



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΚΑΖΑΝΗ ANNA

ΑΜ: 3020084

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΡΟΦΙΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Κακάβας Κωνσταντίνος

Οκτώβριος 2024

Περιεχόμενα

Λέξεις κλειδιά - Ορισμοί.....	3
Εισαγωγή.....	3
Ιστορική Αναδρομή	3
Τεχνολογίες αντιρρύπανσης του αέρα.....	4
Τεχνολογίες αντιρρύπανσης του εδάφους	8
Τεχνολογίες αντιρρύπανσης των ποταμών	9
Τεχνολογίες αντιρρύπανσης των θαλασσών.....	11
Νομοθεσία.....	12
Ευρωπαϊκή νομοθεσία.....	12
Ελληνική νομοθεσία.....	13
Ατμοσφαιρική ρύπανση	13
Ρύποι και πηγές ρύπανσης.....	13
Οι επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ποιότητα του αέρα και στους οργανισμούς.....	16
Επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία.....	16
Επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα οικοσυστήματα και τους οργανισμούς	17
Επιδράσεις στο κλίμα και στους ατμοσφαιρικούς βρόχους ανάδρασης (<i>Feedback Loops</i>)	17
Τεχνολογίες αντιρρύπανσης	18
Ρύπανση του εδάφους	21
Ρύποι και πηγές εδαφικής ρύπανσης.....	22
Οι επιδράσεις της ρύπανσης στην ποιότητα του εδάφους και στους οργανισμούς.....	25
Επίδραση της ρύπανσης του εδάφους στη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους .	25
Επιδράσεις της ρύπανσης του εδάφους σε φυτά και άλλους οργανισμούς	27
Κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία	28
Τεχνολογίες αντιρρύπανσης	28
Παραδοσιακές Τεχνολογίες Αποκατάστασης.....	28
Βιολογικές Μεθόδοι	29
Σύγχρονες Τεχνολογίες για την αποκατάσταση του εδάφους.....	31
Πράσινες και Βιώσιμες Τεχνολογίες Αποκατάστασης.....	32
Η περίπτωση της πετρελαιοκηλίδας στο Κουβέιτ.....	32
Ρύπανση των ποταμών.....	35
Ρύποι και πηγές ρύπανσης.....	35
Επιδράσεις της μόλυνσης των ποταμών στους οργανισμούς	40
Επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία	42

Αντιρρυπαντικές τεχνολογίες ποταμών	42
Βασικές Τεχνολογίες Αντιρρύπανσης για Αστικά Ποτάμια	43
Ρύπανση από πλοία	45
Προηγμένες τεχνολογίες παρακολούθησης και συλλογής δεδομένων	46
Θαλάσσια Ρύπανση	47
Ρύποι και πηγές ρύπανσης.....	47
Επιπτώσεις της θαλάσσιας ρύπανσης.....	50
Επίδραση της θαλάσσιας ρύπανσης στην ποιότητα της θάλασσας.....	50
Επιδράσεις σε Θαλάσσιους Οργανισμούς	51
Αντιρρυπαντικές Τεχνολογίες	53
Προηγμένα Αντιρρυπαντικά Συστήματα Πλοίου	53
Βιοεπικάλυψη (biofouling)	54
Διαχείρισης πλαστικής ρύπανσης και απορριμμάτων.....	54
Η περίπτωση του Exxon Valdez.....	56
Πετρελαιοκηλίδες.....	59
Βιοαποκατάσταση	59
Προηγμένα υλικά για τον καθαρισμό πετρελαιοκηλίδων	60
Μαγνητικά Νανοδομημένα Σύνθετα Ροφητικά	60
Υδροφώβες και Υπερυδροφώβες Μεμβράνες	60
Χημικά Διασκορπιστικά	61
Συμβατικές τεχνολογίες καθαρισμού πετρελαιοκηλίδων.....	61
Έκπλυση ακτογραμμών	62
Φράγματα Αντιρρύπανσης.....	62
Συστήματα Κενού	64
Ροφητικά υλικά.....	64
Καθαριστικά ακτογραμμών και παράγοντες βιοαποκατάστασης	65
Επιτόπια καύση	66
Πειραματική διαδικασία	67
Αποτελέσματα	67
Συζήτηση.....	70
Συμπεράσματα	70
Επίλογος	71
Βιβλιογραφία.....	72
Πηγές Εικόνων	81

Λέξεις κλειδιά - Ορισμοί

Ρύπανση: ορίζεται η παρουσία ουσιών ή/και θερμότητας σε περιβαλλοντικά μέσα (αέρας, νερό, γη) των οποίων η φύση, η τοποθεσία ή η ποσότητα προκαλούν ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. [1]

Κροκίδωση: είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα αιωρούμενα σωματίδια συσσωρεύονται μεταξύ τους, επειδή οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ τους υπερνικούν τις απωστικές δυνάμεις που προκαλούνται από παρόμοια επιφανειακά φορτία. [2]

Βιοδιήθηση: ορίζεται ως μια διαδικασία διήθησης όπου το μέσο φίλτρου περιλαμβάνει πορώδες υλικό (π.χ. άμμο, κοκκοποιημένο ενεργό άνθρακα (GAC) ή ένα συνθετικό υλικό φορέα), το οποίο αποικίζεται από αυτόχθονες μικροβιακές κοινότητες και όπου οι μικροοργανισμοί εκτελούν τουλάχιστον ένα από τα βασικές θεραπευτικές λειτουργίες της διαδικασίας. [3]

Βιότοπος: ορίζεται το μέρος όπου ζει και αναπαράγεται ένας οργανισμός ή μια κοινότητα οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων όλων των έμβιων και μη παραγόντων ή συνθηκών του περιβάλλοντος. [4]

Βυθοκόρηση: Η βυθοκόρηση είναι η θαλάσσια μεταφορά φυσικών υλικών από ένα μέρος του υδάτινου περιβάλλοντος σε άλλο με εξειδικευμένα σκάφη βυθοκόρησης. [5]

Εισαγωγή

Εδώ και αρκετούς αιώνες, τα προϊόντα με βάση τα παράγωγα του πετρελαίου είναι σε ευρεία χρήση. Παρ' ότι είναι βοηθητικά για την καλύτερη διαβίωση του ανθρώπου, ρυπαίνουν σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον και για αυτό οι επιστήμονες, ήδη από τον 17^ο αιώνα, βρήκαν τεχνολογίες για την προστασία και την ελαχιστοποίηση της ζημιάς που προκαλούν. Σήμερα, ειδικά στη περίπτωση της θαλάσσιας αντιρρύπανσης, με τη χρήση υλικών από πολυπροπυλένιο για την απορρόφηση πετρελαιοειδών, η προστασία του θαλάσσιου οικοσυστήματος γίνεται ευκολότερη.

Ιστορική Αναδρομή

Η ρύπανση των φυσικών πόρων (αέρας, νερά, θάλασσες, ποτάμια, έδαφος) αποτελεί, ιστορικά, ένα πρόβλημα το οποίο απασχολούσε έντονα την κοινωνία. Ειδικά μετά τη βιομηχανική επανάσταση (1760), φάνηκε πως ήταν απαραίτητο να βρεθούν τρόποι

διαχείρισης και περιορισμού της, καθώς είχε έντονο αποτύπωμα στην υγεία των ανθρώπων.

Τεχνολογίες αντιρρύπανσης του αέρα

Η ατμοσφαιρική ρύπανση απασχολεί τις ανθρώπινες κοινωνίες εδώ και αιώνες, εξελισσόμενη από ένα τοπικό ζήτημα σε μια παγκόσμια περιβαλλοντική πρόκληση. Σε όλη την ιστορία, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί διάφορες τεχνικές για την καταπολέμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με γνώμονα την αυξανόμενη επιστημονική κατανόηση, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις νομοθετικές ενέργειες. Αυτό το άρθρο διερευνά την ιστορική τροχιά των αντιρρυπαντικών τεχνικών για την ατμοσφαιρική ρύπανση, επισημαίνοντας βασικά ορόσημα και καινοτομίες.

Αρχαία και Μεσαιωνικά Μέτρα

Η επίγνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των επιπτώσεών της χρονολογείται από τους αρχαίους πολιτισμούς. Ενώ οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στοιχειώδεις, έθεσαν τις βάσεις για μελλοντικές εξελίξεις.

Φυσικός αερισμός: Στις αρχαίες πόλεις, ο φυσικός αερισμός ήταν η κύρια μέθοδος για τη διασπορά του καπνού και των ρύπων. Οι πόλεις συχνά σχεδιάζονταν με μεγάλους δρόμους και ανοιχτούς χώρους για να διευκολύνουν τη ροή του αέρα. Για παράδειγμα, η διάταξη των ρωμαϊκών πόλεων περιελάμβανε δημόσιους χώρους όπως πλατείες και λουτρά, που βοήθησαν στη μείωση της συγκέντρωσης καπνού και οσμών από οικιακές και βιομηχανικές δραστηριότητες. [6]

Επιλογή καυσίμου: Οι αρχαίες και οι μεσαιωνικές κοινωνίες συχνά επέλεγαν καύσιμα όπως το ξύλο και το κάρβουνο. Το κάρβουνο, που καίγεται πιο καθαρά από το ακατέργαστο ξύλο, χρησιμοποιούνταν ευρέως για μαγείρεμα και θέρμανση. Ωστόσο, καθώς οι πόλεις μεγάλωσαν και το ξύλο έγινε σπάνιο, η εξάρτηση από τον άνθρακα αυξήθηκε, οδηγώντας σε πιο σημαντικά προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Πρώιμη Βιομηχανική Επανάσταση

Η Βιομηχανική Επανάσταση, που ξεκίνησε στα τέλη του 18ου αιώνα, σηματοδότησε ένα σημείο καμπής στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η μαζική αύξηση της κατανάλωσης άνθρακα για βιομηχανικές διεργασίες και θέρμανση οδήγησε σε σοβαρά προβλήματα ποιότητας του αέρα, ιδιαίτερα σε περιοχές που αστικοποιούνται γρήγορα.

Σχεδιασμός Καμινάδας: Μία από τις πρώτες τεχνικές διαχείρισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ήταν η κατασκευή υψηλότερων καμινάδων. Με τη διασπορά του καπνού σε μεγαλύτερα υψόμετρα, οι καμινάδες μείωσαν τη συγκέντρωση των ρύπων στο επίπεδο του εδάφους, ελαχιστοποιώντας έτσι τις άμεσες επιπτώσεις στην υγεία. Αυτή η μέθοδος δεν μείωσε τη συνολική ποσότητα της ρύπανσης, αλλά απλώς τη διέδωσε σε μια μεγαλύτερη περιοχή. [7]

Κανονισμοί δημόσιας υγείας: Οι αναπτυσσόμενες βιομηχανικές πόλεις άρχισαν να εφαρμόζουν κανονισμούς δημόσιας υγείας για την αντιμετώπιση της ρύπανσης. Για παράδειγμα, στις αρχές του 19ου αιώνα, το Ηνωμένο Βασίλειο εισήγαγε τον Νόμο για τη Δημόσια Υγεία του 1848, ο οποίος είχε ως στόχο τη βελτίωση των συνθηκών υγιεινής στις αστικές περιοχές. Αν και επικεντρώθηκαν κυρίως σε ασθένειες που μεταδίδονται στο νερό, αυτοί οι κανονισμοί επηρέασαν έμμεσα την ποιότητα του αέρα προωθώντας καθαρότερα αστικά περιβάλλοντα. [8]

Μέσα έως τέλη 19^{ου} αιώνα

Καθώς η εκβιομηχάνιση συνεχιζόταν, έγινε εμφανής η ανάγκη για πιο αποτελεσματικό έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Αυτή την περίοδο εισήχθησαν πιο στοχευμένα μέτρα.

Νόμοι για τη μείωση του καπνού: Σε απάντηση στη σοβαρή ρύπανση του καπνού σε πόλεις όπως το Λονδίνο, εισήχθησαν νόμοι για τη μείωση του καπνού. Ο νόμος για τη δημόσια υγεία του Ηνωμένου Βασιλείου του 1875 περιλάμβανε διατάξεις για την καταπολέμηση του καπνού από εργοστάσια και κατοικημένες περιοχές. Αυτοί οι νόμοι επέβαλλαν τη χρήση καθαρότερων καυσίμων και πιο αποτελεσματικών διαδικασιών καύσης στις βιομηχανικές λειτουργίες. [9]

Βιομηχανικοί Κανονισμοί: Συγκεκριμένοι κλάδοι αντιμετώπισαν αυξανόμενες ρυθμίσεις. Τα εργοστάσια έπρεπε να υιοθετήσουν τεχνολογίες που μειώνουν τις εκπομπές καπνού. Για παράδειγμα, η εισαγωγή μηχανικών συστημάτων τροφοδοσίας βελτίωσε την απόδοση καύσης καυσίμου, μειώνοντας την ποσότητα του καπνού που παράγεται.

Αρχές 20^{ου} Αιώνα

Οι αρχές του 20^{ου} αιώνα σηματοδότησαν την αρχή πιο συστηματικών προσπαθειών για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με γνώμονα την αυξανόμενη επιστημονική κατανόηση και τις ανησυχίες για τη δημόσια υγεία.

Νόμος για τα «αλκάλια» του 1906: Ένα από τα πρώτα νομοθετήματα που αντιμετώπισαν άμεσα τις βιομηχανικές εκπομπές ήταν ο νόμος για τα «αλκάλια» του Ηνωμένου Βασιλείου του 1906. Αυτός ο νόμος απαιτούσε από τα εργοστάσια να ελέγχουν την απελευθέρωση όξινων αερίων, όπως το υδροχλώριο, στην ατμόσφαιρα. Σηματοδότησε ένα σημαντικό βήμα προς τη ρύθμιση της βιομηχανικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην πηγή. [\[10\]](#)

Νόμοι για τις «ζώνες»: Πολλές πόλεις άρχισαν να εφαρμόζουν νόμους περί «ζώνης» για να διαχωρίσουν τις βιομηχανικές περιοχές από τις οικιστικές. Με τη δημιουργία καθορισμένων βιομηχανικών ζωνών, οι πόλεις θα μπορούσαν να διαχειριστούν καλύτερα τη ρύπανση και να προστατεύσουν τις κατοικημένες περιοχές από τις χειρότερες επιπτώσεις των βιομηχανικών εκπομπών.

Μέσα 20^{ου} Αιώνα

Οι τεχνολογικές εξελίξεις και η νομοθεσία ορόσημο χαρακτήρισαν τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, ενισχύοντας σημαντικά τα μέτρα ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Πλυντηρίδες και φίλτρα: Η ανάπτυξη πλυντηρίδων και ηλεκτροστατικών κατακρημνιστηρίων επέτρεψε στις βιομηχανίες να δεσμεύουν τα σωματίδια και τους αέριους ρύπους από τις εκπομπές προτού φτάσουν στην ατμόσφαιρα. Αυτές οι τεχνολογίες ήταν ζωτικής σημασίας για τη μείωση της βιομηχανικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. [\[11\]](#)

Καταλυτικοί μετατροπείς: Στη δεκαετία του 1970, η εισαγωγή καταλυτικών μετατροπέων στα οχήματα έφερε επανάσταση στον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον τομέα των μεταφορών. Οι καταλυτικοί μετατροπείς μείωσαν σημαντικά τις εκπομπές επιβλαβών αερίων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου και οι υδρογονάνθρακες από τα αυτοκίνητα, οδηγώντας σε ουσιαστικές βελτιώσεις στην ποιότητα του αέρα των πόλεων. [\[12\]](#)

Νόμοι για τον καθαρό αέρα: Ολοκληρωμένη νομοθεσία, όπως ο νόμος του Ηνωμένου Βασιλείου για τον καθαρό αέρα του 1956 και ο νόμος των ΗΠΑ για τον καθαρό αέρα του 1963, καθιέρωσαν πλαίσια για τη ρύθμιση της ποιότητας του αέρα. Αυτοί οι νόμοι

θέτουν πρότυπα εκπομπών για βιομηχανίες και οχήματα, χρηματοδότησαν την έρευνα για τον έλεγχο της ρύπανσης και παρείχαν μηχανισμούς επιβολής. Η ίδρυση ρυθμιστικών φορέων όπως η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) στις ΗΠΑ το 1970 ενίσχυσε περαιτέρω τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα. [\[13\]](#), [\[14\]](#)

Τέλη 20^{ου} αιώνα έως σήμερα

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι εξελίξεις στην τεχνολογία και η αυξανόμενη δέσμευση για περιβαλλοντική βιωσιμότητα έχουν οδηγήσει σε περαιτέρω πρόοδο στον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Γενικά συστήματα αποθείωσης και αποθείωσης NO_x: Τεχνολογίες όπως η αποθείωση καυσαερίων (FGD) και η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR) έχουν αναπτυχθεί για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του θείου (SO₂) και οξειδίων του αζώτου (NO_x) από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και βιομηχανικές πηγές. Αυτά τα συστήματα έχουν μειώσει σημαντικά την όξινη βροχή και το σχηματισμό αιθαλομίχλης. [\[15\]](#)

Φίλτρα σωματιδίων: Τα σύγχρονα φίλτρα και τα σακουλάκια αποτελούν πλέον στάνταρ εξοπλισμό σε πολλές βιομηχανίες, δεσμεύοντας τα λεπτά σωματίδια από τις εκπομπές. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν μειώσει σημαντικά την ποσότητα της σωματιδιακής ρύπανσης που απελευθερώνεται στον αέρα. [\[16\]](#)

Διεθνείς Συμφωνίες: Πρωτόκολλα όπως το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ (1987), που αποσκοπούσε στη μείωση των εκπομπών ουσιών που καταστρέφουν το όζον (O₃), και το Πρωτόκολλο του Κιότο (1997) και η Συμφωνία του Παρισιού (2015), που εστιάζουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αντικατοπτρίζουν μια παγκόσμια δέσμευση για την καταπολέμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. [\[17\]](#), [\[18\]](#), [\[19\]](#)

Αστικοί χώροι πρασίνου: Ο σύγχρονος πολεοδομικός σχεδιασμός συχνά περιλαμβάνει πράσινες υποδομές όπως πράσινες στέγες, αστικά δάση και πάρκα. Αυτοί οι χώροι συμβάλλουν στην απορρόφηση των ρύπων, στη μείωση των αστικών θερμικών νησιών και στη βελτίωση της συνολικής ποιότητας του αέρα.

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ηλεκτρικά οχήματα: Η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια μειώνει την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, περιορίζοντας σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση από την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, η αυξανόμενη υιοθέτηση ηλεκτρικών

οχημάτων (EV) συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών από τον τομέα των μεταφορών, μια σημαντική πηγή αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Τεχνολογίες αντιρρύπανσης του εδάφους

Ιστορικά, η μόλυνση του εδάφους από βαρέα μέταλλα και πετρελαιοειδή ήταν σε μεγάλο βαθμό ανεξέλεγκτη λόγω της έλλειψης ενημέρωσης σχετικά με τους περιβαλλοντικούς κινδύνους και τους κινδύνους για την υγεία. Πριν από τα μέσα του 20ου αιώνα, η βιομηχανική ρύπανση ήταν σε μεγάλο βαθμό ανεξέλεγκτη και οι τεχνικές αποκατάστασης του εδάφους ήταν σχεδόν ανύπαρκτες. Οι προσπάθειες για τη διαχείριση των μολυσμένων εδαφών βασιζόταν συνήθως στο φυσικό περιορισμό, όπως περίφραξη μολυσμένων περιοχών ή μετεγκατάσταση πληθυσμών σε ασφαλέστερες ζώνες. Ελάχιστη προσοχή δόθηκε στην περιβαλλοντική αποκατάσταση.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 και του 1980, με τη θέσπιση περιβαλλοντικών νόμων, όπως ο νόμος των ΗΠΑ για τα καθαρά ύδατα και η ίδρυση της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) τη δεκαετία του 1970, υπήρξε αυξανόμενη συνειδητοποίηση της ανάγκης για αποκατάσταση του εδάφους, ιδιαίτερα σε περιοχές που επηρεάζονται από εξορύξεις και βιομηχανικές δραστηριότητες.

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η κύρια προσέγγιση ήταν η εκσκαφή και η απόρριψη μολυσμένων εδαφών (*dig and dumb*). Αν και αυτή η μέθοδος ήταν απλή και αποτελεσματική για την απομάκρυνση της μόλυνσης, ήταν δαπανηρή, απαιτούσε μεγάλες χωματερές και απλώς μετέφερε το πρόβλημα αντί να το αντιμετωπίσει στην πηγή. Άρχισαν επίσης να εμφανίζονται τεχνολογίες σταθεροποίησης και στερεοποίησης (S/S), οι οποίες περιλάμβαναν την ανάμειξη μολυσμένων εδαφών με υλικά που θα δέσμευαν τα βαρέα μέταλλα και θα εμπόδιζαν τη μεταφορά τους στο περιβάλλον.

Η δεκαετία του 1990 σηματοδότησε την αρχή πιο εξελιγμένων τεχνικών επιτόπιας αποκατάστασης. Καθώς κατέστη σαφές ότι οι εκσκαφές και η απόρριψη μεγάλης κλίμακας δεν ήταν βιώσιμες τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη, οι ερευνητές στράφηκαν σε μεθόδους που θα μπορούσαν να επεξεργαστούν το μολυσμένο έδαφος.

Πλύσιμο εδάφους: Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την έκπλυση του εδάφους με ένα διάλυμα που διαχωρίζει τους ρύπους από τα σωματίδια του εδάφους. Οι ρύποι μπορούν

στη συνέχεια να συλλεχθούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία. Αυτή η προσέγγιση ήταν αποτελεσματική αλλά απαιτούσε μεγάλες ποσότητες νερού και χημικών.

Φυτοαποκατάσταση: Η φυτοεξυγίανση, που εισήχθη αυτή την περίοδο, είναι μια βιολογική μέθοδος που χρησιμοποιεί φυτά για την απορρόφηση, τη σταθεροποίηση και την απομάκρυνση των ρύπων από το έδαφος. Ορισμένα φυτά, γνωστά ως υπερσυσσωρευτές, έχουν την ικανότητα να προσλαμβάνουν μεγάλες ποσότητες μετάλλων όπως ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος και το κάδμιο από το έδαφος και να τα αποθηκεύουν στους ιστούς τους. Αν και αυτή η μέθοδος είναι φιλική προς το περιβάλλον και φθηνή, η εφαρμογή της περιορίζεται από τους ρυθμούς ανάπτυξης των φυτών και τις εποχιακές παραλλαγές.

Βιοαποκατάσταση: Η χρήση μικροβίων για την αποικοδόμηση των ρύπων (βιοαποκατάσταση) άρχισε να κερδίζει έλξη κατά τη διάρκεια αυτής της εποχής. Στην περίπτωση των μολυσμένων με βαρέα μέταλλα εδάφη, η εστίαση ήταν στα μικρόβια που μπορούσαν είτε να μετατρέψουν τα μέταλλα σε λιγότερο τοξικές μορφές είτε να τα ακινητοποιήσουν στο έδαφος. [20]

Τεχνολογίες αντιρρύπανσης των ποταμών

Η ιστορική εξέλιξη των τεχνολογιών αντιρρύπανσης των ποταμών έχει περάσει από διάφορα στάδια, τα οποία αντανakλούν τις τεχνολογικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές ανάγκες κάθε εποχής.

Πρώιμες Μέθοδοι (Πριν από τον 20^ο αιώνα)

Στους προηγούμενους αιώνες, η αποκατάσταση των ποταμών επικεντρωνόταν κυρίως σε βασικές φυσικές παρεμβάσεις. Οι κύριες ανησυχίες εκείνη την εποχή ήταν πρακτικά ζητήματα, όπως ο έλεγχος των πλημμυρών και η ναυσιπλοΐα, παρά η οικολογική αποκατάσταση. Τα ποτάμια συχνά γίνονταν φράγματα, εκτρέπονταν ή άλλαζαν τα πρότυπα ροής τους για να αποφευχθούν οι πλημμύρες ή χρησιμοποιούνταν για την άρδευση αγροτικών εκτάσεων. Ενώ αυτές οι παρεμβάσεις αντιμετώπιζαν βραχυπρόθεσμες ανθρώπινες ανάγκες, διέκοψαν τις φυσικές διαδικασίες των ποταμών.

20^{ος} Αιώνας: Μηχανικός Έλεγχος και Μετρίασμός Ρύπανσης

Η βιομηχανική επανάσταση και η επακόλουθη αστικοποίηση οδήγησαν σε σοβαρή ρύπανση των ποταμών, η οποία απαιτούσε πιο εστιασμένες παρεμβάσεις. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, χρησιμοποιήθηκαν μηχανικές μέθοδοι όπως η βυθοκόρηση και η εκτροπή λυμάτων για τη διαχείριση των ορατών επιπτώσεων της



Εικόνα 1 Βυθοκόρος σε ποτάμι [\[1\]](#)

ρύπανσης. Η βυθοκόρηση, για παράδειγμα, περιελάμβανε την απομάκρυνση μολυσμένων ιζημάτων, ενώ οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων αναχαίτιζε τα μη επεξεργασμένα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα προτού φτάσουν στα ποτάμια.

Την περίοδο αυτή επικράτησαν και οι χημικές μέθοδοι. Χημικές επεξεργασίες, όπως η κροκίδωση ή η προσθήκη ασβέστη, χρησιμοποιήθηκαν για τη δέσμευση και την εξουδετέρωση των ρύπων στα υδατικά συστήματα. Αν και αποτελεσματικές στη μείωση της ρύπανσης, αυτές οι μέθοδοι ήταν συχνά προσωρινές και δεν αντιμετώπιζαν τις βαθύτερες αιτίες της υποβάθμισης των ποταμών. Επιπλέον, η έντονη χρήση χημικών ουσιών μερικές φορές οδήγησε σε ακούσιες οικολογικές συνέπειες.

Δεκαετίες 1970 και 1980: Άνοδος Οικολογικών Προσεγγίσεων

Το περιβαλλοντικό κίνημα της δεκαετίας του 1970 έφερε αυξημένη ευαισθητοποίηση για τις οικολογικές επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στα ποτάμια. Αυτή η αλλαγή οδήγησε σε μεγαλύτερη εστίαση, σε πιο ολιστικές προσπάθειες αποκατάστασης του ποταμού. Αντί απλώς να απομακρύνουν τους ρύπους, οι οικολογικές προσεγγίσεις στόχευαν στην αποκατάσταση των φυσικών λειτουργιών του ποταμού και της βιοποικιλότητας. Η αποκατάσταση της παρόχθιας βλάστησης, η δημιουργία οικοτόπων στο ρεύμα και η επανασύνδεση των πλημμυρικών πεδιάδων έγιναν κοινές πρακτικές κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Μια αξιοσημείωτη εξέλιξη κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ήταν η χρήση βιοτεχνολογικών μεθόδων. Για παράδειγμα, η βλαστική σταθεροποίηση με χρήση αυτοφυών φυτών χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της διάβρωσης κατά μήκος των όχθων ποταμών, προωθώντας τόσο την οικολογική όσο και τη δομική ανθεκτικότητα.

Τέλη 20^{ου} αιώνα: Βιολογική και Βασισμένη σε Διεργασίες Αποκατάσταση

Στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, οι προσπάθειες αποκατάστασης άρχισαν να επικεντρώνονται στις βιολογικές διεργασίες των ποταμών. Η εισαγωγή τεχνικών βιοδιήθησης, όπου χρησιμοποιούνται φυσικά φυτικά συστήματα για το φιλτράρισμα των ρύπων, έγινε δημοφιλής. Επιπλέον, η επανεισαγωγή υδρόβιων ειδών που είχαν χαθεί λόγω της ρύπανσης ή της καταστροφής των οικοτόπων βοήθησε στην ανοικοδόμηση των οικοσυστημάτων.

