



**Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Τμήμα Περιβάλλοντος**

**Σημειώσεις στο μάθημα
Εδαφολογία: Τα εδάφη στα οικοσυστήματα**

Δρ. Β. Αντωνιάδης

Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή

1.1 Εδαφολογία και περιβάλλον

Το **έδαφος** (soil) είναι μια λεπτή φλούδα γης σε σχέση με το συνολικό μέγεθος του πλανήτη. Και όμως έλκει το ενδιαφέρον του ανθρώπου και σε επιστημονικό επίπεδο, αλλά και σε επίπεδο παραγωγής. Το έδαφος λοιπόν από τη μία αποτελεί έναν βασικό πλουτοπαραγωγικό παράγοντα για τον άνθρωπο (γεωργία, κτηνοτροφία κτλ), ενώ από την άλλη έχει ρόλο ‘κλειδί’ στις επιστήμες που ασχολούνται με το περιβάλλον. Και αυτό γιατί όλες οι διεργασίες της φύσης έχουν άμεση συσχέτιση με το έδαφος, αλλά και όλοι οι γεωχημικοί κύκλοι θρεπτικών και τοξικών στοιχείων ρυθμίζονται και εξαρτώνται από το έδαφος.

Πίνακας 1.1: Μέση πυκνότητα πετρωμάτων ανάλογα με το βάθος όπου βρίσκονται.

Βάθος	Κυρίαρχα ορυκτά	Μέση πυκνότητα, g cm⁻³
Πυρήνας	Ni- Fe	6- 12
Μανδύας	Si- Mg	2.8- 4
Εξωτερική Κρούστα	Si- Al	2.65

Αυτή, λοιπόν, η λεπτή φλούδα γης έχει πυκνότητα υλικών περίπου 2.65 g cm⁻³ (Πίνακας 1.1). Όσο προχωρούμε προς το εσωτερικό της γης φαίνεται ότι η πυκνότητα αυξάνεται, και λόγω της αύξησης της πίεσης λόγω της βαρύτητας, αλλά και λόγω του ότι τα υλικά που βρίσκουμε στο βάθος είναι από τη φύση τους βαρύτερα.

Το έδαφος δημιουργείται από την **αποσάθρωση** (weathering) των πετρωμάτων. Η αποσάθρωση είναι μια διαδοχή φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Πρώτα δρουν οι φυσικές διεργασίες, οι οποίες συντελούν στην κατάτμηση του πετρώματος. Αυτό οδηγεί στην αύξηση της ειδικής επιφάνειας του πετρώματος. Μετά δρουν οι χημικοί παράγοντες, όπως υδρόλυση, διαλυτοποίηση κτλ., οι οποίοι αλλοιώνουν τα πρωτογενή ορυκτά και οδηγούν στη δημιουργία των ορυκτών του εδάφους ή καλύτερα των **ορυκτών της αργίλου** (clay minerals). Οι βιολογικοί παράγοντες είναι βοηθητικοί και στα δύο αυτά στάδια. Για παράδειγμα οι ρίζες των φυτών διεισδύουν στο βράχο και συντελούν στην κατάτμηση του, και τα μικρόβια

του εδάφους εκκρίνουν οξέα που αλλοιώνουν τα χημικά χαρακτηριστικά των πρωτογενών ορυκτών και επιταχύνουν τη δημιουργία των ορυκτών της αργίλου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον επιστήμονα του περιβάλλοντος παίρνει η ιστορία που διαδραματίζεται στο έδαφος, όταν δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες για την εγκατάσταση ανωτέρων φυτών πάνω σε αυτό. Τότε θα έχουμε και τη δημιουργία χερσαίων οικοσυστημάτων. Οι συνθήκες που χαρακτηρίζονται κατάλληλες είναι:

- Η συγκράτηση νερού από το έδαφος
- Ο καλός αερισμός του εδάφους
- Η παρουσία θρεπτικών συστατικών στο έδαφος

Οι χημικοί και φυσικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στο εδαφικό περιβάλλον είναι πολύπλοκοι και όχι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Τα στοιχεία που είναι παρόντα στο έδαφος, είτε διαλυμένα στο εδαφικό διάλυμα είτε στη στερεή φάση, βρίσκονται σε μία διαρκή κίνηση, σε μία δυναμική ανταλλαγής. Η ταχύτητα των μεταβολών αυτών, όπως και η κατεύθυνση που έχει η χημική ισορροπία στα εδαφικά περιβάλλοντα είναι αντικείμενο μελέτης της εδαφολογίας. Αυτή η δυναμική αφορά:

- Τα ιόντα (μπορεί να είναι προσροφημένα στην εδαφική επιφάνεια, διαλυμένα στο εδαφικό διάλυμα κτλ.)
- Το νερό (συμμετέχει στον κύκλο του νερού στη φύση)
- Τα οργανικά υλικά (αποσυντίθενται από τη νεκρή ύλη, αλλά και ανασυντίθενται)
- Τα ανόργανα υλικά (δημιουργία δευτερογενών ορυκτών της αργίλου κτλ.)

1.2 Ορισμός του εδάφους

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το έδαφος είναι

- Προϊόν αποσάθρωσης των πετρωμάτων
- Εξωτερικός φλοιός της γης με πυκνότητα περίπου 2.65 g cm^{-3}
- Υλικό στήριξης και θρέψης των έμβιων όντων των υπερκείμενων οικοσυστημάτων

1.3 Τα συστατικά του εδάφους

Ένα καλά διαμορφωμένο έδαφος έχει στη μάζα του και τις τρεις φάσεις της ύλης, δηλαδή στερεή, υγρή και αέρια. Η στερεή φάση αποτελείται κυρίως από ανόργανα

συστατικά που είναι προϊόντα της αποσάθρωσης, αλλά και από οργανικά. Τα οργανικά προέρχονται από την καλή αποσύνθεση της νεκρής ύλης των φυτικών και ζωικών ιστών που διαβιούν στο έδαφος. Τα οργανικά από εδώ και στο εξής θα ονομάζονται πιο σωστά **οργανική ουσία του εδάφους** (soil organic matter). Η υγρή φάση του εδάφους αναφέρεται στο εδαφικό διάλυμα, από όπου τρέφονται τα ανώτερα φυτά, και η αέρια φάση στο διαχυμένο αέρα του εδάφους που συντελεί στην ανάπτυξη κατάλληλων συνθηκών για την επιβίωση των φυτικών και ζωικών οργανισμών του εδάφους.

Το έδαφος είναι πορώδες υλικό και μάλιστα έχει ένα δαιδαλώδες δίκτυο πόρων. Το εδαφικό διάλυμα και ο εδαφικός αέρας καταλαμβάνουν τον ελεύθερο χώρο των πόρων αυτών. Σε ένα μέσο έδαφος η στερεή φάση θα είναι το 50%, και το υπόλοιπο 50% θα έχουν οι πόροι, δηλαδή θα μοιράζεται σε εδαφικό διάλυμα και αέρα. Τα ελληνικά εδάφη είναι γενικά φτωχά σε οργανική ουσία, καθώς σπάνια αυτή υπερβαίνει το 2%. Έτσι από το 50% της στερεής φάσης το 48% είναι ανόργανα υλικά και το 2% οργανική ουσία. Πρέπει να τονιστεί ότι σε σχέση με τον παράγοντα χρόνο, τα ανόργανα συστατικά είναι πολύ αργά μεταβαλλόμενα, τα οργανικά είναι ευκολότερα μεταβαλλόμενα, ενώ τα υγρά και αέρια είναι πολύ ευμετάβλητα. Εδώ είναι η κατάλληλη στιγμή να τονιστεί ότι το έδαφος μαζί με τους πόρους έχει πυκνότητα κατά πολύ μικρότερη από την πυκνότητα των στερεών του συστατικών. Γίνεται κατανοητό ότι όσο μεγαλύτερο το πορώδες του εδάφους τόσο 'αραιότερο' φαίνεται ανά μονάδα όγκου. Η πυκνότητα του εδάφους που περιέχει και τους πόρους (η οποία είναι η πυκνότητα που βλέπουμε σε συνήθεις συνθήκες) λέγεται **Φαινόμενο Ειδικό Βάρος (ΦΕΒ)** (Bulk density). Σε αντίθεση με την πυκνότητα των στερεών συστατικών, το ΦΕΒ του εδάφους εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και έχει τιμές που κυμαίνονται από 0.9 έως 1.5 g cm⁻³.

1.3.1 Τα στερεά συστατικά του εδάφους

Το έδαφος είναι μια τρισδιάστατη ολότητα. Καθώς προχωράει η αποσάθρωση των μητρικών υλικών, το έδαφος αποκτάει μια διαστρωμάτωση, όπου τα υπερκείμενα στρώματα είναι καλύτερα αποσαθρωμένα και υποκείμενα λιγότερο, και αποκτά διακριτούς **ορίζοντες** (horizons). Σε μια **εδαφική κατατομή** (soil profile) μπορούμε να διακρίνουμε τον Α ορίζοντα, όπου η οργανική ουσία είναι πλουσιότερη και από όπου κυρίως τρέφονται τα φυτά (αυτός ο ορίζοντας ενδιαφέρει περισσότερο και τον

Πίνακας 1.2. Μέση χημική σύσταση κατά βάρος του φλοιού της γης (λάβετε υπόψη ότι είναι 95% πυριγενή, 4% σχιστόλιθοι, 0.75% ψαμμίτες και 0.25% ασβεστόλιθοι).

Στοιχείο	Ποσοστιαία αναλογία κατά βάρος, %
O	46.5
Si	27.6
Al	8.1
Fe	5.1
Ca	3.6
Mg	2.1
Na	2.8
K	2.6
Άλλα*	1.4

*: Εδώ μπαίνουν τα λεγόμενα ιχνοστοιχεία, τα οποία αν και δεν 'χωράνε' σε τέτοιους Πίνακες είναι τις περισσότερες φορές σημαντικότερα από τα υπόλοιπα στοιχεία για τους επιστήμονες του περιβάλλοντος.

Περιβαντολόγο, για αυτό και οι δειγματοληψίες εδάφους γίνονται σε αυτήν την επιφανειακή στρώση). Ο Β ορίζοντας είναι εκείνος που δέχεται τα εκπλύματα του Α, και είναι κυρίως ανόργανος, ενώ ο C είναι ο λιγότερο αποσαθρωμένος. Οι εδαφολογικές ολότητες με όμοια κατατομή και παρόμοιες φυσικές και χημικές ιδιότητες λέγονται **πέδον** (pedon).

Από τον Πίνακα 1.1 φάνηκε ότι τα στοιχεία Si και Al αποτελούν κατά κύριο λόγο τα ορυκτά του εδάφους. Ο Πίνακας 1.2 περιγράφει αναλυτικά την επί τοις εκατό αναλογία των στοιχείων στα ανόργανα συστατικά του εδάφους.

Τα γρήγορα συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε από τον παραπάνω Πίνακα είναι τα εξής:

- Τα κυρίαρχα στοιχεία είναι τα τρία πρώτα, δηλαδή O, Si και Al
- Το O είναι το μόνο ανιόν που καλείται να εξουδετερώσει την ηλεκτροθετικότητα των υπολοίπων
- Τα συστατικά με άμεσο ενδιαφέρον στους έμβιους οργανισμούς είναι με πολύ μικρά ποσοστά

Η προσοχή του Περιβαντολλόγου είναι κυρίως το τρίτο συμπέρασμα. Η αφθονία των θρεπτικών συστατικών είναι περιορισμένη, γιατί οι ανώτεροι οργανισμοί δεν τρέφονται ούτε από Si, ούτε από Al. Χρειάζεται, λοιπόν, μια ευρεία γνώση των εδαφικών συστημάτων και των μηχανισμών που κυριαρχούν σε αυτό, έτσι ώστε να είναι σε θέση να διαχειρίζεται τα οικοσυστήματα με τρόπους που θα διασφαλίζουν την **αιεφορία** τους (sustainability).

Είπαμε, λοιπόν, ότι τα ανόργανα στερεά συστατικά του εδάφους προέρχονται από την αποσάθρωση των μητρικών υλικών. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι κάποια ανθεκτικά ορυκτά κληροδοτούνται στο έδαφος ως έχουν. Τα λιγότερο ανθεκτικά αλλοιώνονται και χημικά, για να αναδημιουργήσουν τα λεγόμενα ορυκτά της αργίλου. Η ανθεκτικότητα των ορυκτών εξαρτάται από το λόγο Si/O. Όσο μεγαλύτερος ο λόγος αυτός, τόσο μεγαλύτερη η ανθεκτικότητα του ορυκτού στην αποσάθρωση. Αυτό γιατί όσο λιγότερα τα άτομα Si στο κρυσταλλικό πλέγμα, τόσο περισσότερα τα κατιόντα που καλούνται να καλύψουν το κενό του Si, και άρα μεγαλύτερη η αλλοίωση του πλέγματος αυτού.

Είπαμε προηγουμένως ότι τα συστατικά του εδάφους βρίσκονται σε μια δυναμική κίνηση στο περιβάλλον. Αυτή η κινητικότητα περιγράφεται από το γεωμορφικό κύκλο. Ο γεωμορφικός κύκλος όμως περιγράφει την κινητικότητα των συστατικών ποιοτικά μόνο. Μία ποσοτική έκφραση, που μας υποδεικνύει το αν ένα στοιχείο εμπλουτίζεται στο έδαφος ή απομακρύνεται από το έδαφος, είναι ο παράγων εμπλουτισμού, EF.

$$EF = \frac{[M] \text{ έδαφος}}{[M] \text{ πέτρωμα}} \quad (\text{Εξίσωση 1.1})$$

όπου [M] έδαφος είναι η συγκέντρωση ενός στοιχείου στο έδαφος και [M] πέτρωμα η συγκέντρωση του ίδιου στοιχείου στο μητρικό πέτρωμα. Πρέπει να τονιστεί ότι για τιμές EF από 0 έως και 0.5 έχουμε τάσεις εξάντλησης του στοιχείου, από 0.5 έως και 2 ούτε εξάντληση, αλλά ούτε και εμπλουτισμό και για EF από 2 και πάνω έχουμε εμπλουτισμό. Στον Πίνακα 1.3 φαίνονται οι παράγοντες εμπλουτισμού για κυριότερα θρεπτικά, αλλά και τοξικά στοιχεία.

Πίνακας 1.3. Παράγοντες εμπλουτισμού για μερικά στοιχεία με περιβαλλοντικό ενδιαφέρον.

Μακροστοιχεία	Ιχνοστοιχεία	PTEs
Ca 0.59	B 3.3	Ni 0.24
C 52	Cl 0.77	As 4.8
N 80	Mn 0.58	Cd 3.2
O 1	Cu 0.5	Hg 1.8
Fe 0.62	Zn 0.8	Pb 1.4
Mg 0.39	Mo 0.65	
P 0.43		
S 6.2		

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι τα περισσότερα στοιχεία δεν είναι στη ζώνη της εξάντλησης, αλλά ότι πολλά από τα θρεπτικά έχουν τιμές μικρότερες από 2, ενώ πολλά PTEs μεγαλύτερες από 2. Οι κύριες παρατηρήσεις που μπορούμε να κάνουμε βασισμένοι στα παραπάνω είναι οι εξής:

- Δεν υπάρχει αφθονία θρεπτικών (άρα χρειάζεται ορθή διαχείριση για αειφορία)
- Χρειάζεται καλή γνώση των κινδύνων από τα PTEs.

1.3.2 Η υγρή φάση του εδάφους

Το νερό του εδάφους έχει πρωταγωνιστικό ρόλο σε δύο σημαντικά ‘κεφάλαια’ της δυναμικής ολότητας που λέγεται έδαφος. Πρώτα στην αποσάθρωση των πρωτογενών ορυκτών. Το νερό δρα με δύο τρόπους:

- Ως χημικός διαλύτης
- Ως μέσο μεταφοράς των αποσαθρωμένων στοιχείων

Αλλά και στη θρέψη των φυτών, δηλαδή σε ένα σύνολο φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του εδάφους έχει σημαντικό ρόλο. Όσο αφορά αυτό το τελευταίο, το υγρό στοιχείο του εδάφους είναι μεγάλης σημασίας από πολλές πλευρές. Είπαμε ήδη ότι τα φυτά τρέφονται από το **εδαφικό διάλυμα** (soil solution). Με το ρεύμα της διαπνοής των φυτών οι ρίζες απορροφούν νερό από το έδαφος, και μαζί με αυτό ό,τι είναι διαλυμένο μέσα σε αυτό, είτε ‘τυχαίνει’ να είναι θρεπτικό για τα φυτά, είτε όχι.

Προαναφέραμε όμως ότι είναι εξαιρετικά ευμετάβλητος παράγων, και άρα δύσκολα υποκείμενος στην επιστημονική μελέτη. Είναι, λοιπόν, δύσκολο να καθορίσουμε τις

ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία, γιατί στηριζόμαστε σε έναν παράγοντα που είναι σήμερα έτσι και αύριο μπορεί να είναι αλλιώς. Είναι επίσης άξιο προσοχής ότι το εδαφικό νερό αποτελεί μόνο το 0.01% του νερού του πλανήτη. Από αυτό το ιδιαίτερα μικρό ποσοστό εξαρτάται η φυτική παραγωγή, και τελικά η επιβίωσή μας. Τα ζητήματα, λοιπόν, που άπτονται των χημικών ιδιοτήτων του εδαφικού διαλύματος είναι εξαιρετικά κρίσιμα. Είναι όμως και κάτι άλλο που κάνει τα πράγματα δυσκολότερα στη μελέτη μας. Το εδαφικό διάλυμα δεν είναι ανεξάρτητο της στερεής φάσης του εδάφους, αλλά βρίσκεται σε συνεχή ισορροπία με αυτήν. Τα διαλυμένα στοιχεία του εδαφικού διαλύματος αλληλεπιδρούν με 3 μηχανισμούς με τις εδαφικές επιφάνειες. Αυτοί φαίνονται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης στερεής και υγρής φάσης του εδάφους.

Μηχανισμός	Πώς λειτουργεί	Χημική συγγένεια μεταξύ του κυρίαρχου στοιχείου στο ορυκτό και του στοιχείου του εδαφικού διαλύματος
Έγκλειση	Το στοιχείο μπαίνει στη δομή του στερεού και εγκλωβίζεται	Ελάχιστη
Προσρόφηση	Το στοιχείο προσκολλάται αντιστρεπτά στην επιφάνεια του στερεού	Μικρή
Σχηματισμός στερεού διαλύματος	Το στοιχείο αντικαθιστά το κυρίαρχο στοιχείο του ορυκτού, δηλαδή γίνεται ισόμορφη αντικατάσταση	Μεγάλη

Πριν κλείσει το εισαγωγικό κεφάλαιο, και για να είναι πλήρης η εικόνα, θα πρέπει να αναφερθούν τα στοιχεία που θεωρούνται απαραίτητα για τη θρέψη των ανώτερων φυτών. Αυτά τα στοιχεία όπως τονίστηκε βρίσκονται διαλυμένα στο εδαφικό διάλυμα. Τα χωρίζουμε σε **μακροστοιχεία** (macronutrients) και ιχνοστοιχεία

(micronutrients ή trace nutrients). Τα ιχνοστοιχεία είναι εκείνα, των οποίων η συγκέντρωση στο εδαφικό διάλυμα είναι μικρότερη από 1 mmol m^{-3} . Τα στοιχεία αυτά είναι:

- Μακροστοιχεία- C, O, H, N, P, K, S, Ca, Mg και Fe
- Ιχνοστοιχεία- Mn, Cu, Mo, Zn, Cl και B

Τα στοιχεία C, O και H είναι τα μόνα, για των οποίων την απόκτηση το φυτό δεν εξαρτάται από το εδαφικό διάλυμα.

1.3.3 Η αέρια φάση του εδάφους

Ο αέρας εμπεριέχεται στους πόρους του εδάφους όπως ακριβώς και το εδαφικό διάλυμα. Λόγω της αναπνοής των ριζών ο εδαφικός αέρας εμπλουτίζεται πολύ σε CO_2 , πράγμα που σημαίνει ότι εκτοπίζεται το O_2 . Είναι, λοιπόν, απαραίτητο το έδαφος να αερίζεται ικανοποιητικά, δηλαδή να είναι σε ισορροπία με τον ατμοσφαιρικό αέρα, γιατί αλλιώς μπορεί να οδηγηθούμε σε τοξικά φαινόμενα για τα φυτά. Όσο μεγαλύτερη η διάμετρος των πόρων τόσο καλύτερος ο αερισμός του εδάφους. Το ποσοστό του αέρα μειώνεται με το βάθος. Συνήθως σε βάθος μεγαλύτερο των 1- 2 m δεν υπάρχει εδαφικός αέρας.

1.1.4 Οι ζωντανοί οργανισμοί του εδάφους

Δεν είναι αδιάφορο το έδαφος όσο αφορά την οικολογία των ζώντων οργανισμών. Μέσα στο έδαφος ζουν κατώτεροι φυτικοί οργανισμοί (μύκητες, βακτήρια κτλ.) και ζωικοί οργανισμοί (σκουλήκια, τρωκτικά κτλ.). Η πυκνότητά τους μειώνεται με το βάθος και εξαρτάται από αντίστοιχη ελάττωση του εδαφικού αέρα.

Κεφάλαιο 2- Η στερεή φάση του εδάφους

2.1 Γενικά

Τα χημικά στοιχεία, τα οποία αποτελούν τα ορυκτά, συνήθως βρίσκονται στη φύση σε ιοντική μορφή. Αυτό φανερώνει ότι ο κυρίαρχος δεσμός μεταξύ τους είναι ο ιοντικός δεσμός. Ο νόμος που περιγράφει τις δυνάμεις της ηλεκτροστατικής έλξης στον ιοντικό δεσμό, θυμίζεται ότι είναι ο νόμος του Coulomb, ο οποίος περιγράφεται από τον τύπο:

$$E = \frac{(Z+) (Z-) e^2}{r^2} \quad (\text{Εξίσωση 2.1})$$

όπου (Z+) είναι το σθένος του θετικά φορτισμένου ιόντος, (Z-) είναι το σθένος του αρνητικά φορτισμένου ιόντος, e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και r είναι η ακτίνα της απόστασης μεταξύ των δύο ιόντων.

