



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Πολυτεχνική και Γεωπονική Σχολή

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών των τμημάτων Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Πολιτικών Μηχανικών και Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος

«Βιώσιμη Διαχείριση Περιβαλλοντικών Αλλαγών και Κυκλική Οικονομία»

Βιώσιμη διαχείριση ρυπασμένων εδαφών: η περίπτωση της πρόσληψης χαλκού από τη βιομηχανική κάνναβη.

ΒΑΣΙΛΟΥ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΓΚΟΛΙΑ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, Α.Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ, 2023

Βιώσιμη διαχείριση ρυπασμένων εδαφών: η περίπτωση της πρόσληψης χαλκού από τη βιομηχανική κάνναβη.



ΒΑΣΙΛΟΥ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ

Εξεταστική επιτροπή:

1. **Γκόλια Ευαγγελία**, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
2. **Τσιρόπουλος Νικόλαος**, Καθηγητής Χημείας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
3. **Σακελλαρίου Σταύρος**, Εντεταλμένος διδασκαλίας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην διεκπεραίωσή της. Ιδιαίτερα, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την Επιβλέπουσα της εργασίας Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Γκόλια Ευαγγελία, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου διατριβής, από την διεξαγωγή των πειραμάτων έως και την συγγραφή, τόσο για τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές της όσο και για την υπομονή και κατανόηση που επέδειξε. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά κ. Τσιρόπουλο Νικόλαο για την ενεργή συμβολή του στην πειραματική διαδικασία και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, καθώς και τον κ. Σακελλαρίου Σταύρο για την συμμετοχή του στην Τριμελή Επιτροπή. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο καθηγητή του Π.Θ. κ. Γιαννούλη Κυριάκο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος, όπως επίσης και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Καρκάνη Ανέστη για την συμβολή του στο πειραματικό σκέλος. Ιδιαίτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Παπαδήμου Σωτηρία για την ενεργό συμμετοχή της τόσο κατά την πειραματική διαδικασία όσο και κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων και την συγγραφή. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον υπεύθυνο του αγροκτήματος του Π.Θ. Δρ. Σουίπα Σπυρίδωνα για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την πειραματική διαδικασία, όπως επίσης και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Πετρόπουλο Σπυρίδωνα και στην ερευνητική του ομάδα, της οποίας είχα την τιμή να συμμετάσχω και συγκεκριμένα στην κ. Σιμοπούλου Σοφία, και στους υποψήφιους διδάκτορες Χασκή Χριστίνα και Νίκο Πολύζο, για την κατανόησή τους ως προς τις απαιτήσεις της διπλωματικής μου εργασίας και την συμβολή τους κατά την πειραματική διαδικασία. Επιπλέον, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω από καρδιάς την αδελφική μου φίλη και συνάδελφο Στεφανία Στεφανίδου για την άκρως πολύτιμη βοήθειά της, τόσο γνωσιακή όσο και ψυχολογική, κατά την συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και όλα τα μέλη της οικογένειάς μου και ιδιαίτερα τη μητέρα μου, για την αφοσίωσή τους και την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

*Η διπλωματική αυτή είναι
αφιερωμένη στον πατέρα μου...*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας του φυτού της βιομηχανικής κάνναβης (*Cannabis sativa* L.) για χρήση σε περιπτώσεις φυτοαποκατάστασης σε εδάφη ρυπασμένα με χαλκό. Το πειραματικό σχέδιο περιλάμβανε δύο είδη εδαφών: αργιλοπηλώδες έδαφος (Έδαφος 1) και μείγμα άμμου με το αργιλοπηλώδες έδαφος σε αναλογία 1:10 (Έδαφος 2). Σε κάθε έδαφος εφαρμόστηκαν 2 επίπεδα συγκεντρώσεων χαλκού -100 (Α) και 200 (Β) ppm- με εργαστηριακή επιμόλυνση, καθώς και μάρτυρας (Μ). Από τον συνδυασμό των παραπάνω παραγόντων προέκυψαν οι εξής μεταχειρίσεις: 1Α, 1Β, 1Μ, 2Α, 2Β, 2Μ. Προσδιορίστηκαν οι ολικές (με βασιλικό νερό Aqua Regia) και οι διαθέσιμες (με διάλυμα DTPA) συγκεντρώσεις Cu των εδαφών, καθώς και οι συγκεντρώσεις Cu στον φυτικό ιστό. Προσδιορίστηκαν τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά και η κοκκομετρική σύσταση των εδαφών. Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις των αναπτυξιακών χαρακτηριστικών των φυτών (ύψος, νωπή και ξηρή υπέργεια βιομάζα, SPAD και δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης-NDVI. Μέσω της στατιστικής Ανάλυσης Διακύμανσης Διπλής Κατεύθυνσης (2-Way ANOVA) έγινε έλεγχος της επίδρασης των δύο παραγόντων στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά των φυτών. Συνδυαστικά, πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις μεταξύ των εδαφολογικών χαρακτηριστικών, των αναπτυξιακών χαρακτηριστικών και των συγκεντρώσεων Cu του εδάφους και των φυτικών ιστών. Τέλος, προσδιορίστηκε η συγκέντρωση της κανναβιδιόλης (CBD) στα φυτά με υγρή χρωματογραφία.

Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν πως η κάνναβη άντεξε και αναπτύχθηκε ικανοποιητικά στα συγκεκριμένα επίπεδα χαλκού και στα δύο εδάφη. Τα φυτά φαίνεται, μάλιστα, να επωφελήθηκαν από την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων χαλκού στο έδαφος και αυτό αποτυπώθηκε στα αναπτυξιακά τους χαρακτηριστικά. Η ολική και η διαθέσιμη συγκέντρωση Cu ήταν υψηλότερη στο Έδαφος 1, παρά στο Έδαφος 2, όπως αντίστοιχα και οι τιμές των συγκεντρώσεων Cu στο φυτό. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού εντοπίστηκε στις άνω ρίζες των φυτών με σταδιακή φθίνουσα τάση προς τα ανώτερα φυτικά τμήματα (CuΡίζα> Cuβλαστός> Cuφύλλα), για τις περιπτώσεις και των δύο εδαφών. Οι δείκτες συσσώρευσης και μεταφοράς του Cu εντός του φυτικού ιστού φανέρωσαν την τάση του χαλκού για συσσώρευση στις ρίζες με μια μικρή μεταφορά προς τον κατώτερο βλαστό. Το γεγονός αυτό, καθιστά την κάνναβη ιδανική επιλογή για περιπτώσεις φυτοσταθεροποίησης σε εδάφη ρυπασμένα με χαλκό, δίνοντας τη δυνατότητα για περεταίρω αξιοποίηση της υπέργειας μη επιβαρυσμένης βιομάζας της. Το είδος του εδάφους επέδρασε στατιστικώς σημαντικά στο ύψος των φυτών, ενώ το επίπεδο επιμόλυνσης επηρέασε σημαντικά τη βιομάζα, τις τιμές SPAD και τις τιμές του δείκτη NDVI. Υπήρξε σημαντικά αρνητική συσχέτιση μεταξύ του

εδαφικού pH και της διαθέσιμης συγκέντρωσης χαλκού στο έδαφος, ενώ με χαμηλότερο επίπεδο σημαντικότητας συσχετίστηκε, αντίστοιχα και η ολική συγκέντρωση του εδάφους. Από τις συσχετίσεις έγινε διακριτή μια θετική επίδραση του Cu στη βιομάζα και στη χλωροφύλλη των φυτών των μεταχειρίσεων 1A και 1B, στις τιμές του δείκτη NDVI της μεταχείρισης 2A και στη βιομάζα, στο ύψος και στη χλωροφύλλη της μεταχείρισης 2B. Τέλος, παρατηρήθηκε αυξημένη συγκέντρωση κανναβιδιόλης (CBD) στις μεταχειρίσεις των υψηλότερων επιπέδων χαλκού B, ακολουθούμενη από τις συγκεντρώσεις στις μεταχειρίσεις A, ενώ οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίστηκαν στα φυτά των μαρτύρων.

Λέξεις κλειδιά: φυτοαποκατάσταση, ολική και διαθέσιμη συγκέντρωση ιχνοστοιχείου, Aqua Regia, DTPA, SPAD, NDVI.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1.ΤΑ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΩΣ ΑΙΤΙΑ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	1
1.1.1.ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΜΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ	2
1.1.1.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	3
1.1.1.2. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	3
1.1.2.Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	5
1.1.3.Η ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ.....	6
1.1.4. Η ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΦΥΤΑ.....	7
1.1.5. Ο ΧΑΛΚΟΣ	7
1.1.6. ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΧΑΛΚΟΥ	8
1.1.7.ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	9
1.1.8.ΒΙΟΣΣΥΣΩΡΕΥΣΗ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΑ ΦΥΤΑ.....	9
1.1.9.ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	10
1.1.10.ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	11
1.2.Η CANNABIS SATIVA	13
1.2.1. Η ΚΑΝΝΑΒΗ ΩΣ ΥΠΕΡΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ	14
1.2.2. ΟΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ.....	15
1.2.3. Η ΑΞΙΑ ΤΗΣ ΚΑΝΝΑΒΙΔΙΟΛΗΣ (CBD).....	16
1.2.4. Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ	17
1.2.5. ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	18
2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	20
2.1 ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΓΡΟΥ	20
2.1.1 ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	20
2.1.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	20
2.1.3. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	20
2.1.4. ΕΠΙΜΟΛΥΝΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	21
2.1.5. ΣΠΟΡΑ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΣΗ	22
2.1.6.ΑΡΑΙΩΣΕΙΣ.....	23
2.1.7.ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	23
2.1.8.ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΙΜΩΝ SPAD	24
2.1.9.ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ NDVI.....	25
2.1.10.ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	26
2.2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	27
2.2.1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	27

2.2.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ (EC) ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	28
2.2.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ (CaCO ₃) ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ	28
2.2.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ	29
2.2.5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΕΔΑΔΟΥΣ.....	30
2.2.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΒΑΣΙΛΙΚΟ ΝΕΡΟ (AQUA REGIA).....	31
2.2.7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΑ DTPA ..	33
2.2.8. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΝΝΑΒΙΔΙΟΛΗΣ ΜΕ ΥΓΡΗ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ.....	34
2.2.9. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ.....	35
2.2.10. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	35
3.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	36
3.1.ΟΙ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	36
3.2.ΟΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΦΥΤΟ	36
3.3.ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟΥΣ ΙΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΦΥΤΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ	40
3.4. ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ.....	42
3.5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ.....	45
3.6. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	48
3.6.1. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ SPAD –NDVI.....	48
3.6.2. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΤΡΩΣΕΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΤΑ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	49
3.7.ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΝΝΑΒΙΔΙΟΛΗΣ.....	61
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	63
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Τα αποτελέσματα των εδαφολογικών αναλύσεων	36
Πίνακας 2 Ποσοστό διαθέσιμης επί της ολικής συγκέντρωσης Cu	37
Πίνακας 3 Ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των mg Cu που συσσωρεύτηκαν στα επιμέρους τμήματα των φυτών της κάνναβης των 6 μεταχειρίσεων.	40
Πίνακας 4 Οι τιμές του παράγοντα βιοσυσώρευσης (BAF) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 1 (μ.ο. επαναλήψεων).	42
Πίνακας 5 Οι τιμές του παράγοντα βιοσυσώρευσης (BAF) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 2 (μ.ο. επαναλήψεων).	42

Πίνακας 6 Οι τιμές του συντελεστή μετατόπισης (TF) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 1 (μ.ο. επαναλήψεων n=5).	43
Πίνακας 7 .Οι τιμές του συντελεστή μετατόπισης (TF) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 2 (μ.ο. επαναλήψεων n=5).	43
Πίνακας 8 Οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς (TC) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 1 (μ.ο. 5 επαναλήψεων n=5).	44
Πίνακας 9 Οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς (TC) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 2 -(μ.ο. επαναλήψεων n=5).	44
Πίνακας 10 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στην κάνναβη με τη συγκέντρωση του χαλκού του εδάφους της μεταχείρισης 1Α και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.....	49
Πίνακας 11 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στην κάνναβη με τη συγκέντρωση του χαλκού στο έδαφος της μεταχείρισης 1Β και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.....	50
Πίνακας 12 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στο έδαφος της μεταχείρισης 1Α με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά	53
Πίνακας 13 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στο έδαφος της μεταχείρισης 1Β με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.....	54
Πίνακας 14 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στην κάνναβη με τη συγκέντρωση του χαλκού του εδάφους της μεταχείρισης 2Α και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.....	55
Πίνακας 15 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στην κάνναβη με τη συγκέντρωση του χαλκού του εδάφους της μεταχείρισης 2Β και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.....	56
Πίνακας 16 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στο έδαφος της μεταχείρισης 2Α με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.	58
Πίνακας 17 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στο έδαφος της μεταχείρισης 2Β με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά	59
Πίνακας 18 Η συγκέντρωση της κανναβιδιόλης CBD στην ξηρά ουσία των φύλλων των επιμέρους μεταχειρίσεων.	61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Ολικές και διαθέσιμες συγκεντρώσεις Cu στο έδαφος πριν και μετά την καλλιέργεια κάνναβης στις επιμέρους μεταχειρίσεις (μ.ο. επαναλήψεων n=5).	37
---	----

Διάγραμμα 2 Συγκέντρωση Cu στα επιμέρους τμήματα των φυτών που καλλιεργήθηκαν στο Έδαφος 1(μ.ο. επαναλήψεων n=5).....	38
Διάγραμμα 3 Συγκέντρωση Cu στα επιμέρους τμήματα των φυτών που καλλιεργήθηκαν στο Έδαφος 2 (μ.ο. επαναλήψεων n=5).....	38
Διάγραμμα 4 Ο μέσος όρος των mg Cu που συσσωρεύτηκε στα επιμέρους φυτικά τμήματα της κάνναβης στις μεταχειρίσεις των δύο εδαφών.....	41
Διάγραμμα 5 Το ύψος, η υπέργεια νωπή και ξηρή βιομάζα (g), οι τιμές SPAD και ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης NDVI των φυτών της κάνναβης των 6 μεταχειρίσεων. (μ.ο. επαναλήψεων n=5)	46
Διάγραμμα 6 Η συσχέτιση μεταξύ των τιμών SPAD και του δείκτη NDVI.....	48
Διάγραμμα 7 Η συγκέντρωση της κανναβιδιόλης CBD στην ξηρά ουσία των φύλλων των επιμέρους μεταχειρίσεων.	61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Η τάση του χαλκού για συσσώρευση πρωτίστως στις ρίζες των φυτών και δευτερευόντως στον βλαστό (Rehman et al.,2019).	10
Εικόνα 2 Η χημική δομή της κανναβιδιόλης (Vlad et al.,2020).	16
Εικόνα 3 Προϊόντα της αγοράς με κανναβιδιόλη	17
Εικόνα 4 Το πειραματικό σχέδιο	21
Εικόνα 5 Η σπορά της κάνναβης.....	22
Εικόνα 6 Τα φυτά κάνναβης στο επιβαρυμένο με Cu έδαφος.....	23
Εικόνα 7 Καταγραφή ύψους και νωπού βάρους των αφαιρούμενων φυτών έπειτα από αραίωση.	24
Εικόνα 8 Τα αφαιρούμενα έπειτα από αραίωση φυτά σε χάρτινες σακούλες λίγο πριν την ξήρανσή τους.	24
Εικόνα 9 Το χλωροφυλλόμετρο SPAD-502, Minolta Co Ltd	25
Εικόνα 10 Το όργανο μέτρησης Crop Circle ACS-211 Active Canopy Crop Sensor, της Holland Scientific.	26
Εικόνα 11 Δείγματα από κονιορτοποιημένα φυτικά μέρη.	27
Εικόνα 12 Συσσκευή θέρμανσης για ατομικές βόμβες εκχύλισης ECO-PRE, ODLAB	32
Εικόνα 13 Διαδικασία διήθησης των εκχυλισμάτων και μεταφοράς τους σε ογκομετρικές φιάλες.....	32
Εικόνα 14 Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης (AAS) με τεχνική φλόγας Shimadzu, AA-6300	33

Εικόνα 15 Προσδιορισμός κανναβινοειδών με την μέθοδο της υγρής χρωματογραφίας.	34
Εικόνα 16 Παραδείγματα χρωματογραφημάτων της περιεχόμενης κανναβιδιόλης σε δείγματα φύλλων κάνναβης.....	62

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.ΤΑ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΩΣ ΑΙΤΙΑ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Ο όρος «βαρέα μέταλλα» είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος εδώ και πολλά χρόνια και αναφέρεται στην ομάδα μετάλλων και μεταλλοειδών με ατομική πυκνότητα μεγαλύτερη από την τιμή 5 g cm^{-3} , τα οποία είναι ικανά να προκαλέσουν προβλήματα τοξικότητας (Alloway, 2013). Πρόκειται για ένα καθορισμένο υποσύνολο στοιχείων που εμφανίζουν μεταλλικές ιδιότητες και χαρακτήρα και περιλαμβάνει κυρίως τα μέταλλα μετάπτωσης, τα μεταλλοειδή, τις λανθανίδες και τις ακτινίδες (Sparks, 2003). Τα τελευταία χρόνια καθιερώθηκαν και κάποιοι νέοι όροι, όπως «Εν δυνάμει τοξικά στοιχεία» ή «Πιθανά Τοξικά Στοιχεία» (ΠΤΣ). Κάποια από τα βαρέα μέταλλα, όπως το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb) και ο υδράργυρος (Hg) έχουν τοξική δράση στους ζώντες οργανισμούς. Ορισμένα όμως βαρέα μέταλλα, όπως ο χακλός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn) κ.α. είναι απαραίτητα σε μικρές συγκεντρώσεις (ίχνη) για την ομαλή λειτουργία των ζώντων οργανισμών και γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως «ιχνοστοιχεία». Αν η συγκέντρωσή τους, όμως, ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή τότε γίνονται τοξικά και επικίνδυνα για τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς (Kabata-Pendias, 2010; Γκόλια 2003). Τα βαρέα μέταλλα ανάλογα με την τοξικότητα που προκαλούν στο περιβάλλον κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα μέταλλα τα οποία θεωρούνται λιγότερο επικίνδυνα για το περιβάλλον, είτε γιατί η ρύπανση που προκαλούν είναι τοπική, είτε γιατί θεωρούνται απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία των φυτικών και των ζωικών οργανισμών, αλλά και κάποιων μικροοργανισμών. Έτσι, στην πρώτη κατηγορία υπάγονται τα εξής: Al, Co, Cu, Mn, Mo, Se, Ti, V, Sn και Zn. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα μέταλλα τα οποία έχουν και καρκινογόνο δράση και σε αυτήν ανήκουν τα As, Be, Cr, Ni και Po, ενώ στην τρίτη κατηγορία κατατάσσονται τα πιο επικίνδυνα μέταλλα από περιβαλλοντικής και τοξικολογικής άποψης, δηλαδή τα Pb, Hg, Cd και τελευταία και το θάλλιο (Tl) (Kabata-Pendias, 2010).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως 20 από αυτά τα μέταλλα θεωρούνται απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την επιβίωση των οργανισμών όταν αυτά βρίσκονται σε μικροποσότητες (ιχνοστοιχεία), ενώ μόλις οι συγκεντρώσεις τους ξεπεράσουν ένα

ανώτατο όριο μετατρέπονται σε ιδιαίτερα επικίνδυνες για τους οργανισμούς ουσίες (Kabata-Pendias, 2010).

Τα ιχνοστοιχεία ή μικροθρεπικά στοιχεία τα οποία θεωρούνται απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία των φυτών είναι τα εξής: Cu, Zn, Fe, Mn, Co, Mo, Cl, B, ενώ τα στοιχεία που επιδρούν τοξικά στους ζωικούς οργανισμούς είναι τα εξής: Cd, Pb, Hg, Al, Ag, Te, Ti, Sb, Zn, Mn, Cu, B, και Cl. Ενδιαφέρον, λοιπόν, παρουσιάζει το πώς η έλλειψη των ιχνοστοιχείων από τους φυτικούς οργανισμούς δημιουργεί τροφопενίες, ενώ οι υψηλές συγκεντρώσεις αυτών δημιουργούν τοξικότητες (Alloway, 2013).

Τα βαρέα μέταλλα θεωρούνται από τους πιο επικίνδυνους ρύπους του περιβάλλοντος. Δεν αποικοδομούνται και παραμένουν αναλλοίωτα επιβαρύνοντας τα οικοσυστήματα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, είτε βρίσκονται σε μεταλλική μορφή (στοιχειακή) είτε με μορφή ενώσεων (Shifaw, 2018). Υπάρχουν περίπου 40 τέτοια στοιχεία και βρίσκονται σε μεγάλο βαθμό σε διάσπαρτη μορφή στα ορυκτά και τα πετρώματα του εδάφους (Sharma et al. 2005).

Σύμφωνα με τον Singh (2011) τα βαρέα μέταλλα διαταράσσουν τις μεταβολικές λειτουργίες των οργανισμών με τους εξής τρόπους: α) συσσωρεύονται, κλονίζοντας τη λειτουργία ζωτικών οργάνων και αδένων όπως ο εγκέφαλος, η καρδιά, τα νεφρά, το συκώτι, τα οστά κ.λπ. β) εκτοπίζουν τα ζωτικά θρεπτικά μέταλλα από την αρχική τους θέση, εμποδίζοντας έτσι τη βιολογική τους λειτουργία. Ωστόσο θεωρείται αδύνατο να ζει κανείς σε ένα περιβάλλον πλήρως απαλλαγμένο από τοξικά μέταλλα, ενώ υπάρχουν ποικίλοι τρόποι με τους οποίους μπορούν να εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα, όπως η κατανάλωση τροφών, ποτών, η έκθεση του δέρματος και ο εισπνεόμενος αέρας.

