



Co-funded by
the European Union

Από το εργαστήριο στο πεδίο: Πώς οι επιστήμονες δοκιμάζουν τον μικροβιακό καθαρισμό σε πραγματικά οικοσυστήματα



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."

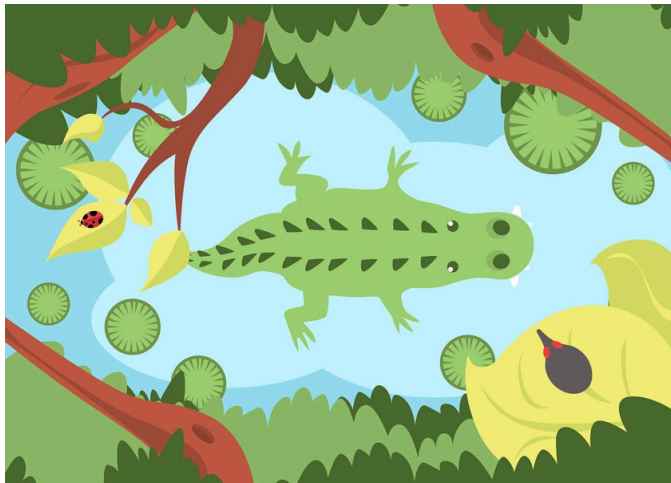




ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

· Εισαγωγή.....	2
· Γιατί οι δοκιμές πεδίου είναι απαραίτητες.....	3
· Από την επιτυχία του εργαστηρίου στη στρατηγική πεδίου.....	4
· Μελέτες Περιπτώσεων Πραγματικού Κόσμου	
· Ενσωμάτωση AR σε δοκιμές πεδίου μικροβιακής βιοαποκατάστασης.....	10
· Παραδείγματα Πραγματικού Κόσμου Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) σε Περιβαλλοντικούς ή Βιολογικά Συναφείς Τομείς.....	12
· Πόροι.....	19





Γενικό θέμα της μαθησιακής διαδρομής	Βιοεξυγίανση και Περιβαλλοντικός Καθαρισμός με Μικροοργανισμούς (Βιοεμπνευσμένες Λύσεις)
Συγκεκριμένη ονομασία της μαθησιακής μονάδας	<i>Από το εργαστήριο στο πεδίο: Πώς οι επιστήμονες δοκιμάζουν τον μικροβιακό καθαρισμό σε πραγματικά οικοσυστήματα</i>
Ηλικία χρήστη-στόχου	14–18 ετών
Προαπαιτούμενα για τον μαθητή	Βασική κατανόηση Βιολογίας, Χημείας, Περιβαλλοντικής Επιστήμης
Περιγραφή της μαθησιακής μονάδας	Αυτή η ενότητα εισάγει τους φοιτητές στην πραγματική μικροβιακή βιοαποκατάσταση. Χρησιμοποιώντας εργαλεία επαυξημένης πραγματικότητας (AR), οι φοιτητές εξερευνούν πώς οι επιστήμονες σχεδιάζουν, παρακολουθούν και αξιολογούν τον μικροβιακό καθαρισμό από εργαστηριακές συνθήκες έως πραγματικές μολυσμένες περιοχές. Η έμφαση δίνεται στην μικροβιακή οικολογία, τη δυναμική των ρύπων και τη χρήση επαυξημένης οπτικοποίησης για την κατανόηση των περιβαλλοντικών διεργασιών.
Εμπλεκόμενα θέματα	Βιολογία, Χημεία, Περιβαλλοντική Επιστήμη, Τεχνολογία
Λέξεις-κλειδιά	Βιοαποκατάσταση, Μικρόβια, Βιο-εμπνευσμένα, AR, Δοκιμές πεδίου, Περιβαλλοντική Αποκατάσταση, STEM, Οπτικοποίηση
Βασικές δεξιότητες, ικανότητες και γνώσεις που πρέπει να αποκτηθούν	- Κατανόηση των μικροβιακών ρόλων στην αποικοδόμηση ρύπων - Οπτικοποίηση της βιοαποκατάστασης μέσω της επαυξημένης πραγματικότητας - Ερμηνεία περιβαλλοντικών δεδομένων - Επίλυση προβλημάτων και συστημική σκέψη σε οικολογικά πλαίσια - Σχεδιασμός απλών μοντέλων αποκατάστασης ενισχυμένων με επαυξημένη πραγματικότητα
Πόροι και διδακτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν	Επιστημονική βιβλιογραφία (π.χ., AEM, Frontiers), εκπαιδευτικά εργαλεία επαυξημένης πραγματικότητας (π.χ., JigSpace, Merge Cube), περιβαλλοντικές μελέτες περιπτώσεων, εικονικές εκδρομές, δεδομένα προσομοίωσης
Κριτήρια αξιολόγησης και αξιολόγηση	Αξιολόγηση μέσω εργασιών που βασίζονται σε AR: οπτικοποίηση ρύπανσης, προσομοίωση μικροβιακής δραστηριότητας, κουίζ σχετικά με τις οδούς υποβάθμισης και ανατροφοδότηση σε εικονικά σενάρια από εργαστήριο σε πεδίο



Εισαγωγή:

Πέρα από το τρυβλίο Petri – Δοκιμάζοντας τον μικροβιακό καθαρισμό στον πραγματικό κόσμο



Fig 2. A concept of an HMD-based AR application for visualising water quality, source: Cao et al., 2024

<https://www.theguardian.com/environment/2023/sep/28/plastic-eating-bacteria-enzyme-recycling-waste>

Όταν σκεφτόμαστε την επιστήμη στην πράξη, συχνά φανταζόμαστε λευκές εργαστηριακές ρόμπες, μικροσκόπια και τρυβλία Petri, καθαρά, ελεγχόμενα περιβάλλοντα όπου γίνονται ανακαλύψεις υπό τέλει συνθήκες. Και ενώ αυτό είναι ένα σημαντικό μέρος της επιστημονικής διαδικασίας, η επίλυση προβλημάτων του πραγματικού κόσμου, όπως η ρύπανση, απαιτεί κάτι περισσότερο από απλή επιτυχία σε ένα εργαστήριο. Εκεί έρχονται οι δοκιμές πεδίου, όπου λαμβάνεται ό,τι λειτουργεί στο εργαστήριο και διαπιστώνεται αν επιβιώνει και πετυχαίνει στη φύση.

Ένα από τα πιο συναρπαστικά εργαλεία στην περιβαλλοντική επιστήμη σήμερα είναι η βιοαποκατάσταση, μια διαδικασία όπου μικροσκοπικοί ζωντανοί οργανισμοί όπως βακτήρια και μύκητες χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό μολυσμένων περιβαλλόντων. Αυτά τα μικρόβια μπορούν να «τρώνε» επιβλαβείς ουσίες, όπως πετρέλαιο, βαρέα μέταλλα ή τοξικές χημικές ουσίες, και να τα μετατρέπουν σε αβλαβή υλικά. Στο εργαστήριο, οι ερευνητές έχουν ανακαλύψει εκατοντάδες μικροβιακά είδη που μπορούν να αφομοιώσουν ένα ευρύ φάσμα ουσιών, όπως καύσιμο ντίζελ, χρώμιο και ενώσεις ουρανίου (Lovley et al., 2022). Αλλά μπορούν αυτά τα ίδια μικρόβια να επιβιώσουν σε ένα μολυσμένο ποτάμι, ένα μολυσμένο δάσος ή μια τοποθεσία τοξικών αποβλήτων; Αυτό είναι το μεγάλο ερώτημα.

Η φύση είναι απρόβλεπτη. Συνθήκες όπως η θερμοκρασία, το ηλιακό φως, η ροή του νερού και η παρουσία άλλων οργανισμών επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται τα μικρόβια εκτός εργαστηρίου. Ακόμα κι αν ένα μικρόβιο είναι εξαιρετικό στη διάσπαση ρύπων σε ένα τρυβλίο Petri, μπορεί να μην λειτουργήσει καθόλου όταν απελευθερωθεί σε μια λίμνη ή στο έδαφος. Για παράδειγμα, *Alcanivorax borkumensis*, ένα φυσικώς απαντώμενο θαλάσσιο βακτήριο, ευδοκimeί σε θαλασσινό νερό μολυσμένο με πετρέλαιο και βοηθά στην αποικοδόμηση των υδρογονανθράκων, αλλά μόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και θρεπτικών συστατικών (Yakimov et al., 2007). Γι' αυτό το λόγο οι επιστήμονες πρέπει να δοκιμάσουν





στρατηγικές βιοαποκατάστασης σε πραγματικά οικοσυστήματα, μέσω πειραμάτων μικρής κλίμακας που ονομάζονται πιλοτικές μελέτες ή δοκιμές πεδίου.

Αυτές οι δοκιμές βοηθούν τους ερευνητές να κατανοήσουν εάν τα επιλεγμένα μικρόβια είναι αποτελεσματικά, ασφαλή και ικανά να επιβιώσουν σε φυσικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι ερευνητές έχουν διεξάγει πειράματα πεδίου στο Ράιφλ του Κολοράντο, χρησιμοποιώντας *Γεωβακτήριο* οξείδη για τη μείωση της μόλυνσης από ουράνιο στα υπόγεια ύδατα, εγχύοντάς τα με απλά θρεπτικά συστατικά όπως το οξικό άλας (Anderson et al., 2003). Σε ένα άλλο έργο στην Ιταλία, οι επιστήμονες δημιούργησαν ένα «βιοφράγμα» σε έναν υδροφόρο ορίζοντα για να δοκιμάσουν τη μείωση του εξασθενούς χρωμίου (Cr VI) στα υπόγεια ύδατα χρησιμοποιώντας φυσικά μικρόβια (Beccari et al., 2010). Αυτά τα πειράματα σε πραγματικό κόσμο παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για το πώς η βιοαποκατάσταση μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Σε αυτήν την ενότητα, θα ανακαλύψετε πώς οι επιστήμονες μεταφέρουν μικρόβια από τον εργαστηριακό πάγκο στο πεδίο και πώς προετοιμάζουν, δοκιμάζουν και παρακολουθούν προσεκτικά τις προσπάθειες μικροβιακού καθαρισμού. Θα εξερευνήσετε επίσης μελέτες περιπτώσεων από την πραγματική ζωή όπου η βιοαποκατάσταση έχει βοηθήσει στην αποκατάσταση μολυσμένων περιοχών και θα μάθετε για τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές όταν ασχολούνται με πολύπλοκα φυσικά περιβάλλοντα. Το πιο σημαντικό, θα δείτε πώς αυτό το έργο διαμορφώνει ένα καθαρότερο, πιο βιώσιμο μέλλον και πώς η επιστήμη κινείται πέρα από το εργαστήριο για να καλύψει τις ανάγκες του πλανήτη μας (Singh et al., 2023).

2. Γιατί οι δοκιμές πεδίου είναι απαραίτητες

Πριν από οποιαδήποτε χρήση μικροβίων σε μεγάλη κλίμακα για τον καθαρισμό της ρύπανσης, οι επιστήμονες πρέπει να τα δοκιμάσουν εκτός εργαστηρίου σε πραγματικές συνθήκες. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται...**δοκιμές πεδίου** και αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα για να διασφαλιστεί ότι η βιοαποκατάσταση είναι αποτελεσματική και ασφαλής όταν εφαρμόζεται σε φυσικά περιβάλλοντα όπως ποτάμια, λίμνες, έδαφος ή ακόμα και υπόγειες πηγές νερού. Οι δοκιμές πεδίου παρέχουν απαντήσεις σε βασικά ερωτήματα: *Θα επιβιώσουν τα μικρόβια; Θα συμπεριφερθούν με τον ίδιο τρόπο στο πεδίο όπως και στο εργαστήριο; Θα μπορούσαν να υπάρξουν απρόβλεπτες συνέπειες;*

2.1. Εργαστήριο vs. Πεδίου: Ελεγχόμενα vs. Σύνθετα Περιβάλλοντα

Στο εργαστήριο, οι επιστήμονες μπορούν να ελέγξουν σχεδόν τα πάντα, τη θερμοκρασία, το pH, την υγρασία, τα θρεπτικά συστατικά και τον τύπο του ρύπου. Αλλά η φύση είναι πολύ πιο ακατάστατη. Στο πεδίο, τα μικρόβια μπορεί να αντιμετωπίσουν:

- **Κυμαινόμενες θερμοκρασίες** (που επηρεάζουν τη μεταβολική δραστηριότητα),
- **Χαμηλά επίπεδα θρεπτικών συστατικών** (που μειώνουν την ανάπτυξη μικροβίων),
- **Παρουσία ιθαγενών μικροοργανισμών** (που ενδέχεται να ανταγωνίζονται ή να παρεμβαίνουν),
- **Μεταβλητές συγκεντρώσεις ρύπων** (το οποίο μπορεί να είναι πολύ υψηλό ή πολύ χαμηλό για υποβάθμιση),
- **Φυσικά εμπόδια** όπως σωματίδια εδάφους ή έλλειψη οξυγόνου (ειδικά υπόγεια ή υποβρύχια).



