



Co-funded by
the European Union

Ομάδα Καθαρισμού της Φύσης: Πώς τα Μικρόβια Τρώνε τη Ρύπανση



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."

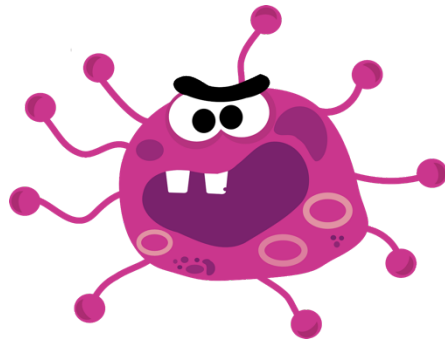




ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

· Εισαγωγή.....	2
· Τι είναι τα μικρόβια;.....	3
· Σημασία των Μικροβίων... ..	
· Προβλήματα Ρύπανσης... ..	5
· Μικροβιακός Ρόλος στον Καθαρισμό της Περιβαλλοντικής Ρύπανσης.....	7
· Εισαγωγή στη Βιοαποκατάσταση... ..	
· Πώς τα μικρόβια «τρώνε» ή διασπούν τους ρύπους... ..	
· Παραδείγματα Μικροβιακής Βιολογικής Αποκατάστασης.....	12
· Μικροβιακή Αποκατάσταση.....	13
· Φυσική εξασθένηση.....	16
· Μελέτες Περιπτώσεων... ..	17
· Βιοτεχνολογία και το Μέλλον.....	18
· Επαυξημένη Πραγματικότητα στην Πράξη: Εξερευνώντας τον Μικροβιακό Καθαρισμό.....	19
· Εφαρμογή της Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) στην Εκπαίδευση για τη Μικροβιακή Βιοαποκατάσταση... ..	
· Συμπέρασμα... ..	22
· Πόροι.....	24





Γενικό θέμα της μαθησιακής διαδρομής	Μικροβιακή Βιολογική Αποκατάσταση και Περιβαλλοντική Καινοτομία
Συγκεκριμένη ονομασία της μαθησιακής μονάδας	Ομάδα Καθαρισμού της Φύσης: Πώς τα Μικρόβια Τρώνε τη Ρύπανση
Ηλικία χρήστη-στόχου	14–18 ετών
Προαπαιτούμενα για τον μαθητή	Βασική κατανόηση της Βιολογίας, της Χημείας και της Περιβαλλοντικής Επιστήμης
Περιγραφή της μαθησιακής μονάδας	Αυτή η ενότητα εισάγει την έννοια της βιοαποκατάστασης, δείχνοντας πώς χρησιμοποιούνται οι μικροοργανισμοί για τον καθαρισμό μολυσμένων περιβαλλόντων. Οι μαθητές θα εξερευνήσουν τη μικροβιακή ποικιλομορφία, τους τύπους ρύπανσης και τις μεθόδους καθαρισμού μέσω διαδραστικού περιεχομένου και προσομοιώσεων AR.
Εμπλεκόμενο θέμα	Βιολογία, Χημεία, Περιβαλλοντική Επιστήμη, Τεχνολογία
Λέξεις-κλειδιά	Μικρόβια, Βιοαποκατάσταση, Ρύπανση, Βιωσιμότητα, Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR), Καινοτομία, Περιβαλλοντική Επιστήμη
Βασικές δεξιότητες, ικανότητες, γνώσεις που μπορούν να αποκτηθούν	Κατανόηση των μικροβιακών ρόλων στον καθαρισμό της ρύπανσης, αξιολόγηση πραγματικών περιπτώσεων βιοαποκατάστασης, εφαρμογή εργαλείων AR για την απεικόνιση των μικροβιακών δράσεων και ανάπτυξη λύσεων σε περιβαλλοντικά προβλήματα.
Πόροι και διδακτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν	Επιστημονικά άρθρα, πλατφόρμες AR (Assemblr EDU, Merge Cube), διαδραστικές προσομοιώσεις, έγγραφα μελέτης περίπτωσης, μικροβιολογικές βάσεις δεδομένων
Κριτήρια αξιολόγησης και αξιολόγηση	Αξιολόγηση μέσω διαδραστικών προσομοιώσεων βασισμένων σε επαυξημένη Πραγματικότητα (AR), κατανόηση των μικροβιακών λειτουργιών, ανάλυση περιπτώσεων και οπτικές εξηγήσεις ή έργα που δημιουργούνται από τους μαθητές



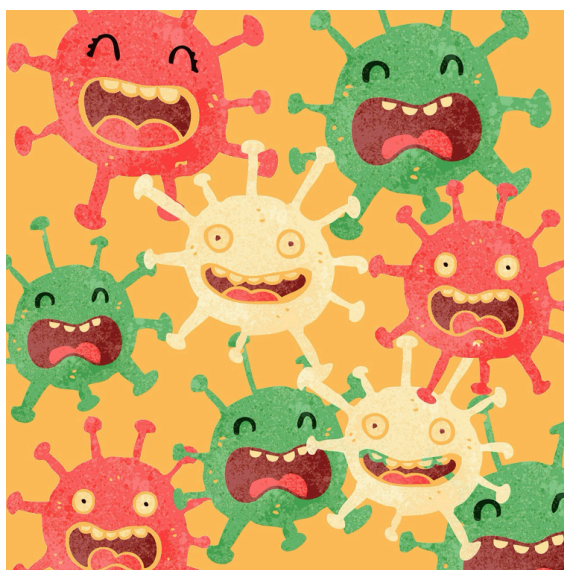
Εισαγωγή

Η βιοαποκατάσταση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση στην καταπολέμηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Στην ουσία της, αξιοποιεί τις φυσικές ικανότητες των μικροοργανισμών για τον καθαρισμό μολυσμένων περιοχών, προσφέροντας μια καινοτόμο και συχνά οικονομική προσέγγιση σε ορισμένα από τα πιο κρίσιμα οικολογικά προβλήματα του σήμερα. Χρησιμοποιώντας βακτήρια, μύκητες ή φυτά, η βιοαποκατάσταση αναδιαμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο διαχειριζόμαστε τους ρύπους, από τις πετρελαιοκηλίδες έως τα τοξικά βαρέα μέταλλα, καθώς η κατανόησή μας για αυτά τα φυσικά συστήματα συνεχίζει να αυξάνεται.

Η ιδέα είναι σχετικά απλή: οι μικροοργανισμοί, μικροσκοπικές αλλά ισχυρές μορφές ζωής, διαθέτουν μοναδικές μεταβολικές οδούς που τους επιτρέπουν να διασπούν ή να μετατρέπουν επιβλαβείς ουσίες σε λιγότερο τοξικές ενώσεις. Σε μολυσμένα περιβάλλοντα, αυτοί οι οργανισμοί μπορούν να ενθαρρυνθούν ή να συμπληρωθούν για να επιταχύνουν την αποικοδόμηση των ρύπων, συμβάλλοντας έτσι στην αποκατάσταση της οικολογικής ισορροπίας.

Ένα πολύ γνωστό παράδειγμα είναι ο καθαρισμός πετρελαιοκηλίδων. Η καταστροφή του Exxon Valdez το 1989 ανέδειξε τις καταστροφικές επιπτώσεις τέτοιων περιστατικών, ενώ παράλληλα πυροδότησε το ενδιαφέρον για τη βιοαποκατάσταση. Οι επιστήμονες έχουν ανακαλύψει ότι ορισμένα βακτήρια, όπως *Alcanivorax borkumensis*, τρέφονται φυσικά με υδρογονάνθρακες που βρίσκονται στο αργό πετρέλαιο. Με την εισαγωγή αυτών των μικροβίων σε σημεία διαρροής ή την ενίσχυση της ανάπτυξής τους με πρόσθετα θρεπτικά συστατικά, οι προσπάθειες καθαρισμού μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά, μειώνοντας τόσο την άμεση όσο και τη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική ζημία.

Πέρα από το πετρέλαιο, η βιοαποκατάσταση είναι επίσης πρακτική στην αντιμετώπιση της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα. Οι βιομηχανικές δραστηριότητες συχνά αφήνουν πίσω τους επικίνδυνα στοιχεία, όπως ο μόλυβδος, ο υδράργυρος και το κάδμιο, τα οποία αποτελούν απειλή τόσο για τα οικοσυστήματα όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Ορισμένα βακτήρια και μύκητες, γνωστά ως βιοπροσροφητικά, μπορούν να δεσμεύσουν αυτά τα μέταλλα στις κυτταρικές τους δομές, καθιστώντας τα λιγότερο τοξικά και ευκολότερα στην εξαγωγή τους από το περιβάλλον (Hartman, 2024)



Project Number: KA220-BW-23-30-126516





Τι είναι τα μικρόβια;

Τα μικρόβια, ή μικροοργανισμοί, είναι μικροσκοπικές μορφές ζωής που είναι συνήθως αόρατες με γυμνό μάτι. Είναι απίστευτα ποικίλες και κατοικούν σχεδόν σε κάθε περιβάλλον στη Γη, από τα βαθιά νερά μέχρι το ανθρώπινο σώμα. Τα μικρόβια παίζουν ουσιαστικό ρόλο στα οικοσυστήματα, την ανθρώπινη υγεία και σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες.

Κύριοι τύποι μικροβίων:

1. Βακτήρια: Μονοκύτταροι οργανισμοί χωρίς πυρήνα (προκαρυωτικά). Εμφανίζουν ένα ευρύ φάσμα σχημάτων και μεταβολικών δυνατοτήτων. Τα βακτήρια είναι πανταχού παρόντα, βρίσκονται στο έδαφος, στο νερό και ως μέρος του ανθρώπινου μικροβιώματος. Ενώ ορισμένα βακτήρια είναι παθογόνα, πολλά είναι ωφέλιμα, βοηθώντας σε διαδικασίες όπως η πέψη και ο κύκλος των θρεπτικών συστατικών.
2. Αρχαία: Επίσης μονοκύτταροι προκαρυώτες, τα αρχαία διαφέρουν από τα βακτήρια ως προς τη γενετική τους σύνθεση και τη σύνθεση της μεμβράνης τους. Είναι γνωστά για την ευημερία τους σε ακραία περιβάλλοντα, όπως θερμές πηγές και αλμυρές λίμνες, αλλά υπάρχουν και σε πιο συνηθισμένα ενδιαιτήματα, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπινου εντέρου. Τα αρχαία παίζουν ρόλο σε διεργασίες όπως η παραγωγή μεθανίου και ο κύκλος του αζώτου (https://en.wikipedia.org/wiki/Archaea?utm_source=chatgpt.com).
3. Μύκητες: Αυτή η ομάδα περιλαμβάνει ζύμες, μούχλες και μανιτάρια. Οι μύκητες είναι ευκαρυωτικοί οργανισμοί (με πυρήνα) που μπορεί να είναι μονοκύτταροι ή πολυκύτταροι. Είναι κρίσιμοι αποικοδομητές στα οικοσυστήματα, διασπώντας την οργανική ύλη και έχουν εφαρμογές στην παραγωγή τροφίμων και στην ιατρική.
4. Πρώτιστα: Μια ποικιλόμορφη ομάδα κυρίως μονοκύτταρων ευκαρυωτικών οργανισμών. Στα πρώτιστα περιλαμβάνονται πρωτόζωα και ορισμένα είδη φυκών. Ζουν σε διάφορα περιβάλλοντα, από γλυκό νερό έως θαλάσσια συστήματα, και παίζουν ρόλο στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών και ως μέρος του τροφικού πλέγματος.
5. Ιοί: Ακυτταρικές οντότητες που αποτελούνται από γενετικό υλικό (DNA ή RNA) περιβεβλημένο σε πρωτεϊνικό περίβλημα. Οι ιοί απαιτούν ένα κύτταρο ξενιστή για να αναπαραχθούν και είναι γνωστοί για την πρόκληση ασθενειών σε ανθρώπους, ζώα και φυτά. Παρά το γεγονός ότι δεν θεωρούνται «ζωντανοί» με βάση όλους τους ορισμούς, μελετώνται εκτενώς στη μικροβιολογία (https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com).

Σημασία των μικροβίων

Οι μικροοργανισμοί είναι θεμελιώδεις για τη ζωή στη Γη, παίζοντας κρίσιμο ρόλο στις περιβαλλοντικές διεργασίες, την ανθρώπινη υγεία και τη βιοτεχνολογία.