1.1.1. ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΜΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Η ρύπανση από βαρέα μέταλλα αποτελεί ένα κρίσιμο οικολογικό και περιβαλλοντικό ζήτημα που απασχολεί την κοινή γνώμη (Xiang et al. 2022), καθώς μπορούν να επηρεάσουν δραματικά την υγεία του ανθρώπου. Τα βαρέα μέταλλα εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της στοματικής πρόσληψης, της

στοματικής και ρινικής εισπνοής, αλλά και μέσω της δερματικής επαφής (Liu et al., 2023). Τα μέταλλα που ρυπαίνουν τα εδάφη, τον υδροφόρο ορίζοντα και την ατμόσφαιρα της γης μπορεί να έχουν τόσο φυσική όσο και ανθρωπογενής προέλευση. Καταλυτικό, όμως ρόλο στην διαιώνιση του προβλήματος έπαιξε η ταχεία παγκόσμια βιομηχανική ανάπτυξη, η αποδιοργανωμένη αστικοποίηση και η εντατική χρήση μεγάλων και πολλές φορές υπερβολικών ποσοτήτων λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων (Zwolak et al., 2019).

1.1.1.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Οι φυσικές πηγές ρύπανσης των βαρέων μετάλλων, σύμφωνα με τον Lui et al. 2023, αντιπροσωπεύουν το μικρότερο ποσοστό, συγκριτικά με τις ανθρωπογενείς. Περισσότερο από το 99% των στοιχείων που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης καταλαμβάνουν τα στοιχεία O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti και P. Λόγω της γεωχημικής τους προέλευσης και σε συνδυασμό με τις διαδικασίες της αποσάθρωση και της διάβρωσης εξαιτίας των κλιματικών συνθηκών (π.χ. άνεμους, βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις, ηλιακή ακτινοβολία), τα βαρέα μέταλλα εναποτίθεται στο περιβάλλον με φυσικό τρόπο (Κουκουλάκης κ.ά., 2018).

1.1.1.2. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Η ρύπανση εδάφους από ανθρωπογενείς παράγοντες μπορεί να είναι είτε τοπική είτε εκτεταμένη, επηρεάζοντας μεγάλες εκτάσεις εδάφους και υφίστανται όταν μεταφέρονται μέταλλα ή μεταλλοειδή από μία πηγή σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία, κυρίως με τους εξής μηχανισμούς (Alloway, 2013):

- κινούμενα ρεύματα αέρα με μεταφορά και εναπόθεση σκόνης, σωματιδιακών αερολυμάτων (<30 μm) και αέριων μορφών μετάλλων (π.χ. Hg),
- κινούμενα υδάτινα σώματα (απορροές ή/και πλημμύρες) που προκαλούν την εναπόθεση εδάφους ρυπασμένου με βαρέα μέταλλα,
- κίνηση πετρωμάτων πλούσια σε μέταλλα σε κατώτερα στρώματα λόγω βαρύτητας,

- σκόπιμη τοποθέτηση χωματογενικών υλικών επιβαρυμένα με βαρέα μέταλλα από τρακτέρ, ψεκαστήρες, κοπροδιανομείς, φορτηγά κτλ.

Οι ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης σύμφωνα με τους Lui et al. 2023, αποτελούν το μεγαλύτερο και πιο περίπλοκο ποσοστό πηγών ρύπανσης. Η ρύπανση από βαρέα μέταλλα στα εδάφη του αστικού ιστού οφείλεται κυρίως στα μέσα μεταφοράς και τις βιομηχανικές εκπομπές και συγκεκριμένα στην καύση ορυκτών καυσίμων και λιπαντικών, στη φθορά των ελαστικών και των τακακιών, στη διάβρωση των κινητήρων και των υλικών επίστρωσης των οχημάτων και των καταλυτών (Lui et al., 2023). Σύμφωνα με τους Zafra et al. 2017 μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων ελευθερώνονται στο περιβάλλον από διερχόμενα οχήματα και συσσωρεύονται σε δρόμους και διασταυρώσεις κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας. Αυτοί οι ρύποι στη συνέχεια παρασύρονται από την απορροή των όμβριων υδάτων και καταλήγουν στο περιβάλλον, εμπλουτίζοντας τα εδάφη με βαρέα μέταλλα.

Μία δεύτερη ανθρωπογενής αιτία ρύπανσης με βαρέα μέταλλα είναι η απόθεση αστικών και βιομηχανικών λυμάτων. Διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες όπως εξόρυξη, ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση, κατασκευή χαρτοπολτού και χαρτιού, κατασκευή χημικών, αποστακτήρια, βυρσοδεψεία, κλωστοϋφαντουργία, λεύκανση και βαφή, αλλά και βιομηχανίες τροφίμων, ζάχαρης, γαλακτοκομικών προϊόντων και ποτών, παράγουν κάθε χρόνο τεράστιο όγκο λυμάτων. Παράλληλα, μόνο το 24% των συνολικών λυμάτων παγκοσμίως που προέρχονται από βιομηχανίες και νοικοκυριά επεξεργάζονται πριν από τη διάθεσή τους σε υδάτινα σώματα ή πριν την επαναχρησιμοποίησή τους στη γεωργία. Αποτέλεσμα αυτού, είναι τα βαρέα μέταλλα που περιέχουν να προκαλούν σοβαρή τοξικότητα στα οικοσυστήματα, με κάποιους από τους πιο τοξικούς ρύπους να θεωρούνται τα Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Fe, Pb, Hg, As και Mn (Pratap et al. 2023).

Ο αγροτικός τομέας αποτελεί άλλη μία σοβαρή πηγή ρύπανσης των εδαφών από βαρέα μέταλλα. Η χρήση λιπασμάτων και αγροχημικών, καθώς και η διαδικασία της κομποστοποίησης αυξάνουν σημαντικά την περιεκτικότητα σε Cu, Zn και Cd στα εδάφη (Rodriguez et al., 2013). Συγκεκριμένα τα φωσφορικά λιπάσματα θεωρούνται η κύρια αιτία εισροής Cd στα εδάφη, καθώς σύμφωνα με τους Semu and Singh (1996), ως πρώτη ύλη για την παρασκευή τους χρησιμοποιούνται φωσφορίτες, οι οποίοι

περιέχουν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων και κυρίως Cd. Σε ενώσεις οι οποίες περιέχουν Cu, Hg, Mn, Pb ή Zn βασίζεται και το 10% των μυκητοκτόνων και εντομοκτόνων. Επιπλέον, η κοπριά που χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό από βοοειδή και χοίρους, αποτελεί εξίσου έναν λόγο εισροής στο έδαφος, κυρίως Cu και Zn (Vries et al., 2023), όπως επίσης και η ιλύς προερχόμενη είτε από βιολογικό καθαρισμό και οικιακή χρήση είτε από αγροκτήματα (Raymond and Felix, 2011).

Άλλες κύριες πηγές ρύπανσης με βαρέα μέταλλα, σύμφωνα με τους Khan et al. (2008) είναι και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από ορυκτά καύσιμα, άλλες μορφές ενέργειας όπως η πυρηνική, η γεωθερμική και η υδροηλεκτρική, η αποτέφρωση απορριμμάτων, οι ατμοσφαιρικές εκπομπές των διαφόρων βιομηχανιών που καταλήγουν στο έδαφος μέσω κατακρημνίσεων (Xiang et al., 2022), η απλή διάθεση απορριμμάτων και η αποτέφρωση φυτών.

1.1.2. Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Το έδαφος είναι ο άμεσος ή έμμεσος αποδέκτης όλων των μετάλλων που προέρχονται από τις προαναφερθείσες πηγές ρύπανσης. Αυτό φέρει ως αποτέλεσμα την τροποποίηση της χημικής του σύστασης με μία σειρά δυσμενών επιπτώσεων, τόσο για το ίδιο το έδαφος όσο και για τα φυτά, τα ζώα και τον άνθρωπο.

Τα τοξικά βαρέα μέταλλα επιδρούν στους μικροοργανισμούς του εδάφους, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για βασικές βιολογικές διεργασίες, όπως η χουμοποίηση, η αμμωνιοποίηση και η νιτροποίηση. Λόγω αυτής της τοξικής επίδρασης στους μικροοργανισμούς, οι διεργασίες αυτές επιβραδύνονται με αποτέλεσμα να αλλάζουν οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους, προκαλώντας αστάθεια στη δομή του, δυσκολία στην κίνηση των θρεπτικών και στην αποικοδόμηση των τοξικών στοιχείων που καταλήγουν σε αυτό (πχ. φυτοφάρμακα). Αυτή η αλλαγή των εδαφικών ιδιοτήτων, οι οποίες σε συνδυασμό με τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά, προσδιορίζουν την γονιμότητα του εδάφους, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγικότητάς του και ό,τι αυτό συνεπάγεται για τον αγροτικό τομέα. Προϋπόθεση βέβαια αυτής της υποβάθμισης είναι η συγκέντρωση των μετάλλων στο έδαφος να υπερβεί κάποιες οριακές τιμές (Μπαλωμένου, 2009).

Τα βαρέα μέταλλα αφού καταλήξουν στο έδαφος δύναται να ακολουθήσουν 4 διαφορετικές διαδρομές σύμφωνα με την Γκόλια 2003. Συγκεκριμένα, μπορούν να διαλυθούν μέσα στο εδαφικό υγρό δημιουργώντας σύμπλοκα, να συγκρατηθούν από την στερεή φάση του εδάφους, να καθιζάνουν υπό διάφορες μορφές-ενώσεις και τέλος να προσληφθούν από τα φυτά.

1.1.3. Η ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ

Η συνολική ποσότητα μετάλλων που μπορεί να εμπεριέχεται σε ένα έδαφος δεν συνάδει απαραίτητα με την ποσότητα των βιοδιαθέσιμων μετάλλων, δηλαδή των μετάλλων που μπορούν να προσληφθούν από τα φυτά, διότι είναι κατά βάση δεσμευμένα στις επιφάνειες των στερεών δομών του εδάφους. Η διαθεσιμότητα των ΒΜ εξαρτάται από ορισμένες εδαφικές ιδιότητες σύμφωνα με τον Αντωνιάδη 2022. Το pH του εδάφους, για παράδειγμα, επηρεάζει τη συμπεριφορά των ΒΜ, καθώς όταν αυτό αυξάνεται μειώνεται η διαθεσιμότητά τους, ενώ σε όξινες συνθήκες (χαμηλό pH) τα ΒΜ γίνονται περισσότερο ευκίνητα. Αυτό παρατηρείται, καθώς με την αύξηση του pH, αυξάνεται και το αρνητικό φορτίο στα ορυκτά της αργίλου, και κατά συνέπεια η έλξη για κατιόντα. Έτσι δεσμεύονται αποτελεσματικότερα και μειώνεται η κινητικότητά τους. Πέραν του pH, άλλες εδαφικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των ΒΜ είναι τα κολλοειδή του εδάφους και συγκεκριμένα η άργιλος και η οργανική ουσία, η ίδια η φύση του μετάλλου, καθώς κάποια δεσμεύονται πιο εύκολα ενώ άλλα είναι πιο ευδιάλυτα, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, η παρουσία CaCO_3 η οποία αυξάνει το pH και τέλος η «γήρανση» των ΒΜ.

Οι συγκεντρώσεις στοιχείων στο έδαφος χωρίζονται σε «ολικές» και «διαθέσιμες». Οι συνολικές συγκεντρώσεις περιλαμβάνουν όλες τις πιθανές μορφές του στοιχείου σε ένα έδαφος, όπως ιόντα δεσμευμένα στην κρυσταλλική δομή των πρωτογενών και δευτερογενών ορυκτών, ιόντα προσροφημένα στις επιφάνειες δευτερογενών ορυκτών όπως οι άργιλοι, τα οξείδια και τα ανθρακικά, ιόντα συνδεδεμένα στην οργανική ύλη, ελεύθερα ιόντα και τα διαλυτά οργανικά και ανόργανα σύμπλοκα στο εδαφικό διάλυμα. Οι περισσότερες από τις παραπάνω μορφές δεν είναι ικανές να

προσληφθούν άμεσα από τα φυτά. Γι' αυτό το λόγο η «διαθέσιμη» συγκέντρωση ενός στοιχείου στο έδαφος εκτιμά το κλάσμα αυτού του στοιχείου που υπάρχει είτε σε μορφή ελεύθερων ιόντων, είτε διαλυτών συμπλόκων είτε εύκολα εκροφήσιμων (αστάθειες) μορφών (Alloway, 2013).

1.1.4. Η ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΦΥΤΑ

Η πρόσληψη των ΒΜ πραγματοποιείται κυρίως από τις ρίζες και από τη φυλλική επιφάνεια του φυτού. Η απορρόφηση των ριζών είναι ταυτόχρονα παθητική και ενεργητική διαδικασία, με την παθητική διαδικασία να περιλαμβάνει την εισχώρηση των ιόντων από την υγρή φάση του εδάφους εσωτερικά στην επιδερμίδα της ρίζας, χωρίς να απαιτείται ενέργεια. Η ενεργητική διαδικασία από την άλλη απαιτεί μεταβολική ενέργεια, μπορεί να παρεμποδιστεί από τοξίνες και πραγματοποιείται εναντίον κάποιου χημικού συστατικού του εδαφικού διαλύματος. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσληψη των τοξικών μετάλλων από ένα φυτό είναι οι εξής: α) η φυσιολογική κατάσταση του μετάλλου στο έδαφος, β) το είδος του φυτού, καθώς κάποια φυτά προσλαμβάνουν ΒΜ πιο εύκολα συγκριτικά με άλλα και γ) εδαφικοί παράγοντες όπως η οργανική ύλη, το είδος και η συγκέντρωση των οξειδίων και το είδος και η συγκέντρωση των αργίλων (Μπαλωμένου, 2009).

1.1.5. Ο ΧΑΛΚΟΣ

Ο χαλκός είναι ένα μέταλλο με ατομικό αριθμό 29, ατομικό βάρος 63,5, πυκνότητα $8,96 \text{ g cm}^{-3}$, σημείο βρασμού 2595°C και σημείο τήξης 1083°C . Είναι ένα μέταλλο μετάπτωσης που ανήκει στην 4^η περίοδο και στην ομάδα IB του περιοδικού πίνακα. Αποτελεί το τρίτο πιο χρησιμοποιούμενο μέταλλο στον κόσμο και ταυτόχρονα αποτελεί ένα απαραίτητο μικροθρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη τόσο των φυτών και των ζώων. Στα φυτά, συγκεκριμένα, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή σπόρων, στη ρύθμιση του νερού και στην αντοχή ενάντια στις ασθένειες (Raymond and Felix, 2011). Παρόλο τον ζωτικής σημασίας ρόλο του στους βιοτικούς οργανισμούς, ο Cu σε υψηλές συγκεντρώσεις προκαλεί περιβαλλοντική ρύπανση και είναι τοξικό για τα φυτά, τα ζώα και τον άνθρωπο (Rehman et al. 2019).

1.1.6. ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΧΑΛΚΟΥ

Ο χαλκός οφείλει την ύπαρξή του στο περιβάλλον τόσο σε φυσικές όσο και σε ανθρωπογενείς πηγές. Γενικότερα, είναι ένα μέταλλο που συναντάται ευρέως στον φλοιό της γης, ειδικότερα με την μορφή ορυκτών (Κουκουλάκης κ.α. 2018). Η περιεκτικότητά του στην γήινη επιφάνεια κυμαίνεται από 24-50 mg/kg, ενώ στα ορυκτά μεταβάλλεται αναλόγως το είδος του ορυκτού (π.χ. χαλκοπυρίτης- 34%). Συχνά μεταφέρεται μέσω του αέρα με τη μορφή μικροσωματιδίων και εναποτίθεται στα εδάφη.

Φυσικά, οι ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης είναι εκείνες που ευθύνονται κατά κύριο λόγο για την περιβαλλοντική επιβάρυνση και συγκεκριμένα δραστηριότητες που σχετίζονται με την εξόρυξή του, την επεξεργασία και την παραγωγή υλικών και προϊόντων που έχουν ως βάση το Cu. Ενδεικτικά, κάποιες από αυτές τις δραστηριότητες είναι οι εξής (Κουκουλάκης κ.α. 2018) :

- Εφαρμογή λιπασμάτων και γεωργικών φαρμάκων (π.χ θεϊκός χαλκός για παρασκευή βορδιγάλειου πολτού).
- Επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων (ιλύς).
- Χρήση στις ζωοτροφές για πάχυνση των ζώων –η παραγόμενη κοπριά που χρησιμοποιείται στην γεωργία.
- Μεταλλουργεία (χύτευση μετάλλων, σωλήνες μεταφοράς φυσικού αερίου και νερού, κατασκευή ηλεκτρικών συσκευών, καλωδίων, ως συστατικό πολλών κραμάτων).
- Συντήρηση ξυλείας από βακτηριακές και μυκητολογικές αλλοιώσεις.
- Χυτήρια επεξεργασίας μεταλλευμάτων.
- Καύση γαιάνθρακα
- Ορυχεία
- Χωματερές
- Εκχιονισμός αστικού δικτύου με ορυκτό άλας.

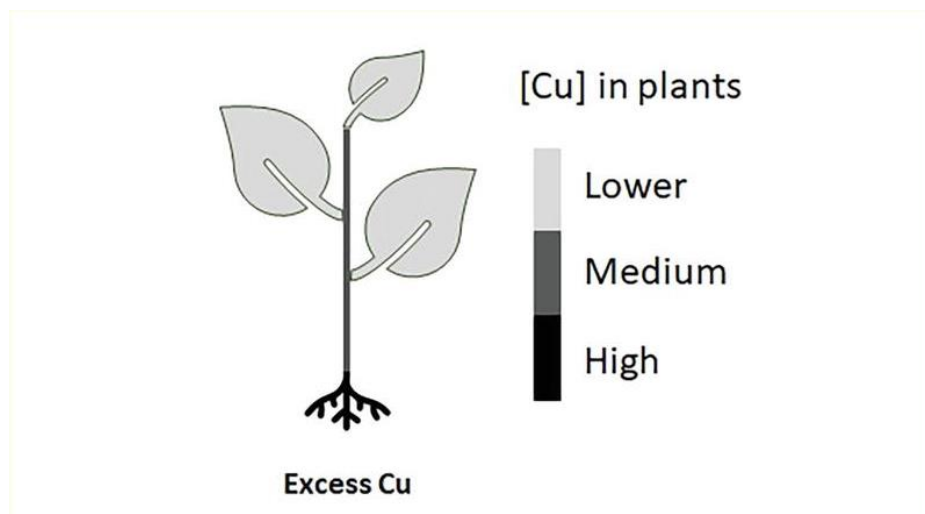
1.1.7.ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η κινητικότητα του εν λόγω στοιχείου στο έδαφος εξαρτάται από την χημική μορφή του και από τις χημικές ιδιότητες του εδάφους. Οι Κουκουλάκης κ.α. (2018) επισημαίνουν πως εάν υπάρχουν στο έδαφος πολλές ανθρακικές ενώσεις αυτό έχει ως συνέπεια την ακινητοποίηση του χαλκού λόγω της προσρόφησής του στην ενεργό επιφάνειά τους, με σταθερή διατήρηση της τιμής του pH. Οι ίδιοι επισημαίνουν πως η κινητικότητα του χαλκού αυξάνεται καθώς μειώνεται το pH και το αντίστροφο, για λόγους που προαναφέρθηκαν. Ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας και το οργανικό αργίλιο φαίνεται, επίσης, να επηρεάζουν την κινητικότητα και μεταφορά του χαλκού, καθώς ο χαλκός και το αργίλιο μετακινούνται στο έδαφος υπό την οργανική τους μορφή. Επίσης επηρεάζει ιδιαίτερα η οργανική ουσία και η δραστηριότητα των μικροοργανισμών, διότι με τα προϊόντα που παράγουν (πρωτεΐνες, οξέα, ένζυμα, φουλβικά και χουμικά οξέα και διάφορες δομικές κυτταρικές ουσίες) σχηματίζουν χηλικές ενώσεις με τον χαλκό, επηρεάζοντας όχι μόνο την μετακίνησή του, αλλά και τον βαθμό τοξικότητάς του.

1.1.8.ΒΙΟΣΣΥΣΩΡΕΥΣΗ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΑ ΦΥΤΑ

Σύμφωνα με τους Rehman et al. (2019), η ικανότητα των φυτών να συσσωρεύουν τον Cu ποικίλει μεταξύ των φυτικών ειδών και εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης και την εφαρμογή του χαλκού. Η τοξικότητα του χαλκού εμφανίζεται κυρίως στην ανάπτυξη και την μορφολογία των ριζών, καθώς δεν μεταφέρεται εύκολα σε υπέργεια μέρη του φυτού, αλλά απορροφάται έντονα από τις ρίζες του. Οι Rehman et al. (2019) αναφέρονται σε μία πληθώρα ερευνών για φυτικά είδη όπως: *Amaranthus spinosus*, *Oryza sativa*, *Triticum aestivum*, *Trigonella foenum-graecum*, *Willows (Salix spp.)*, *Phyllostachys pubescens*, *Eclipta alba* και *Boehmeria nivea*, οι οποίες αποδεικνύουν την τάση του χαλκού για συσσώρευση στη ρίζα με μία μικρή ανοδική πορεία προς τους βλαστούς. Αυτή η τάση συνδέεται με την ανοχή που

επιδεικνύουν τα φυτά έναντι στον χαλκό, ώστε μην επιτρέπουν την μετατόπισή του σε φωτοσυνθετικούς ιστούς.



Εικόνα 1. Η τάση του χαλκού για συσσώρευση πρωτίστως στις ρίζες των φυτών και δευτερευόντως στον βλαστό (Rehman et al.,2019).

