ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΚΥΡΙΑΚΙΔΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ – Α.Μ.: 3020114

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΛΑΡΙΣΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2024

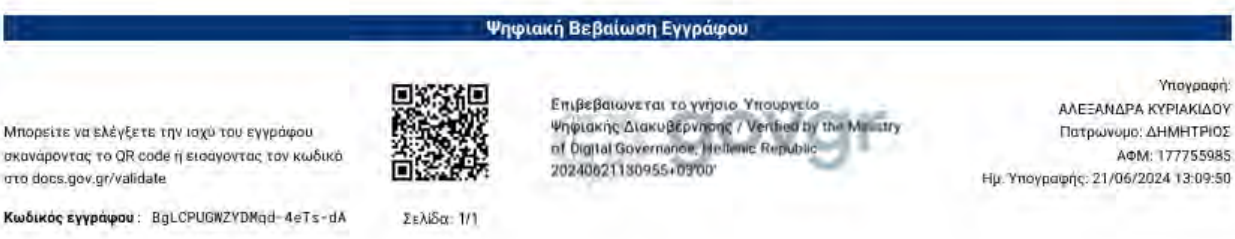
Ενυπόγραφη δήλωση μη λογοκλοπής

Η παρακάτω υπογράφουσα δηλώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και ότι στο πλαίσιο αυτό έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφία, κ.λ.π., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε Κανονισμοί του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Ημερομηνία: 21-06-2024

Ονοματεπώνυμο: Αλεξάνδρα Κυριακίδου

Υπογραφή:



Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

.....

.....

.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία τεχνολογική και βιομηχανική εξέλιξη που σημειώθηκε τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, σε συνδυασμό με την εντατική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και της ενέργειας, έχει επιφέρει σημαντικά προβλήματα ρύπανσης στο περιβάλλον. Ένα από τα σοβαρότερα ζητήματα της σύγχρονης εποχής είναι η ρύπανση και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος από τα βαρέα μέταλλα. Αυτά τα μέταλλα δεν αποικοδομούνται και παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα να εισέρχονται στους γεωχημικούς κύκλους και τελικά στην τροφική αλυσίδα, προκαλώντας μακροπρόθεσμες επιπτώσεις.

Τα βαρέα μέταλλα είναι μια ομάδα στοιχείων του Περιοδικού Πίνακα που χαρακτηρίζονται από ατομική πυκνότητα μεγαλύτερη από 6 gr/cm³. Εναλλακτικά, αναφέρονται ως "δυναμικά τοξικά στοιχεία" λόγω των επιβλαβών τους ιδιοτήτων. Η τοξικότητα αυτών των μετάλλων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η συγκέντρωσή τους, το είδος του μετάλλου, η αλληλεπίδραση με άλλα μέταλλα, το είδος των οργανισμών που εκτίθενται σε αυτά, καθώς και τη μορφή με την οποία είναι διαθέσιμα στο περιβάλλον.

Οι κύριες πηγές μέσω των οποίων τα βαρέα μέταλλα εισέρχονται στο έδαφος περιλαμβάνουν τα αστικά λύματα, τα βιομηχανικά απόβλητα, το νερό της βροχής, τα νερά των ποταμών και τις ατμοσφαιρικές εναποθέσεις. Στην επιφάνεια του εδάφους, αυτά τα μέταλλα ανευρίσκονται σε σχετικά μικρές συγκεντρώσεις, είτε ως συστατικά ανόργανων ή οργανικών ενώσεων, είτε ως προσροφημένα ιόντα στα κολλοειδή του εδάφους.

Η παρουσία και η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον εγείρει σοβαρές ανησυχίες λόγω των τοξικών τους επιδράσεων στους ζωντανούς οργανισμούς. Αυτές οι επιδράσεις μπορεί να είναι άμεσες ή έμμεσες και εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα των μετάλλων, την οικολογική αλληλεπίδραση και τη βιοσυσσώρευσή τους στην τροφική αλυσίδα, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για παρακολούθηση και διαχείριση της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα.

Λέξεις-κλειδιά: περιβαλλοντική ανάλυση, ρυπασμένα εδάφη, βαρέα μέταλλα, τοξικότητα, φυτοεξυγίανση

SUMMARY

The rapid technological and industrial development that has occurred over the past four decades, combined with the intensive exploitation of natural resources and energy, has caused significant pollution problems in the environment. One of the most serious issues of modern times is the pollution and degradation of the environment by heavy metals. These metals do not biodegrade and remain in the environment for long periods, eventually entering geochemical cycles and the food chain, causing long-term impacts.

Heavy metals are a group of elements in the Periodic Table characterized by an atomic density greater than 6 gr/cm³. Alternatively, they are referred to as "potentially toxic elements" due to their harmful properties. The toxicity of these metals depends on various factors, such as their concentration, the type of metal, interaction with other metals, the type of organisms exposed to them, and the form in which they are available in the environment.

The main sources through which heavy metals enter the soil include urban sewage, industrial waste, rainwater, river water, and atmospheric deposits. On the soil surface, these metals are found in relatively small concentrations, either as components of inorganic or organic compounds or as adsorbed ions on soil colloids.

The presence and concentration of heavy metals in the environment raise serious concerns due to their toxic effects on living organisms. These effects can be direct or indirect and depend on the availability of the metals, ecological interactions, and their bioaccumulation in the food chain, making the monitoring and management of heavy metal pollution imperative.

Keywords: Environmental analysis, Contaminated soils, Heavy metals, Toxicity, Phytoremediation

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χριστοδούλου Δημήτριο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την καθοδήγησή του και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας. Η εμπειρία, οι γνώσεις και η αφοσίωσή του υπήρξαν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση αυτού του έργου. Ευχαριστώ θερμά για την ενθάρρυνση, καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε για να με βοηθήσει σε κάθε βήμα της διαδικασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αδιάκοπη αγάπη, ενθάρρυνση και στήριξη που μου παρείχαν σε κάθε μου βήμα. Χωρίς την ανιδιοτελή υποστήριξή τους, η επίτευξη αυτού του στόχου δεν θα ήταν δυνατή.

Ευχαριστώ όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας και στη στήριξή μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ……3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΒΙΟΤΙΚΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ……..14

1.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ……14
1.2 ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΦΗ……16
1.3 ΤΑ ΟΡΥΚΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ……..16
1.4 ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΟΜΗ……17
1.5 ΕΔΑΦΙΚΑ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΑ……18
1.6 ΤΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ……19
1.7 ΤΥΠΟΙ ΕΔΑΦΟΔΟΜΩΝ……19
1.8 ΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ……19
1.9 ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΟΥΣΙΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ……21
1.9.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ……22
1.9.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ……22
1.9.3 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ……22
1.9.4 ΤΗΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ……..22
1.9.5 ΠΟΛΥΤΕΛΕΙΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ……23
1.9.6 ΚΟΜΠΟΣΤΕΣ, ΚΟΠΡΙΕΣ, ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ……23
1.9.7 BIOCHAR……..…23
1.9.8 ΖΩΑ ΚΑΙ ΒΟΣΚΗΣΗ……23
1.9.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΥΞΗΣΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ……23
1.10 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΧΟΥΜΟΥ……24
1.11 ΕΔΑΦΙΚΗ ΤΟΜΗ……25
1.12 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ……25
1.13 ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΣΤΑ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ……26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΔΑΦΙΚΟ ΤΡΟΦΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ……28

2.1 ΕΔΑΦΙΚΗ ΤΡΟΦΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ……28

2.2 ΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ……29

2.3 ΡΙΖΟΣΦΑΙΡΑ……31

2.4 ΜΥΚΟΡΡΙΖΕΣ……34

2.5 ΕΔΑΦΟΠΑΝΙΔΑ……36

2.5.1 ΠΡΩΤΟΖΩΑ……36

2.5.2 ΝΗΜΑΤΩΔΕΙΣ……37

2.5.3 ΠΛΑΤΥΕΛΜΙΝΘΕΣ……38

2.5.4 ΟΛΙΓΟΧΑΙΤΟΙ……39

2.5.5 ΕΝΧΥΤΡΕΪΔΕΣ……41

2.5.6 ΑΚΑΡΕΑ……41

2.5.7 ΚΟΛΛΕΜΒΟΛΑ……43

2.5.8 ΠΡΟΤΟΥΡΑ……43

2.5.9 ΔΙΠΛΟΥΡΑ……44

2.5.10 ΨΕΥΔΟΣΚΟΡΠΙΟΙ……..44

2.5.11 ΣΥΜΦΥΛΑ……..45

2.5.12 ΑΡΑΧΝΕΣ……45

2.5.13 ΟΡΘΟΠΤΕΡΑ……46

2.5.14 ΚΟΛΟΕΠΤΕΡΑ……47

2.5.15 ΛΕΠΙΔΟΠΤΕΡΑ……47

2.5.16 ΔΙΠΤΕΡΑ……48

2.5.17 ΥΜΕΝΟΠΤΕΡΑ……48

2.5.18 ΔΙΠΛΟΠΟΔΑ……49

2.5.19 ΙΣΟΠΟΔΑ……50

2.5.20 ΧΗΛΟΠΟΔΑ……51

2.5.21 ΣΑΛΙΓΚΑΡΙΑ……52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ, ΤΑ ΥΔΑΤΑ, ΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΙ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ……53

3.1 ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ……53

3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ……..……53

3.1.2 ΞΗΡΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ……..……54

3.1.3 ΥΓΡΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ……..54

3.1.4 ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ……..…55

3.2 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ……55

3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ……..55

3.2.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ……57

3.2.3 ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ……..57

3.2.3.1 ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ……58

3.2.3.2 ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟ ΦΥΤΟΦΑΡΜΑΚΑ……59

3.3 ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ……60

3.3.1 ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΛΥΜΑΤΑ……60

3.3.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ……61

3.3.3 ΔΙΑΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΙΛΥΟΣ……..63

3.4 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ……64

3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ……64

3.4.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ……65

3.4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ……65

3.4.4 ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ……66

3.4.5 ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ……67

3.4.5.1 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ……68

3.4.5.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ……69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ……70

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ……70

4.2 ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ……..70

4.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ……71

4.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΟΜΟΠΟΙΗΣΕΩΣ……72

4.2.3 ΟΠΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ……73

4.2.4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ……73

4.2.5 ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΟΜΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ……73

4.2.5.1 ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ……..73

4.2.5.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ……73

4.2.5.3 ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ……73

4.3 ΙΟΝΤΙΚΗ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ……74

4.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ……74

4.3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ……74

4.3.3 ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ ΙΟΝΤΙΚΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ……75

4.3.4 ΣΤΗΛΕΣ ΙΟΝΤΙΚΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ……77

4.3.5 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΩΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΙΟΝΤΙΚΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ……77

4.4 ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑΣ ΜΑΖΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ (ICP-MS)78

4.4.1 ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ ICP-MS……78

4.5 ΤΕΧΝΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (XRF)……80

4.5.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΡΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΙΖΟΥΣΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ Χ (XRF)……80

4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ……80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΦΥΤΑ……83

5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΤΟΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΦΥΤΑ……83

5.1.1 ΣΙΔΗΡΟΣ (Fe)……85

5.1.2 ΒΟΡΙΟ (B)……86

5.1.2.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΒΟΡΙΟΥ……86

5.1.2.2 Η ΣΧΕΣΗ ΤΟΥ ΒΟΡΙΟΥ ΜΕ ΑΛΛΑ ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ……87

5.1.3 ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ (Zn)……87

5.1.3.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ……88

5.1.4 ΜΑΓΓΑΝΙΟ……88

5.1.4.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ……88

5.1.5 ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟ (Mo)……88

5.1.5.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟΥ……89

5.1.5.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟΥ ΜΕ ΑΛΛΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ……89

5.1.6 ΧΑΛΚΟΣ (Cu)……90

5.1.6.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΧΑΛΚΟΥ……90

5.1.7 ΚΑΔΜΙΟ (Cd)……90

5.1.7.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΔΜΙΟΥ……91

5.1.8 ΜΟΛΥΒΔΟΣ (Pb)……91

5.1.8.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ……91

5.1.9 ΚΟΒΑΛΤΙΟ (Co)……92

5.1.10 ΒΑΝΑΔΙΟ (V)……92

5.1.11 ΝΙΚΕΛΙΟ (Ni)……92

5.1.11.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ……92

5.1.12 ΣΕΛΗΝΙΟ (Se)……93

5.1.13 ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ (Hg)……93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ……94

6.1 ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ……94

6.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΗΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ……95

6.2.1 ΦΥΤΟΕΞΑΕΡΩΣΗ……95

6.2.2 ΦΥΤΟΕΞΑΓΩΓΗ……96

6.2.2.1 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΦΥΤΟΕΞΑΓΩΓΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΧΗΛΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ...97

6.2.3 ΦΥΤΟΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ……98

6.2.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΥΤΙΚΟΥ ΕΙΔΟΥΣ……98

6.2.3.2 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ……99

6.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ……100

6.3.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΜΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ……100

6.3.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ……101

6.4 ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ……101

6.4.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ……102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ……103

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ……106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ ΙΛΥ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ. 62
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΠΟΣΟΣΤΑ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΤΗΣ ΙΛΥΟΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΈΝΩΣΗ ΚΑΙ ΤΙΣ Η.Π.Α 64
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ (A.A.S, I.C, ICP-PS, XRF)..... 82
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΑ ΦΥΤΑ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ Η ΜΟΡΦΗ ΜΕ ΤΗΝ ΟΠΟΙΑ ΕΙΝΑΙ ΑΥΤΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ..... 84
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΟΙΑ ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ. 85
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΔΥΝΑΤΑΙ ΝΑ ΕΦΑΡΜΟΣΤΟΥΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ. 95

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1 ΤΟΜΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΤΟΥΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΥΣ ΕΔΑΦΙΚΟΥΣ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ, ΟΠΩΣ ΑΥΤΟΙ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΕ ΔΡΟΣΕΡΟ ΚΑΙ ΥΓΡΟ ΚΛΙΜΑ. (SOIL CONSERVATION SCIENCE, U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE)..... 15
ΕΙΚΟΝΑ 2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΠΟΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΤΡΕΙΣ ΦΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΠΑΝΩ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ. 21
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΑΠΟ ΕΔΑΦΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ (ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΗ ΣΕ DUCHAUFOUR, 1960) ΑΠΟ ΕΔΑΦΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ. 27
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΠΡΩΤΟΖΩΑ 37
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΝΗΜΑΤΩΔΕΙΣ, ΤΑ ΕΞΥΠΝΑ ΠΑΡΑΣΙΤΑ. 38
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΠΛΑΤΥΕΛΜΙΝΘΕΣ..... 39
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΓΕΩΣΚΟΛΗΚΑΣ..... 40
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΣΚΟΥΛΗΚΙ. 41
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΑΚΑΡΕΑ. 42
ΕΙΚΟΝΑ 10. COLLEMBOLA..... 43
ΕΙΚΟΝΑ 11. PROTURA. 44
ΕΙΚΟΝΑ 12. DIPLURA..... 44
ΕΙΚΟΝΑ 13. PSEUDOSCORPIONS Η CHELONETHIDA. 45
ΕΙΚΟΝΑ 14. SYMPHYLA. 45
ΕΙΚΟΝΑ 15. ΑΡΑΧΝΗ. 46
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΟΡΘΟΠΤΕΡΑ..... 46
ΕΙΚΟΝΑ 17. ΚΟΛΕΟΠΤΕΡΑ. 47
ΕΙΚΟΝΑ 18. LEPIDOPTERA. 47
ΕΙΚΟΝΑ 19. EXOTIC DROSOPHILA FRUIT FLY DIPTERA PARASITE INSECT ON PLANT LEAF. 48
ΕΙΚΟΝΑ 20. ΥΜΕΝΟΠΤΕΡΑ. 49
ΕΙΚΟΝΑ 21. ΔΙΠΛΟΠΟΔΑ..... 50
ΕΙΚΟΝΑ 22. ΙΣΟΠΟΔΟ. 51
ΕΙΚΟΝΑ 23. ΧΕΙΛΟΠΟΔΟ..... 51
ΕΙΚΟΝΑ 24. ΣΑΛΙΓΚΑΡΙΑ. 52
ΕΙΚΟΝΑ 25. ΥΔΡΟΣΦΑΙΡΑ. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ. 56
ΕΙΚΟΝΑ 26. ΓΕΩΧΗΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ. 57
ΕΙΚΟΝΑ 27. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΙΛΥΩΔΟΥΣ ΕΔΑΦΟΥΣ 65
ΕΙΚΟΝΑ 28. ΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ. 68
ΕΙΚΟΝΑ 29. ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΡΓΑΝΟΥ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ. 71
ΕΙΚΟΝΑ 30. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΥΧΝΙΑΣ ΚΟΙΛΗΣ ΚΑΘΟΔΟΥ. 72
ΕΙΚΟΝΑ 31. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΟΥΣΙΩΝ ΜΕ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΕΚΛΥΣΗΣ ΣΤΗΛΗΣ. 75
ΕΙΚΟΝΑ 32. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΙΟΝΤΙΚΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ. 76
ΕΙΚΟΝΑ 33. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΝΟΣ ICP-MS..... 79

ΕΙΚΟΝΑ 34. Η ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ XRF. 81
ΕΙΚΟΝΑ 35. ΡΟΛΟΣ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ O2 ΣΤΟ ΦΩΤΟΣΥΣΤΗΜΑ Ι..... 89
ΕΙΚΟΝΑ 36. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΒΙΟΚΟΙΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΡΙΖΟΣΦΑΙΡΑ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ. 94
ΕΙΚΟΝΑ 37. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΜΠΛΕΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΤΗΣ ΦΥΤΟΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ 100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΒΙΟΤΙΚΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

1.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

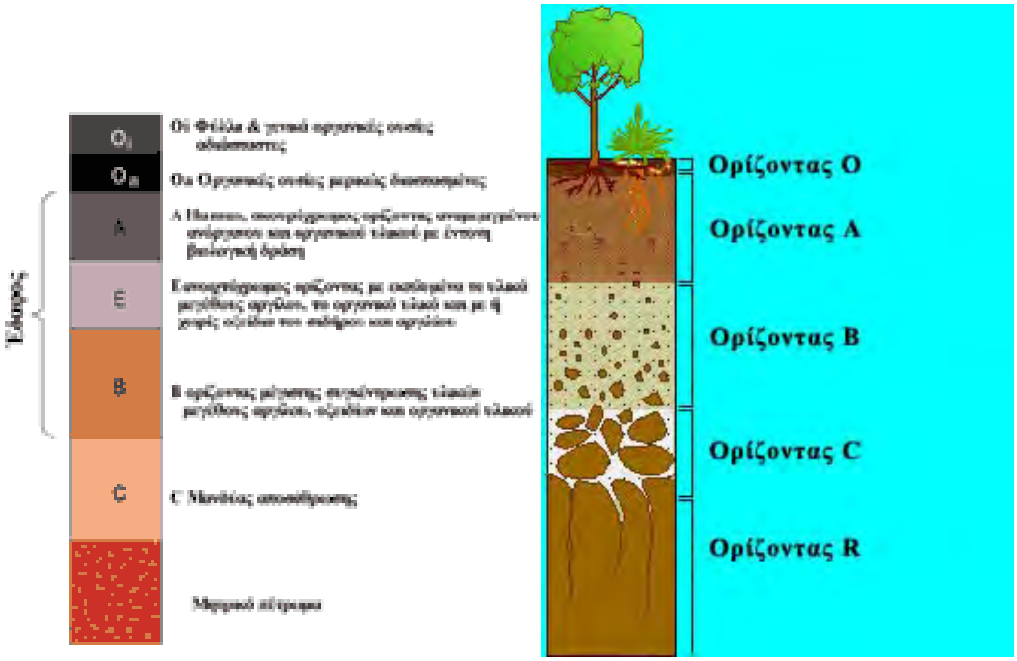
Ο όρος "εδαφικοί ορίζοντες" αναφέρεται στα διακριτικά στρώματα του εδάφους, τα οποία διαφέρουν σε ποικίλες πτυχές, όπως η φυσική και χημική τους σύνθεση, το οργανικό υλικό και η δομή τους. Η διαμόρφωση αυτών των οριζόντων επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες, όπως οι συνθήκες του κλίματος, οι ζωντανοί οργανισμοί που επικαλύπτουν το έδαφος, και η επεξεργασία της επιφάνειας της γης. Συνήθως, η δημιουργία τους οφείλεται στη συσσώρευση ή απώθηση συγκεκριμένων ιοντικών στοιχείων, κολλοειδών και χημικών συνδυασμών μέσα στο έδαφος. Η διαδικασία αυτή, που προξενείται από την κίνηση του νερού που εισχωρεί βαθύτερα στο έδαφος, είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία των οριζόντων. Το κάθε στρώμα του εδάφους αντιπροσωπεύει ένα στάδιο στη διαμόρφωση του εδάφους και τη διαδικασία του εδαφικού σχηματισμού.

Το κάθετο τμήμα αυτών των επίπεδων οριζόντων ονομάζεται εδαφικό προφίλ. Στη συνέχεια, θα αναφερθούν οι εδαφικοί ορίζοντες που κατασκευάζονται σε εδάφη με πυκνή φυτοκάλυψη δάσους στην επιφάνεια και σε περιοχές με υψηλή υγρασία στο περιβάλλον.

Όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, οι εδαφικοί ορίζοντες διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τους οργανικούς και τους ανόργανους. Τα οργανικά υποστρώματα, αναπαριστώνται με το σύμβολο Ο, βρίσκονται πάνω από τους ανόργανους ορίζοντες και δημιουργήθηκαν από τη συσσώρευση οργανικού υλικού, κυρίως από την αποσύνθεση των φυτών και των ζώων. Οι εδαφολόγοι καταγράφουν δύο κύριες στρώσεις στον οργανικό ορίζοντα. Η επικρατούσα στρώση Οι περιέχει μερικώς αποσυνθεμένο οργανικό υλικό, ενώ η κάτω στρώση Οα περιέχει πλήρως αποσυνθεμένο οργανικό υλικό (χούμους).

Οι ανόργανοι ορίζοντες βρίσκονται κάτω από τους οργανικούς ορίζοντες και κατηγοριοποιούνται με τα γράμματα Α, Ε, Β και C. Η ριζική δομή των φυτών επηρεάζει τη διαδικασία σχηματισμού τους, διεισδύοντας στους ορίζοντες Α, Ε και Β. Ο ανώτερος ανόργανος ορίζοντας Α πλούτισε σε οργανικό υλικό, λόγω της παρουσίας του ριζικού συστήματος και της απόμακρυνσης του εκπλυμένου χούμους από τους ανώτερους οργανικούς ορίζοντες. Στον ορίζοντα Ε, κόκκοι αργίλου και οξείδια αργιλίου και σιδήρου απομακρύνονται από την έκπλυση, αφήνοντας πίσω καθαρούς κόκκους άμμου και χονδρόκοκκη ιλύς.

Σύμφωνα με τους εδαφολόγους, ο τελευταίος εδαφικός ορίζοντας, γνωστός ως Β, αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη φάση στη διαμόρφωση του εδάφους. Σε αυτόν τον ορίζοντα, οι κόκκοι αργίλου, μαζί με τα οξείδια του σιδήρου και του αργιλίου, καθώς και το οργανικό υλικό που έχει εκπλυθεί από τους προηγούμενους ορίζοντες Α και Ε, εκπίπτουν σε μια μορφή η οποία μπορεί να είναι είτε κρυσταλλική είτε άμορφη. Αυτός ο ορίζοντας χαρακτηρίζεται από μια πυκνή και συνεκτική δομή λόγω της πλήρωσης των κενών με οξείδια και άργιλο.



Εικόνα 1 Τομή εδάφους με τους χαρακτηριστικούς εδαφικούς ορίζοντες, όπως αυτοί αναπτύσσονται σε δροσερό και υγρό κλίμα. (Soil Conservation Science, U.S. Department of Agriculture).

Πηγή:http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge427y/chapter063.html

Κάτω από το εδαφικό στρώμα που συμβολίζεται με τον ορίζοντα B, υπάρχει ο ορίζοντας C, ο οποίος δεν χαρακτηρίζεται ως εδαφικό στρώμα. Αντιπροσωπεύει μια μεταβατική στρώση μεταξύ του εδάφους και του υποκείμενου πετρώματος, όπου συμβαίνουν οι διαδικασίες αποσάθρωσης. Σε αυτό το επίπεδο, δημιουργείται ο λεγόμενος "μανδύας αποσάθρωσης", ο οποίος περιέχει υλικά που μπορεί να αποτελέσουν προηγούμενο υλικό για τη διαδικασία σχηματισμού εδάφους, όπως περιγράφεται πιο πριν.

Κάτω από αυτόν τον μανδύα αποσύνδεσης υπάρχει το υποκείμενο πέτρωμα ή τα προηγούμενα ιζήματα, πολύ αρχαιότερης ηλικίας από τη δημιουργία του εδάφους.

Οι αλλαγές που συμβάλλουν στον σχηματισμό των εδαφών περιλαμβάνουν τον εμπλουτισμό, την απομάκρυνση, την εσωτερική μετατόπιση και τον μετασχηματισμό.

Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες διαδικασιών που συμβάλλουν στο σχηματισμό του εδάφους. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις διεργασίες που προσθέτουν νέο υλικό στο έδαφος. Για παράδειγμα, οι πλημμυρικές εκβολές ενός ποταμού μπορούν να φέρουν λεπτόκοκκο ανόργανο υλικό και να το προσθέσουν στο έδαφος. Επίσης, ο οργανικός πλούτος μπορεί να αυξηθεί μετακινώντας οργανικά υλικά από τους O οργανικούς ορίζοντες προς τον κατώτερο A ορίζοντα.

Η δευτερεύουσα κατηγορία περιέχει διαδικασίες που αφαιρούν υλικό από το έδαφος. Αυτή η αφαίρεση υλικού υπάρχει πιθανότητα να προκαλείται ή από την επιφανειακή διάβρωση του εδάφους από το ρεύμα του νερού, ή από την αποκόλληση τμήματος των στοιχείων του

από το νερό που εισέρχεται προς το βάθος. Η τρίτη σειρά διαδικασιών επικεντρώνεται στην εσωτερική μετακίνηση υλικών εντός του εδάφους, συνήθως από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Δύο βασικές δραστηριότητες εμφανίζονται συγχρόνως: η μετακίνηση και η απόθεση . Η μετακίνηση μεταφέρει μικρούς κόκκους υλικού από τα ανώτερα επίπεδα προς τα βαθύτερα, αφήνοντας πίσω άμμο και ιλύ (ορίζοντας Ε). Αντίστοιχα, η απόθεση δημιουργεί στρώσεις με μεγαλύτερη συστηματικότητα στα βαθύτερα επίπεδα (ορίζοντας Β).

Μια εξίσου σημαντική διαδικασία είναι η μεταφορά του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO3), που δημιουργεί την ασβεστοποίηση ή απασβέστωση των εδαφικών ζωνών. Επιπλέον, η υφαλμύρωση του εδάφους σε ξηρά κλίματα, λόγω της εκτεταμένης υγρασίας των ατμοσφαιρικών συνθηκών, αποτελεί μια ακόμη διαδικασία εσωτερικής μετατόπισης.

Τέλος, η τέταρτη κατηγορία διαδικασιών περιλαμβάνει τον μετασχηματισμό των υλικών εντός του εδάφους. Συγκεκριμένα, στις διαδικασίες μετασχηματισμού των ανόργανων υλικών περιλαμβάνονται όλες οι διαδικασίες που οδηγούν στο σχηματισμό δευτερογενών ορυκτών. Επιπλέον, ο μετασχηματισμός της οργανικής ύλης του εδάφους περιλαμβάνει την διασπορά του, γνωστή ως χουμοποίηση.

1.2 ΕΔΑΦΙΚΗ ΥΦΗ

Οι πρωταρχικές φυσικές ιδιότητες ενός εδάφους αναφέρονται στη υφή και τη δομή του. Η εδαφική υφή αναφέρεται στο ποσοστό των διαφορετικών μεγεθών ορυκτών σωματιδίων που συνθέτουν το έδαφος.

Η υφή του εδάφους παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον κύριο τύπο ή τη διάταξη των σωματιδίων που το απαρτίζουν με τρόπο που αξιολογείται τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Ποιοτικά, μπορεί να γίνει αντιληπτή η δομή του εδάφους με την αφή, διακρίνοντας αν είναι χονδρόκοκκο ή λεπτόκοκκο. Ποσοτικά, η υφή του εδάφους δηλώνει την αναλογία των διαφορετικών μεγεθών των σωματιδίων που περιλαμβάνει, ενισχύοντας την κατανόηση της σύνθεσής του. Μια κλασική προσέγγιση για να κατηγοριοποιηθεί το μέγεθος των σωματιδίων σε ένα έδαφος είναι να καταταχθούν σε τρεις κύριες ομάδες: άμμος, ιλύς, και άργιλος.

1.3 ΤΑ ΟΡΥΚΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ

Τα δευτερογενή αργιλιοπυριτικά ορυκτά είναι το βασικό συστατικό της αργίλου που παρουσιάζεται στα εδάφη και, γι’ αυτό, περιγράφεται και ως «ορυκτά της αργίλου».

Πρόκειται για δευτερογενή φυλλόμορφα αργιλιοπυριτικά ορυκτά, κολλοειδών διαστάσεων και επομένως με μεγάλη ειδική επιφάνεια, ικανά να απορροφούν και να ελευθερώνουν νερό και ορισμένα από αυτά να διογκώνονται ή να συρρικνώνονται. Διακρίνονται για τη μεγάλη τους πλαστικότητα και την ικανότητα τους να απορροφούν και να ανταποδίδουν, σε χημικώς ισοδύναμα ποσά, κατιόντα με άλλα που βρίσκονται σε εδαφικό διάλυμα. Τα ορυκτά της

αργίλου σε συνδυασμό με την οργανική ουσία που περιέχεται στο έδαφος φαίνεται ότι δημιουργούν τα ενεργητικότερα συστατικά του εδάφους. Η ενεργητικότητα αυτή των ορυκτών της αργίλου οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα και στο ηλεκτρικό φορτίο που κουβαλούν τα κρυσταλλωμένα μόρια των ορυκτών.

Η άργιλος είναι ένα φυσικό, λεπτόκοκκο υλικό με γαιώδη όψη (πηλός) που εμφανίζει πλαστικότητα όταν αναμιχθεί με μικρές ποσότητες νερού. Το μεγαλύτερο μέγεθος των κόκκων που χαρακτηρίζεται ως άργιλος είναι 2μ. (0,002mm).

Τα ορυκτά της αργίλου αποτελούν μία ομάδα ορυκτών πολύ σημαντική για τα εδάφη και τη θρέψη των φυτών και σχηματίστηκαν από την αποσάθρωση αστρίων, μαρμαρυγιών και ίσως και άλλων πυριτικών ορυκτών.

Η ορυκτολογική σύσταση της αργίλου εξαρτάται αναμφισβήτητα από τον χαρακτήρα του μητρικού υλικού, αλλά και από τις κυρίαρχες συνθήκες που επικρατούν κατά τον σχηματισμό της. Έτσι, σε περιοχές με υγρό τροπικό κλίμα και όξινο περιβάλλον, η παραγωγή καολινίτη προωθείται, ενώ σε περιοχές με λιγότερη υγρασία και εύκρατο κλίμα ή ουδέτερο περιβάλλον, η δημιουργία μοντμοριλονίτη είναι πιο πιθανή (Uddin, 2008). Αυτό συμβαίνει διότι οι συνθήκες αυτές δεν επιτρέπουν την διάλυση των βάσεων του ασβεστίου και μαγνησίου από την περιοχή αποσάθρωσης.

1.4 ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΟΜΗ

Η εδαφική δομή αναφέρεται στον τρόπο που τα σωματίδια οργανώνονται προκειμένου να σχηματίσουν ομάδες ή συσσωματώματα.

Η διάταξη των αρχικών σωματιδίων του εδάφους σε πολύπλοκες δομές, οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους με επιφάνειες μικρής συνοχής, αποτελεί τη δομή του εδάφους. Αυτή η διάταξη είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη γονιμότητα του εδάφους. Σχετίζεται με την ικανότητά του να κρατάει νερό, να επιτρέπει την αποστράγγισή του, την ανάπτυξη των ριζών και την κυκλοφορία του αέρα. Η δομή του εδάφους μπορεί να είναι ομοιόμορφη σε όλο το βάθος του ή να διαφέρει από ορίζοντα σε ορίζοντα, με τη δεύτερη περίπτωση να είναι πιο συνηθισμένη. Από άποψη δομής, τα εδάφη κατηγοριοποιούνται σε έξι βασικές κατηγορίες, δηλαδή:

1. Ελαφρά μονόκοκκα
2. Βαριά μονόκοκκα
3. Κυβικής μορφής
4. Πλακώδη
5. Κοκκώδη
6. Πρισματικά

Τα ελαφρά μονόκοκκα εδάφη αποτελούνται από σωματίδια που μοιάζουν με ομοιόμορφους κόκκους άμμου και επιτρέπουν εύκολη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού. Σε αντίθεση,

τα βαριά μονόκοκκα εδάφη, αποτελούνται από κόκκους αργίλου που δεν έχουν συγκεκριμένη δομή και φαίνονται σαν πυκνή άμορφη μάζα. Στα ενδιάμεσα αυτά εδάφη, βρίσκονται άλλοι τέσσερις τύποι δομής. Τα κυβικής μορφής εδάφη έχουν κόκκους που σχηματίζουν κύβους και επιτρέπουν καλή διακίνηση του νερού. Τα πλακώδη εδάφη, περιλαμβάνουν πλατιά συσσωματώματα που επιτρέπουν την εύκολη πλευρική ροή του νερού. Τα πρισματικά εδάφη έχουν μορφή πρισμάτων με μακρόστενο άξονα και ευνοούν την κατακόρυφη κίνηση του νερού. Τέλος, τα κοκκώδη εδάφη αποτελούνται από σφαιρικά συσσωματώματα και επιτρέπουν την ομοιόμορφη ροή του νερού. Αν και η υφή του εδάφους παραμένει σταθερή, η δομή του μπορεί να αλλάξει με διάφορες επεμβάσεις, ιδίως στα ανώτερα επίπεδα.

1.5 ΕΔΑΦΙΚΑ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΑ

Τα ανόργανα στοιχεία του εδάφους φαίνεται να είναι αλληλοσυνδεμένα, δημιουργώντας συσσωματώματα που μεταβάλλονται σε μέγεθος από 1 έως 10 χιλιοστά. Η διαμόρφωση και η ανθεκτικότητα αυτών των συσσωματωμάτων επηρεάζουν σημαντικά τη γονιμότητα του εδάφους. Τα καλώς συσσωματωμένα εδάφη επιτρέπουν αποτελεσματική αποστράγγιση, διευκολύνουν την κυκλοφορία των αερίων και των υγρών, και διευκολύνουν την εξέλιξη ριζών και μικροβιακών κοινοτήτων. Αντίθετα, τα εδάφη που έχουν μικρό βαθμό συσσωμάτωσης μπορεί να κατακλυστούν από νερό, δημιουργώντας αναερόβιες συνθήκες που αναστέλλουν την ανάπτυξη μικροβιακής βιομάζας.

Τα μικρά συσσωματώματα εδάφους σχηματίζονται από τη σύνδεση τους μέσω της αλληλεπίδρασης με τις ρίζες των φυτών και τους μυκητικούς οργανισμούς. Κατά τη δημιουργία των συσσωματωμάτων, τα μικρόβια παίζουν σημαντικό ρόλο παράγοντας εκτός κυττάρου πολυσακχαρίτες που συμβάλλουν στη σύνδεση και στη δημιουργία αρωματικών πολυμερών που ενώνουν τα νεοσχηματιζόμενα συσσωματώματα.

Μέσα στα συσσωματώματα, υπάρχουν πολλές μικροθέσεις που κατοικούνται από μικρόβια. Η δημιουργία ευνοϊκών περιβαλλόντων για την προώθηση της μικροβιακής ανάπτυξης εξαρτάται από παράγοντες όπως η υγρασία, η διάσταση των πόρων, η εσωτερική δομή και η προσβασιμότητα οξυγόνου μέσα στο συσσωματώμα. Γενικά, τα αναερόβια βακτήρια συγκεντρώνονται στο εσωτερικό, ενώ οι μύκητες και οι αερόβιοι οργανισμοί κατανέμονται γύρω από το περίγραμμα του συσσωματώματος.

Αρχίζοντας από την περιφερειακή περιοχή του συσσωματώματος και κατευθυνόμενοι προς το εσωτερικό, κατασκευάζεται μια σταθερά αυξανόμενη στρώση υγρασίας, ιδίως κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων. Αναμενόμενα, οι εξωτερικές επιφάνειες είναι οι πρώτες που αποξηραίνονται. Αντίθετα, τα μικρόβια στην εξωτερική επιφάνεια του συσσωματώματος επωφελούνται αρχικά από μικρές και απροσδόκητες ροές νερού, καθώς και από τα θρεπτικά συστατικά που προσφέρονται από αυτό. Επιπλέον, οι μικροοργανισμοί μέσα στο σύνθετο πλέγμα αποκτούν φυσική προστασία από κυνηγούς, κατά βάση τα πρωτόζωα, αλλά ο χώρος για την ανάπτυξή τους είναι συγκεκριμένος.

Οι ρίζες βελτιώνουν τα εδαφικά συσσωματώματα με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

1. Αύξηση της πίεσης στο έδαφος → επιβάλλεται αύξηση στα συσσωματώματα.
2. Αύξηση της οργανικής ουσίας του εδάφους λόγω των υπολειμμάτων των ριζών → ενίσχυση των συσσωματωμάτων.
3. Αφαίρεση νερού από το έδαφος → ενίσχυση των συσσωματωμάτων (οπότε συμβαίνει αυτό και στην περιοχή όπου βρίσκονται τα ριζικά τρίχωμα, καθώς και στις γύρω περιοχές λόγω των υδραυλικών φαινομένων).

