

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

Επιστήμες και Μηχανική Περιβάλλοντος



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**Αξιολόγηση του αλόφυτου *Salsola soda* ως
εναλλακτική καλλιέργεια σε υποβαθμισμένα εδάφη με
την χρήση αρδευτικού νερού υψηλής αλατότητας**

Μαρκάκης Νικόλαος

Υπεύθυνος Καθηγητής: Δρ. Μανιός Θρασύβουλος

ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

UNIVERSITY OF CRETE
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

Sciences and Environmental Engineering



Master Thesis

**Evaluation of halophyte *Salsola soda* as an alternative
crop in degraded soils using high salinity irrigation
water**

Markakis Nikolaos

Master Thesis Supervisor: Dr. Thrassyvoulos Manios

HERAKLION, OCTOBER 2018

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Αγρόκτημα του τμήματος Τεχνολόγων Γεωπόνων του ΤΕΙ Κρήτης.

ΤΕΙ Κρήτης



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό
Ίδρυμα Κρήτης

Οι εργαστηριακές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής του Τμήματος Τεχνολογίας Γεωπονίας του ΤΕΙ Κρήτης



Αφιερώνεται στα παιδιά μου Φαίη και Μιχαέλα

Εξεταστική Επιτροπή

Μανιός Θρασύβουλος

Καθηγητής, Τμήμα Τεχνολογίας Γεωπονίας ΤΕΙ Κρήτης (Επιβλέπων)

Κανακίδου Μαρία

Καθηγήτρια, Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμια Κρήτης

Περγαντής Σπύρος

Καθηγητής, Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Κρήτης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Αξιολόγηση του αλόφυτου *Salsola soda* ως εναλλακτική καλλιέργεια σε υποβαθμισμένα εδάφη με την χρήση αρδευτικού νερού υψηλής αλατότητας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος ειδίκευσης, «Επιστήμες και Μηχανική Περιβάλλοντος» που υλοποιείται από το Τμήμα Χημείας της Σχολής Θετικών και Τεχνολογικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Κρήτης σε συνεργασία με τα Τμήματα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ και Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του ΤΕΙ Κρήτης

Αφορμή για την πραγματοποίηση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας στάθηκε το ενδιαφέρον μου για τις επιπτώσεις της αλάτωσης εδαφών που βιώνουν χώρες όπως η Ελλάδα και η εμπιστοσύνη που μου έδειξαν οι καθηγητές για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Θρασύβουλο Μανιό του τμήματος Τεχνολόγων Γεωπόνων του ΑΤΕΙ Κρήτης, υπεύθυνο του Εργαστηρίου Διαχείρισης και Επεξεργασίας Στερεών Υπολειμμάτων και Υγρών Αποβλήτων, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την εκπλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τη συνεχή καθοδήγηση, την συμβολή του στην διαμόρφωση του θέματος, την εποικοδομητική κριτική του κατά την εξέλιξη της διατριβής, καθώς επίσης την πολύτιμη και συνεχή καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας. Συνεπώς, ευχαριστώ θερμά τον κ. Θρασύβουλο Μανιό, Καθηγητή του Τμήματος Τεχνολογίας Γεωπονίας του ΤΕΙ Κρήτης.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την συνεπιβλέποντα καθηγήτρια κ. Κανακίδου Μαρία, Καθηγήτρια του Τμήματος Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην εκπλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε το τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής κος. Περγαντής Σπύρος.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Πετούση Ιωάννα, για τον χρόνο που αφιέρωσε στην επιλογή και την προετοιμασία της παρούσας εργασίας.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Διαχείρισης και Επεξεργασίας Στερεών Υπολειμμάτων και Υγρών Αποβλήτων, του Τμήματος Τεχνολογίας Γεωπονίας για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για την καθοδήγηση τους κατά την διεξαγωγή των πειραματικών διεργασιών. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Φουντουλάκη Μιχάλη, για την καθοδήγηση του σε θέματα χημικών αναλύσεων, τον Δρ. Δαλιακόπουλο Γιάννη για τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας, τον κ. Σαμπαθιανάκη Γιάννη για την συμβολή του στην ανάπτυξη των φυτών στο πεδίο, τον Δασκαλάκη Γιώργο εργαστηριακό συνεργάτη, όπου κάθε στιγμή ήταν δίπλα μου για την ορθή χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού και την επιτυχή διεκπεραίωση του πειραματικού μέρους της έρευνας, και την Δρ. Μαραγκάκη Αγγελική για τις συμβουλές της κατά την συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους δικούς μου ανθρώπους, τη σύζυγο μου, για τη βοήθεια τους όλη αυτή την περίοδο.

Μαρκάκης Νικόλαος

Ηράκλειο, Οκτώβριος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε πολλές ξηρές και ημίξηρες περιοχές σε όλο τον κόσμο, τα υψηλά επίπεδα αλατότητας του εδάφους είναι αίτιο υποβάθμισής του. Η καταπολέμηση της υποβάθμισης του εδάφους και της διάβρωσης που σχετίζεται με την αλατότητα του, απαιτεί πειραματικό προσδιορισμό των φυτικών ειδών που μπορούν να αναπτυχθούν σε εδάφη με υψηλά επίπεδα αλατότητας. Σε αυτή τη μελέτη αξιολογείται η απόκριση του αλοφυτικού είδους *Salsola Soda* (κο: Αλμύρα) σε εδάφη με υψηλή αλατότητα. Η αξιολόγηση γίνεται σε διάφορα επίπεδα αλατότητας NaCl (EC: 0, 40 mM, 120 mM) και σε τρία διαφορετικά υποστρώματα: (α) τύρφη/περλίτη, (β) παράκτιο έδαφος και (γ) υποβαθμισμένο έδαφος θερμοκηπίου.

Επιπροσθέτως, διερευνάται πειραματικά η χρήση αυτών των φυτών για τη φυτοεξυγίανση εδάφους ρυπασμένου με μέταλλα καθώς έχει διαπιστωθεί ότι τα αλοφυτικά είδη μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην φυτοαποκατάσταση του εδάφους σωρεύοντας βαρέα μέταλλα στο φυτικό ιστό τους. Στην πράξη, τα φυτά που συσσωρεύουν τα μέταλλα φυτεύονται στο ρυπασμένο έδαφος και καλλιεργούνται σύμφωνα με τις συμβατικές καλλιεργητικές τεχνικές. Τα τελευταία χρόνια, έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον στη χρήση των Αλόφυτων, λόγω της ανθεκτικότητας που παρουσιάζουν σε υψηλές συγκεντρώσεις αλατότητας και βαρέων μετάλλων και συνεπώς και της προοπτικής για τη χρήση τους σε αλατούχα εδάφη που είναι πολλές φορές ρυπασμένα και με βαρέα μέταλλα. Στην παρούσα εργασία θα αξιολογήσουμε την απορρόφηση μεταλλικών ιόντων στο υπέργειο τμήμα του αλόφυτου *Salsola Soda*.

Στα πλαίσια της διπλωματική εργασίας, καλλιεργήθηκε το φυτό *Salsola Soda* για διάρκεια δύο μηνών μέσα σε θερμοκήπιο σε διαφορετικά υποστρώματα και με διαφορετικές επεμβάσεις αλατότητας. Αξιολογήθηκε η βιομάζα των φυτών, οι δείκτες της αλατότητας, τα θρεπτικά τόσο στα υποστρώματα όσο και στο φυτό, και η απορρόφηση βαρέων μετάλλων από το φυτικό ιστό.

Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι το αλόφυτο *Salsola soda*, είναι ικανό να αποκαταστήσει εδάφη με υψηλή αλατότητα και αυξημένη συγκέντρωση μετάλλων, εφόσον τα εδάφη αυτά έχουν τα απαραίτητα μακρό θρεπτικά για την ανάπτυξη των φυτών.

Λέξεις κλειδιά:

Αλόφυτο, Salsola Soda, αλατότητα, βαρέα μέταλλα, απόδοση παραγωγής,
θερμοκήπιο, φυτοαποκατάσταση εδαφών

ABSTRACT

In many dry and semi-dry areas around the world, high levels of soil salinity are a driver of degradation. Combating soil degradation and corrosion associated with its salinity requires experimental identification of plant species that can grow in soils with high levels of salinity. In this study we will evaluate the response of *Salsola Soda* (alumina) to soils with high salinity. We will evaluate the growth response of this plant species at various levels of NaCl salinity (EC: 0, 40 mM, 120 mM) and on three different substrates: (a) optimal substrate, (b) coastal soil and (c) degraded greenhouse soil.

In addition, the use of these plants for the phytoremediation, of soil contaminated with metals has been investigated and it has been found that the halophytes species can be used in soil-phytoremediation accumulation of heavy metals in their plant tissue. In practice, the plants that accumulate the metals are planted in the contaminated soil and cultivated according to conventional cultivation techniques. In recent years, there has been a growing interest in the use of Aloe Vents because of their resistance to high concentrations of salinity and heavy metals and hence the prospect of their use on saline soils that are often polluted and heavy metals. In the present study we will evaluate the absorption of metal ions in the above-ground part of *Salsola Soda* halophyte.

In the context of the thesis, *Salsola soda* was cultivated for two months in a greenhouse on different substrates and with different salinity treatments. Plant biomass, salinity indexes, nutrients in the substrates and the plant, and the absorption of metal beaks from plant tissue were evaluated.

From the results it is clear that the halophyte *Salsola soda* is capable of restoring soils with high salinity and increased concentration of metals, since these soils have the necessary macro-nutrients for the growth of the plants.

Keywords: Halophyte, *Salsola soda*, salinity, heavy metals, production yield, greenhouse, soil-phytoremediation

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... | 6 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 8 |
| ABSTRACT | 10 |
| 1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή..... | 15 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 15 |
| 1.2 Αλόφυτα | 15 |
| 1.2.1 Ανατομικά χαρακτηριστικά του φυτού..... | 18 |
| 1.2.2 Ιστορική αναδρομή..... | 20 |
| 1.2.3 Χρήσεις του φυτού | 21 |
| 1.3 Χαρακτηρισμός υποβαθμισμένων εδαφών | 21 |
| 1.3.1 Αλατούχα εδάφη (<i>Salon chak</i>)..... | 22 |
| 1.3.2 Αλκαλιωμένα (με νάτριο) εδάφη (<i>Sodic</i>)..... | 24 |
| 1.3.3 Προβλήματα αλατότητας | 24 |
| 1.3.4 Αλατότητα του νερού..... | 24 |
| 1.3.5 Ποιοτική σύσταση υφάλμυρου νερού | 25 |
| 1.3.6 Αλατότητα του Εδάφους..... | 26 |
| 1.3.7 Επίδρασης της αλάτωσης στη βλάστηση | 28 |
| 1.3.8 Μηχανισμοί ανοχής της βλάστησης στην αλάτωση..... | 30 |
| 1.4 Βαρέα μέταλλα..... | 33 |
| 1.4.1 Πηγές ρύπανσης βαρέων μετάλλων..... | 34 |
| 1.4.2 Επιπτώσεις στα φυτά από απορρόφηση βαρέων μετάλλων | 36 |
| 1.4.3 Αντιμετώπιση της καταπόνησης από βαρέα μέταλλα | 37 |
| 1.5 Μηχανισμοί φυτοεξυγίανσης εδαφών | 46 |
| 1.5.1 Φυτοσυσσώρευση..... | 47 |
| 1.5.2 Φυτοσταθεροποίηση | 51 |
| 1.5.3 Φυτοεξάτμιση | 51 |
| 1.6 Στόχοι και αντικείμενο μεταπτυχιακής διατριβής | 52 |

| | |
|--|----|
| 2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Υλικά και Μέθοδοι | 53 |
| 2.1 Περιοχή μελέτης..... | 53 |
| 2.2 Προετοιμασία και παραγωγή σποριόφυτων..... | 53 |
| 2.3 Πειραματική διάταξη..... | 55 |
| 2.4 Καλλιεργητικές φροντίδες..... | 59 |
| 2.4.1 Άρδευση φυτών..... | 60 |
| 2.4.2 Κλιματικά δεδομένα πειράματος..... | 60 |
| 2.5 Ανάπτυξη των Φυτών | 62 |
| 2.5.1 Ύψος φυτών..... | 62 |
| 2.5.2 Νωπό βάρος φυτών | 62 |
| 2.5.3 Ξηρό βάρος φυτών..... | 64 |
| 2.6 Φυσικοχημικές αναλύσεις | 64 |
| 2.6.1 Μηχανική ανάλυση εδάφους | 64 |
| 2.6.2 Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (pH)..... | 65 |
| 2.6.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα | 65 |
| 2.6.4 Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (TKN)..... | 66 |
| 2.6.5 Προσδιορισμός οργανικής ουσίας εδάφους | 66 |
| 2.6.6 Διαθέσιμος εδαφικός φώσφορος (P) | 67 |
| 2.6.7 Αφομοιώσιμο Κάλιο (K) στο έδαφος..... | 68 |
| 2.6.8 Υδατοδιαλυτό νάτριο (Na) σε υποστρώματα | 68 |
| 2.6.9 Προσδιορισμός υδροδιαλυτός Ca^{+2} , Mg^{+2} | 69 |
| 2.6.10 Ολικά θρεπτικά σε φυτικό ιστό (K, Na, P, Ca, Mg)..... | 70 |
| 2.7 Λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR) | 71 |
| 2.8 Προσδιορισμός Βαρέων μετάλλων | 72 |
| 2.8.1 Στα υποστρώματα | 72 |
| 2.8.2 Στο υπέργειο μέρος του φυτού | 73 |
| 3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Αποτελέσματα φυσικοχημικών αναλύσεων..... | 74 |
| 3.1 Βιομάζα φυτών | 74 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.1.1 | Νωπό βάρος φυτών | 74 |
| 3.1.2 | Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος φυτών..... | 76 |
| 3.1.3 | Ύψος φυτών..... | 76 |
| 3.2 | Δείκτες αλατότητας | 78 |
| 3.2.1 | pH..... | 78 |
| 3.2.2 | Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)..... | 79 |
| 3.2.3 | Νάτριο (Na) | 79 |
| 3.2.4 | Ασβέστιο, Μαγνήσιο (Ca, Mg)..... | 80 |
| 3.2.5 | Λόγος Προσρόφησης Νατρίου SAR..... | 81 |
| 3.3 | Συγκεντρώσεις μακρό-θρεπτικών στοιχείων | 82 |
| 3.3.1 | Άζωτο κατά Kjeldahl..... | 82 |
| 3.3.2 | Φώσφορος (P) | 83 |
| 3.3.3 | Κάλιο (K) | 85 |
| 3.3.4 | Οργανική ουσία/οργανικός άνθρακας..... | 87 |
| 3.4 | Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων | 88 |
| 3.4.1 | Fe..... | 88 |
| 3.4.2 | Cu, Zn | 89 |
| 3.4.3 | Pb, Ni, Cr..... | 92 |
| 4. | ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Συμπεράσματα και προτάσεις..... | 96 |
| 5. | Βιβλιογραφία | 100 |

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

SAR: Sodium Adsorption Ratio

TKN: Total Kjeldahl Nitrogen

TOC: Total Organic Carbon

EC: Electrical Conductivity

DTPA: Diethylene Triamine Pentaacetic Acid

TEA: TriEthanolAmine

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Με την ανάπτυξη της αστικοποίησης και της βιομηχανοποίησης, τα εδάφη ρυπαίνονται όλο και περισσότερο από υψηλή αλατότητα και από βαρέα μέταλλα. Η φυτοεξυγίανση είναι μια αναδυόμενη οικονομική, μη παρεμβατική και αισθητικά ευχάριστη τεχνολογία που χρησιμοποιεί την αξιοσημείωτη ικανότητα των φυτών να συγκεντρώνουν στοιχεία και μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση περιοχών ρυπασμένων με μέταλλα [1].

Σύμφωνα με την αναφορά των United Nations (2006), ο πληθυσμός της Γης αναμένεται να ξεπεράσει τα 9.5 δις έως το 2050, ενώ το 2006 βρίσκονταν στα 6.5 δις και σήμερα στα 7.5 δις [2]. Αυτή η ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση εγείρει ανησυχίες για τη δυνατότητα κάλυψης των αναγκών σε φυσικούς πόρους [3], τη στιγμή μάλιστα που η επιστημονική κοινότητα προβλέπει ένα διπλασιασμό στις ανάγκες τροφής και νερού τις επόμενες δεκαετίες [4], ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Ως εκ τούτου, ο γεωργικός τομέας οφείλει να αυξήσει την απόδοσή του, εκφρασμένη ως παραγωγή. Η επιστημονική κοινότητα σε συνεργασία με κυβερνητικούς και διακυβερνητικούς φορείς οφείλει να αναζητήσει λύσεις και να προτείνει πολιτικές που θα ενισχύσουν την βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα του παρόντος κοινωνικο-οικονομικού συστήματος και θα διασφαλίσουν την κοινωνική ευημερία. Δεδομένου της υπερεκμετάλλευσης των εδαφικών και υδάτινων πόρων, καθώς και της υψηλής χρήσης λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων, αντιμετωπίζουμε σε πολλές περιοχές προβλήματα αλατότητας εδαφών, υφαλμύρωση αρδευτικού νερού και συσσώρευση βαρέων μετάλλων στα εδάφη αυτά.

1.2 Αλόφυτα

Τα αλόφυτα είναι φυτά που φυτρώνουν και ευδοκιμούν σε αλατούχα εδάφη. Διακρίνονται σε γνήσια ή υποχρεωτικά αλόφυτα και σε προαιρετικά αλόφυτα. Τα γνήσια φυτρώνουν αποκλειστικά σε αλατούχα εδάφη και σε αλμυρά ύδατα, ενώ τα προαιρετικά ευδοκιμούν και σε εδάφη απαλλαγμένα από άλατα. [5].

Τα αλατούχα εδάφη είναι εχθρικοί βιότοποι για τα υπόλοιπα φυτά, γιατί, αν και είναι υγρά, πολλές φορές συμπεριφέρονται σαν ξηρά από φυσιολογική άποψη. Αυτό συμβαίνει γιατί το νερό που βρίσκεται μέσα σε αυτά συγκρατείται από τα ιόντα των αλάτων με ισχυρές φυσικοχημικές δυνάμεις και έτσι δεν είναι εύκολα διαθέσιμο στα φυτά. Επιπροσθέτως, τα άλατα σε μεγάλη συγκέντρωση είναι τοξικά για τα περισσότερα φυτά.

Τα κυρίως αλόφυτα ή όπως λέγονταν παλαιότερα, «υποχρεωτικά αλόφιλα» είναι σχετικά λίγα και ανήκουν σε ορισμένες οικογένειες, όπως οι ΧΗΝΟΠΟΔΙΔΕΣ, οι ΦΡΑΓΚΕΝΙΔΕΣ, οι ΠΛΟΥΜΒΑΓΙΝΙΔΕΣ, οι ΛΙΘΡΙΔΕΣ, τα ΣΥΝΘΕΤΑ, οι ΚΥΠΕΡΙΔΕΣ και οι ΑΓΡΩΣΤΙΔΕΣ. Τα είδη αυτά είναι πόες – ποώδη ή θάμνοι.

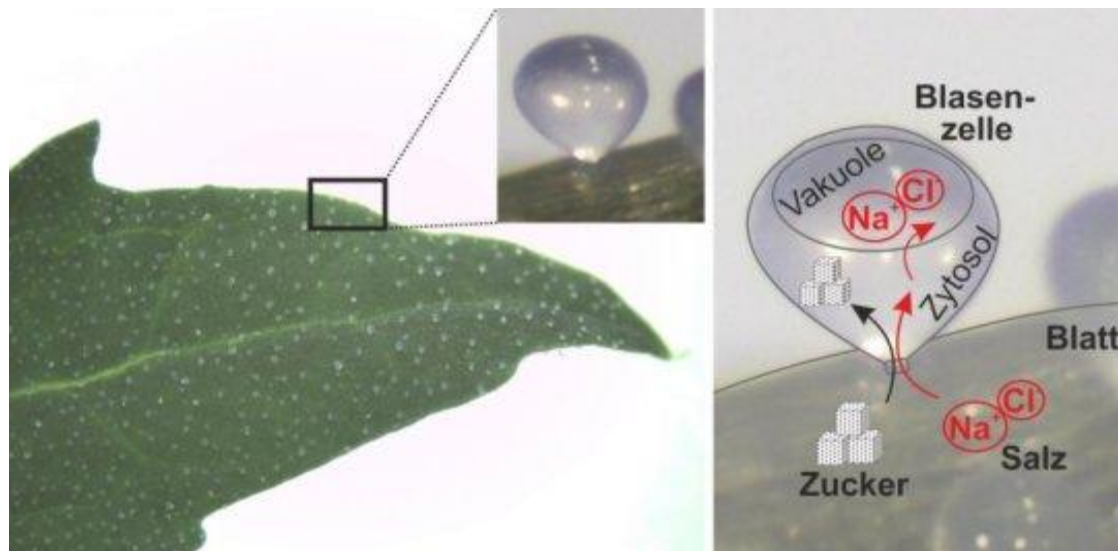
Τα γνήσια ή υποχρεωτικά αλόφυτα παρουσιάζουν ορισμένες διαφοροποιήσεις και προσαρμογές, προκειμένου να ανταπεξέλθουν στο τοξικό περιβάλλον και στη φυσιολογική ξηρασία των αλατούχων εδαφών, δηλαδή να μπορούν να αντλούν νερό από τα φυσιολογικώς ξηρά εδάφη, αλλά και να εξουδετερώνουν την τοξική υπερτονική δράση των διαφόρων αλάτων και ιόντων, τα οποία είναι διαλυμένα μέσα σε αυτά. Έτσι υπάρχει η επικρατούσα θεωρία ότι τα αλόφυτα ανυψώνουν την ωσμωτική τους πίεση αποθηκεύοντας άλατα. Όσο περισσότερο μπορεί το πρωτόπλασμα να υποφέρει άλατα, τόσο περισσότερο νερό μπορεί να απορροφήσει το φυτό. Αυτό ακριβώς συμβαίνει με τα είδη των γενών Σαλικόρνια (*Salicornia*), Αρθρόκνημον (*Arthrocnemum*) και Σουαίδα (*Suaeda*). Συγκεκριμένα, τα παραπάνω είδη αυξάνουν την ωσμωτική πίεσή τους περισσότερο από την πίεση των διαλύσεων του εδάφους, αποθηκεύοντας μέσα στον κυτταρικό χυμό τους διάφορα άλατα. Αποτέλεσμα αυτής της προσαρμογής είναι η σαρκώδης μορφή, την οποία παίρνουν τα φυτά αυτά (π.χ. κρίταμο), όπως επίσης και οι ανατομικές και μορφολογικές διαφοροποιήσεις τους. Μερικά είδη μπορούν να καταλήξουν στο ίδιο αποτέλεσμα με παραγωγή οργανικών ουσιών, δηλαδή η αύξηση της ωσμωτικής πίεσης γίνεται με συγκέντρωση οργανικών ουσιών και όχι αλάτων.

Άλλα γνήσια αλόφυτα αντιδρούν στην τοξική δράση των αλατούχων εδαφών με τους εξής τρόπους: α) ελαττώνουν την είσοδο των αλάτων, β) επιλέγουν ορισμένα μόνο ιόντα, και γ) δεν αποθηκεύουν, αν και απορροφούν, άλατα στον κυτταρικό χυμό τους, αλλά τα εκκρίνουν με πολυάριθμους αδένες (με

απέκκριση των αλάτων). Παραδείγματα τέτοιων ειδών είναι διάφορα είδη Λειμώνιου (*Limonium*), Στατικής (*Statice*), ήτοι το κοινό αμάραντο ή θαλασσόγαμπρος, και Ταμάριξ (*Tamarix*), ήτοι τα κοινά αρμυρίκια. Αυτά τα είδη φυτών δεν αποθηκεύουν τα άλατα στο χυμό τους, αλλά τα εκκρίνουν με πολλούς αδένες των βλαστών και των φύλλων, όπου και κρυσταλλώνονται και είναι εμφανή ακόμη και με γυμνό μάτι. Πράγματι, επάνω σ' αυτά τα φυτά διακρίνονται κρυσταλλωμένα επανθίσματα αλάτων, που επιδρούν και από αυτή τη θέση στην απορρόφηση του νερού από το έδαφος.



Εικόνα 1.1. Φύλλα του γένους *Limonium* με εκκρίσεις αλατιού [85]



Εικόνα 1.2. Φύλλο *Quinoa* με τυπικές κύστες αλατιού. Στα δεξιά βλέπετε το φυτό που μεταφέρει τα διαλυμένα άλατα νατρίου και χλωριούχου πρώτα στην κύστη και έπειτα στα κενοτόπιά του. Η ζάχαρη που μεταφέρεται μαζί τους παρέχει την απαραίτητη ενέργεια [86].

Εκτός από τα παραπάνω, κυρίως ή γνήσια αλόφυτα, υπάρχουν και άλλα φυτά, τα λεγόμενα «προαιρετικά αλόφυτα», που ζουν, τόσο σε αλμυρά, όσο και σε μη αλμυρά εδάφη. Αυτά τα φυτά παρουσιάζουν, σε αλατούχα εδάφη τους μηχανισμούς των αλόφυτων, κυρίως, ως προς την παραγωγή οργανικών ουσιών.

Η μορφολογία των αλόφυτων ποικίλλει. Άλλοτε τα φυτά αυτά είναι σαρκώδη (Σαλικόρνια, Κρίταμα), λόγω της αποθηκεύσεως αλάτων στο χυμό τους, και άλλοτε έχουν μορφή ξηροφύτων (Στατική).

Τα αλόφυτα δημιουργούν χαρακτηριστικές φυτοκοινωνίες σε παραλιακά αλίπεδα και αλμυρά έλη.

Τα αλόφυτα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση των αλάτων από τα αλατούχα εδάφη με σκοπό την αποκατάσταση και την επαναχρησιμοποίηση των εδαφών αυτών από καλλιεργούμενα είδη φυτών.

Κάποιοι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση αλόφυτων που υπερσυσσωρεύουν Na^+ και Cl^- για την αφαλάτωση του εδάφους. Είδη όπως τα *Suaeda maitima*, *Suaeda portulacastrum*, *Suaeda fruticosa*, *Suaeda salsa*, *Suaeda calceoliformis*, *Kalidium folium*, *Sesuvium portulacastrum*, *Arthrocnemum indicum*, *Atriplex nummularia* και *Atriplex prostrata* έχει αναφερθεί ότι συσσωρεύουν υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων στους υπέργειους ιστούς τους, συνεπάγοντας την αναβάθμιση του εδάφους με την απομάκρυνσή της φυτικής τους βιομάζας. Για τη συγκεκριμένη μέθοδο έχει προταθεί ο όρος Phytodesalination [6][7][8]. Οι Rabhi et al. (2010) [7] μελέτησαν την “φυτο-αφαλάτωση” του εδάφους με την καλλιέργεια του φυτού *Sesuvium portulacastrum* και παρατήρησαν ότι το φυτό συσσωρεύει μέχρι 872 mg ιόντα Na^+ σε κάθε φυτό (περίπου 1 τόνο / εκτάριο) μειώνοντας την αλατότητα του εδάφους.

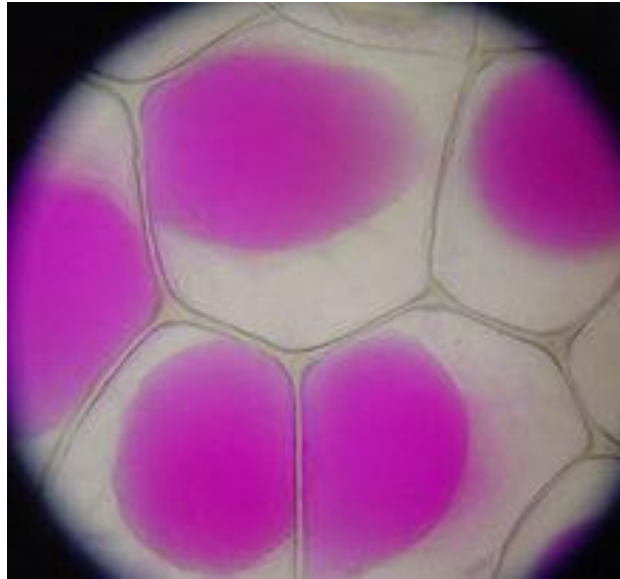
1.2.1 Ανατομικά χαρακτηριστικά του φυτού

Η *Salsola soda*, κοινώς γνωστή ως «αλμύρα» στην Ελλάδα “agretti” στην Ιταλία και “saltwort” στην Αγγλία, είναι ένας μικρός (ύψος έως 0,7 m), ετήσιος, χυμώδης θάμνος που είναι εγγενής στη λεκάνη της Μεσογείου [9]. Έχει σαρκώδη πράσινα φύλλα με πράσινα ή κόκκινα στελέχη. Τα μικροσκοπικά λουλούδια αναπτύσσονται από ταξιανθίες που εξέρχονται από τη βάση των

φύλλων κοντά στο στέλεχος [10]. Πρόκειται για ένα αλόφυτο που συνήθως αναπτύσσεται στις παράκτιες περιοχές και μπορεί να καλύπτει τις υδατικές του ανάγκες με θαλασσινό νερό.

Είναι αξιοσημείωτο ότι βρίσκουμε υψηλότερη συγκέντρωση νατρίου από ότι καλίου στους φυτικούς ιστούς του φυτού, καθώς το πρώτο στοιχείο είναι συνήθως τοξικό και το δεύτερο στοιχείο είναι απαραίτητο για τις μεταβολικές διεργασίες των φυτών. Έτσι, τα περισσότερα φυτά, και ειδικά τα περισσότερα φυτά καλλιέργειας, είναι "γλυκόφυτα" και υφίστανται ζημιά όταν φυτεύονται σε αλατούχα εδάφη [11][12]. Η *Salsola soda* και τα άλλα φυτά που καλλιεργήθηκαν παλαιότερα για την ανθρακική σόδα είναι αλογονούχα που ανέχονται πολύ περισσότερο αλατούχα εδάφη από ό, τι τα γλυκόφυτα και μπορούν να ευδοκιμούν με πολύ μεγαλύτερες πυκνότητες νατρίου στους ιστούς τους [13].

Οι βιοχημικές διεργασίες εντός των κυττάρων των αλόφυτων είναι ουσιαστικά τόσο ευαίσθητες στο νάτριο όσο και οι διεργασίες σε γλυκόφυτα. Τα ιόντα νατρίου από το εδαφικό υπόστρωμα ή από το νερό άρδευσης είναι τοξικά κυρίως επειδή παρεμβαίνουν στις βιοχημικές διεργασίες εντός των κυττάρων ενός φυτού που απαιτούν κάλιο, το οποίο είναι ένα χημικά παρόμοιο στοιχείο αλκαλικού μετάλλου [10]. Το κύτταρο ενός αλόφυτου όπως το *S. soda* έχει έναν μηχανισμό μοριακής μεταφοράς που διασυνδέει τα ιόντα νατρίου σε ένα διαμέρισμα μέσα στο φυτικό κύτταρο που ονομάζεται «κενοτόπιο». Το κενοτόπιο ενός φυτικού κυττάρου μπορεί να καταλαμβάνει το 80% του όγκου του κυττάρου. Το μεγαλύτερο μέρος του νατρίου ενός φυτού αλοφυτικών ειδών, μπορεί να απομονωθεί στο κενοτόπιο, αφήνοντας το υπόλοιπο κύτταρο με μια ανεκτή αναλογία ιόντων νατρίου προς κάλιο.



Εικόνα 1.3. Κύτταρα του φυτού *Rhoeo* αποχρωματισμένα. Η μεγάλη ροζ περιοχή σε κάθε κύτταρο είναι ένα κενοτόπιο. Το νάτριο απομονώθηκε σε κενοτόπια από κύτταρα αλοφυτικών κυττάρων. [13]

1.2.2 Ιστορική αναδρομή

Το φυτό έχει μεγάλη ιστορική σημασία ως πηγή ανθρακικού νατρίου, το οποίο εξαγόταν από τις στάχτες της *Salsola soda* και άλλων αλατούχων φυτών [14]. Το ανθρακικό νάτριο είναι μία από τις αλκαλικές ουσίες που είναι καθοριστικές για την υαλοποιία και την παρασκευή σαπουνιού. Η φημισμένη σαφήνεια του κρυσταλλικού γυαλιού του 16ου αιώνα από το Μουράνο και τη Βενετία εξαρτιόταν από την καθαρότητα της «ανθρακικού νατρίου Λεβαντινικής σόδας» [15] και η φύση αυτού του συστατικού κρατιόταν μυστική. Η Ισπανία διέθετε μια τεράστια βιομηχανία τον 18ου αιώνα που παρήγαγε ανθρακικό νάτριο από την αλμύρα [16]. Η ανθρακική σόδα είναι πλέον γνωστή ως ανθρακικό νάτριο. Το 1807, ο Sir Humphry Davy απομόνωσε ένα μεταλλικό στοιχείο από καυστική σόδα. Ονόμασε το νέο στοιχείο "νάτριο" για να δείξει τη σχέση του με το "σόδα". Προτού η σόδα γίνει κάπως συνώνυμη με τα αναψυκτικά, η λέξη αφορούσε τη *Salsola soda* και άλλα φυτά αλατιού, καθώς και τη «σόδα» που προέρχονταν από ανθρακικό νάτριο. Υψηλή συγκέντρωση ανθρακικού νατρίου στις στάχτες του φυτού *Salsola Soda* παρατηρείται εάν το φυτό καλλιεργείται σε πολύ αλατούχα εδάφη (δηλαδή σε εδάφη με υψηλή συγκέντρωση χλωριούχου νατρίου), ή εάν αρδεύεται με θαλασσινό νερό, που περιέχει περίπου 40 g/L διαλυμένο

χλωριούχο νάτριο και άλλα άλατα. Όταν καίγονται τα πλούσια σε νάτριο φυτά, το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται, αντιδρά με το νάτριο για να σχηματιστεί το ανθρακικό νάτριο.

1.2.3 Χρήσεις του φυτού

Ενώ η εποχή της καλλιέργειας ανθρακικού νατρίου έχει περάσει πολύ καιρό, η *S. soda* εξακολουθεί να καλλιεργείται ως λαχανικό που απολαμβάνει μεγάλη δημοτικότητα στην Ιταλία και σε εστιατόρια υψηλής μαγειρικής σε όλο τον κόσμο.

Η *S. soda* συλλέγεται σε δέσμες όταν είναι μικρού μεγέθους ή κόβεται τακτικά ώστε να ενθαρρύνεται η ανάπτυξη των νέων βλαστών. Μαγειρεύεται σε βραστό νερό μέχρι να μαλακώσουν τα φύλλα της και τρώγεται ως φυλλώδες λαχανικό. Επίσης, μπορεί να καταναλωθεί και ωμό.

Από τη μαγειρική του αξία, ο Frances Mayes έχει γράψει ότι "Το σπανάκι είναι η πλησιέστερη γεύση, αλλά ενώ το *agretti* (*Salsola soda*) έχει την ορुकτή οξύτητα του σπανακιού, έχει γεύση πιο ζωντανή, γεμάτη ενέργεια από την άνοιξη" [16]. Στη λαϊκή ιατρική, τα είδη *Salsola* χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για τη θεραπεία της υπέρτασης, της δυσκοιλιότητας και της φλεγμονής [17]. Αποσπασματικά τα είδη *Salsola* έχουν αξιολογηθεί για τη θεραπεία της νόσου του Alzheimer [17]. Η *Salsola soda* έχει μελετηθεί από τον Colla και ως «φυτό σύντροφος» για τις ντομάτες και τις πιπεριές σε αλατούχα εδάφη στην κεντρική Ιταλία [18]. Όταν καλλιεργηθούν ντομάτες και πιπεριές μαζί με αυτό το φυτό, η αλμύρα παίρνει αρκετό νάτριο από το έδαφος βελτιώνοντας έτσι την ανάπτυξη των φυτών καλλιέργειας. Έτσι επιτυγχάνεται καλύτερο αποτέλεσμα στις αποδόσεις των καλλιεργειών, παρά τον ανταγωνισμό των δυο φυτών για την πρόσληψη από το έδαφος των υπολοίπων αναγκαίων για την ανάπτυξή τους μετάλλων [13].

