

**“ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ  
ΕΔΑΦΟΥΣ ΠΟΥ ΜΟΛΥΝΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ  
ΜΟΛΥΒΔΟ”**

**“PROCESSES FOR THE REMEDIATION OF  
SOIL POLLUTED FROM LEAD”**

---

**ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ**

**ΣΑΧΙΝΙΔΗΣ ΣΥΜΕΩΝ**  
Φυσικός Ραδιοηλεκτρολόγος  
Επιστημονικός συνεργάτης  
ΤΕΙ Καβάλας<sup>1</sup>

**ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΙΔΗΣ ΑΧΙΛΛΕΑΣ**  
Χημικός Μηχανικός  
Καθηγητής ΤΕΙ Καβάλας<sup>1</sup>

**ΛΑΖΑΡΙΔΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ**  
Μηχανικός Τεχνολογίας Πετρελαίου ΤΕΙ Καβάλας<sup>1</sup>

1. Τμήμα Τεχνολογίας Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου

---

Sachinidis Simeon  
Physical Electronics  
Technological Educational  
Institute (TEI) of Kavala<sup>1</sup>.

Christoforidis Achilleas  
Dr Chem. Engineer  
Tecnological Educational Institute  
(TEI) of Kavala<sup>1</sup>

Lazaridou Anastasia  
Petroleum Engineer  
Technological Educational Institute (TEI) of Kavala<sup>1</sup>

1. Department :Petroleum and Naturale Gas Tecnology

## ABSTRACT

Waste that can cause substantial environmental damage, when improperly buried or disposed of, is classified as dangerous. Environmental damage may be irreversible, since dangerous waste can infiltrate and contaminate groundwater. Heavy metals and their compounds, asbestos, hazardous organic compounds, and petroleum byproducts constitute dangerous waste.

Frequently, dangerous waste can be located in dumping sites of industrial areas, i.e. in the vicinity of chemical industries, base metal and leather industries, petroleum-refining facilities, etc. The objective of our paper is to review soil cleanup operations in sectors that have been contaminated with lead. In particular, we study the process of phytoremediation, whereby clover is used as hyperaccumulator plant.

Key words: Lead, remediation of Soil, clover, absorption, phytoextraction, hyperaccumulators, environment.

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ως επικίνδυνα κατατάσσονται τα απόβλητα εκείνα, τα οποία προκαλούν εκτεταμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση, όταν ταφούν ή διατεθούν στο έδαφος. Η περιβαλλοντική επιβάρυνση μπορεί μάλιστα να είναι μη αντιστρέψιμη, καθώς τα επικίνδυνα απόβλητα έχουν την δυνατότητα να φθάσουν και να μολύνουν τα υπόγεια νερά. Απόβλητα αυτού του τύπου είναι τα βαρέα μέταλλα και ενώσεις τους, ο αμίαντος, οι επικίνδυνες οργανικές χημικές ενώσεις και τα προϊόντα πετρελαίου.

Συνήθως, συναντάμε επικίνδυνα απόβλητα σε περιοχές διάθεσης επικίνδυνων στερεών αποβλήτων, όπως σε βιομηχανίες χημικών, κυρίως μετάλλων, δέρματος, διυλιστήρια και βιομηχανίες υγρών καυσίμων. Αντικείμενο της εργασίας μας είναι η απορρύπανση εκτάσεων που έχουν μολυνθεί από μόλυβδο. Ειδικότερα, μελετάται η μέθοδος της φυτοαποκατάστασης, κατά την οποία χρησιμοποιείται το τριφύλλι ως φυτό υπερσυσσωρευτής.

Λέξεις κλειδιά: Μόλυβδος, αποκατάσταση εδαφών, τριφύλλι, απορρόφηση, φυτοεξαγωγή, υπερσυσσωρευτές, περιβάλλον.

---

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες συντέλεσαν και στην ρύπανση των εδαφών σε μεγάλο ποσοστό, με αποτέλεσμα μεγάλες εκτάσεις γης να εμφανίζουν μορφές ρύπανσης, κυρίως από βαρέα μέταλλα. Η απορρύπανση των εδαφών με τις συμβατικές μεθόδους, δεν είναι απλή διαδικασία, διότι οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν και αρκετά προβλήματα και είναι δαπανηρές όπως επίσης και επικίνδυνες για τον ανθρώπινο παράγοντα. Μια μέθοδος απορρύπανσης για παράδειγμα εδαφών είναι η απομάκρυνση τους και εναπόθεση τους στην συνέχεια σε ειδικούς χώρους, μέθοδος με μεγάλη διαδικασία και κόστος.

Αναπτυσσόμενη εναλλακτική μέθοδος απορρύπανσης εδαφών από βαρέα μέταλλα αποτελεί η απορρύπανση με φυτά (φυτοαποκατάσταση). Η μέθοδος αυτή είναι φυσική, έχει χαμηλό κόστος και υψηλή αποτελεσματικότητα καθώς επίσης και μηδενική επικινδυνότητα για τον ανθρώπινο παράγοντα.

