



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Επίδραση των ρύπων στη συμπεριφορά των εδαφών”

ΔΑΣΚΑΛΟΠΟΥΛΟΥ ΝΙΚΗ-ΟΛΓΑ

A.M.: 3020027

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΛΑΡΙΣΑ, 2025

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

.....
.....
.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρύπανση του εδάφους αποτελεί μια κρίσιμη περιβαλλοντική πρόκληση που απειλεί την υγεία των οικοσυστημάτων, των ανθρώπινων πληθυσμών και τη βιωσιμότητα των αγροτικών και αστικών συστημάτων παγκοσμίως. Τα εδάφη, ως δυναμικά φυσικά συστήματα, παρέχουν ουσιαστικές οικοσυστημικές υπηρεσίες, όπως ο κύκλος των θρεπτικών ουσιών, η διήθηση του νερού και η υποστήριξη της ζωής φυτών και μικροοργανισμών. Ωστόσο, η συσσώρευση ρύπων, όπως βαρέα μέταλλα, υδρογονάνθρακες, φυτοφάρμακα και βιομηχανικά χημικά, έχει ολοένα και περισσότερο υποβαθμίσει αυτές τις λειτουργίες, με μακροχρόνιες συνέπειες για τη γονιμότητα του εδάφους, την περιβαλλοντική ποιότητα και τη δημόσια υγεία.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία διερευνά τα αίτια, τους μηχανισμούς και τις επιπτώσεις της ρύπανσης του εδάφους, καθώς και τις προσεγγίσεις για την αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών. Η έρευνα ξεκινά με την παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου των εδαφικών συστημάτων, αναλύοντας τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που καθορίζουν τη λειτουργία και την ευπάθεια του εδάφους. Οι ρύποι ταξινομούνται ανάλογα με την προέλευση και τις χημικές τους ιδιότητες, ενώ εξετάζονται οι μηχανισμοί διάχυσης και μεταφοράς τους στο έδαφος.

Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται οι επιπτώσεις των ρύπων στη συμπεριφορά του εδάφους, εστιάζοντας στις αλλαγές στις φυσικές δομές, στη χημική σύσταση, στις μηχανικές ιδιότητες και στη βιολογική δραστηριότητα. Η μελέτη διερευνά επίσης τις περιβαλλοντικές και τεχνικές συνέπειες της ρύπανσης, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων στη γεωτεχνική μηχανική, στην υγεία των οικοσυστημάτων και στη δημόσια ασφάλεια, τονίζοντας την επείγουσα ανάγκη για αποκατάσταση των υποβαθμισμένων εδαφών. Τέλος, η πτυχιακή εργασία παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των τεχνολογιών απορρύπανσης, από τις συμβατικές μεθόδους, όπως το πλύσιμο και η σταθεροποίηση του εδάφους, έως τις καινοτόμες προσεγγίσεις, όπως η βιοαποκατάσταση και η φυτοαποκατάσταση. Παρέχονται πρακτικές συστάσεις και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με στόχο τη βιώσιμη διαχείριση των μολυσμένων εδαφών.

Συνολικά, η μελέτη προσφέρει μια διεπιστημονική προσέγγιση στη ρύπανση του εδάφους, ενσωματώνοντας γνώσεις από την περιβαλλοντική επιστήμη, τη χημεία του εδάφους, τη μικροβιολογία και τη πολιτική μηχανική, προκειμένου να παρασχεθεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση του προβλήματος και των πιθανών λύσεων. Μέσω της σύνθεσης της υπάρχουσας γνώσης και της αναγνώρισης των ελλείψεων, η έρευνα συμβάλλει τόσο στην επιστημονική γνώση όσο και στις πρακτικές στρατηγικές για την προστασία της υγείας του εδάφους και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Λέξεις κλειδιά: Ρύπανση Εδάφους, Βαρέα Μέταλλα, Υδρογονάνθρακες, Βιοαποκατάσταση, Φυτοαποκατάσταση, Υγεία Εδάφους

ABSTRACT

Soil pollution is a critical environmental challenge that threatens the health of ecosystems, human populations, and the sustainability of agricultural and urban systems worldwide. Soils, as dynamic natural systems, provide essential ecosystem services including nutrient cycling, water filtration, and support for plant and microbial life. However, the accumulation of pollutants such as heavy metals, hydrocarbons, pesticides, and industrial chemicals has increasingly compromised these functions, with long-term consequences for soil fertility, environmental quality, and public health.

This thesis investigates the causes, mechanisms, and impacts of soil pollution, as well as approaches to remediate contaminated soils. The research begins by establishing the theoretical background of soil systems, detailing the physical, chemical, and biological processes that govern soil function and vulnerability. Pollutants are classified according to origin and chemical properties, and their transport and dispersion in soil matrices are examined.

Subsequent chapters analyze the effects of contaminants on soil behavior, highlighting changes in physical structure, chemical composition, mechanical properties, and biological activity. The study further explores the environmental and technical implications of soil pollution, including impacts on geotechnical engineering, ecosystem health, and human safety, emphasizing the urgent need for restoration of degraded soils.

Finally, the thesis presents a comprehensive review of remediation technologies, ranging from conventional methods such as soil washing and stabilization to innovative approaches like bioremediation and phytoremediation. Practical recommendations and guidelines for future research are provided to inform sustainable management of polluted soils.

Overall, this study provides a multidisciplinary perspective on soil pollution, integrating insights from environmental science, soil chemistry, microbiology, and civil engineering to offer a holistic understanding of the problem and its potential solutions. By synthesizing current knowledge and identifying gaps, the research contributes to both scientific understanding and practical strategies for protecting soil health and environmental sustainability.

Keywords: Soil Pollution, Heavy Metals, Hydrocarbons, Bioremediation, Phytoremediation, Soil Health

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου, των οποίων η υποστήριξη υπήρξε το θεμέλιο της ακαδημαϊκής μου πορείας. Επίσης, εκφράζω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου, κ. Χριστοδούλου, για την ανεκτίμητη καθοδήγηση, τα διορατικά σχόλια και τη συνεχή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΗΜΑΣΙΑΣ ΤΟΥ	12
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ)	15
1.3.1 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	16
Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΝ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ Η ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ, ΑΛΛΑ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΕ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ. ΑΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΠΕΡΙΟΡΙΖΕΙ ΤΗΝ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ, ΕΠΙΤΡΕΠΕΙ ΜΙΑ ΕΥΡΕΙΑ ΣΥΝΘΕΣΗ ΓΝΩΣΕΩΝ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΚΛΑΔΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ.	16
1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	18
2.1 ΤΟ ΕΛΑΦΟΣ ΩΣ ΦΥΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	18
2.1.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ	18
2.1.2 ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	19
2.1.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ	20
2.1.4 ΕΛΑΦΙΚΗ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	21
2.1.5 ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ	21
2.1.6 ΤΟ ΈΛΑΦΟΣ ΩΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	22
2.2 ΡΥΠΟΙ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	22
2.2.1 ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΡΥΠΟΙ.....	23
2.2.2 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΩΝ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ	24
2.2.3 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ	24
2.2.4 ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ	24
2.2.5 ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	24
2.2.6 ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΚΑΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	24

2.2.7 ΑΠΟΨΙΛΩΣΗ ΚΑΙ ΏΞΙΝΗ ΒΡΟΧΗ	25
2.3 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ ΈΔΑΦΟΣ	25
2.3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ.....	26
2.3.2 ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ.....	26
2.3.3 ΜΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΗ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗ	26
2.3.4 ΔΙΗΘΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ ΡΟΗΣ	26
2.3.5 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΕ ΡΟΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ.....	26
2.3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	27
2.3.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ.....	27
2.3.8 ΡΥΠΟΙ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ...	28
3.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	29
3.1.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΥΦΗΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗΣ.....	29
3.1.2 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΟΡΩΔΕΣ	30
3.1.3 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	30
3.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	31
3.2.1 ΡΗ ΚΑΙ ΟΞΥΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	31
3.2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΙΟΝΙΚΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ (CEC)	32
3.2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (EC) ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ.....	32
3.2.4 ΩΣΜΩΤΙΚΟ ΣΤΡΕΣ	32
3.2.4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ.....	33
3.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	34
3.3.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	34
3.3.2 ΌΡΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΤΗΤΑΣ.....	34
3.3.3 ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ.....	35
3.3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ	36
3.4 ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ.....	36
3.4.1 ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ ΚΑΙ ΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ.....	37
3.4.2 ΕΝΖΥΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΩΣ ΔΕΙΚΤΗΣ.....	37
3.4.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΦΥΤΩΝ–ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΡΙΖΟΣΦΑΙΡΑ	38
3.4.4 ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΟΙ ΡΥΠΟΙ.....	38

3.4.5 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	39
3.4.6 ΔΕΙΚΤΕΣ ΥΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	41
4.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ	41
4.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ	42
4.1.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΤΑΣΗ ΚΟΠΗΣ.....	42
4.1.3. ΌΡΙΑ ATTERBERG	43
4.1.4. ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	43
4.1.5. ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ CALIFORNIA (CBR).....	43
4.2 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΥΓΕΙΑ	44
4.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΓΟΝΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	45
4.2.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΕΛΑΦΟΥΣ–ΦΥΤΩΝ	45
4.2.3 ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ	45
4.2.4 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΙΣΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	46
4.2.5 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ	46
4.2.6 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	47
4.2.7 ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	47
4.2.8 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ-ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΕΚΘΕΣΗ.....	47
4.2.9 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΤΟΞΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	48
4.2.10 ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ.....	48
4.2.11 ΕΥΑΛΩΤΟΙ ΠΛΗΘΥΣΜΟΙ	49
4.2.12 ΤΕΚΜΗΡΙΩΜΕΝΑ ΕΠΙΔΗΜΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	49
4.2.13 ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΟΙ ΡΥΠΟΙ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΑ ΑΝΤΙΜΙΚΡΟΒΙΑΚΑ	49
4.2.14 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	49
4.3 ΑΝΑΓΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	50
4.3.1 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	50
4.3.2 ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	50
4.3.3 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	52
5.1 ΒΙΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	52
5.1.1 EX SITU ΒΙΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	53

5.1.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕ ΑΙΩΡΗΜΑ (SLURRY-PHASE TREATMENT).....	53
5.1.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΦΑΣΗ (SOLID-PHASE TREATMENT).....	54
5.1.4 IN SITU ΒΙΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	54
5.1.5 ΕΓΓΕΝΗΣ ΒΙΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (INTRINSIC BIOREMEDIATION).....	54
5.1.6 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ IN SITU ΒΙΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (ENHANCED IN SITU BIOREMEDIATION).....	55
5.2 ΕΛΑΦΟΠΛΥΣΗ (SOIL WASHING).....	55
5.2.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ	56
5.2.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΕΚΧΥΛΙΣΗΣ.....	57
5.2.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΑΛΥΣΙΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ (INTEGRATED TREATMENT TRAINS).....	57
5.3 ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ (STABILIZATION AND SOLIDIFICATION).....	58
5.3.1 ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ (STABILIZATION)	58
5.3.2 ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ (SOLIDIFICATION).....	58
5.3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ / ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	59
5.4 ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	60
5.4.1 ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (PHYTOREMEDIATION)	60
5.4.2 ΜΥΚΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	61
5.4.3 ΝΑΝΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	62
5.4.4 ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	62
5.4.5 ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	64
6.1 ΚΥΡΙΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ.....	64
6.1.1 Η ΈΚΤΑΣΗ ΚΑΙ Η ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	65
6.1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ	65
6.1.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	66
6.1.4 Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	67
6.1.5 ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	68
6.2 ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	68
6.2.1 Η ΠΡΟΛΗΨΗ ΩΣ ΠΡΩΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΑΜΥΝΑΣ	68

6.2.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	69
6.2.3 ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	69
6.2.4 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	69
6.2.5 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ.....	69
6.2.6 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΓΝΩΣΗΣ.....	70
6.2.7 ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΤΗΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΑΣ.....	70
6.2.8 ΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ.....	70
6.2.9 ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΕΥΘΥΝΗΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	70
6.2.10 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	71
6.2.11 ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΛΑΦΩΝ ΜΕ ΕΥΡΥΤΕΡΟΥΣ ΣΤΟΧΟΥΣ ΒΙΩΣΙΜΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ	71
6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ.....	71
6.3.1 ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	72
6.3.2 ΕΞΕΤΑΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	72
6.3.3 ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	73
6.3.4 ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	73
6.3.5 ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΗΝ ΈΡΕΥΝΑ	73
6.3.6 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ	73
6.3.7 ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ	73
6.3.8 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΓΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΟΠΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΧΘΟΝΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ.....	74
6.3.9 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΈΡΕΥΝΑ.....	74
6.3.10 ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΈΡΕΥΝΑ	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Σχηματισμός και Εξέλιξη του Εδάφους [Πηγή: Sapkota, 2020]	19
Εικόνα 2 Λειτουργίες και Οικοσυστημικές Υπηρεσίες του Εδάφους [Πηγή: Keesstra et al., 2018].....	20
Εικόνα 3 Ρύπανση και Ρύποι του Εδάφους [Πηγή: FAO and UNEP, 2021]	23
Εικόνα 4 Διασπορά και Μεταφορά Ρύπων στο Έδαφος [Πηγή: FAO and UNEP, 2021]. .	25
Εικόνα 5: Επίδραση των ρύπων στη συμπεριφορά των εδαφών [Πηγή: Sachan, Tiwari and Tripathi, 2023].....	29
Εικόνα 6: Επίδραση των ρύπων στις φυσικές ιδιότητες των εδαφών [Πηγή: Wang et al., 2024].....	31
Εικόνα 7: Επίδραση των ρύπων στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των εδαφών [Πηγή: Suazo-Hernández et al., 2023].....	33
Εικόνα 8: Επίδραση των ρύπων στις μηχανικές ιδιότητες των εδαφών [Πηγή: Sylwia Kukowska and Katarzyna Szewczuk-Karpisz, 2024].....	36
Εικόνα 9: Επίδραση των ρύπων στη βιολογική δραστηριότητα των εδαφών [Πηγή: IASPOINT, 2024].....	40
Εικόνα 10: Όρια Atterberg [Πηγή: Pavetest, 2025]	43
Εικόνα 11: Τιμές CBR [Πηγή: Backus, n.d.]	44
Εικόνα 12: Έδαφος και Οικοσυστήματα [Πηγή: (FAO and UNEP, 2021).....	44
Εικόνα 13: Ρύπανση εδάφους και υγεία [Πηγή: (FAO and UNEP, 2021).....	48
Εικόνα 14: Τεχνικές Βιοαποκατάστασης [Πηγή: Alori et al., 2022]	53
Εικόνα 15: Διάγραμμα Πλύσης Εδάφους [Πηγή: Rasheed, Patil and Dayal, 2013].....	56
Εικόνα 16: Καινοτόμες μέθοδοι βιοαποκατάστασης [Πηγή: Rodrigues, Carolina and Silva, 2020].....	60
Εικόνα 17: Απώλειες λόγω ρύπανσης του εδάφους [Πηγή: FAO and UNEP, 2021]	66
Εικόνα 18: Πλαίσιο πολιτικής του συστήματος διαχείρισης εδάφους. [Πηγή: (Li et al., 2019).....	67
Εικόνα 19: Περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη της αποκατάστασης των εδαφών [Πηγή: Santos, Rebola and Evtuguin, 2025].....	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

FAO: Διεθνής Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας

UNEP: Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών

DDT: π, π'-διχλωρο-διφαινυλοτριχλωροαιθάνιο

WHO: Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

SBA: Sugarcane Bagasse Ash

CEC: Cation-exchange capacity

SM: sand with silty

Cl: Clay loam

LL: Liquid Limit

PL: Plastic Limit

PCB: Πολυχλωριωμένα διφαινύλια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Παρουσίαση του Θέματος και της Σημασίας του

Το έδαφος, συχνά παραγνωρισμένο σε σύγκριση με τον αέρα και το νερό, αποτελεί έναν από τους πλέον αναντικατάστατους φυσικούς πόρους που στηρίζουν τη ζωή στη Γη. Λειτουργεί ως αποθετήριο θρεπτικών στοιχείων, νερού και βιοποικιλότητας, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί τη θεμελιώδη βάση για τη γεωργία, τη φυσική βλάστηση και τις ανθρώπινες υποδομές. Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) ορίζει το έδαφος ως έναν «ζωντανό οργανισμό», υπογραμμίζοντας τη βιολογική, χημική και φυσική του πολυπλοκότητα. Τα υγιή εδάφη ρυθμίζουν τον υδρολογικό κύκλο, φιλτράρουν τους ρύπους, δεσμεύουν τον άνθρακα και προσφέρουν οικοσυστημικές υπηρεσίες απαραίτητες για την ανθρώπινη επιβίωση. Ωστόσο, αυτός ο αναντικατάστατος πόρος υφίσταται ολοένα και μεγαλύτερες πιέσεις.

Η ρύπανση του εδάφους έχει αναδειχθεί ως μία από τις πλέον επιτακτικές παγκόσμιες περιβαλλοντικές προκλήσεις του 21ου αιώνα. Σε αντίθεση με τη ρύπανση του αέρα ή του νερού, που είναι περισσότερο ορατές και συχνά αναστρέψιμες σε συντομότερο χρονικό διάστημα, η ρύπανση του εδάφους είναι ύπουλη και μακροχρόνια. Οι ρυπαντές μπορούν να παραμείνουν στα εδάφη για δεκαετίες ή ακόμη και αιώνες, δημιουργώντας μια «κρυφή απειλή» για την επισιτιστική ασφάλεια, την ποιότητα του νερού, την υγεία των οικοσυστημάτων και τη σταθερότητα των υποδομών. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Αξιολόγηση της Ρύπανσης του Εδάφους του FAO (2021), περισσότερο από το 33% των εδαφών παγκοσμίως έχει υποβαθμιστεί, με τη ρύπανση να αποτελεί έναν από τους βασικούς παράγοντες. Το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) αναφέρει επιπλέον ότι 3,2 δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο επηρεάζονται ήδη από υποβαθμισμένα εδάφη, κυρίως σε αναπτυσσόμενες περιοχές όπου η εξάρτηση από το έδαφος για τροφή και βιοπορισμό είναι μεγαλύτερη.

Οι ρύποι προέρχονται από ποικίλες πηγές:

- **Οι βιομηχανικές δραστηριότητες** (μεταλλεία, μεταλλουργία, χημική βιομηχανία) απελευθερώνουν βαρέα μέταλλα όπως το κάδμιο, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος και το αρσενικό.
- **Η εντατικοποίηση της γεωργίας** εισάγει φυτοφάρμακα, ζιζανιοκτόνα και λιπάσματα, πολλά από τα οποία παραμένουν στα εδάφη πολύ καιρό μετά την εφαρμογή τους.
- **Η αστικοποίηση** και η διάθεση αποβλήτων συνεισφέρουν υδρογονάνθρακες πετρελαίου, πλαστικά, διαλύτες και ιλύ βιολογικών καθαρισμών.
- **Οι τυχαίες εκλύσεις** (π.χ. πετρελαιοκηλίδες, βιομηχανικά ατυχήματα) μπορούν να προκαλέσουν οξεία ρύπανση με μακροπρόθεσμες συνέπειες.

Η εμμονή των ρύπων αποτελεί καθοριστική ανησυχία. Ο μόλυβδος, για παράδειγμα, έχει εκτιμώμενο χρόνο ημιζωής στο έδαφος που υπερβαίνει τα 700 χρόνια, ενώ οι έμμονοι

οργανικοί ρύποι (POPs), όπως το DDT, παραμένουν ανιχνεύσιμοι ακόμη και δεκαετίες μετά την απαγόρευσή τους. Τέτοιου είδους συσσώρευση υπονομεύει άμεσα την παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια: ο FAO εκτιμά ότι πάνω από το 10% της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων βρίσκεται σε κίνδυνο λόγω των μολυσμένων εδαφών. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο στην Ασία και την Αφρική, όπου η ζήτηση τροφίμων αυξάνεται ραγδαία.

Οι επιπτώσεις στην υγεία είναι βαθύτατες. Τα μολυσμένα εδάφη επιβαρύνουν τα υπόγεια ύδατα και τις καλλιέργειες, δημιουργώντας οδούς έκθεσης για τον άνθρωπο και τα ζώα. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) εκτιμά ότι σχεδόν 1 στους 4 θανάτους παγκοσμίως συνδέεται με περιβαλλοντικούς παράγοντες, με τη ρύπανση του εδάφους να αποτελεί έναν από τους κύριους έμμεσους συντελεστές. Η περίπτωση του αρσενικού στο Μπανγκλαντές, όπου η φυσική αλλά και ανθρωπογενώς επιδεινωμένη ρύπανση του εδάφους οδήγησε σε συγκεντρώσεις στα υπόγεια νερά που υπερβαίνουν τα όρια ασφαλείας, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του πώς οι ρυπαντές του εδάφους μπορούν να εξελιχθούν σε μια εκτεταμένη υγειονομική καταστροφή, επηρεάζοντας δεκάδες εκατομμύρια ανθρώπους. Αντίστοιχα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, η περίπτωση του Love Canal στη Νέα Υόρκη (δεκαετία του 1970) ανέδειξε τις καταστροφικές συνέπειες για την υγεία από την ανάπτυξη οικιστικών περιοχών πάνω σε ανεπαρκώς αποκατεστημένα μολυσμένα εδάφη [Gibbs, 1982].

Από τεχνική σκοπιά, η ρύπανση του εδάφους επηρεάζει επίσης τη γεωτεχνική και τη δομοστατική μηχανική. Τα μολυσμένα εδάφη ενδέχεται να υποστούν χημικές μεταβολές που μειώνουν τη διατμητική τους αντοχή, αυξάνουν τη συμπιεστότητα και μεταβάλλουν τη διαπερατότητά τους. Τα εδάφη που έχουν επιβαρυνθεί με υδρογονάνθρακες, για παράδειγμα, παρουσιάζουν διόγκωση και αποδυνάμωση, γεγονός που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα θεμέλια κτιρίων και τα υπόγεια δίκτυα υποδομών. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, περισσότερες από 2,5 εκατομμύρια περιοχές θεωρούνται ύποπτες για ρύπανση, με το κόστος αποκατάστασης να υπερβαίνει τα 6 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως. Στην Κίνα, μια εθνική έρευνα του 2014 κατέδειξε ότι το 16% του συνόλου των εδαφών και το 19% της καλλιεργούμενης γης ήταν μολυσμένα, απειλώντας τη βιωσιμότητα της γεωργίας και οδηγώντας σε εκτεταμένες κρατικά καθοδηγούμενες πρωτοβουλίες απορρύπανσης [EEA, 2021].

Η ρύπανση του εδάφους, επομένως, δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντικό ζήτημα αλλά και οικονομική, κοινωνική και τεχνική πρόκληση. Συνδέεται άμεσα με αρκετούς Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) του ΟΗΕ, και συγκεκριμένα:

- **ΣΒΑ 2 (Μηδενική Πείνα):** Διασφάλιση βιώσιμων συστημάτων τροφίμων μέσω της προστασίας της γονιμότητας του εδάφους.
- **ΣΒΑ 3 (Καλή Υγεία και Ευημερία):** Μείωση της έκθεσης σε τοξικούς ρυπαντές.
- **ΣΒΑ 6 (Καθαρό Νερό και Αποχέτευση):** Πρόληψη της διήθησης ρυπαντών στα υπόγεια ύδατα.

- **ΣΒΑ 11 (Βιώσιμες Πόλεις και Κοινότητες):** Αντιμετώπιση της ρύπανσης που προέρχεται από την αστικοποίηση.
- **ΣΒΑ 15 (Ζωή στη Στεριά):** Αποκατάσταση υποβαθμισμένων και ρυπασμένων εδαφών.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει την πολύπλοκη και πολυδιάστατη φύση της ρύπανσης του εδάφους, αναλύοντας τόσο τους επιστημονικούς μηχανισμούς της όσο και τις επιπτώσεις της στη μηχανική, τη βιωσιμότητα του περιβάλλοντος και την ανθρώπινη υγεία.

1.2 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να προσφέρει μια διεπιστημονική διερεύνηση της ρύπανσης του εδάφους, γεφυρώνοντας την περιβαλλοντική επιστήμη με τις εφαρμογές της μηχανικής. Παρότι η ρύπανση του εδάφους έχει μελετηθεί εκτενώς σε μεμονωμένα πλαίσια -όπως η γεωργία, η τοξικολογία ή η μηχανική αποκατάστασης- η παρούσα εργασία επιδιώκει να ενσωματώσει αυτές τις προσεγγίσεις σε ένα ενιαίο πλαίσιο.

Οι στόχοι είναι τόσο περιγραφικοί (χαρακτηρισμός του προβλήματος) όσο και κανονιστικοί/προτασιακοί (διατύπωση λύσεων):

- **Ανάλυση του εδάφους ως φυσικού συστήματος** με έμφαση στη δομή, τα συστατικά και τις οικολογικές του λειτουργίες. Η κατανόηση του εδάφους στην αρχική, αμόλυντη του κατάσταση είναι ουσιώδης για την αναγνώριση της έκτασης και των συνεπειών της ρύπανσης.
- **Ταξινόμηση των ρυπαντών και των μορφών ρύπανσης** — διάκριση μεταξύ ανόργανων (π.χ. μέταλλα, άλατα) και οργανικών (π.χ. υδρογονάνθρακες, φυτοφάρμακα) ρυπαντών, καθώς και ανάδειξη των νέων αναδυόμενων ρυπαντών όπως τα φαρμακευτικά υπολείμματα και τα μικροπλαστικά.
- **Εξέταση των μηχανισμών διασποράς και μεταφοράς** — ερμηνεία του τρόπου με τον οποίο οι ρυπαντές κινούνται στα εδαφικά προφίλ μέσω διαδικασιών όπως η διάχυση, η εκπλυση, η πτητικοποίηση, η προσρόφηση και η βιοαποδόμηση. Ο στόχος αυτός συνδέει την εδαφολογία με την υδρογεωλογία και τη μοντελοποίηση μεταφοράς ρύπων.
- **Αξιολόγηση των επιπτώσεων των ρυπαντών στη συμπεριφορά του εδάφους** — εξετάζοντας τις αλλαγές στις φυσικές, χημικές, μηχανικές και βιολογικές ιδιότητες. Η ανάλυση αυτή είναι ιδιαιτέρως σχετική για γεωτεχνικούς μηχανικούς, γεωπόνους και περιβαλλοντικούς επιστήμονες.
- **Αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και τεχνικών επιπτώσεων** — περιλαμβάνοντας τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, τις οικοσυστημικές υπηρεσίες και τις υποδομές. Ο στόχος αυτός συνδέει τη ρύπανση του εδάφους με τη συνολική διαχείριση του περιβάλλοντος και την πρακτική της μηχανικής.

- **Ανασκόπηση τεχνολογιών και μεθόδων απορρύπανσης** — ανάλυση τόσο των παραδοσιακών προσεγγίσεων (έκπλυση εδαφών, σταθεροποίηση, χημική επεξεργασία) όσο και των καινοτόμων (βιοαποκατάσταση, φυτοαποκατάσταση, νανοτεχνολογία), με αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας, του κόστους και της βιωσιμότητας.
- **Διατύπωση συμπερασμάτων και προτάσεων** — σύνθεση των ευρημάτων σε πρακτικά αξιοποιήσιμες γνώσεις για ερευνητές, μηχανικούς, φορείς χάραξης πολιτικής και διαχειριστές γης.

1.3 Μεθοδολογία (Συνοπτικά)

Η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή είναι κυρίως θεωρητική και βασισμένη στη βιβλιογραφία, αντιστακώνοντας την πολυπλοκότητα και τη διεπιστημονική φύση της ρύπανσης του εδάφους. Συνδυάζει την περιβαλλοντική επιστήμη, τη μηχανική και την ανάλυση μελετών περίπτωσης.

Βήμα 1: Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Μία εκτενής ανασκόπηση επιστημονικών άρθρων με κριτές, βιβλίων και διεθνών εκθέσεων αποτέλεσε το θεμέλιο της εργασίας. Χρησιμοποιήθηκαν βάσεις δεδομένων όπως οι *ScienceDirect*, *Scopus*, *Web of Science* και *SpringerLink*. Διεθνείς οργανισμοί όπως ο FAO, ο WHO, το UNEP και ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος παρείχαν παγκόσμια και περιφερειακά δεδομένα. Εθνικές μελέτες (π.χ. εκθέσεις της U.S. EPA, η έρευνα ρύπανσης εδαφών στην Κίνα) ενσωματώθηκαν για την παροχή συγκριτικών προοπτικών.

Βήμα 2: Συγκριτική Ανάλυση

Οι ρυπαντές αναλύθηκαν σε τέσσερις τομείς: φυσικές, χημικές, μηχανικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Οι επιπτώσεις βαρέων μετάλλων, υδρογονανθράκων, αγροχημικών και βιομηχανικών αποβλήτων συγκρίθηκαν ώστε να αναδειχθούν πρότυπα και διαφοροποιήσεις.

Βήμα 3: Ενσωμάτωση Μελετών Περίπτωσης

Πραγματικά παραδείγματα μολυσμένων περιοχών και έργων απορρύπανσης περιλαμβάνονται για να καταδείξουν πώς οι θεωρητικές έννοιες εφαρμόζονται στην πράξη. Για παράδειγμα, η πετρελαιοκηλίδα *Exxon Valdez* στην Αλάσκα και οι μακροχρόνιες επιπτώσεις της στα εδάφη, καθώς και η απορρύπανση εδαφών με βαρέα μέταλλα στην Ανατολική Ευρώπη μετά από δεκαετίες βιομηχανικής δραστηριότητας, παρέχουν εμπειρική θεμελίωση στο θεωρητικό πλαίσιο.

Βήμα 4: Σύνθεση & Αξιολόγηση

Τα ευρήματα από την εδαφολογία και τη μηχανική συντέθηκαν ώστε να αναδειχθούν βασικά θέματα: η εμμόνη των ρυπαντών, οι πολλαπλές οδοί κινδύνου, οι προκλήσεις

απορρύπανσης και τα ερευνητικά κενά. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διεπιστημονική ενσωμάτωση, αναγνωρίζοντας ότι η ρύπανση του εδάφους δεν μπορεί να κατανοηθεί από μία μόνο οπτική.

1.3.1 Περιορισμοί

Η παρούσα εργασία δεν περιλαμβάνει εργαστηριακά πειράματα ή δειγματοληψίες στο πεδίο, αλλά βασίζεται σε δευτερογενή δεδομένα. Αν και αυτό μπορεί να περιορίζει την εμπειρική πρωτοτυπία, επιτρέπει μια ευρεία σύνθεση γνώσεων διαμέσου πολλαπλών επιστημονικών κλάδων και γεωγραφικών περιοχών.

1.4 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια, οργανωμένα ώστε να ακολουθούν μια λογική πορεία από τα βασικά στοιχεία προς τις επιπτώσεις και τις λύσεις:

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο

Παρέχει τη επιστημονική θεμελίωση. Αρχικά, αναλύει το έδαφος ως φυσικό σύστημα — τη σύσταση, τους ορίζοντες και τις οικοσυστημικές του υπηρεσίες. Στη συνέχεια εισάγει τους ρυπαντές, ταξινομώντας τους κατά τύπο και προέλευση. Τέλος, εξηγεί τους μηχανισμούς διασποράς και μεταφοράς, συνδέοντας τη χημεία και τη φυσική του εδάφους με τη μετακίνηση των ρυπαντών. Το κεφάλαιο αυτό δημιουργεί τη βάση για την κατανόηση των επιπτώσεων που θα εξεταστούν στα επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 3: Επιπτώσεις των Ρυπαντών στη Συμπεριφορά των Εδαφών

Ασχολείται με τον τρόπο με τον οποίο οι ρυπαντές τροποποιούν τις ιδιότητες του εδάφους.