1.3 Χαρακτηρισμός υποβαθμισμένων εδαφών

Σε ξηρικές παράκτιες περιοχές, όπως αυτές της Μεσογείου, η εφαρμογή ποιοτικά υποβαθμισμένης άρδευσης εξαιτίας της υφαλμύρινσης των υδροφόρων στρωμάτων, σε συνδυασμό με την εντατική καλλιέργεια,

ενισχύουν την εδαφική αλάτωση και θέτουν σε κίνδυνο την βιωσιμότητα της καλλιεργητικής παραγωγής.

Έχει αποδειχθεί πειραματικά πως υψηλές συγκεντρώσεις νατρίου στο έδαφος και πιο συγκεκριμένα η σχέση του νατρίου με τα επίπεδα του ασβεστίου και μαγνησίου, ευθύνονται εξίσου για επιβλαβείς επιδράσεις στα φυτά με αυτές των διαλυτών αλάτων. Οι επιδράσεις αυτές αφορούν όχι μόνο τις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών αλλά και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους.

Τα εδάφη κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες λαμβάνοντας υπόψη το pH, την EC και τον δείκτη SAR:

Αλατούχα

Αλατούχα – Αλκαλιωμένα

Αλκαλιωμένα (με Νάτριο)

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των κανονικών εδαφών σε σχέση με τα αλατούχα, όξινα, αλατούχα - αλκαλιωμένα και τα αλκαλιωμένα (με Na) εδάφη.

Πίνακας 1. Κατηγορίες εδαφών σε σχέση με τα pH, EC και SAR.

| Εδάφη | pH | Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) dS m ⁻¹ | SAR |
|-------------------------|---------|--|--------|
| Κανονικά | 6.7-7.2 | <4 | <13-15 |
| Όξινα | <6.5 | <4 | <13-15 |
| Αλατούχα | <8.5 | >4 | <13-15 |
| Αλατούχα – Αλκαλιωμένα | <8.5 | >4 | >13-15 |
| Αλκαλιωμένα (με νάτριο) | >8.5 | <4 | >13-15 |

1.3.1 Αλατούχα εδάφη (*Salon chak*)

Τα αλατούχα εδάφη περιέχουν ουδέτερα διαλυτά άλατα περισσότερο από 0,5% με συνέπεια την πρόκληση βλαβών στην ανάπτυξη των περισσότερων

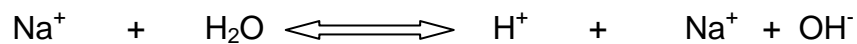
φυτών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εκχυλίσματος κορεσμού είναι μεγαλύτερη των $EC > 4 \text{ dS m}^{-1}$. Το pH είναι μικρότερο του 8,5 αφού τα άλατα είναι συνήθως ουδέτερα. Τέλος το SAR είναι μικρότερο του 13 παρά το ότι η συγκέντρωση των ιόντων νατρίου είναι σχετικά μεγαλύτερη των συγκεντρώσεων των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου. Λόγω της λευκής κρούστας λέγονται λευκά αλκαλικά (*White alkali*).

Η υψηλή συγκέντρωση αλάτων στο εδαφικό διάλυμα προκαλεί πλασμόλυση των κυττάρων των ριζών, με συνέπεια να μην κάνουν για γεωργική χρήση, παρά μόνο αφού επέλθει έκπλυση των ουδετέρων αλάτων.

Αλατούχα - Αλκαλιωμένα εδάφη (*Saline - Sodic*)

Στα εδάφη αυτά παρατηρούνται και υδατοδιαλυτά άλατα και ανταλλάξιμο νάτριο, που μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στην ανάπτυξη των φυτών. Η EC του εκχυλίσματος κορεσμού είναι $> 4 \text{ dS/m}$, το $pH < 8,5$ και τέλος το SAR είναι τουλάχιστον 13.

Τα εδάφη αυτά εκπλυνόμενα με νερό τείνουν να αυξήσουν σημαντικά το pH. καθώς τα διαλυτά ουδέτερα άλατα απομακρύνονται, το εναλλακτικό νάτριο ευκόλως υδρολύεται με αποτέλεσμα η συγκέντρωση των OH^- να αυξηθεί. Η παραπάνω πορεία φαίνεται κάτωθι:



Στερεή εδαφική φάση Εδαφικό διάλυμα Στερεή εδαφική φάση Εδαφικό διάλυμα

Όταν υπάρχουν ουδέτερα διαλυτά άλατα του νατρίου, η παραπάνω αντίδραση κινείται προς τα αριστερά, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης των OH^- στο εδαφικό διάλυμα. Στη περίπτωση αυτή το pH δεν ανεβαίνει πάνω από την τιμή $pH=8$. Στην αντίθετη περίπτωση όταν δηλαδή τα διαλυτά ουδέτερα άλατα απομακρύνονται, το pH αυξάνεται και ξεπερνούν το όριο $pH=8,5$ με αποτέλεσμα τα κolloειδή των ορυκτών της αργίλου να υποστούν διασπορά. Άμεσο επακόλουθο είναι η καταστροφή της δομής του εδάφους η οποία γίνεται συνεκτική, φράζουν οι εδαφικοί πόροι, άρα ο αερισμός τους εδάφους μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα τα τοξικά συμπτώματα από το νάτριο στα φυτά, αυξάνονται.

1.3.2 Αλκαλιωμένα (με νάτριο) εδάφη (*Sodic*)

Στα εδάφη αυτά *EC* είναι μικρότερη των 4 dS/m , το *pH* φτάνει την τιμή $\text{pH}=10$ ή και υψηλότερα. Στα αλκαλιωμένα με νάτριο εδάφη το εδαφικό διάλυμα διαφέρει στη σύνθεσή του από αυτό των αλατούχων εδαφών. Το επικρατέστερο κατιόν είναι το Na^+ . Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται όχι μόνο από το υψηλό *pH* αλλά και από την παρουσία ανθρακικών ανιόντων που δημιουργεί κατακρήμνιση του ασβεστίου και μαγνησίου με τη μορφή αδιάλυτων αλάτων του CaCO_3 και του MgCO_3 .

Το υψηλό *pH* των εν λόγω εδαφών συντελεί στη διάλυση της οργανικής ουσίας αυτών, η οποία μεταφερόμενη στην επιφάνεια με την ανοδική κίνηση του νερού, δίδει μελανούς χρωματισμούς. Γι' αυτό το λόγο τα αλκαλιωμένα αυτά εδάφη ονομάζονται και μαύρα αλκαλιωμένα (*Black alkali soils*).

1.3.3 Προβλήματα αλατότητας

Η αλάτωση των εδαφών αποτελεί μια σημαντική απειλή υποβάθμισης του εδάφους, ιδιαίτερα για τις παράκτιες περιοχές με ξηρό κλίμα, όπως αυτές της Μεσογείου.

Υπολογίζεται ότι μεταξύ του 2020 και του 2030 οι καλλιεργούμενες εκτάσεις παγκοσμίως δεν θα καλύπτουν τη ζήτηση σε τρόφιμα λόγω της μετατροπής τους σε μη χρησιμοποιήσιμες, ως απόρροια της εμφανιζόμενης αλατότητας, σε αυτές [19].

Η υψηλή αλατότητα θεωρείται ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση καλλιεργούμενων φυτών τα οποία δεν έχουν ή έχουν ελάχιστα χαρακτηριστικά αλόφυτων.

1.3.4 Αλατότητα του νερού

Τα νερά που χρησιμοποιούνται για αρδεύσεις εδαφών επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στην εξέλιξη και στη διαμόρφωση των φυσικοχημικών τους ιδιοτήτων. Όλα τα νερά περιέχουν πάντοτε ορισμένες ποσότητες διαλυτών αλάτων. Για το λόγο αυτό το νερό που χρησιμοποιείται για πότισμα θεωρείται η μεγαλύτερη πηγή αλάτων στο έδαφος. Το νερό ποτίσματος μπορεί να διαφέρει σημαντικά όσον αφορά την ποιότητα του, ανάλογα με το είδος και την ποσότητα των υδατοδιαλυτών αλάτων. Με το πότισμα, τα άλατα που

βρίσκονται στο νερό παραμένουν στο έδαφος, ενώ το νερό εξατμίζεται ή χρησιμοποιείται από τα φυτά.

Η καταλληλότητα του νερού ποτίσματος δεν χαρακτηρίζεται μόνο από τη συνολική συγκέντρωση των υδατοδιαλυτών αλάτων αλλά και από το είδος των επιμέρους ιόντων. Με την αύξηση των υδατοδιαλυτών αλάτων παρουσιάζονται διάφορα προβλήματα στα εδάφη.

Το νερό είναι το βασικό συστατικό των φυτικών ιστών. Η σημασία του για τους ζωντανούς οργανισμούς συμπεραίνεται από την περιεκτικότητα του φυτικού ιστού σε νερό, που κυμαίνεται κατά μέσο όρο γύρω στο 75-85% του νωπού τους βάρους. Το νερό χρησιμοποιείται από τα φυτικά κύτταρα ως αντιδραστήριο, κατά την φωτοσύνθεση και την αναπνοή, ως διαλύτης οργανικών και ανόργανων ουσιών, ως μέσο διασποράς των κολλοειδών ουσιών του πρωτοπλάσματος και ως μέσο μεταφοράς διαλυτών ανόργανων και οργανικών συστατικών του φυτού. Αξίζει να σημειωθεί και ο σημαντικός ρόλος του στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του φυτού ιδιαίτερα τις περιόδους υψηλών θερμοκρασιών.

1.3.5 Ποιοτική σύσταση υφάλμυρου νερού

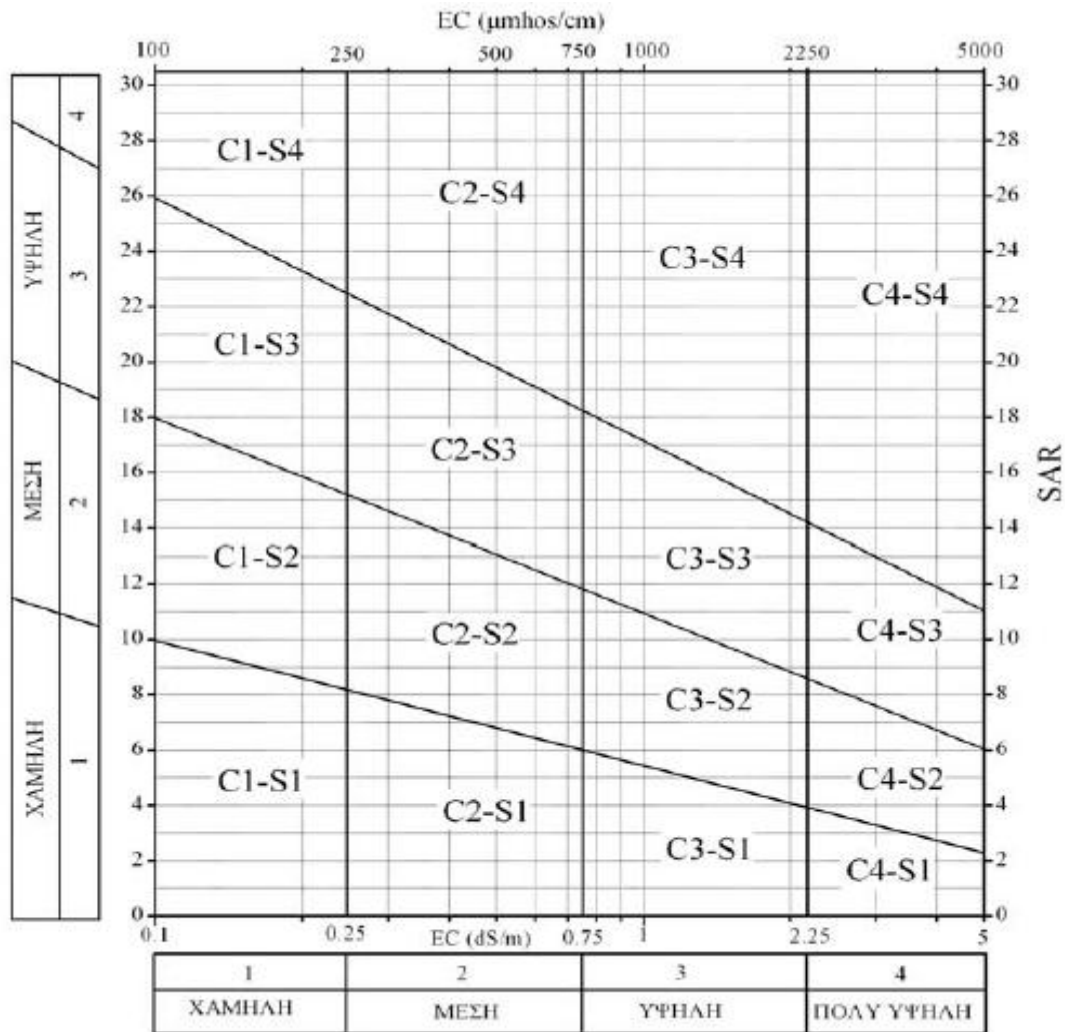
Τα νερά που χαρακτηρίζονται ως αλατούχα έχουν τις παρακάτω τιμές στους βασικούς παραμέτρους:

-Ηλεκτρική Αγωγιμότητα: 4.000-7.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ / Μέση τιμή: 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

-Συγκέντρωση NaCl: 1.500 – 2.500 mg/l

-Μέση τιμή NaCl : 2.000 mg/l = 2,0 g/m³ =0,002 kg/m³

Με βάση τους παραμέτρους EC και SAR γίνεται η ποιοτική ταξινόμηση του νερού άρδευσης σύμφωνα με το σύστημα του Αμερικανικού Υπουργείου Γεωργίας. Με βάση το σύστημα αυτό τα νερά κατατάσσονται σε 16 κατηγορίες καταλληλότητας νερού για άρδευση των καλλιεργειών όπως φαίνεται στο παρακάτω νομογράφημα.



| ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΝΕΡΟΥ | ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ |
|----------------------------------|--|
| C1-S1 | Νερό πολύ καλής ποιότητας με χαμηλή περιεκτικότητα σε άλατα. Κατάλληλο |
| C1-S2 C2-S1 | Νερό καλής ποιότητας. Κατάλληλο για άρδευση με εξαίρεση ευαίσθητα φυτά στα άλατα ή εδάφη με κακή στράγγιση. |
| C2-S2 C1-S3 C3-S1 | Νερό μέσης ποιότητας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση με περιορισμούς |
| C1-S4 C2-S3 C3-S2 C4-S1 | Νερό μέσης προς κακής ποιότητας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ανθεκτικές σε άλατα καλλιέργειες και σε στραγγιζόμενα εδάφη. |
| C2-S4, C4-S2 C3-S3 | Νερό κακής ποιότητας. Δεν συνιστάται η χρήση του. Παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αυστηρούς περιορισμούς σε καλά στραγγιζόμενα εδάφη και φυτά ανθεκτικά στα άλατα. Κίνδυνος αύξησης της αλατότητας του εδάφους. Συνιστάται περιοδική έκπλυση των αλάτων. |
| C3-C4, C4-S3 | Νερό κακής ποιότητας. Δεν συνιστάται η χρήση του. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση κάτω από αυστηρούς περιορισμούς |
| C4-S4 | Νερό πολύ κακής ποιότητας. Η εφαρμογή του για άρδευση καθίσταται απαγορευτική |

Εικόνα 1.4. Κατηγορίες καταλληλότητας νερού για άρδευση καλλιεργειών.

1.3.6 Αλατότητα του Εδάφους

Αλατούχα εδάφη (saline soils) θεωρούνται τα εδάφη εκείνα που έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα εδαφικού διαλύματος, EC_e , μεγαλύτερη από 4 dS m^{-1} . Τέτοια εδάφη προκαλούν πολλά προβλήματα στις καλλιέργειες και χρειάζονται βελτίωση. Σύμφωνα με εκτιμήσεις 2 - 5% των καλλιεργούμενων

εδαφών της Ελλάδας υποφέρουν από υποβαθμίσεις που έχουν προκληθεί από την αλατότητα. Τα αλατούχα εδάφη έχουν συνήθως μια χαρακτηριστική λευκή επίστρωση στην επιφάνειά τους, που οφείλεται στη συσσώρευση αλάτων.

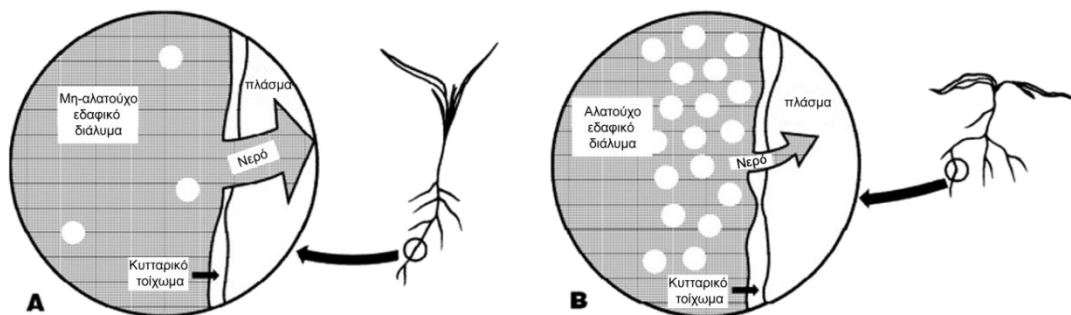
Η αλάτωση αποτελεί ένα σημαντικό κίνδυνο για την ποιότητα των εδαφών που υποβαθμίζει την αγροτική παραγωγή, την εδαφική γονιμότητα και την ποιότητα των υδατικών πόρων. Σε ξηρικές παράκτιες περιοχές, όπως αυτές της Μεσογείου, η εφαρμογή ποιοτικά υποβαθμισμένης άρδευσης εξαιτίας της υφαλμύρινσης των υδροφόρων στρωμάτων σε συνδυασμό με την εντατική καλλιέργεια ενισχύουν την εδαφική αλάτωση και θέτουν σε κίνδυνο την βιωσιμότητα της καλλιεργητικής παραγωγής. Επιπλέον, οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες άρδευσης, ενώ η κλιματική αλλαγή δύναται να προκαλέσει επιπλέον αύξηση των αρδευτικών αναγκών, λόγω αύξησης της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας [21].

Για την αξιολόγηση της αλάτωσης του εδάφους χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις δείκτες ποιότητας. Ο πρώτος δείκτης όπως προαναφέραμε είναι η EC, η οποία αποτελεί μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να άγει ηλεκτρικά φορτία και στα εδάφη εκφράζει την παρουσία των ολικών διαλυτών στερεών. Ο δεύτερος δείκτης είναι ο λόγος προσρόφησης νατρίου (Sodium Adsorption Ratio, SAR) που προσδιορίζει την αναλογία των κατιόντων Na^+ προς το άθροισμα των ωφέλιμων ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} και καθορίζει τα αλκαλιωμένα εδάφη και τέλος το pH που αφορά και τα αλατούχα και τα αλκαλιωμένα εδάφη [20].

Η υψηλή αλατότητα μπορεί να διαταράξει την πρόσληψη καλίου και θρεπτικών από τα φυτά, εξαιτίας των παρεμφερών φυσικοχημικών ιδιοτήτων των ιόντων K^+ και Na^+ και του συνακόλουθου ανταγωνισμού τους, για τις θέσεις προσρόφησης στα σωματίδια του χώματος, για τους μεμβρανικούς υποδοχείς, μεταφορείς, διαύλους και εξαιτίας της ευαισθησίας στο Na^+ ενζύμων του κυτταροπλάσματος [22]. Ένδειξη καταπόνησης ενός φυτού λόγω αλατότητας είναι οι αυξημένες συγκεντρώσεις Na^+ και Cl^- στους φυτικούς ιστούς του, συνοδευόμενες από αντίστοιχες μειωμένες για το K^+ [23].

1.3.7 Επίδρασης της αλάτωσης στη βλάστηση

Οι κυριότερες επιδράσεις της εδαφικής αλάτωσης στη βλάστηση είναι δύο: η ωσμωτική επίδραση και η ειδική τοξικότητα ιόντων [24]. Συχνά παρατηρούνται και φαινόμενα τροφοπενίας εξαιτίας του αυξημένου pH. Προκειμένου ένα φυτό να αντλήσει νερό από την εδαφική υγρασία, πρέπει να ξεπεράσει το ολικό δυναμικό του εδαφικού νερού (total soil water potential), που απαρτίζεται από το βαρυτικό δυναμικό (gravitational potential), το δυναμικό της εδαφικής μήτρας (matrix potential) και το ωσμωτικό δυναμικό (osmotic potential), καθώς και το υδροστατικό δυναμικό (hydrostatic potential) στην περίπτωση κορεσμένης ζώνης [24]. Η κίνηση του νερού λαμβάνει χώρα από τα υψηλά στα χαμηλά δυναμικά.



Εικόνα 1.5. (Α) Τα φυτά προσλαμβάνουν εύκολα νερό από υγιή εδάφη, (Β) Η αλάτωση του εδάφους υπό ξηρές συνθήκες μειώνει το ωσμωτικό φορτίο με αποτέλεσμα την δυσκολία πρόσληψης νερού από τα φυτά.

Το ωσμωτικό δυναμικό οφείλεται στην ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ των πολικών μορίων του νερού και ανόργανων ή οργανικών διαλυμένων ουσιών, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ελευθερίας κίνησης των μορίων του νερού και τη μείωση της δυναμικής ενέργειάς του [25]. Η αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στην εδαφική διάλυση, μειώνει το δυναμικό του νερού και περιορίζει την δυνατότητα πρόσληψης νερού, από το ριζικό σύστημα διαμέσου της ημι-περατής κυτταρικής μεμβράνης. Έτσι, τα φυτά δαπανούν τη διαθέσιμη ενέργεια τους στην απόκτηση του απαραίτητου νερού, αναστέλλοντας την ανάπτυξη τους [26]. Υπό πολύ υψηλές συνθήκες αλατότητας το ωσμωτικό δυναμικό μπορεί να είναι τόσο χαμηλό ώστε να

προκαλέσει τη λύση του κυτταρικού σπαργού σε σπορόφυτα, λόγω της κίνησης του νερού από τα κύτταρα στο έδαφος [25]. Τα περισσότερα φυτά, και ιδιαίτερα εκείνα με υψηλή γεωργική σημασία, βιώνουν την εδαφική αλατότητα ως ένα ωσμωτικό στρες, που προστίθεται στο ενδεχόμενο στρες λόγω ελλειμματικής υγρασίας και παρουσιάζουν συμπτώματα ίδια με αυτά της ξηρασίας [26]. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν την καχεκτική εμφάνιση και την αργή ανάπτυξη ή ακόμα και την παύση της ανάπτυξης ενώ οδηγούν στην απώλεια παραγωγής και την μείωση της παραγόμενης ξηρής μάζας [27].

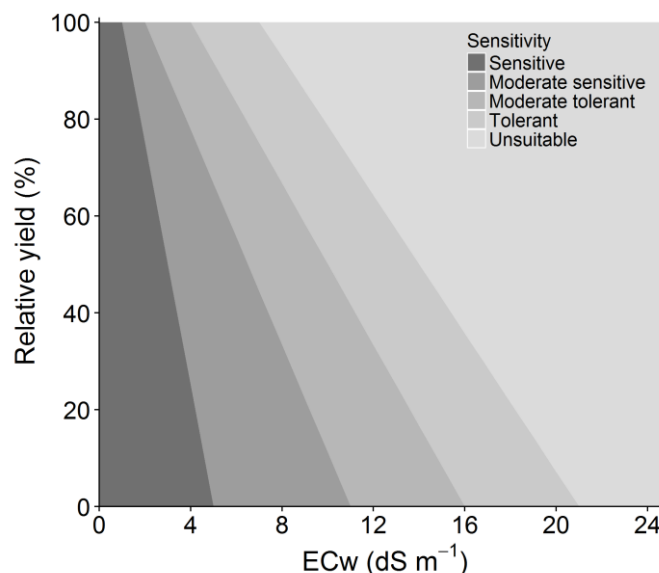
Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται στην ευαισθησία ορισμένων φυτών, κυρίως ξυλώδης βλάστησης [27], στην αύξηση της συγκέντρωσης συγκεκριμένων ιόντων, όπως το Na, το χλώριο (Cl) και το βόριο (B) στους φυτικούς ιστούς [25]. Η παρουσία των αλάτων στους φυτικούς ιστούς οφείλεται στην παθητική είσοδο τους στο ρεύμα διαπνοής με συνέπεια τη συσσώρευση τους στα φύλλα. Όταν η συγκέντρωση ενός ιόντος στα φύλλα φτάσει σε τοξικά επίπεδα για την εύρυθμη λειτουργία ενός φυτού, τότε δύναται να εμφανιστούν συμπτώματα, όπως μαύρισμα στις άκρες ή μερική νέκρωση των φύλλων τους ή ακόμα και πτώση και αποφύλλωση του φυτού και κατά συνέπεια περαιτέρω μείωση του ρυθμού ανάπτυξης [27].

Η ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών [27]. Τα υποβαθμισμένα από αλάτωση εδάφη συχνά παρουσιάζουν τιμές pH μεγαλύτερες του 7 με αποτέλεσμα διάφορα ιχνοστοιχεία, όπως ο σίδηρος (Fe), ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn) και το μαγγάνιο (Mn), να μην είναι διαλυτά και διαθέσιμα για πρόσληψη από τα φυτά. Επιπρόσθετα, η αυξημένη παρουσία του Na μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της πρόσληψης άλλων κατιόντων, όπως συμβαίνει με το απαραίτητο θρεπτικό κάλιο (K) λόγω του ανταγωνισμού κατά τη διεργασία της μεταφοράς διάμεσων της κυτταρικής μεμβράνης. Τέλος, η ανάπτυξη των φυτών σε αλατούχα εδάφη συχνά περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα του φωσφόρου (P), καθώς οι αυξημένες συγκεντρώσεις Ca και Mg μειώνουν τη διαλυτότητα των ορυκτών που περιέχουν P, μέσω της δράσης του κοινού ιόντος (Common Ion Effect, CIE). Σημειώνεται ότι η παρουσία του Ca δύναται να περιορίσει τη διαθεσιμότητα του P, ακόμα και όταν λαμβάνει χώρα

προσθήκη P μέσω χημικής λίπανσης, λόγω του σχηματισμού των μη διαλυτών ενώσεων φωσφορικού ασβεστίου, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

1.3.8 Μηχανισμοί ανοχής της βλάστησης στην αλάτωση

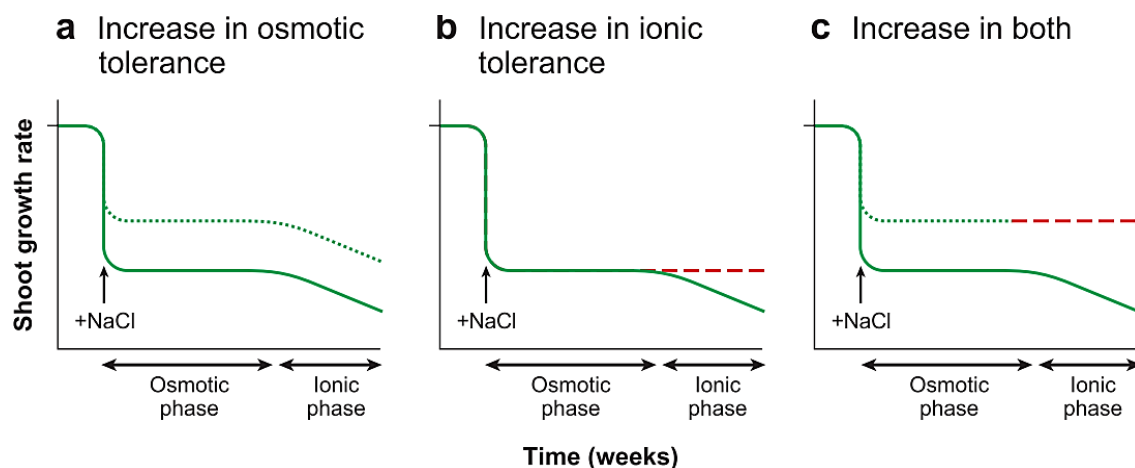
Η ανθεκτικότητα της βλάστησης σε συνθήκες υψηλής αλατότητας ορίζεται ως η ικανότητα του φυτού να επιβιώνει και να παράγει οικονομικά αποδεκτή σοδειά [27] και διαφέρει σε μεγάλο βαθμό ανάμεσα στα διάφορα γένη, αλλά και μεταξύ των διαφορετικών ειδών του ίδιου γένους [28]. Οι Maas & Hoffman (1977) παρατήρησαν ότι τα φυτά δεν αντιδρούν στην αύξηση της εδαφικής αλατότητας, έως ότου αυτή ξεπεράσει ένα κατώφλι ανοχής [29]. Το κατώφλι αυτό εξαρτάται από το είδος και την ποικιλία του φυτού, ενώ η αύξηση της αλατότητας πάνω από το όριο οδηγεί σε σταδιακή απώλεια παραγωγής έως και την νέκρωση του φυτού [27]. Στην Εικόνα παρουσιάζεται η μεταβολή της σχετικής απόδοσης της καλλιέργειας ως συνάρτηση της εδαφικής αλατότητας εκφρασμένη σε EC_{se} και της ποιότητας άρδευσης εκφρασμένη σε EC_{w} για τις διάφορες κατηγορίες ευαισθησίας φυτών [30]. Οι ευαίσθητες καλλιέργειες παρουσιάζουν απότομη πτώση της απόδοσης ακόμα και για $\text{EC}_{\text{se}} < 4 \text{ dS m}^{-1}$, ενώ οι πιο ανθεκτικές δεν επηρεάζονται ούτε σε έντονες συνθήκες αλατότητας ($\text{EC}_{\text{se}} > 10 \text{ dS m}^{-1}$).



Εικόνα 1.6. Κατηγοριοποίηση σχετική απόδοση καλλιέργεια συναρτήσει EC_{w} σύμφωνα με την ευαισθησία της καλλιέργειας. Οι καλλιέργειες διακρίνονται σε ευαίσθητες (sensitive), μέτρια ευαίσθητες (moderately sensitive), μέτρια

ανθεκτικές (moderately tolerant) και ανθεκτικές (tolerant), όπως παρουσιάζονται από τα αριστερά στα δεξιά [30].

Το ωσμωτικό στρες και η επίδραση του ειδικού ιόντος, που αποτελούν τους δύο κύριους μηχανισμούς επίδρασης της αλάτωσης, παρουσιάζουν μια χρονική διάκριση στην εμφάνιση τους. Το ωσμωτικό στρες οφείλεται στην παρουσία των αλάτων στο έδαφος και εμφανίζεται αμέσως μετά την αύξηση της εδαφικής αλατότητας σε τιμές ίσες με 40 mM ή ισοδύναμα 4.0 dS m^{-1} , για τα περισσότερα φυτά. Αντίθετα, η επίδραση του ειδικού ιόντος οφείλεται στην παρουσία αλάτων στους φυτικούς ιστούς και παρουσιάζεται μετά από εβδομάδες ή μήνες ανάλογα με το είδος του φυτού. Η χρονική διάκριση των μηχανισμών επίδρασης στο ρυθμό βλαστικής ανάπτυξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.7 [28]. Για τον περιορισμό των αρνητικών επιδράσεων της εδαφικής αλατότητας στην ανάπτυξη της βλάστησης, οι φυτικοί οργανισμοί αναπτύσσουν άμυνες, που διαφέρουν ανάλογα με τον μηχανισμό αλάτωσης που τους προσβάλλει. Έτσι, ένας φυτικός οργανισμός μπορεί να παρουσιάζει αυξημένη ανθεκτικότητα στο ωσμωτικό στρες ή στην επίδραση των ειδικών ιόντων ή και στους δύο μηχανισμούς επίδρασης της αλάτωσης, με αποτέλεσμα τη διατήρηση του ρυθμού ανάπτυξης του, υπό συνθήκες εδαφικής αλατότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.7.



Εικόνα 1.7. Ποιοτική απόκριση ρυθμού βλαστικής ανάπτυξης στην αλάτωση συναρτήσει του χρόνου, με διάκριση των δυο φάσεων/μηχανισμών επίδρασης και επίδραση φυτικής ανθεκτικότητας σε κάθε μηχανισμό [28].

Οι φυτικοί οργανισμοί παρουσιάζουν τρεις βασικές στρατηγικές απόκρισης στην εδαφική αλατότητα [28]. Η πρώτη στρατηγική ανθεκτικότητας βασίζεται στη μείωση του απαιτούμενου νερού για την επιβίωση του φυτού με συνέπεια να μη δαπανάται η διαθέσιμη ενέργεια του φυτού στην πρόσληψη νερού. Η στρατηγική αυτή αντισταθμίζει της αρνητικές συνέπειες του ωσμωτικού στρες και επιτυγχάνεται μέσω της αναστολής της ανάπτυξης των φύλλων και το κλείσιμο των στομάτων ώστε να μειωθεί η διαπνοή. Ιδιαίτερο ρόλο στην υλοποίηση του μηχανισμού αυτού παρουσιάζει η διαταραχή της υδατικής ισορροπίας μεταξύ εδάφους και φυτού [31], καθώς και η δράση διάφορων ορμονών, όπως το αποκοπτικό οξύ (Abscisic acid, ABA) και το γιββερελλικό οξύ (Gibberellic acid, GA), που παραγόμενες στο ριζικό σύστημα καθορίζουν το ρυθμό ανάπτυξης των φύλλων και την αγωγιμότητα των στομάτων υπό συνθήκες αβιοτικού στρες [32][33].

Οι άλλες δύο στρατηγικές ανθεκτικότητας αποσκοπούν στην ενίσχυση του φυτού απέναντι στην επίδραση του ειδικού ιόντος. Πιο συγκεκριμένα, η δεύτερη στρατηγική βασίζεται στον αποκλεισμό του Na από το ριζικό σύστημα και ως εκ τούτου την καθυστέρηση της συσσώρευσης του ειδικού ιόντος στο φύλλωμα και οι βιοχημικές διεργασίες της φωτοσύνθεσης πραγματοποιούνται ανεμπόδιστες. Εάν το φυτό επιτυγχάνει τον αποκλεισμό του 98% των αλάτων της εδαφικής διάλυσης, τότε η συγκέντρωση στο εσωτερικό των φυτών δεν πρόκειται να υπερβεί αυτήν του εδάφους και επομένως δεν θα διαταραχθεί η λειτουργία του [26].

Ο τρίτος μηχανισμός οφείλεται στην ανθεκτικότητα των ιστών του φυτού απέναντι σε συγκεκριμένα ιόντα, όπως το Na και το Cl και επιτυγχάνεται με τη διαμερισματοποίηση των τοξικών ιόντων τόσο σε διακυτταρικό όσο και κυτταρικό επίπεδο [28]. Διακυτταρική διαμερισματοποίηση πραγματοποιείται στα φύλλα με το Na να συσσωρεύεται στα εξωτερικά κύτταρα και όχι στα μεσόφυλλα, όπου περιέχεται η χλωροφύλλη και πραγματοποιείται η φωτοσύνθεση. Εσωτερικά των κυττάρων, αυξημένη συγκέντρωση αλάτων στο κυτόπλασμα προκαλεί τοξικότητα και παρεμποδίζει τη δράση των περισσότερων ενζύμων, ενώ η συσσώρευση αλάτων στα κυτταρικά τοιχώματα οδηγεί σε αφυδάτωση και λύση του κυττάρου. Στο εσωτερικό των

κυττάρων, η διαμερισματοποίηση επιτυγχάνεται με τη συσσώρευση των αλάτων στα κενοτόπια [34][35].

