

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ (Α.Τ.Ε.Ι.) ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΓΕΩΠΟΝΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΠΙΟΥ ΣΤΟΝ ΚΡΑΤΙΚΟ ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΑ
ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ**

ΚΑΛΑΜΑΤΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΜΑΡΙΑ ΜΠΑΡΜΠΟΥΤΣΗ

ΕΞΑΜΗΝΟ: 10^ο

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΡΤΣΩΝΑΣ ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ

Ευχαριστίες

Θερμά ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ε. Κάρτσωνα, για την υπομονή του και τις πολύτιμες υποδείξεις του κατά την εκπόνηση της εργασίας και στον πατέρα μου Α. Μπαρμπούτση για την υποστήριξη του.

Εισαγωγή.....	5
1 Ιστορική αναδρομή	6
2 Μέθοδοι αποκατάστασης τοποθεσιών από ρύπους	7
2.1 Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών.....	7
2.1.1 Φυσικοχημικές μέθοδοι.....	8
2.1.2 Βιολογικές μέθοδοι.....	14
2.1.3 Θερμικές μέθοδοι.....	21
2.2 Τεχνολογίες αποκατάστασης υπόγειων υδάτων	24
2.2.1 Ex- situ τεχνολογίες.....	25
2.2.2 In – situ τεχνολογίες.....	26
3 Φυτοαποκατάσταση	31
3.1 Στοιχεία φυσιολογίας και φυτά υπερσυσσωρευτές	32
3.2 Αποκατάσταση εδάφους και υδροφόρου ορίζοντα	41
3.2.1 Φυτοεξαγωγή (phytoextraction)	42
3.2.2 Φιλτράρισμα ή ριζοδιήθηση (rhizofiltration)	45
3.2.3 Φυτοσταθεροποίηση (phytostabilization)	46
3.3 Αποκατάσταση περιοχών μολυσμένων από υδρογονάνθρακες.....	47
3.3.1 Φυτοαποδόμηση (phytodegradation)	48
3.3.2 Ριζοδιάσπαση (rhizodegradation)	49
3.3.3 Φυτοεξάτμιση (phytonovolatilization)	50
3.4 Υδραυλικός έλεγχος.....	51
3.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσληψη των ρύπων από τα φυτά	52
3.6 Καταπονήσεις φυτών.....	53
4 Ρύποι.....	63
4.1 Ορισμός και ιδιότητες ρύπων.....	63
4.2 Φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων	64
4.3 Είδη ρύπανσης	66
4.3.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	66
4.3.2 Ρύπανση εδάφους	70
4.3.3 Ρύπανση υδάτων.....	73
4.4 Τρόποι παρακολούθησης των ρύπων.....	77
5 Το αεροδρόμιο σαν βιομηχανική μονάδα.....	78
5.1 Κρατικός αερολιμένας Καλαμάτας.....	80

5.1.1	Χρήσεις αεροδρομίου.....	80
5.1.2	Μετεωρολογικά στοιχεία.....	80
5.1.3	Αεροσκάφη σε χρήση (πολεμικής και πολιτικής αεροπορίας).....	84
5.2	Συνηθέστεροι ρύποι ενός αεροδρομίου.....	88
5.2.1	Αεροπορικά καύσιμα.....	88
5.2.2	Ελαιολιπαντικά και υδραυλικά υγρά.....	93
5.2.3	Απόβλητα χημικού καθαρισμού.....	95
5.2.4	Απόβλητα μη καταστροφικών ελέγχων.....	97
5.2.5	Απόβλητα επιμεταλλώσεων.....	99
5.2.6	Απόβλητα χρωστηρίων (αντιδιαβρωτικής προστασίες α/φων).....	102
5.2.7	Μπαταρίες.....	105
5.2.8	Αποπαγωτικά.....	105
5.2.9	Πλυντήρια αεροσκαφών κινητήρων και εξοπλισμού.....	107
5.3	Φυτοαποκατάσταση ως προτεινόμενη μέθοδος.....	108
5.4	Τόπος φύτευσης – σχέδιο.....	108
5.5	Προτεινόμενο φυτικό υλικό.....	112
5.6	Συγκομιδή, επεξεργασία και συντήρηση της φυτοαποκατάστασης.....	117
6	Βιβλιογραφία.....	119

Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή η κλιματική αλλαγή είναι έντονη, οι επιπτώσεις της κάθε χρόνο κοστίζουν ανθρώπινες ζωές και ανυπολόγιστες ζημιές. Η συναλλαγή του ανθρώπου με το περιβάλλον κι ο σεβασμός του είναι περισσότερο από ποτέ επιβεβλημένος. Η πρόοδος της τεχνολογίας βασίστηκε στην αλόγιστη χρήση των φυσικών πόρων με αποτέλεσμα την ενδεχόμενη εξάντλησή τους και την καταστροφή του περιβάλλοντος. Μπορεί η τεχνολογία και το περιβάλλον να συνυπάρξουν με εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης των πόρων. Σκοπός της παρακάτω εργασίας είναι να παραθέσει τρόπους απομάκρυνσης ρύπων σε επιβαρυμένες περιοχές όπως ο Κρατικός Αερολιμένας Καλαμάτας, τον οποίο αφορά η εργασία. Η μέθοδος που θα αναλυθεί παρακάτω αφορά την φυτοαποκατάσταση αεροδρομίων από βαρέα μέταλλα και χημικά. **Αποτελεί πρόταση διαχείρισης του αερολιμένα Καλαμάτας, με στόχο την διατήρηση χαμηλής συγκέντρωσης τοξικών ρύπων στον περιβάλλοντα χώρο των εγκαταστάσεων του αεροδρομίου.**

1 Ιστορική αναδρομή

Η μόλυνση του εδάφους με μέταλλα ξεκίνησε την εποχή του Χαλκού (2500 - 600 π.Χ.), συνεχίστηκε με τα ελληνικά και ρωμαϊκά ορυχεία και τις βιομηχανίες μετάλλων από το 500 έως 300 π.Χ. Η αύξηση σε συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον οδήγησε και στον εντοπισμό - καταγραφή φυτών που παρουσίαζαν ανεκτικότητα στις υψηλές συγκεντρώσεις. Κατά το μεσαίωνα η πρώτη έννοια και χρήση της αποκατάστασης ήταν με τη μορφή της αμειψισποράς για τη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους. Καθ' όλη τη δεκαετία του 1970 και μετά, πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες μελέτες εργαστηριακής κλίμακας για τον προσδιορισμό τοξικότητας και της ικανότητας πρόσληψης των ρύπων από τα φυτά, με θεαματικά αποτελέσματα.

Τη δεκαετία του '80, στις Ηνωμένες Πολιτείες, η έρευνα της φυτοαποκατάστασης χρηματοδοτήθηκε με 8,5 εκατομμύρια δολάρια και στη συνέχεια καθιερώθηκε από τις ομοσπονδιακές και πολιτειακές κυβερνήσεις, καθώς και από μη κυβερνητικές οργανώσεις. Η χρήση του όρου φυτοαποκατάσταση ξεκίνησε από την EPA το 1991, και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία το 1993 από τον Cunningham και Berti. Μελετήθηκε εκτενώς σε μικρή κλίμακα στο Τσερνομπίλ της Ουκρανίας μετά την καταστροφή του εργοστασίου, όπου χρησιμοποιήθηκαν οι ηλιανθοί (ηλιοτρόπια) για την αφαίρεση των ραδιενεργών ρυπαντών από τα νερά των λιμνών. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, ανακαλύφθηκαν νέα στοιχεία τα οποία την κατατάσσουν στις καινοτόμες επιστημονικές τεχνολογίες. Το 1994 η τεχνολογία ονομάστηκε επίσημα φυτοαποκατάσταση. Την ίδια χρονιά υπήρξε ενδιαφέρον από την κυβέρνηση και τη βιομηχανία της Αμερικής και έτσι ιδρύθηκαν το εργαστήριο DOE (Department of Energy) και η πρώτη εταιρία φυτοαποκατάστασης Phytotech. Το 1995 διεξήχθη το πρώτο συνέδριο φυτοαποκατάστασης. Το 2000 η Αμερικανική υπηρεσία περιβάλλοντος (EPA - Environmental Protection Agency) διοργάνωσε πρώτο συνέδριο που αφορούσε τη φυτοαποκατάσταση. Η τεχνολογία της φυτοαποκατάστασης είναι αποτέλεσμα συνεργασίας πολλών τομέων, όπως η γεωπονία, η δασοκομία, η χημεία, η γεωργική μηχανική, η μικροβιολογία και πολλοί άλλοι. Πλέον αποτελεί ανεξάρτητο τομέα μελέτης και είναι ευρέως εφαρμόσιμη τεχνολογία κυρίως στην Αμερική. Οι συνεχείς έρευνες εξακολουθούν να παρέχουν πληροφορίες για τη μελλοντική την εφαρμογή της (Kristi Russell, 2005).

2 Μέθοδοι αποκατάστασης τοποθεσιών από ρύπους

2.1 Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών

Η έντονη εμφάνιση προβλημάτων ρύπανσης του υπεδάφους σε συνδυασμό με τη μελέτη και την κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς και μετασχηματισμού των ρύπων μέσα σε αυτό, οδήγησαν σταδιακά στην ανάπτυξη πολλών αποτελεσματικών τεχνολογιών αποκατάστασης εδάφους και υπόγειων υδάτων. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες είναι αρκετά εξειδικευμένες και είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε ξεχωριστές κατηγορίες, βάσει κάποιου κριτηρίου. Ένας τρόπος ταξινόμησής τους είναι σε in-situ και ex-situ. Η κατηγοριοποίηση αυτή, γίνεται ανάλογα με το αν εφαρμόζονται απευθείας στο πεδίο ή αν περιλαμβάνουν την απομάκρυνση του ρυπασμένου μέσου και την επεξεργασία του σε ειδικές εγκαταστάσεις. Μια άλλη ταξινόμηση αφορά τους μηχανισμούς που εκμεταλλεύεται κάθε τεχνολογία για την απομάκρυνση του εκάστοτε ρύπου.

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών με βάση τα χαρακτηριστικά του ρύπου	
Ρύπος (χαρακτηριστικά)	Τεχνολογία / Μέθοδος
Φυσικοί	Φυσική
Χημικοί	Χημική
Βιοτικοί	Βιοαποκατάσταση/ Βιοεξυγίανση

Πηγή: Γιδάρακος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τον τύπο και τα χαρακτηριστικά του ρύπου, τα χαρακτηριστικά του πεδίου στο οποίο πρόκειται να εφαρμοστεί η αποκατάσταση, το στόχο ή τους στόχους της τεχνολογίας και το κόστος.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι – τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφικών και υδατικών πόρων και τα χαρακτηριστικά τους (Γιδάρακος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005).

2.1.1 Φυσικοχημικές μέθοδοι

2.1.1.1 Ηλεκτροκινητική μέθοδος

Η ηλεκτροκινητική μέθοδος αποτελεί μια νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί in-situ και να δώσει υψηλή απόδοση αποκατάστασης. Περιλαμβάνει την ανάπτυξη ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο ρυπασμένο έδαφος, με το οποίο αλλάζει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του και ενεργοποιεί ηλεκτροχημικούς και ηλεκτροκινητικούς μηχανισμούς εκρόφησης και τελικά απομάκρυνσης των υφιστάμενων ρύπων.

Η ηλεκτροκινητική μέθοδος παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005)

Πλεονεκτήματα

- λειτουργεί in-situ
- περιλαμβάνει ελάχιστη επέμβαση στο πεδίο
- δεν απαιτεί την εκσκαφή του ρυπασμένου μέσου
- η διαπερατότητα του εδάφους δε λειτουργεί ανασταλτικά
- επιτυγχάνει απομάκρυνση των ρύπων και όχι απλή ακινητοποίηση ή δέσμευση
- επιτυγχάνει τη διαλυτοποίηση και την κινητοποίηση των υπαρχόντων ρύπων, εκμεταλλευόμενη τη μείωση του pH χωρίς χρήση οξέων

Μειονεκτήματα

- η βέλτιστη χωροθέτηση και τάση των εισαγόμενων στο έδαφος ηλεκτροδίων βρίσκεται ακόμη υπό μελέτη
- το υψηλό κόστος εφαρμογής
- η απόδοση μειώνεται σημαντικά σε χαμηλά ποσοστά εδαφικής υγρασίας, πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 14 και 18%
- η διεξαγωγή αντιδράσεων οξειδοαναγωγής σε συνδυασμό με την παρουσία φυσικών ιόντων και οργανικών ρύπων στο έδαφος είναι δυνατόν να οδηγήσει στη δημιουργία ανεπιθύμητων επικινδύνων προϊόντων

- η παρουσία μεταλλικών ή μονωτικών υλικών στο έδαφος, η χωρική μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπαρχόντων γεωλογικών σχηματισμών και η ροή του υπόγειου νερού επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση και την εφαρμοσιμότητα της ηλεκτροκινητικής μεθόδου
- απαιτείται χρήση ηλεκτροδίων από αδρανή υλικά
- η αποτελεσματικότητα της είναι μεγάλη σε αργιλικά εδάφη (λόγω του αρνητικού φορτίου τους).

2.1.1.2 Σταθεροποίηση - στερεοποίηση

Η σταθεροποίηση - στερεοποίηση είναι μια τεχνολογία, που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη διαχείριση επικινδύνων και τοξικών αποβλήτων, κατά την οποία το απόβλητο αναμειγνύεται με υλικά που συντελούν στη δημιουργία μιας στερεής δομής μειωμένης τοξικότητας, με παράλληλο εγκλωβισμό των επικινδύνων και τοξικών ουσιών μέσα στη δομή αυτή. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση της τεχνολογίας αυτής έχει επεκταθεί και στην επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών, με στόχο όχι την απομάκρυνση των ρύπων, αλλά την αλλαγή των φυσικών και χημικών τους χαρακτηριστικών, έτσι ώστε τα εδάφη να μπορούν να διαχειριστούν ή να διατεθούν με ασφαλή τρόπο. Η τεχνολογία σταθεροποίησης - στερεοποίησης ρυπασμένων εδαφών παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλα τα εδάφη
- ο απαιτούμενος χρόνος εξυγίανσης είναι σχετικά μικρός
- το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ενός συστήματος σταθεροποίησης - στερεοποίησης είναι σχετικά μικρό

Μειονεκτήματα και περιορισμοί

- κατά την προσθήκη των απαιτούμενων συνδετικών υλικών ο όγκος του προς επεξεργασία εδάφους είναι δυνατόν να αυξηθεί σημαντικά (ακόμη και να

διπλασιαστεί), καθιστώντας δύσκολη τη μετέπειτα διαχείριση του (ειδικά σε ex-situ εφαρμογές)

- η αντοχή του τελικού σταθεροποιημένου - στερεοποιημένου υλικού δεν είναι δεδομένη, καθώς μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από πολλές παραμέτρους (π.χ. καιρικές συνθήκες), οδηγώντας σε απελευθέρωση των συγκρατημένων ρύπων
- το βάθος της υπάρχουσας ρύπανσης είναι δυνατόν να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα στην εφαρμογή
- σε in-situ εφαρμογές το σταθεροποιημένο-στερεοποιημένο έδαφος ίσως αποτρέψει οποιαδήποτε μελλοντική χρήση της εξυγιασμένης περιοχής
- σε περιπτώσεις που απαιτείται μικρός λόγος εδάφους προς συνδετικό υλικό το κόστος εφαρμογής αυξάνεται σημαντικά
- δεν μπορεί να αντιμετωπίσει ικανοποιητικά τους οργανικούς ρύπους, καθώς η ακινητοποίηση τους είναι δύσκολη, ενώ παράλληλα η καταστροφή τους σε υψηλές θερμοκρασίες (με εφαρμογή της τεχνολογίας της υαλοποίησης) είναι δυνατόν να προκαλέσει την έκλυση διοξινών και φουρανίων
- η παρουσία ανόργανων αλάτων στο έδαφος είναι δυνατόν να επηρεάσει σημαντικά τη δράση των χρησιμοποιούμενων συνδετικών υλικών και ως εκ τούτου πρέπει να είναι πλήρως προσδιορισμένη πριν την εφαρμογή της τεχνολογίας.

2.1.1.3 Εδαφική έκπλυση

Η εδαφική έκπλυση αποτελεί μια καινοτόμο τεχνολογία επεξεργασίας ρυπασμένων εδαφών, η οποία περιλαμβάνει την εισαγωγή - διήθηση ενός υδατικού διαλύματος μέσα στην υφιστάμενη ζώνη ρύπανσης, με στόχο τη μεταφορά των εδαφικών ρύπων στο χρησιμοποιούμενο διάλυμα και τη μετέπειτα απομάκρυνση τους με την άντληση του ρυπασμένου πλέον διαλύματος. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται in-situ και πολλές φορές συγχέεται με την εδαφική πλύση (soil washing), η οποία ναι μεν παρουσιάζει παρόμοια αρχή επεξεργασίας, αλλά είναι ex-situ διεργασία, η οποία απαιτεί την εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους για την αποκατάσταση του.

Η τεχνολογία της εδαφικής έκπλυσης παρουσιάζει τα ακόλουθα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- λειτουργεί in-situ
- δεν απαιτεί εκσκαφή και μεταφορά του ρυπασμένου εδάφους σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας
- χαμηλό κόστος εφαρμογής
- εφαρμόζεται και στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους
- μπορεί να συνδυαστεί με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης
- μπορεί να αντιμετωπίσει ένα μεγάλο αριθμό εδαφικών ρύπων.

Μειονεκτήματα

- δεν είναι αποτελεσματική σε χαμηλής διαπερατότητας εδάφη
- απαιτεί μεγάλους χρόνους εξυγίανσης
- απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό του συστήματος συλλογής και άντλησης του διαλύματος έκπλυσης, καθώς υπάρχει κίνδυνος διαφυγής και/ ή εξάπλωσης των κινητοποιημένων/ διαλυτοποιημένων ρύπων
- το εισαγόμενο διάλυμα έκπλυσης είναι δυνατόν να επηρεάσει αρνητικά τις χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους
- αντιμετωπίζει νομοθετικούς περιορισμούς λόγω του κινδύνου που εμπεριέχει η εισαγωγή χημικών ουσιών (διαλύματος έκπλυσης) στο υπέδαφος
- είναι δύσκολο να προβλεφθεί η απόδοση και ο απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής
- η παρουσία κατασκευών (υπόγειων σωλήνων, δεξαμενών, κτιρίων, κτλ) μπορεί να περιορίσει ή να αποτρέψει την εφαρμογή
- επιβάλλει την επεξεργασία του συλλεχθέντος μίγματος διαλύματος έκπλυσης - ρύπων, μετατρέποντας ουσιαστικά το πρόβλημα εξυγίανσης εδάφους σε πρόβλημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

2.1.1.4 Εδαφική πλύση

Η εδαφική πλύση είναι μια τεχνολογία επεξεργασίας ρυπασμένων εδαφών, που χρησιμοποιεί υγρά διαλύματα, συνήθως νερό με πρόσθετες χημικές ενώσεις, και μηχανικές διεργασίες, με στόχο την απομάκρυνση των υφιστάμενων ρύπων από μέρος του επεξεργαζόμενου εδάφους και τη συγκέντρωσή τους στο χρησιμοποιούμενο διάλυμα. Αποτέλεσμα της είναι η μείωση της ποσότητας του ρυπασμένου εδάφους και κατ' επέκταση του προς επεξεργασία εδάφους έως και 90%, επιτρέποντας την μετέπειτα εφαρμογή κάποιας άλλης τεχνολογίας αποκατάστασης. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η εδαφική πλύση είναι περισσότερο μια μέθοδος διαχωρισμού, παρά μια μέθοδος εξουδετέρωσης και επεξεργασίας των εδαφικών ρύπων. Ορισμένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εδαφικής πλύσης είναι τα ακόλουθα (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- χρησιμοποιεί ένα κλειστό ex-situ σύστημα επεξεργασίας, το οποίο μπορεί να ελεγχθεί πλήρως και δεν επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες
- επιτρέπει την επεξεργασία του εδάφους on-site, χωρίς την ανάγκη μεταφοράς του σε μακρινές ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας
- με τη χρήση διαφορετικού διαλύματος πλύσης, επιτρέπει την απομάκρυνση μεγάλης ποικιλίας εδαφικών ρύπων
- στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως προεπεξεργασία ρυπασμένου εδάφους, παρέχει σημαντικό οικονομικό όφελος, καθώς μειώνει τον όγκο που τελικά θα καταλήξει στην κύρια μέθοδο επεξεργασίας.

Μειονεκτήματα

- δεν μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς περίπλοκα μίγματα εδαφικών ρύπων
- δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην απομάκρυνση προσροφημένων οργανικών ρύπων
- δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας σε έδαφος με υψηλό ποσοστό χουμικών ενώσεων

- παράγει υγρά απόβλητα, από τα οποία είναι δύσκολο να απομακρυνθούν τα πολύ μικρά εδαφικά σωματίδια και απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία
- απαιτεί την εγκατάσταση μεγάλου εξοπλισμού, προκαλώντας αισθητική και ηχητική όχληση
- δε συμφέρει οικονομικά για την επεξεργασία ελαφριά ρυπασμένου εδάφους

2.1.1.5 Άντληση εδαφικού αέρα

Η άντληση ατμών από το έδαφος (soil vapor extraction) είναι μια αποδεκτή, αναγνωρισμένη και οικονομικά συμφέρουσα in-situ τεχνολογία αποκατάστασης εδαφών, που έχουν ρυπανθεί από πτητικά και ήμιπτητικά οργανικά συστατικά. Κατά την εφαρμογή της λαμβάνει χώρα φυσικός διαχωρισμός των υφιστάμενων ρύπων από το έδαφος, μέσω άσκησης υποπίεσης στην ακόρεστη ζώνη. Η τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα, η οποία είναι επίσης γνωστή ως εδαφικός αερισμός (soil venting) ή «αφαίρεση» υπό κενό (vacuum extraction), εκμεταλλεύεται την πτητικότητα των εδαφικών ρύπων, επιτρέποντας τη μεταφορά της μάζας τους από την προσροφημένη, διαλυμένη και ελεύθερη φάση προς την αέρια, από όπου αντλούνται και επεξεργάζονται υπέργεια.

Η τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα που την καθιστούν εφαρμόσιμη σε ένα μεγάλο εύρος πεδίων καθώς και μειονεκτήματα (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- η μεγάλη απόδοση και επιτυχία
- ελάχιστες επεμβάσεις στο πεδίο
- είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση πτητικών οργανικών ρύπων από την ακόρεστη ζώνη
- έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί μεγάλους όγκους εδάφους με αποδεκτό κόστος
- τα συστήματα άντλησης εδαφικού αέρα μπορούν να εγκατασταθούν και να λειτουργήσουν πολύ γρήγορα

- μπορεί να συνδυαστεί πολύ εύκολα και αποτελεσματικά με άλλες τεχνολογίες εξυγίανσης εδαφών και υπογείων υδάτων.

Μειονεκτήματα

- η εφαρμοσιμότητα και η απόδοση της καθορίζονται άμεσα από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του εδάφους
- στην περίπτωση μέτρια διαπερατών εδαφών απαιτείται μεγάλου μήκους διάτρητο τμήμα άντλησης στα χρησιμοποιούμενα πηγάδια
- η έντονη παρουσία αργίλου ή χουμικών ενώσεων, ευνοεί την προσρόφηση των ρύπων στα εδαφικά σωματίδια και αποτρέπει την μεταφορά τους στην αέρια φάση, μειώνοντας σημαντικά την απόδοση της άντλησης του εδαφικού αέρα
- είναι δύσκολο να επιτύχει μείωση της συγκέντρωσης των υφιστάμενων ρύπων σε ποσοστό μεγαλύτερο από 90%
- η έντονη διακύμανση ενός ενδεχόμενου υποκείμενου υδροφορέα είναι δυνατόν να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση της
- η επεξεργασία των αντλούμενων απαερίων είναι σχεδόν πάντα αναγκαία, εξαρτάται άμεσα από το είδος του ρύπου και το ρυθμό απομάκρυνσης του εδαφικού αέρα και αυξάνει σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα του αναγκαίου συστήματος άντλησης εδαφικού αέρα.

2.1.2 Βιολογικές μέθοδοι

2.1.2.1 Βιοαερισμός

Ο βιοαερισμός αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία εξυγίανσης εδαφών, η οποία περιλαμβάνει τη διοχέτευση αέρα στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους με στόχο την ενεργοποίηση της μικροβιακής δράσης και τη βιοαποικοδόμηση των υφιστάμενων ρύπων. Αν και πολλές φορές συγχέεται με την τεχνολογία άντλησης εδαφικού αέρα, είναι σημαντικό να διευκρινιστεί το γεγονός ότι πρόκειται για δυο τελείως διαφορετικές τεχνολογίες, οι οποίες στοχεύουν στην ενίσχυση διαφορετικού μηχανισμού απομάκρυνσης των εδαφικών ρύπων. Η άντληση εδαφικού αέρα βασίζεται στην πτητικότητα των υπαρχόντων ρύπων, ενώ ο βιοαερισμός στη βιοαποικοδομησιμότητα τους και ως εκ τούτου η εφαρμοσιμότητα των τεχνολογιών αυτών, καθώς και ο

σχεδιασμός και η λειτουργία των αντίστοιχων συστημάτων τους διαφέρουν σημαντικά. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διεργασίας του βιοαερισμού ρυπασμένων εδαφών είναι τα εξής (Γιδαράκος Ε., και Αίβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- χρησιμοποιεί άμεσα παραδοτέο εξοπλισμό, ο οποίος είναι εύκολο να εγκατασταθεί
- προκαλεί ελάχιστη παρέμβαση στο προς εξυγίανση πεδίο
- μπορεί να εφαρμοστεί και σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές
- απαιτεί σχετικά μικρούς χρόνους εξυγίανσης (από 6 μήνες έως 2 χρόνια) υπό βέλτιστες συνθήκες
- παρουσιάζει λογικό κόστος αποκατάστασης
- συνδυάζεται εύκολα με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης εδάφους και υπογείων υδάτων
- υπό κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας δεν απαιτεί άντληση και επεξεργασία εδαφικού αέρα.

Μειονεκτήματα

- δεν είναι αποτελεσματική στην αποκατάσταση πολύ ρυπασμένων εδαφών, καθώς η μεγάλη συγκέντρωση των υφιστάμενων ρύπων αποδεικνύεται τοξική για τους μικροοργανισμούς και δεν είναι δυνατή η βιοαποικοδόμηση
- πολλές φορές απαιτεί την προσθήκη θρεπτικών στοιχείων για την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης
- η παρουσία ρηχού υδροφόρου ορίζοντα και/ ή η αυξημένη διακύμανση του μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση της
- ο εισαγόμενος αέρας μπορεί να προκαλέσει σταδιακά πρόβλημα συσσώρευσης ατμών στο έδαφος και να καταστεί αναγκαία η άντληση και η επεξεργασία τους
- η ύπαρξη ετερογένειας και χαμηλής διαπερατότητας στο έδαφος μπορεί να αποτρέψει τελείως την εφαρμογή της

- η μειωμένη παρουσία υγρασίας και οι χαμηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν άμεσα την απόδοση της, καθώς είναι δυνατόν να περιορίσουν σημαντικά τη βιοαποικοδόμηση των υφιστάμενων ρύπων
- δεν μπορεί να εφαρμοστεί για την εξυγίανση βαρέων μετάλλων και γενικότερα μη βιοαποικοδομήσιμων εδαφικών ρύπων πριν την πλήρη εφαρμογή της σε ένα πεδίο απαιτείται η διεξαγωγή πιλοτικών δοκιμών.

2.1.2.2 Βιοαντιδραστήρας Slurry

Μια από τις κυριότερες *ex-situ* βιολογικές επεξεργασίες ρυπασμένων εδαφών περιλαμβάνει τη χρήση του λεγόμενου βιοαντιδραστήρα slurry, ο οποίος ουσιαστικά εκπροσωπεί έναν αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (batch reactor). Το προς επεξεργασία έδαφος εισάγεται στον εν λόγω αντιδραστήρα μαζί με ορισμένα απαραίτητα συστατικά (π.χ. θρεπτικά στοιχεία και νερό), όπου υπό κατάλληλες και σχεδόν πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες απαλλάσσεται από τους υφιστάμενους οργανικούς ρύπους με τη βοήθεια μικροοργανισμών. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των βιοαντιδραστήρων slurry είναι τα εξής (Γιδαράκος Ε., και Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- επιτυγχάνουν πολύ μεγάλες αποδόσεις εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών
- μειώνουν σημαντικά τον όγκο του ρυπασμένου εδάφους (το οποίο μπορεί να επεξεργαστεί στη συνέχεια με άλλη κατάλληλη τεχνολογία εξυγίανσης)
- μπορούν να εφαρμοστούν για επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών σε ευρεία κλίμακα
- το επεξεργασμένο έδαφος μπορεί να επανατοποθετηθεί στην αρχική του θέση.

Μειονεκτήματα

- απαιτούν την εκσκαφή και την προεπεξεργασία του ρυπασμένου εδάφους
- παράγουν αρκετά αέρια, υγρά και στερεά απόβλητα, τα οποία χρήζουν κατάλληλης επεξεργασίας

- η απόδοση τους μπορεί να μειωθεί σημαντικά από την παρουσία βαρέων μετάλλων ή χλωριωμένων ενώσεων, λόγω παρεμπόδισης της μικροβιακής δράσης
- είναι δύσκολο να αντιμετωπίσουν μη διαλυτούς ρύπους, λόγω της μικρής δυνατότητας βιοαποικοδόμησής τους
- απαιτούν ομοιογένεια στο μέγεθος των εδαφικών σωματιδίων, για αποτελεσματική επαφή των ρύπων με τους βιοαποικοδομητικούς μικροοργανισμούς.

2.1.2.3 Εδαφική επεξεργασία

Με τον όρο εδαφική επεξεργασία (land treatment) ή εδαφική «καλλιέργεια» (landfarming) ή εδαφική εφαρμογή (land application) περιγράφεται μια βιολογική διεργασία αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών, η οποία περιλαμβάνει την εκσκαφή του προς επεξεργασία εδάφους και την εξάπλωση του σε λεπτά στρώματα στην επιφάνεια μιας περιοχής, με στόχο την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης των περιεχόμενων ρύπων, μέσω του αερισμού και της προσθήκης αναγκαίων ουσιών (π.χ. νερού και θρεπτικών συστατικών). Αν το ρυπασμένο έδαφος βρίσκεται σε μικρό βάθος (λιγότερο από 1 μέτρο) ίσως είναι δυνατή η ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης χωρίς εκσκαφή, αλλά με απλή ανάμιξη και προσθήκη θρεπτικών συστατικών. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εδαφικής επεξεργασίας ρυπασμένων εδαφών είναι τα εξής (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- αποτελεί μια σχετικά εύκολα σχεδιαζόμενη και εφαρμοζόμενη τεχνολογία
- απαιτεί μικρά χρονικά διαστήματα εξυγίανσης (από 6 μήνες έως 2 χρόνια) υπό βέλτιστες συνθήκες
- παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλό κόστος εξυγίανσης (από 30 έως 60€ ανά τόνο εδάφους)
- είναι αποτελεσματική στην επεξεργασία αργά βιοδιασπάσιμων ρύπων.

Μειονεκτήματα

- δεν μπορεί να επιτύχει απόδοση μεγαλύτερη από 95% ή να μειώσει τη συγκέντρωση των υφιστάμενων ρύπων σε τιμή μικρότερη του 0,1 ppm
- δεν είναι εφαρμόσιμη σε υψηλές συγκεντρώσεις εδαφικών ρύπων (μεγαλύτερες από 50.000 ppm)
- η έντονη παρουσία βαρέων μετάλλων (σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από 2.500 ppm) είναι δυνατόν να περιορίσει σημαντικά τη μικροβιακή δραστηριότητα
- απαιτεί μεγάλη έκταση για την εφαρμογή της
- η παρουσία πτητικών ρύπων καθιστά αναγκαία την εγκατάσταση συστήματος ελέγχου και επεξεργασίας αερίων
- παρουσιάζει κίνδυνο μεταφοράς των υφιστάμενων ρύπων σε μεγαλύτερα βάθη ή ακόμη και στους υπόγειους υδροφορείς και ως εκ τούτου κρίνεται αναγκαία η μόνωση της ζώνης επεξεργασίας.

2.1.2.4 Κομποστοποίηση

Η διεργασία της κομποστοποίησης περιλαμβάνει την εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους και την ανάμιξη του με διάφορα υλικά, όπως πριονίδια, απορρίμματα κήπων, κοπριά και σανό, τα οποία είναι εύκολα αποικοδομήσιμα. Η αποικοδόμηση των υλικών αυτών, αυξάνει τη θερμοκρασία του προς επεξεργασία εδάφους (σε τιμές από 55 έως 65°C), ενισχύοντας ακόμη περισσότερο τη μικροβιακή δραστηριότητα και επιτυγχάνοντας την αποδόμηση των υφιστάμενων ρύπων, είτε υπό αερόβιες, είτε υπό αναερόβιες συνθήκες. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διεργασίας της κομποστοποίησης είναι τα εξής(Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- επιτυγχάνει σημαντική ή ακόμη και ολοκληρωτική μείωση της τοξικότητας των υφιστάμενων εδαφικών ρύπων
- η εφαρμογή της είναι σχετικά εύκολη και απαιτεί ελάχιστο εξοπλισμό και συντήρηση
- μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε ευρεία κλίμακα

- το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι δυνατόν να έχει αξία και δυνατότητες αξιοποίησης.

Μειονεκτήματα

- αποτελεί ex-situ διεργασία, η οποία απαιτεί την εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους, παρουσιάζοντας υψηλό κόστος, λόγω μεταφοράς του σε κατάλληλους χώρους
- είναι δυνατόν να προκαλέσει εκπομπές πτητικών ρύπων, οι οποίες είναι δύσκολο να ελεγχθούν
- μεγάλες συγκεντρώσεις ρύπων μπορούν να περιορίσουν την εφαρμοσιμότητα και την απόδοση.

2.1.2.5 Φυτοαποκατάσταση

Η φυτοαποκατάσταση ή φυτοεξυγίανση αποτελεί μια καινοτόμο in-situ βιολογική τεχνολογία αποκατάστασης εδαφών που περιλαμβάνει την απομάκρυνση, τη μεταφορά, τη σταθεροποίηση και την καταστροφή οργανικών και ανόργανων ρύπων με χρήση φυτών. Τη δεκαετία του 1980, η ανακάλυψη ορισμένων φυτών, τα οποία είχαν την δυνατότητα να συσσωρεύουν υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων, που ήταν ιδιαίτερα τοξικά σε άλλα φυτά, προώθησε την ιδέα της χρήσης ορισμένων ειδών φυτών για την εξυγίανση εδαφών, αναπτύσσοντας την τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης. Η φυτοεξυγίανση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών, μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

Πλεονεκτήματα

- παρουσιάζει χαμηλό κόστος εφαρμογής και δεν απαιτεί τη χρήση εξοπλισμού ή την κατανάλωση ενέργειας
- είναι in-situ τεχνολογία αποκατάστασης (δεν απαιτεί την εκσκαφή του προς επεξεργασία εδάφους)
- είναι περιβαλλοντικά φιλική τεχνολογία, καθώς δεν παράγει σημαντικά απόβλητα και είναι αισθητικά ευχάριστη
- μπορεί να παρουσιάσει σχετικά γρήγορους χρόνους αποκατάστασης, ανάλογα πάντα με το είδος και την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων φυτών, το είδος και

τον αριθμό των υφιστάμενων ρύπων, την έκταση του ρυπασμένου εδάφους, καθώς επίσης και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του

- είναι αποτελεσματική στην αντιμετώπιση μεγάλης ποικιλίας ρύπων
- αποτρέπει την εξάπλωση των υφιστάμενων ρύπων, προστατεύοντας παράλληλα το έδαφος από τον άνεμο, τη βροχή και γενικότερα τη διάβρωση.

Μειονεκτήματα

- το βάθος της ζώνης επεξεργασίας είναι περιορισμένο (ουσιαστικά ταυτίζεται με την ζώνη εδαφικού ύδατος), με αποτέλεσμα η εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης να είναι αποτελεσματική μόνο σε επιφανειακά ρυπασμένα εδάφη
- υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στο έδαφος είναι δυνατόν να έχουν τοξική επίδραση στα χρησιμοποιούμενα φυτά, καθιστώντας αδύνατη την εφαρμογή της τεχνολογίας
- το κόστος της είναι δυνατόν να αυξηθεί, λόγω της ανάγκης ειδικής επεξεργασίας και διάθεσης των χρησιμοποιούμενων φυτών
- η απόδοση της εξαρτάται κατά ένα πολύ σημαντικό βαθμό από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες και συνήθως απαιτεί μεγάλη έκταση γης (τουλάχιστον ίση με τη ρυπασμένη περιοχή) και μεγάλο χρόνο εξυγίανσης
- δεν είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση προσροφημένων στα εδαφικά σωματίδια ρύπων
- είναι δυνατόν να προκαλέσει μεταφορά ρύπων από ένα περιβαλλοντικό μέσο σε κάποιο άλλο (π.χ. από το έδαφος στον αέρα)
- εμπεριέχει κίνδυνο αρνητικής επίδρασης στην τροφική αλυσίδα, στην περίπτωση που τα χρησιμοποιούμενα φυτά αποτελέσουν τροφή ανώτερων οργανισμών
- βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης και επίδειξης.

Εκτενέστερη αναφορά στην φυτοαποκατάσταση γίνεται στην επόμενη ενότητα.

2.1.3 Θερμικές μέθοδοι

2.1.3.1 In-situ

Η in-situ θερμική επεξεργασία περιλαμβάνει τη θέρμανση του προς εξυγίανση εδάφους είτε σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, με στόχο την τήξη του εδάφους και την καταστροφή των υφιστάμενων ρύπων (π.χ. in-situ υαλοποίηση), είτε σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, με στόχο την ενίσχυση της εξάτμισης των πτητικών ρύπων. Στη δεύτερη περίπτωση η θερμική επεξεργασία συνδυάζεται με συστήματα άντλησης του εδαφικού αέρα, ο οποίος έχει εμπλουτιστεί σε πτητικούς ρύπους, που έχουν εξατμιστεί, λόγω αυξημένης θερμοκρασίας. Οι βασικότεροι περιορισμοί της in-situ θερμικής επεξεργασίας ρυπασμένων εδαφών σχετίζονται με τα εξής φαινόμενα (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

- η παρουσία ογκωδών αντικειμένων (π.χ. μπαζών) στο προς επεξεργασία έδαφος είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντικά λειτουργικά προβλήματα στο εγκατεστημένο σύστημα
- η απόδοση της ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με τη θερμοκρασία που τελικά επιτυγχάνεται στο έδαφος
- η παρουσία πολύ πυκνών και υγρών εδαφών μπορεί να αυξήσει κατά πολύ την απαιτούμενη ενέργεια και θερμοκρασία για την επεξεργασία τους
- η απόδοση της είναι σχετικά χαμηλή για την απομάκρυνση προσροφημένων εδαφικών ρύπων σε εδάφη με υψηλό περιεχόμενο οργανικής ύλης
- η απόδοση συστημάτων εισαγωγής θερμού αέρα περιορίζεται από τη μικρή θερμοχωρητικότητα του αέρα.