1.6 ΤΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Τα ομοιογενή εδαφικά μείγματα, γνωστά ως κολλοειδή του εδάφους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: αυτά που προκύπτουν από την αποσάθρωση των πετρωμάτων (κολλοειδή αργίλου) και εκείνα που προκύπτουν από την διάσπαση των υπολειμμάτων ζωικής και φυτικής προέλευσης (οργανικά κολλοειδή). Τα μικροσκοπικά σωματίδια αργίλου και οργανικών κολλοειδών, γνωστά ως χούμους, έχουν καίριο ρόλο στη μικροβιακή οικολογία. Επιπλέον, λόγω της συνήθους αρνητικής φόρτισης των κολλοειδών, έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν κατιόντα από το εδαφικό διάλυμα στην επιφάνειά τους. Το συνολικό ποσό κατιόντων που μπορούν να απορροφήσουν και να διατηρηθούν εκεί επηρεάζει τη δυνατότητα ανταλλαγής του εδάφους.

1.7 ΤΥΠΟΙ ΕΔΑΦΟΔΟΜΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τύποι εδαφικών δομών που περιγράφουν τον τρόπο που οργανώνονται τα σωματίδια του εδάφους και δημιουργούν τους εδαφικούς τύπους. Η έννοια "εδαφοδομή" ή "δομή εδάφους" εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο για να περιγράψει αυτή τη διάταξη.

Οι δομές κυβοειδούς τύπου χαρακτηρίζονται από άξονες με ίσες διαστάσεις σε μήκος, πλάτος και ύψος. Εάν η κατακόρυφη διάσταση είναι μικρότερη από τις δύο οριζόντιες, τότε η δομή είναι πλακοειδής, ενώ εάν η κατακόρυφη διάταξη είναι μεγαλύτερη από τις δύο οριζόντιες, η δομή είναι πρισματική. Στο βάθος των στρωμάτων του εδάφους, η εδαφοδομή μεταβάλλεται σε κυβοειδή μορφή.

1.8 ΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Το έδαφος συγκρατεί υγρασία από την υγρασία της ατμόσφαιρας και δημιουργεί λεπτά υγρά περιβλήματα τριγύρω από τα σωματίδια του. Αυτή την υγρότητα που αναρροφάται δεν είναι προσβάσιμη στη βλάστηση.

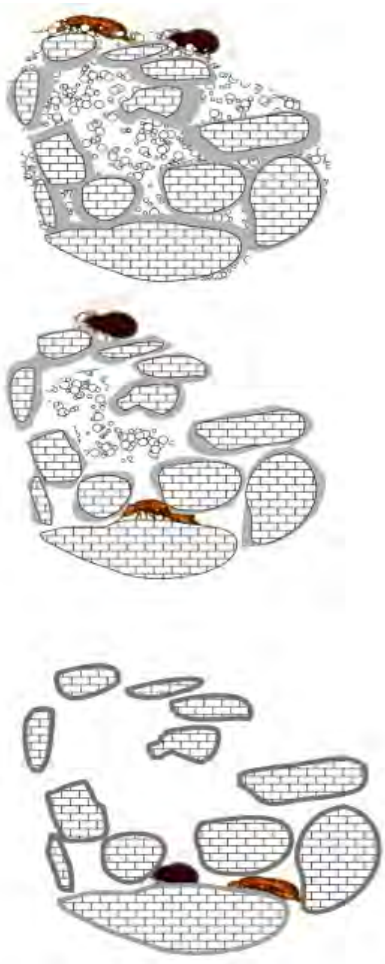
Τα κενά μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων που σχηματίζουν το εδαφικό πορώδες έχουν κρίσιμη επίδραση στην ισορροπία του υδατικού συστήματος, στον αερισμό και στην ροή

των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος. Οι πόροι διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθός τους, με τους πολύ μεγάλους πόρους να έχουν διάμετρο πάνω από 0,05 mm. Το μέγεθος αυτών των πόρων εγκρίνει την ταχεία εισροή και απορρόφηση του νερού, ειδικά μετά από βροχή. Οι πόροι μεσαίου μεγέθους (μακροπόροι) έχουν κρίσιμη σημασία για τη γονιμότητα του εδάφους, καθώς επιτρέπουν τη συγκράτηση του νερού με αρκετή δύναμη, αλλά είναι επίσης προσβάσιμοι για τα φυτά, αποτελώντας χρήσιμη πηγή νερού.

Το ίδιο δεν ισχύει για τους μικρούς πόρους με διάμετρο μικρότερη των 0,002 mm. Οι μικροί πόροι, κρατούν το νερό με τόση αποτελεσματικότητα ώστε να δυσκολεύεται η αφαίρεσή του από τα φυτά. Αυτός ο τύπος νερού ονομάζεται τριχοειδές. Το κατιόν που έχει ενυδατωθεί μπορεί να διατηρήσει σταθερά έως και 6 μόρια νερού. Μέσω αυτών των δυνάμεων, το νερό παραμένει στερεά γύρω από τα ορυκτά του εδάφους, σχηματίζοντας υγρούς μανδύες. Αλληλοεπιδρώντας μεταξύ τους, οι υγροί μανδύες ενδιάμεσα σε πιο συμπαγή σωματίδια δημιουργούν τους μηνίσκους του νερού. Ακόμη, για να μετρηθεί το πορώδες του εδάφους, εφαρμόζονται οι παράμετροι Φαινόμενο Ειδικό Βάρος και Μέσο Ειδικό Βάρος Ανόργανων Στερεών. Το Φαινόμενο Ειδικό Βάρος αναφέρεται στο βάρος που ζυγίζει 1 cm3 αδιατάρακτου εδάφους, ενώ το Μέσο Ειδικό Βάρος Ανόργανων Στερεών υπολογίζεται σε 2,65 g/cm3. Έτσι, ο τύπος για το ποσοστό πορώδους εδάφους είναι Πορώδες (%) = (1 - Φ.Ε.Β. / Ε.Β.Σ.) * 100 (Αληφραγκής, 2008).

Η διαδικασία ξήρανσης του εδάφους είναι σημαντική για τη ζωή εκεί. Τα στερεά εδαφικά σωματίδια εμφανίζονται ως γραμμές, ενώ οι μανδύες νερού απεικονίζονται ως φυσαλίδες. Αυτό το νερό είναι διαθέσιμο για τη βλάστηση. Οι πόροι με αέρα δεν έχουν χρωματισμό. Η θερμοκρασία του αέρα των πόρων είναι πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, αλλά ίση με εκείνη της στερεάς φάσης. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του πειράματος που οδήγησε στο μοντέλο, η θερμοκρασία του αέρα στους πόρους ήταν 10°C, ενώ στην ατμόσφαιρα ήταν 15°C. Η σχετική υγρασία του αέρα στους πόρους ήταν 100%, ενώ στην ατμόσφαιρα ήταν μόλις 51%. Φαίνονται δύο εκπρόσωποι της εδαφοπανίδας: ένα άκαρι αριστερά και ένα κολλέμβολο δεξιά. Και τα δύο ζώα κινούνται στην επιφάνεια του εδάφους. Στη συνέχεια, ακολουθεί το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας της εδαφικής ξήρανσης. Έχουν ελαττωθεί σημαντικά οι μανδύες του ελεύθερου νερού, ενώ υπάρχει τώρα τριχοειδές νερό και εξατμίζεται νερό κοντά στα σωματίδια του εδάφους σε στερεή μορφή. Εξαιτίας της απώλειας υγρασίας, η θερμοκρασία του αέρα στους πόρους είναι ακόμα χαμηλότερη από αυτή της στερεάς φάσης και σημαντικά χαμηλότερη από αυτή της ατμόσφαιρας.
Παρατηρείται ότι η σχετική υγρασία του αέρα στους πόρους παραμένει σταθερή στο 100%, ενώ στην ατμόσφαιρα είναι μόλις 51%. Είναι ενδιαφέρον ότι το κολλέμβολο, το οποίο είναι πιο ευαίσθητο στις αλλαγές του περιβάλλοντος, έχει μετακινηθεί σε μια θέση που το κάνει να παραμένει ακίνητο. Μόνο ένα ανθεκτικό άκαρι παραμένει κινούμενο στην επιφάνεια του συσσωματώματος. Στην τρίτη φάση του μοντέλου, διακρίνονται μόνο υδρατμοί, ενώ σε ορισμένα μέρη διατηρείται λίγο τριχοειδές νερό. Η θερμοκρασία των πόρων έχει ισορροπήσει με της στερεάς φάσης και της ατμόσφαιρας, ενώ η σχετική υγρασία του αέρα έχει επίσης εξισορροπηθεί. Σε αυτή τη φάση, το άκαρι έχει μετακινηθεί στο εσωτερικό του

συσσωματώματος και έχει ακινητοποιηθεί, προκειμένου να επιβιώσει στις αντίξοες συνθήκες του περιβάλλοντος.



Εικόνα 2 Διαδικασία αποξήρανσης του εδάφους σε τρεις φάσεις από πάνω προς τα κάτω.

Πηγή: ΕΔΑΦΙΚΕΣ_ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ_ΚΑΙ_ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ_ΕΔΑΦΩΝ.pdf

1.9 ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΟΥΣΙΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Το έδαφος αποτελεί έναν πολύπλοκο συνδυασμό υλικών, μεταξύ των οποίων πρωτεϊνικά, αλλά και οργανικές ουσίες, τα οποία επηρεάζουν τις βασικές λειτουργίες του εδάφους. Αυτές οι λειτουργίες, όπως η παραγωγικότητα, η ρύθμιση του νερού, η διαχείριση του άνθρακα και η ανακύκλωση των θρεπτικών, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την οργανική ουσία εδάφους (SOM). Η SOM περιλαμβάνει περίπου 58% άνθρακα, ο οποίος καταλήγει στο έδαφος μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης από τα φυτά. Το επίπεδο αυτό της οργανικής ουσίας δεν επηρεάζει μόνο την ποιότητα του εδάφους και την απόδοση των καλλιεργειών, αλλά έχει σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα, το περιβάλλον και την κοινωνία. Η ποιότητα και η ποσότητα της οργανικής ουσίας διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του

εδάφους, με τα ποσοστά να κυμαίνονται συνήθως από 1% έως 6% του συνολικού βάρους του εδάφους. Ακόμη και σε τόσο μικρά ποσοστά, η οργανική ουσία επηρεάζει σημαντικά τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους (Stevenson, 1986).

1.9.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Η προσθήκη οργανικής ουσίας στο έδαφος έχει σημαντικές επιδράσεις στα φυσικά του χαρακτηριστικά. Η σταθερότητα του μείγματος βελτιώνεται, προκαλώντας αύξηση στη διήθηση του νερού και στην ικανότητα κατακράτησής του, ενώ παράλληλα βελτιώνεται και η διανομή του νερού και του αέρα στο έδαφος. Επιπλέον, η προσθήκη οργανικής ουσίας οδηγεί σε μείωση της δημιουργίας κρούστας και βελτιώνει την κατανομή των πόρων στο έδαφος.

1.9.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Με την αύξηση της οργανικής ουσίας, παρατηρείται αύξηση στην ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων στο έδαφος. Αυτό έχει θετικές επιπτώσεις τόσο στα φυτά όσο και στους αγρότες, καθώς δημιουργούνται μεγαλύτερα επίπεδα θρεπτικών και αυξάνεται η διαθεσιμότητα και η κινητικότητά τους στο έδαφος.

1.9.3 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

Η παρουσία οργανικής ουσίας στο έδαφος αποτελεί έναν ολοκληρωμένο οικοσύστημα που παρέχει καταφύγιο, τροφή και θρέψη σε μια πληθώρα οργανισμών. Είναι το υπόστρωμα για μια ποικιλία μικροοργανισμών, από βακτήρια έως σκουλήκια, οι οποίοι συνεισφέρουν σημαντικά στη βιολογική δραστηριότητα του εδάφους. Η πλούσια οργανική ουσία δεν τρέφει αυτούς τους οργανισμούς αλλά και τους ενθαρρύνει να διατηρούν το ισορροπημένο οικοσύστημα του εδάφους, που αποτελεί κλειδί για την υγεία και τη βιωσιμότητα του εδαφικού οικοσυστήματος. Αυτό το ευαίσθητο ισορροπημένο σύστημα προσφέρει τη βάση για την αποτελεσματική διαχείριση των θρεπτικών, την καταστολή των ασθενειών των φυτών και τη διατήρηση της φυσικής γονιμότητας του εδάφους.

1.9.4 ΤΗΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η διατήρηση της οργανικής ουσίας στο έδαφος είναι ουσιώδης για κάθε γεωργό και αγρότη. Οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να διασφαλιστούν τα επίπεδα SOM περιλαμβάνουν τη μείωση του οργώματος, την αποτροπή της διάβρωσης και την ενσωμάτωση αποβλήτων καλλιέργειας. Το όργωμα παίζει κρίσιμο ρόλο καθώς επιτρέπει τον αερισμό του εδάφους.

Τα μικρόβια ανταποκρίνονται στην αυξημένη διαθεσιμότητα οξυγόνου και καταναλώνουν μέρος της οργανικής ουσίας, απελευθερώνοντας διοξείδιο του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ζωτικής σημασίας για τη φωτοσύνθεση των φυτών, αλλά η υπερβολική του παρουσία δεν είναι χρήσιμη καθώς αποτελεί απώλεια που επηρεάζει αρνητικά το έδαφος.

1.9.5 ΠΟΛΥΕΤΕΙΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ

Οι παραγωγοί βιολογικών προϊόντων συχνά ενσωματώνουν πολυετείς καλλιέργειες στις αλλαγές καλλιεργειών τους, με τριφύλλι, alfalfa και μείγματα τριφυλλιού και γρασιδιού να ξεχωρίζουν ως εξαιρετικές επιλογές για την αύξηση της οργανικής ουσίας. Αυτές οι καλλιέργειες διατηρούν υψηλά επίπεδα άνθρακα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ ταυτόχρονα δεν απαιτούν όργωμα επεξεργασία του εδάφους.

1.9.6 ΚΟΜΠΟΣΤΕΣ, ΚΟΠΡΙΕΣ, ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων αποτελεί μια εναλλακτική προσέγγιση για την ενίσχυση της οργανικής ουσίας του εδάφους.

1.9.7 BIOCHAR

Η χρήση του Biochar, συνήθως σε σύνθετα μείγματα όπως η κομπόστα ή η κοπριά, αποτελεί μια σχετικά καινούργια πρακτική για την ενίσχυση της οργανικής ουσίας του εδάφους. Το Biochar παράγεται από οργανικά υπολείμματα μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται πυρόλυση και είναι πλούσιο σε άνθρακα, παραμένοντας στο έδαφος για εκατοντάδες χρόνια.

1.9.8 ΖΩΑ ΚΑΙ ΒΟΣΚΗΣΗ

Μια εναλλακτική προσέγγιση που προκαλεί αυξανόμενο ενδιαφέρον είναι η μέθοδος της εκτροφής ζώων σε εκτεταμένες εκτάσεις. Σε αυτήν την πρακτική, τα ζώα χρησιμοποιούνται για βόσκηση, καταστρώνουν το έδαφος με την κίνησή τους και συμβάλλουν στην ανάπτυξη των φυτών. Η μέθοδος αυτή αντλεί έμπνευση από τη φυσική συμπεριφορά των μεγάλων κοπαδιών ζώων όπως τα βουβάλια και οι αντιλόπες, οι οποίες επιτρέπουν στα λιβάδια να αποκτήσουν υψηλότερη γονιμότητα.

1.9.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΥΞΗΣΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Δεδομένου ότι ένα μέρος της οργανικής ουσίας του εδάφους πάντα απειλείται λόγω των γεωργικών δραστηριοτήτων, είναι αναγκαίο να αυξήσουμε αυτά τα επίπεδα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να επιτευχθεί αυτό. Η εναλλαγή καλλιεργούμενων φυτών, δηλαδή η

φύτευση διαφορετικών ειδών δύο φορές το έτος, παρέχει κάλυψη στο έδαφος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, διατηρώντας ισορροπημένα επίπεδα οργανικής ουσίας. Οι καλλιέργειες κάλυψης και οι χλωρές λιπάνσεις χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του μεταξύ χρόνου και μεταξύ των κερδοφόρων καλλιεργειών για να ευνοήσουν το έδαφος, αντί για την παραγωγή εισοδήματος για τον αγρότη. Αυτά τα φυτά δεν συλλέγονται, αλλά ενσωματώνονται στο έδαφος, βοηθώντας έτσι στην αύξηση των επιπέδων οργανικής ουσίας.

1.10 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΧΟΥΜΟΥ

Το υπέδαφος αποκαλείται χούμος όταν περιέχει ένα πλούσιο μείγμα οργανικής ύλης, η οποία υφίσταται συνεχή μεταβολή μέσω διαδικασιών όπως η αποσύνθεση και η σύνθεση νέων ουσιών. Αυτή η οργανική ύλη προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως τα φύλλα, οι βελόνες, τα κλαδιά και οι ρίζες που πέφτουν κάθε χρόνο, καθώς και από τα απόβλητα και τα υπολείμματα των ζώων. Η διάσπαση αυτών των οργανικών υλικών προωθείται από διάφορους μικροοργανισμούς και βακτήρια, οι οποίοι συμβάλλουν στην ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών και την απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος (Αληφραγκής, 2008).

Κατά τη διαδικασία δημιουργίας του χούμου, παρατηρούνται δύο βασικές διεργασίες:

- Η πρώτη είναι η αποσύνθεση της αρχικής οργανικής ύλης, κατά την οποία οι οργανικές ενώσεις μετατρέπονται σε ορυκτά συστατικά, μια διαδικασία γνωστή ως ορυκτογένεση.
- Η δεύτερη είναι η δημιουργία νέων πολύπλοκων οργανικών ενώσεων μέσω χημικών αντιδράσεων, γνωστή ως χουμοποίηση.

Ο χούμος αποτελεί ένα σημαντικό στρώμα στην επιφάνεια του εδάφους, χαρακτηριζόμενο από τη μαύρη, πλούσια σε οργανική ύλη υφή του. Η σημασία του στον φυσικό κύκλο είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους. Μέσω διαδικασιών όπως η διατήρηση των οργανικών ουσιών στο ανώτερο επίπεδο του εδάφους και η αύξηση της ικανότητάς του να διατηρεί υδατικά αποθέματα, ο χούμος συμβάλλει στη δημιουργία μιας πιο ευνοϊκής περιβάλλουσας για την ανάπτυξη των φυτών. Επιπλέον, με την αύξηση της καλλιεργητικής αποδοτικότητας του εδάφους και τη βελτίωση της μορφολογίας του, ο χούμος συμβάλλει στη διατήρηση της υγείας του εδάφους και την ανάπτυξη ενός πιο παραγωγικού περιβάλλοντος για τη γεωργία και τη βιολογική ποικιλομορφία.

Ο χούμος, εκτός από το ρόλο του ως συστατικό του εδάφους, χρησιμοποιείται επίσης ως φυσικό λίπασμα για άλλα εδάφη. Στην αρχαιολογία, ο όρος "χούμος" αναφέρεται στο επιφανειακό υπόστρωμα του εδάφους, το οποίο συχνά αφαιρείται πριν από την έναρξη της ανασκαφής.

Ο χούμος αποτελεί μέρος της οργανικής ύλης του εδάφους και αποτελείται από μια ποικιλία συστατικών. Αυτά τα συστατικά υφίστανται διάφορες διεργασίες, όπως μηχανική, βιολογική, χημική και μικροβιακή επεξεργασία, πάνω στα υπολείμματα των φυτών και των ζώων, ή ακόμα και από νέες ουσίες που παράγονται από τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Τα συστατικά του χούμου έχουν χάσει την κυτταρική τους δομή σε τέτοιο βαθμό, ώστε να είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η προέλευσή τους, είτε προέρχονται από τα υπολείμματα των φυτών είτε από τους μικροοργανισμούς του εδάφους.

1.11 ΕΔΑΦΙΚΗ ΤΟΜΗ

Η διαφοροποίηση του εδάφους ,κατά μήκος του βάθους, προκύπτει από την πολύπλοκη επίδραση διαφόρων παραγόντων εδαφογένεσης κατά τη διάρκεια εκτεταμένων χρονικών διαδικασιών. Αυτή η διαφοροποίηση οδηγεί στη δημιουργία διακριτών ζωνών εντός του εδαφικού προφίλ, τοποθετημένων παράλληλα προς την επιφάνεια του εδάφους. Αυτές οι ζώνες διαφέρουν μεταξύ τους σε πολλά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένου του χρώματος, της σύστασής τους, της υγρασίας τους, και της παρουσίας ριζών φυτών, που αποτελούν αποτυπώματα των διαφορετικών συνθηκών και διεργασιών που έχουν συμβεί σε αυτές τις περιοχές με την πάροδο του χρόνου. Οι ζώνες αυτές ονομάζονται «γενετικοί ορίζοντες» και η μελέτη τους μπορεί να γίνει στο εδαφικό προφίλ (εδαφοτομή).

Ως «εδαφικό προφίλ» ορίζεται μια κατακόρυφη τομή του εδάφους (φυσική ή τεχνητή), η οποία αρχίζει από την επιφάνειά του και φθάνει μέχρι το μητρικό υλικό. Η μελέτη του εδαφικού προφίλ σε όλο του το βάθος ενδιαφέρει, κυρίως, τους ταξινόμους των εδαφών. Ο έλεγχος, όμως, της παραγωγικότητας ενός εδάφους βασίζεται στην παρατήρηση του εδαφικού προφίλ, μέχρι το βάθος στο οποίο μπορούν να φτάσουν (σε κανονικές συνθήκες) οι ρίζες των φυτών, δηλαδή περίπου μέχρι βάθος 1,5 m. Οι ορίζοντες του εδάφους αντικατοπτρίζουν τη γενετική του ιστορία και διακρίνονται σε τέσσερις κυρίως τύπους, οι οποίοι συμβολίζονται με τα κεφαλαία γράμματα O, A, B και C. Στη μελέτη του εδαφικού προφίλ συμπεριλαμβάνεται, επίσης, και η στρώση του μητρικού πετρώματος, που συμβολίζεται με R.

1.12 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ

Η διαδικασία ταξινόμησης των εδαφών αποτελεί ένα πολύπλοκο και πολυστρωματικό σύστημα, το οποίο βασίζεται σε εκτεταμένες εργαστηριακές αναλύσεις. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, χρησιμοποιούνται πίνακες κατάταξης, όπου ο ερευνητής προσπαθεί να συσχετίσει τις παρατηρούμενες ιδιότητες του υλικού με συγκεκριμένες κατηγορίες.

Οι αναγκαίες δοκιμές για την εκτέλεση της ταξινόμησης είναι πολλές και ποικίλες. Μερικές από αυτές περιλαμβάνουν:

- **Κοκκομετρική δοκιμή**: Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιεί τη βασική σειρά κόσκινων για να διαχωρίσει τα υλικά σε χαλίκια, άμμο και λεπτόκοκκα. Επιπλέον, προσδιορίζει με ακρίβεια τα μεγέθη της κοκκομετρικής καμπύλης (Cc, Cu).
- **Προσδιορισμός των ορίων Atterberg**: Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η πλαστικότητα του εδάφους, καθώς προσδιορίζει τα όρια Atterberg του λεπτόκοκκου υλικού.
- **Χημική Ανάλυση**: Αυτή η ανάλυση προορίζεται για τον προσδιορισμό των οργανικών ουσιών που περιέχονται στο υλικό.
- **Ανάλυση Οργανικού Υλικού**: Σε περιπτώσεις οργανικών υλικών, ο προσδιορισμός του λόγου LL αποτελεί κρίσιμη δοκιμή. Εάν ο λόγος LL είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, τότε οι οργανικές ουσίες υπόκεινται σε διαφορετική κατηγοριοποίηση.

Η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού επιταχύνει και διευκολύνει τη διαδικασία ταξινόμησης, με μεθόδους που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη και νευρωνικά δίκτυα. Αυτό οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα και βοηθά στην εκτίμηση των ιδιοτήτων των εδαφών με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία.

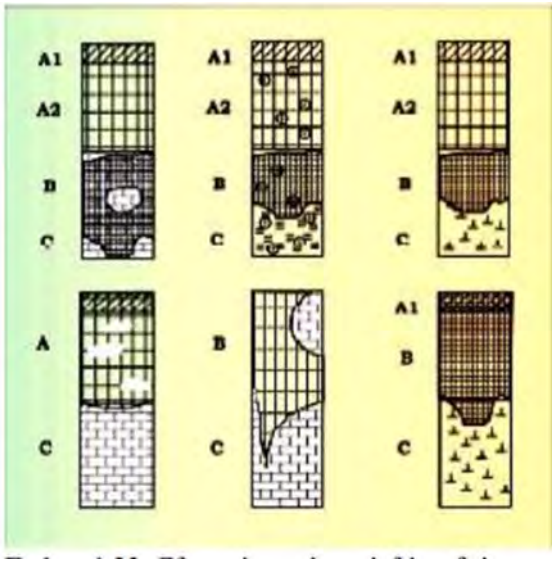
1.13 ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΣΤΑ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η εδαφική δομή και η διαδικασία εδαφογένεσης, δηλαδή ο τρόπος δημιουργίας του εδάφους, παρουσιάζουν μοναδικές ιδιαιτερότητες, καθώς και άλλα πολλά χαρακτηριστικά των μεσογειακών οικοσυστημάτων. Στον τομέα της εδαφικής δομής, η οργανική ύλη συγκεντρώνεται κυρίως στην επιφάνεια, σχηματίζοντας λεπτό στρώμα. Η αποικοδόμηση παρουσιάζει σχετικά γρήγορη εξέλιξη, ενώ η αποσάθρωση των αρχικών ορυκτών υλικών λαμβάνει χώρα σε βαθύτερα στρώματα (Boix Fayos, Calvo-Cases, Imeson & Soriano-Soto, 2001).

Μία σημαντική ιδιότητα των εδαφών της μεσογειακής περιοχής είναι η πλούσια σε αργίλιο και σίδηρο ενίσχυση των βαθύτερων στρωμάτων. Αυτό οδηγεί στην κατάταξή τους, στην κατηγορία των Alfisols (Alf), όπου η περιεκτικότητα σε αργίλιο και σίδηρο είναι υψηλή. Στα εδάφη της μεσογειακής περιοχής, που είναι πλούσια σε ασβέστιο και μαγνήσιο, οι αργίλοι κατά βάση αποτελούνται από μοντμοριλονίτη. Σε εδάφη με φτωχή περιεκτικότητα σε ασβέστιο και με καλύτερη αποστράγγιση, οι αργίλοι περιέχουν κατά βάση καολινίτη. Η παρουσία των οξειδίων του σιδήρου δημιουργεί έντονες αποχρώσεις καφέ και κόκκινου στα εδάφη αυτά. Όσον αφορά τις διαδικασίες εδαφογένεσης, ο μετασχηματισμός των αρχικών ορυκτών υλικών στη μεσογειακή περιοχή υπαγορεύεται από τη fersiallitization. Συγκεκριμένα, τα ορυκτά αποσαθρώνονται, δίνοντας πηλούς και απελευθερώνοντας Fe++. Στη συνέχεια, οι ιόντες του σιδήρου οξειδώνονται, δημιουργώντας οξυύδροξειδίων. Αυτά τα υλικά μεταφέρονται προς τα βαθύτερα στρώματα, όπου δημιουργούν περιβλήματα από αιματίτες γύρω από τα σωματίδια των πηλών, καθιστώντας τα εδάφη κυρίως κόκκινα.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που συναντάται συχνά στα μεσογειακά εδάφη είναι η εμφάνιση του Β ορίζοντα, ο οποίος προέρχεται από τις διαδικασίες απόπλυσης που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Η επιφάνεια ενός μεσογειακού εδάφους αποτελείται από χούμο τύπου mull, ενώ ο ορίζοντας Α είναι καλά αναπτυγμένος. Επίσης, ο σκούρος ορίζοντας Β διακρίνεται καθαρά από τον Α. Αυτή η κατάσταση δεν αποτελεί τον κανόνα στο μεσογειακό οικοσύστημα, όπου τα εδάφη είναι συνήθως ρηχά. Στο σχήμα παρουσιάζονται γραφήματα από τρεις διαφορετικές εδαφοτομές που ανήκουν σε μεσογειακούς σχηματισμούς. Αυτές οι εδαφοτομές είναι αντιπροσωπευτικές του καλά εκπλυμένου εδάφους με αυξημένη δραστηριότητα στον ορίζοντα Α. Το μοτίβο των οριζόντων είναι χαρακτηριστικό σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 3. Εδαφικές τομές από εδάφη διάφορων (Σχεδίαση βασιζόμενη σε Duchaufour, 1960) από εδάφη διάφορων μεσογειακών σχηματισμών.

Πηγή: ΕΔΑΦΙΚΕΣ_ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ_ΚΑΙ_ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ_ΕΔΑΦΩΝ.pdf

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΔΑΦΙΚΟ ΤΡΟΦΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

2.1 ΕΔΑΦΙΚΗ ΤΡΟΦΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ

Η αλυσίδα τροφής σε ένα οικοσύστημα που βασίζεται στη γη αποτελείται από ποικιλία οργανισμών. Η φρέσκια στρωμνή είναι το πρώτο θύμα των βακτηρίων, τα οποία χρησιμοποιούν τα οργανικά μόρια της για τη διατροφή τους. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, περίπου το 60% του άνθρακα που χρησιμοποιούν, εκπέμπεται ως CO2 μέσω της αναπνοής τους, ενώ το υπόλοιπο 40% ενσωματώνεται στη βιομάζα των βακτηρίων.

Η αναλογία μεταξύ μυκητών και βακτηρίων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει τη γονιμότητα και την υγεία του εδάφους (F/B, από F: fungi και B: bacteria). Σε φυσικά περιβάλλοντα και σε αγροκτήματα με εκτροφή ζώων, η αναλογία αυτή υποστηρίζει τα βακτήρια. Ωστόσο, σε περιοχές με έντονη παραγωγικότητα, η αναλογία πλησιάζει το ένα προς ένα. Σε ορισμένες καλλιέργειες, ο λόγος F/B μπορεί να φτάσει σε υψηλά επίπεδα, καθώς συμβαίνει σε ορισμένα καλλιεργούμενα περιβάλλοντα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η κυριαρχία των μυκήτων αντί των βακτηρίων συνδέεται με τη μείωση της παραγωγικότητας του αγροσυστήματος, και γι' αυτό λαμβάνονται μέτρα για την αύξηση του εδαφικού pH. Η αύξηση αυτή, σε συνδυασμό με διάφορες διαδικασίες όπως το σκάλισμα ή το φρεζάρισμα του εδάφους, επαναφέρει την υπεροχή των βακτηρίων.

Αντιθέτως, με τις εκτάσεις βόσκησης και τα γεωργικά εδάφη, στα δάση με κωνοφόρα δέντρα κυριαρχούν οι μύκητες, και η ανάπτυξη των νέων φυτών προσανατολίζεται προς ένα λόγο F/B που ανέρχεται κοντά στο 10. Στα πιο γόνιμα δασικά εδάφη, ο λόγος αυτός μπορεί να φτάσει ακόμα και τιμές άνω των 100. Είναι ενδεικτικό ότι σε αυτά τα εδάφη, η ανάπτυξη νέων φυτών δεν είναι εφικτή εάν τα βακτήρια είναι εκείνα που κυριαρχούν.

Κατά τη διαδικασία της αποικοδόμησης, το βιοτικό πλήθος στο έδαφος διαδραματίζει τον δικό του ρόλο. Τα πρωτόζωα απορροφούν τα βακτήρια σε μεγάλες ποσότητες. Επειδή τα πρωτόζωα απαιτούν λιγότερο άζωτο σε σχέση με τα βακτήρια, κάθε φορά καταναλώνεται ένα βακτήριο, απελευθερώνεται μια σημαντική ποσότητα άζωτου στο έδαφος.

Τα νηματώδη ζώα επίσης τρέφονται με βακτήρια και μύκητες. Το άζωτο που απαιτούν τα νηματώδη ζώα είναι πολύ λιγότερο από αυτό που περιέχεται στη βακτηριακή βιομάζα και στη βιομάζα των μυκήτων, με αναλογία που κυμαίνεται από 10 έως 100 φορές λιγότερο στην πρώτη περίπτωση και από 5 έως 50 φορές λιγότερο στη δεύτερη. Έτσι, κατά τη θήρευση, παρατηρείται απελευθέρωση άζωτου.

2.2 ΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Μια συνηθισμένη πρακτική στην ταξινόμηση των οργανισμών που κατοικούν στο έδαφος είναι η κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με το μέγεθός τους. Οι οργανισμοί αυτοί ταξινομούνται σε διάφορες ομάδες, ανάλογα το μέγεθός τους.

Μια διαφορετική προσέγγιση στον τρόπο κατάταξης των οργανισμών που απασχολούν το έδαφος είναι η ταξινόμησή τους βάσει της εξέλιξης του βιολογικού τους κύκλου. Κάποια είδη, όπως το Κολεόπτερο Hippodamia sp., θεωρούνται μεταβατικά, διότι περνούν τη φάση του αυγού αποκλειστικά στο έδαφος. Άλλα ονομάζονται περιοδικοί κάτοικοι του εδάφους, καθώς μπορούν να επιβιώσουν τόσο μέσα όσο και έξω από αυτό. Τέλος, τα εδαφόβια ζώα παραμένουν στο έδαφος καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Ανάμεσά τους περιλαμβάνονται πολλά είδη ακάρεων, κολλεμβόλλων και άλλων μικροοργανισμών που εκτελούν τις ζωτικές τους δραστηριότητες εντός του εδάφους.

Όσον αφορά τη γονιμότητα του εδάφους και γενικότερα την ποιότητά του, οι μικροοργανισμοί αναδεικνύονται ως οι κυριότεροι παράγοντες. Η παρουσία ποικίλων εδαφικών μικροβιακών κοινοτήτων, με διαφορετική δομή και λειτουργία, θεωρείται βασική προϋπόθεση για την αειφόρο γεωργία. Η διαχείριση αυτών των κοινοτήτων και, συνεπώς, του εδαφικού οικοσυστήματος, επηρεάζει την εξέλιξη του περιβάλλοντος. Ένα παράδειγμα, είναι η μετατροπή ενός βοσκοτόπου σε δάσος όπου απαιτεί την ενίσχυση της παρουσίας των μυκητών στη διαδικασία αναδόμησης, καθώς αυτοί έχουν κεντρικό ρόλο στην αναγέννηση των δασών, αντίθετα με τα βακτήρια που κυριαρχούν σε βοσκότοπο.

Τα βακτήρια και οι μύκητες αποτελούν τις πλέον πυκνές και σημαντικές ομάδες μικροοργανισμών στο έδαφος. Αυτοί οι μικροοργανισμοί μπορούν να εμφανιστούν στο έδαφος ή ως μεμονωμένα κύτταρα ή ως συγκεντρώσεις κυττάρων πάνω σε πολυσακχαρίτες υποστρώματος. Η ενασχόλησή τους και η αλληλενέργειά τους με άλλους μικροοργανισμούς και εδαφικούς οργανισμούς εξαρτώνται από τις συνθήκες των μικροπεριβαλλόντων όπου βρίσκονται, τα οποία μπορεί να παρουσιάζουν διαφορές ακόμα και μεταξύ κοντινών περιοχών. Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι λόγω του υψηλού ρυθμού αύξησής τους, τα μικρόβια αντιδρούν άμεσα στις αλλαγές και αποτελούν έναν ευαίσθητο δείκτη των μεταβολών που επικρατεί στο έδαφος.

Η ποσότητα των βακτηρίων δεν εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του εδάφους ή της βλάστησης. Αυτή ποικίλλεται από 1 έως 100 εκατομμύρια ανά γραμμάριο σε καλλιεργήσιμο έδαφος και από 10 έως 1.000 εκατομμύρια ανά γραμμάριο σε δασικό έδαφος. Σε αναερόβια εδάφη ή εδάφη που έχουν εμπλουτιστεί με λυματολάσπη, ο αριθμός τους υπερβαίνει τα 100 εκατομμύρια. Τα βακτήρια συχνά εντοπίζονται σε πιο αλκαλικά εδάφη, σχηματίζοντας μικρά συσσωματώματα, και το κυρίαρχο σχήμα N είναι νιτρικά-νιτρώδες στην παρουσία τους.

Η ποσότητα της μυκητιακής βιομάζας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η φυτεία, η ποσότητα οργανικού υλικού, η εφαρμογή φυτοφαρμάκων και η αναταραχή του εδάφους. Σε δασικά εδάφη, η μυκητιακή βιομάζα

ποικίλλεται από 1.000 μέχρι 60 χιλιοστά του κυβικού μέτρου ανά γραμμάριο εδάφους, ενώ σε εδάφη καλλιεργειών από 1 έως 50 μέτρα. Το μέσο μέγεθος των υφών υπολογίζεται κάπου στα 2,5 μικρόμετρα, αντικατοπτρίζοντας την ποικιλομορφία των βασιδιομυκήτων, ασκομυκήτων και ζυμομυκήτων. Σε περιοχές όπου οι μύκητες κυριαρχούν, το pH είναι χαμηλό λόγω της παραγωγής δευτερογενών μεταβολιτών από αυτούς. Επιπλέον, τα σύμπλοκα είναι μεγαλύτερα από τα συναφή με τα βακτήρια, ενώ το κυρίαρχο άζωτο είναι η αμμωνία, καθώς οι μύκητες δεν μπορούν να εκτελέσουν τη νιτροποίηση του άζωτου.