Το κεφάλαιο διαιρείται σε τέσσερις υποενότητες:

- **Φυσικές ιδιότητες** (π.χ. πορώδες, διαπερατότητα)
- **Χημικές ιδιότητες** (pH, ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, αλατότητα)
- **Μηχανικές ιδιότητες** (αντοχή, συμπιεστότητα)
- **Βιολογικές ιδιότητες** (μικροβιακή ποικιλότητα και ενζυμική δραστηριότητα)

Η οργάνωση αυτή παρέχει μια συστηματική εικόνα για το πώς η ρύπανση μετατρέπει το έδαφος από ένα υγιές, λειτουργικό σύστημα σε υποβαθμισμένο μέσο.

Κεφάλαιο 4: Περιβαλλοντικές και Τεχνικές Επιπτώσεις

Επεκτείνει το πεδίο από το έδαφος στην κοινωνία. Εξετάζει τις επιπτώσεις στη γεωτεχνική μηχανική (αστάθεια θεμελίων, κίνδυνοι κατασκευών), στα περιβαλλοντικά συστήματα (απώλεια βιοποικιλότητας, υποβάθμιση οικοσυστημικών υπηρεσιών) και στην ανθρώπινη υγεία (οδούς έκθεσης, κινδύνους χρόνιων ασθενειών). Μία υποενότητα αφιερώνεται στην ανάγκη αποκατάστασης, τονίζοντας ότι η απορρύπανση αποτελεί τόσο οικολογική όσο και οικονομική αναγκαιότητα.

Κεφάλαιο 5: Τεχνολογίες και Μέθοδοι Απορρύπανσης

Γίνεται ανασκόπηση των σύγχρονων μεθόδων απορρύπανσης του εδάφους. Καλύπτει:

- **Βιολογικές μεθόδους** (βιοαποκατάσταση, κομποστοποίηση, φυτοαποκατάσταση)
- **Φυσικοχημικές μεθόδους** (έκπλυση εδαφών, σταθεροποίηση/συγκόλληση)
- **Αναδυόμενες προσεγγίσεις** (νανοτεχνολογία, ηλεκτροκινητική απορρύπανση)

Η αποτελεσματικότητα, το κόστος και η βιωσιμότητα αξιολογούνται κριτικά, συνοδευόμενα από μελέτες περίπτωσης επιτυχημένων εφαρμογών.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Συνθέτει τα ευρήματα παρουσιάζοντας βασικές γνώσεις για τα αίτια, τους μηχανισμούς και τις συνέπειες της ρύπανσης του εδάφους. Προσφέρει πρακτικές προτάσεις για απορρύπανση και διαχείριση, ενσωμάτωση στην πολιτική και βιώσιμη χρήση γης. Παρέχονται, επίσης, συστάσεις για μελλοντική έρευνα, συμπεριλαμβανομένου του ρόλου των νέων τεχνολογιών και της σημασίας της διεπιστημονικής συνεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Το έδαφος ως φυσικό σύστημα

Το έδαφος είναι ένα δυναμικό και πολυδιάστατο φυσικό σύστημα που αποτελεί το ανώτατο στρώμα του φλοιού της Γης. Αποτελείται από ανόργανα σωματίδια, οργανική ύλη, νερό, αέρα και μια ποικιλόμορφη κοινότητα ζωντανών οργανισμών. Αυτά τα συστατικά αλληλεπιδρούν για να δημιουργήσουν ένα πολύπλοκο και αυτορρυθμιζόμενο οικοσύστημα, το οποίο υποστηρίζει την ανάπτυξη των φυτών, ρυθμίζει τον υδρολογικό και θρεπτικό κύκλο και παρέχει βióτοπο για πολυάριθμα είδη [Nuñez, 2022]. Το έδαφος είναι δομημένο ως ένα τριφασικό σύστημα: η στερεά φάση (ανόργανα υλικά και οργανική ύλη), η υγρή φάση (εδαφικό νερό) και η αέρια φάση (εδαφικός αέρας). Αυτές οι φάσεις βρίσκονται σε συνεχή αλληλεπίδραση, επιτρέποντας την ταυτόχρονη διεξαγωγή θεμελιωδών βιολογικών, χημικών και φυσικών διεργασιών [Jones et al., 2017].

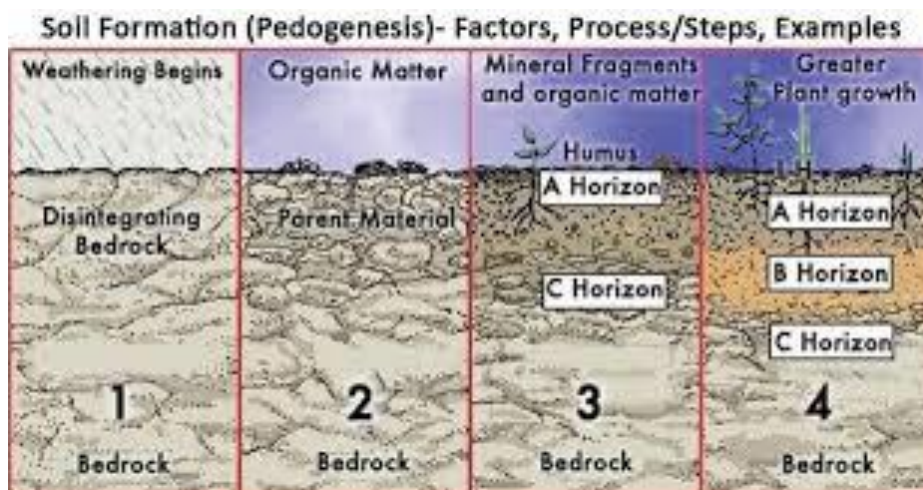
Η ταξινόμηση των συστατικών του εδάφους αποκαλύπτει περαιτέρω την πολυπλοκότητα του συστήματος αυτού. Το ανόργανο υλικό κυμαίνεται από σωματίδια μεγέθους αργίλου (<0,002 mm) έως μεγαλύτερα κλάσματα άμμου και ιλύος. Η οργανική ύλη, η οποία προέρχεται κυρίως από την αποσύνθεση φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων, συμβάλλει όχι μόνο στη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων αλλά και στη βελτίωση της δομής του εδάφους και της ικανότητάς του να συγκρατεί νερό [Nuñez, 2022].

Το εδαφικό σύστημα δεν είναι στατικό εξελίσσεται διαρκώς μέσω αλληλεπιδράσεων με κλιματικούς, γεωλογικούς, υδρολογικούς και βιολογικούς παράγοντες. Η λειτουργία και η δομή του διαφοροποιούνται ανάλογα με το τοπίο, τις καιρικές συνθήκες, το μητρικό υλικό και τις χρήσεις γης. Ως εκ τούτου, το έδαφος αποτελεί τόσο προϊόν περιβαλλοντικών διεργασιών όσο και ενεργό ρυθμιστή του περιβάλλοντος, επηρεάζοντας τη χερσαία ζωή και τη σταθερότητα των οικοσυστημάτων [Jones et al., 2017].

2.1.1 Σχηματισμός και Εξέλιξη του Εδάφους

Ο σχηματισμός του εδάφους καθορίζεται από την αλληλεπίδραση πέντε βασικών παραγόντων: του κλίματος, των οργανισμών, του αναγλύφου (μορφολογία εδάφους), του μητρικού υλικού και του χρόνου. Το κλίμα επηρεάζει τη θερμοκρασία και τις κατακρημνίσεις, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν τον ρυθμό χημικής και φυσικής αποσάθρωσης [Or, Keller and Schlesinger, 2021]. Οι οργανισμοί, συμπεριλαμβανομένων των φυτών, των μικροοργανισμών και των ζώων, συμβάλλουν στην προσθήκη οργανικής ύλης, στην ανάμιξη των υλικών και στην ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων. Το ανάγλυφο ελέγχει την αποστράγγιση και τη διάβρωση, επηρεάζοντας το βάθος και την ανάπτυξη των οριζόντων. Το μητρικό υλικό αποτελεί τη θεμελιώδη ανόργανη βάση, ενώ ο χρόνος επιτρέπει την εξέλιξη και τη διαστρωμάτωση των εδαφικών οριζόντων [Samarasinghe, Greenhalgh and Vesely, 2013]. Καθώς το έδαφος εξελίσσεται, αναπτύσσονται διακριτά στρώματα γνωστά ως ορίζοντες, τα οποία συγκροτούν το εδαφικό προφίλ. Οι ορίζοντες

αυτοί περιλαμβάνουν τον οργανικά πλούσιο ορίζοντα O, τον ανόργανο επιφανειακό ορίζοντα A, τον εκπλυμένο ορίζοντα E και τον συσσωρευτικό ορίζοντα B, μεταξύ άλλων. Κάθε ορίζοντας αντανακλά συγκεκριμένες διεργασίες, όπως η συσσώρευση οργανικής ύλης, η μεταφορά αργίλου και η αποσάθρωση ορυκτών. Η διαμόρφωση και το βάθος αυτών των οριζόντων εξαρτώνται από τη σταθερότητα του περιβάλλοντος και την ένταση των παιδογενετικών διεργασιών με την πάροδο του χρόνου [Jones et al., 2017].



Εικόνα 1 Σχηματισμός και Εξέλιξη του Εδάφους [Πηγή: Sapkota, 2020]

2.1.2 Σύνθεση και Δομή του Εδάφους

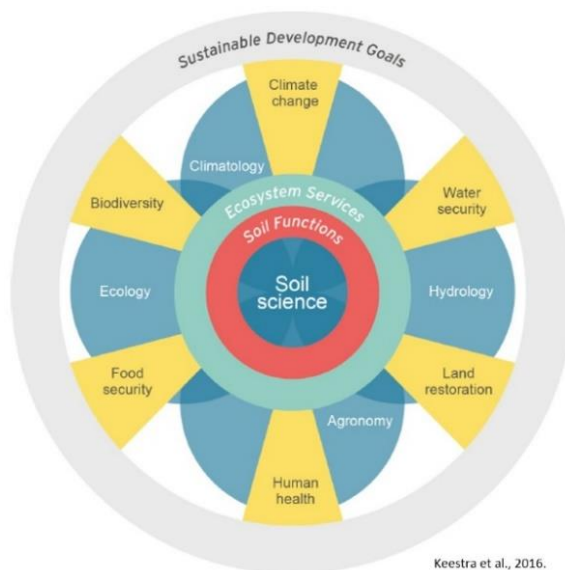
Η σύνθεση του εδάφους περιλαμβάνει, κατά μέσο όρο, περίπου 45% ανόργανο υλικό, 5% οργανική ύλη και 50% πορώδες διάστημα που καταλαμβάνεται από νερό και αέρα. Το ανόργανο κλάσμα αποτελείται από σωματίδια άμμου, ιλύος και αργίλου, των οποίων οι σχετικές αναλογίες καθορίζουν την υφή του εδάφους. Η υφή επηρεάζει σημαντικά τη συγκράτηση νερού, την αποστράγγιση, τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων και τη διεύδυση των ριζών. Για παράδειγμα, τα αργιλώδη εδάφη διαθέτουν υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού αλλά περιορισμένο αερισμό, ενώ τα αμμώδη εδάφη επιτρέπουν γρήγορη αποστράγγιση αλλά έχουν χαμηλή ικανότητα συγκράτησης θρεπτικών στοιχείων [Jones et al., 2017].

Η δομή του εδάφους αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο τα επιμέρους σωματίδια ομαδοποιούνται σε συσσωματώματα ή «σβώλους» (peds). Η καλή δομή του εδάφους ενισχύει την διαπερατότητα, τον αερισμό και την κίνηση του νερού, ενώ υποστηρίζει την υγιή ανάπτυξη των ριζών [Or, Keller and Schlesinger, 2021]. Η οργανική ύλη διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη σύνδεση των σωματιδίων και στη βελτίωση της δομικής σταθερότητας. Ένα καλά δομημένο έδαφος αντιστέκεται καλύτερα στη διάβρωση, υποστηρίζει τη μικροβιακή ζωή και διατηρεί ευνοϊκή ισορροπία γονιμότητας και υγρασίας, καθιστώντας το πιο ανθεκτικό σε περιβαλλοντικές πιέσεις [Samarasinghe, Greenhalgh and Vesely, 2013].

2.1.3 Λειτουργίες και Οικοσυστημικές Υπηρεσίες του Εδάφους

Τα εδάφη προσφέρουν ουσιώδεις οικοσυστημικές υπηρεσίες που στηρίζουν τόσο τα φυσικά οικοσυστήματα όσο και τις ανθρώπινες κοινωνίες. Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες τους είναι η παροχή ενός κατάλληλου μέσου για την ανάπτυξη των φυτών, προσφέροντας θρεπτικά στοιχεία, νερό, στήριξη και οξυγόνο στις ρίζες [Samarasinghe, Greenhalgh and Vesely, 2013]. Παράλληλα, τα εδάφη ρυθμίζουν τη διανομή και τη διαθεσιμότητα του νερού στα οικοσυστήματα, απορροφώντας τη βροχόπτωση, φιλτράροντάς την και απελευθερώνοντάς την σταδιακά σε ρέματα και υδροφόρους ορίζοντες. Η υδρολογική αυτή λειτουργία υποστηρίζει τη γεωργία και συμβάλλει στη μείωση του κινδύνου πλημμυρών και ξηρασιών [Or, Keller and Schlesinger, 2021]. Τα εδάφη αποτελούν επίσης αναπόσπαστο μέρος των παγκόσμιων βιογεωχημικών κύκλων. Λειτουργούν ως δεξαμενές άνθρακα, δεσμεύοντας ατμοσφαιρικό άνθρακα μέσω της ενσωμάτωσης οργανικής ύλης. Αντίθετα, όταν το έδαφος υποβαθμίζεται ή διαταράσσεται, μπορεί να μετατραπεί σε πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου. Επιπλέον, το έδαφος αποτελεί σημαντική αποθήκη οργανικού άνθρακα και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση του κλίματος. Παράλληλα, φιλοξενεί μια τεράστια ποικιλία οργανισμών που συμβάλλουν στη διάσπαση οργανικής ύλης και στην ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων [Nuñez, 2022].

Τα εδάφη μετριάζουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής μέσω της δέσμευσης και αποθήκευσης αερίων του θερμοκηπίου, προστατεύουν από πλημμύρες απορροφώντας το νερό της βροχής και διασπούν ρύπους μέσω μικροβιακής δραστηριότητας. Οι οικοσυστημικές αυτές υπηρεσίες αναδεικνύουν τη σημασία της υγιούς κατάστασης των εδαφών ως φυσικό κεφάλαιο [Schoonover and Crim, 2015].



Εικόνα 2 Λειτουργίες και Οικοσυστημικές Υπηρεσίες του Εδάφους [Πηγή: Keesstra et al., 2018]

2.1.4 Εδαφική Βιοποικιλότητα και Βιολογικές Διεργασίες

Το έδαφος αποτελεί ένα από τα βιολογικά πιο πλούσια οικοσυστήματα του πλανήτη. Φιλοξενεί βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα, νηματώδεις, αρθρόποδα και μακροπανίδα όπως γαιοσκώληκες και έντομα. Οι οργανισμοί αυτοί συγκροτούν πολύπλοκα τροφικά δίκτυα και διαδραματίζουν καίριους ρόλους στη διάσπαση της οργανικής ύλης, στην ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων και στη δημιουργία εδαφικών συσσωματωμάτων. Ένα και μόνο γραμμάριο υγιούς εδάφους μπορεί να περιέχει δισεκατομμύρια μικροοργανισμούς, πολλοί από τους οποίους παραμένουν ακόμη αταξινομήτοι και ανεξερεύνητοι [Nuñez, 2022].

Η βιολογική δραστηριότητα στο έδαφος συμβάλλει άμεσα στη γονιμότητα και την ανθεκτικότητά του. Οι μικροοργανισμοί του εδάφους, ιδιαίτερα τα βακτήρια και οι μύκητες, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διάσπαση οργανικών υπολειμμάτων και στην ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων. Οι μυκορριζικοί μύκητες σχηματίζουν συμβιωτικές σχέσεις με τις ρίζες των φυτών, ενισχύοντας την πρόσληψη νερού και θρεπτικών ουσιών [Stromberger, Comerford and Lindbo, 2015]. Οι γαιοσκώληκες βελτιώνουν τον αερισμό και τη δομή του εδάφους μέσω της δραστηριότητας της σήραγγας και συμβάλλουν στην ανάμειξη οργανικών και ανόργανων υλικών. Η εδαφική βιοποικιλότητα όχι μόνο αντικατοπτρίζει την υγεία του εδάφους, αλλά τη στηρίζει ενεργά, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές πιέσεις και προάγοντας τη μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα [Schoonover and Crim, 2015].

2.1.5 Χημικές και Φυσικές Ιδιότητες του Εδάφους

Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους καθορίζουν τη λειτουργικότητά του και την καταλληλότητά του για διάφορες χρήσεις γης. Από χημική άποψη, η γονιμότητα του εδάφους επηρεάζεται από τη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων, την τιμή του pH και την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC). Το pH ρυθμίζει τη διαλυτότητα των θρεπτικών στοιχείων και τη δραστηριότητα των εδαφικών μικροοργανισμών. Τα περισσότερα καλλιεργούμενα φυτά ευδοκιμούν σε εδάφη με ελαφρώς όξινο έως ουδέτερο pH (6–7). Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων εκφράζει τη δυνατότητα του εδάφους να συγκρατεί και να ανταλλάσσει θετικά φορτισμένα ιόντα, όπως ασβέστιο, μαγνήσιο, κάλιο και αμμώνιο [Schoonover and Crim, 2015].

Από φυσική άποψη, ιδιότητες όπως η υφή, η φαινομενική πυκνότητα, η διαπερατότητα και η ικανότητα συγκράτησης νερού επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών και τη διαχείριση του εδάφους. Η διαπερατότητα καθορίζει την κίνηση του νερού και του αέρα μέσα στο έδαφος, επηρεάζοντας τη ζωτικότητα των ριζών και τη μικροβιακή δραστηριότητα. Τα συμπίεσμένα εδάφη παρουσιάζουν χαμηλή διαπερατότητα και υψηλή πυκνότητα, γεγονός που περιορίζει τη διείσδυση των ριζών και τη διήθηση του νερού. Η οργανική ύλη συμβάλλει στη βελτίωση τόσο των χημικών όσο και των φυσικών ιδιοτήτων, ενισχύοντας τη συγκράτηση θρεπτικών στοιχείων, την αποθήκευση νερού και τη σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων [Bales, Swain and Fulford, 1997].

2.1.6 Το Έδαφος ως Διασυνδεδετικό Σύστημα

Το έδαφος λειτουργεί ως κρίσιμο διασυνδεδετικό σύστημα μεταξύ της λιθόσφαιρας (γη), της ατμόσφαιρας (αέρας), της υδρόσφαιρας (νερό) και της βιόσφαιρας (ζωή). Μέσω της μοναδικής του θέσης, διευκολύνει την ανταλλαγή αερίων, θρεπτικών στοιχείων και νερού μεταξύ αυτών των σφαιρών. Για παράδειγμα, το έδαφος ρυθμίζει τις ροές διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου μεταξύ της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας. Φιλτράρει το νερό της βροχής, επηρεάζοντας την ποιότητα του νερού και την ανατροφοδότηση των υδροφόρων οριζόντων [Osman, 2013]. Το έδαφος μεσολαβεί στη ροή άνθρακα και αζώτου, ρυθμίζει τη διήθηση και την εξάτμιση του νερού και υποστηρίζει την ανάπτυξη και επιβίωση των χερσαίων οργανισμών. Μέσω αυτών των λειτουργιών, συμβάλλει στη διατήρηση της οικοσυστημικής λειτουργίας και της περιβαλλοντικής ισορροπίας τόσο σε τοπική όσο και σε παγκόσμια κλίμακα [Nuñez, 2022].

Σε αυτόν τον ρόλο, το έδαφος δεν αποτελεί απλώς ένα παθητικό μέσο, αλλά έναν ενεργό περιβαλλοντικό ρυθμιστή. Η δομή του, η σύστασή του και η βιοτική του σύνθεση καθορίζουν βασικές πλανητικές διεργασίες. Η υποβάθμιση του εδάφους -είτε μέσω διάβρωσης, ρύπανσης ή μη βιώσιμων χρήσεων γης- μπορεί να διαταράξει αυτές τις λειτουργίες, αναδεικνύοντας τη σημασία της διατήρησης του εδάφους για τη σταθερότητα των οικοσυστημάτων και την ευημερία του ανθρώπου [Osman, 2013].

2.2 Ρύποι και τύποι ρύπανσης

Αφού διασαφηνίστηκαν τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά και οι οικολογικοί ρόλοι του εδάφους ως φυσικού συστήματος, είναι κρίσιμο να εξεταστεί πώς αυτό το μέσο αλληλεπιδρά με εξωτερικές ουσίες, και ειδικότερα με ρύπους. Το έδαφος δεν λειτουργεί μόνο ως βιότοπος και αποθήκη ζωτικών πόρων, αλλά και ως αποδέκτης ρυπογόνων ουσιών που εισέρχονται μέσω φυσικών ή ανθρωπογενών διεργασιών. Η κατανόηση των τύπων των ρύπων και του τρόπου με τον οποίο αυτοί διασπείρονται και συμπεριφέρονται στο εδαφικό περιβάλλον βασίζεται στην προηγούμενη γνώση των φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων του εδάφους. Στην επόμενη ενότητα θα αναλυθούν η ρύπανση και οι ρύποι, ακολουθούμενοι από μια εις βάθος εξέταση των μηχανισμών που διέπουν τη μεταφορά και την τύχη των ρυπαντών στο εδαφικό σύστημα.

Η περιβαλλοντική ρύπανση παραμένει ένα από τα πλέον επιτακτικά παγκόσμια ζητήματα, με σοβαρές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και στην ανθρώπινη υγεία. Μεταξύ των διαφόρων περιβαλλοντικών μέσων -αέρας, νερό και έδαφος- το έδαφος συχνά λαμβάνει λιγότερη προσοχή, παρά τον κρίσιμο ρόλο του ως δεξαμενή και ρυθμιστής πολλών ρυπογόνων ουσιών. Η ρύπανση του εδάφους προκύπτει από έναν συνδυασμό φυσικών διεργασιών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, οι οποίες εισάγουν και συσσωρεύουν επιβλαβείς ουσίες στο εδαφικό περιβάλλον. Οι ρυπαντές αυτοί -είτε χημικοί, βιολογικοί είτε ραδιενεργοί- υποβαθμίζουν την ποιότητα του εδάφους, επηρεάζουν αρνητικά τη φυτική και ζωική ζωή και διαταράσσουν την οικολογική ισορροπία. Η κατανόηση της

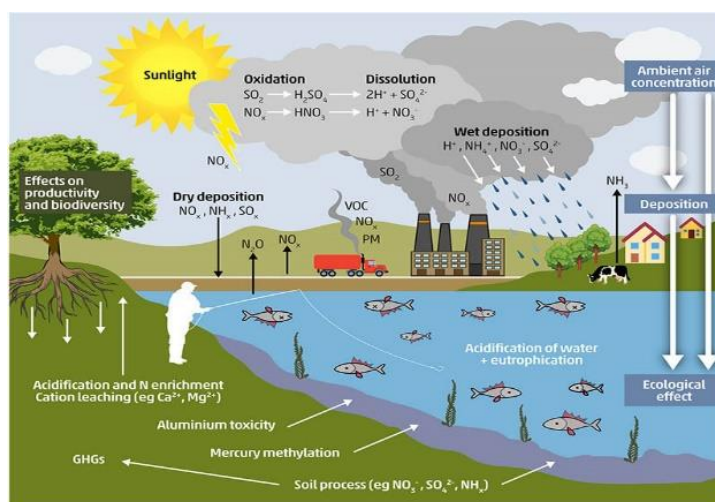
φύσης των ρύπων και των μηχανισμών μέσω των οποίων μεταφέρονται και διασπείρονται στο έδαφος είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών απορρύπανσης και την προστασία τόσο του περιβάλλοντος όσο και της δημόσιας υγείας.

2.2.1 Ρύπανση και Ρύποι

Η ρύπανση αναφέρεται στην εισαγωγή επιβλαβών ουσιών ή μορφών ενέργειας στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα την αρνητική μεταβολή των φυσικών, χημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών του αέρα, του νερού ή του εδάφους. Οι ρυπαντές μπορεί να είναι φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης και περιλαμβάνουν χημικές ενώσεις, βιολογικούς παράγοντες ή μορφές ενέργειας όπως ο θόρυβος και η θερμότητα. Όταν οι συγκεντρώσεις τους υπερβαίνουν τα φυσικά επίπεδα υποβάθρου, χαρακτηρίζονται ως ρύποι [Duarte, Matos and Senesi, 2018].

Οι βασικές μορφές ρύπανσης περιλαμβάνουν τη ρύπανση του αέρα, του νερού και του εδάφους, καθώς και τη ραδιενεργό, ηχητική, φωτορυπαντική, οπτική και θερμική ρύπανση. Κάθε τύπος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένους ρυπαντές. Για παράδειγμα, η ατμοσφαιρική ρύπανση περιλαμβάνει αέρια όπως το διοξείδιο του θείου (SO_2) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x), ενώ η ρύπανση του εδάφους οφείλεται κυρίως στην απόθεση βαρέων μετάλλων, υδρογονανθράκων, φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων [Cachada, Rocha-Santos and Duarte, 2018].

Οι ρύποι διακρίνονται σε βιοαποδομήσιμους και μη βιοαποδομήσιμους. Ωστόσο, τα προϊόντα αποικοδόμησης ορισμένων ουσιών —όπως το DDE και το DDD, παράγωγα του DDT— μπορεί να είναι επίσης τοξικά. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως οι βιομηχανικές διεργασίες, οι εκπομπές από τα μέσα μεταφοράς, η γεωργική απορροή και η ανεπαρκής διαχείριση αποβλήτων, συμβάλλουν σημαντικά στην περιβαλλοντική ρύπανση [Joyner et al., 2024].



Εικόνα 3 Ρύπανση και Ρύποι του Εδάφους [Πηγή: FAO and UNEP, 2021]

2.2.2 Τύποι και Πηγές Ρύπων του Εδάφους

Οι ρύποι του εδάφους διακρίνονται σε χημικούς (π.χ. βαρέα μέταλλα, φυτοφάρμακα), βιολογικούς (π.χ. παθογόνοι μικροοργανισμοί) και ραδιενεργούς. Οι βασικές πηγές προέλευσης περιλαμβάνουν βιομηχανικές δραστηριότητες, μεταλλευτικές εργασίες, γεωργία, αστικοποίηση και απόρριψη αποβλήτων. Για παράδειγμα, η εξόρυξη μεταλλευμάτων οδηγεί στην εισαγωγή βαρέων μετάλλων στο έδαφος, η γεωργική δραστηριότητα προσθέτει φυτοφάρμακα και λιπάσματα, ενώ τα αστικά κέντρα παράγουν στερεά απόβλητα που μπορούν να διεισδύσουν στο υπέδαφος [Cachada, Rocha-Santos and Duarte, 2018].

2.2.3 Βαρέα Μέταλλα

Τα βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος, το κάδμιο, ο υδράργυρος και το αρσενικό, είναι τοξικά για τους περισσότερους οργανισμούς και τείνουν να συσσωρεύονται στο έδαφος λόγω της μη αποικοδομήσιμης φύσης τους. Συχνά εισέρχονται στο εδαφικό περιβάλλον μέσω μεταλλευτικών δραστηριοτήτων, βιομηχανικών απορρίψεων και της χρήσης φωσφορικών λιπασμάτων. Μόλις εναποτεθούν στο έδαφος, συνιστούν μακροχρόνιο οικολογικό και υγειονομικό κίνδυνο και είναι ιδιαίτερα δύσκολο να απομακρυνθούν [Duarte, Matos and Senesi, 2018].

2.2.4 Γεωργικές και Βιομηχανικές Πρακτικές

Οι γεωργικές δραστηριότητες συμβάλλουν σημαντικά στη ρύπανση του εδάφους μέσω της υπερβολικής χρήσης χημικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Οι βιομηχανικές διεργασίες απελευθερώνουν ρυπαντές σε αέρια, υγρή ή στερεή μορφή, οι οποίοι συχνά περιέχουν τοξικά μέταλλα και συνθετικές ενώσεις. Η ανεπαρκής ή αυθαίρετη διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων σε υδάτινα σώματα ή στο έδαφος αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο ρύπανσης των εδαφικών οικοσυστημάτων [Joyner et al., 2024].

2.2.5 Αστικοποίηση και Διαχείριση Αποβλήτων

Η ταχεία αστικοποίηση και οι ανεπαρκείς πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων οδηγούν στη συσσώρευση μη βιοαποδομήσιμων υλικών, όπως τα πλαστικά και τα ηλεκτρονικά απόβλητα, στο έδαφος. Τα νοσοκομειακά και αστικά απόβλητα περιέχουν συχνά επικίνδυνες ουσίες, οι οποίες διεισδύουν στο έδαφος και μεταβάλλουν τις χημικές και βιολογικές του ιδιότητες [Cachada, Rocha-Santos and Duarte, 2018].

2.2.6 Ρύπανση από Πετρέλαιο και Ραδιενεργά Στοιχεία

Οι διαρροές πετρελαίου, είτε τυχαίες είτε λόγω διαρροών κατά τη μεταφορά και αποθήκευση, υποβαθμίζουν σημαντικά την ποιότητα του εδάφους. Τα ραδιενεργά στοιχεία

που απελευθερώνονται από εξορυκτικές δραστηριότητες ή από ακατάλληλη διάθεση αποβλήτων προκαλούν μακροχρόνια ρύπανση και σοβαρούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον [Duarte, Matos and Senesi, 2018].

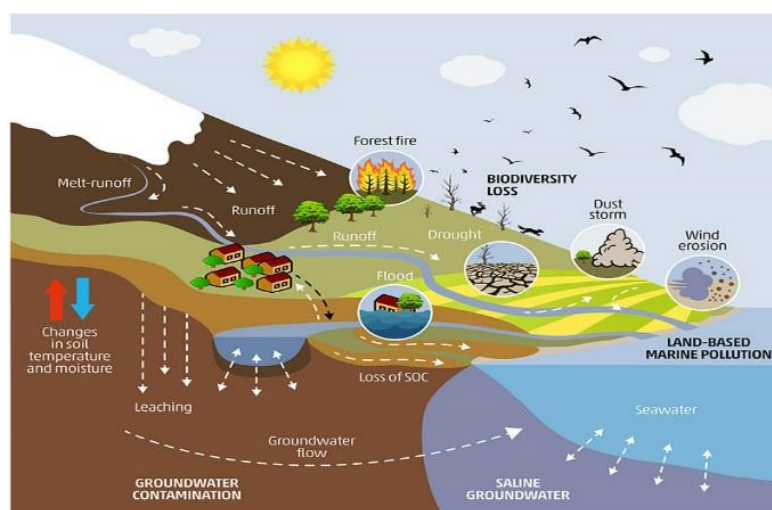
2.2.7 Αποψίλωση και Όξινη Βροχή

Η αποψίλωση των δασών ενισχύει τη διάβρωση του εδάφους και μειώνει την ικανότητά του να συγκρατεί θρεπτικά συστατικά. Η όξινη βροχή, η οποία προκύπτει από την ατμοσφαιρική ρύπανση, μεταβάλλει το pH του εδάφους και διαλύει βασικά θρεπτικά στοιχεία, οδηγώντας σε περαιτέρω υποβάθμιση της ποιότητάς του [Joyner et al., 2024].