2.1.3.2 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση αποτελεί μια παλαιά μέθοδο επεξεργασίας αποβλήτων, η οποία εφαρμόζεται και στην περίπτωση ρυπασμένων εδαφών και περιλαμβάνει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών (870 έως 1200°C) για την εξάτμιση, την αποσύνθεση και/ ή την καταστροφή οργανικών ρύπων, παρουσία οξυγόνου. Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα αποτέφρωσης, των οποίων η τελική απόδοση μπορεί να υπερβεί ακόμη και το 99,99%. Οι κυριότεροι περιορισμοί εφαρμογής της διεργασίας της αποτέφρωσης είναι οι εξής (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

- παρουσιάζει πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας
- αποτελεί *ex-situ* διεργασία, η οποία απαιτεί την εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους και τη μεταφορά του σε κατάλληλες εγκαταστάσεις, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο το απαιτούμενο κόστος εξυγίανσης
- απαιτεί πολύ καλή προεπεξεργασία του προς εξυγίανση εδάφους, ώστε να πληροί τα συγκεκριμένα κριτήρια τροφοδοσίας της χρησιμοποιούμενης μονάδας
- η παρουσία βαρέων μετάλλων στο προς εξυγίανση έδαφος δημιουργεί στάχτη, η οποία απαιτεί κατάλληλη επεξεργασία (π.χ. σταθεροποίηση - στερεοποίηση) πριν την τελική της διάθεση
- η παρουσία πτητικών μετάλλων (π.χ. μολύβδου, καδμίου, υδράργυρου και αρσενικού) στο προς επεξεργασία έδαφος επιβάλλει την επεξεργασία των παραγόμενων αερίων, τα οποία αναμένεται να είναι πλούσια σε αυτά τα συστατικά
- τα μέταλλα που είναι δυνατόν να υπάρχουν στο προς επεξεργασία έδαφος ίσως να αντιδράσουν με άλλα παρόντα στοιχεία (π.χ. χλώριο και θείο) σχηματίζοντας πιο πτητικούς ή τοξικούς ρύπους από αυτούς που υπήρχαν αρχικά.

2.1.3.3 Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες θερμικές μεθόδους επεξεργασίας αποβλήτων και ρυπασμένων εδαφών, η οποία περιλαμβάνει τη θερμική αποδόμηση οργανικών ρύπων, απουσία οξυγόνου ή άλλων αντιδρώντων αερίων. Στην πράξη, κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης δεν απουσιάζει τελείως το οξυγόνο, αλλά υπάρχει σε ποσότητα μικρότερη από τη στοιχειομετρική. Η πυρόλυση λαμβάνει χώρα υπό πίεση και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 430°C, ενώ τα τελικά προϊόντα της περιλαμβάνουν καύσιμα αέρια συστατικά (π.χ. CO, CH₄, H₂, κ.α.), μικρές ποσότητες υγρών και ένα στερεό υπόλειμμα, που περιέχει άνθρακα και τέφρα. Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζει η διεργασία της πυρόλυσης είναι τα ακόλουθα (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται (400-800°C) ελαττώνει τις παραγόμενες εκπομπές επικινδύνων αερίων, την εμφάνιση σκουριάς και γενικότερα τη φθορά του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού
- οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της είναι ενδόθερμες και ως εκ τούτου είναι δυνατόν να ελεγχθούν, βάσει της παρεχόμενης θερμότητας
- η παραγωγή ιπτάμενης τέφρας είναι σημαντικά μειωμένη, λόγω του μικρού στροβιλισμού που επικρατεί στο θάλαμο πυρόλυσης
- η εξάτμιση βαρέων μετάλλων είναι πολύ περιορισμένη, λόγω των μικρών αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών
- στην περίπτωση που το παραγόμενο ανθρακικό στερεό υπόλειμμα (κ.ο.κ) είναι κατάλληλο για απευθείας διάθεση σε κατάλληλο χώρο και δεν είναι αναγκαία η καύση του, μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα
- τα παραγόμενα πτητικά συστατικά της πυρόλυσης, καταστρέφονται πλήρως με αποτέφρωση, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό.

Μειονεκτήματα

- απαιτεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τροφοδοσίας (π.χ. μέγεθος σωματιδίων, υγρασία, κα) αυξάνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις προεπεξεργασίας του προς εξυγίανση εδάφους
- για την επεξεργασία εδαφών που περιέχουν βαρέα μέταλλα απαιτείται σταθεροποίηση – στερεοποίηση
- απαιτεί μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς αναπτύσσονται σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες
- εδάφη με υψηλό ποσοστό υγρασίας, αυξάνουν κατά πολύ το κόστος εφαρμογής της
- συνήθως απαιτείται συνδυασμός αυτής με αποτέφρωση, για την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων εξυγίανσης.

2.1.3.4 Θερμική εκρόφηση

Η θερμική εκρόφηση (thermal desorption) αποτελεί μια φυσική διαδικασία διαχωρισμού, η οποία δε στοχεύει στην καταστροφή των υφιστάμενων οργανικών ρύπων, όπως οι προαναφερόμενες θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας ρυπασμένων εδαφών (αποτέφρωση και πυρόλυση). Αντίθετα, η θερμική εκρόφηση περιλαμβάνει τη θέρμανση του προς επεξεργασία εδάφους για την εξάτμιση του περιεχόμενου νερού και των οργανικών ρύπων, οι οποίοι στη συνέχεια οδηγούνται σε ειδικό σύστημα επεξεργασίας απαερίων (Σχήμα 5-9). Η θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής σε συστήματα θερμικής εκρόφησης επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται εξάτμιση και όχι οξείδωση των οργανικών ρύπων. Οι πλέον σημαντικοί περιορισμοί της θερμικής εκρόφησης εδαφικών ρύπων είναι οι εξής (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

- η απόδοση, η εφαρμοσιμότητα και το κόστος της καθορίζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του προς επεξεργασία εδάφους (π.χ. μέγεθος εδαφικών σωματιδίων)
- στην περίπτωση αυξημένης υγρασίας του εδάφους, ίσως απαιτείται η ρύθμιση της με απομάκρυνση συγκεκριμένων ποσοτήτων νερού
- η παρουσία βαρέων μετάλλων επιβάλλει την επεξεργασία (π.χ. σταθεροποίηση - στερεοποίηση) της παραγόμενης στάχτης
- η αυξημένη συγκέντρωση αργίλου, ιλύος και χουμικών ενώσεων στο προς επεξεργασία έδαφος αυξάνει την προσρόφηση των υφιστάμενων ρύπων, αυξάνοντας σημαντικά τον αναγκαίο χρόνο παραμονής του εδάφους στη μονάδα θερμικής εκρόφησης.

2.2 Τεχνολογίες αποκατάστασης υπόγειων υδάτων

Η ρύπανση των υπογείων υδάτων αποτελεί ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα, λόγω της ευρείας χρήσης του υπόγειου νερού για ύδρευση και άρδευση, καθώς επίσης και της αλληλεπίδρασης του με επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες (π.χ. λίμνες, ποτάμια, κτλ), που έρχονται σε άμεση επαφή με τον άνθρωπο και την πανίδα. Η άντληση και η χρήση ρυπασμένου νερού έχει οδηγήσει πολλές φορές στο παρελθόν σε επιδημίες και σοβαρές ομαδικές ασθένειες. Ως εκ τούτου, η ανάγκη προστασίας και ανάπτυξης κατάλληλων τεχνολογιών αποκατάστασης υπογείων υδάτων έχει από καιρό αποτελέσει

πρωτεύον ζήτημα σε ολόκληρο τον κόσμο. Στη σημερινή εποχή υπάρχουν πολυάριθμα συστήματα επεξεργασίας υπογείων υδάτων, τα οποία έχουν διαφορετικούς στόχους εξυγίανσης, όπως για παράδειγμα τον περιορισμό της εξάπλωσης της υφιστάμενης ρύπανσης, την απομόνωση της πηγής ρύπανσης ή την απομάκρυνση των ρύπων από το υπόγειο νερό. Τα συστήματα αυτά σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών, είναι δυνατόν να σχηματίσουν μια ολοκληρωμένη «ασπίδα» προστασίας του υπόγειου περιβάλλοντος. Όπως και στην περίπτωση αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών, έτσι και για τις τεχνολογίες εξυγίανσης υπογείων υδροφορέων έχει επικρατήσει κάποια ταξινόμηση, βάσει ορισμένων κριτηρίων. Ο κυριότερος διαχωρισμός τους είναι σε *in-situ* και *ex-situ*, ανάλογα με το αν εφαρμόζονται απευθείας στο υπέδαφος ή αν προηγείται άντληση του ρυπασμένου νερού (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005)

2.2.1 Ex- situ τεχνολογίες

2.2.1.1 Άντληση και επεξεργασία (pump – and - treat)

Η αποκατάσταση ρυπασμένων υδροφορέων με άντληση και υπέργεια επεξεργασία του υπόγειου νερού αποτέλεσε για πολλά χρόνια τη μοναδική εφαρμοζόμενη τεχνολογία εξυγίανσης υπογείων υδάτων. Βάσει αυτής, το ρυπασμένο υπόγειο νερό μεταφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους (με κατάλληλα πηγάδια άντλησης), όπου επεξεργάζεται και στη συνέχεια επανατοποθετείται στο υπέδαφος ή καταλήγει σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, επιτυγχάνοντας πολύ ικανοποιητικό βαθμό καθαρισμού του υπόγειου νερού και ταυτόχρονο περιορισμό της εξάπλωσης της ήδη υπάρχουσας ρύπανσης. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας άντλησης και επεξεργασίας ρυπασμένων υδάτων είναι τα εξής (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

- μπορεί να επεξεργαστεί μεγάλη ποικιλία ρύπων, καθώς η επεξεργασία του ρυπασμένου νερού γίνεται υπέργεια, εφαρμόζοντας την καταλληλότερη τεχνολογία
- επιτυγχάνει πολύ καλές αποδόσεις, όσον αφορά στη μείωση της συγκέντρωσης του υφιστάμενου ρύπου στο αντλούμενο νερό
- επιτυγχάνει περιορισμό της υφιστάμενης ρύπανσης, παράλληλα με την εξυγίανση του ρυπασμένου εδάφους δεν επεμβαίνει «χημικά» ή «βιολογικά» στο

υπέδαφος (π.χ. με την προσθήκη χημικών ουσιών ή μικροοργανισμών, αποτελεί σχετικά εύκολα ελεγχόμενη τεχνολογία εξυγίανσης.

2.2.2 In – situ τεχνολογίες

2.2.2.1 Διαπερατά αντιδρώντα φράγματα

Τα διαπερατά αντιδρώντα φράγματα (Permeable Reactive Barriers - PRB) αποτελούν μια ιδιαίτερα πρόσφατη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία in-situ επεξεργασίας υπογείων υδάτων. Πρόκειται για κάθετους «τοιίχους», οι οποίοι τοποθετούνται κατάντη της πηγής ρύπανσης και αποτελούνται από διαπερατά αντιδρώντα υλικά, που επιτρέπουν τη διέλευση του νερού μέσα από αυτά, αλλά ταυτόχρονα συγκρατούν, μετασχηματίζουν και γενικότερα «εξουδετερώνουν» τους υφιστάμενους ρύπους. Ουσιαστικά λειτουργούν ως ένα είδος φίλτρου, το οποίο καθαρίζει το ρυπασμένο υπόγειο νερό που περνάει μέσα από αυτό. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων είναι τα εξής:

Πλεονεκτήματα

- αποτελούν in-situ τεχνολογία, η οποία δεν προϋποθέτει την άντληση του ρυπασμένου νερού και τη μεταφορά του σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας, μειώνοντας σημαντικά το απαιτούμενο κόστος εφαρμογής
- αποτελούν παθητική τεχνολογία επεξεργασίας, η οποία δεν απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας, αλλά μόνο περιοδική παρακολούθηση
- επιφέρουν σχεδόν μηδενική επέμβαση στην επιφάνεια του εδάφους, επιτρέποντας τη χρήση του προς εξυγίανση πεδίου
- δεν απαιτούν τον ακριβή προσδιορισμό της πηγής ρύπανσης
- μπορούν να αντιμετωπίσουν μεγάλο εύρος ρύπων
- έχουν ελάχιστες απαιτήσεις σε συντήρηση και ιδιαίτερα χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο μακροπρόθεσμα αποσβένει το σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασής τους.

Μειονεκτήματα

- απαιτούν πολύ λεπτομερή και ακριβή χαρακτηρισμό του προς εξυγίανση υδροφορέα και των υφιστάμενων ρύπων
- μπορούν να αντιμετωπίσουν επιτυχώς κυρίως ρηχά πλούμια ρύπανσης (σε βάθος < 16m)
- παρουσιάζουν υψηλό κόστος κατασκευής και εγκατάστασης
- η μικροβιακή δραστηριότητα είναι δυνατόν να περιορίσει την απόδοση τους, λόγω φαινομένων «φραξίματος»
- δεν μπορούν να εγκατασταθούν σε περιοχές με υπάρχουσες επίγειες κατασκευές ή με πολύπλοκα γεωλογικά χαρακτηριστικά (π.χ. παρουσία ρηγμάτων, αδιαπέρατων φακών, κτλ)
- παρουσιάζουν υπερβολικό κόστος εφαρμογής στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλου πλουμίου ρύπανσης (πλάτους μεγαλύτερου από 300m) ή απαίτησης μεγάλων ποσοτήτων αντιδρώντος υλικού
- δεν είναι αποτελεσματικά όταν επικρατούν πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές ταχύτητες ροής του υπόγειου νερού
- ίσως να απαιτείται έλεγχος του pH.

2.2.2.2 Air sparging

Η μέθοδος air sparging εκπροσωπεί μια σχετικά νέα και πολύ αποτελεσματική τεχνολογία εξυγίανσης υπογείων υδάτων, η οποία σε γενικές γραμμές, αφορά στη διοχέτευση αέρα μέσα στο υπέδαφος με στόχο την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων και την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης. Στις πλείστες των περιπτώσεων ο ανεπιθύμητος ρύπος, ο οποίος επιχειρείται να απομακρυνθεί με τη μέθοδο air sparging, είναι οι οργανικές πτητικές ενώσεις. Μερικά από τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου air sparging είναι τα ακόλουθα (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- απομακρύνει πολύ αποτελεσματικά την υπολειμματική ρύπανση από την κορεσμένη ζώνη του εδάφους

- απαιτεί ελάχιστο επιφανειακό χώρο για την εγκατάσταση βοηθητικού εξοπλισμού
- μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες, όπως τις μεθόδους bioslurping, άντλησης και επεξεργασίας και άντλησης εδαφικού αέρα
- παράγει σχετικά μικρούς όγκους αποβλήτων (αερίων), τα οποία απαιτούν ελάχιστη ή και καθόλου επεξεργασία
- χρησιμοποιεί άμεσα παραδοτέο εξοπλισμό, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης
- απαιτεί μικρούς χρόνους εξυγίανσης, συνήθως λιγότερο από 1 χρόνο, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν
- είναι δυνατόν υπάρχοντα πηγάδια παρακολούθησης να μετατραπούν σε πηγάδια εφαρμογής της μεθόδου air sparging, μειώνοντας έτσι το κόστος εφαρμογής της μεθόδου
- η μέθοδος air sparging ξεπερνάει ένα βασικό περιορισμό που παρουσιάζουν τα συστήματα άντλησης και επεξεργασίας: τη μείωση των ποσοτήτων των ρύπων που απομακρύνονται με το χρόνο
- οι ρύποι απομακρύνονται ευκολότερα όταν βρίσκονται στην αέρια φάση από ότι όταν είναι διαλυμένοι στο υπόγειο νερό, φαινόμενο το οποίο εκμεταλλεύεται η μέθοδος air sparging
- η μέθοδος air sparging μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των ρύπων που βρίσκονται στην ζώνη επικράτησης των τριχοειδών φαινομένων και/ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα (σε αντίθεση με τις απλές τεχνικές απομάκρυνσης των ατμών από το έδαφος)
- λόγω του χαμηλού κόστους λειτουργίας και συντήρησης των συστημάτων air sparging, η εφαρμογή της τεχνολογίας είναι περισσότερο συμφέρουσα σε περιπτώσεις, όπου είναι αναγκαία η επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων υπόγειων υδάτων.

Μειονεκτήματα

- δεν είναι αποτελεσματική η εφαρμογή του για την απομάκρυνση ελαφρών μη υδατικής φάσης υγρών (LNAPL), τα οποία σχηματίζουν στρώμα πάχους μεγαλύτερο από 0,3m

- η παρουσία και η λειτουργία πηγαδιών άντλησης ατμών είναι συνήθως αναγκαίες, προκειμένου να προστατευθεί το κοντινό περιβάλλον από τυχόν τοξικούς ή εκρηκτικούς ατμούς
- αργιλώδη εδάφη και διαστρωματωμένες περιοχές περιορίζουν την απόδοση της μεθόδου, παρεμποδίζοντας την ομοιόμορφη κατανομή του διοχετευόμενου αέρα
- δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιορισμένους υδροφορείς, λόγω πιθανής μεταφοράς των πτητικών ρύπων σε περιοχές εκτός του πεδίου ρύπανσης
- είναι απαραίτητη η κατασκευή και η λειτουργία μιας πιλοτικής μονάδας πριν την πλήρη εφαρμογή της μεθόδου
- η ύπαρξη ρύπων που σχηματίζουν σύμπλοκα με τα εδαφικά συστατικά, μειώνουν την απόδοση της
- η παρουσία λεπτόκοκκων, χαμηλής διαπερατότητας εδαφών πάνω από τον υδροφορέα παρεμποδίζουν τη μεταφορά των εξατμισμένων ρύπων από το υπόγειο νερό προς την ακόρεστη ζώνη και κατ' επέκταση την απόδοση των πηγαδιών άντλησης των ατμών
- η παρουσία ετερογενών εδαφών ίσως να προκαλέσει τη δημιουργία «καναλιών» (επικρατέστερων διαδρομών του αέρα μέσα από στρώματα μεγάλης αγωγιμότητας και μεταφορά αυτού μακριά από την περιοχή ρύπανσης) ή άλλων πολύπλοκων συνθηκών ροής του αέρα, οι οποίες να είναι δύσκολο να προβλεφθούν και/ ή να ελεγχθούν
- η ύπαρξη μικρού βάθους και πάχους υδροφορέα αυξάνει δραματικά τον αριθμό των απαιτούμενων πηγαδιών διοχέτευσης αέρα (προκειμένου να καλυφτεί όλη η προς επεξεργασία περιοχή) και κατ' επέκταση αυξάνεται και το κόστος εφαρμογής της μεθόδου
- ο πολύπλοκος σχεδιασμός και ο στενός έλεγχος που απαιτείται, προκειμένου να επιτευχθεί ο εκάστοτε βέλτιστος ρυθμός παροχής αέρα και να αποφευχθεί η εμφάνιση ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως διαφυγή ατμών εκτός του πεδίου, έντονη ανάμιξη του υδροφορέα και κατ' επέκταση εξάπλωση της ζώνης ρύπανσης, φράξιμο του υδροφορέα και δημιουργία καναλιών.

2.2.2.3 Βιοαναρόφηση (bioslurping)

Η βιοαναρόφηση (bioslurping) αποτελεί μια νέα και ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνολογία, η οποία εφαρμόζεται κυρίως για την αποκατάσταση υδροφορέων που έχουν ρυπανθεί από πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες. Στην πραγματικότητα, επιτυγχάνει την ταυτόχρονη εξυγίανση δυο διαφορετικών μέσων, του εδάφους και των υπογείων υδάτων, καθώς συνδυάζει στοιχεία της μεθόδου άντλησης ελεύθερης φάσης (LNAPL) υπό κενό, της άντλησης εδαφικού αέρα (soil vapor extraction) και του βιοαερισμού (bioventing). Με τη διεργασία της άντλησης υπό κενό, επιτυγχάνεται η ανάκτηση των υφιστάμενων ποσοτήτων ελαιωδών που «επιπλέουν» στον υπόγειο υδροφορέα, με όσο το δυνατόν μικρότερη άντληση υπόγειου νερού, ενώ με τις τεχνολογίες της άντλησης εδαφικού αέρα και του βιοαερισμού της ακόρεστης ζώνης ενισχύεται η βιοαποικοδόμηση πτητικών οργανικών ρύπων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας της βιοαναρόφησης είναι τα εξής (Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005):

Πλεονεκτήματα

- επιτυγχάνει ιδιαίτερα αποτελεσματική ανάκτηση της υφιστάμενης ελεύθερης ελαιώδους φάσης, λόγω της ασκούμενης υποπίεσης
- αποτρέπει τη διείσδυση της ελεύθερης φάσης στον υδροφορέα και γενικότερα την πτώση της στάθμης του υδροφορέα, λόγω της οριζόντιας ροής της κατά τη διάρκεια της άντλησης της
- ελαχιστοποιεί την ποσότητα του αντλούμενου υπόγειου νερού, μειώνοντας σημαντικά τον όγκο του προς επεξεργασία υγρού και το κόστος της όλης διεργασίας
- ενισχύει τη διεργασία της βιοαποικοδόμησης στην ακόρεστη ζώνη
- τα συστήματα της μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν καινά χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή της διεργασίας του βιοαερισμού
- μπορεί να εφαρμοστεί με χρήση κινητών μονάδων
- με κατάλληλη εφαρμογή (π.χ. με μικρούς ρυθμούς άντλησης του εδαφικού αέρα ή του υπόγειου νερού) είναι δυνατόν να μην απαιτείται μονάδα επεξεργασίας αερίων ή νερού

- με κατάλληλο σχεδιασμό μπορεί να ελέγξει την κίνηση της υπάρχουσας ελεύθερης ελαιώδους φάσης.

Μειονεκτήματα

- εφαρμόζεται μόνο για την περίπτωση ρύπων που ανήκουν στην κατηγορία των LNAPL
- δεν είναι αποτελεσματική στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 7,5m
- παρουσιάζει χαμηλή απόδοση σε εδάφη με μικρή διαπερατότητα και χαμηλά ποσοστά υγρασίας, καθώς σε αυτήν την περίπτωση μειώνεται η αποτελεσματικότητα της διεργασίας του βιοαερισμού και της βιοαποικοδόμησης
- απαιτεί την επεξεργασία του αντλούμενου νερού και του εδαφικού αέρα, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος εφαρμογής της
- απαιτεί στενή παρακολούθηση και συχνή συντήρηση των εγκατεστημένων συστημάτων
- τα πηγάδια που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή της είναι δυνατόν να παρουσιάσουν προβλήματα «φραξίματος»
- δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τη λεγόμενη «υπολειμματική» ρύπανση (προσροφημένους ρύπους).

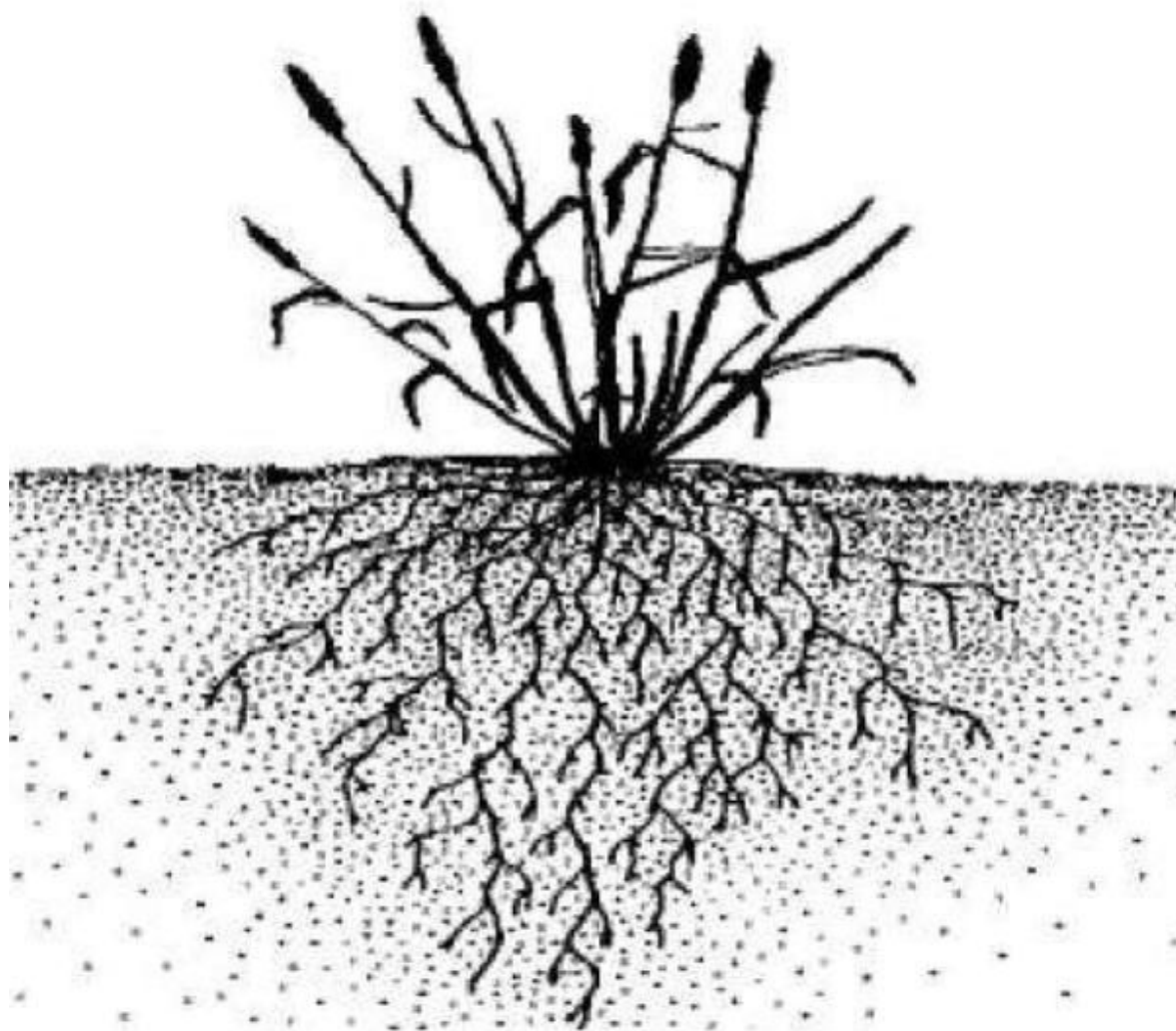
3 Φυτοαποκατάσταση

Είναι μια σχετικά νέα τεχνική που χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην Αμερική για αποκατάσταση περιοχών από βαρέα μέταλλα και κυρίως από ραδιενεργούς ρύπους λόγω των πυρηνικών δοκιμών. Στηρίζεται στη χρήση φυτικών ειδών για την επιτόπου (in situ) μείωση της συγκέντρωσης διαφόρων ρύπων, στα εδάφη ή τα υπόγεια νερά, στη συνέχεια το φυτικό υλικό συλλέγεται και με κατάλληλη επεξεργασία οι ρύποι ανακυκλώνονται. Πρόκειται για μια οικονομική μέθοδο με μεγάλη διάρκεια ζωής. Αξιοποιεί ήπιας μορφής ενέργεια, την ηλιακή, μπορεί να εφαρμοστεί και σε αβαθείς τοποθεσίες με συγκέντρωση τοξικών ουσιών και γενικότερα σε τοποθεσίες με ποικίλες περιβαλλοντικές μολύνσεις, η βλάστηση που χρησιμοποιείται αποτελεί καταφύγιο ενδημικής πανίδας. Τέλος έχει τη δυνατότητα είτε μεμονωμένης εφαρμογής είτε

συνδυαστικής με κάποια άλλη μέθοδο (A Citizen's Guide to Bioremediation, April 1996, EPA 542-F-96-007).

3.1 Στοιχεία φυσιολογίας και φυτά υπερσυσσωρευτές

Η ριζόσφαιρα, αποτελεί την περιοχή γύρω από το ριζικό σύστημα των φυτών, στην οποία παρατηρείται έντονη μικροβιακή δραστηριότητα. Εκτός από τους μικροοργανισμούς (βακτήρια, μύκητες), στην περιοχή της ριζόσφαιρας υπάρχουν πρωτόζωα, νηματώδεις, και έντομα τα οποία συμβάλουν μέσω της μεταβολικής τους δραστηριότητας στις διαδικασίες αποδόμησης που συντελούνται στα οικοσυστήματα. Γενικά, η ανάπτυξη των μικροοργανισμών στη περιοχή της ριζόσφαιρας οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυτικές ρίζες εκκρίνουν διάφορες ουσίες στο έδαφος. Μεταξύ των ουσιών αυτών συγκαταλέγονται σάκχαρα, αμινοξέα, οργανικά οξέα, τα οποία χρησιμοποιούνται από τους μικροοργανισμούς για την ανάπτυξη τους.



Σχήμα1 : Η ριζόσφαιρα των φυτών αποτελεί περιοχή έντονης μικροβιακής δραστηριότητας

Πηγή: Σαχινίδης Σ., 2012

Επίσης, εφήμερα κύτταρα των ριζών, όπως ριζικά τριχίδια ή συνεχώς αποβαλλόμενα κύτταρα από την αυξανόμενη ρίζα, αποτελούν υποστρώματα για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Ο μικροβιακός πληθυσμός της ριζόσφαιρας διαφέρει από τον αντίστοιχο πληθυσμό που αναπτύσσεται μακριά από αυτήν. Οι διαφορές είναι τόσο ποιοτικές (είδος μικροοργανισμού), όσο και ποσοτικές (πυκνότητα του πληθυσμού). Έχει βρεθεί ότι η πυκνότητα και η ποιοτική σύνθεση του μικροβιακού πληθυσμού της ριζόσφαιρας ποικίλει ανάλογα με το είδος του φυτού και τις εδαφικές συνθήκες. Η πυκνότητα του μικροβιακού πληθυσμού στη ριζόσφαιρα εκφράζεται με το λόγο των μικροοργανισμών ανά

γραμμάριο εδάφους της ριζόσφαιρας, (R), προς τον αντίστοιχο αριθμό ανά γραμμάριο εδάφους μακριά από τις ρίζες (S). Ο λόγος αυτός που αναφέρεται ως R/S (Rhizosphere/Soil), έχει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 10 –70 αλλά έχουν παρατηρηθεί και τιμές γύρω στα 150 – 200. Η αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα στην ριζόσφαιρα είναι ευνοϊκή, στις περισσότερες περιπτώσεις, για την ανόργανη θρέψη του φυτού καθώς και στην προστασία από παρασιτικές ασθένειες, λόγω έντονων ανταγωνιστικών σχέσεων μεταξύ των μικροοργανισμών. Η χρήση του συστήματος φυτού -μικροοργανισμών της ριζόσφαιρας στην τεχνολογία της φυτοαποκατάστασης, παρουσιάζει έντονο πρακτικό και ερευνητικό ενδιαφέρον, για την *in situ* επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών και υπόγειων υδάτων. Από τις αρχές της δεκαετίας του '70, διάφορες αναφορές παρουσιάζουν την ικανότητα που έχουν τα φυτά να εντείνουν τη διάσπαση οργανικών ουσιών στην περιοχή της ριζόσφαιρας.

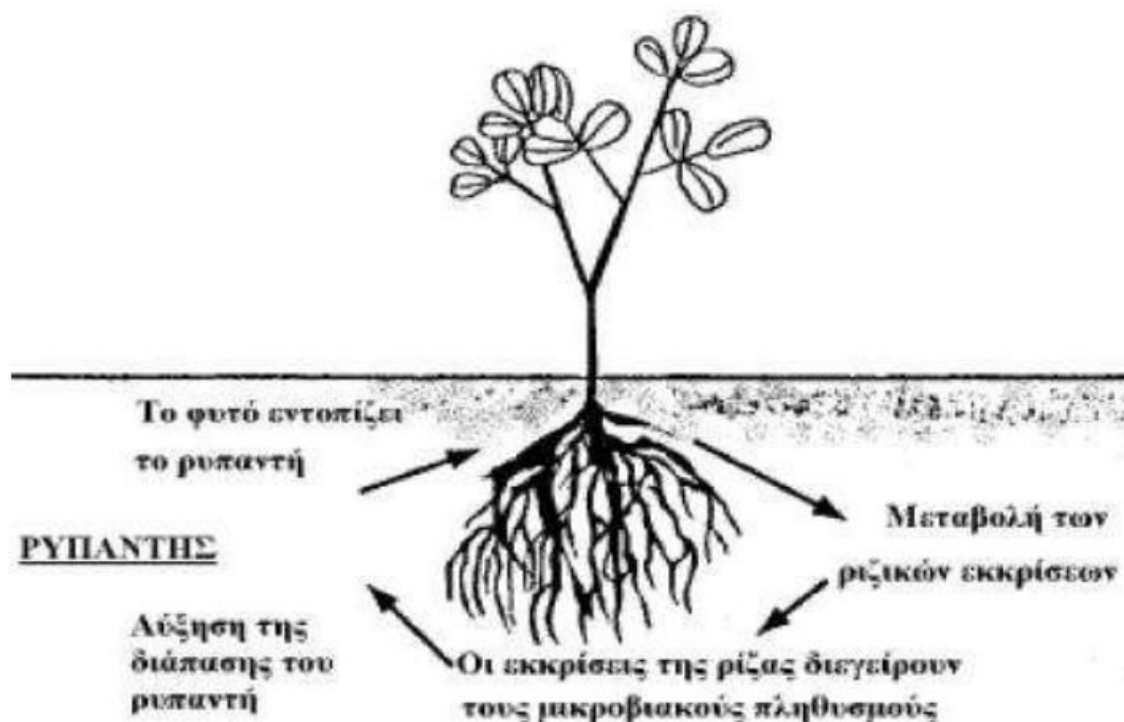
Πίνακας 2: Οργανικές ουσίες που διασπώνται από βακτήρια στη περιοχή της ριζόσφαιρας

Βακτήριο	Υπόστρωμα
<i>Achromobacter</i>	Υδρογονάνθρακες, (BTXE)
<i>Acinetobacter</i>	Υδρογονάνθρακες
<i>Alcaligenes</i>	Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες
<i>Azotobacter</i>	Υδρογονάνθρακες
<i>Nitrosomonas</i>	Αρωματικοί υδρογονάνθρακες
<i>Nocardia</i>	Αρωματικοί υδρογονάνθρακες
<i>Pseudomonas</i>	Υδρογονάνθρακες
<i>Xanthobacter</i>	Αλιφατικές ενώσεις

Πηγή: Σαχινίδης Σ., 2012

Οι γνώσεις, για τους μηχανισμούς με τους οποίους τα φυτά εντείνουν τη δράση των μικροοργανισμών της ριζόσφαιρας για τη διάσπαση ξενοβιοτικών ουσιών, είναι πολύ περιορισμένες. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ένας υποθετικός μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο ο μικροβιακός πληθυσμός της ριζόσφαιρας

επηρεάζεται από το φυτό. Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, η ξενοβιοτική ουσία στο έδαφος εντοπίζεται από το φυτό το οποίο αντιδρά μεταβάλλοντας την ποσότητα και την ποιότητα των εκκρίσεων μέσω του ριζικού συστήματος. Αυτή η τροποποίηση του εδαφικού περιβάλλοντος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των μικροβιακών κυττάρων και μάλιστα εκείνου του είδους το οποίο έχει την ικανότητα να διασπά τον ρυπαντή. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την μείωση της συγκέντρωσης του ρυπαντή σε αποδεκτές, από το φυτό.



Σχήμα 2: Υποθετικός μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο, η παρουσία του φυτού επηρεάζει την μικροβιακή δραστηριότητα

Πηγή: Σαχινίδης Σ., 2012

Τα φυτά για να αναπτυχθούν χρειάζονται τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία (μακρο και μικροστοιχεία) και διαθέτουν ειδικούς μηχανισμούς πρόσληψης, μεταφοράς και αποθήκευσης καθενός από τα στοιχεία αυτά. Τα βαρέα μέταλλα Zn, Mn, Ni και Cu είναι απαραίτητα μικροστοιχεία για τα φυτά. Τα κοινά φυτά προσλαμβάνουν και συσσωρεύουν μικρές ποσότητες αυτών των μικροστοιχείων (< 10ppm), που

δεν ξεπερνούν τις μεταβολικές τους ανάγκες. Τα φυτά απορροφούν επίσης σημαντικές ποσότητες μερικών στοιχείων μέσω των φύλλων τους γεγονός που συντελεί στη ρύπανση αυτών από τα στοιχεία Mn, Zn και Cu. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται και στην γεωργία για την παροχή των φυτών με τα απαραίτητα για την ανάπτυξή τους ιχνοστοιχεία όπως το Mn και ο Cu. Τα μέταλλα που προσλαμβάνονται από τα φύλλα μπορούν στη συνέχεια να οδηγηθούν και σε άλλα μέρη του φυτού και κυρίως στις ρίζες, όπου πολλές φορές συσσωρεύονται οι πλεονάζουσες ποσότητες των μεταλλικών αυτών στοιχείων. Αντίθετα, ένας υπερσυσσωρευτής μπορεί να προσλάβει πολύ μεγαλύτερες ποσότητες (χιλιάδες ppm). Πρόσφατες μελέτες έχουν συσχετίσει την συσσώρευση βαρέων μετάλλων στο φύλλωμα των φυτών με την ανθεκτικότητά τους σε εχθρούς και ασθένειες (έντομα, μύκητες και βακτήρια). Επίσης, οι υπερσυσσωρευτές προσλαμβάνουν όχι μόνο τα απαραίτητα μικροστοιχεία, αλλά και άλλα μη απαραίτητα μέταλλα, όπως το Cd. Στις περιπτώσεις αυτές, φαίνεται ότι τα μη απαραίτητα μέταλλα προσλαμβάνονται και μεταφέρονται στο φυτό με τους μηχανισμούς πρόσληψης και μεταφοράς άλλων απαραίτητων μικροστοιχείων (π.χ. το Cd με το μηχανισμό του Zn). Οι διαλυμένες ουσίες απορροφούνται από το έδαφος από την ριζική αποπλαστική μεταφορά, μεταφέρονται στα ανώτερα μέρη του φυτού από την συμπλαστική μεταφορά. Η μεταφορά των μεταλλικών ιόντων μέσα στον κορμό γίνεται με την βοήθεια των πρωτεϊνικών μεταφορών. Όμως οι μεταφορείς μέσα στον κορμό δεν έχουν αναγνωριστεί ακόμα. Η μεταφορά μέσω του κορμού είναι ο πρώτος έλεγχος που κάνει το φυτό ώστε να επιτύχει την καλύτερη δυνατή διακίνηση και αποτοξίνωση των μετάλλων από τον βλαστό πριν να γίνει η διακίνηση στο φλοιώμα. Οι μοριακοί μηχανισμοί και παράγοντες που ελέγχουν την συσσώρευση και την αποθήκευση των μετάλλων είναι άγνωστοι. Πιστεύεται πως η συγκράτησή τους από τα χυμοτόπια παίζει σημαντικό ρόλο. Μηχανικοί χυμοτοπιακοί μεταφορείς σε συγκεκριμένους τύπους φυτικών κυττάρων μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση του ρυθμού συσσώρευσης των μετάλλων. Κάθε φυτικό κύτταρο ανταλλάσσει τις συγκεντρώσεις των διαφόρων μετάλλων με το περιβάλλον του με στόχο να διατηρούνται σταθερές, ανάλογα με τις ανάγκες του, οι φυσιολογικές λειτουργίες των διαφόρων οργανιδίων, αλλά και να

υπάρχουν ικανοποιητικές ποσότητες σε σημαντικά ενδοκυτταρικά συστήματα. Το τρίχωμα παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτοξίνωση και αποθήκευση των μετάλλων από το φυτό. Σε διάφορα φυτά με θεραπευτικές ιδιότητες όπως το είδος *Brassica juncea*, η συσσώρευση του καδμίου φέρεται να είναι 40 φορές υψηλότερη στις τρίχες σε σχέση με την συνολική ποσότητα του στα φύλλα. Υπάρχουν πολλά σημεία ελέγχου στην διαδρομή των μετάλλων από το έδαφος μέχρι τους αποθηκευτικούς χώρους στα φύλλα. Έχουν γίνει κατανοητές κάποιες από τις λειτουργίες κλειδιά που συμβάλλουν στη διατήρηση της ομοιόστασης στο φυτό όσον αφορά τις μεταβολές των συγκεντρώσεων των μετάλλων, αλλά και οι ιδιαίτεροι φαινότυποι των μετάλλων. Ωστόσο κάποια ακόμα σημεία της όλης διαδρομής παραμένουν αινιγματικά. Επίσης άγνωστες παραμένουν και οι μεταφορικές και αποθηκευτικές διαδικασίες των μετάλλων. Μελλοντικά απαιτείται σημαντική μελέτη και έρευνα όσον αφορά τους μηχανισμούς μεταφοράς σε επίπεδο λειτουργίας χωροταξικότητας και δομής. Σημεία κλειδιά όπως οι πρωτεΐνες που συμβάλλουν στην μεταφορά στο ξύλωμα αλλά και στην επιλεκτική διανομή στα φύλλα είναι ακόμα άγνωστα. Τα βαρέα μέταλλα όταν βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις στα εδάφη, ενεργούν ως δυνάμεις πίεσης στους φυτικούς πληθυσμούς και προσανατολίζονται στην επιλογή ανθεκτικών γενοτύπων. Ανθεκτικότητα χαρακτηρίζεται η ικανότητα διαφόρων φυτικών μορφών να παραμένουν ανεπηρέαστες σε διάφορες συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων, οι οποίες όμως θα ήταν τοξικές για άλλα φυτά. Ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η ανθεκτικότητα των φυτών έναντι των βαρέων μετάλλων οφείλεται σε μηχανισμούς αποτοξικότητας και βιοχημική ανθεκτικότητα (Σαχινίδης Σ., 2012).