1.1.9.ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Η αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών και των υπόγειων υδάτινων σωμάτων είναι μια διαδικασία σύνθετη που αποσκοπεί είτε στην πλήρη εξάλειψη των μετάλλων, είτε στη μείωση της συγκέντρωσής τους στα αποδεκτά όρια που υποδεικνύει η παρούσα νομοθεσία (Golia et.al, 2023). Με την πάροδο των χρόνων αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές αποκατάστασης των εδαφών, ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ρύπανσης από ΒΜ. Κάποιες τεχνικές αφορούν την επιτόπια αντιμετώπιση του προβλήματος (in-situ), ενώ άλλες απαιτούν την μεταφορά και αποκατάσταση του ρυπασμένου εδάφους σε ειδικούς χώρους επεξεργασίας (ex-situ). Σύμφωνα με τον Liu et al. 2018, στις επιτόπιες μεθόδους αποκατάστασης ανήκουν το κάλυμμα επιφάνειας, η ενθυλάκωση, η ηλεκτροκινητική εξαγωγή, η έκπλυση εδάφους, η χημική ακινητοποίηση, η φυτοαποκατάσταση και η βιοαποκατάσταση, ενώ στις τεχνικές ex-situ αποκατάστασης ανήκει η υγειονομική ταφή, η πλύση εδάφους, η στερεοποίηση ή μικροενθυλάκωση και η υαλοποίηση. Περαιτέρω κατηγοριοποίηση των τεχνικών μπορεί να γίνει με βάση τη μέθοδο που ακολουθούν σε: φυσικές, χημικές, ηλεκτρικές θερμικές και βιολογικές, καθώς και με

βάση τον μετασχηματισμό των μετάλλων (π.χ. σταθεροποίηση/ακινητοποίηση), τη μεταφορά των μετάλλων (π.χ. εξαγωγή/αφαίρεση) ή τον περιορισμό τους (π.χ. κάλυψη/ενθυλάκωση).

Πολλές από τις παραπάνω μεθόδους, ανεξαρτήτως της αποτελεσματικότητάς τους, είναι περιοριστικές λόγω του υψηλού λειτουργικού τους κόστους, με αποτέλεσμα να θεωρούνται ακατάλληλες για την αποκατάσταση μεγάλων ρυπασμένων περιοχών, στις οποίες η ρύπανση συχνά εμφανίζεται επιφανειακά και σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (Guidi Nissim et al., 2018). Πέραν αυτού, στις *ex-situ* μεθόδους, ο έλεγχος κατά τη διαδικασία είναι εξαιρετικά δύσκολος και θέτει σε περαιτέρω κινδύνους το περιβάλλον, η μεταφορά και η αποκατάσταση στις ειδικές εγκαταστάσεις είναι εξαιρετικά κοστοβόρα, ενώ συχνά δημιουργείται οπτική όχληση λόγω της αισθητικής αλλοίωσης του τοπίου. Γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος η φυτοαποκατάσταση (Golia et.al, 2023).

1.1.10.ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Από τη δεκαετία κιάλας του 1970, τα φυτά άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την θεραπεία και την αποκατάσταση εδαφών και υγροτόπων ρυπασμένων από βαρέα μέταλλα. Επίσημα σαν μέθοδος υιοθετήθηκε από τις κυβερνήσεις και γενικότερα την αγορά τη δεκαετία του 1980. Με την πάροδο των χρόνων η τεχνολογία εξερευνήθηκε εκτενέστερα και αναπτύχθηκε με γοργούς ρυθμούς (Liu et al., 2018).

Με τον όρο φυτοαποκατάσταση νοείται η καλλιέργεια φυτών σε ρυπασμένα εδάφη με σκοπό την απομάκρυνση των ΒΜ από τα φυτά ή την σταθεροποίησή τους σε αδρανή κατάσταση. Ως τεχνολογία είναι πρακτικά απλή, οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμη, αισθητικά πιο θεμιτή και ευρέως αποδεκτή. Πέραν όμως αυτών, υπερτερεί σε κάτι ακόμη πολύ σημαντικό: συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους οι οποίες μεταβάλλουν με μη αναστρέψιμο τρόπο τις ιδιότητες του εδάφους, η φυτοαποκατάσταση βελτιώνει την ποιότητα τους εδάφους με φυσικό, χημικό και βιολογικό τρόπο. Η μέθοδος της φυτοαποκατάστασης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: στην φυτοεκχύλιση ή φυτοεξαγωγή, κατά την οποία τα ΒΜ μεταφέρονται και

συσσωρεύονται σε βλαστούς και φύλλα και στην φυτοσταθεροποίηση, κατά την οποία τα ΒΜ ακινητοποιούνται στο έδαφος από τις ρίζες των φυτών (Liu et al., 2018).

Για την εφαρμογή της φυτοεξαγωγής επιλέγονται φυτά, τα οποία έχουν την ικανότητα να συγκεντρώνουν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων στους ιστούς τους, χωρίς να υφίστανται κάποια φυτοτοξική βλάβη (Liu et al., 2018). Ορισμένα μάλιστα συσσωρεύουν βαρέα μέταλλα τα οποία δεν θεωρούνται καθόλου απαραίτητα για τον οργανισμό τους, ούτε καν σε μικρές ποσότητες όπως για παράδειγμα το Cd, Cr, Pb, Co, Ag, Se και Hg (Sheoran V., 2016). Τα συγκεκριμένα φυτά αναπτύσσονται ικανοποιητικά σε τέτοιου είδους μεταλλοφόρα εδάφη, απορροφώντας αποτελεσματικά συγκεκριμένα μεταλλικά ιόντα από το έδαφος, μεταφέροντάς τα από τις ρίζες στους βλαστούς και δεσμεύοντάς τα στους ιστούς των φύλλων (Liu et al., 2018). Γι' αυτό τον λόγο χαρακτηρίζονται ως μεταλλόφυτα. Τα μεταλλόφυτα είναι τυπικά ενδημικά φυτά στα εγγενή μεταλλοφόρα εδάφη τους και αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της βιοποικιλότητας σε τέτοιου είδους περιοχές. Υπάρχουν ορισμένα μεταλλόφυτα που συσσωρεύουν ακραία υψηλές ποσότητες ιχνοστοιχείων στα υπέργεια τμήματά τους ($> 10\,000$ (Mn και Zn), $> 1\,000$ (Cu, Co, Cr, Ni και Pb) ή > 100 (Cd) mg kg⁻¹) και ως εκ τούτου ονομάζονται υπερσυσσωρευτές (Sheoran V., 2016). Στην κατηγορία των υπερσυσσωρευτών ανήκουν 721 είδη (Liu et al., 2018). Για να θεωρηθεί ένα φυτό ως υπερσυσσωρευτής θα πρέπει να μπορεί να συσσωρεύει μέταλλα και μεταλλοειδή σε συγκέντρωση 100 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τα φυτά που δεν ανήκουν σε αυτή την κατηγορία αλλά αναπτύσσονται στο ίδιο περιβάλλον (Sheoran V., 2016).

Υπάρχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει ένα φυτό ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί αποτελεσματικά φυτοεκχύλιση. Συγκεκριμένα, είναι απαραίτητο να αναπτύσσεται με ταχύ ρυθμό, να έχει υψηλή βιομάζα, να διαθέτει εκτεταμένο ριζικό σύστημα ώστε να μπορεί να διεισδύει σε μεγάλο όγκο εδάφους, να έχει καλή ανοχή στις υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων και υψηλό παράγοντα μετατόπισης, να προσαρμόζεται σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα και να είναι εύκολη η γεωργική του διαχείριση. Πέρα από τα φυτικά χαρακτηριστικά η αποτελεσματική φυτοεξαγωγή εξαρτάται και από τη βιοδιαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων στο εδαφικό διάλυμα

αλλά και από την ικανοποιητική μετακίνησή του στην υπέργεια βιομάζα. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών πολύ δύσκολα επιτυγχάνεται από ένα μόνο φυτό. Για το λόγο αυτό ακολουθούνται κατά βάση δύο στρατηγικές για την επιλογή κατάλληλου φυτικού είδους: η χρήση υπερσυσσωρευτή ή η χρήση φυτικών ειδών υψηλής βιομάζας συνδυαστικά με παράγοντες διαλυτοποίησης μετάλλων (Sheoran V., 2016). Ένα φυτό που τα τελευταία χρόνια έχει προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον ως υπερσυσσωρευτής σε περιπτώσεις φυτοεξυγίανσης, είναι η *Cannabis Sativa*.

1.2.Η CANNABIS SATIVA

Η *Cannabis sativa* L. είναι ένα δίοικο, ετήσιο, ποώδες φυτό (Ahmad et al. 2015), που ανήκει στην οικογένεια *Cannabaceae*. Έχει την ικανότητα να φύεται σε ποικίλους οικοτόπους και υψόμετρα, από περιοχές που βρίσκονται στο επίπεδο της θάλασσας, μέχρι στους αλπικούς πρόποδες των Ιμαλαΐων, από όπου πιθανώς προήλθε. Η καλλιέργεια και η χρήση της χρονολογείται πριν από 5000-6000 χρόνια, γεγονός που δυσκολεύει ιδιαίτερα τον εντοπισμό του τόπου προέλευσής της. Θεωρείται ως μια από τις παλαιότερες φυτικές πηγές τροφίμων και υφαντικών ινών. Η καλλιέργεια της με σκοπό την αξιοποίησή της ίνας ως μέσο ύφανσης προέρχεται από την Αίγυπτο και τη δυτική Ασία. Στην Ευρώπη εισήχθη μεταξύ του 1000 και 2000 π.Χ., ενώ στην Νότια Αμερική και συγκεκριμένα στη Χιλή έφτασε το 1545. Πέρασαν πάνω από 60 χρόνια μέχρι η καλλιέργεια να φτάσει και στην Βόρεια Αμερική (El Sohly et.al 2017). Η χρήση και η καλλιέργειά της περιορίστηκε σημαντικά μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, λόγω της παρουσίας ψυχοτρόπων ενώσεων και συγκεκριμένα της Δ9-τετραϋδροκανναβινόλης (THC) (Angelini et al. 2014).

Το γένος *Cannabis* χωρίζεται σε τρία ξεχωριστά είδη: *Cannabis sativa*, *Cannabis indica* και *Cannabis ruderalis*. Από οικονομικής απόψεως οι *sativa* και *indica* είναι οι πιο σημαντικές και διαδεδομένες (ElSohly et.al 2017). Ο κύκλος ζωής της διαρκεί από 4-8 μήνες και αναπαράγεται μέσω του πολλαπλασιασμού των σπόρων (Golía et.al 2021). Αναλόγως την ποικιλία φτάνει σε ύψος από 2 έως 5 μέτρα. Η κύρια ρίζα του έχει την ικανότητα να αναπτύσσεται σε βάθος 2 μέτρων, ενώ η δευτερεύουσα που αποτελεί την πλειοψηφία του ριζικού συστήματος φτάνει σε βάθος 10-60 cm. Τα

φύλλα του έχουν χαρακτηριστικές έντονες οδοντώσεις και είναι λεπτά και μακριά (Galic et al. 2019). Ως είδος θεωρείται αρκετά ανεκτικό, αφού μπορεί και αναπτύσσεται στις περισσότερες αντίξοες συνθήκες, αποδίδοντας ταυτόχρονα μία ικανοποιητική ποσότητα βιομάζας ως δευτερεύον προϊόν (Galic et al. 2019), χωρίς να απαιτεί υψηλές εισροές υπό το φάσμα ποικίλων αγρονομικών συνθηκών (Angelini et al. 2014). Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα και την ποιότητα των τελικών προϊόντων της είναι το κλίμα, οι εδαφικές συνθήκες και ιδιότητες, το γενετικό υλικό και οι τεχνικές καλλιέργειας που ακολουθούνται (Angelini et al. 2014).

Με την πάροδο των χρόνων η ανθρώπινη παρέμβαση οδήγησε στην δημιουργία διαφόρων ποικυλίων κάνναβης. Οι Golia et.al 2023 επισημαίνουν μερικές από αυτές: *Cannabis americana* Pharm πρώην *Wehmer*, *Cannabis chinensis* Delile, *Cannabis erratica* Siev, *Cannabis feetens* Gilib, *Cannabis generalis* EHL Krause, *Cannabis gigantea* Crevost, *Cannabis indica* Lam, *Cannabis intersita* Soja'k, *Cannabis kafiristanica* (Vav.) Chrték, *Cannabis lupulus* (L.) Scop., *Cannabis macrosperma* Stokes, *Cannabis ruderalis* Janisch., και *Cannabis sativa* L.

1.2.1. Η ΚΑΝΝΑΒΗ ΩΣ ΥΠΕΡΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ

Η κάνναβη διαθέτει ορισμένα χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδανική επιλογή σε περιπτώσεις φυτοαποκατάστασης. Σαν καλλιέργεια παράγει μεγάλα ποσά βιομάζας, αναπτύσσεται με γρήγορο ρυθμό, εύκολα και σε πυκνές συστάδες. Το βαθύ ριζικό της σύστημα της επιτρέπει να εισχωρεί σε κατώτερα στρώματα εδάφους και επομένως να απορροφά αποτελεσματικότερα τα βαρέα μέταλλα, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγάλη ανοχή σε υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων (κυρίως Cd και Ni). Επίσης, έχει αποδειχθεί πως ανέχεται και εν μέρει συσσωρεύει Cu σε όλα τα φυτικά μέρη (Bona et al. 2007).

Χάρη στα παραπάνω χαρακτηριστικά, η κάνναβη μπορεί να μετατρέψει έρημες ρυπασμένες περιοχές σε καλλιεργήσιμη γη και ταυτόχρονα μπορεί να βοηθήσει στη σταθεροποίηση του μολυσματικού φορτίου των περιοχών αυτών (Mahmood et al., 2013). Θεωρείται κατάλληλη για την εξυγίανση περιοχών ρυπασμένων με βαρέα μέταλλα, εκρηκτικά, φυτοφάρμακα, διαλύτες, αργό πετρέλαιο, πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες και τοξίνες (Placido and Lee 2022).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημά της είναι πως έπειτα από τη διαδικασία της φυτοαποκατάστασης μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί με διάφορες τελικές χρήσεις, ολοκληρώνοντας έτσι ένα κυκλικό βιώσιμο μοντέλο.

1.2.2. ΟΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ

Η κάνναβη θεωρείται ως ένα πολυλειτουργικό φυτό με ποικίλες βιομηχανικές και φαρμακευτικές χρήσεις. Στην σύγχρονη εποχή όπου οι ανθρώπινες απαιτήσεις συνεχώς αυξάνονται και κατασπαταλούνται οι φυσικοί πόροι με αμείωτο ρυθμό, η κάνναβη, ως φυτική πρώτη ύλη, αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη βιώσιμη επιλογή, με τις εφαρμογές της να επεκτείνονται σε 4 μεγάλους τομείς: βιομηχανική χρήση-κατασκευή νέων υλικών, αγροδιατροφικός τομέας, φαρμακευτική χρήση και ψυχαγωγία. Ο Fike J. (2017) παρέθεσε απόσπασμα ενός άρθρου της Popular Mechanics του 1938, στο οποίο αναγράφονταν χαρακτηριστικά πως η κάνναβη «μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή περισσότερων από 25.000 προϊόντων, που κυμαίνονται από δυναμίτη έως σελοφάν».

Οι εξωτερικές ίνες του φλοιού είναι μακριές και περιβάλλουν τον αγγειακό ιστό του στελέχους του φυτού, ενώ οι εσωτερικές ίνες είναι κοντύτερες και σχηματίζουν τον ξυλώδη πυρήνα (Small, 2015). Αυτοί οι διαφορετικοί τύποι ινών μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ποικίλων κλωστοϋφαντουργικών και βιομηχανικών υλικών, μερικά από τα οποία είναι τα εξής (Fike J., 2017):

1. Πολτός και χαρτί
2. υφάσματα
3. ίνες και χαλί
4. νανοκρύσταλλοι και νανοΐνες
5. υλικά συσκευασίας ενισχυμένου αφρού
6. βιοσύνθετα υλικά και μοριοσανίδες
7. ενισχυμένο πλαστικό και σκυρόδεμα

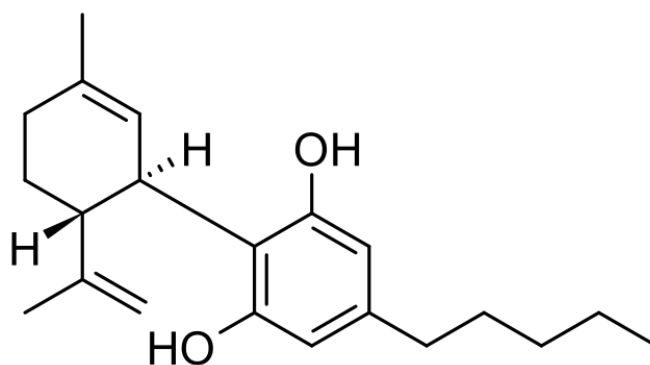
Από τον σπόρο της κάνναβης μπορεί να παρασκευαστεί έλαιο, άλευρο και κατά συνέπεια ποικίλα διατροφικά προϊόντα. Οι σπόροι κάνναβης αποτελούν μία πλούσια πηγή φυτικών πρωτεϊνών (20-35% της συνολικής μάζας των σπόρων) και μπορούν να

αντικαταστήσουν εν μέρει την ανάγκη πρόσληψης ζωικών πρωτεϊνών. Το έλαιο της κάνναβης (20-35% της συνολικής μάζας των σπόρων), λόγω των πολυακόρεστων λιπαρών οξέων που διαθέτει στην καλύτερη αναλογία για τον άνθρωπο και πολλών άλλων ευεργετικών συστατικών, φαίνεται να προλαμβάνει πολλές και σοβαρές ασθένειες, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου, των νευροεκφυλιστικών ασθενειών και των γαστρεντερικών διαταραχών (Sorrentino, 2021). Ο υπόλοιπος σπόρος της κάνναβης (20%-30%) αποτελείται από υδατάνθρακες και φυτικές ίνες. Αυτή η σύνθεση επιτρέπει στον σπόρο να χρησιμοποιείται πέρα από διατροφικά προϊόντα και ζωοτροφές και σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας και καύσιμα (Golia et. al, 2023).

Η κάνναβη έχει μακρά ιστορία και στην ιατρική, λόγω των πολύτιμων κανναβινοειδών που περιέχει. Μέχρι στιγμής έχουν καταγραφεί πάνω από 120 (Morales et. al, 2019), με την Δ9 τετραϋδροκανναβινόλη (Δ9-THC) και την κανναβιδιόλη (CBD) να βρίσκονται στις υψηλότερες συγκεντρώσεις. Η Δ9-THC αποτελεί το κύριο ψυχοδραστικό συστατικό της κάνναβης και η παρουσία της είναι αυτή που ευθύνεται για τη διάκριση της «κάνναβης» από τη «μαριχουάνα», ενώ η κανναβιδιόλη (CBD) παρουσιάζει σπουδαία θεραπευτικά οφέλη σε μια πληθώρα ασθενειών (Morales et. al 2019).

1.2.3. Η ΑΞΙΑ ΤΗΣ ΚΑΝΝΑΒΙΔΙΟΛΗΣ (CBD)

Η θεραπευτική ιδιότητα της κανναβιδιόλης αγνοήθηκε για πάρα πολλά χρόνια, καθώς η έρευνα γύρω από την κάνναβη επικεντρώνονταν για πολύ καιρό στην ψυχοτρόπα δράση της Δ9-THC (Burstein, 2015).



Εικόνα 2 Η χημική δομή της κανναβιδιόλης (Vlad et al., 2020).

Η κανναβιδιόλη απομονώθηκε για πρώτη φορά από εκχυλίσματα κάνναβης το 1940. Ωστόσο, για σχεδόν 25 χρόνια δεν πραγματοποιήθηκε περαιτέρω έρευνα εκτός από μερικές μελέτες για την απομόνωσή της. Η ακριβής χημική δομή της (Εικόνα 2) επισημάνθηκε το 1963 (Crippa et. al 2018).

Μέχρι σήμερα πολυάριθμα in vitro και in vivo πειράματα απέδειξαν τα θεραπευτικά οφέλη αυτού του κανναβινοειδούς. Μεταξύ άλλων, η κανναβιδιόλη εμφανίζει αντικαρκινικές, αντιφλεγμονώδεις, αντισπασμωδικές, αντιεπιληπτικές, αναλγητικές, αγχολυτικές και νευροπροστατευτικές ιδιότητες (Morales et. al 2019). Ιδιαίτερα τα ευεργετικά αποτελέσματά της σε σοβαρές ασθένειες όπως η σκλήρυνση κατά πλάκας και η επιληψία, ώθησαν το νομοθετικό πλαίσιο χωρών όπως του Ηνωμένου Βασιλείου προς τη νομιμοποίηση της φαρμακευτικής κάνναβης (Bhamra et.al 2021).



Εικόνα 3 Προϊόντα της αγοράς με κανναβιδιόλη

Η CBD διατίθεται σε συμπληρώματα διατροφής και καλλυντικά και τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον του καταναλωτικού κοινού για τέτοιου είδους προϊόντα έχει εκτοξευτεί. Αυτή η αύξηση της ευαισθητοποίησης για τα θεραπευτικά οφέλη της και τη χρήση των προϊόντων της, οδήγησε το 2020 την παγκόσμια αγοραία αξία της CBD να φτάσει στα 2,8 δισεκατομμύρια δολάρια, με αναμενόμενη αύξηση 21% τα επόμενα 7 χρόνια (Bhamra et.al 2021).

1.2.4. Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

Η κυκλική οικονομία προτείνεται τα τελευταία χρόνια ως μια λύση στην αντιμετώπιση της εξάντλησης των φυσικών πόρων και της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Σαν μοντέλο επιτυγχάνει κοινωνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη μέσω της ανάκτησης πόρων από υλικά που μέχρι πρότινος αντιμετωπίζονταν ως απόβλητα.

Ομοίως, η βιομηχανική κάνναβη μετά τη διαδικασία της φυτοαποκατάστασης μπορεί να αντιμετωπιστεί ως «πόρος», καθώς ο τρόπος που συσσωρεύει τα ΒΜ και το γεγονός πως δεν επηρεάζουν δραματικά τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της, επιτρέπει την περεταίρω εκμετάλλευσή της (Wu et al. 2021).

Έπειτα από 120 ημέρες ανάπτυξης σε ρυπασμένα εδάφη, η ώριμη κάνναβη, που χαρακτηρίζεται από ορισμένη βιομάζα, όγκο, ύψος και επίπεδο τοξικότητας, διαχωρίζεται σε υψηλότερης και χαμηλότερης ποιότητας. Η κάνναβη υψηλότερης ποιότητας προτείνεται για περεταίρω επεξεργασία, δηλαδή για ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση, ενώ η κάνναβη χαμηλότερης ποιότητας προτείνεται για υποβολή σε διαδικασίες πυρόλυσης και πέψης ή για χρήση ως εναλλακτική πηγή ενέργειας (Wu et al. 2021).