Η αποκατάσταση βασισμένη σε διαδικασίες, η οποία έγινε γνωστή στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της δεκαετίας του 2000, περιλάμβανε την αποκατάσταση των φυσικών διεργασιών που διαμορφώνουν τους ποταμούς, όπως η μεταφορά ιζημάτων, η ροή του νερού και η δυναμική των πλημμυρικών πεδιάδων. Αντί να δημιουργήσουν στατικές δομές, οι μηχανικοί στόχευαν να αποκαταστήσουν τη δυναμική φύση των ποταμών, επιτρέποντάς τους να αναδιαμορφωθούν και να προσαρμοστούν φυσικά. [\[21\]](#)

Τεχνολογίες αντιρρύπανσης των θαλασσών

Η αποκατάσταση των θαλάσσιων περιβαλλόντων έχει μακρά ιστορία ανάπτυξης, που επικεντρώνεται κυρίως στην αντιμετώπιση της μόλυνσης που προκαλείται από βιομηχανικές και αστικές δραστηριότητες. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση μολυσμένων θαλάσσιων τοποθεσιών έχουν εξελιχθεί σημαντικά με την πάροδο του χρόνου.

Πρώιμες προσεγγίσεις

Οι αρχικές προσπάθειες τον 20^ο αιώνα περιστρέφονταν κυρίως γύρω από τον περιορισμό. Αυτό περιλάμβανε την απομόνωση μολυσμένων περιοχών για να αποτραπεί η εξάπλωση των ρύπων σε άλλα μέρη του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Απλά εμπόδια, όπως σάκοι άμμου και τοίχοι βράχων, χρησιμοποιήθηκαν σε παράκτιες περιοχές για να περιορίσουν τις διαρροές, αλλά αυτές οι πρώτες μέθοδοι ήταν στοιχειώδεις και συχνά αναποτελεσματικές.

Μια σημαντική πρώιμη καινοτομία ήταν η «βυθοκόρηση», όπου τα μολυσμένα ιζήματα απομακρύνονται φυσικά από τον βυθό της θάλασσας. Αν και είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση μεγάλων ποσοτήτων μολυσμένου υλικού, η βυθοκόρηση επικρίθηκε συχνά για τις καταστροφικές της επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα, καθώς μπορούσε να απελευθερώσει εκ νέου τους ρύπους στη στήλη του νερού, εξαπλώνοντας περαιτέρω τη ρύπανση.

Προόδους στα μέσα του 20^{ου} αιώνα

Μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, οι τεχνικές φυσικής αποκατάστασης γνώρισαν σημαντική πρόοδο. Κατά τη δεκαετία του 1960, αναπτύχθηκε η τεχνολογία των πετρελαιοσυλλεκτών (*skimmers*) η οποία έφερε επανάσταση στη διαχείριση των πετρελαιοκηλίδων. Τα φράγματα (*oil booms*), σχεδιασμένοι για να απορροφούν λάδι στην επιφάνεια του νερού και οι συλλέκτες πετρελαίου, έγιναν απαραίτητα εργαλεία, ειδικά σε περιστατικά εκτεταμένης διαρροής όπως η περίπτωση του Torrey Canyon το 1967. Αυτές οι μέθοδοι, ενώ είναι αποτελεσματικές στον περιορισμό και την αφαίρεση του λαδιού περιορίζονται σε επιφανειακές διαρροές και δεν αντιμετωπίζουν υποεπιφανειακή μόλυνση ή εξαιρετικά τοξικές ουσίες όπως τα βαρέα μέταλλα.

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, τα χημικά διασκορπιστικά εισήχθησαν επίσης ως εργαλείο αποκατάστασης. Αυτές οι χημικές ουσίες διασπούν τις πετρελαιοκηλίδες σε μικρότερα σταγονίδια, προάγοντας τη φυσική υποβάθμιση. Ωστόσο, οι ανησυχίες για την περιβαλλοντική τοξικότητα των ίδιων των διασκορπιστικών οδήγησαν σε συζητήσεις σχετικά με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις τους στη θαλάσσια ζωή. [22]

Νομοθεσία

Η νομοθεσία για τη ρύπανση της θάλασσας από πετρελαιοειδή συνδυάζει διεθνείς και εθνικές ρυθμίσεις, με βασικό στόχο την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Ευρωπαϊκή νομοθεσία

Στην Ευρωπαϊκή ένωση εφαρμόζονται γενικά οι παρακάτω κανονισμοί:

- Οδηγία 2005/35/EK: Αφορά τη ρύπανση της θάλασσας από πετρελαιοειδή και άλλες επικίνδυνες ουσίες. Θεσπίζει μέτρα για την πρόληψη και την καταπολέμηση της ρύπανσης της θάλασσας, με έμφαση στη θαλάσσια ρύπανση από πλοία και τη θέσπιση αυστηρών κανόνων για την αποφυγή ατυχημάτων. [23]
- Κανονισμός 782/2003/EK: Αναφέρεται στη χρήση της τεχνολογίας για τη μείωση της ρύπανσης από πετρελαιοειδή. Αφορά τα πλοία και καθορίζει τις υποχρεώσεις τους για τη χρήση τεχνολογιών που μειώνουν την ρύπανση της θάλασσας. [24]
- Οδηγία 2013/39/EE: Ορίζει τον τρόπο δράσης για τη διαχείριση της ρύπανσης από πετρελαιοειδή και άλλα επικίνδυνα χημικά. [25]

- Ευρωπαϊκό Σύστημα Ελέγχου της Θαλάσσιας Ρύπανσης (HELCOM): Συνεργασία για την καταπολέμηση της ρύπανσης και τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών, όπως τα πολυμερή υλικά για την απορρόφηση πετρελαιοειδών. [\[26\]](#)

Ελληνική νομοθεσία

Η Ελληνική νομοθεσία ορίζει τα εξής:

- Νόμος 3983/2011: Εφαρμόζει την ευρωπαϊκή νομοθεσία για την πρόληψη και καταπολέμηση της ρύπανσης από πετρελαιοειδή και άλλες επικίνδυνες ουσίες. [\[27\]](#)
- Προεδρικό Διάταγμα 45/2012: Καθορίζει τις διαδικασίες και τις αρμοδιότητες για την εφαρμογή μέτρων αποκατάστασης θαλάσσιας ρύπανσης, συμπεριλαμβάνοντας τη χρήση τεχνολογιών, όπως τα πολυμερή υλικά. [\[28\]](#)
- Νόμος 4042/2012: Περί προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τη ρύπανση, με ενσωμάτωση διεθνών και ευρωπαϊκών κανόνων. [\[29\]](#)

Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι μια από τις πιο σοβαρές περιβαλλοντικές προκλήσεις παγκοσμίως, που χαρακτηρίζεται από την παρουσία επιβλαβών ουσιών στην ατμόσφαιρα που ενέχουν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα και το κλίμα. Αυτοί οι ρύποι προέρχονται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανικών εκπομπών, των καυσαερίων των οχημάτων, των γεωργικών δραστηριοτήτων και των δασικών πυρκαγιών.

Οι κοινοί ατμοσφαιρικοί ρύποι περιλαμβάνουν σωματίδια (*PM*), οξείδια του αζώτου (*NO_x*), διοξείδιο του θείου (*SO₂*), μονοξείδιο του άνθρακα (*CO*) και πτητικές οργανικές ενώσεις (*VOCs*). Η μακροχρόνια έκθεση σε αυτές τις ουσίες έχει συνδεθεί με αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις, ενώ ορισμένοι ρύποι όπως τα αέρια του θερμοκηπίου συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην κλιματική αλλαγή.

Ρύποι και πηγές ρύπανσης

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αέριους ρύπους, σωματίδια και δευτερογενείς ρύπους που σχηματίζονται από χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα.

Αέριοι ρύποι:

Αυτά περιλαμβάνουν αέρια όπως οξείδια του αζώτου (NO_x), διοξείδιο του θείου (SO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), πτητικές οργανικές ενώσεις ($VOCs$) και όζον (O_3). Αυτοί οι ρύποι εκπέμπονται κυρίως από βιομηχανικές διεργασίες, καυσαέρια οχημάτων και σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Στο αστικό περιβάλλον, τα οξείδια του αζώτου και οι πτητικές οργανικές ενώσεις αντιδρούν παρουσία ηλιακού φωτός για να σχηματίσουν το όζον στο επίπεδο του εδάφους, ένα κύριο συστατικό της αιθαλομίχλης.

Σωματίδια (PM):

Τα σωματίδια είναι ένα σύνθετο μείγμα μικροσκοπικών σωματιδίων που αιωρούνται στον αέρα. Κατηγοριοποιείται σε PM_{10} (σωματίδια με διάμετρο 10 μικρομέτρων ή μικρότερη) και $PM_{2.5}$ (σωματίδια με διάμετρο 2,5 μικρομέτρων ή μικρότερη). Αυτά τα σωματίδια μπορούν να εκπέμπονται απευθείας από πηγές όπως εργοτάξια, μη ασφαλισμένους δρόμους και καπνοδόχους ή μπορούν να σχηματιστούν στην ατμόσφαιρα όταν αντιδρούν στον αέρα αέρια από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, βιομηχανίες και αυτοκίνητα.

Δευτερογενείς ρύποι:

Οι δευτερογενείς ρύποι δεν εκπέμπονται απευθείας αλλά σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών αντιδράσεων μεταξύ των πρωτογενών ρύπων. Για παράδειγμα, το όζον (O_3), ενώ υπάρχει φυσικά στη στρατόσφαιρα, είναι ένας επιβλαβής δευτερογενής ρύπος στο επίπεδο του εδάφους, που σχηματίζεται από την αντίδραση οξειδίων του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων παρουσία ηλιακού φωτός.

Πηγές Ατμοσφαιρικών Ρύπων

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι προέρχονται από ποικίλες ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές.

Ανθρωπογενείς πηγές

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλλουν σημαντικά στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Οι βασικές πηγές περιλαμβάνουν:

Μεταφορά: Η καύση ορυκτών καυσίμων σε αυτοκίνητα, φορτηγά, πλοία και αεροπλάνα απελευθερώνει σημαντικές ποσότητες CO , NO_x και $VOCs$ στην

ατμόσφαιρα. Οι μεταφορές αποτελούν επίσης σημαντική πηγή σωματιδίων, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές.

Βιομηχανικές εκπομπές: Οι βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών παραγωγής ενέργειας, των διυλιστηρίων και των μονάδων παραγωγής, εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες NO_x , SO_2 , $VOCs$ και σωματιδίων. Επίσης, οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του θείου και οξειδίων του αζώτου, που συμβάλλουν στην όξινη βροχή και το σχηματισμό αιθαλομίχλης.

Γεωργία: Οι γεωργικές δραστηριότητες συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση μέσω της απελευθέρωσης αμμωνίας (NH_3) από λιπάσματα και ζωικά απόβλητα. Η καύση των υπολειμμάτων των καλλιεργειών εκπέμπει επίσης σωματίδια και αέρια όπως μονοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο (CH_4).

Διαχείριση αποβλήτων: Οι χώροι υγειονομικής ταφής και η αποτέφρωση αποβλήτων συμβάλλουν στις εκπομπές μεθανίου και πτητικές οργανικές ενώσεις, ενώ η υπαίθρια καύση των αποβλήτων απελευθερώνει σωματίδια και τοξικά αέρια όπως διοξίνες και φουράνια.

Φυσικές πηγές

Οι φυσικές διεργασίες απελευθερώνουν επίσης ρύπους στην ατμόσφαιρα, σε μικρότερες συγκεντρώσεις από αυτούς που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες.

Ηφαιστειακές εκρήξεις: Τα ηφαίστεια εκπέμπουν διοξείδιο του θείου (SO_2), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), σωματίδια και ίχνη άλλων αερίων. Οι μεγάλες εκρήξεις μπορούν να έχουν παγκόσμιο αντίκτυπο με έγχυση σωματιδίων στη στρατόσφαιρα, επηρεάζοντας το κλίμα, αντανακλώντας το ηλιακό φως και ψύχοντας την επιφάνεια της Γης.

Δασικές πυρκαγιές: Οι πυρκαγιές απελευθερώνουν μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), σωματίδια και πτητικές οργανικές ενώσεις.

Βλάστηση: Ορισμένα φυτά εκπέμπουν πτητικές οργανικές ενώσεις όπως το ισοπρένιο (C_5H_8) και τα τερπένια, που μπορούν να συμβάλουν στο σχηματισμό όζοντος (O_3) υπό τις κατάλληλες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ωστόσο, αυτές οι εκπομπές συνήθως

εξισορροπούνται από τον ρόλο της βλάστησης στην απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων ρύπων. [30], [31], [32]

Οι επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ποιότητα του αέρα και στους οργανισμούς

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα κρίσιμο παγκόσμιο ζήτημα, που αποτελεί άμεση απειλή για την ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Η απελευθέρωση επιβλαβών ουσιών στην ατμόσφαιρα από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές, υποβαθμίζουν την ποιότητα του αέρα και οδηγώντας σε μια σειρά περιβαλλοντικών και βιολογικών επιπτώσεων.

Επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία

Η έκθεση του ανθρώπου στην ατμοσφαιρική ρύπανση έχει καλά πολλές δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, καθιστώντας την κορυφαία περιβαλλοντική αιτία θανάτου και ασθενειών παγκοσμίως. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), η ατμοσφαιρική ρύπανση ευθύνεται για περίπου 7 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους ετησίως.

Αναπνευστικά και καρδιαγγειακά νοσήματα:

Η εισπνοή λεπτών σωματιδίων ($PM_{2.5}$) είναι ιδιαίτερα επιβλαβής, οδηγώντας σε χρόνιες αναπνευστικές παθήσεις όπως άσθμα, βρογχίτιδα και χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ). Επιπλέον, η μακροχρόνια έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση αυξάνει τον κίνδυνο καρδιαγγειακών παθήσεων, συμπεριλαμβανομένων των καρδιακών προσβολών και των εγκεφαλικών.

Καρκίνος:

Η ατμοσφαιρική ρύπανση, ειδικά από σωματίδια, έχει χαρακτηριστεί ως καρκινογόνος από τον Διεθνή Οργανισμό Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC). Η μακροχρόνια έκθεση αυξάνει τον κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα και μπορεί επίσης να συμβάλει σε άλλους καρκίνους λόγω των μεταλλαξιογόνων ιδιοτήτων ορισμένων ρύπων.

Αναπτυξιακές και Γνωστικές Επιδράσεις:

Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη νευροανάπτυξη στα παιδιά, οδηγώντας σε γνωστικές βλάβες, ελλειμματική προσοχή και αναπτυξιακές διαταραχές. Οι γυναίκες σε κατάσταση

εγκυμοσύνης που εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης μπορεί να γεννήσουν μωρά με μικρότερου βάρους και υψηλότερους κινδύνους αναπτυξιακών καθυστερήσεων.

Επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα οικοσυστήματα και τους οργανισμούς
Τα οικοσυστήματα, όπως και οι άνθρωποι, είναι πολύ ευάλωτα στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Ολόκληρο το οικοσύστημα μιας περιοχής μπορεί να επηρεαστεί από τους διάφορους ρύπους, οδηγώντας σε αλλοιωμένη βιοποικιλότητα και σε μειωμένη λειτουργία του οικοσυστήματος.

Ζημιές στη βλάστηση και στις καλλιέργειες:

Το όζον (O_3) είναι ιδιαίτερα επιβλαβές για τα φυτά, προκαλώντας ορατές βλάβες όπως αποχρωματισμό και νέκρωση των φύλλων, ενώ παράλληλα μειώνει την ανάπτυξη των φυτών και τις αποδόσεις των καλλιεργειών. Καλλιέργειες όπως το σιτάρι, η σόγια και το καλαμπόκι είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στην έκθεση στο όζον, οδηγώντας σε σημαντικές οικονομικές απώλειες στη γεωργία.

Οξίνιση υδατικών σωμάτων:

Η όξινη βροχή, που προκύπτει από τις εκπομπές SO_2 και NO_x , μειώνει το pH του εδάφους και των υδάτινων οικοσυστημάτων, βλάπτοντας τα ευαίσθητα είδη. Τα οικοσυστήματα του γλυκού νερού, όπως οι λίμνες και τα ποτάμια, επηρεάζονται ιδιαίτερα, καθώς τα ψάρια και οι υδρόβιοι οργανισμοί δεν μπορούν να επιβιώσουν σε όξινες συνθήκες. Ακόμη, τα εδάφη χάνουν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, καθυστερώντας την ανάπτυξη των φυτών και διαταράσσοντας τα οικοσυστήματα.

Απώλεια βιοποικιλότητας:

Η ατμοσφαιρική ρύπανση οδηγεί σε μείωση της βιοποικιλότητας αλλάζοντας τη σύνθεση των οικοσυστημάτων. Τα ευαίσθητα είδη μπορεί να αντικατασταθούν από είδη πιο ανθεκτικά στη ρύπανση, οδηγώντας σε μείωση της βιοποικιλότητας. Η όξινη βροχή, ειδικότερα, έχει προκαλέσει σημαντική μείωση στα είδη λειχήνων και βρύων, τα οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις αλλαγές των επιπέδων του pH.

Επιδράσεις στο κλίμα και στους ατμοσφαιρικούς βρόχους ανάδρασης (*Feedback Loops*)

Η ατμοσφαιρική ρύπανση συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή μέσω της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το μεθάνιο (CH_4), καθώς και αερολύματα όπως ο μαύρος άνθρακας (αιθάλη).

Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου:

Το CO₂ και το μεθάνιο είναι οι κύριοι παράγοντες της υπερθέρμανσης του πλανήτη, παγιδεύοντας τη θερμότητα στην ατμόσφαιρα και προκαλώντας άνοδο της θερμοκρασίας. Το μεθάνιο είναι ιδιαίτερα ισχυρό, με δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη 25 φορές μεγαλύτερο από το CO₂ σε μια περίοδο 100 ετών.

Μαύρος άνθρακας (αιθάλη):

Ο μαύρος άνθρακας που εκπέμπεται από την ατελή καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας είναι ένας ισχυρός βραχύβιος ρύπος του κλίματος. Απορροφά το ηλιακό φως, θερμαίνει την ατμόσφαιρα και συμβάλλει στην επιταχυνόμενη τήξη των πάγων στις πολικές περιοχές.

Αερολύματα και θευκά σωματίδια:

Τα θευκά αερολύματα, που σχηματίζονται από τις εκπομπές SO₂, αντανακλούν το ηλιακό φως και έχουν δροσιστική επίδραση στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, συμβάλλουν επίσης στον σχηματισμό όξινης βροχής και έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία, καθιστώντας την καθαρή επίδραση των αερολυμάτων πολύπλοκη και μεταβλητή. [\[20\]](#), [\[33\]](#), [\[34\]](#), [\[35\]](#)

Τεχνολογίες αντιρρύπανσης

Η ανάπτυξη τεχνολογιών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι κρίσιμη για τη μείωση αυτών των ρύπων ώστε να συμμορφώνονται με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και να βελτιωθεί η ποιότητα του αέρα.

Τεχνολογίες ελέγχου σωματιδίων

Ένας από τους σημαντικότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους, τα σωματίδια (*PM*), μπορεί να ελεγχθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τεχνολογιών. Αυτά περιλαμβάνουν μηχανικούς συλλέκτες, ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές και υφασμάτινα φίλτρα.

Κυκλώνες και Μηχανικοί Συλλέκτες: Αυτές οι τεχνολογίες βασίζονται στη φυγόκεντρη δύναμη για την αφαίρεση μεγαλύτερων σωματιδίων από τις εκπομπές και χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μείωση του φορτίου στα συστήματα φιλτραρίσματος. Είναι αποτελεσματικά για την αφαίρεση μεγάλων σωματιδίων, αλλά μειονεκτούν ως προς τα μικρότερα σωματίδια.

Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (ESP): Αυτές οι συσκευές είναι εξαιρετικά αποτελεσματικές στη σύλληψη τόσο μικρών όσο και μεγάλων σε διάμετρο σωματιδίων. Χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρικό πεδίο για να φορτίσουν τα σωματίδια, τα οποία στη συνέχεια έλκονται από αντίθετα φορτισμένες πλάκες συλλέκτη. Τα *ESP* χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες όπως οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, η παραγωγή τσιμέντου και η κατασκευή χάλυβα. Η απόδοσή τους μπορεί να ξεπεράσει το 99%, καθιστώντας τα μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες ελέγχου PM που είναι διαθέσιμες.

Υφασμάτινα φίλτρα (baghouses): Τα υφασμάτινα φίλτρα, ή σακούλες, χρησιμοποιούνται για τη σύλληψη σωματιδίων περνώντας ρεύματα αερίου μέσα από σακούλες φίλτρων. Αυτά τα συστήματα μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις αφαίρεσης, ιδιαίτερα για λεπτά σωματίδια, καθιστώντας τα κατάλληλα για βιομηχανίες όπως η παραγωγή χημικών και η αποτέφρωση απορριμμάτων. Η χρήση προηγμένων υλικών και σχεδίων έχει βελτιώσει περαιτέρω την απόδοσή τους, επιτρέποντάς τους να συλλαμβάνουν σωματίδια σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Τεχνολογίες ελέγχου διοξειδίου του θείου (SO_2).

Το SO_2 είναι ένας σημαντικός ρύπος λόγω του ρόλου του στο σχηματισμό όξινης βροχής και των επιπτώσεών του στην υγεία στο αναπνευστικό σύστημα. Οι κύριες μέθοδοι για τον έλεγχο των εκπομπών SO_2 είναι τα συστήματα αποθείωσης καυσαερίων (*FGD*), τα οποία το αφαιρούν από τα καυσαέρια πριν απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα.

Αποθείωση υγρών καυσαερίων (Wet Scrubbers): Αυτή είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους για τον έλεγχο του SO_2 . Σε αυτό το σύστημα, τα καυσαέρια διέρχονται μέσω ενός διαλύματος καθαρισμού (συνήθως ένας πολτός ασβεστόλιθου ή ασβέστη), το οποίο αντιδρά με το SO_2 για να σχηματίσει θειώδες ασβέστιο ή θειικό ασβέστιο (γύψος). Η απόδοση των υγρών πλυντηρίων μπορεί να ξεπεράσει το 90%, καθιστώντας τα εξαιρετικά αποτελεσματικά για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Αποθείωση ξηρού καυσαερίου: Οι ξηροί καθαριστές χρησιμοποιούν παρόμοια αρχή αλλά χρησιμοποιούν ξηρό προσροφητικό υλικό (συνήα άσβεστο ή διττανθρακικό νάτριο) που αντιδρά με το SO_2 του αερίου. Τα ξηρά υποπροϊόντα συλλέγονται ως

στερεά απόβλητα. Αυτή η μέθοδος είναι λιγότερο αποδοτική, αλλά χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η χρήση νερού.

Έγχυση Προσροφητικών Υλικών: Η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει την έγχυση κονιοποιημένων υλικών, όπως ασβέστη ή διττανθρακικό νάτριο, απευθείας στον θάλαμο καύσης ή στη ροή των καυσαερίων. Εκεί, τα υλικά αυτά αντιδρούν με το SO_2 και σχηματίζουν ένα στερεό προϊόν που μπορεί να αφαιρεθεί με συστήματα ελέγχου σωματιδίων. Αυτή η μέθοδος είναι γενικά λιγότερο αποδοτική από τα συστήματα αποθείωσης καυσαερίων (FGD), αλλά μπορεί να αποτελεί μια οικονομική επιλογή για μικρότερες εγκαταστάσεις.

Τεχνολογίες ελέγχου οξειδίων του αζώτου (NO_x).

Οι εκπομπές NO_x αντιμετωπίζονται κυρίως μέσω τροποποιήσεων καύσης και τεχνολογιών ελέγχου μετά την καύση, όπως η Επιλεκτική Καταλυτική Μείωση (SCR) και η Επιλεκτική Μη Καταλυτική Μείωση (SNCR).

Επιλεκτική Καταλυτική Μείωση (SCR): Η SCR είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες για τη μείωση των εκπομπών NO_x . Σε αυτή τη διαδικασία, ένας αναγωγικός παράγοντας (συνήθως αμμωνία ή ουρία) εγχέεται στο ρεύμα καυσαερίων, όπου αντιδρά με NO_x παρουσία καταλύτη για να σχηματίσει άζωτο και νερό. Τα συστήματα SCR χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή τσιμέντου και η διύλιση πετρελαίου. Με απόδοση που ξεπερνά το 90%, η SCR είναι μια από τις πιο αξιόπιστες και αποδεδειγμένες μεθόδους για τη μείωση των NO_x .

Επιλεκτική Μη Καταλυτική Αναγωγή (SNCR): Το SNCR λειτουργεί παρόμοια με το SCR, αλλά χωρίς τη χρήση καταλύτη. Ο αναγωγικός παράγοντας εγχέεται στα καυσαέρια σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου αντιδρά με NO_x σχηματίζοντας άζωτο και νερό. Το SNCR είναι λιγότερο αποδοτικό από το SCR (με τυπικές αποδόσεις μείωσης 30-70%), αλλά μπορεί να είναι μια πιο οικονομική λύση για μικρότερες εγκαταστάσεις ή όπου οι περιορισμοί χώρου εμποδίζουν την εγκατάσταση ενός συστήματος καταλύτη.

Τροποποιήσεις καύσης: Αυτές περιλαμβάνουν τεχνικές όπως καυστήρες χαμηλών NO_x , σταδιακή καύση και ανακυκλοφορία καυσαερίων, οι οποίες μειώνουν το σχηματισμό NO_x κατά τη διαδικασία καύσης. Βελτιστοποιώντας τη διαδικασία καύσης, αυτές οι

μέθοδοι μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές NO_x στην πηγή, συχνά σε συνδυασμό με ελέγχους μετά την καύση, όπως το *SCR* ή το *SNCR*.

Τεχνολογίες ελέγχου πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs).

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις συμβάλλουν στο σχηματισμό του όζοντος και της αιθαλομίχλης, καθιστώντας τον έλεγχό τους κρίσιμο για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Η θερμική οξείδωση, η καταλυτική οξείδωση και η προσρόφηση είναι οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των εκπομπών VOCs.

Θερμική οξείδωση: Η Θερμική Οξείδωση περιλαμβάνει την καύση των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων (VOCs) σε υψηλές θερμοκρασίες, με σκοπό τη μετατροπή τους σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Οι αναγεννητικές θερμικές οξειδωτικές μονάδες (RTOs) χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες με υψηλές εκπομπές VOCs, όπως η χημική βιομηχανία και η παραγωγή χρωμάτων, λόγω της ικανότητάς τους να επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες αερίων.

Καταλυτική οξείδωση: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί καταλύτη για τη μείωση της θερμοκρασίας οξείδωσης, καθιστώντας τη διαδικασία πιο ενεργειακά αποδοτική. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές με χαμηλότερες συγκεντρώσεις VOCs, όπως διεργασίες με βάση διαλύτες και εργασίες επίστρωσης.

