



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΦΩΝ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ - ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ  
ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**

Γεωργία Κεραμίδα

Επιβλέπων: Νικόλαος Μάντζος

Άρτα, Ιούνιος, 2021

**SOILS POLLUTION BY HEAVY METALS – IMPACT ON THE  
ENVIRONMENT AND PHYTOREMEDIATION**

## **Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή**

Άρτα, 6 Απριλίου 2021

### **ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

1. Επιβλέπων καθηγητής

Νικόλαος Μάντζος

Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό

2. Μέλος επιτροπής

Δημήτριος Κύρκας

Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό

3. Μέλος επιτροπής

Παρασκευή Μπέζα

Επίκουρη Καθηγήτρια

© Κεραμίδα, Γεωργία, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

## Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Κεραμίδα, Γεωργία

Υπογραφή

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μάντζο Νικόλαο για την καθοδήγησή του καθώς και την οικογένειά μου για την υπομονή και τη συμπαράσταση καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου και της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρύπανση του περιβάλλοντος έχει πάρει ανησυχητικές διαστάσεις με δυσμενείς επιπτώσεις τόσο για τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς όσο και για τα οικοσυστήματα γενικά, γεγονός που την καθιστά ως ένα σημαντικό περιβαλλοντικό και κοινωνικό πρόβλημα. Στο πλαίσιο αυτό, τα εδαφικά οικοσυστήματα έχουν επιβαρυνθεί με πλήθος ρυπαντών με συνέπεια την υποβάθμιση της ποιότητάς τους. Τα βαρέα μέταλλα μεταξύ των ρύπων θεωρούνται από τα πλέον τοξικά και επικίνδυνα καθώς δεν διασπώνται και παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο περιβάλλον.

Τα τελευταία χρόνια, το πρόβλημα της ρύπανσης των εδαφών με βαρέα μέταλλα αντιμετωπίζεται τόσο σε νομοθετικό όσο και σε τεχνολογικό επίπεδο με την εφαρμογή βιολογικών τεχνολογιών αποκατάστασής τους. Η φυτοαποκατάσταση αποτελεί μέρος των λεγόμενων «φυτοτεχνολογιών», στο πλαίσιο της οποίας συμμετέχουν σημαντικοί μηχανισμοί των φυτών με τη συμβολή των οποίων η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στο έδαφος μειώνεται σε αποδεκτά επίπεδα με αποτέλεσμα την εξυγίανσή του. Στους μηχανισμούς αυτούς περιλαμβάνονται η ριζοαποδόμηση, η ριζοδιήθηση, η φυτοαποδόμηση, η φυτοεξάτμιση, η φυτοεξαγωγή και η φυτοσταθεροποίηση.

Αν και χαρακτηρίζεται ως μια εξελισσόμενη, οικονομική, «πράσινη» τεχνολογία που με τη χρήση κατάλληλων και ανθεκτικών σε βαρέα μέταλλα φυτών επιδιώκεται η απορρύπανση του εδαφικού οικοσυστήματος, διέπεται και από ορισμένους περιορισμούς. Οι εν λόγω περιορισμοί αφορούν στους αργούς ρυθμούς της φυτοεξυγίανσης και στην πιθανότητα τοξικότητας των φυτών από τις υψηλές τιμές συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων με άμεσο αντίκτυπο την είσοδο αυτών στην τροφική αλυσίδα διαμέσου των ζώων.

Ωστόσο, η έρευνα αναφορικά με τη φυτοαποκατάσταση είναι περιορισμένη καθώς εφαρμόζεται ως επί το πλείστον σε εργαστηριακές μελέτες και μελέτες θερμοκηπίων. Για τον λόγο αυτό κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για περαιτέρω πιλοτικές εφαρμογές και μελέτες πεδίου με σκοπό αφενός την ανάδειξη της αποτελεσματικότητας της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης αφετέρου την αύξηση την αποδοχή της.

**Λέξεις – κλειδιά:** Βαρέα μέταλλα, ρύπανση εδάφους, υπερσυσσωρευτές, εδαφική ποιότητα, φυτοαποκατάσταση.

## **ABSTRACT**

Environmental pollution has reached alarming proportions with adverse effects for both plant and animal organisms and ecosystems, making it a major environmental and social problem. Heavy metals among pollutants are considered to be particularly toxic and dangerous due to their ability to remain in the environment long periods of time.

In recent years, the problem of heavy metal soil pollution has been addressed both at the legislative and technological level with the application of biological remediation technologies. Plant restoration is part of the so-called "phytotechnologies" in which plant mechanisms participate with the contribution of which the concentration of heavy metals in the soil is reduced to acceptable levels resulting in its consolidation. These mechanisms include root degradation, root filtration, phytodegradation, phytovolatilization, phytoextraction-phytoaccumulation and phytostabilization.

Although it is characterized as a developing, low-cost, "green" technology using appropriate, heavy metal resistant plants to decontaminate the soil environment, it is also governed by certain limitations. These limitations are related to the slow rates of phytoremediation and, due the high concentrations of heavy metals, the potential toxicity of the plants to the animals with their entrance in the food chain.

However, research on phytoremediation is limited as it is mostly applied in laboratory and greenhouse studies. For this reason, the need for further pilot applications and field studies is considered imperative in order to highlight the effectiveness of phytoremediation technology and to increase its acceptance.

**Keywords:** Heavy metals, soil pollution, hyperaccumulators, soil quality, phytoremediation.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT .....	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	xiii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	xiv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	xv
1. Το εδαφικό οικοσύστημα .....	1
1.1 Το έδαφος ως φυσικός πόρος.....	1
1.1.1 Μητρικό υλικό.....	4
1.1.2 Κλίμα .....	4
1.1.3 Οργανισμοί.....	5
1.1.4 Τοπογραφία .....	5
1.1.5 Χρόνος .....	6
1.2 Σύσταση του εδάφους .....	7
1.3 Λειτουργίες του εδάφους.....	9
2. Ρύπανση του περιβάλλοντος και διαταραγμένα εδάφη .....	10
2.1 Ποιότητα του εδάφους .....	13
2.2 Υποβάθμιση εδάφους.....	17
2.2.1 Διάβρωση .....	18
2.2.2 Οξίνιση.....	19
2.2.3 Αλάτωση – Αλκαλίωση .....	20
2.2.4 Συμπύεση του εδάφους.....	20
2.2.5 Μείωση της οργανικής ουσίας .....	21

2.2.6 Λατεριτίωση .....	21
2.3 Πηγές ρύπανσης.....	21
2.4 Ρύπανση εδαφών από οργανικές ενώσεις.....	23
2.4.1 Συμπεριφορά οργανικών ουσιών στο έδαφος.....	23
2.4.2 Επιπτώσεις της οργανικής ρύπανσης στις λειτουργίες του εδάφους.....	25
2.5 Ρύπανση εδαφών με βαρέα μέταλλα.....	25
2.5.1 Βιοχημικός ρόλος των βαρέων μετάλλων.....	28
2.5.2 Τοξικότητα των βαρέων μετάλλων .....	30
2.5.3 Πηγές ρύπανσης από βαρέα μέταλλα .....	36
2.5.3.1 Φυσικές πηγές.....	38
2.5.3.2. Ανθρώπινη δραστηριότητα .....	39
Βιομηχανική δραστηριότητα .....	40
Αστικά λύματα .....	42
Γεωργία.....	48
2.5.4 Μηχανισμοί της τοξικής δράσης των βαρέων μετάλλων .....	49
2.5.5 Δείκτες τοξικότητας.....	49
2.5.6 Επιδράσεις των βαρέων μετάλλων στην ανθρώπινη υγεία.....	50
3. Εξυγίανση των ρυπασμένων εδαφών.....	51
3.1 Τεχνολογίες αποκατάστασης υποβαθμισμένων εδαφών .....	51
3.2 Μηχανικές τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών .....	52
3.3 Βιολογικές τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών .....	54
3.4. Τεχνολογία βιοαποικοδόμησης.....	55
3.5 Τεχνολογία φυτοαποκατάστασης.....	56
3.5.1 Μηχανισμοί Φυτοαποκατάστασης .....	59
3.5.1.1 Ριζοαποδόμηση (Rhizodegradation).....	59
3.5.1.2 Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration) .....	60
3.5.1.3 Φυτοαποδόμηση (Phytodegradation).....	61
3.5.1.4 Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization) .....	62

3.5.1.5 Φυτοεξαγωγή – Φυτοσυσσώρευση (Phytoextraction - Phytoaccumulation).....	63
3.5.1.6 Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization).....	71
3.6 Μελέτες περιπτώσεων .....	74
3.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοαποκατάστασης .....	76
4. Θεσμικό πλαίσιο για την προστασία των εδαφών .....	79
4.1 Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικές με την αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών .....	81
4.2 Η Ελληνική νομοθεσία .....	82
5. Συμπεράσματα.....	83
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>85</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Βιολογικοί, φυσικοί και χημικοί δείκτες για την εκτίμηση της εδαφικής ποιότητας (Larson & Pierce, 1994).....	14
Πίνακας 2. Δείκτες ποιότητας εδάφους – Σχέση με εδαφικές λειτουργίες (Doran & Parkin, 1994).....	15
Πίνακας 3. Περιοδικός πίνακας των στοιχείων (Θεοδωρόπουλος κ. ά., 2016).....	26
Πίνακας 4. Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας).....	27
Πίνακας 5. Απαραίτητα ιχνοστοιχεία και χρονολογία ανακάλυψης του βιοχημικού τους ρόλου (Gavriil et al., 2005).....	28
Πίνακας 6. Κατηγοριοποίηση μετάλλων βάσει του βαθμού τοξικότητάς τους (Prasad, 2013).....	31
Πίνακας 7. Συνοπτική παρουσίαση βιομηχανιών και των αντίστοιχων βαρέων μετάλλων (Das & Dash, 2017).....	41
Πίνακας 8. Παροχές (Q) αστικών λυμάτων σε lt/ημέρα από διάφορες περιοχές προέλευσης (Βλυσίδης, 2007).....	43
Πίνακας 9. Συνιστώμενες μέγιστες συγκεντρώσεις ορισμένων βαρέων μετάλλων στο αρδευτικό νερό (Westcot & Ayers, 1985).....	47
Πίνακας 10. Παράμετροι παρακολούθησης ενός προγράμματος φυτοαποκατάστασης (Γιδαράκος, 2009).....	58
Πίνακας 11. Γνωστές οικογένειες υπερσυσσωρευτών φυτών για επτά (7) βαρέα μέταλλα (Ζαμπετάκης, 2000).....	66
Πίνακας 12. Ενδεικτικά είδη υπερσυσσωρευτών μετάλλων και το αντίστοιχο δυναμικό βιοσυσσώρευσης (Lasat, 2000).....	66
Πίνακας 13. Μελέτες φυτοαποκατάστασης εδαφών.....	74
Πίνακας 14. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοαποκατάστασης (Laghlimi 2015).....	78
Πίνακας 15. Κατηγορία 1 τοξικών ουσιών (Καββαδάς & Πανταζίδου, 2007).....	79

Πίνακας 16. Κατηγορία 2 τοξικών ουσιών (Καββαδάς & Πανταζίδου, 2007).....	80
Πίνακας 17. Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος (Daniel, 1993).....	80
Πίνακας 18. Όρια τοξικότητας που ορίζουν τη ρύπανση των εδαφών (Cairney, 1993).....	81

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Φυσικοί πόροι (Γεωργίου κ. ά., 2009).....	2
Διάγραμμα 2. Οι κυριότερες αιτίες υποβάθμισης των εδαφικών πόρων (Lal, 1994)...	18
Διάγραμμα 3. Φυσικές πηγές ρύπανσης και ανθρώπινες πρακτικές που σχετίζονται με τις εκπομπές βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον (Das & Dash, 2017).....	38

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Ο πολλαπλός ρόλος του εδάφους (Szabolcs, 1989).....	2
Σχήμα 2. Σχηματική παράσταση εδαφικής κατατομής με τους κυριότερους ορίζοντες (NRCS Soils).....	8
Σχήμα 3. Σειρά τοξικότητας ορισμένων βαρέων μετάλλων (Νταρακάς, 2010).....	35

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων, Άρτα (Δ.Ε.Υ.Α.Α.).....	43
Εικόνα 2. Μονάδες επεξεργασίας λυμάτων Ψυτάλλειας και Σίνδου Θεσσαλονίκης (Ε.Υ.Δ.Α.Π., Ε.Υ.Α.Θ.).....	44
Εικόνα 3. Μορφές παθογόνων μικροοργανισμών (Envima, 2013; Μαυρίδου, 2014)	45
Εικόνα 4. Ριζοαποδόμηση (ITRC, 2009).....	60
Εικόνα 5. Ο μηχανισμός της ριζοδιήθησης σε καλλιέργεια σε θρεπτικό διάλυμα (υδροπονικό σύστημα) με μολυσμένα επιφανειακά ύδατα (Σαϊτάνης, 2018).....	61
Εικόνα 6. Ο μηχανισμός της φυτοαποδόμησης: Α) Ενζυμική δραστηριότητα των φυτών, Β) Οξείδωση κατά τη φωτοσύνθεση (ITRC, 2009).....	62
Εικόνα 7. Μηχανισμός της φυτοεξάτμισης σε μολυσμένο από ρύπους έδαφος (Datta et al., 2013).....	63
Εικόνα 8. Ο μηχανισμός της φυτοεξαγωγής ή φυτοεκχύλισης (ITRC, 2009).....	64
Εικόνα 9. <i>Thlaspi caerulescens</i> – Θλάσπι (Walker, 2004).....	67
Εικόνα 10. <i>Ipomea alpine</i> – Ιπομέα (Blittersdorff, 2011).....	67
Εικόνα 11. <i>Haumaniastrum robertii</i> (Copper flora, 2018).....	68
Εικόνα 12. <i>Astragalus racemosus</i> – Αστράγαλος (Rechenthin, 2019).....	68
Εικόνα 13. <i>Sebertia acuminata</i> (Benoit, 2016).....	69
Εικόνα 14. <i>Streptanthus polygaloides</i> (Aaron, 2010).....	69
Εικόνα 15. <i>Helianthus annuus</i> – Ηλίανθος (Copper flora, 2018).....	70
Εικόνα 16. <i>Brassica juncea</i> - Ινδική μουστάρδα (Copper flora, 2018).....	70
Εικόνα 17. Λειτουργίες φυτοσταθεροποίησης (Shackira & Puthur, 2019).....	72
Εικόνα 18. Η τεχνολογία της φυτοαποκατάστασης και οι μηχανισμοί της (Cristaldi et al., 2017).....	73



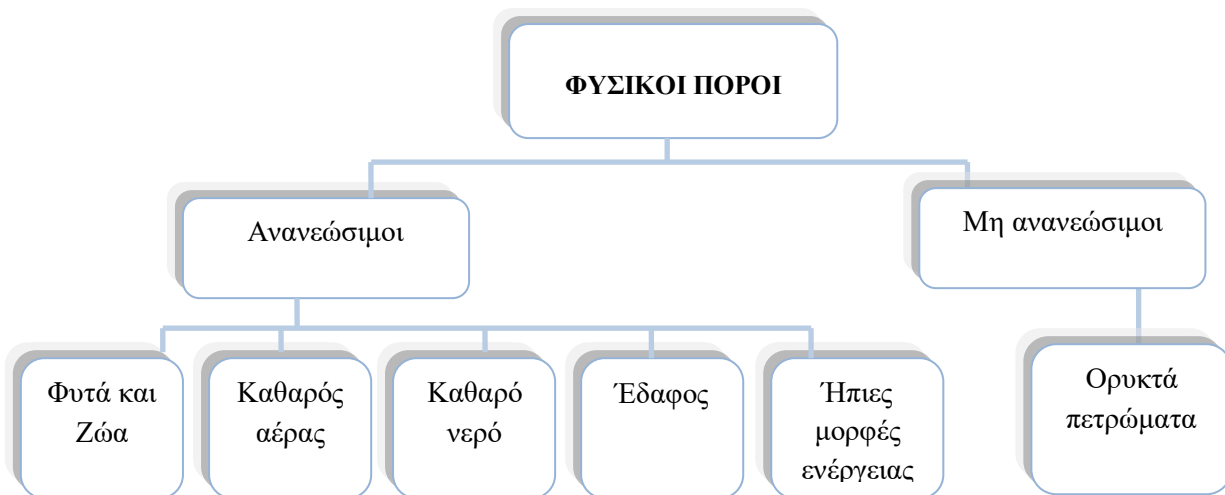
# 1. Το εδαφικό οικοσύστημα

Ως έδαφος ορίζεται το λεπτό επιφανειακό στρώμα του στερεού φλοιού της γης, το οποίο υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτών και ρυθμίζει τη θρέψη του ανθρώπινου πληθυσμού. Θεωρείται δε ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους καθώς διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην ομαλή λειτουργία του περιβάλλοντος, αποτελεί τη βάση για το 90% των ανθρώπινων τροφών, των ζωοτροφών και επιπρόσθετα συντελεί στον καθαρισμό των υπόγειων υδάτων και του αέρα (European Commission, 2007). Η ρύπανση του εδάφους από τα βαρέα μέταλλα καταδεικνύεται ως ένα σοβαρό πρόβλημα που οφείλεται κυρίως στις ανθρώπινες δραστηριότητες (Christopherson, 1997). Κατά συνέπεια, η αειφορική διαχείριση και η προστασία των εδαφικών πόρων κρίνεται απαραίτητη για τη δραστηριότητα πολλών οργανισμών και κατ' επέκταση για το οικοσύστημα (Lasat, 2002; Lottermoser & Asley, 2006).

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες αποκατάστασής του από τα βαρέα μέταλλα οι οποίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι φυσικοχημικές τεχνολογίες στα πλαίσια των οποίων λαμβάνει χώρα η συγκράτηση των βαρέων μετάλλων σε περιορισμένη έκταση μέσα στο έδαφος ώστε να αποφεύγεται η μετανάστευσή τους στα κατώτερα στρώματα και στον υδροφόρο ορίζοντα ή η χρήση χημικών αντιδραστηρίων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μια μορφή βιολογικής αποκατάστασης του εδάφους η οποία επιτυγχάνεται από διάφορα είδη φυτών και μικροοργανισμών. Ωστόσο, οι περισσότερες μελέτες που υλοποιούνται αναφορικά με τους φυσικούς πόρους και την προστασία τους περιορίζονται στην ατμόσφαιρα και τα ύδατα, επιφανειακά, υπόγεια, θαλάσσια παρά στο έδαφος (Τζόβολου, 2011).

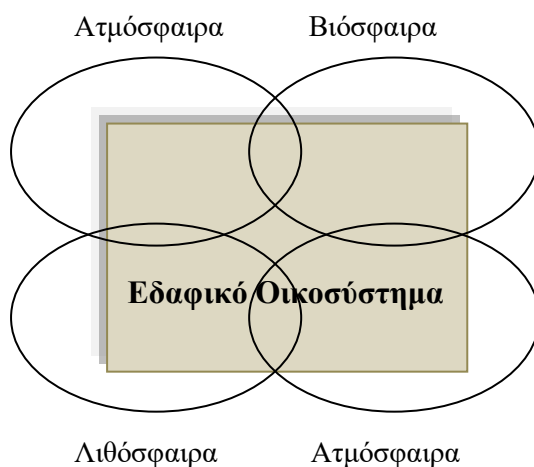
## 1.1 Το έδαφος ως φυσικός πόρος

Σύμφωνα με τον Tilman (1982) ως πόρος ορίζεται «οποιαδήποτε ουσία που είναι αναλώσιμη από τους οργανισμούς και της οποίας η αύξηση της διαθεσιμότητάς της οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας (ρυθμός παραγωγής βιομάζας) των οργανισμών». Ο όρος «αναλώσιμη» αναφέρεται με την έννοια ότι η προμήθεια ή το απόθεμα του πόρου κάτω από ορισμένη διαχείριση είναι δυνατόν να μειώνεται. Οι πόροι γενικά διακρίνονται σε ανανεώσιμους και μη ανανεώσιμους (Διάγρ. 1). Από την πλευρά του το έδαφος θεωρητικά αποτελεί έναν ανανεώσιμο πόρο, καθώς μέσα από την ορθή διαχείρισή του ανανεώνεται διαρκώς στα πλαίσια εφαρμογής ποικίλων φυσικών και τεχνητών διεργασιών.



**Διάγραμμα 1.** Φυσικοί πόροι (Γεωργίου κ. ά., 2009)

Το έδαφος, ως μια ειδική συνιστώσα του φυσικού περιβάλλοντος, λειτουργεί ως ένας φυσικός ρυθμιστής που ελέγχει τη μεταφορά των χημικών στοιχείων και ουσιών στην ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα, τη λιθόσφαιρα και τους ζωντανούς οργανισμούς αλλά και ως ένα δυναμικό σύστημα στήριξης της ζωής με την παραγωγή προϊόντων απαραίτητων για την ύπαρξη τόσο των φυτικών και ζωικών οργανισμών όσο και του ανθρώπου (Σχ. 1). Ο ρόλος του είναι πολλαπλός καθώς αποτελεί το υπόστρωμα για την ανάπτυξη των φυτών και λειτουργεί ως φίλτρο για τη διατήρηση της ποιότητας του αέρα μέσω αλληλεπιδράσεων με την ατμόσφαιρα (Christopherson, 1997). Επιπλέον, στηρίζει τη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών που μετέχουν στην αποσύνθεση και αποδόμηση των φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων. Η συμβολή του στην ποιότητα του περιβάλλοντος, τη βιοποικιλότητα και την παραγωγικότητα των εδαφικών πόρων είναι ιδιαίτερα σημαντική (Pierzynski et al., 2000).



**Σχήμα 1.** Ο πολλαπλός ρόλος του εδάφους (Szabolcs, 1989)

Ειδικότερα, το έδαφος σε ό,τι αφορά την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών αποτελεί (ΚΕΕ, χ. η.):

- ✓ Μέσο στήριξης του ριζικού συστήματος.
- ✓ Μέσο εφοδιασμού των ριζών με οξυγόνο.
- ✓ Μέσο εφοδιασμού των φυτών με νερό.
- ✓ Πηγή εφοδιασμού των φυτών με τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία.
- ✓ Μέσο για τη διατήρηση των μικροοργανισμών που είναι αναγκαίοι για τις βιολογικές διεργασίες των φυτών.
- ✓ Ρυθμιστής της θερμοκρασίας και του pH στο περιβάλλον των ριζών.

Το έδαφος εκλαμβάνεται ως ένα «οικοσύστημα», καθώς κατά τον ορισμό του Odum (1971) «οικοσύστημα θεωρείται οποιαδήποτε μονάδα που περιλαμβάνει όλους τους οργανισμούς μιας συγκεκριμένης περιοχής που καλείται βιοκοινότητα, οι οποίοι αλληλεπιδρούν τόσο μεταξύ τους όσο και με τους αβιοτικούς παράγοντες κατά τέτοιο τρόπο, ώστε μια ροή ενέργειας να οδηγεί σε σαφώς καθορισμένη τροφική δομή, βιοτική ποικιλότητα και ανακυκλώσεις της ύλης». Κατ' επέκταση, το οικοσύστημα αποτελεί ένα δυναμικό πλέγμα αλληλεπιδράσεων και αλληλεξαρτήσεων μεταξύ βιοτικών και μη βιοτικών μερών του, τα οποία βρίσκονται σε μια συνεχή μεταβολή και εξέλιξη.

Οι συντελεστές εκείνοι που παίζουν καθοριστικό ρόλο στον σχηματισμό του εδάφους αλλά και της διαμόρφωσης των χαρακτηριστικών του ιδιοτήτων είναι το κλίμα, η βλάστηση και οι γενικότερες γεωμορφολογικές συνθήκες της επιφάνειας της γης. Συνεπώς, το έδαφος αποτελεί ένα φυσικό, ανοικτό σύστημα που δέχεται επιδράσεις από το περιβάλλον αλλά επιδρά και το ίδιο στο περιβάλλον. Η παρουσία αυτής της αμφίπλευρης αλληλεπίδρασης δημιουργεί μια δυναμική ισορροπία μεταξύ τους. Λόγω αυτής της δυναμικότητάς του, το έδαφος συνεχώς μεταβάλλει τις ιδιότητές του και κατά συνέπεια τα δομικά του χαρακτηριστικά. Βάσει αυτού, το έδαφος μπορεί να "περιγραφεί" με την ακόλουθη μαθηματική συνάρτηση:  $s = f(p, c, o, r, t)$ , όπου:

- $s$  = εδαφική ιδιότητα,
- $p$  = μητρικό υλικό,
- $c$  = κλίμα,
- $o$  = οργανισμοί,

- $r$  = τοπογραφία και
- $t$  = χρόνος.

Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τους παράγοντες εδαφογένεσης καθώς οδηγούν στον σχηματισμό ενός τύπου εδάφους με εσωτερική δομή και συγκεκριμένες φυσικές και χημικές ιδιότητες (Karlen & Stott, 1992). Όταν ένας από τους παράγοντες αυτούς διαφοροποιηθεί, προκύπτει και ένας διαφορετικός εδαφικός τύπος (Foth, 1990).

### **1.1.1 Μητρικό υλικό**

Ως μητρικό υλικό καλείται το χαλαρό υλικό που προέρχεται από την αποσάθρωση των πετρωμάτων κατά την οποία λαμβάνουν χώρα ποικίλες μεταβολές στο μέγεθος, το σχήμα, την εσωτερική δομή και τη χημική σύστασή τους. Μάλιστα, η αποσάθρωση των πετρωμάτων χαρακτηρίζεται ως ο πρωταρχικός παράγοντας γένεσης του εδάφους (Μισοπολινός, 1990). Οι πιο βασικές ιδιότητες του μητρικού υλικού που επηρεάζουν τόσο τον σχηματισμό όσο και την εξέλιξη των εδαφών είναι η υφή, η ορυκτολογική σύσταση, η στρωμάτωση και η διαπερατότητα. Ειδικότερα, η παρουσία του έχει καθοριστική επίδραση στην ταχύτητα σχηματισμού του εδάφους, τις φυσικές και χημικές ιδιότητές του. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι η δασική δενδρώδη βλάστηση εξαρτάται από την ύπαρξη του μητρικού υλικού καθώς ένα μέρος του ριζικού της συστήματος βρίσκεται πάντοτε μέσα σε αυτό (Τσιτσιάς, 1997).

### **1.1.2 Κλίμα**

Το κλίμα θεωρείται ως ένας από τους βασικότερους παράγοντες εδαφογένεσης με την υγρασία και τη θερμοκρασία να αποτελούν τα χαρακτηριστικά εκείνα που επηρεάζουν την εξέλιξη των εδαφών και καθορίζουν κατά τα μέγιστα την ένταση της έκλυσης που υπόκεινται τα μητρικά υλικά (Παπαμίχος, 1990). Η αύξηση της υγρασίας και της θερμοκρασίας επιταχύνουν τις χημικές καθώς και τις βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα εδάφη, αντιθέτως, οι χαμηλές θερμοκρασίες και η έλλειψη υγρασίας τις επιβραδύνουν (Παπαδόπουλος, 2011). Επιπλέον, το κλίμα επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό και τον τρόπο σχηματισμού των εδαφών και καθορίζει την ύπαρξη της βλάστησης που αυτή με τη σειρά της επιδρά στον σχηματισμό του εδάφους (Ritter, 2006). Επίδραση στην εδαφογένεση ασκεί πέραν του κλίματος και το μικροκλίμα που συνήθως διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή.

### 1.1.3 Οργανισμοί

Τον βασικότερο ρόλο στην εδαφογένεση διαδραματίζουν οι φυτικοί οργανισμοί. Η παρουσία βλάστησης εξασφαλίζει τη σταθερότητα της εδαφικής δομής, τη συγκέντρωση της οργανικής ουσίας και την ανακύκλωση στοιχείων. Σε περίπτωση που λάβει χώρα οποιαδήποτε αλλαγή στη βλάστηση αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επικείμενη μεταβολή των μορφολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους και κατ' επέκταση την αλλαγή του από έναν συγκεκριμένο τύπο σε έναν άλλο (Γιάσογλου, 1973).

Πέραν των φυτικών οργανισμών, οι ζωικοί οργανισμοί από την πλευρά τους βοηθούν στην αποσύνθεση της οργανικής ουσίας, στη δημιουργία εδαφικών οπών και στην ανάμιξη των εδαφικών υλικών. Στον κατάλογο αυτών των ζωικών οργανισμών εντάσσονται τα έντομα, οι σκώληκες, τα ακάρεα και τα τρωκτικά (Διαμαντόπουλος, 2014). Διόλου αμελητέα είναι και η συμβολή του ανθρώπου στη γένεση αλλά και στην καταστροφή του εδάφους. Η επίδρασή του είναι εμφανής κυρίως με την καλλιέργεια και τη χρήση των εδαφών με σκοπό την παραγωγή διαφόρων προϊόντων, γεωργικών, κτηνοτροφικών αλλά και δασικών. Ωστόσο, ο τρόπος εκμετάλλευσής τους δεν είναι πάντα ορθός (υπερβόσκηση της γης, εντατικές καλλιέργειες επικλινών περιοχών, εντατική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, εκτεταμένες υλοτομίες) με αποτέλεσμα την υποβάθμιση και τη διάβρωσή τους (Kosmas et al., 1993). Δικαιολογημένα λοιπόν οι ανωτέρω ενέργειες χαρακτηρίζονται ως ακατάλληλες γεωργικές πρακτικές, ως παρεμβάσεις ανθρώπου που οδηγούν στην ερημοποίηση της γης.

### 1.1.4 Τοπογραφία

Τόσο οι διεργασίες της εδαφογένεσης όπως η διάλυση, η μετακίνηση και η πρόσθεση υλικών όσο και η περαιτέρω εξέλιξη του εδάφους επηρεάζονται από το τοπογραφικό ανάγλυφο. Η εν λόγω μεταβλητή δύναται να δράσει είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες. Στην περίπτωση όπου το τοπογραφικό ανάγλυφο εξασφαλίζει την ύπαρξη νερού σε αφθονία και κατ' επέκταση την έκπλυση των προϊόντων των χημικών αντιδράσεων, ο ρυθμός εξέλιξης των εδαφών είναι ταχύτερος. Στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό των αλατούχων και των αλκαλικών εδαφών (Τάντος & Παπαϊωάννου, 2006).

Η κλίση του εδάφους και η επιφανειακή απορροή των νερών της βροχής βρίσκονται σε άμεση συσχέτιση. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση του εδάφους τόσο αυξημένη είναι και

η επιφανειακή απορροή, γεγονός που μειώνει το ποσοστό διείσδυσης των βρόχινων νερών στο εσωτερικό του. Συνέπεια αυτού είναι η περιορισμένη βλάστηση και οργανική ουσία. Επιπρόσθετα, η επιφανειακή απορροή σε μεγάλες κλίσεις σχετίζεται με την αυξημένη διάβρωση κατά την οποία παρατηρείται απομάκρυνση σημαντικών ποσοτήτων επιφανειακού εδάφους (Brady & Weill, 2011).

### 1.1.5 Χρόνος

Η ηλικία του εδάφους προσδιορίζεται από τη διάρκεια του χρόνου που απαιτήθηκε ώστε το μητρικό υλικό να μετατραπεί σε έδαφος με τη βοήθεια της επίδρασης του κλίματος, των οργανισμών και του τοπικού ανάγλυφου. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η ηλικία ενός εδάφους τόσο περισσότερο διαφέρει από τους άλλους τύπους εδαφών ως προς τη μορφολογία και τη σύσταση. Ανάλογα με τον χρόνο σχηματισμού τα εδάφη ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες (Παπαμίχος, 1990):

- ✓ *Ανώριμα εδάφη* (Immature soils). Χαρακτηριστικά των εδαφών αυτών είναι η συσσώρευση της οργανικής ουσίας στην επιφάνεια τους, η μικρού βαθμού αποσάθρωση, η έκπλυση και η μετακίνηση υλικών. Τα εδάφη που ανήκουν στην κατηγορία αυτή έχουν εδαφοτομή A-C (A - Ορίζοντας και C - Ορίζοντας).
- ✓ *Ωριμα εδάφη* (Mature soils). Στα εδάφη αυτά έχει σχηματιστεί και ο B - Ορίζοντας. Συνεπώς, παρουσιάζει εδαφοτομή A-B-C.
- ✓ *Παλαιό έδαφος* (Old age soil). Χαρακτηριστικές είναι οι μεγάλες διαφορές που σημειώνονται μεταξύ του A – Ορίζοντα και του B – Ορίζοντα καθώς και η προχωρημένη αποσάθρωση.

Επειδή υπάρχει πολύ μεγάλη ποικιλία για καθένα από τους παράγοντες αυτούς, δύναται να δημιουργηθεί ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών τύπων εδαφών (Gregorich et al., 1994). Σύμφωνα δε με την Kabata-Pendias (2011), το κλίμα παίζει σημαντικό ρόλο στις διάφορες βιογεωχημικές διεργασίες που εξελίσσονται για μεγάλο χρονικό διάστημα στην επιφάνεια της γης και οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν τη μορφολογία του εδάφους.

Για τη σωστή διαχείριση του εδάφους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ορισμένες βασικές αρχές ώστε να διασφαλίζεται η ορθολογική του χρήση. Σ' αυτές συγκαταλέγονται (Αλιφραγκής, 2002):

- ✓ η εξασφάλιση της παραγωγής σε βάθος χρόνου,
- ✓ η σωστή και αποτελεσματική χρήση των εδαφικών πόρων με το μικρότερο δυνατό περιβαλλοντικό κόστος,
- ✓ η πρόβλεψη των μεταβολών στις εδαφικές ιδιότητες που προκαλούνται από τη διαχείριση και
- ✓ η βελτιστοποίηση των λειτουργιών του εδάφους προς όφελος της διατήρησης της ποιότητας του περιβάλλοντος.

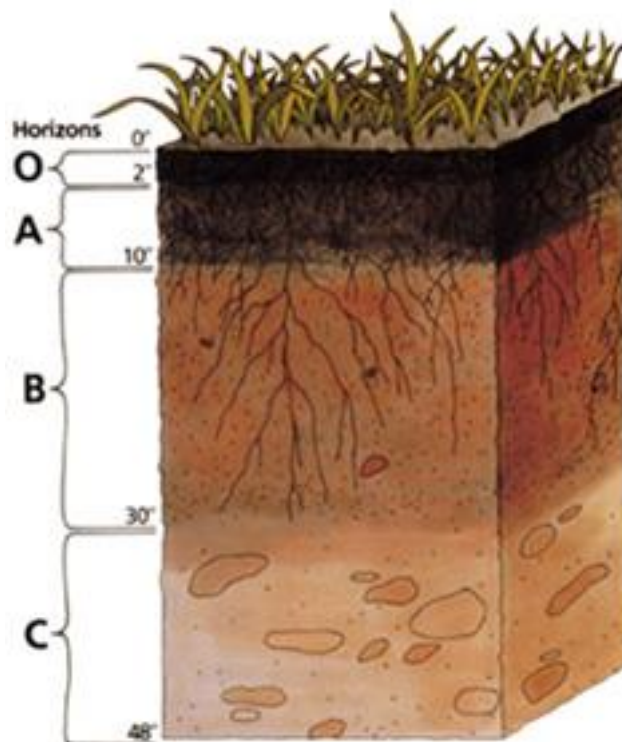
## 1.2 Σύσταση του εδάφους

Το επιφανειακό έδαφος είναι ένα σύμπλοκο μίγμα ανόργανων υλικών και οργανικής ύλης που αποσυντίθεται ή σχηματίζει σύμπλοκα χουμικά οξέα, νερού, αέρα και ζωντανών μικροοργανισμών (Gardiner & Miler, 2004). Τα εδάφη ως ένα ανοικτό περιβαλλοντικό τμήμα που βρίσκεται σε συνεχή ανταλλαγή με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη βιόσφαιρα, διαμορφώνονται σε στιβάδες που καλούνται ορίζοντες (horizons). Οι στιβάδες αυτές αφορούν το ιδανικό εδαφικό προφίλ το οποίο όμως σπάνια απαντάται στη φύση (Balasubramanian, 2017). Ο εδαφικός ορίζοντας είναι ένα στρώμα εδάφους, σχεδόν παράλληλο με την επιφάνεια του εδάφους, με ιδιότητες που είναι το αποτέλεσμα των διεργασιών της εδαφογένεσης (Lindbo et al., 2008).

Ένας εδαφικός ορίζοντας, ωστόσο, διαφέρει από τα υποκείμενα ή υπερκείμενα στρώματα στο χρώμα, στη δομή, στη μηχανική σύσταση, στην παρουσία ή απουσία ανθρακικών και γενικά στη μορφολογία και σε διάφορες ιδιότητες. Ειδικότερα, οι ορίζοντες του εδάφους διακρίνονται σε τέσσερις κυρίως τύπους οι οποίοι συμβολίζονται με τα κεφαλαία γράμματα O, A, B και C (Σχ. 2) (Σινάνης, 2016):

- ✓ **O - Ορίζοντας:** Είναι το ανώτατο στρώμα εδάφους με φυτά, οργανικά υπολείμματα, πεσμένα φύλλα δένδρων και μερικώς αποσυντιθέμενη οργανική ύλη. Η περιεκτικότητα του οργανικού ορίζοντα σε οργανική ουσία ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε άργιλο πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 20-30%.
- ✓ **A - Ορίζοντας:** Είναι ανόργανος ορίζοντας που σχηματίζεται στην επιφάνεια του εδάφους ή κάτω από έναν O - ορίζοντα και χαρακτηρίζεται από χουμικά οξέα, μερικά ανόργανα ορυκτά, ζωντανούς οργανισμούς και οργανική ύλη, με τη μεγαλύτερη βιολογική δραστηριότητα από όλες τις άλλες στιβάδες.