Όμως και ο ομοιοπολικός δεσμός έχει σημαντική συνεισφορά στο δέσιμο των ιόντων στο κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών. Πρέπει να τονιστεί ότι πρακτικά οι δεσμοί των ορυκτών δεν είναι μόνο του ενός είδους ή μόνο του άλλου, αλλά τις περισσότερες φορές συνδυασμός τους. Έτσι ο δεσμός Si-O είναι ταυτόχρονα 50% ιοντικός και 50% ομοιοπολικός. Αυτό που είναι σίγουρο, παρ' όλ' αυτά, είναι ότι τα ορυκτά έχουν συγκεκριμένες γεωμετρικές διατάξεις ιόντων και αυτές είναι τέτοιες ώστε ελαχιστοποιούν κατά το δυνατό την ηλεκτροστατική ενέργεια του πλέγματος.

Έχει ήδη αναφερθεί ότι το κυριότερο ηλεκτραρνητικό στοιχείο των ορυκτών είναι το οξυγόνο. Ένα μέγεθος που εκφράζει πόσα άτομα οξυγόνου συναρμόζονται με ένα δοσμένο κατιόν, είναι ο **αριθμός συναρμογής (ΑΣ)**, και δίνεται ποσοτικά από την ακόλουθη εξίσωση

$$ΑΣ = \frac{r_c}{r_o} \quad (\text{Εξίσωση 2.2})$$

όπου r_c είναι η ιοντική ακτίνα του κατιόντος και r_o είναι η ιοντική ακτίνα του οξυγόνου.

Ανάλογα με την τιμή του ΑΣ έχουμε μια κρυσταλλική δομή στο ορυκτό και ένα συγκεκριμένο αριθμό ατόμων οξυγόνου γύρω από ένα δοσμένο κατιόν. Αυτό πιο ποσοτικά δίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Αριθμός συναρμογής κατιόντων και αντίστοιχη κρυσταλλική δομή ορυκτού.

Αριθμός Συναρμογής (r_c / r_o)	Άτομα Ο που συναρμόζονται	Κρυσταλλική δομή	Χαρακτηριστικό κατιόν της δομής
0-0.15	3	Τρίγωνο	
0.15- 0.40	4	4εδρο	Si
0.40-0.72	6	8εδρο	Al
0.72-1.10	8	Κύβος	
>1.10	12	Κυβο- οκτάεδρο	

Πριν προχωρήσουμε στην αναλυτική αναφορά των κυριότερων ορυκτών, είναι καλό να συζητήσουμε για έναν ακόμα μηχανισμό που συμβάλει στη διάταξη των κατιόντων στο κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών, και για τον οποίο πολύ αδρά μιλήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτός είναι η ισόμορφη αντικατάσταση. Ισόμορφη αντικατάσταση συμβαίνει όταν ένα κατιόν που ανήκει στον κρύσταλλο του ορυκτού αντικαθίσταται από ένα άλλο με παρόμοια r_c . Αν από αυτήν την αλλαγή προκύψει διαφορά σθένους, τότε αυτή η διαφορά καλύπτεται από την προσκόλληση και έτερου ιόντος στο πλέγμα. Μπορεί αυτή η αντικατάσταση να λέγεται ισόμορφη, εντούτοις πρακτικά δεν είναι σχεδόν ποτέ τέτοια, και προκαλεί τόσο μεγάλη ‘αναστάτωση’ στη δομή του ορυκτού, ώστε σύντομα αυτό αποσαθρώνεται.

2.2 Τα πρωτογενή ορυκτά

Η βασική δομική ομάδα αυτών των ορυκτών είναι το τετράεδρο Si, δηλαδή το SiO_4^{4-} . Στην εύλογη απορία κάποιου ‘πώς είναι δυνατό η βασική επαναλαμβανόμενη δομή ενός ορυκτού να είναι τέτοια που να αφήνει 4 αρνητικά φορτία ελεύθερα’ η απάντηση είναι η εξής. Τα άτομα Ο συμμερίζονται σε δύο ή και τρία τέτοια τετράεδρα, έτσι ώστε σε κάθε τετράεδρο τελικά το φορτίο να είναι μικρότερο από -4. Επιπλέον, ενδιάμεσα στις δομές υπεισέρχονται κατιόντα, τα οποία εξουδετερώνουν εντελώς τα όποια ελεύθερα αρνητικά φορτία και έτσι βοηθάνε στη σταθερότητα των κρυσταλλικών δομών.

Τα κυριότερα, λοιπόν, πρωτογενή ορυκτά είναι τα εξής:

- Ολιβίνες (ή Νησοπυριτικά ορυκτά)
- Πυρόξενοι (ή Ινοπυριτικά ορυκτά)
- Αμφίβολοι (ή Ινοπυριτικά ορυκτά)
- Μαρμαρυγίες (ή Φυλλοπυριτικά ορυκτά)
- Άστριοι (ή Τεκτοπυριτικά ορυκτά)

Για την αναλυτική τους περιγραφή ακολουθεί ο Πίνακας 2.2

Πρέπει να τονιστεί ότι όλα τα παραπάνω ορυκτά μπορεί να βρεθούν στο έδαφος ως έχουν. Θα τα βρούμε κυρίως στα κλάσματα της άμμου και ιλύος. Από την άλλη βέβαια, είναι υποκείμενα της χημικής αποσάθρωσης. Το πόσο μεγάλο χρονικό διάστημα θα παραμείνουν στο έδαφος με την παραπάνω μορφή τους, δηλαδή ως πρωτογενή ορυκτά, θα εξαρτηθεί από την ευπάθειά τους. Έχοντας κατά νου ότι όσο μεγαλύτερος ο λόγος Si/O τόσο σταθερότερο το ορυκτό, μπορούμε να πούμε ότι η σταθερότητα των ορυκτών στον Πίνακα 2.2 αυξάνεται από πάνω προς τα κάτω. Πρακτικά μιλώντας, οι άστριοι δεν αποσαθρώνονται χημικά ποτέ. Είναι τόσο ‘σκληροτράχηλα’ ορυκτά που ελάχιστη συμμετοχή έχουν στις χημικές διεργασίες του εδάφους, και αποτελούν κυρίως τα δομικά (ή αλλιώς σκελετικά) συστατικά του εδάφους.

Πίνακας 2.2 Τα κυριότερα πρωτογενή ορυκτά και η περιγραφή τους.

Ορυκτό	Μονάδα	Si/O	Ισόμορφη αντικατάσταση	Σχήμα
Ολιβίνες	SiO_4^{4-}	0.25		Ένα 4εδρο-Si ενωμένο 'βάση με βάση' με ένα άλλο 4εδρο-Si. Στην κοινή βάση τα O συμμερίζονται μεταξύ των 4έδρων και υπάρχουν και 2 δισθενή κατιόντα (Fe^{+2} , Mg^{+2} Ca^{+2} κτλ.).
Πυρόξενοι	SiO_3^{2-}	0.33		Απλές αλυσίδες 4έδρων. Συνδέονται μεταξύ τους με κατιόντα.
Αμφίβολοι	$\text{Si}_4\text{O}_{11}^{6-}$	0.36		Διπλές αλυσίδες 4έδρων. Συνδέονται μεταξύ τους με κατιόντα
Μαρμαρυγίες (Βερμικουλίτης και Βιοτίτης)	$\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$	0.4	<u>4εδρα-Si:</u> Si από Al <u>8εδρα-Al:</u> Al από Fe^{3+} και Mg^{2+}	Φύλλα 4έδρων-Si και 8έδρων-Al 2:1, με κατιόντα ενδιάμεσα για εξουδετέρωση (κυρίως K^+).
Άστριοι	SiO_2	0.5		Όλα τα O είναι κοινά μεταξύ των 4έδρων.

2.3 Τα ορυκτά της αργίλου

Τα ορυκτά της αργίλου θυμίζουν πολύ τις μαρμαρυγίες. Πρόκειται, δηλαδή, για ορυκτά με εναλλαγές μεταξύ 4έδρων-Si και 8έδρων-Al σε διάφορες αναλογίες (1:1, 2:1 και 2:1:1), με κατιόντα ανάμεσα στα φύλλα αυτά για την εξουδετέρωση των αρνητικών φορτίων. Οι κυριότερες διαφορές τους με τις μαρμαρυγίες είναι οι εξής:

- Πιο χαλασμένο πλέγμα
- Πιο εκτεταμένη ισόμορφη αντικατάσταση

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι αυτά τα χαρακτηριστικά είναι γενικόλογα, και δεν αφορούν όλες τις αργίλους. Τα ορυκτά 1:1 είναι παραδείγματα τέτοιων εξαιρέσεων.

2.3.1 Τα ορυκτά 1:1

Καολινίτης (Kaolinite): Δεν υπάρχει καθόλου ισόμορφη αντικατάσταση στον καολινίτη. Φέρει ελάχιστο φορτίο και κυρίως στις θραυστιγενείς επιφάνειες. Έχει CEC 3 – 15 cmol_c kg⁻¹ (CEC, Cation Exchange Capacity ή Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων. Εκφράζει την ικανότητα της αργίλου να **προσροφά** (adsorb) κατιόντα στις επιφάνειές της. Όσο μεγαλύτερη η CEC, τόσο εντονότερη η χημική συμπεριφορά της αργίλου. Περισσότερα για την CEC θα αναφέρουμε όταν θα συζητήσουμε τις χημικές ιδιότητες των εδαφών). Τα πλακίδια του καολινίτη συγκρατούνται ισχυρά με δεσμούς-H και δεν επιτρέπουν σε μόρια νερού και σε ιόντα να εισχωρήσουν στους ενδοστοιβαδικούς χώρους. Ως αποτέλεσμα των ισχυρών αυτών έλξεων μεταξύ των φύλλων 4έδρων και 8έδρων, η ειδική επιφάνεια του καολινίτη είναι μόνο 10-30 m² g⁻¹

Σερπεντίτης (Serpentite): Ό,τι ισχύει για τον καολινίτη. Η μόνη διαφορά είναι ότι 2 Al αντικαθίστανται από 3 Mg.

Αλλοϋσίτης (Halloysite): Ό,τι ισχύει για τον καολινίτη, μόνο που ενδοστοιβαδικά έχει εισχωρήσει 1 μόριο νερού.

2.3.2 Τα ορυκτά 2:1

Αυτά έχουν 2 4εδρα Si με ένα ενδιάμεσο φύλλο 8έδρου Al. Στα πλακίδια των ορυκτών αυτών οι βάσεις των 4έδρων Si είναι προς τα έξω και οι κορυφές προς τα μέσα. Στα ορυκτά 2:1 έχουμε εκτεταμένη ισόμορφη αντικατάσταση ως εξής:

- Στα 4εδρα Si: αντικατάσταση Si από Al
- Στα 8εδρα Al: αντικατάσταση Al από Mg²⁺, Fe²⁺ ή Ni²⁺

Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πολλά αρνητικά φορτία στις επιφάνειες των ορυκτών 2:1, κάτι που τα κάνει να έχουν υψηλές τιμές CEC. Κύριοι εκπρόσωποι των 2:1 είναι οι εξής:

Σμεκτίτες (Smectite): Στους σμεκτίτες ανήκει ο **μοντιοριλονίτης** (montmorillonite). Έχει ισόμορφη αντικατάσταση κυρίως στα 8εδρα Al. Έχει CEC περίπου 110 cmol_c kg⁻¹. Τα φύλλα δεν κρατιούνται ισχυρά, έτσι εισέρχονται μόρια νερού και θρεπτικά στις εσωτερικές του επιφάνειες. Έχει ειδική επιφάνεια 600- 800 m² g⁻¹.

Βερμικουλίτης (Bermiculite): Έχει CEC περίπου 150 cmol_c kg⁻¹. Στα 8εδρα Al υπάρχει ισόμορφη αντικατάσταση του Mg²⁺ από Al ή Fe²⁺. Χαρακτηστικό του βερμικουλίτη είναι ότι δεσμεύει ενδοστοιβαδικό K⁺ και το καθιστά μη διαθέσιμο για τη θρέψη των φυτών.

Ιλλίτης (Illite): Είναι όπως ο βερμικουλίτης, μόνο που από αυτόν έχει απομακρυνθεί το ενδοστοιβαδικό K⁺.

Μίκες (Micas): Πρόκειται για μαρμαρυγιακά ορυκτά (θυμίζω ότι αυτά είναι φυλλόμορφα πρωτογενή), όχι ακριβώς δευτερογενή. Καλύτερα πρόκειται για προϊόντα μεταμορφωσιγενούς προέλευσης. Εδώ όμως εμφανίζονται ξανά τα ορυκτά **μοσχοβίτης** (muscovite) και **βιοτίτης** (biotite), αυτή τη φορά σαν ορυκτά της αργίλου. Έχουν CEC περίπου 30 cmol_c kg⁻¹, που οφείλεται κυρίως στο ενδοστοιβαδικό K⁺.

2.3.3 Τα ορυκτά 2:1:1

Αυτά είναι ορυκτά παρόμοια σε μορφολογία με τα 2:1, δηλαδή 2 4εδρα Si με ενδιάμεσο φύλλο 8έδρου Al. Εδώ όμως υπάρχει και ένα ακόμα ενδιάμεσο φύλλο, που είναι οξείδιο του Mg. Το φύλλο αυτό το ονομάζουμε **γέφυρα βρουκίτη** (γιατί το οξείδιο του Mg λέγεται βρουκίτης). Τα ορυκτά 2:1:1 έχουν CEC 10- 40 cmol_c kg⁻¹. Κύριος εκπρόσωπός τους είναι ο **γλωρίτης**.

2.3.4 Τα αλλοφανή ορυκτά της αργίλου

Πρόκειται για Al-Si ορυκτά, που βρίσκονται σε προχωρημένα στάδια αποσάθρωσης. Έχουν διάρθρωση φύλλων Si- Al 1:1, αλλά με πολλές ατέλειες στη δομή τους. Αυτές οι ατέλειες είναι τόσο σημαντικές, που είναι δύσκολη η ταυτοποίησή τους. Σε αυτό το γεγονός οφείλουν και το όνομα 'αλλοφανή'.

2.3.5 Μη πυριγενή ορυκτά της αργίλου

Η αποσάθρωση των ορυκτών δεν σταματάει με τη δημιουργία των ορυκτών της αργίλου. Συνεχίζεται μέχρι την τέλεια καταστροφή κάθε κρυσταλλικής δομής. Όταν τα ιόντα είναι ‘γυμνά’ από κρυσταλλική δομή, συνήθως σαν ένα επόμενο στάδιο μόνιμης κατάστασης σε στερεή φάση, έχουν τη δημιουργία **οξειδίων και υδροξειδίων** (oxides and hydroxides). Τονίζεται η ‘στερεή φάση’, γιατί τα ιόντα όταν αποκόπτονται από το κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών με τη χημική αποσάθρωση μπαίνουν στο εδαφικό διάλυμα και τότε βρίσκονται σε υγρή φάση. Τα οξείδια και υδροξείδια, λοιπόν, είναι κυρίαρχα σε εδάφη όπου η αποσάθρωση έχει προχωρήσει πολύ. Τέτοια εδάφη είναι συνήθως ‘ξεπλυμένα’ από θρεπτικά και άρα μη γόνιμα. Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι ότι έχουν κοκκινωπή απόχρωση, και τέτοια κυρίως είναι τα εδάφη της τροπικής ζώνης. Τα οξείδια και υδροξείδια, επίσης, δεν έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό όσο αφορά τα φορτία της επιφάνειάς τους. Συλλέγουμε, λοιπόν, δύο σημαντικές ιδιότητές τους:

- Δεν έχουν κρυσταλλική δομή
- Έχουν επιφανειακά φορτία που είναι εξαρτώμενα από το pH του εδαφικού διαλύματος

Αυτό το δεύτερο σημαίνει ότι όταν το pH είναι μικρότερο από μια κρίσιμη τιμή οι επιφάνειες είναι φορτισμένες θετικά. Όταν το pH είναι υψηλότερο από αυτήν την κρίσιμη τιμή οι επιφάνειες είναι φορτισμένες αρνητικά. Η τιμή αυτή του pH λέγεται **ισοηλεκτρικό σημείο** (point of zero charge, PZC).

Τα κυριότερα οξείδια και υδροξείδια είναι αυτά των Fe, Al και Mn. Δεν θα εντυπήσουμε στη χημική συμπεριφορά των οξειδίων, αναφέρουμε μόνο τα ονόματα των κυριότερων από αυτά. Το κυριότερο οξείδιο-Fe είναι ο **γκετίτης**, το κυριότερο οξείδιο-Al είναι ο **γψίτης** και το κυριότερο οξείδιο-Mn είναι ο **μπιρνεσίτης**.

2.4 Οργανική ουσία

2.4.1 Γενικά

Το έδαφος έχει μεγάλη ποικιλότητα όσο αφορά τα ανόργανα συστατικά του, όπως εξηγήσαμε μέχρι τώρα. Κυρίως όμως είναι ένα περιβάλλον βιολογικής δράσης. Αρκεί να αναφερθεί ότι το συνολικό μήκος ριζών ενός απλού φυτού μπορεί να φτάσει τα

600 km σε βάθος 1 m. Επίσης, δισεκατομύρια άτομα μικροβίων (βακτήρια, μύκητες, ακτινομύκητες κτλ.) διαβιούν στο έδαφος.

Τα μικρόβια του εδάφους έχουν δύο κυρίως ρόλους στη χημεία του εδάφους:

- Καταλύουν οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις
- Εκκρίνουν **μικρού μοριακού βάρους οργανικά οξέα** (Low Molecular Weight Organic Acids, LMWOAs) (αυτά εκκρίνονται και από τις ρίζες των φυτών)

Αυτό το δεύτερο είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Ο λόγος είναι διπλός και θα φανεί καλύτερα από την εξίσωση διάστασης της καρβοξυλικής ρίζας (αυτή είναι η ενεργή ομάδα των οργανικών οξέων):



Από αυτήν την εξίσωση, λοιπόν, φαίνεται ότι τα οργανικά οξέα (γενικότερα η οργανική ουσία) έχουν αρνητικά φορτία στις επιφάνειές τους (το COO^- είναι η πηγή των αρνητικών φορτίων), και άρα μπορεί να προσροφά κατιόντα του εδαφικού διαλύματος. Το δεύτερο που βλέπουμε από την Εξίσωση 2.3 είναι ότι η οργανική ουσία¹ είναι πηγή οξύτητας για το έδαφος, καθώς παράγονται H^+ , ως αποτέλεσμα της διάστασης του καρβοξυλίου.

Πριν προχωρήσουμε στις λοιπές ιδιότητες της οργανικής ουσίας, είναι καλό να αναρωτηθούμε από πού προήλθε, ποιες διεργασίες, δηλαδή, είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό της. Προτείνονται τέσσερις:

- Αποσύνθεση της βιομάζας
- Μεταβολισμός των οργανικών ενώσεων των βιομορίων ζώντων οργανισμών
- Ανακύκλωση μεταξύ της οργανικής ουσίας και των βιομορίων ζώντων οργανισμών
- Πολυμερισμός των απλούστερων ενώσεων μέσω των βιομορίων ζώντων οργανισμών

¹ Η οργανική ουσία σε κάποια συγγράμματα αναφέρεται ως **χούμος** (humus). Όμως για να μη γίνει σύγχυση των όρων που ακούγονται παρόμοια (όπως χουμικά οξέα, χουμίνη κτλ.), προτιμάται εδώ ο απλούστερος και πιο περιγραφικός όρος 'οργανική ουσία'.

