

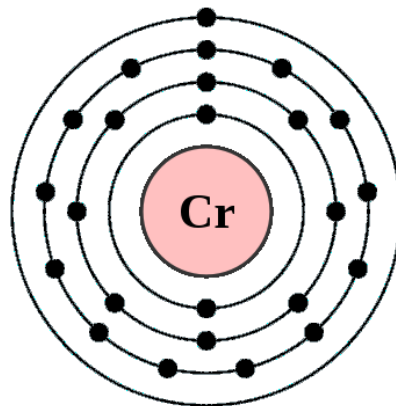
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ, ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

“Επίδραση προσθήκης εξασθενούς χρωμίου στην ανάπτυξη της γλυστρίδας  
(*Portulaca oleracea*)”

ΑΝΔΡΟΥΔΗ ΜΑΡΙΑ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΒΟΛΟΣ, 2021

“Επίδραση προσθήκης εξασθενούς χρωμίου στην ανάπτυξη της γλυστρίδας (*Portulaca oleracea*)”

“Effect of added hexavalent chromium in the development of *Portulaca oleracea*”

**Ανδρούδη Μαρία**

### **Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

**Αντωνιάδης Βασίλειος** (Επιβλέπων), Αναπληρωτής Καθηγητής Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Λεβίζου Ευθυμία** (Μέλος), Επίκουρη Καθηγήτρια Φυσιολογίας Φυτών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Πετρόπουλος Σπυρίδων** (Μέλος), Αναπληρωτής Καθηγητής Λαχανοκομίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου και να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Αντωνιάδη Βασίλειο, Αναπληρωτή Καθηγητή Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, αλλά και για τη συνεχή καθοδήγηση και συμπαράστασή του για την εκπόνηση της πτυχιακής μου διατριβής. Η επιστημονική και ηθική υποστήριξή του συνείσφερε καθοριστικά στην ολοκλήρωση και συγγραφή της μελέτης μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, την Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Λεβίζου Ευθυμία και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Πετρόπουλο Σπυρίδων, τόσο για την βοήθεια τους, όσο και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν για την μελέτη και διόρθωση της διατριβής μου.

Θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον υποψήφιο διδάκτορα Θαλασσινό Γεώργιο, για την πολύτιμη βοήθειά του στο χειρισμό του εργαστηριακού εξοπλισμού για την πραγματοποίηση των αναλύσεων.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξη, την αγάπη και την κατανόηση που μου προσέφεραν καθώς και για την βοήθεια τους για το Πανεπιστήμιο αλλά και την ζωή έξω από αυτό.

Στην οικογένειά μου...

Βεβαιώνω ότι είμαι η συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ.

## Περίληψη

Η ρύπανση του εδάφους από Cr, η οποία προκαλείται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή/και φυσικές διεργασίες, αποτελεί σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα σε πολλές χώρες. Στη φύση οι μορφές του χρωμίου που απαντούν σε μεγαλύτερη αφθονία είναι το Cr(III) και το Cr(VI). Το Cr(III) είναι χαμηλής βιοδιαθεσιμότητας και τοξικότητας και ουσιώδες στοιχείο για τη φυσιολογία των ανθρώπων και των ζώων, ενώ το Cr(VI) είναι εξαιρετικά βιοδιαθέσιμο και τοξικό. Για το λόγο αυτό, έχει αυξηθεί η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα του αποδοτικότερου τρόπου απομάκρυνσης του Cr(VI) από το περιβάλλον. Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να μελετηθεί η επίδραση του Cr(VI) στη γλυστρίδα (*Portulaca oleracea*) σε εδάφη με και χωρίς άζωτούχο λίπανση και να διερευνηθεί η πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί το είδος αυτό ως φυτό-βιοσυσσωρευτής για την φυτο-εξυγείανση του εδάφους. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα σε γλάστρες, όπου εφαρμόστηκαν 5 επίπεδα Cr(VI) (0, 50, 100, 150 και 200 mg kg<sup>-1</sup>) και 2 επίπεδα N σε 10 επαναλήψεις. Από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη Cr(VI) στο έδαφος σε υψηλά επίπεδα (150-200 mg kg<sup>-1</sup>) οδήγησε στην αναγωγή μεγαλύτερων συγκεντρώσεων Cr(VI) σε Cr(III), ενώ συγχρόνως ανέστειλε σοβαρά την ανάπτυξη της γλυστρίδας. Πιο συγκεκριμένα, το χορηγούμενο Cr(VI) προκάλεσε μείωση του βάρους των φύλλων, του συνολικού βάρους των φυτών, του ύψους των βλαστών, της φυλλικής επιφάνειας, της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη, καθώς και του ρυθμού φωτοσύνθεσης. Ωστόσο, σε κάθε μετρούμενη παράμετρο που αφορούσε την φωτοσύνθεση του φυτού, ελήφθησαν ανώτερα αποτελέσματα στις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε άζωτο σε σχέση με τις μεταχειρίσεις χωρίς άζωτο. Τέλος, βρέθηκε ότι στο φυτό δεν εμποδίστηκε η απορρόφηση P και K από το έδαφος από την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων Cr(VI). Συνεπώς, αν και το Cr(VI) ανάγεται ταχέως σε αδρανές Cr(III), η επίδρασή του, ιδίως σε υψηλές δόσεις χορήγησης, είναι επιβλαβής για τη γλυστρίδα. Συμπεραίνουμε ότι εξαιτίας της δραματικά μειωμένης βιομάζας, αυτό το φυτικό είδος δεν μπορεί να προταθεί για καλλιέργεια μεγάλης κλίμακας σε σοβαρά μολυσμένα εδάφη από Cr(VI).

## Abstract

Soil contamination by Cr is a serious environmental problem in many countries caused by anthropogenic activities and/or natural processes. In nature the most abundant forms of chromium are Cr(III) and Cr(VI). Cr(III) is of low bioavailability and toxicity and an essential element for human and animal physiology, while Cr(VI) is highly bioavailable and toxic. This has increased the need for further research in order to identify an efficient way to remove Cr(VI) from soil. The aim of this work was to study the impact of Cr(VI) in *Portulaca oleracea* in soils with and without added nitrogen in order to assess this test plant as a potential phytoremediation species. For this purpose, in a pot experiment we added 5 Cr(VI) levels (0,50, 100, 150 and 200 mg kg<sup>-1</sup>) and 2 N levels, with each treatment replicated 10 times. The results showed that the addition of Cr(VI) to the soil at high levels (150-200 mg kg<sup>-1</sup>) caused the reduction of Cr(VI) to Cr(III), although at the same time Cr(VI) severely inhibited the growth of *Portulaca oleracea*. More specifically, added Cr(VI) caused a decrease in leaf weight, total plant weight, shoots height, leaf area, chlorophyll content, and photosynthesis rate. In the N-added treatments superior results were obtained in every measured parameter related to the photosynthesis of the plant. Finally, added Cr(VI) did not inhibit the absorption of P and K from the soil, despite the presence of high concentrations of Cr(VI). Therefore, although Cr(VI) was rapidly reduced to inert Cr(III), its effect, at high doses, was harmful to *Portulaca oleracea*. Due to the dramatically reduced biomass, this plant species cannot be proposed for large-scale cultivation in severely Cr(VI)-contaminated soils.

## Περιεχόμενα

|  |    |
|--|----|
| Ευχαριστίες .....  | ii |
| Περίληψη .....   | v  |
| Abstract .....   | vi |
| Κατάλογος Πινάκων .....  | ix |
| Κατάλογος Σχημάτων .....   | ix |
| Κατάλογος Εικόνων .....  | x  |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....   | 1  |
| 1.1 Βαρέα Μέταλλα .....  | 1  |
| 1.1.1 Ορισμοί .....  | 1  |
| 1.1.2 Πηγές .....  | 2  |
| 1.1.3 Επίδραση στο περιβάλλον και την δημόσια υγεία .....                    | 3  |
| 1.1.4 Επίδραση στα φυτά .....  | 5  |
| 1.1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την διαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων .....  | 6  |
| 1.2 Χρώμιο .....   | 8  |
| 1.2.1 Ιδιότητες και μορφές του χρωμίου στο περιβάλλον .....                  | 8  |
| 1.2.2 Το χρώμιο στο έδαφος .....   | 9  |
| 1.2.3 Πρόσληψη από τα φυτά .....   | 10 |
| 1.2.4 Εφαρμογές και χρήσεις εξασθενούς χρωμίου .....                         | 11 |
| 1.2.5 Επιπτώσεις του εξασθενούς χρωμίου στον άνθρωπο .....                   | 12 |
| 1.2.6 Ρυπασμένες περιοχές στην Ελλάδα .....                                  | 13 |
| 1.3 Γλυστρίδα ( <i>Portulaca oleracea</i> ) .....                            | 15 |
| 1.4 Κενά στη βιβλιογραφία και σκοποί της εργασίας .....                      | 17 |
| 2.1 Πειραματικός σχεδιασμός .....  | 17 |
| 2.2 Μέθοδοι ανάλυσης εδάφους .....   | 19 |
| 2.2.1 Μέτρηση διαθέσιμων ιχνοστοιχείων (εκχύλιση με DTPA) .....              | 19 |
| 2.2.2 Ολικές συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων με βασιλικό νερό (aqua regia) ..... | 19 |
| 2.2.3 Μέτρηση εξασθενούς χρωμίου (με φωσφορικό κάλιο) .....                  | 20 |
| 2.3 Φυτοκομικές μετρήσεις και μέθοδοι ανάλυσης .....                         | 20 |
| 2.4 Στατιστική επεξεργασία .....   | 21 |
| Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα και συζήτηση .....                                  | 22 |
| Συμπεράσματα .....   | 48 |
| Βιβλιογραφία .....   | 49 |
| Ελληνική βιβλιογραφία .....  | 49 |
| Ξενόγλωσση βιβλιογραφία .....  | 50 |



Βιβλιογραφία από το διαδίκτυο.....57

## Κατάλογος Πινάκων

|   |    |
|---|----|
| Πίνακας 1: Διάφορες χρήσεις μετάλλων σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Πηγή: Τάσιος, 2014) ....  | 3  |
| Πίνακας 2: Κίνδυνοι ανθρώπινης υγείας από ορισμένα τοξικά μέταλλα (Πηγή: Mishra et al., 2018) ....  | 4  |
| Πίνακας 3: Ευκινησία ορισμένων βαρέων μετάλλων ανάλογα με την τιμή pH (Πηγή: Μόλλα, 2012) ..  | 7  |
| Πίνακας 4: Φυτά καταμεμημένα ανάλογα με την ικανότητά τους στην απορρόφηση βαρέων μετάλλων (Πηγή: Αντωνιάδης, 2002) .....                 | 8  |
| Πίνακας 5: Συγκέντρωση χρωμίου σε βρώσιμα φυτά που καλλιεργήθηκαν σε μολυσμένα από χρώμιο εδάφη (Πηγή: Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007) ..... | 11 |
| Πίνακας 6: Συστηματική κατάταξη γλυστρίδας (Πηγή: USDA, 2020) .....   | 15 |

## Κατάλογος Σχημάτων

|  |    |
|--|----|
| Σχήμα 1: Απεικόνιση βιολογικής δράσης απαραίτητων και μη στοιχείων στους ζωντανούς οργανισμούς (Πηγή: Αντωνιάδης, 2002) .....  | 2  |
| Σχήμα 2: Τρόποι μεταφοράς βαρέων μετάλλων που καταλήγουν στον άνθρωπο (Πηγή: Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007) .....  | 5  |
| Σχήμα 3: Ανθρωπογενείς εκπομπές του χρωμίου στο περιβάλλον (Πηγή: Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007) .....   | 12 |
| Σχήμα 4: Τιμές νωπού βάρους (σε g) των φύλλων της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος .....  | 22 |
| Σχήμα 5: Τιμές νωπού βάρους (σε g) του υπέργειου τμήματος της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος .....  | 23 |
| Σχήμα 6: Τιμές ύψους (σε cm) του βλαστού των φυτών της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος .....   | 24 |
| Σχήμα 7: Τιμές ξηρού βάρους (σε g) των ριζών της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος .....   | 25 |
| Σχήμα 8: Τιμές φυλλικής επιφάνειας (σε cm <sup>2</sup> ) των φύλλων της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος .....  | 26 |
| Σχήμα 9: Τιμές δείκτη SPAD οι οποίες παρουσιάζουν τη συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης των φύλλων των φυτών της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος ..... | 28 |
| Σχήμα 10: Τιμές μέτρησης του ρυθμού φωτοσύνθεσης στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος .....  | 30 |
| Σχήμα 11: Τιμές εξασθενούς χρωμίου (σε mg kg <sup>-1</sup> ) εκχυλισμένο στο έδαφος στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος .....   | 31 |
| Σχήμα 12: Τιμές τρισθενούς χρωμίου (σε mg kg <sup>-1</sup> ) εκχυλισμένο στο έδαφος στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος .....   | 33 |

|   |    |
|---|----|
| Σχήμα 13: Τιμές ολικού χρωμίου (σε mg kg <sup>-1</sup> ) στο υπέργειο τμήμα της γλυστρίδας, στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος.....     | 34 |
| Σχήμα 14: Τιμές ολικού χρωμίου (σε mg kg <sup>-1</sup> ) στις ρίζες της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος.....              | 35 |
| Σχήμα 15: Τιμές εξασθενούς χρωμίου (σε mg kg <sup>-1</sup> ) στο υπέργειο τμήμα της γλυστρίδας, στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος..... | 36 |
| Σχήμα 16: Τιμές εξασθενούς χρωμίου (σε mg kg <sup>-1</sup> ) στις ρίζες της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος.....          | 37 |
| Σχήμα 17: Τιμές φωσφόρου (σε mg kg <sup>-1</sup> ) που εκχυλίστηκαν από το φυτό .....   | 38 |
| Σχήμα 18: Τιμές καλίου (σε mg kg <sup>-1</sup> ) που εκχυλίστηκαν από το φυτό .....   | 39 |

#### Κατάλογος Εικόνων

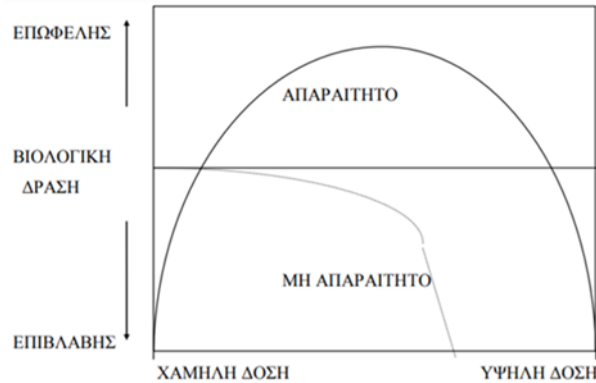
|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 1: Τα μέρη του φυτού τη γλυστρίδας (Πηγή: World of succulents)..... | 16 |
| Εικόνα 2: Οι σπόροι της γλυστρίδας (Πηγή: The herb gardener) .....         | 16 |

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Βαρέα Μέταλλα

### 1.1.1 Ορισμοί

Όλοι οι φυτικοί οργανισμοί για την εξασφάλιση μίας ομαλής αύξησης και ανάπτυξης απαιτούν ένα σχετικά μικρό αριθμό θρεπτικών στοιχείων, τα οποία αντλούν κυρίως από το έδαφος. Ωστόσο, στο εδαφικό σύστημα περιέχεται και πληθώρα μη απαραίτητων στοιχείων τα οποία κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ενδέχεται να προκαλέσουν διάφορα προβλήματα στο σύνολο των ζωντανών οργανισμών (Αντωνιάδης, 2002, Καραμπουρνιώτης κ.σ. 2012). Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και τα απαραίτητα στοιχεία είναι ωφέλιμα μόνο σε ένα συγκεκριμένο εύρος συγκεντρώσεων, ενώ δύναται να γίνουν επιβλαβή αν βρεθούν είτε σε έλλειψη, είτε σε πλεόνασμα (Σχήμα 1). Μια κατηγορία στοιχείων που έχει αυξήσει την ανάγκη να μελετηθεί η συμπεριφορά τους στο έδαφος, διότι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε θέματα που σχετίζονται με την ρύπανση των οικοσυστημάτων, είναι τα βαρέα μέταλλα (Αντωνιάδης, 2002). Στην βιβλιογραφία ο όρος «βαρέα μέταλλα» συνήθως, χρησιμοποιείται ως όνομα ομάδας, για τα χημικά στοιχεία που διαθέτουν μεταλλικές ιδιότητες και έχουν σχετική ατομική μάζα μεγαλύτερη του 20 (Γκαύρου, 2016, Παπαθεοδώρου, 2015). Σύμφωνα με τον Duffus βέβαια συχνά χρησιμοποιείται και για μεταλλικά στοιχεία με ατομικό βάρος μεγαλύτερο του σιδήρου (Duffus, 2002), ή σύμφωνα με άλλους μελετητές, για αυτά που έχουν πυκνότητα υψηλότερη από  $5 \text{ g cm}^{-3}$  (Gupta et al., 2014). Γενικά, τα βαρέα μέταλλα ανήκουν σε μία ευρεία ομάδα χημικών ουσιών που έχουν την ικανότητα να σχηματίζουν κατιόντα και χαρακτηρίζονται από μεταλλική λάμψη, από υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, ελαστικότητα και ολκιμότητα (Duffus, 2002). Επίσης, για τα μέταλλα αυτά χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο ο χαρακτηρισμός «δυσνητικώς τοξικά στοιχεία» (Γκόλια κ.σ., 2020), γιατί ακόμη και σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα και τοξικά για όλες της μορφές ζωής (Αντωνιάδης, 2002). Στα πλέον συνήθη τοξικά μέταλλα, που απαντώνται ως ρύποι, συγκαταλέγονται τα εξής: το χρώμιο, που θα μελετηθεί παρακάτω, ο μόλυβδος, το κάδμιο, ο χαλκός, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος, το αρσενικό και ο υδράργυρος (Γκαύρου, 2016).



Σχήμα 1. Απεικόνιση βιολογικής δράσης απαραίτητων και μη στοιχείων στους ζωντανούς οργανισμούς (Πηγή: Αντωνιάδης, 2002)

### 1.1.2 Πηγές

Η παρουσία των μεταλλικών ιόντων στο έδαφος μπορεί να οφείλεται είτε σε φυσικές, είτε σε ανθρωπογενείς πηγές. Λαμβάνοντας υπόψη ότι όλα τα βαρέα μέταλλα υπάρχουν στα μητρικά πετρώματα και κληροδοτούνται και στα εδάφη, είναι φυσιολογικό να εντοπίζονται σε μετρήσιμες συγκεντρώσεις στο έδαφος χωρίς αυτό αναγκαία να σημαίνει ρύπανση (Αντωνιάδης, 2002). Παρά την φυσική τους προέλευση όμως, η εκτεταμένη συσσώρευση τοξικών μετάλλων που παρατηρείται σε εδάφη πολλών οικοσυστημάτων (βιομηχανικά, γεωργικά, δασικά κα.), αποτελεί πλέον μία σημαντική παρενέργεια της ανθρώπινης δραστηριότητας (Golia et al., 2008, Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012).

Οι πηγές απ' όπου ελευθερώνονται τα βαρέα μέταλλα στο έδαφος, μεταξύ άλλων, είναι οι ακόλουθες:

- Φυσικές πηγές: στην ομάδα αυτή περιλαμβάνονται η αποσάθρωση των μητρικών πετρωμάτων, η διάβρωση, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, η σκόνη από τις ερήμους, οι πυρκαγιές δασών.
- Γεωργικές πηγές: οι κύριες γεωργικές εργασίες που εμπλουτίζουν τα εδάφη με στοιχεία είναι η χρήση ανόργανων και φωσφορικών λιπασμάτων, μυκητοκτόνων, ζιζανιοκτόνων, κοπριά ζώων, λυματολάσπη.
- Βιομηχανικές πηγές: στις διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες που απελευθερώνουν βαρέα μέταλλα ανήκουν η εξόρυξη και η τήξη, τα μεταλλουργεία, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας (καύση άνθρακα, καύση πετρελαίου), η επεξεργασία πλαστικών, υφασμάτων και μικροηλεκτρονικών, η συντήρηση ξύλου, η επεξεργασία χαρτιού.

- Αστικές πηγές: σε αυτή την ομάδα περιλαμβάνονται οι εκπομπές από τα μέσα μεταφοράς, η αποτέφρωση απορριμμάτων, η διάβρωση κτιρίων και οδοστρωμάτων (Γκαύρου, 2016, Antoniadis et al., 2017a, Παπαθεοδώρου 2015, Kelepertzis & Stathopoulou, 2013).