- ✓ **B - Ορίζοντας:** Είναι ορίζοντας εμπλουτισμού στο υπέδαφος όπου συγκεντρώνονται τα χουμικά οξέα, η άργιλος, ο σίδηρος, το αργίλιο και η οργανική ουσία, τα οποία μετακινούνται από τον A – Ορίζοντα. Ειδικότερα, πρόκειται για έναν ανόργανο ορίζοντα που σχηματίζεται βαθύτερα από τον A.
- ✓ **C - Ορίζοντας:** Είναι ανόργανος ορίζοντας, ο οποίος έχει υποστεί μικρή αλλοίωση εξαιτίας της δράσης των εδαφογενετικών παραγόντων. Ως αποτέλεσμα αυτού, δεν παρουσιάζει χαρακτηριστικές ιδιότητες με εκείνες των υπερκείμενων οριζόντων. Κάτω από τον C - Ορίζοντα βρίσκεται το συμπαγές μητρικό πέτρωμα, η σύσταση του οποίου επηρεάζει σημαντικά τη γονιμότητα του εδάφους που προέρχεται από αυτό, την ικανότητά του δηλαδή να προμηθεύει τα φυτά με νερό, θρεπτικά στοιχεία, αέρα και άλλες ουσίες και να εξασφαλίζει κατάλληλο περιβάλλον ανάπτυξης και εξέλιξης των φυτών (Πασχαλίδης, 1999).



**Σχήμα 2.** Σχηματική παράσταση εδαφικής κατατομής με τους κυριότερους ορίζοντες (NRCS Soils)



### 1.3 Λειτουργίες του εδάφους

Το έδαφος ως ένα απαραίτητο συστατικό της βιόσφαιρας διακρίνεται από ουσιαστικές και καθοριστικές λειτουργίες για τη διατήρηση των οικοσυστημάτων και την αειφορική ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Με τον όρο «εδαφικές λειτουργίες» νοούνται οι λειτουργίες οι οποίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για το περιβάλλον, τη γεωργία, την αρχιτεκτονική τοπίου, την προστασία της φύσης. Οι λειτουργίες του εδάφους ως αποτέλεσμα φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σ' αυτό, είναι πολλές όπως (Αλιφραγκής, 2008):

- ✓ στήριξη της βιολογικής δραστηριότητας,
- ✓ στήριξη της βιοποικιλότητας,
- ✓ στήριξη της θρέψης των φυτών,
- ✓ διήθηση, διάσπαση και ακινητοποίηση των ρύπων,
- ✓ ρύθμιση του υδρολογικού κύκλου,
- ✓ στήριξη των κοινωνικοοικονομικών δομών, των κατασκευών,
- ✓ προστασία των αρχαιολογικών θησαυρών,
- ✓ επίδραση στα αέρια του θερμοκηπίου και
- ✓ συμμετοχή στη ροή και μετατροπή ενέργειας.

Ειδικότερα, το έδαφος συντηρεί τη βιολογική δραστηριότητα, τη βιοποικιλότητα και την παραγωγικότητα καθώς παράγει τροφές για τον άνθρωπο και το ζωικό βασίλειο αλλά και ανανεώσιμες πρώτες ύλες (βιομάζα). Το ύψος δε της παραγωγής ανέρχεται στο 90% του συνόλου των τροφίμων, ζωοτροφών, ινών και καυσίμων. Επίσης, αποτελεί ένα είδος κινητήριας δύναμης παρέχοντας στα φυτά τα κατάλληλα θρεπτικά συστατικά και το νερό, ως απαραίτητα στοιχεία για την ανάπτυξή τους, το οξυγόνο και παράλληλα εξασφαλίζοντας τη μηχανική τους στήριξη. Μεγάλοι πληθυσμοί κατώτερων και ανώτερων οργανισμών αναπτύσσονται στο έδαφος, η παρουσία των οποίων είναι υπεύθυνη για τη διατήρηση της ποιότητας του εδάφους καθώς συνεισφέρουν στους κύκλους των θρεπτικών στοιχείων, στις μετατροπές της οργανικής ύλης και στη δημιουργία εδαφικής δομής (Larson & Pierce, 1994).

Επιπρόσθετα, η ρύθμιση του υδρολογικού κύκλου που αφορά στην κίνηση και την κατανομή του νερού αποτελεί μια από τις βασικές λειτουργίες του εδάφους, η οποία εξαρτάται από παραμέτρους όπως οι ιδιότητες της εδαφικής δομής, οι καλλιεργητικές

πρακτικές που εφαρμόζονται στο έδαφος, το είδος και ο πληθυσμός της πανίδας. Η ρύθμιση του νερού ενισχύεται με την αύξηση της οργανικής ουσίας η οποία βοηθά στην αύξηση τόσο των μικροοργανισμών όσο και της πανίδας (Brady & Weill, 2017).

Ιδιαίτερα σημαντικός είναι και ο ρόλος του εδάφους στην καταστροφή των παθογόνων οργανισμών και τη διάσπαση των τοξικών ενώσεων. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει στο έδαφος να διαχειρίζεται επιβλαβείς ουσίες, οργανικές, ανόργανες και ραδιενεργές τις οποίες διηθεί με μηχανικό τρόπο, ιζηματοποιεί φυσικοχημικά και ακολούθως προχωρά στην αποσύνθεσή τους με τη βοήθεια μικροοργανισμών. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η ότι ανακόπτεται η πορεία των επιβλαβών ουσιών και η μεταφορά τους στα υπόγεια νερά και στην τροφική αλυσίδα. Οι δείκτες από τους οποίους εξαρτάται αυτή η λειτουργία είναι η διαπνοή, ο οργανικός άνθρακας, η δομή του εδάφους, η μικροβιακή βιομάζα, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, οι χημικές επιβαρύνσεις και τέλος τα υπολείμματα φυτοφαρμάκων (Καραμάνος, 2004).

Καθίσταται φανερό ότι οι λειτουργίες του εδάφους αντιστοιχούν σε ποικίλες αξίες που αποτελούν αντικείμενα χρήσης τόσο του φυτικού βασιλείου όσο και του ανθρώπινου παράγοντα, όπως: θεμελιωτική, βιολογική, κλιματορρυθμιστική, αποικοδομητική, αισθητική, πολιτιστική κ.α. Οι εν λόγω αξίες είναι αντιπροσωπευτικές του είδους του και του προσδίδουν αναμφισβήτητα έναν ιδιαίτερο δυναμισμό (Xu & Sparks, 2013).

## **2. Ρύπανση του περιβάλλοντος και διαταραγμένα εδάφη**

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και η αλόγιστη χρήση της από τον άνθρωπο σε συνδυασμό με την ικανότητά του να ασκεί αρνητική επίδραση στο περιβάλλον διαταράσσοντας ή καταστρέφοντας τη φυσική ισορροπία οδήγησαν σε ραγδαίες μεταβολές που έλαβαν χώρα τα τελευταία 200 χρόνια μετά τη βιομηχανική επανάσταση, τη στιγμή που οι βιολογικές και γεωλογικές μεταβολές στην επιφάνεια της γης υπήρξαν πολύ αργές. Η ανθρώπινη δε επέμβαση είναι τόσο μεγάλη ώστε το οικοσύστημα αδυνατεί να χρησιμοποιήσει τους ρυθμιστικούς του μηχανισμούς γεγονός που μειώνει την ικανότητα ανάδρασής του. Μολονότι η ανθρώπινη επίδραση στη βιόσφαιρα ξεκινά από τη Νεολιθική εποχή με την αγροτική επανάσταση, η υποβάθμιση των οικοσυστημάτων που αυτή προκαλεί έχει γίνει ιδιαίτερα έντονη στα τέλη του 20ου αιώνα (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

Η ρύπανση συγκαταλέγεται μεταξύ των σπουδαιότερων ανθρώπινων επεμβάσεων στα φυσικά οικοσυστήματα αρχής γενομένης από την εποχή του χαλκού (3000-1100π.Χ.), τη χρυσή εποχή των μεταλλείων κατά τα Ρωμαϊκά χρόνια, τη βιομηχανική επανάσταση έως και τις τελευταίες δεκαετίες. Σύμφωνα με τον Νόμο 1650/1986 (ΦΕΚ 160/16-10-86), ως ρύπανση ορίζεται η παρουσία ρύπων στο περιβάλλον, δηλαδή κάθε είδους ουσιών, θορύβου, ακτινοβολίας ή άλλων μορφών ενέργειας, σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα ή υλικές ζημιές και γενικά να καταστήσουν το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του (Alloway, 2012; Μιχαλοπούλου, 2004).

Σύμφωνα με τον καθηγητή Τσιούρη (2004), «ρύπανση» είναι η άμεση ή έμμεση αλλοίωση των φυσικών ή χημικών ή βιολογικών ιδιοτήτων, οποιουδήποτε συστατικού του περιβάλλοντος, κατά τρόπο που να δημιουργεί βλάβη στην υγεία, στην ασφάλεια ή στην ευδοκίμηση οποιουδήποτε έμβιου όντος. Συνεπώς, με τον όρο «ρύπανση φυσικού περιβάλλοντος» (ύδατα, αέρας, έδαφος) νοείται η δυσμενής μεταβολή των φυσικοχημικών ή βιολογικών παραμέτρων του και μπορεί να είναι χημική, με την εισαγωγή βλαβερών ή και τοξικών ουσιών, ραδιενεργή, βιολογική αλλά και γενετική με την εισαγωγή γενετικά μεταλλαγμένων ειδών (Ξένος, 2006).

Δεδομένου του γεγονότος ότι η ρύπανση μπορεί να προκληθεί και από διάφορα φυσικά γεγονότα, τις λεγόμενες «φυσικές καταστροφές» όπως πυρκαγιές, εκρήξεις ηφαιστειών που ελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα και επιβαρύνουν με διάφορες τοξικές ουσίες εκτεταμένες περιοχές κ.α., η ρύπανση που οφείλεται σε ανθρωπογενείς δράσεις (βιομηχανία, μέσα συγκοινωνίας, παραγωγή ενέργειας, θέρμανση) θεωρείται περισσότερο επικίνδυνη τόσο για το ίδιο το περιβάλλον όσο και για την ποιότητα ζωής και την υγεία των ανθρώπων (Βλυσιδής, 2007). Κάθε δραστηριότητα που συνδέεται με την καταστροφή της βλάστησης συνοδεύεται από την απομάκρυνση εδαφικού υλικού, η παρουσία του οποίου υπολογίζεται σε εκατοντάδες χιλιάδες ή και εκατομμύρια χρόνια (Αλιφραγκής, 2002).

Η ρύπανση του εδάφους αναφέρεται κυρίως στις αγροτικές περιοχές και στα εδάφη της υπαίθρου. Επιπλέον, εδαφική ρύπανση μπορεί να προκληθεί και από τα οικιακά και βιομηχανικά απόβλητα τα οποία απαντώνται σε αστικές ή υπαίθριες περιοχές. Η ρύπανση του εδάφους δημιουργείται κυρίως από τη χρήση ορισμένων πρακτικών της σύγχρονης

γεωργίας, όπως τα χημικά λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα. Αν και τα χημικά λιπάσματα επιφέρουν μεγάλη αύξηση της παραγωγής, περιέχουν ίχνη από τοξικά μέταλλα και μεταλλοειδή τα οποία παραμένουν στο έδαφος και συγκεντρώνονται στους επιφανειακούς ορίζοντες, ιδιαίτερα στην περιοχή της ριζόσφαιρας των φυτών (Wolters, 2019). Έτσι οι ρύποι, οι οποίοι δημιουργούνται στο έδαφος ή απλά διέρχονται από αυτό, καταλήγουν αργά ή γρήγορα στην υδρόσφαιρα και μέσω των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων στις θάλασσες.

Ως διαταραγμένα εδάφη νοούνται εκείνα τα εδάφη στα οποία όλες οι λειτουργίες τους ή μέρος αυτών έχουν μεταβληθεί ή έχουν υποβαθμιστεί. Βάσει του βαθμού διατάραξης, τα εδάφη διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (Αλιφραγκής, 2002):

- *Ισχυρώς διαταραγμένα εδάφη.* Στα εν λόγω εδάφη οι φυσικές τους λειτουργίες έχουν διακοπεί ή έχουν υποστεί μεταβολές. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν α) οι εκτάσεις στις οποίες ο επιφανειακός ορίζοντας έχει απομακρυνθεί και είναι εμφανές το μητρικό υλικό ή το πέτρωμα, β) τα εδάφη στα οποία έχει λάβει χώρα η ανάμιξη του επιφανειακού ορίζοντα με μεγάλες ποσότητες σκελετικού υλικού, το ποσοστό του οποίου ξεπερνά το 80%, γ) τα εδάφη στα οποία σημειώνονται υψηλά επίπεδα ρύπανσης. Οι αποθέσεις λατομικών και μεταλλευτικών υλικών αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα ισχυρώς διαταραγμένων εδαφών.
- *Μετρίως διαταραγμένα εδάφη.* Στα εδάφη αυτά, οι ποσότητες του σκελετικού υλικού με το οποίο είναι αναμεμιγμένος ο επιφανειακός ορίζοντας είναι μικρές. Υπάρχει δε περίπτωση ο επιφανειακός ορίζοντας να έχει απομακρυνθεί.
- *Ελαφρώς διαταραγμένα εδάφη.* Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται τα εδάφη εκείνα που παρουσιάζουν μεταβολές στις βιολογικές, φυσικές και χημικές τους ιδιότητες σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην επιφέρει αναστολή της βλάστησης.

Στις βασικές αιτίες που προκαλούν τη διατάραξη εδαφών συγκαταλέγονται: η κατασκευή τεχνικών έργων, η διάβρωση των εδαφών, η δημιουργία χώρων απόθεσης υλικών, η υπερβόσκηση, οι καλλιέργειες σε επικλινή εδάφη κ.α.

Σε ότι αφορά τις φυσικές πηγές ρύπανσης, η ίδια η φύση έχει αναπτύξει διάφορους μηχανισμούς αυτοκαθαρισμού που εξισορροπούν τη ρύπανση που προκαλείται από αυτές, στα πλαίσια των οποίων λαμβάνει χώρα η ανακύκλωση της ύλης και της ενέργειας.

Αντιθέτως, η συγκέντρωση των ρυπογόνων ουσιών λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων είναι αυξημένη τόσο σε κλίμακα όσο και σε ταχύτητα καθώς συγκεντρώνεται σε περιορισμένους χώρους (βιομηχανικά και αστικά κέντρα) γεγονός που οδηγεί σε μη αντιστρεπτές καταστάσεις (Progiou & Ziomas, 2011).

## 2.1 Ποιότητα του εδάφους

Ένας από τους σημαντικότερους ρόλους στη μορφή διαχείρισης του εδάφους σύμφωνα με τις αρχές της αειφορίας είναι η ποιότητά του. Ως ποιότητα του εδάφους θεωρείται *«η ικανότητα του εδάφους να υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτών και των ζώων, να συγκρατεί το νερό, να αποθηκεύει ρύπους μετατρέποντάς τους σε μορφές μη επικίνδυνες για την ποιότητα του περιβάλλοντος και να υποστηρίζει την υγεία και τη διατροφή του ανθρώπου»* (Doran & Parkin, 1994). Σύμφωνα δε με την Εδαφολογική Εταιρεία των Ηνωμένων Πολιτειών ως ποιότητα του εδάφους ορίζεται *“η ικανότητα του εδάφους να διατηρεί την παραγωγικότητα των φυτών και ζώων, να βελτιώνει την ποιότητα του νερού και του αέρα, να υποστηρίζει την υγεία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος, ανεξάρτητα αν το έδαφος αποτελεί μέρος ενός φυσικού ή διαχειριζόμενου οικοσυστήματος”* (Αλιφραγκής, 2008; Papendick & Parr, 1992).

Πολλοί μελετητές θεωρούν δύσκολο εγχείρημα τον προσδιορισμό της ποιότητας του εδάφους καθώς αποτελεί ένα πολυσύνθετο και δυναμικό σύστημα και αυτό οφείλεται στην ποικιλία των χρήσεων του και των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του καθώς επίσης και των διαφορετικών του τύπων (Karlen et al., 1994; Sojka & Urchurch, 1999). Σύμφωνα με τον Thien (1998), η διαχείριση της ποιότητας του εδάφους υλοποιείται σε πέντε στάδια:

### 1. Ταυτοποίηση χαρακτηριστικών λειτουργιών

Κατά το πρώτο στάδιο αξιολόγησης της εδαφικής ποιότητας, λαμβάνει χώρα η αναγνώριση των λειτουργιών του εδάφους και των χρήσεων της γης. Η ταυτοποίηση των εδαφικών λειτουργιών επιτρέπει και την ταυτοποίηση των εδαφικών δεικτών, οι οποίοι με τη σειρά τους προσδιορίζουν την εδαφική ποιότητα.

### 2. Επιλογή των δεικτών

Οι Larson και Pierce (1994) διέκριναν τρία είδη δεικτών βάσει των οποίων καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση της ποιότητας των εδαφών, τους βιολογικούς, τους φυσικούς και τους χημικούς (Πίν. 1).

**Πίνακας 1.** Βιολογικοί, φυσικοί και χημικοί δείκτες για την εκτίμηση της εδαφικής ποιότητας (Larson & Pierce, 1994)

<b>Εδαφικοί Δείκτες</b>		
<b>Βιολογικοί</b>	<b>Φυσικοί</b>	<b>Χημικοί</b>
Μικροβιακή μάζα C & N	Μηχανική σύσταση	Ολικό οργανικό C και N
Δυνητικά ανοργανοποιήσιμο N	Βάθος εδάφους και ριζών	pH
Αναπνοή εδάφους	Φαινόμενο Ειδικό Βάρος (Φ.Ε.Β.) και διηθητικότητα	Ηλεκτρική αγωγιμότητα
	Υδατοϊκανότητα	Αφομοιώσιμο N, P, και K
	Θερμοκρασία	

Οι Doran και Parkin (1994) προχώρησαν και σε μία αξιολόγηση της ποιότητας του εδάφους μέσα από την εκτίμηση των δεικτών αναφορικά με τις πέντε βασικές λειτουργίες του εδάφους που αφορούν (Πίν. 2):

- ✓ στην ικανότητα του εδάφους να αποθηκεύει νερό και να ρυθμίζει την κίνηση του προς τα φυτά, το υπέδαφος και τα επιφανειακά νερά,
- ✓ στην ικανότητά του να αποθηκεύει θρεπτικές και άλλες ουσίες,
- ✓ στην ικανότητα του εδάφους να παρέχει στήριξη στο ριζικό σύστημα του φυτού,
- ✓ στην ικανότητα του εδάφους να διατηρεί το κατάλληλο βιοτικό περιβάλλον και
- ✓ στην ικανότητά του να ανταποκρίνεται στις ποικίλες πρακτικές που του εφαρμόζονται και να αντιστέκεται στην υποβάθμιση.

**Πίνακας 2.** Δείκτες ποιότητας εδάφους – Σχέση με εδαφικές λειτουργίες (Doran & Parkin, 1994)

Δείκτες Εδαφικής Ποιότητας	Σχέση δεικτών με εδαφικές λειτουργίες
<b>Φυσικοί Δείκτες</b>	
Μηχανική σύσταση	Κατακράτηση και μεταφορά νερού και χημικών ουσιών
Βάθος εδάφους, επιφανειακό στρώμα και ριζόστρωμα	Εκτίμηση του δυναμικού παραγωγής και της διάβρωσης
Φαινόμενο Ειδικό Βάρος (SBD) και Διήθηση	Δυναμικό έκπλυσης, παραγωγικότητας και διάβρωσης
Υδατοϊκανότητα	Συνδέεται με τη συγκράτηση και τη μεταφορά νερού και τη διάβρωση
<b>Χημικοί Δείκτες</b>	
Οργανική ουσία (OM)	Καθορίζει τη γονιμότητα, τη σταθερότητα και το εύρος διάβρωσης
pH	Ορίζει τα όρια φυτικής και μικροβιακής δραστηριότητας
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Ορίζει τα όρια φυτικής και μικροβιακής δραστηριότητας
Αφομοιώσιμο N, P και K	Διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία και δυναμικό απώλειας N
<b>Βιολογικοί Δείκτες</b>	
Μικροβιακή μάζα C & N	Μικροβιακό καταλυτικό δυναμικό και απόθεμα C & N
Δυνητικά ανοργανοποιήσιμο N	Γονιμότητα και δυναμικό εφοδιασμού N
Αναπνοή εδάφους	Μέτρηση μικροβιακής δραστηριότητας

Οι ίδιοι υποστηρίζουν ότι οι δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν, θα πρέπει να ανταποκρίνονται στα ακόλουθα κριτήρια:

- να καλύπτουν το φάσμα όλων των φυσικών διεργασιών που συμβαίνουν στο περιβάλλον,
- να ενσωματώνουν τις βιολογικές, φυσικές και χημικές διεργασίες και τα χαρακτηριστικά τους,
- να είναι εύχρηστοι και εύκολα υπολογίσιμοι,
- να είναι ευαίσθητοι σε κάθε αλλαγή της διαχείρισης και της κατάστασης του περιβάλλοντος.

### 3. Ανάλυση και αξιολόγηση των κρίσιμων τιμών των δεικτών για την εδαφική ποιότητα

Μέσα από τη διαδικασία του ποσοτικού προσδιορισμού των εδαφικών δεικτών επιτυγχάνεται αφενός ο εντοπισμός του προβλήματος που δύναται να υπάρχει σε ένα έδαφος αφετέρου η χάραξη πολιτικών για τη διαχείριση του περιβάλλοντος. Ωστόσο, λόγω των πολλών λειτουργιών του εδάφους, ο καθορισμός συγκεκριμένων ορίων καθίσταται δύσκολος (Larson & Pierce, 1994). Η προσέγγιση για τον καθορισμό ορίων για την εδαφική ποιότητα μπορεί να γίνει με δύο τρόπους (Granatstein & Bezdicsek, 1992). Κατά τον πρώτο τρόπο ως «ιδανική κατάσταση» μπορεί να θεωρηθεί η αρχική κατάσταση του εδάφους και κατά τον δεύτερο «ιδανική κατάσταση» είναι η κατάσταση κατά την οποία σημειώνεται αύξηση της παραγωγής, διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος ή εμφάνιση άλλης λειτουργίας του εδάφους. Τα όρια βάσει των οποίων γίνεται η αξιολόγηση της εδαφικής ποιότητας μπορούν να προέλθουν από ποικίλες πηγές στις οποίες συγκαταλέγονται οι κρατικές υπηρεσίες, η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, οι εκάστοτε ερευνητικές μελέτες, η εμπειρία των αναλυτών. Σε γενικές γραμμές, αν οι τιμές των δεικτών βρίσκονται μέσα στην περιοχή που ορίζουν τα όρια, τότε η εδαφική ποιότητα βρίσκεται υπό έλεγχο. Στην αντίθετη περίπτωση όπου οι τιμές είναι εκτός ορίων, τότε μπορεί να θεωρηθεί πως επικρατούν συνθήκες υποβάθμισης του εδάφους.

### 4. Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αποκατάστασης με βάση τους εδαφικούς δείκτες

Με βάση τη μελέτη των εδαφικών δεικτών που βρίσκονται σε κατάσταση υποβάθμισης, δηλαδή εκτός των προκαθορισμένων ορίων, επιλέγονται και οι κατάλληλες πρακτικές ως προς τη βελτίωσή τους και την αποκατάσταση του εδάφους μέσα από την επαναφορά του στην αρχική ή σε κάποια επιθυμητή κατάσταση. Αυτές αφορούν σε



αλλαγές στο είδος των φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, στον τρόπο εφαρμογής τους, στο αρδευτικό σύστημα κ.α. (Granatstein & Bezdicek, 1992).

#### 5. Εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου αποκατάστασης

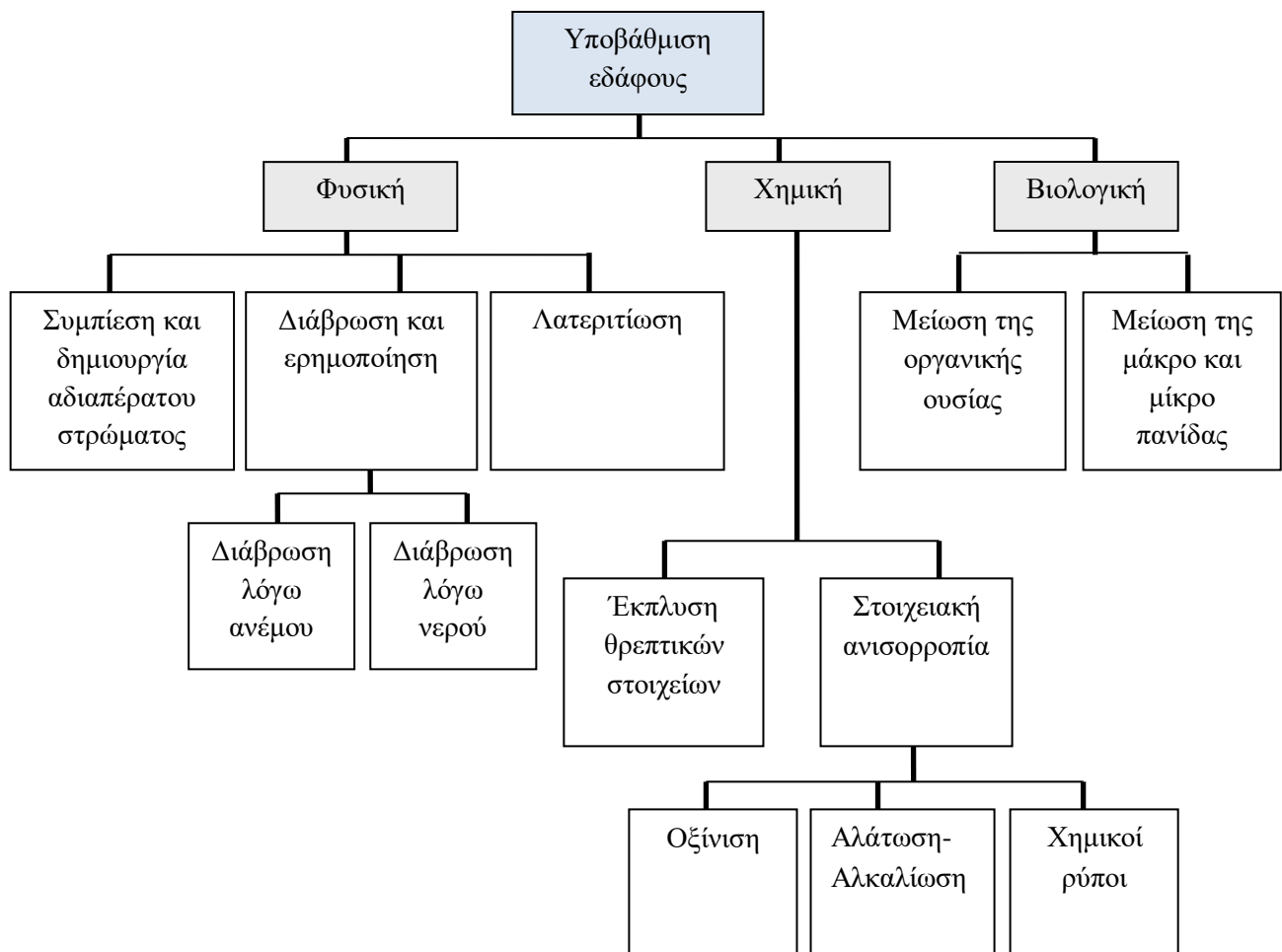
Η επιτυχημένη χρήση της μεθόδου αναμένεται να συμβάλει στη βελτίωση της ποιότητας των ρυπασμένων εδαφών.

## 2.2 Υποβάθμιση εδάφους

Η υποβάθμιση του εδάφους αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα το οποίο προκαλείται και οξύνεται εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2006). Ο άνθρωπος με τις πράξεις του υπονομεύει τις παρούσες αλλά και τις μελλοντικές λειτουργίες του εδαφικού οικοσυστήματος για να υποστηρίξει την ανθρώπινη ζωή (Van Lynden & Oldeman, 1994).

Χαρακτηρίζεται ως «η μείωση της ικανότητάς του να επιτελέσει τις βασικές του λειτουργίες και οφείλεται στη χρήση της γης, στη μη ορθολογική διαχείριση των εδαφικών πόρων και στην ευαισθησία του εδάφους απέναντι στις διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτό και οι οποίες οδηγούν στη μείωση της λειτουργικότητάς του» (Blum, 1998; Lal, 1998).

Η δυσκολία του εδάφους να εξασφαλίζει στα φυτά τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία είναι αποτέλεσμα ποικίλων αιτιών όπως: η διάβρωση και η έκπλυσή του, η μειωμένη περιεκτικότητά του σε οργανική ουσία, η μειωμένη εδαφική βιοποικιλότητα, ο κακός αερισμός κ.ά. (Oldeman, 1994). Οι βασικότερες αιτίες υποβάθμισης των εδαφών αποτυπώνονται στο διάγραμμα 2:



**Διάγραμμα 2.** Οι κυριότερες αιτίες υποβάθμισης των εδαφικών πόρων (Lal, 1994)

Οι πιο σοβαρές αιτίες υποβάθμισης του εδάφους είναι η διάβρωση, η οξίνιση, η αλάτωση - αλκαλίωση, η συμπίεση, η απώλεια της οργανικής ουσίας και η λατεριτίωση. Πρόκειται για μορφές υποβάθμισης που δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους αλλά βρίσκονται σε μια συνεχή αλληλεπίδραση με αποτέλεσμα η μια μορφή να οδηγεί σε μια άλλη.

### 2.2.1 Διάβρωση

Ο όρος «διάβρωση» αναφέρεται στην απομάκρυνση του επιφανειακού εδαφικού υλικού, τη μετακίνησή του από μια περιοχή σε μια άλλη με το νερό και σε μικρότερο βαθμό με τον άνεμο. Πρόκειται για έναν από τους πιο διαδεδομένους τύπους υποβάθμισης του εδαφικού οικοσυστήματος που ενισχύεται με τις ανθρώπινες δραστηριότητες στα πλαίσια γεωργικών εργασιών όπως η αύξηση της έκτασης των αγροτεμαχίων, η συμπίεση

από βαριά μηχανήματα, η αφαίρεση της βλάστησης στα περιθώρια των χωραφιών, η άροση κάθετα στις ισοϋψείς καμπύλες σε επικλινείς περιοχές κ.α. Επίσης, η διάβρωση προκαλείται και από άλλες πρακτικές που αφορούν στην αποψίλωση και τις πυρκαγιές των δασών αλλά και την υπερβόσκηση κατά την οποία απομακρύνεται μεγάλο μέρος της βλάστησης (Pennycook, 2019).

Η διάβρωση που προκαλείται από το νερό οδηγεί στη μείωση του βάθους του ριζικού συστήματος των φυτών, την απώλεια της οργανικής ουσίας και των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους γεγονός που θέτει σε κίνδυνο αφενός την παραγωγικότητά του αφετέρου τις αποδόσεις των καλλιεργειών (Karavayeva et al., 1991). Κατά γενική ομολογία, όλα τα επικλινή εδάφη επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη διάβρωση.

Τα ελαφριάς κοκκομετρικής σύστασης εδάφη, ήτοι τα αμμώδη, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη υδατοπερατότητα, καλό αερισμό αλλά μικρή ικανότητα συγκράτησης νερού και θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά, επηρεάζονται από τη διάβρωση που προκαλείται με τον άνεμο. Η παρουσία των μεγάλων κενών μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους καθιστά ευκολότερο για τον άνεμο την μετακίνηση αυτών. Τα αργιλώδη εδάφη είναι πιο ανθεκτικά στη διάβρωση καθώς είναι πιο συμπαγή. Ωστόσο, το γυμνό αργιλώδες έδαφος είναι ευάλωτο από τις βροχοπτώσεις καθώς οι σταγόνες της βροχής φθάνουν στο έδαφος με μεγάλες ταχύτητες, περνούν μέσα από τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των σωματιδίων του και έτσι το έδαφος χαλαρώνει. Τα κενά που δημιουργούνται στο αργιλώδες έδαφος όχι μόνο το καθιστούν εύκολο στο να παρασυρθεί αλλά μειώνουν και την ικανότητά του να συγκρατεί το νερό (Χουλιάρης, 2010).

### **2.2.2 Οξίνιση**

Η οξίνιση των εδαφών είναι μία φυσική διεργασία καθώς προκαλείται από τις υψηλές βροχοπτώσεις (η βροχή, στη φυσική της κατάσταση, είναι ελαφρά όξινη με pH μεταξύ 5.0 και 5.6 και αυτό οφείλεται κυρίως στο διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) της ατμόσφαιρας), η οποία ωστόσο τείνει να ενισχυθεί από τον ανθρώπινο παράγοντα στα πλαίσια δραστηριοτήτων όπως η αλόγιστη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων (φωσφορική αμμωνία, θεική αμμωνία, νιτρική αμμωνία), η μη ορθολογική εφαρμογή των αρδεύσεων (υπεραρδεύσεις), οι ατμοσφαιρικές αποθέσεις διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>), οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και αμμωνίας (NH<sub>3</sub>), που προέρχονται κυρίως από την παραγωγή ενέργειας, τη βιομηχανία, τα μέσα μεταφοράς, την κτηνοτροφία κ.α. (Θεοδώρου & Πασχαλίδης, 1999).

### 2.2.3 Αλάτωση – Αλκαλίωση

Η αλάτωση αποτελεί μια σημαντική απειλή υποβάθμισης του εδαφικού οικοσυστήματος η οποία επιδρά τόσο στη γονιμότητά του με την απώλεια της οργανικής ουσίας και των θρεπτικών του συστατικών όσο και στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Prager et al., 2011; Sparks, 2003). Ειδικότερα, η αυξημένη συγκέντρωση των ιόντων  $\text{Na}^+$  καταστρέφει τη μορφολογία των φυτικών κυττάρων, μειώνει την παραγωγή της χλωροφύλλης και τη φωτοσύνθεση (Verbruggen & Hermans, 2013).

Προκαλείται κυρίως με την άρδευση με νερό το οποίο έχει υψηλή συγκέντρωση άλατος, με την είσοδο αλατούχου θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα και την έντονη εξατμισοδιαπνοή (Dubois et al., 2011). Συνεπώς, δύναται να προκληθεί από φυσικές αλλά και ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Daliakopoulos et al., 2016). Κυρίως παρατηρείται σε περιοχές με ξηρό ή ημίξηρο κλίμα, με χαμηλή βροχόπτωση και έντονη εξατμισοδιαπνοή που οδηγούν στη συσσώρευση άλατος στα ανώτερα στρώματα του εδάφους (Mateo-Sagasta & Burke, 2011).

Η αλάτωση του εδάφους αναφέρεται σε τρεις κατηγορίες αλατότητας: α) το αλατούχο έδαφος που διακρίνεται από αυξημένη συγκέντρωση αλάτων, β) το αλκαλιωμένο ή νατριούχο έδαφος στο οποίο εντοπίζεται διαταραγμένη αναλογία κατιόντων νατρίου προς ασβεστίου και μαγνησίου και γ) το αλκαλικό έδαφος το οποίο χαρακτηρίζεται από αυξημένο pH (Van Beek & Toth, 2012). Στην περίπτωση των αλατούχων εδαφών παρεμποδίζεται η διαπνοή των φυτών με άμεση συνέπεια τη μειωμένη πρόσληψη του νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών ενώ στα αλκαλιωμένα εδάφη, όπου η συγκέντρωση  $\text{Na}^+$  οδηγεί σε διασπορά της αργίλου, παρατηρείται υποβάθμιση της εδαφικής δομής (Jones & Finley, 2003).

### 2.2.4 Συμπύεση του εδάφους

Η συμπύεση του εδάφους προκαλείται από τη διέλευση βαρέων οχημάτων από τα ίδια σημεία κατά την άρωση ή υπερβολικού αριθμού αγροτικών ζώων σε εδάφη που χαρακτηρίζονται από υψηλή εδαφική υγρασία. Η επαναλαμβανόμενη επίδραση των βαρέων οχημάτων οδηγεί στη δημιουργία αδιαπέρατου στρώματος και στη μεταβολή των βιοχημικών και μικροβιολογικών λειτουργιών του εδάφους. Συγκεκριμένα, μειώνεται το εδαφικό πορώδες με συνέπεια τον περιορισμό αφενός του διαθέσιμου εδαφικού νερού αφετέρου του διαθέσιμου εδαφικού αέρα. Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της

επιφανειακής απορροής ως αποτέλεσμα του μικρού βαθμού διήθησης του νερού της βροχής η οποία επιφέρει την αύξηση της διάβρωσης και την απώλεια του επιφανειακού εδάφους. Το ριζικό δε σύστημα δυσκολεύεται να διεισδύσει στο εσωτερικό του εδάφους καθώς και να απορροφήσει τα απαραίτητα για τα φυτά θρεπτικά στοιχεία. Η συμπίεση του εδάφους λαμβάνει χώρα τόσο στα επιφανειακά όσο και στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα (Shah et al., 2017).