1. Περιβαλλοντική Σημασία

- **Κύκλος θρεπτικών συστατικών:** Τα μικρόβια είναι απαραίτητα στους βιογεωχημικούς κύκλους, συμπεριλαμβανομένων των κύκλων του αζώτου, του άνθρακα και του θείου, διευκολύνοντας τον μετασχηματισμό και την κίνηση αυτών των στοιχείων μέσω των οικοσυστημάτων (preprints.org).
- **Βιοαποκατάσταση:** Ορισμένα μικρόβια μπορούν να αποικοδομήσουν περιβαλλοντικούς ρύπους, όπως υδρογονάνθρακες και βαρέα μέταλλα, γεγονός που τα καθιστά ανεκτίμητα για τον καθαρισμό μολυσμένων χώρων.

2. Ανθρώπινη Υγεία

- **Λειτουργία του μικροβιώματος:** Το ανθρώπινο μικροβίωμα, που περιλαμβάνει τρισεκατομμύρια μικρόβια, είναι αναπόσπαστο κομμάτι της πέψης, της ανάπτυξης του ανοσοποιητικού συστήματος και της προστασίας από παθογόνους παράγοντες. Οι διαταραχές σε αυτήν την μικροβιακή κοινότητα συνδέονται με διάφορες ασθένειες ([pmc.ncbi.nlm.nih.gov](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov)).
- **Πρόληψη και Θεραπεία Νοσημάτων:** Οι πρόοδοι στην κατανόηση του μικροβιώματος έχουν οδηγήσει σε νέες θεραπευτικές προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένης της τροποποίησης του μικροβιώματος για τη θεραπεία ή την πρόληψη ασθενειών (nature.com).

3. Βιοτεχνολογικές Εφαρμογές

- **Βιομηχανικές Διεργασίες:** Τα μικρόβια αξιοποιούνται στη βιοτεχνολογία για την παραγωγή αντιβιοτικών, ενζύμων, βιοκαυσίμων και ζυμωμένων τροφίμων. Οι μεταβολικές τους δυνατότητες αξιοποιούνται σε διάφορες βιομηχανίες.
- **Γενετική Μηχανική:** Τα γενετικά τροποποιημένα μικρόβια αναπτύσσονται για συγκεκριμένες εργασίες, όπως η παραγωγή θεραπευτικών ενώσεων ή η αποικοδόμηση περιβαλλοντικών ρύπων, αναδεικνύοντας την ευελιξία τους στη βιοτεχνολογία.



Προβλήματα Ρύπανσης

Είδη Περιβαλλοντικής Ρύπανσης



Fig 1.Environmental pollution, source:

https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de

Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αναφέρεται στην παρουσία επιβλαβών ουσιών στην ατμόσφαιρα της Γης, συμπεριλαμβανομένων αερίων, σωματιδίων και βιολογικών μορίων που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Κοινοί ρύποι όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου, το διοξείδιο του θείου, το όζον και τα σωματίδια προέρχονται συχνά από την καύση ορυκτών καυσίμων στις μεταφορές, τη βιομηχανία και την παραγωγή ενέργειας. Οι συνέπειες κυμαίνονται από αναπνευστικές ασθένειες και καρδιαγγειακά προβλήματα έως υποβάθμιση του περιβάλλοντος όπως η όξινη βροχή και η υπερθέρμανση του πλανήτη.

Ρύπανση των υδάτων

Η ρύπανση των υδάτων είναι η μόλυνση των υδάτινων σωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των ποταμών, των λιμνών, των ωκεανών και των υπόγειων υδάτων, καθιστώντας τα μη ασφαλή για ανθρώπινη χρήση και επιβλαβή για την υδροβία ζωή. Συνήθως προκαλείται από την απόρριψη ρύπων όπως βιομηχανικά απόβλητα, λύματα, φυτοφάρμακα, πλαστικά και βαρέα μέταλλα σε πηγές νερού. Αυτή η ρύπανση οδηγεί σε μια σειρά προβλημάτων, όπως ασθένειες που μεταδίδονται μέσω του νερού, καταστροφή οικοσυστημάτων και μείωση της διαθεσιμότητας





πόσιμου νερού.

Ρύπανση του εδάφους

Η ρύπανση του εδάφους περιλαμβάνει την υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους μέσω της παρουσίας τοξικών χημικών ουσιών, βαρέων μετάλλων και αποβλήτων που διαταράσσουν την υγεία και την παραγωγικότητα του εδάφους. Οι πηγές περιλαμβάνουν βιομηχανικές δραστηριότητες, γεωργικά χημικά, ακατάλληλη διάθεση αποβλήτων και μεταλλευτικές εργασίες. Το μολυσμένο έδαφος μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια των τροφίμων, την ανάπτυξη των φυτών και την ποιότητα των υπόγειων υδάτων, ενώ παράλληλα θέτει άμεσους κινδύνους για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων.

Ηχορύπανση

Ηχορύπανση είναι το υπερβολικό ή ενοχλητικό επίπεδο θορύβου στο περιβάλλον που επηρεάζει τις κανονικές δραστηριότητες και την ευημερία. Προέρχεται κυρίως από την κυκλοφορία, τις κατασκευές, τις βιομηχανικές διεργασίες και την αστική ανάπτυξη. Η χρόνια έκθεση σε υψηλά επίπεδα θορύβου σχετίζεται με μια σειρά από προβλήματα υγείας, όπως απώλεια ακοής, διαταραχές ύπνου, αυξημένα επίπεδα στρες και μειωμένη γνωστική απόδοση, ειδικά στα παιδιά.

Φωτορύπανση

Η φωτορύπανση αναφέρεται στο υπερβολικό ή λανθασμένα κατευθυνόμενο τεχνητό φως που φωτίζει τον νυχτερινό ουρανό και διαταράσσει το φυσικό σκοτάδι. Προέρχεται κυρίως από τον φωτισμό των δρόμων, τις διαφημιστικές πινακίδες, τα κτίρια και τους δημόσιους χώρους σε αστικές περιοχές. Η φωτορύπανση όχι μόνο αποκρύπτει την ορατότητα των αστεριών, αλλά διαταράσσει και τη συμπεριφορά της άγριας ζωής και τους ανθρώπινους κιρκαδικούς ρυθμούς, οδηγώντας σε οικολογική ανισορροπία και προβλήματα υγείας που σχετίζονται με τον ύπνο.

Θερμική Ρύπανση

Η θερμική ρύπανση συμβαίνει όταν οι βιομηχανίες απορρίπτουν θερμαινόμενο νερό ή αέρα σε φυσικά περιβάλλοντα, ιδίως σε υδάτινα συστήματα, μεταβάλλοντας την ισορροπία της θερμοκρασίας. Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, οι μονάδες παραγωγής και τα διυλιστήρια είναι τυπικοί παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτό. Οι αυξημένες θερμοκρασίες μειώνουν τα επίπεδα οξυγόνου στο νερό, βλάπτουν τους ευαίσθητους υδρόβιους οργανισμούς και μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια βιοποικιλότητας και άνθηση φυκιών, διαταράσσοντας τα υδάτινα οικοσυστήματα.

Ραδιενεργός Ρύπανση

Η ραδιενεργός ρύπανση είναι η μόλυνση του περιβάλλοντος από ραδιενεργές ουσίες, είτε μέσω τυχαίων απελευθερώσεων, ακατάλληλης διάθεσης αποβλήτων είτε φυσικών φαινομένων. Συνήθεις πηγές περιλαμβάνουν πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, ιατρικές και





ερευνητικές εγκαταστάσεις και προηγούμενες δοκιμές πυρηνικών όπλων. Αυτός ο τύπος ρύπανσης ενέχει μακροπρόθεσμους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα, με επιπτώσεις όπως καρκίνο, γενετικές μεταλλάξεις και επίμονη περιβαλλοντική μόλυνση.

Μικροβιακός ρόλος στον καθαρισμό της περιβαλλοντικής ρύπανσης

Οι μικροοργανισμοί διαδραματίζουν ζωτικό και φυσικό ρόλο στον μετριασμό της περιβαλλοντικής ρύπανσης μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως βιοαποκατάσταση, όπου βακτήρια, μύκητες, φύκια ή αρχαία διασπώνται, μετασχηματίζουν ή ακινητοποιούν επιβλαβείς ρύπους. Αυτά τα μικρόβια είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμα και μπορούν να ευδοκιμήσουν σε ποικίλα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένου του μολυσμένου αέρα, του νερού και του εδάφους. Στα υδάτινα συστήματα, βακτήρια όπως...Ψευδομονάδακαι σαν φύκια*Chlorella vulgaris*μπορούν να αποικοδομήσουν τις ενώσεις πετρελαίου, να απομακρύνουν τα βαρέα μέταλλα και να απορροφήσουν την περίσσεια θρεπτικών συστατικών, συμβάλλοντας στην αποκατάσταση της ποιότητας του νερού (UNEP, 2021). Κατά την αποκατάσταση του εδάφους, ορισμένα μικρόβια αποικοδομούν σύνθετους υδρογονάνθρακες, φυτοφάρμακα, ακόμη και βαρέα μέταλλα, ενώ μύκητες όπως*Φανεροχαίτης χρυσοσπόριος*διασπούν τους επίμονους οργανικούς ρύπους (FAO, 2021). Τα συστήματα καθαρισμού του αέρα, συμπεριλαμβανομένων των βιολογικών φίλτρων και των βιολογικών πλυντρίδων, χρησιμοποιούν μικροβιακές κοινότητες για την απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων και αμμωνίας από βιομηχανικά καυσάερια (EPA, 2023). Επιπλέον, οι εξελίξεις στη μικροβιακή βιοτεχνολογία έχουν επιτρέψει τη δημιουργία μικροβιακών στελεχών που στοχεύουν συγκεκριμένους ρύπους με βελτιωμένη απόδοση. Τα οικολογικά οφέλη του μικροβιακού καθαρισμού όχι μόνο μειώνουν την εξάρτηση από χημικές ή μηχανικές παρεμβάσεις, αλλά και προάγουν τη βιώσιμη περιβαλλοντική διαχείριση. Ως εκ τούτου, τα μικρόβια αναγνωρίζονται ολοένα και περισσότερο ως κρίσιμοι σύμμαχοι στην καταπολέμηση της ρύπανσης και στην επίτευξη μακροπρόθεσμης οικολογικής αποκατάστασης.

Μέθοδοι καθαρισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η ατμοσφαιρική ρύπανση μετριάζεται χρησιμοποιώντας μηχανική διήθηση, χημική εξουδετέρωση και, ολοένα και περισσότερο, βιολογικές μεθόδους. Τεχνολογίες όπως οι ηλεκτροστατικοί ιζηματοποιητές και οι πλυντρίδες απομακρύνουν σωματίδια και αέρια από τις βιομηχανικές εκπομπές, ενώ οι καταλυτικοί μετατροπείς μειώνουν τους ρύπους των οχημάτων. Τα συστήματα βιοδιήθησης, τα οποία χρησιμοποιούν μικροβιακές κοινότητες για τον μεταβολισμό των αερομεταφερόμενων τοξινών όπως οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και οι ενώσεις θείου, προσφέρουν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στις χημικές επεξεργασίες. Αυτά τα βιολογικά συστήματα είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην επεξεργασία οσμηρών εκπομπών από λύματα και εγκαταστάσεις κομποστοποίησης (Deshusses, 1997).





Μέθοδοι καθαρισμού της ρύπανσης των υδάτων

Ο καθαρισμός της ρύπανσης των υδάτων περιλαμβάνει διαδικασίες επεξεργασίας πολλαπλών σταδίων που συνδυάζουν φυσικό διαχωρισμό, χημική απολύμανση και βιολογική αποικοδόμηση. Η καθίζηση και η διήθηση με μεμβράνη απομακρύνουν τα στερεά, ενώ η οζονοποίηση και η πήξη εξαλείφουν τα παθογόνα και τα βαρέα μέταλλα. Οι βιολογικές επεξεργασίες, όπως η ενεργοποιημένη ιλύς και οι αντιδραστήρες βιοφίλμ, βασίζονται στη μικροβιακή δραστηριότητα για την πέψη της οργανικής ύλης και των θρεπτικών συστατικών. Τα μικροβιακά κυψέλες καυσίμου έχουν επίσης διερευνηθεί για την ταυτόχρονη επεξεργασία λυμάτων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζοντας καινοτόμες εφαρμογές διπλής χρήσης (Logan et al., 2006).