## **ΚΥΡΙΩΣ ΘΕΜΑ**

Γνωρίζουμε ότι τα επικίνδυνα απόβλητα, τα οποία όταν ταφούν ή διατεθούν στο έδαφος, προκαλούν εκτεταμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Μια περιβαλλοντική επιβάρυνση που είναι μη αντιστρέψιμη γιατί τα απόβλητα αυτά έχουν την δυνατότητα να φθάσουν και να μολύνουν τα υπόγεια νερά. Τα επικίνδυνα απόβλητα είναι αυτά που περιέχουν:

Βαρέα μέταλλα και ενώσεις τους.

Αμίαντο ή άλλα επικίνδυνα ορυκτά.

Ραδιενεργά συστατικά.

Επικίνδυνες οργανικές χημικές ενώσεις.

Πετρελαιοειδή ή πίσσες.

Οι μεγαλύτερες εκτάσεις ρυπασμένων εδαφών, βρίσκονται κυρίως σε:

Περιοχές διάθεσης επικίνδυνων στερεών αποβλήτων.

Μεταλλευτικές, μεταλλουργικές και χημικές βιομηχανίες.

Δωλίστηρια και περιοχές αποθήκευσης υγρών καυσίμων.

Φαρμακευτικές επιχειρήσεις.

Ο σκοπός της εργασίας είναι να περιγραφεί μια μέθοδο βιοαποκατάστασης εδαφών για περιοχές που έχουν μολυνθεί από μια βιομηχανία επιμεταλλώσεων και πιο συγκεκριμένα της ιλύος που παράγεται ως παραπροϊόν, πλούσια σε βαρέα μέταλλα και ειδικά σε μόλυβδο. Η μέθοδος που προτείνουμε για την περίπτωση μας είναι η αποκατάσταση των εδαφών με φυτοαποκατάσταση, δηλ με τη χρήση των υπερσυσσωρευτικών φυτών. Είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται επί τόπου, δηλ. στο τόπο όπου έχουμε τα απόβλητα. Η επί τόπου επεξεργασία των ρυπασμένων εδαφών δεν περιλαμβάνει εκσκαφή και μεταφορά του εδάφους, αλλά επί τόπου εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων, με σκοπό την εξαγωγή, αδρανοποίηση ή σταθεροποίηση των ρυπαντών.

Η διαδικασία της αποκατάστασης έχει σκοπό:

Στην απομάκρυνση των ρυπαντών, με χημική ή μικροβιακή καταστροφή. Στη σταθεροποίηση των ρυπαντών και στην εξουδετέρωση των τοξικών τους χαρακτηριστικών (τοξικότητα, αναφλεξιμότητα), με μετατροπή τους σε αδιάλυτες σταθερές ενώσεις.

Η επιλογή και ο τρόπος εφαρμογής των μεθόδων αποκατάστασης, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό, εκτός από τα χαρακτηριστικά της ρυπασμένης περιοχής και από την μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητά τους. Τα ερωτήματα που θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε είναι:

Ποια είναι η διάρκεια του σταδίου εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου;

Σε πόσο χρόνο μετά την εφαρμογή της, θα αποκτήσει η μέθοδος τη μέγιστη αποτελεσματικότητα;

Εάν οι ρυπαντές δεν απομακρυνθούν πλήρως από το έδαφος, ποιο θα είναι το μέγεθος της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που μπορεί να προκληθεί από τις παραμένουσες ποσότητες και συγκεντρώσεις των ρυπαντών.

Η φυτοαποκατάσταση είναι ένας όρος που αναφέρεται σε μια ομάδα τεχνολογιών και διεργασιών, οι οποίες περιλαμβάνουν τη χρήση φυτών για τον καθαρισμό λυμάτων, ρυπασμένων εδαφών, ιζημάτων και ιλύος από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Δύο μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά τη φυτοαποκατάσταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων από την ιλύ των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, η φυτοεξαγωγή και η φυτοσταθεροποίηση. (Raskin et al.,1998). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και αναφέρονται διάφορες τεχνικές φυτοαποκατάστασης. (Fiorenza et al.,1998).

Η Φυτοεξαγωγή (Phytoextraction) είναι η απορρόφηση και μεταφορά βαρέων μετάλλων από το χώμα, μέσω του ριζικού συστήματος στα υπέργεια μέρη των φυτών. Αυτά τα φυτά ονομάζονται “υπερσυσσωρευτές” (hyperaccumulators) και

απορροφούν ασυνήθιστα μεγάλες ποσότητες μετάλλων σε σύγκριση με άλλα φυτά. Ένα ή μια ομάδα από τέτοια φυτά επιλέγονται και φυτεύονται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η επιλογή γίνεται ανάλογα με τα είδη των μετάλλων που βρίσκονται στη περιοχή και αρκετών άλλων παραμέτρων της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Αφού τα φυτά μεγαλώσουν όσο χρειάζεται, συλλέγονται, αποτεφρώνονται κατά κάποιους ερευνητές “κομποστοποιούνται” ώστε να ανακυκλωθούν τα βαρέα μέταλλα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές απαιτείται για να μειωθεί η συγκέντρωση των ρύπων που βρίσκονται στο χώμα, σε επιτρεπτά όρια. (McCrath, S. ,1998).

Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται ο αριθμός των γνωστών μέχρι σήμερα υπερσυσσωρευτών για 7 βαρέα μέταλλα καθώς και οι φυτικές οικογένειες στις οποίες ανήκουν.

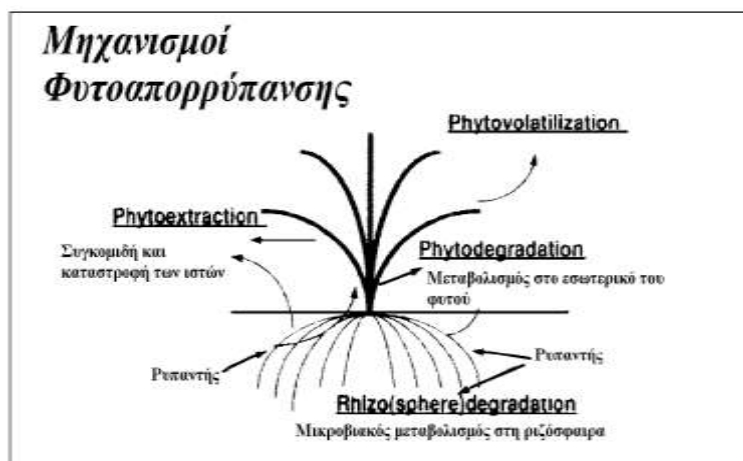
Πίνακας 1 Αριθμός γνωστών υπερσυσσωρευτών για 7 βαρέα μέταλλα και οι οικογένειες στις οποίες απαντώνται πιο συχνά. (Brooks R. ,1998).

Βαρέα μέταλλα	No.	Οικογένεια
Κάδμιο ( Cd )	1	Brassicaceae
Κοβάλτιο ( Co )	26	Lamiaceae, Scrophulariaceae
Χαλκός ( Cu )	24	Cyperaceae, Lamniaceae, Poaceae, Scrophulariaceae
Μαγγάνιο ( Mn )	11	Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Νικέλιο ( Ni )	290	Brassicaceae, Violaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Σελήνιο ( Se )	19	Fabaceae
Θάλιο ( Tl )	1	Brassicaceae

Ένα φυτό υπερσυσσωρευτής έχει την ικανότητα απορρόφησης έως και 100 φορές μεγαλύτερη ποσότητα μετάλλου σε σχέση με ένα κοινό φυτό. Έτσι, για παράδειγμα, ένα φυτό υπερσυσσωρευτής μπορεί να συγκεντρώσει περισσότερο από 1.000 mg/kg η 0,1 τοις εκατό (επί ξηρού βάρους) μετάλλων όπως Co, Cu, Cr, Pb, ή 10.000 mg/kg (1%) μετάλλων όπως Zn και Ni. Σχεδόν όλα τα γνωστά φυτά υπερσυσσωρευτές μετάλλων έχουν ανακαλυφθεί σε εδάφη πλούσια σε μέταλλα και είναι ενδημικά σε τέτοια εδάφη, αποδεικνύοντας ότι η υπερσυσσώρευση αποτελεί μία σημαντική οικοφυσιολογική προσαρμογή στην έντονη παρουσία των μετάλλων και μία ένδειξη-εκδήλωση της αντίστασης σε αυτές τις υψηλές συγκεντρώσεις. Ο σχεδιασμός των συστημάτων της φυτοαποκατάστασης ποικίλει ανάλογα με το είδος του ρυπαντή και το επιθυμητό επίπεδο μείωσης της συγκέντρωσης του, τις επικρατούσες

περιβαλλοντικές συνθήκες και από τα φυτά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν .  
(Cunningham et al., 1996) .

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι μηχανισμοί που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν κατά τη διαδικασία της φυτοαπορρύπανσης.



Σχήμα 1.Μηχανισμοί που εμπλέκονται στην διαδικασίας της φυτοαπορρύπανσης.

(Cunningham et al.,1996).

Για την εφαρμογή της τεχνολογίας της φυτοαποκατάστασης σχεδιάζονται κάποιοι παράγοντες που αυτοί περιλαμβάνουν . (Cunningham et al.,1996) , (Miller P.,1996) , (Brix H., 1997) :

1.Προσδιορισμό του επιπέδου της ρύπανσης.

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος φυτοαποκατάστασης, πρέπει να προσδιοριστεί το είδος και η συγκέντρωση των ρυπαντών καθώς και το βάθος στο οποίο εκτείνεται η ρύπανση.

2.Επιλογή του φυτικού υλικού.