2.3 Διασπορά και Μεταφορά Ρύπων στο Έδαφος

Ενώ η κατανόηση των τύπων και των πηγών των ρύπων είναι κρίσιμη, εξίσου σημαντική είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι ουσίες αυτές αλληλεπιδρούν με το εδαφικό περιβάλλον και μετακινούνται εντός αυτού. Οι μηχανισμοί διασποράς και μεταφοράς των ρύπων καθορίζουν την έκταση, τη διάρκεια και τη σοβαρότητα των επιπτώσεών τους στα οικοσυστήματα και στην ανθρώπινη υγεία. Η παρούσα ενότητα εξετάζει τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που καθορίζουν την τύχη των ρυπαντών στο έδαφος [Fiveable, 2024].

Αφού εισέλθουν στο έδαφος, οι ρυπαντές υπόκεινται σε ποικίλες διεργασίες που επηρεάζουν την κίνησή τους και τον μετασχηματισμό τους. Σε αυτές περιλαμβάνονται η κατακράτηση, η διήθηση, η διάχυση, καθώς και χημικοί ή βιολογικοί μετασχηματισμοί. Οι μηχανισμοί αυτοί καθορίζουν τη διάρκεια παραμονής των ρύπων, τη βιοδιαθεσιμότητά τους και τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο [Duarte, Matos and Senesi, 2018].



Εικόνα 4 Διασπορά και Μεταφορά Ρύπων στο Έδαφος [Πηγή: FAO and UNEP, 2021].

2.3.1 Μηχανισμοί Κατακράτησης

Οι ρυπαντές μπορούν να κατακρατηθούν στα σωματίδια του εδάφους μέσω προσρόφησης ή παγίδευσης στους πόρους του εδαφικού συστήματος. Η προσρόφηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω ασθενών δυνάμεων Van der Waals (φυσιοπροσρόφηση), είτε μέσω ισχυρών ομοιοπολικών δεσμών (χημειοπροσρόφηση). Συστατικά του εδάφους όπως τα αργιλικά ορυκτά, οι χουμικές ουσίες, και τα οξείδια του σιδήρου και του μαγγανίου λειτουργούν ως βασικά προσροφητικά μέσα [Fiveable, 2024].

2.3.2 Ισόθερμες Προσρόφησης και Παράγοντες

Η προσρόφηση επηρεάζεται από ιδιότητες του εδάφους όπως η ορυκτολογική σύσταση, το μέγεθος των κόκκων, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και το pH. Ο βαθμός προσρόφησης περιγράφεται με τη χρήση ισοθερμών, όπως ο γραμμικός συντελεστής κατανομής (Kd) και ο συντελεστής κατανομής οργανικού άνθρακα (Koc), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της κινητικότητας των ρύπων στο έδαφος [Fiveable, 2024].

2.3.3 Μη Προσροφητική Κατακράτηση

Πέρα από την προσρόφηση, οι ρυπαντές μπορούν να κατακρατηθούν μέσω φυσικής παγίδευσης ή καθίζησης. Μεγάλες σωματιδιακές ενώσεις μπορεί να παγιδευτούν μηχανικά στους πόρους του εδάφους, ενώ χημικές αντιδράσεις ενδέχεται να μετατρέψουν διαλυτές ρυπογόνες ουσίες σε αδιάλυτες μορφές, οδηγώντας στην καθίζησή τους από το εδαφικό διάλυμα [Fiveable, 2024].

2.3.4 Διήθηση και Πρότυπα Ροής

Οι ρυπαντές διεισδύουν στο έδαφος κυρίως μέσω κατακόρυφης κατεύθυνσης (περκόλησης) και μπορούν να μετακινηθούν τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια. Τα πρότυπα ροής, όπως ο βασικός κύκλος μετανάστευσης, η γεωχημική ροή εντός του τοπίου και η εξωτοπική ροή, περιγράφουν τις διάφορες διαδρομές που μπορεί να ακολουθήσουν οι ρύποι μέσα στο εδαφικό περιβάλλον και στο ευρύτερο οικοσύστημα [Cachada, Rocha-Santos and Duarte, 2018].

2.3.5 Μεταφορά με Ροή και Διασπορά

Η μεταφορά ρυπαντών στο έδαφος καθορίζεται κυρίως από τη ροή (advection), δηλαδή την κίνηση των ρύπων με το ρέον νερό, και τη διασπορά, η οποία οφείλεται σε μικρο- και μακροκλίμακα ανάμειξη. Οι μηχανισμοί αυτοί προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι ρύποι μεταναστεύουν κατά μήκος του εδαφικού προφίλ και τη δυνατότητα να φτάσουν στον υπόγειο υδροφόρο [Joyner et al., 2024].

2.3.6 Επίδραση των Πρακτικών Διαχείρισης του Εδάφους

Η κατεργασία του εδάφους, η άρδευση και η χρήση οργανικών βελτιωτικών επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ρυπαντών. Για παράδειγμα, η κατεργασία μπορεί να διαταράξει τη δομή του εδάφους και να ενισχύσει την κινητικότητα των ρύπων, ενώ οι αρδευτικές πρακτικές επηρεάζουν τη διαρροή και τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες. Τα οργανικά βελτιωτικά, όπως το κομπόστ και το βιοάνθρακα, μπορούν να προσροφήσουν ή να αδρανοποιήσουν ορισμένους ρύπους, μειώνοντας τη βιοδιαθεσιμότητά τους [Joyner et al., 2024].

2.3.7 Επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής

Η κλιματική αλλαγή επιτείνει τις επιπτώσεις της ρύπανσης του εδάφους, αυξάνοντας τη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι ξηρασίες και οι πλημμύρες. Οι συνθήκες αυτές μεταβάλλουν την υγρασία, τη θερμοκρασία και τη βιολογική δραστηριότητα του εδάφους, επηρεάζοντας έτσι την κινητικότητα και τον μετασχηματισμό των ρύπων [Fiveable, 2024].

2.3.8 Ρύποι και Αλληλεπιδράσεις

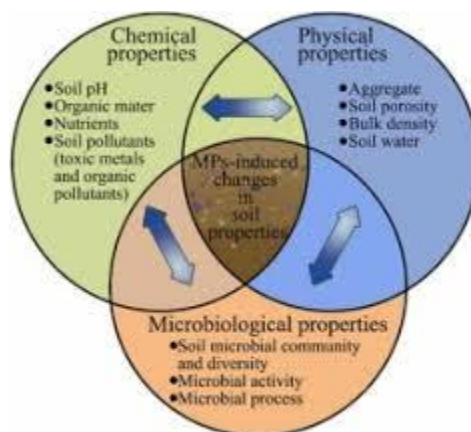
Τα εδάφη περιέχουν συχνά πολλαπλούς ρύπους, γεγονός που οδηγεί σε πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ρυπαντών. Για παράδειγμα, η παρουσία βαρέων μετάλλων μπορεί να αναστείλει τη μικροβιακή δραστηριότητα, μειώνοντας την αποικοδόμηση οργανικών ρύπων. Επιπλέον, οι οργανικοί ρύποι είναι δυνατόν να μεταβάλλουν τη ικανότητα προσρόφησης του εδάφους, επηρεάζοντας την κατακράτηση άλλων ουσιών μέσω αλλαγών στη δυναμική της προσρόφησης [Joyner et al., 2024].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Επίδραση των ρύπων στη συμπεριφορά των εδαφών

Το έδαφος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα συστήματα υποστήριξης της ζωής στον πλανήτη, λειτουργώντας ως θεμέλιο για την ανάπτυξη των φυτών, ρυθμιστής των υδρολογικών κύκλων, αποθήκη βιοποικιλότητας και φυσικό φίλτρο για τους ρύπους. Ωστόσο, η αυξανόμενη ανθρωπογενής δραστηριότητα, όπως η εξόρυξη πετρελαίου, η βιομηχανική παραγωγή, η ακατάλληλη διαχείριση αποβλήτων και η εντατική γεωργική εκμετάλλευση έχει οδηγήσει στη συστηματική ρύπανση των εδαφών. Ανάμεσα στις διάφορες μορφές περιβαλλοντικής ρύπανσης, η επιβάρυνση του εδάφους με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες και βαρέα μέταλλα είναι ιδιαίτερα ανησυχητική, λόγω του μακροχρόνιου, επίμονου και πολυσύνθετου αντίκτυπού της στο περιβάλλον.

Οι ρύποι που εισέρχονται στο έδαφος μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά τις φυσικές, χημικές, μηχανικές και βιολογικές του ιδιότητες. Αυτές οι αλλαγές ενδέχεται να υποβαθμίσουν τη γονιμότητα του εδάφους, να μειώσουν την ικανότητά του να συγκρατεί νερό, να παρεμποδίσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και να προκαλέσουν τη συσσώρευση τοξικών ουσιών στις τροφικές αλυσίδες. Ιδιαίτερα, οι διαρροές πετρελαίου και οι διαφυγές από δεξαμενές υδρογονανθράκων, όπως έχει παρατηρηθεί σε πολλές πετρελαιοπαραγωγές περιοχές, όπως η Γκατσαράν στο Ιράν, αποτελούν σοβαρή απειλή για την ακεραιότητα του εδάφους. Καθώς οι πετρελαϊκές ενώσεις αλληλεπιδρούν με τα συστατικά του εδάφους, όχι μόνο επιβαρύνουν τη δομή του, αλλά εισάγουν και τοξικότητα στο περιβάλλον που το περιβάλλει.

Το παρόν κεφάλαιο παρέχει μια ανάλυση του τρόπου με τον οποίο οι ρύποι επηρεάζουν τη συμπεριφορά του εδάφους, με εστίαση σε τέσσερις θεμελιώδεις τομείς: τις φυσικές ιδιότητες, τα χημικά χαρακτηριστικά, τη μηχανική συμπεριφορά και τη βιολογική δραστηριότητα. Ζητήματα γεωτεχνικού χαρακτήρα, όπως η φέρουσα ικανότητα, η αλληλεπίδραση με θεμελιώσεις ή η ευστάθεια πρανών, αποκλείονται σκόπιμα, καθώς εξετάζονται σε ξεχωριστό κεφάλαιο. Στις επόμενες ενότητες αναλύεται καθεμία από αυτές τις κατηγορίες, αξιοποιώντας πειραματικά δεδομένα, σύγχρονες επιστημονικές γνώσεις και θεωρητικά μοντέλα για να εξηγηθούν οι πολύπλευρες συνέπειες της ρύπανσης στα εδαφικά συστήματα.



Εικόνα 5: Επίδραση των ρύπων στη συμπεριφορά των εδαφών [Πηγή: Sachan, Tiwari and Tripathi, 2023]

3.1 Φυσικές Ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η υφή, η δομή, η διαπερατότητα, η ικανότητα συγκράτησης υγρασίας και η φαινόμενη πυκνότητα, αποτελούν κρίσιμους δείκτες της υγείας του εδάφους και διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της οικολογικής και υδρολογικής του λειτουργίας. Όταν τα εδάφη ρυπαίνονται, ιδιαίτερα με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, τα φυσικά αυτά χαρακτηριστικά υφίστανται αξιοσημείωτες μεταβολές [Zahermand et al., 2020].

3.1.1 Μεταβολή Υφής και Δομής

Η υφή του εδάφους αναφέρεται στη σχετική αναλογία των κόκκων άμμου, ιλύος και αργίλου, ενώ η δομή αφορά τον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι κόκκοι συναθροίζονται. Οι ρύποι μπορούν να προκαλέσουν αποσυσσωμάτωση των εδαφικών σωματιδίων ή να τα καλύψουν με παχύρρευστες, υδρόφοβες μεμβράνες, παρεμποδίζοντας τη φυσική συσσωμάτωση. Σε αργιλώδη εδάφη που έχουν ρυπανθεί με πετρέλαιο (CL), οι ερευνητές έχουν παρατηρήσει αύξηση των ορίων πλαστικότητας και υγρότητας, γεγονός που υποδηλώνει ότι απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα νερού για να παραμορφωθεί το έδαφος, πιθανώς λόγω της επικάλυψης των κόκκων από πετρέλαιο, η οποία εμποδίζει την πρόσβαση του νερού στο διπλό στρώμα της αργίλου [Zahermand et al., 2020]. Παρά τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άργιλο σε ορισμένα ρυπασμένα δείγματα, το όριο πλαστικότητας παρέμενε υψηλότερο σε σύγκριση με καθαρότερα δείγματα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η παρουσία πετρελαίου επηρεάζει την πλαστικότητα περισσότερο από την περιεκτικότητα του εδάφους σε μέταλλα.

Σε αμμώδη ή ιλυώδη εδάφη (SM), η ρύπανση οδηγεί συχνά σε προσωρινή βελτίωση της συμπίκνωσης, λόγω των λιπαντικών ιδιοτήτων των υδρογονανθράκων, οι οποίοι διευκολύνουν την ολίσθηση και πυκνότερη διάταξη των σωματιδίων. Ωστόσο, πέραν ενός ορίου συγκέντρωσης ρύπανσης (π.χ. >70 g/kg πετρέλαιο), η συνοχή των σωματιδίων μειώνεται και η φαινόμενη πυκνότητα αρχίζει να υποχωρεί, εξαιτίας της υπερβολικής

πλήρωσης των πόρων και της παρεμπόδισης της φυσικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των κόκκων [Zahermand et al., 2020].

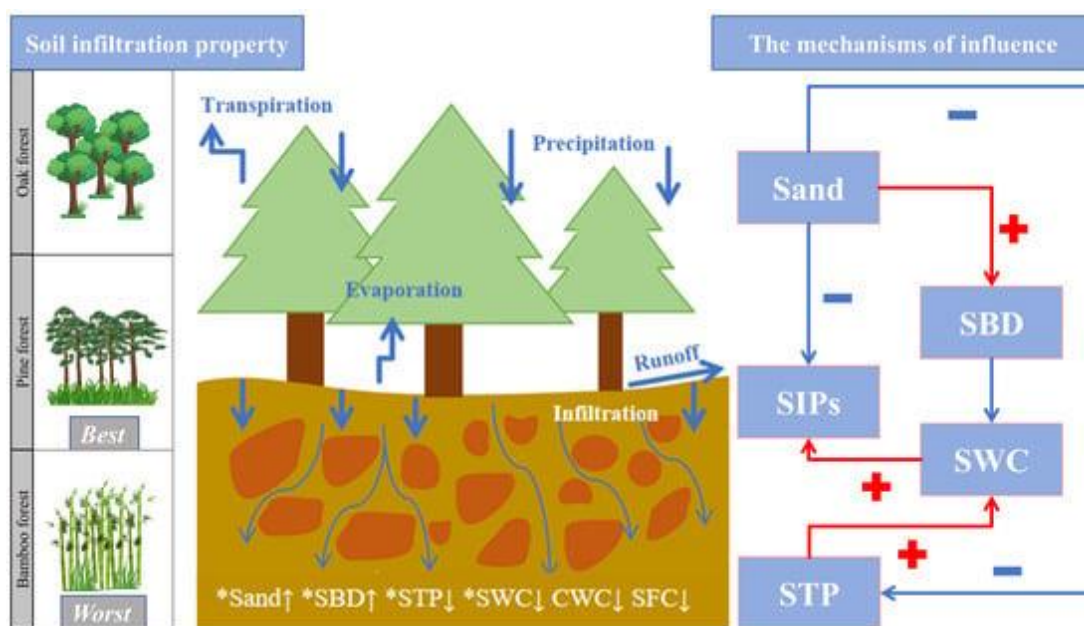
3.1.2 Πυκνότητα και Πορώδες

Ρύποι όπως το αργό πετρέλαιο μειώνουν τη συνοχή μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους και μεταβάλλουν τη φαινόμενη πυκνότητα. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, το λιπαντικό αποτέλεσμα των υδρογονανθράκων οδηγεί σε υψηλότερη ξηρή πυκνότητα. Όμως, καθώς η συγκέντρωση του πετρελαίου αυξάνεται, το έδαφος οδηγείται σε κορεσμό από πετρέλαιο αντί για νερό, γεγονός που αυξάνει τον λόγο των πόρων (void ratio) και μειώνει τη φαινόμενη πυκνότητα. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν σημαντικά την διαπερατότητα του εδάφους, με πιθανή μείωση του αερισμού και της διηθητικότητας του νερού. Σε πρακτικό επίπεδο, τα εδάφη που είναι συμπίεσμένα και κορεσμένα με πετρέλαιο τείνουν να γίνονται αναερόβια και αδιαπέραστα, γεγονός που μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη των ριζών και τη συγκράτηση νερού [Zahermand et al., 2020].

3.1.3 Ικανότητα Συγκράτησης Υγρασίας

Ένα από τα πιο έντονα αποτελέσματα της ρύπανσης από υδρογονάνθρακες είναι η αύξηση της υδροφοβικότητας. Οι πετρελαϊκές ουσίες επικάθονται στα σωματίδια του εδάφους, εμποδίζοντας τη διείσδυση του νερού στους μικροπόρους. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση της ικανότητας συγκράτησης υγρασίας και διαταράσσει τον φυσικό κύκλο του νερού στο έδαφος. Σε ξηρές και ημι-άνυδρες περιοχές, όπου η διαθεσιμότητα νερού είναι ήδη περιορισμένη, το φαινόμενο αυτό μπορεί να επιδεινώσει τη διαδικασία υποβάθμισης των εδαφών και την ερημοποίηση [Zahermand et al., 2020].

Επιπλέον, η συμπεριφορά συστολής και διόγκωσης του εδάφους ενδέχεται επίσης να μεταβληθεί, ιδιαίτερα σε εδάφη πλούσια σε άργιλο. Η ρύπανση με πετρέλαιο μπορεί να μειώσει τη διογκωτική ικανότητα, τροποποιώντας τη συγγένεια του εδάφους με το νερό. Αντιθέτως, σε ορισμένες περιπτώσεις, η παρουσία πετρελαίου ενδέχεται να αυξήσει τον όγκο του εδάφους, λόγω πλήρωσης των πόρων, οδηγώντας σε ακανόνιστη συμπεριφορά κατά τους κύκλους ύγρανσης και ξήρανσης [Zahermand et al., 2020].



Εικόνα 6: Επίδραση των ρύπων στις φυσικές ιδιότητες των εδαφών [Πηγή: Wang et al., 2024]

3.2 Χημικές Ιδιότητες

Οι ρύποι επηρεάζουν το χημικό προφίλ του εδάφους με πολύπλοκους και συχνά μη αναστρέψιμους τρόπους. Οι σημαντικότερες μεταβολές παρατηρούνται στο pH, την αλατότητα, τη δυναμική κατιονικής ανταλλαγής (CEC), την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων. Οι χημικές αυτές αλλαγές δεν επηρεάζουν μόνο τη γονιμότητα του εδάφους, αλλά καθορίζουν επίσης τη μετακίνηση και την τοξικότητα των ίδιων των ρύπων [Biswas et al., 2018].

3.2.1 pH και Οξύτητα Εδάφους

Οι ρυπαντές, και ιδιαίτερα οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες, συχνά οδηγούν σε μείωση του pH του εδάφους, αυξάνοντας έτσι την οξύτητά του. Η οξίνιση αυτή προκύπτει από την παρουσία οργανικών ενώσεων που περιέχουν υδρογόνο και την αποδόμηση των υδρογονανθράκων σε όξινα παραπροϊόντα. Οι όξινες συνθήκες εμποδίζουν τη διαθεσιμότητα βασικών θρεπτικών στοιχείων όπως ο φώσφορος, το μαγνήσιο και το ασβέστιο, ενώ παράλληλα ενισχύουν τη μετακίνηση τοξικών μετάλλων όπως ο μόλυβδος, το κάδμιο και ο ψευδάργυρος [Zahermand et al, 2020; Biswas et al., 2018].

Η πτώση του pH επηρεάζει επίσης τη σύνθεση των μικροβιακών κοινοτήτων και μειώνει τη δράση των ενζύμων, περιορίζοντας περαιτέρω τη βιολογική παραγωγικότητα του εδάφους. Έρευνες έχουν δείξει ότι περιοχές με μακροχρόνια έκθεση σε υδρογονάνθρακες παρουσιάζουν σταθερά χαμηλότερες τιμές pH, ιδιαίτερα στα ανώτερα στρώματα του εδαφικού προφίλ [Biswas et al., 2018].

3.2.2 Δυναμική Κατιονικής Ανταλλαγής (CEC)

Η δυναμική κατιονικής ανταλλαγής (CEC) είναι ένα μέτρο της ικανότητας του εδάφους να συγκρατεί θετικά φορτισμένα ιόντα (κατιόντα), όπως το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το κάλιο και το αμμώνιο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα εδάφη που έχουν ρυπανθεί με πετρέλαιο μπορεί να εμφανίζουν αυξημένη CEC, ιδιαίτερα όταν υπάρχει υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο. Αυτό αποδίδεται στην αλληλεπίδραση των υδρογονανθράκων με την οργανική ουσία, η οποία δημιουργεί επιπλέον θέσεις δέσμευσης κατιόντων [Suazo-Hernández et al., 2023].

Ωστόσο, η αύξηση της CEC δεν συνεπάγεται απαραίτητα βελτίωση της γονιμότητας, καθώς οι νέες θέσεις δέσμευσης ενδέχεται να καταλαμβάνονται από ανεπιθύμητα ή τοξικά στοιχεία.

3.2.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC) και Αλατότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους αυξάνεται συχνά σε ρυπασμένα περιβάλλοντα λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης διαλυμένων ιόντων. Σε εδάφη μολυσμένα με πετρέλαιο, έχουν παρατηρηθεί αυξημένες τιμές EC, κυρίως λόγω της αποδόμησης του αργού πετρελαίου σε διαλυτά άλατα και οργανικά οξέα. Η υψηλή αγωγιμότητα συνδέεται συνήθως με αυξημένη αλατότητα, η οποία αποτελεί σοβαρή απειλή για τα περισσότερα καλλιεργούμενα είδη και την εδαφική πανίδα. Τα αλατούχα εδάφη προκαλούν ωσμωτικό στρες, δυσχεραίνοντας την απορρόφηση του νερού από τα φυτά και οδηγώντας σε καθυστερημένη ανάπτυξη και μειωμένες αποδόσεις [Alamgir, 2016].

3.2.4 Ωσμωτικό στρες

Ωσμωτικό στρες είναι η φυσιολογική κατάσταση που προκύπτει όταν υπάρχει ανισορροπία στο υδατικό δυναμικό μεταξύ του εσωτερικού ενός κυττάρου και του εξωτερικού του περιβάλλοντος, οδηγώντας σε διαταραχές της κυτταρικής ομοιόστασης. Το στρες αυτό μπορεί να εμφανιστεί τόσο σε υπερωσμωτικές συνθήκες, όπου η έξοδος νερού προκαλεί αφυδάτωση και συρρίκνωση του κυττάρου, όσο και σε υποωσμωτικές συνθήκες, οι οποίες προκαλούν είσοδο νερού και ενδεχόμενη διόγκωση ή λύση του κυττάρου. Στα φυτά, το ωσμωτικό στρες έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς σχετίζεται άμεσα με την ξηρασία, την υψηλή αλατότητα και άλλους αβιοτικούς παράγοντες που περιορίζουν την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα [Show et al., 2015].

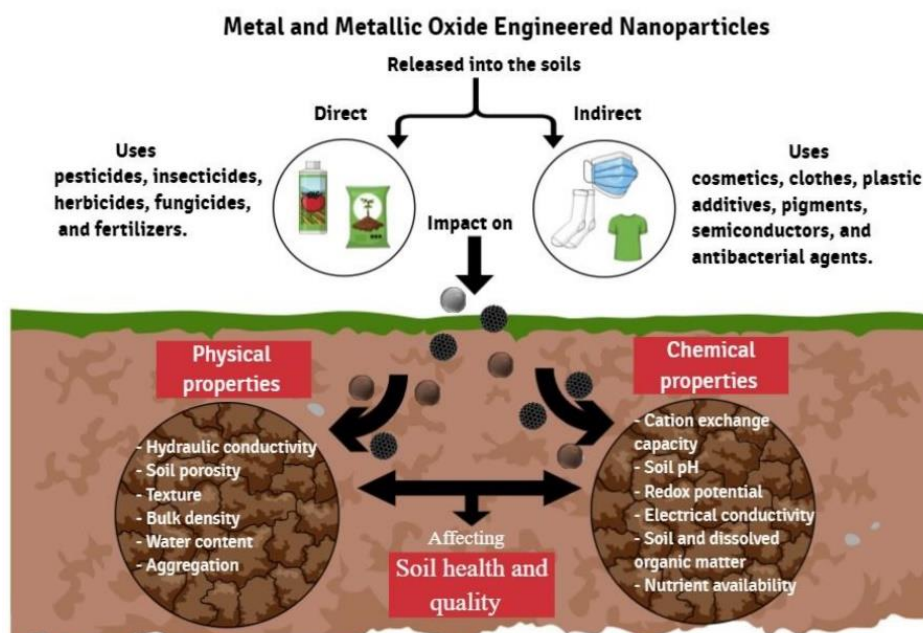
Για να ανταπεξέλθουν σε αυτές τις προκλήσεις, τα κύτταρα ενεργοποιούν ένα σύνολο προσαρμοστικών μηχανισμών, όπως η συσσώρευση συμβατών ωσμολυτών (όπως η προλίνη, η γλυκίνη-βηταΐνη και τα σάκχαρα), η ρύθμιση της ιοντικής μεταφοράς και η ενεργοποίηση σηματοδοτικών μονοπατιών που ρυθμίζουν την έκφραση γονιδίων και τη δραστηριότητα πρωτεϊνών. Οι προσαρμοστικές αυτές αποκρίσεις όχι μόνο αποκαθιστούν την ωσμωτική ισορροπία αλλά και προστατεύουν τα μακρομόρια και τις κυτταρικές δομές

από βλάβες, υπογραμμίζοντας τον κεντρικό ρόλο του ωσμωτικού στρες στην επιβίωση του κυττάρου και στην ανθεκτικότητα του οργανισμού σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες [Show et al., 2015].

3.2.4 Δυναμική Θρεπτικών Στοιχείων και Βαρέα Μέταλλα

Η ρύπανση διαταράσσει την ευαίσθητη ισορροπία των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Για παράδειγμα, οι υδρογονάνθρακες και τα βαρέα μέταλλα μπορούν να ακινητοποιήσουν βασικά θρεπτικά στοιχεία ή να τα απομακρύνουν από τις θέσεις ανταλλαγής, καθιστώντας τα μη διαθέσιμα για την απορρόφηση από τα φυτά. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται μείωση των επιπέδων αζώτου και φωσφόρου, λόγω της καταστολής της μικροβιακής ορυκτοποίησης, ενώ σε άλλες περιπτώσεις σημειώνεται συσσώρευση τοξικών συγκεντρώσεων μετάλλων με την πάροδο του χρόνου. Αυτές οι αλλαγές είναι ιδιαίτερα ανησυχητικές σε γεωργικά εδάφη, όπου η ποιότητα του εδάφους επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια των τροφίμων και την παραγωγικότητα [Suazo-Hernández et al., 2023].

Επιπλέον, οι ρύποι μπορούν να διευκολύνουν την κινητικότητα των μετάλλων, καθιστώντας τα κατά τα άλλα αδρανή μέταλλα βιοδιαθέσιμα και τοξικά. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε όξινα εδάφη, όπου το χαμηλό pH αυξάνει τη διαλυτότητα των μετάλλων. Επιπλέον, συνθετικοί οργανικοί ρύποι όπως τα φυτοφάρμακα μπορούν να μεταβάλλουν το δυναμικό οξειδοαναγωγής του εδάφους, διαταράσσοντας τους κύκλους των θρεπτικών στοιχείων και προάγοντας τον σχηματισμό δραστικών μορφών οξυγόνου (ROS), οι οποίες επιδεινώνουν περαιτέρω την υγεία του εδάφους [Alamgir, 2016].



Εικόνα 7: Επίδραση των ρύπων στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των εδαφών [Πηγή: Suazo-Hernández et al., 2023]

3.3 Μηχανικές Ιδιότητες

Παρόλο που το παρόν κεφάλαιο δεν περιλαμβάνει άμεση γεωτεχνική ανάλυση, ορισμένες μηχανικές αντιδράσεις του εδάφους, όπως η συμπιεστότητα, η διάταξη των σωματιδίων και τα όρια συνέπειας, παραμένουν ουσιώδεις για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι ρύποι επηρεάζουν τη συμπεριφορά του εδάφους σε φυσικά και γεωργικά περιβάλλοντα. Οι ιδιότητες αυτές σχετίζονται με την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό, να αντιστέκεται στη διάβρωση, να υποστηρίζει την ανάπτυξη ριζών και να διατηρεί τη δομική του σταθερότητα, ιδιαίτερα υπό συνθήκες περιβαλλοντικής καταπόνησης [Zhao et al., 2023].

3.3.1 Συμπεριφορά Συμπύκνωσης και Πυκνότητα

Οι ρύποι, και ιδιαίτερα οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες, επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά συμπύκνωσης του εδάφους. Σε χαμηλά επίπεδα ρύπανσης, οι υδρογονάνθρακες λειτουργούν ως λιπαντικά, μειώνοντας την εσωτερική τριβή μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους. Αυτό επιτρέπει την πιο αποτελεσματική αναδιάταξη των κόκκων, οδηγώντας σε υψηλότερες ξηρές πυκνότητες και χαμηλότερη βέλτιστη υγρασία. Τα φαινόμενα αυτά είναι ιδιαίτερα εμφανή σε εδάφη αμμώδους ιλύος (SM), όπου η απουσία ισχυρών συνεκτικών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων καθιστά πιο έντονο το λιπαντικό αποτέλεσμα [Zhao et al., 2023].

Ωστόσο, καθώς η συγκέντρωση πετρελαίου αυξάνεται, συνήθως πέραν των 68 g/kg, σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα, η τάση αυτή αντιστρέφεται. Το πετρέλαιο αρχίζει να καταλαμβάνει τους πόρους μεταξύ των κόκκων, εκτοπίζοντας τον αέρα και το νερό, και αυξάνοντας τον λόγο πόρων. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ξηρής πυκνότητας, ακόμη και όταν εφαρμόζεται η ίδια ενέργεια συμπύκνωσης. Το φαινόμενο αυτό επιτείνεται από το υψηλό ιξώδες του αργού πετρελαίου, το οποίο παρεμποδίζει την κίνηση και την καθίζηση των σωματιδίων, ιδιαίτερα σε λεπτόκοκκα εδάφη όπως η άργιλος χαμηλής πλαστικότητας (CL).

Η βέλτιστη υγρασία μειώνεται επίσης σε ρυπασμένα εδάφη, όχι επειδή απαιτείται λιγότερη υγρασία, αλλά επειδή το πετρέλαιο αντικαθιστά το νερό ως κύριο μέσο διαβροχής. Λόγω της υδροφοβικότητάς του και της αδυναμίας του να σχηματίσει δεσμούς υδρογόνου, το πετρέλαιο δεν διευκολύνει την τριχοειδή τάση ή τη διόγκωση του διπλού στρώματος, όπως κάνει το νερό. Κατά συνέπεια, απαιτείται λιγότερη ποσότητα υγρού για την επίτευξη της μέγιστης συμπύκνωσης υπό αυτές τις μεταβαλλόμενες συνθήκες [Mohammad et al., 2025].

