

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Σχολή Γεωπονικών Επιστημών
Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
Τεχνολογίες και Διαχείριση Θερμοκηπίων και Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΘΟΚΟΜΙΑΣ & ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΟΠΙΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**«Δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της ανάπτυξης της ρίζας φυτών
τριανταφυλλιάς (*Rosa sp.*)»**

**«Development of a mathematical model simulating the growth of rose (*Rosa sp.*) root
system»**

Παπαδήμος Αθανάσιος

Βόλος, 2021

«Δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της ανάπτυξης της ρίζας φυτών τριανταφυλλιάς (Rosa sp.)»

«Development of a mathematical model simulating the growth of rose (Rosa sp.) root system»

Παπαδήμος Αθανάσιος

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Λύκας Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ανθοκομία, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπων

Κατσούλας Νικόλαος, Καθηγητής, Γεωργικές Κατασκευές, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος

Λεβίζου Ευθυμία, Επίκουρος Καθηγήτρια, Φυσιολογία Φυτών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος

Copyright © ΠΑΠΑΔΗΜΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διατριβής, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Η έγκριση της Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης από το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δε δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

Πρόλογος

Η ρίζα αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του φυτού. Μέσω αυτής το φυτό προσπορίζεται νερό και θρεπτικά συστατικά από το έδαφος ή το θρεπτικό υπόστρωμα ανάπτυξής του, στο οποίο είναι προσαρτημένο. Όμως, σε αντίθεση με το υπέργειο τμήμα του φυτού που έχει μελετηθεί εκτενώς εδώ και πολλές δεκαετίες, το υπόγειο ή το «άδηλο» τμήμα του φυτού, δηλαδή η ρίζα του, παραμένει εν πολλοίς ένα μυστήριο. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον των επιστημόνων για τη μελέτη των διάφορων χαρακτηριστικών του ριζικού συστήματος, αξιοποιώντας όπου είναι δυνατόν και τις νέες τεχνολογίες.

Στα πλαίσια αυτής της θεώρησης, δηλαδή της μελέτης του ριζικού συστήματος, εκπονήθηκε και η παρούσα εργασία, ως Πτυχιακή Διατριβή του Μεταπτυχιακού Προγράμματος, με τίτλο «Τεχνολογίες και Διαχείριση Θερμοκηπίων και Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών», της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, του Τμήματος Φυτικής Παραγωγής. Η εργασία έχει τον τίτλο «Δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της ανάπτυξης της ρίζας φυτών τριανταφυλλιάς (*Rosa* sp.)» και διεξήχθη στα εργαστήρια της Σχολής και στα Θερμοκήπια του Αγροκτήματος της Σχολής στο Βελεστίνο.

Η εργασία έχει ως σκοπό της τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της εκτίμησης του ριζικού συστήματος της τριανταφυλλιάς, καλλιεργούμενης υδροπονικά.

Περίληψη

Η ρίζα αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό τμήμα του φυτού. Μέσω αυτής το φυτό προσλαμβάνει νερό και θρεπτικά συστατικά από το έδαφος ή το θρεπτικό υπόστρωμα ανάπτυξής του. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της ριζικής ανάπτυξης σε φυτά τριανταφυλλιάς που αναπτύχθηκαν σε θερμοκηπιακή υδροπονική καλλιέργεια. Για το σκοπό αυτό εκπονήθηκε πειραματική εργασία κατά την χρονική περίοδο Φεβρουαρίου – Ιουλίου του 2019 στα θερμοκήπια του αγροκτήματος της σχολής Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, στο Βελεστίνο Μαγνησίας. Νεαρά φυτά τριανταφυλλιάς ποικιλίας Miss Piggy αναπτύχθηκαν τον Φεβρουάριο του 2019 από μοσχεύματα. Τον Απρίλιο μετρήθηκε και καταγράφηκε το εμβαδόν της φυλλικής τους επιφάνειας. Τον Ιούλιο πραγματοποιήθηκε καταστροφική μεταχείριση και εκτιμήθηκε το νωπό αλλά και το ξηρό συνολικό βάρος του φυτού καθώς και το επιμέρους βάρος των βλαστών, των φύλλων και του ριζικού συστήματος. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των παραμέτρων του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) καθώς και της θερμοκρασίας του θρεπτικού διαλύματος. Από όλα αυτά τα δεδομένα προέκυψε ότι η διαπνοή του φυτού συσχετίζεται ($R^2=0,75$) με το βάρος της ρίζας, αλλά και από τις τιμές του pH, της EC και της θερμοκρασίας του υποστρώματος. Επίσης, πλέον δίνεται η δυνατότητα να εκτιμηθεί, με αρκετά μεγάλη ακρίβεια ($R^2=0,79$) το βάρος της ρίζας υπολογίζοντας την διαπνοή και μετρώντας πάλι τις τιμές του pH, της EC και της θερμοκρασίας του υποστρώματος.

Λέξεις – κλειδιά: ριζικό σύστημα, διαπνοή, μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης

Summary

The root is an extremely important part of the plant. Through this the plant receives water and nutrients from the soil or the nutrient substrate of its growth. The purpose of this work is to create a mathematical model to simulate root growth in rose plants grown in greenhouse hydroponic cultivation. For this purpose, an experimental work was prepared during the period February - July 2019 in the greenhouses of the farm of the School of Agricultural Sciences, Department of Crop Production & Rural Environment, in Velestino, Magnesia. Young Miss Piggy rose plants were grown in February 2019 from cuttings. In April, the area of their leaf surface was measured and recorded. In July, a disaster treatment was carried out and the fresh and dry total weight of the plant as well as the individual weight of the shoots, leaves and root system were assessed. Measurements of climate parameters inside the greenhouse, pH, EC as well as the temperature of the nutrient solution were also performed. From all these data, it emerged that plant perspiration is correlated ($R^2 = 0.75$) with root weight, but also with the values of pH, EC and substrate temperature. Also, it is now possible to estimate, with quite high accuracy ($R^2 = 0.79$) the weight of the root by calculating the transpiration and again measuring the values of pH, EC and substrate temperature.

Keywords: root system, perspiration, mathematical simulation model

«Εγώ, ο Παπαδήμος Αθανάσιος, είμαι ο συγγραφέας αυτής της Μ.Δ.Ε. Αυτή η Μ.Δ.Ε. αντικατοπτρίζει την έρευνα που έγινε από εμένα και δεν έχει υποβληθεί (εξ ολοκλήρου ή μέρος της) σαν προπτυχιακή διατριβή ή Μ.Δ.Ε. ή ως μέρος Διδακτορικής Διατριβής σε αυτό ή άλλο Προπτυχιακό ή Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Ιδρυμάτων Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης του εσωτερικού ή εξωτερικού. Όποια συνεργασία καθώς και το μέγεθος αυτής δηλώνονται επακριβώς στο αντίστοιχο πεδίο αυτής της διατριβής. Επίσης έχω διαβάσει όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές που παρατίθενται στο τέλος.»

·

«Ως επιβλέπων της έρευνας που περιγράφεται σε αυτή τη διατριβή, δηλώνω ότι όλοι οι όροι του Εσωτερικού Κανονισμού του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος έχουν τηρηθεί από τον κο Παπαδήμο Αθανάσιο»

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Διαγραμμάτων	x
Σκοπός	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.1 Τριανταφυλλιά και καλλιέργεια	2
1.1.1 Βοτανική περιγραφή του φυτού.....	2
1.1.2 Είδη και ποικιλίες.....	2
1.1.3 Πολλαπλασιασμός.....	2
1.1.4 Υποκείμενα Τριανταφυλλιάς	3
1.1.5 Προδιαγραφές θερμοκηπίου και κλιματικοί παράμετροι για την καλλιέργεια της τριανταφυλλιάς.....	3
1.1.5.1 Θερμοκρασία	3
1.1.5.2 Φωτισμός.....	3
1.1.5.3 Αερισμός και υγρασία	4
1.1.5.4 Άρδευση	4
1.1.5.5 Απαιτήσεις υποστρώματος και θρεπτικού διαλύματος	4
1.2.1 Ριζικά Τριχίδια	6
1.2.2 Τύποι Ρίζας.....	6
1.2.3 Αρχιτεκτονική Ρίζας.....	7
1.2.4 Διάμετρος Ρίζας	7
1.2.5 Σχέση Βλαστού και Ρίζας.....	7
1.2.6 Συσχέτιση της ρίζας με φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού	8
1.3 Μέθοδοι ανάλυσης και απεικόνισης της ρίζας	9
1.3.1 Μέθοδοι Αγρού (Field-Grown Methods).....	10
1.3.2 Μέθοδοι μετρήσεις σε δοχεία – γλάστρες (Container – Grown Methods)	13
1.3.3 Μέθοδοι Ψηφιακής Απεικόνισης (Digital Imaging Methods).....	17
1.4 Σύγκριση της εκτίμησης ανάπτυξης ριζικού συτήματος μέσω μαθηματικών μοντέλων έναντι της πειραματικής διαδικασίας.....	19
1.4.1 Μοντέλα Ανάπτυξης Ρίζας.....	20
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	21
2.1 Μεταχείριση των φυτών πριν την εγκατάστασή στο υδροπονικό σύστημα.....	21

2.2 Μεταχείριση των φυτών μετά την εγκατάστασή τους στο υδροπονικό σύστημα	21
2.3 Μετρήσεις	23
2.4 Στατιστική επεξεργασία	25
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ	26
3.1 Κλιματικά δεδομένα θερμοκηπίου	26
3.2 Φυλλική Επιφάνεια	27
3.3 Διαπνοή	29
3.4 Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης νωπού βάρους ρίζας	32
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	35
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	36

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά και σύνθεση του Θ.Δ. σε ppm που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση των φυτοδοχείων	25
Πίνακας 2. Τιμές των συντελεστών της εξίσωσης 2 με την οποία έγινε η εκτίμηση της διαπνοής των φυτών με βάση το νωπό βάρος της ρίζας, του pH, του θρεπτικού διαλύματος, της θερμοκρασίας του υποστρώματος, και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος.	31
Πίνακας 3. Τιμές των συντελεστών της εξίσωσης 3 με την οποία έγινε η εκτίμηση του νωπού βάρους της ρίζας των φυτών με βάση τη διαπνοή, το pH του θρεπτικού διαλύματος, τη θερμοκρασία του υποστρώματος, και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος.	35

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Νεαρά φυτά τριανταφυλλιάς τοποθετημένα σε δοχεία με τέτοιο τρόπο ώστε το ριζικό τους σύστημα να βρίσκεται συνεχώς εμβαπτισμένο στο θρεπτικό διάλυμα, σε πάγκο στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.	26
Εικόνα 2: Ζύγισμα φυτού τριανταφυλλιάς σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας	27
Εικόνα 3: Απεικόνιση του ριζικού συστήματος φυτού τριανταφυλλιάς.	27

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Εικόνα 4: Διάγραμμα θερμοκρασίας αέρα του θερμοκηπίου από 03.07.2019 μέχρι 22.07.2019	28
Εικόνα 5: Διάγραμμα σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου από 03.07.2019 μέχρι 22.07.2019	29
Εικόνα 6: Συσχέτιση της μετρημένης φυλλικής επιφάνειας (LA scan) με την προβλεπόμενη από το μοντέλο υπολογισμού (LA model). Οι πορτοκαλί γραμμές δηλώνουν τα όρια πρόβλεψης (prediction limits). Οι πράσινες γραμμές δηλώνουν τα όρια εμπιστοσύνης (confidence limits). Η μπλε γραμμή δηλώνει την γραμμική συσχέτιση των τιμών της φυλλικής επιφάνειας.	30
Εικόνα 7 : Συσχέτιση της προβλεπόμενης προς την παρατηρούμενης διαπνοή (TR σε gr).	32
Εικόνα 8: Συσχέτιση της διαπνοής (TR σε gr) με το βάρος της ρίζας (RW σε gr). Οι πορτοκαλί γραμμές δηλώνουν τα όρια πρόβλεψης (prediction limits). Οι πράσινες γραμμές δηλώνουν τα όρια εμπιστοσύνης (confidence limits). Η μπλε γραμμή δηλώνει την γραμμική συσχέτιση των τιμών.	33
Εικόνα 9: Συσχέτιση του προβλεπόμενου προς το παρατηρούμενο νωπό βάρος της ρίζας (RW σε gr).	35
Εικόνα 10: Συσχέτιση του μετρημένου νωπού βάρους της ρίζας (RW σε gr) με το	36

υπολογισμένο από την εξίσωση (3) βάρος της ρίζας (RW σε gr). Οι πορτοκαλί γραμμές δηλώνουν τα όρια πρόβλεψης (prediction limits). Οι πράσινες γραμμές δηλώνουν τα όρια εμπιστοσύνης (confidence limits). Η μπλε γραμμή δηλώνει την γραμμική συσχέτιση των τιμών.

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της ανάπτυξης της ρίζας φυτών τριανταφυλλιάς εγκατεστημένων σε θερμοκηπιακή υδροπονική καλλιέργεια.

Το μοντέλο που θα δημιουργηθεί, αξιοποιώντας εύκολα μετρήσιμες παραμέτρους του συστήματος καλλιέργειας, θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καλύτερο έλεγχο και τη βελτίωση της απόδοσης της καλλιέργειας φυτών τριανταφυλλιάς εγκατεστημένων σε υδροπονικό σύστημα, αξιοποιώντας και τις δυνατότητες που προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες. Επιπλέον, το παραγόμενο μαθηματικό μοντέλο, θα συμβάλλει στην καλύτερη αξιοποίηση και στη βελτίωση της άρδευσης και λίπανσης των φυτών και κατ' επέκταση την αύξηση της παραγωγής. Θα συμβάλλει ακόμη στην καλύτερη αξιοποίηση των υδάτινων πόρων που χρησιμοποιούνται στην καλλιέργεια και στον περιορισμό της άσκοπης χρήσης λιπασμάτων και θρεπτικού διαλύματος.

Η εργασία αυτή, επιπλέον, έχει ως σκοπό την διεύρυνση των γνώσεων σχετικά με την μορφή, την λειτουργία και τα επιμέρους χαρακτηριστικά που αφορούν στο ριζικό σύστημα και πιο συγκεκριμένα, σε αυτό της τριανταφυλλιάς.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τριανταφυλλιά και καλλιέργεια

1.1.1 Βοτανική περιγραφή του φυτού

Η τριανταφυλλιά ανήκει στο γένος *Rosa*, της οικογένειας Rosaceae. Είναι μη φωτοπεριοδικό φυτό με θαμνώδη ανάπτυξη, πολυετές, με σκληρούς βλαστούς, αγκάθια και φύλλα σύνθετα οδοντωτά. Η τριανταφυλλιά καλλιεργείται σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις ως μονοκαλλιέργεια. Οι ανθοφόροι βλαστοί έχουν τριών ειδών φύλλα. Στην μεσαία περιοχή φέρουν 2-5 σύνθετα φύλλα με πέντε φυλλάρια. Πάνω και κάτω από την μεσαία περιοχή φέρουν σύνθετα φύλλα με τρία φυλλάρια. Επίσης φέρει λίγα απλά επιμήκη φύλλα κάτω από το επάκριο άνθος καθώς και στη βάση του στελέχους (Κιζηρόπουλος, 1999).

Τα άνθη είναι μονήρη ή σε ταξιανθία κορύμβου ή φόβης στην άκρη του βλαστού. Κάθε άνθος έχει 4-5 σέπαλα, 5-35 πέταλα και πολυάριθμους στήμονες. Η ωοθήκη είναι μονόχωρη και μαζί με την ανθοδόχη σχηματίζει καρπό αχάινιο (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, 2014).

1.1.2 Είδη και ποικιλίες

Το γένος *Rosa* περιλαμβάνει 493 αποδεκτά είδη σύμφωνα με το Global Biodiversity Information Facility, που βρίσκονται κυρίως στο Βόρειο ημισφαίριο (Global Biodiversity Information Facility, 2020). Ανάλογα με το χρόνο που απαιτείται για να μπου σε ανθοφορία, οι ποικιλίες χαρακτηρίζονται γενικά σαν πρώιμες, μεσοπρώιμες και όψιμες (Τσαούσης, 2005).