Για παράδειγμα, *Pseudomonas putida*, ένα βακτήριο που χρησιμοποιείται συχνά στην έρευνα για τη βιοαποκατάσταση, διασπά αποτελεσματικά το πετρέλαιο και τους διαλύτες σε εργαστηριακές καλλιέργειες. Ωστόσο, σε εδάφη αγρού με μικτούς ρύπους, η αποτελεσματικότητά του μπορεί να μειωθεί λόγω ανταγωνισμού με τοπικές μικροβιακές κοινότητες και ακανόνιστης παροχής οξυγόνου (Cases & de Lorenzo, 2005).

2.2. Κατανόηση της βιοδιαθεσιμότητας στον πραγματικό κόσμο

Στο εργαστήριο, οι ρύποι βρίσκονται συχνά σε διαλυμένη ή προσβάσιμη μορφή, αλλά στη φύση, μπορεί να είναι παγιδευμένοι σε σωματίδια εδάφους ή κρυμμένοι σε στρώματα ιζημάτων. Αυτό καθιστά πιο δύσκολο για τα μικρόβια να τα «φτάσουν» και να τα διασπάσουν. Αυτή η έννοια είναι γνωστή ως **βιοδιαθεσιμότητα**, το οποίο αναφέρεται στην προσβασιμότητα ενός ρύπου για μικροβιακή δράση. Για παράδειγμα, το πετρέλαιο που παγιδεύεται σε λεπτά ιζήματα μετά από μια διαρροή είναι πολύ πιο δύσκολο να καθαριστεί από το πετρέλαιο που επιπλέει στο νερό, επειδή τα μικρόβια δεν έχουν εύκολη πρόσβαση σε αυτό (Prince et al., 2013). Στις δοκιμές πεδίου, οι επιστήμονες πρέπει να αξιολογήσουν όχι μόνο την ικανότητα του μικροβίου αλλά και το κατά πόσον η ρύπανση είναι φυσικά διαθέσιμη για αποικοδόμηση.

2.3. Παρακολούθηση ασφάλειας και περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Ένας κρίσιμος λόγος για τις δοκιμές πεδίου είναι **διασφάλιση της ασφάλειας**. Ακόμα κι αν ένα μικρόβιο διασπάσει ρύπους, μπορεί να έχει ανεπιθύμητες παρενέργειες:

- Μπορεί να υπερισχύσει του ανταγωνισμού των ιθαγενών ειδών.
- Μπορεί να παράγει επιβλαβή υποπροϊόντα.
- Μπορεί να εξαπλωθεί πέρα από την προβλεπόμενη περιοχή.

Οι δοκιμές πεδίου επιτρέπουν στους ερευνητές να παρακολουθούν αυτά τα αποτελέσματα και να περιορίζουν την εξάπλωση ή τον αντίκτυπο των εισαγόμενων μικροβίων. Για παράδειγμα, οι ερευνητές δοκιμάζουν γενετικά τροποποιημένα μικρόβια (ΓΤΟ) μόνο σε ασφαλείς τοποθεσίες πεδίου υπό αυστηρούς κανονισμούς πριν εξετάσουν το ενδεχόμενο ευρύτερης χρήσης (Ghosal et al., 2016).

3. Από την επιτυχία του εργαστηρίου στη στρατηγική πεδίου

Η μετάβαση μιας μεθόδου μικροβιακού καθαρισμού από το εργαστήριο σε μια μολυσμένη τοποθεσία είναι πολύ περισσότερο από μια απλή κλιμάκωση. Απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και δοκιμές για να διασφαλιστεί ότι τα μικρόβια λειτουργούν αποτελεσματικά σε πραγματικές συνθήκες. Οι δοκιμές σε επίπεδο πεδίου περιλαμβάνουν πολλαπλές φάσεις - από την επιλογή μιας μολυσμένης τοποθεσίας και την προετοιμασία των μικροβίων, έως την ανάπτυξή τους, την παρακολούθηση της δραστηριότητάς τους με την πάροδο του χρόνου και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Αυτά τα βήματα βοηθούν στην επαλήθευση του κατά πόσον τα μικρόβια μπορούν να ευδοκιμήσουν εκτός ελεγχόμενων συνθηκών, να αλληλεπιδράσουν σωστά με τις ιθαγενείς κοινότητες και να μειώσουν πραγματικά τη ρύπανση σε πολύπλοκα περιβάλλοντα.

Αρκετές πρόσφατες μελέτες τονίζουν τη σημασία αυτής της διαδικασίας. Πειράματα πεδίου σε υδροφορείς μολυσμένους με ουράνιο έχουν δείξει ότι η διέγερση των ιθαγενών...*Γεωβακτήριο* τα είδη μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα διαλυτού ουρανίου σε ασφαλή όρια (turn0search0, turn0search6). Ομοίως, η πιλοτική βιοσυσσώρευση για έδαφος μολυσμένο με ΠΑΥ καταδεικνύει ότι η μικροβιακή αποκατάσταση μπορεί να είναι αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική, αν και τα εμπόδια που αφορούν συγκεκριμένα την τοποθεσία, όπως η δομή του εδάφους και το κλίμα, επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα (turn0search1, turn0search9). Αυτές οι γνώσεις επιβεβαιώνουν ότι οι δοκιμές πεδίου είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της μεταβλητότητας, της βιοδιαθεσιμότητας, της μικροβιακής δυναμικής και της οικολογικής ασφάλειας.





Στις ενότητες που ακολουθούν, θα εξερευνήσετε πώς οι επιστήμονες σχεδιάζουν και εκτελούν ένα πρόγραμμα δοκιμών πεδίου, το οποίο αναλύεται σε βασικά βήματα. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει αυτά τα βήματα με σαφήνεια και στη συνέχεια, το καθένα εξηγείται σε μεγαλύτερο βάθος με πρόσθετα υποθέματα για τον εμπλουτισμό της μάθησης.

3.1. Βήματα στις δοκιμές σε κλίμακα πεδίου: Πίνακας επισκόπησης

Βήμα	Υποθέματα	Σκοπός
A. Επιλογή τοποθεσίας και αξιολόγηση ρύπανσης	• Γεωχημική ανάλυση προφίλ • Φυσική μικροβιακή βάση • Ανάλυση βιοδιαθεσιμότητας	Κατανόηση των συνθηκών του χώρου και της παρουσίας των ρύπων
B. Επιλογή ή Διέγερση Μικροβίων	• Αυτοφυή έναντι εισαγόμενων ειδών • Διεγερμένες κοινοπραξίες • Γενετικά/μηχανικά τροποποιημένες βελτιώσεις	Επιλέξτε μικρόβια που ταιριάζουν με τον ρύπο και το οικοσύστημα
Γ. Παράδοση & Προετοιμασία	• Τροποποιήσεις θρεπτικών συστατικών (π.χ., οξικό άλας) • Ρύθμιση βιοφραγμού • Αξιοποίηση βιοφίλμ	Αναπτύξτε μικρόβια και ενισχύστε την επιβίωση/δραστηριότητα
Δ. Παρακολούθηση και Εντοπισμός	• Χημική δειγματοληψία • Μοριακά εργαλεία (DNA/RNA) • Μετατοπίσεις κοινότητας και αξιολόγηση PICT	Παρακολούθηση της μείωσης των ρύπων και της μικροβιακής συμπεριφοράς
Ε. Αξιολόγηση και Κλιμάκωση Αποτελεσμάτων	• Μετρήσεις μείωσης ρύπων • Ασφάλεια/οικολογικός αντίκτυπος • Σχεδιασμός κλιμάκωσης	Μετρήστε την επιτυχία και καθοδηγήστε τη μελλοντική εφαρμογή

3.2. Εκτεταμένη Επεξήγηση & Υποθέματα

A. Επιλογή τοποθεσίας και αξιολόγηση ρύπανσης

Ο εντοπισμός μιας τοποθεσίας πεδίου για βιοαποκατάσταση απαιτεί διεξοδική έρευνα. Οι επιστήμονες ξεκινούν με τη γεωχημική ανάλυση, εξετάζοντας παραμέτρους του εδάφους ή των υπόγειων υδάτων, όπως το pH, το διαλυμένο οξυγόνο, το οξειδοαναγωγικό δυναμικό και την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, οι οποίες καθορίζουν εάν τα μικρόβια μπορούν να επιβιώσουν και να αποικοδομήσουν τους ρύπους (Madison et al., 2022). Επίσης, καθορίζουν μια μικροβιακή γραμμή βάσης αλληλουχώντας γονίδια 16S rRNA για να αποκαλύψουν φυσικούς πληθυσμούς, συμπεριλαμβανομένων βακτηρίων ικανών να αποικοδομήσουν χλωριωμένους διαλύτες ή υδρογονάνθρακες πετρελαίου (Madison et al., 2022). Ένα άλλο κρίσιμο βήμα είναι η αξιολόγηση της βιοδιαθεσιμότητας των ρύπων, δηλαδή το πόσο προσβάσιμος είναι ένας ρύπος για τα μικρόβια. Οι ουσίες που απορροφώνται σε μεγάλο βαθμό σε εδάφη πλούσια σε άργιλο ή είναι παγιδευμένες σε υγρά μη υδατικής φάσης μπορεί να απαιτούν βελτίωση πριν προχωρήσει η βιοαποικοδόμηση (Semple et al., 2004).

Μαζί, αυτά τα βήματα βοηθούν στην επιλογή μιας τοποθεσίας όπου τόσο οι περιβαλλοντικές συνθήκες όσο και η παρουσία μικροβίων υποστηρίζουν την





αποτελεσματική αποκατάσταση, αποφεύγοντας τις αποτυχίες των δοκιμών λόγω κακής καταλληλότητας της τοποθεσίας.

B. Επιλογή ή Διέγερση Μικροβίων

Μόλις χαρακτηριστεί η τοποθεσία, οι ερευνητές αποφασίζουν εάν θα εισαγάγουν συγκεκριμένα μικρόβια (βιοενίσχυση) ή θα αναζωογονήσουν τα αυτοφυή μικρόβια (βιοδιέγερση). Σε περιοχές υπόγειων υδάτων που έχουν μολυνθεί με χλωριωμένους διαλύτες όπως το TCE, μετρήσεις χαμηλών αλλά ανιχνεύσιμων πληθυσμών...Δεχαλοκοκκοειδή(10^1 – 10^2 κύτταρα/mL) καθοδήγησε τη συνδυασμένη χρήση προσθήκης δότη ηλεκτρονίων και βιοενίσχυσης κατά τη διάρκεια πιλοτικών δοκιμών, εξασφαλίζοντας ταχεία και πλήρη αποχλωρίωση (Madison et al., 2022) Σύνορα Σε άλλα περιβάλλοντα, η διέγερση των ιθαγενών οργανισμών μέσω θρεπτικών συστατικών όπως το οξικό άλας έχει αποδειχθεί επαρκής. Για παράδειγμα, τα δεδομένα NGS και η ποσοτικοποίηση qPCR έδειξαν ότι τα γονίδια που εμπλέκονται στην αναερόβια βιοαποικοδόμηση (π.χ., συνθάση αλκυλοηλεκτρικού) ήταν 100-1.000 φορές πιο άφθονα μετά τη βιοδιέγερση, υποδεικνύοντας αποτελεσματική φυσική εξασθένηση των ρύπων (Madison et al., 2022), Σύνορα.

Η χρήση προσαρμοσμένων μικροβιακών κοινοπραξιών, υποστηριζόμενη από μοριακά δεδομένα, βοηθά στη διασφάλιση της ενεργότητας πολλαπλών οδών αποικοδόμησης, ειδικά για μικτούς ρύπους, μια στρατηγική που κερδίζει έδαφος σε πιλοτικά σχέδια πεδίου (Madison et al., 2022).