Περαιτέρω πληροφορίες για την προέλευση συγκεκριμένων τοξικών μετάλλων παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 1. Διάφορες χρήσεις μετάλλων σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Πηγή: Τάσιος, 2014)

| <b>Μέταλλο</b> | <b>Δραστηριότητα</b>   |
|----------------|--|
| <b>Cd</b>      | Μεταλλουργικές βιομηχανίες, παρασκευή χημικών προϊόντων και ουσιών, βαφεία-φινιριστήρια, μπαταρίες.  |
| <b>Cr</b>      | Βαφεία-φινιριστήρια, μεταλλουργικές βιομηχανίες, χημική βιομηχανία, δυλιστήρια, βυρσοδεψεία.   |
| <b>Pb</b>      | Μεταλλουργικές βιομηχανίες, βαφεία-φινιριστήρια, κατασκευή μπαταριών, πυρομαχικά, ηλεκτρονικά, λιπάσματα, κατασκευή κεραμικών και γυάλινων συσκευών.                                     |
| <b>Ni</b>      | Μεταλλουργικές βιομηχανίες, παραγωγή βασικών πολύτιμων μετάλλων και άλλων μη σιδηρούχων μετάλλων, βαφεία, ηλεκτρονικά, μπαταρίες, παρασκευή θειικού χαλκού, παρασκευή κραμάτων μετάλλων. |
| <b>Zn</b>      | Μεταλλουργικές βιομηχανίες, λιπάσματα, παρασκευή κραμάτων μετάλλων, μπαταρίες, βαφεία, εξόρυξη.  |
| <b>Cu</b>      | Μεταλλουργικές βιομηχανίες, ηλεκτρικός εξοπλισμός, λιπάσματα, δυλιστήρια.  |

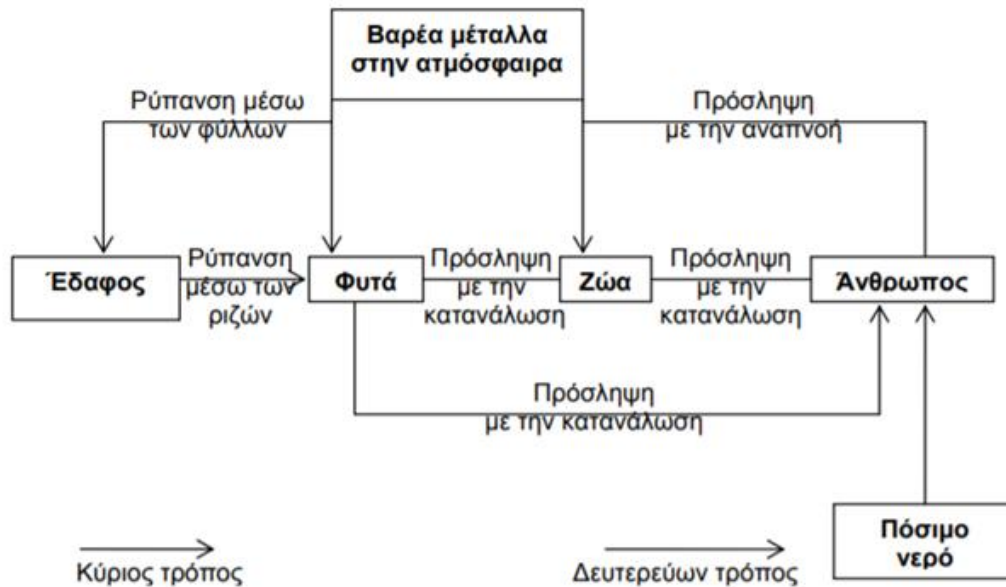
### 1.1.3 Επίδραση στο περιβάλλον και την δημόσια υγεία

Τα βαρέα μέταλλα είναι στοιχεία με μεγάλη βιολογική σημασία η οποία δεν περιορίζεται μόνο στις επιπτώσεις που προκαλούν, αλλά επεκτείνεται και στις θετικές τους επιδράσεις (Γκόλια κ.σ., 2018). Ορισμένα από αυτά σε μικρές ποσότητες (ίχνη) είναι απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία των οργανισμών (Γκόλια κ.σ., 2018), διότι εμπλέκονται σε διάφορες μεταβολικές και ορμονικές λειτουργίες, αλλά ενεργούν και ως συμπαραγόντες για πολλά ένζυμα και πρωτεΐνες (Prashanth et al., 2015, Mishra et al., 2018). Εντούτοις, η έντονη βιομηχανική και αστική ανάπτυξη που παρατηρείται τις τελευταίες δεκαετίες, έχει οδηγήσει σε δραματική αύξηση της συγκέντρωσης τους (Γκαύρου, 2016), με αποτέλεσμα να δημιουργούν έντονα προβλήματα τοξικότητας σε κάθε μορφής ζωής,

συμπεριλαμβανομένων των μικροοργανισμών, των φυτών και των ζώων (Γκόλια κ.σ., 2020, Gurta et al., 2014). Αυτό οφείλεται στο ότι τα βαρέα μέταλλα ως σταθεροί και ανθεκτικοί ρύποι που δεν αποικοδομούνται (Coral et al., 2005), έχουν την ικανότητα να παραμένουν σε τοξικές συγκεντρώσεις στο έδαφος για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Καραμπουρνιώτης κ.σ. 2012). Η συσσώρευση αυτή παίζει καθοριστικό ρόλο στο γήινο περιβάλλον καθώς, το οικοσύστημα του εδάφους αποτελεί συνδετικό κρίκο μεταξύ της ατμόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και του συνόλου των ζωντανών οργανισμών (Γκόλια κ.σ., 2020). Η μακροχρόνια ρύπανση που υφίσταται το έδαφος επηρεάζει αρνητικά αρχικά τη γονιμότητά του και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών, και στη συνέχεια την ποιότητα του νερού και των τροφίμων (Mishra et al., 2018). Με αυτόν τον τρόπο και εξαιτίας του εξαιρετικού δυναμικού οικολογικής μεταφοράς που διαθέτουν τα βαρέα μέταλλα (Golía et al., 2008), γίνεται κατανοητό ότι μέσω του εδάφους έχουν την δυνατότητα να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα και στη συνέχεια να συσσωρευθούν στους οργανισμούς (Σχήμα 2), επηρεάζοντας την εύρυθμη λειτουργία τους (Kelepertzis & Stathopoulou, 2013). Πιο αναλυτικά, στον Πίνακα 2, φαίνεται πώς η έκθεση του ανθρώπου σε ορισμένα μεταλλικά ιόντα επηρεάζει την υγεία του.

Πίνακας 2. Κίνδυνοι ανθρώπινης υγείας από ορισμένα τοξικά μέταλλα (Πηγή: Mishra et al., 2018)

| Μέταλλο   | Κίνδυνοι υγείας  |
|-----------|--|
| <b>Cr</b> | Νεφρίτιδα, έλκος, τριχόπτωση, δερματικά προβλήματα, ρινικός ερεθισμός, προβλήματα ακοής, καρκίνος του πνεύμονα                 |
| <b>Hg</b> | Αυτοάνοσο νόσημα, κατάθλιψη, κόπωση, απώλεια μνήμης, διαταραχή της όρασης, εγκεφαλική βλάβη, πνευμονική και νεφρική ανεπάρκεια |
| <b>Pb</b> | Καρδιαγγειακές παθήσεις  |
| <b>Cd</b> | Νεφρική και πνευμονική βλάβη, εύθραυστα οστά   |
| <b>Zn</b> | Ζάλη, κόπωση, έμετος, νεφρική βλάβη και κράμπες  |
| <b>As</b> | Επίδραση σε βασικές κυτταρικές διεργασίες, καρκίνος  |
| <b>Ni</b> | Επίδραση στη γονιμότητα, τριχόπτωση, καρκίνος του πνεύμονα   |
| <b>Cu</b> | Νεφρική και πνευμονική βλάβη, εύθραυστα οστά   |



Σχήμα 2. Τρόποι μεταφοράς βαρέων μετάλλων που καταλήγουν στον άνθρωπο (Πηγή: Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007)

#### 1.1.4 Επίδραση στα φυτά

Τα φυτά μέσω της εξελικτικής διαδικασίας, έχουν προσαρμοστεί να αναπτύσσονται φυσιολογικά εντός καθορισμένων ορίων συνθηκών του περιβάλλοντος. Σε περίπτωση, λοιπόν, που υπάρχουν αποκλίσεις από αυτά τα βέλτιστα όρια η ανάπτυξη τους επηρεάζεται δυσμενώς και εμφανίζονται σημάδια καταπόνησης (Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012). Ανάμεσα στους πολυάριθμους παράγοντες του περιβάλλοντος που μπορούν να προκαλέσουν καταπονήσεις στα φυτά, ανήκουν και τα βαρέα μέταλλα. Τόσο τα απαραίτητα, όσο και τα μη απαραίτητα μέταλλα μπορούν να διαταράξουν την εύρυθμη λειτουργία των ευαίσθητων φυτικών ειδών, προκαλώντας ως χαρακτηριστικά συμπτώματα την αναστολή της ανάπτυξης τους, τη μείωση της απόδοσης τους ή και τη βλάβη των φύλλων τους (Παπαθεοδώρου, 2015, Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012). Πιο συγκεκριμένα, αυτά είναι τα ορατά αποτελέσματα μίας σειράς αρνητικών επιδράσεων στις λειτουργίες των φυτικών οργανισμών, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Αντίδραση με τις κυτταρικές μεμβράνες, με συνέπεια τον περιορισμό της διαπερατότητάς τους και ως εκ τούτου τη παρεμπόδιση μεταφοράς ιόντων όπως ασβεστίου, μαγνησίου, νιτρικού και καλίου.
- Αναστολή της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής λόγω παρεμπόδισης της μεταφοράς ηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια τους.



- Μη αντιστρεπτή διαταραχή των ενζυμικών λειτουργιών (Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012).

Παρόλο αυτά, όταν τα φυτά βρίσκονται σε μία συνεχή επαφή και αλληλεξάρτηση με το περιβάλλον τους, αντιλαμβάνονται την καταπόνηση και αποκρίνονται σε αυτή με βραχυπρόθεσμες ή/και μακροπρόθεσμες τροποποιήσεις δομών και λειτουργιών, ώστε να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα και να επιστρέψουν σε κανονικά επίπεδα λειτουργικότητας (Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012). Έτσι, ορισμένα φυτικά είδη μπορούν να επιβιώσουν σε εδάφη με υψηλές περιεκτικότητες βαρέων μετάλλων, γιατί έχουν αναπτύξει στρατηγικές αντιμετώπισης της καταπόνησης (Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012). Ειδικότερα, κάποια φυτά διαθέτουν μηχανισμούς αποφυγής των μεταλλικών ιόντων (μεταλλόφυτα), ενώ άλλα έχουν αναπτύξει μηχανισμούς ανθεκτικότητας (υπερσυσσωρευτές) σε αυτά (Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012). Στη πρώτη περίπτωση εμποδίζεται η είσοδος των τοξικών μετάλλων στους φυτικούς ιστούς, είτε λόγω της υψηλής εκλεκτικότητας που διαθέτουν οι μεμβράνες των κυττάρων της ρίζας, είτε λόγω των χηλικών ενώσεων (κυρίως οργανικά οξέα) που εκκρίνονται από τα κύτταρα της ρίζας και τα δεσμεύουν ή τα εξουδετερώνουν. Βέβαια τα κύτταρα των μεταλλόφυτων δεν είναι ανθεκτικά σε υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, γεγονός που σημαίνει ότι είναι το ίδιο ευάλωτα με τα ευαίσθητα φυτά (Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012, Παπαθεοδώρου, 2015). Αντίθετα, οι φυτικοί οργανισμοί που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν τα βαρέα μέταλλα στους ιστούς τους (και του υπέργειου τμήματος) σε ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις χωρίς να παρουσιάσουν συμπτώματα τοξικότητας (Καραμπουρνιώτης κ.σ., 2012, Παπαθεοδώρου, 2015).

#### 1.1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την διαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων

Από τη στιγμή που τα βαρέα μέταλλα εναποτίθενται στο εδαφικό σύστημα αρχίζει μία αλληλουχία φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, οι οποίες θα καθορίσουν αν ένα μέρος της συγκέντρωσής τους θα χαθεί, λόγω έκπλυσης τους προς βαθύτερα στρώματα και ίσως και προς τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, θα συγκρατηθεί στο έδαφος ή θα γίνει διαθέσιμο για απορρόφηση από έναν φυτικό οργανισμό (Αντωνιάδης, 2002). Στη τελευταία περίπτωση, η ακριβής γνώση της ποσότητας των μεταλλικών ιόντων, που είναι διαθέσιμη να προσληφθεί από ένα φυτό στο έδαφος (βιοδιαθεσιμότητα), είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων που δημιουργούνται από την χρήση τους (Μόλλα, 2012).

Η πορεία των μετάλλων λοιπόν εξαρτάται κάθε φορά από διάφορες εδαφικές ιδιότητες, με καθοριστικό παράγοντα το pH (Πίνακας 3). Γενικά, το έδαφος συγκρατεί σε μεγαλύτερο ποσοστό τα κατιόντα σε ουδέτερες έως αλκαλικές τιμές του pH (Μόλλα, 2012). Άρα, σε ένα αλκαλικό έδαφος παρατηρείται χαμηλότερη κινητικότητα και ως εκ τούτου διαθεσιμότητα των κατιόντων, γεγονός που ενώ για τα θρεπτικά στοιχεία είναι αρνητικό, στην περίπτωση των βαρέων μετάλλων είναι εξαιρετικά ωφέλιμο. Η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί τα μεταλλικά στοιχεία σε ένα έδαφος με υψηλό pH, οφείλεται τόσο στο γεγονός ότι οι επιφάνειες προσροφούν πιο αποδοτικά τα κατιόντα λόγω του έντονου αρνητικού φορτίου τους, όσο και στο ότι τα θετικά φορτισμένα ιόντα σχηματίζουν σταθερά σύμπλοκα με τις στερεές επιφάνειες του εδάφους (Αντωνιάδης, 2002).

Πίνακας 3. Ευκίνησια ορισμένων βαρέων μετάλλων ανάλογα με την τιμή του pH (Πηγή: Μόλλα, 2012)

| Τιμές pH  | Ευκίνητα   | Μετρίως ευκίνητα | Μη ευκίνητα |
|-----------|------------|------------------|-------------|
| 4.2 – 6.6 | Cd, Ni, Zn | As, Be, Cr       | Cu, Pb, Se  |
| 6.7 – 8.8 | As, Cr     | Be, Cd, Hg, Zn,  | Cu, Pb, Ni  |

Εκτός από το pH, ένας άλλος κύριος παράγοντας που επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των μετάλλων είναι το δυναμικό οξειδο-αναγωγής. Σε ένα έδαφος με μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό (αναγωγικές συνθήκες) η διαθεσιμότητα των μετάλλων μειώνεται, ενώ αντίθετο αποτέλεσμα παρατηρείται σε ένα καλά αεριζόμενο έδαφος (οξειδωτικές συνθήκες), όπου η διαθεσιμότητα αυξάνεται (Αντωνιάδης, 2002). Το δυναμικό οξειδοαναγωγής του εδάφους, είναι πολύ σημαντικό για τα στοιχεία πολλαπλών σθένους, στα οποία ανήκει και το χρώμιο, γιατί η κινητικότητα και η τοξικότητά αυτών των στοιχείων επηρεάζεται από την οξειδωτική κατάσταση που βρίσκονται. Για παράδειγμα, η παρουσία αναγωγικών παραγόντων στο έδαφος, όπως η προσθήκη οργανικής ύλης, επιταχύνει τη μετατροπή του Cr(VI) που είναι πολύ ευκίνητο και τοξικό, σε Cr(III) που είναι δυσκίνητο, μειώνοντας έτσι σημαντικά τη διαθεσιμότητα του πρώτου (Antoniadis et al., 2017a).

Επίσης, σημαντικό ρόλο στην ικανότητα των εδαφών να συγκρατούν μεγάλες ποσότητες στοιχείων, διαδραματίζουν οι υψηλές συγκεντρώσεις αργίλου και οργανικής ουσίας. Οι υψηλές τιμές της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων (I.A.K.) που χαρακτηρίζουν αυτά τα εδάφη, επιβραδύνουν την κινητικότητα των μεταλλικών ιόντων και συνεπώς τη διαθεσιμότητά τους. Συγχρόνως, με την τιμή της I.A.K. σχετίζεται και η επίδραση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO<sub>3</sub>). Όσο υψηλότερη είναι η I.A.K. του εδάφους τόσο πιο

δύσκολα αλλάζει το pH, με αποτέλεσμα όταν προστεθεί CaCO<sub>3</sub>, να ρυθμίζεται σε τιμές μεταξύ 7-8, δηλαδή αλκαλικές τιμές. Η διαθεσιμότητα των μετάλλων σε αυτά τα εδάφη είναι χαμηλή (Antoniadis et al., 2017a).

Επιπλέον, δεν πρέπει να παραληφθεί ότι η πρόσληψη των μετάλλων από τα φυτά σχετίζεται με τον γενότυπό τους (Antoniadis et al., 2017a). Ακόμη και σε εδάφη με ίδιο επίπεδο ρύπανσης, διαφορετικά φυτά απορροφούν διαφορετικές ποσότητες βαρέων μετάλλων. Συνήθως, τα στοιχεία που προσλαμβάνονται από τα φυτά συσσωρεύονται κυρίως στο υπόγειο τμήμα τους, ενώ στο υπέργειο μεταφέρονται πολύ μικρότερες ποσότητες. Έτσι, τα πιο ευαίσθητα φυτικά είδη είναι αυτά από τα οποία καταναλώνονται το υπόγειο ή το τρυφερό υπέργειο τμήμα (Πίνακας 4) (Αντωνιάδης, 2002).

Πίνακας 4. Φυτά κατανεμημένα ανάλογα με την ικανότητά τους στην απορρόφηση βαρέων μετάλλων (Πηγή: Αντωνιάδης, 2002).

| Υψηλή απορρόφηση | Μέτρια απορρόφηση | Χαμηλή Απορρόφηση  | Πολύ χαμηλή απορρόφηση |
|------------------|-------------------|--------------------|------------------------|
| Μαρούλι          | Τεύτλα            | Λάχανο             | Φασολάκια              |
| Σπανάκι          | Σινάπι            | Μπρόκολο           | Οπωροφόρα              |
| Καρότο           | Πατάτα            | Λαχανάκι βρυξελλών | Κολοκυνθοειδή          |

## 1.2 Χρώμιο

### 1.2.1 Ιδιότητες και μορφές του χρωμίου στο περιβάλλον

Το χρώμιο (Cr) είναι ένα βαρύ μέταλλο για το οποίο έχει κλιμακωθεί το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, λόγω της αύξησής του σε τοξικά επίπεδα στο περιβάλλον (Μιχαηλίδη, 2015). Είναι ένα στοιχείο μετάπτωσης, με ατομικό αριθμό 24, που εμφανίζεται στην VIB ομάδα του περιοδικού πίνακα, ως το πρώτο στοιχείο της ομάδας (Παπαδόπουλος, 2019, Jobby et al., 2018). Αν και είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο, το όνομά του προέρχεται από τον ελληνικό όρο «χρώμα», διότι οι διάφορες ενώσεις του έχουν αποχρώσεις που καλύπτουν ουσιαστικά όλο το ορατό φάσμα (Μόλλα, 2012). Πρόκειται για ένα άοσμο, σκληρό και ανθεκτικό στη διάβρωση μέταλλο, που έχει υψηλό σημείο τήξεως και υψηλή στιλπνότητα (Owland et al., 2008, Παπαδόπουλος, 2019). Το χρώμιο, στη φύση, μπορεί να υπάρχει σε διάφορες καταστάσεις οξειδωσης που κυμαίνονται από -2 έως +6, αλλά οι πιο συνήθεις μορφές του είναι ως τρισθενές Cr(III) και ως εξασθενές Cr(VI), λόγω της σταθερότητας που παρουσιάζουν (Jobby et al., 2018). Αυτές οι μορφές του χρωμίου εμφανίζουν αρκετά

διαφορετικές χημικές ιδιότητες και επηρεάζουν τους οργανισμούς με αντίθετους τρόπους (Dhal et al., 2013). Το τρισθενές, που συναντάται κυρίως ως χρωμίτης (ορυκτό,  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), είναι η πιο σταθερή και λιγότερο τοξική μορφή του χρωμίου (Mishra & Bharagava, 2015, Παπαδόπουλος, 2019). Μάλιστα, σε χαμηλές ποσότητες αποτελεί απαραίτητο θρεπτικό συστατικό στη διατροφή των ζώων και των ανθρώπων, αφού συμβάλλει στον φυσιολογικό μεταβολισμό του σακχάρου και των λιπιδίων (Mishra & Bharagava, 2015). Το εξασθενές από την άλλη, που προέρχεται κυρίως από ανθρωπογενή δραστηριότητα και βιομηχανική ρύπανση (Dhal et al, 2016), είναι ιδιαίτερα τοξικό λόγω της υψηλής υδατοδιαλυτότητας και κινητικότητας που παρουσιάζει (Mohan et al., 2006). Πρέπει να τονισθεί, όμως, ότι εκτός από τις βιομηχανικές πηγές ρύπανσης του  $\text{Cr(VI)}$  υπάρχουν και οι φυσικές πηγές, όπως είναι τα βασικά και υπερβασικά πετρώματα και οι οφιόλιθοι (Dhal et al, 2016).