Τα πλέον χρησιμοποιούμενα υβρίδια τριανταφυλλιάς είναι τα υβρίδια Τσαγιού (Hybrid teas), τα οποία είναι θαμνώδη, με ζωνρή βλάστηση. Είναι τα πιο δημοφιλή υβρίδια αντιπροσωπεύοντας ένα μεγάλο ποσοστό της παγκόσμιας αγοράς τριαντάφυλλου για «κομμένο» (δρεπτό) άνθος (Κιζηρόπουλος, 1999; Τσαούσης, 2005).

Εκτός από τα παραπάνω υβρίδια καλλιεργούνται και τα Πολύανθα (Polyantha), τα Φλοριμπούντα (Floribundas) καθώς και τα Μεγανθή (Grandiflora), καθένα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους (Κιζηρόπουλος, 1999, Τσαούσης, 2005).

1.1.3 Πολλαπλασιασμός

Η τριανταφυλλιά πολλαπλασιάζεται εγγενώς με σπόρο και αγενώς με καταβολάδες, ενοφθαλμισμό, ιστοκαλλιέργεια και μοσχεύματα καθώς και με εμβολιασμό κατάλληλα επιλεγμένων υποκειμένων. (Κιζηρόπουλος, 1999, Nazari, Khosh-Khui and Salehi, 2009).

1.1.4 Υποκείμενα Τριανταφυλλιάς

Τα είδη που χρησιμοποιούνται σαν υποκείμενα κατατάσσονται σε δύο ομάδες, την ομάδα *Caninae* και την ομάδα *Indicae* (Κιζηρόπουλος, 1999). Η χρήση φυτών εμβολιασμένων σε άγριο υποκείμενο ενδείκνυται διότι εξασφαλίζονται μεγαλύτερες αποδόσεις, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των φυτών καθώς και ανθεκτικότητα σε αρκετές ασθένειες. Επίσης τα υποκείμενα έχουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα σε αντίξοες εδαφικές συνθήκες (υψηλή συγκέντρωση CaCO_3 , χαμηλό ή υψηλό pH κ.α.) (Κιζηρόπουλος, 1999) και βοηθούν στην βελτίωση της ποιότητας του άνθους (Nazari, Khosh-Khui and Salehi, 2009).

Οι Otiende *et al.* (2017) μελέτησαν τα χαρακτηριστικά και τη δυναμική ανάπτυξης του μοσχεύματος ανάλογα με τη θέση του πάνω στο μητρικό φυτό. Συγκεκριμένα σε εργασίες που πραγματοποιήθηκαν σε μοσχεύματα τριανταφυλλιάς, τα οποία αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα κοκκοφοίνικα και σε συνθήκες θερμοκηπίου, μελετήθηκε η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, η περιεκτικότητα σε ανόργανα θρεπτικά συστατικά και οι ενδογενείς υδατάνθρακες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αριθμός των ριζών, το συνολικό τους μήκος, το ύψος των βλαστών, ο αριθμός φύλλων και το ποσοστό επιβίωσης διαφοροποιήθηκαν ανάλογα με την θέση κοπής του υποκειμένου. Ο αριθμός των ριζών σχετίστηκε θετικά με την περιεκτικότητα των μοσχευμάτων σε ενδογενείς υδατάνθρακες (σουκρόζη) (Otiende *et al.*, 2017)

1.1.5 Προδιαγραφές θερμοκηπίου και κλιματικοί παράμετροι για την καλλιέργεια της τριανταφυλλιάς

Για την καλλιέργεια της τριανταφυλλιάς, προτιμώνται θερμοκήπια με μεγάλο ύψος, σημαντικό εξοπλισμό και αρκετούς αυτοματισμούς. Στα θερμοκήπια αυτά επιτυγχάνεται καλύτερος φωτισμός και καλύτερος έλεγχος των παραμέτρων του κλίματος που επιτρέπει την καλύτερη ανάπτυξη των φυτών (Κιζηρόπουλος, 1999, Τσαούσης, 2005).

1.1.5.1 Θερμοκρασία

Η άριστη νυχτερινή θερμοκρασία κυμαίνεται περίπου στους 16°C (Κιζηρόπουλος, 1999, Τσαούσης, 2005). Η ημερήσια θερμοκρασία πρέπει να είναι $20 - 24^\circ\text{C}$ τις ημέρες με υψηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και όχι πάνω από 28°C τις συννεφιασμένες ημέρες (Κιζηρόπουλος, 1999, Τσαούσης, 2005). Η επιθυμητή θερμοκρασία για την καλύτερη ανάπτυξη της ρίζας κυμαίνεται μεταξύ $17 - 20^\circ\text{C}$. Σε καμιά περίπτωση η θερμοκρασία του χώρου, έστω και αν πρόκειται για περίοδο βλαστικής αδράνειας, δεν πρέπει να πέφτει κάτω από $3 - 4^\circ\text{C}$ (Κιζηρόπουλος, 1999, Τσαούσης, 2005).

1.1.5.2 Φωτισμός

Η τριανταφυλλιά έχει ανάγκη από υψηλής έντασης φωτισμό και έκθεσης των φυτών στο άμεσο ηλιακό φως κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Ωστόσο κατά την περίοδο του καλοκαιριού η

καλλιέργεια έχει ανάγκη σκίασης. Η παραγωγή λουλουδιών (ποσότητα και ποιότητα) επηρεάζεται από την ηλιοφάνεια, γι' αυτό και είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι και μικρότερη το χειμώνα, όμως η ποιότητα των λουλουδιών είναι χαμηλότερη το καλοκαίρι. (Κιζηρόπουλος, 1999).

1.1.5.3 Αερισμός και υγρασία

Ανάγκη άμεσου αερισμού υπάρχει όταν η θερμοκρασία του θερμοκηπίου ξεπεράσει τους 24°C τους καλοκαιρινούς μήνες και τους 20°C τον υπόλοιπο χρόνο. Η τριανταφυλλιά απαιτεί συνθήκες υψηλής υγρασίας 75 – 80%, ενώ πρέπει να εξασφαλίζεται επαρκής αερισμός για να μειώνεται ο κίνδυνος εξάπλωσης μυκητολογικών ασθενειών (Κιζηρόπουλος, 1999).

1.1.5.4 Άρδευση

Η έλλειψη νερού δημιουργεί φυτά καχεκτικά και ξυλοποιημένα με μικρά φύλλα. Σε καταστάσεις έντονης έλλειψης νερού παρατηρείται φυλλόπτωση. Η ποσότητα του νερού άρδευσης σε κάθε πότισμα εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης του φυτού (Κιζηρόπουλος, 1999).

1.1.5.5 Απαιτήσεις υποστρώματος και θρεπτικού διαλύματος

Σε συνθήκες καλλιέργειας σε κλειστά ή ημί-κλειστά υδροπονικά συστήματα είναι σημαντικός ο προσδιορισμός των μέγιστων επιπέδων της αλατότητας στο θρεπτικό διάλυμα ανακύκλωσης. Έχει αποδειχτεί ότι το θρεπτικό διάλυμα μπορεί να ανακυκλωθεί κατά 100%, βελτιστοποιώντας τη χρήση θρεπτικών συστατικών και την εξοικονόμηση νερού (Yepes V. and Flórez R., 2013).

Πειραματικά έχει χρησιμοποιηθεί σε υδροπονικές καλλιέργειες τριανταφυλλιάς ένας μεγάλος αριθμός υποστρωμάτων, όπως κοκκοφοίνικας (Fascella and Zizzo, 2005; Choi *et al.*, 2014), φλοιός ριζιού (Song *et al.*, 2010), ελαφρόπετρα (Gizas and Savvas, 2007), ηφαιστειακή τέφρα (Raviv *et al.*, 1999; Paradiso, Raimondi and De Pascale, 2003), πορώδη κεραμικά σφαιρίδια (Nimura, Yoshimi and Kondou, 2001), ζεόλιθος (Trinchera *et al.*, 2013), άμμος με τύρφη (Farina *et al.*, 2003), περλίτης (Lykas *et al.*, 2006), πετροβάμβακας (Katsoulas *et al.*, 2006) και συνδιασμοί αυτών. Τα υποστρώματα αυτά εμφανίζουν διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες σε ό, τι αφορά το πορώδες, τη σχέση αερισμού και υγρασίας, καθώς και το pH, την EC, αλλά και τη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών.

Το επιθυμητό pH της καλλιέργειας είναι 5,4-6,0. Το υψηλό pH μπορεί να μειώσει τη διαθεσιμότητα σιδήρου (Fe), μαγγανίου (Mn), ψευδάργυρου (Zn), χαλκού (Cu) και φωσφόρου (P). Το χαμηλό pH μπορεί να μειώσει τη διαθεσιμότητα καλίου (K), θείου (S), ασβεστίου (Ca), μαγνησίου (Mg) και την διαθεσιμότητα φωσφόρου (P) (Roosta and Rezaei, 2014). Προτείνεται ότι για νεαρά φυτά η κατάλληλη EC είναι 1,8 dS/ m έως τις 90 ημέρες και στη συνέχεια EC 1,4 dS/ m έως 165 ημέρες μετά τη μεταφύτευση (Choi *et al.*, 2014).

1.2 Μορφολογία και ανατομία ρίζας

Μία παράμετρος, που δεν έχει μελετηθεί εκτενώς, είναι το υπόγειο τμήμα των φυτών, δηλαδή η ρίζα και η σχέση της με την ανάπτυξη του φυτού. Η μελέτη, όμως, των ριζών είναι δύσκολο αντικείμενο για παρατήρηση και ανάλυση (Judd, Jackson and Fonteno, 2015b; Kalogiros *et al.*, 2016). Καθώς βελτιώνονται οι τεχνικές δυνατότητες μελέτης της ρίζας, τόσο περισσότερο το επιστημονικό ενδιαφέρον στρέφεται στον «σκοτεινό» χώρο της. Πολλές μελέτες διεξάγονται σε παγκόσμιο επίπεδο προς την κατεύθυνση της κατανόησης των μηχανισμών και ιδιοτήτων ανάπτυξης του ριζικού συστήματος (Atkinson *et al.*, 2019).

Σύμφωνα με τους Weaver *et al.* (1922), η ακριβής γνώση της ανάπτυξης των ριζών, η θέση τους, η έκτασή τους και οι δραστηριότητές τους είναι υψίστης σημασίας για την κατανόηση της δράσης της και την διαμόρφωση στρατηγικών διαχείρισης των καλλιεργειών. Οι ρίζες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των φυτών και είναι υπεύθυνες για την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και νερού από το έδαφος, τη σύνθεση φυτικών ορμονών, οργανικών οξέων και αμινοξέων και για τη σταθεροποίηση του φυτού στο έδαφος. Η μορφολογία και η φυσιολογία των ριζών συνδέονται στενά με την ανάπτυξη και την εξέλιξη του υπέργειου τμήματος των φυτών (Yang, Zhang and Zhang, 2012).

Οι ρίζες των φυτών έχουν εξελιχθεί αποκτώντας την ικανότητα να αντιλαμβάνονται πολλούς παράγοντες του υπόγειου περιβάλλοντος και να χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για να κατευθύνουν τις αλλαγές στην ανάπτυξη (τροπισμούς) και στην αύξηση του ριζικού συστήματος. Η μηχανική σύσταση του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσονται και η διαθεσιμότητα του νερού και των θρεπτικών στοιχείων έχουν ουσιαστικό και άμεσο αντίκτυπο στην έκταση του ριζικού συστήματος (Monshausen and Gilroy, 2009).

Καθώς παρατηρείται μια μεγάλη ποικιλία στη μορφολογία, στη φυσιολογία και στον τρόπο ανάπτυξης των ριζικών συστημάτων, απαιτείται η εκτίμηση και η μέτρηση πολλών παραμέτρων για την κατανόηση της λειτουργίας τους. Για την επέκταση της γνώσης σχετικά με το μέγεθος της ρίζας και τις λειτουργίες της, οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι:

- α) Μήκος του ριζικού συστήματος
- β) Βάρος του ριζικού συστήματος
- γ) Όγκος του ριζικού συστήματος
- δ) Λόγος ρίζας προς βλαστό (ρίζα/βλαστός)
- ε) Ειδικό μήκος ρίζας
- στ) Τρόπος διακλάδωσης
- ζ) Οριζόντια και κάθετη κατανομή

- η) Πυκνότητα ριζικών τριχιδίων
- θ) Ικανότητα απορρόφησης ρίζας
- ι) Υδραυλική αγωγιμότητα ρίζας
- ια) Βιωσιμότητα ρίζας (Smit *et al.*, 2000; Judd, Jackson and Fonteno, 2015a)

Με την βοήθεια των παραπάνω παραμέτρων μπορούν να προσδιοριστούν σημαντικές λειτουργίες της ρίζας, μέσα και ανάμεσα στα είδη, συμπεριλαμβανομένων της αναπνοής των φυτών, της πρόσληψης νερού και θρεπτικών στοιχείων, τη διάρκεια ζωής της ρίζας και την αποσύνθεσή της. Οι πιο απομακρυσμένες ρίζες θεωρούνται ως απορροφητικές ρίζες, ενώ οι εγγύτερες προς την κεντρική θεωρούνται ως ρίζες μεταφοράς θρεπτικών στοιχείων και νερού (Zhou *et al.*, 2021)

1.2.1 Ριζικά Τριχίδια

Από τον 17^ο αιώνα οι ερευνητές της εποχής είχαν παρατηρήσει ότι η απορρόφηση νερού και θρεπτικών από το χώμα πραγματοποιείται στο επίπεδο των ριζικών τριχιδίων (Rosene, 1943; Landmeyer, 2011; Judd, Jackson and Fonteno, 2015a). Στην τυπική τους μορφή τα ριζικά τριχίδια είναι κυλινδρικά, ευθέα, με άκρη θολωτού σχήματος που συχνά σχηματίζουν ορθή γωνία με την κύρια ρίζα. Εκπύσσονται σε μικρή απόσταση από τη ρίζα εκεί όπου διαιρούνται τα επιδερμικά κύτταρα (Dittmer, 1949). Παραμένουν ενεργά για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, το οποίο εξαρτάται από το είδος του φυτού. Όταν τα ριζικά τριχίδια αποπίπτουν, εμφανίζονται νέα, εγγύτερα στο άκρο της ρίζας. Τα ριζικά τριχίδια κατέχουν εξέχουσα θέση στη ριζόσφαιρα. Το 1949 ο Dittmer ανακάλυψε ότι οι διαφορές των τριχιδίων ανάμεσα σε διαφορετικές οικογένειες αγγειόσπερμων ήταν σημαντικές ως προς τη διάμετρο, το μήκος, το σχήμα και το χρωματισμό, ενώ ανάμεσα σε φυτά του ίδιου είδους, το μήκος και το χρώμα των ριζικών τριχιδίων παρέμενε σταθερό (Dittmer, 1949).

1.2.2 Τύποι Ρίζας

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του ριζικού συστήματος, το οποίο συνδέεται άμεσα με την μηχανική υποστήριξη του φυτού και την πρόσληψη νερού και θρεπτικών, είναι ο τύπος της ρίζας καθώς και η διάμετρος της. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της παραγωγής σε ειδικές συνθήκες καλλιέργειας, όπως σε ξηρασία ή σε χαμηλή γονιμότητα των εδαφών. Επίσης τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ενδεικτικά της φυσικής κατάστασης των φυτών (Bucksch *et al.*, 2014).

Σύμφωνα με την Διεθνή Εταιρεία Έρευνας των Ριζών (International Society for Root Research, ISSR), οι ρίζες διακρίνονται σε τέσσερις τύπους:

- α) Κύρια ρίζα (tap root), που αναδύεται από τον σπόρο
- β) Βασικές ρίζες (basal roots), οι οποίες αναπτύσσονται από το υποκοτύλιο
- γ) Δευτερεύουσες ρίζες (lateral roots), που είναι οι κλάδοι άλλων ριζών

δ) Ρίζες που προέρχονται από κύτταρα βλαστών (shoot-borne roots) (Zobel and Waisel, 2010)

Οι τύποι των ριζών σε ένα ριζικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό του φυτού και του περιβάλλοντός του. Για παράδειγμα, αν ένα ριζικό σύστημα αποτελείται από την κύρια ρίζα με λίγες βασικές ή δευτερεύουσες ρίζες, θεωρείται πως το φυτό είναι νεαρό και αυτό παρατηρείται στα περισσότερα είδη (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a). Ο αριθμός, η τοποθέτηση και η κατεύθυνση ανάπτυξης κάθε ρίζας στη ριζόσφαιρα είναι εξαιρετικά μεταβλητή, ακόμη και μεταξύ γενετικά παρόμοιων φυτών. Ο αριθμός και το μήκος των δευτερογενών ριζών ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με το είδος των φυτών, τη σύνθεση του εδάφους και τη διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών συστατικών (Malamy, 2005).

