καναδά, το εδαφικό pH έχει πέσει λιγότερο από μια μονάδα παρά την τακτική χρήση αμμωνιακού αζώτου για περισσότερο από 30 έτη. Αυτή η μικρή πτώση και μεν δείχνει τη μεγάλη ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους, αλλά μακροπρόθεσμα αναμένονται πιο γρήγορες αλλαγές του pH καθώς η ρυθμιστική ικανότητα σταδιακά μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα ανάκαμψης του εδάφους.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο της ικανότητας του εδαφικού διαλύματος να άγει ηλεκτρισμό και έχει σχέση με το σύνολο των ηλεκτρολυτών στο εδαφικό διάλυμα. Η αγωγιμότητα χρησιμοποιείται γενικά για τον προσδιορισμό της αλατότητας του εδάφους, αλλά είναι επίσης ένα μέτρο των διαλυτών θρεπτικών ενώσεων (ανιόντων και κατιόντων). Εντός ενός συγκεκριμένου εύρους, ενδιάμεσες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι δείκτες της πλούσιας περιεκτικότητας του εδαφικού διαλύματος σε διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά για τα φυτά, χαμηλές τιμές είναι δείκτες ενός φτωχού σε θρεπτικά συστατικά και δομικά ασταθούς εδάφους, ενώ υψηλές τιμές είναι δείκτες προβλημάτων αλατότητας. Η αλατότητα μπορεί να επηρεάσει σοβαρά τις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες και διεργασίες του εδάφους. Η ανοχή των μικροοργανισμών ποικίλλει με τα βακτήρια να είναι τα πιο ευαίσθητα σε αλλαγές της αλατότητας. Ως εκ τούτου, οι βακτηριακές διεργασίες της νιτροποίησης και απονιτροποίησης είναι πολύ ευαίσθητες στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους και επηρεάζονται πολύ σε εύρος τιμών 0,6 έως 2,5 dS/m (EC<sub>1:1</sub>, σε αιώρημα 1:1 εδάφους-νερού κατά βάρος). Οι Weier κ.ά. (1993) βρήκαν ότι 16 έως 28% των νιτρικών στο έδαφος χάθηκαν δια της απονιτροποίησης, κυρίως ως N<sub>2</sub>O, όταν οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ήταν πάνω από 1,5-2,0 dS/m και οφείλονταν στην υψηλή συγκέντρωση των νιτρικών. Η σχέση της απονιτροποίησης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας φαίνεται ότι έχει επιπτώσεις στη σχέση της ποιότητας του εδάφους με την ποιότητα του αέρα και των υδάτων.

Η ανθεκτικότητα των καλλιεργειών στην αλατότητα ποικίλλει επίσης (Πίνακας 5.5). Για παράδειγμα, μια τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας 3 dS/m (EC<sub>1:1</sub>) αντιπροσωπεύει χαμηλή ποιότητα του εδάφους για τα φασόλια, τα περισσότερα όσπρια, τον αραβόσιτο, την πιπεριά, τις πατάτες, το ρύζι και τις τομάτες, αλλά αντιπροσωπεύει μια αποδεκτή ποιότητα για τις καλλιέργειες

ζαχαρότευτλων, κριθαριού, βαμβακιού και σιταριού. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετράται σε συνδυασμό με το pH, διότι αποδεκτές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορούν να βρεθούν σε όξινα εδάφη, τα οποία δεν είναι κατάλληλα για την αύξηση των φυτών. Η ερμηνεία των τιμών της αγωγιμότητας, όμως, που αφορά άλλες λειτουργίες του εδάφους μπορεί να είναι διαφορετική από εκείνες της παραγωγικότητας. Για παράδειγμα, μια τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC<sub>1:1</sub>) 1,5 dS/m δείχνει μια καλή ποιότητα του εδάφους ως προς τη φυτική παραγωγή, αλλά εάν αυτή η αγωγιμότητα οφείλεται σε συσσώρευση νιτρικών αλάτων (περίπου 210 mg/l N), τότε υπάρχει κίνδυνος έκπλυσης των νιτρικών και ρύπανσης των υδάτων ή συσσώρευσης αυτών στους φυτικούς ιστούς και απειλής της υγείας των ζώων και των ανθρώπων (Smith και Doran 1996).

**Πίνακας 5.5.** Ανθεκτικότητα των γεωργικών καλλιεργειών στην αλατότητα (Smith και Doran 1996).

Είδος φυτού	Ανώτατο Οριο Ηλεκτρ. Αγωγιμότητας		Μείωση απόδοσης ανα μονάδα EC πάνω από το όριο
	EC <sub>e</sub>	EC <sub>1:1</sub>	
	dS/m ή mmhos/cm		%
Κριθάρι ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	8,0	4,5-5,7	5,0
Βαμβάκι ( <i>Gossypium hirsutum</i> L.)	7,7	4,3-5,5	5,2
Ζαχαρότευτλο ( <i>Beta vulgaris</i> L.)	7,0	3,9-5,0	5,9
Σιτάρι ( <i>Triticum aestivum</i> L.)	6,0	3,4-4,3	7,1
Σόγια ( <i>Glycine max</i> (L.) Merr.)	5,0	2,8-3,6	20,0
Φυστίκι ( <i>Arachis hypogaea</i> L.)	3,2	1,8-2,3	29,0
Ρύζι ( <i>Oryza sativa</i> L.)	3,0	1,7-2,1	12,0
Τομάτα ( <i>Lycopersicon esculentum</i> L.)	2,5	1,4-1,8	9,9
Μηδική ( <i>Medicago sativa</i> L.)	2,0	1,1-1,4	7,3
Πατάτα ( <i>Solanum tuberosum</i> L.)	1,7	1,0-1,2	12,0
Πιπεριά ( <i>Capsicum annuum</i> L.)	1,5	0,8-1,1	14,0
Φασόλια ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	1,0	0,6-0,7	19,0

Η μέτρηση της συγκέντρωσης των νιτρικών επιτρέπει την πληρέστερη ερμηνεία των μετρήσεων του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σχέση με την ποιότητα του εδάφους. Επιπλέον, το νιτρικό άζωτο παρέχει άμεση πληροφόρηση για τις ανάγκες θρέψης των καλλιεργειών και τον κίνδυνο έκπλυσης των νιτρικών. Η λίπανση καλλιέργειας μπρόκολου με νιτρική αμμωνία (165 kg N/ha) πριν από τη μεταφύτευση στον αγρό οδήγησε στη συσσώρευση νιτρικού N στο έδαφος σε επίπεδα 2 με 10 φορές υψηλότερα από εκείνα που χρειάζεται το μπρόκολο κατά την περίοδο μέγιστης αύξησης (Stamatiadis κ.ά. 1999). Αυτές οι μεγάλες ποσότητες διαθέσιμου αζώτου σε

συνδυασμό με τη γρήγορη διήθηση του νερού και τη χαμηλή ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους, όπως προκύπτει από την δραστική μείωση του pH, ήταν δείκτες του κινδύνου οξίνισης του εδάφους και του κινδύνου ρύπανσης των υπογείων υδάτων δια της έκπλυσης των νιτρικών.

Η συνιστώμενη μέτρηση στο έδαφος για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας αζώτου για το καλαμπόκι είναι ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των νιτρικών σε βάθος 30 cm όταν τα φυτά έχουν ύψος 15 με 30 cm (pre-sidedress soil nitrate test ή PSNT), μερικές εβδομάδες πριν από τη μέγιστη αύξησή τους. Ο χρόνος δειγματοληψίας καθορίζεται έτσι ώστε η ύπαρξη ή μη νιτρικών να αντανακλά στη σύζευξη των διεργασιών νιτροποίησης και πρόσληψης αζώτου από τα φυτά. Για τον λόγο αυτό, η δειγματοληψία δεν γίνεται πριν τη φύτευση, αλλά σε στάδιο πλήρους εγκαθίδρυσης των φυτών (Magdoff κ.ά. 1990). Για άλλες καλλιέργειες, είναι σπουδαίο να γνωρίζουμε τις διαχρονικές ανάγκες του φυτού σε άζωτο και να προσαρμόζουμε ανάλογα τον χρόνο δειγματοληψίας. Επομένως, η δοκιμή PSNT έχει τη δυνατότητα να προβλέψει αυξήσεις στη διαθεσιμότητα αζώτου που προέρχονται από την ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας του εδάφους και άλλες πηγές οργανικού αζώτου περιλαμβανομένης της κοπριάς. Επίσης, αυτή η δοκιμή μετρά την απώλεια του διαθέσιμου αζώτου λόγω έκπλυσης ή απονιτροποίησης των νιτρικών, μέχρι τη στιγμή της δειγματοληψίας. Υπάρχει μια αξιοσημείωτη ομοφωνία για το ότι συγκεντρώσεις του νιτρικού αζώτου στο έδαφος που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 25 mg/kg (σύμφωνα με τη δοκιμή PSNT), είναι επαρκείς για τις ανάγκες του καλαμποκιού σε άζωτο (Bundy και Meisinger 1994). Οι ανάγκες της καλλιέργειας σε άζωτο είναι ακόμη μικρότερες μετά την προσθήκη κοπριάς και αντιστοιχούν σε περίπου 16 mg/kg νιτρικού αζώτου (Practical Farmer 1997).

#### **5.2.4 Οι τεχνητοί υγρότοποι ως μέσο διατήρησης της εδαφικής ποιότητας**

Οι πρώτες συντονισμένες προσπάθειες κατασκευής υγροτοπικών οικοσυστημάτων από τον άνθρωπο, άρχισαν κατά τη δεκαετία του '70. Οι υγρότοποι σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σήμερα για τέσσερις κυρίως λόγους: 1) την επεξεργασία λυμάτων και τη βελτίωση της ποιότητας νερών, 2)

την αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων και την επαναπλήρωση υπόγειων υδροφορέων, 3) την εκμετάλλευσή τους για πρωτογενή παραγωγή και 4) την αναπλήρωση των υγροτόπων που χάνονται από την επέκταση της γεωργίας και των κατοικημένων περιοχών (Kadlec και Knight 1996). Ιδιαίτερη σημασία για τη διατήρηση της ποιότητας των εδαφικών πόρων έχουν οι υγρότοποι που κατασκευάζονται για τους τρεις πρώτους λόγους.

Οι τεχνητοί υγρότοποι για επεξεργασία λυμάτων χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση ρύπων που προέρχονται, είτε από σημειακές, είτε από μη σημειακές πηγές ρύπανσης. Με άλλα λόγια, τα οικοσυστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για τη μείωση του ρυπαντικού φορτίου αστικών, βιομηχανικών και γεωργικών λυμάτων καθώς και νερών απορροής. Με τη χρήση των τεχνητών υγροτόπων για επεξεργασία λυμάτων προστατεύονται οι εδαφικοί πόροι μιας περιοχής από τη διάθεση στην επιφάνεια του εδάφους ανεπεξέργαστων λυμάτων, με ανόργανους και οργανικούς ρύπους, και άρα διατηρείται η εδαφική υγεία. Σήμερα εκτιμάται ότι πάνω από 1000 συστήματα τεχνητών υγροτόπων για επεξεργασία λυμάτων λειτουργούν παγκοσμίως. Τουλάχιστον τα μισά από αυτά βρίσκονται στις ΗΠΑ (Reed κ.ά. 1995).

Η κατασκευή και λειτουργία τους βασίζεται στον κατάλληλο συνδυασμό των δομικών στοιχείων των υγροτόπων δηλαδή του εδάφους, του νερού και της βλάστησης, με σκοπό τη δημιουργία εκείνων των λειτουργιών, που είναι υπεύθυνες για τη βελτίωση της ποιότητας του νερού που διέρχεται από τους υγροτόπους (Ζαλίδης κ.ά. 1998). Οι λειτουργίες αυτές είναι: α) η απομάκρυνση και ο μετασχηματισμός των θρεπτικών ουσιών και β) η συγκράτηση ιζημάτων και τοξικών ουσιών. Οι λειτουργίες αυτές είναι αποτέλεσμα ενός συνόλου επιμέρους φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν στους υγροτόπους (Πίνακας 5.6) και είναι υπεύθυνες για τη βελτίωση της ποιότητας του νερού που διέρχεται από αυτούς και άρα για τη διατήρηση της εδαφικής ποιότητας στην κατάντη του υγροτόπου περιοχή.



**Πίνακας 5.6.** Διεργασίες μείωσης ρυπαντικού φορτίου στους τεχνητούς Υγροτόπους (Kadlec και Knight 1996)

<b>ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΡΥΠΑΝΤΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ</b>		
<b>Φυσικές</b>	<b>Χημικές</b>	<b>Βιολογικές</b>
Καθίζηση	Κατακρήμνιση	Βακτηριακός μεταβολισμός
Διήθηση	Προσρόφηση	Μεταβολισμός των φυτών
Προσρόφηση	Υδρόλυση	Πρόσληψη από τα φυτά
Εξαέρωση	Οξειδωση - αναγωγή	Αποικοδόμηση φυτών
	Φωτοχημικές αντιδράσεις	

Οι υγροτόποι που κατασκευάζονται για την αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων και την επαναπλήρωση υπόγειων υδροφορέων έχουν επίσης μεγάλη σημασία για τη διατήρηση της ποιότητας των εδαφών. Η σημασία τους έγκειται σε τρεις κυρίως λόγους:

- μειώνουν την παροχή των νερών απορροής και συγκρατούν μεγάλες ποσότητες από αυτά, κατά συνέπεια οι περιοχές κατάντη του υγροτόπου διατρέχουν μικρότερο κίνδυνο διάβρωσης από το νερό,
- συγκρατούν τα προϊόντα διάβρωσης που παρασύρουν τα νερά απορροής από περιοχές ανάντη του υγροτόπου. Τα προϊόντα διάβρωσης συχνά περιέχουν, εκτός από αδρανή υλικά, και ρύπους ανάλογους με τη χρήση γης της περιοχής από όπου προέρχονται (για παράδειγμα εάν προέρχονται από γεωργικές εκτάσεις πιθανώς να έχουν υπολείμματα γεωργικών φαρμάκων και αυξημένες συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών),
- επαναπληρώνουν τους υπόγειους υδροφορείς. Η λειτουργία αυτή έχει θετικές συνέπειες στην παραγωγικότητα των εδαφών αφού με αύξηση του αποθέματος νερού και συνετή χρήση αυτού αυξάνεται η παραγωγή στις καλλιεργούμενες εκτάσεις. Η λειτουργία της επαναπλήρωσης των υπόγειων υδροφορέων έχει ιδιαίτερη σημασία όταν πρόκειται για υδροφορείς που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα. Η ενίσχυση αυτών των υδροφορέων με νερό καλής ποιότητας εμποδίζει τη διείσδυση θαλάσσιου νερού στους υδροφορείς. Κατά συνέπεια δεν αλλοιώνεται η

ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται για άρδευση από τα άλατα και αποφεύγεται ο κίνδυνος αλάτωσης των εδαφών λόγω άρδευσης με νερό υψηλής αλατότητας.

Στην περίπτωση των υγροτόπων που κατασκευάζονται για πρωτογενή παραγωγή, τα οφέλη για τα εδάφη της περιοχής προέρχονται τόσο από τη διατήρηση της ποιότητάς τους όσο και από τη βελτίωση αυτής. Οι υγρότοποι μπορούν να προσφέρουν εναλλακτικό εισόδημα στους κατοίκους της περιοχής (αλιεία, κτηνοτροφία κ.λπ.). Το αποτέλεσμα είναι ευεργετικό για τα εδάφη της περιοχής αφού πλέον το εισόδημα των κατοίκων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωργική παραγωγή και δεν είναι αναγκασμένοι να εντατικοποιήσουν τις γεωργικές τους πρακτικές έως την τελική εξάντληση και υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών. Παράλληλα, ένα πιθανό σύστημα διαχείρισης των εδαφών της περιοχής με εναλλαγές των χρήσεων γης, για παράδειγμα καλλιέργεια εδαφών για ορισμένα έτη και κατόπιν εναλλαγή με υγρολίβαδα για κτηνοτροφική χρήση, θα μπορούσε να βελτιώσει την ποιότητα των εδαφών της περιοχής με αύξηση της οργανικής ουσίας και εμπλουτισμό των εδαφών με θρεπτικά στοιχεία.

Η αναπλήρωση των υγροτοπικών εκτάσεων που αποξηράνθηκαν συνήθως αποκαθιστά πολλαπλές λειτουργίες. Αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της αειφορικής διαχείρισης των λεκανών απορροής και βοηθάει στη διατήρηση της εδαφικής ποιότητας σε όλη την έκταση της λεκάνης.

Από τα προηγούμενα είναι προφανές ότι οι τεχνητοί υγρότοποι δίνουν αποτελεσματικές λύσεις σε προβλήματα διαχείρισης όχι μόνο υδάτινων, όπως ήταν γνωστό μέχρι σήμερα, άλλα και εδαφικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Οι λύσεις αυτές δεν είναι ευεργετικές μόνο για το περιβάλλον, αλλά συνοδεύονται και από άμεσα και έμμεσα οικονομικά οφέλη για τους χρήστες, γεγονός που ευνοεί την υιοθέτησή τους σε μελλοντικά σχέδια αειφορικής διαχείρισης των φυσικών πόρων.

### **5.3 Αποκατάσταση εδαφικής υγείας**

Ως υποβάθμιση των εδαφικών οικοσυστημάτων χαρακτηρίζεται το σύνολο των επιπτώσεων στις διάφορες εδαφικές λειτουργίες. Η

αποκατάσταση των υποβαθμισμένων εδαφικών οικοσυστημάτων αναφέρεται στη μείωση ή εξάλειψη αυτών των επιπτώσεων, έτσι ώστε να επανέλθει η εδαφική υγεία. Η αποκατάσταση της εδαφικής υγείας κατά ανάλογο τρόπο με την αποκατάσταση της ανθρώπινης υγείας προϋποθέτει αρχικά την απομάκρυνση των αιτιών της υποβάθμισης και στη συνέχεια τους απαραίτητους χειρισμούς, ώστε να εξλειφθούν οι επιπτώσεις που προκλήθηκαν. Από καθαρά πρακτική άποψη, ένα σχέδιο αποκατάστασης ενός εδαφικού οικοσυστήματος αποσκοπεί στην αποκατάσταση των λειτουργιών εκείνων που είναι απαραίτητες για μία δεδομένη χρήση γης. Επίσης, ειδικά στην περίπτωση των χημικώς υποβαθμισμένων εδαφικών οικοσυστημάτων, ένα ολοκληρωμένο σχέδιο αποκατάστασης των λειτουργιών αποσκοπεί στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων όχι μόνο της εδαφικής ρύπανσης, αλλά και της μετακίνησης είτε του εδάφους (διάβρωση) είτε των ρύπων (επιφανειακή απορροή και έκπλυση) (Logan 1992).