### 1.2.2 Το χρώμιο στο έδαφος

Από τη στιγμή που το χρώμιο θα εισχωρήσει στο έδαφος, η σταθερότητά του επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες με βασικότερους το pH και το δυναμικό οξειδοαναγωγής ( $E_h$ ). Αναλυτικότερα, σε οξειδωτικές ( $E_h > 0$ ) και αλκαλικές ( $\text{pH} > 6$ ) συνθήκες ευνοείται η οξείδωση των ενώσεων του τρισθενούς χρωμίου σε ενώσεις τους εξασθενούς. Αντίθετα, σε ένα όξινο ( $\text{pH} < 6$ ) και αναγωγικό περιβάλλον ( $E_h < 0$ ) είναι δυνατή η αναγωγή του εξασθενούς σε τρισθενές (Dhal et al, 2016). Οι μετατροπές αυτές είναι δυνατές υπό ορισμένες προϋποθέσεις (Μόλλα, 2012). Η οξείδωση του  $\text{Cr(III)}$  ευνοείται από την ύπαρξη οξειδίου του μαγγανίου ( $\text{MnO}_2$ ) στο έδαφος (Jobby et al., 2018), ενώ η μείωση του  $\text{Cr(VI)}$  επιταχύνεται από την παρουσία οργανικής ύλης (Dhal et al, 2016). Μάλιστα, έχει παρατηρηθεί ότι σε αμμώδη εδάφη, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα οργανικής ουσίας, το εξασθενές χρώμιο μπορεί να παραμείνει για χρόνια (Oliveira, 2012). Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση έλλειψης οργανικής ύλης, η αποτελεσματική μείωση του  $\text{Cr(VI)}$  στα όξινα εδάφη επιτυγχάνεται και λόγω του ότι οι όξινες συνθήκες ενισχύουν το ρυθμό απελευθέρωσης του δισθενούς σιδήρου (αναγωγικός παράγοντας) από ορυκτά του εδάφους (Dhal et al., 2013). Από τα παραπάνω, λοιπόν, συμπεραίνεται ότι τα καλώς αεριζόμενα εδάφη, τα εδάφη που είναι πλούσια σε οργανική ύλη, καθώς και τα όξινα, ευνοούν την αναγωγή του  $\text{Cr(VI)}$  σε  $\text{Cr(III)}$ , ενώ στα αλκαλικά εδάφη ευνοείται η σταθερότητα του πρώτου (Μόλλα, 2012). Οι πιο διαλυτές και συνεπώς τοξικές μορφές με τις οποίες απαντά το  $\text{Cr(VI)}$  στο εδαφικό διάλυμα είναι ως χρωμικό  $\text{CrO}_4^{2-}$  (σε τιμές  $\text{pH} > 6,4$ ) και ως όξινο χρωμικό  $\text{HCrO}_4^-$  (σε τιμές  $\text{pH} < 6,4$ ) (Dhal et al., 2013, Mohan et al., 2006).

### 1.2.3 Πρόσληψη από τα φυτά

Η συγκέντρωση του χρωμίου στα εδάφη, η οποία μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τη φυσική σύνθεση των πετρωμάτων που περιέχουν, αλλά και την βιομηχανική δραστηριότητα της περιοχής κυμαίνεται από 1 έως 3000 mg kg<sup>-1</sup>. Συνήθως, βέβαια εντοπίζονται σε χαμηλές περιεκτικότητες  $\zeta$  (2-60 mg kg<sup>-1</sup>), από τις οποίες μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό είναι διαθέσιμο στα φυτά (Μιχαηλίδη, 2015, Oliveira, 2012). Γενικά, ανάλογα με την περιεκτικότητα των εδαφών σε χρώμιο, οι συγκεντρώσεις που προσλαμβάνονται από τα φυτικά είδη κυμαίνονται μεταξύ 0,006-18 mg kg<sup>-1</sup> (Πίνακας 5) (Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007).

Ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι ποσότητες χρωμίου προσλαμβάνονται από τους φυτικούς οργανισμούς δεν είναι σαφώς καθορισμένος, γεγονός που οφείλεται στο ότι δεν κατατάσσεται στα απαραίτητα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, επικρατεί η άποψη ότι η πρόσληψη του Cr(III) από τα φυτά είναι μία παθητική διαδικασία κατά την οποία δεν καταναλώνεται καθόλου ενέργεια, ενώ η πρόσληψη του Cr(VI) θεωρείται μία ενεργητική διαδικασία που εκτελείται από τους μεταφορείς για την πρόσληψη βασικών στοιχείων (π.χ. P, S). Σε κάθε περίπτωση λοιπόν, η πρόσληψη και η μετακίνηση του χρωμίου εξαρτάται από την μορφή στην οποία βρίσκεται. Από την μία το Cr(III) τείνει να σχηματίζει σταθερά σύμπλοκα στο έδαφος με αποτέλεσμα να έχει χαμηλή βιοδιαθεσιμότητα, ενώ από την άλλη το Cr(VI) χαρακτηρίζεται από υψηλή διαλυτότητα και συνεπώς βιοδιαθεσιμότητα, με αποτέλεσμα να καθίσταται εξαιρετικά επικίνδυνο και τοξικό (Oliveira, 2012).

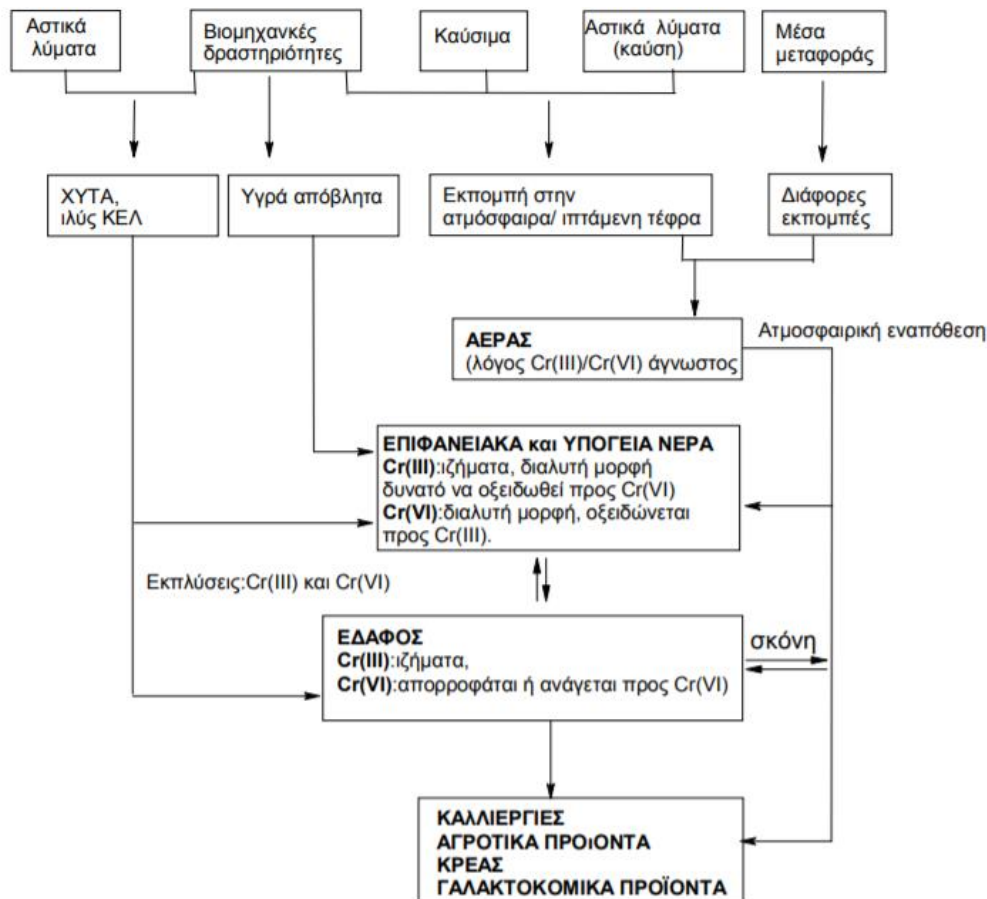
Πίνακας 5. Συγκέντρωση χρωμίου σε βρώσιμα φυτά που καλλιεργήθηκαν σε μολυσμένα από χρώμιο εδάφη (Πηγή: Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007)

| Είδος φυτού         | Συγκέντρωση χρωμίου (mg kg <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|--|
| Τεύτλα              | 0,05                                       |
| Λαχανάκια βρυξελλών | 0,14                                       |
| Λάχανα              | 0,15                                       |
| Πράσινα φασολάκια   | 0,04                                       |
| Κρεμμύδια           | 0,19                                       |
| Καρότα              | 0,08                                       |
| Σκόρδα              | 1,50                                       |
| Πατάτες             | 0,21                                       |
| Σπόροι δημητριακών  | 0,37                                       |
| Θυμάρι              | 10,00                                      |
| Πιπέρι μαύρο        | 3,70                                       |

#### 1.2.4 Εφαρμογές και χρήσεις εξασθενούς χρωμίου

Το χρώμιο κατατάσσεται στα πιο σημαντικά υλικά στον κόσμο παρουσιάζοντας πληθώρα εφαρμογών σε διάφορες βιομηχανικές διαδικασίες (Σχήμα 4) (Μιχαηλίδη, 2015). Παγκοσμίως, η εκτιμώμενη συνολική ετήσια κατανάλωση χρωμίου είναι 12,5 εκατομμύρια τόνοι, εκ των οποίων το 85% καταναλώνεται από μεταλλουργικές βιομηχανίες, το 8% από χημικές και το υπόλοιπο 7% από πυρίμαχες (Mishra & Bharagava, 2015). Ειδικότερα, στη μεταλλουργική βιομηχανία, η κυριότερη χρήση του χρωμίου είναι για την παραγωγή ανοξειδώτου χάλυβα και σιδηρούχων ή μη κραμάτων (Πίνακας 6). Με προσθήκη χρωμίου σε ποσοστό από 0,5% έως 30% στους χρωμοχάλυβες αυξάνεται η αντοχή τους στη διάβρωση και την οξείδωση συγκριτικά με τον κοινό χάλυβα. Παράλληλα, σε θερμοκρασίες δωματίου το χρώμιο παρουσιάζει ανθεκτικότητα στους συνηθισμένους διαβρωτικούς παράγοντες, με αποτέλεσμα να βρίσκει εφαρμογή στην ηλεκτρολυτική επίστρωση για την προστατευτική επικάλυψη μεταλλικών επιφανειών (Dhal et al., 2013). Ταυτόχρονα, μια από τις σημαντικότερες πηγές ρύπανσής του στο περιβάλλον αποτελούν οι βιομηχανίες βυρσοδεψίας, οι οποίες χρησιμοποιούν το Cr(VI) για το μαύρισμα ζωικών δερμάτων. Η ποσότητα του χρωμίου που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας δεν απορροφάται πλήρως από τα δέρματα και έτσι ένα μεγάλο μέρος του διαφεύγει στα λύματα. Εάν αυτά τα λύματα απορριφθούν στο περιβάλλον χωρίς επαρκή επεξεργασία, προκαλούν

σοβαρή ρύπανση του εδάφους και των υδάτων μαζί με σοβαρές απειλές για την ανθρώπινη υγεία και τα ζώα (Mishra & Bharagava, 2015, Jobby et al., 2018). Στη χημική βιομηχανία επίσης μεγάλες ποσότητες χρωμίου χρησιμοποιούνται στην κλωστοϋφαντουργία, στο μελάνι φωτοτυπικών μηχανημάτων, στις μαγνητοταινίες, στη παραγωγή βερνικιών για τη συντήρηση του ξύλου, στη παραγωγή χρωμάτων και χρωστικών, στα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου καθώς και σε διάφορες άλλες εφαρμογές (Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007).



Σχήμα 3. Ανθρωπογενείς εκπομπές του χρωμίου στο περιβάλλον (Πηγή: Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007)

### 1.2.5 Επιπτώσεις του εξασθενούς χρωμίου στον άνθρωπο

Αν και το επίπεδο τοξικότητας του χρωμίου σχετίζεται με την οξειδωτική του κατάσταση, σε αυξημένες συγκεντρώσεις είναι πάντα επιβλαβές. Το Cr(VI) πέρα απ' ότι είναι εξαιρετικά μεταλλαξιογόνο και καρκινογόνο, εμπλέκεται και στην πρόκληση γενετικών ανωμαλιών και στη μείωση της αναπαραγωγικής υγείας (Mishra & Bharagava, 2015). Η κατάποση υψηλών ποσοτήτων Cr(VI) δύναται να προκαλέσει ηπατική και νεφρική δυσλειτουργία, έλκος στομάχου και ερεθισμό του εντέρου, ενώ επίσης έχουν αναφερθεί και περιπτώσεις θανάτων (Ζιώγας κ.σ., 2009). Για το λόγο αυτό κιάλας έχουν θεσπιστεί όρια για

την ποσότητα του ολικού χρωμίου που είναι αποδεκτή για το πόσιμο νερό. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα, σύμφωνα με την οδηγία 98/83/EC, αυτό το επιτρεπτό όριο ορίζεται στα  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  (Μιχαηλίδη, 2015). Επιπρόσθετα, η έκθεση σε συγκεντρώσεις Cr(VI) υψηλότερες από  $1.5 \mu\text{g}$  στοιχείου ανά κιλό σωματικού βάρους ανά ημέρα μέσω της εισπνοής μπορεί να προκαλέσει έλκος, ρινική αιμορραγία, κνησμό και φτάρνισμα. Επιδημιολογικές μελέτες σε εργάτες έδειξαν ότι η εισπνοή σκόνης που περιέχει Cr(VI) προκαλεί καρκίνο του πνεύμονα και της ρινικής κοιλότητας, το οποίο έχει επιβεβαιωθεί και από εργαστηριακά πειράματα (σε ζώα) (Ζιώγας κ.σ., 2009). Αυτό πιθανόν να οφείλετε στο ότι παρόλο που το 53–85% του στοιχείου απομακρύνεται από τους πνεύμονες, λόγω απορρόφησης από το αίμα ή από τους βλεννογόνους του φάρυγγα, το 15–47% του εξασθενούς χρωμίου παραμένει σε αυτούς (Μιχαηλίδη, 2015). Ακόμη, η δερματική έκθεση σε ενώσεις του Cr(VI) που περιέχονται σε διάφορα προϊόντα, όπως στο τσιμέντο, στη μαγιά μύρας, στα συντηρητικά ξύλου, στο αστάρι, στη κόλλα και στις χρωστικές ουσίες, προκαλεί δερματικά έλκη και δριμείες αλλεργικές αντιδράσεις (Ζιώγας κ.σ., 2009, Μιχαηλίδη, 2015).

#### 1.2.6 Ρυπασμένες περιοχές στην Ελλάδα

Η πλειοψηφία των δημοσιευμένων ερευνών σχετικά με την προέλευση των βαρέων μετάλλων στα εδάφη έχουν επικεντρωθεί σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από βιομηχανική δραστηριότητα και μεγάλη αστική ανάπτυξη (Kelepertzis & Stathopoulou, 2013). Στον Ελλαδικό χώρο μερικές γνωστές μολυσμένες περιοχές, βρίσκονται κοντά στα εγκαταλελειμμένα ορυχεία της Κίρκης, της Δράμας (βόρεια Ελλάδα) και του Λαυρίου (νότια της Αθήνας) καθώς και στις βιομηχανικές περιοχές της Αθήνας (περιοχή Θίασοι), της Θεσσαλονίκης (περιοχή Σίνδου), του Βόλου και της Καβάλας (Παπαθεοδώρου, 2015, Antoniadis et al., 2019). Ειδικότερα, μία τυπική περίπτωση βιομηχανικής ρύπανσης στην Ελλάδα εντοπίζεται στον ποταμό Ασωπό. Έπειτα από μερικά χρόνια έρευνας στα νερά του ποταμού, τα αποτελέσματα έδειξαν πως η περιοχή γύρω από την λεκάνη του έχει μολυνθεί εκτενώς από εξασθενές χρώμιο, με τις συγκεντρώσεις αυτού να φτάνουν μέχρι  $80 \mu\text{g L}^{-1}$ , αλλά και σε μικρότερο βαθμό από νικέλιο, σίδηρο, αρσενικό και μόλυβδο (Ζιώγας κ.σ., 2009, Karpara et al., 2015). Σύμφωνα με άλλες μελέτες, στα υπόγεια ύδατα της λεκάνης παρατηρήθηκε μεγάλη χωρική μεταβλητότητα της συνολικής περιεκτικότητας του χρωμίου, φτάνοντας μέχρι και τα  $180 \mu\text{g L}^{-1}$ . Τα αυξημένα επίπεδα Cr(VI) στα νερά αποδίδονται κυρίως στην εντατική βιομηχανική δραστηριότητα της περιοχής, αν και σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες δεν αποκλείεται και η φυσική προέλευση του στοιχείου (Karpara et al., 2015). Η μόλυνση της συγκεκριμένης περιοχής προκαλεί μεγάλη ανησυχία διότι στους



αγρούς της καλλιεργούνται σχεδόν αποκλειστικά φυτικά είδη (καρότα, πατάτες και κρεμμύδια) που μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων (Μόλλα, 2012). Μια αντίστοιχη περίπτωση είναι και η μόλυνση των υδάτων της υδρολογικής λεκάνης Κρηστώνη (Σαρίγκιολ), κοντά στην πόλη της Κοζάνης. Στα υπόγεια ύδατα της περιοχής έχουν αναφερθεί υψηλές συγκεντρώσεις εξασθενούς χρωμίου, της τάξεως των  $120 \mu\text{g L}^{-1}$ , οι οποίες χωροθετούνται κοντά στο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Δ.Ε.Η.). Ωστόσο, σημαντική παρουσία χρωμίου στην περιοχή αποδίδεται και στα οφιολιθικά πετρώματα που υπάρχουν στον ποταμό και τα εδάφη. Παρόμοια κατάσταση φέρει και η ρύπανση του οφιολιθικού υδροφόρου ορίζοντα στη Βεργίνα (βόρεια Ελλάδα), περιοχή στην οποία αναπτύσσεται γεωργική δραστηριότητα (Παπαδόπουλος, 2019). Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι στα μη ρυπασμένα επιφανειακά ύδατα οι συγκεντρώσεις χρωμίου κυμαίνονται μεταξύ  $1-10 \mu\text{g L}^{-1}$ , ενώ στο πόσιμο νερό τα φυσιολογικά επίπεδα είναι  $0,4-8 \mu\text{g L}^{-1}$  (Μόλλα, 2012). Ακόμη, από δείγματα που συλλέχθηκαν από δίκτυα ύδρευσης, τοποθετούμενα κοντά σε υπερβασικά πετρώματα σε όλο το εύρος της χώρας, τα υψηλότερα επίπεδα χρωμίου ανιχνεύτηκαν:

- στη Κεντρική Μακεδονία στις περιοχές Ν. Τρίγλια, Ν. Τενέδος, Ταγαράδες, Μακροχώρι,
- στη Θεσσαλία, στους οικισμούς Μικροθηβών, Στεφανοβίκιου και Ελευθεροχωρίου.
- στην Αττική, και πιο συγκεκριμένα στο Αλεποχώρι και στο Λουτράκι,
- στο βόρειο Αιγαίο, στις πηγές Τσίγκκος του νησιού της Λέσβου,
- στη πόλη της Ρόδου

(Karpara et al., 2015).

### 1.3 Γλυστρίδα (*Portulaca oleracea*)

Πίνακας 6. Συστηματική κατάταξη γλυστρίδας (Πηγή: USDA, 2020)

| Βασίλειο    | Φυτά (Plantae)                         |
|-------------|--|
| Συνομοταξία | Αγγειόσπερμα ( <i>Magnoliophyta</i> )  |
| Ομοταξία    | Δικοτυλήδονα ( <i>Magnoliopsida</i> )  |
| Τάξη        | Καρνοφυλλώδη ( <i>Caryophyllales</i> ) |
| Οικογένεια  | Πορτουλακίδες ( <i>Portulacaceae</i> ) |
| Γένος       | Πορτουλάκη ( <i>Portulaca</i> )        |
| Είδος       | <i>P. oleracea</i>                     |

Η γλυστρίδα (*Portulaca oleracea* L.), γνωστή και ως αντράκλα, είναι ένα ετήσιο, ποώδες και δικοτυλήδονο ζιζάνιο που εμφανίζεται σε πολλές αρδευόμενες καλλιέργειες αλλά και σε ακαλλιέργητους αγρούς. Ανήκει στο γένος *Portulaca* και στο είδος *oleracea* της οικογένειας *Portulacaceae*, η οποία περιλαμβάνει περίπου 21 γένη και 580 είδη (Chugh et al., 2019). Είναι ένα κοσμοπολίτικο ζιζάνιο που μπορεί να βρεθεί στην Αφρική, την Κίνα, την Ινδία, την Αυστραλία, τη Μέση Ανατολή, την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες (Rashed et al., 2003). Η εξάπλωσή του στα διάφορα γεωγραφικά περιβάλλοντα οφείλεται κυρίως στον μεγάλο αριθμό σπόρων που παράγονται ανά φυτό, στην προσαρμοστικότητά του σε όλους τους εδαφικούς τύπους (ιδίως στα άγονα), καθώς και στην ανεκτικότητα που παρουσιάζει σε αβιοτικές καταπονήσεις, όπως η ξηρασία, η έλλειψη νερού και η αλατότητα (Gonnella et al., 2010). Ως εκ τούτου, η γλυστρίδα θα μπορούσε να είναι ένα πιθανό είδος λαχανικών για την εκμετάλλευση γεωργικών εκτάσεων όπου οι συμβατικές καλλιέργειες δεν θα μπορούσαν να αναπτυχθούν (Petropoulos et al., 2016). Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή προσαρμοστικότητα και την ανοχή του είδους σε διάφορους αβιοτικούς παράγοντες, καθώς και τον βραχύ κύκλο ανάπτυξης, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα χρήσης του για σκοπούς φυτοεξυγίανσης (Petropoulos et al., 2016).