1.2.3 Αρχιτεκτονική Ρίζας

Ως αρχιτεκτονική ορίζεται η χωρική διαμόρφωση ολόκληρου του ριζικού συστήματος. Ωστόσο, οι μελέτες της αρχιτεκτονικής των ριζών συνήθως δεν περιλαμβάνουν σημαντικές δομικές λεπτομέρειες, όπως τα ριζικά τριχίδια. Λίγα είναι γνωστά για την αρχιτεκτονική της ρίζας και τους ρόλους της για το φυτό, επειδή είναι δύσκολο να παρατηρηθεί, να ποσοτικοποιηθεί και να ερμηνευτεί χωρίς να καταστραφεί η μητρική αρχιτεκτονική, εξαιτίας της κατάρρευσης της διαμόρφωσής της μετά την αφαίρεση του υποστρώματος (Lynch, 1995; Pace *et al.*, 2014). Η αρχιτεκτονική του ριζικού συστήματος των φυτών καθορίζει την προσαρμοστικότητα και τη δυναμική των ριζών των φυτών. Ανταποκρίνεται στο περιβάλλον προκειμένου να αξιοποιηθεί ο όγκος του εδάφους που καταλαμβάνεται από την ρίζα, αλλά και η πρόσληψη θρεπτικών που περιέχονται στον συγκεκριμένο όγκο εδάφους (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a).

1.2.4 Διάμετρος Ρίζας

Η διάμετρος της ρίζας διαφέρει τόσο ανάμεσα στα είδη των φυτών, όσο και ανάμεσα στα φυτά του ίδιου είδους. Από τη διάμετρο της ρίζας μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το τι έχει συμβεί στο φυτό και στη ρίζα του στο περιβάλλον όπου αναπτύσσονται. Ορισμένα είδη φυτών παράγουν λεπτές ρίζες όταν καλλιεργούνται σε υπόστρωμα με χαμηλή συγκέντρωση θρεπτικών ουσιών. Η μηχανική αντίσταση στην ανάπτυξη της ρίζας είναι ένας επιπλέον παράγοντας που εμποδίζει την ανάπτυξή της σε λεπτά και πυκνά συμπαγή στρώματα εδάφους. (Wiersum, 1957).

1.2.5 Σχέση Βλαστού και Ρίζας

Οι βλαστοί και οι ρίζες βρίσκονται σε συνεχή ανταγωνισμό για την ενέργεια και τα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξή τους. Οι αναλογίες βλαστών και ρίζας μπορούν να βοηθήσουν να εξακριβωθεί ο τρόπος με τον οποίο οι περιβαλλοντικοί και χημικοί παράγοντες επηρεάζουν και τροποποιούν την ανάπτυξή τους. Συνηθέστερα, η σχέση μεταξύ βλαστού και ρίζας μετριέται με

την καταστροφική μέθοδο της σύγκρισης των ξηρών βαρών των βλαστών και της ρίζας (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a).

1.2.6 Συσχέτιση της ρίζας με φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού

Το ριζικό σύστημα αποτελεί ζωτικής σημασίας σύστημα για το φυτό και ρυθμίζει πολλά χαρακτηριστικά της ανάπτυξης και της εξέλιξης των βλαστών. Όσο υψηλότερες είναι η βιομάζα της ρίζας, η οξειδωτική της δραστηριότητα και η συγκέντρωση κιτοκινών, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ανθέων, το μέγεθος και η ποιότητα των καρπών. Επίσης, ο υψηλός αριθμός μιτοχονδρίων, σωματίων Golgi και αμυλοπλαστών στα ριζικά κύτταρα ωφελεί την ανάπτυξη της ρίζας και των βλαστών με παράλληλη αύξηση της απόδοσης (Yang, Zhang and Zhang, 2012). Έχει δειχτεί ότι φυτά με μικρότερη διάμετρος ρίζας και μικρότερο πάχος φλοιού εμφανίζουν υψηλότερους ρυθμούς διαπνοής και στοματικής αγωγιμότητας, αλλά χαμηλότερη αποτελεσματικότητα χρήσης νερού. Τα χαρακτηριστικά των ριζών είναι στενά συνδεδεμένα με την υδραυλική αγωγιμότητα και διαδραματίζουν κρίσιμους ρόλους στον έλεγχο της διαπνοής, η οποία με την σειρά της επηρεάζει τη φωτοσύνθεση, την ανάπτυξη του φυτού και την αξιοποίηση του νερού από το φυτό. Παρατηρείται στενή συσχέτιση ανάμεσα στα ανατομικά χαρακτηριστικά των απορροφητικών ριζών και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φύλλων. Όμως τα ανατομικά χαρακτηριστικά των ριζών και η πιθανή αλληλεπίδρασή τους τόσο στη φυσιολογία του φυτού όσο σε επίπεδο φύλλων, παραμένουν μη κατανοητά σε μεγάλο βαθμό (Alameda and Villar, 2012; Zhou *et al.*, 2021)

Η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών και η δυνατότητα απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από τη ρίζα επηρεάζεται σημαντικά επίσης από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Για παράδειγμα σε εδάφη με ισχυρή συμπίεση και μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο παρατηρείται μικρότερη ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, με αποτέλεσμα αφενός την περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης μεγάλου όγκου υποστρώματος και αφετέρου την περιορισμένη πρόσληψη νερού και θρεπτικών, οδηγώντας σε αλλαγές της φυσιολογίας του φυτού (Alameda and Villar, 2012). Ιδιαίτερη σημασία για την ανάπτυξη των ριζών του φυτού έχει η τιμή του pH του εδάφους, αφού αυτή επηρεάζει τόσο την ανάπτυξη της ρίζας όσο και την δυνατότητα απορρόφησης συγκεκριμένων θρεπτικών στοιχείων (Turner, Arzola and Nunez, 2020).

1.3 Μέθοδοι ανάλυσης και απεικόνισης της ρίζας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μελέτη των ριζών είναι ένα αρκετά δύσκολο και περίπλοκο αντικείμενο για επιστημονική παρατήρηση και ανάλυση (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a; Kalogiros *et al.*, 2016). Αν και έχουν αναφερθεί τις τελευταίες δεκαετίες διάφορες στρατηγικές και τεχνικές για παρατήρηση, μελέτη και ποσοτικοποίηση της ανάπτυξης της ρίζας, η ακρίβειά τους είναι γενικά χαμηλή και πολύ λίγες μέθοδοι είναι μεθοδολογικά στανταρισμένες (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a).

Μέχρι σήμερα, κλασικές μη καταστρεπτικές τεχνικές 2D, όπως οι πλάκες άγαρ ή τα rhizotrons, αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο της κατανόησης της ανάπτυξης των ριζών. Η μη καταστρεπτική ανάλυση της αύξησης των ριζών με 3D μεθόδους είναι δυνατή με τη χρήση διαφανών πηκτωμάτων σαν υπόστρωμα ανάπτυξης ριζών, αλλά τα αποτελέσματά της συχνά είναι δύσκολο να εμφανιστούν σε συνθήκες αγρού (Atkinson *et al.*, 2019).

Το επιστημονικό ενδιαφέρον εκτίμησης του ριζικού συστήματος των φυτών βαίνει συνεχώς αυξανόμενο. Σε συνδυασμό με την τεχνολογική εξέλιξη, η οποία συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση και απεικόνιση της ρίζας, οι μέθοδοι ανάλυσης, απεικόνισης και εκτίμησης συνεχώς εξελίσσονται, προστίθενται νέες ή βελτιώνονται και συνδυάζονται οι παλαιότερες μέθοδοι. Κάποιες από τις μεθόδους έχουν καλύτερη εφαρμογή και αποτελέσματα σε φυτά που καλλιεργούνται τον αγρό, άλλες σε φυτά που καλλιεργούνται σε περιέκτες και άλλες σε φυτά που αναπτύσσονται σε συνθήκες εργαστηρίου.

1.3.1 Μέθοδοι Αγρού (Field-Grown Methods)

	Μέθοδος	Πληροφορίες	Καταστροφή Ρίζας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Βιβλιογραφία
1	Photographs or drawings (Φωτογράφιση ή ζωγραφική της ρίζας)	Ποιοτική ανάλυση 2D μορφολογία ρίζας	Όχι	Αντιγραφή της ακριβούς δομής ρίζας ορατή, εύκολη και γρήγορη (φωτογραφίες)	Κουραστική (σχεδίαση), θολή ή κακής ποιότητας φωτογραφίες, μη στατιστικά συμπεράσματα ή ποσοτικές πληροφορίες, μόνο ποιοτικές πληροφορίες, μόνο 2D, προβλήματα με επικαλύψεις ρίζας	(Weaver, Jean and Crist, 1922; Böhm, 1979)
2	Trench / window (Όρυγμα με παράθυρο)	2D χωρική κατανομή ρίζας	Ναι / Όχι	Εύκολη στην καταγραφή δεδομένων ρίζας, επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε συγκεκριμένες ρίζες	Στατική, περιορισμένη περιοχή 2D, οι ρίζες και η δομή τους θα μπορούσαν να καταστραφούν από τη διαδικασία εκσκαφής του ορύγματος, ανώμαλη ανάπτυξη των ριζών κατά μήκος του εγκατεστημένου παραθύρου	(Böhm, 1979)
3	Pinboards and Monoliths	Μήκος, βάρος, διάμετρος, μοτίβο διανομής	Ναι	Προβολή κάποιας φυσικής διάταξης των ριζών	Απαιτούνται ορισμένες δεξιότητες, ένταση εργασίας. Παρατηρούνται μεγάλες απώλειες λεπτών	(Böhm, 1979; Kono <i>et al.</i> , 1987; Kano-Nakata <i>et al.</i> , 2011)

					ρίζων	
4	Auger and Cores (Πυρήνες εδάφους με την βοήθεια τρυπανιού εδάφους)	Μήκος, βάρος, διάμετρος, μοτίβο διανομής	Όχι	Εύκολη μέθοδος	Απαιτεί μεγάλο αριθμό δειγμάτων, ένταση εργασίας, υπάρχει περιορισμένο βάθος δειγματοληψίας, είναι χρονοβόρα η επεξεργασία των δειγμάτων στο εργαστήριο	(Böhm, 1979; Engel, Nichols and Brummer, 1993)
5	Rhizotron, Minirhizotron and Mesorhizotron	Δυναμικές 2D πληροφορίες για την ρίζα, τη μορφολογία, την ανάπτυξη και τον κύκλο εργασιών της ρίζας	Όχι	Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε συγκεκριμένες ρίζες (επαναληψιμότητα μετρήσεων)	Δαπανηρή μέθοδος, ενδεχομένως με έντασης εργασίας κατά την κατασκευή και την ανάλυση των δεδομένων, ανώμαλη ανάπτυξη ρίζας κατά μήκος του παραθύρου	(Klepper and Kaspar, 1994; Dannoura <i>et al.</i> , 2008)
6	Above-Ground Rhizotrons	Δυναμικές 2D πληροφορίες για την ρίζα, τη μορφολογία, την ανάπτυξη και τον κύκλο εργασιών της ρίζας	Όχι	Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε συγκεκριμένες ρίζες (επαναληψιμότητα μετρήσεων)	Παρατηρείται ανώμαλη ανάπτυξη ρίζας κατά μήκος του παραθύρου	(James, Bartlett and Amadon, 1985; Neufeld <i>et al.</i> , 1989; Dilma Daniela Silva1 and Richard C. Beeson Jr., 2011)

Trench / window (Ορυγμα με παράθυρο)

Η εκσκαφή ορυγμάτων ή η εγκατάσταση παραθύρων για την παρακολούθηση της ρίζας χρησιμοποιείται ως τεχνική ακόμη και σήμερα για την καταγραφή του ριζικού συστήματος στο πεδίο (in situ). Ωστόσο, η τεχνική του ορύγματος / παραθύρου παραμένει στατική και αντιπροσωπεύει μια περιορισμένη, δισδιάστατη περιοχή η οποία δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη συνολική έκταση του προς μελέτη ριζικού συστήματος (Neumann, George and Plassard, 2009).

Pinboards and Monoliths

Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε παρατηρήσεις στον αγρό όσο και σε γλαστρικά φυτά. Η μέθοδος pinboard πιστεύεται ότι δίνει μια αρκετά πλήρη απεικόνιση της δομής και του σχήματος του ριζικού συστήματος, με καταστροφή όμως ενός σημαντικού αριθμού λεπτών ριζών (Böhm, 1979; Kono *et al.*, 1987; Kano-Nakata *et al.*, 2011).

Rhizotron και παραλλαγές του

Είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a). Αποτελεί μια τεχνική για την πραγματοποίηση μη καταστρεπτικών, επαναλαμβανόμενων μετρήσεων σε μεγάλη κλίμακα. Το Rhizotron μπορεί να οριστεί ως συσκευή σχεδιασμένη για υπόγεια παρατήρηση, προβολή και μέτρηση των ριζών και των υπόγειων τμημάτων των φυτών μέσω διαφανών επιφανειών που έρχονται σε επαφή με το χώμα (Taylor, Urchurch and McMichael, 1990).

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα, με τα Rhizotrons μπορούν να ληφθούν διαδοχικές μετρήσεις της ίδιας ρίζας και να παρατηρηθεί η αύξηση του μήκους της (Taylor, Urchurch and McMichael, 1990). Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης αισθητήρων ή και καμερών για την καταγραφή συνθηκών του εδάφους καθώς και για λήψη φωτογραφιών σε καθορισμένες χρονικές στιγμές (Glinski, Karnok and Carrow, 1993). Σύμφωνα με τους Huck και Taylor (1982), τα πειράματα με τα Rhizotrons έχουν πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων, η πειραματική δομή είναι ακίνητη, καθώς επίσης παρατηρείται και αλλαγή στο περιβάλλον του εδάφους όταν εγκαθίστανται τα Rhizotrons.

