



**Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**  
**Σχολή Γεωπονικών Επιστημών**  
**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**  
**Αυτοματισμοί και Αρδεύσεις στις Γεωργικές Κατασκευές και στην Εκμηχάνιση**  
**της Γεωργίας**

**Θέμα μεταπτυχιακής διατριβής**  
**Χρήση αισθητήρων μέτρησης από απόσταση για ανίχνευση**  
**έλλειψης θρεπτικών στοιχείων σε καλλιέργεια τομάτας**



**Λούλου Ιφιγένεια**

**Επιβλέπων καθηγητής**  
**Κατσούλας Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Βόλος, Σεπτέμβριος 2016**

**Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**  
**Σχολή Γεωπονικών Επιστημών**  
**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**  
**Αυτοματισμοί και Αρδεύσεις στις Γεωργικές Κατασκευές και στην Εκμηχάνιση**  
**της Γεωργίας**

**Θέμα μεταπτυχιακής διατριβής**  
**Χρήση αισθητήρων μέτρησης από απόσταση για ανίχνευση**  
**έλλειψης θρεπτικών στοιχείων σε καλλιέργεια τομάτας**



**Λούλου Ιφιγένεια**

**Επιβλέπων καθηγητής**  
**Κατσούλας Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Βόλος, Σεπτέμβριος 2016**

**Θέμα μεταπτυχιακής διατριβής**  
**Χρήση αισθητήρων μέτρησης από απόσταση για ανίχνευση**  
**έλλειψης θρεπτικών στοιχείων σε καλλιέργεια τομάτας**

**Επίθετο : Λούλου**

**Όνομα : Ιφιγένεια**

**Επιβλέπων καθηγητής : Νικόλαος Κατσούλας**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

**Νικόλαος Κατσούλας , Αν. Καθηγητής Π.Θ. , Επιβλέπων ΜΔΕ**

**Θωμάς Μπαρτζάνας , Ερευνητής Α ΕΚΕΤΑ**

**Ευθυμία Λεβίζου, Λέκτορας Π.Θ**

**Βόλος, Σεπτέμβριος 2016**

## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Αυτοματισμοί και Αρδεύσεις στις Γεωργικές Κατασκευές και στην Εκμηχάνιση της Γεωργίας» του τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος.

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγματοποίησή της.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Κατσούλα, για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση, εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, τον Ερευνητή Θωμά Μπαρτζάνα και τη Λέκτορα Ευθυμία Λεβίζου, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για της πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ πολύ τη συνάδελφο μου Αγγελική Ελβανίδη για την πολύτιμη βοήθειά της στην διεκπεραίωση της πειραματικής μου διαδικασίας και την επεξεργασία των δεδομένων μου καθώς και για την συνδρομή της στην σύνταξη και διόρθωση αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής.

Ευχαριστώ τον συνάδελφο και φίλο Βάιο Κουπριτζιώτη για την πολύτιμη βοήθειά του, την ηθική υποστήριξη και την κατανόηση του ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των μηνών της προσπάθειάς μου.

Πάνω από όλα, όμως, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Δημήτριο Λούλο, Βασιλική Μίκου και τον αδερφό μου Βασίλη Λούλο, για την ολόψυχη αγάπη, οικονομική και ηθική υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή τη μεταπτυχιακή μου εργασία στους γονείς μου.

## Περίληψη

Η διαχείριση της θρεπτικής και υδατικής κατάστασης των καλλιεργειών αποτελεί ζωτικής σημασίας έργο για την κερδοφορία της απόδοσης των καλλιεργειών θερμοκηπίου. Οι πολλές, όμως, και διαφορετικές καθημερινές δόσεις θρεπτικού διαλύματος καταπονούν το φυτό με σειρά ποικίλων συμπτωμάτων στη φυσιολογία του. Συγκεκριμένα, η αζωτική καταπόνηση μειώνει τη συγκέντρωση της περιεχόμενης περιεκτικότητας της χλωροφύλλης, παρεμποδίζει τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, με αποτέλεσμα την αλλαγή του χρωματισμού των φύλλων, τον φθορισμό της χλωροφύλλης, ενώ ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας των φύλλων (LAI) τείνει μειούμενος.

Οι τεχνικές της διαχείρισης των θρεπτικών διαλυμάτων βασίζονταν μέχρι πρόσφατα στη μελέτη έντασης του νερού, στη φυλλοδιαγνωστική και στη μέτρηση της χλωροφύλλης. Οι μέθοδοι αυτές παρέχουν άμεσες πληροφορίες για την περιεκτικότητα του νερού και των θρεπτικών συστατικών του φυτού, απαιτούν, όμως, την άμεση επαφή με αυτό είτε την ολική ή μερική καταστροφική δειγματοληψία του. Τα τελευταία χρόνια, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στη διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης της άρδευσης και της θρέψης μέσω θερμικών δεικτών και δεικτών ανάκλασης. Η χρήση οπτικών αισθητήρων ανάκλασης με την εφαρμογή των κατάλληλων πειραματικών πρωτοκόλλων και στατιστικών μοντέλων είναι σε θέση να αναπτύσσει αποτελεσματικούς θερμικούς δείκτες και δείκτες ανάκλασης για την ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης σε επίπεδο φυτού ή καλλιέργειας.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στη θεωρητική ανάλυση της μεθόδου και στη συσχέτιση δεικτών με τη θρεπτική κατάσταση των φυτών, ενώ με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρουσιάζει και αξιολογεί τους πιο αποτελεσματικούς δείκτες για την ανίχνευση θρεπτικής καταπόνησης. Με την παρούσα έρευνα διαπιστώθηκε η δυνατότητα ανίχνευσης της αζωτικής καταπόνησης των φυτών, σχεδόν αμέσως μετά την εφαρμογή της χορηγούμενης μειωμένης δόσης αζώτου. Τέλος, αποδείχτηκε ότι οι δείκτες PRI, sPRI, mrSRI και TCARI μπορούν να αποτελέσουν σήμα ανίχνευσης διαφορετικών επιπέδων θρεπτικής καταπόνησης και ότι οι δείκτες rNDVI, TCARI, PRI και VOGREI1 μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη των τιμών της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης, της φωτοσύνθεσης και της στοματικής αγωγιμότητας αντίστοιχα σε πραγματικό χρόνο από απόσταση.

<b>Περιεχόμενα</b>	<b>σελ</b>
<b>1. Εισαγωγή</b>	7
1.1 Θεωρητική ανάλυση υδροπονίας-Μέθοδοι υδρολίπανσης	10
1.2 Θρέψη	15
1.2.1 Ο ρόλος της θρέψης στην υδροπονία	18
1.2.2 Έλεγχος της θρέψης σε υδροπονική καλλιέργεια	20
1.2.3 Νέα μέθοδος προσδιορισμού της θρέψης μέσω ανακλώμενης ακτινοβολίας της καλλιέργειας	21
1.2.3.1 Δείκτες ανάκλασης	24
1.2.3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των δεικτών ανάκλασης	26
1.3 Αισθητήρες	29
1.3.1 Τύποι αισθητήρων	30
1.3.2 Πρωτόκολλο εφαρμογής και βαθμονόμηση αισθητήρων απεικόνισης	34
1.3.3 Μέθοδοι επεξεργασίας υπερφασματικής κάμερας	37
1.4 Στόχος εργασίας	40
<b>2. Υλικά και Μέθοδοι</b>	41
2.1. Εγκαταστάσεις και καλλιέργεια	41

2.2 Μετρήσεις	45
2.3 Βαθμονόμηση αισθητήρων	50
<b>3. Αποτελέσματα</b>	56
3.1 Εξέλιξη και μελέτη βιοτικών δεικτών θρεπτικής καταπόνησης	56
3.2 Εξέλιξη καμπυλών ανάκλασης της καλλιέργειας μέσω θρεπτικής καταπόνησης	61
3.3 Μελέτη των μεταβολών των δεικτών ανάκλασης	68
<b>4. Συζήτηση-Συμπεράσματα</b>	78
<b>5. Βιβλιογραφία</b>	81

