

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ:
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ»

ΛΟΪΖΙΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΓΕΩΡΓΑΣ ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΡΙΑ ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΠΑΤΡΑ- 2018

Περιεχόμενα

1. ΕΔΑΦΟΣ	5
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	5
1.2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	6
1.3 ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΟΡΩΝ.....	11
1.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	11
1.5 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	12
1.6 ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ	15
2. ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΔΑΦΩΝ.....	17
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	17
2.2 ΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	17
2.3 ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	18
2.4 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ	19
2.4.1 ΧΡΩΜΙΟ.....	19
2.4.2 ΝΙΚΕΛΙΟ	20
2.4.3 ΧΑΛΚΟΣ.....	20
2.4.4 ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ.....	21
2.4.5 ΑΡΣΕΝΙΚΟ.....	22
2.4.6 ΜΟΛΥΒΔΟΣ.....	23
2.5 ΠΟΛΥΚΥΚΛΙΚΟΙ ΑΡΩΜΑΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ.....	24
3. ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	27
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	27
3.2 ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	27
3.3 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΦΑΣΗΣ	28
3.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	29
3.5 ΤΟ pH ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	31
4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	32
4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	32
4.2 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ	33

4.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	35
4.4 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ARCHIE	38
4.5 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	44
4.6 Η σημασία της ηλεκτρικής αγωγιμότητας	46
4.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	48
4.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	50
4.8.1 Μέτρηση με Επαφή.....	51
4.8.2 Μέτρηση χωρίς Επαφή	56
4.9 Σύγκριση ΤΩΝ δύο μεθόδων μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.....	58
4.10 ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	59
5. ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	61
5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	61
5.2 Είδη ρύπων που απομακρύνονται με την ηλεκτροκινητική αποκατάσταση.....	62
5.3 Διεργασίες μεταφοράς	63
5.3.1 Διάχυση.....	63
5.3.2 Ηλεκτρομετανάστευση	63
5.3.3 Ηλεκτροώσμωση.....	64
5.3.4 Ηλεκτροφόρηση	65
5.3.5 Άλλοι Μηχανισμοί.....	66
5.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	66
5.5 Απόδοση απομάκρυνσης ρύπων	68
5.5.1 Σύσταση του Εδάφους	69
5.5.2 Αγωγιμότητα.....	70
5.5.3 Θερμοκρασία	70
5.5.4 Υγρασία	70
5.5.5 Οργανική ύλη στο έδαφος.....	70
5.5.6 Βαθμός κορεσμού	71
5.5.7 Ηλεκτρόδια	71
5.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	72
5.7 Κόστος	74
6. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ.....	75
6.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	75

6.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ.....	77
6.3 ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.....	78
6.4 ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	80
6.4.1 Συμβατικές διαγραφίες Αντίστασης (ES Log).....	80
6.4.2 Μικροδιατάξεις.....	82
6.4.3 Καταγραφές Εστιασμένων Αντιστάσεων	83
6.4.4 Διαγραφίες Επαγωγής.....	84
7. ΠΛΑΣΜΑ	86
7.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	86
7.2 Θωράκιση Debye	87
7.3 ΟΙΟΝΕΙ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑ	89
7.4 Η ΤΕΤΑΡΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ	90
7.5 ΠΛΑΣΜΑ ΣΤΗ ΦΥΣΗ	92
7.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	93
7.7 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	94
8. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΨΥΧΡΟ ΠΛΑΣΜΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	96
8.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	96
8.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	96
8.2.1 Εκκένωση τύπου Κορώνας.....	97
8.2.2 Εκκένωση Διηλεκτρικού Φράγματος.....	97
8.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	99
8.3.1 Απορρύπανση από NAPLs	99
8.3.2 Απορρύπανση Χώματος από Χλωραμφενικόλη.....	100
8.3.3 Οξείδωση Κηροζίνης στο Έδαφος.....	100
8.3.4 Αποδόμηση Πενταχλωροφενόλης στο Έδαφος μέσω Παλμικής Εκκένωσης Κορώνας.....	101
8.3.5 Απορρύπανση Εδάφους από Πολυχλωριωμένο Διφαινύλιο με Ψυχρό Πλάσμα ...	101
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	104

1. ΕΔΑΦΟΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το έδαφος αποτελεί τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ της ατμόσφαιρας και της λιθόσφαιρας η οποία διαχωρίζει τη λιθόσφαιρα από τις υδάτινες μάζες , για παράδειγμα τις λίμνες, τα ποτάμια και τις θάλασσες (υδρόσφαιρα).

Είναι ένα μη-συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή χαλαρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους. Τα κενά ανάμεσα στους κόκκους ονομάζονται πόροι και μπορεί να περιέχουν υγρά (συνήθως νερό) ή/και αέρια (συνήθως αέρα). Τα υλικά που το αποτελούν προέρχονται από τη μηχανική ή/και χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Με τον όρο αποσάθρωση συμπεριλαμβάνουμε τις μεταβολές ως προς το μέγεθος, το σχήμα, την εσωτερική δομή και τη χημική σύσταση των πετρωμάτων που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης, οι οποίες συμβαίνουν με την επίδραση των παραγόντων της λεγόμενης εδαφογένεσης.

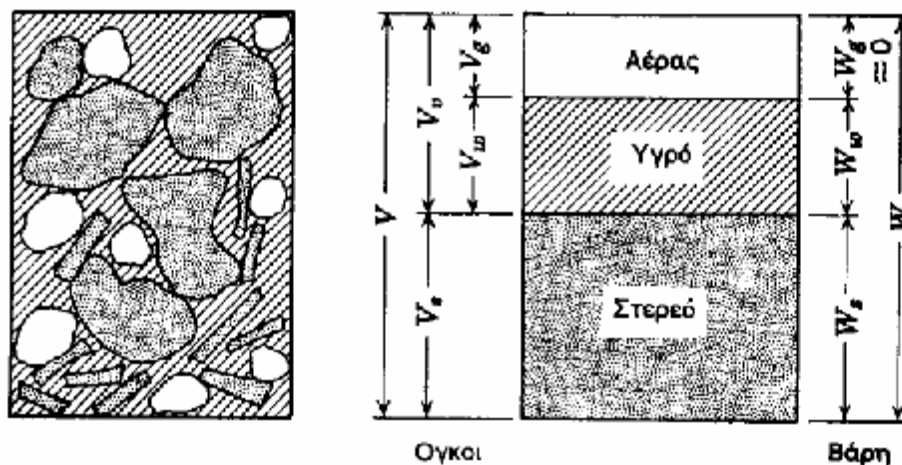
Παράγοντες όπως ο παγετός, οι συνεχείς μεταβολές της θερμοκρασίας, η διάβρωση από το νερό και τον αέρα, οι λειτουργίες των φυτών, των ζώων και του ανθρώπου προκαλούν τη μηχανική αποσάθρωση και έχει ως αποτέλεσμα τον κατατεμαχισμό και θρυμματισμό των βράχων.

Αντίστοιχα, η χημική αποσάθρωση προκαλεί την αποσύνθεση των πετρωμάτων λόγω οξείδωσης, ενανθράκωσης, αναγωγής και άλλων χημικών διαδικασιών.

Γενικά, η χημική αποσάθρωση είναι ο κυριότερος παράγοντας γένεσης λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών (ιλύων και αργίλων), ενώ η μηχανική αποσάθρωση συντελεί κυρίως στη δημιουργία των χονδρόκοκκων εδαφών (χαλίκων και άμμων), χωρίς όμως να αποκλείεται και η μερική συμμετοχή του εναλλακτικού τρόπου αποσάθρωσης στη δημιουργία εδαφών κάθε τύπου.

1.2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Όπως αναφέρθηκε ήδη, το έδαφος είναι ένα πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από στερεούς κόκκους και από τους πόρους που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων και περιέχουν νερό ή/και αέρα. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει τις τρεις φάσεις ενός εδαφικού δείγματος. Ο συνολικός όγκος V του εδάφους αποτελείται από τον όγκο V_s που καταλαμβάνουν οι στερεοί κόκκοι και τον όγκο V_v των πόρων. Ο όγκος των πόρων γεμίζεται με νερό όγκου V_w και με αέρα όγκου V_g . Οι αντίστοιχες μάζες, M , ή ισοδύναμα τα βάρη, W , των ανωτέρω ποσοτήτων είναι: M η ολική μάζα, M_s η μάζα στερεών κόκκων, M_w η μάζα του νερού των πόρων και M_g η μάζα του αέρα των πόρων. Στη συνέχεια η μάζα του αέρα των πόρων θεωρείται αμελητέα, γιατί η πυκνότητα του αέρα είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις πυκνότητες των στερεών κόκκων και του νερού.



Σχήμα 1.1 Οι φάσεις των εδαφικών σχηματισμών [5].

Με βάση τις παραπάνω ποσότητες, ορίζονται τα εξής μεγέθη που είναι πολύ χρήσιμα στη μελέτη και κατάταξη σε κατηγορίες των εδαφών:

1. Το Πορώδες.

Είναι ο λόγος του όγκου των κενών προς τον ολικό όγκο του εδάφους.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Το πορώδες πολύ συχνά εκφράζεται ως εκατοστιαίο ποσοστό.

2. Ο Δείκτης Πόρων.

Είναι ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών κόκκων.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι το πορώδες και ο δείκτης πόρων συνδέονται με τη σχέση:

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

3. Ο Βαθμός Κορεσμού.

Είναι ο λόγος του όγκου του νερού των πόρων προς τον όγκο των κενών.

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

Ο βαθμός κορεσμού εκφράζει το ποσοστό του όγκου των πόρων που είναι γεμάτος με νερό. Ένα ξηρό εδαφικό υλικό έχει βαθμό κορεσμού μηδέν, ενώ ένα εδαφικό υλικό του οποίου όλοι οι πόροι είναι γεμισμένοι με νερό έχει βαθμό κορεσμού 100% και ονομάζεται κορεσμένο.

4. Το Ποσοστό Υγρασίας.

Είναι ο λόγος της μάζας του νερού των πόρων προς τη μάζα των στερεών κόκκων.

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$

Το ποσοστό υγρασίας ενός ξηρού εδάφους είναι μηδέν. Το ποσοστό υγρασίας ενός υγρού εδάφους υπολογίζεται με την εξής μέθοδο. Ένα δείγμα του εδάφους ζυγίζεται στη φυσική του κατάσταση και υπολογίζεται η μάζα του, έστω M_1 . Στη συνέχεια και αφού ξηρανθεί σε κατάλληλο κλίβανο, ώστε να εξατμιστεί το σύνολο του νερού που περιέχεται στους πόρους ζυγίζεται ξανά και υπολογίζεται η μάζα του, έστω M_2 . Το ποσοστό υγρασίας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100\%$$

5. Η Πυκνότητα του Εδαφικού Υλικού.

Είναι ο λόγος της μάζας του εδαφικού δείγματος προς τον όγκο του.

$$r = \frac{M}{V}$$

6. Η Πυκνότητα των Στερεών Κόκκων.

Είναι ο λόγος της μάζας των στερεών κόκκων προς τον όγκο τους.

$$r_s = \frac{M_s}{V_s}$$

7. Η Πυκνότητα του Νερού.

Είναι ο λόγος της μάζας του νερού προς τον όγκο του.

$$r_w = \frac{M_w}{V_w}$$

Η πυκνότητα του νερού είναι ίση με $r_w = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$.

Οι πυκνότητες του εδάφους, των στερεών κόκκων και του νερού συνδέονται με τις σχέσεις:

$$r = r_s \frac{1+w}{1+e}$$

και

$$r_s w = S e r_w$$

Με βάση τα παραπάνω θεμελιώδη μεγέθη είναι δυνατόν να οριστούν και κάποιες παράγωγες ποσότητες. Οι σημαντικότερες είναι:

1. Η Ξηρή Πυκνότητα του Εδαφικού Υλικού.

Είναι η πυκνότητα ενός εδάφους που έχει μηδενικό ποσοστό υγρασίας.

$$r_d = r_s \frac{1}{1+e}$$

2. Η Πυκνότητα του Κορεσμένου Εδαφικού Υλικού.

Είναι η πυκνότητα ενός εδάφους που έχει βαθμό κορεσμού $S=1$.

$$r_{sat} = \frac{r_s + e r_w}{1 + e}$$

3. Η Υπό Άνωση Πυκνότητα ενός Κορεσμένου Εδαφικού Υλικού.

$$r_b = r_{sat} - r_w = \frac{r_s - r_w}{1 + e}$$

Μερικές τυπικές τιμές των θεμελιωδών μεγεθών για διάφορα εδαφικά υλικά είναι:

1. Πορώδες

Άμμοι: 0,30 έως 0,50

Άργιλοι: 0,20 έως 0,60 (ή και υψηλότερο)

2. Δείκτης πόρων

Άμμοι: 0,40 έως 1,00

Άργιλοι: 0,30 έως 1,50 (ή και υψηλότερος)

3. Βαθμός κορεσμού 0 έως 1

4. Ποσοστό υγρασίας

Κυμαίνεται συνήθως στις άμμους από 0 έως 0,40 (40%) και στις αργίλους από 0 έως 1 (100%). Σε ορισμένα εδάφη (π.χ. οργανικά ή ευαίσθητες αργίλους) μπορεί να φθάνει και το 5 (500%).

5. Πυκνότητα εδαφικού υλικού(σε Mg/m^3):

Άμμοι και χάλικες: 1,70 έως 2,40

Πλείς και άργιλοι: 1,40 έως 2,10

Οργανικά και ευαίσθητες άργιλοι: 1,00 έως 1,60.

6. Πυκνότητα στερεών κόκκων

Για όλους τους τύπους εδαφών εκτός των οργανικών:

$\rho_s = 2,50 - 2,80 Mg/m^3$

Τα οργανικά εδάφη μπορεί να έχουν πυκνότητα στερεών κόκκων πολύ μικρότερη από $2,50 Mg/m^3$.

1.3 ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΟΡΩΝ

Στην ανάπτυξη των φυτών σημαντικό ρόλο έχει κυρίως το μέγεθος των πόρων του εδάφους και η κατανομή που ακολουθούν τα μεγέθη των εδαφικών πόρων. Διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες εδαφικών πόρων:

1. Μεγάλοι πόροι:

Μεγάλοι πόροι χαρακτηρίζονται οι εδαφικοί πόροι που έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 50 μm . Διευκολύνουν την κυκλοφορία του αέρα όταν το έδαφος βρίσκεται στην κατάσταση της υδατοϊκανότητας. Η καλή κυκλοφορία του αέρα και η στράγγιση του νερού στο έδαφος απαιτούν τη συνεχή διάταξη των πόρων αυτών στην κατακόρυφη κατεύθυνση.

2. Μέσοι πόροι

Οι εδαφικοί πόροι που έχουν διάμετρο μικρότερη των 50 και μεγαλύτερη των 0,2 μm χαρακτηρίζονται ως μέσοι πόροι. Οι πόροι αυτοί επιτελούν σημαντικό έργο γιατί συγκρατούν το νερό και τα θρεπτικά στοιχεία που είναι διαλυμένα σ' αυτό ώστε να είναι διαθέσιμα στα φυτά.

3. Μικροί πόροι

Οι πόροι με διάμετρο μικρότερη από 0,2 μm χαρακτηρίζονται ως μικροί. Αποθηκεύουν εφεδρείες νερού και θρεπτικών στοιχείων, με τη διαφορά ότι το νερό και τα θρεπτικά στοιχεία που αποθηκεύουν δεν είναι διαθέσιμα στα φυτά.

1.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους είναι:

- Ø η υφή
- Ø το βάθος του προφίλ
- Ø τα χαρακτηριστικά των οριζόντων
- Ø η δομή

- Ø η συγκράτηση νερού
- Ø ο ρυθμός απορρόφησης υγρασίας
- Ø η ελεύθερη κίνηση του αέρα
- Ø ο βαθμός συνεκτικότητας του εδάφους.

Εξαρτώνται κυρίως από το κλίμα, το μητρικό υλικό και το χρόνο. Η υφή, το βάθος του προφίλ και τα χαρακτηριστικά των οριζόντων είναι ιδιότητες ανεξάρτητες από τις επεμβάσεις του ανθρώπου, ενώ οι υπόλοιπες μπορούν να επηρεαστούν με τις καλλιεργητικές ενέργειες που διενεργούνται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες .

Υφή ορίζεται ως το μέγεθος των εδαφικών τεμαχιδίων. Τα εδάφη που αποτελούνται από μεγάλα τεμαχίδια άμμου παρουσιάζουν καλή αποστράγγιση, θερμαίνονται και ψύχονται εύκολα και πολλές φορές είναι φτωχά σε θρεπτικά συστατικά. Τα εδάφη που αποτελούνται κυρίως από τα μικρά τεμαχίδια της αργίλου χαρακτηρίζονται από τελείως αντίθετες ιδιότητες. Ενδιάμεσα βρίσκονται όλοι οι άλλοι τύποι εδαφών.

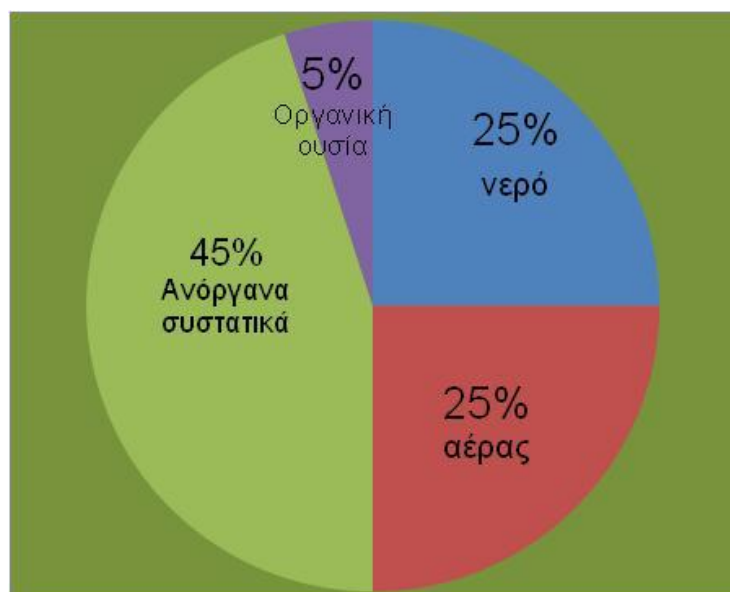
Δομή είναι η διάταξη των αρχικών τεμαχιδίων σε μεγαλύτερα συσσωματώματα και χαρακτηρίζεται από το μέγεθος και τη θέση μεταξύ τους.

Το έδαφος πρέπει να έχει αρκετούς πόρους που να μην καταλαμβάνονται από νερό καθώς και ευνοϊκές συνθήκες ανταλλαγής του εδαφικού αέρα με τον ατμοσφαιρικό. Είναι απαραίτητη διαδικασία για την απομάκρυνση του CO₂ που παράγεται με τον εμπλουτισμό του αέρα με O₂. Η ανταλλαγή αυτή ορίζεται ως αερισμός του εδάφους. Η διαφορά του αέρα εδάφους με τον ατμοσφαιρικό εντοπίζεται στο γεγονός ότι περιέχει λιγότερο οξυγόνο και περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα.

1.5 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Το έδαφος αποτελείται από τα παρακάτω τέσσερα είδη συστατικών: ανόργανα συστατικά, νερό, αέρα και οργανικά

συστατικά. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η αναλογία των συστατικών αυτών σε ένα μέσο έδαφος.



Σχήμα 1.2 Αναλογία των τεσσάρων συστατικών σε ένα μέσο έδαφος [7].

Με διεθνή σύμβαση η λεπτή γη (δηλαδή τα τεμαχίδια με μέγεθος μικρότερο από 2mm) υποδιαιρείται στα κλάσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Διαστάσεις Κλασμάτων

Κατηγορία Κλάσματος	Διάμετρος (mm)
Χονδρή άμμος	2-0,2
Λεπτή άμμος	0,2-0,02
Ιλύς	0,02-0,002
Άργιλος	<0,002

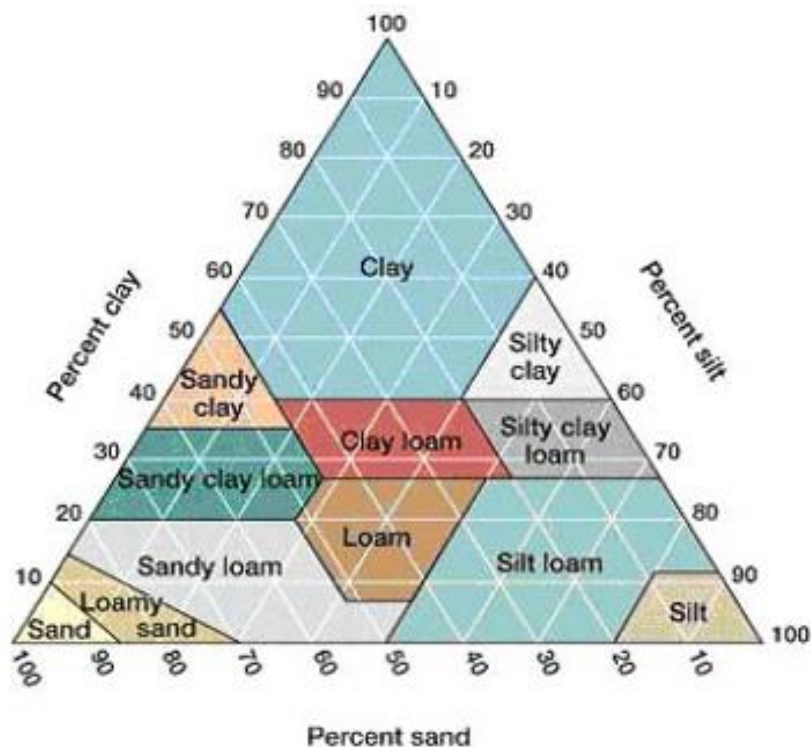
Η εκατοστιαία περιεκτικότητα ενός εδάφους σε άμμο, ιλύ και άργιλο καθορίζει τη μηχανική σύσταση ή κοκκομετρική σύνθεση.

Οι κόκκοι της άμμου είναι αποστρογγυλωμένοι,γωνιώδεις ή ακανόνιστοι, στερούνται πλαστικότητας,καθώς και η υδατοϊκανότητα είναι μικρή, η κίνηση του νερού στα διάκενα είναι γρήγορη.

Οι κόκκοι της ιλύος έχουν ακανόνιστο σχήμα, πλαστικότητα, περιβάλλονται από μεμβράνη αργίλου,και είναι αυτοί που δίνουν συμπαγή ή ασθενή δομή στο έδαφος.

Η άργιλος αποτελείται από πεπλατυσμένους κόκκους και είναι πολύ πλαστική σε υγρή κατάσταση, έχει μεγάλη ικανότητα προσρόφησης αερίων, νερού και ιόντων.

Η ταξινόμηση των εδαφών σε κατηγορίες με βάση τα ποσοστά της άμμου, της ιλύος και της αργίλου γίνεται με τη βοήθεια του τριγώνου που φαίνεται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 Τρίγωνο ταξινόμησης των εδαφών [7]
sand=άμμος, loam=πηλός, silt=ιλύς, clay=άργιλος.

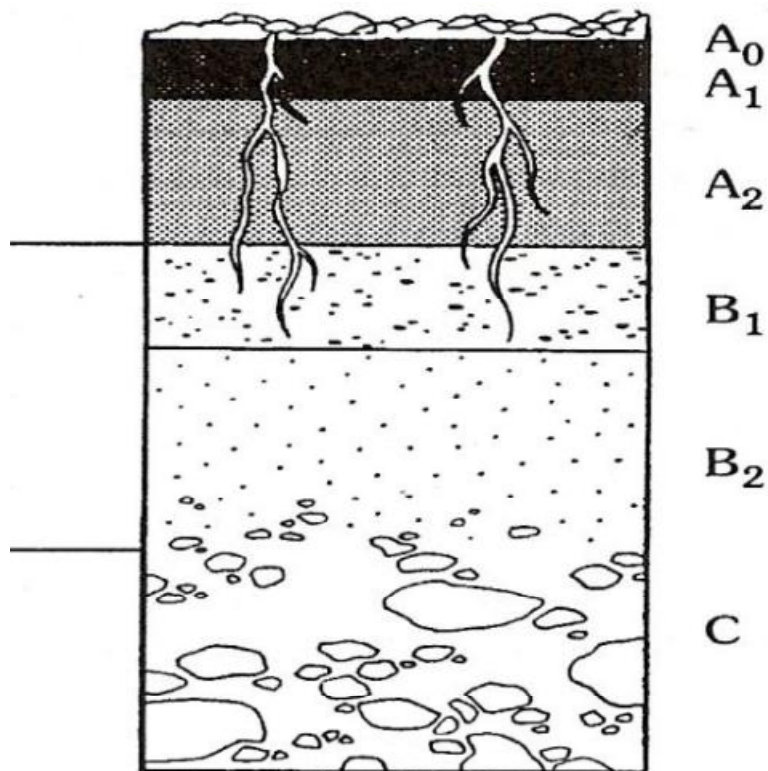
1.6 ΕΔΑΦΙΚΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ

Εδαφικοί ορίζοντες ονομάζονται τα στρώματα που διακρίνονται σε μία κάθετη τομή του εδάφους (soil profile). Τα στρώματα αυτά έχουν διαφορετικό πάχος. Παρουσιάζουν επίσης σημαντικές διαφορές στο χρώμα, τη σύσταση των εδαφικών σωματιδίων, αλλά και ως προς τον τρόπο που αυτά τα σωματίδια ενώνονται μεταξύ τους.

Οι βασικοί ορίζοντες που απαρτίζουν το έδαφος είναι τρεις και συμβολίζονται με τα γράμματα A, B, C. Το συμπαγές μητρικό πέτρωμα συμβολίζεται με το γράμμα R.

Ο ορίζοντας A αρχίζει από την επιφάνεια του εδάφους, έρχεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον του εδάφους και είναι πλούσιος σε οργανικά υλικά. Αποτελεί τη ζώνη μεταφοράς των περισσότερων υλικών προς τα χαμηλότερα στρώματα και ονομάζεται αποπλυμένος. Σε δασικά κυρίως εδάφη που είναι ακαλλιέργητα και γενικότερα σε ώριμα εδάφη, βρίσκει κανείς στην επιφάνεια του εδάφους ένα στρώμα από οργανικά υλικά τα οποία έχουν αρχίσει να αποσυντίθενται χωρίς όμως να έχει ολοκληρωθεί η αποσύνθεση τους όπως φύλλα και άλλα φυτικά υπολείμματα. Το στρώμα αυτό είναι ο υπό-ορίζοντας A0. Στη συνέχεια ακολουθούν αρκετοί υπό-ορίζοντες οι οποίοι συμβολίζονται ως A1, A2... Αυτοί περιέχουν οργανικά υλικά σε ποσότητες που σταδιακά μειώνονται και επίσης περιέχουν και ανόργανα συστατικά.

Ο ορίζοντας B δέχεται υλικά που μεταφέρονται από τον ορίζοντα A, για αυτό και ονομάζεται εμπλουτισμένος. Αποτελείται κυρίως από αργιλικά υλικά καθώς και από οξείδια σιδήρου (Fe), αργιλίου (Al) και μαγγανίου (Mn). Οι ρίζες των φυτών διεισδύουν εύκολα στον ορίζοντα B και αντλούν τα θρεπτικά συστατικά. Ο ορίζοντας B υποδιαιρείται όπως και ο A σε υπό-ορίζοντες που συμβολίζονται ως B0, B1, B2...



Σχήμα 1.4 Κάθετη τομή εδάφους στην οποία διακρίνονται οι εδαφικοί ορίζοντες [11].

Ο ορίζοντας C αποτελείται από τα υλικά του μητρικού πετρώματος και γι' αυτό το λόγο ονομάζεται μητρικός ορίζοντας. Στο ανώτερο τμήμα του ορίζοντα C τα υλικά είναι συνήθως θρυμματισμένα.

Η πλήρης ανάπτυξη των εδαφικών οριζόντων συναντάται σε εδάφη που δεν έχουν καλλιεργηθεί ή διαβρωθεί. Στα εδάφη που καλλιεργούνται συνήθως απουσιάζουν οι υπό-ορίζοντες A0, A1 ενώ στα περισσότερα διαβρωμένα εδάφη απουσιάζουν ένας ή περισσότεροι ορίζοντες ανάλογα με το βαθμό της διάβρωσης.

2. ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΛΑΦΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Με τον όρο ρύπανση εννοείται η εισαγωγή από τον άνθρωπο στο περιβάλλον ουσιών ή ενεργειών που μπορεί να προκαλέσουν κινδύνους στην ανθρώπινη υγεία, ζημιά στους πόρους διαβίωσης και τα οικολογικά συστήματα, ζημιά στις δομές ή την παρέμβαση με τις νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος.

Σύμφωνα με την Υπηρεσία Περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, κάθε χρόνο δαπανούνται τεράστια χρηματικά ποσά για την εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 60 και 110 δις €

Η ρύπανση του εδάφους γίνεται κυρίως μέσω της αλληλεπίδρασής του με εξωγενείς παράγοντες, όπως ατμοσφαιρικοί ρύποι, στερεά και υγρά απόβλητα. Το έδαφος γίνεται δέκτης μιας μεγάλης ποικιλίας ρύπων. Έτσι, η ρύπανση του εδάφους μπορεί να οφείλεται στην κατακρήμιση οργανικών και ανόργανων ρύπων, στα λιπάσματα, στα φυτοφάρμακα, σε κτηνοτροφικά, γεωργικά, χημικά, αστικά και νοσοκομειακά απόβλητα καθώς και σε βαρέα μέταλλα. Οι παραπάνω ουσίες παρασύρονται με τη βροχή στα υπόγεια νερά με προσρόφηση, αφού πρώτα απορροφηθούν στην επιφάνεια του εδάφους. Οι πηγές της ρύπανσης του εδάφους διακρίνονται σε σημειακές και μη σημειακές.

2.2 ΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Οι μη-σημειακές πηγές σχετίζονται με ανθρώπινες δραστηριότητες που καλύπτουν ή επηρεάζουν άμεσα μεγάλες εκτάσεις. Η μη σημειακή ρύπανση του εδάφους προκύπτει από ρύπους που μεταφέρονται με τον αέρα, ορισμένες γεωργικές πρακτικές όπως η χρήση αστικών λυμάτων, ανόργανων λιπασμάτων, εντομοκτόνων κ.ά. Επίσης προκύπτουν και από

ανεπαρκείς μεθόδους ανακύκλωσης ή γενικότερα διαχείρισης υδάτων και λυμάτων.

Σήμερα, τα σημαντικότερα προβλήματα μη σημειακής ρύπανσης του εδάφους οφείλονται:

- Ø σε εναποθέσεις μέσω του αέρα ενώσεων που αυξάνουν την οξύτητα και ευνοούν την εμφάνιση του φαινομένου του ευτροφισμού καθώς και επιζήμιων χημικών ουσιών.
- Ø σε εναποθέσεις μέσω ρεόντων υδάτων ή μέσω διάβρωσης.
- Ø στην άμεση χρήση ουσιών που ενδέχεται να περιέχουν βαρέα μέταλλα (μικροβιοκτόνα, λιπάσματα κ.τ.λ.).

Τα βαρέα μέταλλα και οι υπερβολικές δόσεις αζώτου, που προέρχονται από προσπάθειες αύξησης της γεωργικής παραγωγής, π.χ. η χρήση λιπασμάτων, είναι τα κύρια στοιχεία εδαφικής ρύπανσης σε γεωργικές ζώνες. Μεταλλικά στοιχεία, όπως Hg, Cd, As, Pb, συσσωρεύονται σταδιακά προκαλώντας βλάβες στο οικοσύστημα του εδάφους. Με την εισχώρησή τους στην τροφική αλυσίδα προκαλούν μείωση της βιοποικιλότητας, υδατική ρύπανση και σημαντικούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία.

2.3 ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Με τον όρο σημειακές πηγές ρύπανσης αναφέρονται οι τοπικές και διακριτές ρυπαντικές διεργασίες. Οι πιο συνηθισμένες πηγές είναι οι μη λειτουργικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις, οι μονάδες παραγωγής ενέργειας, τα βιομηχανικά ατυχήματα, η ανεξέλεγκτη διάθεση αστικών, γεωργικών και βιομηχανικών λυμάτων και οι μεταλλευτικές-μεταλλουργικές δραστηριότητες. Οι εστίες ρύπανσης αυτού του είδους είναι δυνατό να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον με την απελευθέρωση βλαβερών ουσιών στους υδάτινους πόρους, την πρόσληψή των ουσιών αυτών από τα φυτά ή την άμεση επαφή τους με τους ανθρώπους.

Οι πιο σημαντικοί ρύποι που απελευθερώνονται από σημειακές πηγές είναι τα βαρέα μέταλλα, διάφοροι οργανικοί ρύποι (π.χ. χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες) και ορυκτέλαια. Η διασπορά των ρύπων

ακολουθεί μία φυσιολογική ροή, με τις συγκεντρώσεις των ρύπων να μειώνονται κατά κανόνα με την αύξηση της απόστασης από την εστία ρύπανσης.

2.4 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Ο όρος «βαρέα μέταλλα», αν και δεν μπορεί να οριστεί ξεκάθαρα, χρησιμοποιείται ευρέως. Αναφέρεται στα μέταλλα και τα μεταλλοειδή στοιχεία που συνδέονται με τη ρύπανση και την τοξικότητα. Στην κατηγορία «βαρέα μέταλλα» περιλαμβάνονται τα μεταλλικά στοιχεία που έχουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο από αυτό του σιδήρου, όπως ο μόλυβδος, το νικέλιο, ο υδράργυρος, το βανάδιο, το κάδμιο, ο κασσίτερος, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, το μαγγάνιο και άλλα, καθώς και μερικά στοιχεία που, σε χαμηλές συγκεντρώσεις, είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των οργανισμών.

2.4.1 ΧΡΩΜΙΟ

Το χρώμιο (Cr) είναι χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 24. Είναι αργυρόλευκο γυαλιστερό και σκληρό μέταλλο με υψηλό σημείο τήξης. Ανήκει στην ομάδα της 1ης κύριας σειράς των στοιχείων μετάπτωσης. Το χρώμιο που υπάρχει στη φύση αποτελείται από 3 σταθερά ισότοπα: το ^{52}Cr , το ^{53}Cr και το ^{54}Cr με το ^{52}Cr να υπερισχύει σε σχέση με τα άλλα δύο με ποσοστό 83,8%. Δεκαεννιά ισότοπα του χρωμίου έχουν βρεθεί με πιο σταθερά από αυτά τα ^{50}Cr και ^{51}Cr . Χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως σε οδοντοτεχνικά κράματα, στον επιχρωμιωμένο και ανοξειδωτο χάλυβα καθώς και στην επιχρωμίωση μετάλλων με σκοπό την προστασία τους από τη διάβρωση.

Η μεγαλύτερη ποσότητα χρωμίου χρησιμοποιείται στην παραγωγή ανοξειδωτου χάλυβα. Με προσθήκη χρωμίου σε ποσοστό το λιγότερο 13%, το οποίο μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 30%, οι χρωμιοχάλυβες εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τον κοινό χάλυβα στη διάβρωση και στην οξείδωση στο φυσικό και στο αστικό περιβάλλον. Το χρώμιο σχηματίζει μια αδρανή επικάλυψη τριοξειδίου του χρωμίου (Cr_2O_3) η οποία είναι απρόσβλητη από το νερό και τον αέρα.

Ταυτόχρονα όμως είναι εξαιρετικά λεπτή ώστε το κράμα να μην χάνει τη λάμψη του. Λόγω της βιομηχανικής χρήσης του χρωμίου σε μεγάλη κλίμακα, το μέταλλο αυτό έχει εξελιχθεί σε σοβαρό ρύπο των φυσικών οικοσυστημάτων, καθώς διαφεύγει σε μεγάλες συγκεντρώσεις στα βιομηχανικά απόβλητα.

2.4.2 ΝΙΚΕΛΙΟ

Το νικέλιο (Ni) είναι ένα μεταβατικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 28 και ατομικό βάρος 58.69 g/mol. Υπάρχουν επτά γνωστά ισότοπα, με το πιο συνηθισμένο να είναι το ⁶³Ni. Η κυριότερη χρήση του νικελίου είναι στην παραγωγή ανοξειδωτού χάλυβα. Χρησιμοποιείται επίσης στο γαλβανισμό μετάλλων, στην κατασκευή διαφόρων κραμάτων, στις μπαταρίες Ni-Cd, καθώς και σε διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και πετρελαϊκά προϊόντα.

Η κυριότερη πηγή εκπομπής νικελίου στην ατμόσφαιρα είναι η καύση παραγώγων του πετρελαίου. Το πετρέλαιο περιέχει περισσότερο νικέλιο από το κάρβουνο, και αυτό αποδεικνύεται από τις συγκεντρώσεις νικελίου στο έδαφος και στο γρασίδι σε σχέση με την απόσταση από τους κύριους οδικούς άξονες. Επίσης, η καύση ορυκτών και τα ορυχεία νικελίου είναι από τις σημαντικότερες πηγές εκπομπής του.

2.4.3 ΧΑΛΚΟΣ

Ο χαλκός (Cu) έχει κοκκινωπό χρώμα και είναι ιδιαίτερα καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Έχει ατομικό αριθμό 29, ατομικό βάρος 65.546 g/mol και πυκνότητα 8.96 g/cm³. Ο μεταλλικός χαλκός και μείγματα του χαλκού χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο εδώ και τουλάχιστον 5000 χρόνια. Ίσως είναι το δεύτερο σημαντικότερο μέταλλο μετά τον σίδηρο, όσο αφορά την χρησιμότητά του για τους ανθρώπους.

Λόγω του συνδυασμού των διαφόρων ιδιοτήτων του (ανθεκτικότητα, ελαστικότητα, θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα), χρησιμοποιείται σε ποικιλία βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Το 65% της παραγωγής χαλκού χρησιμοποιείται για την κατασκευή ηλεκτρικών καλωδίων και γενικότερα ηλεκτρικού εξοπλισμού. Επίσης χρησιμοποιείται σε επιμεταλλώσεις, στην παραγωγή κραμάτων (μπρούντζος), χημικών καταλυτών, αντιδιαβρωτικών χρωμάτων,

χαλκούχων σκευών και μυκητοκτόνων. Ο χαλκός επίσης χρησιμοποιείται στις κατασκευές και στις στεγάσεις (χάλκινες οροφές).

Ο χαλκός απελευθερώνεται στο περιβάλλον, τόσο από ανθρώπινες, όσο και από φυσικές πηγές. Οι φυσικές πηγές του χαλκού περιλαμβάνουν την αποσάθρωση των θειούχων και ανθρακούχων ορυκτών και τις φυσικές αποθήκες χαλκού. Παρόλα αυτά, πολύ μικρό ποσοστό του χαλκού που ανιχνεύεται στο νερό προέρχεται από φυσικές πηγές λόγω του ότι τα περισσότερα χαλκούχα ορυκτά τείνουν να είναι ιδιαίτερα αδιάλυτα. Ο χαλκός στο έδαφος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συγκράτηση καθώς αντιδρά έντονα και συμπλοκοποιείται με οργανικά συστατικά καθώς και με οξείδια του σιδήρου και του μαγγανίου, όπως επίσης και με ανθρακικά ορυκτά.

Οι βασικές πηγές ρύπανσης του εδάφους με χαλκό είναι η γεωργία, οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, η διάθεση της ιλύος από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, καθώς και η διάθεση αποβλήτων από μεταλλουργικές εγκαταστάσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι η πιο τοξική μορφή του χαλκού είναι το κατιόν Cu^{2+} . Επομένως, η συμπλοκοποίηση του χαλκού καθώς και αντιδράσεις όπως η προσρόφιση και η κατακρήμιση, που τείνουν να μειώσουν την συγκέντρωση του ελεύθερου χαλκού, διαδραματίζουν πολύ μεγάλο ρόλο στην τελική τοξικότητά του.

2.4.4 ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ

Ο ψευδάργυρος (Zn) είναι χημικό στοιχείο της δεύτερης ομάδας του περιοδικού πίνακα, ανήκει στα λεγόμενα βαρέα μέταλλα και αποτελεί παράλληλα σημαντικό ιχνοστοιχείο, δηλαδή μέταλλο που είναι απαραίτητο για τον οργανισμό σε μικρές όμως ποσότητες. Είναι μέταλλο χρώματος κυανόλευκου με ατομικό αριθμό 30 και ατομικό βάρος 65.38 g/mol. Υπάρχουν πέντε σταθερά ισότοπα με μαζικούς αριθμούς 65, 66, 67, 68 και 70.

Ο ψευδάργυρος είναι στοιχείο που μεταναστεύει μέσω του νερού. Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η μετανάστευσή του στα θερμά νερά μαζί με το μόλυβδο. Ο μισός από τον παραγόμενο ψευδάργυρο χρησιμοποιείται για την προστασία χαλύβδινων αντικειμένων από τη διάβρωση (επιψευδαργύρωση). Λόγω του ότι παρουσιάζει καλή χυτευτική ιδιότητα και χαμηλή θερμοκρασία τήξης, χρησιμοποιείται για τον γαλβανισμό διαφόρων εξαρτημάτων των αεροπλάνων και άλλων

μηχανών. Η αντοχή στη διάβρωση των διαφόρων κραμάτων του ψευδαργύρου, όπως ο ορείχαλκος, είναι παρόμοια με αυτή του επιψευδαργυρωμένου χάλυβα. Επίσης, χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του μολύβδου από ευγενή μέταλλα, και πολλές από τις ενώσεις του ψευδαργύρου είναι φθορίζουσες ουσίες και σημαντικοί ημιαγωγοί.

Η παρουσία ψευδαργύρου με τη μορφή αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα οφείλεται σε φυσικές πηγές, αλλά και στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Στις φυσικές πηγές συγκαταλέγονται η διηπειρωτική σκόνη, και η σκόνη και τα αέρια που εκλύονται από τα ηφαίστεια. Στις ανθρώπινες δραστηριότητες που έχουν σαν αποτέλεσμα ο ψευδάργυρος να καταλήγει στον αέρα περιλαμβάνονται δραστηριότητες όπως η καύση των ορυκτών καυσίμων από σταθερές πηγές και μεταφορικά μέσα, η αποτέφρωση των απορριμμάτων, η βιομηχανική διαδικασία εξαγωγής του (μεταλλουργία) και η ρευστοποίηση μη σιδηρούχων μεταλλευμάτων.

Στη λάσπη από βιολογικούς καθαρισμούς περιέχονται σημαντικές ποσότητες ψευδαργύρου, οι οποίες συνδέονται με τα αιωρούμενα σωματίδια. Η συμβατική επεξεργασία των αποβλήτων απομακρύνει το 40% έως το 74% του ψευδαργύρου από το ρεύμα εισόδου και έτσι παραμένουν υψηλές συγκεντρώσεις στη λάσπη, μεγαλύτερες κατά κανόνα από τις συνηθισμένες συγκεντρώσεις στο έδαφος. Τα λιπάσματα και τα εντομοκτόνα και ζιζανιοκτόνα μπορούν να αυξήσουν τις συγκεντρώσεις ψευδαργύρου στο έδαφος και το νερό. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάποια εντομοκτόνα και ζιζανιοκτόνα περιέχουν ψευδάργυρο με περιεκτικότητα έως και 25%. Επίσης, όλα τα λιπάσματα περιέχουν ψευδάργυρο, κυρίως με τη μορφή προσμίξεων.

2.4.5 ΑΡΣΕΝΙΚΟ

Το Αρσενικό (As) είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 33 και ατομικό βάρος 74,92160 g/mol. Ένα πολύ μικρό ποσοστό του αρσενικού βρίσκεται σε καθαρή φυσική κατάσταση. Το μεγαλύτερο μέρος του είναι ενωμένο με διάφορα ορυκτά (πάνω από 150) κυρίως θειούχα, αρσενικούχα, η προσμίξεις και των δύο προηγούμενων, καθώς και τα λεγόμενα αρσενικά. Το μεγαλύτερο, όμως, μέρος του αρσενικού που διακινείται στο εμπόριο προέρχεται από τη κατεργασία μεταλλευμάτων κυρίως χαλκού, μολύβδου, κοβαλτίου και χρυσού, όπου παράγεται ως υποπροϊόν.

Η κατανάλωση του μεταλλικού αρσενικού είναι σχετικά μικρή, περίπου 500 τόνοι ετησίως. Η μεγαλύτερη παραγωγή και κατανάλωση είναι από τη Σουηδία. Λόγω των ιδιοτήτων του χρησιμοποιείται σε κράμα σε ποσοστό 1% στη παραγωγή μολύβδινων σφαιρών, 3% σε μολύβδινους τριβείς καθώς και σε μπαταρίες και περικαλύμματα καλωδίων, ενώ σε υψηλότερη καθαρότητα χρησιμοποιείται μαζί με το πυρίτιο και το γερμάνιο σε κατασκευές ημιαγωγών, καθώς και σε μορφή αρσενικούχου γαλλίου (που είναι ένας από τους σημαντικότερους ημιαγωγούς) σε διόδους για λέιζερ, και σε κρυσταλλοτριόδους (τρανζίστορες).

Σε αντίθεση με την περιορισμένη χρήση του μεταλλικού αρσενικού, καταναλώνονται ετησίως χιλιάδες τόνοι αρσενικού, σε μορφές πάρα πολλών χημικών ενώσεων του. Η μεγαλύτερη χρήση γίνεται στη γεωργία, ως εντομοκτόνα, ζιζανιοκτόνα, ξηραντικά αλλά και απολυμαντικά προϊόντα. Επίσης κάποιες από τις ενώσεις του αρσενικού χρησιμοποιούνται και ως κύρια ύλη βεγγαλικών καθώς και στην υαλουργία για κατασκευή φακών και για τον αποχρωματισμό γυαλιών.

Το αρσενικό παρουσιάζει αυξημένη τοξικότητα ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις. Οι ανθρωπογενείς πηγές του αρσενικού προέρχονται κυρίως από τη βιομηχανία, την εξόρυξη μετάλλων και κάρβουνου, τα βυρσοδεψεία και τη γεωργία. Το As_2O_3 χρησιμοποιείται στη βιομηχανία κεραμικής, στην υαλουργία, στα ηλεκτρονικά όργανα, στις βαφές, διαυγάσεις, στην παρασκευή κραμάτων και σε πολλές άλλες χρήσεις.

Όλες αυτές οι δραστηριότητες για την παραγωγή και χρήση ενώσεων του αρσενικού δημιουργούν απόβλητα με σημαντικές συγκεντρώσεις αρσενικού που μπορεί να ρυπάνουν σοβαρά το εδαφικό περιβάλλον. Οι κύριες εισροές αρσενικού στο έδαφος προέρχονται από τα φυτοφάρμακα (εντομοκτόνα και ζιζανιοκτόνα) και τα κακής ποιότητας λιπάσματα. Η γενικευμένη χρήση, παλαιότερα, των φυτοφαρμάκων που περιείχαν ως δραστική ουσία το αρσενικό οδήγησε σε εκτεταμένη ρύπανση των εδαφών σε παγκόσμιο επίπεδο.

2.4.6 ΜΟΛΥΒΔΟΣ

Ο μόλυβδος (Pb) είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 82 και πυκνότητα 11.3 g/cm^3 . Είναι ιδιαίτερα τοξικό για τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς. Η εύκολη εξόρυξη, το χαμηλό σημείο τήξης και η














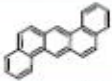

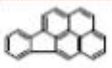
ολκιμότητα του είναι βασικές ιδιότητες που δικαιολογούν την ευρύτατη χρήση που είχε ο μόλυβδος εδώ και 7000 χρόνια. Χρησιμοποιήθηκε κατά την ρωμαϊκή περίοδο για την παρασκευή σωλήνων νερού ύδρευσης και μέχρι το 1950 χρησιμοποιείτο σε πάρα πολλές εφαρμογές σε πολλές χώρες. Η βασική του χρήση ήταν για την παραγωγή μπαταριών αυτοκινήτων, καθώς και για παραγωγή τετρααιθυλιούχου και τετραμεθυλιούχου μολύβδου που χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα στη βενζίνη. Άλλες χρήσεις βρίσκει στη μεταλλουργία, βαφές, τυπογραφία, βερνίκια, υαλουργία, αγγειοπλαστική φαρμακευτική, κουτιά κονσερβών, κατασκευή καλλυντικών, εντομοκτόνα, επικάλυψη καλωδίων και βλήματα πυροβόλων όπλων. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, αποδείχτηκε ότι η υπερβολική απορρόφηση μολύβδου αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα εμφάνισης νευροψυχολογικών παθήσεων, ιδίως στους νέους ανθρώπους. Γι' αυτό το λόγο, η χρήση του μειώθηκε σημαντικά.

Το έδαφος αποτελεί δεξαμενή των ανθρωπογενών εκπομπών μολύβδου στο περιβάλλον και έχουν αναγνωριστεί οι κυριότερες βασικές πηγές. Κύριες πηγές είναι η εξόρυξη και η μεταλλουργία του μολύβδου, η διάθεση ιλύος, η οποία χρησιμοποιείται και ως εδαφοβελτιωτικό στη γεωργία, η ρύπανση από τους κινητήρες των αυτοκινήτων που γίνεται καύση μη αμόλυβδης βενζίνης, και η ατμοσφαιρική εναπόθεση.

2.5 ΠΟΛΥΚΥΚΛΙΚΟΙ ΑΡΩΜΑΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) είναι οργανικοί ρύποι που μπορεί να σχηματιστούν από ατελείς καύσεις ή πυρολυτικές διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας οι οποίες περιλαμβάνουν ορυκτά καύσιμα και άλλες οργανικές ενώσεις που περιέχουν άνθρακα (C) και υδρογόνο (H).

Πίνακας 2.1 Δομή και μοριακός τύπος των Πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων [10].

ΡΑΗ (Σύντμηση)	Δομή	Μοριακός τύπος	Μοριακό βάρος
Ναφθαλίνιο, Np		C ₁₀ H ₈	128
Ακεναφθυλένιο, Acy		C ₁₂ H ₈	152
Ακεναφθένιο, Ace		C ₁₂ H ₁₀	154
Φλουορένιο, F		C ₁₃ H ₁₀	166
Φαινανθρένιο, Ph		C ₁₄ H ₁₀	178
Ανθρακένιο, An		C ₁₆ H ₁₀	178
Φλουορανθένιο, Fl		C ₁₆ H ₁₀	202
Πυρένιο, Py		C ₁₈ H ₁₂	202
Βενζο[α]ανθρακένιο, B[α]An		C ₁₈ H ₁₂	228
Χρυσένιο, Chry		C ₁₈ H ₁₂	228
Βενζο[β]φλουορανθένιο, B[β]Fl		C ₂₀ H ₁₂	252
Βενζο[κ]φλουορανθένιο, B[κ]Fl		C ₂₀ H ₁₂	252
Βενζο[α]πυρένιο, B[α]Py		C ₂₀ H ₁₂	252
Διβενζο[α,η]ανθρακένιο, dB[α,η]An		C ₂₂ H ₁₄	278
Βενζο[ghi]περυλένιο, B[ghi]Pe		C ₂₂ H ₁₂	276
Ινδενο[1,2,3-cd]πυρένιο, I[1,2,3-cd]Py		C ₂₂ H ₁₂	276

Αν και υπάρχουν φυσικές πηγές εκπομπής ΡΑΗs, όπως οι δασικές πυρκαγιές και η ηφαιστειακή δραστηριότητα, η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα είναι κυρίως αποτέλεσμα ανθρωπογενών δραστηριοτήτων όπως η κυκλοφορία οχημάτων, η καύση στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων, η αποτέφρωση απορριμμάτων και διάφορες βιομηχανικές διεργασίες όπως η διύλιση του πετρελαίου, η παραγωγή χάλυβα κ.ά.

Η φυσική πτώση των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας καθώς και οι βροχές έχουν σαν αποτέλεσμα την παρουσία μικρών συγκεντρώσεων PAHs στο έδαφος. Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε περιοχές με βιομηχανική δραστηριότητα καθώς και σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα πληθυσμού.

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι οργανικές ενώσεις που έχουν στο μόριό τους συμπυκνωμένους αρωματικούς δακτυλίους. Η δομή και ο μοριακός τύπος των πιο συνηθισμένων πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων που ρυπαίνουν τα εδάφη φαίνεται στον πίνακα 2.1.

3. ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πολλές χημικές ιδιότητες του εδάφους επηρεάζονται από τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στο νερό του εδάφους και τις επιφάνειες των εδαφικών σωματιδίων. Το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα διάλυμα που περιέχει ένα μεγάλο εύρος κατιόντων, ανιόντων και οργανικών ενώσεων σε μικρές συγκεντρώσεις.

Οι επιφάνειες της στερεής φάσης του εδάφους αντιδρούν με το νερό του εδάφους με δύο τρόπους:

- Ø Διάλυση και κατακρήμνιση των αλάτων και ορισμένων κατιόντων.
- Ø Προσρόφηση και εκρόφηση από τις επιφάνειες των ορυκτών της αργίλου, από τις επιφάνειες του εδαφικού χούμου και από τις επιφάνειες του γκιψίτη, του αιματίτη, του γκαιτίτη, των ένυδρων υδροξειδίων του σιδήρου και των άμορφων υδροξειδίων του σιδήρου και αργιλίου.

3.2 ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Η σύνθεση του εδαφικού διαλύματος μεταβάλλεται μέσα σε πολύ στενά όρια παρά το γεγονός ότι οι εδαφικές συνθήκες συνεχώς μεταβάλλονται εξαιτίας ενός μεγάλου πλήθους παραγόντων όπως:

- Ø η ύγρανση και η ξήρανση του εδάφους.
- Ø οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

- Ø η πρόσληψη από τα φυτά των θρεπτικών στοιχείων του εδαφικού διαλύματος.
- Ø Η μετατροπή της οργανικής ουσίας του εδάφους σε ανόργανη ύλη.

Η ικανότητα αυτή του εδάφους να αντιστέκεται σε οποιαδήποτε μεταβολή της χημικής σύνθεσης του εδαφικού διαλύματος ονομάζεται ρυθμιστική ικανότητα.

Η ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους είναι χαρακτηριστική για κάθε τύπο εδάφους. Έχει ιδιαίτερη σημασία, γιατί παρεμποδίζει τις απώλειες των θρεπτικών στοιχείων εξαιτίας της έκπλυσης. Επομένως η ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους διατηρεί το επίπεδο των θρεπτικών στοιχείων στο εδαφικό διάλυμα ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός των ριζών με θρεπτικά στοιχεία.

3.3 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΦΑΣΗΣ

Αρκετά ορυκτά της αργίλου παρουσιάζουν αρνητικά ηλεκτρικά φορτία στις επιφάνειες τους. Τα φορτία αυτά εξουδετερώνονται από κατιόντα των μετάλλων ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου, νατρίου κ. ά.

Τα ορυκτά οξειδία και υδροξείδια είναι μια ομάδα ορυκτών που περιλαμβάνει τα ορυκτά γκιψίτη, γκαιτίτη και αιματίτη που έχουν καλή κρυσταλλική δομή, τα ένυδρα υδροξείδια του σιδήρου που έχουν όχι καλή κρυσταλλική δομή και κάποια υδροξείδια του σιδήρου και του αργιλίου που είναι άμορφα, δηλαδή δεν παρουσιάζουν κρυσταλλική δομή.

Τα παραπάνω ορυκτά που έχουν κρυσταλλική δομή είναι φυλλόμορφα ορυκτά από φύλλα οξυγόνου ή υδροξυλίου σε οκταεδρική διάταξη με το αργίλιο ή με το σίδηρο. Στα ορυκτά αυτά, τα πλακίδια τους συνδέονται με δεσμούς υδρογόνου ή αλλιώς γέφυρες υδρογόνου. Οι γέφυρες υδρογόνου δημιουργούν ισχυρούς δεσμούς με τα πλακίδια με αποτέλεσμα αυτά να συγκρατούνται τόσο ισχυρά μεταξύ τους σε σημείο που να μην επιτρέπουν την είσοδο του νερού. Αυτός είναι ο λόγος γιατί δεν παρατηρείται το φαινόμενο της διόγκωσης στα ορυκτά αυτά. Στο κρυσταλλικό τους πλέγμα δεν παρατηρείται ισόμορφη αντικατάσταση

από ιόντα με διαφορετικά φορτία και για αυτό λόγο αυτό δεν υπάρχει μόνιμο αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο.