Προσρόφηση: Σε αυτή τη διαδικασία, οι πτητικές οργανικές ενώσεις δεσμεύονται από ένα στερεό προσροφητικό υλικό, συνήθως ενεργό άνθρακα ή ζεόλιθους. Το υλικό αυτό παγιδεύει τα μόρια VOCs, εμποδίζοντάς τα να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα. Μόλις κορεσθεί, αναγεννάται ή αντικαθίσταται. Η προσρόφηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για βιομηχανίες που παράγουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων ή διαλείπουσες εκπομπές. [\[36\]](#), [\[37\]](#), [\[38\]](#)

Ρύπανση του εδάφους

Η ρύπανση του εδάφους ή η μόλυνση του εδάφους είναι ένα σοβαρό περιβαλλοντικό ζήτημα που περιλαμβάνει τη συσσώρευση επικίνδυνων ουσιών στο έδαφος, επηρεάζοντας αρνητικά τα οικοσυστήματα, τη γεωργία και την ανθρώπινη υγεία. Μπορεί να προκύψει από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως βιομηχανικές λειτουργίες, γεωργικές πρακτικές, ακατάλληλη διάθεση απορριμμάτων και αστικοποίηση. Επικίνδυνες χημικές ουσίες όπως βαρέα μέταλλα (μόλυβδος, υδράργυρος), οργανικοί ρύποι (φυτοκτόνα, υδρογονάνθρακες), πετρελαιοειδή και

ραδιενεργά υλικά μπορούν να διεισδύσουν στο έδαφος, οδηγώντας σε σοβαρές συνέπειες τόσο για το περιβάλλον όσο και για τη δημόσια υγεία.

Ρύποι και πηγές εδαφικής ρύπανσης

Οι ρύποι του εδάφους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως στις ακόλουθες μεγάλες ομάδες: βαρέα μέταλλα, οργανικοί ρύποι, γεωργικά χημικά προϊόντα και απόβλητα.

Βαρέα μέταλλα

Είναι από τους πιο ανθεκτικούς ρύπους του εδάφους λόγω της μη βιοδιασπώμενης φύσης τους. Σε μολυσμένα εδάφη συνήθως απαντώνται ο μόλυβδος (*Pb*), το κάδμιο (*Cd*), ο υδράργυρος (*Hg*) και το αρσενικό (*As*).

Μόλυβδος (*Pb*): Συχνά απελευθερώνεται από τις εργασίες τήξης, ο μόλυβδος είναι εξαιρετικά τοξικός και αποτελεί σημαντική απειλή τόσο για τα οικοσυστήματα όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Η έκθεση σε μόλυβδο μπορεί να προκαλέσει νευρολογική βλάβη, ειδικά σε παιδιά.

Κάδμιο (*Cd*): Βρίσκεται στα βιομηχανικά απόβλητα και στα λιπάσματα, το κάδμιο είναι ένα άλλο τοξικό μέταλλο που συσσωρεύεται στο έδαφος και μπορεί να εισέλθει στην τροφική αλυσίδα. Η μακροχρόνια έκθεση στο κάδμιο μπορεί να οδηγήσει σε νεφρική βλάβη και εξασθενημένα οστά.

Υδράργυρος (*Hg*): Η εξόρυξη, ειδικά του χρυσού, είναι μια σημαντική πηγή μόλυνσης από υδράργυρο. Ο υδράργυρος παραμένει στο περιβάλλον και μπορεί να μετατραπεί σε μεθυλϋδράργυρο, μια εξαιρετικά τοξική μορφή που συσσωρεύεται σε ζωντανούς οργανισμούς. [\[20\]](#)

Οργανικοί Ρύποι

Οι οργανικοί ρύποι περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα χημικών ουσιών, όπως φυτοφάρμακα, ζιζανιοκτόνα, υδρογονάνθρακες και βιομηχανικούς διαλύτες. Αυτοί οι ρύποι είναι συχνά υποπροϊόντα γεωργικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων και μπορούν να παραμείνουν στο έδαφος για μεγάλες περιόδους, προκαλώντας επιβλαβείς επιπτώσεις στη ζωή των φυτών και των ζώων.

Φυτοφάρμακα: Η υπερβολική χρήση φυτοφαρμάκων στη σύγχρονη γεωργία συμβάλλει σημαντικά στη ρύπανση του εδάφους. Οι έμμονοι οργανικοί ρύποι (*POPs*)

όπως το *DDT* είναι ανθεκτικοί στην περιβαλλοντική υποβάθμιση, οδηγώντας σε βιοσυσσώρευση σε φυτά και ζώα.

Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (*PAHs*): Οι *PAHs* που απελευθερώνονται από την καύση ορυκτών καυσίμων είναι καρκινογόνοι και μπορούν να συσσωρευτούν σε εδάφη κοντά σε βιομηχανικές περιοχές. Αυτοί οι υδρογονάνθρακες είναι ιδιαίτερα προβληματικοί λόγω της εμμονής τους και της ικανότητάς τους να επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. [20]

Γεωργικά Χημικά

Η εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων έχει ενισχύσει σημαντικά την παραγωγή τροφίμων αλλά έχει συμβάλει επίσης στην υποβάθμιση και τη ρύπανση του εδάφους. Οι κύριοι ρυπαντές από τη γεωργία περιλαμβάνουν άζωτο, φώσφορο και υπολείμματα φυτοφαρμάκων.

Λιπάσματα: Αν και είναι απαραίτητα για την προώθηση της ανάπτυξης των φυτών, η υπερβολική εφαρμογή λιπασμάτων με βάση το άζωτο και το φώσφορο μπορεί να οδηγήσει σε ανισορροπίες θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Η περίσσεια αζώτου μπορεί να προκαλέσει όξυνση του εδάφους, ενώ η συσσώρευση φωσφόρου μπορεί να οδηγήσει σε ευτροφισμό των κοντινών υδάτινων σωμάτων.

Ζιζανιοκτόνα: Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ζιζανίων. Κάποια από αυτά έχουν την ιδιότητα να παραμένουν στο έδαφος, επηρεάζοντας τις μικροβιακές του κοινότητες και δυνητικά μολύνοντας τα υπόγεια ύδατα.

Πηγές ρύπανσης του εδάφους

Οι ρύποι του εδάφους προέρχονται από ποικίλες φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές, με τις ανθρώπινες δραστηριότητες να είναι οι κυρίαρχοι παράγοντες.

1. Βιομηχανικές Δραστηριότητες

Οι βιομηχανικές δραστηριότητες όπως η εξόρυξη, η τήξη μετάλλων και η χημική παραγωγή αποτελούν σημαντικές πηγές ρύπανσης του εδάφους. Η ακατάλληλη διάθεση των βιομηχανικών απορριμμάτων μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευση βαρέων μετάλλων και τοξικών χημικών ουσιών στο έδαφος, τα οποία μπορούν να παραμείνουν εκεί για δεκαετίες ή και αιώνες.

Εξόρυξη μετάλλων: Οι εργασίες εξόρυξης παράγουν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων γνωστών ως απορριμμάτων, τα οποία περιέχουν υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων όπως αρσενικό, κάδμιο και μόλυβδο. Αυτοί οι ρύποι μπορούν να εισχωρήσουν στο έδαφος και να εξαπλωθούν σε μεγάλες περιοχές, προκαλώντας εκτεταμένη περιβαλλοντική ζημιά

Χημική Βιομηχανία: Οι βιομηχανίες που παράγουν χημικές ουσίες για διάφορες εφαρμογές συχνά απορρίπτουν λύματα που περιέχουν επικίνδυνες ουσίες στο περιβάλλον. Αυτά τα λύματα μπορούν να εισχωρήσουν στο έδαφος, μολύνοντάς το με οργανικούς ρύπους όπως *PAHs*, *PCB* και διοξίνες.

2. Αγροτικές Πρακτικές

Η γεωργία είναι από τις μεγαλύτερες αιτίες ρύπανσης του εδάφους παγκοσμίως. Η χρήση χημικών λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων έχει γίνει ευρέως διαδεδομένη, οδηγώντας στη μόλυνση του εδάφους με τοξικές χημικές ουσίες.

Παρασιτοκτόνα και ζιζανιοκτόνα: Τα φυτοφάρμακα και τα ζιζανιοκτόνα χρησιμοποιούνται εκτενώς για την προστασία των καλλιεργειών από παράσιτα και ζιζάνια. Ωστόσο, η υπερβολική χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε μόλυνση του εδάφους, καθώς αυτές οι χημικές ουσίες συχνά επιμένουν στο περιβάλλον και μπορούν να συσσωρευτούν στο έδαφος.

Υπερβολική χρήση λιπασμάτων: Τα λιπάσματα που περιέχουν άζωτο και φώσφορο εφαρμόζονται για την ενίσχυση των αποδόσεων των καλλιεργειών, αλλά η υπερβολική χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε έκπλυση θρεπτικών συστατικών, η οποία επηρεάζει τη γονιμότητα του εδάφους και μολύνει τα κοντινά υδάτινα σώματα.

3. Αστικοποίηση και Διάθεση Απορριμμάτων

Η αστικοποίηση έχει οδηγήσει σε αυξημένη παραγωγή αποβλήτων και η ακατάλληλη διαχείριση αυτών συμβάλλει σημαντικά στη ρύπανση του εδάφους. Τα αστικά απόβλητα, ιδιαίτερα από χωματερές, μπορούν να εισάγουν βαρέα μέταλλα, πλαστικά και οργανικούς ρύπους στο έδαφος.

ΧΥΤΑ: Οι χώροι υγειονομικής ταφής αποβλήτων περιέχουν μεγάλη ποικιλία ρύπων, από βαρέα μέταλλα μέχρι πλαστικά. Αυτοί οι ρύποι μπορούν να εκπλυθούν στο έδαφος, οδηγώντας σε μακροχρόνια μόλυνση. Σε πολλές περιπτώσεις, οι χωματερές βρίσκονται

κοντά σε αστικές περιοχές, θέτοντας σε σημαντικό κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον

Αστική απορροή: Η απορροή από αστικές περιοχές μπορεί να μεταφέρει ρύπους όπως πετρέλαιο, βαρέα μέταλλα και χημικές ουσίες από δρόμους, χώρους στάθμευσης και βιομηχανικές περιοχές στο έδαφος, συμβάλλοντας περαιτέρω στη μόλυνση.

4. Πετρελαιοκηλίδες και διαρροές

Οι πετρελαιοκηλίδες και οι διαρροές από τις εγκαταστάσεις εξόρυξης, μεταφοράς και αποθήκευσης πετρελαίου αποτελούν σημαντικές πηγές ρύπανσης του εδάφους. Οι υδρογονάνθρακες από πετρελαιοκηλίδες μπορούν να διεισδύσουν στο έδαφος και να επιμείνουν για χρόνια, διαταράσσοντας τη δομή του εδάφους και βλάπτοντας τη ζωή των φυτών και των ζώων. [\[39\]](#), [\[40\]](#), [\[41\]](#)

Οι επιδράσεις της ρύπανσης στην ποιότητα του εδάφους και στους οργανισμούς

Η ποιότητα του εδάφους αναφέρεται στην ικανότητα του εδάφους να διατηρεί την παραγωγικότητα των φυτών και των ζώων, να διατηρεί την ποιότητα του περιβάλλοντος και να υποστηρίζει την ανθρώπινη υγεία. Καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η φυσική του δομή, η χημική σύσταση και η βιολογική του δραστηριότητα.

Η ρύπανση του εδάφους επηρεάζει άμεσα αυτές τις λειτουργίες του εδάφους, θέτοντας σε κίνδυνο την ικανότητά του να υποστηρίζει τη ζωή. Το μολυσμένο έδαφος χάνει τη δομή, τη γονιμότητα και την ικανότητά του να ρυθμίζει τις βιολογικές διεργασίες, απειλώντας έτσι τη βιοποικιλότητα και τις υπηρεσίες του οικοσυστήματος. Σύμφωνα με μελέτες, οι ρύποι που υποβαθμίζουν την ποιότητα του εδάφους περιλαμβάνουν βαρέα μέταλλα, υδρογονάνθρακες και οργανικές ενώσεις από βιομηχανικές και γεωργικές πηγές. .

Επίδραση της ρύπανσης του εδάφους στη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους

Οι μικροοργανισμοί του εδάφους διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της υγείας του εδάφους αποσυνθέτοντας οργανική ύλη, ανακυκλώνοντας θρεπτικά συστατικά και συμβάλλοντας στη δομή του εδάφους. Ωστόσο, η ρύπανση του εδάφους έχει βαθιές επιπτώσεις στις μικροβιακές κοινότητες, οδηγώντας σε μείωση της βιοποικιλότητας και μείωση της μικροβιακής δραστηριότητας.

Βαρέα μέταλλα και μικροβιακή αναστολή

Τα βαρέα μέταλλα είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Οι υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο μπορούν να αναστείλουν τη μικροβιακή ανάπτυξη και να μειώσουν την ενζυμική δραστηριότητα, η οποία είναι κρίσιμη για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης και τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών. Μελέτες έχουν δείξει ότι η μόλυνση από βαρέα μέταλλα οδηγεί σε μείωση της μικροβιακής βιομάζας και της ποικιλότητας, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τη γονιμότητα του εδάφους.

Μεταβολές μικροβιακής κοινότητας: Η παρουσία τοξικών μετάλλων στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στη σύνθεση των μικροβιακών κοινοτήτων. Τα ευαίσθητα είδη μπορεί να εξαλειφθούν, ενώ κυριαρχούν τα ανθεκτικά στα μέταλλα στελέχη. Αυτή η μετατόπιση των μικροβιακών πληθυσμών μπορεί να μειώσει τη συνολική λειτουργικότητα του εδάφους, καθώς η απώλεια της μικροβιακής ποικιλότητας εμποδίζει την ικανότητα του οικοσυστήματος να προσαρμοστεί στις περιβαλλοντικές αλλαγές.

Παρασιτοκτόνα και Μικροβιακή Τοξικότητα

Τα φυτοφάρμακα, ιδιαίτερα αυτά που παραμένουν στο περιβάλλον, μπορούν να έχουν μακροπρόθεσμες αρνητικές επιπτώσεις στους μικροβιακούς πληθυσμούς. Πολλά φυτοφάρμακα έχουν σχεδιαστεί για να σκοτώνουν έντομα ή μύκητες, αλλά επηρεάζουν επίσης τους μη στοχευόμενους οργανισμούς του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων των βακτηρίων και των μυκήτων που είναι απαραίτητα για τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών.

Μείωση των ρυθμών αποσύνθεσης: Τα φυτοφάρμακα μπορούν να μειώσουν τη δραστηριότητα των οργανισμών αποσύνθεσης, επιβραδύνοντας τη διάσπαση της οργανικής ύλης στο έδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση οργανικών αποβλήτων και μειώνει τη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών για τα φυτά.

Διαταραχή των συμβιωτικών σχέσεων: Ορισμένοι μικροοργανισμοί του εδάφους, όπως οι μυκόρριζοι μύκητες, σχηματίζουν συμβιωτικές σχέσεις με τα φυτά, βοηθώντας τα να απορροφούν θρεπτικά συστατικά. Η μόλυνση από φυτοφάρμακα μπορεί να διαταράξει αυτές τις σχέσεις, οδηγώντας σε φτωχότερη ανάπτυξη των φυτών και μειωμένη υγεία του εδάφους. [\[42\]](#), [\[43\]](#)

Επιδράσεις της ρύπανσης του εδάφους σε φυτά και άλλους οργανισμούς

Η ρύπανση του εδάφους δεν επηρεάζει μόνο τις χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους, αλλά έχει επίσης άμεσες επιπτώσεις στους οργανισμούς που βασίζονται στο έδαφος για την επιβίωση, συμπεριλαμβανομένων των φυτών, των ζώων και των ανθρώπων.

Επιπτώσεις στα φυτά

Τα φυτά επηρεάζονται άμεσα από τη ρύπανση του εδάφους μέσω αλλαγών στη χημεία του και της μειωμένης διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών. Τα μολυσμένα εδάφη συχνά στερούνται τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται τα φυτά για την ανάπτυξη και οι τοξικές ουσίες μπορούν να συσσωρευτούν στους φυτικούς ιστούς, επηρεάζοντας την ανάπτυξή τους.

Πρόσληψη βαρέων μετάλλων: Τα φυτά που αναπτύσσονται σε μολυσμένα εδάφη μπορεί να απορροφήσουν βαρέα μέταλλα, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν τις μεταβολικές τους διαδικασίες και να μειώσουν τις αποδόσεις των καλλιεργειών. Αυτή η πρόσληψη ενέχει επίσης κίνδυνο για τους ανθρώπους και τα ζώα που καταναλώνουν μολυσμένα φυτά.

Μειωμένη ανάπτυξη των φυτών: Τα μολυσμένα εδάφη παρουσιάζουν συχνά χαμηλότερη γονιμότητα, η οποία οδηγεί σε καθυστερημένη ανάπτυξη των φυτών και χαμηλότερη παραγωγικότητα. Σε ακραίες περιπτώσεις, τοξικά επίπεδα ρύπων μπορεί να προκαλέσουν θάνατο των φυτών, υποβαθμίζοντας περαιτέρω το οικοσύστημα.

Επιπτώσεις στην πανίδα

Οι οργανισμοί που ζουν στο έδαφος, όπως οι γαιοσκώληκες, τα έντομα και τα μικρά θηλαστικά, είναι επίσης ευάλωτοι στη ρύπανση του. Αυτοί οι οργανισμοί συμβάλλουν στη δομή και τη γονιμότητα του εδάφους διασπώντας την οργανική ύλη και αερίζοντας το έδαφος.

Γαιοσκώληκες: Οι γαιοσκώληκες είναι βασικοί δείκτες της υγείας του εδάφους. Συμβάλλουν στον κύκλο των θρεπτικών ουσιών και στη δομή του εδάφους τρυπώντας και αποσυνθέτοντας οργανική ύλη. Η μόλυνση από βαρέα μέταλλα μπορεί να είναι θανατηφόρα για τους γαιοσκώληκες, μειώνοντας τους πληθυσμούς τους και επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα του εδάφους.

Ασπόνδυλα και θηλαστικά: Άλλη πανίδα του εδάφους, όπως τα έντομα και τα μικρά θηλαστικά, μπορεί επίσης να υποφέρουν από έκθεση σε τοξικές ουσίες στο έδαφος. Τα φυτοφάρμακα και τα βαρέα μέταλλα μπορούν να συσσωρευτούν στην τροφική αλυσίδα, οδηγώντας σε βιομεγέθυνση και θέτοντας κινδύνους για την υγεία ανώτερων οργανισμών, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων. [\[43\]](#), [\[44\]](#), [\[45\]](#)

Κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία

Η μόλυνση του εδάφους με επιβλαβείς ουσίες δεν επηρεάζει μόνο το περιβάλλον αλλά εγκυμονεί σημαντικούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Οι ρύποι στο έδαφος μπορούν να εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα μέσω άμεσης επαφής, εισπνοής σωματιδίων σκόνης ή κατανάλωσης μολυσμένων τροφίμων και νερού.

Βαρέα μέταλλα: Η έκθεση σε βαρέα μέταλλα όπως ο μόλυβδος, ο υδράργυρος και το κάδμιο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα υγείας, συμπεριλαμβανομένων αναπτυξιακών διαταραχών, νευρολογικών βλαβών και καρκίνου. Τα παιδιά είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στη δηλητηρίαση από μόλυβδο από μολυσμένα εδάφη.

Παρασιτοκτόνα: Η μακροχρόνια έκθεση σε υπολείμματα φυτοφαρμάκων στα τρόφιμα μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο χρόνιων ασθενειών όπως ο καρκίνος, οι ενδοκρινικές διαταραχές και τα αναπαραγωγικά προβλήματα. [\[46\]](#)

Τεχνολογίες αντιρρύπανσης

Η ανάπτυξη τεχνολογιών κατά της ρύπανσης του εδάφους έχει καταστεί ζωτικός τομέας έρευνας, ειδικά με την αυξανόμενη εστίαση σε βιώσιμες και πράσινες λύσεις. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν σχεδιαστεί όχι μόνο για την αφαίρεση ή τη σταθεροποίηση των ρύπων αλλά και για την αποκατάσταση των φυσικών λειτουργιών των οικοσυστημάτων του εδάφους.

Παραδοσιακές Τεχνολογίες Αποκατάστασης

Οι παραδοσιακές μέθοδοι για την αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών συχνά περιλαμβάνουν μηχανικές και χημικές διεργασίες. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται ευρέως εδώ και δεκαετίες και παραμένουν σχετικές λόγω της αποτελεσματικότητάς τους σε ορισμένες περιπτώσεις.

Εκσκαφή και Απόρριψη

Αυτή είναι μια από τις παλαιότερες και απλούστερες μεθόδους αποκατάστασης. Το μολυσμένο έδαφος ανασκάπτεται και μεταφέρεται σε καθορισμένο χώρο υγειονομικής

ταφής ή επεξεργασίας. Αν και είναι αποτελεσματική για την απομάκρυνση των ρύπων από την πληγείσα περιοχή, αυτή η μέθοδος δεν είναι βιώσιμη, καθώς απλώς μεταφέρει το πρόβλημα της ρύπανσης σε άλλη τοποθεσία. Επιπλέον, το κόστος της εκσκαφής, της μεταφοράς και της διάθεσης είναι υψηλό και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι σημαντικές λόγω της πιθανότητας δευτερογενούς ρύπανσης κατά τη μεταφορά.

Πλύσιμο εδάφους

Το πλύσιμο του εδάφους περιλαμβάνει τη χρήση νερού, μερικές φορές με χημικά πρόσθετα, για τον διαχωρισμό των ρύπων από τα σωματίδια του εδάφους. Η διαδικασία στοχεύει συνήθως βαρέα μέταλλα και υδρόφοβες οργανικές ενώσεις, συγκεντρώνοντας αποτελεσματικά τους ρύπους για περαιτέρω επεξεργασία ή διάθεση. Αν και αποτελεσματικό για ορισμένους ρύπους, το πλύσιμο του εδάφους μπορεί να είναι δαπανηρό και το επεξεργασμένο νερό συχνά απαιτεί περαιτέρω κατεργασία για την αποφυγή δευτερογενούς ρύπανσης.

Χημική Σταθεροποίηση

Η χημική σταθεροποίηση περιλαμβάνει την προσθήκη χημικών παραγόντων σε μολυσμένα εδάφη για τη μετατροπή των ρύπων σε λιγότερο τοξικές ή πιο σταθερές μορφές. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως για μόλυνση από βαρέα μέταλλα, όπου ουσίες όπως ο ασβέστης ή τα φωσφορικά άλατα προστίθενται στο έδαφος για να ακινητοποιήσουν μέταλλα, μειώνοντας τη βιοδιαθεσιμότητά τους. Ωστόσο, η σταθεροποίηση δεν απομακρύνει τους ρύπους, περιορίζει μόνο την κινητικότητά τους, πράγμα που σημαίνει ότι παραμένει η πιθανότητα μακροχρόνιας μόλυνσης. [\[47\]](#)

Βιολογικές Μέθοδοι

Ως απόκριση στους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς περιορισμούς των παραδοσιακών μεθόδων, οι τεχνικές βιολογικής αποκατάστασης έχουν αποκτήσει εξέχουσα θέση. Αυτές οι προσεγγίσεις αξιοποιούν τις φυσικές δυνατότητες των μικροοργανισμών, των φυτών και άλλων βιολογικών παραγόντων για την αποτοξίνωση και την αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών.

Βιοαποκατάσταση

Η βιοαποκατάσταση είναι η διαδικασία χρήσης μικροοργανισμών για τη διάσπαση ή την αποτοξίνωση των ρύπων στο έδαφος. Μικρόβια όπως βακτήρια (π.χ *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis*) και μύκητες (π.χ *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride*)

μεταβολίζουν οργανικούς ρύπους, μετατρέποντάς τους σε λιγότερο επιβλαβείς ουσίες. Υπάρχουν διάφοροι τύποι:

Βιοαύξηση: Η εισαγωγή συγκεκριμένων μικροοργανισμών για την επιτάχυνση της διάσπασης των ρύπων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιβάλλοντα όπου οι εγγενείς πληθυσμοί μικροβίων είναι ανεπαρκείς για την αποτελεσματική αποικοδόμηση των ρύπων.

Βιοδιέγερση: Ενίσχυση της δραστηριότητας των υπαρχόντων μικροβιακών πληθυσμών με την προσθήκη θρεπτικών ουσιών ή την αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών για την προώθηση της μικροβιακής ανάπτυξης και δραστηριότητας. Η βιοδιέγερση χρησιμοποιείται συνήθως για την αποικοδόμηση υδρογονανθράκων και άλλων οργανικών ρύπων.

Η βιοαποκατάσταση είναι μια οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος, αλλά περιορίζεται από τον τύπο των ρύπων που υπάρχουν και τις περιβαλλοντικές συνθήκες της μολυσμένης τοποθεσίας. Τα βαρέα μέταλλα, για παράδειγμα, δεν μπορούν να βιοδιασπαστούν, αν και ορισμένα μικρόβια μπορούν να τα μετατρέψουν σε λιγότερο τοξικές μορφές.

Φυτοαποκατάσταση

Η φυτοαποκατάσταση χρησιμοποιεί φυτά για την απορρόφηση, τη συσσώρευση ή την αποτοξίνωση των ρύπων από το έδαφος. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την αφαίρεση βαρέων μετάλλων και ορισμένων οργανικών ρύπων.

Φυτοεξαγωγή: Τα φυτά χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση βαρέων μετάλλων από το έδαφος, τα οποία στη συνέχεια συλλέγονται και απορρίπτονται με ασφάλεια. Ορισμένα φυτά, γνωστά ως υπερσυσσωρευτές, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην εξαγωγή μετάλλων όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο.

Φυτοαποδόμηση: Τα φυτά μπορούν να διασπάσουν οργανικούς ρύπους μέσω μεταβολικών διεργασιών. Αυτή η τεχνική είναι αποτελεσματική για φυτοφάρμακα και άλλες οργανικές ενώσεις που είναι τοξικές για τους οργανισμούς του εδάφους.

Φυτοσταθεροποίηση: Τα φυτά χρησιμοποιούνται για την ακινητοποίηση των ρύπων στο έδαφος, αποτρέποντας τη μετανάστευση τους σε άλλες περιοχές. Αυτή η

προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την πρόληψη της έκπλυσης βαρέων μετάλλων στα υπόγεια ύδατα.

Η φυτοαποκατάσταση είναι βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική, αλλά μπορεί να είναι αργή, απαιτώντας χρόνια ή και δεκαετίες για να αποκατασταθούν πλήρως οι πολύ μολυσμένες περιοχές. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα της φυτοαποκατάστασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο των φυτών που χρησιμοποιούνται και τις ειδικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σύγχρονες Τεχνολογίες για την αποκατάσταση του εδάφους

Οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις αντιμετωπίζουν τους περιορισμούς των παραδοσιακών και βιολογικών προσεγγίσεων, προσφέροντας πιο αποτελεσματικές και στοχευμένες λύσεις για την αποκατάσταση του εδάφους.

Ηλεκτροκινητική αποκατάσταση

Η ηλεκτροκινητική αποκατάσταση χρησιμοποιεί ηλεκτρικά ρεύματα για να κινητοποιήσει τους ρύπους στο έδαφος, επιτρέποντάς τους να εξαχθούν πιο εύκολα. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στο έδαφος και ένα ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από το έδαφος, προκαλώντας ιόντα και φορτισμένα σωματίδια, όπως τα βαρέα μέταλλα, να μεταναστεύσουν προς τα ηλεκτρόδια. Οι ρύποι μπορούν στη συνέχεια να συλλεχθούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για βαρέα μέταλλα και ραδιονουκλεΐδια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές αποκατάστασης.