Τα φυτά τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν επιλέγονται με βάση τον επιθυμητό μηχανισμό φυτοαποκατάστασης και το είδος του ρυπαντή. Η επιλογή των φυτών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζει την επιτυχία ή αποτυχία μίας εφαρμογής φυτοαποκατάστασης. Η προσεκτική επιλογή του φυτού και της ποικιλίας είναι σημαντική καθώς το επιλεγμένο φυτό πρέπει κατ' αρχάς να είναι κατάλληλο για τις κλιματολογικές και εδαφολογικές συνθήκες της περιοχής και κατά δεύτερον να είναι αποτελεσματικό στη φυτοαποκατάσταση. Τα φυτά πρέπει να είναι σε θέση να παράγουν μια υψηλή-βιομάζα, συσσωρεύοντας την υψηλή συγκέντρωση των βαριών μετάλλων, δεδομένου ότι η αύξηση στη βιομάζα επιτρέπει ένα υψηλότερο ποσό συσσώρευσης μετάλλων στα διάφορα μέρη των φυτών. Η

αύξηση στην παραγωγή βιομαζών είναι επιτεύξιμη μέσω της χρήσης των λιπασμάτων. Για τη φυτοαποδόμηση των οργανικών ενώσεων, η μέθοδος πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε η βλάστηση να μεγαλώνει γρήγορα και πυκνά, να είναι εύκολη στη φύτευση και συντήρηση, να χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες νερού με εξατμισοδιαπνοή (σε περίπτωση που το υπόγειο νερό εμπλέκεται στο πρόβλημα) και να μετατρέπει τους ρύπους σε μη τοξικές ή λιγότερο τοξικές μορφές. Το σινάπι (Indian mustard) όπως και ο Ηλίανθος (*Helianthus annuus*) είναι φυτά υπερσυσσωρευτές με σχετικά μεγάλη βιομάζα και υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης, που έχουν την ικανότητα να απορροφούν και να συσσωρεύουν μέταλλα και ραδιονουκλίδια. ( Σκορδίλης Α., Κομνίτσας Κ., 2004) .

3.Έλεγχος της δυνατότητας χρησιμοποίησης των επιλεγμένων φυτών (Treatability tests).

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται έλεγχος της τοξικότητας των ρυπαντών καθώς και προϊόντων που προκύπτουν από την εφαρμογή της φυτοαποκατάστασης.

4.Συντήρηση του συστήματος της φυτοαποκατάστασης.

Η συντήρηση του συστήματος της φυτοαποκατάστασης περιλαμβάνει την άρδευση των φυτών, προσθήκη κατάλληλων λιπασμάτων για τη γρήγορη ανάπτυξη τους και σε ορισμένες περιπτώσεις την αντιμετώπιση βιολογικών εχθρών των φυτών.

5.Συγκομιδή του φυτικού υλικού.

Μετά τη φυτοαποκατάσταση των μολυσμένων περιοχών τα φυτά πρέπει να κοπούν και το φυτικό τους σύστημα να ξεριζωθεί. Η επεξεργασία, που θα ακολουθεί στη συνέχεια εξαρτάται από την τοξικότητα των βιοσυσσωρευμένων ουσιών.

Η πιο συνηθισμένη επεξεργασία είναι η θερμική αποδόμηση ή η ελεγχόμενη αποτέφρωση, ιδιαίτερα στην περίπτωση των βαρέων μετάλλων. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μεταφορά των βαρέων μετάλλων στην παραγόμενη στάχτη, είτε μεταφέρονται ως πτητικά στα αερίδια από τα οποία ανακτώνται. Είναι μια ειδική επεξεργασία που δίνει επιπλέον κόστος στην εφαρμογή της φυτοαποκατάστασης.

Αναλυτικότερα.Τα μέταλλα προσλαμβάνονται από τα φυτά με διαφορετικούς ρυθμούς. Οι συντελεστές φυτοεξαγωγής (ο λόγος της συγκέντρωσης μετάλλου στα υπέργεια τμήματα του φυτού σε σχέση με τη συγκέντρωση του μετάλλου στο έδαφος), για απορρόφηση διαφορετικών μετάλλων από το είδος σιναπιού Indian mustard (*Brassica juncea*) διαφοροποιείται σημαντικά όπως φαίνεται στον πίνακα 2.

Οι υψηλότερες τιμές συντελεστή φυτοεξαγωγής σχετίζονται με υψηλότερη απορρόφηση μετάλλων. Η αποτελεσματικότητα της φυτοεξαγωγής μπορεί να περιοριστεί από τη ρόφηση των μετάλλων σε σωματίδια εδάφους και από τη χαμηλή διαλυτότητα των μετάλλων. Για τον υπολογισμό του ρυθμού απορρόφησης ρύπων

και κατά συνέπεια του χρόνου που απαιτείται για τη φυτοαποκατάσταση μιας ρυπασμένης περιοχής μπορούν να εφαρμοστούν απλά μαθηματικά μοντέλα.

Πίνακας 2. Συντελεστές φυτοεξαγωγής Indian mustard.