3.3.2 Όρια Πλαστικότητας και Υγρότητας

Τα εδάφη που έχουν ρυπανθεί με πετρέλαιο συχνά παρουσιάζουν αυξημένα όρια πλαστικότητας και υγρότητας, ιδιαίτερα όταν είναι πλούσια σε άργιλο. Τα όρια Atterberg καθορίζουν το εύρος περιεκτικότητας σε υγρασία εντός του οποίου το έδαφος συμπεριφέρεται πλαστικά. Παρουσία πετρελαίου, το όριο πλαστικότητας αυξάνεται

περισσότερο από το όριο υγρότητας, περιορίζοντας έτσι τον δείκτη πλαστικότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι υδρογονάνθρακες παρεμποδίζουν την ευθυγράμμιση και αλληλεπίδραση των αργιλικών σωματιδίων, καλύπτοντάς τα και μειώνοντας την ικανότητά τους να απορροφούν και να αλληλεπιδρούν με το νερό [Mohammad et al., 2025].

Αξιοσημείωτο είναι ότι ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν πως η ικανότητα κατιονικής ανταλλαγής (CEC) διαδραματίζει πιο καθοριστικό ρόλο από την περιεκτικότητα σε άργιλο στον καθορισμό του ορίου πλαστικότητας σε ρυπασμένα εδάφη [Zahermand et al.]. Εδάφη με υψηλότερη CEC μπορούν να συγκρατούν μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαίου, το οποίο μιμείται τη συμπεριφορά του νερού κατά την πλαστική παραμόρφωση, οδηγώντας σε μια φαινομενικά παράδοξη κατάσταση όπου εδάφη με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άργιλο εμφανίζουν υψηλότερα όρια πλαστικότητας υπό ρύπανση.

Επιπλέον, η διηλεκτρική σταθερά του πετρελαίου είναι σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη του νερού, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των αργιλικών σωματιδίων. Αυτό ενισχύει τη συσσωμάτωση (floculation), μειώνει την απόσταση μεταξύ των σωματιδίων και επιτρέπει στο έδαφος να φτάσει στο όριο υγρότητας με λιγότερη υγρασία. Ως εκ τούτου, το ρυπασμένο έδαφος γίνεται πιο εύθραυστο και λιγότερο εύκαμπτο, αυξάνοντας την πιθανότητα ρηγμάτωσης κατά τους κύκλους ξήρανσης και μειώνοντας τη μακροχρόνια δομική του σταθερότητα [Zheng et al., 2023].

3.3.3 Συμπιεστότητα Εδάφους και Συμπεριφορά Καθίζησης

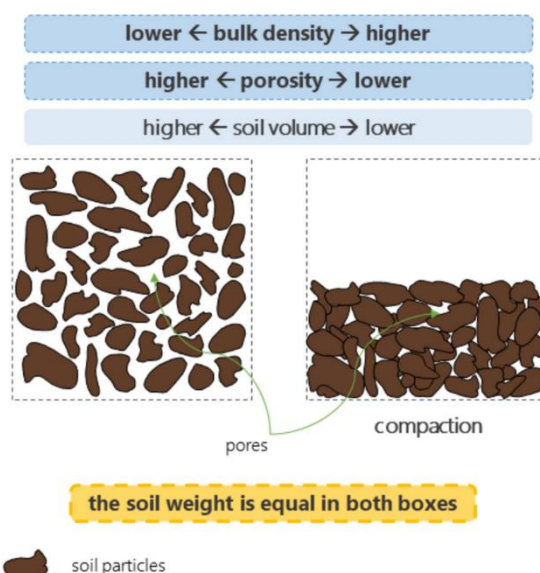
Μια άλλη σημαντική μηχανική παράμετρος σε ρυπασμένα εδάφη είναι η συμπιεστότητα. Η αναδιάταξη των σωματιδίων υπό φορτίο επηρεάζεται από την παρουσία ρύπων, οι οποίοι είτε λιπαίνουν είτε εμποδίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων. Σε αμμώδη και ιλυώδη εδάφη, χαμηλά επίπεδα ρύπανσης με πετρέλαιο μπορεί να αυξήσουν τη συμπιεστότητα λόγω μειωμένης αντίστασης μεταξύ των κόκκων. Στα αργιλώδη εδάφη, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη. Αν οι υδρογονάνθρακες προκαλέσουν διασπορά των αργιλικών πλακιδίων, η δομή του εδάφους μπορεί να γίνει πιο συμπιεστή, οδηγώντας σε μεγαλύτερη καθίζηση ακόμη και υπό μέτρια φορτία. Αντίθετα, αν το πετρέλαιο σχηματίσει μια συνεκτική μεμβράνη γύρω από τα σωματίδια, η συμπιεστότητα μπορεί να μειωθεί, δημιουργώντας μια πυκνότερη αλλά πιο εύθραυστη δομή [Zheng et al., 2023].

Αυτή η διττή συμπεριφορά είναι σημαντική για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς γεωργικών γαιών ή αποκατεστημένων περιοχών. Εδάφη με αυξημένη συμπιεστότητα ενδέχεται να υποστούν σημαντικές καθιζήσεις, γεγονός που επηρεάζει τον σχεδιασμό αρδευτικών συστημάτων, την ανάπτυξη των ριζών των φυτών και ακόμη και τη σταθερότητα της επιφάνειας.

3.3.4 Σύγκριση Υγρών που Χρησιμοποιούνται σε Δοκιμές

Στις δοκιμές συμπίκνωσης, η επιλογή του υγρού -νερό έναντι πετρελαίου- οδηγεί σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα. Οι δοκιμές που χρησιμοποιούν πετρέλαιο ως υγρό συμπίκνωσης συχνά αποδίδουν χαμηλότερες ξηρές πυκνότητες και υψηλότερη βέλτιστη υγρασία σε σύγκριση με τις δοκιμές που χρησιμοποιούν νερό. Αυτό οφείλεται στο υψηλότερο ιξώδες του πετρελαίου και στην αδυναμία του να προάγει την ίδια δυναμική αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωματιδίων όπως το νερό. Στις δοκιμές με πετρέλαιο κυριαρχεί το φαινόμενο της λίπανσης και της επικάλυψης, ενώ στις δοκιμές με νερό υπερσχύουν η υδραυλική αγωγιμότητα και η επιφανειακή τάση [Zheng et al., 2023].

Επιπλέον, η παρουσία πετρελαίου παρεμποδίζει τη μετακίνηση του νερού, κάτι που έχει σημαντικές επιπτώσεις σε στρατηγικές αποκατάστασης, όπως η έκπλυση και η άρδευση. Σε ρυπασμένα εδάφη, η διήθηση του νερού επιβραδύνεται, αυξάνοντας τον κίνδυνο υδατοκορεσμού και μειώνοντας τη διάχυση του οξυγόνου, συνθήκες που είναι εχθρικές για τις ρίζες των φυτών και για τους ωφέλιμους μικροοργανισμούς του εδάφους.



Εικόνα 8: Επίδραση των ρύπων στις μηχανικές ιδιότητες των εδαφών [Πηγή: Sylwia Kukowska and Katarzyna Szewczuk-Karpisz, 2024]

3.4 Βιολογική Δραστηριότητα

Το έδαφος δεν αποτελεί απλώς ένα παθητικό μέσο για την ανάπτυξη των φυτών, είναι ένα ζωντανό σύστημα γεμάτο βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα και μακροπανίδα όπως οι γαιοσκώληκες. Οι οργανισμοί αυτοί συμβάλλουν στη διάσπαση της οργανικής ύλης, στην ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων και στη διαμόρφωση της δομής του εδάφους. Η εισαγωγή ρύπων, ιδίως πετρελαϊκών υδρογονανθράκων, βαρέων μετάλλων και συνθετικών οργανικών ενώσεων, ασκεί σημαντική επίδραση σε αυτή τη βιολογική κοινότητα, οδηγώντας συχνά σε υποβάθμιση ή και πλήρη κατάρρευση των οικοσυστημικών λειτουργιών [Samanth. 2024].

3.4.1 Μικροβιακή Βιομάζα και Ποικιλότητα

Η άμεση επίδραση της ρύπανσης του εδάφους είναι η μείωση της μικροβιακής βιομάζας. Οι τοξικές ενώσεις παρεμποδίζουν τη κυτταρική αναπνοή, τη λειτουργία των ενζύμων και τη σταθερότητα των μεμβρανών σε βακτήρια και μύκητες. Οι υδρογονάνθρακες, ειδικότερα, είναι ελάχιστα διαλυτοί στο νερό, δημιουργώντας υδρόφοβες ζώνες στο έδαφος που περιορίζουν την πρόσβαση των μικροοργανισμών σε οξυγόνο και θρεπτικά στοιχεία. Ευαίσθητες ομάδες όπως τα αζωτοδεσμευτικά βακτήρια (π.χ. *Rhizobia*) και οι ακτινομύκητες είναι από τις πρώτες που παρακμάζουν, υπονομεύοντας τη διαθεσιμότητα αζώτου και τη διάσπαση οργανικής ύλης [Samanth. 2024].

Επιπλέον, η ποικιλότητα μειώνεται σημαντικά σε ρυπασμένα εδάφη. Ένας μικρός αριθμός μικροοργανισμών που αποδομούν υδρογονάνθρακες (όπως οι *Pseudomonas*, *Alcaligenes* και *Mycobacterium*) μπορεί να επιβιώσει ή ακόμη και να πολλαπλασιαστεί, αλλά αυτή η λειτουργική εξειδίκευση συμβαίνει εις βάρος της συνολικής βιοποικιλότητας και της οικολογικής ανθεκτικότητας [Papa and Alvarez-Romero, 2023].

3.4.2 Ενζυμική Δραστηριότητα ως Δείκτης

Τα ένζυμα του εδάφους, όπως η αφυδρογονάση (dehydrogenase), η φωσφατάση (phosphatase), η ουρεάση (urease) και η β-γλυκοζιδάση (β-glucosidase), λειτουργούν ως βιοδείκτες της μικροβιακής δραστηριότητας. Αυτά τα ένζυμα διαμεσολαβούν κρίσιμες λειτουργίες του εδάφους, όπως η αποδόμηση οργανικής ύλης, η ανοργανοποίηση και η απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι οι ρύποι μειώνουν τα επίπεδα δραστηριότητας αυτών των ενζύμων, υποδεικνύοντας μείωση της μεταβολικής ικανότητας των μικροοργανισμών. Για παράδειγμα:

- Η αφυδρογονάση συμμετέχει άμεσα στην αναπνευστική δραστηριότητα των μικροοργανισμών η καταστολή της οποίας αποτελεί ένδειξη γενικευμένης μεταβολικής αναστολής.
- Η φωσφατάση είναι ζωτικής σημασίας για τον κύκλο του φωσφόρου, η μείωσή της οδηγεί σε περιορισμένη διαθεσιμότητα φωσφόρου για τα φυτά.
- Η δραστηριότητα της ουρεάσης μειώνεται παρουσία βαρέων μετάλλων, διαταράσσοντας τη μετατροπή του αζώτου και την απελευθέρωση αμμωνίας.

Τέτοιες ενζυμικές διαταραχές δεν αποτελούν μόνο συμπτώματα ρύπανσης, αλλά και μηχανισμούς που ενισχύουν την υποβάθμιση του εδάφους, καθώς η μειωμένη ενζυμική δραστηριότητα οδηγεί σε χαμηλότερο ρυθμό αποδόμησης της οργανικής ύλης, γεγονός που με τη σειρά του υποστηρίζει λιγότερους μικροοργανισμούς, δημιουργώντας έναν φαύλο κύκλο αρνητικής ανάδρασης [Radka Donkova and Nadya Kaloyanova, 2008].

3.4.3 Αλληλεπιδράσεις Φυτών–Μικροοργανισμών και Επιδράσεις στη Ριζόσφαιρα

Οι ρύποι δεν επηρεάζουν μόνο τους ελεύθερα διαβιούντες μικροοργανισμούς του εδάφους, αλλά και τη ριζόσφαιρα, τη ζωτική μικροζώνη που περιβάλλει τις ρίζες των φυτών. Η ρύπανση με πετρελαιο έχει αποδειχθεί ότι μειώνει το μήκος των ριζών, αναστέλλει τον σχηματισμό ριζικών τριχιδίων και παρεμποδίζει την πρόσληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων. Αυτές οι επιδράσεις μεταφέρονται και στο μικροβιακό σύστημα, καθώς τα φυτά εκκρίνουν λιγότερα σάκχαρα, αμινοξέα και οργανικά οξέα, ουσίες που αποτελούν βασικά υποστρώματα για την υποστήριξη ωφέλιμων μικροοργανισμών [Papa and Alvarez-Romero, 2023].

Η διατάραξη της συμβιωτικής σχέσης φυτών–μικροοργανισμών αποδυναμώνει τη γονιμότητα του εδάφους. Οι μυκορριζικοί μύκητες, για παράδειγμα, είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι στους ρύπους. Η απώλειά τους δεν περιορίζει μόνο την πρόσληψη φωσφόρου από τα φυτά, αλλά επηρεάζει επίσης την συσσωμάτωση του εδάφους, τη διατήρηση υγρασίας και την ανθεκτικότητα στη διάβρωση [Samanth. 2024].

3.4.4 Μικροπλαστικά και Αναδύμενοι Ρύποι

Αν και έχει δοθεί εκτενής προσοχή στους υδρογονάνθρακες και τα βαρέα μέταλλα, οι αναδύμενοι ρύποι του εδάφους, όπως τα μικροπλαστικά, αναγνωρίζονται ολοένα και περισσότερο για τις διαταρακτικές τους βιολογικές επιδράσεις. Τα μικροπλαστικά πλαστικά σωματίδια μικρότερα των 5 mm, εισέρχονται στα εδαφικά οικοσυστήματα μέσω εφαρμογής ιλύων καθαρισμού, αποσύνθεσης γεωργικών πλαστικών ή ατμοσφαιρικής εναπόθεσης. Αφού εισχωρήσουν στο έδαφος, τροποποιούν τη δομή των πόρων, προσροφούν ρύπους και παρεμβαίνουν στις βιολογικές οδούς επικοινωνίας [Chang et al., 2024].

Τα μικροπλαστικά μπορούν να:

- Μειώσουν την διαπερατότητα του εδάφους, οδηγώντας σε κακό αερισμό και κατακράτηση νερού.
- Διαταράζουν τη γονιδιακή έκφραση των μικροοργανισμών, επηρεάζοντας διαδικασίες όπως η αζωτοδέσμευση και η διαλυτοποίηση του φωσφόρου.
- Δράσουν ως φορείς άλλων ρύπων (π.χ. βαρέα μέταλλα ή αντιβιοτικά), ενισχύοντας τη συνολική τοξικότητα.

Τα εδάφη που είναι επιβαρυνμένα με μικροπλαστικά συχνά παρουσιάζουν μεταβολές στη σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας, ευνοώντας ανθεκτικά στους πλαστικούς ρύπους είδη, τα οποία όμως είναι λειτουργικά περιορισμένα. Αυτό διαταράσσει βασικές διεργασίες του εδάφους, όπως η ορυκτοποίηση του άνθρακα, οδηγώντας σε επιβραδυνόμενη αποσύνθεση και μειωμένη απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά επηρεάζουν το εντερικό μικροβίωμα των εδαφόβιων ασπόνδυλων (π.χ. γαιοσκώληκες), προκαλώντας δυσλειτουργία στην πέψη, φλεγμονές και

αυξημένη θνησιμότητα, επιπτώσεις που μεταφέρονται τροφικά σε υψηλότερα επίπεδα της οικολογικής αλυσίδας [Chang et al., 2024].

3.4.5 Δυνατότητα Βιοαποδόμησης και Φυσική Αποκατάσταση

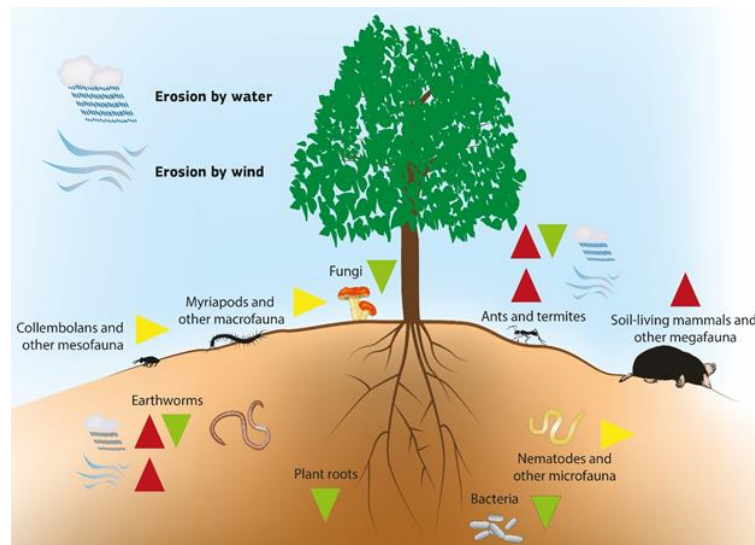
Παρά τις επιβλαβείς επιδράσεις της ρύπανσης στη βιολογία του εδάφους, ορισμένοι μικροβιακοί πληθυσμοί παρουσιάζουν ικανότητα αποδόμησης ή μετασχηματισμού ρυπαντών, συμβάλλοντας στη φυσική αποκατάσταση. Σε εδάφη ρυπασμένα με υδρογονάνθρακες, είδη όπως τα *Pseudomonas putida*, *Mycobacterium* και *Alcaligenes* έχουν επιδείξει ικανότητα μεταβολισμού πετρελαϊκών υδρογονανθράκων μέσω ενζυμικής οξείδωσης και αντιδράσεων διάσπασης αρωματικών δακτυλίων. Αυτά τα βακτήρια βασίζονται στην επάρκεια οξυγόνου, αζώτου και φωσφόρου για τη διατήρηση των μεταβολικών τους οδών [Radka Donkova and Nadya Kaloyanova, 2008].

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της βιοαποδόμησης επηρεάζεται σημαντικά από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως:

- Η κοκκομετρική σύσταση και η διαπερατότητα του εδάφους (που επηρεάζουν τη διάχυση του οξυγόνου).
- Η υγρασία και η θερμοκρασία (που επηρεάζουν τους ρυθμούς μεταβολισμού).
- Η παρουσία τοξικών συνεπιμολυντών (π.χ. βαρέα μέταλλα που μπορεί να αναστέλλουν υδρογονανθρακο-αποικοδομητικά ένζυμα).

Σε αργιλώδη εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα, η παροχή οξυγόνου αποτελεί περιοριστικό παράγοντα και η βιοαποδόμηση προχωρά με βραδύ ρυθμό. Αντίστοιχα, σε εδάφη όπου οι μικροβιακές κοινότητες έχουν κατασταλεί έντονα, η αποδόμηση μπορεί να διακοπεί πλήρως, οδηγώντας σε παρατεταμένη τοξικότητα ακόμη και πολλά χρόνια μετά το αρχικό συμβάν ρύπανσης [Samanth. 2024].

Υπάρχουν επίσης οικολογικά όρια στη φυσική αποκατάσταση. Ορισμένοι ρύποι, όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) υψηλού μοριακού βάρους και οι οργανοχλωριωμένες ενώσεις, είναι ανθεκτικοί (recalcitrant), καθώς αντιστέκονται στη μικροβιακή αποδόμηση λόγω της χημικής τους σταθερότητας και της χαμηλής διαλυτότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να απαιτείται βιοενίσχυση (bioaugmentation) -δηλαδή προσθήκη εξειδικευμένων μικροοργανισμών αποδόμησης- ή βιοδιέγερση (biostimulation) δηλαδή ενίσχυση της εγχώριας μικροχλωρίδας μέσω προσθήκης θρεπτικών στοιχείων [Samanth. 2024].



Εικόνα 9: Επίδραση των ρύπων στη βιολογική δραστηριότητα των εδαφών [Πηγή: IASPOINT, 2024]

3.4.6 Δείκτες Υγείας του Εδάφους και Παρακολούθηση

Λόγω των πολύπλοκων βιολογικών αλληλεπιδράσεων εντός του εδαφικού συστήματος, οι επιστήμονες βασίζονται συχνά σε δείκτες υγείας του εδάφους για την παρακολούθηση των επιπτώσεων της ρύπανσης. Αυτοί οι δείκτες περιλαμβάνουν:

- **Μικροβιακός άνθρακας βιομάζας (Microbial Biomass Carbon – MBC):** Αντανακλά το σύνολο του ενεργού μικροβιακού πληθυσμού.
- **Βασικός ρυθμός αναπνοής (Basal respiration):** Μετρά τη μεταβολική δραστηριότητα και την αντίδραση σε περιβαλλοντικό στρες.
- **Δραστηριότητα ενζύμων:** Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί έμμεσο δείκτη για την αποδοτικότητα των κύκλων θρεπτικών στοιχείων.
- **Δείκτες ποικιλότητας εδαφικής πανίδας:** Αντικατοπτρίζουν την τροφική ισορροπία και τη λειτουργικότητα του οικοσυστήματος.

Σε ρυπασμένα εδάφη παρατηρούνται συνήθως τα εξής:

- **Χαμηλές τιμές MBC** που υποδεικνύουν εξασθενημένους μικροβιακούς πληθυσμούς.
- **Μειωμένοι ρυθμοί αναπνοής** που υποδηλώνουν μεταβολική καταστολή.
- **Μειωμένη ενζυμική δραστηριότητα**, ιδιαίτερα σε ενζυμικές οδούς αζώτου και φωσφόρου
- **Απλοποιημένη δομή της πανίδας**, με επικράτηση ειδών ανθεκτικών στη ρύπανση

Αυτές οι μεταβολές συμβάλλουν στην ποσοτικοποίηση της υποβάθμισης της εδαφικής λειτουργίας και καθοδηγούν αποφάσεις για την αποκατάσταση των εδαφών ή για την επιβολή περιορισμών στη γεωργική τους χρήση [Geoffroy Sere et al., 2024] [Sujaina Madasseri et al., 2023].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Περιβαλλοντικές και Τεχνικές Επιπτώσεις

Η ταχεία βιομηχανοποίηση, η αστικοποίηση και οι μη βιώσιμες γεωργικές πρακτικές έχουν οδηγήσει σε πρωτοφανή επίπεδα ρύπανσης του εδάφους παγκοσμίως. Ρύποι που κυμαίνονται από υδρογονάνθρακες πετρελαίου και βαρέα μέταλλα έως φυτοφάρμακα και συνθετικές οργανικές ενώσεις απειλούν πλέον την ικανότητα του εδάφους να εκτελεί τις βασικές οικολογικές του λειτουργίες.

Οι συνέπειες της ρύπανσης του εδάφους είναι εκτεταμένες. Από περιβαλλοντική σκοπιά, η ρύπανση μπορεί να μεταβάλλει τη χημεία του εδάφους, να μειώσει τη γονιμότητα και να διαταράξει τη βιολογική δραστηριότητα. Από την οπτική της δημόσιας υγείας, οι ρύποι μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω άμεσης επαφής, εισπνοής σκόνης ή κατανάλωσης μολυσμένων τροφίμων και νερού. Οι επιπτώσεις μπορεί να κυμαίνονται από οξεία τοξικότητα έως χρόνιες ασθένειες, συμπεριλαμβανομένων νευρολογικών διαταραχών, καρδιαγγειακών παθήσεων και διαφόρων τύπων καρκίνου.

Πέραν των περιβαλλοντικών και υγειονομικών παραμέτρων, η ρύπανση του εδάφους έχει σημαντικές μηχανικές και γεωτεχνικές επιπτώσεις. Οι ρύποι μπορούν να τροποποιήσουν τις γεωτεχνικές ιδιότητες των εδαφών, μεταβάλλοντας την αντοχή τους, τη συμπιεστότητα, τη διαπερατότητα και τη φέρουσα ικανότητά τους. Τέτοιες αλλαγές μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη σταθερότητα πρανών, να μειώσουν τη φέρουσα ικανότητα θεμελιώσεων και να αυξήσουν τις καθιζήσεις σε πολιτικομηχανικά έργα. Η κατανόηση αυτών των γεωτεχνικών επιπτώσεων είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό ασφαλών υποδομών σε μολυσμένες περιοχές και για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών αποκατάστασης.

Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει τρεις αλληλένδετες πτυχές της ρύπανσης του εδάφους:

1. Τη γεωτεχνική μηχανική των μολυσμένων εδαφών,
2. Τους περιβαλλοντικούς και υγειονομικούς κινδύνους που προκύπτουν από τη ρύπανση, και
3. Την επείγουσα ανάγκη για αποκατάσταση, προκειμένου να επανέλθει η λειτουργικότητα του εδάφους και να διασφαλιστεί η ασφαλής χρήση της γης.

4.1 Επιπτώσεις στη Γεωτεχνική Μηχανική

Η γεωτεχνική συμπεριφορά του εδάφους καθορίζεται από τη φυσική και χημική του σύσταση, τη δομή του και την αλληλεπίδρασή του με το νερό και άλλα υγρά. Η ρύπανση εισάγει ξένες ουσίες που μπορούν να τροποποιήσουν σημαντικά αυτά τα χαρακτηριστικά. Οι υδρογονάνθρακες πετρελαίου, για παράδειγμα, είναι μη πολικές ενώσεις που αλληλεπιδρούν διαφορετικά με τα σωματίδια του εδάφους σε σύγκριση με το νερό, επηρεάζοντας τη δομή του εδάφους και τις σχέσεις υγρασίας. Τα βαρέα μέταλλα μπορούν να προσροφηθούν σε αργιλικά ορυκτά, τροποποιώντας τις επιφανειακές φορτίσεις και τις

δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων. Ο βαθμός αλλαγής των γεωτεχνικών ιδιοτήτων εξαρτάται από τον τύπο και τη συγκέντρωση του ρυπαντή, τον τύπο του εδάφους και τη διάρκεια έκθεσης [Mahdi Khodaparast and Amir Khoshgoftar, 2024].

4.1.1 Χαρακτηριστικά Συμπύκνωσης

Η συμπύκνωση είναι η διαδικασία πυκνότητας του εδάφους μέσω μείωσης των κενών αέρος με μηχανική προσπάθεια. Αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στην κατασκευή, καθώς επηρεάζει την αντοχή, τη συμπιεστότητα και τη διαπερατότητα. Οι ρύποι μπορούν να τροποποιήσουν τη συμπυκνωτική συμπεριφορά με διάφορους τρόπους. Οι ρυπαντές υδρογονανθράκων, όπως αργό πετρέλαιο, ντίζελ και όξινη λάσπη, συχνά επικαλύπτουν τα σωματίδια του εδάφους, μειώνοντας την τριβή και αλλάζοντας την κατανομή υγρασίας [Harun, Rahman and Damanhuri, 2025].

Στα λεπτόκοκκα εδάφη, οι υδρογονάνθρακες μειώνουν τη διηλεκτρική σταθερά των υγρών πόρων, ελαττώνοντας το πάχος του διάχυτου διπλού στρώματος γύρω από τα αργιλικά σωματίδια. Αυτό προάγει τη φλοκκίωση και αλλάζει την απόκριση του εδάφους στην ενέργεια συμπύκνωσης. Δεδομένου ότι οι υδρογονάνθρακες είναι μη πολικοί και δεν απορροφώνται εύκολα από τα αργιλικά ορυκτά, δεν μπορούν να αντικαταστήσουν το νερό στη διατήρηση της συνεκτικότητας μεταξύ των σωματιδίων, με αποτέλεσμα χαμηλότερη αποδοτικότητα συμπύκνωσης σε σύγκριση με το νερό [Vinoth et al., 2021].

4.1.2. Παράμετροι Αντοχής σε Τάση Κοπής

Η αντοχή σε τάση κοπής αποτελεί την αντίσταση του εδάφους στη παραμόρφωση και την αστοχία υπό δράση κοπτικών τάσεων και καθορίζεται από τη συνοχή (c) και τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ). Οι ρύποι μπορούν να επηρεάσουν και τις δύο παραμέτρους. Οι υδρογονάνθρακες μπορεί να αυξήσουν τη συνοχή, λειτουργώντας ως ιξώδεις συγκολλητικές ουσίες μεταξύ των σωματιδίων, αλλά μπορούν επίσης να μειώσουν τη γωνία εσωτερικής τριβής, λιπαίνοντας τις επαφές των σωματιδίων. Για παράδειγμα, αργιλοπηλώδεις άμμοι μολυσμένοι με όξινη λάσπη παρουσίασαν υψηλότερη συνοχή αλλά μειωμένη γωνία τριβής λόγω λειότερων επιφανειών σωματιδίων και μειωμένου αλληλομπλεξίματος [Zhao et al., 2023].

Η επίδραση των βαρέων μετάλλων είναι διαφορετική. Τα ιόντα μολύβδου και ψευδαργύρου μπορούν να μειώσουν τη συνοχή, συμπιέζοντας το διπλό στρώμα και διαταράσσοντας τις ηλεκτροστατικές έλξεις μεταξύ των αργιλικών σωματιδίων, με αποτέλεσμα πιο χαλαρή δομή και χαμηλότερη αντοχή σε τάση κοπής. Το μέγεθος και η κατεύθυνση των αλλαγών στην αντοχή σε τάση κοπής εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους, τον τύπο και τη συγκέντρωση του ρυπαντή [Vinoth et al., 2021].

4.1.3. Όρια Atterberg

Τα όρια Atterberg — υγρό όριο (LL), πλαστικό όριο (PL) και δείκτης πλαστικότητας (PI) — καθορίζουν τα εύρη υγρασίας στα οποία ένα λεπτόκοκκο έδαφος αλλάζει τη συνοχή του. Οι ρύποι επηρεάζουν αυτά τα όρια τροποποιώντας τη χημεία της επιφάνειας και την ικανότητα πρόσληψης νερού. Η ρύπανση από υδρογονάνθρακες συχνά μειώνει τα LL και PL με την πάροδο του χρόνου, καθώς οι μη πολικοί μοριακοί παράγοντες αντικαθιστούν τα πολικά στρώματα νερού, μειώνοντας τη συνοχή του εδάφους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αρχική ρύπανση αυξάνει την πλαστικότητα λόγω συγκολλητικών επιδράσεων, αλλά η παρατεταμένη έκθεση οδηγεί συνήθως σε μείωση [Harun, Rahman and Damanhuri, 2025].



Εικόνα 10: Όρια Atterberg [Πηγή: Pavetest, 2025]

4.1.4. Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα καθορίζει την ευκολία με την οποία τα υγρά μπορούν να ρέουν μέσω του εδάφους. Οι υδρογονάνθρακες, λόγω υψηλού ιξώδους, γενικά μειώνουν τη διαπερατότητα, φράσσοντας τους πόρους και σχηματίζοντας υδρόφοβα φράγματα. Σε αργιλικά εδάφη, ωστόσο, ορισμένοι ρύποι μπορούν να αυξήσουν τη διαπερατότητα διαλύοντας ορυκτά ή μειώνοντας το διπλό στρώμα, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερους πόρους. Για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί ότι όξινες διηθήσεις από χωματερές αυξάνουν τη διαπερατότητα σε λατεριτικά εδάφη, αντιδρώντας με τα αργιλικά ορυκτά και αυξάνοντας τον ενεργό όγκο πόρων [Mahdi Khodaparast and Amir Khoshgoftar, 2024].