## 1. Εισαγωγή

Η έκταση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών αυξάνεται συστηματικά με την πάροδο του χρόνου, στην περιοχή της Μεσογείου, μιας και αποτελεί, πλέον, την πιο παραγωγική μορφή πρωτογενούς αγροτικής παραγωγής. Στην Ελλάδα, πάνω από 56.000 στρέμματα καλύπτονται με περισσότερες από 10.000 θερμοκηπιακές μονάδες, στις οποίες απασχολούνται περίπου 25.000 εργαζόμενοι. Η έκταση αυτή αυξάνεται χρόνο με το χρόνο, με ρυθμό περίπου 1.500 στρέμματα/έτος (ΕΣΥΕ, 2011). Πιο συγκεκριμένα, το 50% από αυτές βρίσκονται στην Κρήτη, το 25% στην Πελοπόννησο και το υπόλοιπο ποσοστό είναι διάσπαρτο στην υπόλοιπη Ελλάδα, κυρίως σε Πρέβεζα και Μακεδονία.

Ένας από τους λόγους που οδήγησαν σε αυτήν τη συνεχώς αυξανόμενη επέκταση των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων είναι οι ακραίες και απρόβλεπτες κλιματικές συνθήκες (αέρας, χαλάζι, βροχές). Οι Cook et al. (2013); Anderegg (2010), μιλώντας για κλιματική αλλαγή, εννοούν την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, στην οποία οφείλεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η χρήση υλικών κάλυψης σε ένα θερμοκήπιο επιτρέπει τη διεύθυνση της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, τα φυτά μέσα στο θερμοκήπιο στο οποίο βρίσκονται, διαθέτουν χρωστικές με τις οποίες απορροφούν την ακτινοβολούμενη ενέργεια από τις διάφορες περιοχές του ηλιακού φάσματος. Με βάση αυτή την ικανότητα, ρυθμίζουν τις διαδικασίες ανάπτυξης, άνθησης, έκπτυξης οφθαλμών, ανάπτυξης των ριζών και βλαστών και επιμήκυνσης των μίσχων. Είναι γνωστό ότι η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στη γη, μετατρέπεται και διασπείρεται υπό μορφή θερμικής ενέργειας. Μικρό μέρος (1-2%) μετατρέπεται από τα φυτά σε δυναμική ή χημική ενέργεια με τη φωτοσύνθεση. Ένα ποσοστό της δυναμικής ενέργειας μετατρέπεται, κατά την τροφική αλυσίδα, πάλι σε θερμική ενέργεια με την αναπνοή. Μία άλλη παράμετρος που ευνοεί στην ανάπτυξη θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων, είναι η παροχή της δυνατότητας ρύθμισης των παραγόντων του περιβάλλοντος της ρίζας των φυτών, όπως της υγρασίας, του οξυγόνου, της θερμότητας, των ανόργανων θρεπτικών στοιχείων και του pH, που με τη χρήση κατάλληλων εδαφικών υποστρωμάτων ή υδροπονικών καλλιεργειών, μπορούν να καλύψουν με ακρίβεια τις ανάγκες των φυτών. Είναι λογικό, σε ένα χώρο, όπως είναι ο χώρος του θερμοκηπίου, όπου υπάρχει η δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης των συνθηκών του περιβάλλοντος, να



ευνοείται η αποδοτική ανάπτυξη των φυτών με την ελάχιστη εισροή των πρώτων υλών, όπως είναι το νερό άρδευσης και τα λιπάσματα, κάτι το οποίο δεν είναι εφικτό σε ανοιχτές καλλιέργειες.

Ο παραδοσιακός τρόπος καλλιέργειας των λαχανοκομικών ειδών στο θερμοκήπιο είναι κυρίως στο έδαφος. Υπάρχουν, βέβαια, αρκετά προβλήματα, όπως η αποστράγγιση του εδάφους και η συσσώρευση αλάτων σε αυτό, εξαιτίας της συνεχούς λίπανσης. Η υδροπονική τεχνική καλείται να δώσει λύση στα σημαντικά προβλήματα της καλλιέργειας στο έδαφος.

Στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις, και ιδιαίτερα στην υδροπονία, η διαχείριση τόσο της άρδευσης όσο και της θρέψης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πρακτικές εφαρμογές. Ο αποτελεσματικός έλεγχος της υδρολίπανσης στις υδροπονικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες βελτιστοποιεί την ποσότητα και την ποιότητα του προϊόντος.

Η υδροπονική καλλιέργεια, η οποία κερδίζει διεθνώς έδαφος έναντι των παραδοσιακών μεθόδων, βρίσκεται στη χώρα μας ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, καθώς αγγίζει μόλις το 7% (περίπου 1500 στρέμματα) (ΥΠΑΑΤ, 2007; Agrenda, 2007). Δυστυχώς, το ποσοστό αυτό είναι πολύ μικρό, καθώς σε άλλες χώρες η υδροπονική καλλιέργεια αποτελεί ένα σημαντικό, αν όχι το σημαντικότερο, κλάδο. Επίσης, το ποσοστό τεχνολογικών μηχανημάτων και αυτοματοποιημένων υδροπονικών εγκαταστάσεων στη χώρα μας είναι ακόμα μικρό. Λόγω των παραπάνω στατιστικών καταχωρήσεων, είναι αναγκαία η εισαγωγή εξελιγμένων και αυτοματοποιημένων νέων τεχνολογιών, με σκοπό την εξέλιξη και βελτίωσή τους.

Μέχρι τώρα, ο έλεγχος της υδρολίπανσης στα θερμοκήπια βασίζεται σε αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας ή μοντέλα προσδιορισμού της διαπνοής του φυτού μέσω της ολοκλήρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι μέθοδοι αυτοί, αν και είναι χρήσιμοι και αποτελεσματικοί, δεν παύουν να έχουν και μειονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι η μεγάλη χρονική υστέρηση στον εντοπισμό της καταπόνησης, η αβεβαιότητα σχετικά με το πόσο αποδοτικό και αντιπροσωπευτικό είναι το αποτέλεσμα των μετρήσεων και η δυσκολία λήψης των δεδομένων.

Στο πλαίσιο αυτό, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στη διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης τόσο της άρδευσης όσο και της λίπανσης με χρήση άλλων

μεθόδων, όπως των οπτικών αισθητήρων. Η χρήση οπτικών αισθητήρων (υπερφασματική κάμερα – remote sensing) από απόσταση δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να καταγράψει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλά το φυτό. Επιπλέον, οι μετρήσεις δίνονται στο χρήστη σε πραγματικό χρόνο από το ίδιο το φυτό, χωρίς να επηρεάζονται από τις κλιματολογικές και εδαφολογικές συνθήκες που επικρατούν στο θερμοκήπιο. Η μεταβολή της ανακλώμενης ακτινοβολίας της καλλιέργειας από τα 400-2500 nm ανάλογα με τη συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος στο σπογγώδες παρέγχυμα ή της συγκέντρωσης αζώτου στους μεσοκυττάρους χώρους οδηγεί στην ανίχνευση διαφορετικών επιπέδων θρεπτικής και υδατικής καταπόνησης.