Το κάθε τμήμα του φυτού της κάνναβης μπορεί να αξιοποιηθεί για διαφορετικό σκοπό και να μετατραπεί σε ένα διαφορετικό τελικό προϊόν. Για παράδειγμα, οι ίνες της κάνναβης λόγω της υψηλής τους περιεκτικότητας σε κυτταρίνη και της υψηλής τους βιομάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοενέργειας και χαρτιού. Αντίστοιχα, το υποπροϊόν που προκύπτει μετά την τήξη του στελέχους της κάνναβης, τα λεγόμενα Hemp Hurds, μπορούν να αξιοποιηθούν στην στρωμή ζώων (Wu et al. 2021). Το hemp shiv, που προέρχεται επίσης από τα στελέχη του φυτού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύνθετο μονωτικό υλικό (hempcrete) στην κατασκευή κτηρίων (Grassa et al., 2018), αυξάνοντας την αεροστεγανότητά τους, βελτιώνοντας την ποιότητα του αέρα εσωτερικά και επιτυγχάνοντας χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Οι σπόροι κάνναβης θεωρούνται μία πολλά υποσχόμενη πηγή για την παραγωγή βιοντίζελ και βιοαιθανόλης, ενώ οι ταξιανθίες της κάνναβης χρησιμοποιούνται ως εντομοκτόνο, λόγω των αδενικών τριχών που εκκρίνουν ελαιορητίνη, η οποία παγιδεύει τα έντομα (Wu et al. 2021).

1.2.5. ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της αντίδρασης, της συσώρευσης και της ανοχής του φυτού της κάνναβης σε διαφορετικά επίπεδα χαλκού και σε εδάφη διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης, με σκοπό την αξιολόγησή της καταλληλότητάς της σε περιπτώσεις φυτοαποκατάστασης εδαφών ρυπασμένα με χαλκό. Επιπλέον, θεωρήθηκε σημαντικό να διερευνηθεί ο τρόπος

συσσώρευσης του χαλκού εντός του φυτικού ιστού, δηλαδή το κατά πόσο παραμένει συγκεντρωμένος στις ρίζες ή μεταφέρεται και στην υπέργεια βιομάζα, ώστε να προταθεί η περεταίρω αξιοποίησή της στα πλαίσια ενός κυκλικού μοντέλου.

2.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΓΡΟΥ

2.1.1 ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

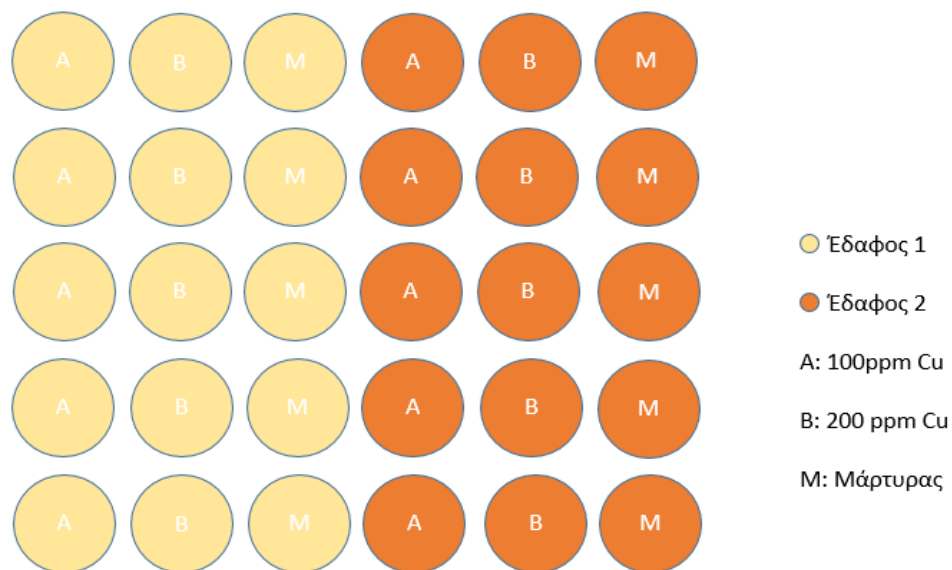
Το πείραμα πραγματοποιήθηκε χρονικά κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου Μάιος 2022- Σεπτέμβριος 2022 στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που βρίσκεται στην περιοχή του Βελεστίνου του νομού Μαγνησίας.

2.1.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Η διεξαγωγή του πειραματικού μέρους πραγματοποιήθηκε σε φυτοδοχεία, στα οποία έγινε εργαστηριακή επιμόλυνση του εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχθηκε η αντίδραση και η αντοχή της κάνναβης σε συγκεκριμένα και διαφορετικά επίπεδα χαλκού, υπό ελεγχόμενες συνθήκες, χωρίς να επεκταθεί η μόλυνση στο υπόλοιπο αγρόκτημα.

2.1.3. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 30 φυτοδοχεία των είκοσι λίτρων. Στα 15 φυτοδοχεία τοποθετήθηκε έδαφος απευθείας συλλεγμένο από το αγρόκτημα του Πανεπιστημίου, μέχρι συμπλήρωσης τελικού όγκου 10 L, ενώ στα υπόλοιπα 15 φυτοδοχεία τοποθετήθηκε μείγμα άμμου με έδαφος του αγροκτήματος, σε αναλογία 1:10. Το πειραματικό σχέδιο περιλάμβανε 2 επίπεδα χαλκού με 5 επαναλήψεις (Εικόνα 4). Η εγκατάσταση του πειράματος τοποθετείται χρονικά στις 6/5/2022. Για την καλύτερη διεξαγωγή του πειράματος και την ευκολότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων οι μεταχειρίσεις κωδικοποιήθηκαν με τον εξής τρόπο: ως Έδαφος 1 ορίστηκε το έδαφος που συλλέχθηκε από το αγρόκτημα του Πανεπιστημίου και ως Έδαφος 2 ορίστηκε το μείγμα 1:10. Οι μεταχειρίσεις των 100ppm Cu ορίστηκαν ως Α, οι μεταχειρίσεις των 200ppm Cu ορίστηκαν ως Β, ενώ οι μεταχειρίσεις του μάρτυρα ορίστηκαν ως Μ. Έτσι, προέκυψαν οι εξής κωδικοποιήσεις: 1Α, 1Β, 1Μ, 2Α, 2Β, 2Μ. Η εγκατάσταση του πειράματος τοποθετείται χρονικά στις 6/5/2022.



Εικόνα 4 Το πειραματικό σχέδιο

2.1.4. ΕΠΙΜΟΛΥΝΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το έδαφος, αφού συλλέχθηκε από τον χώρο του αγροκτήματος του Π.Θ. κοσκινίστηκε, ώστε να απομακρυνθούν από αυτό περιττά υλικά και τοποθετήθηκε σε 30 γλάστρες των 20L μέχρι πληρώσεως των 10L. Έπειτα, στα 15 φυτοδοχεία πραγματοποιήθηκε ανάμειξη με άμμο σε αναλογία 1:10. Αφού ομογενοποιήθηκαν, τα εδάφη των φυτοδοχείων τοποθετήθηκαν μέσα σε ξεχωριστές μαύρες σακούλες απορριμμάτων, ώστε να γίνει η επιμόλυνση.

Για την επιμόλυνση χρησιμοποιήθηκε νιτρικός χαλκός $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Στόχος ήταν στα δύο διαφορετικά εδάφη να δημιουργηθούν εξίσου 3 μεταχειρίσεις και να εφαρμοστούν 2 διαφορετικά επίπεδα Cu, των 100ppm και των 200ppm, καθώς και η παρουσία μάρτυρα. Για να επιτευχθεί η δόση των 100 ppm προστέθηκε σε ογκομετρική φιάλη ενός λίτρου 3,1g $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, και νερό μέχρι πληρώσεως του όγκου, ενώ αντίστοιχα για την δόση των 200ppm προστέθηκαν 6,2 g $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Σε κάθε γλάστρα προστέθηκαν 200mL διαλύματος.

Μετά την επιμόλυνση, οι σακούλες κλείστηκαν ερμητικά και πραγματοποιήθηκε χειροκίνητη ανάδευση του εδάφους. Ακολούθησε επώαση με σφραγισμένες τις

σακούλες για 2 εβδομάδες, ενώ κάθε 2-3 ημέρες η ανάδευση επαναλαμβάνονταν. Μετά το πέρας των 2 εβδομάδων το έδαφος τοποθετήθηκε εντός των φυτοδοχείων και πραγματοποιήθηκε σπορά.

2.1.5. ΣΠΟΡΑ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΣΗ

Η ποικιλία που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος ήταν η Felina 32. Μετά την ολοκλήρωση της επώασης, στις 6/5/22, εφαρμόστηκε λίπανση χρησιμοποιώντας το σκεύασμα Nitrophosca 15-5-20 και συγκεκριμένα 2g σε κάθε γλάστρα. Στη συνέχεια το έδαφος ποτίστηκε επαρκώς και τοποθετήθηκαν 10 σπόροι της ποικιλίας περιμετρικά σε κάθε φυτοδοχείο (Εικόνα 4). Έπειτα από μία εβδομάδα παρατηρήθηκε πως οι περισσότεροι σπόροι είχαν φυτρώσει, πάρα το επιβαρυνμένο έδαφος, ενώ μετά από ένα μήνα τα φυτά αναπτύχθηκαν ικανοποιητικά, φτάνοντας στο στάδιο που απεικονίζεται στην Εικόνα 6. Εφαρμόστηκε άλλη μία λίπανση στις 24/6/22 με βασικό σκεύασμα 20-20-20 από όπου τοποθετήθηκαν 1,25g σε κάθε γλάστρα.



Εικόνα 5 Η σπορά της κάνναβης



Εικόνα 6 Τα φυτά κάνναβης στο επιβαρυμένο με Cu έδαφος

2.1.6.ΑΡΑΙΩΣΕΙΣ

Έπειτα από 16 ημέρες πραγματοποιήθηκε η πρώτη αραίωση, ώστε να μπορέσουν αναπτυχθούν εύρωστα και χωρίς την επίδραση ανταγωνισμού μόνο 3 φυτά σε κάθε γλάστρα. Τα τρία φυτά που επιλέχθηκαν να παραμείνουν ήταν πανομοιότυπα σε μέγεθος, ενώ τα υπόλοιπα που αφαιρέθηκαν απομακρύνθηκαν μαζί με την ρίζα τους και διατέθηκαν για ορισμένες αναπτυξιακές μετρήσεις. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 3 αραιώσεις. Σε κάθε αραίωση (ανά 4 εβδομάδες), αφαιρούνταν ένα φυτό τη φορά από κάθε γλάστρα και πραγματοποιούνταν σε αυτό οι ίδιες αντίστοιχα αναπτυξιακές μετρήσεις.

2.1.7.ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Σε κάθε φυτό που αφαιρούνταν με τη διαδικασία της αραίωσης, γινόταν μέτρηση του ύψους, του νωπού βάρους και του ξηρού βάρους. Η διαδικασία που τελούνταν κάθε φορά ήταν η εξής: Αρχικά, έπρεπε να εκπλυθεί το έδαφος που βρίσκονταν προσκολλημένο στις ρίζες του φυτού, ώστε να μην προσμετρηθεί στο συνολικό νωπό βάρος. Στη συνέχεια με ένα επιτραπέζιο ζυγό γινόταν καταμέτρηση του νωπού βάρους, ενώ καταγράφονταν, αντίστοιχα, το υπέργειο μήκος του και το μήκος ρίζας. Έπειτα, κάθε φυτό τοποθετούνταν μέσα σε αριθμημένη χάρτινη σακούλα και αφήνονταν σε πυριαντήριο θερμοκρασίας 60 °C για τρεις ημέρες, ώστε να

απομακρυνθεί όλη η υγρασία από τους ιστούς του. Μετά το πέρας των ημερών καταγράφονταν το ξηρό τους βάρος.



Εικόνα 7 Καταγραφή ύψους και νωπού βάρους των αφαιρούμενων φυτών έπειτα από αραίωση.



Εικόνα 8 Τα αφαιρούμενα έπειτα από αραίωση φυτά σε χάρτινες σακούλες λίγο πριν την ξήρανσή τους.

2.1.8.ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΙΜΩΝ SPAD

Συνδυαστικά με τις παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιήθηκε καταμέτρηση και των επιπέδων της χλωροφύλλης. Η μέτρηση έγινε με τρόπο μη καταστροφικό με το φορητό χλωροφυλλόμετρο SPAD-502, Minolta Co Ltd. Οι προκύπτουσες τιμές θεωρούνται ανάλογες της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης στα φύλλα. Το SPAD-502

προσδιορίζει τη σχετική ποσότητα χλωροφύλλης, μετρώντας την απορρόφηση του φύλλου σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος, στο ερυθρό και στο υπέρυθρο. Με αυτόν τον τρόπο ο μετρητής υπολογίζει μια αριθμητική τιμή SPAD που είναι ανάλογη της ποσότητας χλωροφύλλης του φύλλου. (Konica Minolta Sensing , 2009).

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τον εξής τρόπο: καταγραφή 3 μετρήσεων στο άνω μέρος κάθε φυτού και υπολογισμός του μέσου όρου αυτών και αντίστοιχα, 3 μετρήσεων στο κάτω μέρος κάθε φυτού και ομοίως, υπολογισμός του μέσου όρου αυτών. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε 4 φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος, ανά 20 ημέρες.



Εικόνα 9 Το χλωροφυλλόμετρο SPAD-502, Minolta Co Ltd

2.1.9.ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ NDVI

Για τον προσδιορισμό του κανονικοποιημένου δείκτη διαφοράς βλάστησης (NDVI) χρησιμοποιήθηκε το όργανο Crop Circle ACS-211 Active Canopy Crop Sensor, της Holland Scientific. Το συγκεκριμένο όργανο τοποθετούνταν πάνω από τον θόλο του κάθε φυτού και κατέγραφε την ανακλώμενη ακτινοβολία του φυτού στο εγγύς υπέρυθρο.

Ο δείκτης εκφράζεται μέσα από την εξίσωση: $NDVI = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red})$, όπου:
 R_{nir} = η τιμή της ανακλαστικότητας στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου R_{red} = η τιμή της ανακλαστικότητας στην περιοχή του κόκκινου.

Το εύρος τιμών του κυμαίνεται από -1,0 έως 1.0. Οι αρνητικές τιμές φανερώνουν επιφάνειες με έντονη ανακλαστικότητα στο ορατό φάσμα όπως νερό, πάγο, χιόνι. Η μηδενική τιμή έως και η τιμή 0,2 εμφανίζονται στο γυμνό χωρίς βλάστηση έδαφος και οι υψηλότερες τιμές υποδηλώνουν αύξηση της φυτοκάλυψης ή και πιο υγιή φυτά (αυξημένη χλωροφύλλη) , με μέγιστη δυνατή τιμή το 1.

Ο συγκεκριμένος δείκτης χρησιμοποιήθηκε ως συμπληρωματικό στοιχείο της κατάστασης της υγείας των φυτών, όπου μαζί με τις μετρήσεις SPAD μπόρεσαν να αποδώσουν μία εικόνα για την κατάσταση της χλωροφύλλης των φυτών και κατά πόσο επηρεάστηκε από της επιμέρους συγκεντρώσεις του Cu.



Εικόνα 10 Το όργανο μέτρησης Crop Circle ACS-211 Active Canopy Crop Sensor, της Holland Scientific.

2.1.10.ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Έπειτα από την ξήρανση και την μέτρηση του ξηρού βάρους, κάθε φυτό τεμαχίστηκε σε 3 σημεία : άνω, μέσο, κάτω μέρος και διαχωρίστηκε προσεκτικά με τη χρήση λαβίδας στα εξής επιμέρους τμήματα:

- άνω φύλλα (60-90 cm)
- μεσαία φύλλα (30-60 cm)
- άνω βλαστός (60-90 cm)
- μέσος βλαστός (30-60 cm)
- κάτω βλαστός (0-30 cm)
- άνω ρίζα (5-10 cm)

- κάτω ρίζα (0-5 cm)

Όλα αυτά τα επιμέρους τμήματα κονιορτοποιήθηκαν ξεχωριστά, αρχικά με ηλεκτρικό μύλο και έπειτα με γουδί πορσελάνης και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε πλαστικό αριθμημένο σακουλάκι.



Εικόνα 11 Δείγματα από κονιορτοποιημένα φυτικά μέρη.

2.2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

2.2.1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Ο προσδιορισμός της τιμής του εδαφικού pH, πραγματοποιήθηκε με χρήση ηλεκτρονικού pH μέτρου του Οίκου Crison (Crison2002). Συγκεκριμένα προηγήθηκε ζύγιση 10g εδάφους από το κάθε εδαφικό δείγμα σε πλαστικό δοχείο (falcon) των 50mL. Έπειτα, ακολούθησε η προσθήκη 25 mL απιονισμένου ύδατος έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η αναλογία 1:2,5 και τοποθετήθηκαν σε ανακινητήρα για 10 λεπτά. Στη συνέχεια, παρέμειναν για μισή ώρα σε κατάσταση ηρεμίας. Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση στο πεχάμετρο με τη βοήθεια ρυθμιστικών διαλυμάτων με τιμές PH 4 και 7. Τελικά, η μέτρηση του pH διεκπεραιώθηκε με εμβάπτιση του ηλεκτροδίου στο ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης pH σε καθένα δείγμα με καταγραφή της τιμής του pH κάθε εδαφικού μίγματος.

2.2.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ (EC) ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Από το κάθε εδαφικό δείγμα για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ζυγίστηκαν 20 g εδάφους σε πλαστικό δοχείο (falcon) των 50 mL. Μετέπειτα, ακολούθησε η προσθήκη 20 mL απιονισμένου ύδατος σε κάθε falcon έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η αναλογία 1:1 και τοποθετήθηκαν στον ανακινητήρα για 20 λεπτά. Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκε και σε αυτή την περίπτωση με εμβάπτιση του ηλεκτροδίου σε κάθε δείγμα και έγινε η καταγραφή ένδειξης του οργάνου. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε mS/cm.

2.2.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ (CaCO₃) ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ

Το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃ %) των εδαφικών δειγμάτων προσδιορίστηκε με τη βοήθεια ασβεστομέτρου Bernard. Για την επίτευξη του προσδιορισμού CaCO₃ των εδαφικών δειγματοληψιών που συλλέχθηκαν ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

Σε κωνική φιάλη των 500 mL προστέθηκαν 3g εδάφους. Στη συνέχεια έγινε προσθήκη σε falcon 30 mL αραιού HCl με προσεκτική τοποθέτηση σε κωνική φιάλη έτσι ώστε να μην έρθουν σε επαφή οι ποσότητες του εδάφους με το υδροχλωρικό οξύ. Στη συνέχεια, με το πώμα του ασβεστομέτρου πωματίστηκε η κωνική φιάλη, διενεργήθηκε με περιστροφή της βάνας η εξαέρωση της στήλης και καταγράφηκε η πρώτη τιμή της υδατικής στήλης σε mL. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η ανάδευση υδροχλωρικού οξέος με την εδαφική ποσότητα έως το τέλος της αντίδρασης, αφού προηγήθηκε η επαφή των παραπάνω αντιδρώντων. Μετά το πέρας της αντίδρασης, καταγράφηκε η δεύτερη τιμή της υδατικής στήλης σε mL, η οποία συμπίεστηκε λόγω της έκλυσης του CO₂. Ο προσδιορισμός του ποσοστιαίου εδαφικού CaCO₃ έγινε με τη χρήση του τύπου: $\% \text{CaCO}_3 = 0,445 \cdot (A/B)$, όπου A τα mL του CO₂ που εκλύθηκε στο ασβεστόμετρο και B τα g εδάφους που ζυγίστηκαν για το συγκεκριμένο εδαφικό δείγμα. Επιπρόσθετα, η διαφορά μεταξύ δεύτερης και πρώτης τιμής είναι ίση με τον συνολικό όγκο του εκλυόμενου CO₂.

2.2.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ

Σε πλαστικά ποτήρια των 250mL ζυγίστηκαν 50g εδάφους από εκάστοτε εδαφικό δείγμα και πραγματοποιήθηκε η προσθήκη 50mL διασπορικού διαλύματος. Εν συνεχεία, ακολούθησε ανάδευση και αεροστεγής κάλυψη αυτών με Parafilm, όπου παρέμειναν σε κατάσταση ηρεμίας για 1 ημέρα. Την επομένη των 24 ωρών, έγινε μεταφορά των δειγμάτων ποσοτικά σε μηχανικό αναδευτήρα, όπου πραγματοποιήθηκε η ανάδευση περί των 10 λεπτών. Για τη διευκόλυνση της ανάδευσης προστέθηκε συγκεκριμένη δοσολογία νερού βρύσης. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ογκομετρικούς κυλίνδρους του 1L, όπου προστέθηκε νερό βρύσης έως τη χαραγή και ανακινήθηκαν. Έπειτα 40 δευτερολέπτων ανακίνησης, πραγματοποιήθηκε μέτρηση όπου καταγράφηκε η θερμοκρασία και η πυκνότητα του διαλύματος (με το πυκνόμετρο Βουγιούκου). Η μέτρηση Α αναφέρεται στην πυκνότητα της ιλύος λόγω καθίζησης της άμμου. Μετά το πέρας 2 ωρών, έγινε επανάληψη της μέτρησης της πυκνότητας και της θερμοκρασίας σε κάθε αιώρημα. Η παρούσα μέτρηση (Β), αντιπροσωπεύει την πυκνότητα της αργίλου, εξαιτίας καθίζησης και της ιλύς.