Γ. Παράδοση & Προετοιμασία

Η μεταφορά μικροβίων και η διασφάλιση της δραστηριότητάς τους επί τόπου εξαρτώνται από ισχυρές στρατηγικές μεταφοράς. Σε υδροφορείς μολυσμένους με ουράνιο, οι περιοδικές ενέσεις οξικού άλατος αντλούν δότες ηλεκτρονίων σε πηγάδια για να τροφοδοτήσουν Γεωβακτήριο Μείωση του U(VI) λόγω της μείωσης του U(VI) με την πάροδο των μηνών (Anderson et al., 2003; Lovley et al., 2005). Αντιδραστικά φράγματα, που αποτελούνται από διαπερατές ζώνες θρεπτικών συστατικών, αναπτύσσονται επίσης για να κατευθύνουν τη ροή των υπόγειων υδάτων μέσω ζωνών πλούσιων σε μικρόβια. Στα εδάφη, φορείς όπως ικρίωματα βιοφίλμ, χάντρες ή οργανικό κομπόστ υποστηρίζουν τον μικροβιακό αποικισμό και την επαφή με τους ρύπους, κάτι κρίσιμο σε σύνθετες μήτρες όπου τα θρεπτικά συστατικά και τα μικρόβια μπορούν να διασκορπιστούν άνισα (Semple et al., 2004). Ο σχεδιασμός των συστημάτων χορήγησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα στο πορώδες, τη διαπερατότητα και τις εποχιακές συνθήκες για συνεπή απόδοση αποκατάστασης.





Δ. Παρακολούθηση και Εντοπισμός

Η παρακολούθηση πέρα από τη συγκέντρωση ρύπων είναι απαραίτητη. Οι ομάδες διεξάγουν χημικές αναλύσεις (π.χ., επίπεδα ρύπων, διαλυμένο οξυγόνο, pH, μεταβολικά υποπροϊόντα) περιοδικά σε πολλαπλά βάθη και τοποθεσίες. Παράλληλα, Μοριακά Βιολογικά Εργαλεία (MBTs) όπως η qPCR μετρούν την αφθονία λειτουργικών γονιδίων (π.χ., συνθάση ναφθαλινικού ηλεκτρικού, συνθάση κιτρικού *glfA*for), ενώ οι δοκιμασίες που βασίζονται σε RNA αντικατοπτρίζουν τον ενεργό μικροβιακό μεταβολισμό (Madison et al., 2022).

Πιο συγκεκριμένα, οι αυξήσεις στα μεταγραφήματα του γονιδίου συνθάσης κιτρικού άλατος (*glfA*) του *Geobacter* παρακολουθούν στενά την παροχή οξικού άλατος και τη δραστηριότητα αναγωγής ουρανίου κατά τη διάρκεια των εφαρμογών πεδίου (Methe et al., 2005; Holmes et al., 2007). Οι ερευνητές παρακολουθούν επίσης για δείκτες οξειδωτικού στρες για να διασφαλίσουν ότι διατηρούνται οι αναερόβιες συνθήκες και ότι η μικροβιακή αποικοδόμηση δεν αναστέλλεται από την εισροή οξυγόνου (Holmes et al., 2007).

Ε. Αξιολόγηση και Κλιμάκωση Αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των μετρήσεων μείωσης των ρύπων, όπως ο χρόνος συμμόρφωσης με τους κανονισμούς, βοηθά στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας στο πεδίο. Για παράδειγμα, τα επίπεδα ουρανίου μειώθηκαν κάτω από τα όρια ασφαλείας εντός ~40 ημερών μετά την διέγερση με οξικό άλας (Lovley et al., 2005). Η παράλληλη οικολογική παρακολούθηση, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών στην μικροβιακή ποικιλομορφία, της ανθεκτικότητας της εγγενούς κοινότητας και της απουσίας τοξικών υποπροϊόντων, επιβεβαιώνει την αποκατάσταση του οικοσυστήματος (Xiong et al., 2025). Εάν οι δοκιμές πεδίου είναι επιτυχείς, ο σχεδιασμός για πλήρη εφαρμογή λαμβάνει υπόψη τη δυναμική της εποχιακής ροής, την εφοδιαστική των θρεπτικών συστατικών, τις κανονιστικές εγκρίσεις και την αποδοχή των ενδιαφερόμενων μερών. Τα αποτελέσματα του πεδίου ενημερώνουν για την ανάλυση κόστους-οφέλους και τις μακροπρόθεσμες απαιτήσεις παρακολούθησης.

Για να κατανοήσουν καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζεται και βελτιστοποιείται η μικροβιακή βιοαποκατάσταση σε κλίμακα πεδίου, οι ερευνητές συχνά εξερευνούν προηγμένες και αναδυόμενες έννοιες που βελτιώνουν την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών καθαρισμού. Αυτά τα πρόσθετα θέματα αντιπροσωπεύουν πρωτοποριακές επιστημονικές προσεγγίσεις και παρέχουν ένα ευρύτερο πλαίσιο για φοιτητές που ενδιαφέρονται για την περιβαλλοντική καινοτομία.

α. Μικροβιακή Μεταφορά και Βιομεταφορά

Σε πολλές μολυσμένες περιοχές, ειδικά σε εδάφη και υπόγειους υδροφορείς, τα μικρόβια δεν μένουν απλώς εκεί που βρίσκονται. Κινούνται, μερικές φορές με παθητική ροή στο νερό και άλλες φορές με τη δική τους κινητικότητα. **Βιομεταφορά** αναφέρεται στην κίνηση μικροβιακών πληθυσμών ως απόκριση σε οξυγόνο ή χημικές διαβαθμίσεις. Αυτές οι αυτοοργανωμένες ροές μπορούν να βοηθήσουν τα μικρόβια να φτάσουν σε βαθύτερους ή πιο απρόσιτους ρύπους.





Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα μικρόβια κινούνται μέσα από πορώδη υλικά όπως η άμμος ή ο άργιλος βοηθά τους επιστήμονες να σχεδιάσουν καλύτερα συστήματα έγχυσης ή να επιλέξουν μικροβιακά στελέχη με μεγαλύτερη κινητικότητα. Για παράδειγμα, πρόσφατες μελέτες μοντελοποίησης έχουν διερευνήσει πώς τα βακτήρια κατανέμονται σε συστήματα υπόγειων υδάτων για τη βελτιστοποίηση της διάσπασης των ρύπων, υπογραμμίζοντας τη σημασία της ρευστοδυναμικής στην μικροβιακή αποκατάσταση (Banerjee et al., 2024).

β. Βιοφίλμ ως στρατηγική πεδίου

Τα μικρόβια συχνά προσκολλώνται σε επιφάνειες και σχηματίζουν **βιοφίλμ**, λεπτά στρώματα μικροβιακών κοινοτήτων που περικλείονται σε μια προστατευτική μήτρα. Σε επιτόπιες συνθήκες, τα βιοφίλμ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στρατηγικά: βοηθούν τα μικρόβια να παραμένουν στη θέση τους, να αντιστέκονται στο περιβαλλοντικό στρες και να αλληλεπιδρούν πιο αποτελεσματικά με τους ρύπους. Οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε βιοφίλμ χρησιμοποιούνται συνήθως στην επεξεργασία λυμάτων και τώρα δοκιμάζονται στον καθαρισμό του εδάφους και των ιζημάτων.

Σε συστήματα βιοφραγμάτων, για παράδειγμα, τα μικρόβια σχηματίζουν βιοφίλμ κατά μήκος διαπερατών τοιχωμάτων υπόγεια. Καθώς τα μολυσμένα υπόγεια ύδατα ρέουν μέσα από αυτά, τα μικρόβια στο βιοφίλμ αποικοδομούν ρύπους όπως βαρέα μέταλλα ή υδρογονάνθρακες. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν απαιτείται μακροπρόθεσμη ή παθητική αποκατάσταση σε μεγάλες ή δυσπρόσιτες περιοχές.

γ. Ανοχή της Κοινότητας που Προκαλείται από τη Ρύπανση (PICT)

Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν επίσης μια μέθοδο που ονομάζεται **Ανοχή της Κοινότητας που Προκαλείται από τη Ρύπανση (PICT)** να αξιολογηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι μικροβιακές κοινότητες σε μολυσμένα περιβάλλοντα προσαρμόζονται με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η έννοια βοηθά τους ερευνητές να αξιολογήσουν την υγεία και την ανθεκτικότητα του οικοσυστήματος και να προσδιορίσουν εάν τα μικρόβια που εισήχθησαν στο πεδίο αλλάζουν την εγγενή μικροβιακή ισορροπία με ακούσιους τρόπους.

Για παράδειγμα, εάν μια αυτοφυής μικροβιακή κοινότητα του εδάφους γίνει πιο ανεκτική σε έναν ρύπο με την πάροδο του χρόνου, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει είτε επιτυχή προσαρμογή είτε συνεχιζόμενο περιβαλλοντικό στρες. Η ανάλυση PICT βοηθά τους επιστήμονες να παρακολουθούν την μικροβιακή εξέλιξη και διασφαλίζει ότι το οικοσύστημα ανακάμπτει πραγματικά, όχι απλώς γίνεται ανθεκτικό.

δ. Εργαλεία Multi-Omics για Ανάλυση Πεδίου

Η σύγχρονη περιβαλλοντική επιστήμη βασίζεται ολοένα και περισσότερο σε **πολυ-ομική**, ένας συνδυασμός γονιδιωματικής, μεταγραφομικής, πρωτεωμικής και μεταβολομικής, για την κατανόηση των μικροβίων που υπάρχουν, της δραστηρότητάς τους και των χημικών ουσιών που παράγουν. Αυτά τα εργαλεία επιτρέπουν στους επιστήμονες να παρακολουθούν όχι μόνο την επιβίωση των μικροβίων στο πεδίο, αλλά και τη συμπεριφορά τους σε πραγματικό χρόνο.

Για παράδειγμα, μια πρόσφατη μελέτη χρησιμοποίησε την αλληλούχιση περιβαλλοντικού DNA (eDNA) και RNA για την παρακολούθηση της μικροβιακής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της βιοαποκατάστασης εδαφών μολυσμένων με πετρέλαιο. Αυτές οι τεχνικές βοηθούν να διασφαλιστεί ότι τα μικρόβια όχι μόνο είναι παρόντα, αλλά και διασπούν ενεργά τους ρύπους και δεν παράγουν επιβλαβή υποπροϊόντα στη διαδικασία.

ε. Προγνωστική Μοντελοποίηση και Προσομοίωση

Πριν από την εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα, οι επιστήμονες χρησιμοποιούν **προσομοιώσεις υπολογιστών και προγνωστικά μοντέλα** για να προβλέψουν πώς θα συμπεριφέρονται οι





μικροοργανισμοί σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η ροή του νερού, τα επίπεδα θρεπτικών συστατικών, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση ρύπων.

Τέτοια εργαλεία βοηθούν στο σχεδιασμό καλύτερων πιλοτικών μελετών, εντοπίζοντας ιδανικές συνθήκες για μικροβιακή ανάπτυξη και δραστηριότητα. Για παράδειγμα, οι προσομοιώσεις μπορούν να προβλέψουν εάν μια στρατηγική έγχυσης θρεπτικών συστατικών θα φτάσει στη μολυσμένη ζώνη ή θα διασκορπιστεί πολύ γρήγορα. Συνδυάζοντας εργαστηριακά δεδομένα και περιβαλλοντικές μετρήσεις, τα προγνωστικά μοντέλα μειώνουν την αβεβαιότητα και βελτιώνουν τα ποσοστά επιτυχίας.

Η μετάβαση από το εργαστήριο στο πεδίο είναι ένα σύνθετο αλλά ουσιαστικό ταξίδι στη βιοαποκατάσταση. Κάθε βήμα, από την επιλογή της σωστής τοποθεσίας και των μικροβίων έως την παρακολούθηση, την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τον σχεδιασμό της κλιμάκωσης, διασφαλίζει ότι η προσέγγιση καθαρισμού είναι επιστημονικά άρτια, περιβαλλοντικά ασφαλής και πρακτικά αποτελεσματική σε απρόβλεπτα φυσικά περιβάλλοντα. Η ενσωμάτωση υποθεμάτων όπως η μικροβιακή μεταφορά και η ομική βοήθα να καταδειχθεί πώς τα προηγμένα εργαλεία βελτιώνουν ακόμη περισσότερο αυτή τη διαδικασία.