### **5.3.1 Αρχές αποκατάστασης εδαφικών πόρων**

Στα πλαίσια της αειφορικής ανάπτυξης, η υποβάθμιση ή η πλήρης αναστολή των λειτουργιών των εδαφικών οικοσυστημάτων, απαιτεί την “ανόρθωση” (rehabilitation) ή την πλήρη “αποκατάστασή” (restoration) τους. Έτσι, η αειφορική ανόρθωση ή αποκατάσταση των λειτουργιών των εδαφικών οικοσυστημάτων περιλαμβάνει :

- i) την αναγνώριση των οικολογικά, κοινωνικά και οικονομικά επιθυμητών αγαθών, και υπηρεσιών των εδαφικών οικοσυστημάτων,
- ii) τον προσδιορισμό των δομικών και λειτουργικών στοιχείων των εδαφικών οικοσυστημάτων, που είναι απαραίτητα για την παροχή των παραπάνω αγαθών, και υπηρεσιών σε μια αυτοσυντηρούμενη (self - sustained) κατάσταση,
- iii) τη διευκόλυνση των εδαφικών οικοσυστημάτων να ανακάμψουν σε μια αυτοσυντηρούμενη κατάσταση, μέσω ανάλογου χειρισμού των φυσικών, βιολογικών, χημικών και κοινωνικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής του υπό αποκατάσταση εδάφους.

Με βάση τον ορισμό αυτόν, ένα αποκατεστημένο εδαφικό οικοσύστημα δεν θα έχει απαραίτητα τα ίδια κυρίαρχα είδη, την ίδια βιοποικιλότητα, τους

ίδιους ρυθμούς παραγωγής και ανακύκλωσης θρεπτικών στοιχείων μ' ένα παρόμοιο αλλά αδιατάρακτο χερσαίο εδαφικό οικοσύστημα. Σκοπός της αποκατάστασης δεν είναι η επαναφορά του συστήματος στην κατάσταση, που βρισκόταν πριν την υποβάθμισή του, αλλά η δημιουργία ενός αυτοσυντηρούμενου συστήματος, όπως αυτό υπαγορεύεται από τις οικολογικές, κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες της περιοχής.

Η αποκατάσταση των λειτουργιών των εδαφικών οικοσυστημάτων στηρίζεται στην έννοια της αειφορίας, όπως αυτή ορίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η αειφορία απαιτεί την εξισορρόπηση των οικολογικών, κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων, που επιδρούν στη λήψη αποφάσεων αποκατάστασης.

Οι οικολογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την αποκατάσταση των εδαφικών λειτουργιών και μέσω αυτών την αποκατάσταση της εδαφικής ποιότητας.

Οι κοινωνικοί παράγοντες αναφέρονται στην ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα ζωής, τη δίκαιη απολαβή των αγαθών που προσφέρει το έδαφος και την ισότιμη συμμετοχή όλων των κοινωνικών φορέων στην απολαβή των αγαθών αυτών.

Οι οικονομικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την οικονομική ανάπτυξη, την οικονομικότητα και παραλλακτικότητα των προτεινόμενων χρήσεων των εδαφικών οικοσυστημάτων μετά την αποκατάστασή τους, τον ανταγωνισμό των παρεχόμενων από τα εδαφικά οικοσυστήματα αγαθών και υπηρεσιών σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, καθώς και τις εφικτούς κόστους οικονομικές πολιτικές αποκατάστασης.

Η πορεία της αειφορικής αποκατάστασης των εδαφικών λειτουργιών, περιλαμβάνει :

**1. την περιγραφή του προβλήματος.** Συγκεκριμένα, περιγράφεται η παρούσα κατάσταση από οικολογική, κοινωνική και οικονομική άποψη, καθώς και οι πιθανές αιτίες που την προκάλεσαν. Επίσης, γίνεται διάγνωση των επιπτώσεων της υπάρχουσας κατάστασης στην υγεία του πληθυσμού, την οικολογική ισορροπία, και την περαιτέρω κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη. Επιπλέον, παρουσιάζεται οικονομικός υπολογισμός των επιπτώσεων της υπάρχουσας κατάστασης, εφόσον αυτές μπορούν να υπολογιστούν

οικονομικά, καθώς και απλή αρίθμηση των επιπτώσεων που δεν μπορούν να εκφραστούν ποσοτικά.

**2. τις προτεινόμενες λύσεις.** Προκύπτουν μέσα από την ταυτόχρονη σύνθεση των οικολογικών, κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων του προβλήματος της αποκατάστασης των λειτουργιών των εδαφικών οικοσυστημάτων. Κάθε ολοκληρωμένη προτεινόμενη λύση φανερώνει τις πιθανές θετικές ή αρνητικές οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές συνέπειες. Επίσης καταδεικνύει τις ανάγκες και τα μέτρα, που απαιτούνται για την πραγματοποίησή της και αφορούν αλλαγές στην τεχνολογία, τις δυνατότητες παραγωγής, το εργατικό δυναμικό, τις επενδύσεις, τα νομοθετικά και οικονομικά μέτρα, καθώς και το κόστος όλων αυτών.

**3. το σύστημα παρακολούθησης (monitoring system) και το σχέδιο διαχείρισης (management) του χερσαίου οικοσυστήματος μετά την αποκατάστασή του.** Για την αξιολόγηση της επιτυχίας της εφαρμογής κάποιου προγράμματος αποκατάστασης ενός υποβαθμισμένου εδαφικού οικοσυστήματος, αλλά και τη μετέπειτα ορθολογική διαχείρισή του, απαιτείται ο καθορισμός φυσικών, χημικών και βιολογικών δεικτών που συνδέονται άμεσα με τη δομή και τη λειτουργία του συστήματος. Επίσης, απαιτείται ένα σύστημα παρακολούθησης των δεικτών. Τέλος, μετά την αποκατάσταση του εδαφικού οικοσυστήματος είναι απαραίτητη η εκπόνηση ενός διαχειριστικού σχεδίου, το οποίο λαμβάνει υπόψη οικολογικές και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους με σκοπό τη διατήρηση της αειφορίας του οικοσυστήματος.

Συμπερασματικά, με βάση τις αρχές της αειφορίας οι σκοποί του προγράμματος αποκατάστασης ενός εδαφικού οικοσυστήματος είναι στενά συνυφασμένοι με τις λειτουργίες, που έχουν υποβαθμισθεί, και γεννούν κοινωνικά οφέλη, τα οποία βασίζονται σε οικολογικά γνωρίσματα συμβατά με τις κοινωνικοοικονομικές απαιτήσεις. Η επίτευξη των σκοπών αυτών ελέγχεται μέσω της διαδικασίας της ανάδρασης, απαραίτητο στάδιο ενός διαχειριστικού σχεδίου έτσι ώστε να είναι δυνατή η υλοποίησή τους σε επίπεδο πολιτικών αποφάσεων.

### 5.3.2 Τεχνολογίες αποκατάστασης χημικώς υποβαθμισμένων εδαφών

Η αποκατάσταση των χημικώς υποβαθμισμένων εδαφών αναφέρεται στις ενέργειες, που αποσκοπούν στην ανόρθωση των υποβαθμισμένων λειτουργιών με τη χρήση επικουρικών εισροών (φυσικών, χημικών, βιολογικών) στο εδαφικό οικοσύστημα. Οι τεχνολογίες αποκατάστασης διακρίνονται σε: α) **μηχανικές**, όταν οι επικουρικές εισροές είναι φυσικές (απομάκρυνση εδαφών) ή χημικές (κινητοποίηση – ακινητοποίηση ρύπων με χρήση χημικών ουσιών) και β) **βιολογικές**, όταν οι εισροές είναι βακτήρια, ένζυμα, φυτά. Τόσο οι μηχανικές όσο και οι βιολογικές τεχνολογίες εφαρμόζονται επί τόπου (in-situ) και εκτός τόπου (ex-situ).

Οι επιτόπου τεχνολογίες αποκατάστασης υποβαθμισμένων εδαφών εφαρμόζονται στο ίδιο το υποβαθμισμένο έδαφος και έχουν ως σκοπό να προκαλούν όσο το δυνατό μικρότερη διαταραχή στο εδαφικό οικοσύστημα. Κατά την επιτόπου εφαρμογή των διάφορων τεχνικών αποκατάστασης των υποβαθμισμένων εδαφών λαμβάνουμε πάντα υπόψη μας τα εξής (Stief 1981):

1. οι ρύποι στη ρυπασμένη εδαφική μάζα παρουσιάζουν οριζόντια ή κατακόρυφη κατανομή,
2. στη ρυπασμένη εδαφική μάζα συνήθως είναι παρούσα ποικιλία ρύπων,
3. η εφαρμογή των διάφορων επιτόπου τεχνολογιών αποκατάστασης τις περισσότερες φορές απαιτεί την έγχυση διαφόρων ουσιών στο έδαφος, με σκοπό την εκδήλωση κάποιων επιθυμητών αντιδράσεων των ρύπων με τις ουσίες αυτές. Το γεγονός αυτό, πολλές φορές έχει ως συνέπεια, εάν δεν ληφθεί μέριμνα, οι ουσίες αυτές να χρησιμοποιούνται σε υπερβολική ποσότητα με άμεσο κίνδυνο ρύπανσης του υπόγειου νερού.

Οι τεχνικές δυσκολίες που προκύπτουν κατά την εφαρμογή των επιτόπου τεχνολογιών αποκατάστασης είναι (Stief 1981):

1. οι διάφοροι περιορισμοί σχετικά με το βάθος της ρυπασμένης εδαφικής μάζας, μέσα στο οποίο εφαρμόζονται οι διάφορες τεχνολογίες επιτόπου αποκατάστασης. Τα συνήθη βάθη στα οποία γίνεται έκχυση των διάφορων ουσιών δεν ξεπερνούν τα 2 m,
2. η απόλυτη βεβαιότητα για την πλήρη επαφή των ρύπων της ρυπασμένης εδαφικής μάζας με τις διάφορες ουσίες, που εκχύνονται σ' αυτήν. Δυο μέθοδοι κυρίως χρησιμοποιούνται προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι οι

ουσίες αυτές φτάνουν στον στόχο τους. Η πρώτη αφορά την εφαρμογή πίεσης πάνω στην επιφάνεια του ρυπασμένου εδάφους (π.χ. τοποθέτηση και μετακίνηση εδάφους με γεραμούς μεγάλων όγκων τσιμέντου πάνω στην επιφάνεια του ρυπασμένου). Η δεύτερη μέθοδος αφορά τη χρήση της τεχνικής της ήλεκτρο - όσμωσης (βλ. παρακάτω),

3. οι πιθανές ανεπιθύμητες αντιδράσεις μεταξύ των ρύπων της ρυπασμένης εδαφικής μάζας και των διαφόρων ουσιών που εκχύθηκαν σ' αυτήν,
4. η φυσική, χημική και βιολογική ετερογένεια της ρυπασμένης εδαφικής μάζας,
5. ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής της επιτόπου τεχνολογίας αποκατάστασης.

Οι εκτός τόπου τεχνολογίες αποκατάστασης απαιτούν την εκσκαφή του εδάφους ή την άντληση του υπόγειου νερού, τα οποία στη συνέχεια υφίστανται επεξεργασία, είτε στην επιφάνεια του εδάφους πάνω ακριβώς από τη ρυπασμένη περιοχή είτε σε κάποια άλλη κατάλληλη για τέτοιες μεταχειρίσεις περιοχή. Οι εκτός τόπου τεχνολογίες αποκατάστασης περιλαμβάνουν την εφαρμογή διάφορων φυσικών, χημικών, μικροβιακών ή και θερμικών τεχνικών στην εκσκαμμένη εδαφική μάζα, με σκοπό τον διαχωρισμό, την καταστροφή, την εξουδετέρωση ή τη σταθεροποίηση των ρύπων της.

Κατά την επανατοποθέτηση της απορρυπασμένης πλέον εδαφικής μάζας, λαμβάνεται σοβαρά υπόψη ο κίνδυνος επαναρρύπανσής της από το ήδη ρυπασμένο υπόγειο νερό. Εξαιρεση αποτελούν οι περιπτώσεις που αυτό έχει ήδη υποστεί κατάλληλη επεξεργασία ή το ύψος της υπόγειας στάθμης (βλέπε παρακάτω) είναι πολύ χαμηλότερο από το βάθος, στο οποίο έφτασε η ρύπανση της εδαφικής μάζας. Η εκσκαφή και η επανατοποθέτηση εφαρμόζεται συνήθως σε εδάφη, που έχουν ρυπανθεί σε μεγάλο βαθμό, αλλά σε μικρή έκταση. Η επανατοποθέτηση του εδάφους γίνεται σε καθορισμένο από πριν χώρο διάθεσης, εφοδιασμένο με προστατευτική επένδυση και του οποίου ελέγχεται η απορροή. Η τεχνική αυτή απομάκρυνσης έχει χρησιμοποιηθεί στο Rotterdam για την απομάκρυνση των ισχυρά ρυπασμένων ιζημάτων του ποταμού Ρήνου (Nijssen 1988).

### 5.3.3 Μηχανικές τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών

Οι μηχανικές τεχνολογίες αποκατάστασης ανάλογα με την επίδραση, που έχουν στη διαλυτότητα και στην κινητοποίηση των ρύπων διακρίνονται στις τεχνολογίες κινητοποίησης και τις τεχνολογίες ακινητοποίησης.

#### A) Μηχανικές τεχνολογίες κινητοποίησης

Έχουν ως σκοπό την αύξηση της διαλυτότητας και την κινητοποίηση των ρύπων οι οποίοι τελικά οδηγούνται έξω από τη ρυπασμένη εδαφική μάζα. Οι τεχνικές απομάκρυνσης (κινητοποίησης) των ρύπων είναι οι εξής: 1) η εκχύλιση των πτητικών οργανικών ενώσεων σε κενό αέρος [Soil Vapor Extraction (SVE)] (Malmanis κ.ά. 1989), 2) η ήλεκτρο - όσμωση (Shapiro κ.ά. 1990), 3) η ήλεκτρο - ακουστική εκχύλιση (Hinchee κ.ά. 1990), 4) ο διαμερισμός της ρυπασμένης εδαφικής μάζας με πεπιεσμένο αέρα και στη συνέχεια η εκχύλιση και η καταλυτική οξειδωση των πτητικών οργανικών ρύπων (Korfiatis 1992), 5) η θερμική προσρόφηση των ρύπων σε χαμηλές θερμοκρασίες 6) η ελεγχόμενη κατακόρυφη έκπλυση των ρύπων του εδάφους με νερό, οξύ, χηλική ένωση, (π.χ. το συνθετικό EDTA), οργανικό διαλύτη (Griffin και Chou 1980) ή άλλο εκχυλιστικό, όπως οι τασενεργές ουσίες (surfactants) (Chawla κ.ά. 1990). Οι έξι αυτές τεχνικές αναλύονται στη συνέχεια ως εξής:

*A1) Τεχνική της Εκχύλισης των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων σε Κενό Αέρος [Soil Vapor Extraction (SVE)].* Η τεχνική αυτή έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία τα 10 τελευταία έτη. Η αρχή λειτουργίας της συνίσταται στη γρήγορη μεταφορά των πτητικών οργανικών ενώσεων από τη στερεά και την υγρή φάση του ρυπασμένου εδάφους, στην αέρια. Αυτό γίνεται με εισαγωγή ρεύματος αέρα στη ρυπασμένη εδαφική μάζα δια μέσου των πόρων της, αφού πρώτα έχει εφαρμοσθεί κενό αέρος κατά μήκος μιας λεπτής εδαφικής τομής (extraction well), έτσι ώστε να επιτευχθεί η εκχύλιση των ατμών. Στη συνέχεια, οι ρυπασμένοι ατμοί αντλούνται έξω από το έδαφος, όπου και υφίστανται επεξεργασία με ενεργό άνθρακα. Οι κυριότεροι παράγοντες, που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της τεχνικής αυτής είναι η κατανομή



των πτητικών οργανικών ρύπων στο έδαφος, οι υδρογεωλογικές ιδιότητες του ρυπασμένου εδάφους καθώς και οι ιδιότητες των πτητικών οργανικών ρύπων.

Η τεχνική αυτή απομάκρυνσης ρύπων από τα εδαφικά οικοσυστήματα εφαρμόζεται για την απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων από μεγάλο όγκο εδάφους ή όταν δεν επαρκεί η βιολογική αποικοδόμηση των ενώσεων αυτών. Επίσης, εφαρμόζεται όταν η πίεση των ατμών των εδαφικών ρύπων είναι μεγαλύτερη από 0,5 mm Hg ή η διαπερατότητα του αέρα στο έδαφος κυμαίνεται μεταξύ  $10^{-5}$  και  $10^{-2}$  cm / sec.

Τα πλεονεκτήματα της επιτόπιας αυτής τεχνικής απομάκρυνσης πτητικών οργανικών ρύπων είναι:

- εγκαθίστανται αμέσως και απαιτεί ελάχιστο μηχανικό εξοπλισμό,
- έχει χαμηλό λειτουργικό κόστος και χαμηλό κόστος συντήρησης,
- τα αποτελέσματά της είναι μόνιμα,
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση εδαφών κάτω από κτίρια ή άλλες κατασκευές.

Οι εφαρμογές της τεχνικής περιορίζονται από παράγοντες όπως:

- οι πτητικοί οργανικοί ρύποι με χαμηλή τάση ατμών δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά,
- η τοξικότητα των ρύπων αυτών δεν μεταβάλλεται,
- η ετερογένεια του εδάφους καθώς και η παρουσία σ' αυτό των κλασμάτων της ιλύος και της αργίλλου αυξάνουν τις επαναλήψεις της εφαρμογής της τεχνικής αυτής.

