

Βιοεξόρυξη

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ



Μ.Π.Σ. Οικολογία και Διαχείριση της Βιοποικιλότητας

Δημήτριος Οικονομίδης
Επιβλέπουσα: Κα Γκόνου Ζ.

Ιούνιος 2025



Εισαγωγή

Η μεγάλη αύξηση της ζήτησης για πολύτιμα μέταλλα και σπάνιες γαίες κάνει πιο απαραίτητους τους τρόπους εξόρυξης που να είναι:

- φιλικό προς το περιβάλλον
- και οικονομικά αποδοτικοί

Η βιοεξόρυξη ξεχωρίζει, γιατί:

- χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς, για να απελευθερώνει μέταλλα από πετρώματα, απόβλητα και παλιά ηλεκτρονικά

Η βιοεξόρυξη χρησιμοποιείται ήδη στη βιομηχανία για:

- την εξαγωγή μετάλλων
- τον καθαρισμό περιοχών με παλιά ορυχεία
- την ανάκτηση πολύτιμων υλικών από άλλες πηγές



Ιστορική Εξέλιξη της Βιοεξόρυξης





Πρώιμες παρατηρήσεις (Προβιομηχανική εποχή)

- Από τον 16ο αιώνα παρατηρήθηκαν φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη βιοεξόρυξη
- Στη Γερμανία και στο Ρίο Τίντο της Ισπανίας, υπήρχε ροή γαλαζοπράσινων υγρών από σωρούς με πετρώματα χαλκού
- Τα υγρά αυτά περιείχαν διαλυμένο χαλκό και συλλέγονταν για να γίνει χημική κατακρήμνιση (να «πέσει» ο χαλκός από το διάλυμα)
- Τότε δεν υπήρχε εξήγηση για το φαινόμενο, αλλά σήμερα γνωρίζουμε ότι ήταν φυσική βιοεξόρυξη
- Η διαδικασία γινόταν από μικροοργανισμούς, όπως το *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Επιστημονική τεκμηρίωση (20ός αιώνας)

Στη δεκαετία του 1940, επιστήμονες παρατήρησαν ότι τα βακτήρια βοηθούσαν να διαλυθούν πιο εύκολα τα μέταλλα

Το 1950, ο Colmer και οι συνεργάτες του απέδειξαν ότι το βακτήριο *T. ferrooxidans*:

- παίζει ρόλο στην οξείδωση του σιδήρου και του θείου, βασικό στη διαδικασία της βιοεξόρυξης.





Εξάπλωση και εκβιομηχάνιση (1980–2000)

Κατά τις δεκαετίες 1980–1990 η βιοεξόρυξη επεκτείνεται και γίνεται πιο οργανωμένη:

- Χρησιμοποιείται ευρέως στη Λατινική Αμερική για εξαγωγή χαλκού (Cu)
- Γίνονται δοκιμές για εξαγωγή ουρανίου (U)
- Ξεκινά η χρήση της για βιοοξείδωση χρυσού (Au) πριν από την εκχύλιση με κυάνιο

Η τεχνολογία προχωρά χάρη σε:

- Βιοαντιδραστήρες
- Βελτίωση των μικροβιακών κοινοτήτων
- Καλύτερη κατανόηση των μικροβίων με τη βοήθεια της βιοχημείας και της μοριακής βιολογίας

Σύγχρονη εποχή (2000–σήμερα)

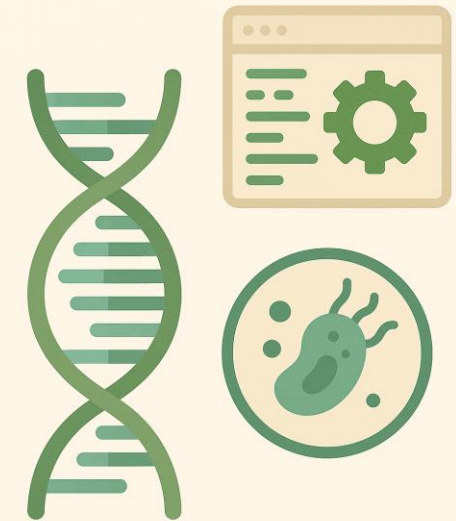
Στον 21ο αιώνα:

- Η βιοεξόρυξη επεκτείνεται σε ηλεκτρονικά απόβλητα (e-waste) και απορρύπανση μεταλλευτικών περιοχών
- Ενσωματώνει μεταγονιδιωματική, συνθετική βιολογία, γονιδιωματική τροποποίηση και αυτοματοποιημένους βιοαντιδραστήρες

Διερευνάται για εφαρμογές σε εξωγήινα περιβάλλοντα:

- Σελήνη
- Άρης
- Αστεροειδείς

Η βιοεξόρυξη σήμερα αποτελεί πυλώνα της βιομεταλλουργίας και εργαλείο για τη μετάβαση σε κυκλική και βιώσιμη οικονομία πρώτων υλών



Θεωρητικό Υπόβαθρο



Κύριοι Μικροοργανισμοί

Βακτήρια οξείδωσης σιδήρου και θείου:

- *Acidithiobacillus ferrooxidans*
- *Acidithiobacillus thiooxidans*
- *Leptospirillum ferrooxidans*

Θερμόφιλα και υπερθερμόφιλα βακτήρια:

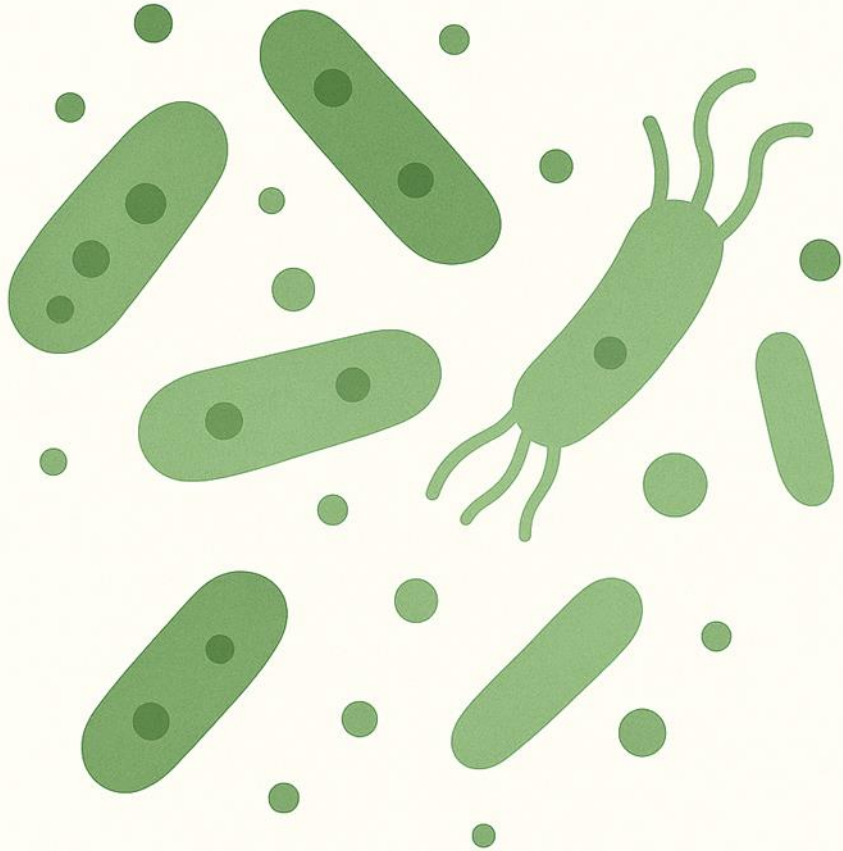
- *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*
- *Ferroplasma acidarmanus*

Αρχαία (Archaea):

- *Metallosphaera sedula* (υπερθερμόφιλο αρχαιοβακτήριο)

Ετεροτροφικά βακτήρια υποστήριξης:

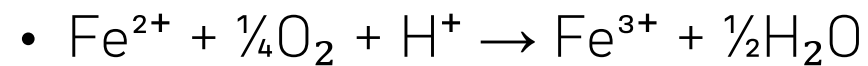
- *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Shewanella* spp.