### **2.2.5 Μείωση της οργανικής ουσίας**

Η παρουσία της οργανικής ουσίας στο έδαφος θεωρείται απαραίτητη για τη διατήρηση της δομής του, τη συγκράτηση του νερού και την αποθήκευση των θρεπτικών στοιχείων. Ποικίλες γεωργικές πρακτικές ασκούν δυσμενή επίδραση στην ποσότητα της οργανικής ουσίας στο εδαφικό οικοσύστημα, όπως οι εντατικές καλλιέργειες, η βαθιά άροση, η απουσία της αμειψισποράς καθώς μειώνουν την ποσότητα της βλάστησης που επιστρέφει στο έδαφος. Αυτή η μείωση της βιολογικής δραστηριότητας επιφέρει τη διάβρωση του εδάφους, την έκπλυση και την επιφανειακή απορροή (Watts & Dexter, 1997).

### **2.2.6 Λατεριτίωση**

Λατεριτίωση καλείται η διαδικασία κατά την οποία δημιουργούνται κοιτάσματα νικελίου αλλά και βωξίτη από την αποσάθρωση πετρωμάτων. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε Ni είναι μεταβλητή, με μέσο όρο παγκοσμίως περίπου τα 20 ppm. Όταν όμως οι συγκεντρώσεις του νικελίου υπερβαίνουν τα 50 ppm, τότε τα φυτά υποφέρουν και εκδηλώνουν συμπτώματα τοξικότητας. Το πιο συνηθισμένο σύμπτωμα της φυτοτοξικότητας από το νικέλιο είναι η χλώρωση των φύλλων και ακολούθως το κιτρίνισμα και η νέκρωσή τους, το οποίο και οφείλεται στην αλληλεπίδρασή του με τον σίδηρο που βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα στα φύλλα των φυτών (Adriano, 2001). Τα αυξημένα επίπεδα Ni στα βρώσιμα φυτά συνδέονται με κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007).

## **2.3 Πηγές ρύπανσης**

Το έδαφος γίνεται καθημερινά αποδέκτης μεγάλων ποσοτήτων από τοξικές και επιβλαβείς ουσίες με αποτέλεσμα την υποβάθμιση ή ακόμα και τη ρύπανσή του (Τζόβολου, 2011). Τα προβλήματα που σχετίζονται με τη ρύπανση του εδάφους συνδέονται με την ανάπτυξη της βιομηχανίας και την καταναλωτική κατεύθυνση της

κοινωνίας. Συγκεκριμένα, οι σημαντικότερες οικονομικές δραστηριότητες που συμβάλλουν στην υποβάθμιση του εδάφους είναι ο κλάδος της βιομηχανικής παραγωγής, της βιομηχανίας επεξεργασίας πετρελαιοειδών και της επεξεργασίας απορριμμάτων από διάφορες δραστηριότητες (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2006). Τόσο τα υγρά όσο και τα στερεά απόβλητα αρχικά εναποτίθενται και ακολούθως επεξεργάζονται σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Επιπρόσθετα, ποικίλες ακατάλληλες κτηνοτροφικές, γεωργικές και δασοπονικές πρακτικές αλλά και η εντατικοποίηση των καλλιεργειών αποτελούν σημαντικές πηγές υποβάθμισης του εδάφους (E.C., 2007). Κτηνοτροφικά και γεωργικά απόβλητα, φυτοφάρμακα και λιπάσματα καταλήγουν σε χερσαία οικοσυστήματα και οδηγούν στη ρύπανσή του. Η γεωμορφολογία του εδάφους αποτελεί τον βασικό παράγοντα που καθορίζει την έκταση της ρύπανσης η οποία δύναται να περιορίζεται τοπικά ή να προχωρά και στα υπόγεια ύδατα (Kuhlman & Greenfield, 1999).

Ειδικότερα, οι κυριότερες κατηγορίες ανθρωπογενών πηγών ρύπανσης του περιβάλλοντος είναι οι ακόλουθες (Καφφέ, 2018; Φυτιανός & Σαμαρά, 2009):

- Βιομηχανίες. Συμμετέχουν σε μεγάλο ποσοστό στη ρύπανση του περιβάλλοντος με αέρια, υγρά και στερεά απόβλητα.
- Χημικές βιομηχανίες, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη ρύπανση από βαρέα μέταλλα.
- Αστικές δραστηριότητες, στις οποίες περιλαμβάνονται τα αστικά λύματα και τα στερεά απορρίμματα.
- Συγκοινωνίες και κεντρική θέρμανση. Οι πηγές αυτές προκαλούν μεγάλη ρύπανση στην ατμόσφαιρα των πυκνοκατοικημένων περιοχών.
- Γεωργικές δραστηριότητες που αφορούν στη χρήση λιπασμάτων, παρασιτοκτόνων, εντομοκτόνων και μυκητοκτόνων οι οποίες και προκαλούν έντονα προβλήματα ρύπανσης κυρίως στους υδάτινους αποδέκτες.
- Κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις, στις οποίες ανήκουν τα υγρά και στερεά απόβλητα.
- Ατυχήματα – τυχαία περιστατικά. Τα ατυχήματα που συμβαίνουν στις βιομηχανίες, στα πυρηνικά εργοστάσια, στα δεξαμενόπλοια κ.α. δημιουργούν συχνά σοβαρά προβλήματα ρύπανσης με απρόβλεπτες συνέπειες (Κουϊμτζής κ. ά., 1998; Miller, 1999α).

Τα βιομηχανικά και τα αστικά απόβλητα χαρακτηρίζονται ως σημειακές πηγές ρύπανσης ενώ τα γεωργικά αποτελούν παράδειγμα μη σημειακής ρύπανσης. Οι χημικές οργανικές ή ανόργανες ουσίες για να χαρακτηρισθούν ως ρύποι και να προκαλέσουν ρύπανση στο εδαφικό οικοσύστημα δεν αρκεί μόνο η ύπαρξή τους στο έδαφος αλλά πρέπει να εντοπίζονται σε τέτοιες ποσότητες ώστε να παρεμποδίζουν μία ή περισσότερες εδαφικές λειτουργίες (Eweis et al., 1998).

Τα βαρέα μέταλλα αποτελούν επίσης μια βασική αιτία ρύπανσης των εδαφών όταν οι συγκεντρώσεις τους κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα με αρνητικές επιδράσεις στην ενζυμική λειτουργία σε χερσαία ζώα, σε μικροοργανισμούς, γαιοσκώληκες και νηματώδεις, οι οποίοι υποβαθμίζουν την υφή και την ποιότητα των εδαφών (Hu et al., 2013).

## **2.4 Ρύπανση εδαφών από οργανικές ενώσεις**

Οι οργανικοί ρύποι που εναποτίθενται στο έδαφος υφίστανται μια σειρά από φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται αλλά και την κατανομή τους στον χώρο. Οι διεργασίες αυτές εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους καθώς και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των οργανικών ουσιών. Η ρύπανση του εδάφους με οργανικές ουσίες οδηγεί σε δυσλειτουργία του εδαφικού οικοσυστήματος. Οι λειτουργίες του εδάφους επηρεάζονται κυρίως από την επίδραση των οργανικών ρύπων στους μικροοργανισμούς του εδάφους οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για πληθώρα διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό (Rada et al., 2019).

### **2.4.1 Συμπεριφορά οργανικών ουσιών στο έδαφος**

Οι διεργασίες που καθορίζουν την τύχη των οργανικών ουσιών είναι η προσρόφησή τους στη στερεή φάση του εδάφους, η αποικοδόμηση και η μετακίνησή τους (Ζαλίδης, 2002).

#### **➤ Προσρόφηση οργανικών ουσιών**

Η προσρόφηση αφορά στην ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί μια οργανική ουσία και να εμποδίζει τη μετακίνησή της μέσω του εδαφικού διαλύματος. Κατά τη προσρόφηση λαμβάνουν χώρα ποικίλες διαδικασίες, αποτέλεσμα κυρίως της ετερογένειας του εδάφους, των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του καθώς και της φύσης των οργανικών ρύπων. Το έδαφος αποτελείται από τρεις φάσεις, τη στερεά (οργανικά και ανόργανα υλικά -

σωματίδια), την υγρή (νερό) και την αέρια (αέρας), με τις δύο τελευταίες να αποτελούν τις κύριες οδούς κίνησης των οργανικών ουσιών στο έδαφος. Τα οργανικά και τα ανόργανα στερεά υλικά αποτελούν τις θέσεις προσρόφησης ενώ στο έδαφος απαντώνται οι λεγόμενες επιφάνειες προσρόφησης, που διακρίνονται στις ανόργανες επιφάνειες και τις οργανικές. Οι ανόργανες επιφάνειες αποτελούνται από κρυσταλλικά και άμορφα υλικά. Οι οργανικές επιφάνειες αποτελούνται από οργανικά πολυμερή, οργανισμούς και αποικοδομημένα υπολείμματα φυτών και ζώων.

Σπουδαίο ρόλο στην προσρόφηση διαδραματίζουν και οι φυσικοχημικές ιδιότητες των οργανικών ουσιών, οι οποίες διακρίνονται στις ουσίες σε ιονική μορφή και τις ουσίες σε μη ιονική μορφή. Στην πρώτη περίπτωση, οι ουσίες με θετικό φορτίο προσροφώνται στα κολλοειδή της αργίλου, η οποία έχει αρνητικό φορτίο, ενώ οι ουσίες με αρνητικό φορτίο κατά κανόνα δεν προσροφώνται και δύναται να εκπλυθούν.

#### ➤ Αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών στο έδαφος

Η αποικοδόμηση συνίσταται στη διάσπαση των οργανικών ουσιών στα επιμέρους στοιχεία τους και διακρίνεται σε φυσική, χημική και βιολογική βάσει των αντίστοιχων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο πλαίσιο της. Αναφορικά με τις φυσικές διεργασίες, οι σημαντικότεροι παράγοντες που ασκούν επίδραση είναι το φως και η θερμοκρασία. Η θερμική αποικοδόμηση γίνεται ταυτόχρονα με τη φωτόλυση. Σε αρκετές περιπτώσεις η φωτόλυση επιταχύνεται όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα. Η χημική αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών εξαρτάται από παράγοντες όπως είναι το pH του εδάφους, το εδαφικό διάλυμα, οι φυσικοχημικές ιδιότητες των ουσιών κ.α. Η αποικοδόμηση των οργανικών μορίων από διάφορους μικροοργανισμούς του εδάφους, όπως μύκητες και βακτήρια, καλείται βιολογική ή μικροβιακή αποικοδόμηση. Στην περίπτωση που αυτή γίνεται από μύκητες, είναι αερόβια και παρατηρείται στα ανώτερα εδαφικά στρώματα, ενώ όταν τον ρόλο της αποικοδόμησης έχουν αναλάβει τα βακτήρια, πραγματοποιείται σε μεγαλύτερα βάθη υπό από αναερόβιες συνθήκες.

#### ➤ Μετακίνηση των οργανικών ουσιών

Η μετακίνηση των οργανικών ουσιών στο έδαφος γίνεται με τρεις τρόπους: την επιφανειακή απορροή, την εξάτμιση και την κατακόρυφη έκπλυση. Κατά την επιφανειακή μετακίνηση, η ουσία δύναται να μετακινηθεί είτε μαζί με τα εδαφικά σωματίδια στα οποία είναι προσροφημένη είτε με την επιφανειακή απορροή του νερού. Η επιφανειακή απορροή



αποτελεί μια σημαντική περίπτωση μετακίνησης καθώς εμπεριέχει τον κίνδυνο ρύπανσης και άλλων εδαφών αλλά και επιφανειακών υδάτων.

Για ορισμένες οργανικές ουσίες η εξάτμιση αποτελεί έναν σπουδαίο τρόπο απομάκρυνσής τους από το έδαφος. Ο ρυθμός της εξάτμισης εξαρτάται από την πτητικότητα της κάθε ουσίας, δηλαδή την τάση των ατμών της, την προσρόφηση, την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία και τη θερμοκρασία του. Ειδικότερα, η προσρόφηση μειώνει σημαντικά τον βαθμό εξάτμισης ενώ αντίθετα η παρουσία της υγρασίας επιταχύνει την εξάτμιση.

Η κατακόρυφη έκπλυση αναφέρεται στην καθοδική κίνηση που εκτελεί κάθε οργανική ουσία περνώντας από την ακόρεστη στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους χωρίς να υποστεί προσρόφηση ή αποικοδόμηση. Στην περίπτωση αυτή σημειώνεται ρύπανση των υπόγειων νερών έχοντας ωστόσο ως βασική παράμετρο το βάθος στο οποίο βρίσκεται η κορεσμένη ζώνη.

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

Η ρύπανση του εδάφους με οργανικές ενώσεις επιφέρει δυσλειτουργία στο εδαφικό οικοσύστημα και κατ' επέκταση μειώνει την ικανότητά του να εκτελεί αποτελεσματικά ορισμένες από τις λειτουργίες του. Οι λειτουργίες του εδάφους επηρεάζονται κυρίως από την επίδραση που ασκούν οι οργανικοί ρύποι στους μικροοργανισμούς που υπάρχουν σε αυτό οι οποίοι και διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο σε πληθώρα διεργασιών στο έδαφος. Ο ρόλος του εδάφους στη διατήρηση της ισορροπίας της τροφικής αλυσίδας δύναται να επηρεαστεί από τις επιπτώσεις ορισμένων οργανικών ρύπων στη χλωρίδα και την πανίδα του εδάφους.

#### **2.5 Ρύπανση εδαφών με βαρέα μέταλλα**

Η ρύπανση του εδαφικού οικοσυστήματος με μέταλλα σε υψηλές συγκεντρώσεις, τα λεγόμενα «βαρέα μέταλλα», αποτελεί ένα πολύ σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα αναφορικά με την ανθρώπινη υγεία και την ισορροπία του περιβάλλοντος (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). «Βαρέα μέταλλα» είναι ο πιο ευρέως αναγνωρισμένος και χρησιμοποιούμενος όρος για τη μεγάλη ομάδα των στοιχείων που παρουσιάζουν ιδιότητες μετάλλων, έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από 5g/cm<sup>3</sup> και ατομικό βάρος υψηλότερο του 20 (Dotaniya et al., 2018; Martin & Coughtrey, 2012). Από την ομάδα αυτή εξαιρούνται τα αλκάλια, οι αλκαλικές γαίες, οι λανθανίδες και οι ακτινίδες (Mason, 1991). Τα μέταλλα

αυτά έχουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο του σιδήρου (Fe), σχετικά υψηλή πυκνότητα και είναι τοξικά ή δηλητηριώδη σε χαμηλές συγκεντρώσεις (Αλμπάνης, 1996; Schroeder, 1975). Θεωρούνται δε από τους πλέον επικίνδυνους ρύπους του περιβάλλοντος καθώς δεν αποικοδομούνται, δηλαδή δεν είναι βιοδιασπώμενα αλλά παραμένουν στο έδαφος για μεγάλο χρονικό διάστημα (Τσιούρης, 2004).

Τα σημαντικότερα βαρέα μέταλλα που συμπεριλαμβάνονται σε έναν τυπικό έλεγχο περιβαλλοντικής μελέτης είναι τα στοιχεία: Cu (χαλκός), Zn (ψευδάργυρος), Fe (σίδηρος), Se (σελήνιο), Mn (μαγγάνιο), Mg (μαγνήσιο), Mo (μολυβδαίνιο), Co (κοβάλτιο), Hg (υδράργυρος), Pb (μόλυβδος), Cd (κάδμιο), Cr (χρώμιο), Ni (νικέλιο), Al (αργίλιο), Ag (άργυρος), B (βόριο), As (αρσενικό), V (βανάδιο), Be (βηρύλλιο), Si (πυρίτιο), Sb (αντιμόνιο), Sn (κασσίτερος) και Li (λίθιο) (Σακελλαριάδου, 2007). Ορισμένα από αυτά χαρακτηρίζονται ως "απαραίτητα" θρεπτικά στοιχεία για τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς καθώς δεν μπορούν να αντικατασταθούν από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία Cu, B, Zn, Fe, Mn, V, Si και Mo θεωρούνται απαραίτητα για τα φυτά ενώ για τα ζώα τα στοιχεία Fe, Mo, Cu, Mn, Mo, Se, Ni, Zn (Πίν. 3). Οι ρόλοι του κοβαλτίου για τον σχηματισμό της βιταμίνης B12, του νικελίου και του βαναδίου για τη φυσιολογική ανάπτυξη του οργανισμού και του πυριτίου για τον υγιή σχηματισμό των δοντιών και των οστών καθώς και για την αναγέννηση του συνδετικού ιστού έχουν επίσης καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια ως χρήσιμοι στην ανθρώπινη διατροφή (Lepp, 2012).

**Πίνακας 3.** Περιοδικός πίνακας των στοιχείων (Θεοδωρόπουλος κ. ά., 2016).

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H	μέταλλα														He		
2	Li	Be	αμέταλλα										B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	ευγενή αέρια										Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mb	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	<sup>f</sup> λανθανίδες	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Th	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	<sup>f</sup> ακτινίδες	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub						
λανθανίδες	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
ακτινίδες	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Ωστόσο, η περιεκτικότητά τους στους ιστούς είναι πολύ χαμηλή (0,01%) σε σύγκριση με άλλα στοιχεία, όπως C, H, O, N, P, K, για τον λόγο αυτό αποκαλούνται "ιχνοστοιχεία" ή "μικροθρεπτικά" (Uaf et al., 2017). Η παρουσία των στοιχείων αυτών στους οργανισμούς σε τιμές κατώτερες ή ανώτερες από το άριστο επίπεδο επιφέρει ανωμαλίες στις φυσιολογικές λειτουργίες τους ή ακόμη και τον θάνατό τους. Ειδικότερα, σε μεγάλες συγκεντρώσεις πολλά από τα ιχνοστοιχεία δύναται να αποδειχθούν τοξικά για τα φυτά ή/και τα ζώα ενώ σίγουρα επηρεάζουν την ποιότητα των τροφίμων που διατίθενται για ανθρώπινη κατανάλωση. Κατά γενική ομολογία, η άριστη συγκέντρωσή τους διαφέρει ανάμεσα στα είδη και τις ποικιλίες ή ακόμη και τις φυλές του ίδιου είδους (Alloway, 2012).

Τα μέταλλα με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό κίνδυνο αποτελούν ο υδράργυρος (Hg), ο μόλυβδος (Pb), το κάδμιο (Cd), το αρσενικό (As), το χρώμιο (Cr), το νικέλιο (Ni), το βανάδιο (V), ο χαλκός (Cu) και το αργίλιο (Al) λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους, του βαθμού τοξικότητάς τους και της ευρείας κατανομής τους σε αβιοτικά και βιολογικά συστήματα. Ιδιαίτερα για τον άνθρωπο πολύ τοξικά σε υψηλές συγκεντρώσεις θεωρούνται τα στοιχεία Cu, Zn, Mn, Mo, Co, Hg, Pb, Cd, Cr, Ni. Σύμφωνα με την Οδηγία 278/1986/EEC, ΚΥΑ 80568/4225/91 οι οριακές τιμές συγκέντρωσης ορισμένων βαρέων μετάλλων για τα εδάφη αποτυπώνονται στον πίνακα 4:

**Πίνακας 4.** Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας)

Στοιχείο	Οριακές τιμές βαρέων μετάλλων (mg/kg) στο έδαφος			
	Οδηγία 278/1986/EEC 6<pH<7	5≤pH<6	6≤pH<7	pH≥7
Cd (κάδμιο)	1-3	0.5	1	1.5
Cu (χαλκός)	50-140	30	50	100
Ni (νικέλιο)	30-75	30	50	70
Pb (μόλυβδος)	50-300	70	70	100
Zn (ψευδάργυρος)	150-300	100	150	200

### 2.5.1 Βιοχημικός ρόλος των βαρέων μετάλλων

Τα βαρέα μέταλλα, παρά το γεγονός ότι απαντώνται σε ιδιαίτερα χαμηλές συγκεντρώσεις, διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στη ζωή των οργανισμών καθώς, αφενός παρεμβαίνουν στις βιοχημικές τους λειτουργίες με ποικίλους τρόπους αφετέρου συμμετέχουν στις μεταβολικές διαδικασίες και επηρεάζουν τη φυσιολογία τους. Η δε επίδρασή τους χαρακτηρίζεται ως θετική ή αρνητική (Cotton & Wilkinson, 1980).

Αναφορικά με τον βαθμό σημαντικότητάς τους στην ανθρώπινη ζωή, τα βαρέα μέταλλα διακρίνονται σε απαραίτητα (Πίν. 5) και μη απαραίτητα. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται τα βαρέα μέταλλα που ανιχνεύονται σε σταθερές συγκεντρώσεις σε υγιείς ιστούς ενώ ως μη απαραίτητα θεωρούνται τα βαρέα μέταλλα για τα οποία δεν έχει βρεθεί μέχρι στιγμής ότι έχουν κάποια θετική επίδραση στη ζωή (Gavriil et al., 2005).

**Πίνακας 5.** Απαραίτητα ιχνοστοιχεία και χρονολογία ανακάλυψης του βιοχημικού τους ρόλου (Gavriil et al., 2005)

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΕΤΟΣ	ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΕΤΟΣ
Fe (Σίδηρος)	17ος αιώνας	Se (Σελήνιο)	1957
Cu (Χαλκός)	1928	Cr (Χρώμιο)	1959
Mn (Μαγγάνιο)	1931	Sn (Κασσίτερος)	1970
Zn (Ψευδάργυρος)	1934	V (Βανάδιο)	1971
Co (Κοβάλτιο)	1935	Ni (Νικέλιο)	1973
Mo (Μολυβδαίνιο)	1953	Cd (Κάδμιο)	Δεκαετία του 1990

Σε πολλές περιπτώσεις, τα απαραίτητα μέταλλα, τα οποία απαντώνται ως ιόντα αλάτων (π.χ. ηλεκτρολύτες) ή ως σύμπλοκα με οργανικά μόρια ενώ σε άλλες περιπτώσεις βρίσκονται ενσωματωμένα μέσα σε βιομόρια (πεπτίδια, πρωτεΐνες, ένζυμα, σύμπλοκα με νουκλεϊκά οξέα, κλπ.), επιτελούν τις ακόλουθες βασικές λειτουργίες (Μπόμπορη, 1996):

- ❖ συμπεριφέρονται ως κύρια στοιχεία σύστασης βιολογικών υγρών (αίμα, ούρα), όπως για παράδειγμα τα στοιχεία κάδμιο, χαλκός, ψευδάργυρος,
- ❖ συμμετέχουν στην κατάλυση βιοχημικών αντιδράσεων. Τέτοια μέταλλα είναι: Zn, Mn, Fe κ.ά.,
- ❖ συμμετέχουν σε αντιδράσεις οξειδωσης-αναγωγής, όπου απαιτείται η μεταφορά ηλεκτρονίων,
- ❖ δρουν ως συμπαραγοντες (Co factors) σε βασικά ένζυμα.

Για παράδειγμα, το μολυβδαίνιο, ένα βασικό μεταλλικό στοιχείο που βρίσκεται σε μια ποικιλία τροφών, ενεργοποιεί τρία βασικά ένζυμα, τη θειική οξειδάση, την οξειδάση αλδεΐδης και την οξειδάση ξανθίνης ώστε να επιτελέσουν το καθένα χωριστά τις λειτουργίες τους.

- ❖ δρουν ως δομικά στοιχεία ή ως στοιχεία που συνδέονται με ορμονικές λειτουργίες.

Ορισμένα απαραίτητα για τον οργανισμό ιχνοστοιχεία παρουσιάζονται στη συνέχεια με συνοπτικό τρόπο (Aitio et al., 1991):

**Σίδηρος (Fe):** Θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα μέταλλα καθώς αποτελεί βασικό στοιχείο για τη σύνθεση της αιμοσφαιρίνης του αίματος και διαφόρων ενζύμων. Βοηθά στην ανάπτυξη, αυξάνει την αντοχή στις ασθένειες και προλαμβάνει την κόπωση. Εκτός από την αιμοσφαιρίνη, ο σίδηρος υπάρχει στη φερριτίνη, την πρωτεΐνη που λειτουργεί ως αποθήκη του σιδήρου στον οργανισμό καθώς και στη μυοσφαιρίνη που παραλαμβάνεται μέσω των ζωικών τροφών.

**Ψευδάργυρος (Zn):** Ο βασικός του ρόλος είναι να κατευθύνει και να ρυθμίζει τη ροή των διαδικασιών του σώματος καθώς και να διατηρεί τα κύτταρα σε καλή κατάσταση. Επιπρόσθετα, αποτελεί τον βασικό δομικό λίθο του γεννητικού συστήματος των αρρένων και βοηθά στην ομαλή ανάπτυξη των νυχιών, του δέρματος και των τριχών. Ανεπάρκεια του Zn μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση στην ανάπτυξη, δερματίτιδα, νόσους του

γαστρεντερικού συστήματος, πτώση μαλλιών κλπ. Επίσης, αποτελεί βασικό συστατικό πολλών ενζύμων, όπως οι πολυμεράσες του DNA και του RNA.

**Χαλκός (Cu):** Γενικά είναι απαραίτητος για τον ενεργειακό μεταβολισμό των κυττάρων και την παραγωγή του συνδετικού ιστού μέσω ενώσεών του με τουλάχιστον 16 πρωτεΐνες. Δρα μέσω μεταλλοενζύμων που σχετίζονται με τη σύνθεση της αιμοσφαιρίνης, το μεταβολισμό των υδατανθράκων, τη σύνθεση του κολλαγόνου, της ελαστίνης και της κερατίνης και στον αντιοξειδωτικό μηχανισμό του οργανισμού.

**Μαγγάνιο (Mn):** Η συμβολή του στην ανάπτυξη του συνδετικού ιστού και στον μεταβολισμό των υδατανθράκων και λιπών είναι καταφανής. Παραλαμβάνεται μέσω της διατροφής και απορροφάται εύκολα μέσω της γαστρεντερικής οδού.

**Σελήνιο (Se):** Διακρίνεται από άριστα επίπεδα αντιοξειδωτικότητας, προστατεύει τη βιταμίνη E και καθυστερεί τη γήρανση του δέρματος καθώς διατηρεί την ελαστικότητα τόσο του δέρματος όσο και των ιστών. Έλλειψή του πιθανώς προκαλεί καρδιοαγγειακά νοσήματα.

**Κοβάλτιο (Co):** Το κοβάλτιο είναι βασικό στοιχείο για τον οργανισμό γιατί αποτελεί μέρος της βιταμίνης B12. Παραλαμβάνεται μέσω της διατροφής και απορροφάται εύκολα μέσω της γαστρεντερικής οδού.

**Χρώμιο (Cr):** Μόνο το τρισθενές χρώμιο σε ίχνη θεωρείται απαραίτητο στον οργανισμό, πιθανότατα για τον μεταβολισμό των υδατανθράκων, ενώ το εξασθενές είναι πολύ τοξικό. Ασκεί θετική επίδραση στο μεταβολισμό των λιπιδίων, ενώ υποβοηθά και τη διαδικασία ανάπτυξης.

### **2.5.2 Τοξικότητα των βαρέων μετάλλων**

Ως τοξικότητα ορίζεται η ικανότητα μιας ουσίας, στην προκειμένη περίπτωση των βαρέων μετάλλων, να προκαλέσει βλάβη στις ζωτικές λειτουργίες ενός βιολογικού συστήματος ή ενός ζωντανού οργανισμού (Κυρανάς, 2010). Ειδικότερα, τα βαρέα μέταλλα έχουν την τάση να ενώνονται με βιολογικής σημασίας μόρια με συνέπεια να μεταβάλλουν ή να αναστέλλουν τη δράση τους με αρνητικά αποτελέσματα για τις βιολογικές λειτουργίες των οργανισμών. Η τοξικότητα των βαρέων μετάλλων εξαρτάται από τη συγκέντρωσή τους, το είδος του μετάλλου, την παρουσία και συνεργιστική δράση άλλων μετάλλων καθώς και το είδος του οργανισμού (Miller, 1999β). Επίσης, μπορεί να εκφραστεί ως νευροφυσιολογικές διαταραχές, μεταλλάξεις, καρκινογενέσεις αλλά και

επιδράσεις στην ενζυμική και ορμονική δραστηριότητα, στις βασικές λειτουργίες του οργανισμού. Συνεπώς, τα βαρέα μέταλλα επιφέρουν ποικίλες μεταβολικές αλλοιώσεις, οι οποίες δύναται να αποτελέσουν σοβαρό κίνδυνο για την υγεία.

Παρά το γεγονός ότι η τοξική δράση πολλών βαρέων μετάλλων είναι γνωστή εδώ και πολλούς αιώνες, η αναγνώριση των τοξικών τους ιδιοτήτων έλαβε χώρα τις τελευταίες δεκαετίες μέσα από μελέτες οι οποίες διερευνούσαν κυρίως την έκθεση των εργαζομένων σε βιομηχανικούς χώρους. Μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα, τα περισσότερα από τα εν λόγω μέταλλα ήταν παρόντα σε ασήμαντες ποσότητες στο άμεσο περιβάλλον των ανθρώπων. Ακολούθως όμως, η ραγδαία εκβιομηχάνιση, η οποία συνοδεύτηκε από την αύξηση της παραγωγής και την ανάπτυξη της τεχνολογίας είχαν ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη διασπορά των βαρέων μετάλλων καθώς και την επικίνδυνη αύξηση των επιπέδων παρουσίας τους στο περιβάλλον, στους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς. Χρειάστηκαν κάποια τραγικά επεισόδια ρύπανσης από βαρέα μέταλλα, που κόστισαν ανθρώπινες ζωές, για να αποκαλυφθεί η τοξική δράση του υδραργύρου, του καδμίου, ή του χρωμίου και να στραφεί η επιστημονική έρευνα προς τη διαλεύκανση της δράσης των βαρέων μετάλλων (Αρβανίτης, 2006).

Σύμφωνα με τον Prasad (2013), τα μέταλλα ανάλογα με την τοξικότητά τους και τη διαθεσιμότητά τους ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: σε μη τοξικά ή ελαφρά μέταλλα, σε τοξικά αλλά σπάνια και σε τοξικά – διαθέσιμα μέταλλα, τα οποία και θεωρούνται από τους βασικότερους παράγοντες ρύπανσης (Πίν. 6).

**Πίνακας 6.** Κατηγοριοποίηση μετάλλων βάσει του βαθμού τοξικότητας τους (Prasad, 2013)

Μη τοξικά μέταλλα	Τοξικά αλλά σπάνια μέταλλα	Τοξικά και διαθέσιμα μέταλλα
Na (νάτριο), K (κάλιο), Mg (μαγνήσιο), Ca (ασβέστιο), Fe (σίδηρος), Li (λίθιο), Al (αργίλιο)	Ti (τιτάνιο), Zr (ζιρκόνιο), W (βολφράμιο), Nb (νιόβιο), Re (ρήνιο), Ga (γάλλιο), Os (όσμιο), Rh (Ρόδιο), Ba (βάριο)	Co (κοβάλτιο), Ni (νικέλιο), Cu (χαλκός), Zn (ψευδάργυρος), Sn (κασσίτερος), As (αρσενικό), Se (σελήνιο), Te (τελλούριο), Ag (άργυρος), Cd(κάδμιο), Cr (χρώμιο), Hg (υδράργυρος), Ti (τιτάνιο), Pb (μόλυβδος)

Η τοξικότητά τους μπορεί να αποτελέσει σημαντικό και επίβουλο πρόβλημα καθώς αυτά αποτελούν εγγενή συστατικά του περιβάλλοντος. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, κάποια μέταλλα είναι απαραίτητα για τη διαβίωση των οργανισμών όπως ο σίδηρος, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, το πυρίτιο κ.ά.. Τα περισσότερα από τα ιχνοστοιχεία είναι συστατικά ενζύμων και άλλων πρωτεϊνών που διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στις μεταβολικές διαδικασίες. Για όλα όμως αυτά τα ιχνοστοιχεία υπάρχουν συγκεκριμένα όρια συγκέντρωσης που τα καθιστούν τοξικά ή απαραίτητα. Έτσι, ένα στοιχείο που είναι απαραίτητο για τη φυσιολογική λειτουργία του οργανισμού μπορεί να είναι εξαιρετικά τοξικό όταν παρουσιαστεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις (Jaishankar et al., 2014).

Βιβλιογραφικά, τα βαρέα μέταλλα είναι συνυφασμένα με την περιβαλλοντική ρύπανση. Οι ποικίλες ερευνητικές μελέτες που ασχολούνται με τη ρύπανση του περιβάλλοντος αναφέρονται σε σωματιδιακούς ρύπους, τα λεγόμενα σωματίδια, τα οποία χαρακτηρίζονται από την υγρή ή ξηρή εναπόθεσή τους στη γη. Το μέγεθός τους ποικίλει και από αυτό εξαρτάται ο ρυθμός εναπόθεσής τους καθώς και οι τοξικολογικές ιδιότητές τους. Έτσι, υπάρχουν σωματίδια που το μέγεθός τους φτάνει μόλις τα 0,25 μm και χαρακτηρίζονται ως λεπτά σωματίδια, όπως οι ενώσεις μολύβδου αλλά και χονδρόκοκκα σωματίδια μεγέθους περίπου 10 μm (Γεντακάκης, 2010). Με την είσοδό τους στην ατμόσφαιρα ως σωματιδιακή ύλη παραμένουν σε αυτή από λίγες ημέρες έως 2-3 εβδομάδες και ακολούθως φτάνουν στην επιφάνεια της γης και εναποτίθενται στο έδαφος ή στο νερό. Ο μεγάλος χρόνος παραμονής αλλά και οι υψηλές συγκεντρώσεις τους ενισχύουν τη μεταφορά και τη διασπορά τους σε μεγάλη κλίμακα (Gebrekidan et al., 2013).

Η τοξική δράση των βαρέων μετάλλων δύναται να εκδηλωθεί με ποικίλους βιοχημικούς μηχανισμούς και να δημιουργήσει πολύ σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα καθώς και προβλήματα υγείας (Bakere et al., 1994). Ειδικότερα αναφέρονται ενδεικτικά τα ακόλουθα βαρέα μέταλλα:

- ✓ **Μόλυβδος (Pb):** Θεωρείται από τα πιο επικίνδυνα βαρέα μέταλλα με υψηλό επίπεδο τοξικότητας για τους έμβιους οργανισμούς. Ο μόλυβδος μπορεί να εισέλθει στο περιβάλλον από τα εργοστάσια που παράγουν ή χρησιμοποιούν μόλυβδο, κράματα μολύβδου ή ενώσεις μολύβδου, από την καύση άνθρακα και από τις εξατμίσεις οχημάτων παλαιάς τεχνολογίας. Τις τελευταίες βέβαια δεκαετίες έχουν περιοριστεί αρκετά οι εκπομπές του με τη χρήση αμόλυβδης βενζίνης χωρίς αυτό να σημαίνει ότι



έχουν εκλείψει εντελώς. Υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικών εκπομπών μπορεί να μολύνουν περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ορυχεία και χυτήρια. Ο μόλυβδος έχει την τάση να επικάθεται από την ατμόσφαιρα στο έδαφος με τη μορφή σωματιδίων με αποτέλεσμα να μολύνει τα τρόφιμα και το νερό, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει τοξικότητα στον άνθρωπο (Watts & Dexter, 1997). Η συνηθέστερη μορφή μολύβδου είναι η δισθενής και η μέση τιμή στο παγκόσμιο έδαφος είναι 27 mg/kg (Özkuş, 2016). Ο μόλυβδος εισέρχεται στην κυκλοφορία του αίματος και αντικαθιστά το ασβέστιο λόγω του παρόμοιου μεγέθους και φορτίου του. Πιθανότατα οδηγεί σε επιβράδυνση της παιδικής ανάπτυξης και θεωρείται υπεύθυνος για την εμφάνιση μαθησιακών δυσκολιών. Προκαλεί νευροτοξικότητα, νεφροτοξικότητα και υπέρταση, ενώ με την εισπνοή συσσωρεύεται στους πνεύμονες (μολυβδίαση).