Βλέπουμε ότι όλες αυτές οι διεργασίες είναι αλληλένδετες με τη **μικροβιακή κοινότητα** (microbial biomass) του εδάφους. Όμως πρέπει να τονιστεί ότι τα μόρια της οργανικής ουσίας δεν είναι αυτούσια τα μόρια των ζώντων οργανισμών του εδάφους. Είναι 3 τα κυριότερα χαρακτηριστικά της οργανικής ουσίας που μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι αυτή δεν είναι αυτούσιο υλικό των μικροοργανισμών. Οι ενώσεις, λοιπόν, που απαρτίζουν την οργανική ουσία:

- Δεν έχουν καμιά χρησιμότητα στο βιολογικό κύκλο των μικροβίων
- Είναι ουσίες που παράγονται έξω από το σώμα των μικροβίων
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής στο έδαφος (αυτό αφορά κυρίως τα χουμικά οξέα)

Μέχρις εδώ σκόρπια αναφέραμε κάποιες από τις ιδιότητες της οργανικής ουσίας. Αν θέλουμε να τις συγκεφαλαιώσουμε, αναφέροντας ίσως και κάποιες καινούργιες, θα κρατούσαμε τις τέσσερις πιο σημαντικές. Η οργανική ουσία, λοιπόν, έχει:

- Πολλές ενεργές ομάδες. Εκτός από την καρβοξυλική, που προαναφέρθηκε, προσθέστε τη φαινολική, κετονική κτλ.
- Μεγάλη ειδική επιφάνεια φορτισμένη κυρίως αρνητικά (τονίζεται το ‘κυρίως’, γιατί αυτό δεν συμβαίνει πάντα). Ως αποτέλεσμα του παραπάνω, έχει εντυπωσιακή CEC που κυμαίνεται από 400 έως 900 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$
- Υδρόφιλο χαρακτήρα. Οι ενεργές της ομάδες σχηματίζουν δεσμούς-H με το νερό
- Μη σταθερή μοριακή δομή. Αυτή εξαρτάται κυρίως από το pH του εδαφικού περιβάλλοντος

Πολλοί επιστήμονες της γης πιστεύουν ότι όσο μεγαλύτερο το ποσοστό της οργανικής ουσίας στο έδαφος τόσο το καλύτερο. Αν και αυτό δεν είναι πάντα ορθό, πολλές είναι οι ευεργετικές ιδιότητες που προσδίδει η οργανική ουσία στο έδαφος. Μερικές από αυτές καταγράφονται παρακάτω. Με την αύξηση της οργανικής ουσίας, λοιπόν:

- Το έδαφος γίνεται σκουρότερο, άρα θερμαίνεται γρηγορότερα (‘πρωιμίζει’, δηλαδή, γρηγορότερα) και οι σπόροι φυτρώνουν καλύτερα
- Βελτιώνει τις κακές ιδιότητες και των αμμωδών, αλλά και των αργιλωδών εδαφών (συγκρατεί περισσότερο νερό και θρεπτικά στα αμμώδη και αυξάνει τους μεγάλους πόρους στα αργιλώδη)

- Κατά την ανοργανοποίησή της, παρέχει θρεπτικά συστατικά, που πριν τα είχε δεσμευμένα στα χουμικά μακρομόρια,

2.4.2 Η αποσύνθεση της οργανικής ουσίας

Η **αποσύνθεση** (decomposition) της οργανικής ουσίας γενικά ακολουθεί την πορεία: γρήγορη στην αρχή, εξομαλύνεται στη συνέχεια. Αυτό ισχύει ιδίως μετά την εφαρμογή στο έδαφος οργανικών λιπασμάτων (κοπριά, ιλύ κατεργασίας αποβλήτων κτλ.). Η αποσύνθεση της οργανικής ουσίας προκαλείται από τη δράση των μικροβίων του εδάφους, τα οποία σπάνε τα μακρομόρια, για να τραφούν τα ίδια από τα θρεπτικά που εμπεριέχονται στις οργανικές ενώσεις.

Το πόσο γρήγορα θα **αποικοδομηθεί** (decompose) η οργανική ουσία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Θα δοθούν εδώ ενδεικτικά κάποιοι από αυτούς. Η οργανική ουσία, λοιπόν, θα αποικοδομηθεί γρηγορότερα αν:

- Περιέχει πολλές γλυκόζες, αμινοξέα, πυρουβικά και λίγες λιγνιτικές ενώσεις
- Υπάρχει καλός εδαφικός αερισμός, γιατί από αυτόν εξαρτώνται τα μικρόβια του εδάφους. Για αυτό οι καλλιεργητικές φροντίδες επιταχύνουν το σπάσιμο των μακρομορίων της οργανικής ουσίας.
- Δεν υπάρχει πολλή άργιλος στο έδαφος. Η άργιλος προστατεύει την οργανική ουσία από το να διασπαστεί, και μάλιστα όσο μεγαλύτερες οι επιφάνειες της αργίλου τόσο εντονότερο αυτό. Δηλαδή, ο μοντμοριλονίτης είναι πιο αποδοτικός στον προστατευτικό αυτό ρόλο από ό,τι ο ιλλίτης ή ο καολινίτης.
- Η εδαφική θερμοκρασία είναι υψηλότερη, γιατί τότε αυξάνεται η μικροβική δραστηριότητα.

Γενικά γίνεται δεκτό ότι το οργανικό-N είναι δείκτης του βαθμού **ανοργανοποίησης**² (mineralisation) της οργανικής ουσίας. Χαρακτηριστικά δίνεται ο τύπος:

$$\text{Ανοργανοποίηση, \%} = 6.37 * \text{οργανικό-N} + 4.63 \quad (\text{Εξίσωση 2.4})$$

2.4.3 Χουμικά οξέα

Η οργανική ουσία αποτελείται από μόρια διαφόρων μεγεθών και **μοριακών βαρών** (molecular weight). Επειδή κατά κόρον έχει όξινο χαρακτήρα, όλα τα μόρια της

² Οι όροι αποσύνθεση, αποικοδόμηση και ανοργανοποίηση είναι συνώνυμοι.

οργανικής ουσίας λέγονται οξέα (εδώ αφήνονται έξω οι **χουμίνες** (humins) που είναι χημικά αδρανείς). Τα μόρια μεγάλου μοριακού βάρους λέγονται **χουμικά οξέα** (humic acids). Συνήθως τέτοια λέγονται όσα έχουν μοριακό βάρος μεγαλύτερο από 1000 D (Dalton ή mol g⁻¹, μονάδα μέτρησης μοριακού βάρους). Τα μόρια μικρότερου μοριακού βάρους από 1000 D, λέγονται **φουλβικά οξέα** (fulvic acids). Τα χουμικά οξέα είναι μη **υδατοδιαλυτά** (water-soluble), δηλαδή στο έδαφος αποτελούν στερεή φάση. Τα φουλβικά οξέα είναι υδατοδιαλυτά και ανήκουν στην υγρή φάση, δηλαδή είναι μέρος του εδαφικού διαλύματος. Τα χουμικά οξέα είναι δύσκολο να ταυτοποιηθούν, λόγω του μεγέθους τους.

Τα χουμικά οξέα έχουν χημική συμπεριφορά στο έδαφος που εξαρτάται από το pH. Σε χαμηλά (όξινα) pH τα χουμικά οξέα είναι αδιάλυτα σαν 'σφαιρικά κολλοειδή' με μικρή συμμετοχή στις χημικές δραστηριότητες των στερεών επιφανειών. Καθώς το pH αυξάνεται, αυξάνουν και οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ των διαφόρων αρνητικά φορτισμένων ενεργών ομάδων, με αποτέλεσμα να αποκτούν μία πιο ανοικτή, γραμμική μορφή. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της ειδικής επιφάνειάς του και σε ενεργοποίηση των χημικών του ιδιοτήτων στο εδαφικό περιβάλλον. Να τονιστεί ότι οργανικής ουσίας λέγονται οξέα (εδώ αφήνονται έξω οι **χουμίνες** (humins) που είναι χημικά αδρανείς).

Τα χουμικά οξέα έχουν χημική συμπεριφορά στο έδαφος που εξαρτάται από το pH. Σε χαμηλά (όξινα) pH τα χουμικά οξέα είναι αδιάλυτα σαν 'σφαιρικά κολλοειδή' με μικρή συμμετοχή στις χημικές δραστηριότητες των στερεών επιφανειών. Καθώς το pH αυξάνεται, αυξάνουν και οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ των διαφόρων αρνητικά φορτισμένων ενεργών ομάδων, με αποτέλεσμα να αποκτούν μία πιο ανοικτή, γραμμική μορφή. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της ειδικής επιφάνειάς του και σε ενεργοποίηση των χημικών του ιδιοτήτων στο εδαφικό περιβάλλον. Να τονιστεί ότι τα χουμικά οξέα είναι υδατοδιαλυτά σε αλκαλικά pH, αλλά ακόμα και τότε συμπεριφέρονται σαν στερεές επιφάνειες, όχι σαν μέρος του εδαφικού διαλύματος.

2.4.4 Φουλβικά οξέα

Τα φουλβικά οξέα του εδάφους είναι χαμηλού μοριακού βάρους οργανικά οξέα. Αλλιώς ονομάζονται και **Διαλυτός Οργανικός Άνθρακας** (Dissolved Organic Carbon, DOC). Αυτά έχουν ταυτοποιηθεί πλήρως.

Δύο είναι τα κυριότερα χαρακτηριστικά των φουλβικών οξέων:

- Είναι υδατοδιαλυτά σε μεγάλο εύρος εδαφικού pH
- Μπορούν να απορροφηθούν από τα ριζικά τριχίδια μέσα από το εδαφικό διάλυμα

Αυτό το δεύτερο είναι μεγάλης σημασίας από περιβαλλοντικής σκοπιάς, καθώς μας βοηθάει να κατανοήσουμε τους μηχανισμούς της βιοδιαθεσιμότητας και των θρεπτικών, αλλά και των ρυπαντών ουσιών του εδάφους. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, δηλαδή, μπορεί να ελέγχουν τη διαλυτότητα των ουσιών του εδαφικού διαλύματος, δρώντας σαν ανταγωνιστές για την προσρόφηση κατιόντων στις στερεές επιφάνειες. Με άλλα λόγια, κάτω από ορισμένες συνθήκες, μπορεί κατιόντα του εδαφικού διαλύματος να 'προτιμήσουν' να δημιουργήσουν **σύμπλοκα** (complexes) με τα φουλβικά, παρά να προσροφηθούν στις επιφάνειες των στερεών. Αν αυτά τα κατιόντα είναι ρυπαντές θα απορροφηθούν από τα φυτά χωρίς διάκριση και αυτό θα δημιουργήσει προβλήματα, καθώς τότε ανοίγει διάπλατα την πόρτα στους ρυπαντές για την **τροφική αλυσίδα του ανθρώπου** (human food chain).

Δεν θα μπορούσαμε να κλείσουμε αυτή τη συζήτηση αν δεν εξηγήσαμε προηγουμένως πολύ αδρά ποιες είναι αυτές οι 'ορισμένες συνθήκες' που αναφέραμε παραπάνω. Τέτοιες μπορεί να είναι για παράδειγμα το χαμηλό εδαφικό pH. Σε χαμηλό εδαφικό pH τα χουμικά οξέα είναι 'εκτός παιχνιδιού' (θυμίζω ότι τότε παίρνουν τη 'σφαιρο-κολλοειδή' τους μορφή) και τα φουλβικά μπορεί να κυριαρχήσουν. Ή μπορεί να είναι περίοδοι έντονης μικροβιακής δραστηριότητας, οπότε θα εκκριθούν οργανικά οξέα από τα μικρόβια και τις ρίζες. Αυτές οι περίοδοι μπορεί να είναι την άνοιξη με τη θέρμανση του εδάφους, οπότε και το εδαφικό pH χαμηλώνει, λόγω έντονης δράσης των **νιτροποιητικών βακτηρίων** (nitrification bacteria).

Κεφάλαιο 3- Αποσάθρωση και Εδαφογένεση

3.1 Αποσάθρωση

3.1.1 Φυσική αποσάθρωση

Οι μηχανισμοί που συμβάλουν στη φυσική αποσάθρωση των ορυκτών είναι οι εξής:

1. Θερμοκρασία
2. Υδατικά κατακρημνίσματα
3. Παγετοί
4. Παγετώνες
5. Άνεμος
6. Μηχανική δράση των αλάτων

Πρέπει να τονιστεί ότι ποτέ ένας και μόνο παράγοντας δεν δρα πάνω σε ένα πέτρωμα, αλλά πάντα υπάρχει συνδυασμός δράσεων όλων των παραγόντων. Αρχίζουμε, λοιπόν, την περιγραφή με τον πρώτο παράγοντα

3.1.1.1 Θερμοκρασία

Το εύρος της θερμοκρασίας στη διάρκεια του 24ώρου μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Αυτές οι μεταβολές προκαλούν συστολή και διαστολή στα πετρώματα, και αυτό μειώνει τις αντοχές του πετρώματος. Τα σημεία εκείνα όπου υπάρχουν ήδη ατέλειες στη δομή, αποτελούν την αρχή μιας διαδικασίας φθοράς που τελικά θα οδηγήσει στον κατατεμαχισμό του πετρώματος.

3.1.1.2 Υδατικά κατακρημνίσματα

Το νερό είτε βρίσκεται στην υγρή είτε στην αέρια κατάσταση αποτελεί τον κυριότερο 'μοχλό πίεσης' στη διαδικασία της μηχανικής αποσάθρωσης των ορυκτών. Στην υγρή του μορφή πρώτα, η επίδρασή του αφορά κυρίως τη ροή των επιφανειακών ρευμάτων. Είναι χαρακτηριστικό να αναφέρουμε ότι όταν η ταχύτητα του νερού διπλασιάζεται, η μεταφορική του ικανότητα αυξάνεται κατά 2⁶ φορές. Τα ποτάμια, λοιπόν, παρασύρουν στο πέρασμά τους υλικά από πετρώματα που βρίσκονται στην πορεία τους. Αυτά τα υλικά αν είναι μεγάλου μεγέθους θα λειανθούν και θα αποθεθούν αμέσως όταν το νερό του ποταμού μειώσει την ταχύτητά του (π.χ. όταν φτάσει σε κάμπο). Τα πιο λεπτόκοκκα υλικά θα αποθεθούν πιο κοντά στην εκβολή του ποταμού, ενώ τα διαλυμένα υλικά (τα άλατα του ποτάμιου νερού) θα εμπλουτίσουν περισσότερο το σημείο της εκβολής. Η μεταφορική δράση του νερού

είναι τόσο έντονη, ώστε μπορεί να δημιουργήσει χιλιάδες στρέμματα επίπεδης επιφάνειας από τα φερτά του υλικά σε μερικά εκατοντάδες χρόνια. Τρανό παράδειγμα είναι ο κάμπος της Θεσσαλονίκης, όπου τα 2 εκατομμύρια στρέμματα κάμπου είναι δημιουργία των φερτών υλικών του Αξιού, του Γαλλικού και του Αλιάκμονα ποταμού.

3.1.1.3 Παγετοί

Το νερό στους 4 °C έχει τη μέγιστη πυκνότητα. Σε θερμοκρασίες μικρότερες η πυκνότητά του ελαττώνεται, οπότε ο όγκος του αυξάνεται. Ο πάγος είναι κατά 0.9% πιο διογκωμένος από το υγρό νερό. Αν, λοιπόν, νερό εισχωρήσει σε ρωγμές του βράχου και παγώσει θα διασταλεί και θα προκαλέσει περαιτέρω φθορά στη ρωγμή εκείνη. Αυτός βέβαια ο μηχανισμός αφορά στη χώρα μας κυρίως υψηλά υψόμετρα. Τα προϊόντα της αποσάθρωσης από τον πάγο μεταφέρονται με τα υδάτινα ρεύματα στα χαμηλότερα μέρη του ανάγλυφου.

3.1.1.4 Παγετώνας

Παρόμοια επίδραση έχουν οι παγετώνες. Λόγω πίεσης τα χαμηλότερα στρώματα του παγετώνα υγροποιούνται, εισχωρούν στα ήδη ταλαιπωρημένα υποκείμενα πετρώματα, όπου σε λίγο θα ξαναπαγώσουν. Τότε θα επαναληφθεί ο μηχανισμός που περιγράψαμε παραπάνω.

3.1.1.5 Άνεμος

Απορρίνιση και εκτριβή είναι οι δύο μηχανισμοί φθοράς του ανέμου στα πετρώματα. Όταν φυσάει τεμαχίδια σκόνης τρίβουν πετρώματα που αποτελούν εξάρσεις του ανάγλυφου. Αυτός ο μηχανισμός είναι κυρίαρχος σε περιοχές με ελλιπή βλάστηση, όπου πνέουν συχνά ισχυροί άνεμοι και με χαμηλή βροχόπτωση. Τέτοιες περιοχές είναι πολλά νησιά του Αιγαίου.

3.1.1.5 Άλατα

Παρόμοια είναι η δράση των αλάτων με αυτή του νερού, και μάλλον νερό και άλατα δρουν σε συνεργασία. Το υγρό νερό εισχωρεί σε ρωγμές του βράχου, από όπου όταν το νερό εξατμιστεί τα άλατα θα παραμείνουν εκεί συμπυκνωμένα. Μετά από μερικούς κύκλους συμπύκνωσης – αραίωσης, τα άλατα αυτά δρουν ως σφήνες που με τον καιρό θα κατακερματίσουν σημαντικό τμήμα του πετρώματος όπου εισχώρησαν.

3.1.2 Χημική αποσάθρωση

3.1.2.1 Ενυδάτωση

Το νερό έχει την τάση να ενυδατώνει κατιόντα. Δηλαδή συνήθως δημιουργείται ένα υμένιο νερού γύρω-γύρω από το κατιόν. Σε κάποια κατιόντα αυτό γίνεται ευκολότερα και σε κάποια λιγότερο εύκολα. Η λυότροπη σειρά, όπως λέγεται, είναι η εξής:



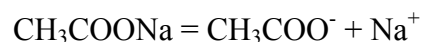
Το νερό, λοιπόν, έχει την τάση να αποσπά κατιόντα από τα κρυσταλλικά πλέγματα ορυκτών, όταν αυτά τα κατιόντα είναι στις παρειές της δομής. Αυτό γίνεται γιατί τα 'εξωτερικά' ιόντα είναι σε δυσχερέστερη θέση, καθώς τα φορτία τους είναι λιγότερο εξουδετερωμένα. Έτσι, τα εξωτερικά ιόντα δέχονται ενυδάτωση, οι δεσμοί με τη δομή του ορυκτού εξασθενούν και σιγά-σιγά αποσπώνται από το ορυκτό και εισάγονται στο εδαφικό διάλυμα.

3.1.2.2 Διαλυτοποίηση

Υδατοδιαλυτά άλατα που πιθανό να αποτελούν προσμίξεις ορυκτών, διαλυτοποιούνται και μπαίνουν στο εδαφικό διάλυμα. Όταν το εδαφικό διάλυμα κορεστεί από το άλας αυτό, τότε αυτό θα γίνει ίζημα, δηλαδή θα εισαχθεί και πάλι στην στερεή φάση. Για παράδειγμα, η διαλυτότητα του NaCl στο νερό είναι 360 g L⁻¹, του CaCO₃ είναι 0.01 g L⁻¹ και της γίψου (CaSO₄.2H₂O) είναι 0.26 g L⁻¹. Αυτός ο μηχανισμός είναι παρόμοιος με την ενυδάτωση, μόνο που εκείνη αναφέρεται σε μεμονωμένα κατιόντα, ενώ η διαλυτοποίηση σε χημικές ενώσεις.

3.1.2.3 Υδρόλυση

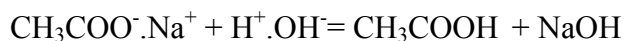
Έστω ένα υδατικό διάλυμα που περιέχει ποσότητες CH₃COONa. Αυτό θα διασταθεί ως εξής:



Το νερό, ως γνωστό, δεν είναι ουδέτερο υλικό, αλλά διίσταται το ίδιο ως εξής:

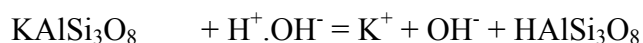


Αν, λοιπόν, το διπολικό νερό αντιδράσει με τα αντίθετα φορτία του ηλεκτρολύτη, θα έχουμε:



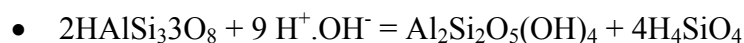
Η αντίδραση αυτή λέγεται **υδρόλυση**. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με τα ορυκτά. Μόνο που επειδή αυτά είναι πολύ δυσδιάλυτα σε σχέση με τους συνηθισμένους ανόργανους ηλεκτρολύτες, η πορεία υδρόλυσης είναι πολύ αργή. Η ανταλλαγή H^+ του νερού και κατιόντων του πλέγματος ορυκτών γίνεται στην αρχή στην επιφάνεια του ορυκτού, αλλά καθώς το πλέγμα αλλοιώνεται προχωράει και στο εσωτερικό του ορυκτού. Η υδρόλυση αυξάνεται με το βαθμό διάστασης του νερού. Δηλαδή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους και με την αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στο έδαφος.

Η υδρόλυση μπορεί να δώσει διάφορα προϊόντα με το ίδιο ορυκτό. Παράδειγμα δίνονται οι εξής αντιδράσεις:

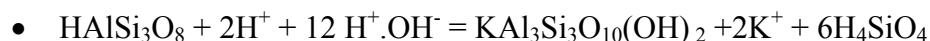


(Μικροκλινής)

Τώρα, το $HAlSi_3O_8$ μπορεί να αντιδράσει με δύο τρόπους:



(Καολινίτης)



(Ιλλίτης)

Το ποια κατεύθυνση θα ακολουθήσει η υδρόλυση θα εξαρτηθεί και από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, σε περιβάλλοντα με υψηλές βροχοπτώσεις, όπου τα κατιόντα-προϊόντα αποσάθρωσης ξεπλένονται, η υδρόλυση αστρίων θα δώσει μοντμοριλονίτη. Σε περιβάλλοντα λιγότερο βροχερά, όπου τα κατιόντα δεν ξεπλένονται, θα δώσει καολινίτη.

3.1.2.4 Οξείδωση

Οξείδωση είναι γνωστό ότι είναι η απώλεια ενός ηλεκτρονίου από ένα στοιχείο. Στις κρυσταλλικές δομές των ορυκτών τα ιόντα που είναι στοιχεία ενδιαφέροντος για τέτοιες αλληλεπιδράσεις είναι το $Mn^{2+}-Mn^{3+}$ και το $Fe^{2+}-Fe^{3+}$. Ο μηχανισμός με τον οποίο λειτουργεί η αποσάθρωση με την οξείδωση είναι ο εξής. Όταν αυξηθεί το

Πίνακας 3.1 Αποθέσεις μητρικού υλικού που βοηθάνε στην εδαφογένεση.

<u>Αποθέσεις</u>	<u>Πώς λειτουργούν</u>	<u>Θετικά τέτοιων εδαφών</u>	<u>Προβλήματα τέτοιων εδαφών</u>
Αλλουβιακές (ποτάμιες)	Φερτά ποταμών	Γόνιμα	Ίσως αλατούχα
Λιμναίες	Ιζήματα λιμνών	Γόνιμα, οργανικά	Ίσως αλατούχα
Θαλάσσιες	Ιζήματα θαλασσών		Ισχυρώς αλατούχα
Αιολικές	Φερτά ανέμων	Γόνιμα, καλές φυσ. ιδιότητες	
Διλουβιακές (Παγετόνες)	Φερτά παγετώνων		
Κολλουβιακές (Βαρύτητας)	Κατακρημνίσματα	Καλές φυσ. ιδιότητες	

Πίνακας 3.2 Το κλίμα ως παράγοντας εδαφογένεσης.