4. Μελέτες Περιπτώσεων Πραγματικού Κόσμου

Πριν εμβαθύνουμε σε συγκεκριμένα παραδείγματα, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τον σκοπό της μελέτης πραγματικών έργων μικροβιακής βιοαποκατάστασης:

Μελέτες περιπτώσεων από τον πραγματικό κόσμο παρέχουν απτά στοιχεία για το πώς σχεδιάζονται, εφαρμόζονται και αξιολογούνται οι στρατηγικές βιοαποκατάστασης σε σύνθετες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αποκαλύπτουν τι λειτουργεί, ποιες προκλήσεις προκύπτουν και πώς οι επιστήμονες προσαρμόζουν τις μεθόδους στα τοπικά οικοσυστήματα.

Παρακάτω θα βρείτε δύο καλά τεκμηριωμένα έργα πεδίου, το ένα επικεντρώνεται σε υπόγεια ύδατα μολυσμένα με ουράνιο και το άλλο στον καθαρισμό θαλάσσιων πετρελαιοκηλίδων, καθένα από τα οποία παρουσιάζει πώς τα μικρόβια έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την αντιμετώπιση πραγματικών προβλημάτων ρύπανσης.

Μελέτη Περίπτωσης 4.1: Υπόγεια ύδατα μολυσμένα με ουράνιο σε υδροφορέα που επηρεάζεται από την εξόρυξη

- **Πρόβλημα & Τοποθεσία:** Τα υπόγεια ύδατα που είχαν επηρεαστεί προηγουμένως από δραστηριότητες εξόρυξης ουρανίου περιείχαν επικίνδυνα υψηλά επίπεδα διαλυτού ουρανίου (U(VI)), θέτοντας σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα.
- **Προσέγγιση:** Οι επιστήμονες ενθάρρυναν τους ιθαγενείς *Γεωβακτήριοι*ειδη, ιδιαίτερα *Geobacter metallireducens*, με την έγχυση οξικού οξέος ως δότη ηλεκτρονίων στον υδροφόρο ορίζοντα (turn0search21). Αυτό ενίσχυσε τη μικροβιακή αναγωγή του U(VI) σε λιγότερο διαλυτό U(IV), το οποίο καθιζάνει από τα υπόγεια ύδατα.
- **Αποτελέσματα:** Εντός περίπου 40 ημερών, τα πηγάδια καθοδικής κλίσης έδειξαν ότι τα επίπεδα ουρανίου μειώθηκαν κάτω από τα κανονιστικά επίπεδα κινδύνου για την υγεία, ενώ τα πηγάδια αναβάθμισης παρέμειναν αμετάβλητα, υπογραμμίζοντας την περιφερειακή αποτελεσματικότητα (turn 0 search 21). Η βιομετρική και μοριακή παρακολούθηση επιβεβαίωσαν την αυξημένη δραστηριότητα του *Γεωβακτήριου*, ιδιαίτερα





η έκφραση γονιδίων απόκρισης στο στρες όπως *συνεργασία* και *σόδα*(στροφή 0 αναζήτηση 6, στροφή 0 αναζήτηση 14).

- **Σημασία:**Αυτή η πιλοτική δοκιμή πεδίου επιβεβαίωσε ότι η διέγερση των ιθαγενών μικροβιακών πληθυσμών μπορεί να ακινητοποιήσει με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα το ουράνιο επί τόπου, με ελάχιστη οικολογική διαταραχή.

Μελέτη Περίπτωσης 4.2: Βιοαποκατάσταση Θαλάσσιων Πετρελαιοκηλίδων στον Κόλπο του Μεξικού

- **Πρόβλημα & Πλαίσιο:**Κατά τη διάρκεια της πετρελαιοκηλίδας στο Deepwater Horizon, η εκτεταμένη μόλυνση από υδρογονάνθρακες απείλησε την άγρια ζωή στη θάλασσα, τα παράκτια οικοσυστήματα και την τοπική αλιεία.
- **Προσέγγιση:**Μετά την διαρροή, η μικροβιακή παρακολούθηση έδειξε αύξηση των αυτοφυών βακτηρίων που αποικοδομούν το πετρέλαιο, ιδίως *Alcanivorax borkumensis* και *Oleispira Antarctica* Η ανάπτυξή τους ενισχύθηκε περαιτέρω με την προσθήκη θρεπτικών συστατικών (άζωτο και φώσφορος) για την υποστήριξη μικροβιακών κοινοτήτων που παράγουν βιοεπιφανειοδραστικές ουσίες (turn0search1, turn0search26, turn0search22).
- **Αποτελέσματα:**Αυτοί οι ιθαγενείς πληθυσμοί γρήγορα κυριαρχούσαν στις πληγείσες ζώνες, επιταχύνοντας την αποικοδόμηση των υδρογονανθράκων. Μελέτες πεδίου επιβεβαίωσαν την αποτελεσματική αποικοδόμηση των ρύπων χωρίς την εισαγωγή ξένων ειδών (turn0search1, turn0search7).
- **Σημασία:**Αυτό το έργο κατέδειξε ότι τα αυτοφυή θαλάσσια βακτήρια, όταν διεγείρονται σωστά, μπορούν να διαδραματίσουν ισχυρό ρόλο στον καθαρισμό των πετρελαιοκηλίδων με φυσικό και βιώσιμο τρόπο.

Αυτά τα δύο παραδείγματα από τον πραγματικό κόσμο υπογραμμίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι στρατηγικές βιοαποκατάστασης προσαρμόζονται σε συγκεκριμένους ρύπους και οικοσυστήματα. Και στα δύο έργα, οι επιστήμονες συνεργάστηκαν με ιθαγενείς μικροβιακές κοινότητες, διεγείροντας και παρακολουθώντας τις φυσικές τους δραστηριότητες για να επιτύχουν μετρήσιμα αποτελέσματα καθαρισμού με ασφάλεια και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Μελέτες περιπτώσεων πεδίου όπως αυτές επιτρέπουν στους μαθητές να δουν πώς η βιολογία, η χημεία και η περιβαλλοντική επιστήμη συνεργάζονται για να λύσουν προβλήματα ρύπανσης.

Διέγερση in situ του *Γεωβακτήριο* είδη για την απομάκρυνση ουρανίου: επίδειξη πεδίου (2003) συμπεριλαμβανομένης της γονιδιακής έκφρασης του *συνεργασία* και *σόδα*(Λόβλεϊ κ.ά.)

- Μελέτη πεδίου που δείχνει *Alcanivorax borkumensis* Κυριαρχία και δραστηριότητα σε ζώνες θαλάσσιων πετρελαιοκηλίδων (μετά το Deepwater Horizon)
- Ανασκόπηση των μηχανισμών βιοαποκατάστασης υδρογονανθράκων και της μικροβιακής απόκρισης σε πραγματικά περιστατικά πετρελαιοκηλίδας [Σύνοψη+15PMC+15PMC+15](#)
- Περισσότερα για *G. metallireducens* μείωση του ουρανίου και του βαναδίου σε μολυσμένους υδροφορείς (σύνοψη Wikipedia) [NRC Web+13Wikipedia+13ScienceDirect+13](#)



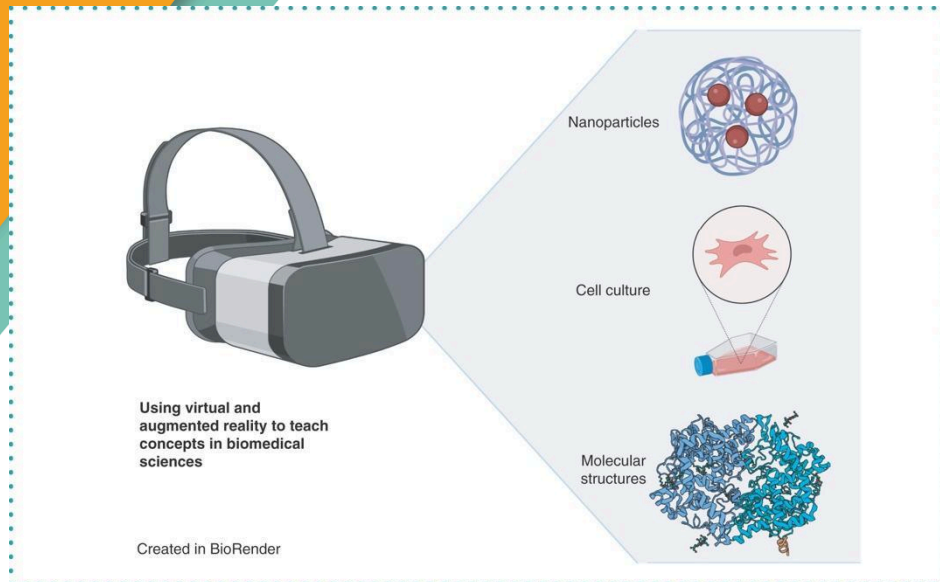


Fig 1- AR in biomedical science, source: Hemme et al., 2023

Καθώς οι στρατηγικές μικροβιακής βιοαποκατάστασης μεταβαίνουν από εργαστηριακές διατάξεις σε σύνθετα περιβάλλοντα πεδίου, οι επιστήμονες αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις: την παρακολούθηση της μικροβιακής συμπεριφοράς επί τόπου, την επικοινωνία χωρικών και χρονικών δεδομένων στα ενδιαφερόμενα μέρη και τη διασφάλιση της ασφάλειας του οικοσυστήματος. Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) διερευνάται ολοένα και περισσότερο ως ψηφιακή διεπαφή που μπορεί να βελτιώσει την οπτικοποίηση, την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την ερμηνεία δεδομένων στις περιβαλλοντικές επιστήμες. Ενώ η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) έχει εφαρμοστεί ευρέως στην περιβαλλοντική εκπαίδευση και την βιομηχανική παρακολούθηση, η χρήση της στη μικροβιακή βιοαποκατάσταση αναδύεται, υποστηριζόμενη από τις εξελίξεις στην ενσωμάτωση γεωχωρικών δεδομένων, την οπτικοποίηση omics και τις ψηφιακές διεπαφές πεδίου.

1. Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) για την Οπτικοποίηση της Μικροβιακής Δραστηριότητας και της Αποικοδόμησης Ρύπων

Η επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) μπορεί να βοηθήσει τους επιστήμονες **οπτικοποιήστε τις μικροβιακές αλληλεπιδράσεις με τους ρύπους** σε τρισδιάστατη απεικόνιση, επικαλυμμένη σε πραγματικά περιβάλλοντα. Σε δοκιμές πεδίου, η κατανόηση του πού και του πώς λειτουργούν οι μικροοργανισμοί, ειδικά σε υποεπιφανειακά ή υδάτινα συστήματα, είναι κρίσιμη. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της *in situ* βιοαποκατάστασης ουρανίου, η χωρική κατανόηση των ζωνών όπου...*Γεωβακτήριο* η ύπαρξη ενεργών ειδών είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της επιτυχίας της αποκατάστασης.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικάλυψη **περιβαλλοντικά γεωχωρικά δεδομένα**, όπως οι συγκεντρώσεις ρύπων, η ροή των υπόγειων υδάτων ή η κατανομή θρεπτικών συστατικών, σε φυσικές τοποθεσίες χρησιμοποιώντας δισκία





ή γυαλιά AR (Silva & Gültekin, 2021). Αυτό επιτρέπει στους ερευνητές πεδίου να «δουν» πού αναμένεται να κορυφωθεί η μικροβιακή δραστηριότητα και βοηθά στη συσχέτιση της απόδοσης αποικοδόμησης με περιβαλλοντικές μεταβλητές όπως το pH, το οξειδοαναγωγικό δυναμικό ή η βιοδιαθεσιμότητα.