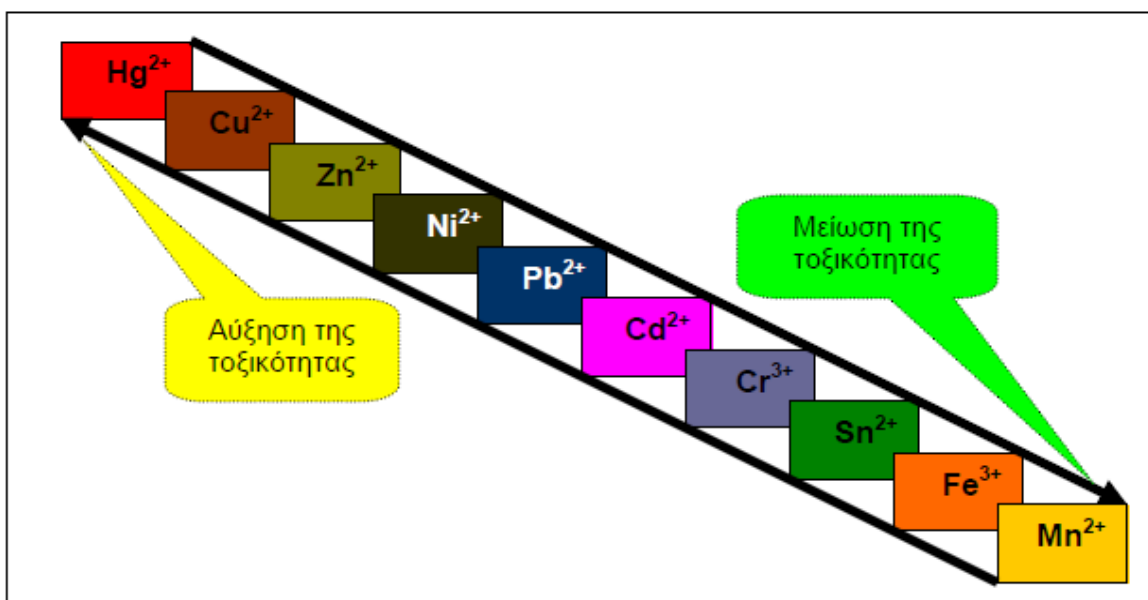
- ✓ **Αρσενικό (As):** Απαντάται σε πετρώδη εδάφη, στο νερό και στον αέρα ως σωματίδιο (Özkuş, 2016). Οι γεωργικές πρακτικές (χρήση λιπασμάτων και παρασιτοκτόνων), η παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα αλλά και οι διαδικασίες εξόρυξης αποτελούν τις σημαντικότερες πηγές περιβαλλοντικής ρύπανσης με αρσενικό (Peralta-Videa et al., 2009). Άλλες πηγές ρύπανσης είναι η παρασκευή και χρήση φυτοφαρμάκων καθώς και συντηρητικών ξύλου. Το αρσενικό προκαλεί ισχυρή τοξική αντίδραση στον οργανισμό ως αποτέλεσμα κατάποσης μέσω επιμολυσμένης τροφής και κυρίως νερού. Στα συμπτώματα που παρατηρούνται αναφέρονται οι εμετικές τάσεις, η διάρροια, η καρδιακή ανωμαλία, οι δερματικές παθήσεις ενώ είναι θανατηφόρο σε μεγαλύτερες δόσεις. Το αρσενικό είναι ο σημαντικότερος ρύπος που καθιστά απαγορευτική τη χρήση υπόγειων νερών ως πόσιμων.
- ✓ **Υδράργυρος (Hg):** Έχει εντοπιστεί στη φύση ως στοιχείο ή μεταλλικός υδράργυρος, ως ανόργανες ενώσεις υδραργύρου, με πιο συνηθισμένο τον χλωριούχο υδράργυρο και ως οργανικός υδράργυρος, με κύρια αναφορά στον μεθυλιούχο υδράργυρο (Guzzi et al., 2008). Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25° C βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Εξαιτίας της υψηλής τάσης ατμών που παρουσιάζει αυτή η μορφή του καθώς και ορισμένα άλατά του, διαχέεται στον αέρα ως ατμός. Ωστόσο, οι οργανικές ενώσεις του είναι ακόμη πιο τοξικές. Ο μεθυλιούχος υδράργυρος (CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>) εισέρχεται με τη διατροφή στον ανθρώπινο οργανισμό, κυρίως από λιπαρά ψάρια και προκαλεί χρόνια ή οξεία δηλητηρίαση ή και θάνατο. Λόγω του ότι ο υδράργυρος είναι λιποδιαλυτός, έχει την τάση να συσσωρεύεται στον εγκέφαλο. Τα συμπτώματα που προκαλούνται

από αυτή την κατάσταση είναι νεφρίτιδα, κατάρρευση του κυκλοφοριακού, νευρικές βλάβες και τερατογενέσεις.

- ✓ **Κάδμιο (Cd):** Αν και θεωρείται πιο τοξικό από τον μόλυβδο, η χρήση του είναι πολύ περιορισμένη. Χαρακτηρίζεται δε από την υψηλή κινητικότητα του και τις σοβαρές επιπτώσεις που έχει στους οργανισμούς ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις (Chen et al., 2013). Μάλιστα ανήκει στα συχνότερα βαρέα μέταλλα που ανιχνεύεται στα λαχανικά απειλώντας την παραγωγή και την υγεία. Η διαδικασία πρόσληψης του καδμίου του εδάφους από τα φυτά είναι γνωστό ότι ενισχύεται σε χαμηλές τιμές pH 4-5 (Garg & Singh, 2018). Η βασική μεταβλητή που καθορίζει τις συγκεντρώσεις Cd στο έδαφος είναι το μητρικό υλικό, όπου η μέση του τιμή είναι 0,4 mg/kg (Özku, 2016). Άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης λόγω καδμίου αποτελούν τα λιπάσματα που παράγονται από φωσφορικά ορυκτά όπως και η ακατάλληλη χρήση μη σωστά επεξεργασμένων αποβλήτων που περιέχουν Cd (Kumar et al., 2015). Οι ενώσεις του καδμίου χρησιμοποιούνται επίσης ως σταθεροποιητές σε προϊόντα PVC και σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Jägar, 2003). Το κάδμιο παρεμποδίζει ή/και διακόπτει τη δράση της μεταλλοθειονίνης, μιας πρωτεΐνης που δεσμεύει την περίσσεια του ψευδαργύρου και του χαλκού στο ανθρώπινο σώμα, ρυθμίζει τις συγκεντρώσεις τους και επιφέρει την προσωρινή αδρανοποίησή τους. Επιπρόσθετα, οι ενώσεις του καδμίου θεωρούνται υπεύθυνες για αναπνευστικές δυσλειτουργίες και καρκινογενέσεις.
- ✓ **Χρώμιο (Cr):** Το Cr απελευθερώνεται στο περιβάλλον στα πλαίσια διαφόρων βιομηχανικών διεργασιών όπως, η βυρσοδεψία, η βαφή, η παραγωγή χρωστικών ουσιών και η συντήρηση του ξύλου. Επιπλέον, μπορεί να απελευθερωθεί στο περιβάλλον από την καύση του άνθρακα (Özku, 2016). Το χρώμιο απαντάται συνήθως ως τρισθενές - Cr (III) ή εξασθενές - Cr (VI) ιόν. Ως εξασθενές, το χρώμιο προκαλεί συμπτώματα χρόνιας δηλητηρίασης τα οποία χαρακτηρίζονται από αναπνευστικές και δερματολογικές βλάβες. Επιπρόσθετα, μετά από χρόνια έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις του, είναι καρκινογόνο. Αντίθετα, οι ενώσεις του τρισθενούς χρωμίου είναι χρήσιμες σε πολλούς οργανισμούς καθώς συμβάλλει στη διατήρηση του βάρους με την ενεργοποίηση των ενζύμων που μεταβολίζουν τη γλυκόζη και τα λίπη σε ενέργεια (Peralta-Videa et al., 2009; Prasad et al., 2013).
- ✓ **Χαλκός (Cu):** Τόσο οι γεωλογικές πηγές όσο και η βιομηχανική δραστηριότητα συμβάλλουν στην ρύπανση του περιβάλλοντος με Cu. Η συγκέντρωση Cu στο έδαφος

εξαρτάται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους και τις πιθανές εξωγενείς εισροές από τη γεωργία ή τη βιομηχανία (Ballabio et al., 2018). Στη βιομηχανική δραστηριότητα περιλαμβάνονται η καύση άνθρακα, οι μεταλλουργικές δραστηριότητες, οι δραστηριότητες εξόρυξης και τα φωσφορικά λιπάσματα (Mwamba et al., 2016). Ωστόσο, η ευρεία χρήση χαλκούχων σκευασμάτων φυτοπροστασίας αποτελεί τη βασικότερη αιτία για την αύξηση του χαλκού στο περιβάλλον (Kirdey & Veselov, 2016). Αν και απορροφάται εύκολα από το στομάχι και το έντερο, σπάνια προκαλεί προβλήματα στα εν λόγω όργανα. Είναι, άλλωστε, γνωστό ότι σε πολύ μικρές ποσότητες αποτελεί ένα χρήσιμο ιχνοστοιχείο για οξειδοαναγωγικές δράσεις στον οργανισμό. Η έκθεση όμως σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευσή του στο συκώτι, ιδιαίτερα για όσους πάσχουν από τη νόσο Wilson (γενετική πάθηση, η οποία χαρακτηρίζεται από την αδυναμία του οργανισμού να αποβάλλει τον χαλκό με αποτέλεσμα την προοδευτική συσσώρευσή του στους ιστούς) και σε παιδική κίρρωση.

Συνεπώς, η δράση των διαφόρων βαρέων μετάλλων ποικίλλει, γεγονός που τα κατατάσσει σε διαφορετικά επίπεδα τοξικότητας (Σχ. 3) και τα καθιστά μια όχι ορατή αλλά πολύ σημαντική μορφή ρύπανσης για το θαλάσσιο και το χερσαίο περιβάλλον (Νταρακάς, 2010).



Σχήμα 3. Σειρά τοξικότητας ορισμένων βαρέων μετάλλων (Νταρακάς, 2010)

### 2.5.3 Πηγές ρύπανσης από βαρέα μέταλλα

Ο φλοιός της γης αποτελείται από πυριγενή – μαγματογενή πετρώματα (πετρώματα που δημιουργήθηκαν από μάγμα που σταθεροποιήθηκε στο εσωτερικό της γης ή καλύφθηκε από άλλα πετρώματα του εξωτερικού φλοιού της γης) σε ποσοστό 95% και ιζηματογενή πετρώματα σε ποσοστό 5%, από τα οποία περίπου 80% είναι σχιστόλιθοι, 15% ψαμμίτες και 5% ασβεστόλιθοι (Lepp, 2012). Η περιεκτικότητα του φλοιού σε στοιχεία ανέρχεται περίπου στα 90 εκατομμύρια, εκ των οποίων τα στοιχεία Al, Ca, Fe, Mg, O, K, Si και Ti αποτελούν το 90% του συνολικού του βάρους. Τα λοιπά στοιχεία, γνωστά και ως ιχνοστοιχεία, απαντώνται σε ποσοστό 1%, πολλά εκ των οποίων είναι βαρέα μέταλλα (Gupta, 2013).

Αρχικά, τα βαρέα μέταλλα υπήρχαν στη φύση ως ορυκτά στο υπέδαφος, ως συστατικά του περιβάλλοντος. Τα ορυκτά αυτά, πριν την ανθρώπινη παρουσία στον πλανήτη, έμεναν συνήθως ανέπαφα. Μικρές ωστόσο ποσότητες αυτών των μετάλλων δύναται να απελευθερωθούν στο περιβάλλον είτε με την αποσάθρωση των πετρωμάτων είτε με την παρουσία έντονων φυσικών φαινομένων, όπως εκρήξεις ηφαιστείων ή μεγάλες δασικές πυρκαγιές. Οι εκπομπές λοιπόν των βαρέων μετάλλων μπορεί να προκληθούν μέσα από φυσικά φαινόμενα και υπό μορφή ρύπων να λειτουργήσουν αρνητικά στο περιβάλλον (Saha et al., 2010). Με τη ραγδαία όμως ανάπτυξη της βιομηχανίας σημαντικές ποσότητες ενώσεων βαρέων μετάλλων απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα και έκτοτε εξακολουθούν να ρυπαίνουν επικίνδυνα το περιβάλλον, καθώς μέσω των νερών της βροχής καταλήγουν στα ποτάμια ή τη θάλασσα και επιφέρουν τη μόλυνση των υδάτινων οικοσυστημάτων και την περαιτέρω υποβάθμισή τους (Mausbach & Tugel, 1997). Συνεπώς, η ρύπανση του εδάφους με βαρέα μέταλλα μπορεί να προκληθεί είτε από φυσικές πηγές είτε να είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας (Διάγρ. 3) (Singh et al., 2011). Ωστόσο, βάσει μετρήσεων έχει αποδειχθεί ότι η έκταση των επιπτώσεων από τις φυσικές πηγές σε σύγκριση με τον ανθρώπινο παράγοντα είναι μηδαμινές (Dotaniya et al., 2018).

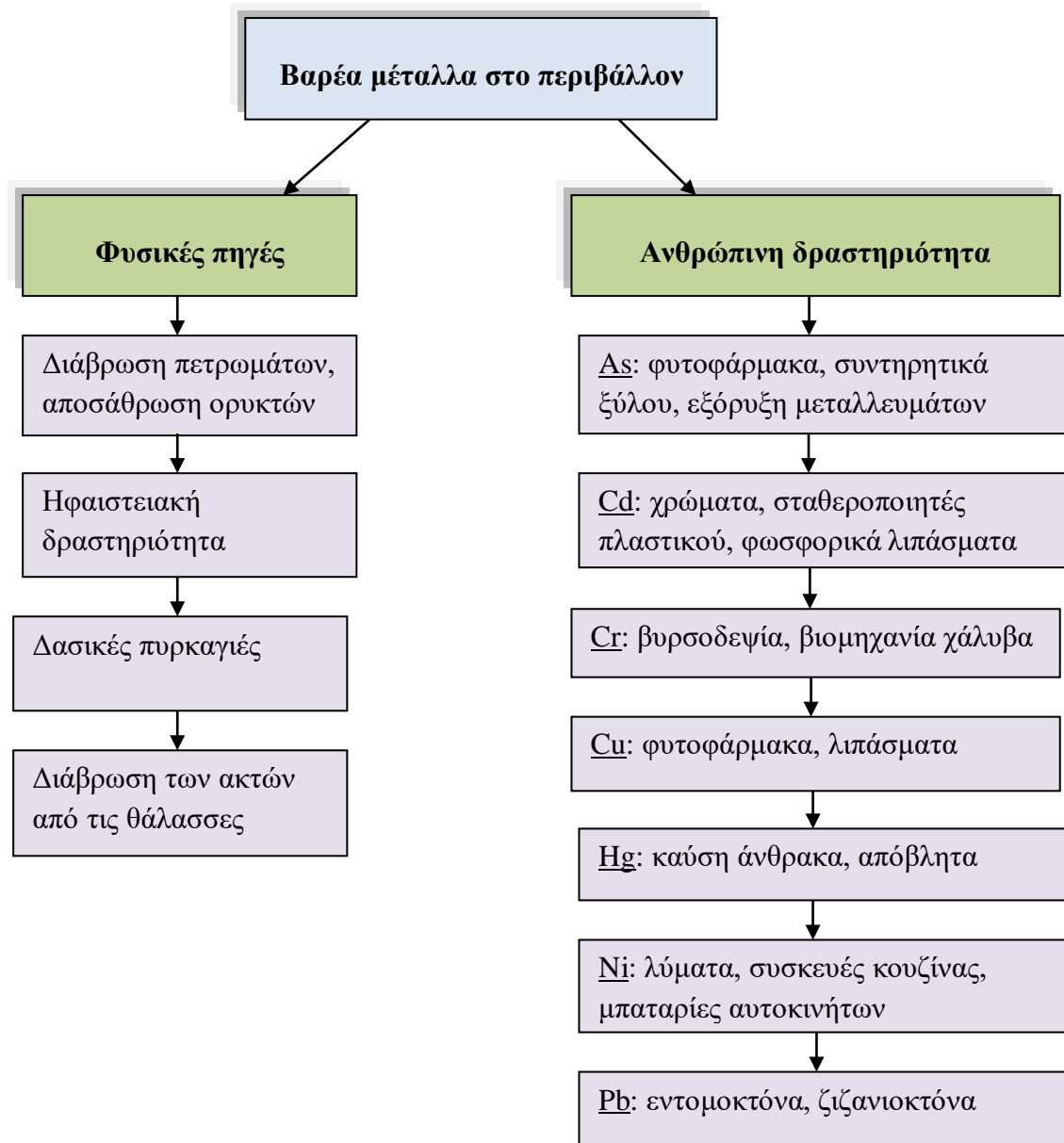
Φυσικές πηγές βαρέων μετάλλων αποτελούν τα ορυκτά και τα πετρώματα, απ' όπου μεταφέρονται είτε στα εδάφη και κατ' επέκταση στην ατμόσφαιρα υπό τη μορφή αιωρούμενης σκόνης είτε στα υπόγεια και επιφανειακά νερά μέσω έκλυσης ή επιφανειακής απορροής είτε στα φυτά διαμέσου του ριζικού τους συστήματος. Στις περιπτώσεις αυτές, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων γίνονται τοξικές όταν τα μητρικά πετρώματα του εδάφους είναι εξαιρετικά εμπλουτισμένα με ένα ή περισσότερα

βαρέα μέταλλα και απαντώνται κυρίως σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ορυχεία (Tchounpou et al., 2014). Άλλοι φυσικοί παράγοντες ρύπανσης με βαρέα μέταλλα είναι η ηφαιστειακή δραστηριότητα, οι ανεξέλεγκτες πυρκαγιές όπως και η διάβρωση των ακτών από τις θάλασσες (Γεντεκάκης, 2010).

Ομολογουμένως, οι ανθρώπινες πρακτικές είναι εκείνες που κατά κόρον οδηγούν στην εισαγωγή διαφόρων ενώσεων και ουσιών στο περιβάλλον οι οποίες και περιέχουν διάφορες ποσότητες βαρέων μετάλλων επιβλαβείς για το οικοσύστημα. Η ρύπανση του περιβάλλοντος από τα βαρέα μέταλλα εκδηλώνεται κυρίως με τη μόλυνση του νερού. Οι σημαντικότερες από αυτές τις πρακτικές είναι οι ακόλουθες (U. S. Environmental Protection Agency, 1999):

- Η μη ορθολογική διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων (στερεά, υγρά και αέρια), των αστικών και ζωικών αποβλήτων καθώς και των απορριμμάτων (στερεά, υγρά και αέρια).
- Οι εκπομπές καυσαερίων από τις καύσεις των μηχανών (βενζίνη, πετρέλαιο, λιπαντικά).
- Η εφαρμογή φωσφορικών λιπασμάτων, ζιζανιοκτόνων και εντομοκτόνων στα πλαίσια των γεωργικών πρακτικών.
- Η παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.
- Η εξόρυξη και επεξεργασία ορυκτών.

Άλλες πηγές, εξίσου σημαντικές αποτελούν οι σταθεροποιητές των πλαστικών, τα χρώματα που υπάρχουν στα στιλβωτικά, τα συντηρητικά χάρτου και ξύλου που περιέχουν ψευδάργυρο (Zn), μόλυβδο (Pb) ή κάδμιο (Cd) καθώς και οι μπαταρίες αυτοκινήτων. Οι εν λόγω πηγές συγκροτούν ένα μεγάλο κατάλογο υλικών που έχουν ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση των βαρέων μετάλλων στο έδαφος και στη συνέχεια στο υδάτινο περιβάλλον (Chougui, 2014).



**Διάγραμμα 3.** Φυσικές πηγές ρύπανσης και ανθρώπινες πρακτικές που σχετίζονται με τις εκπομπές βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον (Das & Dash, 2017)

### 2.5.3.1 Φυσικές πηγές

Στο περιβάλλον παρατηρείται ένα ευρύ φάσμα φυσικών πηγών ρύπανσης που σχετίζονται με τις εκπομπές βαρέων μετάλλων. Πρωταρχικό ρόλο διαδραματίζουν τα μητρικά υλικά από τα οποία παράγεται το έδαφος το οποίο είναι αποδέκτης βαρέων μετάλλων καθώς και μέσο για την αποθήκευση και τη μεταφορά τους στον αέρα, το νερό και τους οργανισμούς (Khan et al., 2013).

Σύμφωνα με τον Huang και τους συνεργάτες του (2014), «η ορυκτολογική σύσταση του μητρικού πετρώματος διαμορφώνει το αναγωγικό ή το οξειδωτικό περιβάλλον

επιταχύνοντας ή επιβραδύνοντας τις αντίστοιχες χημικές διαδικασίες και κατ' επέκταση τις συγκεντρώσεις που προσδιορίζουν την τοξικότητα». Για παράδειγμα, τα σερπεντινικά εδάφη, τα οποία αποτελούνται από μια απροσδιόριστα καθορισμένη σειρά υποστρωμάτων που προέκυψαν από την αποσάθρωση πετρωμάτων με υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου και μαγνησίου, χαρακτηρίζονται από αυξημένα επίπεδα βαρέων μετάλλων (κυρίως Fe, Ni, Zn, Co, Cr και Mg), χαμηλή υγρασία και χαμηλές συγκεντρώσεις μικροστοιχείων (Arlianoutsou et al., 1993). Για τον λόγο αυτό είναι αφιλόξενα για τα περισσότερα φυτικά είδη, είτε γιατί τα ίδια δεν αναπτύσσονται είτε γιατί καταφέρνουν μεν να έχουν ανάπτυξη παρουσιάζουν δε αρκετά φυσιολογικά και μορφολογικά προβλήματα (Harrison & Rajakaruna, 2011).

Άλλοι φυσικοί παράγοντες ρύπανσης με βαρέα μέταλλα είναι η ηφαιστειακή δραστηριότητα και οι ανεξέλεγκτες πυρκαγιές που πολλές φορές ξεσπούν λόγω υψηλών θερμοκρασιών τους καλοκαιρινούς μήνες (Peralta-Videa et al., 2009). Επίσης, η διάβρωση των ακτών όπως και οι μεγάλοι υδάτινοι όγκοι (ωκεανοί, ποτάμια, λίμνες και θάλασσες) αποτελούν σημαντικά αίτια ρύπανσης αλλά και εξάπλωσής της (Γεντεκάκης, 2010). Λόγω φυσικών γεωχημικών διαδικασιών είναι δυνατό να συγκεντρώνονται υψηλές ποσότητες βαρέων μετάλλων στο φυσικό περιβάλλον. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις αυτές περιορίζονται σε ορισμένες μόνο περιοχές και σε μεγάλες αποστάσεις ανά την έκταση της γης ώστε να μην αποτελούν έναν σπουδαίο παράγοντα ρύπανσης.

### **2.5.3.2. Ανθρώπινη δραστηριότητα**

Ο άνθρωπος από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα καταχράται την εξέλιξη της τεχνολογίας για την επιβίωση αλλά και την κυριαρχία του πάνω στη γη, εις βάρος όμως της φύσης. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο αιώνων, σημειώθηκε δραματική αύξηση των εκπομπών βαρέων μετάλλων, οι οποίες και υπερέβησαν κατά πολύ τις εκπομπές που προέρχονται από φυσικές πηγές (Peralta-Videa et al., 2009; Yi et al., 2018). Η έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα, που στην περίπτωση των βαρέων μετάλλων συνήθως αφορά την επεξεργασία των πρώτων υλών διαβίωσης, συνοδεύεται με την ανεπιθύμητη έμμεση ή άμεση απελευθέρωση τοξικών παραπροϊόντων, τα οποία και υπερτερούν των φυσικών εκπομπών βαρέων μετάλλων (Lepp, 2012).

Μια ακόμη παράμετρος που συμβάλει στη ρύπανση από βαρέα μέταλλα σχετίζεται με την οικονομία και την κοινωνία. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η οικονομική κρίση είναι έντονη, η ανάγκη για επιβίωση οδηγεί σε αύξηση του αριθμού των ανθρώπων που

ασχολούνται με τη γεωργία. Ωστόσο, οι λανθασμένες γεωργικές πρακτικές, που οφείλονται είτε σε άγνοια είτε σε σκευάσματα που έχουν αποσυρθεί, εντείνουν την εισαγωγή βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον. Επιπρόσθετα, και η ποιότητα του νερού άρδευσης των χωρών αυτών δεν ενδείκνυται για τις γεωργικές καλλιέργειες (Koumoliou et al., 2013). Συγκεκριμένα, σε ερευνητική μελέτη γίνεται αναφορά στη Ζιμπάμπουε της νοτιοανατολικής Αφρικής, όπου υπάρχει μεγάλη ανησυχία για την καλλιέργεια λαχανικών σε εδάφη με λυματολάσπη ή σε εδάφη που αρδεύονται με προσμίξεις λυμάτων και ιλύος. Έπειτα από ανάλυση των στοιχείων Cd, Cu, Pb και Zn σε λαχανικά όπως: ντομάτα, φασόλια, αραβόσιτος, ζαχαροκάλαμο και πιπεριά βρέθηκε ότι οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων ήταν πάνω από τα επιτρεπτά όρια. Η έρευνα καταλήγει επισημαίνοντας τους κινδύνους για την υγεία των καταναλωτών (Muchuweti et al., 2006).

### Βιομηχανική δραστηριότητα

Οι εκπομπές ρύπων από τις ποικίλες βιομηχανικές δραστηριότητες (Πίν. 7) και συγκεκριμένα αέριων ρύπων, αερολυμάτων, καπνού και σκόνης υπερτερούν σε σχέση με τη ρύπανση που προκαλείται από την ανθρώπινη δραστηριότητα στο πλαίσιο κάλυψης των προσωπικών καθημερινών αναγκών (Islam et al., 2007). Η εκτεταμένη συσσώρευση βαρέων μετάλλων σε καλλιεργούμενα και μη εδάφη αποτελεί μια αρνητική μεταβλητή της βιομηχανικής δραστηριότητας η οποία οφείλεται σε απόβλητα μεταλλείων, διαφόρων βιομηχανιών και σε κατακρημνίσματα ρύπων (Ai et al., 2018; Li et al., 2018).

Δύο από τις μεγαλύτερες πηγές εκπομπής ρύπων είναι η παραγωγή ενέργειας και η επεξεργασία υγρών και στερεών αποβλήτων (Rene et al., 2017). Οι ρύποι που παράγονται σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς από τις καύσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμική είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι (Özkuş, 2016). Ένας υπερφορτωμένος ή με ελλιπή υποδομή βιολογικός καθαρισμός, για παράδειγμα, μπορεί να προκαλέσει σημαντικής έκτασης περιβαλλοντική ρύπανση σε τοπική κλίμακα (Liu et al., 2018). Σε εργοστάσια παρασκευής σαπουνιών και απορρυπαντικών, οι εκπομπές των αιωρούμενων σωματιδίων είναι τόσο μεγάλες που συγκρίνονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλούν τα διυλιστήρια (Γεντεκάκης, 2010).

Η βιομηχανία μετάλλων, ωστόσο, έχει τον πρωταγωνιστικό ρόλο στις εκπομπές βαρέων μετάλλων με τις βασικές από αυτές να είναι της μορφής οξειδίων, καπνού και σκόνης. Από την αρχή της ιστορίας, οι βιομηχανίες σιδήρου και χάλυβα έχουν συνδεθεί με πολύ έντονες εκπομπές σωματιδιακών ρύπων με αποτέλεσμα σήμερα να εφαρμόζονται



αυστηρά κριτήρια για χαμηλά όρια εκπομπών (Das & Dash, 2017). Όσον αφορά τις αρνητικές επιδράσεις των βιομηχανιών χαλκού, μολύβδου και ψευδαργύρου ήταν ανέκαθεν πολύ μεγάλες για το περιβάλλον. Επιπρόσθετα, η καύση του πετρελαίου και της βενζίνης δημιουργεί σύμπλοκα μετάλλων τα οποία μεταφέρονται με τον αέρα στο έδαφος.

Γενικότερα, τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, οι εγκαταστάσεις οικιακής θέρμανσης και η καύση απορριμμάτων συμπεριλαμβάνονται στα λεγόμενα αστικά απόβλητα και αποτελούν μια πολύ σημαντική πηγή εισόδου των βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον κοντά στα αστικά κέντρα (Rene et al., 2017). Ακόμη, στα αστικά λύματα συμπεριλαμβάνονται και τα υπολείμματα απορρυπαντικών, τα οποία λόγω των ενζύμων τους ενισχύουν τόσο τη συγκέντρωση όσο και τη δράση των βαρέων μετάλλων. Όλα αυτά τα βιομηχανικά λύματα μαζί με τα αστικά απόβλητα που εμπεριέχουν τοξικές ουσίες μετάλλων εναποτίθενται είτε στο έδαφος ή στα επιφανειακά ύδατα είτε ακόμα αιωρούνται στην ατμόσφαιρα μεταφέροντας ίχνη βαρέων μετάλλων στις διάφορες καλλιέργειες και κατ' επέκταση στους καταναλωτές (Sridhara et al., 2008).

**Πίνακας 7.** Συνοπτική παρουσίαση βιομηχανιών και των αντίστοιχων βαρέων μετάλλων (Das & Dash, 2017)

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ	ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ
❖ Βιομηχανία εξόρυξης μετάλλων	❖ Al, As, Cd, Hg, Mn, Mo, Pb, Pd
❖ Ηλεκτρική βιομηχανία	❖ Ag, As, Be, Bi, Cd, Cr, Cu, Hg, In, Pb, Ni, Zn
❖ Χημική βιομηχανία	❖ Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, Pb, Sn, Zn
❖ Βιομηχανία βαφών - χρωστικών	❖ Al, As, Cd, Cu, Fe, Pb, Sb, Tl, Ti
❖ Τυπογραφία	❖ Ba, Cr, Os, Pb, Ti, Zn
❖ Φωτογραφία	❖ Ag, Au, Cd, Cr, Mo, Pb
❖ Βιομηχανία γυαλιού	❖ As, Ba, Co, Ni, Ti
❖ Βιομηχανία χαρτιού	❖ Al, Cr, Cu, Hg, Pd, Sb, Ta, Ti
❖ Βυρσοδεψία	❖ Al, As, Ba, Cr, Cu, Fe, Hg, Zn
❖ Φαρμακευτική βιομηχανία	❖ Al, Cu, Fe, Ga, Hg, Os, Ta
❖ Υφαντουργία	❖ Al, Ag, Ba, Cd, Cu, Fe, Hg, Os, Ni, Sb
❖ Βιομηχανία πυρην. τεχνολογίας	❖ Ba, Cd, In
❖ Βιομηχανία λιπασμάτων	❖ Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pd, Ni, Zn
❖ Δωλιστήρια πετρελαίου	❖ Al, As, Cd, Cr, Fe, Ga, Hg, Pb, Ni, Zn

## Αστικά λύματα

Ως αστικά λύματα καλούνται τα μη στερεά απόβλητα που προέρχονται από τις κατοικίες και την εμπορική δραστηριότητα του εκάστοτε αστικού ιστού, η δε διαχείρισή τους λαμβάνει χώρα σε ειδικές εγκαταστάσεις μεγάλης ή μικρής κλίμακας (Ξένος, 2006). Χαρακτηρίζονται από την παρουσία ενός θολού υγρού, το οποίο περιέχει κυρίως νερό, αιωρούμενα στερεά σωματίδια, διαλυμένα συστατικά καθώς και μικροοργανισμούς και διακρίνονται για τη δυσάρεστη οσμή τους που κατά ένα μεγάλο μέρος προκαλείται από την αναερόβια διάσπαση του οργανικού υλικού από βακτήρια (Βλυσίδης, 2007).

Τα οργανικά υλικά που απαντώνται στα λύματα είναι συνήθως κόπρανα, ούρα, λίπη, έλαια, απορρυπαντικά, σαπούνια, υπολείμματα προϊόντων οικιακής χρήσης (πλαστικά) και υπολείμματα χαρτιού (Ξένος, 2006). Γενικά, τα αστικά λύματα προέρχονται από κατοικίες, σχολεία – πανεπιστήμια, χώρους εργασίας, δημόσιες υπηρεσίες, νοσοκομεία, βιοτεχνίες, εργαστηριακά και ιατρικά κέντρα (Βλυσίδης, 2007).

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίν. 8), παρουσιάζεται η ποσότητα (παροχή) αστικών λυμάτων ( $Q$ ) που παράγεται ανά ημέρα από διάφορες περιοχές προέλευσης. Η παροχή δίνεται από τον τύπο (Βλυσίδης, 2007):

$$Q_d = Q_{\max} \cdot n^{-1} \text{ [m}^3\text{/h]}, \text{ όπου } Q_{\max} = \alpha p Q_{\eta\mu},$$

- $\alpha = 0.7-0.85$
- $p = 2.25$
- $n = 10$  για εξυπηρετούμενο πληθυσμό ως 1.000 άτομα
- $n = 12$  για εξυπηρετούμενο πληθυσμό 1.000-10.000 άτομα
- $n = 14$  για εξυπηρετούμενο πληθυσμό 10.000-50.000 άτομα
- $n = 16$  για εξυπηρετούμενο πληθυσμό 50.000-150.000 άτομα
- $n = 18$  για εξυπηρετούμενο πληθυσμό >150.000 άτομα

**Πίνακας 8.** Παροχές (Q) αστικών λυμάτων σε lt/ημέρα από διάφορες περιοχές προέλευσης (Βλυσίδης, 2007)

ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ	ΠΑΡΟΧΕΣ Q (lt/ημέρα)
Κατοικία	200-300
Ξενοδοχείο (πελάτης)	150-230
Ξενοδοχείο (εργαζόμενος)	30-50
Γραφεία	50-70
Νοσοκομεία (κρεβάτι)	500-1000
Καφενεία	5-8
Εστιατόριο	30-38
Σχολείο	35-60
Κατασκήνωση	130-190

Στην Ελλάδα (Εικ. 1, Εικ. 2), τα λύματα που καταλήγουν στην Ψυτάλλεια, εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων στο λεκανοπέδιο Αττικής, ανέρχονται σε 750.000 m<sup>3</sup>/ημ. (Epoli.gr., 2019), τα λύματα τα οποία επεξεργάζεται η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) στην Άρτα φθάνουν τα 11.500 m<sup>3</sup>/ημ. (Δ.Ε.Υ.Α.Α.) ενώ η μέση παροχή λυμάτων για το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Σίνδου Θεσσαλονίκης αγγίζει τα 296.000m<sup>3</sup>/ημ. (Ε.Υ.Α.Θ.).

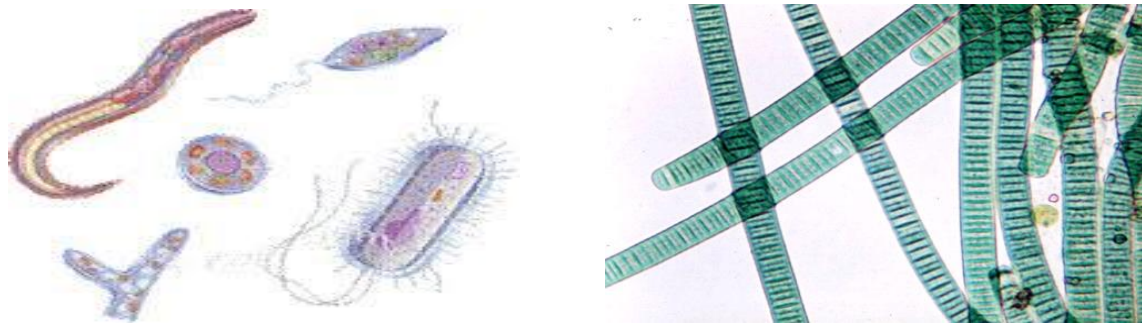


**Εικόνα 1.** Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων, Άρτα (Δ.Ε.Υ.Α.Α.)



**Εικόνα 2.** Μονάδες επεξεργασίας λυμάτων Ψυτάλλειας και Σίνδου Θεσσαλονίκης (Ε.Υ.Δ.Α.Π., Ε.Υ.Α.Θ.)

Γενικά, στα αστικά λύματα ανιχνεύονται παθογόνοι μικροοργανισμοί (Εικ. 3), συμβατικοί και μη συμβατικοί, οι οποίοι κατά την είσοδό τους στον ανθρώπινο οργανισμό προκαλούν ασθένειες που δύναται να είναι μεταδοτικές και σ' αυτούς ανήκουν τα βακτήρια της χολέρας, του τύφου, της δυσεντερίας, τα κυανοβακτήρια, που παράγουν τις λεγόμενες μικροτοξίνες (Μαυρίδου, 2014), τα κολοβακτηρίδια, οι ιοί της ηπατίτιδας, της πολιομυελίτιδας καθώς και μύκητες, όπως οι *Amoebae Naeglaria fowleri*, *Entamoeba histolytica*, *Giardia Lamblia*, *Cryptosporidium parvum* που προκαλούν μικροβιακή μόλυνση του νερού, των ζώων και των ανθρώπων (Envima, 2013).



