

Σημειώσεις στο μάθημα *Γενική Οικολογία*

1. Έδαφος και περιβάλλον

1.1 Εισαγωγή

Έδαφος (soil) είναι το χαλαρό στρώμα της επιφάνειας της γης, το οποίο είναι βιολογικά, φυσικά και χημικά ενεργό.

- Βιολογικά γιατί σε αυτό υπάρχει μια οργιώδης δραστηριότητα μικροοργανισμών (βακτήρια, μύκητες, ακτινομύκητες κτλ.) και ανώτερων οργανισμών (ρίζες φυτών, και διάφοροι ζωικοί οργανισμοί).
- Φυσικά γιατί έχουμε μετακίνηση νερού και αέρα μέσα σε αυτό.
- Χημικά γιατί γίνονται χημικές διεργασίες χημικής ισορροπίας και ανταλλαγής της ενέργειας και της ύλης.

Το έδαφος είναι δυναμικό, δηλαδή αλλάζει με το χρόνο. Υπόκειται σε διαδικασίες γένεσης, ωρίμασης και φθοράς. Το έδαφος κατ' αρχήν θα δημιουργηθεί μόνο όταν οι 4 κύριες συνιστώσες του περιβάλλοντος αλληλεπιδράσουν: Λιθόσφαιρα, Ατμόσφαιρα, Υδρόσφαιρα και Βιόσφαιρα.

Πρώτα η λιθόσφαιρα: το έδαφος είναι το προϊόν της **αποσάθρωσης** (weathering) των πετρωμάτων. Αυτή γίνεται με δύο τρόπους, τη φυσική και τη χημική αποσάθρωση, οι οποίοι δρουν σχεδόν ταυτόχρονα.

- Φυσική αποσάθρωση έχουμε όταν τα **ορυκτά** (minerals) των πετρωμάτων σπάνε με την επίδραση του νερού και του αέρα (κυρίως του νερού) και έτσι αυξάνεται η ειδική τους επιφάνεια.
- Η χημική αποσάθρωση είναι όταν τα προϊόντα της φυσικής αποσάθρωσης δέχονται χημικές επιδράσεις (κυρίως από το νερό) και αλλάζει η χημική τους σύσταση έτσι ώστε να δώσουν γένεση στα δευτερογενή ορυκτά ή τα **ορυκτά της αργίλου** (clay minerals).

Έτσι το έδαφος αποτελείται από **άμμο** (sand) και **ιλύ** (silt) (προϊόντα φυσικής αποσάθρωσης των ορυκτών των πετρωμάτων) και από **άργιλο** (clay) (δευτερογενή ορυκτά, προϊόντα χημικής αποσάθρωσης των ορυκτών των πετρωμάτων). Η άμμος

έχει διάμετρο κόκκων από 2 mm έως 0.02 mm, η ιλύς από 0.02mm έως 2μm και η άργιλος έχει κόκκους μικρότερους από 2μm. Η άργιλος είναι και το μόνο εδαφικό κλάσμα που είναι χημικά ενεργό. Από αυτήν (μαζί με την οργανική ουσία όπως θα δούμε παρακάτω) εξαρτάται η συγκράτηση του εδαφικού νερού και θρεπτικών ιόντων, λόγω του ότι φέρει αρνητικό φορτίο.

Ατμόσφαιρα και Υδρόσφαιρα: Ο ρόλος της λιθόσφαιρας, λοιπόν, είναι καθοριστικός, γιατί προμηθεύει τα πρώτα υλικά για τη δημιουργία του εδάφους. Για τον Περιβαντολόγο, όμως, το έδαφος αρχίζει να έχει αξία μόνο όταν αναπτυχθούν οι συνθήκες για την εγκατάσταση ανώτερων φυτών, κάτι που θα οδηγήσει στην ανάπτυξη όλων των αλληλεπιδράσεων των οικοσυστημάτων. Αυτές οι συνθήκες είναι η παροχή νερού και θρεπτικών συστατικών (η συνεισφορά της υδρόσφαιρας) και ο επαρκής αερισμός (η συνεισφορά της ατμόσφαιρας).

Βιόσφαιρα: Όταν στο έδαφος αναπτυχθούν φυτά και αποικήσουν ζώα θα υπάρχει μια συνεχής ροή οργανικών ουσιών σε αυτό. Την πλήρη ανάπτυξη του εδάφους θα την έχουμε μόνο όταν στο έδαφος υπάρχει εκτός των άλλων και οργανική ουσία (προϊόντα αποσύνθεσης και μεταβολισμού ζώντων οργανισμών του εδάφους).