Ως προς τα μορφολογικά χαρακτηριστικά, πρόκειται για ένα μέτριας ανάπτυξης (μήκους έως 30 cm) φυτό με σαρκώδεις, λείους βλαστούς που έρπουν στο έδαφος. Τα φύλλα είναι λεία, βρίσκονται κατ' εναλλαγή ή σχεδόν αντίθετα και έχουν ωοειδές σχήμα. Τα άνθη έχουν κίτρινη απόχρωση, είναι μικρού μεγέθους και βρίσκονται στις μασχάλες των φύλλων ή στα σημεία διακλαδώσεων του βλαστού. Αργότερα εξελίσσονται σε σφαιροειδείς κάψες με πολλούς μικρούς, μαύρους και γυαλιστερούς σπόρους (Uddin et al., 2014).



Εικόνα 1. Τα μέρη του φυτού τη γλυστρίδας  
(Πηγή: World of succulents)



Εικόνα 2. Οι σπόροι της γλυστρίδας  
(Πηγή: The herb gardener)

Η γλυστρίδα αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα φαρμακευτικά φυτά στον κόσμο, λόγω των αντιβακτηριακών, αντιοξειδωτικών και αντιφλεγμονωδών επιδράσεών της, αλλά και για τη συμβολή της στη θεραπεία ασθενειών που σχετίζονται με το ήπαρ, τα νεφρά και την καρδιά (Naeem & Khan, 2013). Αποτελεί βασικό συστατικό στη διατροφή πολλών μεσογειακών και ασιατικών χωρών λόγω της υψηλής θρεπτικής αξίας των βρώσιμων φυτικών μερών της. Τα φύλλα και τα στελέχη του φυτού μπορούν να καταναλωθούν είτε ωμά σε σαλάτες, είτε μαγειρεμένα σε σούπες. Η κατανάλωση τους παρέχει μια πηγή διατροφικών οφελών εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε ωμέγα-3 λιπαρά οξέα και ιδίως σε α-λινολενικό οξύ (Nemzer et al., 2020). Επίσης, αποτελεί μία εξαιρετική πηγή αντιοξειδωτικών που περιέχουν τοκοφερόλες, βιταμίνη A και C (ασκορβικό οξύ) καθώς και βιταμίνες συμπλόκου B. Η βιταμίνη A είναι ένα φυσικό αντιοξειδωτικό πολύ σημαντικό για την υγιή όραση, ενώ οι τοκοφερόλες μπορούν να εξουδετερώσουν τις ελεύθερες ρίζες και να συμβάλουν στην πρόληψη σχετικών διαταραχών (Nemzer, 2020). Άλλα πολύτιμα συστατικά των βρώσιμων μερών της γλυστρίδας περιλαμβάνουν μέταλλα, όπως ασβέστιο, κάλιο και φώσφορο, μακροθρεπτικά συστατικά όπως πρωτεΐνες και υδατάνθρακες, καθώς και καροτενοειδή, αλκαλοειδή και φλαβονοειδή (Petrooulos et al., 2019). Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη ποικιλία σε βιοδραστικές ουσίες, η γλυστρίδα θεωρείται μια ιδιαίτερα συνιστώμενη πηγή τροφής που μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη συνιστώμενη διατροφική πρόσληψη βασικών θρεπτικών ουσιών και να παρέχει μία ισορροπημένη διατροφή για το ανθρώπινο σώμα (Petrooulos et al., 2016).

## 1.4 Κενά στη βιβλιογραφία και σκοποί της εργασίας

Με την πάροδο των ετών, έχουν διεξαχθεί εκτεταμένες έρευνες για την δυναμική των βαρέων μετάλλων, και συγκεκριμένα του χρωμίου, στο σύστημα έδαφος-φυτό. Παρόλα αυτά, η επίδραση του Cr(VI) στην γλυστρίδα (*Portulaca oleracea*), η οποία είναι ένα γνωστό ανεκτικό είδος προς διάφορες αβιοτικές καταπονήσεις, δεν είναι γνωστή. Επίσης, η πιθανότητα της μείωσης της αρνητικής επίδρασης του Cr(VI) σε ανθεκτικά φυτά (όπως η γλυστρίδα) όταν ταυτόχρονα έχει χορηγηθεί μεγάλη δόση θρεπτικού στοιχείου (π.χ. N) δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη της ανθεκτικότητας των φυτών της γλυστρίδας σε εδάφη με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις σε Cr(VI) όταν στο έδαφος χορηγούνται υψηλές δόσεις αζωτούχου λίπανσης.

## Κεφάλαιο 2: Υλικά και Μέθοδοι

### 2.1 Πειραματικός σχεδιασμός

Για το πειραματικό κομμάτι της παρούσας πτυχιακής διατριβής, αρχικά, συλλέχθηκε δείγμα εδάφους από την περιοχή αγροκτήματος του Βελεστίνου. Το έδαφος αυτό αφού αεροξηράνθηκε, κοσκινίστηκε, ώστε να απομακρυνθούν τα συσσωματώματα και οι πέτρες, και κατόπιν μεταφέρθηκε στο χώρο της σχολής για το στήσιμο του πειράματος. Έπειτα, παρελήφθησαν οι σπόροι της γλυστρίδας και στις 16/09/19 φυτεύτηκαν σε σπορεία με τύρφη. Τα φυτά αφέθηκαν να αναπτυχθούν για ένα μήνα, ώστε να φθάσουν στην επιθυμητή ανάπτυξη για την τελική τους μεταφύτευση. Σε αυτό το διάστημα ποτίζονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα ανάλογα με τις ανάγκες τους. Καθ' όλη την διάρκεια της αναμονής, για την δημιουργία ευνοϊκότερου υποστρώματος, το έδαφος, τοποθετούμενο σε σακουλάκια, αναμίχθηκε με περλίτη (αναλογία 1:1) και περίπου 400 mL νερό ώστε να φθάσει στην υδατοϊκανότητά του. Ανά τρεις ημέρες περίπου γινόταν ανακίνηση του. Παράλληλα, παρασκευάστηκαν τα διαλύματα για την επιμόλυνση, τα οποία χορηγήθηκαν στο έδαφος στις 1/10/19. Για την καλή του ομογενοποίηση πραγματοποιούνταν ανακίνηση ανά τακτά χρονικά διαστήματα και η τελευταία έγινε στις 14/10/19. Έπειτα από δύο ημέρες, στις 16/10/19, έγινε μεταφορά του επιμολυσμένου εδάφους σε γλάστρες του ενός λίτρου, αφού πρώτα είχαν αριθμηθεί και είχε τοποθετηθεί διηθητικό χαρτί στον πάτο κάθε μίας. Την ίδια ημέρα, εφόσον εκτιμήθηκε ότι τα φυτά της γλυστρίδας είχαν την κατάλληλη ανάπτυξη, έγινε η μεταφύτευσή τους στις γλάστρες με το επιμολυσμένο έδαφος, ενώ 8 ημέρες αργότερα, στις 24/10/19 πραγματοποιήθηκε και εφαρμογή του θρεπτικού διαλύματος (λίπανση).

Για την επιμόλυνση παρασκευάστηκε διάλυμα Cr(VI) διαλύοντας 19,229 g οξειδίου του χρωμίου ( $\text{CrO}_3$ ) σε 1 L νερού (απιονισμένο), ενώ για την λίπανση παρασκευάστηκε θρεπτικό διάλυμα νιτρικής αμμωνίας διαλύοντας 3,763 g  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  σε 2 L νερού. Συγκεκριμένα, για την λίπανση παρασκευάστηκαν συνολικά 40 μονάδες θρεπτικού διαλύματος νιτρικής αμμωνίας και προστέθηκαν στο έδαφος σε 4 δόσεις ως εξής:

- Πρώτη εφαρμογή: 5 λιπαντικές μονάδες αζώτου (ΛΜΑ) στις 24/9/19.
- Δεύτερη εφαρμογή: 5 ΛΜΑ στις 24/10/19.
- Τρίτη εφαρμογή: 10 ΛΜΑ στις 1/11/19.
- Τέταρτη εφαρμογή: 20 ΛΜΑ στις 17/11/19.

Το πείραμα λοιπόν ήταν διπαραγοντικό, για το οποίο δημιουργήθηκαν συνολικά δέκα μεταχειρίσεις των δέκα γλαστρών η κάθε μία. Πιο συγκεκριμένα, οι πρώτες πέντε μεταχειρίσεις δέχθηκαν μόνο επιμόλυνση με Cr(VI) και καθόλου λίπανση, ως εξής:

- $\text{Cr}_0\text{N}_0$ : η μεταχείριση δημιουργήθηκε ως μάρτυρας και δεν δέχθηκε καθόλου επιμόλυνση.
- $\text{Cr}_{50}\text{N}_0$ : για 50 ppm χρωμίου προστέθηκαν 5 mL διαλύματος Cr(VI) ανά σακούλα.
- $\text{Cr}_{100}\text{N}_0$ : για 100 ppm χρωμίου προστέθηκαν 10 mL διαλύματος Cr(VI) ανά σακούλα.
- $\text{Cr}_{150}\text{N}_0$ : για 150 ppm χρωμίου προστέθηκαν 15 mL διαλύματος Cr(VI) ανά σακούλα.
- $\text{Cr}_{200}\text{N}_0$ : για 200 ppm χρωμίου προστέθηκαν 20 mL διαλύματος Cr(VI) ανά σακούλα.

Αντίστοιχα, οι υπόλοιπες πέντε μεταχειρίσεις δέχθηκαν επιμόλυνση όπως ακριβώς ανωτέρω, αλλά και λίπανση. Οι μεταχειρίσεις ήταν οι εξής:

- $\text{Cr}_0\text{N}_1$ : στη μεταχείριση αυτή δεν προστέθηκε Cr(VI), αλλά προστέθηκε διάλυμα  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  σε κάθε σακούλα.
- $\text{Cr}_{50}\text{N}_1$ : στη μεταχείριση αυτή για 50 ppm Cr(VI) προστέθηκαν 5 mL διαλύματος Cr(VI) καθώς και διάλυμα  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  σε κάθε σακούλα.
- $\text{Cr}_{100}\text{N}_1$ : στη μεταχείριση αυτή για 100 ppm Cr(VI) προστέθηκαν 10 mL διαλύματος Cr(VI) καθώς και διάλυμα  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  σε κάθε σακούλα.
- $\text{Cr}_{150}\text{N}_1$ : στη μεταχείριση αυτή για 150 ppm Cr(VI) προστέθηκαν 15 mL διαλύματος Cr(VI) καθώς και διάλυμα  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  σε κάθε σακούλα.
- $\text{Cr}_{200}\text{N}_1$ : στη μεταχείριση αυτή για 200 ppm Cr(VI) προστέθηκαν 20 mL διαλύματος Cr(VI) καθώς και διάλυμα  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  σε κάθε σακούλα.

Στη συνέχεια του πειράματος, όταν διαπιστώθηκε ότι η γλιστρίδα προσέγγιζε στο τέλος του κύκλου ζωής της, δηλαδή άρχισαν τα φυτά να σποριάζουν, ξεκίνησε η διαδικασία της

συγκομιδής. Από κάθε μεταχείριση, επιλέχθηκαν τυχαία 10 γλάστρες, ώστε σε αυτές να γίνουν οι φυτοκομικές μετρήσεις και αναλύσεις καθώς και οι αναλύσεις εδάφους.

## 2.2 Μέθοδοι ανάλυσης εδάφους

Οι εδαφικές αναλύσεις του πειράματος επικεντρώνονται στο προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ολικού, του τρισθενούς και του εξασθενούς χρωμίου.

### 2.2.1 Μέτρηση διαθέσιμων ιχνοστοιχείων (εκχύλιση με DTPA)

Για τη μέθοδο αυτή, αρχικά παρασκευάστηκε το διάλυμα DTPA (diethylo-triamino-penta-acetic acid, διαίθυλο-τριάμινο-πεντα-οξικό οξύ) με την ανάμιξη 9,835 g DTPA, 7,4 g  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  και 74.5 g τριαιθανολαμίνης σε 5 L  $\text{H}_2\text{O}$ . Κατόπιν, ρυθμίστηκε το pH του διαλύματος στην τιμή 7,3 με λίγες σταγόνες υδροχλωρίου (HCl). Στη συνέχεια, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκχύλιση ζυγίστηκαν 20 g εδάφους και τοποθετήθηκαν σε πλαστικά φιαλίδια τύπου falcon των 50 mL. Αμέσως μετά, προστέθηκαν σε κάθε φιαλίδιο 40 mL διαλύματος DTPA. Ακολούθησε ανακίνηση για 2 ώρες και διήθηση σε νέα φιαλίδια falcon. Τα εκχυλίσματα τελικά μετρήθηκαν σε ατομική απορρόφηση για τη συγκέντρωση του τρισθενούς χρωμίου.

### 2.2.2 Ολικές συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων με βασιλικό νερό (aqua regia)

Για τη μέθοδο aqua regia, στην αρχή ζυγίστηκαν 2 g εδάφους (από κάθε δείγμα, αφού είχε κοσκινιστεί σε λεπτό κόσκινο με ανοίγματα 250  $\mu\text{m}$ ) τα οποία τοποθετήθηκαν σε σωλήνα πέψης των 250 mL. Στη συνέχεια προστέθηκαν 15 mL πυκνού HCl και 5 mL πυκνού  $\text{HNO}_3$  σε απαγωγό αερίων. Το μείγμα αυτών των πυκνών οξέων σε αναλογία 3:1 ονομάζεται βασιλικό νερό (aqua regia). Οι δοκιμαστικοί σωλήνες τοποθετήθηκαν σε ειδικό block πέψης που βρισκόταν μέσα στον απαγωγό αερίων. Τα δείγματα παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου για 16 ώρες ώστε να εισχωρήσουν τα οξέα σε όλους τους πόρους του εδάφους και να διευκολυνθεί η διαλυτοποίηση των ορυκτών του. Την επόμενη μέρα το block πέψης θερμάνθηκε στους 50 °C μέχρι τον τερματισμό κάθε αντίδρασης (περίπου μία ώρα). Έπειτα προθερμάνθηκε στους 140 °C για 3 ώρες. Τα δείγματα αφού αφέθηκαν να κρυώσουν μεταφέρθηκαν και διηθήθηκε το περιεχόμενο των σωλήνων πέψης με απιονισμένο νερό σε ογκομετρικές φιάλες των 100 mL. Στο τέλος, μετρήθηκε η συγκέντρωση ολικού χρωμίου στην ατομική απορρόφηση.

### 2.2.3 Μέτρηση εξασθενούς χρωμίου (με φωσφορικό κάλιο)

Για την συγκεκριμένη ανάλυση, αρχικά παρασκευάστηκε διάλυμα  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0,01 M. Για το σκοπό αυτό ζυγίστηκαν 1,361 g από το αντιδραστήριο και διαλύθηκαν σε τελικό όγκο 1 L. Στη συνέχεια, ζυγίστηκαν 2,5 g εδάφους και τοποθετήθηκαν σε φιαλίδια τύπου falcon των 50 mL, μαζί με 25 mL διαλύματος  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε ανακίνηση για 16 ώρες, φυγοκέντρωση για 20 λεπτά και τελικά διήθηση. Από το εκχύλισμα πάρθηκαν 8 mL, τα οποία μεταφέρθηκαν σε φιαλίδια falcon των 50 mL όπου προστέθηκε και 1 mL χρωστικής ουσίας. Για την παρασκευή της ζυγίστηκαν 0,1 g διαφαινυλο-καρμπαζίδιου σε ποτήρι ζέσεως, στο οποίο προστέθηκαν 25 mL αιθανόλης και 30 mL πυκνού φωσφορικού οξέος ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Μετά από ανάδευση, πληρώθηκε ο όγκος σε ογκομετρική φιάλη των 100 mL έως την χαραγή. Αυτή η χρωστική ουσία παρασκευάστηκε περίπου μία ώρα πριν από την μέτρηση. Το διάλυμα που δημιουργήθηκε αφήθηκε για μία ώρα για την πλήρη ανάπτυξη φούξια χρώματος, και ακολούθησε μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο στα 540 nm.

### 2.3 Φυτοκομικές μετρήσεις και μέθοδοι ανάλυσης

Όσον αφορά τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών της γλυστρίδας, αρχικά μετά την επιμόλυνση των φυτών με εξασθενές χρώμιο, πραγματοποιήθηκε μέτρηση της χλωροφύλλης επί του φύλλου με το όργανο μέτρησης της χλωροφύλλης SPAD. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις στις 4/11/19 και στις 3/12/19 αντίστοιχα, αλλά τα αποτελέσματα αφορούν μόνο την δεύτερη μέτρηση. Οι μετρήσεις έγιναν πρωινές ώρες και όταν τα φυτά ήταν φρεσκοαρδεύμενα επιλέγοντας τυχαία μερικές γλάστρες από κάθε μεταχείριση. Παράλληλα στις 11/11/19 πραγματοποιήθηκε και μέτρηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης των φυτών πάλι πρωινές ώρες και σε φρεσκοαρδεύμενα φυτά με το όργανο LI-Cor Li 6400 XT. Στη συνέχεια, μετά την συγκομιδή των υπέργειων τμημάτων των φυτών, από τις γλάστρες της κάθε μεταχείρισης που επιλέχθηκαν, μετρήθηκε το ύψος κάθε φυτού με τη χρήση χάρακα κλίμακας εκατοστών. Έπειτα, έγινε μέτρηση της φυλλικής επιφάνειας των νωπών φύλλων με τη βοήθεια σαρωτή. Στο τέλος, αφού ζυγίστηκε το νωπό βάρος του υπέργειου τμήματος (φύλλα και βλαστός) του φυτού, τοποθετήθηκε για 48 ώρες σε φούρνο στους 70 °C. Καθώς υπέστη ξήρανση, ακολούθησε μέτρηση του ξηρού του βάρους, κονιορτοποίηση σε μύλο άλεσης και τοποθέτηση του σε χάρτινες σακούλες. Αφού ολοκληρώθηκε αυτό το σκέλος του πειράματος, στη συνέχεια αφαιρέθηκε η ρίζα από το έδαφος κάθε γλάστρας, των γλαστρών της κάθε μεταχείρισης που επιλέχθηκαν, και μετά από προσεκτικό ξέπλυμα με νερό τοποθετήθηκαν σε χάρτινα σακουλάκια και αποξηράθηκαν σε φούρνο στους 70 °C για 48 ώρες. Μετά ζυγίστηκαν και κονιορτοποιήθηκαν σε μύλο άλεσης.

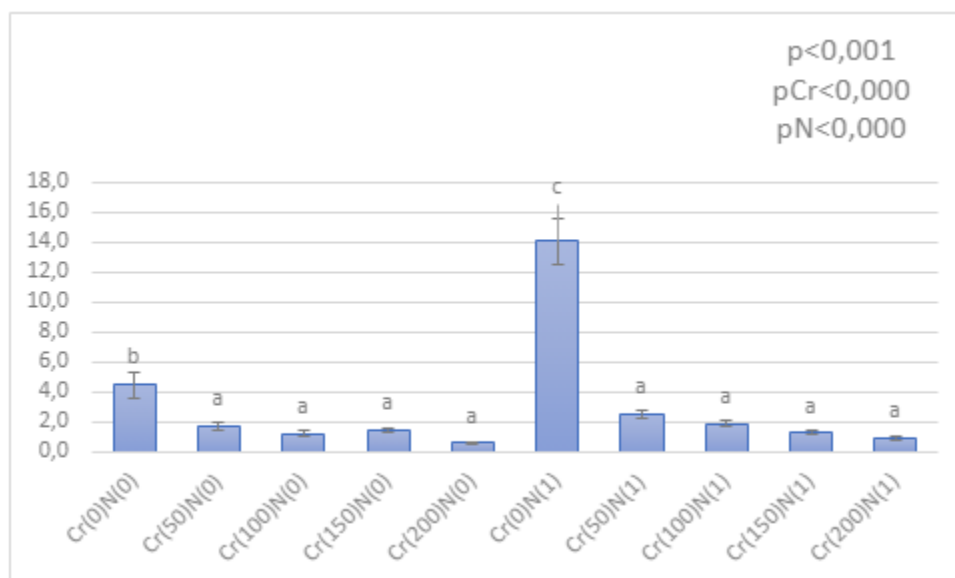
Τα κονιορτοποιημένα δείγματα (υπέργειο μέρος και ριζών) έπειτα αποθηκεύτηκαν για τις εκχυλίσεις. Ειδικότερα, για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του χρωμίου, στο υπέργειο μέρος του φυτού καθώς και στη ρίζα, πραγματοποιήθηκε εκχύλιση με διάλυμα HCl 20% v/v ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία. Από το κονιορτοποιημένο φυτικό υλικό, αρχικά, ζυγίστηκε περίπου 1 g φυτικού ιστού, το οποίο τοποθετήθηκε σε πυρίμαχες πορσελάνινες κάψες και μετά σε φούρνο σε θερμοκρασία 500 °C για 4 ώρες. Στη συνέχεια, αφού κρύωσαν οι κάψες αποτέφρωσης, έγινε παραλαβή της τέφρας του φυτικού ιστού με 20 mL HCl 20% και κατόπιν διήθηση σε ογκομετρικές φιάλες των 50 mL. Τέλος συμπληρώθηκε ο όγκος με απιονισμένο νερό και το εκχύλισμα τοποθετήθηκε σε φιαλίδια falcon των 50 mL. Αργότερα μετρήθηκε η συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων στην ατομική απορρόφηση.