Θερμική Εκρόφηση

Η θερμική εκρόφηση περιλαμβάνει τη θέρμανση μολυσμένου εδάφους για την εξάτμιση οργανικών ρύπων, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να δεσμευτούν και να υποστούν επεξεργασία στην αέρια φάση. Αυτή η τεχνική είναι εξαιρετικά αποτελεσματική για οργανικούς ρύπους όπως υδρογονάνθρακες και διαλύτες. Ωστόσο, είναι ενεργοβόρα και μπορεί να μην είναι κατάλληλο για τη θεραπεία μεγάλων περιοχών.

Χημική Οξείδωση In Situ (ISCO)

Το ISCO περιλαμβάνει την έγχυση χημικών οξειδωτικών σε μολυσμένα εδάφη για την αποικοδόμηση των οργανικών ρύπων σε αβλαβείς ενώσεις. Τα κοινά οξειδωτικά

περιλαμβάνουν το υπεροξείδιο του υδρογόνου, το όζον και το υπερμαγγανικό κάλιο. Το ISCO είναι αποτελεσματικό για ένα ευρύ φάσμα οργανικών ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των φυτοφαρμάκων και των βιομηχανικών διαλυτών, αλλά το υψηλό κόστος των χημικών ουσιών και η ανάγκη για ακριβή συστήματα διανομής περιορίζουν την ευρεία χρήση του. [\[47\]](#), [\[48\]](#)

Πράσινες και Βιώσιμες Τεχνολογίες Αποκατάστασης

Τα τελευταία χρόνια, έχει δοθεί αυξανόμενη έμφαση στις βιώσιμες και πράσινες τεχνολογίες αποκατάστασης που ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενώ αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τη ρύπανση του εδάφους. Αυτές οι μέθοδοι επικεντρώνονται στη μείωση των εισροών ενέργειας και πόρων που απαιτούνται για την αποκατάσταση, καθώς και στην προώθηση της μακροπρόθεσμης οικολογικής ανάκαμψης.

Πράσινη Χημεία στην Αποκατάσταση

Οι προσεγγίσεις της πράσινης χημείας περιλαμβάνουν τη χρήση φιλικών προς το περιβάλλον χημικών ουσιών (π.χ αλκυλο πολυγλυκοσιδίων, πολυγαλακτικό οξύ) και διεργασιών για την αποκατάσταση του εδάφους. Αυτές οι μέθοδοι στοχεύουν στη μείωση της τοξικότητας και της ανθεκτικότητας των παραγόντων αποκατάστασης στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, τα βιοαποδομήσιμα τασιενεργά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην πλήση του εδάφους για την ελαχιστοποίηση της δευτερογενούς ρύπανσης.

Βιοκάρβουνα και δέσμευση άνθρακα

Το βιοκάρβουνο, μια μορφή άνθρακα που παράγεται από οργανικά υλικά, έχει αναδειχθεί ως ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την αποκατάσταση των μολυσμένων εδαφών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακινητοποίηση βαρέων μετάλλων και οργανικών ρύπων, αποτρέποντας την έκπλυση τους στα υπόγεια ύδατα. Επιπλέον, βελτιώνει τη γονιμότητα του εδάφους και προωθεί τη δέσμευση άνθρακα, καθιστώντας το μια βιώσιμη λύση που ωφελεί τόσο την υγεία του εδάφους όσο και τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. [\[49\]](#), [\[50\]](#)

Η περίπτωση της πετρελαιοκηλίδας στο Κουβέιτ

Η πετρελαιοκηλίδα του Κουβέιτ του 1991, κατά τη διάρκεια του Πολέμου του Κόλπου, είναι μια από τις πιο καταστροφικές περιβαλλοντικές καταστροφές στην ιστορία, που

επηρεάζει κυρίως το έδαφος της ερήμου και τα συστήματα υπόγειων υδάτων καθώς οι ιρακινές δυνάμεις άναψαν σκόπιμα πετρελαιοπηγές και δημιούργησαν «λίμνες πετρελαίου», απελευθερώνοντας περίπου 25-50 εκατομμύρια βαρέλια αργού πετρελαίου.

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να γίνουν βαθιές αλλαγές στο έδαφος και στα οικοσυστήματα στις πληγείσες περιοχές. Το λάδι σχημάτισε μια σκληρή κρούστα στην επιφάνεια του εδάφους, εμποδίζοντας τη διείσδυση και τον αερισμό του νερού, γεγονός που διατάραξε τη φυσική δομή του εδάφους. Αυτή η κρούστα δημιούργησε υδρόφοβες συνθήκες, εμποδίζοντας περαιτέρω την απορρόφηση του νερού και βλάπτοντας τη γονιμότητα του εδάφους. Χημικά, η μόλυνση εισήγαγε υψηλά επίπεδα πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (*PAHs*), αλκανίων και βαρέων μετάλλων όπως το νικέλιο (*Ni*) και το βανάδιο (*V*). Αυτές οι τοξικές ουσίες μείωσαν την ικανότητα του εδάφους να υποστηρίξει τη βλάστηση και ενέχουν κινδύνους για την ποιότητα των υπόγειων υδάτων μέσω της έκπλυσης. Βιολογικά, οι τοξικοί υδρογονάνθρακες κατέστειλαν τη μικροβιακή δραστηριότητα, η οποία επιβράδυνε τις διαδικασίες φυσικής βιοαποδόμησης. Η απώλεια βλάστησης διατάραξε επίσης τους τοπικούς βιότοπους άγριας ζωής, βλάπτοντας περαιτέρω το εύθραυστο οικοσύστημα της ερήμου.

Η αντιμετώπιση της μεγάλης κλίμακας ρύπανσης του εδάφους που προκλήθηκε από την πετρελαιοκηλίδα του Κουβέιτ απαιτούσε έναν συνδυασμό παραδοσιακών και καινοτόμων τεχνικών αποκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα:

Θερμική Εκρόφηση

Η θερμική εκρόφηση αναδείχθηκε ως μία από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές για την απομάκρυνση των υδρογονανθράκων από το μολυσμένο έδαφος. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη θέρμανση του εδάφους σε υψηλές θερμοκρασίες, προκαλώντας την εξάτμιση των υδρογονανθράκων και τον διαχωρισμό από τα σωματίδια του εδάφους. Οι πτητικές υδρογονάνθρακες στη συνέχεια δεσμεύονται και είτε καταστρέφονται είτε ανακυκλώνονται. Αν και η θερμική εκρόφηση ήταν εξαιρετικά αποδοτική, απαιτούσε σημαντικές εισροές ενέργειας, εξειδικευμένο εξοπλισμό και ουσιαστικό υλικοτεχνικό σχεδιασμό για τη διαχείριση των τεράστιων ποσοτήτων μολυσμένου εδάφους.

Βιοαποκατάσταση

Η βιοαποκατάσταση αξιοποίησε τη φυσική ικανότητα των μικροοργανισμών να αποικοδομούν τους υδρογονάνθρακες του πετρελαίου. Με την εισαγωγή θρεπτικών συστατικών όπως το άζωτο και τον φώσφορο και την ενίσχυση της διαθεσιμότητας οξυγόνου, διεγείρεται η δραστηριότητα των μικροβίων που αποικοδομούν τους υδρογονάνθρακες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η βιοαύξηση χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή συγκεκριμένων μικροβιακών στελεχών που ήταν πιο αποτελεσματικά στη διάσπαση των ρύπων. Αυτή η τεχνική ήταν βιώσιμη, φιλική προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτική, καθιστώντας την ιδιαίτερα κατάλληλη για μεγάλες περιοχές με μέτρια μόλυνση.

Διάθεση στο έδαφος

Η διαδικασία περιλάμβανε τη διάδοση μολυσμένου εδάφους σε λεπτά στρώματα σε ελεγχόμενη περιοχή. Το έδαφος καλλιεργούνταν περιοδικά για να ενισχυθεί ο αερισμός, ο οποίος διευκόλυνε τη μικροβιακή δραστηριότητα και τη φυσική διάσπαση των υδρογονανθράκων. Ενώ αυτή η μέθοδος ήταν πρακτική για την αντιμετώπιση της επιφανειακής μόλυνσης, απαιτούσε εκτεταμένο χερσαίο χώρο και ήταν λιγότερο αποτελεσματική για τους βαθιά ενσωματωμένους ρύπους.

Πλύσιμο εδάφους

Το πλύσιμο του εδάφους χρησιμοποίησε νερό και χημικά επιφανειοδραστικά για τον διαχωρισμό των υδρογονανθράκων από τα σωματίδια του εδάφους. Οι προσμείξεις είτε διαλύθηκαν στο διάλυμα πλύσης είτε διαχωρίστηκαν ως συμπύκνωμα για περαιτέρω επεξεργασία. Ενώ αυτή η μέθοδος αποδείχθηκε αποτελεσματική για τη θεραπεία της επιφανειακής μόλυνσης, δυσκολεύτηκε να αντιμετωπίσει το πετρέλαιο που ήταν βαθιά ενσωματωμένο στα στρώματα του εδάφους.

Συγκράτηση και σταθεροποίηση

Μέτρα περιορισμού, όπως η κατασκευή φυσικών φραγμών, εφαρμόστηκαν για να αποτραπεί η περαιτέρω εξάπλωση της μόλυνσης από πετρέλαιο. Εφαρμόστηκαν επίσης τεχνικές σταθεροποίησης για την ακινητοποίηση των ρύπων, μειώνοντας την κινητικότητά τους και τον κίνδυνο έκπλυσης στα υπόγεια ύδατα. Αυτές οι μέθοδοι ήταν απαραίτητες για την προστασία των κοντινών οικοσυστημάτων και των πηγών νερού.

Φυσική Εξασθένιση

Σε ορισμένες περιπτώσεις, επιτράπη να συμβούν διεργασίες φυσικής εξασθένησης, όπου η μόλυνση αφέθηκε να υποβαθμιστεί φυσικά με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η μέθοδος βασίστηκε στην εγγενή ικανότητα του περιβάλλοντος να διασπά τους υδρογονάνθρακες μέσω της μικροβιακής δραστηριότητας, της οξείδωσης και της εξάτμισης. Ωστόσο, λόγω των ξηρών συνθηκών της ερήμου του Κουβέιτ, ο ρυθμός φυσικής εξασθένησης ήταν σημαντικά πιο αργός από ό,τι σε πιο εύκρατες περιοχές.

Η κλίμακα και η πολυπλοκότητά του παρουσίασαν σημαντικές προκλήσεις, οδηγώντας την καινοτομία στις τεχνολογίες αποκατάστασης του εδάφους. Ενώ σημειώθηκε πρόοδος στην αποκατάσταση των πληγείσων περιοχών, η μακροπρόθεσμη παρακολούθηση και η έρευνα είναι απαραίτητες για την πλήρη αντιμετώπιση των συνεπειών τέτοιων καταστροφών. [\[51\]](#), [\[52\]](#), [\[53\]](#)

Ρύπανση των ποταμών

Η ρύπανση των ποταμών αποτελεί ένα πολύ σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα καθώς επηρεάζει τα οικοσυστήματα, την ανθρώπινη υγεία και τη διαθεσιμότητα καθαρού νερού. Προκύπτει από την εισαγωγή επιβλαβών ουσιών στα υδατικά συστήματα, συχνά μέσω των βιομηχανικών αποβλήτων, της γεωργικής απορροής, της απόρριψης λυμάτων και της αστικοποίησης. Οι ρύποι στα ποτάμια μπορεί να περιλαμβάνουν χημικά, βαρέα μέταλλα, φυτοφάρμακα, πλαστικά και οργανικά απόβλητα, τα οποία διαταράσσουν την υδρόβια ζωή, υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού και θέτουν κινδύνους για τους ανθρώπινους πληθυσμούς που βασίζονται σε αυτά τα ποτάμια για πόσιμο νερό και γεωργία.

Ρύποι και πηγές ρύπανσης

Οι ρύποι των ποταμών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πολλές μεγάλες ομάδες, συμπεριλαμβανομένων των χημικών, βιολογικών, φυσικών και θερμικών ρύπων. Καθένας από αυτούς τους τύπους ρύπων έχει διαφορετικές επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον και θέτει μοναδικές προκλήσεις για την αποκατάσταση.

Χημικοί Ρύποι

Οι χημικοί ρύποι στα ποτάμια αποτελούνται από μια ποικιλία τοξικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των βαρέων μετάλλων, φυτοφαρμάκων, υδρογονανθράκων και βιομηχανικών χημικών ουσιών. Αυτοί οι ρύποι προέρχονται συχνά από ανθρώπινες

δραστηριότητες, με καταστροφικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού, την υδρόβια ζωή και την ανθρώπινη υγεία.

Τα βαρέα μέταλλα όπως ο υδράργυρος (*Hg*), ο μόλυβδος (*Pb*), το κάδμιο (*Cd*), το αρσενικό (*As*) και το χρώμιο (*Cr*) είναι μερικοί από τους πιο επικίνδυνους ρύπους που βρίσκονται στα ποτάμια. Αυτά τα μέταλλα συνήθως απελευθερώνονται μέσω βιομηχανικών εκκενώσεων, εργασιών εξόρυξης και ακατάλληλης διάθεσης ηλεκτρονικών απορριμμάτων. Τα βαρέα μέταλλα είναι μη βιοαποδομήσιμα και συσσωρεύονται στους ιστούς των υδρόβιων οργανισμών, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να μεταφερθούν στην τροφική αλυσίδα, προκαλώντας σημαντικούς κινδύνους για την υγεία τόσο για την άγρια ζωή όσο και για τον άνθρωπο. Η μακροχρόνια έκθεση μπορεί να οδηγήσει σε νευρολογική βλάβη, ανεπάρκεια οργάνων και αναπτυξιακά προβλήματα στους ανθρώπους.

Τα φυτοφάρμακα και τα ζιζανιοκτόνα είναι μια άλλη σημαντική κατηγορία χημικών ρύπων. Χρησιμοποιούνται συχνά στη γεωργία, αυτές οι χημικές ουσίες τρέχουν στα ποτάμια, ειδικά μετά τις βροχοπτώσεις, όπου μολύνουν το νερό. Ουσίες όπως το *glyphosate*, η *atrazine* και το *DDT* (αν και απαγορεύονται σε πολλές χώρες, τα υπολείμματα *DDT* εξακολουθούν να παραμένουν στο περιβάλλον) είναι κοινά παραδείγματα. Αυτές οι χημικές ουσίες όχι μόνο βλάπτουν τα υδάτινα οικοσυστήματα σκοτώνοντας είδη που δεν αποτελούν στόχο, αλλά επίσης συσσωρεύονται σε οργανισμούς, οδηγώντας σε αναπαραγωγικές ανεπάρκειες και οικολογικές ανισορροπίες. Για τους ανθρώπους, η παρατεταμένη έκθεση σε ορισμένα φυτοφάρμακα έχει συνδεθεί με καρκίνους και ορμονικές διαταραχές.

Οι βιομηχανικές χημικές ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (*PCBs*), των διοξινών και των πτητικών οργανικών ενώσεων (*VOCs*), συμβάλλουν σημαντικά στη ρύπανση των ποταμών. Αυτές οι χημικές ουσίες που απελευθερώνονται μέσω βιομηχανικών διεργασιών και ακατάλληλης διάθεσης απορριμμάτων είναι ανθεκτικές και εξαιρετικά τοξικές. Αποτελούν μακροπρόθεσμους περιβαλλοντικούς κινδύνους, προκαλώντας καρκίνους, καταστολή του ανοσοποιητικού συστήματος και αναπαραγωγική βλάβη τόσο στον άνθρωπο όσο και στην άγρια ζωή. Τα *PCBs* και οι διοξίνες, ειδικότερα, είναι γνωστό ότι βιοσυσσωρεύονται σε υδρόβιους οργανισμούς, καθιστώντας τα ιδιαίτερα επικίνδυνα

για είδη σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων που καταναλώνουν μολυσμένα ψάρια. [54], [55], [56], [57]

Βιολογικοί Ρύποι

Οι βιολογικοί ρύποι αποτελούνται από επιβλαβή παθογόνα όπως βακτήρια, ιούς και παράσιτα που εισέρχονται στα ποτάμια μέσω ακατέργαστων ή ανεπαρκώς επεξεργασμένων λυμάτων, ζωικών αποβλήτων και γεωργικών απορροών. Αυτοί οι μολυσματικοί παράγοντες είναι υπεύθυνοι για ασθένειες που μεταδίδονται στο νερό, συμπεριλαμβανομένης της χολέρας, της δυσεντερίας και του τύφου, θέτοντας σημαντικούς κινδύνους για τους ανθρώπινους πληθυσμούς που εξαρτώνται από τα ποτάμια για πόσιμο νερό και αποχέτευση.

Παθογόνοι μικροοργανισμοί όπως το *Escherichia coli* (*E. coli*), η σαλμονέλα και διάφοροι ιοί είναι βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν στη ρύπανση των ποταμών. Η παρουσία τους είναι συχνά αποτέλεσμα μη επεξεργασμένων ή ακατάλληλων λυμάτων, μολυσματικών πηγών νερού που χρησιμοποιούνται για αναψυχή, ψάρεμα και πόσιμο. Αυτό το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σοβαρό στις αναπτυσσόμενες περιοχές όπου λείπουν οι υποδομές υγιεινής, αυξάνοντας περαιτέρω τους κινδύνους για τη δημόσια υγεία.

Η βιολογική ρύπανση περιλαμβάνει επίσης περίσσεια θρεπτικών ουσιών, ιδιαίτερα άζωτο και φώσφορο, από τις γεωργικές απορροές, τα λύματα και τα ζωικά απόβλητα. Αν και είναι απαραίτητο σε μέτριες ποσότητες, η υπερβολικά μεγάλη ποσότητά τους οδηγεί σε ευτροφισμό - ένα φαινόμενο που πυροδοτεί την υπερβολική ανάπτυξη φυκών και υδρόβιων φυτών, διαταράσσοντας τα οικοσυστήματα των ποταμών και μειώνοντας τα επίπεδα οξυγόνου.

Τα οργανικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των περιττωμάτων και των αποσυντιθέμενων φυτικών και ζωικών υλικών, αντιπροσωπεύουν μια άλλη σημαντική μορφή βιολογικής ρύπανσης. Τυπικά προερχόμενα από μη επεξεργασμένα λύματα, γεωργικές απορροές και κτηνοτροφία, αυτά τα απόβλητα συμβάλλουν στην εξάντληση του οξυγόνου στα ποτάμια, δημιουργώντας συνθήκες υποξίας που είναι επιζήμιες για την υδρόβια ζωή.

Επιπλέον, η εμφάνιση ανθεκτικών στα αντιβιοτικά βακτηρίων στα ποτάμια αποτελεί αυξανόμενη απειλή. Αυτά τα βακτήρια προέρχονται συχνά από την υπερβολική χρήση αντιβιοτικών στη γεωργία, τα λύματα νοσοκομείων και την ακατάλληλη απόρριψη

φαρμάκων. Μόλις εισαχθούν στα υδάτινα οικοσυστήματα, μπορούν να εξαπλωθούν, αυξάνοντας τον κίνδυνο ανθεκτικών στα φάρμακα λοιμώξεων σε ανθρώπους και ζώα. [\[54\]](#), [\[55\]](#), [\[56\]](#), [\[57\]](#)

Φυσικοί Ρύποι

Οι φυσικοί ρύποι στα ποτάμια περιλαμβάνουν στερεά απόβλητα, πλαστικά και ιζήματα. Η ρύπανση από ιζήματα προκύπτει όταν το έδαφος, που συνήθως διαβρώνεται από αποψιλωμένα εδάφη, εργοτάξια ή γεωργικά χωράφια, εισέρχεται στα ποτάμια. Αυτό μπορεί να διαταράξει τους υδρόβιους οικοτόπους, να μειώσει τη διαύγεια του νερού και να μειώσει τα επίπεδα οξυγόνου, επηρεάζοντας αρνητικά την υδρόβια ζωή.

Η ρύπανση από ιζήματα είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους φυσικούς ρύπους στα ποτάμια. Προκαλείται όταν τα σωματίδια του εδάφους πλένονται σε ποτάμια λόγω της διάβρωσης του εδάφους, της αποψίλωσης των δασών ή των κακών γεωργικών πρακτικών. Αυτή η συσσώρευση ιζημάτων διαταράσσει τα υδάτινα οικοσυστήματα θάβοντας ενδιαιτήματα, μειώνοντας την ποιότητα του νερού και εμποδίζοντας τη διείσδυση του φωτός που είναι απαραίτητη για τα υδρόβια φυτά.

Τα πλαστικά, που κυμαίνονται από μεγάλα συντρίμια έως μικροπλαστικά, αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο ως σημαντικοί ρύποι στα συστήματα ποταμών. Αυτοί οι ρύποι προέρχονται από την αστική απορροή, την ακατάλληλη διάθεση απορριμμάτων και τη διάσπαση μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων σε μικρότερα σωματίδια.

Τα ποτάμια επίσης συχνά μολύνονται με διάφορες μορφές στερεών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των οικιακών απορριμμάτων και των βιομηχανικών απορριμμάτων. [\[54\]](#), [\[55\]](#), [\[56\]](#), [\[57\]](#)

Θερμικοί Ρύποι

Η θερμική ρύπανση προκύπτει από την απόρριψη θερμαινόμενου νερού από βιομηχανικές διεργασίες, όπως μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, σε ποτάμια. Η αυξημένη θερμοκρασία του νερού μειώνει τα επίπεδα οξυγόνου, τα οποία μπορεί να είναι επιζήμια για την υδρόβια ζωή, ιδιαίτερα τα ψάρια που χρειάζονται κρύο νερό για να επιβιώσουν. [\[54\]](#), [\[55\]](#), [\[56\]](#), [\[57\]](#)

Πηγές Ρύπων Ποταμών

Οι πηγές των ποταμών ρύπων ποικίλλουν και μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: σημειακές και μη σημειακές πηγές.

Σημειακές πηγές

Οι σημειακές πηγές ρύπανσης είναι αναγνωρίσιμες, μεμονωμένες τοποθεσίες όπου οι ρύποι εισέρχονται στο υδάτινο σύστημα. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Βιομηχανικές απορρίψεις: Τα εργοστάσια και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις συχνά απορρίπτουν τοξικές χημικές ουσίες και βαρέα μέταλλα απευθείας στα ποτάμια, είτε νόμιμα βάσει συστημάτων αδειών είτε παράνομα. Οι βιομηχανικοί ρύποι, συμπεριλαμβανομένου του υδραργύρου, του μολύβδου και άλλων βαρέων μετάλλων, μπορούν να βιοσυσσωρευτούν στα ψάρια και σε άλλους υδρόβιους οργανισμούς, επηρεάζοντας τελικά ολόκληρα οικοσυστήματα.
- Λύματα και λύματα: Τα μη επεξεργασμένα ή μερικώς επεξεργασμένα λύματα από αστικές περιοχές αποτελούν σημαντική πηγή βιολογικών ρύπων στα ποτάμια. Οι ανεπαρκείς εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων επιτρέπουν σε επιβλαβή βακτήρια, ιούς και χημικές ουσίες να εισέλθουν στα υδάτινα σώματα, θέτοντας σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και την υδρόβια ζωή. Αυτό είναι ιδιαίτερα προβληματικό στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου τα συστήματα υγιεινής είναι ανεπαρκώς ανεπτυγμένα.
- Σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής: Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν σημαντική πηγή θερμικής ρύπανσης. Όταν το νερό ψύξης απελευθερώνεται σε κοντινά ποτάμια σε υψηλές θερμοκρασίες, προκαλεί θερμική καταπόνηση στους υδρόβιους οργανισμούς. Τα ψάρια και άλλα υδρόβια είδη ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορεί να παρουσιάσουν μείωση του πληθυσμού λόγω μειωμένων επιπέδων οξυγόνου στα θερμότερα νερά.

Μη σημειακές πηγές

Οι μη σημειακές πηγές είναι διάχυτες και συχνά πιο δύσκολο να ελεγχθούν, καθώς προέρχονται από πολλές μικρές εισόδους και όχι από ένα μόνο σημείο εκφόρτισης. Αυτά περιλαμβάνουν:

- **Αγροτική απορροή:** Η γεωργία είναι ένας από τους μεγαλύτερους παράγοντες που συμβάλλουν στη ρύπανση των ποταμών παγκοσμίως. Η χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων οδηγεί σε απορροή κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων, μεταφέροντας αυτές τις χημικές ουσίες σε κοντινά ποτάμια. Θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο και ο φώσφορος από τα λιπάσματα προάγουν την ανάπτυξη επιβλαβών φυκών, οι οποίες εξαντλούν τα επίπεδα οξυγόνου στο νερό, μια διαδικασία γνωστή ως ευτροφισμός.
- **Αστική απορροή:** Καθώς το νερό της βροχής ρέει πάνω από τις αστικές περιοχές, συλλαμβάνει ρύπους όπως πετρέλαιο, βαρέα μέταλλα από οχήματα, πλαστικά και άλλα συντρίμια. Αυτή η απορροή συνήθως δεν αντιμετωπίζεται πριν εισέλθει στα ποτάμια, οδηγώντας σε μόλυνση. Ο αυξανόμενος ρυθμός αστικοποίησης έχει επιδεινώσει αυτό το ζήτημα, με τις αδιαπέραστες επιφάνειες όπως οι δρόμοι και οι χώροι στάθμευσης να συμβάλλουν σε μεγαλύτερους όγκους μολυσμένης απορροής.
- **Μεταλλεία και Λατομεία:** Οι εργασίες εξόρυξης συμβάλλουν στη ρύπανση των ποταμών με την απελευθέρωση βαρέων μετάλλων και ιζημάτων σε υδάτινα σώματα. Η όξινη αποστράγγιση ορυχείων, η οποία συμβαίνει όταν θειούχα ορυκτά σε εκτεθειμένα πετρώματα αντιδρούν με νερό και αέρα για να σχηματίσουν θειικό οξύ, μπορεί να μολύνει σοβαρά τα ποτάμια, μειώνοντας τα επίπεδα pH και καθιστώντας το νερό τοξικό για την υδρόβια ζωή. [\[54\]](#), [\[55\]](#), [\[56\]](#), [\[57\]](#)

Επιδράσεις της μόλυνσης των ποταμών στους οργανισμούς

Οι ρύποι που εισάγονται στα συστήματα ποταμών επηρεάζουν σημαντικά τους υδρόβιους οργανισμούς σε πολλαπλά επίπεδα, από ψάρια και φυτά έως μικροοργανισμούς. Αυτές οι επιπτώσεις φαίνονται στη μείωση της βιοποικιλότητας, στην αλλαγή των τροφικών αλυσίδων και στη διακοπή των φυσικών διεργασιών που είναι απαραίτητες για τη σταθερότητα του οικοσυστήματος.

Επιδράσεις στα ψάρια και στην υδρόβια ζωή

Οι χημικοί και βιολογικοί ρύποι στα ποτάμια βλάπτουν άμεσα τα ψάρια και άλλους υδρόβιους οργανισμούς. Τα βαρέα μέταλλα και οι βιομηχανικές χημικές ουσίες μπορούν να συσσωρευτούν στους ιστούς των ψαριών, οδηγώντας σε ποικίλα φυσιολογικά προβλήματα, όπως αναπαραγωγικές ανεπάρκειες, αναπτυξιακές

ανωμαλίες και βλάβες οργάνων. Τα είδη ψαριών που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στους ρύπους, όπως η πέστροφα και ο σολομός, είναι συχνά τα πρώτα που μειώνονται σε μολυσμένα ποτάμια.