Στις θραυστιγενείς επιφάνειες των κρυστάλλων των οξειδίων και υδροξειδίων ή στις επιφάνειες των άμορφων οξειδίων και υδροξειδίων, υπάρχουν εκτεθειμένες χημικές ομάδες του αργιλίου και του σιδήρου οι οποίες έχουν επαμφοτερίζουσες ιδιότητες. Αυτό σημαίνει πως άλλοτε αποδέχονται ιόντα υδρογόνου και άλλοτε χάνουν ιόντα υδρογόνου. Το ηλεκτρικό τους φορτίο εξαρτάται από το pH του διαλύματος που βρίσκεται σε επαφή με τα ορυκτά αυτά. Σε όξινα εδάφη (χαμηλό pH) τα ορυκτά αυτά φέρουν θετικό φορτίο, σε ουδέτερα εδάφη έχουν μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο (ονομάζεται σημείο μηδενικού φορτίου) και σε αλκαλιωμένα εδάφη (υψηλό pH) φέρουν αρνητικό φορτίο. Τα εδάφη των οποίων το ηλεκτρικό φορτίο εξαρτάται από το pH χαρακτηρίζονται ως εδάφη με ποικίλο ηλεκτρικό φορτίο.

3.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η ιδιότητα των κολλοειδών του εδάφους να προσροφούν και να συγκρατούν κατιόντα ονομάζεται ικανότητα προσρόφησης κατιόντων. Το ποσό των κατιόντων, που μπορούν προσροφήσουν και να συγκρατήσουν σε ανταλλάξιμη μορφή τα κολλοειδή του εδάφους, λέγεται εναλλακτική ικανότητα κατιόντων (CEC, Cationexchange capacity) ή και ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ). Τα κατιόντα στα οποία αναφέρεται η CEC είναι τα: H^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , NH_4^+ .

Η CEC παλαιότερα μετριόταν σε χιλιοστοϊσοδύναμα (milliequivalents) κατιόντων ανά 100 g ξηρού εδάφους (me/100 g εδάφους). Η C.E.C. κυμαίνεται στα ορυκτά από λίγα έως 60 me/100 g εδάφους, ενώ στα οργανικά εδάφη υπερβαίνει τα 200 me/100 g εδάφους.

Σήμερα εκφράζεται σε mol_c , όπου ο δείκτης c σημαίνει φορτίο (charge), που προσροφάται ανά μονάδα μάζας του εδάφους ή $mol_c \cdot kg^{-1}$ εδάφους. Το mol_c , δηλαδή το mol φορτίου, συμπίπτει με το Eq. Για να συμπίπτουν οι σύγχρονες μονάδες με αυτές που χρησιμοποιούνταν ευρέως παλαιότερα δηλαδή την mEq 100 g⁻¹, συνήθως χρησιμοποιείται

το εκατοστό του mol_c , δηλαδή η μονάδα $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ εδάφους. Οι τιμές της CEC του εδάφους κυμαίνονται από 2 μέχρι 60 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$

Συνήθεις τιμές CEC εδαφών (σε $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$):

- Ø Αμμώδη: 5
- Ø Πηλώδη: 15
- Ø Αργιλώδη: 30

Ενδεικτικές τιμές CEC των εδαφικών συστατικών σε pH 7, σε $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$:

- Ø Μοντοριλλονίτης 110
- Ø Βερμικουλίτης 160
- Ø Χλωρίτης 30
- Ø Ιλλίτης 30
- Ø Αλλοφανή 100
- Ø Χούμος 200
- Ø Καολινίτης 5
- Ø Οξειδία Fe-Al 15

Η CEC τού εδάφους αποτελεί άθροισμα των τιμών CEC των επιμέρους κολλοειδών (αργίλου και χούμου) τού εδάφους. Η C.E.C. των εδαφών εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση, τη μηχανική σύσταση, την οργανική ουσία και την οξύτητα του εδάφους. Η CEC του εδάφους οφείλεται στις αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες των κολλοειδών του. Είναι βασικά υπεύθυνη για όλο το φάσμα των χημικών ιδιοτήτων του εδάφους

Η ανταλλαγή κατιόντων έχει πολύ μεγάλη σημασία της για τη θρέψη των φυτών. Ιόντα υδρογόνου, που δημιουργούνται από τη δράση των ριζών ή τη δράση μικροοργανισμών, αντικαθιστούν κατιόντα που υπάρχουν στα κολλοειδή. Αυτά μεταβιβάζονται στο εδαφικό διάλυμα από όπου αφομοιώνονται εύκολα από τα φυτά. Η αφομοιωσιμότητα των κατιόντων, εξαρτάται από τη δύναμη προσρόφησης, από το ποσοστό τους στο εδαφικό σύμπλοκο και από τον τύπο και τις ιδιότητες των κολλοειδών. Ο τρόπος και ο βαθμός λίπανσης προσδιορίζεται από την εναλλακτική ικανότητα.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα κατιόντα του διαλύματος πάντα συνοδεύονται από ανιόντα, τα οποία είναι περισσότερο εκτεθειμένα σε έκπλυση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μετά από βροχή ή άρδευση είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν στο εδαφικό διάλυμα περισσότερα κατιόντα από ανιόντα.

Σε χαμηλό pH τα ανιόντα συγκρατούνται στις επιφάνειες των ορυκτών και η αντίστοιχη ικανότητα ανταλλαγής ανιόντων (AEC, Anionexchange capacity) γενικά είναι μικρότερη από $1 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$. Τα ανιόντα στα οποία αναφέρεται η AEC είναι τα: SO_4^- , Cl^- , PO_4^{4-} , NO_3^-

3.5 ΤΟ pH ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Κάποια φυτά αναπτύσσονται καλύτερα σε έδαφος με όξινο pH και άλλα σε έδαφος με αλκαλικό. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι καλλιεργητές πρέπει να ελέγχουν και να τροποποιούν, αν είναι απαραίτητο, την οξύτητα των αγροκτημάτων τους προτού τα καλλιεργήσουν. Για τον ίδιο λόγο οι επιλογές στα είδη φυτών που θα φυτεύονται στο κήπο ή στην καλλιέργεια απαιτούν διάφορες βαθμίδες οξύτητας του εδάφους. Με άλλα λόγια, το χώμα που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να έχει την κατάλληλη οξύτητα, ή τη σωστή τιμή pH, ώστε να βοηθήσουμε τα διάφορα φυτά που θα καλλιεργηθούν να αναπτυχθούν με τον πιο αποδοτικό τρόπο και χωρίς προβλήματα. Οι κηπευτικές εγκαταστάσεις είναι πολύ ευαίσθητες στα εδαφολογικά επίπεδα του pH. Σε μερικές εγκαταστάσεις κήπων θα πρέπει να προτιμηθούν τα όξινα χώματα ενώ σε άλλες τα αλκαλικά.

Επίσης το pH είναι η μονάδα μέτρησης που στοιχειοθετεί την ποσότητα Ασβεστίου (Ca) που περιλαμβάνεται στο έδαφος ενώ παράλληλα προσδιορίζει και τον τύπο του εδάφους (όξινο ή αλκαλικό). Το έδαφος στα υγρά κλίματα τείνει να είναι όξινο ενώ στα ξηρά κλίματα αλκαλικό. Όπως είναι γνωστό τιμές του pH χαμηλότερες από 7.0 σημαίνουν ότι είναι όξινο ενώ τιμές pH υψηλότερες του 7.0 σημαίνουν ότι είναι αλκαλικό (ή αλλιώς βασικό).

Το pH του εδάφους κυμαίνεται συνήθως από 5 έως 8. Το χαμηλό pH του χώματος διαλύει συγκεκριμένα μέταλλα και θρεπτικά συστατικά τα οποία μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά.

Η πιο συχνή μέθοδος μέτρησης του pH εκμεταλλεύεται τη δημιουργία πάστας κορεσμού. Η αρχή της μεθόδου χρησιμοποιεί διάλυμα χόματος με απιονισμένο νερό σε αναλογία ένα προς ένα και, αφού αναμειχθεί, μέχρι το διάλυμα να γίνει ομοιογενές. Έπειτα φιλτράρεται και τοποθετείται πεχάμετρο υάλου μέσα στο νεοπαγές πλέον μείγμα για να μετρήσει την τιμή του pH.

4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ως ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται η ικανότητα ενός σώματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Το αντίθετο της αγωγιμότητας είναι η αντίσταση στη ροή του ηλεκτρισμού (ηλεκτρική αντίσταση) η οποία όπως μετριέται σε ohm (Ω). Η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σώματος και από τη σύστασή του. Η εξάρτηση από τη σύσταση εμπεριέχεται στη λεγόμενη ειδική αντίσταση που είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών. Η ειδική αντίσταση στο SI μετριέται σε $\Omega \cdot m$. Το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, ή απλά ηλεκτρική αγωγιμότητα και μετριέται σε S/m (Siemens ανά m). Η μονάδα Siemens είναι το αντίστροφο του Ohm. Μία μονάδα μέτρησης της αγωγιμότητας που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη γεωφυσική είναι το 1mmhos/cm που είναι ίσο με το ένα δέκατο του 1S/m, ή με άλλα λόγια 1mmhos/cm=1dS/m.

Ως αγωγός συνήθως ορίζεται ένα υλικό με ειδική αντίσταση μικρότερη των $10^{-5}\Omega m$, ενώ μονωτής είναι ένα υλικό με ειδική αντίσταση μεγαλύτερη από $10^7\Omega m$. Μεταξύ των ορίων αυτών κατανέμονται οι ημιαγωγοί. Σύμφωνα με αυτήν την ταξινόμηση, τα μέταλλα και ο γραφίτης είναι αγωγοί και μάλιστα χαρακτηρίζονται από ηλεκτρονική αγωγιμότητα. Αυτό σημαίνει περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό εξαιρετικά ευκίνητων ελεύθερων ηλεκτρονίων τα οποία αποτελούν τους φορείς του

ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ημιαγωγοί επίσης διαθέτουν ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσω των οποίων γίνεται η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά σε σαφώς μικρότερους αριθμούς από τους αγωγούς. Οι μονωτές είναι υλικά που χαρακτηρίζονται από ιονικούς δεσμούς, οι οποίοι δεν επιτρέπουν στα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων να μετακινηθούν. Οι ιονικές ενώσεις παρουσιάζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα που οφείλεται στην κίνηση των ιόντων (ιοντική αγωγιμότητα) η οποία όμως έχει γενικά πολύ χαμηλότερες τιμές από την ηλεκτρονική αγωγιμότητα των αγωγών. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα ιόντα έχουν πολύ μεγαλύτερο μέγεθος από τα ηλεκτρόνια και συνεπώς είναι λιγότερο ευκίνητα.

4.2 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ

Στη γεωφυσική ακολουθείται μία πιο χαλαρή, αλλά πρακτική ταξινόμηση σε καλούς, ενδιάμεσους και πτωχούς αγωγούς ως εξής:

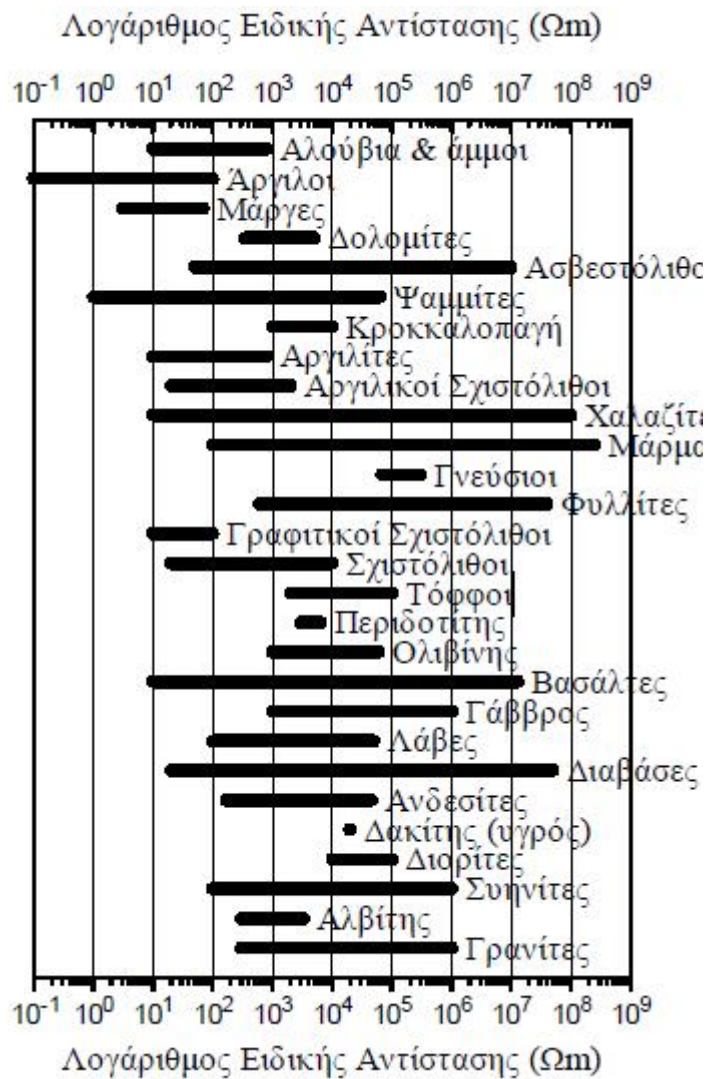
- α) Καλοί αγωγοί: Γεωλογικές ενότητες με ειδική αντίσταση 10^{-8} - $1\Omega\text{m}$
- β) Αγωγοί: Γεωλογικές ενότητες με ειδική αντίσταση 1 - $10^7\Omega\text{m}$
- γ) Πτωχοί αγωγοί: Γεωλογικές ενότητες με ειδική αντίσταση μεγαλύτερη των $10^7\Omega\text{m}$.

Η ομάδα (α) περιλαμβάνει τα μέταλλα, τον γραφίτη, τα σουλφίδια εκτός των σφαλερίτη κιναβάρεως και στιβνίτη, όλα τα αρσενίδια και θειο-αρσενίδια εκτός του SbAs_2 , τα αντιμονιούχα εκτός μερικών ενώσεων του μολύβδου, τα τελλουρίδια και μερικά οξειδία όπως ο μαγνησίτης, μαγγανίτης, πυρολουσίτης και ιλμενίτης. Τα περισσότερα οξειδία, μεταλλεύματα και ένυδρα πορώδη πετρώματα είναι ενδιάμεσοι αγωγοί. Τα κοινότερα πετρογενετικά ορυκτά, πυριτικά, φωσφορικά και τα ανθρακικά, νιτρικά θειικά, βορικά κ.τ.λ. είναι πτωχοί αγωγοί.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζονται τυπικές τιμές διακύμανσης της ειδικής αντίστασης για τους βασικούς τύπους πετρωμάτων και μη διαγεγεννημένων γεωλογικών σχηματισμών. Στην τελευταία περίπτωση, οι τιμές της ειδικής αντίστασης κυμαίνονται όπως αυτές των διαφόρων τύπων ρευστής φάσης (νερού), το οποίο προφανώς αποτελεί και τον βασικό φορέα αγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτούς.

Σε γενικές γραμμές, τα εκρηξιγενή, και μάλιστα τα ηφαιστειακά, πετρώματα έχουν τις μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις και τα ιζηματογενή

τις μικρότερες, με τα μεταμορφωμένα να καταλαμβάνουν τον ενδιάμεσο χώρο. Στο σχήμα 4.1 ειδικά για τα εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, οι μικρές τιμές ειδικής αντίστασης συνήθως αναφέρονται σε κορεσμένα πετρώματα, ενώ οι μεγαλύτερες σε ξηρά.



Σχήμα 4.1 Διακύμανση ειδικών αντιστάσεων των πιο κοινών τύπων πετρωμάτων [13].

Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι γενικά υπάρχουν σημαντικές αλληλοεπικαλύψεις. Επιπλέον, οι ειδικές αντιστάσεις πολλών τύπων

πετρωμάτων μεταβάλλονται σε άμεση συνάρτηση με την ηλικία και λιθολογία τους, αφού το ενεργό πορώδες και η αλατότητά τους εξαρτάται από αμφότερους τους ανωτέρω παράγοντες. Ακόμη και μικρές μεταβολές στην ποσοστιαία συμμετοχή της ρευστής φάσης μπορούν να έχουν τεράστια επίδραση στην ειδική αντίσταση του πετρώματος.

4.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Από όλες τις φυσικές ιδιότητες των γεωλογικών μονάδων, η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι αυτή που παρουσιάζει την μεγαλύτερη και πολλές φορές ακραία διακύμανση, ακόμη και για το αυτό υλικό, ανάλογα με τις συνθήκες.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους είναι [8]:

- Ø Η μηχανική σύσταση του εδάφους. Η άμμος έχει μικρή, η ιλύς μέση και η άργιλος υψηλή αγωγιμότητα.
- Ø Η συμπίεση του εδάφους η οποία αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους.
- Ø Η περιεκτικότητα σε νερό αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- Ø Η αλατότητα. Η αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στο έδαφος αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- Ø Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Εδάφη με μεγάλη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων έχουν μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- Ø Η οργανική ουσία. Η οργανική ουσία αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους, γιατί συγκρατεί πολλά ιόντα.
- Ø Η θερμοκρασία του εδάφους. Κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε τιμές άνω του μηδενός, η ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταβάλλεται ελάχιστα. Όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω του μηδενός, η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώνεται σημαντικά.

Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε ένα έδαφος δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Οι παράγοντες που

μπορούν να επιφέρουν δραστικές αλλαγές στην τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι:

- Ø Η μεταφορά εδάφους π.χ. ισοπέδωση.
- Ø Το βαθύ όργωμα.
- Ø Η χρήση αρδευτικού νερού με πολλά άλατα.
- Ø Η προσθήκη μεγάλης ποσότητας οργανικής ουσίας.
- Ø Η προσθήκη εδαφοβελτιωτικών π.χ. ασβέστη για διόρθωση του pH.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους αυξάνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άλατα του εδάφους. Ωστόσο, η συγκέντρωση (%) σε άλατα σε ένα διάλυμα εξαρτάται και από την ποσότητα του νερού (υγρασία εδάφους). Αν στο σύμπλεγμα τώρα υγρασίας εδάφους και άλατα προσθέσουμε την επίδραση της αγωγιμότητας του εδάφους ως υλικό, τότε καταλήγουμε ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένας συνδυασμός συγκέντρωσης αλάτων, υγρασίας εδάφους και δομής εδάφους. Η σχέση αυτή εκφράζεται μαθηματικά ως εξής [8]:

$$EC = c \cdot EC_a \cdot W + S$$

όπου:

C είναι ο συντελεστής μετάδοσης ένδειξης

EC_a είναι η αγωγιμότητα νερού εδάφους, άρα εξαρτάται από την περιεκτικότητα αλάτων

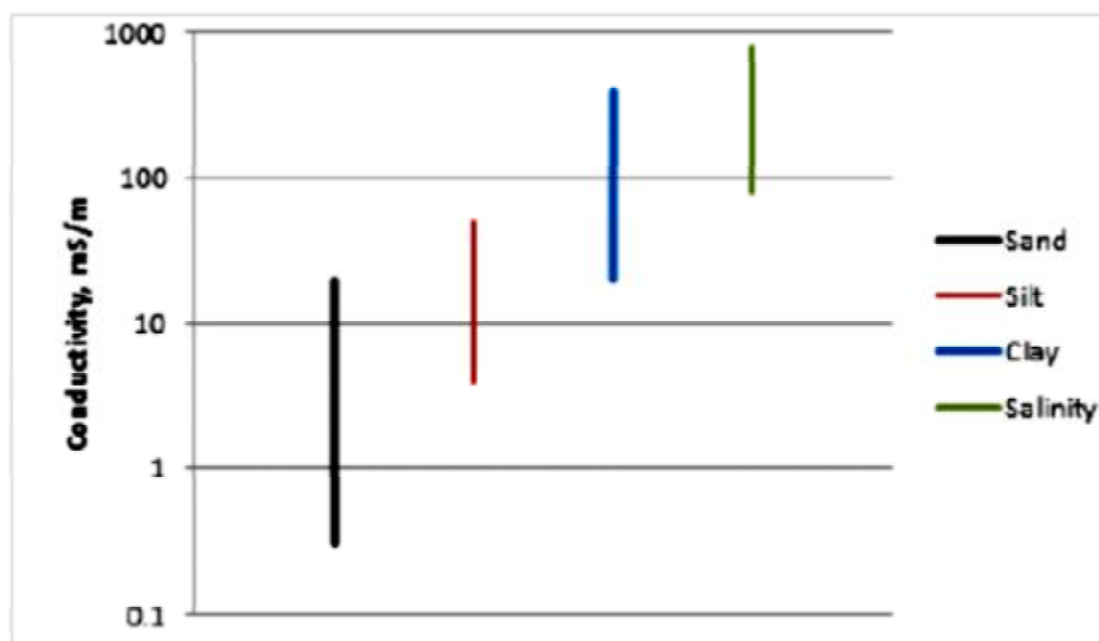
W είναι η περιεκτικότητα σε νερό στο έδαφος

Το γινόμενο W·EC_a είναι η πραγματική συγκέντρωση αλάτων στην ανάλογη παρουσία νερού.

S είναι η αγωγιμότητα εδάφους.

Όσον αφορά τη σχέση ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της αγωγιμότητας του εδάφους (S), αυτή προσδιορίζεται κυρίως από την υφή του εδάφους, τη θερμοκρασία και το πορώδες του εδάφους, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Σχετικά με την υφή του, όσο περισσότερη περιεκτικότητα έχει ένα έδαφος σε άργιλο, τόσο καλύτερος αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος είναι. Η θερμοκρασία του εδάφους είναι ανάλογη με την αγωγιμότητα του. Τέλος, όσο πιο μεγάλο πορώδες έχει ένα

έδαφος, τόσο καλύτερος αγωγός του ηλεκτρισμού είναι, καθώς η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται μέσω των τριχοειδών πόρων που σχηματίζουν μεταξύ τους τα εδαφικά συσσωματώματα.



Σχήμα 4.2 Συμπεριφορά ηλεκτρικής αγωγιμότητας ανάλογα με την υφή του εδάφους [8].

Επίσης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα σχετίζεται με την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων του εδάφους και με την οργανική ουσία. Συγκεκριμένα, η ικανότητα αυτής της ανταλλαγής σε υψηλές τιμές σημαίνει ταυτόχρονα υψηλές ενδείξεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Τα εδάφη, ανάλογα την ένδειξη σε ηλεκτρική αγωγιμότητα, κατατάσσονται σε εδάφη έντονης αλατότητας, σε μέτριας, σε ελαφρώς, σε ελάχιστης και σε καθόλου. Η ταξινόμηση αυτή φαίνεται στον Πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1 Χαρακτηρισμός εδάφους ανάλογα με τα επίπεδα αλάτων και την αγωγιμότητα [8]

Επίπεδο αλατότητας	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (mmho /cm)
Καθόλου	0 ως <2
Ελάχιστης	2 ως <4
Ελαφρώς	4 ως <8
Μέτρια	8 ως <16
Έντονης	≥16

Μια πηγή αλατότητας είναι η εφαρμογή λιπάσματος στο έδαφος. Ο διαφορετικός συνδυασμός στοιχείων στα λιπάσματα διαφοροποιεί την ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως βλέπουμε στο Πίνακα 4.2. Ακόμα, στο πίνακα αυτόν φαίνεται και η έννοια της αλληλεπίδρασης περιεκτικότητας άλατος και ποσότητας νερού. Συγκεκριμένα, έχοντας μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού και αυξάνοντας μόνο την περιεκτικότητα σε λίπασμα (άλατα) από 50 σε 100 ppm βλέπουμε ότι αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Πίνακας 4.2 Λιπάσματα και τιμές Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας [8]

Λίπασμα	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (mmhos/cm)	
	50ppm	100ppm
27-9-18	0,13	0,25
20-20-20	0,20	0,40
30-10-10	0,7	0,14
21-7-7	0,30	0,61
15-0-15	0,36	0,71

4.4 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ARCHIE

Ο νόμος του Archie είναι ένας εμπειρικός νόμος που συσχετίζει την ηλεκτρική ειδική αντίσταση του εδάφους με το πορώδες στην περίπτωση κορεσμένων εδαφών, δηλαδή όταν οι πόροι είναι πλήρως

γεμάτοι με νερό. Σύμφωνα με το νόμο αυτό η ειδική αντίσταση του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$r = a \times \rho_v \times \phi^{-m}$$

όπου:

ρ_v είναι η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων

ϕ είναι το πορώδες, δηλαδή ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνουν οι πόροι προς τον ολικό όγκο

a και m είναι εμπειρικές σταθερές που εξαρτώνται από το εκάστοτε πέτρωμα και κυμαίνονται ως $0.5 \leq a \leq 2.5$ και $1.3 \leq m \leq 2.5$.

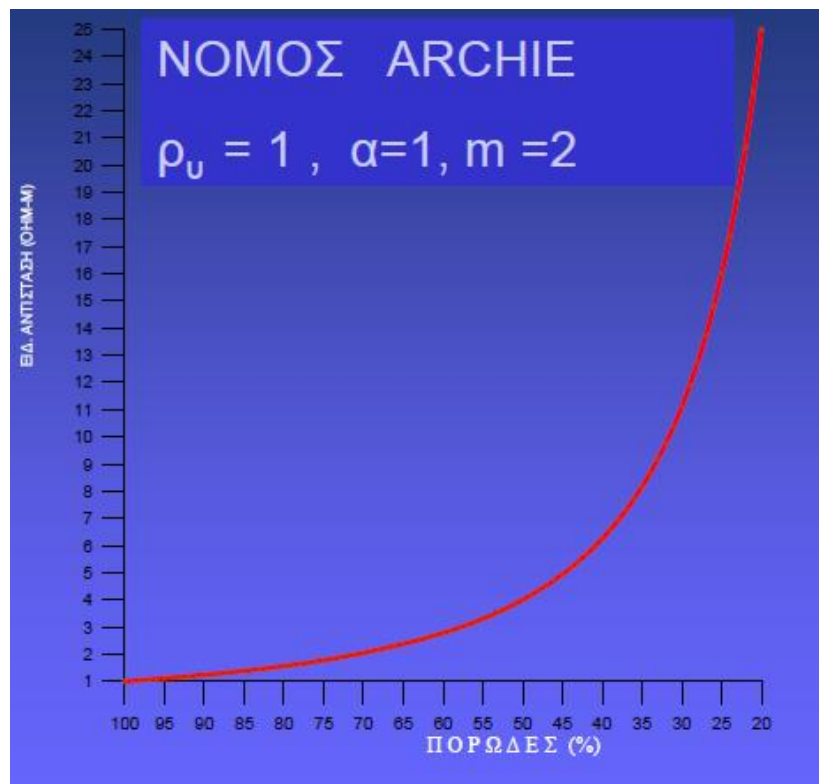
Η μορφολογία των πόρων ενός πετρώματος, είναι αρκετά πολύπλοκη και είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί με απλή γεωμετρία. Σε γενικές γραμμές, αναγνωρίζονται οι παρακάτω μορφολογικοί τύποι πόρων:

1. Χώρος μεταξύ των (ακανόνιστων) κόκκων ιζηματογενούς πετρώματος.
2. Γραμμικές μορφές (μικροδιαρρήξεις, διακλάσεις και μικρορωγμές). Αυτές συνήθως απαντούν σε σκληρά ιζηματογενή και κρυσταλλικά πετρώματα.
3. Υγρά εγκλείσματα (ρευστή φάση) κρυσταλλοσχιστωδών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων.
4. Πομφόλυγες και βακουόλες, ή άλλοι μεγάλοι, καθόλου έως λίγο επικοινωνούντες κενοί χώροι, όπως στα έκχυτα εκρηξιγενή πετρώματα.

Στον παρακάτω πίνακα 4.3 φαίνονται οι τιμές των σταθερών a και m σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται γραφικά η εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από το πορώδες σύμφωνα με το νόμο του Archie.