4.1.5. Δείκτης Φέρουσας Ικανότητας California (CBR)

Ο δείκτης CBR αποτελεί μέτρο της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, ιδιαίτερα για τα υποστρώματα οδοστρωμάτων. Η ρύπανση από υδρογονάνθρακες συνήθως μειώνει τις τιμές CBR, ειδικά σε αργιλικά εδάφη, λόγω λιπαντικών επιδράσεων στα σωματίδια και απώλειας της τριβής μεταξύ τους. Σε αμμώδη εδάφη, μικρές ποσότητες υδρογονανθράκων μπορεί αρχικά να αυξήσουν τον CBR λόγω συγκόλλησης των σωματιδίων, αλλά η περαιτέρω ρύπανση τον μειώνει καθώς το έδαφος γίνεται υπερβολικά λιπασμένο [Mahdi Khodaparast and Amir Khoshgoftar, 2024].

Οι γεωτεχνικές επιπτώσεις της ρύπανσης είναι σημαντικές για την εφαρμογή στην μηχανική. Χωρίς να ληφθούν υπόψη αυτές οι τροποποιημένες ιδιότητες, η κατασκευή σε

μολυσμένα εδάφη μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρες αστοχίες θεμελιώσεων, υπερβολικές καθιζήσεις και μειωμένη διάρκεια ζωής των κατασκευών. Οι κίνδυνοι αυτοί υπογραμμίζουν την ανάγκη για λεπτομερή γεωτεχνική διερεύνηση των μολυσμένων περιοχών πριν από οποιαδήποτε ανάπτυξη ή εργασίες αποκατάστασης [Vinoth et al., 2021].

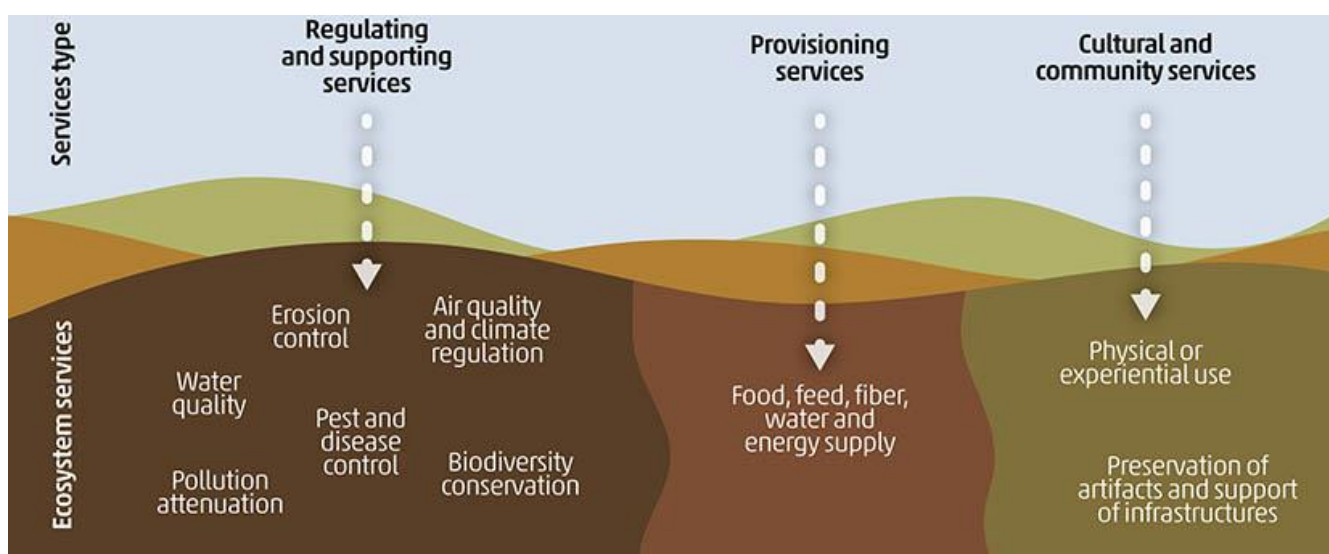
Typical CBR Values Table			
USCS Soil Class	Soil Type	Laboratory CBR Range	Field CBR Range
GW	Well graded sandy gravel	20 – 60	60 – 80
SW	Well graded sand	15 – 40	20 – 40
SC	Sandy clay	4 – 7	10 – 20
CL	Clay	1 – 3	5 – 15

Note: The CBR value of the standard sample is assumed to be 100

Εικόνα 11: Τιμές CBR [Πηγή: Backus, n.d.]

4.2 Κίνδυνοι για Περιβάλλον και Υγεία

Η ρύπανση του εδάφους δεν αποτελεί τοπικό ή απομονωμένο πρόβλημα, αλλά ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό και δημόσιο υγειονομικό ζήτημα που επηρεάζει τα οικοσυστήματα, τη γεωργία, τους υδατικούς πόρους και την ανθρώπινη ευημερία. Οι επιπτώσεις της είναι περίπλοκες, μακροχρόνιες και συχνά υποτιμημένες. Η φύση και η σοβαρότητα των κινδύνων εξαρτώνται από τους τύπους των ρύπων, τις ιδιότητες του εδάφους, τη χρήση γης και τις οδούς έκθεσης. Στην παρούσα ενότητα, εξετάζονται αρχικά οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι και ακολούθως οι επιπτώσεις στην υγεία, ώστε να δοθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του τρόπου με τον οποίο η ρύπανση του εδάφους απειλεί τόσο τα φυσικά οικοσυστήματα όσο και τα ανθρώπινα συστήματα [FAO and UNEP, 2021].



Εικόνα 12: Έδαφος και Οικοσυστήματα [Πηγή: (FAO and UNEP, 2021)]

4.2.1 Επιδράσεις στη Χημεία και τη Γονιμότητα του Εδάφους

Οι ρύποι διαταράσσουν την εύθραυστη χημική ισορροπία των εδαφών. Τα βαρέα μέταλλα, όπως το κάδμιο, ο μόλυβδος και ο υδράργυρος, ανταγωνίζονται τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, όπως το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το κάλιο, στις θέσεις ανταλλαγής, μειώνοντας έτσι τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά. Οι υδρογονάνθρακες σχηματίζουν υδρόφοβα στρώματα γύρω από τα εδαφικά σωματίδια, μειώνοντας τη διήθηση και την ανταλλαγή αερίων, γεγονός που με τη σειρά του περιορίζει την παροχή οξυγόνου στους μικροοργανισμούς και τις ρίζες των φυτών [Münzel et al., 2022]. Η οξίνιση του εδάφους αποτελεί συνηθισμένη συνέπεια της ρύπανσης από όξινα βιομηχανικά απόβλητα και την απορροή μεταλλείων. Οι όξινες συνθήκες αυξάνουν τη διαλυτότητα των τοξικών μετάλλων, επιτρέποντάς τους να μεταναστεύσουν στα υπόγεια ύδατα ή να απορροφηθούν ευκολότερα από τα φυτά. Αντιθέτως, τα αλκαλικά διηθήματα, που συχνά εκλύονται από χώρους υγειονομικής ταφής, μπορούν να καταβυθίσουν άλατα και να υποβαθμίσουν περαιτέρω τη δομή του εδάφους [Diana Che Lat et al., 2023]. Με την πάροδο του χρόνου, αυτές οι διεργασίες μειώνουν τη γονιμότητα του εδάφους, εμποδίζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και περιορίζουν την αγροτική παραγωγικότητα.

4.2.2 Αλληλεπιδράσεις Εδάφους–Φυτών

Η ρύπανση του εδάφους επηρεάζει άμεσα τις φυσιολογικές διεργασίες και την ανάπτυξη των φυτών. Η αυξημένη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων μπορεί να αναστείλει τη βλάστηση των σπόρων, να περιορίσει τη βιοσύνθεση της χλωροφύλλης και να μειώσει τη φωτοσυνθετική απόδοση [Münzel et al., 2022]. Με την παρουσία υδρογονανθράκων στο έδαφος, συχνά παρατηρείται χλώρωση, αναστολή της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος και μείωση της παραγόμενης βιομάζας. Σε πολλές περιπτώσεις, οι ρύποι που απορροφώνται από τα φυτά συσσωρεύονται στους βρώσιμους φυτικούς ιστούς, επιτρέποντας έτσι τη μεταφορά τους στην τροφική αλυσίδα. Οι καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε ρυπασμένα εδάφη παρουσιάζουν συχνά αυξημένα επίπεδα καδμίου, μόλυβδου ή αρσενικού, τα οποία συνεπάγονται έκθεση του ανθρώπου και των ζώων μέσω της διατροφής [Diana Che Lat et al., 2023]. Η μεταφορά αυτή από το έδαφος στους φυτικούς οργανισμούς αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους μηχανισμούς μέσω των οποίων η ρύπανση του εδάφους υπονομεύει την ασφάλεια των τροφίμων και την ανθρώπινη υγεία.

4.2.3 Μικροοργανισμοί του Εδάφους και Βιογεωχημικοί Κύκλοι

Τα υγιή εδάφη φιλοξενούν πολύπλοκες μικροβιακές κοινότητες που ρυθμίζουν τους κύκλους θρεπτικών συστατικών, την αποδόμηση της οργανικής ύλης και την καταστολή ασθενειών. Η ρύπανση διαταράσσει αυτές τις κοινότητες, συχνά μειώνοντας την μικροβιακή ποικιλότητα και τροποποιώντας τη μεταβολική δραστηριότητα [Münzel et al., 2022].

Τα βαρέα μέταλλα μπορούν να αναστείλουν ένζυμα κρίσιμα για τη δέσμευση αζώτου και την ορυκτοποίηση της οργανικής ύλης, ενώ οι πετρελαιοειδείς υδρογονάνθρακες δημιουργούν αναερόβια μικροπεριβάλλοντα που ευνοούν έναν περιορισμένο αριθμό οργανισμών ικανών να διασπούν υδρογονάνθρακες. Η απώλεια μικροβιακής λειτουργίας μειώνει την ανθεκτικότητα του εδάφους και υπονομεύει τις οικοσυστημικές υπηρεσίες, όπως η δέσμευση άνθρακα και η φυσική ικανότητα αναμόρφωσης [FAO and UNEP, 2021].

4.2.4 Συσσωρευτικές και Συνεργιστικές Επιπτώσεις

Σπάνια τα εδάφη ρυπαίνονται από έναν μόνο ρύπο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, πολλαπλοί ρύποι συνυπάρχουν, δημιουργώντας πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις που ενισχύουν τους κινδύνους. Για παράδειγμα, η παρουσία υδρογονανθράκων παράλληλα με βαρέα μέταλλα μπορεί να αυξήσει την κινητικότητα των μετάλλων τροποποιώντας τις συνθήκες αναγωγής-οξειδωσης και τη δέσμευσή τους από την οργανική ύλη κρέατος [Münzel et al., 2022].

Παρομοίως, η συνδυασμένη έκθεση σε φυτοφάρμακα και λιπάσματα μπορεί να επιταχύνει τις ανισορροπίες θρεπτικών συστατικών και να προκαλέσει περαιτέρω πίεση στις μικροβιακές κοινότητες. Αυτές οι συσσωρευτικές και συνεργιστικές επιπτώσεις περιπλέκουν τόσο την πρόβλεψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και το σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών αποκατάστασης [FAO and UNEP, 2021].

4.2.5 Επιπτώσεις στη Βιοποικιλότητα του Εδάφους και στις Οικοσυστημικές Υπηρεσίες

Τα υγιή εδάφη υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα μικροοργανισμών, ασπόνδυλων και φυτικών ειδών, τα οποία συμβάλλουν στους κύκλους θρεπτικών στοιχείων, στην αποδόμηση της οργανικής ύλης και στη διαμόρφωση της δομής του εδάφους. Η ρύπανση διαταράσσει αυτές τις βιολογικές διεργασίες. Για παράδειγμα, οι πετρελαιοειδείς υδρογονάνθρακες μειώνουν τη μικροβιακή ποικιλότητα, ευνοώντας βακτήρια ικανά να διασπούν υδρογονάνθρακες ενώ καταστέλλουν ευαίσθητα είδη [Diana Che Lat et al., 2023]. Τα βαρέα μέταλλα μπορούν να αναστείλουν τη δραστηριότητα ενζύμων στους μικροοργανισμούς του εδάφους, μειώνοντας τη δέσμευση αζώτου και την αποδόμηση της οργανικής ύλης.

Η απώλεια της βιοποικιλότητας του εδάφους αποδυναμώνει τις οικοσυστημικές υπηρεσίες, όπως η δέσμευση άνθρακα, η διήθηση νερού και η ρύθμιση ασθενειών. Με την πάροδο του χρόνου, τα ρυπασμένα εδάφη χάνουν την ανθεκτικότητά τους, καθιστάμενα πιο ευάλωτα στη διάβρωση, τη συμπίκνωση και περαιτέρω υποβάθμιση [FAO and UNEP, 2021].

4.2.6 Ποιότητα Νερού και Υδρολογικές Επιπτώσεις

Μία από τις σοβαρότερες περιβαλλοντικές συνέπειες της ρύπανσης του εδάφους είναι η επίδρασή της στους υδάτινους πόρους. Τα διηθήματα από ρυπασμένα εδάφη μπορούν να διεισδύσουν σε υπόγεια υδροφόρα στρώματα, ρυπαίνοντας τα αποθέματα πόσιμου νερού. Τα νιτρικά από γεωργικά εδάφη αποτελούν μερικούς από τους πιο κοινούς ρύπους υπόγειων υδάτων, προκαλώντας ευτροφισμό σε επιφανειακά ύδατα και άμεσους κινδύνους για την υγεία, όπως η μεθαιμοσφαιριναιμία («σύνδρομο μπλε βρέφους»).

Οι οργανικοί ρύποι, ιδιαίτερα οι πετρελαιοειδείς υδρογονάνθρακες, δημιουργούν αδιαπέρατα στρώματα που τροποποιούν τις αλληλεπιδράσεις εδάφους–νερού και συμβάλλουν στη μείωση της διήθησης, σε τοπικές πλημμύρες ή υδροκρατήματα. Σε ξηρές και ημιξηρές περιοχές, όπου η εξάρτηση από τα υπόγεια ύδατα είναι υψηλή, η ρύπανση αυτή αποτελεί υπαρκτικό κίνδυνο για τις κοινότητες που βασίζονται στα υδροφόρα στρώματα για πόσιμο νερό και άρδευση κρέατος [Münzel et al., 2022].

4.2.7 Μακροπρόθεσμες Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

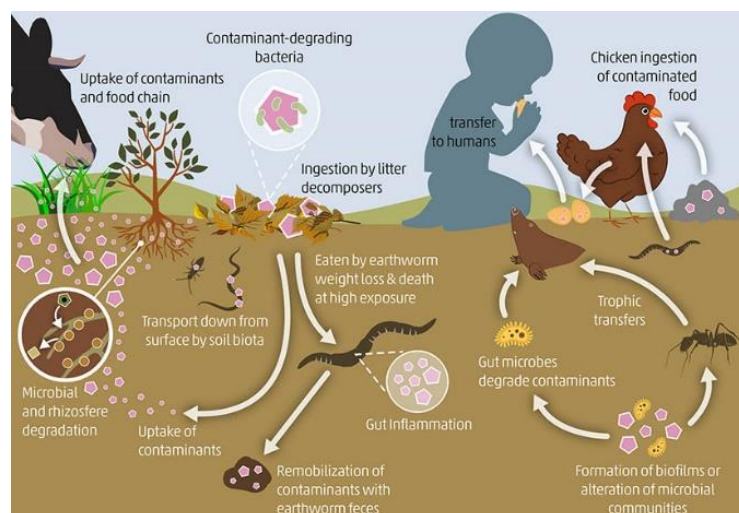
Η ρύπανση του εδάφους δεν περιορίζεται στο σημείο προέλευσής της. Τα ρυπασμένα σωματίδια σκόνης μπορούν να αιωρηθούν, μεταφέροντας βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις σε μεγάλες αποστάσεις [Diana Che Lat et al., 2023]. Παρομοίως, οι ρύποι που εισέρχονται στα ποτάμια μέσω απορροών μπορούν να διασχίσουν υδρολογικές λεκάνες, επηρεάζοντας οικοσυστήματα μακριά από την αρχική πηγή. Οι επίμονοι οργανικοί ρύποι (POPs), όπως οι διοξίνες και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs), είναι ιδιαίτερα ανησυχητικοί λόγω της ικανότητάς τους να παραμένουν σταθεροί και να συσσωρεύονται σε εδάφη και ιζήματα σε διάφορες ηπείρους [FAO and UNEP, 2021].

4.2.8 Κίνδυνοι για την Υγεία-Ανθρώπινη έκθεση

Η ανθρώπινη έκθεση σε ρυπασμένο έδαφος πραγματοποιείται μέσω τριών κύριων οδών [FAO and UNEP, 2021]:

1. **Δερματική επαφή** κατά την αγροτική εργασία, τον κηπουρικό χειρισμό ή δραστηριότητες αναψυχής.
2. **Εισπνοή** ρυπασμένης σκόνης, ιδιαίτερα σε ξηρές περιοχές ή κατά τις οικοδομικές εργασίες.
3. **Κατάποση**, είτε άμεσα μέσω τυχαίας κατάποσης εδάφους (συχνό στα παιδιά) είτε έμμεσα μέσω κατανάλωσης ρυπασμένων τροφίμων και νερού

Αυτές οι οδοί έκθεσης εξασφαλίζουν ότι ακόμη και πληθυσμοί που δεν εργάζονται άμεσα με ρυπασμένα εδάφη μπορούν να υποστούν μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία.



Εικόνα 13: Ρύπανση εδάφους και υγεία [Πηγή: (FAO and UNEP, 2021)]

4.2.9 Βαρέα Μέταλλα και Τοξικά Στοιχεία

Τα βαρέα μέταλλα συγκαταλέγονται στους πιο επικίνδυνους ρυπαντές του εδάφους λόγω της επίμονης παρουσίας τους και της δυνατότητας βιοσυσσώρευσης. Η έκθεση σε **μόλυβδο** επηρεάζει την νευρολογική ανάπτυξη των παιδιών, προκαλεί υπέρταση και βλάπτει το νεφρικό σύστημα. Το **κάδμιο** συσσωρεύεται στα νεφρά και τα οστά, οδηγώντας σε σκελετικές παραμορφώσεις και νεφρική δυσλειτουργία. Η έκθεση σε **υδράργυρο**, ιδιαίτερα στη μορφή του οργανικού μεθυλδραργύρου, είναι εξαιρετικά νευροτοξική και μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη του εμβρύου [FAO and UNEP, 2021]. Το **αρσενικό**, που συχνά βρίσκεται σε υπόγεια ύδατα λόγω εκπλύσεων από το έδαφος, προκαλεί δερματικές βλάβες, καρδιαγγειακά νοσήματα και πολλαπλούς τύπους καρκίνου [Diana Che Lat et al., 2023]. Η μακρά περίοδος λανθάνουσας εμφάνισης των ασθενειών που σχετίζονται με το αρσενικό το καθιστά ιδιαίτερα ύπουλο. Κοινότητες στο Μπαγκλαντές, στη Δυτική Βεγγάλη και σε τμήματα της Λατινικής Αμερικής αντιμετωπίζουν σοβαρές κρίσεις δημόσιας υγείας λόγω χρόνιας έκθεσης σε αρσενικό από ρυπασμένα εδάφη και υδροφόρα στρώματα [European Environment Agency, 2022].

4.2.10 Οργανικοί Ρύποι

Οι πετρελαιοειδείς υδρογονάνθρακες περιέχουν ενώσεις όπως το βενζόλιο, η τολουόλη, η αιθυλοβενζόλη και η ξυλένη (BTEX), οι οποίες είναι γνωστοί καρκινογόνοι και νευροτοξικοί παράγοντες. Τα φυτοφάρμακα, ιδιαίτερα οι οργανοφωσφορικές ενώσεις και τα καρβαμικά, συνδέονται με διαταραχές του ενδοκρινικού συστήματος, επιβλαβείς επιδράσεις στην αναπαραγωγή και νευρολογική βλάβη [Münzel et al., 2022]. Οι επίμονοι οργανικοί ρύποι (POPs), όπως τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) και οι διοξίνες, συσσωρεύονται στους λιπώδεις ιστούς και σχετίζονται με καρκίνους, δυσλειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος και ορμονικές διαταραχές [European Environment Agency, 2022].

4.2.11 Ευάλωτοι Πληθυσμοί

Τα παιδιά αποτελούν την πιο ευάλωτη ομάδα λόγω υψηλότερων ποσοστών κατάποσης εδάφους και της ανάπτυξης των ανοσοποιητικών και νευρικών τους συστημάτων. Οι έγκυες γυναίκες και οι ηλικιωμένοι διατρέχουν επίσης αυξημένο κίνδυνο λόγω μεγαλύτερης ευαισθησίας ή προϋπαρχουσών παθήσεων [FAO and UNEP, 2021]. Οι κοινότητες χαμηλού εισοδήματος επηρεάζονται δυσανάλογα, καθώς είναι πιο πιθανό να ζουν κοντά σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, χωματερές ή σε περιθωριακά εδάφη με ιστορική ρύπανση, ενώ συχνά στερούνται πρόσβασης σε υγειονομική περίθαλψη ή ασφαλείς εναλλακτικές [FAO and UNEP, 2021].

4.2.12 Τεκμηριωμένα Επιδημιολογικά Στοιχεία

Πολλές μελέτες έχουν επιβεβαιώσει τη σύνδεση μεταξύ ρυπασμένων εδαφών και αρνητικών επιπτώσεων στην υγεία. Για παράδειγμα, κάτοικοι κοντά σε εγκαταστάσεις ανακύκλωσης ηλεκτρονικών αποβλήτων στην Κίνα παρουσίασαν αυξημένα επίπεδα μολύβδου στο αίμα, τα οποία συνδέθηκαν με γνωστικές διαταραχές στα παιδιά [FAO and UNEP, 2021]. Στο Μαρόκο, τα βοοειδή που έβοσκαν σε ρυπασμένα εδάφη κοντά σε εγκαταλελειμμένα ορυχεία παρουσίασαν αυξημένες συγκεντρώσεις καδμίου, οι οποίες μεταφέρθηκαν στη συνέχεια στον άνθρωπο μέσω της κατανάλωσης κρέατος [Münzel et al., 2022]. Στην Ευρώπη, μελέτες έχουν συσχετίσει τη διαμονή κοντά σε βιομηχανικά ρυπασμένες περιοχές με αυξημένα ποσοστά συγγενών ανωμαλιών, χρόνιων αναπνευστικών νοσημάτων και πρόωρης θνησιμότητας [European Environment Agency, 2022].

4.2.13 Αναδυόμενοι Ρύποι και Αντοχή στα Αντιμικροβιακά

Οι αναδυόμενοι ρύποι, όπως οι ενώσεις περ- και πολυφθοροαλκυλίων (PFAS), τα υπολείμματα φαρμάκων και τα μικροπλαστικά, αποτελούν μια νέα πηγή ανησυχίας. Οι PFAS είναι εξαιρετικά επίμονοι και έχουν συνδεθεί με ηπατική βλάβη, καταστολή του ανοσοποιητικού συστήματος και δυσλειτουργία του θυρεοειδούς [Münzel et al., 2022]. Τα μικροπλαστικά στο έδαφος μπορούν να προσροφούν άλλους ρύπους, δημιουργώντας σύνθετα σενάρια έκθεσης [FAO and UNEP, 2021]. Επιπλέον, τα ρυπασμένα εδάφη μπορούν να φιλοξενούν γονίδια αντοχής σε αντιμικροβιακά λόγω της διάδοσης αντιβιοτικών από απόβλητα και κοπριά. Αυτά τα γονίδια μπορούν να μεταφερθούν σε ανθρώπινα παθογόνα, θέτοντας μια παγκόσμια πρόκληση για τη δημόσια υγεία [Diana Che Lat et al., 2023].

4.2.14 Ολοκληρωμένη Προσέγγιση

Οι περιβαλλοντικοί και υγειονομικοί κίνδυνοι της ρύπανσης του εδάφους είναι αλληλένδετοι. Η υποβάθμιση των εδαφών μειώνει την αγροτική παραγωγικότητα, υπονομεύοντας την επισιτιστική ασφάλεια και αναγκάζοντας τις κοινότητες να καταναλώνουν ρυπασμένα προϊόντα. Οι ρύποι που εισέρχονται στα υδάτινα συστήματα

διευρύνουν τον κίνδυνο για ολόκληρους πληθυσμούς. Τα υγειονομικά βάρη επιβαρύνουν τα συστήματα δημόσιας υγείας, ενώ η οικολογική υποβάθμιση μειώνει την ανθεκτικότητα των φυσικών συστημάτων στις κλιματικές αλλαγές και άλλους στρεσογόνους παράγοντες. Η αναγνώριση αυτών των συνδέσεων υπογραμμίζει την ανάγκη για ολοκληρωμένες στρατηγικές που αντιμετωπίζουν τη ρύπανση όχι μόνο ως περιβαλλοντικό ζήτημα, αλλά και ως καθοριστικό παράγοντα της ανθρώπινης υγείας και της κοινωνικοοικονομικής σταθερότητας [Diana Che Lat et al., 2023].

4.3 Ανάγκη Αποκατάστασης

Η ανθεκτικότητα, η τοξικότητα και η κινητικότητα πολλών ρυπαντών του εδάφους καθιστούν την αποκατάσταση κρίσιμο βήμα στη διαχείριση μολυσμένων χώρων. Χωρίς παρέμβαση, οι ρυπαντές μπορούν να συνεχίσουν να διηθούνται στα υπόγεια ύδατα, να διασπείρονται μέσω διάβρωσης ή μεταφοράς σκόνης και να συσσωρεύονται στις τροφικές αλυσίδες, επιδεινώνοντας με την πάροδο του χρόνου τους περιβαλλοντικούς και δημόσιους κινδύνους υγείας. Η αποκατάσταση είναι επομένως απαραίτητη όχι μόνο για την αποκατάσταση της οικολογικής λειτουργίας, αλλά και για τη διασφάλιση ασφαλούς χρήσης γης και την προστασία των κοινοτήτων από μακροχρόνια έκθεση [Bini, 2011].

4.3.1 Στόχοι της Αποκατάστασης

Οι κύριοι στόχοι της αποκατάστασης του εδάφους είναι οι εξής [Claude, 2022]:

- Μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπαντών σε αποδεκτά επίπεδα για την προβλεπόμενη χρήση της γης.
- Αποτροπή περαιτέρω μετανάστευσης των ρύπων στο περιβάλλον γύρω από τον χώρο.
- Αποκατάσταση των φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων του εδάφους για την υποστήριξη της βλάστησης και των οικοσυστημικών υπηρεσιών.
- Διευκόλυνση της ασφαλούς αναπτυξιακής αξιοποίησης ή της συνεχιζόμενης χρήσης του χώρου.

4.3.2 Κοινωνικοοικονομικά Οφέλη της Αποκατάστασης

Η αποκατάσταση μετατρέπει υποβαθμισμένες περιοχές σε πολύτιμα περιουσιακά στοιχεία για την κοινότητα. Η αναβάθμιση των «brownfields» μπορεί να ενισχύσει τις τοπικές οικονομίες, να παρέχει πράσινους χώρους και να περιορίσει την αστική επέκταση μέσω της επαναχρησιμοποίησης υφιστάμενων εκτάσεων. Η προληπτική απορρύπανση μειώνει τα έξοδα υγειονομικής περίθαλψης, περιορίζοντας την έκθεση σε τοξικές ουσίες, και αποτρέπει τις νομικές ευθύνες που συνδέονται με μολυσμένες ιδιοκτησίες [Robinson et al., 2024].

4.3.3 Σημασία της Παρακολούθησης και της Συντήρησης

Η αποκατάσταση δεν τελειώνει με την αρχική απορρύπανση. Η μακροχρόνια παρακολούθηση εξασφαλίζει ότι τα επίπεδα των ρύπων παραμένουν εντός ασφαλών ορίων και ότι τα αποκαταστημένα εδάφη συνεχίζουν να λειτουργούν σύμφωνα με τον προορισμό τους. Τα προγράμματα παρακολούθησης συχνά περιλαμβάνουν περιοδική δειγματοληψία εδάφους, έλεγχο υπόγειων υδάτων και επιθεώρηση της βλάστησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, πρέπει να διατηρούνται τεχνικά μέτρα όπως καλύμματα, στρώματα επένδυσης ή συστήματα αποστράγγισης για την αποτροπή επαναρύπανσης [Chen, Gao and Li, 2025].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Τεχνολογίες και Μέθοδοι Αποκατάστασης

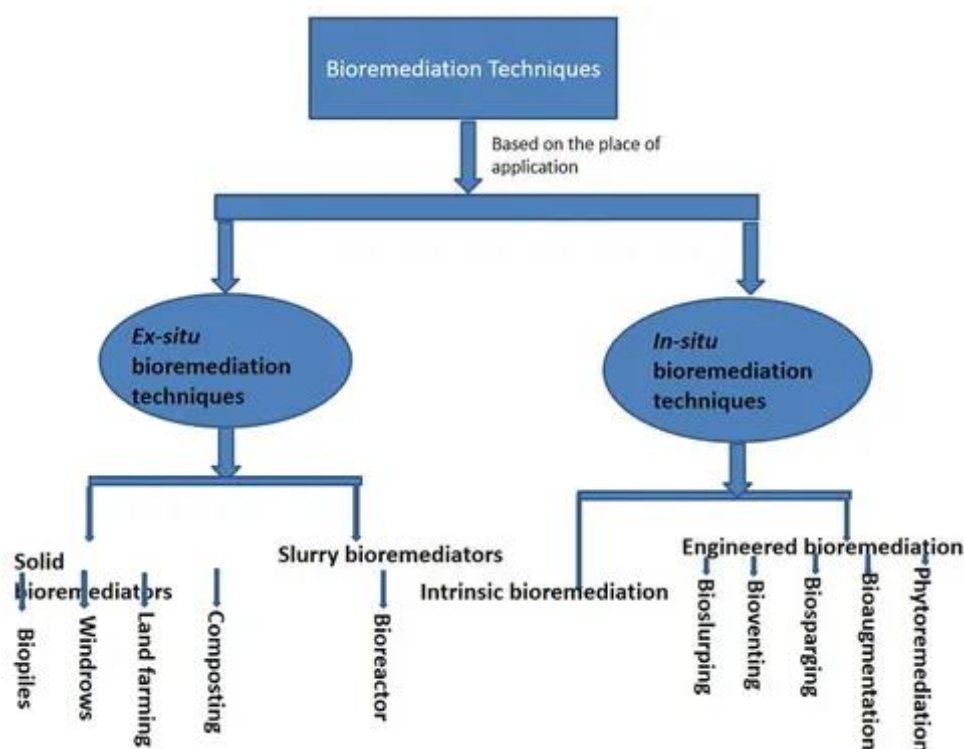
Οι τεχνολογίες αποκατάστασης αποτελούν ένα ευρύ σύνολο προσεγγίσεων που αποσκοπούν στον μετριασμό, την ακινητοποίηση ή την απομάκρυνση ρύπων από επιμολυσμένα εδάφη. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αποκατάστασης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του ρύπου, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η οικονομική βιωσιμότητα και οι κανονιστικές απαιτήσεις. Σε γενικές γραμμές, οι στρατηγικές αποκατάστασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε βιολογικές, φυσικοχημικές και καινοτόμες προσεγγίσεις. Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται σε τέσσερις βασικούς τομείς: βιοαποκατάσταση, έκπλυση εδάφους, σταθεροποίηση/στερεοποίηση και καινοτόμες μεθόδους. Για κάθε μέθοδο αναλύονται οι αρχές, οι διεργασίες, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί, ακολουθούμενα από την εξέταση εφαρμογών πεδίου και της μακροπρόθεσμης αποτελεσματικότητάς τους.