για το Indian Mustard	
Στοιχείο	Συντελεστής φυτοεξαγωγής
Cr <sup>6+</sup>	58
Cd <sup>2+</sup>	52
Ni <sup>2+</sup>	31
Cu <sup>2+</sup>	7
Pb <sup>2+</sup>	1.7
Cr <sup>3+</sup>	0.1
Zn <sup>2+</sup>	17

Λαμβάνοντας σοβαρά τους παράγοντες 1,2,3,4 επελέχθη το τριφύλλι κατάλληλο για την απορρύπανση εδαφών στην περίπτωση που εξετάζουμε.

Εχουμε προς εξέταση μια ρυπασμένη περιοχή 30 στρεμμάτων από μια βιομηχανία επιμεταλλώσεως. Ο μόλυβδος, το κύριο μέταλλο, να αποτελεί τον ρυπαντή για την περιοχή αυτή.

Στην Α περίπτωση η συγκέντρωση στο έδαφος είναι της τάξης 600 mg/kg και σε βάθος 30 περίπου εκατοστών.

Στη Β περίπτωση –περιοχή Λαυρίου. Η νομοθετημένη ανώτατη τιμή του ολικού μολύβδου στο έδαφος των οικιστικών περιοχών με κήπο είναι 500 mg/kg (ICRCL 1987).

Η προτεινόμενη συγκέντρωση μολύβδου στο έδαφος για την υγιή ανάπτυξη των φυτών είναι 200 mg/kg, με συνέπεια το μεγαλύτερο ποσοστό (85%) του εδάφους της Λαυρεωτικής να είναι ακατάλληλο για την καλλιέργεια εδώδιμων φυτών.

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε μόλυβδο ανέρχεται σε 2232 mg/kg, σε βάθος 30 εκ.

Εφαρμόζεται η μέθοδο της φυτοεξαγωγής και στις δύο περιπτώσεις. Σαν φυτό, θα χρησιμοποιηθεί το τριφύλλι. Αν υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες όπως κλίμα μαλακό, όχι βαρύ χειμώνα και πότισμα συνεχώς, το φυτό αυτό μπορεί να θεριστεί μέχρι και 4 φορές το χρόνο. Θα εξετάσουμε πως επιδρά η συλλογή του (θέρισμα), στο χρόνο της απορρύπανσης αν θεριστεί μία, δύο και τρεις φορές το χρόνο.

Περίπτωση Α. Εστω  $r$ : Ο ρυθμός πρόσληψης του ρύπου, (kg/yr), και ότι το όριο για να θεωρείται η περιοχή μη ρυπασμένη είναι 400 mg/kg. Με τη χρήση μικρών δόσεων EDTA, είναι δυνατόν να επιτευχθούν συγκεντρώσεις στο φυτό της τάξης των 5000 mg/kg (επί ξηρού), και συγκομιδή της τάξης των 650 kg ξηρού υλικού ανά σοδειά και στρέμμα.

Ο απαιτούμενος χρόνος για την απορρύπανση για μία συλλογή (θέρισμα):



$$r = (5000 \text{ mg/kg}) (650 \text{ kg}/(\text{στρέμμα} \times \text{σοδιά})) \times (1 \text{ σοδιά} / \text{έτος}) \times (10^{-6} \text{ kg/mg}) = 3,25 \text{ kg}/(\text{στρέμμα} \times \text{έτος}). \quad (1)$$

Ο απαιτούμενος χρόνος για την απορρύπανση για δύο συλλογές (θερίσματα):

$$r = (5000 \text{ mg/kg}) (650 \text{ kg}/(\text{στρέμμα} \times \text{σοδιά})) \times (2 \text{ σοδιές} / \text{έτος}) \times (10^{-6} \text{ kg/mg}) = 6,5 \text{ kg}/(\text{στρέμμα} \times \text{έτος}). \quad (2)$$

Ο απαιτούμενος χρόνος για την απορρύπανση για τρεις συλλογές (θερίσματα):

$$r = (5000 \text{ mg/kg}) (6500 \text{ kg}/(\text{στρέμμα} \times \text{σοδιά})) \times (3 \text{ σοδιές} / \text{έτος}) \times (10^{-6} \text{ kg/mg}) = 9,75/(\text{στρέμμα} \times \text{έτος}). \quad (3)$$

Αν θεωρηθεί ότι η ξηρή φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους είναι 1,7 kg/L, τότε η συνολική μάζα  $M_0$  του Pb στο έδαφος για επιφάνεια 1 στρέμματος είναι:

$$M_0 = (600 \text{ mg/kg})(1,7 \text{ kg/L})(0,3 \text{ m}) (1000 \text{ m}^2/\text{στρέμμα}) (10^3 \text{ L/m}^3) (10^{-6} \text{ kg/mg}) = 306 \text{ kg}/\text{στρέμμα} \text{ (αρχική μάζα στο έδαφος)}.$$

$$\text{Αλλά } M_t = (400 \text{ mg/kg})(1,7 \text{ kg/L})(0,3 \text{ m}) (1000 \text{ m}^2/\text{στρέμμα}) (10^3 \text{ L/m}^3) (10^{-6} \text{ kg/mg}) = 204 \text{ kg}/\text{στρέμμα} \text{ (όριο μη ρυπασμένου εδάφους 400 mg/kg)}.$$