Πίνακας 4.3 Τιμές των σταθερών του νόμου του Archie όταν η λιθολογία είναι γνωστή [13]

Περιγραφή Πετρώματος	a	m
Χαλαρά συνδεδεμένα πετρώματα και σχηματισμοί (άμμοι, ψαμίτες και τύποι ασβεστολίθων) με πορώδες 25-45%.	0.88	1.37
Μετρίως συγκολλημένα ιζηματογενή πετρώματα περιλαμβανομένων των ψαμιτών και ασβεστολίθων με πορώδες 18-35%.	0.62	1.72
Καλά συγκολλημένα και διαγεννημένα πετρώματα με πορώδες 5-25%.	0.62	1.95
Πομφολυγώδη - εξαιρετικά πορώδη ηφαιστειακά πετρώματα (τόφφοι, λάβες άα, παχόεχοε κλπ.) με πορώδες 20-80%	3.5	1.44
Πυκνά εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα με πορώδες < 4%	1.4	1.58



Σχήμα 4.3 Εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από το πορώδες για συγκεκριμένες τιμές των άλλων παραμέτρων του νόμου του Archie [14].

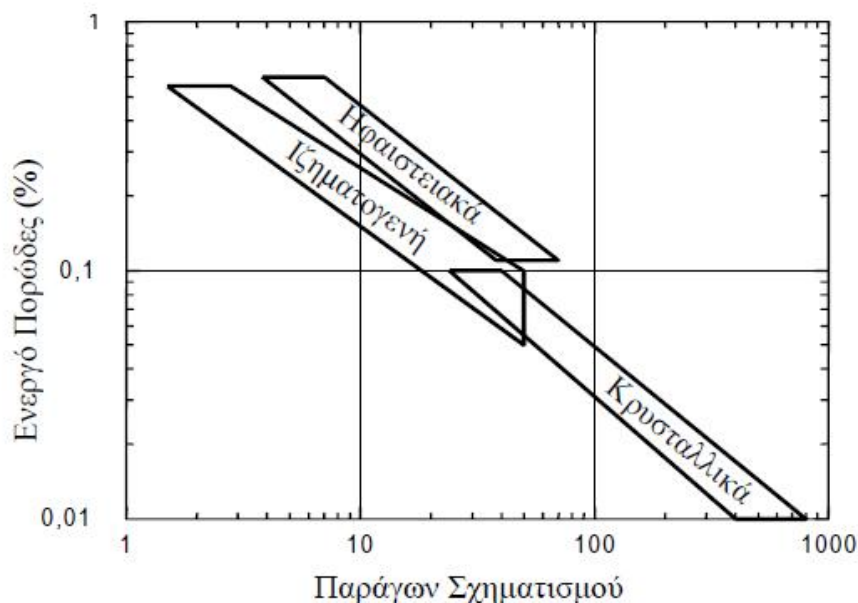
Ο παράγοντας σχηματισμού F ορίζεται από το λόγο της ειδικής αντίστασης του πετρώματος προς την ειδική αντίσταση του νερού των πόρων:

$$F = \frac{r}{r_u}$$

Οπότε σύμφωνα με το νόμο του Archie ο παράγοντας σχηματισμού θα δίνεται από τη σχέση:

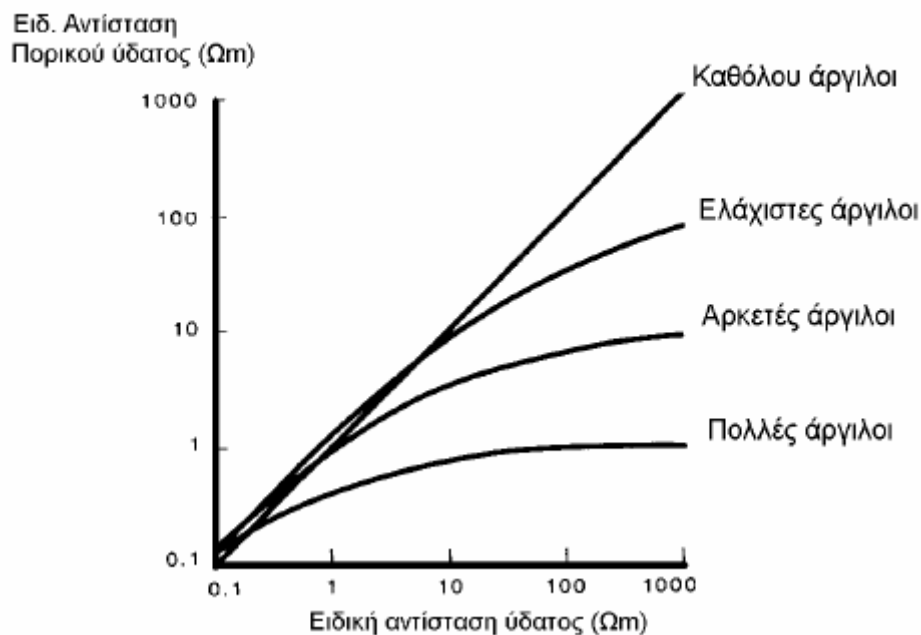
$$F = a \mathcal{F}^{-m}$$

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το εύρος διακύμανσης της σχέσης του πορώδους με τον λογάριθμο του παράγοντα σχηματισμού για τρεις βασικές κατηγορίες πετρωμάτων. Τέτοιου είδους γραφικές παραστάσεις είναι πολύ χρήσιμες για την πρόβλεψη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων και χαρακτηρισμό των πετρωμάτων με βάση ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις.



Σχήμα 4.4 Σχέση μεταξύ του πορώδους και του παράγοντα σχηματισμού [13].

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων εξαρτάται ισχυρά από την αλατότητα που προστίθεται από τα ορυκτά των αργίλων στο νερό των πόρων, κάτι που φαίνεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Επίδραση της αλατότητας στην ειδική αντίσταση του νερού των πόρων [13].

Για δεδομένο πορώδες και ποσοστό πλήρωσης των πόρων με ρευστό, ο νόμος του Archie θα δώσει τις πλέον μεγάλες αγωγιμότητες, λόγω της απλούστερης μορφής και της καλύτερης δυνατότητας επικοινωνίας μεταξύ των πόρων τα οποία αποτελούν βασικές προϋποθέσεις ισχύος του νόμου. Στο αντίθετο άκρο, τα πομφολυγώδη ηφαιστειακά πετρώματα, αν και διαθέτουν πολύ μεγάλο ποσοστό κενών χώρων, συνήθως εμφανίζουν πολύ χαμηλές αγωγιμότητες λόγω της αδυναμίας επικοινωνίας μεταξύ των πόρων.

Περισσότερες μελέτες έχουν γίνει σε ιζηματογενή πετρώματα, κυρίως λόγω της σπουδαιότητάς τους ως ταμιευτήρων κοιτασμάτων

υδρογονανθράκων και φυσικού αερίου. Αρκετές μελέτες της σχέσης της αγωγιμότητας με το πορώδες έχουν επίσης γίνει και σε εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις ο νόμος του Archie φαίνεται να ισχύει σε ικανοποιητικό βαθμό.

Κατά την έρευνα γεωθερμικών συστημάτων, πολλές φορές προέκυψε το πρόβλημα της εκτίμησης της αγωγιμότητας σχηματισμού που περιέχει μερικό τήγμα. Και σε αυτή την περίπτωση ο νόμος του Archie χρησίμευσε ως βάση εκκίνησης για την περιγραφή της αγωγιμότητας.

Η εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από τη θερμοκρασία ακολουθεί τη σχέση:

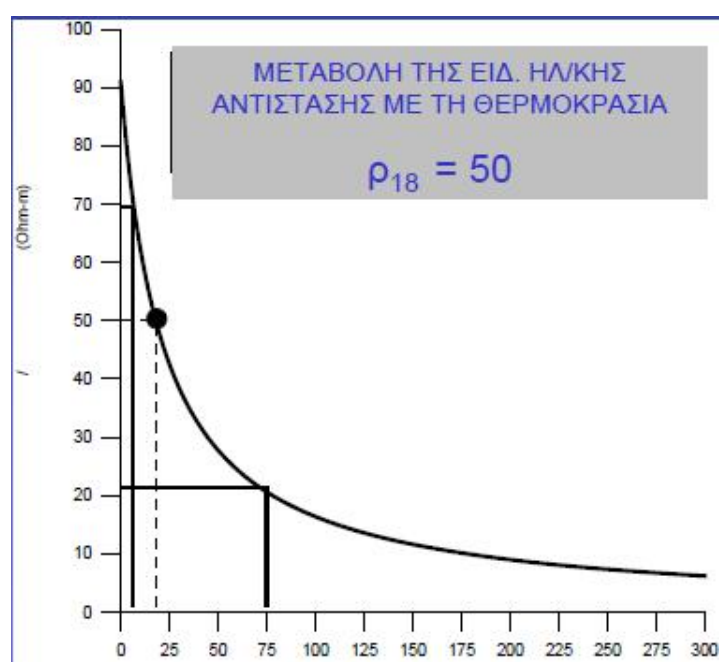
$$r_{\theta} = \frac{r_{18}}{1 + a_{\theta} (\theta - 18)}$$

όπου:

r_{θ} είναι η ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία θ °C

r_{18} είναι η ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία 18 °C

a_{θ} είναι ο θερμικός συντελεστής της ειδικής αντίστασης που συνήθως είναι περίπου ίσος με 0.025/°C



Σχήμα 4.6 Εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από τη θερμοκρασία [14].

Η παραπάνω σχέση βρίσκει σημαντικές εφαρμογές στη γεωθερμία και στη χαρτογράφηση μόνιμα παγωμένων εδαφών. Η γραφική παράσταση της σχέσης αυτής φαίνεται στο σχήμα 4.6

4.5 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η διηλεκτρική αγωγιμότητα χαρακτηρίζει φτωχούς αγωγούς ή μονωτές, οι οποίοι διαθέτουν μικρό αριθμό ελευθέρων ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση αυτή και υπό την επίδραση εξωτερικού, χρονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τα ατομικά ηλεκτρόνια μετατοπίζονται ελαφρά ως προς τους πυρήνες. Αυτός ο διαχωρισμός θετικών και αρνητικών φορτίων (πυρήνων και ηλεκτρονίων στην προκειμένη περίπτωση) είναι γνωστός ως ηλεκτρονική διηλεκτρική πόλωση του υλικού. Με τον ίδιο τρόπο, ιονική και μοριακή πόλωση εμφανίζεται σε υλικά με ιονικούς και μοριακούς δεσμούς αντίστοιχα.

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά K είναι μέτρο της διηλεκτρικής πόλωσης ενός υλικού λόγω εφαρμοζόμενου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αυτή μπορεί να είναι ηλεκτρονική, ιονική ή μοριακή. Ιονική πόλωση εμφανίζουν πολλά πετρογενετικά ορυκτά, ενώ το νερό και οι υδρογονάνθρακες είναι τα μόνα κοινά υλικά που εμφανίζουν μοριακή πόλωση, η οποία είναι το ισχυρότερο από τα τρία φαινόμενα. Με την αύξηση της συχνότητας του ηλεκτρικού πεδίου, η μοριακή και η ιονική πόλωση μειώνονται πολύ γρήγορα.

Έτσι, η διηλεκτρική σταθερά, η οποία είναι ανάλογος του βαθμού πόλωσης μεταβάλλεται αντιστρόφως με την συχνότητα και επιπλέον, είναι ενδεικτική του ποσοστού του νερού στο υλικό. Το νερό έχει αρκετά μεγάλη σχετική διηλεκτρική σταθερά. Για το νερό είναι $K=80$ στις χαμηλές συχνότητες. Ο Πίνακας 4.4 περιέχει τις τιμές των σχετικών διηλεκτρικών σταθερών για διάφορα ορυκτά και πετρώματα. Οι μετρήσεις έχουν γίνει σε συχνότητες άνω των 100kHz. Για πολύ χαμηλές συχνότητες, οι τιμές του Πίνακα 4.4 θα ήταν αυξημένες κατά 30% περίπου.

Πίνακας 4.4 Σχετικές διηλεκτρικές σταθερές ορυκτών και πετρωμάτων
[13]

Ορυκτό	Διηλεκτρική Σταθερά.	Πέτρωμα	Διηλεκτρική Σταθερά
Γαληνίτης	18	Περιδοτίτες	8.6
Σφαλερίτης	7.9 - 69.7	Νορίτες	61
Κορούνδιο	11-13.2	Χαλαζιακοί Πορφύρες	14-49.3
Κασσιτερίτης	23	Διαβάσες	10.5 - 34.5
Αιματίτης	25	Δακίτες	6.8 - 8.2
Ρουτίλιο	31-170	Γρανίτες (ξηροί)	4.8 - 18.9
Φθορίτης	6.2 - 6.8	Γάββροι	8.5 - 40
Απατίτης	7.4 - 11.7	Διορίτες	6
Βαρύτης	7 - 12.2	Σερπεντινίτες	6.6
Οψιδιανός	5.8 - 10.4	Γνεύσιοι	8.5
Θείο (αυτοφυές)	3.6 - 4.7	Ψαμμίτες (υγροί-ξηροί)	4.7 - 12
Ορυκτό άλας	5.6	Συμπαγείς άμμοι (υγρές ως ξηρές)	2.9 - 105
Ανθρακίτης	5.6 - 6.3	Εδάφη (υγρά ως ξηρά)	3.9 - 29.4
Γύψος	5 - 11.5	Βασάλτες	12
Βήρυλος	5.5 - 11.5	Άργιλοι (υγρές ως ξηρές)	7 - 43
Βιοτίτης	4.7 - 9.3	Πετρέλαια	2.07 - .14
Επίδοτο	7.6 - 15.4	Ύδωρ (20°C)	80.36
Ορθόκλαστα	3 - 58	Πάγος	3 - 4.3
Πλαγιόκλαστα	5.4 - 7.1		
Χαλαζίας	4.2 - 5		
Ζιρκόνιο	8.6 - 12		

4.6 Η σημασία της ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους είναι ένα μέτρο το οποίο σχετίζεται με ιδιότητες του εδάφους που επηρεάζουν την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Στις ιδιότητες αυτές περιλαμβάνονται: η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, οι συνθηκες αποστράγγισης, τα επίπεδα οργανικής ύλης, η αλατότητα κ.ά. Νέοι ηλεκτρονικοί, μηχανικοί και χημικοί αισθητήρες κατασκευάζονται για να μετρούν και να χαρτογραφούν πολλές εκτάσεις καλλιεργούμενες η μη. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι η λιγότερο ακριβή σε κόστος μέτρηση χαρακτηριστικών του εδάφους. Μία μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους μπορεί να παρέχει περισσότερα δεδομένα σε μικρότερο χρονικό διάστημα από το παραδοσιακό δειγματικό πλέγμα εδάφους.

Πιο αναλυτικά η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους σχετίζεται με τις παρακάτω ιδιότητες του εδάφους:

Ικανότητα συγκράτησης-αποστράγγισης νερού:

Οι ξηρές περιοχές έχουν διακριτές διαφορές στη δομή του χώματος σε σχέση με αυτές με περίσσεια νερού. Αυτές οι διαφορές μπορούν να διακριθούν μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Τα εδάφη με μέτρια τιμή αγωγιμότητας, τα οποία έχουν εξίσου μέτρια υφή και μέτρια χαρακτηριστικά συγκράτησης-αποστράγγισης νερού τείνουν να είναι τα πιο παραγωγικά. Από την στιγμή που η συγκράτηση-αποστράγγιση νερού είναι τόσο σημαντικός παράγοντας στη παραγωγικότητα του χωραφιού αυτό καθιστά την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας πολύτιμο εργαλείο στα χέρια του παραγωγού.

Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων:

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων σχετίζεται με την παρουσία πηλού και οργανικής ύλης στο έδαφος. Όσο αυξάνονται τα δυο τελευταία, τόσο αυξάνεται και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Έρευνες επιβεβαιώνουν την συσχέτιση ανάμεσα στην ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους.

Απορροφητικότητα

Όσο μεγαλύτερη είναι η απορροφητικότητα του εδάφους τόσο πιο εύκολα αυτό άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Τα πηλώδη εδάφη έχουν περισσότερη απορροφητικότητα σε σχέση με τα αμμώδη εφόσον όλοι οι άλλοι παράμετροι παραμένουν σταθεροί.

Αλατότητα

Μία περίσσεια διαλυμένων αλάτων στο έδαφος εντοπίζεται εύκολα μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Θερμοκρασία

Όσο η θερμοκρασία μειώνεται προς τους 0 °C, που είναι η θερμοκρασία πήξης του νερού, η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώνεται. Κάτω από τους 0 °C οι πόροι του εδάφους απομονώνονται ο ένας από τον άλλο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ραγδαία πτώση της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του.

Πορώδες του εδάφους

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι αύξουσα συνάρτηση του πορώδους.

Περιεκτικότητα σε νερό

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ανάλογη της περιεκτικότητας σε νερό, αφού το νερό είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού

Οξύτητα του εδάφους (pH)

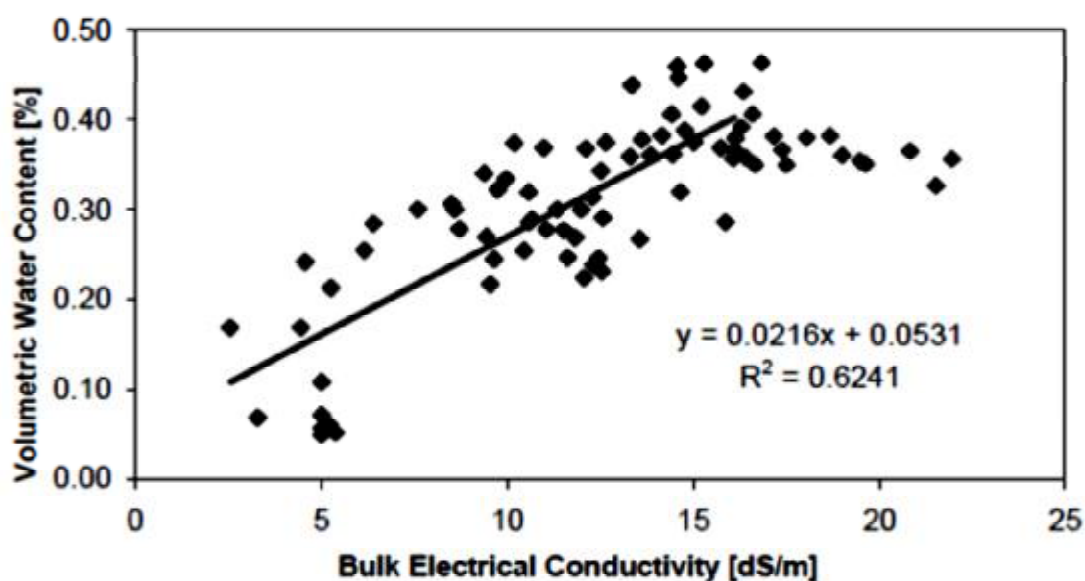
Σε άλλες περιπτώσεις βρίσκουμε ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ανάλογη και σε άλλες ότι είναι αντιστρόφως ανάλογη του pH. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των δύο μεγεθών έχει υπολογιστεί ότι

έχει χαμηλή τιμή και η εκτίμηση του pH από την ηλεκτρική αγωγιμότητα δεν είναι πάντα ασφαλής.

4.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση πολλών ιδιοτήτων του εδάφους. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία έχει μια ικανοποιητική συσχέτιση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα για βάθος ως 1 m και θα μπορούσε να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$\% \text{ Νερό} = 0,0215 \rho + 0,0531$$

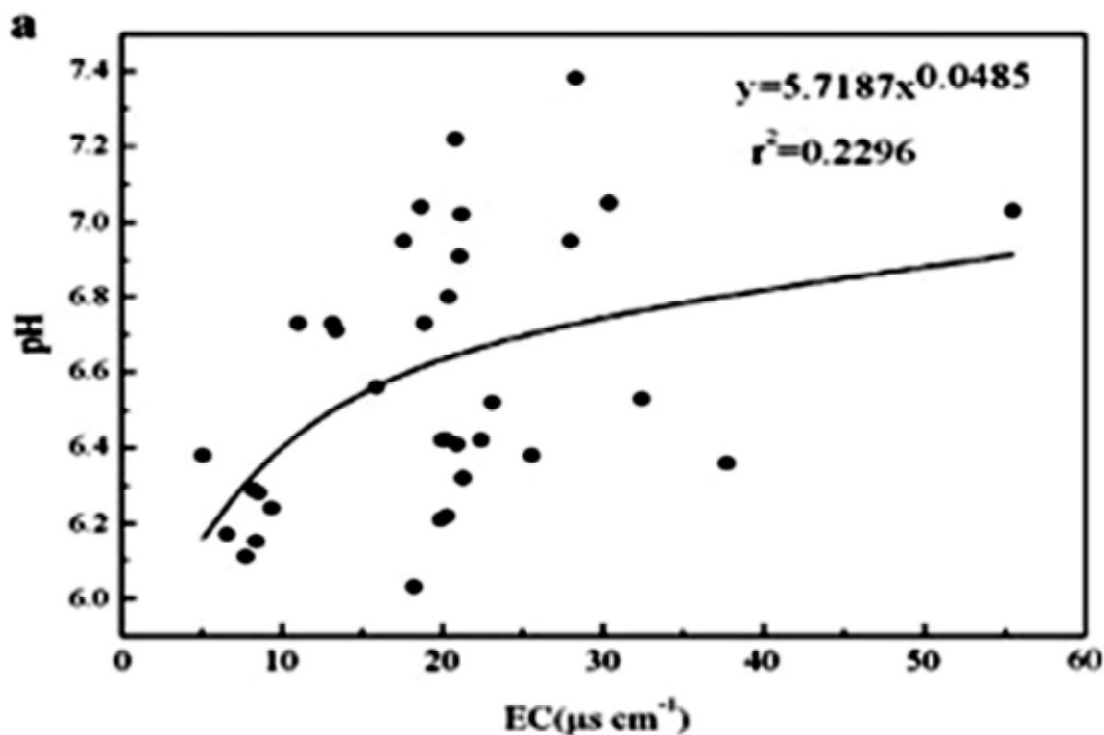


Σχήμα 4.7 Συσχέτιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την % υγρασία του εδάφους [8].

Για το pH το είδος της συμμεταβολής διαφοροποιείται σε αρνητικό και θετικό ανάλογα με το σύνολο των ιόντων στο εδαφικό διάλυμα. Σε περίπτωση θετικής συμμεταβολής, το γραμμικό μοντέλο μπορεί να μην προσφέρεται για τον ακριβή προσδιορισμό του pH. Από την άλλη μεριά ένα εκθετικό μοντέλο, όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.8, παρουσιάζει έναν ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης.

Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι υπάρχουν και περιπτώσεις αρνητικής συμμετάβολης που εκφράζονται με μοντέλα που όμως έχουν χαμηλό συντελεστή συσχέτισης και δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μας δίνει μια ένδειξη για το σύνολο των αλάτων στο έδαφος, αλλά όχι για το είδος των χημικών στοιχείων που την απαρτίζουν. Σε μοντέλα που αναπτύχθηκαν για παρατηρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε βάθος έως 15cm, οι συγκεντρώσεις φωσφόρου και ασβεστίου παρουσιάζουν καλή συσχέτιση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα με συντελεστές. Η συγκέντρωση του αζώτου και του καλίου δεν εκφράζει ικανοποιητικά τη θετική συσχέτιση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ωστόσο, τα ιχνοστοιχεία Cu, Zn, Fe, Mn παρουσιάζουν θετική συμμεταβολή με απόλυτα ικανοποιητικούς συντελεστές συσχέτισης.



Σχήμα 4.8 Θετική συσχέτιση του pH με την ηλεκτρική αγωγιμότητα [8].

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι με την επιλογή κατάλληλου μοντέλου συσχέτισης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να οδηγήσει σε πλήθος πληροφοριών που αφορούν το έδαφος.

Τέλος, έχει βρεθεί σημαντική η συσχέτιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τις αποδόσεις των καλλιεργειών. Ένα παράδειγμα είναι η αρνητική συσχέτιση απόδοσης καλλιεργειών καλαμποκιού, σιταριού και σόγιας σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

4.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Υπάρχουν δύο μέθοδοι εκτίμησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους:

- Ø με επαφή
- Ø χωρίς επαφή με ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή).

Η επίδραση του εδάφους σε κάποιο μαγνητικό πεδίο επαγωγής μετριέται με τη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η επίδραση αυτή σχετίζεται με την εδαφική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής παρουσιάζονται διότι έχει δύσκολη εφαρμογή, απαιτεί συχνή βαθμονόμηση, είναι ευαίσθητη σε παρεμβολές μεταλλικών αντικειμένων και δίνει μετρήσεις που αφορούν ένα και μόνο βάθος.

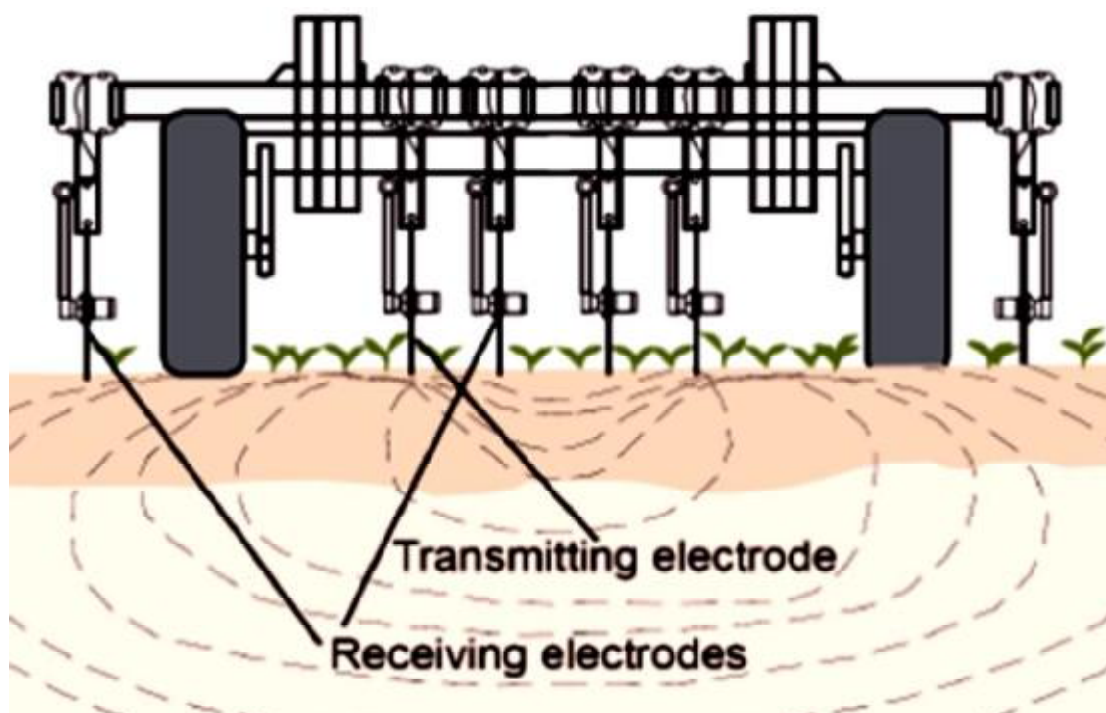
Με την μέθοδο της επαφής (contact method) μετριέται η πτώση δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίων στο έδαφος, η οποία πλεονεκτεί καθώς προσφέρει ευκολία, ταχύτητα και χαμηλό κόστος.