Συνθήκες	Εδάφη που γεννιούνται	Παρατηρήσεις
Βροχή και Κρύο	Podzols	AB- καολινίτης
Βροχή και Ζέστη	Latozols	Οξειδία Fe και Al
Ξηρασία και Ζέστη		Αλατούχα
Συνθήκες ερήμου	Tundra soils	AC- Βρύα και Λειχήνες
Τούνδρα	Dessert soils	AC
Εύκρατο κλίμα		Ορυκτά 2:1, όχι έκπλυση

3.2.3 Βλάστηση

Βλάστηση περιμένουμε να υπάρχει σε σημεία όπου οι διαδικασίες της εδαφογένεσης προχώρησαν σε βαθμό ικανοποιητικό για την ανάπτυξη οικοσυστημάτων. Σε ένα οργανωμένο οικοσύστημα υπάρχουν μηχανισμοί που τείνουν να αναιρέσουν τυχόν επερχόμενες μεταβολές. Έτσι, λοιπόν, και σε οικοσυστήματα που περιλαμβάνουν ώριμες και μόνιμες φυτοκοινωνίες (όπως τα δάση) τα εδάφη προστατεύονται

ικανοποιητικά από διαδικασίες φθοράς όπως διαβρώσεις, αποσαθρώσεις. Για παράδειγμα έχουμε τις ακόλουθες ευεργετικές επιδράσεις:

- Μικρότερο εύρος θερμοκρασιών: Λόγω σκίασης η θερμοκρασία εδάφους ρυθμίζεται
- Μικρότερη διάβρωση: Οι ρίζες των φυτών συγκρατούν το έδαφος
- Καλές φυσικές ιδιότητες: Οι ρίζες ανοίγουν πόρους, το έδαφος αερίζεται καλύτερα
- Βιοκύκλωση: Εκπλυμένα θρεπτικά στο Β ορίζοντα επανέρχονται στον Α, λόγω του ότι οι ρίζες των δένδρων εισχωρούν σε μεγάλα βάθη

Το δάσος βέβαια δεν είναι πανάκεια. Υπάρχουν παραδείγματα, κατά τα οποία αλλαγή βλάστησης αύξησε την υδρόλυση των ορυκτών και οδήγησε στη δημιουργία αργλικού ορίζοντα. Αυτό συνέβη κατά την εγκατάσταση δάσους στις ρωσικές στέπες.

Άλλο ένα παράδειγμα για το πώς η βλάστηση επηρεάζει το έδαφος είναι η κατανομή της οργανικής ουσίας σε βοσκοτόπια και σε δάση. Στα βοσκοτόπια είναι σχεδόν ομοιόμορφη με το βάθος, ενώ στα δάση περιορίζεται σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα. Αυτό γιατί στα βοσκοτόπια το έδαφος εμπλουτίζεται σε οργανική ουσία σχεδόν μόνο από υπολείμματα των ριζών, ενώ στα δάση από τα πεσμένα φύλλα και κλαδιά στο έδαφος.

3.2.4 Ανάγλυφο

Το ανάγλυφο αφορά παράγοντες όπως την έκθεση, το υψόμετρο και την κλίση. Το υψόμετρο δεν θα συζητηθεί, γιατί εκεί ακολουθείται ό,τι έχει ειπωθεί για τις γεωγραφικές κατανομές. Με άλλα λόγια, όσο αυξάνεται το υψόμετρο οι συνθήκες αλλάζουν έτσι ώστε είναι σαν να αυξάνεται το γεωγραφικό ύψος. Δηλαδή όσο αυξάνεται το υψόμετρο έχουμε μεγαλύτερες βροχοπτώσεις, χαμηλότερες θερμοκρασίες και αλλαγή της βλάστησης.

Όσο αφορά την επίδραση της έκθεσης, εδώ στην Ελλάδα συμβαίνει το εξής. Εδάφη με νότια έκθεση έχουν μεγαλύτερη εξατμισοδιαπνοή, αραιότερη βλάστηση και άρα μεγαλύτερες διαβρώσεις και ταχύτερες αποσαθρώσεις και εδαφογενέσεις. Αυτό το

τελευταίο δεν είναι ποτέ ευνοϊκό. Τα εδάφη βόρειας έκθεσης είναι γενικά πιο γόνιμα, αν βέβαια δεν υπάρχουν άλλοι περιοριστικοί παράγοντες.

Σε μεγάλες κλίσεις έχουμε έντονες διαβρώσεις, πολύ λίγη οργανική ουσία και τις περισσότερες φορές μη σχηματισμό Β ορίζοντα. Μια ακολουθία εδαφών που τροποποιούνται κατά μήκος μιας πλαγιάς μόνο λόγω κλίσης, αλλά προέρχονται από το ίδιο μητρικό υλικό λέγονται **γεωγραφική ακολουθία** ή **κατένα** (από το λατινικό catena, που σημαίνει αλυσίδα).

Επίσης, λόγω ανάγλυφου έχουμε τη δημιουργία αλατούχων εδαφών ή οργανικών εδαφών. Αλατούχα εδάφη δημιουργούνται στα χαμηλά μέρη του αναγλύφου, όταν εξατμίζεται το νερό που τα μετέφερε και όπου ήταν διαλυμένα (το ίδιο συμβαίνει όπως είπαμε και στα δέλτα των ποταμών). Από την άλλη μεριά, δημιουργία οργανικών εδαφών λόγω ανάγλυφου έχουμε ως εξής. Στις κοιλότητες έχουμε συγκέντρωση νερών και τη δημιουργία λιμνών. Εκεί αποτίθενται οργανικά υλικά, τα ποία αποκαλύπτονται είτε με τη φυσική είτε με την τεχνητή αποξήρανση της λίμνης. Πολλές φορές, πιο απλά, τα οργανικά που μεταφέρει το νερό διαλυμένα και αιωρούμενα αποτίθενται στα χαμηλότερα μέρη του αναγλύφου.

3.2.5 Χρόνος

Τα εδάφη χωρίζονται σε πρόσφατα, ώριμα και παλιά. Τα πρόσφατα δεν έχουν αναπτύξει τον Β ορίζοντα και είναι λιγότερο γόνιμα. Τα ώριμα έχουν ευδιάκριτους τους ABC ορίζοντες και είναι πιο γόνιμα. Τα παλιά έχουν ευδιάκριτους ορίζοντες, αλλά δεν είναι πολύ γόνιμα. Το πόσο γρήγορα θα εξελιχθεί ένα έδαφος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Για παράδειγμα, σε εύκρατα κλίματα οι πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις θα δημιουργήσουν ώριμο έδαφος σε περίπου 100 χρόνια. Σε νοτιότερα κλίματα θα χρειαστούν πολύ περισσότερα χρόνια. Εδάφη που είναι όμοια όσο αφορά όλους τους άλλους παράγοντες εδαφογένεσης, αλλά διαφέρουν μόνο όσο αφορά την ωριμότητά τους λέγεται ότι αποτελούν μια **χρονοσειρά**.

Κεφάλαιο 4- Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους

4.1 Μηχανική σύσταση των εδαφών

Έχουμε ήδη πει ότι 3 είναι τα κλάσματα του εδάφους, άμμος, ιλύς και άργιλος. Το κλάσμα με τη μεγαλύτερη χημική ενεργότητα είναι αυτό της αργίλου. Θα μπορούσε κάποιος να πει ότι όσο μεγαλύτερο το ποσοστό της αργίλου τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός των τεμαχιδίων του εδάφους ανά μονάδα μάζας, άρα τόσο μεγαλύτερες οι επιφάνειες του εδάφους και τότε μεγαλύτερη και η γονιμότητα του εδάφους. Αυτό είναι αλήθεια, αλλά μόνο μέχρι ενός σημείου. Όταν η άργιλος είναι πάρα πολλή σε ένα έδαφος τότε αυτό υποφέρει από το γεγονός ότι δεν υπάρχουν πολλοί μεγάλοι πόροι, άρα είναι κακός ο αερισμός και η κίνηση του νερού και άρα η γονιμότητα πέφτει.

Σε αναλύσεις ρουτίνας η μηχανική ανάλυση (ή αλλιώς η κοκκομετρική σύσταση) του εδάφους μετρίεται με το πυκνόμετρο Βουγιούκου. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου κάνουμε κάποιες παραδοχές που έχουν να κάνουν με την καθίζηση του εδάφους στον κυλινδρικό σωλήνα. Αυτές οι παραδοχές είναι ότι τα τεμαχίδια:

1. Δεν επηρεάζονται από τις κινήσεις Brown του νερού
2. Είναι σφαιρικά
3. Έχουν την ίδια πυκνότητα
4. Δεν αλληλεπιδρούν (το αιώρημα είναι αρκετά αραιό)
5. Καθιζάνουν με ταχύτητες που δεν αγγίζουν τα όρια της τυρβώδους ροής

Το καθένα από τα εδαφικά τεμαχίδια, ανάλογα με το κλάσμα όπου ανήκουν, θα καθιζάνουν σε διαφορετικές ταχύτητες. Ο χρόνος που θα χρειαστούν δίνεται από την εξίσωση του Stokes:

$$t = \frac{18 * H * \eta}{d^2 * g * (\rho_s - \rho_f)} \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

όπου t είναι ο χρόνος (sec), H το βάθος όπου τα τεμαχίδια έχουν καθιζάνει (m), η το ιξώδες του νερού ($\text{g m}^{-1} \text{sec}^{-1}$) (λαμβάνεται από ειδικούς πίνακες), d η διάμετρος του

εδαφικού τεμαχιδίου (m), g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($m \text{ sec}^{-2}$), ρ_s η πυκνότητα των εδαφικών τεμαχιδίων (λαμβάνεται πάντα ίση με $2.65 \cdot 10^6 \text{ g m}^{-3}$) και ρ_f η πυκνότητα του νερού (πρακτικά ίση με 10^6 g m^{-3}).

4.2 Επιφάνεια εδαφών

Είναι μεγαλύτερη για εδάφη που έχουν μεγαλύτερα ποσοστά μικρής διαμέτρου τεμαχιδίων. Δηλαδή, όσο περισσότερα και όσο μικρότερα τα εδαφικά τεμαχίδια, τόσο μεγαλύτερη η ειδική επιφάνεια του εδάφους. Η ειδική επιφάνεια του εδάφους a_m δίνεται από τους τύπους:

$$a_m (\text{m}^2 \text{ g}^{-1}) = \frac{6}{2.65 \times 10^6} \sum \frac{c_i}{d_i} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

$$a_m (\text{m}^2 \text{ g}^{-1}) = \frac{2}{2.65 \times 10^6} \sum \frac{c_i}{z_i} \quad (\text{Εξίσωση 4.3})$$

όπου 2.65 είναι το πραγματικό ειδικό βάρος του εδάφους, σε g cm^{-3} , 10^6 ο συντελεστής μετατροπής των g cm^{-3} σε g m^{-3} , c_i το ποσοστό του κλάσματος του εδάφους, d_i η διάμετρος των κόκκων του κλάσματος άμμου και ιλύος σε m, και z_i το πάχος των τεμαχιδίων της αργίλου σε m.

Να τονιστεί ότι η Εξίσωση 4.2 ισχύει για την άμμο και την ιλύ και ότι η Εξίσωση 4.3 ισχύει για την άργιλο.

4.3 Η θεωρία της διπλής ιονικής στοιβάδας (ΔΙΣ)

Τα κατιόντα δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στο εδαφικό διάλυμα. Είναι πυκνότερα κοντά στις επιφάνειες των τεμαχιδίων της αργίλου και αραιότερα μακριά από αυτές. Συγκεκριμένα, για τα προσροφημένα κατιόντα η θεωρία της ΔΙΣ λέει ότι δεν είναι ακριβώς 'κολλημένα' στις επιφάνειες, αλλά βρίσκονται σε δύο στοιβάδες. Στην πρώτη στοιβάδα τα κατιόντα είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια, ενώ στη

δεύτερη στοιβάδα τα κατιόντα είναι εν διαχύσει (αλλά πάντως σε μεγαλύτερη πυκνότητα από ό,τι στο 'εξωτερικό' διάλυμα). Κατά τη ΔΙΣ, υπάρχουν δύο δυνάμεις εν δράσει:

1. Ηλεκτροστατική: Η έλξη αρνητικής επιφάνειας και θετικών κατιόντων.
2. Κίνηση Brown: Η τυχαία κίνηση λόγω μορίων νερού που τείνει να εξισορροπήσει όλο το εδαφικό διάλυμα.

Παρ' όλ' αυτά, οι συγκεντρώσεις στη ΔΙΣ είναι 100 με 1000 φορές πυκνότερες από ό,τι στο εξωτερικό διάλυμα.

Το πάχος της ΔΙΣ δίνεται από τον τύπο:

$$L = \frac{1}{ez} \left(\frac{ekT}{8\pi n_0} \right)^{1/2} \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

Όπου e είναι το φορτίο ενός ηλεκτρονίου, z το σθένος του κατιόντος, ϵ η διηλεκτρική σταθερά του νερού, k ένας συντελεστής που ισούται με το λόγο R/N (όπου R είναι η σταθερά των αερίων, και N ο αριθμός Avogadro), T η απόλυτη θερμοκρασία, και τέλος n_0 η συγκέντρωση του εδαφικού διαλύματος. Από την Εξίσωση 4.4 βγάζουμε τα εξής:

- Τα δισθενή κατιόντα δίνουν μικρότερο πάχος ΔΙΣ
- Όσο πυκνότερο το διάλυμα τόσο μικρότερο και το πάχος της ΔΙΣ

Διασπορά αργίλου: Όταν στο εδαφικό διάλυμα κυριαρχούν μονοσθενή κατιόντα, και όταν το εδαφικό διάλυμα είναι αραιό τότε τα τεμαχίδια της αργίλου δεν συκκορούνται μαζί, αφού η ΔΙΣ δεν είναι ισχυρή. Τότε διασπείρεται η άργιλος, φράζουν οι πόροι του εδάφους και μειώνεται η διηθητικότητα του εδάφους, πράγμα καταστροφικό για την παραγωγικότητά του. Αυτό συμβαίνει ιδίως όταν κυριαρχεί το Na^+ . Τα εδάφη τότε είναι προβληματικά και ονομάζονται νατριωμένα.

Θρόμβωση αργίλου: Η ΔΙΣ είναι πυκνή (κυριαρχούν τα πολυσθενή κατιόντα όπως το Ca^{2+} και το Al^{3+}), τα τεμαχίδια αργίλου συνενώνονται (άρα μειώνεται η ειδική

επιφάνεια του εδάφους), μεγαλώνουν οι πόροι και άρα αυξάνει η διηθητικότητα του εδάφους. Θρόμβωση έχουμε είτε όταν επικρατούν τα ιόντα Ca^{2+} , είτε σε χαμηλό pH (γιατί τότε κυριαρχούν τα Al^{3+})

4.4 Δομή του εδάφους

4.4.1 Γενικά

Η δομή του εδάφους έχει να κάνει με τα συσσωματώματα του εδάφους. Αυτά είναι κόκκοι του εδάφους που έχουν συνενωθεί και συγκρατούνται μεταξύ τους. Μερικά από τα συστατικά του εδάφους είναι συνενωτικά στοιχεία, δηλαδή βοηθούν τα τεμαχίδια του εδάφους να δημιουργούν συσσωματώματα.

4.4.2 Μέγεθος συσσωματωμάτων

Συνήθως όσο μεγαλύτερα τα συσσωματώματα, τόσο μεγαλύτεροι οι πόροι του εδάφους που αφήνουν. Για να έχει το έδαφος καλές φυσικές ιδιότητες (καλό αερισμό και καλή μετακίνηση νερού) πρέπει να υπάρχουν μεγάλοι πόροι, άρα ένα έδαφος με μεγάλα και σταθερά συσσωματώματα έχει καλές φυσικές ιδιότητες. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι όσο περισσότερη η άργιλος σε ένα έδαφος, τόσο μεγαλύτερο το πορώδες του εδάφους. Ξέρουμε όμως ότι το αργιλώδες έδαφος έχει πολύ μικρή υδραυλική αγωγιμότητα (σας θυμίζω ότι στην Υδρογεωλογία, οι αργιλικοί ορίζοντες θεωρούνται πρακτικά αδιαπέρατοι για το νερό). Φαίνονται ασυμβίβαστα αυτά τα δύο, αλλά η εξήγηση δόθηκε προηγουμένως. Αυτό που μετράει για να έχει ένα έδαφος καλές φυσικές ιδιότητες δεν είναι απλώς το πορώδες, αλλά το ποσοστό των μεγάλων πόρων. Η άμμος για παράδειγμα έχει πολύ μικρότερο πορώδες από την άργιλο, αλλά η υδραυλική αγωγιμότητά της είναι 10-15 φορές υψηλότερη της αργίλου (για αυτό τα πειράματα που σχετίζονται με τη μετακίνηση του νερού στο έδαφος πραγματοποιούνται πάντα σε αμμώδη εδάφη), γιατί οι μεγάλοι πόροι είναι πολύ περισσότεροι από ό,τι στην άργιλο.

Στην άργιλο, όταν υπάρχει το φαινόμενο της θρόμβωσης η δομή του εδάφους καλυτερεύει και οι αρνητικές ιδιότητες της αργίλου μετριάζονται. Όταν όμως υπάρχει διασπορά τα αργιλώδη εδάφη καθίστανται ουσιαστικά μη παραγωγικά.

Η σχέση μεγέθους πόρων και ταχύτητας κίνησης του νερού στο έδαφος (υδραυλική αγωγιμότητα) δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$K = \frac{\pi r^2}{8} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

Όπου K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, n το πορώδες % του εδάφους, r είναι η ακτίνα των πόρων του εδάφους και ο αριθμός 8 προέρχεται από τη στρογγυλοποίηση σταθερών που έχουν τη διάσταση του χρόνου.

4.4.3 Σταθερότητα συσσωματωμάτων

Όσο πιο σταθερά τα συσσωματώματα τόσο το έδαφος αντέχει σε διαβρώσεις. Όσο λιγότερο σταθερά τα συσσωματώματα τόσο περισσότερο το έδαφος κινδυνεύει με τη δημιουργία επιφανειακής κρούστας μετά από βροχή, κάτι που σημαίνει αύξηση της επιφανειακής απορροής του νερού και μείωση της διηθητικότητας του εδάφους.

4.4.4 Παράγοντες συσσωμάτωσης

4.4.4.1 Άργιλος

Έχουμε ήδη συζητήσει το ρόλο της θρόμβωσης και της διασποράς της αργίλου στη δομή του εδάφους. Θυμίζω ότι θα έχουμε μεγαλύτερη θρόμβωση και άρα περισσότερα συσσωματώματα όταν ισχύουν τα εξής:

- Χαμηλό pH (γιατί τότε κυριαρχούν τα Al^{3+})
- πιο πυκνό διάλυμα
- περισσότερα δισθενή και τρισθενή κατιόντα στο εδαφικό διάλυμα

4.4.4.2 Προσροφημένα κατιόντα

Και αυτός ο παράγων έχει να κάνει με τη θρόμβωση της αργίλου. Μονοσθενή κατιόντα, όπως Na^+ και K^+ διασπείρουν την άργιλο. Ιόντα όπως Ca^{2+} και Al^{3+} (όπως και H^+) τη θρομβώνουν. Επειδή η παρουσία των Al^{3+} και H^+ συνδέεται με χαμηλό εδαφικό pH, δεχόμαστε ότι σε όξινα pH έχουμε αύξηση του μεγαλοπορώδους του εδάφους, και άρα εντονότερες εκπλύσεις θρεπτικών (θα δούμε και στις χημικές ιδιότητες των εδαφών ότι αυτό το φαινόμενο πράγματι λαμβάνει χώρα και τότε θα εξηγηθεί και χημικώς).

4.4.4.3 Διύγρανση εδάφους

Όσο αυξάνει το ποσοστό του νερού στο έδαφος μειώνεται η σταθερότητα των συσσωματωμάτων. Όταν έχουμε μια ραγδαία βροχή, έχουμε απότομη διύγρανση του εδάφους, και αυτό οδηγεί πολλές φορές σε σπάσιμο των εδαφικών συσσωματωμάτων, ιδίως όταν οι υπόλοιπες συνθήκες είναι ευνοϊκές για κάτι τέτοιο (π.χ. υψηλό pH, έδαφος πλούσιο σε εναλλακτικό Na^+). Αυτή καταστροφή της εδαφικής δομής γίνεται ορατή από την επιφανειακή κρούστα που παρατηρείται. Αυτή η κρούστα έχει πολλές αρνητικές συνέπειες για το έδαφος, καθώς δεν την διαπερνά το νερό της βροχής, κάτι που οδηγεί σε μηδενισμό της διηθητικότητας του εδάφους και σε αύξηση της επιφανειακής απορροής. Με άλλα λόγια το νερό της βροχής ή της άρδευσης σπαταλιέται χωρίς να ωφελήσει το έδαφος. Η κρούστα αυτή σπάει μόνο με άροση του εδάφους, κάτι που σημαίνει επιπλέον έξοδα, αλλά και αχρείαστη φόρτιση του εδάφους από τη διέλευση του καλλιεργητικού μηχανήματος (που και αυτό θα δούμε ότι έχει κακές συνέπειες στη δομή του εδάφους).

4.4.4.4 Καλλιέργεια εδάφους με μηχανήματα

Σαν πρώτη σκέψη θα μπορούσε κάποιος να πει ότι το βάρος των μηχανημάτων φέρνουν τα τεμαχίδια του εδάφους κοντά και αυξάνουν τα συσσωματώματά του. Εν τούτοις έχει βρεθεί ότι μόνο αρνητικές είναι οι συνέπειες της εκμηχανισμένης καλλιέργειας για το έδαφος. Το πώς λειτουργεί αυτό μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Περισσότερη καλλιέργεια του εδάφους → αυξάνεται ο αερισμός → μειώνεται η οργανική ουσία → μειώνονται τα συσσωματώματα και χειροτερεύει η δομή του εδάφους.