Τελικά, το έδαφος είναι μια δυναμική ολότητα που αποτελείται από στερεή φάση (ανόργανη και οργανική), υγρή φάση (το εδαφικό διάλυμα) και αέρια φάση (τον εδαφικό αέρα). Διάλυμα και αέρας καταλαμβάνουν τους πόρους του εδάφους, οι οποίοι είναι περίπου το 50% του όγκου του εδάφους. Στο υπόλοιπο 50%, περίπου 1-2% είναι οργανική ουσία και 48-49% ανόργανα συστατικά.

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι το έδαφος είναι το θεμέλιο της ζωής για τα χερσαία (αλλά σε καθοριστικό βαθμό και τα υδατικά) οικοσύστημα. Επηρεάζει την ανταλλαγή ενέργειας, ρυθμίζει τους κύκλους νερού και στοιχείων (θρεπτικών, αλλά και ρυπαντών) και τελικά καθορίζει περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο παράγοντα την παραγωγικότητα των οικοσυστημάτων. Έχει αναγνωριστεί πλέον από όλους τους επιστήμονες του Περιβάλλοντος ότι το έδαφος έχει τις απαντήσεις για ένα φάσμα αντικειμένων έρευνας. Μερικά από αυτά είναι:

1. Υπολογισμοί ανταλλαγής ύλης και ενέργειας: Ζητήματα όπως η αλλαγή του παγκόσμιου κλίματος, και οι μεταβολές ενέργειας από τους γεωχημικούς κύκλους άνθρακα και αζώτου εξαρτώνται με τρόπο καθοριστικό από το έδαφος.
2. Υδρολογικός κύκλος: Η ταχύτητα ροής του κύκλου αυτού, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο επηρεάζεται κυρίως από εδαφικές ιδιότητες.
3. Βιόσφαιρα: Τα είδη των οργανισμών που έχουν αποικήσει ένα οικοσύστημα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το έδαφος, το οποίο είναι πηγή θρέψης.
4. Χρήσεις γης: Οι επιδράσεις στο περιβάλλον από τις διάφορες χρήσεις γης. Εκείνη που ιδίως χρειάζεται προσοχή είναι η γεωργική, αφού αυτή έχει το μεγαλύτερο οικονομικό ενδιαφέρον, αλλά προκαλεί και την περισσότερη ρύπανση στο περιβάλλον. Εδώ είναι και το εντονότερο ενδιαφέρον της παραδοσιακής Εδαφολογίας.
5. Αειφορία (sustainability) οικοσυστημάτων-Ερημοποίηση (dessertification): Οι πόροι της γης δεν είναι αστείρευτοι, χρειάζονται ορθή διαχείριση για να μη φθαρούν τα οικοσυστήματα. Η ερημοποίηση που είναι μάστιγα για τα μεσογειακά οικοσυστήματα έχει παραμέτρους οικονομικές, κοινωνικές, αλλά και φυσικές. Οι φυσικές έχουν άμεση συνάφεια με το έδαφος, καθώς οι συνιστώσες της ερημοποίησης (αλάτωση, οξίνιση, διάβρωση εδαφών και ρύπανση οικοσυστημάτων) προσεγγίζονται μόνο από ζητήματα που άπτονται της Εδαφολογίας.
6. Συστήματα GIS: Η μελέτη της γης από αεροφωτογραφίες ενδιαφέρει ένα φάσμα επιστημόνων, από τον μηχανικό μέχρι τον περιβαντολόγο. Καλή γνώση των εδαφικών ιδιοτήτων όμως είναι απαραίτητη σαν εργαλείο στα χέρια όλων όσων ασχολούνται σε αυτό το χώρο.

1.2 Ορισμοί

Καθώς η αποσάθρωση των πετρωμάτων προχωράει, το έδαφος που σχηματίζεται αποκτάει μια διαστρωμάτωση, όπου τα βαθύτερα στρώματα είναι λιγότερο αποσαθρωμένα και τα πιο επιφανειακά περισσότερο αποσαθρωμένα. Στο επιφανειακό στρώμα θα σχηματιστεί οργανική ουσία και καλύτερο δίκτυο εδαφικών πόρων. Το στρώμα αυτό, λοιπόν, θα έχει μεγαλύτερη **γονιμότητα** (fertility), **παραγωγικότητα** (productivity) και καλύτερες φυσικές ιδιότητες. Οι εδαφικές διαστρωματώσεις λέγονται **ορίζοντες** (horizons). Ο επιφανειακός ορίζοντας λέγεται ορίζοντας Α και ο