5.1 Βιοαποκατάσταση

Η βιοαποκατάσταση αξιοποιεί ζωντανούς οργανισμούς -κυρίως μικροοργανισμούς και φυτά- για την αποδόμηση, αποτοξικοποίηση ή ακινητοποίηση ρύπων στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα. Βασίζεται σε φυσικές διεργασίες για τη μείωση των συγκεντρώσεων ρύπων, προσφέροντας μια βιώσιμη, οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών μηχανικών μεθόδων. Σε αντίθεση με ορισμένες τεχνικές που απλώς μεταφέρουν τους ρύπους σε άλλο μέσο, η βιοαποκατάσταση μπορεί συχνά να προσφέρει μια μόνιμη, *in situ* λύση, εξαλείφοντας τους ρύπους απευθείας στο σημείο ρύπανσης [Verma, 2021].

Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική έναντι ενός ευρέος φάσματος ρύπων, συμπεριλαμβανομένων πετρελαϊκών υδρογονανθράκων, πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs), διαλυτών, φυτοφαρμάκων, βαρέων μετάλλων και ραδιονουκλιδίων. Τα οργανικά συστατικά συνήθως μεταλλοποιούνται σε αβλαβή παραπροϊόντα, όπως νερό και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ οι ανόργανες ενώσεις μπορούν να μετατραπούν σε λιγότερο κινητές ή λιγότερο τοξικές μορφές. Η αποτελεσματικότητα της βιοαποκατάστασης επηρεάζεται έντονα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως το pH του εδάφους, η θερμοκρασία, η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων και η συγκέντρωση οξυγόνου, παράγοντες που καθορίζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και τους ρυθμούς αποδόμησης [Verma, 2021].

Η βιοαποκατάσταση διακρίνεται σε *ex situ* και *in situ* προσεγγίσεις.



Εικόνα 14: Τεχνικές Βιοαποκατάστασης [Πηγή: Alori et al., 2022]

5.1.1 Ex Situ Βιοαποκατάσταση

Η ex situ βιοαποκατάσταση περιλαμβάνει την απομάκρυνση του επιμολυσμένου εδάφους και την επεξεργασία του σε διαφορετική τοποθεσία υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Αν και η μέθοδος αυτή επιτρέπει καλύτερη παρακολούθηση και έλεγχο της διαδικασίας, είναι συχνά δαπανηρή και απαιτητική από πλευράς υλικοτεχνικής υποστήριξης, λόγω των αναγκών εκσκαφής και μεταφοράς. Επιπλέον, ενέχει τον κίνδυνο τυχαίας διασποράς ρύπων κατά τη διαχείριση. Παρά τις προκλήσεις αυτές, οι ex situ μέθοδοι είναι αποτελεσματικές όταν οι ρύποι βρίσκονται σε μεγάλο βάθος ή όταν απαιτείται ταχεία αποκατάσταση [Verma, 2021].

5.1.2 Επεξεργασία σε αιώρημα (Slurry-Phase Treatment)

Στην τεχνική της βιοαποκατάστασης σε αιώρημα, το επιμολυσμένο έδαφος αναμιγνύεται με νερό και πρόσθετα σε έναν μεγάλο βιοαντιδραστήρα. Οι αυτόχθονες μικροοργανισμοί διατηρούνται σε αιώρηση, ενώ προστίθενται βασικά θρεπτικά συστατικά και οξυγόνο για την ενίσχυση της βιοαποδόμησης. Το ελεγχόμενο περιβάλλον μέσα στον βιοαντιδραστήρα εξασφαλίζει ταχεία και αποδοτική διάσπαση των ρύπων, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα χρήσιμη για αργιλώδη και λεπτόκοκκα εδάφη. Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας, το νερό διαχωρίζεται, υποβάλλεται σε περαιτέρω καθαρισμό εφόσον απαιτείται, και το καθαρισμένο έδαφος επιστρέφει στο περιβάλλον [Sales da Silva et al., 2020].

5.1.3 Επεξεργασία σε στερεά φάση (Solid-Phase Treatment)

Τα συστήματα στερεάς φάσης επεξεργάζονται τα εδάφη σε υπέργειες μονάδες, όπου ρυθμίζονται η υγρασία, τα θρεπτικά συστατικά και ο αερισμός. Οι μέθοδοι αυτές απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους επεξεργασίας και εκτεταμένες εκτάσεις γης, αλλά είναι απλούστερες στη λειτουργία τους [Sales da Silva et al., 2020].

Κύριες τεχνικές περιλαμβάνουν [Verma, 2021]:

- **Αγροτεχνική εφαρμογή (Landfarming):** Το επιμολυσμένο έδαφος απλώνεται σε λεπτά στρώματα πάνω σε προετοιμασμένο έδαφος και οργώνεται περιοδικά για να ενισχυθεί ο αερισμός και η μικροβιακή δραστηριότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις προστίθενται θρεπτικά συστατικά για την επιτάχυνση της αποδόμησης.
- **Σωροί βιοαποκατάστασης (Biopiles / Biocells):** Τα προερχόμενα από εκσκαφή εδάφη, κυρίως όσα έχουν μολυνθεί με πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες, συγκεντρώνονται σε σωρούς, μέσα στους οποίους εγκαθίστανται σωληνώσεις αερισμού για την παροχή οξυγόνου. Η υγρασία και τα θρεπτικά στοιχεία ρυθμίζονται ώστε να υποστηρίζεται ο μικροβιακός μεταβολισμός.
- **Κομποστοποίηση (Composting):** Τα επιμολυσμένα εδάφη αναμειγνύονται με οργανικά υλικά, όπως άχυρο ή κοπριά, ώστε να βελτιστοποιείται η διαθεσιμότητα αέρα και θρεπτικών συστατικών. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα ταχεία, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις η αποκατάσταση μπορεί να επιτευχθεί μέσα σε λίγες εβδομάδες.

5.1.4 In Situ Βιοαποκατάσταση

Οι in situ τεχνικές αντιμετωπίζουν τη ρύπανση του εδάφους απευθείας στο σημείο, χωρίς εκσκαφή, περιορίζοντας έτσι τις διαταραχές στο περιβάλλον. Οι μέθοδοι αυτές είναι γενικά λιγότερο δαπανηρές, προκαλούν μικρότερη περιβαλλοντική όχληση και ενέχουν μειωμένο κίνδυνο διασποράς ρύπων κατά τη μεταφορά. Η in situ βιοαποκατάσταση βασίζεται είτε στους φυσικούς μικροβιακούς πληθυσμούς είτε σε ενισχυμένες παρεμβάσεις μέσω μηχανικής υποστήριξης [Sales da Silva et al., 2020].

5.1.5 Εγγενής βιοαποκατάσταση (Intrinsic Bioremediation)

Γνωστή και ως φυσική εξασθένηση (natural attenuation), η εγγενής βιοαποκατάσταση αξιοποιεί τους αυτόχθονες μικροοργανισμούς για την αποδόμηση ρύπων χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, βασιζόμενη αποκλειστικά σε ευνοϊκές φυσικές συνθήκες. Παρά το χαμηλό κόστος της, η μέθοδος αυτή απαιτεί παρατεταμένα χρονικά διαστήματα και συστηματική παρακολούθηση, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι ρύποι αποδομούνται πριν υπάρξει πιθανότητα διασποράς τους [Sales da Silva et al., 2020].

5.1.6 Ενισχυμένη In Situ Βιοαποκατάσταση (Enhanced In Situ Bioremediation)

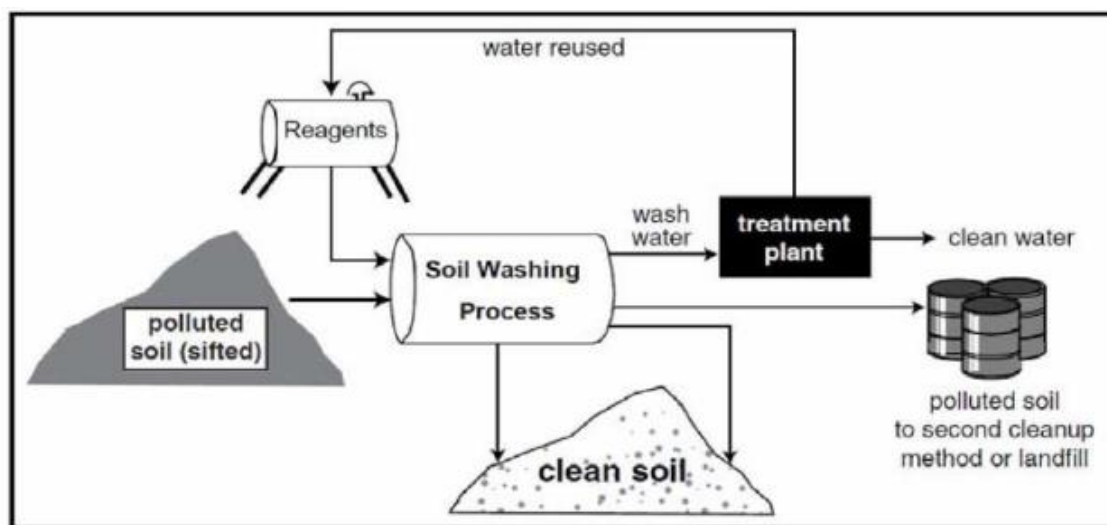
Οι μηχανικά ενισχυμένες μέθοδοι επιταχύνουν τις φυσικές διεργασίες τροποποιώντας τις περιβαλλοντικές συνθήκες ή προσθέτοντας μικροοργανισμούς. Περιλαμβάνονται παραδείγματα όπως [Verma, 2021]:

- **Βιοαερισμός (Bioventing):** Χαμηλής ροής αέρας εγχέεται σε αεριζόμενες ζώνες κορεσμένου εδάφους για την τόνωση της αερόβιας μικροβιακής αποδόμησης υδρογονανθράκων.
- **Βιοέγχυση αέρα (Biosparging):** Αέρας εγχέεται σε κορεσμένα στρώματα εδάφους για την ενίσχυση της βιοαποδόμησης πτητικών και ημιπτητικών ενώσεων.
- **Βιοαναρρόφηση (Bioslurping):** Συνδυάζει τον βιοαερισμό με αντλήσεις ενισχυμένες με κενό για την ανάκτηση υδρογονανθράκων σε ελεύθερη φάση, ενώ παρέχει οξυγόνο για τη μικροβιακή δραστηριότητα.
- **Βιοενίσχυση (Bioaugmentation):** Περιλαμβάνει την προσθήκη συγκεκριμένων μικροβιακών στελεχών ή μικροβιακών κοινοτήτων σε μολυσμένους χώρους για την επιτάχυνση της αποδόμησης, ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιβάλλοντα πλούσια σε υδρογονάνθρακες.

5.2 Εδαφοπλύση (Soil Washing)

Η πλύση εδάφους είναι μια μηχανική και χημική διαδικασία σχεδιασμένη για την εξαγωγή και συγκέντρωση ρύπων από το έδαφος, ιδιαίτερα βαρέων μετάλλων και επίμονων οργανικών ρυπαντών. Σε αντίθεση με στρατηγικές ακινητοποίησης, η πλύση εδάφους στοχεύει στη μόνιμη απομάκρυνση των ρύπων, είτε μέσω διαχωρισμού των μολυσμένων σωματιδίων είτε μέσω διαλυτοποίησης των ρύπων σε υδατικό διάλυμα. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται *ex situ*, απαιτώντας εκσκαφή και επεξεργασία σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις ή σε μονάδες επί τόπου.

Οι διαδικασίες πλύσης εδάφους διακρίνονται σε δύο ευρείες κατηγορίες: **φυσικός διαχωρισμός (physical separation)** και **χημική εξαγωγή (chemical extraction)**. Συχνά, για μέγιστη αποτελεσματικότητα, εφαρμόζεται συνδυασμός και των δύο μεθόδων [Dermont et al., 2008].



Εικόνα 15: Διάγραμμα Πλύσης Εδάφους [Πηγή: Rasheed, Patil and Dayal, 2013]

5.2.1 Τεχνικές Φυσικού Διαχωρισμού

Οι μέθοδοι αυτές προέρχονται από την τεχνολογία εμπλουτισμού μεταλλευμάτων και αξιοποιούν τις φυσικές διαφορές μεταξύ μολυσμένων και μη μολυσμένων σωματιδίων, όπως το μέγεθος, η πυκνότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα και οι επιφανειακές ιδιότητες. Κύριες τεχνικές περιλαμβάνουν [Dermont et al., 2008]:

- **Υδροδυναμική ταξινόμηση (Hydrodynamic Classification):** Χρησιμοποιεί ροή νερού ή φυγόκεντρη δύναμη για τον διαχωρισμό σωματιδίων βάσει μεγέθους και πυκνότητας, με συχνή χρήση υδροκυκλώνων ή στηλών εκλούσεως (elutriation columns).
- **Βαρύτητα-συγκέντρωση (Gravity Concentration):** Διαχωρίζει σωματίδια με βάση τις διαφορές πυκνότητας, μέσω συσκευών όπως jig, σπειροειδείς διαχωριστές (spirals) ή δονούμενα τραπέζια (shaking tables). Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για σωματίδια που περιέχουν μόλυβδο ή χαλκό.
- **Αφρώδης επίπλευση (Froth Flotation):** Αξιοποιεί τις διαφορές στην υδροφοβικότητα της επιφάνειας. Οι φυσαλίδες αέρα προσκολλώνται στα σωματίδια που περιέχουν μέταλλα, τα ανυψώνουν στην επιφάνεια και απομακρύνονται.
- **Μαγνητικός διαχωρισμός (Magnetic Separation):** Απομακρύνει φερρομαγνητικά σωματίδια που συνδέονται με ρύπους όπως το χρώμιο ή το νικέλιο.
- **Ηλεκτροστατικός διαχωρισμός (Electrostatic Separation):** Χρησιμοποιεί ηλεκτρικά φορτία για την απομόνωση σωματιδίων πλούσιων σε ρύπους, αν και εφαρμόζεται σπανιότερα.

- **Τριβο-καθαρισμός (Attrition Scrubbing):** Χρησιμοποιεί μηχανική τριβή για τον καθαρισμό των επιφανειών των σωματιδίων, βελτιώνοντας έτσι τον επακόλουθο φυσικό διαχωρισμό ή τη χημική εκχύλιση.

Ο φυσικός διαχωρισμός είναι καταλληλότερος για εδάφη με υφή που κυριαρχείται από άμμο, όπου οι ρύποι είναι δεσμευμένοι σε διακριτά σωματίδια. Οι περιορισμοί της μεθόδου περιλαμβάνουν τη μειωμένη αποτελεσματικότητα σε λεπτόκοκκα εδάφη καθώς και σε περιπτώσεις όπου τα μέταλλα είναι ισχυρά προσροφημένα στις επιφάνειες των εδαφικών σωματιδίων [Lee et al., 2021].

5.2.2 Τεχνικές Χημικής Εκχύλισης

Η χημική εκχύλιση χρησιμοποιεί χημικούς αντιδραστήρες για την αποδιαλυτοποίηση (solubilization) των μετάλλων και τη μεταφορά τους σε υδατικά διαλύματα. Βασικές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν [Dermont et al., 2008].

Όξινη εκχύλιση (Acid Leaching): Χρησιμοποιεί ισχυρά οξέα (π.χ. HCl , H_2SO_4) για τη διάλυση μεταλλικών ενώσεων. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική αλλά καταστρεπτική για τη δομή του εδάφους.

- **Διαλύματα αλάτων (Salt Solutions):** Χρησιμοποιούν χλωρίδια όπως CaCl_2 ή NaCl για τον σχηματισμό διαλυτών μεταλλικών συμπλόκων, προκαλώντας συνήθως μικρότερη βλάβη στο έδαφος σε σύγκριση με τα ισχυρά οξέα.
- **Χηλικοί παράγοντες (Chelating Agents):** Συνθετικές ενώσεις όπως το EDTA σχηματίζουν σταθερά σύμπλοκα με μέταλλα, διευκολύνοντας την απομάκρυνσή τους. Ωστόσο, το υψηλό κόστος και η περιβαλλοντική τους εμμονή αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα.
- **Εκχύλιση με τη συνδρομή επιφανειοδραστικών ουσιών (Surfactant-Assisted Extraction):** Ενισχύει την απορόφηση και απομάκρυνση μετάλλων και οργανικών ρύπων, ιδιαίτερα όταν αυτοί συνδέονται με οργανική ύλη.
- **Μεταβολή οξειδοαναγωγικών συνθηκών (Redox Manipulation):** Χρησιμοποιεί οξειδωτικούς ή αναγωγικούς παράγοντες για τη μετατροπή των μετάλλων σε πιο διαλυτές μορφές.

Οι χημικές μέθοδοι μπορούν να στοχεύσουν τόσο τα προσροφημένα όσο και τα λεπτόκοκκα κλάσματα του εδάφους, ωστόσο παράγουν μεγάλο όγκο δευτερογενών αποβλήτων και ενδέχεται να μεταβάλουν τη χημεία του εδάφους.

5.2.3 Ολοκληρωμένες Αλυσίδες Επεξεργασίας (Integrated Treatment Trains)

Στην πράξη, η πλύση εδάφους συχνά συνδυάζει φυσικές και χημικές διεργασίες. Για παράδειγμα, ο φυσικός διαχωρισμός μπορεί να συγκεντρώσει τους ρύπους σε μικρότερο

όγκο, ακολουθούμενος από χημική εκχύλιση του κλάσματος αυτού. Ο συνδυασμός αυτός μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα απομάκρυνσης των ρύπων και μειώνει τον όγκο των αποβλήτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα ανακτημένα μέταλλα μπορούν να ανακυκλωθούν, βελτιώνοντας την οικονομική βιωσιμότητα της μεθόδου [Lee et al., 2021].

5.3 Σταθεροποίηση και Στερεοποίηση (Stabilization and Solidification)

Οι μέθοδοι **σταθεροποίησης και στερεοποίησης (S/S)** εστιάζουν στην ακινητοποίηση των ρύπων εντός του εδάφους, αντί στην απομάκρυνσή τους. Οι προσεγγίσεις αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για ανόργανους ρύπους, όπως τα βαρέα μέταλλα και τα ραδιονουκλίδια, οι οποίοι είναι ανθεκτικοί στην αποδόμηση ή στην εκχύλιση. Οι τεχνικές S/S μειώνουν την κινητικότητα, τη βιοδιαθεσιμότητα και την εκχυλισιμότητα των ρύπων, ελαχιστοποιώντας έτσι τους κινδύνους για τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία [Lee et al., 2021].

5.3.1 Σταθεροποίηση (Stabilization)

Η σταθεροποίηση περιλαμβάνει τη χρήση χημικών τροποποιητών που μετατρέπουν τους ρύπους σε λιγότερο διαλυτές ή λιγότερο τοξικές μορφές. Αντιδραστήρια όπως ο ασβέστης, τα φωσφορικά άλατα και η ιπτάμενη τέφρα αντιδρούν με βαρέα μέταλλα προκαλώντας την καταβύθισή τους σε σταθερές ενώσεις. Η αποτελεσματικότητα της σταθεροποίησης εξαρτάται από τη χημεία του εδάφους, τον τύπο του ρύπου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως το pH και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό [Lee et al., 2021].

5.3.2 Στερεοποίηση (Solidification)

Η στερεοποίηση είναι μια τεχνική αποκατάστασης που εγκλείει το μολυσμένο έδαφος μέσα σε μια στερεή, σταθερή μήτρα, ώστε να αποτραπεί η κινητικότητα επικίνδυνων ουσιών. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει συνήθως την προσθήκη συνδετικών υλικών, όπως τσιμέντο Portland, ασβέστη, ιπτάμενης τέφρας ή άλλων ποζολανικών υλικών, τα οποία μειώνουν την πορώδη δομή και τη διαπερατότητα του εδάφους, «κλειδώνοντας» ουσιαστικά τους ρύπους στη θέση τους [Lee et al., 2021].

Σε αντίθεση με τη σταθεροποίηση, η οποία βασίζεται κυρίως σε χημικές αντιδράσεις που μεταβάλλουν τη διαλυτότητα των ρύπων, η στερεοποίηση δημιουργεί ένα φυσικό φράγμα που απομονώνει τους ρύπους από το περιβάλλον. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για ανόργανους ρύπους, όπως τα βαρέα μέταλλα και τα ραδιονουκλίδια, προσφέροντας μακροπρόθεσμη συγκράτηση και βελτίωση της δομικής σταθερότητας των επεξεργασμένων εδαφών [Dermont et al., 2008].

Ωστόσο, αν και η στερεοποίηση μειώνει σημαντικά την «εκχυλισιμότητα» και τους κινδύνους έκθεσης, δεν μειώνει τη συνολική μάζα των ρύπων και απαιτεί προσεκτική παρακολούθηση ώστε να διασφαλίζεται η μακροχρόνια ανθεκτικότητα έναντι

περιβαλλοντικών καταπονήσεων, όπως οι κύκλοι πήξης-τήξης, η κίνηση των υπόγειων υδάτων ή η διάβρωση του εδάφους [Lee et al., 2021].

5.3.3 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί της Σταθεροποίησης / Στερεοποίησης

Οι τεχνικές σταθεροποίησης και στερεοποίησης (S/S) προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα κατά την επεξεργασία ανόργανων ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα και τα ραδιονουκλίδια, τα οποία είναι ανθεκτικά στη βιολογική αποδόμηση. Με τη χημική δέσμευση ή τον εγκλεισμό των ρύπων, οι μέθοδοι S/S μειώνουν τη διαλυτότητα, την κινητικότητα και τη δυνητική πρόσληψή τους από φυτά ή οργανισμούς.

Το επεξεργασμένο έδαφος μπορεί συχνά να επαναχρησιμοποιηθεί με ασφάλεια ως υλικό επίχωσης, αποφεύγοντας έτσι το κόστος εκσκαφής και διάθεσης. Επιπλέον, οι μέθοδοι S/S είναι σχετικά απλές στην εφαρμογή και έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία τόσο σε βιομηχανικά όσο και σε αστικά περιβάλλοντα, όπως σε αποθέσεις μεταλλευτικών καταλοίπων, εδάφη επηρεασμένα από μεταλλουργικές δραστηριότητες, καθώς και σε επιμολυσμένα ιζήματα από βυθοκορήσεις [Lee et al., 2021].

Ωστόσο, πρέπει να αναγνωριστούν και οι περιορισμοί. Αν και οι τεχνικές S/S ακινητοποιούν αποτελεσματικά τους ρύπους, δεν τους απομακρύνουν από το περιβάλλον. Η μακροχρόνια παρακολούθηση είναι απαραίτητη ώστε να διασφαλίζεται ότι οι σταθεροποιημένοι ρύποι παραμένουν ακίνητοι, ιδιαίτερα υπό συνθήκες κλιματικών μεταβολών, διακυμάνσεων της στάθμης των υπόγειων υδάτων και αλλαγών στη χημεία του εδάφους. Ορισμένα πρόσθετα, όπως το τσιμέντο Portland, μπορούν να αυξήσουν την αλκαλικότητα του εδάφους και να μεταβάλουν τη δομή του, γεγονός που ενδέχεται να περιορίσει τη μελλοντική χρήση της γης.

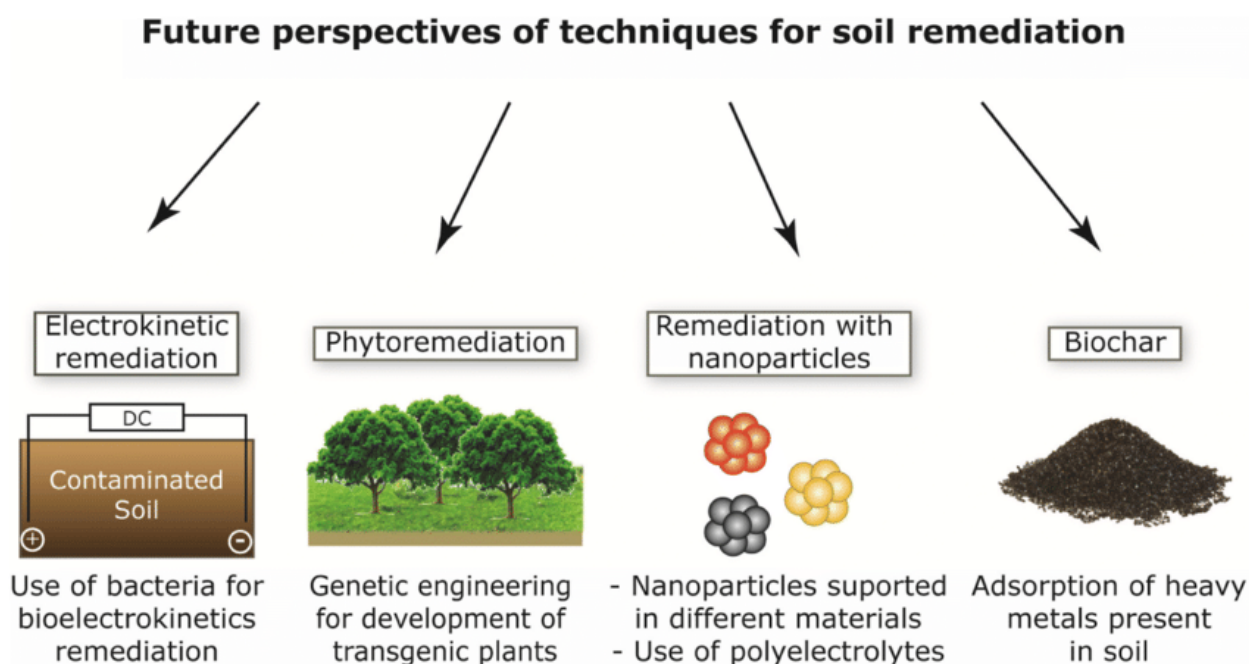
Επιπλέον, η απόδοση των μεθόδων S/S εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συμβατότητα μεταξύ του ρύπου και του επιλεγμένου σταθεροποιητικού παράγοντα. Για παράδειγμα, ορισμένα μέταλλα (όπως το αρσενικό) σταθεροποιούνται ανεπαρκώς σε μήτρες τσιμέντου και μπορεί να απαιτούν τροποποιημένα συνδετικά υλικά ή συνδυασμένες τεχνικές επεξεργασίας.

Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, οι μέθοδοι S/S παραμένουν μια ελκυστική και ευρέως εφαρμοζόμενη επιλογή αποκατάστασης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η εκσκαφή ή η απομάκρυνση των ρύπων είναι ανέφικτη. Όλο και περισσότερη έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση των συνθέσεων των συνδετικών υλικών, μέσω αλκαλικά ενεργοποιημένων υλικών, γεωπολυμερών και βιομηχανικών παραπροϊόντων, με στόχο την ενίσχυση τόσο της περιβαλλοντικής ασφάλειας όσο και της οικονομικής βιωσιμότητας [Dermont et al., 2008].

5.4 Καινοτόμες και Αναδυόμενες Μέθοδοι

Αν και οι παραδοσιακές στρατηγικές αποκατάστασης, όπως η βιοαποκατάσταση, η πλύση εδάφους και η σταθεροποίηση, έχουν εφαρμοστεί ευρέως, συχνά παρουσιάζουν περιορισμούς που σχετίζονται με το κόστος, τον απαιτούμενο χρόνο ή την εξειδίκευση ως προς το είδος του ρύπου. Ως αποτέλεσμα, οι καινοτόμες και αναδυόμενες μέθοδοι αποκατάστασης προσελκύουν ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι προσεγγίσεις αυτές ενσωματώνουν εξελίξεις στη βιολογία, τη χημεία και τη μηχανική, με στόχο την παροχή οικονομικά αποδοτικών, βιώσιμων και ευέλικτων λύσεων.

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει βασικές καινοτόμες μεθόδους, όπως η φυτοαποκατάσταση (phytoremediation), η μυκοαποκατάσταση (mycoremediation), η νανοαποκατάσταση (nanoremediation) και η ηλεκτροκινητική αποκατάσταση (electrokinetic remediation), καθώς και υβριδικές στρατηγικές που συνδυάζουν παραδοσιακές και νεότερες τεχνικές. Οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα πολύτιμες για την αντιμετώπιση σύνθετων σεναρίων ρύπανσης, όπου μία μόνο τεχνολογία μπορεί να αποδειχθεί ανεπαρκής.



Εικόνα 16: Καινοτόμες μέθοδοι βιοαποκατάστασης [Πηγή: Rodrigues, Carolina and Silva, 2020]

5.4.1 Φυτοαποκατάσταση (Phytoremediation)

Η φυτοαποκατάσταση είναι η χρήση πράσινων φυτών και των συνδεδεμένων μικροοργανισμών τους για τη μείωση, σταθεροποίηση ή απομάκρυνση ρύπων από εδάφη, ιζήματα και ύδατα. Είναι ιδιαίτερα ελκυστική για μεγάλους, ρηχούς χώρους όπου οι συγκεντρώσεις ρύπων είναι σχετικά χαμηλές αλλά εκτεταμένες. Η φυτοαποκατάσταση είναι οικονομικά αποδοτική, βασίζεται στην ηλιακή ενέργεια και είναι φιλική προς το

περιβάλλον, συχνά βελτιώνοντας παράλληλα τη γονιμότητα και την αισθητική του εδάφους, ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζει τη ρύπανση [Gautham Devendrapandi et al., 2024].

Πολλοί μηχανισμοί ορίζουν τη φυτοαποκατάσταση:

- **Φυτοεξαγωγή (Phytoextraction):** απορρόφηση ρύπων (ιδιαίτερα μετάλλων) από τους φυτικούς ιστούς, οι οποίοι στη συνέχεια συγκομίζονται και είτε απορρίπτονται είτε ανακυκλώνονται. Ειδικά είδη υπερσυσσωρευτών, όπως η *Brassica juncea*, χρησιμοποιούνται συχνά για μέταλλα όπως κάδμιο, μόλυβδο και ψευδάργυρο.
- **Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization):** ακινητοποίηση ρύπων στην περιοχή των ριζών, μειώνοντας την κινητικότητα και τη βιοδιαθεσιμότητά τους. Αυτή η τεχνική είναι χρήσιμη για τα απόβλητα μεταλλείων και εδάφη πλούσια σε μέταλλα.
- **Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization):** μετατροπή ρύπων σε πτητικές ενώσεις και απελευθέρωσή τους μέσω διαπνοής. Στοιχεία όπως το σελήνιο και ο υδράργυρος διαχειρίζονται μέσω αυτής της διαδικασίας.
- **Φυτοδιήθηση (Phytofiltration):** χρήση φυτών που καλλιεργούνται υδροπονικά για διήθηση μετάλλων ή οργανικών ενώσεων από ύδατα ή υδατικά απόβλητα.
- **Φυτοαποδόμηση (Phytodegradation):** ενζυμική διάσπαση οργανικών ρύπων, όπως φυτοφαρμάκων ή υδρογονανθράκων, εντός των φυτικών ιστών ή των εκκρίσεων των ριζών.

Παρά το γεγονός ότι η φυτοαποκατάσταση έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε υδρογονάνθρακες πετρελαίου, φυτοφάρμακα και βαρέα μέταλλα, παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Η διαδικασία είναι γενικά αργή και εποχιακή, με την αποδοτικότητα να εξαρτάται από τους κύκλους ανάπτυξης των φυτών, τις συνθήκες του εδάφους και τις συγκεντρώσεις των ρύπων. Επιπλέον, η συγκομιζόμενη βιομάζα που περιέχει συσσωρευμένα μέταλλα πρέπει να διαχειρίζεται με προσοχή για την αποφυγή δευτερογενούς ρύπανσης. Παρ' όλα αυτά, η φυτοαποκατάσταση συνεχίζει να επεκτείνεται, υποστηριζόμενη από προόδους στη γενετική μηχανική, τις αλληλεπιδράσεις φυτού-μικροβίου και τις βελτιώσεις του εδάφους που ενισχύουν την πρόσληψη και τη διάσπαση ρύπων [Malik et al., 2025].