## 2.4 Στατιστική επεξεργασία

Όλα τα πρωτογενή δεδομένα του πειράματος επεξεργάστηκαν με ανάλυση της παραλλακτικότητας (one-way ANOVA) για να βρεθούν οι στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων όρων κάθε παραμέτρου σε επίπεδο σημαντικότητας  $p < 0,005$ . Το στατιστικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το SPSS. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε και two-way ANOVA για να βρεθούν οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ανά παράμετρο, έχοντας ως πρώτο παράγοντα το εξασθενές χρώμιο και ως δεύτερο το άζωτο.

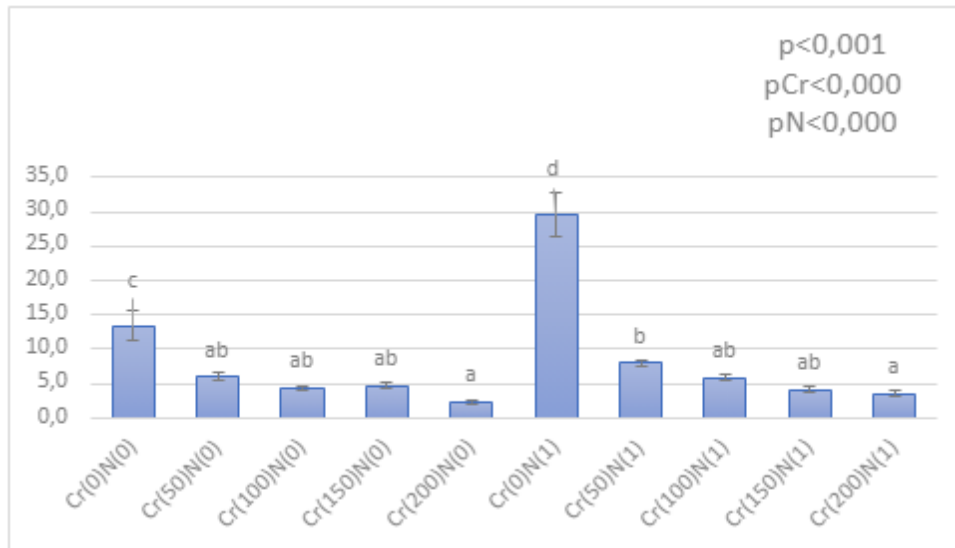


### Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα και συζήτηση



Σχήμα 4. Τιμές νωπού βάρους (σε g) των φύλλων της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 4 παρατηρείται ότι το νωπό βάρος των φύλλων στις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε χρώμιο μειώθηκε σημαντικά σε σχέση με τον μάρτυρα χωρίς άζωτο. Στη μεταχείριση όπου προστέθηκε άζωτο (Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>) το νωπό βάρος των φύλλων αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με τον μάρτυρα χωρίς N (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>). Συγκεκριμένα, οι τιμές που μετρήθηκαν ήταν 14,1 g και 4,5 g, αντίστοιχα. Επίσης, είναι χαρακτηριστικό ότι δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές σε καμία από τις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε Cr(VI), είτε στη χαμηλή προσθήκη (50 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>), είτε στην υψηλή (200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>).

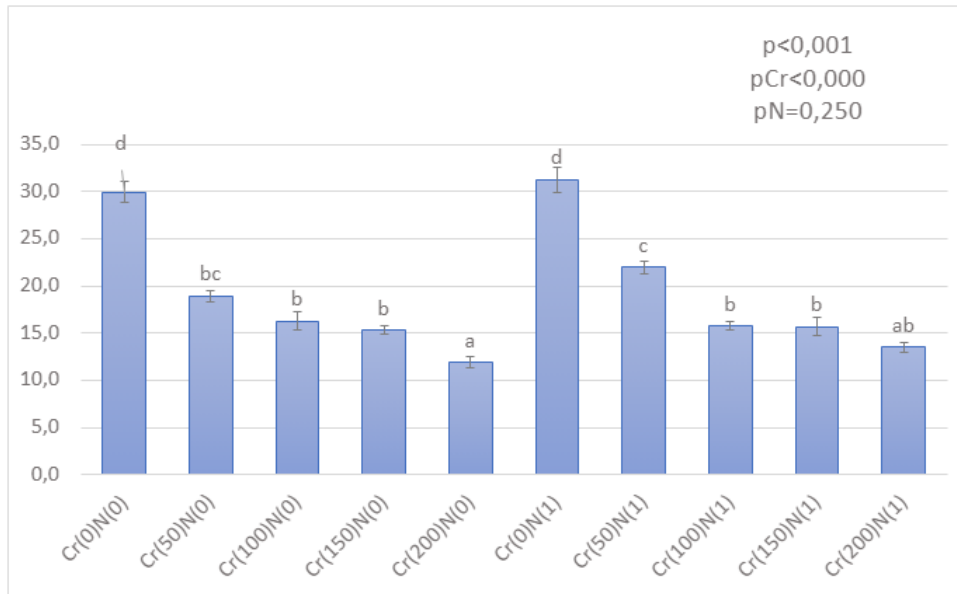


Σχήμα 5. Τιμές νωπού βάρους (σε g) συνολικά του υπέργειου τμήματος της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 5, όπου παρουσιάζεται το νωπό βάρος συνολικά του υπέργειου μέρους (φύλλα και βλαστοί) των φυτών, παρατηρείται, ομοίως με προηγούμενως (Σχήμα 4), ότι το νωπό βάρος μειώθηκε σημαντικά σε όλες τις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε χρώμιο συγκριτικά με τους μάρτυρες (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>). Συγχρόνως, παρατηρώντας αυτούς τους δύο μάρτυρες φαίνεται πώς το νωπό βάρος του υπέργειου αυξήθηκε σημαντικά στη περίπτωση που προστέθηκε άζωτο (Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>). Οι τιμές που σημειώθηκαν σε αυτές τις δύο μεταχειρίσεις ήταν 13,4 g και 29,5 g, αντίστοιχα.

Οι τιμές που ελήφθησαν τόσο για το νωπό βάρος των φύλλων, όσο και για το νωπό βάρος συνολικά του υπέργειου μέρους των φυτών υποδεικνύουν ότι η τόσο η εφαρμογή Cr(VI) όσο και η εφαρμογή αζώτου είχαν στατιστικά σημαντική επίδραση σε αυτή την παράμετρο ανάπτυξης. Δεδομένου ότι το άζωτο είναι το πιο επιτακτικό στοιχείο για τη σωστή αύξηση και ανάπτυξη των φυτών (Pasandi et al., 2021), το εύρημα αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς σε αυτή τη μεταχείριση (Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>) πραγματοποιήθηκε μόνο προσθήκη αζώτου και όχι Cr(VI). Από την άλλη, η χορήγηση Cr(VI) είχε ως αποτέλεσμα σημαντικά μειωμένες τιμές, ακόμη και στη χαμηλή δόση χορήγησης (50 mg kg<sup>-1</sup>). Αυτό πιθανόν οφείλεται στην τοξική δράση του Cr(VI), η οποία εκδηλώνεται στα φυτά αρχικά με αναστολή της βλάστησης των σπόρων και ακολουθείται από μειωμένους ρυθμούς ανάπτυξης

και συνεπώς απόδοσης (Christou et al., 2020). Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τους Levizou et al. (2019), οι οποίοι ερεύνησαν την συνολική απόδοση της ρίγανης (*Origanum vulgare*) εφαρμόζοντας στο έδαφος ακριβώς τις ίδιες συγκεντρώσεις Cr(VI) με την τρέχουσα μελέτη. Ωστόσο, έρχεται σε ασυμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα των Christou et al. (2021), όπου δεν βρέθηκαν αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις στην απόδοση της βιομάζας του σιταριού (*Triticum aestivum*) και του μαρουλιού (*Lactuca sativa*). Αυτό πιθανόν οφείλεται στις μικρότερες συγκεντρώσεις Cr(VI) που χορήγησαν στο έδαφος σε σχέση με εμάς.

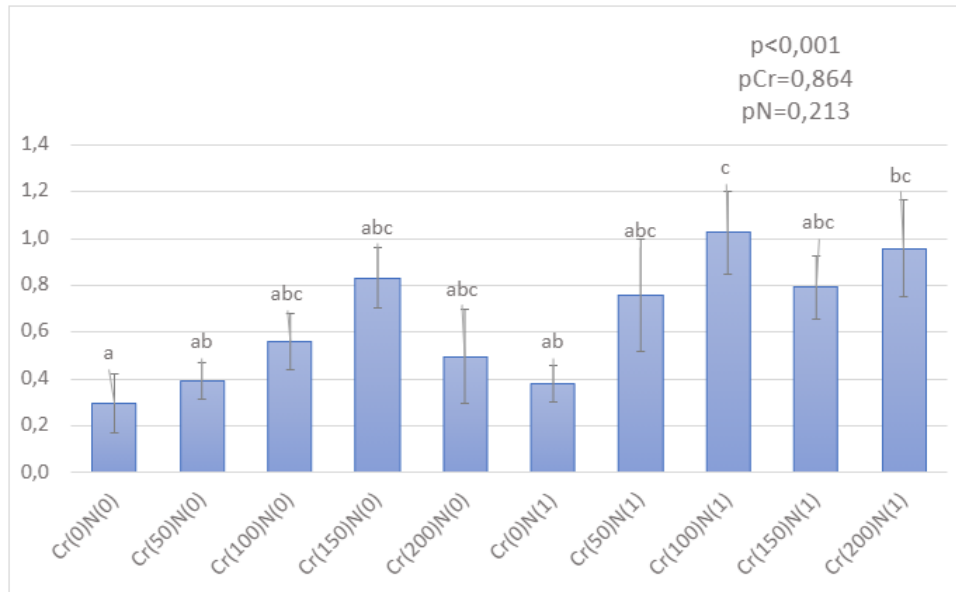


Σχήμα 6. Τιμές ύψους (σε cm) των βλαστών των φυτών της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος.

Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο p που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 6, όπου παρουσιάζονται οι τιμές του ύψους των φυτών, παρατηρείται ότι στους δύο μάρτυρες (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>) καταγράφηκαν οι υψηλότερες τιμές, οι οποίες δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Η εφαρμογή Cr(VI), όμως, είχε ως αποτέλεσμα σημαντικά μειωμένες τιμές σε όλες τις μεταχειρίσεις. Ακόμη, είναι αξιοσημείωτο ότι η επίδραση του αζώτου στο ύψος των φυτών δεν ήταν στατιστικά σημαντική.

Τα εν λόγω αποτελέσματα, λοιπόν, δείχνουν ότι το ύψος των φυτών επηρεάστηκε σημαντικά ακόμη και στη χαμηλότερη προσθήκη Cr(VI) (50 mg kg<sup>-1</sup>). Φαίνεται, ότι σε αυτή την παράμετρο ανάπτυξης η τοξική δράση του Cr(VI) ήταν τόσο ισχυρή που η εφαρμογή αζώτου δεν είχε κάποια σημαντική επίδραση. Σύμφωνα με τους Christou et al. (2020), η μείωση του ύψους των φυτών θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός ότι η υψηλή συγκέντρωση Cr(VI) στους φυτικούς ιστούς προκαλεί υπερπαραγωγή και συσσώρευση αντιδραστικών ειδών οξυγόνου (ROS). Αυτό, κατά συνέπεια, οδηγεί σε δυσμενείς επιδράσεις στην ανάπτυξη και την συνολική απόδοση των φυτών (Kumar et al., 2020).

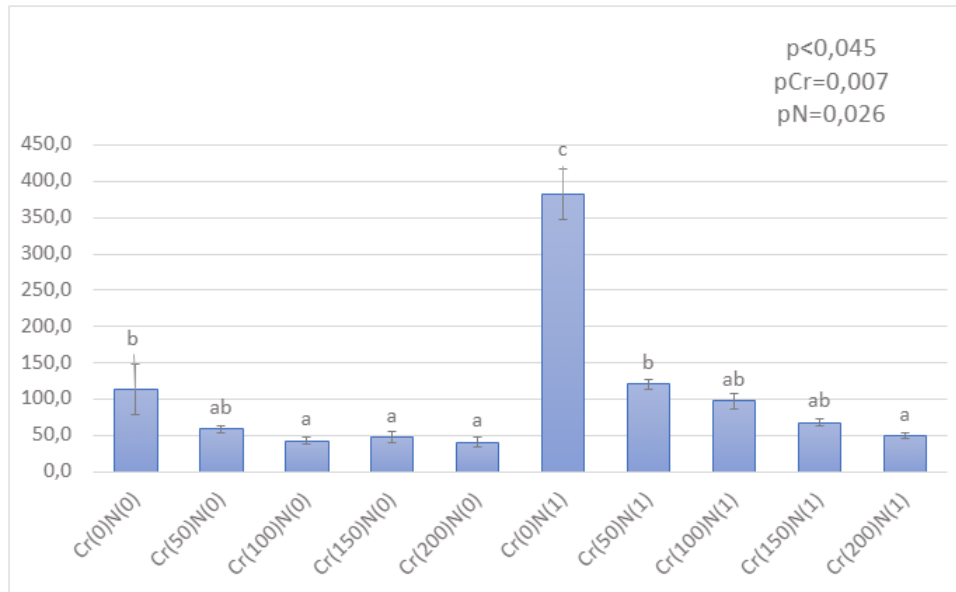


Σχήμα 7. Τιμές ξηρού βάρους (σε g) των ριζών της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7, στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές που ελήφθησαν για το ξηρό βάρος των ριζών της γλυστρίδας, φαίνεται ότι δεν υπήρχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο μαρτύρων (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>). Μάλιστα οι τιμές που σημειώθηκαν ήταν 0,3 g και 0,4 g, αντίστοιχα. Συγκρίνοντας, επίσης, τους δύο μάρτυρες με τις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε Cr(VI), αλλά και τις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε Cr(VI) μεταξύ τους, δεν εντοπίστηκαν αξιοσημείωτες διαφορές. Η μόνη σημαντική αύξηση στο ξηρό βάρος του υπόγειου μέρους των φυτών βρέθηκε στη μεταχείριση Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub> και Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub> (μεταχειρίσεις προσθήκης 100 και 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, αντίστοιχα) συγκριτικά με τον μάρτυρα (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>).

Τα παραπάνω αποτελέσματα λοιπόν για το ξηρό βάρος των συγκομισμένων ριζών, υποδηλώνουν ότι τόσο η προσθήκη Cr(VI), όσο και η προσθήκη αζώτου στο έδαφος δεν επηρέασαν σημαντικά το ριζικό σύστημα των φυτών. Αυτό επιβεβαιώνεται όχι μόνο συγκρίνοντας τους μάρτυρες μεταξύ τους, αλλά και συγκρίνοντας τους μάρτυρες με τις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε Cr(VI). Οι τιμές κυμαίνονταν περίπου στα ίδια επίπεδα. Συνεπώς, σε αυτές τις συγκεντρώσεις Cr(VI) η γλυστρίδα μπορεί να αναπτυχθεί φυσιολογικά, χωρίς να υποστεί υποβάθμιση των ριζών της (Alyazouri, 2010). Το εύρημα

αυτό έρχεται σε συμφωνία με την μελέτη του Alyazouri (2010), η οποία αφορούσε επίσης φυτά γλυστρίδας. Σύμφωνα με αυτή, δεν υπήρχαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στις τιμές του ξηρού βάρους των ριζών, όταν τα φυτά αναπτύχθηκαν με παρουσία Cr(VI) σε συγκεντρώσεις από 0-150 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, ενώ σημειώθηκε σημαντική μείωση σε επίπεδα υψηλότερα από 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>. Βέβαια, αρκετές προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει τη μείωση της βιομάζας των ριζών άλλων φυτικών ειδών, καθώς αυξανόταν η προστιθέμενη συγκέντρωση του Cr(VI) (Alyazouri, 2010). Τα διαφορετικά αποτελέσματα μας, συγκριτικά με άλλες έρευνες, πιθανόν οφείλονται στη χρήση διαφορετικών φυτών ή στην εφαρμογή χαμηλότερων συγκεντρώσεων Cr(VI) (Alyazouri, 2010). Ένα τυπικό παράδειγμα αποτελεί η έρευνα των Levizou et al. (2019), όπου εφάρμοσαν στο έδαφος ακριβώς τις ίδιες συγκεντρώσεις Cr(VI) με την παρούσα μελέτη. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το ξηρό βάρος των ριζών της ρίγανης μειώθηκε στατιστικά σημαντικά συγκριτικά με τον μάρτυρα, όταν προστέθηκε στο έδαφος Cr(VI) σε συγκεντρώσεις από 100 έως 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>. Σε αυτή την περίπτωση, λοιπόν, τα αντίθετα ευρήματά μας θα μπορούσαν να οφείλονται σε γονοτυπικές διαφορές (Uddin et al., 2015).



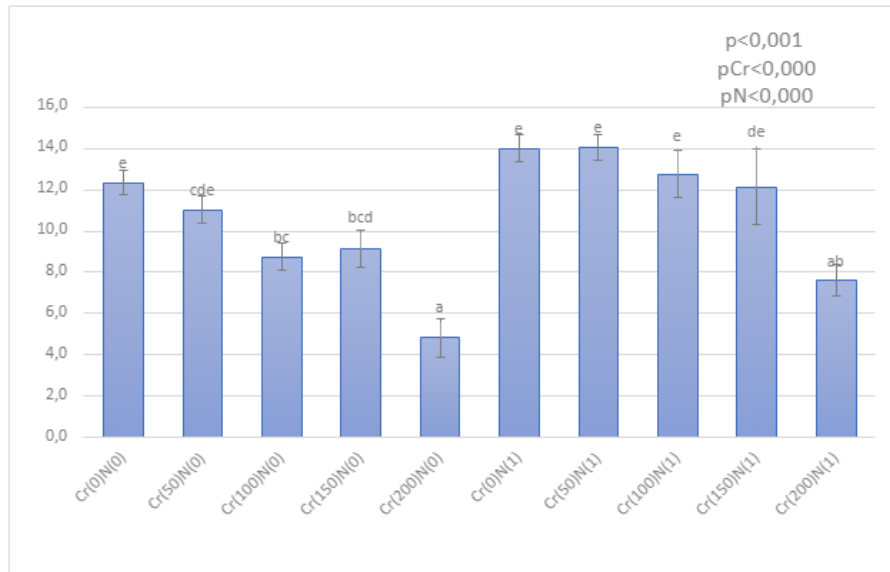
Σχήμα 8. Τιμές φυλλικής επιφάνειας (σε cm<sup>2</sup>) των φύλλων της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Συγκρίνοντας τους δύο μάρτυρες (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>), στο Σχήμα 8, φαίνεται πώς η τιμή της φυλλικής επιφάνειας των φυτών (114,5 cm<sup>2</sup> και 381,5 cm<sup>2</sup>, αντίστοιχα) ήταν σημαντικά υψηλότερη στη περίπτωση που προστέθηκε στο έδαφος άζωτο (Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>). Ωστόσο, όταν τα φυτά αναπτύχθηκαν σε επιμολυσμένο έδαφος υπήρχε μείωση των τιμών της. Αναφορικά με τον μάρτυρα χωρίς άζωτο (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>), η μείωση αυτή ήταν στατιστικά σημαντική στις μεταχειρίσεις Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub> (μεταχειρίσεις προσθήκης 100, 150 και 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, αντίστοιχα, χωρίς N), όπου δεν εφαρμόστηκε άζωτο. Αντιθέτως, στις μεταχειρίσεις όπου πραγματοποιήθηκε αζωτούχος λίπανση, υπήρχε στατιστικά σημαντική απόκλιση από τον μάρτυρα (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>) μόνο στη μεταχείριση Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub> (μεταχείριση προσθήκης 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, με N).

Τα αποτελέσματα αυτά λοιπόν δείχνουν ότι η προσθήκη Cr(VI) επέφερε σημαντική μείωση στις τιμές της φυλλικής επιφάνειας των φυτών, γεγονός που θα μπορούσε να αποδοθεί είτε στη μείωση του αριθμού των κυττάρων των φύλλων, είτε στη μείωση του μεγέθους των κυττάρων των φύλλων (Farquhar et al., 2002). Παρόλα αυτά, η εφαρμογή αζώτου είχε σημαντικά θετική επίδραση στην φυλλική επιφάνεια των φυτών που αναπτύχθηκαν σε επιμολυσμένο με Cr(VI) έδαφος, γεγονός που συμφωνεί με τους Farquhar

et al. (2002), όπου αναφέρουν ότι καθώς αυξάνεται το συνολικό διαθέσιμο άζωτο, αυξάνεται και η επιφάνεια των φύλλων. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή Cr(VI) στην υψηλή δόση χορήγησης ( $200 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ήταν τόσο ισχυρή που η επωφελής δράση του εδαφικού αζώτου παραγκωνίστηκε.