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται και κάποιες παραλλαγές του συστήματος όπως τα Mesorhizotron (Pan *et al.*, 1998), τα Minirhizotron (Bates, 1937; Taylor, Urchurch and McMichael, 1990; Pateña and Ingram, 2000; Smit *et al.*, 2000; Dannoura *et al.*, 2008) και τα Above-Ground Rhizotrons (James, Bartlett and Amadon, 1985; Neufeld *et al.*, 1989; Dilma Daniela Silva¹ and Richard C. Beeson Jr., 2011)

1.3.2 Μέθοδοι μετρήσεις σε δοχεία – γλάστρες (Container – Grown Methods)

	Μέθοδος	Πληροφορίες	Καταστροφή Ρίζας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Βιβλιογραφία
1	Root Washing (Πλύσιμο ρίζας)	Ξηρό βάρος ρίζας, λόγος βλαστού/ρίζας διάμετρος ρίζας, μοτίβο διανομής	Ναι	Εμφανές όλο το ριζικό σύστημα	Μεγάλες απώλειες λεπτών ριζών, απώλεια φυσικών θέσεων / αρχιτεκτονικής της ρίζας, χρονοβόρα και κουραστική μέθοδος	(van Noordwijk and Floris, 1979; do Rosário G. Oliveira <i>et al.</i> , 2000)
2	Root rating (Εκτίμηση ρίζας)	Πυκνότητα ρίζας, εμφάνιση, διακλάδωση και μοτίβο διανομής	Όχι	Εύκολη, γρήγορη	Υποκειμενική μέτρηση, ποιοτικό και ανθρώπινο σφάλμα	(Cid, Socorro and Perez-Rosales, 1993; Walters and Wehner, 1994; Jackson <i>et al.</i> , 2005)
3	Transparent containers/s ubstrates (Διαφανείς περιέκτες/ υποστρώματα)	Πυκνότητα ρίζας, εμφάνιση, διακλάδωση και μοτίβο διανομής	Όχι	Ολόκληρο ριζικό σύστημα ορατό, 3D, πιο φυσική αρχιτεκτονική	Διαφορετικό περιβάλλον σε σχέση με τα εδάφη και υποστρώματα χωρίς έδαφος, πιθανή χρήση δαπανηρού εξοπλισμού	(Neumann, George and Plassard, 2009; Zhu <i>et al.</i> , 2011; Pound <i>et al.</i> , 2013)
4	Horhizotron TM	Πυκνότητα ρίζας, εμφάνιση, διακλάδωση	Όχι	Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε συγκεκριμένες ρίζες, ελαφρά υλικά κατασκευής	Μόνο για μεγάλα φυτά (όγκος ριζών 3.78-11.35 L), υλικά μη μόνιμα / σταθερά, εύθρυπτα,	(N. Wright and D. Wright, 2004; Jackson <i>et al.</i> , 2005)

		και μοτίβο διανομής			ανώμαλη ανάπτυξη ρίζας κατά μήκος του παραθύρου	
5	Mini- Horhizotron	Πυκνότητα ρίζας, εμφάνιση, διακλάδωση και μοτίβο διανομής	Όχι	Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε συγκεκριμένες ρίζες, ελαφρά υλικά κατασκευής	Μόνο για μικρούς σπόρους/ φυτά, ανώμαλη ανάπτυξη ρίζας κατά μήκος του παραθύρου	(Judd <i>et al.</i> , 2014)
6	Rhizometer	Πυκνότητα ρίζας, εμφάνιση, διακλάδωση και μοτίβο διακλάδωσης	Όχι	Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε συγκεκριμένες ρίζες, παρατήρηση ανάπτυξης και αρχιτεκτονικής	Παρατήρηση μέρους του ριζικού συστήματος	(Judd, Jackson and Fonteno, 2014, 2015b)
7	Hydraulic Conductance Flow Meter (HCFM) (Μετρητής ροής υδραυλικής αγωγιμότητας)	Ριζική υδραυλική αγωγιμότητα, βλαστική υδραυλική αγωγιμότητα	Ναι	Συσχέτιση υδραυλικής αγωγιμότητας με τη μάζα της ρίζας	Καταστροφική μέθοδος ανάλυσης	(Judd, Jackson and Fonteno, 2014)

Η μέτρηση των ριζικών συστημάτων σε δοχεία μειώνει τον όγκο της περιοχής ή του υποστρώματος που απαιτείται για να βρεθούν όλες οι ρίζες ενός φυτού και επιτρέπει μια πληρέστερη «εικόνα» του ριζικού συστήματος σε σύγκριση με τα φυτά που καλλιεργούνται στο πεδίο (Neumann, George and Plassard, 2009).

Root Washing (Πλύσιμο ρίζας)

Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, οι περισσότερες από τις λεπτές ρίζες και τα ριζικά τριχίδια καταστρέφονται ή απομακρύνονται, ενώ η δομή των φυσικών θέσεων διαταράσσεται. Η απομάκρυνση των ριζών από το χώμα ή τα υποστρώματα χωρίς χώμα, είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνεται σε πολλές τεχνικές μέτρησης ρίζας, παρόλο που το κύριο μειονέκτημα οποιασδήποτε μεθόδου που χρησιμοποιεί πλύσιμο ή απομάκρυνση ριζών, είναι η μεγάλη απώλεια ρίζας (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a).

Root rating (Εκτίμηση ρίζας)

Η εκτίμηση των ριζών μπορεί να είναι ένας απλός και εύκολος τρόπος ώστε να περιγράψουν ποιοτικά χαρακτηριστικά των ριζών, όπως η πυκνότητα, η εμφάνιση, η διακλάδωση και η κατανομή τους (Cid, Socorro and Perez-Rosales, 1993; Jackson *et al.*, 2005).

Transparent containers/substrates (Διαφανείς περιέκτες/υποστρώματα)

Για να είναι εφικτή η παρατήρηση του ριζικού συστήματος, τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν σε διαφανή δοχεία (Neumann, George and Plassard, 2009). Για να διευκολυνθεί η οπτική πρόσβαση σε ολόκληρο το ριζικό σύστημα, τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν σε υγρή καλλιέργεια, σε επιφάνεια από άγαρ ή χαρτί, αλλά και σε ένα διαφανές υπόστρωμα γέλης μέσα σε διαφανή δοχεία (Zhu *et al.*, 2011; Pound *et al.*, 2013). Τα διαφανή υποστρώματα γέλης έχουν το πλεονέκτημα ότι παρέχουν μια στερεή ριζόσφαιρα για τις αναπτυσσόμενες ρίζες, γεγονός που επιτρέπει στις ρίζες να αναπτυχθούν σε τρεις διαστάσεις (3D) για πολύπλοκες μετρήσεις ρίζας (Thompson and Holbrook, 2004; Zhu *et al.*, 2011). Ωστόσο, η ανάπτυξη των ριζών σε διαφανή υποστρώματα μπορεί να μην είναι παρόμοια με τον τρόπο με τον οποίο αυτές θα αναπτύσσονταν σε πραγματικά εδάφη ή σε υποστρώματα χωρίς έδαφος (Downie *et al.*, 2012).

Horhizotron™

Τα above-ground rhizotrons και minirhizotrons και οι προσαρμογές τους έχουν οδηγήσει στη δημιουργία μιας επανασχεδιασμένης και βελτιωμένης τεχνικής, το Horhizotron™. Το Horhizotron™ είναι μια μη καταστρεπτική τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πλευρικής ανάπτυξης της ρίζας και αξιοποιείται ευρέως για την εκ των υστέρων αξιολόγηση των μεταφυτεύσεων (N. Wright and D. Wright, 2004). Το Horhizotron™ μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί στο θερμοκήπιο ή στον αγρό (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a).

Mini-Horhizotron

Το Mini-Horhizotron επινοήθηκε για να μελετήσει την ανάπτυξη των ριζών των σπόρων μετά από φύτευση ή μεταφύτευση σε κοινά δοχεία θερμοκηπίου υπό συνθήκες παραγωγής. Έχει δείξει ότι τα φυτά που καλλιεργούνται στο Mini-Horhizotron έχουν παρόμοια βάρη ξηρής ρίζας σε σύγκριση με τα φυτά που καλλιεργούνται σε γλάστρα (Judd *et al.*, 2014). Ο παραπάνω σχεδιασμός επιτρέπει επαναλαμβανόμενες μετρήσεις των ριζών και η μέθοδος αυτή βοηθά στην καλύτερη κατανόηση των μοτίβων, των προβλημάτων και των δυνατοτήτων ανάπτυξης της ρίζας (Judd, Jackson and Fonteno, 2014).

Rhizometer (ριζόμετρο)

Το rhizometer μελετά την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων του υποστρώματος στην ανάπτυξη της ρίζας με την πάροδο του χρόνου. Το ριζόμετρο αποτελείται από διάφανο κύλινδρο που επιτρέπει τόσο την προβολή ενός αναπτυσσόμενου ριζικού συστήματος όσο και τις επί τόπου μετρήσεις, όπως το μήκος της ρίζας, η ταχύτητα ανάπτυξης, η παρουσία και η ποσότητα των ριζικών τριχιδίων καθώς και η διακλάδωση / αρχιτεκτονική της ρίζας (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a).

Hydraulic Conductance Flow Meter (HCFM) (Μετρητής ροής υδραυλικής αγωγιμότητας)

Είναι μια συσκευή η οποία μετρά τόσο τη ριζική υδραυλική αγωγιμότητα όσο και τη βλαστική υδραυλική αγωγιμότητα με ελάχιστη διαταραχή στο ριζικό σύστημα (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a).

1.3.3 Μέθοδοι Ψηφιακής Απεικόνισης (Digital Imaging Methods)

	Μέθοδος	Πληροφορίες	Καταστροφή Ρίζας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Βιβλιογραφία
1	Image Analyzing Computer (Ανάλυση εικόνας με χρήση H/Y)	Πρότυπα διακλάδωσης και κατανομής	Ναι/ Όχι	Αντικειμενικότητα, αυτοματοποιημένη ανάλυση, μεγάλο εύρος μετρήσεων, λιγότερος χρόνος καταγραφής, λιγότερη υποκειμενικότητα	Παρατήρηση μέρους του ριζικού συστήματος, πιθανή αλληλοκάλυψη ριζών, πιθανή καταστροφή υλικού πριν την τελική ανάλυση	(Ottman and Timm, 1984)
2	WinRHIZO / WinRHIZO Tron	Πυκνότητα και μήκος ρίζας, επιφάνεια των ριζών, σημεία διακλάδωσης	Ναι/ Όχι	Φθηνά, ευκολία χρήσης, ταχύτητα μετρήσεων, κατάλληλα για πειράματα τόσο σε μεγάλη όσο και σε μικρή κλίμακα, λιγότερη υποκειμενικότητα	Παρατήρηση μέρους του ριζικού συστήματος, πιθανή αλληλοκάλυψη ριζών, χρήση μόνο σε πλυμένες ρίζες, ακατάλληλα για μακροχρόνια παρατήρηση	(Arsenaul <i>et al.</i> , 1995; Fang, Clark and Liao, 2012)
3	NMR, X-ray CT	Μήκος και ανάπτυξη ρίζας, κατανομή και διακλάδωση, διάμετρος	Όχι	Πλήρης 3D εικόνα του ριζικού συστήματος Μη επεμβατικές, μη καταστρεπτικές	Δύσχρηστη, ανάπτυξη ριζών μόνο σε μικρούς περιέκτες, δεν είναι επαρκώς εξελιγμένες μέθοδοι	(Daly <i>et al.</i> , 2015; Metzner <i>et al.</i> , 2015; Tracy <i>et al.</i> , 2015)

Image Analyzing Computer (Ανάλυση εικόνας με χρήση Η/Υ)

Τα Rhizotrons, τα minirhizotrons και άλλες μέθοδοι προσδιορισμού του ριζικού συστήματος έχουν τη δυνατότητα ψηφιακής απεικόνισης (Downie *et al.*, 2012; Bucksch *et al.*, 2014). Τα δεδομένα από φωτογραφίες, βίντεο ή σαρωμένες εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από προγράμματα υπολογιστών για την εξαγωγή αρκετών μετρήσεων. Η αξιοποίηση της ψηφιακής απεικόνισης σε συνδυασμό με την αντικειμενικότητά της, επιτρέπει την επαναλαμβανόμενη ανάλυση μεγάλου εύρους μετρήσεων (Pound *et al.*, 2013). Υπάρχουν πολλά προγράμματα υπολογιστών, τόσο εμπορικά όσο και ελεύθερα, τα οποία είναι διαθέσιμα και μερικά από αυτά είναι τα: RootLM, RootReader 2D, EZ-Rhizo, WinRHIZO και WinRHIZO Tron. (Zhu *et al.*, 2011).

WinRHIZO / WinRHIZO Tron

Το WinRHIZO βασίζεται σε έναν οπτικό σαρωτή αντί για μια βιντεοκάμερα, επειδή οι σαρωτές παράγουν εικόνες υψηλής ποιότητας (Arsenaul *et al.*, 1995).

NMR, X-ray CT

Με την χρήση των μεθόδων αυτών είναι εύκολη η παρακολούθηση της ανάπτυξης της ρίζας χωρίς αυτή να παρεμποδίζεται, δίνοντας την δυνατότητα παρατήρησης της ίδιας ρίζας σε βάθος χρόνου. Παρατηρούνται η ανάπτυξη πλευρικών ριζών αλλά και ο ρυθμός επιμήκυνσής τους. Συγκρίνοντας τις μεθόδους αυτές, η αξονική τομογραφία (X-ray CT) παρέχει καλύτερη ανάλυση της χωρικής κατανομής των ριζών, ενώ η NMRI έχει καλύτερη ανάλυση των ριζικών διακλαδώσεων. Οι μέθοδοι αυτές ενδέχεται να αξιοποιηθούν συνδυαστικά στο μέλλον προκειμένου να αναλυθεί πιο αποτελεσματικά το ριζικό σύστημα (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a; Metzner *et al.*, 2015).

1.4 Σύγκριση της εκτίμησης ανάπτυξης ριζικού συστήματος μέσω μαθηματικών μοντέλων έναντι της πειραματικής διαδικασίας

Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ως εργαλεία διερεύνησης και αξιολόγησης περισσότερων σεναρίων εκτίμησης διαφόρων παραμέτρων, από ό, τι θα ήταν εφικτό να δοκιμαστεί πειραματικά, λόγω οικονομικών και χρονικών περιορισμών (Robert *et al.*, 2012). Με τα μαθηματικά μοντέλα προτείνεται μια μαθηματική διατύπωση, όπου λαμβάνονται υπόψη οι βασικές διαδικασίες και οι αλληλεπιδράσεις τους, που έχουν αναγνωριστεί σαν θεμελιώδεις στο προς μελέτη σύστημα (Demongeot, Françoise and Nerini, 2009). Επομένως, τα μοντέλα πρέπει να περιλαμβάνουν τις βασικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται σε ένα πείραμα και να μπορούν να απαντούν σε συγκεκριμένες ερωτήσεις, καθώς και να μπορούν να προβλέπουν τους περιορισμούς ενός πειράματος, πριν την διάθεση πόρων για την εκτέλεσή του (Robert *et al.*, 2012). Εφόσον δημιουργηθεί το μοντέλο ελέγχεται πειραματικά προκειμένου να επικυρωθεί ή να ακυρωθεί η ακρίβεια πρόβλεψής του (Demongeot, Françoise and Nerini, 2009). Πολλές φορές όμως τα μαθηματικά μοντέλα μπορεί να υποκρύπτουν ανακρίβειες στις προβλέψεις ή μπορεί να βασίζονται σε εμπειρικές προσεγγίσεις λόγω έλλειψης επιστημονικών αποδείξεων (Robert *et al.*, 2012). Συχνά, τα προς μελέτη θέματα είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και δεν είναι εφικτό να αποτυπωθούν οι λειτουργίες τους με μαθηματικά μοντέλα. Τα μοντέλα πρέπει να μιμούνται τη συμπεριφορά του θέματος που μελετάται και είναι αναγκαίο να έχουν αναπτυχθεί μαθηματικές μέθοδοι ικανές είτε να μειώνουν την πολυπλοκότητα του μοντέλου, διατηρώντας όμως τη δυναμική του, είτε κατασκευάζοντας απλά και κατανοητά μοντέλα, που να μπορούν να δημιουργούν σύνθετες δυναμικές (Demongeot, Françoise and Nerini, 2009).

Εξαιτίας του ότι οι δυνατότητες ακριβούς εκτίμησης του ριζικού συστήματος των φυτών δεν είναι πάντοτε εφικτή με την χρήση των ποικίλων μεθόδων εκτίμησης που έχουν ήδη αναφερθεί, λόγω του ότι οι περισσότερες από αυτές είναι δαπανηρές, περίπλοκες και χρονοβόρες, επινοήθηκαν και σε αυτή την περίπτωση μαθηματικά μοντέλα εκτίμησης, χρησιμοποιώντας αρκετές παραμέτρους. Με τα μαθηματικά μοντέλα γίνεται προσομοίωση και πρόβλεψη της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος συναρτήσει των παραγόντων του περιβάλλοντος στο οποίο αυτό αναπτύσσεται. Αποτελούν παράδειγμα για το πώς οι θεωρητικές προσεγγίσεις μπορούν να συμπληρώσουν πειραματικές μελέτες και να παρέχουν νέες δυνατότητες σε πολύπλοκα συστήματα, όπως είναι αυτά που απαιτούνται για την περιγραφή της ανάπτυξης της ρίζας. Η μαθηματική μοντελοποίηση παρέχει ένα πλαίσιο για την τυποποίηση των αλληλεπιδράσεων και για την κατανόηση των μεταβολών των παραμέτρων τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Πολλές φορές τα μοντέλα έχουν ισχυρό ρόλο στην διατύπωση υποθέσεων και στον εντοπισμό κενών στις υπάρχουσες γνώσεις, ενώ μπορούν να κατευθύνουν το μελλοντικό θεωρητικό και πειραματικό έργο των επιστημόνων και των ερευνητών (Mellor *et al.*, 2016)

1.4.1 Μοντέλα Ανάπτυξης Ρίζας

Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, ο Diggle, (1988) περιέγραψε ένα μοντέλο τρισδιάστατης προσομοίωσης της ανάπτυξης και εξέλιξης του ριζικού συστήματος του σιταριού. Όπως αποκαλύπτεται στην διεθνή βιβλιογραφία, τα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της ανάπτυξης της ρίζας συνέχιζαν να εξελίσσονται παράλληλα με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Η πλειονότητα των μοντέλων αυτών αφορούν σε καλλιέργειες μείζονος σημασίας για την διατροφή του ανθρώπου, όπως ρύζι (Yang *et al.*, 2021), σιτάρι (Landl *et al.*, 2019), ντομάτα (Ji *et al.*, 2017), καλαμπόκι (de Moraes *et al.*, 2019), κριθάρι (Ahmadi, Sepaskhah and Zarei, 2020), σόγια (de Moraes *et al.*, 2018) και μπανάνες (Lecompte, Ozier-Lafontaine and Pages, 2003) με τελικό σκοπό την βελτιστοποίηση των καλλιεργητικών τεχνικών για την αύξηση της απόδοσης. Οι περισσότερες εργασίες προσομοιάζουν τα μοντέλα τους σε συνθήκες εδάφους και κάποιες εφαρμόζουν περιοριστικούς παράγοντες ανάπτυξης της ρίζας, όπως έλλειψη νερού (Hautala and Hakojärvi, 2011), ξηρασία (de Moraes *et al.*, 2019; Landl *et al.*, 2019), συμπίεση εδάφους (Lecompte, Ozier-Lafontaine and Pages, 2003) και σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης του φυτού (Ji *et al.*, 2017).