Η συνεισφορά των τριών αυτών μηχανισμών στην επιβίωση του φυτού σε περιβάλλον αλάτωσης διαφέρει μεταξύ των ειδών αλλά και των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν, όπως το επίπεδο της εδαφικής υγρασίας, της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας και το χρόνο και της έκθεσης στην εδαφική αλάτωση.

1.4 Βαρέα μέταλλα

Ο όρος «βαρέα μέταλλα» χρησιμοποιείται συχνά ως όνομα ομάδας για τα μέταλλα και τα ημιμέταλλα που έχουν συνδεθεί με τη μόλυνση και την πιθανή τοξικότητα ή την οικοτοξικότητα. Είναι επικίνδυνα στη μορφή των κατιόντων τους και όταν είναι συνδεδεμένα με μικρές αλυσίδες ατόμων άνθρακα. Ο βαθμός τοξικότητας των μετάλλων ποικίλλει πολύ από μέταλλο σε μέταλλο και από οργανισμό σε οργανισμό. Ιδιότητες του εδάφους, όπως η ικανότητα κατιοντοανταλλαγής, το pH, η μικροχλωρίδα, επηρεάζουν έντονα τόσο την πρόσληψη ενός μετάλλου από το φυτό όσο και τον τελικό βαθμό τοξικότητάς του.

Τα βαρέα μέταλλα είναι στοιχεία τα οποία παραμένουν σταθερά στο περιβάλλον και συσσωρεύονται εύκολα σε τοξικά επίπεδα.

Βαρέα μέταλλα, όπως Zn, Mn, Ni και Cu είναι απαραίτητα μικροστοιχεία για τα φυτά. Τα φυτά προσλαμβάνουν και συσσωρεύουν μικρές ποσότητες αυτών των στοιχείων (< 10ppm), ώστε να καλύπτουν τις μεταβολικές τους ανάγκες. Αντίθετα, οι υπερσυσσωρευτές μπορεί να προσλάβουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες (χιλιάδες ppm).

Η πρόσληψη των ευκίνητων ιόντων από το εδαφικό διάλυμα εξαρτάται κυρίως από τη συνολική ποσότητα των ιόντων στο έδαφος και από την προσροφητική ικανότητα του ριζικού συστήματος όπως, επίσης, και από τη διαπερατότητα και την ευαισθησία των κυτταρικών μεμβρανών του κάθε οργανισμού [36].

Επιπλέον, η παρουσία οργανικής ουσίας στο έδαφος μειώνει τη διαθεσιμότητα των μετάλλων επειδή τα προσροφά και τα απομακρύνει από το εδαφικό διάλυμα.

Η πρόσληψη των μετάλλων από τις ρίζες μπορεί να είναι είτε ενεργητική είτε παθητική. Η ενεργητική πρόσληψη λαμβάνει χώρα εξαιτίας της διαφοράς συγκέντρωσης του μετάλλου, απαιτεί δαπάνη ενέργειας η οποία προέρχεται από το μεταβολισμό του φυτού [36]. Η παθητική πρόσληψη περιλαμβάνει τη διάχυση των ιόντων από το εδαφικό διάλυμα στην ενδοδερμίδα των ριζών. Επιπλέον, ο μηχανισμός πρόσληψης σχετίζεται με το είδος του [36].

Ο ρυθμός και η έκταση της μετακίνησης εξαρτώνται από το είδος του μετάλλου και του ίδιου του φυτού. Τα στοιχεία Mn, Zn, Cd, B, Mo και Se πιστεύεται ότι μεταφέρονται εύκολα μέσα στο φυτό, τα Ni, Co και Cu θεωρείται ότι μετακινούνται μέτρια, ενώ τα Cr, Pb και Hg μετακινούνται σε μικρό βαθμό. Το Mn υπάρχει κυρίως ως ελεύθερο ιόν. Το Ni και ο Zn απαντώνται σε ανιονικά συμπλέγματα, ενώ ο Cu σε οργανικά συμπλέγματα με αμινοξέα ή σε άλλες ανιονικές μορφές [36].

1.4.1 Πηγές ρύπανσης βαρέων μετάλλων

Η ρύπανση λόγω των βαρέων μετάλλων είναι ένας από τους σοβαρότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Τα μέταλλα που βρίσκονται στο έδαφος προέρχονται από φυσικές και από ανθρωπογενείς πηγές [37]. Τα τελευταία χρόνια το παγκόσμιο ενδιαφέρον για το είδος αυτό της ρύπανσης έχει αυξηθεί καθώς παρατηρείται δραματική αύξηση των βαρέων μετάλλων, εξαιτίας ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, στα οικοσυστήματα μέσω του αέρα, του ύδατος, και του εδάφους.

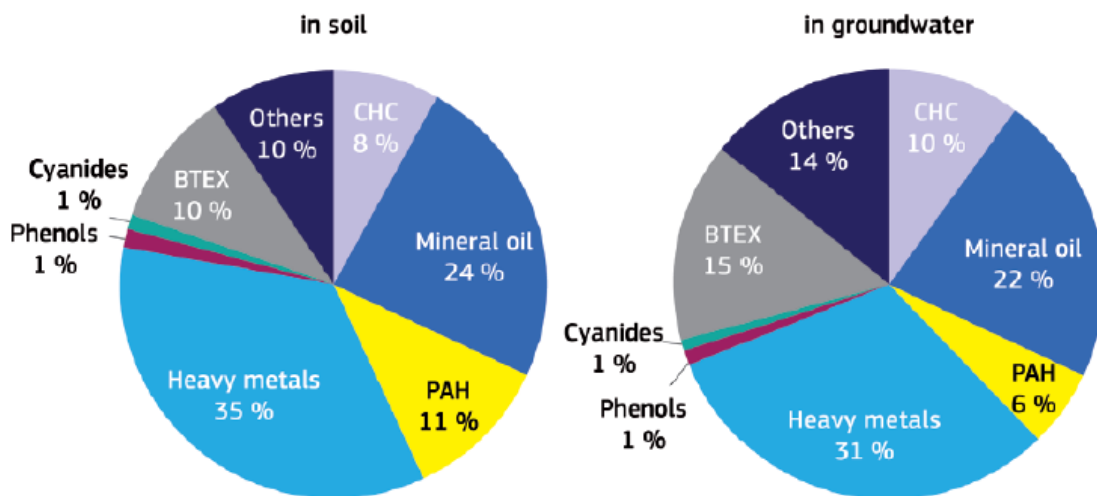
Όπως αναφέρετε σε έρευνες τις οποίες συγκεντρώνουν οι Orcutt & Nilsen, μία από τις σημαντικότερες φυσικές πηγές είναι το μητρικό πέτρωμα. Άλλες φυσικές πηγές βαρέων μετάλλων είναι τα αέρια που παράγονται, κατά τις εκρήξεις των ηφαιστειών και τις πυρκαγιές των δασών, καθώς και οι αποθέσεις των μαζών σκόνης που μεταφέρονται από την Σαχάρα σε άλλες περιοχές.

Από την αρχή όμως της βιομηχανικής επανάστασης, η ρύπανση του εδάφους με τοξικά μέταλλα αυξήθηκε δραματικά. Περίπου το 90% των ανθρωπογενών εκπομπών βαρέων μετάλλων συνέβησαν από το 1900 και έπειτα και είναι πλέον γνωστό ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες οδηγούν σε σημαντική συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος σε παγκόσμια κλίμακα [38]. Οι

μεταλλευτικές δραστηριότητες μεταφέρουν μέταλλα στο περιβάλλον είτε κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας των μεταλλευμάτων είτε με τη ρύπανση των νερών και του εδάφους από τη διάβρωση και την απορροή των υπολειμμάτων των μεταλλείων ή με την μεταφορά της σκόνης που παράγεται. Άλλες βιομηχανικές πηγές βαρέων μετάλλων αποτελούν η παραγωγή και επεξεργασία πλαστικού και υφασμάτων, τα ηλεκτρονικά συστήματα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, η συντήρηση της ξυλείας, η επεξεργασία του χαρτιού και τα διυλιστήρια. Επίσης βαρέα μέταλλα απελευθερώνονται στο περιβάλλον κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, από τα καυσαέρια των οχημάτων, κατά την αποτέφρωση των στερεών απορριμμάτων, από την τριβή των λάστιχων των οχημάτων, από τη διάβρωση γαλβανισμένων μετάλλων, από τους μεταλλικούς πυλώνες και τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικές ποσότητες μετάλλων αποτίθενται στο έδαφος και κατά τις αγροτικές δραστηριότητες είτε κατά τη χρήση λιπασμάτων και ιδιαίτερα των φωσφορικών λιπασμάτων ή εδαφοβελτιωτικών, είτε κατά τη χρήση λυματολάσπης ως λίπασμα, κατά τη χρήση του νερού άρδευσης όταν αυτό περιέχει βαρέα μέταλλα, ή την χρήση των εντομοκτόνων και των μυκητοκτόνων [36][37][68].

Στην Ελλάδα, όπως και αλλού, ρύπανση με βαρέα μέταλλα εμφανίζεται κυρίως στις αστικές περιοχές, λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως η συχνή κυκλοφορία οχημάτων, οι βιομηχανικές δραστηριότητες, η διάθεση των στερεών και υγρών αποβλήτων, η παραγωγή ενέργειας, οι κατασκευές κ.τ.λ. Εμφανίζεται όμως και σε αγροτικές περιοχές λόγω της χρήσης διάφορων αγροχημικών (εντομοκτόνων και λιπασμάτων) [39].

Most frequently applied occurring contaminants



Σχήμα 1.1. Οι κύριες κατηγορίες ρύπων στο έδαφος και στα υπόγεια νερά. Στοιχεία: Ευρωπαϊκή Επιτροπή Περιβάλλοντος, 2011.

1.4.2 Επιπτώσεις στα φυτά από απορρόφηση βαρέων μετάλλων

Στις ρίζες των φυτών για παράδειγμα, το Cd ανταγωνίζεται την απορρόφηση ιχνοστοιχείων, κυρίως αυτών με τα οποία έχει κοινές χημικές ιδιότητες όπως τα Ca^{2+} και Mg^{2+} , προκαλώντας έτσι έλλειμμα ιχνοστοιχείων στα φυτά [40]. Έχουν αναφερθεί μειωμένες συγκεντρώσεις K, Ca και Mg στους ιστούς φυτών τομάτας και αγγουριού εξαιτίας υψηλών συγκεντρώσεων Cd στο έδαφος [41].

Η παρουσία των βαρέων μετάλλων δεν γίνεται ανεκτή μέσα σε ένα φυτό και έτσι γεννιούνται αντιδράσεις κατά τις οποίες παράγονται τοξικές ελεύθερες ρίζες οι οποίες τροποποιούν το δυναμικό της κυτταρικής μεμβράνης και τις δραστηριότητες των ενζύμων [42][43].

Όταν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων συσσωρεύονται μέσα σε ένα φυτό προκαλούν κυτταρικό θάνατο επειδή καταστρέφουν καταλυτικά ανενεργά τα κυτταρικά ένζυμα [44]. Οι υψηλές συγκεντρώσεις των απαραίτητων και μη στοιχείων οδηγούν σε φυτοτοξικότητα. Οι μηχανισμοί τοξικότητας των μεταλλικών ιόντων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες. Τα μεταλλικά ιόντα:

1. Αντικαθιστούν άλλα, απαραίτητα μεταλλικά ιόντα από τις βιολογικά λειτουργικές μονάδες.

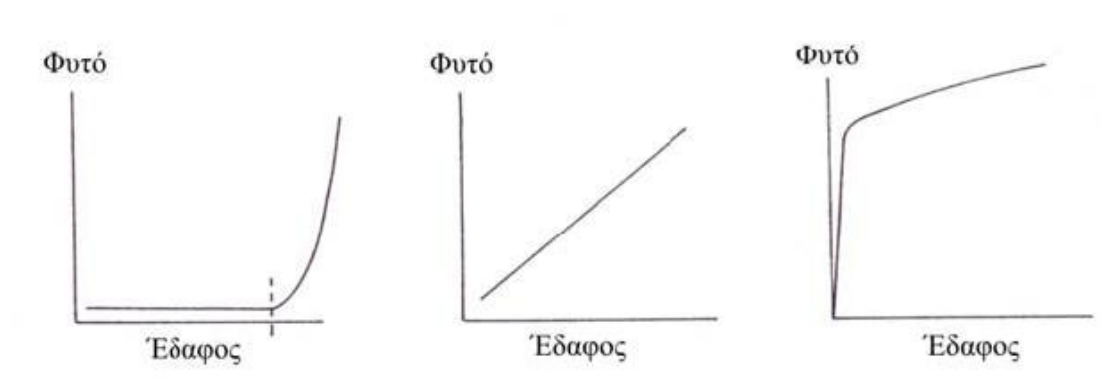
2. Εμποδίζουν απαραίτητες λειτουργικές ομάδες, συμπεριλαμβανομένων των ενζύμων και των πολυνουκλεοτιδίων.

3. Μεταβάλλουν και διαταράσσουν την ενεργή δομή βιομορίων, κυρίως ενζύμων και πολυνουκλεοτιδίων.

1.4.3 Αντιμετώπιση της καταπόνησης από βαρέα μέταλλα

Με βάση τους διάφορους μηχανισμούς αντοχής που έχουν αναπτύξει τα φυτά στα βαρέα μέταλλα διακρίνονται τρεις βασικοί τύποι αντίδρασης: α) η στρατηγική του αποκλεισμού-εξαίρεσης, στην οποία η συγκέντρωση του μετάλλου στους ιστούς διατηρείται σε ένα σταθερό, χαμηλό επίπεδο, μέχρις ότου η συγκέντρωσή του στο έδαφος φτάσει ένα κρίσιμο σημείο, πέρα από το οποίο αρχίζει η τοξική δράση και ακολουθεί η χωρίς περιορισμούς μεταφορά του μετάλλου μέσα στο φυτό. Τα φυτά που ακολουθούν αυτήν τη στρατηγική περιορίζουν τη μεταφορά των μετάλλων στους βλαστούς, όσο υψηλές και αν είναι οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στο περιβάλλον και στις ρίζες, β) η στρατηγική των δεικτών, κατά την οποία η πρόσληψη και μεταφορά του μετάλλου στους βλαστούς είναι ελεγχόμενη ή επικρατεί παθητική πρόσληψη, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση του μετάλλου στο φυτό να αντικατοπτρίζει τη συγκέντρωσή του στο έδαφος, και γ) η στρατηγική της συσσώρευσης, στην οποία το μέταλλο συγκεντρώνεται εξ αρχής ενεργά στους φυτικούς ιστούς οποιαδήποτε και αν είναι η συγκέντρωσή του στο έδαφος (βιοσυσσωρεύει)

Εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.8. Οι τρεις βασικές στρατηγικές πρόσληψης των μετάλλων από τα φυτά σε σχέση με τη συγκέντρωση του υποστρώματος. Οι συγκεντρώσεις στα φυτά αναφέρονται στο υπέργειο τμήμα τους [44].

Έτσι οι κυτταρικοί μηχανισμοί ανάπτυξης - ανεκτικότητας των φυτών απέναντι στα μέταλλα διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη, που είναι η πιο διαδεδομένη, επιχειρείται από το φυτό να κρατηθεί χαμηλά η συγκέντρωση του τοξικού μεταλλικού ιόντος στο κυτταρόπλασμα (μηχανισμός αποφυγής, avoidance) με το να αποτρέπεται να περάσει το μέταλλο μέσα από την κυτταρική μεμβράνη, είτε μέσω της ισχυρότερης πρόσδεσης των μεταλλικών ιόντων στο κυτταρικό τοίχωμα, είτε μέσω τροποποιημένων καναλιών ιόντων ή ακόμα και με εξώθηση του μετάλλου έξω από το κύτταρο με τη χρήση αντλιών ενεργητικής εκροής [45]. Στη δεύτερη κατηγορία μηχανισμών, τα ιόντα των τοξικών μετάλλων αποτοξικοποιούνται αφού εισέλθουν στο κυτταρόπλασμα (μηχανισμός ανθεκτικότητας), είτε μέσω εξάλειψης της δραστηότητάς τους μετά από χηλική συμπλοκοποίηση ή μέσω της μετατροπής τους σε ιόντα που επιδέχονται ευκολότερο χειρισμό ή και μέσω της κατάτμησής τους [46].

Διαφορετικά αμινοξέα όπως η ιστιδίνη και καρβοξυλικά οξέα όπως το κιτρικό, τα οποία εκκρίνονται από τις ρίζες με σκοπό να δεσμεύσουν και να αποτοξικοποιήσουν τα βαρέα μέταλλα στο χώμα, συμβάλλουν στην ανάπτυξη ανοχής των φυτών απέναντι στα βαρέα μέταλλα [40].

Το αμυντικό σύστημα ενός φυτού ανταποκρίνεται στην καταπόνηση από την παρουσία βαρέων μετάλλων τροποποιώντας τη ρύθμιση των ορμονών του μέσω ενεργοποίησης μηχανισμών αποτοξικοποίησης και διαμερισματοποίησης, ρύθμισης του οξειδοαναγωγικού δυναμικού και αναπλήρωσης βασικών θρεπτικών ουσιών [40].

Όταν τα μέταλλα βρίσκονται στα υπέργεια τμήματα του φυτού μετακινούνται και αποθηκεύονται σε περιοχές, όπως το κυτταρόπλασμα και το χυμοτόπιο, έτσι ώστε το μέταλλο να μην έχει επίδραση στις ζωτικές λειτουργίες του κυττάρου. Τα προσληφθέντα μεταλλικά ιόντα μετά την κατανομή τους στα τριχώματα του φυτού και τα κυτταρικά τοιχώματα των φυτικών κυττάρων αποτοξικοποιούνται μέσω της πρόσδεσής τους και χηλικής συμπλοκοποίησής τους με χαμηλού μοριακού βάρους οργανικά συστατικά (Low Molecular Weight Organic Compounds ή LMWOC) όπως οι μεταλλοθειονίνες (MTs), οι PCs (οικογένεια πεπτιδίων πλούσιων σε μερκαπτάνες, που πρωτοεπισημάνθηκαν στη μαγιά), η γλουταθειόνη, η ιστιδίνη και κάποια

οργανικά οξέα και αμινοξέα και της ακόλουθης αφομοίωσής τους στα χυμοτόπια ως μέταλλο-οργανικά σύμπλοκα [46].

Εξαιτίας της υψηλής τοξικότητας των μετάλλων όταν αυτά βρίσκονται σε υψηλές ενδοκυτταρικές συγκεντρώσεις, τα φυτά καταλύουν οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις με σκοπό να μετατρέψουν τα μεταλλικά ιόντα σε μη τοξικές μορφές τους μετά από αλλαγή της χημικής τους δομής και έτσι να καταστεί εφικτή η συσσώρευσή τους, όπως συμβαίνει με την αναγωγή του As^{5+} σε As^{3+} στο *B. juncea*, αν και πολλά από τα βαρέα μέταλλα όπως τα Pb, Zn και Cd δεν υφίστανται σε διαφορετικές οξειδωτικές καταστάσεις.

Πιστεύεται ότι το κύριο σημείο αποθήκευσης μετάλλων μέσα στο κύτταρο είναι τα χυμοτόπια και ότι η διαμερισματοποίηση των μετάλλων μέσα στα χυμοτόπια αποτελεί ένα ακόμα μέρος του μηχανισμού ανοχής του φυτού υπερσυσσωρευτή μετάλλων [45][46].

Σίδηρος (Fe)

Ο σίδηρος είναι ένα θρεπτικό στοιχείο το οποίο είναι απαραίτητο για τη λειτουργία των φυτών. Πολλές από τις ζωτικής σημασίας λειτουργίες του φυτού, όπως η παραγωγή ενζύμων και χλωροφύλλης, η δέσμευση του αζώτου καθώς και η ανάπτυξη και ο μεταβολισμός των φυτών, όλες εξαρτώνται από την παρουσία του σιδήρου.

Όταν το pH είναι μεγαλύτερο του 7 περιορίζεται η δυνατότητα των φυτών να απορροφήσουν σίδηρο από το έδαφος.

Υψηλή περιεκτικότητα αργίλου στο έδαφος συνεπάγεται και έλλειψη οργανικής ουσίας στο έδαφος. Η οργανική ουσία περιέχει διάφορα θρεπτικά στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα για την πρόσληψη του σιδήρου.

Ο σίδηρος απορροφάται από τα φυτά ως δισθενής Fe^{+2} , ως τρισθενής Fe^{+3} και ως οργανικό σύμπλοκο, μολονότι η δισθενής μορφή του είναι η πιο κινητική και διαθέσιμη για να χρησιμοποιηθεί στις μεταβολικές διεργασίες του φυτού.

Στα όξινα εδάφη βρίσκεται με τη μορφή του δισθενούς σιδήρου που είναι και η αφομοιώσιμη ενώ στα ουδέτερα και αλκαλικά με τη μορφή Fe^{+3} που είναι η αδιάλυτη και ελάχιστα αφομοιώσιμη.

Ο σίδηρος σπάνια απουσιάζει από τα εδάφη. Η τροφοπενίες σιδήρου σχετίζονται με το pH του εδάφους καθώς η διαθεσιμότητα του σιδήρου μειώνεται πολύ σε εδάφη με pH μεγαλύτερο του 6,5. Ο σίδηρος είναι δυσκίνητο στοιχείο μέσα στο φυτό, γι' αυτό το λόγο οι τροφοπενίες παρουσιάζονται πρωτίστως στα νεαρά φύλα του φυτού.

Ο σίδηρος παίζει σημαντικό ρόλο σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις στο φυτό, γιατί μπορεί να πάρει ή να δώσει ηλεκτρόνια, ανάλογα με το δυναμικό οξειδοαναγωγής των αντιδρώντων συστατικών. Η μετακίνηση ηλεκτρονίων μεταξύ των οργανικών μορίων και του σιδήρου καθορίζει το δυναμικό πολλών ενζυμικών διαδικασιών, στις οποίες ο σίδηρος είναι απαραίτητος. Μερικά από τα ένζυμα αυτά μετέχουν στη σύνθεση της χλωροφύλλης και όταν υπάρχει έλλειψη σιδήρου, η παραγωγή της μειώνεται.

Χαλκός (Cu)

Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σημαντικά και απαραίτητα στοιχεία, τόσο για τα φυτά όσο και για τα ζώα. Ενώσεις του Cu χρησιμοποιούνται σαν μυκητοκτόνα, εντομοκτόνα, συντηρητικά ξύλου, στο γαλβάνισμα, στη βιομηχανία βαφής κ.α. Λιπάσματα, ζωοτροφές και φαρμακευτικά προϊόντα μπορεί επίσης να περιέχουν ενώσεις του μετάλλου. Στη φύση ο χαλκός σχηματίζει κυρίως σουλφίδια, από τα οποία ελευθερώνεται σε όξινο περιβάλλον, θεικές ενώσεις και ανθρακικά άλατα.

Ο χαλκός συχνά συσσωρεύεται σε επιφανειακούς ορίζοντες και το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων που οφείλεται κυρίως στην βιοσυσσώρευσή του και σε έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα.

Ο χαλκός σε χαμηλές συγκεντρώσεις είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη των φυτών, αλλά και την υγεία των ζώων και του ανθρώπου. Ορισμένα είδη φυτών έχουν την ιδιότητα να συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες χαλκού στους ιστούς τους.

Επειδή η απομάκρυνσή του από το έδαφος εξαιτίας της έκπλυσης είναι μηδαμινή, η προσθήκη ποσοτήτων χαλκού στο έδαφος οδηγεί στη δημιουργία υψηλών συγκεντρώσεων με αποτέλεσμα να εμφανίζονται τοξικά συμπτώματα στα φύλα. Η προσθήκη ποσοτήτων χαλκού στο έδαφος έχει μακροχρόνια

αποτελέσματα. Διαπιστώθηκε ότι τα αποθέματα χαλκού που προέρχονται από τα λιπάσματα διατηρούνται σε αυτό για χρονικό διάστημα 10 ετών.

Ο χαλκός βρίσκεται στο έδαφος με τις παρακάτω μορφές:

Υδατοδιαλυτά ιόντα του μετάλλου, καθώς και ανόργανα και οργανικά σύμπλοκα του στο εδαφικό διάλυμα (HCO_2^-), ανταλλάξιμος χαλκός, όπου ενώσεις συγκρατούνται στην επιφάνεια της στερεής φάσης του εδάφους (CuCO_3), σταθερά οργανικά σύμπλοκα με την οργανική ουσία (Cu^{2+}), προσροφημένος στα οξειδία του σιδήρου, μαγγανίου και αργιλίου (Cu-O-Fe), (Cu-O-Mn), (Cu-O-Al), προσροφημένος στα κolloειδή σωματίδια της αργίλου ή των χουμικών οξέων (Cu(OH)_2), χαλκός που είναι δεσμευμένος στο κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών του εδάφους (CuO).

Τα ορυκτά του εδάφους έχουν τη δυνατότητα να προσροφούν ιόντα χαλκού (Cu^{2+} και CuOH^+) από υδατικά διαλύματα, ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο που διαθέτουν το οποίο ελέγχεται από την τιμή του pH.

Ο σχηματισμός σύμπλοκων μεταξύ του χαλκού και της οργανικής ουσίας του εδάφους είναι η σπουδαιότερη διεργασία που συμβαίνει στα έδαφος. Μεγάλος αριθμός οργανικών ενώσεων έχει την ικανότητα να δημιουργεί τόσο ευδιάλυτα, όσο και αδιάλυτα σύμπλοκα, κυρίως με τα ιόντα χαλκού.

Ψευδάργυρος (Zn)

Ο ψευδάργυρος είναι απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο σε μικρές ποσότητες. Είναι ένα μεταλλικό στοιχείο (ιχνοστοιχείο) που βρίσκεται σε σχεδόν κάθε κύτταρο. Ο ψευδάργυρος ενεργεί ως καταλύτης, αλλά και ως δομικό συστατικό, σε μεγάλο αριθμό ενζύμων τα οποία συμμετέχουν στο μεταβολισμό των οργανισμών. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις όμως είναι τοξικός για τα φυτά.

Σε σχέση με τα άλλα μικροστοιχεία, ο ψευδάργυρος απαντάται στα βιολογικά συστήματα σε υψηλές συγκεντρώσεις. Οι διαλυτές μορφές του Zn είναι άμεσα διαθέσιμες για τα φυτά, ενώ η πρόσληψη του θεωρείται ότι αποτελεί γραμμική συνάρτηση της συγκέντρωσής του στο έδαφος. Το στοιχείο αυτό χαρακτηρίζεται από μέτρια έως υψηλή κινητικότητα μέσα στο φυτό, συχνά όμως το ριζικό σύστημα περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα Zn από ότι ο βλαστός.

Σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα, ο Zn μεταφέρεται από τις ρίζες συσσωρευόμενος στα υπέργεια τμήματα του φυτού.

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε για τον Zn τα εξής:

Το ποσοστό του υδατοδιαλυτού Zn αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού της οργανικής ουσίας του εδάφους και η συμπεριφορά του καθορίζεται από την τιμή το pH του εδαφικού διαλύματος.

Σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις φωσφόρου ελαττώνεται η διαθεσιμότητα και η πρόσληψη του Zn από τα φυτά. Μεταξύ του φωσφόρου και του ψευδαργύρου αναπτύσσονται έντονα ανταγωνιστικά φαινόμενα.

Όταν οι συγκεντρώσεις των στοιχείων σιδήρου, χαλκού, αζώτου και ασβεστίου είναι υψηλές δημιουργούν ανταγωνιστική δράση με τον Zn με αποτέλεσμα τη μείωση ικανότητας των φυτών να προσλαμβάνουν Zn.

Ο Zn εμφανίζεται με τις εξής μορφές στο έδαφος:

Υδατοδιαλυτός (ZnO), ανταλλάξιμος ($ZnCl^+$), συμπλοκοποιημένες μορφές ψευδαργύρου που δημιουργούν σύμπλοκες ενώσεις με οργανικούς υποκατάστατες και ενώσεις του μετάλλου που είναι προσροφημένες στην οργανική ουσία ($ZnCO_3$). Ακόμα μπορεί να βρίσκεται προσροφημένος από τα ορυκτά της αργίλου ($Zn(OH)_2$) και σε μητρικά πετρώματα ($ZnHCO_3^+$).

Μόλυβδος (Pb)

Ο μόλυβδος δεν είναι ευκίνητο στοιχείο στο έδαφος διότι καθιζάνει σχηματίζοντας άλατα με φωσφορικά και θειικά ($Pb(OH)_2$), $PbSO_4$, $Pb_4O(PO_4)_2$. Είναι το λιγότερο διαλυτό από τα βαρέα μέταλλα. Συσσωρεύεται κυρίως στην επιφάνεια του εδάφους και εισέρχεται στα φυτά μέσω των ριζών. Η διαθεσιμότητα του μόλυβδου στο έδαφος επηρεάζεται από το pH και συγκεκριμένα μειώνεται με την αύξηση του pH στο έδαφος [47]. Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα κανάλια εισόδου γι' αυτόν και ακόμη δεν είναι σαφής ο μηχανισμός εισόδου στο φυτό. Από τη στιγμή όμως που εισέρχεται στις ρίζες, ο μόλυβδος συσσωρεύεται κυρίως σ' αυτές διότι προσδένεται στις καρβοξυλικές ομάδες του γλυκουρονικού και του γαλακτουρονικού οξέος στα κυτταρικά τοιχώματα και μόνο ένα μικρό ποσοστό (περίπου 3%) μετακινείται στους βλαστούς [48][49]. Για να κινηθεί χρησιμοποιεί κυρίως τα κανάλια του

ασβεστίου και μπορεί να συσσωρεύεται κοντά στην ενδοδερμίδα ή στους ιστούς του φλοιώματος, πράγμα που σημαίνει ότι ο μόλυβδος μετακινείται διαμέσου του ξυλήματος στα φύλλα και επιστρέφει στο φλοιώμα, στο κυρίως σώμα του φυτού [50].

Ο μόλυβδος φαίνεται να ανταγωνίζεται το ασβέστιο στη σύνδεσή του με διάφορες πρωτεΐνες, όπως η καλμοδουλίνη, οι οποίες λειτουργούν ως ανιχνευτές και σταθεροποιητές των ποσοστών του ασβεστίου. Ο Pb υποκαθιστά το ασβέστιο σε αυτές τις πρωτεΐνες διαταράσσοντας την ομοιόσταση του ασβεστίου στο κύτταρο, πράγμα που σημαίνει ότι τα μιτοχόνδρια πλήττονται άμεσα, όπως και η κυτταρική μεμβράνη, την οποία σταθεροποιεί το ασβέστιο [51].

Επίσης, ο μόλυβδος επιδρά στη φωτοσυνθετική διεργασία των φυτών. Η μείωση της φωτοσύνθεσης των φύλλων από το μόλυβδο μπορεί να οφείλεται σε κλείσιμο των στομάτων των φύλλων, σε διατάραξη των χλωροπλαστικών λειτουργιών λόγω υποκατάστασης των απαραίτητων ιόντων, όπως Mg^{2+} , Mn^{2+} από Pb^{2+} στους χλωροπλάστες. Η υποκατάσταση του κεντρικού ατόμου της χλωροφύλλης, του Mg^{2+} , αποτρέπει τη δέσμευση του φωτός και ουσιαστικά αναστέλλει τη φωτοσυνθετική λειτουργία [52].

Ακόμη, η τοξικότητα του μόλυβδου σχετίζεται με μείωση της πρόσληψης και μεταφοράς απαραίτητων μακρο και μικροστοιχείων, όπως Ca, Fe, Mg, Mn, P και Zn, λόγω κατάληψης των θέσεων δέσμευσης ιόντων στα κανάλια μεταφοράς των θρεπτικών συστατικών [53].

Νικέλιο (Ni)

Το μέταλλο αυτό θεωρείται σήμερα απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών. Είναι δομικό στοιχείο ορισμένων ενζύμων, μεταξύ αυτών της ουρεάσης που είναι σημαντική για τον μεταβολισμό του αζώτου στα φυτά [54]. Με τη βοήθεια της ουρεάσης τα φυτά μπορούν και μετατρέπουν την ουρία σε αμμωνιακό ιόν (NH_4^+) και το χρησιμοποιούν ως πηγή αζώτου. Οι συγκεντρώσεις Ni στο έδαφος κυμαίνονται από 0,7-259,0 mg/kg, με μέση τιμή τα 24,0 mg/kg. [55].

Η μεγάλη κινητικότητα και βιοδιαθεσιμότητα το νικελίου σε σχέση με τα άλλα μέταλλα, αποτελούν συχνά αντικείμενο έρευνας. Το Ni απορροφάται εύκολα

από όλα σχεδόν τα είδη φυτών. Θεωρείται ότι σε όξινα εδάφη (pH 4,2-6,7) το νικέλιο είναι «ευκίνητο» ενώ σε αλκαλικά (pH έως 7,8) το νικέλιο είναι σχεδόν ακινητοποιημένο.

Σχετικά με το ρόλο της οργανικής ουσίας σε σχέση με την απορρόφηση του μετάλλου αναφέρεται ότι η ανθεκτικότητα των φυτών-«υπερσυσσωρευτών» στο νικέλιο κυρίως επιτυγχάνεται με τη συμπλοκοποίηση του με οργανικές ενώσεις.

Το νικέλιο απαντάται στα εδάφη με διάφορες μορφές. Η μορφή του νικελίου είναι η πιθανότερη στερεά φάση που μπορεί να κατακρημνιστεί στα εδάφη. Τα σουλφίδια του νικελίου μπορούν να επηρεάσουν τη συγκέντρωση του στο εδαφικό διάλυμα, σε όξινες και αναγωγικές συνθήκες. Σε οξειδωτικές συνθήκες και όξινα εδάφη, τα κύρια χημικά είδη του νικελίου είναι Ni^{2+} , το $NiSO_4$, το $NiHC_3^+$, και οργανικά σύμπλοκα. Σε αλκαλικά εδάφη αναμένονται τα $NiCO_3$, Ni^{2+} και $NiB(OH)_4^+$.

Ευδιάλυτες ενώσεις Ni προσλαμβάνονται από τα φυτά παθητικά μέσω ενός συστήματος μεταφοράς κατιόντων, ενώ χηλικές ενώσεις Ni προσλαμβάνονται μέσω ενεργητικής διαδικασίας με τη βοήθεια των περμεασών. Το Ni μεταφέρεται εύκολα στα διάφορα τμήματα των φυτών μέσω της ξυλώδους μοίρας πιθανότατα ως σύμπλοκο με οργανικά οξέα όπως το κιτρικό ή με αμινοξέα όπως η ιστιδίνη σε pH>6,5 [56].

Χρώμιο (Cr)

Το χρώμιο είναι ένα στοιχείο τοξικό και μη αναγκαίο για τα φυτά. Συνεπώς τα φυτά δεν διαθέτουν ειδικούς μηχανισμούς για την πρόσληψή του, η οποία γίνεται μέσω μεταφορέων, που χρησιμοποιούνται για τη πρόσληψη αναγκαίων για τα φυτά μέταλλα. Οι τοξικές επιπτώσεις του χρωμίου εξαρτώνται από το σθένος του, το οποίο καθορίζει και την πρόσληψη, τη μετακίνηση και τη συσσώρευση του στοιχείου.