Μέθοδοι καθαρισμού της ρύπανσης του εδάφους

Η αποκατάσταση της ρύπανσης του εδάφους χρησιμοποιεί στρατηγικές όπως η εκσκαφή, η χημική ακινητοποίηση και οι βιολογικές διεργασίες. Οι τεχνικές βιοαποκατάστασης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές, χρησιμοποιώντας αυτόχθονα ή εισαγόμενα μικρόβια για την αποικοδόμηση υδρογονανθράκων πετρελαίου, διαλυτών και φυτοφαρμάκων. Η φυτοαποκατάσταση, ενισχυμένη από μικρόβια που σχετίζονται με τη ριζόσφαιρα, προσφέρει μια πράσινη λύση προωθώντας την πρόσληψη ή την αποικοδόμηση ρύπων μέσω αλληλεπιδράσεων φυτού-μικροβίου. Πρόσφατες μελέτες υπογραμμίζουν την επιτυχία μικροβιακών κοινοπραξιών στην αποικοδόμηση πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ) σε σύνθετα μολυσμένα εδάφη (Meckenstock et al., 2015).

Μέθοδοι Μετριασμού της Ηχορύπανσης

Η ηχορύπανση, σε αντίθεση με τους χημικούς ρύπους, δεν μπορεί να απομακρυνθεί, αλλά πρέπει να μετριαστεί μέσω σχεδιασμού και μηχανικής. Οι στρατηγικές περιλαμβάνουν ακουστικά φράγματα, ηχοαπορροφητικά δομικά υλικά και αστικά πράσινα προστατευτικά που μειώνουν τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος. Η βλάστηση και το έδαφος, τα οποία επωφελούνται από υγιείς μικροβιακές κοινότητες, παίζουν έναν παθητικό αλλά υποστηρικτικό ρόλο στη μείωση του θορύβου, μαλακώνοντας τις επιφάνειες και απορροφώντας την ηχητική ενέργεια. Μια μελέτη σχετικά με τον σχεδιασμό των αστικών δασών έδειξε ότι η ενσωμάτωση πυκνής βλάστησης μπορεί να μειώσει τον θόρυβο έως και 10 dB σε αστικά περιβάλλοντα (Fang & Ling, 2003).





Μέθοδοι Μείωσης Φωτορύπανσης

Η μείωση της φωτορύπανσης περιλαμβάνει έξυπνο σχεδιασμό φωτισμού και κοινοτικό σχεδιασμό για την ελαχιστοποίηση του περιττού τεχνητού φωτισμού. Τεχνικές όπως η χρήση φωτιστικών πλήρους αποκοπής, αισθητήρων κίνησης και θερμών χρωμάτων LED βοηθούν στον περιορισμό της λάμψης του ουρανού και της αντανάκλασης. Αν και η μικροβιακή δράση δεν μειώνει άμεσα τη φωτορύπανση, η ελαχιστοποίηση του τεχνητού φωτός ωφελεί τα νυκτερινά οικοσυστήματα που βασίζονται σε εδάφη πλούσια σε μικροβίου και φυσικούς κύκλους φωτός. Η έρευνα δείχνει ότι ο τεχνητός φωτισμός διαταράσσει τα νυκτερινά δίκτυα επικοινωνίας και τη μικροβιακή δραστηριότητα στους φλοιούς του εδάφους (Khop et al., 2017).

Μέθοδοι μετριασμού της θερμικής ρύπανσης

Η θερμική ρύπανση, ιδίως από βιομηχανικές απορρίψεις σε υδάτινα σώματα, αντιμετωπίζεται μέσω μηχανικών συστημάτων ψύξης, όπως λίμνες ψύξης και πύργοι. Τα αναδυόμενα φυσικά συστήματα, όπως οι τεχνητοί υγρότοποι, χρησιμοποιούν θερμικά ανθεκτικά μικρόβια όχι μόνο για να ρυθμίζουν τη θερμοκρασία αλλά και για να διασπούν τους ρύπους στα θερμαινόμενα λύματα. Μια μελέτη του Vymazal (2011) δίνει έμφαση στη χρήση τεχνητών υγροτόπων για τη συνδυασμένη απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και τη μείωση της θερμοκρασίας στην επεξεργασία λυμάτων.

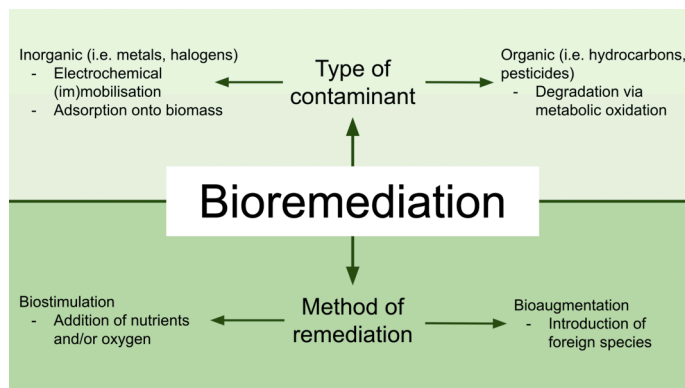
Table 1. Environmental Pollution Types and Associated Treatment Techniques

Τύπος ρύπανσης	Μέθοδος μικροβιακού καθαρισμού	Παράδειγμα Μικροβίων
Αέρας	Βιοδιήθηση, Βιοκαθαριστές	Ψευδομονάδα, Βάκιλλος, Ασπέργιλλος
Νερό	Ενεργοποιημένη λάσπη, Βιοενίσχυση, Φύκια	Νιτροσόμονας, <i>P. putida</i> , <i>Chlorella</i>
Εδαφος	Βιοαποκατάσταση, Μυοαποκατάσταση	<i>Phanerochaete</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Rhizobium</i>
Θόρυβος	Χωρίς άμεσο ρόλο	—
Φως	Χωρίς άμεσο ρόλο	—
Θερμικός	Έμμεσα (θερμόφιλα μικρόβια)	<i>Thermus aquaticus</i> , <i>B. stearothermophilus</i>
Ραδιενεργός	Πειραματικό (ραδιοανθεκτικά μικρόβια)	<i>Deinococcus radiodurans</i> , ραδιοτροφικοί μύκητες

Η αποκατάσταση της ραδιενεργού μόλυνσης περιλαμβάνει περιορισμό, υαλοποίηση και, ολοένα και περισσότερο, βιολογική σταθεροποίηση. Ορισμένα μικρόβια, όπως *Δεινόκοκκος ακτινοδουράνης* και αναγωγικό ουράνιο *Γεωβακτήριο* είδη, εμφανίζουν αντοχή στην ακτινοβολία και μπορούν να μεταβάλουν τη διαλυτότητα ή την κινητικότητα των ραδιονουκλιδίων. Αυτοί οι οργανισμοί μελετώνται για τον ρόλο τους στη μακροπρόθεσμη βιοαποκατάσταση σε χώρους πυρηνικών αποβλήτων. Πρόσφατη έρευνα των Fredrickson et al. (2004) έδειξε πολλά υποσχόμενη μικροβιακή μείωση του ουρανού υπό αναερόβιες συνθήκες, περιορίζοντας την κινητικότητά του στα υπόγεια ύδατα.



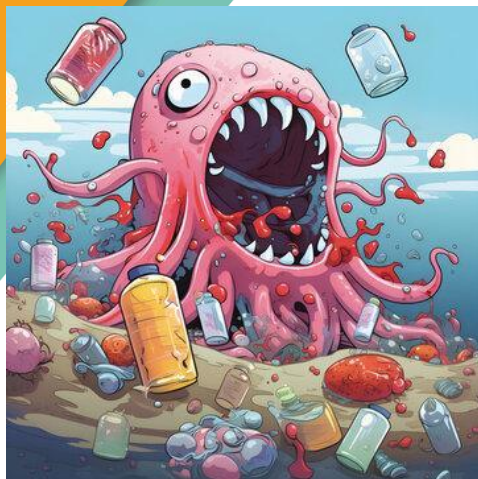
Εισαγωγή στη Βιολογική Αποκατάσταση



Η βιοαποκατάσταση είναι μια βιώσιμη και βιολογικά καθοδηγούμενη προσέγγιση που χρησιμοποιεί ζωντανούς μικροοργανισμούς, κυρίως βακτήρια, μύκητες, φύκια και αρχαία, για την αποικοδόμηση, την αποτοξίνωση ή τον μετασχηματισμό των περιβαλλοντικών ρύπων σε λιγότερο επιβλαβείς μορφές. Ενώ παραδοσιακά συνδέεται με τη ρύπανση του εδάφους, η βιοαποκατάσταση έχει αποδειχθεί αποτελεσματική σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών πλαισίων, συμπεριλαμβανομένων των μολυσμένων υδάτων, του μολυσμένου αέρα, ακόμη και των χώρων ραδιενεργών αποβλήτων. Στα συστήματα ύδρευσης, για παράδειγμα, βακτήρια που αποικοδομούν το πετρέλαιο και φύκια που καταναλώνουν θρεπτικά συστατικά χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό πετρελαιοκηλίδων και ευτροφικών λιμνών. Στον καθαρισμό του αέρα, τα βιοφίλτρα χρησιμοποιούν μικροβιακά βιοφίλμ για τη δέσμευση και τη βιοαποικοδόμηση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) και θειούχων αερίων από βιομηχανικά καυσαέρια. Επιπλέον, η ραδιενεργός βιοαποκατάσταση αποτελεί ένα αναδυόμενο μέτωπο, με ακραιόφιλα μικρόβια όπως *Γεωβακτήριο* και *Δεινόκοκκος ακτινοδουράνης* μελετώνται για την ικανότητά τους να ακινητοποιούν ή να μετασχηματίζουν ραδιενεργά στοιχεία. Η αυξανόμενη εφαρμογή μικροβιακών κοινοπραξιών και γενετικά τροποποιημένων στελεχών έχει επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητες της βιοαποκατάστασης για σύνθετους και ανθεκτικούς ρύπους. Σύμφωνα με τους Singh και Strong (2022), η ενσωμάτωση τεχνολογιών omics και βιοπληροφορικών εργαλείων έχει βελτιώσει σημαντικά την εξειδίκευση, την ταχύτητα και την επεκτασιμότητα των μικροβιακών παρεμβάσεων στον περιβαλλοντικό καθαρισμό. Καθώς οι παγκόσμιες προκλήσεις της ρύπανσης εντείνονται, η βιοαποκατάσταση προσφέρει μια οικονομική, χαμηλής ενέργειας και οικολογικά αποκαταστατική εναλλακτική λύση σε σχέση με τις συμβατικές χημικές και μηχανικές μεθόδους αποκατάστασης.



Πώς τα μικρόβια «τρώνε» ή διασπούν τους ρύπους



Οι μικροοργανισμοί είναι ικανοί να διασπούν τους ρύπους μέσω μεταβολικών διεργασιών στις οποίες οι ρύποι χρησιμεύουν ως πηγές ενέργειας, άνθρακα ή θρεπτικών συστατικών. Αυτή η βιολογική αποικοδόμηση συμβαίνει όταν τα μικρόβια εκκρίνουν ένζυμα που αλλοιώνουν χημικά τις τοξικές ουσίες,

μετατρέποντάς τις σε απλούστερες, λιγότερο επιβλαβείς ενώσεις. Για παράδειγμα, βακτήρια που αποικοδομούν υδρογονάνθρακες, όπως...*Ψευδομονάδα*, *Αλκανιβόραζ* και *Μυκοβακτήριο* μπορούν να μεταβολίσουν συστατικά λαδιού οξειδώνοντάς τα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό κατά την αερόβια αναπνοή. Σε αναερόβιες συνθήκες, ορισμένα βακτήρια μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν ρύπους ως εναλλακτικούς δέκτες ηλεκτρονίων, επιτρέποντάς τους να αποικοδομήσουν ενώσεις όπως νιτρικά, χλωριωμένους διαλύτες ή βαρέα μέταλλα.

Μύκητες όπως *Φανεροχαΐτης χρυσοσπόριος* είναι ικανά να αποικοδομούν επίμονους οργανικούς ρύπους, όπως τα φυτοφάρμακα και τις χρωστικές ουσίες, παράγοντας λιγνινολυτικά ένζυμα που διασπούν σύνθετα μόρια σε μικρότερα θραύσματα. Ορισμένα μικρόβια μετατρέπουν ακόμη και τα βαρέα μέταλλα σε αδιάλυτες μορφές μέσω αντιδράσεων οξειδοαναγωγής, ακινητοποιώντας τα στο έδαφος ή τα ιζήματα. Περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως το pH, η θερμοκρασία, η διαθεσιμότητα οξυγόνου και η παρουσία συν-υποστρωμάτων, επηρεάζουν αυτές τις διεργασίες. Σύμφωνα με πρόσφατα ευρήματα των Ghosal et al. (2016), οι μικροβιακές κοινότητες συχνά λειτουργούν πιο αποτελεσματικά ως κοινοπραξίες, όπου διαφορετικά είδη συνεργάζονται για να αποικοδομήσουν σύνθετα μείγματα ρύπων πιο αποτελεσματικά από ό,τι μεμονωμένα στελέχη. Αυτοί οι βιολογικοί μηχανισμοί είναι κεντρικοί τόσο στα φυσικά όσο και στα μηχανικά συστήματα βιοαποκατάστασης, καθιστώντας τα μικρόβια απαραίτητα μέσα στη βιώσιμη αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής μόλυνσης.