Επίσης, η τεχνική αυτή έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία και σε εκτός τόπου αποκαταστάσεις χερσαίων οικοσυστημάτων. Στην περίπτωση, αυτή το ρυπασμένο έδαφος σκάβεται και στη συνέχεια τοποθετείται σε σωρούς. Διαμέσου των σωρών αυτών εγκαθίσταται ένα διάτρητο σύστημα σωληνώσεων, η άκρη του οποίου είναι συνδεδεμένη με μια αντλία που προμηθεύει το ρεύμα του αέρα.

Τέλος, η τεχνική εφαρμόζεται και σε αποκαταστάσεις υπόγειων υδροφορέων που έχουν ρυπανθεί με πτητικές οργανικές ενώσεις. Στην περίπτωση αυτή η τεχνική ονομάζεται “διασπορά του αέρα” και ο αέρας εισάγεται κάτω από το στρώμα του υπόγειου υδροφορέα.

A2) *Τεχνική της Ήλεκτρο-Όσμωσης*. Η σχετικά νέα αυτή τεχνική χρησιμεύει στην επιτόπια απομάκρυνση (κινητοποίηση) διαφόρων οργανικών ρύπων και βαρέων μετάλλων από ρυπασμένα εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα. Η αρχή λειτουργίας της συνίσταται στην εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που τοποθετούνται μέσα στο ρυπασμένο έδαφος. Η διαφορά του ηλεκτρικού δυναμικού προκαλεί κίνηση των ρύπων από την άνοδο προς την κάθοδο. Με αυτό τον τρόπο οι διάφοροι οργανικοί ρύποι καθώς και τα βαρέα μέταλλα συλλέγονται και στη συνέχεια υφίστανται επεξεργασία.

A3) *Τεχνική της Ήλεκτρο-Ακουστικής Εκχύλισης*. Η νέα αυτή τεχνική αποτελεί συνδυασμό της δημιουργίας διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού και της χρήσης ακουστικών κυμάτων, τα οποία προάγουν την κινητοποίηση των ακινητοποιημένων (προσροφημένων) οργανικών και ανόργανων ρύπων στα ρυπασμένα εδάφη. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί ακουστικές συχνότητες για τη θέρμανση μεγάλων όγκων ρυπασμένου εδάφους επιτόπου. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου συνίσταται στην εξάτμιση (εξαέρωση) διαφόρων χλωριωμένων οργανικών ρύπων καθώς και αλειφατικών και αρωματικών κλασμάτων ορυκτών καυσίμων, που έχουν ρυπάνει το εδαφικό οικοσύστημα.

A4) *Τεχνική του Διαμερισμού της Ρυπασμένης Εδαφικής Μάζας με Πεπιεσμένο Αέρα και στη συνέχεια Εκχύλιση και Καταλυτική Οξειδωση των Πτητικών Οργανικών Ρύπων*. Η αρχή λειτουργίας της πολύ καινούργιας αυτής τεχνικής συνίσταται στη χρήση αέρα υψηλής πίεσης για τον διαμερισμό των οργανικών ουσιών μεγάλων ρυπασμένων γεωλογικών σχηματισμών με χαμηλή διαπερατότητα. Έτσι διευκολύνεται η εκχύλιση των ατμών των πτητικών οργανικών ενώσεων, οι οποίοι στη συνέχεια συλλέγονται και υφίστανται επεξεργασία με καταλυτική οξειδωση στην επιφάνεια του εδάφους.

A5) *Τεχνική της Θερμικής Προσρόφησης των Ρύπων σε Χαμηλές Θερμοκρασίες*. Η αρχή λειτουργίας της εκτός τόπου αυτής τεχνικής βασίζεται στη χρήση θερμού ρεύματος αέρα για τη θερμική προσρόφηση των ρύπων του εδάφους, σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με την ανακίνηση του ρυπασμένου εδάφους. Με τη διαδικασία αυτή οι ρύποι μεταφέρονται από τη στερεά και την υγρή φάση του εδάφους στο θερμό ρεύμα

αέρα, το οποίο στη συνέχεια υφίσταται επεξεργασία, πριν αφεθεί ελεύθερο στην ατμόσφαιρα. Η μηχανική αυτή τεχνική είναι πολύ αποτελεσματική στην απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων από χημικώς υποβαθμισμένα εδαφικά οικοσυστήματα.

Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής εξαρτάται από το είδος των ρύπων, τις ιδιότητες του ρυπασμένου εδάφους (μηχανική σύσταση, περιεκτικότητα σε υγρασία και οργανική ουσία), τον βαθμό ενσωμάτωσης των ρύπων στην εδαφική μάζα και τη θερμοκρασία του ρεύματος του αέρα.

*A6) Τεχνική του “πλυσίματος ή απόπλυσης του εδάφους” (Soil Washing or Soil Flushing Technology).* Κατά την τεχνική του πλυσίματος του εδάφους (Soil Washing Technology) το ρυπασμένο έδαφος σκάβεται και στη συνέχεια υφίσταται κατεργασία (πλένεται) με νερό και άλλους οργανικούς και ανόργανους διαλύτες για την απομάκρυνση των ρύπων του (Nash και Traver 1989). Η τεχνική της απόπλυσης του εδάφους (Soil Flushing Technology) αποτελείται από την ίδια ακριβώς διαδικασία, με μόνη διαφορά ότι εφαρμόζεται επιτόπου για την απομάκρυνση (κινητοποίηση) οργανικών και ανόργανων ρύπων. Κατά την επιτόπου εφαρμογή της τεχνολογίας απόπλυσης το νερό και οι διάφοροι φορείς εκχύλισης εισάγονται στη ρυπασμένη εδαφική ζώνη και στη συνέχεια το υγρό του πλυσίματος αντλείται έξω από το έδαφος διάμεσου μιας λεπτής κατακόρυφης εδαφικής τομής και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία. Οι πλέον διαδεδομένες εκχυλιστικές ουσίες είναι οι τασινεργές ουσίες (surfactants), οι οποίες έχουν την ικανότητα να προσροφούν τους ρύπους. Επίσης, χρησιμοποιούνται τα όξινα υδατικά διαλύματα, όπως το υδροχλωρικό και το νιτρικό οξύ και τα βασικά διαλύματα, όπως το υδροξείδιο του νατρίου.

## **B) Μηχανικές τεχνολογίες ακινητοποίησης**

Οι μηχανικές τεχνολογίες ακινητοποίησης ονομάζονται επίσης και τεχνολογίες σταθεροποίησης και στερεοποίησης [Stabilization / Solidification (S/S) Technologies] και στοχεύουν στη μείωση της διαλυτότητας και κινητικότητας των ρύπων στο έδαφος. Στις μηχανικές τεχνολογίες ακινητοποίησης περιλαμβάνονται: α) Η τεχνική Σταθεροποίησης /

Στερεοποίησης που βασίζεται στο τσιμέντο (Cement Based S/S), β) Η τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης που βασίζεται στην άσβεστο (Lime Based S/S), γ) Η τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης που βασίζεται σε υλικά αργιλιο-πυριτικής σύστασης (Pozzolanic S/S), δ) Οι Θερμοπλαστικές τεχνικές Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης, ε) Η τεχνική Μικροεγκλειβωτισμού Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης, στ) Η στεγανοποίηση της ρυπασμένης εδαφικής μάζας (in ground macroencapsulation), ζ) Η τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης με οργανικά πολυμερή, η) Η τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης με υαλοποίηση (Vitrification).

*B1) Τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης που Βασίζεται στο Τσιμέντο (Cement Based S/S).* Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην ανάμιξη των σωματιδίων των αποβλήτων με τσιμέντο (portland cement). Στο μίγμα αυτό προστίθεται νερό, εφόσον αυτό δεν βρίσκεται στα απόβλητα, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί επαρκής ενυδάτωση, η οποία είναι απαραίτητη για να "δέσει" το τσιμέντο. Με αυτόν τον τρόπο τα σωματίδια των αποβλήτων ενσωματώνονται με το τσιμέντο και συνήθως υφίστανται αλλαγές των φυσικοχημικών τους ιδιοτήτων. Σε πολλές περιπτώσεις μαζί με το τσιμέντο προστίθενται και μικρές ποσότητες ιπτάμενης τέφρας, Na, Si και μπετονίτη με σκοπό την προαγωγή της διεργασίας σταθεροποίησης και στερεοποίησης.

*B2) Τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης που Βασίζεται στην Άσβεστο (Lime Based S/S).* Η αρχή λειτουργίας της είναι ακριβώς η ίδια με την προηγούμενη, με μόνη διαφορά το γενικά υψηλότερο pH των τελικών προϊόντων, ως αποτέλεσμα της κατεργασίας των αποβλήτων με άσβεστο. Ο όρος άσβεστος είναι ένας γενικός όρος και περιλαμβάνει διάφορες ενώσεις του ασβεστίου. Τα πιο συνηθισμένα προϊόντα ασβέστου, που χρησιμοποιούνται στην πράξη, είναι το υδροξείδιο του ασβεστίου, ο ασβεστιτικός και δολομιτικός ασβεστόλιθος.

Γενικά, η άσβεστος είναι πιο αποτελεσματική για τη σταθεροποίηση / στερεοποίηση τόσο των οργανικών όσο και των ανόργανων ρύπων των αποβλήτων συγκρινόμενη με το τσιμέντο. Αυτό συμβαίνει επειδή μολονότι τα υλικά, που προστίθενται στο τσιμέντο για την προαγωγή της σταθεροποίησης και στερεοποίησης είναι τα ίδια με εκείνα που προστίθενται στην άσβεστο, οι

επιδράσεις τους είναι διαφορετικές. Η αύξηση του όγκου με την προσθήκη ασβέστου είναι μικρότερη και ο έλεγχος του pH αποτελεσματικότερος. Ακόμη, η κατεργασία αφορά βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Η τεχνική της σταθεροποίησης / στερεοποίησης, που βασίζεται στην άσβεστο δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ίδια τεχνική, που βασίζεται στην προσθήκη τσιμέντου. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα μόρια του τσιμέντου έχουν μικρή δυνατότητα κίνησης σε πορώδη μέσα, σε σχέση με τα μόρια της ασβέστου.

*B3) Τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης που Βασίζεται σε Ηφαιστιογενή Υλικά (Pozzolanic S/S).* Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη χρήση διαφόρων πυριτικών και αργίλιο-πυριτικών υλικών, τα οποία δεν παρουσιάζουν μόνο δράση τσιμεντοποίησης, αλλά σχηματίζουν επίσης διάφορες ουσίες που έχουν οι ίδιες τσιμεντοποιητική δράση κάτω από τις συνήθεις θερμοκρασίες, όταν συνδυάζονται με νερό, άσβεστο ή τσιμέντο. Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση έχουμε φυσική παγίδευση των ρύπων σε αυτά τα υλικά. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι η ιπτάμενη τέφρα, η ελαφρόπετρα, τα ιπτάμενα υπολείμματα τήξης μετάλλων (blast furnace slag) κ.ά. Η τεχνική της σταθεροποίησης / στερεοποίησης που βασίζεται σε ηφαιστειογενή υλικά είναι κατά κανόνα πολύ βραδύτερη σε σχέση με τις αντίστοιχες τεχνικές που βασίζονται στην προσθήκη τσιμέντου ή ασβέστου, και η αύξηση του όγκου μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις ίδιες τεχνικές.

*B4) Θερμοπλαστικές Τεχνικές Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης.* Κατά τις τεχνικές αυτές τα σωματίδια (ρύποι) των αποβλήτων των εδαφών δεν αντιδρούν χημικά με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την ακινητοποίησή τους, αλλά ενσωματώνονται σε μία σταθεροποιημένη/στερεοποιημένη μάζα. Τα θερμοπλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι η άσφαλτος, το πολυαιθυλένιο και η παραφίνη. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματά της εφαρμογής των θερμοπλαστικών τεχνικών σταθεροποίησης / στερεοποίησης είναι η μείωση του όγκου των αποβλήτων, εξαιτίας της απομάκρυνσης του νερού από τη σταθεροποιημένη / στερεοποιημένη μάζα.

*B5) Μικροεγκλειβωτισμού Τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης (Microencapsulation).* Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει το στερεό σφράγισμα (encapsulation) των πιο λεπτόκοκκων συστατικών των αποβλήτων κυρίως με οργανική ρητίνη. Άλλα υλικά που εφαρμόζονται είναι το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και το πολύ-βουταδιένιο. Όλα αυτά τα υλικά είναι ευρέως διαδεδομένα στο εμπόριο και χημικώς σταθερά. Επίσης, με κατάλληλους χειρισμούς επιτυγχάνεται το επιθυμητό σχήμα των προϊόντων της διαδικασίας ώστε αυτά να είναι κατάλληλα για μεταφορά, αποθήκευση ή απόθεση σε κατάλληλο χώρο.

*B6) Στεγανοποίηση της ρυπασμένης εδαφικής μάζας (in ground macroencapsulation).* Με τον όρο αυτό εννοούμε την εγκατάσταση διαφόρων συστημάτων με σκοπό την παρεμπόδιση της μετακίνησης των ρύπων του εδάφους οριζόντια ή κατακόρυφα, καθώς επίσης και την αποτροπή της εισόδου υπόγειου ή επιφανειακού νερού στη ρυπασμένη εδαφική περιοχή. Τα συστήματα στεγανού σφραγίσματος της ρυπασμένης εδαφικής μάζας χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες (Childs 1981):

- I) υπεδάφια οριζόντια συστήματα, (bottom sealing),
- II) συστήματα κατακόρυφων φρακτών μάζας (vertical barriers systems),
- III) συστήματα επιφανειακής εδαφικής κάλυψης (covering systems),
- IV) συνδυασμοί όλων των παραπάνω συστημάτων.

Για την εφαρμογή κάποιου από τα παραπάνω συστήματα λαμβάνουμε υπόψη τα εξής (Childs 1981):

- απαιτείται σημαντική αρχική επένδυση κεφαλαίου,
- τα συστήματα σχεδιάζονται από την αρχή, έτσι ώστε να παρέχουν τη μεγαλύτερη δυνατή αποτελεσματικότητα για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα,
- τα υλικά και οι τεχνικές, που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση των συστημάτων στεγανού σφραγίσματος, δεν εξασφαλίζουν συνολική απομόνωση της ρυπασμένης εδαφικής μάζας,
- η εφαρμογή των συστημάτων δεν συνεπάγεται την εξυγίανση των εδαφών, απλά επιβραδύνεται η μετακίνηση των ρύπων προς όλες τις κατευθύνσεις, καθώς και η είσοδος υπόγειου ή επιφανειακού νερού μέσα στη ρυπασμένη εδαφική μάζα,

- ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις πιθανές επιπτώσεις διαφόρων εξωτερικών πιέσεων στη ρυπασμένη εδαφική μάζα μετά τη σφράγιση της, καθώς επίσης και στις λαμβανόμενες προφυλάξεις για τη διασφάλιση της ακεραιότητας του συστήματος,
- το σύστημα παρακολουθείται καθ' όλη τη διάρκεια της εφαρμογής του και καταγράφονται τυχόν αλλαγές στους ρυθμούς ελευθέρωσης των ρύπων, οι οποίες συσχετίζονται με το αρχικό συνολικό φορτίο των ρύπων του εδάφους,
- οι προσπάθειες επικεντρώνονται στη διατήρηση του λόγου κόστος / ωφέλειας του συστήματος σε χαμηλά επίπεδα.

*B7) Τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης με Οργανικά Πολυμερή.* Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην ακινητοποίηση των ρύπων με ένα οργανικό πολυμερές. Η τεχνική αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για τη στερεοποίηση των ραδιενεργών κυρίως αποβλήτων.

Σήμερα ωστόσο η τεχνική θεωρείται ξεπερασμένη. Αυτό κυρίως οφείλεται στο υψηλό κόστος εφαρμογής, στο γεγονός ότι τα οργανικά πολυμερή παράγουν νερό κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσής τους, αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή της φορμαλδεΐδης. Παρόλα αυτά, πολλοί παλαιοί πυρηνικοί σταθμοί που εγκαταστάθηκαν σε διάφορα μέρη του κόσμου κατά τη δεκαετία του '70 τη χρησιμοποιούν ακόμη.

*B8) Τεχνική Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης με Υαλοποίηση (Vitrification).* Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις πολύ τοξικών ή ραδιενεργών ρύπων. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη χρήση υψηλών θερμοκρασιών για την τήξη της ρυπασμένης εδαφικής μάζας σε μια “υαλώδη” μάζα. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η πιθανότητα της έκπλυσης των ρύπων του εδάφους, στην περίπτωση της επιτόπου εφαρμογής της για την αποκατάσταση των χερσαίων οικοσυστημάτων με τη μέθοδο Battelle. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο διοχετεύεται ηλεκτρική ενέργεια στο έδαφος η οποία προκαλεί την ύψωση της θερμοκρασίας του. Σε θερμοκρασίες άνω των 1600 °C οι οργανικοί ρύποι εξαερώνονται και στη συνέχεια πολυμερίζονται, ενώ οι ανόργανοι υφίστανται θερμική αποσύνθεση και τελικά τήξη. Το τελικό προϊόν των αντιδράσεων

αυτών είναι η παραγωγή σταθερής και αδρανούς υαλώδους μάζας, μονοκρυσταλλικής δομής.

Επίσης, η τεχνική αυτή εφαρμόζεται και σε εκτός τόπου διαδικασίες αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών με τη χρησιμοποίηση ειδικού ηλεκτρικού κλιβάνου. Στην περίπτωση αυτή, συμβαίνει καύση των ρύπων μέχρι την πλήρη οξειδωσή τους.