Από τις έρευνες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα γύρω από την ανθεκτικότητα των ανώτερων φυτών στα βαρέα μέταλλα προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα (Σαχινίδης Σ., 2012):

- Η ανθεκτικότητα ενός φυτού είναι εξειδικευμένη για το συγκεκριμένο μέταλλο του υποστρώματος και οι ανθεκτικοί οικότυποι αναπτύσσονται μόνο σαν απόκριση στις τοξικές συγκεντρώσεις του μετάλλου στο έδαφος. Παρόλα

αυτά, αν το έδαφος περιέχει περισσότερα από ένα μέταλλο σε τοξικές συγκεντρώσεις, τότε τα φυτά εμφανίζουν πολλαπλή ανθεκτικότητα.

- Η ανθεκτικότητα στα βαρέα μέταλλα είναι ένα χαρακτηριστικό που παρουσιάζει διαβάθμιση μεταξύ ατόμων του ίδιου πληθυσμού.
- Η ανθεκτικότητα στα βαρέα μέταλλα είναι κληρονομήσιμο χαρακτηριστικό, το οποίο δεν επηρεάζεται από το περιβάλλον και διατηρείται σε οποιοδήποτε υπόστρωμα.
- Η ανθεκτικότητα στα βαρέα μέταλλα μπορεί να αναπτυχθεί σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (τάξης δεκαετίας). Επίσης, η ανθεκτικότητα μπορεί να αναπτυχθεί σε πολύ περιορισμένη περιοχή, ενώ σε παρακείμενες περιοχές να υπάρχουν μη ανθεκτικοί πληθυσμοί.

Η τεχνική βασίζεται στην ιδιότητα ορισμένων φυτών, να προσλαμβάνουν βαρέα μέταλλα και άλλους ρύπους ενσωματώνοντας τα στη βιομάζα τους. Αυτά τα φυτά μπορούν να συσσωρεύσουν εξαιρετικά μεγάλες συγκεντρώσεις ρύπων χωρίς να τους προξενείται βλάβη, λειτουργώντας σαν αντλίες, φίλτρα ή παγίδες (A Citizen's Guide to Bioremediation, April 1996, EPA 542-F-96-007). Η ικανότητα αυτή ελέγχεται γενετικά, ωστόσο διαφοροποιείται μέσω του εγκλιματισμού. Μέχρι στιγμής έχουν χαρακτηριστεί περίπου 450 είδη αγγειόσπερμων. Πολλά είδη χαρακτηρίζονται από διαφορετική ικανότητα συσσώρευσης καθώς και από εκλεκτικότητα δηλαδή εξειδίκευση για ένα ή ορισμένα είδος/-η ρύπου/-ων. Ορισμένα, έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν ιόντα βαρέων μετάλλων σε συγκεντρώσεις που φθάνουν και το 10% του ξηρού τους βάρους. Τα χαρακτηριστικά τα οποία τα διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα φυτά είναι:

Πρώτον, η ισχυρή ικανότητα πρόσληψης των βαρέων μετάλλων, η οποία οφείλεται στην υπερέκφραση ορισμένων γονιδίων ZIP, που κωδικοποιούν μεταφορείς κατιόντων που εντοπίζονται στην πλασματική μεμβράνη.

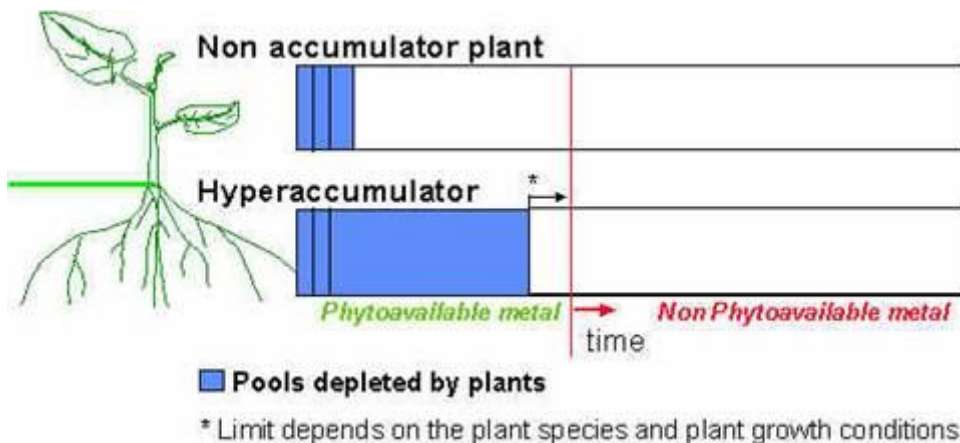
Δεύτερον, η ταχεία μεταφορά των ιόντων των μετάλλων από τη ρίζα στο βλαστό, η οποία οφείλεται στην υπερέκφραση γονιδίων που κωδικοποιούν μεταφορείς οι οποίοι ευθύνονται για την αυξημένη φόρτωση των αγγείων του ξύλου. Αν η φόρτωση πραγματοποιείται με τη μορφή ιόντων, σημαντικό ρόλο παίζουν οι πρωτεΐνες HMAs (Heavy Metal ATPases). Η HMA4 ανήκει στην υποομάδα μεταφορέων Zn/Co/Cd/Pb και εντοπίζεται στην πλασματική μεμβράνη των κυττάρων του ξυλώδους παρεγχύματος. Ο

μεταφορέας αυτός ευθύνεται για την εκροή Cd και Zn από τα κύτταρα της ρίζας στα αγγεία του ξύλου και είναι αναγκαίος παράγοντας για την υπερσυσσώρευση των δύο μετάλλων στο βλαστό. Αντίθετα, αν η φόρτωση πραγματοποιείται με τη μορφή συμπλόκων, σημαντικό ρόλο στη μεταφορά των βαρέων μετάλλων παίζει η οικογένεια των πρωτεϊνών MATE (Multidrug And Toxin Efflux). Οι πρωτεΐνες αυτές είναι μεταφορείς οργανικών μορίων χαμηλού μοριακού βάρους, επομένως θεωρείται πιθανό οι πρωτεΐνες αυτές να ευθύνονται για τη μεταφορά των συμπλόκων μεταξύ των οργανικών μορίων (π.χ. αμινοξέα και βαρέα μέταλλα)

Τρίτον, η ισχυρή ικανότητα αποτοξίνωσης και αδρανοποίησης των μετάλλων στα φύλλα, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, δεδομένου ότι η λειτουργία της φωτοσύνθεσης είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην παρουσία βαρέων μετάλλων. Η αδρανοποίηση τους παρατηρείται σε επιφανειακές δομές όπως η επιδερμίδα. Η συγκέντρωσή τους διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα σε ευαίσθητα κύτταρα στόχους όπως αυτά του φωτοσυνθετικού παρεγχύματος. Η αδρανοποίηση των βαρέων μετάλλων στις δομές που προαναφέρθηκαν πραγματοποιείται με τη συμπλοκοποίηση και τη μεταφορά τους στα χυμοτόπια ή στα κυτταρικά τοιχώματα. Παρατηρείται υπερέκφραση γονιδίων που κωδικοποιούν πρωτεΐνες που ευθύνονται για τη μεταφορά των μετάλλων διαμέσου της πλασματικής μεμβράνης ή του τονοπλάστη. Πρόκειται για την οικογένεια πρωτεϊνών MTP (Metal Transporter Protein) οι οποίες μεταφέρουν δισθενή κατιόντα από το κυτταρόπλασμα προς το χυμοτόπιο, καθώς και άλλους μεταφορείς, όπως η HMA3.

Τα παραπάνω φυσιολογικά χαρακτηριστικά φαίνεται ότι δεν οφείλονται σε γονίδια που εκφράζονται αποκλειστικά στα είδη αυτά, αλλά μάλλον σε υπερέκφραση γονιδίων που απαντώνται και σε ευαίσθητα είδη δηλαδή στα φυτά που δεν είναι υπερσυσσωρευτές, και κυρίως γονιδίων που κωδικοποιούν διαμεμβρανικούς μεταφορείς, μέλη των οικογενειών πρωτεϊνών ZIP, HMA, MATE, YSL και MTP. Για την κατανόηση των μοριακών και φυσιολογικών μηχανισμών της υπερσυσσώρευσης, χρησιμοποιήθηκαν ως πειραματόφυτα συγγενικά είδη φυτών που είτε διαθέτουν είτε όχι τα χαρακτηριστικά της υπερσυσσώρευσης, ιδιαίτερα των συγγενικών ειδών *Arabidopsis halleri* και *Arabidopsis thaliana*. Το πρώτο είναι υπερσυσσωρευτής και το δεύτερο είναι ευαίσθητο. Η αδρανοποίηση των βαρέων μετάλλων στους υπερσυσσωρευτές πραγματοποιείται μέσω των ίδιων μηχανισμών που λειτουργούν και σε άλλα μεταλλόφυτα ή ακόμη και σε

ευαίσθητα φυτά. Ωστόσο, υπάρχουν διαφορές. Η συμπλοκοποίηση των βαρέων μετάλλων πραγματοποιείται κυρίως μέσω των οργανικών οξέων, χαμηλού μοριακού βάρους όπως το κιτρικό και το οξικό και όχι μέσω πεπτιδίων. Οι υπερσυσσωρευτές συνθέτουν τέτοιου είδους πεπτίδια σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε σύγκριση με τα ευαίσθητα φυτά. Υπάρχουν ενδείξεις ότι τα πεπτίδια λειτουργούν ως βραχυπρόθεσμοι μηχανισμοί αποθήκευσης ή/ και μεταφοράς συμπλόκοποιημένων μετάλλων. Σημαντικό ρόλο στην υπερσυσσώρευση παίζουν ορισμένα αμινοξέα που μπορούν να σχηματίσουν σύμπλοκα με δισθενή κατιόντα όπως η ιστιδίνη και νικοτιδαμίνη. Η ελεύθερη ιστιδίνη θεωρείται ο αποτελεσματικός δεσμευτής που εμπλέκεται στην υπερσυσσώρευση του νικελίου. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των υπερσυσσωρευτών αποτελεί η υπερέκφραση των γονιδίων που σχετίζονται με την αντιοξειδωτική προστασία (Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ. 2012).



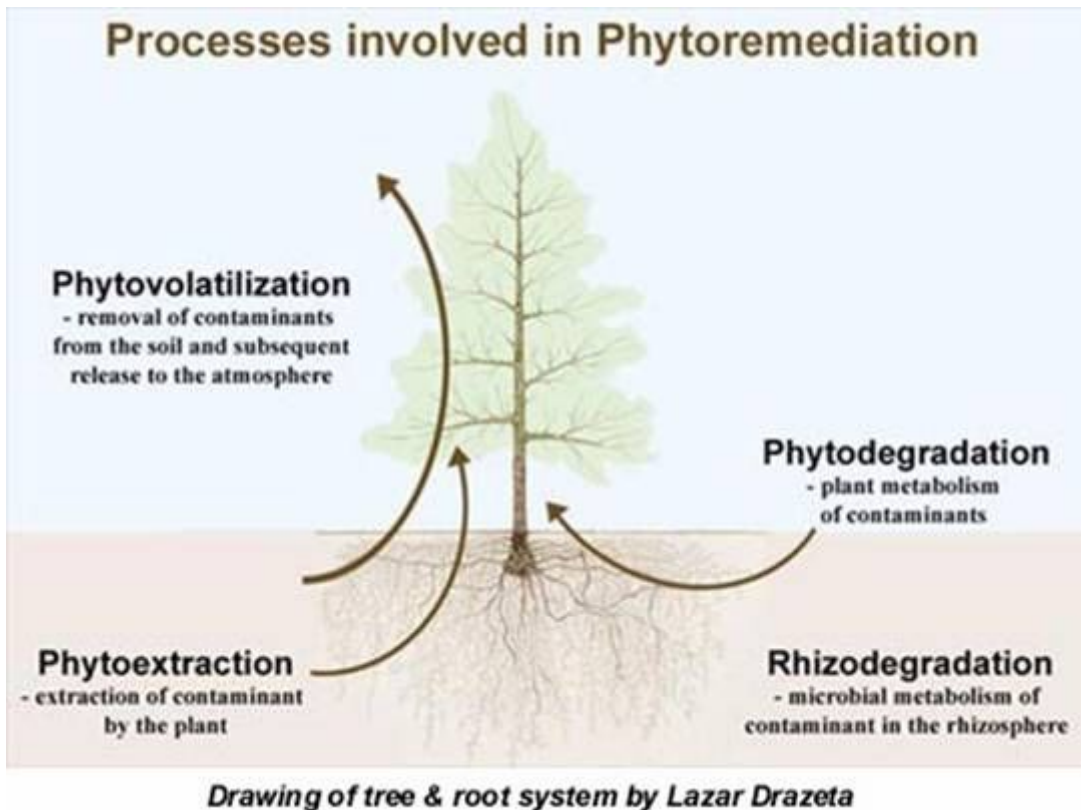
Σχήμα 3: Τα φυτά υπερσυσσωρευτές απορροφούν μεγαλύτερες ποσότητες ρύπου σε σύγκριση με τα κοινά φυτά.

Πηγή: ίντερνετ

3.2 Αποκατάσταση εδάφους και υδροφόρου ορίζοντα

Στις μολυσμένες από βαρέα μέταλλα τοποθεσίες, τα φυτά μπορούν να απομακρύνουν τα μέταλλα από το χώμα ή το νερό με τους ακόλουθους τρεις μηχανισμούς:

- Φυτοεξαγωγή (phytoextraction)
- Φιλτράρισμα των ριζών (rhizofiltration)
- Φυτοσταθεροποίηση (phytostabilization)

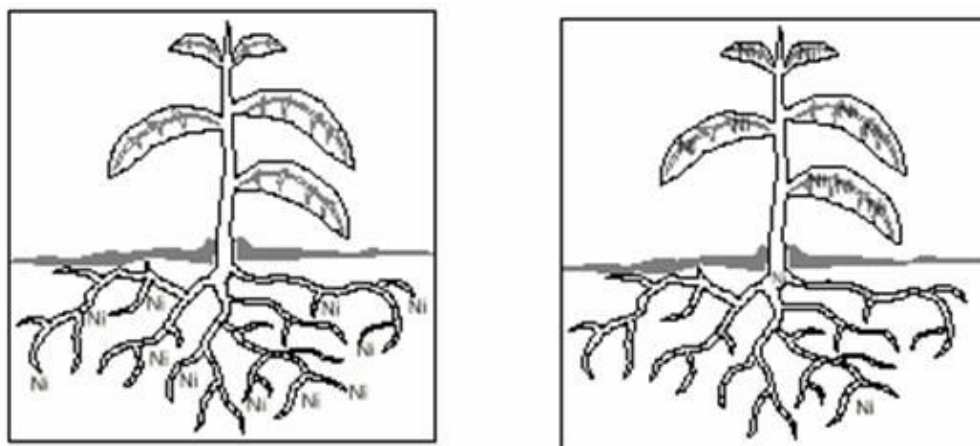


Σχήμα 4: Μηχανισμοί φυτοαποκατάστασης

Πηγή: ίντερνετ

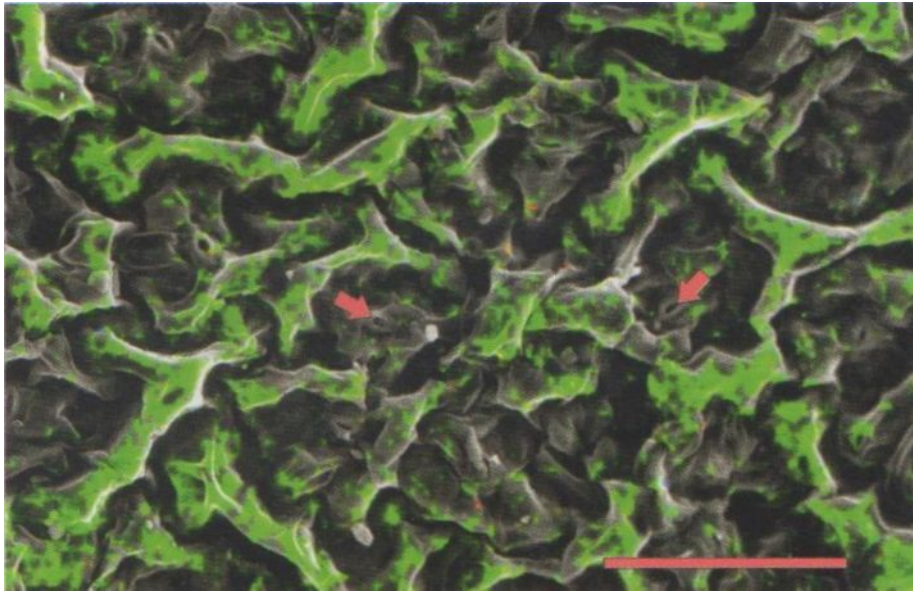
3.2.1 Φυτοεξαγωγή (phytoextraction)

Είναι η απορρόφηση και μεταφορά βαρέων μετάλλων από το χώμα, μέσω του ριζικού συστήματος στα υπέργεια μέρη των φυτών. 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 ή “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. Αν τα φυτά είναι αποτεφρωμένα ο όγκος της στάχτης θα είναι μικρότερος από το 10% του όγκου που θα προέκυπτε αν στο μολυσμένο χώμα εφαρμόζονταν μηχανικές μέθοδοι εκσκαφής για την θεραπεία του. Μέταλλα όπως το νικέλιο, ο ψευδάργυρος και ο χαλκός είναι από τα καταλληλότερα για απομάκρυνση με φυτοεξαγωγή γιατί, όπως έχει διαπιστωθεί, προτιμούνται από 400 περίπου είδη φυτών. Παράλληλα συνεχίζεται η έρευνα για φυτά που απορροφούν το χρώμιο και τον μόλυβδο.



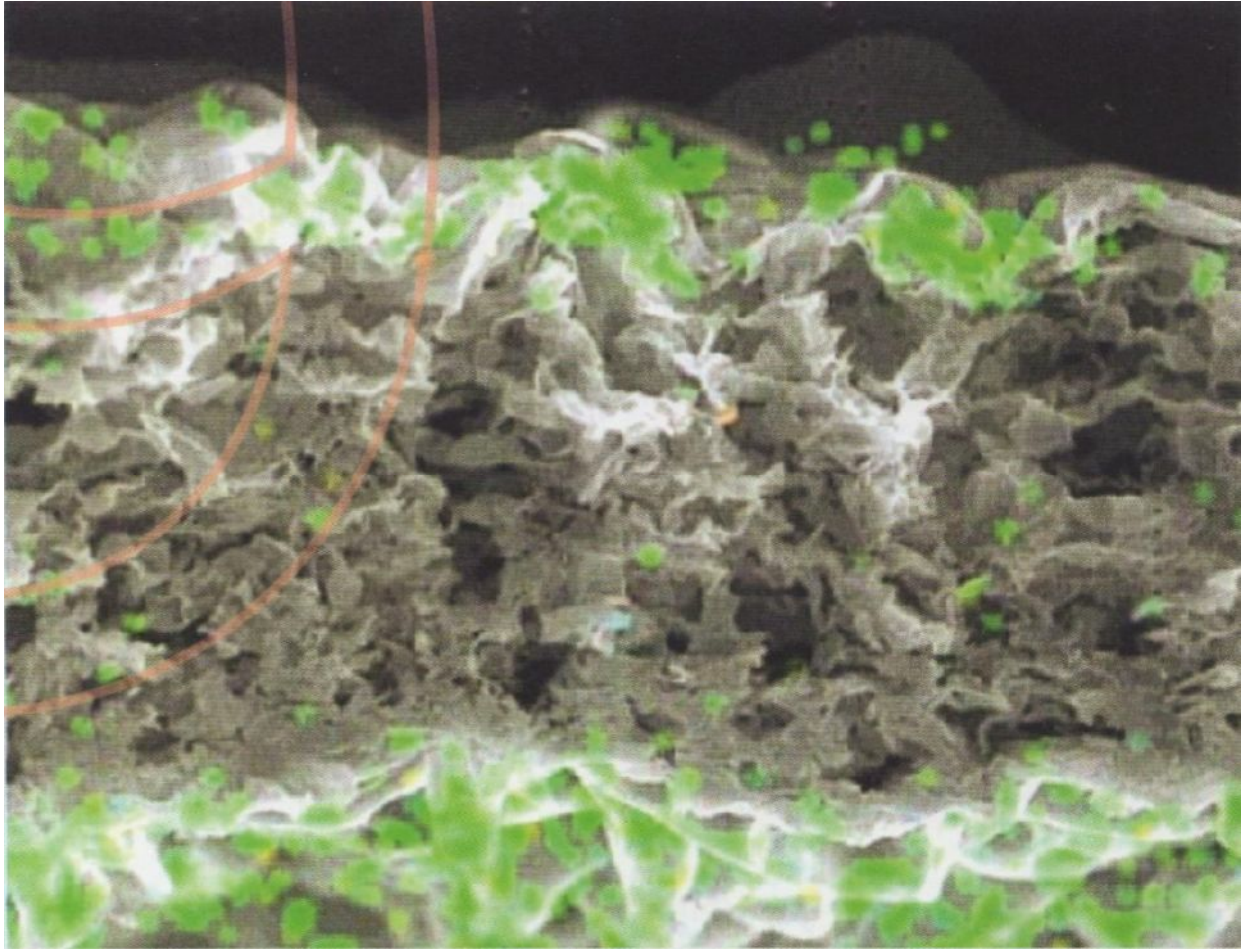
Σχήμα 5: Πρόσληψη Νικελίου (Ni)

Πηγή: ίντερνετ



Σχήμα 6: Μικροφωτογραφία σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης με δυνατότητα μικροανάλυσης . Τμήμα της επιδερμίδας του φύλλου του υπερσυσσωρευτή *Thlaspi pindicum*. Οι περιοχές του φύλλου στις οποίες εντοπίζεται το Νί εμφανίζονται με πράσινο χρώμα. Το Νί συσσωρεύεται στα επιδερμικά και όχι στα καταφρακτικά κύτταρα.

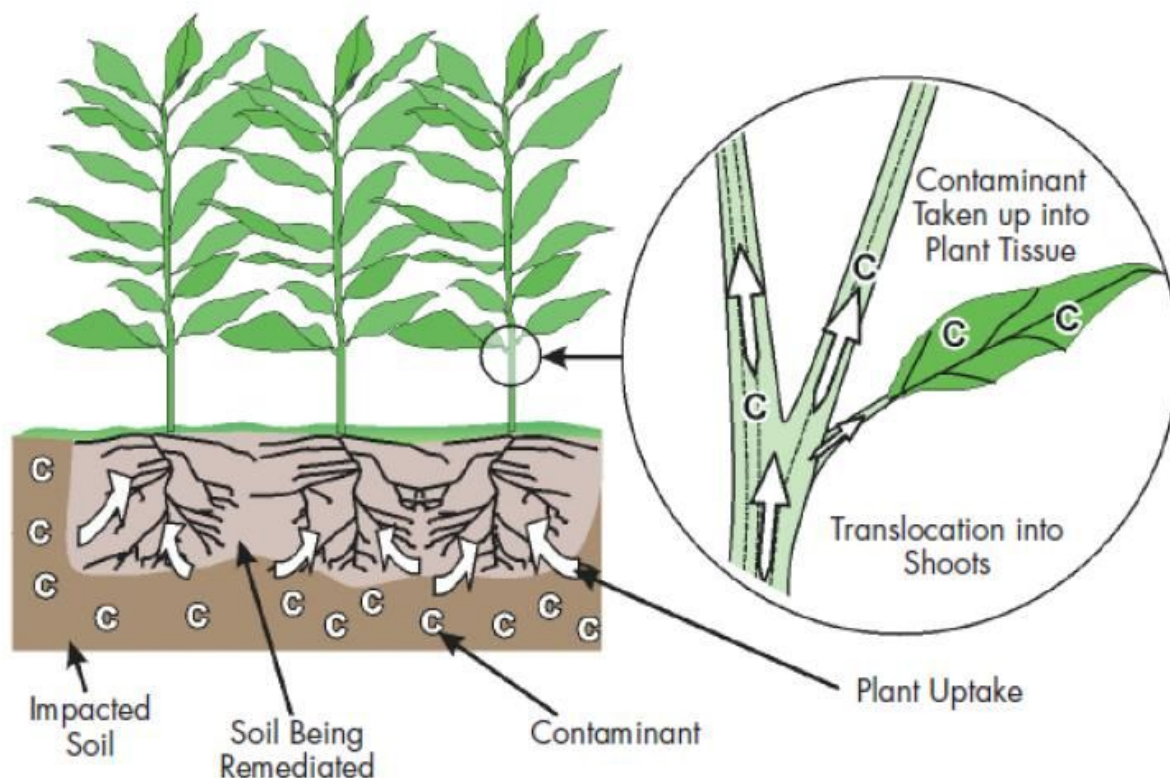
Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012



Σχήμα 7: Μικροφωτογραφία σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης με δυνατότητα μικροανάλυσης . παρουσιάζεται η εγκάρσια τομή του φύλλου του υπερσυσσωρευτή *Thlaspi pindicum*. Οι περιοχές του φύλλου στις οποίες εντοπίζεται το Νί εμφανίζονται με πράσινο χρώμα. Το Νί συσσωρεύεται στα επιδερμικά κύτταρα και όχι στο μεσόφυλλο.

Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012

PHYTOEXTRACTION

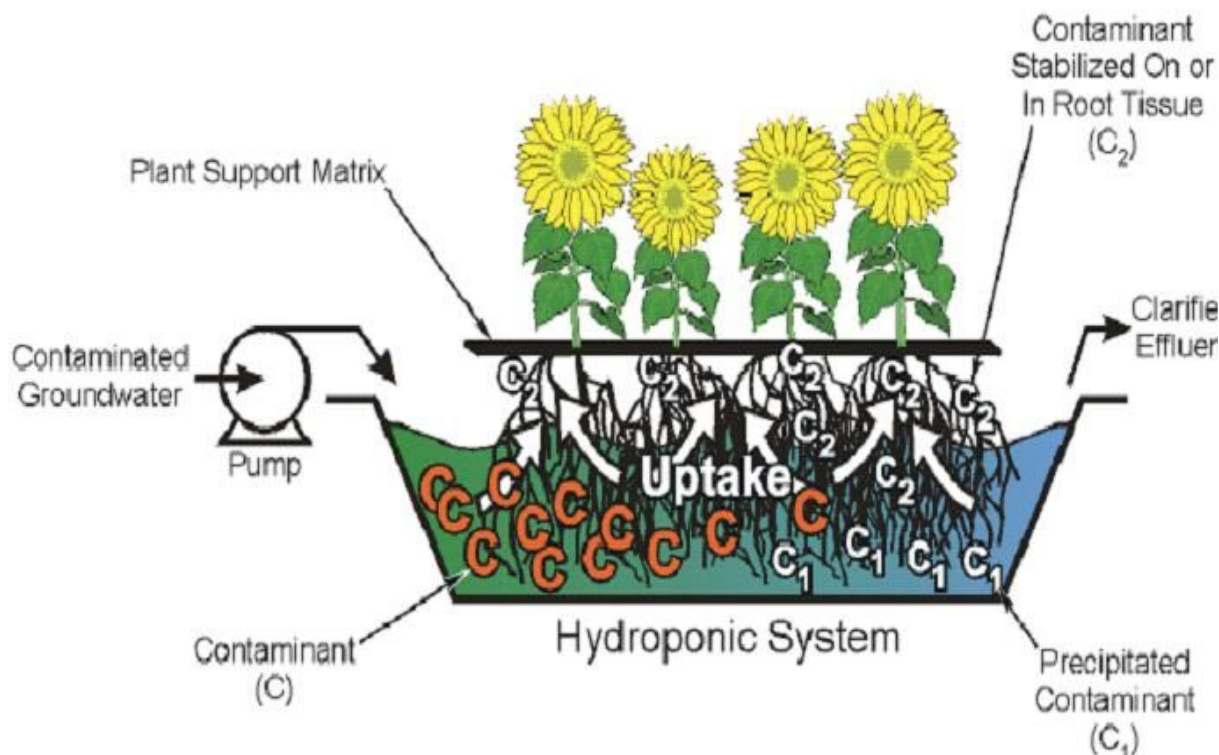


Σχήμα 8: Φυτοεξαγωγή

Πηγή: ίντερνετ

3.2.2 Φιλτράρισμα ή ριζοδιήθηση (rhizofiltration)

Πρόκειται για την διήθηση (σούρωμα) των τοξικών ρύπων από τις ρίζες. Αφορά τα φυτά που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση μολυσμένου υδροφόρου ορίζοντα και όχι μολυσμένου χώματος. Τα φυτά αυτά, έχουν ισχυρό ριζικό σύστημα το οποίο έχουν αναπτύξει σε υδροπονική καλλιέργεια. Φυτεύονται νεαρά στη μολυσμένη τοποθεσία, όπου οι ρίζες δέχονται άφθονο μολυσμένο νερό. Όταν οι ρίζες φτάσουν σε κορεσμό τότε τα φυτά συλλέγονται και ανακυκλώνονται με ειδική επεξεργασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί ο ηλιάνθος που χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για την απομάκρυνση ραδιενεργών στοιχείων από υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα κατά τη διάρκεια έρευνας στο Chernobyl της Ουκρανίας.



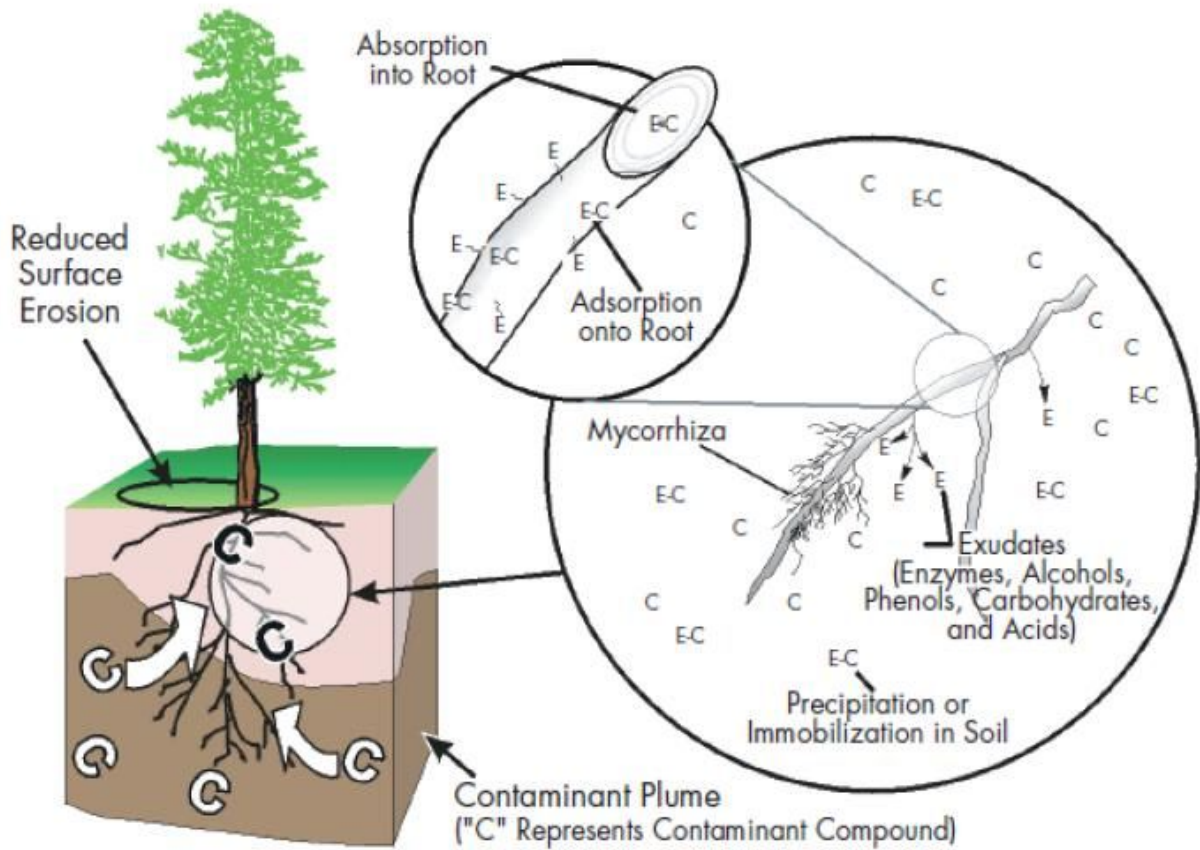
Σχήμα 9: Φιλτράρισμα ή Ριζοδιήθηση

Πηγή: ίντερνετ

3.2.3 Φυτοσταθεροποίηση (phytostabilization)

Είναι η «ακίνητοποίηση» των τοξικών ρύπων, στο χώμα ή στο υπόγειο νερό, με την απορρόφηση, την συσσώρευση, ή την συγκράτηση τους επάνω ή μέσα στη ριζόσφαιρα, μειώνοντας και εμποδίζοντας τη μετακίνηση των ρύπων τους προς το υπόγειο νερό και τον αέρα. Χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση της φυσικής ισορροπίας σε περιοχές που η φυσική βλάστηση είναι ελλιπής είτε λόγω υψηλής συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων είτε λόγω φυσικών διαταραχών στα επιφανειακά εδάφη. Αναεώνεται η βλάστηση ελαττώνοντας τη μόλυνση μέσω διάβρωσης, μεταφοράς επιφανειακών χωμάτων και εισόδου τοξικών ρύπων στο υπόγειο νερό.

PHYTOSTABILIZATION



Σχήμα 10: Φυτοσταθεροποίηση

Πηγή: ίντερνετ

3.3 Αποκατάσταση περιοχών μολυσμένων από υδρογονάνθρακες

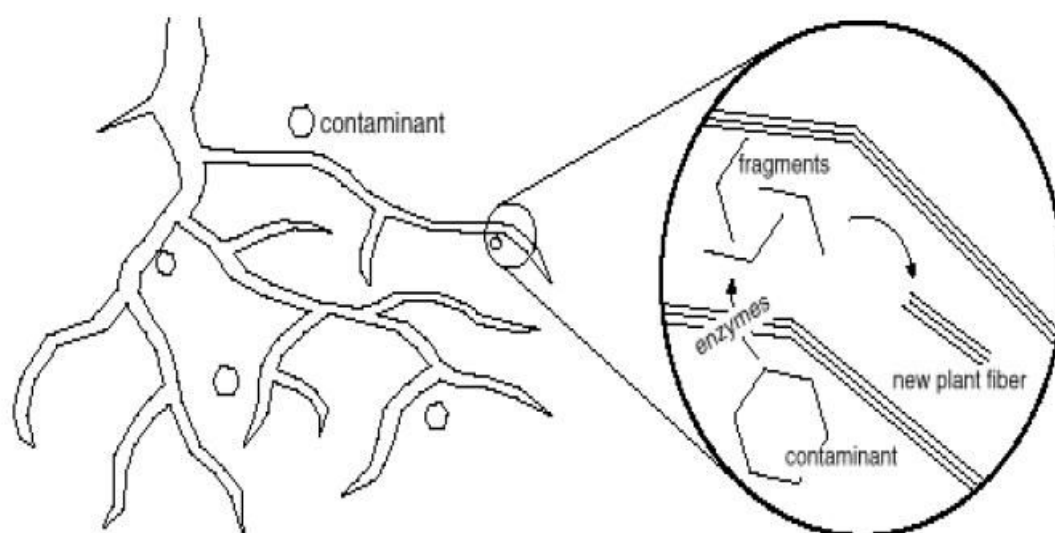
Οι οργανικές τοξικές ουσίες (υδρογονάνθρακες) είναι συνώνυμες με τις περιβαλλοντικές μολύνσεις. Η αποκατάσταση περιοχών μολυσμένων από τοξικές οργανικές ουσίες (υδρογονάνθρακες) γίνεται με τους ακόλουθους μηχανισμούς:

- Φυτοαποδόμηση (Phytodegradation)
- Ριζοδιάσπαση (Rhizodegradation)
- Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization)

3.3.1 Φυτοαποδόμηση (phytodegradation)

Είναι η αποδόμηση των υδρογονανθράκων που έχουν προσληφθεί από τα φυτά, μέσω μεταβολικών διαδικασιών ή η αποσύνθεση τους μέσω ενζύμων που παράγουν τα ίδια τα φυτά. Οι υδρογονάνθρακες διασπώνται σε απλούστερα μόρια και απορροφώνται από τους φυτικούς ιστούς, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη του φυτού. Τα φυτά περιέχουν ένζυμα, τα οποία προκαλούν ταχύτερες χημικές αντιδράσεις και αποδομούν τους υδρογονάνθρακες όπως το τριχλωροαιθυλένιο (TCE).