Η ενασχόληση των μικροοργανισμών στο έδαφος συχνά φράσσεται από έλλειψη πηγών άνθρακα. Αυτό είναι ακόμα πιο εμφανές όταν προστίθεται γλυκόζη στο έδαφος, καθώς τότε παρατηρείται άμεση αύξηση της δραστηριότητας τους. Επιπλέον, η έρευνα έχει δείξει μια στενή σχέση μεταξύ της ποσότητας οργανικού άνθρακα (Corg) και της μικροβιακής βιομάζας (Cμικρ). Ωστόσο, η αναλογία αυτής της σχέσης (Cμικρ/Corg) μπορεί να ποικίλλει αναλόγως με τις γεωργικές πρακτικές. Συχνά, υψηλότερες τιμές παρατηρούνται σε καλλιέργειες που εφαρμόζουν εναλλαγή καλλιεργητικών κύκλων ή έχουν προσθέσει οργανικά λιπάσματα στο έδαφος, αντικατοπτρίζοντας έτσι την αυξημένη διαθεσιμότητα πηγών άνθρακα.

Από άποψη φυσιολογίας του οικοσυστήματος, ένα σημαντικό μέτρο για την κατάσταση της μικροβιακής κοινότητας είναι η παράμετρος qCO2, που αξιολογεί την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα μικροβιακής βιομάζας. Αυτό είναι γνωστό ως αναπνευστικό πηλίκο. Οι υψηλές τιμές της παραμέτρου συνήθως υποδηλώνουν καταπόνηση, όπως έντονη παρουσία βαρέων μετάλλων ή ακραία περιβαλλοντικά πλαίσια. Αυτό γίνεται, διότι, σε αυτές τις φάσεις, η ενέργεια καταναλώνεται ,κατά βάση, για τη διατήρηση της μικροβιακής βιομάζας. Επιπλέον, το qCO2 εμπλέκεται με την ηλικιακή δομή της μικροβιακής κοινότητας, με αυξημένες τιμές να υποδηλώνουν την προσαρμογή νεότερων οργανισμών.

Μια άλλη μετρική που χρησιμοποιείται ευρέως για να αξιολογηθούν οι αλλαγές στον σχηματισμό της μικροβιακής κοινότητας είναι η αναλογία Cμικρ/Nμικρ. Οι έρευνες δείχνουν μια έντονη τάση αύξησης αυτής της αναλογίας όταν η κοινότητα μετακινείται από την κυριαρχία των βακτηρίων προς την κυριαρχία των μυκήτων. Σε αγροτικά εδάφη, ο λόγος Cμικρ/Nμικρ κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5 και 10, αλλά έχουν καταγραφεί και τιμές εκτός αυτών των ορίων. Υψηλότερες τιμές από 10 έχουν παρατηρηθεί σε εδάφη με περιορισμένο αριθμό διαθεσιμότητας αζώτου και φωσφόρου, μετά από προσθήκη γλυκόζης, σε εδάφη με ελλείψεις οξυγόνου, καθώς και σε έδαφος από τροπικά εδάφη. Επιπλέον, η ελάττωση της αναλογίας Cμικρ/Nμικρ υποδεικνύει μείωση των θρεπτικών συστατικών που είναι διαθέσιμα για τους μικροοργανισμούς.

Αυτές οι μετρικές αξιοποιούνται για να αποτυπώσουν την αντίδραση της μικροβιακής κοινότητας σε οποιαδήποτε παρατηρούνται αλλαγές στην ποσότητα και την ποιότητα των οργανικών υλικών στο έδαφος. Η αναλογία C/N στο οργανικό υλικό είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την αποικοδόμηση, καθώς επηρεάζει τον τύπο των μικροοργανισμών που δραστηριοποιούνται κυρίως και την ταχύτητα της διαδικασίας. Στα υγρά εδάφη με χαμηλή αναλογία C/N, οι βακτηριακοί πληθυσμοί κυριαρχούν και η αποικοδόμηση είναι γρήγορη,

ενώ σε υψηλή αναλογία C/N, οι μύκητες αναλαμβάνουν τον πρωταγωνιστικό ρόλο, αποσυνθλίπτοντας δύσκολα αποικοδομήσιμα υλικά. Η δράση των μυκητών είναι αργότερη και πιο μακροπρόθεσμη σε σχέση με τους βακτηριακούς πληθυσμούς. Ωστόσο, σημειώνεται ότι οι διαδικασίες αυτές συμβαίνουν ταυτόχρονα, δίχως αυστηρά διακεκριμένες διαφορές μεταξύ τους.

Πέρα από τις τεχνικές καλλιέργειες, η ενσωμάτωση οργανικών υλικών όπως το κομπόστ, τα υπολείμματα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων κλπ. αντιπροσωπεύει μια διαταραχή που μπορεί να προκαλέσει τροποποιήσεις στη μικροβιακή κοινότητα του εδάφους. Αυτά τα οργανικά υλικά αξιολογούνται για την ανάκτηση εξαντλημένων εδαφών, παρέχοντας σταθερότητα και αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων για τη φυτική ανάπτυξη. Ο τρόπος και το είδος των επιπτώσεων που προκαλούνται από τα πρόσθετα στους μικροοργανισμούς εξαρτάται από την ποσότητα, τη χημική δομή του υλικού και τη συχνότητα εφαρμογής του. Παρατηρείται ότι η δομή της μικροβιακής κοινότητας μεταβάλλεται, ειδικά προς όφελος των βακτηριακών πληθυσμών, όταν προστίθεται κατάλληλο υλικό. Η συνολική πληθυσμιακή πυκνότητα των μικροοργανισμών, υπάρχει περίπτωση να ελαττωθεί λόγω της τοξικότητας του υλικού ή να μεγαλώσει λόγω της αυξημένης παραγωγής φυτικής βιομάζας. Επιπλέον, στην περίπτωση της κοπριάς και άλλων οργανικών προσθέτων, οι αλλαγές στη μικροβιακή κοινότητα ευθύνονται και στη φάση ότι αυτά τα υλικά έχουν ήδη μικροβιακό φορτίο. Επομένως, οι επιπτώσεις στη δομή, τη λειτουργία και τον πληθυσμό των μικροβίων εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες.

2.3 ΡΙΖΟΣΦΑΙΡΑ

Ο όρος "ριζόσφαιρα" αναφέρεται στην περιοχή γύρω από τις ρίζες των φυτών, όπου ευδοκιμούν οι μικροοργανισμοί που επηρεάζουν την υγεία και την ανάπτυξή τους. Αν και παλιά η προσοχή επικεντρωνόταν κυρίως στον περιορισμένο χώρο των ριζών, σήμερα είναι γνωστό ότι η ριζόσφαιρα αποτελεί ένα δυναμικό, πλούσιο σε ποικιλία και ενεργότητα, οικοσύστημα. Αυτό το μικροβιακό περιβάλλον είναι ουσιώδους σημασίας για την υγεία των φυτών και την εδαφική παραγωγικότητα. Οι μικροοργανισμοί στη ριζόσφαιρα συνεργάζονται σε μια σύνθετη οικολογική κοινότητα που περιλαμβάνει βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα και άλλους οργανισμούς. Αυτοί οι μικροοργανισμοί εκτελούν ποικίλες λειτουργίες, όπως η αποικοδόμηση οργανικού υλικού, η διάσπαση παθογόνων μικροοργανισμών, και η παροχή θρεπτικών ουσιών στα φυτά. Η δομή και η σύνθεση της ριζόσφαιρας μπορεί να ποικίλει ανάλογα με πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των φυτικών ειδών, των συνθηκών ανάπτυξης και των πρακτικών διαχείρισης του εδάφους. Στα πρώτα 2 χιλιοστά από την επιφάνεια των ριζών, παρατηρείται μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών που αναπτύσσονται με γρήγορους ρυθμούς. Όσο πιο απομακρυσμένα από τη ριζική περιοχή, τόσο εντοπίζονται ριζίδια και νεκρά κύτταρα, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις επικρατούν διαφορετικοί τύποι μικροοργανισμών με πιο αργούς ρυθμούς ανάπτυξης.

Η ευδιάκριτη ενασχόληση που παρατηρείται στη ριζόσφαιρα αφορά την αποδέσμευση ουσιών με χαμηλό ή υψηλό μοριακό βάρος, γνωστό ως exudates. Τα φυτά παράγουν αυτές τις ουσίες σε μεγάλη ποσότητα, έως και το 40% του συνολικού τους ξηρού βάρους (Lynch &Whipp, 1990). Αυτές οι χημικές εκκρίσεις μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

Πρώτον, τα υδατοδιαλυτά εκκρίματα, που περιλαμβάνουν σάκχαρα, αμινοξέα, οργανικά οξέα, ορμόνες και βιταμίνες. Η αποδέσμευσή τους δεν ζητάει ενέργεια από το φυτό.

Δεύτερον, οι πολυμερισμένοι υδατάνθρακες και τα ένζυμα, όπως τα πρωτεϊνούχα ένζυμα. Η παραγωγή τους απαιτεί συγκεκριμένα μεταβολικά μονοπάτια και, συνεπώς, ενεργειακό κόστος.

Τρίτον, τα αέρια, όπως το αιθυλένιο και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).

Παρότι το φυτό καθορίζει κάποια ποσότητα του δεσμευμένου άνθρακα που θα επωφεληθεί στο υπόγειο τμήμα του, συνήθως αυτό φτάνει γύρω στο 50% του ολικού δεσμευμένου άνθρακα στη φυτική βιομάζα. Πιο συγκεκριμένα, η απελευθέρωση άνθρακα μέσω των ριζικών εκκρίσεων ποικίλλει συνήθως μεταξύ 10% και 20%, ενώ περίπου ένα άλλο 10% έως 20% τροφοδοτείται από τους συνυπάρχοντες μικροοργανισμούς στο έδαφος, όπως τα βακτήρια που δένουν αζωτικά. Το υπόλοιπο, έως και το 50%, επενδύεται στη δημιουργία ριζικών ιστών.

Ωστόσο, είναι παράδοξο το γεγονός ότι το φυτό δεσμεύει μεγάλο μέρος του διαθέσιμου άνθρακα στην εδαφική μικροβιακή κοινότητα, αν και τα μικρόβια αυτά αμιλλώνται τα ριζικά συστήματα των φυτών για την πρόσβαση σε θρεπτικά συστατικά. Η λύση σε αυτό το παράδοξο βρίσκεται στην κινητική των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος και στη μορφολογία του ριζικού συστήματος.

Προσωρινά, τα θρεπτικά στοιχεία στο έδαφος, δεσμεύονται στη βιομάζα των μικροοργανισμών και αποδεσμεύονται όταν αυτοί πεθαίνουν, αφού λύνονται τα κύτταρά τους. Η αιτία του θανάτου των μικροβίων αναφέρεται κυρίως στην κατανάλωσή τους από οργανισμούς που τρέφονται με βακτήρια, όπως τα πρωτόζωα και οι βακτηριοφάγοι ή μυκητοφάγοι νηματώδεις.

Συνεπώς, η επένδυση του φυτού στην εδαφική μικροβιακή κοινότητα συνεισφέρει στην αύξηση της βιομάζας των μικροοργανισμών, που αποτελούν τροφική πηγή για τους ανώτερους καταναλωτές, όπως τα πρωτόζωα και οι βακτηριοφάγοι ή μυκητοφάγοι νηματώδεις.

Η διάδραση μεταξύ των μικροβίων και των καταναλωτών τους, επηρεάζει τον κύκλο αναχώνευσης των θρεπτικών στοιχείων, βελτιώνει τη διαθεσιμότητά τους για τη βλάστηση, και εμποδίζει τη μορφολογία και την αρχιτεκτονική του ριζικού συστήματος. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη δομή της ρίζας, η πλειοψηφία των βακτηρίων της ριζόσφαιρας μπορεί να φέρει επιπτώσεις στο σχήμα και την ανάπτυξη των φυτών με την παραγωγή ορμονών. Περισσότερο από το 80% των βακτηρίων που έχουν μείνει από τη ριζόσφαιρα παρουσιάζουν

δραστηριότητα στην παραγωγή αυξίνης, ενώ φαίνεται να διαθέτουν την ικανότητα να παράγουν κυτοκινίνη.

Ο μηχανισμός που μόλις αναφέρθηκε αποκαλείται ως "βιολογικός κύκλος" και ξεκλειδώνεται μέσω της παραγωγής ριζικών εκκρίσεων. Ιδιαίτερα, όσον αφορά τις ανόργανες διαδικασίες, παρατηρείται ότι, χωρίς τη θήρευση των μικροβίων, τα θρεπτικά στοιχεία θα παρέμεναν ακίνητα στη βιομάζα των μικροβίων για μεγάλο χρονικό διάστημα και θα απομακρυνόντουσαν από τον κύκλο. Τώρα, λόγω των χαμηλών ρυθμών απορρόφησης από πρωτόζωα και νηματώδεις, μόνο το 10-40% και το 50-70% του μικροβιακού άνθρακα μπορούν να εφαρμοστούν από αυτούς για την παραγωγή βιομάζας. Τα υπόλοιπα αποβάλλονται ως αμμωνία και γίνονται αμέσως προσβάσιμα για άλλους εδαφικούς οργανισμούς, καθώς και για τις ρίζες των φυτών.

Η ευεργετική επίδραση της εδαφικής οικολογίας στην άνοδο της φυτικής ζωής έχει επαρκώς αποδειχθεί, ειδικά όσον αφορά τους μικροοργανισμούς όπως τα πρωτόζωα και οι νηματώδεις. Με γενικούς υπολογισμούς, οι οργανισμοί μπορεί να συμβάλλουν στο ποσοστό της αναπνοής του εδάφους κατά περίπου 15% και 70%. Πιο συγκεκριμένα, τα πρωτόζωα διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο σε αυτήν τη διαδικασία. Παρόλο που το μέγεθός τους ποικίλλει μεταξύ 10 και 100 μm, η ποσότητα των μυκήτων στο έδαφος μπορεί να είναι ίση ή μεγαλύτερη από αυτήν των άλλων εδαφικών οργανισμών, εξαιρουμένων των γεωσκωλήκων. Η σύντομη διάρκεια ζωής τους, που κυμαίνεται από 2 έως 4 ώρες, και οι μεγάλοι ρυθμοί αναπαραγωγής τους, καθώς παράγουν 10 έως 12 φορές τη βιομάζα τους κάθε έτος, αποδεικνύουν ότι αυτή η κατηγορία εδαφικών οργανισμών ασκεί έντονη πίεση στα βακτήρια. Ως εκ τούτου, έχει σημαντικό ρόλο στον κύκλο των θρεπτικών στοιχείων.

Πληθώρα πειραματικών αποδείξεων υπογραμμίζει τη σπουδαιότητα της εδαφικής οικολογίας για την ανάπτυξη των φυτών. Δεδομένα από μικροκόσμους, για παράδειγμα, δείχνουν ότι η παρουσία μικροοργανισμών στο έδαφος συνδέεται με σημαντική αύξηση της βιομάζας των φυτών και της συγκέντρωσης του αζώτου σε αυτά. Επιπλέον, η έμμεση συμβολή των οργανισμών του εδάφους στις ενέργειες ορυκτοποίησης είναι ακόμα σημαντικότερη από την άμεση, καθώς η θήρευσή τους ενεργοποιεί τη μικροβιακή δραστηριότητα και επιταχύνει την δράση της αποικοδόμησης. Ακόμη, αν και η παρουσία των νηματωδών στη συνολική διαδικασία ανοργανοποίησης του αζώτου είναι 5%, η αφαίρεσή τους από το εδαφικό οικοσύστημα καταλήγει σε μείωση της συνολικής ανοργανοποίησης κατά 12%.

Τα φυτά δεν είναι απλά παθητικοί δέκτες των θρεπτικών στοιχείων αλλά αλληλοεπιδρούν ενεργά με το περιβάλλον. Λαμβάνουν σήματα που επηρεάζουν την κατανομή του άνθρακα στο υπόγειο μέρος τους, τις συμβιωτικές τους σχέσεις, το ρυθμό απόδοσης ουσιών, την αμοιβαία επίδρασή τους με τους ελεύθερους μικροοργανισμούς ή την δημιουργία δευτερογενών μεταβολιτών που συνδράμουν στην αυτοάμυνά τους.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ταυτόχρονη παρουσία οργανισμών στην περιοχή της ριζόσφαιρας μπορεί να έχει και αρνητικές επιδράσεις. Υπάρχουν και επιδράσεις, τόσο άμεσες όσο και έμμεσες, οι οποίες έχουν δυσμενείς επιπτώσεις.

2.4 ΜΥΚΟΡΡΙΖΕΣ

Αν και ο όρος "ριζόσφαιρα" περιγράφει την περιοχή γύρω από τις ρίζες, η έννοια της "μυκόρριζας" εστιάζει στην αλληλεπίδραση μεταξύ των εδαφικών μυκητών και τα ριζικά κύτταρα των φυτών. Ο μύκητας εισχωρεί μέσα στα νέα ριζικά κύτταρα και παράλληλα εξαπλώνεται στο έδαφος, δημιουργώντας μια είδους γέφυρας μεταξύ του φυτού και του εδαφικού υποστρώματος. Σε αυτήν την αλληλεπίδραση, το φυτό προσφέρει στον μύκητα υδατάνθρακες όπως σακχαρόζη και φρουκτόζη, ενώ ο μύκητας διευκολύνει την επέκταση του ριζικού συστήματος για την ανάληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων. Σχετικά με την απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων από το φυτό, η μυκόρριζα συνήθως συνδέεται με την απορρόφηση φωσφόρου, περισσότερο από το άζωτο ή άλλα θρεπτικά στοιχεία.

Η βοήθεια που παρέχει ο μύκητας στα φυτά προέρχεται από την ικανότητά του να διεισδύει σε ευρύτερες περιοχές του εδάφους λόγω της λεπτής διάμετρος των μυκηλιακών υφών του. Επιπλέον, οι κυτταρικές μεμβράνες των μυκηλίων είναι αποδοτικότερες στην απορρόφηση νερού και θρεπτικών στοιχείων λόγω της χημικής τους δομής. Εκτός από την απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων, η παρουσία μυκόρριζας καθιστά τα φυτά ανθεκτικότερα σε συνθήκες όπως η ξηρασία, η αλατότητα του εδάφους, οι θερμικές πιέσεις και διάφορες ασθένειες του ριζικού συστήματος.

Τα μυκήλια των μυκορριζών μπορούν να εισέρχονται είτε εσωτερικά στα ριζικά κύτταρα είτε να μεγαλώνουν ενδιάμεσα στα κύτταρα ή ακόμα και εκτός της ρίζας. Οι μυκορρίζες που εισέρχονται εντός των κυττάρων είναι γνωστές ως ενδομυκορρίζες, γνωστές και με τα αρχικά AM από τον όρο "Arbuscular mycorrhiza". Τα μυκορριζικά μυκήλια, αν και δεν διαπερνούν τις κυτταρικές μεμβράνες, πιέζουν τα κυτταρικά τοιχώματα των ριζών, ώθηση που οδηγεί στη δημιουργία εγκολπώσεων διάφορων σχημάτων όπως κύστες και διακλαδιζόμενες δομές. Αυτό επιτρέπει τη μεγέθυνση της επιφάνειας επαφής μεταξύ μύκητα και φυτικού κυττάρου. Επιπλέον, οι κύστες χρησιμεύουν για την αποθήκευση λιπιδίων. Ανάμεσα στο εξωτερικό έδαφος, διακρίνονται υφές και αναπαραγωγικές μονάδες όπως χλαμυδοσπόρια, ενώ εμφανίζονται, επίσης, υφές μεταξύ των κυττάρων του ριζικού φλοιού και πιο σύνθετες δομές που σχηματίζουν κύστες και το μεσοκυττάριο δίκτυο Hartig.

Οι μύκητες που δημιουργούν ενδομυκορρίζες σχέσεις κυρίως ανήκουν στο φύλο Glomeromycota και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία των φυτών ξενιστών για την ανάπτυξή τους. Συνήθως, ενδομύκητες βρίσκονται σε φυτά πόας, αλλά δεν είναι εντελώς απροσδόκητο να βρεθούν και σε ορισμένα ξυλώδη φυτά.

Οι εκτομυκόρριζες, γνωστές και ως EM ή ECM, συνήθως ευδοκιμούν στις ρίζες των ξύλινων φυτών. Οι μύκητες αυτοί ανήκουν σε διάφορες ομάδες, όπως οι βασιδιομύκητες, οι

ασκομύκητες και οι ζυγομύκητες. Τα μυκήλια τους απλώνονται γύρω από τις λεπτές ρίζες και δημιουργούν ένα είδος περιβλήματος γύρω από αυτές, μερικές φορές εισχωρώντας ανάμεσα στα επιδερμικά κύτταρα. Αυτοί οι μύκητες είναι γνωστοί για την ικανότητά τους να αποικοδομούν ουσίες χάρη στην παραγωγή ενζύμων, όπως φωσφατάση, πρωτεάση και κυτταρινάση, από τα οποία παίρνουν τον απαραίτητο άνθρακα, και μπορούν να επιβιώσουν και χωρίς τα φυτά που τους φιλοξενούν. Ορισμένες ειδικές παραλλαγές των μυκορριζών παρατηρούνται σε ορχιδέες και είδη της οικογένειας Ericaceae στις βόρειες περιοχές.

Η επιβίωση πολλών ειδών φυτών βασίζεται σημαντικά από την αλληλεπίδραση που αναπτύσσουν οι ρίζες τους με τους μύκητες. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως μυκοτροφία, είναι κοινό σε πολλά δένδρα, θάμνους και πολυετή φυτά. Σε αντίθεση, τα φυτά που δεν μπορούν να αναπτύξουν μυκορριζώματα ονομάζονται μη-φιλοξενούμενα, και τα περισσότερα ζιζάνια ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία (John, 2000).

Ωστόσο, δεν επωφελείται κάθε φυτό από την παρουσία μυκορριζών, καθώς σε ορισμένες περιστάσεις μπορεί να είναι αντίθετες. Η επίδραση των μυκορριζών εξαρτάται από το είδος του φυτού, και μπορεί να είναι είτε ευεργετική είτε παρασιτική. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο ανταγωνισμός για θρεπτικά στοιχεία μεταξύ του φυτού και του μύκητα μπορεί να είναι αρνητικός. Αντίθετα, η παρουσία μυκορριζών μπορεί να προστατεύσει τη ρίζα από παθογόνους μύκητες και βακτήρια, έχοντας θετική επίδραση στη σχέση μεταξύ τους.

Στα ανέπαφα εδάφη, κυριαρχούν οι μύκητες των μυκορριζών , αποτελώντας το 70% της παρέας των μικροβίων. Η παρουσία τους αποτελεί μια ένδειξη ότι η εδαφική οικολογία βρίσκεται σε ισορροπία, ενώ οι διαταραχές σε αυτό το οικοσύστημα μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφικές συνέπειες για τους μύκητες και το εδαφικό περιβάλλον γενικότερα. Είναι παράξενο που σε νεαρά εδάφη η μυκορριζαία είναι σπάνια. Παρόλα αυτά, τα νεαρά φυτά είναι περισσότερο πρόθυμα να δέχονται τη συντροφιά των μυκορριζών όταν βρίσκονται σε εδάφη που περιέχουν υψηλές ποσότητες μυκητιακών δομών, παρά σε αυτά που απλά περιλαμβάνουν σπόρους μυκήτων.

Η ανάπτυξη των μυκορριζών αναδεικνύει ένα ευρύτατο φάσμα πτυχών που επηρεάζουν την οικολογία του εδάφους και τη βιολογία των φυτών. Από τη μία πλευρά, η παραγωγή της γλυκοπρωτεΐνης γκλομαλίνης από τους μύκητες ενισχύει τη σταθερότητα του εδαφικού μικροπεριβάλλοντος, καθιστώντας εφικτή τη συγκράτηση και την προστασία των εδαφικών σωματιδίων. Από την άλλη, η μυκόρριζα λειτουργεί ως μέσο επικοινωνίας μεταξύ των ριζικών συστημάτων διαφόρων φυτικών ειδών, διευκολύνοντας τη μεταφορά θρεπτικών στοιχείων ανάμεσά τους. Αυτή η πολυπλοκότητα της αλληλεπίδρασης των μυκορριζών αποτυπώνεται στη διαφοροποιημένη τους δράση, η οποία ενισχύει την ετερογένεια και την πολυπλοκότητα του βιολογικού κοινωνικού δικτύου στο εδαφικό οικοσύστημα.

Πέρα από τις προηγούμενες πτυχές, η μυκόρριζα συνεισφέρει σημαντικά στην αλληλεπίδραση με άλλους εδαφικούς οργανισμούς μέσω ποικίλων βιοτικών σχέσεων. Συγκεκριμένα, σε εδάφη όπου έχουν εγκατασταθεί μυκητιακές υφές, παρατηρείται αύξηση του πληθυσμού ευεργετικών βακτηριακών ειδών, την ίδια ώρα που περιορίζεται η ανάπτυξη

των παθογόνων. Αυτή η αλληλεπίδραση πιθανότατα οφείλεται σε αυξημένη παραγωγή αντιβιοτικών από τους μύκητες, που ενδέχεται να εμποδίζει την ανάπτυξη των παθογόνων βακτηρίων.

Συνοπτικά, η παρουσία των μυκορριζών επηρεάζει πολλαπλές πτυχές της εδαφικής οικολογίας, συμπεριλαμβανομένης της διακίνησης θρεπτικών στοιχείων, της ροής του νερού και της ατμόσφαιρας στο έδαφος, της κίνησης των εδαφικών οργανισμών και της ανάπτυξης των ριζών. Ακόμα, έχουν αναφερθεί επιπτώσεις στον σχηματισμό των φυτών. Ανάμεσα από τα επιτεύγματα που προκύπτουν από την παρουσία αυτών των μυκορριζών, περιλαμβάνουν την αύξηση της βιωσιμότητας των φυτών και την υπεράσπιση τους από ασθένειες, την καλυτέρευση της σύνθεσης του εδάφους, την αύξηση της ποικιλότητας στο σύστημα, καθώς και την ανακοπή στην επιδρομή ξένων φυτών.

2.5 ΕΔΑΦΟΠΑΝΙΔΑ

2.5.1. ΠΡΩΤΟΖΩΑ

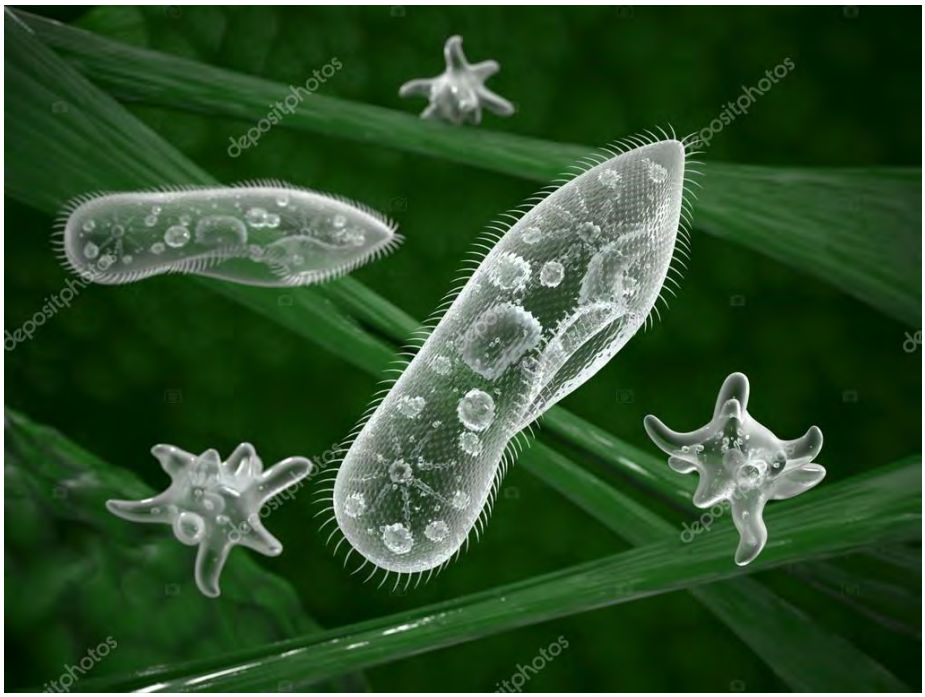
Τα πρωτόζωα αποτελούν σημαντικό μέρος της μικροπανίδας, χαρακτηρίζονται από την αναπαραγωγή τους μέσω αγενούς διαίρεσης ή σύμφυσης δύο κυττάρων. Πολλά είδη διαθέτουν μηχανισμούς προσαρμογής στην ξηρασία, διατηρώντας παράλληλα την ικανότητα γρήγορης ανακατάληψης όταν η υγρασία επανέλθει στις φυσιολογικές της συνθήκες. Συνήθως, παρουσιάζουν μεγάλη πληθυσμιακή παρουσία σε εδάφη με υψηλή οξύτητα και επικρατούν σε ανώτερα εδαφικά στρώματα.

Η κύρια λειτουργία τους εστιάζεται στον έλεγχο των βακτηριακών πληθυσμών σε μικρές εδαφικές κοιλάδες και κοντά στις ρίζες των φυτών. Οι συνδυασμοί που φτιάχνουν με τις βακτηριακές κοινότητες δημιουργούν ουσίες στο περιβάλλον της ριζόσφαιρας, οι οποίες προωθούν τη φυτική ανάπτυξη. Επανειλημμένα, οι μεταβολές στην κατανομή και την πληθυσμιακή παρουσία τους χρησιμοποιούνται ως δείκτες για την αξιολόγηση της ποιότητας του εδάφους.

Ενδιάμεσα στα πρωτόζωα, τα ριζόποδα διατρέφονται κυρίως με φύκια, μύκητες, βακτήρια, άλλα πρωτόζωα και υπολείμματα βιολογικής προέλευσης. Ο πληθυσμιακός τους πλούτος εκτιμάται στα 200 έως 10^6 άτομα ανά γραμμάριο εδάφους. Συναντώνται ευρέως σε υγρά, όξινα εδάφη και στα περιβάλλοντα όπου επικρατούν τα βρύα. Εκμεταλλεύονται επικρατέστερα τους υδάτινους μανδύες σε καλλιέργειες και λιβάδια. Επιπλέον, η ενεργότητά τους συμβάλλει στη σημαντική ανακύκλωση των υλικών στο εδαφικό οικοσύστημα.

Τα πράσινα φύκια, μια άλλη κατηγορία πρωτόζωων, είναι βακτηριοφάγα κυρίως, με επιπρόσθετη κατανάλωση φυτικών υπολειμμάτων. Ο πληθυσμιακός τους πλούτος είναι ελαφρώς μικρότερος από αυτόν των ριζοπόδων και κυμαίνεται σε παρόμοια εύρη τιμών ανά γραμμάριο εδάφους. Τα χαρακτηριστικά της διατροφής και ο ρόλος τους στην ανακύκλωση των υλικών μοιάζουν με αυτά των ριζοπόδων.

Εν τέλει, τα βλεφαριδοφόρα πρωτόζωα τροφοδοτούνται κυρίως με βακτήρια και υπολείμματα βιολογικής προέλευσης, με πολύ μικρότερο πληθυσμό που κυμαίνεται από 10^3 έως 200 άτομα ανά λίτρο νερού. Κατοικούν κυρίως σε υδάτινους μανδύες.



Εικόνα 4. Πρωτόζωα

Πηγή:https://depositphotos.com/gr/photo/paramecium-protozoa-69791523.html

2.5.2. ΝΗΜΑΤΩΔΕΙΣ

Οι νηματώδεις αποτελούν μία εξαιρετικά πλούσια και ίσως η πλέον σημαντική ομάδα της εδαφικής πανίδας, με πληθυσμιακές πυκνότητες που κυμαίνονται σε χιλιάδες άτομα ανά γραμμάριο εδάφους. Βρίσκονται, κυρίως, σε αυξημένα ποσοστά γύρω από τη ριζόσφαιρα των ανώτερων φυτών, με προτίμηση σε υδατικούς μανδύες. Είναι ευάλωτοι στις μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Το ενδιαφέρον αυξάνεται καθώς ορισμένα είδη αναπαράγονται γενετικά, ενώ άλλα μεταβαίνουν στην παρθενογένεση, με τον βιολογικό τους κύκλο να κυμαίνεται από 3 έως 350 ημέρες.

Οι νηματώδεις εκδηλώνουν εξαιρετική ποικιλία ειδών και τροφικών τύπων. Εντοπίζονται οι βακτηριοφάγοι και οι μυκητοφάγοι νηματώδεις, τα ριζικά ενδοπαράσιτα, οι κυνηγοί και οι παμφάγοι. Ένας βακτηριοφάγος νηματώδης τρέφεται με 106 βακτήρια την ημέρα, ενώ ένας μυκητοφάγος τρέφεται με μυκητική ύλη μήκους 10-15m. Το 70-80% του άζωτου που εφαρμόζουν τα ταχέως αναπτυσσόμενα δέντρα προέρχεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των λειτουργών (βακτηρίων, μυκήτων) και των κυνηγών τους (βακτηριοφάγων, μυκητοφάγων νηματωδών). Η απουσία των μικροβιοφάγων νηματωδών έχει ως αποτέλεσμα

την απραξία των θρεπτικών στοιχείων στη μικροβιακή βιομάζα και την συγκεκριμένη προσβασιμότητά τους για την φυτική ανάπτυξη.

Εικόνα 5. Νηματώδεις, τα έξυπνα παράσιτα.

Πηγή: https://blog.farmacon.gr/katigories/texniki-arthrografia/fytoprostasia/item/2370-nimatodeis-ta-eksypna-parasita

2.5.3. ΠΛΑΤΥΕΛΜΙΝΘΕΣ

Τα πλατυελμίνθια βρίσκουν τροφή στα μικρά σαλιγκάρια, στα μικρά έντομα, καθώς και στα οργανισμούς που ζουν στα νερά. Το φαγητό τους κυρίως αποτελείται από υλικά όπως φυτικά υπολείμματα, πεσμένα φύλλα, και υγρά φυτά που βρίσκονται κοντά στα νερά. Η παρουσία τους συνήθως είναι περιορισμένη από άποψη πληθυσμού.

Εικόνα 6. Πλατυέλμινθες.

Πηγή:https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BB%CE%B1%CF%84%CF%85%CE%AD%CE%BB%CE%BC%CE%B9%CE%BD%CE%B8%CE%B5%CF%82

2.5.4. ΟΛΙΓΟΧΑΙΤΟΙ

Από την οπτική γωνία του οικοσυστήματος, οι ολιγόχαιτοι ανήκουν σε μια από τις κύριες εδαφικές κοινότητες, με ποικιλία ειδών που διακρίνονται για τη μηχανική τους πολυμορφία. Η πυκνότητα των ολιγόχαιτων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10 έως 1000 ατόμων ανά τετραγωνικό μέτρο, με μικρό αριθμό ειδών, περίπου 3,500, που έχουν καταγραφεί. Η πλειονότητα από αυτά είναι ερμαφρόδιτα, με μερικά να αναπαράγονται μέσω παρθενογένεσης. Οι ολιγόχαιτοι τροφοδοτούνται με βακτήρια, μύκητες και νεκρό φυτικό υλικό, μερικά από τα οποία έχουν την ικανότητα να διασπώνται κυτταρίνη ή χιτίνη. Κατοικούν σε περιοχές εύκρατων και τροπικών δασών, καθώς και σε λιβάδια, προτιμώντας υγρά ασβεστολιθικά εδάφη, με ευαισθησία στην οξύτητα του εδάφους.

Οι δακτυλιοσκώληκες είναι μια ομάδα ζώων που εφαρμόζεται ευρέως σε προγραμματισμό αναζωογόνησης εδάφους. Με την ικανότητά τους να δημιουργούν μεγάλες ποσότητες απορριμμάτων, τα οποία περιέχουν άζωτο και μικροοργανισμούς, συμβάλλουν σημαντικά στον παραγωγικό τομέα χούμου τύπου mull. Ο ρυθμός ανάμιξης του εδάφους από τα μέλη αυτής της ομάδας κυμαίνεται από 40 έως 70 τόνους ανά εκτάριο ετησίως σε μέτριες κλιματικές ζώνες και φτάνει από 5 έως 1000 τόνους σε τροπικές περιοχές. Τα απορρίμματα που παράγουν συγκρατούνται από πολυμερή ουσία, παρέχοντας σταθερή δομή στα έντονα. Το ενδιαφέρον είναι ότι με τις απελευθερώσεις τους, τα απορρίμματα υφίστανται σταδιακή σκλήρυνση μέσω εναλλαγών υγρασίας και ξήρανσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα για τον επιβλέπων είναι, η δυνατότητά τους να καλυτερεύουν την ποιότητα του εδάφους. Μέσω της

κατασκευής τους οργανικών δομών και της απόθεσης των αποβλήτων τους, συμβάλλουν στη σταθεροποίηση του εδαφικού υλικού και στην αύξηση των διαθέσιμων πόρων.