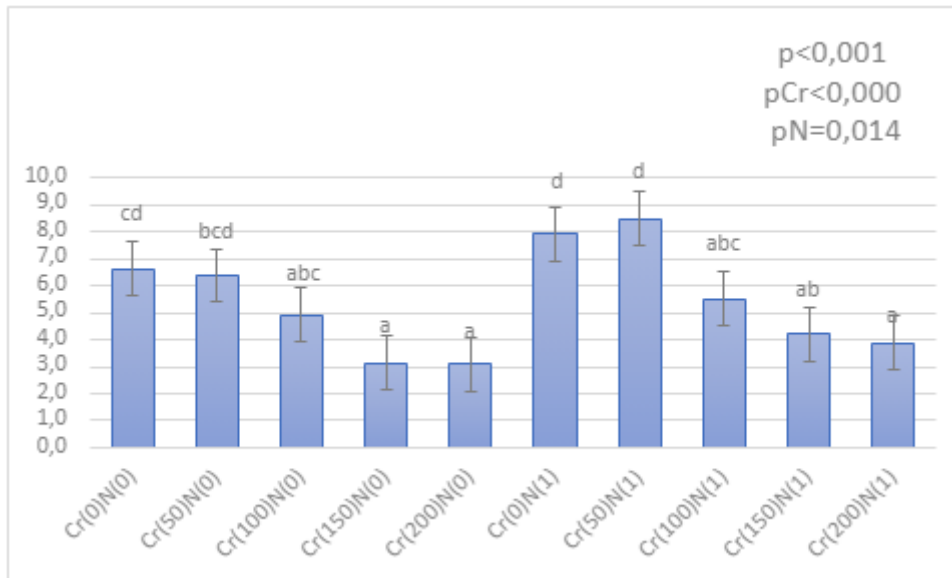
Σχήμα 9. Τιμές δείκτη SPAD οι οποίες παρουσιάζουν την εκτίμηση της συγκέντρωσης σε ολική χλωροφύλλη των φύλλων (πόσο πράσινα είναι τα φύλλα) των φυτών της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος.

Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο p που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 9, στο οποίο παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη SPAD, φαίνεται ότι η συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης των φύλλων δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ των φυτών που καλλιεργήθηκαν στα εδάφη μάρτυρες (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>). Ομοίως, σε σχέση με τον μάρτυρα χωρίς άζωτο (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>) δεν καταγράφηκαν σημαντικά διαφορετικές τιμές στις μεταχειρίσεις όπου έγινε προσθήκη Cr(VI), αλλά και αζώτου. Εξάιρεση, βέβαια, ήταν η μεταχείριση Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub> (μεταχείριση προσθήκης 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, με N) στην οποία υπήρχε σημαντική μείωση. Από την άλλη, όσον αφορά τις περιπτώσεις που τα φυτά αναπτύχθηκαν σε επιμολυσμένο με Cr(VI) έδαφος και χωρίς άζωτο υπήρχε σημαντική μείωση στη τιμή του δείκτη SPAD σε σχέση με τον μάρτυρα (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>) στις μεταχειρίσεις Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub> (μεταχειρίσεις προσθήκης 100, 150 και 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, αντίστοιχα, χωρίς N). Η μικρότερη τιμή (4,8) σημειώθηκε στην τελευταία μεταχείριση.

Προκειμένου να προσδιοριστούν τυχόν διαταραχές στη φωτοσύνθεση των φυτών, πραγματοποιήθηκε, αρχικά, μέτρηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη, η οποία γίνεται με την τιμή SPAD (Orcen et al., 2013). Από τα αποτελέσματα αυτής της μέτρησης βρέθηκε ότι η προσθήκη Cr(VI) προκάλεσε σημαντική μείωση στις τιμές του δείκτη SPAD, ενώ η εφαρμογή αζώτου είχε σημαντικά θετική επίδραση. Αυτό σημαίνει ότι η

προσθήκη N στο έδαφος διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην αύξηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη (Sotiropoulou & Karamanos, 2010). Η τάση αυτή ήταν αναμενόμενη, καθώς σύμφωνα με τους Pasandi et al. (2021) τα ποσά αζώτου που προσλαμβάνει ένα φυτό συμβάλλουν καθοριστικά στη λειτουργία της φωτοσύνθεσης, είτε θετικά είτε αρνητικά. Έτσι, ίσως εξηγείται και η σημαντική μείωση που βρέθηκε στη τιμή του δείκτη SPAD στη περίπτωση που χορηγήθηκε στο έδαφος Cr(VI) στην υψηλότερη (200 mg kg<sup>-1</sup>) συγκέντρωση (μεταχείριση Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι υψηλές συγκεντρώσεις Cr(VI) μπορεί να περιορίσουν την απορρόφηση του εδαφικού αζώτου από το φυτό (Sundaramoorthy et al., 2010), με αποτέλεσμα στη προκειμένη περίπτωση τη μείωση των χρωστικών ουσιών της φωτοσύνθεσης των φύλλων. Από την άλλη μεριά, η εφαρμογή Cr(VI) στις μεταχειρίσεις όπου δεν προστέθηκε άζωτο, προκάλεσε αξιοσημείωτη μείωση στη τιμή του δείκτη SPAD όταν τα φυτά αναπτύχθηκαν με προσθήκη 100-200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>. Η μείωση αυτή πιθανόν οφείλεται σε μορφολογικές αλλαγές των φύλλων, λόγω της τοξικής δράσης του Cr(VI) (Orcen et al., 2013). Το Cr(VI) έχει αναφερθεί ότι προκαλεί υπερδομικές αλλαγές (αλλοιώσεις) στους χλωροπλάστες σε πολλά φυτικά είδη που οδηγούν σε αναστολή της φωτοσύνθεσης (Daud et al., 2014).



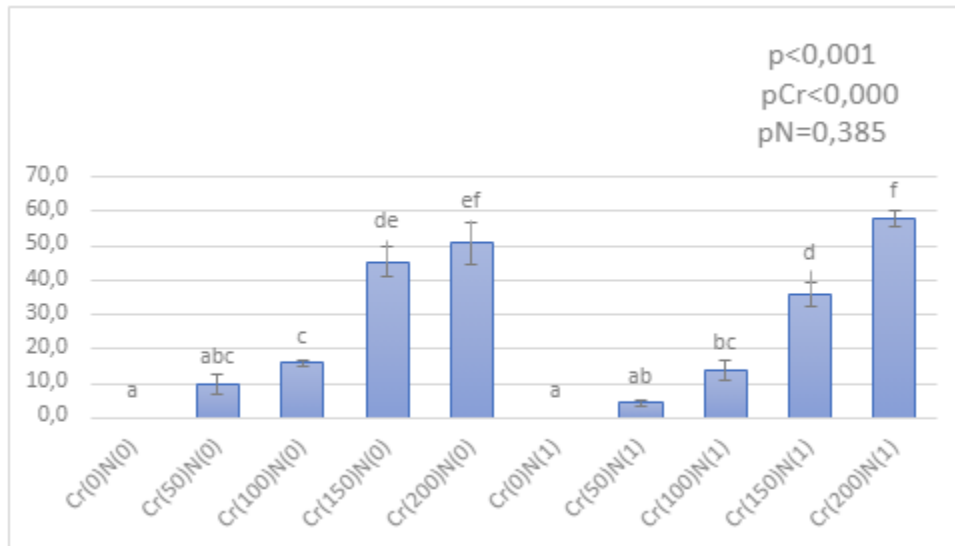
Σχήμα 10. Τιμές μέτρησης του ρυθμού φωτοσύνθεσης ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\text{s}$ ) στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος.

Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται οι τιμές του ρυθμού φωτοσύνθεσης των φυτών στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Συγκριτικά με τον μάρτυρα χωρίς άζωτο (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>), δεν βρέθηκε αξιοσημείωτη διαφορά στον ρυθμό φωτοσύνθεσης των φυτών όταν αυτά αναπτύχθηκαν με παρουσία αζώτου (Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>), αλλά και με προσθήκη 50 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup> (μεταχειρίσεις Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>). Αναφορικά με τον μάρτυρα χωρίς άζωτο (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>), επίσης, φαίνεται ότι ο ρυθμός φωτοσύνθεσης μειώθηκε σημαντικά στις μεταχειρίσεις όπου εφαρμόστηκε Cr(VI) σε συγκεντρώσεις 150 και 200 mg kg<sup>-1</sup>, είτε περιείχαν άζωτο είτε όχι. Σε αυτές τις μεταχειρίσεις, οι οποίες δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους, αλλά ούτε με τις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε Cr(VI) σε συγκέντρωση 100 mg kg<sup>-1</sup>, σημειώθηκαν οι χαμηλότερες τιμές. Φαίνεται λοιπόν ότι ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης επηρεάστηκε σημαντικά από την επιμόλυνση του εδάφους με Cr(VI). Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι και η επίδραση του αζώτου στον ρυθμό φωτοσύνθεσης ήταν στατιστικά σημαντική.

Αυτή η παρατηρούμενη μείωση στον ρυθμό φωτοσύνθεσης εν μέρει θα μπορούσε να αποδοθεί στην αναστολή της βιοσύνθεσης χρωστικών ουσιών της φωτοσύνθεσης των φύλλων, όπως βρέθηκε με την τιμή SPAD (Σχήμα 7) (Orcen et al., 2013), ή στη μείωση της φυλλικής επιφάνειας των φυτών (Σχήμα 8) (Farquhar et al., 2002). Η συνολική επιφάνεια των φύλλων είναι ένα συστατικό του μήκους, του εύρους και του αριθμού των φύλλων, το

οποίο αντανακλά στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Farquhar et al., 2002). Βέβαια, το Cr(VI) μπορεί να επηρεάσει τη φωτοσύνθεση και λόγω της καταστολής της δραστηριότητας διαφόρων συναφών ενζύμων ή εξαιτίας των χαμηλότερων επιπέδων ανταλλαγής CO<sub>2</sub> (Christou et al., 2020).

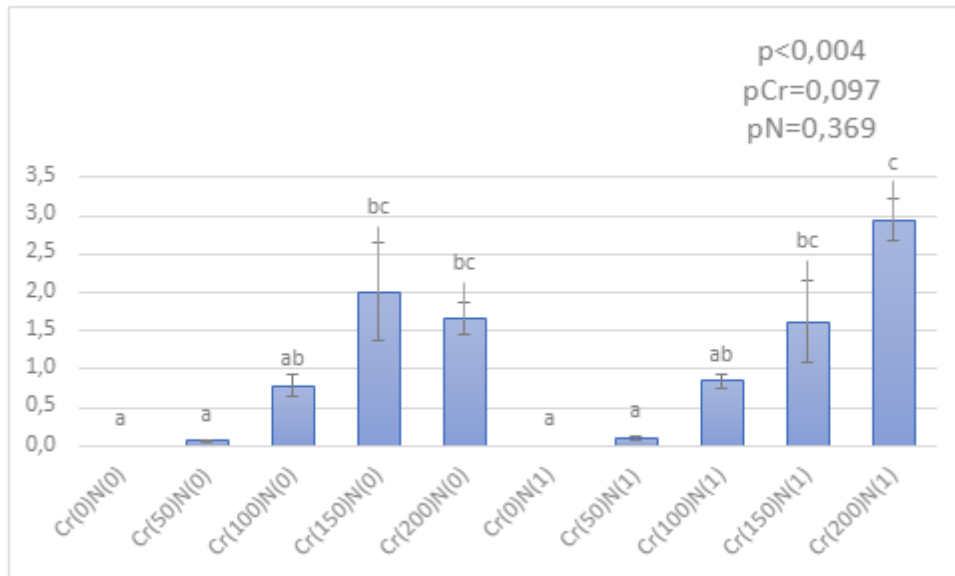


Σχήμα 11. Τιμές εξασθενούς χρωμίου (σε mg kg<sup>-1</sup>) εκχυλισμένο στο έδαφος (με φωσφορικό κάλιο) στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 11 απεικονίζεται η συγκέντρωση του εξασθενούς χρωμίου που εκχυλίστηκε από το έδαφος στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Παρατηρείται ότι στις μεταχειρίσεις Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, όπου δεν εφαρμόστηκε Cr(VI), η συγκέντρωση του ήταν μηδενική. Με την έναρξη της χορήγησης του Cr(VI) στο έδαφος, όμως, φαίνεται ότι η εκχύλιση του στοιχείου αυτού αυξήθηκε στα εδάφη όλων των μεταχειρίσεων και μάλιστα σημαντικά όταν προστέθηκε σε συγκεντρώσεις 100, 150 και 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>. Φαίνεται λοιπόν ότι οι συγκεντρώσεις του προστιθέμενου χρωμίου έπαιξαν σημαντικό ρόλο σε αυτή την παράμετρο. Αντιθέτως, είναι αξιοσημείωτο ότι η επίδραση του αζώτου στα επίπεδα του Cr(VI) που εκχυλίστηκαν από το έδαφος δεν ήταν σημαντική.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ελάχιστη συγκέντρωση Cr(VI) που εκχυλίστηκε από το έδαφος επιτεύχθηκε στους μάρτυρες (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>) όπου δεν εφαρμόστηκε Cr(VI), ενώ στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις καταγράφηκαν υψηλότερες τιμές. Αναλυτικότερα, παρατηρώντας τις τιμές που καταγράφηκαν φαίνεται ότι η ποσότητα του Cr(VI) που εκχυλίστηκε από το έδαφος κάθε μεταχείρισης ήταν μικρότερη από αυτή που χορηγήθηκε στην αρχή. Για παράδειγμα, στη μεταχείριση Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub> προστέθηκαν στο έδαφος 50 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, αλλά εκχυλίστηκαν 9,7 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανόν οφείλεται στο

γεγονός ότι το φυτό προσέλαβε ένα ποσοστό του προστιθέμενου Cr(VI) (Lattanzi et al., 2015), έτσι ώστε το διαθέσιμο που παραμένει στο έδαφος να είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό που εφαρμόστηκε. Συγχρόνως, το εύρημα αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στην αναγωγή του Cr(VI) σε Cr(III) (Antoniadis et al., 2017b), όπως επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 12, με συνέπεια τη μείωση της συγκέντρωσης του πρώτου. Τέλος, τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης έδειξαν ότι η συγκέντρωση του Cr(VI), που παραμένει διαθέσιμη στο έδαφος, είναι ανεξάρτητη του επιπέδου αζώτου που υπάρχει σε αυτό, διότι όπως προέκυψε από την στατιστική ανάλυση ο παράγοντας του αζώτου δεν είχε στατιστικά σημαντική επίδραση σε αυτή την παράμετρο.

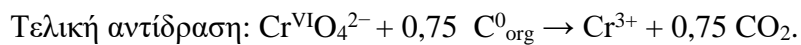
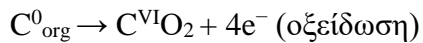
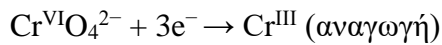


Σχήμα 12. Τιμές τρισθενούς χρωμίου (σε  $\text{mg kg}^{-1}$ ) εκχυλισμένο στο έδαφος με τη μέθοδο DTPA στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής:  $\text{Cr}_0\text{N}_0$ : μάρτυρας,  $\text{Cr}_{50}\text{N}_0$ :  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N,  $\text{Cr}_{100}\text{N}_0$ :  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N,  $\text{Cr}_{150}\text{N}_0$ :  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N,  $\text{Cr}_{200}\text{N}_0$ :  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N,  $\text{Cr}_0\text{N}_1$ : χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N,  $\text{Cr}_{50}\text{N}_1$ :  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και προσθήκη N,  $\text{Cr}_{100}\text{N}_1$ :  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και προσθήκη N,  $\text{Cr}_{150}\text{N}_1$ :  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και προσθήκη N,  $\text{Cr}_{200}\text{N}_1$ :  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο  $p$  που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του Cr(III) που εκχυλίστηκε από το έδαφος, η οποία, ομοίως με προηγούμενως (Σχήμα 11), δείχνει ότι αυτή ήταν μηδενική στο έδαφος μάρτυρα ( $\text{Cr}_0\text{N}_0$ ). Το ίδιο παρατηρείται και για τη μεταχείριση  $\text{Cr}_0\text{N}_1$ , όπου επίσης δεν προστέθηκε Cr(VI). Όπως η ποσότητα του Cr(VI), όμως, έτσι και η ποσότητα του Cr(III), αυξήθηκε με τη προσθήκη Cr(VI) στο έδαφος, και μάλιστα σημαντικά σε σχέση με τον μάρτυρα στις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκαν 150 και  $200 \text{ mg Cr(VI) kg}^{-1}$ . Παρόλα αυτά φαίνεται ότι οι εκχυλίσιμες συγκεντρώσεις του Cr(III) ήταν ανεξάρτητες από την ποσότητα του Cr(VI) που προστέθηκε. Ακόμη, αντίστοιχα με τις εκχυλίσιμες συγκεντρώσεις του Cr(VI), έτσι και οι συγκεντρώσεις του Cr(III), δεν επηρεάστηκαν από την παρουσία.

Τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν, λοιπόν, έδειξαν ότι στις μεταχειρίσεις όπου εφαρμόστηκε Cr(VI), εκχυλίστηκαν και μετρήσιμες συγκεντρώσεις Cr(III). Αυτό σημαίνει ότι όλες οι μετρήσιμες συγκεντρώσεις του Cr(III) που ανιχνεύτηκαν ήταν το αποτέλεσμα της αναγωγής του προστιθέμενου Cr(VI) (Levizou et al., 2019). Ειδικότερα, βρέθηκαν σημαντικά υψηλές συγκεντρώσεις Cr(III) στις μεταχειρίσεις  $\text{Cr}_{150}\text{N}_0$ ,  $\text{Cr}_{150}\text{N}_1$ ,  $\text{Cr}_{200}\text{N}_0$  και  $\text{Cr}_{200}\text{N}_1$ , γεγονός που ίσως υποδηλώνει ότι για να επιτευχθεί η αναγωγή του Cr(VI) σε Cr(III) απαιτείται υψηλή συγκέντρωση διαθέσιμου Cr(VI) (Chen et al., 2017). Η κατάσταση αυτή

ήταν επιθυμητή, διότι το Cr(III), σε αντίθεση με το Cr(VI), τείνει να συγκρατείται ισχυρά από το έδαφος, με αποτέλεσμα να έχει χαμηλή διαλυτότητα και ως εκ τούτου βιοδιαθεσιμότητα (Oliveira, 2012). Η μετατροπή του Cr(VI) σε Cr(III) γίνεται με την προϋπόθεση της παρουσίας δοτών ηλεκτρονίων που θα λειτουργούσαν ως αναγωγικοί παράγοντες (Antoniadis et al., 2017b). Πιο συγκεκριμένα, η μετατροπή αυτή γίνεται σύμφωνα με την εξής αντίδραση:

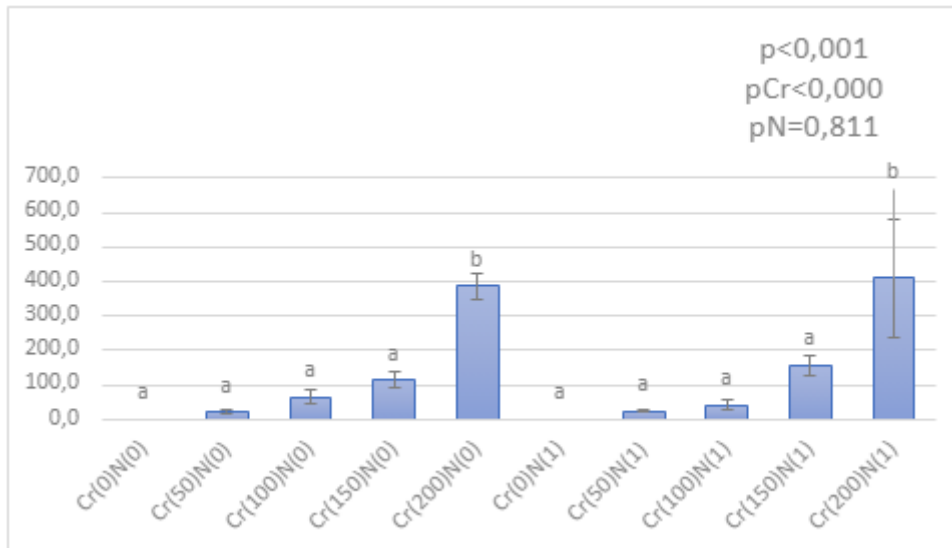


Τέτοιοι δότες ηλεκτρονίων θα μπορούσε να είναι η οργανική ουσία του εδάφους, αλλά ίσως ακόμη και η παρουσία αμμωνιακού αζώτου, το οποίο οξειδώνεται στη νιτρική του μορφή ως εξής:



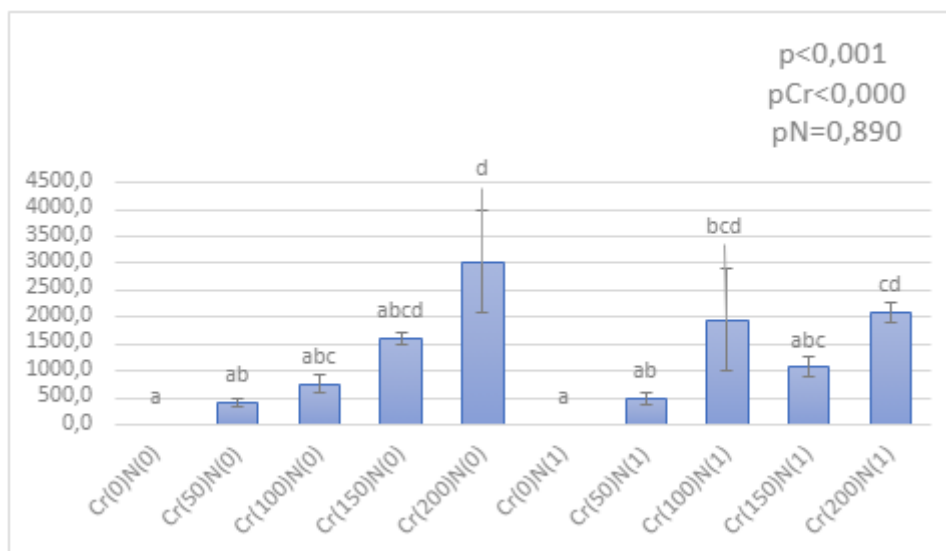
Πάντως, πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή αζωτούχου λίπανσης δεν βοήθησε στην αναγωγή του Cr(VI).