Ωστόσο τα μοντέλα αυτά δεν αναπτύχθηκαν με στόχο την εκτίμηση της διαπνοής των φυτών ή την ένταξή τους σε προσομοίωση άλλων φυσιολογικών διεργασιών των φυτών, αλλά κυρίως ως ένα εργαλείο εκτίμησης του όγκου και της αρχιτεκτονικής του ριζικού συστήματος. Για παράδειγμα οι Yang *et al.*, (2021) μελέτησαν το ριζικό σύστημα του ρυζιού με επιπλέον σκοπό την επιλεκτική αναπαραγωγή και γενετική του βελτίωση, χρησιμοποιώντας υδροπονικό σύστημα για να αναπτύξουν το μοντέλο τους. Για καλλιέργειες ανθοκομικών ή καλλωπιστικών φυτών δεν βρέθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές που να έχουν ασχοληθεί με την μοντελοποίηση της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος των φυτών αυτών.

Για την ανάπτυξη και αξιοποίηση των παραπάνω μοντέλων είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, καθώς στην πλειονότητά τους τα μοντέλα χρησιμοποιούν ανώτερα μαθηματικά και περίπλοκες εξισώσεις – συναρτήσεις. Τα μοντέλα αυτά πέρα από την ανάπτυξη του ίδιου του ριζικού συστήματος των φυτών δίνουν με μεγάλη ακρίβεια τόσο την αρχιτεκτονική του ριζικού συστήματος όσο και την ποσοτική του εκτίμηση.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε από το Φεβρουάριο έως και τον Ιούλιο του 2019 στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών στο Βελεστίνο Μαγνησίας. Το θερμοκήπιο ήταν τοξωτό και καλυμμένο με φύλλο πολυαιθυλενίου με διαστάσεις 20 μέτρα μήκος και 8 μέτρα πλάτος και συνολικό εμβαδόν 160 m².

2.1 Μεταχείριση των φυτών πριν την εγκατάστασή στο υδροπονικό σύστημα

Τα προς μελέτη φυτά προέκυψαν από μοσχεύματα, μετά από κλάδεμα μητρικών φυτών (Φεβρουάριος 2019) ποικιλίας Miss Piggy που καλλιεργούνταν ήδη στο ίδιο θερμοκήπιο. Τα μοσχεύματα, αφού εμβαπτίστηκαν σε εμπορικό διάλυμα αυξίνης, τοποθετήθηκαν σε περιέκτες μικρού όγκου με χόμα. Μετά, οι περιέκτες τοποθετήθηκαν σε γυάλινο θερμοκήπιο στις ίδιες εγκαταστάσεις για ριζοβολία, για διάστημα περίπου 7 – 8 εβδομάδων. Από αυτά τα φυτά, για τη διεξαγωγή του πειράματος επιλέχθηκαν τυχαία 100 νεαρά φυτά τριανταφυλλιάς, στα οποία μετρήθηκε και καταγράφηκε το εμβαδόν της φυλλικής τους επιφάνειας (Απρίλιος 2019). Παράλληλα το εμβαδόν της φυλλικής τους επιφάνειας για κάθε ένα από τα υπόλοιπα φυτά που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα υπολογίστηκε από την εξίσωση (Zografou and Lykas, 2020):

$$LA_L = A_{LA} * (L_L + W_L)^B_{LA} \quad (1)$$

Όπου:

LA_L = Το εμβαδόν της φυλλικής επιφάνειας του φυλλαρίου σε cm²

L_L = Το μήκος του φυλλαρίου σε cm

W_L = Το πλάτος του φυλλαρίου σε cm

A_{LA} και B = Σταθερές παράμετροι της εξίσωσης

Το πλάτος και το μήκος του κάθε φύλλου μετρήθηκαν με χρήση υποδεκάμετρου. Η φυλλική επιφάνεια κάθε φυτού υπολογίστηκε από το άθροισμα της φυλλικής επιφάνειας του κάθε φύλλου του (LA_L). Τα φυτά ταξινομήθηκαν με βάση το εμβαδόν της φυλλικής τους επιφάνειας. Όλα τα φυτά υπέστησαν τις ίδιες καλλιεργητικές φροντίδες.

2.2 Μεταχείριση των φυτών μετά την εγκατάστασή τους στο υδροπονικό σύστημα

Στα τέλη Μαΐου εξήντα (60) από φυτά μεταφέρθηκαν σε μαύρα πλαστικά δοχεία που περιείχαν θρεπτικό διάλυμα, τα χαρακτηριστικά και η σύνθεση του οποίου φαίνεται στον Πίνακα 1. Τα δοχεία διέθεταν καπάκι, το οποίο τρυπήθηκε στο κέντρο ώστε να μην υπάρχει σημαντική εξάτμιση του θρεπτικού διαλύματος που περιείχαν. Πριν την εγκατάσταση των φυτών στα δοχεία, έγινε απομάκρυνση του υποστρώματος από το ριζικό σύστημα των φυτών, με ισχυρό πλύσιμο, ώστε να μείνει μόνο το ριζικό τους σύστημα. Τα φυτά τοποθετήθηκαν μέσα στα δοχεία

με τέτοιο τρόπο ώστε το ριζικό τους σύστημα να βρίσκεται συνεχώς εμβαπτισμένο στο θρεπτικό διάλυμα.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά και σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος, σε ppm που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση των φυτοδοχείων (Sonneveld and Straver, 1994)

pH	5.5
EC (mS/cm)	1.7-2.5
NO ₃	763
NH ₄	18
K	253
PO ₄	97
Ca	160
Mg	36
SO ₄	72
Fe	1.7
Cu	0.6
Mn	0.5
B	0.28
Zn	0.23
Mo	0.015

Τα δοχεία με τα φυτά τοποθετήθηκαν σε πάγκο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1 στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, όπου ήδη ήταν εγκαταστημένη σε σάκους με περλίτη υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, η οποία αρδεύονταν με θρεπτικό διάλυμα ίδιας σύνθεσης (Πίνακας 1).



Εικόνα 1: Νεαρά φυτά τριανταφυλλιάς τοποθετημένα σε δοχεία με τέτοιο τρόπο ώστε το ριζικό τους σύστημα να βρίσκεται συνεχώς εμβαπτισμένο στο θρεπτικό διάλυμα, σε πάγκο στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

2.3 Μετρήσεις

Για διάστημα 17 ημερών μετρούνταν με ζυγό ακριβείας, για δύο συνεχόμενες ημέρες, το συνολικό βάρος τεσσάρων προεπιλεγμένων φυτοδοχείων (φυτοδοχείο – θρεπτικό διάλυμα – φυτό). Από τη διαφορά των δύο διαδοχικών μετρήσεων για το κάθε φυτοδοχείο υπολογιζόταν η διαπνοή του κάθε φυτού για το αντίστοιχο διάστημα.

Στη συνέχεια τα φυτά μεταφέρονταν στο εργαστήριο Ανθοκομίας του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών όπου μετρούνταν οι παρακάτω παράμετροι:

- το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα ($EC, dS\ cm^{-1}$) του θρεπτικού διαλύματος από καθένα από τα φυτοδοχεία,
- η φυλλική επιφάνεια, με χρήση scanner και του λογισμικού Image j, καθώς και οι διαστάσεις των σύνθετων φυλλαρίων του κάθε φυτού. Από το άθροισμα της φυλλικής

επιφάνειας των φυλλαρίων του κάθε φυτού υπολογίστηκε η φυλλική επιφάνεια ολόκληρου του φυτού.

- το χλωρό (Εικόνα 2 και Εικόνα 3) και το ξηρό βάρος των φυτών (gr) των φύλλων, των βλαστών και της ρίζας των φυτών μετά από ξήρανσή τους στους 50 °C για διάστημα 72 ωρών.



Εικόνα 2: Ζύγισμα φυτού τριανταφυλλιάς σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας



Εικόνα 3: Απεικόνιση του ριζικού συστήματος φυτού τριανταφυλλιάς.

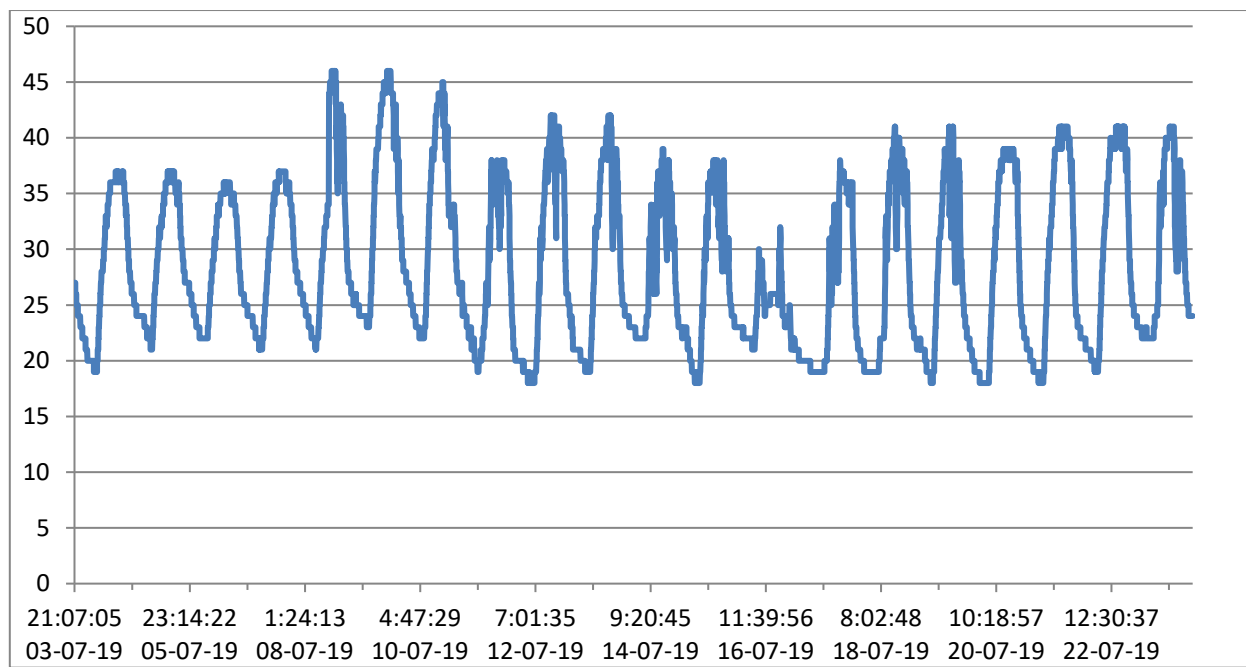
2.4 Στατιστική επεξεργασία

Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων έγινε με το λογισμικό Statgraphics και το Microsoft Excel 2007.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

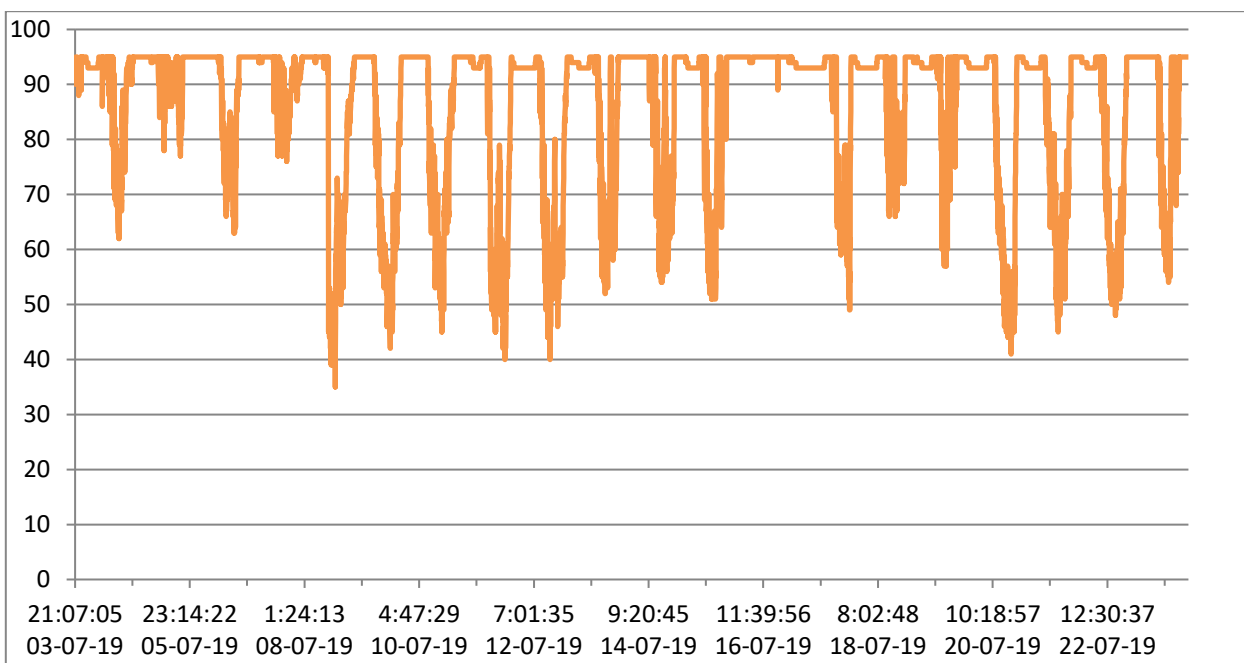
3.1 Κλιματικά δεδομένα θερμοκηπίου

Στην Εικόνα 4 αναφέρονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου κατά το χρονικό διάστημα εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η ελάχιστη θερμοκρασία ήταν 18 °C, η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 46 °C και η μέση θερμοκρασία στον χώρο του θερμοκηπίου ήταν 26 °C.



Εικόνα 4: Διάγραμμα θερμοκρασίας αέρα του θερμοκηπίου από 03.07.2019 μέχρι 22.07.2019

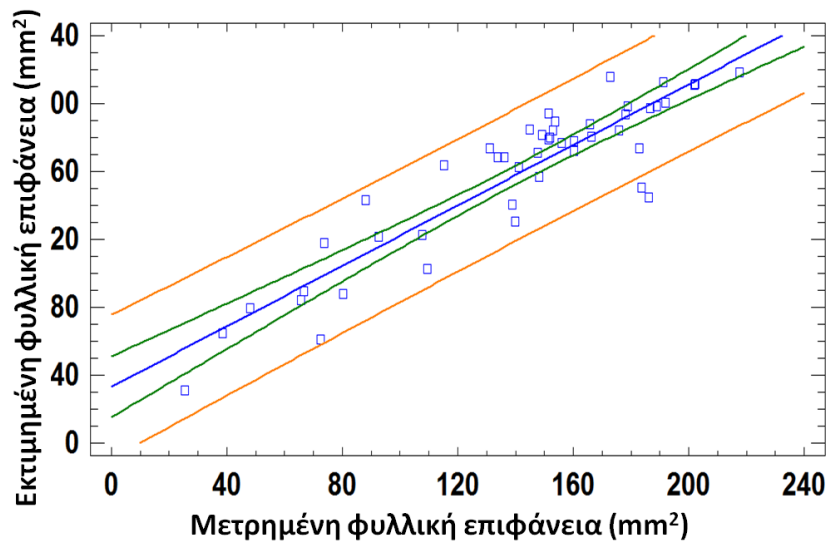
Στην Εικόνα 5 αναφέρονται οι μετρήσεις της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου κατά το χρονικό διάστημα εκτέλεσης του πειράματος. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η ελάχιστη σχετική υγρασία ήταν 35%, η μέγιστη σχετική υγρασία ήταν 95% και η μέση σχετική υγρασία στον χώρο του θερμοκηπίου ήταν 93%.