2. Ενσωμάτωση AR και Multi-Omics στην παρακολούθηση πεδίου

Μία από τις βασικές προκλήσεις στις δοκιμές πεδίου είναι η ερμηνεία των **δεδομένα πολλαπλών ομικών** (π.χ., μεταγονιδιωματική, μεταγραφομική) που συλλέγονται από δειγματοληπτικά φρέατα και πυρήνες εδάφους. Παραδοσιακά, αυτά τα σύνολα δεδομένων αναλύονται σε εργαστήρια και απεικονίζονται σε υπολογιστές. Ωστόσο, **Η επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) μπορεί να επιτρέψει την απεικόνιση της έκφρασης μικροβιακών γονιδίων σε πραγματικό χρόνο, βάσει τοποθεσίας, ή μετακινήσεις πληθυσμού.**

Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας μια διεπαφή AR, οι ερευνητές θα μπορούσαν να κατευθύνουν μια συσκευή σε ένα φρέατο παρακολούθησης και να δουν τη σχετική αφθονία γονιδίων που σχετίζονται με τη μείωση του ουρανίου (π.χ. *συνεργασία*, *σόδα*) ή οδούς αποικοδόμησης υδρογονανθράκων σε εδάφη που έχουν επηρεαστεί από πετρέλαιο (Guo et al., 2023). Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο υποστηρίζει την χωρική ερμηνεία σύνθετων μικροβιακών δεδομένων, αλλά διευκολύνει και τη συνεργασία μεταξύ ομάδων πεδίου και αναλυτών εργαστηρίου.

Πρόσφατες μελέτες στη μικροβιακή οικολογία έχουν τονίσει το όφελος της AR σε **παρουσίαση μεταγονιδιωματικών δεδομένων στο πλαίσιο**, βελτιώνοντας την επιστημονική επικοινωνία και επιτρέποντας πιο διαισθητική λήψη αποφάσεων κατά την παρακολούθηση του χώρου (Wang et al., 2022).

3. AR για την Εκτίμηση Κινδύνου και την Οικολογική Ασφάλεια

Οι μικροβιακές δοκιμές σε επιτόπια κλίμακα πρέπει να αντιμετωπίζουν οικολογικά ζητήματα και ζητήματα ασφάλειας, ειδικά όταν εμπλέκονται γενετικά τροποποιημένοι οργανισμοί (ΓΤΟ). Η επαυξημένη ορμόνη μπορεί να παρέχει μια οπτική... **χάρτης κινδύνου** για να επισημάνω:

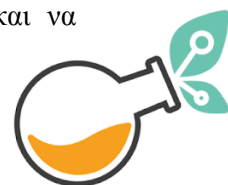
- Περιοχές πιθανής μικροβιακής υπερανάπτυξης,
- Περιοχές στα όρια όπου θα μπορούσαν να εξαπλωθούν οι εισαγόμενοι μικροοργανισμοί,
- Θερμά σημεία υποβάθμισης ή ζώνες τοξικών υποπροϊόντων.

Αυτή η προσέγγιση αντικατοπτρίζει τη χρήση της Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) στην υγειονομική περίθαλψη και τη βιοασφάλεια, όπου χρησιμοποιούνται επικαλύψεις σε πραγματικό χρόνο για την παρακολούθηση ζωνών μόλυνσης (π.χ., Clean-AR για χαρτογράφηση κινδύνου από αερομεταφερόμενα αίτια σε νοσοκομεία: Schmidt et al., 2021). Η προσαρμογή αυτής της στρατηγικής στην περιβαλλοντική βιοαποκατάσταση θα μπορούσε να βελτιώσει την απόκριση στο πεδίο και τον σχεδιασμό περιορισμού.

4. Επικοινωνία με την υποστήριξη της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών

Τα μεγάλης κλίμακας έργα βιοαποκατάστασης συχνά περιλαμβάνουν πολλαπλά ενδιαφερόμενα μέρη: επιστήμονες, περιβαλλοντικές ρυθμιστικές αρχές, γαιοκτήμονες και τοπικές κοινότητες. **Η επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) έχει αποδειχθεί αποτελεσματική ως εργαλείο επιστημονικής επικοινωνίας**, επιτρέποντας σε μη ειδικούς να κατανοήσουν πολύπλοκες στρατηγικές αποκατάστασης (Garzón et al., 2019).

Σε πιλοτικές μελέτες, η AR έχει χρησιμοποιηθεί για να **επικάλυψη προτεινόμενων σχεδίων παρέμβασης πεδίου**, όπως ζώνες βιοφραγμού ή φρέατα έγχυσης θρεπτικών συστατικών, σε φυσικούς χάρτες ή σε πραγματικές συνθήκες πεδίου. Αυτό επιτρέπει στα ενδιαφερόμενα μέρη να οπτικοποιήσουν πιθανά αποτελέσματα, να αξιολογήσουν τα χρονοδιαγράμματα αποκατάστασης του χώρου και να συμμετάσχουν ουσιαστικά στη διαδικασία έρευνας.





Αν και εξακολουθεί να αναδύεται στον τομέα της μικροβιακής βιοαποκατάστασης, **Οι τεχνολογίες AR είναι έτοιμες να βελτιώσουν σημαντικά τις επιχειρήσεις σε κλίμακα πεδίου**, ειδικά όταν ενσωματώνονται με δεδομένα omics, γεωχωρική ανάλυση και οικολογική παρακολούθηση. Αυτές οι εφαρμογές ευθυγραμμίζονται καλά με τη μετάβαση «από το εργαστήριο στο πεδίο», καθιστώντας τις αόρατες βιολογικές και χημικές διεργασίες προσβάσιμες, μετρήσιμες και κατανοητές σε πραγματικό χρόνο. Καθώς η περιβαλλοντική έρευνα συνεχίζει να ψηφιοποιείται και να εκδημοκρατικοποιείται, η AR ξεχωρίζει ως ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την υποστήριξη τόσο της επιστημονικής αυστηρότητας όσο και της δημόσιας διαφάνειας.

5. Παραδείγματα Πραγματικού Κόσμου Επαυξημένης Πραγματικότητας (ΕΠ) σε Περιβαλλοντικούς ή Βιολογικά Συναφείς Τομείς

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (ΕΠ) έχει εξελιχθεί ραγδαία από ένα εργαλείο οπτικής αλληλεπίδρασης σε μια λειτουργική διεπαφή για σύνθετη επιστημονική παρακολούθηση και λήψη αποφάσεων. Στην περιβαλλοντική επιστήμη και τη βιοτεχνολογία, η ΕΠ αρχίζει να γεφυρώνει φυσικά τοπία με δεδομένα πραγματικού χρόνου, επιτρέποντας σε ερευνητές, μηχανικούς και υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να αλληλεπιδρούν με αόρατες βιολογικές ή χημικές διεργασίες στον τόπο ενδιαφέροντος.

Ενώ οι άμεσες εφαρμογές της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) στη μικροβιακή βιοαποκατάσταση βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη, υπάρχει ένα αυξανόμενο σύνολο παραδειγμάτων από τον πραγματικό κόσμο. **περιβαλλοντική παρακολούθηση, έλεγχος της ρύπανσης, οπτικοποίηση δεδομένων και αξιολόγηση κινδύνου** καταδεικνύει το ισχυρό δυναμικό της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για την ενίσχυση των διεργασιών «από το εργαστήριο στο πεδίο». Παρακάτω παρατίθενται βασικά παραδείγματα με επιπτώσεις στον μικροβιακό καθαρισμό σε πραγματικά οικοσυστήματα.

5.1. Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) για Επιτόπια Παρακολούθηση Περιβάλλοντος και Οπτικοποίηση Δεδομένων

Επισκόπηση

Η περιβαλλοντική παρακολούθηση σε χώρους επιτόπιων εργασιών συνήθως περιλαμβάνει την ανάπτυξη αισθητήρων, τη συλλογή δειγμάτων και τη διεξαγωγή ανάλυσης εκτός χώρου, μεθόδων που συχνά καθυστερούν τον χρόνο απόκρισης και περιορίζουν το χωρικό πλαίσιο. Στην περίπτωση της μικροβιακής βιοαποκατάστασης, αυτό καθίσταται ιδιαίτερα προβληματικό, καθώς η μικροβιακή δραστηριότητα, οι συνθήκες οξειδοαναγωγής ή οι διαβαθμίσεις συγκέντρωσης ρύπων είναι σε μεγάλο βαθμό αόρατες και εξαιρετικά δυναμικές. **Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR)** αντιμετωπίζει αυτά τα ζητήματα επιτρέποντας την οπτικοποίηση δεδομένων πεδίου σε πραγματικό χρόνο, με χωρική αγκύρωση, επιτρέποντας στους επιστήμονες να αλληλεπιδρούν με περιβαλλοντικές πληροφορίες ακριβώς στο σημείο που είναι πιο σχετικές (Wang et al., 2022; Pokrić et al., 2012).



Τα συστήματα AR μπορούν να συγχωνεύσουν:

- Δεδομένα περιβαλλοντικών αισθητήρων (π.χ. pH, διαλυμένο οξυγόνο, θερμοκρασία),
- Διατάξεις τοποθεσίας που βασίζονται σε GIS (π.χ. ζώνες πηγής ρύπων),
- Προγνωστικά μοντέλα (π.χ., COMSOL/MODFLOW),
- Πρότυπα μικροβιακής δραστηριότητας (π.χ., αφθονία ή προφίλ γονιδιακής έκφρασης που βασίζονται στο eDNA).

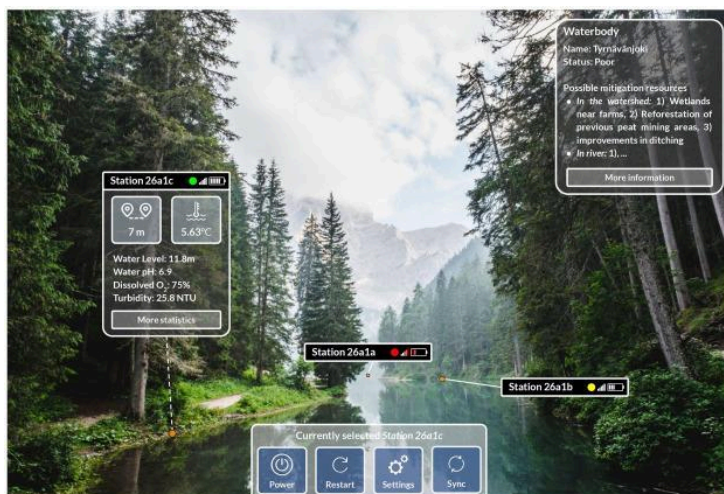
Αυτό επιτρέπει στους ερευνητές, τους περιβαλλοντικούς μηχανικούς ή τους διαχειριστές εγκαταστάσεων να «βλέπει» **χημικές και βιολογικές διεργασίες** επικαλύπτονται στο πραγματικό πεδίο, διευκολύνοντας έγκαιρες και τεκμηριωμένες παρεμβάσεις (Zhang et al., 2023).

Επιστημονικές Εφαρμογές στη Μικροβιακή Βιοαποκατάσταση

Σε έργα μικροβιακής αποκατάστασης, η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) μπορεί:

- Εμφάνιση **συγκεντρώσεις σε πραγματικό χρόνο** ρύπων όπως ουράνιο, υδρογονάνθρακες ή νιτρικά άλατα απευθείας στην επιφάνεια ενός πεδίου·
- Επικάλυψη **ζώνες μικροβιακού αποικισμού**(βάσει δεδομένων qPCR, eDNA ή omics) σε φυσικές τοποθεσίες δειγματοληψίας·
- Εμφάνιση **ζώνες βιοδιαθεσιμότητας**, όπου οι ρύποι είναι προσβάσιμοι ή απρόσιτοι στην μικροβιακή αποικοδόμηση με βάση το πορώδες του εδάφους ή την κατάσταση σύνδεσης (Guo et al., 2023)·
- Οπτική αναπαράσταση **επίδραση του φρέατος έγχυσης**, π.χ., δείχνοντας πώς το οξικό άλας εξαπλώνεται στο υπέδαφος για να διεγείρει *Γεωβακτήριο*πληθυσμοί (Lovley et al., 2003; Zhang et al., 2023).

Αυτές οι εφαρμογές μετατοπίζουν την παρακολούθηση της βιοαποκατάστασης από αντιδραστική σε προληπτική: πιθανές βλάβες μπορούν να εντοπιστούν έγκαιρα και οι επιστήμονες αποκτούν έναν χάρτη μικροβιακής δραστηριότητας και συμπεριφοράς ρύπων σε πραγματικό χρόνο.