Παραδείγματα Μικροβιακής Βιολογικής Αποκατάστασης

Ψευδομονάδα και αποικοδόμηση λαδιού

Είδη του γένους *Ψευδομονάδα*, ιδιαίτερα *Pseudomonas aeruginosa*, είναι γνωστά για την ικανότητά τους να αποικοδομούν τους υδρογονάνθρακες που βρίσκονται στο αργό πετρέλαιο. Αυτά τα βακτήρια παράγουν βιοεπιφανειοδραστικές ουσίες που γαλακτωματοποιούν το πετρέλαιο, αυξάνοντας τη βιοδιαθεσιμότητά του για μικροβιακή αποικοδόμηση. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η συγκαλλιέργεια *P. aeruginosa* με *Bacillus subtilis* βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της αποικοδόμησης του αργού πετρελαίου, επιτυγχάνοντας έως και 63,05% απομάκρυνση των συστατικών του πετρελαίου. pmc.ncbi.nlm.nih.gov/frontiersin.org





Ideonella sakaiensis και οι ικανότητες κατανάλωσης πλαστικού

Ιδεονέλα σακάιενσις είναι ένα βακτήριο ικανό να αποικοδομεί το τереφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), ένα κοινό πλαστικό που χρησιμοποιείται σε φιάλες και συσκευασίες. Εκκρίνει ένα ένζυμο που ονομάζεται PETase, το οποίο διασπά το PET στα μονομερή του, τереφθαλικό οξύ και αιθυλενογλυκόλη, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιεί το βακτήριο για ανάπτυξη. Πρόσφατη έρευνα έχει επικεντρωθεί στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της PETase μέσω της γενετικής μηχανικής για τη βελτίωση των ρυθμών αποικοδόμησης του πλαστικού.
el.wikipedia.org

Είδη Γεωβακτηρίων και Καθαρισμός Μετάλλων

Μέλη του γένους *Γεωβακτήριο*, όπως π.χ. *Geobacter metallireducens*, είναι γνωστά για την ικανότητά τους να μειώνουν και να ακινητοποιούν βαρέα μέταλλα, συμπεριλαμβανομένου του ουρανίου και του χρωμίου, σε μολυσμένα περιβάλλοντα. Αυτά τα βακτήρια μεταφέρουν ηλεκτρόνια σε μεταλλικά ιόντα κατά τη διάρκεια των μεταβολικών τους διεργασιών, μετατρέποντας τα διαλυτά τοξικά μέταλλα σε αδιάλυτες μορφές που καθιζάνουν από το διάλυμα, μειώνοντας έτσι την κινητικότητα και τη βιοδιαθεσιμότητά τους.

Διάφορες Τεχνικές Βιολογικής Αποκατάστασης

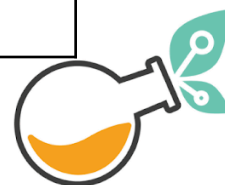
Υπάρχουν πολλοί τρόποι χρήσης της βιοεξυγίανσης, ο καθένας για διαφορετικούς ρύπους και τοποθεσίες:

- Φυτοαποκατάσταση – Τα φυτά βοηθούν στον καθαρισμό του εδάφους, του νερού και του αέρα από ρύπους.
- Μικροβιακή Αποκατάσταση – Τα μικρόβια εργάζονται για να διασπάσουν και να μετατρέψουν τους ρύπους σε ασφαλέστερες ουσίες.
- Mycoremediation – Οι μύκητες χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό πολλών ειδών ρύπων.
- Βιοχειρισμός – Τα ζώα, όπως τα ψάρια, βοηθούν στον καθαρισμό του μολυσμένου νερού.

Αυτές οι μέθοδοι προσφέρουν πολλούς τρόπους για την επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Δείχνουν πώς η φύση μπορεί να μας βοηθήσει να καθαρίσουμε (<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>).

Table 2. Bioremediation Techniques

Τεχνική βιοαποκατάστασης	Περιγραφή	Παραδείγματα
Φυτοαποκατάσταση	Τα φυτά βοηθούν στον καθαρισμό του εδάφους, του νερού και του αέρα από ρύπους.	Ριζοδιήθηση, Φυτοεκχύλιση, Φυτοδιέγερση, Φυτοσταθεροποίηση
Μικροβιακή Αποκατάσταση	Τα μικρόβια διασπώνται και μετατρέπουν τους ρύπους σε ασφαλέστερα υλικά.	Βιοδιέγερση, Βιοενίσχυση, Εγγενής Βιοαποκατάσταση
Μυκοδιαμεσολάβηση	Οι μύκητες χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό ρύπων όπως βαρέα μέταλλα και πετρέλαιο.	Μυκητιακή αποικοδόμηση βαρέων μετάλλων, υδρογονανθράκων και οργανικών ενώσεων

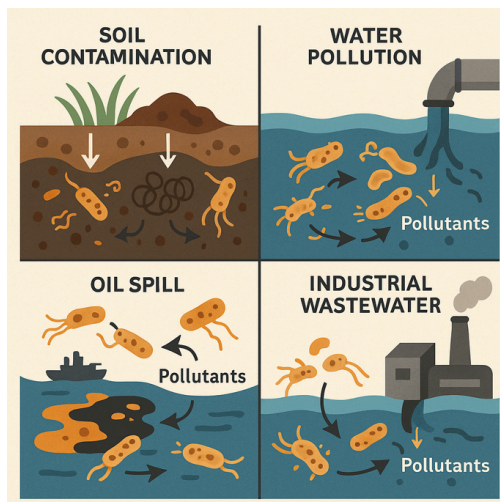


Βιοχειραγώγηση	Τα ζώα, όπως τα ψάρια, βοηθούν στον καθαρισμό του μολυσμένου νερού.	Χρήση ψαριών για τον έλεγχο της ανθοφορίας των φυκιών και τη βελτίωση της ποιότητας του νερού
----------------	---	---

Μικροβιακή Αποκατάσταση

Τα μικρόβια είναι μικροσκοπικοί οργανισμοί που ταξινομούνται σε δύο σημαντικούς τομείς της ζωής: τα Αρχαία και τα Ευβακτήρια. Περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα μορφών ζωής, συμπεριλαμβανομένων των πρωτογενών παραγωγών που μετατρέπουν το φως ή τις χημικές ενώσεις σε ενέργεια, καθώς και των ετερότροφων και των αποικοδομητών που βασίζονται σε εξωτερικές πηγές για την επιβίωσή τους. Πανταχού παρόντα στη φύση τους, τα μικρόβια βρίσκονται σχεδόν σε κάθε περιβάλλον στη Γη.

Αυτοί οι μικροσκοπικοί οργανισμοί παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη ζωή. Βοηθούν στον καθαρισμό των ρύπων, εμπλουτίζουν τη γονιμότητα του εδάφους, συμβάλλουν στην πρόοδο της τεχνολογίας τροφίμων και συνθέτουν απαραίτητα θρεπτικά συστατικά που υποστηρίζουν την υγεία μας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, συνυπάρχουμε με μικρόβια χωρίς να γνωρίζουμε την παρουσία τους. Ενώ πολλά μικρόβια παρέχουν προστατευτικές λειτουργίες, όπως η θωράκισή μας από επιβλαβή παθογόνα, άλλα μπορεί να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις. Μπορεί να προκαλέσουν επιδημίες, να αλλοιώσουν τρόφιμα ή να συμβάλουν στην αποσύνθεση και τη φθορά των υλικών (Postgate, 2003). Στρατηγικές και τεχνολογίες μικροβιακής αποκατάστασης



Η μικροβιακή αποκατάσταση είναι ένας τύπος μεθόδου αποκατάστασης που χρησιμοποιεί τις φυσικές λειτουργίες των μικροβίων στο έδαφος για να καταστήσει τους ρύπους μη τοξικούς και συνήθως περιλαμβάνει βιοενίσχυση και βιοδιέγερση. Λόγω της μικρής τους ποσότητας και της χαμηλής ικανότητας αποικοδόμησης, τα αυτόχθονα μικρόβια περιορίζονται συνεχώς από την τοξικότητα των ρύπων σε ένα συν-μολυσμένο περιβάλλον. Η βιοενίσχυση περιλαμβάνει τον συνδυασμό υποχρεωτικά αποικοδομητικών βακτηρίων με στελέχη που μπορούν να αντέξουν σε πολλά βαρέα μέταλλα (HMs) για την εξάλειψη των ρύπων-στόχων

(Εικ. 3). Η βιοδιέγερση βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους εισάγοντας αυξητικές ορμόνες και θρεπτικά συστατικά για την προώθηση της ανάπτυξης της τοπικής μικροχλωρίδας. Ωστόσο, διάφορες μικροβιακές τεχνολογίες για την αποκατάσταση συζητούνται παρακάτω.



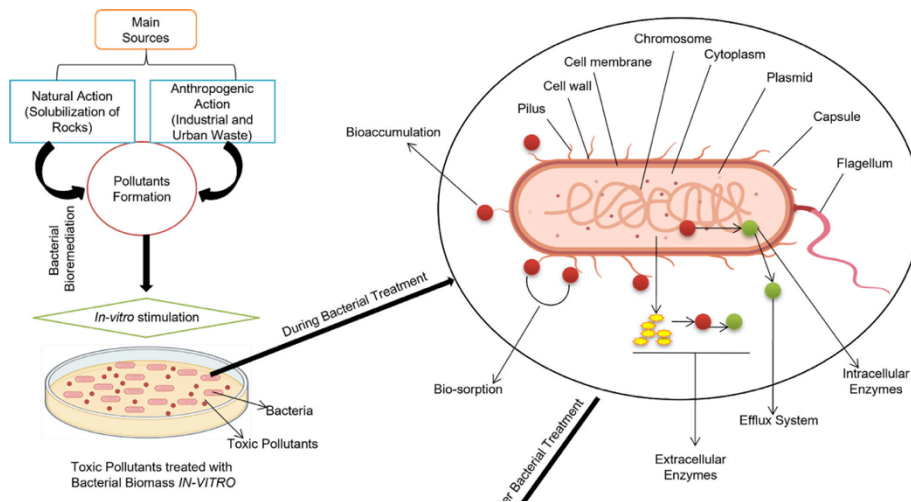
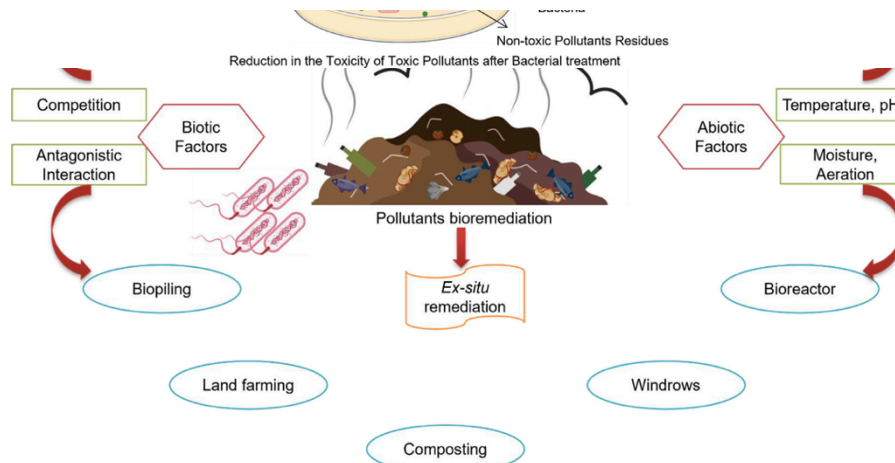


Figure 3-In vitro mechanisms of bacterial bioremediation in the polluted environment, source: Sharma et al., 2022



- Τεχνικές in situ για βιοαποκατάσταση

Αυτή η αποκατάσταση εξαλείφει την ανάγκη εξαγωγής και μεταφοράς του μολυσμένου εδάφους σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας εκτός των εγκαταστάσεων, μειώνοντας έτσι τη διατάραξη του εδάφους, ελαχιστοποιώντας την έκθεση σε τοξίνες για τους βοηθούς και την κοινότητα και ενδεχομένως μειώνοντας το κόστος επεξεργασίας. Η διαπερατότητα του εδάφους, το βάθος της ρύπανσης, η θερμοκρασία και η πιθανή χημική βαθιά έκπλυση είναι όλα σημαντικά χαρακτηριστικά του πεδίου που πρέπει να ληφθούν υπόψη (Fasani et al., 2018). Ο επιτόπιος καθαρισμός των ρύπων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.