βαθύτερος ανόργανος λέγεται C. Όσο περνάει ο καιρός, υλικά όπως οργανική ουσία και άργιλος ξεπλένονται από τον A ορίζοντα. Αυτή η **έκπλυση** (leaching) θα δημιουργήσει έναν ενδιάμεσο ορίζοντα που ονομάζεται B. Έτσι, η **εδαφική κατατομή** (soil profile) ενός ώριμου εδάφους θα έχει 3 καλοσχηματισμένους ορίζοντες, οι οποίοι πολλές φορές είναι και εύκολα διακριτοί. Ακόμα πιο χαμηλά από τον ορίζοντα C συνήθως βρίσκεται το πέτρωμα από όπου προήλθε η εδαφογένεση. Αυτό ονομάζεται μητρικό πέτρωμα, και σε μια κατατομή χαρακτηρίζεται με το γράμμα R. Μια τρισδιάστατη εδαφική ολότητα λέγεται **πέδον** (pedon).

1.3 Στερεή φάση του εδάφους

Πίνακας 1.1. 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.

Τα στοιχεία Si και Al αποτελούν κατά κύριο λόγο τα ορυκτά του εδάφους. Ο Πίνακας 1.1 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 Περιβαντολόγου 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 αειφορία τους.

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 1.2 φαίνονται οι παράγοντες εμπλουτισμού για κυριότερα θρεπτικά, αλλά και τοξικά στοιχεία.

Πίνακας 1.2. 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.

Η στερεή φάση του εδάφους αποτελείται από οργανική ουσία και ανόργανα ορυκτά, πρωτογενή (κυρίως στα κλάσματα άμμου και ιλύος) και δευτερογενή (στο κλάσμα της αργίλου). Πρέπει να τονιστεί ότι οι εδαφικές επιφάνειες δεν είναι ουδέτερες, αλλά

φορτισμένες αρνητικά. Αυτό αφορά ιδίως την οργανική ουσία και την άργιλο. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα εδαφικά τεμαχίδια αλληλεπιδρούν με τα διαλυμένα κατιόντα του εδαφικού διαλύματος, αφού βρίσκονται σε χημική ισορροπία με αυτά. Τα εδάφη που έχουν μεγάλες εδαφικές επιφάνειες (πολλή οργανική ουσία και πολλή άργιλο) μπορούν να συγκρατήσουν καλύτερα τα θρεπτικά του εδάφους από την έκπλυση, παρά ένα αμμώδες έδαφος. Η ικανότητα των εδαφών να κρατά κατιόντα του διαλύματος λέγεται Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων, πιο γνωστή ως CEC (Cation Exchange Capacity) και μετριέται σε $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ εδάφους. Η CEC του εδάφους εξαρτάται από το εδαφικό pH. Όσο χαμηλότερο το pH τόσο μικρότερη η CEC. Σε ουδέτερο pH εδάφη πλούσια σε οργανική ουσία και άργιλο μπορεί να έχουν και 100-150 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$. Οι ανταλλαγές μάζας και ενέργειας στο έδαφος είναι καθοριστικής σημασίας για την οικονομία των θρεπτικών του οικοσυστήματος, και κατά πολλούς η δεύτερη πιο σημαντική διεργασία της φύσης μετά από τη φωτοσύνθεση.

1.5 Περιβαλλοντικά ζητήματα

Είπαμε ότι για τη δημιουργία εδάφους συνεισφέρουν οι 4 συνιστώσες περιβαλλοντικές: Λιθόσφαιρα, Ατμόσφαιρα, Υδρόσφαιρα και Βιόσφαιρα. Δεν είναι αδύνατο να δημιουργηθούν οικοσυστήματα με 2 μόνο ή 3 από αυτά. Τότε όμως έχουμε προβληματικές καταστάσεις που χρειάζονται σοφή διαχείριση. Να μερικά παραδείγματα:

1. Ερημικές τοποθεσίες (συνεισφορά μόνο Λιθόσφαιρας και Ατμόσφαιρας). Η περίπτωση του Βόρειου Πακιστάν.
2. Περιπτώσεις βαριάς ρύπανσης από πετρελαιοειδή (συνεισφορά μόνο Λιθόσφαιρας, Ατμόσφαιρας, Βιόσφαιρας). Η περίπτωση του Μεξικού.
3. Έντονες διαβρώσεις (συνεισφορά μόνο Λιθόσφαιρας, Ατμόσφαιρα, και Υδρόσφαιρα). Η περίπτωση του Σείχ-Σου της Θεσσαλονίκης.