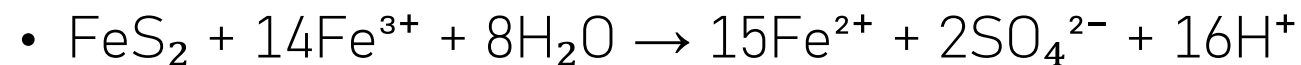
Βιοχημικές Αντιδράσεις Εξόρυξης

Οι βασικές διεργασίες που διενεργούνται από τους μικροοργανισμούς είναι η οξείδωση του Fe^{2+} σε Fe^{3+} και του θειούχου θείου (S^{2-} , S^0) σε H_2SO_4 . Αυτά τα παραγόμενα οξειδωτικά και όξινα είδη προκαλούν τη διάλυση των μεταλλικών ενώσεων.

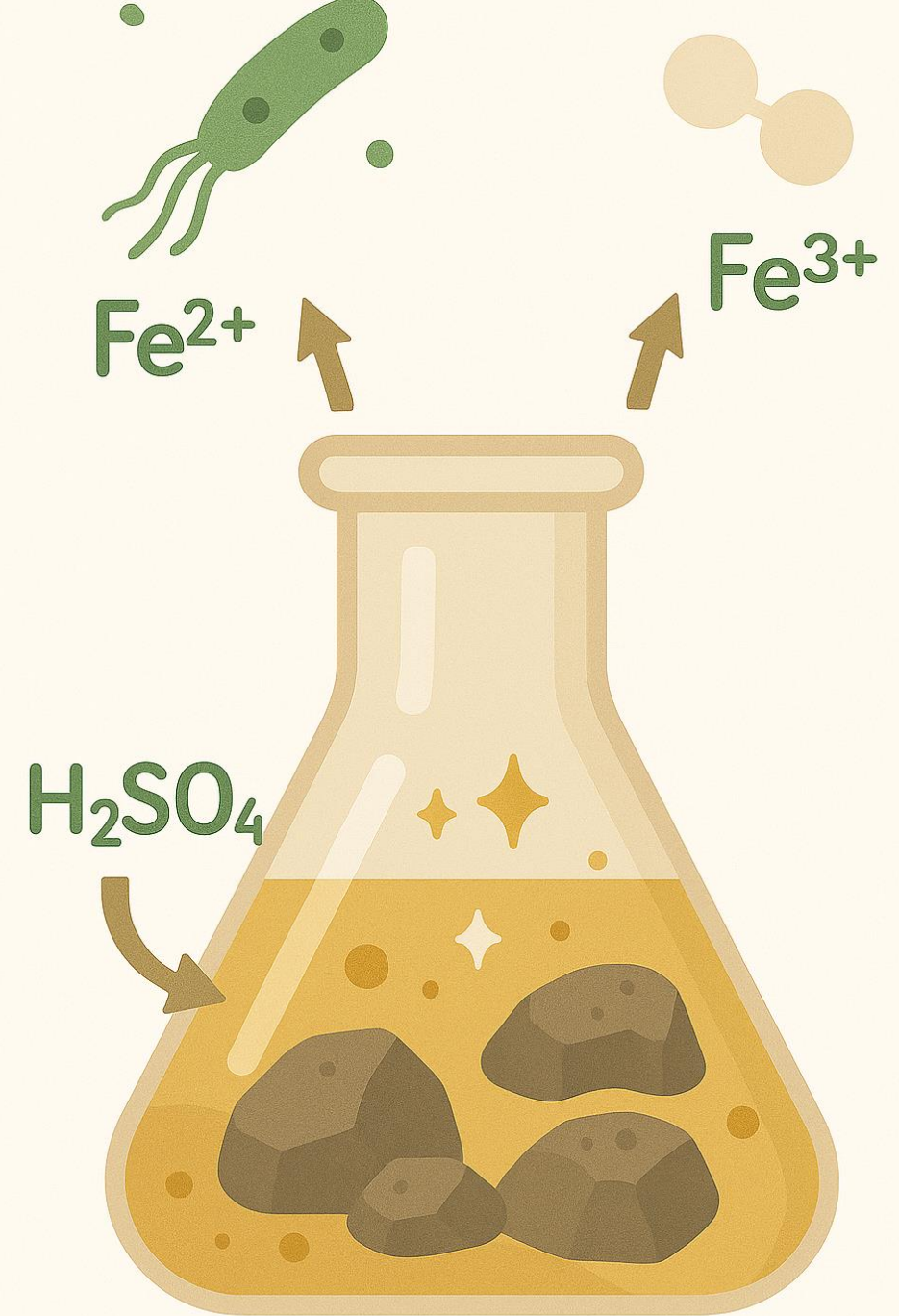
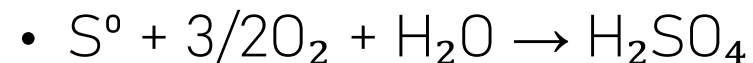
Οξείδωση του Fe^{2+} σε Fe^{3+} (ισχυρός οξειδωτικός παράγοντας)