Θεωρείται κινητική μηδενικής τάξης (σταθερός ρυθμός απορρόφησης Pb κάθε χρόνο) επειδή το EDTA θα κάνει το μόλυβδο συνεχώς βιοδιαθέσιμο στα φυτά. Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει:

$r = \lambda$  (σταθερό). Ολοκληρώνοντας  $M_t - M_0 = -\lambda \cdot t$  και επομένως

$$t = \frac{M_0 - M_t}{\lambda} = \frac{306 - 204}{3,25} = 31,4 \text{ ετη} \text{ για την περίπτωση (1)}$$

$$t = \frac{M_0 - M_t}{\lambda} = \frac{306 - 204}{6,5} = 15,7 \text{ ετη} \text{ για την περίπτωση (2)}$$

$$t = \frac{M_0 - M_t}{\lambda} = \frac{306 - 204}{9,75} = 10,5 \text{ ετη} \text{ για την περίπτωση (3)}$$

Ο χρόνος απορρύπανσης (περίπτωση 3) θα είναι στην πραγματικότητα μικρότερος από δέκα χρόνια σε περίπτωση που ο μόλυβδος μεταναστεύσει στο έδαφος λόγω της προσθήκης του EDTA, ή αν οι εφαρμοζόμενες καλλιεργητικές πρακτικές βοηθήσουν στη γρηγορότερη απορρύπανση περιοχών με μεγαλύτερη ρύπανση. Τα κριτήρια απορρύπανσης που τίθενται, βασίζονται σε ένα όριο το οποίο δε θα πρέπει να υπερβαίνεται, όπως για παράδειγμα τα 400 mg/kg, και έτσι το έδαφος θα πρέπει να αναλύεται στο τέλος κάθε χρόνου για να επιβεβαιώνεται η συμμόρφωση με το όριο

που έχει τεθεί. Αν το θέρισμα του εξεταζόμενου φυτού γίνει μέσα στο χρόνο και τέταρτη φορά σπάνια αλλά και πιθανή και αυτό γιατί εξαρτάται από τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν πριν τότε ο χρόνος απορρύπανσης μειώνεται ακόμη περισσότερο.

Περίπτωση Β.  $r=5000 \text{ mg/kg} \cdot 3 \text{ σοδειές/έτος} \cdot 672 \text{ kg} = 10,08 \text{ kg}$  ανά στρέμμα και έτος. Αν δεχτούμε ότι η ξηρή φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους είναι κατά το REC software,  $1,7 \text{ kg/l}$ , και ότι το ενεργό βάθος απορρύπανσης είναι  $0,30 \text{ m}$ , τότε η συνολική μάζα του μολύβδου Mo (πριν την απορρύπανση) είναι:  $M_0 = 2232 \text{ mg/kg} \cdot 1,7 \text{ kg/l} \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 1000 \text{ m}^2 / \text{στρέμμα} \cdot 1000 \text{ l/m}^3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mg} = 1138,32 \text{ kg}$  Pb. Θέτοντας τιμή – στόχο  $2000 \text{ mg/kg}$  τότε  $M_t = 2000 \text{ mg/kg} \cdot 1,7 \text{ kg/l} \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 1000 \text{ m}^2 / \text{στρέμμα} \cdot 1000 \text{ l/m}^3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mg} = 1020 \text{ kg}$  Pb.

Θεωρώντας ότι με την προσθήκη EDTA ο μόλυβδος θα είναι διαρκώς βιοδιαθέσιμος και για κινητική μηδενικής τάξης, τότε  $r=\lambda$  οπότε έχουμε :

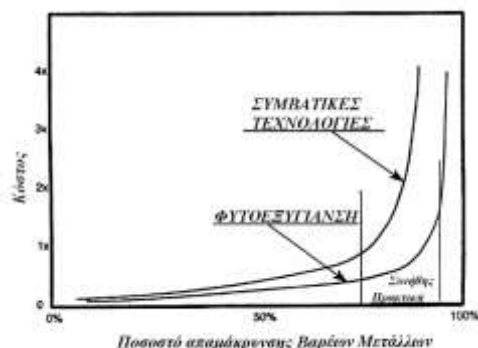
$M_t = M_0 \cdot e^{-\lambda t}$  και ολοκληρώνοντας  $M_t - M_0 = -\lambda t$  άρα  $t = (M_t - M_0) / \lambda = (1138,32 - 1020) / 10,08 = 11,73$  έτη.

Εκτίμηση Κόστους, Παραπροϊόντων και Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων της συγκεκριμένης επιλεχθείσας μεθόδου.