Παρακάτω θα αναπτυχθεί και θα μελετηθεί η ανάπτυξη μιας μεθόδου, η οποία θα προσδιορίζει διαφορετικά επίπεδα θρεπτικής καταπόνησης από απόσταση σε συνθήκες θερμοκηπίου. Για το λόγο αυτό, μελετάται η μεταβολή της ανακλώμενης ακτινοβολίας του φυτού για διαφορετικές συγκεντρώσεις αζώτου μέσω υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης. Πριν γίνει οποιαδήποτε αναφορά στην πειραματική διαδικασία, θα πραγματοποιηθεί θεωρητική ανάλυση της υδροπονίας και των μεθόδων υδρολίπανσης, ώστε να επισημανθεί η σημαντικότητα της θρέψης. Επίσης, θα μελετηθεί η εξέλιξη της ανακλώμενης ακτινοβολίας σε διαφορετικά μήκη κύματος ανάλογα με τη θρεπτική κατάσταση του φυτού καθώς και θεωρητική ανάλυση της μεθολογίας που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή αισθητήρα απεικόνισης σε συνθήκες θερμοκηπίου.

## 1.1 Θεωρητική ανάλυση υδροπονίας – Μέθοδοι υδρολίπανσης

Τα θερμοκήπια διαφέρουν μεταξύ τους τόσο από κατασκευαστικής πλευράς, στο σχήμα και στις διαστάσεις της βασικής τους μονάδας, όσο και στα χρησιμοποιούμενα υλικά σκελετού και κάλυψης. Ανάλογα με το σχήμα, τα θερμοκήπια διακρίνονται σε διαφορετικές κατηγορίες (αμφίρρικτο, αμφίρρικτο απλό, τοξωτό, τοξωτό απλό, τροποποιημένο τοξωτό, τροποποιημένο τοξωτό πολλαπλό), ενώ ανάλογα με τον τύπο κατασκευής τους (από τους ίδιους τους παραγωγούς ή από τις βιομηχανίες – βιοτεχνίες) μπορούν να ταξινομηθούν σε χωρικού και τυποποιημένου τύπου. Επιπλέον, σε κατηγορίες χωρίζονται ανάλογα με το σκελετό κατασκευής (ξύλο, μέταλλο, αλουμίνιο) ή το υλικό κάλυψης (τζάμι ή πλαστικό). Ο τύπος του θερμοκηπίου θα παίζει καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό των αναγκών της υδρολίπανσης της καλλιέργειας. Σε κάθε περίπτωση, ο υπολογισμός των αναγκών της καλλιέργειας θα ελέγχεται σε συνδυασμό με τη μεταβολή των μετεωρολογικών δεδομένων της εκάστοτε περιοχής.

Ως υδροπονία ορίζεται η καλλιέργεια φυτών εκτός εδάφους, σε θρεπτικό διάλυμα με ή χωρίς τη χρήση ενός αδρανούς υποστρώματος (πετροβάμβακας, περλίτης, ελαφρόπετρα κ.α.). Μέσω της υδροπονίας αντιλαμβάνεται κανείς ότι, ενώ το έδαφος είναι το κυρίαρχο μέσο για την καλλιέργεια των φυτών, δεν είναι, όμως, πάντοτε και το ιδανικότερο, σε περίπτωση που υπάρχουν ακατάλληλα (έρημοι, παραθαλάσσιες περιοχές, βραχώδεις εκτάσεις) και προβληματικά εδάφη (κακή δομή και σύσταση, κακή στράγγιση, φτωχή γονιμότητα, αλατότητα, παθογόνα). Ήδη, σε αρκετές χώρες του εξωτερικού, όπως είναι η Ολλανδία, καλλιεργούνται τα λαχανοκομικά στο σύνολό τους σε υδροπονικές τεχνικές εκτός εδάφους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέσω των υδροπονικών συστημάτων γίνεται ορθολογική χρήση νερού στα κλειστά συστήματα (απώλειες νερού μόνο εξαιτίας της διαπνοής) και ορθολογική χρήση των λιπασμάτων· από τις ποσότητες των λιπασμάτων που εφαρμόζονται στο έδαφος, εκτιμάται ότι μόνο το 20%-50% αξιοποιείται από τις καλλιέργειες (HydroFiles, 2012). Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται αποτελεσματικότερος έλεγχος της θρέψης των φυτών (ομοιομορφία στην ανάπτυξη των φυτών, προγραμματισμός παραγωγής, υψηλότερες αποδόσεις),

βελτιώνεται η ποιότητα και η εμφάνιση των προϊόντων, ενώ οι συνθήκες εργασίας εντός του θερμοκηπίου είναι ευνοϊκότερες.

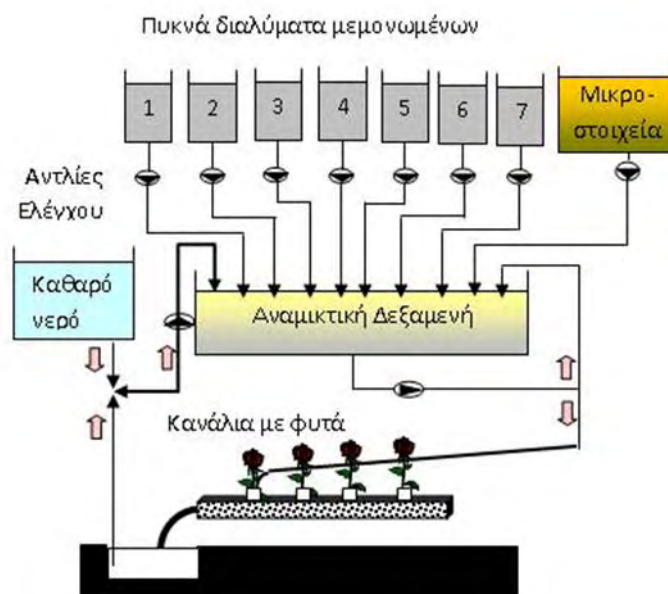
Τα συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας χωρίζονται σε υγρά συστήματα και σε συστήματα από υπόστρωμα, ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται ή όχι υπόστρωμα για την ανάπτυξη και στήριξη του ριζικού συστήματος των φυτών. Τα συστήματα υποστρώματος, ανάλογα με το μέσο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος στη θερμοκηπιακή μονάδα, ταξινομούνται σε :

- A) Συστήματα καλλιέργειας σε πορώδη υποστρώματα:
  - I. Καλλιέργεια σε ορυκτοβάμβακα ( Rockwoolculture)
  - II. Καλλιέργεια σε ίνες καρύδας (Κοκκοφοίνικας, Cocosoil).
- B) Συστήματα καλλιέργειας χωρίς πορώδη υποστρώματα σε θρεπτικά διαλύματα.
- C) Αεροπονία.

Επιπλέον, τα συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας ταξινομούνται σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα, ανάλογα με το αν το απορροούμενο θρεπτικό διάλυμα επαναχρησιμοποιείται ή όχι αντίστοιχα. Από μελέτες οικονομικών, τεχνικών και περιβαλλοντικών στοιχείων έγινε ξεκάθαρο το γεγονός ότι με τα κλειστά συστήματα η κατανάλωση νερού και λιπασμάτων μπορεί να μειωθεί σημαντικά για όλες τις ομάδες φυτών (Verpooy, 2012). Έρευνες έχουν δείξει ότι το νερό που απαιτείται στην υπαίθρια καλλιέργεια τομάτας, είναι περίπου 60 λίτρα ανά κιλό τομάτας, ενώ στο θερμοκήπιο αυτή η ποσότητα μειώνεται στα 25-30 λίτρα· με το ανοιχτό σύστημα υδροπονίας (χωρίς ανακύκλωση νερού) μειώνεται στα 20 λίτρα, ενώ στο κλειστό σύστημα υδροπονίας (ανακύκλωση νερού) μειώνεται μέχρι και τα 15 λίτρα. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι με τη χρήση κλειστού συστήματος υδροπονικών θερμοκηπίων η χρήση των λιπασμάτων μπορεί να μειωθεί μέχρι και 50%. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η καλή γνώση και η συνεχής παρακολούθηση των απορροών, ώστε να γίνεται ελάχιστη χρήση χημικών απολυμαντικών ουσιών. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής ενός κλειστού υδροπονικού συστήματος καλλιέργειας.