Παραδείγματα Πραγματικών Συστημάτων Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR)

ekoNET: Πλατφόρμα Παρακολούθησης Περιβάλλοντος με Ενεργοποίηση Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR)

Αναπτύχθηκε ως σύστημα παρακολούθησης ρύπανσης βασισμένο στο IoT, **ekoNET** Ενσωματώνει την κινητή επαυξημένη πραγματικότητα (AR) με περιβαλλοντικούς αισθητήρες για την απεικόνιση της ποιότητας του αέρα και του νερού σε πραγματικό χρόνο επί τόπου (Pokrić et al., 2012). Οι χρήστες σαρώνουν το περιβάλλον χρησιμοποιώντας κινητές συσκευές για να δουν τα επίπεδα ρύπων όπως το CO₂, OX₂, και θολότητα.

Επιπτώσεις για τη Βιολογική Αποκατάσταση: Σε μικροβιακές δοκιμές πεδίου, μια παρόμοια ρύθμιση θα μπορούσε να διαμορφωθεί για να εμφανίζει χάρτες των εξής:

- Υπόγεια λοφία ρύπων,
- Ζώνες διάχυσης θρεπτικών συστατικών,
- Αντιδραστικά φράγματα ενισχυμένα με μικροβιακές κοινοπραξίες.

Οπτικοποίηση υπόγειων υδάτων με χρήση AR (επαυξημένης πραγματικότητας)

Οι Zhang et al. (2023) ανέπτυξαν ένα εργαλείο επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για την οπτικοποίηση της ροής των υπόγειων υδάτων, της διασποράς ρύπων και των υποδομών αποκατάστασης χρησιμοποιώντας γεωαναφερμένα τρισδιάστατα μοντέλα. Αυτό το σύστημα επέτρεψε στους χρήστες να κατανοήσουν τις χωρικές σχέσεις μεταξύ πηγών ρύπων, καθαρών ζωνών και ζωνών μικροβιακής δραστηριότητας σε πραγματικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Εφαρμογή σε δοκιμές πεδίου: Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) θα μπορούσε να βοηθήσει σε πιλοτικές περιοχές μικροβιακής αποκατάστασης, δείχνοντας πώς οι συγκεντρώσεις ρύπων αλλάζουν χωρικά μετά τον μικροβιακό εμβολιασμό ή την έγχυση θρεπτικών συστατικών, απευθείας επί τόπου, χωρίς να χρειάζεται να συμβουλευτείτε πλατφόρμες GIS ή να περιμένετε τα αποτελέσματα των εργαστηριακών εξετάσεων.

Ενσωμάτωση με Omics και μοντέλα προσομοίωσης

Η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) έχει αυξανόμενες δυνατότητες υποστήριξης **ερμηνεία πεδίου με βάση την πολυομική**. Οι Wang et al. (2022) κατέδειξαν την ενσωμάτωση της AR με τη μεταγονιδιωμική, επιτρέποντας στους χρήστες να επικαλύπτουν την λειτουργική γονιδιακή έκφραση (π.χ. *συνεργασία*, *alkB*, *narG*) σε συγκεκριμένες θέσεις με ετικέτα GPS, παράγοντας χωρικές όψεις των μικροβιακών λειτουργιών.

Συνάφεια με τις μικροβιακές δοκιμές πεδίου:

- Οι ομάδες πεδίου θα μπορούσαν να οπτικοποιήσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα που συνδέεται με την υποβάθμιση των ρύπων σε πραγματικό χρόνο.
- Τα δεδομένα Omics θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να επαληθευτεί εάν τα μικρόβια μειώνουν ενεργά τους ρύπους ή απλώς επιβιώνουν.

Εργαλεία προσομοίωσης όπως το COMSOL ή το MODFLOW μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της διασποράς θρεπτικών συστατικών ή της μικροβιακής μεταφοράς. Όταν συνδυάζονται με AR (επαυξημένη πραγματικότητα), αυτά τα μοντέλα μπορούν να...**αναμενόμενα αποτελέσματα του έργου απευθείας στον ιστότοπο**, βοηθώντας στον σχεδιασμό συστημάτων έγχυσης και σταθμών παρακολούθησης (Silva & Gültekin, 2021).

Οφέλη στην πρακτική της βιοαποκατάστασης

1. Λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο

Συνδυάζοντας τις επιτόπιες απεικονίσεις με ζωντανά δεδομένα, οι ομάδες πεδίου μπορούν να





προσαρμόσουν γρήγορα τις στρατηγικές βιοαποκατάστασης (π.χ., αλλαγή της έγχυσης θρεπτικών συστατικών, αλλαγή σχεδίων δειγματοληψίας).

2. Βελτιωμένη Χωρική Επίγνωση

Η οπτικοποίηση των χημικών διαβαθμίσεων ή των ζωνών μικροβιακής αφθονίας απευθείας στο πεδίο βοηθά στον ακριβέστερο στόχο της αποκατάστασης.

3. Βελτιωμένη επικοινωνία

Τα ενδιαφερόμενα μέρη (π.χ. γαιοκτήμονες, ρυθμιστικές αρχές) μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τις αόρατες διαδικασίες, χτίζοντας εμπιστοσύνη και επιτρέποντας μια σαφέστερη επικοινωνία σχετικά με τους κινδύνους.

4. Παρακολούθηση ασφάλειας και περιορισμού

Η αντιρετροϊκή αγωγή μπορεί να επισημάνει ζώνες όπου μπορεί να εμφανιστεί μικροβιακή υπερανάπτυξη ή δευτερογενείς ρύποι, υποστηρίζοντας τη βιοασφάλεια σε περιπτώσεις που αφορούν γενετικά τροποποιημένους οργανισμούς (Schmidt et al., 2021).

5.2. Πλούσια Εκροή: Μοντελοποίηση AR της Μικροβιακής και Χημικής Δυναμικής

Αναπτύχθηκε από τους Silva & Gültekin (2021). *Πλούσια Λύματα* είναι μια εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας (AR) που προσομοιώνει τις περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ρύπων και μικροβιακών πληθυσμών. Το μοντέλο ενσωματώνει:

- Δυναμική θρεπτικών συστατικών,
- Φάσεις μικροβιακής ανάπτυξης,
- Ρυθμοί αποικοδόμησης ρύπων.

1. Δυναμική των θρεπτικών συστατικών

Ορισμός:

Η δυναμική των θρεπτικών συστατικών αναφέρεται στο **μετακίνηση, μετασχηματισμός, διαθεσιμότητα και πρόσληψη απαραίτητων θρεπτικών συστατικών** (π.χ., άνθρακας, άζωτο, φώσφορος, οξυγόνο ή δότες ηλεκτρονίων όπως το οξικό άλας) που υποστηρίζουν τη μικροβιακή ζωή και επηρεάζουν τη δραστηριότητά τους σε μολυσμένα περιβάλλοντα.

Στο πλαίσιο της βιοαποκατάστασης:

- Οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό των αγρών βασίζονται στα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των ρύπων.
- Μερικές φορές, τα θρεπτικά συστατικά είναι **φυσικά παρόν**, αλλά σε πολλές περιπτώσεις, πρέπει να είναι **προστέθηκε τεχνητά** (βιοδιέγερση) για την ενθάρρυνση της μικροβιακής αποικοδόμησης.
- Για παράδειγμα, σε υδροφορείς μολυσμένους με ουράνιο, **οξικό άλας** εγχέεται για να διεγείρει *Γεωβακτήριοειδη*, τα οποία το χρησιμοποιούν ως δότη ηλεκτρονίων για να ανάγουν το διαλυτό U(VI) σε αδιάλυτο U(IV) (Lovley et al., 2003).

Στη Μοντελοποίηση AR:

- Η δυναμική των θρεπτικών συστατικών απεικονίζεται ως **ζώνες εξάπλωσης ή διαβαθμίσεις συγκέντρωσης** που αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου.
- Οι φοιτητές ή οι ερευνητές μπορούν να δουν πώς **περιοχές πλούσιες σε θρεπτικά συστατικά** επιτρέπουν την αύξηση της μικροβιακής ανάπτυξης και της διάσπασης των ρύπων.
- Η προσομοίωση μπορεί επίσης να δείξει **ανταγωνισμός για θρεπτικά συστατικά**, επηρεάζοντας τα μικρόβια που κυριαρχούν.





2. Φάσεις Μικροβιακής Ανάπτυξης

Ορισμός:

Οι φάσεις μικροβιακής ανάπτυξης περιγράφουν το **κύκλος τεσσάρων σταδίων** που συνήθως ακολουθούν οι μικροβιακοί πληθυσμοί όταν εισάγονται σε ένα νέο περιβάλλον ή υπόστρωμα:

1. **Φάση καθυστέρησης**– Περίοδος προσαρμογής κατά την οποία οι μικροοργανισμοί προσαρμόζονται στις νέες συνθήκες (καμία ανάπτυξη).
2. **Λογαριθμική (Εκθετική) Φάση**– Ταχεία αναπαραγωγή λόγω άφθονων θρεπτικών συστατικών.
3. **Στατική Φάση**– Η ανάπτυξη επιβραδύνεται καθώς τα θρεπτικά συστατικά εξαντλούνται και συσσωρεύονται απόβλητα.
4. **Φάση Θανάτου**– Τα μικρόβια πεθαίνουν λόγω έλλειψης πόρων ή συσσώρευσης τοξικών υποπροϊόντων.

Στο πλαίσιο της βιοαποκατάστασης:

- Η κατανόηση των φάσεων ανάπτυξης είναι το κλειδί για την **παρεμβάσεις πεδίου χρονισμού** όπως ο επαναεμβολιασμός ή η επαναεφαρμογή θρεπτικών συστατικών.
- Για παράδειγμα, εάν ένας μικροβιακός πληθυσμός βρίσκεται σε στατική φάση, η αποικοδόμηση των ρύπων θα σταθεροποιηθεί χωρίς περαιτέρω δράση.

Στη Μοντελοποίηση AR:

- Αυτές οι φάσεις αναπαρίστανται οπτικά, όπως **φυσαλίδες μικροβιακών αποικιών που επεκτείνονται και σταθεροποιούνται** ή αλλάζουν χρώμα καθώς εισέρχονται σε διαφορετικές φάσεις.
- Οι χρήστες μπορούν **προσαρμογή συνθηκών** (π.χ. θερμοκρασία, εισροή θρεπτικών συστατικών) και να παρατηρήσουν πώς μεταβάλλεται η φάση ανάπτυξης, βοηθώντας τους να κατανοήσουν **λεπτή ισορροπία** που απαιτούνται για την επιτυχή βιοαποκατάσταση σε κλίμακα πεδίου.

3. Ρυθμοί Αποικοδόμησης Ρύπων

Ορισμός:

Ο ρυθμός αποικοδόμησης των ρύπων είναι **η ταχύτητα με την οποία ένας συγκεκριμένος ρύπος διασπάται ή μετασχηματίζεται** σε λιγότερο επιβλαβείς ουσίες μέσω μικροβιακών ή χημικών διεργασιών.

Στο πλαίσιο της βιοαποκατάστασης:

- Τα μικρόβια μπορούν να αποικοδομήσουν τους ρύπους μέσω:
 - ο **Αερόβια υποβάθμιση** (με οξυγόνο) – π.χ., υδρογονάνθρακες από *Ψευδομονάδα* spp.
 - ο **Αναερόβια αποικοδόμηση** (χωρίς οξυγόνο) – π.χ. ουράνιο ή νιτρικό άλας από *Γεωβακτήριο* spp.
- Παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό υποβάθμισης περιλαμβάνουν:
 - ο Αποδοτικότητα μικροβιακού στελέχους,
 - ο Θερμοκρασία και pH,
 - ο Συγκέντρωση ρύπων και χημική μορφή,
 - ο Διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών και συνθήκες οξειδοαναγωγής.

Στη Μοντελοποίηση AR:

- Τα ποσοστά υποβάθμισης αντιπροσωπεύονται μέσω **καμπύλες οπτικής φθοράς, αλλαγές χρώματος στο νέφος ρύπων ή χρονισμένες κινούμενες εικόνες** δείχνοντας πόσος ρύπος παραμένει με την πάροδο του χρόνου.
- Οι χρήστες μπορούν να παρατηρήσουν πώς οι μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ., η έγχυση περισσότερων θρεπτικών συστατικών ή η μετατόπιση του pH) επηρεάζουν το **χρονοδιάγραμμα αποικοδόμησης**.