**Εικόνα 3.** Μορφές παθογόνων μικροοργανισμών (Envima, 2013; Μαυρίδου, 2014)

Στους συμβατικούς ρύπους περιλαμβάνονται οι ανόργανες ενώσεις (Αμμωνιακά  $\text{NH}_4^+$ , Νιτρώδη  $\text{NO}_2^-$ , Νιτρικά  $\text{NO}_3^-$ , Φωσφορικά  $\text{PO}_4^{3-}$ ), με τα ανόργανα χημικά συστατικά του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P) να κυριαρχούν και οργανική ύλη (οργανικές ουσίες) που αφορά σε φαρμακευτικές ουσίες και προϊόντα προσωπικής φροντίδας (Ιατρού, 2012; Juliano & Magrini, 2017).

Στα αστικά λύματα περιέχονται και οι λεγόμενοι μη συμβατικοί ρύποι που αφορούν σε οργανικά δηλητήρια, ραδιενεργές ύλες, οξέα και βάσεις που μεταβάλλουν το pH του αποδέκτη και δεν είναι ανεκτά από τους ζώντες οργανισμούς τους καθώς και σε βαρέα μέταλλα (Νταρακάς, 2010). Η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στα αστικά λύματα σχετίζονται με την προέλευση των νερών και τις δραστηριότητες της εκάστοτε αστικής περιοχής. Βαρέα μέταλλα μπορούν να εντοπιστούν επίσης μέσα σε αστικά λύματα ιδιαίτερα όταν βιομηχανικές επιχειρήσεις εδρεύουν σε αστικά κέντρα. Επιπλέον, η παλαιώση καθώς και η σταδιακή διάβρωση των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης συνεισφέρει στην παρουσία βαρέων μετάλλων στα αστικά λύματα. Ορισμένα αποχετευτικά δίκτυα δέχονται και βιομηχανικές εκροές με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα αστικά λύματα. Ωστόσο, λύματα που προέρχονται από κοινότητες μικρού και μεσαίου μεγέθους, κατά κανόνα δεν είναι επιβαρυνμένα με μεγάλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, καθώς οι περιοχές αυτές δεν είναι ιδιαίτερα βιομηχανοποιημένες, για τον λόγο αυτό, μετά την επεξεργασία τους από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, προσφέρονται για επαναχρησιμοποίηση (Kalavrouziotis & Dracatos, 2002).

Βαρέα μέταλλα που μπορούν να ανιχνευθούν σε αστικά λύματα θεωρούνται ο υδράργυρος (Hg), το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb), το χρώμιο (Cr), ο μόλυβδος (Pb), το

μολυβδένιο (Mo), το νικέλιο (Ni), ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn), το σελήνιο (Se), ουσίες όπως τα θειούχα ( $S^{2-}$ ), τα κυανιούχα ( $CN^-$ ) και τα ραδιενεργά υλικά. Μεταξύ αυτών, το κάδμιο, ο χαλκός, ο υδράργυρος, το μολυβδένιο, το νικέλιο, το σελήνιο και ο ψευδάργυρος θεωρούνται επικίνδυνα, εάν εισαχθούν στα καλλιεργούμενα εδάφη κατά την άρδευση χωρίς έλεγχο (Council on Agricultural Science and Technology, 1976). Συνεπώς, η ρύπανση που προκαλείται από τα αστικά λύματα που καταλήγουν στα υπόγεια ύδατα είναι μεγάλη καθώς μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά τοξικά συμπτώματα στα φυτά του εδάφους. Στα εν λόγω συμπτώματα συγκαταλέγονται η χλώρωση και νέκρωση των φύλλων, η περιορισμένη ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, η μειωμένη ανάπτυξη των φυτών και η μειωμένη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος (Καραμπουρνιώτης, 2014).

Η διαθεσιμότητα και η πρόσληψη των βαρέων μετάλλων από τα φυτά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εδαφικές συνθήκες στις οποίες συγκαταλέγονται το pH, η παρουσία άλλων βαρέων μετάλλων, η εφαρμογή χημικών λιπασμάτων, η προσθήκη ασβέστου στο έδαφος, η κατεργασία του εδάφους και ο τρόπος διαχείρισης του νερού (Chen, 1992). Οι Alloway and Morgan (1986) διαπίστωσαν ότι το νικέλιο (Ni), όταν εφαρμόζεται σε οργανικά υποστρώματα (π.χ. λυματολάσπη), προσλαμβάνεται πιο εύκολα από τα φυτά σε αντίθεση με τα ανόργανα υποστρώματα. Τα φυτά απορροφούν περισσότερο κάδμιο και μόλυβδο από τα όξινα εδάφη παρά από τα ουδέτερα εδάφη (Chen et al., 2013). Σε ορισμένες δε περιπτώσεις, η παρουσία ή η απουσία άλλων δισθενών μετάλλων στο έδαφος μπορεί να επηρεάσει την πρόσληψη των βαρέων μετάλλων. Για παράδειγμα, τα στοιχεία ασβέστιο (Ca), μαγγάνιο (Mn) και ψευδάργυρος (Zn) θεωρείται ότι ανταγωνίζονται την πρόσληψη του καδμίου από τα φυτά (Cox, 2000).

Η ορθολογική χρήση των αστικών λυμάτων για αρδευτικούς σκοπούς, αν και συσσωρεύει βαρέα μέταλλα στην καλλιεργούμενη εδαφική ζώνη, δεν προκαλεί αρνητικές επιδράσεις στις καλλιέργειες, ακόμη και στην περίπτωση που εφαρμόζονται για μεγάλες χρονικές περιόδους. Η απορρόφηση των βαρέων μετάλλων από τους φυτικούς οργανισμούς παρατηρείται στις περιπτώσεις όπου: α) η συγκέντρωσή τους ξεπεράσει τα επίπεδα που έχουν καθοριστεί από τη διεθνή βιβλιογραφία είτε σε σχέση με την υγεία του ανθρώπου είτε σε σχέση με την παραγωγικότητα των φυτών (Πίν. 9), β) τα μέταλλα βρίσκονται σε ευκίνητη φάση (διαλυμένα στο εδαφικό διάλυμα), γ) το pH ξεπερνά το 6,5 ή το ποσοστό της οργανικής ουσίας είναι υψηλό. Το Cd και το Ni είναι τα πλέον

σημαντικά από πλευράς κινδύνου υγείας σε σχέση με άλλα μέταλλα λόγω της μεγαλύτερης τοξικότητάς τους στον άνθρωπο (Dracatos et al., 2002).

**Πίνακας 9.** Συνιστώμενες μέγιστες συγκεντρώσεις ορισμένων βαρέων μετάλλων στο αρδευτικό νερό (Westcot & Ayers, 1985)

<b>Βαρέα μέταλλα</b>	<b>Συνιστώμενη μέγιστη συγκέντρωση (mg/l)</b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
Cd	0,01	Είναι τοξικό στα φασόλια, παντζάρια και ζαχαρότευτλα. Συσσωρεύεται σε εδάφη και φυτικούς ιστούς σε συγκεντρώσεις που μπορεί να είναι επιβλαβείς για τους ανθρώπους.
Cu	0,20	Είναι τοξικό σε αρκετά φυτά, όταν οι συγκεντρώσεις του στο θρεπτικό διάλυμα κυμαίνονται από 0,1 έως 1,0 mg/l.
Mn	0,20	Τοξικό σε διάφορα φυτά αλλά συνήθως μόνο σε όξινα εδάφη.
Mo	0,01	Μη τοξικό για τα φυτά όταν βρίσκεται σε κανονικές συγκεντρώσεις στο έδαφος και στο νερό.
Ni	0,20	Τοξικό σε διάφορα φυτά. Μειωμένη τοξικότητα σε ουδέτερα ή αλκαλικά εδάφη.
Se	0,02	Τοξικό στα φυτά ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις, όπως 0,025 mg/l.
Zn	2,00	Τοξικό σε πολλά φυτά σε μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων. Η τοξικότητά του μειώνεται όταν το pH>6 και τα εδάφη είναι καλής δομής ή οργανικά.

## Γεωργία

Η γεωργία συγκαταλέγεται στις βασικότερες πηγές εκπομπής βαρέων μετάλλων λόγω της ατμοσφαιρικής, εδαφικής και υδρόβιας ρύπανσης που προκαλείται εξαιτίας της απορροής των εισροών (ζιζανιοκτόνα, συνθετικά λιπάσματα, φυτοπροστατευτικά προϊόντα) στο έδαφος (Radwan & Salama, 2006; Yi et al., 2018). Μεγάλες ποσότητες χημικών ουσιών εφαρμόζονται ετησίως σε γεωργικά εδάφη ως λιπάσματα και φυτοφάρμακα με άμεση συνέπεια την αύξηση της ρύπανσης με βαρέα μέταλλα όπως το κάδμιο (Cd), το αρσενικό (As) και ο μόλυβδος (Pb) (Gebrekidan et al., 2013).

Επιπλέον, ερευνητικές μελέτες τεκμηριώνουν την παρουσία βαρέων μετάλλων σε λιπάσματα που περιέχουν ιχνοστοιχεία όπως τον ψευδάργυρο και σε οργανικά λιπάσματα, όπως η κοπριά (Das & Dash, 2017). Τα φωσφορικά δε λιπάσματα διακρίνονται για τις υψηλότερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων εξαιτίας των πρώτων υλών παρασκευής τους. Τα φωσφορικά ορυκτά, που είναι μακράν η μεγαλύτερη πηγή P για λιπάσματα, είναι εμπλουτισμένα με μεγάλο αριθμό στοιχείων. Εξαιτίας των προσμείξεων που υπάρχουν στα λιπάσματα, συχνά τα καλλιεργούμενα εδάφη δύναται να συσσωρεύουν σημαντικές συγκεντρώσεις ορισμένων βαρέων μετάλλων, όπως: αρσενικό, κάδμιο και ψευδάργυρο (Alloway, 2012).

Ωστόσο, τα φωσφορικά λιπάσματα δεν είναι τα μοναδικά με μετρήσιμα επίπεδα βαρέων μετάλλων. Ο Atafar και οι συνεργάτες του (2010) διερεύνησαν τις συγκεντρώσεις των Cd, Pb, και As σε εδάφη με καλλιέργεια σιταριού και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις των εν λόγω μετάλλων παρουσίασαν σημαντική αύξηση λόγω της υπερβολικής εφαρμογής λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων που χρησιμοποιούνταν για παράσιτα και ζιζάνια. Ιδιαίτερη αύξηση κατείχε ο μόλυβδος.

Πέραν του είδους των λιπασμάτων και των φυτοπροστατευτικών προϊόντων, το σύστημα καλλιέργειας διαφοροποιεί τη ρύπανση από βαρέα μέταλλα. Ο Hu και οι συνεργάτες του (2013), στο πλαίσιο της έρευνας τους στο Nanjing της Κίνας, προχώρησαν σε συλλογή και ανάλυση εδάφους, όπου καλλιεργούνταν λαχανικά με διαφορετικά συστήματα καλλιέργειας και συμπέραναν ότι η εντατική μορφή καλλιέργειας είχε ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση Cd, Pb, Cu και Zn στα επιφανειακά εδάφη. Παρόμοια μελέτη διεξήγαγαν ο Chen και οι συνεργάτες του (2013) σε παραγωγή διαφορετικών λαχανοκομικών ειδών τόσο σε θερμοκήπια όσο και σε υπαίθριες καλλιέργειες. Κατά την ολοκλήρωσή της διαπιστώθηκε ότι σε συνθήκες θερμοκηπίου αυξήθηκαν σημαντικά οι



συγκεντρώσεις ορισμένων βαρέων μετάλλων στο έδαφος συγκριτικά με τις υπαίθριες καλλιέργειες.

#### **2.5.4 Μηχανισμοί της τοξικής δράσης των βαρέων μετάλλων**

Η τοξική δράση των βαρέων μετάλλων στους ζώντες οργανισμούς εκδηλώνεται με ποικίλους μηχανισμούς. Ο κυριότερος από αυτούς είναι η αναστολή της δράσης των διαφόρων ενζυμικών συστημάτων λόγω σχηματισμού χημικών ενώσεων των μεταλλοϊόντων με τις δραστικές ομάδες των οργανικών μορίων των ενζύμων. Λαμβάνοντας υπόψη τον μεγάλο αριθμό των διαφόρων ενζύμων που απαντώνται στα ζώντα κύτταρα, το εύρος της τοξικής δράσης των μετάλλων είναι πολύ μεγάλο. Ειδικότερα, τα βαρέα μέταλλα συσσωρεύονται σε διάφορα τμήματα των ζώντων οργανισμών και ασκούν αρνητική επίδραση σε διαφορετικά ένζυμα και δραστικές ομάδες, όπως για παράδειγμα τα Cd, Cu, Hg, Pb που αντιδρούν με τις μεμβράνες των κυττάρων περιορίζοντας την περατότητά τους, γεγονός που οδηγεί στον περιορισμό ή τη διακοπή της μεταφοράς Na, K, Cl ή των οργανικών μορίων διαμέσου της μεμβράνης (Sayed, 1999). Στα πλαίσια ερευνητικών μελετών έχει διαπιστωθεί ότι ορισμένοι συνδυασμοί μετάλλων (Ni+Zn, Cu+Zn, Cu+Cd) επιφέρουν αύξηση της τοξικής δράσης μέχρι και σε πενταπλάσια τιμή από εκείνη που προκύπτει από την άθροιση των επιμέρους δράσεων (Γκέκας κ. ά., 2002).

Για την αντιμετώπιση των ποικίλων διαταραχών που υφίστανται από τα βαρέα μέταλλα, οι οργανισμοί διαθέτουν μηχανισμούς απομάκρυνσης και αναπτύσσουν μηχανισμούς ανθεκτικότητας και προσαρμογής (Beedy, 1991). Οι εν λόγω μηχανισμοί περιλαμβάνουν αντιδράσεις οξειδοαναγωγής ή υδρόλυσης αλλά και την απομόνωση των μετάλλων σε υποκυτταρικές δομές, όπως τα λυσοσώματα ή άλλα εξειδικευμένα σωματίδια καθώς και τη σύνδεση των βαρέων μετάλλων με χηλικούς υποκαταστάτες που βοηθούν στη διαδικασία της απέκκρισης από τον οργανισμό. Η τοξική δράση των βαρέων μετάλλων λαμβάνει χώρα τη στιγμή που οι μηχανισμοί αυτοί απενεργοποιούνται από την παρουσία των πρώτων (Mason, 1991).

#### **2.5.5 Δείκτες τοξικότητας**

Για την έκφραση της τοξικότητας των βαρέων μετάλλων χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες, μερικοί εκ των οποίων είναι (Κυρανάς, 2010):

- LC50 (Lethal Concentration): εκφράζει τη μέση θανατηφόρα συγκέντρωση της τοξικής ουσίας που προκαλεί τον θάνατο στο 50% του πληθυσμού που εκτίθενται σε αυτή μέσα σε χρονικό διάστημα 24 ωρών. Εκφράζεται σε μονάδες συγκέντρωσης (mg/lit ή mg/kg) της τοξικής ουσίας στον διαλύτη της. Όταν τα ζώα εκτίθενται σε χημικές ουσίες μέσω του αέρα που αναπνέουν ή του νερού που καταναλώνουν, η δόση που λαμβάνουν δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί ως δόση από το στόμα ή ως συγκέντρωση στην τροφή, για τον λόγο αυτό η τοξικότητα εκφράζεται ως συγκέντρωση ουσίας στο νερό ή τον αέρα.
- LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level): αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο συγκέντρωσης της τοξικής ουσίας, στην οποία όταν εκτεθεί ο οργανισμός παρατηρούνται δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία του. Εκφράζεται σε mg τοξικής ουσίας/kg σωματικού βάρους του οργανισμού.
- NOAEL (No Observed Adverse Effect Level): είναι το επίπεδο συγκέντρωσης της τοξικής ουσίας στην οποία όταν εκτεθεί ο οργανισμός δεν παρατηρούνται δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία του. Εκφράζεται σε mg τοξικής ουσίας/kg σωματικού βάρους του οργανισμού.

#### **2.5.6 Επιδράσεις των βαρέων μετάλλων στην ανθρώπινη υγεία**

Τα βαρέα μέταλλα δηλητηριάζουν τον οργανισμό προκαλώντας τη διάσπαση των κυτταρικών ενζύμων (βιολογικά δραστικών πρωτεϊνών), τα οποία δρουν ως καταλύτες των πολύτιμων μετάλλων, όπως το μαγνήσιο, ο ψευδάργυρος και το σελήνιο μεταβάλλοντας την ταχύτητα για κάθε περαιτέρω βιοχημική αντίδραση που συμβαίνει μέσα στο ανθρώπινο σώμα (Xu & Sparks, 2013). Επιπλέον, τα βαρέα μέταλλα έχουν την ικανότητα να αντικαθιστούν τα θρεπτικά στοιχεία σε ενζυμικές λειτουργίες. Στην περίπτωση αυτή, το μέταλλο παρεμποδίζει ή άλλες φορές αλλοιώνει χιλιάδες ένζυμα (Braunwald, 2001). Επίσης, τα βαρέα μέταλλα μπορούν να αντικαθιστούν άλλες ουσίες σε ιστούς, όπως οι αρτηρίες, οι αρθρώσεις, τα οστά και οι μύες που με τη σειρά τους αποδυναμώνονται λόγω της διαδικασίας της αντικατάστασης που λαμβάνει χώρα. Συνεπώς, τα βαρέα μέταλλα επηρεάζουν όλα τα συστήματα του οργανισμού και κυρίως το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ), το Περιφερικό Νευρικό Σύστημα (ΠΝΣ), το αιμοποιητικό, το νεφρικό και το καρδιαγγειακό (Δημητριάδης, 2009). Η τοξική επίδραση ενός μετάλλου μπορεί να εκδηλωθεί ως οξεία ή χρόνια. Η οξεία τοξικότητα προέρχεται από υψηλή δόση και οδηγεί στην εμφάνιση συμπτωμάτων και σε βλάβες μη αναστρέψιμες ενώ η χρόνια προκύπτει από

μακροχρόνια έκθεση του οργανισμού σε χαμηλές συγκεντρώσεις μετάλλων. Η χρόνια δηλητηρίαση δύναται να αντιστραφεί με διακοπή της έκθεσης (Van Loon, 1985).

### **3. Εξυγίανση των ρυπασμένων εδαφών**

#### **3.1 Τεχνολογίες αποκατάστασης υποβαθμισμένων εδαφών**

Η αποκατάσταση των υποβαθμισμένων εδαφών αναφέρεται στο σύνολο των ενεργειών που αποσκοπούν στη μείωση ή στην εξάλειψη των παραγόντων που βλάπτουν τις εδαφικές λειτουργίες με τη χρήση εισροών έτσι ώστε να επιτευχθεί η εξυγίανσή τους. Ένα σχέδιο αποκατάστασης της εδαφικής υγείας προϋποθέτει αρχικά την απομάκρυνση των αιτιών της υποβάθμισης και ακολούθως την αντιμετώπιση των επιπτώσεων που προκλήθηκαν με τελικό στόχο τη δημιουργία ενός αυτοσυντηρούμενου συστήματος, όπως αυτό υπαγορεύεται από τις οικολογικές, κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής (Logan, 1992).

Οι τεχνολογίες αποκατάστασης διακρίνονται σε:

- ❖ μηχανικές, στην περίπτωση που οι εισροές είναι φυσικές (απομάκρυνση εδαφών) ή χημικές (κινητοποίηση – ακινητοποίηση ρύπων με χρήση χημικών ουσιών) και
- ❖ βιολογικές, όταν οι εισροές είναι μικροοργανισμοί, βακτήρια, ένζυμα, φυτά.

Τόσο οι μηχανικές όσο και οι βιολογικές τεχνολογίες εφαρμόζονται είτε επί τόπου (in situ), δηλαδή χωρίς την απομάκρυνση του ρυπασμένου εδάφους είτε εκτός τόπου (ex situ), με την απομάκρυνση του ρυπασμένου μέσου και την επεξεργασία του μακριά από το πεδίο, σε ειδικές εγκαταστάσεις. Ειδικότερα, οι επί τόπου τεχνολογίες αποκατάστασης υποβαθμισμένων εδαφών εφαρμόζονται στο ίδιο το έδαφος και προκαλούν όσο το δυνατό μικρότερη διαταραχή στο εδαφικό οικοσύστημα. Αντιθέτως, οι εκτός τόπου τεχνολογίες αποκατάστασης απαιτούν την εκσκαφή του εδάφους ή την άντληση του υπόγειου νερού, τα οποία στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία. Επιπλέον, περιλαμβάνουν την εφαρμογή διαφόρων φυσικών, χημικών, μικροβιακών ή και θερμικών τεχνικών στην εκσκαμμένη εδαφική μάζα στο πλαίσιο της οποίας επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός, η καταστροφή, η εξουδετέρωση ή η σταθεροποίηση των ρύπων της. Συνήθως, η εκσκαφή και η επανατοποθέτηση εφαρμόζονται σε εδάφη που παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά ρύπανσης και έχουν μικρή έκταση (Ζαλίδης, 2002).

## 3.2 Μηχανικές τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών

Οι μηχανικές τεχνολογίες αποκατάστασης επιφέρουν αλλαγές στις φυσικοχημικές ιδιότητες των ρυπαντών και του εδάφους στο οποίο έχουν συσσωρευτεί. Ανάλογα με την επίδραση που έχουν στη διαλυτότητα και στην κινητοποίηση των ρύπων διακρίνονται στις τεχνολογίες κινητοποίησης και στις τεχνολογίες ακινητοποίησης.

Οι μηχανικές τεχνολογίες κινητοποίησης έχουν ως σκοπό την αύξηση της διαλυτότητας και την κινητοποίηση των ρύπων, οι οποίοι τελικά οδηγούνται έξω από τη ρυπασμένη εδαφική μάζα. Στις μηχανικές τεχνολογίες κινητοποίησης των ρύπων ανήκουν οι εξής (Ζαλίδης, 2002):

➤ Τεχνική της εκχύλισης των πτητικών οργανικών ενώσεων σε κενό αέρος

Η αρχή λειτουργίας της συνίσταται στη γρήγορη μεταφορά των πτητικών οργανικών ενώσεων από τη στερεά και την υγρή φάση του ρυπασμένου εδάφους στην αέρια. Αυτό γίνεται με εισαγωγή ρεύματος αέρα στη ρυπασμένη εδαφική μάζα δια μέσου των πόρων της, αφού πρώτα έχει εφαρμοσθεί κενό αέρος κατά μήκος μιας λεπτής εδαφικής τομής έτσι ώστε να επιτευχθεί η εκχύλιση των ατμών. Στη συνέχεια, οι ρυπασμένοι ατμοί αντλούνται έξω από το έδαφος, όπου και υφίστανται επεξεργασία με ενεργό άνθρακα (Malmanis et al., 1989).

➤ Τεχνική της ηλεκτρο-ώσμωσης

Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμεύει στην επιτόπια απομάκρυνση διαφόρων οργανικών ρύπων και βαρέων μετάλλων από ρυπασμένα εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα. Η αρχή λειτουργίας της συνίσταται στην εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που τοποθετούνται μέσα στο ρυπασμένο έδαφος. Η διαφορά δυναμικού προκαλεί κίνηση των ρύπων από την άνοδο προς την κάθοδο. Με αυτό τον τρόπο οι διάφοροι οργανικοί ρύποι καθώς και τα βαρέα μέταλλα συλλέγονται και στη συνέχεια υφίστανται επεξεργασία (Shapiro et al., 1990).

➤ Τεχνική της ηλεκτρο-ακουστικής εκχύλισης

Η νέα αυτή τεχνική αποτελεί συνδυασμό της δημιουργίας διαφοράς δυναμικού και της χρήσης ακουστικών κυμάτων, τα οποία προάγουν την κινητικότητα των ακινητοποιημένων (προσροφημένων) οργανικών και ανόργανων ρύπων στα ρυπασμένα εδάφη. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί ακουστικές συχνότητες για τη

θέρμανση μεγάλων όγκων ρυπασμένου εδάφους επί τόπου. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου συνίσταται στην εξάτμιση (εξαέρωση) διαφόρων χλωριωμένων οργανικών ρύπων καθώς και αλειφατικών και αρωματικών κλασμάτων ορυκτών καυσίμων που έχουν ρυπάνει το εδαφικό οικοσύστημα (Hinchee et al., 1990).

➤ Τεχνική του διαμερισμού της ρυπασμένης εδαφικής μάζας με πεπιεσμένο αέρα και στη συνέχεια εκχύλιση και καταλυτική οξείδωση των πτητικών οργανικών ρύπων

Η αρχή λειτουργίας της καινούργιας αυτής τεχνικής συνίσταται στη χρήση αέρα υψηλής πίεσης για τον διαμερισμό των οργανικών ουσιών μεγάλων ρυπασμένων γεωλογικών συστημάτων με χαμηλή διαπερατότητα. Έτσι, διευκολύνεται η εκχύλιση των ατμών των πτητικών οργανικών ενώσεων οι οποίοι στη συνέχεια συλλέγονται και υφίστανται επεξεργασία με καταλυτική οξείδωση στην επιφάνεια του εδάφους (Shapiro et al., 1990).

➤ Τεχνική της θερμικής προσρόφησης των ρύπων σε χαμηλές θερμοκρασίες

Η αρχή λειτουργίας της εν λόγω τεχνικής βασίζεται στη χρήση θερμού ρεύματος αέρα για τη θερμική προσρόφηση των ρύπων του εδάφους, σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με την ανακίνηση του ρυπασμένου εδάφους. Με τη διαδικασία αυτή οι ρύποι μεταφέρονται από τη στερεά και την υγρή φάση του εδάφους στο θερμό ρεύμα αέρα, το οποίο στη συνέχεια υφίσταται επεξεργασία πριν αφεθεί ελεύθερο στην ατμόσφαιρα (Hinchee et al., 1990).

➤ Τεχνική της απόπλυσης του εδάφους με ελεγχόμενη κατακόρυφη έκπλυση των ρύπων (Soil Washing)

Κατά την τεχνική της απόπλυσης το ρυπασμένο έδαφος σκάβεται και στη συνέχεια υφίσταται κατεργασία (πλένεται) με νερό, οξύ, χημική ένωση (π.χ. EDTA), οργανικό ή ανόργανο διαλύτη για την απομάκρυνση των ρύπων του. Κατά την επιτόπου εφαρμογή της τεχνολογίας απόπλυσης, το νερό και οι διάφοροι φορείς εκχύλισης εισάγονται στη ρυπασμένη εδαφική ζώνη και στη συνέχεια το υγρό της απόπλυσης αντλείται έξω από το έδαφος διαμέσου μιας λεπτής κατακόρυφης εδαφικής τομής και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία (Chawla et al., 1990).

Οι μηχανικές τεχνολογίες ακινητοποίησης, γνωστές και ως τεχνολογίες σταθεροποίησης και στερεοποίησης, στοχεύουν στη μείωση της διαλυτότητας και κινητικότητας των ρύπων στο έδαφος. Πρόκειται για τεχνολογίες που έχουν

χρησιμοποιηθεί ευρέως στη διαχείριση επικίνδυνων και τοξικών ρύπων, κατά την οποία οι ρύποι αναμειγνύονται με υλικά (τσιμέντο, άσβεστος, άργιλος κ.α.) ώστε να δημιουργηθεί μια στερεή δομή ενώ παράλληλα λαμβάνει χώρα εγκλωβισμός των ρύπων μέσα στη δομή αυτή. Στις εν λόγω τεχνικές απομάκρυνσης των ρύπων περιλαμβάνονται (Ζαλίδης, 2002):

- Η τεχνική Σταθεροποίησης/Στερεοποίησης που βασίζεται στο τσιμέντο,
- Η τεχνική Σταθεροποίησης/Στερεοποίησης που βασίζεται στην άσβεστο,
- Η τεχνική Σταθεροποίησης/Στερεοποίησης που βασίζεται σε υλικά αργιλο-πυριτικής σύστασης,
- Οι θερμοπλαστικές τεχνικές Σταθεροποίησης/Στερεοποίησης (οι ρύποι ενσωματώνονται σε υλικά, όπως η άσφαλτος, το πολυαιθυλένιο και η παραφίνη),
- Η τεχνική μικροεγκυβωτισμού Σταθεροποίησης/Στερεοποίησης (τα λεπτόκοκκα συστατικά των αποβλήτων υπόκεινται σε στερεό σφράγισμα κυρίως με οργανική ρητίνη),
- Η στεγανοποίηση της ρυπασμένης εδαφικής μάζας (εγκατάσταση διαφόρων συστημάτων με σκοπό την παρεμπόδιση της μετακίνησης των ρύπων του εδάφους οριζόντια ή κατακόρυφα καθώς επίσης και την αποτροπή της εισόδου υπόγειου ή επιφανειακού νερού στη ρυπασμένη εδαφική περιοχή),
- Η τεχνική Σταθεροποίησης/Στερεοποίησης με οργανικά πολυμερή,
- Η τεχνική Σταθεροποίησης/Στερεοποίησης με υαλοποίηση η οποία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις πολύ τοξικών ή ραδιενεργών ρύπων. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη χρήση υψηλών θερμοκρασιών (άνω των 1600°C) για την τήξη της ρυπασμένης εδαφικής μάζας σε μια «υαλώδη» μάζα.

Οι παραπάνω τεχνικές παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς, όπως το υψηλό κόστος λειτουργίας και η περιορισμένη αποτελεσματικότητα στην επεξεργασία μίγματος ρυπαντών (Kavanaugh, 1996).

### **3.3 Βιολογικές τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών**

Ο όρος «βιολογική αποκατάσταση» ή «βιοαποκατάσταση» αναφέρεται στη χρήση μικροοργανισμών ή φυτών για την εξυγίανση του εδαφικού οικοσυστήματος, δηλαδή την αποκατάσταση του υποστρώματός του από οργανικούς (υδρογονάνθρακες, χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, εντομοκτόνα) ή ανόργανους ρύπους (βαρέα μέταλλα). Ειδικότερα, η

αξιοποίηση μικροοργανισμών ή η εφαρμογή μικροβιακών ενζύμων συντελεί στη διάσπαση των οργανικών ρύπων του εδάφους ενώ η χρήση φυτών βοηθά στην απομάκρυνση, τη σταθεροποίηση και την καταστροφή των βαρέων μετάλλων καθώς και των οργανικών ρύπων. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται λόγος για την τεχνολογία της βιοαποικοδόμησης και στη δεύτερη για την τεχνολογία της φυτοαποκατάστασης (Ζαλίδης, 2002).

### **3.4. Τεχνολογία βιοαποικοδόμησης**

Η βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων σε ένα εδαφικό οικοσύστημα επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους: α) με την τροποποίηση των συνθηκών του ενδιαιτήματος των ιθαγενών μικροοργανισμών με σκοπό τον πολλαπλασιασμό και τη δραστηριοποίησή τους, β) με την εισαγωγή στο έδαφος μικροοργανισμών ειδικής αποικοδομητικής ικανότητας και γ) με την προσθήκη στο έδαφος ενζύμων ικανών να διασπάσουν τους ρύπους (Atlas & Pramer, 1990). Και στις τρεις περιπτώσεις, η τεχνολογία της βιοαποικοδόμησης λαμβάνει χώρα σε εδάφη στα οποία οι ρύποι εντοπίζονται στα επιφανειακά στρώματά τους. Στην περίπτωση βιοαποικοδόμησης ρύπων σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα, γίνεται χρήση βακτηρίων. Τα τελικά προϊόντα της εν λόγω αποικοδόμησης είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Παράγοντες που δύναται να επηρεάσουν τη μικροβιακή διάσπαση των οργανικών ρύπων είναι η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία καθώς και η συγκέντρωση του οργανικού ρύπου (Anderson & Coats, 1995). Επιπρόσθετα, οι μικροοργανισμοί είναι ευαίσθητοι στις μεταβολές της θερμοκρασίας, του pH, της διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών και οξυγόνου καθώς και στην περιεχόμενη υγρασία του υποστρώματος ανάπτυξής τους (Alexander, 1994).

Εργαστηριακά ωστόσο πειράματα έχουν δείξει ότι η βιοαποικοδόμηση δεν βρίσκει εφαρμογή μόνο σε περιπτώσεις οργανικών ρύπων αλλά και σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η υποβάθμιση των εδαφικών οικοσυστημάτων οφείλεται σε ρύπανση με βαρέα μέταλλα. Διάφορα είδη εδαφικής πανίδας (π.χ. γαιοσκωλήκων) είναι αποτελεσματικά για τη βιοαποκατάσταση των υποβαθμισμένων εδαφών λόγω της ικανότητάς τους να συσσωρεύουν ποικίλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στους ιστούς τους (Morgan & Morgan, 1988). Οι ποσότητες των βαρέων μετάλλων που συσσωρεύονται στα διάφορα είδη εδαφικής πανίδας εξαρτώνται από τον βαθμό της ρύπανσης και τις ιδιότητες του ρυπασμένου με βαρέα μέταλλα εδάφους, όπως το pH, η περιεκτικότητά του σε οργανική ουσία. Τα μέταλλα ωστόσο δεν βιοαποικοδομούνται, καθίσταται όμως εφικτή η μετατροπή

τους από τη μία χημική μορφή στην άλλη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το εξασθενές χρώμιο - Cr (VI) που ανάγεται σε τρισθενές - Cr (III) με τη βοήθεια μικροοργανισμών (Ζαλίδης, 2002).

### 3.5 Τεχνολογία φυτοαποκατάστασης

Η φυτοαποκατάσταση, γνωστή και ως φυτοεξυγίανση (Phytoremediation), αποτελεί μέρος των λεγόμενων φυτοτεχνολογιών (Phytotechnologies), οι οποίες περιλαμβάνουν την αξιοποίηση φυτών για τη συγκράτηση και αποδόμηση ρύπων καθώς και τη σταθεροποίηση, την αποκατάσταση, την αποτοξικοποίηση και γενικά τη διαχείριση των περιοχών που χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα ρύπανσης (Ifon et al., 2019). Οι ρύποι που μπορούν να αντιμετωπιστούν επιτυχώς από την τεχνολογία αυτή είναι: α) τα βαρέα μέταλλα: Cd, Cr, Pb, Co, Cu, Ni, Se, Zn (ανόργανοι ρύποι), β) οι υδρογονάνθρακες, οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, τα εντομοκτόνα, τα χλωριωμένα φυτοφάρμακα (οργανικοί ρύποι) και γ) τα ραδιενεργά στοιχεία: Cs (Καίσιο) και Sr (Σρόντιο) (Luo et al., 2018).

Ο όρος φυτοαποκατάσταση (Phytoremediation) είναι σχετικά νέος με απαρχή του το έτος 1991. Αποτελείται από το ελληνικό πρόθεμα «phyto» που σημαίνει «φυτό» και τη λατινική λέξη «remedium» που ερμηνεύεται «Για να διορθώσετε ή να αφαιρέσετε το κακό». Σύμφωνα με τον Αλιφραγκή (2015), έχουν δοθεί ποικίλοι ορισμοί για τη μέθοδο της φυτοαποκατάστασης. Κατά τον Landmeyer (2012) ορίζεται ως η αλληλεπίδραση των φυτών με το ρυπασμένο έδαφος και τις ανόργανες και οργανικές ενώσεις που εμπεριέχονται σε αυτό με σκοπό την αποκατάστασή του. Ο Baker (2000) αναφέρει ότι κατά την φυτοαποκατάσταση γίνεται χρήση φυτών για την απομάκρυνση των ρύπων από το περιβάλλον, τα οποία πρέπει να παρουσιάζουν ανεκτικότητα στις υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

Συγκεκριμένα, τη δεκαετία του 1980, η ανακάλυψη ορισμένων φυτικών ειδών, τα οποία είχαν τη δυνατότητα να συσσωρεύουν στους ιστούς τους υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων, προώθησε την ιδέα της χρήσης τους για την εξυγίανση εδαφών και οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης. Θεωρείται δε ως μια «πράσινη» τεχνολογία εξυγίανσης και εκφράζεται επίσης με τους όρους «βοτανοεξυγίανση» (botanoremediation), «αγροεξυγίανση» (agroremediation) και «βλαστική εξυγίανση» (vegetative remediation) (U. S. EPA, 2000). Συνεπώς, η βασική ιδέα της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης είναι η φύτευση κατάλληλων φυτών σε ρυπασμένα εδάφη, τα οποία



δρουν ως υπερσυσσωρευτές (hyperaccumulators), μεταφορείς ή αποδομητές των υφιστάμενων ρύπων με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος (Tangahu et al., 2011).