Σχήμα 13. Τιμές ολικού χρωμίου (σε mg kg<sup>-1</sup>) στο υπέργειο τμήμα της γλυστρίδας, στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 13, όπου παρουσιάζεται η συγκέντρωση του ολικού χρωμίου στο υπέργειο τμήμα των φυτών, παρατηρείται ότι στον μάρτυρα χωρίς άζωτο (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>) αυτή ήταν μηδέν. Ακριβώς το ίδιο ισχύει και για τη μεταχείριση Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub> όπου εφαρμόστηκε άζωτο, αλλά όχι Cr(VI). Παρατηρώντας, όμως, τη συγκέντρωση του ολικού Cr στο υπέργειο τμήμα των φυτών στις περιπτώσεις όπου τα φυτά αναπτύχθηκαν σε επιμολυσμένα με Cr(VI) εδάφη διακρίνεται αύξηση στη συγκέντρωσή του. Η αύξηση αυτή ήταν σημαντική μόνο στις μεταχειρίσεις Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>, όπου προστέθηκε Cr(VI) στην υψηλότερη συγκέντρωση (200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>). Οι τιμές που καταγράφηκαν ήταν 385,6 mg kg<sup>-1</sup> και 409,8 mg kg<sup>-1</sup>, αντίστοιχα. Είναι ακόμη χαρακτηριστικό ότι σε αντίθεση με την επίδραση του προστιθέμενου Cr(VI), η επίδραση του προστιθέμενου αζώτου στα επίπεδα του ολικού χρωμίου που προσέλαβε το φυτό δεν ήταν στατιστικά σημαντική.

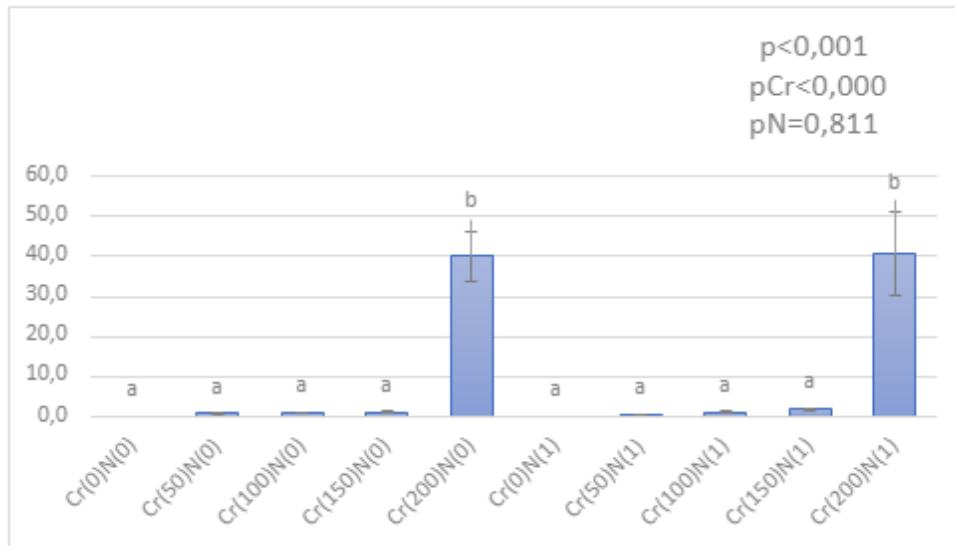


Σχήμα 14. Τιμές ολικού χρωμίου (σε mg kg<sup>-1</sup>) στις ρίζες της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 14 παρατηρείται, ομοίως με προηγουμένως (Σχήμα 13), ότι η συγκέντρωση του ολικού Cr στις ρίζες των φυτών ήταν μηδενική στις περιπτώσεις που τα φυτά αναπτύχθηκαν στα εδάφη μάρτυρες (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>), αλλά σημαντικά υψηλότερη στις μεταχειρίσεις Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub> (μεταχειρίσεις προσθήκης 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>). Σε αυτές τις μεταχειρίσεις σημειώθηκαν οι υψηλότερες τιμές ολικού Cr οι οποίες ήταν 3023,7 mg kg<sup>-1</sup> και 2093,1 mg kg<sup>-1</sup>, αντίστοιχα. Επιπλέον, στο υπόγειο τμήμα των φυτών υπήρχε σημαντική αύξηση και στη μεταχείριση Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub> (μεταχείριση προσθήκης 100 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, με άζωτο), η οποία δεν διέφερε στατιστικώς σημαντικά με τις δύο προηγούμενες μεταχειρίσεις. Φαίνεται λοιπόν ότι η προσθήκη του Cr(VI) είχε σημαντική επίδραση στα επίπεδα του ολικού χρωμίου που προσέλαβε το φυτό στο υπέργειο μέρος. Τέλος, προκύπτει ότι όπως στο υπέργειο, έτσι και στο υπόγειο μέρος των φυτών η εφαρμογή αζωτούχου λίπανσης δεν είχε καμία σημαντική επίδραση.

Από τις τιμές που μετρήθηκαν για το ολικό Cr τόσο στο υπέργειο, όσο και στο υπόγειο τμήμα των φυτών της γλυστρίδας φαίνεται ότι η συγκέντρωση του ήταν μηδενική όταν τα φυτά αναπτύχθηκαν στα εδάφη μάρτυρες, αλλά σημαντικά υψηλότερη στις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε η υψηλότερη συγκέντρωση Cr(VI) (200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>).

Σύμφωνα με τον Alyazouri, αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση ενός βαρέος μετάλλου στο έδαφος, αυξάνεται και η πρόσληψη και η συσσώρευσή του στους φυτικούς ιστούς (Alyazouri, 2010). Το εύρημα αυτό έρχεται σε συμφωνία με την μελέτη των Zhang et al. (2007), η οποία έδειξε ότι η πρόσληψη του χρωμίου αυξανόταν τόσο στις ρίζες όσο και στους βλαστούς, καθώς αυξανόταν η συγκέντρωση του Cr(VI) στο έδαφος. Αναλυτικότερα στην παρούσα μελέτη, η βιοσυσσώρευση του ολικού Cr στα εναέρια μέρη της γλυστρίδας κυμαίνονταν από 22,1 έως 409,8 mg ολικού Cr kg<sup>-1</sup>, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις αναφερόμενες τιμές ολικού Cr ορισμένων εδαφικών πειραμάτων με φυτά που προτείνονται ως υπερσυσσωρευτές. Για παράδειγμα, οι Liu et al. (2011) σε έρευνα τους αναφέρουν ότι το φυτικό είδος *Leersia hexandra* συγκέντρωσε περίπου 1200-1400 mg ολικού Cr kg<sup>-1</sup>, όταν αναπτύχθηκε σε έδαφος με προσθήκη 80-180 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>, ενώ η Levizou et al. (2019) αναφέρουν ότι η ρίγανη συγκέντρωσε από 200-1200 mg ολικού Cr kg<sup>-1</sup>, όταν αναπτύχθηκε στο έδαφος με προσθήκη 50-200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup> (Levizou et al., 2019). Παρόλα' αυτά, αν και στη μελέτη μας η συγκέντρωση του χρωμίου στο υπέργειο μέρος της γλυστρίδας δεν ξεπέρασε τα 1000 mg kg<sup>-1</sup>, (κατώτερο όριο για να χαρακτηριστεί ένα φυτό ως υπερσυσσωρευτής) (Koptsik, 2014), θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για σκοπούς φυτοεξυγίανσης σε εδάφη με χαμηλά επίπεδα Cr(VI). Εναλλακτικά, ως ετήσιο φυτό θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε διαδοχικά συστήματα καλλιέργειας, επιταχύνοντας έτσι τη διαδικασία της φυτοαποκατάστασης (Antoniadis et al., 2017b). Όμοια εικόνα με τη συγκέντρωση του ολικού Cr στο υπέργειο (Σχήμα 13) παρατηρήθηκε και στις ρίζες των φυτών της γλυστρίδας (Σχήμα 14), όπου οι τιμές του κυμαίνονταν από 422,6 έως 3023,7 mg ολικού Cr kg<sup>-1</sup>. Από τις προαναφερόμενες τιμές, παρατηρείται ότι παρά την υψηλή περιεκτικότητα των ριζών σε ολικό Cr, η περιεκτικότητα του στο εναέριο μέρος των φυτών ήταν κατά πολύ μικρότερη. Η τάση αυτή ήταν αναμενόμενη, διότι σύμφωνα με έρευνες το χρώμιο που λαμβάνεται από τα φυτά συσσωρεύεται κυρίως εντός των ριζών, παρουσιάζοντας χαμηλό δυναμικό μεταφοράς. Αρκετές μελέτες έδειξαν ότι η συσσώρευση χρωμίου στα διάφορα φυτικά μέρη ακολουθεί την εξής σειρά: ρίζες > μίσχοι > φύλλα > καρποί (Christou et al., 2021).

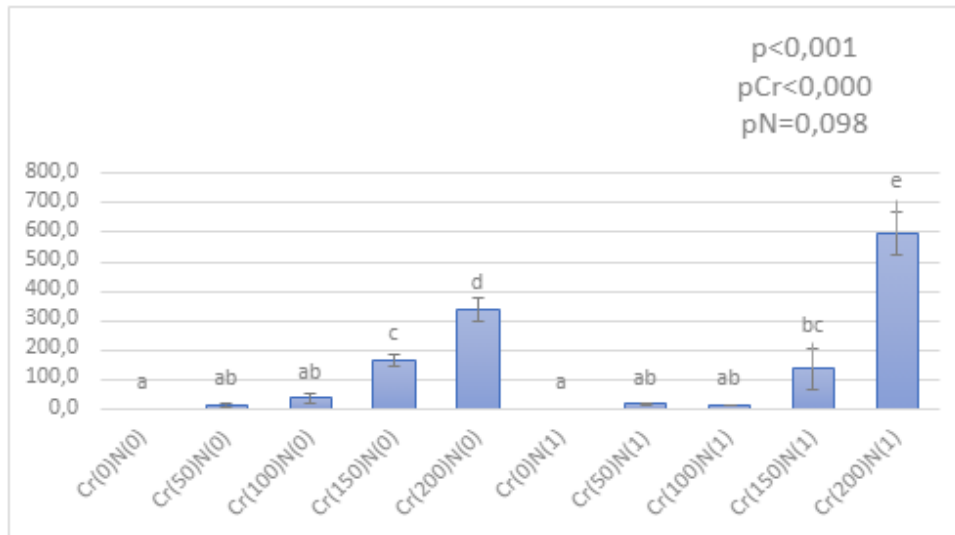


Σχήμα 15. Τιμές εξασθενούς χρωμίου (σε  $\text{mg kg}^{-1}$ ) στο υπέργειο τμήμα της γλυστρίδας, στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής:  $\text{Cr}_0\text{N}_0$ : μάρτυρας,  $\text{Cr}_{50}\text{N}_0$ :  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N,  $\text{Cr}_{100}\text{N}_0$ :  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N,  $\text{Cr}_{150}\text{N}_0$ :  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N,  $\text{Cr}_{200}\text{N}_0$ :  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N,  $\text{Cr}_0\text{N}_1$ : χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N,  $\text{Cr}_{50}\text{N}_1$ :  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και προσθήκη N,  $\text{Cr}_{100}\text{N}_1$ :  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και προσθήκη N,  $\text{Cr}_{150}\text{N}_1$ :  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και προσθήκη N,  $\text{Cr}_{200}\text{N}_1$ :  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο  $p$  που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 15, όπου παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του εξασθενούς χρωμίου στο υπέργειο τμήμα των φυτών, παρατηρείται η ίδια εικόνα με τις συγκεντρώσεις του ολικού χρωμίου σε αυτό το φυτικό μέρος (Σχήμα 13). Πιο συγκεκριμένα, στις μεταχειρίσεις ( $\text{Cr}_0\text{N}_0$  και  $\text{Cr}_0\text{N}_1$ ) όπου δεν εφαρμόστηκε Cr(VI) η συγκέντρωση αυτού του στοιχείου στο υπέργειο ήταν μηδενική, ενώ με την έναρξη της χορήγησης του στο έδαφος, η συγκέντρωση του αυξήθηκε. Η αύξηση ήταν σημαντική μόνο στις δύο μεταχειρίσεις ( $\text{Cr}_{200}\text{N}_0$  και  $\text{Cr}_{200}\text{N}_1$ ) που προστέθηκε Cr(VI) στην υψηλή προσθήκη ( $200 \text{ mg Cr(VI) kg}^{-1}$ ), με τις τιμές του να είναι  $40,1 \text{ mg Cr(VI) kg}^{-1}$  και  $40,7 \text{ mg Cr(VI) kg}^{-1}$ , αντίστοιχα. Είναι αξιοσημείωτο ακόμη ότι η προσθήκη αζώτου δεν είχε στατιστικά σημαντική επίδραση ούτε στα επίπεδα Cr(VI) που βρέθηκαν στις ρίζες του φυτού.

Παρατηρώντας, λοιπόν, τα Σχήματα 13 και 15, φαίνεται ότι οι τιμές που καταγράφηκαν τόσο για το ολικό χρώμιο, όσο και για το εξασθενές, ήταν μηδενικές στο υπέργειο τμήμα των φυτών της γλυστρίδας, στις περιπτώσεις όπου τα φυτά αναπτύχθηκαν χωρίς Cr(VI), αλλά σημαντικά υψηλότερες στις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε στην υψηλή δόση χορήγησης ( $200 \text{ mg Cr(VI) kg}^{-1}$ ). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η συσσώρευση του χρωμίου αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση των συγκεντρώσεών του (Sundaramoorthy

et al., 2010). Σε αυτό το φυτικό μέρος το εύρος συγκεντρώσεων του Cr(VI) κυμαίνονταν από 0,8 έως 40,7 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές, με τις τιμές του ολικού Cr στο υπέργειο μέρος των φυτών, φαίνεται ότι το Cr(VI) ήταν κατά πολύ χαμηλότερο. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι το Cr(VI) μπορεί να αναχθεί στην επιφάνεια της ρίζας (Oliveira, 2012) με αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης του. Αν και είναι περιορισμένες, υπάρχουν ενδείξεις ότι τα φυτά είναι σε θέση να μειώσουν το Cr(VI) σε Cr(III), ως μέρος του μηχανισμού φυτοεξυγίανσης (Ranieri & Gikas, 2014).

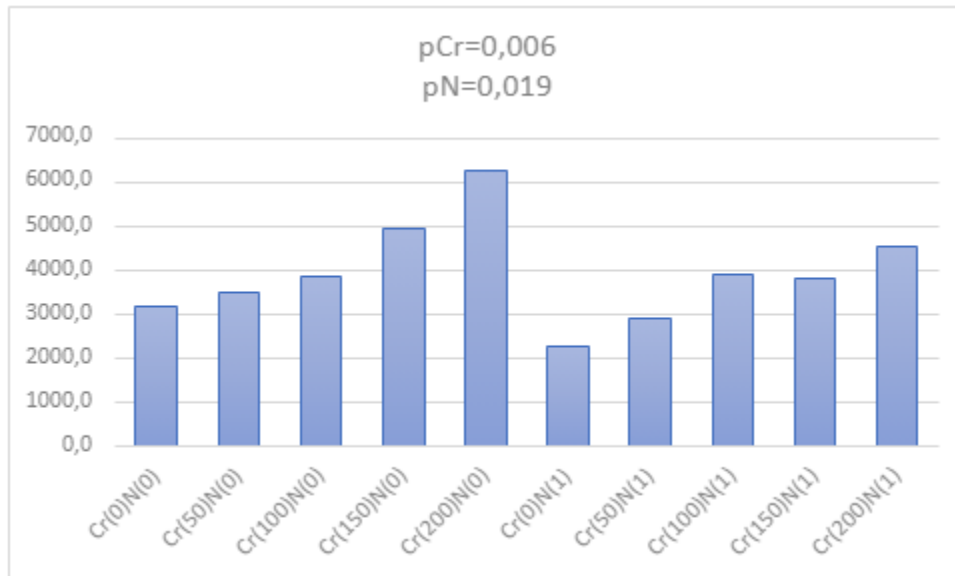


Σχήμα 16. Τιμές εξασθενούς χρωμίου (σε mg kg<sup>-1</sup>) στις ρίζες της γλυστρίδας στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N. Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στο επίπεδο *p* που αναγράφεται στο αντίστοιχο γράφημα.

Στο Σχήμα 16 παρατηρείται και πάλι ότι στις μεταχειρίσεις (Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>) όπου δεν εφαρμόστηκε χρώμιο η συγκέντρωση του στις ρίζες των φυτών ήταν μηδέν. Όταν βέβαια άρχισε η χορήγηση του Cr(VI) στο έδαφος, παρατηρήθηκε αύξηση της συγκέντρωσής του η οποία ήταν σημαντική στις μεταχειρίσεις Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub> (μεταχειρίσεις προσθήκης 150 mg και 200 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup> αντίστοιχα). Ακόμη, ομοίως με την προηγούμενη παράμετρο (Σχήμα 15), παρατηρείται ότι η επίδραση του αζώτου στα επίπεδα Cr(VI) στις ρίζες των φυτών δεν ήταν στατιστικά σημαντική.

Αντίθετα με το υπέργειο μέρος των φυτών, λοιπόν, στο υπόγειο η συγκέντρωση του Cr(VI) ήταν σημαντικά υψηλότερη συγκριτικά με τους μάρτυρες όχι μόνο στις μεταχειρίσεις Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>, αλλά και στις μεταχειρίσεις Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub> και Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι η πρόσληψη και η μετατόπιση του Cr(VI), αυξάνεται με την αύξηση του στοιχείου στο έδαφος (Alyazouri, 2010). Συγχρόνως το εύρημα αυτό ίσως υποδεικνύει ότι η γλυστρίδα παρουσιάζει χαμηλό ρυθμό μετατόπισης από τις ρίζες στο υπέργειο μέρος των φυτών (Ranieri & Gikas, 2014). Προηγούμενες μελέτες έχουν επιβεβαιώσει ότι η υψηλότερη συσσώρευση Cr(VI) στα φυτά βρίσκεται συνήθως στις ρίζες (Ranieri & Gikas, 2014). Για παράδειγμα, έχει αναφερθεί ότι το 98% του χρωμίου στα φασόλια συσσωρεύεται στις ρίζες, σε σύγκριση με μόνο το 0,1% που βρέθηκε στους

σπόρους των φασολιών (Ranieri & Gikas, 2014). Όπως αναφέρουν αρκετοί ερευνητές, ένας πιθανός λόγος στον οποίο μπορεί να οφείλεται η υψηλή συσσώρευση χρωμίου στο ριζικό σύστημα, είναι η ανάγκη των φυτών να αποτρέψουν την τοξική δράση του στοιχείου αυτού στη φωτοσυνθετική τους ικανότητα (Ranieri & Gikas, 2014).



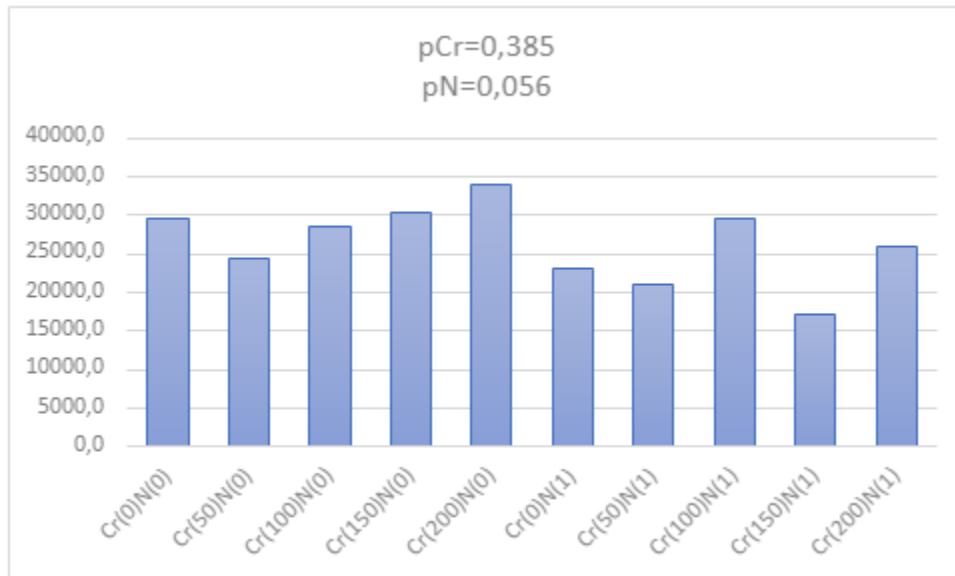
Σχήμα 17. Τιμές φωσφόρου (σε mg kg<sup>-1</sup>) που εκχυλίστηκαν από το φυτό. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N.