Πέρα από τα θετικά τους χαρακτηριστικά, οι ολιγόχαιτοι μπορεί να έχουν και αρνητικές επιπτώσεις στο έδαφος. Ανάμεσα σε αυτές περιλαμβάνονται η τάφηση επιφανειακών υλικών που αναστέλλουν τη διάβρωση, η παραγωγή διαβρωτικών επιφανειακών απορριμμάτων και η συμπύκνωση του εδάφους. Αναφέρονται περιπτώσεις προβλημάτων όπως η συσσώρευση μη επιθυμητών επιφανειακών απορριμμάτων σε γήπεδα γκολφ, η διασπορά σπόρων, ζιζανίων και παθογόνων στις καλλιέργειες. Επιπλέον, η ανατροπή της υδρολογικής ισορροπίας σε ευρύτερη κλίμακα και οι απώλειες αζώτου λόγω αυξημένης αποπλύσεως του εδάφους αποτελούν σοβαρά θέματα που σχετίζονται με αυτήν την ομάδα. Επίσης, η απώλεια οργανικού άνθρακα λόγω της αυξημένης δραστηριότητας των μικροοργανισμών που προκαλείται από την παραγωγή μεγάλου όγκου απορριμμάτων είναι άλλο ζήτημα που ανακύπτει. Όλα αυτά υπογραμμίζουν την ανάγκη για ορθολογική διαχείριση των πληθυσμών των ολιγόχαιτων. Στην πράξη, αυτά τα ζώα έχουν εφαρμοστεί ευρέως για την παραγωγή οργανικών λιπασμάτων, τη διαχείριση απορριμμάτων και το vermicomposting. Επίσης, εφαρμόζονται για την παραγωγή ζωικής πρωτεΐνης, ως δολώματα, προκειμένου να βελτιώσουν την ποιότητα του εδάφους ή να ενισχύσουν συγκεκριμένες εδαφικές ιδιότητες, όπως η αύξηση της οργανικής ύλης.

Εικόνα 7. Γεωσκόληκας.

Πηγή:https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CF%89%CF%83%CE%BA%CF%8E%CE%BB%CE%B7%CE%BA%CE%B1%CF%82

2.5.5. ΕΝΧΥΤΡΕΪΔΕΣ

Αυτή η ομάδα οργανισμών διατρέφεται με μύκητες, βακτήρια και νηματώδεις. Αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του οικοσυστήματος, καθώς διαδραματίζει ένα κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση των μικροβιακών κοινοτήτων στο έδαφος. Οι οργανισμοί αυτοί είναι ευέλικτοι, καθώς μπορούν να αναπτυχθούν και να φτάσουν στην ενηλικίωση σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Συνήθως βρίσκονται σε ψυχρά κλίματα και υγρά εδάφη, ενώ είναι σπάνιο να συναντηθούν σε στοές. Αν και η ποικιλία των ειδών τους είναι χαμηλή, το πληθυσμιακό τους μέγεθος μπορεί να είναι εντυπωσιακά υψηλό, φτάνοντας μέχρι και τα 130.000 άτομα ανά τετραγωνικό μέτρο. Είναι επίσης γνωστό για τη σημαντική παραγωγή απορριμμάτων, η οποία έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Εικόνα 8. Σκουλήκι.

Πηγή:https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%BA%CE%BF%CF%85%CE%BB%CE%AE%CE%BA%CE%B9

2.5.6. ΑΚΑΡΕΑ

Τα ακάρεα αποτελούν μία από τις πλέον πολυάριθμες ομάδες μικροαρθροπόδων. Αναπτύσσονται σε πολλά επίπεδα τροφικής αλυσίδας, με τους ορειβάτες να ξεχωρίζουν ως η πιο άφθονη κατηγορία. Η πλειονότητά τους είναι μυκητοφάγοι, αν και μερικοί είναι σαπροφάγοι. Τα μεσοστίγματα, άφθονης μέτρου, κυρίως ασχολούνται με το κυνήγι. Στα καλλιεργούμενα εδάφη, τα ακάρεα βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες, ενώ οι περιοχές με υψηλή αφθονία συχνά τους φιλοξενούν ως κυνηγούς. Εκτός από την ποικιλία στις προτιμήσεις τροφής, τα ακάρεα επιδεικνύουν και διάφορες στρατηγικές αναπαραγωγής και διασποράς.

Συγκεκριμένα, οι ορειβάτες είναι μια ομάδα που έχει εξειδικευμένες ανάγκες διατροφής. Εκτός από μύκητες και βακτήρια, τρέφονται και με φύκια και αποικοδομημένη στρωμνή. Ορισμένα αναπαράγονται φυλετικά, ενώ άλλα προτιμούν την παρθενογένεση. Ζουν στη στρωμνή και στο χούμο, με υψηλή βιοποικιλότητα και μεγάλα πληθυσμιακά μεγέθη. Τα μεσοστίγματα χαρακτηρίζονται από αργή αναπαραγωγή και έναν βιολογικό κύκλο που διαρκεί από 6 έως 24 μήνες. Η αργή ενεργειακή διαδικασία και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικοί παράγοντες για την επιβίωσή τους. Ανάλογα με τη διατροφική τους στρατηγική, μερικά καταναλώνουν και τα κυτταρικά τοιχώματα των μικροοργανισμών, ενώ άλλα περιορίζονται στο κυτταρικό περιεχόμενο. Επίσης, επηρεάζουν σημαντικά την αρμονική λειτουργία των μικροβιακών κοινοτήτων και στον τεμαχισμό της στρωμνής. Συνήθως, τα μεσοστίγματα είναι κυνηγοί που τρέφονται με νηματώδεις, άλλα ακάρεα και κολλέμβολα. Ωστόσο, υπάρχει και μια οικογένεια, οι uropodidae, που είναι παμφάγα.

Αυτή η κοινότητα παρουσιάζει μέτρια ποικιλότητα και μέτρια πληθυσμιακά μεγέθη και συνήθως την συναντάμε σε επιφανειακά υγρά εδάφη.

Εικόνα 9. Ακάρεα.

Πηγές: https://www.bio-clean.gr/%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%B1-%CE%B1%CE%BA%CE%AC%CF%81%CE%B5%CE%B1/

https://www.aoratos-cleaning.gr/ti-einai-ta-akarea-skonis-kai-pos-na-apallageite-apo-afta/

2.5.7. ΚΟΛΛΕΜΒΟΛΑ

Τα κολλέμβολα αποτελούν μία από τις πλέον πολυπληθείς ομάδες εδαφικών αρθροπόδων, διακρινόμενα σε τρεις υποομάδες: τα επιεδαφικά συμφυπλέονα, τα εδαφικά αρθροπλέονα και τα ευεδαφικά αρθροπλέονα. Παρουσιάζουν αυξημένη ποικιλότητα και οι σημαντικές πληθυσμιακές διαστάσεις ποικίλλουν από 1.000 έως 80.000 ατόμων ανά τετραγωνικό μέτρο. Οι περισσότεροι αναπαράγονται είτε φυλετικά είτε μέσω παρθενογένεσης, με υψηλό αναπαραγωγικό δυναμικό και συνήθως ετήσιο βιολογικό κύκλο. Η διατροφή τους είναι εξειδικευμένη, περιλαμβάνοντας μύκητες, γύρη, λειχήνες και φύκια. Κατοικούν σε σχετικά υγρό έδαφος, στη στρωμνή και τον χούμο, εκδηλώνοντας υψηλή ενεργειακή ισορροπία και σημαντική επίδραση στη διανομή των υφών και τη δομή των μυκητιακών κοινοτήτων μέσω της επιλεκτικής βόσκησης. Τέλος, συμβάλλουν στην προστασία της ριζόσφαιρας από παθογόνους οργανισμούς.

Εικόνα 10. Collembola.

Πηγή: https://www.alphaapolymantiki.gr/%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%B1-collembola/

2.5.8. ΠΡΟΤΟΥΡΑ

Οι πληθυσμοί τους είναι αραιοί, κυμαίνονται από 1.000 έως 7.000 άτομα ανά τετραγωνικό μέτρο και οι πηγές τροφής τους περιλαμβάνουν τις μυκόρριζες των ψηλότερων φυτών.

Εικόνα 11. Protura.

Πηγή:https://keys.lucidcentral.org/keys/v3/TFI/start%20key/key/hexapoda%20key/Media/HTML/Protura.html

2.5.9. ΔΙΠΛΟΥΡΑ

Τα δίπλουρα είναι ζώα που ενεργούν κυρίως τη νύχτα, κατοικούν σε εδάφη πλούσια σε υγρασία ή στη στρωμνή του δάσους και οι πληθυσμοί τους είναι σχετικά αραιοί (περίπου 50 άτομα ανά τετραγωνικό μέτρο). Η διατροφή τους περιλαμβάνει ακάρεα, νηματώδεις, κολλέμβολα και, ενδεχομένως, ορισμένα υφές.

Εικόνα 12. Diplura.

Πηγή: https://gr.pinterest.com/pin/816488607415785963/

2.5.10. ΨΕΥΔΟΣΚΟΡΠΙΟΙ

Κατοικούν στο περιβάλλον του εδάφους και στην υγρή στρώση του δασικού εδάφους, ενώ η διατροφή τους βασίζεται κυρίως σε ακάρεα και κολλέμβολα. Ο αριθμός τους σε κάθε μονάδα είναι μικρός.

Εικόνα 13. Pseudoscorpions ή Chelonethida.

Πηγή: https://papagiannisdimitris.blogspot.com/2013/12/blog-post_30.html

2.5.11. ΣΥΜΦΥΛΑ

Αυτά τα πλάσματα είναι παμφάγα και συναντώνται σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως δάση, λιβάδια και αγρούς. Σε ορισμένες περιπτώσεις, έχουν προκαλέσει ζημιές σε θερμοκήπια λόγω της κατανάλωσης σπόρων και ριζών.

Εικόνα 14. Symphyla.

Πηγή: https://it.wikipedia.org/wiki/Symphyla

2.5.12. ΑΡΑΧΝΕΣ

Πρόκειται για γενικούς κυνηγούς που ζουν στο χώμα, σε ρωγμές του εδάφους, κάτω από πέτρες, και ορισμένοι ακόμα κατασκευάζουν το δικό τους καταφύγιο. Αν και υπάρχουν

πολλά είδη αυτού του taxon, οι σημαντικές πληθυσμιακές διαστάσεις καταγράφονται μόνο στα δάση. Γενικότερα, οι αράχνες έχουν χαμηλό ρυθμό αναπαραγωγής, αλλά παίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των πληθυσμών άλλων αρθροπόδων, όπως των κολλεμβόλων.

Εικόνα 15. Αράχνη.

Πηγή: https://www.newsbeast.gr/health/arthro/821450/trome-odos-arahnes-ston-upno-mas

2.5.13. ΟΡΘΟΠΤΕΡΑ

Κατοικούν σε σπηλαιώδεις δομές στο έδαφος και τρέφονται με ρίζες, σπόρους και άλλα είδη εντόμων.

Εικόνα 16. Ορθόπτερα.

*Πηγή:*https://www.naturagraeca.com/ws/168,230,1,%CE%9F%CF%81%CE%B8%CF%8C%CF%80%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%B1&page=2

2.5.14. ΚΟΛΟΕΠΤΕΡΑ

Ανήκουν σε μια ευρεία γκάμα καταναλωτών, καθώς ορισμένα είναι φυτοφάγα, άλλα τρέφονται με πτώματα και άλλα είναι κυνηγοί. Τα κολεόπτερα, ιδίως οι προνύμφες τους, μπορούν να συναντηθούν, από σπηλιές και εδαφικές ρωγμές μέχρι το χώμα στην επιφάνεια. Ωστόσο, η πλουσιότερη ποικιλία τους παρατηρείται σε ανοιχτούς οικολογικούς χώρους.

Εικόνα 17. Κολεόπτερα.

Πηγή:https://www.naturagraeca.com/ws/170,232,1,%CE%9A%CE%BF%CE%BB%CE%B5%CF%8C%CF%80%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%B1

2.5.15. ΛΕΠΙΔΟΠΤΕΡΑ

Στο έδαφος συναντούμε νύμφες που δεν χρειάζονται τροφή για την επιβίωσή τους, καθώς και προνύμφες που τρέφονται αποκλειστικά με φυτική ύλη. Αυτά τα είδη επικαθίστανται σε εδαφικές ρωγμές και άλλες περιοχές του εδάφους.

Εικόνα 18. Lepidoptera.

Πηγή: https://greece.inaturalist.org/taxa/47157-Lepidoptera

2.5.16. ΔΙΠΤΕΡΑ

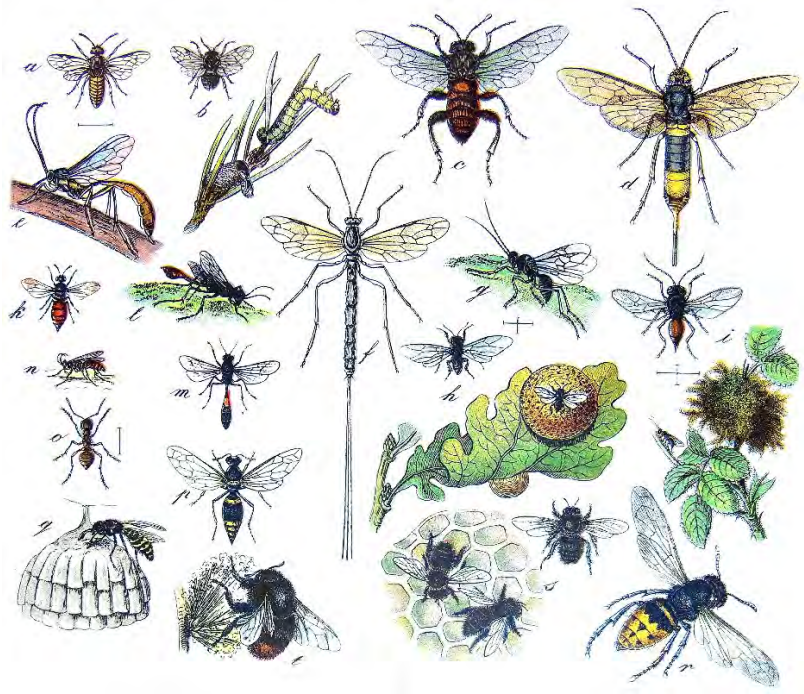
Οι νυμφίδες των διπτερών είναι αρκετά διαδεδομένες στη στρωμνή του εδάφους και σε εδαφορωγμές, μερικές φορές προκαλώντας προβλήματα παρασιτισμού σε σαλιγκάρια.

Εικόνα 19. Exotic Drosophila Fruit Fly Diptera Parasite Insect on Plant Leaf.

Πηγή: https://stock.adobe.com/images/exotic-drosophila-fruit-fly-diptera-parasite-insect-on-plant-leaf/252205469

2.5.17. ΥΜΕΝΟΠΤΕΡΑ

Τα υμενόπτερα παρουσιάζουν μια ευρεία ποικιλία διατροφικών προτιμήσεων, καθώς κάποια είναι φυτοφάγα, άλλα τρέφονται με σπόρους και άλλα είναι θηρευτές μικρών ζώων. Βρίσκονται συχνά σε σπηλιές ή κάτω από πέτρες στην επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 20. Υμενόπτερα.

Πηγή:
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CF%8C%CF%80%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%B1

2.5.18. ΔΙΠΛΟΠΟΔΑ

Αφορά οργανισμούς που μπορούν να διασπάσουν την κυτταρίνη και συνήθως τρέφονται με αποικοδομημένα υλικά στρωμνής. Συνήθως κατοικούν στη στρώση φύλλων των δασών, ενώ ορισμένα είδη δημιουργούν και στοές. Το μέγεθος τους ποικίλλει από μερικά εκατοστά έως και αρκετές δεκάδες εκατοστά. Σημαντικά χαρακτηριστικά τους είναι η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, το μικρό κόστος συντήρησης και η χαμηλή τους αναπαραγωγική ικανότητα. Ανάλογα με το περιβάλλον τους, ο πληθυσμός τους μπορεί να ποικίλει από λίγα άτομα ανά τετραγωνικό μέτρο έως και αρκετές εκατοντάδες. Τα διπλόποδα έχουν σημαντικό ρόλο στη διάσπαση της στρωμνής, και σε ορισμένες περιπτώσεις αναλαμβάνουν αποκλειστικά αυτή τη λειτουργία. Ανήκουν στα είδη που ονομάζονται μηχανικοί λόγω του ρόλου που διαδραματίζουν στην επεξεργασία του υλικού.

Εικόνα 21. Διπλόποδα

Πηγή:
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%8C%CF%80%CE%BF%CE%B4%CE%B1

2.5.19. ΙΣΟΠΟΔΑ

Τα ισόποδα κατατάσσουν τη δεύτερη πιο πληθυσμιακή ομάδα μακροαρθροπόδων. Η διατροφή τους περιέχει τόσο ρίζες όσο και αποσύνθετα, καθώς και ορισμένα οργανικά απόβλητα. Απαντώνται στη στρώση φύλλων και άλλων οικοσυστημάτων, ενώ μπορεί να υπάρξουν και κάτω από πέτρες, εκδηλώνοντας ευαισθησία στην ξήρανση του εδάφους. Τα ισόποδα έχουν μια ζωή που κυμαίνεται από ένα έως τρία έτη. Ένα χαρακτηριστικό πολλών ειδών είναι η ικανότητά τους να εξουδετερώνουν τα ιδιαίτερα τοξικά μέταλλα, κυρίως το χαλκό, καθώς και να αντιμετωπίζουν τις επιπτώσεις των τοξικών φαινολικών ενώσεων.

Εικόνα 22. Ισόποδο.

Πηγή: https://entomythia.blogspot.com/2016/08/isopoda.html

2.5.20. ΧΗΛΟΠΟΔΑ

Αυτοί οι γενικευμένοι κυνηγοί εντοπίζονται στη στρώση φύλλων, κάτω από πέτρες και εντός εδαφορών. Ξεχωρίζουν τα scolopedromorpha, τα geophilomorpha και τα lithobiomorpha.

Εικόνα 23. Χειλόποδο.

Πηγή:
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%B5%CE%B9%CE%BB%CF%8C%CF%80%CE%BF%CE%B4%CE%B1

2.5.21. ΣΑΛΙΓΚΑΡΙΑ

Τρέφονται με στρώση φύλλων, φρέσκο φυτικό υλικό, μύκητες, και ορισμένοι από αυτούς είναι κυνηγοί. Κατοικούν στο δάσος, κάτω από πέτρες, και σε εδαφορωγμές.

Εικόνα 24. Σαλιγκάρια.

Πηγή:https://www.ypaithros.gr/%CF%83%CE%B1%CE%BB%CE%B9%CE%B3%CE%BA%CE%AC%CF%81%CE%B9%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%B1-%CF%80%CF%81%CF%8C%CE%B8%CF%85%CF%81%CE%B1-%CE%B5%CE%BE%CE%B1%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82/

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ, ΤΑ ΥΔΑΤΑ, ΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΙ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

3.1 ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Η βιομηχανική εξέλιξη τα τελευταία 150 έτη, μαζί με την πληθυσμιακή αύξηση και την σταδιακή βελτίωση του επιπέδου διαβίωσης στις χώρες που βρίσκονται σε ανάπτυξη, είναι οι κύριοι λόγοι για την ρύπανση της ατμόσφαιρας. Κατά τη διάρκεια του προηγούμενου αιώνα, δεν είχαν εντοπιστεί σημαντικές προκλήσεις όπως η αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και η εξάντληση του στρώματος του όζοντος. Η ανακάλυψη αυτών των δυσκολιών οδήγησε στην εκκίνηση σημαντικών διεθνών πρωτοβουλιών που αποσκοπούσαν στην επίλυσή τους. Οι κύριες δραστηριότητες του ανθρώπου που εκπέμπουν ρύπους στον αέρα στις βιομηχανικές χώρες περιλαμβάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη βιομηχανία και τις μεταφορές.

Στην ατμόσφαιρα, το μεγαλύτερο μέρος βαρέων μετάλλων πηγάζει από ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως από την έντονη βιομηχανική δραστηριότητα, την αναίτια καύση άνθρακα, τις μονάδες εξόρυξης και μεταποίησης μετάλλων, και την κυκλοφορία των οχημάτων. Η ανθρωπογενής προέλευση των βαρέων μετάλλων εμφανίζει υψηλότερο ποσοστό στο Βόρειο Ημισφαίριο, το οποίο ανέρχεται στο 80%, σε αντίθεση με το Νότιο Ημισφαίριο, όπου το ποσοστό είναι μόνο 30%. Πέρα από τις ανθρώπινες πηγές, σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα λόγω φυσικών διεργασιών, κατά βάση από εκρήξεις ηφαιστείων.

Τα σωματίδια που περιλαμβάνουν βαρέα μέταλλα έχουν μέγεθος που σημειώνεται μεταξύ 5 νανομέτρων έως 20 μικρομέτρων και παραμένουν στον ατμοσφαιρικό αέρα για περίοδο 10 έως 30 ημερών. Τα σωματίδια προσδιορίζονται ως μικρά, διακριτά στερεά σωματίδια ή υγρές σταγόνες, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η χημική σύσταση και η προέλευσή τους, που επιπλέουν στον αέρα της ατμόσφαιρας ή σε οποιοδήποτε άλλο αέριο περιβάλλον. Από την άλλη, τα αερολύματα (aerosols) αποτελούν σχετικά σταθερά σωματίδια υγρών ή στερεών ουσιών σε αέριο μέσο. Τα aerosols ξεχωρίζουν από τα σωματίδια διότι περιλαμβάνουν, επίσης, το αέριο μέσο στο οποίο επιπλέουν αυτά τα σωματίδια.

Τα αερολύματα παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία σε μέγεθος, κυμαινόμενα από 0.001 έως 100 μικρόμετρα, και ταξινομούνται κυρίως σε δύο κατηγορίες:

1. Τα χονδρά αερολύματα (με διάμετρο μεγαλύτερη από 2.5 μικρόμετρα) προέρχονται κυρίως από φυσικές πηγές, όπως η σκόνη, τα θαλάσσια άλατα, οι ηφαιστειακές εκπομπές και τα φυτά. Λόγω του μεγάλου τους μεγέθους, είτε κατακάθονται στο έδαφος λόγω βαρύτητας είτε απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα μέσω της βροχής.

2. Τα λεπτά σωματίδια (με διάμετρο μικρότερη από 2.5 μικρόμετρα) δημιουργούνται είτε μέσω της συμπύκνωσης αερίων είτε από τη συγχώνευση μικρότερων σωματιδίων. Αυτά τα αερολύματα μπορεί να προέρχονται τόσο από φυσικές πηγές όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες. Καταλήγουν στο έδαφος και στο νερό μέσω διαδικασιών ξηρής και υγρής εναπόθεσης.

3.1.2 ΞΗΡΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Η διαδικασία της ξηρής εναπόθεσης περιγράφει την άμεση μεταφορά και, ως αποτέλεσμα, την εναπόθεση σωματιδίων στο έδαφος. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται κυρίως μέσω τεσσάρων διαφορετικών μηχανισμών μεταφοράς:

1. της κατάθεσης λόγω βαρύτητας,
2. της συσσωμάτωσης,
3. της τυρβώδους μεταφοράς,
4. της μεταφοράς μέσω εξάπλωσης Brown.

Η σημασία αυτών των μηχανισμών προσδιορίζεται κατά κύριο λόγο από τον όγκο των σωματιδίων, καθώς τα μικρότερα σωματίδια κυριαρχούνται από τη διάχυση Brown, ενώ όσο αυξάνεται το μέγεθός τους, η κατάθεση λόγω βαρύτητας γίνεται η πιο σημαντική διαδικασία απομάκρυνσής τους.

3.1.3 ΥΓΡΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Η υγρή εναπόθεση συμβαίνει διαμέσου φυσικών φαινομένων, όπως τα νέφη, η ομίχλη, το χιόνι και η βροχή, τα οποία μετακινούν τα υλικά από την ατμόσφαιρα στο έδαφος της γης. Η βροχή αποτελεί την πρωταρχική μορφή υγρασίας που φθάνει στο έδαφος, κυρίως λόγω της συχνής εμφάνισής της σε σύγκριση με άλλες μορφές κατακρημνίσεων. Αυτό συμβάλλει στην απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους των ατμοσφαιρικών ενώσεων. Ένα σημαντικό ποσοστό των βαρέων μετάλλων που εισέρχονται στον κύκλο του νερού μέσω της ατμόσφαιρας βρίσκονται είτε σε στερεή μορφή είτε σε διαλυμένη μορφή. Η εναπόθεση των βαρέων μετάλλων στη γη επηρεάζεται ιδίως από την δεξιότητα της γης και των υδάτων να προβαίνουν σε οξειδωτικές και αναγωγικές διεργασίες.

Αντίθετα από την υγρή κατακρήμνιση, τα βαρέα μέταλλα στο χιόνι και στον πάγο ενσωματώνονται στην κρυσταλλική δομή του πάγου. Η ακεραιότητα των μετάλλων στον κατακαθισμένο πάγο επηρεάζεται αποκλειστικά από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ως αποτέλεσμα, το πρόσφατα κατακαθισμένο χιόνι που περιλαμβάνει βαρέα μέταλλα αναδιανέμεται λόγω των ισχυρών ανέμων, κατά βάση στην Ανταρκτική. Παρ' όλα αυτά, η διευθέτηση των στρώσεων του καθισμένου χιονιού βασίζεται από τη διαχείριση του θερμικού επιπέδου υπό το μηδέν.

3.1.4 ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Στην τροπόσφαιρα, η χημική σύνθεση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, καθορίζεται τόσο από την προέλευσή τους (φυσική ή ανθρωπογενής) όσο και από τη δομή του περιβάλλοντος (ωκεανός ή γη) στο οποίο εκλύονται. Τα σωματίδια που απελευθερώνονται από την επιφάνεια της ξηράς κατά κύριο λόγο προέρχονται από ανθρώπινες πηγές, όπως βιομηχανικές διεργασίες και καύση ορυκτών καυσίμων. Αντίθετα, τα σωματίδια που απελευθερώνονται από τον ωκεανό προκύπτουν από φυσικές πηγές, καθώς περιλαμβάνουν NaCl λόγω της εκτίναξης και εξάτμισης μεγάλων ποσοτήτων θαλασσινού νερού.

Συνοψίζοντας, σημαντικός παράγοντας ρύπανσης αναδεικνύεται η ατμοσφαιρική εναπόθεση των βαρέων μετάλλων, που επηρεάζει όλα τα άλλα στοιχεία της βιόσφαιρας, δηλαδή το νερό, το έδαφος και τη βλάστηση.

3.2 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

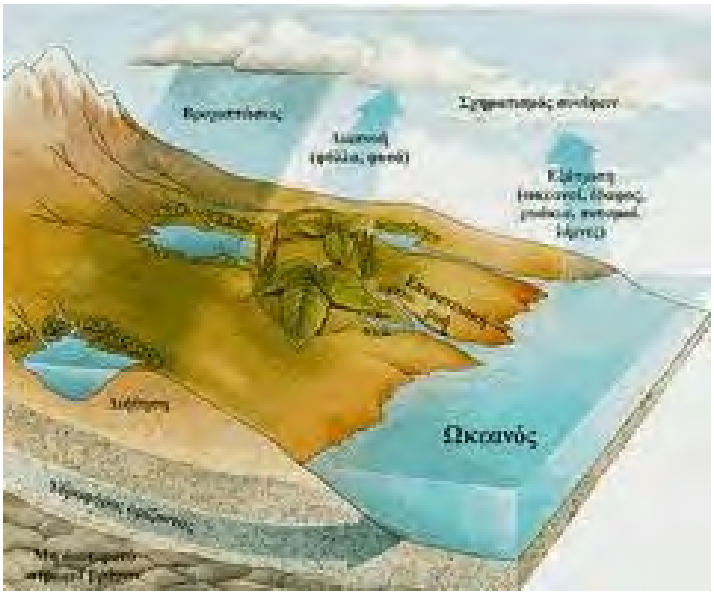
Η ύπαρξη νερού ανέδειξε τις δυνατότητες ζωής στη Γη. Στην αρχή της εξέλιξης, το νερό δημιούργησε έναν παράγοντα για τις βιολογικές διαδικασίες και την προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία. Οι πρώτες κοινότητες ανθρώπων αναπτύχθηκαν κοντά σε υδάτινους οικισμούς, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και πόρους για τη διαβίωση και τη γεωργία. Ωκεανοί και θάλασσες συνέβαλαν στην πλούσια βιοποικιλότητα του πλανήτη. Έτσι, το νερό, ως η πιο πολύτιμη πηγή, εξασφάλισε την επιβίωση των ζωών και την ακεραιότητα του πλανήτη στο μήκος της ιστορίας.

Οι υδάτινοι πόροι του πλανήτη καταμερίζονται σε διάφορες μορφές, όπως οι ωκεανοί, οι παγετώνες, οι λίμνες, τα ποτάμια και οι υδροφόρες στρώσεις. Οι ωκεανοί και οι θάλασσες αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της υδρόσφαιρας, αποτελώντας το 97,13% του συνόλου, ενώ οι παγετώνες και οι υδροφόρες στρώσεις συνθέτουν το 2,24%. Οι λίμνες και οι ποταμοί αποτελούν μόλις το 0,02% της υδρόσφαιρας. Αυτός ο συνολικός υδρολογικός κύκλος συνδέει τις διάφορες μορφές του ύδατος σε ένα αναπόσπαστο σύστημα.

Εικόνα 25. Υδρόσφαιρα. Κατανομή των υδάτων.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

Σε αυτό τον κύκλο, το υδρατμισμένο νερό αναδύεται από το επιφανειακό πέλαγος των απέραντων ωκεανών και των ατελείωτων θαλασσών, κατόπιν μετατοπίζεται στις ανώτατες στρώσεις της ατμόσφαιρας και στη συνέχεια επιστρέφει στη Γη κάτω από μορφές ποικίλες όπως η βροχή, το χιόνι ή το χαλάζι. Κατά τη διάρκεια της επαφής του με την επιφάνεια, το νερό που πέφτει αλληλοεπιδρά με τα πετρώματα, την ιλύ, το χώμα και τους ζωντανούς οργανισμούς, προκαλώντας συνεχόμενες χημικές αντιδράσεις που επηρεάζουν τη σύστασή του. Μέσω της αυξομείωσης και της απόθεσής του στη Γη και τους ωκεανούς, ολοκληρώνεται ο γεωχημικός κύκλος του νερού.



Εικόνα 26. Γεωχημικός κύκλος του νερού.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

3.2.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η σύνθεση και, συνεπώς, η ποιότητα του υδάτινου περιβάλλοντος στην επιφάνεια και υπογείως, βασίζεται από τη μετακίνηση μάζας διαφόρων υλικών και στοιχείων που την διαμορφώνουν. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η έννοια της ποιότητας του νερού δεν είναι σταθερή, αλλά υπόκειται σε διαρκείς αλλαγές και επομένως είναι απαραίτητο να αξιολογείται σε συνάρτηση με τα οικοσυστήματα και τις ποικίλες εφαρμογές του νερού. Η ολοκληρωμένη σύνθεση του υδάτινου περιβάλλοντος διαμορφώνεται από φυσικές, χημικές, βιολογικές και ανθρωπογενείς διεργασίες ή με την άμεση προσθήκη χημικών και βιολογικών ουσιών στα υπόγεια ύδατα, ή έμμεσα μέσω παρεμβάσεων στις φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν το υπόγειο υδρολογικό σύστημα (π.χ. η διοχέτευση θαλασσινού νερού).

Τα τελευταία χρόνια, η φυσική κατάσταση των υδατικών πόρων έχει υποστεί σημαντικές μεταβολές λόγω της υδροχρηστικής ρύπανσης, προκαλούμενης κυρίως από ανθρώπινες δραστηριότητες και εκμεταλλεύσεις των υδάτινων πόρων. Σε πολλές περιπτώσεις, η έκταση της ρύπανσης έχει φτάσει σε τόσο ανησυχητικά επίπεδα που έχει γίνει προφανής και ποσοτικά μετρήσιμη.

3.2.3 ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η έννοια της "ρύπανσης του νερού" περιλαμβάνει οποιαδήποτε μη επιθυμητή μεταβολή στα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των υδατικών συστημάτων, είτε αυτά είναι θάλασσες, λίμνες ή ποτάμια, και μπορεί να προκαλέσει ζημιά στον άνθρωπο και την

υπόλοιπη φυτική και ζωική ζωή. Η κύρια αιτία αυτής της ρύπανσης είναι η εκτεταμένη ανθρώπινη παρέμβαση. Η αδιάκοπη πληθυσμιακή αύξηση, οι διαρκείς απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής, η αστική ανάπτυξη, η έντονη γεωργική και κτηνοτροφική δραστηριότητα, και πιο συγκεκριμένα, η άνθηση της βιομηχανίας, έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων, όπου καταλήγουν στο έδαφος και τα ύδατα. Η πρόληψη της ρύπανσης των υδατικών συστημάτων κατέχει σήμερα κεντρική θέση στις ατζέντες των διεθνών και εθνικών φορέων προστασίας του περιβάλλοντος, καθώς αποτελεί ένα θέμα ζωτικής σημασίας.

Κοινές πηγές ρύπανσης των υδατικών περιβαλλόντων περιλαμβάνουν βιομηχανικές εκπομπές και αστικές απορρίψεις , τα βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή, τα ραδιενεργά υλικά, τα απόβλητα των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων και τη μεταφορά επικίνδυνων ουσιών μέσω ποταμών και χειμάρρων που καταλήγουν στη θάλασσα. Το νερό από την επιφάνεια, διοχετεύεται στο έδαφος και μέσω της μη κορεσμένης ζώνης μεταφέρεται προς τις υδροφορείς στρώσεις, εκεί όπου κατευθύνεται, ανάλογα με τη ροή των συνθηκών. Οι ρυπαντές ουσίες ακολουθούν τις φυσικές διαδικασίες μεταφοράς του υπόγειου νερού. Καθώς περνά ο χρόνος, η ένταση της ρύπανσης μπορεί να μειωθεί εντός του υδροφορέα ή το ρυπασμένο νερό μπορεί να εκχέεται σε φράγμα ή να φτάνει σε επιφανειακά ύδατα όπως ποτάμια, λίμνες και θάλασσες.

Η αξιολόγηση της ρύπανσης των υπόγειων νερών και του επιπέδου κινδύνου πραγματοποιείται μέσω μαθηματικών μοντέλων, τα οποία αναλύουν τη μεταβίβαση μάζας, τις μεταμορφώσεις και τις αλληλεπιδράσεις με τα στερεά σωματίδια του εδάφους εντός και εκτός της κορεσμένης ζώνη. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου πληροφοριών που απαιτείται για την υλοποίηση αυτών των μοντέλων, έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες απλούστευσης για την εκτίμηση της πιθανότητας ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Αυτές οι διαδικασίες είναι πρακτικές σε μεγάλη χωρική κλίμακα και σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες

3.2.3.1 ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Στο περιβαλλοντικό πλαίσιο ανιχνεύονται πολλά στοιχεία όπου κατηγοριοποιούνται στα μέταλλα. Μεταλλικά στοιχεία όπως ο Σίδηρος (Fe), ο Χαλκός (Cu), και το Μαγγάνιο (Mn) είναι ζωτικής σημασίας για τους οργανισμούς, καθώς συμμετέχουν σε πολλές βιολογικές διεργασίες και είναι απαραίτητα για την παραγωγή πρωτεϊνών και ενζύμων. Ωστόσο, όταν εμφανίζονται σε υψηλές συγκεντρώσεις, μπορούν να έχουν τοξικές επιπτώσεις και ακόμα να οδηγήσουν σε θάνατο τους οργανισμούς. Επιπλέον, μέταλλα όπως ο μόλυβδος (Pb), το κάδμιο (Cd) και ο υδράργυρος (Hg), παρουσιάζουν υψηλή τοξικότητα για τους βιολογικούς ιστούς, μέχρι και σε χαμηλές συγκεντρώσεις.

Το έδαφος αποτελεί την σημαντικότερη πηγή μετάλλων στο περιβάλλον, καθώς περίπου όλα τα μέταλλα βρίσκονται διαθέσιμα και, μέσω γεωχημικών διαδικασιών και ανθρωπογενών επεμβάσεων, διανέμονται σε διάφορους περιβαλλοντικούς τομείς. Η εκτόξευση βιομηχανικών απορριμμάτων που περιλαμβάνουν μεγάλες συγκεντρώσεις μετάλλων, η

εφαρμογή φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων στον αγροτικό τομέα, καθώς και η ανάκαμψη στερεών και υγρών καυσίμων αντιπροσωπεύουν σημαντικές πηγές μετάλλων στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η παραγωγή μετάλλων αυξήθηκε σημαντικά από το 1970 έως το 2000, όπου αυξήθηκε από περίπου 600 εκατομμύρια τόνους σε περίπου 900 εκατομμύρια τόνους. Στα υδατικά περιβάλλοντα, τα μέταλλα υπάρχουν είτε σε διαλυτή είτε σε σωματίδια μορφή, καθώς με τα χρόνια συσσωρεύονται στα ιζήματα ποταμών, λιμνών και παράκτιων περιοχών. Οι διάφορες διαδικασίες, όπως οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, οι γεωθερμικές διεργασίες, η εξουδετέρωση επιφανειακών εδαφών, η διάβρωση του εδάφους και η αποσύνθεση ορυκτών ουσιών, συμβάλλουν στην παρουσία βαρέων μετάλλων και μεταλλοειδών στα ύδατα.

Τέλος, είναι σημαντικό να τονισθεί ότι, όπως μπορεί να προκύψει με πολλούς ρύπους, η επίδραση των βαρέων μετάλλων και των ενώσεών τους στο περιβάλλον δεν επικεντρώνεται μόνο σε περιοχές με ανθρώπινη δραστηριότητα, αλλά μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Για παράδειγμα, τοξικά μέταλλα έχουν εντοπιστεί μέχρι και σε οικοσυστήματα της Ανταρκτικής, όπου απέχουν πολύ από μέρη με έντονη βιομηχανική παρουσία.