Το χρώμιο συνήθως κατακρατείται στα χυμοτόπια και στα κυτταρικά τοιχώματα των ριζικών κυττάρων παρουσιάζοντας συνεπώς μικρή κινητικότητα μέσα στο φυτό [57]. Εντούτοις, έχουν αναφερθεί αυξημένες

συγκεντρώσεις στα φύλλα φυτών που αναπτύσσονται σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις [58].

Το εξασθενές χρώμιο που είναι συνήθως συνδεδεμένο με οξυγόνο (με τη μορφή χρωμικών CrO_4^{2-} ή διχρωμικών $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) είναι πολύ πιο τοξικό και ευκίνητο από το τρισθενές, το οποίο είναι κυρίως συνδεδεμένο με οργανικό υλικό στο έδαφος. Συνηθισμένα ιόντα είναι επίσης και τα $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$.

Και το εξασθενές και το τρισθενές χρώμιο εισέρχονται στα ριζικά κύτταρα, όπου το Cr^{6+} ανάγεται σε Cr^{3+} , και συσσωρεύεται στο φλοιό [59]. Η κινητικότητά του στους φυτικούς ιστούς καθίσταται περιορισμένη λόγω της τάσης του τρισθενούς χρωμίου να προσδένεται στα κυτταρικά τοιχώματα [60]. Έτσι, λιγότερο από το 1% του χρωμίου που συσσωρεύεται στις ρίζες μετακινείται προς τους βλαστούς [60].

Οι συνήθειες περιεκτικότητες των ξηρών φυτικών ιστών σε χρώμιο κυμαίνονται από 0,02 ως 0,20 ppm. Η παρουσία του χρωμίου φαίνεται να προκαλεί μείωση στην πρόσληψη απαραίτητων θρεπτικών, όπως το Κ και τον Ρ [61]. Τα όρια για τις επιτρεπτές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε εδάφη και υπέργειο μέρος των φυτών εμφανίζονται στους Πίνακες 2 και 3. Στον Πίνακα 3 φαίνεται η διακύμανση των συγκεντρώσεων των μακρό και μικρό στοιχείων στους φυτικούς ιστούς.

Πίνακας 2. Οριακές επιτρεπτές τιμές συγκεντρώσεων κάποιων βαρέων μετάλλων στο έδαφος, στην Ελλάδα (αφορούν έδαφος με pH=6 έως 7). Πηγή: ΦΕΚ 641/7.8.1991

| Παράμετρος | Οριακές τιμές (mg kg^{-1} ξηράς ουσίας εδάφους με pH = 6-7) |
|------------|--|
| Cd | 1-3 |
| Cu | 50-140 |
| Ni | 30-75 |
| Pb | 50-300 |
| Zn | 150-300 |
| Hg | 1.0-1.5 |
| Cr | - |

Πίνακας 3.: Εύρος μάκρο και μικροστοιχείων στο υπέργειο μέρος των φυτών.

Πηγή: Μιχαλοπούλου Χ. (2004)

| Στοιχείο | Συγκέντρωση |
|-----------------|--------------------|
| N (%) | 1.0 – 6.0 |
| P (%) | 0.2 - 0.5 |
| K (%) | 1.5 -4.0 |
| Ca (%) | 0.8 - 1.5 |
| Mg (%) | 0.1 - 0.5 |
| Fe (ppm) | 70 - 120 |
| Cu (ppm) | 10 – 20 |
| Zn (ppm) | 30 - 80 |
| Pb (ppm) | 0.1 – 10.0 |
| Cr (ppm) | 0.02 - 0.20 |

1.5 Μηχανισμοί φυτοεξυγίανσης εδαφών

Η φυτοεξυγίανση αποτελεί μια τεχνολογία εξυγίανσης, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί παράλληλα ή και σε αντικατάσταση των συμβατικών μηχανικών μεθόδων απορρύπανσης εδαφών [62].

Με τον όρο φυτοεξυγίανση εννοούμε ομάδα τεχνολογιών οι οποίες χρησιμοποιούν τα φυτά και τους σχετιζόμενους με αυτά μικροοργανισμούς, για να απομακρύνουν, μειώσουν, διασπύσουν ή ακινητοποιήσουν τις τοξικές ουσίες με στόχο την αποκατάσταση του εδάφους του νερού ή του αέρα μίας περιοχής σε επίπεδο ώστε να μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί [63].

Πρόκειται για *in situ* τεχνολογία που αξιοποιεί τις έμφυτες ιδιότητες των φυτών και χρησιμοποιείται για να μειώσει τη συγκέντρωση, την κινητικότητα ή την τοξικότητα του εκάστοτε ρύπου, ο οποίος μπορεί να βρίσκεται στο έδαφος, σε υπόγειο υδροφόρα ή άλλο ρυπασμένο μέσο (United States Environmental Protection Agency, 2000).

Η πρώτη πρόταση χρήσης φυτών για επεξεργασία υγρών αποβλήτων συναντάται πριν 300 περίπου χρόνια. Ακολούθησε ένας αριθμός από ευρήματα και διαπιστώσεις ότι υπάρχουν φυτά κατάλληλα για χρήση με σκοπό την εξυγίανση, έως το 1977, οπότε παρουσιάστηκαν ευρήματα από τον Robert Brooks του πανεπιστημίου Massey της Νέας Ζηλανδίας. Το 1991

πραγματοποιήθηκε η πρώτη εφαρμογή φυτοεξυγίανσης στο πεδίο με σκοπό την εξαγωγή ποσοτήτων Cd και Zn από το έδαφος, οπότε έκτοτε η φυτοεξυγίανση ξεκίνησε να εφαρμόζεται σε υπολογίσιμη κλίμακα.

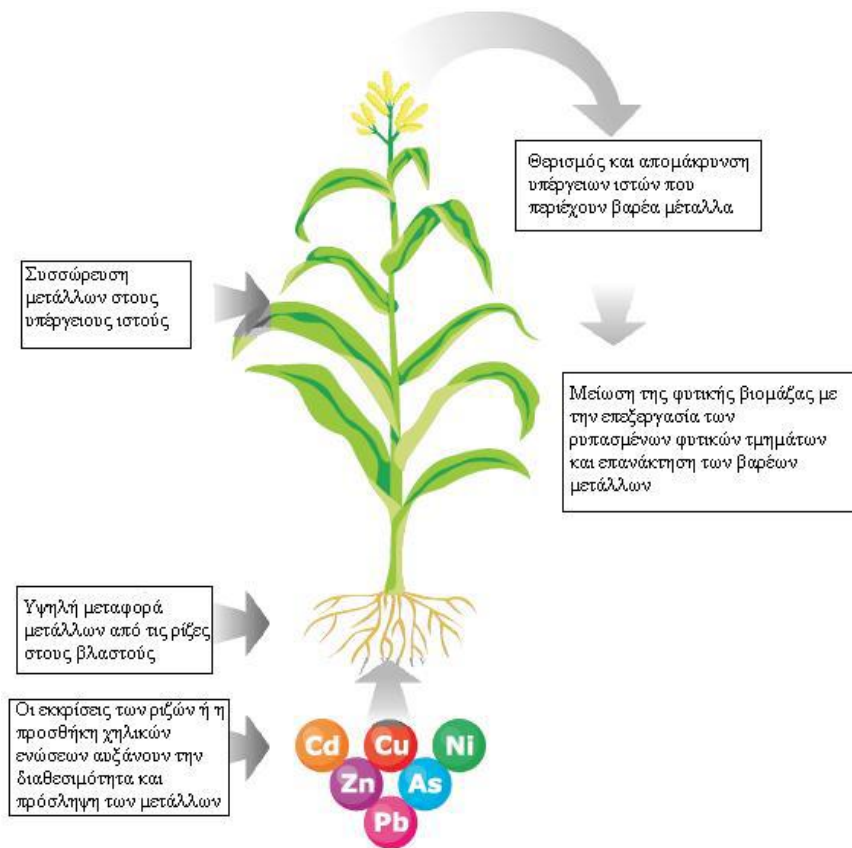
Οι τεχνικές που αφορούν στην αποκατάσταση του εδάφους από τοξικά για το φυτό ή και από βαρέα μέταλλα είναι κυρίως αυτές που παρουσιάζονται παρακάτω [63][64].

1.5.1 Φυτοσυσσώρευση

Φυτοσυσσώρευση (phytoaccumulation ή phytoextraction, πρόσληψη και συσσώρευση του ρύπου στις ρίζες ή τα υπέργεια τμήματα των φυτών).

Πολλά φυτά που αναπτύσσονται σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων περιέχουν μεγάλες ποσότητες των στοιχείων αυτών στους ιστούς τους. Τα φυτά αυτά, ονομάζονται υπερσυσσωρευτές (hyperaccumulators) και περιέχουν έως 1000 μg/g ξηρού βάρους Ni, Cu, Cr, Pb ή 10000 μg/g ξηρού βάρους Zn και Mn [66]. Από ορισμένους ερευνητές πιστεύεται ότι ένα φυτικό είδος θεωρείται ότι είναι υπερσυσσωρευτής βαρέων μετάλλων όταν ο λόγος της συγκέντρωσης των μετάλλων στους βλαστούς και τα φύλλα προς τη συγκέντρωσή τους στις ρίζες, είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα [66].

Η φυτοσυσσώρευση (Εικόνα 1.3) είναι η συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από το έδαφος [67][68]. Στην πράξη, φυτά που συσσωρεύουν τα μέταλλα φυτεύονται στο ρυπασμένο έδαφος και καλλιεργούνται σύμφωνα με τις συμβατικές καλλιεργητικές τεχνικές. Οι ρίζες από τα φυτά αυτά απορροφούν τα μέταλλα από το έδαφος και τα μεταφέρουν στο υπέργειο τμήμα τους, όπου και συσσωρεύονται. Έπειτα όταν τα φυτά έχουν αναπτυχθεί επαρκώς κόβονται και απομακρύνονται τα υπέργεια μέρη τους, συνεπάγοντας έτσι την μόνιμη απομάκρυνση και των βαρέων μετάλλων από το έδαφος [67][69][70].



Εικόνα 1.9. Σχηματική παράσταση των διαδικασιών που περιλαμβάνονται στην φυτοσυσσωρευση των μετάλλων από το έδαφος (τροποποιημένο από: Nascimento & Xing 2006).

Δεν είναι ακόμα γνωστοί οι ακριβείς μηχανισμοί με τους οποίους επιτυγχάνεται η υπερσυσσωρευση μετάλλων στα φυτά αυτά, ωστόσο συνεχώς αυξάνεται η γενετική τροποποίηση φυτών για να λειτουργούν ως υπερσυσσωρευτές [71][72]. Αυτό οφείλεται στο ότι τα φυτά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην φυτοαποκατάσταση του εδάφους. Ο Chaney (1983) ήταν ο πρώτος που πρότεινε τη χρήση αυτών των φυτών για τη φυτοεξυγίανση εδάφους ρυπασμένου με μέταλλα [68].

Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητη η χρήση φυτών τα οποία να έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν (translocate) τα απορροφούμενα από το ριζικό τους σύστημα μέταλλα, στα υπέργεια τμήματά τους, και κυρίως στα φύλλα τους, επειδή αυτά μπορούν να συλλεχθούν [73]. Οι υπερσυσσωρευτές, ως κατηγορία φυτών, έχουν εξαιρετική ικανότητα να απορροφούν μέταλλα από το χώμα και να τα συγκεντρώνουν στα υπέργεια τμήματά τους, είτε τα μέταλλα βρίσκονται σε υψηλές ή σε χαμηλές συγκεντρώσεις στο έδαφος. Το

φυτό θεωρείται ότι ανήκει σε αυτή την κατηγορία όταν μπορεί να αφομοιώσει στους ιστούς του μέταλλα σε συγκεντρώσεις 100 φορές μεγαλύτερες από τα υπόλοιπα είδη φυτών, χωρίς να παρουσιάσει συμπτώματα τοξικότητας [63]. Για να θεωρείται επιτυχής εφαρμογή της φυτοσυσσώρευσης θα πρέπει το ρυπασμένο μέσο να καθαρίζεται σε επίπεδο που συμμορφώνεται με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και σε λογικό χρονικό διάστημα ενώ επιπλέον η αποκατάσταση να επιτυγχάνεται με χαμηλότερο κόστος από μια εναλλακτική τεχνολογία [62].

Το ιδανικό φυτό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φυτοσυσσώρευση πρέπει να διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά [62][67][69]:

- να είναι ανθεκτικό σε υψηλά επίπεδα μετάλλων
- να συσσωρεύει μεγάλα ποσά μετάλλων στους υπέργειους ιστούς
- να συσσωρεύει πολλά διαφορετικά μέταλλα
- να αναπτύσσει εκτεταμένο ριζικό σύστημα,
- να έχει ταχύ ρυθμό αύξησης
- να παρουσιάζει μεγάλη παραγωγή βιομάζας
- να μπορεί να αποκομιστεί με τις συμβατικές γεωργικές μεθόδους
- να έχει μικρές θρεπτικές απαιτήσεις
- να είναι ανθεκτικό στις ασθένειες και τα παράσιτα
- να είναι ανθεκτικό σε διάφορες περιβαλλοντικές καταπονήσεις όπως η ξηρασία και ο παγετός
- να μην αποτελεί τροφή για τα φυτοφάγα ζώα

Μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί κανένα φυτικό είδος που να ικανοποιεί πλήρως όλα τα παραπάνω κριτήρια [74]. Τα περισσότερα φυτά υπερσυσσωρευτές είναι μικρόσωμα με μικρή παραγωγή βιομάζας, ρηχό ριζικό σύστημα και συσσωρεύουν συνήθως μεγάλες ποσότητες από ένα μόνο μέταλλο. Αντιθέτως, τα φυτά με μεγάλη ανάπτυξη συνήθως δεν συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες μετάλλων και δεν είναι ανθεκτικά στις υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων [67][75][76].

1.5.1.1 Πλεονεκτήματα φυτοσυσσώρευσης

Η φυτοσυσσώρευση πλεονεκτεί έναντι άλλων τεχνικών αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών με μέταλλα διότι [64][67][75][76]:

- είναι μία περιβαλλοντικά φιλική και εύκολα αποδεκτή από το ευρύ κοινό τεχνολογία.
- δεν προκαλεί μείωση της γονιμότητας του εδάφους μετά το πέρας της αποκατάστασης, όπως άλλες *ex situ* τεχνικές, αλλά αντίθετα οδηγεί σε βελτίωση του.
- είναι μία τεχνική *in situ* που δεν απαιτεί ακριβό εξοπλισμό και ιδιαίτερα εξειδικευμένο προσωπικό.
- είναι εξαιρετικά χαμηλού κόστους (60-80% φθηνότερη σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους)
- είναι οικονομικά αποδοτική για μεγάλες περιοχές με χαμηλό ή μέτριο επίπεδο ρύπανσης όπου άλλες τεχνολογίες είναι οικονομικά μη αποδεκτές.
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα εύρος τοξικών μετάλλων και ραδιονουκλεϊδίων.
- χαρακτηρίζεται από μειωμένες ποσότητες παραγόμενων αποβλήτων που απαιτούν διάθεση και επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα ανάκτησης των μετάλλων από τη ρυπασμένη βιομάζα.
- η χρήση βλάστησης μειώνει τη διάβρωση του εδάφους και τη μεταφορά των ρύπων μέσω του αέρα σε άλλες περιοχές.

1.5.1.2 Μειονεκτήματα φυτοσυσσώρευσης

Η φυτοσυσσώρευση παρουσιάζει και κάποιους περιορισμούς [62][69][74][76]:

- Απαιτείται μεγάλος χρόνος για τη φυτοαποκατάσταση του εδάφους. Για παράδειγμα, σύμφωνα με μία εκτίμηση αποκατάστασης μιας ρυπασμένης με βαρέα μέταλλα περιοχής, με τη χρήση του υπερσυσσωρευτή *Thlaspi caerulescens*, θα χρειαστούν 13-14 χρόνια για να μειωθούν οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στις επιτρεπτές οριακές τιμές.

- Δεν μπορεί να εφαρμοστεί για πολύ υψηλά επίπεδα ρύπανσης τα οποία είναι φυτοτοξικά.
- Είναι μη αποτελεσματική για ρύπανση σε μεγάλο βάθος στο έδαφος κάτω από την ριζόσφαιρα.
- Απομακρύνεται μόνο το βιοδιαθέσιμο κλάσμα των βαρέων μετάλλων του εδάφους.
- Επηρεάζεται φυσικά από τις κλιματικές συνθήκες οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την αύξηση και την παραγόμενη μάζα των φυτών.
- Μετά την αποκατάσταση απαιτείται ειδική επεξεργασία της παραγόμενης ρυπασμένης φυτικής βιομάζας.
- Υπάρχει κίνδυνος της εισαγωγής των μετάλλων στην τροφική αλυσίδα μέσω των φυτοφάγων ζώων και μεταφοράς των ρύπων σε άλλο μέσο μέσω της πτώσης των φύλλων που περιέχουν τα μέταλλα.
- Υπάρχει η πιθανότητα να μεταφερθούν στα υπόγεια και επιφανειακά νερά οι ρύποι μέσω της χρήσης βελτιωτικών και της αύξησης της βιοδιαθεσιμότητας των μετάλλων.

1.5.2 Φυτοσταθεροποίηση

Φυτοσταθεροποίηση (phytostabilization, σταθεροποίηση του ρύπου μέσω δέσμευσης, συγκράτησης του εδάφους και/ή μείωση της διήθησης με τη χρήση φυτών). Στη φυτοσταθεροποίηση συγκεκριμένα φυτά επιφέρουν αλλαγές στη χημική σύσταση του χώματος διευκολύνουν τη διεξαγωγή διεργασιών όπως η προσρόφηση, συσσώρευση, συμπλοκοποίηση, αναγωγή και κατακρήμνιση των ρύπων στις ρίζες των φυτών με αποτέλεσμα τη μείωση της κινητικότητας τους και ως εκ τούτου την αποτροπή κατείσδυσης τους στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα αλλά και τη μείωση της πιθανότητας εισόδου τους στην τροφική αλυσίδα. Επιτυγχάνει κυρίως τη σταθεροποίηση μετάλλων (πρόσληψη και απομόνωση ή αδρανοποίηση του ρυπαντή), όπως τα Pb, Cd, Cu, Cr, Zn και As, και άλλων ανόργανων ρύπων σε έδαφος και ιζήματα [62]

1.5.3 Φυτοεξάτμιση

Φυτοεξάτμιση (phytovolatilization, πρόσληψη του ρύπου και εξάτμιση-απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα από τα φυτά). Η φυτοεξάτμιση εφαρμόζεται για την απομάκρυνση μετάλλων από το χώμα, την απομάκρυνση πτητικών

οργανικών ενώσεων, αλλά και άλλων ανόργανων ουσιών, όπως το Se και το As, όταν αυτές μπορούν να μετατραπούν σε πτητική μορφή τους. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ο ρύπος συλλέγεται από το φυτό, όπου μετά τις διεργασίες μέσα σε αυτό, αποβάλλεται από τα φύλλα του μέσω διαπνοής σε άλλη του μορφή που είναι πτητική ή ως κάποιο πτητικό προϊόν της αποδόμησής του. Μειονέκτημα της μεθόδου θεωρείται η πιθανότητα ανακύκλωσης του εξαγόμενου ρύπου, μέσω κατακρήμνισης του στα υδάτινα σώματα και μετατροπής του εκ νέου σε τοξική του μορφή.

1.6 Στόχοι και αντικείμενο μεταπτυχιακής διατριβής

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας του μεσογειακού αλόφυτου *Salsola soda* να αναπτύσσεται σε επιβαρυμένα εδάφη που αρδεύονται με νερό υψηλής αλατότητας καθώς επίσης και της δυνατότητας να χρησιμοποιηθεί για αποκατάσταση εδαφών με χρήση της μεθόδου της φυτοσυσσώρευσης.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται διερεύνηση των επιδράσεων της άρδευσης με αλμυρό νερό στις διεργασίες του εδάφους που τελικά καθορίζουν την απόδοση και την ποιότητα των καλλιεργούμενου φυτού εντός του θερμοκηπίου. Προσδιορίστηκαν οι βασικότεροι ποιοτικοί δείκτες του εδάφους καθώς και η περιεκτικότητά του σε θρεπτικά για κάθε εδαφική μεταχείριση, καθώς και η συσσώρευση των μακροθρεπτικών στο φυτικό ιστό.

Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι της εργασίας είναι:

- Η διερεύνηση της ικανότητας του φυτού να ανέχεται και να αναπτύσσεται σε υψηλές συγκεντρώσεις αλατότητας (NaCl) σε διαφορετικά υποστρώματα.
- Η μελέτη της επίδρασης της εδαφικής αλατότητας στην πρόσληψη και συσσώρευση των μετάλλων στους φυτικούς ιστούς.
- Η δυνατότητα συσσώρευσης βαρέων μετάλλων στο υπέργειο τμήμα του φυτού.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Περιοχή μελέτης

Η παρούσα πειραματική μελέτη αναπτύχθηκε στο Αγρόκτημα ΤΕΙ Κρήτης στο Ηράκλειο. Το πειραματικό μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε στο θερμοκήπιο Καλλιεργειών Εκτός Εδάφους του εργαστηρίου Στερεών Υπολειμμάτων και Υγρών Αποβλήτων όπως φαίνεται στην εικόνα 1 (γεωγραφική θέση $35^{\circ}18'0058.1''N$ $25^{\circ}06'27.1''E$, με νοτιοανατολικό προσανατολισμό στην περιοχή του Εσταυρωμένου Ηρακλείου Κρήτης).



Εικόνα 2.1. Θερμοκήπιο καλλιεργειών εκτός εδάφους, Αγροκτήματος ΤΕΙ Κρήτης.

Το θερμοκήπιο αυτό αποτέλεσε μια προσομοίωση των ξερικών συνθηκών που μπορεί να επικρατούν σε μια περιοχή της νότιας Μεσογείου. Έτσι εξασφαλίσαμε τον ορθολογικότερο έλεγχο των παραμέτρων ανάπτυξης των φυτών και την διευκόλυνση της επίβλεψης της καλλιέργειας. Η καλλιεργητική περίοδος από τη σπορά έως την συγκομιδή του φυτού *Salsola soda*, διήρκεσε περίπου 2 μήνες (από 22/2/2018 έως 27/4/2018).

2.2 Προετοιμασία και παραγωγή σποριόφυτων

Για την παραγωγή των σποριόφυτων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των φυτών στις γλάστρες, χρησιμοποιήθηκαν σπόροι της Αγγλικής εταιρείας CN Seeds. Οι σπόροι του συγκεκριμένου φυτού είναι δύσκολοι στη

βλαστικότητα τους, καθώς χρειάζονται συγκεκριμένη φωτοπερίοδο, υγρασία και θερμοκρασία για να βλαστήσουν. Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι είχαμε κάνει δύο ακόμα προσπάθειες σποράς από τον Ιούλιο του 2017 έως τον Οκτώβριο του ίδιου έτους με πλήρως αποθαρρυντικά αποτελέσματα, και με σπόρους όμως από διαφορετική εταιρεία.

Οι σπόροι τοποθετήθηκαν σε σπορεία των 150 κελιών από φενιζόλ ανά δύο σε κάθε θέση. Στο ένα σπορείο η στρωμάτωση των σπόρων έγινε με τύρφη και περλίτη σε αναλογία 3:1 ενώ στο δεύτερο χρησιμοποιήσαμε, για τη στρωμάτωση, άμμο θαλάσσης. Το βάθος σποράς ήταν 0,5 cm. Η διεργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στις 22/01/2018 όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2.

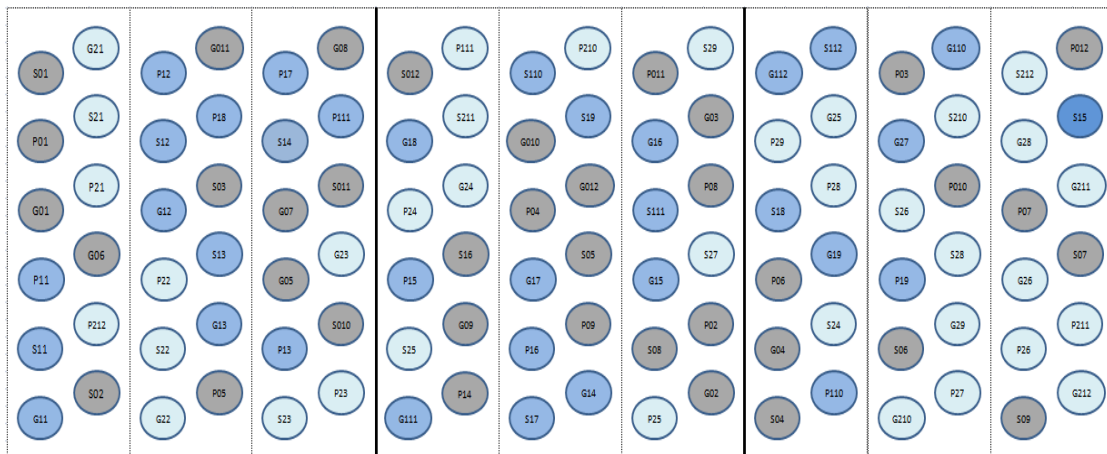


Εικόνα 2.2. Εγκατάσταση του σπορείου, φύτευση των σπόρων *Salsola soda* 22/1/2018, βλάστηση των πρώτων σπόρων 6/2/2018.

Τα σποριόφυτα ποτίζονταν καθημερινά στις 10:00 με 11:00 το πρωί με το αρδευτικό νερό του θερμοκηπίου, το οποίο είχε κατά μέσο όρο $pH=6,2$ και $EC=0,47 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Στις 2/2/2018 στο σπορείο με την τύρφη/περλίτη είχαν βλαστήσει σπόροι στα 80/150 κελιά, ενώ στο σπορείο με την άμμο θαλάσσης είχαν βλαστήσει σπόροι στα 73/150 κελιά του σπορείου. Στις 5/2/2018 στο πρώτο σπορείο είχαν βλαστήσει σπόροι σε όλα τα κελιά, ενώ στο σπορείο με την άμμο θαλάσσης είχαν βλαστήσει στα 107/150 κελιά.

2.3 Πειραματική διάταξη

Για το πείραμά μας χρησιμοποιήθηκαν 216 φυτά *Salsola soda* τα οποία φυτεύτηκαν ανά δύο σε 108 γλάστρες των 7 λίτρων. Η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών επεμβάσεων (αποστάσεις μεταξύ των γραμμών) ήταν 50 cm και μεταξύ των γλαστρών σε κάθε επέμβαση 15 cm. Η κάθε γλάστρα τοποθετήθηκε στο χώρο εφαρμόζοντας ένα πλήρως τυχαίο σύστημα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3. Η διάταξη του πειράματος μέσα στο θερμοκήπιο φαίνεται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.3. Πλήρως τυχαίο σύστημα διάταξης των φυτών του πειράματος. Το πρώτο γράμμα σε κάθε κύκλο υποδηλώνει το υπόστρωμα, το δεύτερο μέρος, ο αριθμός υποδηλώνει την αλατότητα και το τρίτο μέρος τον αύξων αριθμό της επανάληψης σε κάθε επέμβαση.



Εικόνα 2.4. Διάταξη των φυτών μέσα στο θερμοκήπιο.

Μόλις τα φυτά ήταν έτοιμα για μεταφύτευση στην οριστική τους θέση, πληρώθηκαν οι γλάστρες με το ανάλογο υπόστρωμα και τοποθετήσαμε τα σποριόφυτα (Εικόνες 2.5, 2.6).



Εικόνα 2.5. Σποριόφυτα *Salsola soda* έτοιμα προς μεταφύτευση στην οριστική τους θέση.



Εικόνα 2.6. Φύτευση των σποριόφυτων στην οριστική τους θέση στις γλάστρες μέσα στο θερμοκήπιο.

Για την ανάπτυξη των φυτών χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά υποστρώματα. Το πρώτο υπόστρωμα αφορούσε τύρφη και περλίτη σε αναλογία 3 μέρη τύρφη :1 περλίτη (PEAT/Perlite Soil) που για συντομία θα αναφέρεται ως «P». Το υπόστρωμα αυτό έχει όλα εκείνα τα απαραίτητα φυσικοχημικά στοιχεία (οργανική ουσία, πυκνότητα, καλή αποστράγγιση) για την ανάπτυξη του φυτού.



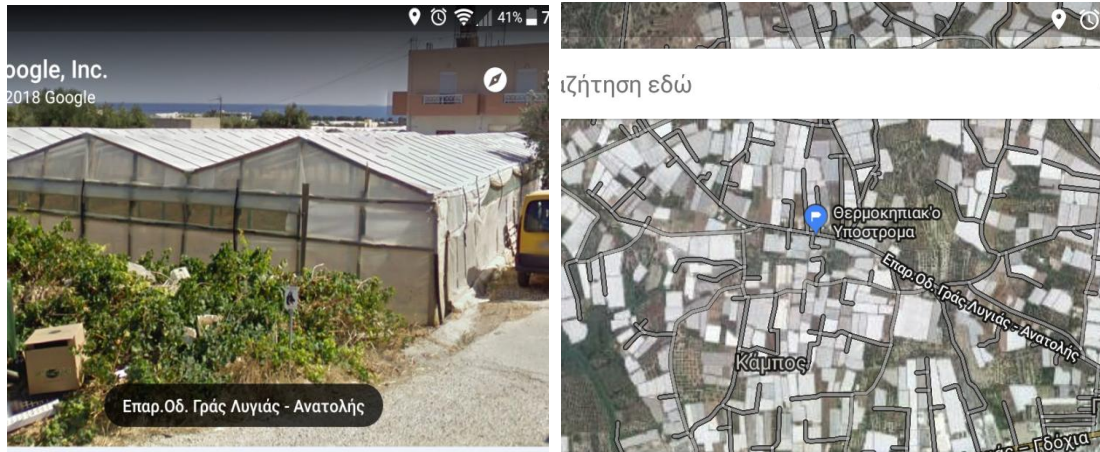
Εικόνα 2.7. Η τύρφη και ο περλίτης που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα.

Το επόμενο υπόστρωμα ανάπτυξης του φυτού ήταν η άμμος θαλάσσης (Sea Sand Soil) που για συντομία θα αναφέρεται ως «**S**». Αυτή η επιλογή έγινε για να διερευνήσουμε αν θα μπορούσε το φυτό να αντέξει σε συνθήκες που είναι πολύ δύσκολο να αναπτύσσονται τα φυτά.



Εικόνα 2.8. Άμμος θαλάσσης που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα.

Το τρίτο υπόστρωμα ήταν έδαφος από θερμοκήπιο (Green House Soil), που για συντομία θα αναφέρεται ως «**G**», το οποίο καλλιεργείται με κηπευτικά φυτά στην περιοχή της Ιεράπετρας τα τελευταία 70 συναπτά έτη.



Εικόνα 2.9. Τοποθεσία δειγματοληψίας Θερμοκηπιακού Εδάφους.

Τα εδάφη αυτά είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων επιβαρυσμένα με μεταλλικά ιόντα τα οποία δρουν κατασταλτικά στην ανάπτυξη του φυτού. Σε αυτή την περίπτωση θέλαμε να διερευνήσουμε την δυνατότητα του φυτού να αναπτύσσεται σε υποβαθμισμένα εδάφη με υψηλή αλατότητα, την ικανότητα του να εξυγιάνει ένα επιβαρυσμένο με μέταλλα έδαφος και κατά πόσο τα μέταλλα, κυρίως τα βαρέα, μεταφέρονται στο υπέργειο μέρος του φυτού.

Το θερμοκηπιακό έδαφος μεταφέρθηκε από την περιοχή της Ιεράπετρας στο θερμοκήπιο του πειράματος, όπου και κοσκινίστηκε με κόσκινο 20 mm ώστε να απομακρύνουμε μεγάλα φερτά υλικά και πέτρες.



Εικόνα 2.10. Κοσκίνισμα Θερμοκηπιακού εδάφους.

Στους δύο παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές αναλύσεις των τριών υποστρωμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του πειράματος.

Πίνακας 4. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υποστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά κατά την έναρξη του πειράματος.

| Φυσικοχημικές Αναλύσεις | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Υπόστρωμα | «P» Peat/Perlite 3:1 | «S» Sea Side soil | «G» GreenHouse soil |
| Σύσταση | Ιλυοπηλώδες | Αμμώδες | Αμμοαργιλώδες |
| pH | 7,10 | 7,90 | 6,40 |
| EC (dS/m) | 0,98 | 2,54 | 27,5 |
| TKN (%) | 0,81 | 0,00 | 0,17 |
| K (%) | 0,39 | 0,12 | 0,81 |
| P (%) | 1,87 | 0,08 | 3,37 |
| TOC (%) | 13,6 | 0,12 | 1,89 |
| Na (mmol/L) | 67,6 | 1342 | 3043 |
| Ca+Mg (mmol/L) | 1444 | 700 | 27600 |
| SAR (mmol/L) | 2,5 | 71,7 | 25,9 |

Πίνακας 5. Συγκεντρώσεις των διαθέσιμων μορφών μετάλλων στα αρχικά υποστρώματα.

| Βαρέα μέταλλα | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Υπόστρωμα | «P» Peat/Perlite 3:1 | «S» Sea Side soil | «G» GreenHouse soil |
| Fe (mg kg⁻¹) | 421,5 | 1,750 | 265,3 |
| Cu (mg kg⁻¹) | 20,59 | 1,320 | 39,21 |
| Zn (mg kg⁻¹) | 7,940 | 1,960 | 48,780 |
| Pb (mg kg⁻¹) | 0,00 | 0,47 | 1,28 |
| Ni (mg kg⁻¹) | 0,55 | 2,40 | 3,46 |
| Cr (mg kg⁻¹) | 0,00 | 1,22 | 4,23 |

2.4 Καλλιεργητικές φροντίδες

Κάθε διαφορετικό υπόστρωμα αρδεύονταν καθημερινά την ίδια χρονική στιγμή με τρία διαφορετικά υδατικά διαλύματα. Το «P» υπόστρωμα χωρίστηκε σε 3 επεμβάσεις που περιλάμβανε 12 επαναλήψεις / γλάστρες η κάθε μια, και κάθε επέμβαση αρδεύονταν με διαφορετικό υδατικό διάλυμα. Το ίδιο έγινε και

με τα άλλα δύο υποστρώματα («S» και «G»). Αναλυτικά η κατανομή των επεμβάσεων στο χώρο παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.3**. Το πρώτο διάλυμα ήταν νερό απευθείας από το αρδευτικό δίκτυο (**0=Blanc**). Η επόμενη επέμβαση γινόταν με υδατικό διάλυμα που περιείχε χλωριούχο νάτριο, NaCl καθαρότητας 99,5% σε συγκέντρωση 40mM (**1=Αλατότητα 1η**) και η τρίτη επέμβαση με υδατικό διάλυμα που περιείχε NaCl με συγκέντρωση 120mM (**2=Αλατότητα 2η**).