Το σύστημα χαρτογράφησης εδαφών Veris συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους με τη μέθοδο της επαφής και τις δυνατότητες που παρέχει το GPS. Με το

σύστημα αυτό μπορούν να χαρτογραφηθούν μεγάλες εκτάσεις εύκολα και γρήγορα. Ο μηχανισμός σύρεται στην επιφάνεια του εδάφους με έναν αγροτικό ελκυστήρα ή ένα αυτοκίνητο και πραγματοποιεί μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους κάθε δευτερόλεπτο, ενώ με τη βοήθεια του GPS καταγράφει και τη θέση του στον αγρό. Το μοντέλο Veris 3100 καταγράφει τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητάς ταυτόχρονα στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους (0-30 cm) και στο υπέδαφος (0-90 cm). Στη συνέχεια, οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συνδυασμό με το γεωγραφικό στίγμα των σημείων στα οποία αναφέρονται μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου με το κατάλληλο λογισμικό πραγματοποιείται η χαρτογράφηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

4.8.1 Μέτρηση με Επαφή

Χρησιμοποιείται το σύστημα VERIS. Υπάρχουν ηλεκτρόδια εφαρμοσμένα σε 2 ως 3 ζεύγη δίσκων, οι οποίοι είναι προσαρμοσμένοι σε εργαλιοδοκό και το όλο σύστημα έλκεται από έναν γεωργικό ελκυστήρα. Δύο δίσκοι με ηλεκτρόδια είναι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος. Δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος και οι υπόλοιποι δίσκοι με τα ηλεκτρόδιά τους λαμβάνουν το ρεύμα που προκύπτει ανάλογα με την αντίσταση του εδάφους. Ανάλογα το βάθος της μέτρησης επιλέγουμε την απόσταση των δίσκων που δίνουν ηλεκτρικό ρεύμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση των δίσκων-ηλεκτροδίων, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου, άρα και το βάθος του. Ανάλογα με το βάθος μέτρησης που θέλουμε και τις συνθήκες του αγρού, υπάρχει το αντίστοιχο μηχάνημα.



Σχήμα 4.9 Αρχή λειτουργίας του Veris. Στη μέση οι δύο αισθητήρες απορρόφησης του ηλεκτρικού πεδίου και στα άκρα και εσωτερικά οι πηγές ηλεκτρικού ρεύματος και τα αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται [8].

Τα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί από την εταιρεία Veris για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι τα 3100, 3150, 2000XA, QuandEC1000 και Quand 2800. Όλα τα παραπάνω είναι ολοκληρωμένα συστήματα χαρτογράφησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Veris 3100

Ειδικά προσαρμοσμένο μηχάνημα για βαριά συνεκτικά εδάφη με πολύ ανθεκτική κατασκευή και πολύ καλή μετάδοση ηλεκτρικού πεδίου. Παρέχει δυνατότητα γρήγορης εκτέλεσης εργασίας σε πλάτος 235 cm. Το βάθος λειτουργίας του είναι στα 0-30 cm και στα 0-91 cm, μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα ως 25 km/h, ενώ απαιτεί ελκυστήρα τουλάχιστον 30 ίππων.



Εικόνα 4.1 Veris 3100 [8].

Veris 2000 XA

Πρόκειται για μηχάνημα με τα ίδια χαρακτηριστικά κατασκευής και μετάδοσης ηλεκτρικού πεδίου (χωρίς παρεμβολές) σε σχέση με το V3100. Η διαφορά τους είναι ότι παρουσιάζει πολύ μικρότερο μέγεθος, αφού είναι προσαρμοσμένο για ελκυστήρες μικρής ιπποδύναμης και κυρίως για εφαρμογές σε οπωρώνες (πλάτος εργασίας 147 cm). Το βάθος λειτουργίας του είναι στα 0-45 cm και στα 0-91 cm και μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα ως 25 km/h, ενώ απαιτεί ελκυστήρα τουλάχιστον 12-20 ίππους.



Εικόνα 4.2 Εφαρμογές Veris 2000XA πάνω στη γραμμή και σε οπωρώνα [8].

Veris 3150

Το σύστημα αυτό κατασκευαστικά και όσον αφορά την ποιότητα μετρήσεων δεν διαφέρει από τα άλλα δύο. Ωστόσο παρουσιάζεται ως πιο λειτουργικό, καθώς μπορεί να αφαιρεθεί το ακραίο ζεύγος δίσκων και μπορεί να μεταβληθούν και οι αποστάσεις δίσκων-ρόδας. Το μεγάλο πλεονέκτημα του είναι ότι δίνει μια επιπλέον πληροφορία από τον αισθητήρα μέτρησης του pH. Το βάθος λειτουργίας του είναι στα 0-45 cm και στα 0-91 cm και μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα ως 25 km/h, ενώ απαιτεί ελκυστήρα τουλάχιστον 30 ίππων και έχει πλάτος εργασίας 249 cm. Αξίζει να τονιστεί ότι υπάρχει και η δυνατότητα να προστεθούν και αισθητήρες μέτρησης οργανικής ουσίας και ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων.



Εικόνα 4.3 Veris 3150 με τη δυνατότητα αφαίρεσης των ακριανών βραχιόνων [8].

Veris Quand EC1000 και Quand 2800

Τα συγκεκριμένα παρελκόμενα μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι πιο πρακτικά όσον αφορά το μέγεθος και τη διαχείριση χρόνου, καθώς για να είναι εφικτή η έλξη δεν απαιτείται γεωργικός ελκυστήρας, αλλά είναι δυνατό και με συμβατικό αγροτικό αμάξι. Είναι ιδανικά για μικρές καλλιεργούμενες εκτάσεις. Η διαφορά τους είναι ότι το QuandEC1000 λαμβάνει μετρήσεις μόνο σε βάθος 0-30 cm και πλάτος εργασίας 56 cm, ενώ το 2800 παρέχει επιπλέον και το βάθος 0-91 cm και πλάτος εργασίας από 52 ως 77 cm. Και τα δύο μπορούν να αναπτύξουν ταχύτητα ως 24 km/h, ενώ απαιτούν τουλάχιστον 400 κυβικά κινητήρα.



Εικόνα 4.4 Μικρά σε μέγεθος και ευέλικτη λειτουργία των VerisQuandEC1000 και Quand 2800 [8].

4.8.2 Μέτρηση χωρίς Επαφή

Στη μέθοδο αυτή το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, καθώς το όργανο δεν έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Η συσκευή αποτελείται από έναν πομπό που παράγει ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και έναν δέκτη, στην άλλη άκρη, που ανιχνεύει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που προκύπτει ανάλογα με την ικανότητα του εδάφους να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι, όσο μεγαλύτερη αγωγιμότητα παρουσιάζει ένα έδαφος, τόσο υψηλότερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προκύπτει.

Έχουν αναπτυχθεί δύο συστήματα που χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές:

- Ø EM38 από την εταιρεία Geonix Limited.
- Ø GEM-2 από την εταιρεία Georex.

Σύστημα EM38

Το σύστημα αυτό έχει δύο δέκτες και πομπό. Η διαμόρφωση πομπού-δέκτη είναι στα 0,5 και στο 1 cm, έτσι ώστε να είναι εφικτές οι μετρήσεις σε βάθη 0,75 και 1,5 m. Αν περιστρέψουμε το όργανο ωστόσο σε οριζόντιο προσανατολισμό, μπορεί να πάρει και επιφανειακές παρατηρήσεις 0,375 με 0,75 m.

Θεωρείται πρακτικό σύστημα με το οποίο μπορούμε είτε να το τοποθετήσουμε στο γεωργικό ελκυστήρα είτε χειρωνακτικά να πάρουμε μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας, αφού είναι ένα ελαφρύ σύστημα και έχει τη δυνατότητα λειτουργίας μπαταρίας έως και 25 ώρες. Επίσης, έχει και αυτό τη δυνατότητα αποθήκευσης, μεταφοράς και επεξεργασίας δεδομένων σε ολοκληρωμένο σύστημα χαρτογράφησης. Έχουν αναφερθεί προβλήματα στην μετάδοση του σήματος όταν αυξάνονται οι θερμοκρασίες λειτουργίας, ωστόσο σύμφωνα με τον κατασκευαστή στο τελευταίο μοντέλο του συστήματος το πρόβλημα αυτό έχει ξεπεραστεί. Παρόμοια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν και τα συστήματα Dualem 1 και 2 με διαφορετική ωστόσο διαμόρφωση οργάνων.



Εικόνα 4.5 Σύστημα EM38 [8].

GEM-2

Το σύστημα αυτό είναι ψηφιακό, αλλά στηρίζεται επίσης στην ίδια αρχή λειτουργίας. Τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι ότι μπορούμε εμείς να καθορίσουμε τα βάρη μετρήσεων αγωγιμότητας (μέσω του καθορισμού ρυθμού συχνοτήτων) και ότι οι ενδείξεις μπορούν να φτάσουν ως 30 m βάθος σε περιπτώσεις που έχουμε έδαφος αντίστασης $<100\text{ohm/m}$. Ακόμα, σαν σύστημα παρέχει επιπλέον δυνατότητες

επεξεργασίας και ανάλυσης των αποτελεσμάτων και την δυνατότητα χαρτογράφησης. Είναι το ίδιο πρακτικό με το EM-38.



Εικόνα 4.6 Σύστημα GEM-2 [8].

4.9 Σύγκριση ΤΩΝ δύο μεθόδων μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Παρόλη την υψηλή ποιότητα μετρήσεων και των δύο συστημάτων, παρατηρήθηκαν μεταξύ των διαφορές όσον αφορά τις ενδείξεις. Έχει παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων έχουν καλύτερη συμφωνία όταν πρόκειται για μετρήσεις που γίνονται σε κάποιο βάθος ενώ η συμφωνία είναι χαμηλότερης ποιότητας όταν πρόκειται για επιφανειακές μετρήσεις. Αυτές οι διαφοροποιήσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο στον χρόνο υστέρησης της μέτρησης σε κάθε μέθοδο.

Η καλύτερη συσχέτιση με την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και με την υφή του εδάφους στα επιφανειακά στρώματα προέκυψε από τις επιφανειακές ενδείξεις του Veris.

Πρακτικά, το Veris δεν είναι τόσο λειτουργικό λόγω του όγκου του όσο είναι τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα που μπορούμε να κάνουμε και μετρήσεις ακόμα και εμείς χειρωνακτικά.

Μεταξύ των συστημάτων της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου πιστεύεται ότι το πλεονέκτημα του EM-38 σε σχέση με το Dualem είναι ότι έχει πιο ακριβείς μετρήσεις, ενώ το κύριο πλεονέκτημα του Dualem είναι η χαμηλότερη τιμή του.

4.10 ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Ανήκει στις θερμικές μεθόδους αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών γιατί βασίζεται στην αρχή της αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους για την αύξηση της αποδοτικότητας απομάκρυνσης οργανικών ρύπων μέσω πτητικότητας. Στις θερμοκρασίες τις οποίες επιτυγχάνονται οι οργανικοί ρύποι πρακτικά εξατμίζονται ή διασπώνται. Τα αέρια που προκύπτουν από την εξάτμιση συλλέγονται και επεξεργάζονται στη συνέχεια από κατάλληλες διατάξεις. Ο πιο κοινός τρόπος θέρμανσης των εδαφών είναι η διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος η οποία, λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης που παρουσιάζει το έδαφος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας. Η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αφενός ξηραίνει το έδαφος, δημιουργώντας ρωγμές και αυξάνοντας το πορώδες και τη διαπερατότητα του και αφετέρου ενισχύει την εξάτμιση των υφιστάμενων ρύπων, οι οποίοι μεταφέρονται στην αέρια φάση.

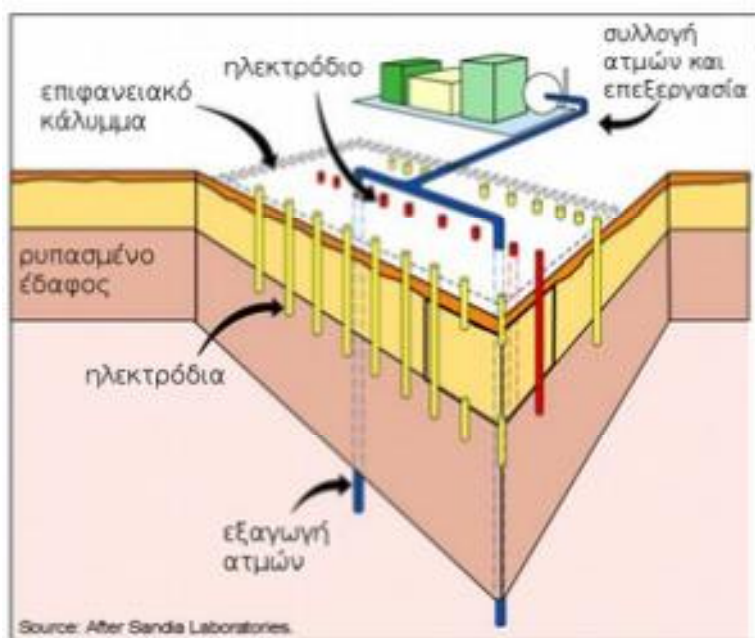
Για την εφαρμογή της παραπάνου μεθόδου απαιτείται η διάνοιξη γεωτρήσεων ώστε να τοποθετηθούν ηλεκτροδία με σκοπό τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε επιλεγμένα βάθη. Οι γεωτρήσεις αυτές χρησιμεύουν και για τη συλλογή των αερίων που προκύπτουν από τη

θέρμανση του εδάφους. Μετά τη συλλογή των αερίων απαιτείται η επεξεργασία τους σε εγκαταστάσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Μια ομάδα μηχανισμών θέρμανσης του εδάφους (χρήση ηλεκτρικών αντιστάσεων, ραδιοκύματα, ηλεκτρομαγνητισμός) αποτελούν τα συχνότερα μέσα για την αύξηση του ρυθμού πτητικότητας ημι-πτητικών ρύπων με σκοπό την ευκολότερη εξαγωγή τους από το έδαφος.

Η χρήση της μεθόδου περιορίζεται στην αντιμετώπιση οργανικών ρύπων και εφαρμόζεται insitu στην περιοχή που χρήζει αποκατάστασης. Το ποσοστό της εργασίας του εδάφους είναι σημαντικό για να διεκαπεραιωθεί επιτυχώς η διαδικασία.

Μια τυπική διάταξη της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10 και αποτελείται από τρεις σειρές ηλεκτροδίων τοποθετημένες σε συγκεκριμένο βάθος. Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση και η θερμοκρασία του εδάφους αρχίζει να ανεβαίνει ενώ παράλληλα απομακρύνεται η υγρασία του.



Σχήμα 4.10 Τυπική διάταξη θέρμανσης του εδάφους με ηλεκτρικές αντιστάσεις [9].

Περιοριστικοί παράγοντες για την εφαρμογή της μεθόδου αποτελούν η πτητικότητα του ρύπου, η έλλειψη αέρα σε κορεσμένα περιβάλλοντα και η διαπερατότητα του εδάφους στη ροή των εισερχόμενων αερίων.

5. ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

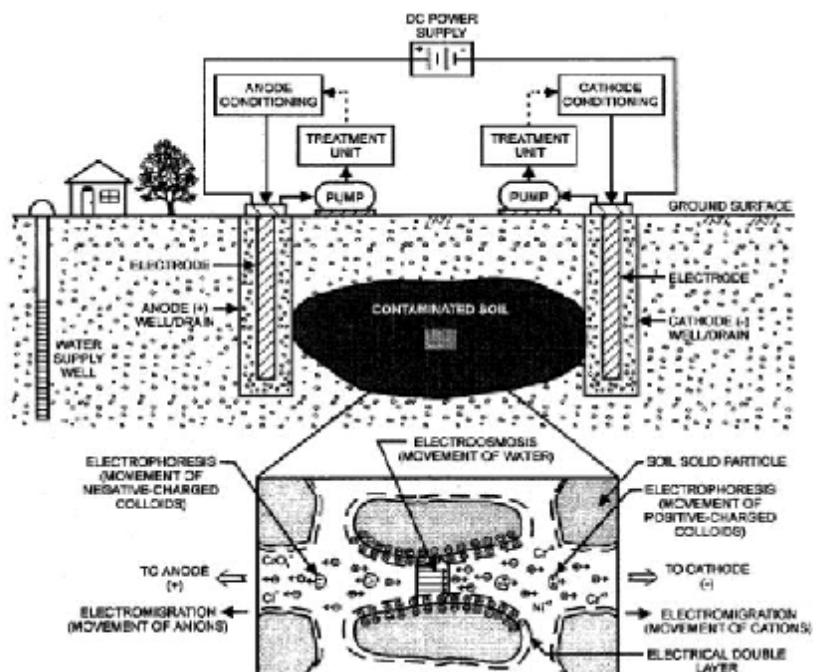
5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ηλεκτροκινητική αποκατάσταση (electrokinetic remediation) είναι μία νέα αλλά πολλά υποσχόμενη τεχνική αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών. Εφαρμόζεται *insitu* και παρουσιάζει υψηλή απόδοση απορρύπανσης. Αναφέρεται επίσης και με τα ονόματα: ηλεκτροεπανόρθωση (electro-reclamation) και ηλεκτροχημική απορρύπανση (electrochemical decontamination).

Οι απαιτήσεις της μεθόδου για την εφαρμογή περιλαμβάνουν συνεχές ρεύμα με πυκνότητα χαμηλής τιμής, της τάξης των μερικών mA/cm². Η δίοδος του συνεχούς ρεύματος από το έδαφος επιφέρει φυσικοχημικές και υδρολογικές αλλαγές στη μάζα του εδάφους, προκαλώντας τη μεταφορά των ρύπων με συνδυασμένους μηχανισμούς.

Η βασική αρχή της τεχνολογίας της ηλεκτροκινητικής επεξεργασίας εδαφών είναι η εισαγωγή ηλεκτροδίων (ανόδου και καθόδου) στο έδαφος και η εφαρμογή χαμηλής συνεχούς τάσης με αποτέλεσμα μεταξύ των ηλεκτροδίων να αναπτύσσεται ηλεκτρικό πεδίο. Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα φορτισμένα είδη του εδάφους αρχίζουν να κινούνται, με αποτέλεσμα τόσο τα υπάρχοντα ιόντα, όσο και το νερό να κινούνται προς τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια (ανάλογα με το ηλεκτρικό τους φορτίο). Πιο συγκεκριμένα, τα μεταλλικά κατιόντα, όπως αμμωνιακά κατιόντα, και τα θετικά φορτισμένα οργανικά συστατικά κινούνται προς την κάθοδο, ενώ τα ανιόντα όπως για παράδειγμα τα ιόντα του χλωρίου του φθορίου και του κυανίου, καθώς και αρνητικά φορτισμένα οργανικά συστατικά κινούνται προς την άνοδο.

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται ένα βασικό και ένα όξινο μέτωπο κοντά στα ηλεκτρόδια, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1 Σχηματική αναπαράσταση της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης ρυπασμένου εδάφους [10].

5.2 Είδη ρύπων που απομακρύνονται με την ηλεκτροκινητική αποκατάσταση

Ως ρύποι που απομακρύνονται με την ηλεκτροκινητική αποκατάσταση αναφέρονται οι παρακάτω ομάδες:

- Ø Βαρέα μέταλλα: μόλυβδος, υδράργυρος, κάδμιο, νικέλιο, χαλκός, ψευδάργυρος, χρώμιο
- Ø Ραδιενεργά στοιχεία: Cs^{137} , Sr^{90} , Co^{60} , U^{235}
- Ø Τοξικά ανιόντα: νιτρικά και θειικά ιόντα
- Ø Πυκνά μη-υδατικής φάσης υγρά (DNAPLs)

- Ø Κυανίδια
- Ø Πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες: πετρέλαιο diesel, βενζίνη, κηροζίνη και λάδια λίπανσης
- Ø Εκρηκτικά
- Ø Μείγματα οργανικών και ιοντικών ρύπων
- Ø Αρωματικοί υδρογονάνθρακες (TCE)
- Ø Μη-αρωματικοί οργανικοί ρύποι (BTEX)
- Ø Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH)

5.3 Διεργασίες μεταφοράς

Οι σημαντικότερες διαδικασίες μεταφοράς ρύπων που συμβαίνουν υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, έχουν να κάνουν με τη ροή μάζας μέσω κυρίως των φαινομένων της διάχυσης, της ηλεκτρομετανάστευσης, της ηλεκτροώσμωσης και της ηλεκτροφόρησης. Όλα αυτά τα φαινόμενα μεταφοράς των ρύπων περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

5.3.1 Διάχυση

Διάχυση ορίζεται ως η μεταφορά μάζας από μία περιοχή μεγαλύτερης συγκέντρωσης σε μία περιοχή μικρότερης συγκέντρωσης. Κινητήρια δύναμη της διάχυσης είναι η κλίση της συγκέντρωσης και σκοπό έχει την εξισορρόπηση των συγκεντρώσεων.

5.3.2 Ηλεκτρομετανάστευση

Έστω ότι εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση σε ρυπασμένο έδαφος μέσω ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στο έδαφος. Τότε λαμβάνει χώρα μετακίνηση των φορτισμένων ιόντων. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα έλκονται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος), και τα αρνητικά ιόντα κινούνται προς το θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος). Ηλεκτρομετανάστευση ονομάζεται επακριβώς η μεταφορά ιόντων και συμπλόκων ιόντων προς το ηλεκτρόδιο του αντίθετου φορτίου.

Ο ρυθμός ηλεκτρομετανάστευσης στο έδαφος εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Ø Την πυκνότητα της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος

- Ø Το μέγεθος των κόκκων
- Ø Την ευκινησία των ιόντων
- Ø Την ολική συγκέντρωση των ιόντων
- Ø Τη συγκέντρωση των ρύπων

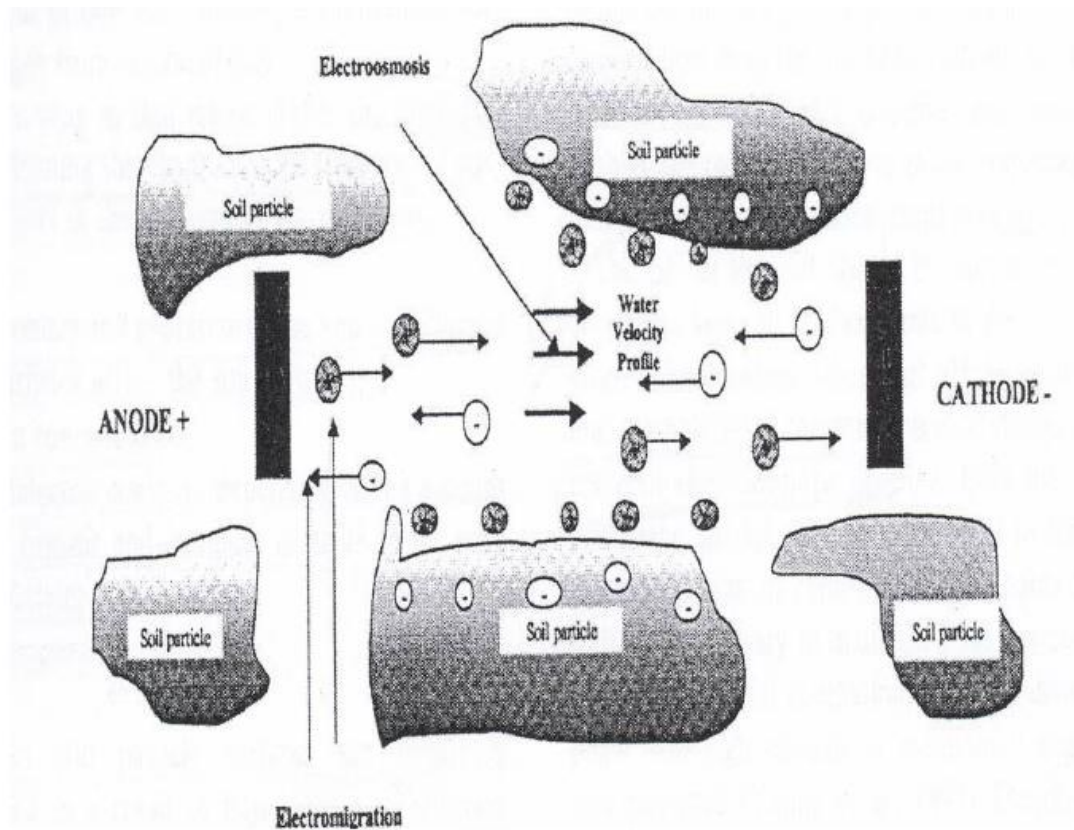
Η απόδοση της διαδικασίας είναι ανεξάρτητη από την διαπερατότητα του ρευστού στο έδαφος. Επηρεάζεται όμως από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού των πόρων και το μήκος της διαδρομής, που με τη σειρά τους εξαρτώνται από την υγρασία που περιέχεται στο έδαφος. Επιπλέον, η ηλεκτρομετανάστευση δεν εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε χονδρόκοκα όσο και λεπτόκοκα εδάφη.

5.3.3 Ηλεκτροόσμωση

Ηλεκτροόσμωση είναι η μετακίνηση της υγρασίας του εδάφους ή του υπόγειου νερού από την άνοδο στην κάθοδο του ηλεκτρολυτικού κελιού. Η κίνηση αυτή του υπόγειου νερού συμπαρασύρει τα μη-ιονισμένα είδη μαζί με το νερό και έχει σαν αποτέλεσμα τον περαιτέρω καθαρισμό του ρυπασμένου πλούμιου.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτροοσμωτική μεταφορά των ρύπων στο έδαφος είναι:

- Ø Η κινητικότητα και ενυδάτωση των ιόντων και των φορτισμένων σωματιδίων στην υγρασία του εδάφους.
- Ø Η συγκέντρωση ιόντος.
- Ø Η διηλεκτρική σταθερά, εξαρτώμενη από την ποσότητα των οργανικών και ανόργανων σωματιδίων στο διάλυμα των πόρων.



Σχήμα 5.2 Σχηματική αναπαράσταση της ηλεκτροώσμωσης και της ηλεκτρομετανάστευσης [10].

5.3.4 Ηλεκτροφόρηση

Είναι η μεταφορά των φορτισμένων σωματιδίων ή κολλοειδών λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου. Οι ρύποι μεταφέρουν τα κινούμενα σωματίδια μέσω της σύνδεσης τους με αυτά. Η ηλεκτροκινητική διαδικασία εντείνεται με την χρήση κατάλληλων ουσιών (απορρυπαντικών ή αντιδραστηρίων) οι οποίες αυξάνουν τον ρυθμό μετακίνησης των ρύπων προς τα ηλεκτρόδια. Όταν εισάγονται απορρυπαντικά στο εδαφικό διάλυμα, η ηλεκτροφόρηση είναι πολύ σημαντική γιατί τότε δημιουργούνται φορτισμένα σωματίδια με άλλα είδη.

5.3.5 Άλλοι Μηχανισμοί

Επιπλέον μηχανισμοί που επηρεάζουν, σε μικρότερο βαθμό, την διαδικασία της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης είναι οι εξής:

- ∅ προσρόφησης-εκρόφησης,
- ∅ κατακρήμνισης και
- ∅ διαλυτοποίησης.

Είναι σημαντικό, πριν την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης να ληφθούν υπόψη και να μελετηθούν όλες οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα.

5.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η ηλεκτρομετανάστευση και η ηλεκτροώσμωση είναι οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης ρύπων κατά την εφαρμογή της ηλεκτροκινητικής μεθόδου. Η ηλεκτροώσμωση είναι πιο αποτελεσματική στην απομάκρυνση κατιόντων από ότι ανιόντων. Αντίθετα, η ηλεκτρομετανάστευση έχει πολύ μεγάλη σημασία και για τα ανιόντα και για τα κατιόντα. Η διάχυση παίζει έναν σχετικά σταθερό αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις όχι πολύ σημαντικό ρόλο, για την μεταφορά και των ανιόντων και των κατιόντων.

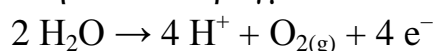
Η ηλεκτροφόρηση, η οποία αναφέρεται στην μεταφορά των φορτισμένων σωματιδίων υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού ρεύματος, μπορεί να είναι ένας σημαντικός μηχανισμός για τις ιλύες, αλλά δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική για την μεταφορά των ρύπων μέσα στο έδαφος. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των κολλοειδών αιωρημάτων, τα φορτισμένα σωματίδια έλκονται με ηλεκτροστατικές δυνάμεις από το ένα ηλεκτρόδιο και απωθούνται από το άλλο. Τα αρνητικά φορτισμένα αργιλικά σωματίδια κινούνται προς την άνοδο και τα θετικά φορτισμένα σωματίδια κινούνται προς την κάθοδο. Αυτός είναι ακριβώς ο μηχανισμός της ηλεκτροφόρησης.