3.2.3.2 ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟ ΦΥΤΟΦΑΡΜΑΚΑ

Τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα αποτελούν μια ομάδα ρυπογόνων ουσιών όπου εμφανίζονται σε μεγάλες ποσότητες στα ύδατα ποικίλων ρευμάτων, λιμνών και υπόγειων πηγών κοντά στις ακτές, λόγω της διαδικασίας έκπλυσης υπολειμμάτων από αγροτικές δραστηριότητες. Οι βασικές ομάδες ρύπων στα ύδατα περιλαμβάνουν:

α) τα οργανοχλωριωμένα φυτοπροστατευτικά προϊόντα,

β) τα οργανοφωσφορικά,

γ) τα καρβαμιδικά,

δ) τα πυρεθροειδή κ.α.

Η επίδραση ενός φυτοπροστατευτικού στη γη βασίζεται στην:

α) αντοχή του σε συγκεκριμένες συνθήκες και

β) τη δυνατότητά του να απορροφάται από το έδαφος.

Η αποσύνθεση κάθε χημικού φαρμάκου για τα φυτά και, κατά συνέπεια, η αντοχή του, επηρεάζεται από το φως του ηλίου και τις βιολογικές διεργασίες. Η αντοχή αξιολογείται με τον χρόνο ημίσειας ζωής t1/2, που χαρακτηρίζεται ως η διάρκεια που χρειάζεται για να ελαττωθεί στο μισό η ποσότητα του φυτοφαρμάκου ή να καταστεί ανενεργό. Με τη μείωση του διαθέσιμου αέρα με το βάθος του εδάφους, η δραστηριότητα των μικροβίων μειώνεται, καθιστώντας δυσκολότερη την αποικοδόμηση των φυτοφαρμάκων που διεισδύουν σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους.

Η παραγωγή φυτοφαρμάκων για τη γεωργία έχει γνωρίσει σημαντική αύξηση στην τελευταία πεντηκονταετία, καθώς η ζήτησή τους έχει αυξηθεί δραματικά. Η κατανάλωση φυτοφαρμάκων έχει αυξηθεί περίπου 15 φορές, με ετήσια αύξηση που φτάνει το 8-10%. Η χρήση φυτοφαρμάκων στις καλλιέργειες των σιτηρών, ρυζιού, αραβοσίτου, βαμβακιού, σόγιας και καπνού απορροφά το 50% των αγροφαρμάκων. Το 2000, ο συνολικός όγκος πωλήσεων αγροφαρμάκων υπερέβη τα 35 δισεκατομμύρια δολάρια.

Η εφαρμογή αγροφαρμάκων έπαιξε έναν καθοριστικό παράγοντα στην εκτίναξη της αγροτικής δραστηριότητας την τελευταία δεκαετία αλλά παρά τις ανησυχίες για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, δεν έχει επιτευχθεί ακόμα η πλήρης αντικατάστασή τους. Σημαντικά μέτρα έχουν ληφθεί παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης, της αντικατάστασης ή ακόμα και της απαγόρευσης των χημικών φαρμάκων φυτών που είναι πιο επιβλαβείς και δεν διασπώνται βιολογικά. Επιπλέον, η συνεργασία των επιστημών, ιδίως της χημείας και της βιολογίας, σε συνδυασμό με την τροποποίηση των μεθόδων καλλιέργειας του εδάφους, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων βιοδιασπώμενων φυτοπροστατευτικών προϊόντων με χαμηλότερη τοξικότητα και στην προώθηση μεθόδων αγροτικού ελέγχου παρασίτων και ζιζανίων. Ωστόσο, η μόλυνση του περιβάλλοντος και ειδικότερα των υδάτινων οικοσυστημάτων από φυτοφάρμακα παραμένει ένα σημαντικό και δύσκολα διαχειρίσιμο ζήτημα, το οποίο ερευνάται από πολλές επιστημονικές ομάδες διεθνώς.

3.3 ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

3.3.1 ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΑ ΛΥΜΑΤΑ

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, οι περιβαλλοντικοί φορείς των βιομηχανικά ανεπτυγμένων χωρών έχουν δώσει έμφαση στη σωστή αντιμετώπιση των τοξικών απορριμμάτων. Αυτό προέκυψε, κυρίως, μετά την παραδοχή ότι το κόστος επανόρθωσης των περιβαλλοντικών ζημιών που προκαλούν αυτά τα απόβλητα είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος της σωστής αντιμετώπισής τους. Επομένως, η δημιουργία ενός αποτελεσματικού σχεδίου αντιμετώπισης και επεξεργασίας των επικίνδυνων και τοξικών απορριμμάτων είναι απαραίτητη πριν από οποιεσδήποτε δράσεις αποκατάστασης.

Τα απόβλητα που θεωρούνται επικίνδυνα έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που τα καθιστούν επιβλαβή τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για το περιβάλλον. Ο προσδιορισμός των επικίνδυνων αποβλήτων έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών επιστημόνων και νομοθετών, επειδή δεν είναι εύκολο να ενσωματωθούν σε έναν απλό ορισμό όλες οι ιδιότητες που τα κάνουν επικίνδυνα. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν τοξικότητα, διαβρωτικότητα, ευφλεκτότητα, και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια και την υγεία των ζώντων οργανισμών και των οικοσυστημάτων. Λόγω της πολυπλοκότητας αυτών των χαρακτηριστικών, η διαμόρφωση ενός πλήρους και κατανοητού ορισμού για τα επικίνδυνα απόβλητα είναι μια συνεχής πρόκληση.

Σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA), επικίνδυνα απόβλητα είναι εκείνα που περιλαμβάνουν εύφλεκτες, διαβρωτικές και τοξικές ενώσεις. Επειδή ο ορισμός αυτός είναι αρκετά γενικός, η EPA έχει συντάξει καταλόγους με συγκεκριμένες ουσίες που ταξινομούνται ως επικίνδυνα απόβλητα:

1. Τη λίστα συγκεκριμένων επικίνδυνων ουσιών της EPA, Κωδικός K
2. Τη λίστα μη συγκεκριμένων επικινδύνων ουσιών της EPA, Κωδικός F
3. Τη λίστα εμπορικών χημικών προϊόντων της EPA

3.3.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Η διαχείριση των αποβλήτων, τόσο στερεών όσο και υγρών και ιδίως των επικίνδυνων, έχει ως κύριο στόχο την ελάττωση της παραγωγής αποβλήτων, την ανακύκλωση χρήσιμων υλικών, την επεξεργασία των υπολειμμάτων και την ασφαλή διάθεσή τους. Η ορθή υλοποίηση αυτών των μεθόδων είναι καθοριστική για τον αξιόπιστο χειρισμό των απορριμμάτων, την διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και την ευεξία του ανθρώπου από τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα των επικίνδυνων αποβλήτων.

Παρόλα αυτά, η επιθυμία για την ολοκληρωμένη επεξεργασία και ασφαλή διάθεση μεγάλων εκτάσεων επικίνδυνων απορριμμάτων ή υπολειμμάτων τους είναι απαραίτητη. Εξαιτίας αυτού, έχουν εξελιχθεί και υλοποιηθεί πολλές διαδικασίες διαχείρισης επικίνδυνων απορριμμάτων, όπου συνήθως ταξινομούνται με βάση των χαρακτηριστικών τους (π.χ. φυσικοχημικές μεθόδους, θερμικές διαδικασίες, κλπ).

Η ποσότητα ιλύος που δημιουργείται στα κέντρα διαχείρισης υγρών αποβλήτων αντιστοιχεί μόνο σε ένα πολύ μικρό ποσοστό, περίπου 1-2%, της συνολικής ποσότητάς τους. Σύμφωνα με την πηγή των λυμάτων και τις μεθόδους επεξεργασίας, η παραγόμενη ιλύς συνήθως περιλαμβάνει μεταξύ 0.25% έως 10% στερεά και συντίθεται κυρίως από οργανικά υπολείμματα της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης, καθώς και από άμμο, αφρούς, εσχαρίσματα, μακροστοιχεία, ιχνοστοιχεία και βαρέα μέταλλα. Τα οργανικά συστατικά και τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία που υπάρχουν στην ιλύ την επισημαίνουν ως ένα κατάλληλο οργανικό λίπασμα, το οποίο εφαρμόζεται σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες. Η χρήση της ιλύος ως εδαφοβελτιωτικού έχει σημαντικό αντίκτυπο στη γονιμότητα του εδάφους, βελτιώνοντας τα θρεπτικά του χαρακτηριστικά και αυξάνοντας, επομένως, την παραγωγικότητα των καλλιεργειών όπου εφαρμόζεται.

Παρόλα αυτά, εκτός από τα θρεπτικά στοιχεία, η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στην ιλύ μπορεί να επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις στην ποιότητα του εδάφους, με αποτέλεσμα να αναστατώνεται η ανάπτυξη των φυτών. Λόγω των παραπάνω, είναι ζωτικής σημασίας η προσεκτική διαχείριση της ιλύος στη γεωργία, καθώς η μη ελεγχόμενη χρήση μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση βαρέων μετάλλων στο έδαφος και στα γεωργικά προϊόντα, θέτοντας σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η

προεπεξεργασία των υγρών αποβλήτων πριν την απόθεσή τους διατηρεί τα επίπεδα των βαρέων μετάλλων στην ιλύ σε ελάχιστη παρουσία. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τυπικές τιμές συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων που εντοπίζονται στην ιλύ ποικίλων ελληνικών πόλεων.

Είδος Μετάλλου	Μέση Σύνηθες Τιμή (mg/kg ξηρής ουσίας)
Zn	1500
Cu	650
Pb	400
Cr	400
Ni	100
B	30
As	20
Cd	20
Co	15
Mo	6
Hg	5
Se	3

Πίνακας 1. Μέση τιμή συγκεντρώσεων μετάλλων στην ιλύ Ελληνικών πόλεων.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

Οι κυριότερες πηγές ρύπανσης από τα επιβλαβή βαρέα μέταλλα περιλαμβάνουν την εκτεταμένη βιομηχανική δραστηριότητα, τα αστικά απόβλητα που περιέχουν υπολείμματα από καθαριστικά, διαλύτες, βαφές και άλλες επιβλαβείς ουσίες, καθώς και τα εκπλύματα από διαβρωμένες σωληνώσεις, οδούς και κτίρια. Κατά συνέπεια, ένα βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση της ποιότητας της ιλύος είναι η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων, καθώς η υψηλή τους παρουσία επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, υπερβαίνοντας κάποια καθορισμένα όρια. Τα μέταλλα είναι ευρέως διαδεδομένα σε διάφορους τομείς της καθημερινής ζωής και αποτελούν αναπόσπαστο μέρος πολλών βιομηχανικών προϊόντων, με αποτέλεσμα να εντοπίζονται συχνά στα υγρά απόβλητα που διαχειρίζονται οι μονάδες διαχείρισης αποβλήτων.

Τα συνηθισμένα μέταλλα στοιχεία που παρουσιάζονται συχνά στην ιλύ είναι:

- Ο ψευδάργυρος (Zn)

- Ο χαλκός (Cu)
- Το σελήνιο (Se)
- Το νικέλιο (Ni)
- Το μολυβδαίνιο (Mo)
- Ο υδράργυρος (Hg)
- Ο μόλυβδος (Pb)
- Το χρώμιο (Cr)
- Το κάδμιο (Cd)
- Το αρσενικό (As)

3.3.3 ΔΙΑΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΙΛΥΟΣ

Βάσει των κανονισμών που έχουν θεσπιστεί από την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (U.S.A. EPA), που αφορούν την κατηγοριοποίηση, την εφαρμογή και τη διάθεση της ιλύος, με γνώμονα την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος, η ποιότητα της ιλύος κρίνεται με βάση το περιεχόμενο μεταλλικών στοιχείων με υψηλή πυκνότητα, παθογόνων μικροοργανισμών και την επίδρασή της σε διάφορα είδη εντόμων. Η ιλύς που πληροί τα αυστηρότερα κριτήρια των τριών αυτών παραμέτρων ποιότητας θεωρείται ως υψηλής ποιότητας και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς, χωρίς να προκαλεί απειλή για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Παρ' όλο που η ιλύς δεν συμμορφώνεται με τα πρότυπα του κανονισμού αναφέρεται ως ιλύς χαμηλής ποιότητας, η διαχείριση και η απόρριψή της απαιτεί επιπλέον επεξεργασία.

Οι πρωταρχικοί τρόποι διάθεσης της ιλύος περιλαμβάνουν τον αγροτικό τομέα και την ταφή. Η επιλογή μεταξύ αυτών των δύο μεθόδων διακρίνεται από την ποιότητά της και την επεξεργασία που έχει υποστεί. Στην Ελλάδα, μόνο το 3% του παραχθέντος ιλύος εφαρμόζεται για γεωργικούς σκοπούς, ενώ το υπόλοιπο 97% διατίθεται σε ΧΥΤΑ (χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων). Ο Πίνακας παρουσιάζει τα ποσοστά χρήσης και των διαφορετικών μεθόδων διάθεσης της βιολογικής ιλύος σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

Χώρα	Γεωργία (%)	Ταφή (%)	Αποτέφρωση (%)	Άλλοι τρόποι διάθεσης (%)
Αυστρία	13	56	31	0
Βέλγιο	31	56	9	4
Δανία	37	33	28	2
Γαλλία	50	50	0	0
Γερμανία	25	63	12	0
Ελλάδα	3	97	0	0
Αγγλία	51	16	5	28
Ιταλία	34	55	11	0
Ισπανία	10	50	10	30
Πορτογαλία	80	13	0	7
Η.Π.Α	36	38	16	10

Πίνακας 2. Ποσοστά διάθεσης της ιλύος στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τις Η.Π.Α

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

Η ενσωμάτωση της ιλύος σε χώρους ταφής λαμβάνει υπόψη τις πιθανές μελλοντικές επιπτώσεις και αποτελεί μια πρακτική χωρίς ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τεχνολογικής άποψης. Ωστόσο, αντιπροσωπεύει την κυρίαρχη διαδικασία στην Ελλάδα και σε πολλές άλλες χώρες, λόγω της οικονομικής προσέγγισης (χαμηλό κόστος) και της εύκολης χρήσης της.

Η κύρια πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί για την ενσωμάτωση της ιλύος στον αγροτικό τομέα είναι η απενεργοποίηση των βαρέων μετάλλων που συμπεριλαμβάνει. Οι βασικότερες τεχνολογίες αφαίρεσης ή αδρανοποίησης των βαρέων μετάλλων που παρουσιάζονται στη βιολογική ιλύ περιλαμβάνουν χημικές, φυσικές, βιολογικές και νέες καινοτόμες μεθόδους, όπως η φυτοεξυγίανση.

3.4 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

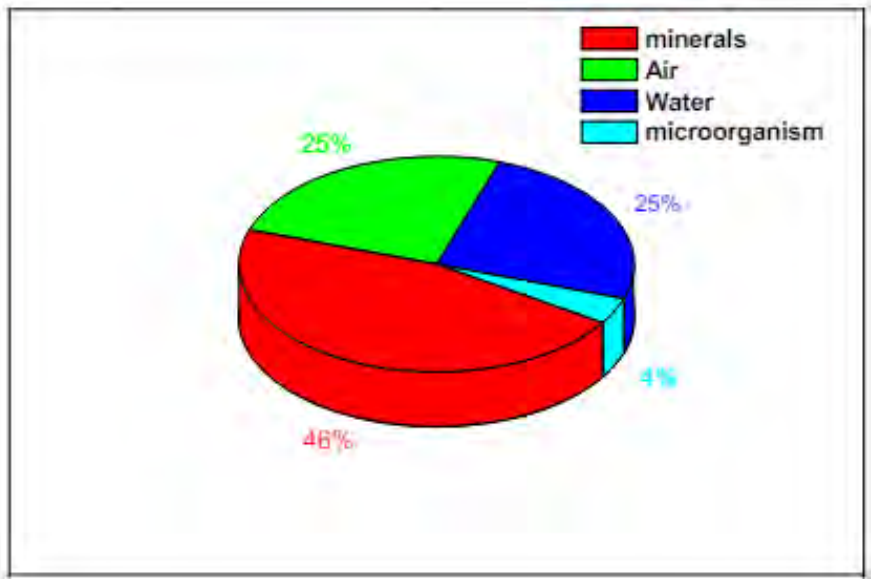
3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η δυσλειτουργία του εδαφικού οικοσυστήματος, που προκαλείται από την εναπόθεση οργανικών ή ανόργανων ουσιών, αποτελεί την ρύπανση του εδάφους. Αυτή η μορφή ρύπανσης αποτελεί ένα είδος υποβάθμισης του εδάφους. Οι χημικές ουσίες που δημιουργούν ρύπανση του εδάφους μπορούν να προκαλούνται είτε από φυσικές διεργασίες, γνωστές ως φυσικοί ρύποι, είτε από δραστηριότητες που προέρχονται από τον άνθρωπο, γνωστές ως ανθρωπογενείς ρύποι. Οι κυριότερες πηγές οργανικών και ανόργανων χημικών ουσιών που προκαλούν ρύπανση στο εδαφικό οικοσύστημα περιλαμβάνουν τα αστικά, τα βιομηχανικά και γεωργικά απόβλητα, καθώς και η εναπόθεσή τους στην ατμόσφαιρα. Οι αιτίες αυτής της μόλυνσης του εδάφους θεωρούνται ως άμεσες όταν οι ρυπογόνες ουσίες

μεταφέρονται κατευθείαν στο έδαφος, ενώ εμφανίζονται ως έμμεσες όταν οι ρυπογόνες ουσίες καταλήγουν στο έδαφος μέσω της αλληλεπίδρασης του με άλλα στοιχεία του φυσικού περιβάλλοντος, όπως το νερό και η ατμόσφαιρα. Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να εξετάσει τις έμμεσες και άμεσες πηγές ρύπανσης του εδάφους με βαρέα μέταλλα, καθώς και τους μηχανισμούς μέσω των οποίων αυτά διακινούνται.

3.4.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το επιφανειακό στρώμα του εδάφους αποτελεί ένα πολύπλοκο μείγμα, όπου συμβιώνουν οι τρεις μορφές της ύλης: α) η στερεή (περιλαμβάνουσα ανόργανη και οργανική ύλη που είτε διασπάται είτε δημιουργεί σύμπλοκα χουμικών οξέων), β) η υγρή και γ) η αέρια. Η σύνθεση του εδάφους διαφέρει σημαντικά, ανάλογα με μια ουρά παραγόντων όπως συνθήκες του περιβάλλοντος της κάθε συγκεκριμένης περιοχής και το προγενέστερο στοιχείο που προϋπήρχε στον χώρο.



Εικόνα 27. Χαρακτηριστικό διάγραμμα σύστασης ιλυώδους εδάφους

Πηγή:https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

3.4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Μια από τις βασικότερες διαδικασίες που συντελούν στο σχηματισμό των εδαφών είναι η διάβρωση των βράχων και των πετρωμάτων. Αυτή η διαδικασία προέρχεται από διάφορους παράγοντες, με κύριο μεταξύ αυτών τους κλιματικούς, όπως η βροχή, ο άνεμος και οι θερμοκρασιακές μεταβολές. Επιπλέον, συμβάλλουν και παράγοντες όπως η χημική επίδραση, π.χ. η διάλυση χημικών ουσιών που μεταφέρονται από το υπόγειο νερό ή τα υδροθερμικά διαλύματα που κυκλοφορούν μέσα από τις ρωγμές των πετρωμάτων, καθώς

και παράγοντες οργανικής φύσης, όπως το ριζικό σύστημα των φυτών και τα βακτήρια. Οι προαναφερθέντες παράγοντες δημιουργούν είτε μηχανική επιβάρυνση και φθορά των γεωλογικών σχηματισμών, είτε χημική μεταβολή κατά την οποία παρατηρείται τροποποίηση στη χημική σύνθεση των ορυκτών, προκαλώντας την εμφάνιση ουσιών με διαφορετική σύνθεση και ιδιότητες. Επιπλέον, σημαντικές διαδικασίες σχηματισμού εδαφών περιλαμβάνουν την αύξηση της οργανικής ύλης μέσω της αποσύνθεσης από βακτήρια και τη μετακίνηση ανόργανων ενώσεων προς διάφορες περιοχές μέσω της δράσης του νερού και του αέρα.

Σε αυτή τη φάση είναι σημαντικό να τονισθεί ότι το νερό καθιστά καίριο ρόλο στον διαμορφωτικό επηρεασμό των εδαφών και στη μεταφορά των θρεπτικών ουσιών που είναι απαραίτητες για την φυτοανάπτυξη. Τα εδάφη που περιέχουν υψηλό ποσοστό οργανικής ύλης διατηρούν περισσότερο νερό. Όταν το νερό παγιδευτεί και υπερβεί κάποια επίπεδα, οι μικροοργανισμοί που αποσυνθέτουν την οργανική ύλη ενεργοποιούνται. Το οξυγόνο απορροφάται από αυτούς γρήγορα για την αναπνοή τους, ώστε να μειωθεί η συνέχεια των σωματιδίων που κρατούν το έδαφος, με αποτέλεσμα τη διάσπαση του εδάφους.

3.4.4 ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

Η πρωταρχική πηγή ρύπανσης του εδάφους οφείλεται σε έντονες ανθρωπογενείς δραστηριότητες, κυρίως λόγω της βιομηχανικής και εμπορικής δραστηριότητας. Το έδαφος λαμβάνει από:

- τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, οι οποίοι κατακρημνίζονται με διαφορετικούς ρυθμούς, εξαρτώμενοι από τις συνθήκες και τη γεωμορφολογία των περιοχών,
- τα υγρά και στερεά απόβλητα, τα οποία, παρότι υφίστανται επεξεργασία ή απορρύπανση, καταλήγουν τελικά στο έδαφος,
- τα ύδατα (επιφανειακά και υπόγεια), καθώς οι ρύποι που περιέχονται στα νερά μεταφέρονται και στο έδαφος, λόγω της στενής αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα δύο στοιχεία της φύσης.

Συνοπτικά, τα κύρια αίτια ρύπανσης του εδάφους παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Η εκτεταμένη και συχνή εφαρμογή φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων στα αγροτικά εδάφη. Εξαιρετικές δυσκολίες προκαλούν οι εφαρμογές φυτοφαρμάκων που υφίστανται βιοαποικοδόμηση με σιγανούς ρυθμούς ή παράγουν τοξικούς μεταβολίτες κατά την αποδόμησή τους.

2. Τα υγρά και στερεά απορρίμματα που παράγονται από κτηνοτροφικές μονάδες και βιομηχανίες. Η διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες, ειδικά όσον αφορά την ποιότητα του εδάφους και τις τοξικές επιπτώσεις σε ζωντανούς οργανισμούς.

3. Η διάθεση των αστικών και νοσοκομειακών αποβλήτων σε εγκαταστάσεις υγιεινής ταφής και ανακύκλωσης.
4. Η ρύπανση που προκαλείται από την εξόρυξη και τη χρήση καυσίμων, λιπαντικών προϊόντων και την κατασκευή ελαστικών στα οχήματα.
5. Η ατμοσφαιρική ρύπανση από βαρέα μέταλλα, που προέρχεται από χημικές βιομηχανίες και τα απόβλητα των επιχειρήσεων εξόρυξης και λατομείων, καθώς και από την καύση στερεών και υγρών ορυκτών καυσίμων και άλλες διαδικασίες εμπλουτισμού ή καθαρισμού μεταλλευμάτων.

Το έδαφος απορροφά όλες τις επιβλαβείς χημικές ουσίες και παράγωγα προϊόντα ή απόβλητα, τα οποία, σύμφωνα με την γεωλογική διαμόρφωση του εδάφους και άλλες εξωγενείς παραμέτρους, μπορεί να προκαλέσουν τοπική ρύπανση ή να απλώνονται τα ρυπογόνα σε άλλα περιβαλλοντικά οικοσυστήματα (π.χ. υπόγεια ύδατα) ή ακόμη να απομακρυνθούν μέσω της ροής προς διάφορα υδάτινα συστήματα. Η αμοιβαία επίδραση αυτής της ρύπανσης με το έδαφος χαρακτηρίζεται ως γεωχημική διαβρωτική διαδικασία. Η γεωχημική διαβρωτική διαδικασία περιλαμβάνει μια ποικιλία φυσικών μηχανισμών (π.χ. απορρόφηση, διάλυση, καθίζηση), χημικών αντιδράσεων (όπως αντιδράσεις εξουδετέρωσης και οξειδοαναγωγής) και βιολογικών διεργασιών. Αποτέλεσμα όλων των προηγούμενων παραγόντων είναι η διάδοση των ρύπων στο έδαφος, ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε παγκόσμια κλίμακα. Η διάδοση των ρύπων στο έδαφος επιτυγχάνεται μέσω τριών κυρίως μηχανισμών:

1. Τη Μεταγωγή. Στην εν λόγω διαδικασία ο ρύπος μεταφέρεται από το υπόγειο νερό και κατευθύνεται από την ροή του μέσω των εδαφικών στρωμάτων. Κατά συνέπεια, η συγκέντρωση του ρύπου μεταβάλλεται κατά την πορεία, ενώ συνολικά παραμένει σταθερή εντός του όγκου του νερού.
2. Τη Διάχυση. Στη διάχυση, ο ρύπος εξαπλώνεται στις υπόγειες υδροπηγές και μεταφέρεται λόγω της ανισορροπίας της συγκέντρωσής του (από την υψηλότερη στη χαμηλότερη). Κρίνεται απαραίτητο να τονισθεί, ότι η διάχυση συμβαίνει ακόμα και στην απουσία ροής του νερού στο υπέδαφος.
3. Τη Διασπορά. Η διασπορά του ρύπου ευθύνεται στην μη τακτοποιημένη τοποθέτηση των κόκκων του εδάφους και συμβαίνει είτε κατά μήκος, είτε διαγώνια. Επιπλέον, λόγω της μη τακτοποιημένης τοποθέτησης των κόκκων του εδάφους, η ροή του νερού είναι ανομοιόμορφη και παρουσιάζει άλλες ταχύτητες κυκλοφορίας.

3.4.5 ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

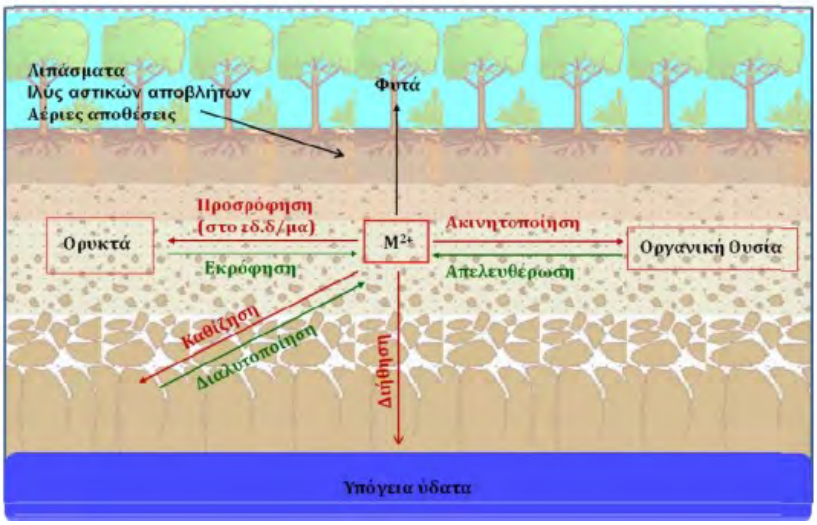
Τα μέταλλα συγκροτούν ένα αναπόσπαστο τμήμα της σύστασης του εδάφους, παρά το γεγονός ότι συχνά θεωρούνται μικρό ποσοστό. Παρ' όλα αυτά, ο ρόλος τους είναι κρίσιμος για την ευελιξία του εδάφους και τη διατήρηση της γονιμότητάς του. Μέσω της διάσπασης

και της απελευθέρωσής τους, τα μέταλλα συμβάλλουν στην απορρόφηση και την παροχή θρεπτικών στοιχείων στα φυτά. Επιπλέον, καθορίζουν την οξύτητα του εδάφους και επηρεάζουν τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών που ευνοούν την αποσύνθεση των οργανικών υλικών και την αποθήκευση του άνθρακα. Ως εκ τούτου, η ισορροπία και η ποιότητα των μετάλλων στο έδαφος έχει άμεσο αντίκτυπο στην παραγωγικότητα των καλλιεργούμενων φυτών και τη βιωσιμότητα του αγροτικού οικοσυστήματος.

3.4.5.1 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η παρουσία βαρέων μετάλλων στο έδαφος ευθύνεται σε δραστηριότητες που έχουν εκτελέσει οι άνθρωποι και συμβαίνει κυρίως με τη συμμετοχή των παρακάτω διαδικασιών:

- ✓ Στις αγροτικές περιοχές, η παρουσία βαρέων μετάλλων στο έδαφος αφορά την χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων για την ενίσχυση της γεωργικής παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα επιδεινώνεται περαιτέρω όταν γίνεται υπερβολική χρήση λιπασμάτων, μια πρακτική που επικρατεί σε πολλές γεωργικές εκτάσεις παγκοσμίως.
- ✓ Οι ρύποι μπορούν να διανύσουν πολύ μεγάλες αποστάσεις μέσω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, οδηγώντας σε απόθεση βαρέων μετάλλων σε περιοχές που απέχουν δεκάδες χιλιόμετρα από την πηγή της ρύπανσης.
- ✓ Κατά τη διαδικασία είτε της υγρής είτε της ξηρής ενσωμάτωσης των βαρέων μετάλλων στο έδαφος, παρατηρείται η ενίσχυση του φαινομένου αυτού σε μέρη με εκτεταμένη βιομηχανική δραστηριότητα. Παρόλα αυτά, οι ρύποι μπορούν να διασπείρονται σε ευρείες αποστάσεις, λόγω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, ώστε να παρουσιάζεται η ενσωμάτωση βαρέων μετάλλων σε απόσταση εκατοντάδων χιλιομέτρων από την πηγή ρύπανσης.
- ✓ Από τη χρήση λυμάτων από αστικά απόβλητα στο έδαφος.



Εικόνα 28. Χημικές διεργασίες στο εδαφικό διάλυμα.

Πηγή:https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

Μετά την εισροή των βαρέων μετάλλων στο έδαφος, ακολουθεί μια σειρά φυσικών, χημικών και βιολογικών διαδικασιών, οι οποίες έχουν κρίσιμο ρόλο εάν θα παραμείνουν εκεί ή θα απομακρυνθούν από το έδαφος. Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι απομάκρυνσής τους από την επιφάνεια του εδάφους: α) η απόπλυση προς τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και β) η απορρόφησή τους από τη φυτομάζα.

Η παρουσία όλων των ποσοτήτων των βαρέων μετάλλων που εισχωρούν στο έδαφος δεν είναι διαθέσιμη. Η αύξηση της διαθεσιμότητας των βαρέων μετάλλων μεγεθύνει την απειλή εισδοχής τους στο τροφικό σύστημα του ανθρώπου και την πιθανότητα έκπλυσής τους στα υπόγεια ύδατα. Συνεπώς, η εισδοχή τους στον υδρολογικό κύκλο αποτελεί μία απειλή. Η παρουσία ενός μετάλλου είναι στενά συνδεδεμένη με την κινητικότητά του στο εδαφικό περιβάλλον.

3.4.5.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η αποκατάσταση εδαφών επιβαρυμένων με βαρέα μέταλλα αποτελεί ένα σοβαρό περιβαλλοντικό ζήτημα που έχει προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα. Η διαδικασία αποκατάστασης απαιτεί εις βάθος κατανόηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους και των παραγόντων που τις επηρεάζουν. Υπάρχει πληθώρα τεχνικών βελτίωσης του εδάφους, οι οποίες επικεντρώνονται κυρίως στη διήθηση των υδατοδιαλυτών στοιχείων και στην ακινητοποίηση των κατιόντων μέσα στο έδαφος. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν τη χρήση χημικών τροποποιητών, φυτοεξυγίανσης, βιοαποκατάστασης, και άλλες προηγμένες μεθόδους που στοχεύουν στη μείωση της κινητικότητας των βαρέων μετάλλων και την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής τους επίδρασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Η Αναλυτική Χημεία αποτελεί έναν εφαρμοσμένο κλάδο της Χημείας που επικεντρώνεται στην ανίχνευση και ποσοτική ανάλυση της χημικής σύστασης άγνωστων δειγμάτων ύλης. Ειδικότερα, οι ποιοτικές μέθοδοι παρέχουν πληροφορίες που αφορούν την αναγνώριση της ταυτότητας μοριακών και ατομικών ειδών, επιβεβαιώνοντας την παρουσία ή απουσία συστατικών και χημικών ενώσεων. Αντίστοιχα, οι ποσοτικές μέθοδοι προσφέρουν αριθμητικά δεδομένα σχετικά με τη συγκέντρωση των εν λόγω στοιχείων.

Η ραγδαία επιστημονική πρόοδος στις αρχές του 20ού αιώνα επέφερε σημαντικές τεχνολογικές καινοτομίες σε σχεδόν όλους τους τομείς, παρέχοντας εξαιρετικά ισχυρά μέσα ανάλυσης με υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία σε κάθε επιστημονική περιοχή. Αυτή η πρόοδος πυροδότησε μια «επανάσταση» στον τομέα της αναλυτικής χημείας, καθιστώντας δυνατές τις νέες τεχνικές για τον προσδιορισμό και την ανάλυση χημικών ουσιών, γνωστές ως αναλυτικές μέθοδοι χωρίς οργανικές διαδικασίες. Η καθυστέρηση στην ανάπτυξη αυτών των μεθόδων οφείλεται στην έλλειψη αξιόπιστων και εύχρηστων οργάνων ανάλυσης.

Τα όργανα αναλυτικής χημείας έχουν ως κύριο ρόλο τη μετατροπή των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του αναλυτή σε πληροφορίες που μπορούν να ερμηνευθούν εύκολα από τον ερευνητή. Μέχρι την παρούσα στιγμή, για την εκτίμηση τόσο της ποσότητας όσο και της ποιότητας των μετάλλων σε δείγματα, χρησιμοποιούνται κυρίως τέσσερεις αναλυτικές μέθοδοι: η Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης (AAS), η Ιοντική Χρωματογραφία (IC), η Φασματομετρία Μάζας Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος (ICP-MS), και η Φασματοσκοπία Φθορισμού Ακτίνων Χ (XRF).

Στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου, θα ακολουθήσει μια λεπτομερής περιγραφή αυτών των αναλυτικών τεχνικών.

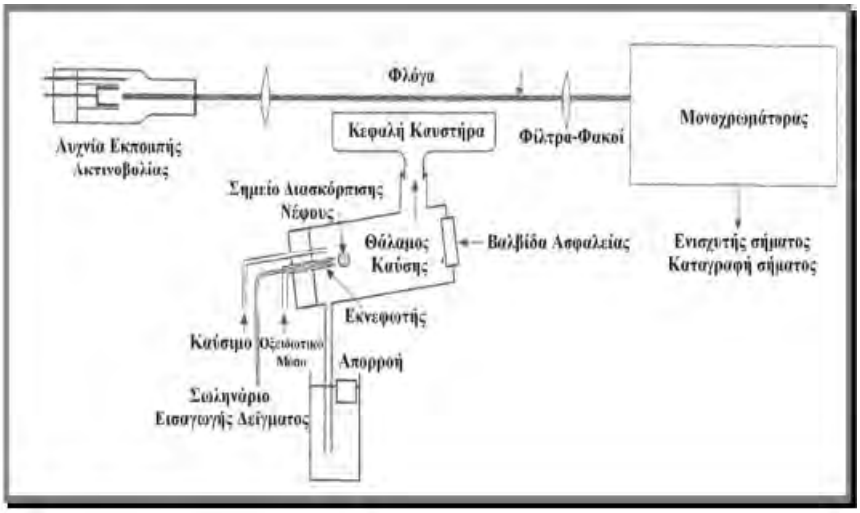
4.2 ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Η Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης (Φ.Α.Α.) είναι μια τεχνική ανάλυσης ευρέως χρησιμοποιούμενη για τον εντοπισμό και την ποσοτική ανάλυση μετάλλων σε δείγματα. Με τις σύγχρονες δυνατότητες της τεχνολογίας, η Φ.Α.Α. επιτρέπει την ανάλυση περισσότερων από 70 στοιχείων σε ένα διάλυμα.

Η λειτουργία της Φ.Α.Α. βασίζεται στην απορρόφηση ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος από ελεύθερα ουδέτερα άτομα ενός στοιχείου στη θεμελιώδη κατάσταση. Η ατομοποίηση του στοιχείου που πρόκειται να προσδιοριστεί επιτυγχάνεται συνήθως μέσω φλόγας ή θερμαινόμενου κλιβάνου. Η διέγερση των ατόμων επιτυγχάνεται μέσω απορρόφησης ακτινοβολίας που προέρχεται από εξωτερική πηγή και διαπερνά το νέφος των ατόμων. Η ποσότητα της ακτινοβολίας που απορροφάται εξαρτάται από τον αριθμό των ατόμων εντός της δέσμης φωτός, αντιστοιχώντας στην ενέργεια που απαιτείται για μια ηλεκτρονιακή μετάπτωση από τη θεμελιώδη στη διεγερμένη κατάσταση.