2.4.1 Άρδευση φυτών

Τα διαλύματα για την άρδευση των φυτών παρασκευάζονταν καθημερινά επί τόπου στο χώρο του θερμοκηπίου, διαλύοντας σε λεκάνες 9 λίτρων προζυγισμένες στο εργαστήριο ποσότητες στερεού NaCl καθαρότητας 99,5% σε ζυγό δύο δεκαδικών ψηφίων. Για την παρασκευή του διαλύματος αλατότητας 40 mM NaCl χρησιμοποιήθηκε NaCl συγκέντρωσης 2,3376 g/L, συνεπώς απαιτούνταν κάθε φορά 21,0411 g που διαλύονταν στη λεκάνη των 9 λίτρων. Επίσης, για τη συγκέντρωση 120 mM απαιτείται NaCl συγκέντρωσης 7,0128 g/L οπότε απαιτούνταν 63,1233 g κάθε φορά για τις επεμβάσεις.

Κατά τη μεταφύτευση των σποριόφυτων στην οριστική τους θέση, ποτίστηκαν με νερό του δικτύου άρδευσης και μέχρι κορεσμού του υποστρώματος. (περίπου 1 L). Για τις επόμενες 4 ημέρες η άρδευση συνεχίστηκε με νερό δικτύου, ώστε να μην στρεσαριστούν τα φυτά από την αυξημένη αλατότητα των επεμβάσεων. Τα χαρακτηριστικά του αρδευτικού νερού στις 16/3/2018 ήταν $pH=6,1$ και $EC=0,55 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Τα φυτά ποτίζονταν με τη χρήση ενός πλαστικού ποτηριού ζέσεων με 250 ml διαλύματος κάθε φορά. Έπειτα από 4 ημέρες και έως την ολοκλήρωση του πειράματος, κάθε επέμβαση αρδεύονταν με διαφορετικό διάλυμα αλατότητας. Σε καμία επέμβαση και σε κανένα σημείο του πειράματος δεν χρησιμοποιήθηκε χημική λίπανση.

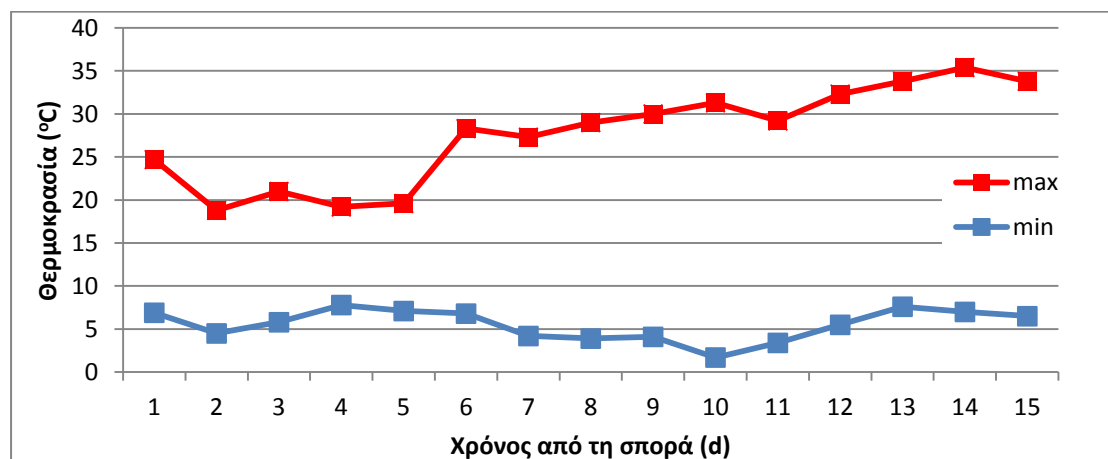
2.4.2 Κλιματικά δεδομένα πειράματος

Σε όλες τις ημέρες του πειράματος καταγράφονταν οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες στο χώρο του θερμοκηπίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα θερμόμετρο μεγίστου ελαχίστου που ήταν τοποθετημένο στο χώρο του θερμοκηπίου, σε κοντινή απόσταση από την πειραματική διάταξη.

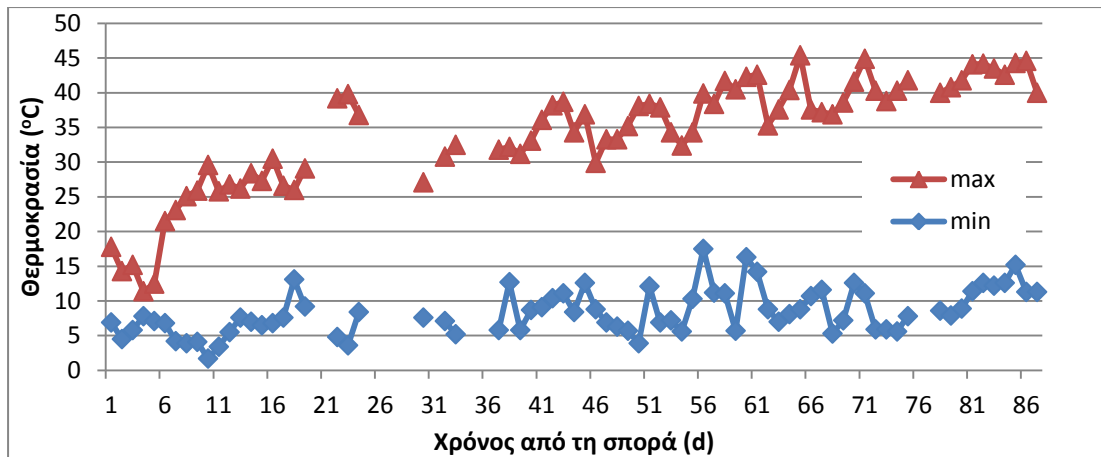


Εικόνα 2.11. Θερμόμετρο μεγίστου ελαχίστου τιμής.

Στην περίοδο από τη σπορά έως και την βλάστηση όλων των σποριόφυτων οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.1. Επίσης, στο Διάγραμμα 2, εμφανίζονται οι θερμοκρασίες κατά την περίοδο ανάπτυξης των φυτών. Η φωτοπερίοδος κατά τη διάρκεια του πειράματος κυμαινόταν από 13 h έως 14,5 h περίπου. Επίσης, παρατηρούνταν και καταγράφονταν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών με σκοπό τη διαπίστωση συμπτωμάτων τοξικότητας από την επίδραση της αυξημένης αλατότητας σε αυτά.



Διάγραμμα 2.1. Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ανά ημέρα κατά την βλάστηση των σπόρων.



Διάγραμμα 2.2. Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες κατά την περίοδο ανάπτυξης των φυτών (από τη σπορά έως την συλλογή τους)..

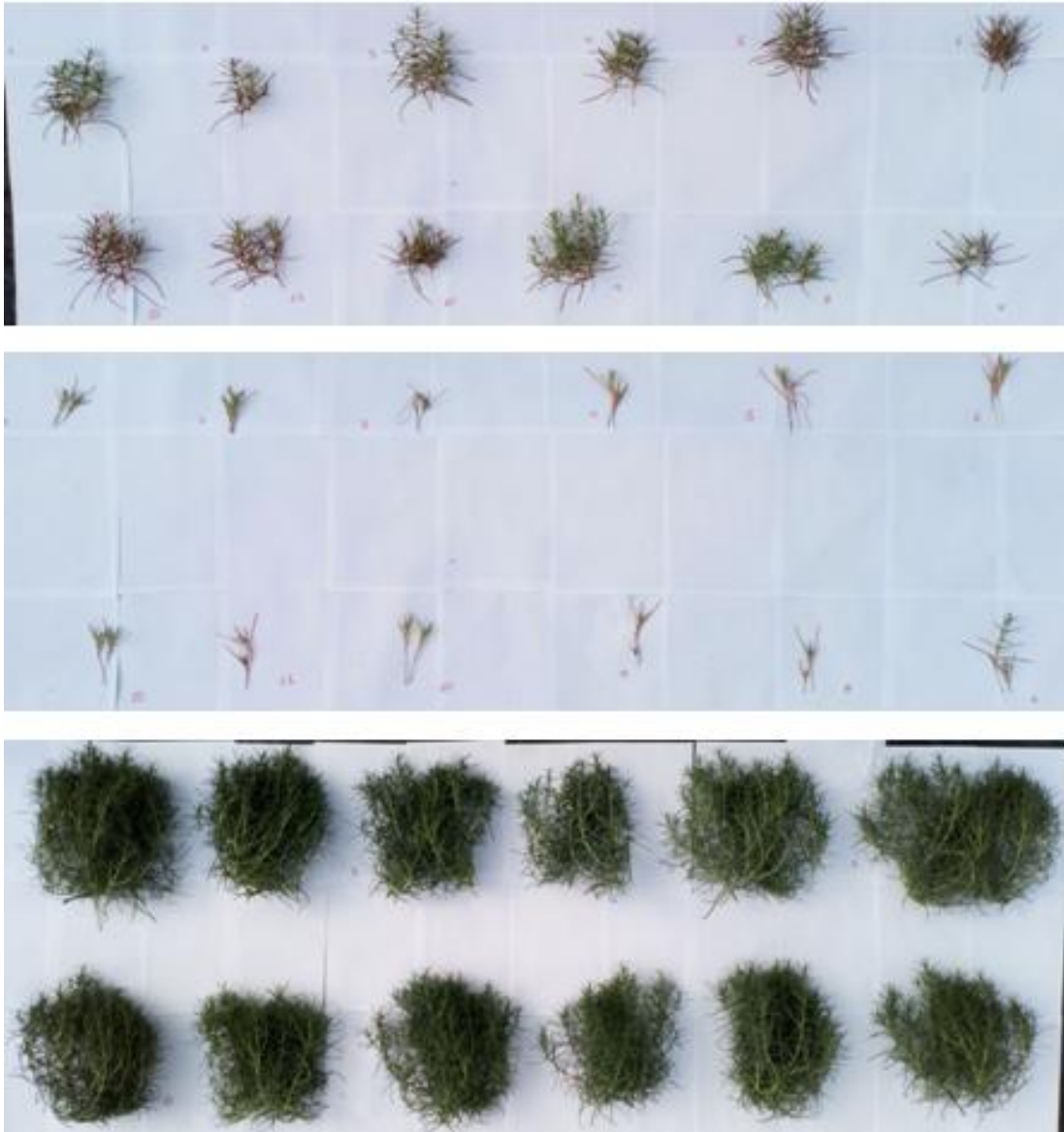
2.5 Ανάπτυξη των Φυτών

2.5.1 Ύψος φυτών

Σε τακτά χρονικά διαστήματα μετριόνταν το ύψος των φυτών για να διερευνηθεί η βέλτιστη ανάπτυξη του αλόφυτου. Η μέτρηση της ανάπτυξης των φυτών γίνονταν κάθε 10 ημέρες από την φύτευση των σποριόφυτων στην οριστική τους θέση. Η πρώτη μέτρηση έγινε 5 ημέρες μετά από την φύτευση των σποριοφυτών στις γλάστρες. Η μέτρηση γίνονταν από την επιφάνεια του εδάφους έως το ύψος του τελευταίου φύλλου του φυτού.

2.5.2 Νωπό βάρος φυτών

Το βάρος του νωπού υπέργειου μέρους του φυτού μας δίνει μια ασφαλή εικόνα της ανάπτυξης των φυτών. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το νωπό βάρος τόσο καλύτερη είναι και η ανάπτυξη του φυτού. Την τελευταία ημέρα του πειράματος τα φυτά κόπηκαν από τη βάση του στελέχους τους, ομαδοποιήθηκαν με βάση την επέμβασή αλατότητας και μεταφέρθηκαν αμέσως μετά στο εργαστήριο όπου ζυγίστηκε το νωπό βάρος τους.



Εικόνα 2.11. Ομαδοποίηση επεμβάσεων για την ζύγιση του νωπού βάρους. Επέμβαση αλατότητας "0", υποστρώματα επάνω: «P», υπόστρωμα στη μέση: «S», και κάτω «G».



Εικόνα 2.12. Μετρήσεις νωπού βάρους φυτών.

2.5.3 Ξηρό βάρος φυτών

Μετά το τέλος του πειράματος και την συλλογή του υπέργειου μέρους μετρήσαμε το ξηρό βάρος των φυτών, αποξηραίνοντάς τα σε φούρνο ξήρανσης στου 60 °C για 5 ημέρες. Στη συνέχεια μετρήσαμε ξηρό βάρος και υπολογίσαμε την αναλογία νωπού- ξηρού βάρους ανά επέμβαση.

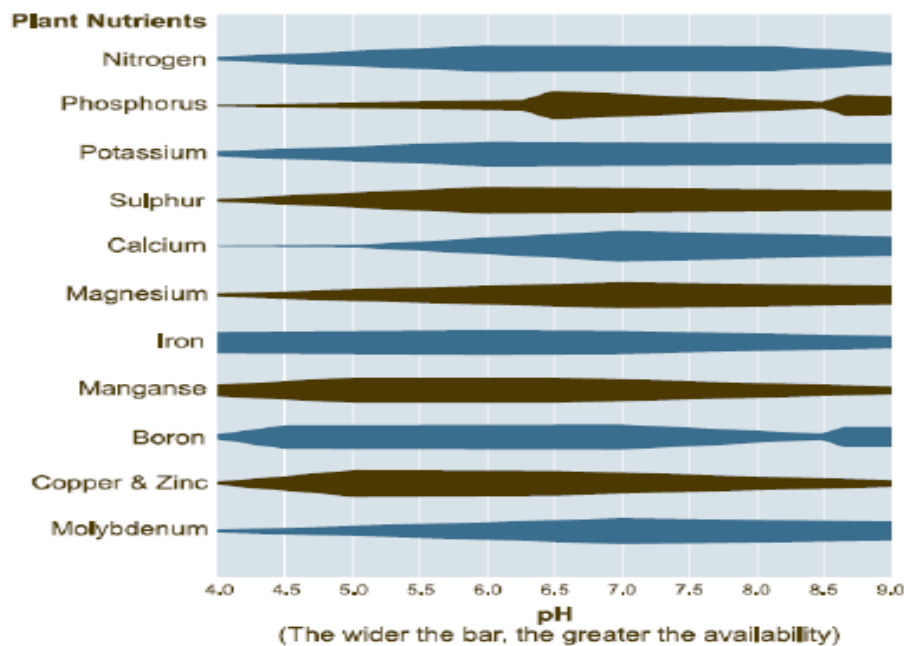
2.6 Φυσικοχημικές αναλύσεις

2.6.1 Μηχανική ανάλυση εδάφους

Με τον όρο μηχανική ανάλυση του εδάφους ορίζεται η εργαστηριακή τεχνική με την οποία γίνεται ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής σύστασης του. Συγκεκριμένα μετράται η περιεκτικότητα επί τοις εκατό του εδάφους σε άμμο, ιλύς και άργιλο. Η γνώση του ποσοστού συμμετοχής του καθενός στη σύσταση του εδάφους είναι βασικής σημασίας κριτήριο για το χαρακτηρισμό του και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις φυσικοχημικές του ιδιότητες, άρα και την παραγωγικότητα του. Διαφορετικές καλλιέργειες ευνοούνται σε διαφορετικής μηχανικής σύστασης εδάφη.

2.6.2 Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (pH)

Η γνώση της τιμής του pH στα εδάφη είναι ένα σημαντικό διαγνωστικό στοιχείο, που μας βοηθά να βγάλουμε συμπεράσματα γύρω από το τι συνέβη ή τι συμβαίνει και διαμορφώθηκε η τιμή αυτή και τι συνέπειες αναμένεται να έχει στα εδάφη αλλά και στα φυτά που αναπτύσσονται σε αυτά. Στη μέτρηση του pH μετράται η συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου στο εδαφικό διάλυμα. Για τη μέτρηση του pH στα εδάφη χρησιμοποιείται η πάστα κορεσμού και για το φυτικό ιστό το δείγμα εκχυλίζεται με νερό στην αναλογία 1:1^{1/2} [80][81].



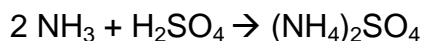
ΕΙΚΟΝΑ 2.13. Η θρεπτική διαθεσιμότητα όπως επηρεάζεται από το pH (Πηγή: AGRI-FACTS).

2.6.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

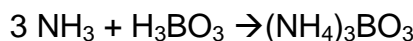
Αντίστοιχα η γνώση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα εδάφη, μας πληροφορεί για τη συνολική παρουσία αλάτων η οποία είναι σημαντική για την ανάπτυξη των φυτών. Έτσι για παράδειγμα σε εδάφη με μεγάλη συγκέντρωση υδατοδιαλυτών αλάτων τα φυτά υποφέρουν εξαιτίας της μεγάλης ωσμωτικής πίεσης του πλούσιου εδαφικού διαλύματος. Στην τεχνική που παρουσιάζεται παρακάτω μετράται η συγκέντρωση των ανιόντων και των κατιόντων στο εδαφικό διάλυμα [80][81].

2.6.4 Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (TKN)

Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην οξειδωση της οργανικής ουσίας παρουσία καταλύτη, όπου το άζωτο (εκτός από το νιτρικό) μετατρέπεται σε αμμωνία και αυτό σε νιτρικό αμμώνιο:



Στη συνέχεια το θειικό αμμώνιο σε θερμό αλκαλικό περιβάλλον διασπάται και παράγεται αμμωνία, η οποία ψύχεται και διαβιβάζεται σε διάλυμα βορικού οξέος όπου δεσμεύεται με τη μορφή βορικού αμμωνίου. Ακολουθεί οσομέτρηση με θειικό οξύ. Ο όγκος του προτύπου διαλύματος HCl που καταναλώθηκε μετατρέπεται σε ποσότητα αζώτου [78][82][84]. Οι αντιδράσεις παραγωγής και δέσμευσης της αμμωνίας έχουν ως εξής:



2.6.5 Προσδιορισμός οργανικής ουσίας εδάφους

Σαν οργανική ουσία του εδάφους ορίζεται το σύνολο της φυτικής και ζωικής προέλευσης υπολειμμάτων ή απορριμμάτων που ενσωματώνονται στο έδαφος, όπως π.χ. ρίζες, φύλλα, βλαστοί διάφοροι ζωντανοί ή νεκροί μικροοργανισμοί, κοπριά ζώων κτλ., ανεξάρτητα από το στάδιο αποσύνθεσης τους.

Τα εδάφη, που η περιεκτικότητά τους σε οργανική ουσία φτάνει σε ποσοστό μέχρι και 20% χαρακτηρίζονται ανόργανα, ενώ εκείνα στα οποία το ποσοστό αυτό είναι υψηλότερο χαρακτηρίζονται σαν οργανικά. Το ποσοστό της οργανικής ουσίας των περισσότερων Ελληνικών εδαφών κυμαίνεται μεταξύ 1,0-2,5%.

Η οργανική ουσία παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε CO₂ καθώς και στις φυσικές αλλά και χημικές ιδιότητες του εδάφους.

Τα δείγματα μετά την ξήρανση τους αλέστηκαν σε μύλο άλεσης σε μορφή λεπτής πούδρας. Στη συνέχεια μετρήθηκε ο ολικός οργανικός άνθρακας σε αναλυτή TOC-V της εταιρίας Shimadzu.



Εικόνα 2.14. Αναλυτής TOC-V της εταιρίας Shimadzu με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η μέτρηση.

2.6.6 Διαθέσιμος εδαφικός φώσφορος (P)

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι προσδιορισμού των διαφόρων μορφών (διαθέσιμου ή μη) εδαφικού φωσφόρου, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την αρχή και την τεχνική. Όμως, μεγαλύτερη γεωργική σημασία έχει η γνώση του ποσού του αφομοιώσιμου εδαφικού φωσφόρου, αυτού δηλαδή που μπορεί να αφομοιωθεί εύκολα από τα φυτά, είτε γιατί βρίσκεται στο εδαφικό διάλυμα, είτε γιατί μπορεί να μετακινηθεί εύκολα από τη στερεή φάση προς το εδαφικό διάλυμα.

Η μέθοδος Olsen είναι μια εκ των πλέον χρησιμοποιούμενων μεθόδων προσδιορισμού του διαθέσιμου κλάσματος. Κρίνεται ικανοποιητική για εδάφη με $pH > 6,5$ και χαμηλής περιεκτικότητας σε διαθέσιμο φώσφορο, όπως συμβαίνει στα περισσότερα εδάφη. Αρχικά το δείγμα εδάφους εκχυλίζεται με κατάλληλο αντιδραστήριο. Στο εκχύλισμα που παραλαμβάνεται προσδιορίζεται ο φώσφορος χρωματομετρικά, δηλαδή αναπτύσσεται χρώμα η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της συγκέντρωσης [80][82].



Εικόνα 2.15. Ανάπτυξη χρώματος σε δείγματα εδάφους για τον προσδιορισμό του φωσφόρου.

2.6.7 Αφομοιώσιμο Κάλιο (K) στο έδαφος

Το Κάλιο K είναι ένα από τα βασικά θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών και το προσλαμβάνουν από το έδαφος (σε μικρότερες όμως ποσότητες από το Ca και το N). Το 99% του ολικού K στο έδαφος είναι μη αφομοιώσιμο. Στην παρακάτω μέθοδο προσδιορίζεται το αφομοιώσιμο K στο έδαφος αυτό δηλαδή που μπορούν να αξιοποιήσουν τα φυτά για την ανάπτυξη τους. Το αφομοιώσιμο K απαντάται σε δύο μορφές:

i) στο ανταλλάξιμο, το οποίο είναι προσροφημένο στα κolloειδή τεμαχίδια του εδάφους.

ii) στο υδατοδιαλυτό, που βρίσκεται με τη μορφή ιόντων στο εδαφικό διάλυμα.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει εκχύλιση των δειγμάτων με οξικό αμμώνιο οπότε εκχυλίζονται από το έδαφος το ανταλλάξιμο και το υδροδιαλυτό κλάσμα Καλίου. Η μέτρηση γίνεται με χρήση φλογοφωτόμετρου. [79][83].

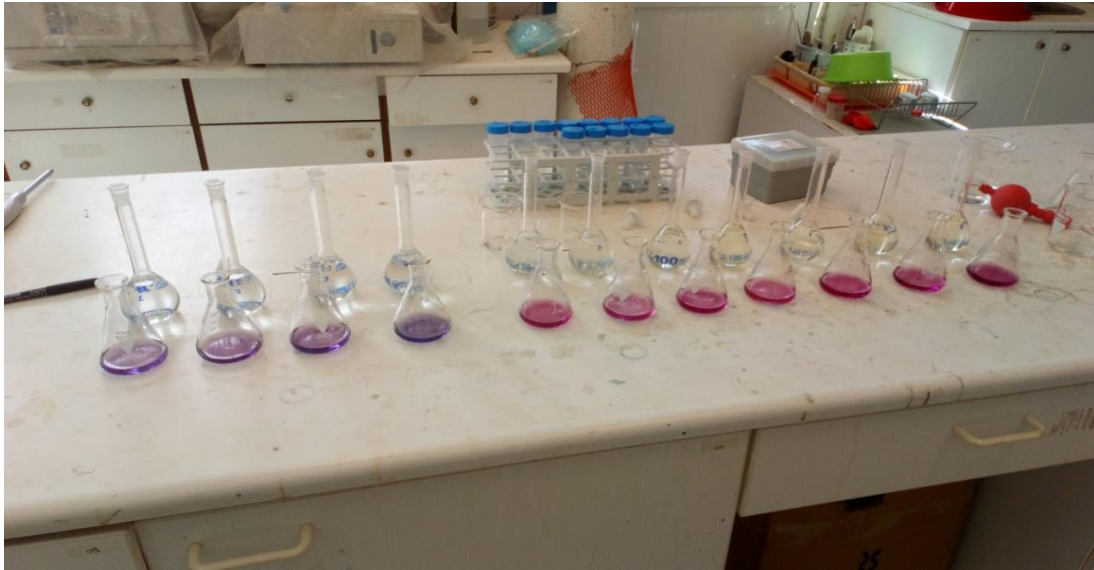
2.6.8 Υδατοδιαλυτό νάτριο (Na) σε υποστρώματα

Τα βασικά κατιόντα στο έδαφος, όπως τα Na, K, Ca, Mg, Li, Ba, Sr, κατατάσσονται σε τέσσερα «κλάσματα»: α) το υδατοδιαλυτό (ιόντα που βρίσκονται στο εδαφικό διάλυμα β) το προσροφημένο (ιόντα προσροφημένα στις επιφάνειες ανταλλαγής και εφοδιάζουν εύκολα το εδαφικό διάλυμα), γ) το βραδέως ανταλλάξιμο (ιόντα εγκλωβισμένα μέσα σε ορυκτά του εδάφους), δ) το μη αφομοιώσιμο.

Στην τεχνική για την εκχύλιση του εδάφους χρησιμοποιείται οξικό αμμώνιο. Με τη χρήση του οξικού εκχυλίζονται από το έδαφος τα δύο πρώτα «κλάσματα». Το Νάτριο δεν αποτελεί θρεπτικό στοιχείο για τα φυτά αλλά το εκχυλιζόμενο ποσό του αφορά την αλατότητα του εδάφους και επομένως την αντοχή των καλλιεργουμένων φυτών καθώς και την επίλυση σχετικών προβλημάτων [80][82]. Η συγκέντρωση του εκχυλιζόμενου Na μετριέται με τη βοήθεια του φλογοφωτόμετρου [79][81][83].

2.6.9 Προσδιορισμός υδροδιαλυτός Ca^{+2} , Mg^{+2}

Για τα εδαφικά δείγματα ο προσδιορισμός του αθροίσματος $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ αλλά και μεμονωμένα του Ca^{+2} ή Mg^{+2} στο εκχύλισμα κορεσμού γίνεται μέσω της ογκομέτρησης με EDTA, το οποίο έχει ισχυρή συγγένεια και επομένως την ικανότητα να σχηματίζει ευδιάλυτα σύμπλοκα με τα κατιόντα αυτά (τις γνωστές χηλικές ενώσεις), σε ορισμένες τιμές pH. Το τελικό σημείο της ογκομέτρησης ανιχνεύεται με τη βοήθεια του δείκτη Eriochrome BlackT (EBT) και την αλλαγή του χρώματος του διαλύματος. Ο μηχανισμός διαπιστώσεως του τέλους της ογκομέτρησης είναι ο εξής: Το EBT προστιθέμενο στο προς ογκομέτρηση διάλυμα, σχηματίζει σύμπλοκα με τα $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, τα οποία έχουν χρώμα ερυθροϊώδες. Το προστιθέμενο μετά, κατά την ογκομέτρηση, EDTA σχηματίζει σύμπλοκα πρώτα με τα ελεύθερα ιόντα $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ και κατόπιν αποσπά και σχηματίζει σύμπλοκα με τα δεσμευμένα από το EBT ιόντα $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ λόγω της ισχυρότερης συγγενειάς του με τα ιόντα $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ από ότι το EBT. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο δείκτης EBT να παραμένει ελεύθερος και το ογκομετρούμενο διάλυμα να χρωματίζεται μπλε που είναι το χρώμα του ελεύθερου δείκτη, γεγονός που υποδηλώνει και το τέλος της ογκομέτρησης [81][83].



Εικόνα 2.16. Ογκομέτρηση με EDTA και τη βοήθεια δείκτη Eriochrome Black (EBT) για τον προσδιορισμό των ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} .

2.6.10 Ολικά θρεπτικά σε φυτικό ιστό (K, Na, P, Ca, Mg)

Για τα δείγματα φυτικού ιστού ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των κατιόντων γίνεται από το εκχύλισμα που λαμβάνεται με τη μέθοδο της ξηρής καύσης.

Για την εκτέλεση του προσδιορισμού ολικών ποσοτήτων των διαφόρων θρεπτικών στοιχείων (K, Na, P, Ca, Mg και ιχνοστοιχείων), είναι αναγκαία η μετατροπή αυτών, σε μορφή ενός ανόργανου άλατος. Αυτή επιτυγχάνεται με την καύση της λειοτριβημένης οργανικής ουσίας των φυτικών ιστών με τη μέθοδο της ξηρής καύσης.

Κατά τη διαδικασία αυτή 1 g (η ακριβής μέτρηση καταγράφεται σε ζυγό τεσσάρων δεκαδικών) προετοιμασμένα κατάλληλα φυτικού ιστού. Στη συνέχεια η κάψα τοποθετείτε στον φούρνο αποτέφρωσης στους 550 °C μέχρι το δείγμα να ασπρίσει.



Εικόνα 2.17. Τα δείγματα μετά το φούρνο των 550 °C αριστερά και κατά την προσθήκη HCl 1 M πάνω σε θερμαντική πλάκα δεξιά.

Αφού τελειώσει η καύση, η κάψα τοποθετείται σε θερμαντική πλάκα και προστίθενται 5 ml HCl 1 M. Ακολουθεί θέρμανση (όχι βρασμός). Η θέρμανση βοηθά να διαλυθούν ευκολότερα τα διάφορα άλατα. Στη συνέχεια διηθείται το περιεχόμενο της κάψας από φίλτρο Whatman N° 40. Ακολουθούν 3 εκπλήξεις και με απιονισμένο νερό και το δείγμα αραιώνεται έως τα 50ml [79][82].

Για τον υπολογισμό του φωσφόρου χρησιμοποιείται η μέθοδος του βαναδομολυβδαινικού αμμωνίου [77][78][79][82].

2.7 Λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR)

Ο λόγος προσρόφησης νατρίου από το έδαφος (SAR) είναι ένας δείκτης της καταλληλότητας του εδάφους για γεωργική χρήση και προσδιορίζεται από τις συγκεντρώσεις των κατιόντων Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} σε mmol L^{-1} , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{0.5([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])}}$$

2.8 Προσδιορισμός Βαρέων μετάλλων

2.8.1 Στα υποστρώματα

Για τον προσδιορισμό των αφομοιώσιμων μορφών των μετάλλων τα υποστρώματα εκχυλιστήκαν με τη μέθοδο του DTPA. Η μέθοδος χρησιμοποιεί DTPA (Diethylene Triamine Pentaacetic Acid) ως τον συμπλοκοποιό παράγοντα και TEA (TriEthanolAmine) ως ρυθμιστή του pH. Το DTPA επιλέχθηκε διότι παρουσιάζει τον πλέον ευνοϊκό συν-δυασμό συντελεστών σταθερότητας των συμπλόκων ώστε να επιτρέπει την ταυτόχρονη συμπλοκοποίηση Fe, Zn, Cu και Mn. Τα μόρια του DTPA σχηματίζουν υδατοδιαλυτά σύμπλοκα με τα ιόντα Fe, Zn, Cu και Mn, η σταθερότητα των οποίων είναι βέλτιστη στο pH 7,3, ελαττώνοντας έτσι την συγκέντρωσή τους στο εδαφικό διάλυμα, αναγκάζοντας τη στερεή φάση του εδάφους να ελευθερώσει ανάλογα ιόντα προς αποκατάσταση της ισορροπίας. Οι ποσότητες επομένως των Fe, Zn, Cu και Mn που παραλαμβάνει το εκχυλιστικό είναι συνάρτηση τόσο της συγκέντρωσής τους στο εδαφικό διάλυμα όσο και της ικανότητας της στερεής φάσης να αναπληρώνει τις απώλειες. Επειδή ελλείψεις αυτών των μικροθρεπτικών εκδηλώνονται κυρίως σε ασβεστούχα εδάφη, το εκχυλιστικό έχει σχεδιασθεί έτσι ώστε να ελαττώνει την διαλυτότητα του CaCO₃ σε σημαντικό βαθμό και να αποφεύγεται έτσι η ελευθέρωση έγκλειστων μορφών των μικροθρεπτικών, οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες για πρόσληψη από τις ρίζες. Η αυξημένη διαλυτότητα του CaCO₃ αποφεύγεται ρυθμίζοντας το pH του εκχυλιστικού στο 7,3 με την τριαιθανολαμίνη (TEA) και συμπεριλαμβάνοντας ιόντα Ca με τη μορφή CaCl₂ στο εκχυλιστικό.

Το εκχυλιστικό DTPA-TEA περιλαμβάνει συγκέντρωση DTPA 0,005 M, CaCl₂ 0,01 M και TEA 0,1 M με ρύθμιση του pH στο 7,3 με HCl 6,0 M. Για την παρασκευή 2 L διαλύματος, 3,934 g DTPA, 29,840 g TEA και 2,940 g CaCl₂ · 2H₂O (αναλυτικά αντιδραστήρια) διαλύονται με 100 mL απεσταγμένου νερού σε ογκομετρική φιάλη των 2 L. Μετά την πλήρη διάλυση του DTPA προστίθεται νερό μέχρι όγκου 1800 mL. Κατόπιν γίνεται ρύθμιση του pH στο 7,3 ± 0,05 με 6,0 M HCl, με συνεχή ανάδευση, και αραίωση μέχρι όγκου 2 L με αποσταγμένο νερό [81, 83].

2.8.2 Στο υπέργειο μέρος του φυτού

Για τον προσδιορισμό μετάλλων στο φυτικό ιστό χρησιμοποιήθηκε το εκχύλισμα που είχε προκύψει από τη μέθοδο της ξηρής καύσης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.6.10.



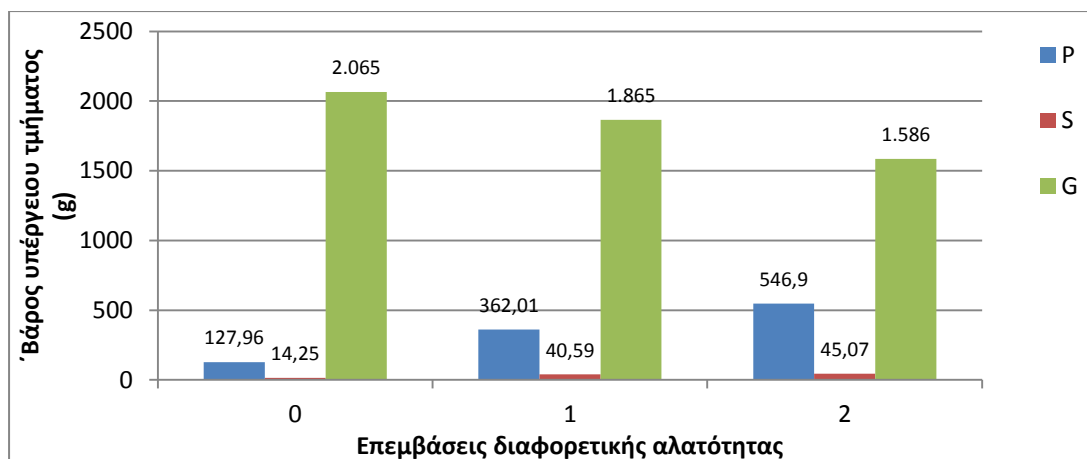
Εικόνα 2.18. Μετρήσεις μετάλλων με φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης (Perkin Elmer 400).

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Αποτελέσματα φυσικοχημικών αναλύσεων

3.1 Βιομάζα φυτών

3.1.1 Νωπό βάρος φυτών

Στο παρακάτω διάγραμμα 1 παρουσιάζονται τα βάρη των υπέργειων τμημάτων των φυτών συνολικά ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας και διαφορετικό υπόστρωμα.



Διάγραμμα 1. Τελικό νωπό βάρος υπέργειου τμήματος του φυτού.

Παρατηρούμε ότι τα φυτά που αναπτύχθηκαν στο θερμοκηπιακό έδαφος είχαν καλύτερη ανάπτυξη με μεγάλες αποκλίσεις από τα άλλα δυο υποστρώματα. Τα φυτά που τοποθετήθηκαν στο υπόστρωμα άμμου αναπτύχθηκαν ελάχιστα και παρουσίασαν πολλά συμπτώματα τροφοπενιών.