Στο Σχήμα 17, παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του φωσφόρου (P) που εκχυλίστηκαν από το φυτό στις δέκα μεταχειρίσεις του πειράματος. Παρατηρώντας τις τιμές που καταγράφηκαν, φαίνεται ότι υπήρχε μία κλιμακούμενη αύξηση στην συγκέντρωση του, καθώς αυξανόταν η προστιθέμενη συγκέντρωση Cr(VI). Μάλιστα διακρίνεται ότι οι τιμές ήταν υψηλότερες στις μεταχειρίσεις όπου δεν πραγματοποιήθηκε λίπανση με άζωτο. Είναι αξιοσημείωτο ότι τόσο η επίδραση του Cr(VI) όσο και η επίδραση του αζώτου στα επίπεδα του φωσφόρου στο φυτό ήταν στατιστικά σημαντική.

Δεδομένης της ομοιότητας του Cr(VI) με τα φωσφορικά ιόντα (Ukhurebor et al., 2021), η παρατηρούμενη αύξηση στη συγκέντρωση του φωσφόρου, καθώς αυξανόταν η συγκέντρωση του Cr(VI), μπορεί να υποδεικνύει ότι η γλυστρίδα προτιμά να απορροφήσει τον P, ως μακροθρεπτικό συστατικό εις βάρος του Cr(VI) (Alyazouiri, 2010). Ωστόσο, το εύρημα αυτό έρχεται σε ασυμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα των Sundaramoorthy et al. (2010), όπου παρατηρήθηκε μείωση της περιεκτικότητας σε φώσφορο στο φυτικό είδος *Oryza sativa* L. καθώς αυξανόταν οι προστιθέμενες συγκεντρώσεις χρωμίου. Το αποτέλεσμα αυτό το απέδωσαν σε τοξικές επιδράσεις του χρωμίου στα ριζικά κύτταρα, με συνέπεια την παρεμπόδιση απορρόφησης φωσφόρου από το φυτό. Συνεπώς, τα διαφορετικά αποτελέσματα μας θα μπορούσαν να οφείλονται στο γεγονός ότι στην παρούσα μελέτη η εφαρμογή Cr(VI), δεν επηρέασε το ριζικό σύστημα των φυτών της γλυστρίδας. Επιπλέον, οι χαμηλότερες τιμές



φωσφόρου που σημειώθηκαν στις περιπτώσεις όπου είχε προστεθεί άζωτο στο έδαφος, ενδεχομένως υποδεικνύουν την ανάγκη προτεραιότητας των φυτών για το άζωτο (Alyazouri, 2010).



Σχήμα 18. Τιμές καλίου (σε mg kg<sup>-1</sup>) που εκχυλίστηκαν από το φυτό. Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x και είναι οι εξής: Cr<sub>0</sub>N<sub>0</sub>: μάρτυρας, Cr<sub>50</sub>N<sub>0</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>0</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>0</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>0</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και χωρίς προσθήκη N, Cr<sub>0</sub>N<sub>1</sub>: χωρίς προσθήκη Cr(VI), αλλά προσθήκη N, Cr<sub>50</sub>N<sub>1</sub>: 50 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>100</sub>N<sub>1</sub>: 100 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>150</sub>N<sub>1</sub>: 150 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N, Cr<sub>200</sub>N<sub>1</sub>: 200 mg kg<sup>-1</sup> Cr(VI) και προσθήκη N.

Στο Σχήμα 18, παρατηρώντας τις τιμές που ελήφθησαν για το κάλιο, φαίνεται, ομοίως με προηγουμένως (σχήμα 17), ότι το φυτό συνέχισε κανονικά την απορρόφηση αυτού του θρεπτικού στοιχείου από το έδαφος. Ωστόσο, ούτε η εφαρμογή Cr(VI) αλλά ούτε και η εφαρμογή αζώτου επηρέασαν σημαντικά τα επίπεδα του καλίου στο φυτό.

Η υψηλή συγκέντρωση καλίου που βρέθηκε παρουσία Cr(VI) μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι τα φυτά απαιτούν κατιόντα K ως μακροθρεπτικά συστατικά. Τα φυτά μπορούν να προσλάβουν K<sup>+</sup> χρησιμοποιώντας συζευγμένους μεταφορείς, γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει ότι το Cr(VI) (ανιόν) μπορεί να συζευχθεί με αυτό το κατιόν μέσω της διέλευσης της μεμβράνης των ριζικών κυττάρων. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τα αποτελέσματα προηγούμενης μελέτης που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του συσσωρευτή *Pteris vittata* (Fayiga et al., 2008). Οι ερευνητές αυτής της μελέτης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το K<sup>+</sup> ενίσχυσε την πρόσληψη αρσενικού (βαρύ μέταλλο πολλαπλού σθένους, όπως το χρώμιο) από αυτό το φυτικό είδος (Fayiga et al., 2008). Συνεπώς, ίσως ο εμπλουτισμός ενός μολυσμένου εδάφους από Cr(VI) με κατιόντα καλίου να ενίσχυε την απομάκρυνσή του από το έδαφος (Alyazouri, 2010).

## Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη δείχνει ότι η γλυστρίδα δεν μπορεί να προταθεί για καλλιέργεια μεγάλης κλίμακας σε σοβαρά μολυσμένα εδάφη από Cr(VI), λόγω της δραματικά μειωμένης βιομάζας που παρατηρήθηκε. Ωστόσο, δεδομένου ότι το φυτό προσέλαβε ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις χρωμίου τόσο στο εναέριο τμήμα (έως 409,8 mg ολικού Cr kg<sup>-1</sup>) όσο και στις ρίζες (έως 3023,7 mg ολικού Cr kg<sup>-1</sup>) φαίνεται ότι ίσως θα μπορούσε να εφαρμοστεί για σκοπούς φυτοεξυγίανσης σε εδάφη με χαμηλά επίπεδα Cr(VI). Εναλλακτικά, ως ετήσιο φυτό θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε διαδοχικά συστήματα καλλιέργειας, επιταχύνοντας έτσι τη διαδικασία της φυτοαποκατάστασης. Συγχρόνως, επειδή η προσπάθεια ήταν να ελαχιστοποιηθεί η καταπόνηση του Cr(VI) σε αυτό το φυτικό είδος, φαίνεται ότι η προσθήκη αζώτου αποτελεί μία καλή πρακτική για την μείωση των τοξικών επιδράσεων του προστιθέμενου Cr(VI) έως 100-150 mg Cr(VI) kg<sup>-1</sup>. Ως εκ τούτου, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες σε επίπεδο αγρού προκειμένου να διεξαχθεί ένα οριστικό συμπέρασμα για την επίδραση του Cr(VI) στη γλυστρίδα (*Portulaca oleracea*) σε εδάφη με εφαρμογή αζωτούχου λίπανσης.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική βιβλιογραφία

Αντωνιάδης, Β. (2002). Σημειώσεις του Μαθήματος «Εδαφολογία: Τα εδάφη στα Οικοσυστήματα». Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.

Γκαύρου, Γ. (2016). Ικανότητα Απομάκρυνσης Cd, Ni και Zn Τεχνητών Υγροβιότοπων με Δύο Είδη Αλοφύτων για Επεξεργασία Ρυπασμένου Νερού. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Γκόλια, Ε.Ε., Χαρτοδιπλωμένου, Μ.Α., Ζούντα, Δ., Κάντζου, Ο.Δ., Λακιώτης, Κ., Μαμαλούδης, Χ., Παρχαρίδου, Κ., Θαλασσινός, Γ., Μπαθρέλλος, Γ., Σκυλοδήμου, Χ., Αντωνιάδης, Β. (2020). Παρακολούθηση της χωρικής μεταβλητότητας των επιπέδων βαρέων μετάλλων στο κέντρο της πόλης του Βόλου. Πρακτικά 11<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Βόλος.

Ένωση Ελλήνων Χημικών. (2007). Θέσεις για την Επικινδυνότητα της Παρουσίας Cr (VI) στα Υπόγεια Νερά. Επιστημονικό Τμήμα Περιβάλλοντος, Υγείας και Ασφάλειας της Εργασίας, σελ. 1-11.

Ζιώγας, Χ., Θεοχάρη, Χ., Λειβαδάρος, Ρ., Μπούρα, Α., Παντελάρας, Π., Παπαδοπούλου, Μ., Στάμου Α. (2009). Το Πρόβλημα του Ασωπού Ποταμού: Προτάσεις Αντιμετώπισής του. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

Καραμπουρνιώτης, Γ., Λιακόπουλος, Γ., Νικολόπουλος Δ. (2012). Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών. 3η Έκδοση, Εκδόσεις Έμβρυο, Αθήνα.

Μιχαηλίδη, Μ.Κ. (2015). Βιολογική Αναγωγή Εξασθενούς Χρωμίου. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Αγρίνιο.

Μόλλα, Α.Ι. (2012). Βελτίωση Ρυπασμένων Εδαφών και Υδάτων από Νιτρικά, Αμμωνιακά και Χρώμιο και Αξιοποίηση Αυτών στην Καλλιέργεια Φυτών. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Παπαδόπουλος, Γ. (2019). Βελτιστοποίηση της Λειτουργίας Συστήματος Καθαρισμού Νερού με Βάση Κοκκώδες Υδροξυ-Οξειδίο Κασσιτέρου. Μεταπτυχιακή Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Παπαθεοδώρου, Σ.Α. (2015). Διαθεσιμότητα Βαρέων Μετάλλων Ενός Έντονα Ρυπασμένου Εδάφους σε Τρία Είδη Φυτών. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Τάσιος, Φ. (2014). Επισκόπηση Μεθόδων Απομάκρυνσης και Ανάκτησης Χρωμίου από Υγρά Απόβλητα. Μεταπτυχιακή Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Alyazouri, A. (2010). Analytical Chemistry and Phytoextraction of Hexavalent Chromium with *Portulaca oleracea*. Doctoral Thesis, University of Huddersfield.

Antoniadis, V., Golia, E., Liu, Y.T., Wang, S.L., Shaheen, S.M., Rinklebe J. (2019). Soil and maize contamination by trace elements and associated health risk assessment in the industrial area of Volos, Greece. *Environment International* 124, 79-88.

Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S.M., Sik Y., Sebastian A., Baum C., Prasad M.N.V., Wenzel, W.W., Rinklebe J. (2017a). Trace elements in the soil-plant interface:

phytoavailability, translocation, and phytoremediation-a review. *Earth-Science Reviews* 171, 621-645.

Antoniadis, V., Polyzos, T., Golia, E.E., Petropoulos, S.A. (2017b). Hexavalent chromium availability and phytoremediation potential of *Cichorium spinosum* as affected by manure, zeolite and soil ageing. *Chemosphere* 171, 729–734.

Benard, C., Gautier, H., Bourgaud, F., Grassely, D., Navez, B., Caris-Veyrat, C., Weiss, M., Genard, M. (2009). Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis in sugars, acid's, ascorbate, carotenoids and phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57, 4112-4123.

Bragato, C., Schiavon, M., Polese, P., Ertani, A., Pittarello, M., Malagoli, M. (2009). Seasonal variations of Cu, Zn, Ni and Cr concentration in *Phragmites australis* (Cav.), trin ex steudel in a constructed wetland of north Italy. *Desalination* 246, 35- 44.

Chen, H., Dou, J., Xu, H. (2017). Removal of Cr(VI) ions by sewage sludge compost biomass from aqueous solutions: reduction to Cr(III) and biosorption. *Applied Surface Science* 425, 728–735.

Christou, A., Georgiadou, E.C., Zissimos, A.M., Christoforou, I.C., Christofi, C., Neocleous, D., Dalias, P., Fotopoulos, V. (2020). Hexavalent chromium leads to differential hormetic or damaging effects in alfalfa (*Medicago sativa* L.) plants in a concentration-dependent manner by regulating nitro-oxidative and proline metabolism. *Environmental Pollution* 267, 115379.

Christou, A., Georgiadou, E.C., Zissimos, A.M., Christoforou, I.C., Christofi, C., Neocleous, D., Dalias, P., Fotopoulos, V. (2021). Uptake of hexavalent chromium by *Lactuca sativa* and *Triticum aestivum* plants and mediated effects on their performance, linked with associated public health risks. *Chemosphere* 267, 128912.

Chugh, V., Mishra, V., Dwivedi, S.V., Sharma, K.D. (2019). Purslane (*Portulaca oleracea* L.): an underutilized wonder plant with potential pharmacological value. *The Pharma Innovation Journal* 8, 236-246.

Coral, M.N.U., Korkmaz, H., Arikan, B., Coral, G. (2005). Plasmid mediated heavy metal resistances in *Enterobacter* spp. isolated from Sofulu landfill, in Adana, Turkey. *Annals of Microbiology* 55, 175-179.

Daud, M., Mei, L., Variant, M., Ali, S., Li, C., Rafiq, M., Zhu, S. (2014). Chromium(VI) uptake and tolerance potential in cotton cultivars: effect on their root physiology, ultramorphology and oxidative metabolism. *BioMed Research International* 1, 1-12.

Dhal, B., Thatoi, H.N., Das, N.N, Pandeya, B.D. (2016). Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: a review. *Journal of Hazardous Materials* 250-251, 272-291.

Duffus, J.H. (2002). "Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry* 74, 793-807.

Farquhar, G.D., Buckley, T.N., Miller, J.M. (2002). Optimal stomatal control in relation to leaf area and nitrogen content. *Silva Fennica* 36, 625–637.

Fayiga, A.O., Ma, L.Q., Rathinasabapathi, B. (2008). Effects of nutrients on arsenic accumulation by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Environmental and Experimental Botany* 62, 231-237.

Golia, E.E., Dimirkou, A., Mitsios, I.K. (2008). Levels of heavy metals pollution in different types of soil of central Greece. *Bulletin of Environmental Contamination Toxicology* 80, 206-210.

Gonnella, M., Charfeddine, M., Conversa, G., Santamaria, P. (2010). Purslane: a review of its potential for health and agricultural aspects. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology* 4 (1), 131-136.

Gupta, M.K., Kiran, K., Amita, S., Shikha, G. (2014). Bioremediation of heavy metal polluted environment using resistant bacteria. *Journal of Environmental Research and Development* 8.

Jobby, R., Jha, P., Yadav, A.K., Desai, N. (2018). Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr(VI)]: a comprehensive review. *Chemosphere* 207, 255-266.

Kaprara, E., Kazakis, N., Simeonidis, K., Coles, S., Zouboulis, A.I., Samaras, P., Mitrakas, M. (2015). Occurrence of Cr(VI) in drinking water of Greece and relation to the geological background. *Journal of Hazardous Materials* 281, 2-11.

Kelepertzis, E., Stathopoulou, E. (2013). Availability of geogenic heavy metals in soils of Thiva town (central Greece). *Environmental Monitoring and Assessment* 185, 9603–9618.

Koptsik, G.N. (2014). Problems and prospects concerning the phytoremediation of heavy metal polluted soils: a review. *Eurasian Soil Science* 47, 923–939.

Kumar, A., Joseph, S., Tsechansky, L., Schreiter, I.J., Schuth, C., Taherysoosavi, S., Mitchell, D.R.G., Graber, E.R. (2020). Mechanistic evaluation of biochar potential for plant growth promotion and alleviation of chromium-induced phytotoxicity in *Ficus elastica*. *Chemosphere* 243, 125332.



Lattanzi, P., Aquilanti, G., Bardelli, F., Iadecola, A., Rosellini, I., Tassi, E., Pezzarossa, B., Petruzzelli, G., (2015). Spectroscopic evidence of Cr(VI) reduction in a contaminated soil by in situ treatment with whey. *Agrochimica* 59, 218-230.

Levizou, E., Zanni, A.A., Antoniadis, V. (2019). Varying concentrations of soil chromium (VI) for the exploration of tolerance thresholds and phytoremediation potential of the oregano (*Origanum vulgare*). *Environmental Science and Pollution Research* 26, 14-23.

Liu, J., Duan, C., Zhang, X., Zhu, Y., Lu, X. (2011). Potential of *Leersia hexandra* Swartz for phytoextraction of Cr from soil. *Journal of Hazardous Materials* 188, 85-91.

Mishra, S., Bharagava, R.N. (2015). Toxic and genotoxic effects of hexavalent chromium in environment and its bioremediation strategies. *Journal of Environmental Science and Health, Part C* 34.

Mishra, S., Bharagava, R.N., More, N., Yadav, A., Zainith, S., Mani, S., Chowdhary, P. (2018). Heavy metal contamination: an alarming threat to environment and human health. *Environmental Biotechnology: For Sustainable Future*, 103-125.

Mohan, D., Charles, U., Pittman, Jr. (2006). Activated carbons and lowcost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials* 137, 762-811.

Naeem, F., Khan, H. (2013). Purslane (*Portulaca oleracea* L.) as phytogetic substance-a review. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants* 19.

Nemzer, B., Al-Taher, F., Abshiru, N. (2020). Phytochemical composition and nutritional value of different plant parts in two cultivated and wild purslane (*Portulaca oleracea* L.) genotypes. *Food Chemistry* 320, 126621.

Oliveira, H. (2012). Chromium as an environmental pollutant: insights on induced plant toxicity. *Journal of Botany*, 375843.

Orcen, N., Nazarian, G., Gharibkhani, M. (2013). The responses of stomatal parameters and SPAD value in Asian Tobacco exposed to chromium. *Polish Journal of Environmental Studies* 22, 1441-1447.

Owlad, M., Aroua, M.K, Daud, W.A., Baroutian, S. (2008). Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: a review. *Water, Air, and Soil Pollution* 200, 59-77.

Pasandi, P.A., Farahbakhsh, H., Tohidinejad, E. (2021). Nitrogen, phosphorous and potassium levels affected growth indices, leaf gas exchange parameters and biomass production of henna (*Lawsonia inermis* L.) ecotypes. *Industrial Crops and Products* 163, 113297.

Petropoulos, S.A., Fernandes, A., Dias, M.I., Vasilakoglou, I.B., Petrotos, K., Barros, L., Ferreira, I. (2019). Nutritional value, chemical composition and cytotoxic properties of common purslane (*Portulaca oleracea* L.) in relation to harvesting stage and plant part. *Antioxidant Properties of Natural Products* 8, 293.

Petropoulos, S., Karkanis, A., Martins, N., Ferreira, I. (2016). Phytochemical composition and bioactive compounds of common purslane (*Portulaca oleracea* L.) as affected by crop management practices. *Trends in Food Science & Technology* 55, 1-10.

Prashanth, L., Kattapagari, K.K., Chitturi, R.T., Baddam, V.R., Prasad, L.K. (2015). A review on role of essential trace elements in health and disease. *JNTR University of Health Science* 4, 75-85.

Ranieri, E., Gikas P. (2014). Effects of plants for reduction and removal of hexavalent chromium from a contaminated soil. *Water, Air and Soil Pollution* 225, 1981.

Rashed, A.N., Afifi, F.U., Disi, A.M. (2003). Simple evaluation of the wound healing activity of a crude extract of *Portulaca oleracea* L. (growing in Jordan) in *Mus musculus* JVI-1. *Journal of Ethnopharmacology* 88, 131-136.

Sotiropoulou, D.E., Karamanos, A.J. (2010). Field studies of nitrogen application on growth and yield of Greek oregano (*Origanum vulgare* spp. *Hirtum* (Link) letsvaart). *Industrial Crops and Products* 32, 450-457.

Sundaramoorthy, P., Chidambaram, A., Unnikannan, K.P., Baskaran, L. (2010). Chromium stress in paddy: (i) Nutrient status of paddy under chromium stress; (ii) Phytoremediation of chromium by aquatic and terrestrial weeds. *Comptes Rendus Biologies* 333, 597-607.

Uddin, I., Bano, A., Masood, S. (2015). Chromium toxicity tolerance of *Solanum nigrum* L. and *Parthenium hysterophorus* L. plants with reference to ion pattern, antioxidation activity and root exudation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 113, 271-278.

Uddin, M., Juraimi, A.S., Hossain, M.S., Nahar, M., Ali, M.E., Rahman, M.M. (2014). Purslane weed (*Portulaca oleracea*): a prospective plant source of nutrition, omega-3 fatty acid, and antioxidant attributes. *The Scientific World Journal*, 951019.

Ukhurebor, K.E., Aigbe, U.O., Onyancha, R.B., Nwankwo, W., Osibote, O.A., Paumo, H.K., Ama, O.M., Adetunji, C.O., Siloko, I.U. (2021). Effect of hexavalent chromium on the environment and removal techniques: a review. *Journal of Environmental Management* 280, 111809.

Zhang, X.H., Liu, J., Huang, H.T., Chen, J., Zhu Y.N., Wang, D.Q. (2007). Chromium accumulation by the hyperaccumulator plant *Leersia hexandra* Swartz. *Chemosphere* 67, 1138–1143.

### Βιβλιογραφία από το διαδίκτυο

USDA, Natural Resources Conservation Service, plants database - plant profile, 2020.

<http://theherbgardener.blogspot.com/2014/06/how-to-identify-and-use-purslane.html>

<https://worldofsucculents.com/succulent-herbs/>