Ένα τυπικό όργανο Ατομικής Απορρόφησης αποτελείται από:

- Σύστημα εκπομπής ακτινοβολίας
- Σύστημα ατομοποίησης
- Οπτικό σύστημα
- Σύστημα ανίχνευσης



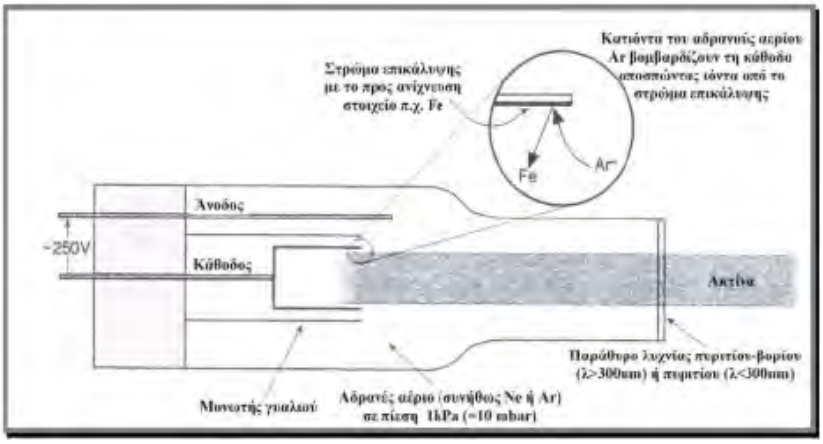
Εικόνα 29. Διάταξη οργάνου ατομικής απορρόφησης.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

4.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Για την ανίχνευση στοιχείων μέσω της Φασματομετρίας Ατομικής Απορρόφησης (Α.Α.), απαιτείται συνήθως μια ειδική πηγή ακτινοβολίας με συγκεκριμένο μήκος κύματος για κάθε στοιχείο που επιθυμεί να αναλυθεί. Οι πιο διαδεδομένες πηγές ακτινοβολίας περιλαμβάνουν:

1. **Κυλινδρική Λυχνία Κοίλης Καθόδου (ΛΚΚ)** Η ΛΚΚ αποτελείται από έναν γυάλινο σωλήνα που περιέχει φέρον αέριο, συνήθως κάποιο ευγενές αέριο όπως το ήλιο (He) ή το αργό (Ar). Ο σωλήνας αυτός διαθέτει δύο ηλεκτρόδια, με την κάθοδο να είναι κατασκευασμένη από το στοιχείο που πρόκειται να προσδιοριστεί. Εφαρμόζοντας υψηλή τάση (περίπου 300V) στη λυχνία, το ευγενές αέριο ιονίζεται, και τα θετικά ιόντα που δημιουργούνται προσπίπτουν στην επιφάνεια της καθόδου. Αυτό προκαλεί την εξαέρωση και ατομοποίηση ενός μέρους της καθόδου. Τα άτομα του στοιχείου που παράγονται στην κάθοδο διεγείρονται από την εκκένωση και εκπέμπουν την επιθυμητή χαρακτηριστική ακτινοβολία, είτε στο ορατό είτε στο υπεριώδες φάσμα, αντιστοιχώντας στο στοιχείο που βρίσκεται στο εσωτερικό της λυχνίας.



Εικόνα 30. Σχηματική αναπαράσταση της λυχνίας κοίλης καθόδου.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από τη λυχνία αντιστοιχεί στην ακτινοβολία που είναι απαραίτητη για την ιοντοποίηση των ατόμων στον καυστήρα, όπου πραγματοποιείται η ατομοποίηση. Τα άτομα απορροφούν αυτή την ακτινοβολία, η οποία απαιτείται για τη μετάβασή τους από τη θεμελιώδη κατάσταση σε μία διεγερμένη κατάσταση.

2. **Λυχνία Εκκένωσης Χωρίς Ηλεκτρόδια (ΛΕΧΗ)**

Η ιδιαιτερότητα αυτών των λυχνιών έγκειται στη μέθοδο διέγερσης των ατόμων του στοιχείου, καθώς στις ΛΕΧΗ η εκκένωση πραγματοποιείται μέσω μικροκυμάτων.

4.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΟΜΟΠΟΙΗΣΕΩΣ

Η διαδικασία που περιγράφεται ως ατομοποίηση αναφέρεται στην απομάκρυνση των ουσιών από τα δείγματα που έχουν διαλυθεί σε αυτές. Αυτή η απελευθέρωση συνήθως επιτυγχάνεται μέσω της έκθεσης του δείγματος σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει έναν εκνεφωτή και ένα φούρνο από γραφίτη.

4.2.3 ΟΠΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το οπτικό σύστημα αποτελείται από ένα μονοχρωματικό φίλτρο, το οποίο μπορεί να είναι ένα πρίσμα ή ένα φράγμα, και επιτρέπει τη διέλευση μόνο της επιθυμητής ακτινοβολίας.

4.2.4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Συνήθως, για την ανίχνευση εφαρμόζεται ένας αισθητήρας, ο οποίος ανιχνεύει την ακτινοβολία, καταγράφοντας το νούμερο των φωτονίων που φθάνουν σε αυτόν, και το μετασχηματίζει σε σήμα αναλογικής μορφής. Έπειτα, το σήμα αυτό ενισχύεται και καταχωρείται είτε σε έναν αναλογικό καταγραφέα είτε σε έναν ψηφιακό υπολογιστή.

4.2.5 ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΤΟΜΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

Παρά τη χρηστικότητα και την ευκολία των μετρήσεων στην ατομική απορρόφηση, συχνά προκύπτουν παρεμβολές που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή για την αποφυγή σφαλμάτων στις αναλύσεις. Οι κυριότερες από αυτές περιλαμβάνουν:

4.2.5.1 ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ

Φασματική παρεμπόδιση ονομάζεται η ακτινοβολία που φθάνει στον ανιχνευτή χωρίς να πηγάζει από το καθορισμένο τμήμα. Αυτό συνήθως συμβαίνει λόγω των ταινιωτών φασμάτων εκπομπής των μοριακών σωματιδίων που βρίσκονται στη φλόγα ή λόγω ανεπαρκούς διαχωρισμού δύο φασματικών γραμμών όταν δεν εφαρμόζεται μονοχρωμάτορας. Παρ' όλα αυτά, κρίνεται επιβεβλημένο να τονισθεί, ότι οι φασματικές παρεμβολές είναι περιορισμένες στην Ατομική Απορρόφηση, λόγω του πολύ στενού εύρους των ακτινοβολιών που απελευθερώνονται από την πηγή, ώσπου δεν εντοπίζονται αλληλεπικαλύψεις.

4.2.5.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ

Οι φυσικές παρεμβολές προκύπτουν από την τροποποίηση των φυσικών χαρακτηριστικών του διαλύματος λόγω της παρουσίας ηλεκτρολυτών ή οργανικών ενώσεων.

4.2.5.3 ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΕΙΣ

Οι χημικές παρεμβολές προκύπτουν από τον σχηματισμό αδιάλυτων ενώσεων με το προς ανάλυση στοιχείο, οδηγώντας σε ατελή ατομοποίηση. Για να μειωθούν αυτές οι παρεμβολές, μπορεί να αυξηθεί η θερμοκρασία της φλόγας ή να προστεθεί κατάλληλο αντιδραστήριο, το οποίο έρχεται σε αντιπαράθεση με το προς ανάλυση στοιχείο για την παρεμβαίνουσα ουσία ή σχηματίζει σύμπλοκα με χαμηλότερη πτητικότητα. Η ευαισθησία της μεθόδου ποικίλλεται από μερικά ppm έως μερικά ppb, και τα κύρια πλεονεκτήματά της είναι η ταχύτητα και η απλότητα της ανάλυσης των δειγμάτων.

4.3 ΙΟΝΤΙΚΗ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ

4.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η χρωματογραφία, ανακαλυφθείσα στις αρχές του 20ου αιώνα από τον Ρώσο βοτανολόγο M. Tswett, αποτελεί μία από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές για τον διαχωρισμό

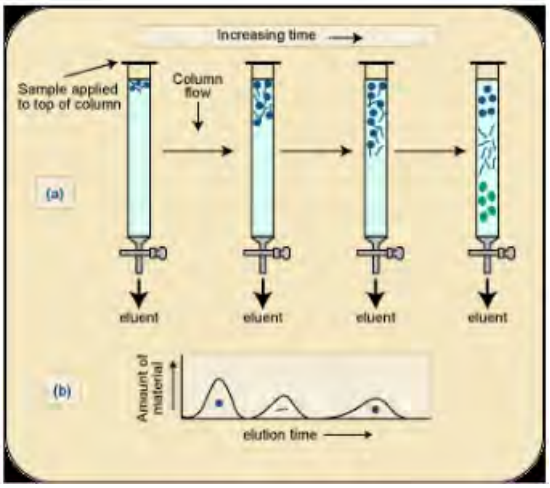
συστατικών περίπλοκων μιγμάτων. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι εφαρμογές της έχουν μεγαλώσει με ταχύτατο ρυθμό. Ο όρος "ιοντική χρωματογραφία" εισήχθη στη διεθνή βιβλιογραφία το 1975 από τον H. Small, περιγράφοντας μια τεχνική υγρής χρωματογραφίας για τον διαχωρισμό ανόργανων ιόντων. Στην τεχνική αυτή, η στατική φάση της στήλης διαχωρισμού είναι ιονανταλλακτική ρητίνη, το υγρό έκλουσης είναι υδατικό διάλυμα ηλεκτρολυτών και ο ανιχνευτής είναι αγωγιμομετρικός. Για την ενίσχυση του ορίου ανίχνευσης, προστέθηκε μία δεύτερη στήλη ιονανταλλακτικής ρητίνης με δραστικές ομάδες αντίθετου φορτίου για την εξουδετέρωση της κινητής φάσης.

Η τεχνολογική πρόοδος των επόμενων ετών συνέβαλε σημαντικά στην εξέλιξη της ιοντικής χρωματογραφίας. Αυτή η εξέλιξη επέτρεψε τον προσδιορισμό τόσο οργανικών όσο και ανόργανων κατιόντων και ανιόντων, ακόμη και πολύ ασθενώς ιονιζόμενων σωματιδίων. Οι μηχανισμοί διαχωρισμού ιόντων διευρύνθηκαν πέρα από τον κλασικό ιονανταλλακτικό μηχανισμό, περιλαμβάνοντας πλέον μηχανισμούς όπως ο αποκλεισμός κατά μέγεθος (ion exclusion chromatography), οι ιοντικές αλληλεπιδράσεις (ion interaction chromatography), καθώς και συνδυασμούς αυτών για ταυτόχρονο προσδιορισμό ανιόντων και κατιόντων μέσω πολυδιάστατης ιοντικής χρωματογραφίας.

Σημαντική ήταν και η εισαγωγή στηλών υψηλής απόδοσης στην ιοντική χρωματογραφία. Αυτές οι στήλες στηρίζονται σε υλικά μικρής χωρητικότητας και σωματίδια μικρού μεγέθους, γεγονός που βελτίωσε σημαντικά την απόδοση της τεχνικής. Η ιοντική χρωματογραφία αξιολογείται η πιο ιδανική για την εξέταση περιβαλλοντικών δειγμάτων, ιδίως για την ανάλυση της ιοντικής σύστασης ατμοσφαιρικών δειγμάτων. Αυτή η μέθοδος προσφέρει μια γκάμα πλεονεκτημάτων, όπως η ανάγκη για μικρή ποσότητα δείγματος, η υψηλή επαναληψιμότητα και η μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

4.3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στην πλειονότητα των χρωματογραφικών διαχωρισμών, το δείγμα υπό μελέτη κινείται μέσα σε μια κινητή φάση, η οποία μπορεί να είναι υγρή ή αέρια. Στη συνέχεια, η κινητή φάση, που περιέχει το δείγμα, περνάει μέσω μιας στατικής φάσης, η οποία είναι σταθεροποιημένη είτε σε μια στήλη είτε σε μια στερεή επιφάνεια. Η ταχύτητα με την οποία τα συστατικά της κινητής φάσης κινούνται βασίζεται στην ισχύ της αλληλεπίδρασής τους με τη στατική φάση. Συνεπώς, όσο ισχυρότερη είναι αυτή η αλληλεπίδραση, τόσο μεγαλύτερη είναι η κατακράτηση των συστατικών στη στατική φάση.



Εικόνα 31. Διάγραμμα απεικόνισης διαχωρισμού μίγματος ουσιών με χρωματογραφία έκλυσης στήλης.

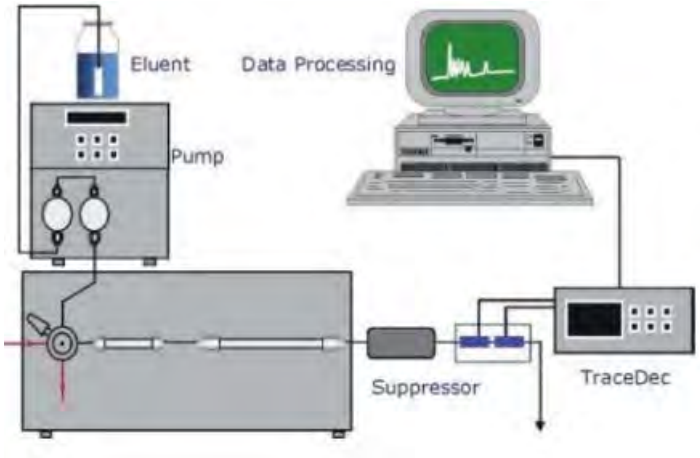
Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

4.3.3 ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ ΙΟΝΤΙΚΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ

Ένα τυπικό σύστημα ιοντικής χρωματογραφίας αποτελείται από επτά βασικά τμήματα:

1. **Δοχεία παροχής κινητής φάσης**: Αυτά περιέχουν τα διαλύματα που θα χρησιμοποιηθούν ως κινητή φάση.
2. **Αντλία:** Ρυθμίζει τη ροή της κινητής φάσης μέσω παλινδρομικής κίνησης ενός ή δύο πιστονιών, τα οποία μπορούν να είναι τοποθετημένα είτε σε σειρά είτε παράλληλα.
3. **Σύστημα εισαγωγής δείγματος**: Απαρτίζεται από έναν βρόχο συγκεκριμένου όγκου και μπορεί να ενσωματώνει σύστημα αυτόματης δειγματοληψίας.
4. **Αναλυτική στήλη**: Αναλαμβάνει τον χρωματογραφικό διαχωρισμό και συνήθως διαθέτει υποστηρικτικό υλικό όπως συμπολυμερές στυρενίου/διβινυλοβενζολίου με σταυροδεσμούς ή πηκτή διοξειδίου του πυριτίου (silica gel). Στην περίπτωση του ιονανταλλακτικού μηχανισμού, το υλικό στήριξης είναι χημικά τροποποιημένο με προσθήκη δραστικών ιονανταλλακτικών ομάδων.
5. **Σύστημα καταστολής**: Μειώνει την αγωγιμότητα υποβάθρου μέσω χημικών, ηλεκτροχημικών ή ηλεκτρονικών μεθόδων και χρησιμοποιείται κυρίως όταν ο ανιχνευτής είναι αγωγιμομετρικός.
6. **Ανιχνευτής**: Ανιχνεύει τα διαχωρισμένα συστατικά της κινητής φάσης.
7. **Σύστημα ελέγχου:** Περιλαμβάνει το λογισμικό επεξεργασίας και τη μονάδα αποθήκευσης των δεδομένων.

Τα περισσότερα από τα εξαρτήματα του συστήματος ιοντικής χρωματογραφίας, εκτός από το θάλαμο της αντλίας, κατασκευάζονται από το οργανικό πολυμερές PEEK (Poly-Ether-EtherKetone), το οποίο είναι ανθεκτικό σε όλο το φάσμα του pH.



Εικόνα 32. Σχηματική αναπαράσταση διάταξης ιοντικής χρωματογραφίας.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

Η καθορισμένη ποσότητα του δείγματος διοχετεύεται μέσω ενός βρόγχου, χρησιμοποιώντας έναν αυτόματο εισαγωγέα. Έπειτα, το δείγμα περνά στην κατάλληλη στήλη ανιόντων ή κατιόντων, όπου λαμβάνει χώρα ο ιοντικός διαχωρισμός. Στη συνέχεια, το δείγμα περνά στην ειδική στήλη ανιόντων ή κατιόντων, όπου λαμβάνει χώρα ο ιοντικός διαχωρισμός. Σειρά έχει η στήλη καταστολής, ώστε να πραγματοποιηθεί η εξασθένιση του σήματος του διαλύτη έκλουσης. Ακολούθως, τα ιόντα διακινούνται μέσω της κυψελίδας του ανιχνευτή (ο οποίος είναι συνήθως αγωγιμομετρικού τύπου) και το σήμα τους καταχωρείται μέσω ιδανικού λογισμικού. Μέσω αυτής της διαδικασίας δημιουργείται ένα χρωματογράφημα, από το οποίο, μετά από επεξεργασία, παρέχει τις συγκεντρώσεις των ιόντων.

Ο χρωματογραφικός διαχωρισμός, με βάση τον μηχανισμό της ιονανταλλαγής, στηρίζεται στην κατανομή μιας ουσίας μεταξύ δύο φάσεων και στην ταχεία αποκατάσταση χημικής ισορροπίας. Οι φάσεις που εμπλέκονται σε αυτόν τον διαχωρισμό είναι: α) ένα διάλυμα ιόντων, συνήθως με νερό ως διαλύτη, το οποίο ρέει (κινητή φάση), και β) ένα στερεό πολυμερές, με σχεδόν μηδενική διαλυτότητα στον διαλύτη της κινητής φάσης, το οποίο φέρει ιονισμένες δραστικές ομάδες χημικά προσδεμένες στο πολυμερές υπόστρωμα (ιονανταλλάκτης). Η ηλεκτρική ουδετερότητα του ιονανταλλάκτη διατηρείται μέσω της παρουσίας ίσου και αντίθετου φορτίου από τα αντισταθμιστικά ιόντα, τα οποία

συγκρατούνται στη ρητίνη λόγω των ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων με τις δραστικές ομάδες.

4.3.4 ΣΤΗΛΕΣ ΙΟΝΤΙΚΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ

Οι ρητίνες ιοντοανταλλαγής αποτελούν συνήθως το προτιμώμενο υλικό για την πλήρωση των στηλών στην ιοντική χρωματογραφία. Αυτές οι ρητίνες είναι αδιάλυτες ενώσεις που περιέχουν ιόντα, τα οποία είναι ασθενώς συνδεδεμένα και μπορούν να ανταλλαχθούν με άλλα ιόντα μέσω αλληλεπιδράσεων. Μια ρητίνη ιοντοανταλλαγής αποτελείται από τρία κύρια μέρη:

1. Ένα αδιάλυτο οργανικό ή ανόργανο υπόστρωμα.
2. Δραστικές ιοντοανταλλακτικές ομάδες.
3. Αντισταθμιστικά ιόντα αντίθετου φορτίου προς τις ιοντοανταλλακτικές ομάδες, ώστε να διατηρείται η ηλεκτρική ουδετερότητα.

Η καταλληλότητα των υλικών πλήρωσης των στηλών ιοντικής χρωματογραφίας καθορίζεται από συγκεκριμένα πρότυπα, τα οποία περιλαμβάνουν:

1) Υψηλή ταχύτητα ανταλλαγής ιόντων.
2) Χημική σταθερότητα σε ευρύ φάσμα pH.
3) Καλή μηχανική αντοχή και ανθεκτικότητα σε μεγάλες μεταβολές της οσμωτικής πίεσης.
4) Αντίσταση στην αποσύνθεση κατά τη διαδικασία πλήρωσης και κατά τη ροή της κινητής φάσης.

Το κυρίαρχο υλικό στις σύγχρονες στήλες ιοντικής χρωματογραφίας είναι τα οργανικά συμπολυμερή του στυρενίου, αν και χρησιμοποιείται επίσης η πηκτή διοξειδίου του πυριτίου.

4.3.5 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΩΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΙΟΝΤΙΚΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στην ιονική χρωματογραφία, τα υποστρώματα στατικών φάσεων χρησιμοποιούνται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα πολυμερή τύπου πηκτή και τα μακροπορώδη πολυμερή. Η δομική διαφοροποίηση αυτών των υλικών επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα ιονανταλλαγής. Τα πολυμερή τύπου πηκτή δημιουργούνται από τον συμπολυμερισμό στυρενίου και διβινυλοβενζολίου με την παρουσία βενζυλοϋπεροξειδίου ως καταλύτη. Η παρουσία του διβινυλοβενζολίου λειτουργεί καταλυτικά, προωθώντας το σχηματισμό σταυροδεσμών, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από το ποσοστό της συγκέντρωσής του στο αρχικό μείγμα των μονομερών. Για να αυξηθεί η δραστικότητα του πολυμερούς προς τα ιόντα, είναι

σημαντική η σύνδεση δραστικών οξέων ή βασικών ομάδων στο πλέγμα, συνήθως με οξείδια σουλφονικού ή τεταρτοταγώνες αμίνες.

Τα μακροπορώδη πολυμερή δημιουργούνται μέσω του συμπολυμερισμού στυρενίου και διβινυλοβενζολίου. Σε αυτή τη φάση, προστίθεται ένας διαλύτης στο πρώτο μείγμα μονομερών, ο οποίος είναι μη αναμίξιμος με το νερό αλλά αναμίξιμος με τα μονομερή, αλλά χρησιμοποιείται ως φτωχός διαλύτης για το τελικό πολυμερές. Κατά την εκτέλεση του πολυμερισμού, ο διαλύτης παράγει σταγονίδια εντός του σχηματιζόμενου πολυμερούς, προκαλώντας τη δημιουργία πόρων μεγάλου μεγέθους στο τελικό πολυμερές. Τα πολυμερή αυτού του τύπου περιέχουν υψηλά ποσοστά διβινυλοβενζολίου, καθιστώντας τη ρητίνη αρκετά άκαμπτη. Οι μακροπορώδεις ρητίνες εφαρμόζονται ιδιαιτέρως για την ανέγερση στηλών υψηλής χωρητικότητας ή για ιοντική χρωματογραφία ζεύγους ιόντων.

4.4 ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΜΑΖΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ (ICP-MS)

Η τεχνική της φασματομετρίας μάζας με επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (ICP-MS) αναπτύχθηκε και έγινε διαθέσιμη στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Αυτή η τεχνολογία έχει καθιερωθεί ως ένα από τα κυριότερα εργαλεία για την ανάλυση στοιχείων, χάρη στην ικανότητά της να ανιχνεύει χαμηλές συγκεντρώσεις πολλών στοιχείων, την υψηλή εκλεκτικότητα, την καλή επαναληψιμότητα και ακρίβεια, καθώς και τη δυνατότητα της για πολυστοιχειακή ανάλυση και μέτρηση ισοτοπικών λόγων.

Στην ICP-MS, το πλάσμα, που αποτελείται από ιόντα, ηλεκτρόνια και ουδέτερα μόρια, δημιουργείται από αέριο αργό (Ar) και χρησιμοποιείται για την ατομοποίηση και τον ιονισμό του αναλυτή στο δείγμα. Τα παραγόμενα ιόντα κινούνται μέσω των διαφόρων τμημάτων του οργάνου και καταλήγουν στον αναλυτή μάζας, όπου οι ισότοποι διαχωρίζονται με βάση το λόγο μάζας προς φορτίο (m/z). Η ένταση μιας συγκεκριμένης κορυφής στο φάσμα μάζας είναι ανάλογη με την ποσότητα του ισοτόπου στο δείγμα.

4.4.1 ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ ICP-MS

Η τεχνική του Επαγόμενου Συζευγμένου Πλάσματος με Φασματομετρία Μάζας (ICP-MS) είναι μια προηγμένη αναλυτική μέθοδος που εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό ιχνοστοιχείων και ισοτόπων σε διάφορους τύπους δειγμάτων. Το σύστημα ICP-MS αποτελεί ένα σύνολο από τρία βασικά στοιχεία: το σύστημα εισαγωγής του δείγματος, την πηγή ιόντων (πλάσμα αργού) και τον αναλυτή μάζας.

- **Σύστημα Εισαγωγής Δείγματος**

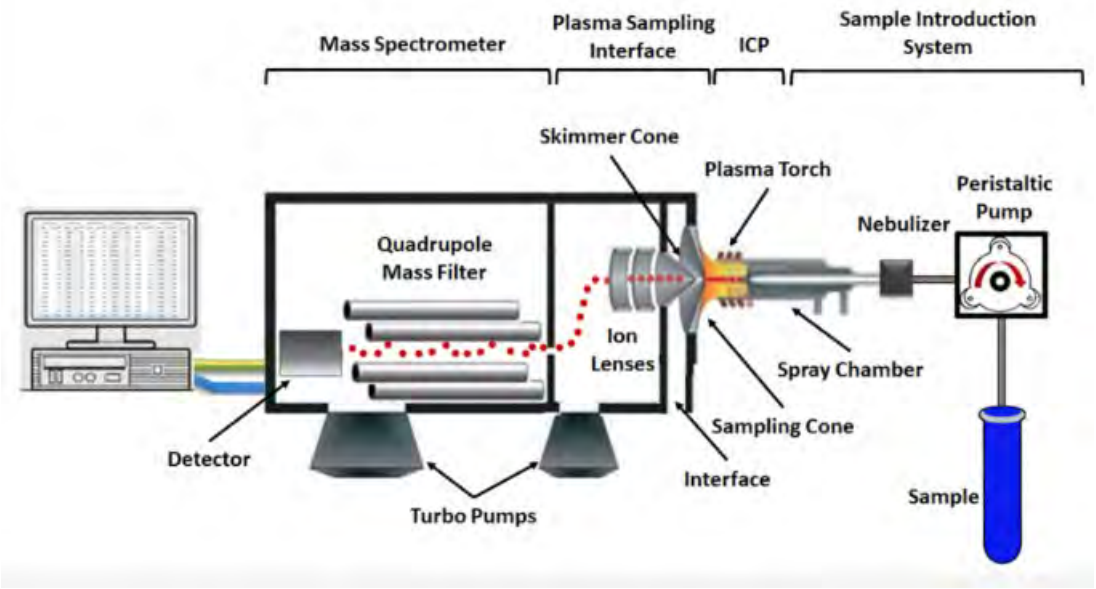
Το σύστημα εισαγωγής δείγματος είναι υπεύθυνο για την εισαγωγή του δείγματος στο πλάσμα. Το κύριο μέρος του συστήματος εισαγωγής είναι ο νεφελοποιητής, ο οποίος μετατρέπει το υγρό δείγμα σε αερόλυμα. Το αερόλυμα στη συνέχεια διέρχεται από τον θάλαμο εκνεφωτή, όπου τα μεγαλύτερα σταγονίδια διαχωρίζονται και απομακρύνονται, επιτρέποντας μόνο τα μικρά σταγονίδια να εισέλθουν στο πλάσμα.

- **Πηγή Ιόντων (Πλάσμα Αργού)**

Η πηγή ιόντων αποτελείται από το πλάσμα αργού, το οποίο δημιουργείται με τη βοήθεια ενός ραδιοσυχνικού (RF) πεδίου. Το αργό αέριο ιονίζεται και φτάνει σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 6,000 έως 10,000 Κέλβιν. Σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες, τα δείγματα διασπώνται σε ατομικά ιόντα. Το πλάσμα είναι το κεντρικό μέρος του ICP-MS, καθώς δημιουργεί τις συνθήκες για την πλήρη ατομοποίηση και ιονισμό των συστατικών του δείγματος.

- **Αναλυτής Μάζας**

Ο αναλυτής μάζας είναι το μέρος του συστήματος που διαχωρίζει και ανιχνεύει τα ιόντα με βάση τη μάζα τους. Ο διαχωρισμός των ιόντων γίνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός τετραπολικού αναλυτή (quadrupole), ο οποίος διαχωρίζει τα ιόντα με βάση τη σχέση μάζας/φορτίου (m/z). Άλλοι τύποι αναλυτών μάζας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν τον τομέα χρόνου πτήσης (Time-of-Flight, TOF) και τον μαγνητικό τομέα (Magnetic Sector). Μετά τον διαχωρισμό, τα ιόντα ανιχνεύονται και καταγράφονται από έναν ανιχνευτή ιόντων, ο οποίος μετατρέπει τα ανιχνευθέντα σήματα σε ηλεκτρικά σήματα.



Εικόνα 33. Σχηματικό διάγραμμα των κύριων στοιχείων ενός ICP-MS.

Πηγή: https://www.mdpi.com/2304-8158/11/22/3705

4.5 ΤΕΧΝΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (XRF)

Μια σημαντική τεχνική ανάλυσης που οδηγεί στον καθορισμό της ιοντικής σύστασης δειγμάτων είναι η Φασματοσκοπία Φθορισμού Ακτινών Χ (X-ray Fluorescence, XRF). Το ξεχωριστό της χαρακτηριστικό είναι ότι δεν καταστρέφει το δείγμα, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους ανάλυσης, επιτρέποντας την επαναληπτική χρήση της. Αυτό επιτρέπει στον ερευνητή να ελέγχει και να συγκρίνει τη συνοχή των μετρήσεων του, προσφέροντας αυξημένη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

4.5.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΙΖΟΥΣΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ Χ (XRF)

Η Φθορίζουσα Ακτινοβολία Χ (XRF) είναι μια αναλυτική τεχνική που εφαρμόζεται για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των στοιχείων που περιέχονται σε ένα δείγμα. Η αρχή λειτουργίας της XRF στηρίζεται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας Χ με την ύλη και στην επακόλουθη εκπομπή χαρακτηριστικών ακτινών Χ από τα στοιχεία του δείγματος. Η διαδικασία ανάλυσης μέσω XRF συμπεριλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. **Διέγερση του Δείγματος**: Η διαδικασία ξεκινά με την έκθεση του δείγματος σε πρωτογενή ακτινοβολία Χ. Αυτή η ακτινοβολία παράγεται συνήθως από μια λυχνία ακτινών Χ ή από ραδιενεργές πηγές. Η πρωτογενής ακτινοβολία έχει αρκετή ενέργεια ώστε να απομακρύνει τα εσωτερικά ηλεκτρόνια από τα άτομα του δείγματος, δημιουργώντας κενά στις εσωτερικές στιβάδες ηλεκτρονίων.

2. **Εκπομπή Φθορισμού**: Όταν ένα εσωτερικό ηλεκτρόνιο απομακρύνεται από την ακτινοβολία, τα ηλεκτρόνια από τις εξωτερικές στιβάδες πέφτουν στις εσωτερικές για να καλύψουν τα κενά. Κατά τη φάση αυτής της μετάπτωσης, απελευθερώνεται ενέργεια με τη μορφή δευτερογενών ακτινών Χ, γνωστών και ως χαρακτηριστικών ακτινών Χ. Αυτές οι ακτίνες Χ έχουν συγκεκριμένες ενέργειες που είναι χαρακτηριστικές για κάθε στοιχείο.

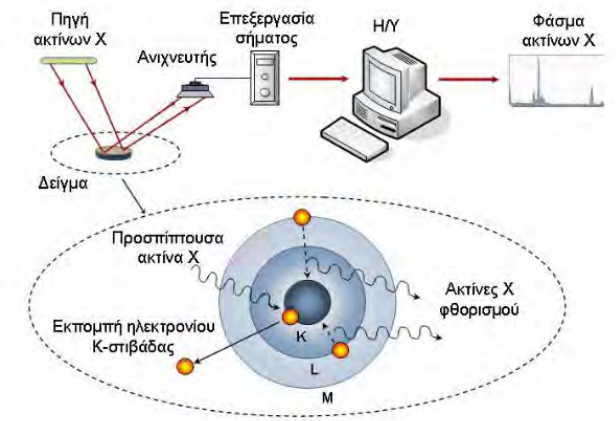
3. **Ανίχνευση και Ανάλυση**: Οι δευτερογενείς ακτίνες Χ ανιχνεύονται και αναλύονται από έναν ανιχνευτή ακτινών Χ. Ο ανιχνευτής μετρά την ενέργεια και την ένταση των ακτινών, που σχετίζονται με τα στοιχεία του δείγματος. Το φάσμα που παράγεται περιέχει πληροφορίες για τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο δείγμα και τις συγκεντρώσεις τους.

Ένα τυπικό σύστημα XRF αποτελείται από τα εξής κύρια συστατικά:

1. **Πηγή Ακτινοβολίας Χ**: Η πηγή αυτή μπορεί να είναι μια λυχνία ακτίνων Χ ή μια ραδιενεργή πηγή. Παράγει την πρωτογενή ακτινοβολία που βομβαρδίζει το δείγμα.

2. **Δείγμα και Κράτημα Δείγματος**: Το δείγμα τοποθετείται σε ένα φορέα δειγμάτων που διασφαλίζει τη σωστή θέση και σταθερότητα κατά την ανάλυση.

3. **Ανιχνευτής Ακτινών Χ**: Ο ανιχνευτής μετρά την ενέργεια και την ένταση των χαρακτηριστικών ακτινών Χ που εκπέμπονται από το δείγμα. Συνηθισμένοι ανιχνευτές είναι οι ημιαγωγοί Si (Li) ή Si-PIN.
4. **Φασματογράφος**: Ο φασματογράφος αναλύει το φάσμα των ακτινών Χ, διαχωρίζοντας τις ακτίνες βάσει της ενέργειάς τους, και παρέχει λεπτομέρειες σχετικά με τη σύσταση του δείγματος.
5. **Λογισμικό Ανάλυσης και Επεξεργασίας Δεδομένων**: Το λογισμικό επεξεργάζεται τα δεδομένα από το φάσμα και υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των στοιχείων στο δείγμα.



Εικόνα 34. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου και η τυπική διάταξη φασματοσκοπίας XRF.

Πηγή: http://old.uoi.gr/services/lab-net/net-web/XRF_gr.pdf

4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει μια σύνοψη των κύριων χαρακτηριστικών των αναφερθέντων τεχνικών, μαζί με τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Όνομα	Φασματοσκοπία Ατομική Απορρόφηση (Atomic Absorption Spectroscopy)	Ιοντική Χρωματογραφία (Ion Chromatography)	Φασματομετρία Μάζας Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος (ICP-MS)	Φασματοσκοπία Φθορισμού Ακτίνων Χ (XRF)
Ακτινοβολία διέγερσης	Φωτόνια στο Uv/Vis			Ακτίνες Χ
Πληροφορίες βάθους	Όχι	Όχι	Όχι	Χαρακτηριστικά φωτόνια ακτίνων Χ
Χωρική Ανάλυση	Όχι	Όχι	50-110μm (laser)	500A^0-10μm
Όριο ανίχνευσης	0.1ppb-100ppm		10ppt-10ppb	1-10ppm
Ανιχνεύσιμα μέταλλα	Όλα		Li-U	Li-U
Ποσοτική ανάλυση	Ναι	Ναι	Ναι, 2-10%	Ναι, υψηλής ακρίβειας
Απεικόνιση	Όχι	όχι	Ναι	Ναι
Σχεδίαση-χαρτογράφηση	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι
Κατάσταση ύλης δείγματος	Στερεά, υγρά, αέρια	Στερεά και υγρά	Στερεά και υγρά	Στερεά και υγρά με χαμηλή τάση ατμών
Εφαρμογή σε γεωλογικά και περιβαλλοντικά δείγματα	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Εφαρμογή - Εξαγόμενες Πληροφορίες	Στοιχειακή ανάλυση σε κατάλληλα δείγματα ή σε εξατμιζόμενα στερεά.		Στοιχειακή ανάλυση, ισοτοπική ανάλυση.	Στοιχειακή ανάλυση
Πλεονεκτήματα	α)Ακριβής και επαναλήψιμη β)Χαμηλά όρια ανίχνευσης	α)Μικρή ποσότητα δείγματος β)Επαναληψιμότητα και ακρίβεια	α)Πολύ χαμηλά όρια ανίχνευσης β)Υψηλή ακρίβεια γ)Ευρεία εφαρμοστικότητα δ)Μερικές πληροφορίες για τη δομή του δείγματος, ισοτοπική ανάλυση	α)Ανίχνευση πολλών στοιχείων β)Δεν καταστρέφεται το υπό μελέτη δείγμα γ)Σχηματική αναπαράσταση και απεικόνιση
Μειονεκτήματα	α)Παρέχει μόνο στοιχειακές πληροφορίες β) Μπορεί να ανιχνευτεί ένα στοιχείο κάθε φορά γ)Παρουσιάζονται παρεμποδίσεις στην ανάλυση		α)Καταστροφή του δείγματος β)Απαιτείται η δημιουργία υψηλού κενού	α)Μόνο στοιχειακή ανάλυση β)Υψηλότερα όρια ανίχνευσης
Διαθεσιμότητα	Ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική	Ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική	Κοινή τεχνική αλλά όχι ευρέως χρησιμοποιούμενη	Κοινή τεχνική αλλά όχι ευρέως χρησιμοποιούμενη

Πίνακας 3. Σύγκριση Αναλυτικών τεχνικών (A.A.S, I.C, ICP-PS, XRF).

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΦΥΤΑ

5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΤΟΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΦΥΤΑ

Για περισσότερο από έναν αιώνα, η επιστημονική κοινότητα έχει ερευνήσει τα αναγκαία συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Ήδη από το 1869, γνωρίζαμε τα 10 από τα 16 απαραίτητα στοιχεία: άνθρακας (C), υδρογόνος (H), οξυγόνο (O), αζώτιο (N), φωσφόρος (P), θείο (S), καθώς και τα κάλιο (K), ασβέστιο (Ca), μαγνήσιο (Mg) και σίδηρος (Fe). Αργότερα, μεταξύ των ετών 1920 και 1939, ανακαλύφθηκαν άλλα 6 στοιχεία, όπως το χαλκός (Cu), το μόλυβδος (Mo), το βόριο (B), το ψευδάργυρος (Zn), το μαγγάνιο (Mn), και το χλώριο (Cl), τα οποία είναι αναγκαία για την ανάπτυξη των φυτών σε πολύ μικρότερες ποσότητες, γνωστές και ως ιχνοστοιχεία. Τα φυτά χρειάζονται σημαντικές ποσότητες από τα μακροστοιχεία, όπως τα C, H, O, N, P, S, K, Ca και Mg. Τα ιχνοστοιχεία, ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των βαρέων μετάλλων και απαιτούνται σε πολύ μικρότερες ποσότητες. Επιπλέον, ο σίδηρος (Fe), δεν εμπίπτει σε καμία από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, καθώς οι ποσότητες που χρειάζονται, κινούνται μεταξύ των μακροστοιχείων και των ιχνοστοιχείων.