Η διαφορά μεταξύ ηλεκτροφόρησης και ηλεκτροώσμωσης είναι ότι η πρώτη περιλαμβάνει την μεταφορά ξεχωριστών σωματιδίων μέσω του νερού ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει την μεταφορά του νερού μέσω ενός

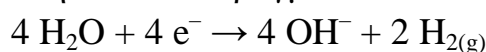
δικτύου συνεχών εδαφικών σωματιδίων. Η ηλεκτροκινητική αποκατάσταση του εδάφους βασίζεται σε μηχανισμούς αλληλεπίδρασης στους οποίους συμπεριλαμβάνεται και η συμμεταφορά, η οποία δημιουργείται από την ηλεκτροσμωτική ροή και την εξωτερικά εφαρμοζόμενη υδραυλική πίεση. Επιπλέον, περιλαμβάνονται η διάχυση των υδρογονοκατιόντων προς την κάθοδο και η μετανάστευση των κατιόντων και των ανιόντων προς τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια.

Οι πιο σημαντικές αντιδράσεις μεταφοράς ιόντων που συμβαίνουν κατά την εφαρμογή της ηλεκτροκινητικής μεθόδου έχουν να κάνουν με την ηλεκτρόλυση του νερού.

Στην άνοδο πραγματοποιείται η αντίδραση:



Στην κάθοδο πραγματοποιείται η αντίδραση:



Όταν από τα ηλεκτρόδια περάσει ρεύμα, η ηλεκτρόλυση του νερού οδηγεί στο σχηματισμό ιόντων, υδρογονοκατιόντων (H^+) στην άνοδο και ιόντων υδροξυλίου (OH^-) στην κάθοδο. Στην ουσία κάθε άνοδος είναι μία πηγή οξέων (H^+) και κάθε κάθοδος μία πηγή βάσεων (OH^-). Τα ηλεκτρόδια και οι κυκλοφορούμενοι ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται για να προμηθεύσουν και να απομακρύνουν τα ιόντα από το μείγμα εδάφους και νερού.

Τα υδρογονοκατιόντα που παράγονται στην άνοδο και τα υδροξυλιοανιόντα που παράγονται στην κάθοδο, δημιουργούν ένα όξινο και ένα βασικό μέτωπο στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, τα οποία οδεύουν στα αντίθετα ηλεκτρόδια με ηλεκτρομετανάστευση, διάχυση και συμμεταφορά, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτροσμωτικής ροής. Όταν τα δύο μέτωπα συναντηθούν, το έδαφος μεταξύ των ηλεκτροδίων θα χωριστεί σε δύο ζώνες, στη χαμηλή και υψηλή ζώνη pH, με απότομη αναπήδηση του pH μεταξύ τους.

Η μετακίνηση του όξινου μετώπου μαζί με τη μετανάστευση και τη μετατόπιση των κατιόντων και ανιόντων υπό την επίδραση του ηλεκτρικού δυναμικού αποτελεί τον κύριο μηχανισμό απομάκρυνσης των ρύπων από τα εδάφη.

Η κίνηση του όξινου μετώπου και η ενέργεια των H^+ οδηγούν στην απελευθέρωση των προσροφημένων κατιόντων στο υγρό των πόρων. Αν δεν ουδετεροποιηθεί από την άφιξη του όξινου μετώπου, το βασικό

μέτωπο, που παράγεται στην κάθοδο από την ηλεκτρόλυση, θα προκαλέσει κατακρήμνιση των περισσότερων βαρέων μετάλλων και των ραδιενεργών στοιχείων, σχηματίζοντας υδροξείδια τα οποία είναι διαλυτά στο νερό. Το ποσοστό της κατακρήμνισης θα διαφέρει για κάθε είδος και θα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το pH του εδάφους και του υγρού των πόρων στους οποίους θα καταλήξει καθώς και από τις συγκεντρώσεις όλων των χημικών ειδών που εμπλέκονται. Όταν οι ρύποι διαλυθούν, μπορούν ελεύθερα να μεταναστεύσουν προς την άνοδο ή την κάθοδο υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, οι ρύποι περνούν μέσω της μεμβράνης των ηλεκτροδίων και απομακρύνονται από το έδαφος για περαιτέρω επεξεργασία και ανάκτηση. Η απομάκρυνση των ρύπων μέσω της ηλεκτροκινητικής διαδικασίας εντείνεται με την χρήση απορρυπαντικών ή αντιδραστηρίων, τα οποία χρησιμοποιούνται με σκοπό την αύξηση του ρυθμού μετακίνησης των ρύπων.

5.5 Απόδοση απομάκρυνσης ρύπων

Ο βαθμός της απορρύπανσης του εδάφους εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Ø Τα χημικά είδη και τη συγκέντρωση των ρύπων στο εδαφικό διάλυμα, οι οποίες επηρεάζουν πολλές πιθανές αλληλεπιδράσεις (προσρόφηση/εκρόφηση, συμπλοκοποίηση, κατακρήμνιση, διαλυτοποίηση κ.ά.).
- Ø Την προετοιμασία του δείγματος, τον τύπο του εδάφους, τον κορεσμό του, την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και οργανικά, το pH και τις χημικές διαδικασίες στα ηλεκτρόδια.
- Ø Την ταχύτητα στους πόρους του διαλύματος. Η ταχύτητα εξαρτάται από διάφορες κινητικές δυνάμεις (εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση, υδραυλική πίεση και κλίση συγκέντρωσης). Επίσης, η ταχύτητα εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους, μόνο όμως όσον αφορά το ηλεκτροοσμωτικό φαινόμενο.

Στη συνέχεια αναλύονται περαιτέρω οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης.

5.5.1 Σύσταση του Εδάφους

Το ποιο έδαφος θα επιλεγεί για τη διαδικασία ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης είναι ο κυριότερος παράγοντας και πρέπει να γόνεται με μεγάλη προσοχή. Για να γίνει η ορθή επιλογή, πολλές φορές απαιτούνται πειράματα προεπεξεργασίας του εδάφους. Η ηλεκτροκινητική διαδικασία εφαρμόζεται σε κορεσμένα ή ακόρεστα εδάφη, σε διαλύματα ιλύος και σε ιζήματα. Προκειμένου η μέθοδος να έχει αποτέλεσμα, τα εδάφη πρέπει να έχουν χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, υδατοδιαλυτούς ρύπους και σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις ιόντων τα οποία δεν επιθυμείται να απομακρυνθούν. Έχει βρεθεί ότι τα καταλληλότερα εδάφη για αποκατάσταση τοξικών μετάλλων είναι αυτά με καολινίτη, τα αργιλικά και τα αμμώδη. Συγκεκριμένα το αργιλώδες έδαφος συνιστάται γιατί έχει χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, μειωμένο δυναμικό οξειδοαναγωγής, ελαφρώς αλκαλικό pH (το οποίο είναι κατάλληλο για αποκατάσταση από βαρέα μέταλλα), υψηλή κατιονεναλλακτική ικανότητα και υψηλή πλαστικότητα.

Ο υψηλότερος βαθμός απομάκρυνσης τοξικών μετάλλων (πάνω από 90%) έχει επιτευχθεί για αργιλώδη εδάφη χαμηλής διαπερατότητας ενώ για πορώδη εδάφη υψηλής διαπερατότητας, όπως τύρφη, ο βαθμός της απομάκρυνσης ήταν μόνο 65%. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η ηλεκτροκινητική απομάκρυνση εστέρων και φαινολών από κορεσμένα αργιλώδη εδάφη που περιείχαν καολινίτη ήταν μεγαλύτερη από 94%.

Οι εφαρμογές της μεθόδου της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης έχουν επιδείξει 85-95% ικανότητα απομάκρυνσης αρσενικού, καδμίου, χρωμίου, καβαλτίου, υδραργύρου, νικελίου, μαγγανίου, μολυβδενίου, ψευδαργύρου, αντιμονίου και μολύβδου από χαμηλής διαπερατότητας εδάφη, π.χ. χώμα, τύρφη, καολινίτη, υψηλής καθαρότητας ψιλού quartz, καθώς επίσης αργιλώδους άμμου.

Γίνονται σημαντικές προσπάθειες να βελτιωθεί η ικανότητα απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων από εδάφη υψηλής προσροφητικής ικανότητας. Η ηλεκτροκινητική αποκατάσταση τέτοιων εδαφών χρειάζεται υψηλότερη ηλεκτρική τάση, χρόνο αποκατάστασης, και είναι πιο ενεργοβόρα σε σύγκριση με εδάφη όπως καολινίτη. Όσο υψηλότερο είναι, τέλος, το περιεχόμενο σε ανθρακικά και οργανικά υλικά στο

έδαφος, τόσο χαμηλότερη είναι η ικανότητα απομάκρυνσης των βαρέων μετάλλων.

5.5.2 Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα του εδάφους είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για την εφαρμογή της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης του. Μαζί με το ρευστό των πόρων και του εδάφους, η αγωγιμότητα επηρεάζει το ρυθμό ηλεκτροωσμωτικής ροής.

5.5.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία επηρεάζει την αγωγιμότητα, την ευκινησία των ιόντων, την ηλεκτροώσμωση καθώς και τις αντιδράσεις ρόφησης. Μέσω αυτών επηρεάζεται έμμεσα η απόδοση απομάκρυνσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας βελτιώνει τόσο την κατιονική όσο και την ανιονική μετανάστευση. Λόγω αυτού με αυξημένες θερμοκρασίες αυξάνεται η ταχύτητα απομάκρυνσης των ρύπων, δηλαδή μειώνεται ο χρόνος αποκατάστασης. Όμως προϋποθέτουν μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος και συνεπώς μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

5.5.4 Υγρασία

Η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η ηλεκτρομετανάστευση, αλλά για να είναι βέλτιστο το αποτέλεσμα, πρέπει να είναι μικρότερη από την περιεχόμενη υγρασία κορεσμού. Τα σχετικά πειράματα έχουν δείξει ότι υπάρχει μία ελάχιστη τιμή περιεχόμενης υγρασίας ώστε να μπορεί να λάβει χώρα η ηλεκτρομετανάστευση. Η ελάχιστη αυτή τιμή σχετίζεται με την εναπομείνουσα περιεχόμενη υγρασία, η οποία ονομάζεται και ακίνητο νερό. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι η ελάχιστη περιεχόμενη υγρασία είναι περίπου 3.5% κ.β. και η βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία είναι μεταξύ 14 και 18% σε αμμώδη εδάφη.

5.5.5 Οργανική ύλη στο έδαφος

Αδιάλυτες οργανικές ουσίες, όπως υδρογονάνθρακες μεγάλου μοριακού βάρους, είναι ουσιαστικά μη ιονισμένες, και το έδαφος σε επαφή με αυτούς δεν φορτίζεται. Η απομάκρυνση των αδιάλυτων

οργανικών από το έδαφος μέσω του ηλεκτρικού πεδίου με ηλεκτροωσμωτική εκκαθάριση του ρευστού είναι γενικά περιορισμένη και γίνεται, είτε με νερό και απορρυπαντικό για να διαλυτοποιηθεί το περιεχόμενο, είτε ωθώντας το περιεχόμενο μπροστά στο μέτωπο του νερού.

5.5.6 Βαθμός κορεσμού

Ο κορεσμός του εδάφους κατέχει σπουδαία θέση στους παράγοντες που επηρεάζουν πολλές τεχνικές αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών. Ανάλογα με τον στόχο του μηχανισμού μεταφοράς, ο βαθμός κορεσμού του εδάφους επηρεάζει και την ηλεκτροώσμωση και την μετανάστευση των ιόντων.

5.5.7 Ηλεκτρόδια

Με τη βύθιση του ηλεκτροδίου στο ρυπασμένο πεδίο σχηματίζεται ένας τύπος ηλεκτρολυτικού κελιού. Με σκοπό την αναζήτηση τρόπων για αύξηση της απόδοσης, έχει δοκιμαστεί η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων όχι απευθείας μέσα στην υγρή μάζα του εδάφους, αλλά μέσα σε ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα, σχετιζόμενο με το ρυπασμένο έδαφος. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία αποκατάστασης πρέπει να είναι αδρανή για την ανοδική διαλυτοποίηση. Ο γραφίτης, ο αργυρός και ο χρυσός είναι τα κυριότερα στοιχεία κατασκευής των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται σε έρευνα. Όμως, για πιλοτικές μελέτες, προτιμάται το πιο φτηνό αλλά αξιόπιστο, τιτάνιο καθώς και ο ανοξείδωτος χάλυβας.

Χρησιμοποιώντας αδρανή ηλεκτρόδια, οι αντιδράσεις του ηλεκτροδίου θα παράγουν ιόντα H^+ και αέριο οξυγόνο στην άνοδο και ιόντα OH^- και αέριο υδρογόνο στην κάθοδο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι, εάν το pH δεν ελέγχεται, ένα όξινο μέτωπο θα διαδοθεί μέσα στους πόρους του εδάφους από την άνοδο και ένα βασικό μέτωπο θα κινηθεί έξω από την κάθοδο. Τα πειράματα έχουν δείξει ότι όταν τα τοξικά μέταλλα βρεθούν σε βασικές συνθήκες, προσροφώνται στα σωματίδια του εδάφους και κατακρημνίζονται ως υδροξείδια μετάλλων κ.ά., ενώ σε όξινες συνθήκες τα ιόντα τους απελευθερώνονται, διαλυτοποιούνται και μεταναστεύουν. Για να αποφευχθούν οι βασικές συνθήκες, γίνεται απομάκρυνση των OH^- με ξέπλυμα της καθόδου. Επιπλέον,

παρατηρήθηκε ότι καθαρίζοντας την περιοχή γύρω από την άνοδο με κάποιο κατάλληλο μη-τοξικό ρευστό, βελτιώνεται η ηλεκτροωσμωτική αποκατάσταση του εδάφους. Με σκοπό τον έλεγχο του pH, τα ρευστά που χρησιμοποιούνται περιέχουν ρυθμιστικές ενώσεις καθώς και διαλύματα που αυξάνουν τη διαλυτότητα των μετάλλων.

5.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης είναι:

- Ø Είναι κατάλληλη για εξειδικευμένες τοποθεσίες, επειδή η επεξεργασία του εδάφους συμβαίνει μόνο μεταξύ των ηλεκτροδίων.
- Ø Έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε ρυπασμένα εδάφη χωρίς να είναι απαραίτητη η εκσκαφή, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές που αυτή δεν είναι εφικτή. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα γιατί μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη που άλλες τεχνολογίες δεν μπορούν.
- Ø Μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη που περιέχουν άργιλο σε υψηλές συγκεντρώσεις.
- Ø Είναι αποτελεσματική και σε εδάφη με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- Ø Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε κορεσμένα όσο και σε ακόρεστα εδάφη.
- Ø Έχει τη δυνατότητα να απομακρύνει και οργανικούς και ανόργανους ρύπους.
- Ø Έχει την ικανότητα να απομακρύνει ρύπους από ετερογενή φυσικά ιζήματα.
- Ø Είναι χαμηλή σε κόστος σε σχέση με άλλες μεθόδους αντίστοιχης αποτελεσματικότητας.

Η απομάκρυνση των τοξικών μετάλλων από το έδαφος με την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης έχει

ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι έχουν ευρέως μελετηθεί. Αυτοί είναι οι εξής:

- Ø Η διαλυτότητα των ρύπων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του pH του εδάφους.
- Ø Η επεξεργασία μπορεί να μην είναι αποδοτική σε εδάφη με μικρή ρύπανση και υψηλές συγκεντρώσεις ορισμένων ιόντων που δεν ενδιαφερόμαστε να απομακρύνουμε.
- Ø Είναι απαραίτητη η παρουσία ενός αγωγίμου ρευστού στους πόρους του εδάφους που να συμπαρασύρει τα μέταλλα καθώς και η χρήση ενός διαλύματος εμπλουτισμού στην περιοχή που βρίσκεται η κάθοδος.
- Ø Η τεχνολογία είναι πιο αποδοτική σε εδάφη με χαμηλές τιμές αλατότητας. Όταν υπάρχει σημαντική συγκέντρωση ιόντων χλωρίου, αυτά υφίστανται αναγωγή στην περιοχή της καθόδου και ελευθερώνεται αέριο χλώριο.
- Ø Όταν εφαρμόζεται στο έδαφος αρκετά υψηλό ηλεκτρικό δυναμικό, η αποδοτικότητα της μεθόδου μειώνεται γιατί προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας.
- Ø Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην απομάκρυνση των ρύπων μειώνεται σημαντικά αν το έδαφος περιέχει ανθρακικά και οργανικά. Το ίδιο συμβαίνει αν το έδαφος περιέχει μεγάλους βράχους ή χαλίκια.
- Ø Η επιφάνεια των ηλεκτροδίων προσελκύει το υδρογόνο και το οξυγόνο που ελευθερώνονται κατά την ηλεκτρολυτική διαδικασία καθώς εξελίσσεται η αντίδραση. Το γεγονός αυτό μειώνει αρκετά την απόδοση της αποκατάστασης του εδάφους.
- Ø Στα πρώτα στάδια της ηλεκτροκινητικής διαδικασίας απαιτείται χαμηλότερη ηλεκτρική τάση. Στη συνέχεια όμως η εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση πρέπει να αυξηθεί για να διατηρηθεί η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Ø Τα ιόντα OH^- τα οποία σχηματίζονται αντιδρούν με τα κατιόντα με αποτέλεσμα το σχηματισμό ιζήματος. Το ίζημα αυτό βουλώνει τους χώρους μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους και επίσης μειώνει την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και επίσης μειώνει το ρυθμό διάχυσης.

5.7 Κόστος

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το κόστος της διαδικασίας της ηλεκτροκινητικής αποκατάστασης είναι οι παρακάτω:

- Ø Τα χαρακτηριστικά του εδάφους και η περιεχόμενη σε αυτό υγρασία.
- Ø Οι συγκεντρώσεις των ρύπων.
- Ø Οι συγκεντρώσεις των ιόντων που δεν ενδιαφερόμαστε να απομακρύνουμε.
- Ø Η αγωγιμότητα του νερού των πόρων.
- Ø Το βάθος του εδάφους που πρέπει να αποκατασταθεί.
- Ø Οι απαιτήσεις για προετοιμασία του χώρου.
- Ø Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ø Η απαιτούμενη περαιτέρω επεξεργασία των αποβλήτων.

Η κατανάλωση ενέργειας είναι ανάλογη της ολικής απομάκρυνσης των ρύπων από το έδαφος. Για τη μείωση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες καθοδικές τεχνικές πόλωσης. Ο ρυθμός μετανάστευσης των ρύπων μέσα από το έδαφος είναι περίπου 2-3 cm ανά ημέρα. Συνήθως η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 2-3 m, οπότε ο χρόνος που απαιτείται για μια επιτυχή αποκατάσταση θα ήταν πάνω από 100 ημέρες. Ωστόσο, η χρήση μιας κατάλληλης κατιονικής μεμβράνης μπορεί να μειώσει το χρόνο αποκατάστασης σε 10 έως 20 ημέρες.

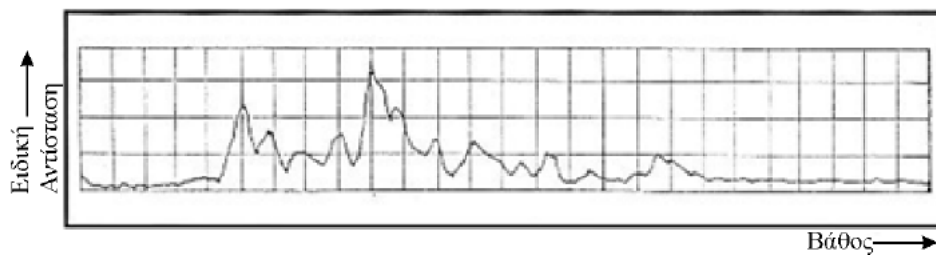
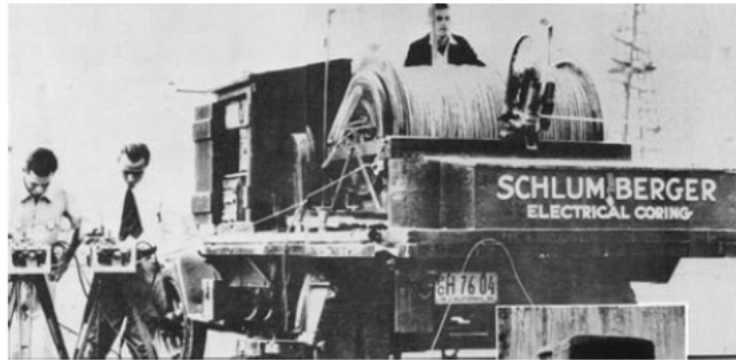
6. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η μέθοδος των γεωφυσικών διαγραφιών (geophysical well logging) είναι η εφαρμογή διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων στο εσωτερικό μιας γεώτρησης. Πρωτοπόροι στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου ήταν οι αδελφοί Schlumberger το 1929 στο πεδίο Pechelbroun, στη Γαλλία οι οποίοι πραγματοποίησαν μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φυσικού δυναμικού.

Γεωφυσική διαγραφή είναι μία συνεχής καταγραφή μετρήσεων μέσα σε γεωτρήσεις και αποκρίνονται σε μεταβολές φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων που έχουν διατρηθεί. Οι γεωφυσικές διαγραφίες έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Από την ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων έχουν καταγραφεί πολλές γεωλογικές ιδιοότητες, όπως:

- Ø Πάχος σχηματισμών
- Ø Λιθολογία
- Ø Πορώδες
- Ø Διαπερατότητα
- Ø Βαθμός κορεσμού σε νερό ή/και υδρογονάνθρακα
- Ø Κλίση στρωμάτων
- Ø Θερμοκρασία
- Ø Εντοπισμός ρωγμών



Εικόνα 6.1 Η μονάδα εκτέλεσης μετρήσεων γεωφυσικών διαγραφών των αδελφών Schlumberger και η πρώτη γεωφυσική διαγραφή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης [16].

Οι πιο σημαντικές κατηγορίες διαγραφών είναι:

- Ø Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης
- Ø Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού
- Ø Μέθοδος Ραδιενέργειας
- Ø Μέθοδος Ακουστικής Ταχύτητας

Γενικά ,οι διαγραφίες πλεονεκτούν έναντι άλλων τεχνικών. Παρουσιάζουν υψηλή διακριτική ικανότητα και επίσης προσφέρουν τη δυνατότητα συνδυαστικής ερμηνείας διαφορετικών δεδομένων με σκοπό την κατανόηση των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών.

6.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ

Η συστηματική εφαρμογή των ηλεκτρικών διαγραφιών άρχισε μετά το 1970 με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι οποίοι βοήθησαν ουσιαστικά, τόσο στη συλλογή όσο και στην επεξεργασία των μετρήσεων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι δύο παράμετροι που μετρώνται με αυτές τις τεχνικές είναι:

- 1) η αντίσταση των σχηματισμών που βρίσκονται κοντά στο φρέαρ
- 2) το ίδιο ή στιγμιαίο ή φυσικό δυναμικό (SelfPotential, SP) που οφείλεται στη φυσική αντίσταση του γεωτρητικού πολφού και των στρωμάτων του υπεδάφους.

Η δεύτερη παράμετρος, μάλιστα, δίνει ενδείξεις για τη διαπερατότητα των πετρωμάτων, με την οποία και σχετίζεται άμεσα. Είναι λάθος όμως να θεωρείται η μέθοδος αυτή, αποκλειστικά μέθοδος διασκόπησης της διαπερατότητας ή του πορώδους γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση και άλλων παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων αντίστασης-βάθους και ίδιου δυναμικού-βάθους. Συνήθως οι δύο καταγραφές δίνονται σε κοινό διάγραμμα με τη διαπερατότητα, όπου ο άξονας των βαθών είναι κοινός. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δυνατό να γίνουν συσχετισμοί μεταξύ καταγραφών γειτονικών φρεάτων με τη χρησιμοποίηση των κορυφών των καμπυλών και να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τη δομή του υπεδάφους. Τέλος, η αναπαράσταση μιας ηλεκτρικής διαγραφίας πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα γνωστά στοιχεία (στοιχεία από εξέταση πυρήνων, θραυσμάτων κ.τ.λ.) για να εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα. Για παράδειγμα, μια υψηλή τιμή ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να αντιστοιχεί σε έναν μη πορώδη σχηματισμό ή σε έναν πορώδη που περιέχει μη αγωγίμα ρευστά. Μια χαμηλή τιμή ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να δείχνει έναν πορώδη σχηματισμό κορεσμένο σε αγωγίμα ρευστά. Παρόμοια, υψηλή τιμή μπορεί να δείχνει διαπερατούς σχηματισμούς κ.ο.κ.

Οι εταιρείες που εκτελούν γεωφυσικές διαγραφίες χρησιμοποιούν διάφορες μονάδες μέτρησης ανάλογα με τη θέση και τις απαιτήσεις της έρευνας. Κάθε μονάδα περιέχει τα παρακάτω εξαρτήματα:

- Ø Καλώδιο καταγραφής
- Ø Συρματόσχοινο για την ανέλκυση και την καταβύθιση του καλωδίου στην γεώτρηση
- Ø Γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος
- Ø Πίνακες ελέγχου επιφανείας
- Ø Οβίδες μέτρησης
- Ø Ψηφιοποιητές

Για την σωστή εφαρμογή των ηλεκτρικών τεχνικών και να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών διαγραφιών, απαιτείται σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ του υπό μελέτη γεωλογικού σχηματισμού και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος.

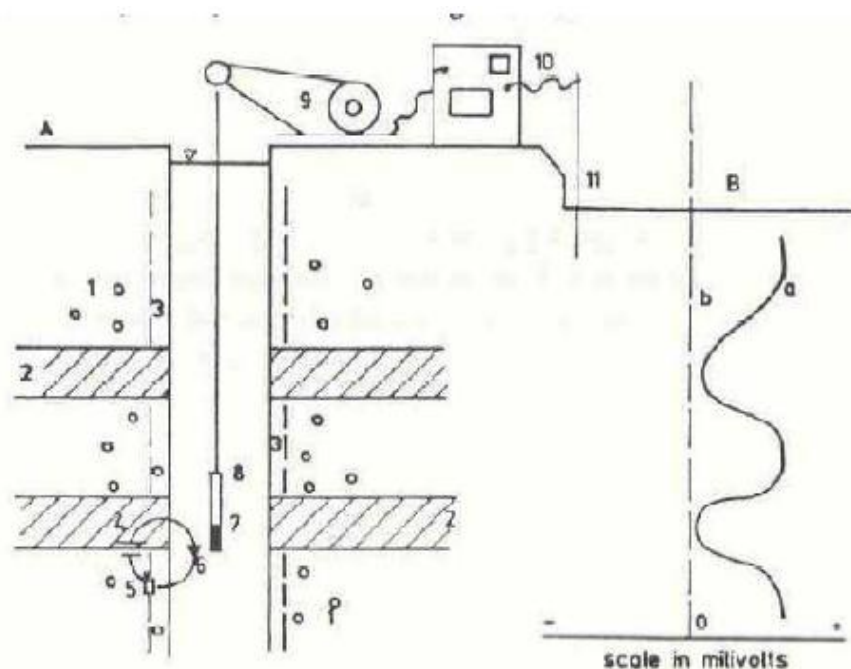
Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών, στην Υδρογεωλογία, στη Γεωθερμία, στην Κοιτασματολογία και στην Αρχαιολογία.

6.3 ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Η μέτρηση του φυσικού δυναμικού, που οφείλεται στη φυσική αντίδραση του γεωτρητικού πολφού και των στρωμάτων του υπεδάφους, σε ένα φρεάτιο που είναι πλήρες με ρευστό, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη βιομηχανία του πετρελαίου. Αυτό συμβαίνει γιατί έχει πολύ μικρό κόστος εκτέλεσης και δεν προκαλεί προβλήματα στη γεώτρηση. Μάλιστα, η εικόνα του δυναμικού ενός φρέατος μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- Ø στην αλληλοσύνδεση όμοιων οριζόντων σε περισσότερες γεωτρήσεις,
- Ø στον καθορισμό του πάχους των στρωμάτων,
- Ø στην εξακρίβωση της αντίστασης του νερού των σχηματισμών,
- Ø στον χαρακτηρισμό διαπερατών οριζόντων,
- Ø στον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε άργιλο.