### **5.3.4 Βιολογικές τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών**

Βιολογική αποκατάσταση ή βιοαποκατάσταση εδάφους ορίζεται η χρήση μικροοργανισμών ή φυτών για την εξυγίανση του εδαφικού οικοσυστήματος, κυρίως με τις διεργασίες μετασχηματισμού και απομάκρυνσης ρύπων. Οι κύριοι μηχανισμοί βιολογικής αποκατάστασης εδαφών είναι τέσσερις: α) η ενίσχυση των ιθαγενών μικροοργανισμών του εδάφους με βελτίωση των συνθηκών διαβίωσής τους, β) η προσθήκη στο έδαφος μικροοργανισμών ειδικής βιοαποικοδομητικής ικανότητας, γ) η εφαρμογή μικροβιακών ενζύμων και δ) η χρήση φυτών για την απομάκρυνση, τον μετασχηματισμό και τη συγκράτηση των ρύπων. Οι δύο βασικές τεχνικές βιοαποκατάστασης είναι η βιοαποικοδόμηση, που βασίζεται στους τρεις πρώτους μηχανισμούς (α,β,γ) και η φυτοεκχύλιση, που βασίζεται στον τέταρτο μηχανισμό. Πιο αναλυτικά οι τεχνικές αυτές έχουν ως εξής:

#### **5.3.4.1 Τεχνολογία βιοαποικοδόμησης**

Η βιοαποικοδόμηση (bioremediation) ως τεχνολογία αποκατάστασης υποβαθμισμένων εδαφικών οικοσυστημάτων περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση διαφόρων μικροοργανισμών και μικροβιακών ενζύμων για την απομάκρυνση των ρύπων από το έδαφος (Atlas και Pramer 1990). Η αποικοδόμηση εφαρμόζεται στην πράξη για την απομάκρυνση ενός συγκεκριμένου χημικού ρύπου ή ενός μίγματος χημικών ρύπων όταν: α) ο ρύπος αυτός βιοαποικοδομείται και β) η εφαρμογή στην πράξη της τεχνολογίας δεν έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η βιοαποικοδόμηση των ρύπων εξαρτάται από



τη φύση και την ποσότητα των ρύπων, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας (Atlas 1981, Leahy και Colwell 1990).

Η βιοαποικοδόμηση των ρύπων σε ένα εδαφικό οικοσύστημα επιτυγχάνεται με: α) την τροποποίηση των συνθηκών του ενδιαίτηματος των ιθαγενών μικροοργανισμών, ώστε να ευνοηθεί ο πολλαπλασιασμός και η δραστηριοποίησή τους, β) την εισαγωγή στο έδαφος μικροοργανισμών ειδικής αποικοδομητικής ικανότητας και γ) την προσθήκη στο έδαφος μικροβιακών ενζύμων ικανών να διασπάσουν τους ρύπους. Τα τελικά προϊόντα της πλήρους βιοαποικοδόμησης των ρύπων και στις τρεις περιπτώσεις είναι το CO<sub>2</sub> και το νερό. Το κόστος εφαρμογής της βιοαποκατάστασης είναι μικρότερο σε σχέση με εκείνο των άλλων συμβατικών τεχνολογιών αποκατάστασης των υποβαθμισμένων εδαφικών οικοσυστημάτων.

Το είδος και η σύνθεση του πληθυσμού των βιοαποικοδομητικών μικροοργανισμών είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη βιοαποικοδόμηση των ρύπων ενός υποβαθμισμένου εδαφικού οικοσυστήματος. Συνήθως, στις περιπτώσεις επιτόπου βιοαποκατάστασης των ρυπασμένων με οργανικούς ρύπους επιφανειακών εδαφικών στρωμάτων, ως βιοαποικοδομητικοί μικροοργανισμοί χρησιμοποιούνται μύκητες, οι οποίοι επιτελούν τη διεργασία αυτή κάτω από οξειδωτικές συνθήκες. Στις περιπτώσεις όμως επιτόπου βιοαποικοδόμησης βαθύτερων εδαφικών οριζόντων χρησιμοποιούνται βακτήρια, τα οποία αναπτύσσονται κάτω από αναγωγικές συνθήκες.

Άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν τη μικροβιακή διάσπαση των ρύπων είναι η θερμοκρασία, η ύπαρξη άλλων πηγών ενέργειας για τους βιοαποικοδομητικούς μικροοργανισμούς, η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία και, τέλος, το ποσοστό του οργανικού ρύπου, που προσροφάται στα οργανικά και ανόργανα εδαφικά κolloειδή (Anderson 1995).

Οι πιο συχνοί περιβαλλοντικοί περιορισμοί της βιοαποικοδόμησης των χημικώς υποβαθμισμένων εδαφικών οικοσυστημάτων είναι η έλλειψη οξυγόνου, θρεπτικών για τους μικροοργανισμούς στοιχείων και υγρασίας, το ακατάλληλο pH και οι ακατάλληλες θερμοκρασίες. Έτσι, ανάλογα με τον παράγοντα που δρα περιοριστικά γίνονται κατάλληλες επεμβάσεις στο έδαφος, όπως η στράγγιση του εδαφικού νερού για την εξασφάλιση

ικανοποιητικών συνθηκών αερισμού, ή η δημιουργία επιθυμητού δυναμικού οξειδοαναγωγής. Μια άλλη τροποποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, που συνήθως εφαρμόζεται κατά τη βιοαποκατάσταση των υποβαθμισμένων εδαφών, είναι η προσθήκη ανόργανων λιπασμάτων, κυρίως αζώτου και φωσφόρου, με σκοπό την υποστήριξη ικανού για βιοαποικοδόμηση ενδογενούς μικροβιακού πληθυσμού.

Στην περίπτωση κατά την οποία οι ενδογενείς μικροβιακοί πληθυσμοί της ρυπασμένης εδαφικής μάζας, ακόμη και κάτω από κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες, δεν είναι ικανοί για αποικοδόμηση των συγκεκριμένων ρύπων, προσθέτουμε στο έδαφος πληθυσμούς μικροοργανισμών με συγκεκριμένες μεταβολικές ιδιότητες. Κατά τον εμβολιασμό εξασφαλίζονται στους νεοεισαχθέντες μικροοργανισμούς ευνοϊκές συνθήκες αύξησης και ανάπτυξης, δηλαδή κατάλληλη θερμοκρασία, υγρασία, pH, επάρκεια θρεπτικών στοιχείων και τις περισσότερες φορές οξειδωτικές συνθήκες. Στην πράξη η εισαγωγή μικροοργανισμών χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις δύσκολα αποικοδομήσιμων οργανικών ενώσεων, όπως είναι αυτές με πολλά άτομα χλωρίου.

Η τεχνολογία της βιοαποκατάστασης έχει εφαρμοσθεί για την απομάκρυνση ρύπων όπως το TNT, το ζιζανιοκτόνο Dinoseb (2- sec- butyl-3,4-dinitro-o-cresol), διάφοροι αρωματικοί υδρογονάνθρακες χαμηλού μοριακού βάρους, απόβλητα των βιομηχανιών πετρελαίου, καθώς και διάσπαρτες κηλίδες υδρογονανθράκων.

Η βιοαποικοδόμηση δεν βρίσκει εφαρμογή μόνο σε περιπτώσεις οργανικών ρύπων, αλλά και σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η υποβάθμιση των εδαφικών οικοσυστημάτων οφείλεται σε ρύπανση με βαρέα μέταλλα ή ραδιενεργά υλικά (Organization for Economic Cooperation and Denelopment 1994).

Ειδικά σε περιπτώσεις εδαφών που έχουν υποστεί ρύπανση με βαρέα μέταλλα, εργαστηριακά πειράματα έχουν δείξει ότι διάφορα είδη εδαφικής πανίδας (π.χ. γαιοσκωλήκων) είναι αποτελεσματικά για τη βιοαποκατάσταση των εδαφών αυτών, λόγω της ικανότητάς τους να συσσωρεύουν ποικίλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στους ιστούς τους (Ireland 1979, Ireland και Wooton 1976, Morgan και Morgan 1988). Οι ποσότητες των βαρέων μετάλλων που συσσωρεύονται στα διάφορα αυτά είδη της εδαφικής πανίδας, εξαρτώνται

από τον βαθμό της ρύπανσης και τις ιδιότητες του ρυπασμένου με βαρέα μέταλλα εδάφους, όπως για παράδειγμα το pH, τη C.E.C, την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία κ.ά. (Ma 1982, Ma κ.ά. 1983, Beyer κ.ά. 1987, Morgan και Morgan 1988).

#### 5.3.4.2 Η τεχνολογία της φυτοεκχύλισης

Η τεχνολογία αυτή στηρίζεται στη χρησιμοποίηση φυτικών ειδών ικανών να συσσωρεύουν στους ιστούς τους μεγάλες συγκεντρώσεις διαφόρων τοξικών στοιχείων-ρύπων με στόχο την απομάκρυνσή τους από τη ρυπασμένη εδαφική μάζα. Σήμερα υπάρχουν διαθέσιμα φυτικά είδη αποτελεσματικά για την φυτοεκχύλιση του Zn, Cd, Pb, Se, Ni.

Κατά κύριο λόγο, η αποτελεσματικότητα εφαρμογής της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης εξαρτάται από: **i)** Την περιεκτικότητα των τοξικών στοιχείων-ρύπων στη φυτομάζα και ειδικά στην υπέργεια (διότι υπάρχει το πρακτικό πρόβλημα της συγκομιδής των ριζών). Αν και η περιεκτικότητα του ρύπου στη μάζα του φυτού εξαρτάται από εγγενείς ικανότητες του φυτού, εντούτοις η συσσώρευση προάγεται εισάγοντας στο έδαφος κατάλληλες ουσίες, οι οποίες αυξάνουν την κινητικότητα των ρύπων, **ii)** Την παραγόμενη ποσότητα βιομάζας από τα φυτικά αυτά είδη.

Έως σήμερα ελάχιστες είναι οι περιπτώσεις αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών με την τεχνολογία της φυτοεκχύλισης. Όμως το πολύ χαμηλό κόστος εφαρμογής της μεθόδου σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες αποκατάστασης, αναμένεται να συμβάλλει στην ανάπτυξη της. Με την πρόοδο της έρευνας για την πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα εξής (McGrath κ.ά. 1997):

1. αύξηση των καλλιεργητικών εισροών (π.χ. λιπασμάτων) με σκοπό την αύξηση της παραγωγικότητας των φυτικών ειδών που χρησιμοποιούνται στη φυτοεκχύλιση,
2. χρήση εδαφοβελτιωτικών ουσιών με σκοπό την αύξηση της διαθεσιμότητας των ρύπων στα χρησιμοποιούμενα φυτικά είδη,
3. χρήση αυξητικών ή άλλων ουσιών για τη μεταβολή της αναλογίας υπέργειας προς υπόγεια βιομάζα των χρησιμοποιούμενων φυτικών ειδών, με σκοπό

- τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης,
4. αναπαραγωγή των χρησιμοποιούμενων φυτικών ειδών με ιστοκαλλιέργεια, ώστε η γενετική παραλλακτικότητα να μην παίζει σπουδαίο ρόλο στην εκδήλωση ιδιοτήτων σχετικών με την αποτελεσματικότητα εφαρμογής της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης, όπως για παράδειγμα η παραγωγή βιομάζας, ο ρυθμός πρόσληψης μεταλλικών ρύπων από το έδαφος,
  5. συμβίωση των ριζών των φυτικών ειδών με διάφορους μύκητες ή βακτήρια του εδάφους (π.χ. μυκόρριζες) με σκοπό τη διέγερση της πρόσληψης από τα φυτικά αυτά είδη των ρύπων του εδάφους.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης. Αυτό γίνεται με την αποφυγή της διασποράς της γύρης και των σπόρων των φυτών και της συσσώρευσης επικίνδυνων ποσοτήτων ρύπων στους φυτοφάγους οργανισμούς που τρέφονται με τα συγκεκριμένα φυτά. Τρόποι αποτροπής των επιπτώσεων αυτών είναι η εύρεση φυτικών ειδών μικρής οικονομικής αξίας τα οποία δεν προτιμούνται ως τροφή από τους φυτοφάγους οργανισμούς, η συγκομιδή των φυτών πριν ανθίσουν, καθώς επίσης και η συγκομιδή των γερασμένων και παλαιών φύλλων πριν πέσουν στο έδαφος και αποικοδομηθούν.

Επίσης, ένα πολύ σπουδαίο και ελάχιστα μέχρι σήμερα μελετημένο τμήμα της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης είναι η ανακύκλωση των τοξικών αυτών μετάλλων που απομακρύνονται από την εδαφική μάζα, ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής.

#### **5.3.4.2.1 Φυτοεκχύλιση σεληνίου (Se)**

Οι μορφές με τις οποίες το σεληνίο απαντά σε ρυπασμένα εδάφη είναι:  $\text{Se}^0$  (στοιχειακό),  $\text{Se}^{2-}$ ,  $\text{SeO}_3^{2-}$ ,  $\text{SeO}_4^{2-}$ . Συνήθως κυριαρχούν οι τελευταίες δύο μορφές, οι οποίες είναι και οι πιο ευκίνητες στο έδαφος. Τα φυτά προσλαμβάνουν από το έδαφος μεγαλύτερες ποσότητες Se όταν αυτό βρίσκεται με τη μορφή  $\text{SeO}_4^{2-}$  παρά με τη μορφή  $\text{SeO}_3^{2-}$  (Banuelos και Schrale 1989, Banuelos 1996).

Επίσης, οι Banuelos και Meek (1990) αναφέρουν ότι σε εργαστηριακά πειράματα στα οποία έγινε τεχνητή ρύπανση εδαφικών δειγμάτων με Se ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ), δεν ανιχνεύθηκε όλη η προστιθέμενη ποσότητα Se ούτε στα εδαφικά δείγματα, ούτε στους φυτικούς ιστούς. Αυτό συμβαίνει επειδή κάποια ποσότητα Se εξαερώνεται. Ειδικότερα, για την εξαέρωση του Se βρέθηκε ότι προάγεται από μικροοργανισμούς του εδάφους (Frankenberger και Karlson 1992).

Τα φυτικά είδη τα οποία χρησιμοποιούνται για τη φυτοεκχύλιση του Se ανήκουν κυρίως στα γένη *Astragalus*, *Brassica* (*B. juncea*), *Stanleya*, *Atriplex* (*A. semibaccata*, *A. nummularia*, *A. incanus*), *Grindelia* και *Gutierrezia* και έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν στους ιστούς τους ποσότητες μεταξύ μερικών εκατοντάδων  $\text{mg Se kg}^{-1}$ , μέχρι και  $10000 \text{ mg Se kg}^{-1}$  ξηρού φυτικού βάρους

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης του Se. Ένας τέτοιος παράγοντας είναι τα θειικά άλατα, τα οποία βρέθηκε ότι ασκούν ανταγωνιστική επίδραση στην πρόσληψη Se από τα φυτά. Επιπλέον, αυξημένες συγκεντρώσεις  $\text{SO}_4^{2-}$  στο ρυπασμένο με Se έδαφος έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της εξαέρωσης του Se από τα φυτά (Zayed και Terry 1994). Αυτό συμβαίνει λόγω της χημικής ομοιότητας του Se με το S, οπότε παρατηρείται ανταγωνισμός μεταξύ των δύο αυτών στοιχείων για την ενσωμάτωσή τους στα αμινοξέα των πρωτεϊνών, τα οποία αποτελούν τις πρόδρομες πτητικές ενώσεις του Se. Η εξαέρωση του Se από τα φυτά αποδείχθηκε ότι συμβαίνει ταχύτερα όταν το στοιχείο αυτό βρίσκεται με την ανηγμένη μορφή ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ). Ένας άλλος παράγοντας που επίσης επηρεάζει τη φυτοεκχύλιση του Se, είναι η συγκέντρωση των φωσφορικών αλάτων στο ρυπασμένο με Se έδαφος. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι τα φωσφορικά άλατα του εδάφους αυξάνουν την αποτελεσματικότητά της φυτοεκχύλισης του Se (Banuelos κ.ά. 1992a).

Επίσης, το κορυφολόγημα των χρησιμοποιούμενων φυτών είναι μια επέμβαση, που συμβάλλει στην αύξηση της αποτελεσματικότητας της φυτοεκχύλισης του Se. Ο μηχανισμός όμως που λειτουργεί στην περίπτωση αυτή δεν είναι ακόμη γνωστός (Banuelos και Meek 1990).

#### 5.3.4.2.2 Φυτοεκχύλιση ψευδαργύρου (Zn) και καδμίου (Cd)

Κατά κανόνα οι ρύποι αυτοί συνυπάρχουν στα ρυπασμένα εδάφη. Το Cd μολονότι δεν συγκαταλέγεται στα απαραίτητα για τη ζωή των φυτών στοιχεία, παρουσιάζει κάποιες χημικές ομοιότητες με τον Zn. Έτσι, τα στοιχεία αυτά προσλαμβάνονται κατά τον ίδιο τρόπο από τα φυτά κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης.

Για τη φυτοεκχύλιση του Zn και του Cd χρησιμοποιούνται κυρίως φυτικά είδη της οικογένειας *Brassicaceae*, του γένους *Thlaspi*, καθώς επίσης και τα φυτικά είδη *Cardaminopsis haller* και *Viola calaminariata*, τα οποία συσσωρεύουν στους ιστούς ποσότητες Zn μεγαλύτερες από 10.000 mg Zn/kg<sup>-1</sup> ξηρού βάρους βιομάζας (McGrath και Dunham 1997).

Καθοριστική για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, είναι η σχέση μεταξύ της απόδοσης των χρησιμοποιούμενων φυτικών ειδών και των συγκεντρώσεων του Zn και του Cd στη βιομάζα τους. Η αποτελεσματικότητα αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον με τη βοήθεια της γενετικής μηχανικής, η οποία θα δώσει φυτικά είδη υψηλής απόδοσης, ικανά να συσσωρεύουν μεγάλες συγκεντρώσεις των βαρέων αυτών μετάλλων στους ιστούς τους.

#### 5.3.4.2.3 Φυτοεκχύλιση μολύβδου (Pb)

Η εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης του Pb από τα εδάφη είναι δύσκολη, επειδή ο Pb έχει την ιδιότητα να συγκρατείται ισχυρά από τα οργανικά και ανόργανα κolloειδή του εδάφους. Τα φυτικά είδη που χρησιμοποιούνται είναι το *Thlaspi rotundifolium*, διάφορα είδη του γένους *Brassica*, το καλαμπόκι, ο ηλίανθος κ.ά.