Ο ευτροφισμός, που προκαλείται από την περίσσεια θρεπτικών ουσιών από τις γεωργικές απορροές, οδηγεί σε συνθήκες υποξίας (χαμηλά επίπεδα οξυγόνου), οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν μαζική θανάτωση ψαριών. Η διάσπαση των ανθισμάτων φυκιών από βακτήρια καταναλώνει οξυγόνο, αφήνοντας ελάχιστο διαθέσιμο για άλλους οργανισμούς. Αυτή η εξάντληση του οξυγόνου δημιουργεί νεκρές ζώνες, οι οποίες είναι ακατοίκητες για τις περισσότερες μορφές υδρόβιας ζωής, με αποτέλεσμα τη δραματική μείωση της βιοποικιλότητας.

Διαταραχή των μικροβιακών κοινοτήτων

Η ρύπανση επηρεάζει επίσης σημαντικά τις μικροβιακές κοινότητες στα ποτάμια οικοσυστήματα. Οι μικροοργανισμοί παίζουν ζωτικό ρόλο στον κύκλο των θρεπτικών ουσιών, στην αποσύνθεση της οργανικής ύλης και στη διατήρηση της ποιότητας του νερού. Ωστόσο, ρύποι όπως τα βαρέα μέταλλα, τα φυτοφάρμακα και οι βιομηχανικές χημικές ουσίες μπορούν να αναστείλουν τη μικροβιακή δραστηριότητα, διαταράσσοντας αυτές τις κρίσιμες οικολογικές διαδικασίες. Ειδικότερα, η μόλυνση από βαρέα μέταλλα μεταβάλλει τη σύνθεση των μικροβιακών κοινοτήτων, μειώνοντας την ποικιλομορφία και τη λειτουργική τους ικανότητα.

Η εισαγωγή παθογόνων παραγόντων από τα λύματα και τις γεωργικές απορροές διαταράσσει περαιτέρω τα μικροβιακά οικοσυστήματα εισάγοντας επιβλαβή βακτήρια που ανταγωνίζονται ή σκοτώνουν τα ωφέλιμα μικρόβια. Αυτή η μετατόπιση των μικροβιακών πληθυσμών μπορεί να αποδυναμώσει τη συνολική ανθεκτικότητα του οικοσυστήματος, καθιστώντας το πιο ευάλωτο σε περαιτέρω ρύπανση και περιβαλλοντικές αλλαγές. [\[58\]](#)

Βιοσυσσώρευση και Βιομεγέθυνση

Μία ακόμη σοβαρή επίπτωση της ρύπανσης των ποταμών στους υδρόβιους οργανισμούς είναι η βιοσυσσώρευση, όπου ρύποι όπως τα βαρέα μέταλλα και οι επίμονοι οργανικοί ρύποι (POPs) συσσωρεύονται στους ιστούς των οργανισμών με την πάροδο του χρόνου. Καθώς αυτοί οι οργανισμοί καταναλώνονται από θηρευτές, η συγκέντρωση των ρύπων αυξάνεται περαιτέρω στην τροφική αλυσίδα. Τα κορυφαία

αρπακτικά, συμπεριλαμβανομένων των μεγαλύτερων ψαριών, των πουλιών, ακόμη και των ανθρώπων, αντιμετωπίζουν τον υψηλότερο κίνδυνο έκθεσης σε επικίνδυνα επίπεδα ρύπων μέσω αυτής της διαδικασίας.

Η βιοσυσσώρευση ρύπων όπως ο υδράργυρος και τα PCB στα ψάρια έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η κατανάλωση μολυσμένων ψαριών μπορεί να οδηγήσει σε νευρολογικές βλάβες, αναπαραγωγικά προβλήματα και άλλες χρόνιες παθήσεις υγείας. Για το λόγο αυτό, η ρύπανση των ποταμών αποτελεί όχι μόνο οικολογική απειλή, αλλά και άμεσο κίνδυνο για την επισιτιστική ασφάλεια και τη δημόσια υγεία. [\[58\]](#), [\[59\]](#)

Επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία

Πέρα από τις επιπτώσεις στην υδρόβια ζωή, η ρύπανση των ποταμών έχει ευρύτερες συνέπειες για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Το μολυσμένο νερό των ποταμών μπορεί να διεισδύσει στα υπόγεια ύδατα, εξαπλώνοντας ρύπους σε μεγάλες εκτάσεις και επηρεάζοντας τη γεωργική παραγωγικότητα. Τα μολυσμένα ποτάμια είναι επίσης λιγότερο ικανά να παρέχουν υπηρεσίες οικοσυστήματος όπως καθαρό πόσιμο νερό, ρύθμιση πλημμυρών και βιότοπο για την άγρια ζωή.

Στις αστικές περιοχές, τα μολυσμένα ποτάμια συχνά οδηγούν σε οικονομικές απώλειες καθώς αυξάνεται το κόστος επεξεργασίας του νερού, μειώνονται οι ψυχαγωγικές δραστηριότητες και η αλιεία υποφέρει από τη μείωση των πληθυσμών των ψαριών. Για τις αγροτικές κοινότητες, ειδικά εκείνες που εξαρτώνται από ποτάμια για πόσιμο νερό και γεωργία, οι συνέπειες της ρύπανσης είναι ακόμη πιο σοβαρές. Οι ασθένειες που μεταδίδονται στο νερό, η επισιτιστική ανασφάλεια και τα μειωμένα μέσα διαβίωσης είναι κοινά αποτελέσματα όταν η ποιότητα του νερού του ποταμού επιδεινώνεται. [\[57\]](#) [\[58\]](#), [\[59\]](#)

Αντιρρυπαντικές τεχνολογίες ποταμών

Τα ποτάμια αντιμετωπίζουν ρύπανση από πολλαπλές πηγές, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανικών απορρίψεων, των μη επεξεργασμένων λυμάτων, της γεωργικής απορροής και των αστικών όμβριων υδάτων. Σε αστικά περιβάλλοντα, ο αντίκτυπος των ανθρώπινων δραστηριοτήτων είναι ιδιαίτερα έντονος, καθώς οι πυκνοκατοικημένες περιοχές συνεισφέρουν μεγάλες ποσότητες ρύπων όπως χημικά, βαρέα μέταλλα και πλαστικά στα ποτάμια.

Βασικές Τεχνολογίες Αντιρρύπανσης για Αστικά Ποτάμια

Στα αστικό περιβάλλον, οι τεχνολογίες κατά της ρύπανσης επικεντρώνονται στη μείωση της εισροής ρύπων από πόλεις και βιομηχανίες, ενώ παράλληλα ενισχύουν τη φυσική ικανότητα των ποταμών να επεξεργάζονται και να υποβαθμίζουν τους ρύπους. Οι ακόλουθες ενότητες περιγράφουν λεπτομερώς μερικές από τις βασικές τεχνολογίες και μεθόδους που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της ρύπανσης των αστικών ποταμών.

Πράσινη Υποδομή και Συστήματα Βιώσιμης Αστικής Αποχέτευσης (SUDS)

Η πράσινη υποδομή είναι μια από τις πιο βιώσιμες προσεγγίσεις για τη διαχείριση της ρύπανσης των αστικών ποταμών. Επικεντρώνεται στην αξιοποίηση φυσικών διεργασιών για το φιλτράρισμα και την απορρόφηση των ρύπων πριν εισέλθουν στα ποτάμια. Τα Αειφόρα Αστικά Συστήματα Αποχέτευσης (SUDS) αποτελούν ουσιαστικό μέρος της πράσινης υποδομής, σχεδιασμένα να μιμούνται τα φυσικά συστήματα αποχέτευσης και να μειώνουν τη ροή των ρύπων στα υδάτινα σώματα.

Vegetative Swales: Πρόκειται για ρηχά κανάλια με βλάστηση που επιβραδύνουν τη ροή των ομβρίων και επιτρέπουν στα ιζήματα και τους ρύπους να καθιζάνουν. Τα φυτά σε αυτές τις λωρίδες μπορούν να απορροφήσουν θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο και φώσφορο, αποτρέποντας τη ρύπανση από θρεπτικά συστατικά που συμβάλλει στον ευτροφισμό.

Πράσινες στέγες και κήποι βροχής: Οι πράσινες στέγες και οι κήποι της βροχής απορροφούν και φιλτράρουν τα όμβρια ύδατα πριν εισέλθουν στο σύστημα αποχέτευσης. Με τη δέσμευση της απορροής, αυτές οι τεχνολογίες μειώνουν το φορτίο των αστικών ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των ελαίων, μετάλλων και αιωρούμενων στερεών, που εισέρχονται στα ποτάμια.

Διαπερατά πεζοδρόμια: Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές αδιαπέραστες επιφάνειες, τα διαπερατά πεζοδρόμια επιτρέπουν στο νερό να διεισδύσει στο έδαφος, μειώνοντας την απορροή και αποτρέποντας την έκπλυση των ρύπων στα ποτάμια κατά τη διάρκεια καταιγίδων. Αυτή η τεχνολογία βοηθά επίσης στην επαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων και στη μείωση των αστικών πλημμυρών, ωφελώντας έμμεσα την υγεία των ποταμών. [\[60\]](#), [\[61\]](#)

Κατασκευασμένοι Υγρότοποι

Οι κατασκευασμένοι υγρότοποι είναι μηχανικά συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για να προσομοιώνουν τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν σε φυσικούς υγροτόπους. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν φυτά, μικροοργανισμούς και έδαφος για την επεξεργασία του μολυσμένου νερού προτού εισέλθει στα ποτάμια.

Απομάκρυνση ρύπων: Οι κατασκευασμένοι υγρότοποι είναι αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση ενός ευρέος φάσματος ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των βαρέων μετάλλων, της οργανικής ύλης και των θρεπτικών ουσιών. Τα φυτά σε αυτούς τους υγροτόπους μπορούν να προσλάβουν θρεπτικά συστατικά, ενώ οι μικροβιακές κοινότητες διασπούν τους οργανικούς ρύπους και μειώνουν τα επίπεδα τοξικών ουσιών όπως η αμμωνία και τα νιτρικά άλατα. [62]

Παγίδευση ιζημάτων: Οι υγρότοποι είναι επίσης αποτελεσματικοί στην παγίδευση ιζημάτων, εμποδίζοντάς τα να φτάσουν στα ποτάμια και προκαλώντας θολότητα ή φράξιμο των υδρόβιων οικοτόπων. Η συσσώρευση ιζημάτων στα ποτάμια μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ποιότητα του νερού και να επηρεάσει αρνητικά τα ψάρια και τους άλλους υδρόβιους οργανισμούς. [63]

Συστήματα Αερισμού για Ενίσχυση Οξυγόνου

Τα χαμηλά επίπεδα οξυγόνου, που συχνά προκαλούνται από υπερβολική οργανική ύλη και ρύπανση από θρεπτικά συστατικά, μπορούν να βλάψουν σοβαρά τους υδρόβιους οργανισμούς στα ποτάμια. Οι τεχνολογίες αερισμού, σχεδιασμένες για να αυξάνουν τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου στο νερό, βοηθούν στην ανακούφιση αυτού του προβλήματος.

Αερισμός σε ροή: Αυτή η τεχνική εισάγει αέρα ή οξυγόνο απευθείας στα ποτάμια χρησιμοποιώντας μηχανικούς αεραγωγούς ή διαχυτές. Αυξάνοντας τα επίπεδα οξυγόνου, ο αερισμός προάγει τη διάσπαση των οργανικών ρύπων από αερόβια βακτήρια και βοηθά στην πρόληψη των υποξικών συνθηκών, που μπορεί να οδηγήσουν σε θανάτωση ψαριών. [64]

Πλωτοί αεριστές: Χρησιμοποιούνται σε λίμνες, δεξαμενές και τμήματα βραδέως κινούμενων ποταμών, οι πλωτοί αεριστές αναδύουν την επιφάνεια του νερού και εισάγουν αέρα, ενισχύοντας την ανταλλαγή οξυγόνου. Αυτά τα συστήματα μπορούν να

είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε αστικά ποτάμια που υποφέρουν από υψηλά φορτία οργανικών αποβλήτων και χαμηλή ροή νερού. [65]

Ρύπανση από πλοία

Η ρύπανση από τα ποταμόπλοια, συμπεριλαμβανομένων τόσο των εμπορικών όσο και των σκαφών αναψυχής, είναι ένας παράγοντας που συχνά παραβλέπεται στη ρύπανση των ποταμών. Τα ποταμόπλοια μπορούν να απελευθερώσουν ρύπους όπως πετρέλαιο, καύσιμα, βαρέα μέταλλα και στερεά απόβλητα απευθείας στα υδάτινα σώματα, επιδεινώνοντας το πρόβλημα της ρύπανσης. Το River Project, ένας καινοτόμος τρόπος για τη μείωση της ρύπανσης στα ποταμόπλοια, υπογραμμίζει διάφορες τεχνολογίες που έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν αυτόν τον αντίκτυπο.

Συστήματα επεξεργασίας πετρελαίου και υδροσυλλεκτών

Η πετρελαϊκή ρύπανση από τα σκάφη αποτελεί σημαντική απειλή για τα ποτάμια οικοσυστήματα. Οι πετρελαιοκηλίδες και το νερό «σεντίνας», το οποίο περιέχει ένα μείγμα νερού, πετρελαίου και άλλων ρύπων, μπορεί να επηρεάσει σοβαρά την ποιότητα του νερού και την υδρόβια ζωή. Τεχνολογίες σχεδιασμένες για την αντιμετώπιση της ρύπανσης από πετρέλαιο στα ποταμόπλοια περιλαμβάνουν:

- Διαχωριστές λαδιού-νερού: Εγκατεστημένοι σε ποταμόπλοια, αυτά τα συστήματα διαχωρίζουν το λάδι από το νερό υδροσυλλεκτών πριν από την απόρριψή του. Οι διαχωριστές λαδιού-νερού είναι ικανοί να αφαιρούν λάδι και άλλους υδρογονάνθρακες, διασφαλίζοντας ότι μόνο επεξεργασμένο νερό απελευθερώνεται στα ποτάμια.
- Συστήματα φιλτραρίσματος υδροσυλλεκτών: Τα προηγμένα συστήματα φιλτραρίσματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω επεξεργασία του νερού υδροσυλλεκτών, αφαιρώντας λεπτά σωματίδια λαδιού και άλλους ρύπους. Αποτρέποντας την απόρριψη μολυσμένου νερού, αυτές οι τεχνολογίες προστατεύουν τα οικοσυστήματα των ποταμών από τη ρύπανση από πετρέλαιο.

Συστήματα Διαχείρισης και Ανακύκλωσης Στερεών Αποβλήτων

Τα στερεά απόβλητα που παράγονται από ποταμόπλοια, όπως πλαστικά, υπολείμματα τροφίμων και άλλα υπολείμματα, συμβάλλουν σημαντικά στη ρύπανση των ποταμών εάν δεν διαχειρίζονται σωστά. Η εφαρμογή τεχνολογιών διαχείρισης στερεών αποβλήτων σε ποταμόπλοια μπορεί να μειώσει δραστικά αυτόν τον αντίκτυπο.

Ενσωματωμένοι συμπίεστές απορριμμάτων: Αυτά τα συστήματα συμπιέζουν τα στερεά απόβλητα, μειώνοντας τον όγκο τους και διευκολύνουν την αποθήκευση και την υπεύθυνη απόρριψή τους μόλις το σκάφος επιστρέψει στην ακτή. Οι συμπίεστές συμβάλλουν στην πρόληψη της παράνομης απόρριψης απορριμμάτων απευθείας στα ποτάμια.

Προγράμματα ανακύκλωσης: Τα σκάφη εξοπλισμένα με σταθμούς ανακύκλωσης ενθαρρύνουν τα μέλη του πληρώματος και τους επιβάτες να διαχωρίζουν τα απόβλητα για ανακύκλωση. Αυτό μειώνει την ποσότητα των απορριμμάτων που πρέπει να υποστούν επεξεργασία στην ξηρά και μειώνει την πιθανότητα ρύπανσης από τα ποταμόπλοια. [66]

Συστήματα επεξεργασίας νερού έρματος

Το νερό «έρματος», που χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση των πλοίων, περιέχει συχνά ρύπους όπως ιζήματα, θρεπτικά συστατικά και χωροκατακτητικά είδη. Όταν απορρίπτεται σε ποτάμια, το νερό του «έρματος» μπορεί να εισάγει αυτούς τους ρύπους στα τοπικά οικοσυστήματα, προκαλώντας σημαντική οικολογική διαταραχή. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, έχουν αναπτυχθεί συστήματα επεξεργασίας νερού έρματος.

- Απολύμανση και διήθηση με υπεριώδη ακτινοβολία: Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν υπεριώδες φως (UV) και φίλτρα για να σκοτώσουν βακτήρια, ιούς και χωροκατακτητικά είδη που υπάρχουν στο νερό «έρματος». Με την επεξεργασία του νερού έρματος πριν από την απόρριψη, αυτές οι τεχνολογίες αποτρέπουν την εισαγωγή επιβλαβών οργανισμών και μειώνουν τη ρύπανση από θρεπτικά συστατικά στα ποτάμια. [66]

Προηγμένες τεχνολογίες παρακολούθησης και συλλογής δεδομένων

Ο αποτελεσματικός έλεγχος της ρύπανσης των ποταμών απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων για τον εντοπισμό των πηγών ρύπανσης και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των τεχνολογιών αποκατάστασης. Πολλές καινοτόμες τεχνολογίες παρακολούθησης χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού του ποταμού σε πραγματικό χρόνο.

- Τηλεπισκόπηση και δορυφορική παρακολούθηση: Αυτές οι τεχνολογίες παρέχουν δεδομένα μεγάλης κλίμακας για τη ρύπανση των ποταμών,

συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών στην ποιότητα του νερού, τη θερμοκρασία και τα επίπεδα ιζημάτων. Η τηλεπισκόπηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον εντοπισμό σημείων ρύπανσης και την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας μεγάλων έργων αποκατάστασης.

- Επιτόπιοι αισθητήρες ποιότητας νερού: Τοποθετημένοι απευθείας σε ποτάμια, αυτοί οι αισθητήρες παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για βασικές παραμέτρους ποιότητας του νερού όπως το pH, το διαλυμένο οξυγόνο, η θολότητα και τα επίπεδα θρεπτικών συστατικών. Αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για την ταχεία απόκριση σε περιστατικά ρύπανσης και την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης αποτελεσματικότητας των αντιρρυπαντικών τεχνολογιών. [66]

Θαλάσσια Ρύπανση

Η θαλάσσια ρύπανση περιλαμβάνει την εισαγωγή επιβλαβών ουσιών όπως χημικών, πλαστικών και βιολογικών υλικών στον ωκεανό. Αυτοί οι ρύποι διαταράσσουν τα θαλάσσια οικοσυστήματα, απειλούν τη βιοποικιλότητα και επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με έρευνες, περίπου το 80% της θαλάσσιας ρύπανσης προέρχεται από χερσαίες δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένων των γεωργικών απορριμμάτων, των αστικών απορριμμάτων και των πλαστικών απορριμμάτων, τα οποία τελικά ρέουν στη θάλασσα μέσω ποταμών και ακτών.

Ρύποι και πηγές ρύπανσης

Η θαλάσσια ρύπανση προέρχεται από διάφορες πηγές, με τις πιο σημαντικές να περιλαμβάνουν πλαστικά, γεωργικές απορροές, χημικά, πετρελαιοκηλίδες και απόβλητα από βιομηχανικές και αστικές περιοχές.

Ρύπανση από πλαστικά

Τα πλαστικά αντιπροσωπεύουν ένα από τα πιο πιεστικά ζητήματα στη θαλάσσια ρύπανση. Κάθε χρόνο, εκατομμύρια τόνοι πλαστικών απορριμμάτων εισέρχονται στον ωκεανό, όπου διασπώνται σε μικρότερα σωματίδια, γνωστά ως μικροπλαστικά. Αυτά τα μικροσκοπικά σωματίδια είναι ιδιαίτερα προβληματικά καθώς καταπίνονται από θαλάσσια ζώα, εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα και τελικά επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Τα πλαστικά συντρίμμια προέρχονται κυρίως από κακή διαχείριση απορριμμάτων στη γη, απόρριψη απορριμμάτων, απορροή όμβριων υδάτων και ανεπαρκείς εγκαταστάσεις επεξεργασίας απορριμμάτων.

Τα μικροπλαστικά, τα οποία είναι πλαστικά θραύσματα μεγέθους μικρότερου από 5 χιλιοστά, έχουν γίνει πανταχού παρόντα στον ωκεανό. Βρίσκονται σε όλα σχεδόν τα θαλάσσια περιβάλλοντα, από τα επιφανειακά ύδατα μέχρι τα ιζήματα βαθέων υδάτων. Αυτή η εκτεταμένη παρουσία είναι ανησυχητική γιατί αυτά τα σωματίδια όχι μόνο απειλούν τους θαλάσσιους οργανισμούς αλλά συσσωρεύονται και στους ιστούς των ζώων, επηρεάζοντας δυνητικά την υγεία των ανθρώπων που καταναλώνουν θαλασσινά.

Αγροτική απορροή και ρύπανση από θρεπτικά συστατικά

Οι γεωργικές απορροές συμβάλλουν σημαντικά στη θαλάσσια ρύπανση, ειδικά στις παράκτιες περιοχές. Λιπάσματα, φυτοφάρμακα και ζωικά απόβλητα από γεωργικές εκτάσεις μεταφέρονται από ποτάμια και ρυάκια στον ωκεανό. Τα υψηλά επίπεδα θρεπτικών συστατικών, ιδιαίτερα του αζώτου και του φωσφόρου από τα λιπάσματα, οδηγούν σε ευτροφισμό - μια διαδικασία που πυροδοτεί την ταχεία ανάπτυξη των φυκών, με αποτέλεσμα την επιβλαβή άνθηση των φυκών (HABs). Αυτές οι ανθοφορίες μπορούν να εξαντλήσουν το οξυγόνο στο νερό, δημιουργώντας «νεκρές ζώνες» όπου η θαλάσσια ζωή δεν μπορεί να επιβιώσει.

Η άνθηση των φυκών όχι μόνο διαταράσσει την ισορροπία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων αλλά και παράγει τοξίνες που μπορεί να είναι επιβλαβείς τόσο για τα θαλάσσια είδη όσο και για τον άνθρωπο. Για παράδειγμα, ορισμένοι τύποι φυκιών απελευθερώνουν νευροτοξίνες που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα, νευρολογική βλάβη, ακόμη και θάνατο σε θαλάσσια ζώα και ανθρώπους που καταναλώνουν μολυσμένα θαλασσινά.

Χημικοί Ρύποι

Το θαλάσσιο περιβάλλον εκτίθεται σε μια σειρά χημικών ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των βαρέων μετάλλων (όπως ο υδράργυρος και ο μόλυβδος), των φαρμακευτικών προϊόντων και των βιομηχανικών χημικών ουσιών (όπως πολυχλωριωμένα διφαινύλια ή PCB). Αυτοί οι ρύποι εισέρχονται συχνά στον ωκεανό μέσω βιομηχανικών απορρίψεων, μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και ατμοσφαιρικών εναποθέσεων. Μόλις εισαχθούν στα θαλάσσια οικοσυστήματα, οι χημικές ουσίες μπορούν να συσσωρευτούν στους ιστούς των θαλάσσιων οργανισμών, οδηγώντας σε βιοσυσσωρευση και βιομεγέθυνση. Αυτό το φαινόμενο εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για τα αρπακτικά της κορυφής, όπως οι καρχαρίες και τα δελφίνια, και οι άνθρωποι που καταναλώνουν μολυσμένα ψάρια και θαλασσινά.

Ο υδράργυρος, ειδικότερα, είναι ένα τοξικό βαρύ μέταλλο που εισέρχεται στον ωκεανό μέσω των βιομηχανικών εκπομπών και της διάθεσης αποβλήτων. Όταν ο υδράργυρος μετατρέπεται σε μεθυλϋδράργυρο από μικροοργανισμούς στο νερό, γίνεται ιδιαίτερα τοξικός και συσσωρεύεται στους ιστούς των ψαριών. Τα υψηλά επίπεδα υδραργύρου στα ψάρια μπορεί να οδηγήσουν σε νευρολογικά προβλήματα στους ανθρώπους, ιδιαίτερα σε εγκύους και μικρά παιδιά.

Πετρελαιοκηλίδες

Οι πετρελαιοκηλίδες είναι μια σημαντική μορφή θαλάσσιας ρύπανσης, προκαλώντας εκτεταμένες ζημιές στα οικοσυστήματα, την άγρια ζωή και τις ανθρώπινες κοινότητες. Εμφανίζονται όταν το πετρέλαιο, κυρίως από διαρροές αργού πετρελαίου, εισέρχεται στο θαλάσσιο περιβάλλον λόγω ατυχημάτων, διαρροών ή παράνομης απόρριψης από πλοία, υπεράκτιες εγκαταστάσεις ή αγωγούς. Οι επιπτώσεις των πετρελαιοκηλίδων μπορεί να επιμείνουν για χρόνια, επηρεάζοντας τα πάντα, από τη θαλάσσια ζωή έως τις οικονομικές δραστηριότητες όπως η αλιεία και ο τουρισμός. Ακολουθεί μια εις βάθος ματιά στις πηγές, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις στρατηγικές αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.

Οι πετρελαιοκηλίδες προέρχονται από διάφορες πηγές:

- Ατυχήματα μεταφοράς: Ατυχήματα πετρελαιοφόρων, όπως η διαρροή του Exxon Valdez το 1989, απελευθερώνουν τεράστιες ποσότητες πετρελαίου όταν τα πλοία συγκρούονται, προσάραξαν ή αντιμετωπίζουν άλλες δυσλειτουργίες. Αυτά τα περιστατικά συχνά γίνονται παγκόσμιοι πρωτοσέλιδο λόγω των άμεσων και εκτεταμένων επιπτώσεών τους στα τοπικά θαλάσσια και παράκτια οικοσυστήματα.
- Λειτουργίες γεώτρησης ανοικτής θαλάσσης: Τα ατυχήματα σε υπεράκτιες εξέδρες γεώτρησης, όπως η έκρηξη του Deepwater Horizon το 2010, είναι ιδιαίτερα καταστροφικά. Αυτά τα ατυχήματα απελευθερώνουν λάδι απευθείας κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, οδηγώντας σε εκτεταμένες, συνεχείς διαρροές. Η διαρροή του Deepwater Horizon, για παράδειγμα, απελευθέρωσε περίπου 4,9 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου στον Κόλπο του Μεξικού για αρκετούς μήνες.
- Διαρροές αγωγών και χερσαίες πηγές: Οι υπεράκτιοι και υποθαλάσσιοι αγωγοί που μεταφέρουν πετρέλαιο μπορεί να σπάσουν λόγω γήρανσης, διάβρωσης,

φυσικών καταστροφών ή ατυχημάτων. Οι χερσαίοι αγωγοί ή εγκαταστάσεις αποθήκευσης μπορεί επίσης να διαρρέουν, μολύνοντας ποτάμια και ρέματα που εκβάλλουν στους ωκεανούς.

- Διαρροές φυσικού πετρελαίου: Οι διαρροές φυσικού πετρελαίου απελευθερώνουν λάδι στον ωκεανό με πιο αργό, συνεχή ρυθμό. Αν και δεν προκαλούνται από ανθρώπινη δραστηριότητα, αυτές οι διαρροές συμβάλλουν στη συνολική παρουσία πετρελαίου στον ωκεανό, αλλά είναι λιγότερο επιβλαβείς λόγω του αργού ρυθμού απελευθέρωσης και της τοπικής φύσης. [\[67\]](#), [\[68\]](#), [\[69\]](#), [\[70\]](#), [\[71\]](#), [\[72\]](#)

Επιπτώσεις της θαλάσσιας ρύπανσης

Οι εισαγόμενοι ρύποι στο θαλάσσιο οικοσύστημα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του νερού και κατά συνέπεια και τους οργανισμούς που διαβιούν εκεί. Σε πολλές περιπτώσεις, μάλιστα, προκαλούνται και σοβαρά οικολογικά προβλήματα.