Ένα από τα υγρά συστήματα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι το NFT (Nutrient Film Technique). Το θρεπτικό διάλυμα που βρίσκεται σε συνεχή ροή λεπτής στοιβάδας κυκλοφορεί σε κανάλι, στο οποίο αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα των φυτών, προστατευμένο, βέβαια, από το φως.

Το σύστημα είναι κλειστό και δίνει τη δυνατότητα για έλεγχο της θερμοκρασίας στο περιβάλλον του ριζικού συστήματος. Όμως, οι περισσότερες εμπορικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες από τομάτες αναπτύσσονται υδροπονικά, χρησιμοποιώντας κάποιο αδρανές υπόστρωμα, όπως ο πετροβάμβακας. Παρ' όλα αυτά, ένα στοιχείο του NFT είναι ότι έχει πολύ μικρή ρυθμιστική ικανότητα σε διακοπές στη ροή λόγω διακοπών ρεύματος. Η ρίζα στο σύστημα NFT αναπτύσσεται πάνω στο θρεπτικό διάλυμα, χωρίς να υπάρχει κανένα πορώδες θρεπτικό υπόστρωμα. Με την ανάπτυξη της ρίζας δημιουργείται ένα παχύ πλέγμα ριζών, στο οποίο συμπλέκονται οι ρίζες από όλα τα φυτά του καναλιού και το οποίο αποτελεί το κάτω στήριγμα των φυτών. Το ρηχό ρεύμα του θρεπτικού διαλύματος περνά κάτω από το ριζικό πλέγμα, ενώ το επάνω μέρος του ριζικού πλέγματος, αν και είναι υγρό, βρίσκεται περισσότερο στον αέρα που του επιτρέπει καλή οξυγόνωση. Το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοτείται στο υψηλότερο σημείο του καναλιού και με τη βαρύτητα καταλήγει στο χαμηλότερο σημείο, απ' όπου με σωληνώσεις επιστρέφει στη δεξαμενή θρεπτικού διαλύματος. Εάν η ροή είναι αρκετά χαμηλή, τότε το πρόβλημα που προκύπτει, δεν οφείλεται στην έλλειψη νερού αλλά στην έλλειψη θρεπτικών στοιχείων, κυρίως για τα φυτά των οποίων οι ρίζες βρίσκονται προς τα κάτω στο αυλάκι και προσλαμβάνουν νερό το οποίο έχουν χρησιμοποιήσει ήδη άλλα φυτά και από το οποίο έχουν αφαιρέσει θρεπτικά συστατικά.



**Εικόνα 1** . Σύστημα λίπανσης σε κλειστό σύστημα θερμοκηπίου

Οι παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχία στην τεχνική NFT είναι:

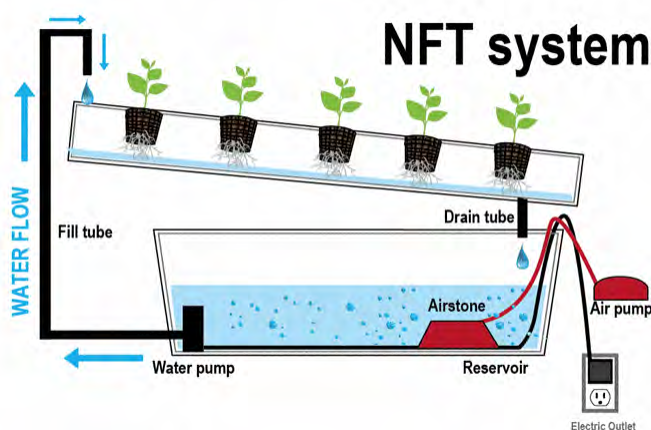
1. Ομοιόμορφη κλίση του καναλιού για ομοιόμορφη παροχή του νερού χωρίς τοπικές ανωμαλίες.
2. Το πλάτος του καναλιού να είναι αρκετό, ώστε το νερό να ρέει ομοιόμορφα σε όλο το μήκος.
3. Η βάση του καναλιού να είναι τελείως επίπεδη και οριζόντια και τέλος,
4. Η παροχή του θρεπτικού διαλύματος να ρυθμίζεται συνεχώς, έτσι ώστε στο τέλος των καναλιών να υπάρχει πάντα μια μικρή ροή, χωρίς όμως να υψώνεται η στάθμη του νερού.

Μια μεταβολή στο ρυθμό διαπνοής των φυτών, που συνήθως οφείλεται στη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας ή του μεγέθους της φυλλικής επιφάνειας, επιβάλλει την ύπαρξη επαναρρύθμισης της παροχής, γιατί είναι πιθανό να μην επαρκεί ή να γίνει υπερβολική και να δημιουργήσει έλλειψη οξυγόνου. Η συνεχής ρύθμιση της παροχής, ανάλογα με τη διαπνοή των φυτών, είναι απαραίτητη φροντίδα στην περίπτωση της καλλιέργειας NFT.

Το σύστημα NFT (Εικόνα 2) έχει προσαρμοστεί σε ένα εύρος καλλιεργειών. Έχουν γίνει αρκετές βελτιώσεις στο σύστημα με την πάροδο των χρόνων, όμως αυτό που το χαρακτηρίζει, είναι η υψηλή ποιότητα και ποσότητα παραγωγής. Το σύστημα NFT έχει αποτελέσει μία χρήσιμη τεχνική στην έρευνα της θρέψης των φυτών. Η ικανότητα να ελέγχεται το περιβάλλον της ρίζας, έχει οδηγήσει σε πρακτικές, όπως η θέρμανση του διαλύματος, η διακύμανση στην αγωγιμότητα του διαλύματος και την διακεκομμένη ροή για τον έλεγχο της ανάπτυξης των καλλιεργειών. Η ελάχιστη χρήση νερού και θρεπτικών στοιχείων το έχει καταστήσει ιδιαίτερα επιθυμητό σε ξηρά κλίματα. Επίσης, η ελάχιστη χρήση των υλικών και το υψηλό επίπεδο του αυτοματισμού, όπου είναι δυνατόν, επιτρέπει γρήγορη εναλλαγή των καλλιεργειών.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα, το NFT παρουσιάζει και όλα τα μειονεκτήματα των κλειστών υδροπονικών συστημάτων, δηλαδή αναγκαιότητα συχνών αναλύσεων και εκτεταμένων αναπροσαρμογών στη σύνθεσή του μετά από κάθε ανάλυση, συσσώρευση ιόντων Na και Cl σε περίπτωση που το νερό έχει υψηλή περιεκτικότητα

στα δύο ιόντα. Επίσης, σε περίπτωση που η αντλία ή το σύστημα αυτόματου ελέγχου παρουσιάσουν βλάβη, τότε ενδέχεται να καταστραφεί η καλλιέργεια, γιατί διακόπτεται για σημαντικό χρονικό διάστημα η παροχή θρεπτικού διαλύματος στα φυτά. Τέλος, υπάρχει ο κίνδυνος μόλυνσης του θρεπτικού διαλύματος από κάποιο παθογόνο και η διασπορά του σε όλη την καλλιέργεια. Λόγω, όμως, του μεγάλου όγκου θρεπτικού διαλύματος που ανακυκλώνεται ανά ημέρα στις καλλιέργειες NFT, η απολύμανση πριν την επαναχρησιμοποίησή του είναι πολύ δαπανηρή. Στην πράξη, η χημική απολύμανση, όπως προσθήκη χλωρίου, είναι η μόνη σχετικά οικονομική λύση.



Εικόνα 2. NFT σύστημα (Nutrient Film Technique)

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη παραγωγή των προϊόντων με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης των πρώτων υλών, όπως νερό και λίπασμα, καθώς και το κόστος παραγωγής, είναι προτιμητέα η καλλιέργεια με ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκηπίου. Για να ελεγχθεί η ποσότητα των θρεπτικών στοιχείων στην καλλιέργεια, πρέπει να καθοριστεί ταυτόχρονα ο χρόνος καθώς και η ποσότητα των θρεπτικών στοιχείων.