Η διαδικασία που ακολουθείται για την εφαρμογή της φυτοαποκατάστασης σε δεδομένο πεδίο βασίζεται σε μια ακολουθία σταδίων ώστε να είναι αποδοτική και με άμεσα αποτελέσματα για το περιβάλλον. Σε γενικές γραμμές τα βήματα που ακολουθούνται είναι (Γιδαράκος, 2009):

- Εκτίμηση του επιπέδου ρύπανσης
  - χαρακτηρισμός πεδίου
  - χαρακτηρισμός ρύπων
  - προσδιορισμός νομοθετικών ορίων
  - προσδιορισμός στόχου απορρύπανσης
- Αξιολόγηση πεδίου
  - υπολογισμός βάθους ρύπανσης
  - επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού φυτοαποκατάστασης
  - επιλογή των κατάλληλων φυτών
- Εργαστηριακές ή/και πιλοτικές μελέτες εκτίμησης της απόδοσης της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης
- Εφαρμογή της τεχνολογίας σε πλήρη κλίμακα
- Αξιολόγηση της απόδοσης της τεχνολογίας και πιθανές μετατροπές

Κατά την υλοποίηση ενός προγράμματος φυτοαποκατάστασης δεν απαιτείται ιδιαίτερος εξοπλισμός και όσον αφορά την παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος χρησιμοποιούνται όργανα δειγματοληψίας του εδάφους, μέτρησης των παραμέτρων του, όπως υγρασία, pH αλλά και όργανα παρακολούθησης των καιρικών συνθηκών (Γιδαράκος, 2009). Προκειμένου δε για την ορθή και αποδοτική εφαρμογή του κρίνεται αναγκαία η παρακολούθηση ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων (Πίν. 10):

**Πίνακας 10.** Παράμετροι παρακολούθησης ενός προγράμματος φυτοαποκατάστασης (Γιδαράκος, 2009)

Παράμετρος	Λόγος παρακολούθησης
<b><i>Κλιματολογικά Δεδομένα</i></b>	
Θερμοκρασία	Ανάγκη συντήρησης των φυτών  (άρδευση)
Σχετική υγρασία	
Ηλιοφάνεια	
Διεύθυνση και ένταση ανέμων	
<b><i>Φυτά</i></b>	
«Οπτικά» χαρακτηριστικά (ζωτικότητα, σημάδια υπανάπτυξης, ζημιές από έντομα ή ζώα )	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Συντήρηση (αντικατάσταση φυτών, λίπανση, χρήση παρασιτοκτόνων)</li> <li>✓ Ποσοτικοποίηση ρύπων</li> <li>✓ Ποσοτικοποίηση / πρόβλεψη λειτουργίας «συστήματος»</li> </ul>
Σύσταση (ρίζες, φύλλα)	
Ρυθμός αναπνοής	
Πυκνότητα ριζών	
<b><i>Έδαφος</i></b>	
Γεωχημικές παράμετροι (pH, θρεπτικά συστατικά, υγρασία, οξυγόνο)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Βελτιστοποίηση ανάπτυξης του φυτού</li> <li>✓ Εκτίμηση ισοζυγίου νερού και ρυθμού εξατμισοδιαπνοής</li> <li>✓ Ποσοτικοποίηση ρύπων</li> <li>✓ Ποσοτικοποίηση / πρόβλεψη λειτουργίας του «συστήματος»</li> </ul>
Επίπεδα ρύπων	
Μικροβιακός πληθυσμός	

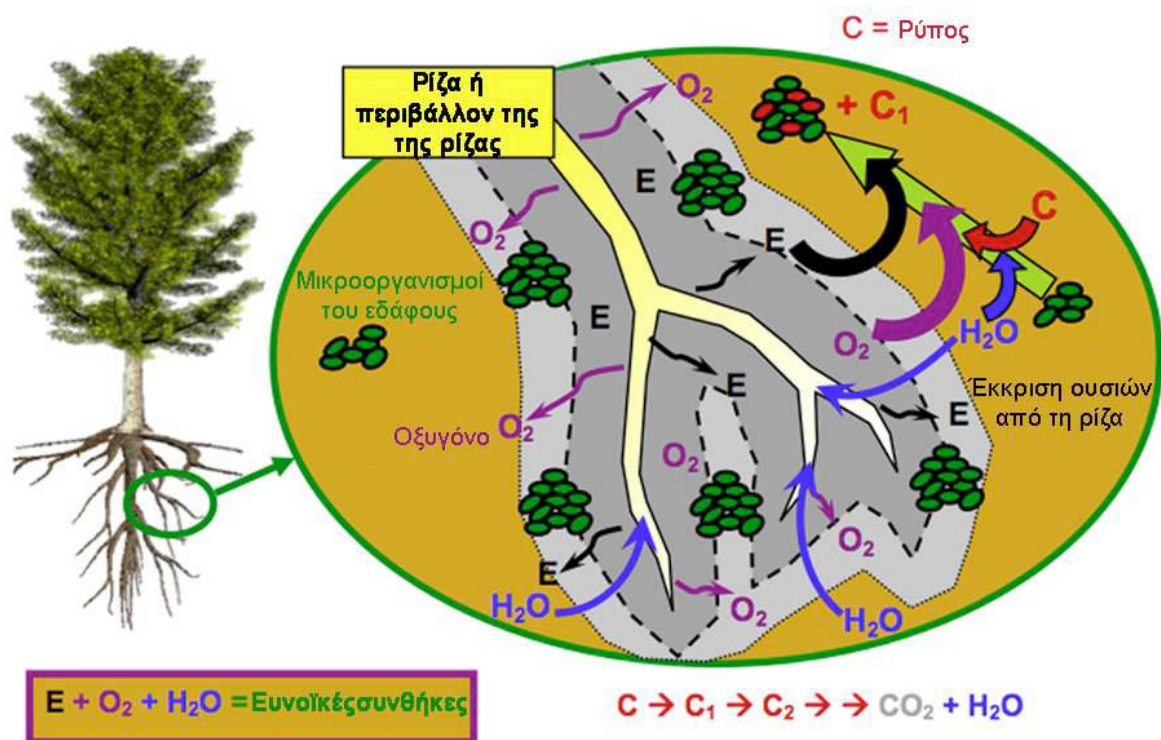
### **3.5.1 Μηχανισμοί Φυτοαποκατάστασης**

Στη διαδικασία της φυτοαποκατάστασης συμμετέχουν σημαντικοί μηχανισμοί των φυτών στους οποίους περιλαμβάνονται η ριζοαποδόμηση, η ριζοδιήθηση, η φυτοαποδόμηση, η φυτοεξάτμιση, η φυτοεξαγωγή και η φυτοσταθεροποίηση.

#### **3.5.1.1 Ριζοαποδόμηση (Rhizodegradation)**

Η ριζοαποδόμηση αφορά τη διάσπαση των ρύπων του εδάφους με τη βιοδραστηριότητα που συμβαίνει στη ριζόσφαιρα (Εικ. 4). Ουσιαστικά πρόκειται για μια έμμεση μέθοδο βιοαποδόμησης από τους μικροοργανισμούς του εδάφους (βακτήρια, ζύμες και μύκητες) που βρίσκονται στη ριζόσφαιρα (Σαϊτάνης, 2018). Ο καλύτερος αερισμός του εδάφους στο περιβάλλον των ριζών δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, οι οποίοι μέσω της δραστηριότητάς τους συμβάλλουν στην αποδόμηση των ρύπων. Παράλληλα, το ριζικό σύστημα (λόγω του μεγάλου αριθμού των ριζικών τριχιδίων) προσφέρει την κατάλληλη επιφάνεια για την ανάπτυξή τους και τους παρέχει τροφή εντείνοντας με τον τρόπο αυτό τις βιολογικές τους δραστηριότητες.

Ειδικότερα, ο οργανικός άνθρακας ο οποίος εμπεριέχεται σε φυσικές ουσίες που απελευθερώνονται από τις ρίζες των φυτών, όπως σάκχαρα, αλκοόλες, υδατάνθρακες και οξέα αυξάνει τον πληθυσμό και τη δραστηριότητα των μικροβίων 5-100 φορές περισσότερο σε σχέση με το υπόλοιπο έδαφος (Ζαμπετάκης κ. ά., 2005). Στην ουσία γίνεται λόγος για μια συμβιωτική σχέση μεταξύ των φυτών και των μικροοργανισμών στο πλαίσιο της οποίας τα φυτά παρέχουν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά στους μικροοργανισμούς και εκείνοι με τη σειρά τους προσφέρουν ένα υγιές περιβάλλον για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών μέσω της διάσπασης των ρύπων. Φυτά που χρησιμοποιούνται στη ριζοαποδόμηση είναι η μουριά, η λεύκα, το ρύζι και διάφορα είδη γρασιδιού.



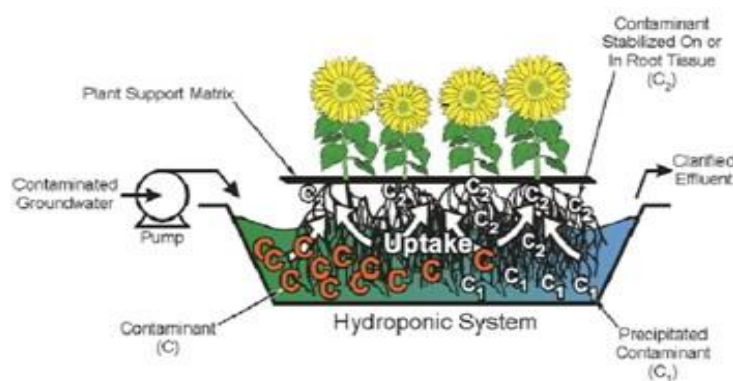
Εικόνα 4. Ρίζοαποδόμηση (ITRC, 2009)

### 3.5.1.2 Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration)

Τα φυτά διαμέσου του ριζικού τους συστήματος αντλούν μεγάλες ποσότητες εδαφικού νερού και απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων που είναι διαλυμένα σε αυτό για την κάλυψη των αναγκών τους και την επιτέλεση των φυσιολογικών τους λειτουργιών. Στην ουσία τα φυτά λειτουργούν ως φυσικές αντλίες καθώς δημιουργούν μια διαφορά πίεσης που αναγκάζει μέρος του εδαφικού νερού να κινείται προς τις ρίζες τους, ωστόσο με την κίνησή του αυτή μετακινούνται και οι διαλυμένες σε αυτό ουσίες, όπως οι ρύποι και κυρίως τα βαρέα μέταλλα (Susarla et al., 2002).

Στο πλαίσιο του μηχανισμού της ριζοδιήθησης συντελείται η ρόφηση, η συγκέντρωση και η κατακράτηση πάνω στις ρίζες του φυτού, των ρύπων, ήτοι των βαρέων μετάλλων, που βρίσκονται σε διαλυμένη μορφή γύρω από τη ρίζα (Εικ. 5). Σημαντικό ρόλο στη ριζοδιήθηση διαδραματίζει το βάθος στο οποίο μπορούν να φτάσουν οι ρίζες καθώς, αν τα βαρέα μέταλλα βρίσκονται κάτω από αυτές, δεν μπορούν να προσροφηθούν. Κατά το τελικό στάδιο του εν λόγω μηχανισμού και αφού οι ρίζες των φυτών έχουν κορεστεί με τα βαρέα μέταλλα, τα φυτά συλλέγονται και οδηγούνται σε περαιτέρω επεξεργασία (Datta et

al., 2013). Οι ιτιές αποτελούν ένα είδος φυτού που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία αυτή καθώς έχουν την ικανότητα να αντλούν μέχρι 200 λίτρα νερού καθημερινά (Gatliff, 1994). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στην επεξεργασία λυμάτων. Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι η μέθοδος της ριζοδιήθησης εφαρμόστηκε στο Τσερνομπίλ της Ουκρανίας όπου χρησιμοποιήθηκαν ηλιάνθοι για την απομάκρυνση ραδιενεργών ρύπων από τα υπόγεια ύδατα (USDA, 2000).

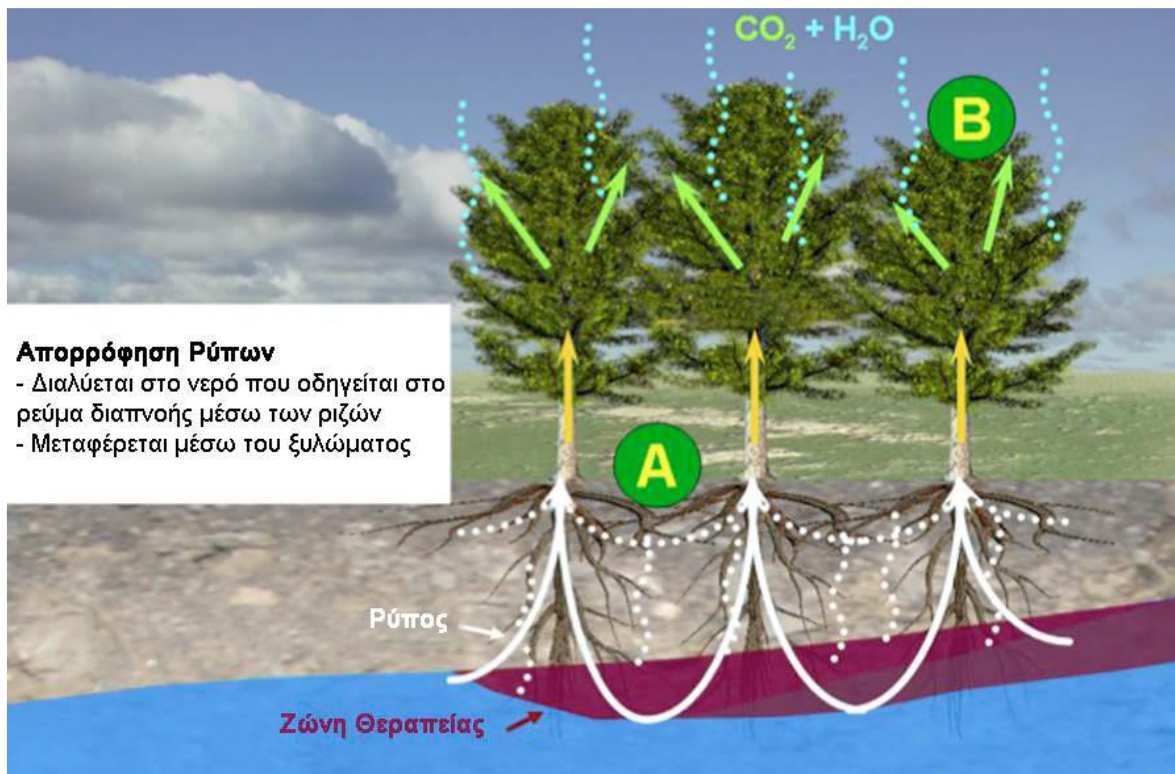


**Εικόνα 5.** Ο μηχανισμός της ριζοδιήθησης σε καλλιέργεια σε θρεπτικό διάλυμα (υδροπονικό σύστημα) με μολυσμένα επιφανειακά ύδατα (Σαϊτάνης, 2018)

### 3.5.1.3 Φυτοαποδόμηση (Phytodegradation)

Η φυτοαποδόμηση ή φυτομετατροπή (Phyotransformation) όπως ονομάζεται αλλιώς είναι ένας μηχανισμός κατά τη διάρκεια του οποίου λαμβάνει χώρα η πρόσληψη των ρύπων από τα φυτά και ακολούθως διενεργείται η αποδόμηση αυτών στο εσωτερικό του φυτού, στις ρίζες, στον κορμό ή στα φύλλα μέσω μεταβολικών – ενζυμικών διεργασιών (Εικ. 6). Οι ρύποι, μετά την είσοδό τους στους φυτικούς ιστούς, υπόκεινται σε βιολογικές διεργασίες και διασπώνται σε απλούστερες μορφές με τη βοήθεια ενζύμων, τα οποία περιέχονται στα κύτταρά του (Σαϊτάνης, 2018; BohatALA, 2018).

Με τη διεργασία της φυτοαποδόμησης, τα φυτά έχουν τη δυνατότητα να μετασχηματίζουν τα βαρέα μέταλλα σε λιγότερο τοξικές μορφές, όπως π.χ. το εξασθενές χρώμιο (Cr), το οποίο το μετατρέπουν σε μη τοξικό τρισθενές Cr. Αυτή η ιδιότητα είναι γνωστή και ως φυτοαποτοξικοποίηση (Phydetoxification) (Ζαμπετάκης κ. ά., 2005). Φυτά που δύναται να χρησιμοποιηθούν για τη φυτοαποδόμηση θεωρούνται οι λεύκες, τα κυπαρίσσια και οι ιτιές (US EPA, 2000)



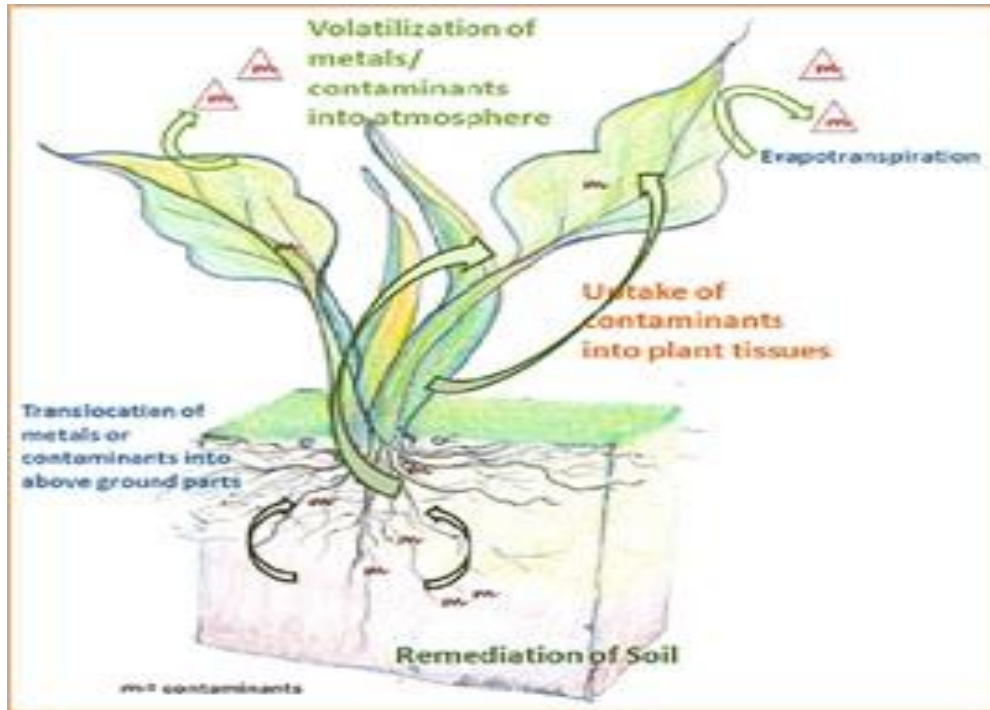
**Εικόνα 6.** Ο μηχανισμός της φυτοαποδόμησης: A) Ενζυμική δραστηριότητα των φυτών, B) Οξείδωση κατά τη φωτοσύνθεση (ITRC, 2009)

#### 3.5.1.4 Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization)

Ο όρος φυτοεξάτμιση αναφέρεται στην πρόσληψη ρύπων από τα φυτά, στη μετατροπή τους σε αέριους ρύπους και στη συνέχεια στην αποβολή και απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισοδιαπνοής (Εικ. 7). Ειδικότερα, τα φυτά κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού και μέσω αυτού και τοξικούς ρύπους, ορισμένοι από τους οποίους περνάνε στο φύλλωμα και εξατμίζονται στην ατμόσφαιρα. Η φυτοεξάτμιση θεωρείται ένας επιτυχής μηχανισμός για την απομάκρυνση του υδραργύρου (Hg) από το έδαφος. Το θετικό στην περίπτωση εφαρμογής του εν λόγω μηχανισμού είναι ότι το φυτό δεν μολύνεται και έτσι δεν απαιτείται η συγκομιδή του μετά το πέρας της διεργασίας (Ζαμπετάκης κ. ά., 2005).

Στη φύση ο υδράργυρος σχεδόν πάντα απαντάται ως άλας ή ως οξείδιο ενώ σε θερμοκρασία δωματίου είναι υγρός στην στοιχειακή του μορφή. Έχει παρατηρηθεί σε έρευνες ότι το φυτό *Arabidopsis thaliana*, αφού εισαχθούν σε αυτό γονίδια βακτηρίων, αφομοιώνει οργανικά και ανόργανα άλατα του Hg και τον μετατρέπει στην στοιχειακή

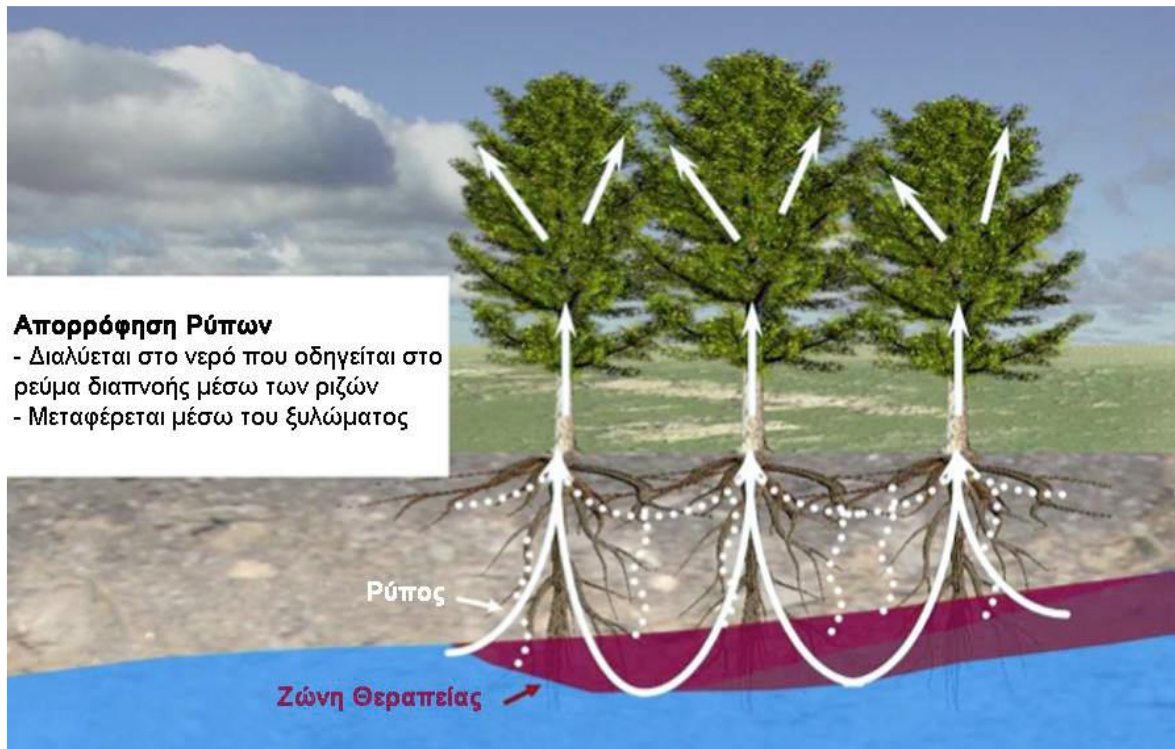
του μορφή, διαπνέοντάς τον στην ατμόσφαιρα (Σαϊτάνης, 2018). Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι το τριφύλλι, το ινδικό σινάπι και η λεύκα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διεργασία της φυτοεξάτμισης (U.S EPA, 2000).



**Εικόνα 7.** Μηχανισμός της φυτοεξάτμισης σε μολυσμένο από ρύπους έδαφος (Datta et al., 2013)

### 3.5.1.5 Φυτοεξαγωγή – Φυτοσυσσώρευση (Phytoextraction - Phytoaccumulation)

Ο μηχανισμός της φυτοεξαγωγής ή φυτοεκχύλισης μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα εδάφη. Τα φυτά διαμέσου του ριζικού τους συστήματος απορροφούν βαρέα μέταλλα με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις και τα συσσωρεύουν στους ιστούς του βλαστού, των φύλλων και των καρπών (Sharma & Pandey, 2014) (Εικ. 8).



**Εικόνα 8.** Ο μηχανισμός της φυτοεξαγωγής ή φυτοεκχύλισης (ITRC, 2009)

Τα βαρέα μέταλλα που βρίσκονται στο εδαφικό διάλυμα κινούνται προς τις ρίζες με μαζική ροή ή διάχυση, όπου και προσλαμβάνονται από τα φυτά. Ακολούθως, τα φυτά μετά από κάθε αυξητική περίοδο, συλλέγονται και αποτεφρώνονται σε ειδικούς κλιβάνους με σκοπό την ανακύκλωση του μετάλλου λαμβάνοντας υπόψη τους απαραίτητους κανονισμούς ασφαλείας. Η εν λόγω διαδικασία επαναλαμβάνεται εφόσον επιτευχθεί η πλήρης απομάκρυνση του μετάλλου από το ρυπογόνο έδαφος (Anderson et al., 1999). Το οικονομικό όφελος που απορρέει από την ανακύκλωση των μετάλλων καθιστά την φυτοεξαγωγή ως μια οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία φυτοαποκατάστασης (Σαχινίδης κ. ά., 2014).

Ωστόσο, για να είναι η μέθοδος της φυτοεξαγωγής εφαρμόσιμη, τα φυτά πρέπει να προσλαμβάνουν σχετικά μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων και να τα μεταφέρουν στην υπέργεια βιομάζα τους σε υψηλά ποσοστά. Επιπλέον, τα φυτά πρέπει να παράγουν μεγάλη ποσότητα φυτικής βιομάζας και να έχουν αναπτύξει μηχανισμούς αποβολής των μετάλλων ή να παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στη συσσώρευση υψηλών συγκεντρώσεων μετάλλων στους ιστούς των βλαστών και των φύλλων (Sursala et al., 2002). Τα φυτά αυτά, όταν συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων ονομάζονται «υπερσυσσωρευτές» (Ifon et al., 2019).



Ειδικότερα, με τον όρο «υπερσυσσωρευτές» χαρακτηρίζονται τα φυτά, που είναι ικανά να συσσωρεύουν βαρέα μέταλλα σε 100-πλάσια ποσότητα από ότι τα συνηθισμένα φυτά, χρησιμοποιώντας τα για την προστασία τους από ενδεχόμενους εισβολείς, όπως βακτήρια, μύκητες, κ.α. (Feng et al., 2018; Zhao et al., 2003).

Αναπτύσσονται σε εδάφη πλούσια σε βαρέα μέταλλα και παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε υψηλές ποσότητες βαρέων μετάλλων. Το μεγαλύτερο μέρος των βαρέων μετάλλων που προσλαμβάνονται από αυτά παραμένουν στις ρίζες ενώ ένα μέρος μεταφέρεται στο υπέργειο τμήμα. Ειδικότερα, οι καρποί (π.χ. σπόροι σιτηρών) περιέχουν πολύ μικρότερα ποσά σε σχέση με τους βλαστούς ενώ οι ρίζες πολύ περισσότερο από ότι οι βλαστοί. Η πιθανότερη εξήγηση της συσσώρευσης βαρέων μετάλλων σε διάφορα τμήματα των φυτών έχει σχέση με τη διάρκεια και τον ρυθμό διαπνοής (Καντερές, 2010).

Η πρόσληψη των μετάλλων από τα φυτά υπερσυσσωρευτές εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες (Ζαμπετάκης κ. ά., 2005):

- ❖ Ο τύπος και η συγκέντρωση του μετάλλου στη ριζόσφαιρα.
- ❖ Ο τύπος και το είδος του φυτού.
- ❖ Η ηλικία του φυτού.
- ❖ Το βάθος διείδυσης του ριζικού συστήματος.
- ❖ Ο ρυθμός και οι συνθήκες ανάπτυξης.
- ❖ Ο τύπος του εδάφους.
- ❖ Η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία και pH.

Ο χρόνος που απαιτείται για τη φυτοαποκατάσταση μιας ρυπασμένης με βαρέα μέταλλα περιοχής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Μεταξύ των σπουδαιότερων συγκαταλέγονται (Αλιφραγκής, 2015):

- ❖ Ο σκοπός της φυτοαποκατάστασης.
- ❖ Η σχεδιαζόμενη χρήση της περιοχής μετά από τη φυτοαποκατάσταση.
- ❖ Το αποδεκτό επίπεδο κινδύνου.
- ❖ Το είδος, η μορφή και η ποσότητα των ρύπων.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται γνωστές οικογένειες στις οποίες ανήκουν διάφορα είδη υπερσυσσωρευτών για επτά (7) βαρέα μέταλλα (Ζαμπετάκης, 2000) και στον Πίνακα 12 ορισμένα ενδεικτικά παραδείγματα υπερσυσσωρευτών βαρέων μετάλλων καθώς και το δυναμικό βιοσυσσώρευσης που παρουσιάζουν (Lasat, 2000).

**Πίνακας 11.** Γνωστές οικογένειες υπερσυσσωρευτών φυτών για επτά (7) βαρέα μέταλλα (Ζαμπετάκης, 2000)

Οικογένεια Φυτού	Βαρέα Μέταλλα
Brassicaceae	Cd
Lamiaceae, Scrophulariaceae	Co
Cyperaceae, Lamiaceae, Poaceae, Scrophulariaceae	Cu
Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae	Mn
Brassicaceae, Violaceae, Cunoniaceae, Proteaceae	Ni
Fabaceae	Se
Brassicaceae, Violaceae	Zn

**Πίνακας 12.** Ενδεικτικά είδη υπερσυσσωρευτών μετάλλων και το αντίστοιχο δυναμικό βιοσυσσώρευσης (Lasat, 2000)

Είδος Φυτού	Βαρέα Μέταλλα	Περιεχόμενο στα φύλλα (ppm)
<i>Thlaspi caerulescens</i> (Εικ. 9)	Zn - Cd	36.900 – 1.800
<i>Ipomea alpina</i> (Εικ. 10)	Cu	12.300
<i>Haumaniastrum robertii</i> (Εικ. 11)	Co	10.200
<i>Astragalus racemosus</i> (Εικ. 12)	Se	14.900
<i>Sebertia acuminata</i> (Εικ. 13)	Ni	25% ξηρού βάρους
<i>Streptanthus polygaloides</i> (Εικ. 14)	Ni	16.400

Επιπλέον, στα δημοφιλή είδη που επιτελούν τη φυτοεξαγωγή περιλαμβάνονται ο ηλίανθος (*Helianthus annuus*) (Εικ. 15) και η ινδική μουστάρδα (*Brassica juncea*) (Εικ. 16) τα οποία διακρίνονται για την ταχύτητα ανάπτυξής τους, την υψηλή βιομάζα καθώς και την υψηλή ανεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα, Cr και Ni στην περίπτωση του ηλίανθου, Pb και Ni για την ινδική μουστάρδα (Kathal et al., 2016).



**Εικόνα 9.** *Thlaspi caerulescens* – Θλάσπι (Walker, 2004)



**Εικόνα 10.** *Ipomea alpine* – Ιπομέα (Blittersdorff, 2011)



**Εικόνα 11.** *Haumaniastrum robertii* (Copper flora, 2018)



**Εικόνα 12.** *Astragalus racemosus* - Αστράγαλος (Rechenthin, 2019)



**Εικόνα 13.** *Sebertia acuminata* (Benoit, 2016)



**Εικόνα 14.** *Streptanthus polygaloides* (Aaron, 2010)



**Εικόνα 15.** *Helianthus annuus* – Ηλιάνθος (Copper flora, 2018)



**Εικόνα 16.** *Brassica juncea* - Ινδική μουστάρδα (Copper flora, 2018)

Η διεργασία της φυτοεξαγωγής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι (Chaney et al., 1997):

- Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στο εδαφικό διάλυμα.
- Ο ρυθμός πρόσληψης των βαρέων μετάλλων από το ριζικό σύστημα του φυτού.
- Η μεταφορά και τα ποσοστά αποθήκευσης των βαρέων μετάλλων στην υπέργεια βιομάζα του φυτού (φύλλα, βλαστοί κ.τ.λ.).
- Ο βαθμός ανθεκτικότητας των φυτικών κυττάρων στα τοξικά μέταλλα κατά τη διάρκεια της μεταφοράς και αποθήκευσης.

Συνεπώς, το σημαντικότερο όφελος αυτού του μηχανισμού της φυτοαποκατάστασης είναι ότι τα βαρέα μέταλλα απομακρύνονται μόνιμα από το έδαφος και δύναται να ανακυκλωθούν από τη φυτική βιομάζα (Pulford et al., 2002).

#### **3.5.1.6 Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization)**

Ο μηχανισμός της φυτοσταθεροποίησης χρησιμοποιεί συγκεκριμένα φυτικά είδη τα οποία προσλαμβάνουν τα βαρέα μέταλλα του εδάφους, τα συσσωρεύουν είτε στις ρίζες είτε στο περιβάλλον των ριζών και τα ακινητοποιούν (Εικ. 17). Η ακινητοποίηση στις ρίζες γίνεται είτε στις κυτταρικές μεμβράνες, είτε στα κυτταρικά τοιχώματα, είτε στα χυμοτόπια ενώ εκτός των ριζών, με τη βοήθεια πρωτεϊνών και ενζύμων (Αλιφραγκής, 2015). Η παραμονή των βαρέων μετάλλων στη ριζόσφαιρα αποτρέπει την εξάπλωσή τους, την κατακόρυφη έκπλυσή τους η οποία θέτει σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία καθώς και τη διάβρωση του εδάφους (Siegel, 2002). Ο μηχανισμός της φυτοσταθεροποίησης χρησιμοποιείται για βαρέα μέταλλα, όπως: Pb, As, Cd, Cr, Cu και Zn (Evangelou et al., 2007).

Ειδικότερα, η φυτοσταθεροποίηση λαμβάνει χώρα με τρεις λειτουργίες:

##### ❖ Φυτοσταθεροποίηση στη ριζόσφαιρα (Phytostabilization in the root zone)

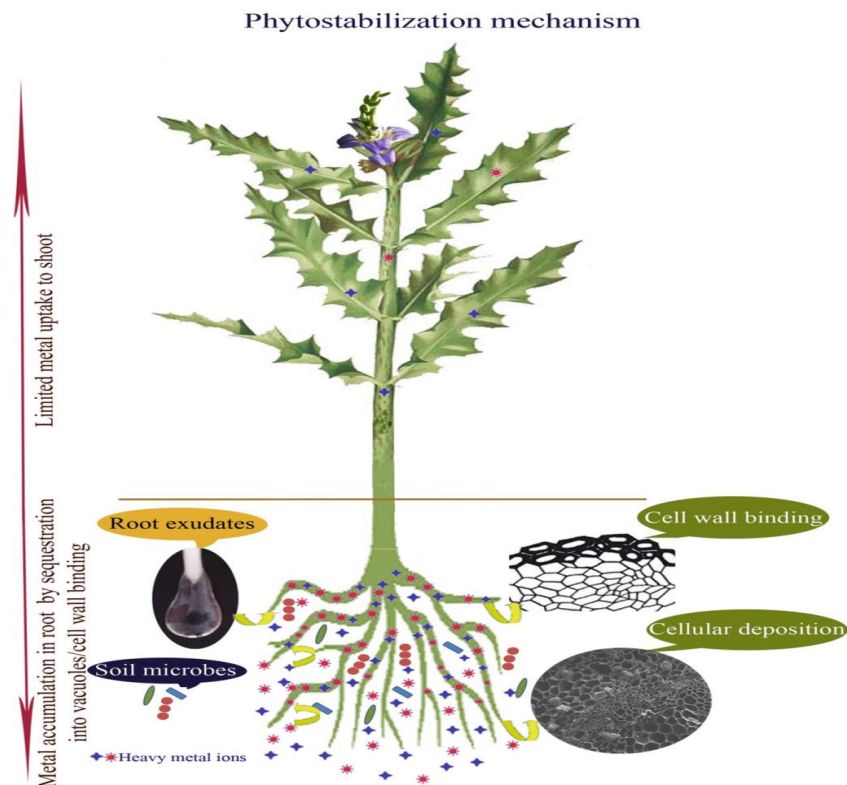
Οι ρίζες των φυτών εκκρίνουν πρωτεΐνες και ένζυμα, ουσίες που προκαλούν την ακινητοποίηση των βαρέων μετάλλων στη ριζόσφαιρα.

❖ Φυτοσταθεροποίηση στις επιφάνειες των ριζών (Phytostabilization on the root membranes)

Πρωτεΐνες και ένζυμα, τα οποία συσχετίζονται άμεσα με τα τοιχώματα των κυττάρων των ριζών, μπορούν να συντελέσουν στη δέσμευση και τη σταθεροποίηση των βαρέων μετάλλων στην εξωτερική επιφάνεια των ριζών με αποτέλεσμα την αποτροπή της εισόδου των μετάλλων στο φυτό.

❖ Φυτοσταθεροποίηση στα κύτταρα των ριζών (Phytostabilization in the root cells)

Πρωτεΐνες και ένζυμα μπορούν να βοηθήσουν και στη μεταφορά των βαρέων μετάλλων μέσα από τις κυτταρικές μεμβράνες. Τα βαρέα μέταλλα απορροφώνται από τα χυμοτόπια των κυττάρων της ρίζας και ακινητοποιούνται με αποτέλεσμα την αποτροπή μετατόπισής τους στο ξύλωμα του φυτού.