Εικόνα 5: Διάγραμμα σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου από 03.07.2019 μέχρι 22.07.2019

3.2 Φυλλική Επιφάνεια

Η φυλλική επιφάνεια στην παρούσα εργασία μετρήθηκε σε νεαρά φυτά τριανταφυλλιάς της ποικιλίας Miss Piggy. Στην εικόνα 6 παρουσιάζεται η συσχέτιση της μετρημένης φυλλικής επιφάνειας των φυτών (με χρήση scanner) με την φυλλική επιφάνεια που εκτιμήθηκε από το μαθηματικό μοντέλο (1). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, για όρια εμπιστοσύνης 95,0%, ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών είναι υψηλός (0,91). Καλύτερη συσχέτιση παρατηρήθηκε σε τιμές που κυμαίνονταν από 140 έως 220 mm². Με βάση τα παραπάνω είναι δυνατή η εκτίμηση της φυλλικής επιφάνειας των νεαρών φυτών τριανταφυλλιάς με τη χρήση του παραπάνω μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις των φύλλων που έχουν εκπτυχθεί στο φυτό.



Εικόνα 6: Συσχέτιση της μετρημένης φυλλικής επιφάνειας (LA scan) με την προβλεπόμενη από το μοντέλο υπολογισμού (LA model). Οι πορτοκαλί γραμμές δηλώνουν τα όρια πρόβλεψης (prediction limits). Οι πράσινες γραμμές δηλώνουν τα όρια εμπιστοσύνης (confidence limits). Η μπλε γραμμή δηλώνει την γραμμική συσχέτιση των τιμών της φυλλικής επιφάνειας.

Οι Rourphael *et al.*, 2010 έχει παρουσιαστεί επίσης υψηλά ποσοστά συσχέτισης της φυλλικής επιφάνειας και των διαστάσεων των φύλλων σε ανεπτυγμένα φυτά τριανταφυλλιάς. Η εκτίμηση της φυλλικής επιφάνειας των φυτών στην εργασία των παραπάνω ερευνητών έγινε με χρήση παρόμοιου μαθηματικού μοντέλου, που έχει την μορφή:

$$LA = a + b (L * W)$$

όπου:

LA = Το εμβαδόν της φυλλικής επιφάνειας του φύλλου σε cm^2

a = Προσαρμοσμένη σταθερά

b = συντελεστής σχήματος (μεταξύ 0,5 για τριγωνικό σχήμα και 0,78 για ελλειπτικό σχήμα)

L = μήκος φύλλου σε cm

W = πλάτος φύλλου σε cm (Rourphael *et al.*, 2010).

Επειδή το πλάτος των φύλλων και το μήκος στο μέσο του φύλλου είναι διαστάσεις που μπορούν εύκολα να μετρηθούν στο πεδίο, σε πειράματα θερμοκηπίου ή εργαστηρίου, η χρήση αυτού του μοντέλου επιτρέπει την πραγματοποίηση μη καταστρεπτικών αλλά και επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στα ίδια φύλλα. Τέτοια μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνεχή και

ακριβή εκτίμηση της φυλλικής επιφάνειας πολλών φυτών επιτρέποντας την καλύτερη εκτίμηση της διαπνοής μιας καλλιέργειας. Για την εκτέλεση των πειραμάτων δεν απαιτείται καταστροφή των φύλλων, χρήση δαπανηρών οργάνων μέτρησης και χρονοβόρων διαδικασιών (Rouphael *et al.*, 2010; Zografou and Lykas, 2020).

Οι περισσότερες από τις μη καταστρεπτικές μεθόδους εκτίμησης της φυλλικής επιφάνειας βασίζονται σε παραμετρικά μοντέλα που εκτιμούν το εμβαδόν ως συνάρτηση άλλων μορφομετρικών χαρακτηριστικών του φύλλου, όπως είναι το μήκος και το πλάτος του. Η εκτίμηση της φυλλικής επιφάνειας χρησιμοποιείται επίσης για την διερεύνηση του ρυθμού της ανάπτυξης μεταξύ διαφορετικών ειδών και διαφορετικών ατόμων ή γεωγραφικών πληθυσμών του ίδιου είδους (Yu *et al.*, 2020).

Έχουν αναπτυχθεί πληθώρα μαθηματικών μοντέλων εκτίμησης του εμβαδού της φυλλικής επιφάνειας, χρησιμοποιώντας ποικίλους συνδυασμούς μετρήσεων του μήκους και του πλάτους των φύλλων για διάφορα οπωροφόρα δέντρα και λαχανοκομικά φυτά, ενώ για τα καλλωπιστικά φυτά δεν έχουν αναπτυχθεί επαρκώς τέτοια μαθηματικά μοντέλα (Rouphael *et al.*, 2010).

3.3 Διαπνοή

Τα αποτελέσματα της προσαρμογής του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης περιγράφει τη σχέση μεταξύ της μετρημένης διαπνοής (TR σε gr) και 4 ανεξάρτητων μεταβλητών, δηλαδή του νωπού βάρους της ρίζας (WR σε gr), του pH του θρεπτικού διαλύματος, της θερμοκρασίας του υποστρώματος (T σε °C) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (EC σε mS/cm).

Η **εξίσωση (2)** περιγράφει τη εκτίμηση της διαπνοής των νεαρών φυτών τριανταφυλλιάς συναρτήσει των παραπάνω παραμέτρων:

$$TR = a + b *RW + c * pH + d *T + e * EC \quad (2)$$

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών της εξίσωσης 2.

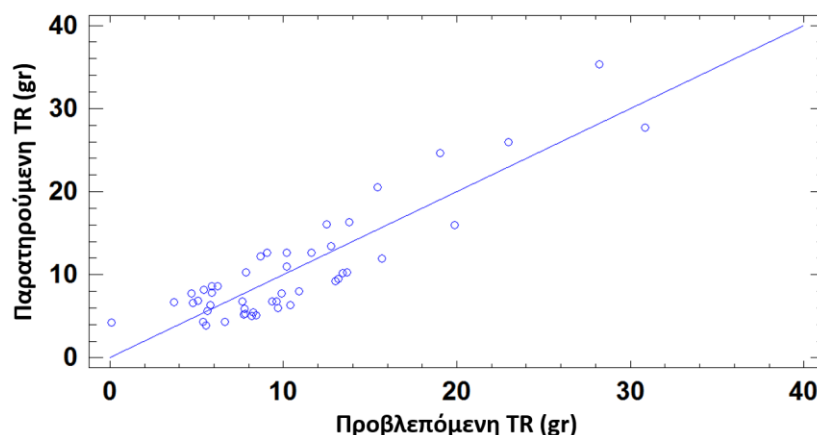
Πίνακας 2. Τιμές των συντελεστών της εξίσωσης 2 με την οποία έγινε η εκτίμηση της διαπνοής των φυτών με βάση το νωπό βάρος της ρίζας, του pH του θρεπτικού διαλύματος, της θερμοκρασίας του υποστρώματος, και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος.

Συντελεστής	Τιμή
a	4.360
b	5.990
c	-7.000

d	1.290
e	0.002

Δεδομένου ότι η τιμή P στον πίνακα ANOVA είναι μικρότερη από 0.05, υπάρχει στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών στο διάστημα εμπιστοσύνης 95,0%. Το υψηλό R^2 της παραπάνω εξίσωσης (0,79) δείχνει ότι με τη χρήση της παραπάνω μαθηματικής εξίσωσης (2) μπορεί να προβλεφθεί σε πολύ καλό βαθμό η διαπνοή των φυτών από τις παραμέτρους που σχετίζονται με την ρίζα (RW) και τα χαρακτηριστικά του θρεπτικού διαλύματος (T, pH και EC).

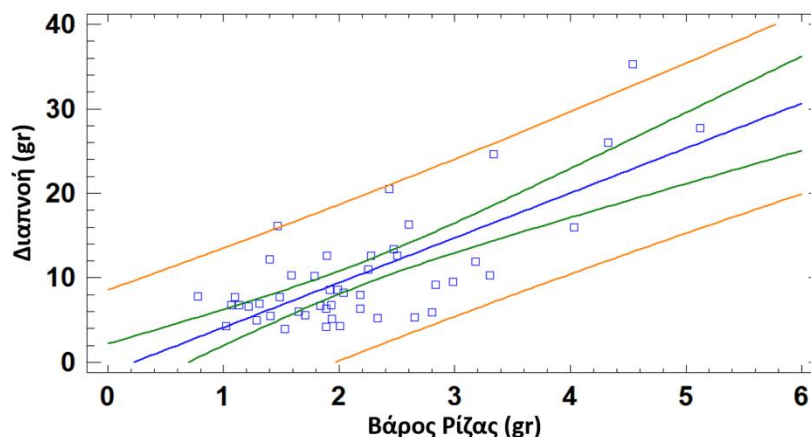
Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η 1:1 συσχέτιση των μετρημένων και εκτιμημένων με τη χρήση της μαθηματικής εξίσωσης (2) τιμών διαπνοής των φυτών. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ιδιαίτερα υψηλή συσχέτιση μεταξύ των μετρημένων και των εκτιμημένων τιμών παρατηρείται όταν αυτές κυμαίνονται από 5 έως 17 gr/φυτό.



Εικόνα 7: Συσχέτιση της προβλεπόμενης προς την παρατηρούμενης διαπνοή (TR σε gr).

Από την εξίσωση (2) φαίνεται ότι υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της διαπνοής των φυτών με το νωπό βάρος του ριζικού συστήματος (Bar-Tal *et al.*, 1994; Kharkina, Ottosen and Rosenqvist, 1999), καθώς και με την θερμοκρασία (Baille, Baille and Delmon, 1994; Nagasuga, Murai-Hatano and Kuwagata, 2011) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (Son and Takakura, 1989; Schwarz and Kuchenbuch, 1998; Ding *et al.*, 2018) του διαλύματος. Επίσης, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, η διαπνοή του φυτού παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με την τιμή του pH του θρεπτικού διαλύματος (Piao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2019). Σημαντικότερη ωστόσο συσχέτιση με την διαπνοή των φυτών εκτιμήθηκε ότι έχει το βάρος της ρίζας (συντελεστής συσχέτισης 0.75).

Στην Εικόνα 8 εμφανίζεται η συσχέτιση του νωπού βάρους της ρίζας των φυτών τριανταφυλλιάς (σε gr) προς την μετρημένη διαπνοή των ίδιων φυτών (σε gr). Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 8, για όρια εμπιστοσύνης 95,0 %, ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών είναι σχετικά ισχυρός (0,75). Καλύτερη συσχέτιση παρατηρήθηκε όταν το βάρος της ρίζας ήταν μικρότερο από 3 gr και η διαπνοή ήταν μεταξύ 5 και 20 gr. Με βάση τις παρούσες ενδείξεις, είναι δυνατή η συσχέτιση της διαπνοής με το βάρος της ρίζας νεαρών φυτών τριανταφυλλιάς.



Εικόνα 8: Συσχέτιση της διαπνοής (TR σε gr) με το βάρος της ρίζας (RW σε gr). Οι πορτοκαλί γραμμές δηλώνουν τα όρια πρόβλεψης (prediction limits). Οι πράσινες γραμμές δηλώνουν τα όρια εμπιστοσύνης (confidence limits). Η μπλε γραμμή δηλώνει την γραμμική συσχέτιση των τιμών.

Τα υπάρχοντα επιστημονικά δεδομένα που σχετίζουν την διαπνοή με το βάρος της ρίζας είναι λίγα. Τα ευρήματα της εργασίας συμφωνούν με τα ευρήματα των Bar-Tal *et al.* (1994) όπου σε φυτά ντομάτας που καλλιεργήθηκαν θερμοκηπιακά αφαιρέθηκε μέρος του ριζικού συστήματος και επηρεάστηκε αρνητικά η διαπνοή των φυτών. Ομοίως και οι Kharkina, Ottosen and Rosenqvist (1999) διαπίστωσαν ότι η μείωση του όγκου του ριζικού συστήματος φυταρίων αγγουριάς οδήγησε σε μείωση του ρυθμού διαπνοής κατά 70% σε σχέση με τα φυτά μάρτυρες.

Η θετική συσχέτιση μεταξύ της διαπνοής και της θερμοκρασίας του υποστρώματος, όπως αυτή περιγράφεται στην εξίσωση (2), αναφέρεται και από τους Nagasuga, Murai-Hatano and Kuwagata (2011) για υδροπονική καλλιέργεια ρυζιού. Οι παραπάνω ερευνητές διαπίστωσαν ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες υποστρώματος επήλθε μείωση της διαπνοής, τόσο λόγω μείωσης της φυλλικής επιφάνειας όσο και λόγω επίδρασης της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της ρίζας. Αντίστοιχα, υλικά που συσσωρεύουν μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας, όπως ο πετροβάμβακας, μπορούν να επιβραδύνουν την ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών, ειδικά σε θερμά

περιβάλλοντα, όπως τα Μεσογειακά, όπου η θερμοκρασία του αέρα μπορεί εύκολα να ξεπεράσει τους 35 °C, ιδίως τις απογευματινές ώρες (Baille, Baille and Delmon, 1994).

Φαίνεται ότι στην εξίσωση (2) υπάρχει μικρή συσχέτιση μεταξύ της διαπνοής και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας υποστρώματος (EC). Αντιθέτως, οι Son and Takakura (1989) διαπίστωσαν ότι ο ρυθμός διαπνοής μειωνόταν καθώς αυξανόταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος σε φυτά μαρουλιού. Την ίδια άποψη με τους Son and Takakura (1989) εκφράζουν και οι Schwarz and Kuchenbuch (1998) σε υδροπονική καλλιέργεια ντομάτας. Σε περιπτώσεις όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος παίρνει ακραίες τιμές (π.χ. πολύ υψηλή 9,6 dS/m, ή πολύ χαμηλή 0,3 dS/m) όλες οι λειτουργίες των φυτών επηρεάζονται, όπως συμβαίνει και με την διαπνοή, ενώ στις περισσότερες καλλιέργειες, όπως και στην τριανταφυλλιά (Zografou and Lykas, 2020), μέσες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC 1.8 dS/m ως EC 2.4 dS/m) προάγουν τους ρυθμούς φωτοσύνθεσης και διαπνοής (Ding *et al.*, 2018).

Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το επίπεδο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορεί να επιδράσει λιγότερο ή περισσότερο τις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών (υψηλές ή χαμηλότερες τιμές αγωγιμότητας). Αυτό εξαρτάται και από την ανεκτικότητα των φυτικών ειδών στην υψηλή αγωγιμότητα. Στην παρούσα εργασία η μέση τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ήταν 2,99 dS/m, με μικρότερη τιμή τα 1,75 dS/m και μέγιστη τιμή 6,33 dS/m. Επειδή η μέση τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι κοντά στις βέλτιστες τιμές για την καλλιέργεια της τριανταφυλλιάς (Zografou and Lykas, 2020), για αυτόν τον λόγο πιθανώς παρατηρείται και μικρή συσχέτιση στην εξίσωση (2).

Από την εξίσωση (2) προκύπτει ότι υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ του pH του υποστρώματος και της διαπνοής του φυτού. Με αυτό το εύρημα συμφωνούν και οι Xu *et al.* (2019), όπου σε ημι-αυτόματο υδροπονικό σύστημα καλλιεργώντας νεαρά δασικά είδη διαπίστωσαν ότι η αύξηση του pH οδηγεί σε μειωμένο ρυθμό διαπνοής. Ομοίως σε αυτό καταλήγουν και οι Piao *et al.* (2004) όταν καλλιεργήσαν κονδύλους πατάτας σε DFT (deep flow technique).

3.4 Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης νωπού βάρους ρίζας

Τα αποτελέσματα της προσαρμογής του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης περιγράφει τη σχέση μεταξύ του νωπού βάρους της ρίζας (WR σε gr) και 4 ανεξάρτητων μεταβλητών, δηλαδή της διαπνοής (TR σε gr), του pH του υποστρώματος, της θερμοκρασίας του υποστρώματος (T σε °C) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (EC σε mS/cm).