Ο εξοπλισμός, τώρα, που χρησιμοποιείται για την παροχή λιπασμάτων μέσω του νερού στα φυτά, είναι:

- A. Υδρολιπαντήρες.
- B. Δοσομετρικές αντλίες.

Νερό και λίπασμα = θρεπτικό διάλυμα

Στις υδροπονικές καλλιέργειες κηπευτικών και λαχανικών, η υδρολίπανση εφαρμόζεται συνήθως μέσω συστημάτων στάγδην άρδευσης, ενώ απαντώνται δύο τύποι συστημάτων αυτόματης υδρολίπανσης:

**A.** Με ανάμειξη των λιπασμάτων κατευθείαν στο νερό άρδευσης.

**B.** Με χωριστό δοχείο προετοιμασίας του διαλύματος της υδρολίπανσης.

Κατά την εφαρμογή του κλειστού συστήματος θερμοκηπίου για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων χρησιμοποιούνται μεμονωμένες δεξαμενές για κάθε θρεπτικό στοιχείο. Αυτό κρίνεται απαραίτητο γιατί σε κάθε κύκλο του θρεπτικού διαλύματος, λόγω της διαφορετικής απορρόφησης κάθε στοιχείου από το φυτό, το ανακυκλώμενο διάλυμα χάνει τη σωστή του σύσταση, ακόμα και αν εμπλουτίζεται με φρέσκο διάλυμα, που προέρχεται από σύστημα δεξαμενών. Με το σύστημα, όμως, των μεμονωμένων δεξαμενών η ρύθμιση του ανακυκλώμενου διαλύματος είναι ακριβής, γιατί βασίζεται στην απορρόφηση κάθε στοιχείου χωριστά. Επίσης, έχει δοθεί η δυνατότητα στους γεωργούς για τη δημιουργία παρασκευής πολλών διαφορετικών συνταγών, ανάλογα με το είδος και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας.

## 1.2 Θρέψη

Τα θρεπτικά στοιχεία κατηγοριοποιούνται σε μακροστοιχεία και ιχνοστοιχεία. Το άζωτο (N), ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), το ασβέστιο (Ca) και το μαγνήσιο (Mg) αποτελούν τα μακροστοιχεία, ενώ τα ιχνοστοιχεία είναι ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn), το βόριο (B), ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu), το μολυβδαίνιο (Mo) και το χλώριο (Cl) (Lazaridou & Athanasiadou, 2004). Αυτά τα θρεπτικά συστατικά είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Σε περίπτωση μειωμένης ή αυξημένης δόσης λίπανσης μπορεί να προκληθούν αρνητικές επιπτώσεις στη φυσιολογία του φυτού.

Είναι γνωστό πως οι απαιτήσεις των φυτών σε άζωτο ποικίλλουν μεταξύ των ειδών. Διαπιστώθηκε, όμως, ότι οι απαιτήσεις αυτές κυμαίνονται γενικώς μεταξύ 2 και 5% του ξηρού βάρους των φυτών, ενώ τα νιτρικά ιόντα είναι η κύρια μορφή υπό την οποία προσλαμβάνεται το άζωτο από τα φυτά. Τα νιτρικά ιόντα διαχέονται από



το εδαφικό διάλυμα στον αποπλάστη της ρίζας και προσλαμβάνονται από τα επιδερμικά κύτταρα και τα κύτταρα του φλοιού δια μέσου ειδικών πρωτεϊνών, μεταφορέων νιτρικών. Η κάθε υδροπονική θερμοκηπιακή καλλιέργεια απαιτεί μεγάλες ποσότητες σε άζωτο είτε με τη μορφή αμμωνίας είτε με τη μορφή νιτρικών. Η καλλιέργεια τομάτας απορροφά και τις δύο μορφές αζώτου (Lazaridou & Athanasiadou, 2004). Όταν παρατηρείται αυξημένη αναλογία  $\text{NH}_4^+\text{N}^-$ , τότε η βλαστική ανάπτυξη καθώς και η απόδοση της καλλιέργειας μειώνονται. Επίσης, μειώνεται το pH στη ριζόσφαιρα (<5), όπως και η απορροφητική του ικανότητα σε K, Ca και Mg. Εκτός των άλλων, εντείνει την εκδήλωση της ξηρής κορυφής του καρπού της τομάτας, η οποία αποτελεί φυσιολογική ασθένεια.

Πιο αναλυτικά, το άζωτο είναι βασικό συστατικό πολλών οργανικών ενώσεων του κυττάρου, μεταξύ των οποίων οι πρωτεΐνες αποτελούν το κύριο μέρος του πρωτοπλάσματος και των νουκλεϊκών οξέων που περιέχουν την κωδικοποιημένη γενετική πληροφορία (Lydakakis & Simadiris, 2005). Οι δύο αυτές μεγάλης σημασίας αζωτούχες ουσίες αποτελούν τα κλειδιά της ζωής κάθε έμβιου οργανισμού. Το άζωτο, επίσης, αποτελεί συστατικό πολλών οργανικών ουσιών του φυτικού κυττάρου, όπως της χλωροφύλλης των αμινοξέων των αλκαλοειδών και μερικών ορμονών (Bonneau et al., 2011). Το άζωτο, το οποίο κατανέμεται στα φύλλα, μπορεί να μεταβληθεί από τη φωτοσύνθεση και το ρυθμό παραγωγής του RUBISCO - πρόκειται για ένα ένζυμο που βρίσκεται στους χλωροπλάστες των φύλλων και είναι υπεύθυνο για την πρόσμειξη του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα κατά την διάρκεια της φωτοσύνθεσης και το οποίο αντιπροσωπεύει περίπου το 50% της περιεκτικότητας των φύλλων σε άζωτο (Gutschick et al., 1999; Bonneau et al., 2011). Τα φύλλα που προέρχονται από υγιή φυτά, περιέχουν υψηλότερες ποσότητες αζώτου, χλωροφύλλης, του RUBISCO, πιο γρήγορο ρυθμό φωτοσύνθεσης και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άμυλο καθώς και μικρότερο πάχος φύλλου σε σύγκριση με φυτά τα οποία έχουν υποστεί αζωτική καταπόνηση (Penuelas et al., 1994). Η αύξηση του ποσού του περιεχομένου αζώτου στα φύλλα προσδίδει μεγάλη αποτελεσματικότητα στη χρήση του νερού, αυξάνοντας την αγωγιμότητα του μεσοφύλλου και μειώνοντας την αναλογία ανάμεσα στην αγωγιμότητα των στοματίων (GS) και στην αγωγιμότητα του μεσοφύλλου (GM) (Flexas et al., 2013). Στην περίπτωση που η αγωγιμότητα του μεσοφύλλου (GM) μειωθεί, ο ρυθμός καρβοξυλίωσης του ενζύμου του RUBISCO ανά μάζα μειώνεται, μειώνοντας το ρυθμό αφομοίωσης  $\text{CO}_2$  ανά μάζα αζώτου.

Ωστόσο, η φωτοσυνθετική παραγωγή και ο ρυθμός παραγωγής του RUBISCO συνδέονται στενά με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη στον ιστό του φύλλου (Schlemmer et al., 2005), ενώ το N είναι η μόνη ένωση που επηρεάζει την πραγματική εξαγωγήμνη συγκέντρωση της περιεκτικότητας της χλωροφύλλης (Schlemmer et al., 2005; Silleos et al., 2006).