Τα χρησιμοποιούμενα φυτικά είδη αντιμετωπίζουν τροφοπενία φωσφόρου, η οποία οφείλεται στον σχηματισμό αδιάλυτων φωσφορικών αλάτων του μολύβδου (pyromorphite) και αντιμετωπίζεται είτε με την εφαρμογή διαφυλλικού φωσφορικού λιπάσματος είτε με την αύξηση της φυτομάζας (αραιώνοντας δηλαδή τον Pb μέσα στη φυτομάζα).

Γενικά, η πορεία που ακολουθείται κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης του Pb είναι η εξής: **1)** Εφαρμογή κάποιας

συμπλοκοποιητικής ένωσης στο έδαφος με σκοπό την κινητοποίηση του Pb, **2)** Εφαρμογή συστήματος στράγγισης με το οποίο ελέγχεται το νερό της έκπλυσης, ώστε να αποφεύγεται η ρύπανση των υπόγειων νερών με τον Pb, που κινητοποιήθηκε, **3)** Προσθήκη διαφυλλικού φωσφορικού λιπάσματος, **4)** Τροποποίηση με κάποιο τρόπο της αύξησης των χρησιμοποιούμενων φυτικών ειδών, όπως για παράδειγμα αύξηση της πυκνότητας των ριζών (όπου κυρίως συσσωρεύεται ο Pb), και αύξηση του βάθους στο οποίο φθάνουν οι ρίζες, **5)** Συγκομιδή των χρησιμοποιούμενων φυτικών ειδών σε σχετικά νεαρό στάδιο, **6)** Μείωση του όγκου του φυτικού υλικού που αποτίθεται και πάλι στο έδαφος. Επίσης, κατά την εφαρμογή της συμπλοκοποιητικής ένωσης στο έδαφος είναι απαραίτητη η γνώση της συμπεριφοράς της, ιδιαίτερα όσον αφορά την αποικοδόμησή της και την πιθανή πρόκληση τοξικότητας στο εδαφικό οικοσύστημα. Για παράδειγμα, βρέθηκε ότι το EDTA όταν εφαρμόζεται στο έδαφος σε ποσότητα 1 ως 2 g kg<sup>-1</sup> έχει ημιπερίοδο ζωής 10 - 20 ημέρες περίπου (Means κ.ά. 1980).

#### **5.3.4.2.4 Φυτοεκχύλιση νικελίου (Ni)**

Το Ni απαντά σε μεγάλες συγκεντρώσεις σε σερπεντινικά κυρίως εδάφη, ως αποτέλεσμα της εδαφογένεσης (McGrath 1995). Γενικά, το στοιχείο αυτό σπάνια βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις στα εδάφη, εκτός αν αυτά έχουν δεχθεί βιομηχανικά ή αστικά απόβλητα πλούσια σε Ni.

Επειδή το Ni είναι ένα μέταλλο με μεγάλη σχετικά αξία, η αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών αποκαλείται συχνά **φυτοεξόρυξη** και όχι φυτοεκχύλιση. Η φυτοεκχύλιση αποσκοπεί στην αποκατάσταση των ρυπασμένων με διάφορα μέταλλα εδαφών, ενώ η φυτοεξόρυξη σχετίζεται με την οικονομική αξία των μετάλλων που “επανακτώνται”. Σε περιπτώσεις μετάλλων υψηλής αξίας, το κόστος της αποκατάστασης του εδάφους, εξισορροπείται από την ανακύκλωσή τους.

#### 5.3.4.2.5 Φυτοεκχύλιση υδραργύρου (Hg)

Η ρύπανση των εδαφών με Hg είναι συχνή και οφείλεται κυρίως σε βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες. Επειδή ο Hg έχει την ιδιότητα να αναπτύσσει ισχυρούς δεσμούς με τα οργανικά και ανόργανα εδαφικά κολλοειδή, η διαθεσιμότητά του στο έδαφος για τα φυτά είναι πολύ μικρή. Έτσι, μέχρι σήμερα δεν είναι γνωστή η ύπαρξη φυτικών ειδών, που συσσωρεύουν στην υπέργεια βιομάζα τους μεγάλες ποσότητες Hg. Πρόσφατα όμως, μοριακοί βιολόγοι, εργαζόμενοι με το φυτικό είδος *Arabidopsis thaliana* βρήκαν με τη χρήση των τεχνικών της γενετικής μηχανικής, την αλληλουχία των γονιδίων, που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή και εκδήλωση της δράσης του ενζύμου “ρεδουκτάση του ιόντος Hg”. Το ένζυμο αυτό ανάγει μέσα στο φυτό το πολύ τοξικό για τα φυτά κατιόν του  $Hg^{2+}$  σε σχετικά αδρανές και πτητικό στοιχειακό υδράργυρο ( $Hg^0$ ). Η επιτυχία όμως της φυτοεκχύλισης του Hg προϋποθέτει ότι το χρησιμοποιημένο είδος δεν θα διαφύγει με τη μορφή ζιζανίων ή σπόρων σε άλλες περιοχές. Γίνονται προσπάθειες να διαπιστωθεί η ύπαρξη του ενζύμου αυτού και σε άλλα φυτικά είδη με μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας.

#### 5.3.4.2.6 Φυτοεκχύλιση αρσενικού (As)

Η ρύπανση των εδαφών με αρσενικό αποτελεί μεγάλο πρόβλημα σε πολλές περιοχές του κόσμου. Η ρύπανση αυτή προέρχεται κυρίως από τα απόβλητα των χυτηρίων As και τη χρήση διαφόρων γεωργικών φαρμάκων με δραστική ουσία άλατα του As. Γενικά, τα φυτά έχουν την ικανότητα να προσλαμβάνουν από το έδαφος τα ανιόντα του As, και να ανέχονται τις υψηλές ποσότητες των ανιόντων αυτών στο έδαφος, επειδή το ανιόν του αρσενικού έχει την ίδια ιονική ακτίνα με αυτό του φωσφόρου. Για την αποκατάσταση των ρυπασμένων με μεθυλιωμένες πτητικές ενώσεις αρσενικού εδαφών αποδεικνύεται χρήσιμος ο συνδυασμός των τεχνολογιών της φυτοεκχύλισης και της βιοαποικοδόμησής τους.



#### 5.3.4.2.7 Φυτοεκχύλιση χαλκού και κοβαλτίου (Cu, Co)

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί 24 φυτικά είδη, τα οποία συσσωρεύουν στη βιομάζα τους Cu και Co σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις, αλλά μέχρι σήμερα δεν έχει ελεγχθεί η αποτελεσματικότητά τους στη φυτοεκχύλιση για την αποκατάσταση των ρυπασμένων με χαλκό και κοβάλτιο εδαφών (Baker και Brooks 1989). Τα φυτικά αυτά είδη συνήθως απαντούν στα εδάφη των νοτιοκεντρικών περιοχών της Αφρικής και συγκεκριμένα στο Ζαίρ και τη Ζάμπια, όπου λόγω εδαφογένεσης, τα εδάφη είναι πλούσια σε χαλκό και κοβάλτιο. Τα περισσότερα από αυτά τα φυτικά είδη ανήκουν στις οικογένειες *Cyperaceae*, *Lamiaceae*, *Poaceae* και *Scrophulariaceae*.

#### 5.3.4.2.8 Φυτοεκχύλιση θαλλίου (Tl)

Η ρύπανση των εδαφών με θάλλιο είναι έντονη κοντά σε εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου και στους χώρους απόθεσης των αποβλήτων των μονάδων παραγωγής και επεξεργασίας πυρίτη. Το *Iberis intermedia* και διάφορα είδη του γένους *Brassica* (π.χ. *B. napus* και *B. juncea*) συσσωρεύουν στους ιστούς τους μεγάλες ποσότητες θαλλίου.

#### 5.3.4.2.9 Φυτοεκχύλιση ραδιοισοτόπων

Μέχρι σήμερα δεν έχει αναφερθεί κανένα παράδειγμα φυτοεκχύλισης ραδιονουκλιδίων, μολονότι γίνονται πολλές έρευνες προς αυτή την κατεύθυνση (Black 1995). Το κόστος αποκατάστασης μεγάλης έκτασης εδαφικών οικοσυστημάτων που έχουν ρυπανθεί με διάφορα ραδιενεργά υλικά με την εφαρμογή φυσικών και χημικών τεχνικών, είναι συνήθως υψηλό (Entry κ.ά. 1996). Η έρευνα στρέφεται κυρίως προς τη φυτοεκχύλιση του Cs-137, που έχει τη μεγαλύτερη ημιπερίοδο ζωής, και του Sr-90, του οποίου η συνολική ακτινοβολία ανά μονάδα εισαγωγής στο σώμα του ανθρώπου και των ζώων είναι μεγαλύτερη, παρά το γεγονός ότι έχει μικρότερη ημιπερίοδο ζωής σε σχέση με το Cs-137.

Γενικά, τα διάφορα φυτικά είδη έχουν διαφορετικές ικανότητες πρόσληψης του Sr-90. Το στρόντιο έχει υψηλή χημική συγγένεια με το ασβέστιο, σε βαθμό που τα φυτά δεν μπορούν να διαχωρίσουν τα δύο αυτά στοιχεία. Επομένως, τα φυτικά είδη που προσλαμβάνουν περισσότερο ασβέστιο θα προσλαμβάνουν και περισσότερο στρόντιο. Επιπλέον, όσο περισσότερο ασβέστιο περιέχεται στο θρεπτικό ή στο εδαφικό διάλυμα, τόσο λιγότερο στρόντιο θα προσλαμβάνουν τα φυτικά αυτά είδη.

Το καίσιο ακινητοποιείται στο έδαφος και έτσι είναι λιγότερο διαθέσιμο για τα φυτά σε σχέση με το στρόντιο. Γενικά τα φυτικά είδη που αναπτύσσονται σε οργανικά εδάφη έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν στους ιστούς τους μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αυτών των ραδιονουκλιδίων σε σχέση με τα ίδια φυτικά είδη τα οποία όμως αναπτύσσονται σε βαριά αργιλλώδη εδάφη, τα οποία έχουν την ικανότητα να ακινητοποιούν τα ραδιενεργά αυτά στοιχεία. Ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει σε πολύ οργανικά και ταυτόχρονα όξινα εδάφη.

Επειδή οι διαφορετικοί τύποι εδαφών παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό ακινητοποίησης του στρόντιου και του καϊσίου στο έδαφος, η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της τεχνολογίας της φυτοεκχύλισης για την αποκατάσταση των ραδιενεργά ρυπασμένων χερσαίων οικοσυστημάτων εξαρτάται και από τις ιδιότητες του εδάφους (Entry κ.ά. 1996).

Υπάρχουν φυτικά είδη τα οποία έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν στους ιστούς τους σχετικά μεγάλες συγκεντρώσεις Cs-137 και Sr-90. Επίσης η πρόσληψη των δύο στοιχείων από αυτά τα φυτικά είδη αυξάνεται με την πρόκληση μεταβολών στο εδαφικό περιβάλλον, και συγκεκριμένα γύρω από τις ρίζες των φυτικών αυτών ειδών, όπως είναι η προσθήκη οργανικού υποστρώματος από τύρφη που προήλθε κυρίως από ιστούς του φυτού *sphagnum peat* (Entry κ.ά. 1996), ή χηλικών φορέων με σκοπό την αύξηση της διαθεσιμότητας για τα φυτά των ραδιονουκλιδίων αυτών (Black 1995).

Ένας ακόμη παράγοντας, ο οποίος αυξάνει την πρόσληψη των ραδιενεργών αυτών στοιχείων από τα χρησιμοποιούμενα φυτικά είδη, είναι η δημιουργία μυκόρριζων. Σε αυτό το είδος της συμβίωσης οι μυκηλιακές υφές αυξάνουν τόσο την ενεργό απορροφητική επιφάνεια των ριζών, όσο και τον όγκο του εδάφους που εκμεταλλεύονται τα φυτικά είδη που χρησιμοποιούνται στην φυτοεκχύλιση (Entry κ.ά. 1996).

## 5.4 Παρακολούθηση ποιότητας εδαφών

Όπως έχει αναφερθεί, τόσο για τη διατήρηση της εδαφικής ποιότητας όσο και για την αποκατάστασή της πρέπει να σχεδιασθεί ένα σύστημα παρακολούθησης. Με το σύστημα αυτό, αφενός μεν διαπιστώνεται η μεταβολή της εδαφικής ποιότητας σε σχέση με τις υφιστάμενες χρήσεις και τις γεωργικές πρακτικές, ώστε να διαγνωσθεί έγκαιρα η όποια υποβάθμιση των εδαφικών λειτουργιών αφετέρου ελέγχεται η πορεία αποκατάστασης των υποβαθμισμένων λειτουργιών σε σχέση με τους σκοπούς αποκατάστασης.

Η παρακολούθηση της ποιότητας των εδαφικών πόρων περιλαμβάνει τον σχεδιασμό ενός προγράμματος παρακολούθησης στα πλαίσια ενός διαχειριστικού σχεδίου, την υιοθέτηση κατάλληλων δεικτών οι οποίοι δύνανται να διαγνώσουν τη μεταβολή της εδαφικής ποιότητας και να αξιολογήσουν την πορεία ενός σχεδίου αποκατάστασης και τέλος τη χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας με την οποία η παρακολούθηση της εδαφικής ποιότητας πραγματοποιείται αποτελεσματικότερα και οικονομικότερα.

### 5.4.1 Γενικές αρχές παρακολούθησης

Στα σχέδια διαχείρισης του εδαφικού οικοσυστήματος, η παρακολούθηση (monitoring) είναι ένα αναπόσπαστο εργαλείο, που τροφοδοτεί περιοδικά τον σχεδιασμό της διαχείρισης εδαφών και καθοδηγεί την τροποποίησή του, έτσι ώστε να κατευθύνεται εγγύτερα προς τους ιδανικούς και εφικτούς σκοπούς της διαχείρισης. Όντας ένα μέσον για την επίτευξη κάποιου σκοπού και όχι ένας αυτοσκοπός από μόνη της, η παρακολούθηση μπορεί να καλύπτει μεγάλο φάσμα διαδικασιών. Αυτονόητα παραδεκτή μέσα σε κάθε πρόγραμμα παρακολούθησης είναι η εν δυνάμει μεταβολή. Με το πρόγραμμα παρακολούθησης, προσπαθούμε να διασφαλίσουμε την ανίχνευση αυτής της μεταβολής, της κατεύθυνσής της και να προσδιορίσουμε την έκταση ή την έντασή της. Αυτό ενδεχομένως να είναι και το ευκολότερο τμήμα της διαδικασίας παρακολούθησης, αφού συχνά είναι δυσκολότερο να εκτιμηθεί η σημασία της μεταβολής που ανιχνεύθηκε (Hellawell 1991). Ως δυσμενή μεταβολή του εδαφικού οικοσυστήματος

εννοούμε τη μεταβολή των λειτουργιών του με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητάς του και συνεπώς της αξίας του για την ανθρώπινη κοινωνία. Βεβαίως, θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι η μεταβολή της ποιότητας των εδαφικών πόρων, μπορεί να είναι και θετική, εάν έχει συντελεσθεί βελτίωση κάποιων υποβαθμισμένων λειτουργιών.

Ο σχεδιασμός ενός προγράμματος παρακολούθησης διευκολύνεται από τη σαφή διάκριση ορισμένων εννοιών (Αναγνωστοπούλου 1998):

**Απλή επισκόπηση (survey)** είναι ένα σύνολο ποιοτικών και ποσοτικών εκτιμήσεων, οι οποίες διεξάγονται με συγκεκριμένες διαδικασίες και μέσα σε περιορισμένο χρονικό διάστημα, αλλά χωρίς προσχηματισμένη αντίληψη για το ποια θα έπρεπε να είναι τα αποτελέσματα.

**Εκτενής επισκόπηση (surveillance)** είναι ένα εκτεταμένο πρόγραμμα απλών επισκοπήσεων για να βεβαιώσει την ποικιλία ή το εύρος διακύμανσης και να παράσχει μια χρονική σειρά καταστάσεων ή τιμών κατά την πάροδο του χρόνου, αλλά και πάλι χωρίς προσχηματισμένη αντίληψη για το ποια θα έπρεπε να είναι τα αποτελέσματα.

**Παρακολούθηση (monitoring)** είναι η περιοδική (με κανονική ή μη κανονική περιοδικότητα) επισκόπηση που διεξάγεται για να ελέγξει τον βαθμό συμφωνίας με κάποια προκαθορισμένη τιμή (standard) ή δεδομένα βάσης, ή τον βαθμό απόκλισης από μία προσδοκώμενη πρότυπη τιμή.

Είναι φανερό ότι ενώ η απλή και η εκτενής επισκόπηση είναι ανοιχτές διαδικασίες, ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός προγράμματος παρακολούθησης επιβάλλει τον καθορισμό των δεδομένων βάσης, ακόμη και σε ελλιπή μορφή, πριν αρχίσει να ασκείται η παρακολούθηση. Στην έννοια της παρακολούθησης εμπεριέχεται ο σκοπός αυτής. Ασφαλώς, η απλή ή η εκτενής επισκόπηση γίνονται κι αυτές με κάποιο σκοπό, δηλαδή την απόκτηση γνώσης ή την ικανοποίηση της περιέργειας. Στην παρακολούθηση όμως, ενδιαφερόμαστε να θέσουμε όρια, έστω και αυθαίρετα, και επίσης να αποφασίσουμε για το τι δράση θα αναλάβουμε στην περίπτωση που η παρακολούθηση αποκαλύψει απόκλιση από τα όρια αυτά. Ενίοτε το στοιχείο αυτό δεν συνεκτιμάται από νωρίς στον σχεδιασμό ενός προγράμματος παρακολούθησης. Είναι δε πολύ αμφισβητήσιμη η χρησιμότητα της

παρακολούθησης μιας κατάστασης την οποία δεν μπορούμε να ελέγξουμε αποτελεσματικά ή για την οποία δεν απαιτείται κανενός είδους απόκριση.

Όλα τα προγράμματα παρακολούθησης θα πρέπει να αναθεωρούνται τακτικά, να τροποποιούνται εάν χρειαστεί και όταν ο σκοπός τους έχει επιτευχθεί, θα πρέπει να σταματούν

Ένα από τα πλέον καίρια ενδιαφέροντα των διαχειριστών μιας περιοχής, είναι η δυνατότητα να λαμβάνουν έγκαιρες ενδείξεις για μια επερχόμενη μεταβολή (συνήθως ανεπιθύμητη) στην εδαφική ποιότητα.