Περίπτωση Α. Για την εκτίμηση του κόστους της απορρύπανσης της ανωτέρω περιοχής με τη μέθοδο της φυτοεξαγωγής θα θεωρήσουμε ότι η καλλιέργεια του τριφυλλιού εφόσον γίνεται με εδαφοκάλυψη σε ποσοστό 90%, θα έχει τις ίδιες απαιτήσεις με την καλλιέργεια εποχιακών κτηνοτροφικών φυτών, τα οποία απαιτούν 40 ώρες μηχανής ανά στρέμμα και 9 ώρες ανθρώπινης εργασίας, με κοστολόγιο  $20\text{€} \cdot 40 = 800\text{€}$  και  $8\text{€} \cdot 8 = 64\text{€}$  αντίστοιχα. Η μηχανική κατεργασία αφορά την προετοιμασία της σποράς, σπαρτική, αρδευτικά, κοπή (θερισμό), σύνθλιψη για τη γρηγορότερη αποβολή της υγρασίας, ανάδευση, δεματοποίηση και μεταφορά (απομάκρυνση βιομάζας και ρυπαντή). Η ανθρώπινη εργασία αφορά λοιπές εργασίες (επίβλεψη φόρτωσης των δεμάτων, αρδεύσεις κ.ά.). Η ανωτέρω διαδικασία θα εκτελείται 3 φορές ετησίως. Άρα για την έκταση των 30 στρεμμάτων θα απαιτούνται:  $30 \cdot (800\text{€} + 64\text{€}) \cdot 3 \text{ συγκομιδές /έτος} = 77760 \text{ € /έτος}$  και για τα σχεδόν 10,5 έτη θα απαιτηθούν  $103680\text{€} / \text{έτος} \cdot 10,5 = 816480 \text{ €}$ . Επιπλέον έξοδα που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη είναι η περαιτέρω επεξεργασία Η μάζα προς συγκομιδή (παραπροϊόντα) ανέρχεται σε  $650 \text{ kg} \cdot 3 \text{ συγκομιδές} \cdot 30 \text{ στρ} = 58500 \text{ kg} / \text{έτος}$  με πιθανό κόστος μεταφοράς και επεξεργασίας  $40\text{€} / \text{τόνο}$ , άρα θα απαιτηθούν  $2340 \text{ €}$  περίπου ανά έτος και για 10,5 έτη  $24570\text{€}$ . Το κόστος εργαστηριακής παρακολούθησης μπορεί να ανατεθεί σε εδαφολογικό εργαστήριο είτε ιδιωτικό, είτε της νομαρχιακής αυτοδιοίκησης (Διεύθυνσης Αγροτικής Ανάπτυξης) και θα απαιτεί επεξεργασία 150 δειγμάτων συνολικού κόστους  $50000\text{€}$ . Σαν συνολικό κόστος για 10,5 έτη περίπου  $925000\text{€}$ . Το κόστος μεγαλώνει περισσότερο με την διαδικασία της αποτέφρωσης. Σε γενικές γραμμές το κόστος παραμένει χαμηλό.

Περίπτωση. Κόστος 1050000 €.

Η επίδραση της φυτοεξυγίανσης στην απόδοση και το κόστος ρυπασμένων περιοχών δίνεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Η επίδραση της φυτοεξυγίανσης στην απόδοση και το κόστος ρυπασμένων περιοχών (Crusberg, 1997).

Κατά τη χρήση του REC software, του φύλλου εργασίας Risk Reduction, στη Zero Alternative.

Περίπτωση Α. Μείωση κινδύνου κατά Μ.Ο. σε άνθρωπο και περιβάλλον ελάχιστα.

Περίπτωση Β. Μείωση κινδύνου κατά Μ.Ο. σε άνθρωπο και περιβάλλον 27,7%.

Risk reduction	Current situation	Zero Alternative (Average risk)	Risk reduction
Humans	1240,0	629	49,2%
Agr.+Eco	23,1	21,6	6,2%
Other objects	0	0	
<i>Average</i>			<i>27,7%</i>

Εργαστηριακά αποδείχθηκε ότι το τριφύλλι απορροφά το μόλυβδο και τα θεωρητικά αποτελέσματα μπορούν να ταυτιστούν με τα εργαστηριακά αποτελέσματα των οικείων προσπαθειών.

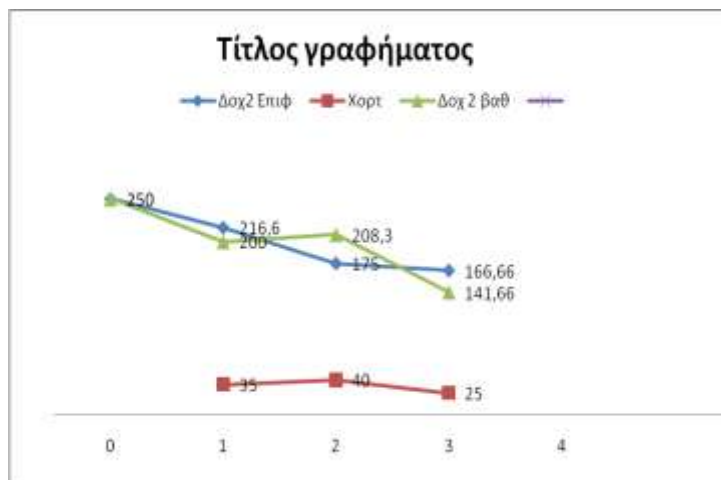
Αρχικό δείγμα χώματος. Συγκέντρωση Pb 150 mgr/Kgr.