Επειδή το άζωτο συμμετέχει στην πρωτεϊνική σύνθεση, αλλά κυρίως στη δομή της χλωροφύλλης, τα συμπτώματα έλλειψής του εμφανίζονται αρχικά υπό τη μορφή χλώρωσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στα ηλικιωμένα κατώτερα φύλλα, τα οποία ως χλωρωτικά κιτρινίζουν και πέφτουν. Τα πιο νέα φύλλα μπορεί να μη δείχνουν αρχικά αυτά τα συμπτώματα, επειδή το άζωτο μπορεί να μετακινηθεί από τα παλαιότερα προς τα νεότερα φύλλα. Η έλλειψη αζώτου προκαλεί κιτρίνισμα των φύλλων, κυρίως στο στάδιο της ανάπτυξης, γιατί το φυτό το αφομοιώνει άμεσα. Έτσι, η έλλειψη του αζώτου σε ένα φυτό μπορεί να προσδίδει ελαφρώς πράσινο χρώμα στα ανώτερα φύλλα και κίτρινο στα κατώτερα.

Παράλληλα με την χλώρωση, αναπτύσσονται ανθοκυανίνες και μπεταλαΐνες στους μίσχους και κατά μήκος των νεύρων του πλατύσματος των φύλλων (Βαφειάδης & Σταματιάδου, 2007). Ένα άλλο, επίσης, σύμπτωμα έλλειψης αζώτου είναι η αναστολή της αύξησης των μερών του φυτού και κυρίως των πλευρικών κλάδων, γιατί αδρανοποιούνται οι πλευρικοί οφθαλμοί. Αντίθετα, αύξηση της ποσότητας του αζώτου συνεπάγεται εντονότερη ανάπτυξη του βλαστού και των φύλλων, όμως μπορεί να προκαλέσει βράχυνση της ρίζας. Οι πρωτεΐνες είναι στα φυτά τα πλουσιότερα σε άζωτο συστατικά, αφού συγκεντρώνουν περίπου 80-85% του συνολικού αζώτου. Εξάλλου, το άζωτο των νουκλεϊκών οξέων φτάνει μέχρι 10% και των διαλυτών αζωτούχων ενώσεων περίπου 5% του συνολικού αζώτου των φυτών. Έχει διαπιστωθεί ότι στη φάση της βλάστησης του φυτού οι πρωτεΐνες που περιέχονται, βρίσκονται, κυρίως, υπό μορφή ενζύμων, ενώ στο στάδιο σχηματισμού σπερμάτων και καρπών το μεγαλύτερο μέρος των πρωτεϊνών βρίσκεται υπό μορφή αποταμιευτικών πρωτεϊνών (Βαφειάδης & Σταματειάδου, 2007). Σε μελέτη των Βαφειάδη και Σταματειάδου (2007) που έχει γίνει πάνω στα τεύτλα και ειδικότερα στο παντζάρι καθώς και σε υδροπονικές καλλιέργειες τομάτας, έχει βρεθεί ότι η έλλειψη αζώτου προκαλεί, επίσης, και μείωση στη μετακίνηση νερού από τις ρίζες στα φύλλα, με συνέπεια τη μείωση της διαπνοής των φυτών.

Από την άλλη πλευρά, αν και η αύξηση της χορηγούμενης ποσότητας αζώτου έχει ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση του γήρατος και την προώθηση και αύξηση του φυτού, πέραν τούτου προκαλεί και μεταβολές στη μορφολογία του. Διαφορετικά συμπτώματα ανιχνεύονται στην περίπτωση της περίσσειας αζωτολίπανσης. Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται έντονη βλαστική ανάπτυξη της καλλιέργειας καθώς επίσης και καθυστέρηση της καρπόδεσης και της ωρίμανσης των καρπών. Άλλα συμπτώματα είναι η μείωση της απόδοσης των καρπών της καλλιέργειας, το έντονο πράσινο χρώμα, η μικροφυλλία και η συστροφή των φύλλων της κορυφής. Σπανίως οι καλλιεργητές τείνουν να πιστεύουν ότι, προσδίδοντας περισσότερο αζωτούχο λίπασμα στα φυτά, θα έχουν μεγαλύτερη απόδοση.

### **1.2.1 Ο ρόλος της θρέψης στην υδροπονία**

Μέσω της υδροπονικής τεχνικής πραγματοποιείται αποτελεσματικότερος έλεγχος της θρέψης των φυτών, βελτιώνονται η ποιότητα και η εμφάνιση των προϊόντων, ενώ οι συνθήκες εργασίας εντός του θερμοκηπίου είναι ευνοϊκότερες. Στην υδροπονική καλλιέργεια, η υδατολίπανση πραγματοποιείται μέσω ενός θρεπτικού διαλύματος. Το θρεπτικό διάλυμα είναι ένα αραιό υδατικό διάλυμα που περιέχει όλα τα θρεπτικά στοιχεία (νερό και λιπάσματα) που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών.

Ένα πλήθος θρεπτικών συστατικών χαρακτηρίζονται απαραίτητα από την υδροπονική τεχνική για την ανάπτυξη των φυτών, εξαιτίας του ότι το φυτό δεν μπορεί να ολοκληρώσει το βιολογικό του κύκλο σε συνθήκες έλλειψης του στοιχείου αυτού· η επίδραση του στοιχείου αυτού είναι καθορισμένη και δεν μπορεί να αντικατασταθεί από άλλο στοιχείο· το στοιχείο αυτό πρέπει άμεσα να εμπλέκεται στη θρέψη του φυτού, αποτελώντας συστατικό ενός απαραίτητου μεταβολίτη ή ενζύμου και τέλος δεν μπορεί να απορροφήσει κάποια από τα στοιχεία από κάπου αλλού, όπως για παράδειγμα από το έδαφος.

Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία παρασκευής του θρεπτικού διαλύματος είναι:

#### **1. pH**

2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα
3. Λόγος N/P/K.

Το pH του θρεπτικού διαλύματος κυμαίνεται από 5.5 μέχρι 6 για ελαφρώς όξινο υπόστρωμα, γιατί σε αυτό το εύρος γίνεται καλύτερη πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων. Από την άλλη, η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων του διαλύματος. Δεν υπάρχει κάποιος κανόνας για το ποια είναι η άριστη ηλεκτρική αγωγιμότητα για την καλλιέργεια τομάτας, γιατί εξαρτάται από την αρχική αγωγιμότητα του νερού. Αν η αρχική αγωγιμότητα του νερού είναι υψηλή, τότε υπάρχει και υψηλή συγκέντρωση νατρίου, οπότε κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη θρεπτικών στοιχείων, με στόχο τη μείωση του ανταγωνισμού των φυτών για την πρόσληψη Ca, Na αλλά και για να διατηρηθεί η σχέση N/P/K στα επιθυμητά επίπεδα (Δανηλίδου, 2010). Επιπλέον, μεγάλη σημασία έχει η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο διάλυμα απορροής, η οποία πρέπει να είναι ελαφρώς υψηλότερη από το αρχικό θρεπτικό διάλυμα.

Η σχέση N/P/K εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Στην καλλιέργεια της τομάτας πραγματοποιείται εφαρμογή τριών διαφορετικών συνταγών, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Από μελέτες έχει προκύψει ότι η σχέση απορρόφησης N/K κατά την περίοδο της πρώτης ταξιανθίας σε καλλιέργεια τομάτας κυμαίνεται στο 1,2 (Σωτηράκογλου, 2006). Η τιμή του λόγου αζώτου καλίου τείνει να αυξηθεί με την περαιτέρω αύξηση των ταξιανθιών και πλησιάζει το 2,5 με την ανάπτυξη της έντασης της ταξιανθίας. Μετά το τέλος της συγκομιδής των δύο πρώτων ταξικαρπιών, όταν μειώνεται το φορτίο των φυτών, η σχέση αυτή πέφτει στο 2.