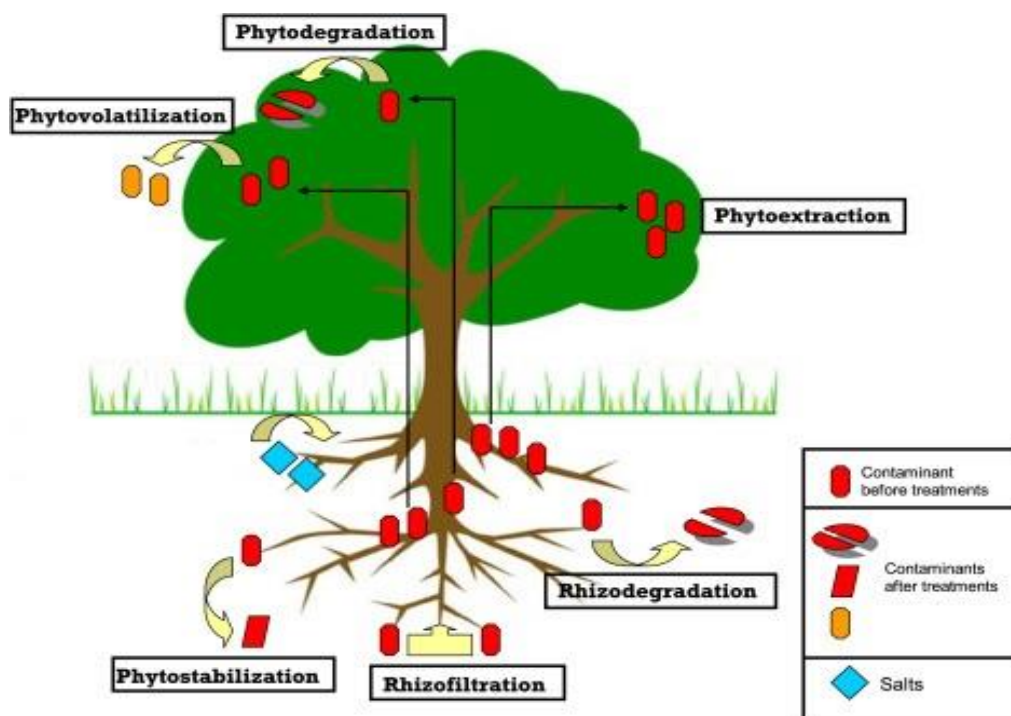
**Εικόνα 17.** Λειτουργίες φυτοσταθεροποίησης (Shackira & Puthur, 2019)



Τα φυτά που επιλέγονται για την φυτοσταθεροποίηση πρέπει να είναι μη ξηρικά, να έχουν ταχεία ανάπτυξη, να δίνουν μεγάλη φυτοκάλυψη και να είναι ανθεκτικά σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών μετάλλων. Η φυτοσταθεροποίηση χρησιμοποιείται κυρίως για να εξυγιανθούν περιοχές κοντά σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία και τα κυριότερα φυτικά είδη που χρησιμοποιούνται είναι τα *Cynodon dactylon* (Αγριάδα), *Festuca rubra* (Φεστούκα, η ερυθρά), *Typha latifolia* (Τύφη) και *Phragmites australis* (Φαγμίτης, ο νότιος, το κοινό καλάμι) (Wong, 2003). Το βασικότερο μειονέκτημα της φυτοσταθεροποίησης συνδέεται με το γεγονός ότι οι ρύποι παραμένουν στο έδαφος. Για τον λόγο αυτό πρέπει να διασφαλίζεται η μακροχρόνια κάλυψη της επιφάνειας με βλάστηση. Στην περίπτωση αυτή, τα φυτά δεν πρέπει να συσσωρεύουν ρύπους στους υπέργειους φυτικούς ιστούς, απλώς να αντέχουν σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (Pivetz, 2001).

Μέσα από την παρουσίαση των μηχανισμών της φυτοαποκατάστασης καταδεικνύεται η συμβολή της εν λόγω τεχνολογίας στην αποκατάσταση των εδαφών από βαρέα μέταλλα.

Στην εικόνα 18 αποτυπώνονται όλοι οι μηχανισμοί της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης.



**Εικόνα 18.** Η τεχνολογία της φυτοαποκατάστασης και οι μηχανισμοί της (Cristaldi et al., 2017)

### 3.6 Μελέτες περιπτώσεων

Ακολούθως παρουσιάζονται μελέτες περιπτώσεων όπου αποτυπώνονται τα διάφορα είδη φυτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης καθώς και οι τύποι των βαρέων μετάλλων που απομάκρυναν (Πίν. 13).

**Πίνακας 13.** Μελέτες φυτοαποκατάστασης εδαφών

Φυτά	Βαρέα Μέταλλα	Αναφορά
<i>Calendula officinalis</i> (Καλέντουλα, η φαρμακευτική)	Cu	(Goswami & Das, 2016)
<i>Helianthus annuus</i> (Ηλίανθος)	Pb Cd, Ni, Pb, Cu, Fe, Mn, Zn.	(Koptsik, 2014) (Liphadzi et al., 2003)
<i>Rumex acetosa</i> (Λάπαθο)	Cd, Pb, Zn	(Burges et al., 2017)
<i>Medicago sativa</i> (Μηδική)	Zn, Cu, Pb	(Agnello et al., 2016)
<i>Lupinus albus</i> (Λευκό λούπινο)	Cu, Pb, Ni, Zn, Cr, Cd	(Fumagalli et al., 2014)
<i>Arundo donax</i> (Καλαμιά)	Zn, Cu, Cd, Pb, Cr	(Fiorentino et al., 2013)
<i>Oryza sativa L.</i> (Ρύζι)	Cd, Cr, Pb, As, Hg	(Liu et al., 2007)
<i>Salix viminalis</i> (Ιτιά)	Cd, Pb, Zn	(Vyslouzilova et al., 2003)
<i>Paulownia fortunei</i> (Παυλώνια)	Cu, Pb, Cd, Zn	(Wang et al., 2009)
<i>Populus spp.</i> (Λεύκα) <i>Salix viminalis</i> (Ιτιά)	As, Co, Cu, Pb, Zn, Cr	(Pulford & Watson, 2003)
<i>Brassica juncea</i> (Ινδική μουστάρδα)	As, Pb, Ni	(Salido et al., 2003)

Σύμφωνα με την έρευνα των Goswami και Das (2016), τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το φυτό *Calendula officinalis* είχε υψηλή ανοχή σε Cu έως και 400mg/kg, που είναι πολύ πάνω από το φυτοτοξικό εύρος για τους μη υπερσυσσωρευτές. Η συσσώρευση μάλιστα του χαλκού στα φύλλα ήταν υψηλότερη από τη συσσώρευση στη ρίζα φτάνοντας να είναι 4675μg/g και 3995μg/g του ξηρού βάρους αντίστοιχα, πολύ περισσότερο από το ελάχιστο των 1000μg/g του ξηρού βάρους για υπερσυσσωρευτή Cu.

Η σημαντικότητα της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης καταδείχθηκε και μέσα από την επιστημονική μελέτη του Kortsik (2014), στο πλαίσιο της οποίας εξετάστηκε και αποδείχθηκε η αποτελεσματικότητά της στον καθαρισμό μολυσμένων εδαφών στο Rasteburg της Νότιας Αφρικής, στο Sudbury του Καναδά και στο Subarctic Kola της Ρωσίας με τη χρήση του φυτού *Helianthus annuus*, το οποίο και απομάκρυνε τον μόλυβδο από τα εν λόγω επιβαρυμένα πεδία. Ομοίως, σκοπός του πειράματος που διεξήχθη από τον Liphadzi και τους συνεργάτες του (2003) ήταν να προσδιοριστεί η πρόσληψη των βαρέων μετάλλων Cd, Ni και Pb από το ίδιο φυτό. Κατά την ολοκλήρωσή του αποδείχθηκε η μεγάλη αποτελεσματικότητα του ηλίανθου στην απομάκρυνση αυτών των μετάλλων, η συσσώρευση των οποίων (έως και 15,6μg/g) εντοπίστηκε στα φύλλα.

Το δυναμικό συσσώρευσης και φυτοεξαγωγής Cd και Zn από την ιτιά διερευνήθηκε σε ένα πείραμα από την Vyslouzilona και τους συνεργάτες της (2003). Κατά την ολοκλήρωσή του διαπιστώθηκε ότι τα βαρέα μέταλλα Cd και Zn μεταφέρθηκαν από το ρυπασμένο έδαφος διαμέσου του ριζικού συστήματος του φυτού στους υπέργειους ιστούς του, με την υψηλότερη συσσώρευση να εντοπίζεται στα φύλλα 83% για το κάδμιο (Cd) και 71% για τον ψευδάργυρο (Zn). Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι οι ιτιές είναι κατάλληλοι φυτοεξαγωγείς εδάφους μέτριας μόλυνσης.

Επίσης, η δυνατότητα χρήσης δέντρων και συγκεκριμένα της ιτιάς (*Salix viminalis*) και της λεύκας (*Populus spp.*) για τη φυτοαποκατάσταση εδάφους μολυσμένου με βαρέα μέταλλα διερευνήθηκε από τους Pulford και Watson (2003). Σημαντικές συσσωρεύσεις ψευδαργύρου (Zn) και καδμίου (Cd) βρέθηκαν στα κλαδιά της ιτιάς ενώ χαλκού (Cu), μόλυβδου (Pb) και χρωμίου (Cr) στους μίσχους. Η παρουσία ψευδαργύρου εντοπίστηκε και στα φύλλα της ιτιάς. Στο φυτό λεύκα σημειώθηκε συσσώρευση καδμίου και ψευδαργύρου στο φύλλωμα.

Πειράματα πεδίου και θερμοκηπίου για την αξιολόγηση της απόδοσης της φυτοαποκατάστασης του μόλυβδου (Pb) από μολυσμένο έδαφος διενεργήθηκαν από τον

Salido και τους συνεργάτες του (2010) σε μια τοποθεσία της Βόρειας Καρολίνας. Χρησιμοποιήθηκε το φυτό *Brassica juncea* (Ινδική μουστάρδα) το οποίο θεωρείται υπερσυσσωρευτής βαρέων μετάλλων. Αρχικά εφαρμόστηκε στο έδαφος EDTA προς βελτίωση της εξαγωγής του μολύβδου. Όταν η συγκέντρωση EDTA ήταν 10mmol EDTA/kg εδάφους σε έδαφος που περιείχε 338mg Pb/kg εδάφους, τα φυτά *Brassica juncea* εξήγαγαν περίπου 32mg μολύβδου. Το συμπέρασμα στο οποίο οδηγήθηκε η εν λόγω πειραματική μελέτη ήταν ότι η φυτοαποκατάσταση αποτελεί μια κατάλληλη εναλλακτική λύση στις συμβατικές τεχνικές αποκατάστασης ειδικά για εδάφη που δεν απαιτούν άμεση αποκατάσταση.

### 3.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοαποκατάστασης

Η φυτοαποκατάσταση θεωρείται μεγίστης σημασίας καινοτόμος τεχνολογία με σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Στα θετικά της σημεία συγκαταλέγονται (Ζαμπετάκης κ. ά., 2005; Leguizamo, 2017):

- Η απομάκρυνση πλήθος ρύπων (ανόργανων/οργανικών) χωρίς τη διατάραξη της λειτουργίας του εδαφικού οικοσυστήματος.
- Ο περιορισμός του περιβαλλοντικού προβλήματος χωρίς την ανάγκη μεταφοράς ή ενταφιασμού του ρυπογόνου παράγοντα.
- Η αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων με την αποτροπή διασποράς της γύρης και των σπόρων των φυτών καθώς και της συσσώρευσης των ρύπων στους φυτοφάγους οργανισμούς που τρέφονται με τα συγκεκριμένα φυτικά είδη. Τρόποι αποτροπής των επιπτώσεων αυτών είναι η εύρεση φυτικών ειδών μικρής διατροφικής αξίας, τα οποία δεν προτιμώνται ως τροφή από τους φυτοφάγους οργανισμούς, η συγκομιδή των φυτών πριν ανθίσουν καθώς επίσης και η συγκομιδή των γερασμένων και παλαιών φύλλων πριν πέσουν στο έδαφος και αποικοδομηθούν.
- Η μετατροπή ενός μολυσμένου τοπίου σε έναν πιο καλαίσθητο, ελκυστικό και ευχάριστο χώρο.
- Η δημιουργία αισθήματος καθαριότητας και προόδου.
- Το χαμηλό κόστος εφαρμογής σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες αποκατάστασης και ο περιορισμένος εξοπλισμός. Ουσιαστικά απαιτούνται φυτά,

ένα σύστημα άρδευσης, εξοπλισμός περιποίησης φυτών (π.χ. κλάδεμα), περίφραξη πεδίου και όργανα δειγματοληψίας εδάφους με στόχο την ανάλυση αυτών.

Στον αντίποδα όμως αυτών των πλεονεκτημάτων υπάρχουν και ορισμένοι περιορισμοί που ορίζουν τα μειονεκτήματα της φυτοαποκατάστασης (Γιδαράκος & Αϊβαλιώτη, 2005; Tangahu, 2011):

- Οι αργοί ρυθμοί της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης.
- Η πιθανότητα βρώσης των φυτών από τα ζώα με άμεση συνέπεια την είσοδο σημαντικών ποσοτήτων βαρέων μετάλλων στην τροφική αλυσίδα.
- Η πιθανότητα τοξικής επίδρασης στα χρησιμοποιούμενα φυτά λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων, γεγονός που καθιστά αδύνατη την εφαρμογή αυτής της τεχνικής.

Ωστόσο, παρά τους εν λόγω περιορισμούς, η φυτοαποκατάσταση θεωρείται γενικά ως μια χαμηλού κόστους μέθοδος αποκατάστασης που προσφέρει μόνιμα αποτελέσματα ενώ παράλληλα βελτιώνει την αισθητική αξία της ρυπασμένης περιοχής (Prasad & Freitas, 2003). Δύναται δε να εφαρμοστεί (Αλιφραγκής, 2015):

- ✓ σε μεγάλης έκτασης περιοχές, για την αποκατάσταση των οποίων δεν μπορεί να εφαρμοσθεί άλλη μέθοδος,
- ✓ σε περιοχές στις οποίες είναι οικονομικά ασύμφορη η εφαρμογή άλλων μεθόδων αποκατάστασης,
- ✓ σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους, όπως αυτής της χημικής σταθεροποίησης και
- ✓ σε περιπτώσεις όπου η φυτοκάλυψη θεωρείται ως το τελικό στάδιο μιας ολοκληρωμένης αποκατάστασης ρυπασμένου εδάφους.

Σύμφωνα με τον Laghlimi (2015), η τεχνολογία της φυτοαποκατάστασης αξιολογείται με βάση τρεις παραμέτρους, το κόστος εφαρμογής της, τον χρόνο υλοποίησης και την απόδοση (Πίν. 14).

**Πίνακας 14.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοαποκατάστασης (Laghlimi 2015)

	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
<b>Κόστος</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Χαμηλό κεφάλαιο έναρξης</li> <li>❖ Χαμηλό λειτουργικό κόστος</li> <li>❖ Η ανακύκλωση μετάλλων παρέχει περαιτέρω οικονομικά πλεονεκτήματα</li> </ul>	
<b>Χρόνος</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Αργή σε σύγκριση με άλλες τεχνικές</li> <li>❖ Εποχικά εξαρτώμενη</li> <li>❖ Οι περισσότεροι από τους υπερσυσσωρευτές αναπτύσσονται με αργούς ρυθμούς</li> </ul>
<b>Απόδοση</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Μόνιμο αποτέλεσμα</li> <li>❖ Δυνατότητα αποκατάστασης των ρύπων</li> <li>❖ Δυνατότητα αποκατάστασης ρυπασμένων περιοχών με περισσότερους από έναν τύπους ρύπανσης</li> <li>❖ Δεν διαχέεται πέραν του βάθους των ριζών</li> <li>❖ Δεν απαιτείται ιδιαίτερα εξειδικευμένο προσωπικό</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Δεν είναι σε θέση να μειώσει τη ρύπανση κατά 100%</li> <li>❖ Η υψηλή συγκέντρωση των ρύπων μπορεί να είναι τοξική για τα φυτά</li> <li>❖ Στην περίπτωση αποκατάστασης εδαφών, εφαρμόζεται μόνο στα επιφανειακά εδάφη</li> <li>❖ Περιορίζεται σε μέρη με χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων</li> <li>❖ Απαιτεί εμπειρία στον σχεδιασμό και στην επιλογή των κατάλληλων φυτών ανάλογα με το είδος των βαρέων μετάλλων της περιοχής</li> </ul>

#### 4. Θεσμικό πλαίσιο για την προστασία των εδαφών

Σύμφωνα με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (75/442/EEC – 91/156/EEC) ο όρος «απόβλητα» περιλαμβάνει όλες τις ουσίες και τα αντικείμενα τα οποία απορρίπτονται ή προβλέπεται να απορριφθούν ή απαιτείται να απορριφθούν. Για πολλά χρόνια η μέριμνα για την ορθή απόθεση των αποβλήτων ήταν απύσασα με αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση των ρυπασμένων εδαφών και υδάτων. Η ευαισθητοποίηση της διεθνούς κοινότητας αναφορικά με την εύρεση λύσεων για την προστασία του εδάφους οδήγησε σε πολιτικές όπως, η ορθολογική χρήση των εδαφικών πόρων, η διατήρηση της βιοποικιλότητας και η αειφόρος ανάπτυξη (ΥΠΕΣ, 2011).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση θεσπίστηκαν πλείστες Οδηγίες που αφορούν τα όρια ρύπανσης εδαφών και υπόγειων υδάτων. Σύμφωνα με την Οδηγία 76/464/EEC, οι επικίνδυνες ρυπαντικές ουσίες κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες (Καββαδάς & Πανταζίδου, 2007):

- Κατηγορία 1 – Black List, στην οποία ανήκουν οι πλέον τοξικές ουσίες (Πίν. 15).
- Κατηγορία 2 – Grey List, στην οποία εντάσσονται οι λιγότερο τοξικές ουσίες (Πίν. 16).

**Πίνακας 15.** Κατηγορία 1 τοξικών ουσιών (Καββαδάς & Πανταζίδου, 2007)

<b>Κατηγορία 1 - Black List - Τοξικές ρυπαντικές ουσίες</b>
1. Οργανο-αλογόνες ουσίες και ουσίες που μπορούν να τις παράγουν
2. Ουσίες που περιέχουν οργανικό φώσφορο ή οργανικό κασσίτερο
3. Ουσίες που μπορούν να προκαλέσουν καρκινογένεσεις
4. Ουσίες που περιέχουν υδράργυρο ή κάδμιο
5. Ανθεκτικά ορυκτέλαια και ανθεκτικοί υδρογονάνθρακες πετρελαιοειδών
6. Ανθεκτικές συνθετικές ουσίες

**Πίνακας 16.** Κατηγορία 2 τοξικών ουσιών (Καββαδάς & Πανταζίδου, 2007)

<b>Κατηγορία 2 - Grey List - Τοξικές ρυπαντικές ουσίες</b>
1. Μέταλλα (ψευδάργυρος, χαλκός, νικέλιο, χρώμιο, μόλυβδος, σελήνιο, αρσενικό, μολυβδαίνιο, βάριο, βόριο, βανάδιο, βηρύλλιο, άργυρος, κασσίτερος, αντιμόνιο, τιτάνιο, κοβάλτιο, τελλούριο, θάλλιο)
2. Οργανικές ενώσεις των ανωτέρω μετάλλων που δεν περιλαμβάνονται στην Κατηγορία 1
3. Τοξικές ή ανθεκτικές οργανικές ενώσεις του πυριτίου
4. Ανόργανες ενώσεις του φωσφόρου και καθαρός φώσφορος
5. Μη ανθεκτικά ορυκτέλαια και υδρογονάνθρακες πετρελαιοειδών
6. Φθοριούχες ενώσεις

Για την εκτίμηση του βαθμού ρύπανσης των εδαφών και των υπόγειων υδάτων από επικίνδυνα απόβλητα, έχουν θεσπιστεί ανώτερα αποδεκτά όρια για τους διάφορους ρύπους. Σύμφωνα με την Οδηγία 278/1986/EEC, ΚΥΑ80568/4225/91, καθορίζονται οι οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος, όπως αποτυπώνονται στον πίνακα 17 (Daniel, 1993). Επιπλέον, στον πίνακα 18 παρουσιάζονται τα όρια τοξικότητας βαρέων μετάλλων που ορίζουν τη ρύπανση των εδαφών (Cairney, 1993).

**Πίνακας 17.** Οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος (Daniel, 1993)

<b>Στοιχείο</b>	<b>mg/Kg ξηράς ουσίας</b>
Cd	1-3
Cu	50-140
Ni	30-75
Pb	50-300
Zn	150-300
Hg	1-1,5



**Πίνακας 18.** Όρια τοξικότητας που ορίζουν τη ρύπανση των εδαφών (Cairney, 1993)

Στοιχείο	Τυπική τιμή για μη ρυπασμένα εδάφη (mg/kg)	Ελαφρώς ρυπασμένα εδάφη (mg/kg)	Ρυπασμένα εδάφη (mg/kg)	Βαρέως ρυπασμένα εδάφη (mg/kg)	Ασυνήθως βαριά ρύπανση πάνω από (mg/kg)
Cd	0-1	1-3	3-10	10-50	50
Cr	0-100	100-200	200-500	500-2500	2500
Cu	0-100	100-200	200-500	500-2500	2500
Mn	0-500	500-1000	1000-2000	2000-1,0%	1,0%
Ni	0-20	20-50	50-200	200-1000	1000
Pb	0-500	500-1000	500-1000	2000-1,0%	1,0%
Zn	0-250	50-500	500-1000	1000-5000	5000

#### 4.1 Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικές με την αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών

Οι Ευρωπαϊκές Οδηγίες που αφορούν την αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών είναι οι ακόλουθες (INTERGEO, 2018):

- *Οδηγία 2000/60/ΕΚ* του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Στο πλαίσιο της προστασίας της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων εντάσσεται και η παρακολούθηση της ρύπανσης του εδάφους και της ατμόσφαιρας ως πηγές επιβλαβών ουσιών.
- *Οδηγία 96/61/ΕΚ* του Συμβουλίου της 24ης Σεπτεμβρίου 1996 σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης. Αντικείμενο της Οδηγίας είναι ο σχεδιασμός και η λειτουργία συγκεκριμένων εγκαταστάσεων, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος.

- Οδηγία 2004/35/EK για την περιβαλλοντική ευθύνη, με ισχύ από τον Απρίλιο του 2007. Βάσει αυτής, ο ιδιοκτήτης εγκατάστασης που προκάλεσε ζημία πρέπει να αναλάβει τα κατάλληλα μέτρα αποκατάστασης.

## **4.2 Η Ελληνική νομοθεσία**

Στην Ελλάδα, ειδική νομοθεσία για τη διαχείριση του εδάφους και την αποκατάσταση ρυπασμένων τοποθεσιών δεν υπάρχει παρά μόνο σχετικές διατάξεις σε γενικότερους νόμους για την προστασία του περιβάλλοντος και τη διαχείριση των απορριμμάτων. Συγκεκριμένα ισχύουν οι ακόλουθες σχετικές διατάξεις (INTERGEO, 2018):

### Νόμος 1650/1986 για την Προστασία του Περιβάλλοντος

Σύμφωνα με το άρθρο 10 του νόμου καθορίζονται: α) τα μέτρα και οι τρόποι προστασίας των εδαφών από τις φυσικές ζημιές και κυρίως από διάβρωση, έλλειψη αερισμού, αποξήρανση, υπεργήρανση, καταστροφή της δομής του εδάφους, αλάτωση, αποκάλυψη δυσμενών οριζόντων, χημική εξάντληση, υπερλίπανση ή ακατάλληλη λίπανση, προσθήκη τοξικών ουσιών από τη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων για τη διατήρηση και αύξηση της παραγωγικότητάς τους, β) οι χώροι όπου επιτρέπεται η τελική διάθεση τοξικών και επικίνδυνων αποβλήτων και ιλύος και γ) οι περιορισμοί ή οι απαγορεύσεις στην παραγωγή, εισαγωγή και εμπορία φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων που δημιουργούν κίνδυνο ρύπανσης.

### ΚΥΑ (Κοινή Υπουργική Απόφαση) 26857/553/88 ΦΕΚ 196Β

Αναφέρεται σε μέτρα και περιορισμούς για την προστασία των υπόγειων νερών από απορρίψεις ορισμένων επικίνδυνων ουσιών.

### ΚΥΑ 69728/824/96

Αφορά σε μέτρα και όρους για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.

### ΚΥΑ 113944/97

Η εν λόγω Απόφαση αναφέρεται στον Εθνικό Σχεδιασμό διαχείρισης στερεών αποβλήτων ο οποίος αποσκοπεί στην αποκατάσταση των περιβαλλοντικών βλαβών μέσα από τη σταδιακή αναβάθμιση του ρυπασμένου τοπίου και τη λήψη μέτρων για τον ουσιαστικό περιορισμό της προκαλούμενης ρύπανσης.

Κεντρικό θέμα της Κοινής Υπουργικής Απόφασης είναι τα μέτρα και οι όροι για τη Διαχείριση των Επικίνδυνων Αποβλήτων στα οποία περιλαμβάνονται η αποκατάσταση και η εξυγίανση ρυπασμένων χώρων από επικίνδυνα απόβλητα.

## **5. Συμπεράσματα**

Το πρόβλημα της ρύπανσης των εδαφών όσον αφορά τα βαρέα μέταλλα έχει λάβει ανησυχητικές διαστάσεις καθώς αποτελούν έναν πολύ σημαντικό παράγοντα αβιοτικής καταπόνησης που προκαλεί την παρεμπόδιση βασικών φυσιολογικών λειτουργιών όπως είναι η φωτοσύνθεση, η αναπνοή και η απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων. Υπολογίζεται δε ότι το κόστος αποκατάστασης των εδαφών της Ε.Ε. που έχουν επιβαρυνθεί με βαρέα μέταλλα ανέρχεται στο ύψος των 17,3 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως, γεγονός που υποδηλώνει το εύρος του προβλήματος (Τόθ, 2016).

Η φυτοαποκατάσταση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία απορρύπανσης εδαφών από βαρέα μέταλλα και αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ως μια οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στις συμβατικές φυσικοχημικές μεθόδους καθαρισμού του περιβάλλοντος (Boyajian & Carreira, 1997). Παρουσιάζει ωστόσο το μειονέκτημα ότι απαιτεί μεγάλους χρόνους κατεργασίας και επιπλέον υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες που ελέγχουν την αποδοτικότητα της τεχνικής αυτής, όπως οι ιδιότητες των εδαφών, τα φυτικά είδη και οι κλιματολογικές συνθήκες. Πολλά βέβαια είναι τα προγράμματα φυτοαποκατάστασης που έχουν στεφθεί με επιτυχία (Schnoor et al., 1995) και ο μηχανισμός αυτός έχει ευρεία εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο, ειδικότερα στις ΗΠΑ και στις χώρες της Ε.Ε. (Vallero, 2010).

Ωστόσο, η έρευνα σχετικά με την φυτοαποκατάσταση βρίσκεται ακόμα σε νηπιακό στάδιο. Για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητάς της απαιτείται περαιτέρω έρευνα με σκοπό την εξεύρεση αποτελεσματικότερων φυτικών ειδών - υπερσυσσωρευτών, που παρουσιάζουν γρήγορη ανάπτυξη, υψηλή βιομάζα, υψηλή ανοχή και συσσώρευση μετάλλων και άλλων ανόργανων ουσιών. Τα υπάρχοντα φυτά θα μπορούσαν επίσης να βελτιωθούν μέσω της χρήσης συμβατικών τεχνικών αναπαραγωγής και προσεγγίσεων της γενετικής μηχανικής (Dobson, 1997). Οι μακροχρόνιες βελτιώσεις στη φυτοαποκατάσταση είναι πιθανό να προκύψουν από την εισαγωγή γονιδίων που είναι υπεύθυνα για την ανοχή - ανεκτικότητα των φυτών στα βαρέα μέταλλα (Arthur et al.,

2005). Τόσο οι φυσιολόγοι όσο και οι μικροβιολόγοι θα παίξουν βασικό ρόλο σε αυτή τη γραμμή έρευνας. Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη για περισσότερες πιλοτικές εφαρμογές και μελέτες πεδίου για την ανάδειξη της αποτελεσματικότητας της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης και την αύξηση την αποδοχή της (Pilon-Smits, 2005).

Εν κατακλείδι, καθώς η φυτοαποκατάσταση βρίσκεται ακόμη σε αρχικά στάδια έρευνας και ανάπτυξης, πολυδιάστατες ομάδες ερευνητών από διαφορετικά υπόβαθρα όπως φυσιολόγοι, γεωπόνοι, επιστήμονες του εδάφους, μοριακοί βιολόγοι, μικροβιολόγοι, χημικοί, περιβαλλοντικοί μηχανικοί θα πρέπει να προχωρήσουν σε νέες ερευνητικές μελέτες για περαιτέρω βελτιώσεις του μηχανισμού της. Μία καλά σχεδιασμένη και τεκμηριωμένη ερευνητική πορεία κρίνεται απαραίτητη για την προώθηση της φυτοαποκατάστασης ως μιας φιλικής προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτικής τεχνολογίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξενόγλωσση

Aaron, A. (2010). *Streptanthus polygaloides*. CalPhotos. University of California. Retrieved from [https://calphotos.berkeley.edu/cgi/img\\_query?enlarge=0000+0000+0610+0057](https://calphotos.berkeley.edu/cgi/img_query?enlarge=0000+0000+0610+0057)

Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in the Terrestrial Environment*. New York: Springer-Verlag.

Agnello, A. C., Bagard, M., Hullebusch, E. D., Esposito, G., & Huguenot, D. (2016). Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *The Science of the Total Environment*, 563-564, 693-703. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.061.

Ai, S., Liu, B., Yang, Y., Ding, J., Yang, W., Bai, X., Naeem, S., & Zhang, Y. (2018). Temporal variations and spatial distributions of heavy metals in a wastewater-irrigated soil-eggplant system and associated influencing factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 153, 204-214. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.02.026.

Aitio, A., Aro, A., Jarvisalo, J., & Vainio, H. (1991). *Trace elements in health and disease*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.

Alexander, M. (1994). *Biodegradation and Bioremediation*. USA: Academic Press Inc.

Alloway, B. J., & Morgan, H. (1986). The behavior and availability of cadmium, nickel and lead in polluted soils. In J. W. Assink, & Van den Brink (Eds.), *Contaminated Soil* (pp. 101-113). Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers.

Alloway, B. J. (2012). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Spoils and their Bioavailability*. London: Springer.

Anderson, T. A., & Coats, J. R. (1995). An overview of microbial degradation in the rhizosphere and its implications for bioremediation. In H.D. Skipper, & R. F. Turco (Eds.). *Science and Applications* (pp. 135-143). Madison, WI.

Anderson, C. W. N., Brooks, R. R., Chiarucci, A., LaCoste, C. J., Leblanc, M., Robinson, B. H., Simack, R., & Stewart, R. B. (1999). Phytomining for nickel, thallium and gold. *Journal of Geochemical Exploration*, 67, 407–415. doi: 10.1016/S0375-6742(99)00055-2.

Arianoutsou, M., Philip, W., & Berry, L. (1993). *Serpentine Endemics as Biological Indicators of Soil Elemental Concentrations*. VCH Publishers Weinheim.

Arthur, E. L., Rice, P. J., Anderson, T. A., Baladi, S. M., Henderson, K. L. D., & Coats, J. R. (2005). Phytoremediation: An overview. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24, 109-122. doi: 10.1080/07352680590952496.

Atafar, Z., Mesdaghinia, A., Nouri, J., Homaei, M., Yunesian, M., Ahmadimoghaddam M., & Mahvi, A. H. (2010). Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration. *Environmental Monitoring and Assessment*, 160 (1-4), 83–89. doi: 10.1007/s10661-008-0659-x.

Atlas, R. M., & Pramer, D. (1990). *Focus on Bioremediation*. ASM News.

Bakere, A. J. M., Reeves, R. D., & Hajar, A. S. M. (1994). Heavy metal accumulation and tolerance in British population of the metallophyte thalassic. *New Phytologist*, 127 (1), 61-68. doi: 10.1111/j.1469-8137.1994.tb04259.x.

Baker, A. J. M., McGrath, S. P., Reeves, R. D., & Smith, J. A. C. (2000). Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In N. Terry & G. Banuelos (Eds.), *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (pp. 85–107). Boca Raton, FL: Lewis.

Balasubramanian, A. (2017). *Characteristics of soil profile*. University of Mysore.

Ballabio, C., Panagos, P., Lugato, E., Huang, J. H., Orgiazzi, A., Jones, A., Fernández-Ugalde, O., Borrelli, P., & Montanarella, L. (2018). Copper distribution in European topsoils: An assessment based on LUCAS soil survey. *Science of The Total Environment*, 636, 282-298. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.268.

Beedy, A. (1991). *Toxic metal uptake and essential metal regulation in terinvertebrates: A review*. Michigan: Lewis Publishers.

- Benoit, H. (2016). *Sebertia acuminata*. Wikimedia Commons. Retrieved from [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pycnandra\\_acuminata\\_01\\_-BH-\\_Feuilles.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pycnandra_acuminata_01_-BH-_Feuilles.jpg)
- Blittersdorff, R. V. (2011). *Iponomea alpine*. African Plants. Retrieved from [http://www.africanplants.senckenberg.de/root/index.php?page\\_id=78&id=3550](http://www.africanplants.senckenberg.de/root/index.php?page_id=78&id=3550)
- Blum, W. E. R. (1998). Basic concepts: Degradation, resilience, and rehabilitation. In R. Lal et al. (Ed.), *Methods for assessment of soil degradation* (pp. 1-16). Boca Raton, FL: CRC Press.
- BohatALA. (2018). *Application and techniques for phytoremediation*. Retrieved from: <https://bohatala.com/application-and-techniques-for-phytoremediation/>
- Boyajian, G. E., & Carreira, L. H. (1997). Phytoremediation: A clean transition from laboratory to marketplace? *National Biotechnology*, 15 (2), 127-128. doi: 10.1038/nbt0297-127.
- Brady, N. C., & Weill, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education.
- Braunwald, E., Fauci, A. S., Kasper, D. L., Hauser, S. L., Longo, D. L., & Jameson, J. L. (2001). *Harrison's Principles of Internal Medicine*. McGraw-Hill.
- Burges, A., Epelde, L., Blanco, F., Becerril, J. M., & Garbisu, C. (2017). Ecosystem services and plant physiological status during endophyte-assisted phytoremediation of metal contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 584-585, 329-338. doi: 10.1016./j.scitotenv.2016.12.146.
- Cairney, T. (1993). *Contaminated land: problems and solutions*. USA and Canada: Lewis Publishers.
- Chaney, R. L., Malikz, M., Li, Y. M., Brown, S. L., Brewer, E. P., Angle, S. J., & Bake, A. J. M. (1997). Phytoremediation of soil metals. *Environmental biotechnology*, 279-284.
- Chawla, R. C., Diallo, M. S., Cannon, J. N., & Johnson, J. H. (1990). In-situ treatment of soils contaminated with hazardous organic wastes using surfactants: A critical analysis. In:

H. S. Muralidhara (Ed.), *Solid/liquid separation: Waste management and productivity enhancement* (pp. 365-367). Battelle press, Battelle Memorial Institute, Columbus. OH.

Chen, Z. S. (1992). Metal contamination of flooded soils, rice plants and surface waters in Asia. In D. C. Adriano (Ed), *Biogeochemistry of Trace Metals* (pp. 85-108). Boca Raton, FL, Lewis Publishers.

Chen, Y., Hu, W., Huang, B., Weindorf, D. C., Rajan, N., Liu, X., & Niedermann, S. (2013). Accumulation and health risk of heavy metals in vegetables from harmless and organic vegetable production systems of China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 98, 324–330. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.09.037.

Chougui, A. (2014). Heavy metals and color retention by a synthesized inorganic membrane. *Arabian Journal of Chemistry*, 7 (5), 817-822. doi: 10.1016/j.arabjc.2012.11.017.

Christopherson, R. W. (1997). *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*. Upper Saddle River, NJ/USA: Prentice Hall Inc.

Copper flora (2018). *Haumaniastrum robertii*. Retrieved from <https://copperflora.org/eflora/species.php?id=148>

Cotton, F. A., & Wilkinson, G. (1980). *Advanced Inorganic Chemistry*. New York: J. Wiley & Sons.

Cox, S. (2000). *Mechanisms and strategies for phytoremediation of cadmium*. Fort Collins, CO, Colorado State University, Department of Horticulture.

Cristaldi, A., Conti, G. O., Jho, E. H., Zuccarello, P., Grasso, A., Copat, C., & Ferrante, M. (2017). Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 309-326. doi: 10.1016/j.eti.2017.08.002.

Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I.K., Koutroulis, A., & Kourgialas, N. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Elsevier Editorial System for Science of The Total Environment*, 573, 727. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.177.