Figure 4. Microbial bioremediation for the restoration of the contaminated sites via *in-situ* and *ex-situ* remediation, source: Sharma et al., 2022

Τα μικρόβια δεν αποικοδομούν σημαντικούς ρύπους, αλλά αντίθετα επηρεάζουν τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά (Sharma et al., 2021f; Sharma et al., 2021g). Το συστατικό της αποκατάστασης περιλαμβάνει ενδοκυτταρική συσσώρευση, περαιτέρω σχηματισμό κυτταρικών συμπλεγμάτων και υπολογισμούς οξειδωσης-αναγωγής ή καθίζησης. Τα επικίνδυνα βαρέα μέταλλα είναι ευρέως παρόντα σε βιομηχανικές διεργασίες και αποτελούν σημαντικούς περιβαλλοντικούς ρύπους. Η μοριακή διήθηση για την εξαγωγή μετάλλων από υλικά χαμηλής ποιότητας ήταν απλή και επιτυχημένη (Dhaliwal et al., 2020). Τα *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Torulopsis bombicola*, *Desulfuromonas palmitatis* και άλλοι μικροοργανισμοί μπορούν να αποτοξινώσουν μηχανικά απόβλητα, ιλύ λυμάτων και να αποκαταστήσουν υπολείμματα και εδάφη μολυσμένα με βαρέα μέταλλα (HMs) (Priya and Nagan, 2015). Η μικροβιακή βιομάζα έχει ποικίλες δυνατότητες βιοπροσρόφησης και εμφανίζονται θεμελιώδεις αλλοιώσεις μεταξύ των ειδών. Η εξαιρετική ικανότητα βιοπροσρόφησης τους αποδίδεται σε υψηλότερους λόγους όγκου προς επιφάνεια και στις πιθανές θέσεις σύνθετης χημικής προσρόφησης, κυρίως σε κυτταρικές μεμβράνες (Li et al., 2019). Οι μικροοργανισμοί είναι συχνά πιο ανθεκτικοί και διαρκούν περισσότερο σε μικτές καλλιέργειες. Συνεπώς, οι κοινοπραξίες καλλιιεργειών είναι μεταβολικά κυρίαρχες για τη βιορρόφηση μετάλλων και επομένως είναι κατάλληλες για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, επειδή η ικανότητα βιορρόφησης κάθε κυττάρου μικροοργανισμού ποικίλλει, εξαρτάται από τις συγκεκριμένες συνθήκες επεξεργασίας και δοκιμής (Dhaliwal et al., 2020).

Φυσική εξασθένηση

Οι ρύποι μετατρέπονται σε λιγότερο επικίνδυνη μορφή ή ακινητοποιούνται κατά τη διάρκεια της βιοαποικοδόμησης (φυσική εξασθένηση). Αυτοί οι μηχανισμοί μετασχηματισμού και ακινητοποίησης προκαλούνται κυρίως από τη βιοαποικοδόμηση μικροοργανισμών και, σε μικρότερο βαθμό, από αλληλεπιδράσεις με φυσικώς απαντώμενα χημικά και γεωλογικά μέσα



προσρόφησης. Αυτός ο μηχανισμός είναι ειδικός για τον ρύπο και έχει εγκριθεί ως προσέγγιση για την επεξεργασία συστατικών καυσίμων, όπως το BTEX (βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο και ξυλόλιο), αλλά όχι για πολλές άλλες κατηγορίες (Ganiyu et al., 2022). Η περίοδος που απαιτείται για τη φυσική εξασθένηση ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες του χώρου. Πολλές μολυσμένες τοποθεσίες μπορεί να μην απαιτούν εκτεταμένη στρατηγική καθαρισμού και η βιοεξασθένηση είναι οικονομικά αποδοτική και αποτελεσματική. Στην πραγματικότητα, οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν εφαρμόσει με επιτυχία μια σειρά προσεγγίσεων βιοαποκατάστασης σε τιμές που είναι περίπου 80-90% φθηνότερες από τις εναλλακτικές τεχνολογίες καθαρισμού που βασίζονται σε χημικές και φυσικές αρχές. Οι δαπάνες μετά τον καθαρισμό μειώνονται σημαντικά με ελάχιστη διακοπή του χώρου. Οι βιομηχανικές και περιβαλλοντικές βιοτεχνολογίες ευνοούν επίσης τις νέες προσεγγίσεις, οδηγώντας σε διαδικασίες που χρησιμοποιούν καθαρές τεχνολογίες για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής, παράγοντας παράλληλα λιγότερα υπολείμματα (Rhea and Clark, 2022). Επειδή η πλειονότητα των εδαφών είναι ολιγοτροφικά ή δεν διαθέτουν τα απαραίτητα μικρόβια, η βιοεξασθένηση από μόνη της καθίσταται ανεπαρκής και χρονοβόρα σε πολλές περιπτώσεις.

Αυτές οι τεχνικές γενετικής και μεταβολικής μηχανικής μπορούν να βοηθήσουν στη διαδικασία βιοαποκατάστασης (Liang et al., 2020). Για την επεξεργασία του γονιδίου καθώς και για τη μεταβολική μηχανική, τα βακτήρια που κατοικούν σε ρύπους αποτελούν έναν σημαντικό ιδανικό υποψήφιο, καθώς χρησιμοποιούνται για να επιβιώσουν και να βρουν καταφύγιο σε αγχωτικές συνθήκες ποικίλων τοξικών, ανθεκτικών και μη αποικοδομήσιμων ξενοβιοτικών. Επιπλέον, η κατανόηση της μεταβολικής οδού φαίνεται να είναι κρίσιμη στην ανάλυση της μικροβιακής βιοαποκατάστασης (Plewniak et al., 2018). Το Σχήμα 5 απεικονίζει τον ρόλο της μεταβολικής ανακατασκευής στη συνθετική βιοαποκατάσταση, χρησιμοποιώντας τόσο in situ όσο και ex-situ οδούς για την επεξεργασία επικίνδυνων ρύπων.

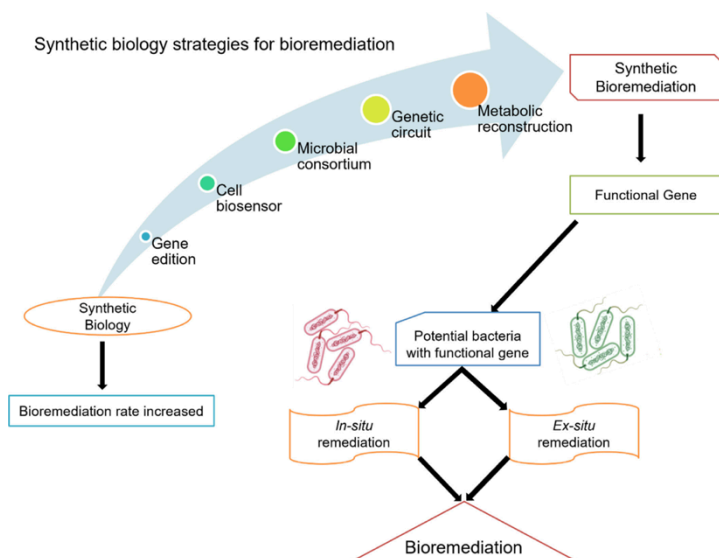


Figure 5. Role of metabolic reconstruction in synthetic bioremediation via in-situ and ex-situ routes to bioremediation of hazardous pollutants.

Μελέτες Περιπτώσεων





Πετρελαιοκηλίδα Deepwater Horizon (2010, Κόλπος του Μεξικού)

Η καταστροφή του Deepwater Horizon απελευθέρωσε περίπου 134 εκατομμύρια γαλόνια αργού πετρελαίου στον Κόλπο του Μεξικού, σηματοδοτώντας μια από τις σημαντικότερες θαλάσσιες πετρελαιοκηλίδες στην ιστορία. Μετά την καταστροφή, τα αυτόχθονα θαλάσσια βακτήρια, ιδίως τα είδη *Alcanivorax* και *Cycloclasticus*, πολλαπλασιάστηκαν και έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην αποικοδόμηση των υδρογονανθράκων. Αυτά τα μικρόβια χρησιμοποίησαν το πετρέλαιο ως πηγή άνθρακα, μειώνοντας αποτελεσματικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαρροής. Η έρευνα που χρηματοδοτήθηκε από την Πρωτοβουλία Έρευνας του Κόλπου του Μεξικού (GoMRI) παρείχε πληροφορίες για τη μικροβιακή γονιδιωματική και τις αποκρίσεις βιοαποκατάστασης υδρογονανθράκων στα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Ρύπανση από πλαστικά στους ωκεανούς

Τα πλαστικά απόβλητα, και ιδιαίτερα τα μικροπλαστικά, έχουν γίνει διάχυτα στο θαλάσσιο περιβάλλον, θέτοντας σε κίνδυνο τη θαλάσσια ζωή και την ανθρώπινη υγεία. Διερευνώνται καινοτόμες προσεγγίσεις βιοαποκατάστασης για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος:

Πρωτοβουλίες με επικεφαλής την κοινότητα: Στην Κεράλα της Ινδίας, η αλιευτική κοινότητα του Munambam ξεκίνησε το έργο Drive to Recover Ocean Plastic (DROP). Πάνω από 600 αλιευτικά σκάφη συμμετέχουν συλλέγοντας πλαστικά απόβλητα κατά τη διάρκεια των ταξιδιών τους, με αποτέλεσμα την ανάκτηση 22.000 κιλών πλαστικού μόνο το 2024-25. timesofindia.indiatimes.com

Μικροβιακές Λύσεις: Έρευνες έχουν εντοπίσει μύκητες που αποικοδομούν το πλαστικό, ικανούς να διασπούν συνθετικά πολυμερή όπως η πολυουρεθάνη. Αυτοί οι μύκητες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, όπως μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, για τον μετριασμό της ρύπανσης από πλαστικά. reuters.com+bassconnections.duke.edu+1

Μόλυνση από βαρέα μέταλλα σε εγκαταστάσεις εξόρυξης

Οι εξορυκτικές δραστηριότητες συχνά οδηγούν σε μόλυνση από βαρέα μέταλλα στα γύρω εδάφη και υδάτινα σώματα. Οι στρατηγικές βιοαποκατάστασης που χρησιμοποιούν μικρόβια έχουν δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα στον μετριασμό αυτών των ρύπων:

Ορυχείο μολύβδου-ψευδαργύρου στο όρος Qixia, Κίνα: Μελέτες αποκάλυψαν σοβαρή ρύπανση από βαρέα μέταλλα στα εδάφη γύρω από το ορυχείο. Μικροβιακές κοινότητες, συμπεριλαμβανομένων των ειδών *Sphingomonas* και *Pseudomonas*, επέδειξαν αντοχή στα βαρέα μέταλλα και συνέβαλαν στις προσπάθειες αποκατάστασης του εδάφους. pubs.rsc.org

Τοποθεσία Tar Creek Superfund, ΗΠΑ: Ένα καινοτόμο σύστημα βιοεξυγίανσης εφαρμόστηκε για την επεξεργασία υπόγειων υδάτων μολυσμένων με μολύβδο, ψευδάργυρο, κάδμιο και σίδηρο από εγκαταλελειμμένα ορυχεία. Το σύστημα χρησιμοποιεί μια σειρά από λίμνες με αερόβιες και αναερόβιες βακτηριακές επεξεργασίες, μειώνοντας σημαντικά τις συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο νερό.