Οξείδωση θειούχων μεταλλευμάτων (π.χ. πυρίτης, χαλκοπυρίτης)



Παραγωγή θειικού οξέος, το οποίο διαλύει τα μέταλλα



Σχηματισμός Βιοφίλμ

- Οι μικροοργανισμοί προσκολλώνται στις επιφάνειες των μεταλλευμάτων σχηματίζοντας βιοφίλμ, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα της οξείδωσης και αυξάνοντας την τοπική συγκέντρωση αντιδραστηρίων στην επιφάνεια του ορυκτού

Συνεργατική Δράση

Συχνά χρησιμοποιούνται μικτές καλλιέργειες, στις οποίες διαφορετικοί μικροοργανισμοί συνεργάζονται:

- Π.χ. *A. ferrooxidans* οξειδώνει Fe^{2+} , ενώ *A. thiooxidans* οξειδώνει S^0 .
- Βέλτιστη δραστηριότητα όλων των βιοχημικών οδών και επιτυγχάνεται ολοκληρωμένη αποδόμηση του μεταλλεύματος

Περιβαλλοντικές Συνθήκες Λειτουργίας



Η επιτυχία της βιοεξόρυξης εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες στο κάθε σύστημα

Οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται είναι:

- Ακρεόφιλοι
- Ευαίσθητοι σε αλλαγές στο περιβάλλον.

Οι βασικές συνθήκες που πρέπει να ελέγχονται είναι:

- Το Ph
- Η θερμοκρασία
- Η παρουσία οξυγόνου
- Επίπεδα μετάλλων

Η σωστή ρύθμιση αυτών των παραμέτρων είναι σημαντική για να λειτουργούν σωστά οι μεταβολικές διεργασίες των μικροοργανισμών.

Τεχνολογίες και Διαδικασίες Βιοεξόρυξης





Heap Leaching (έκπλυση σε σωρούς)

Η πιο ευρέως διαδεδομένη πρακτική στη βιομηχανική βιοεξόρυξη. Το μετάλλευμα θρυμματίζεται και τοποθετείται σε μεγάλους σωρούς πάνω σε αδιάβροχη μεμβράνη. Έπειτα, διαβρέχεται με διαλύματα που περιέχουν κατάλληλους μικροοργανισμούς. Τα διαλύματα διαπερνούν τους σωρούς και συλλέγονται στη βάση, μεταφέροντας τα διαλυμένα.

Πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης
- Κατάλληλο για χαμηλής περιεκτικότητας μεταλλεύματα
- Εύκολη προσαρμογή σε υφιστάμενες μεταλλευτικές υποδομές

Περιορισμοί:

- Αργή απόδοση (μήνες)
- Ανάγκη συνεχούς ελέγχου θερμοκρασίας, pH, διαπερατότητας

In situ Leaching (επιτόπια έκπλυση)

Το βιοεξορυκτικό διάλυμα εγχύεται απευθείας στο υπέδαφος, χωρίς εξόρυξη του μεταλλεύματος. Το διαλυμένο μέταλλο αντλείται μέσω φρεατίων εξαγωγής. Η τεχνική είναι κατάλληλη για διαπερατά, πορώδη πετρώματα που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος.