4.4.4.5 Οργανική ουσία

Δύο είναι οι κύριοι τρόποι, με τους οποίους η οργανική ουσία συνενώνει τα εδαφικά τεμαχίδια:

1. Γέφυρα κατιόντος, κατά το σχήμα: Άργιλος (-) ↔ Κατιόν (+) ↔ ΟΜ (-)
2. Προσρόφηση, κατά το σχήμα (αυτό συμβαίνει σε θραυστιγενείς επιφάνειες της αργίλου ή σε οξειδία, τα οποία σε χαμηλά pH είναι θετικά φορτισμένα), κατά το σχήμα: Άργιλος (+) ή Οξείδιο (+) ↔ ΟΜ (-)

4.4.4.6 Σκουλήκια

Για να υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός σκουληκιών θα πρέπει το pH να είναι ουδέτερο προς αλκαλικό, να υπάρχει καλή υγρασία, πολλή οργανική ουσία και το έδαφος να μην καλλιεργείται. Τα σκουλήκια καλυτερεύουν την εδαφική δομή με δύο τρόπους:

1. Ανοίγουν στοές → συμπιέζεται το έδαφος → αυξάνονται τα συσσωματώματα
2. Τα περιττώματα του σκουληκιού: αποτελούνται από συνενωμένα τεμαχίδια εδάφους

4.4.4.7 Ρίζες φυτών

Με τρεις τρόπους καλυτερεύουν οι ρίζες τα εδαφικά συσσωματώματα:

1. Αυξάνεται η φυσική πίεση στο έδαφος → αυξάνονται τα συσσωματώματα
2. Λόγω των υπολειμμάτων τους αυξάνεται η οργανική ουσία του εδάφους → αυξάνονται τα συσσωματώματα
3. Απορροφούν νερό από το έδαφος → αυξάνονται τα συσσωματώματα (αυτό γίνεται και ακριβώς στην περιοχή που βρίσκονται τα ριζικά τριχίδια, αλλά και στις γειτονικές τους περιοχές, λόγω των υδραυλικών κλίσεων).

Κεφάλαιο 5: Χημικές ιδιότητες των εδαφών

5.1 Αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες

Τα στερεά συστατικά του εδάφους έχουν κυρίως αρνητικό φορτίο. Κάποιες επιφάνειες είναι εξαρτώμενες από το pH του εδαφικού διαλύματος (π.χ. οξείδια, υδροξείδια και θραυστιγενείς επιφάνειες ορυκτών της αργίλου). Κάποιες επιφάνειες δεν έχουν σχέση με το pH διαλύματος (π.χ. οργανική ουσία, ορυκτά 1:1 και 1:2). Οι εξαρτώμενες από το pH επιφάνειες σε όξινα περιβάλλοντα φορτίζονται θετικά.

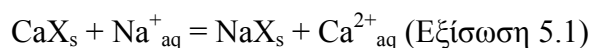
5.2 Κατιόντα

Τα κατιόντα του εδάφους είτε είναι εξαρτώμενα από τη στερεή φάση, είτε είναι διαλυμένα στο εδαφικό διάλυμα. Τα εξαρτώμενα από τη στερεή φάση μπορεί να είναι **προσροφημένα** (adsorbed) (προσκολλημένα αντιστρεπτά στις εξωτερικές επιφάνειες των στερεών) και τότε εύκολα ανταλλάξιμα με τα κατιόντα του εδαφικού διαλύματος. Μπορεί όμως να είναι και **απορροφημένα** (absorbed) (δηλαδή εγκλωβισμένα ενδοστοιβαδικά ή στο πλέγμα των ορυκτών) και τότε δεν συμμετέχουν στη χημική ισορροπία με τα κατιόντα του εδαφικού διαλύματος.

Πρέπει να τονιστεί ότι όσο μικρότερη η CEC ενός ορυκτού τόσο μικρότερες οι αποστάσεις των πλακιδίων και άρα μεγαλύτερη η πυκνότητα των φορτίων σε αυτό το ορυκτό.

5.3 CEC

Τα ανταλλάξιμα κατιόντα των εδαφικών επιφανειών είναι σε ισορροπία με τα κατιόντα του εδαφικού διαλύματος. Η συνήθης αναλογία των κατιόντων στο διάλυμα είναι $Ca > Mg > K > Na$ και αυτή παραμένει και στα προσροφημένα κατιόντα. Μια τυπική εξίσωση ανταλλαγής έχει ως εξής:



Ισχύει ότι όσο μεγαλύτερες οι επιφάνειες ενός εδάφους τόσο μεγαλύτερη η τιμή της CEC για το έδαφος αυτό. Όλες οι επιφάνειες του εδάφους συνεισφέρουν στην CEC του εδάφους.

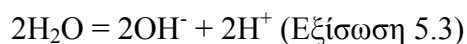
4.4 Ρυθμιστική ικανότητα των εδαφών

Όσο μεγαλύτερη η CEC του εδάφους τόσο πιο δύσκολα αλλάζει το pH του εδάφους.

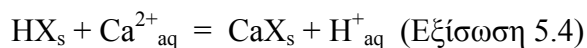
Αυτό γίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:



Αφού τα OH^- και H^+ αυξάνονται η αντίδραση διάστασης του νερού στο εδαφικό διάλυμα θα προχωρήσει αριστερά:



Σαν αποτέλεσμα των δύο παραπάνω εξισώσεων θα είναι να ανεβεί το pH. Αυτή όμως η επίδραση του CaCO_3 θα καθυστερήσει, γιατί:



Αποτέλεσμα της Εξίσωσης 5.4 είναι να μειωθεί το pH. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι ενώ έχουμε τάσεις αύξησης του εδαφικού pH, αυτό ρυθμίζεται και παραμένει στα αρχικά επίπεδα. Το πόσο πολύ θα 'αντισταθεί' στην αύξηση του pH θα εξαρτηθεί από το πόσα αποθέματα σε HX_s έχει, δηλαδή πόσες ελεύθερες επιφάνειες έχει. Ισχύει, δηλαδή, ότι όσο μεγαλύτερη η CEC του εδάφους, τόσο μεγαλύτερα τα αποθέματα του εδάφους σε HX_s , και άρα τόσο μεγαλύτερη η ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους στις αλλαγές του pH.

5.5 Η σημασία του pH του εδάφους

Το pH του εδαφικού διαλύματος είναι ίσως η σημαντικότερη χημική ιδιότητα του εδάφους. Από αυτό εξαρτάται η ισορροπία των κατιόντων μεταξύ των προσροφημένων και των διαλυμένων συγκεντρώσεων. Γενικά ισχύει ότι:

Όσο χαμηλότερο το pH από την ουδετερότητα (pH 7) τόσο η συγκέντρωση των κατιόντων στο εδαφικό διάλυμα αυξάνει. Δηλαδή, όσο χαμηλότερο το pH τόσο η αντίδραση $\text{Ca}_s = \text{Ca}_{\text{aq}}$ (Εξίσωση 5.5) χωρεί δεξιά.

Παρατήρηση 1: Για τα *θρεπτικά* αυτό είναι καλό για μικρό χρονικό διάστημα, γιατί αυξάνεται η βιοδιαθεσιμότητά τους για τα φυτά. Τελικά όμως είναι κακό, γιατί σε μια βροχή τα θρεπτικά θα ξεπλυθούν από το ριζοστρώμα και θα χαθούν από το οικοσύστημα. Αν αναλογιστούμε ότι όξινα εδάφη συνήθως έχουμε σε βροχερά κλίματα, τότε καταλήγουμε ότι τελικά η πτώση του pH είναι δυσμενής.

Παρατήρηση 2: Για τους *ρυπαντές* αυτό είναι μόνο καταστροφικό. Είτε γίνουν πιο βιοδιαθέσιμοι στα φυτά, είτε ξεπλυθούν και εμπλουτίσουν υπόγειους υδροφορείς οι συνέπειες είναι αρνητικές.

Να μερικοί λόγοι για τους οποίους ισχύει αυτός ο κανόνας:

1. Οι επιφάνειες τείνουν να φορτιστούν θετικά, άρα διώχνουν τα κατιόντα στο διάλυμα
2. Αυξάνεται η ενεργότητα του H^+ στο διάλυμα και ανταλλάσσει προσροφημένα κατιόντα, τα οποία μπαίνουν στο διάλυμα (με άλλα λόγια, η Εξίσωση 5.4 χωρεί αριστερά)
3. Οι στερεές επιφάνειες (τα σύμπλοκα στερεών ανόργανων συστατικών (όχι ορυκτά ή οργανική ουσία) με κατιόντα) είναι λιγότερο σταθερές
4. Η ενεργότητα των φουλβικών οξέων σε pH 5 είναι μέγιστη και αυτά δημιουργούν σύμπλοκα με κατιόντα (θυμίζω ότι τα σύμπλοκα φουλβικών με κατιόντα είναι μέρος του διαλύματος, όχι στερεή φάση)

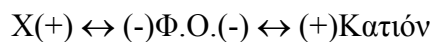
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

1. Τα κατιόντα ξεπλένονται εύκολα και χάνονται.
2. Όσα έχουν την ικανότητα να μην ξεπλένονται (H^+ , $Fe^{2+/3+}$ και Al^{3+}) προκαλούν τοξικότητες στα φυτά

Τα όξινα εδάφη είναι χαρακτηριστικό των βροχερών περιοχών. Αυτό λειτουργεί ως εξής:

Βρέχει → Αραιώνεται το εδαφικό διάλυμα → Η εξίσωση 4.5 χωρεί δεξιά → Τα κατιόντα (ή αλλιώς οι *βάσεις*) ξεπλένονται → Μένει το H^+ (δεν ξεπλένεται) → Αυξάνεται η συγκέντρωση του H^+ στο διάλυμα → Ταπεινώνεται το pH

Πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλά εδάφη όπου τα οξείδια είναι τα κυρίαρχα ορυκτά, σε pH 2-3 η τάση αυτή αντιστρέφεται. Τότε οι επιφάνειες είναι κυρίως φορτισμένες θετικά, οπότε προσροφούν φουλβικά οξέα, τα οποία με τη σειρά τους προσροφούν κατιόντα. Δηλαδή δημιουργούνται γέφυρες:



Έτσι τα κατιόντα συγκρατούνται στη στερεή φάση και δεν ξεπλένονται.

Τώρα θα δούμε τι συμβαίνει σε αλκαλικά εδαφικά pH. Τότε συμβαίνει το εξής:

Όσο υψηλότερο το pH από την ουδετερότητα (pH 7) τόσο η συγκέντρωση των κατιόντων στο εδαφικό διάλυμα μειώνεται. Δηλαδή, όσο χαμηλότερο το pH τόσο η αντίδραση $Ca_s = Ca_{aq}$ (Εξίσωση 5.5) χωρεί αριστερά.

Παρατήρηση: Αυτό σημαίνει ότι σε αλκαλικά pH η βιοδιαθεσιμότητα των κατιόντων είναι πολύ χαμηλή. Αυτό είναι κακό για τα θρεπτικά, πολύ καλό όμως για τους ρυπαντές.

Να μερικοί λόγοι για τους οποίους ισχύει αυτός ο κανόνας:

1. Οι επιφάνειες προσροφούν πιο αποδοτικά τα κατιόντα γιατί είναι έντονα φορτισμένες αρνητικά
2. Οι στερεές επιφάνειες (ανόργανα συστατικά εκτός των ορυκτών και της οργανικής ουσίας) είναι δυσδιάλυτες, άρα η σταθερότητα των συμπλόκων τους με τα κατιόντα είναι μεγάλη, άρα τα κατιόντα περιορίζονται από το εδαφικό διάλυμα
3. Τα χουμικά οξέα έχουν μεγάλη χημική ενεργότητα, οπότε η CEC του εδάφους αυξάνεται.

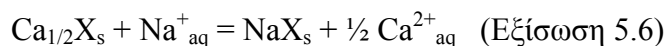
Τα εδάφη με μεγάλο pH είναι χαρακτηριστικό περιοχών με μικρή βροχόπτωση και υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό λειτουργεί ως εξής:

Εξάτμιση → Πυκνώνει το εδαφικό διάλυμα → Η εξίσωση 4.5 χωρεί αριστερά → Η συγκεντρώσεις των κατιόντων (ή αλλιώς των *βάσεων*) στο έδαφος αυξάνονται → Αυξάνεται το pH

Είτε σε χαμηλό, είτε σε υψηλό εδαφικό pH τα προβλήματα για τα εδάφη είναι μεγάλα. Και στις δύο περιπτώσεις τα εδάφη ονομάζονται **προβληματικά εδάφη** (problem soils) και χρειάζονται βελτίωση. Τα μεν ονομάζονται όξινα, τα δε ονομάζονται αλατούχα. Αν το κυρίαρχο κατιόν είναι το νάτριο τότε ονομάζονται αλατούχα – νατριωμένα. Τα ακριβή τους χαρακτηριστικά και τους τρόπους βελτίωσής τους θα τα δούμε στις Διαλέξεις 6 και 7.

5.6 Χαρακτηριστικά προσρόφησης κατιόντων

Αν σε μία στήλη εδάφους κορεσμένου σε Ca ρίξουμε διάλυμα NaCl από πάνω, θα βγει CaCl₂ από κάτω. Ο λόγος είναι ότι θα ανταλλαχθεί Na – Ca από τις στερεές επιφάνειες του εδάφους και θα προσροφηθεί Na αντί για Ca. Αυτό θα γίνει σύμφωνα με την αντίδραση:



Τα χαρακτηριστικά της ανταλλαγής, λοιπόν, είναι τα εξής:

1. Γίνεται γρήγορα
2. Είναι αντιστρεπτή
3. Ανταλλάσσονται ισοδύναμα φορτία, π.χ. 2 Na⁺ για 1 Ca²⁺
4. Η ανταλλαγή εξαρτάται από την αναλογία Ca : Na στο διάλυμα και από το πόσο εύκολα αυτά τα κατιόντα προσκολλώνται στις επιφάνειες (θα εξηγήσουμε ότι άλλα προσκολλώνται ευκολότερα και άλλα δυσκολότερα).

Βασισμένοι στην εξίσωση 5.6 μπορούμε να γράψουμε:

$$K^G = \frac{(Ca^{2+}_{aq})^{1/2}}{Na^+_{aq}} * \frac{NaX_s}{Ca_{1/2}X_s} \rightarrow \frac{(Ca^{2+}_{aq})^{1/2}}{Na^+_{aq}} = K^G * \frac{Ca_{1/2}X_s}{NaX_s} \quad (\text{Εξίσωση 5.7})$$

Η σταθερή K^G ονομάζεται σταθερή του Garron, καθώς αυτός είναι ο πρώτος που περιέγραψε αυτό το σύστημα. Η Εξίσωση 5.7 ισχύει για κάθε ζεύγος κατιόντων. Ειδικά όμως για το ζεύγος Ca – Na η Εξίσωση 5.7 τροποποιήθηκε από τον Shainberg, και μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

$$\sigma_{Ca-Na} = n_0 * \frac{Ca_s}{Na^2_s} * \frac{Na^2_{aq}}{Ca_{aq}} \quad (\text{Εξίσωση 5.8})$$

Από την Εξίσωση του Garron μπορεί να εκληφθεί ο **Νόμος της Αναλογίας** (Ratio Law), που εκφράζεται ως εξής:

Για να παραμείνει η ισορροπία μεταξύ στερεής φάσης και εδαφικού διαλύματος ως έχει, όταν γίνεται αλλαγή στο εδαφικό διάλυμα τα μονοσθενή ιόντα πρέπει να αλλάζουν σε διπλάσιες αναλογίες από ό,τι τα δισθενή ιόντα.

Με άλλα λόγια, αν οι συγκεντρώσεις των κατιόντων στο διάλυμα αυξηθούν, τα μονοσθενή κατιόντα θα έχουν διπλάσια αύξηση από ό,τι τα δισθενή. Αντίστοιχα, αν οι συγκεντρώσεις των κατιόντων στο διάλυμα μειωθούν, τα μονοσθενή κατιόντα θα έχουν διπλάσια μείωση από ό,τι τα δισθενή.

Παρατηρήσεις στο Νόμο της Αναλογίας:

1. Αν αραιώσει το εδαφικό διάλυμα (π.χ. σε βροχή ή άρδευση), τα δισθενή προτιμούνται για προσρόφηση από τα μονοσθενή.

Να πώς λειτουργεί αυτό:

Αραιώνει το εδαφικό διάλυμα → τα μονοσθενή αραιώνουν 2 φορές περισσότερο → Μονοσθενή περνάνε από τη στερεή φάση στο διάλυμα → Τα δισθενή καταλαμβάνουν τις θέσεις των μονοσθενών στις επιφάνειες

2. Αν πυκνώσει το εδαφικό διάλυμα (π.χ. σε έντονη εξάτμιση) τα μονοσθενή προτιμούνται για προσρόφηση από τα δισθενή. Αυτός είναι και ένας λόγος για τον οποίο σε εδάφη ξηρικών περιοχών (όπου τα εδάφη είναι αλατούχα), κυριαρχεί το Na αντί του Ca (και τα εδάφη είναι και νατριωμένα).

Να πώς λειτουργεί αυτό:

Πυκνώνει το εδαφικό διάλυμα → τα μονοσθενή πυκνώνουν 2 φορές περισσότερο → Μονοσθενή περνάνε από το διάλυμα στη στερεή φάση → Τα δισθενή αντικαθίστανται και μεταβαίνουν στο διάλυμα

Άρα τελικά:

- Σε αραιό διάλυμα: προτιμούνται τα δισθενή από τα μονοσθενή
- Σε πυκνό διάλυμα: προτιμούνται τα μονοσθενή από τα δισθενή

Σημείωση: Το εδαφικό διάλυμα, γενικά μιλώντας, θεωρείται αραιό διάλυμα.

Αναφέραμε μέχρι τώρα ένα βασικό παράγοντα που καθορίζει τα χαρακτηριστικά προσρόφησης των κατιόντων στις επιφάνειες. Αυτός έχει να κάνει με την πυκνότητα του εδαφικού διαλύματος. Υπάρχουν άλλοι δύο βασικοί παράγοντες που αναφέρθηκαν λιγότερο ή περισσότερο, τώρα όμως θα τους συνοψίσουμε. Η προσρόφηση, λοιπόν, των κατιόντων εξαρτάται από την:

1. Πυκνότητα του εδαφικού διαλύματος
2. Λυότροπη σειρά: όσο πιο δεξιά πάμε τόσο πιο εύκολη η προσρόφηση
3. Αναλογία των κατιόντων στο εδαφικό διάλυμα: όσο πιο πολύ το κατιόν στο διάλυμα αναλογικά με τα υπόλοιπα κατιόντα, τόσο πιο εύκολα θα προσροφηθεί

Κεφάλαιο 6- Προβληματικά εδάφη:

6.1 Αλατούχα εδάφη

6.2 Αλατούχα-νατριωμένα και Νατριωμένα εδάφη

6.3 Όξινα εδάφη

6.1 Αλατούχα εδάφη

Αλατούχα θεωρούνται τα εδάφη που έχουν αγωγιμότητα του νερού του εδαφικού διαλύματος EC_e μεγαλύτερη από 2 dS m^{-1} . Τέτοια εδάφη έχουν πολλά προβλήματα για τις καλλιέργειες και χρειάζονται βελτίωση. Δημιουργούνται κυρίως για 2 λόγους:

- Λόγω τοπογραφίας
- Λόγω αρδευτικού νερού

Τα προβλήματα που προκαλούν τα αλατούχα εδάφη είναι τα εξής:

1. Μείωση παραγωγικότητας εδαφών
2. Μείωση της διηθητικότητας των εδαφών – δυσμενείς φυσικές ιδιότητες
3. Τοξικότητα αλάτων στις καλλιέργειες

6.1.1 Αλατούχα εδάφη λόγω τοπογραφίας

Ευπαθή είναι τα εδάφη, τα οποία είναι:

1. Σε δέλτα ποταμών: αυτά εμπλουτίζονται με άλατα λόγω της γειτνίασης με τη θάλασσα.
2. Χαμηλά στο ανάγλυφο: Συγκεντρώνονται τα απορρέοντα νερά, και όταν εξατμίζονται αφήνουν πίσω τους τα προηγουμένως διαλυμένα άλατα.
3. Μικρής διαπερατότητας (κυρίως αργιλώδη): Το νερό εξατμίζεται πιο γρήγορα από ό,τι διηθείται, έτσι τα διαλυμένα άλατα συμπυκνώνονται.

6.1.2 Αλατούχα εδάφη λόγω νερού άρδευσης

Το νερό άρδευσης για να μην προκαλέσει προβλήματα, θα πρέπει να έχει EC_w έως 2 dS m^{-1} και SAR (σχέση προσρόφησης νατρίου) μέχρι $8 (\text{mEq L}^{-1})^{1/2}$. Το SAR δίνεται από τον τύπο:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{1/2}} \quad (\text{Εξίσωση 6.1})$$

Πρέπει να τονιστεί ότι αυτή η μέτρηση SAR υποτιμάει τη δραστηριότητα των ανθρακικών αλάτων στο νερό. Σε ουδέτερα προς αλκαλικά pH τα ιόντα HCO_3^- δημιουργούν σταθερά σύμπλοκα με τα ιόντα Ca^{2+} και έτσι μειώνουν τη δραστηριότητα των Ca^{2+} στο νερό. Αυτή η επίδραση συνεκτιμάται στο AdjSAR:

$$\text{AdjSAR} = \frac{\text{Na}^+}{[(\text{Ca}_x^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{1/2}} \quad (\text{Εξίσωση 6.2})$$

Το Ca_x^{2+} δίνεται από πίνακες όταν είναι γνωστά τα $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ και EC_w .