Βιοτεχνολογία και το μέλλον

Ενίσχυση των μικροβίων για τον καθαρισμό του περιβάλλοντος

Οι εξελίξεις στη βιοτεχνολογία έχουν επιτρέψει στους επιστήμονες να τροποποιούν γενετικά μικροοργανισμούς, ώστε να βελτιώνουν την ικανότητά τους να αποικοδομούν τους περιβαλλοντικούς ρύπους. Τεχνικές όπως το CRISPR-Cas9 επιτρέπουν ακριβείς τροποποιήσεις στα μικροβιακά γονιδιώματα, ενισχύοντας τις μεταβολικές τους οδούς για την αποικοδόμηση σύνθετων ρύπων. Για παράδειγμα, τα *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis* και *Escherichia coli* έχουν τροποποιηθεί ώστε να υπερεκφράζουν ένζυμα όπως το κυτόχρωμα P450 και οι διοξυγενάσες, με αποτέλεσμα την επιταχυνόμενη αποικοδόμηση οργανικών ρύπων. mdpi.comresearchgate.net

Επιπλέον, εργαλεία όπως το XenoBug, που αναπτύχθηκαν από ερευνητές στο IISER Bhopal, χρησιμοποιούν μηχανική μάθηση για να προβλέψουν βακτηριακά ένζυμα ικανά να διασπάσουν





διάφορους ρύπους, βελτιστοποιώντας την αναγνώριση αποτελεσματικών μικροβιακών στελεχών για προσπάθειες βιοαποκατάστασης. timesofindia.indiatimes.com

Ηθικές και Οικολογικές Σκέψεις

Ενώ τα γενετικά τροποποιημένα μικρόβια προσφέρουν πολλά υποσχόμενες λύσεις για την αποκατάσταση της ρύπανσης, η ανάπτυξή τους εγείρει αρκετές ηθικές και οικολογικές ανησυχίες:

- Οικολογικός αντίκτυπος: Η απελευθέρωση τροποποιημένων οργανισμών στο περιβάλλον θα μπορούσε να διαταράξει τα υπάρχοντα οικοσυστήματα, οδηγώντας ενδεχομένως σε ακούσιες συνέπειες, όπως η εκτόπιση των ιθαγενών μικροβιακών κοινοτήτων ή η οριζόντια μεταφορά γονιδίων σε μη στοχευόμενα είδη. pollution.sustainability-directory.com
- Προκλήσεις στον Βιολογικό Περιορισμό: Η διασφάλιση ότι τα γενετικά τροποποιημένα μικρόβια δεν επιμένουν πέρα από τις προβλεπόμενες περιοχές εφαρμογής τους είναι ζωτικής σημασίας. Οι στρατηγικές για τον εγγενή βιοπεριορισμό βρίσκονται ακόμη υπό ανάπτυξη και η αποτελεσματικότητά τους σε πραγματικές συνθήκες παραμένει αβέβαιη. nature.com
- Ισότητα και Πρόσβαση: Τα οφέλη των τεχνολογιών βιοαποκατάστασης πρέπει να είναι προσβάσιμα σε όλες τις κοινότητες, ειδικά σε εκείνες που επηρεάζονται δυσανάλογα από τη ρύπανση. Υπάρχει κίνδυνος οι ιδιόκτητες τεχνολογίες να περιορίσουν την πρόσβαση για τις μειονεκτούσες περιοχές, επιδεινώνοντας τις περιβαλλοντικές αδικίες. pollution.sustainability-directory.com
- Ορισμός Στόχων Αποκατάστασης: Ο προσδιορισμός του τι συνιστά «καθαρό» ή «αποκατεστημένο» περιβάλλον είναι υποκειμενικός και μπορεί να διαφέρει μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών. Είναι απαραίτητο να εμπλακούν οι κοινότητες στον καθορισμό στόχων αποκατάστασης, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι προσπάθειες βιοαποκατάστασης ευθυγραμμίζονται με τις τοπικές αξίες και ανάγκες. pollution.sustainability-directory.com

Μελλοντικές δυνατότητες στις πράσινες τεχνολογίες

Η ενσωμάτωση της βιοτεχνολογίας στην περιβαλλοντική αποκατάσταση προσφέρει σημαντικές προοπτικές για την ανάπτυξη βιώσιμων και αποτελεσματικών στρατηγικών καθαρισμού:

- Συνθετική Βιολογία και Κατευθυνόμενη Εξέλιξη: Αξιοποιώντας τη συνθετική βιολογία και την κατευθυνόμενη εξέλιξη, οι επιστήμονες μπορούν να σχεδιάσουν μικρόβια με βελτιωμένες δυνατότητες αποικοδόμησης ρύπων, προσφέροντας εξατομικευμένες λύσεις για συγκεκριμένα σενάρια μόλυνσης.
- Νανοβιοαποκατάσταση: Ο συνδυασμός της νανοτεχνολογίας με τη μικροβιακή αποκατάσταση μπορεί να βελτιώσει την παροχή και την αποτελεσματικότητα των παραγόντων βιοαποκατάστασης, επιτρέποντας την ακριβέστερη στόχευση των ρύπων. prism.sustainability-directory.com
- Μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (MFC): Οι MFC χρησιμοποιούν τις μεταβολικές δραστηριότητες των μικροβίων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα αποικοδομούν τους οργανικούς ρύπους, παρουσιάζοντας ένα διπλό όφελος, τόσο στην παραγωγή ενέργειας όσο και στον καθαρισμό του περιβάλλοντος. el.wikipedia.org
- Δέσμευση Άνθρακα με Μικροβιακή Ηλεκτρόλυση (MECC): Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί μικρόβια για τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια των διεργασιών επεξεργασίας λυμάτων, μετατρέποντάς το σε σταθερές ορυκτές μορφές και συμβάλλοντας στις προσπάθειες δέσμευσης άνθρακα. el.wikipedia.org

Καθώς αυτές οι τεχνολογίες προχωρούν, η διεπιστημονική συνεργασία μεταξύ μικροβιολόγων, περιβαλλοντικών επιστημόνων, ηθικολόγων και υπευθύνων χάραξης πολιτικής θα είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι οι βιοτεχνολογικές λύσεις για τη ρύπανση είναι αποτελεσματικές, ηθικές και δίκαιες. Επαυξημένη Πραγματικότητα σε Δράση: Εξερευνώντας τον Μικροβιακό Καθαρισμό





Φανταστείτε να μπορείτε να οπτικοποιήσετε μικροσκοπικά μικρόβια, να παρατηρήσετε πώς αλληλεπιδρούν με τους ρύπους και να τα παρακολουθήσετε εν δράσει καθώς καθαρίζουν πετρελαιοκηλίδες ή πλαστικά απόβλητα, όλα στο άμεσο περιβάλλον σας. Αυτή η καθηλωτική εμπειρία καθίσταται δυνατή μέσω της Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR), μιας τεχνολογίας που επιβάλλει ψηφιακό περιεχόμενο στον πραγματικό κόσμο μέσω συσκευών όπως smartphone, tablet ή γυαλιά AR.

Πρόσφατες μελέτες έχουν επισημάνει την αποτελεσματικότητα της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) στην ενίσχυση της εκπαίδευσης στις θετικές επιστήμες. Έρευνα του Agici (2024) κατέδειξε ότι η τεχνολογία επαυξημένης πραγματικότητας (AR) υποστηρίζει την περιβαλλοντική ευαισθησία και τη θετική συμπεριφορά, καθιστώντας την ένα πολύτιμο εργαλείο στην εκπαίδευση στις θετικές επιστήμες.

Στον τομέα της μικροβιολογίας, η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη διευκόλυνση της εκμάθησης περίπλοκων διεργασιών. Μια μελέτη των Herlina et al. (2024) ανέπτυξε έναν οδηγό πρακτικής άσκησης μικροβιολογίας βασισμένο στην Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR), ο οποίος βελτίωσε σημαντικά την κατανόηση και την εμπλοκή των μαθητών, επιτρέποντάς τους να αλληλεπιδρούν με τρισδιάστατα μοντέλα ιών και άλλων μικροοργανισμών.

Σε αυτήν την ενότητα, όχι μόνο θα μάθετε για τις αξιοσημείωτες δυνατότητες των μικροβίων στον καθαρισμό του περιβάλλοντος, αλλά θα αλληλεπιδράσετε και μαζί τους μέσω εμπειριών επαυξημένης πραγματικότητας (AR). Αυτές οι δραστηριότητες έχουν σχεδιαστεί για να κάνουν απτές αφηρημένες επιστημονικές έννοιες, να ενισχύσουν την κατανόησή σας για τις μικροβιακές διεργασίες και να εμπνεύσουν καινοτόμο σκέψη σχετικά με βιώσιμες λύσεις για τη ρύπανση.

Η «Επαυξημένη Πραγματικότητα στην Πράξη: Εξερευνώντας τον Μικροβιακό Καθαρισμό» είναι μια εκπαιδευτική έννοια που ενσωματώνει τις αναδιδόμενες τεχνολογίες με την περιβαλλοντική επιστήμη για να καταστήσει τις αόρατες διαδικασίες της μικροβιακής βιοαποκατάστασης ορατές και διαδραστικές. Ο μικροβιακός καθαρισμός, γνωστός και ως βιοαποκατάσταση, αναφέρεται στη χρήση μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, μύκητες και φύκια, για την αποικοδόμηση ή τον μετασχηματισμό επικίνδυνων ρύπων σε λιγότερο επιβλαβείς μορφές. Αυτή η διαδικασία παίζει κρίσιμο ρόλο στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προκλήσεων όπως οι πετρελαιοκηλίδες, η μόλυνση από βαρέα μέταλλα και η πλαστική ρύπανση. Για παράδειγμα, τα είδη *Pseudomonas* και *Bacillus* χρησιμοποιούνται συνήθως για την αποικοδόμηση υδρογονανθράκων, ενώ το *Deinococcus radiodurans* έχει δείξει αξιοσημείωτες δυνατότητες στον καθαρισμό ραδιενεργών αποβλήτων (Gadd, 2010; Varjani, 2017). Η ενσωμάτωση της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) σε αυτό το πλαίσιο παρέχει ένα νέο παιδαγωγικό εργαλείο για την οπτικοποίηση σύνθετων βιολογικών αλληλεπιδράσεων που διαφορετικά θα ήταν ανεπαίσθητες με γυμνό μάτι. Η AR μπορεί να προσομοιώσει μολυσμένα περιβάλλοντα, να εμφανίσει μικροβιακή δραστηριότητα σε πραγματικό χρόνο και να επιτρέψει στους μαθητές να αλληλεπιδρούν με διαφορετικές στρατηγικές βιοαποκατάστασης, ενισχύοντας τόσο την κατανόηση όσο και την εμπλοκή. Έρευνα από Οι Bacca et al. (2014) και Dunleavy et al. (2009) καταδεικνύουν ότι η Επαυξημένη Πραγματικότητα (ΕΠ) υποστηρίζει την εμπειρική μάθηση καθιστώντας τις αφηρημένες επιστημονικές διαδικασίες πιο προσιτές και αξιομνημόνευτες. Εκπαιδευτικές εφαρμογές ΕΠ όπως το Unity with Vuforia, το JigSpace ή το Assemblr EDU μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία δυναμικών προσομοιώσεων μικροβιακών αποκρίσεων σε περιβαλλοντικές τοξίνες. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο εμπλουτίζει την επιστημονική παιδεία, αλλά ενθαρρύνει επίσης τους μαθητές να σκεφτούν κριτικά για βιώσιμες λύσεις και τον ρόλο της βιοτεχνολογίας στην προστασία του περιβάλλοντος. Ο συνδυασμός ΕΠ και μικροβιακής βιοαποκατάστασης προσφέρει μια ισχυρή διεπιστημονική μαθησιακή εμπειρία, βασισμένη στις αρχές που περιγράφονται από τους Singh και Chandra (2019) στην εξερεύνησή τους για τη βιοτεχνολογία ελέγχου της ρύπανσης και υποστηρίζεται από το θεμελιώδες πλαίσιο που παρέχεται στο έργο των Crawford και Crawford σχετικά με τις αρχές και τις εφαρμογές της βιοαποκατάστασης.