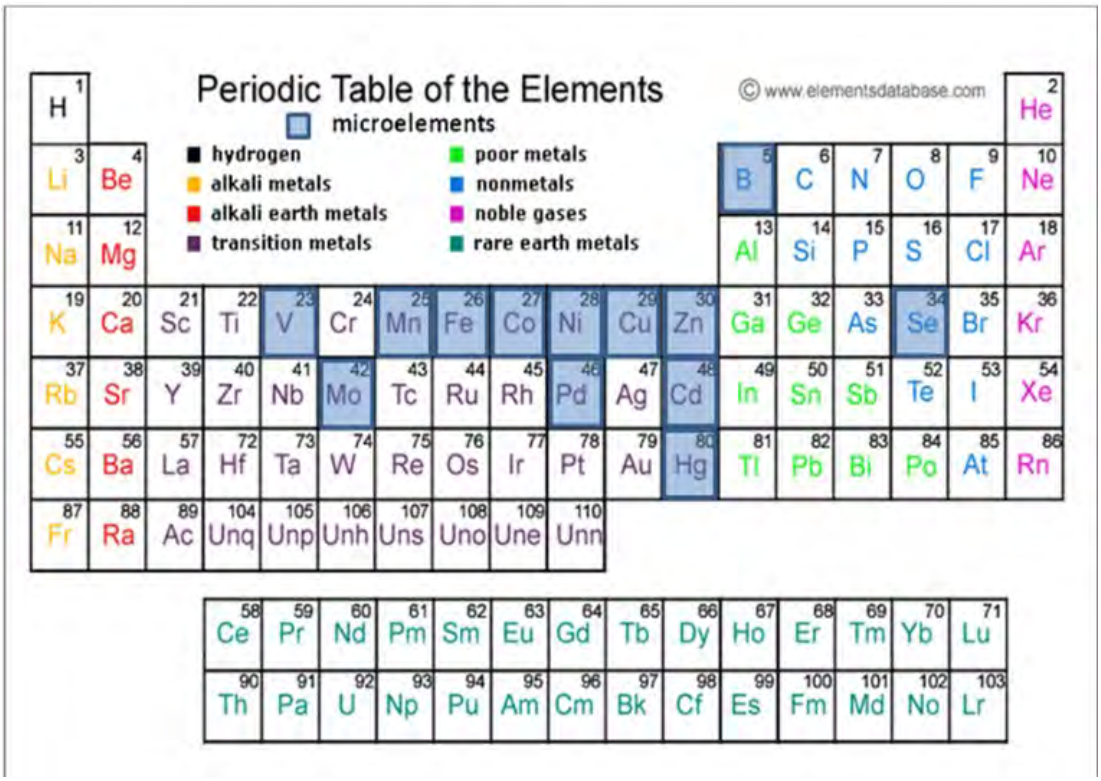
Οι κύριες αποθήκες των στοιχείων των μετάλλων βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, τη λιθόσφαιρα (το έδαφος και τα αποσαθρωμένα πετρώματα) και την υδρόσφαιρα. Η κατανόηση της κυκλοφορίας κάθε θρεπτικού στοιχείου απαιτεί τη γνώση των διαδικασιών που περιλαμβάνουν τη βιολογία των οργανισμών, τη γεωλογική διαθεσιμότητα του στοιχείου και τη χημική του συμπεριφορά, τόσο οργανική όσο και ανόργανη. Οι επαναλαμβανόμενες κυκλικές διαδρομές των χημικών στοιχείων στα οικοσυστήματα διεξάγονται με τη συμμετοχή βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων, όπως οι βιολογικές, χημικές και γεωλογικές διαδικασίες, και ονομάζονται βιογεωχημικοί κύκλοι των στοιχείων. Όταν οι συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων υπερβαίνουν κάποια όρια, ειδικά όταν εμφανίζονται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από αυτές που απαιτούνται για την ανάπτυξη τους -χαρακτηριστικά για κάθε φυτό -προκαλούν τοξική επίδραση, η οποία μπορεί να αποτρέψει την ανάπτυξή τους ή ακόμα και να οδηγήσει στον θάνατό τους.

Η λειτουργία και η τοξική επίδραση των βαρέων μετάλλων είναι κρίσιμοι για την ανάπτυξη των φυτών, όπως του σιδήρου (Fe), χαλκού (Cu), μολυβδαινίου (Mo), βορίου (B), ψευδαργύρου (Zn) και μαγγανίου (Mn), καθώς και άλλων μετάλλων όπως το κοβάλτιο (Co), το σελήνιο (Se), το κάδμιο (Cd), το μόλυβδο (Pb), το υδράργυρο (Hg), το βανάδιο (V), το νικέλιο (Ni) κ.ά. Λόγω της έντονης ανθρωπογενούς επέμβασης, οι συγκεντρώσεις αυτών των μετάλλων στα εδάφη έχουν μεγεθυνθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται η θέση και το είδος των μετάλλων που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία.

Στοιχεία	Κυριότερες μορφές με τις οποίες τα στοιχεία απορροφούνται	Συνήθεις συγκεντρώσεις στα υγιή φυτά	Ενδιαφέρουσες λειτουργίες
Μακροστοιχεία			
Άνθρακας	CO_2	44%	Συστατικό των οργανικών ενώσεων
Οξυγόνο	H_2O ή O_2	44%	Συστατικό των οργανικών ενώσεων
Υδρογόνο	H_2O	6%	Συστατικό των οργανικών ενώσεων
Άζωτο	NO_3^- ή NH_4^+	1-4%	Αμινοξέα, πρωτεΐνες, νουκλεοτίδια, νουκλ. οξέα, χλωροφύλλη και συνένζυμα.
Κάλιο	K^+	0.5-6%	Ένζυμα, αμινοξέα και πρωτεϊνική σύνθεση. Ενεργοποιητής πολλών ενζύμων Άνοιγμα και κλείσιμο στομάτων.
Ασβέστιο	Ca^{2+}	0.2-3.5%	Στα κυτταρικά τοιχώματα. Διαπερατότητα του κυττάρου.
Φώσφορος	$H_2PO_4^-$ ή HPO_4^{2-}	0.1-0.8%	Σχηματισμός των υψηλής ενέργειας φωσφορικών συστατικών (ATP και ADP). Νουκλ. οξέα. Φωσφορυλίωση σακχάρων. Πολλά βασικά ένζυμα. Φωσφολιπίδια.
Μαγνήσιο	Mg^{2+}	0,1-0,8%	Μέρος του μορίου της χλωροφύλλης. Ενεργοποιητής πολλών ενζύμων.
Θείο	SO_4^{-2}	0,05-1%	Μερικά αμινοξέα και πρωτεΐνες. Συνένζυμο Α.
Ιχνοστοιχεία			
Σίδηρος	Fe^{2+} ή Fe^{3+}	25-300ppm	Σύνθεση χλωροφύλλης, κυτοχρώματα, νιτρογενάση.
Χλώριο	Cl^-	100-10000ppm	Ωσμωση και ισορροπία ιόντων. Πιθανά βασικό στις φωτοσυνθετικές αντιδράσεις για παραγωγή Οξυγόνου.
Χαλκός	Cu^{+2}	4-30ppm	Ενεργοποιητής μερικών ενζύμων
Μαγγάνιο	Mn^{2+}	15-800ppm	Ενεργοποιητής μερικών ενζύμων
Ψευδάργυρος	Zn^{2+}	15-100ppm	Ενεργοποιητής μερικών ενζύμων.
Μολυβδαίνιο	MoO_4^{-2}	0.1-50ppm	Δέσμευση αζώτου. Νιτρική αναγωγή.
Βόριο	BO_3^- ή $B_4O_7^{-2}$	5-75ppm	Επίδραση χρησιμοποίησης Ca^{2+}
Στοιχεία βασικά σε μερικά φυτά ή οργανισμούς			
Κοβάλτιο	Co^{2+}	ίχνη	Απαιτείται από τους αζωτοδεσμευτικούς οργανισμούς.
Νάτριο	Na^+	ίχνη	Ωσμωτική και ιοντική ισορροπία. Πιθανώς μη απαραίτητο για πολλά φυτά.

Πίνακας 4. Συγκεντρώσεις των βασικών στοιχείων στα φυτά καθώς και η μορφή με την οποία είναι αυτά διαθέσιμα.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf



Πίνακας 5. Περιοδικός Πίνακας των χημικών στοιχείων και ποια ιχνοστοιχεία και βαρέα μέταλλα επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

5.1.1 ΣΙΔΗΡΟΣ (Fe)

Ο σίδηρος αποτελεί ένα από τα κυριότερα και αναγκαία θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Η λειτουργία του σιδήρου εστιάζεται ιδιαίτερα στις οξειδοαναγωγικές διεργασίες, καθώς εμπλέκεται σε μια σειρά από αυτές τις αντιδράσεις, κατά τις οποίες είτε αποδέχεται ηλεκτρόνια (αναγωγή) είτε απομακρύνει ηλεκτρόνια (οξείδωση).

Ο σίδηρος αναπτύσσεται στα μιτοχόνδρια και στους χλωροπλάστες, τα οποία αποτελούν τα κύρια όργανα τη φωτοσύνθεση. Ακόμη, βρίσκεται σε διάφορα ένζυμα, όπως οι καταλάσες και οι υπεροξειδάσες. Η εμφάνιση του σιδήρου στους χλωροπλάστες τον καθιστά ιδιαίτερα σημαντικό για τις διαδικασίες της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής, καθώς συμμετέχει σε πολλές αντιδράσεις μετατροπής της φωτεινής ενέργειας σε θρεπτικά συστατικά. Επιπλέον, ο σίδηρος συμμετέχει σε ένζυμα νιτρικής και νιτρώδους αναγωγάσης, τα οποία συμβάλλουν στη μετατροπή των νιτρικών ιόντων σε αμμωνιακά, καθώς και στο ένζυμο νιτρογενάση, το οποίο είναι υπεύθυνο για την αζωτοδέσμευση. Παρά την ύπαρξη σε υψηλές συγκεντρώσεις στο φυτό, δεν έχει παρατηρηθεί αντικειμενική τοξική αποτελεσματικότητα του σιδήρου μέχρι σήμερα.

5.1.2 ΒΟΡΙΟ (Β)

Η σημασία του βορίου στην ανάπτυξη των φυτών έγινε κατανοητή στις αρχές της δεκαετίας του 1920. Τα φυτά απορροφούν το βόριο από το έδαφος κυρίως με τη μορφή βορικού οξέος. Το pH του εδάφους επηρεάζει άμεσα τη διαθεσιμότητα του βορίου στα φυτά. Όταν το έδαφος έχει υψηλή περιεκτικότητα σε βόριο, αυτό απορροφάται από τις ρίζες μέσω διάχυσης. Αντιθέτως, σε περίπτωση χαμηλών επιπέδων βορίου, το φυτό αναγκάζεται να χρησιμοποιήσει άλλους μηχανισμούς απορρόφησης, οι οποίοι απαιτούν ενέργεια και συνεπώς μειώνουν την φωτοσυνθετική ικανότητά του. Επιπλέον, στις περισσότερες φυτικές οργανισμούς η μεταφορά του βορίου είναι αρκετά περιορισμένη, συμβαίνοντας σχεδόν από κύτταρο σε κύτταρο, κάτι που καθιστά αναγκαία την εξωτερική χορήγησή του (μέσω λίπανσης ή διαφυλλικού ψεκασμού). Ο βασικός μηχανισμός μετακίνησης του βορίου εντός του φυτού σχετίζεται με την παρουσία σακχάρων και αλκοολών (πολυόλες) στη ροή μεταφοράς.

Το βόριο συμβάλλει σημαντικά στη διαμόρφωση του κυτταρικού τοιχώματος, παρέχοντας τη χημική και φυσική δομή που απαιτείται για την εξέλιξή του. Είναι σημαντικό για τα μεριστώματα των βλαστών και συμβάλλει στην εξέλιξη του σωλήνα του γυρεόκοκκου κατά τη γονιμοποίηση. Επιπλέον, το βόριο είναι κρίσιμο για τη σύνθεση των αζωτούχων βάσεων του DNA και του RNA, καθώς και για τη τεχνική της γλυκόλυσης. Έχει, επίσης, σημαντικό ρόλο στη μετακίνηση των σακχάρων μέσω της κυτταρικής μεμβράνης και στην κυτταροδιαίρεση.

Η έλλειψη επαρκούς ποσότητας βορίου οδηγεί σε αυξημένη πορωσιμότητα του κυτταρικού τοιχώματος, αναστολή των βιοχημικών του δραστηριοτήτων, και κατ' επέκταση επιβράδυνση της κυτταρικής εξέλιξης, που είναι θεμελιώδης για την ανάπτυξη του φυτού. Τέλος, έρευνες έχουν δείξει ότι η έλλειψη βορίου μπορεί να παρατηρηθεί σε περιόδους ξηρασίας, υπερβολικού κρύου ή υγρασίας, περιορίζοντας τη μετακίνηση του στοιχείου προς το άνθος.

5.1.2.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΒΟΡΙΟΥ

Η τοξικότητα του βορίου εκδηλώνεται όταν η συγκέντρωσή του ξεπερνά περίπου 5 έως 10 φορές την κανονική ποσότητα που χρειάζονται τα φυτά. Μεγάλες συγκεντρώσεις βορίου απαντώνται περισσότερο σε εδάφη που έχουν σχηματιστεί από θαλάσσια ιζήματα, σε γεωργικές εκτάσεις που λιπαίνονται υπερβολικά με βόριο, καθώς και σε εδάφη που αρδεύονται με νερό εμπλουτισμένο σε βόριο. Τα κύρια τοξικά αποτελέσματα περιλαμβάνουν αποχρωματισμό και νανισμό των φυτών.

Επιπλέον, φυτά που συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες βορίου παρουσιάζουν μαύρα στίγματα στα φύλλα, τα οποία τελικά πέφτουν, μειώνοντας τη φωτοσυνθετική τους ικανότητα. Για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις βορίου στο έδαφος και στα φυτά, είναι

απαραίτητος ο τακτικός έλεγχος του αρδευτικού νερού ή η προσθήκη εδάφους με χαμηλή περιεκτικότητα σε βόριο.

5.1.2.2 Η ΣΧΕΣΗ ΤΟΥ ΒΟΡΙΟΥ ΜΕ ΑΛΛΑ ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ

Το ασβέστιο και το βόριο είναι δύο στοιχεία που σχετίζονται άμεσα και η ισορροπία τους είναι απαραίτητη για την ορθή ανάπτυξη των φυτών. Συγκεκριμένα, χαμηλά επίπεδα βορίου σε συνδυασμό με την προσθήκη ασβεστίου μπορούν να επιδεινώσουν την έλλειψη βορίου. Εδάφη με υψηλό pH ευνοούν την απορρόφηση ασβεστίου από τα φυτά, καθώς το ασβέστιο σχηματίζει υδροξείδια, εμποδίζοντας την πρόσληψη του βορίου που απορροφάται κυρίως με τη μορφή του βορικού οξέος. Επιπλέον, υψηλές συγκεντρώσεις καλίου στο έδαφος αυξάνουν τη διαθεσιμότητα βορίου στα φυτά, δημιουργώντας ευδιάλυτο τετραβορικό κάλιο.

5.1.3 ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ (Zn)

Ο ψευδάργυρος αποτελεί ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο για τη θρέψη των φυτών και κατατάσσεται στα αμετάβλητα μέταλλα, με διάρκεια παραμονής στο έδαφος που κυμαίνεται από 150 έως 5000 χρόνια. Η απορρόφηση του ψευδαργύρου από το ριζικό σύστημα των φυτών γίνεται στη δισθενή του μορφή. Η συγκέντρωσή του στο εδαφικό διάλυμα είναι αρκετά χαμηλότερη (2 έως 70 ppb) σε σύγκριση με το έδαφος, γεγονός που οφείλεται στην τάση του ψευδαργύρου να σχηματίζει σύμπλοκα με την οργανική ύλη του εδάφους και να κατακρημνίζεται κυρίως υπό τη μορφή ανθρακικών και φωσφορικών αλάτων, περιορίζοντας έτσι τη διαθεσιμότητά του στα φυτά.

Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη βιοδιαθεσιμότητα του ψευδαργύρου είναι η παρουσία φωσφορικών ενώσεων στο εδαφικό διάλυμα, καθώς αυτές ανταγωνίζονται με τον ψευδάργυρο. Σε εδάφη με χαμηλό pH (5,5-7,5), η διαλυτότητα του ψευδαργύρου ελέγχεται κυρίως από τα φωσφορικά άλατα. Αντίθετα, σε αλκαλικά εδάφη, ο ψευδάργυρος σχηματίζει σύμπλοκα που δεν είναι διαθέσιμα για απορρόφηση από τα φυτά.

Ο ψευδάργυρος αποτελεί απαραίτητο μεταλλικό στοιχείο για πολλά ένζυμα, όπως η αλκοολική αφυδρογονάση, η αφυδρογονάση του γλουταμινικού οξέος και η 3-P αφυδρογονάση της D-γλυκεριναλδεΰδης, λειτουργώντας ως κρίσιμος παράγοντας για πολλές βιολογικές διεργασίες, έχοντας δομικούς, λειτουργικούς και ρυθμιστικούς ρόλους Έρευνες έχουν αναδείξει τη σημασία του ψευδαργύρου στον μεταβολισμό των υδατανθράκων, των πρωτεϊνών και του RNA εντός του κυττάρου. Είναι, επίσης, απαραίτητος για τη σύνθεση της θρυπτοφάνης, η οποία είναι πρόδρομος του ινδολυλοξικού οξέος (IAA). Νεότερα ευρήματα δείχνουν ότι τα ιόντα ψευδαργύρου ενεργοποιούν το ένζυμο καρβονική ανυδράση, που βρίσκεται στους χλωροπλάστες και το κυτταρόπλασμα.

5.1.3.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ

Όπως συμβαίνει με τα περισσότερα βαρέα μέταλλα, όταν η συγκέντρωση του ψευδαργύρου υπερβεί ορισμένα όρια, τα οποία εξαρτώνται από το συγκεκριμένο φυτό, προκαλεί τοξικές επιδράσεις που επηρεάζουν την ανάπτυξή του, όπως νανισμό. Η ύπαρξη υψηλών επιπέδων ψευδαργύρου στα φυτά συνδέεται άμεσα με την περιεκτικότητά του στο έδαφος. Έρευνες έχουν δείξει ότι υψηλές συγκεντρώσεις ψευδαργύρου εμφανίζονται κυρίως όταν το pH του εδάφους είναι πολύ χαμηλό (pH < 5) ή όταν το έδαφος είναι επιβαρυμένο με αστικά και βιομηχανικά απόβλητα.

5.1.4 ΜΑΓΓΑΝΙΟ (Mn)

Τα φυτά απορροφούν το μαγγάνιο από το έδαφος υπό μορφή κατιόντων Mn^{2+}, τα οποία μεταφέρονται από τις ρίζες στους βλαστούς στην ίδια μορφή. Οι απαιτούμενες συγκεντρώσεις μαγγανίου για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών κυμαίνονται από 15 έως 800 ppm και βασίζονται από το είδος του φυτού. Η παρουσία του μαγγανίου ελαττώνεται σε εδάφη πλούσια σε οργανική ύλη, καθώς δημιουργούνται σύμπλοκα του μαγγανίου που δεν είναι διαθέσιμα για απορρόφηση.

Το μαγγάνιο παίζει σημαντικό ρόλο στη φωτοσυνθετική απελευθέρωση οξυγόνου στο φωτοσύστημα ΙΙ. Επίσης, είναι συστατικό του ενζύμου υπεροξειδική δισμουτάση (SOD), το οποίο συμμετέχει στη φωτόλυση του νερού και προστατεύει τον φωτοσυνθετικό μηχανισμό από τις τοξικές επιδράσεις του οξυγόνου. Ως δομικό στοιχείο των μεμβρανών των χλωροπλαστών, το μαγγάνιο θεωρείται ενεργοποιητής συγκεκριμένων ενζύμων του κύκλου του Krebs, καθιστώντας το απαραίτητο για το μεταβολισμό των υδατανθράκων. Επιπλέον, το Mn μπορεί να αντικαταστήσει το Mg σε ορισμένες λειτουργίες του, όπως στη δημιουργία δεσμών μεταξύ των ΑΤΡασών και των ενζύμων τους, αλλά όχι σε όλες.

5.1.4.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ

Οι συνήθεις ενδείξεις της τοξικότητας του μαγγανίου περιλαμβάνουν το κίτρινο χρώμα στα φύλλα και τη δημιουργία μαύρων σημάνσεων στην επιφάνειά τους. Επιπλέον, παρατηρείται περιορισμός στην ανάπτυξη των φυτών, και σημαντική μείωση της παραγωγικότητας των σπόρων τους. Γενικά, τα συμπτώματα της τοξικότητας του μαγγανίου είναι παρόμοια με αυτά που παρουσιάζονται κατά την έλλειψη σιδήρου.

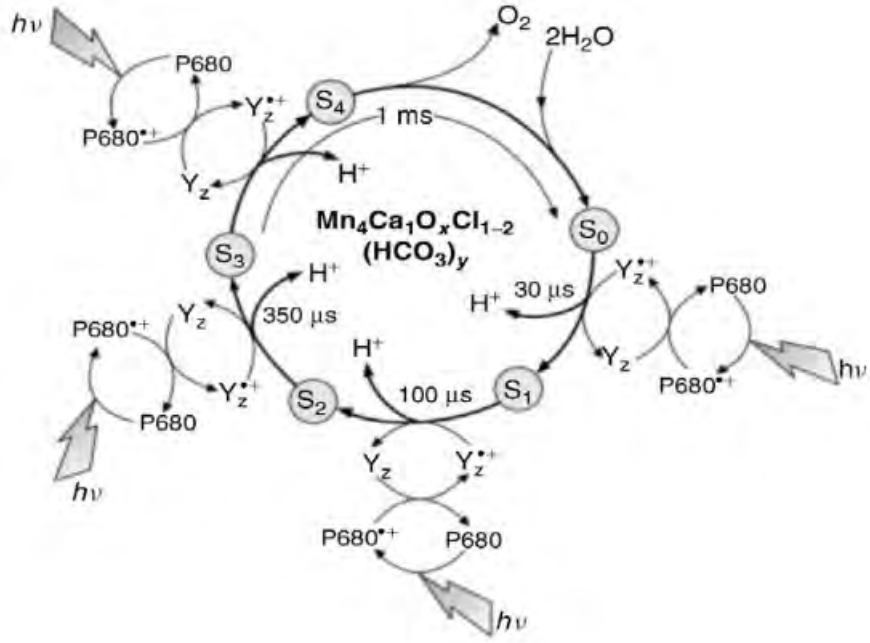
5.1.5 ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟ (Mo)

Ανάμεσα στα βασικά θρεπτικά στοιχεία που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών, το μολυβδαίνιο απαιτείται σε χαμηλότερες ποσότητες σε σύγκριση με άλλα στοιχεία. Συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα σε Mo στο φυτικό υλικό είναι λιγότερη από 1 ppm, ενώ φυτά που υποφέρουν από έλλειψη παρουσιάζουν περιεκτικότητα λιγότερη από 0,2 ppm. Στο έδαφος, το μολυβδαίνιο είναι κυρίως παρών σε μορφές $M_oO_4^{2-}$ και $HM_oO_5^{8}$. Το μολυβδαίνιο

έχει σημαντικό ρόλο στη μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη, καθώς αποτελεί συστατικό της νιτρικής αναγωγάσης.

5.1.5.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟΥ

Οι φυτικοί οργανισμοί εμφανίζουν διαφορετικά συμπτώματα όταν συσσωρεύεται μεγάλη ποσότητα μολυβδαινίου στον ιστό τους, τα οποία σχετίζονται με το είδος του φυτού. Ωστόσο, συνήθως παρατηρείται κιτρίνισμα, "κουλούριασμα" και, τελικά, κάψιμο των φύλλων του φυτού.



Εικόνα 35. Ρόλος μαγγανίου στη φωτοσυνθετική απελευθέρωση O2 στο φωτοσύστημα I.

Πηγή: https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

5.1.5.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟΥ ΜΕ ΑΛΛΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η απορρόφηση μολυβδαινίου επηρεάζεται από την ύπαρξη θειικών ενώσεων, καθώς παρατηρείται ανταγωνισμός μεταξύ των θειικών ενώσεων και των ενώσεων μολυβδαίνιου στις θέσεις πρόσληψης των ριζών του φυτού. Από την άλλη, η απορρόφηση μολυβδαινίου ενθαρρύνεται από την ύπαρξη φωσφορικών ενώσεων, οι οποίες αντικαθιστούν τις ενώσεις μολυβδαίνιου στις θέσεις ανταλλαγής ανιόντων στην επιφάνεια των εδαφικών κολλοειδών. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης του μολυβδαινίου στο εδαφικό διάλυμα και, επομένως, στην αύξηση της διαθεσιμότητάς του για τα φυτά. Επιπλέον, η παρουσία βαρέων

μετάλλων, όπως ο ψευδάργυρος και ο χαλκός, ελαττώνει τις πιθανότητες πρόσληψης μολυβδαινίου από τα φυτά.

5.1.6 ΧΑΛΚΟΣ (Cu)

Ο χαλκός απορροφάται από τα φυτά κυρίως σε μορφή Cu^{2+}. Η μέση συγκέντρωσή του στο έδαφος, συνήθως, δεν υπερβαίνει τα 10-20 ppm10 και σχηματίζει σύμπλοκες ενώσεις με οργανικές ουσίες μικρού μοριακού που παρουσιάζονται στο εδαφικό διάλυμα, όπως τα φουλβικά και χουμικά οξέα. Επομένως, ο χαλκός που βρίσκεται στο έδαφος σε μεγάλες ποσότητες δεν είναι άμεσα διαθέσιμος στα φυτά, μειώνοντας έτσι τη βιοδιαθεσιμότητά του.

Ο χαλκός είναι συστατικό μέρος αρκετών ενζύμων, με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του να υπάρχουν στους χλωροπλάστες (πάνω από το 70% του συνολικού χαλκού που βρίσκεται στα φύλλα). Όταν τα επίπεδα του χαλκού είναι χαμηλά στο φυτό, παρατηρείται καταστροφή των άκρων των ριζών και μαύρισμα των άκρων στα φύλλα.

5.1.6.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΧΑΛΚΟΥ

Τα φυτά δεν έχουν αυτορρύθμιση σχετικά με την ποσότητα χαλκού που απορροφούν, αλλά δένουν όση ποσότητα είναι διαθέσιμη. Όταν η συγκέντρωση φτάσει σε τοξικά επίπεδα, πρώτα εμφανίζονται καφέ περιοχές στα φύλλα και στη συνέχεια παρατηρείται διάλυση του ιστού. Συνήθως, η υπερβολική παρουσία χαλκού παρατηρείται σε ελαφρά αμμώδη, καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη, σε οξείς εδαφικούς παράγοντες ή σε περιοχές όπου ο χαλκός έχει συσσωρευτεί λόγω ψεκασμάτων που εφαρμόζονται στα φυτά.

5.1.7 ΚΑΔΜΙΟ (Cd)

Το κάδμιο δεν αποτελεί αναγκαίο στοιχείο για τις βιοχημικές διαδικασίες των φυτών. Στο έδαφος υπάρχει σε μορφές όπως το CdO, το CdCO3 και το Cd3(PO4)2. Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την κινητικότητα, τη διαλυτότητα και, κατ' επέκταση, τη διαθεσιμότητα του καδμίου είναι το pH του εδάφους. Σε οξείς χαρακτηριστικούς εδαφικούς παράγοντες, η διαλυτότητα και η διαθεσιμότητα του καδμίου ελέγχονται από οργανικές ουσίες και υδροξείδια αλουμινίου, σιδήρου και μαγγανίου που περιέχονται στο έδαφος. Σε αλκαλικούς χαρακτηριστικούς εδαφικούς παράγοντες (κυρίως σε ασβεστούχα), η διαλυτότητα των μειγμάτων όπως το CdCO3 ελέγχει την αύξηση της διαλυτότητας των παραγόμενων μειγμάτων. Τέλος, σε εδάφη με υψηλά επίπεδα χλωρίου, ενδέχεται να σχηματίζονται ευδιάλυτες ενώσεις χλωρίου-καδμίου, όπως το CdCl2, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητικότητα του καδμίου στο έδαφος.

5.1.7.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΔΜΙΟΥ

Η υπέρβαση των 10mg/kg ξηρής ουσίας καδμίου στους φυτικούς ιστούς μπορεί να έχει τοξικές επιπτώσεις. Οι κύριες ενδείξεις της τοξικής διαταραχής περιλαμβάνουν:

α) Καρούλια και χλώρωση των φύλλων.

β) Εμφάνιση κόκκινων και καστανών μεταχρωματισμών στα νεύρα και τα άκρα των φύλλων.

γ) Μειωμένη ανάπτυξη του φυτού με τα φύλλα του.

Αυτές οι ενδείξεις αποτελούν σημαντικά σημάδια δυνητικής τοξικότητας λόγω υπερβολικής έκθεσης σε κάδμιο.

5.1.8 ΜΟΛΥΒΔΟΣ (Pb)

Ο μόλυβδος είναι ένα στοιχείο που συνήθως εντοπίζεται σε περιοχές με υψηλό βαθμό ρύπανσης, κυρίως λόγω έντονης βιομηχανικής δραστηριότητας. Οι κύριες πηγές του περιλαμβάνουν τη χημική βιομηχανία, τις εκπομπές από τα αυτοκίνητα και την απελευθέρωση από παλαιότερα κτίρια που περιείχαν μόλυβδο στα χρώματα τους.

Ο μόλυβδος δεν είναι απαραίτητο στοιχείο για τη φυτική ανάπτυξη, και άρα η διαθεσιμότητά του και η κινητικότητά του στα φυτά είναι περιορισμένη. Η απορρόφησή του από τα φυτά εξαρτάται σημαντικά από το pH του εδάφους, μειώνοντας με την αύξηση του pH. Η κύρια μέθοδος απορρόφησής του είναι μέσω των ριζικών τριχών, όπου κατακρατείται από τα κυτταρικά τοιχώματα των ριζών. Αξίζει να τονισθεί , ότι η ικανότητα των φυτών να απορροφούν μόλυβδο μεγεθύνεται με την αύξηση της συγκέντρωσής του στα ίδια τα φυτά.

5.1.8.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ

Ο μόλυβδος αξιολογείται ως ένα από τα πλέον τοξικά στοιχεία για τις ρίζες των φυτών, λόγω της ικανότητάς τους να απορροφούν υψηλές συγκεντρώσεις Pb, αν και η μεταφορά του στα υπέργεια μέρη των φυτών είναι περιορισμένη. Τα τοξικά εφέ του μολύβδου στα φυτά εμφανίζονται τόσο στις ρίζες όσο και στα υπέργεια μέρη τους. Συγκεκριμένα, οι ρίζες μαυρίζουν, τα φύλλα μαζεύονται (δημιουργώντας μικροφυλλία) και εμφανίζουν κόκκινα στίγματα, ενώ γενικά αναστέλλεται η ανάπτυξη του φυτού. Μελέτες έχουν αποδείξει ότι ο μόλυβδος επηρεάζει τοξικά διαδικασίες όπως η φωτοσύνθεση, η κυτταρική μείωση και η υδρατμίαση των φυτών.

5.1.9 ΚΟΒΑΛΤΙΟ (Co)

Το κοβάλτιο είναι ένα στοιχείο που υπάρχει στα γήινα πετρώματα, με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις (100 έως 300 ppm) να εντοπίζονται συνήθως σε εδάφη πλούσια σε οργανικές ουσίες και μαγνήσιο. Η συγκέντρωση του κοβαλτίου στο ξηρό φυτικό υλικό ποικίλλει από 0,02 έως 0,5 ppm. Είναι απαραίτητο για τα αζωτοδεσμευτικά βακτήρια, συμπεριλαμβανομένων των κυανοβακτηρίων, και είναι αναγκαίο για τη διαδικασία αζωτοδέσμευσης στις ρίζες των φυτών. Η πρόσληψή του από τα φυτά γίνεται μέσω των ριζικών τριχών, όπου παραμένει στα κυτταρικά τοιχώματα των ριζών, με τον ακριβή μηχανισμό μεταφοράς να μην είναι ακόμη γνωστός. Οι ιδιότητες του εδάφους επηρεάζουν σημαντικά τη διαθεσιμότητά του, καθώς η παρουσία οργανικής ουσίας και το υψηλό pH την μειώνουν. Αξιοσημείωτο είναι ότι, όπως και με τον σίδηρο, δεν έχουν αναφερθεί τοξικές επιδράσεις από το κοβάλτιο σε υψηλές συγκεντρώσεις.

5.1.10 ΒΑΝΑΔΙΟ (V)

Διάφορες ερευνητικές εργασίες έχουν αναδείξει ότι το βανάδιο, σε χαμηλές συγκεντρώσεις, μπορεί να ευνοεί την ανάπτυξη μικροοργανισμών, ζώων και ανώτερων φυτών. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν αποδεικτικά στοιχεία για την απαραίτητη παρουσία του βαναδίου στα ανώτερα φυτά. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται ότι η παρουσία του βαναδίου ενισχύει την ανάπτυξη φυτών όπως το σπαράγγι, το ρύζι, το μαρούλι, το κριθάρι και τον αραβόσιτο. Επιπλέον, θεωρείται απαραίτητο στοιχείο για το πράσινο φύκος Scenedesmus. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ανάγκη των φυτών για βανάδιο φαίνεται να είναι μικρότερη από 2 ppb ξηρού βάρους.

5.1.11 ΝΙΚΕΛΙΟ (Ni)

Το νικέλιο απορροφάται εύκολα από τα περισσότερα φυτά σε μορφή Ni^{2+}. Η περιεκτικότητά του στα διάφορα φυτικά είδη κυμαίνεται συνήθως από 0,1 έως 1 ppm ξηρού βάρους. Αποτελεί απαραίτητο συστατικό της ουρεάσης, ενός ενζύμου που μετατρέπει την ουρία σε CO_2 και NH_4^+. Η ουρία παράγεται από την αποσύνθεση των ουρεϊδίων, των αζωτούχων ενώσεων που προκύπτουν από την ενσωμάτωση του αζώτου στα φυμάτια των ριζών των φυτών και την αποσύνθεση των πυρινών. Η έλλειψη νικελίου μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευση ουρίας, η οποία είναι τοξική για το φυτό. Επίσης, η έλλειψη νικελίου στους σπόρους των δημητριακών μπορεί να μειώσει τη βιωσιμότητα και τη βλάστησή τους.

5.1.11.1 ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

Υπάρχουν ελάχιστες πληροφορίες σχετικά με την τοξικότητα του νικελίου στα φυτά. Ωστόσο, σημειώνεται ότι στα κύτταρα, ο πρωτοπλάστης φαίνεται να παρουσιάζει υψηλότερη περιεκτικότητα σε νικέλιο σε σύγκριση με το κυτταρικό τοίχωμα. Σε

συγκεντρώσεις 15, 20, 25 και 35 μM Ni(NO3)2, καθώς και σε 3 mM Ca(NO3)2, το νικέλιο προκαλεί σημαντική μείωση στη διακλάδωση των ριζών των σπορόφυτων, κυρίως λόγω της αυξημένης συγκέντρωσής του στο περικύκλιο και την ενδοδερμίδα της ρίζας.

5.1.12 ΣΕΛΗΝΙΟ (Se)

Το σελήνιο αποτελεί ουσιώδες στοιχείο για τα ζώα, αλλά μπορεί να είναι τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις. Η συνολική συγκέντρωση του σεληνίου στα περισσότερα εδάφη κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 2 ppm. Σε ορισμένες εκτεταμένες περιοχές της Νότιας Αμερικής, καθώς και σε ημιξηρές περιοχές όπου υπάρχει βλάστηση, τα εδάφη μπορεί να παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα σεληνίου, το οποίο είναι τοξικό για τα εκτρεφόμενα ζώα.

5.1.13 ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ (Hg)

Οι συγκεντρώσεις του υδραργύρου στο έδαφος συνήθως είναι μικρότερες από 0,1 μg/g (<100 ppb). Σε οργανικά εδάφη, ωστόσο, έχουν παρατηρηθεί μεγαλύτερα επίπεδα υδραργύρου, τα οποία μπορούν να φτάσουν έως και 0,4 μg/g (400 ppb).