6.1.3 Ποιες συνθήκες οδηγούν στην αλάτωση

- Κακό νερό άρδευσης
- Κακή αποστράγγιση ώστε τα άλατα να ξεπλένονται

Για να προστεθεί αλάτι στο έδαφος θα πρέπει:

$$D_w * \text{EC}_w > D_{wd} * \text{EC}_{wd} \quad (\text{Εξίσωση 6.3})$$

όπου D_w είναι η ποσότητα του νερού άρδευσης, EC_w η αγωγιμότητα του νερού άρδευσης, D_{wd} η ποσότητα του νερού στράγγισης και EC_{wd} η αγωγιμότητα του νερού στράγγισης.

Άρα τελικά στο εδαφικό διάλυμα ισχύει ότι

$$\Delta EC_e = \frac{D_w * EC_w - D_{wd} * EC_{wd}}{H * SP * \rho} \quad (\text{Εξίσωση 6.4})$$

όπου ΔEC_e είναι η μεταβολή της αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος, H είναι το βάθος του εδάφους (cm), SP ο κορεσμός του εδάφους σε νερό ($g\ 100g^{-1}$) και ρ το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους ($g\ cm^{-3}$).

Από την Εξίσωση 6.4 φαίνεται ότι αν το D_{wd} αυξηθεί (δηλαδή αν γίνει καλή στράγγιση) το ΔEC_e θα μειωθεί.

6.1.4 LF – Leaching Fraction – Κλάσμα στράγγισης

Είναι η ποσότητα νερού άρδευσης που χρησιμοποιείται για τη στράγγιση των αλάτων.

$$LF = \frac{D_{wd}}{D_w} = \frac{EC_w}{EC_{wd}} \quad (\text{Εξίσωση 6.5})$$

Ένα καλό LF είναι 0.15, δηλαδή το 15% του νερού άρδευσης να προορίζεται για το ξέπλυμα των αλάτων.

6.1.5 Βελτίωση αλατότητας

1. Στράγγιση: υψηλή υπόγεια στάθμη → υψηλή αλατότητα (ανύψωση νερού → εξάτμιση → άλατα)

2. Βαθιά διήθηση

Leaching Requirement:

$$LR = \frac{5 \cdot EC_w}{5 \cdot EC_e - EC_w} \quad (\text{Εξίσωση 6.6})$$

Εδώ, η EC_e είναι η τιμή της αγωγιμότητας του εδαφικού διαλύματος, που είναι τέτοια ώστε μια συγκεκριμένη καλλιέργεια να μειώσει την απόδοσή της.

$$D_t = \frac{ET}{1 - LR} \quad (\text{Εξίσωση 6.7})$$

όπου D_t η ολική ποσότητα νερού που θα εφαρμοστεί και ET είναι η εξατμισοδιαπνοή.

Διαφορά LF και LR:

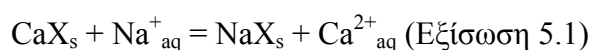
- Το LF μετράει τη διαφορά στην αλατότητα του νερού άρδευσης σε κάθε εδαφικό στρώμα
- Το LR έχει την ωφελιμιστική έννοια του τι θέλουμε για το φυτό.

3. Αγρονομικές επεμβάσεις

- Ισοπέδωση
- Τοποθέτηση σπόρου σωστά

6.2 Αλατούχα-νατριομένα και νατριομένα εδάφη

6.2.1 Γενικά



Αν έχουμε αλάτωση του εδάφους, δηλαδή συμπύκνωση του εδαφικού διαλύματος η 5.1 θα χωρήσει δεξιά. Τα Ca^{2+}_{aq} θα χαθούν (θα δημιουργήσουν στερεές επιφάνειες με ανθρακικές ή θειϊκές ρίζες και θα καθιζάνουν ή αν βρέξει θα ξεπλυθούν). Έτσι πλουτίζεται η στερεή φάση σε Na^+ .

ESP ονομάζεται το ποσοστό κορεσμού του εδάφους σε Na^+ επί του ποσοστού του συνόλου των εναλλακτικών κατιόντων του εδάφους.

$$\text{ESP} = \frac{\text{Na}_s^+}{\text{CEC}} * 100 \text{ (Εξίσωση 6.8)}$$

Όταν ένα έδαφος έχει $\text{ESP} > 15\%$ τότε λέγεται νατριωμένο.

Έτσι έχουμε στοιχεία του Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1. Προβληματικά εδάφη

	ECw dS m⁻¹	ESP %	pH	Φυσικές Ιδιότητες	Χημικές Ιδιότητες
Αλατούχα	>2	<15	Ελαφρώς Αλκαλικό	↑ Διηθητικό- τητα	↓ Γονιμό- τητα
Αλατούχα- Νατριωμένα	>2	>15	8.5	Όχι σίγουρο	↓ Γονιμό- τητα
Νατριωμένα	<2	>15	8.5 - 10	↓ Διηθητι- κότητα	↓ Γονιμό- τητα

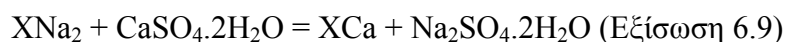
6.2.2 Βελτίωση Αλατούχων-νατριωμένων και νατριωμένων εδαφών

Αυτό που πρέπει να αλλάξει σε αυτά τα εδάφη είναι:

1. Η συγκέντρωση των αλάτων (εναλλακτικά και εδαφικού διαλύματος) να μειωθεί
2. Η υψηλή υπόγεια στάθμη να ταπεινωθεί
3. Η συγκέντρωση του Na^+ σε έδαφος και εδαφικό διάλυμα να μειωθεί
4. Η διηθητικότητα του εδάφους να αυξηθεί

Για την επίτευξη των 1 και 2 συζητήσαμε παραπάνω. Το 4 θα γίνει όταν επιτύχουμε στα 1, 2 και 3. Μένει, λοιπόν, να πούμε για το 3. Για να πετύχουμε το 3

εφαρμόζουμε γύψο στο έδαφος, ώστε να έχουμε ανταλλαγή Ca^{2+} και Na^+ στις εδαφικές επιφάνειες. Έχουμε λοιπόν:



Αυτό πρέπει να γίνεται με ταυτόχρονη έκπλυση για να ξεπλένεται το $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ και η αντίδραση να χωρεί συνέχεια δεξιά.

6.3 Όξινα εδάφη

6.3.1 Γενικά

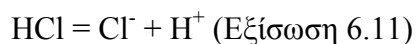
Όλα τα εδάφη κινδυνεύουν από οξίνιση. Όπου υπάρχει βροχή και έκπλυση αυτή η περίπτωση είναι πιθανή. Ιδίως με την ατμοσφαιρική ρύπανση, οι τάσεις αύξησης της οξίνισης των εδαφών συνεχώς αυξάνονται.

6.3.2 pH- Ανασκόπηση θεωρίας

Οξέα είναι οι ουσίες που δίνουν πρωτόνια:



Για παράδειγμα:



6.3.3 Ρυθμιστική ικανότητα και εδαφικό pH

Ρυθμιστική ικανότητα είναι η ποσότητα (σε mol L^{-1}) ενός οξέος ή μιας βάσης που χρειάζεται για να αλλάξει το pH ενός διαλύματος όγκου 1 L κατά 1 μονάδα. Η ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους εξαρτάται από αρκετές εδαφικές διεργασίες:

1. Αντιδράσεις οξέων με ανθρακικά άλατα του Ca^{2+} και Mg^{2+} (βλ. Εξ. 5.2 και 5.3).
2. Ανταλλαγή κατιόντων (βλ. Εξ. 5.1).
3. Αντιδράσεις οργανικής ουσίας (βλ. Εξ. 2.3). Αποτέλεσμα αυτού είναι να μειώνεται το αρνητικό φορτίο της οργανικής ουσίας καθώς το pH πέφτει.
4. Αντιδράσεις με οξείδια (πχ. αλουμινίου):



Αποτέλεσμα αυτού είναι να αυξάνεται το θετικό φορτίο (ή το αρνητικό φορτίο γίνεται θετικό) των οξειδίων καθώς το pH πέφτει.

5. Υδρόλυση ορυκτών (βλ. Εξ. 3.6)

6.3.4 Βαθμός κορεσμού σε βάσεις

Τα Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ και Na^+ λέγονται βασικά κατιόντα

Τα Al^{3+} , AlOH^{2+} και H^+ λέγονται όξινα κατιόντα

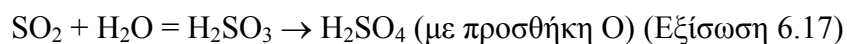
$$\text{BKB} = \frac{\Sigma(\text{βασικά κατιόντα})}{\text{CEC}} * 100 \text{ (Εξίσωση 6.15)}$$

Όταν έχουμε $\text{BKB} > 80\%$ τότε το έδαφος έχει pH περίπου 8

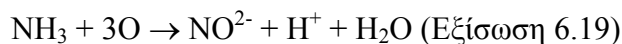
6.3.5 Διαδικασίες οξίνισης

1. Οξέα στα νερά της βροχής: H_2CO_3 , HNO_3 , H_2SO_4 , HCl

2. Οξέα ατμόσφαιρας που προέρχονται από ρύπανση. Στο εδαφικό διάλυμα:



3. Χημικά (πχ. λιπάσματα) που δημιουργούν οξύτητα. Στο έδαφος:



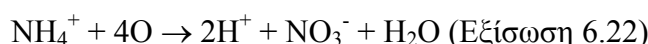
το οποίο ακολουθείται από



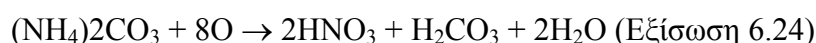
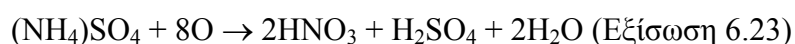
4. Στα φυτά: Αν οι ρίζες απορροφήσουν βασικά κατιόντα $>$ ανιόντα, τότε το pH πέφτει. Αν οι ρίζες απορροφήσουν βασικά κατιόντα $<$ ανιόντα, τότε το pH

αυξάνεται. (Τα παραπάνω δεν ισχύουν αν η φυτομάζα επανέρχεται στο έδαφος). Αυτό, αν και είναι μηχανισμός αρνητικής ανάδρασης των οικοσυστημάτων, θα προκαλέσει απότομη οξίνιση στα εδάφη σε περίπτωση αλλαγής χρήσης γης από δάσος σε γεωργία.

5. Οξειδοαναγωγικές διαδικασίες: Ισχύει ότι όταν έχουμε οξείδωση έχουμε πτώση του pH, ενώ με αναγωγή έχουμε αύξηση του pH. (Να ένας ακόμα λόγος για τον οποίο όταν ανεβεί η στάθμη των υπόγειων υδροφορέων, και άρα έχουμε αλάτωση, έχουμε και άνοδο του εδαφικού pH). Αυτό γίνεται με όλα τα λιπάσματα αμμωνίας και ουρίας:



Παραδείγματα:



6.3.6 Ποιες αρνητικές επιδράσεις έχουν τα όξινα εδάφη

Οξίνιση $\rightarrow \uparrow \text{H}^+$ στο εδαφικό διάλυμα $\rightarrow \uparrow$ η προσρόφηση H^+ στο έδαφος \rightarrow τα βασικά κατιόντα περνάνε στο εδαφικό διάλυμα \rightarrow τα βασικά κατιόντα χάνονται μη αντιστραπτά από το έδαφος είτε με έκπλυση είτε με απορρόφηση από τα φυτά (αν δεν εκπλυθούν είναι στα φυτά $\rightarrow \downarrow$ η γονιμότητα των εδαφών)

6.3.7 Βελτίωση όξινων εδαφών

Γίνεται με εφαρμογή ασβέστη στο έδαφος. Υλικά ασβέστωσης είναι κυρίως το CaCO_3 και το CaO . Το πόσο ασβέστη θα εφαρμόσουμε εξαρτάται από τη ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους (ή τη CEC).

6.4 Τελικά συμπεράσματα για τα προβληματικά εδάφη

Αν η χρήση γης αφεθεί ως έχει, αλλά στα εδάφη δεν γίνει καμιά άλλη ανθρωπογενής παρέμβαση, τότε:

- Σε εύκρατα κλίματα θα έχουμε πορεία οξίνισης των εδαφών
- Σε ξηρικά κλίματα θα έχουμε πορεία αλάτωσης και νατρίωσης των εδαφών

Κεφάλαιο 7- Διάβρωση εδαφών

7.1 Εισαγωγή

Η διάβρωση των εδαφών είναι ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα, που προκαλεί αλυσιδωτά προβλήματα σε οικοσυστήματα και κοινωνίες ανθρώπων. Τα προβλήματα δεν υφίστανται μόνο στις περιοχές που απογυμνώνονται από το επιφανειακό στρώμα εδάφους. Οι κάτοικοι τέτοιων περιοχών αντιμετωπίζουν μείωση γεωργικής παραγωγής και επιτάχυνση της ερημοποίησης, προβλήματα που οδηγούν σε οικονομικά αδιέξοδα και κοινωνικές αναταράξεις. Είναι και τα υδατικά οικοσυστήματα που θα δεχθούν τα μετακινηθέντα ιζήματα. Εκεί θα έχουμε αλλαγή των πληθυσμιακών ισορροπιών των επιφανειακών υδάτων, και κυρίως τον ευτροφισμό τους. Αυτά με τη σειρά τους έχουν βαρύτερες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις στις ντόπιες κοινωνίες ανθρώπων.

Η **διάβρωση (erosion)** θα ξεκινήσει όταν η προσθήκη του νερού στο έδαφος είναι μεγαλύτερη από τη **διηθητικότητα (infiltration)** του εδάφους. Έτσι μένει νερό στην επιφάνεια, το οποίο θα κυλήσει χαμηλότερο στο ανάγλυφο αν υπάρχει εδαφική κλίση και θα αποθηκευτεί σε μικρές κοιλότητες που τυχόν υπάρχουν. **Απορροή (run-off)** θα έχουμε όταν το νερό πλεονάζει τόσο πολύ ώστε ούτε να διηθηθεί προλαβαίνει, ούτε οι κοιλότητες έχουν αρκετή χωρητικότητα για να το αποθηκεύσουν.

Το νερό που κυλάει χαμηλότερα στο ανάγλυφο θα παρασύρει και εδαφικά τεμαχίδια, ώστε να ανοίξει χώρο για να περάσει. Αυτό θα οδηγήσει σε απώλεια επιφανειακού εδάφους και είναι το πρώτο βήμα για τη διάβρωση του εδάφους. Όσο η ταχύτητα κίνησης του νερού είναι υψηλή, τα εδαφικά τεμαχίδια παραμένουν σε αιώρηση, ενώ όσο προχωρούμε χαμηλότερα στο ανάγλυφο και η ταχύτητα μικραίνει, αποτίθενται πρώτα τα μεγαλύτερα και ύστερα τα μικρότερα τεμαχίδια. Με άλλα λόγια, δίπλα σε ποτάμια θα περιμέναμε να βρούμε περισσότερο αμμώδη εδάφη, ενώ όσο απομακρυνόμαστε περιμένουμε τα ποσοστά της αργίλου να αυξάνονται.

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι η διάβρωση είναι μέρος μιας φυσικής διαδικασίας που οδηγεί στην ομαλοποίηση του ανάγλυφου, και 'αντιμάχεται' τη δημιουργία ανάγλυφου λόγω των ορογενέσεων. Η γεωλογική ή φυσική διάβρωση, δηλαδή, είναι αναπόφευκτη και αποκαθιστά στη φύση την ισορροπία στην τοπογραφία του πλανήτη

μας. Αυτό που προβληματίζει όμως είναι το γεγονός ότι ανθρωπογενείς επιδράσεις έχουν επιταχύνει το σκέλος της διάβρωσης και έχουν οδηγήσει σε περιβαλλοντική ανισορροπία.

7.2 Προβλήματα που δημιουργεί η διάβρωση

7.2.1 Μείωση παραγωγικότητας

Αυτή οφείλεται στην απώλεια του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, το οποίο είναι και το πιο γόνιμο. Στα επιφανειακά 30 cm του εδάφους έχουν δράσει εντονότερα όλες οι εδαφογενετικές συνιστώσες, και εκεί έχουμε συγκέντρωση θρεπτικών και οργανικής ουσίας. Η μείωση της παραγωγικότητας των οικοσυστημάτων οδηγεί σε προχωρημένο στάδιο στην ερημοποίηση.

7.2.2 Φυσική ρύπανση επιφανειακών υδάτων

Η διάβρωση των χερσαίων οικοσυστημάτων ακολουθείται από την ιζηματογένεση των υδατικών. Δεν είναι μόνο, δηλαδή, ότι έδαφος θα χαθεί από εκεί που δεν πρέπει, είναι και ότι θα οδηγηθεί και εκεί που δεν πρέπει! Λόγω των εδαφικών τεμαχιδίων που παραμένουν σε αιώρηση στο ποτάμι ή αποτίθενται σε λίμνες και θάλασσες, αυξάνει η θολότητα των επιφανειακών υδάτων. Αυτό θα οδηγήσει σε αλλοίωση των πληθυσμιακών σχέσεων. Π.χ. το ψάρι-λεία θα κρύβεται καλύτερα από το ψάρι-άρπαγα, κάτι που θα οδηγήσει σε μείωση του αριθμού ατόμων του άρπαγα. Συνήθως όμως τα μεγαλύτερα ψάρια είναι και τα εμπορικά. Τελικά θα ακολουθήσει μείωση της αλιείας με όλες τις αρνητικές συνέπειες που αυτό συνεπάγεται.

7.2.3 Ρύπανση υδάτων από τα προσροφημένα θρεπτικά στις επιφάνειες των εδαφικών τεμαχιδίων

Αυτή είναι γνωστή και σαν χημική ρύπανση επιφανειακών υδάτων. Η μεγάλη αύξηση των θρεπτικών θα οδηγήσει σε ευτροφισμό, ο οποίος αλυσιδωτά επιφέρει σημαντικές αλλοιώσεις στα υδατικά οικοσυστήματα. Η εξέτασή του όμως δεν θα γίνει εδώ.

Τελικά, φυσική και χημική ρύπανση των υδατικών οικοσυστημάτων θα επιφέρουν και μια επιτάχυνση της ωρίμανσής τους.

7.3 Μηχανισμοί που δρουν κατά τη διάβρωση

- Αποκόλληση του εδαφικού τεμαχιδίου με την επίδραση της βροχής ή του αέρα (χρειάζεται πολλή ενέργεια)
- Μεταφορά του εδαφικού τεμαχιδίου με το νερό χαμηλότερα στο ανάγλυφο (χρειάζεται λιγότερη ενέργεια)
- Απόθεση χαμηλότερα στο ανάγλυφο (χρειάζεται ακόμα λιγότερη ενέργεια)

Τώρα, ας τονίσουμε ότι υπάρχει η επίδραση δύο αντίθετων δυνάμεων, των οποίων η συνισταμένη δράση θα αποφασίσει αν λάβει χώρα μεταφορά ή όχι του εδάφους. Αυτές είναι οι δυνάμεις αντίστασης και οι δυνάμεις διάβρωσης.

7.3.1 Δυνάμεις αντίστασης

- Βαρύτητα: κρατάει το εδαφικό τεμαχίδιο στη θέση του. Όσο μεγαλύτερο το τεμαχίδιο (ή το εδαφικό συσσωμάτωμα) τόσο καλύτερη η αντίσταση.
- Τριβή: ισχύουν τα ίδια όπως στη βαρύτητα.
- Διάχυτη ιονική στοιβάδα: Άργιλοι με μεγάλα ποσοστά κορεσμού με δισθενή και τρισθενή κατιόντα διατηρούν ικανοποιητική δομή και έτσι μεγάλα και δυνατά συσσωματώματα.
- Οργανική ουσία: Έχει την ικανότητα να 'τσιμεντοποιεί' τα εδαφικά τεμαχίδια. Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό της στο έδαφος τόσο μεγαλύτερη η αντίσταση στη διάβρωση. Είναι ίσως το μόνο υλικό που αν προστεθεί στο έδαφος μπορεί να βελτιώσει ορατά και σχετικά άμεσα την αντίσταση του εδάφους στη διαβρωσιμότητα.

7.3.2 Δυνάμεις διάβρωσης

- Οριζόντια δύναμη:

$$F_D = \frac{\tau_0}{N}$$

Όπου, τ_0 είναι η δύναμη πίεσης των σταγόνων της βροχής και N ο αριθμός τεμαχιδίων του εδάφους ανά μονάδα επιφάνειας. Πάλι φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο το N , τόσο μικρότερη η δύναμη διάβρωσης. Το N είναι μεγάλο όταν έχουμε πολλά μεγάλα και σταθερά εδαφικά συσσωματώματα.

- **Υδραυλική άνωση:** Είναι η δύναμη που προκαλεί την άνωση των στερεών αντικειμένων που είναι σε αιώρηση στο νερό.

Πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν μηχανισμοί αρνητικής ανάδρασης που λαμβάνουν χώρα και τείνουν να αποτρέψουν την περαιτέρω διάβρωση εκεί που έχει ήδη αρχίσει. Σε μέρη, λοιπόν, όπου η διάβρωση έχει ξεκινήσει, τα λεπτά τεμαχίδια του εδάφους που είναι και τα πιο ευπαθή θα φύγουν πρώτα, αφήνοντας πίσω τους μεγαλύτερα (κόκκους άμμου και μεγαλύτερα συσσωματώματα). Έτσι πάνω-πάνω μένει ένα προστατευτικό στρώμα μερικών χιλιοστών που προστατεύει το τα υπόλοιπα εδαφικά τεμαχίδια των υποκείμενων στρωμάτων. Βέβαια, αν η διαδικασία της διάβρωσης είναι έντονη, αυτός ο μηχανισμός προστασίας από μόνος του δεν είναι ικανός να αποτρέψει τη φθορά.