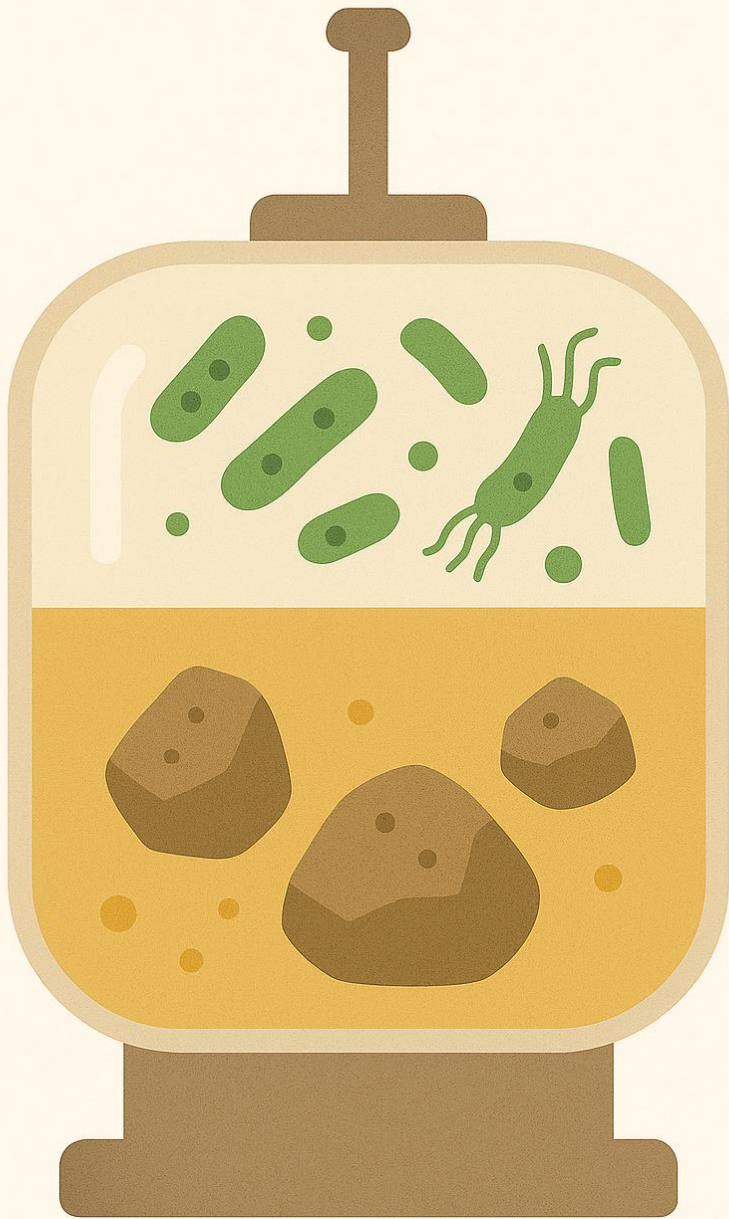
Πλεονεκτήματα:

- Ελάχιστη περιβαλλοντική διατάραξη
- Δεν απαιτεί επιφανειακή εξόρυξη

Περιορισμοί:

- Δυσκολία ελέγχου της κατανομής διαλύματος
- Κίνδυνος ρύπανσης υπόγειων υδάτων





Ex situ Bioreactors (σε δεξαμενές ή κλειστά συστήματα)

Εκτελείται σε ελεγχόμενο περιβάλλον, όπου το μετάλλευμα αναμιγνύεται με διαλύματα που περιέχουν μικροοργανισμούς σε βιοαντιδραστήρες. Μπορούν να είναι τύπου αναδευόμενης δεξαμενής, ανακυκλοφορίας ή τύπου airlift.

Προσφέρουν ακριβή έλεγχο συνθηκών pH, θερμοκρασίας, οξυγόνωσης και αγωγιμότητας, και συνεπώς εξασφαλίζουν υψηλή απόδοση βιοεξόρυξης.