Επίδραση της θαλάσσιας ρύπανσης στην ποιότητα της θάλασσας

Η ποιότητα του θαλασσινού νερού αξιολογείται με βάση παραμέτρους όπως η χημική σύνθεση, τα επίπεδα οξυγόνου, το ισοζύγιο pH και η παρουσία ρύπων. Η θαλάσσια ρύπανση επηρεάζει σημαντικά αυτές τις παραμέτρους με τους ακόλουθους τρόπους:

Οι χημικοί ρύποι, όπως τα βαρέα μέταλλα, τα φυτοφάρμακα και τα βιομηχανικά λύματα, αλλάζουν τη χημική ισορροπία του θαλασσινού νερού. Ο υδράργυρος και ο μόλυβδος, για παράδειγμα, είναι τοξικά βαρέα μέταλλα που εισέρχονται στον ωκεανό μέσω της βιομηχανικής εκκένωσης και της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης. Μόλις βρεθούν στον ωκεανό, επιμένουν στο περιβάλλον, διαταράσσοντας τα θαλάσσια οικοσυστήματα και μολύνοντας τα αποθέματα νερού.

Η γεωργική απορροή που περιέχει λιπάσματα πλούσια σε άζωτο και φώσφορο οδηγεί σε υπερφόρτωση θρεπτικών ουσιών στα παράκτια ύδατα. Αυτό προκαλεί ευτροφισμό, μια διαδικασία όπου τα υπερβολικά θρεπτικά συστατικά προάγουν την άνθηση των φυκιών. Η άνθηση των φυκών εξαντλεί το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό καθώς αποσυντίθεται, δημιουργώντας υποξικές ή «νεκρές ζώνες» όπου η θαλάσσια ζωή δεν μπορεί να επιβιώσει.

Οι αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), υποπροϊόν της καύσης ορυκτών καυσίμων, διαλύονται στους ωκεανούς, σχηματίζοντας ανθρακικό οξύ. Αυτό μειώνει

το pH του ωκεανού, ένα φαινόμενο γνωστό ως όξυνση των ωκεανών. Αποτέλεσμα αυτού είναι η διαταραχή της διαθεσιμότητας ανθρακικών ιόντων, τα οποία είναι απαραίτητα για θαλάσσιους οργανισμούς όπως τα κοράλλια και τα οστρακοειδή για την κατασκευή κελύφους ανθρακικού ασβεστίου.

Ακόμη, τα ακατέργαστα λύματα και τα βιολογικά απόβλητα εισάγουν παθογόνα και επιβλαβή βακτήρια στα θαλάσσια ύδατα, επηρεάζοντας τόσο τους θαλάσσιους οργανισμούς όσο και την ανθρώπινη υγεία. Το μολυσμένο νερό μπορεί να οδηγήσει σε εστίες ασθενειών όπως η χολέρα και η ηπατίτιδα σε παράκτιες κοινότητες που εξαρτώνται από το θαλασσινό νερό για τροφή. [73]

Επιδράσεις σε Θαλάσσιους Οργανισμούς

Η θαλάσσια ρύπανση επηρεάζει τους θαλάσσιους οργανισμούς σε πολλαπλά επίπεδα, από την ατομική φυσιολογική υγεία έως τις επιπτώσεις σε όλο το οικοσύστημα.

Οι ρύποι μπορεί να έχουν οξείες και χρόνιες επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς:

- Τοξικότητα: Βαρέα μέταλλα όπως ο υδράργυρος συσσωρεύονται στους ιστούς των θαλάσσιων οργανισμών, οδηγώντας σε βιοσυσσώρευση και βιομεγέθυνση. Τα κορυφαία αρπακτικά, όπως οι καρχαρίες και ο τόνος, παρουσιάζουν τα υψηλότερα επίπεδα μόλυνσης, καθιστώντας τα μη ασφαλή για ανθρώπινη κατανάλωση. Η τοξικότητα του υδραργύρου διαταράσσει τις νευρολογικές λειτουργίες και την αναπαραγωγή στα θαλάσσια ζώα.
- Πετρελαιοκηλίδες: Τα θαλάσσια ζώα που εκτίθενται σε πετρελαιοκηλίδες υποφέρουν από σωματικό πνιγμό, δηλητηρίαση και μακροχρόνια αναπαραγωγική βλάβη. Για παράδειγμα, τα θαλάσσια πτηνά με επικάλυψη λαδιού χάνουν την ικανότητά τους να μονώνουν, οδηγώντας σε υποθερμία και θάνατο. Τα θαλάσσια θηλαστικά, όπως τα δελφίνια, καταπίνουν τοξικό λάδι ενώ περιπολούνται, προκαλώντας βλάβες στα όργανα.
- Κατάποση πλαστικού: Πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί, συμπεριλαμβανομένων των ψαριών, των θαλάσσιων πτηνών και των χελωνών, συγχέουν τα πλαστικά υπολείμματα ως τροφή. Τα πλαστικά που καταναλώνονται μπορούν να μπλοκάρουν τις πεπτικές οδούς, να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της σίτισης και να απελευθερώσουν τοξικές χημικές ουσίες στην κυκλοφορία του

αίματος. Μελέτες έχουν δείξει ότι πάνω από το 90% των θαλάσσιων πτηνών έχουν καταπιεί πλαστικό κάποια στιγμή στη ζωή τους

Διαταραχή Αναπαραγωγικών και Αναπτυξιακών Διαδικασιών

Ρύποι όπως τα φυτοφάρμακα, τα PCB (πολυχλωριωμένα διφαινύλια) και τα φαρμακευτικά προϊόντα παρεμβαίνουν στα ορμονικά συστήματα στους θαλάσσιους οργανισμούς. Αυτές οι χημικές ουσίες που διαταράσσουν το ενδοκρινικό σύστημα βλάπτουν την αναπαραγωγή, οδηγώντας σε μείωση του πληθυσμού σε είδη όπως τα ψάρια, τα αμφίβια και τα μαλάκια.

Η όξυνση των ωκεανών, που προκαλείται από την απορρόφηση CO₂, επηρεάζει επίσης τις αναπαραγωγικές διαδικασίες. Για παράδειγμα, τα όξινα νερά μειώνουν την επιτυχία εκκόλαψης των προνυμφών ψαριών και αποδυναμώνουν τα κελύφη των μαλακίων, καθιστώντας τα πιο ευάλωτα στη θήρευση και στους περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες.

Καταστροφή οικοτόπων

Η ρύπανση συμβάλλει στην υποβάθμιση των οικοτόπων, ιδιαίτερα σε ευαίσθητα οικοσυστήματα όπως οι κοραλλιογενείς ύφαλοι, τα μαγγρόβια και οι κοίτες θαλάσσιων χόρτων. Για παράδειγμα:

- Λεύκανση κοραλλιών: Η θέρμανση των ωκεανών και η όξυνση αναγκάζουν τα κοράλλια να διώξουν τα συμβιωτικά τους φύκια, οδηγώντας σε λεύκανση και τελικά θάνατο. Ρύποι όπως τα ιζήματα και οι χημικές ουσίες επιδεινώνουν περαιτέρω το στρες στους κοραλλιογενείς υφάλους.
- Απώλεια μαγγροβίων: Οι πετρελαιοκηλίδες και οι βιομηχανικές απορρίψεις πνίγουν τις ρίζες των μαγγροβίων, μειώνοντας την ικανότητά τους να παρέχουν βασικές υπηρεσίες οικοσυστήματος, όπως ενδιστάματα φυτωρίων για θαλάσσια είδη.

Ακόμη δημιουργείται πρόβλημα στη λειτουργία των θαλάσσιων τροφικών ιστών καθώς και στην απώλεια της βιοποικιλότητας.

Οι πρωτογενείς παραγωγοί όπως το φυτοπλαγκτόν υποφέρουν από ευτροφισμό και χημική έκθεση, επηρεάζοντας τη μεταφορά ενέργειας σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα, ενώ η βιοσυσσώρευση και η βιομεγέθυνση των τοξινών οδηγούν σε υψηλότερες

συγκεντρώσεις στους κορυφαίους θηρευτές, προκαλώντας μείωση του πληθυσμού και καταρράκτες σε όλο το οικοσύστημα. Ταυτόχρονα, η καταστροφή των οικοτόπων, η τοξικότητα και η μειωμένη αναπαραγωγική επιτυχία συνδυαστικά απειλούν τα ευάλωτα είδη. Για παράδειγμα, οι θαλάσσιες χελώνες, που ήδη κινδυνεύουν λόγω της καταστροφής των οικοτόπων, κινδυνεύουν περαιτέρω από την κατάποση και την εμπλοκή πλαστικών. [68], [73], [74], [75], [76]

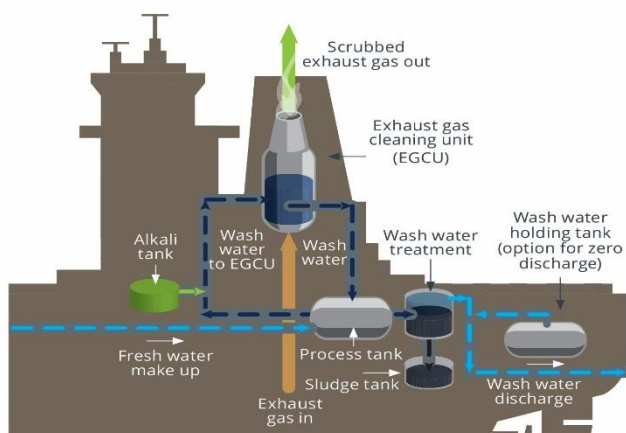
Αντιρρυπαντικές Τεχνολογίες

Τα θαλάσσια οικοσυστήματα, τα οποία αποτελούν θεμέλιο για την παγκόσμια βιοποικιλότητα απειλούνται από τη ρύπανση. Η πρόοδος των τεχνολογιών κατά της ρύπανσης έχει αναδειχθεί ως ακρογωνιαίος λίθος για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας μόλυνσης. Αυτές οι λύσεις στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των επιβλαβών απορρίψεων, στην ενεργοποίηση αποτελεσματικών εργασιών καθαρισμού και στην αποκατάσταση των ωκεανών.

Προηγμένα Αντιρρυπαντικά Συστήματα Πλοίου Συστήματα Scrubber

Τα συστήματα scrubber, γνωστά και ως συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (EGCS), έχουν σχεδιαστεί για την αφαίρεση των οξειδίων του θείου (SO_x) και των σωματιδίων από τις εκπομπές των πλοίων. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν συνδυασμό νερού ή αλκαλικών διαλυμάτων για την εξουδετέρωση των ρύπων, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση

CLOSED LOOP SCRUBBER



Εικόνα 2 Scrubber κλειστού τύπου [11]

με τα πρότυπα εκπομπών θείου του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO). Η ανάπτυξη πλυντηρίων ανοιχτού και κλειστού βρόχου επιτρέπει στους χειριστές πλοίων ευελιξία στη μείωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος.

Τα πλυντήρια μετριάζουν σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση, μειώνοντας τον σχηματισμό όξινης βροχής και μειώνοντας τη συνολική επίδραση άνθρακα των θαλάσσιων δραστηριοτήτων. Όμως τα λύματα που παράγονται από πλυντηρίδες, ειδικά

σε συστήματα ανοιχτού βρόχου, έχουν εγείρει ανησυχίες σχετικά με τις επιπτώσεις τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Γίνονται προσπάθειες για την ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων για την αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών. [77]

Βιοεπικάλυψη (biofouling)

Η βιοεπικάλυψη, όπου μικροοργανισμοί όπως τα φύκια, τα βαρέλια και τα μύδια προσκολλώνται στο κύτος των πλοίων, αυξάνει την αντίσταση και την κατανάλωση καυσίμου. Τα παραδοσιακά αντιρρυπαντικά χρώματα περιέχουν συχνά επιβλαβή βιοκτόνα που διοχετεύονται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι νέες τεχνολογίες στοχεύουν στη βιώσιμη αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων.

Βιομιμητικές Επικαλύψεις

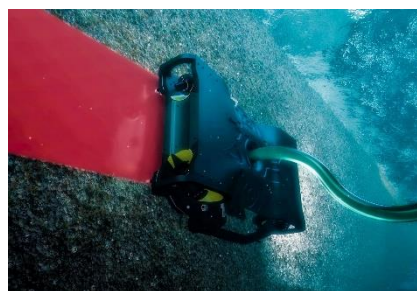
Εμπνευσμένες από φυσικές επιφάνειες, όπως το δέρμα του καρχαρία, οι βιομιμητικές αντιρρυπαντικές επικαλύψεις μειώνουν την προσκόλληση των μικροβίων και των οργανισμών. Αυτές οι μη τοξικές επιφάνειες είναι αποτελεσματικές και φιλικές προς το περιβάλλον, προσφέροντας μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα βιοκτόνα χρώματα.

Προηγμένα Υλικά

Η ανάπτυξη αντιρρυπαντικών χρωμάτων με βάση νανοϋλικά εξασφαλίζει μακροχρόνια απόδοση. Αυτά τα υλικά αποτρέπουν τη ρύπανση χωρίς να απελευθερώνουν τοξίνες, συμβάλλοντας στη σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την αυξημένη απόδοση καυσίμου.

Ρομποτική Καθαρισμός κύτους

Αυτόνομα υποβρύχια ρομπότ εξοπλισμένα με βούρτσες και συστήματα αναρρόφησης καθαρίζουν το κύτος των πλοίων χωρίς στεγνό αγκυροβόλιο, αφαιρώντας τους επιμολυντές ενώ συλλαμβάνουν τα απόβλητα για να αποτρέψουν την επανεισαγωγή τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. [78], [79]



Εικόνα 3 Καθαρισμός πλοίων [111]

Διαχείρισης πλαστικής ρύπανσης και απορριμμάτων

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, υπολογίζεται ότι 4,8 – 12,7 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών εισέρχονται και μολύνουν τους ωκεανούς ετησίως. Τα θαλάσσια ζώα τραυματίζονται, πνίγονται ή καταναλώνουν πλαστικά, με αποτέλεσμα προβλήματα υγείας και θάνατο. Οι άνθρωποι, μέσω της τροφικής αλυσίδας, καταναλώνουν επίσης

μικροπλαστικά, με άγνωστες ακόμη μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάγκη δημιουργίας μηχανισμών για την αντιμετώπιση της μόλυνσης. [\[80\]](#)

Τεχνολογίες καθαρισμού ωκεανών

Οργανισμοί όπως το The Ocean Cleanup αναπτύσσουν παθητικά συστήματα για τη συλλογή πλαστικών συγκεντρωμένων στους ωκεανούς. Αυτά αποτελούνται από πλωτά εμπόδια που παγιδεύουν τα απόβλητα, ενώ επιτρέπουν στη θαλάσσια ζωή να περάσει αβλαβής. Από την κυκλοφορία τους, αυτά τα συστήματα έχουν αφαιρέσει χιλιάδες τόνους πλαστικού.

Συσκευές αναχαίτισης ποταμού

Η αποτροπή του πλαστικού να φτάσει στους ωκεανούς αποτελεί προτεραιότητα. Οι αναχαιτιστές, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε πολύ μολυσμένα ποτάμια, συλλέγουν τα απόβλητα χρησιμοποιώντας ιμάντες μεταφοράς και ενεργειακά αποδοτικά συστήματα που τροφοδοτούνται από ηλιακούς συλλέκτες. Αυτές οι συσκευές



Εικόνα 4 Συσκευή αναχαίτισης [\[IV\]](#)

έχουν αναπτυχθεί με επιτυχία σε περιοχές όπως η Νοτιοανατολική Ασία και η Νότια Αμερική. [\[81\]](#)

Μικροπλαστικά φίλτρα

Τα μικροπλαστικά αποτελούν μια μοναδική πρόκληση λόγω του μεγέθους και της διεισδυτικότητας τους. Τα προηγμένα συστήματα φιλτραρίσματος που είναι εγκατεστημένα σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων συλλαμβάνουν τα μικροπλαστικά προτού εισέλθουν στις υδάτινες οδούς, παρέχοντας ένα κρίσιμο φράγμα έναντι αυτού του αναδυόμενου ρύπου. [\[78\]](#), [\[82\]](#), [\[83\]](#), [\[84\]](#), [\[85\]](#)

Η περίπτωση του Exxon Valdez

Η πετρελαιοκηλίδα του πλοίου Exxon Valdez στις 24 Μαρτίου 1989, παραμένει μια καθοριστική στιγμή στην ιστορία των περιβαλλοντικών καταστροφών, προκαλώντας σημαντικές προόδους στις τεχνολογίες αντιμετώπισης πετρελαιοκηλίδων.

Απελευθερώνοντας

περίπου 11

εκατομμύρια γαλόνια

αργού πετρελαίου στο

Prince William Sound

της Αλάσκας, η

διαρροή κατέστρεψε

τα θαλάσσια

οικοσυστήματα και

την άγρια ζωή. Στον

απόηχο της,



Εικόνα 5 Η πετρελαιοκηλίδα του πλοίου Exxon Valdez [\[V\]](#)

χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι για τον μετριασμό των επιπτώσεων της διαρροής, από παραδοσιακές μηχανικές προσεγγίσεις έως καινοτόμες χημικές και βιολογικές τεχνικές.

Το μέγεθος της πετρελαιοκηλίδας απαιτούσε την ταχεία ανάπτυξη πολλαπλών τεχνολογιών κατά της ρύπανσης για την αντιμετώπιση της εκτεταμένης μόλυνσης. Κάθε τεχνολογία είχε συγκεκριμένους στόχους και περιορισμούς, συμβάλλοντας στη συνολική προσπάθεια ανταπόκρισης σε διάφορες ικανότητες.

Μηχανική συγκράτηση και ανάκτηση

Οι μηχανικές μέθοδοι χρησίμευσαν ως η πρώτη γραμμή άμυνας ενάντια στην πετρελαιοκηλίδα. Ο στόχος ήταν να περιοριστεί φυσικά και να αφαιρεθεί το χυμένο λάδι για να περιοριστεί η περιβαλλοντική ζημιά.

- Βραχίονες: Οι βραχίονες λειτουργούσαν ως επιπλέοντα εμπόδια για να περικυκλώσουν και να απομονώσουν το λάδι, αποτρέποντας την εξάπλωσή του σε μη επηρεασμένες περιοχές. Παρά την ευρεία χρήση τους, τα μπουι αντιμετώπισαν σημαντικές προκλήσεις στο δυναμικό περιβάλλον του Prince William Sound. Οι ισχυροί άνεμοι και τα ισχυρά ρεύματα συχνά τα

καθιστούσαν αναποτελεσματικά, επιτρέποντας στο πετρέλαιο να διαφύγει και να μολύνει νέες περιοχές.

- **Skimmers:** Οι συλλέκτες (*Skimmers*) χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή και ανάκτηση πετρελαίου από την επιφάνεια του νερού. Αυτές οι συσκευές κυμαίνονταν από απλούς συλλέκτες τύπου φράγματος (*weir skimmers*) έως πιο προηγμένα σχέδια που χρησιμοποιούσαν υλικά προσρόφησης του πετρελαίου (*oleophilic designs*). Παρ' όλα αυτά, η λειτουργική αποδοτικότητα των συλλεκτών περιορίστηκε λόγω της υψηλής ιξώδους του αργού πετρελαίου και της παρουσίας απορριμμάτων, τα οποία συχνά εμποδίζαν τη λειτουργία του εξοπλισμού. Αν και κρίσιμοι για την ανάκτηση πετρελαίου, οι συλλέκτες δεν μπόρεσαν να ανταποκριθούν στην τεράστια κλίμακα και τη γρήγορη εξάπλωση της διαρροής, ανακτώντας μόνο ένα μικρό ποσοστό του πετρελαίου.

Χημικά διασκορπιστικά

Χημικά μέσα διασποράς, όπως το *Corexit*, ψεκάστηκαν πάνω από τη διαρροή για να σπάσουν το λάδι σε μικρότερα σταγονίδια. Αυτή η διαδικασία είχε ως στόχο να ενισχύσει τη φυσική διασπορά και τη μικροβιακή αποικοδόμηση του λαδιού αυξάνοντας την επιφάνεια του.

Ενώ τα διασκορπιστικά είχαν τη δυνατότητα να μετριάσουν τις επιφανειακές πετρελαιοκηλίδες, η εφαρμογή τους κατά τη διαρροή του Exxon Valdez παρεμποδίστηκε από διάφορους παράγοντες. Οι θερμοκρασίες του κρύου νερού στο *Prince William Sound* επιβράδυναν τις χημικές αντιδράσεις, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα των διασκορπιστικών. Επιπλέον, προέκυψαν ανησυχίες σχετικά με τις μακροπρόθεσμες οικολογικές επιπτώσεις του διασκορπισμένου πετρελαίου, ιδιαίτερα σε θαλάσσιους οργανισμούς όπως οι προνύμφες ψαριών και το πλαγκτόν.

Επί τόπου καύση (*In Situ Burning*)

Η επί τόπου καύση ήταν μια στρατηγική πρώιμης απόκρισης που χρησιμοποιήθηκε για τη γρήγορη μείωση του όγκου του λαδιού στην επιφάνεια του νερού. Η διαδικασία περιελάμβανε την ανάφλεξη του λαδιού μέσα σε περιορισμένες περιοχές, συνήθως περικυκλωμένες από πυρίμαχους βραχίονες. Όταν είναι επιτυχής, η καύση μπορεί να αφαιρέσει σημαντικές ποσότητες λαδιού σε σύντομο χρονικό διάστημα, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την ανάγκη για φυσική ανάκτηση.

Ωστόσο, αυτή η μέθοδος εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από ευνοϊκές συνθήκες. Το αλλοιωμένο λάδι, το οποίο είχε αναμειχθεί με νερό και συντρίμμια, ήταν πιο δύσκολο να αναφλεγεί. Οι απρόβλεπτοι άνεμοι και οι ανησυχίες για την ποιότητα του αέρα από τον τοξικό καπνό περιόρισαν περαιτέρω την εφαρμογή του. Παρά αυτές τις προκλήσεις, η επί τόπου καύση απέδειξε τη δυνατότητά της να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένα σενάρια, όπως μεμονωμένες κολλήσεις σε ήρεμα νερά.

Βιοαποκατάσταση

Η βιοαποκατάσταση αξιοποίησε φυσικούς μικροοργανισμούς που αποικοδομούν το λάδι ενισχύοντας τη δραστηριότητά τους με θρεπτικά λιπάσματα, όπως το άζωτο και ο φώσφορος. Διεγείροντας τη μικροβιακή ανάπτυξη, η βιοαποκατάσταση είχε στόχο να επιταχύνει τη φυσική διάσπαση των υδρογονανθράκων στο μολυσμένο περιβάλλον.

Αυτή η τεχνική ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική στις ακτές, όπου η μηχανική ανάκτηση δεν ήταν πρακτική. Η εφαρμογή θρεπτικών συστατικών σε παραλίες με λάδι διευκόλυνε σημαντικές μειώσεις στα υπολείμματα πετρελαίου, καθιστώντας τη βιοαποκατάσταση μία από τις πιο επιτυχημένες μακροπρόθεσμες λύσεις. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά του διέφερε ανάλογα με περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η διαθεσιμότητα οξυγόνου και η παρουσία προϋπαρχουσών μικροβιακών κοινοτήτων. Η βιοαποκατάσταση τόνισε τη σημασία της κατανόησης των τοπικών οικοσυστημάτων κατά την εφαρμογή στρατηγικών βιολογικού καθαρισμού.

Ροφητές και Χειροκίνητος Καθαρισμός

Τα ροφητικά, συμπεριλαμβανομένων των συνθετικών μαξιλαριών, της τύρφης και των φυσικών ινών, χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς για την απορρόφηση του πετρελαίου τόσο από την επιφάνεια του νερού όσο και από τις μολυσμένες ακτές. Αυτά τα υλικά ήταν πολύ αποτελεσματικά σε μικρή κλίμακα αλλά απαιτούσαν συχνή αντικατάσταση λόγω του γρήγορου κορεσμού. Η ανάπτυξη ροφητή συχνά συνδυαζόταν με προσπάθειες χειροκίνητου καθαρισμού.

Ο χειρωνακτικός καθαρισμός αφορούσε χιλιάδες εργάτες που χρησιμοποιούσαν εργαλεία όπως φτυάρια και τσουγκράνες για να αφαιρέσουν φυσικά τα εμποτισμένα με λάδι συντρίμμια και το μολυσμένο χώμα από τις παραλίες. Αν και αυτή η προσέγγιση ήταν εντατική και χρονοβόρα, αποδείχθηκε απαραίτητη για την αντιμετώπιση περιοχών με έντονο ρύπανση που άλλες τεχνολογίες δεν μπορούσαν να διαχειριστούν

αποτελεσματικά. Οι χειρωνακτικές προσπάθειες επέτρεψαν επίσης μια πιο λεπτομερή και τοπική απόκριση, αν και συχνά εξέθεταν τους εργαζόμενους σε επικίνδυνες συνθήκες.

Συμπερασματικά, οι αντιρρυπαντικές τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν κατά τη διαρροή του Exxon Valdez επέδειξαν διαφορετικούς βαθμούς επιτυχίας. Οι μηχανικές μέθοδοι, συμπεριλαμβανομένων των βραχιόνων και των *skimmers*, παρείχαν ουσιαστικό αρχικό περιορισμό, αλλά κατακλύζονταν από την κλίμακα της διαρροής και τις δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα χημικά διασκορπιστικά και η επί τόπου καύση πρόσφεραν πρόσθετα εργαλεία, αλλά αντιμετώπισαν σημαντικούς περιορισμούς που σχετίζονται με περιβαλλοντικές ανησυχίες και υλικοτεχνικές προκλήσεις. Ακόμη η βιοαποκατάσταση εμφανίστηκε ως μια ιδιαίτερα πολλά υποσχόμενη προσέγγιση, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες των βιολογικών διεργασιών για την αντιμετώπιση της ρύπανσης από πετρέλαιο σε ευαίσθητα περιβάλλοντα. Ωστόσο, το συνολικό ποσοστό ανάκτησης του χυμένου πετρελαίου ήταν χαμηλό, με τις εκτιμήσεις να υποδηλώνουν ότι λιγότερο από το 15% του πετρελαίου ανακτήθηκε μέσω όλων των μεθόδων συνδυαστικά. [\[86\]](#), [\[87\]](#), [\[88\]](#), [\[89\]](#)

Πετρελαιοκηλίδες

Οι πετρελαιοκηλίδες αποτελούν σημαντική απειλή τόσο για τα θαλάσσια οικοσυστήματα και τα παράκτια περιβάλλοντα όσο και για την παγκόσμια βιοποικιλότητα. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί καινοτόμες τεχνολογίες καθαρισμού που είναι αποτελεσματικές, επεκτάσιμες και περιβαλλοντικά βιώσιμες.