- Daniel, D. E. (1993). Introduction. In D. E. Daniel (Ed.), *Geotechnical Practice for Waste Disposal* (pp. 3-14). London: Chapman & Hall.
- Das, S., & Dash, H. R. (2017). *Handbook of Metal-Microbe Interactions and Bioremediation*. USA: CRC Press.
- Datta, S., Chatterjee, S., Mitra, A., & Veer, V. (2013). Phytoremediation protocols: An overview. *Plant-Based Remediation Processes, 1*, 1-18. doi: 10.1007/978-3-642-35564-6\_1.
- Dobson, A. P., Bradshaw, A. D., & Baker, A. J. M. (1997). Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology. *Science, 277* (5325), 515-522. doi: 10.1126/science.277.5325.515.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In J.W. Doran et al. (Ed.), *Defaming soil quality for a sustainable environment* (pp. 1-22). Madison, WI: SSSA Spec. Publ. 35.
- Dotaniya, M. L., Rajendiran, S., Vassanda, C. M., Meena, V. D., Saha, J. K., Kundu, S., Kumara, A., & Patra, A. K. (2018). Interactive effect of cadmium and zinc on chromium uptake in spinach grown in Vertisol of Central India. *International Journal of Environmental Science and Technology, 15* (1), 441-448. doi: 10.1007/s13762-017-1396-x.
- Dracatos, P. A., Kalavrouziotis, I. K., & Dracatos, S. P. (2002). Antagonistic action of Fe and Mn in certain Mediterranean-type plants irrigated with wastewater effluents following biological treatment. *International Journal of Environmental Studies, 59*, 125-132.
- Dubois, G., Cornford, D., Hristopulos, D., Pebesma, E., & Pilz, J. (2011). Editorial: Introduction to this special issue on geoinformatics for environmental surveillance. *Computers & Geosciences, 37* (3), 277-279. doi: 10.1016/j.cageo.2010.06.002.
- European Commission. (2007). *Environment fact sheet: soil protection - a new policy for the EU*. European Commission, Brussels, Belgium.

- Evangelou, M. W., Ebel, M., & Schaeffer, A. (2007). Chelate assisted phytoextraction of potentially-toxic elements from soil, effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere*, 68 (6), 989-1003. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.01.062.
- Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. Y., & Schroeder, E. D. (1998). *Bioremediation principles*. Malaysia: McGraw-Hill.
- Feng, Y., Wu, Y., Zhang, J., Meng, Q., Wang, Q., Ma, L., Ma, X., & Yang, X. (2018). Ectopic expression of SaNRAMP3 from *Sedum alfredii* enhanced cadmium root-to-shoot transport in *Brassica juncea*. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 156, 279–286. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.03.031.
- Fiorentino, N., Fagnano, M., Adamo, P., Impagliazzo, A., Mori, M., Pepe, O., Ventorino, V., & Zoina, A. (2013). Assisted phytoextraction of heavy metals: compost and trichoderma effects on giant reed (*Arundo donax* L) uptake and soil N-cycle microflora. *Italian Journal of Agronomy* 8 (4), 244-254. doi: 10.4081/ija.2013.e29.
- Flatham, P. E., & Lanza, G. R. (1998). Phytoremediation: Current reviews on an emerging technology. *Journal of Soil Contamination*, 7, 415-432. doi: 10.1080/10588339891334438.
- Foth, H. D. (1990). *Fundamentals of Soil Science*. John Wiley & Sons.
- Fumagalli, P., Comolli, R., Ferrè, C., Ghiani, A., Gentili, R., & Citterio, S. (2014). The rotation of white lupin (*Lupinus albus* L.) with metal-accumulating plant crops: A strategy to increase the benefits of soil phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, 145, 35–42.
- Gardiner, D. T., & Miller, R. W. (2004). *Soils in Our Environment*. New Jersey: Pearson education.
- Garg, N., & Singh, S. (2018). Arbuscular Mycorrhiza *Rhizophagus irregularis* and Silicon Modulate Growth, Proline Biosynthesis and Yield in *Cajanus cajan* L. Millsp. (pigeonpea) Genotypes Under Cadmium and Zinc Stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37, 46-63. doi: 10.1007/s00344-017-9708-4.
- Gatliff, E. G. (1994). Vegetative Remediation Process Offers Advantages over Traditional Pump-and-Treat Technologies. *Remediation Journal*, 4 (3), 343-352. doi: 10.1002/rem.34400040307.

- Gavriil, A. M., Angelidis, M. O., & Aloupi, M. (2005). Processes affecting the distribution of trace metals in Kalloni bay, island of Lesvos, Greece. *Journal of Marine Environmental Engineering*, 8 (2), 129-136.
- Gebrekidan, A., Weldegebriel, Y., Hadera, A., & Van der Bruggen, B. (2013). Toxicological assessment of heavy metals accumulated in vegetables and fruits grown in Ginfel river near Sheba Tannery, Tigray, Northern Ethiopia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 95, 171–178. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.05.035.
- Goswami, S., & Das, S. (2016). Copper phytoremediation potential of *Calendula officinalis* L. and the role of antioxidant enzymes in metal tolerance. *Ecotoxicology and environmental safety*, 126, 211-218. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.12.030.
- Granatstein, D., & Bezdicek, D. F. (1992). The need for a soil quality index: Local and regional perspectives. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7, 12-16. doi: 10.1017/S0889189300004380.
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C. M., & Ellert, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 74, 367-385. doi: 10.4141/cjss94-051.
- Gupta, D. K. (2013). *Plant-Based Remediation Processes*. Springer Science & Business Media.
- Guzzi, G., & La Porta, C. A. M. (2008). Molecular mechanisms triggered by mercury. *Toxicology*, 244 (1) 1–12.
- Harrison, S., & Rajakaruna, N. (2011). *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System*. University of California Press.
- Hinchee, R. E., Muralidhara, H. S., Stulen, F. B., Wickramanayake, G. B., & Jirjis, B. F. (1990). Electroacoustic soil decontamination process for in-situ treatment of contaminated soils. In: H. S. Muralidhara (Ed.), *Solid/liquid separation: Waste management and productivity enhancement* (pp. 370-383). Battelle press, Battelle Memorial Institute, Columbus. OH.
- Hu, W., Huang, B., Shi, X., Chen, W., Zhao, Y., & Jiao, W. (2013). Accumulation and health risk of heavy metals in a plot-scale vegetable production system in a peri-urban

vegetable farm near Nanjing, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 98, 303–309.

Hu, Y., Liu, X., Bai, J., Shih, K., Zeng, Y. E., & Cheng, H. (2013). Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization. *Environmental Science Pollution Research*, 20 (9), 6150–6159. doi: 10.1007/s11356-013-1668-z.

Huang, Z., Pan, X. D., Wu, P. G., Han, J. L., & Chen, Q. (2014). Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China. *Food Control*, 36, 248–252.

Ifon, B. E., Togbé, A. C. F., Tometin, L. A. S., Suanon, F., & Yessoufou, A. (2019). *Metal-Contaminated Soil Remediation: Phytoremediation, Chemical Leaching and Electrochemical Remediation*. IntechOpen.

ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). (2009). *Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised. PHYTO-3*. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council.

Islam, E., Yang, X., He, Z., & Mahmood, Q. (2007). Assessing potential dietary toxicity of heavy metals in selected vegetables and food crops. *Journal of Zhejiang University Science*, 8, 1-13.

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., & Mathew, B. B. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7 (2), 60-72. doi: 10.2478/intox-2014-0009.

Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68, 167-182.

Jones, A. T., & Finley, W. (2003). Recent development in salinity gradient power. *Oceans*, 4, 2284–2287. doi: 10.1109/OCEANS.2003.178265.

Juliano, C., & Magrini, J. (2017). Cosmetic Ingredients as Emerging Pollutants of Environmental and Health Concern. A Mini-Review. *Cosmetics*, 4 (11), 1-18. doi: 10.3390/cosmetics4020011.

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.

Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). *Trace elements from soil to human*. Berlin: Springer.

Kalavrouziotis, I. K., & Dracatos, S. P. (2002). Irrigation of certain Mediterranean-type plants with heavy metals. *International Journal of Environment and Pollution*, 18, 294-300.

Karavayeva, N. A., Nefedova, T. G., & Targulian, V. O. (1991). Historical land use changes and soil degradation on the Russian Plain. In F. M. Brouwer et al. (Eds.), *Land use changes in Europe, processes of change, environmental transformations and future patterns* (pp. 351–377). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Karlen, D. L., & Stott D. E. (1992). A framework for Evaluating Physical and Chemical Indicators of Soil Quality. In J.W. Doran et al. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 53-72). Madison, WI: SSSA Special Publication 35.

Karlen, D. L., Wollenhaupt, N. C., Erbach, D. C., Berry, E. C., Swan, J. B., Eash, N. S., & Jordahl, J. L. (1994). Crop residue effect on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil and Tillage Research*, 31, 149-167. doi: 10.1016/0167-1987(94)90077-9.

Kathal, R., Malhotra P., Kumar, L., & Uniyal, P. L. (2016). Phytoextraction of Pb and Ni from the Polluted Soil by Brassica juncea. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 6 (5), 1-4. doi: 10.4172/2161-0525.1000394.

Kavanaugh, M. C. (1996). An overview of the management of contaminated sites in the US: The conflict between technology and public policy. *Water Science and Technology*, 34: 275-283. doi: 10.1016/S0273-1223(96)00755-X.

Khan, K., Lu, Y., Khan, H., Ishtiaq, M., Khan, S., Waqas, M., Wei, L., & Wang, T. (2013). Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. *Food and Chemical Toxicology*, 58, 449–458. doi: 10.1016/j.fct.2013.05.014.

- Kirdey, T. A., & Veselov, A. P. (2016). Phytoprotective Effect of Ammonium Humate at High Copper Concentrations in the Environment. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 4, 390-398. doi: 10.18500/1684-7318-2016-4-390-398.
- Koptsik, G. N. (2014). Problems and prospects concerning the phytoremediation of heavy metal polluted soils: A review. *Eurasian Soil Science*, 47 (9), 923-939. doi: 10.1134/S1064229314090075.
- Kosmas, C., Danalatos, N., Moustakas, N., Tsatiris, B., Kallianou, Ch., & Yassoglou, N. (1993). The impacts of parent material and landscape position on drought and biomass production of wheat under semi-arid conditions. *Soil Technology*, 6 (4), 337-349. doi: 10.1016/0933-3630(93)90024-9.
- Koumolou, L., Edoth, P., Montcho, S., Aklikokou, K., Loko, F., Boko, M., & Creppy, E. E. (2013). Health-risk market garden production linked to heavy metals in irrigation water in Benin. *Comptes Rendus Biologies*, 336, 278–283.
- Kuhlman, M., & Greenfield, T. (1999). Simplified soil washing processes for a variety of soils. *Journal of Hazardous Material*, 66 (1-2), 31-45. doi: 10.1016/s0304-3894(98)00212-x.
- Kumar, P., Lucini, L., Roupael, Y., Cardarelli, M., Kalunke, R. M., & Colla, G. (2015). Insight into the role of grafting and arbuscular mycorrhiza on cadmium stress tolerance in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 6, 477. doi: 10.3389/fpls.2015.00477.
- Lal, R. (1994). *Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics*. Washington: SCS technical monograph, DC.
- Lal, R. (1998). Soil quality and sustainability. In R. Lal et al. (Eds.), *Methods for assessment of soil degradation* (pp.17-30). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Laghlimi, M., Baghdad, B., Hadi, E. H., & Bouabdli, A. (2015). Phytoremediation Mechanisms of Heavy Metal Contaminated Soils: A Review. *Open Journal of Ecology* 5 (8), 375- 388. doi: 10.4236/oje.2015.58031.

Landmeyer, J. E. (2012). *Introduction to Phytoremediation of Contaminated Groundwater: Historical Foundation, Hydrologic Control and Contaminant Remediation*. Netherlands: Springer.

Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In J. W. Doran et al. (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 37-51). Madison, WI: SSSA Special Publication 35.

Lasat, M. M. (2000). *The Use of Plants for the Removal of Toxic Metals from Contaminated Soil*. American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow.

Lasat, M. M. (2002). Phytoextraction of Toxic Metals: A Review of Biological Mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, 31, 109-120. doi: 10.2134/jeq2002.0109.

Leguizamo, O. A. M., Gomez, F. D. W., & Sarmiento, G. C. M. (2017). Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands- A review. *Chemosphere*, 168, 1230-1247. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.075.

Lepp, N. W. (2012). *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants: Metals in the Environment*. Springer Science & Business Media.

Lindbo, D., Miles, R., Presley, D., & Ransom, N. (2008). Soil Profile Descriptions *Soil Science Society of America*, 1, 11-34. doi: 10.2136/2008.soilsciencestepbystep.c2.

Liphadzi, M. S., Kirkham, M. B., Mankin, K. R., & Paulsen, G. M. (2003). EDTA-assisted heavy-metal uptake by poplar and sunflower grown at a long-term sewage-sludge farm. *Plant and Soil*, 257, 171-182. 10.1023/A: 1026294830323.

Liu, W. X., Shen, L. F., Liu, J. W., Wang, Y. W., & Li, S. R. (2007). Uptake of Toxic Heavy Metals by Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivated in the Agricultural Soil near Zhengzhou City, People's Republic of China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 79, 209-213.

- Liu, M., Wang, T., Skidmore, A. K., & Liu, X. (2018). Heavy metal-induced stress in rice crops detected using multi-temporal Sentinel-2 satellite images. *The Science of the Total Environment*, 637–638, 18–29. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.415.
- Logan, T. J. (1992). Reclamation of chemically degraded soils. In R. Lal, & B. A. Stewart (Eds.), *Advances in Soil Science* (pp. 13-35). New York: Springer-Verlag.
- Lottermoser, B. G., & Ashley, P. M. (2006). Mobility and retention of trace element in hardpan-cemented cassiterite tailings, north Queensland, Australia. *Environmental Geology*, 50 (6), 835-846. doi: 10.1007/s00254-006-0255-8.
- Luo, J. S., Huang, J., Zeng, D. L., Peng, J. S., Zhang, G. B., Ma, H. L., ... Gong, J. M. (2018). A defensin-like protein drives cadmium efflux and allocation in rice. *Nature Communications*, 9 (1), 645. doi: 10.1038/s41467-018-03088-0.
- Malmanis, E., Fuerst, D. W., & Pineiowski, R. J. (1989). *Proceedings sixth national RCRA/Superfund conf. and exhibition*. New Orleans.
- Martin, M. H., & Coughtrey, P. J. (2012). *Biological Monitoring of Heavy Metal Pollution: Land and Air*. Springer Science & Business Media.
- Mason, C. F. (1991). *Biology of freshwater pollution* (2nd ed.). New York: J. Wiley & Sons.
- Mateo-Sagasta, J., & Burke, J. (2011). *Agriculture and water quality interactions: a global overview*. SOLAW Background Thematic Report – TR08.
- Mausbach, J. M., & Tugel, A. (1997, March). *Soil Quality – A Multitude of Approaches. California Soil Quality: From Critical Research to Sustainable Management*. Kearney Foundation Symposium, Berkeley, California.
- Morgan, J. E., & Morgan, A. J. (1988). Earthworms as biological monitors of cadmium, copper, lead and zinc in metalliferous soils. *Environmental Pollution*, 54, 123-138.
- Muchuweti, M., Birkett, J. W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M. D., & Lester, J. N. (2006). Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and



sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 112 (1), 41–48. doi: 10.1016/j.agee.2005.04.028.

Natural Resources Conservation Service (NRCS) Soils. Retrieved from [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nrcs142p2\\_054308](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nrcs142p2_054308)

Odum, E. P. (1971). *Fundamentals of Ecology*. Available from <https://www.worldcat.org/title/fundamentals-of-ecology/oclc/767691115>

Oldeman, L. R. (1994). The Global Extent of Soil Degradation. In: D. J. Greenland, & I. Szabolcs (Eds.), *Soil Resilience and Sustainable Landuse* (pp. 99-119). CAB International, Wallingford.

Özkul, C. (2016). Heavy metal contamination in soils around the Tunçbilek Thermal Power Plant (Kütahya, Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 188 (5), 284. doi: 10.1007/s10661-016-5295-2.

Papendick, R. I., & Parr, J. F. (1992). Soil quality: The key to sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7 (1-2), 2-3. doi: 10.1017/S0889189300004343.

Pennock, D. (2019). *Soil erosion: the greatest challenge for sustainable soil management*. Canada: Leadell Pennock.

Peralta-Videa, J. R., Lopez, M., Narayan, M., Saupe, G., & Gardea-Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 41 (8-9), 1665–1677. doi: 10.1016/j.biocel.2009.03.005.

Pierzynski, G. M., Sims, J. T., & Vance, G. F. (2005). *Soils and Environmental Quality*. USA: CRC Press LLC.

Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15-39. doi: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214.

Pivetz, B. E. (2001). *Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites*. US EPA.

- Prager, K., Schuler, J., & Helming, K. (2011). Soil degradation, farming practices, institutions and policy responses: An analytical framework. *Land Degradation and Development*, 22 (1), 32-46. doi: 10.1002/ldr.979.
- Prasad, M. N. V. (2013). *Heavy Metals Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems*. Springer Science & Business Media.
- Prasad, M. N. V., & Freitas H. (2003). Metal Hyperaccumulator in plants: Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6 (3), 275-321.
- Progiou, A., & Ziomas, I. (2011). Twenty-Year Road Traffic Emissions Trend in Greece. *Water, Air and Soil Pollution*, 223, 305-317. doi: 10.1007/s11270-011-0859-9.
- Pulford, I. D., Riddell-Black, D., & Stewart, C. (2002). Heavy metal uptake by willow clones from sewage sludge-treated soil: the potential for phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 4 (1), 59–72. doi: 10.1080/15226510208500073.
- Pulford, I. D., & Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review. *Environmental International*, 29 (4), 529-540. doi: 10.1016/S0160-4120(02)00152-6.
- Rada, E. C., Andreottola, G., Istrate, I. A., Viotti, P., Conti, F., & Magaril, E. R. (2019). Remediation of Soil Polluted by Organic Compounds Through Chemical Oxidation and Phytoremediation Combined with DCT. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (17), 3179. doi: 10.3390/ijerph16173179.
- Radwan, M. A., & Salama, A. K. (2006). Market basket survey for some heavy metals in Egyptian fruits and vegetables. *Food and Chemical Toxicology*, 44 (8), 1273–1278.
- Rechenthin, C. A. (2019). *Astragalus racemosus*. USDA, Natural Resources Conservation Service. Retrieved from <https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=ASRA2>
- Rene, E. R., Sahinkaya, E., Lewis, A., & Lens, P. N. L. (2017). *Sustainable Heavy Metal Remediation. Principles and Processes*. Available from <https://www.springer.com/gp/book/9783319611457>

Ritter, M. E. (2006). *The physical environment: an introduction to physical Geography*. Available from [http://www.earthonlinemedia.com/ebooks/tpe\\_3e/contents.html](http://www.earthonlinemedia.com/ebooks/tpe_3e/contents.html)

Saha, J. K., Panwar, N. R., & Singh, M. V. (2010). Determination of lead and cadmium concentration limits in agricultural soil and municipal solid waste compost through an approach of zero tolerance to food contamination. *Environmental Monitoring and Assessment* 168, 397-406. doi: 10.1007/s10661-1122-3.

Salido, A. L., Hasty, K. L., Lim, J., & Butcher, D. J. (2010). Phytoremediation of Arsenic and Lead in Contaminated Soil Using Chinese Brake Ferns (*Pteris vittata*) and Indian Mustard (*Brassica juncea*). *International Journal of Phytoremediation*, 5 (2), 89-103. doi: 10.1080/713610173.

Sayed, S. A. (1999, November). Effects of lead and kinetin on the growth and some physiological components of safflower. *Plant Growth Regulation*. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006216630915>

Schnoor, J. L., Licht, L. A., McCutcheon, S. C., Wolfe, N. L., & Carreira, L. H. (1995). Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environmental Science & Technology*, 29, 318-323. doi: 10.1021/es00007a002.

Schroeder, H. (1975). *Trace elements and Man*. The Devin-Adair Company, CT.

Shackira, A. M., & Puthur, J. T. (2019). Phytostabilization of Heavy Metals: Understanding of Principles and Practices. *Plant-Metal Interactions*, 263-282.

Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., & Yang, G. (2017). Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (11), 10056-10067. doi: 10.1007/s11356-0178421-y.

Shapiro, A. P., Renaud, P. C., & Probst, R. F. (1990). In-situ extraction of contaminants from hazardous waste sites by electroosmosis. In: H. S. Muralidhara (Ed.), *Solid/liquid separation: Waste management and productivity enhancement* (pp.346-353). Battelle press, Battelle Memorial Institute, Columbus. OH.

Sharma, P., & Pandey, S. (2014). Status of phytoremediation in world scenario. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, 2 (4), 178-191.

Siegel, F. R. (2002). *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Heidelberg: Springer-Verlag.

Singh, R., Gautam, N., Mishra, A., & Gupta, R. (2011). Heavy metals and living systems: An overview. *Indian Journal of Pharmacology*, 43 (3), 246-253. doi: 10.4102/0253-7613.81505.

Sofu, A., Moreira, I., Gattullo, C. E., Martins, L. L., & Mourato, M. (2018). Antioxidant responses of edible and model plant species subjected to subtoxic zinc concentrations. *Journal of Trace Elements in Medicine Biology*, 49, 261–268. doi:10.1016/j.jtemb.2018.02.010.

Sojka, R. E., & Upchurch, D. R. (1999, September). Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Science Society of America Journal*. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/0d5f/ee4309ba2c7bafa4d1c85606312234fa48a0.pdf>

Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (2nd ed.). Cambridge: Academic Press.

Sridhara, N., Kamala, C. T., & Suman Raj, D. S. (2008). Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 69 (3), 513-524.

Susarla, S., Medina, V. F., & McCutcheon, S. T. (2002). Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, 18 (5), 647-658.

Szabolcs, I. (1989). *Salt-Affected Soils*. Boca Raton: CRC Press Inc.

Tangahu, B. V., Abdullah, S. R. S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, 1-31. doi: 10.1155/2011/939161.

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2014). Heavy Metals Toxicity and the Environment. *PMC in US National Library of Medicine*, 101, 133-164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4\_6.

- Thien, S. (1998). Soil quality and sustainable turf grass management. *Golf Course Management*, 66, 56-60.
- Tilman, D. (1982). *Resource Competition and Community Structure*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Tóth, G., Hermann T., Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299-309. doi: 10.1016/j.envint.2015.12.017.
- Uaf, M., Hina, A., Saeed, A., & Sabahat, S. (2017). Impact of Heavy Metals on Plants and Animals in Relation to Sewage Water - A Review. *Science, Technology and Development*, 36 (4), 215-226. doi: 10.3923/std.2017.215.226.
- USDA (United States Department of Agriculture). (2002). Heavy Metal Soil Contamination. *Soil Quality – Urban Technical Note*, 3, 1-7.
- U. S. Environmental Protection Agency (1999). *Screening Level Ecological Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities*. Washington DC: Peer Review Draft.
- U. S. Environmental Protection Agency (2000). *Introduction to Phytoremediation*. Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory.
- Vallero, D. A. (2010). *Environmental Biotechnology: A biosystems approach*. Elsevier, London, UK: Elsevier.
- Van Beek, C. L., & Tóth, G. (2012). *Risk Assessment Methodologies of Soil Threats in Europe*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Van Loon, J. C. (1985). *Selected methods of trace metal analysis-biological and environmental samples*. New York: J. Wiley & Sons.
- Van Lynden, G. W. J., & Oldeman, L. R. (1997). *The assessment of the status of human-induced soil degradation in South and Southeast Asia*. Wageningen: ISRIC.

Verbruggen, N., & Hermans, C. (2013). Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant and Soil*, 368 (1-2), 87-99. doi: 10.1007/s11104-013-1589-0.

Vyslouzilova, M., Tlustos, P., & Szakova, J. (2003). Cadmium and zinc phytoextraction potential of seven clones of *Salix* spp. planted on heavy metal contaminated soils. *Plant Soil Environment*, 49, 542-547. doi: 10.17221/4191-PSE.

Walker, K. J. (2004). *Thlaspi caerulescens*. Atlas of the British and Irish Flora. Retrieved from <https://www.brc.ac.uk/plantatlas/plant/thlaspi-caerulescens>

Wang, J., Zhang, C. B., & Jin, Z. X. (2009). The distribution and phytoavailability of heavy metal fractions in rhizosphere soils of *Paulownia fortunei* (seem) Hems near a Pb/Zn smelter in Guangdong, PR China. *Geoderma*, 148, 299-306. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.10.015.

Watts, C. W., & Dexter, A. R. (1997). The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. *Science of The Soil and Tillage Research*, 42 (4), 253-275. doi: 10.1016/S0167-1987(97)00009-3.

Westcot, D. W., & Ayers, R. S. (1985). Irrigation water criteria. In G. S. Pettygrove, & T. Asano (Eds.), *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater-A guidance manual* (pp. 81-103). Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI.

Wolters, C. (2019, June 26). Toxic waste, explained. *National Geographic*. Retrieved from: <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/toxic-waste/>

Wong, M. H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50 (6), 775-780. doi: 10.1016/s0045-6535(02)00232-1.

Xu, J., & Sparks, D. L. (2013). *Molecular Environmental Soil Science*. New York, London: Springer.

Yi, K., Fan, W., Chen, J., Jiang, S., Huang, S., Peng, L., Zeng, Q., & Luo, S. (2018). Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of

contaminated areas in Hunan Province, China. *Science of the Total Environment*, 634, 67-76. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.294.

Zhao, F. J., Lombi, E., & McGrath, S. P. (2003). Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 249, 37-43.

## Ελληνόγλωσση

Αλιφραγκής, Δ. (2002). *Επανεγκατάσταση της Βλάστησης στα Διαταραγμένα Εδάφη της Εγνατίας Οδού*. Εγνατία Οδός ΑΕ- Σύμβαση 453/GK/A01. Ελλάδα.

Αλιφραγκής, Δ. (2008). *Το Έδαφος: Γένεση – Ιδιότητες - Ταξινόμηση*. Θεσσαλονίκη: Αϊβάζη.

Αλιφραγκής, Δ. (2015). *Το Έδαφος: Διαχείριση, Προστασία, Βελτίωση και Αποκατάσταση των Λειτουργιών του*. Θεσσαλονίκη: Αϊβάζη.

Αλμπάνης, Τ. (1996). *Ρύπανση και τεχνολογία προστασίας περιβάλλοντος* (2η έκδ.). Ιωάννινα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Αρβανίτης, Λ. (2006). *Γεωχημική μελέτη σε επιφανειακά ιζήματα του επιβατικού τμήματος του Λιμένα Πειραιώς*. (Αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή). Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Βλυσίδης, Α. (2007). *Χαρακτηριστικά αστικών λυμάτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών Σχολή Χημικών Μηχανικών. Αθήνα.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2011). *Εδαφολογία. Η φύση και οι ιδιότητες των εδαφών*. (Συλλογικό, μετάφραση). Αθήνα: Έμβρυο. (Πρωτότυπη έκδοση, 1996).

Γεντακάκης, Ι. (2010). *Ατμοσφαιρική ρύπανση: επιπτώσεις, έλεγχος και εναλλακτικές τεχνολογίες* (2η εκδ.). Χανιά: Κλειδάριθμος.

Γεωργίου, Χ., Γιανναράς, Γ., Κούτσικος, Η., & Τσίμας, Σ. (2009). *Βιομηχανική παραγωγή και ενέργεια*. Διαθέσιμο από <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C124/54/415,1532/>

Γιάσογλου, Ν. Ι. (1973). *Μαθήματα Γεωργικής Χημείας*. Αθήνα.

Γιδαράκος, Ε., Αϊβαλιώτη, Μ., Γιαννής, Α., & Καλδέρης, Δ. (2009). *Μελέτη για τη Διερεύνηση, Αξιολόγηση και Αποκατάσταση Ανεξέλεγκτων Ρυπασμένων Χώρων/Εγκαταστάσεων από Βιομηχανικά και Επικίνδυνα Απόβλητα στην Ελλάδα*. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Περιβάλλον». Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικινδύνων Αποβλήτων, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Γιδαράκος, Ε., & Αϊβαλιώτη, Μ. (2005). *Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδαφών και Υπογείων Υδάτων από Επικίνδυνους Ρύπους*. Θεσσαλονίκη: Ζυγός.

Γκέκας, Β., Φραντζεσκάκη, Ν., & Κατσιβέλα, Ε. (2002). *Τεχνολογίες Επεξεργασίας Τοξικών – Επικινδύνων Αποβλήτων*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλα.

Δ.Ε.Υ.Α.Α. (χ. η.) *Εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων*. Ανάκληση από <http://www.deya-artas.gr/wp1/?p=422>.

Δημητριάδης, Ε. Α. (2009). *Τοξικά βαρέα μέταλλα και η ειδική επίδρασή τους στα διάφορα είδη της άνοιας*. Α΄ Νευρολογική Κλινική ΑΧΕΠΑ Α.Π.Θ.

Διαμαντόπουλος, Π. (2014). *Ο ρόλος της οργανικής ουσίας στο έδαφος*. *Ελληνική Γεωργία*. Ανάκληση από: <https://www.ellinikigeorgia.gr/rolos-organikis-ousias-edafos/>

Envima (2013). *Παθογόνοι μικροοργανισμοί στα λύματα*. Ανάκληση από [http://www.envima.gr/sites/all/libraries/pdf/tech\\_briefs/TB\\_Pathogonoi\\_Aporrofitikoι\\_Vot\\_hroi.pdf](http://www.envima.gr/sites/all/libraries/pdf/tech_briefs/TB_Pathogonoi_Aporrofitikoι_Vot_hroi.pdf)

Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων. (2006). *Ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Συμβούλιο, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή Περιφερειών - Θεματική στρατηγική για την προστασία του εδάφους*. Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων. Βρυξέλλες. Βέλγιο.

Epoli.gr (2019). *Ολοκλήρωση του σχεδιασμού για τα αστικά λύματα της Αττικής*. Ανάκληση από [https://www.epoli.gr/oloklirwsi-sxediasmoy-astika-lymata-a-105360.html?category\\_id=94](https://www.epoli.gr/oloklirwsi-sxediasmoy-astika-lymata-a-105360.html?category_id=94)

Ε.Υ.Α.Θ. (χ. η.). *Εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων της ΕΥΑΘ – Προστασία του Θερμαικού*. Ανάκληση από <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/>



Ζαλίδης, Γ. (2002). *Ρύπανση και υποβάθμιση εδαφών*. Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ. Τμήμα Γεωπονίας-Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας.

Ζαμπετάκης, Α. Λ. (2000). *Αποκατάσταση εδαφών δια της μεθόδου της φυτοεξυγίανσης. Παρουσίαση μαθηματικού μοντέλου για την πρόσληψη ξενοβιοτικών ουσιών από φυτά*. (Αδημοσίευτη μεταπτυχιακή διατριβή). Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Κρήτη.

Ζαμπετάκης, Α. Λ., Μάνιος, Β. Θ., & Καρατζάς, Γ. (2005). *Καινοτομικές μέθοδοι εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων. Η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης*, Διεθνής έκθεση Heleco, Θεσσαλονίκη.

Θεοδωρόπουλος, Π., Παπαθεοφάνους, Π., & Σιδέρη, Φ. (2016). *Χημεία Γ' Γυμνασίου*. Αθήνα: ΙΤΥΕ Διόφαντος.

Θεοδώρου, Μ., & Πασχαλίδης, Χ. (1999). *Εγχειρίδιο καλλιεργητή*. Αθήνα: Έμβρυο.

Ιατρού, Ε. (2012). *Διερεύνηση της απομάκρυνσης αντιβιοτικών μέσω δευτεροβάθμιας και τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και μελέτη της τύχης τους κατά την εισαγωγή τους στο υδάτινο περιβάλλον*. (Αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή). Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.

INTERGEO (2018). *Ευρωπαϊκή και Εθνική Νομοθεσία*. Ανάκληση από <https://intergeo.gr/aporripasi-europaiki-ethniki-nomothesia/>

Καββαδάς, Μ., & Πανταζίδου, Μ. (2007). *Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καντερές, Π. (2010). *Μελέτη της προσρόφησης και της κινητικής προσρόφησης του Cu και του Zn σε δύο όξινα εδάφη*. (Αδημοσίευτη μεταπτυχιακή διατριβή). Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Καραμάνος, Α. Ι. (2004). *Εδαφος*. Αθήνα: Εργαστήριο Γεωργίας Γ.Π.Α.

- Καραμπουρνιώτης, Γ. (2014). *Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών* (3η έκδ.). Αθήνα: Έμβρυο.
- Καφφέ, Δ. (2018). *Περιβαλλοντική Αγωγή για ενήλικες*. Αυτοέκδοση.
- ΚΕΕ (χ. η.). *Οικοσυστήματα χερσαία*. Ανάκληση από: <http://www.kee.gr/perivallontiki/abiotic.html>
- Κουϊμτζής, Θ., Φυτιανός, Κ., & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ. (1998). *Χημεία περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
- Κυρανάς, Ε. (2010). *Συμπληρωματικές σημειώσεις: Επιστήμη Τροφίμων II*. Θεσσαλονίκη: Α.Τ.Ε.Ι.Θ.
- Μαυρίδου, Α. (2014). *Κίνδυνοι από την μόλυνση του πόσιμου νερού - Μέτρα προστασίας - Ενημέρωση καταναλωτών*. ΤΕΙ Αθήνας.
- Miller, T. G. JR. (1999α). *Βιώνοντας στο Περιβάλλον II: Προβλήματα Περιβαλλοντικών Συστημάτων*. (Μ. Ταλαντοπούλου, μετάφραση). Αθήνα: Ίων. (Πρωτότυπη έκδοση, 1996).
- Miller, T. G. JR. (1999β). *Περιβάλλον I: Αρχές Περιβαλλοντικών Επιστημών*. (Μ. Ταλαντοπούλου, μετάφραση). Αθήνα: Ίων. (Πρωτότυπη έκδοση, 1996).
- Μισοπολινός, Ν. (1990). *Γεωλογία – Πετρογραφία*. Θεσσαλονίκη: Γιαχούδη.
- Μιχαλοπούλου, Χ. (2004). *Νομοθεσία για το περιβάλλον*. Θεσσαλονίκη: Ζήτη.
- Μπόμπορη, Δ. Χ. (1996). *Βιοσυσσώρευση βαρέων μετάλλων στο οικοσύστημα της λίμνης Κορώνειας*. (Αδημοσίευτη Διδακτορική Διατριβή). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Νταρακάς, Ε. (2010). *Σημειώσεις: Διεργασίες Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων*. Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ
- Ξένος, Κ. Δ. (2006). *Ρύπανση νερού-Τεχνικές ελέγχου ποιότητας υδάτων*. Αθήνα: Ίων.
- Παπαδόπουλος, Κ. (2011). *Γεωμορφολογία: Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες*. Αθήνα: Ίων.
- Παπαμίχος, Ν. Θ. (1990). *Δασικά εδάφη*. Θεσσαλονίκη.

- Πασχαλίδης, Χ. (1999). *Εγχειρίδιο Καλλιεργητή*. Αθήνα: Έμβρυο.
- Σαϊτάνης, Κ. (2018). *Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος*. Εργαστήριο Οικολογίας και Προστασίας του Περιβάλλοντος, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Σακελλαριάδου, Φ. Α. (2007). *Ωκεανογραφία*. Αθήνα: Σταμούλη.
- Σαχινίδης, Σ., Χριστοφορίδης, Α., & Λαζαρίδου, Α. (2014). *Διαδικασίες για την αποκατάσταση του εδάφους που μολύνεται από τον μόλυβδο*. Τμήμα Τεχνολογίας Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου, ΤΕΙ Καβάλας.
- Σινάνης, Κ. (2016). *Εδαφος – Διαχείριση – Περιβάλλον*. Ηράκλειο: Αυτοέκδοση.
- Τάντος, Β., & Παπαϊωάννου, Α. Γ. (2006). *Δασική Εδαφολογία*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Τζόβολου, Δ. Ν. (2011). *Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων απορρύπανσης της ακόρεστης ζώνης εδάφους μολυσμένου με κηροζίνη*. (Αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή). Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Τσιούρης, Σ. (2004). *Θέματα προστασίας περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Γαρταγάνη.
- Τσιτσιάς, Κ. Κ. (1997). *Λιπασματολογία*. Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας. Α.Τ.Ε.Ι Λάρισας.
- Υπουργείο Εσωτερικών, Αποκέντρωσης και Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης (2011). *Η εφαρμογή του Διεθνούς και Ευρωπαϊκού δικαίου Περιβάλλοντος στην Ελλάδα*. Ανάκληση από <https://www.dsth.gr/documents/10180/275662/16-3-11%CE%A0%CE%99%CE%9D%CE%95%CE%A0%2B%CE%A0%CE%95%CE%A1%2B15.3.11%2B.pdf?version=1.0>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. *Αξιοποίηση Ιλύος*. Ανάκληση από <http://www.opengov.gr/minenv/?p=3338>
- ΦΕΚ 160/16-10-86. Ανάκληση από [https://www.kodiko.gr/nomologia/download\\_fek?f=fek/1986/a/fek\\_a\\_160\\_1986.pdf&t=dfc1efb47d8568e1e76451dfa8e4f373](https://www.kodiko.gr/nomologia/download_fek?f=fek/1986/a/fek_a_160_1986.pdf&t=dfc1efb47d8568e1e76451dfa8e4f373)
- Φυτιανός, Θ., & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ. (2009). *Χημεία Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
- Χουλιάρης, Ν. (2010). *Εδαφος και μέθοδοι μελέτης*. Αθήνα: Ίων.