PHYTODEGRADATION



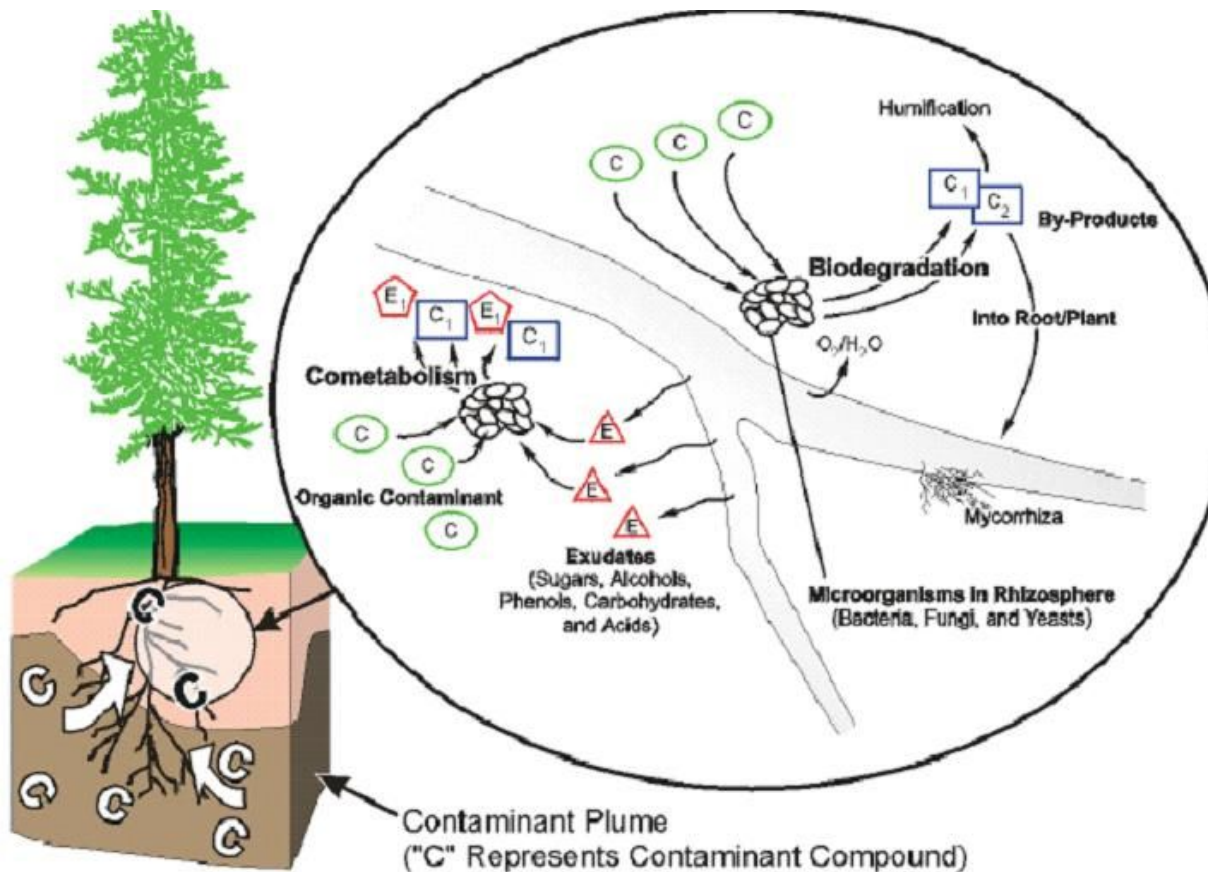
P/S: Rhizodegradation is similar to phytodegradation except fungi and bacteria living in the soil around the roots of the plants degrade the contaminants

Σχήμα 11: Φυτοαποδόμηση

Πηγή: ίντερνετ

3.3.2 Ριζοδιάσπαση (rhizodegradation)

Είναι η αποσύνθεση των τοξικών ρύπων στο χώμα μέσω υπόγειας μικροβιακής δραστηριότητας, η οποία εμπλουτίζεται από το ριζικό σύστημα. Είναι πολύ βραδύτερη διαδικασία από τις προηγούμενες. Αποτελεί συμβιωτική σχέση μεταξύ φυτού και μικροοργανισμού. Οι μικροοργανισμοί (βακτήρια, μύκητες κ.α.) αφομοιώνουν τις οργανικές ουσίες οι οποίες είναι απαραίτητες για την θρέψη τους ενώ, άλλοι τις διασπούν απευθείας σε αβλαβή προϊόντα. Οι ρίζες του φυτού απελευθερώνουν χημικές ενώσεις όπως σάκχαρα, αλκοόλες και οξέα, οι οποίες περιέχουν οργανικό άνθρακα, που είναι αφομοιώσιμος από τους μικροοργανισμούς του εδάφους και δρα ενισχυτικά.

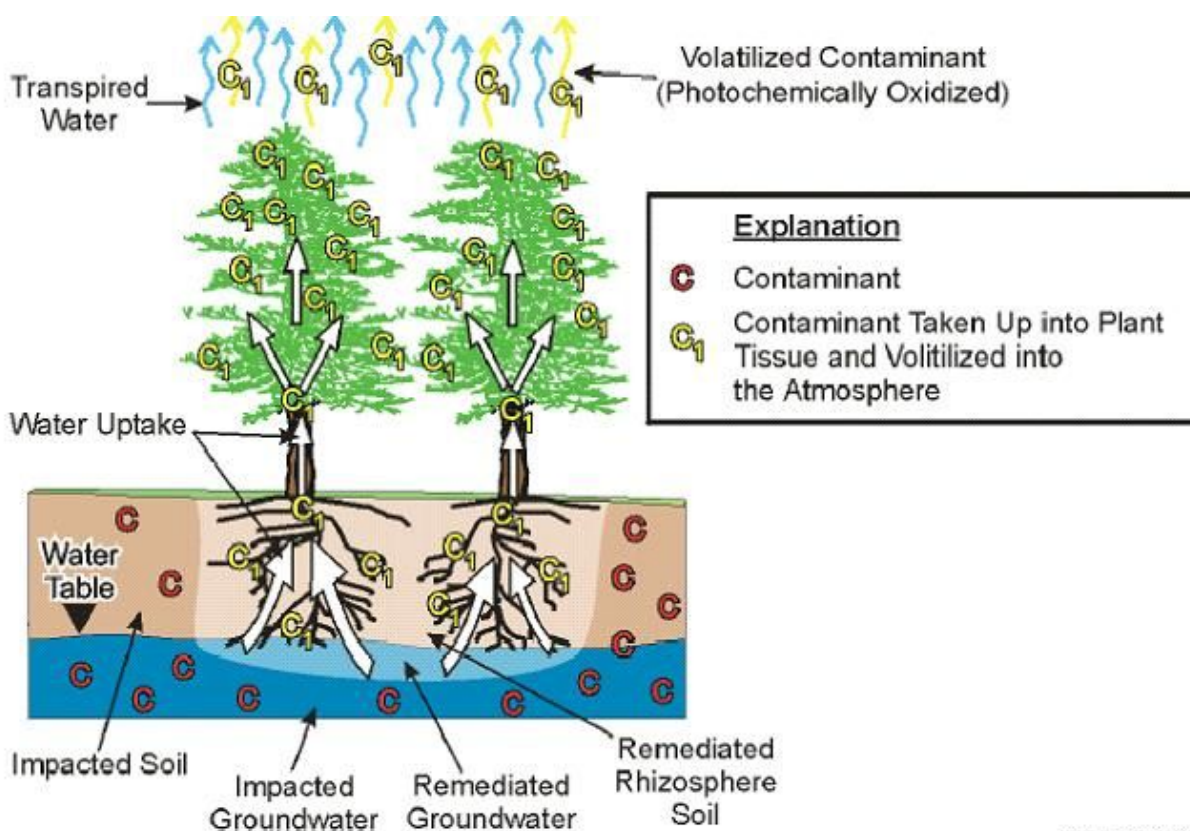


Σχήμα 12: Ριζοδιάσπαση

Πηγή: ίντερνετ

3.3.3 Φυτοεξάτμιση (phytovolatilization)

Είναι η πρόσληψη των ρύπων από τα φυτά και η απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα, μέσω της εξατμισοδιαπνοής, σε άλλη χημική μορφή. Καθώς τα αναπτυσσόμενα φυτά μεγαλώνουν, απορροφώντας μεγάλες ποσότητες νερού και μέσω αυτού, τους τοξικούς ρύπους. Κάποιοι από αυτούς περνάνε στο φύλλωμα και εξατμίζονται στην ατμόσφαιρα. Αποτελέσματα ερευνών έδειξαν ότι τα δένδρα λεύκας εξάτμισαν το 90% του τριχλωροαιθυλενίου (TCE) που είχαν απορροφήσει.

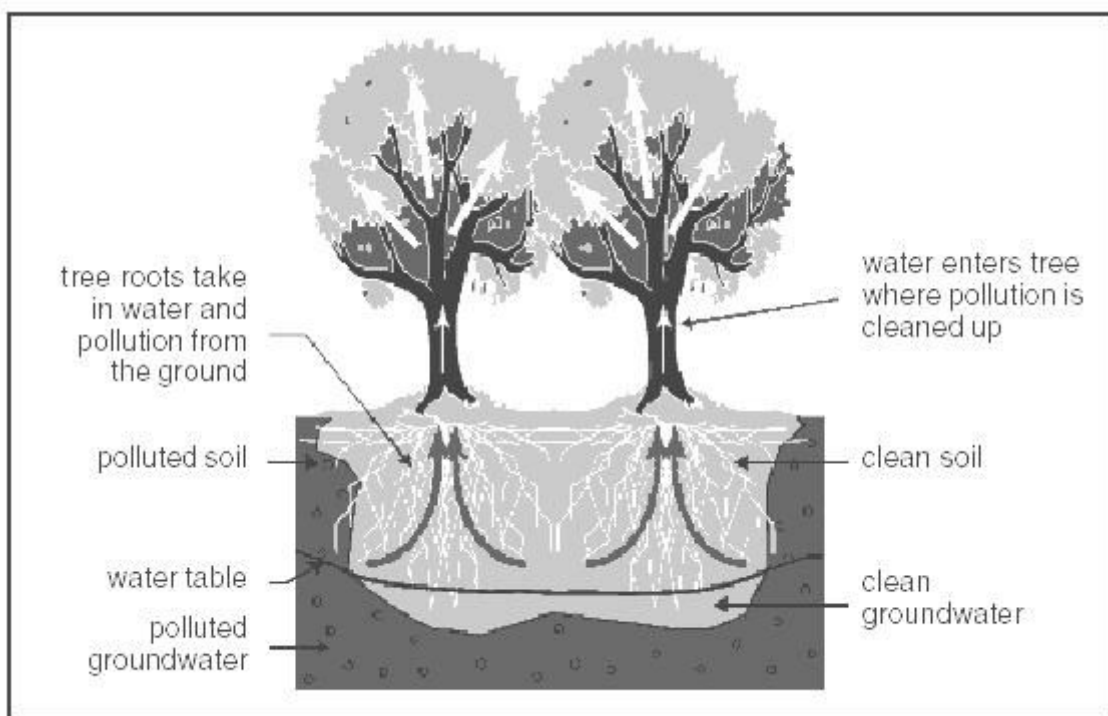


Σχήμα 13: Φυτοεξάτμιση

Πηγή: ίντερνετ

3.4 Υδραυλικός έλεγχος

Ο υδραυλικός έλεγχος είναι η ιδιότητα των φυτών να ελέγχουν την κίνηση του υπόγειου νερού, δηλαδή λειτουργούν σαν υδραυλικές αντλίες. Όταν οι ρίζες τους φθάσουν τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα διαμορφώνουν πυκνό ριζικό πλέγμα, το οποίο απορροφά μεγάλες ποσότητες νερού, με αποτέλεσμα να μειώνεται η τάση των επιφανειακών ρύπων να κινούνται προς το υπόγειο νερό. Η λεύκα μπορεί να αντλήσει 200 με 1200 λίτρα νερού ανά ημέρα από το έδαφος.



Σχήμα 14: Υδραυλικός έλεγχος

Πηγή: ίντερνετ

3.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσληψη των ρύπων από τα φυτά

Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσληψη των ρύπων από τα φυτά, συνεπώς και την επιτυχία της αποκατάστασης είναι (Cynthia Green & Ana Hoffnagle, 2004):

- Η συγκέντρωση των ρύπων στο έδαφος ή το νερό

Η φύση των ρύπων (δυστροπία, η επιμονή, η βιοδιαθεσιμότητα, κ.λπ.) είναι ζωτικής σημασίας κατά την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας φυτοθεραπείας στο μολυσμένο πεδίο. Αν οι συγκεντρώσεις των ρύπων είναι υψηλές τότε μπορεί να δράσουν ανασταλτικά, λόγω της φυτοτοξικότητας.

- Το βάθος της ρίζας

Η φυσική τοποθεσία του ρύπου καθορίζει την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας είτε είναι στο έδαφος είτε στο νερό. Λόγω των περιορισμών της ρίζας, η τεχνολογία εφαρμόζεται συνήθως για τους ρύπους που βρίσκονται στο άμεσο περιβάλλον των ριζών (ριζόσφαιρα).

- Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η περιεκτικότητα σε υγρασία, το διαθέσιμο οξυγόνο, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, το pH, η αλκαλικότητα, το περιεχόμενο, την υφή (μέγεθος σωματιδίων), και η θερμοκρασία θα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην κινητικότητα των ρύπων.

- Το κλίμα τις περιοχής

Το κλίμα είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα ποσοστά εξατμισοδιαπνοής άρα και πρόσληψης καθώς και το ποσό των ρυπαντών που μπορεί να περιέχονται. Οι βέλτιστες συνθήκες για τη μέγιστη εξατμισοδιαπνοή είναι υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, υψηλές ταχύτητες ανέμου, υψηλή θερμοκρασία, χαμηλή σχετική υγρασία. Η εξατμισοδιαπνοή σχετίζεται γραμμικά με την κατακρήμνιση και την ποσότητα του διαθέσιμου νερού στο έδαφος. Η ηλιακή ακτινοβολία ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο των στομάτων και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει συναγωγή της ροής σε όλη την επιφάνεια του φύλλου.

Επίσης, σημαντικοί παράγοντες (Σαχινίδης Σ., 2012):

- Η μορφή και το είδος του μετάλλου μέσα στο εδαφικό διάλυμα

- Η παρουσία ιόντων υδρογόνου ή άλλων ιόντων στο εδαφικό διάλυμα
- Οι συνθήκες αερισμού και θερμοκρασίας που επικρατούν στο έδαφος
- Η τιμή του δυναμικού οξειδοαναγωγής του εδάφους.
- Το είδος του φυτού και η ικανότητά του να προσλαμβάνει ή όχι μεταλλικά στοιχεία
- Το στάδιο ανάπτυξης του φυτού,
- Η κινητικότητα του μεταλλικού ιόντος στο εδαφικό διάλυμα προς την
- επιφάνεια της ρίζας του φυτού,
- η μεταφορά του μετάλλου από την επιφάνεια στο εσωτερικό της ρίζας και
- η μετακίνηση του μετάλλου από τη ρίζα προς το βλαστό και τα φύλλα.

3.6 Καταπονήσεις φυτών

Όπως και σε άλλες περιπτώσεις καταπονήσεων, οι φυτικοί οργανισμοί παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλο εύρος ευαισθησίας έναντι των τοξικών επιδράσεων των βαρέων μετάλλων. Ορισμένα φυτά βιοδείκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί η ύπαρξη βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Η παρουσία στο περιβάλλον βαρέων μετάλλων σε τοξικά επίπεδα έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ανάπτυξης των ευαίσθητων ειδών, η οποία αποτελεί το ορατό αποτέλεσμα μιας σειράς μεταβολικών δυσλειτουργιών. Τα συμπτώματα παρουσιάζονται μέσα σε λίγα λεπτά αφότου το φυτό εκτεθεί σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και περιλαμβάνουν:

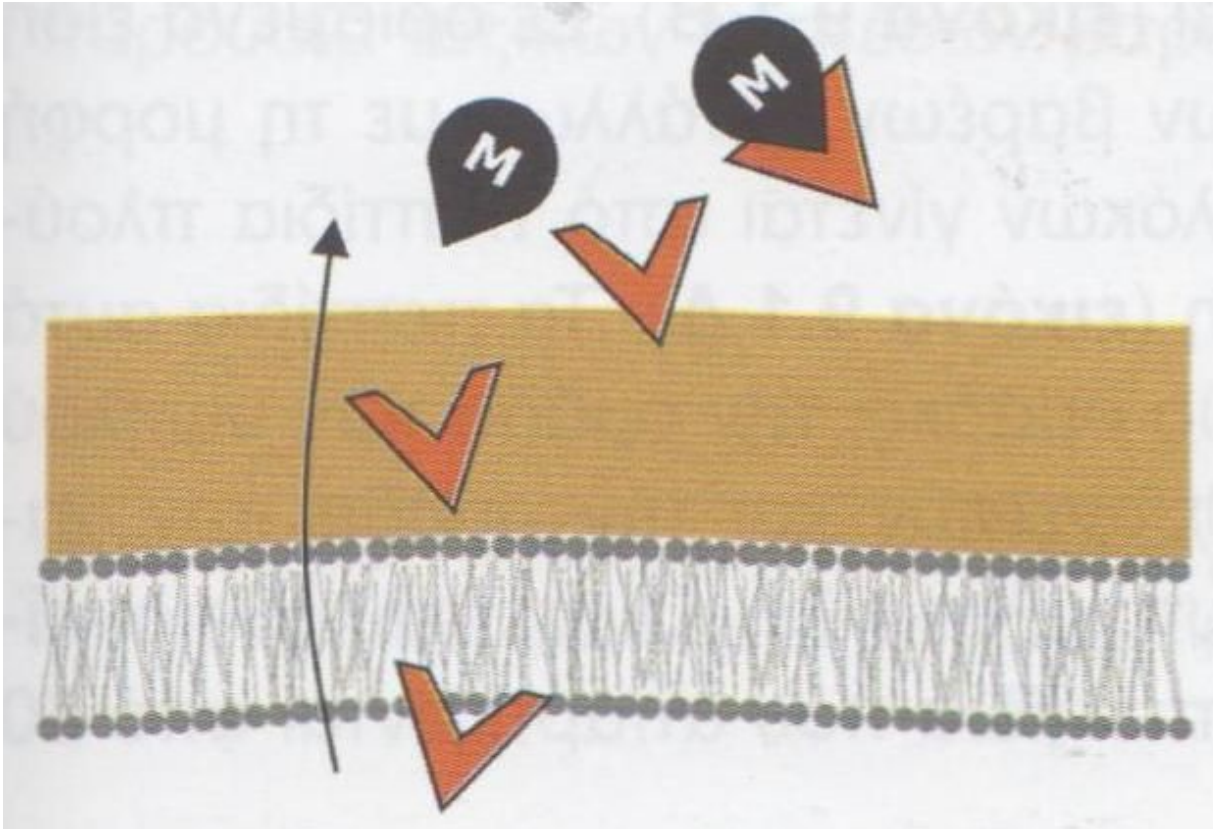
- Δυσλειτουργίες στην είσοδο και έξοδο ιόντων όπως Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- και K^+ μέσω των μεμβρανών. Μια παρενέργεια της δυσλειτουργίας αυτής είναι και οι διαταραχές στα συστήματα διαβίβασης σήματος στα οποία συμμετέχουν τα ιόντα ασβεστίου.
- Παρεμπόδιση της λειτουργίας της αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων τόσο στην αναπνοή, όσο και στη φωτοσύνθεση, προκαλώντας σημαντική πτώση της παραγωγής ενέργειας. Ο χαλκός π.χ. αντικαθιστά το σίδηρο στα μόρια του κυτοχρώματος, ενδιάμεσου φορέα ηλεκτρονίων.
- Μη αντιστρεπτή παρεμπόδιση της δραστηριότητας ενζύμων κλειδιών. Η αποδραστηριοποίηση των ενζυμικών μορίων οφείλεται στη δέσμευση των ιόντων των βαρέων μετάλλων κυρίως σε θέσεις οι οποίες διαθέτουν

σουλφυδρυλομάδες (-SH). Μπορεί επίσης να συμβεί αντικατάσταση του απαραίτητου μετάλλου στο ενεργό κέντρο ενός ενζύμου, όπως π.χ. αντικατάσταση του ψευδαργύρου από κάδμιο στην αφυδατάση των ανθρακικών που έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία αποδραστηριοποίηση του ενζύμου.

- Τη δημιουργία ενεργών μορφών οξυγόνου στα κύτταρα. Εκτός αυτού η παρουσία των βαρέων μετάλλων στο έδαφος ή στα κύτταρα ευνοεί το σχηματισμό ROS μέσω της αντίδρασης Fenton.

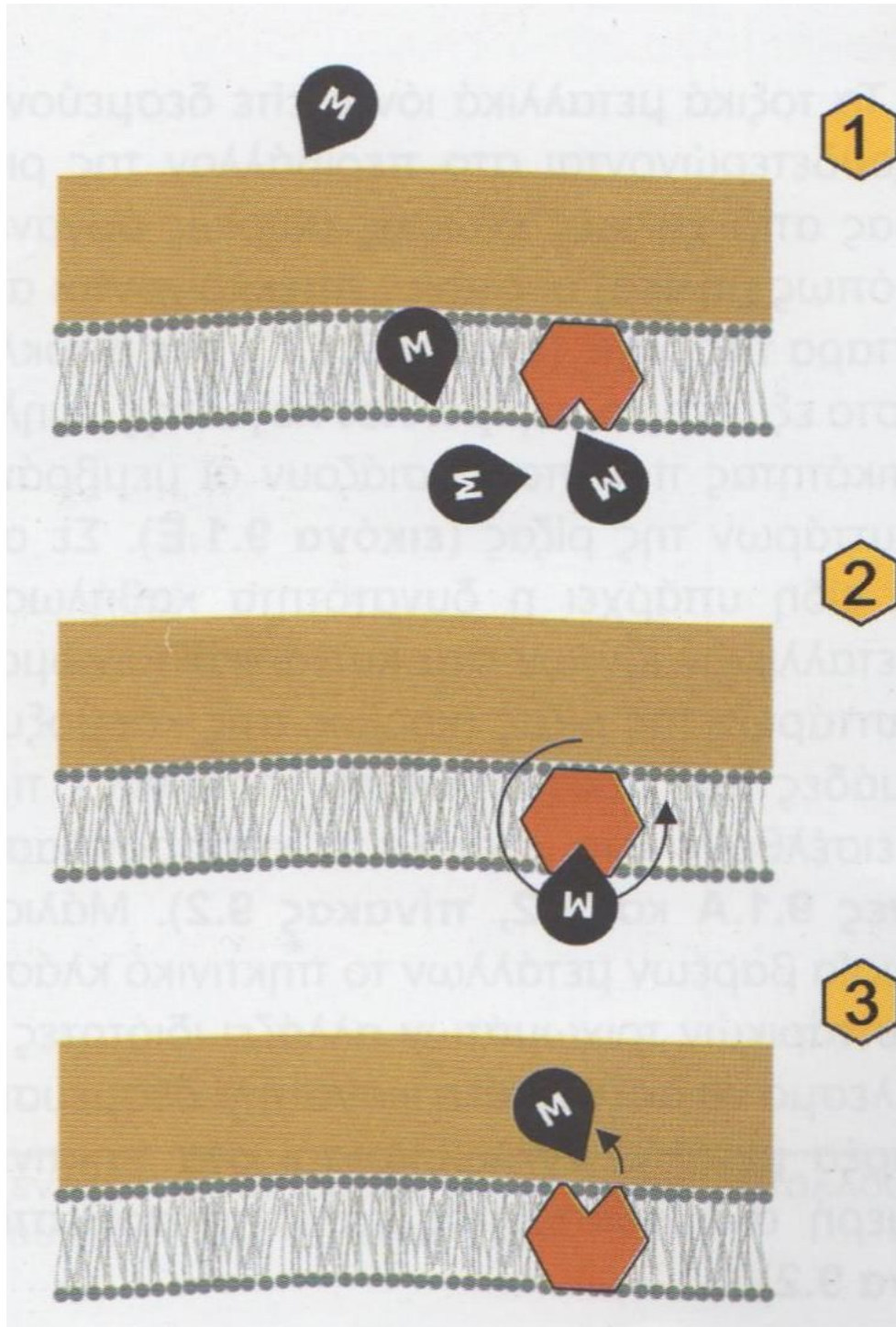
Η παρουσία βαρέων μετάλλων στο συμπλάστη και ιδιαίτερα στο κυτταρόπλασμα και τα οργανίδια δεν είναι συμβατή με την ομαλή πορεία του μεταβολισμού και για το λόγο αυτό κανένα φυτικό είδος δεν έχει αναπτύξει τη στρατηγική της ανθεκτικότητας. Ωστόσο τα πολυάριθμα φυτικά είδη τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν σε εδάφη με αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (μεταλλόφυτα) επιλέγουν τη στρατηγική της αποφυγής, τη μόνη στρατηγική που δίδει τη δυνατότητα επιβίωσης και ανάπτυξης στις δυσμενείς αυτές συνθήκες. Τα φυτά αυτά διαθέτουν κατάλληλους αμυντικούς μηχανισμούς μέσω των οποίων αποκλείουν την είσοδο των βαρέων μετάλλων στα κύτταρα ή τα εξουδετερώνουν στο χυμοτόπιο. Επομένως τα κύτταρα των φυτών αυτών δεν έχουν την εμπειρία υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στον συμπλάστη και παρουσιάζονται το ίδιο ευάλωτα με εκείνα των ευαίσθητων φυτών. Ο αποκλεισμός των τοξικών μετάλλων από τον πρωτοπλάστη των ευαίσθητων κυττάρων πραγματοποιείται με σειρά εναλλακτικών μηχανισμών. Οι μηχανισμοί αυτοί αναλύονται παρακάτω:

- Τα τοξικά μεταλλικά ιόντα είτε δεσμεύονται και εξουδετερώνονται στο περιβάλλον της ριζόσφαιρας από χηλικές ενώσεις (κυρίως οργανικά οξέα, όπως μηλικό) οι οποίες απεκκρίνονται από τα κύτταρα της ρίζας, είτε αποκλείονται στο εξωτερικό περιβάλλον λόγω της υψηλής εκλεκτικότητας που παρουσιάζουν οι μεμβράνες των κυττάρων της ρίζας.



Σχήμα 15: Απέκκριση οργανικών οξέων και δημιουργία χηλικών συμπλόκων με τα μεταλλικά ιόντα στη ριζόσφαιρα

Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012



Σχήμα 16: Ενεργός μεταφορά στον αποπλάστη μέσω μεταφορέων.

Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012

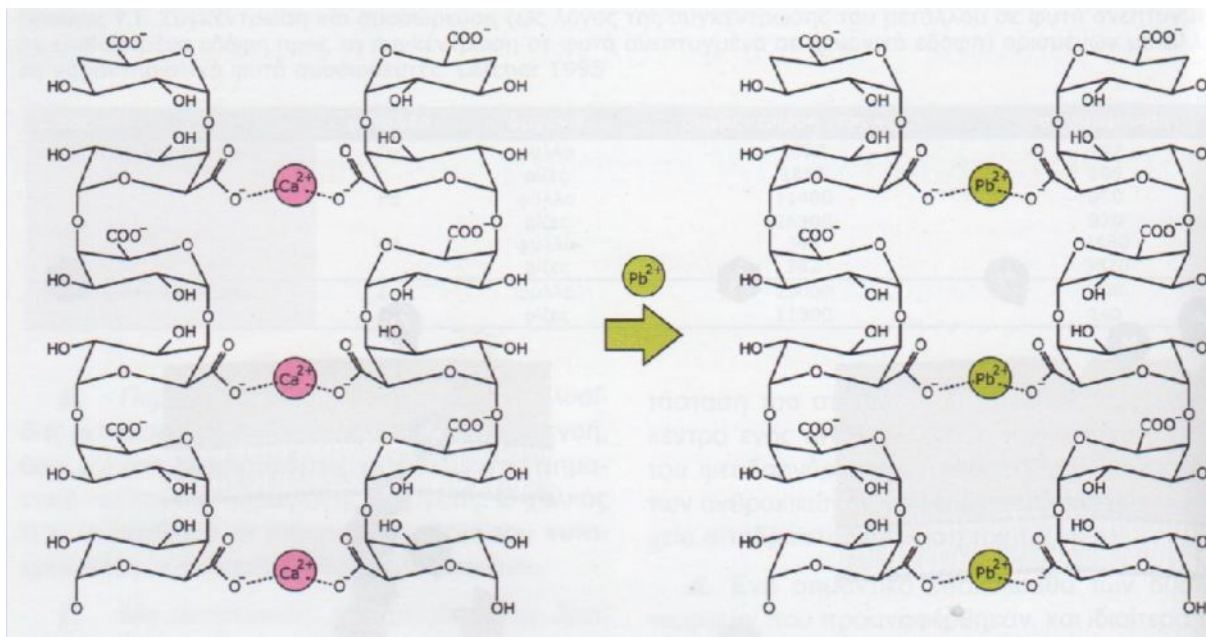
Σε ορισμένα είδη υπάρχει η δυνατότητα καθήλωσης των μεταλλικών ιόντων στα κυτταρικά τοιχώματα των κυττάρων της ρίζας (κυρίως στις καρβοξυλικές ομάδες των συστατικών της πηκτίνης), πριν αυτά εισέλθουν στο ευαίσθητο κυτταρόπλασμα.



Σχήμα 17: Καθήλωση των μεταλλικών ιόντων στο κυτταρικό τοίχωμα κυρίως σε μόρια πηκτικών

Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012

Μάλιστα παρουσία βαρέων μετάλλων το πηκτινικό κλάσμα των κυτταρικών τοιχωμάτων αλλάζει ιδιότητες με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ικανότητα δέσμευσης. Τα βαρέα μέταλλα εγκλωβίζονται στα πηκτινικά πολυμερή αντικαθιστώντας τα ιόντα ασβεστίου.

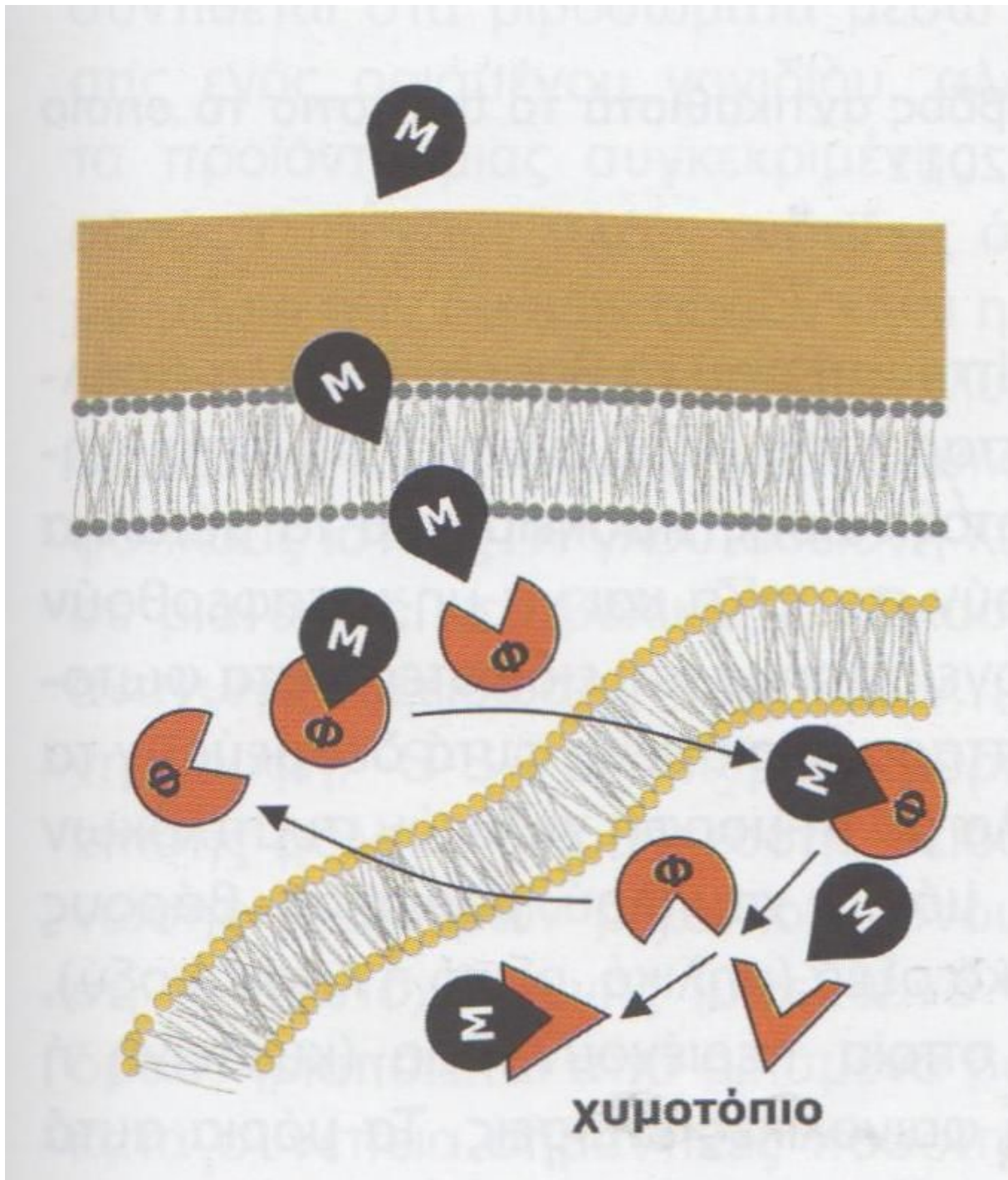


Σχήμα 18: Καθήλωση του μολύβδου στα κυτταρικά τοιχώματα

Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012

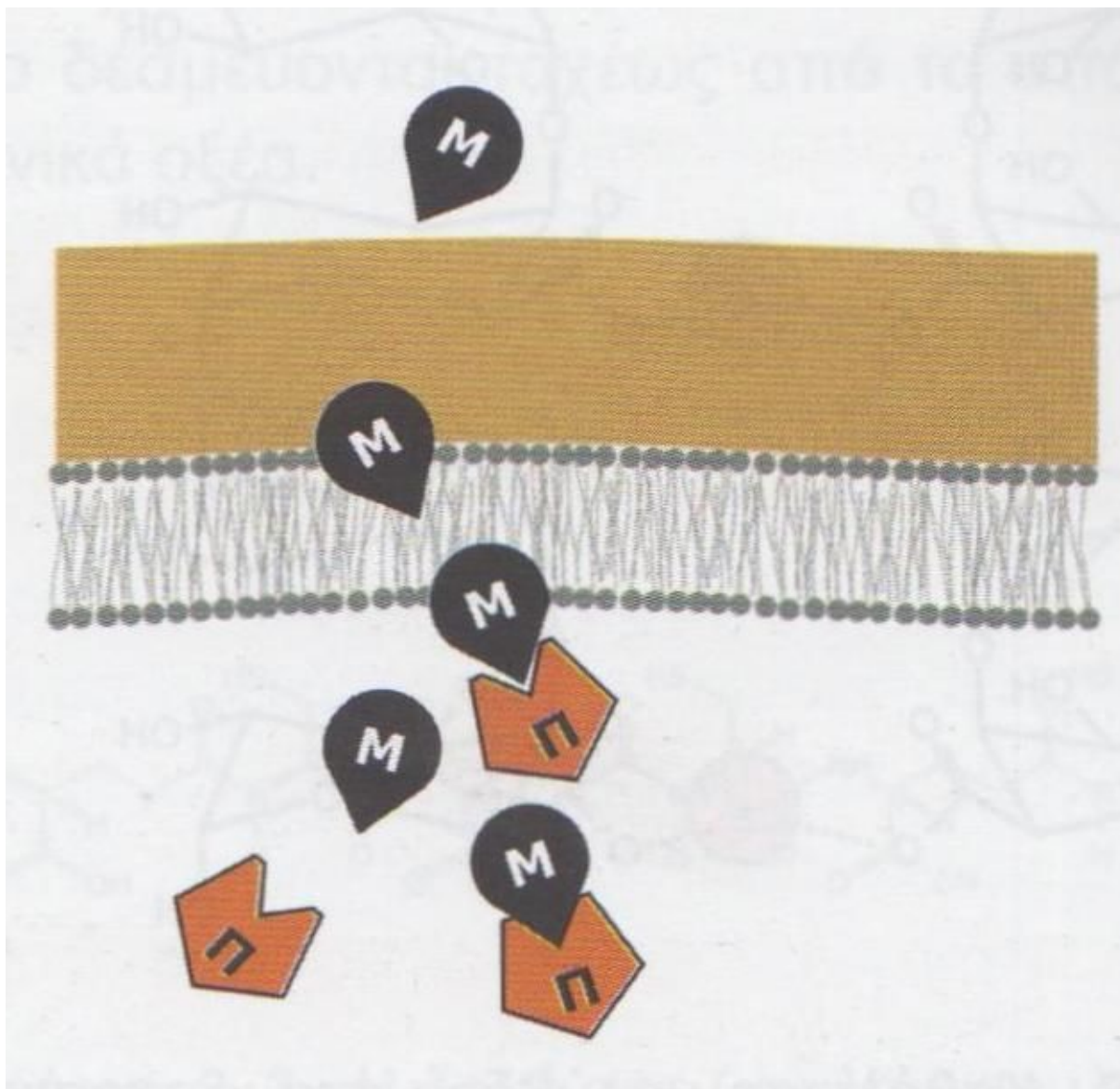
- Σε περίπτωση που τα βαρέα μέταλλα εισέλθουν στα κύτταρα της ρίζας ενεργοποιούνται μηχανισμοί αποτοξίνωσης προκειμένου τα μέταλλα να καθηλωθούν στη ρίζα και να μη μεταφερθούν προς το υπέργειο τμήμα και ειδικότερα στα φωτοσυνθετικά κύτταρα.

Ορισμένα φυτά δεσμεύουν τα βαρέα μέταλλα με τη μορφή χηλικών συμπλοκών με οργανικά μόρια χαμηλού μοριακού βάρους όπως οργανικά οξέα (μηλικό, οξικό ή κιτρικό οξύ), αμινοξέα τα οποία περιέχουν θείο (κυστεΐνη ή μεθειονίνη) ή φαινολικές ενώσεις. Τα μόρια αυτά συνήθως εντοπίζονται στο χυμοτόπιο, όπου και συσσωρεύονται. Σε ορισμένα είδη η δέσμευση των βαρέων μετάλλων με τη μορφή χηλικών συμπλοκών γίνεται από πεπτιδία πλούσια σε κυστεΐνη.



Σχήμα 19: Είσοδος και δέσμευση των μεταλλικών ιόντων υπό μορφή χηλικών συμπλόκων στο κυτταρόπλασμα, μεταφορά του συμπλόκου στο χυμοτόπιο και εκ νέου σχηματισμός συμπλόκου με οργανικά οξέα

Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012

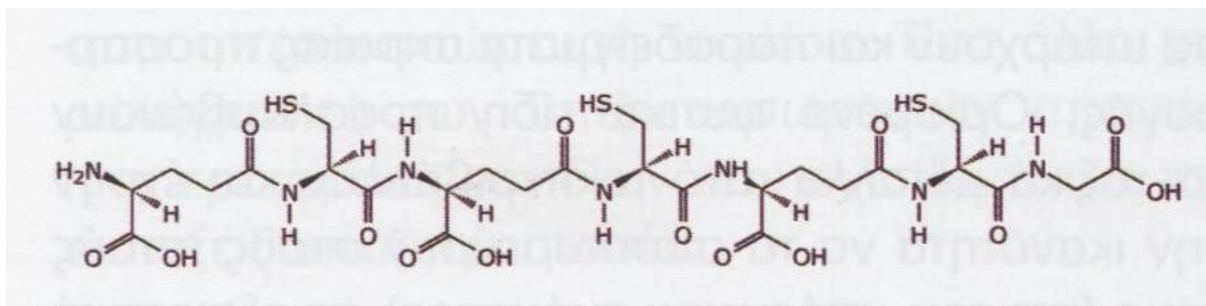


Σχήμα 20: Σύνδεση με πεπτίδια

Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012

Τα πεπτίδια αυτά συγκροτούν δύο ομάδες, την ομάδα των υψηλού Μ.Β. μεταλλοθειονεϊνών και την ομάδα των χαμηλού Μ.Β. φυτοχελατινών. Οι μεταλλοθειονεϊνες είναι πολυπεπτίδια που απαρτίζονται από 60 περίπου αμινοξέα και των οποίων τα αμινο- και καρβοξυ- άκρα είναι πλούσια σε κυστεΐνη. Συνήθως δύο μόρια κυστεΐνης βρίσκονται σε διπλανές θέσεις ή μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα άλλο αμινοξύ, σύμφωνα με τα πρότυπα -cys-amino acid-cys- ή -cys-cys-. Η κατανομή αυτή στην πολυπεπτιδική αλυσίδα υποδηλώνει το σχηματισμό συμπλοκών των μετάλλων με

τις σουλφυδρυλομάδες της κυστεΐνης. Οι φυτοχελατίνες είναι ασυνήθιστα πεπτιδία πλούσια σε θείο τα οποία παρουσιάζουν τον γενικό τύπο (γ-γλουταμινικόκυστεΐνη)_n-γλυκίνη, όπου n = 2-8.