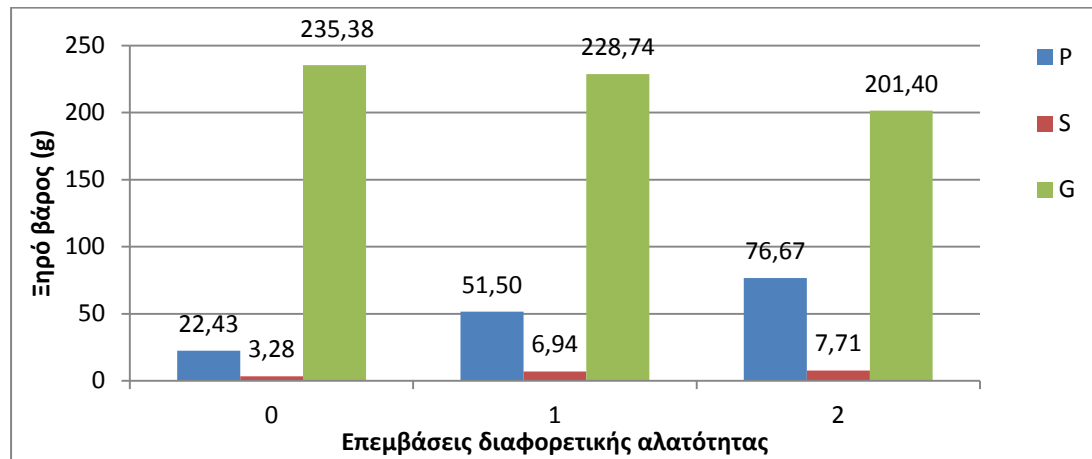
Εικόνα 3.1. Διαφορές στα φυτά κατά την ολοκλήρωση του πειράματος στα υποστρώματα «P» (δεξιά), «S» (κέντρο), «G» (αριστερά).



Εικόνα 3.2. Τα φυτά κατά την ολοκλήρωση του πειράματος.

3.1.2 Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος φυτών

Μετρήθηκε η υγρασία του υπέργειου τμήματος των φυτών και υπολογίσαμε την αναλογία του νωπού/ξηρού βάρους. Από αυτή την αναλογία υπολογίσαμε την ξηρή βιομάζα όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

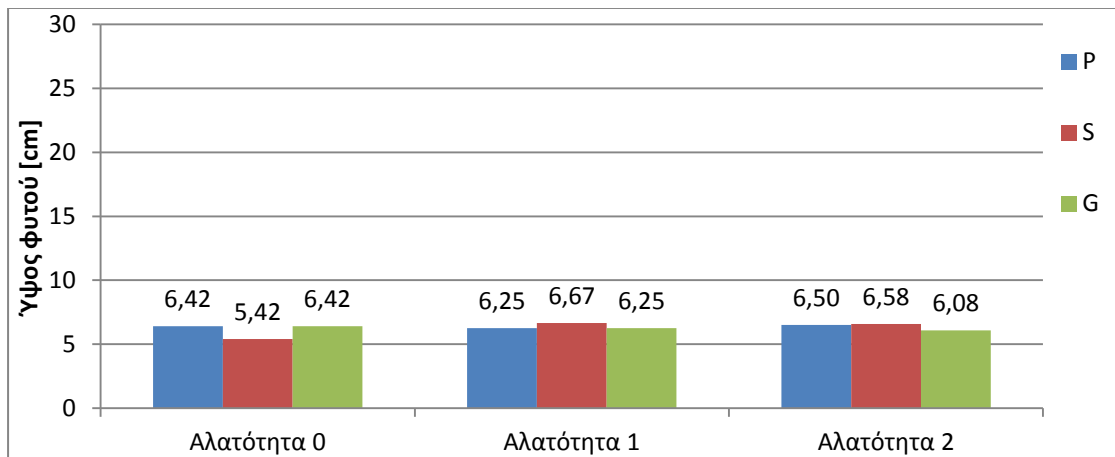


Διάγραμμα 2. Ξηρά βάρος σε g φυτικού ιστού ανά επέμβαση αλατότητας.

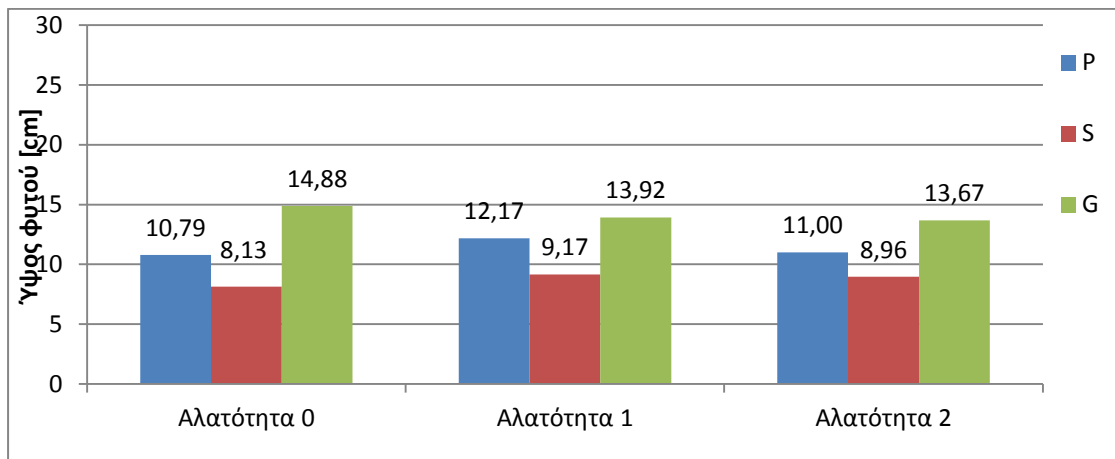
Γίνεται αντιληπτό ότι τα φυτά που αναπτύχθηκαν στο θερμοκηπιακό υπόστρωμα είναι αυτά που ανέπτυξαν την περισσότερη βιομάζα. Είναι αναμενόμενο καθώς το υπόστρωμα αυτό είχε τις μεγαλύτερες ποσότητες θρεπτικών στοιχείων. Παρατηρούμε ότι στο υπόστρωμα τύρφης-περλίτη το αλόφυτο ανέπτυξε περισσότερη βιομάζα όσο αυξανόταν η αλατότητα.

3.1.3 Ύψος φυτών

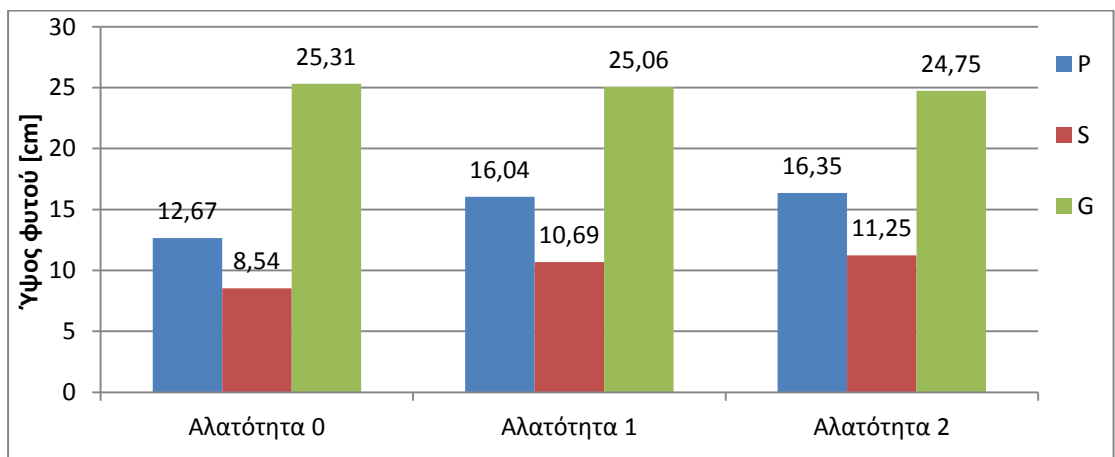
Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις της ανάπτυξης των φυτών ανά επέμβαση φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 3. Ύψος φυτών στις 24/3/2018, δέκα ημέρες μετά στη μεταφύτευσή τους στην οριστική θέση του πειράματος.

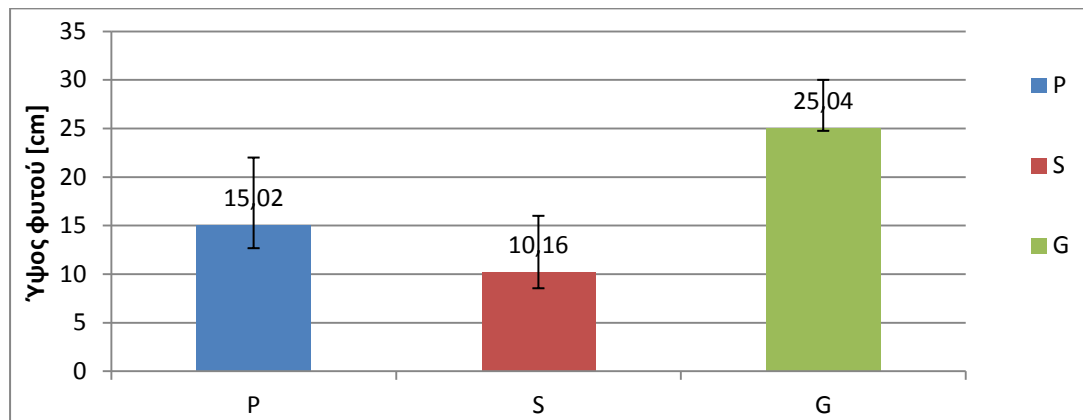


Διάγραμμα 4. Ύψος φυτών στις 4/4/2018



Διάγραμμα 5. Ύψος φυτών στις 16/4/2018, τελικό ύψος φυτών.

Τη μεγαλύτερη ανάπτυξη παρατηρήσαμε στα φυτά που αναπτύχθηκαν στο θερμοκηπιακό έδαφος, ενώ τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε αμμώδες υπόστρωμα είχαν πολύ μικρή ανάπτυξη.



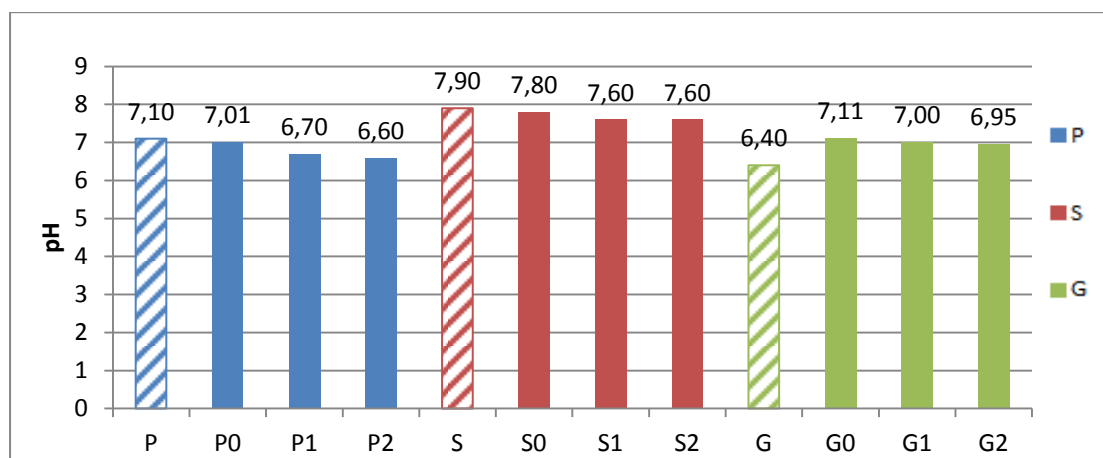
Διάγραμμα 6 . Απόκλιση μέσης τιμής ύψους φυτών ανά υπόστρωμα και για τις τρεις επεμβάσεις αλατότητας.

Στον υπολογισμό της απόκλισης της μέσης τιμής χρησιμοποιήθηκαν όλα τα φυτά και από τις τρεις επεμβάσεις αλατότητας για κάθε υπόστρωμα.

3.2 Δείκτες αλατότητας

3.2.1 pH

Το pH αποτελεί για το υπόστρωμα δείκτη διαθεσιμότητας μακρό-στοιχείων και μικρό-στοιχείων για το φυτό, καθώς σε διαφορετικές τιμές διαφοροποιείται και η διαθεσιμότητα των στοιχείων. Παρακάτω βλέπουμε το pH των υποστρωμάτων στις διαφορετικές επεμβάσεις αλατότητας.

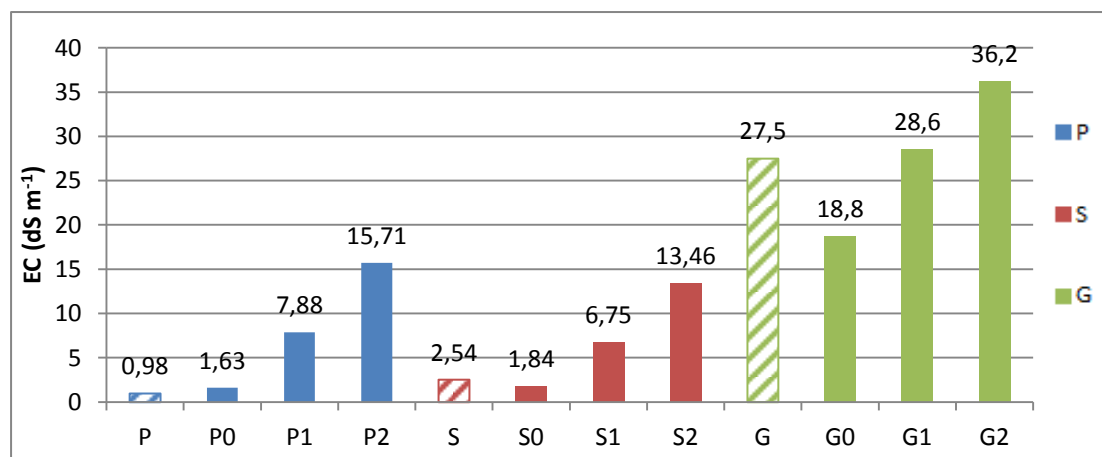


Διαγραμμα 7. pH των διαφορετικών υποστρωμάτων στην αρχή και το τέλος του πειράματος σε διαφορετικές επεμβάσεις αλατότητας.

Η τιμές του pH για το υπόστρωμα άμμου είναι υψηλότερη από τα άλλα δύο υποστρώματα, στα οποία διαμορφώνεται σε φυσιολογικά για την απορρόφηση των μάκρο και μικρο στοιχείων επίπεδα.

3.2.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

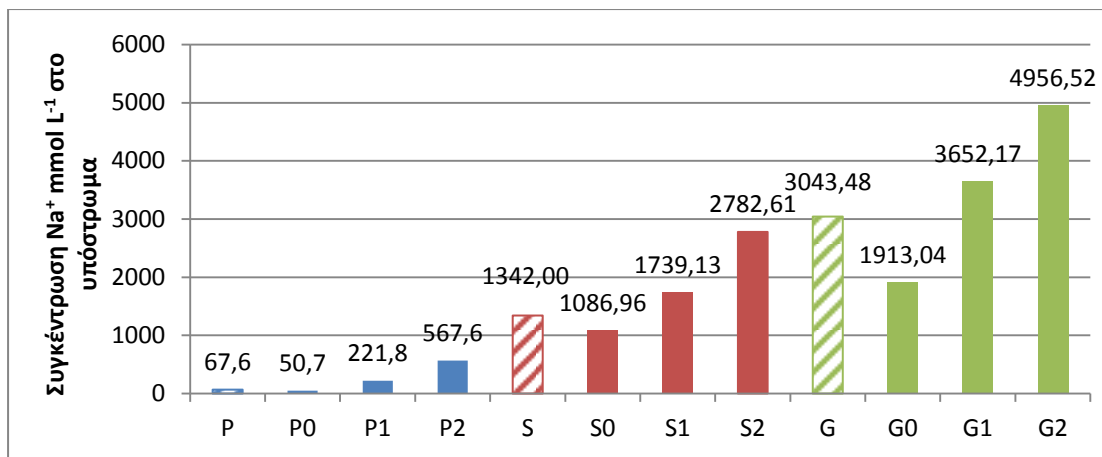
Από τις μετρήσεις στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των υποστρωμάτων παρατηρούμε ότι το θερμοκηπιακό έδαφος είχε υψηλή EC. Τα άλατα που προκαλούν την υψηλή EC αρχικά ξεπλένονται στην επέμβαση χωρίς τη προσθήκη NaCl, οπότε και μειώνεται η EC του υποστρώματος G0. Το θερμοκηπιακό υπόστρωμα που αρδεύονταν με νερό υψηλής αλατότητας (G2), έχει την μεγαλύτερη EC, παράγοντας που όμως δεν εμπόδισε την ανάπτυξη του *Salsola soda*.



Διάγραμμα 8. EC στα διαφορετικά υποστρώματα σε διαφορετικά επίπεδα αλατότητας.

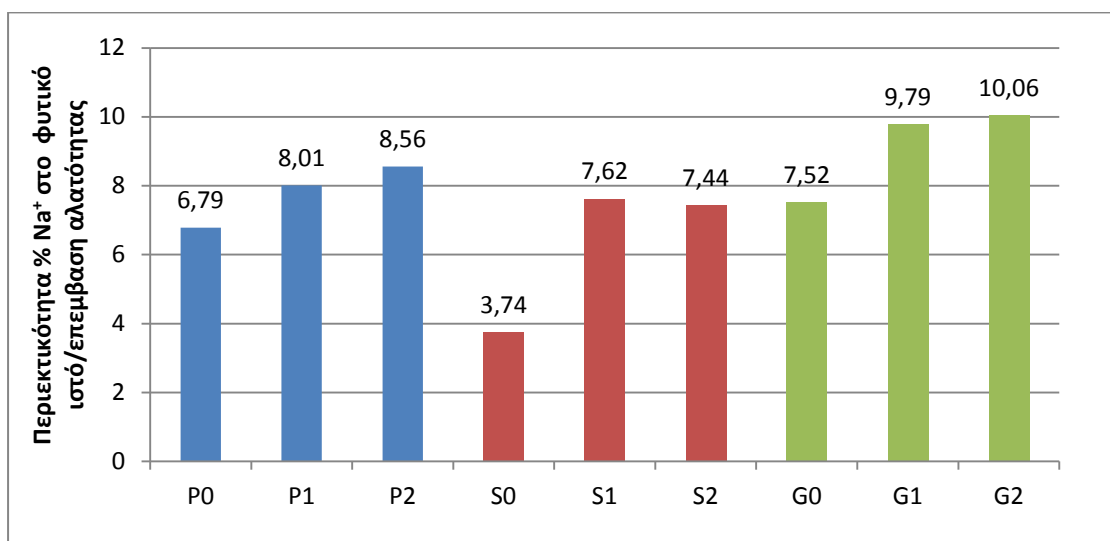
3.2.3 Νάτριο (Na)

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος οι επεμβάσεις Αλατότητας 1 και Αλατότητας 2 και στα τρία διαφορετικά υποστρώματα αρδεύονταν με αλατούχο διάλυμα. Όπως είναι φυσιολογικό, παρατηρούμε παρακάτω τη συγκέντρωση του Na^+ να αυξάνεται στα υποστρώματα που αρδεύονται με αλατούχα διαλύματα. Η συγκέντρωση Na στο μάρτυρα (Control) μειώνεται και στα τρία υποστρώματα, λόγω του ότι σε αυτή την επέμβαση γίνεται έκπλυση αυτών των ιόντων από το αρδευτικό νερό.



Διάγραμμα 21. Αποτελέσματα συγκέντρωσης υδατοδιαλυτού Νατρίου στο εκχύλισμα κορεσμού σε υποστρώματα.

Από το παρακάτω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η απορρόφηση του Na από τα φυτά *Salsola soda* κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Στο θερμοκηπιακό έδαφος, στην επέμβαση G2, τα επίπεδα Na στο φυτικό ιστό (σε ξηρό βάρος) κυμάνθηκε στο 10,06 %.

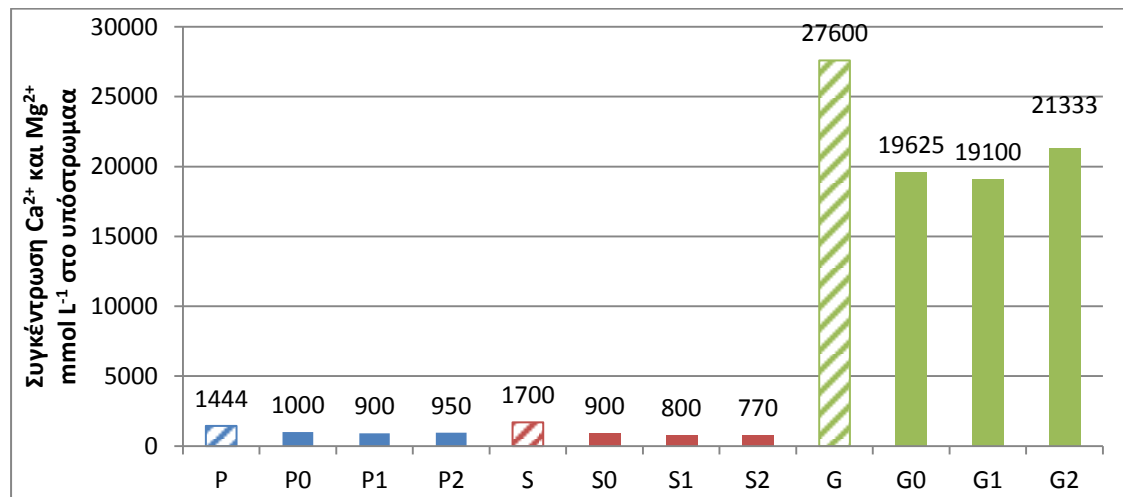


Διάγραμμα 22. Συγκέντρωση % νάτριο του υπέργειου μέρους ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας και υποστρώματος

3.2.4 Ασβέστιο, Μαγνήσιο (Ca, Mg)

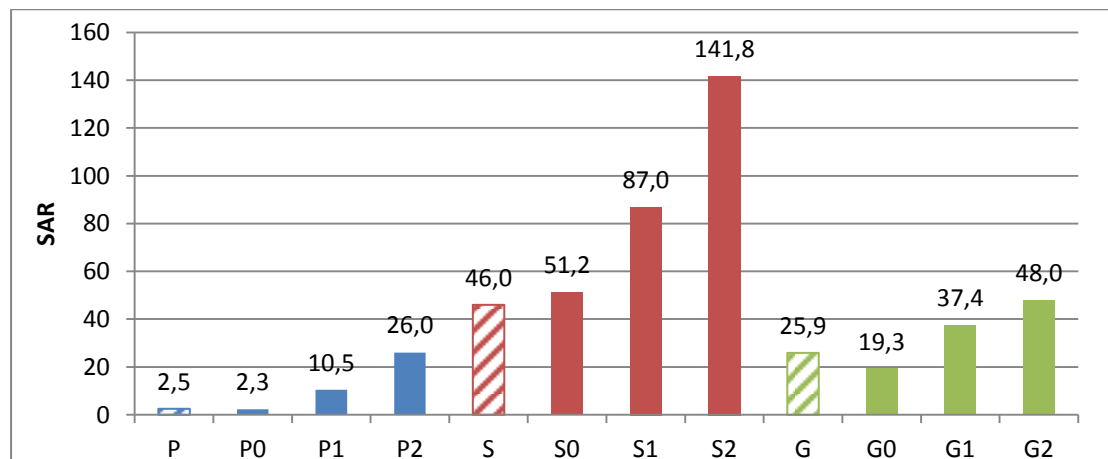
Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων σχετικά με το Ca και Mg, παρατηρούμε ότι το θερμοκηπιακό υποστρώμα ήταν αρκετά επιβαρυνμένο με μεταλλικά

ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα που εμφανίζει το συγκεκριμένο υπόστρωμα. Κατά την άρδευση των φυτών με το διάλυμα αναφοράς (control-αρδευτικό νερό δικτύου).



Διάγραμμα 23. Συγκέντρωση του αθροίσματος των υδατοδιαλυτών ιόντων Ca²⁺ και Mg²⁺ στο θερμοκηπιακό υπόστρωμα.

3.2.5 Λόγος Προσρόφησης Νατρίου SAR



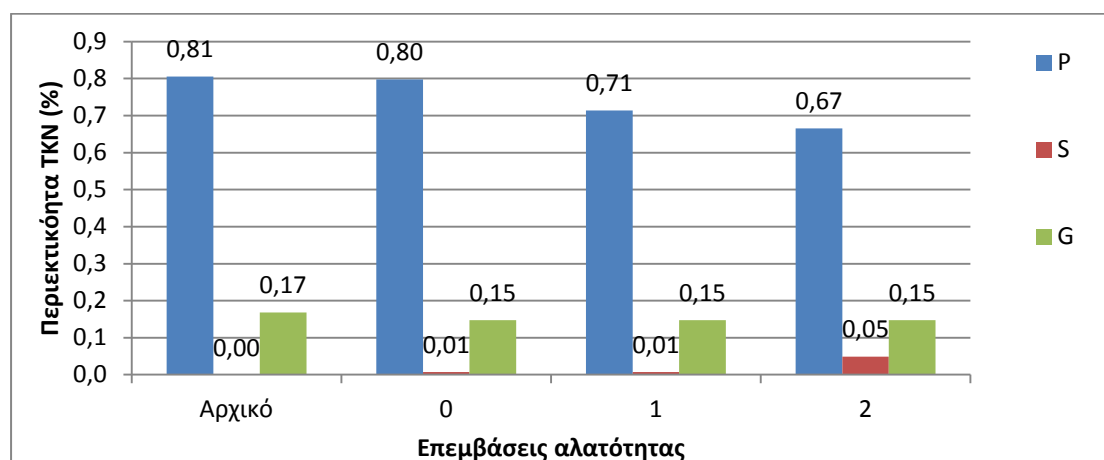
Διάγραμμα 24. Ο λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR) στα διαφορετικά υποστρώματα ανά επέμβαση αλατότητας.

Όπως αναμενόταν το SAR αυξήθηκε κατά τις επεμβάσεις αλατότητας εξαιτίας της μεγάλης αύξησης της συγκέντρωσης του νατρίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μείωση της τιμής του SAR από 25,9 mmol L⁻¹ σε 20,7 mmol L⁻¹ στο θερμοκηπιακό έδαφος κατά την επέμβαση Αλατότητα 0 (αρδευτικό νερό χωρίς αλατότητα).

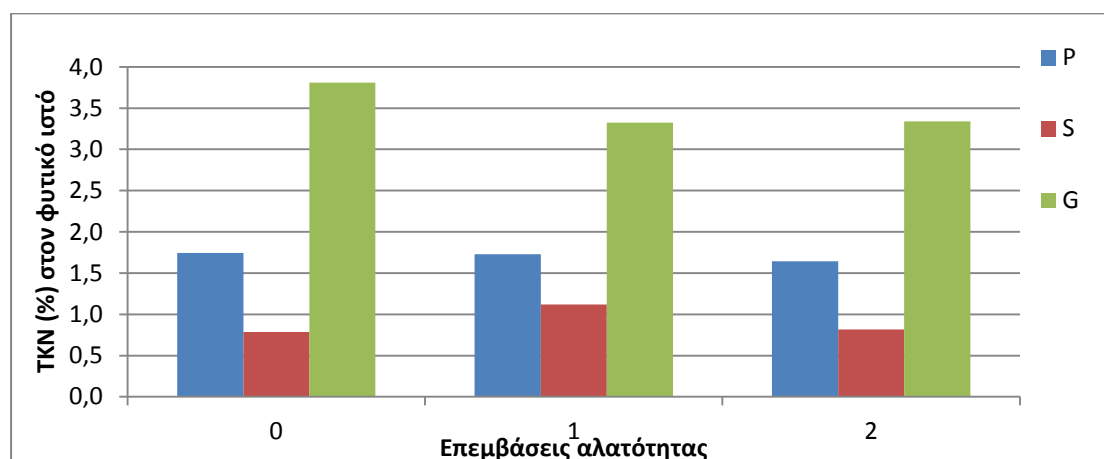
3.3 Συγκεντρώσεις μακρό-θρεπτικών στοιχείων

3.3.1 Άζωτο κατά Kjeldahl

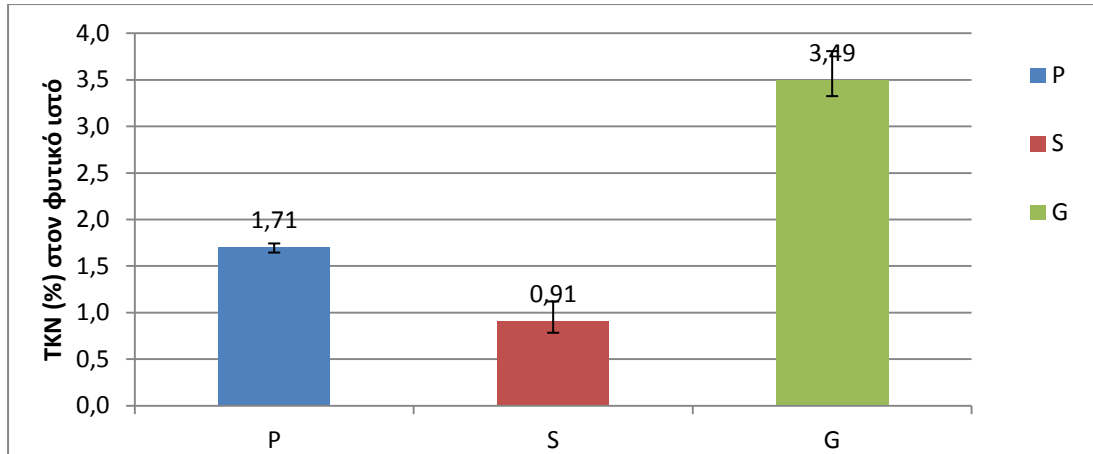
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται το εδαφικό ΤΚΝ καθώς και αυτό που περιέχεται στο φυτικό ιστό των φυτών του πειράματος. Η επίδραση της ισορροπίας του Ν υπό συνθήκες αλατότητας είναι περίπλοκη. Στις περισσότερες μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι η αλατότητα μειώνει την πρόσληψη του Ν από τα φυτά και κατ' επέκταση τη συσσώρευσή του στους ιστούς τους, αλλά υπάρχουν και μελέτες που παρατήρησαν το αντίθετο ή και καμία επίδραση [87].



Διάγραμμα 10. Συγκέντρωση ΤΚΝ στα υποστρώματα ανά επέμβαση.



Διάγραμμα 11. Συγκέντρωση σε ολικά οργανικό άζωτο του υπέργειου μέρους των φυτών στις διαφορετικές επεμβάσεις αλατότητας ανά υπόστρωμα.

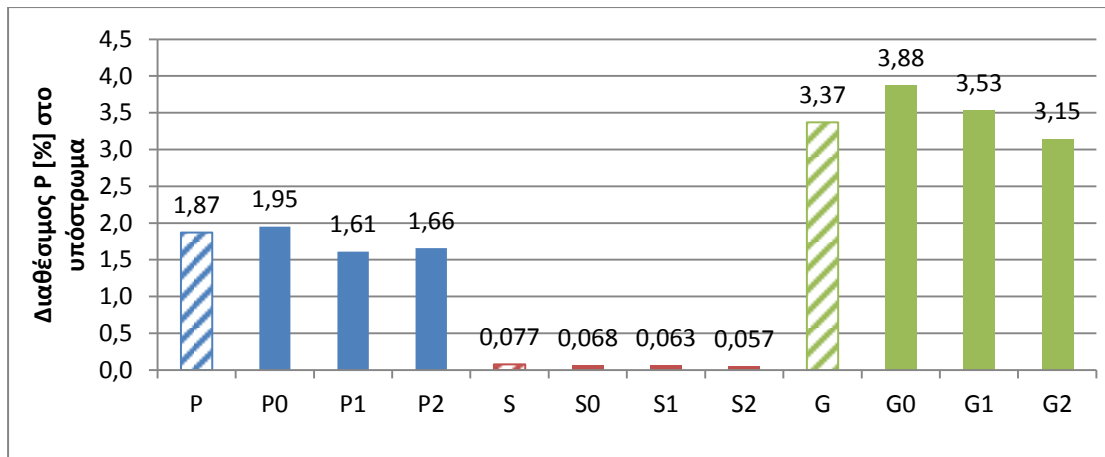


Διάγραμμα 12. Απόκλιση μέσης τιμής TKN φυτών ανά υπόστρωμα και για τις τρεις επεμβάσεις αλατότητας. Στον υπολογισμό της απόκλισης της μέσης τιμής χρησιμοποιήθηκαν όλα τα φυτά και από τις τρεις επεμβάσεις αλατότητας για κάθε υπόστρωμα.

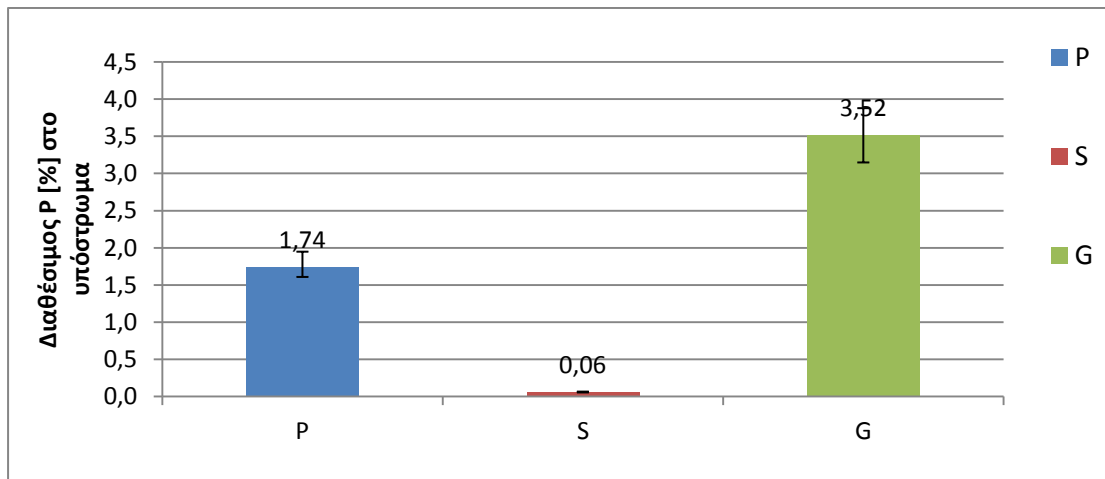
3.3.2 Φώσφορος (P)

Η αλατότητα επηρεάζει την ισορροπία των μορφών του P στο έδαφος (του P που βρίσκεται στο εδαφικό διάλυμα, του διαθέσιμου και του P που είναι δεσμευμένος). Από παλαιότερες μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι η αλατότητα μειώνει τη συγκέντρωση του P στους ιστούς των φυτών [87], ενώ τα αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ότι η αλατότητα δύναται να μειώσει ή να μην επηρεάσει την πρόσληψη P από τα φυτά.