Στα οικοσυστήματα υπάρχουν γενικά τρεις τύποι ενδογενών μεταβολών: στοχαστικές, διαδοχής και κυκλικές. Οι στοχαστικές μεταβολές είναι εξορισμού απρόβλεπτες και μπορούν να συνδεθούν με διάφορα σοβαρά κλιματικά ή άλλα γεγονότα (όπως π.χ. πλημμύρες, διαβρώσεις, ξηρασίες, πυρκαϊές). Εδώ η παρακολούθηση μπορεί να αφορά τον βαθμό και τον ρυθμό ανάκαμψης του πληγέντος συστήματος, εφόσον βέβαια διαθέτουμε δεδομένα βάσης των παραμέτρων που επιθυμούμε να παρακολουθήσουμε. Οι μεταβολές των εδαφικών οικοσυστημάτων που οφείλονται στην οικολογική διαδοχή (π.χ. εδαφογένεση) είναι πολύ βραδείες, τελικά όμως μπορεί να καταλήξουν σε σοβαρές μεταβολές. Ορισμένες μεταβολές που συμβαίνουν λόγω της εδαφογένεσης, μπορούν να ανατραπούν ή να σταματήσουν με ειδικά μέτρα διαχείρισης, αλλά η οικολογική διαδοχή, όπως η εδαφογένεση, είναι μια φυσική πορεία που μεταβάλλει βαθμιαία όχι μόνο τις φυσικοχημικές ιδιότητες των εδαφών αλλά και τους βιογεωχημικούς κύκλους, τις βιοκοινότητες και οδηγεί στη μεταβολή της σύνθεσης των ειδών. Οι κυκλικές μεταβολές μπορεί βραχυπρόθεσμα να έχουν θεαματικά αποτελέσματα, συνήθως όμως συμβάλλουν στη διατήρηση των πληθυσμών. Παραδείγματα είναι οι αλληλεπιδράσεις που εξαρτώνται από τη σχετική πυκνότητα άρπαγα-λείας. Βεβαίως, τα τρία αυτά είδη μεταβολών μπορούν να συνυπάρχουν. Π.χ. η πορεία της οικολογικής διαδοχής, ενδέχεται να περιλαμβάνει κυκλικές μεταβολές και ενίοτε να επηρεάζεται από στοχαστικές μεταβολές (Hellawell 1991).

Συχνά, μεγάλη είναι και η επίδραση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στα εδαφικά οικοσυστήματα. Στην περίπτωση αυτή υφίστανται παρακολούθηση οι συνέπειες αυτών των δραστηριοτήτων και η ανάκαμψη των εδαφικών οικοσυστημάτων σε περίπτωση που ληφθούν μέτρα

ανόρθωσης ή και αποκατάστασης. Εκτός από τα "ανέγγιχτα" εδαφικά οικοσυστήματα, πολλά από τα διαχειριζόμενα εδάφη έχουν μεγάλη βιολογική, αλλά και άλλες αξίες. Εδώ η παρακολούθηση μπορεί να παρέχει επιβεβαίωση της διατήρησης αυτών των αξιών, καθώς και έγκαιρη προειδοποίηση για τα αποτελέσματα της υπερβολικής ή ακατάλληλης ανθρώπινης επέμβασης (Hellawell 1991).

Είναι φανερό ότι ένα πρόγραμμα παρακολούθησης έχει νόημα μόνον εφόσον έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της διαχείρισης μιας περιοχής. Ιδανικά, η περιοχή ενδιαφέροντος θα πρέπει να υπόκειται σε ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης, το οποίο να προβλέπει τους τρόπους αξιοποίησης των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης. Εν απουσία ολοκληρωμένου διαχειριστικού σχεδίου, έχει κρίσιμη σημασία το εκάστοτε ειδικό σχέδιο διαχείρισης να προσδιορίζει και να διασφαλίζει τους τρόπους αξιοποίησης των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης.

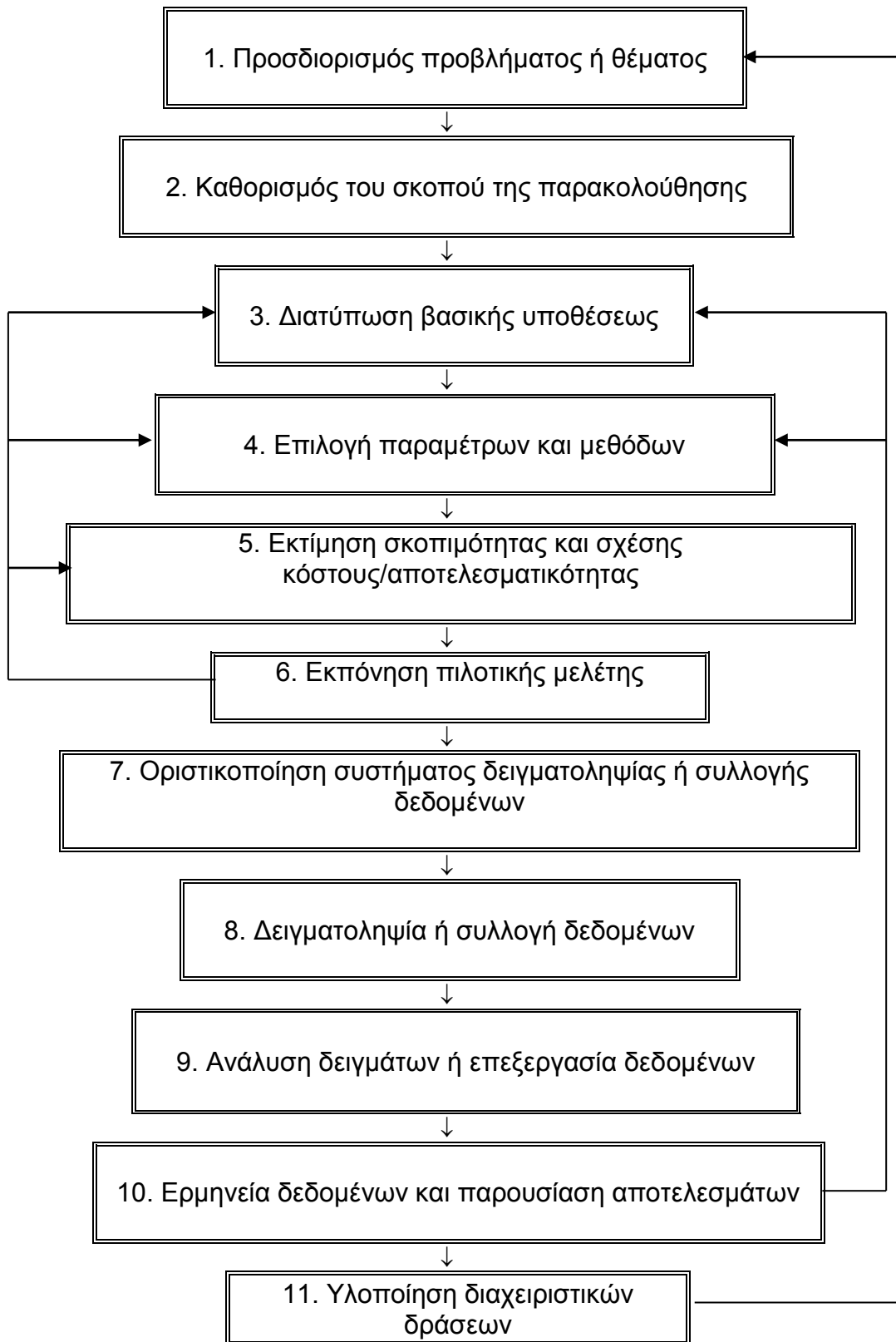
#### **5.4.2 Σχεδιασμός ενός προγράμματος παρακολούθησης**

Η ύπαρξη ενός προγράμματος παρακολούθησης από μόνη της δεν σημαίνει ότι το πρόγραμμα αυτό θα αποτελέσει αποτελεσματικό εργαλείο ενός διαχειριστικού σχεδίου. Προγράμματα παρακολούθησης τα οποία παρέχουν άφθονα δεδομένα αλλά λίγη πληροφορία, δεν βοηθούν τη διαχείριση. Η παρακολούθηση μπορεί να αποβεί τελείως άχρηστη ή και βλαπτική, εάν η ερμηνεία των δεδομένων γίνει λανθασμένα. Το πλαίσιο σχεδιασμού ενός προγράμματος παρακολούθησης, δεν αποτελεί ειδική συνταγή για τη σύνταξη ενός συγκεκριμένου προγράμματος παρακολούθησης. Αποτελεί, όμως, μια λογική σειρά βημάτων. Δεν δίνει τις απαντήσεις, αφού αυτές θα πρέπει να δοθούν από αυτόν που σχεδιάζει το πρόγραμμα. Θέτει όμως σε αυτόν, τα κρίσιμα ερωτήματα ή θέματα τα οποία πρέπει να επιλύσει, για να ολοκληρώσει, με περισσότερες πια πιθανότητες επιτυχίας, τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού προγράμματος παρακολούθησης.

Για να είναι αποτελεσματικό ένα πρόγραμμα παρακολούθησης, δεν είναι απαραίτητο να είναι περίπλοκο, ούτε και πολύ δαπανηρό. Η αποτελεσματικότητα έγκειται στην αξιοπιστία και στην έγκαιρη παρουσίαση

των δεδομένων ή της πληροφορίας που έχει συγκεντρωθεί. Απλά προγράμματα παρακολούθησης μπορούν να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά, εάν σχεδιαστούν σωστά.

Το πλαίσιο για τον σχεδιασμό ενός προγράμματος παρακολούθησης απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3. Ένα υποθετικό παράδειγμα απεικονίζεται στον Πίνακα 5.7.



**Σχήμα 5.3.** Πλαίσιο για τον σχεδιασμό ενός προγράμματος παρακολούθησης (Αναγνωστοπούλου 1998)



**Πίνακας 5.7.** Υποθετικό παράδειγμα προγράμματος για την παρακολούθηση εν δυνάμει υποβάθμισης εδαφών, εξαιτίας του φαινομένου της διάβρωσης εντός της λεκάνης απορροής. Υποθέτουμε ότι προϋπάρχουν επαρκή δεδομένα βάσης για την έκταση της λεκάνης απορροής. Υποθέτουμε επίσης ότι οι σχεδιαστές αυτού του προγράμματος είναι σε θέση να αιτιολογήσουν όλες τις παρακάτω επιλογές τους.

<b>Γενικό πρόβλημα ή θέμα</b>	Η διάβρωση του εδάφους στη λεκάνη απορροής
<b>Ειδικό πρόβλημα ή θέμα</b>	Μείωση των γεωργικών εκτάσεων λόγω διάβρωσης
<b>Σκοπός</b>	Παρακολούθηση της υποβάθμισης στη λεκάνη απορροής
<b>Βασική υπόθεση</b>	Η γεωργική έκταση μέσα στη λεκάνη απορροής δεν θα πρέπει να μειωθεί σημαντικά (95% διάστημα εμπιστοσύνης) από την τρέχουσα έκταση (ορίζουμε την έκταση και δίνουμε τα επίπεδα εμπιστοσύνης γύρω από αυτήν την τιμή)
<b>Μέθοδοι και μεταβλητές</b>	Αεροφωτογραφίες (Α/Φ) λαμβάνονται (λεπτομέρειες πτήσεων, ύψη, τύπος φωτογραφίας, κ.λπ.) κάθε έτος (ημερομηνίες, εναλλακτικές δράσεις στην περίπτωση απρόβλεπτων δυσκολιών λόγω εξοπλισμού ή καιρού) πάνω από τη λεκάνη απορροής (περιγραφή ορίων) και συγκρίνονται με μια βασική τιμή. Αναγνωρίζουμε τους τρόπους χαρτογράφησης των γεωργικών εκτάσεων από τις Α/Φ και αποθηκεύουμε τα δεδομένα ή συμπεραίνουμε εάν έχει χαθεί καλλιεργήσιμη έκταση. Εκτιμούμε την ακρίβεια των δεδομένων. Προσδιορίζουμε τεχνικές επισκόπησης από εδάφους, σε περίπτωση μη διαθεσιμότητας (Α/Φ) για κάποιο χρόνο.
<b>Σκοπιμότητα-σχέση κόστους/αποτελεσματικότητας</b>	Καθορίζουμε την διαθεσιμότητα εξοπλισμού, την καταλληλότητα Α/Φ, τεχνικών επισκόπησης από εδάφους και χαρτογράφησης, κ.λπ. Προσδιορίζουμε το κόστος της απόκτησης και ερμηνείας Α/Φ και της αξιολόγησης των δεδομένων και των επισκοπήσεων από εδάφους. Προσδιορίζουμε τα διαστήματα εμπιστοσύνης στα δεδομένα.
<b>Πιλοτική μελέτη</b>	Δοκιμάζουμε τον εξοπλισμό σε συνθήκες πεδίου και ελέγχουμε την αξιοπιστία των μεθόδων ερμηνείας των δεδομένων, στατιστικές επεξεργασίες, κ.λπ. Επαλήθευση από εδάφους ίσως είναι απαραίτητη για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των δεδομένων. Εκπαιδεύουμε το προσωπικό στη συλλογή και ερμηνεία δεδομένων και σε στατιστικές αναλύσεις.
<b>Δειγματοληψία</b>	Συλλέγουμε Α/Φ, δεδομένα πεδίου, ερμηνεύουμε και αποθηκεύουμε τα δεδομένα. Πραγματοποιούμε επισκοπήσεις από εδάφους.
<b>Ανάλυση δειγμάτων</b>	Συγκρίνουμε στατιστικά τα αποτελέσματα με τα δεδομένα βάσης.
<b>Σύνταξη έκθεσης</b>	Ερμηνεύουμε τη στατιστική ανάλυση και παρουσιάζουμε την έκθεσή μας (προσδιορίζουμε σε ποιόν και σε ποιο χρόνο), με συμπεράσματα και συστάσεις για διαχειριστική δράση και/ή περαιτέρω παρακολούθηση
<b>Εφαρμογή διαχείρισης &amp; αξιολόγησης του προγράμματος</b>	Σταματούμε την παρακολούθηση εάν ή όταν δείχτει ότι δεν συμβαίνει περαιτέρω υποβάθμιση των εδαφών.

#### **5.4.2.1 Προσδιορισμός του προβλήματος**

Ένα πρώτο βήμα στον σχεδιασμό ενός προγράμματος παρακολούθησης, είναι ο εντοπισμός του προβλήματος που οδηγεί στη μεταβολή της εδαφικής ποιότητας της περιοχής που μας ενδιαφέρει. Η αιτία, ή η πλέον πιθανή αιτία του προβλήματος, θα πρέπει επίσης να αναγνωρισθεί, π.χ. η εισροή ρύπων στο έδαφος κατόπιν βαθιάς διήθησης, των πλημμυρώς επεξεργασμένων αποβλήτων. Εάν η αιτία δεν είναι γνωστή θα πρέπει να διερευνηθεί. Συχνά είναι δύσκολο να αποδοθεί σχέση αιτίου-αποτελέσματος ανάμεσα σε μια κατάσταση ή δραστηριότητα και σε κάποια γνωρίσματα του περιβάλλοντος. Ωστόσο, αυτή η πληροφορία είναι αναγκαία για να αποφασισθεί το ποια ή ποιες παραμέτρους θα θέσουμε υπό παρακολούθηση.

#### **5.4.2.2 Καθορισμός του σκοπού της παρακολούθησης**

Οποιοσδήποτε πρόκειται να ξεκινήσει ένα πρόγραμμα παρακολούθησης, έρχεται αντιμέτωπος με σειρά ερωτημάτων, το σπουδαιότερο από τα οποία είναι "Ποιοί είναι οι σκοποί μου;" και επομένως, "τί θα πρέπει να παρακολουθήσω;" Όπως αναφέρθηκε πρωτίτερα, αυτό προϋποθέτει τον καθορισμό δεδομένων βάσης, σε σχέση με τα οποία θα εκτιμηθεί κάποια μεταβολή. Εφόσον διατυπωθούν οι σκοποί, τα επόμενα ερωτήματα, δηλαδή το "πώς", "πότε", "πόσο συχνά", απαντώνται ευκολότερα. Οι σκοποί αυτοί πρέπει να είναι συνδεδεμένοι με τους σκοπούς του διαχειριστικού σχεδίου.

Η διατύπωση των σκοπών της παρακολούθησης είναι το πλέον κρίσιμο στάδιο στον σχεδιασμό ενός προγράμματος παρακολούθησης (Finlayson 1996, Hellowell 1991, Schmoltdt κ.ά. 1994, Finlayson 1994, Reinelt κ.ά. 1992). Οι σκοποί θέτουν τη βάση για τη συλλογή των δεδομένων. Σκοποί οι οποίοι έχουν διατυπωθεί ανακριβώς ή ανεπαρκώς, αναιρούν τη χρησιμότητα της παρακολούθησης. Θα πρέπει, επομένως να διατυπώνονται συγκεκριμένα και με ακρίβεια. Ένα πρόγραμμα διαρκούς επισκόπησης ενδεχομένως να πραγματοποιείται χωρίς ειδικό σκοπό, αλλά όχι και ένα πρόγραμμα

παρακολούθησης, για το οποίο ο σκοπός αποτελεί την αφετηρία. Όταν διατυπώνονται περισσότεροι από έναν σκοποί, αυτοί θα πρέπει να ιεραρχούνται, έτσι ώστε ο χρόνος και οι διαθέσιμοι πόροι να αξιοποιηθούν κατά τον βέλτιστο τρόπο, χωρίς να εγκαταλειφθεί κάποιος από τους σκοπούς.

Σαφώς διατυπωμένοι σκοποί, όχι μόνο βοηθούν τον σχεδιασμό της παρακολούθησης, αλλά και διευκολύνουν τη συνέχιση της εργασίας από νέο προσωπικό σε ορθή βάση, σε μακροχρόνια προγράμματα παρακολούθησης. Οι σκοποί παρέχουν τη βάση για να αποκτηθεί η αναγκαία πληροφορία μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Θα πρέπει να είναι ρεαλιστικοί και να μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα σε εύλογο χρόνο, με τη χρήση μετρήσιμων παραμέτρων.