Σχήμα 21: Η δομή της φυτοχελατίνης, (γ-γλουταμυλκυστεΐνυλ) 3-γλυκίνης

Πηγή: Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012

Η δομή του πεπτιδίου είναι ασυνήθιστη για πρωτεΐνες, επειδή ο δεσμός μεταξύ γλουταμινικού και κυστεΐνης σχηματίζεται στην πλευρική καρβοξυλική ομάδα (γ) του γλουταμινικού, και όχι στην (α) όπως στην περίπτωση των πρωτεϊνών. Λόγω της δομής αυτής οι φυτοχελατίνες, φαίνεται ότι δεν συντίθεται στα ριβοσώματα μέσω της μετάφρασης ενός ορισμένου γονιδίου, αλλά αποτελούν τα προϊόντα μιας συγκεκριμένης βιοσυνθετικής οδού. Υπάρχουν πλέον ενδείξεις ότι το πρόδρομο μόριο των ουσιών αυτών είναι η γλουταθειόνη (GSH, γ - γλουταμινικόκυστεΐνη-γλυκίνη), ο πλέον διαδεδομένος φορέας σουλφυδρυλομάδων στους φυτικούς ιστούς.

Η γλουταθειόνη λαμβάνει μέρος σε μια σειρά μεταβολικές διαδικασίες, μέσω της αναγωγής /οξειδωσης του θείου (-SH, ανηγμένη μορφή, -S-S-, οξειδωμένη μορφή) παίζοντας επίσης ρόλους αποθήκευσης θείου και αποτοξίνωσης ελεύθερων ριζών οξυγόνου. Η συνθετάση της φυτοχελατίνης (υπεύθυνο γονίδιο *Cadi*) δραστηριοποιείται από ορισμένα βαρέα μέταλλα, κατά συνέπεια σημαντικές ποσότητες φυτοχελατινών στους φυτικούς ιστούς ανιχνεύονται μόνο παρουσία τοξικών επιπέδων βαρέων μετάλλων ή μεταλλοειδών. Παρόλο ότι ο μηχανισμός αποτοξίνωσης μέσω των ουσιών αυτών δεν είναι πλήρως γνωστός, φαίνεται ότι δεσμεύουν τα μέταλλα στο κυτταρόπλασμα και στη συνέχεια τα μεταφέρουν στο χυμοτόπιο, όπου λόγω του όξινου pH τα απελευθερώνουν, επιτρέποντας στο πεπτιδίο να επιστρέψει εκ νέου στο

κυτταρόπλασμα. Τα ελεύθερα μεταλλικά ιόντα στο χυμοτόπιο δεσμεύονται ταχέως από τα υπάρχοντα οργανικά οξέα. Το φαινόμενο της υπερσυσσώρευσης βαρέων μετάλλων έχει απασχολήσει εδώ και δεκαετίες την επιστημονική κοινότητα και έχουν διατυπωθεί πολλές υποθέσεις για την ερμηνεία του. Εξ αυτών η «υπόθεση της άμυνας» φαίνεται να διαθέτει και τα περισσότερα επιχειρήματα. Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή η συσσώρευση βαρέων μετάλλων προσφέρει πρόσθετη προστασία έναντι φυτοφάγων εχθρών και παθογόνων μικροοργανισμών. Η υπόθεση αυτή υποστηρίζεται και από πειραματικά δεδομένα, παρά το γεγονός ότι παραμένουν πολλά ερωτηματικά. Π.χ. ορισμένα φυτοφάγα όχι μόνο καταναλώνουν ιστούς φυτικών ειδών που υπερσυσσωρεύουν βαρέα μέταλλα, αλλά χρησιμοποιούν την τοξικότητα ως όπλο έναντι των θηρευτών τους. Εξάλλου η αποτελεσματικότητα της άμυνας λόγω της τοξικότητας των βαρέων μετάλλων που συσσωρεύονται στους φυτικούς ιστούς είναι προθύστερη, αφού η δηλητηρίαση του φυτοφάγου επέρχεται μετά από την κατανάλωση των ιστών. Σύμφωνα με την περισσότερο πρόσφατη «υπόθεση του συνδυασμού», η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων, σε συνδυασμό με την παρουσία ορισμένων δευτερογενών μεταβολιτών ενισχύει την τοξικότητα ή /και απωθητικότητα των φυτικών ιστών. Ας σημειωθεί ότι η παρουσία βαρέων μετάλλων στο έδαφος συνήθως τροποποιεί την ποιοτική και ποσοτική σύσταση των φυτικών ιστών σε δευτερογενείς μεταβολίτες. Η υπερσυσσώρευση βαρέων μετάλλων προσδίδει επίσης ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε διαταραγμένα οικοσυστήματα. Ενώ σε φυσιολογικές συνθήκες σε μη διαταραγμένα οικοσυστήματα οι υπερσυσσωρευτές εμφανίζονται να μειονεκτούν λόγω των χαμηλών ρυθμών ανάπτυξης, η κατάσταση αντιστρέφεται σε συνθήκες υψηλής συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος (Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012).

4 Ρύποι

4.1 Ορισμός και ιδιότητες ρύπων

Ως ρύπος ορίζεται η ουσία που εκπέμπεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα ή προκύπτει από την αλληλεπίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας με το οικοσύστημα και επιφέρει άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις στην ευεξία και υγεία του ανθρώπου και όλων των έμβιων οργανισμών

(<http://lap.physics.auth.gr/atmdiasp/parousiaseis/chapter2.pdf>).

Ο «Επίσημος» ορισμός του ρύπου, σύμφωνα με οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 96/61 για την διαχείριση της ποιότητας του αέρα) είναι ο εξής κάθε ουσία η οποία διοχετεύεται αμέσως ή έμμεσα από τον άνθρωπο στον αέρα του περιβάλλοντος και ενδέχεται να έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ή/ και στο περιβάλλον στο σύνολό του (<http://lap.physics.auth.gr/pms/upload/diafaneies2a.pdf>).

Ταξινομούνται ανάλογα με την προέλευση, την κατάσταση και τη σύσταση τους. Με βάση την προέλευση διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Οι πρώτοι εκπέμπονται απευθείας από την πηγή ενώ οι άλλοι, σχηματίζονται έπειτα από χημικές αντιδράσεις μεταξύ των πρωτογενών και των συστατικών της ατμόσφαιρας. Οι ρύποι συναντώνται σε τρεις διαφορετικές μορφές ή καταστάσεις στην ατμόσφαιρα αέριοι, υγροί και στερεοί. Όσον αφορά τη χημική τους σύσταση κατατάσσονται, σε μη οργανικές ενώσεις οι οποίες περιέχουν C όπως το CO και το CO₂, σε οργανικές ενώσεις όπως το CH₄ και οι ανώτερες πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), σε ενώσεις που περιέχουν S, σε ενώσεις που περιέχουν N, σε σωματίδια ύλης, σε επικίνδυνες τοξικές ουσίες και τέλος σε φωτοχημικά οξειδωτικά. Οι πηγές που εκπέμπουν τους ρύπους στο περιβάλλον είναι είτε φυσικές είτε ανθρωπογενείς. Οι φυσικές παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων αλλά, δεν οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων, πλην ελάχιστων εξαιρέσεων. Σε αυτές περιλαμβάνονται (<http://lap.physics.auth.gr/atmdiasp/parousiaseis/chapter2.pdf>):

1. Αποσάθρωση από ανέμους (τέφρα, ίχνη από βαρέα μέταλλα)
2. Πυρκαγιές δασών (CO, CO₂, SO₂, NO_x, HC, καπνός)
3. Ηφαιστειακές εκρήξεις (σωματίδια, CO₂, SO₂, άλλα αέρια)
4. Βιογενείς εκπομπές (HC, CH₄, NH₃, γύρη, σόροι)
5. Θαλάσσια σταγονίδια – εξάτμιση (αλατούχα σωματίδια, ιχνοστοιχεία)

6. Μικροβιακές διεργασίες εδαφών H_2S , CH_4 , NH_3 , NO
7. Αποσύνθεση οργανικής ύλης H_2S , CH_4 , NH_3
8. Κεραυνοί NO .

Οι ανθρωπογενείς παράγουν μικρότερο ποσοστό των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων και οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στην ατμόσφαιρα. Οι ανθρωπογενείς πηγές είναι υπεύθυνες για την ανατροπή της φυσικής ισορροπίας και την αύξηση των συγκεντρώσεων των ρύπων στο περιβάλλον. Θα μπορούσαν να διακριθούν σε δύο ομάδες, η πρώτη αφορά τις αστικές και βιομηχανικές πηγές και η δεύτερη τις αγροτικές και γεωργικές πηγές. Στις αστικές & βιομηχανικές πηγές περιλαμβάνονται (<http://lap.physics.auth.gr/atmdiasp/parousiaseis/chapter2.pdf>) :

1. Παραγωγή ενέργειας (CO , CO_2 , SO_2 , NO_x , HC , $VOCs$, σωματίδια, τέφρα, βαρέα μέταλλα)
2. Βιομηχανικές μονάδες (πλήθος αερίων ρύπων, σωματίδια)
3. Μεταφορές CO , CO_2 , SO_2 , NO_x , HC , $VOCs$
4. Διαδικασίες καύσεων CO , CO_2 , SO_2 , NO_x , HC , $VOCs$, σωματίδια
5. Απορρίμματα CO , CO_2 , H_2S , NH_3 , CH_4 , σωματίδια
6. Κατασκευαστικά έργα CO , CO_2 , NO_x , HC , $VOCs$, σωματίδια, σκόνη.

Αντίστοιχα, στις γεωργικές και αγροτικές πηγές περιλαμβάνονται:

1. Εκπομπές σκόνης
2. Καύσεις για εκχέρσωση γης & καύση αγροτικών αποβλήτων (CO , CO_2 , SO_2 , HC , σωματίδια)
3. Εκπομπές εδαφών (Αζωτούχα οξείδια)
4. Ψεκασμοί με αεροπλάνα
5. Αποσύνθεση αποβλήτων (NH_3 , CH_4 , ατμοί).

4.2 Φυσικοχημικές ιδιότητες των ρύπων

Οι ρύποι, όπως κάθε ουσία στη φύση, χαρακτηρίζονται από κάποιες ιδιότητες. Οι κυριότερες φυσικοχημικές τους ιδιότητες είναι οι παρακάτω (http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_5.pdf):

- Διαλυτότητα

Είναι η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να διαλυθεί σε ορισμένη ποσότητα διαλύτη, σε ορισμένες συνθήκες. Τα ευδιάλυτα μεταφέρονται πιο εύκολα από τα επιφανειακά νερά.

- Πτητικότητα

Είναι η ικανότητα των μορίων να διαφεύγουν από την επιφάνεια του υγρού και να μεταβαίνουν στην αέρια φάση.

- Προσροφητικότητα

Εκφράζει την ικανότητα προσρόφησης μιας ουσίας από τα σωματίδια του εδάφους.

- Βαθμός αποσύνθεσης

Είναι ο χρόνος που απαιτείται για την αποσύνθεση μιας ουσίας σε άλλες ενώσεις.

- Συντελεστής κατανομής

Περιγράφει τον τρόπο κατανομής ενός ρύπου μεταξύ δύο μέσων, (στερεού–υγρού ή ατμών – υγρού).

- Πίεση των ατμών

Είναι η πίεση που ασκούν οι ατμοί ενός υγρού, όταν αυτό βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς του. Εκφράζεται με το νόμο του Raoult. Η σταθερά Henry (H) συνδέει τη μερική πίεση (P_m) μιας πτητικής ουσίας σε ισορροπία πάνω από διάλυμα, με τη συγκέντρωσή της (C) στο διάλυμα: $P_m = H \times C$ (νόμος Henry). Από αυτή τη σχέση προκύπτει ότι, η διαλυτότητα του αερίου που βρίσκεται εντός του υγρού (gr/L), υπό σταθερή θερμοκρασία, είναι ανάλογη με την πίεση του αερίου σε ισορροπία με το υγρό.

- Δείκτης βιοσυγκέντρωσης

Εκφράζει την ποσότητα μιας ουσίας που μπορεί να συσσωρευτεί στα έμβια όντα.

- Τοξικότητα

Είναι η πρόκληση δυσμενών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα, όταν εκτεθούν στους ρύπους. Η έκθεση γίνεται μέσω της αναπνοής, της διατροφής και της επιδερμίδας. Η τοξικότητα εκφράζεται με τη μέση θανατηφόρα δόση (LD_{50}), που είναι η δόση (mg/kg σωματικού βάρους) στην οποία επιβιώνει μόνο το 50% των οργανισμών που εκτίθενται σε αυτή για ορισμένο χρονικό διάστημα. Όταν η έκθεση γίνεται με την αναπνοή, η τοξικότητα εκφράζεται με τη μέση θανατηφόρο συγκέντρωση (LC_{50}), που είναι η συγκέντρωση του ρύπου σε ορισμένο όγκο αέρα που εισπνέεται, στην οποία επιβιώνει μόνο το 50% των οργανισμών

4.3 Είδη ρύπανσης

4.3.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ρύπων, δηλαδή κάθε είδους ουσιών, θορύβου ή ακτινοβολίας σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια τέτοια ώστε να είναι δυνατόν να προκληθούν αρνητικές συνέπειες στα έμβια όντα και τα οικοσυστήματα

<http://invenio.lib.auth.gr/record/135221/files/ptyxiaki.pdf?version=1>.

Ο όρος ατμοσφαιρική ρύπανση καλύπτει ευρύ φάσμα τοξικών αερίων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπονται στην τροπόσφαιρα του πλανήτη (0-15 km), καθώς και την ποικιλία φωτοχημικών δευτερογενών ρύπων και άλλων ατμοσφαιρικών φαινομένων που είναι αποτέλεσμα ανθρωπογενών εκπομπών. Η στρατόσφαιρα (15-50 km) είναι η περιοχή όπου επικρατεί η αραιή στοιβάδα του όζοντος, με κύριο σκοπό την προστασία της ζωής στον πλανήτη μας από τις υπεριώδεις ακτινοβολίες της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι κυριότερες πηγές ρύπανσης της ατμόσφαιρας είναι τα καυσαέρια των οχημάτων, οι εκπομπές από εργοστάσια και βιοτεχνίες (κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας και σκόνες από την κατεργασία υλικών), τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, οι κεντρικές θερμάνσεις των οικιών, η καύση απορριμμάτων και γεωργικών υπολειμμάτων, οι αέριες εκπομπές από τη γεωργία και τη κτηνοτροφία και οι φυσιολογικές εκπομπές φυτών και δένδρων. Οι κυριότεροι ρύποι είναι:

- το μονοξείδιο (CO)
- το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)
- το διοξείδιο του θείου (SO₂)
- τα οξείδια του αζώτου (NO_x)
- οι πτητικές οργανικές ουσίες (VOCs, Volatile Organic Compounds) και
- τα αιωρούμενα σωματίδια (SPM, Suspended Particulate Matter)
- πολυχλωριωμένες οργανικές ενώσεις (POPs)
- τροποσφαιρικό όζον (O₃).

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι εξαιρετικά τοξικό αέριο που παράγεται κατά 70-80% από τα καυσαέρια των οχημάτων. Οι εκπομπές του CO από οχήματα και βιομηχανίες υπολογίζονται σε περίπου 200 εκατομμύρια τόνους. Ανάλογες ποσότητες

CO παράγονται σε παγκόσμια κλίμακα από τις πυρκαγιές των δασών και την καύση βιομάζας.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το οποίο δεν είναι τοξικό αέριο αλλά με την υπερβολική συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σε παγκόσμια κλίμακα οι εκπομπές CO_2 από 14.520.000 τόνοι το 1971 διπλασιάστηκαν σε, περίπου, 30.000.000 τόνους το 2000 και υπάρχει αλματώδης αύξηση λόγω της μεγάλης ζήτησης στην παραγωγή ενέργειας από αναπτυσσόμενες χώρες. Πολυάριθμες έρευνες δείχνουν ότι τα αέρια του θερμοκηπίου παίζουν σημαντικό ρόλο στα οικοσυστήματα και στους κυριότερους κύκλους θρεπτικών υλικών και στοιχείων.

Το διοξείδιο του θείου (SO_2), είναι αποτέλεσμα της χρήσης ορυκτών καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, καθώς και των εκπομπών ηφαιστείων, αρκετά τοξικός αέριος ρύπος για το φυσικό περιβάλλον. Υπολογίζεται ότι οι εκπομπές SO_2 στη δεκαετία του '80 ήταν περίπου 100 εκατ. τόνοι. Με τη βελτίωση των καυσίμων (αποθείωση) οι εκπομπές SO_2 έχουν μειωθεί σημαντικά. Το SO_2 εκτός από τις επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου σε αστικές περιοχές με αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση, προκαλεί βλάβες στις επιφάνειες των κτιρίων και διαλυόμενο σε υδρατμούς δημιουργεί την όξινη βροχή (acid rain) που καταστρέφει δασικές εκτάσεις και προκαλεί την αύξηση οξύτητας λιμνών με επιπτώσεις στους υδρόβιους οργανισμούς.

Τα οξείδια του αζώτου (NO , NO_2 , NO_x) είναι συνήθως αέριοι ρύποι των καυσαερίων των οχημάτων κατά 40 με 50%, και το υπόλοιπο 50% παράγεται από διάφορες καύσεις σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι εκπομπές NO_x σε παγκόσμια κλίμακα υπολογίζονται σε 60 εκατ. τόνους κατά τα τέλη της δεκαετίας '80. Τα NO_x είναι ένας ακόμη παράγοντας για την παραγωγή όξινης βροχής, ενώ συμβάλλουν μαζί με το CO_2 και το μεθάνιο (CH_4) στην έξαρση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ειδικά για τα NO_x έχει συμφωνηθεί ειδική διεθνής συνθήκη για τον περιορισμό τους.

Τα αιωρούμενα σωματίδια (suspended particulates, particulate matter, PM) είναι ποικιλία μικρής διαμέτρου σωματιδίων (από 50 μέχρι 0,1 μm), προέρχονται από διάφορα υλικά και καύσεις (σκόνη χώματος, σκόνη ελαστικών, ανθρακούχα σωματίδια καύσεων, κλπ) που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα των αστικών και βιομηχανικών περιοχών. Το σύνολο των εκπομπών σωματιδίων υπολογίστηκε στους 60 εκατ. τόνους το 1980. Η πορώδης επιφάνεια των σωματιδίων έχει την ικανότητα προσρόφησης

βαρέων μετάλλων, καρκινογόνων ουσιών και πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ ή PAH's) με αποτέλεσμα να προκαλούν ασθένειες και κακοήθεις νεοπλασίες του αναπνευστικού συστήματος. Οι επιδημιολογικές έρευνες των τελευταίων δεκαετιών δείχνουν αυξημένη νοσηρότητα και θνησιμότητα σε αστικές περιοχές λόγω υψηλών συγκεντρώσεων αιωρούμενων εισπνεόμενων σωματιδίων (ιδιαίτερα τα μικρής διαμέτρου σωματίδια, PM₁₀, PM_{2.5}, με 10 και 2,5 μm).

Οι πτητικές οργανικές ουσίες (Volatile Organic Compounds, VOCs) χαρακτηρίζονται κυρίως οι πτητικές αρωματικές ενώσεις (όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο, ξυλόλια κλπ) που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Οι πηγές των VOCs είναι οι βιομηχανίες, τα καυσαέρια των οχημάτων, τα πρατήρια υγρών καυσίμων, χρώματα και οικοδομικά υλικά. Αν και το σύνολο των εκπομπών είναι δύσκολο να υπολογισθεί, οι ΗΠΑ εκπέμπουν , περίπου, 17.580.000 τόνους (1990), η Μ. Βρετανία 2.600.000 τόνους και η Γερμανία 2.545.000 τόνους. Οι VOCs μπορούν να παραμείνουν για 1-2 ημέρες στην ατμόσφαιρα διασπώμενες σε μεγάλη ποικιλία υδρογονανθράκων. Οι VOCs παίζουν σημαντικό ρόλο σε φωτοχημικές αντιδράσεις και συμβάλλουν στην περιβαλλοντική ρύπανση, λόγω της υψηλής τοξικής και καρκινογόνου δράσης, θεωρούνται επικίνδυνες για την υγεία του ανθρώπου. Οι πολυχλωριωμένες οργανικές ενώσεις (διοξίνες, διβενζοφουράνια, πολυχλωριωμένα διφαινύλια, PCBs) είναι ατμοσφαιρικοί αέριοι ρύποι που παράγονται από διάφορες καύσεις (καυσαέρια αυτοκινήτων, πυρκαγιές δασών, εκπομπές από υλικά μονώσεων), ή από τη χρήση φυτοφαρμάκων. Τα PCBs χρησιμοποιήθηκαν ως θερμομονωτικά και διηλεκτρικά υγρά σε μετασχηματιστές, πριν από την απαγόρευσή τους το 1985. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες σε παγκόσμια κλίμακα για τον περιορισμό των πολυχλωριωμένων ουσιών που δεν βιοδιασπώνται στο περιβάλλον και βιοσυσσωρεύονται μέσω της τροφικής αλυσίδας (φυτοφάρμακα, κλπ). Η συνθήκη της Στοκχόλμης για τα POPs (Persistent Organic Pollutants) έχει ως σκοπό τον περιορισμό των χρήσεων και εκπομπών πολυχλωριωμένων ουσιών (έχει δοθεί προτεραιότητα για τον περιορισμό ή απαγόρευση ορισμένων ουσιών: Aldrin, Dieldrin, Endrin, Chlordane, Heptachlor, Hexachlorobenzene, Mirex, Toxaphene, Polychlorinated Biphenyls, Dioxins, Furans) (http://www.chem.uoa.gr/courses/organiki_1/oikotoxikologia/oikt_x_K03.pdf).

Το τροποσφαιρικό όζον (O_3^1), έχει μικρή διάρκεια ζωής λόγω της μεγάλης ποσότητας σκόνης που αιωρείται στο παρεδάφειο τμήμα της τροπόσφαιρας. Η συγκέντρωση του εμφανίζει έντονες τροποποιήσεις που σχετίζονται με το χρόνο και τον τόπο. Δεν εκλύεται άμεσα στην ατμόσφαιρα, αλλά δημιουργείται από την αντίδραση των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου, παρουσία ηλιακού φωτός. Δεδομένης της παρουσίας ηλιακού φωτός, η αντίδραση αυτή λέγεται φωτοχημική και το προϊόν αυτής, αιθαλομίχλη. Οι υψηλές θερμοκρασίες "ενεργοποιούν" την αντίδραση και γι αυτό οι τιμές του όζοντος είναι υψηλότερες κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Το κιτρινοκαφέ χρώμα που χαρακτηρίζει το νέφος αυτό οφείλεται στο NO_2 . Σε χαμηλές συγκεντρώσεις το όζον αποτελεί κανονικά συστατικό της ατμόσφαιρας, αλλά στην περίπτωση σχηματισμού φωτοχημικού νέφους εμφανίζεται σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις. Εντούτοις, οι μέγιστες συγκεντρώσεις όζοντος δεν παρουσιάζονται σε απόσταση χαμηλότερη των 10 - 20 km από την πηγή των εκπομπών που το δημιουργούν. Αυτό αιτιολογείται από το ότι οι φωτοχημικές αντιδράσεις που το σχηματίζουν χρειάζονται περίπου τρεις ώρες για τους συνήθεις υδρογονάνθρακες και μία ώρα για τους πολύ αντιδραστικούς, ώστε να ολοκληρώσουν έναν φωτοχημικό κύκλο αντιδράσεων. Είναι αέριο άχρωμο, με έντονη οσμή και οξειδωτική δράση. Η χρονική κατανομή του ρύπου παρουσιάζει μέγιστο κατά τις πρώτες μεταμεσημβρινές ώρες. Το βράδυ και την ανατολή, αντίθετα, παρουσιάζονται οι χαμηλότερες

¹ Το όζον όταν βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (στρατόσφαιρα), σε ύψος δηλαδή 15 – 40 km, σχηματίζει στοιβάδα που απορροφά ένα σημαντικό μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας. Η μέγιστη συγκέντρωση αυτής, βρίσκεται σε ύψος 25 km. Στην περιοχή αυτή βρίσκεται πρακτικά το 90% του όζοντος της ατμόσφαιρας, ενώ το υπόλοιπο 10% βρίσκεται σε ύψος μέσα στην τροπόσφαιρα. Το όζον παράγεται από τη φωτολυτική δράση ποσότητας της Γ-υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας (180 nm – 240 nm), η οποία διασπά το μοριακό οξυγόνο τη στιγμή που το ίδιο το παραγόμενο όζον απορροφά έντονα την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία τόσο την Γ όσο και τη Β (250 nm – 320 nm) περιοχή του υπεριώδους ηλιακού φάσματος. Η τελευταία συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας έχει τη δυνατότητα να διεισδύει στο έδαφος προκαλώντας έντονη βιολογική δράση με σοβαρές συνέπειες στη βιόσφαιρα. Παράλληλα, το όζον μπορεί να απορροφά και ορισμένες ακτινοβολίες, οι οποίες βοηθούν στην ψύξη της γης, ακτινοβολώντας προς το διάστημα (9.6 μm). Εκτός από το όζον που δημιουργείται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, μικροποσότητες όζοντος (τροποσφαιρικό όζον) σχηματίζονται και στο κατώτερο στρώμα μέσα από διάφορες άμεσες και έμμεσες ανθρωπογενείς δραστηριότητες (<http://invenio.lib.auth.gr/record/135221/files/ptyxiaki.pdf?version=1>)

συγκεντρώσεις κυρίως λόγω της απουσίας φωτός, και συνεπώς αδυναμίας παραγωγής όζοντος. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται λοιπόν, την θερμή περίοδο του έτους όπου τόσο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και η διάρκεια της ημέρας είναι μεγαλύτερες (<http://invenio.lib.auth.gr/record/135221/files/ptyxiaki.pdf?version=1>) .

4.3.2 Ρύπανση εδάφους

Το επιφανειακό έδαφος είναι ένα σύμπλοκο μίγμα ανόργανων υλικών, οργανικής ύλης που αποσυντίθεται ή σχηματίζει σύμπλοκα χουμικά οξέα, νερού, αέρα και ζωντανών μικροοργανισμών. Είναι ένα ανοικτό περιβαλλοντικό τμήμα που βρίσκεται σε συνεχή ανταλλαγή με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη βιόσφαιρα. Τα εδάφη διαμορφώνονται σε στιβάδες που καλούνται ορίζοντες (horizons), και οι οποίοι έχουν διαφορετική υφή και σύσταση. Ο 0-ορίζοντας είναι το ανώτατο στρώμα του εδάφους στο οποίο βρίσκονται τα φυτά, τα οργανικά υπολείμματα, τα πεσμένα φύλλα δένδρων και μερικώς η αποσυντιθέμενη οργανική ύλη. Ο A-ορίζοντας είναι τα πρώτα 30-50 εκατοστά του μέτρου εδάφους (topsoil) με χουμικά οξέα, μερικά ανόργανα ορυκτά, ζωντανούς οργανισμούς, οργανική ύλη, με τη μεγαλύτερη βιολογική δραστηριότητα από όλες τις άλλες στιβάδες. Ο E-ορίζοντας είναι η ζώνη που διαχωρίζει το επιφανειακό έδαφος από το υπέδαφος. Η διαλυμένη ή αιωρούμενη ύλη κινείται προς τη στιβάδα αυτή και γι' αυτό καλείται η ζώνη αποπλυμάτων (leaching zone). Ο B-ορίζοντας είναι το υπέδαφος είναι ορίζοντας εμπλουτισμού όπου συγκεντρώνονται τα χουμικά οξέα, ο άργιλος (πηλός), σίδηρος και αργίλιο μετά το στράγγισμα από τις επάνω ζώνες. Ο C-ορίζοντας: ελαφρά διαβρωμένο βραχώδες έδαφος που περιέχει τα ορυκτά συστατικά του κυρίου εδάφους. Τέλος, ο R είναι το βραχώδες έδαφος (bedrock) που δεν επηρεάζεται από διάβρωση.

Η σύσταση των εδαφών είναι αποτέλεσμα του μίγματος των ανόργανων και οργανικών υλικών, του μεγέθους των σωματιδίων, της οργανικής ύλης που ενσωματώθηκε με τη βιοαποικοδόμηση, του αέρα και του νερού που έχει εγκλωβισθεί στο έδαφος. Τα εδάφη συνήθως αποτελούνται από μίγματα αργίλου, λάσπης (ιλύς) και άμμου και η υφή τους χαρακτηρίζεται από τα μεγέθη των σωματιδίων των τριών αυτών υλικών. Ένα από τα πλέον παραγωγικά εδάφη είναι το παχύ αμμοαργιλώδες

χώμα (loam) που αποτελείται από 40% λάσπη, 40% άμμο και 20% άργιλο. Τα κυριότερα στοιχεία στο επιφανειακό έδαφος είναι: το οξυγόνο (υπό μορφή οξειδίων), το πυρίτιο, το αργίλιο, ο σίδηρος, το ασβέστιο, το νάτριο, το κάλιο και το μαγνήσιο. Μερικά από τα κλασικά οξείδια του εδάφους είναι: SiO_2 , Fe_3O_4 , MnO_2 , F_2O_3 , και τα ορυκτά KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaO} \cdot 3(\text{AlFe})_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, CaCO_3 , $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$. Τα εδάφη εκτός από τη σύσταση χαρακτηρίζονται από την υφή, το πορώδες, την υγροσκοπικότητα, την ειδική θερμότητα², τη θερμική αγωγιμότητα, την απορροφητική ικανότητα, την οξύτητα και τις βιολογικές τους ιδιότητες. Η γένεση των εδαφών συντελείται με τριών ειδών διεργασίες, όπως η αποσύνθεση βράχων, η αύξηση της οργανικής ύλης με την αποσυνθετική δράση βακτηρίων και η μετανάστευση ανόργανων αλάτων στα διάφορα τμήματα με την δράση του νερού. Τα εδάφη διαχωρίζονται κατά τους γεωλόγους σε ανεξέλικτα (παρθένα), ανόργανα, ολίγον εξελιγμένα (ορεθινά), ασβεστόμορφα (ασβεστολιθικά), εδάφη εξελιγμένα με αλκαλικό χούμο (φαιά), εδάφη εξελιγμένα με όξινο χούμο (ποτζόλ), σιδηρούχα εδάφη θερμού κλίματος, εδάφη λατερικά, εδάφη αλόμορφα (επίδραση άλατος), εδάφη υδρόμορφα (κορεσμός νερού), και τύρφαι (όριο εδάφους- φυτικού σχηματισμού). Το νερό παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των εδαφών και στη μεταφορά θρεπτικών υλικών που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών. Τα εδάφη με μεγαλύτερο ποσοστό οργανικής ύλης συγκρατούν περισσότερο νερό. Επίσης, υπάρχει αρκετή αλληλεπίδραση νερού με τον άργιλο του εδάφους. Όταν όμως το νερό εγκλωβισθεί και ξεπεράσει ορισμένα επίπεδα οι μικροοργανισμοί διάσπασης της οργανικής ύλης ενεργοποιούνται, το οξυγόνο χρησιμοποιείται ταχύτατα για την αναπνοή τους και η συνεκτικότητα των κολλοειδών σωματιδίων που συγκρατεί το έδαφος μειώνεται. Το έδαφος διασπάται, το οξυγόνο που απαιτούν οι ρίζες των φυτών μειώνεται και αρχίζει η αποσύνθεση της φυτικής ύλης. Η περίσσεια νερού στο έδαφος έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση διαλυτών αλάτων σιδήρου και μαγγανίου που σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι τοξικά στα φυτά. Η ανταλλαγή κατιόντων είναι μία από τις σημαντικές χημικές δράσεις των εδαφών και ιζημάτων. Η δράση αυτή των ιζημάτων ή εδαφών εκφράζεται με τον όρο ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC, cation-exchange capacity), που εκφράζεται με την ποσότητα μονοσθενών κατιόντων που

² Η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας για την ανύψωση της θερμοκρασίας κατά 1°C συντελεστής ανάπτυξης φυτών

μπορούν να ανταλλάγουν ανά 100 γραμμάρια εδάφους και εξαρτάται από το pH ($-\log aH^+$) και το pE ($-\log ae^-$) οξειδοαναγωγικό δυναμικό. Τα ορυκτά και η οργανική ύλη των εδαφών ανταλλάσσουν κατιόντα. Τα αργιλικά ορυκτά και η οργανική ύλη, όπως τα χουμικά οξέα, έχουν μεγάλη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Η ανταλλαγή αυτή στα εδάφη διευκολύνει την παραλαβή από τα φυτά του νατρίου, καλίου, μαγνησίου και ασβεστίου με αντίστοιχη εκπομπή κατιόντων υδρογόνου, που καθιστά τα εδάφη όξινα. Συγχρόνως, το έδαφος λειτουργεί ως ρυθμιστικός παράγοντας που δεν επιτρέπει μεταβολές στο pH. Οι όξινες κατακρημνίσεις παίζουν κάποιο ρόλο ρυθμιστή στα αλκαλικά εδάφη, αλλά η υπερβολική οξίνιση σε γρανιτώδη εδάφη καταστρέφει το εδαφικό οικοσύστημα. Το έδαφος είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες στους γεωχημικούς κύκλους του άνθρακα, του αζώτου, του φωσφόρου, του θείου και του νερού. Συγχρόνως όλα τα μακροθρεπτικά συστατικά (macronutrients) και ορισμένα μέταλλα αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο στην ανάπτυξη της χλωρίδας και των χερσαίων ζώων. Τα μικροθρεπτικά συστατικά (micronutrients), όπως τα μέταλλα: ο σίδηρος, το βόριο, ο χαλκός, το μαγγάνιο, το μολυβδαίνιο, το μαγγάνιο, ο ψευδάργυρος, το νάτριο και το βανάδιο, είναι απαραίτητα σε πολύ μικρές ποσότητες για τη φωτοσύνθεση και σε ενζυμικές λειτουργίες βιολογικών οργανισμών. Υψηλότερες συγκεντρώσεις των μετάλλων αυτών είναι τοξικές για τα έμβια όντα που ζουν στο έδαφος.

Ορισμένες από τις βασικές αιτίες ρύπανσης των εδαφών είναι:

- τα λιπάσματα και φυτοφάρμακα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων,
- τα υγρά και στερεά απόβλητα των κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων,
- τα υγρά και στερεά απόβλητα των χημικών βιομηχανιών,
- τα αστικά και νοσοκομειακά απόβλητα που διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής και αποτέφρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες,
- η ρύπανση από την εκμετάλλευση του πετρελαίου, λιπαντικών υλών και ελαστικών τροχοφόρων,
- η ρύπανση από απόβλητα μεταλλευτικών και λατομικών επιχειρήσεων,
- η ρύπανση από βαρέα μέταλλα που προέρχονται από χημικές βιομηχανίες, καύση στερεών και υγρών ορυκτών καυσίμων και άλλες διεργασίες εμπλουτισμού ή καθαρισμού μεταλλευμάτων.

Το έδαφος δέχεται όλες αυτές τις τοξικές και επικίνδυνες χημικές ουσίες και παρασκευάσματα ή απόβλητα, τα οποία ανάλογα με τη γεωμορφολογία του εδάφους και άλλες εξωγενείς συνθήκες ρυπαίνουν τοπικά το έδαφος ή διασκορπίζονται σε άλλα περιβαλλοντικά διαμερίσματα (π.χ. υπόγεια νερά) ή εκπλύνονται στα διάφορα υδάτινα συστήματα. Τα βαρέα μέταλλα είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας ρύπανσης των εδαφών. Αν και οι χαμηλές συγκεντρώσεις μετάλλων μπορούν να γίνουν αποδεκτές από ορισμένα φυτά χωρίς να προκαλούν τοξικές βλάβες, οι υψηλές συγκεντρώσεις έχουν αρνητικές επιδράσεις στην ενζυμική λειτουργία σε χερσαία ζώα και τους γαιοσκώληκες, νηματώδεις και μικροοργανισμούς των εδαφών. Σημαντικό πρόβλημα ρύπανσης εδαφών αποτελούν το πετρέλαιο, τα προϊόντα διύλισης, τα λιπαντικά και οι διάφοροι διαλύτες που είναι προϊόντα της χημικής βιομηχανίας πετρελαίου. Η ρύπανση από πετρέλαιο και τα προϊόντα του προκύπτει κατά τις χερσαίες μεταφορές, τις διαρροές από εργοστάσια, τις βιοτεχνίες και τις αποθήκες τους, τις παλαιές εγκαταστάσεις διυλιστηρίων, τα πρατήρια υγρών καυσίμων και τα διάφορα ατυχήματα σε εγκαταστάσεις άντλησης πετρελαίου. Η τοξικότητα του πετρελαίου λόγω της ύπαρξης αδιάλυτων υδρογονανθράκων, πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ) και πτητικών αρωματικών ενώσεων καθιστά τη ρύπανση επικίνδυνη για τους χερσαίους οργανισμούς, τη χλωρίδα και τους μικροοργανισμούς του εδάφους (Βαλαβανίδης ΑΘ., 2008).

4.3.3 Ρύπανση υδάτων

Το νερό και τα υδάτινα συστήματα στον πλανήτη Γη αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή ζωντανών οργανισμών και ο ρόλος τους είναι ακρογωνιαίος για την βιοποικιλότητα, την διατήρηση ευαίσθητων οικοσυστημάτων και των βιογεωλογικών κύκλων. Υπολογίσθηκε ότι η ποσότητα νερού (υγρό, στερεό και αέριο) στην επιφάνεια του πλανήτη είναι περίπου 14.000×10^{21} Kg. Τα υδάτινα συστήματα εκφράζονται συνδέονται και αλληλεξαρτώνται από τον υδρολογικό κύκλο του νερού, που περιλαμβάνει αρκετές χωριστές υδάτινες μάζες που υποδιαιρούνται σε μικρότερες ανάλογα με τα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των νερών είναι η οξύτητα και αλκαλικότητα (pH) λόγω της διάλυσης αλάτων διαφόρων οξέων και βάσεων, και συμπλόκων μετάλλων και μεταλλοειδών. Στη συμπλοκοποίηση λαμβάνουν μέρος και

οργανικές ουσίες με πολύπλοκη δομή, όπως χουμικά οξέα, φουλβικά οξέα, κ.λπ. Οι κυριότερες μορφές ρύπανσης των υδατίνων συστημάτων είναι αποτέλεσμα των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων, των βαρέων μετάλλων και μεταλλοειδών, των αλογονωμένων και πολυαλογονωμένων ουσιών, των φυτοφαρμάκων και των λιπασμάτων, της νιτρορύπανσης, των πετρελαιοειδών, των ραδιενεργών υλικών, των ουσιών που δρουν ως ενδοκρινικοί διαταρακτές, των αποβλήτων μεταλλευτικών εκμεταλλεύσεων και μεγάλο αριθμό επικίνδυνων υλικών που παρασέρνονται από τα ποτάμια και τους χείμαρρους καταλήγοντας στη θάλασσα. Οι αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες δεν είναι βιοδιασπάσιμοι, ενώ οι κανονικοί υδρογονάνθρακες αποικοδομούνται σχετικά εύκολα με οξειδωτικές διεργασίες και βακτηριακές επεμβάσεις στα υδάτινα συστήματα. Οι αλογονωμένες οργανικές ενώσεις, περιέχουν χλώριο, βρώμιο, φθόριο ή ιώδιο σε αλειφατικό ή σε αρωματικό ανθρακικό σκελετό. Υπάρχουν και φυσικές αλογονωμένες οργανικές ενώσεις μικρού μοριακού βάρους στα νερά, στο έδαφος και στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα της χλωρίωσης ή βρωμίωσης σε ερυθρά φύκια και σε φυτά με βιογενείς αντιδράσεις ή από φυσικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα. Η πλειοψηφία των αλογονωμένων και πολυαλογονωμένων ουσιών είναι τοξικοί ρύποι ανθρωπογενών πηγών ρύπανσης και βρίσκονται σε όλα τα περιβαλλοντικά διαμερίσματα. Η βιομηχανική παρασκευή αλογονωμένων διαλυτών συνεχίζεται ακόμη και σήμερα λόγω της χρησιμότητάς τους σε βιομηχανικές, βιοτεχνικές και εργαστηριακές διεργασίες. Οι πιο σημαντικοί χλωριωμένοι διαλύτες είναι το χλωροφόρμιο (CHCl_3), το διχλωροαιθάνιο (CH_2CHCl_2) και ο τετραχλωράνθρακας (CCl_4). Για το ξηρό καθάρισμα χρησιμοποιήθηκαν διαλύτες, όπως το τριχλωροαιθάνιο (CH_2CHCl_2) και το τριχλωροαιθυλένιο (ClCH=CCl_2), ενώ για την παρασκευή πολυμερών (πολυβινυλοχλωρίδιο, PVC) χρησιμοποιήθηκε το μονομερές βινυλοχλωρίδιο ($\text{CH}_2=\text{CCl}_2$).