Η εξίσωση (3) του προσαρμοσμένου μοντέλου είναι:

$$RW = a + b * TR + c * pH + d * T + e * EC \quad (3)$$

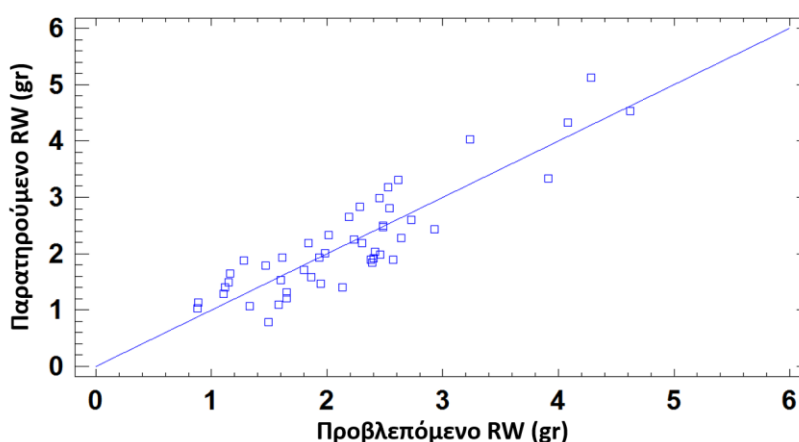
Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών της εξίσωσης 3.

Πίνακας 3. Τιμές των συντελεστών της εξίσωσης 3 με την οποία έγινε η εκτίμηση του νωπού βάρους της ρίζας των φυτών με βάση τη διαπνοή, το pH του θρεπτικού διαλύματος, τη θερμοκρασία του υποστρώματος, και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος.

Συντελεστής	Τιμή
a	1.68
b	0.12
c	0.87
d	- 0.22
e	- 2 * 10 ⁻⁴

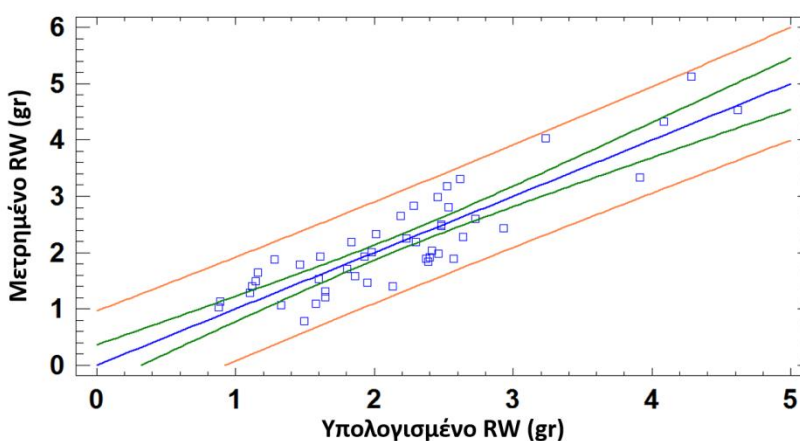
Δεδομένου ότι η τιμή P στον πίνακα ANOVA είναι μικρότερη από 0.05, υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ των μεταβλητών στο διάστημα εμπιστοσύνης 95,0%. Το R² που προκύπτει από την εξίσωση (3) (0,79) αποδεικνύει ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια το βάρος της ρίζας σε σχέση με εύκολα μετρήσιμους παράγοντες, όπως η διαπνοή των φυτών (TR) και τα χαρακτηριστικά του θρεπτικού διαλύματος (T, pH και EC)

Στην Εικόνα 9 εμφανίζεται η 1:1 συσχέτιση των προβλεπόμενων με την χρήση της εξίσωσης (3) προς τα παρατηρούμενα νωπά βάρη των ριζών της τριανταφυλλιάς. Παρατηρείται στην παρακάτω εικόνα υψηλή συσχέτιση των τιμών, τόσο των παρατηρούμενων όσο και των προβλεπόμενων βαρών, μέχρι του βάρους των 3 gr/ρίζα.



Εικόνα 9: Συσχέτιση του προβλεπόμενου προς το παρατηρούμενο νωπό βάρος της ρίζας (RW σε gr).

Στην Εικόνα 10 εμφανίζεται η συσχέτιση του υπολογισμένου βάρους της ρίζας από την εξίσωση (3) (RW σε gr) με το μετρημένο νωπό βάρος την ρίζας σε gr. Όπως προκύπτει, στην Εικόνα 10, για όρια εμπιστοσύνης 95,0 %, ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών είναι υψηλός (0,89). Η βέλτιστη συσχέτιση παρατηρείται όταν, τόσο το υπολογισμένο βάρος της ρίζας από την εξίσωση (3), όσο και το μετρημένο βάρος είναι μεταξύ του 1,00 και 3,00 gr. Από την εξίσωση (3) προκύπτει ότι ο υπολογισμός του νωπού βάρους της ρίζας είναι σχετικά εύκολος, γιατί αξιοποιεί δεδομένα και παραμέτρους που εύκολα αποκτούνται από τα όργανα μέτρησης σε ένα θερμοκήπιο, όπως η διαπνοή και τα χαρακτηριστικά του θρεπτικού διαλύματος.



Εικόνα 10: Συσχέτιση του μετρημένου νωπού βάρους της ρίζας (RW σε gr) με το υπολογισμένο από την εξίσωση (3) βάρος της ρίζας (RW σε gr). Οι πορτοκαλί γραμμές δηλώνουν τα όρια πρόβλεψης (prediction limits). Οι πράσινες γραμμές δηλώνουν τα όρια εμπιστοσύνης (confidence limits). Η μπλε γραμμή δηλώνει την γραμμική συσχέτιση των τιμών.

Η εκτίμηση του νωπού βάρους του ριζικού συστήματος μέσω της διαπνοής μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο προσδιορισμού της ανάπτυξης της ρίζας. Είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος. Σε κάθε άλλη περίπτωση εκτίμησης της ανάπτυξης της ρίζας τα φυτά πρέπει να εκριζωθούν και να καταστραφούν. Η εκτίμηση της διαπνοής μπορεί να γίνει αυτοματοποιημένα με εύκολα υπολογίσιμες παραμέτρους (pH, EC, θερμοκρασία υποστρώματος και αέρα κλπ.). Άρα και η ανάπτυξη της ρίζας μπορεί να εύκολα εκτιμηθεί και με σχετική ασφάλεια.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρά τις μεγάλες εξελίξεις στις τεχνικές μεθόδους εκτίμησης και προσδιορισμού των διαφόρων παραμέτρων του ριζικού συστήματος για την ανάπτυξη και τη λειτουργία του, οι υπάρχουσες γνώσεις είναι ακόμη σε εξαιρετικά πρώιμο στάδιο. Ωστόσο, η πρόκληση της απεικόνισης ολόκληρου του ριζικού συστήματος παραμένει εξαιρετικά δύσκολη, λόγω της αδιαφανούς φύσης των υποστρωμάτων ή του εδάφους. Το πεδίο των Rhizometrics διευρύνεται σε πολλά υποσχόμενες και ενδιαφέρουσες κατευθύνσεις, παρέχοντας περισσότερες επιλογές μέτρησης ρίζας τόσο στην έρευνα όσο και στην εκπαίδευση (Judd, Jackson and Fonteno, 2015a).

Από την παρούσα εργασία προκύπτει υψηλή συσχέτιση μεταξύ της μετρημένης και της εκτιμημένης με την εξίσωση (1) φυλλικής επιφάνειας νεαρών φυτών τριανταφυλλιάς. Η εκτίμηση της διαπνοής από την εξίσωση (2) μπορεί να γίνει εύκολα υπολογιζόμενη, αξιοποιώντας εύκολα μετρήσιμες παραμέτρους (pH, EC, T, και βάρος ρίζας). Η εξίσωση (2) παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της διαπνοής, ειδικά όταν αυτή είναι από 5 έως 17 gr/φυτό.

Με την χρήση του μαθηματικού μοντέλου – εξίσωση (3), που αναπτύχθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, αξιοποιώντας τον υπολογισμό της διαπνοής και τις τιμές του pH, της EC, και της θερμοκρασίας του υποστρώματος, μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια το νωπό βάρος της ρίζας, μέχρι του βάρους των 3 gr/ρίζα, χωρίς να χρειαστεί καταστροφή του φυτού, ενώ παράλληλα επιτρέπει πολλές και επαναλαμβανόμενες μετρήσεις στα ίδια φυτά. Η γνώση του βάρους της ρίζας προσδίδει μια αξιόπιστη εικόνα της κατάστασης του φυτού. Η εκτίμηση του βάρους της ρίζας είναι χρήσιμη γνώση για τις προσπάθειες βελτίωσης της απόδοσης της καλλιέργειας.

Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία θα μπορούσε να εφαρμοστεί με τις κατάλληλες παραμετροποιήσεις, σε θερμοκηπιακά περιβάλλοντα ή σε περιβάλλοντα ελεγχόμενων συνθηκών και σε πολλά καλλιεργούμενα είδη. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο για περαιτέρω αξιοποίηση και μελέτη.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmadi, S. H., Sepaskhah, A. R. and Zarei, M. (2020) 'Modeling winter barley root distribution in flat and raised bed planting systems subject to full, deficit and rainfed irrigation', *Rhizosphere*, 16. doi: 10.1016/j.rhisph.2020.100257.
- Alameda, D. and Villar, R. (2012) 'Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedlings under soil compaction conditions', *Environmental and Experimental Botany*. Elsevier, 79, pp. 49–57. doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.01.004.
- Arsenaul, J.-L. *et al.* (1995) 'WinRHIZO™, a Root-measuring System with a Unique Overlap Correction Method', in *40th Annual Congress of the Canadian Society for Horticultural Science*. Montréal, Québec, Canada, p. 167.
- Atkinson, J. A. *et al.* (2019) 'Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping', *Current Opinion in Biotechnology*. Elsevier Ltd, 55, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.copbio.2018.06.002.
- Baille, M., Baille, A. and Delmon, D. (1994) 'Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops', *Agricultural and Forest Meteorology*. Elsevier, 71(1–2), pp. 83–97. doi: 10.1016/0168-1923(94)90101-5.
- Bar-Tal, A. *et al.* (1994) 'Effects of root pruning and N-NO₃ solution concentration on nutrient uptake and transpiration of tomato plants', *Scientia Horticulturae*. Elsevier, 58(1–2), pp. 77–90. doi: 10.1016/0304-4238(94)90129-5.
- Bates, G. H. (1937) 'A device for the observation of root growth in the soil [9]', *Nature*. Nature Publishing Group, pp. 966–967. doi: 10.1038/139966b0.
- Böhm, W. (1979) *Methods of Studying Root Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Ecological Studies). doi: 10.1007/978-3-642-67282-8.
- Bucksch, A. *et al.* (2014) 'Image-Based High-Throughput Field Phenotyping of Crop Roots', *Plant Physiology*, 166(2), pp. 470 LP – 486. doi: 10.1104/pp.114.243519.
- Choi, G. L. *et al.* (2014) 'Effect of concentration of nutrient solution on the growth and yield of roses during the juvenile period and more than one year after transplanting using coir substrate in hydroponics', *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science, 1037, pp. 1115–1120. doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1037.148.
- Cid, M. C., Socorro, A. R. and Perez-Rosales, L. (1993) 'ROOT GROWTH AND QUALITY RATING OF SCHEFFLERA "GOLDEN CAPELLA" AND FICUS "STARLIGHT" ON SEVERAL PEAT-BASED SUBSTRATES.', *Acta Horticulturae*, (342), pp. 307–312. doi: 10.17660/ActaHortic.1993.342.37.
- Daly, K. R. *et al.* (2015) 'Assessing the influence of the rhizosphere on soil hydraulic properties using X-ray computed tomography and numerical modelling', *Journal of Experimental Botany*. Oxford University Press, 66(8), pp. 2305–2314. doi: 10.1093/jxb/eru509.

- Dannoura, M. *et al.* (2008) 'The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics', *Plant Root*. Japanese Society for Root Research, 2, pp. 14–18. doi: 10.3117/plantroot.2.14.
- Demongeot, J., Françoise, J.-P. and Nerini, D. (2009) 'From biological and clinical experiments to mathematical models', *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Royal Society, 367(1908), pp. 4657–4663. doi: 10.1098/rsta.2009.0187.
- Diggle, A. J. (1988) 'ROOTMAP-a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems', *Plant and Soil*. Kluwer Academic Publishers, 105(2), pp. 169–178. doi: 10.1007/BF02376780.
- Dilma Daniela Silva and Richard C. Beeson Jr. (2011) 'A Large-volume Rhizotron for Evaluating Root Growth Under Natural-like Soil Moisture Conditions', *HortScience*. American Society for Horticultural Science, 46(12), pp. 1677–1682. Available at: <http://hortsci.ashspublications.org/content/46/12/1677.abstract> (Accessed: 5 January 2019).
- Ding, X. *et al.* (2018) 'Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) in a hydroponic system', *PLOS ONE*. Edited by Z. Cheng. Public Library of Science, 13(8), p. e0202090. doi: 10.1371/journal.pone.0202090.
- Dittmer, H. J. (1949) 'Root Hair Variations in Plant Species', *American Journal of Botany*. Botanical Society of America, 36(2), pp. 152–155. doi: 10.2307/2437782.
- Downie, H. *et al.* (2012) 'Transparent soil for imaging the rhizosphere.', *PloS one*. Public Library of Science, 7(9), p. e44276. doi: 10.1371/journal.pone.0044276.
- Engel, R. K., Nichols, J. T. and Brummer, J. E. (1993) 'A Containerized Technique for Studying Root Systems', *Journal of Range Management*. JSTOR, 46(5), p. 467. doi: 10.2307/4002669.
- Fang, S., Clark, R. and Liao, H. (2012) '3D Quantification of Plant Root Architecture In Situ', in *Measuring Roots*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 135–148. doi: 10.1007/978-3-642-22067-8_9.
- Farina, E. *et al.* (2003) 'Mulching as a technique to reduce salt accumulation in soilless culture', in *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science, pp. 459–466. doi: 10.17660/ActaHortic.2003.609.71.
- Fascella, G. and Zizzo, G. V. (2005) 'Effect of growing media on yield and quality of soilless cultivated rose', in *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science, pp. 133–138. doi: 10.17660/ActaHortic.2005.697.15.
- Gizas, G. and Savvas, D. (2007) 'Particle size and hydraulic properties of pumice affect growth and yield of greenhouse crops in soilless culture', *HortScience*. American Society for Horticultural Science, 42(5), pp. 1274–1280. doi: 10.21273/hortsci.42.5.1274.
- Glinski, D. S., Karnok, K. J. and Carrow, R. N. (1993) 'Comparison of Reporting Methods for

- Root Growth Data from Transparent-Interface Measurements', *Crop Science*. Crop Science Society of America, 33(2), p. 310. doi: 10.2135/cropsci1993.0011183X003300020019x.
- Global Biodiversity Information Facility (2020) *Species search*. Available at: https://www.gbif.org/species/search?rank=SPECIES&highertaxon_key=8395064&status=ACCEPTED (Accessed: 24 March 2020).
- Hautala, M. and Hakojärvi, M. (2011) 'An analytical C3-crop growth model for precision farming', *Precision Agriculture*, 12(2), pp. 266–279. doi: 10.1007/s11119-010-9174-5.
- Jackson, B. E. *et al.* (2005) 'Root Growth of Three Horticultural Crops Grown in Pine Bark Amended Cotton Gin Compost 1', 23(September), pp. 133–137.
- James, B. R., Bartlett, R. J. and Amadon, J. F. (1985) 'A root observation and sampling chamber (rhizotron) for pot studies', *Plant and Soil*, 85(2), pp. 291–293. doi: 10.1007/BF02139633.
- Ji, R. H. *et al.* (2017) 'Three-dimensional growth modeling of potted tomato root under negative pressure underground irrigation', *International Agricultural Engineering Journal*, 26(4), pp. 277–282.
- Judd, Jackson, B. and Fonteno, W. (2015a) 'Advancements in root growth measurement technologies and observation capabilities for container-grown plants', *Plants*, 4(3), pp. 369–392. doi: 10.3390/plants4030369.
- Judd, Jackson, B. and Fonteno, W. (2015b) 'Rhizometer: An apparatus to observe and measure root growth and its effect on container substrate physical properties over time', *HortScience*, 50(2), pp. 288–294.
- Judd, L. *et al.* (2014) 'Mini-Horhizotron: An apparatus for observing and measuring root growth of container-grown plant material in Situ', *HortScience*, 49(11), pp. 1424–1431.
- Judd, L., Jackson, B. and Fonteno, W. (2014) 'Rhizometrics: A review of three in situ techniques for observation and measurement of plant root systems in containers', *Acta Horticulturae*, pp. 389–398. doi: 10.17660/actahortic.2014.1034.48.
- Kalogiros, D. I. *et al.* (2016) 'Analysis of root growth from a phenotyping data set using a density-based model', *Journal of Experimental Botany*, 67(4), pp. 1045–1058. doi: 10.1093/jxb/erv573.
- Kano-Nakata, M. *et al.* (2011) 'Root development, water uptake, and shoot dry matter production under water deficit conditions in two cssls of rice: Functional roles of root plasticity', *Plant Production Science*. Taylor & Francis, 14(4), pp. 307–317. doi: 10.1626/pp.14.307.
- Katsoulas, N. *et al.* (2006) 'Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality', *Biosystems Engineering*, 93(2), pp. 237–244. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.11.006.
- Kharkina, T. G., Ottosen, C.-O. and Rosenqvist, E. (1999) 'Effects of root restriction on the growth and physiology of cucumber plants', *Physiologia Plantarum*. John Wiley & Sons, Ltd, 105(3), pp. 434–441. doi: 10.1034/j.1399-3054.1999.105307.x.