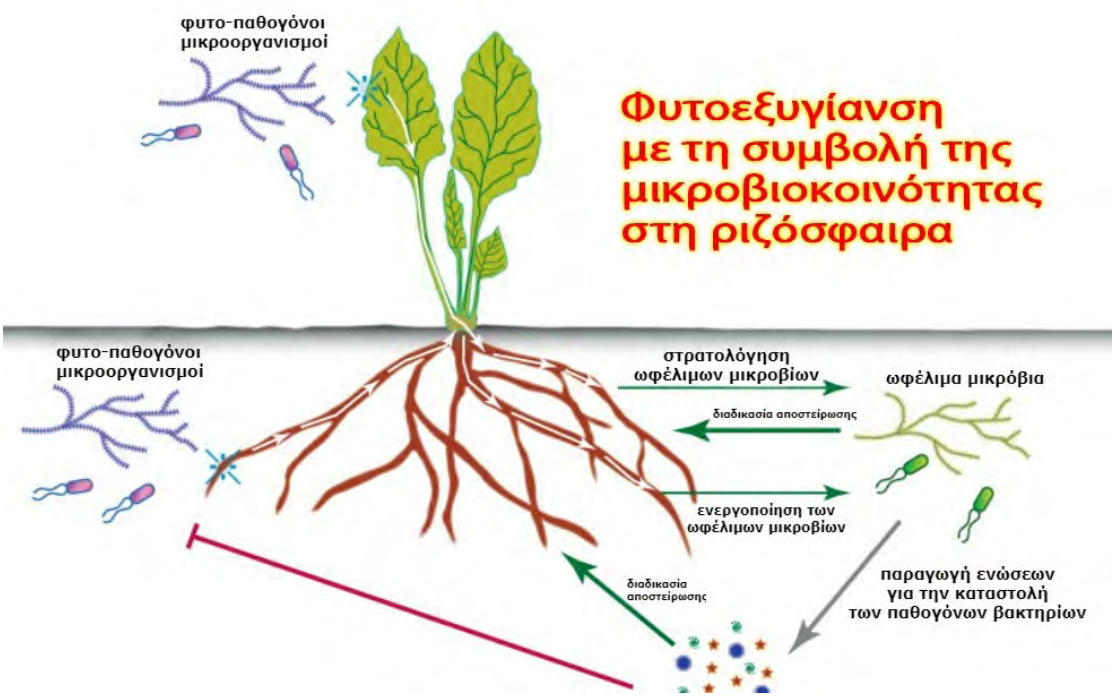
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

6.1 ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ

Ως φυτοεξυγίανση αναφέρεται η διαδικασία μέσω της οποίας τα φυτά έχουν τη δυνατότητα να απομακρύνουν τοξικές ενώσεις από το έδαφος, τα ύδατα και τον αέρα. Η λέξη «φυτοεξυγίανση» πηγάζει από το ελληνικό πρόθεμα "phyto", που σημαίνει «φυτό», και τη λατινική ρίζα της λέξης "remedium", που σημαίνει «αποκατάσταση ισορροπίας». Παρά το γεγονός ότι ο όρος είναι σχετικά νέος, η ιδέα της εφαρμογής της έχει ιστορικές ρίζες. Η πρώτη μορφή φυτοεξυγίανσης εμφανίστηκε στις αρχές του 17ου αιώνα στη Γερμανία. Από εκείνη την εποχή μέχρι σήμερα, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη και εφαρμογή διαφόρων τεχνικών, ακόμα και σε επίπεδο εμπορικής κλίμακας, για τη δευτερογενή επεξεργασία αστικών υδατικών αποβλήτων, μέσω της χρήσης φυτών.

Η μέθοδος της φυτοεξυγίανσης βασίζεται σε φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στα φυτά και περιλαμβάνουν την απορρόφηση νερού και χημικών ενώσεων και τον μεταβολισμό τους εντός του φυτού. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό ρυπασμένων εδαφών, ιζημάτων ή υδάτων, όπου τα φυτά μπορούν να απομακρύνουν οργανικούς ρύπους και να διαλύσουν ή να σταθεροποιήσουν ρύπους μετάλλων.



Εικόνα 36. Η διαδικασία της φυτοεξυγίανσης με τη συμβολή της μικροβιοκοινότητας στη ριζόσφαιρα του φυτού.

Πηγή: https://orchids-succulents.blogspot.com/p/mikroviokoinotita-rizosfaira.html

6.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΗΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

Η αποκατάσταση εδαφών στα οποία εκτιμάται ότι συσσωρεύονται σημαντικές ποσότητες οργανικών και ανόργανων ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα, μπορεί να επιτευχθεί μέσω πέντε διαφορετικών μηχανισμών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της φυτοεξυγίανσης.

Διαδικασία	ΜηχανισμόςΑπομάκρυνσης	Συστατικά Απομάκρυνσης
Φυτοεξαέρωση	Εξάτμιση από τα φύλλα των φυτών	Ανόργανες και Οργανικές Ενώσεις
Φυτοεξαγωγή	Υπερ-συσσώρευση	Ανόργανες Ενώσεις
Φυτοσταθεροποίηση	Συμπλοκοποίηση	Ανόργανες ενώσεις
Ριζοδιήθηση	Δέσμευση στις ρίζες	Ανόργανες και Οργανικές Ενώσεις
Ριζοαποδόμηση	Αποδόμηση στις ρίζες	Οργανικές Ενώσεις

Πίνακας 6. Διαφορετικοί μηχανισμοί που δύναται να εφαρμοστούν με την τεχνική της φυτοεξυγίανσης.

Πηγή:https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

6.2.1 ΦΥΤΟΕΞΑΕΡΩΣΗ

Η διαδικασία της φυτοεξαέρωσης ή φυτοεξάτμισης αποτελεί μια μέθοδο εκμετάλλευσης φυσικών μηχανισμών όπου τα φυτά αναλαμβάνουν την απορρόφηση τόσο πτητικών όσο και μη πτητικών ρύπων μέσω των ριζών, μετατρέποντάς τους σε μορφή πτητική και, στη συνέχεια, μεταφέροντάς τους στα φύλλα των φυτών, όπου αυτοί εξατμίζονται στην ατμόσφαιρα. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός εξυγίανσης έχει εφαρμοστεί κυρίως για τη μετατροπή του ισχυρά τοξικού ιόντος υδραργύρου στη λιγότερο τοξική μορφή του στοιχειακού υδραργύρου. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η ανακύκλωση του υδραργύρου πίσω στο έδαφος λόγω της βροχόπτωσης. Επομένως, επειδή η φυτοεξάτμιση συνεπάγεται τη μεταφορά ρύπων στην ατμόσφαιρα, απαιτείται η αξιολόγηση του πιθανού κινδύνου από αυτήν τη μεταφορά στα οικοσυστήματα. Πρόσφατες μελέτες για τα στοιχεία του υδραργύρου (Hg) και του σεληνίου (Se) αναφέρουν ότι η διάλυση και η διασπορά αυτών των στοιχείων στην ατμόσφαιρα παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα να μην αποτελούν κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Στα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής συγκαταλέγεται το γεγονός ότι δεν απαιτείται η συγκομιδή του φυτικού υλικού για την εξυγίανση των εδαφών και των υπόγειων νερών.

6.2.2 ΦΥΤΟΕΞΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία της φυτοεξαγωγής συμπεριλαμβάνει τους μηχανισμούς που εμπλέκονται στην απορρόφηση, αποθήκευση και μεταφορά των μετάλλων από το έδαφος στα υπέργεια μέρη των φυτών. Η διαδικασία αυτή, χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την αποκατάσταση εδαφών με σχετικά μειωμένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Η επιλογή των φυτών για την αποκατάσταση κρίνεται άμεσα από το είδος των μετάλλων και τις συνθήκες της περιοχής. Ύστερα από αρκετές εβδομάδες ή μήνες ανάπτυξης, τα φυτά μαζεύονται και είτε φλέγονται είτε εφαρμόζονται ως μετάλλευμα. Η μέθοδος συνεχίζεται μέχρι τα επίπεδα των ρύπων στο έδαφος να πέσουν κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια.

Τα μέταλλα στο έδαφος βρίσκονται κυρίως σε μορφή συμπλοκών με τα κολλοειδή του εδάφους, είτε ως αδιάλυτες είτε ως διαλυτές ενώσεις με την οργανική ύλη. Τα μέταλλα που είναι διαθέσιμα για απορρόφηση από τα φυτά είναι αυτά που υπάρχουν ως διαλυτά συστατικά στα εδαφικά διαλύματα ή εκείνα που μπορούν εύκολα να αποσπαστούν ή να διαλυθούν από τα συστατικά του εδάφους. Η διαλυτότητα των μετάλλων επηρεάζεται από διάφορες φυσικοχημικές παραμέτρους, όπως ο βαθμός σχηματισμού συμπλοκών με διαλυτά ligands, το είδος και η πυκνότητα του φορτίου των εδαφικών κολλοειδών, η ενεργή επιφάνεια αντίδρασης, και το pH του εδάφους.

Η μέθοδος της φυτοεξαγωγής εξαρτάται από συγκεκριμένα είδη φυτών, τα οποία αποκαλούνται υπερσυσσωρευτές ή "hyperaccumulators", και τα οποία διακρίνονται για την ικανότητά τους να απορροφούν τεράστιες ποσότητες μετάλλων σε σχέση με άλλα φυτά. Επομένως, η αποτελεσματικότητα και η επιτυχής εφαρμογή αυτής της μεθόδου βασίζονται στη δυνατότητα των φυτών να συγκεντρώνουν αυξημένες ποσότητες μετάλλων.

Ένα φυτό υπερσυσσωρευτής διακρίνεται για την ικανότητά του να απορροφά ποσότητες μετάλλου έως και 100 φορές μεγαλύτερες σε σύγκριση με ένα κοινό φυτό. Η υπερβολική συσσώρευση μετάλλων είναι σπάνια στη φύση. Μέχρι σήμερα, έχουν εντοπιστεί περίπου 400 φυτά που μπορούν να συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες μετάλλων, αντιπροσωπεύοντας μόλις το 0.2% όλων των γνωστών φυτικών ειδών.

Συμπεραίνεται από την έρευνα, ότι τα περισσότερα φυτά υπερσυσσωρευτές μετάλλων εντοπίζονται σε τροπικά εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα, αποδεικνύοντας ότι η υπερσυσσώρευση είναι μια σημαντική οικοφυσιολογική προσαρμογή στην έντονη παρουσία μετάλλων και μια ένδειξη της αντοχής των φυτών σε αυτές τις υψηλές συγκεντρώσεις. Η τεχνική της φυτοεξαγωγής επιτρέπει τη μόνιμη απομάκρυνση των ρυπαντών, κυρίως των βαρέων μετάλλων, από το έδαφος, παρέχοντας ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου, καθώς συχνά οι συσσωρευμένοι ρυπαντές μπορούν να ανακτηθούν από τη ρυπασμένη βιομάζα.

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των υπερσυσσωρευτών περιορίζεται από τη χαμηλή τους ανάπτυξη, το αβαθές ριζικό σύστημα και τη μικρή παραγωγή βιομάζας. Επιπλέον, η φυτοεξαγωγή δεν είναι εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις θρεπτικών ιχνοστοιχείων και οργανικών

ρυπαντών, καθώς μπορεί να αλλοιωθούν, να μεταλλαχθούν ή να αεριοποιηθούν από το φυτό, εμποδίζοντας τη συσσώρευσή τους.

Για να συμπεριληφθεί ένα φυτό στην κατηγορία των υπερσυσσωρευτών, πρέπει να εκπληρώνει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως η ανθεκτικότητα σε ψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων, το πλούσιο ριζικό σύστημα, ο σύντομος χρόνος ανάπτυξης, η μεγάλη παραγωγή βιομάζας και η δυνατότητα δέσμευσης μετάλλων μέχρι τη συγκομιδή. Πρόσφατες μελέτες έχουν επισημάνει ότι γενότυποι φυτών, όπως Nicotiana, Salix, Populus, Brassica, εμφανίζουν υψηλή ικανότητα δέσμευσης και ανθεκτικότητα στα βαρέα μέταλλα, προτείνοντας τη χρήση τους ως εναλλακτικών φυτών υπερσυσσωρευτών.

Η διαχείριση της επιβλαβούς βιομάζας μετά τη φυτοεξαγωγή είναι ένα θέμα πολύ σημαντικό και απαιτεί ειδική προσοχή. Ο φυτικός ιστός που είναι πλούσιος σε μέταλλα απαιτεί ιδιαίτερη διαχείριση, αποθήκευση και διάθεση, προκειμένου να αποφευχθούν οι κίνδυνοι ρύπανσης του περιβάλλοντος. Μεταξύ των προτεινόμενων μεθόδων διαχείρισης αναφέρονται η συμπίεση και η κομποστοποίηση του φυτικού ιστού. Ως εναλλακτική λύση προτείνεται από την ερευνητική ομάδα του Bridgewater η πυρόλυση του φυτικού ιστού, μια διαδικασία όπου η αποσύνθεση του φυτού πραγματοποιείται σε αναερόβιες συνθήκες, χωρίς εκπομπές στην ατμόσφαιρα.

Όσον αφορά το κόστος της εφαρμογής της τεχνικής της φυτοεξαγωγής, οι γνώσεις παραμένουν περιορισμένες, καθώς δεν έχει εφαρμοστεί ευρέως και δεν έχει αξιολογηθεί η οικονομική της επίδραση. Ωστόσο, διάφορες ερευνητικές ομάδες έχουν προτείνει ότι μπορεί να υπάρχει σημαντικό οικονομικό όφελος αν η φυτοεξαγωγή συνδυαστεί με την παραγωγή ενέργειας (βιοενέργειας).

6.2.2.1 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΦΥΤΟΕΞΑΓΩΓΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ

Η προσθήκη χημικών ενώσεων στο έδαφος αποδεικνύεται ότι βελτιώνει σημαντικά την απορρόφηση των μετάλλων από τα φυτά. Σε πολλές περιπτώσεις, η απορρόφηση των μετάλλων από τις ρίζες των φυτών πραγματοποιείται στο εδαφικό διάλυμα. Γενικά, τα μέταλλα του εδάφους υπάρχουν είτε σε μορφή ευδιάλυτων ενώσεων, είτε ως δυσδιάλυτες ενώσεις που καθιζάνουν. Η δέσμευση και η ακινητοποίηση των μετάλλων υπό τη μορφή δυσδιάλυτων ενώσεων στο πλέγμα του εδάφους περιορίζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της τεχνικής της φυτοεξαγωγής, καθώς η απορρόφησή τους από τα φυτά είναι αδύνατη. Η προσθήκη χημικών υποκαταστατών οδηγεί στο σχηματισμό χημικών ενώσεων των μετάλλων, αποτρέποντας την καθίζησή τους από τα συστατικά του εδάφους και διατηρώντας τη βιοδιαθεσιμότητά τους, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα απορρόφησής τους από τα φυτά. Ενώσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν και έχουν αποδειχθεί ότι ενισχύουν σημαντικά την φυτοεξαγωγή είναι το EDTA (ethylene diamine tetra acetic acid) και το EDDS (ethylene diamine disuccinate), μαζί με άλλες

ενώσεις όπως CDTA, HEIDA, HEDTA, DTPA, EGTA, EDDHA, καθώς και οργανικά οξέα μικρού μοριακού βάρους.

6.2.3 ΦΥΤΟΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ

Η φυτοσταθεροποίηση περιλαμβάνει μηχανισμούς αδρανοποίησης και απομόνωσης του εκάστοτε ρυπαντή, με σκοπό την παρεμπόδιση της μετανάστευσής του από το έδαφος στο υπόγειο νερό ή στην ατμόσφαιρα. Η φυτοσταθεροποίηση στηρίζεται στην ικανότητα των φυτών να εκκρίνουν ουσίες μέσω των ριζών τους, οι οποίες διευκολύνουν μηχανισμούς δέσμευσης των ρυπαντών στα χουμικά συστατικά του εδάφους, στα κυτταρικά τοιχώματα των ριζών και στα εδαφικά σωματίδια. Τα φυτά που χρησιμοποιούνται έχουν τη δυνατότητα να σταθεροποιούν τα μέταλλα στην επιφάνεια του εδάφους, εμποδίζοντας τη διάβρωση και την εισχώρησή τους στα εσωτερικά στρώματα, και κατ' επέκταση την εισαγωγή τους στα υπόγεια νερά και την τροφική αλυσίδα του ανθρώπου.

Η φυτοσταθεροποίηση εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις όπου οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο έδαφος είναι τόσο υψηλές που η απομάκρυνσή τις είναι πρακτικά αδύνατη ή όταν ο απαιτούμενος χρόνος για την απομάκρυνση δεν είναι ρεαλιστικός. Η φυτοσταθεροποίηση αξιοποιείται σε εδάφη όπου η φυτοεξαγωγή δεν είναι εφαρμόσιμη. Χρησιμοποιώντας την ικανότητα ορισμένων φυτικών ειδών να αντέχουν σε υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων, τα μέταλλα σταθεροποιούνται στο έδαφος, αν και δεν απομακρύνονται. Η αποτελεσματική εφαρμογή τις φυτοσταθεροποίησης βασίζεται σε δύο κύριους παράγοντες: α) την κατάλληλη επιλογή του φυτικού είδους και β) τις βελτιωτικές ουσίες που προστίθενται στο έδαφος (amendments).

6.2.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΥΤΙΚΟΥ ΕΙΔΟΥΣ

Τα φυτά που χρησιμοποιούνται για τη φυτοσταθεροποίηση έχουν χαμηλό συντελεστή μεταφοράς ουσιών από τις ρίζες στο βλαστό και αποκαλούνται μεταλλοαποκλιστές. Ο ρόλος αυτών των φυτών είναι κρίσιμος, καθώς το πυκνό ριζικό τους σύστημα σταθεροποιεί το έδαφος, περιορίζοντας τη διάβρωση και συνεπώς την εισροή μετάλλων στα εσωτερικά στρώματα του εδάφους και στα υπόγεια νερά. Επιπλέον, αυτά τα φυτά λειτουργούν ως προστατευτικό στρώμα για το έδαφος, μειώνοντας την έκθεση των ανθρώπων σε αυτό και τις επιπτώσεις της βροχής.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που απαιτείται να έχουν τα φυτά για να χρησιμοποιηθούν στη φυτοσταθεροποίηση περιλαμβάνουν:

1. Ανθεκτικότητα στις συνθήκες του εδάφους όπου θα εφαρμοστεί η φυτοσταθεροποίηση.
2. Γρήγορη ανάπτυξη, ώστε να απομονώνεται το έδαφος από το περιβάλλον και να δημιουργείται ένα στρώμα επικάλυψης.
3. Πυκνό ριζικό σύστημα.

4. Ικανοποιητική ανάπτυξη και διατήρηση στις συνθήκες του εδάφους.
7. Μεγάλη διάρκεια ζωής ή ικανότητα εύκολου πολλαπλασιασμού.

6.2.3.2 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ

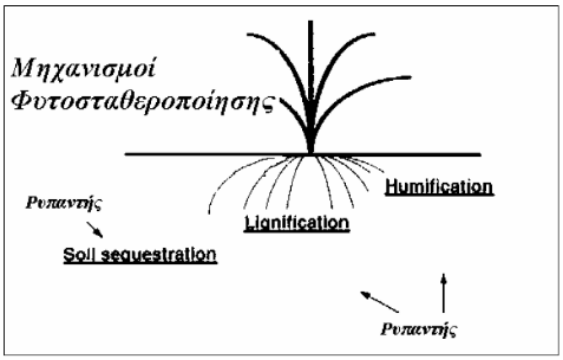
Η προσθήκη βελτιωτικών ουσιών στο έδαφος ενισχύει την αδρανοποίηση των μετάλλων, σχηματίζοντας δυσδιάλυτα σύμπλοκα που εμποδίζουν την απορρόφησή τους και μειώνουν τη βιολογική τους δραστικότητα. Ιδανικά βελτιωτικά είναι αυτά που είναι εύκολα στη χρήση, ασφαλή για τον χρήστη, μη τοξικά για τα φυτά, εύκολα στην παραγωγή και με χαμηλό κόστος. Σημαντική παράμετρος για την επιλογή τους είναι η ικανότητα σταθεροποίησης των μετάλλων, μειώνοντας τη διείσδυσή τους στο έδαφος και προστατεύοντας τα υπόγεια νερά. Έρευνα έδειξε ότι η προσθήκη οργανικής ύλης, όπως κοπριά και κομπόστα, μειώνει σημαντικά τη διείσδυση του ψευδαργύρου στο έδαφος, φτάνοντας σταθεροποίηση έως και 80% σε συνδυασμό με τη δράση των φυτών.

Μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς διάφορες ενώσεις ως βελτιωτικά του εδάφους για την ενίσχυση της φυτοσταθεροποίησης. Οι κυριότερες είναι:

1. Ενώσεις του ασβεστίου, οι οποίες είναι ιδιαίτερα κατάλληλες.
2. Αδιάλυτες και ευδιάλυτες ενώσεις του φωσφόρου, που ακινητοποιούν τα μέταλλα στο έδαφος και μειώνουν τη βιοδιαθεσιμότητά τους μέσω διαφόρων διαδικασιών όπως η δέσμευση και η καθίζηση των μετάλλων ως μέταλλο-φωσφορικές ενώσεις.
3. Η προσθήκη οργανικής ύλης, όπως κοπριά και κομπόστα, είναι ιδανική για τη σταθεροποίηση των μετάλλων. Η οργανική ύλη αυξάνει την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) και αλλάζει το pH του εδάφους, επηρεάζοντας έτσι τη διαθεσιμότητα των μετάλλων.

Πρόσφατες έρευνες εξετάζουν νέες ή βελτιωμένες βελτιωτικές ουσίες, όπως κυκλονικές τέφρες, ανθρακικό ασβέστιο, ζεόλιθους, σφαίρες από σίδηρο, beringite, λεοναρδίτη και κόκκινη ιλύ, για την αυξημένη ικανότητα σταθεροποίησης των μετάλλων.

Συμπερασματικά, η φυτοσταθεροποίηση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική αποκατάστασης εδαφών, αλλά απαιτείται προσεκτική μελέτη για την εφαρμογή της, καθώς η αποτελεσματικότητα της σταθεροποίησης των μετάλλων μπορεί να ποικίλει. Η επιλογή του κατάλληλου φυτικού είδους είναι κρίσιμη, καθώς σε πολλές περιπτώσεις τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν ικανά να σταθεροποιήσουν τα μέταλλα.



Εικόνα 37. Μηχανισμοί που εμπλέκονται στον μηχανισμό της φυτοσταθεροποίησης

Πηγή:https://scientific-journal-articles.org/greek/free-online-journals/physics/physics-articles/sachinidis-lead/sachinidis-lead.htm

6.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

Η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης είναι μια πολύ υποσχόμενη μέθοδος για την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων από το έδαφος και τα υπόγεια νερά. Όπως όλες οι προηγούμενες μέθοδοι, έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Παρακάτω γίνεται μια πρώτη σύγκριση της φυτοεξυγίανσης με τις κοινές μεθόδους περιβαλλοντικής εξυγίανσης.

6.3.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΜΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

1) Μετατρέπει τους ρύπους σε απλούστερες και λιγότερο τοξικές ενώσεις.
2) Η επεξεργασία γίνεται επιτόπου χωρίς να προκαλούνται περιβαλλοντικές διαταραχές. Η φυτοεξυγίανση είναι η λιγότερο καταστρεπτική μέθοδος αποκατάστασης εδαφών, χρησιμοποιώντας φυσικούς οργανισμούς και διατηρώντας την φυσική κατάσταση του περιβάλλοντος, σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές.
3) Αντιμετωπίζει λιγότερες αντιδράσεις από τις τοπικές κοινωνίες, καθώς δεν απαιτείται εκσκαφή και βαριά μηχανολογικός εξοπλισμός, καθιστώντας την περισσότερο αποδεκτή.
4) Η φυτοεξυγίανση επιτρέπει την ανάκτηση των βαρέων μετάλλων που συσσωρεύονται στη φυτική βιομάζα, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα πολύτιμα μέταλλα, σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές.
5) Είναι πιο οικονομική και βιώσιμη μέθοδος, χρησιμοποιώντας τον ίδιο μηχανολογικό εξοπλισμό και εφόδια με τη γεωργία, ενώ είναι λιγότερο αποδιοργανωτική στο περιβάλλον.
6) Μπορεί να εξυγιάνει περιοχές με περισσότερους από έναν τύπο ρύπων, το οποίο είναι ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους.

7) Δεν απαιτείται εκσκαφή και μεταφορά των ρυπασμένων υλικών, περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο διάδοσης της ρύπανσης σε γειτονικές περιοχές.

6.3.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

1) Δυσκολία στην πρόβλεψη της αποτελεσματικότητας, καθώς η απορρόφηση βαρέων μετάλλων από τα φυτά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, καθιστώντας δύσκολη την εκτίμηση της απόδοσης της φυτοεξυγίανσης εκ των προτέρων.
2) Περιορισμένη εφαρμογή σε βάθος ρύπανσης, καθώς η φυτοεξυγίανση μπορεί να αντιμετωπίσει ρύπους μέχρι περίπου ένα μέτρο βάθος στο έδαφος και τρία μέτρα στο υπόγειο νερό.
3) Απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την πλήρη απομάκρυνση των ρύπων, λόγω του αργού ρυθμού ανάπτυξης των φυτών και της μικρής βιομάζας τους.
4) Εξάρτηση από τις φυσικοχημικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής, όπως το κλίμα, η γεωλογία, το υψόμετρο και η θερμοκρασία, που επηρεάζουν τις συνθήκες ανάπτυξης των φυτών.
5) Κίνδυνος διάλυσης των ρύπων, που μπορεί να οδηγήσει στη διήθησή τους στα εσωτερικά στρώματα του εδάφους και στους υπόγειους υδροφορείς, προκαλώντας σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
6) Απειλή βιοσυσσώρευσης ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα, από τα φυτά στους ζώα που καταναλώνουν αυτά τα φυτά, μεταφέροντας έτσι τους ρύπους στην τροφική αλυσίδα.

6.4 ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ

Εκτός από τη φυτοεξυγίανση, παρατηρείται σήμερα η ανάπτυξη της τεχνικής της βιοεξυγίανσης, μιας διαδικασίας που βασίζεται στη δράση μικροοργανισμών. Η βιοεξυγίανση αφορά την απορρόφηση και συμπλοκοποίηση των μετάλλων σε ζωντανή ή νεκρή βιομάζα. Παρόλο που πολλές ερευνητικές ομάδες εξετάζουν την εφαρμογή μικροοργανισμών για την εξάλειψη οργανικών ρυπαντών, οι μελέτες που ασχολούνται με την αφαίρεση βαρέων μετάλλων εξακολουθούν να είναι λίγες.

Η μέθοδος της βιοεξυγίανσης αποτελεί μια μέθοδο έμμεσης απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων από το έδαφος. Οι μικροοργανισμοί που εφαρμόζονται έχουν την ικανότητα να απορροφούν τα βαρέα μέταλλα και να τα μετατρέπουν σε μορφές που είναι λιγότερο δυσδιάλυτες ή ακόμα και σε αέρια κατάσταση με την αλλαγή της οξειδωτικής τους κατάστασης. Ωστόσο, αυτή η ικανότητα μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή της οργανικής ύλης, με αποτέλεσμα τη μετατροπή της σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Εξαιτίας αυτού του λόγου, η βιοεξυγίανση δεν εφαρμόζεται απευθείας στο έδαφος, αλλά κυρίως σε λύματα και νερά πριν αυτά καταλήξουν στο έδαφος. Η απορρόφηση των μετάλλων από τη

μικροβιακή βιομάζα, οδηγεί στην απομάκρυνση των τοξικών ουσιών από τα λύματα και τα νερά, καθώς και τον περιορισμό της μετανάστευσής τους.

6.4.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ

Οι μικροοργανισμοί που εμπλέκονται στη βιοεξυγίανση έχουν τη δυνατότητα να απομακρύνουν ευρέως διαδεδομένα μέταλλα από το περιβάλλον, πιο συγκεκριμένα από βιομηχανικά και αστικά απόβλητα, απλοποιώντας την οξείδωσή τους. Ο στόχος της τεχνικής αυτής είναι η μετατροπή των ευδιάλυτων μορφών μετάλλων σε μορφές που είναι λιγότερο δυσδιάλυτες. Οι μικροοργανισμοί που επιλέγονται δρουν καταλυτικά, μειώνοντας την οξειδωτική κατάσταση των μετάλλων, με συνέπεια να καθίζουν ή να εξατμίζονται και να συλλέγονται και να απομακρύνονται από την ιλύ. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότεροι μικροοργανισμοί εμφανίζουν μεγαλύτερη ικανότητα αλλαγής της οξειδωτικής κατάστασης ορισμένων στοιχείων όπως το Fe3+ και το S0, χρησιμοποιώντας τα ως τελικούς αποδέκτες ηλεκτρονίων. Προηγούμενοι υπολογισμοί έχουν δείξει ότι η βιοεξυγίανση είναι οικονομικά ανταγωνιστική σε σχέση με τις συνήθεις χημικές μεθόδους απομάκρυνσης ρύπων και βαρέων μετάλλων από τα απόβλητα. Για να ενισχυθεί η εφαρμοσιμότητά της, ένας πιθανός δρόμος είναι η εύρεση μικροοργανισμών με ακόμα μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης των μετάλλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εντατική ανθρώπινη και βιομηχανική δραστηριότητα των τελευταίων δεκαετιών είναι οι κύριες αιτίες της ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων υδάτων από βαρέα μέταλλα. Αυτά τα μέταλλα, απαραίτητα για την παραγωγή πολλών σύγχρονων προϊόντων, έχουν την τάση να συσσωρεύονται στους οργανισμούς, προκαλώντας σοβαρά προβλήματα υγείας και θανάτους. Η ρύπανση του εδάφους από βαρέα μέταλλα είναι μία από τις πιο σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις για τις ανεπτυγμένες κοινωνίες.

Η πρόοδος της Αναλυτικής Χημείας έχει συμβάλει σημαντικά στη διάγνωση της ρύπανσης του εδάφους. Κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τη Φασματοσκοπία Ατομικής Απορρόφησης (Φ.Α.Α), την Ιοντική Χρωματογραφία, τη Φασματομετρία Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος (ICP-MS) και τη Τεχνική Φθορισμού Ακτίνων Χ (XRF). Αυτές οι τεχνικές είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές λόγω του χαμηλού ορίου ανίχνευσης, της επιλεκτικότητας, της ευκολίας στη χρήση και της γενικότερης ευελιξίας τους, καθιστώντας τις βασικά εργαλεία για την ποσοτική και ποιοτική ανάλυση δειγμάτων που περιέχουν βαρέα μέταλλα. Στη συνέχεια, παρέχεται μια συνοπτική περιγραφή αυτών των τεχνικών, συμπεριλαμβανομένης της αρχής λειτουργίας τους, των επιμέρους τμημάτων τους, καθώς και των κύριων πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους.

Η παρούσα εργασία αναφέρει τις κύριες πηγές ρύπανσης του εδάφους από βαρέα μέταλλα, οι οποίες μπορεί να είναι άμεσες ή έμμεσες. Άμεση ρύπανση προκαλείται από την απευθείας απόρριψη αποβλήτων στο έδαφος. Έμμεσες πηγές ρύπανσης περιλαμβάνουν τη μεταφορά βαρέων μετάλλων μέσω ατμοσφαιρικών καταθέσεων ή υπόγειων υδάτων κατά την αλληλεπίδρασή τους με το έδαφος. Επιπλέον, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων στο έδαφος περιλαμβάνουν το pH, την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, την παρουσία οργανικής ουσίας και τις κλιματολογικές συνθήκες. Αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την κινητικότητα και τη διαθεσιμότητα των ρυπογόνων ενώσεων στα χερσαία οικοσυστήματα και επηρεάζουν το αν και πώς θα εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα.

Ορισμένα βαρέα μέταλλα είναι χρήσιμα για την εξέλιξη των φυτών. Στοιχεία όπως ο σίδηρος (Fe), ο χαλκός (Cu), το μολυβδαίνιο (Mo), το βόριο (B), ο ψευδάργυρος (Zn) και το μαγγάνιο (Mn) είναι ιδανικά σε μικρές ποσότητες και γι' αυτό ονομάζονται ιχνοστοιχεία. Ωστόσο, όταν αυτά τα μέταλλα συγκεντρώνονται σε αυξημένες ποσότητες στους φυτικούς ιστούς, μπορούν να γίνουν τοξικά και να προκαλέσουν ακόμα και τον θάνατο των φυτών. Τα βαρέα μέταλλα που υπάρχουν στο έδαφος απορροφώνται από τα φυτά μέσω των ριζών και από την ατμόσφαιρα μέσω των φύλλων. Ένα τμήμα της εργασίας επικεντρώνεται στους μηχανισμούς απορρόφησης και στα ανατομικά χαρακτηριστικά των φυτών που διευκολύνουν αυτή τη διαδικασία. Αυτή η γνώση είναι απαραίτητη για την κατανόηση των μηχανισμών της φυτοεξυγίανσης.

Οι κυβερνήσεις σήμερα εστιάζουν κυρίως στη διαχείριση των αποβλήτων παρά στην άμεση αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών, τα οποία λειτουργούν ως τελικοί αποδέκτες της ρύπανσης. Η φυτοεξυγίανση είναι μια καινοτόμος τεχνική αποκατάστασης εδαφών που αξιοποιεί τις φυσικές διαδικασίες των φυτών για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από το έδαφος.

Η αποκατάσταση μέσω φυτοεξυγίανσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με πέντε κύριους μηχανισμούς:

1. **Φυτοεξαγωγή**: Χρήση φυτών που απορροφούν και συγκεντρώνουν μέταλλα στα φύλλα και τους βλαστούς τους.
2. **Φυτοσταθεροποίηση**: Χρήση φυτών που σταθεροποιούν τα μέταλλα στο έδαφος, μειώνοντας τη μετακίνηση και τη βιοδιαθεσιμότητά τους.
3. **Φυτοεξάτμιση**: Διευκόλυνση της μετατροπής των μετάλλων σε αέρια μορφή μέσω των φυτών.
4. **Ριζοδιήθηση:** Απομάκρυνση των μετάλλων μέσω του συστήματος ριζών των φυτών.
5. **Ριζοαποδόμηση**: Διάσπαση των μετάλλων με τη βοήθεια των ριζών.

Φυτά που μπορούν να απορροφήσουν μεγάλα ποσά μετάλλων, γνωστά ως υπερσυσσωρευτές, είναι ιδανικά για τη φυτοεξαγωγή. Αντίθετα, φυτά που απορροφούν λίγα μέταλλα αλλά τα σταθεροποιούν αποτελεσματικά στο έδαφος, γνωστά ως μεταλλοαποκλιστές, είναι κατάλληλα για τη φυτοσταθεροποίηση.

Η φυτοεξυγίανση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών τεχνικών αποκατάστασης εδαφών. Κύρια σημεία που πρέπει να επισημανθούν περιλαμβάνουν:

- **Χαμηλό κόστος**: Η φυτοεξυγίανση είναι οικονομικά αποδοτική σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.
- **Απλότητα εφαρμογής**: Η διαδικασία είναι σχετικά εύκολη στην εκτέλεση και μπορεί να συνδυαστεί με άλλες τεχνικές, όπως η βιοεξυγίανση.

Ωστόσο, υπάρχουν και σημαντικά εμπόδια που περιορίζουν την ευρεία εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης:

- **Χρονική διάρκεια**: Η διαδικασία απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για να μειωθούν οι ρύποι σε αποδεκτά επίπεδα, εξαιτίας του αργού ρυθμού με τον οποίο αναπτύσσονται τα φυτά και της περιορισμένης βιομάζας τους.
- **Δυσχέρεια εκτίμησης**: Η αποτελεσματικότητα της φυτοεξυγίανσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, γεγονός που καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη της απόδοσης.
- **Περιβαλλοντικές συνθήκες**: Η επιτυχία της μεθόδου επηρεάζεται από τις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως το κλίμα, η γεωλογία, το υψόμετρο και η θερμοκρασία.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1) Αλιφραγκής, Δ. (2008). Το Έδαφος: Γένεση, Ιδιότητες, Ταξινόμηση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αϊβαζίδη.

2) https://repository.kallipos.gr/

3) Εδαφική Ρύπανση, Παρουσίαση Μαθήματος Κώστας Μαγκανάς, Επιβλέπων Μάρκος Μποναζούντας, Αθήνα 2004

4) https://elocus.lib.uoc.gr//dlib/9/8/1/attached-metadata-dlib-35867e23c4875fe047c60288c9bf5022_1279089600/master_deinaki_PDF_TELIKO.pdf

5) https://www.eap.gr/en/

6) https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/40879/%CE%91%CE%A1%CE%98%CE%A1%CE%9F_%CE%9F%CE%A1%CE%A5%CE%9A%CE%A4%CE%9F%CE%A3_%CE%A0%CE%9B%CE%9F%CE%A5%CE%A4%CE%9F%CE%A3.pdf?sequence=2

7) http://ikee.lib.auth.gr/record/269916/files/GRI-2015-14698.pdf

8) Κωνσταντακοπούλου, Δήμητρα. "Διαφήμιση στο διαδίκτυο : προστασία του καταναλωτή", University of Piraeus (Greece), 2023

9) Βικιπαίδεια (wikipedia.org)

10) Αριστοτελειο Πανεπιστημιο Θεσσαλονικης - ΙΚΕΕ - ΙΚΕΕ / Αριστοτελειο Πανεπιστημιο Θεσσαλονικης - Βιβλιοθήκη (auth.gr)

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1) https://www.colorado.edu/admissions/visit

2) Tsiourlis, G.M. (1990). Phytomasse, productivité primaire et biogéochimie des écosystèmes méditerranéens phrygana et maquis (île de Naxos, Grèce) (Αδημοσίευτη Διδακτορική Διατριβή). Université Libre de Bruxelles, p. 170.

3) Anderson, P., J.C Elliot, C.R. Thomas, and F. Vanlangevelde. Study of diffusion coefficient in multicomponent solution using the Daresbury Synchrotron X-ray fluorescence microprobe. X-ray spectrum. 1993

4) https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_fluorescence

5) http://biotech.aua.gr/EPEAEK/site_Biotech/gewp_biot/Phys_Elem/boron/AB_left.htm

6) Molybdenum in Agriculture, Edited by Umesh C. Gupta, Cambridge University Press, 1997.

7) Zampetakis A. l , Manios v.t & Karatzas george, innovative methods for the remediation of polluted soils and groundwater. the case of phytoremediation.

8) https://en.wikipedia.org/wiki/Phytoremediation

9) https://clu-in.org/products/intern/phytotce.htm

10) Phytoremediation: A new technology gets ready to bloom. By Jim Bishop in Environmental Solutions Magazine, May/June 1997.