Στο περιβάλλον έχουν ανιχνευθεί άνω των 40 στοιχείων που ανήκουν στην κατηγορία των μετάλλων. Ορισμένα από αυτά είναι χρήσιμα για την ανάπτυξη των βιολογικών οργανισμών. Το ασβέστιο, το μαγνήσιο, ο σίδηρος, το κάλιο και το νάτριο είναι απαραίτητα για την διατήρηση της ζωής, αλλά σε αυξημένες συγκεντρώσεις καθίστανται τοξικά. Ιχνοστοιχεία όπως το χρώμιο, το κοβάλτιο, ο χαλκός, το μαγγάνιο, το νικέλιο, το σελήνιο και ο ψευδάργυρος αποτελούν το ενεργό κέντρο σημαντικών

ενζύμων σε μεταβολικές διεργασίες (φωτοσύνθεση, αντιοξειδωτική δράση, κλπ). Άλλα μέταλλα όμως, όπως ο μόλυβδος, το κάδμιο και ο υδράργυρος είναι τοξικά στους βιολογικούς ιστούς σε οποιαδήποτε συγκέντρωση. Η κυριότερη πηγή μετάλλων στο περιβάλλον είναι το έδαφος της γης όπου βρίσκονται όλα σχεδόν τα μέταλλα και τα οποία με διάφορους γεωχημικούς κύκλους και ανθρωπογενείς επεμβάσεις ανακατανέμονται στα διάφορα περιβαλλοντικά διαμερίσματα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τοξικότητα των μετάλλων σε σχέση με τους βιολογικούς οργανισμούς είναι αρκετοί και αφορούν τις μεταβολικές διεργασίες, την απέκκριση, τη συμπλοκοποίηση και την εξουδετέρωση, καθώς και τους μηχανισμούς ελευθέρων ριζών που παίζουν καθοριστικό ρόλο στις βλάβες των βασικών βιομορίων. Η θερμοκρασία επηρεάζει το μεταβολισμό και την τοξικότητα των ξеноβιοτικών ουσιών και ιδιαίτερα των μετάλλων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την τοξικότητα μετάλλων σε υδρόβια ασπόνδυλα, αλλά τα αποτελέσματα διαφέρουν ανάλογα με το είδος του οργανισμού και του μετάλλου.

Το φως είναι επίσης ένας άλλος παράγοντας, γιατί ορισμένα ένζυμα που επιδρούν κατασταλτικά στην τοξικότητα των μετάλλων επιδεικνύουν αυξομειώσεις μεταξύ των φάσεων φωτός-σκότους στους οργανισμούς. Η μεγαλύτερη δραστηριότητα του μικροσωμικού κυτοχρώματος P450, που είναι το κυριότερο ένζυμο που συμμετέχει σε μηχανισμούς καταστολής της τοξικότητας ξеноβιοτικών, ξεκινά στην σκοτεινή φάση του κύκλου των έμβιων όντων.

Το pH είναι σημαντικός αβιοτικός παράγοντας που προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό την πρόσληψη μετάλλων από τα φυτά σε σχέση με το έδαφος, επηρεάζει τη μετακίνηση των μεταλλικών αλάτων σε εδαφικά στρώματα και στα ιζήματα. Οι όξινες εναποθέσεις επιταχύνουν την τοξική δράση των μετάλλων στα νερά και ορισμένες φορές μετατρέπουν τα μέταλλα και ενώσεις τους σε περισσότερο τοξικές δομές.

Η τοξικότητα των μετάλλων αυξάνεται, όπως είναι φυσικό με την αύξηση των συγκεντρώσεων στο περιβάλλον και στους βιολογικούς ιστούς, τα μίγματα μετάλλων παρουσιάζουν συνεργική δράση και ορισμένα μέταλλα μπορούν να εκτοπίσουν άλλα χρήσιμα μέταλλα για τη λειτουργία των οργανισμών. Τα βαρέα μέταλλα παρουσιάζουν καρκινογόνο δράση μέσω οξειδωτικών μηχανισμών στο κυτταρικό DNA. Στα υδάτινα συστήματα τα μέταλλα βρίσκονται υπό μορφή διαλυτών αλάτων ή αιωρούμενων

σωματιδίων και με το χρόνο συγκεντρώνονται στα ιζήματα ποταμών, λιμνών και παράκτιων περιοχών. Ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, γεωθερμικές διεργασίες, έκπλυση επιφανειακών εδαφών, διάβρωση εδαφών και διάσπαση ορυκτών εμπλουτίζουν στα νερά σε βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή. Σημαντικές συγκεντρώσεις μετάλλων έχουν μετρηθεί σε θαλάσσια, ποτάμια και λιμναία ιζήματα. Η ρύπανση του περιβάλλοντος από μέταλλα και τις ενώσεις τους δεν περιορίζονται μόνο στις περιοχές με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, αλλά όπως και με άλλους ρύπους μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις. Τοξικά μέταλλα έχουν ανιχνευθεί σε οικοσυστήματα της Ανταρκτικής. Τα περισσότερα των μετάλλων έχουν τοξικές παρενέργειες σε υψηλές συγκεντρώσεις, αλλά και μερικά από αυτά που δεν παίζουν ρόλο στη φυσιολογία φυτών και ζώων παρουσιάζουν τοξικές συνέπειες σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Οι κυριότερες δράσεις των μετάλλων είναι νεφροτοξικές (Pb, Hg, As, Cd), νευροτοξικές (ιδιαίτερα των οργανικών ενώσεων Hg, Pb, Sn) και καρκινογόνες (As, Cr, Ni). Η καρκινογόνος δράση των μετάλλων έχει μελετηθεί με μεγάλο αριθμό τοξικολογικών ερευνών και έχει βρεθεί ότι ο μηχανισμός της άμεσης προσθήκης σε κυτταρικό DNA (που προκαλεί μεταλλάξεις) είναι δευτερεύουσας σημασίας, σε σχέση με τη δράση μέσω οξειδωτικών βλαβών στο DNA που προκαλούνται από την παραγωγή ελευθέρων ριζών. Η ρύπανση από πετρέλαιο και προϊόντα διύλισης είναι ιδιαίτερα σημαντική στις θάλασσες και τους ωκεανούς. Λόγω της έκπλυσης και μεταφοράς πετρελαιοειδών όλοι οι υδάτινοι πόροι δέχονται αρκετές ποσότητες αργού και διυλισμένου πετρελαίου από διαρροές και απόβλητα εγκαταστάσεων διύλισης, επεξεργασίας και διανομής πετρελαιοειδών. Το πετρέλαιο που είναι κυρίως μίγμα άκυκλων και κυκλικών υδρογονανθράκων, περιέχει επίσης αρκετές αρωματικές ενώσεις (βενζόλιο, τολουόλιο, ξυλόλια, ναφθαλένιο) και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (ΠΑΥ, polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH), πολλοί εκ των οποίων είναι καρκινογόνες ουσίες. Σημαντικό μέρος του πετρελαίου στο περιβάλλον με τον καιρό εξατμίζεται, διασκορπίζεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες σε μικρά συσσωματώματα που καταβυθίζονται στα ιζήματα, ενώ συγχρόνως υπόκειται σε φωτοχημική διάσπαση και μικροβιακή αποσύνθεση. Η τοξικότητα του πετρελαίου, ανάλογα με τη συγκέντρωση, την οδό έκθεσης και τις φυσικές συνθήκες, μπορεί να είναι θανατηφόρος σε πτηνά, υδρόβιους οργανισμούς και μικροοργανισμούς,

μεσαιίας τοξικότητας σε άλλους οργανισμούς ή και χρόνια λόγω της καρκινογόνου δράση των ΠΑΥ (Βαλαβανίδης ΑΘ., 2008).

4.4 Τρόποι παρακολούθησης των ρύπων

Οι συγκεντρώσεις των ρύπων στην ατμόσφαιρα, στο έδαφος και στο νερό θα πρέπει να παρακολουθούνται σε τακτικά χρονικά διαστήματα, η συχνότητα των οποίων είναι αντικείμενο περαιτέρω μελέτης. Μερικοί από τους τρόπους παρακολούθησης των συγκεντρώσεων των ρύπων στο περιβάλλον είναι:

- Τα συστήματα GIS όπως το SMAQ, με τα οποία σε πραγματικό χρόνο, υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης της συγκέντρωσης και της διασποράς των ρύπων στο περιβάλλον (<http://www.certh.gr/dat/C304E804/file.pdf>).
- Οι εδαφικές αναλύσεις και αναλύσεις νερού, που παρέχουν την δυνατότητα παρακολούθησης των συγκεντρώσεων των ρύπων.
- Τα φυτά – βιοδείκτες
- Η βιοπαρακολούθηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού αποτελούν τα μελίσσια στο αεροδρόμιο του Αμβούργου στη Γερμανία. Τα μελίσσια είναι τοποθετημένα περιμετρικά του αεροδρομίου κοντά στους διαδρόμους προσαπογείωσης. Τα εγκατέστησε η Airbus για να μετρήσει τα επίπεδα μόλυνσης. Οι μέλισσες πετώντας σε μια περιοχή 12 τετραγωνικών χιλιομέτρων, συλλέγουν νέκταρ από όλο το αεροδρόμιο. Στη συνέχεια το μέλι εξετάζεται στο εργαστήριο για να ελεγχθεί το επίπεδο της μόλυνσης.

<http://www.euronews.com/2014/07/31/buzz-and-roar-airport-bees-used-to-monitor-aircraft-pollution/>.

5 Το αεροδρόμιο σαν βιομηχανική μονάδα

Τα αεροδρόμια και οι αεροπορικές μεταφορές έχουν προφανείς αρνητικές επιρροές στο περιβάλλον, τόσο σε τοπικό επίπεδο στην περιοχή του αεροδρομίου, όσο και σε συνολικό επίπεδο για τον πλανήτη και την ανθρωπότητα. Τα άτομα και οι κοινωνίες έχουν πλέον υψηλό βαθμό ευαισθητοποίησης για το περιβάλλον, με συνέπεια να δυσχεραίνεται η κατασκευή νέων αεροδρομίων ή η επέκταση υπαρχόντων και να τίθενται όλο και περισσότεροι περιορισμοί (ιδίως κατά τη νύκτα) στη λειτουργία των αεροπορικών μεταφορών. Η ευαισθητοποίηση για το περιβάλλον, που ποικίλλει από χώρα σε χώρα και από περιοχή σε περιοχή, ανατρέπει το σχεδιασμό πολλών αεροδρομίων, που είχε στο παρελθόν ως επίκεντρο τη βελτιστοποίηση της μεταφορικής ικανότητας του αεροδρομίου, τη μεγιστοποίηση του αριθμού κινήσεων αεροσκαφών στο πεδίο ελιγμών, τη διαρκή αύξηση του αριθμού των εξυπηρετούμενων επιβατών. Θα πρέπει πλέον να αναζητείται ένας διαρκής συμβιβασμός και εξισορρόπηση ανάμεσα στη βελτιστοποίηση του οικονομικού και τεχνικού αποτελέσματος και την ελαχιστοποίηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Έτσι ο τεχνικός σχεδιασμός των εγκαταστάσεων ενός αεροδρομίου πρέπει να συνδυάζεται με έλεγχο και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και σχεδιασμό των χρήσεων γης γύρω από το αεροδρόμιο.

Ως συνέπεια της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης αναδεικνύεται πλέον στο σχεδιασμό των αεροδρομίων και το κριτήριο της περιβαλλοντικής ικανότητας, που νοείται ως η ικανότητα του περιβάλλοντος να ανεχθεί και να αποδεχθεί τις συνέπειες των δραστηριοτήτων ενός αεροδρομίου. Έτσι η στόχευση της οικονομικής βελτιστοποίησης πρέπει να ευθυγραμμισθεί με περιβαλλοντικούς στόχους και κριτήρια και να τεθούν όρια στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συνειδητοποιείται πλέον ότι πρέπει να τεθούν όρια στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Η περιορισμένη περιβαλλοντική ικανότητα των αεροδρομίων συνεπάγεται περιορισμούς στην αεροπορική δραστηριότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις έχει επιλεγεί ως μέσο αποτροπής περαιτέρω αύξησης του αεροπορικού έργου (ιδίως ορισμένες ώρες) και η επιβολή περιβαλλοντικού τέλους για όσους ξεπερνούν κάποια επίπεδα περιβαλλοντικής υποβάθμισης.

Γενικά, τα αεροδρόμια και οι αεροπορικές μεταφορές προκαλούν τις παρακάτω αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον (Προφυλλίδης Β., 2010):

- θόρυβος που προκαλείται κατά την προσαπογείωση, την πορεία, τις δοκιμές καθώς τη λειτουργία των κινητήρων των αεροσκαφών. Επίσης, προκαλείται από την οδική και τη σιδηροδρομική κυκλοφορία για την προσπέλαση του αεροδρομίου.
- ατμοσφαιρική ρύπανση στην περιοχή του αεροδρομίου, που προκαλείται από τις εκπομπές των κινητήρων αεροσκαφών και λοιπών οχημάτων και τις εκπομπές των εγκαταστάσεων του αεροδρομίου.
- ρύπανση εδάφους και υπόγειων νερών, που προκαλείται από την ανεπαρκή διαχείριση των λυμάτων στο χώρο του αεροδρομίου, τις εκροές προϊόντων πετρελαίου και την αποπαγοποίηση του οδοστρώματος του διαδρόμου και των αεροσκαφών.

Ανάλογα με τη γεωγραφική κλίμακα επιρροής κάποιας περιβαλλοντικής επίπτωσης, αυτές διακρίνονται σε τοπικές, όταν επηρεάζουν το αεροδρόμιο και τη γύρω περιοχή και συνολικές, όταν αφορούν τον πλανήτη, όπως π.χ. η συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ανάλογα με το αν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ασκούνται άμεσα ή έμμεσα, αυτές διακρίνονται σε άμεσες όπως π.χ. ο θόρυβος και έμμεσες όπως π.χ. η αφαίρεση υλικών από γειτονικές περιοχές. Η κλίμακα χρόνου των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εκτείνεται μέχρι μερικά χρόνια από σήμερα και πρέπει αντιδιασταλεί από την έννοια της αειφορίας, που αφορά μεγαλύτερη κλίμακα χρόνου και συνίσταται στην εξασφάλιση στις επόμενες γενιές της δυνατότητας να απολαύσουν αγαθά και επίπεδο ζωής τουλάχιστον αντίστοιχο σε σχέση με τη σημερινή γενιά. Είναι προφανές ότι ο έλεγχος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι μια από τις προϋποθέσεις της αειφορίας, η οποία λειτουργεί συμπληρωματικά στην άμβλυνση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Προφυλλίδης Β., 2010).

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά και ανάλυση των συνηθέστερων ρύπων που βρίσκονται σ' ένα αεροδρόμιο.

5.1 Κρατικός αερολιμένας Καλαμάτας

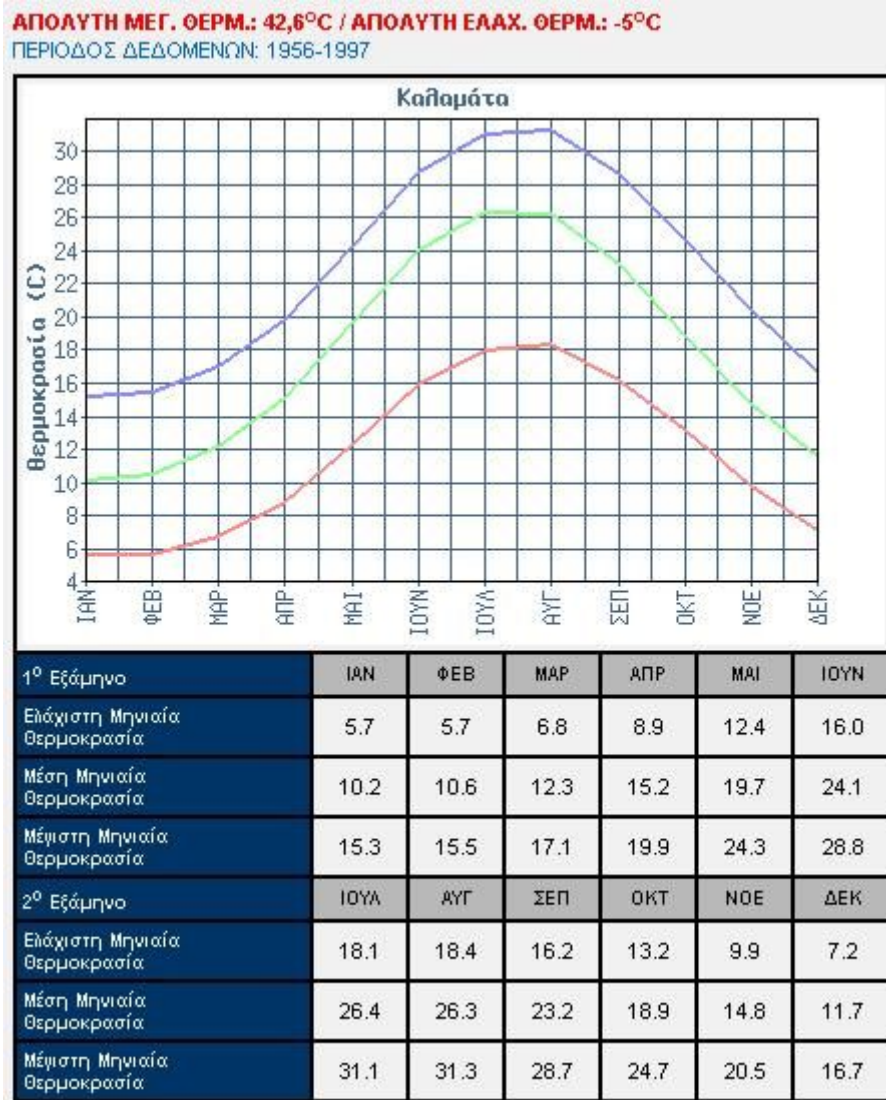
Ο κρατικός αερολιμένας Καλαμάτας ή κρατικός αερολιμένας Καλαμάτας "Καπετάν Βασίλης Κωνσταντακόπουλος", βρίσκεται σε απόσταση 9 km από την πόλη της Καλαμάτας, στην Εθνική Οδό Καλαμάτας – Πύλου, δίπλα στον ποταμό Πάμισο. Λειτουργεί από το 1959, διαθέτει έναν διάδρομο διπλής κατεύθυνσης (17R / 35L) μήκους περίπου 3 χλμ. Επίσης, διαθέτει νοτιοανατολικά του διαδρόμου κτιριακές εγκαταστάσεις 2450 τ.μ. στις οποίες στεγάζεται ο τερματικός σταθμός και χώρο στάθμευσης αεροσκαφών (αργον) χωρητικότητας 4 αεροσκαφών (1 B767, 3 A320) (Βικιπέδια και ιστοσελίδα ΥΠΑ).

5.1.1 Χρήσεις αεροδρομίου

Το αεροδρόμιο χρησιμοποιείται από την πολεμική και την πολιτική αεροπορία. Ακριβώς απέναντι από τον τερματικό βρίσκεται η 120 Πτέρυγα Εκπαιδευσεως Αέρος (120 ΠΕΑ). Επίσης, στον ίδιο χώρο πραγματοποιείται η πτητική εκπαίδευση των χειριστών της γενικής αεροπορίας.

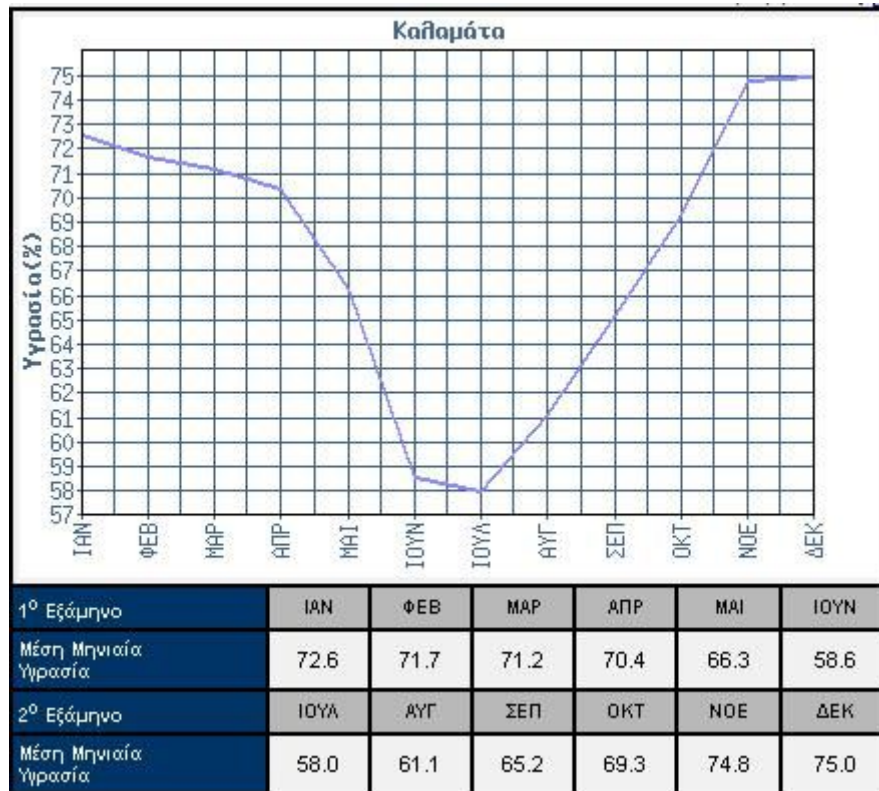
5.1.2 Μετεωρολογικά στοιχεία

Η Μεσσηνία συνεπώς και το αεροδρόμιό της, είναι μια πεδινή περιοχή με κλίμα τυπικά μεσογειακό όπως στην υπόλοιπη Ελλάδα. Τα καλοκαίρια είναι θερμά και ξηρά ενώ οι χειμώνες είναι ήπιοι και βροχεροί. Επικρατεί μεγάλη ηλιοφάνεια όλο σχεδόν το χρόνο. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος κυμαίνεται περίπου μεταξύ των 13 - 19°C. Οι βροχοπτώσεις κυμαίνονται από 600 χιλιοστά στα νότια του Νομού (Φοινικούντα-Μεθώνη) μέχρι τα 1500 χιλιοστά στα πιο ορεινά και στα 800-1200 χιλιοστά στις κεντρικές και βόρειες πεδινές και ημιορεινές περιοχές. Το βουνό, σε κοντινή σχετικά απόσταση, που μπορεί να επηρεάσει το αεροδρόμιο, είναι ο Ταύγετος. Το μεγαλύτερο ποτάμι είναι ο Πάμισος, ο οποίος διασχίζει την αριστερή πλευρά του αεροδρομίου και χύνεται στο Μεσσηνιακό Κόλπο (Ιστοσελίδα ΕΜΥ και Δήμου Καλαμάτας).



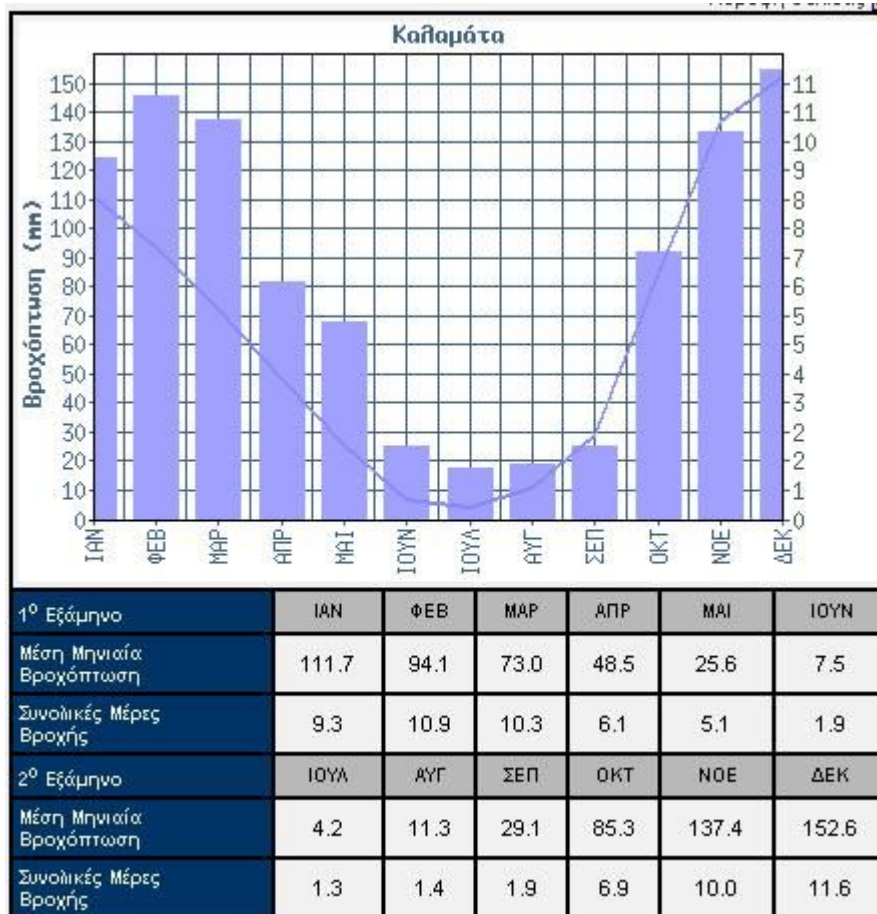
Σχήμα 22: Μέση μηνιαία θερμοκρασία Καλαμάτας – Μεσσηνίας για την περίοδο δεδομένων 1956-1997

Πηγή: ΕΜΥ



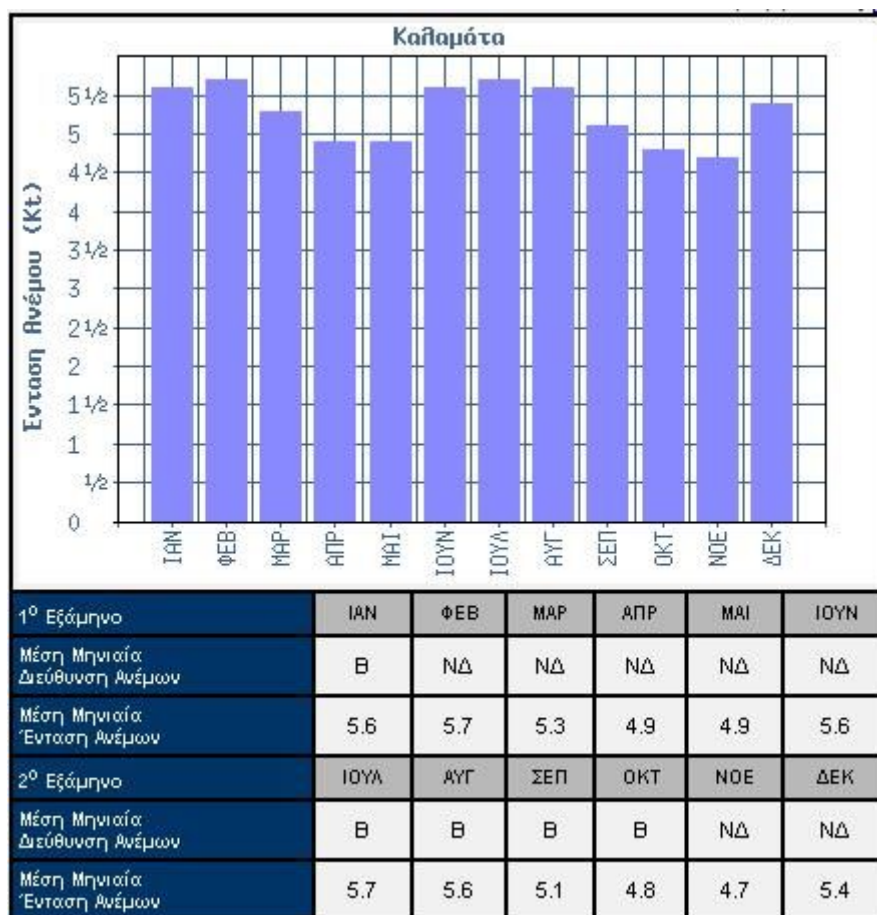
Σχήμα 23: Μέση μηνιαία υγρασία Καλαμάτας – Μεσσηνίας για την περίοδο δεδομένων 1956-1997

Πηγή: ΕΜΥ



Σχήμα 24: Μέση μηνιαία βροχόπτωση Καλαμάτας – Μεσσηνίας για την περίοδο δεδομένων 1956-1997

Πηγή: ΕΜΥ



Σχήμα 25: Μέση μηνιαία διεύθυνση ανέμων

Καλαμάτας – Μεσσηνίας για την περίοδο δεδομένων 1956-1997

Πηγή: ΕΜΥ

5.1.3 Αεροσκάφη σε χρήση (πολεμικής και πολιτικής αεροπορίας)

Όπως προαναφέρθηκε το αεροδρόμιο είναι στρατιωτικό και πολιτικό. Εξυπηρετεί την εκπαίδευση των ίκάρων της πολεμικής αεροπορίας, τις εμπορικές πτήσεις της πολιτικής αεροπορίας, καθώς και την εκπαίδευση χειριστών της γενικής αεροπορίας.

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα στην αεροπορία είναι είτε εμβολοφόροι είτε αεροστρόβιλοι. Η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση το μέσο που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε θερμότητα και στη συνέχεια σε μηχανική ενέργεια. Οι αεροστρόβιλοι κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε τρεις υποομάδες:

- Στροβιλοαντιδραστήρες (turbojet)
- Στροβιλοανεμιστήρες (turbofan)
- Στροβιλοελικοφόροι (turboprop)

Οι turbojet πετυχαίνουν μεγάλες ταχύτητες αλλά είναι θορυβώδεις και μεγάλης κατανάλωσης. Οι turbofan πετυχαίνουν κι αυτοί μεγάλες ταχύτητες ωστόσο, αμβλύνουν την κατανάλωση καυσίμου και δεν είναι τόσο θορυβώδεις. Τέλος, οι turboprop είναι πιο οικονομικοί στην κατανάλωση καυσίμου αλλά πετυχαίνουν μικρότερες ταχύτητες συγκριτικά με τα άλλα δυο είδη στροβίλων.

Οι βασικές διαφορές των δύο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3: Διάκριση αεροπορικών με βάση το μέσο που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε θερμότητα και σε μηχανική ενέργεια		
	Αεροπορικοί κινητήρες	
	Εμβολοφόροι	Αεροστρόβιλοι
Μέσο μετατροπής E (Χ.Ε.→ Θ.Ε. → Μ.Ε.)	Έμβολο	Στρόβιλος
Τύπος Θερμοκινητήρα	Εσωτερικής καύσης	Εσωτερικής καύσης
Τρόπος μετατροπής Θ.Ε.→Μ.Ε.	Παλινδρομικός	Περιστροφικός
Εξάρτημα που κινείται από τα καυσάερα	Έμβολα μέσω στροφαλοφόρου	Περιστρεφόμενα μέρη
Καύσιμο	Βενζίνη	Κηροζίνη

Πηγή: Καρέλας Ε., Τριαντάφυλλος Ι., Φρέσκος Γ., 2004.

Οι αεροπορικοί εμβολοφόροι χρησιμοποιούνται σε μικρά αεροσκάφη, της γενικής αεροπορίας και σε μερικά της πολεμικής όπως τα πυροσβεστικά Canadair CL-215. Αντίθετα, οι αεροστρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε όλα τα μεγάλα αεροσκάφη της πολιτικής και πολεμικής αεροπορίας.



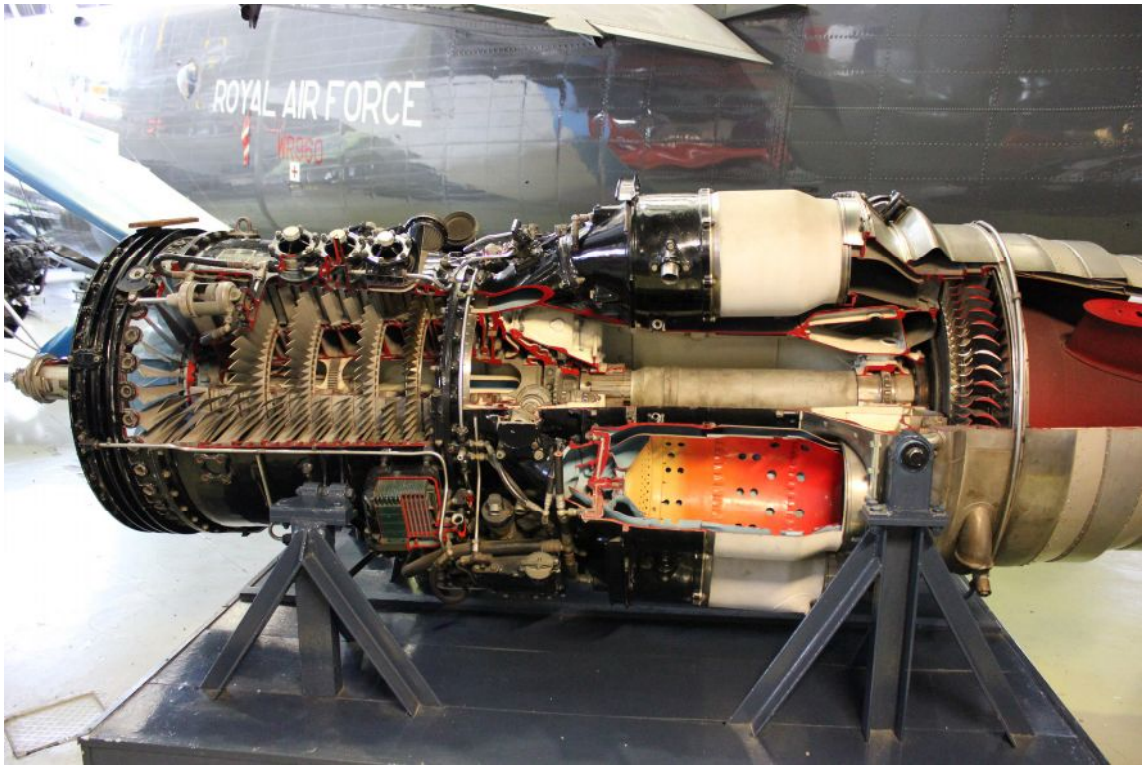
Σχήμα 26: Εμπρόσθια όψη ακτινικού εμβολογόρου

Πηγή: ίντερνετ



Σχήμα 27: Όψη εμβολοφόρου τύπου V

Πηγή: ίντερνετ



Σχήμα 28: Πλάγια όψη αεροστρόβιλου

Πηγή: ίντερνετ



Σχήμα 29: Εμπρόσθια όψη αεροσρόβιλου

Πηγή: ίντερνετ

5.2 Συνηθέστεροι ρύποι ενός αεροδρομίου

5.2.1 Αεροπορικά καύσιμα

Μία από τις βασικότερες λειτουργίες της εξυπηρέτησης των αεροσκαφών είναι η εισαγωγή του καυσίμου, η οποία γίνεται είτε από κατάλληλα διαμορφωμένα οχήματα (κηροζινοφόρα) είτε απευθείας από υπόγειες δεξαμενές μέσω κατάλληλων συστημάτων (σημείων πλήρωσης). Επίσης καύσιμο λαμβάνεται περιοδικά ως δείγμα από τις δεξαμενές του αεροσκάφους για έλεγχο ποιότητας, ενώ κάποιες φορές το καύσιμο του αεροσκάφους κρίνεται ποιοτικά ακατάλληλο και πρέπει να αφαιρεθεί για να δεχτεί επεξεργασία εκτός αυτού.

Τα αεροπορικά καύσιμα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις αεροπορικές βενζίνες και στις κηροζίνες. Οι βενζίνες είναι μείγμα παραφινικών, ολεφινικών και αρωματικών υδρογονανθράκων (C_4 έως C_{10}), και οι κηροζίνες είναι μείγμα παραφινικών και αρωματικών υδρογονανθράκων (C_9 έως C_{18}).

5.2.1.1 Καύσιμο εμβολοφόρου (βενζίνη)

Οι εμβολοφόροι κινητήρες χρησιμοποιούν αεροπορική βενζίνη (Aviation Gas – AVGAS) διάφορων τύπων, η οποία ανάλογα με την κατηγορία της έχει κατάλληλο χρωματισμό. Η πιο διαδεδομένη βενζίνη είναι τύπου 100LL (100 οκτάνια, Low Lead – χαμηλός μόλυβδος) έχει κυανή απόχρωση. Αυτό βοηθά στην αποφυγή ανάμειξης διαφορετικών τύπων βενζίνης αλλά και στην ευχερέστερη παρατήρηση τυχόν διαρροών κατά την επιθεώρηση του αεροσκάφους.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι μολυβδούχου βενζίνης:

- η 100 οκτανίων, η οποία μπορεί να περιέχει έως 4,24 gr Pb /γαλόνι και
- η 100 οκτανίων χαμηλού Μόλυβδου (100 LL), το οποίο μπορεί να περιέχει έως 2,12 gr Pb /γαλόνι.

Σε αυτού του τύπου τους κινητήρες, χρησιμοποιείται ο τετρααιθυλικός μόλυβδος για την επίτευξη μεγαλύτερων λόγων συμπίεσης, χωρίς αυτανάφλεξη. Για την ακρίβεια:

- αυξάνει τα οκτάνια της βενζίνης
- μειώνει τους κραδασμούς στο θάλαμο καύσης
- δεν προκαλεί αυτανάφλεξη του καυσίμου και απώλεια συμπίεσης.

Με τη χρήση της βενζίνης 100LL, η συνολική ποσότητα του μολύβδου που παράγεται στις ΗΠΑ, κυμάνθηκε από τους 762 τόνους το 1999 στους 550 τόνους το 2008 (δηλαδή υπάρχει μια μείωση της τάξης του 28%). Η μείωση της ποσότητας του μολύβδου οφείλεται στη μείωση της δραστηριότητας των εμβολοφόρων αεροσκαφών κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου και όχι λόγω της στροφής στη βενζίνη χαμηλού μολύβδου.