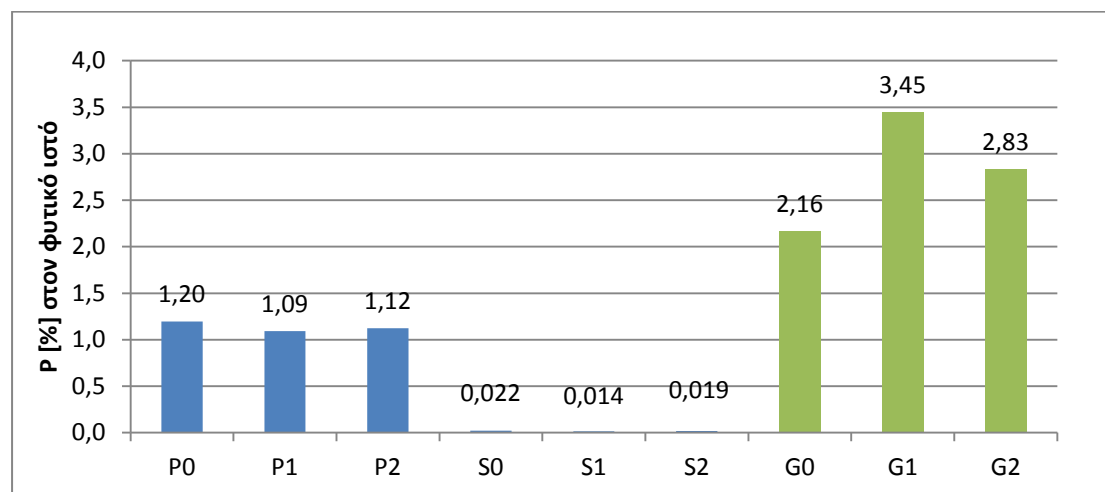
Διαθέσιμος φώσφορος θεωρείται η μορφή του φωσφόρου που μπορεί να αξιοποιηθεί από τους φυτικούς οργανισμούς. Η απορρόφηση του φωσφόρου από τα φυτά εξαρτάται γενικά από τον τύπο του εδάφους, το στάδιο ανάπτυξης του φυτού, τις συνθήκες άρδευσης και έμμεσα από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες η αλατότητα μειώνει την διαθεσιμότητα του φωσφόρου στο έδαφος, με αποτέλεσμα την μείωση της πρόσληψης του από τα φυτά [88]. Από τις τιμές του πίνακα παρατηρείται μια μείωση του διαθέσιμου φωσφόρου με την αύξηση της αλατότητας.



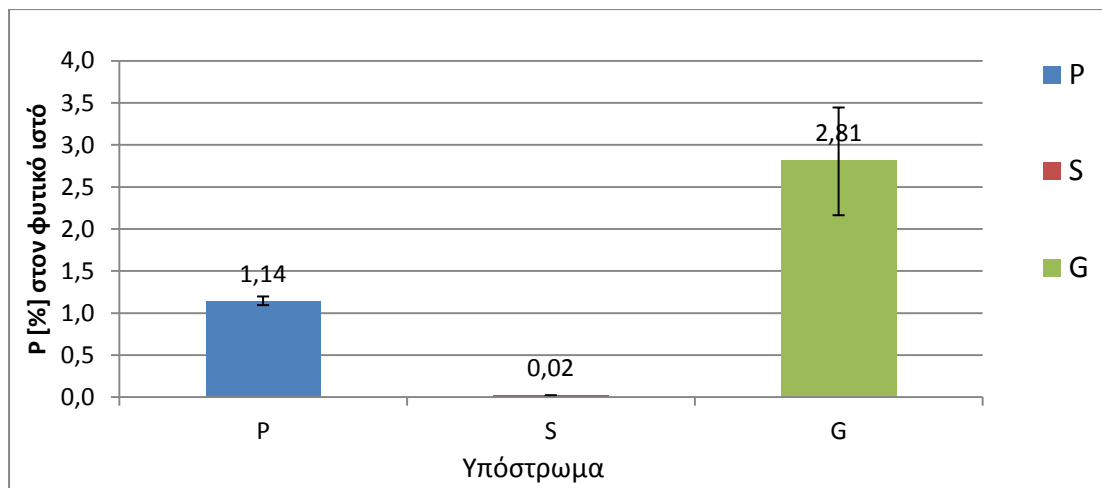
Διάγραμμα 13. Αποτελέσματα φωσφόρου στα υποστρώματα σε κάθε διαφορετική επέμβαση αλατότητας.



Διάγραμμα 14. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση Ρ ανά υπόστρωμα και για τις τρεις επεμβάσεις αλατότητας.



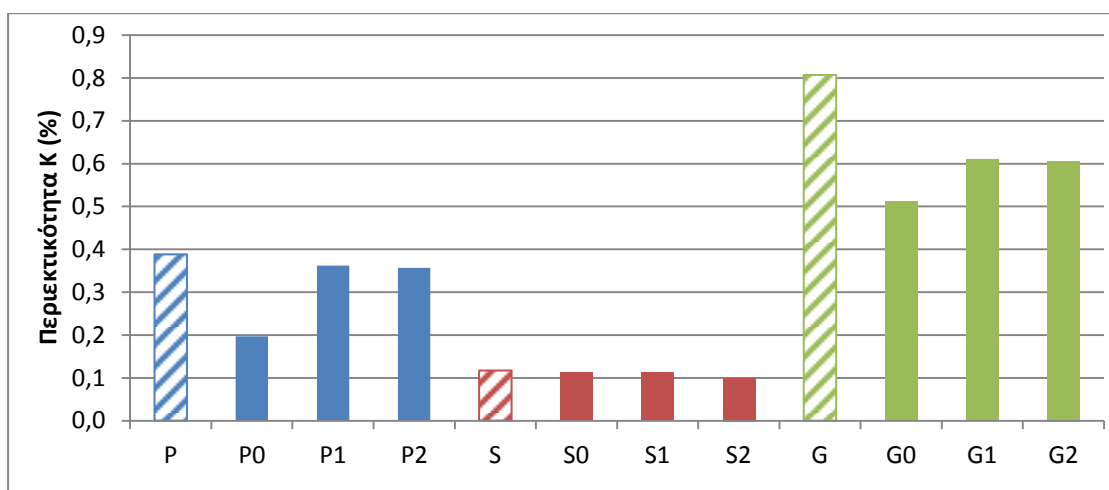
Διάγραμμα 15. Αποτελέσματα φωσφόρου στο φυτικό ιστό σε κάθε διαφορετική επέμβαση αλατότητας.



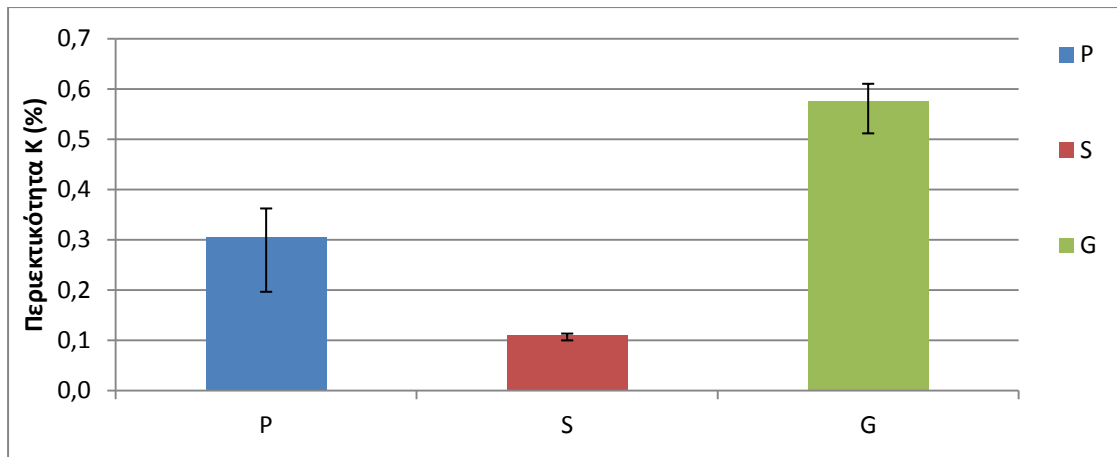
Διάγραμμα 16. Απόκλιση μέσης τιμής P φυτών ανά υπόστρωμα και για τις τρεις επεμβάσεις αλατότητας.

3.3.3 Κάλιο (Κ)

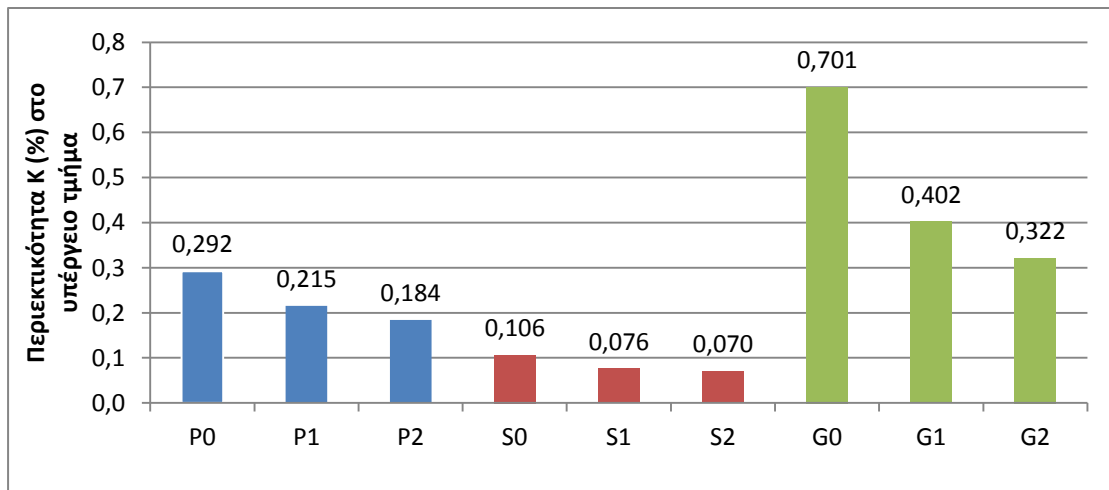
Με βάση πειραματικές μελέτες, τόσο σε καλλιέργειες όσο και σε εργαστηριακή κλίμακα, είναι φανερό ότι τα φυτά δεν αναπτύσσονται απουσία K^+ . Το κάλιο απορροφάται από τα φυτά περισσότερο από όλα τα θρεπτικά στοιχεία εκτός από το N. Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται μείωση της πρόσληψης καλίου όσο αυξάνεται η συγκέντρωση σε NaCl στο αρδευτικό διάλυμα. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη απορρόφηση Na^+ , καθώς αυτά δρουν ανταγωνιστικά με τα ιόντα K^+ .



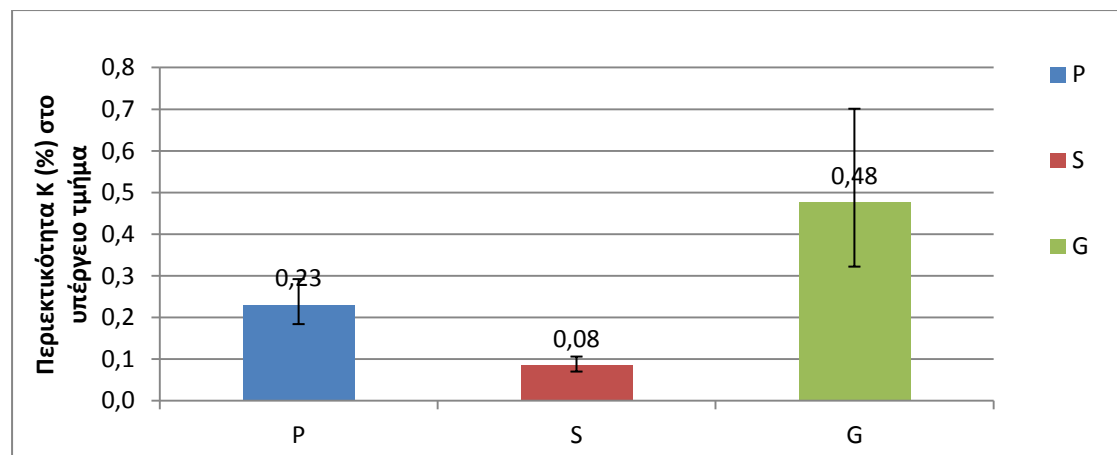
Διάγραμμα 17. Συγκέντρωση % καλίου στα υποστρώματα.



Διάγραμμα 18. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση συγκέντρωσης K^+ ανά υπόστρωμα και για τις τρεις επεμβάσεις αλατότητας.



Διάγραμμα 19. Συγκέντρωση % κάλιου του υπέργειου μέρους ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας και υποστρώματος.

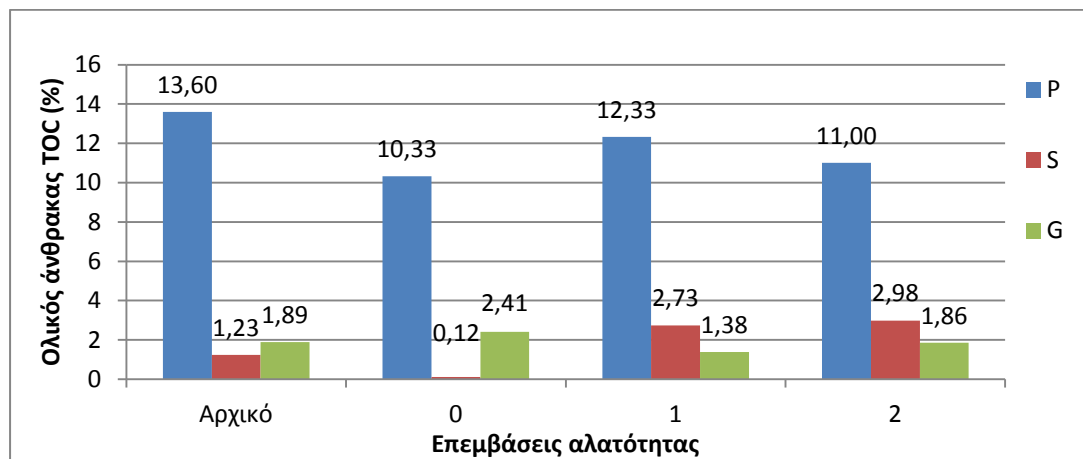


Διάγραμμα 20. Απόκλιση μέσης τιμής K^+ υπέργειου μέρους φυτών ανά υπόστρωμα και για τις τρεις επεμβάσεις αλατότητας.

3.3.4 Οργανική ουσία/οργανικός άνθρακας

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται η εξέλιξη της περιεκτικότητας του εδάφους σε TOC, για κάθε επέμβαση που εφαρμόστηκε. Η αυξημένη συγκέντρωση άλατος στο έδαφος μειώνει την περιεκτικότητα του εδάφους σε TOC, με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγικότητας του εδάφους [87].

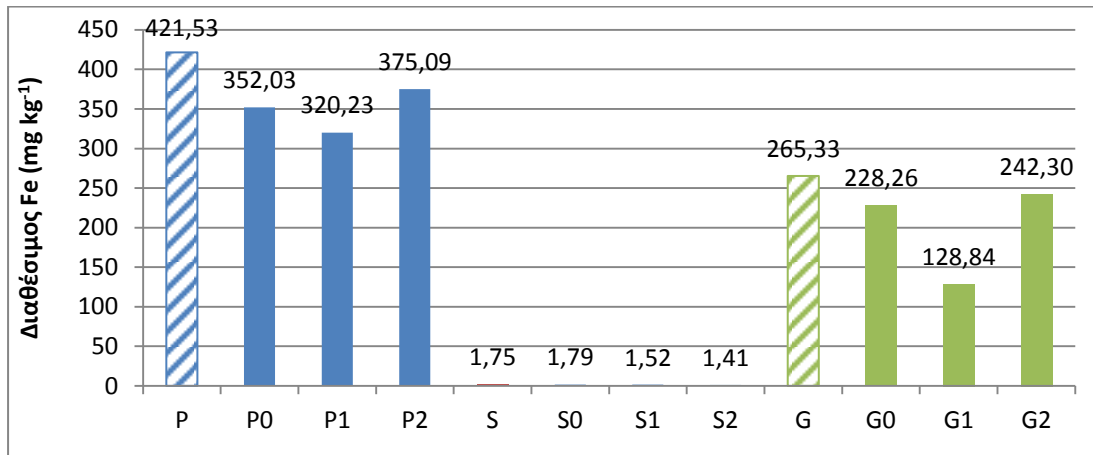
Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα φαίνεται να μειώνεται το TOC με την προσθήκη NaCl στο υπόστρωμα τύρφη-περλίτη και στο θερμοκηπιακό έδαφος. Αυτό φαίνεται να συμφωνεί και με τα βιβλιογραφικά δεδομένα. Στο υπόστρωμα άμμου θαλάσσης παρατηρείται μια αύξηση του TOC και αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι δεν ήταν δυνατό κατά το τέλος του πειράματος να διαχωρίσουμε το ριζικό σύστημα των φυτών από τα υποστρώματα.



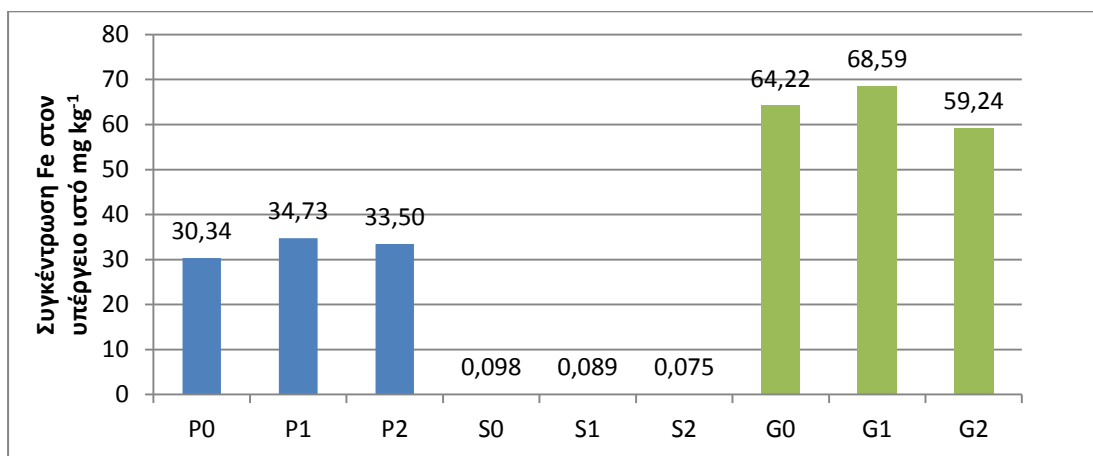
Διάγραμμα 9. Ολικός οργανικός άνθρακας στα υποστρώματα ανά επέμβαση αλατότητας.

3.4 Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων

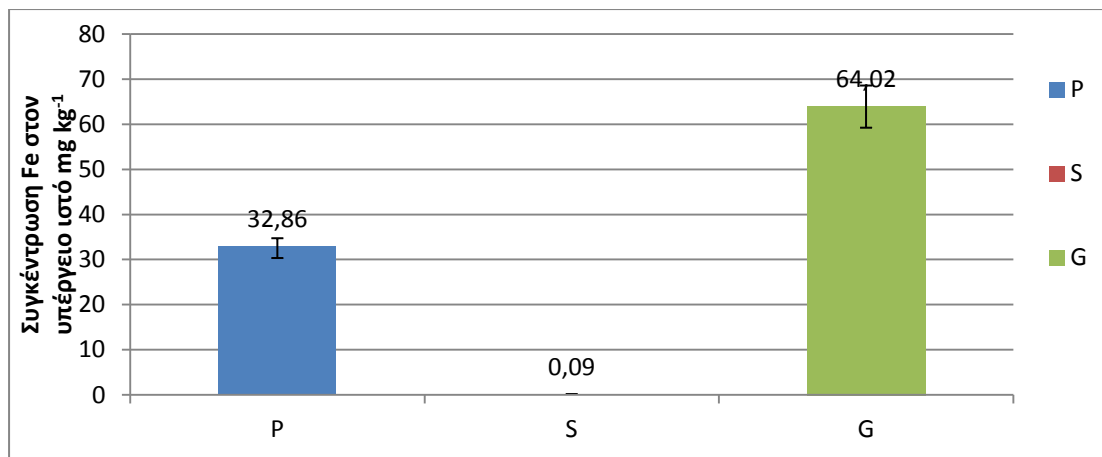
3.4.1 Fe



Διάγραμμα 25. Συγκέντρωση διαθέσιμου Fe στα υποστρώματα ανά επέμβαση αλατότητας.



Διάγραμμα 26. Συγκέντρωση Fe του υπέργειου μέρους ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας και υποστρώματος.

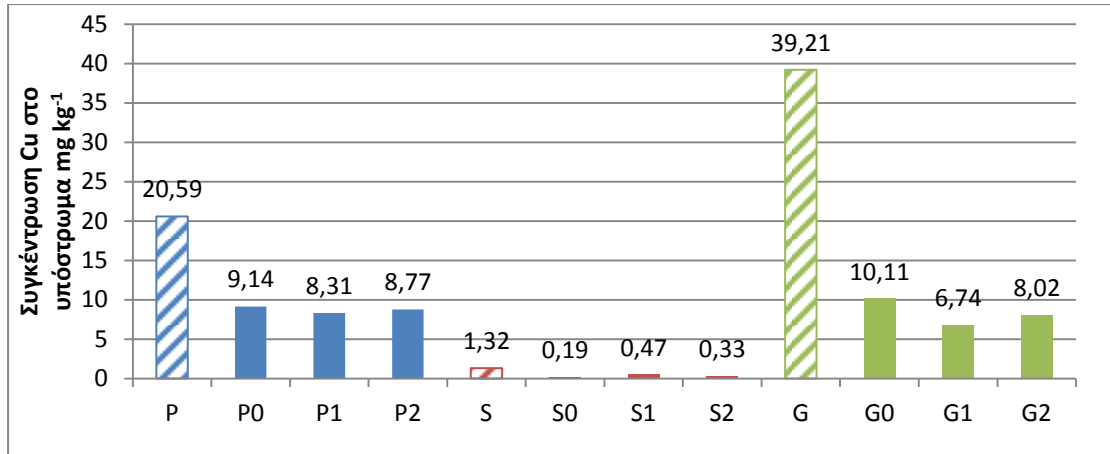


Διάγραμμα 27. Μέση τιμή συγκέντρωσης Fe στο φυτικό ιστό ανά επέμβαση αλατότητας.

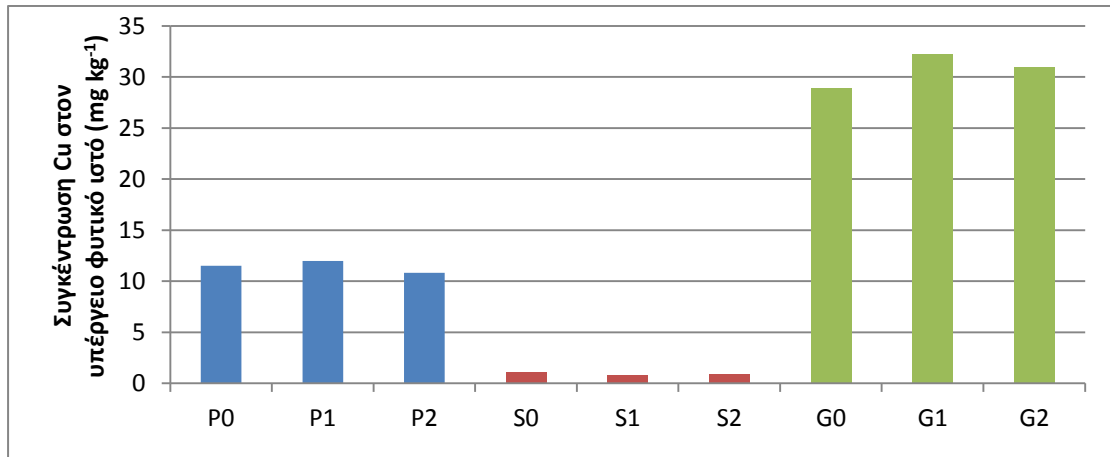
Η ζώνη επάρκειας σιδήρου στο φυτικό ιστό σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, κυμαίνεται από 50 – 250 ppm (επί ξυρού βάρους). Στο θερμοκηπιακό υπόστρωμα τα επίπεδα της συγκέντρωσης του διαθέσιμου Fe βρίσκονται σε ικανοποιητικά επίπεδα, με μέγιστη την επέμβαση G1 (68,51 mg kg⁻¹) όπου τα φυτά αρδεύονταν με διάλυμα NaCl 40 mmol L⁻¹. Στο υπόστρωμα τύρφης-περλίτη όπου η περιεκτικότητα του Fe είναι υψηλή, δεν παρατηρείται ανάλογη απορρόφηση του στοιχείου στο φυτικό ιστό. Στο υπόστρωμα της άμμου η συγκέντρωση του διαθέσιμου Fe ήταν πολύ μικρή, και ανάλογα η μετακίνησή του στο υπέργειο τμήμα του φυτού ήταν ελλιπής, με αποτέλεσμα και την παρατήρηση τροφοπενίας σε πολλά φυτά.

3.4.2 Cu, Zn

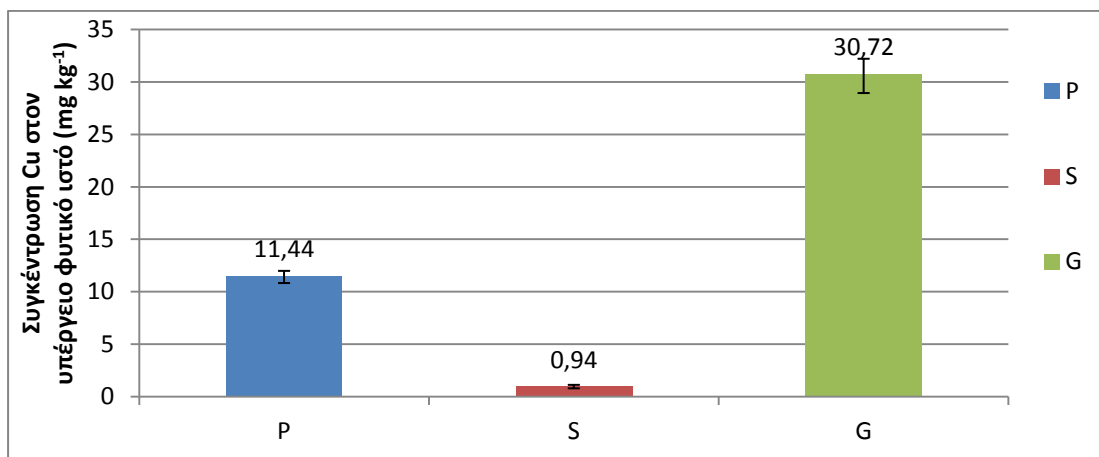
Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα η περιεκτικότητα του θερμοκηπιακού εδάφους σε Cu είναι 39,21 mg kg⁻¹. Σε όλα τα υποστρώματα ο χαλκός απορροφάται σε μεγαλύτερο ποσοστό από τα φυτά, όσο αυξάνεται η αλατότητα στο αρδευτικό διάλυμα.



Διάγραμμα 28. Συγκέντρωση διαθέσιμων ποσοτήτων Cu στα υποστρώματα ανά επέμβαση αλατότητας.



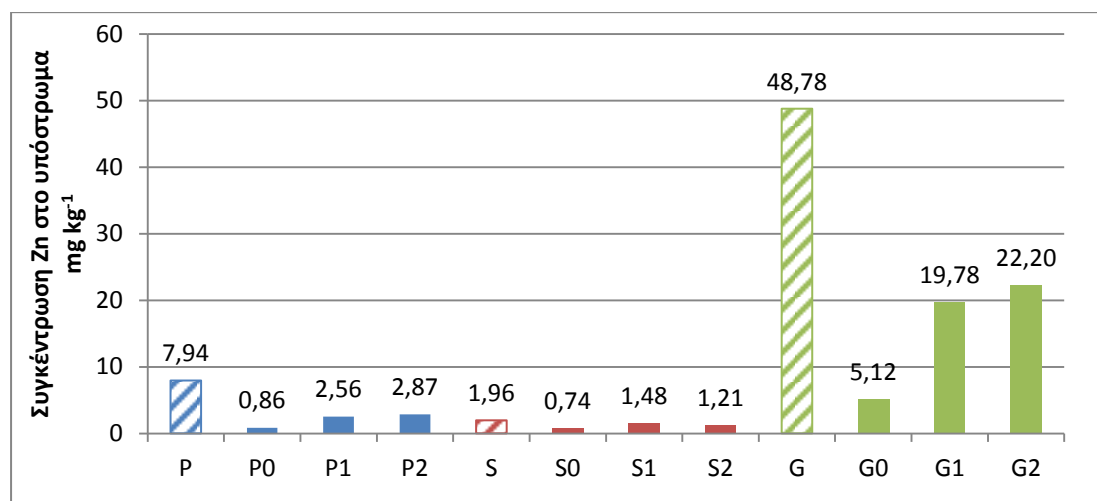
Διάγραμμα 29. Συγκέντρωση Cu στο υπέργειο μέρος του φυτού ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας και υποστρώματος.



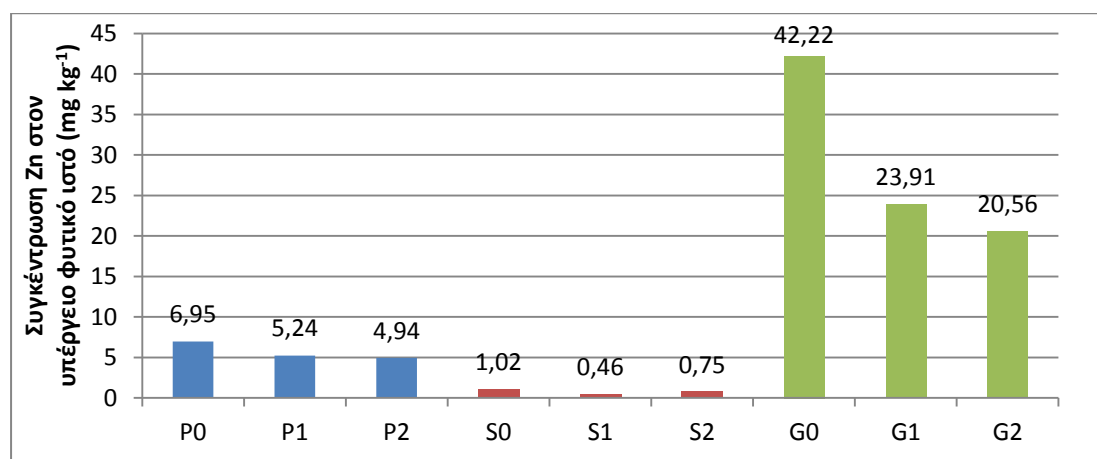
Διαγραμμα 30. Μέση τιμή και σταθερή απόκλιση συγκέντρωσης Cu στο φυτικό ιστό ανά επέμβαση αλατότητας.

Ο Ζn θεωρείται μη τοξικός σε περιεκτικότητα 30-80 ppm στα εδάφη. Η συγκέντρωση του στοιχείου είναι πολύ χαμηλή στα υποστρώματα τύρφης-περλίτη και άμμου. Στο θερμοκηπιακό υπόστρωμα η συγκέντρωσή του είναι αυξημένη, κάτω όμως από τα όρια τοξικότητας.

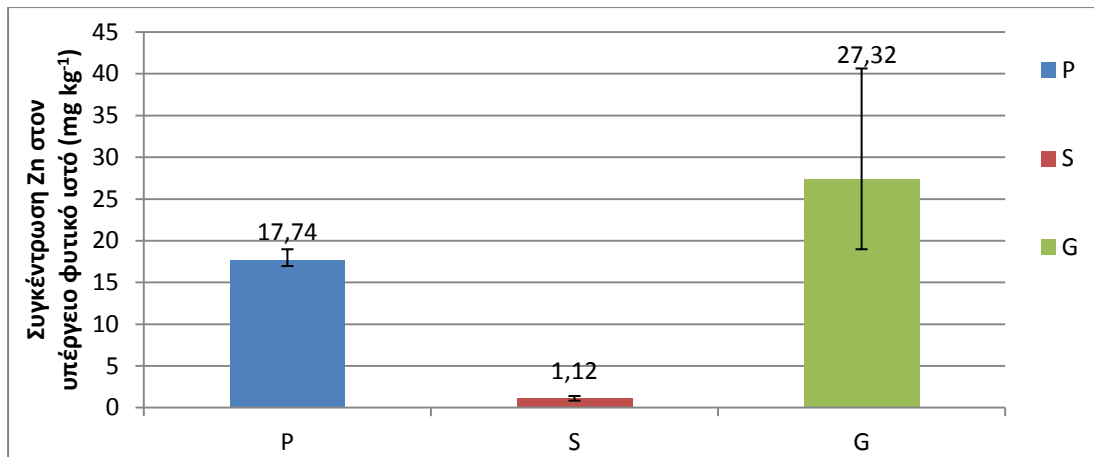
Η περιεκτικότητα του Ζn στο θερμοκηπιακό υπόστρωμα ήταν 48,78 mg kg⁻¹. Το αλόφυτο απορρόφησε υψηλές συγκεντρώσεις του παραπάνω μετάλλου στο φυτικό ιστό. Η απορρόφηση του ψευδαργύρου μειώνεται όσο αυξάνεται η αλατότητα του διαλύματος άρδευσης.



Διάγραμμα 31. Συγκέντρωση διαθέσιμου Ζn στα υποστρώματα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις αλατότητας.



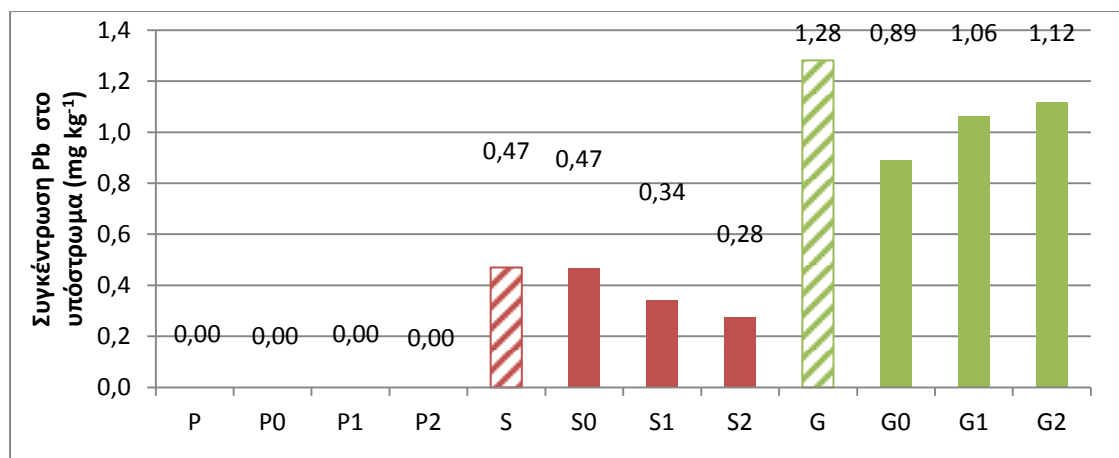
Διάγραμμα 32. Συγκέντρωση Ζn στο υπέργειο μέρος του φυτού ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας και υποστρώματος.



Διάγραμμα 33. Μέση τιμή συγκέντρωσης Zn στο φυτικό ιστό ανά επέμβαση αλατότητας.