7.4 Είδη διάβρωσης

- **Ρηχή διάβρωση:** Είναι το πρώτο στάδιο, όπου το νερό στο πέραςμά του δημιουργεί ρυάκια αβαθή. Αυτά με τον καιρό βαθαίνουν και ανοίγουν τα πρηνή τους. Έτσι οδηγούμαστε στην
- **Χαραδρωτική διάβρωση:** Εδώ η διάβρωση φτάνει μέχρι τον αδιαπέρατο ορίζοντα (αν υπάρχει τέτοιος) ή μέχρι τον ανόργανο ορίζοντα C. Όταν η εκβάθυνση δεν έχει να προχωρήσει άλλο, η διάβρωση κατατρώει τα πρηνή, έτσι ώστε λίγο-λίγο να οδηγηθούμε στην
- **Στρωματική διάβρωση:** Εδώ έχουμε ομοιόμορφη απομάκρυνση εδάφους μέχρι ενός σημαντικού βάθους (ίσως και 50 cm). Είναι η πιο προχωρημένη περίπτωση διάβρωσης, όπου το έδαφος έχει χάσει το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγικότητάς του, και το εκεί οικοσύστημα έχει αρχίσει να δέχεται της επιδράσεις της ερημοποίησης.

7.5 Το μέγεθος του προβλήματος

Κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης το έδαφος 'εκρήγνυται' με κάθε σταγόνα βροχής που δέχεται. Αυτή η επίδραση

1. Λόγω κινητικής ενέργειας θα
- προκαλέσει σπάσιμο των χαλαρών συσσωματωμάτων και θα

- φέρει σε κατάσταση αιώρησης στο νερό τα λεπτοδιαμερισμένα αυτά εδαφικά τεμαχίδια και
2. Λόγω φυσικών ιδιοτήτων του νερού θα
- Χαλαρώσει περαιτέρω τις δυνάμεις συγκράτησης των εδαφικών τεμαχιδίων (βλ. και 4.4.4.3)

Αυτό, βέβαια, δεν σημαίνει ότι όσα τεμαχίδια αποκοπών λόγω της επίδρασης του νερού θα παρασυρθούν απαραίτητα από αυτό. Παρασύρονται χαμηλότερα στο ανάγλυφο (δηλαδή διαβρώνονται) περίπου 50-90 φορές λιγότερα εδαφικά τεμαχίδια από αυτά που αρχικώς εκρήγνυνται.

Σε ραγδαίες βροχές εκρήγνυνται μέχρι και 200 t εδάφους ha^{-1} . Σε βάθος εδάφους 30 cm (μέχρι τόσο είναι περίπου ο γόνιμος Α ορίζοντας) έχουμε περίπου 7,000 t εδάφους ha^{-1} . Από αυτά σε παγκόσμια κλίμακα διαβρώνονται 100 t $\text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$.

7.6 Ποιες περιοχές είναι ευπαθείς ως προς τη διάβρωση

Πρόκειται για περιοχές, οι οποίες:

- Είναι ψηλά στο ανάγλυφο και έχουν μεγάλες κλίσεις.
- Έχουν μικρά ποσοστά οργανικής ουσίας και αργίλου.
- Δέχονται ραγδαίες βροχές (όσο ραγδαιότερη η βροχή, τόσο μεγαλύτερη η διάμετρος των σταγόνων, τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα προσγείωσής τους και άρα τόσο περισσότερη η διάβρωση).
- Δεν έχουν μεγάλη φυτοκάλυψη (όσο μεγαλύτερη φυτοκάλυψη, τόσο μικρότερη η κινητική ενέργεια των σταγόνων της βροχής και άρα καλύτερη η προστασία).

Πρέπει να πούμε ότι τα τρία πρώτα επιτείνουν το τέταρτο. Οι μεσογειακές χώρες είναι περιοχές υψηλού κινδύνου και ήδη έχουν υποφέρει πολύ από τη διάβρωση, γιατί τουλάχιστο τα τρία τελευταία σημεία είναι χαρακτηριστικά των οικοσυστημάτων τους.

Πάντως, οι παραπάνω περιπτώσεις έχουν να κάνουν με μη ανθρωπογενείς συνθήκες. Τις περισσότερες φορές όμως οι λόγοι που επιταχύνουν τη διάβρωση είναι κατά βάση

ανθρωπογενείς, και τα αποτελέσματα γίνονται δραματικότερα όταν ισχύουν και οι παραπάνω συνθήκες. Τέτοιες ανθρωπογενείς επιδράσεις είναι οι εξής:

- Αλλαγή χρήσης γης προς τη γεωργική. Αυτό προκαλεί
 1. Μείωση ριζικού συστήματος. Όσο μικρότερο το ριζικό σύστημα, τόσο μεγαλώνει η ευπάθεια του εδάφους στη διάβρωση. Συνήθως αφορά αποψίλωση περιοχών με μόνιμες φυτοκοινωνίες (δενδρώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις) και εγκατάσταση εμπορικών γεωργικών καλλιεργειών, οι περισσότερες από τις οποίες είναι ετήσιες. Αυτό επίσης προκαλεί
 2. Μείωση του ποσοστού της φυλλικής κάλυψης του εδάφους. Έτσι η βροχή προκαλεί έντονες φθορές στο έδαφος σε σχέση με παλαιότερα που υπήρχε δασοκάλυψη.
 3. Μείωση της οργανικής ουσίας του εδάφους. Γεωργική χρήση σημαίνει εκμηχανισμένη καλλιέργεια, άρα συχνός αερισμός του εδάφους, και τελικά απότομη αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας.
- Αλλαγή χρήσης γης προς κτηνοτροφία. Αυτό επιταχύνει την αποψίλωση περιοχών με μόνιμες φυτοκαλύψεις.

7.7 Ποιοι είναι οι τρόποι αντιμετώπισης της διάβρωσης

Βραχυπρόθεσμα:

- Λίπανση εδαφών: αφού η κύρια αρνητική επίδραση είναι η απώλεια θρεπτικών μια καλή και ορθολογική λίπανση βελτιώνει την κατάσταση κατά πολύ.
- Προσθήκη οργανικών υλικών: τέτοια είναι η κοπριά και η ιλύς αστικών αποβλήτων (ΙΑΑ), τα οποία προσθέτουν και θρεπτικά, και επιπλέον είναι ανέξοδα και άφθονα.
- Ενσωμάτωση φυτικών υπολειμμάτων στο έδαφος: έτσι και θα προστεθεί οργανική ουσία όταν τα υπολείμματα αποικοδομηθούν, και θα αυξηθεί η φυτοκάλυψη του εδάφους.

Μακροπρόθεσμα:

- Φύτευση επικίνδυνων περιοχών (πρανή ποταμών, δρόμων κτλ.)
- Άρωση κατά τις ισουΰειες, και όχι όπως συνήθως σε ευθείες γραμμές. Έτσι 'αναγκάζεται' το νερό να μην κατακυλάει χαμηλότερα στο ανάγλυφο.

- Δημιουργία αναβαθμών, έτσι ώστε να δημιουργηθούν διαδοχή επίπεδων επιφανειών όπου είναι ευκολότερη η καλλιέργεια και ‘αποθαρρύνεται’ η μεταφορά νερού χαμηλότερα στο ανάγλυφο.
- Δημιουργία ταρατσών: αυτές είναι επίπεδες περιοχές που κατασκευάζονται σύμφωνα με το σκεπτικό των αναβαθμών, μόνο που αυτές είναι πολύ μεγαλύτερης έκτασης. Αυτές έχουν νόημα περισσότερο σε εκτάσεις παράλληλα σε κοίτες ποταμών.
- Άρωση που να συνδιάζει και μεταφορά του εδάφους με ‘ήπιους’ ρυθμούς προς τα χαμηλότερα σημεία του αναγλύφου ώστε να μικραίνουν οι υψομετρικές διαφορές.
- Μετατόπιση των καλλιεργειών από ετήσιες σε πολυετείς δενδρώδεις (οπωροφόρα δένδρα).
- Αναδάσωση (αλλαγή χρήσης γης από αγροτική σε δασική).

7.8 Πότε θέλουμε διάβρωση

Είναι περιπτώσεις κατά τις οποίες επιθυμούμε μετακίνηση εδάφους χαμηλότερα στο ανάγλυφο. Αυτό γίνεται μόνο κατόπιν ενδελεχούς σχεδιασμού, και οι περιπτώσεις για τις οποίες ενδείκνυται είναι τέτοιες κατά τις οποίες έχουμε τοποθεσίες με σχετικά γόνιμο έδαφος, αλλά μειωμένου οικονομικού ενδιαφέροντος για εκμετάλλευση (επειδή ίσως εκεί δεν είναι ευχερής η εφαρμογή άρδευσης). Τότε αν ‘κατεβεί’ το έδαφος παρακάτω στο ανάγλυφο όπου οι συνθήκες είναι πιο επωφελείς θα υπάρξει κοινωνικό και οικονομικό όφελος. Αυτό πρέπει να γίνει με συστήματα διαδοχικών ταρατσών τα οποία να συλλέγουν τις απορροές (και το νερό και το μεταφερόμενο ίζημα).

Κεφάλαιο 8- Ρύπανση εδαφών

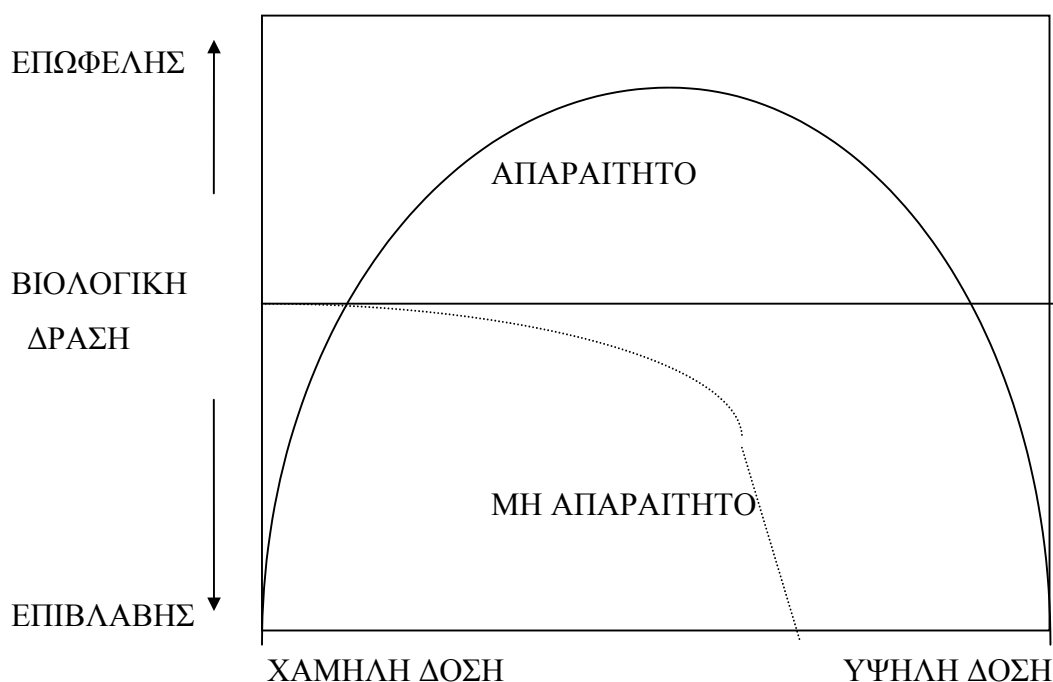
8.1 Εισαγωγή

Στη φύση έχουμε απαραίτητα και μη απαραίτητα στοιχεία για τη θρέψη φυτών και ζώων. Οι διαφορές τους είναι ότι τα απαραίτητα όταν είναι σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις προκαλούν τροφопενίες, ενώ τα μη απαραίτητα και να μην υπάρχουν καθόλου δεν έχουν αρνητικές επιδράσεις. Σε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις και τα μεν και τα δε προκαλούν τοξικότητες στους οργανισμούς. Τα απαραίτητα στοιχεία, λοιπόν, έχουν φυσιολογικές και βιολογικές δράσεις στους οργανισμούς μόνο σε ένα εύρος συγκεντρώσεων, ενώ προκαλούν προβλήματα έξω από αυτά τα όρια. Τα μη απαραίτητα, δεν έχουν αρνητικές επιδράσεις μέχρι μια ανώτατη τιμή συγκέντρωσης, πέρα από την οποία προκαλούν τοξικότητες. Όλα τα στοιχεία, δηλαδή, ακόμα και αυτά που ονομάζουμε τοξικά δεν είναι τοξικά κάτω από όλες τις συνθήκες (Σχήμα 1).

Μια ειδική κατηγορία τοξικών μετάλλων είναι τα **βαρέα μέταλλα** (heavy metals). Ως τέτοια ορίζουμε τα μέταλλα που έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από 6 g cm^{-3} , και έχουν συγκεκριμένη βιομηχανική χρήση. Αυτά είναι τα κάτωθι:
As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Hg και Zn.

Πρέπει να τονιστεί ότι τα Cr, Cu και Zn είναι και απαραίτητα μικροστοιχεία για τη θρέψη των φυτών.

Σχήμα 1: Παραστατική απεικόνιση βιολογικής δράσης απαραίτητων και μη απαραίτητων στοιχείων στους ζώντες οργανισμούς.



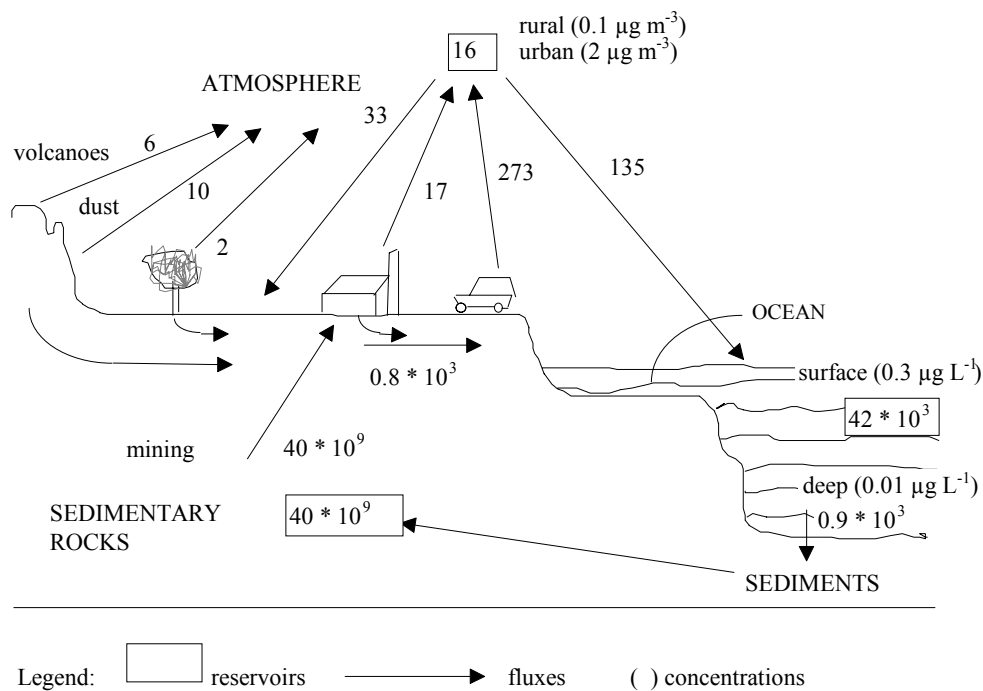
Τα βαρέα μέταλλα (BM) είναι αυτά που έχουν τη μεγαλύτερη σημασία στη ρύπανση των εδαφών. Αυτό οφείλεται στους εξής λόγους:

- Όλα τα BM υπάρχουν στα πρωτογενή ορυκτά και κληροδοτούνται και στα εδάφη. Επομένως είναι φυσιολογικό να μετράμε συγκεντρώσεις τους στο έδαφος χωρίς αυτό απαραίτητα να υποδεικνύει ρύπανση (Σχήματα 2 και 3).
- Η μεγάλη βιομηχανική χρήση τους έχει αυξήσει τις συγκεντρώσεις τους στη δεξαμενή εκείνη, η οποία είναι κυρίως υπεύθυνη για τη ρύθμιση του κύκλου τους, δηλαδή το έδαφος (Πίνακας 1).
- Η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκύπτουν από τη χρήση τους γίνεται με καλή κατανόηση των εδαφικών ιδιοτήτων.

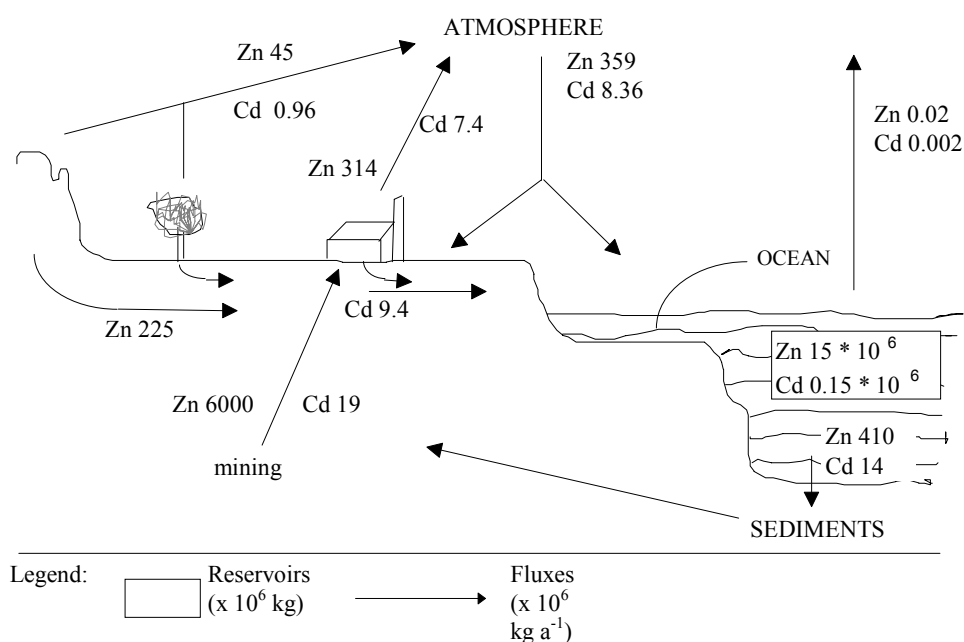
Πίνακας 1: Οι πιο κοινές βιομηχανικές χρήσεις των Cd, Ni, Pb and Zn.

	Cd	Ni	Pb	Zn
Γαλβανισμός	+	+		
Χρώματα	+		+	+
Σταθεροποιητές πλαστικών	+			
Μπαταρίες	+	+	+	
Κέρματα		+		
Σωλήνες νερού			+	
Καύσιμα			+	
Αντισκωριακή προστασία		+		+
Στεγανοποίηση			+	
Απορροφητής ακτίνων-x			+	
Εξόρυξη μεταλλείων	+ (ως παραπροϊόν)	+	+	+
Κάλυμμα καλωδίων			+	

Σχήμα 2: Ο κύκλος του Pb.



Σχήμα 3: Οι κύκλοι των Cd και Zn.



8.2 Διαθεσιμότητα των ΒΜ στο έδαφος

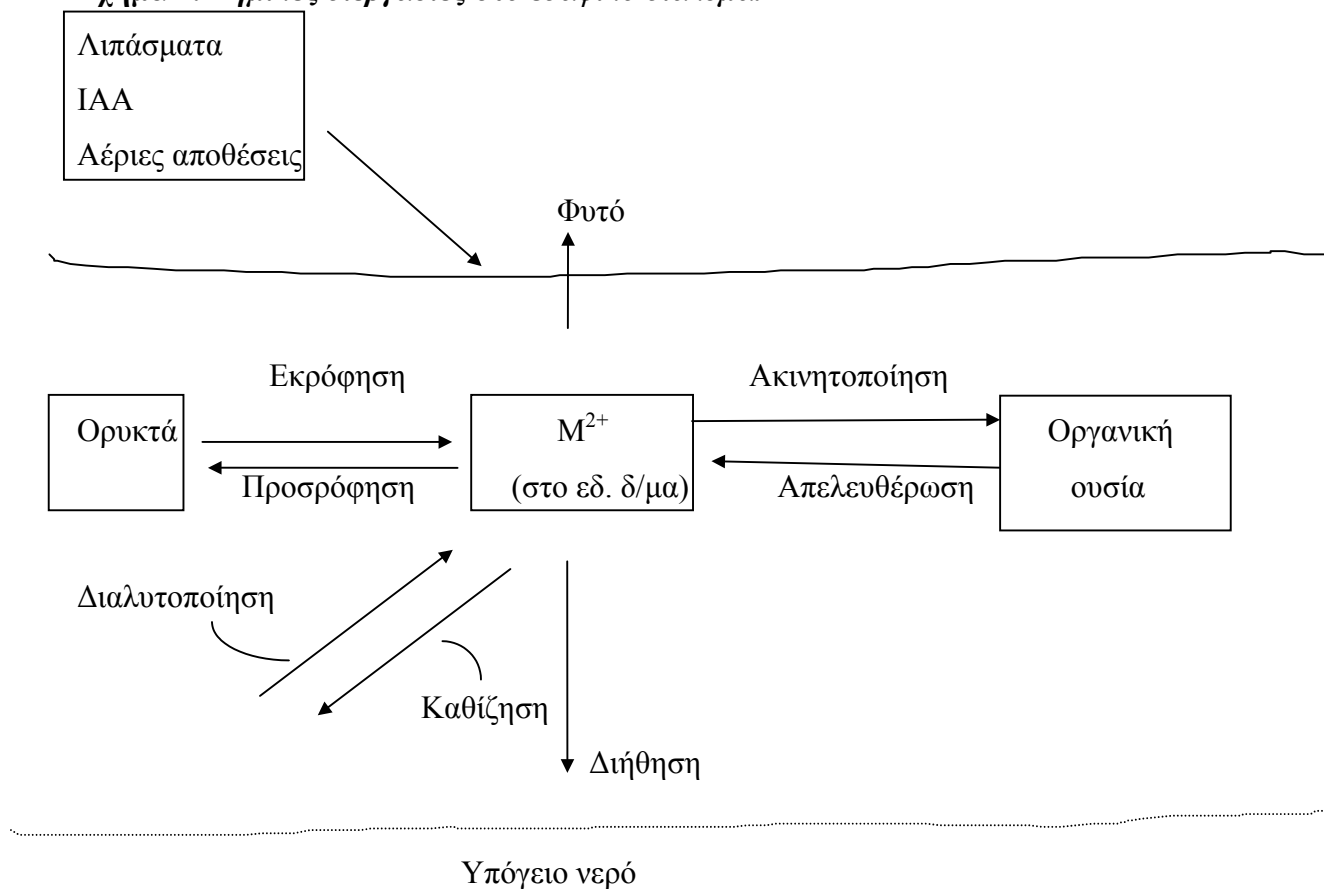
Οι τρόποι που εισάγονται τα ΒΜ στο έδαφος είναι οι ακόλουθοι (Σχήμα 4):

- **Λιπάσματα** (fertilisers) (π.χ. το Cd περιέχεται ως πρόσμιξη στα Ρ-λιπάσματα. Αυτό αποτελεί μέγα πρόβλημα ιδίως στην Αυστραλία).
- **Από αέρος** (aerial depositions), ιδίως σε ακτίνα μερικών χιλιομέτρων γύρω από περιοχές με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα.
- Από την εφαρμογή της **ιλύος αστικών αποβλήτων** (sewage sludge) στο έδαφος.