Τα δυναμικά που εμφανίζονται στην επιφάνεια των τοιχωμάτων ενός φρέατος γεώτρησης, όταν αυτό είναι πλήρες γεωτρητικού πολφού, πιστεύεται ότι οφείλονται σε φαινόμενα ηλεκτροσμώσεων και ηλεκτροδιηθήσεων. Ηλεκτροχημικά δυναμικά δημιουργούνται εκεί όπου συναντώνται δύο διαφορετικά διαλύματα αλάτων. Στην προκειμένη περίπτωση, συγκρίνονται τα ρευστά της γεώτρησης με αυτά του σχηματισμού. Μάλιστα, όταν τα ρευστά των σχηματισμών είναι αλμυρότερα, συνεπώς έχουν χαμηλότερη αντίστασης από τα ρευστά της γεώτρησης, το δυναμικό αυτό είναι αρνητικό.



Σχήμα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση των μετρήσεων φυσικού δυναμικού σε γεώτρηση [16].

Στο σύστημα ηλεκτρικής διαγραφίας, ένα υλικό που έχει χαμηλό ηλεκτροχημικό δυναμικό επαφής (π.χ. μόλυβδος) χρησιμοποιείται με τη μορφή ενός ηλεκτροδίου κλεισμένου μέσα σε πορώδες σώμα γεμισμένο με νιτρικό ή οξικό μόλυβδο. Το ηλεκτρόδιο αυτό κατέρχεται μέσα στο φρεάτιο με ένα μονωμένο καλώδιο, το άλλο άκρο του οποίου συνδέεται

στην επιφάνεια με τον πόλο ενός ποτενσιομέτρου. Ο άλλος πόλος του ποτενσιομέτρου είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρόδιο στην επιφάνεια της γης, όπου το δυναμικό θεωρείται ίσο με μηδέν. Οι μετρήσεις του ποτενσιομέτρου, καθώς το ηλεκτρόδιο ανέρχεται, καταγράφονται και έτσι έχουμε μια συνεχή καταγραφή του σχετικού δυναμικού των γεωλογικών σχηματισμών από τους οποίους περνάει.

Προσεγγιστικά το φυσικό δυναμικό είναι ανάλογο του λογαρίθμου του λόγου της αλατότητας του νερού στο πορώδες προς την αλατότητα του ρευστού της γεώτρησης.

6.4 ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

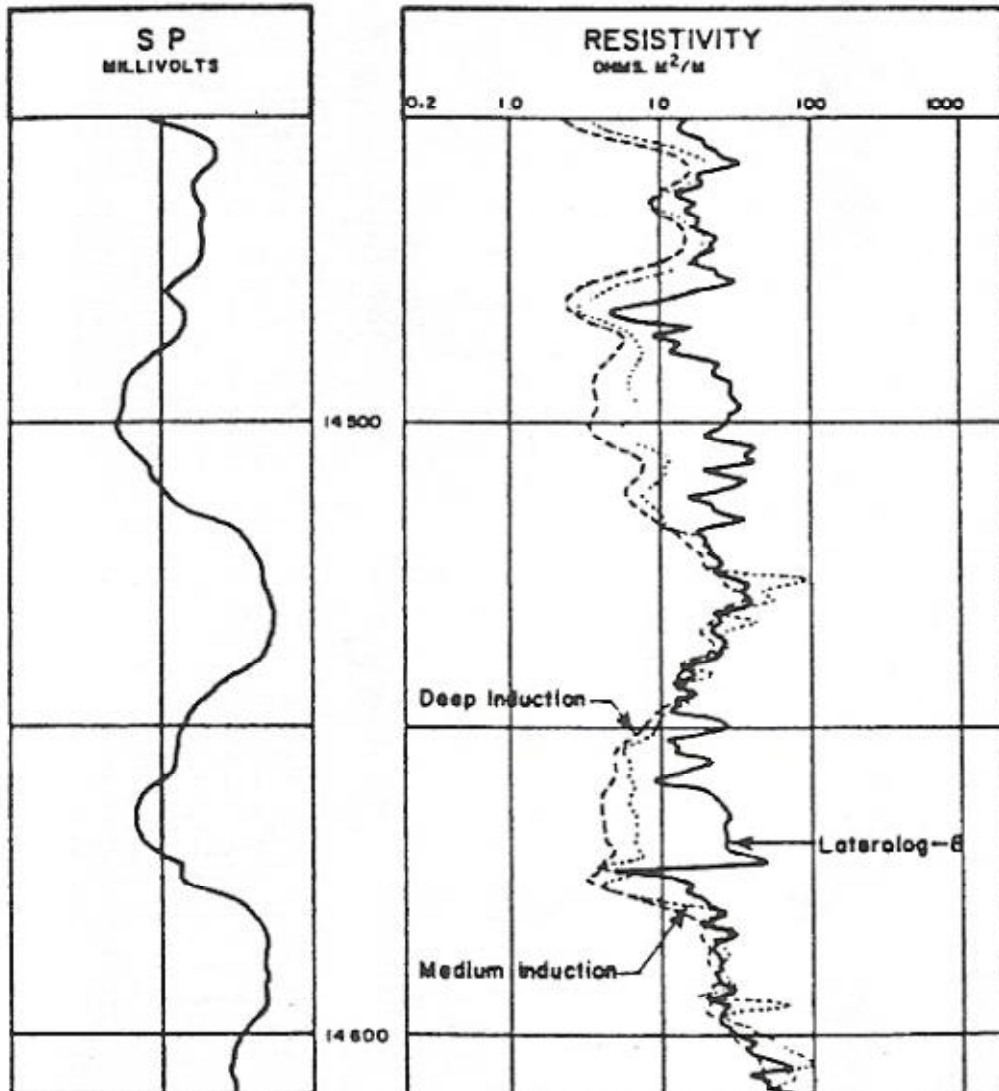
Οι διαγραφίες ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ανάλογα με το συνδυασμό και τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων ηλεκτροδίων διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες.

6.4.1 Συμβατικές διαγραφίες Αντίστασης (ES Log)

Η αντίσταση του υλικού των πετρωμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν ενός διαλύματος άλατος. Συγκεκριμένα, το πετρέλαιο και τα αέρια δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος και έτσι δύναται από τον προσδιορισμό της αντίστασης ενός πορώδους πετρώματος, να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το ποσοστό συμμετοχής ενός υδατικού διαλύματος στον κορεσμό ενός πορώδους. Στόχος του προσδιορισμού αυτής της αντίστασης είναι η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων για τις πετροφυσικές ιδιότητες των αποθηκευτικών πετρωμάτων.

Κάθε πέτρωμα έχει μια ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, η τιμή της οποίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ποσότητα του νερού που περιέχεται μέσα στο πέτρωμα, η χημική σύνθεση του νερού των σχηματισμών κ.τ.λ. Στις γεωφυσικές καταγραφές, η αγωγιμότητα υπολογίζεται μέσω της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων που είναι ακριβώς η αντίστροφη ποσότητα. Μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το Ohm-Meter (Ωm)

και εκφράζει την αντίσταση πετρώματος συγκεκριμένου μήκους και τομής.



Εικόνα 6.2 Παραδείγματα διαγραφιών αντίστασης και στιγμιαίου δυναμικού SP [17].

Σκοπός των διαγραφιών αντίστασης είναι ο προσδιορισμός των πραγματικών αντιστάσεων των πετρωμάτων, δηλαδή αυτών που δεν έχουν επηρεαστεί από τις διεργασίες των γεωτρητικών εργασιών. Διαδεδομένες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος της

«κανονικής διάταξης ηλεκτροδίων» (Normale) και η μέθοδος της «πλάγιας διάταξης ηλεκτροδίων» (Laterale). Οι παραπάνω μέθοδοι, θεωρητικά, εφαρμόζονται σε ομογενή και ισότροπα μέσα. Στην πραγματικότητα, βέβαια, η τιμή μέτρησης επηρεάζεται και από τις διαμέτρους της γεώτρησης και της ζώνης διήθησης, το πάχος των στρωμάτων και την ειδική αντίσταση του πολφού, της ζώνης διήθησης και των γειτονικών στρωμάτων. Για αυτούς του λόγους, έχουν αναπτυχθεί κι άλλες μέθοδοι πέραν των συμβατικών οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

6.4.2 Μικροδιατάξεις

Στη διάταξη της μεθόδου των μικροδιατάξεων (Microlog) τα ηλεκτρόδια είναι σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους (περίπου 4cm) και εφάπτονται των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Σε αυτήν τη μέθοδο, ζητούμενο δεν είναι η πραγματική αντίσταση των σχηματισμών, αλλά η αντίσταση κοντά στα τοιχώματα του φρεατίου, από όπου στην συνέχεια υπολογίζεται το πορώδες. Αυτή η αντίσταση, εξαρτάται από την ποσότητα διηθήματος, το οποίο έχει εισέλθει μέσα στους σχηματισμούς και από την αντίσταση του διηθήματος του πολφού. Άρα συμπεραίνεται πως αυτή η μέθοδος επηρεάζεται κατά πολύ από τον πολφό. Μάλιστα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι πολύ καλά, όταν το πάχος της κρούστας διήθησης δεν είναι μεγαλύτερο από μισή ίντσα, το βάθος διήθησης δεν ξεπερνά τις 3-4 ίντσες και η περιεκτικότητα αργίλου στο αποθηκευτικό πέτρωμα είναι ελάχιστη. Μερικοί από τους σκοπούς που εξυπηρετεί μια τέτοια μέτρηση είναι:

- Ø η εξακρίβωση του πορώδους,
- Ø η επισήμανση διάτρητων στρωμάτων,
- Ø η διεξαγωγή στρωματογραφικών μελετών και
- Ø σε ευνοϊκές περιπτώσεις, η μέτρηση της αντίστασης του πολφού, κάτω από συνθήκες γεώτρησης.

Η μέθοδος Microlaterolog είναι μοναδική για μετρήσεις αντίστασης σε πολφούς αλκαλικών διαλυμάτων. Η διαφορά της από τη μέθοδο Laterolog εντοπίζεται στην πολύ μικρή απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αξίζει να σημειωθεί πως χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις εξακρίβωσης κορεσμού υπολειμμάτων πετρελαίου.

6.4.3 Καταγραφές Εστιασμένων Αντιστάσεων

Οι εστιασμένες διατάξεις (Focused Laterolog ή GuardLog) είναι μέθοδοι καταγραφής των αντιστάσεων που χρησιμοποιούνται κυρίως σε πολφούς αλκαλικών διαλυμάτων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο πολφός επηρεάζει πολλές φορές τις μετρήσεις της αντίστασης των σχηματισμών. Ειδικά στην περίπτωση όπου περιέχουν πολύ αλάτι (διάτρηση αλατούχων στρωμάτων), δεν είναι δυνατή η εξακρίβωση του όγκου των πόρων και του περιεχομένου τους. Μια προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, είναι το ηλεκτρικό ρεύμα να μην διέρχεται μέσα από τον πολφό, ο οποίος είναι καλός αγωγός. Αρχικά, τοποθετούνταν πάνω και κάτω από το κεντρικό ηλεκτρόδιο, ηλεκτρόδια τα οποία δρούσαν ανταγωνιστικά προσφέροντας σταθερό, ανταγωνιστικό ρεύμα και προστάτευαν το κεντρικό ηλεκτρόδιο. Αργότερα, αξιοποιήθηκε η ηλεκτρονική ρύθμιση του προστατευτικού ρεύματος, με αποτέλεσμα να είναι σταθερή η γεωμετρία του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το οβίδιο.

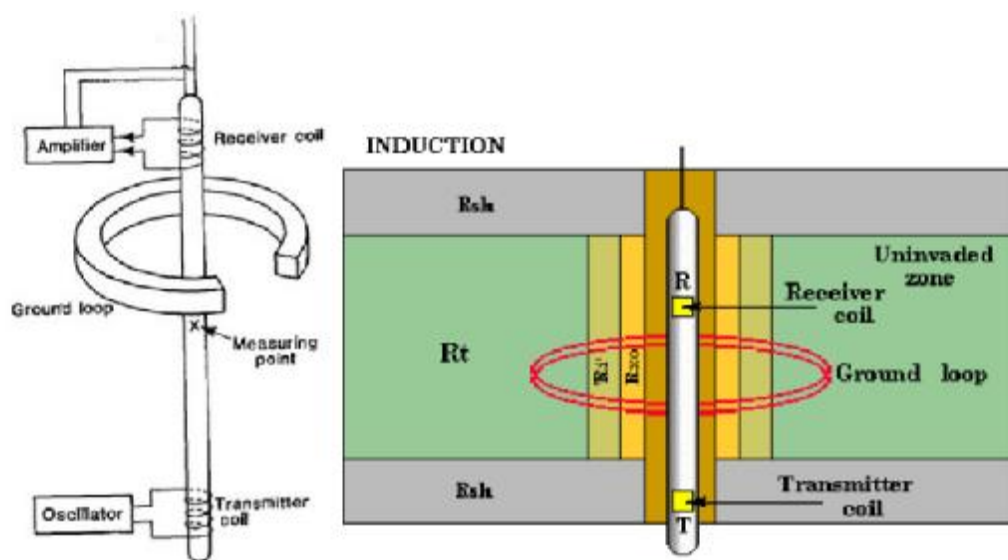
Στόχοι αυτής της μεθοδολογίας είναι:

- Ø να καθοριστεί η πραγματική αντίσταση των σχηματισμών,
- Ø να καθοριστεί το πάχος των στρωμάτων,
- Ø να συγκριθούν στρωματογραφικά διαφορές γεωτρήσεις και
- Ø να καθοριστεί η αντίσταση του νερού των σχηματισμών ή το πορώδες.

Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί γιατί έχει μεγάλη δυνατότητα διεύθυνσης σε βάθος, γεγονός που επιτρέπει τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης σχηματισμών ακόμη και σε λεπτά αποθηκευτικά στρώματα. Από την άλλη, ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η καμπύλη των διαγραμμάτων δεν επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για το βάθος της ζώνης διήθησης, καθώς και ότι απαιτεί μεγάλα ηλεκτρόδια για τα οποία χρειάζεται πηγή ρεύματος υψηλής ισχύος.

6.4.4 Διαγραφίες Επαγωγής

Οι διαγραφίες επαγωγής (Induced Polarization, IPlogs) εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της αντίστασης σχηματισμών σε περιπτώσεις φρεατίων που περιέχουν πολφούς πετρελαίου ή σκέτο αέρα. Με τη μέθοδο αυτή δημιουργούνται ισχυρά εναλλασσόμενα πεδία, τα οποία επαγάγουν δευτερεύοντα ηλεκτρικά κύματα στους σχηματισμούς. Η ένταση των ηλεκτρικών αυτών κυμάτων, είναι ανάλογη της αγωγιμότητας των σχηματισμών και κατά συνέπεια της αντίστασης αυτών. Με την εφαρμογή αυτής της μεθόδου επιτυγχάνεται μείωση της επίδρασης της γεώτρησης και του περιβάλλοντος αυτής χώρου.



Σχήμα 6.3 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας λήψης διαγραφιών επαγωγής [16].

Η οβίδα η οποία κατέρχεται μέσα στη γεώτρηση περιέχει ένα πηνίο εκπομπής το οποίο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου επάγει στους σχηματισμούς που το περιβάλλουν ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα υψηλής συχνότητας (20-40

kHz). Στη συνέχεια η παροχή ρεύματος στο πηνίο εκπομπής διακόπτεται και καταγράφεται η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού σε ένα δεύτερο πηνίο. Το πλάτος των τάσεων αυτών είναι ανάλογο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των πετρωμάτων.

Οι διαγραφίεςIP καταγράφουν την αγωγιμότητα συναρτήσει του βάθους. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα ότι παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης έρευνας σε μεγαλύτερο βάθος. Μάλιστα, έχει μεγάλη ακρίβεια στις τιμές της ειδικής αντίστασης των σχηματισμών που προκύπτουν και δεν χρειάζονται διορθώσεις.

7. ΠΛΑΣΜΑ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο Faraday ήταν ο πρώτος που αντιλήφθηκε τις μοναδικές ιδιότητες ενός ιονισμένου αερίου και κατέγραψε τις παρατηρήσεις του στα μέσα του 19ου αιώνα. Ο όρος «πλάσμα» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Langmuir το 1923 για να προσδιορίσει την κατάσταση αερίων σε πειράματα ηλεκτρικών εκκενώσεων. Είναι φανερό ότι ο πρώτος αυτός ορισμός έχει να κάνει με ιονισμένα αέρια. Όμως κάθε ιονισμένο αέριο δεν είναι πλάσμα. Σήμερα το πλάσμα θεωρείται η τέταρτη κατάσταση της ύλης δίπλα στα στερεά, τα υγρά και τα αέρια και ορίζεται ως ένα αέριο που περιέχει φορτισμένα και ουδέτερα σωματίδια και παρουσιάζει τις εξής ιδιότητες:

- Ø Συλλογική συμπεριφορά
- Ø Οιονεί ουδετερότητα

οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Στο πλάσμα οι κινήσεις των σωματιδίων καθορίζονται από τις ηλεκτρικές δυνάμεις Coulomb, οι οποίες έχουν μεγάλη εμβέλεια σε αντίθεση με τα συνηθισμένα αέρια των οποίων οι δομικοί λίθοι υπόκεινται σε δυνάμεις μικρής σχετικά εμβέλειας.

Πλάσμα συναντάται στον Ήλιο, στους αστέρες, στον μεσοαστρικό χώρο, στην ιονόσφαιρα, τους κεραυνούς και αλλού. Ο ηλιακός άνεμος επίσης αποτελείται από πλάσμα. Σε συνθήκες εργαστηρίου μπορεί να δημιουργηθεί σε θερμοπυρηνικούς αντιδραστήρες, σε σωλήνες φωτισμού που περιέχουν αέρια όπως νέον σε χαμηλή πίεση κ.ά.

Το πλάσμα σχηματίζεται όταν ένα αέριο προσλαμβάνει ενέργεια (π.χ. θερμική ή ηλεκτρική) η οποία είναι αρκετή για να αποσπαστούν από τα άτομα του αερίου ηλεκτρόνια, τα οποία είναι πλέον ελεύθερα να κινηθούν στο χώρο. Αποτελεί μια ιονισμένη μορφή ύλης που αν και σε μικροσκοπικό επίπεδο περιέχει θετικούς και αρνητικούς φορείς, μακροσκοπικά παραμένει ένα ηλεκτρικά ουδέτερο μέσο.

Αυξάνοντας το ποσό της ενέργειας που προσλαμβάνεται από το αέριο, ο βαθμός ιονισμού του αερίου αυξάνεται, οδηγώντας στο σχηματισμό ενός νέφους ιόντων και ηλεκτρονίων όλο και πιο μεγάλης πυκνότητας.

7.2 Θωράκιση Debye

Όπως γνωρίζουμε από τον ηλεκτρισμό, η δύναμη με την οποία αλληλεπιδρούν δύο σημειακά φορτία q_1 και q_2 που βρίσκονται σε απόσταση r , δίνεται από το νόμο του Coulomb:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (7.1)$$

όπου: $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Η δύναμη αυτή είναι μία δύναμη αντιστρόφου τετραγώνου, δηλαδή μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης και θεωρείται μία δύναμη μεγάλης εμβέλειας.

Μεταξύ των ουδετέρων ατόμων ενός αερίου ασκούνται και άλλες δυνάμεις που μειώνονται πιο γρήγορα με την απόσταση και θεωρούνται δυνάμεις μικρής εμβέλειας.

Το μήκος του Debye είναι μια σημαντική φυσική παράμετρος του πλάσματος. Είναι ένα μέτρο της απόστασης στην οποία η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου ενός φορτισμένου σωματιδίου είναι αισθητή από άλλα φορτισμένα σωματίδια μέσα στο πλάσμα. Τα φορτισμένα σωματίδια κατανέμονται με τέτοιο τρόπο ώστε να θωρακίζουν αποτελεσματικά

οποιοδήποτε ηλεκτροστατικό πεδίο σε απόσταση ίση με αυτή του μήκους Debye, λ_D , που δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{n_e e^2}} \quad (7.2)$$

όπου:

T είναι η απόλυτη θερμοκρασία,

$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ είναι η σταθερά του Boltzmann

n_e είναι η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων.

$e = 1.6 \times 10^{-19} C$ είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Αυτή η θωράκιση από ηλεκτροστατικά πεδία είναι αποτέλεσμα της συλλογικής συμπεριφοράς (collective behavior) των σωματιδίων του πλάσματος. Ο Debye πρώτος υπολόγισε το μήκος αυτό σε ένα ηλεκτρολύτη. Τελικά, το μήκος του Debye δίνει τις διαστάσεις ενός ηλεκτροστατικού θώρακα (πέτασμα) ο οποίος θωρακίζει το πλάσμα από τοπικές ηλεκτρικές διαταραχές που δημιουργούνται από ένα σωματίδιο ελέγχου ή από ισοδύναμα φαινόμενα.

Το μήκος Debye καθορίζει την εμβέλεια των ηλεκτρικών δυνάμεων Coulomb μέσα στο πλάσμα. Αναφέρθηκε ότι ένα μέσο χαρακτηρίζεται ως πλάσμα όταν η συλλογική συμπεριφορά κυριαρχεί σε σύγκριση με τη συμπεριφορά ενός σωματιδίου. Αυτό συμβαίνει όταν η ενέργεια που χρειάζεται ένα φορτισμένο σωματίδιο για να διανύσει τη μισή απόσταση μεταξύ δύο τοπικών φορτίων είναι μεγαλύτερη από τη μέση θερμική ενέργεια του σωματιδίου. Επομένως, ένα ιονισμένο αέριο μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλάσμα όταν οι διαστάσεις του L είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος Debye, δηλαδή όταν ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$L \gg \lambda_D$$

Παρά τη μεγάλη εμβέλεια των ηλεκτρικών δυνάμεων Coulomb τα φορτισμένα σωματίδια μέσα στο πλάσμα δεν αλληλεπιδρούν σε αποστάσεις μεγαλύτερες από το μήκος Debye. Έτσι, το μήκος Debye μπορεί να χαρακτηριστεί ως η εμβέλεια των ηλεκτροστατικών δυνάμεων μέσα στο πλάσμα.

Επίσης, η συλλογική συμπεριφορά που εμφανίζει το πλάσμα οφείλεται στο ότι κατά την αλληλεπίδραση των φορτισμένων σωματιδίων οι δυνάμεις μεγάλης εμβέλειας υπερισχύουν των δυνάμεων μικρής εμβέλειας.

7.3 ΟΙΟΝΕΙ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑ

Με το μήκος Debye μπορούμε να ορίσουμε και την έννοια της οιονεί ουδετερότητας (quasi-neutrality). Αν οι διαστάσεις του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος Debye τότε φορτία με διαφορετικά πρόσημα έλκονται μεταξύ τους και τείνουν να δημιουργήσουν μια κατάσταση ουδετερότητας. Το ίδιο συμβαίνει και με την παρεμβολή ενός εξωτερικού φορτίου ή δυναμικού. Αυτή η παρεμβολή θωρακίζεται σε απόσταση λ_D αφήνοντας έτσι το υπόλοιπο πλάσμα ανεπηρέαστο, υπό την έννοια ότι δεν απέχει δραστικά από τη στατική κατάσταση ισορροπίας. Το πλάσμα τότε είναι σχεδόν-ουδέτερο ώστε να ισχύει μια κοινή πυκνότητα πλάσματος αλλά όχι απόλυτα ουδέτερο ώστε να υπάρχουν οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που είναι η κύρια αιτία όλων των σημαντικών φαινομένων σ' αυτό.

Εν τέλει, με τον όρο οιονεί ουδετερότητα εννοούμε ότι οι μεταβολές της πυκνότητας των φορτισμένων σωματιδίων στο πλάσμα περιορίζονται σε πολύ μικρό χώρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η οιονεί ουδετερότητα ισχύει μόνο για αρκετά μεγάλες χρονικές και χωρικές κλίμακες.

Στο πλάσμα, η πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου των ιόντων και των ηλεκτρονίων είναι τέτοια ώστε οποιαδήποτε απόκλιση από την ουδετερότητα δημιουργεί ένα δυνατό ηλεκτρικό πεδίο που τείνει να την αποκαταστήσει. Αν ,λοιπόν, προκληθεί μία τοπική διαταραχή στην

ουδετερότητα, τα ηλεκτρόνια στην προσπάθειά τους να αποκαταστήσουν την αρχική ισορροπία, εκτελούν αρμονική ταλάντωση γύρω από τη θέση ισορροπίας (συλλογική συμπεριφορά). Η συχνότητα της ταλάντωσης αυτής ονομάζεται συχνότητα πλάσματος, συμβολίζεται με ω_p και δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m e_0}} \quad (7.3)$$

όπου m είναι η μάζα του ηλεκτρονίου.

Το αντίστροφο της συχνότητας πλάσματος είναι ο χρόνος αποκατάστασης (relaxation time) των διακυμάνσεων φορτίου στο πλάσμα.


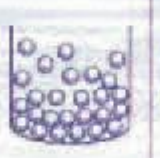

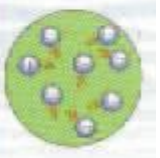
$$t_p = \frac{1}{\omega_p} \quad (7.4)$$

Για ένα ιδανικό πλάσμα θα πρέπει να ισχύει ότι η χρονική κλίμακα των διακυμάνσεων φορτίου είναι πολύ μεγαλύτερη από τον χρόνο αποκατάστασης.

7.4 Η ΤΕΤΑΡΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

Η ύλη σε «κανονικές συνθήκες» εμφανίζεται σε 3 διαφορετικές καταστάσεις: Στερεό, Υγρό και Αέριο. Αυξάνοντας σταδιακά τη θερμοκρασία, και συνεπώς και τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων των δομικών λίθων της ύλης, παρατηρούμε διαδοχικά αλλαγή φάσης από το στερεό, στο υγρό και τελικά στο αέριο.

Μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της συχνότητας συγκρούσεων μεταξύ των μορίων του αερίου, καθώς επίσης και του βαθμού ιονισμού του αερίου. Το ιονισμένο αέριο μπορεί να γίνει Πλάσμα αν υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες οι οποίες σχετίζονται με την πυκνότητά του, τη θερμοκρασία του και το χαρακτηριστικό μήκος Debye. Με άλλα λόγια να εμφανίζει τις δύο βασικές ιδιότητες, οιονεί ουδετερότητα και συλλογική συμπεριφορά. Το πλάσμα δεν εμφανίζει καμία άλλη αλλαγή φάσης, αλλά συμπεριφέρεται διαφορετικά από το αέριο όταν εφαρμόσουμε σε αυτό ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Example Ice H_2O	Example Water H_2O	Example Steam H_2O	Example Ionized Gas $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ 1>10 electron Volts
			
Molecules Fixed in Lattice	Molecules Free to Move	Molecules Free to Move, Large Spacing	Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing

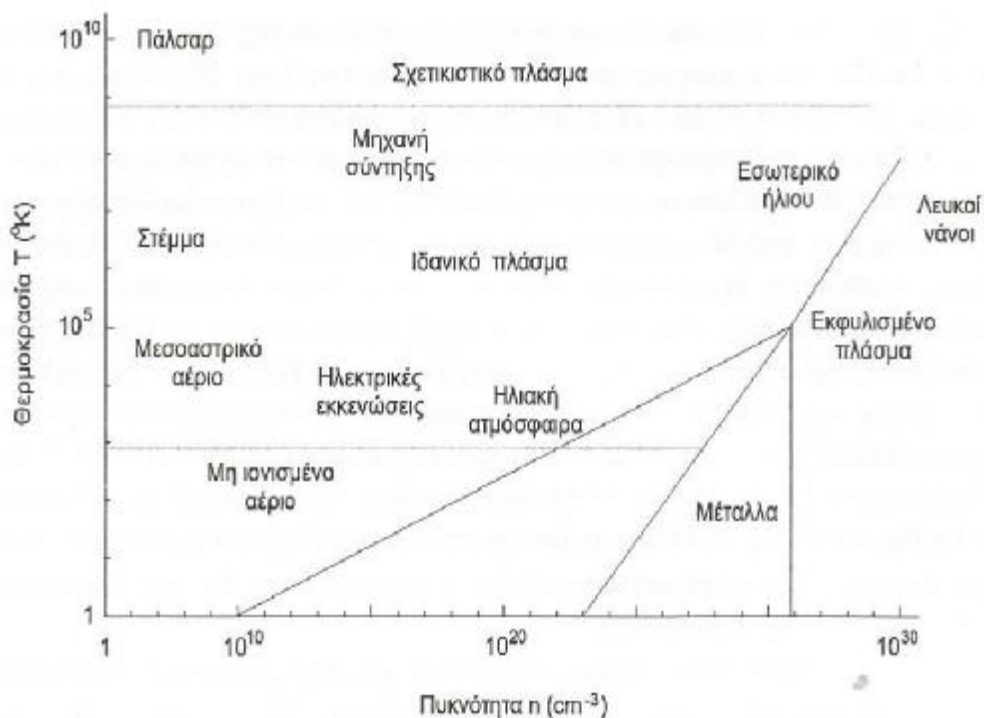
Σχήμα 7.1 Οι τέσσερις καταστάσεις της ύλης [4].