#### **5.4.2.3 Διατύπωση βασικής υπόθεσης**

Ο σκοπός υποστηρίζεται από μία ρητά διατυπωμένη υπόθεση. Η "σημαντική" μεταβολή ή απόκλιση από τα δεδομένα βάσης, θα πρέπει να ορίζεται (π.χ. η υπέρβαση μιας οριακής τιμής, απόκλιση από μια μέση τιμή). Με άλλα λόγια, απαιτείται μια βασική υπόθεση η οποία μπορεί να ελεγχθεί με βάση τα δεδομένα ή την πληροφορία που έχει συλλεχθεί. Εάν δεν συμβαίνει αυτό, δεν θα είναι δυνατόν να γνωρίζουμε εάν ο σκοπός της παρακολούθησης έχει επιτευχθεί ή όχι.

Για να αποφασίσουμε κατά πόσον η βασική μας υπόθεση υποστηρίζεται από τα υπάρχοντα δεδομένα, λαμβάνουμε υπόψη τις πηγές και το εύρος της διακύμανσης των δεδομένων μας. Οι φυσιολογικές διακυμάνσεις των τιμών των παραμέτρων που επιθυμούμε να παρακολουθήσουμε, θα πρέπει να μας είναι γνωστές. Η βασική υπόθεση πρέπει να βασίζεται σε αξιόπιστα δεδομένα. Η διαρκής επισκόπηση πραγματοποιείται χωρίς προηγουμένως να διατυπωθεί κάποια υπόθεση και είναι χρήσιμη, αλλά δεν παρέχει ενδείξεις για τη σχέση αίτιου-αποτελέσματος, της οποίας η γνώση είναι απαραίτητη για την εξυπηρέτηση διαχειριστικών σκοπών.

#### 5.4.2.4 Επιλογή παραμέτρων και μεθόδων

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης. Για να επιλέξουμε την καταλληλότερη, θα πρέπει να γνωρίζουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων εναλλακτικών μεθόδων. Σε αυτό το στάδιο είναι απαραίτητη η επισκόπηση βιβλιογραφίας και η αναζήτηση επιστημονικών συμβουλών από ειδικούς. Πάνω από όλα, θα πρέπει να κρατούνται στο νου, ο σκοπός ή οι σκοποί της παρακολούθησης και η υπόθεση που διατυπώσαμε.

Για την επιλογή των παραμέτρων και των μεθόδων, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε ποιός είναι ο επιτρεπτός βαθμός μεταβολής (η βασική υπόθεση) και επίσης κατά πόσον η προτιμώμενη μέθοδος μπορεί να εξηγήσει πιθανές πηγές διακύμανσης στα δεδομένα που θα συλλεχθούν. Όταν αποφασίζουμε ποια μέθοδο θα χρησιμοποιήσουμε, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τα παρακάτω:

- ύπαρξη και επάρκεια δεδομένων ή πληροφορίας βάσεως,
- γενικές προσεγγίσεις για τη συλλογή δεδομένων ή πληροφορίας,
- αριθμός και εντοπισμός των θέσεων δειγματοληψίας (ή συλλογής δεδομένων),
- συχνότητα δειγματοληψίας ή συλλογής δεδομένων,
- επαναληπτικότητα δείγματος (όπου αρμόζει),
- ειδικές τεχνικές για τη συλλογή δειγμάτων ή τη συλλογή δεδομένων,
- τεχνικές για την επεξεργασία και την αποθήκευση δειγμάτων ή δεδομένων,
- φύλλα καταγραφής δεδομένων (data sheets) και μέσα αποθήκευσης των δεδομένων ή της πληροφορίας,
- μέθοδοι στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων,
- διαδικασίες για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και της πληροφορίας.

Ιδανικά, οι μέθοδοι που θα επιλεγούν θα πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύουν την όποια μεταβολή, να εκτιμούν τη σημασία της και να προσδιορίζουν ή να διευκρινίζουν την αιτία της μεταβολής.

#### 5.4.2.5 Εκτίμηση σκοπιμότητας και σχέσης κόστους /αποτελεσματικότητας

Όταν έχει επιλεγεί η μέθοδος και έχει προσδιοριστεί ένα σύστημα δειγματοληψίας ή συλλογής δεδομένων, θα πρέπει να εκτιμηθεί το κατά πόσον είναι εφικτή η τακτική και συνεχής εφαρμογή του προγράμματος παρακολούθησης. Μετά από αυτή την εκτίμηση, ίσως φανεί αναγκαίο να αναθεωρηθεί η βασική υπόθεση και ενδεχομένως οι παράμετροι και οι μέθοδοι. Παράγοντες που πρέπει να εκτιμηθούν είναι:

- διαθεσιμότητα καταρτισμένου προσωπικού για τη συλλογή των δειγμάτων ή δεδομένων και την επεξεργασία (όπου απαιτείται) των δειγμάτων,
- πρόσβαση στις θέσεις δειγματοληψίας ή στις πηγές των δεδομένων,
- διαθεσιμότητα και αξιοπιστία ειδικού εξοπλισμού για συλλογή και ανάλυση δειγμάτων ή δεδομένων,
- μέσα για την ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων,
- χρησιμότητα των δεδομένων και της εξαγόμενης από αυτά πληροφορίας,
- τρόποι έγκαιρης παρουσίασης των αποτελεσμάτων,
- οικονομική και υλική υποστήριξη για τη συνέχιση του προγράμματος.

Εάν το πρόγραμμα παρακολούθησης περιλαμβάνεται μέσα σε ένα σχέδιο διαχείρισης, οι παραπάνω παράγοντες μπορούν εύκολα να εκτιμηθούν.

Κατά την εκτίμηση της σκοπιμότητας θα πρέπει να νε εξετασθεί η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Πάντοτε υπάρχει ανάγκη να αποκτήσουμε χρήσιμα δεδομένα και πληροφορίες με το μικρότερο δυνατό κόστος. Το κόστος της απόκτησης των δεδομένων και της ανάλυσής τους θα πρέπει να εξετασθεί σε σχέση με τον προϋπολογισμό, αλλά και τους σκοπούς του προγράμματος. Στη φάση αυτή είναι πολύ χρήσιμη η γνώμη ειδικών που δεν εμπλέκονται στο πρόγραμμα. Ιδανικά, η σχέση κόστους/αποτελεσματικότητας θα πρέπει να επηρεάσει την κατανομή του προϋπολογισμού του προγράμματος. Εάν αυτός δεν είναι επαρκής, το πρόγραμμα θα πρέπει να περικοπεί ή ακόμη και να διακοπεί. Η οικονομική ανεπάρκεια δεν θα πρέπει να λειτουργήσει ως λόγος για να μειωθεί η επιστημονική αξιοπιστία του προγράμματος.

#### 5.4.2.6 Εκπόνηση πιλοτικής μελέτης

Πριν από την έναρξη ενός προγράμματος παρακολούθησης μεγάλης κλίμακας, η εκπόνηση μιας πιλοτικής μελέτης είναι απαραίτητη για την εξοικονόμηση χρόνου και πόρων στο μέλλον. Είναι η ώρα να εναρμονίσουμε τη μέθοδο και τα εκάστοτε φύλλα καταγραφής δεδομένων, και να ελέγξουμε τις βασικές παραδοχές που στηρίζουν την επιλογή της μεθόδου και το σύστημα δειγματοληψίας. Σε αυτό το στάδιο μπορούμε να επαληθεύσουμε την αξιοπιστία της μεθόδου που επιλέξαμε και να εντοπίσουμε τις τυχόν αλλαγές που θα πρέπει να γίνουν στον σχεδιασμό του προγράμματος ή στις ειδικές τεχνικές για τη συλλογή και την ανάλυση των δεδομένων. Είναι επομένως η ώρα να γίνουν αλλαγές στις διαδικασίες που έχουν επιλεγεί. Αλλαγές που θα γίνουν σε κάποια μεταγενέστερη στιγμή μπορεί να αποβούν πολύ δαπανηρές, ακόμη και να ακυρώσουν τελείως ένα πρόγραμμα παρακολούθησης. Ο ειδικός εξοπλισμός δειγματοληψίας ή συλλογής δεδομένων πρέπει να δοκιμαστεί σε αυτό το στάδιο, και εάν είναι απαραίτητο, να τροποποιηθεί, σύμφωνα με την πείρα που αποκτήθηκε από την πιλοτική μελέτη. Επιπλέον, σε αυτό το στάδιο, δίνεται η ευκαιρία να προσδιορισθούν οι ανάγκες κατάρτισης του εμπλεκόμενου προσωπικού.

Η καταλληλότητα των μέσων για την ανάλυση των δεδομένων θα πρέπει επίσης να επαληθευθεί. Εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στατιστικές αναλύσεις, αυτές θα πρέπει να δοκιμαστούν πάνω στα δεδομένα της πιλοτικής μελέτης. Τυχόν αποκλίσεις από τις παραδοχές των αναλύσεων (π.χ. μη κανονικά κατανομημένα δεδομένα, μη ανεξάρτητα δεδομένα, ανεπαρκής επαναληπτικότητα δείγματος, κ.λπ.) θα πρέπει να σημειώνονται και να λαμβάνεται διορθωτική δράση. Ενδεχομένως να μην είναι απαραίτητο να ισχύουν όλες οι στατιστικές παραδοχές, αλλά πρέπει να γνωρίζουμε τη σπουδαιότητα και τις συνέπειες της κάθε αποκλίσεως.

Ο χρόνος και η προσπάθεια που απαιτείται για την εκπόνηση της πιλοτικής μελέτης, ποικίλει σε μεγάλο βαθμό, ανάλογα με τη βασική υπόθεση και τις μεθόδους που θα δοκιμασθούν. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η πληροφορία που θα συλλεγεί κατά την πιλοτική μελέτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κανονικά στο πρόγραμμα παρακολούθησης.

Βασιζόμενοι στην πείρα της πιλοτικής μελέτης, το σύστημα δειγματοληψίας ή συλλογής δεδομένων, πρέπει να οριστικοποιηθεί και να διαρθρωθεί με σαφήνεια. Θα πρέπει να συνταχθούν, στην οριστική τους μορφή, ατομικά φύλλα καταγραφής δεδομένων και να κατανεμηθούν στο απασχολούμενο προσωπικό, μαζί με λεπτομερείς επεξηγήσεις της διαδικασίας.

Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να διαφανεί ότι οι μέθοδοι που επιλέξαμε, για ποικίλους λόγους, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν. Τότε θα πρέπει να αλλάξουμε την υπόθεση και τις μεθόδους, ή ακόμη και να εγκαταλείψουμε το πρόγραμμα.

#### **5.4.2.7 Δειγματοληψία ή συλλογή δεδομένων**

Η δειγματοληψία ή η συλλογή δεδομένων δεν πρέπει να ξεκινά προτού οι μέθοδοι και τα φύλλα καταγραφής δεδομένων να έχουν οριστικοποιηθεί και το απασχολούμενο προσωπικό είναι προετοιμασμένο κατάλληλα. Η αυστηρότητα με την οποία διεξάγεται η δειγματοληψία ή η συλλογή δεδομένων μπορεί να καθορίσει τον βαθμό επιτυχίας του προγράμματος. Όπου υπάρχει λόγος να γίνει κάποια παρέκλιση από τον καταγραμμένο τρόπο δειγματοληψίας ή συλλογής δεδομένων και τα φύλλα καταγραφής δεδομένων, αυτή η παρέκλιση θα πρέπει να τεκμηριώνεται και να σημειώνεται. Η σημείωση αυτή θα συνοδεύει και θα αποθηκεύεται μαζί με τα δεδομένα. Όταν γίνεται δειγματοληψία κάποιου υλικού (βιοτικού ή αβιοτικού), τα παρακάτω στοιχεία πρέπει να συνοδεύουν όλα τα δείγματα:

- ημερομηνία και θέση δειγματοληψίας ή συλλογής δεδομένων,
- ονόματα προσωπικού δειγματοληψίας ή συλλογής δεδομένων,
- μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη δειγματοληψία ή τη συλλογή δεδομένων,
- αριθμός δειγμάτων που απαιτούνται (όπου αρμόζει),
- εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των δειγμάτων ή των δεδομένων,
- μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την αποθήκευση ή τη μεταφορά των δειγμάτων (όπου αρμόζει),

- αλλαγές στις καθορισμένες μεθόδους ή φύλλα καταγραφής δεδομένων.

Στις περιπτώσεις που συλλέγονται άλλου είδους δεδομένα (π.χ. κοινωνικο-οικονομικά, αναπτυξιακά, κ.λπ., φροντίζουμε να συνοδεύουμε και αυτά με τις ανάλογες απαραίτητες πληροφορίες.

Η αποτελεσματικότητα ενός προγράμματος παρακολούθησης, σε κάποιες περιπτώσεις, βασίζεται επίσης και στην έγκαιρη επεξεργασία των δειγμάτων που συλλέχθηκαν. Όταν τα δείγματα υφίστανται επεξεργασία, τα παρακάτω πρέπει να καταγράφονται:

- ημερομηνία και τόπος,
- ονόματα προσωπικού επεξεργασίας,
- μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δειγμάτων,
- αριθμός δειγμάτων που απαιτούνται,
- εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δειγμάτων,
- αλλαγές στις καθορισμένες μεθόδους ή φύλλα καταγραφής δεδομένων.

#### **5.4.2.8 Ανάλυση δειγμάτων και επεξεργασία δεδομένων**

Πολλά δείγματα, μετά από τη συλλογή και την τυχόν επεξεργασία τους, καθώς και πολλά είδη δεδομένων, απαιτούν ανάλυση. Οποιοδήποτε τύπου κι αν είναι αυτή η ανάλυση, θα πρέπει να προσδιορίζεται στο στάδιο της πιλοτικής μελέτης. Συχνά, για την επεξεργασία των δεδομένων, χρησιμοποιούνται στατιστικές αναλύσεις. Αυτές οι αναλύσεις θα πρέπει επίσης να έχουν δοκιμαστεί στην πιλοτική μελέτη. Η επιτυχία ενός προγράμματος παρακολούθησης δεν είναι δυνατή, παρά μόνον εάν τα δεδομένα που θα προκύψουν γίνονται διαθέσιμα για ερμηνεία.

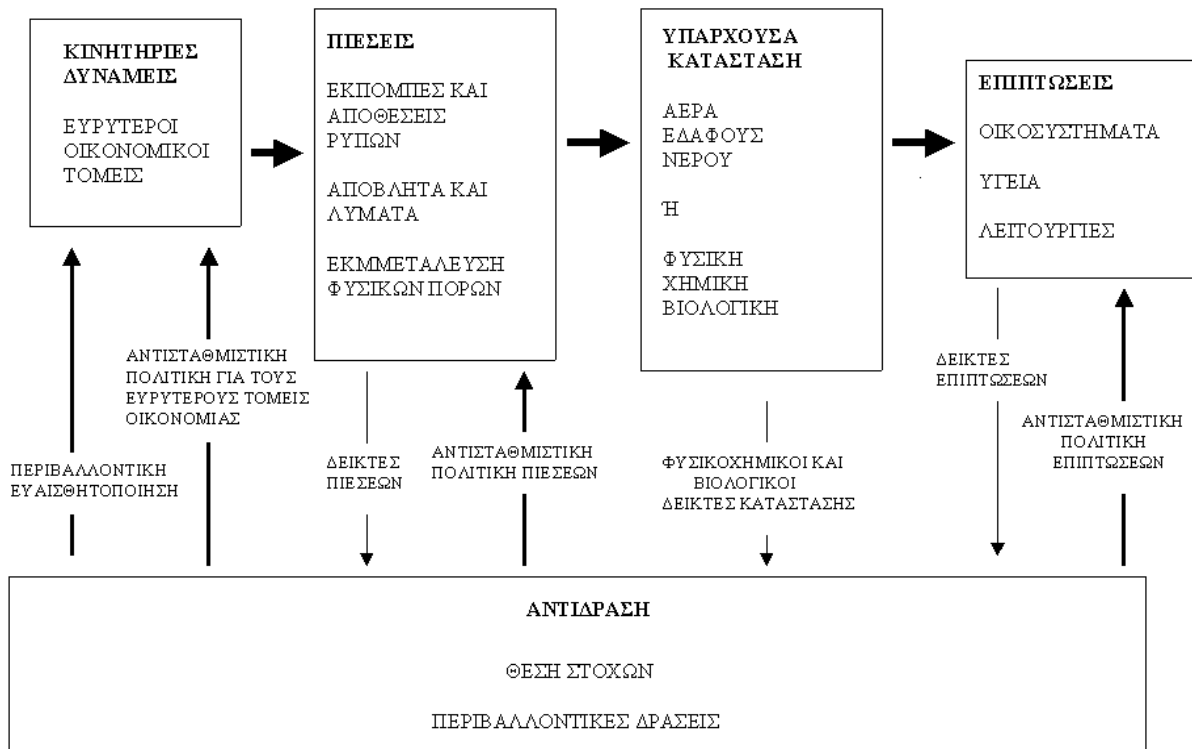
Όπως και με τη συλλογή δειγμάτων, έτσι και κατά την ανάλυσή τους, κάποιες βασικές πληροφορίες θα πρέπει να σημειώνονται:

- ημερομηνία και τόπος,
- ονόματα προσωπικού που πραγματοποιεί τις αναλύσεις,
- μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν,
- εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά τις αναλύσεις,
- μέσα και θέση αποθήκευσης δεδομένων,
- τυχόν αλλαγές στις καθορισμένες μεθόδους,



- στατιστικές δοκιμές (tests) και επίπεδα σημαντικότητας.

Για την καλύτερη δυνατή επεξεργασία των δεδομένων, ώστε να αξιολογηθούν οι ανθρωπογενείς επιπτώσεις στις εδαφικές λειτουργίες συνιστάται η χρησιμοποίηση μιας ολοκληρωμένης μεθόδου περιβαλλοντικών εκτιμήσεων που είναι το σύστημα DPSIR (Σχήμα 5.4).