Από τη στιγμή της εισαγωγής των ΒΜ στο έδαφος αρχίζει μια αλληλουχία φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, οι οποίες θα έχουν αποφασιστικό ρόλο στο αν ένα μέρος της συγκέντρωσης των ΒΜ που εισήχθησαν στο έδαφος θα απολεσθούν. Δύο είναι οι οδοί για την απομάκρυνση ΒΜ από το επιφανειακό και γόνιμο στρώμα εδάφους:

- Η έκπλυσή τους προς τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και
- Η απορρόφησή τους από τη φυτομάζα.

Σχήμα 4: Χημικές διεργασίες στο εδαφικό διάλυμα.



Πρέπει να τονιστεί ότι όλες οι ποσότητες των ΒΜ που θα εισαχθούν στο έδαφος δεν θα είναι διαθέσιμες για απορρόφηση από τα φυτά και υπό τον κίνδυνο έκπλυσης. Αυτά εξαρτώνται από το κλάσμα εκείνο των ολικών συγκεντρώσεων των ΒΜ που ονομάζουμε **διαθέσιμο** ή και **βιο-διαθέσιμο** (available ή bio-available). Όσο μεγαλύτερη η διαθεσιμότητα των ΒΜ, τόσο μεγαλύτερος ο κίνδυνος εμπλοκής των ΒΜ στην τροφική αλυσίδα του ανθρώπου και τόσο μεγαλύτερος ο κίνδυνος έκπλυσής τους στα υπόγεια νερά (και τα δύο είναι ανεπιθύμητα). Όσο μεγαλύτερη η διαθεσιμότητα ενός μετάλλου, τόσο πιο **κινητικό** (mobile) θεωρούμε ότι είναι στο εδαφικό περιβάλλον. Από τα κάτωθι μέταλλα το Cd, ο Zn και λιγότερο το Ni θεωρούνται τα πιο κινητικά, ενώ ο Cu, ο Pb και ο Hg τα λιγότερο κινητικά μέταλλα..

Από τις παραπάνω διόδους εισαγωγής των ΒΜ στο εδαφικό σύστημα, εκείνη της εφαρμογής της ΙΑΑ στο έδαφος είναι η κυριότερη. Και αυτό γιατί η ΙΑΑ είναι πολύ καλό οργανικό λίπασμα που περιέχει πολλά απαραίτητα στοιχεία σε ικανοποιητικές συγκεντρώσεις (Πίνακας 2). Χρειάζεται όμως προσοχή στη χρήση του, γιατί περιέχει

φορτίο ΒΜ (Πίνακας3), των οποίων η διαθεσιμότητα μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το έδαφος, το γενότυπο των καλλιεργειών και τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

Πίνακας 2. Θρεπτικά που περιέχονται στις ΙΑΑ.

	Οργ. ουσία ^a	Οργ. Ανθρακας ^a	N ^a	NH ₄ -N ^b	NO ₃ -N ^b	P ^a	S ^a
Εύρος	19-60	16-40	0.5-17.6	800-5600	79-160	0.5-14.3	0.6-1.5
Αριθμός ΙΑΑ	na ^d	>300	>300	>300	>300	>300	28
	K ^a	Mg ^a	Ca ^a	Na ^a	Στερεά ^b	Διαλυμένα ^b	BOD ^b
Εύρος	0.2-7	0.18-0.27	0.5-3	0.23 ^c	720 ^c	500 ^c	220 ^c
Αριθμός ΙΑΑ	>200	200	>200	200	na	na	na

a: σε %, b: σε mg g⁻¹, c: μέση τιμή, d: μη διαθέσιμο

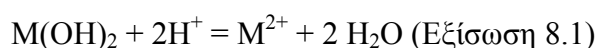
Πίνακας 3. ΒΜ που περιέχονται στις ΙΑΑ (σε mg kg⁻¹).

	Cd	Ni	Pb	Zn
Εύρος	<1-3,410	6-5,300	29-3,600	91-49,000
Τυπικές συγκεντρώσεις	3.2	37	217	889
Επιτρεπόμενα όρια στην ΕΕ	20-40	300-400	750-1,200	2,500-4,000
Επιτρεπόμενα όρια στις ΗΠΑ	85	420	840	7,500

8.3 Από τι εξαρτάται η διαθεσιμότητα των ΒΜ στο έδαφος

8.3.1 pH

Αυτή είναι η πρώτη και πιο σημαντική εδαφική ιδιότητα που επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των ΒΜ. Η διαθεσιμότητα των ΒΜ αυξάνεται με την πτώση του εδαφικού pH. Αυτό εξηγείται ως εξής: η διαλυτότητα των ΒΜ εξαρτάται από το γινόμενο διαλυτότητας της στερεής ουσίας με την οποία τα ΒΜ δημιουργούν σύμπλοκα σε υψηλά pH (σε υψηλά pH τα ΒΜ δημιουργούν στερεές επιφάνειες με τις ρίζες -OH⁻, -Cl⁻, -HCO⁻, -PO₄³⁻, άργιλο, οργανική ουσία κτλ.). Έτσι για τη ρίζα -OH⁻ ισχύει το εξής:



$$\text{και } K = \frac{(M^{2+})}{(H^+)^2} \rightarrow (M^{2+}) = (H^+)^2 K \rightarrow p(M^{2+}) = 2pH + pK \text{ (Εξίσωση 8.2)}$$

Η Εξίσωση 8.1 είναι μια τυπική αντίδραση υδρόλυσης. Η Εξίσωση 8.2 στην οποία αυτή καταλήγει έχει το pK σταθερό σε συνθήκες ισορροπίας. Έτσι, σύμφωνα με την Εξίσωση 8.2, όταν το pH του εδαφικού διαλύματος αυξάνεται, τότε το $p(M^{2+})$ αυξάνεται, δηλαδή η ενεργότητα του διαλυμένου στο νερό μετάλλου M^{2+} μειώνεται. Και αυτό γίνεται λόγω της δημιουργίας της στερεής επιφάνειας $M(OH)_2$. Το ίδιο συμβαίνει και με τις υπόλοιπες ρίζες που προαναφέρθηκαν. Και αντιστρόφως, όταν το pH μειώνεται η ενεργότητα του μετάλλου αυξάνεται.

Δεν πρέπει βέβαια να ξεχνάμε ότι η διαλυτότητα του ΒΜ (ή αλλιώς η ενεργότητα του ελεύθερου ιόντος του ΒΜ στο νερό) μειώνεται σε υψηλά pH για έναν ακόμα λόγο. Αυτός είναι ότι η ικανότητα των στερεών επιφανειών του εδάφους έχουν μεγαλύτερη ικανότητα να προσροφούν κατιόντα, επειδή με την αύξηση του pH αυξάνεται και η CEC του εδάφους.

8.3.2 Στερεές επιφάνειες του εδάφους

Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό της αργίλου, της οργανικής ουσίας και των άλλων στερεών επιφανειών στο έδαφος, τόσο χαμηλότερη η διαθεσιμότητα των ΒΜ, σε σχέση με τις ολικές τους συγκεντρώσεις στο έδαφος.

8.3.3 Δυναμικό οξειδοαναγωγής (ή και συνθήκες υδρομορφίας) του εδάφους

Αναγωγικές συνθήκες (reducing conditions) έχουμε στα εδάφη που είτε είναι πλημμυρισμένα, είτε η στάθμη του υπόγειου νερού σε αυτά είναι υψηλή.

Οξειδωτικές συνθήκες (oxidation conditions) επικρατούν στα καλά αεριζόμενα εδάφη. Στα εδάφη όπου κυριαρχούν οι αναερόβιες (δηλαδή οι αναγωγικές) συνθήκες, η διαθεσιμότητα των ΒΜ μειώνεται. Αυτό οφείλεται στην καθίζηση των ΒΜ με S , που προέρχεται από την ένωση HS , η οποία επικρατεί υπό αυτές τις συνθήκες. Να πώς λειτουργεί αυτό:

Υπάρχει η ισορροπία $\text{SO}_4^{2-} = \text{HS}^-$, μεταξύ των θεικών ριζών στις δύο συνθήκες υδρομορφίας με σταθερά ισορροπίας την K_{redox} . Τότε το **δυναμικό οξειδοαναγωγής** (redox potential, από τη σύνθεση του 'red' = reduction και του 'ox' = oxidation) ισούται με:

$$E_h = \frac{RT}{8F} \ln(K_{\text{redox}}) + \frac{RT}{8F} \ln \frac{\text{SO}_4^{2-}}{\text{HS}^-} + \frac{9RT}{8F} \quad (\text{Εξίσωση 8.3})$$

Η σχέση αυτή μας λέει ότι όταν το E_h μικραίνει (δηλαδή έχουμε αναγωγικές συνθήκες), αυξάνεται το HS^- . Αυτό γίνεται λόγω του ότι υπό αυτές τις συνθήκες τα βακτήρια του εδάφους αναπνέουν αναερόβια και ως τελικό προϊόν δεν έχουν το H_2O όπως συνήθως, αλλά το HS^- . Το HS^- , θα αντιδράσει με ΒΜ, π.χ. Cd και θα δώσει CdS, το οποίο καθιζάνει και έτσι μειώνει τις ποσότητες του Cd στο εδαφικό διάλυμα, και άρα και τη διαθεσιμότητά του.

Πρέπει να τονιστεί ότι τα περισσότερα εδάφη καλά αεριζόμενα λόγω των σύγχρονων μεθόδων της εκμηχανισμένης γεωργίας. Άρα υπάρχουν τάσης αύξησης της διαθεσιμότητας των ΒΜ.

8.3.4 Ανταγωνισμός μεταξύ των ΒΜ του εδάφους

Όταν έχουμε δύο μέταλλα, το Α και το Β που ανταγωνίζονται στο εδαφικό περιβάλλον, π.χ. για την κατάληψη ανταλλάξιμων θέσεων στις στερεές επιφάνειες, αν το ένα κυριαρχήσει τότε το άλλο θα αυξήσει την διαθεσιμότητά του κατά πολύ. Όταν σε ένα σύστημα η συγκέντρωση του Zn αυξάνεται, τότε η προσρόφηση του Cd μειώνεται, και άρα η κινητικότητα του Cd στο εδαφικό διάλυμα μεγαλώνει.

8.3.5 Οργανική ουσία του εδάφους

Η επίδραση της οργανικής ουσίας είναι πολύ σημαντική, αλλά έχει ήδη αναφερθεί στο 2^ο Κεφάλαιο.

8.3.6 Αλατότητα του εδάφους

Όταν αυξάνεται η αλατότητα, αυξάνεται η συγκέντρωση των ανιόντων Cl^- , και τότε το Cd αντιδράει με αυτό για να δημιουργήσει CdCl_2 ή CdCl^+ . Αλλά και το ένα

σύμπλοκο και το άλλο παραλαμβάνεται από τα ριζικά τριχίδια ως έχουν. Οπότε η βιοδιαθεσιμότητα του Cd αυξάνεται σε εδάφη με υψηλή αλατότητα. Το ίδιο συμβαίνει και με τα υπόλοιπα ΒΜ.

8.3.7 Γενότυπος των φυτών

Διαφορετικά φυτά απορροφούν διαφορετικές ποσότητες ΒΜ, ακόμα και από εδάφη με το ίδιο επίπεδο μόλυνσης. Τα ΒΜ γενικά πολύ δύσκολα μετακινούνται από τις ρίζες στα υπέργεια τμήματα, οπότε φυτά από τα οποία καταναλώνουμε το υπόγειο τμήμα (πατάτες, καρότα κτλ.) είναι πιο επιρρεπή. Το ίδιο συμβαίνει και με φυτά με τρυφερό υπέργειο τμήμα (π.χ. μαρούλια). Αντίθετα, φυτά όπως τα οπωροφόρα είναι σε πολύ καλύτερη μοίρα (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Φυτά κατανεμημένα ανάλογα με την ικανότητά τους στην απορρόφηση ΒΜ.

Υψηλή απορρόφηση	Μέτρια απορρόφηση	Χαμηλή απορρόφηση	Πολύ χαμηλή απορρόφηση
Μαρούλι	Τεύτλα	Λάχανο	Φασολάκια
Σπανάκι	Σινάπι	Μπρόκολα	Οπωροφόρα
Καρότο	Πατάτα	Λαχανάκια Βρυξελλών	Κολοκυθοειδή

8.3.8 Κλιματικές συνθήκες

Οι κλιματικές συνθήκες υπαγορεύουν εδαφικές συνθήκες και για αυτό επηρεάζουν καθοριστικά τη διαθεσιμότητα των ΒΜ. Σε περιοχές με μεγάλα ετήσια ύψη βροχής ο κίνδυνος έκπλυσης των ΒΜ είναι μεγαλύτερος από περιοχές με μικρότερα ύψη βροχής. Θυμίζω απλώς ότι βροχερά περιβάλλοντα είναι πιο επιρρεπή στην εδαφική οξίνιση, λόγω έκπλυσης βασικών κατιόντων, οπότε η οξίνιση θα υποβοηθήσει την περαιτέρω αύξηση στη διαλυτότητα των ΒΜ. Επίσης περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες, όπου η οργανική ουσία του εδάφους είναι πολύ πιθανό να αποικοδομείται με ταχύτερους ρυθμούς από ό,τι σε ψυχρότερα περιβάλλοντα, μπορεί να έχουν εντονότερα προβλήματα διαθεσιμότητας ΒΜ. Αυτό οφείλεται στο ότι όταν αποικοδομείται η οργανική ουσία είναι πιθανό να απελευθερώνονται ποσότητες ΒΜ, που πριν ήταν προσροφημένες στις χουμικές ομάδες, στο εδαφικό διάλυμα. Επίσης είναι πιθανό εποχές με έντονα υψηλές θερμοκρασίες να ακολουθούνται από έκλυση

φουλβικών οξέων, τα οποία με τη σειρά τους έχουμε πει ότι αυξάνουν τη διαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων.

8.4 Πώς μετράμε τη διαθεσιμότητα των ΒΜ

8.4.1 Εδαφικές εκχυλίσεις

Αυτές γίνονται με αντιδραστήρια τα οποία έχουν βρεθεί ότι εκχυλίζουν ποσότητες των ΒΜ που συσχετίζονται ισχυρά με τις φυτικές απορροφήσεις σε ΒΜ. Τέτοια εκχυλιστικά είναι το DTPA, το οποίο δημιουργεί σταθερά οργανο-μεταλλικά σύμπλοκα με τα ΒΜ και άλλα μέταλλα, και το 0.05 M CaCl₂, που εκτοπίζει ΒΜ από τις ανταλλάξιμες θέσεις και τα οδηγεί στο εδαφικό διάλυμα.

8.4.2 Μετρήσεις ΒΜ στη φυτομάζα

Είναι ίσως η σημαντικότερη και 'εγκυρότερη' μέτρηση διαθεσιμότητας ΒΜ, αφού αυτή εξ' ορισμού είναι η πρόσληψη ΒΜ από τη **φυτομάζα** (plant biomass).

8.4.3 Υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς

Ο **συντελεστής μεταφοράς** (transfer coefficient), T_c, ορίζεται από το λόγο

$$T_c = \frac{[M]_{\text{φυτό}}}{[M]_{\text{ολικό, έδαφος}}} \quad (\text{Εξίσωση 8.4})$$

όπου $[M]_{\text{φυτό}}$ είναι η συγκέντρωση ενός μετάλλου στο φυτό και $[M]_{\text{ολικό, έδαφος}}$ η ολική (όχι διαθέσιμη!) συγκέντρωση του ίδιου μετάλλου στο έδαφος όπου αυτό το φυτό συγκομίστηκε. Όσο μεγαλύτερος ο T_c, τόσο μεγαλύτερη η διαθεσιμότητα ή κινητικότητα του υπό μελέτη ΒΜ. Ο T_c συνήθως μελετάται σε **πειράματα σε γλάστρες** (pot experiments) ή σε **πειράματα στον αγρό** (field experiments) όπου ένα έδαφος ρυπασμένο από γνωστές ποσότητες ΒΜ καλλιεργείται με φυτό, το οποίο ύστερα συγκομίζεται και μετριέται. Έτσι από την Εξίσωση 8.4 διερευνάται η διαθεσιμότητα του ΒΜ.

8.4.4 Πειράματα προσρόφησης

Από αυτά γίνονται συγκρίσεις για το ποια μέταλλα προσροφούνται καλύτερα σε εδαφικές επιφάνειες. Αυτά είναι σημαντικά είτε ως έχουν, είτε με τον υπολογισμό

του R_d . R_d είναι ο **παράγων υστέρησης** (retardation factor) που είναι μια έκφραση της κινητικότητας των ΒΜ. Είναι καθαρός αδιάστατος αριθμός και εκφράζει το πόσο ένας διαλυμένος στο νερό ρυπαντής θα καθυστερήσει στην κίνησή του σε σχέση με την κίνηση του ίδιου του νερού. Αν δηλαδή το νερό στο έδαφος μετακινηθεί 100m και το C_d που είναι διαλυμένο στο νερό μετακινηθεί μόνο 2m (λόγω προσρόφησής του), τότε ο R_d θα είναι 50. Γίνεται αντιληπτό ότι όσο μεγαλύτερος ο R_d , τόσο λιγότερο κινητικό το υπό μελέτη ΒΜ. Στα **πειράματα προσρόφησης** (batch tests ή adsorption experiments), λοιπόν, το R_d υπολογίζεται από τη σχέση

$$R_d = 1 + \frac{\rho}{n} K_d \text{ (Εξίσωση 8.5)}$$

όπου ρ είναι το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους σε g cm^{-3} , n το πορώδες %, και K_d μια παράμετρος που υπολογίζεται με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων προσρόφησης. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι υπάρχουν τουλάχιστον άλλοι δύο τρόποι υπολογισμού του R_d , κάτι που πολλές φορές κάνει δύσκολο τον αντικειμενικό του υπολογισμό.

8.4.5 Πειράματα εκπλύσεων από εδαφικές στήλες

Αυτές διεξάγονται τροφοδοτώντας μια στήλη εδάφους με διάλυμα γνωστής συγκέντρωσης ρυπαντή, C_0 . Τα εκπλύματα από κάτω συλλέγονται και μετράται σε αυτά η συγκέντρωση C του ρυπαντή. Μετά από κάποιους **όγκους πόρου** (pore volumes). Το pore volume χρησιμοποιείται για να μετρήσουμε την ποσότητα του εκπλυμένου νερού σε mL, και ισούται με τον όγκο των πόρων του εδάφους σε mL στην στήλη του πειράματος) το C θα φτάσει την συγκέντρωση C_0 . Το R_d είναι πολύ πιο εύκολο τώρα να μετρηθεί, γιατί αυτό θα ισούται με τον αριθμό των όγκων πόρου όταν $C = C_0/2$ και υπολογίζεται και γραφικά.

8.5 Τελικά πότε διατρέχουμε κίνδυνο από τα ΒΜ;

Διατρέχουμε κίνδυνο για απορρόφηση ΒΜ από τη φυτομάζα όταν έχουμε:

- Αμμώδη εδάφη
- Όξινα εδαφικά pH
- Υψηλές θερμοκρασίες
- Καλλιέργειες με φυτά υψηλής απορρόφησης

- Υψηλό ρυπαντικό φορτίο σε ΒΜ, π.χ. από ΙΑΑ

Διατρέχουμε κίνδυνο για έκπλυση ΒΜ στους υπόγειους υδραφορείς όταν έχουμε:

- Αμμώδη εδάφη
- Όξινα εδαφικά pH
- Υψηλές θερμοκρασίες
- Μεγάλα ετήσια ύψη βροχής
- Υψηλό ρυπαντικό φορτίο σε ΒΜ, π.χ. από ΙΑΑ

Πρέπει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει κίνδυνος όταν απαραίτητα συμβαίνουν όλα τα παραπάνω. Πιο σωστά θα έπρεπε να πούμε ότι όσο πιο πολλά από τα παραπάνω ισχύουν και σε όσο μεγαλύτερο βαθμό ισχύουν, τόσο εντονότερος ο κίνδυνος από την ρύπανση από τα ΒΜ.