Γιατί αυτά τα τρία είναι αλληλένδετα

Αυτές οι τρεις διαδικασίες, διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών, μικροβιακή ανάπτυξη και υποβάθμιση των ρύπων, σχηματίζουν ένα δυναμικός βρόχος ανατροφοδότησης στη βιοαποκατάσταση:

1. **Διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών** επηρεάζει...
2. **Μικροβιακή ανάπτυξη**, το οποίο οδηγεί...
3. **Υποβάθμιση ρύπων**, τα οποία μπορεί να καταναλώνουν θρεπτικά συστατικά και να παράγουν υποπροϊόντα, επηρεάζοντας την μικροβιακή υγεία.

Η μοντελοποίηση αυτού του συστήματος σε AR επιτρέπει στους χρήστες να **δείτε αυτές τις αλληλεξαρτήσεις** στην πράξη, προσφέροντας βαθύτερη κατανόηση σε περιβαλλοντικούς επιστήμονες, φοιτητές ή τεχνικούς πεδίου.

Βασικά χαρακτηριστικά:

- Οπτικοποιεί τις αλλαγές στη συγκέντρωση χημικών ουσιών με την πάροδο του χρόνου.
- Προσομοιώνει τις μικροβιακές αποκρίσεις υπό διαφορετικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες στρες.
- Λειτουργεί σε πλατφόρμες AR για κινητά (π.χ. smartphones, tablets).

Συνάφεια με τη Βιολογική Αποκατάσταση:

Αυτή η εφαρμογή αντιπροσωπεύει μια πρώιμη αλλά πρακτική προσέγγιση για **AR βασισμένο σε μοντέλο για προσομοίωση διαδικασιών αποκατάστασης**, βοηθώντας ερευνητές ή φοιτητές να προβλέψουν αποτελέσματα υπό συνθήκες πεδίου. Σε πραγματικά έργα αποκατάστασης, τέτοια εργαλεία μπορούν να υποστηρίξουν τον σχεδιασμό συστημάτων έγχυσης ή βελτιώσεων θρεπτικών συστατικών, δείχνοντας την αναμενόμενη μικροβιακή συμπεριφορά σε βάθος χρόνου και χώρου.

5.3. Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) για την Ευαισθητοποίηση σχετικά με την Αστική και Βιομηχανική Ρύπανση

Ερευνητές στην Ιταλία έχουν εφαρμόσει ένα σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για την ενίσχυση της ευαισθητοποίησης του κοινού σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση. Το σύστημα επικαλύπτει... **Μετρήσεις του Δείκτη Ποιότητας Αέρα (AQI) και πηγές ρύπων** σε φυσικές τοποθεσίες χρησιμοποιώντας GIS και AR για κινητά.

Μελέτη περίπτωσης:

- Περιφέρεια Marche, Ιταλία (Sanità et al., 2024): Το σύστημα ενσωμάτωσε δορυφορικά δεδομένα, αστικούς αισθητήρες και μοντέλα AQI, επιτρέποντας στους χρήστες να «περπατούν» μέσα από μολυσμένες ζώνες και να απεικονίζουν τα επίπεδα NO₂, PM_{2.5} και όζον σε πραγματικό χρόνο.

Συνάφεια με τη Βιολογική Αποκατάσταση:

Αν και αναπτύχθηκε για την αστική ατμοσφαιρική ρύπανση, αυτή η περίπτωση χρήσης καταδεικνύει το **Η οπτική δύναμη της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) στην απεικόνιση αόρατων περιβαλλοντικών απειλών**. Ομοίως, η επαυξημένη οξειδωτική ανάλυση (AR) μπορεί να προσαρμοστεί σε τοποθεσίες μικροβιακών πεδίων για να εμφανίσει υπόγεια ρεύματα βαρέων μετάλλων ή πετρελαίου, θερμά σημεία μικροβιακής δραστηριότητας ή εξελισσόμενες ζώνες οξειδοαναγωγής που επηρεάζουν τη βιοδιαθεσιμότητα των ρύπων.

5.4. Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) για Διαδραστικό Σχεδιασμό Πεδίου σε Έργα Νερού και Εδάφους

Στη βιομηχανική αποκατάσταση, η διαχείριση πολλαπλών εισροών, φρεατίων δειγματοληψίας, σημείων έγχυσης και ζωνών αυτοφυών ειδών είναι πολύπλοκη από άποψη εφοδιαστικής. Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) μπορεί να υποστηρίξει:





- Επικάλυψη στοιχείων υποδομής επί τόπου·
- Παρακολούθηση της προόδου (π.χ., καθαρισμένες ζώνες, μικροβιακή αφθονία)·
- Προσομοίωση ροών έγχυσης και κίνησης μετώπου υποβάθμισης.

Παράδειγμα:

- **Επαυξημένη Πραγματικότητα για Κινητές Συσκευές για Παρακολούθηση Περιβάλλοντος**(Stojanovic et al., 2012): Επίδειξη της χρήσης πλατφορμών επαυξημένης πραγματικότητας για κινητές συσκευές για την οπτικοποίηση περιβαλλοντικών προσομοιώσεων που συνδέονται με γεωαναφερμένα δεδομένα.

Συνάφεια με τη Βιολογική Αποκατάσταση:

Αυτό το μοντέλο μπορεί να βελτιώσει άμεσα **επιτόπια εφοδιαστική και επικοινωνία** στον μικροβιακό καθαρισμό, επιτρέποντας την επιθεώρηση σε πραγματικό χρόνο των ζωνών που χρειάζονται μικροβιακό επαναεμβολιασμό, των περιοχών όπου μειώνονται τα επίπεδα ρύπων ή του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλονται οι μικροβιακές κοινότητες μετά την επεξεργασία.

5.5. Clean-AR: AR για Χαρτογράφηση Κινδύνου και Έλεγχου Μόλυνσης

Αρχικά αναπτύχθηκε για νοσοκομεία για τη διαχείριση των κινδύνων ασθενειών που προκαλούνται από τον αέρα, **Καθαρή Επαυξημένη Πραγματικότητα (Clean-AR)** χρησιμοποιεί γυαλιά AR και τρισδιάστατη μοντελοποίηση για να:

- Προσδιορίστε τις οδούς μόλυνσης.
- Επισημάνετε επιφάνειες υψηλού κινδύνου.
- Παρακολουθήστε την εξάπλωση των παθογόνων σε πραγματικό χρόνο (Schmidt et al., 2021).

Συνάφεια με τη Βιολογική Αποκατάσταση:

Σε μικροβιακές εφαρμογές πεδίου, ειδικά με γενετικά τροποποιημένα μικρόβια, η παρακολούθηση **οικολογικές ζώνες περιορισμού** είναι απαραίτητο. Η επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) θα μπορούσε ομοίως να χρησιμοποιηθεί για:

- Σημειώστε τα όρια όπου οι εισαγόμενοι μικροοργανισμοί δεν πρέπει να εξαπλωθούν.
- Προσδιορίστε ζώνες υπερανάπτυξης βιοφίλμ.
- Ειδοποιήστε τους ερευνητές για ακούσια μικροβιακή μετανάστευση πέρα από τις ζώνες επεξεργασίας.

Αυτό διασφαλίζει **συμμόρφωση με τους κανονισμούς βιοασφάλειας και διαφανής τεκμηρίωση**, ιδίως σε ευαίσθητα από κανονιστική άποψη πλαίσια.

5.6. Αναδυόμενη Έρευνα: AR + Πολυ-Ομική για Βιοπληροφορική Πεδίου

Πρόσφατη εργασία υποδηλώνει ότι η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) μπορεί να ενσωματωθεί με **πλατφόρμες omics**(μεταγονιδιωματική, μεταβολομική, μεταγραφομική) για την παρουσίαση μικροβιακών λειτουργικών δεδομένων στο διάστημα.

Παράδειγμα:

- Οι Wang et al. (2022) ανέπτυξαν μια μηχανή οπτικοποίησης AR που ενσωματώνει δεδομένα περιβαλλοντικού DNA (eDNA) με συντεταγμένες GPS για την παραγωγή χωρικά ακριβών επικαλύψεων μικροβιακής ποικιλομορφίας και λειτουργικών χαρακτηριστικών σε πραγματικά τοπία.

Συνάφεια με τη Βιολογική Αποκατάσταση:

Αυτό έχει άμεση χρησιμότητα σε επιτόπιες μελέτες όπου οι ερευνητές πρέπει να αξιολογήσουν εάν οι μικροοργανισμοί αποικοδομούν ενεργά τους ρύπους, εκφράζοντας συγκεκριμένα γονίδια (π.χ. *alkB*, *pahR*, *συνεργασία*), ή σχηματίζοντας κοινοπραξίες. Με την Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR), τέτοια δεδομένα θα μπορούσαν να οπτικοποιηθούν επί τόπου για άμεση οικολογική ερμηνεία.

Αυτά τα παραδείγματα από τον πραγματικό κόσμο καταδεικνύουν πώς η Επαυξημένη Πραγματικότητα (ΕΠ) χρησιμοποιείται σε όλους τους περιβαλλοντικούς τομείς για την απεικόνιση





της μόλυνσης, την προσομοίωση της δυναμικής αποκατάστασης, την παρακολούθηση του οικολογικού κινδύνου και την ερμηνεία μικροβιολογικών δεδομένων. Κάθε παράδειγμα προσφέρει μια...**μεταφράσιμη μέθοδος για προσπάθειες μικροβιακής βιοαποκατάστασης**, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια δοκιμών σε επιτόπια κλίμακα όπου η χωρική επίγνωση, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και η ασφάλεια είναι κρίσιμες.

Φάση	Περιγραφή
Εξερευνώ	-Επιστημονική Ανακάλυψη Εισαγωγή στους μαθητές σε πραγματικές χρήσεις των μικροβίων για τον έλεγχο της ρύπανσης.
	-Έρευνα βασισμένη σε περιπτώσεις Αναλύστε πραγματικές μελέτες περιπτώσεων (π.χ. καθαρισμός πετρελαιοκηλίδας χρησιμοποιώντας <i>Αλκανιβόραξ</i> ή καθαρισμός ουρανού από <i>Γεωβακτήριο</i>).
	-Ανάλυση Αναγκών Εντοπίστε παρανοήσεις ή κενά στην κατανόηση της μικροβιακής δράσης και των περιβαλλοντικών προκλήσεων.
Εκτελώ	-Διαδραστικά Μαθήματα Καθοδηγήστε τους μαθητές στις μεταβάσεις από το εργαστήριο στο πεδίο χρησιμοποιώντας μικροβιακά κινούμενα σχέδια και βίντεο από την πραγματική ζωή.
	-Εξερεύνηση επαυξημένης πραγματικότητας (AR)Χρησιμοποιήστε εργαλεία όπως το CoSpaces ή το Assemblr EDU για να προσομοιώσετε τοποθεσίες πεδίου και να οπτικοποιήσετε την κατανομή των ρύπων με την πάροδο του χρόνου.
	-Ομαδικές Εργασίες Οι μαθητές δημιουργούν μοντέλα καθαρισμού μικροβίων ή εικονογραφημένα σενάρια χρησιμοποιώντας επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) για να παρουσιάσουν την μικροβιακή υποβάθμιση.
Επαυξάνω	- Ενσωμάτωση AR: Οι μαθητές εξερευνούν μικροβιακά θερμά σημεία, ζώνες θρεπτικών συστατικών και κλίσεις ρύπανσης χρησιμοποιώντας επικοινωνίες στην AR.
	- Διαδραστική Μάθηση: Δημιουργήστε εικονικές ζώνες αποκατάστασης (π.χ., χάρτης επαυξημένης πραγματικότητας (AR) ενός σημείου πετρελαιοκηλίδας και στρατηγική εφαρμογής μικροβίων).
	Παιχνιδοποιημένο Περιεχόμενο: Σημεία για την ορθή αναγνώριση των μικροβιακών φάσεων ή των αλληλεπιδράσεων AR • Αποστολές για τον καθαρισμό διαφόρων ρύπων (π.χ. πετρέλαιο έναντι βαρέων μετάλλων) • Συνεργατικές μάχες «Μικρόβιο εναντίον Ρύπου» για την προσομοίωση της ανταγωνιστικής δυναμικής ανάπτυξης
	Αξιολογήσεις που βασίζονται σε AR: - Αξιολογήσεις ενσωματωμένες στην επαυξημένη πραγματικότητα (AR) όπου οι μαθητές: • Προσομοίωση της υποβάθμισης των ρύπων • Αντιστοίχιση μικροβίων με ρύπους • Ερμηνεία συνόλων δεδομένων πραγματικού κόσμου (π.χ., πτώση συγκέντρωσης ρύπων) - Διαμορφωτική αξιολόγηση από ομότιμους σεναρίων AR - Τελική εργασία: Οι μαθητές σχεδιάζουν και παρουσιάζουν ένα σχέδιο καθαρισμού επαυξημένης πραγματικότητας (AR) με βάση τα μικρόβια για ένα μολυσμένο οικοσύστημα.