Σκοπός της μέτρησης και καταγραφής των θερμοκρασιών ήταν η διόρθωση των τιμών της πυκνότητας Α και Β στη θερμοκρασία αναφοράς (20°C). Η διόρθωση αυτή καθίσταται αναγκαία, καθώς επηρεάζει με άμεσο τρόπο το ιξώδες και κατ' επέκταση την ταχύτητα καθίζησης των εδαφικών κλασμάτων. Η διόρθωση ολοκληρώθηκε με τους παρακάτω τρόπους:

$$A' = A + \Sigma\Theta A$$

$$B' = B + \Sigma\Theta B$$

$$\text{όπου } \Sigma\Theta = (\text{Θερμοκρασία} - \text{Θερμοκρασία αναφοράς})/2,5$$

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής σύστασης των εδαφών διεκπεραιώθηκε με τη μέτρηση των επιμέρους εδαφικών κλασμάτων (ιλύς, άργιλος, άμμος) σε καθένα εδαφικό δείγμα, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Άργιλος\%} = 100 \cdot B' / \Gamma$$

$$\text{Ιλύς\%} = (A' - B') \cdot 100 / \Gamma$$

Άμμος% = 100 – (Άργιλος % + Ιλύς %), όπου $\Gamma = 50$ g εδάφους, που χρησιμοποιήθηκαν εξ αρχής. Μετά τον υπολογισμό των ποσοστών ιλύος, άμμου και αργίλου, εφαρμόστηκε το τρίγωνο Βουγιούκου για να προσδιοριστούν οι συστάσεις των εδαφικών δειγμάτων.

2.2.5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΕΔΑΔΟΥΣ

Για τον προσδιορισμό της οργανικής ουσίας και συγκεκριμένα του οργανικού C χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της υγρής οξείδωσης. Ποσότητα εδάφους 1 g ζυγίστηκε και μεταφέρθηκε σε κωνική φιάλη των 500 mL. Προστέθηκαν 10 mL διαλύματος 1 N $K_2Cr_2O_7$, με τη χρήση προχοΐδας. Έπειτα προστέθηκαν 20 mL πυκνού H_2SO_4 , με τον ογκομετρικό κύλινδρο. Η κωνική φιάλη ανακινήθηκε με περιστροφική κίνηση ώστε να διαβραχεί το έδαφος, αλλά όχι τα τοιχώματα της φιάλης. Στη συνέχεια η φιάλη παρέμεινε σε ηρεμία 30 min, ώστε να οξειδωθεί ο C της οργανικής ουσίας. Έπειτα προστέθηκαν ≈ 200 mL H_2O , με τον ογκομετρικό κύλινδρο και 1-2 mL δείκτη διφαινυλαμίνης με σκοπό το εδαφικό αιώρημα να αποκτήσει χρώμα σκούρο μπλε. Με τη βοήθεια της προχοΐδας, ογκομετρήθηκε η περίσσεια του $K_2Cr_2O_7$, που δεν έλαβε μέρος στην οξείδωση του C, με διάλυμα 0,5 N $FeSO_4$. Η ογκομέτρηση έλαβε τέλος (τελικό σημείο της αντίδρασης) τη στιγμή κατά την οποία το χρώμα του αιωρήματος από σκούρο μπλε άλλαξε σε σκούρο πράσινο.

Η προαναφερθείσα διαδικασία επαναλήφθηκε χωρίς τη χρήση εδάφους (λευκός προσδιορισμός), για τον ακριβή υπολογισμό της κανονικότητας του διαλύματος $FeSO_4$, η οποία αλλάζει με το χρόνο. Στο τέλος των 2 ογκομετρήσεων, καταγράφηκαν οι όγκοι V και V_0 (mL) του διαλύματος 0,5 N $FeSO_4$, που καταναλώθηκαν για το δείγμα και αντίστοιχα για το λευκό.

Η % κ.β. περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό C υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$\text{Οργανικός C (\% κ.β.)} = \frac{10 \text{ (mL)} \cdot [V_0 \text{ (mL)} - V \text{ (mL)}] \cdot 0,003 \cdot 100 \text{ (g)}}{V_0 \text{ (mL)} \cdot W \text{ (g)}} \cdot f$$

όπου:

10 = ο όγκος του διαλύματος 1 N $K_2Cr_2O_7$ (mL),

V_0 = ο όγκος του διαλύματος 0,5 N $FeSO_4$, που καταναλώθηκε κατά την ογκομέτρηση του λευκού (mL),

V = ο όγκος του διαλύματος 0,5 N $FeSO_4$, που καταναλώθηκε κατά την ογκομέτρηση του δείγματος (mL),

W = το βάρος του εδάφους (g),

0,003 = συντελεστής μετατροπής 1 mL του διαλύματος 1 N $K_2Cr_2O_7$ σε 1 g C (από την αντίδραση),

$f = 1,3$ και είναι ο συντελεστής που αφορά το ποσοστό του C που οξειδώθηκε.

Σύμφωνα με τη μέθοδο μόνο το 77 % (κατά μέσο όρο) του C οξειδώνεται. Η % κ.β. περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Οργανική Ουσία (\% κ.β.)} = 2 \cdot \text{Οργανικός C (\% κ.β.)}$$

όπου 2 είναι ο συντελεστής μετατροπής του οργανικού C σε οργανική ουσία, γιατί ο οργανικός C αποτελεί το 50 % (κατά μέσο όρο) της οργανικής ουσίας των καλλιεργούμενων εδαφών. Ο συντελεστής αυτός αλλάζει ανάλογα με το είδος της οργανικής ουσίας.

2.2.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΒΑΣΙΛΙΚΟ ΝΕΡΟ (AQUA REGIA)

Οι συγκεντρώσεις χαλκού στα επιμέρους φυτικά τμήματα προσδιορίστηκαν μέσω της εκχύλισης με βασιλικό νερό (Aqua regia). Για την εκχύλιση ζυγίστηκαν 0,5 g σκόνης και τοποθετήθηκαν σε σωλήνες πέψης των 250mL. Στη συνέχεια οι σωλήνες αυτοί διατάχθηκαν μέσα σε ειδικό block κάτω από απαγωγό και προστέθηκαν σε καθέναν εξ αυτών 9mL πυκνού υδροχλωρικού οξέος, 3mL πυκνού νιτρικού οξέος (αναλογία 3:1) και 4mL αραιού νιτρικού οξέος 5%. Αφού πωματίστηκαν με ογκομετρικές φιάλες των 50mL, ώστε να παραμείνουν παγιδευμένα τα αέρια στο εσωτερικό, αφέθηκαν σε κατάσταση ηρεμίας κάτω από τον απαγωγό για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου, με σκοπό να εισχωρήσουν καλά τα οξέα στον φυτικό ιστό και να διαλυθεί αποτελεσματικότερα ο χαλκός.



Εικόνα 12 Συσκευή θέρμανσης για ατομικές βόμβες εκχύλισης ECO-PRE, ODLAB



Εικόνα 13 Διαδικασία διήθησης των εκχυλισμάτων και μεταφοράς τους σε ογκομετρικές φιάλες.

Μετά το πέρας των 24 ωρών τα δείγματα υποβλήθηκαν σε πέψη μίας ώρας και κατόπιν, το block πέψης θερμάνθηκε για 3 ώρες στους 140° C. Αφότου τα δείγματα κρύωσαν, διηθήθηκε το περιεχόμενο των σωλήνων πέψης σε ογκομετρικές φιάλες των 25mL, με τη βοήθεια απιονισμένου νερού μέσα σε πλαστικό χωνί με διηθητικό χαρτί και στη συνέχεια οι ογκομετρικές φιάλες συμπληρώθηκαν μέχρι τα 25mL με απιονισμένο νερό. Στο τελικό στάδιο, τα διηθήματα αραιώθηκαν 100 φορές ως εξής: 1mL από κάθε διήθημα πάρθηκε με μικροπιπέτα και τοποθετήθηκε σε ογκομετρική φιάλη των 100mL και πληρώθηκε μέχρι τη χαραγή με απιονισμένο νερό.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των συγκεντρώσεων του χαλκού πραγματοποιήθηκε με φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης με εξάρτημα φλόγας.



Εικόνα 14 Φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης (AAS) με τεχνική φλόγας Shimadzu, AA-6300

2.2.7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΑ

DTPA

Για τη διαδικασία της εκχύλισης των διαθέσιμων ιχνοστοιχείων ζυγίστηκαν σε falcon των 50mL, 20g εδάφους από κάθε εδαφικό δείγμα, και έπειτα πραγματοποιήθηκε η προσθήκη 40mL διαλύματος DTPA σε καθένα από αυτά. Το διάλυμα DTPA παρασκευάστηκε με ανάμειξη 7,4g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 9,835g DTPA (diethylo-triamino-penta-acetic acid) και 74,5g τριαιθανολαμίνης σε 5L απιονισμένου ύδατος. Έπειτα ρυθμίστηκε το pH του διαλύματος DTPA στο 7,3 χρησιμοποιώντας σταγόνες HCL. Όλα τα δείγματα εισήχθησαν στον ανακινητήρα και διεξήχθη η ανακίνησή αυτών για 2 ώρες. Στη συνέχεια, μετά τις 2 ώρες, ακολούθησε σε falcon των 50 mL με τη χρήση πλαστικών αργών διηθητικών χαρτιών και χωνιών, η διήθηση των δειγμάτων. Επιπροσθέτως, αραιώθηκαν 10 φορές τα πυκνά διηθήματα και τα περιεχόμενα των ογκομετρικών φιαλιδίων τοποθετήθηκαν σε falcon των 50 mL. Η αραιώση των πυκνών διηθημάτων ακολούθησε ως εξής: 2,5mL από το εκάστοτε διήθημα, με τη χρήση μικροπιπέτας, σε ογκομετρικές φιάλες των 25 mL, και πλήρωση μέχρι τη χαραγή με απιονισμένο ύδωρ. Τέλος, για τη μέτρηση, χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης, τοποθετώντας το πυκνό διήθημα για τον ποσοτικό προσδιορισμό του χαλκού.

2.2.8. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΝΝΑΒΙΔΙΟΛΗΣ ΜΕ ΥΓΡΗ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ

Η εκχύλιση των κανναβινοειδών πραγματοποιήθηκε με την εξής διαδικασία: για κάθε δείγμα ζυγίσθηκαν σε ζυγό ακριβείας 0,25 g σκόνης αλεσμένου φυτικού ιστού τα οποία μεταφέρθηκαν σε γυάλινο φιαλίδιο των 50mL και προστέθηκαν, με τη βοήθεια σιφωνίου, 20mL ακετονιτριλίου. Τα φιαλίδια σφραγίσθηκαν, σημειώθηκαν με τον αντίστοιχο κωδικό του δείγματος και τοποθετήθηκαν σε λουτρό υπερήχων για 20 λεπτά, χωρίς θέρμανση. Έπειτα, αφέθηκαν σε ηρεμία για 10 λεπτά. Στη συνέχεια μέρος του υπερκείμενου υγρού διοχετεύθηκε σε φίλτρο nylon 0,45 μ m για την παραλαβή του διαυγούς εκχυλίσματος. Ο διαχωρισμός, η ταυτοποίηση και η ποσοτικοποίηση των κανναβινοειδών πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της υγρής χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης με ανιχνευτή υπεριώδους (HPLC - UV). Συγκεκριμένα προσδιορίστηκε η συγκέντρωση κανναβιδιόλης στα φυτικά δείγματα με τη χρήση της τεχνικής του εξωτερικού προτύπου.



Εικόνα 15 Προσδιορισμός κανναβινοειδών με την μέθοδο της υγρής χρωματογραφίας.

2.2.9. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ

ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ

Η συσσωρευτική ικανότητα της κάνναβης, καθώς και η ενδεχόμενη ικανότητα να μεταφέρει τον Cu από τις ρίζες προς την υπέργεια βιομάζα, υπολογίστηκε με βάση 3 δείκτες:

A) BAF Bioaccumulation Factor (Παράγοντας βιοσυσσώρευσης): $BAF = C_{\text{ρίζες}} / C_{\text{DTPA}}$,

ο οποίος χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της μεταφοράς του μετάλλου από το έδαφος στη ρίζα. Όπου $C_{\text{ρίζες}}$, η συγκέντρωση Cu στην ρίζα (mg kg^{-1}) και C_{DTPA} , η διαθέσιμη συγκέντρωση Cu στο έδαφος (mg kg^{-1}) προσδιορισμένη με DTPA. (Golía et al., 2023). Όταν $BAF > 1$, τότε τα φυτά θεωρούνται υπερσυσσωρευτές και όταν $BAF < 1$ τα φυτά θεωρούνται αποκλειστές (Islam et al., 2020).

B) TF Translocation Factor (Συντελεστής Μετατόπισης) : $TF = C_{\text{βλαστοί}} / C_{\text{ρίζες}}$

ο οποίος εκφράζει τον λόγο της συγκέντρωσης μετάλλου στο βλαστό προς τη συγκέντρωση μετάλλου στη ρίζα (mg kg^{-1}) και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό αυτής ακριβώς της μεταφοράς. Οι μεταλλικοί υπερσυσσωρευτές παρουσιάζουν συντελεστή μετατόπισης $TF > 1$ (Islam et al, 2020).

Γ) TC Transfer Coefficient (Συντελεστής μεταφοράς): $TC = C_p / C_s$

όπου C_p η συγκέντρωση μετάλλου σε υπέργεια βιομάζα (mg kg^{-1}) και C_s η ολική συγκέντρωση μετάλλου στο έδαφος (mg kg^{-1} εδάφους) προσδιορισμένη με την μέθοδο Aqua Regia.

2.2.10. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η επίδραση των 2 παραγόντων, δηλαδή του τύπου εδάφους και του διαφορετικού επιπέδου επιμόλυνσης στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά της κάνναβης διερευνήθηκε μέσω της στατιστικής Ανάλυσης Διακύμανσης Διπλής Κατεύθυνσης (2-Way ANOVA) του SPSS. Για την ανίχνευση στατιστικά σημαντικών διαφορών στα χαρακτηριστικά ανάπτυξης μεταξύ των μεταχειρίσεων έγινε ανάλυση Post hoc. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις μεταξύ των εδαφολογικών

χαρακτηριστικών και των συγκεντρώσεων Cu του εδάφους και των επιμέρους φυτικών τμημάτων, επίσης μέσω SPSS.

3.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1.ΟΙ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

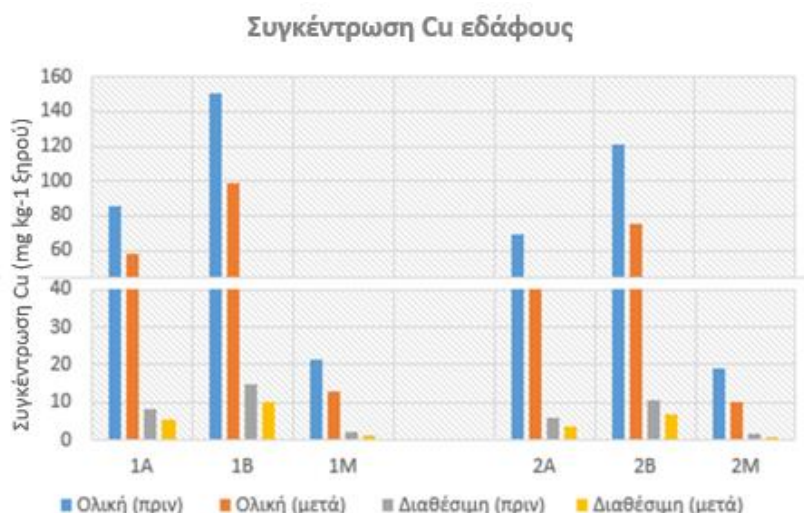
Πίνακας 1 Τα αποτελέσματα των εδαφολογικών αναλύσεων

	Έδαφος 1	Έδαφος 2
pH(1:2,5)	7,45	7,3
EC (μS/cm)	475	357
OM (%)	2,1	1,4
CaCO ₃ (%)	9,2	7,8
Άργιλος (%)	32	28,2

Από τα αποτελέσματα των εδαφολογικών χαρακτηριστικών προκύπτει το πως το Έδαφος 1 είναι ένα αλκαλικό αργιλοπηλώδες έδαφος (άργιλος 32%, άμμος 28%, ιλύς 40%) και το Έδαφος 2 είναι αλκαλικό αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος (άργιλος 28,2%, άμμος 50,5%, ιλύς 21,3%).

3.2.ΟΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΦΥΤΟ

Το Διάγραμμα 1 απεικονίζει την ολική (προσδιορισμένη με Aqua Regia) και την διαθέσιμη (προσδιορισμένη με DTPA) συγκέντρωση Cu στο έδαφος πριν και μετά την καλλιέργεια κάνναβης. Όπως ήταν αναμενόμενο οι διαθέσιμες συγκεντρώσεις εδάφους είναι πολύ μικρότερες σε σύγκριση με τις ολικές. Συγκεκριμένα, το ποσοστό της διαθέσιμης ως προς την ολική συγκέντρωση Cu κυμαίνεται από 8,5-9,9% (Πίνακας 2), γεγονός που συμφωνεί με τους Vega et. al (2004), οι οποίοι αναφέρουν σχέση μεταξύ των δύο συγκεντρώσεων της τάξεως του 10%.



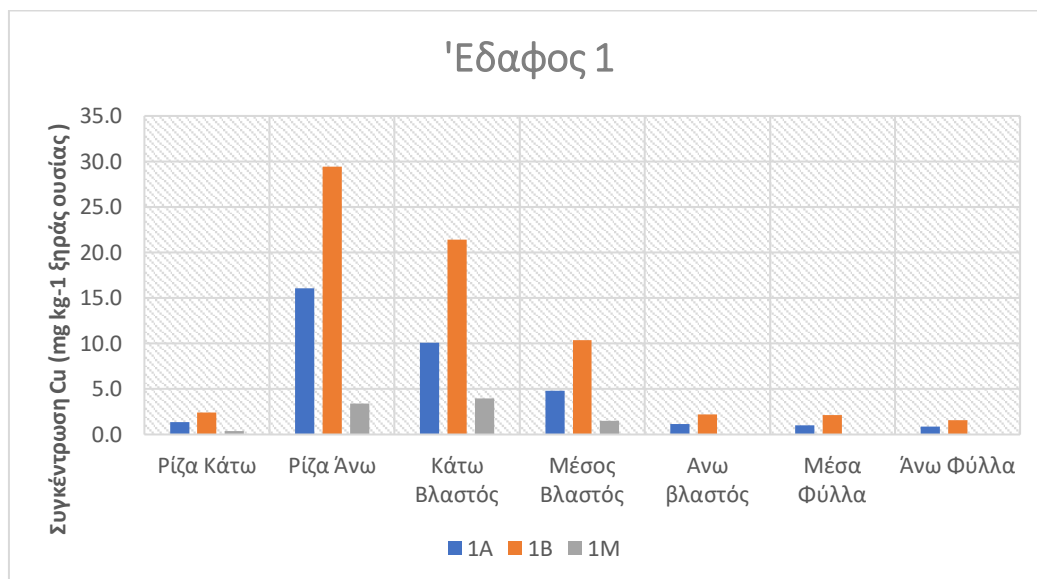
Διάγραμμα 1 Ολικές και διαθέσιμες συγκεντρώσεις Cu στο έδαφος πριν και μετά την καλλιέργεια κάνναβης στις επιμέρους μεταχειρίσεις (μ.ο. επαναλήψεων n=5).

Πίνακας 2 Ποσοστό διαθέσιμης επί της ολικής συγκέντρωσης Cu

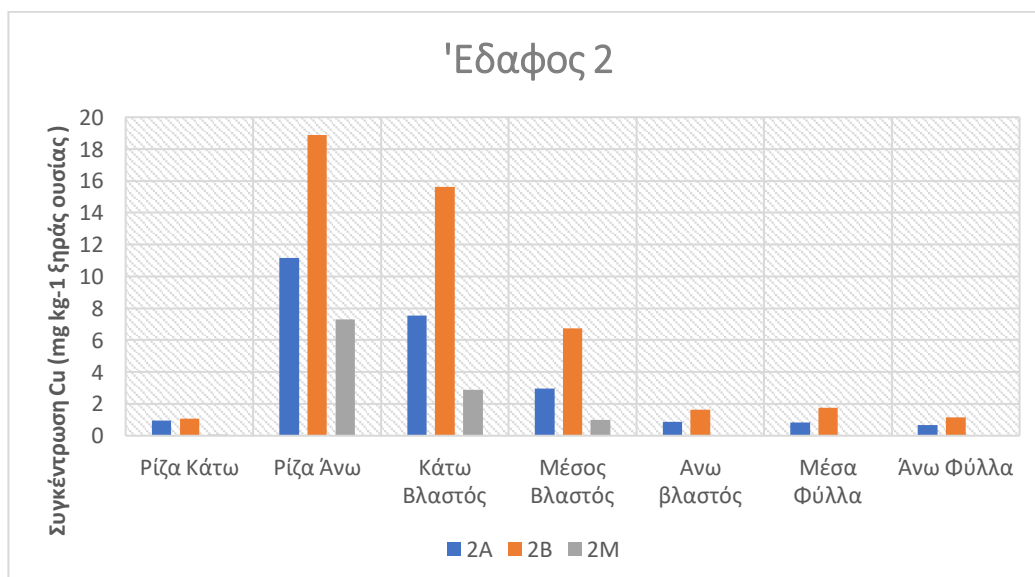
	Ποσοστό της διαθέσιμης επί της ολικής συγκέντρωσης Cu (Μ.Ο. επαναλήψεων, n=5)
1M	9,2 ± 0,3 (%)
1A	9,5 ± 0,25 (%)
1B	9,9 ± 0,20 (%)
2M	8,5 ± 0,18 (%)
2A	8,7 ± 0,15 (%)
2B	8,9 ± 0,22 (%)

Η ολική και κατά συνέπεια η διαθέσιμη συγκέντρωση Cu φαίνεται μεγαλύτερη στο έδαφος του αγροκτήματος (Έδαφος 1) παρά στο μείγμα εδάφους με άμμο (Έδαφος 2). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός πως στο αμμώδες έδαφος το ποσοστό αργίλου και η οργανική ουσία είναι μικρότερη και είναι κατά συνέπεια μικρότερη η CEC. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο προστιθέμενος Cu (νιτρικός χαλκός κατά την επιμόλυνση) να μην έχει στην διάθεση του επαρκή ιόντα για να συγκρατηθεί στη στερεή φάση και έτσι ένα μεγάλο μέρος του να εκπλυθεί (Khan, 2018).