Εφαρμογή της Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) στην Εκπαίδευση για τη Μικροβιακή Βιοαποκατάσταση

Σχεδιασμός μαθησιακών δραστηριοτήτων που βασίζονται σε επαυξημένη πραγματικότητα (AR)

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) προσφέρει καθηλωτικές εμπειρίες που μπορούν να βελτιώσουν την κατανόηση των διεργασιών μικροβιακής βιοαποκατάστασης. Με την επικάλυψη ψηφιακών πληροφοριών σε πραγματικά περιβάλλοντα, η AR μπορεί να κάνει αφηρημένες έννοιες απτές. Για παράδειγμα, οι





μαθητές μπορούν να απεικονίσουν πώς συγκεκριμένοι μικροοργανισμοί αλληλεπιδρούν με ρύπους, να παρατηρήσουν τη διαδικασία διάσπασης και να κατανοήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Πρόσφατες μελέτες έχουν καταδείξει την αποτελεσματικότητα της Επαυξημένης Πραγματικότητας (ΕΠ) στην εκπαίδευση των φυσικών επιστημών. Μια συστηματική ανασκόπηση τόνισε ότι οι εφαρμογές της ΕΠ στην περιβαλλοντική εκπαίδευση βελτιώνουν σημαντικά την κατανόηση σύνθετων εννοιών από τους μαθητές, αυξάνουν την εμπλοκή και ενισχύουν την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση. Ομοίως, η έρευνα στην εκπαίδευση στη μικροβιολογία έχει δείξει ότι τα εργαλεία που βασίζονται στην ΕΠ μπορούν να ενισχύσουν την κατανόηση και το ενδιαφέρον των μαθητών για το θέμα.ejmste.comacademic.oup.com

Επιστημονική Λογική, Εκπαιδευτική Ενσωμάτωση και Εργαλεία

Η μικροβιακή βιοαποκατάσταση είναι η διαδικασία χρήσης μικροοργανισμών για την αποικοδόμηση, τον μετασχηματισμό ή την απομάκρυνση ρύπων από το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένου του εδάφους, των υπόγειων υδάτων και των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Ενώ η βιοαποκατάσταση είναι απαραίτητη για την βιώσιμη αντιμετώπιση της ρύπανσης, η διδασκαλία της θέτει σημαντικές προκλήσεις λόγω των αόρατων και πολύπλοκων μικροβιακών αλληλεπιδράσεων που εμπλέκονται. Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR), ως μια καθηλωτική τεχνολογία, παρέχει μια μοναδική ευκαιρία για την ενίσχυση της κατανόησης και της επικοινωνίας των διαδικασιών μικροβιακής βιοαποκατάστασης. Μέσω διαδραστικών απεικονίσεων, χωρικών επικαλύψεων και ενσωματώσεων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, η AR γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της αφηρημένης μικροβιολογικής γνώσης και της βιωματικής μάθησης (Bacca et al., 2014; Beck et al., 2022).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) είναι η ικανότητά της να οπτικοποιεί αόρατη μικροβιακή δραστηριότητα. Χρησιμοποιώντας τρισδιάστατες προσομοιώσεις, οι μαθητές μπορούν να παρατηρήσουν πώς βακτηριακά στελέχη όπως το *Alcanivorax borkumensis* ή το *Pseudomonas putida* αντιδρούν σε ρύπους όπως υδρογονάνθρακες ή βαρέα μέταλλα (Vidali, 2001). Αυτές οι προσομοιώσεις μπορούν να καταδείξουν την εξέλιξη της βιοαποκατάστασης με την πάροδο του χρόνου, δείχνοντας πώς οι περιβαλλοντικοί παράγοντες (π.χ. θερμοκρασία, επίπεδα θρεπτικών συστατικών, διαθεσιμότητα οξυγόνου) επηρεάζουν την μικροβιακή απόδοση (Dunleavy & Dede, 2014). Αυτή η διαδραστικότητα ενισχύει την εννοιολογική απομνημόνευση και την εμπλοκή των μαθητών, επιτρέποντας τον ενεργό πειραματισμό σε εικονικά περιβάλλοντα.

Επιπλέον, η AR προσφέρει σημαντικά οφέληχωρική μάθησηΠροβάλλοντας μικροβιακές διεργασίες σε πραγματικούς χώρους, όπως διατομές μολυσμένου εδάφους ή υδάτινα περιβάλλοντα, οι μαθητές αποκτούν μια βαθύτερη κατανόηση της χωρικής δυναμικής και των αλληλεπιδράσεων μικροβίων-ρύπων (Martínez-García et al., 2020). Επειδή η άμεση πρόσβαση σε μολυσμένες τοποθεσίες ή σε ζωντανά μικρόβια είναι συχνά μη ασφαλής ή μη πρακτική, η Επαυξημένη Πραγματικότητα (ΕΠ) χρησιμεύει ως...ασφαλές εργαλείο προσομοίωσης, αναπαράγοντας επικίνδυνα σενάρια χωρίς κίνδυνο στον πραγματικό κόσμο (Bacca et al., 2014).

Εκπαιδευτικές περιπτώσεις χρήσης

- Προσομοίωση Εργαστηρίου Πετρελαιοκηλίδων AR: Χρησιμοποιώντας το Meta Quest ή κινητές συσκευές, οι μαθητές αναπτύσσουν εικονικούς μικροοργανισμούς σε πετρελαιοκηλίδες και παρατηρούν την υποβάθμισή τους σε διαφορετικές συνθήκες.
- Διαδραστικός Χάρτης Αποκατάστασης Εδάφους: Η επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) που βασίζεται στο HoloLens επιτρέπει στους μαθητές να εξερευνήσουν μοντέλα εδάφους σε στρώσεις που δείχνουν την εξάπλωση ρύπων και τον μικροβιακό αποικισμό (Gadd, 2010).
- Πίνακας ελέγχου αισθητήρα πραγματικού χρόνου + επαυξημένης πραγματικότητας (AR): Οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες παρακολουθούν τα επίπεδα ρύπων. Οι επικαλύψεις επαυξημένης πραγματικότητας (AR) εμφανίζουν μικροβιακές αποκρίσεις, συνδέοντας τα δεδομένα με βιολογική λειτουργία (Martínez-García et al., 2020).
- Εφαρμογή 3D Microbial Explorer: Οι μαθητές σαρώνουν κωδικούς QR για να ενεργοποιήσουν λεπτομερή μοντέλα βακτηρίων, επισημαίνοντας τις κυτταρικές δομές και τους ρόλους βιοαποικοδόμησης (Beck et al., 2022).





Αυτές οι εφαρμογές υποστηρίζονται από προσβάσιμα εργαλεία και πλατφόρμες, όπως τα Unity 3D, AR Foundation, ARKit/ARCore, και λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης όπως το Blender και το Sketchfab. Υλικό όπως το Microsoft HoloLens και το Meta Quest 3 υποστηρίζει καθηλωτικές εμπειρίες σε πραγματικό χρόνο που είναι ολόενα και πιο προσιτές και επεκτάσιμες.

Ενσωμάτωση Προγραμμάτων Σπουδών

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (ΕΠ) μπορεί να εισαχθεί σε μαθήματα περιβαλλοντικής επιστήμης, βιοτεχνολογίας ή μικροβιολογίας σε όλο το λύκειο, το πανεπιστήμιο ή την επαγγελματική εκπαίδευση. Οι αποτελεσματικές παιδαγωγικές στρατηγικές περιλαμβάνουν:

- Μάθηση βασισμένη στην έρευνα: Ενθαρρύνει τους μαθητές να δοκιμάζουν μεταβλητές σε εικονικά περιβάλλοντα βιοαποκατάστασης.
- Μάθηση βασισμένη σε παιχνίδια: Προσθέτει κίνητρο μέσω αποστολών ή προκλήσεων επίλυσης προβλημάτων.
- Ανεστραμμένες Αίθουσες Διδασκαλίας: Οι μαθητές εξερευνούν ενότητες AR πριν από το μάθημα και εφαρμόζουν έννοιες κατά τη διάρκεια της συζήτησης.

Τα οφέλη της Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) σε αυτό το πλαίσιο συνοψίζονται παρακάτω:

Οφέλος	Περιγραφή
Βύθιση	Ρεαλιστικές, διαδραστικές προσομοιώσεις περιβαλλόντων αποκατάστασης
Κράτηση	Η πολυαισθητηριακή μάθηση βελτιώνει την κατανόηση και τη μνήμη
Προσιτότητα	Φορητό και επεκτάσιμο σε ψηφιακές συσκευές
Προσαρμογή	Οι προσομοιώσεις μπορούν να προσαρμοστούν σε τοπικούς ρύπους, οικοσυστήματα ή μικρόβια
Συνεργασία	Υποστηρίζει την ομαδική μάθηση και τα κοινόχρηστα περιβάλλοντα AR

Οι μελλοντικές εξελίξεις ενδέχεται να περιλαμβάνουν συστήματα διδασκαλίας επαυξημένης πραγματικότητας (AR) με γνώμονα την τεχνητή νοημοσύνη, οπτικοποιήσεις ενσωματωμένες σε αισθητήρες και πλατφόρμες εκμάθησης επαυξημένης πραγματικότητας (AR) που βασίζονται στο cloud, ενισχύοντας περαιτέρω την προσβασιμότητα και την προσαρμοστικότητα σε διάφορους κλάδους και τοποθεσίες.

Σύναψη

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα αποτελεί ένα ισχυρό εκπαιδευτικό εργαλείο για την ενίσχυση της μάθησης στη μικροβιακή βιοαποκατάσταση. Μετατρέποντας τις αόρατες βιολογικές διεργασίες σε ορατές, διαδραστικές και χειρίσιμες εμπειρίες, η Επαυξημένη Πραγματικότητα βοηθά τους μαθητές να κατανοήσουν πολύπλοκες περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις που συχνά είναι απρόσιτες μέσω των παραδοσιακών μεθόδων. Επιτρέπει την ασφαλή προσομοίωση σεναρίων πραγματικού κόσμου, βελτιώνει την εμπλοκή μέσω της διαδραστικής μάθησης και υποστηρίζει τη διατήρηση της γνώσης μέσω της χωρικής και οπτικής συλλογιστικής.

Καθώς ο τομέας της εμβυθιστικής τεχνολογίας εξελίσσεται, η Επαυξημένη Πραγματικότητα (ΕΠ) είναι έτοιμη να καταστεί αναπόσπαστο κομμάτι της περιβαλλοντικής εκπαίδευσης και προσέγγισης, ιδίως στην προώθηση βιώσιμων πρακτικών, διεπιστημονικής μάθησης και επιστημονικής περιέργειας. Είτε σε τάξη, εργαστήριο είτε σε δημόσιο χώρο, η Επαυξημένη Πραγματικότητα (ΕΠ) μπορεί να καλλιεργήσει μια γενιά μαθητών που θα είναι πιο κατάλληλα εξοπλισμένοι για να κατανοήσουν και να αντιμετωπίσουν τη ρύπανση μέσω βιολογικών και οικολογικών λύσεων.

Φάση	Περιγραφή
------	-----------





Εξερευνώ	- Διερευνήστε πώς τα μικρόβια καθαρίζουν την περιβαλλοντική ρύπανση μέσω της βιοαποκατάστασης και πώς αυτό εφαρμόζεται σε πραγματικά σενάρια.
	- Ανάπτυξη Περιεχομένου: Δημιουργία εκπαιδευτικού περιεχομένου που συνδέει τη βιολογία, την περιβαλλοντική επιστήμη και την τεχνολογία που σχετίζεται με τον μικροβιακό καθαρισμό.
	- Ανάλυση Αναγκών: Προσδιορισμός της κατανόησης των μαθητών σχετικά με τη ρύπανση, τους μικροοργανισμούς και την οικολογική αποκατάσταση, με σκοπό τη διαμόρφωση αποτελεσματικής διδασκαλίας.
Εκτελώ	- Εφαρμογή Προγράμματος Σπουδών: Παρουσίαση διαδραστικών μαθημάτων σχετικά με τους τύπους ρύπανσης, τη μικροβιακή δράση και τους μηχανισμούς βιοαποκατάστασης χρησιμοποιώντας εργαλεία AR.
	- Διαδραστικές ασκήσεις: Χρησιμοποιήστε εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (π.χ., Curiscope Virtuali-Tee, Merge Cube) για την προσομοίωση μολυσμένων περιβαλλόντων και μικροβιακής δραστηριότητας.
	- Συλλογή σχολίων: Καταγράψτε τις παρατηρήσεις και τα σχόλια των μαθητών σχετικά με εικονικούς καθαρισμούς και προσομοιώσεις μικροβιακής συμπεριφοράς για να βελτιώσετε τις μαθησιακές εμπειρίες.
Επαυξάνω	- Ενσωμάτωση AR: Εφαρμογή AR για την απεικόνιση μολυσμένων οικοσυστημάτων, μικροβιακών αποικιών και των διαδικασιών διάσπασης της ρύπανσης.
	- Διαδραστική Μάθηση: Αφήστε τους μαθητές να δοκιμάσουν εικονική μικροβιακή αποτελεσματικότητα εισάγοντας ρύπους και μετρώντας τα αποτελέσματα καθαρισμού.
	Παιχνιδοποιημένο Περιεχόμενο:
	- Πόντοι και Εμβλήματα Κερδίστε ανταμοιβές για τον εντοπισμό τύπων ρύπανσης, την προσομοίωση αποτελεσματικών καθαρισμών ή τη βελτιστοποίηση της μικροβιακής δράσης.
	- Πίνακες κατάταξης: Βαθμολογία απόδοσης σε χρονικά καθορισμένες προκλήσεις για τον καθαρισμό εικονικών μολυσμένων τοποθεσιών.
Επαυξάνω	- Αποστολές και Επίπεδα Ξεκλειδώστε στάδια αυξανόμενης πολυπλοκότητας, από τον εντοπισμό ρύπων έως τη διαχείριση ολόκληρων οικοσυστημάτων αποκατάστασης.
	- Ανταμοιβές για Εξερεύνηση Απόκρυψη μικροβιακών ειδών ή ενδείξεων καθαρισμού σε περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για την ενθάρρυνση εις βάθος έρευνας.
	- Συνεργατικές Παιχνιδοποιημένες Εργασίες Οι ομάδες συνεργάζονται για την αντιμετώπιση μεγάλης κλίμακας περιβαλλοντικών καταστροφών που βασίζονται στην επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) χρησιμοποιώντας μικροβιακές στρατηγικές.
	Αξιολογήσεις που βασίζονται σε AR:
	- Αξιολογήστε την κατανόηση αναθέτοντας στους μαθητές την ολοκλήρωση των αποστολών καθαρισμού της ρύπανσης χρησιμοποιώντας AR (επαυξημένη Πραγματικότητα) και αναφέρετε τα αποτελέσματα με αναλύσεις πριν και μετά.