- Klepper, B. and Kaspar, T. C. (1994) 'Rhizotrons: Their Development and Use in Agricultural Research', *Agronomy Journal*. American Society of Agronomy, 86(5), p. 745. doi: 10.2134/agronj1994.00021962008600050002x.
- Kono, Y. *et al.* (1987) 'A revised experimental system of root-soil interaction for laboratory work.', *Environment Control in Biology*. Japanese Society of Agricultural, Biological and Environmental Engineers and Scientists, 25(4), pp. 141–151. doi: 10.2525/ecb1963.25.141.
- Landl, M. *et al.* (2019) 'Modeling the impact of biopores on root growth and root water uptake', *Vadose Zone Journal*, 18(1). doi: 10.2136/vzj2018.11.0196.
- Landmeyer, J. (2011) *Introduction to Phytoremediation of Contaminated Groundwater: Historical foundation, hydrologic control, and contaminant remediation*.
- Lecompte, F., Ozier-Lafontaine, H. and Pages, L. (2003) 'An analysis of growth rates and directions of growth of primary roots of field-grown banana trees in an andisol at three levels of soil compaction', *Agronomie*, 23(3), pp. 209–218. doi: 10.1051/agro:2002084.
- Lykas, C. *et al.* (2006) 'Electrical Conductivity and pH Prediction in a Recirculated Nutrient Solution of a Greenhouse Soilless Rose Crop', *Journal of Plant Nutrition*. Taylor & Francis Group, 29(9), pp. 1585–1599. doi: 10.1080/01904160600848904.
- Lynch, J. (1995) 'Root Architecture and Plant Productivity', *Plant Physiology*, 109(1), pp. 7–13. doi: 10.1104/pp.109.1.7.
- Malamy, J. E. (2005) 'Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture', *Plant, Cell and Environment*, 28(1), pp. 67–77. doi: 10.1111/j.1365-3040.2005.01306.x.
- Mellor, N. *et al.* (2016) 'Theoretical approaches to understanding root vascular patterning: A consensus between recent models', *Journal of Experimental Botany*. Oxford University Press, pp. 5–16. doi: 10.1093/jxb/erw410.
- Metzner, R. *et al.* (2015) 'Direct comparison of MRI and X-ray CT technologies for 3D imaging of root systems in soil: Potential and challenges for root trait quantification', *Plant Methods*. BioMed Central Ltd., 11(1). doi: 10.1186/s13007-015-0060-z.
- Monshausen, G. B. and Gilroy, S. (2009) 'The exploring root—root growth responses to local environmental conditions', *Current Opinion in Plant Biology*, 12(6), pp. 766–772. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.08.002>.
- de Moraes, M. T. *et al.* (2018) 'Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil', *Plant and Soil*. Plant and Soil, 428(1–2), pp. 67–92. doi: 10.1007/s11104-018-3656-z.
- de Moraes, M. T. *et al.* (2019) 'Mechanical and Hydric Stress Effects on Maize Root System Development at Different Soil Compaction Levels', *Frontiers in Plant Science*, 10. doi:

10.3389/fpls.2019.01358.

N. Wright, A. and D. Wright, R. (2004) *The HorhizotronTM: A New Instrument for Measuring Root Growth*, *HortTechnology*. doi: 10.21273/HORTTECH.14.4.0560.

Nagasuga, K., Murai-Hatano, M. and Kuwagata, T. (2011) 'Effects of low root temperature on dry matter production and root water uptake in rice plants', *Plant Production Science*. Taylor & Francis, 14(1), pp. 22–29. doi: 10.1626/pp.14.22.

Nazari, F., Khosh-Khui, M. and Salehi, H. (2009) 'Growth and flower quality of four *Rosa hybrida* L. cultivars in response to propagation by stenting or cutting in soilless culture', *Scientia Horticulturae*. Elsevier, 119(3), pp. 302–305. doi: 10.1016/j.scienta.2008.08.004.

Neufeld, H. S. *et al.* (1989) 'A rootbox for quantitative observations on intact entire root systems', *Plant and Soil*. Kluwer Academic Publishers, 117(2), pp. 295–298. doi: 10.1007/BF02220725.

Neumann, G., George, T. S. and Plassard, C. (2009) 'Strategies and methods for studying the rhizosphere-the plant science toolbox', *Plant and Soil*, 321(1–2), pp. 431–456. doi: 10.1007/s11104-009-9953-9.

Nimura, M., Yoshimi, H. and Kondou, M. (2001) 'The influence of porous ceramic particle size and fertigation quantity on the yield and quality of roses grown in soilless culture', *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*. Japanese Society for Horticultural Science, 70(5), pp. 650–655. doi: 10.2503/jjshs.70.650.

van Noordwijk, M. and Floris, J. (1979) 'Loss of dry weight during washing and storage of root samples', *Plant and Soil*. Martinus Nijhoff, The Hague/Kluwer Academic Publishers, 53(1–2), pp. 239–243. doi: 10.1007/BF02181896.

Otiende, M. A. *et al.* (2017) 'Effects of cutting position of rose rootstock cultivars on rooting and its relationship with mineral nutrient content and endogenous carbohydrates', *Scientia Horticulturae*. Elsevier B.V., 225, pp. 204–212. doi: 10.1016/j.scienta.2017.07.009.

Ottman, M. J. and Timm, H. (1984) 'Measurement of Viable Plant Roots with the Image Analyzing Computer ¹', *Agronomy Journal*. Wiley, 76(6), pp. 1018–1020. doi: 10.2134/agronj1984.00021962007600060036x.

Pace, J. *et al.* (2014) 'Analysis of Maize (*Zea mays* L.) Seedling Roots with the High-Throughput Image Analysis Tool ARIA (Automatic Root Image Analysis)', *PLOS ONE*. Public Library of Science, 9(9), p. e108255. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108255>.

Pan, W. B. *et al.* (1998) 'Portable rhizotron and color scanner system for monitoring root development', in *Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 745–756. doi: 10.1007/978-94-011-5270-9_64.

Paradiso, R., Raimondi, G. and De Pascale, S. (2003) 'Growth and yield of rose in a closed

soilless system on two inert substrates', in *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science, pp. 193–198. doi: 10.17660/ActaHortic.2003.614.27.

Pateña, G. and Ingram, K. T. (2000) 'Digital acquisition and measurement of peanut root minirhizotron images', *Agronomy Journal*. American Society of Agronomy, 92(3), pp. 541–544. doi: 10.2134/agronj2000.923541x.

Piao, X. C. *et al.* (2004) 'The Growth and Photosynthetic Characteristics of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Plantlets as Affected by Hydroponic Solution pH and EC, Light, and CO₂', *Journal of the American Society for Horticultural Science*. American Society for Horticultural Science, 129(1), pp. 100–105. doi: 10.21273/jashs.129.1.0100.

Pound, M. P. *et al.* (2013) 'RootNav: Navigating images of complex root architectures', *Plant Physiology*, 162(4), pp. 1802–1814. doi: 10.1104/pp.113.221531.

Raviv, M. *et al.* (1999) 'The effect of hydraulic characteristics of volcanic materials on yield of roses grown in soilless culture', *Journal of the American Society for Horticultural Science*. American Society for Horticultural Science, 124(2), pp. 205–209. doi: 10.21273/jashs.124.2.205.

Robert, M. A. *et al.* (2012) 'Mathematical models as aids for design and development of experiments: The case of transgenic mosquitoes', *Journal of Medical Entomology*. J Med Entomol, pp. 1177–1188. doi: 10.1603/ME11205.

Roosta, H. R. and Rezaei, I. (2014) 'Effect of Nutrient Solution PH on the Vegetative and Reproductive Growth and Physiological Characteristics of Rose Cv. "Grand Gala" in Hydroponic System', *Journal of Plant Nutrition*. Taylor and Francis Inc., 37(13), pp. 2179–2194. doi: 10.1080/01904167.2014.920377.

do Rosário G. Oliveira, M. *et al.* (2000) 'Auger Sampling, Ingrowth Cores and Pinboard Methods', in *Root Methods*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 175–210. doi: 10.1007/978-3-662-04188-8_6.

Rosene, H. F. (1943) 'QUANTITATIVE MEASUREMENT OF THE VELOCITY OF WATER ABSORPTION IN INDIVIDUAL ROOT HAIRS BY A MICROTECHNIQUE', *Plant Physiology*, 18(4), pp. 588 LP – 607. doi: 10.1104/pp.18.4.588.

Rouphael, Y. *et al.* (2010) *Modeling individual leaf area of rose (Rosa hybrida L.) based on leaf length and width measurement, PHOTOSYNTHEICA*.

Schwarz, D. and Kuchenbuch, R. (1998) 'Water uptake by tomato plants grown in closed hydroponic systems dependent on the ec-level', in *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science, pp. 323–328. doi: 10.17660/ActaHortic.1998.458.41.

Smit, A. L. *et al.* (2000) *Root Methods, Root Methods*. doi: 10.1007/978-3-662-04188-8.

Son, J. E. and Takakura, T. (1989) 'Effect of EC of Nutrient Solution and Light Condition on Transpiration and Tipburn Injury of Lettuce in a Plant Factory', *Journal of Agricultural Meteorology*, 44(4), pp. 253–258. doi: 10.2480/agrmet.44.253.

- Song, C. Y. *et al.* (2010) 'Efficacy and physical properties of ground, composted rice hulls as a component of soilless substrate for selected bedding plants', *Journal of Applied Horticulture*, 12(1), pp. 16–20. doi: 10.37855/jah.2010.v12i01.03.
- Sonneveld, C. and Straver, N. (1994) 'Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates', *Serie: Voedingsoplossingen Glastuinbouw (Netherlands)*. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas. Available at: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=NL8901262> (Accessed: 23 January 2021).
- Taylor, H. M., Upchurch, D. R. and McMichael, B. L. (1990) 'Applications and limitations of rhizotrons and minirhizotrons for root studies', *Plant and Soil*. Kluwer Academic Publishers, 129(1), pp. 29–35. doi: 10.1007/BF00011688.
- Thompson, M. V and Holbrook, N. M. (2004) 'Root-Gel Interactions and the Root Waving Behavior of Arabidopsis', *Plant Physiology*, 135(3), pp. 1822 LP – 1837. doi: 10.1104/pp.104.040881.
- Tracy, S. R. *et al.* (2015) 'Using X-ray Computed Tomography to explore the role of abscisic acid in moderating the impact of soil compaction on root system architecture', *Environmental and Experimental Botany*. Elsevier, 110, pp. 11–18. doi: 10.1016/j.envexpbot.2014.09.003.
- Trincherà, A. *et al.* (2013) 'Effect of zeolite and vine vinasse on rose seedling growth', *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science, 1013, pp. 423–430. doi: 10.17660/ActaHortic.2013.1013.53.
- Turner, A. J., Arzola, C. I. and Nunez, G. H. (2020) 'High pH stress affects root morphology and nutritional status of hydroponically grown rhododendron (*Rhododendron* spp.)', *Plants*. MDPI AG, 9(8), pp. 1–12. doi: 10.3390/plants9081019.
- Walters, S. A. and Wehner, T. C. (1994) 'Evaluation of the U.S. cucumber germplasm collection for root size using a subjective rating technique', *Euphytica*. Kluwer Academic Publishers, 79(1–2), pp. 39–43. doi: 10.1007/BF00023574.
- Weaver, J. E., Jean, F. C. and Crist, J. W. (1922) 'Development and Activities of Roots of Crop Plants : A Study in Crop Ecology', *Horticulture*. doi: 10.1126/science.56.1445.283.
- Wiersum, L. K. (1957) 'The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots', *Plant and Soil*, 9(1), pp. 75–85. doi: 10.1007/BF01343483.
- Xu, F. *et al.* (2019) 'Effects of iron and root zone pH on growth and physiological responses of paper birch (*Betula papyrifera*), trembling aspen (*Populus tremuloides*) and red-osier dogwood (*Cornus stolonifera*) seedlings in a split-root hydroponic system', *Acta Physiologiae Plantarum*. Polish Academy of Sciences, Institute of Slavic Studies, 41(8), p. 142. doi: 10.1007/s11738-019-2933-7.
- Yang, J. chang, Zhang, H. and Zhang, J. hua (2012) 'Root Morphology and Physiology in Relation to the Yield Formation of Rice', *Journal of Integrative Agriculture*. Chinese Academy

of Agricultural Sciences, pp. 920–926. doi: 10.1016/S2095-3119(12)60082-3.

Yang, L. *et al.* (2021) ‘Research on the construction and visualization of a three-dimensional model of rice root growth’, *Applied Engineering in Agriculture*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 36(6), pp. 847–857. doi: 10.13031/AEA.13543.

Yepes V., L. F. and Flórez R., V. J. (2013) ‘Analysis of the electric conductivity and pH behaviors in recycled drainage solution of rose cv. Charlotte plants grown in substrate(Article)’, *Agronomia Colombiana*, 31(3), pp. 352–361.

Yu, X. *et al.* (2020) ‘Nondestructive estimation of leaf area for 15 species of vines with different leaf shapes’, *American Journal of Botany*. Wiley-Blackwell, 107(11), pp. 1481–1490. doi: 10.1002/ajb2.1560.

Zhou, M. *et al.* (2021) ‘Root anatomical traits determined leaf-level physiology and responses to precipitation change of herbaceous species in a temperate steppe’, *New Phytologist*. Blackwell Publishing Ltd, 229(3), pp. 1481–1491. doi: 10.1111/nph.16797.

Zhu, J. *et al.* (2011) ‘From lab to field, new approaches to phenotyping root system architecture’, *Current Opinion in Plant Biology*. Elsevier Current Trends, 14(3), pp. 310–317. doi: 10.1016/J.PBI.2011.03.020.

Zobel, R. and Waisel, Y. (2010) *A plant root system architectural taxonomy: A framework for root nomenclature*, *Plant Biosystems*. doi: 10.1080/11263501003764483.

Zografou, M. and Lykas, C. (2020) ‘Estimation of water needs of young and aged rose plants with the use of two simplified transpiration models’, in *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science, pp. 485–492. doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1296.63.

Κιζηρόπουλος, Ν. (1999) *ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΕΚΤΑΣΗΣ ΠΕΝΤΕ ΣΤΡΕΜΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΚΟΡΙΝΘΙΑΣ*. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΤΜΗΜΑ: ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΘΟΚΟΜΙΑΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: ΑΝΘΟΚΟΜΙΑΣ.

Τσαούσης, Δ. (2005) *ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ ΣΕ ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΤΟΥ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΤΡΙΦΥΛΙΑ ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ*. Τ.Ε.Ι. ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ / Σ.Τ.Ε.Γ. Available at: http://nestor.teipel.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/13992/STEG_THEKA_00226_Medium.pdf?sequence=1 (Accessed: 22 January 2019).

Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (2014) *Τριανταφυλλιά*. Available at: <http://www.minagric.gr/index.php/el/for-farmer-2/crop-production/anth-kallopist/2639-triantafillia> (Accessed: 23 January 2019).