5.4.2 Μυκοαποκατάσταση

Η μυκοαποκατάσταση αξιοποιεί μύκητες και τα ένζυμά τους για τη διάσπαση επίμονων οργανικών ρύπων και την ακινητοποίηση ορισμένων μετάλλων. Ειδικότερα, είδη λευκής σήψης, όπως ο *Phanerochaete chrysosporium*, παράγουν εξωκυτταρικά ένζυμα (λακάσες, υπεροξειδάσες) ικανά να διασπούν υδρογονάνθρακες, φυτοφάρμακα, χρωστικές και άλλες πολύπλοκες οργανικές ενώσεις. Σε αντίθεση με πολλούς βακτήριους, οι μύκητες μπορούν να αποικοδομήσουν ιδιαίτερα ανθεκτικές ενώσεις λόγω των ισχυρών οξειδωτικών τους συστημάτων.

Επιπλέον, τα μυκηλιακά δίκτυα μπορούν να προσροφούν ή να καθιζάνουν μέταλλα, συμβάλλοντας στις διαδικασίες ακινητοποίησης. Η μυκοαποκατάσταση είναι σχετικά οικονομική, προσαρμόσιμη σε ποικίλα περιβάλλοντα και συχνά ταχύτερη από τη φυτοαποκατάσταση. Ωστόσο, απαιτεί προσεκτικό έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασία, οξυγόνο, οργανικά υποστρώματα) για τη διατήρηση της μυκητιακής δραστηριότητας, ενώ οι εφαρμογές μεγάλης κλίμακας παραμένουν περιορισμένες σε σύγκριση με τα εργαστηριακά πειράματα [Gautham Devendrapandi et al., 2024].

5.4.3 Νανοαποκατάσταση

Η νανοτεχνολογία εισάγει ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων για την αποκατάσταση εδαφών. Τα νανοσωματίδια, λόγω του μικρού τους μεγέθους και της υψηλής επιφανειακής δραστηριότητας, μπορούν να διασπασουν ή να ακινητοποιήσουν ρύπους σε μοριακό επίπεδο με ταχύ ρυθμό. Για παράδειγμα, τα νανοσωματίδια μηδενικής τιμής σιδήρου (nZVI) έχουν μελετηθεί εκτενώς για την ικανότητά τους να αναχαιτίζουν χλωριωμένους διαλύτες, φυτοφάρμακα και βαρέα μέταλλα. Άλλα μηχανικά νανοϋλικά, όπως το διοξείδιο του τιτανίου ή νανοδομές βασισμένες σε άνθρακα, εξετάζονται επίσης για καταλυτική διάσπαση οργανικών ρύπων [Malik et al., 2025].

Τα πλεονεκτήματα της νανοαποκατάστασης περιλαμβάνουν ταχύτατη κινητική αντίδραση, υψηλή απόδοση και εφαρμοσιμότητα τόσο σε οργανικούς όσο και σε ανόργανους ρύπους. Ωστόσο, οι ενδεχόμενοι κίνδυνοι σχετικοί με την οικοτοξικότητα των νανοσωματιδίων και την ανεξέλεγκτη κινητικότητά τους σε εδάφη και υπόγεια ύδατα παραμένουν ενεργό πεδίο έρευνας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, αναπτύσσονται νανοσωματίδια με ακινητοποιημένη ή τροποποιημένη επιφάνεια, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι [Gautham Devendrapandi et al., 2024].

5.4.4 Ηλεκτροκινητική αποκατάσταση

Η ηλεκτροκινητική αποκατάσταση (Electrokinetic Remediation – EKR) περιλαμβάνει την εφαρμογή χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος μέσω ηλεκτροδίων τοποθετημένων σε μολυσμένα εδάφη. Το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μετανάστευση ιόντων, νερού και φορτισμένων σωματιδίων προς τα ηλεκτρόδια, όπου μπορούν να αφαιρεθούν, να ακινητοποιηθούν ή να μετασχηματιστούν. Η EKR είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε λεπτόκοκκα εδάφη (πηλώδη και ιλυώδη), όπου η υδραυλική έκπλυση είναι αναποτελεσματική [Malik et al., 2025].

Η τεχνολογία αυτή έχει εφαρμοστεί για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, ραδιονουκλιδίων και οργανικών ενώσεων. Μπορεί επίσης να συνδυαστεί με χημικούς προσθέτες, βιοαποκατάσταση ή φυτοαποκατάσταση για την ενίσχυση της κινητοποίησης των ρύπων. Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν την υψηλή κατανάλωση ενέργειας και την πιθανότητα θέρμανσης του εδάφους ή δημιουργίας pH βαθμίδων κοντά στα ηλεκτρόδια, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την οικολογία του εδάφους. Παρ' όλα αυτά, οι συνεχείς

εξελίξεις στο σχεδιασμό ηλεκτροδίων και τα υβριδικά συστήματα καθιστούν την EKR ολοένα και πιο εφαρμόσιμη [Gautham Devendrapandi et al., 2024].

5.4.5 Υβριδικές και Ολοκληρωμένες Προσεγγίσεις

Λόγω της πολυπλοκότητας των μολυσμένων περιοχών, οι μεμονωμένες τεχνολογίες αποκατάστασης συχνά δεν επαρκούν. Οι υβριδικές προσεγγίσεις συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα διαφορετικών μεθόδων για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας. Παραδείγματα περιλαμβάνουν [Hcienv, 2025]:

- **Ηλεκτροκινητικά υποβοηθούμενη φυτοαποκατάσταση**, όπου τα ηλεκτρικά ρεύματα ενισχύουν την κινητικότητα των μετάλλων και την πρόσληψή τους από τα φυτά.
- **Βιοηλεκτροχημικά συστήματα**, που συνδυάζουν τη μικροβιακή αποδόμηση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Νανοϋλική ενισχυμένη βιοαποκατάσταση**, όπου νανοϋλικά διεγείρουν τη μικροβιακή δραστηριότητα ή την αποδόμηση ρύπων.
- **Αλληλουχίες επεξεργασιών**, όπου το πλύσιμο εδάφους συγκεντρώνει ρύπους στα λεπτά κλάσματα που στη συνέχεια υποβάλλονται σε βιοαποκατάσταση ή σταθεροποίηση.

Αυτές οι ολοκληρωμένες προσεγγίσεις αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο ως ο πλέον υποσχόμενος δρόμος για την αντιμετώπιση της ετερογενούς φύσης της ρύπανσης του εδάφους.

Κάθε τεχνική προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Η βιοαποκατάσταση διακρίνεται για τη βιωσιμότητα και την οικονομική αποδοτικότητα, αλλά απαιτεί ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες. Το πλύσιμο εδάφους παρέχει μόνιμη απομάκρυνση ρύπων, αλλά είναι απαιτητικό σε πόρους. Οι μέθοδοι σταθεροποίησης και στερεοποίησης είναι αξιόπιστες για την ακινητοποίηση μετάλλων, αν και δεν τα εξαλείφουν. Οι καινοτόμες μέθοδοι, όπως η φυτοαποκατάσταση, η μυκοαποκατάσταση, η νανοαποκατάσταση και η ηλεκτροκινητική, προσφέρουν νέες δυνατότητες, αν και πολλές βρίσκονται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης ή περιορίζονται σε πιλοτικές εφαρμογές.

Συνολικά, η αποκατάσταση του εδάφους δεν αποτελεί μόνο τεχνική πρόκληση, αλλά και κοινωνικό καθήκον διασφαλίζοντας ότι τα μολυσμένα εδάφη μπορούν να επιστραφούν σε ασφαλή χρήση, υποστηρίζοντας υγιή οικοσυστήματα, γεωργία και κοινότητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Το έδαφος αποτελεί το θεμέλιο των χερσαίων οικοσυστημάτων και έναν κρίσιμο φυσικό πόρο για την παραγωγή τροφίμων, τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και την ανθρώπινη ευημερία. Ωστόσο, όπως καταδείχθηκε σε όλη τη διάρκεια της παρούσας διατριβής, η ρύπανση του εδάφους έχει αναδειχθεί σε μία από τις πλέον πειστικές περιβαλλοντικές προκλήσεις της εποχής μας. Υπό την επίδραση βιομηχανικών δραστηριοτήτων, εξορυκτικών εργασιών, εντατικοποίησης της γεωργίας και αστικής ανάπτυξης, ρύποι όπως τα βαρέα μέταλλα, οι υδρογονάνθρακες, τα φυτοφάρμακα και τα βιομηχανικά παραπροϊόντα συσσωρεύονται στα εδάφη σε συγκεντρώσεις που απειλούν τη σταθερότητα των οικοσυστημάτων και τη δημόσια υγεία.

Στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας διερευνήθηκαν οι αιτίες και οι συνέπειες της ρύπανσης του εδάφους, καταγράφηκαν τεχνολογίες αποκατάστασης και αναδείχτηκε το ευρύτερο κοινωνικοοικονομικό και θεσμικό πλαίσιο μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η διαχείριση των εδαφικών πόρων. Το παρόν καταληκτικό κεφάλαιο συνθέτει τα συμπεράσματα που προέκυψαν, παρέχοντας μία συνολική επισκόπηση των βασικών ευρημάτων, πρακτικές συστάσεις για τους εμπλεκόμενους φορείς, καθώς και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Μέσω της ενοποίησης της επιστημονικής γνώσης με τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις πολιτικές παραμέτρους, το κεφάλαιο αυτό υπογραμμίζει ότι η αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών δεν αποτελεί απλώς ένα τεχνικό ζήτημα, αλλά μια πολυδιάστατη επιταγή. Η ανάπτυξη αποτελεσματικών λύσεων απαιτεί τον συνδυασμό περιβαλλοντικής επιστήμης, τεχνολογικής καινοτομίας, ρυθμιστικών πλαισίων και ενεργής συμμετοχής της κοινωνίας. Ο απώτερος στόχος είναι η αποκατάσταση των λειτουργιών του εδάφους, η προστασία της ανθρώπινης υγείας και της οικολογικής ισορροπίας και η εξασφάλιση βιώσιμης χρήσης γης για τις επόμενες γενιές.

Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε τρεις ενότητες. Η πρώτη ενότητα παρουσιάζει τα κύρια ευρήματα της μελέτης, αναδεικνύοντας την πολυπλοκότητα της ρύπανσης του εδάφους, τις περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις, καθώς και την αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων αποκατάστασης. Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει πρακτικές συστάσεις προς τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τους διαχειριστές περιβάλλοντος και τις τοπικές κοινότητες, μετατρέποντας την επιστημονική γνώση σε εφαρμόσιμες παρεμβάσεις. Η τελευταία ενότητα διατυπώνει προτάσεις για μελλοντική έρευνα, με έμφαση στη σημασία της καινοτομίας, της διεπιστημονικότητας και της βιωσιμότητας στην αντιμετώπιση της κρίσης της εδαφικής ρύπανσης.

6.1 Κύρια Ευρήματα

Η παρούσα μελέτη παρήγαγε μια σειρά από συμπεράσματα σχετικά με τη φύση της εδαφικής ρύπανσης, τις επιπτώσεις της και τις διαθέσιμες μεθόδους αποκατάστασης. Τα ευρήματα αυτά ενισχύουν την αίσθηση του κατεπείγοντος για την αντιμετώπιση της

ρύπανσης του εδάφους, ενώ παράλληλα αναδεικνύουν ευκαιρίες βελτίωσης στους τεχνολογικούς, κοινωνικούς και πολιτικούς τομείς.

6.1.1 Η Έκταση και η Φύση της Εδαφικής Ρύπανσης

Ένα από τα κεντρικά συμπεράσματα της παρούσας έρευνας είναι ότι η εδαφική ρύπανση είναι τόσο εκτεταμένη όσο και πολυπαραγοντική. Δεν περιορίζεται σε απομονωμένες βιομηχανικές εστίες, αλλά επηρεάζει επίσης γεωργικές εκτάσεις, περιαστικές ζώνες και φυσικά οικοσυστήματα. Στις αγροτικές περιοχές, η επαναλαμβανόμενη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων συμβάλλει στη συσσώρευση χημικών υπολειμμάτων, ενώ στις αστικές περιοχές, η ατμοσφαιρική εναπόθεση, οι βιομηχανικές εκπομπές και η διάθεση αποβλήτων επιδεινώνουν το πρόβλημα. Οι μεταλλευτικές και μεταλλουργικές δραστηριότητες αφήνουν πίσω τους εκτεταμένα τέλματα πλούσια σε βαρέα μέταλλα, τα οποία παραμένουν στο έδαφος για δεκαετίες [Wei et al., 2023].

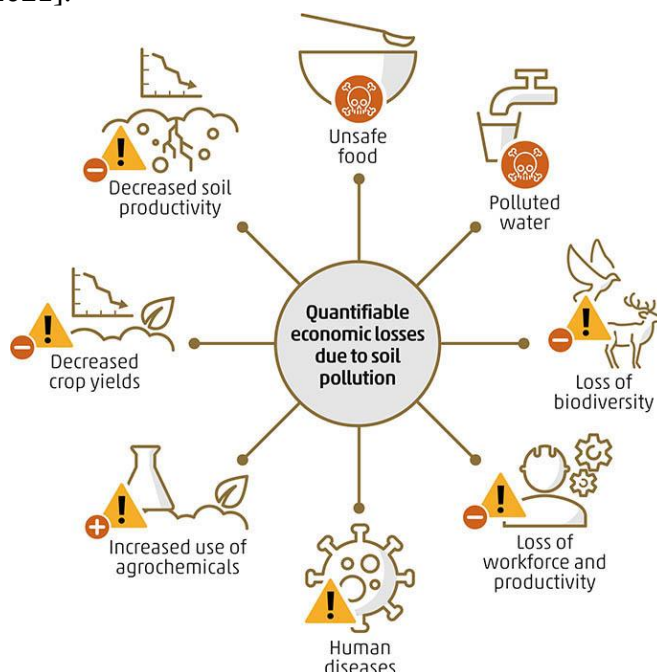
Οι ρύποι συνήθως εμφανίζονται ως πολύπλοκα μίγματα και όχι ως μεμονωμένες ενώσεις. Για παράδειγμα, τα εδάφη κοντά σε πετρελαϊκά διυλιστήρια μπορεί να περιέχουν υδρογονάνθρακες σε συνδυασμό με βαρέα μέταλλα και διαλύτες. Αυτή η πολυπλοκότητα δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις για την αποκατάσταση, καθώς οι περισσότερες τεχνολογίες στοχεύουν σε συγκεκριμένους ρύπους και δυσκολεύονται να αντιμετωπίσουν μικτές μορφές ρύπανσης. Η εμμονή των ρύπων, ιδιαίτερα των βαρέων μετάλλων και των χλωριωμένων οργανικών ενώσεων, διασφαλίζει ότι η ρύπανση παραμένει μακροπρόθεσμος κίνδυνος, ακόμη και μετά τον έλεγχο των πηγών ρύπανσης [FAO and UNEP, 2021].

6.1.2 Επιπτώσεις στο Περιβάλλον και την Υγεία

Οι επιπτώσεις της εδαφικής ρύπανσης εκτείνονται πολύ πέρα από το ίδιο το έδαφος. Οι ρύποι μπορούν να διαρρεύσουν προς τα υπόγεια ύδατα, να συσσωρευτούν στις καλλιέργειες και να εισέλθουν στις τροφικές αλυσίδες. Τα βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος, το κάδμιο και ο υδράργυρος, ενέχουν χρόνιους κινδύνους για την υγεία, συμπεριλαμβανομένων νευρολογικών, νεφρικών και αναπτυξιακών διαταραχών. Τα υπολείμματα υδρογονανθράκων και η συσσώρευση φυτοφαρμάκων έχουν συσχετιστεί με καρκινογόνες επιδράσεις και διαταραχές του ενδοκρινικού συστήματος [Europe.eu, 2022].

Σε οικολογικό επίπεδο, η εδαφική ρύπανση διαταράσσει τις μικροβιακές κοινότητες, μειώνοντας τη βιοποικιλότητα και αποδυναμώνοντας τη φυσική ικανότητα του εδάφους να ρυθμίζει τους κύκλους των θρεπτικών στοιχείων. Οι γεωργικές αποδόσεις μειώνονται σε μολυσμένα εδάφη, εντείνοντας τις ανησυχίες για την επισιτιστική ασφάλεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως η ρύπανση με αρσενικό στη Νότια και Νοτιοανατολική Ασία, ο συνδυασμός μολυσμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων έχει οδηγήσει σε μεγάλης κλίμακας κρίσεις δημόσιας υγείας. Τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν την άμεση σύνδεση

μεταξύ ποιότητας του εδάφους, ακεραιότητας των οικοσυστημάτων και ανθρώπινης υγείας [FAO and UNEP, 2021].



Εικόνα 17: Απώλειες λόγω ρύπανσης του εδάφους [Πηγή: FAO and UNEP, 2021]

6.1.3 Αξιολόγηση Μεθόδων Αποκατάστασης

Η αξιολόγηση των τεχνολογιών αποκατάστασης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, κατέδειξε ότι καμία μέθοδος από μόνη της δεν προσφέρει μια καθολική λύση. Κάθε τεχνική παρουσιάζει πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς [Shi et al., 2024]:

- **Βιοαποκατάσταση:** Αποτελεσματική, φιλική προς το περιβάλλον και χαμηλού κόστους, ιδιαίτερα για οργανικούς ρύπους όπως οι υδρογονάνθρακες και τα φυτοφάρμακα. Ωστόσο, η επιτυχία της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως το pH, η θερμοκρασία και η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων.
- **Έκπλυση εδαφών (soil washing):** Παρέχει μόνιμη απομάκρυνση μετάλλων και άλλων ανόργανων ρύπων, αλλά είναι ιδιαίτερα απαιτητική σε πόρους και παράγει δευτερογενή ρεύματα αποβλήτων που απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία.
- **Σταθεροποίηση και στερεοποίηση (S/S):** Αξιόπιστες μέθοδοι για την ακινητοποίηση μετάλλων και ραδιονουκλιδίων, μειώνοντας την κινητικότητα και τον κίνδυνο έκθεσης· ωστόσο, δεν εξαλείφουν τους ρύπους από το περιβάλλον.
- **Καινοτόμες μέθοδοι** (φυτοαποκατάσταση, μυκοαποκατάσταση, νανοτεχνολογία, ηλεκτροκινητικές προσεγγίσεις): Παρουσιάζουν σημαντικές προοπτικές για συγκεκριμένες εφαρμογές, αλλά εξακολουθούν να περιορίζονται από ζητήματα κλιμάκωσης, κόστους ή ελλείψεων γνώσης.

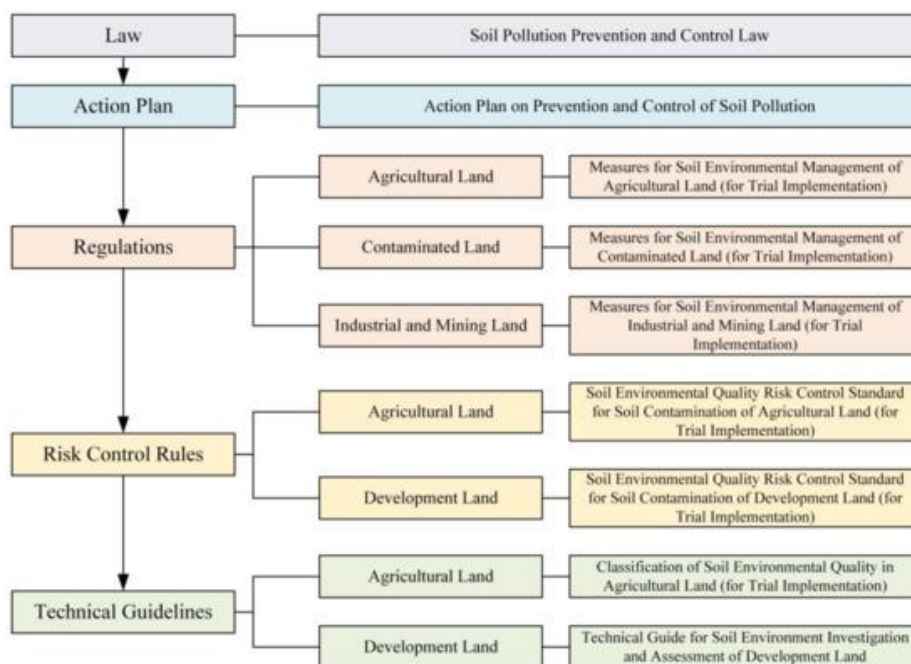
Η ποικιλομορφία αυτών των πλεονεκτημάτων και αδυναμιών καταδεικνύει ότι οι τεχνολογίες αποκατάστασης δεν θα πρέπει να εφαρμόζονται απομονωμένα, αλλά ως μέρος ολοκληρωμένων, προσαρμοσμένων στις ιδιαιτερότητες κάθε χώρου στρατηγικών.

6.1.4 Η Ανάγκη για Ολοκληρωμένες Προσεγγίσεις

Ένα επαναλαμβανόμενο συμπέρασμα της παρούσας μελέτης είναι ότι οι ολοκληρωμένες προσεγγίσεις παρέχουν τα πιο αποτελεσματικά και βιώσιμα αποτελέσματα. Υβριδικές στρατηγικές, όπως ο συνδυασμός έκπλυσης εδαφών με βιοαποκατάσταση ή η σύζευξη φυτοαποκατάστασης με ηλεκτροκινητικές τεχνικές, μπορούν να αντιμετωπίσουν ταυτόχρονα οργανικούς και ανόργανους ρύπους, ενώ παράλληλα μειώνουν το κόστος και τον χρόνο επεξεργασίας [Beykzade and Sepide Beykzade, 2020].

Η ετερογένεια των ρυπασμένων χώρων -που διαφοροποιούνται ως προς τον τύπο εδάφους, τη σύνθεση του μίγματος ρύπων και τις τοπικές κοινωνικοοικονομικές συνθήκες- σημαίνει ότι η αποκατάσταση πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στο εκάστοτε πλαίσιο. Σχεδιασμοί ειδικά προσανατολισμένοι στη συγκεκριμένη τοποθεσία, καθοδηγούμενοι από ενδελεχή εκτίμηση κινδύνου και ανάλυση κόστους-οφέλους, αποδίδουν σταθερά καλύτερα από γενικευμένες λύσεις [Beykzade and Sepide Beykzade, 2020].

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών παρακολούθησης, όπως οι βιοαισθητήρες και η τηλεπισκόπηση, ενισχύει περαιτέρω τη δυνατότητα προσαρμοστικής διαχείρισης των έργων αποκατάστασης.



Εικόνα 18: Πλαίσιο πολιτικής του συστήματος διαχείρισης εδάφους. [Πηγή: (Li et al., 2019)]

6.1.5 Κοινωνικοοικονομικές και Πολιτικές Διαστάσεις

Η μελέτη κατέδειξε, επίσης, ότι οι τεχνικές λύσεις από μόνες τους δεν επαρκούν χωρίς την παράλληλη ενίσχυση των οικονομικών και θεσμικών πλαισίων. Το υψηλό κόστος, η έλλειψη κατάλληλης υποδομής και η ανεπαρκής εφαρμογή της νομοθεσίας συχνά εμποδίζουν τις προσπάθειες αποκατάστασης. Σε πολλές χώρες, η προστασία του εδάφους λαμβάνει λιγότερη προσοχή σε σχέση με την ποιότητα του αέρα ή του νερού, παρά τον κεντρικό ρόλο του εδάφους στην οικολογική ισορροπία και την ανθρώπινη υγεία.

Η υιοθέτηση της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», η παροχή οικονομικών κινήτρων για βιώσιμες πρακτικές, καθώς και η ενεργός συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για την υπέρβαση αυτών των εμποδίων. Επιπλέον, η δημόσια ευαισθητοποίηση παραμένει περιορισμένη: πολλές κοινότητες δεν αντιλαμβάνονται τους κινδύνους που συνεπάγεται η ρύπανση του εδάφους παρά μόνο όταν οι επιπτώσεις στην υγεία γίνονται εμφανείς. Απαιτούνται ισχυρότερα προγράμματα εκπαίδευσης και ενημέρωσης ώστε να καλλιεργηθεί μια κουλτούρα υπεύθυνης διαχείρισης και προστασίας του εδαφικού περιβάλλοντος [He et al., 2025].

6.2 Πρακτικές Προτάσεις

Τα ευρήματα της παρούσας διατριβής αναδεικνύουν ότι η ρύπανση του εδάφους αποτελεί ταυτόχρονα τεχνική και κοινωνικοοικονομική πρόκληση. Η αντιμετώπισή της απαιτεί ένα συντονισμένο σύνολο παρεμβάσεων που εκτείνεται από την παρακολούθηση και τη διακυβέρνηση έως τις τεχνολογίες αποκατάστασης, τους χρηματοοικονομικούς μηχανισμούς και τη συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών. Οι συστάσεις που ακολουθούν οργανώνονται σε θεματικούς άξονες, καθένας από τους οποίους παρέχει ένα σύνολο πρακτικών μέτρων που μπορούν να υιοθετηθούν από τους φορείς χάραξης πολιτικής, τους περιβαλλοντικούς διαχειριστές, τους βιομηχανικούς φορείς και τις τοπικές κοινότητες.

6.2.1 Η Πρόληψη ως Πρώτη Γραμμή Άμυνας

Αν και οι τεχνολογίες αποκατάστασης είναι αναγκαίες, η πλέον αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική στρατηγική είναι η πρόληψη. Οι κυβερνήσεις οφείλουν να δώσουν προτεραιότητα στην εφαρμογή αυστηρότερων ελέγχων στις βιομηχανικές εκπομπές, στις μεταλλευτικές δραστηριότητες και στις γεωργικές πρακτικές, ώστε να περιοριστεί η απελευθέρωση ρύπων στο έδαφος.

Για παράδειγμα, η προώθηση της Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Εντόμων (Integrated Pest Management – IPM) μειώνει τη χρήση φυτοφαρμάκων, ενώ η υποχρέωση των βιομηχανιών να εγκαθιστούν συστήματα φιλτραρίσματος και επεξεργασίας αποβλήτων αποτρέπει την είσοδο βαρέων μετάλλων και υδρογονανθράκων στο έδαφος. Μακροπρόθεσμα, τα προληπτικά μέτρα εξοικονομούν περισσότερους πόρους σε σχέση με τις επεμβάσεις αποκατάστασης [Beykzade and Sepide Beykzade, 2020].

6.2.2 Ενίσχυση της Παρακολούθησης και της Αξιολόγησης

Αξιόπιστα συστήματα παρακολούθησης είναι απαραίτητα για την έγκαιρη ανίχνευση της ρύπανσης και την παρακολούθηση της προόδου των έργων αποκατάστασης. Τα κράτη θα πρέπει να επενδύσουν στη δημιουργία παρατηρητηρίων εδάφους, τα οποία θα συνδυάζουν τις παραδοσιακές μεθόδους δειγματοληψίας με προηγμένες τεχνολογίες, όπως η τηλεπισκόπηση, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) και η χαρτογράφηση με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Τα συστήματα αυτά μπορούν να εντοπίζουν εστίες ρύπανσης, να αξιολογούν τις τάσεις ρύπανσης και να συμβάλλουν στην ιεράρχηση των παρεμβάσεων αποκατάστασης. Η δημόσια διάθεση των δεδομένων θα ενίσχυε τη διαφάνεια και θα έδινε στις τοπικές κοινωνίες τη δυνατότητα να διεκδικούν πιο άμεσα μέτρα προστασίας [Beykzade and Sepide Beykzade, 2020].

6.2.3 Προώθηση Βιώσιμων Πρακτικών Αποκατάστασης

Όπου είναι εφικτό, η αποκατάσταση θα πρέπει να δίνει προτεραιότητα σε μεθόδους που είναι οικονομικά αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον, όπως η βιοαποκατάσταση και η φυτοαποκατάσταση. Στις γεωργικές περιοχές, η χρήση υπερσυσσωρευτικών φυτών μπορεί να αποκαθιστά τα εδάφη ενώ παράλληλα παρέχει βιομάζα για παραγωγή βιοενέργειας. Στις αστικές περιοχές, οι λύσεις πράσινων υποδομών—όπως η φύτευση βλάστησης που σταθεροποιεί ρύπους—μπορούν να συμβάλλουν ταυτόχρονα στην αποκατάσταση και στη βελτίωση του αστικού τοπίου. Οι φορείς χάραξης πολιτικής οφείλουν να ενθαρρύνουν τέτοιες λύσεις διπλού οφέλους μέσω επιδοτήσεων και παροχής τεχνικής υποστήριξης [Alvarenga, 2022].

6.2.4 Ενσωμάτωση Τεχνολογιών Αποκατάστασης

Δεδομένου ότι καμία μεμονωμένη μέθοδος δεν είναι καθολικά αποτελεσματική, η αποκατάσταση πρέπει να βασίζεται σε ολοκληρωμένες προσεγγίσεις. Για παράδειγμα, η έκπλυση εδάφους μπορεί αρχικά να συγκεντρώνει τους ρύπους, ακολουθούμενη από σταθεροποίηση των καταλοίπων ή βιοαποκατάσταση των υπολειπόμενων οργανικών ενώσεων. Τα υβριδικά συστήματα, όπως η ηλεκτροκινητικά υποβοηθούμενη φυτοαποκατάσταση ή η νανοσωματιδιακά ενισχυμένη βιοαποκατάσταση, έχουν ήδη δείξει ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε πιλοτικά έργα. Για τον σχεδιασμό στρατηγικών προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, πρέπει να χρησιμοποιούνται εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων, όπως οι πολυκριτηριακές αναλύσεις [Alvarenga, 2022].

6.2.5 Ενίσχυση του Πολιτικού και Κανονιστικού Πλαισίου

Η προστασία του εδάφους συχνά υστερεί σε σχέση με την ποιότητα του αέρα και του νερού στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής πολιτικής. Τα κράτη πρέπει να υιοθετήσουν ολοκληρωμένη νομοθεσία για την προστασία του εδάφους, η οποία να καθορίζει σαφή πρότυπα ποιότητας, υποχρεώσεις αποκατάστασης και μηχανισμούς ευθύνης. Οι κανονισμοί οφείλουν να εφαρμόζουν την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», ενώ ταυτόχρονα

να δημιουργούν κίνητρα για τις βιομηχανίες που επενδύουν σε βιώσιμες πρακτικές. Η διεθνής εναρμόνιση προτύπων θα επέτρεπε μια πιο συνετή διαχείριση της διασυννοριακής ρύπανσης [Shi et al., 2024].

6.2.6 Ανάπτυξη Τεχνικής Ικανότητας και Μεταφορά Γνώσης

Πολλές χώρες αντιμετωπίζουν έλλειψη εξειδικευμένων επαγγελματιών στον τομέα της αποκατάστασης εδαφών. Τα πανεπιστήμια, τα ερευνητικά ιδρύματα και οι περιβαλλοντικοί φορείς θα πρέπει να επεκτείνουν τα προγράμματα ενίσχυσης ικανότητας για μηχανικούς, επιστήμονες του εδάφους και τεχνικούς. Η μεταφορά γνώσης μεταξύ χωρών -μέσω περιφερειακών κέντρων αριστείας ή προγραμμάτων ανταλλαγής- θα επιταχύνει την υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες που αντιμετωπίζουν σοβαρή ρύπανση αλλά διαθέτουν περιορισμένη τεχνική εξειδίκευση [Beykzade and Sepide Beykzade, 2020].