Βιοαποκατάσταση

Με τη βιοαποκατάσταση αξιοποιείται η φυσική ικανότητα των μικροοργανισμών να αποικοδομούν τους υδρογονάνθρακες σε λιγότερο επιβλαβείς ουσίες. Σύμφωνα με επιστημονικές έρευνες, μύκητες όπως ο *Aspergillus* και το *Penicillium* επιδεικνύουν υψηλή αποτελεσματικότητα στη διάσπαση των υδρογονανθράκων του πετρελαίου. Αυτοί οι μύκητες εκκρίνουν ένζυμα που καταλύουν την οξείδωση των υδρογονανθράκων, διευκολύνοντας τη μετατροπή τους σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. [\[90\]](#)

Ομοίως, βακτήρια όπως το *Alcanivorax* και το *Pseudomonas* έχουν αναγνωριστεί ως ισχυροί αποικοδομητές υδρογονανθράκων καθώς φαίνεται πως έχουν τη δυνατότητα

να επιταχύνουν τις διεργασίες καθαρισμού. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει τη βιωσιμότητα των βακτηρίων κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά, επιτρέποντας την ταχεία ανάπτυξη κατά τη διάρκεια συμβάντων διαρροής. [91]

Παρά τις δυνατότητές της, η βιοαποκατάσταση αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως η μεταβλητότητα στη μικροβιακή απόδοση κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι στρατηγικές για την αντιμετώπισή τους περιλαμβάνουν τη βιοαύξηση - την εισαγωγή συγκεκριμένων μικροβιακών στελεχών - και τη βιοδιέγερση, η οποία περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών για την ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας. [90], [91], [92]

Προηγμένα υλικά για τον καθαρισμό πετρελαιοκηλίδων

Οι εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων για τον καθαρισμό πετρελαιοκηλίδων. Οι παραδοσιακές μέθοδοι συχνά υπολείπονται όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, την επεκτασιμότητα και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εξερεύνηση προηγμένων υλικών. Αυτά τα υλικά, όπως τα μαγνητικά νανοδομημένα ροφητικά και οι υπερυδρόφοβες μεμβράνες, προσφέρουν ανώτερες δυνατότητες απορρόφησης λαδιού, επαναχρησιμοποίηση και οικονομική απόδοση.

Μαγνητικά Νανοδομημένα Σύνθετα Ροφητικά

Αυτά τα σύνθετα ροφητικά, που προέρχονται από απόβλητα υλικά όπως η ιπτάμενη τέφρα και το παλιοσίδηρο, παρουσιάζουν εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης λαδιού και μαγνητικές ιδιότητες. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική ανάκτηση των ροφητών χρησιμοποιώντας μαγνητικά πεδία, μειώνοντας τα δευτερεύοντα απόβλητα.

Τα νανοδομημένα υλικά προσφέρουν υψηλές αναλογίες επιφάνειας προς όγκο, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητά τους σχετικά με την απορρόφηση λαδιού. Το χαμηλό κόστος και η φιλική προς το περιβάλλον φύση τους τα καθιστούν βιώσιμα για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένους πόρους. [93]

Υδρόφοβες και Υπερυδρόφοβες Μεμβράνες

Οι συγκεκριμένες μεμβράνες είναι κατασκευασμένες από πλέγματα από ανοξείδωτο χάλυβα επικαλυμμένα με φθοριοπολυμερή και παρουσιάζουν εξαιρετική λιποαπωθητικότητα και υδατοπερατότητα.

Τέτοιες μεμβράνες είναι πολύ αποτελεσματικές στο διαχωρισμό του λαδιού από το νερό τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές συνθήκες. Η αντοχή και η

επαναχρησιμοποίησή τους ενισχύουν περαιτέρω την πρακτικότητά τους στη μακροπρόθεσμη διαχείριση πετρελαιοκηλίδων. Ωστόσο, οι ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επικαλύψεων φθοριοπολυμερών απαιτούν την ανάπτυξη πιο πράσινων εναλλακτικών λύσεων. [94]

Χημικά Διασκορπιστικά

Τα χημικά διασκορπιστικά είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό της πετρελαιοκηλίδας, δρώντας για τη διάσπαση των πετρελαιοκηλίδων σε μικρότερα σταγονίδια. Αυτή η διαδικασία αυξάνει την επιφάνεια του λαδιού, διευκολύνοντας τη φυσική του αποικοδόμηση από τη μικροβιακή δραστηριότητα. Τα σύγχρονα σκευάσματα διασποράς τυπικά περιλαμβάνουν επιφανειοδραστικά και διαλύτες που διεισδύουν και γαλακτωματοποιούν τη στιβάδα ελαίου. Τα επιφανειοδραστικά μειώνουν τη διεπιφανειακή τάση μεταξύ λαδιού και νερού, επιτρέποντας στα σταγονίδια λαδιού να διασκορπιστούν πιο εύκολα στη στήλη του νερού.

Η αποτελεσματικότητα των διασκορπιστικών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος και το ιξώδες του λαδιού, η θερμοκρασία του νερού, η αλατότητα και ο βαθμός αναταράξεων. Τα ελαφριά και μεσαία λάδια ανταποκρίνονται καλά στα διασκορπιστικά, ενώ τα βαρύτερα λάδια μπορεί να απαιτούν πρόσθετα μέτρα ή εναλλακτικές προσεγγίσεις. Οι αναταράξεις, όπως αυτές που προκαλούνται από τα κύματα ή τη μηχανική ανάδευση, βοηθούν στη διαδικασία ανάμιξης και ενισχύουν τη διασπορά. [95]

Συμβατικές τεχνολογίες καθαρισμού πετρελαιοκηλίδων

Οι συμβατικές τεχνολογίες καθαρισμού πετρελαιοκηλίδων αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των στρατηγικών αντιμετώπισης διαρροών παγκοσμίως. Παρά τις εξελίξεις στη βιοαποκατάσταση και την ανάπτυξη υλικών αιχμής, οι παραδοσιακές μέθοδοι παραμένουν απαραίτητες για την αξιοπιστία, την επεκτασιμότητα και την προσαρμοστικότητά τους σε διαφορετικά σενάρια. Από την έκπλυση της ακτογραμμής έως τη μηχανική απομάκρυνση, αυτές οι προσεγγίσεις είναι κρίσιμες για την αντιμετώπιση των διαρροών τόσο σε θαλάσσιο όσο και σε παράκτιο περιβάλλον.

Κάθε τεχνολογία είναι προσαρμοσμένη σε συγκεκριμένες συνθήκες και τύπους διαρροών, που χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση της οικολογικής ζημιάς. Αν και έχουν τελειοποιηθεί

για δεκαετίες εφαρμογής, αυτές οι μέθοδοι αντιμετωπίζουν επίσης προκλήσεις όπως περιβαλλοντικές επιπτώσεις, υλικοτεχνικούς περιορισμούς και μεταβλητή αποτελεσματικότητα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διαρροής.

Έκπλυση ακτογραμμών

Η έκπλυση ακτών περιλαμβάνει τη χρήση πίδακες νερού υψηλής πίεσης για την απομάκρυνση του πετρελαίου από τις μολυσμένες ακτές. Έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σε βραχώδεις ακτές όπου το πετρέλαιο τείνει να συσσωρεύεται σε σχισμές και είναι δύσκολο να προσπελαστεί χρησιμοποιώντας άλλες τεχνικές. Για παράδειγμα,

κατά τη διάρκεια της διαρροής του Exxon Valdez, η έκπλυση της ακτογραμμής έπαιξε κρίσιμο ρόλο στον καθαρισμό απόκρημνες



Εικόνα 6 Έκπλυση ακτογραμμής Exxon Valdez [\[VI\]](#)

παράκτιες περιοχές. Ωστόσο, δεν είναι χωρίς περιορισμούς. Το νερό υψηλής πίεσης μπορεί να προκαλέσει δευτερογενή μόλυνση διασπείροντας το πετρέλαιο σε παρακείμενα οικοσυστήματα ή οδηγώντας το βαθύτερα σε ιζήματα. Επιπλέον, η μέθοδος απαιτεί προσεκτική περιβαλλοντική αξιολόγηση για να αποφευχθεί η διατάραξη της τοπικής χλωρίδας και πανίδας, ιδιαίτερα σε ευαίσθητα ενδιαιτήματα. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην αφαίρεση λαδιού που έχει παγιδευτεί σε βραχώδεις ρωγμές ή προσκόλληση σε επιφάνειες, απαιτεί, όμως, προσεκτική παρακολούθηση για την αποφυγή δευτερογενούς μόλυνσης των παρακείμενων οικοσυστημάτων.

Φράγματα Αντιρρύπανσης

Είναι πλωτά εμπόδια που έχουν σχεδιαστεί για να περιορίζουν τις πετρελαιοκηλίδες και να αποτρέπουν την εξάπλωσή τους. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε ήρεμα νερά και

χρησιμοποιούν ως πρώτη γραμμή άμυνας κατά την απόκριση διαρροής. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μπουμ προσαρμοσμένων για συγκεκριμένες συνθήκες και σενάρια διαρροής:

➤ Απορροφητικά Φράγματα:

Κατασκευάζονται από υλικά που απορροφούν λάδι. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε μικρότερες διαρροές ή σε περιοχές με ελάχιστη κίνηση νερού.



Εικόνα 7 Απορροφητικά φράγματα [VII]

Ωστόσο, έχουν περιορισμένη ικανότητα απορρόφησης και δεν είναι σχεδιασμένα για περιορισμό μεγάλης κλίμακας.

➤ Φουσκωτά Φράγματα:

Είναι ελαφριά και φορητά και αναπτύσσονται γρήγορα σε μεγάλης κλίμακας επιχειρήσεις.



Εικόνα 8 Φουσκωτά Φράγματα [VIII]

Είναι ιδιαίτερα

αποτελεσματικά σε ανοιχτά νερά, αλλά μπορούν να επηρεαστούν από υψηλά κύματα ή ισχυρά ρεύματα.

➤ Πυρίμαχα Φράγματα:

Σχεδιασμένα για επιτόπια καύση, αυτοί οι βραχίονες είναι κατασκευασμένοι από



υλικά που αντέχουν σε

Εικόνα 9 Πυρίμαχα Φράγματα [IX]

υψηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας την ελεγχόμενη καύση πετρελαιοκηλίδων.

Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το ύψος κύματος, η ταχύτητα του ανέμου και το ιξώδες του χυμένου λαδιού. Η σωστή συντήρηση και η έγκαιρη ανάπτυξη είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση των επιπτώσεών τους. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε ήρεμα νερά και χρησιμεύουν ως πρώτη γραμμή άμυνας κατά την απόκριση διαρροής. [96]

Συστήματα Κενού

Τα συστήματα κενού χρησιμοποιούνται για την αναρρόφηση πετρελαίου από την επιφάνεια του νερού, ιδιαίτερα σε περιορισμένους χώρους όπως λιμάνια. Αυτά τα συστήματα αποτελούνται συνήθως από αντλίες υψηλής χωρητικότητας και εξειδικευμένες κεφαλές αναρρόφησης που έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται παχύρρευστο λάδι. Τοποθετούνται σε σκάφη ή φορτηγά για ευκινησία και είναι εξοπλισμένα με δεξαμενές αποθήκευσης για το συλλεγμένο πετρέλαιο.



Εικόνα 10 Συστήματα Κενού [X]

Είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά σε τοπικές διαρροές, όπως αυτές που συμβαίνουν σε λιμάνια, κοντά σε αποβάθρες ή σε άλλους περιορισμένους χώρους. Ωστόσο, η απόδοσή τους μπορεί να μειωθεί σε συνθήκες θαλασσοταραχής, όπου η δράση των κυμάτων διασκορπίζει το λάδι. Οι λειτουργικές προκλήσεις περιλαμβάνουν τη διαχείριση της απόρριψης του ανακτημένου λαδιού και των υπολειμμάτων, τη διατήρηση σταθερής αναρρόφησης σε διάφορες συνθήκες και τη διασφάλιση της προσαρμοστικότητας του συστήματος σε διαφορετικούς τύπους λαδιών και σενάρια διαρροής. [96]

Ροφητικά υλικά

Τα συγκεκριμένα υλικά απορροφούν ή προσροφούν λάδι, καθιστώντας τα ένα ευέλικτο εργαλείο για τον καθαρισμό των διαρροών. Κατηγοριοποιούνται ευρέως σε φυσικά και συνθετικά ροφητικά, το καθένα με διακριτά πλεονεκτήματα και περιορισμούς.

Φυσικά ροφητικά: Προερχόμενα από οργανικά υλικά όπως η τύρφη, το άχυρο και το βαμβάκι. Είναι βιοδιασπώμενα και φιλικά προς το περιβάλλον. Το κύριο πλεονέκτημά τους έγκειται στη διαθεσιμότητά τους και στο χαμηλό κόστος, καθιστώντας τα κατάλληλα για εργασίες μεγάλης κλίμακας σε ρυθμίσεις περιορισμένων πόρων. Ωστόσο, η ικανότητα απορρόφησης λαδιού τους είναι γενικά χαμηλότερη από τα συνθετικά και μπορεί να απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία για τη βελτίωση της απόδοσης.

Συνθετικά ροφητικά: Κατασκευασμένα από υλικά όπως πολυπροπυλένιο και πολυουρεθάνη, τα συνθετικά ροφητικά προσφέρουν υψηλότερη ικανότητα συγκράτησης λαδιού και ανθεκτικότητα. Αυτά τα ροφητικά συχνά σχεδιάζονται με τη

μορφή μαξιλαριών, κυλίνδρων ή φραγμάτων για να ταιριάζουν σε διάφορα σενάρια διαρροής. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε θαλάσσια περιβάλλοντα όπου η ταχεία απορρόφηση είναι κρίσιμη. Ωστόσο, η παραγωγή και η διάθεσή τους εγείρει περιβαλλοντικές ανησυχίες, καθώς είναι συνήθως μη βιοαποδομήσιμα.

Η επιλογή μεταξύ φυσικών και συνθετικών ροφητών εξαρτάται από παράγοντες όπως η θέση της διαρροής, η κλίμακα και η περιβαλλοντική ευαισθησία της πληγείσας περιοχής. Ο συνδυασμός των φυσικών και συνθετικών ροφητών εξαρτάται από παράγοντες όπως η θέση της διαρροής, η κλίμακα και η περιβαλλοντική ευαισθησία της πληγείσας περιοχής. Η χρήση και των δύο τύπων μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση και να ελαχιστοποιήσει τις οικολογικές επιπτώσεις. [96]

Καθαριστικά ακτογραμμών και παράγοντες βιοαποκατάστασης

Τα καθαριστικά ακτών είναι χημικές συνθέσεις που χρησιμοποιούνται για τη γαλακτωματοποίηση λαδιού για ευκολότερη αφαίρεση. Αυτοί οι παράγοντες λειτουργούν διασπώντας το λάδι σε μικρότερα σταγονίδια, επιτρέποντας την πιο αποτελεσματική συλλογή και αφαίρεση. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του λαδιού που χύθηκε, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η μέθοδος εφαρμογής. Ενώ μπορούν να επισπεύσουν τις προσπάθειες καθαρισμού, τα καθαριστικά ακτών μπορεί να έχουν υπολειπόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένης της πιθανής τοξικότητας για τους θαλάσσιους οργανισμούς, εάν δεν διαχειρίζονται σωστά.

Οι παράγοντες βιοαποκατάστασης, όπως τα θρεπτικά συστατικά και οι μικροοργανισμοί που αποικοδομούν τους υδρογονάνθρακες, ενισχύουν τις διαδικασίες φυσικής αποδόμησης επιταχύνοντας τη διάσπαση του ελαίου σε λιγότερο επιβλαβείς ενώσεις. Όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, τα καθαριστικά ακτών και οι παράγοντες βιοαποκατάστασης μπορούν να στοχεύουν τόσο στην άμεση αφαίρεση όσο και στη μακροπρόθεσμη οικολογική αποκατάσταση. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός χημικών γαλακτωματοποιητών με παράγοντες βιοαποκατάστασης έχει αποδειχθεί πολλά υποσχόμενες σε πολύ μολυσμένες περιοχές, ιδιαίτερα όπου απαιτείται γρήγορος καθαρισμός χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η υγεία του περιβάλλοντος. Ωστόσο, η προσεκτική παρακολούθηση και οι περιβαλλοντικές αξιολογήσεις είναι ουσιαστικής σημασίας για τον μετριασμό των πιθανών κινδύνων που σχετίζονται με αυτές τις τεχνολογίες. Οι παράγοντες βιοαποκατάστασης, συμπεριλαμβανομένων των θρεπτικών τροποποιήσεων και των μικροοργανισμών που αποικοδομούν τους

υδρογονάνθρακες, ενισχύουν τις φυσικές διαδικασίες αποδόμησης στις ακτές. Ο συνδυασμός αυτών των μεθόδων μπορεί να επιταχύνει τον καθαρισμό των πολύ μολυσμένων περιοχών. [\[96\]](#)

Επιτόπια καύση

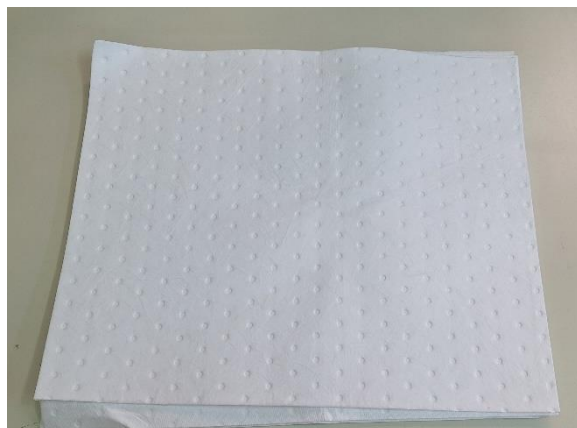
Η επιτόπια καύση περιλαμβάνει την ανάφλεξη πετρελαιοκηλίδων για τη μείωση του όγκου του χυμένου λαδιού. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για διαρροές μεγάλης κλίμακας σε ανοιχτά ύδατα, όπου είναι εφικτή η συγκράτηση και το πετρέλαιο δεν έχει υποστεί σημαντική αλλοίωση. Η καύση είναι εξαιρετικά αποτελεσματική για τη γρήγορη μείωση του όγκου του λαδιού, αφαιρώντας συχνά έως και το 90% της κηλίδας σε ιδανικές συνθήκες.

Το κύριο πλεονέκτημα της έγκειται στην ταχύτητα και την ικανότητά της να αντιμετωπίζει σημαντικές ποσότητες λαδιού που διαφορετικά θα μπορούσαν να εξαπλωθούν ανεξέλεγκτα. Συχνά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με πυρίμαχες ράβδους για τη συγκέντρωση του λαδιού για καύση.

Ωστόσο, η καύση παράγει σημαντικές ποσότητες τοξικού καπνού, ο οποίος μπορεί να θέσει κινδύνους για την υγεία των ατόμων που ανταποκρίνονται και των γύρω πληθυσμών. Επιπλέον, η μέθοδος είναι λιγότερο αποτελεσματική για διαρροές που περιλαμβάνουν βαρέα έλαια ή γαλακτωματοποιημένα μείγματα, καθώς αυτά είναι πιο δύσκολο να αναφλεγούν και να διατηρηθούν η καύση. Η υπολειμματική τέφρα και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε δευτερογενή ρύπανση. Ως αποτέλεσμα, η επιτόπια καύση χρησιμοποιείται συχνά ως έσχατη λύση όταν άλλες μέθοδοι, όπως η μηχανική ανάκτηση ή η χημική διασπορά, κρίνονται μη πρακτικές ή ανεπαρκείς. [\[91\]](#), [\[96\]](#)

Πειραματική διαδικασία

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρονικός ζυγός, υλικά από πολυπροπυλένιο (δύο τύποι «μαλλιά» και «κουβέρτα») πετρέλαιο και βενζίνη. Στόχος ήταν ο υπολογισμός της απορροφητικότητας των υλικών σε πετρέλαιο και βενζίνη. Ακολούθησε το πρότυπο ASTM F726-99.



Εικόνα 12 Κουβέρτα από πολυπροπυλένιο



Εικόνα 11 Μαλλιά από πολυπροπυλένιο

Αρχικά, μετρήθηκε το βάρος των υλικών με τον ηλεκτρονικό ζυγό πριν την απορρόφηση. Στη συνέχεια, σε δύο πλαστικά δοχεία τοποθετήθηκαν 500 ml βενζίνη και 500 ml πετρέλαιο έκαστο. Ακολούθως, έγινε διήθηση από ένα κομμάτι «κουβέρτας» (13cm x 13cm) στο πετρέλαιο και στη βενζίνη, όπου και παρέμειναν για 3 λεπτά. Τέλος, αφαιρέθηκαν από τα δοχεία και ζυγίστηκαν εκ νέου. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα «μαλλιά».

Αποτελέσματα

Η παραπάνω διαδικασία έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

	«ΚΟΥΒΕΡΤΑ»	
	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	BENZINH
ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	3gr	3gr
ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	38gr	38gr

	«ΜΑΛΛΙΑ»	
	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	BENZINH
ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	10gr	10gr
ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	137gr	143gr

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον βαθμό απορρόφησης σύμφωνα με των υλικών καθώς και την απορροφητικότητα της βενζίνης και του πετρελαίου από την κουβέρτα και τα μαλλιά.

Σύμφωνα με το Standard ASTM F716-09 ο βαθμός απορρόφησης των υλικών υπολογίζεται ως εξής:

Για την «κουβέρτα» από πολυπροπυλένιο:

- Βενζίνη

$$A = \left[\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right] \times 100 \Rightarrow A = \left[\frac{38 - 3}{38} \right] \times 100 \Rightarrow A = 92\%$$

- Πετρέλαιο

$$A = \left[\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right] \times 100 \Rightarrow A = \left[\frac{38 - 3}{38} \right] \times 100 \Rightarrow A = 92\%$$

Για τα «μαλλιά» από πολυπροπυλένιο:

- Βενζίνη

$$A = \left[\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right] \times 100 \Rightarrow A = \left[\frac{143 - 10}{143} \right] \times 100 \Rightarrow A = 93\%$$

- Πετρέλαιο

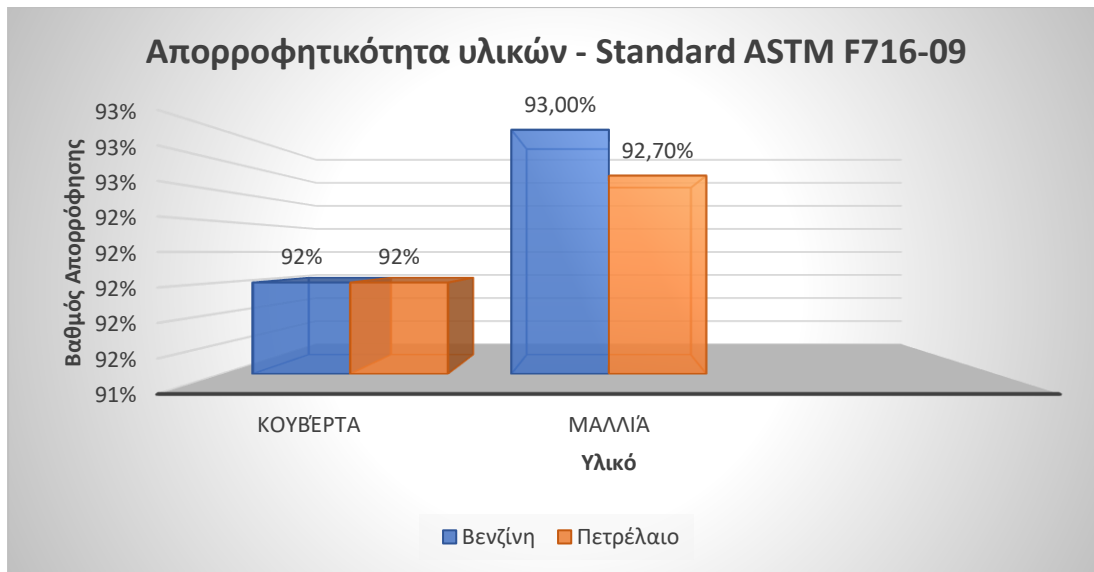
$$A = \left[\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right] \times 100 \Rightarrow A = \left[\frac{137 - 10}{137} \right] \times 100 \Rightarrow A = 92,7\%$$

Όπου:

W_1 : είναι το βάρος του υλικού μετά την απορρόφηση

W_2 : είναι το βάρος του υλικού πριν την απορρόφηση και

A : είναι ο βαθμός απορρόφησης για το κάθε υγρό που ελέγχθηκε



Σύμφωνα με το Standard ASTM F726-99 η αποδοτικότητα προσρόφησης λαδιού (βενζίνης και πετρελαίου) υπολογίζεται ως εξής:

Για την «κουβέρτα»:

- Βενζίνη

$$oil\ absorbency = \frac{S_s}{S_o}, \text{ όπου } S_s = S_{ST} - S_o \text{ οπότε:}$$

$$oil\ absorbency = \frac{S_{ST} - S_o}{S_o} \Rightarrow oil\ absorbency = (38 - 3)/3 \Rightarrow$$

$$oil\ absorbency = 11.7g/g$$

- Πετρέλαιο

$$oil\ absorbency = \frac{S_s}{S_o}, \text{ όπου } S_s = S_{ST} - S_o \text{ οπότε:}$$

$$oil\ absorbency = \frac{S_{ST} - S_o}{S_o} \Rightarrow oil\ absorbency = (38 - 3)/3 \Rightarrow$$

$$oil\ absorbency = 11.7g/g$$

Για τα «μαλλιά»:

- Βενζίνη

$$oil\ absorbency = \frac{S_s}{S_o}, \text{ όπου } S_s = S_{ST} - S_o \text{ οπότε:}$$

$$oil\ absorbency = \frac{S_{ST} - S_o}{S_o} \Rightarrow oil\ absorbency = (143 - 10)/10 \Rightarrow$$

$$oil\ absorbency = 13,3g/g$$

- Πετρέλαιο

$$\text{oil absorbency} = \frac{S_s}{S_o}, \text{ όπου } S_s = S_{ST} - S_o \text{ οπότε:}$$

$$\text{oil absorbency} = \frac{S_{ST} - S_o}{S_o} \Rightarrow \text{oil absorbency} = (137 - 10)/10 \Rightarrow$$

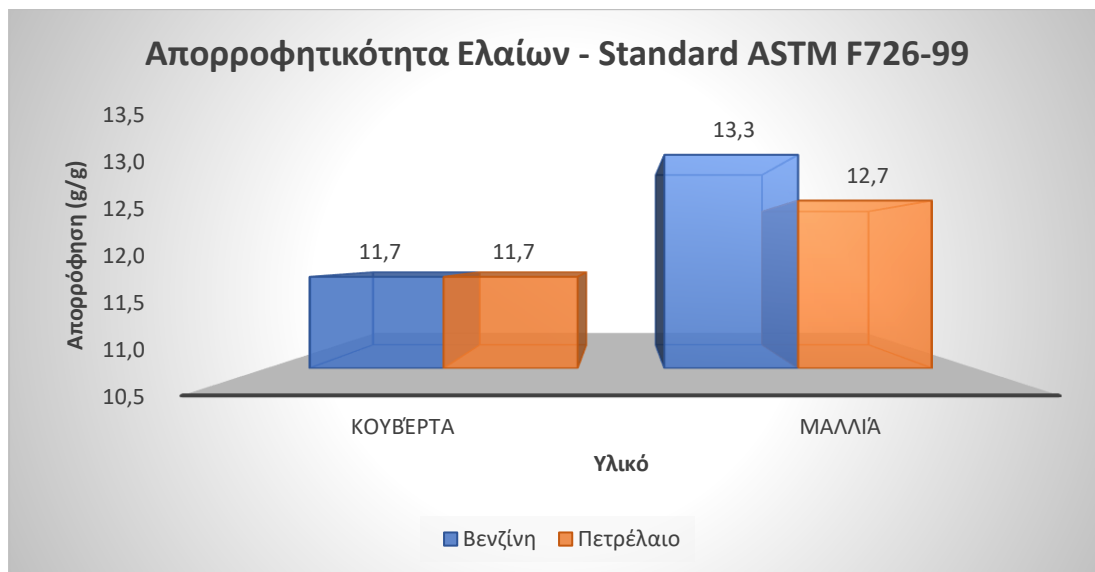
$$\text{oil absorbency} = 12.7 \text{ g/g}$$

Όπου:

S_o : αρχικό βάρος ξηρού προσροφητικού

S_{ST} : βάρος δειγμάτων προσροφητικού

S_s : καθαρό προσροφημένο λάδι



Συζήτηση

Από το πειραματικό μέρος, παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση της «κουβέρτας» από πολυπροπυλένιο εμφανίζεται κοινός βαθμός απορρόφησης και κοινή απορροφητικότητα και για τα δύο έλαια όπου φτάνουν το 92% και το 11,7g/g αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά τα «μαλλιά» έχουν διαφορά ανάμεσα στα δύο πετρελαιοειδή. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της βενζίνης εμφανίζεται μεγαλύτερος βαθμός απορρόφησης έναντι του πετρελαίου – 93% αντί του 92,7% - και μεγαλύτερη απορροφητικότητα, 13,3g/g προς 12,7g/g.