Αναφορές

- Anderson, R. T., Vrionis, H. A., Ortiz-Bernad, I., Resch, J. T., Long, P. E., Dayvault, R., ... & Lovely, D. R. (2003). Διέγερση της *in situ* δραστηριότητας των ειδών *Geobacter* για την απομάκρυνση του ουρανίου από τα υπόγεια ύδατα ενός υδροφορέα μολυσμένου με ουράνιο. *Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Μικροβιολογία*, 69(10), 5884–5891.
- Banerjee, R., Singh, J., & Sarkar, A. (2024). Βιομεταφορά και βακτηριακή μεταφορά μέσω πορώδων μέσων: Επιπτώσεις για την *in situ* βιοαποκατάσταση. *Μηχανική Ρευστών Περιβάλλοντος*, 24(2), 167–185.
- Εφαρμογές βιοφίλμ στον καθαρισμό του περιβάλλοντος. [Βικιπαίδεια](#)
- Βιομεταφορά και μικροβιακή κινητικότητα σε πορώδη μέσα. [arXiv](#)
- Beccari, M., Di Palma, L., Lombardi, F., & Majone, M. (2010). Πιλοτικές μελέτες για την αποκατάσταση υδροφορέα μολυσμένου με χρώμιο χρησιμοποιώντας τεχνολογίες βιοφραγμού και αντιδραστικής ζώνης. *Επιθεώρηση Επικινδύνων Υλικών*, 178(1-3), 875–882.
- Μπλανκ, Χ. (2002). Μια κριτική ανασκόπηση της ανοχής της κοινότητας που προκαλείται από τη ρύπανση (PICT) και η χρήση της για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών κινδύνων. *Περιβαλλοντική Τοξικολογία και Χημεία*, 21(3), 503–511.
- Cao, J., Liu, X., Su, X., Hædahl, J. E., Berg Fjellestad, T., Haziri, D., Hoang, A. N., Vu, A., Koskiah, J., Karjalainen, S. M., Ronkanen, A. K., Tarkoma, S., Hui, P., 2024, Επαυξημένη πραγματικότητα με οθόνη τοποθετημένη στο κεφάλι για οπτικοποίηση της ποιότητας του νερού. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.12.002>
- Cases, I., & de Lorenzo, V. (2005). Γενετικά τροποποιημένοι οργανισμοί για το περιβάλλον: Ιστορίες επιτυχίας και αποτυχίας και τι έχουμε μάθει από αυτές. *Διεθνής Μικροβιολογία*, 8(3), 213–222.
- Πλήρης αξιολόγηση: Βιοαποκατάσταση μολυσμένης με ΠΛΥ περιοχής σε πλήρη κλίμακα βιοσυσσώρευσης (2024). [ScienceDirect](#)
- Φλέμινγκ, Χ.-Κ., και Γουέρτζ, Σ. (2019). Βακτήρια και αρχαία στη Γη και η αφθονία τους σε βιοφίλμ. *Κριτικές για τη Μικροβιολογία της Φύσης*, 17(4), 247–260
- Garzón, J., Pavón, J., & Baldiris, S. (2019). Συστηματική ανασκόπηση και μετα-ανάλυση της επαυξημένης πραγματικότητας σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα. *Επιθεώρηση Εκπαιδευτικής Έρευνας*, 27, 244–260.
- Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K., & Ahn, Y. (2016). Τρέχουσα κατάσταση γνώσεων σχετικά με τη μικροβιακή αποικοδόμηση πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΛΥ): Μια ανασκόπηση. *Σύνορα στη Μικροβιολογία*, 7, 1369.
- Guo, J., Lin, X., Zhao, M., et al. (2023). Ολοκληρωμένη ομική για μικροβιακή παρακολούθηση κατά τη διάρκεια βιοαποκατάστασης σε κλίμακα πεδίου εδάφους μολυσμένου με πετρέλαιο. *Επιστήμη του Συνολικού Περιβάλλοντος*, 869, 161649.
- Hemme, C. L., Careley, R., Norton, A., Ghuman, M., Nguyen, H., Ivone, R., Umenon, J., Shen, J., Bertin, M., King, R., Leibovitz, E., Bergstrom, R., Cho, B., 2023, Ανάπτυξη εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας
- εφαρμογές για την εκπαίδευση στις επιστήμες, την τεχνολογία, τη μηχανική και τα μαθηματικά, *BioTechniques* 75: 11–20, 10.2144/btn-2023-0029
- Holmes, D. E., Utturkar, S. M., D'haeseleer, P., et al. (2007). Μεταγραφή του *Geobacter uraniireducens* που αναπτύσσεται σε υποεπιφανειακά ιζήματα μολυσμένα με ουράνιο. *Περιοδικό ISME*.
- Lovley, D. R., κ.ά. (2003). Διέγερση της *in situ* δραστηριότητας των ειδών *Geobacter* για την απομάκρυνση του ουρανίου από τα υπόγεια ύδατα ενός υδροφορέα μολυσμένου με ουράνιο. *Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Μικροβιολογία*, 69(10), 5884–5891.
- Keller, A. A., & Yang, R. T. (2021). Προγνωστική μοντελοποίηση στη βιοαποκατάσταση: Από τη θεωρία στην εφαρμογή στο πεδίο. *Περιβαλλοντική Επιστήμη και Τεχνολογία*, 55(8), 5082–5094.
- Lovley, D. R., κ.ά. (2022). Περιβαλλοντική βιοτεχνολογία: Βιολογική αποκατάσταση με χρήση μικροβιακών συστημάτων. *Ετήσια Επιθεώρηση Μικροβιολογίας*, 76, 145–165.



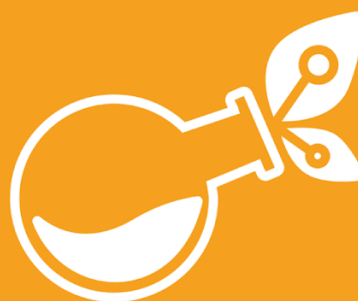


- Μάντισον, Α. Σ., Σόρσμπι, Σ. Τζ., Γουάνγκ, Γ., & Κι, Τ. Α. (2022). *Αύξηση της αποτελεσματικότητας της in situ βιοαποκατάστασης μέσω εφαρμογής σε κλίμακα πεδίου εργαλείων μοριακής βιολογίας*. Σύνορα στη Μικροβιολογία.
- Πολυ-ομικές προσεγγίσεις στη μικροβιακή οικολογία για τη μηχανική του νερού. [arXiv](#)
- Επισκόπηση της μεθόδου ανοχής της κοινότητας που προκαλείται από τη ρύπανση. [Βικιπαίδεια](#)
- Pokrić, B., κ.ά. (2012). *ekoNET: Σύστημα παρακολούθησης περιβάλλοντος με χρήση επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και σύντηξης αισθητήρων* Περιοδικό Ασύρματων και Κινητών Δικτύων.
- Prince, R. C., McFarlin, K. M., Butler, J. D., & Febbo, E. J. (2013). *Η πρωτογενής βιοαποικοδόμηση του διασκορπισμένου αργού πετρελαίου στη θάλασσα* Χημειόσφαιρα, 90(2), 521–526.
- Πρόσφατη μελέτη υδροφορέα πεδίου: *Επιδράσεις των μηχανισμών βιοαποκατάστασης στη μείωση του ουρανίου των υπόγειων υδάτων* (2024). [ScienceDirect](#)
- Ανασκόπηση βιώσιμων στρατηγικών βιοαποκατάστασης (2024). [ScienceDirect](#)
- Sanità, M., κ.ά. (2024). *Επαυξημένη Πραγματικότητα για την Παρακολούθηση της Ποιότητας του Αέρα στην Περιφέρεια Μάρκε, Ιταλία* WJARR, 22(1), 120–128.
- Schmidt, A., Barz, M., & Wittstock, A. (2021). *Clean-AR: Χρήση επαυξημένης πραγματικότητας για τη μείωση του κινδύνου μόλυνσης από αερομεταφερόμενους νοσογόνους παράγοντες σε επιφάνειες*. Τρέχουσες Κατευθύνσεις στη Βιοϊατρική Μηχανική, 7(1), 159–162.
- Semple, K. T., Doick, K. J., Jones, K. C., κ.ά. (2004). *Ο ορισμός της βιοδιαθεσιμότητας και της βιοπροσβασιμότητας του μολυσμένου εδάφους και ιζημάτων είναι περίπλοκος*. Περιβαλλοντική Επιστήμη και Τεχνολογία.
- Silva, E. R., & Gültekin, A. (2021). *Μάθηση φυσικών επιστημών με ενίσχυση επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για μαθητές γυμνασίου: Εμπλοκή των μαθητών σε θέματα ρύπανσης και βιωσιμότητας* Περιοδικό Εκπαίδευσης STEM, 22(3), 45–53.
- Singh, J. S., Abhilash, P. C., & Singh, H. B. (2023). *Μικροβιακή βιοαποκατάσταση: Στρατηγικές για τον περιβαλλοντικό καθαρισμό και τη βιωσιμότητα* Επιστήμη του Συνολικού Περιβάλλοντος, 892, 164503.
- Στοιγάνοβιτς, Γ., κ.ά. (2012). *Επαυξημένη Πραγματικότητα για Κινητές Συσκευές για Παρακολούθηση Περιβάλλοντος* Προσωπική και Πανταχού Παρούσα Υπολογιστική, 16(8), 1027–1039.
- Μελέτη για την αποκατάσταση Cr(VI) από Γεωβακτήριο είδος: *Βιοαποκατάσταση υπόγειων υδάτων μολυσμένων με Cr (VI)* (2019). [Wikipedia+3ScienceDirect+3Wikipedia+3](#)
- Thomsen, P. F., & Willerslev, E. (2015). *Περιβαλλοντικό DNA – Ένα αναδυόμενο εργαλείο στη διατήρηση για την παρακολούθηση της βιοποικιλότητας του παρελθόντος και του παρόντος*. Βιολογική Διατήρηση, 183, 4–18.
- Wang, X., Gao, Y., & Liu, J. (2022). *Οπτικοποίηση μεταγονιδιωτικών δεδομένων με βάση την επαυξημένη πραγματικότητα στην περιβαλλοντική παρακολούθηση*. Σύνορα στην Επιστήμη των Υπολογιστών, 4, 934694.
- Wu-Juan Sun κ.ά. (2024). *Πιλοτικές μελέτες πεδίου για την ενεργοποιημένη μικροβιακή αποκατάσταση εδαφών μολυσμένων με πετρέλαιο* (Environ Geochem Health). [ResearchGate+1PubMed+1](#)
- Xiong, W., Chen, L., Gao, H., et al. (2025). *Ρύπανση από βαρέα μέταλλα και μετασχηματισμός στο έδαφος: μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των στρατηγικών φυσικής βιοαποκατάστασης*. Περιοδικό του Πανεπιστημίου Εφαρμοσμένων Επιστημών Umm Al-Qura.
- Yakimov, M. M., Timmis, K. N., & Golyshin, P. N. (2007). *Υποχρεωτικά θαλάσσια βακτήρια που αποικοδομούν το πετρέλαιο: βασικοί παράγοντες στον καθαρισμό των πετρελαιοκηλίδων*. Nature Reviews Microbiology, 5(10), 803–812.
- Zhang, Y., Karpf, A., & Brovelli, M. A. (2023). *Επαυξημένη πραγματικότητα για οπτικοποίηση υπόγειων υδάτων στην βιομηχανική παρακολούθηση και την αποκατάσταση χώρων*. Υπολογιστές & Γεωεπιστήμες, 173, 105055.





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.