Με εμπλουτισμό Pb στο χώμα 250 mgr/Kgr.

Στα τρία θερίσματα το τριφύλλι να απορροφά τις αναγραφόμενες τιμές σε mg/Kg.

Λάβαμε υπόψιν στην μελέτη μας, την πρόσληψη του ρύπου επιφανειακά και σε κάποιο βάθος.

	Δοχ Επιφ	2 Χορτ	Δοχ 2 βαθ (mgr/Kgr)
0	250		250
1	216,6	35	200
2	175	40	208,3
3	166,66	25	141,66



Αποτελέσματα της εργαστηριακής έρευνας.

Μεγάλοι χρόνοι απορρύπανσης για χαμηλά-υψηλά επίπεδα ρύπανσης. Η μέγιστη αποτελεσματικότητα επιτυγχάνεται από 8-10 έτη μετά την εφαρμογή της φυτοαποκατάστασης. Μείωση κινδύνου κατά Μ.Ο. σε άνθρωπο και περιβάλλον.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτυσσόμενη εναλλακτική μέθοδος απορρύπανσης εδαφών από βαρέα μέταλλα αποτελεί η απορρύπανση με φυτά. Η μέθοδος αυτή είναι φυσική, έχει σχετικά χαμηλό κόστος και υψηλή αποτελεσματικότητα καθώς επίσης μηδενική επικινδυνότητα για τον ανθρώπινο παράγοντα.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της φυτοαποκατάστασης γενικά είναι ότι έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει τους ρυπαντές σε απλούστερες και λιγότερο τοξικές ενώσεις. Στα μειονεκτήματα της φυτοαποκατάστασης συγκαταλέγονται, η δυσκολία πρόβλεψης της απόδοσής της, η εφαρμογή της σε σχετικά περιορισμένο βάθος

ρύπανσης, η μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωσή της, η εξάρτησή της από τις φυσικοχημικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής και τέλος η αρκετά συχνά μη επιτυχής μετάβαση από τις εργαστηριακές έρευνες στις επικρατούσες συνθήκες στην περιοχή της ρύπανσης.

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Ιωαννίδης Θ. , Ζουμπούλης Α.. Φωτοεξυγίανση Χημικά Χρονικά (Γεν. Έκδοση), Τεύχος 9, σελ. 254-257. 2001.

Σκορδίλης Α . , Κομνίστας Κ. Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων Τόμος Β Σελ 140-141. Πάτρα 2004.

Brennan, M. A., and Shelley, M. L. A model of uptake, translocation and accumulation of lead by maize for the purpose of phytoextraction. *Ecological Engineering*, Vol. 2, pp. 271-297. 1999.

Brooks, R. R. Plants that hyperaccumulate heavy metals. Their role in Phytoremediation Microbiology, Archaeology and Phytomining, (CAB International). 1998.

Brix, H. "Do macrophytes play a role in constructed wetlands?" *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35, pp. 11-17. 1997.

Chappell, J. Phytoremediation of TCE in groundwater using *Populus*. United States E.P.A. Technology Innovation Office ( <http://clu-in.org>). 1997.

Cunningham, S. D., Anderson, T. A., Schwab, A. P., and Hsu, F. C. "Phytoremediation of soil contaminated with organic pollutants". *Advances in Agronomy* , Vol. 56, pp. 55-114. 1996.

Gabriel, P. F. "Innovative technologies for contaminated soil remediation: focus on bioremediation". In *Bioremediation: the state of practise in Hazardous waste remediation operations: AWMA/HWAC*). 1992.

Fiorenza, S., Balshaw, K., Lowe, D. F., Oubre, C. L., and Ward, C. H. Innovative bioremediation technologies: The DOD/AATDE contribution. In *Global Environmental Biotechnology*, D. L. Wise, ed. (Kluwer Academic Publishers), pp. 365-376. 1998.

Miller, P. G. "Phytoremediation", *Ground Water Remediation Technologies Analysis Center*. 1996.

McCrath, S. P.. Phytoextraction for soil remediation. In *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: their role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining*, R. R. Brooks, ed. (New York: CAB International), pp. 261-287. 1998.

Raskin, I., Salt, D., Kramer, U., and Schulman, R. "Phytoremediation: Green and Clean". Acta Horticulture, Vol. 457, pp. 329-331. 1998.

Salt D.E., Smith R.D. and Raskin I. Phytoremediation. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 49: pp 643-68. 1998 .

### **Software**

L.T.C. Bonten, M. van Drunen and J. Japenga 'REC-model for diffusively polluted areas - Decision support system for remediation strategies, including Risk, Environmental merits and Costs' Free University, Amsterdam.