Τα διαφορετικά επίπεδα επιμόλυνσης αποτυπώθηκαν ικανοποιητικά στο Διάγραμμα 1, με την συγκέντρωση Cu να ακολουθεί ορθώς την εξής σειρά στις μεταχειρίσεις : Δόση B>Δόση A>Μάρτυρας. Το έδαφος του μάρτυρα δεν ήταν εντελώς απαλλαγμένο από Cu, πιθανόν εξαιτίας της χρόνιας χρήσης γεωργικών φαρμάκων και λιπασμάτων στην περιοχή από όπου συλλέχθηκε (πειραματικός αργός Π.Θ).



Διάγραμμα 2 Συγκέντρωση Cu στα επιμέρους τμήματα των φυτών που καλλιεργήθηκαν στο Έδαφος 1 (μ.ο. επαναλήψεων n=5).



Διάγραμμα 3 Συγκέντρωση Cu στα επιμέρους τμήματα των φυτών που καλλιεργήθηκαν στο Έδαφος 2 (μ.ο. επαναλήψεων n=5).

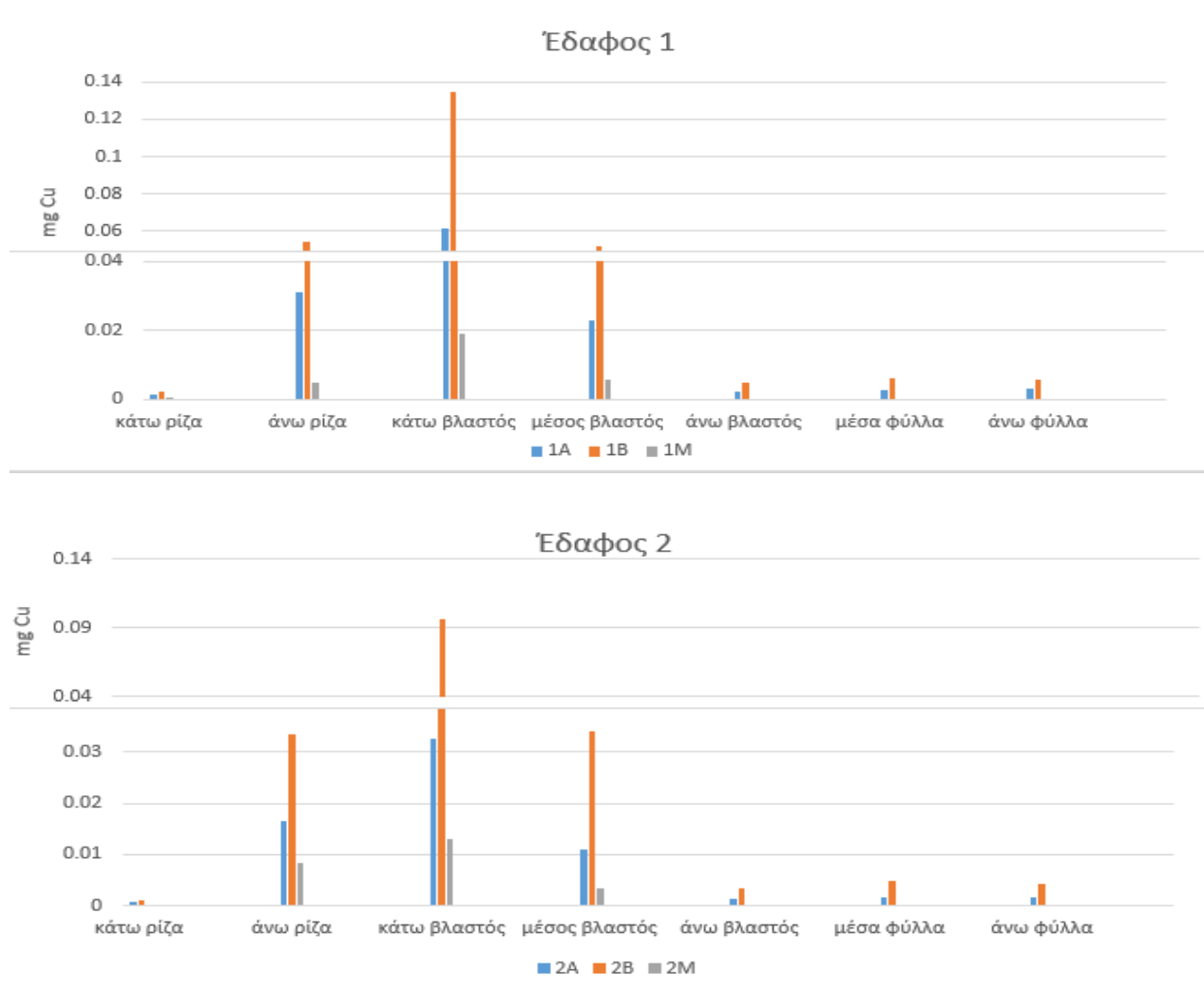
Ως πρώτη παρατήρηση από τα διαγράμματα της συγκέντρωσης Cu στα επιμέρους φυτικά τμήματα, θα μπορούσε να είναι πως η συγκέντρωσή του φθίνει καθώς ανέρχεται στα υψηλότερα μέρη του φυτού. Η μεγαλύτερη ποσότητα συγκεντρώνεται στην ρίζα και συγκεκριμένα στη άνω ρίζα. Η κάτω ρίζα αποτελείται κατά κύριο λόγο από λεπτά και ευαίσθητά ριζίδια που δεν ήταν εφικτό να παραμείνουν εντελώς ακέραια κατά τη διαδικασία των καταστροφικών μετρήσεων, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση Cu να υποτιμηθεί. Το γεγονός πως ο χαλκός συγκεντρώνεται κυρίως στις ρίζες του φυτού της κάνναβης έρχεται σε συμφωνία με αντίστοιχα πειράματα (Angelova et al. 2004, Galic et al. 2019, Quagliata et al. 2021, Guidi Nissim et al. 2018, Golia et. al. 2021) και εξηγείται καθώς είναι γενικά δυσκίνητος εντός του φυτικού ιστού (Κουκουλάκης κα. 2018). Οι αμέσως μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Cu παρατηρούνται στον κάτω και μέσο βλαστό, σε συμφωνία με τους Ahmand et. al, 2016, ενώ στα φύλλα (άνω και μέσα) σημειώνονται οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις.

Ο Alloway (2013) επισημαίνει πως οι αναμενόμενες συγκεντρώσεις Cu σε φυτά μη ρυπασμένων εδαφών κυμαίνονται από 4 έως 15 mg Cu kg⁻¹ ξηρής ύλης και σπάνια υπερβαίνουν τα 20 mg Cu kg⁻¹ ξηρής ύλης, γεγονός που δικαιολογεί τις τιμές του μάρτυρα του συγκεκριμένου πειράματος.

3.3.ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟΥΣ ΙΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΦΥΤΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Πίνακας 3 Ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των mg Cu που συσσωρεύτηκαν στα επιμέρους τμήματα των φυτών της κάνναβης των 6 μεταχειρίσεων.

	1A	1B	1M	2A	2B	2M
κάτω ρίζα	0,0013 ± 0,0001	0,0024 ± 0,0004	0,0003 ± 0,0001	0,0007 ± 0,0002	0,0010 ± 0,0003	0,00005 ± 0,00003
άνω ρίζα	0,0313 ± 0,0016	0,0543 ± 0,0185	0,0050 ± 0,0010	0,0165 ± 0,0058	0,0335 ± 0,0091	0,0084 ± 0,0024
κάτω βλαστός	0,0611 ± 0,0029	0,1351 ± 0,0256	0,0191 ± 0,0037	0,0326 ± 0,0080	0,0966 ± 0,0232	0,0129 ± 0,0023
μέσος βλαστός	0,0228 ± 0,0028	0,0514 ± 0,0090	0,0056 ± 0,0011	0,0111 ± 0,0026	0,0340 ± 0,0084	0,0035 ± 0,0006
άνω βλαστός	0,0024 ± 0,0004	0,0050 ± 0,0006	0	0,0012 ± 0,0003	0,0035 ± 0,0010	0
μέσα φύλλα	0,0028 ± 0,0002	0,0062 ± 0,0009	0	0,0016 ± 0,0004	0,0049 ± 0,0014	0
άνω φύλλα	0,0030 ± 0,0003	0,0058 ± 0,0011	0	0,0016 ± 0,0004	0,0044 ± 0,0011	0



Διάγραμμα 4 Ο μέσος όρος των mg Cu που συσσωρεύτηκε στα επιμέρους φυτικά τμήματα της κάνναβης στις μεταχειρίσεις των δύο εδαφών.

Στα παραπάνω διαγράμματα οπτικοποιούνται τα mg Cu που συσσωρεύτηκαν στα φυτικά τμήματα της κάνναβης στις μεταχειρίσεις του Εδάφους 1 και Εδάφους 2. Και στις τρεις μεταχειρίσεις του εκάστοτε εδάφους, η μεγαλύτερη ποσότητα Cu παρατηρείται στον κάτω βλαστό, ενώ ακολουθεί η άνω ρίζα και ο κάτω βλαστός με παρόμοιες ποσότητες. Συγκριτικά μεταξύ των τριών επαναλήψεων του εκάστοτε εδάφους, η ποσότητα Cu ακολουθεί την εξής σειρά: B>A>M. Η ποσότητα Cu που παρατηρείται στον άνω βλαστό, στα μέσα και άνω φύλλα και στην κάτω ρίζα είναι αμελητέα για τις μεταχειρίσεις A και B των δύο εδαφών, ενώ στους μάρτυρες (1M, 2M) η ποσότητα σε αυτά τα φυτικά τμήματα είναι σχεδόν μηδενική.

Μεταξύ των δύο εδαφών, τα φυτά του Εδάφους 1 συσσωρεύσαν μεγαλύτερη ποσότητα Cu στα επιμέρους τμήματά τους σε σχέση με τα φυτά του Εδάφους 2. Αυτό έρχεται ως αποτέλεσμα της μικρότερης συγκράτησης του Cu στο δεύτερο έδαφος, καθώς αποτελεί μείγμα εδάφους με άμμο.

3.4. ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ

A) BAF Bioaccumulation Factor (Παράγοντας βιοσυσσώρευσης)

Έδαφος 1

Πίνακας 4 Οι τιμές του παράγοντα βιοσυσσώρευσης (BAF) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 1 (μ.ο. επαναλήψεων).

	$C_{\text{ρίζα}} / C_{\text{DTPA}}$
1M	1,746
1A	1,972
1B	1,767

Έδαφος 2

Πίνακας 5 Οι τιμές του παράγοντα βιοσυσσώρευσης (BAF) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 2 (μ.ο. επαναλήψεων).

	$C_{\text{ρίζα}} / C_{\text{DTPA}}$
1M	1,533
1A	1,846
1B	1,661

Στους παραπάνω πίνακες διαφαίνονται οι τιμές του παράγοντα βιοσυσσώρευσης για τα φυτά της κάνναβης στις επιμέρους μεταχειρίσεις των δύο εδαφών. Παρατηρείται πως ο BAF όλων των μεταχειρίσεων και στα δυο εδάφη είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η κάνναβη συμπεριφέρεται ως υπερσυσσωρευτής στην περίπτωση του χαλκού (Islam et al., 2020), δηλαδή μπορεί και συγκρατεί στις ρίζες της ικανή ποσότητα χαλκού ώστε να εξυγιάνει το έδαφος από το φορτίο. Οι Golia et al. (2023) μέσα από μία βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναφέρουν για την περίπτωση του χαλκού στο φυτό της κάνναβης μέση τιμή BAF =

12,57 για δεδομένα μέσα από 21 εργασίες που αφορούσαν την φυτοαποκατάσταση με κάνναβη. Επισφραγίζεται, επομένως, η ικανότητα της κάνναβης για βιοσυσσώρευση του χαλκού στις ρίζες της, γεγονός που σε συνδυασμό με την υψηλή της βιομάζα την καθιστά ιδανικό υποψήφιο για φυτοαποκατάσταση. Στις μεταχειρίσεις του Εδάφους 1, η τιμή του BAF της άνω ρίζας διαμορφώνεται ως εξής για τις 3 μεταχειρίσεις: $1M > 1A > 1B$, ενώ της άνω ρίζας ως εξής: $1A > 1B > 1M$. Αντίστοιχα, στις μεταχειρίσεις του Εδάφους 2, η τιμή του BAF της κάτω ρίζας διαμορφώνεται ως εξής: $1A > 1B > 1M$, ενώ της άνω ρίζας ως εξής: $1A > 1B > 1M$.

B) TF Translocation Factor (Συντελεστής Μετατόπισης)

Έδαφος 1

Πίνακας 6 Οι τιμές του συντελεστή μετατόπισης (TF) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 1 (μ.ο. επαναλήψεων $n=5$).

	C βλαστού /C ρίζας
1M	0,459
1A	0,726
1B	0,819

Έδαφος 2

Πίνακας 7 .Οι τιμές του συντελεστή μετατόπισης (TF) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 2 (μ.ο. επαναλήψεων $n=5$).

	C βλαστού /C ρίζας
2M	0,394
2A	0,660
2B	0,862

Στους παραπάνω πίνακες παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή μετατόπισης (TF), ο οποίος φανερώνει εάν το συγκεκριμένο φυτό έχει την ικανότητα να μεταφέρει τον χαλκό από τις ρίζες προς τον βλαστό. Όλες οι μεταχειρίσεις και των δύο εδαφών παρουσιάζουν τιμές <1 , γεγονός που δείχνει την ασθενή τάση του χαλκού για μεταφορά στα υπέργεια τμήματα. Αυτό εξηγείται καθώς ο χαλκός είναι γενικά

δυσκίνητο στοιχείο μέσα στο φυτό. (Κουκουλάκης κ.ά, 2018). Παρόμοια αποτελέσματα για τον συγκεκριμένο δείκτη στο φυτό της κάνναβης σε συνάρτηση με τον χαλκό, προκύπτουν μέσα από το πείραμα ελεγχόμενων συνθηκών με εργαστηριακά μολυσμένο διάλυμα, των Petrova et al. (2012), καθώς και μέσα από το πείραμα θερμοκηπίου των Galic et al. (2019) τόσο σε αλκαλικό όσο και σε όξινο έδαφος. Και στα δύο εδάφη, οι τιμές του TF των επιμέρους μεταχειρίσεων ακολουθούν την εξής σειρά: B>A>M.

Γ) TC Transfer Coefficient (Συντελεστής μεταφοράς)

Έδαφος 1

Πίνακας 8 Οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς (TC) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 1 (μ.ο. 5 επαναλήψεων n=5).

	C βλαστού/ C ολική	C φύλλα/ C ολική
1M	0,084	0,000
1A	0,117	0,012
1B	0,140	0,014

Έδαφος 2

Πίνακας 9 Οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς (TC) στην κάνναβη των μεταχειρίσεων του Εδάφους 2 (μ.ο. επαναλήψεων n=5).

	C βλαστού/ C ολική	C φύλλα/ C ολική
2M	0,050	0,000
2A	0,106	0,009
2B	0,127	0,010

Παρατηρείται πως οι τιμές του συντελεστή μεταφοράς μειώνονται καθώς αυξάνεται το ύψος των φυτών, γεγονός που συμφωνεί με τις συγκεντρώσεις χαλκού που βρέθηκαν στα φυτικά τμήματα, οι οποίες μειώνονταν σε συνάρτηση με το ύψος του φυτού (Διάγραμμα 2 και 3). Όλοι οι παραπάνω δείκτες, επομένως, επιβεβαιώνουν

την τάση του χαλκού να συσσωρεύεται κυρίως στις ρίζες του φυτού της κάνναβης, καθιστώντας έτσι την κάνναβη ως έναν ιδανικό υποψήφιο για σταθεροποίηση του μετάλλου του χαλκού στο έδαφος, δίνοντας παράλληλα την δυνατότητα για περεταίρω εκμετάλλευση του υπέργειου τμήματός του.

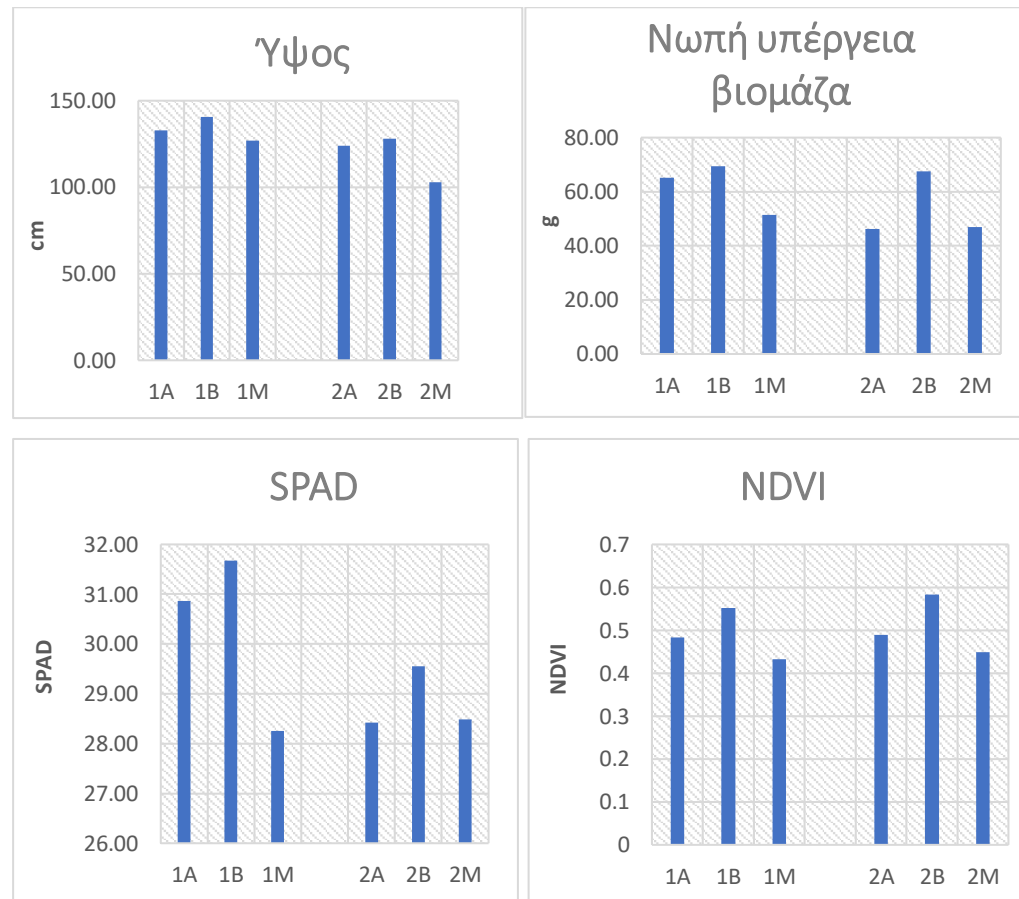
3.5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

Στα παρακάτω διαγράμματα οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα των αναπτυξιακών χαρακτηριστικών για τα φυτά της κάνναβης των επιμέρους μεταχειρίσεων. Σε γενικές γραμμές παρατηρείται μία θετική επίδραση του χαλκού στην ανάπτυξη των φυτών , καθώς το υψηλότερο επίπεδο επιμόλυνσης Β παρουσιάζει ως επί τω πλείστων τις μεγαλύτερες τιμές, ακολουθούμενο από το επίπεδο επιμόλυνσης Α, ενώ οι μάρτυρες (Μ) εμφανίζουν την χαμηλότερη ανάπτυξη. Αυτό είναι λογικό, εφόσον ο χαλκός αποτελεί ιχνοστοιχείο για τα φυτά και η αυξημένη δόση στην συγκεκριμένη περίπτωση προάγει την ανάπτυξή τους. Σύμφωνα με τους Κουκουλάκη κα. (2018), ο χαλκός ως μικροθρεπτικό, λαμβάνει μέρος σε πολλές βιολογικές διεργασίες ως βασικός παράγοντας σε πολλές μεταλλοπρωτεΐνες, εξαιτίας της παρεμβολής του σε διάφορες κυτταρικές διεργασίες (πχ. φωτοσύνθεση, μεταφορά ηλεκτρονίων κλπ.)

Καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των δύο παραγόντων (έδαφος και επίπεδο επιμόλυνσης) στην ανάπτυξη των φυτών προκύπτει μέσα από την στατιστική Ανάλυση Διακύμανσης Διπλής Κατεύθυνσης (2-Way ANOVA). Από την ανάλυση αυτή διαπιστώθηκε πως υπήρξε στατιστικά σημαντική επίδραση της παραμέτρου του εδάφους στο ύψος των φυτών, στην υπέργεια βιομάζα και στις τιμές του δείκτη SPAD που συσχετίζονται με την περιεχόμενη στο φύλλο χλωροφύλλη.

Αυτή η πληροφορία, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που φαίνονται στα διαγράμματα, μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως τα φυτά του Εδάφους 1 αναπτύχθηκαν πιο εύρωστα σε σχέση με τα φυτά του Εδάφους 2. Αυτό το φαινόμενο πιθανόν δημιουργήθηκε εξαιτίας της δομής των εδαφών, η οποία στην πρώτη περίπτωση μπόρεσε να συγκρατήσει μεγαλύτερη ποσότητα χαλκού, λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας σε άργιλο. Ο χαλκός έδρασε ως μικροθρεπτικό και βοήθησε στην ανάπτυξη των φυτών. Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση, εξαιτίας της

ανάμειξης του εδάφους με ποσοστό άμμου, η συγκράτηση του χαλκού ήταν λιγότερη (Khan, 2018), με αποτέλεσμα τα φυτά να έχουν μικρότερη ανάπτυξη και λιγότερη χλωροφύλλη.



Διάγραμμα 5 Το ύψος, η υπέργεια νωπή και ξηρή βιομάζα (g), οι τιμές SPAD και ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης NDVI των φυτών της κάνναβης των 6 μεταχειρίσεων (μ.ο. επαναλήψεων n=5).