Ένας εναλλακτικός τρόπος ελέγχου της αφομοίωσης των θρεπτικών στοιχείων της καλλιέργειας είναι η διαφοροποίηση της αναλογίας  $\text{NH}_4^+\text{NO}_3^-$ . Όταν αυξηθεί η συγκέντρωση των αμμωνιακών, ενισχύεται η αφομοίωση των κατιόντων (Ca, Mg, K, Zn, Mn, Fe), με την προϋπόθεση ότι η ολική συγκέντρωση αζώτου παραμένει σταθερή, ενώ περιορίζεται η αφομοίωση των αρνητικά φορτισμένων στοιχείων. Από πειράματα έχει προκύψει ότι η ιδανική αναλογία  $\text{NH}_4^+\text{N}^-$  κυμαίνεται στο 0,2, ενώ, αν η αναλογία αυτή ξεπεράσει το 1,5, το pH της απορροής μπορεί να μειωθεί κάτω του 4 (Νταρακάς, 2014).

### 1.2.2 Έλεγχος της θρέψης σε υδροπονική καλλιέργεια

Στις υδροπονικές καλλιέργειες κρίνεται απαραίτητος ο πρόωρος έλεγχος της θρέψης της καλλιέργειας, με σκοπό ο παραγωγός να γνωρίζει τα αποθέματα σε θρεπτικά στοιχεία και τις ανάγκες της καλλιέργειάς του, ώστε να προχωρήσει σε ορθολογική λίπανση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο έλεγχος αυτός μέχρι τώρα πραγματοποιείται με τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος, με φυλλοδιαγνωστική και με μακροσκοπική παρατήρηση συμπτωμάτων. Όταν η πληροφορία αντλείται από το ίδιο το φυτό (φυλλοδιαγνωστική και μακροσκοπική παρατήρηση κλπ), η μέθοδος είτε είναι χρονοβόρα, επειδή απαιτεί κοπή του φυτού, είτε απαιτεί την επαφή του αισθητήρα με το ίδιο το φύλλο.

Για παράδειγμα, η *φυλλοδιαγνωστική* είναι μια διαδικασία για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στα φύλλα, που χρησιμοποιείται για πρόληψη και αναγνώριση θρεπτικών προβλημάτων. Βασίζεται στις κριτικές συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων - *κριτική συγκέντρωση* είναι εκείνη η συγκέντρωση του στοιχείου στον ιστό, με την οποία επιτυγχάνεται παραγωγή ίση με το 90% της μέγιστης- μέσα στο φυτό, κάτω από τις οποίες η αύξηση μειώνεται. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κριτική συγκέντρωση είναι η ποικιλία, η ηλικία φυτικού ιστού, το είδος φυτικού ιστού (έλασμα, μίσχος), η εποχιακή μεταβολή κριτικών συγκεντρώσεων (μικρότερες μεταβολές Ιούνιος-Ιούλιος), οι κλιματικές συνθήκες, π.χ. βλάστηση και, τέλος, η αλληλεπίδραση θρεπτικών στοιχείων.

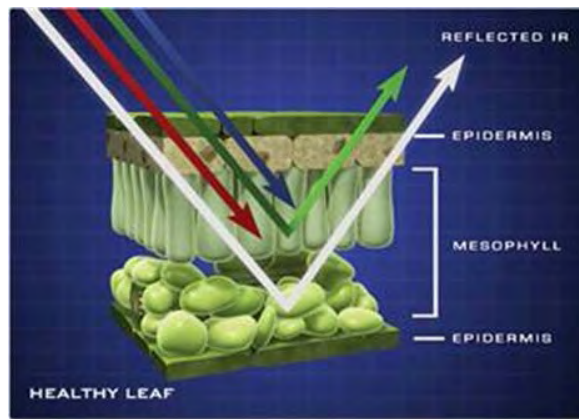
Αντίστοιχα, η *μακροσκοπική παρατήρηση* των συμπτωμάτων είναι η οπτική παρατήρηση ορατών συμπτωμάτων και προβλημάτων της καλλιέργειας και βασίζεται στη διαταραχή του μεταβολισμού των φυτών που εκδηλώνεται με ορατές ανωμαλίες.

### 1.2.3 Νέα μέθοδος προσδιορισμού της θρέψης μέσω της μέτρησης της ανακλώμενης ακτινοβολίας της καλλιέργειας

Μια νέα μέθοδος προσδιορισμού της θρέψης στο πεδίο είναι η μέτρηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας του φυτού με τη χρήση αισθητήρων ανάκλασης. Η βασική αρχή στην οποία στηρίζονται οι αισθητήρες ανάκλασης σχετίζεται με τη δραστηριότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εμφανίζεται με διάφορες μορφές στο χώρο του θερμοκηπίου, ανάλογα με τη θέση του φυτού, όπως:

- Ακτινοβολία που διέρχεται μέσω του φύλλου (διερχόμενη ακτινοβολία).
- Ακτινοβολία που απορροφάται από το φύλλο και αποδίδει ενέργεια κυρίως για τη θέρμανσή του (απορροφώμενη ακτινοβολία).
- Ακτινοβολία που διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις και χάνεται είτε λόγω απορρόφησης είτε λόγω περαιτέρω διάχυσης (διαχεόμενη ακτινοβολία).
- Ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια του φύλλου με γωνία ανάκλασης ίση και αντίθετη με τη γωνία πρόσπτωσης (ανακλώμενη ακτινοβολία).

Οι Carlson et al. (1971) και Gausman et al. (1971) ήταν οι πρώτοι που ανέλυσαν τη συμπεριφορά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε διαφορετικά είδη φύλλων και επισήμαναν τη δυνατότητα εκτίμησης της υδατικής ή θρεπτικής κατάστασης σε διαφορετικά μήκη κύματος. Απέδειξαν ότι, αν και τα φύλλα των φυτών συχνά φαίνονται όμοια, ποικίλλουν ευρέως τόσο σε σχήμα όσο και σε χημική σύσταση, ενώ μεταβάλλεται η περιεκτικότητα των θρεπτικών στοιχείων στους ενδοκυτταρικούς χώρους των φύλλων. Αποτέλεσμα είναι η συνεχής ποικίλη συμπεριφορά στην ανάκλαση των φυτών. Στην Εικόνα 3 παρατηρείται η απεικόνιση της εσωτερικής κατασκευής ενός φύλλου και η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν προσπίπτει σε αυτό.



**Εικόνα 3.** Απεικόνιση ακτινοβολίας στην εσωτερική δομή του φύλλου

Συνήθως, τα φύλλα απορροφούν την πλειονότητα της ακτινοβολίας στο ορατό φάσμα (400-700 nm), εξαιτίας των χρωστικών που βρίσκονται στη μεσόφυλλη περιοχή, όπως η χλωροφύλλη, η ξανθοφύλλη, τα καροτενοειδή και οι ανθοκυανίνες. Όταν ένα φυτό βρίσκεται σε κατάσταση θρεπτικής καταπόνησης, πραγματοποιείται οξείδωση της ξανθοφύλλης, με αποτέλεσμα τα στομάτια να κλείνουν και ο ρυθμός απορρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα να μειώνεται. Ως εκ τούτου, η ενέργεια του φωτός που απορροφάται από το φύλλο, δεν μπορεί να συντελέσει στη μεταφορά των φωτοσυνθετικών ηλεκτρονίων και ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως ανακλώμενη ακτινοβολία, ενώ το υπόλοιπο μέρος διαχέεται ως θερμότητα ή επαναεκπέμπεται ως φθορισμένη χλωροφύλλη. Επιπλέον, υπό συνθήκες θρεπτικής καταπόνησης επηρεάζεται και ο δείκτης φωτοσύνθεσης και συνεπώς η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που απορροφάται από το φύλλο, εξαιτίας της συμμετοχής των θρεπτικών στοιχείων στη φωτοσυνθετική διαδικασία ως συστατικών των φωτοσυνθετικών ενζύμων και της χλωροφύλλης. Η περιεκτικότητα του φύλλου σε χλωροφύλλη μειώνεται, το φύλλο αλλάζει χρώμα από πράσινο σε κιτρινοπράσινο και χρησιμοποιείται λιγότερη ακτινοβολία από το φυτό. Αποτέλεσμα αυτής της δραστηριότητας είναι η αύξηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην κόκκινη περιοχή του φάσματος.