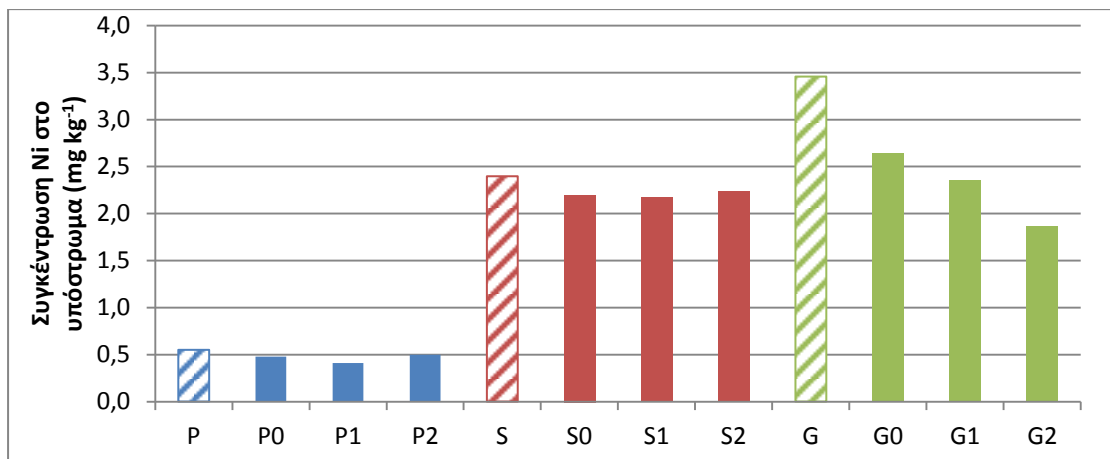
3.4.3 Pb, Ni, Cr

Στα διαγράμματα 24 και 25 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων Ni, Cr και Pb στα διαφορετικά υποστρώματα. Η συγκέντρωση του Cr στο θερμοκηπιακό υπόστρωμα είναι 4,23 mg kg⁻¹, που μειώνεται κατά τις επεμβάσεις με αλατότητα, καθώς απορροφάται μια μικρή ποσότητα από το αλόφυτο. Όπως και στο Cr, έτσι και στα στοιχεία Ni και Pb η απορρόφηση των στοιχείων αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση NaCl στο διάλυμα άρδευσης. Πρέπει να σημειώσουμε ότι οι συγκεντρώσεις των συγκεκριμένων βαρέων μετάλλων που ανιχνεύθηκαν στα υποστρώματα δεν κρίνονται τοξικές για τα φυτά.

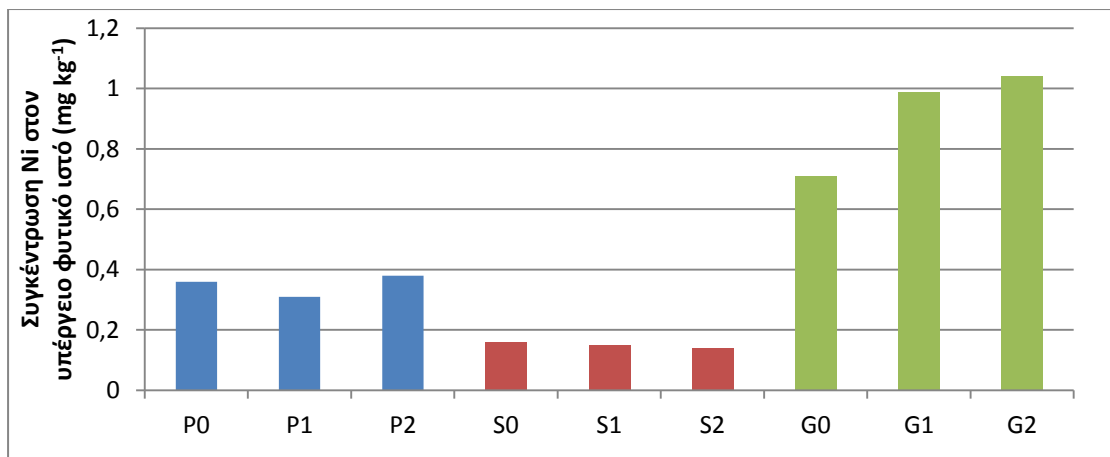


Διάγραμμα 34. Συγκέντρωση διαθέσιμων ποσοτήτων Pb ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας και υποστρώματος.

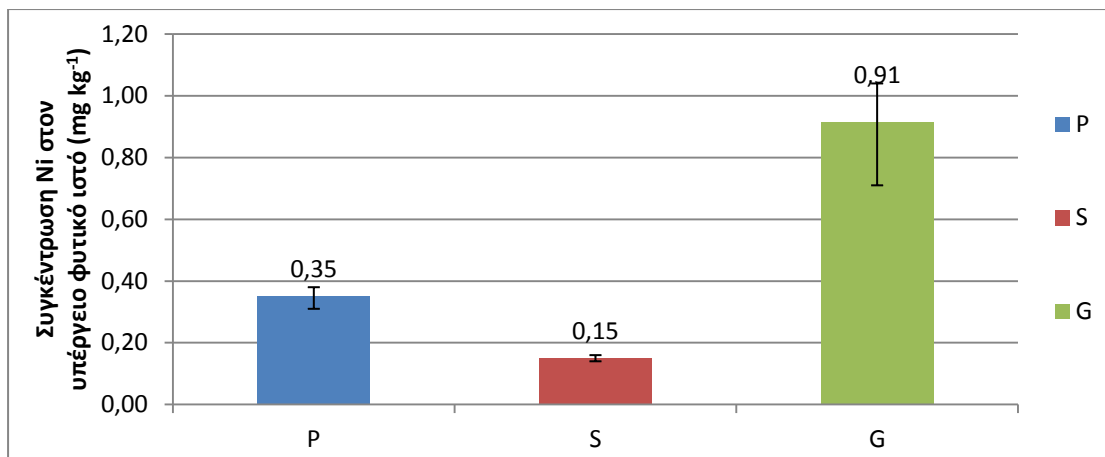
Στο υπέργειο μέρος των φυτών σε όλες τις διαφορετικές επεμβάσεις υποστρώματος και αλατότητας δεν ανιχνεύτηκε Pb. Ο μόλυβδος δεν είναι ευκίνητος μέσα στο έδαφος και η μεταφορά του στους βλαστούς είναι ελάχιστη. Μόνο το 2-3% μπορεί να μεταφέρεται στο υπέργειο μέρος. Καθώς χρησιμοποιεί κανάλια μεταφοράς όμοια με αυτά του Ca δικαιολογείται η μειωμένη απορρόφηση σε ένα υπόστρωμα με αυξημένη συγκέντρωση ασβεστίου.



Διάγραμμα 35. Συγκέντρωση διαθέσιμου Ni στα υποστρώματα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις αλατότητας.

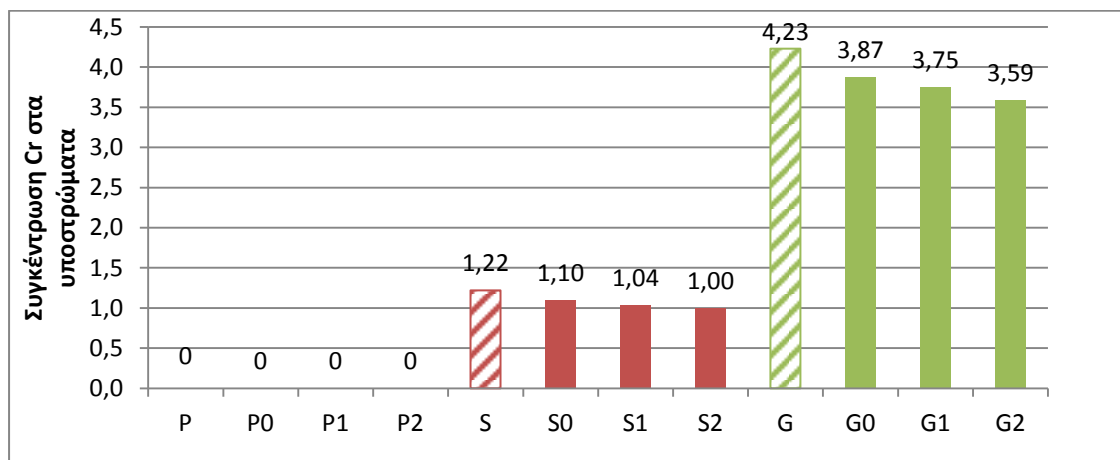


Διάγραμμα 36. Συγκέντρωση Ni στο υπέργειο μέρος του φυτού ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας και υποστρώματος.

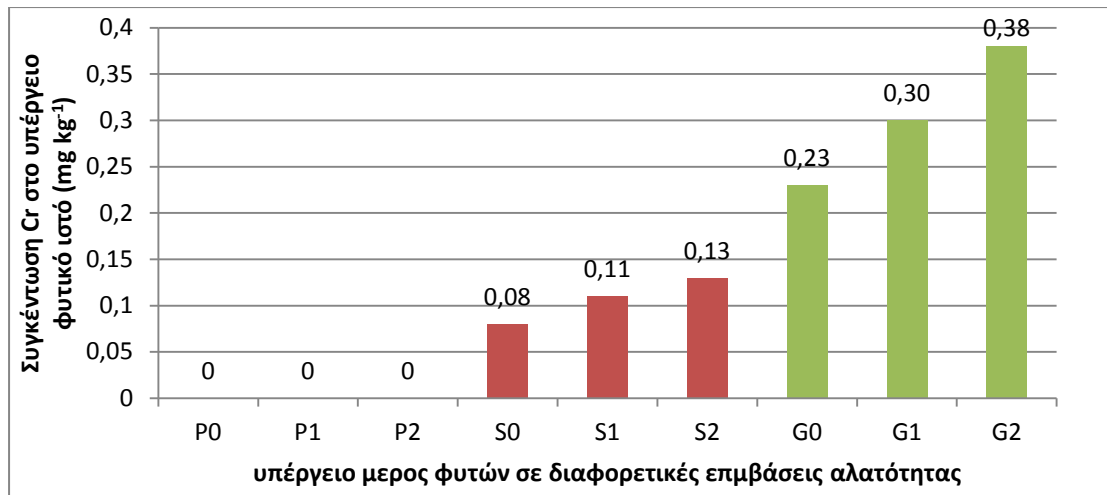


Διάγραμμα 37. Μέση τιμή και τυπικά απόκλιση συγκέντρωσης Ni στο φυτικό ιστό ανά επέμβαση αλατότητας.

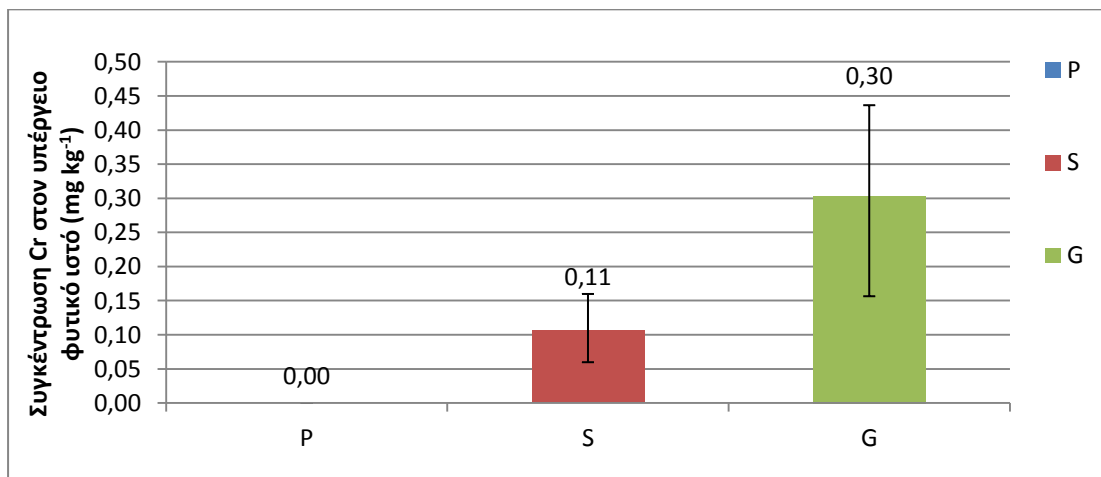
Το Cr⁶⁺ είναι πιο ευκίνητο στο έδαφος. Ανάγεται σε Cr³⁺ στο ριζικό σύστημα και μεταφέρεται στο υπέργειο τμήμα του φυτού. Μικρή συγκέντρωση χρωμίου μπορεί να απορροφηθεί, μόνο το 1-2% της διαθέσιμης. Παρακάτω παρατηρείται μια αυξημένη απορρόφηση από το αλόφυτο και στις επεμβάσεις αυξημένης αλατότητας.



Διάγραμμα 38. Συγκέντρωση διαθέσιμου Cr στα υποστρώματα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις αλατότητας.



Διάγραμμα 39. Συγκέντρωση Cr στο υπέργειο μέρος του φυτού ανά διαφορετική επέμβαση αλατότητας.



Διαγραμμα 40. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση συγκέντρωσης Cr στο φυτικό ιστό ανά επέμβαση αλατότητας.

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Συμπεράσματα και προτάσεις

Τα αποτελέσματα του πειράματος μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βαθμίδες. Αρχικά στην επίδραση της ποιότητας του αρδευτικού διαλύματος, του υποστρώματος και των κλιματικών συνθηκών στην ανάπτυξη του αλόφυτου *Salsola soda* και σε δεύτερη φάση στην εξέταση του αλόφυτου ως προς την απορρόφηση των μετάλλων.

Από τα αποτελέσματα της ανάπτυξης των φυτών παρατηρούμε ότι το *Salsola soda* έχει την ικανότητα να αναπτύσσεται σε διάφορους τύπους εδαφών και με πολύ υψηλά επίπεδα αλατότητας. Αρχικά στο υποβαθμισμένο θερμοκηπιακό έδαφος παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη ανάπτυξη και στις τρεις επεμβάσεις αλατότητας. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την μεγαλύτερη συγκέντρωση θρεπτικών που περιείχε το συγκεκριμένο υπόστρωμα. Καθώς στο συγκεκριμένο θερμοκήπιο από όπου πάρθηκε το έδαφος, υπήρχε λίγο καιρό πριν, ενεργή καλλιέργεια, δικαιολογεί την υψηλή συγκέντρωση θρεπτικών. Η ανάπτυξη του αλόφυτου ήταν καλύτερη στην επέμβαση Αλατότητα 0 (2,065 g), χωρίς όμως να έχει μεγάλες διαφορές από τις άλλες δύο επεμβάσεις αλατότητας 1 (1,865 g) και 2 (1,586 g). Αυτό αποδεικνύει ότι το αλόφυτο μπορεί να αναπτυχθεί με μεγάλη ευκολία σε συνθήκες μέτριας (40 mM NaCl) αλλά και πολύ υψηλής (120 mM NaCl) αλατότητας.

Στο υπόστρωμα τύρφης-περλίτη, παρόλο που παρατηρήθηκε υγιείς ανάπτυξη του αλόφυτου, δεν εξελίχθηκε τόσο όσο στο θερμοκηπιακό έδαφος. Σε αυτό το υπόστρωμα όμως παρατηρήθηκε διαφορετική επίδραση της αλατότητας στην ανάπτυξη του φυτού. Το φυτό αναπτύχθηκε καλύτερα στην επέμβαση αλατότητας 2 (120 mM NaCl) από ότι στην αλατότητα 0. Και σε αυτή την περίπτωση γίνεται αντιληπτή η ικανότητα του αλόφυτου να αναπτύσσεται και σε συνθήκες υψηλής αλατότητας.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στο θερμοκηπιακό έδαφος η αλατότητα ήταν από την αρχή σε πολύ υψηλά επίπεδα με SAR=25,9 και EC=27,6 dS m⁻¹, ενώ στο υπόστρωμα τύρφη-περλίτη είχε SAR=2,5 και EC=0,98 dS m⁻¹. Έτσι η υψηλή συγκέντρωση αλάτων στο θερμοκηπιακό έδαφος μαζί με την υψηλή προστιθέμενη αλατότητα με τις επεμβάσεις 1 και 2, οδήγησε στην χαμηλότερη απόκριση του αλόφυτου.

Όλα τα παραπάνω αποδεικνύουν την ικανότητα του φυτού για φυτοαποκατάσταση εδαφών με μεγάλη συγκέντρωση αλάτων.

Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από πολλές παραγωγικές θερμοκηπιακές μονάδες που αντιμετωπίζουν παρόμοια προβλήματα αλατότητας, και που για να τα επιλύσουν κάνουν χρήση πολύτιμου αρδευτικού νερού ώστε να ξεπλύνουν το έδαφος από την αλατότητα. Καλλιεργώντας *Salsola soda*, με καλλιεργητική περίοδο ένα μήνα, γεγονός που σημαίνει αλληπάλληλες δύο με τρεις καλλιεργητικές περιόδους, μπορούν να καταφέρουν να ελαττώσουν την αλατότητα του εδάφους σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Βεβαίως πρέπει να αναφέρουμε ότι πρόκειται για ένα εδώδιμο αλόφυτο, που σημαίνει κερδοφορία σε μια παραγωγική μονάδα την στιγμή που παράλληλα εφαρμόζεται φυτοεξυγίανση του εδάφους. Επιπροσθέτως, το αλόφυτο μπορεί να αναπτυχθεί και σε αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες (όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 2.2**) γεγονός που καθιστά το φυτό ικανό να αναπτυχθεί σε καλοκαιρινούς μήνες, που τα θερμοκήπια δεν καλλιεργούνται. Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για ένα πολύ κερδοφόρο είδος καθώς έχει βρεθεί να πωλείται σε αλυσίδες υπεραγορών προς 3,29 €/kg όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1. *Salsola soda* σε καφάσι αλυσίδας υπεραγορών.

Τα αποτελέσματα της απορρόφησης βαρέων μετάλλων από το υπέργειο μέρος των φυτών δεν μας έδειξαν πολύ σαφή αποτελέσματα. Η περιεκτικότητα και οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο υποβαθμισμένο θερμοκηπιακό έδαφος, στο οποίο και αναμέναμε τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μετάλλων, δεν ήταν υψηλή και δεν μας βοήθησαν να εξάγουμε ασφαλή δεδομένα.

Το υπόστρωμα τύρφης-περλίτη δεν περιείχε, παρά σε ελάχιστες συγκεντρώσεις, βαρέα μέταλλα γεγονός που ήταν αναμενόμενο. Στο υπόστρωμα άμμου θαλάσσης ανιχνεύθηκαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μετάλλων καθώς το δείγμα πάρθηκε από παράκτια περιοχή με πάρα πολύ μεγάλη τουριστική επισκεψιμότητα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της απορρόφησης των βαρέων μετάλλων και της ανάπτυξης των αλόφυτων, παρατηρούμε ότι η απορρόφηση είναι ανάλογη της ανάπτυξης των φυτών. Όμως στο θερμοκηπιακό έδαφος, στο οποίο η ανάπτυξη των φυτών είναι και η μεγαλύτερη, δεν είχαμε υψηλές συγκεντρώσεις (σε τοξικό βαθμό) μετάλλων, ώστε να διαπιστώσουμε με ασφάλεια αν αυτά δρουν με καταλυτικό τρόπο στην ανάπτυξη των φυτών στις διαφορετικές επεμβάσεις αλατότητας.

Αξιοσημείωτη είναι η υψηλή απορρόφηση Zn που παρατηρείται σε όλα τα υποστρώματα και ιδιαίτερα στο θερμοκηπιακό έδαφος όπου απαντάται με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ($48,78 \text{ mg kg}^{-1}$). Η απορρόφηση του Zn φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από τα άλλα μέταλλα από την αύξηση της αλατότητας. Στην επέμβαση με το νερό άρδευσης δικτύου παρατηρείται η μεγαλύτερη απορρόφηση (σε ποσοστό 86%), ενώ ελαττώνεται με την αύξηση της αλατότητας (ελάττωση αρχικής συγκέντρωσης 49% και 42% στις επεμβάσεις αλατότητας 1 και 2).

Παρόμοια αποτελέσματα εμφανίζονται και στην απορρόφηση του Cu. Παρατηρούμε ότι το αλόφυτο έχει την ικανότητα να σωρεύει μεγάλη συγκέντρωση του μετάλλου στο φυτικό ιστό του. Η αλατότητα του υποστρώματος αλλά και η διαφορετική επέμβαση άρδευσης δεν φαίνεται να έχει σημαντικές διαφοροποιήσεις στην απορρόφηση Cu από το φυτό.

Για να διερευνήσουμε και να κατανοήσουμε καλύτερα την απορρόφηση βαρέων μετάλλων, θα μπορούσαμε σε μελλοντικά πειράματα, να επιμολύνουμε τα υποστρώματα με υψηλότερες συγκεντρώσεις κοντά στις οριακές επιτρεπόμενες τιμές, και να αναλύσουμε την μετακίνησή τους από το υπόστρωμα στο υπέργειο μέρος του φυτού, καθώς και την απόκριση του αλόφυτου στις τοξικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μια πειραματική διάταξη όπου τα φυτά θα αρδεύονταν με ακόμα μεγαλύτερη συγκέντρωση NaCl, πολύ υψηλότερη από τα 120 mM, ώστε να εξεταστεί η απόκριση του φυτού και σε ακόμα πιο ακραίο περιβάλλον.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των εδώδιμων φυτών είναι και η θρεπτική τους αξία. Αξίζει μελλοντικά να διερευνήσουμε την συγκέντρωσή του υπέργειου μέρους του φυτού σε πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπαρά και άλλες παραμέτρους που συνθέτουν τη θρεπτική αξία του φυτού και με διαφορετικές επεμβάσεις αλατότητας.

5. Βιβλιογραφία

1. Lorestani B., Yousefi N., Cheraghi M., Farmany A.: Phytoextraction and phytostabilization potential of plants grown in the vicinity of heavy metal-contaminated soils: a case study at an industrial town site. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013, 185, pp 10217–10223.
2. <https://www.un.org/press/en>
3. Ragab Y, Nabih M, Aly I, Kamal A, Abd-Allah MA, El-Refai R, Emad Y, El-Naggar A, El-Shaarawy N, Rasker JJ.: Magnetic resonance imaging features of hip disorders in an Egyptian pediatric population. *Reumatismo*. 2015, 67, pp 68-77.
4. Banwart S.C., Bernasconi S.M., Bloem J., Blum W., Brandao M., Brantley S., Chabaux F., Duffy C., Kram P., Lair G., Lundin L., Nikolaidis N., Novak M., Panagos P., Ragnarsdottir K.V., Reynolds B., Rousseva S., de Ruyter P., van Gaans P., van Riemsdijk W., White T. and Zhang B. Assessing soil processes and function across an international network of Critical Zone Observatories: research hypotheses and experimental design. *Vadose Zone J*. 2011, 10, pp 974–987.
5. <http://www.greekencyclopedia.com/alofyta-p6803.html>
6. Glenn EP, Brown JJ, Blumwald E. Salt tolerance and crop potential of halophytes. *Critical Reviews in Plant Sciences* . 1999, 18, pp 227–256.
7. Rabhi M, Giuntini D, Castagna A, Remorini D, Baldan B, Smaoui A, Abdelly C, Ranieri A. *Sesuvium portulacastrum* maintains adequate gas exchange, pigment composition, and thylakoid proteins under moderate and high salinity. *Journal of Plant Physiology*. 2010a, 167, pp1336–1341.
8. Manousaki E., Kalogerakis N. Halophytes present new opportunities in phytoremediation of heavy metals and saline soils. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2011, 50, pp. 656-660.

9. "*Salsola soda* L". Integrated Taxonomic Information System. Retrieved May 19, 2007
10. Jepson Willis Linn. The Jepson manual: higher plants of California, James C. Hickman, editor: Berkeley: University of California Press, 1993, pp. 514.
11. Glenn Edward P., Brown J. Jed, and Blumwald Eduardo. Salt Tolerance and Crop Potential of Halophytes. Critical Review in Plant Sciences. 1999, 18, pp. 227–255.
12. Xiong Liming and Zhu Jian-Kang, "Salt Tolerance," in Somerville, C. R. and Meyerowitz, E. M., eds, The Arabidopsis Book. American Society of Plant Biologists, Rockville, MD., 2002.
13. https://en.wikipedia.org/wiki/Salsola_soda
14. Clow Archibald and Clow Nan L. Chemical Revolution, Ayer Co Pub, June 1952, pp. 65–90.
15. Turner Guy. Allume Catina and the Aesthetics of Venetian Cristallo. Journal of Design History. 1999, pp. 111–122.
16. Mayes, Frances. Bella Tuscany: The Sweet Life of Italy, Broadway, 2000, p 15.
17. Tundis R., Loizzo M.R., Bonesi M., Menichini F., Dodaro D., Passalacqua N.G., et al. In vitro cytotoxic effects of *Senecio stabianus* Lacaita (Asteraceae) on human cancer cell lines. Natural Product Research. 2009, 23, pp 1707–1718.
18. Colla S.R., Otterstatter M.C., Gegear R.J., Thomson J.D., 2006. Plight of the bumble bee: pathogen spillover from commercial to wild populations. Biological Conservation. 2006, 129, pp 461–467.
19. Vance C. P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition: plant nutrition in a world of declining renewable resources. Plant Physiology. 2001, 129, pp 390-397.
20. Van Beek, C. L. and Tóth, G.: Risk Assessment Methodologies of Soil Threats in Europe, JRC Scientific and Policy Reports, 2012.

21. Αντώνιου Αποστολάκη. Προσομοίωση Καλλιέργειας Θερμοκηπιακής Τομάτας με το Μοντέλο SALTMED: Σενάρια Ποιότητας Άρδευσης και Κλιματικής Αλλαγής. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2017.
22. Ondrasek G., Romic D., Rengel Z., Romic M., Zovko M. Cadmium accumulation by muskmelon under salt stress in contaminated organic soil. *Science of the Total Environment*. 2009, 407, pp 2175-2182.
23. Αγγελάκης & Τσομبانόγλου. Υγρά Απόβλητα: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτησης, Επαναχρησιμοποίηση και Διάθεση Εκροών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ελλάδα. 1995.
24. Ignacio R.I. & Porporato A. *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*, Cambridge, 2004.
25. Brady N. & Weil R. *The nature & properties of soils*, 3rd edition. Pearson, 2011.
26. Munns R. Genes and Salt Tolerance. *New Phytologist*. 2005, 167, pp.645–663.
27. DERM. *Salinity management handbook*, 2nd edition. The State of Queensland, Australia, 2011.
28. Munns R. & Tester, M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual review of plant biology*. 2008, 59, pp.651–81.
29. Maas E.V. & Hoffman G.J. Crop salt tolerance, current assessment. *Irrigation and Drainage*. 1977, 103, pp.115–134.
30. Ayers R.S. & Westcot D.W. *Water quality for agriculture*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1985.
31. Fricke W. Rapid and tissue specific accumulation of solutes in the growth zone of barley leaves in response to salinity. *Planta*. 2004, 219, pp.515–525.
32. Davies W.J., Kudoyarova G. & Hartung W. Long-distance ABA signaling and its relation to other signaling pathways in the detection of

- soil drying and the mediation of the plant's response to drought. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2005, 24, pp.285–295.
33. Zhu J.K.,. Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*. 2001, 6, pp.66–71
 34. Flowers T.J. Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*. 2004, 55, pp.307–319.
 35. Flowers T.J., Ragab R., Malash N., Gawad G.A., Cuartero J. & Arslan, A. Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean: SALTMED. *Agricultural Water Management*. 2005, 78, pp.3–14.
 36. Alloway B.J. “*The Origins of Heavy metals in soils*” in: Alloway B.J., *Heavy Metals in Soils*, 2nd edition, Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman & Hall, UK, 1995.
 37. Orcutt D.M., Nilsen E.T. *Physiology of Plants under Stress, soil and biotic factors*, John Wiley & sons Inc, 2000.
 38. Jadia C.D., Fulekar M.H. Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques. *African Journal of Biotechnology*. 2009, 8, pp 921-928.
 39. Farmaki E.G., Thomaidis N.S. Current status of the metal pollution of the environment of Greece– A Review. *Global NEST Journal*. 2008, 10, pp 366-375.
 40. Irfan M, Safdar A, Syed Q, Nadeem M. Isolation and screening of cellulolytic bacteria from soil and optimization of cellulase production and activity. *Turkish Journal of Biochemistry*. 2012, 37, pp287–293.
 41. Burzynski M. The uptake and accumulation of phosphorus and nitrates and the activity of nitrate reductase in cucumber seedlings treated with Pb and Cd. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 1988, 57, pp 349–359.
 42. Lindh U., 2007. Metal biology: aspects of beneficial effects. *AMBIO*. 2007, 36, pp 107–110.
 43. Schützendübel A., Polle A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *Journal of Experimental Botany*. 2002, 53, pp 1351–1365.

44. Fediuc E., Lips S.H., Erdei L. O-Acetylserine (thiol) lyase activity in Phragmites and Typha plants under cadmium and NaCl stress conditions and the involvement of ABA in the stress response. *Journal of Plant Physiology*. 2005, 162, pp 865– 872.
45. Tong Y.P., Kneer R., Zhu Y.G. Vacuolar compartmentalization: a second generation approach to engineering plants for phytoremediation. *Trends Plant Sci*. 2004, 9, p 7–9.
46. Yang X., Feng Y., He Z., Stoffella P. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Chemistry & Biology*. 2005, 18, pp 339-353.
47. Karakas S., Ali Cullu M., Kaya, C., Dikilitas M. Halophytic companion plants improve growth and physiological parameters of tomato plants grown under salinity. *Pakistan Journal of Botany*. 2016, 48, p. 21-28.
48. Sharma P. and Dubey R.S. Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 2005, 17, p 35-52.
49. Kabata – Pendias A. and Pendias H. *Trace Elements in soils and plants*, Edition, CRC Press LLC, 2001.
50. Peralta-Videa J.R., Lopez M.L., Narayan M., Saupe G. and Gardea-Torresdey J. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*. 2009, 41, pp 1665-1677.
51. Yadav S.K. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants”, *South African Journal of Botany*. 2010, 76, pp167-179.
52. Singh R.P., Tripathi R.D., Sinha S.K., Maheshwai R. and Srivastava H.S. Response of higher plants to lead contaminated environment. *Chemosphere*. 1977, 34, pp 2467-2493
53. Xiong Z.T. Bioaccumulation and physiological effects of excess lead in a roadside pioneer species *Sonchus Oleraceus* L. *Environmental Pollution*. 1997, 97, pp 275-279

54. Dixon N.E., C. Gazzola R.L. Blakely and B. Zerner. Jack-bean urease. A metalloenzyme. A simple biological role for nickel. *Journal of the American Chemical Society*. 1975, 97, pp 4131-4133.
55. <http://www.nickelinstitute.org/Sustainability/EnvironmentalQuality/Soil>.
56. Ahmad M.S., and M. Ashraf. 2011. Essential roles and hazardous effects of nickel in plants. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 2011, 214, pp 125-67.
57. Shanker A., Cervantes C., Loza-Tavera H. and Avudainayagam S. Chromium toxicity in plants. *Environment International*. 2005, 31, pp 739-753.
58. Patricia Dreyer Parr, Fred G. Taylor Jr. Incorporation of chromium in vegetation through root uptake and foliar absorption pathways. *Environmental and Experimental Botany*. 1980, 20, pp 157-160.
59. Nalini Pandey, Chandra Prakash Sharma. Chromium interference in iron nutrition and water relations of cabbage. *Environmental and Experimental Botany*. 2003, 49, pp195-200.
60. Zayed A., Lytle C.M., Qian J.H. and Terry N. Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. *Planta*. 1998, 206, pp 293-299.
61. Farago M. *Plants & the Chemical Elements*, VCH, Weinheim, 1994.
62. Μανουσάκη Ε. Χαρακτηρισμός της ικανότητας μεσογειακών φυτών για απομάκρυνση Pb και Cd από ρυπασμένα εδάφη. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2008.
63. Mench M., Lepp N., Bert V., Schwitzguébel J.-P, Gawronski S.W., Schröder P., Vangronsveld J. Successes and limitations of phytotechnologies at field scale:outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils and Sediments*. 2010, 6, pp 1039-1070.
64. Jadia C.D., Fulekar M.H. Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques (Review). *African Journal of Biotechnology*. 2009, 8, pp 921-928.

65. BOYD R.S.; MARTENS S.N. Nickel hyperaccumulation by *Thlaspi montanum* var. *montanum* (Brassicaceae) a constitutive trait. *Am. J. Bot.* 1988, 85, pp 259–265.
66. Baghour M., D.A. Moreno G. Villora, J. Hernández N. Castilla & L. Romero. Phytoextraction of Cd and Pb and Physiological Effects in Potato Plants (*Solanum Tuberosum* Var. Spunta): Importance of Root Temperature. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001, 49, pp 5356-5363.
67. Kirkham M.B. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*. 2006, 137, pp 19-32.
68. Prasad M.N.V., Freitas H.M.O. Metal hyperaccumulation in plants- Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic journal of Biotechnology*. 2003, 6.
69. Peer W.A., Baxter I.R., Richards E.L., Freeman J.L., Murphy A.S. Phytoremediation and Hyperaccumulator Plants. Ch. 11 In: Klomp LWJ, Martinoia E and Tamas MJ (Eds). *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification: from microbes to man*. Topics in Current Genetics. Vol. 14 New York, Springer-Verlag Produced by The Center for Phytoremediation, Purdue University, West Lafayette, USA, 2005.
70. Wei S., Teixeira da Silva J.A., Zhou Q. Agro-improving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, 150, pp 662–668.
71. Krämer U., Chardonnens A.N. The use of transgenic plants in the bioremediation of soils contaminated with trace elements. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2001, 55, pp 661–672.
72. Chaney R.L., Angle J.S., Broadhurst C.L., Peters C.A., Tappero R.V., Sparks D.L. Improved Understanding of Hyperaccumulation Yields Commercial Phytoextraction and Phytomining Technologies” *Journal of Environmental Quality*. 2007, 36, pp 1429-1443.

73. Kadukova J., Kalogerakis N. Lead accumulation from non-saline and saline environment by *Tamarix smyrnensis* Bunge. *European Journal of Soil Biology*. 2007, 43, pp 216-223
74. Clemens S., Palmgren M.G., Krämer U. A Long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*. 2002, 7, pp 309-15.
75. Ghosh M., Singh S.P. A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of its Byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2005, 3, pp 1-18.
76. Lasat M.M. The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. *American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow*, 2000.
77. Chapman H., Pratt P. *Methods of Analysis for Soils, Plants, and Waters*, Division of Agricultural Sciences, University of California, 1961.
78. Clesceri L.S, Greenberg A. E., Trussell R.R, “ Standard methods for the examination of water and wastewater” APHA, AWWA, WPCF, 20th edition, 1999.
79. Ασημακόπουλος Ι. Εργαστηριακές Ασκήσεις Μαθημάτων: Γονιμότητα Εδάφους, Αναλύσεις φυτών και εδαφών –Αξιολόγηση αποτελεσμάτων, Λιπάσματα –Λιπάνσεις, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικής Χημείας και Εδαφολογίας, Αθήνα 2005.
80. Μανιός Θ., Φουντουλάκης Μ, Τερζάκης Σ. Εργαστήριο Επεξεργασίας και Αξιοποίησης Υγρών Αποβλήτων, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Τμήμα Βιολογικών Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών & Ανθοκομίας, Ηράκλειο, 2009.
81. Σινάνης Κ., Εργαστηριακές Ασκήσεις Εδαφολογίας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Σχολή Γεωπονίας, Ηράκλειο, 2003.
82. Τσικαλός Π., Σημειώσεις Εργαστηρίων Φυλλοδιαγνωστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Σχολή Γεωπονίας, Ηράκλειο 1992.

83. Σινάνης, Κ. Ν. Εργαστηριακές Ασκήσεις Διαχείρισης Εδαφών. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα-Κάλλιπος, Ηράκλειο Κρήτης, 2015.
84. Operating Manual for Gerhardt 's Kjeldahl System .
85. Basilio Zafrilla, Rosa M Martínez-Espinosa, María A Alonso, María J Bonete. Biodiversity of Archaea and flora of two inland saltern ecosystems in the Alto Vinalopo Valley, Spain, 2010.
86. <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/10/171010124050.htm>
87. Feigin A. Fertilization management of crops irrigated with saline water. Plant and Soil. 1985, 89, pp 285-299.
88. Sharpley A.N., Smit, S.J., Jones O.R., Berg W.A. and Coleman G.A. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. J. Environ. Qual. 1992, 21, pp 30-35.