2. Ο κύκλος του άνθρακα και του αζώτου

2.1 Άνθρακας

Το CO_2 έχει αυξηθεί από 280 ppm πριν τη βιομηχανική επανάσταση στα 330 ppm σήμερα. Υπολογίζεται ότι ίσως να φτάσει και τα 440 με 660 ppm μέχρι το έτος 2050. Αυτό ίσως φέρει αλυσίδα αλλαγών που λόγω του **φαινομένου του θερμοκηπίου** (greenhouse effect) θα οδηγήσουν σε δραματικές αλλαγές των οικοσυστημάτων, και

τελικά σε έλλειψη τροφής. Στα χερσαία οικοσυστήματα το 25% του άνθρακα είναι η φυτομάζα και το 75% η οργανική ουσία. Έτσι, ένας τρόπος για την μείωση του ατμοσφαιρικού άνθρακα είναι η αύξηση του εδαφικού, και ιδιαίτερα της οργανικής ουσίας. Αντίθετα μείωση της οργανικής ουσίας αυξάνει το CO₂, γιατί αυτό είναι το τελικό προϊόν της αποικοδόμησής της. Δηλαδή η οργανική ουσία είναι και πηγή, αλλά και δεξαμενή του ατμοσφαιρικού CO₂.

2.2 Τι είναι η οργανική ουσία του εδάφους

Το έδαφος έχει μεγάλη ποικιλότητα όσο αφορά τα ανόργανα συστατικά του. 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 1.2 είναι ότι η οργανική ουσία¹ είναι πηγή οξύτητας για το έδαφος, καθώς παράγονται H⁺, ως αποτέλεσμα της διάστασης του καρβοξυλίου.

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'.

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

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,

2.3 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 άργιλου 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 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 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 κolloειδή' 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).

² Οι όροι αποσύνθεση, αποικοδόμηση και ανοργανοποίηση είναι συνώνυμοι.

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.

2.5 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).

2.6 Άζωτο

Ο κύκλος του αζώτου είναι σημαντικός για τα οικοσυστήματα, γιατί πρόκειται ίσως για το σημαντικότερο θρεπτικό στοιχείο. Τα φυτά μπορούν να παραλάβουν μόνο το ανόργανο άζωτο (αυτό ισχύει και για όλα τα άλλα θρεπτικά), δηλαδή NH_4^+ (**αμμωνιακά** ή ammonium) και NO_3^- (**νιτρικά** ή nitrates). Η μετατροπή του N από τη μια μορφή στην άλλη (από την μοριακή, στην οργανική, την ανόργανη ανηγμένη και την ανόργανη οξειδωμένη) γίνεται αποκλειστικά από τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Τα διάφορα στάδια του κύκλου του N στο έδαφος περιλαμβάνουν τις εξής μετατροπές:

1. **Άζωτοδέσμευση (nitrogen fixation)**: Το ατμοσφαιρικό N_2 γίνεται NH_4^+ με τη βοήθεια βακτηρίων που ζουν συμβιωτικά στις ρίζες των ψυχανθών.

2. **Νιτροποίηση (nitrification)**: Το εδαφικό NH_4^+ μετατρέπεται σε NO_3^- . Τα φυτά προσλαμβάνουν εξίσου καλά και τις δύο αυτές μορφές αζώτου. Μόνο που τα νιτρικά δεν συγκρατούνται καλά από τις εδαφικές επιφάνειες (αφού είπαμε ότι αυτές είναι φορτισμένες θετικά) και έτσι μπορεί να ξεπλυθούν σε βαθύτερους ορίζοντες.

Αυτό έχει δύο αρνητικές συνέπειες:

- Χάνεται άζωτο από το οικοσύστημα
- Τα νιτρικά, που τελικά θα εμπλουτίσουν τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, είναι επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία. Το όριο των νιτρικών στο πόσιμο νερό είναι 10 mg L^{-1} .

3. **Ακίνητοποίηση (immobilisation)**: Αν τα μικρόβια χρειάζονται άζωτο για τη διατροφή τους (πχ. Όταν τα οργανικά υπολείμματα που ενσωματώνουμε στο έδαφος έχουν λόγο C/N μεγαλύτερο από 25) θα το δεσμεύσουν από τις ανόργανες μορφές του εδαφικού διαλύματος. Τότε το συνολικό άζωτο μένει σταθερό, αλλά το

διαθέσιμο για τη θρέψη των φυτών (και άρα και για το υπόλοιπο οικοσύστημα) μειώνεται.

4. **Ανοργανοποίηση (mineralisation)**: Είναι το αντίθετο της ακινητοποίησης. Συμβαίνει όταν τα μικρόβια του εδάφους μετατρέπουν το άζωτο της οργανικής ουσίας (δηλαδή το οργανικό άζωτο) σε ανόργανη μορφή κατά την αποσύνθεση της οργανικής ουσίας του εδάφους.

5. **Απονιτροποίηση (denitrification)**: Αυτό γίνεται όταν τα μικρόβια του εδάφους μετατρέπουν το NO_3^- σε NO_2 , που χάνεται στην ατμόσφαιρα.