Συμπεράσματα

Με βάση το βαθμό απορρόφησης και την αποδοτικότητα απορρόφησης του κάθε υλικού έναντι της βενζίνης και του πετρελαίου παρατηρείται ότι τόσο τα «μαλλιά» όσο και η «κουβέρτα» έχουν πολύ καλά ποσοστά απορρόφησης. Λίγο πιο αποτελεσματική

φαίνεται η χρήση «μαλλιών», ειδικά στη περίπτωση της βενζίνης, χωρίς όμως να είναι έντονη η διαφορά.

Επίλογος

Οι τεχνολογίες αντιρρύπανσης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον μετριασμό της μόλυνσης από πετρέλαιο στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα. Στην περίπτωση της ξηράς, τεχνικές όπως οι παράγοντες βιοαποκατάστασης, η φυτοεξυγίανση και οι χημικοί σταθεροποιητές επικεντρώνονται στην αποκατάσταση της υγείας του εδάφους, στην πρόληψη της εξάπλωσης των ρύπων και στην ελαχιστοποίηση της οικολογικής ζημίας. Καινοτομίες όπως η χρήση λυοφιλοποιημένων βακτηρίων που αποικοδομούν τους υδρογονάνθρακες και μυκήτων που αποικοδομούν το πετρέλαιο ενισχύουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα αυτών των μεθόδων. Τα συστήματα πλύσης, εκσκαφής και περιορισμού του εδάφους παρέχουν ουσιαστικές φυσικές λύσεις, ενώ η βιοαύξηση και οι τροποποιήσεις θρεπτικών ουσιών διασφαλίζουν τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών φυσικής αποδόμησης.

Στα θαλάσσια οικοσυστήματα, προηγμένα υλικά όπως μαγνητικά νανοδομημένα ροφητικά και υπερυδρόφοβες μεμβράνες παρέχουν λύσεις υψηλής απόδοσης για ανάκτηση και διαχωρισμό πετρελαίου. Οι τεχνικές βιοαποκατάστασης, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης μικροοργανισμών που αποικοδομούν τους υδρογονάνθρακες και διασκορπιστικών βιολογικών προϊόντων, καταδεικνύουν τη δυνατότητα για περιβαλλοντικά βιώσιμες στρατηγικές καθαρισμού. Οι συμβατικές τεχνολογίες όπως οι βραχίονες και οι σκούπες παραμένουν ζωτικής σημασίας εργαλεία, διασφαλίζοντας δυνατότητες άμεσης απόκρισης. Μέθοδοι όπως η έκπλυση ακτών, η χειροκίνητη ανάκτηση και η επιτόπια καύση προσφέρουν εξατομικευμένες λύσεις για συγκεκριμένα σενάρια, με προσεκτική εξέταση των περιβαλλοντικών συνθηκών τους.

Ακόμη, στο συνεχώς εξελισσόμενο πεδίο των τεχνολογιών αντιρρύπανσης πετρελαιοκηλίδων αποδεικνύει ότι καμία μεμονωμένη μέθοδος δεν μπορεί να αντιμετωπίσει πλήρως τις περίπλοκες προκλήσεις που δημιουργούνται από τις πετρελαιοκηλίδες. Μεταξύ της ποικιλίας λύσεων, τα υλικά πολυπροπυλενίου ξεχωρίζουν ως ακρογωνιαίος λίθος της σύγχρονης απόκρισης διαρροής. Η ευελιξία τους, η υψηλή ικανότητα κατακράτησης πετρελαίου και η προσαρμοστικότητα σε διάφορα σενάρια διαρροής τα έχουν καταστήσει απαραίτητα στις προσπάθειες ανάκτησης πετρελαίου. Από συνθετικά ροφητικά έως εξαρτήματα σε προηγμένα

συστήματα μηχανικής αφαίρεσης, το πολυπροπυλένιο προσφέρει μια ισορροπία μεταξύ απόδοσης και επεκτασιμότητας που ευθυγραμμίζεται με τις απαιτήσεις των λειτουργιών ταχείας απόκρισης.

Βιβλιογραφία

- [1]. (2020, 10 23). *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*. Ανάκτηση από Pollution: <https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/tl0028>
- [2] Shashank Kumar Singh, Yatender, K., & Soumya, S. (2023, 05). Perspectives of HMF and LA from microalgal biomass. *Algal Research*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103133>
- [3] Hammes, F., Velten, S., Egli, T., & Juhna, T. (2011). Biotreatment of Drinking Water. Στο *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)* (σσ. 517-530). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00386-X>
- [4]. (χ.χ.). *Habitat*. Ανάκτηση από Britannica: <https://www.britannica.com/science/habitat-biology>
- [5]. (χ.χ.). *About Dredging*. Ανάκτηση από European Dredging Association: <https://european-dredging.eu/Definitions>
- [6], Ghiaus, C., Allard, F., Santamouris, M., Georgakis, C., & Nicol, F. (2006, 04). Urban environment influence on natural ventilation potential. *Building and Environment*, σσ. 395-406. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.003>
- [7], Douet, J. (1988). *Going up in Smoke: The History of the Industrial Chimney*. Victorian Society. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/339536666_Going_up_in_SmokeThe_History_of_the_Industrial_Chimney
- [8]. (χ.χ.). *The 1848 Public Health Act*. Ανάκτηση από UK Parliament: <https://www.parliament.uk/about/living-heritage/transformingsociety/towncountry/towns/tyne-and-wear-case-study/about-the-group/public-administration/the-1848-public-health-act/>
- [9]. (χ.χ.). *Public Health Act 1875*. Ανάκτηση από Legislation: <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/Vict/38-39/55/enacted>

- [10]. (χ.χ.). *Alkali, &c. Works Regulation Act 1906*. Ανάκτηση από Legislation: <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/Edw7/6/14/schedule/FIRST/enacted>
- [11]. (χ.χ.). *Scrubbers*. Ανάκτηση από Britannica: <https://www.britannica.com/technology/air-pollution-control/Scrubbers>
- [12], Zhiping, Z., & Greedan, J. (2003). *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. doi:<https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00653-0>
- [13]. (χ.χ.). *Clean Air Act 1956*. Ανάκτηση από Legislation: <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/Eliz2/4-5/52/enacted>
- [14]. (χ.χ.). *Evolution of the Clean Air Act*. Ανάκτηση από EPA: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/evolution-clean-air-act>
- [15], Kouravand, S., & Kermani, A. (2018, 11). Clean power production by simultaneous reduction of NO_x and SO_x contaminants using Mazut Nano-Emulsion and wet flue gas desulfurization. *Journal of Cleaner Production*, σσ. 229-235. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.017>
- [16], Xuzheng, J., Jianying, H., Teng, L., Shuhui, L., Xiao, L., . . . Yuekun, L. (2023, 06). Advances in particulate matter filtration: Materials, performance, and application. *Green Energy & Environment*, σσ. 673-697. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.03.012>
- [17]. (χ.χ.). *Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ για τις ουσίες που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος*. Ανάκτηση από EUR - Lex: <https://eur-lex.europa.eu/EL/legal-content/summary/montreal-protocol-on-substances-that-deplete-the-ozone-layer.html>
- [18]. (χ.χ.). *Πρωτόκολλο του Κιότο*. Ανάκτηση από EUR - Lex: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=LEGISSUM:kyoto_protocol
- [19]. (χ.χ.). *Συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή*. Ανάκτηση από Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/paris-agreement-climate/>
- [20], Sánchez-Castro, I., Molina, L., Prieto-Fernández, M., & Segura, A. (2023, 06). Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil - Remediation techniques applied in real soil-contamination events. *Heliyon*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16692>

- [21], Baozhu, P., Jiaping, Y., Xinhua, Z., Zhaoyin, W., Jiao, C., . . . Mengzhen, X. (2016, 06). A review of ecological restoration techniques in fluvial rivers. *International Journal of Sediment Research*, σσ. 110-119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.03.001>
- [22], Faisal, K., Tahir, H., & Ramzi, H. (2004, 06). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, σσ. 95-122. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.02.003>
- [23]. (2005, 09). ΟΔΗΓΙΑ 2005/35/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ. Ανάκτηση από EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005L0035>
- [24]. (2009, 04). ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΚ) αριθ. 782/2003 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ. Ανάκτηση από EUR - Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02003R0782-20090420>
- [25]. (2013, 08). ΟΔΗΓΙΑ 2013/39/ΕΕ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ . Ανάκτηση από EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0039&from=pt>
- [26]. (χ.χ.). HELCOM Organisation. Ανάκτηση από HELCOM : <https://helcom.fi/about-us/organisation/>
- [27]. (2024). Νόμος 3983/2011. Ανάκτηση από Kodiko: <https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/123999/nomos-3983-2011>
- [28]. (2024). ΠΡΟΕΔΡΙΚΟ ΔΙΑΤΑΓΜΑ ΥΠ' ΑΡΙΘ. 26. Ανάκτηση από ΚΟΔΙΚΟ: <https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/370899/p.d.-26-2012>
- [29]. (2021). ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘ. 4042 . Ανάκτηση από ΚΟΔΙΚΟ: <https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/115637/nomos-4042-2012>
- [30], Gheorghe, I., & Barbu, I. (2011). The Effects of Air Pollutants on Vegetation and the Role of Vegetation in Reducing Atmospheric Pollution. Στο *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources* (σσ. 241-280). doi:10.5772/1000
- [31], Robinson, E., & Robbins , R. (χ.χ.). Gaseous Atmospheric Pollutants from Urban and Natural Sources. Στο *The Changing Global Environment* (σσ. 111-123). doi:<https://doi.org/10.1007/978-94-010-1729-9>

- [32], & Fishbein , L. (χ.χ.). Sources, Nature and Levels of Air Pollutants. Στο *Air Pollution and Human Cancer* (σσ. 9-34). doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-75906-2>
- [33], Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020, 02). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers Public Health*. doi:10.3389/fpubh.2020.00014
- [34]. (2022). *Impacts of air pollution on ecosystems*. Ανάκτηση από European Environment Agency: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/impacts-of-air-pollution-on-ecosystems>
- [35]. (χ.χ.). *Health & Environmental Effects of Air Pollution*. Ανάκτηση από Commonwealth of Massachusetts: <https://www.mass.gov/doc/health-environmental-effects-of-air-pollution/download>
- [36], & Mudakavi, J. (χ.χ.). *Principles and Practices of Air Pollution Control and Analysis*. Ανάκτηση από https://www.google.gr/books/edition/Principles_and_Practices_of_Air_Pollutio/WfZH7ZgyzT8C?hl=el&gbpv=1&dq=air+antipollution+technologies&printsec=frontcover
- [37], Seesaard, T., Kamjornkittikoon, K., & Wongchoosuk, C. (2024, 11). A comprehensive review on advancements in sensors for air pollution applications. *Science of The Total Environment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175696>
- [38], & Cheremisinoff, N. (2002). *Handbook of Air Pollution Prevention and Control*. Ανάκτηση από https://www.google.gr/books/edition/Handbook_of_Air_Pollution_Prevention_and/CMVRS7K0IDcC?hl=el&gbpv=1&dq=air+antipollution+technologies&printsec=frontcover
- [39], & Misral, I. (2008). Major Types of Soil Pollutants. Στο *Soil Pollution* (σσ. 117-136). Springer Berlin, Heidelberg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-540-70777-6>
- [40]. (2022). *Soil pollution and health*. Ανάκτηση από European Environment Agency: <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/health/soil-pollution>
- [41], Rodríguez Eugenio, N., & Ronzan, M. (2021). Sources of soil pollution. Στο *Global assessment of soil pollution*. FAO. doi:<https://doi.org/10.4060/cb4894en>

- [42], Donkova, R., & Kaloyanova, N. (χ.χ.). The Impact of Soil Pollutants on Soil Microbial Activity. Στο *Soil Chemical Pollution, Risk Assessment, Remediation and Security* (σσ. 73-93). Springer, Dordrecht. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8257-3_6
- [43], & Edwards, C. (2002). Assessing the effects of environmental pollutants on soil organisms, communities, processes and ecosystems. *European Journal of Soil Biology*, σσ. 225-231. doi:[https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(02\)01150-0](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(02)01150-0)
- [44], Mishra, R., Mohammad, N., & Roychoudhury, N. (2016, 01). *Soil pollution: Causes, effects and control*. Ανάκτηση από Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/289281444_Soil_pollution_Causes_effects_and_control
- [45], & Hassan Al-Taai, S. (2021). Soil Pollution - Causes and Effects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. doi:0.1088/1755-1315/790/1/012009
- [46], Münzel, T., Hahad, O., Daiber, A., & Landrigan, P. (2023, 02). Soil and water pollution and human health: what should cardiologists worry about? *Cardiovascular Research*, σσ. 440-449. doi:<https://doi.org/10.1093/cvr/cvac082>
- [47], Smarzewska, S., & Guziejewski, D. (2021). 10 - Soil remediation technologies. Στο *Handbook of Advanced Approaches Towards Pollution Prevention and Control* (σσ. 193-219). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822121-1.00010-2>
- [48], & Thompson, R. (χ.χ.). Actions to tackle soil pollution. Στο *Global assessment of soil pollution*. FAO. doi:<https://doi.org/10.4060/cb4894en>
- [49]. (χ.χ.). *Innovative technology for Removal of toxic metals form highly contaminated soil & sediments*. Ανάκτηση από European Commission: <https://cordis.europa.eu/article/id/413357-sustainable-remediation-technology-for-detoxing-soil>
- [50]. (2024). *FAO Regional Office for Europe and Central Asia*. Ανάκτηση από Food and Agriculture Organization of the United Nations: <https://www.fao.org/europe/news/detail/soil-remediation-and-green-technologies-offer-solutions-to-pesticide-pollution-and-soil-sustainability/en>
- [51], Byung-Hoop, C., Hiroyuki, C., Hirokazu, T., Takashi, K., Kazunari, N., . . . Hiroshi, O. (1997, 10). Laboratory-scale bioremediation of oil-contaminated soil of Kuwait with soil

amendment materials. *Chemosphere*, σσ. 1599-1611.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)00220-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)00220-8)

- [52], Kansour, M., & Al-Mailem, D. (2023, 06). Bioremediation of two oil-contaminated Kuwaiti hyper-saline soils by cross bioaugmentation and the role of indigenous halophilic/halotolerant hydrocarbonoclastic bacteria. *Environmental Technology & Innovation*. doi: 10.1016/j.eti.2023.103259
- [53], Lindén, O., Jernelöv, A., & Egerup, J. (2004). *The Environmental Impacts of the Gulf War 1991*. International Institute for Applied Systems Analysis. Ανάκτηση από <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/7427/1/IR-04-019.pdf>
- [54], Singh, J., Yadav, P., Pal, A., & Mishra, V. (2020). Water Pollutants: Origin and Status. Στο *Sensors in Water Pollutants Monitoring: Role of Material* (σσ. 5-20). doi:10.1007/978-981-15-0671-0_2
- [55], Ha, M., & Schleiger, R. (χ.χ.). 12.3: *Water Pollutants and Their Sources*. Ανάκτηση από Libretexts:
[https://bio.libretexts.org/Courses/University_of_Pittsburgh/Environmental_Science_\(Whittinghill\)/12%3A_Water_Supply_and_Water_Pollution/12.03%3A_Water_Pollutants_and_Their_Sources#:~:text=These%20pollutants%20might%20include%20herbicides,surface%20water%2](https://bio.libretexts.org/Courses/University_of_Pittsburgh/Environmental_Science_(Whittinghill)/12%3A_Water_Supply_and_Water_Pollution/12.03%3A_Water_Pollutants_and_Their_Sources#:~:text=These%20pollutants%20might%20include%20herbicides,surface%20water%2)
- [56]. (2023). *What are the main sources of water pollution?* Ανάκτηση από European Environment Agency: [https://www.eea.europa.eu/en/about/contact-us/faqs/what-are-the-main-sources-of-water-pollution#:~:text=The%20main%20point%20source%20of,plants%20\(via%20the%20air\)](https://www.eea.europa.eu/en/about/contact-us/faqs/what-are-the-main-sources-of-water-pollution#:~:text=The%20main%20point%20source%20of,plants%20(via%20the%20air))
- [57], Sciortino, J., & Ravikumar, R. (1999). Potential Pollutants, Their Sources and their Impacts. *Fishery Harbour Manual on the Prevention of Pollution - Bay of Bengal Programme*. Ανάκτηση από <https://www.fao.org/4/x5624e/x5624e04.htm#chapter%201%20%20%20potential%20pollutants,%20their%20sources%20and%20their%20impacts>
- [58], Ecological Frontiers, G., Oghenenyoreme Itoje-akpokiniovo, L., Obasohan, P., Ovie Ikpekor, V., Oghenekeno Samuel, P., . . . Johnson Agbo, J. (2024, 10). Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate

- change. *Ecological Frontiers*, σσ. 874-889.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.02.014>
- [59], Tuan Anh, N., Duy Can, L., Thi Nhan, N., Schmalz, B., & Le Luu, T. (2023, 12). Influences of key factors on river water quality in urban and rural areas: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100424>
- [60]. (χ.χ.). *Environmental Benefits of Green Infrastructure*. Ανάκτηση από EPA: <https://www.epa.gov/green-infrastructure/environmental-benefits-green-infrastructure>
- [61]. (χ.χ.). *Green Infrastructure and Groundwater Protection*. Ανάκτηση από EPA: <https://www.epa.gov/green-infrastructure/green-infrastructure-and-groundwater-protection>
- [62], Tang, z., Wood, J., Smith, D., Thapa, A., & Aryal, N. (2021, 10). A Review on Constructed Treatment Wetlands for Removal of Pollutants in the Agricultural Runoff. *Constructed and Floating Wetlands for Sustainable Water Reclamation*. doi:<https://doi.org/10.3390/su132413578>
- [63]. (2018). *Sediment-Associated Contaminants*. Ανάκτηση από USGS: https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/sediment-associated-contaminants?utm_source=chatgpt.com#science
- [64], & Melching, C. (2018, 01). Application of a water quality model for determining instream aeration station location and operational rules: A case study. *Water Science and Engineering*, σσ. 8-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.09.005>
- [65], Chang, Y., Cui, H., Huang, M., & He, Y. (2017, 03). Artificial floating islands for water quality improvement. *Environmental Reviews*. doi: 10.1139/er-2016-0038
- [66], Aitouche, A., Mobasheri, R., & Li, X. (2023). River Project, An Innovative Way to Reduce Pollution on Riverboats. Στο *Proceedings of PIANC Smart Rivers 2022*. doi:10.1007/978-981-19-6138-0_80
- [67]. (2024). *What is the biggest source of pollution in the ocean?* Ανάκτηση από National Ocean Service: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/pollution.html>
- [68]. (2024). *Coastal Pollution*. Ανάκτηση από National Ocean Service: <https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial-coastal/welcome.html>

- [69]. (χ.χ.). *Marine Pollution*. Ανάκτηση από National Geographic: <https://education.nationalgeographic.org/resource/marine-pollution/>
- [70]. (χ.χ.). *Marine Pollutants*. Ανάκτηση από Foras na Mara Marine Institute: <https://www.marine.ie/site-area/areas-activity/marine-environment/marine-pollutants>
- [71]. (χ.χ.). *Sustainable Blue Economy*. Ανάκτηση από Unep: <https://www.unep.org/topics/ocean-seas-and-coasts/regional-seas-programme/sustainable-blue-economy>
- [72]. (χ.χ.). *Ocean pollution and marine debris*. Ανάκτηση από NOAA: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-pollution>
- [73]. (2024). *Where does marine debris come from?* Ανάκτηση από National Ocean Service: <https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial-coastal/marine-debris/md02.html>
- [74]. (χ.χ.). *Nonpoint Source Pollution*. Ανάκτηση από National Ocean Service: https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_pollution/welcome.html
- [75], Mearns, A., Reish, D., & Oshida, P. (2013, 10). Effects of Pollution on Marine Organisms. *Water Environment Research*. doi:10.2175/106143013X13698672322949
- [76], Wilhelmsson, D., Thompson, R., Holmström, K., Lindén, O., & Eriksson-Hägg, H. (2013). Chapter 6 - Marine Pollution. Στο *Managing Ocean Environments in a Changing Climate* (σσ. 127-169). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407668-6.00006>
- [77], & Sargun, S. (2021, 03). *A Guide To Scrubber System On Ship*. Ανάκτηση από Marine insight: <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>
- [78], Kumar, A., AL-Jumaili, A., Bazaka, O., Ivanova, E., Levchenko, I., . . . Jacob, M. (2021). Functional nanomaterials, synergisms, and biomimicry for environmentally benign marine antifouling technology. *Royal Society of Chemistry*. doi:10.1039/d1mh01103k
- [79], Ciriminn, R., Bright, F., & Pagliaro, M. (2015, 02). Ecofriendly Antifouling Marine Coatings. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, σσ. 559-565. doi:<https://doi.org/10.1021/sc500845n>
- [80]. (2018). *Πλαστικά στους ωκεανούς: στοιχεία, επιπτώσεις και νέοι κανόνες*. Ανάκτηση από European Parliament:

<https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20181005STO15110/plastika-stous-okeanous-stoicheia-epiptoseis-kai-neoi-kanones>

- [81]. (χ.χ.). *The Largest Cleanup in History*. Ανάκτηση από The Ocean Cleanup: <https://theoceancleanup.com/>
- [82], Winterstetter, A., Grodent, M., Kini, V., Ragaert, K., & Vrancken, K. (2021, 04). A Review of Technological Solutions to Prevent or Reduce Marine Plastic Litter in Developing Countries. *Recycling and Sustainability of Plastics*. doi: <https://doi.org/10.3390/su13094894>
- [83], Mazzocchi, M., Altosole, M., Vigna, V., Bosio, B., & Arato, E. (2020, 12). Marine Pollution Mitigation by Waste Oils Recycling Onboard Ships: Technical Feasibility and Need for New Policy and Regulations. *Frontiers in Marine Science*. doi:<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.566363>
- [84]. (2025). Polymer-Plastics Technology and Engineering.
- [85]. (χ.χ.). *PLASTICS POLICYPLAYBOOK*. Ανάκτηση από Ocean Conservancy: <https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2019/10/Plastics-Policy-Playbook-10.17.19.pdf>
- [86]. (χ.χ.). *Lessons Learned From the Exxon Valdez Spill*. Ανάκτηση από NOAA: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/significant-incidents/lessons-learned-exxon-valdez-spill>
- [87], Peterson, C., Rice, S., Short, J., Esler, D., Bodkin, J., . . . Irons, D. (2003, 12). Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. *Science*. doi:10.1126/science.1084282.
- [88], & EPA. (χ.χ.). *Understanding Oil Spills And Oil Spill Response*. Ανάκτηση από EPA: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-01/documents/ospguide99.pdf>
- [89], Gundlach, E., & Hayes, M. (1978, 08). Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts. *Marine Technology Society Journal*. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/255538772_Vulnerability_of_coastal_environments_to_oil_spill_impacts
- [90], Daâssi, D., & Qabil Almaghrabi, F. (2023, 05). Petroleum-Degrading Fungal Isolates for the Treatment of Soil Microcosms. *Microorganisms*. doi:10.3390/microorganisms11051351

- [91], Perdigão, R., Almeida, C., Magalhães, C., Ramos, S., Carolas, A., . . . Mucha, A. (2021, 11). Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in Seawater: Prospects of Using Lyophilized Native Hydrocarbon-Degrading Bacteria. *Microorganisms*. doi:10.3390/microorganisms9112285
- [92]. (χ.χ.). *Oil spills*. Ανάκτηση από NOAA: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills>
- [93], Bunge, A., Leoştean, C., & Turcu, R. (2023, 12). Synthesis of a Magnetic Nanostructured Composite Sorbent Only from Waste Materials. *Materials*. doi:<https://doi.org/10.3390/ma16247696>
- [94], Melnik, A., Bogoslovtseva, A., Petrova, A., Safonov, A., & Markides, C. (2023, 03). Oil–Water Separation on Hydrophobic and Superhydrophobic Membranes Made of Stainless Steel Meshes with Fluoropolymer Coatings. *Water*. doi:<https://doi.org/10.3390/w15071346>
- [95]. (2022, 09). *Position on the use of chemical dispersants*. Ανάκτηση από Prince William Sound Regional Citizens’ Advisory Council: <https://www.pwsrca.org/programs/environmental-monitoring/dispersants/position-on-dispersants/>
- [96], & NOAA. (2015, 10). *How Do Oil Spills Get Cleaned up on Shore?* Ανάκτηση από NOAA: <https://response.restoration.noaa.gov/about/media/how-do-oil-spills-get-cleaned-shore.html>

Πηγές Εικόνων

- [I]. (χ.χ.). *Βυθόκορος σε γερμανικό ποτάμι*. Ανάκτηση από https://el.wiktionary.org/wiki/%CE%B2%CF%85%CE%B8%CE%BF%CE%BA%CF%8C%CF%81%CE%BF%CF%82#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Dredge_ship_on_the_Danube.JPG
- [II]. (χ.χ.). *Closed Loop scrubber*. Ανάκτηση από Nickel Institute: <https://nickelinstitute.org/en/blog/2020%E5%B9%B4/march/onboard-with-marine-scrubbers/>
- [III]. (χ.χ.). *Hull Cleaner*. Ανάκτηση από <https://ocean-robotics.com/hull-cleaner/>

- [IV]. (χ.χ.). *The Interceptor Barricade in Guatemala*. Ανάκτηση από <https://theoceancleanup.com/rivers/>
- [V]. (χ.χ.). *Exxon Valdez*. Ανάκτηση από Hakai Magazine: <https://hakaimagazine.com/news/wounded-wilderness-the-exxon-valdez-oil-spill-30-years-later/>
- [VI]. (χ.χ.). *Exxon Valdez oil spill*. Ανάκτηση από Britannica: <https://www.britannica.com/event/Exxon-Valdez-oil-spill>
- [VII]. (χ.χ.). *Απορροφητικά Φράγματα*. Ανάκτηση από Nauticexpo: <https://www.nauticexpo.com/prod/markleen-terra/product-32644-590056.html>
- [VIII]. (χ.χ.). *Φουσκωτά Φράγματα*. Ανάκτηση από Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/313425642_In-situ_Burning_An_Update/figures
- [IX]. (χ.χ.). *Πυρίμαχα Φράγματα*. Ανάκτηση από <https://www.newnavalshop.com/scorpion-oil-absorbents-booms-p3020-453>
- [X]. (χ.χ.). *Συστήματα Κενού*. Ανάκτηση από Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/325427939_Oil_Spills_in_the_Arabian_Gulf_A_Case_Study_and_Environmental_Review