Επί του παρόντος, υπάρχουν πάνω από 200.000 ενεργά εμβολοφόρα αεροσκάφη στις ΗΠΑ, που συνεχίζουν να καταναλώνουν μολυβδούχο βενζίνη και περίπου 2.000 νέα αεροσκάφη κατασκευάζονται ετησίως.

Η απογραφή μολύβδου των εμβολοφόρων αεροσκαφών πραγματοποιείται κάθε τρία χρόνια, από τον EPA και σκοπό έχει την καταγραφή ατμοσφαιρικών εκπομπών καθώς και τα κριτήρια των επικινδυνότητας των ατμοσφαιρικών ρύπων. Για το 2008, εκτιμάται ότι καταναλώθηκαν τα 351.000.000 γαλόνια αεροπορικής βενζίνης. Η κατανάλωση αυτού του όγκου εκτιμάται ότι ισοδυναμεί με 779 τόνους εκπεμπόμενου μολύβδου. Στις εκτιμήσεις δεν περιλαμβάνονται οι απώλειες λόγω αναθυμιάσεων.

Για να εξαχθεί η θερμική ενέργεια από έναν υδρογονάνθρακα πραγματοποιείται η καύση η οποία επιτυγχάνεται όταν ο καύσιμος υδρογονάνθρακας έρθει σε επαφή με πηγή οξυγόνου και η θερμοκρασία των δύο συστατικών ανέλθει σε διαφορετική, για κάθε μείγμα τιμή. Τα προϊόντα της καύσης βενζίνης είναι, εκτός από την παραγωγή θερμότητας, διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), υδρατμοί, μονοξείδιο του άνθρακα (CO) λόγω ατελούς καύσης, μικρές ποσότητες λαδιού, καπνού, ενώσεις αζώτου, μολύβδου³ και άλλων πρόσθετων ουσιών στη βενζίνη.

Η αντίδραση καύσης τη βενζίνης⁴ είναι η παρακάτω:



Η βενζίνη που χρησιμοποιείται στους αεροπορικούς εμβολοφόρους κινητήρες, αποτελεί πολύ μικρό ποσοστό της παραγωγής ενός διυλιστηρίου – 0,25% περίπου. Η παραγωγή της προέρχεται από τη συμπύκνωση κλασμάτων αργού πετρελαίου με την προσθήκη κάποιων άλλων ουσιών οι οποίες της προσδίδουν κάποιες ιδιότητες που είναι σημαντικές για τη λειτουργία ενός αεροπορικού κινητήρα. Απαιτείται να έχει καλή θερμική απόδοση, υψηλό σημείο βρασμού, χαμηλό σημείο παγοποίησης και κατάλληλη πίεση ατμών ώστε να επιτυγχάνεται ανάφλεξη από το σπινθηριστή του κινητήρα. Επίσης, πρέπει να φιλτράρεται και να αντλείται εύκολα σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Ένα μέτρο κατάταξης του καυσίμου, λοιπόν, στηρίζεται στην αντικρηκτικότητα (antiknock value) που παρουσιάζει και εκφράζεται με τον αριθμό οκτανίου. Ο προσδιορισμός του γίνεται με τη σύγκριση της βενζίνης με ένα πρότυπο μείγμα. Αυτό αποτελείται από κανονικό επτάνιο, με πολύ μικρή αντοχή σε κρουστική καύση και από

³ Ο μόλυβδος (Pb) προστίθενται για την αύξηση του αριθμού οκτανίου της βενζίνης. Ονομάζεται αντικτυπικό ή αντικροτικό (anti-knocks) διότι μειώνει τους κραδασμούς στον θάλαμο καύσης. Στους κινητήρες των αυτοκινήτων δεν χρησιμοποιείται, ωστόσο στους αεροπορικούς αν και με χαμηλό μόλυβδο χρησιμοποιείται σε συνεχή βάση διότι αποφεύγεται η αυτανάφλεξη του καυσίμου.

⁴ NO_x: οξείδια του αζώτου, δεδομένου ότι ο αέρας αποτελείται από άζωτο(N)

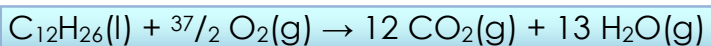
SO₂: ορισμένα από τα «ιχνοστοιχεία» στην βενζίνη, όπως το θείο μπορούν να αντιδράσουν για να σχηματίσουν μικρές ποσότητες άλλων ρύπων, όπως SO₂.

ισο-οκτάνιο που είναι πολύ ανθεκτικό. Η σύγκριση πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικού δοκιμαστικού κινητήρα. Σε αυτόν, μεταβάλλεται η συμπίεση κατά τη λειτουργία με το παραπάνω μείγμα μέχρι να εμφανιστεί κρουστική καύση. Έτσι, λέμε ότι μία βενζίνη έχει βαθμό οκτανίου 88 όταν κατά τον παραπάνω έλεγχο παρουσιάσει την ίδια εκρηκτικότητα με μείγμα που περιέχει 88%, κατά όγκο, ισο-οκτάνιο. (Καρέλας Ε., Τριαντάφυλλος Ι., Φρέσκος Γ., 2004).

5.2.1.2 Καύσιμο αεροστρόβιλου (κηροζίνη)

Για τους κινητήρες αεροστροβίλου (τζετ), χρησιμοποιούνται δύο κύριοι τύποι κηροζίνης, η JET-A (ή A1) και η JET-B. Η κηροζίνη JET-A/A1 είναι η πιο διαδεδομένη, και περιέχει υδρογονάνθρακες με 8 έως 16 άτομα άνθρακα. Η λιγότερο διαδεδομένη, τύπου νάφθα κηροζίνη JET-B περιέχει πιο ελαφρούς υδρογονάνθρακες, με 5 έως 15 άτομα άνθρακα και είναι καταλληλότερη για ψυχρά κλίματα. Η κηροζίνη είναι ένα λεπτό, διαυγές υγρό που σχηματίζεται από υδρογονάνθρακες, λαμβάνεται από την κλασματική απόσταξη πετρελαίου μεταξύ 150°C και 275°C, καταλήγοντας σε ένα μίγμα από ανθρακικές αλυσίδες που περιέχουν από έξι μέχρι 16 άτομα άνθρακα. Τα κυριότερα συστατικά της κηροζίνης είναι το n-δωδεκάνιο⁵, και τα αλκυλοβενζόλια. Το σημείο ανάφλεξης της κηροζίνης είναι μεταξύ 37 και 65 ° C, και η θερμοκρασία αυτοανάφλεξης του είναι 220 ° C. Θερμότητα της καύσης της κηροζίνης είναι όμοια με εκείνη του ντίζελ. Κηροζίνη είναι μη αναμίξιμη με νερό (κρύο ή ζεστό), αλλά αναμίξιμη με πετρελαϊκούς διαλύτες (Ιωάννης Μάγειρας 2012).

Η αντίδραση καύσης της κηροζίνης είναι η παρακάτω:



Για να καούν 15 kg αέρα χρειάζεται ένα λίτρο καυσίμου που θα παράξουν 2,3 kg CO₂ κατά την πλήρη καύση.

⁵ το n - δωδεκάνιο είναι υποκατάστατο με βάση την κηροζίνη

Οι δεξαμενές καυσίμου στη πλειοψηφία των αεροσκαφών, βρίσκονται στις πτέρυγες. Στη συνηθέστερη περίπτωση των δικινητήριων αεροσκαφών, οι αντλίες, οι σωληνώσεις και οι βαλβίδες του συστήματος διατρέχουν το χείλος προσβολής των πτερύγων.

Τα αεροπορικά καύσιμα, είναι τοξικά για τα οικοσυστήματα και για τους οργανισμούς. Ένα από τα βασικά τους συστατικά είναι το βενζόλιο. Ο μόλυβδος είναι επικίνδυνος για τους οργανισμούς διότι επεμβαίνει στη λειτουργία διάφορων ενζύμων. Στα εδάφη είναι σχετικά σταθερός, σε σχέση με την ατμόσφαιρα και νερά, τα οποία λειτουργούν ως οι τελικοί αποδέκτες (Μάγειρας Ι., 2012). Στα φυτά οι συγκεντρώσεις είναι αποτέλεσμα της απόστασης από την πηγή ρύπανσης, το είδος του φυτού και τις συγκεντρώσεις στο έδαφος. Για τον λόγο αυτό, οι συγκεντρώσεις σε ορισμένα φυτά έχουν προταθεί ως δείκτες ρύπανσης του περιβάλλοντος από μόλυβδο. Ο μόλυβδος προσλαμβάνεται από τα ριζικά τριχίδια μέσω παθητικής διαδικασίας και συγκρατείται κυρίως στο κυτταρικό τοίχωμα των κυττάρων της ρίζας. Η ποσότητα του μόλυβδου που προσλαμβάνεται από τα φυτά σχετίζεται με την ποσότητα του μόλυβδου που υπάρχει στο έδαφος. Η πρόσληψη του μόλυβδου από τα φυτά αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του αλλά και με την πάροδο του χρόνου. Ο ρυθμός πρόσληψης του μόλυβδου ελαττώνεται με την αύξηση της τιμής του pH του εδάφους που συνήθως γίνεται με ασβέστωση, ενώ περιορίζεται όταν η θερμοκρασία του εδάφους ελαττώνεται. Ένα ποσοστό της ποσότητας του μόλυβδου που αποτίθεται στα φύλλα είναι δυνατό να απομακρυνθεί με ξέπλυμα των φύλλων με νερό, αλλά ένα μέρος όμως του, συγκρατείται στα κύτταρα των φύλλων. Έχει διαπιστωθεί ότι οι τετρααλκυλιωμένες ενώσεις του μόλυβδου εύκολα μπορούν να μετατραπούν σε υδατοδιαλυτές ενώσεις οι οποίες μπορούν να προσληφθούν από τα φυτά. Η έρευνα έδειξε ότι ο μόλυβδος συνδέεται στενά με την κυτταροπλασματική μεμβράνη των φυτικών κυττάρων. Υπάρχουν είδη φυτών που είναι ανθεκτικά στις συγκεντρώσεις του μόλυβδου, μπορούν να δεσμεύσουν και να αδρανοποιήσουν μεγάλες ποσότητες του στοιχείου αυτού. Ο μόλυβδος αποτελεί το πιο αμετάβλητο μέταλλο, με διάρκεια συγκράτησής του από το έδαφος περίπου 150-5000 χρόνια. Είναι το πιο τοξικό στοιχείο στο περιβάλλον, με περιορισμένη διαλυτότητα στα εδάφη και διαθεσιμότητα στα φυτά, λόγω της συμπλοκοποίησής του με οργανική ύλη οπότε και κατακρημνίζεται ως ανθρακικό, υδροξείδιο και φωσφορικό άλας. Η διαλυτότητά του στα εδαφικά διαλύματα ελέγχεται

από τα φωσφορικά άλατα ή τα ανθρακικά ιζήματα σε εδάφη με pH από 5,5-7,5. Υψηλά εδαφικά pH (άνω του 7,5) και ιδιαίτερα χαμηλά (κάτω του 5,5) είτε μειώνουν, είτε αυξάνουν την διαλυτότητα του Μολύβδου. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις το συγκεκριμένο μέταλλο, καθώς και πολλά άλλα (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Mo), αποτελούν βασικά μικροστοιχεία για τον μεταβολισμό των φυτών καθώς είναι συστατικά πολλών πρωτεϊνών και ενζύμων που εμπλέκονται σε αντιοξειδωτικές αντιδράσεις. Σε υψηλές συγκεντρώσεις όμως μπορεί να έχουν διάφορες αρνητικές επιδράσεις στα φυτά, όπως (Σαχινίδης Σ., 2012):

- Πρόκληση τοξικότητας
- Προβλήματα στην φωτοσύνθεση
- Βλάβες στις κυτοπλασματικές μεμβράνες
- Παρεμπόδιση ενζυμικών αντιδράσεων
- Βλάβες στον γενετικό κώδικα (DNA)
- Οξειδωση πρωτεϊνών.

Το βενζόλιο είναι κυκλική ένωση άνθρακα. Είναι πτητικό και διαχέεται στην ατμόσφαιρα και τα φυτά δεν είναι εύκολο να το δεσμεύσουν. Η μακροχρόνια έκθεση σε βενζόλιο έχει σημαντικές επιπτώσεις κυρίως στο αίμα, καθώς καταστρέφει το μυελό των οστών και μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση αναιμίας. Επίσης μειώνει την ικανότητα του ανοσοποιητικού συστήματος, αυξάνοντας τις πιθανότητες μόλυνσης. Τέλος, θεωρείται καρκινογόνο για τον άνθρωπο, και η μακροχρόνια έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει λευχαιμία (Μάγειρας Ι., 2012).

5.2.2 Ελαιολιπαντικά και υδραυλικά υγρά

Για τη λίπανση των κινούμενων μερών του αεροσκάφους και κυρίως των κινητήρων χρησιμοποιούνται αεροπορικά έλαια και λιπαντικά. Επίσης για την κίνηση των επιφανειών ελέγχου και του συστήματος προσγείωσης χρησιμοποιούνται υδραυλικά συστήματα ελέγχου. Τα υδραυλικά εκτός από μέσο μεταφοράς της κίνησης λειτουργούν ταυτόχρονα και ως λιπαντικό μέσο που μειώνει την τριβή και τη θερμότητα ανάμεσα στα κινούμενα μέρη. Η λίπανση του αεροσκάφους και η πλήρωση με έλαια και υδραυλικά γίνεται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα αλλά και σύμφωνα με τις ενδείξεις των κινητήρων ή συστημάτων.

Τα ελαιολιπαντικά μπορεί να βρεθούν στο περιβάλλον από μικρές ή μεγαλύτερες βλάβες και διαρροές, καθώς και από τη διαδικασία πλήρωσης ή αντικατάστασης τους από το προσωπικό συντήρησης. Τα αεροπορικά υδραυλικά υγρά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα ορυκτά που βασίζονται σε ορυκτέλαια και στα συνθετικά, που βασίζονται στους φωσφορικούς εστέρες και είναι τα συνηθέστερα. Φέρουν κατάλληλο έντονο χρωματισμό, συνήθως κόκκινο για να εντοπίζονται ευκολότερα οι διαρροές, δεδομένης της κρισιμότητας των συστημάτων που υποστηρίζουν (πηδάλια - επιφάνειες ελέγχου πτήσεως). Λόγω των πολύ υψηλών πιέσεων λειτουργίας, που επιτυγχάνονται μέσω των αντλιών για τη μείωση του ανθρώπινου φόρτου, είναι πολύ συχνές οι διαρροές των υδραυλικών συστημάτων. Εκτιμάται ότι περίπου το 85% των υδραυλικών που εισάγεται σε ένα αεροσκάφος καταλήγει τελικά στο περιβάλλον από μικρές ή μεγάλες διαρροές.

Τα ελαιολιπαντικά και τα υδραυλικά θεωρούνται επικίνδυνα απόβλητα, σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε (ευρωπαϊκός κατάλογος αποβλήτων ΕΚΑ – Κατηγορία 13) αλλά και την αντίστοιχη ελληνική νομοθεσία (Υπουργική Απόφαση Η.Π.13588/725/2006). Δεν θεωρούνται τοξικά, αν και εξετάζεται η επίδραση τους στη δημιουργία καρκίνων. Μετά τη χρήση τους είναι περαιτέρω επιμολυσμένα με ακαθαρσίες και μέταλλα. Η αποδέσμευση τους στον υδροφόρο ορίζοντα είναι επιβλαβής, καθώς δημιουργούν προβλήματα γεύσης και οσμής. Λόγω της διαφοράς στο ειδικό τους βάρος, σχηματίζουν διακριτή επιφανειακή στιβάδα, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τη φωτοσύνθεση και τον αερισμό του νερού, και σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσουν ασφυξία στους υδρόβιους οργανισμούς. Ακόμη, οι αργές διεργασίες βιοαποδόμησης, όταν λαμβάνουν χώρα αναλόγως του ιξώδους, μπορεί να μειώσουν σημαντικά το διαλυμένο οξυγόνο στον αποδέκτη, δημιουργώντας επίσης πρόβλημα στους υδρόβιους οργανισμούς. Τα υδραυλικά που βασίζονται σε ορυκτέλαια, αν και δεν είναι τοξικά, θεωρούνται επιβλαβή λόγω της πολύ αργής αποδόμησης τους (μπορεί να αποδομηθούν σε περισσότερο από ένα χρόνο), με αποτέλεσμα να επιβαρύνουν το έδαφος και το νερό και θεωρούνται επικίνδυνα για την υδρόβια ζωή. Επίσης περιέχουν επιβλαβή πρόσθετα όπως φωσφορικούς εστέρες ή ψευδάργυρο. Τα συνθετικά υδραυλικά είναι τοξικά, καθώς οι φωσφορικοί εστέρες είναι τοξικές ενώσεις με σοβαρή επίδραση στο νευρικό σύστημα (Μάγειρας Ι., 2012).

5.2.3 Απόβλητα χημικού καθαρισμού

Τα τμήματα και παρελκόμενα του αεροσκάφους απαιτείται να καθαρίζονται συχνά για την αφαίρεση επικαθήσεων όπως λάδια, λίπη, γράσα και άλλες ακαθαρσίες. Αυτό είναι απαραίτητο για λόγους αισθητικής, πρόσβασης στην επιφάνεια του υλικού για εργασία, αλλά και για την αντιδιαβρωτική προστασία της δομής του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της, καθώς οι επικαθίσεις επιταχύνουν τη δημιουργία οξειδωσης που είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη. Οι διαδικασίες καθαρισμού μπορεί να περιλαμβάνουν εμβάπτιση, πλύση, ψεκασμό ή τρίψιμο με το χέρι. Τα περισσότερα τμήματα του αεροσκάφους καθαρίζονται με τρίψιμο, εκτός από πολύ μεγάλα ή πολύ σκληρά σε ακαθαρσίες τμήματα, τα οποία τοποθετούνται σε λουτρά με διαλύτη ή σε μηχανές καθαρισμού. Τμήματα ή μηχανισμοί που δεν μπορούν να αφαιρεθούν ή βρίσκονται σε δυσπρόσιτα σημεία μπορούν να καθαριστούν με έγχυση του καθαριστικού στο τμήμα. Το καθαριστικό μετά τη δράση του στραγγίζει από το τμήμα, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την επιτυχή ολοκλήρωση του καθαρισμού. Ο καθαρισμός γίνεται με ποικιλία καθαριστικών που περιλαμβάνουν κυρίως καθαριστικά βασισμένα σε διαλύτες. Οι διαλύτες είναι οργανικές ενώσεις (πετρελαιοειδή και αλογωνομένα οργανικά καθαριστικά) που χρησιμοποιούνται για τη διάλυση άλλων οργανικών ενώσεων-πετρελαιοειδών, και κυρίως των σκληρών υπολειμμάτων από λάδια, ακαθαρσίες και λιπαντικά στα μεταλλικά τμήματα του αεροσκάφους και του κινητήρα. Η αντικατάστασή τους από υδατικά ή ημιυδατικά, ηπιότερα καθαριστικά είναι μια προσπάθεια σε έρευνα και εξέλιξη, που δεν μπορεί όμως να καλύψει πλήρως τις απαιτήσεις καθαρισμού.

Μερικές από τις κύριες βλαβερές ενώσεις που περιέχουν στη σύστασή τους οι οργανικοί διαλύτες είναι το τριχλωροαιθυλένιο (TCE), το 1,1,1-Τριχλωροαιθάνιο, το μεθυλενοχλωρίδιο, το τολουένιο (μεθυλοβενζόλιο), μεθυλαιθυλκετόνη (MEK) και το ξυλένιο. Ένα πολύ διαδεδομένο στην αεροπορική βιομηχανία ισχυρό καθαριστικό είναι αυτό της ομοσπονδιακής προδιαγραφής PD-680, που αποτελεί βελτιωτική παραλλαγή του γνωστού διαλυτικού mineral ή white spirit. Περιέχει κλάσματα πετρελαίου, τα οποία είναι σύνθετα μείγματα κυρίως αλειφατικών υδρογονανθράκων, ενώ περιέχει επίσης κάποιους αρωματικούς και ολεφίνες.

Η επίδραση στο περιβάλλον από τα απόβλητα του καθαρισμού εξαρτάται από τον τύπο του καθαριστικού. Τα οργανικά καθαριστικά που βασίζονται σε αλογωνομένους διαλύτες έχουν μεγαλύτερη επίπτωση στο περιβάλλον. Η προσπάθεια έρευνας και πλήρους αντικατάστασης των οργανικών διαλυτών από υδατικά καθαριστικά είναι σε εξέλιξη καθώς κάποια παρελκόμενα μπορούν να καθαριστούν με σαπούνι και νερό. Οι διαλύτες δημιουργούν εκπομπή επικίνδυνων οργανικών ενώσεων (VOCs-HAPs) από την εξάτμιση τους, τόσο στη διαδικασία καθαρισμού, όσο και από τα δοχεία και τις δεξαμενές όπου αποθηκεύονται. Ακόμη οι κηλίδες από τους διαλύτες μπορεί να μολύνουν το έδαφος και το νερό, τόσο από τις βλαβερές ουσίες που τα ίδια τα διαλυτικά περιλαμβάνουν στη σύστασή τους, όσο και μέταλλα, λάδια ή άλλες ακαθαρσίες που αφαιρέθηκαν από το τμήμα που υπέστη τον καθαρισμό. Οι οργανικές ενώσεις που περιέχουν οι διαλύτες όπως οι φαινόλες, το διχλωρομεθάνιο, το 1-2 διχλωροαιθάνιο, η μεθυλαιθυλοκετόνη (ΜΕΚ) και το τριχλωροαιθυλένιο θεωρούνται καρκινογόνες. Πολλές από τις ουσίες αυτές συμβάλουν και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η επιτρεπόμενη συγκέντρωση για τις φαινόλες καθώς και για ορισμένους άλλους κοινούς βιομηχανικούς διαλύτες, όπως καθορίζονται στα κριτήρια ποιότητας υδάτων της USEPA (ΗΠΑ) και στα Πρότυπα Ποιότητας Περιβάλλοντος (ΠΠΠ) της Ελλάδας φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4: Επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις διαλυτών σε ύδατα		
Ονομασία Ουσίας	ΗΠΑ (ppm)	Ελλάς (µg/lf ή 0,001 ppm)
Φαινόλες	50	50
Διχλωρομεθάνιο	0,00019	20
1-2 Διχλωροαιθάνιο	0,00094	10
Τριχλωροαιθυλένιο	0,0027	10

Πηγή: Ιωάννης Μάγειρας 2012

Το τολουένιο που περιλαμβάνεται επίσης στους διαλύτες είναι τοξικό και προκαλεί ερεθισμούς στα μάτια, στο αναπνευστικό και το νευρικό σύστημα. Το τριχλωροαιθυλένιο αναγνωρίζεται από την «γλυκιά» οσμή του, επίσης έχει επίδραση στο νευρικό σύστημα και μπορεί να προκαλέσει κόπωση, ζάλη και ίλιγγο. Οι

αναθυμιάσεις του απορροφούνται εύκολα από τους πνεύμονες και μπορεί να προκαλέσουν κώμα ή θάνατο. Αποτελεί μία από τις ενώσεις με επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η μεθυλαιθυλοκετόνη (MEK) είναι γνωστή τοξική καρκινογόνος ουσία. Εξατμίζεται αμέσως και οι ατμοί της είναι επικίνδυνοι, καθώς επιδρά στο νευρικό σύστημα και μπορεί να προκαλέσει κόπωση, ζάλη, απώλεια συντονισμού ή και καταστολή. Η επίδραση του PD-680 στο περιβάλλον συνίσταται κυρίως στην τοξικότητα, την ευφλεκτότητα και τις αναθυμιάσεις σε πτητικές οργανικές ενώσεις. Έχει όμως πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε πτητικούς υδρογονάνθρακες (VOC), που υπερβαίνει τα 750 γραμμάρια ανά λίτρο (g/L). Αν και αρκετά τοξικό στο νερό, σπάνια φτάνει εκεί λόγω της πτητικότητας του. Η άμεση απελευθέρωση του στο αποχετευτικό σύστημα απαγορεύεται. Οι οργανικοί διαλύτες μπορεί να δημιουργήσουν κίνδυνο έκρηξης και τοξικότητας, παρεμβαίνουν στην επεξεργασία των λυμάτων και ειδικότερα στη βακτηριακή δραστηριότητα για τη χώνευση της ιλύος. Οι διαλύτες επίσης, και ειδικότερα οι φαινόλες, ρυπαίνουν το πόσιμο νερό καθώς δημιουργούν δυσάρεστη γεύση και οσμή στο νερό. Όσον αφορά τους πτητικούς υδρογονάνθρακες (VOC), οι επιπτώσεις τους στην ατμόσφαιρα διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες: στο φωτοχημικό νέφος, στην καταστροφή του όζοντος με αποτέλεσμα τη συμμετοχή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, και τις τοξικές και καρκινογενείς επιπτώσεις στα έμβια όντα. Τα υδατικά ή ημιυδατικά καθαριστικά έχουν μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον, καθώς δεν περιέχουν βλαβερές τοξικές ενώσεις, ενώ επίσης δεν δημιουργούν εκπομπές επικίνδυνων αερίων. Παρ' όλα αυτά δημιουργούν επιμόλυνση του νερού που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό με λάδια, λίπη και μέταλλα. Το νερό αυτό συνεπώς πρέπει να ελέγχεται για την καταλληλότητα του πριν απελευθερωθεί στο περιβάλλον (Μάγειρας Ι., 2012).

5.2.4 Απόβλητα μη καταστροφικών ελέγχων

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (Non Destructive Inspection – NDI) περιλαμβάνουν ελέγχους της μεταλλικής κυρίως δομής και τμημάτων του αεροσκάφους για εμφάνιση ρωγμών σε εσωτερικά ή μη προσβάσιμα σημεία. Οι κυριότερες μέθοδοι NDI στην αεροπορική βιομηχανία περιλαμβάνουν τα δεισδυτικά υγρά, τον μαγνητικό έλεγχο (EDDY CURRENT) και τις ακτινογραφίες (X-ray). Απόβλητα από τους ελέγχους αυτούς

δημιουργούνται κυρίως από την εφαρμογή της μεθόδου διεισδυτικών υγρών. Η μέθοδος διεισδυτικών υγρών (LPI ή FPI, από τα αρχικά των λέξεων Liquid Dye ή Fluorescent Penetrant Inspection) είναι ουσιαστικά ένας υποβοηθούμενος οπτικός έλεγχος, και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών όπως σχισμές, ρωγμές ή κενά, κυρίως σε μέταλλα. Τα απόβλητα περιλαμβάνουν τα ειδικά χημικά για την εφαρμογή της μεθόδου (penetrants - συνήθως πετρελαιοειδή με μεγάλη περιεκτικότητα σε επιφανειοδραστικές ουσίες) και τα απόνερα από την έκπλυση των ελεγχόμενων υλικών από τα χημικά αυτά. Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρύτατα στην αεροπορική βιομηχανία, λόγω της απλότητας και ακρίβειας της, καθώς και της ανταπόκρισης της στις απαιτήσεις τακτικής παρακολούθησης της δομής των αεροσκαφών για επιφανειακές ρωγμές από το φαινόμενο της κόπωσης. Με τη μέθοδο αυτή, που μπορεί να εφαρμοστεί και επί τοποθετημένων υλικών μπορούν να ανιχνευθούν πολύ μικρές και αόρατες στον οπτικό έλεγχο ρωγμές, οι οποίες μπορούν, αν περάσουν απαρατήρητες, να επεκταθούν ραγδαία και να προκαλέσουν σοβαρές και κρίσιμες δομικές αστοχίες. Επίσης χρησιμοποιείται για να ανιχνευτούν ατέλειες ή κενά σε συγκολλήσεις, όπως π.χ στη βάση των πτερυγίων των κινητήρων, που επίσης μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφική αστοχία του πτερυγίου και σοβαρή ζημιά του κινητήρα. Τα βασικά βήματα της μεθόδου LPI έχουν ως εξής: Αρχικά καθαρίζεται η επιφάνεια προς επιθεώρηση και εφαρμόζεται διεισδυτικό στην επιφάνεια του υλικού, το οποίο διεισδύει στη σχισμή ή ρωγμή. Η εφαρμογή γίνεται είτε με ψεκασμό (σπρέι) είτε με εμβάπτιση. Στη συνέχεια, γίνεται εφαρμογή γαλακτωματοποιητή και μετά έκπλυση του υλικού σε λουτρό με νερό, προκειμένου να αφαιρεθεί όλο το διεισδυτικό από την επιφάνεια του ελεγχόμενου υλικού, εκτός από αυτό που είναι εγκλωβισμένο στη σχισμή ή ρωγμή.

Ο γαλακτωματοποιητής μπορεί να είναι είτε λιπόφιλος είτε υδρόφιλος, και σε αυτή την περίπτωση (υδρόφιλος) απαιτείται ένα επιπλέον στάδιο έκπλυσης με νερό, πριν την εφαρμογή του γαλακτωματοποιητή και αμέσως μετά το διεισδυτικό. Ακολουθεί, η εφαρμογή του εμφανιστικού που μπορεί να είναι σκόνη ή υγρό. Το εμφανιστικό εκμεταλλεύεται το τριχοειδές φαινόμενο και φέρνει στην επιφάνεια του υλικού το εγκλωβισμένο φωσφορίζον διεισδυτικό, προβάλλοντας τη ρωγμή ή την ατέλεια, αρκετά μεγεθυμένη στην επιφάνεια.

Με αυτό τον τρόπο (και ανάλογα με το είδος της βαφής), η ρωγμή ή ατέλεια και η θέση της είναι ορατή, είτε απευθείας είτε με χρήση υπεριώδους φωτός, ανάλογα με το είδος της βαφής του διεισδυτικού. Το κυριότερο πρόβλημα αποβλήτων δημιουργείται από το διεισδυτικό υγρό. Τα υγρά αυτά, κατά κανόνα πετρελαιϊκής βάσης, κυκλοφορούν σε αρκετές διαφορετικές προδιαγραφές, είναι οργανικά και περιέχουν ισχυρές βαφές, και είναι ακατάλληλα για άμεση απόρριψη στο περιβάλλον. Το νερό που χρησιμοποιείται σε σημαντική ποσότητα για την πλύση ή τον καθαρισμό του υλικού συνεπώς, περιέχει και μεταφέρει στο περιβάλλον σε μεγάλο βαθμό τα επιβλαβή χαρακτηριστικά του διεισδυτικού. Εκτιμάται ότι για την έκπλυση 1 λίτρου διεισδυτικού από ένα υλικό μπορεί να απαιτηθούν από 500 έως ακόμη και 2000 λίτρα νερού, ανάλογα με την προδιαγραφή του. Σε μικρότερο βαθμό, πρόβλημα μπορεί να αποτελούν και τα απόβλητα από την έκπλυση από το γαλακτωματοποιητή και το εμφανιστικό, εφόσον το τελευταίο είναι υγρό, λόγω όμως κυρίως της παρουσίας υπολειμμάτων του διεισδυτικού.

Τα επιβλαβή συστατικά του διεισδυτικού και των απόνερων που το περιέχουν είναι οι υδρογονάνθρακες, οι οργανικοί εστέρες, η περιεκτικότητα σε λίπη και έλαια, οι επιφανειοδραστικές ουσίες και οι φωσφορικές βαφές. Τα απόβλητα αυτά είναι επίσης εκτός των αποδεκτών ορίων χρώματος καθώς και περιεκτικότητας BOD και COD. Πέραν αυτών όμως, ένα επιπρόσθετο πρόβλημα των συγκεκριμένων αποβλήτων αποτελούν οι περιεχόμενες βαφές. Οι βαφές που περιέχονται στα απόνερα της μεθόδου δημιουργούν πρόβλημα στη τη λειτουργία των εγκαταστάσεων βιολογικής επεξεργασίας των αστικών λυμάτων, διότι συγκεντρώνονται στην επιφάνεια των λυμάτων και απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή είναι απαραίτητη στους μικροοργανισμούς για να επιζήσουν και να πολλαπλασιαστούν, και συνεπώς για να λειτουργήσουν οι εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας (Μάγειρας Ι., 2012).

5.2.5 Απόβλητα επιμεταλλώσεων

Οι διεργασίες «φινιρίσματος» των μετάλλων χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία για την προετοιμασία της επιφάνειας ενός μεταλλικού τμήματος του αεροσκάφους για καλύτερη εφαρμογή, βελτιωμένη επιφανειακή σκληρότητα και

βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση. Οι συνηθέστερες διαδικασίες φινιρίσματος μετάλλων περιλαμβάνουν τη χημική επικάλυψη, την ανοδίσωση, την επιμετάλλωση και άλλες αντίστοιχες εργασίες που επηρεάζουν χημικά το επιφανειακό στρώμα ενός τμήματος. Κάθε μία από αυτές τις διεργασίες έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει σημαντικά το περιβάλλον από την απελευθέρωση τοξικών ουσιών στα επιφανειακά νερά, το έδαφος ή τα υπόγεια νερά. Οι κύριες εργασίες επιμετάλλωσης που συμβάλλουν στη δημιουργία αποβλήτων είναι οι εξής:

- Απογύμνωση: Η χρήση όξινων ή αλκαλικών λουτρών για την εξάλειψη ανεπιθύμητων μεμβρανών ή επιστρώσεων στο μέταλλο που θα υποστεί επιμετάλλωση.
- Καθαρισμός: Η απομάκρυνση πετρελαίου, γράσων, βρωμιάς και διάβρωσης χρησιμοποιώντας όξινα και αλκαλικά καθαριστικά.
- Επιμετάλλωση: Διαδικασία που χρησιμοποιεί ηλεκτρικό ρεύμα για να αποθέσει μέταλλο στο υλικό που επιμεταλλώνεται, η οποία και παράγει μεταλλικά και κυανιούχα απόβλητα.

Οι κυριότερες πηγές δημιουργίας αποβλήτων από τα συνεργεία επιμεταλλώσεων είναι οι εξής:

- Απώλειες, διαρροές και υπερχειλίσεις από τις δεξαμενές που περιέχουν τα διαλύματα και το νερό έκπλυσης των υλικών
- Απώλειες από τον ψεκασμό, κυρίως στην επιχρωμίωση, όπου χρησιμοποιείται λεπτός ψεκασμός
- Χρησιμοποιημένα ακατάλληλα διαλύματα και λουτρά (απόνερα) έκπλυσης.

Τα ειδικότερα χαρακτηριστικά των αποβλήτων των επιμεταλλώσεων ποικίλουν σημαντικά. Μπορούν να είναι είτε όξινα ή αλκαλικά, ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα διαλύματα και λουτρά. Τα λουτρά επιχρωμίωσης παράγουν πολύ όξινα απόβλητα, ενώ τα λουτρά αποχρωμίωσης παράγουν αλκαλικά και κυανιούχα απόβλητα. Τα απόβλητα είναι κυρίως ανόργανα, και περιλαμβάνουν στη σύνθεσή τους επικίνδυνες ενώσεις και συγκεκριμένα οξέα, αλκάλια, κυανιούχες ενώσεις και βαρέα μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, ο μόλυβδος, το κάδμιο, το νικέλιο και το χρώμιο.

Τα απόβλητα των επιμεταλλώσεων είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα και χαρακτηρίζονται από έντονα τοξικά και διαβρωτικά χαρακτηριστικά. Το κυάνιο δεν απορροφάται από τους

οργανισμούς και είναι από τις ισχυρότερες τοξικές και δηλητηριώδεις ενώσεις για όλους τους οργανισμούς. Η συνολική συγκέντρωση σε κυάνιο που καθορίζονται στα κριτήρια ποιότητας των υδάτων για την προστασία της ανθρώπινης υγείας συστάθηκε από την USEPA (ΗΠΑ) σε 0,2 μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Στην Ελλάδα το αντίστοιχο όριο είναι 10 $\mu\text{g}/\text{lt}$ ή 0,01 ppm (Υπουργική Απόφαση Η.Π 51354/2641/Ε103/2010). Τα βαριά μέταλλα επίσης, όπως το χρώμιο, το κάδμιο και τα άλλα βαριά μέταλλα από τα διαλύματα επιμεταλλώσεων έχουν ισχυρή μεταλλαξιογόνο και καρκινογόνο δράση. Η πλέον επικίνδυνη δράση είναι αυτή του εξασθενούς χρωμίου, το οποίο είναι εξαιρετικά τοξικό καθώς παρουσιάζει ισχυρά οξειδωτικά χαρακτηριστικά και μεγάλη διαπερατότητα, προκαλώντας πνευμονικούς και άλλους καρκίνους. Απόβλητα που περιέχουν αυτές τις ενώσεις πάνω από ορισμένες συγκεντρώσεις είναι τοξικά για τους μικροοργανισμούς που χρησιμοποιούνται στη βιολογική επεξεργασία των αστικών αποβλήτων. Οι ενώσεις του εξασθενούς χρωμίου που παράγονται από την επιμετάλλωση και την ανοδίωση, είναι τοξικές για τους αερόβιους μικροοργανισμούς που χρησιμοποιούνται στη βιολογική αποδόμηση των λυμάτων. Το χρώμιο σε τρισθενή μορφή έχει βρεθεί επίσης να είναι επιζήμιο για τη χώνευση της λάσπης κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των αποβλήτων. Η τοξικότητα των αλάτων χρωμίου, τόσο για το τρισθενές όσο και το εξασθενές, ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό με το pH (την οξύτητα και την αλκαλικότητα), τη θερμοκρασία και τη σκληρότητα του αποδέκτη. Η συνολική συγκέντρωση χρωμίου που καθορίζεται στα κριτήρια ποιότητας των υδάτων της USEPA για την προστασία της ανθρώπινης υγείας είναι 0,05 μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Για το χρώμιο στη χώρα μας, στο πόσιμο νερό, το επιτρεπτό ανώτατο όριο ολικού χρωμίου είχε θεσπιστεί με την Οδηγία 98/83/EC στα 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ (Οδηγία 98/83/ΕΚ της 3/11/1998). Επίσης, με την ΚΥΑ 4859/726 ρυθμιζόνταν οι εκπομπές ολικού χρωμίου από απόβλητα βιομηχανιών σε υδάτινους αποδέκτες, σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται (ανάλογα με τον αποδέκτη) από 0,6 έως 3 mg/L . Με πρόσφατη τέλος ΚΥΑ, που βασίζεται στην κοινοτική οδηγία 105/2008/ΕΚ καθορίστηκαν όρια ειδικά για το εξασθενές χρώμιο στα 0,3 $\mu\text{g}/\text{lt}$. Τέλος τα οξέα που χρησιμοποιούνται στις επιμεταλλώσεις, πέρα από την τοξική τους δράση μέσω της αλλαγής του pH του νερού, έχουν διαβρωτική δράση και η μακρά έκθεση σε αυτά συνδέεται με ασθένειες όπως η αναιμία και η λευκοπενία. Τα όξινα απόβλητα παρεμβαίνουν στη χώνευση της ιλύος και

τη βιολογική δραστηριότητα και είναι τοξικά για την υδρόβια ζωή. Όξινα και αλκαλικά απόβλητα, μπορούν επίσης να διαβρώσουν το μέταλλο και σκυρόδεμα των σωλήνων αποχέτευσης. Το pH βιομηχανικών αποβλήτων που απορρίπτονται στα αστικά λύματα θα πρέπει να είναι μεταξύ 6,0 και 9,0 (Μάγειρας Ι., 2012).