Εφαρμόζονται κυρίως σε:

Πλούσια μεταλλεύματα ή συμπυκνώματα.

- Ηλεκτρονικά απόβλητα (e-waste).
- Πειραματικά συστήματα για βιοτεχνολογική βελτιστοποίηση.

Πλεονεκτήματα:

- Σταθερή και ελεγχόμενη λειτουργία.
- Υψηλότερη ταχύτητα εξόρυξης σε σύγκριση με heap leaching.

Μειονεκτήματα:

- Αυξημένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.
- Απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό και τεχνογνωσία.

Εφαρμογές της Βιοεξόρυξης





Παραδοσιακή Εξόρυξη Μετάλλων

Χαλκός (Cu)

Είναι το πρώτο μέταλλο που εξήχθη βιομηχανικά με βιοεξόρυξη

- Τα βασικά μεταλλεύματα είναι:
 - χαλκοπυρίτης (CuFeS_2)
 - χαλκοσίτης (Cu_2S)
 - κοβελίτης (CuS)

Χρησιμοποιείται η τεχνική heap leaching με βοήθεια μικροοργανισμών όπως:

- *Acidithiobacillus ferrooxidans*,
- *Leptospirillum ferrooxidans*.

Οι μικροοργανισμοί αυτοί οξειδώνουν τον σίδηρο και το θείο, διαλύοντας τον χαλκό

Εφαρμόζεται κυρίως σε:

- Χιλή, ΗΠΑ, Αυστραλία, Περού.



Παραδοσιακή Εξόρυξη Μετάλλων

Χρυσός (Au)

Ο χρυσός δεν διαλύεται απευθείας με μικρόβια

Η βιοεξόρυξη χρησιμοποιείται ως προκατεργασία:

- Διασπά το ορυκτό που "παγιδεύει" τον χρυσό (π.χ. πυρίτης, αρσеноπυρίτης)
- Γίνεται προσβάσιμος για εκχύλιση με κυάνιο.

Αυξάνει σημαντικά την απόδοση εξαγωγής.



Παραδοσιακή Εξόρυξη Μετάλλων

Νικέλιο (Ni) & Κοβάλτιο (Co)

Χρησιμοποιούνται:

- lateritic μεταλλεύματα νικελίου
- θειούχα μεταλλεύματα κοβαλτίου

Η διαδικασία γίνεται σε θερμοφιλικούς βιοαντιδραστήρες (υψηλή θερμοκρασία)

Εφαρμόζεται πιλοτικά σε:

- Φινλανδία,
- Κούβα.



Παραδοσιακή Εξόρυξη Μετάλλων

Ουράνιο (U)

Η βιοεξόρυξη βοηθά στη μετατροπή του U(IV) σε U(VI) (διαλυτή μορφή)

Κύριος μικροοργανισμός: *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Εφαρμόζεται σε:

- Καζακστάν,
- Καναδά,
- Νότια Αφρική.



Παραδοσιακή Εξόρυξη Μετάλλων

Πλεονεκτήματα έναντι συμβατικών τεχνικών:

- Επιτρέπει την αξιοποίηση φτωχών μεταλλευμάτων και αποβλήτων
- Έχει χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και ενέργειας
- Είναι πιο ασφαλής για εργαζομένους και πιο φιλική προς το περιβάλλον.

Ηλεκτρονικά απόβλητα (e-waste) και βιοεξόρυξη

Τα ηλεκτρονικά απόβλητα αυξάνονται ραγδαία παγκοσμίως.

Περιέχουν πολλά πολύτιμα μέταλλα, όπως:

- Χρυσό (Au)
- Άργυρο (Ag)
- Παλλάδιο (Pd)
- Λευκόχρυσο (Pt)
- Χαλκό (Cu)
- Σπάνιες γαίες

Η ανάκτηση αυτών των μετάλλων είναι σημαντική για:

- Την προστασία του περιβάλλοντος
- Τη στρατηγική διαχείριση πρώτων υλών



Μικροοργανισμοί και πώς λειτουργούν

Χρησιμοποιούμενα βακτήρια:

- *Acidithiobacillus ferrooxidans* & *A. thiooxidans* – οξειδώνουν χαλκό, σίδηρο, θείο
- *Chromobacterium violaceum* – ανακτά χρυσό παράγοντας κυανιούχες ενώσεις
- *Pseudomonas spp.* & *Shewanella spp.* – βοηθούν στην ανάκτηση αργύρου και παλλαδίου

Πώς λειτουργούν:

- Προσκολλώνται στις επιφάνειες των μετάλλων.
- Οξειδώνουν θειούχα και μεταλλικά υλικά.
- Διαλύουν επιλεκτικά τα μέταλλα που θέλουμε να ανακτήσουμε.
- Η διαδικασία διαρκεί από μερικές μέρες έως εβδομάδες.



Πλεονεκτήματα

- Δεν χρησιμοποιούνται τοξικά χημικά (όπως κυάνιο ή νιτρικά οξέα)
- Είναι ενεργειακά αποδοτική και χρειάζεται απλό εξοπλισμό
- Έχει επιλεκτικότητα – μπορεί να στοχεύσει συγκεκριμένα μέταλλα
- Ταιριάζει σε κυκλική οικονομία και πρακτικές μηδενικών αποβλήτων

Προκλήσεις και μέλλον

Δυσκολίες:

- Η ποικιλία των υλικών στο e-waste
- Η παρουσία οργανικών ρητινών
- Η ανάγκη για προεπεξεργασία

Προοπτικές βελτίωσης:

- Με χρήση μεταγονιδιατικής
- Συνθετικής βιολογίας
- Και μικτών βιοαντιδραστήρων (συστήματα με πολλά είδη μικροοργανισμών)

Απορρύπανση Μεταλλευτικών Περιοχών με Βιοεξόρυξη





Απορρύπανση Μεταλλευτικών Περιοχών με Βιοεξόρυξη

Η παλιά μεταλλευτική δραστηριότητα έχει αφήσει πίσω της:

- Τοξικά απόβλητα (τέλματα, στείρα υλικά)
- Όξινες απορροές (AMD – acid mine drainage)

Η βιοεξόρυξη και άλλες μικροβιακές τεχνικές βοηθούν στην ανάκτηση μετάλλων και στον καθαρισμό του περιβάλλοντος.



Ανάκτηση μετάλλων από τέλματα και στείρα υλικά

Παλιά μεταλλευτικά απόβλητα περιέχουν ακόμα:

- χαλκό (Cu)
- ψευδάργυρο (Zn)
- κοβάλτιο (Co)
- κ.ά.

Με τη βοήθεια βακτηρίων σε:

- heap bioleaching (σε σωρούς)
- in situ leaching (επιτόπια έγχυση), πετυχαίνουμε:
 - ανάκτηση μετάλλων με αξία
 - μείωση τοξικότητας και ρύπανσης.



Βιοσταθεροποίηση βαρέων μετάλλων στο έδαφος

- Ορισμένα βακτήρια μετατρέπουν τοξικά μέταλλα (π.χ. Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+}) σε αδιάλυτες μορφές
- Αυτά τα μέταλλα γίνονται μη κινητικά και σταθερά στο περιβάλλον
- Η τεχνική εφαρμόζεται σε ρυπασμένα εδάφη κοντά σε μεταλλεία ή βιομηχανίες.



Βιολογική εξουδετέρωση όξινων απορροών (AMD)

Η οξείδωση πυρίτη από μικρόβια παράγει θειικό οξύ (H_2SO_4)

Με κατάλληλη διαχείριση μικροβιακής κοινότητας μπορούμε να:

- Περιορίσουμε την παραγωγή οξέος
- Κρατήσουμε τα μέταλλα σε σταθερές μορφές
- Προστατέψουμε τα νερά από ρύπανση (ποτάμια και υπόγεια ύδατα)

Πλεονεκτήματα:

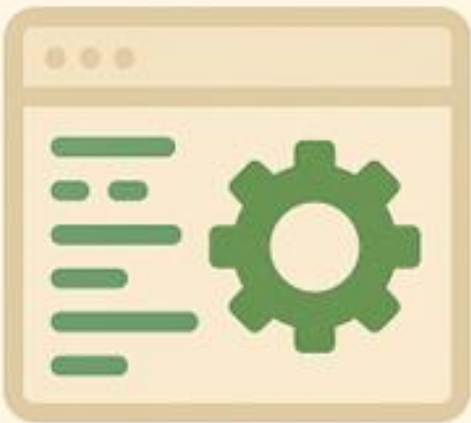
1. Περιβαλλοντική φιλικότητα
2. Χαμηλό ενεργειακό και λειτουργικό κόστος
3. Αξιοποίηση φτωχών και περιθωριακών μεταλλευμάτων
4. Απλότητα εγκατάστασης και εφαρμογής
5. Ενσωμάτωση στην κυκλική οικονομία

Περιορισμοί:

1. Αργή κινητική απόδοση
2. Απαιτήσεις περιβαλλοντικής σταθερότητας
3. Πιθανή δημιουργία όξινων απορροών (AMD)
4. Περιορισμοί ορυκτολογικής φύσης
5. Κίνδυνοι βιοασφάλειας

Καινοτομίες και Προοπτικές





Συνθετική Βιολογία και Γενετική Μηχανική

Στο πλαίσιο της συνθετικής βιολογίας, σχεδιάζονται «έξυπνοι» μικροοργανισμοί με:

- Ενισχυμένη έκφραση οξειδωτικών ενζύμων (π.χ. ρουσρεδοξινών, σιδηροοξειδασών)
- Αντοχή σε μεταλλική τοξικότητα και όξινο pH
- Ελεγχόμενη μεταβολική απόκριση ανάλογα με τη σύσταση του μεταλλεύματος.



Βιοεξόρυξη στο Διάστημα (Astrobiomining)

Η βιοεξόρυξη στο διάστημα είναι μια νέα τεχνολογία που στοχεύει:

- Στην αξιοποίηση πρώτων υλών από το διάστημα
- Για διαστημικές αποστολές και μελλοντικούς οικισμούς

Τα κύρια πλεονεκτήματα:

- Αυτοσυντηρούμενη λύση (δεν χρειάζεται πολλά υλικά από τη Γη)
- Χαμηλό βάρος και κατανάλωση ενέργειας

Ιδανική για χρήση σε:

- Σελήνη
- Άρη
- Αστεροειδείς.



Βιοεξόρυξη στο Διάστημα (Astrobiomining)

Πείραμα BioRock (ISS, 2019):

- Πραγματοποιήθηκε στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS) από την ESA
- Οι μικροοργανισμοί κατάφεραν να εξάγουν μέταλλα (σπάνιες γαίες) από βασαλτικά πετρώματα
- Αποτελέσματα: Οι μικροοργανισμοί λειτούργησαν κανονικά ή και καλύτερα στο διάστημα

Στρατηγική ISRU (In Situ Resource Utilization)

- Στόχος: να χρησιμοποιούνται οι πόροι του ίδιου του ουράνιου σώματος (π.χ. Άρη).

Επιστροφή τεχνογνωσίας στη Γη βοηθήσει στη δημιουργία:

- προηγμένων βιοαντιδραστήρων με απόδοση σε ακραία περιβάλλοντα

Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της βιοεξόρυξης εντοπίζονται:

- Στην ελαχιστοποίηση της ρύπανσης και την αποφυγή χρήσης τοξικών ουσιών,
- Στη χαμηλή ενεργειακή απαίτηση και το χαμηλό λειτουργικό κόστος,
- Στην ευελιξία εφαρμογής σε φτωχά μεταλλεύματα και δυσπρόσιτες γεωγραφικές περιοχές.

Οι προοπτικές εξέλιξης είναι εξαιρετικά ενθαρρυντικές, χάρη:

- Στη ραγδαία πρόοδο των γονιδιωματικών και συνθετικών τεχνολογιών,
- Στην εφαρμογή της σε σύγχρονα προβλήματα, όπως η ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων από e-waste,
- Και στις διαστημικές αποστολές, όπου ήδη εξετάζεται ως μέθοδος εξόρυξης σε εξωγήινα περιβάλλοντα.