6.2.7 Ευαισθητοποίηση και Συμμετοχή της Κοινότητας

Η ενεργός συμμετοχή του κοινού είναι κρίσιμη για την επιτυχία των έργων αποκατάστασης. Οι κοινότητες που ζουν κοντά σε ρυπασμένες περιοχές πρέπει να ενημερώνονται για τους κινδύνους και να εμπλέκονται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Οι συμμετοχικές προσεγγίσεις, όπου οι κάτοικοι συνεργάζονται με επιστήμονες και φορείς χάραξης πολιτικής, διασφαλίζουν ότι οι στρατηγικές αποκατάστασης είναι κοινωνικά αποδεκτές. Τα σχολεία και οι ενημερωτικές καμπάνιες στα μέσα μαζικής ενημέρωσης μπορούν επιπλέον να ενισχύσουν τη συνειδητοποίηση σχετικά με τη σημασία της υγείας του εδάφους, δημιουργώντας μια κουλτούρα υπεύθυνης διαχείρισης [He et al., 2025].

6.2.8 Κινητοποίηση Οικονομικών Πόρων

Η αποκατάσταση των εδαφών απαιτεί συχνά σημαντικές επενδύσεις. Τα κράτη θα πρέπει να δημιουργήσουν ειδικά ταμεία αποκατάστασης εδαφών και να διερευνήσουν καινοτόμα χρηματοδοτικά μοντέλα, όπως πράσινα ομόλογα, πιστωτικές μονάδες άνθρακα και συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα. Οι διεθνείς χρηματοπιστωτικοί οργανισμοί μπορούν να παρέχουν επιχορηγήσεις ή δάνεια για μεγάλης κλίμακας έργα, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες. Η εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» διασφαλίζει ότι οι βιομηχανίες συμβάλλουν στο κόστος αποκατάστασης, δημιουργώντας λογοδοσία και δικαιοσύνη [Shi et al., 2024].

6.2.9 Προώθηση Ευθύνης και Καινοτομίας από τη Βιομηχανία

Οι βιομηχανίες πρέπει να ενθαρρύνονται -και να υποχρεώνονται- να υιοθετούν καθαρές μεθόδους παραγωγής και να επενδύουν στην έρευνα για την αποκατάσταση εδαφών. Τα προγράμματα εταιρικής περιβαλλοντικής ευθύνης μπορούν να χρηματοδοτούν την καθαριότητα των εδαφών, ενώ η συνεργασία με πανεπιστήμια μπορεί να προάγει την καινοτομία. Τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για τη διαχείριση μεταλλευτικών αποβλήτων

ή την επεξεργασία βιομηχανικών υγρών αποβλήτων μπορούν συχνά να προσαρμοστούν για την αποκατάσταση εδαφών. Οι βιομηχανίες που επιδεικνύουν ηγετικό ρόλο στην προστασία του εδάφους θα πρέπει να αναγνωρίζονται και να λαμβάνουν κίνητρα [Beykzade and Sepide Beykzade, 2020].

6.2.10 Ενίσχυση της Διεθνούς Συνεργασίας

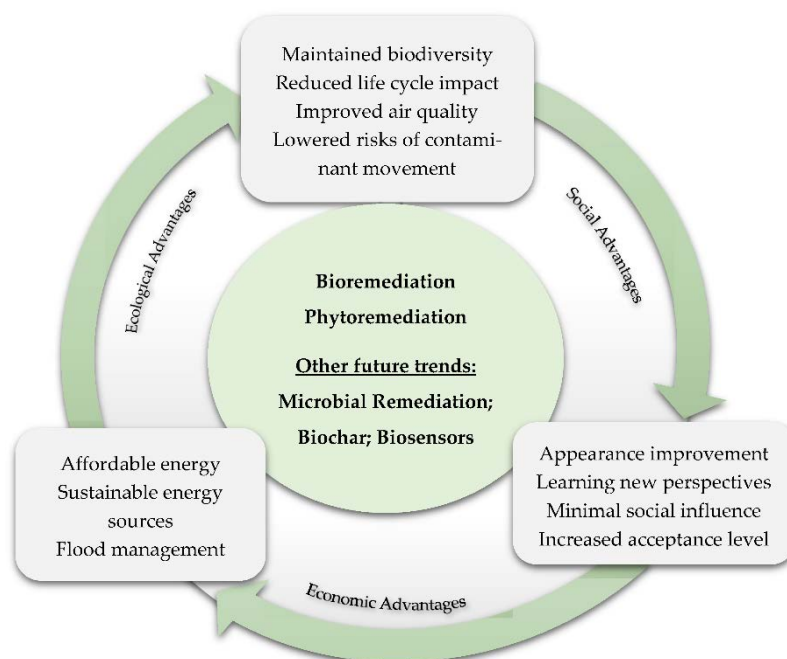
Η ρύπανση του εδάφους αποτελεί παγκόσμιο ζήτημα που απαιτεί διεθνή συνεργασία. Περιφερειακές συμφωνίες σχετικά με τα πρότυπα παρακολούθησης, την ανταλλαγή δεδομένων και τα κοινά έργα αποκατάστασης είναι απαραίτητες. Διεθνείς οργανισμοί μπορούν να λειτουργούν ως πλατφόρμες ανταλλαγής γνώσης και συντονισμού μεγάλων πρωτοβουλιών. Οι ανεπτυγμένες χώρες θα πρέπει να παρέχουν οικονομική και τεχνική υποστήριξη σε λιγότερο ανεπτυγμένα κράτη, καθώς η παγκόσμια υποβάθμιση των εδαφών επηρεάζει τελικά την ασφάλεια τροφίμων, τη μετανάστευση και την ανθεκτικότητα στις κλιματικές αλλαγές παγκοσμίως [EU4Green, 2024].

6.2.11 Σύνδεση της Αποκατάστασης Εδαφών με Ευρύτερους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης

Η αποκατάσταση εδαφών δεν πρέπει να θεωρείται αποσπασματικά αλλά να συνδέεται με ευρύτερες στρατηγικές, όπως οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) του ΟΗΕ, η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή και οι στρατηγικές ασφάλειας τροφίμων. Για παράδειγμα, η αποκατάσταση ρυπασμένων γεωργικών εδαφών συμβάλλει άμεσα στους SDG 2 (Μηδενική Πείνα) και SDG 15 (Ζωή στη Στεριά). Η ενσωμάτωση της αποκατάστασης στις κλιματικές πολιτικές διασφαλίζει επίσης την πρόσβαση σε μηχανισμούς χρηματοδότησης για την κλιματική αλλαγή, υποστηρίζοντας τόσο την περιβαλλοντική όσο και την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη [Alvarenga, 2022].

6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Παρά τις σημαντικές προόδους που έχουν σημειωθεί, εξακολουθούν να υφίστανται πολλές αβεβαιότητες και περιορισμοί στη επιστήμη και την πολιτική αποκατάστασης εδαφών. Η μελλοντική έρευνα πρέπει να είναι διεπιστημονική, καλύπτοντας όχι μόνο τις τεχνικές πτυχές της αφαίρεσης ρύπων, αλλά και τις διαστάσεις διακυβέρνησης, οικονομίας και κοινωνίας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι προτεραιότητες για την προώθηση του πεδίου.



Εικόνα 19: Περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη της αποκατάστασης των εδαφών [Πηγή: Santos, Rebola and Evtuguin, 2025]

6.3.1 Προώθηση Βιολογικών Τεχνικών Αποκατάστασης

Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την βελτίωση της αποτελεσματικότητας της βιοαποκατάστασης. Η γενετική μηχανική και η συνθετική βιολογία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μικροβιακών κοινοτήτων με βελτιστοποιημένες οδούς αποδόμησης για σύνθετα μίγματα ρύπων. Παρομοίως, θα πρέπει να εξεταστεί η χρήση γενετικά τροποποιημένων φυτών με ενισχυμένη ικανότητα πρόσληψης μετάλλων ή αποδόμησης υδρογονανθράκων, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη βιοασφάλεια. Η μυκοαποκατάσταση αξίζει επίσης μεγαλύτερη προσοχή, δεδομένης της μοναδικής ικανότητάς της να αποδομεί ιδιαίτερα ανθεκτικούς ρύπους [Santos, Rebola and Evtuguin, 2025].

6.3.2 Εξέταση Υβριδικών και Ολοκληρωμένων Συστημάτων

Οι μελλοντικές μελέτες πρέπει να αξιολογούν συστηματικά την απόδοση των υβριδικών τεχνολογιών υπό συνθήκες πεδίου. Για παράδειγμα, η ηλεκτροκινητικά υποβοηθούμενη φυτοαποκατάσταση έχει δείξει προοπτικές στην κινητοποίηση μετάλλων για πρόσληψη από φυτά, αλλά λείπουν μεγάλης κλίμακας επιδείξεις. Η έρευνα θα πρέπει να επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση αυτών των συνδυαστικών προσεγγίσεων, συμπεριλαμβανομένων αναλύσεων κόστους-οφέλους και εκτιμήσεων περιβαλλοντικού κινδύνου [Valdiviezo et al., 2023].

6.3.3 Μακροπρόθεσμη Αποτελεσματικότητα και Ανθεκτικότητα στην Κλιματική Αλλαγή

Ένα κρίσιμο ερευνητικό κενό αφορά τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα των έργων αποκατάστασης. Πολλές τεχνολογίες ακινητοποιούν ρύπους, αλλά η απόδοσή τους υπό κλιματική μεταβλητότητα (πλημμύρες, ξηρασία, κύκλοι πήξης-τήξης) παραμένει αβέβαιη. Οι μελέτες πρέπει να αξιολογήσουν πώς η κλιματική αλλαγή μπορεί να αποσταθεροποιήσει εδάφη που έχουν ήδη υποστεί επεξεργασία. Τα προγνωστικά μοντέλα που προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των ρύπων υπό διαφορετικά κλιματικά σενάρια θα είναι απαραίτητα [Chen, Gao and Li, 2025].

6.3.4 Καινοτομίες στην Παρακολούθηση και Αξιολόγηση

Αναδυόμενα εργαλεία, όπως βιοαισθητήρες, μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) και δορυφορική απεικόνιση, μπορούν να φέρουν επανάσταση στην παρακολούθηση της ρύπανσης του εδάφους. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν ευρέως. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών με μηχανική μάθηση μπορεί να επιτρέψει την προγνωστική μοντελοποίηση της διάδοσης των ρύπων και των αποτελεσμάτων της αποκατάστασης [Santos, Rebola and Evtuguin, 2025].

6.3.5 Κοινωνικο-Οικονομική και Πολιτική Προσέγγιση στην Έρευνα

Η αποκατάσταση εδαφών δεν αποτελεί μόνο τεχνική πρόκληση, αλλά και κοινωνικο-οικονομικό ζήτημα. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να αναλύσει πώς η διακυβέρνηση, η συμμετοχή της κοινότητας και τα οικονομικά κίνητρα επηρεάζουν την επιτυχία των έργων αποκατάστασης. Οι συγκριτικές μελέτες περιπτώσεων σε διαφορετικές περιοχές μπορούν να αποκαλύψουν τις βέλτιστες πρακτικές για την ενσωμάτωση της επιστήμης, της πολιτικής και της κοινωνίας. Αυτό απαιτεί συνεργασία μεταξύ περιβαλλοντολόγων, οικονομολόγων και κοινωνικών επιστημόνων [Chen, Gao and Li, 2025].

6.3.6 Προσεγγίσεις Κυκλικής Οικονομίας

Η έρευνα θα πρέπει να επεκταθεί στον τρόπο με τον οποίο η αποκατάσταση μπορεί να ενσωματωθεί στην κυκλική οικονομία. Τα μέταλλα που ανακτώνται κατά την πλύση εδαφών μπορούν να ανακυκλωθούν για βιομηχανική χρήση, ενώ η βιομάζα από τη φυτοαποκατάσταση μπορεί να παράγει ανανεώσιμη ενέργεια. Αυτό όχι μόνο μειώνει το κόστος, αλλά δημιουργεί και οικονομικές ευκαιρίες. Οι μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να αξιολογούν τη δυνατότητα εφαρμογής, την κλιμάκωση και την ασφάλεια αυτών των διαδικασιών ανάκτησης [Valdiviezo et al., 2023].

6.3.7 Ψηφιακές και Εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης

Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (big data) στην αποκατάσταση εδαφών παρουσιάζει μεγάλες προοπτικές. Η AI μπορεί να βελτιστοποιήσει στρατηγικές αποκατάστασης, να προβλέψει τη διάδοση των ρύπων και να

μοντελοποιήσει την αποτελεσματικότητα κόστους. Τα ψηφιακά δίδυμα—εικονικά μοντέλα ρυπασμένων χώρων—μπορούν να αναπτυχθούν για να δοκιμάσουν διαφορετικά σενάρια αποκατάστασης πριν από την υλοποίηση [Valdiviezo et al., 2023].

6.3.8 Ενσωμάτωση της Γνώσης των Τοπικών και Αυτόχθονων Κοινοτήτων

Σε πολλές περιοχές, οι τοπικές και αυτόχθονες κοινότητες διαχειρίζονται τα εδάφη εδώ και χρόνια χρησιμοποιώντας παραδοσιακά συστήματα γνώσης. Η έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει πώς αυτές οι πρακτικές μπορούν να ενημερώσουν την βιώσιμη αποκατάσταση. Ο συνδυασμός επιστημονικής καινοτομίας με παραδοσιακές στρατηγικές διαχείρισης γης μπορεί να οδηγήσει σε πολιτιστικά κατάλληλες, χαμηλού κόστους λύσεις που ενισχύουν την ανθεκτικότητα της κοινότητας [Chen, Gao and Li, 2025].

6.3.9 Ενίσχυση Διεθνούς Συνεργασίας στην Έρευνα

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να προάγει την παγκόσμια συνεργασία, ιδιαίτερα σε θέματα ρύπων με διασυνοριακές επιπτώσεις, όπως βαρέα μέταλλα στον αέρα και υπολείμματα φυτοφαρμάκων. Η κοινή ερευνητική υποδομή, οι βάσεις δεδομένων ανοιχτής πρόσβασης και τα κοινά πιλοτικά έργα θα επιταχύνουν την καινοτομία. Τα συνεργατικά πλαίσια μπορούν επίσης να διασφαλίσουν ισότιμη κατανομή των οφελών της έρευνας μεταξύ αναπτυσσόμενων και αναπτυσσόμενων χωρών [Santos, Rebola and Evtuguin, 2025].

6.3.10 Εκπαίδευση και Ενίσχυση Δυναμικού στην Έρευνα

Τέλος, η μελλοντική έρευνα δεν θα πρέπει να επικεντρώνεται μόνο στην τεχνολογία, αλλά και στη διαμόρφωση της επόμενης γενιάς επιστημόνων και μηχανικών εδαφών. Τα διεθνή προγράμματα μεταπτυχιακών σπουδών, τα κοινά ερευνητικά έργα και η διεπιστημονική εκπαίδευση θα διευρύνουν τις δυνατότητες παγκοσμίως, διασφαλίζοντας ότι οι καινοτόμες μέθοδοι εφαρμόζονται αποτελεσματικά σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

Βιβλιογραφία

1. Alamgir, Md. “The Effects of Soil Properties to the Extent of Soil Contamination with Metals.” *Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils*, 2016, pp. 1–19, https://doi.org/10.1007/978-4-431-55759-3_1.
2. Alori, E.T., Gabasawa, A.I., Elenwo, C.E. and Agbeyegbe, O.O. (2022). Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. *Frontiers in Soil Science*, 2. doi:<https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.937186>.
3. Alvarenga, P. (2022). Soil Pollution Assessment and Sustainable Remediation Strategies. *Environments*, 9(4), p.46. doi:<https://doi.org/10.3390/environments9040046>.
4. Backus, B. (n.d.). *California Bearing Ratio Test: CBR Values & Why They Matter*. [online] GlobalGilson.com. Available at: <https://www.globalgilson.com/blog/cbr-testing>.
5. Bales, J.D., Swain, E. and Fulford, J.M. (1997). Review of Selected Features of the Natural System Model, and Suggestions for Applications in South Florida. [online] Available at: https://pubs.usgs.gov/wri/wri97-4039/pdf/wrir_97-4039.pdf
6. Beykzade, M. and Sepide Beykzade (2020). Management Evaluate and Review Solutions to Reduce Soil Pollution. *SPECTA Journal of Technology*, [online] 4(3), pp.1–8. doi:<https://doi.org/10.35718/specta.v4i3.214>.
7. Bini, C. (2011). *From soil contamination to land restoration. Contaminated Soils: Environmental Impact, Disposal and Treatment*, pp.97–137.
8. Biswas, Bhabananda, et al. “The Fate of Chemical Pollutants with Soil Properties and Processes in the Climate Change Paradigm—a Review.” *Soil Systems*, vol. 2, no. 3, 1 Sept. 2018, p. 51, <https://doi.org/10.3390/soilsystems2030051>.
9. Cachada, Anabela, et al. “Soil and Pollution.” *Soil Pollution*, 2018, pp. 1–28, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-849873-6.00001-7>.
10. Chang, Nan, et al. “Unveiling the Impacts of Microplastic Pollution on Soil Health: A Comprehensive Review.” *Science of the Total Environment*, vol. 951, 20 Aug. 2024, p. 175643, [www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724057991](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175643), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175643>.
11. Chen, H., Gao, B. and Li, Y. (2025). Soil pollution and remediation: emerging challenges and innovations. *Frontiers in Environmental Science*, 13. doi:<https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1606054>.
12. Claude, G. (2022). *Restoration of polluted soils by plants (phytoremediation) - Encyclopedia of the Environment*. [online] Encyclopedia of the Environment. Available at: <https://www.encyclopédie-environnement.org/en/soil/restoration-polluted-soils-by-plants-phytoremediation/>.

13. Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G. and Richer-Lafleche, M. (2008). Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications. *Journal of Hazardous Materials*, [online] 152(1), pp.1–31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.043>.
14. Diana Che Lat, Asmani, D., Mohd Hanafie Yasin, Nur, S., Noor and Razif Razali (2023). Effect of Soil Contamination on Human Health and Environment with Preventive Measures: A Review. *CONSTRUCTION*, 3(1), pp.142–151. doi:<https://doi.org/10.15282/construction.v3i1.9404>.
15. Duarte, Regina M.B.O., et al. “Organic Pollutants in Soils.” *Soil Pollution*, 2018, pp. 103–126, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-849873-6.00005-4>.
16. EU4Green (2024). *Practical Guidance for Soil Pollution Management in the Western Balkans (WB6) - EU4Green*. [online] EU4Green. Available at: <https://eu4green.eu/practical-guidance-for-soil-pollution-management-in-the-western-balkans-wb6/>.
17. Europa.eu. (2022). *Soil pollution and health*. [online] Available at: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/zero-pollution/health/soil-pollution-and-health>
18. European Environment Agency. (2020). *Contamination from local sources*. [online] Available at: <https://www.eea.europa.eu/themes/soil/soil-threats> [Accessed 19 Mar. 2025].
19. European Environment Agency (2022). *Soil pollution and health — European Environment Agency*. [online] www.eea.europa.eu. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/health/soil-pollution>.
20. FAO and UNEP (2021). *Global assessment of soil pollution: Report*. FAO and UNEP. doi:<https://doi.org/10.4060/cb4894en>.
21. “Fate and Transport of Pollutants in Soil | Environmental Chemistry I Class Notes | Fiveable.” *Fiveable*, 2024.
22. Gautham Devendrapandi, Liu, X., Balu, R., Ramamoorthy Ayyamperumal, Mariadhas Valan Arasu, Mahimaluru Lavanya, Vasudeva, Woo Kyoung Kim and P.C. Karthika (2024). Innovative remediation strategies for persistent organic pollutants in soil and water: A comprehensive review. *Environmental research*, pp.118404–118404. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118404>.
23. Geoffroy Sere, et al. “Selection of Soil Health Indicators for Modelling Soil Functions to Promote Smart Urban Planning.” *Science of the Total Environment*, vol. 924, 1 May 2024, pp. 171347–171347, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171347>. Accessed 17 Apr. 2024.
24. Harun, S.N., Rahman, Z.A. and Damanhuri, N.A. (2025). Impact of landfill leachate contamination on the geotechnical behavior of granitic sandy-clayey soil. *International*

- Journal of Environmental Science and Technology*. doi:<https://doi.org/10.1007/s13762-025-06622-y>.
25. Hcienv.com. (2025). *Innovations in Soil Remediation*. [online] Available at: <https://www.hcienv.com/innovations-in-soil-remediation> [Accessed 18 Mar. 2025].
 26. He, F., Liu, F., Li, S., Mu, X., Han, Q., Song, L. and Huang, J.-H. (2025). A critical review of soil pollution sources and advances in the remediation of arsenic-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, [online] 302, p.118504. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118504>.
 27. IASPOINT. (2024). *Soil Ecosystems and Soil Biodiversity*. [online] Available at: <https://iaspoint.com/soil-ecosystems-and-soil-biodiversity/>
 28. Joyner, L., Gonzales, G., Gao, S. and Cachelin, A. (2024). Understanding environmental and food (in)justice through community-based research. pp.64–78. doi: <https://doi.org/10.4324/9781032631110-6>.
 29. Jones, Karl, and David Hackett. *Soils and Soil-Forming Material*. Landscape Institute, 30 Nov. 2017.
 30. Keesstra, S., Mol, G., de Leeuw, J., Okx, J., Molenaar, C., de Cleen, M. and Visser, S. (2018). Soil-Related Sustainable Development Goals: Four Concepts to Make Land Degradation Neutrality and Restoration Work. *Land*, 7(4), p.133. doi:<https://doi.org/10.3390/land7040133>.
 31. Lee, S.-H., Kim, S.-O., Lee, S.-W., Kim, M.-S. and Park, H. (2021). Application of Soil Washing and Thermal Desorption for Sustainable Remediation and Reuse of Remediated Soil. *Sustainability*, 13(22), p.12523. doi:<https://doi.org/10.3390/su132212523>.
 32. Li, T., Liu, Y., Lin, S., Liu, Y. and Xie, Y. (2019). Soil Pollution Management in China: A Brief Introduction. *Sustainability*, [online] 11(3), p.556. doi:<https://doi.org/10.3390/su11030556>.
 33. Lois Marie Gibbs and Levine, M. (1982). *Love Canal : my story*. Albany: State University Of New York Press.
 34. Mahdi Khodaparast and Amir Khoshgoftar (2024). Effect of Contamination on Geotechnical Characteristics of Soil. *IntechOpen eBooks*. [online] doi:<https://doi.org/10.5772/intechopen.1004215>.
 35. Malik, K., Iftikhar, A., Maqsood, Q., Tariq, M.R. and Ali, S.W. (2025). Cleaner horizons: Exploring advanced technologies for pollution remediation. *Biotechnology Reports*, [online] 46, p.e00890. doi:<https://doi.org/10.1016/j.btre.2025.e00890>.
 36. Mohammad, Shamsuddeen Jumande, et al. “Heavy Metal Pollution and Transformation in Soil: A Comprehensive Review of Natural Bioremediation Strategies.” *Journal of*

Umm Al-Qura University for Applied Sciences, 3 June 2025, <https://doi.org/10.1007/s43994-025-00241-6>.

37. Münzel, T., Hahad, O., Daiber, A. and Landrigan, P. (2022). Soil and water pollution and human health: what should cardiologists worry about? *Cardiovascular Research*, [online] 119(2). doi:<https://doi.org/10.1093/cvr/cvac082>.
38. Nuñez, Andre Martin. “CHAPTER-1-SOIL-AS-NATURAL-AND-DYNAMIC-BODY.” *Scribd*, 2022.
39. Or, Dani, et al. “Natural and Managed Soil Structure: On the Fragile Scaffolding for Soil Functioning.” *Soil and Tillage Research*, vol. 208, 1 Apr. 2021, p. 104912, <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104912>.
40. Osman, Khan Towhid. “Soil Pollution.” *Soil Degradation, Conservation and Remediation*, 5 Sept. 2013, pp. 149–226, https://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9_6.
41. Papa, Stefania, and Marta Alvarez-Romero. “Biological Activities in Artificially Heavy-Metal-Contaminated Growing Substrates.” *Soil Systems*, vol. 7, no. 4, 11 Dec. 2023, pp. 111–111, www.mdpi.com/2571-8789/7/4/111, <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040111>. Accessed 30 Oct. 2024.
42. Pavetest. (2025). *Ορία Atterberg - Υδαρότητα και πλαστικότητα*. [online] Available at: <https://pavetest.gr/index.php/el/proionta/edafika-ylika/oria-atterberg-ydarothta-kai-plastikothta> [Accessed 26 Aug. 2025].
43. Radka Donkova, and Nadya Kaloyanova. “The Impact of Soil Pollutants on Soil Microbial Activity.” NATO Science for Peace and Security Series. C, Environmental Security, 23 Feb. 2008, pp. 73–93, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8257-3_6.
44. Raimi, M.O., Iyingiala, A.-A., Sawyerr, O.H., Saliu, A.O., Ebuete, A.W., Emberru, R.E., Sanchez, N.D. and Osungbemiro, W.B. (2022). Leaving No One Behind: Impact of Soil Pollution on Biodiversity in the Global South: A Global Call for Action. *Sustainable Development and Biodiversity*, pp.205–237. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-19-3326-4_8.
45. Rasheed, M.A., Patil, D.J. and Dayal, A.M. (2013). Microbial Techniques for Hydrocarbon Exploration. *InTech eBooks*. doi:<https://doi.org/10.5772/50885>.
46. Robinson, J.M., Liddicoat, C., Muñoz-Rojas, M. and Breed, M.F. (2024). Restoring soil biodiversity. *Current Biology*, 34(9), pp.R393–R398. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.02.035>.
47. Rodrigues, L., Carolina, P.L. and Silva (2020). From classic methodologies to application of nanomaterials for soil remediation: an integrated view of methods for decontamination of toxic metal(oid)s. *Environmental Science and Pollution Research*, [online] 27(10), pp.10205–10227. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356020080328>.

48. Sachan, R., Tiwari, T. and Tripathi, S. (2023). *Impact of microplastics on soil bio-physical environment and crop production*. pp.105–108.
49. Sales da Silva, I.G., Gomes de Almeida, F.C., Padilha da Rocha e Silva, N.M., Casazza, A.A., Converti, A. and Asfora Sarubbo, L. (2020). Soil Bioremediation: Overview of Technologies and Trends. *Energies*, [online] 13(18), p.4664. doi:<https://doi.org/10.3390/en13184664>.
50. Samanth, Mahima. “An Inclusive Evaluation of Soil Pollution and Its Remediation by Chemical, Physical and Biological Methods.” SSRN Electronic Journal, 2024, papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4905334, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4905334>. Accessed 22 July 2025.
51. Samarasinghe, Oshadhi, et al. “Looking at Soils through the Natural Capital and Ecosystem Services Lens.” *Oclc.org*, 2023.
52. Santos, M., Rebola, S. and Evtuguin, D.V. (2025). Soil Remediation: Current Approaches and Emerging Bio-Based Trends. *Soil Systems*, [online] 9(2), pp.35–35. doi:<https://doi.org/10.3390/soilsystems9020035>.
53. Sapkota, A. (2020). *Soil Formation (Pedogenesis)- Factors, Process/Steps, Examples*. [online] Microbe Notes. Available at: <https://microbenotes.com/soil-formation-pedogenesis/> [Accessed 11 Jun. 2021].
54. Schoonover, Jon E., and Jackie F. Crim. “An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management.” *Journal of Contemporary Water Research & Education*, vol. 154, no. 1, Apr. 2015, pp. 21–47, <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2015.03186.x>.
55. Shi, B., Meng, J., Wang, T., Li, Q., Zhang, Q. and Su, G. (2024). The main strategies for soil pollution apportionment: A review of the numerical methods. *Journal of Environmental Sciences*, [online] 136, pp.95–109. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.09.027>.
56. Show, K.-Y., Lee, D.-J., Tay, J.-H., Lee, T.-M. and Chang, J.-S. (2015). Microalgal drying and cell disruption – Recent advances. *Bioresource Technology*, 184, pp.258–266. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.139>.
57. Stromberger, Mary E, et al. *Soil Ecosystem Services and Natural Capital*. 14 Dec. 2015, <https://doi.org/10.2136/2015.soilecosystemsservices.2014.0055>.
58. Suazo-Hernández, Jonathan, et al. “Impact on Some Soil Physical and Chemical Properties Caused by Metal and Metallic Oxide Engineered Nanoparticles: A Review.” *Nanomaterials*, vol. 13, no. 3, 31 Jan. 2023, p. 572, <https://doi.org/10.3390/nano13030572>. Accessed 17 Mar. 2023.
59. Sujaina Madasseri, et al. “Soil Health Assessment: Indicators, Monitoring and Evaluation.” *ResearchGate*, Aug. 2023, pp. 391–413,

www.researchgate.net/publication/372807515_Soil_Health_Assessment_Indicators_Monitoring_and_Evaluation.

60. Sylwia Kukowska and Katarzyna Szewczuk-Karpisz (2024). Management of the soil environment using biochar and zeolite in various combinations: impact on soil condition and economical aspects. *Journal of Soils and Sediments*. doi:<https://doi.org/10.1007/s11368-024-03927-2>.
61. Valdiviezo, G., Carlos Alberto Castañeda-Olivera, Rita Jaqueline Cabello-Torres, Fernando, F., Munive, V. and Alfaro, A. (2023). Scientometric study of treatment technologies of soil pollution: Present and future challenges. *Applied Soil Ecology*, 182, pp.104695–104695. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104695>.
62. Verma, A. (2021). Bioremediation Techniques for Soil Pollution: An Introduction. *Biodegradation [Working Title]*. doi:<https://doi.org/10.5772/intechopen.99028>.
63. Vinoth, S., Rajeshkumar, V., Sivabalan, T., Surya, M., Thamilkumaran, M. and Saiprakash, S. (2021). Impact of industrial effluents on geotechnical properties of soil. *Materials Today: Proceedings*, 37, pp.2636–2643. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.513>.
64. Wang, D., Chen, J., Tang, Z. and Zhang, Y. (2024). Effects of Soil Physical Properties on Soil Infiltration in Forest Ecosystems of Southeast China. *Forests*, [online] 15(8), pp.1470–1470. doi:<https://doi.org/10.3390/f15081470>.
65. Wei, J., Shi, P., Cui, G., Li, X., Xu, M., Xu, D. and Xie, Y. (2023). Analysis of soil pollution characteristics and influencing factors based on ten electroplating enterprises. *Environmental Pollution*, [online] 337, p.122562. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122562>.
66. Zahermand, Samad, et al. “Analysis of the Physical and Chemical Properties of Soil Contaminated with Oily (Petroleum) Hydrocarbons.” *Earth Sciences Research Journal*, vol. 24, no. 2, 1 Apr. 2020, pp. 163–168, <https://doi.org/10.15446/esrj.v24n2.76217>. Accessed 12 Oct. 2022.
67. Zhao, Shan, et al. “Impacts of Contaminants from Different Sources on Geotechnical Properties of Soils.” *Sustainability*, vol. 15, no. 16, 1 Jan. 2023, p. 12586, www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12586, <https://doi.org/10.3390/su151612586>. Accessed 7 Dec. 2023.
68. Zheng, Yanlin, et al. “Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Expansive Soil Polluted by Heavy Metals.” *IOP Conference Series*, vol. 218, 23 Feb. 2019, pp. 012022–012022, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/218/1/012022>. Accessed 29 Nov. 2023.