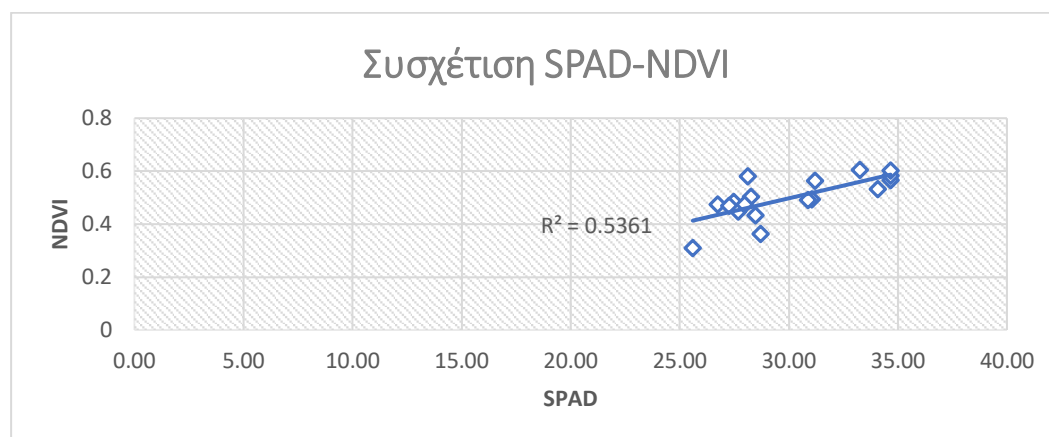
Επιπλέον, μέσα από την στατιστική ανάλυση προέκυψε σημαντική επίδραση της παραμέτρου του επιπέδου επιμόλυνσης σε όλα τα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά. Η επίδραση ήταν θετική, όπως διαπιστώνεται από τα διαγράμματα, καθώς οι τιμές των συγκεκριμένων αναπτυξιακών παραμέτρων στα επιμέρους επίπεδα επιμόλυνσης διαμορφώθηκαν με την εξής σειρά: B>A>M. Και σε αυτή την περίπτωση οι υψηλές συγκέντρωσης χαλκού συγκριτικά με τον μάρτυρα, συνέβαλαν στην αύξηση της

βιομάζας, του ύψους και της χλωροφύλλης των φυτών, για τους προαναφερθέντες λόγους.

Η Post-Hoc ανάλυση (LSD test, $P=0.05$) έδειξε συγκεκριμένα σε ποια επίπεδα χαλκού παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές για τις μετρήσεις των αναπτυξιακών χαρακτηριστικών. Στις μετρήσεις του ύψους διέφεραν σημαντικά τα επίπεδα A-M και B-M. Στις μετρήσεις της υπέργειας βιομάζας παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιπέδων A-B και B-M. Στις τιμές SPAD υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιπέδων B-M, ενώ οι τιμές του δείκτη NDVI παρουσίασαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα σε όλα τα επίπεδα χαλκού.

3.6. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

3.6.1. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ SPAD –NDVI



Διάγραμμα 6 Η συσχέτιση μεταξύ των τιμών SPAD και του δείκτη NDVI

Από τον συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των τιμών SPAD και του δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης NDVI, διαφαίνεται μια θετική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών, όχι όμως σημαντική όπως θα ήταν αναμενόμενο. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με τους Ang et al. (2020), οι οποίοι στα πλαίσια πειράματος χαρτογράφησης αγρού, φανέρωσαν σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ του δείκτη NDVI (υπολογισμένου από εναέριες εικόνες) και των τιμών SPAD. Σε αυτή την εργασία η χαμηλή συσχέτιση οφείλεται πιθανότατα στην μορφολογία της κάνναβης, η οποία κατά τις μετρήσεις του συγκεκριμένου δείκτη δεν επέτρεψε την συμβολή όλων των φύλλων κατά μήκος του φυτού, παρά μόνο των ανώτερων φύλλων του θόλου. Γι' αυτό το λόγο, ως καταλληλότερη μέθοδος προσδιορισμού της χλωροφύλλης στο συγκεκριμένο πείραμα αναδείχθηκε το χλωροφυλλόμετρο SPAD, στου οποίου τις μετρήσεις συνυπολογίζονται τα μεσαία αλλά και τα κατώτερα φύλλα.

3.6.2. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΤΡΩΣΕΩΝ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΤΑ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Έδαφος 1- Επίπεδο επιμόλυνσης Α

Πίνακας 10 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στην κάνναβη με τη συγκέντρωση του χαλκού του εδάφους της μεταχείρισης 1Α και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.

	Cu κάτω ρίζα (0- 5cm)	Cu άνω ρίζα (5- 10cm)	Cu κάτω βλαστός (0-30cm)	Cu μέσος βλαστός (30- 60cm)	Cu άνω βλαστός (60- 90cm)	Cu μέσα φύλλα (30- 60cm)	Cu άνω φύλλα (60-90cm)
pH (1:2,5)	-,558	-,854**	-,771**	-,633*	-,686*	-,554*	,664
EC (μS/cm)	-,334	-,774**	-,801**	-,644*	-,432	-,767	,649
Άργιλος (%)	-,676	-,688*	-,456*	-,435*	-,676	-,722	-,465
Cu 1Α διαθέσιμη	,970**	,999**	,998**	,970**	,987**	,944**	,872*
Cu 1Α ολική	,858*	,888*	,890*	,857*	,879*	,866*	,865*
Cu κάτω ρίζα (0-5cm)	1	,993**	,984**	,878*	,949**	,962**	,790
Cu άνω ρίζα (5-10cm)		1	,994**	,982**	,985**	,997**	,996**
Cu κάτω βλαστός (0-30cm)			1	,943**	,983**	,952**	,856*
Cu μέσος βλαστός (30-60cm)				1	,973**	,845*	,941**
Cu άνω βλαστός (60-90cm)					1	,932**	,936**
Cu μέσα φύλλα (30-60cm)						1	,807
Cu άνω φύλλα (60-90cm)							1

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (2-tailed)

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01 (2-tailed)

Έδαφος 1- Επίπεδο επιμόλυνσης Β

Πίνακας 11 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στην κάνναβη με τη συγκέντρωση του χαλκού του εδάφους της μεταχείρισης 1B και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.

pH	-,523	-,873**	-,767**	-,649*	-,678*	-,554*	,654
EC	-,378	-,789**	-,813**	-,654*	-,429	-,672	,659
Άργιλος(%)	-,658	-,675*	-,462*	-,455*	-,669	-,729	-,475
Cu 1B διαθέσιμη	,528	,644	,937**	,968**	,918**	,683	,766
Cu 1B ολική	,565	,669	,840*	,881*	,834*	,695	,578
Cu κάτω ρίζα (0-5cm)	1	,979**	,804	,711	,796	,973**	,763
Cu άνω ρίζα (5-10cm)		1	,881*	,795	,872*	,976**	,861*
Cu κάτω βλαστός (0-30cm)			1	,986**	,988**	,897*	,899*
Cu μέσος βλαστός (30-60cm)				1	,974**	,829*	,850*
Cu άνω βλαστός (60-90cm)					1	,914*	,857*
Cu μέσα φύλλα (30-60cm)						1	,800
Cu άνω φύλλα (60-90cm)							1

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (2-tailed)

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01 (2-tailed)

Στον Πίνακα 10, παρατηρείται πως μεταξύ της διαθέσιμης και της ολικής συγκέντρωσης χαλκού στο έδαφος, η διαθέσιμη συγκέντρωση είναι αυτή που παρουσιάζει ισχυρότερες θετικές συσχετίσεις με τις συγκεντρώσεις Cu των επιμέρους φυτικών τμημάτων. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τους Κουκουλάκης κα.(2018), οι οποίοι επισημαίνουν πως η διαθέσιμη συγκέντρωση μετάλλου στο έδαφος συσχετίζεται καλύτερα με την συγκέντρωση του μετάλλου στα φυτά, συγκριτικά με την ολική. Επιπλέον, οι σημαντικές θετικές συσχετίσεις που εμφανίζονται μεταξύ της διαθέσιμης και των συγκεντρώσεων Cu των φυτικών τμημάτων επιβεβαιώνεται από τους Petrova et al. (2012) οι οποίοι έδειξαν μέσω των αποτελεσμάτων τους πως η συσσώρευση μετάλλων ή μεταλλοειδών σε φυτά κάνναβης αυξήθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσής τους στο διάλυμα των επιμολύνσεων.

Παρόμοια συμπεριφορά διαφαίνεται και στην μεταχείριση 2B (Πίνακας 11), όπου παρουσιάζονται πολύ σημαντικές θετικές συσχετίσεις μεταξύ των συγκεντρώσεων Cu των περισσότερων φυτικών τμημάτων, μεταξύ τους. Επιπλέον, και σε αυτή την περίπτωση η διαθέσιμη συγκέντρωση Cu της μεταχείρισης παρουσιάζει σημαντικότερες θετικές συσχετίσεις με τις συγκεντρώσεις Cu των επιμέρους φυτικών τμημάτων, συγκριτικά με την ολική. Παρόλα αυτά, συσχετίζεται σημαντικά μόνο με τον κάτω, μέσο και άνω βλαστό και όχι με την ρίζα και τα φύλλα. Οι Petrova et al. (2012) στο πείραμά τους κατά το οποίο επιμόλυναν εδάφη με διάφορες δόσεις μετάλλων και μεταλλοειδών, κατέληξαν πως στην περίπτωση του χαλκού οι αυξημένες δόσεις στο εδαφικό διάλυμα δεν οδήγησαν σε αύξηση της συσσώρευσης του χαλκού στις ρίζες της κάνναβης, αλλά προκάλεσαν την αύξηση της ποσότητας του χαλκού στους μίσχους. Αυτό το συμπέρασμα πιθανόν να εξηγεί και σε αυτή την περίπτωση την σημαντική συσχέτιση που παρουσιάζει ο χαλκός με τον βλαστό των φυτών. (Golia et al. 2007; 2009)

Όσον αφορά τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τόσο στην μεταχείριση 1A (Πίνακας 10) όσο και στη μεταχείριση 2B (Πίνακας 11) παρατηρείται σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ του pH του εδάφους και των συγκεντρώσεων χαλκού του μεγαλύτερους μέρους του φυτού (άνω ρίζα, κάτω βλαστός, μέσος βλαστός, άνω βλαστός, μέσα φύλλα). Αυτό παρατηρείται σε πλήθος μελετών, καθώς είναι γνωστό

ότι σε εδάφη με χαμηλές τιμές pH αυξάνεται η διαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων (Γκόλια, 2003) Επιπλέον, η EC του εδάφους συσχετίζεται αρνητικά με την συγκέντρωση Cu της άνω ρίζας, του κάτω βλαστού και του μέσου βλαστού. Ομοίως, το ποσοστό αργίλου του εδάφους συσχετίζεται σημαντικά και με αρνητικό πρόσημο με την συγκέντρωση Cu της άνω ρίζας, του κάτω βλαστού και του μέσου βλαστού.

Έδαφος 1- Επίπεδο επιμόλυνσης A

Πίνακας 12 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στο έδαφος της μεταχείρισης 1A με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά

	pH	EC	OM	CaCO ₃ (%)	Clay (%)	Cu 1A διαθέσιμη	Cu 1A ολική
pH	1	,762*	,460	-,558	-0,659	-,855**	-, 719*
EC		1	,662	-, 441	-320	-552*	-,502*
OM			1	,562	,341	,803*	,651*
CaCO ₃ (%)				1	,540*	,319	,341
Clay (%)					1	,650	,450
Cu 1A διαθέσιμη						1	,891*
Cu 1A ολική							1

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (2-tailed)

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01 (2-tailed)

Έδαφος 1- Επίπεδο επιμόλυνσης Β

Πίνακας 13 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στο έδαφος της μεταχείρισης 1B με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.

	pH	EC	OM	CaCO ₃ (%)	Clay (%)	Cu 1B διαθέσιμη	Cu 1B ολική
pH	1	,769*	,475	-,568	-0,672	-,864**	-, 729*
EC		1	,668	-, 451	-332	-561*	-,518*
OM			1	,568	,349	,813*	,662*
CaCO ₃ (%)				1	,549*	,327	,350
Clay (%)					1	,659	,460
Cu 1B διαθέσιμη						1	,898**
Cu 1B ολική							1

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (2-tailed)

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01 (2-tailed)

Στους Πίνακες 14 και 15 παρατηρείται σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ του pH και της διαθέσιμης συγκέντρωσης του εδάφους, καθώς και με την ολική συγκέντρωση του εδάφους με μικρότερο όμως επίπεδο σημαντικότητας από την διαθέσιμη. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τους Golia et al. (2009), οι οποίοι επισημαίνουν πως το χαμηλό pH του εδάφους οδηγεί σε αυξημένη διαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Επιπλέον παρατηρείται αρνητική συσχέτιση μεταξύ της διαθέσιμης και ολικής συγκέντρωσης του χαλκού με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του εδάφους. Το pH συσχετίζεται θετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Έδαφος 2- Επίπεδο επιμόλυνσης Α

Πίνακας 14 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στην κάνναβη με τη συγκέντρωση του χαλκού του εδάφους της μεταχείρισης 2Α και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.

	Cu κάτω ρίζα (0-5cm)	Cu άνω ρίζα (5- 10cm)	Cu κάτω βλαστός (0-30cm)	Cu μέσος βλαστός (30- 60cm)	Cu άνω βλαστός (60- 90cm)	Cu μέσα φύλλα (30- 60cm)	Cu άνω φύλλα (60-90cm)
pH	-,553	-,857**	-,778**	-,639*	-,689*	-,555*	,669
EC	-,338	-,778**	-,804**	-,648*	-,435	-,766	,640
Άργιλος (%)	-,679	-,689*	-,453*	-,439*	-,678	-,727	-,469
Cu 2Α διαθέσιμη	,166	,869*	,885*	,990**	,948**	,691	,888*
Cu 2Α ολική	,582	,768	,784	,889*	,846*	,698	,7α92
Cu κάτω ρίζα (0-5cm)	1	,859*	,853*	,894*	,912*	,619	,987**
Cu άνω ρίζα (5-10cm)		1	,998**	,916*	,979**	,888*	,819*
Cu κάτω βλαστός (0-30cm)			1	,927**	,982**	,902*	,813*
Cu μέσος βλαστός (30-60cm)				1	,968**	,770	,901*
Cu άνω βλαστός (60-90cm)					1	,818*	,888*
Cu μέσα φύλλα (30-60cm)						1	,559
Cu άνω φύλλα (60-90cm)							1

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (2-tailed)

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01 (2-tailed)

Έδαφος 2- Επίπεδο επιμόλυνσης Β

Πίνακας 15 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στην κάνναβη με τη συγκέντρωση του χαλκού του εδάφους της μεταχείρισης 2B και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά

	Cu κάτω ρίζα (0-5cm)	Cu άνω ρίζα (5-10cm)	Cu κάτω βλαστός (0-30cm)	Cu μέσος βλαστός (30-60cm)	Cu άνω βλαστός (60-90cm)	Cu μέσα φύλλα (30-60cm)	Cu άνω φύλλα (60-90cm)
pH	-,585	-,859**	-,767**	-,636*	-,687*	-,659*	,606
EC	-,343	-,777**	-,809**	-,649*	-,423	-,778	,613
Άργιλος (%)	-,667	-,682*	-,465*	-,452*	-,667	-,731	-,478
Cu 2B διαθέσιμη	,909*	,982**	,936**	,879*	,909*	,981**	,816*
Cu 2B ολική	,835*	,818*	,856*	,797	,786	,828*	,762
Cu κάτω ρίζα (0-5cm)	1	,902*	801	,726	,853*	,830*	,922**
Cu άνω ρίζα (5-10cm)		1	,856*	,781	,821*	,952**	,839*
Cu κάτω βλαστός (0-30cm)			1	,988**	,978**	,945**	,642
Cu μέσος βλαστός (30-60cm)				1	,958**	896*	,540
Cu άνω βλαστός (60-90cm)					1	,897*	,689
Cu μέσα φύλλα (30-60cm)						1	,768
Cu άνω φύλλα (60-90cm)							1

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (2-tailed)

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01 (2-tailed)

Τόσο στην μεταχείριση 2Α (Πίνακας 16) όσο και στη μεταχείριση 2Β (Πίνακας 17) παρατηρείται σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ του pH του εδάφους και των συγκεντρώσεων χαλκού του μεγαλύτερους μέρους του φυτού(άνω ρίζα, κάτω βλαστός, μέσος βλαστός, άνω βλαστός, μέσα φύλλα). Επιπλέον, η EC του εδάφους συσχετίζεται αρνητικά με την συγκέντρωση Cu της άνω ρίζας, του κάτω βλαστού και του μέσου βλαστού. Ομοίως, το ποσοστό αργίλου του εδάφους συσχετίζεται σημαντικά και με αρνητικό πρόσημο με την συγκέντρωση Cu της άνω ρίζας, του κάτω βλαστού και του μέσου βλαστού. Όπως συνέβη στο Έδαφος 1, έτσι και στην περίπτωση του Εδάφους 2, η διαθέσιμη συγκέντρωση χαλκού παρουσιάζει σημαντικές θετικές συσχετίσεις με τις συγκεντρώσεις Cu όλων των επιμέρους φυτικών τμημάτων, σε σχέση με την ολική συγκέντρωση η οποία συσχετίζεται με χαμηλότερο επίπεδο σημαντικότητας. Η υψηλή συσχέτιση της διαθέσιμης και των επιμέρους φυτικών τμημάτων, συμφωνεί με τους Golia et al. (2009). Επιπλέον, σημαντικές θετικές συσχετίσεις παρουσιάζονται μεταξύ των συγκεντρώσεων των περισσότερων φυτικών τμημάτων, σε συμφωνία με τους Petrova et al. (2012). Η αρνητική συσχέτιση που παρατηρείται μεταξύ του pH και της συγκέντρωσης χαλκού στα μέσα φύλλα, καθώς και η θετική συσχέτιση της διαθέσιμης με την συγκέντρωση χαλκού στα άνω και μέσα φύλλα, συνάδει με τα αποτελέσματα των Golia et al. (2007), ε αντίστοιχο πείραμα με το φυτό του καπνού (*Oriental tobacco*).

Έδαφος 2- Επίπεδο επιμόλυνσης Α

Πίνακας 16 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στο έδαφος της μεταχείρισης 2Α με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά.

	pH	EC	OM	CaCO ₃ (%)	Clay (%)	Cu 2A διαθέσιμη	Cu 2A ολική
pH	1	,755*	,456	-,558	-0,654	-,856**	-, 718*
EC		1	,658	-, 439	-318	-551*	-,501*
OM			1	,558	,333	,801*	,645*
CaCO ₃ (%)				1	,541*	,317	,339
Clay (%)					1	,645	,447
Cu 2A διαθέσιμη						1	,890*
Cu 2A ολική							1

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (2-tailed)

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01 (2-tailed)

Έδαφος 2- Επίπεδο επιμόλυνσης Β

Πίνακας 17 Συντελεστές συσχέτισης των συγκεντρώσεων του χαλκού Cu στο έδαφος της μεταχείρισης 2B με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά

	pH	EC	OM	CaCO ₃ (%)	Clay (%)	Cu 2B διαθέσιμη	Cu 2B ολική
pH	1	,765*	,465	-,565	-0,665	-,859**	-, 721*
EC		1	,664	-, 444	-,323	-,556*	-,501*
OM			1	,564	,343	,808*	,655*
CaCO ₃ (%)				1	,543*	,323	,345
Clay (%)					1	,654	,454
Cu 2B διαθέσιμη						1	,894*
Cu 2B ολική							1

* Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (2-tailed)

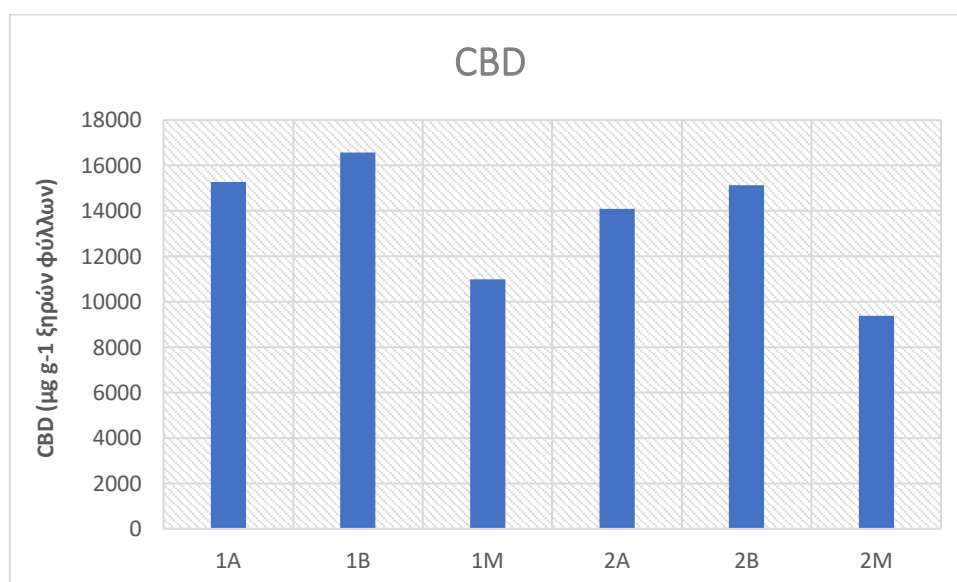
** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01 (2-tailed)

Στους Πίνακες 20 και 21 παρατηρείται σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ του pH και της διαθέσιμης συγκέντρωσης του εδάφους, καθώς και με την ολική συγκέντρωση του εδάφους με μικρότερο όμως επίπεδο σημαντικότητας από την διαθέσιμη. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, έρχεται σε συμφωνία με τους Golia et al. (2009), οι οποίοι επισημαίνουν πως το χαμηλό pH του εδάφους οδηγεί σε αυξημένη διαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων στο έδαφος. Επιπλέον παρατηρείται αρνητική συσχέτιση μεταξύ της διαθέσιμης και ολικής συγκέντρωσης του χαλκού με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του εδάφους. Το pH συσχετίζεται θετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

3.7.ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΝΝΑΒΙΔΙΟΛΗΣ

Πίνακας 18 Η συγκέντρωση της κανναβιδιόλης CBD στην ξηρά ουσία των φύλλων των επιμέρους μεταχειρίσεων.