5.2.6 Απόβλητα χρωστικών (αντιδιαβρωτικής προστασίας α/φών)

Οι κρίσιμες απαιτήσεις για αντοχή της δομής των αεροσκαφών, οδήγησαν στην καθιέρωση της αντιδιαβρωτικής τους προστασίας με ισχυρές επιστρώσεις (βαφή). Με τον όρο διάβρωση εννοείται η φθορά των μεταλλικών επιφανειών από τη φυσική οξείδωση ή τη δράση χημικών. Η διαδικασία της βαφής αποσκοπεί στην αντιδιαβρωτική προστασία, στην ανακοπή δηλαδή της διάβρωσης με την τοποθέτηση επί των μεταλλικών επιφανειών προστατευτικών επιστρώσεων. Η βαφή προστατεύει το αεροσκάφος από την οξείδωση, το αλμυρό νερό, τις εξατμίσεις των κινητήρων και την όξινη βροχή, με το σφράγισμα των μεταλλικών επιφανειών με ουσίες όπως το χρώμιο. Τα προστατευτικά επιστρώματα της βαφής υφίστανται πλέον αυτά την οξείδωση, φθείρονται με το χρόνο και απαιτείται περιοδικά η αντικατάστασή τους πριν η φθορά επιδράσει στις μεταλλικές επιφάνειες. Τα αεροσκάφη ανανεώνουν εξ' ολοκλήρου την εξωτερική τους βαφή ανά διαστήματα που κυμαίνονται ενδεικτικά ανάμεσα στα 3 έως 5 έτη. Αυτό γίνεται πρώτον, για να καταστεί δυνατή η επιθεώρηση της μεταλλικής δομής για ενδείξεις ρωγμών ή διάβρωσης, αλλά και δεύτερον, για να ανανεωθεί η αντιδιαβρωτική προστασία της.

Τα διαστήματα αυτά προτείνονται από τους κατασκευαστές τους, λαμβάνοντας υπόψη και το επιχειρησιακό περιβάλλον (π.χ γειτνίαση ή πτήσεις πάνω από τη θάλασσα). Η διαδικασία της βαφής μπορεί να χωριστεί στην εφαρμογή του επιστρώματος, στη χρώση δηλαδή, και την αντίστροφη διαδικασία, την απόχρωση. Οι διαδικασίες αυτές, καθώς και η περιβαλλοντική τους σημασία εξηγούνται ακολούθως αναλυτικότερα. Κατά την χρώση γίνεται εφαρμογή των επιστρωμάτων στη μεταλλική δομή. Το επιστρώμα (coating) είναι το υλικό που εφαρμόζεται στην επιφάνεια ενός τμήματος για να σχηματίσει ένα διακοσμητικό ή λειτουργικό στερεό στρώμα. Τα δύο κυριότερα επιστρώματα είναι τα αντιδιαβρωτικά αστάρια (primer) και τα τελικά υποστρώματα (topcoats). Όλα τα είδη επιστρωμάτων συμπεριλαμβάνουν στη σύνθεσή τους

οργανικούς διαλύτες όπως το τολουένιο ή πετρελαιοειδή όπως το νάφθα ή white spirit. Τα αστάρια περιλαμβάνουν επίσης στη σύνθεση τους βαριά μέταλλα όπως χρώμιο, ψευδάργυρο, εποξικά και σμάλτα, που αραιώνονται με τους διαλύτες. Τα επιστρώματα εφαρμόζονται στα τμήματα του αεροσκάφους με μεθόδους που περιλαμβάνουν ψεκασμό, πινέλο, ρολό, επίστρωση με ροή και με εμβάπτιση. Η εργασία γίνεται συνήθως σε κλειστό χώρο, προκειμένου να απομειώνονται και να ελέγχονται κατά το δυνατόν οι επιδράσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τα πιστόλια ψεκασμού καθαρίζονται όταν αλλάζει η χρήση τους, και γι' αυτό το σκοπό τοποθετούνται σε δεξαμενή με κατάλληλο αποχρωστικό. Η εφαρμογή επιστρωμάτων δημιουργεί εκπομπές βλαβερών αέριων από την εξάτμιση των διαλυτών κατά την ανάμιξη, εφαρμογή, και από τον πλεονάζοντα ψεκασμό, που εξατμίζεται από το θάλαμο ψεκασμού ή το υπόστεγο αεροσκαφών. Επίσης παράγονται απόβλητα από χρώματα και διαλυτικά που πρέπει να δεσμευθούν ως επιβλαβή για το περιβάλλον. Μετά την εφαρμογή του ασταριού (primer) ακολουθεί η εφαρμογή της εξωτερικής βαφής ("torcoat" ή «καμουφλάζ»). Η εξωτερική βαφή περιλαμβάνει τρία κύρια συστατικά: τα πηγμένα, τα συνδετικά υλικά και τους διαλύτες. Τα πηγμένα προσδίδουν το χρώμα, την αντοχή και την προσκόλληση της βαφής στην επιφάνεια. Χρησιμοποιούνται για τη δομική ενίσχυση του επιστρώματος, για την προστασία του μετάλλου, για ενίσχυση της αδιαπερατότητας και τη διατήρηση της σπιλπνότητας. Τα συνδετικά υλικά κρατούν τα πηγμένα σε υγρή μορφή, ενώ οι διαλυτικά κρατούν και τα δύο αυτά συστατικά διαλυμένα προκειμένου να είναι εύκολη η εφαρμογή τους. Το τελικό στρώμα εξωτερικής βαφής είναι τριών τύπων, έναμελ, λακέρ ή πολυουρεθάνης, με πλέον διαδεδομένη την τελευταία. Κατά την απόχρωση (depainting) γίνεται η αφαίρεση των επιστρωμάτων από την εξωτερική επιφάνεια του αεροσκάφους και των τμημάτων του. Υπάρχουν δύο μέθοδοι απόχρωσης, η χημική μέθοδος (chemical stripping) και η ψηγματοβολή (blast depainting). Στη χημική μέθοδο εφαρμόζονται στο αεροσκάφος αποχρωστικές ουσίες, που υποβαθμίζουν το επίστρωμα, και ακολούθως αυτό αφαιρείται με τριβή ή πλύση μαζί με την εξωτερική βαφή. Οι αποχρωστικές ενώσεις είναι πολύ ισχυρές, για να μπορέσουν να αποδομήσουν τα επίσης ισχυρά πολυουρεθανικά χρώματα. Οι βασικές χημικές ουσίες που χρησιμοποιούν είναι οι φαινόλες, σε ποσοστό 20% και οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες (συνήθως μεθυλενοχλωρίδιο, CH_2Cl_2). Η αρχή

λειτουργίας της ψηγματοβολής στηρίζεται στη βίαια προώθηση ρεύματος αποξεστικού υλικού πάνω στην επιφάνεια. Τα αποξεστικά υλικά (άμμος, πλαστικό, νερό υψηλής πίεσης, αποκαμινεύματα, ψήγματα μετάλλων κλπ.) με την πρόσπτωση στην επιφάνεια απομακρύνουν τα επιστρώματα βαφής, τα προϊόντα οξείδωσης και άλλα υπολείμματα και προετοιμάζουν την επιφάνεια για βαφή. Οι μέθοδοι ψηγματοβολής δημιουργούν ρεύμα αποβλήτων υγρό ή στερεό, ανάλογα με το αποξεστικό. Η βαφή συμβάλλει σημαντικά στη δημιουργία επικίνδυνων υγρών και στερεών αποβλήτων καθώς και αέριων εκπομπών. Τα απόβλητα από τα χρωστήρια συμπεριλαμβάνουν στερεά απόβλητα (μπογιές), υγρά τοξικά (αποχρωστικά, διαλύτες, υπολείμματα από βαφές) και επικίνδυνα αέρια (VOCs). Μέχρι το πρόσφατο παρελθόν οι περισσότερες εταιρείες απέρριπταν τα απόβλητα τους από βαφές σε χωματερές και χώρους ταφής. Σήμερα εκτιμάται ότι το 50% του κόστους διαχείρισης μιας αεροπορικής βιομηχανίας προέρχεται από τα απόβλητα βαφής.

Η κυριότερη επίδραση της χρώσης στο περιβάλλον συνίσταται στην εκπομπή αέριων υδρογονανθράκων (VOCs) από τα αραιωτικά και τους διαλύτες που περιλαμβάνουν τα χρώματα στη σύνθεσή τους. Η χημική μέθοδος απόχρωσης δημιουργεί βλαβερές αέριες εκπομπές οργανικών ενώσεων που προέρχονται από τους διαλύτες των αποχρωστικών, αλλά το ίδιο συμβαίνει και κατά τη ψηγματοβολή, παρ' ότι δεν χρησιμοποιούνται διαλύτες, από τα αποξεστικά υλικά. Ειδικό χειρισμό απαιτούν οι βαφές και τα αραιωτικά σε περίσσεια, τα φίλτρα αέρος στους θαλάμους ψεκασμού, τα στουπιά και τα κουτιά από τις βαφές (αν περιέχουν ποσότητα βαφής), καθώς οι τελευταίες περιέχουν βαριά μέταλλα, συνήθως ψευδάργυρο και χρώμιο. Η απόχρωση επίσης δημιουργεί ρεύμα αποβλήτων, υγρό ή στερεό ανάλογα με τη μέθοδο που ακολουθείται. Η χημική μέθοδος παράγει υγρή ιλύ (λάσπη) που αποτελείται από το αποχρωστικό και τα υπολείμματα της βαφής, και περιέχει διαλύτες και βαριά μέταλλα από τα πηγμένα. Οι συνήθεις αποχρωστικές ουσίες είναι οργανικοί διαλύτες και περιλαμβάνουν στη σύστασή τους φαινόλες, διχλωρομεθάνιο και χρωμικό νάτριο. Οι ουσίες αυτές αποτελούν επικίνδυνα αέρια, καυστικά, τοξικά και ύποπτα για καρκινογένεση. Η βαφή και το αποχρωστικό αφαιρούνται από την επιφάνεια του αεροσκάφους με κύκλους πλύσης, με νερό σε υψηλή πίεση. Κατά προσέγγιση 1000 γαλόνια (περί τα 3800 λίτρα) νερού απαιτούνται για την απόχρωση ενός μεγάλου

αεροσκάφους, δημιουργώντας μεγάλη ποσότητα από φαινορικά απόνερα που περιλαμβάνουν διαλύτες και βαριά μέταλλα. Η ψηγματοβολή παράγει αντίστοιχα στερεά απόβλητα που αποτελούνται από κομμάτια βαφής και αποξεστικού. Τα απόβλητα αυτά είναι επιβλαβή για το περιβάλλον καθώς περιέχουν βαριά μέταλλα (Μάγειρας Ι., 2012).

5.2.7 Μπαταρίες

Στα αεροσκάφη χρησιμοποιούνται δύο τύποι μπαταριών, οι μπαταρίες μολύβδου /θειικού οξέος και νικελίου καδμίου, με τις πρώτες περισσότερο διαδεδομένες. Και τα δύο είδη μπαταριών περιέχουν επικίνδυνες, διαβρωτικές και τοξικές ουσίες που μπορούν να μολύνουν το έδαφος αλλά και να βλάψουν τον άνθρωπο εφόσον έρθει σε άμεση επαφή. Ειδικά το θειικό οξύ μπορεί να μολύνει το έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα (Μάγειρας Ι., 2012).

5.2.8 Αποπαγωτικά

Η αποπάγωση και η αντιπάγωση είναι οι διαδικασίες αφαίρεσης ή παρεμπόδισης σχηματισμού αντίστοιχα του πάγου από τις επιφάνειες του αεροσκάφους που του δίνουν άντωση κατά την απογείωση και την πτήση, όπως κυρίως οι πτέρυγες και δευτερευόντως η άτρακτος. Η διαδικασία που ακολουθείται στο έδαφος περιλαμβάνει συνήθως την αφαίρεση του συγκεντρωμένου πάγου (αποπάγωση) και την παρεμπόδιση δημιουργίας νέου μέχρι την απογείωση (αντιπάγωση). Κατά τη διαδικασία χρησιμοποιούνται διαλύματα με βάση γλυκόλες, όπως η αιθυλενογλυκόλη, η διαιθυλενογλυκόλη ή προπυλενογλυκόλη. Η διαδικασία γίνεται συνήθως κοντά στο διάδρομο προκειμένου να μεσολαβήσει κατά το δυνατόν μικρός χρόνος μέχρι την απογείωση. Η διαδικασία αποπάγωσης και αντιπάγωσης κατά την πτήση γίνεται με ηλεκτρικά συστήματα ή συστήματα αέρος του αεροσκάφους, που φουσκώνουν ή θερμαίνουν με ζεστό αέρα ή ηλεκτρικές αντιστάσεις τα κρίσιμα τμήματα του αεροσκάφους, από όπου πρέπει να αφαιρεθεί ή να μη σχηματιστεί πάγος.



Σχήμα 30: Διαδικασία αποπάγωσης αεροσκάφους πριν την αναχώρηση

Πηγή: ίντερνετ



Σχήμα 31: Διαδικασία αποπάγωσης αεροσκάφους πριν την αναχώρηση

Πηγή: ίντερνετ

Τα υγρά αποπάγωσης, μαζί με το λιωμένο πάγο στραγγίζουν από την επιφάνεια του αεροσκάφους στο έδαφος. Το μείγμα αυτό νερού και γλυκολών, αν δε συλλεχθεί αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για τον υδροφόρο ορίζοντα. Οι γλυκόλες αποδομούνται

πολύ αργά και εξαντλούν το οξυγόνο από το νερό, και έχουν συνεπώς πολύ σοβαρή τοξική επίδραση στα υδατικά έμβια όντα (Μάγειρας Ι., 2012).

5.2.9 Πλυντήρια αεροσκαφών κινητήρων και εξοπλισμού

Το πλύσιμο των αεροσκαφών γίνεται για την προστασία των μεταλλικών επιφανειών από τη διάβρωση, που μπορεί να προκαλέσουν το θαλασσινό νερό, άλλες διαβρωτικές στερεές ουσίες και ηλεκτρολύτες. Η συχνότητα που εκτελείται ποικίλει ανάλογα με τη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος, και συνίσταται από τους περισσότερους κατασκευαστές στους τέσσερις μήνες. Συνοπτικά, το πλύσιμο των αεροσκαφών γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία. Αρχικά, γίνεται ψεκασμός υπό πίεση σε ολόκληρη την επιφάνεια του αεροσκάφους με μείγμα ζεστού νερού και καθαριστικού, για να μαλακώσει η συσσωρευμένη επίστρωση από έλαια, ακαθαρσίες και οξείδωση. Στη συνέχεια, γίνεται το βούρτσισμα των επιφανειών με αλκαλικό καθαριστικό, συνήθως υδατικής βάσης για να μαλακώσουν και να γαλακτωματοποιηθούν οι ακαθαρσίες και τα ξένα σώματα και να αποκολληθούν από την επιφάνεια του αεροσκάφους. Ακολουθεί, η ρίψη με υδροσωλήνα ζεστού ή κρύου νερού στις επιφάνειες του αεροσκάφους, για την πλήρη απομάκρυνση του περιλαμβάνουν πετρέλαιο, γράσο, και άλλες ακαθαρσίες από το αεροσκάφος.

Παρόμοια με τα πλυντήρια αεροσκαφών, στα συνεργεία επισκευής και τα δοκιμαστήρια κινητήρων προκύπτουν απόβλητα από τις εργασίες καθαρισμού του κινητήρα και του δαπέδου με αλκαλικά καθαριστικά και συνήθως περιλαμβάνουν λάδια, λιπαντικά, και γαλακτωματοποιημένες ακαθαρσίες. Κατά τη συντήρηση των οχημάτων εξυπηρέτησης επίσης, προκύπτουν απόβλητα από πλύσιμο και την αντικατάσταση λιπαντικών και ελαίων.

Υπολογίζεται ότι από το πλύσιμο ενός σχετικά μικρού μεγέθους αεροσκάφους όπως το F-16 δημιουργούνται περίπου 1000 λίτρα (250 γαλόνια) απόβλητων, ποσότητα που μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 5000 λίτρα για το πλύσιμο ενός μεγάλου αεροσκάφους, όπως το C-130 ή ένα αντίστοιχου μεγέθους πολιτικό. Τα απόβλητα από τα πλυντήρια των αεροσκαφών, τα συνεργεία επισκευής και δοκιμαστήρια κινητήρων και τα συνεργεία οχημάτων δημιουργούν υγρά απόβλητα που περιλαμβάνουν κυρίως μεγάλες ποσότητες ελαίων, λιπών, και αλκαλικών καθαριστικών, και σε μικρότερο

βαθμό μέταλλα και βιοχημική απαίτηση σε οξυγόνο. Τα περιεχόμενα έλαια είναι και στις τρεις φάσεις, αδιάλυτα (στην επιφάνεια), διαλυμένα και γαλακτωματοποιημένα μέσα στα λύματα. Τα μέταλλα προέρχονται από το νερό του δικτύου, την επιφάνεια του αεροσκάφους και κομμάτια του χρώματος που αποκολλούνται με το νερό. Οι περιεκτικότητες τους είναι γενικά χαμηλές και μη ενέχουσες σημαντικό περιβαλλοντικό κίνδυνο, εκτός από εξαιρετικές περιπτώσεις όπως, η μεγάλη περιεκτικότητα των απόνερων σε κάδμιο και νικέλιο από τους κινητήρες των C-130, λόγω της επιμετάλλωσης των πτερυγίων του συμπιεστή με τα μέταλλα αυτά.

Όπως προαναφέρθηκε, δημιουργούν προβλήματα γεύσης και οσμής, ενώ επίσης σχηματίζουν διακριτή επιφανειακή στιβάδα, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τη φωτοσύνθεση και τον αερισμό του νερού, άλλα και τη λειτουργία των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων. Η απελευθέρωση των αποβλήτων που περιέχουν έλαια και λίπη σε μεγάλες ποσότητες στο αποχετευτικό σύστημα, συμβάλλει στην δημιουργία επίστρωσης στα συστήματα μεταφοράς των αστικών λυμάτων. Εφόσον προηγηθεί επεξεργασία, οι επιστρώσεις από έλαια, λιπαντικά επηρεάζουν συνολικά την αποδοτικότητα των χημικών κατακρημνιστικών που χρησιμοποιούνται για την κροκίδωση των αποβλήτων. Το pH των αποβλήτων που περιλαμβάνει απορρυπαντικά συνήθως κυμαίνεται σε πολύ ψηλά επίπεδα, από 9,0 έως 10,8, και πρέπει να μειωθεί με κατάλληλη επεξεργασία. Τα απορρυπαντικά μπορεί να προκαλέσουν μερική επίπλευση της λάσπης μέσω της απελευθέρωσης διοξειδίου του άνθρακα (Μάγειρας Ι., 2012).

5.3 Φυτοαποκατάσταση ως προτεινόμενη μέθοδος

5.4 Τόπος φύτευσης – σχέδιο

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προκύπτει ότι, αφού η διαδικασία της φυτοαποκατάστασης είναι in-situ, τα φυτά θα πρέπει να βρίσκονται όσο είναι δυνατόν πιο κοντά στη πηγή εκπομπής, ώστε να απορροφήσουν τους ρύπους άμεσα, προτού εξαπλωθούν. Γι αυτό τον λόγο προτείνεται να εγκατασταθούν τόσο εντός της πίστας ελιγμών του αεροδρομίου όσο και περιμετρικά αυτού.

Στην πρώτη περίπτωση θα φυτευτούν στις επιφάνειες μεταξύ των τροχόδρομων και του διαδρόμου. Τα φυτά που θα φυτευτούν θα πρέπει να είναι:

- **Χαμηλού ύψους** (έρποντα - εδαφοκαλυπτικά)

Τα φυτά θα πρέπει να είναι χαμηλής ανάπτυξης ή εδαφοκαλυπτικά ώστε αφ ενός να μην επηρεάζουν την ομαλή κίνηση του ανέμου και αφ ετέρου να μη προκαλούν σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά ώστε να δημιουργούνται αεροδίνες οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν αναταράξεις κατά την προσαπογείωση των αεροσκαφών.

- **Ξηροφυτικά**

Να αντέχουν στην ξηρασία και στις υψηλές θερμοκρασίες κυρίως το καλοκαίρι.

- **Ελάχιστα απαιτητικά σε συντήρηση και επεμβάσεις**

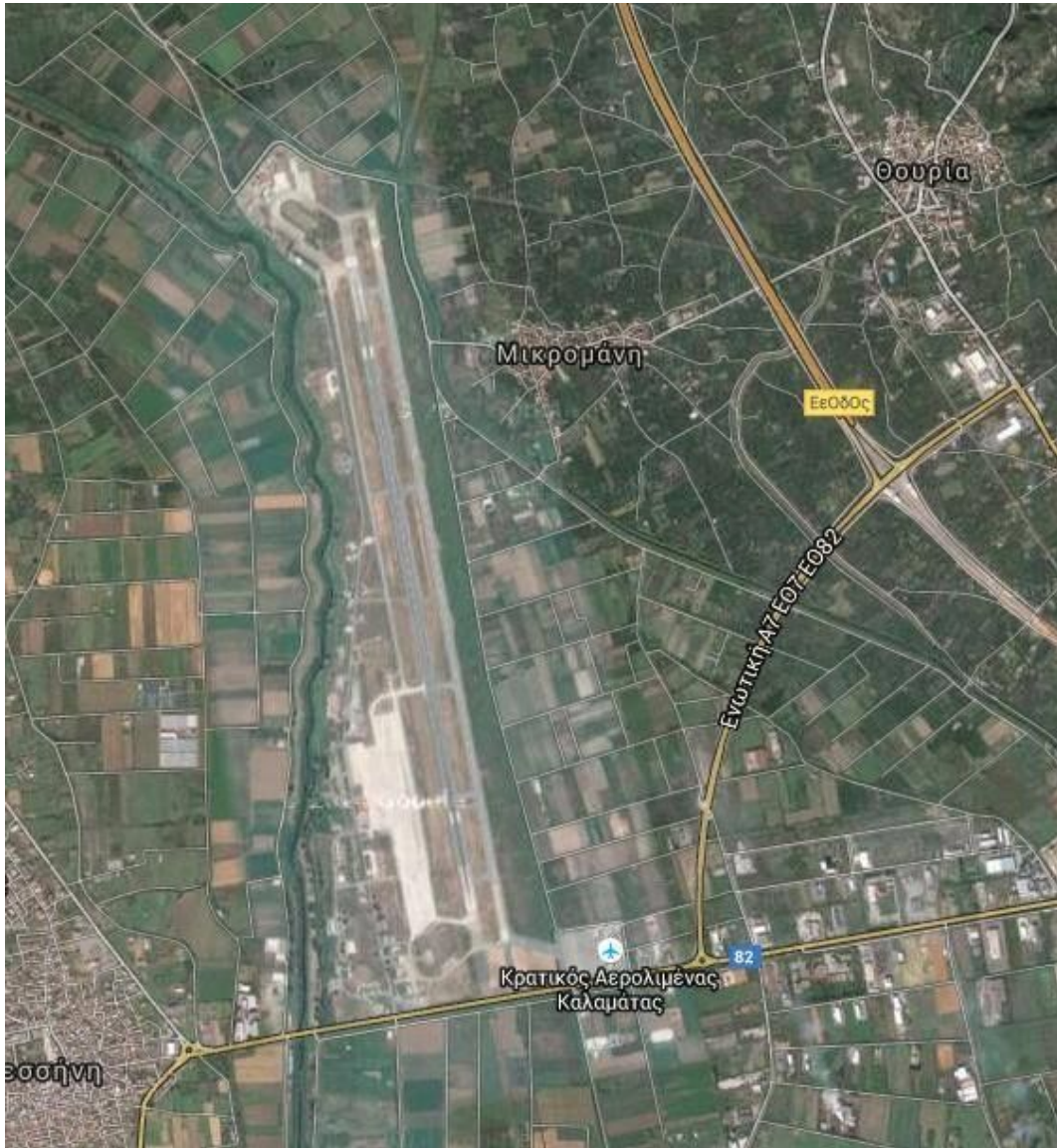
Αυτές οι θέσεις φύτευσης κατά τη λειτουργία του αεροδρομίου είναι δυσπρόσιτες λόγω της συνεχούς κίνησης των αεροσκαφών και των οχημάτων επίγειας εξυπηρέτησης. Συνεπώς δε θα πρέπει να απαιτούν τακτική παρακολούθηση αλλά ελάχιστες επεμβάσεις.

- **Ενδημικά της περιοχής**

Τα ιθαγενή φυτά που ευδοκιμούν στην περιοχή προδιαγράφονται γενετικά για αντεπεξέλθουν στις τοπικές εδαφοκλιματικές συνθήκες ενώ διατηρούν την ισορροπία του οικοσυστήματος.

- **Μην είναι ελκυστικά για άγρια μεταναστευτικά πουλιά (που πετούν σε σμήνη)**

Τα μεταναστευτικά πουλιά που πετούν σε σμήνη αποτελούν κίνδυνο για τις πτήσεις (bird strike). Προκαλούν ζημιές στα αεροσκάφη, οι οποίες μπορεί να αποβούν και μοιραίες. Θα πρέπει τα φυτά που θα εγκατασταθούν εκεί να μη τα προσελκύουν.



Σχήμα 32: Κάτοψη του αεροδρομίου Καλαμάτας



Σχήμα 33: Προτεινόμενη φύτευση του αεροδρομίου Καλαμάτας

Υπόμνημα:

	Εδαφοκαλυπτική φύτευση
	Θάμνοι ή μικρά δένδρα

5.5 Προτεινόμενο φυτικό υλικό

Σύμφωνα με τα παραπάνω προτείνονται φυτά τα οποία θα πρέπει να απορροφούν όσο το δυνατόν περισσότερα είδη ρύπων, με βάση τον επιθυμητό μηχανισμό φυτοαποκατάστασης και το είδος του ρυπαντή. Στην περίπτωση του φυτομετασχηματισμού οργανικών ρυπαντών και της φυτοαποκατάστασης βαρέων μετάλλων τα φυτά πρέπει να παρουσιάζουν γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης, υψηλούς ρυθμούς εξατμισοδιαπνοής, αρκετά βαθύ ριζικό σύστημα για την περίπτωση υπογείων υδάτων και να μετατρέπουν το ρυπαντή σε μη τοξικά παράγωγα.

Η φύτευση χωρίζεται σε δύο τύπους, την εδαφοκαλυπτική και την χαμηλού ύψους (θάμνοι μικρής ανάπτυξης). Τα εδαφοκαλυπτικά (κόκκινο χρώμα) θα εγκατασταθούν στις επιφάνειες των τροχοδρόμων και των διαδρόμων. Η χαμηλού ύψους φύτευση θα εγκατασταθεί περιμετρικά (μπλε χρώμα).

Στη συνέχεια αναφέρονται φυτά κατάλληλα για τη φυτοαποκατάσταση του τοπίου.

Πίνακας 5: Συγκεντρωτικός πίνακας προτεινόμενων φυτών

ΦΥΤΟ		Ρύπος	Μηχανισμός δέσμευσης
Οικογένεια	Γένος - Είδος		
Brassicaceae	<i>B. napus</i> <i>B. Nigra</i> <i>B.oleracea</i> <i>Crambe cordifolia,</i> <i>Eruca sativa</i> <i>Iberis umbellate</i> <i>Matthiola sp.</i> <i>Raphanus sativus</i>	Cr, Pb, Zn, Ni, Cd, Cu	Φυτοεξαγωγή
Salicaceae	<i>Salix spp.</i>	Cr, Πετρελαιοειδή, υδρογονάνθρακες, Οργανικοί διαλύτες, Cd, Pb, Zn, TCE	Φυτοεξαγωγή
Poaceae	<i>Agrostis capillaris,</i> <i>Triticum aestivum,</i> <i>Cynodon dactylon,</i> <i>Festuca arundinacea</i>	Pb, Zn, Υδρογονάνθρακες	

<p><i>Asteraceae</i></p>	<p><i>Helianthus annuus</i> <i>Achillea sp.</i> <i>Ageratum sp.</i> <i>Anthemis sp.</i> <i>Artemisia sp.</i> <i>Aster sp.</i> <i>Bellis perennis</i> <i>Calendula officinalis</i> <i>Centaurea cineraria</i> <i>Chrysanthemum coronarium</i> <i>Coreopsis maritima</i> <i>Cosmos atrosanguineus</i> <i>Cynara cardunculus</i> <i>Dahlia imperialis</i> <i>Dimorphotheca</i> <i>Gazania krebsiana</i> <i>Inula helenium,</i> <i>Santolina chamaecyparissus</i> <i>Tagetes erecta</i> <i>Zinnia elegans</i></p>	<p>Cr, Cu, Pb, Zn, Cd, Ni</p>	<p>Φυτοεξαγωγή, Φιλτράρισμα ή ριζοδιήθηση</p>
--------------------------	--	-------------------------------	---

Fabaceae	<i>Medicago sativa</i> <i>Trifolium pratense</i>	Cr	
Violaceae	<i>Viola sp.</i>	Zn, Ni	
Lamiaceae	<i>Thymus sp.</i> <i>Teucrium polium</i> <i>Rosmaris officinalis</i> <i>Phlomis fruticosa</i> <i>Origanum sp.</i> <i>Ocinum basilicum</i> <i>Mentha spicata</i> <i>Melissa officinalis,</i> <i>Levandula angustifolia</i> <i>Ballota pseudodictamus</i>	Cu, Pb, Zn, Ni	
Plumbaginaceae	<i>Plumbago sp.</i> <i>Limonium sp.</i> <i>Armeria sp.</i>	Pb, Ni	

Craryophyllaceae	<i>Cerastium</i> <i>Dianthus chinensis</i> <i>Gypsophila sp.</i> <i>Silene sp.</i>	Pb	
Moraceae	<i>Ficus elastica</i>	Βενζόλιο	
Crassulaceae	<i>Kalanchoe blossfeldiana</i>	Βενζόλιο	
Scrophulariaceae	<i>Veronica austriaca</i> <i>Verbascum sp.</i> <i>Linaria vulgaris</i> <i>Digitalis purpurea</i> <i>Antirrhinum hispanicum</i>	Cu	
Pinaceae	<i>Pinus spp.</i>	Υδρογονάνθρακες, πετρελαιοειδή, οργανικοί διαλύτες, TCE	
Cyperaceae	<i>Cyperus albobstriatus</i>	Cu	

5.6 Συγκομιδή, επεξεργασία και συντήρηση της φυτοαποκατάστασης

Το σύστημα της φυτοαποκατάστασης είναι διαχείριση ζωντανών οργανισμών. Η διατήρηση ενός υγιούς συστήματος είναι ζωτικής σημασίας για τη συνέχιση και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αποκατάστασης. Γι αυτό το σκοπό απαιτείται η συντήρηση του προτεινόμενου φυτικού υλικού και συγκεκριμένα:

- **Κούρεμα – κλάδεμα όπου απαιτείται**

Τα φυτά θα πρέπει να κλαδεύονται (δένδρα) και να κουρεύονται (εδαφοκαλυπτικά) σε τακτικά χρονικά διαστήματα, ώστε να λειτουργούν πιο αποτελεσματικά αλλά και για λόγους ασφαλείας του αεροδρομίου. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι τα υπολείμματα κλαδεμάτων ή κουρέματος δεν πρέπει να κομποστοποιηθούν, αντίθετα, θα πρέπει να αποθηκεύονται σε ειδικό χώρο και να σταλούν απευθείας για διαχείριση σε ειδική μονάδα, σύμφωνα πάντα με τις υποδείξεις του φορέα/εταιρία κλπ που διαθέτει την απαραίτητη τεχνογνωσία και θα υποστηρίξει το έργο.

- **Λίπανση**

Γενικά, τα φυτά που προτείνονται είναι από τη φύση τους σκληραγωγημένα και δεν έχουν ιδιαίτερες ανάγκες σε λίπανση όπως τα καλλιεργούμενα. Καλό θα ήταν όμως, να γίνει μια βασική λίπανση πριν ή κατά την εγκατάστασή τους. Κατά τη διάρκεια του χρόνου να παρακολουθούνται από τον επιβλέποντα σε συνεργασία με τον φορέα/εταιρία κλπ που διαθέτει την απαραίτητη τεχνογνωσία και θα υποστηρίξει το έργο.

- **Φυτοπροστασία – ζιζανιοκτονία**

Προτείνεται η ολοκληρωμένη διαχείριση. Στόχος είναι να αποκατασταθεί η περιοχή από ρύπους και όχι να επιβαρυνθεί και με χημικά φυτοπροστασίας.

- **Άρδευση – όπου απαιτείται**

Τα προτεινόμενα φυτά είναι κατά κανόνα ξηροφυτικά. Εξαιρούνται τα καλλιεργούμενα φυτά (π.χ. οικογένεια Brassicaceae) τα οποία απαιτούν άρδευση.

- **Συγκομιδή**

Όταν τα φυτά συσσωρεύσουν τον ρυπαντή πρέπει να πραγματοποιηθεί η συγκομιδή, η απομάκρυνσή τους από την περιοχή και η περαιτέρω διαχείριση τους, η οποία εξαρτάται από τη φύση των παραγόμενων προϊόντων μεταβολισμού καθώς και από την συγκέντρωσή τους στα φυτικά κύτταρα. Στην περίπτωση οργανικών ρυπαντών που διασπώνται σε μη τοξικές ουσίες δεν είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία του φυτικού υλικού. Στην περίπτωση που πραγματοποιείται σημαντική συσσώρευση στην περιοχή της ρίζας, τότε είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία των φυτικών ιστών. Η πιο συνηθισμένη διαδικασία επεξεργασίας του φυτικού υλικού είναι η ελεγχόμενη καύση (controlled incineration). Άλλες μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι η κομποστοποίηση (composting) καθώς και διάθεση σε χωματερές (landfilling) (Σαχινίδης Σ., 2012).

6 Βιβλιογραφία

- Βαλαβανίδης ΑΘ., 2008. Οικολογία και περιβαλλοντική τοξικολογία – ερευνητική μεθοδολογία για την εκτίμηση οικολογικού κινδύνου από επικίνδυνες χημικές ουσίες. Εκδόσεις Σύγχρονα Θέματα.
- Καρέλας Ε., Τριαντάφυλλος Ι., Φρέσκος Γ., 2004. Κινητήρες Αεροσκαφών , ειδικότητα μηχανοσύνθετων αεροσκαφών. Β τάξη 1^{ου} κύκλου ΤΕΕ. Εκδόσεις ΟΑΕΔΒ Αθήνα.
- Σαρλής Γ., 1999. Συστηματική Βοτανική Εφαρμογές Κορμοφύτων. Εκδόσεις Σταμούλη 1999.
- Προφυλλίδης Β., 2010. Αεροπορικές Μεταφορές και Αεροδρόμια. Εκδόσεις Παπασωτηρίου. Αθήνα.
- Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012. Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών. Εκδόσεις Έμβρυο.
- Γιδαράκος Γ. και Αϊβαλιώτη Μ., 2005. Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδαφών και Υπόγειων Υδάτων από Επικίνδυνους Ρύπους. Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη.
- Μάγειρας Ι., 2012. Διαχείριση Αποβλήτων στην Αεροπορική Βιομηχανία. Μελέτη Περίπτωσης στο Κρατικό Εργοστάσιο Αεροσκαφών (ΚΕΑ). Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία Αθήνα.
http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/6627/mageirasi_aviationwaste.pdf;jsessionid=0FB19A8B0EFB3D6CCC11B5692ECC10FC?sequence=3
- Σαχινίδης Σ., 2012. Επίδραση των βαρέων μετάλλων και ειδικότερα του μόλυβδου, στην υγεία του ανθρώπου. Διεργασίες απομάκρυνσης του με την μέθοδο της φυτοαποκατάστασης. (μηδικής). Πειραματική εργασία.
<http://blogs.sch.gr/sachinidi/files/2012/08/saxd1.pdf>
- Ρύποι (ατμοσφαιρικοί, μονάδες συγκέντρωσης, αιωρούμενα σωματίδια, χωρικές και χρονικές κλίμακες διασποράς)
<http://lap.physics.auth.gr/atmdiasp/parousiaseis/chapter2.pdf>
- Ατμοσφαιρικοί ρύποι δεύτερη παράγραφος ορισμός ΕΕ
<http://lap.physics.auth.gr/pms/upload/diafaneies2a.pdf>

- Πηγές και διάδοση της ρύπανσης
http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_5.pdf
- SMAQ Ένα ολοκληρωμένο σύστημα ατμοσφαιρικής ρύπανσης
<http://www.certh.gr/dat/C304E804/file.pdf>
- Μαλανδρης Αθ., 2014. Η τάση του όζοντος στη Θεσσαλονίκη. Πτυχιακή εργασία. Θεσσαλονίκη.
<http://invenio.lib.auth.gr/record/135221/files/ptyxiaki.pdf?version=1>
- Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία - Κλιματολογικά στοιχεία Καλαμάτας
<http://www.emy.gr/hnms/greek/climatology/climatology.html>
- Δήμος Καλαμάτας – πληροφορίες για την περιοχή
<http://www.kalamata.gr/perioxi/klima.html>
- Advance Notice of Proposed Rulemaking on Lead Emissions From Piston-Engine Aircraft Using Leaded Aviation Gasoline; Proposed Rule, Part II. Environmental Protection Agency. Federal register, Wednesday, April 28, 2010.
<http://www.nbaa.org/ops/environment/avgas/20100428-epa-anprm-lead-emissions-piston-engine-aircraft.pdf>.
- Phytoremediation field studies database for chlorinated solvents, pesticides, explosives, and metals. U.S. Environmental Protection Agency, by Cynthia Green & Ana Hoffnagle, August 2004.
<https://clu-in.org/download/studentpapers/hoffnagle-phytoremediation.pdf>
- The Use and Effectiveness of Phytoremediation to Treat Persistent Organic Pollutants U.S. Environmental Protection Agency, by Kristi Russell, August 2005.
https://clu-in.org/download/studentpapers/phyto_to_treat_pops_russell.pdf
- Hyperaccumulators and contaminants : Al, Ag, As, Be, Cr, Cu, Mn, Hg, Mo, naphthalene, Pb, Pd, Pt, Se, Zn – accumulation rates. From Wikipedia the free encyclopedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_hyperaccumulators
- Hyperaccumulators and contaminants : Ni – accumulation rates. From Wikipedia the free encyclopedia.

https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperaccumulators_table_%E2%80%93_2 : Nicke

l

- Hyperaccumulators and contaminants: Radionuclides, Hydrocarbons and Organic Solvents – accumulation rates. From Wikipedia the free encyclopedia.

https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperaccumulators_table_%E2%80%93_3

- Phytoremediation of TCE in Groundwater by Jonathan Chappell, EPA NNEMS Fellow, February 1998. <http://clu-in.org/products/phytotce.htm>

- Phytoremediation Technology Evaluation Report, prepared by Jerry Schnoor for GWRTAC, October 1997, TE-98-01. https://clu-in.org/download/toolkit/phyto_e.pdf

- Phytoremediation Technology Overview Report, prepared by Ralinda R. Miller for GWRTAC, October 1996, TO-96-03. http://www.cluin.org/download/toolkit/phyto_o.pdf

- A Citizen's Guide to Bioremediation, April 1996, EPA 542-F-96-007. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/10002SZG.PDF?Dockkey=10002SZG.PDF>

F

- A Citizen's Guide to Bioremediation, April 1998, EPA 542-F-98-011 <http://naturalsystems.uchicago.edu/urbanecosystems/calumet/cdrom/problem%20solving/EPA%20guide%20to%20phyto2.pdf>

- Soil Stabilization Action Team, April 1996, EPA 542-F-96-010d. <http://www.oocities.org/mikiang2/mich4.htm>

- Phytoremediation Handbook, prepared by EPA (in Draft).

- Buzz and roar airport bees used to monitor aircraft pollution <http://www.euronews.com/2014/07/31/buzz-and-roar-airport-bees-used-to-monitor-aircraft-pollution/>