Ακριβώς λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς που παρουσιάζει το πλάσμα σε σχέση με τις άλλες τρεις καταστάσεις της ύλης, πολύ συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως «τέταρτη κατάσταση της ύλης».

Πρώτος ο W. Crookes το 1879 χρησιμοποίησε τον όρο αυτό για να περιγράψει το ιονισμένο αέριο σε μια ηλεκτρική εκκένωση.

7.5 ΠΛΑΣΜΑ ΣΤΗ ΦΥΣΗ

Ένας από τους λόγους που η μελέτη του πλάσματος είναι πολύ σημαντική, είναι το γεγονός ότι το 99% της ύλης στο Σύμπαν είναι σε μορφή πλάσματος. Για παράδειγμα, το εσωτερικό των αστέρων είναι σε κατάσταση πλάσματος με συγκεντρώσεις της τάξης του 10^{30} m^{-3} και θερμοκρασίες της τάξης των 10^7 K . Ομοίως η μαγνητόσφαιρα και η ιονόσφαιρα της γης αποτελούνται από πλάσμα, μικρότερης όμως πυκνότητας και θερμοκρασίας. Το πολικό σέλας δημιουργείται όταν τα φορτισμένα σωματίδια του ηλιακού ανέμου, ο οποίος αποτελείται από πλάσμα, εκτρέπονται από το μαγνητικό πεδίο της γης.



Σχήμα 7.2 Παράμετροι συστημάτων που αποτελούνται από πλάσμα [1]

Στο σχήμα 7.2 φαίνονται διάφορα είδη πλάσματος και τυπικές τιμές πυκνότητας φορτισμένων σωματιδίων και θερμοκρασίας σε κάθε περίπτωση.

7.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Μια εκκένωση πλάσματος χαρακτηρίζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία και την πίεση και κατηγοριοποιείται ανάλογα.

Με βάση την πίεση ως προς την ατμοσφαιρική το πλάσμα χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

1. Πλάσμα υψηλής πίεσης
2. Πλάσμα ατμοσφαιρικής πίεσης
3. Πλάσμα χαμηλής πίεσης

Το πλάσμα έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενέστατων μελετών τόσο γιατί απαντάται σε πάρα πολλές περιπτώσεις στη φύση αλλά και γιατί έχει σημαντικές εφαρμογές. Από αυτές τις μελέτες έχει προκύψει το συμπέρασμα πως η μακροσκοπική κατάσταση του πλάσματος χαρακτηρίζεται καθαρά από την ηλεκτρονική του θερμοκρασία και πυκνότητα καθώς και από τον βαθμό ιονισμού του.

Η εξίσωση του Saha μας βοηθάει να υπολογίσουμε το ποσοστό των ιονισμένων ατόμων σ' ένα αέριο το οποίο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία:

$$\frac{n_i}{n_n} \gg 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-\frac{U_i}{k_B T}} \quad (7.5)$$

όπου:

n_i και n_n είναι η συγκέντρωση (ή αλλιώς πυκνότητα) των ιονισμένων και των ουδέτερων ατόμων αντίστοιχα. Εκφράζει τον αριθμό ατόμων ανά m^3 , T είναι η απόλυτη θερμοκρασία σε K ,

U_i είναι η ενέργεια ιονισμού του αερίου, δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για να αφαιρεθεί το εξώτατο ηλεκτρόνιο από ένα άτομο.

Για συνήθεις θερμοκρασίες ο βαθμός ιονισμού είναι αμελητέος. Με την αύξηση όμως της θερμοκρασίας ο βαθμός ιονισμού αυξάνεται δραστικά, ειδικά όταν η θερμική ενέργεια $k_B T$ γίνει της ίδιας τάξης μεγέθους με την ενέργεια ιονισμού U_i . Τότε το αέριο μεταβαίνει στην κατάσταση πλάσματος, όταν $n_i > n_n$. Αυτός είναι ο λόγος που το πλάσμα υπάρχει στα αστέρια που έχουν μεγάλη θερμοκρασία και δεν υπάρχει στη γη.

Από τα παραπάνω ,είναι φανερό ότι ο βαθμός ιονισμού του αερίου εξαρτάται ισχυρά από την απόλυτη θερμοκρασία.Καθίσταται αναγκαίο να διαχωρίσει το πλάσμα σε κατηγορίες με βάση τη θερμοκρασία του. Οι κατηγορίες που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία είναι οι παρακάτω:

1. Το θερμό πλάσμα, που αφορά θερμοκρασίες μεγαλύτερες από $10^6 K$, με κύρια παραδείγματα το πλάσμα ενός αντιδραστήρα θερμοπυρηνικής σύντηξης και το πλάσμα στο εσωτερικό των αστεριών.
2. Το θερμικό πλάσμα, που αφορά θερμοκρασίες υψηλότερες των $3000 K$, όπως το πλάσμα του ηλεκτρικού τόξου. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές συγκόλλησης και κοπής.
3. Το ψυχρό πλάσμα, όπου τα μεν ηλεκτρόνια παρουσιάζουν θερμοκρασίες μεταξύ των $20000 K$ και $150000 K$, ενώ τα βαρύτερα σωματία (ιόντα και ουδέτερα σωματία) χαμηλότερες των $1000 K$. Σημαντικές εφαρμογές του ψυχρού πλάσματος αποτελούν η παραγωγή όζοντος, η επεξεργασία επιφανειών και υλικών, η αποστείρωση κ.τ.λ.

7.7 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Για να δημιουργήσουμε πλάσμα στο εργαστήριο, πρέπει να έχουμε

κάποιο μηχανισμό ιονισμού, τέτοιον ώστε να εξασφαλίζεται ότι ο ρυθμός ιονισμού θα είναι μεγαλύτερος του ρυθμού επανασύνδεσης, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα το ποσοστό των ιονισμένων ατόμων να φτάσει σε υψηλά επίπεδα.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι παραγωγής πλάσματος οι οποίοι φυσικά εξαρτώνται από το είδος του πλάσματος που θέλουμε να παράξουμε. Οι σημαντικότερες τεχνικές είναι:

1. Με εφαρμογή ηλεκτρικών πεδίων / ηλεκτρικές εκκενώσεις.
2. Με ηλεκτρομαγνητικά κύματα.
3. Με βομβαρδισμό από ουδέτερα σωματίδια.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα με τις τεχνικές παραγωγής ψυχρού πλάσματος ατμοσφαιρικής πίεσης.

Η αλματώδης ανάπτυξη της φυσικής του πλάσματος τις τελευταίες δεκαετίες οφείλεται κατά ένα μέρος στην προσπάθεια εγκλωβισμού πλάσματος με υψηλή θερμοκρασία και πυκνότητα μέσα σε ειδικούς αντιδραστήρες (Tokamak) για περισσότερο από ένα δευτερόλεπτο με σκοπό την έναρξη της πυρηνικής σύντηξης. Η σύντηξη πυρήνων δευτερίου (^2H) και τριτίου (^3H) έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία νετρονίων με μέση ενέργεια 14.1 MeV ($1\text{eV}=1.6\cdot 10^{-19}\text{Joule}$). Η ενέργεια των νετρονίων μπορεί να μετατραπεί σε θερμική ενέργεια με απόδοση μέχρι και 40%. Μέχρι σήμερα κανένας μηχανισμός παγίδευσης πλάσματος δεν έχει επιτύχει συνθήκες που να επιτρέπουν την παραγωγή άφθονης και φθηνής ενέργειας και αυτό το θέμα παραμένει ανοικτό.

8. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΛΔΑΦΩΝ ΜΕ ΨΥΧΡΟ ΠΛΑΣΜΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο ψυχρό πλάσμα το μεγαλύτερο μέρος της προσδιδόμενης ενέργειας διοχετεύεται στα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια γίνονται πολύ ενεργητικά και έχουν τη δυνατότητα να διεγείρουν ουδέτερα σωματίδια με αποτέλεσμα την παραγωγή χημικών ριζών, ενώ η συνολική θερμοκρασία του αερίου δεν αυξάνεται σημαντικά. Το ψυχρό πλάσμα μπορεί να παραχθεί και σε ατμοσφαιρική πίεση, άρα χωρίς την ανάγκη ακριβού εξοπλισμού χαμηλής πίεσης. Αυτές οι ιδιαιτερότητες του ψυχρού πλάσματος ατμοσφαιρικής πίεσης έχουν οδηγήσει σε εκτεταμένη χρήση του τα τελευταία χρόνια κυρίως σε εφαρμογές επεξεργασίας θερμοευαίσθητων υλικών, όπως πολυμερή ή ακόμα και βιολογικοί ιστοί.

8.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

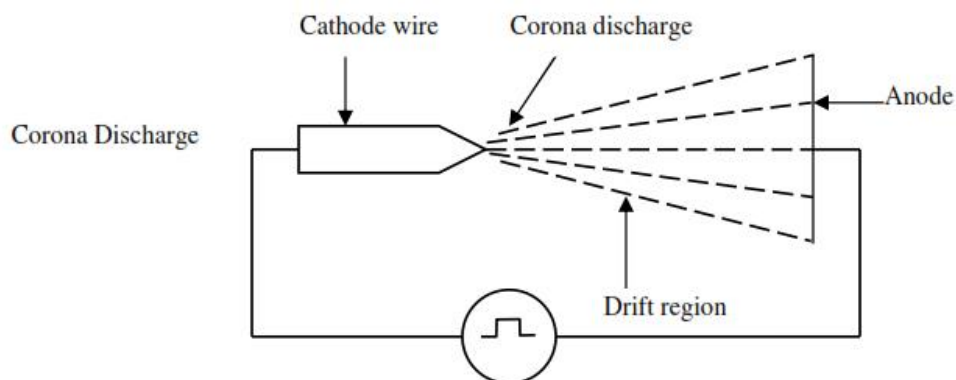
Το ψυχρό πλάσμα ατμοσφαιρικής πίεσης πλεονεκτεί έναντι του ψυχρού πλάσματος χαμηλής πίεσης γιατί οι συσκευές παραγωγής του δεν είναι ιδιαίτερα ογκώδεις ούτε ακριβές και επίσης δεν απαιτούν συνεχή συντήρηση σε αντίθεση με τις συσκευές παραγωγής ψυχρού πλάσματος σε χαμηλή πίεση. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν το ψυχρό

πλάσμα ατμοσφαιρικής πίεσης ιδιαίτερα ελκυστικό σε πάρα πολλές εφαρμογές σήμερα.

8.2.1 Εκκένωση τύπου Κορώνας

Η εκκένωση τύπου κορώνας (CoronaDischarge) αποτελεί την πρώτη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ψυχρού πλάσματος ατμοσφαιρικής πίεσης. Η ηλεκτρική εκκένωση τύπου κορώνας είναι εξ ορισμού μια εκκένωση αερίου όπου η γεωμετρία καθορίζει τις διαδικασίες ιονισμού σε περιοχές υψηλού πεδίου στο άμεσο γειτονικό περιβάλλον του ηλεκτροδίου ή των ηλεκτροδίων.

Υπάρχει μία ποικιλία διατάξεων πραγματοποίησης εκκενώσεων κορώνας ανάλογα με την πολικότητα του πεδίου και τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Λόγω της ασυμμετρίας των ηλεκτροδίων, όπως π.χ. στη διάταξη ακίδα-πλάκα, δημιουργείται ένα μη-ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, η ένταση του οποίου στην περιοχή γύρω από το πολωμένο ηλεκτρόδιο, μπορεί να ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή της έντασης διάσπασης κι συνεπώς να έχουμε την έναρξη του ιονισμού και την παραγωγή πλάσματος.

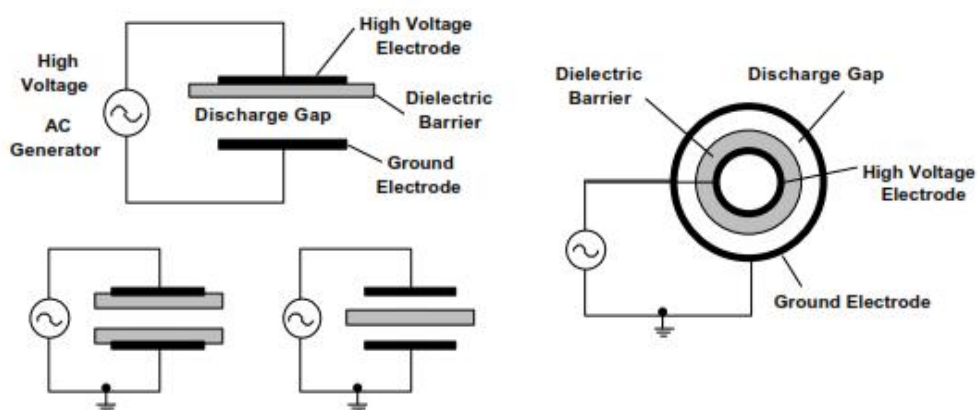


Σχήμα 8.1 Τυπική διάταξη παραγωγής εκκένωσης τύπου κορώνας [1].

8.2.2 Εκκένωση Διηλεκτρικού Φράγματος

Εκτός από την εκκένωση κορώνας, ένας πολύ διαδεδομένος τύπος ηλεκτρικής εκκένωσης είναι αυτός της εκκένωσης διηλεκτρικού φράγματος (DielectricBarrierDischarge, DBD).

Στις διατάξεις DBD επιτυγχάνεται η παραγωγή ψυχρού πλάσματος σε ατμοσφαιρική πίεση με τη χρήση δύο παράλληλων ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε απόσταση μερικών χιλιοστών. Τουλάχιστον το ένα από τα δύο ηλεκτρόδια καλύπτεται από στρώμα διηλεκτρικού υλικού. Η εκκένωση DBD χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον περιορισμό του ρεύματος αγωγιμότητας καθώς και την αποφυγή μετάβασης σε καθεστώς ηλεκτρικού τόξου, διατηρώντας έτσι τη θερμοκρασία του αερίου αρκετά χαμηλή.



Σχήμα 8.2 Συνήθισμένες διαμορφώσεις ηλεκτροδίων για την παραγωγή DBD [1].

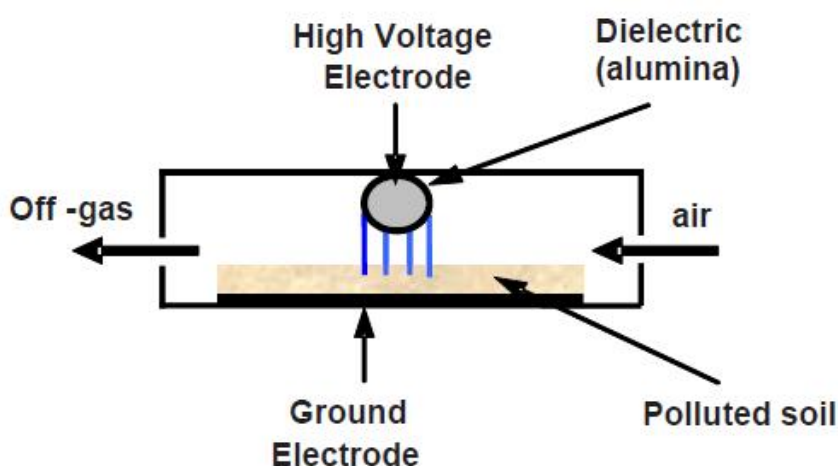
Λόγω της παρουσίας του διηλεκτρικού, για τη λειτουργία της διάταξης απαιτείται η χρήση εναλλασσόμενης τάσης. Το πλάσμα εμφανίζεται υπό μορφή νηματοειδών αγωγίμων καναλιών (filaments), τα οποία κατανέμονται σε όλη την επιφάνεια του διηλεκτρικού και η διάρκειά τους είναι της τάξης των νανοδευτερολέπτων. Κατά τη διάρκεια της εκκένωσης παράγονται σωματίδια με βραχύ χρόνο ζωής, αλλά και μετασταθή σωματίδια, δηλαδή διεγερμένα μόρια και άτομα με σχετικά μεγάλο χρόνο ζωής. Εκτός από διεγέρσεις, τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με άτομα και μόρια, προκαλώντας επιπλέον αντιδράσεις διαχωρισμού, επανασύνδεσης, ιονισμού κ.τ.λ. Με αυτόν τον τρόπο το αέριο εμπλουτίζεται με χημικές ρίζες, ιόντα, όζον κ.ά.

8.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η απορρύπανση του χώματος μέσω διατάξεων πλάσματος είναι ένας νέος ερευνητικός τομέας που προσφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Η επεξεργασία του εδάφους με πλάσμα είναι μία σχετικά φθηνή τεχνική, η οποία επιτυγχάνει γρήγορη απορρύπανση του εδάφους. Η απόδοση της απορρύπανσης είναι πολύ μεγάλη και σε πολλές περιπτώσεις αγγίζει το 99%. Παράλληλα, η μέθοδος αυτή είναι φιλική προς το περιβάλλον αφού δεν αφήνει σε πολλές περιπτώσεις ρυπογόνα κατάλοιπα. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν απαιτείται καμία επιπλέον επεξεργασία του δείγματος μετά την απορρύπανση με πλάσμα. Στη συνέχεια αναφέρονται οι σημαντικότερες πειραματικές μελέτες απορρύπανσης εδάφους με ψυχρό πλάσμα ατμοσφαιρικής πίεσης [1].

8.3.1 Απορρύπανση από NAPLs

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές [18] για την απορρύπανση χώματος περιέχοντος υγρό ρύπο μη-υδατικής φάσης (non-aqueousphaseliquid, NAPL) περιλαμβάνει ένα τροφοδοτικό τάσης υψηλής ισχύος και έναν αντιδραστήρα DBD. Ο ρύπος ήταν ένα μείγμα κανονικού δεκανίου ($n-C_{10}$), κανονικού δωδεκανίου ($n-C_{12}$) και κανονικού δεκαεξανίου ($n-C_{16}$).



Σχήμα 8.3 Ο αντιδραστήρας DBD που χρησιμοποιήθηκε [18].

Στην ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι ερευνητές έλαβαν υπόψη πολλές παραμέτρους όπως, η ομοιογένεια του χόματος (ως προς το μέγεθος των κόκκων του και της σύστασής του), ο χρόνος επεξεργασίας του δείγματος και η συγκέντρωση του ρύπου.

Τα πειράματα έδειξαν πως η απομάκρυνση του ρύπου μπορεί να φθάσει ακόμα και το 99%. Η απόδοση απομάκρυνσης του ρύπου ήταν ανάλογη της προσδιδόμενης ενέργειας από το τροφοδοτικό. Για χαμηλές συγκεντρώσεις του ρύπου και μικρό χρόνο επεξεργασίας, η μέθοδος ήταν πιο αποδοτική στα δείγματα με τη μεγαλύτερη ομοιογένεια έναντι αυτών με τη μικρότερη ομοιογένεια. Ακόμη, παρατηρήθηκε πως η απόδοση απορρύπανσης ήταν αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των ατόμων άνθρακα που περιέχονταν στα συστατικά του ρύπου. Αυτό μπορεί εύκολα να ερμηνευτεί αφού όσο μεγαλύτερα είναι τα μόρια, απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος και περισσότερη ενέργεια για να σπάσουν οι δεσμοί.

8.3.2 Απορρύπανση Χόματος από Χλωραμφενικόλη

Οι διατάξεις DBD έχουν εξεταστεί σχετικά με τη δυνατότητα απορρύπανσης χόματος από χλωραμφενικόλη ($C_{11}H_{12}O_5N_2Cl_2$) η οποία είναι χημική ουσία που περιέχεται στα αντιβιοτικά.

Τα σχετικά πειράματα έδειξαν πως η αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης βελτίωνε την απόδοση της διάταξης. Η απόδοση έφθασε το 65% σε 10 λεπτά επεξεργασίας. Επίσης, το είδος, η ροή του αερίου κι η υγρασία του χόματος έπαιζαν σημαντικό ρόλο στην απορρύπανση του εδάφους, καθώς συνέβαλαν κι αυτά στην παραγωγή δραστικών σωματιδίων όπως το όζον που αναγνωρίστηκε ως το πιο οξειδωτικό όλων. Τέλος, τα ενδιάμεσα προϊόντα που παράχθηκαν από την επεξεργασία, βρέθηκαν λιγότερο τοξικά σε σχέση με τον αρχικό ρύπο.

8.3.3 Οξείδωση Κηροζίνης στο Έδαφος

Το ποσοστό απομάκρυνσης της κηροζίνης από το έδαφος ήταν αύξουσα συνάρτηση της καταναλισκόμενης ενέργειας από τη διάταξη DBD και του χρόνου επεξεργασίας. Η χημική ανάλυση του χόματος έδειξε πως μετά από 22 min επεξεργασίας του, κανένα συστατικό του

ρύπου (υδρογονάνθρακες με αριθμό ατόμων άνθρακα από 10 έως 32) δεν ανιχνεύθηκε. Όσο πιο πτητικοί ήταν οι υδρογονάνθρακες τόσο ευκολότερα απομακρύνονται. Το ποσοστό του άνθρακα που εκλύθηκε στην ατμόσφαιρα υπό την μορφή μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα ήταν πολύ μικρό σε σχέση με την αρχική συγκέντρωσή του στο χώμα. Συνεπώς, ο βασικός μηχανισμός απορρύπανσης ήταν η απευθείας οξείδωση του ρύπου στο έδαφος.

8.3.4 Αποδόμηση Πενταχλωροφενόλης στο Έδαφος μέσω Παλμικής Εκκένωσης Κορώνας

Μελετήθηκε η απορρύπανση του εδάφους από πενταχλωροφενόλες (C_6HCl_5O). Βρέθηκε ότι η αύξηση της τάσης ή/και της συχνότητας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απορρύπανσης του εδάφους. Η απόδοση απορρύπανσης ήταν πιο υψηλή κατά τα πρώτα λεπτά της επεξεργασίας, ενώ μετά από περίπου 60 λεπτά επεξεργασίας επέρχεται κορεσμός. Το όζον κι οι ρίζες υδροξυλίου αναγνωρίστηκαν ως τα κύρια οξειδωτικά σωματίδια. Επίσης, παρατηρήθηκε πως ο χρόνος για τον οποίο το έδαφος παρέμεινε ρυπασμένο πριν την επεξεργασία του, επηρέασε ελαφρά την απόδοση της απορρύπανσης. Για αύξηση της χρονικής διάρκειας παραμονής του ρύπου στο έδαφος από 4 σε 96 ώρες, η απόδοση της επεξεργασίας μειώθηκε κατά 13.4%. Τέλος, τα ενδιάμεσα προϊόντα που παράχθηκαν από τη διαδικασία βρέθηκαν λιγότερο τοξικά και πιο εύκολα αποικοδομήσιμα από τον αρχικό ρύπο.

8.3.5 Απορρύπανση Εδάφους από Πολυχλωριωμένο Διφαινύλιο με Ψυχρό Πλάσμα

Αντικείμενο της έρευνας ήταν η αποδόμηση πολυχλωριωμένων διφαινυλίων στο έδαφος μέσω εκκένωσης διηλεκτρικού φράγματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο βαθμός απορρύπανσης μπορεί να φτάσει έως και 85%. Όσο μεγαλύτερο ήταν το μέγεθος των κόκκων του ρύπου τόσο πιο εύκολη ήταν η αποδόμηση του. Επίσης, όσο μεγαλύτερη ήταν η αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας και του χρόνου επεξεργασίας του δείγματος επηρέαζε θετικά το βαθμό απόδοσης της διαδικασίας. Τέλος, δεν ανιχνεύθηκαν καθόλου ενδιάμεσα προϊόντα, κάτι που δείχνει ότι η απορρύπανση του εδάφους με ψυχρό

πλάσμα ατμοσφαιρικής πίεσης είναι μία διαδικασία φιλική προς το περιβάλλον.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες λόγω της πολυπλοκότητας του εδαφικού συστήματος.

Από την άλλη πλευρά έχουν πολύ μεγάλη σημασία γιατί:

- Μέσω της ποσοτικής ανάλυσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων μπορεί να γίνει καταγραφή πολλών γεωλογικών ιδιοτήτων
- Έχουν αναπτυχθεί και αναπτύσσονται τεχνικές απορρύπανσης του εδάφους που βασίζονται στον ηλεκτρισμό και εκμεταλλεύονται τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες τεχνικές είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1] Καλαϊτζής Α., Απορρύπανση εδάφους από ηλεκτρικές εκκενώσεις διηλεκτρικού φράγματος, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών Ιούλιος 2015.
- 2] Βλάχος Λ., Φυσική Πλάσματος, εκδόσεις Τζιόλα 2000.
- 3] Θρουμουλόπουλος Γ., Εισαγωγή στη Φυσική Πλάσματος, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων 2009.
- 4] Αναστασιάδης Α., Εισαγωγή στη Φυσική Πλάσματος, 10^ο Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης, Βόλος Μάιος 2011.
- 5] Καββαδάς Μ., Στοιχεία Εδαφομηχανικής, έκδοση ΕΜΠ 2005.
- 6] http://www.teidasoponias.gr/site/news/xtra/morfologia/fisikes_idiotites_edafous.pdf
- 7] Δημήρκου Α., Εδαφολογία, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- 8] Φουντάς Σ. και Γέμτος Θ., Γεωργία Ακριβείας, ΣΕΑΒ 2015.
- 9] Αραβαντινός Κ., Προσθήκη Πυρολυμένης Βιομάζας για τη Βελτίωση Αστικών Εδαφών, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών 2016.
- 10] Σμπόνιας Α., Σύγκριση απόδοσης κυκλοδεξτρίνων και μη-ιονικών τασιενεργών στην ηλεκτροκινητική απομάκρυνση βαρέων μετάλλων και πολυαρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs) από ρυπασμένα ιζήματα, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης 2014.
- 11] Ανανιάδης Ι., Μελέτη ρύπανσης επιφανειακού εδάφους περιοχής επιβαρυσμένης με βιομηχανικούς ρύπους, βασισμένη στη μέτρηση των ανταλλάξιμων ιόντων Ασβεστίου (Ca^{2+}), Μαγνησίου (Mg^{2+}) και Καλίου (K^+) με χρήση μεθόδων Ενόργανης Χημικής Ανάλυσης, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ 2014.

- 12] Μόδης Κ και Σταματάκη Σ., Εισαγωγή στη Μεταλλευτική Έρευνα, ΣΕΑΒ 2015.
- 13] Τζάνης Α., Εισαγωγή στις Ηλεκτρομαγνητικές Μεθόδους Γεωφυσικής Διασκόπησης, Τμήμα Γεωλογίας, ΕΚΠΑ 2003.
- 14] Τσούρλος Π., Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικών Διασκοπήσεων, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ.
- 15] Ράδης Μ., Μελέτη και κατασκευή συσκευής για τη μέτρηση του pH και της αγωγιμότητας στο έδαφος, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Κρήτης 2015.
- 16] Σημειώσεις Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- 17] Πουρσαϊτίδης Α., Η Υπόγεια Υδραυλική στα Εδάφη, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ ΑΜΘ 2013.
- 18] Aggelopoulos C.A., Tsakiroglou C.D., Ognier S. and Cavadias S., Ex situ soil remediation by cold atmospheric plasma discharge, *Procedia Environmental Sciences* **18** 649-656 (2013).