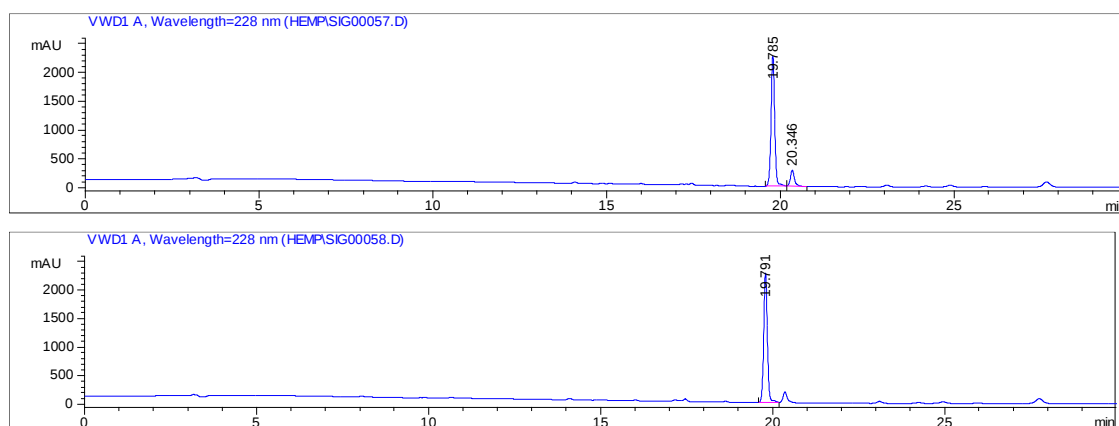
	CBD ($\mu\text{g g}^{-1}$ ξηρών φύλλων)	SD	RSD (%)
1A	15262,5	1520,8	10,0
1B	16554,2	1402,0	8,5
1M	10991,4	1762,2	16,0
2A	14081,5	5875,6	41,7
2B	15115,7	1763,5	11,7
2M	9373,6	2422,8	25,8



Διάγραμμα 7 Η συγκέντρωση της κανναβιδιόλης CBD στην ξηρά ουσία των φύλλων των επιμέρους μεταχειρίσεων.

Ο παραπάνω πίνακας και το διάγραμμα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του προσδιορισμού της κανναβιδιόλης στην ξηρή βιομάζα των φύλλων. Αυτό που παρατηρείται είναι πως όσο αυξάνει η δόση του Cu στα φυτά τόσο αυξάνεται και η περιεκτικότητα σε κανναβιδιόλη, καθώς η συγκέντρωσή της ακολουθεί την εξής σειρά στις περιπτώσεις και των δύο εδαφών: B>A>M. Φαίνεται, επομένως, πως η υψηλή συγκέντρωση του Cu στο έδαφος και κατ' επέκταση στους ιστούς των φυτών,

πυροδότησε την παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας κανναβιδιόλης. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τους Husain (2019), οι οποίοι σε πείραμα που διεξήγαγαν με φυτά κάνναβης σε ρυπασμένο και μη έδαφος, απέδειξαν πως η συνολική περιεκτικότητα σε CBD στα άνθη των φυτών του ρυπασμένου εδάφους ήταν υψηλότερη συγκριτικά με τα φυτά του μάρτυρα. Σύμφωνα με τους Berni (2019) σε περιπτώσεις περίσσειας μετάλλων και ιδιαίτερα βαρέων μετάλλων στους ιστούς των φυτών, τα φυτικά κύτταρα θέτουν σε εφαρμογή μηχανισμούς άμυνας, όπως την παραγωγή δευτερογενών μεταβολιτών. Ενδεχομένως αυτό να εξηγεί στην συγκεκριμένη περίπτωση την αύξηση της κανναβιδιόλης στα φυτά των μεταχειρίσεων με υψηλά επίπεδα επιμόλυνσης με χαλκό.



Εικόνα 16 Παραδείγματα χρωματογραφημάτων της περιεχόμενης κανναβιδιόλης σε δείγματα φύλλων κάνναβης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Από το πείραμα αυτό που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση βιομηχανικής κάνναβης (*Cannabis Sativa* L.) προκύπτει το συμπέρασμα πως η κάνναβη αντέχει και αναπτύσσεται ικανοποιητικά σε εδάφη με υψηλά επίπεδα χαλκού (100 και 200 ppm) και διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μάλιστα, τα φυτά της κάνναβης φαίνεται να επωφελήθηκαν από την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων χαλκού στο έδαφος και αυτό αποτυπώθηκε στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά των φυτών.

2. Η ολική και η διαθέσιμη συγκέντρωση χαλκού ήταν υψηλότερη στο Έδαφος 1, (έδαφος του αγροκτήματος του Π.Θ) παρά στο Έδαφος 2 (μείγμα εδάφους με άμμο). Αυτό οφείλεται στην διαφορετική κοκκομετρική σύσταση των δύο εδαφών, αφού στην πρώτη περίπτωση υπήρχε μεγαλύτερο ποσοστό αργίλου και οργανικής ουσίας με αποτέλεσμα να συγκρατηθεί μεγαλύτερη ποσότητα χαλκού.

3. Για τον ίδιο λόγο, οι τιμές των συγκεντρώσεων του χαλκού στο φυτό ήταν χαμηλότερες στο έδαφος με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άμμο, σε σύγκριση με το έδαφος που δεν περιείχε άμμο.

4. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού εντοπίστηκε στις άνω ρίζες των φυτών με σταδιακή φθίνουσα τάση προς τα ανώτερα φυτικά τμήματα ($Cu_{Ρίζα} > Cu_{βλαστός} > Cu_{φύλλα}$), για τις περιπτώσεις και των δύο εδαφών. Αυτό αποδεικνύεται και μέσω των δεικτών συσσώρευσης και μεταφοράς του ιχνοστοιχείου εντός του φυτικού ιστού, οι οποίοι φανέρωσαν την τάση του χαλκού για συσσώρευση στις ρίζες με μια μικρή μεταφορά προς το κατώτερο μέρος του βλαστού. Το γεγονός αυτό, καθιστά την κάνναβη μια ιδανική επιλογή για περιπτώσεις φυτοσταθεροποίησης σε εδάφη ρυπασμένα με χαλκό, δίνοντας την δυνατότητα για περεταίρω αξιοποίηση της υπέργειας μη επιβαρυσμένης βιομάζας.

5. Από τη στατιστική Ανάλυση Διακύμανσης Διπλής κατεύθυνσης προέκυψε το συμπέρασμα ότι το είδος του εδάφους επέδρασε στατιστικώς σημαντικά στο ύψος των φυτών, ενώ το επίπεδο επιμόλυνσης επηρέασε σημαντικά την βιομάζα, τις τιμές SPAD και τις τιμές του δείκτη NDVI.

6. Υπήρξε σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ του εδαφικού pH και της διαθέσιμης συγκέντρωσης χαλκού στο έδαφος, επιβεβαιώνοντας την ήδη υπάρχουσα γνώση, πως το όξινο pH οδηγεί σε αυξημένη διαθεσιμότητα μετάλλων στο έδαφος. Με χαμηλότερο επίπεδο σημαντικότητας συσχετίστηκε, αντίστοιχα και η ολική συγκέντρωση του εδάφους.

7. Μέσω των συσχετίσεων γίνεται εμφανής μία θετική επίδραση του χαλκού στην βιομάζα και στην χλωροφύλλη των φυτών των μεταχειρίσεων 1A και 1B, στις τιμές του NDVI της μεταχείρισης 2A και στην βιομάζα, στο ύψος και στη χλωροφύλλη της μεταχείρισης 2B.

8. Τέλος, αυξημένη συγκέντρωση κανναβιδιόλης παρουσιάστηκε στις μεταχειρίσεις των υψηλότερων επιπέδων χαλκού B, ακολουθούμενες από τις συγκεντρώσεις της στα φυτά των μεταχειρίσεων A, ενώ οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίστηκαν στα φυτά των μαρτύρων, για τις περιπτώσεις και των δύο εδαφών.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Adriano D.C, Wenzel W.W., Vangronsveld J., Bolan N.S. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup, *Geoderma*, Volume 122, Issues 2–4, Pages 121-142, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.003>.

Ang Y., Norasma N., Ya C., Roslin N., Ismail M., Che'Ya N. (2020). Rice Chlorophyll Content Monitoring using Vegetation Indices from Multispectral Aerial Imagery. *Pertanika Journal of Science and Technology*. 28. 779-795.

Ahmad R., Tehsin Z., Malik S., & Asad S., Muhammad S., Shah M., & Khan S.A. (2015) Phytoremediation Potential of Hemp (*Cannabis sativa* L.): Identification and Characterization of Heavy Metals Responsive Genes. *CLEAN - Soil Air Water*. 44. 10.1002/clen.201500117.

Alloway, B.J. (2013). Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. In: Alloway, B. (eds) *Heavy Metals in Soils. Environmental Pollution*, vol 22. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2

Angelova V., Ivanova R., Delibaltova V., Ivanov K. (2004) Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp), *Industrial Crops and Products*, Volume 19, Issue 3, Pages 197-205, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.001>

Berni R., Luyckx M., Xu X., Legay S., Sergeant K., Hausman J.F., Lutts S., Cai G., Guerriero G. (2019) Reactive oxygen species and heavy metal stress in plants: Impact on the cell wall and secondary metabolism, *Environmental and Experimental Botany*, Volume 161, Pages 98-106, ISSN 0098-8472, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.10.017>.

Bhamra K.S., Desai A., Imani-Berendjestanki P., Horgan M. (2021). The emerging role of cannabidiol (CBD) products; a survey exploring the public's use and perceptions of CBD. *Phytotherapy Research*. Volume35, Issue10. Pages 5734-5740 <https://doi.org/10.1002/ptr.7232>.

Bona E., Marsano F., Cavaletto M., Berta G. (2007) Proteomic characterization of copper stress response in Cannabis sativa roots. Proteomics. Apr;7(7):1121-30. doi: 10.1002/pmic.200600712. PMID: 17352425.

Brady N. C. & Weil R. R.. (2015) Εδαφολογία. Η φύση και οι ιδιότητες των εδαφών. Σελίδες: 1004. ISBN: 9789608002623

Burstein S. (2015). Cannabidiol (CBD) and its analogs: a review of their effects on inflammation, Bioorganic & Medicinal Chemistry, Volume 23, Issue 7, Pages 1377-1385, ISSN 0968-0896, <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2015.01.059>.

Crippa José A., Guimarães Francisco S., Campos Alline C., Zuardi Antonio W. (2018) Translational Investigation of the Therapeutic Potential of Cannabidiol (CBD): Toward a New Age, Frontiers in Immunology, Vol 9, DOI 10.3389/fimmu.2018.02009, ISSN 1664-3224

ElSohly M.A., Radwan M.M., Gul W., Chandra S., Galal A. (2017). Phytochemistry of Cannabis sativa L.. In: Kinghorn, A., Falk, H., Gibbons, S., Kobayashi, J. (eds) Phytocannabinoids. Progress in the Chemistry of Organic Natural Products, vol 103. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45541-9_1

Fike J. (2017). Industrial Hemp: Renewed Opportunities for an Ancient Crop. Critical Reviews in Plant Sciences. Volume 35, 2016 - Issue 5-6: Cannabis <https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1257842>.

Galic M., Perčin A., Zgorelec Z., Ivica K. (2019). Evaluation of heavy metals accumulation potential of hemp (Cannabis sativa L.). Journal of Central European Agriculture. 20. 700-711. 10.5513/JCEA01/20.2.2201.

Golia E.E., Dimirkou A, Mitsios IK (2007) Accumulation of Heavy Metals on Burley, Virginia and Oriental Tobacco Leaves Grown in an Agricultural Area in Relation to Soil. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 79: 158–162

Golia E.E, Dimirkou A, Mitsios IK (2009) Heavy metals concentration in tobacco leaves in relation to their available soil fractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 40:106-120

Golia E.E., A. Angelaki, K.D. Giannoulis, E. Skoufogianni, D. Bartzialis, C. Cavalaris, S. Vleioras (2021) Evaluation of soil properties, irrigation and solid waste application levels on Cu and Zn uptake by industrial hemp *Agron. Res.*, 19, p. 9299, 10.15159/ar.21.016

Golia E.E., Bethanis J., Ntinopoulos N., Kaffe G.G., Komnou A.A., Vasilou C. (2023) Investigating the potential of heavy metal accumulation from hemp. The use of industrial hemp (*Cannabis Sativa L.*) for phytoremediation of heavily and moderated polluted soils. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Volume 31,100961,ISSN 2352-5541, <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100961>

Grassa C.J., Wenger J.P., Dabney C., Poplawski S.G., Motley S.T, Michael T.P., Schwartz C.J. , Weiblen G.D. (2018) A Complete Cannabis Chromosome Assembly and Adaptive Admixture for Elevated Cannabidiol (CBD) Content, *bioRxiv* (2018), Article 458083, 10.1101/458083

Guidi Nissim, W., Palm, E., Mancuso, S. et al. (2018). Trace element phytoextraction from contaminated soil: a case study under Mediterranean climate. *Environ Sci Pollut Res* 25, 9114–9131. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1197-x>

Husain R., Weeden H., Bogush D., Deguchi M., Soliman M., Potlakayala S., Ramesh K., Goldman S., Id S. (2019). Enhanced tolerance of industrial hemp (*Cannabis sativa L.*) plants on abandoned mine land soil leads to overexpression of cannabinoids. *PLoS ONE*. 14. 10.1371/journal.pone.0221570.

Islam, M.D., Hasan, M.M., Rahaman, A. et al. Translocation and bioaccumulation of trace metals from industrial effluent to locally grown vegetables and assessment of human health risk in Bangladesh. *SN Appl. Sci.* 2, 1315 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3123-3>

Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>

Kaur, R., Rani, R. (2006) Spatial Characterization and Prioritization of Heavy Metal Contaminated Soil-Water Resources in Peri-Urban Areas of National Capital Territory (NCT), Delhi. *Environ Monit Assess* 123, 233–247. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9193-x>

Khan, Osman. (2018). Management of Soil Problems. 10.1007/978-3-319-75527-4.

Khan S., Cao Q., Zheng Y.M., Huang Y.Z., Zh Y.G. (2008) Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China, *Environmental Pollution*, Volume 152, Issue 3, Pages 686-692, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.056>.

Konica Minolta Sensing (2009). A lightweight handheld meter for measuring the chlorophyll content of leaves without causing damage to plants.

Liu J., Kang H., Tao W., Li H., He Dan, Ma L., Tang H., Wu S., Yang K., Li X. (2023) A spatial distribution – Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil, *Science of The Total Environment*, Volume 859, Part 1, 160112, ISSN 0048-9697

Mahmood A., Rashid S., Malik R.N. (2013) Determination of toxic heavy metals in indigenous medicinal plants used in Rawalpindi and Islamabad cities, Pakistan, *Journal of Ethnopharmacology*, Volume 148, Issue 1, Pages 158-164, ISSN 0378-8741, <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.04.005>.

Morales P., Reggio H. P. (2019). CBD: A new Hope? *ACS Med. Chem. Lett.* 2019, 10, 5, 694–695. <https://doi.org/10.1021/acsmmedchemlett.9b00127>. Copyright © 2019 American Chemical Society

Petrova S., Benesova D., Soudek P., Vanek T. (2012) Enhancement of metal(loid)s phytoextraction by *Cannabis sativa* L. anuary 2012 *Journal of Food Agriculture and Environment* 10(1):631-641

Placido DF, Lee CC. (2022) Potential of Industrial Hemp for Phytoremediation of Heavy Metals. *Plants*. 11(5):595. <https://doi.org/10.3390/plants11050595>

Pratap B., Kumar S., Nand S., Azad I., Bharagava R.N., Romanholo Ferreira L.F., Dutta V. (2023) Wastewater generation and treatment by various eco-friendly technologies: Possible health hazards and further reuse for environmental safety, *Chemosphere*, Volume 313, 137547, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137547>.

Quagliata G., Celletti S., Coppa E., Mimmo T., Cesco S., Astolfi S. (2021) Potential Use of Copper-Contaminated Soils for Hemp (*Cannabis sativa* L.) Cultivation. *Environments*. 2021; 8(11):111. <https://doi.org/10.3390/environments8110111>

Raymond A.W., Felix E. O., (2011). "Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation", *International Scholarly Research Notices*, vol. 2011, Article ID 402647, 20 pages, <https://doi.org/10.5402/2011/402647>

Rehman, M., Fahad, S., Du, G. et al. Evaluation of hemp (*Cannabis sativa* L.) as an industrial crop: a review. (2021) *Environ Sci Pollut Res* 28, 52832–52843. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16264-5>

Rehman, M., Liu, L., Wang, Q. et al. Copper environmental toxicology, recent advances, and future outlook: a review . *Environ Sci Pollut Res* 26, 18003–18016 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05073-6>

Rodríguez Martín J.A. , Ramos-Miras J.J. , Boluda R., Gil C.. (2013). Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain). *Geoderma*, Volumes 200–201, Pages 180-188, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.014>.

Semu E., Singh B.R. (1995). Accumulation of heavy metals in soils and plants after long-term use of fertilizers and fungicides in Tanzania. *Fertilizer Research* 44, 241–248 <https://doi.org/10.1007/BF00750931>

Sharma, R. K., & Agrawal, M. (2005). Biological effects of heavy metals: an overview. *Journal of environmental Biology*, 26(2), 301-313.

SHEORAN V., SHEORAN A.S., POONIA P.(2016). Factors Affecting Phytoextraction: A Review, *Pedosphere*, Volume 26, Issue 2, Pages 148-166,

ISSN 1002-0160, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60032-7)

Singh R, Gautam N, Mishra A, Gupta R. (2011). Heavy metals and living systems: An overview. *Indian J Pharmacol.* May;43(3):246-53. doi: 10.4103/0253-7613.81505. PMID: 21713085; PMCID: PMC3113373.

Small, E. (2015) Evolution and Classification of *Cannabis sativa* (Marijuana, Hemp) in Relation to Human Utilization. *Bot. Rev.* 81, 189–294 <https://doi.org/10.1007/s12229-015-9157-3>

Sorrentino, G. (2021) Introduction to emerging industrial applications of cannabis (*Cannabis sativa* L.). *Rend. Fis. Acc. Lincei* 32, 233–243. <https://doi.org/10.1007/s12210-021-00979-1>

Shifaw E. (2018) Review of Heavy Metals Pollution in China in Agricultural and Urban Soils. *J Health Pollut.* 2018 Jun 6;8(18):180607. doi: 10.5696/2156-9614-8.18.180607. PMID: 30524856; PMCID: PMC6239058.

Sparks, D.L. (2003). *Environmental Soil Chemistry*, 2nd ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA.

Vega F.A , Covelo E.F., Andrade M.L., Marcet P.(2004) Relationships between heavy metals content and soil properties in minesoils. *Analytica Chimica Acta*, Volume 524, Issues 1–2, Pages 141-150, ISSN 0003-2670, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.06.073>.

Vlad R.A., Hancu G., Ciurba A., Antonoaea P., Redai E., Todoran N., Silasi O., Muntean D., Hancu G. (2020). Cannabidiol -therapeutic and legal aspects. *Pharmazie.* 75. 463-469. 10.1691/ph.2020.0076.

Vries W, Kros J, Voogd JC, Ros GH. (2023). Integrated assessment of agricultural practices on large scale losses of ammonia, greenhouse gases, nutrients and heavy metals to air and water. *Sci Total Environ.* Jan 20;857(Pt 1):159220. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159220. Epub 2022 Oct 6. PMID: 36209876.

Wu, Y., Trejo, H.X., Chen, G. et al. (2021) Phytoremediation of contaminants of emerging concern from soil with industrial hemp (*Cannabis sativa* L.): a review. *Environ Dev Sustain* 23, 14405–14435. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01289->

Xiang M., Ma J., Cheng J., Lei K., Li F., Shi Z., Li Y. (2022). Collaborative evaluation of heavy metal pollution of soil-crop system in the southeast of Yangtze River Delta, China, *Ecological Indicators*, Volume 143, 109412, SSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109412>.

Yruela I. (2005) Copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 17 (1) • Mar 2005 <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100012>

Zafra C., Temprano J., Tejero I. (2017) The physical factors affecting heavy metals accumulated in the sediment deposited on road surfaces in dry weather: a review. *Urban Water Journal*, 14 (6), pp. 639 - 649, Cited 28 times. DOI: 10.1080/1573062X.2016.1223320

Zwolak, A., Sarzyńska, M., Szpyrka, E. et al. Πηγές ρύπανσης του εδάφους από βαρέα μέταλλα και η συσσώρευσή τους στα λαχανικά: μια ανασκόπηση. *Water Air Soil Pollut* **230** , 164 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4221-y>

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αντωνιάδης Β. (2022). Πανεπιστημιακές σημειώσεις: Ρύπανση Εδαφών - Βελτίωση και Διαχείριση Προβληματικών Εδαφών. Π.Θ. Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος.

Γκόλια Ε.Ε. (2003). Ρύπανση εδαφών της Θεσσαλίας από Βαρέα μέταλλα (Zn, Cu, Mn, Fe, Cd και Pb) και πρόσληψη αυτών από ποικιλίες καπνού. Απεικόνιση της χωρικής παραλλακτικότητας των βαρέων μετάλλων σε επιλεγμένες περιοχές της μελέτης. Διδακτορική Διατριβή

Κουκουλάκης, Π., Καλαβρουζιώτης, Ι., Κόκκινος, Π. (συγγ.) (2018) Η γεωχημική συμπεριφορά των βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον, Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

Μπαλωμένου Γ. (2009) Προσδιορισμός βαρέων μετάλλων στα νερά, στο έδαφος και στα λαχανικά στις αγροτικές περιοχές του Νομού Αιτωλοακαρνανίας και χρήση ειδικών αδρανοποιητών στα υποστρώματα καλλιέργειας για ελαχιστοποιημένη περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα. Διδακτορική Διπλωματική Εργασία. DOI 10.12681/eadd/17739, <http://hdl.handle.net/10442/hedi/17739>, ND 17739