Αναφορές

- Arici, F. (2024). Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της τεχνολογίας επαυξημένης πραγματικότητας στην εκπαίδευση στις φυσικές επιστήμες όσον αφορά τον περιβαλλοντικό γραμματισμό, την αυτορρύθμιση και το κίνητρο για τη μάθηση των φυσικών επιστημών. Διεθνές Περιοδικό Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Υπολογιστή, 40(24), 8476–8496. <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2310921>
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S., & Kinshuk. (2014). Τάσεις επαυξημένης πραγματικότητας στην εκπαίδευση: Μια συστηματική ανασκόπηση της έρευνας και των εφαρμογών. Εκπαιδευτική Τεχνολογία & Κοινωνία, 17(4), 133–149.
- Beck, D. A. C., Pope, R. K., & McNicholas, P. J. (2022). Ο Αόρατος Κόσμος Αποκαλύπτεται: Επαυξημένη Πραγματικότητα για την Εκπαίδευση στη Μικροβιολογία. Journal of Microbiology & Biology Education, 23(1), e00143-21.
- Boorpathy, R. (2021). Βιολογική επεξεργασία ατμοσφαιρικών ρύπων: Μια ανασκόπηση. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 20, 457–472. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09555-9>.
- Crawford, R. L., & Crawford, D. L. (1996). Βιοαποκατάσταση: Αρχές και Εφαρμογές. Cambridge University Press.
- Deshusses, M. A. (1997). Βιολογική επεξεργασία αέρα αποβλήτων σε βιοφίλτρα. Biotechnology Progress, 13(3), 239–248.
- Dhaliwal, S.S., Singh, J., Taneja, P.K., Mandal, A., 2020. Τεχνικές αποκατάστασης για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από το έδαφος που έχει μολυνθεί από διαφορετικές πηγές: μια ανασκόπηση. Environmental Science and Pollution Research 27 (2), 1319–1333.
- Dunleavy, M., & Dede, C. (2014). Διδασκαλία και μάθηση επαυξημένης πραγματικότητας. Στο J. M. Spector et al. (Επιμ.), Handbook of Research on Educational Communications and Technology (σελ. 735–745). Springer.





Dunleavy, M., Dede, C., & Mitchell, R. (2009). Δυνατότητες και περιορισμοί των εμβυθιστικών συμμετοχικών προσομοιώσεων επαυξημένης πραγματικότητας για τη διδασκαλία και τη μάθηση. *Journal of Science Education and Technology*, 18(1), 7–22. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>

Fang, C. F., & Ling, D. L. (2003). Διερεύνηση της μείωσης του θορύβου που παρέχεται από τις δέντροφυτες ζώνες. *Landscape and Urban Planning*, 63(4), 187–195.

Fasani, E., Manara, A., Martini, F., Furini, A., DalCorso, G., 2018. Οι δυνατότητες της γενετικής μηχανικής φυτών για την αποκατάσταση εδαφών που έχουν μολυνθεί με βαρέα μέταλλα. *Φυτό, κύτταρο & περιβάλλον* 41 (5), 1201–1232.

Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO). (2021). Ρύπανση του εδάφους: Μια κρυφή πραγματικότητα. Ανακτήθηκε από: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN>

Fredrickson, J. K., Zachara, J. M., Kennedy, D. W., et al. (2004). Το *Geobacter metallireducens* μειώνει το ουράνιο και προάγει την ακινητοποίησή του. *Environmental Science & Technology*, 38(7), 2149–2154.

Gadd, G. M. (2010). Μέταλλα, ορυκτά και μικρόβια: γεωμικροβιολογία και βιοαποκατάσταση. *Μικροβιολογία*, 156(3), 609–643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>

Ganiyu, S.O., Sable, S., El-Din, M.G., 2022. Προηγμένες διεργασίες οξείδωσης για την αποικοδόμηση διαλυμένων οργανικών ουσιών στο παραγόμενο νερό: Μια ανασκόπηση της απόδοσης της διεργασίας, της κινητικής αποικοδόμησης και της οδού. *Chemical Engineering Journal* 429, σελ. 132492.

Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K., & Ahn, Y. (2016). Τρέχουσα κατάσταση γνώσεων σχετικά με τη μικροβιακή αποικοδόμηση πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ): Μια ανασκόπηση. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1369. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369>

Hartman A (2024). Βιοαποκατάσταση: Η οικολογικά συνειδητή στρατηγική καθαρισμού της φύσης. *Adv Genet Eng*. 13:282.

Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. (2009). Πτυχές βιοαποικοδόμησης πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ): Μια ανασκόπηση. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 115. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>.

Herlina.M, Fitriani.A, Lubis.R. (2024).Ανάπτυξη ενός Πρακτικού Οδηγού Μικροβιολογίας Βασισμένου στην Τεχνολογία Επαυξημένης Πραγματικότητας σε Υλικό Ιού, DOI: 10.35445/alishlah.v16i4.4952

Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., et al. (2017). Τεχνητό φως τη νύχτα ως νέα απειλή για την επικοινωνία. *Nature*, 548(7666), 206–209.

Kumar, M., & Gopal, M. (2021). Μικροβιακή Βιοαποκατάσταση: Ένα Βιώσιμο Εργαλείο για τον Περιβαλλοντικό Καθαρισμό. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101693. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101693>.

Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W., 2019. Μια ανασκόπηση της μόλυνσης του εδάφους από βαρέα μέταλλα: επιπτώσεις, πηγές και τεχνικές αποκατάστασης. *Ρύπανση εδάφους και ιζημάτων: Διεθνές Περιοδικό* 28 (4), 380–394.

Liang, Y., Jiao, S., Wang, M., Yu, H., Shen, Z., 2020. Ένα σύστημα επεξεργασίας γονιδιώματος βασισμένο σε CRISPR/Cas9 για το *Rhodococcus ruber* TH. *Μεταβολική μηχανική* 57, 13–22.





Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., et al. (2006). Μικροβιακά στοιχεία καυσίμου: μεθοδολογία και τεχνολογία. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192.

Martínez-García, M., Andrés, M. A., & Andreu, A. (2020). Οπτικοποίηση του αόρατου: Προς τη χρήση τεχνολογιών εμπύθισης για την ενίσχυση της περιβαλλοντικής διαχείρισης. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 23.

Meckenstock, R. U., Elsner, M., Griebler, C., et al. (2015). Βιοαποικοδόμηση: ενημέρωση των εννοιών ελέγχου για τον μικροβιακό καθαρισμό σε μολυσμένους υδροφορείς. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7073–7081.

Plewniak, F., Crognale, S., Rossetti, S., Bertin, P.N., 2018. Μια γονιδιωματική προοπτική στη βιοαποκατάσταση: η περίπτωση της απομάκρυνσης αρσενικού. *Frontiers in microbiology* 9, σ.820.

Pointing, S. B. (2001). Σκοπιμότητα βιοαποκατάστασης από μύκητες λευκής σήψης. Εφαρμοσμένη Μικροβιολογία και Βιοτεχνολογία, 57(1–2), 20–33. <https://doi.org/10.1007/s002530100754>

Priya, A.K., Nagan, S., 2015. Αποκατάσταση βαρέων μετάλλων από ηλεκτρολυτικά επιμεταλλωμένα λύματα χρησιμοποιώντας βακτηριακά στελέχη σε αντιδραστήρα στήλης ακινητοποιημένης ροής προς τα πάνω. *Journal of Pure and Applied Microbiology* 9 (2), 1411–1416.

Rhea, L.K., Clark, C., 2022. Διαχείριση μεγάλων αραιωμένων ποσοτήτων χλωροαιθενίων και 1,4-διοξανίου μέσω παρακολουθούμενης φυσικής εξασθένησης (MNA) και ενίσχυσης MNA. *Remediation Journal*.

Sharma, P, Bano.A, Pratap Singh.S, Kishore Dubey.N, Chandra.R, Iqbal.H.M.N.(2022) Πρόσφατες εξελίξεις στις στρατηγικές μικροβιακής υποβοήθησης για την αποκατάσταση τοξικών ρύπων

Sharma, P., Kumar, S., 2021f. Βιοαποκατάσταση βαρέων μετάλλων από βιομηχανικά λύματα από ενδόφυτα και η μεταβολική τους δραστηριότητα: Πρόσφατες εξελίξεις. *Bioresource Technology* 339, 125589.

Sharma, P., Kumar, S., Pandey, A., 2021g. Τεχνικές βιοδιαμεσολάβησης για την αποκατάσταση μεταλλικών ρύπων χρησιμοποιώντας μεταγονιδιωματικές προσεγγίσεις: μια ανασκόπηση. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (4), σελ. 105684.

Singh, R., & Strong, P. J. (2022). Βιοαποκατάσταση: Τρέχουσες Εφαρμογές και Αναδυόμενες Τάσεις. *Frontiers in Microbiology*, 13, 872695. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.872695>.

Singh, J., & Chandra, R. (2019). Βιοτεχνολογία ελέγχου της ρύπανσης. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 1335–1355. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00865-6>

Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον (UNEP, 2021), Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (FAO, 2021), Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA, 2023)

Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον (UNEP, 2021). Ρύπανση των υδάτων. Ανακτήθηκε από: <https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>

Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA). (2023). Βιοαντιδραστήρες και βιοφίλτρα για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ανακτήθηκε από: <https://www.epa.gov/air-research/bioreactors-and-biofilters-air-pollution-control>





Varjani, S. J. (2017). Μικροβιακή αποικοδόμηση υδρογονανθράκων πετρελαίου. *Bioresource Technology*, 223, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>

Vidali, M. (2001). Βιοαποκατάσταση. Μια επισκόπηση. *Καθαρή και Εφαρμοσμένη Χημεία*, 73(7), 1163–1172.

Vymazal, J. (2011). Τεχνητοί υγρότοποι για επεξεργασία λυμάτων: πέντε δεκαετίες εμπειρίας. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69.

Zeyaulah, M., et al. (2023). Πρόοδοι στις προσεγγίσεις βιοαποκατάστασης: Πρόσφατες εξελίξεις και μελλοντικές προοπτικές. Περιβαλλοντική επιστήμη και έρευνα για τη ρύπανση. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27790-z>.

https://en.wikipedia.org/wiki/Archaea?utm_source=chatgpt.com

https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com

preprints.org

pmc.ncbi.nlm.nih.gov

[nature.com](https://www.nature.com)

https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de

<https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

<https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>

<https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN>

<https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>

<https://www.darksky.org/light-pollution/>

<https://www.epa.gov/nps/nonpoint-source-urban-areas>

<https://www.iaea.org/topics/radioactive-contamination>

pmc.ncbi.nlm.nih.gov/frontiersin.org

el.wikipedia.org

<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>

wired.com/tos.org+1wired.com+1

timesofindia.indiatimes.com

reuters.com+1bassconnections.duke.edu+1





pubs.rsc.org

mdpi.comresearchgate.net

pollution.sustainability-directory.com

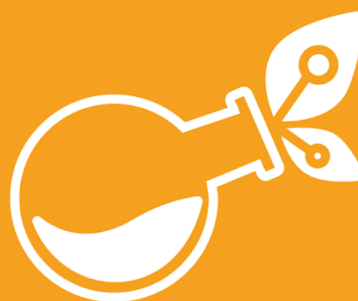
prism.sustainability-directory.com

ejmste.comacademic.oup.com





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.