**Σχήμα 5.4.** Μέθοδος περιβαλλοντικών εκτιμήσεων DPSIR

Το σύστημα αυτό δεν έχει σκοπό μόνο την ορθή ταξινόμηση των πληροφοριών αλλά βοηθάει στη διάγνωση τυχόν αλληλεπιδράσεων μεταξύ ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και ποιότητας του εδαφικού οικοσυστήματος. Το σύστημα DPSIR αποτελείται από μια αλυσίδα αιτιωδών δεσμών ανάμεσα στις Κινητήριες Δυνάμεις (Driving forces) οι οποίες προκαλούν τις πιέσεις (pressures) σε μια (δεδομένη) κατάσταση (state) του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα την πρόκληση επιπτώσεων (impacts), οι οποίες τελικά οδηγούν σε πολιτικές αντιδράσεις για την αποκατάστασή τους (responses).

Τα πέντε δομικά στοιχεία του συστήματος DPSIR υποδιαιρούνται σε μικρότερες ενότητες. Οι κινητήριες δυνάμεις που τις προκαλούν προέρχονται από τους γενικούς κοινωνικοοικονομικούς τομείς (οικονομία, πληθυσμός) και τους ειδικούς (π.χ. μεταφορές, τουρισμός κ. λπ.). Οι πιέσεις διαιρούνται σε εκπομπές, απόβλητα και χρήση πόρων. Η κατάσταση προσεγγίζεται ανάλογα

είτε με το μέσο (αέρας, έδαφος, νερό) είτε με τον τύπο (φυσική, χημική, βιολογική). Οι επιπτώσεις αφορούν τα οικοσυστήματα, την ανθρώπινη υγεία και τις λειτουργίες ενώ οι αντιδράσεις τα μέτρα γενικής ή ειδικής πολιτικής. Αναλυτικότερες πληροφορίες δίνονται στον Πίνακα 5.8.

**Πίνακας 5.8.** Δομικά στοιχεία του συστήματος DPSIR

<b>Κινητήριες Δυνάμεις</b>
<i>Γενικοί τομείς</i>
1. Οικονομία
2. Πληθυσμός
3. Χρήσεις γης
<i>Συγκεκριμένοι τομείς</i>
1. Γεωργία
2. Βιομηχανία
3. Μεταφορές
4. Ενέργεια
5. Τουρισμός
6. Άλλοι τομείς
7. Συνεισφορές έξω από την περιοχή μελέτης
<b>Πιέσεις</b>
1. Αποθέσεις στο έδαφος
2. Εκροές στο νερό
3. Εκπομπές στον αέρα
4. Απόβλητα
5. Χρήση πόρων
6. Εκροές στο νερό έξω από την περιοχή μελέτης
7. Εκπομπές στον αέρα έξω από την περιοχή μελέτης
<b>Κατάσταση</b>
1. Νερά, υποδιαιρούμενα σε:
• Υπόγεια νερά
• Επιφανειακά νερά
• Θαλάσσια νερά
2. Έδαφος
3. Αέρας
<b>Επιπτώσεις</b>
1. Οικοσυστήματα
2. Λειτουργίες
3. Ανθρώπινη υγεία
<b>Αντιδράσεις</b>
1. Καθορισμός στόχων
2. Περιβαλλοντικές ενέργειες

Για την ανάλυση των δεδομένων το προτεινόμενο σύστημα βοηθάει να μη χαθούν σημαντικές σχέσεις ανάδρασης ανάμεσα στους κρίκους της αλυσίδας. Η αξία του συστήματος DPSIR είναι πρακτική και θεωρητική. Η πρακτική αξία βρίσκεται στο ότι οργανώνει εύχρηστους δείκτες. Οι υπεύθυνοι του συστήματος παρακολούθησης μπορούν να αναλύσουν ευκολότερα τυχόν αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ των διαφόρων δεδομένων του κύκλου DPSIR και παράλληλα καθορίζονται οι ευθύνες των συνεργαζόμενων μέσα στο σύστημα παρακολούθησης. Στο θεωρητικό επίπεδο το σύστημα δείχνει την πολυπλοκότητα των περιβαλλοντικών προβλημάτων και δικαιολογεί την αξίωση για περισσότερες πηγές. Τέλος, εδραιώνει τη θέση πως αν και η κατάσταση είναι πολύπλοκη, η οργάνωσή της μπορεί να ελεγχθεί.

#### **5.4.2.9 Ερμηνεία δεδομένων και παρουσίαση αποτελεσμάτων**

Τα αποτελέσματα ενός προγράμματος παρακολούθησης θα πρέπει να ερμηνεύονται και να παρουσιάζονται υπό μορφή ειδικής έκθεσης εγκαίρως. Δεν πρέπει να ξεχνούμε ότι σκοπός μας είναι να χρησιμοποιήσουμε αυτά τα αποτελέσματα για να επιτύχουμε τους διαχειριστικούς μας σκοπούς. Η ερμηνεία θα πρέπει να γίνεται στο πλαίσιο που θέτει ο σκοπός του προγράμματος. Η δημοσιοποίηση των σχετικών εκθέσεων, μπορεί να λειτουργήσει και ως τρόπος ελέγχου της ποιότητας του προγράμματος.

Η έκθεση δεν πρέπει κατ' ανάγκη να περιλαμβάνει όλα τα αποτελέσματα και όλες τις λεπτομέρειες, παρόλο που αυτά θα πρέπει να είναι αμέσως προσβάσιμα. Η δομή, το περιεχόμενο και το ύφος της έκθεσης εξαρτώνται από τη φύση του προβλήματος ή θέματος που προσεγγίζει και από τους σκοπούς του προγράμματος. Σε πολλές περιπτώσεις είναι χρήσιμο να υπάρχουν συστάσεις για περαιτέρω παρακολούθηση όμοιου ή άλλου τύπου. Το μέγεθος και το ύφος της έκθεσης θα ποικίλει ανάλογα και πάλι με τον σκοπό και τους πιθανούς αναγνώστες της. Η πληροφορία που περιέχει θα πρέπει να είναι σαφής και περιεκτική, χωρίς περιττές γενικολογίες και πάντοτε μέσα στο θέμα.

Η έκθεση θα πρέπει να δείχνει κατά πόσον η βασική υπόθεση ισχύει και κατά πόσον απαιτείται διαχειριστική δράση. Επίσης θα πρέπει να δείχνει τον

βαθμό αποτελεσματικότητας των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στη δειγματοληψία ή συλλογή δεδομένων.

#### **5.4.2.10 Υλοποίηση διαχειριστικών δράσεων και αξιολόγηση του προγράμματος**

Καθ'όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού και της εφαρμογής ενός προγράμματος παρακολούθησης, θα πρέπει να χρησιμοποιείται η ανάδραση που φαίνεται στο Σχήμα. 5.4, έτσι ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι τηρείται η απαραίτητη αυστηρότητα και ότι η βασική υπόθεση μπορεί να ελεγχθεί από τα δεδομένα που έχουν συλλεγεί. Στο τέλος του προγράμματος ή σε κάποιο προκαθορισμένο χρόνο, η όλη διαδικασία πρέπει να επανεξεταστεί και, όπου είναι απαραίτητο, να γίνουν αλλαγές. Οι αλλαγές αυτές θα πρέπει να καταγράφονται και να τεκμηριώνονται. Όταν οι σκοποί του προγράμματος εκπληρώνονται, το πρόγραμμα μπορεί να παύσει.

#### **5.4.3 Δείκτες και πρόγραμμα παρακολούθησης**

Οι δείκτες είναι μετρήσιμες μεταβλητές, των οποίων οι τιμές μας υποδεικνύουν κάποια μεταβολή που έχει συντελεστεί, συντελείται, ή πρόκειται να συντελεστεί, στο μελετώμενο οικοσύστημα (ή την απουσία κάποιας μεταβολής). Οι δείκτες παρέχουν έναν σπουδαίο τρόπο για την παρακολούθηση της κατάστασης και των μεταβολών σε σύνθετα συστήματα με αλληλεπιδρώσες συνιστώσες. Η τάση του δείκτη είναι συχνά το ίδιο σημαντική όσο και η στιγμιαία τιμή του. Υπάρχει ένας θεωρητικός "ενδοιασμός", όταν χρησιμοποιούμε δείκτες για να αξιολογήσουμε τη μεταβολή ενός οικοσυστήματος, διότι σχεδόν σε κάθε περίπτωση, ο δείκτης είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, ενώ οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που ελέγχουν τις λειτουργίες του οικοσυστήματος, αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Όταν λοιπόν μετρούμε έναν δείκτη, μετρούμε μια εξαρτημένη μεταβλητή μέσα σε ένα σύστημα πολλαπλών μεταβλητών, συχνότατα δίχως να γνωρίζουμε ποια από τις ανεξάρτητες μεταβλητές έχει αλλάξει. Γι' αυτόν τον λόγο χρειάζεται

προσοχή στην ερμηνεία των τιμών των δεικτών, καθώς σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι φανερό τι κάνει το δείκτη να συμπεριφέρεται κατά έναν ορισμένο τρόπο.

Ο αριθμός των παραμέτρων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πρόγραμμα παρακολούθησης είναι τεράστιος. Το κόστος και η αποδοτικότητα (αξία ως δείκτες, έγκαιρη προειδοποίηση), διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ανάμεσα σε διαφόρους δείκτες. Γι' αυτό η επιλογή τους είναι ένα από τα πλέον καίρια θέματα στον σχεδιασμό ενός προγράμματος παρακολούθησης. Για την επιλογή δεικτών, πολύ μεγάλη σημασία έχει η ξεκάθαρη διατύπωση των σκοπών της παρακολούθησης. Οι δείκτες μπορεί να είναι φυσικοί, χημικοί ή βιολογικοί. Στα αντίστοιχα κεφάλαια αναλύθηκαν οι δείκτες οι οποίοι πρέπει να χρησιμοποιούνται για μια γρήγορη εκτίμηση της ποιότητας των εδαφών (ελάχιστος αριθμός δεδομένων), καθώς και τα πιο λεπτομερή δεδομένα τα οποία πρέπει να χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της εδαφικής ρύπανσης. Αμφότερα πρέπει να εντάσσονται σ' ένα λεπτομερές σύστημα παρακολούθησης.

#### **5.4.4 Η χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας για την παρακολούθηση της εδαφικής ποιότητας**

Η τηλεπισκόπηση μπορεί να αυξήσει τις πληροφορίες που παρέχει το χαρτογραφικό υπόβαθρο, όπως η φυσιογραφία, η στράγγιση, η διάβρωση, η αλατότητα και το βάθος των εδαφών. Με τις πληροφορίες αυτές γίνεται ακριβέστερη η οριοθέτηση των χαρτογραφικών μονάδων χρήσεων γης και επίσης μπορούν να αναγνωρισθούν στοιχεία της επιφάνειας της γης όπως π.χ. φυσική βλάστηση, βραχώδεις περιοχές, υδρογραφικό δίκτυο, κλίσεις κ.λπ. που κάνουν πιο εύκολη την αναγνώριση της παρούσας κατάστασης χρήσεων γης. Η χρήση γης αναγνωρίζεται από το χαρακτηριστικό τύπο τόνου που δημιουργείται από τα ανεξάρτητα αγροτεμάχια ή από ορισμένη διάταξη όπως π.χ. τους οπωρώνες ή το δάσος.

Οι πληροφορίες του αναγλύφου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποτιμηθεί η καταλληλότητα των διαφόρων τμημάτων γης για διάφορες χρήσεις. Τα τοπογραφικά γνωρίσματα μιας περιοχής είναι από τους

σπουδαιότερους προσδιοριστικούς παράγοντες για την αξιολόγηση μιας περιοχής για να επιτελέσει συγκεκριμένες λειτουργίες.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ψηφιακή χωρική αποθήκευση πρωτογενών ή και παραγώγων δεδομένων και για την αλληλεπίθεση αυτών, για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από μετρήσεις, όπως επίσης και για την ερμηνεία και αξιολόγηση των εδαφικών και υδατικών πόρων. Υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ψηφιακών υψομετρικών ομοιωμάτων και τρισδιάστατων απεικονίσεων (Digital Elevation Models - DEM και 3D-views). Επίσης με βάση τα DEM το ΓΣΠ είναι δυνατό να παραχθούν νέες πληροφορίες, όπως χάρτες κλίσεων, προσανατολισμού, υδρογραφικών δικτύων, κ.λπ.

Μετά τις εργασίες πεδίου και κατά τη διάρκεια των αναλύσεων, όλα τα διαθέσιμα στοιχεία αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων του ΓΣΠ με σκοπό τη δημιουργία νέων θεματικών χαρτών, όπως διάβρωσης, ποιοτήτων γης, αρδευσιμότητας, κ.λπ. Εάν φαντασθούμε ότι κάθε δεδομένο στη βάση δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός θεματικού χάρτη, αντιλαμβάνεται κανείς το πλήθος των θεματικών χαρτών που μπορούν να παραχθούν και τον όγκο και την ποιότητα των δεδομένων που θα έχει στα χέρια του ο φορέας που θα είναι επιφορτισμένος με το έργο της λήψης αποφάσεων.

Με τη χρήση των υπαρχουσών πληροφοριών και με την εφαρμογή της φυσιογραφικής μεθόδου μπορούμε να καθορίσουμε την τάση (φθίνουσα-αύξουσα) της εδαφικής ποιότητας μελετώντας τις κλίσεις, το ανάγλυφο, το υδρογραφικό δίκτυο, τη φυσική βλάστηση και τη θέση (έκθεση) μιας συγκεκριμένης περιοχής σε συνάρτηση με τα δεδομένα μας. Πάνω στα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορεί να βασισθεί η λήψη αποφάσεων ως προς τον σχεδιασμό χρήσεων γης, τη μεταβολή ή τη διατήρηση της εφαρμοζόμενης χωροδιάταξης καλλιεργειών, τον καθορισμό των επιπέδων αναφοράς ως προς τους δείκτες εδαφικής ποιότητας (π.χ. ομάδα ελαχίστων δεδομένων M.D.S) και γενικά την παρακολούθηση των φυσικών παραμέτρων της περιοχής ενδιαφέροντος. Όλα αυτά τα στοιχεία μπορούν να ενσωματωθούν σ' ένα έμπειρο σύστημα (expert system) το οποίο βοηθάει στη

λήψη αποφάσεων σε επίπεδο λεκάνης απορροής και αποτελεί απαραίτητο «εργαλείο» στα χέρια των τοπικών φορέων.

Σκοπός της σύγχρονης προσέγγισης στον σχεδιασμό χρήσεων γης, αλλά και στα περιβαλλοντικά προβλήματα γενικότερα είναι η ολοκληρωμένη προσέγγιση και αποτίμηση σ' επίπεδο λεκάνης απορροής των ανθρωπογενών επιπτώσεων στις μεταβολές της εδαφικής ποιότητας.

Η ολοκληρωμένη προσέγγιση είναι απαραίτητη για την κατανόηση των περίπλοκων διεργασιών που ρυθμίζουν τις μεταβολές της εδαφικής ποιότητας. Οι εκτιμήσεις που προκύπτουν μας δείχνουν τον τρόπο σύνδεσης των κινητήριων δυνάμεων (driving forces), των περιβαλλοντικών και κοινωνικών συνεπειών των μεταβολών αλλά και των αναδράσεων και της κοινωνικής προσαρμογής που με τη σειρά τους επηρεάζουν τη μεταβολή.

Επειδή οι μεταβολές που επέρχονται στο έδαφος είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της σύνθεσης τόσο των φυσικών όσο και των ανθρωπογενών φαινομένων που συμβαίνουν σε ένα πλήθος από διαφορετικές κλίμακες, είναι απαραίτητο να υπάρχει σχεδιασμός σ' επίπεδο λεκάνης απορροής.

Οι πρακτικές διαχείρισης του εδάφους είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την εδαφική ποιότητα. Τόσο τα στελέχη που είναι επιφορτισμένα με το έργο της λήψης αποφάσεων όσο και οι ίδιοι οι παραγωγοί, χρειάζονται πρακτικά εργαλεία και τεχνικές προσέγγισης για τη μέτρηση και αποτίμηση των επιδράσεων των διάφορων διαχειριστικών πρακτικών στην ποιότητα του εδάφους (αλλά και στην ποιότητα των υδατικών πόρων).

Η αποτελεσματική χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας για την καταγραφή και παρακολούθηση της εδαφικής ποιότητας απαιτεί:

- βελτίωση της ακρίβειας και μείωση της δαπάνης και του χρόνου σύνταξης χαρτών και διάφορων ειδών μελετών,
- παρουσίαση δεδομένων και συμπερασμάτων υπό μορφή αντιληπτή και εύχρηστη από όλους τους ενδιαφερόμενους,
- μεταφορά δεδομένων των θεματικών χαρτών στην επίλυση προβλημάτων άρδευσης, στράγγισης, λίπανσης καλλιεργειών και διατήρησης της εδαφικής ποιότητας σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Η χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της ακρίβειας, στη μείωση των απαιτούμενων δαπανών και στη μείωση του απαιτούμενου χρόνου για τη διεκπεραίωση των εργασιών. Η

οργάνωση, διοίκηση και εκτέλεση των έργων απογραφής και αξιολόγησης της εδαφικής ποιότητας με τη χρήση των εργαλείων αυτών μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο και τις απαιτούμενες δαπάνες.

Τα δεδομένα και η όλη προσπάθεια σύνταξης θεματικών χαρτών και μελετών με απώτερο σκοπό τη διατήρηση της εδαφικής ποιότητας είναι τελείως άχρηστη αν δεν είναι εύκολα προσιτά από τους χρήστες. Η εύκολη πρόσβαση χρειάζεται την ανάπτυξη δικτύων ηλεκτρονικής επικοινωνίας τόσο μεταξύ των επί μέρους βάσεων δεδομένων, όσο και μεταξύ των χρηστών. Επίσης οι διάφορες βάσεις δεδομένων πρέπει να γίνουν συμβατές μεταξύ τους. Τα δίκτυα πληροφοριών θα πρέπει να δίνουν τη δυνατότητα στους αρμόδιους φορείς να ερμηνεύουν τα δεδομένα και να εξάγουν μόνοι τους τα συμπεράσματα που τους ενδιαφέρουν μέσα από τη χρήση εμπειρων συστημάτων. Τέλος, η εκπαίδευση του προσωπικού θα επιτρέψει την αποτελεσματική χρήση των εργαλείων αυτών, ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα των εδαφικών πόρων της λεκάνης απορροής.