Από την άλλη πλευρά, τα φύλλα ανακλούν μεγαλύτερη ένταση της ακτινοβολίας στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου (700-1300 nm). Σε αυτήν την περιοχή η ακτινοβολία προσπίπτει στο φύλλο, διαπερνά το πρώτο επίπεδο των χρωστικών και φτάνει στους μεσοκυττάρους και αεροφόρους χώρους (Τσιρογιάννης, 2010). Στη συνέχεια, η ακτινοβολία υπόκειται σε επιπλέον διάχυση και πολλαπλές ανακλάσεις,

με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας να επιστρέφει στο χώρο του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, η ανάκλαση στην φασματική περιοχή μεταξύ 680-750 nm αντανακλάται από την συγκέντρωση του νερού και των θρεπτικών συστατικών, ενώ η ανάκλαση στην περιοχή 750-800 nm εξαρτάται κυρίως από την υδατική περιεκτικότητα των φύλλων. Η ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα από 950 nm συνήθως απορροφάται από τους χυμούς του φύλλου, ενώ η ακτινοβολία περίπου στα 1000 nm απορροφάται από την ξηρή ουσία του φύλλου (άνθρακας και θρεπτικά συστατικά).

Σε μήκη κύματος >1300 nm, η ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας μειώνεται λόγω ισχυρής απορρόφησης της ενέργειας από το νερό που βρίσκεται μέσα στο φύλλο. Ο Peñuelas et al. (1997) αναφέρει ότι η άμεση ανταπόκριση της ποσότητας του νερού που περιέχεται στους φυτικούς ιστούς φαίνεται στις περιοχές 1400-1900 nm. Ωστόσο, οι Clevers et al. (2008) υποστηρίζουν πως η τιμή της ανάκλασης που μετρά ο αισθητήρας, επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία του χώρου και τη δομή του φύλλου του φυτού (παρουσία πρωτεϊνών, σακχάρων κλπ.), καθιστώντας τη μέτρηση αβέβαιη και τη μέθοδο αναξιόπιστη. Οι περιοχές αυτές του φάσματος δεν μπορούν εύκολα να ενταχθούν σε αισθητήρες τηλεσκοπίσης. Σε αντίθεση με την περιοχή NIR, στο μέσο της υπέρυθρης περιοχής (MIR 700nm - 1300nm) παρατηρείται μεγαλύτερη απορρόφηση και λιγότερη ανάκλαση και διαπερατότητα στα πράσινα φύλλα, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα φυτά απορροφούν περισσότερα θρεπτικά συστατικά σε εκείνη την περιοχή του φάσματος. Έτσι, αυτή η περιοχή περιέχει περισσότερες πληροφορίες για το σπογγώδες παρέγχυμα, το οποίο περιλαμβάνει νερό, κυτταρίνη, λυγνίνη, άζωτο και άμυλο. Οι βασικές περιοχές απορρόφησης που δείχνουν τη θρεπτική κατάσταση του φυτού βρίσκονται στα 1450 nm, 1940 nm και 2500 nm, καθώς επίσης και στο τμήμα του MIR.

Ορισμένοι ερευνητές (Peñuelas et al., 1993, 1994, 1997; Ray et al. 2006; Kim et al., 2010; Kruse et al., 2004; Schlemmer et al., 2005; Jain et al., 2007) απέδειξαν ότι τα φυτά κάτω από θρεπτική και υδατική καταπόνηση τείνουν να αυξάνουν την ανάκλασή τους στην πράσινη και την κόκκινη περιοχή του φάσματος, εξαιτίας της μείωσης της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (λιγότερη απορροφούμενη ακτινοβολία). Σε ορισμένες έρευνες (Jones et al., 2004; Schlemmer et al., 2005; Vigneau et al., 2011; Amatya et al., 2012) η ανάκλαση των καταπονημένων φυτών φαίνεται να αυξάνεται στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου (NIR), εξαιτίας



της σκέδασης της ακτινοβολίας από την αύξηση της περιεκτικότητας του αέρα στο σπογγώδες παρέγχυμα. Ο Peñuelas et al. (1993) παρατήρησε σημαντική μείωση στο μέγεθος της συνολικής ανάκλασης στη NIR περιοχή στα καταπονημένα φυτά, μόνο όταν αυτά βρίσκονταν κοντά στο μαρασμό. Σύμφωνα με τους Ray et al. (2006), οι τιμές ανάκλασης του φύλλου στο κοντινό υπέρυθρο (700-1300 nm) δείχνουν πιο αντιπροσωπευτική εκτίμηση της υδατικής ή θρεπτικής κατάστασης του φυτού σε σχέση με τις τιμές ανάκλασης στο μακρινό υπέρυθρο (1300-2500 nm), με την τιμή της μέτρησης να αυξάνεται κατά την εξέλιξη του υδατικού ελλείμματος, ως συνέπεια της απώλειας της κυτταρικής πίεσης σπαργής.

### 1.2.3.1 Δείκτες ανάκλασης

Πολλές έρευνες έχουν αποδείξει ότι η υψηλή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα φυτά, στην ορατή περιοχή του φάσματος, μπορεί να προκαλέσει ταχύ κορεσμό των ανακλώμενων σημάτων για μία πολύ μικρή ποσότητα της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας, με αποτέλεσμα να οδηγήσει στη μείωση του ευρέως του σήματος (Soudani et al., 2012). Εκτός αυτού, μερικοί άλλοι παράμετροι, όπως το πάχος του φύλλου, η ηλικία του φύλλου, η γωνία του φύλλου, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) και το είδος φυτού μπορούν να επηρεάσουν την φασματική ανταπόκριση του φυτού σε μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι η θρεπτική καταπόνηση των φυτών κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών μετρήσεων. Γι' αυτό το λόγο, οι τιμές της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην πράσινη περιοχή του φάσματος ή στην ορατή περιοχή του φάσματος έχουν περισσότερο θόρυβο - *θόρυβος* ορίζεται το σύνολο των ανεπιθύμητων πληροφοριών οι οποίες συνοδεύουν το σήμα και υποβαθμίζουν την ορθότητα και την ακρίβεια μιας μέτρησης- και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον φως.

Σύμφωνα με τον Köksal et al. (2010), ορισμένα μέρη του φάσματος μπορούν να επιλεγούν για περαιτέρω ανάλυση, με σκοπό να ενισχυθεί η ανίχνευση των φασματικών διαφορών και να προστεθούν επιπρόσθετες λεπτομέρειες για την ανίχνευση της καταπόνησης. Για το λόγο αυτό, διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει διάφορους συνδυασμούς δεδομένων από διαφορετικές φασματικές περιοχές για το

σηματισμό φασματικών δεικτών ή δεικτών ανάκλασης (RI). Περισσότεροι από 150 φασματικοί δείκτες έχουν παρουσιαστεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών (Asner et al., 1998; Silleos et al., 2006; Borzuchowski & Sculz et al., 2010), αλλά μόνο ένα μικρό τμήμα αυτών έχει ουσιώδεις βιοφυσικές βάσεις ή έχει συστηματικά μελετηθεί με σκοπό τον εντοπισμό διαφορετικών μορφών θρεπτικής καταπόνησης σε καλλιέργειες. Επιπλέον, περισσότεροι από 20 φασματικοί δείκτες βασίζονται στο ορατό και στο NIR φάσμα. Σύμφωνα με τους Aparicio et al., (2004) και Zakaluk και SriRanjan (2008), οι πιο διαδεδομένες μορφές δεικτών ανάκλασης είναι οι ακόλουθες:

- Φασματικός δείκτης *Simple Ratio (SR)*. Αντιστοιχεί στην αναλογία δύο φασματικών περιοχών, οι οποίες αναφέρονται ως δείκτες βλάστησης απλής αναλογίας. Οι τιμές του SR κυμαίνονται από 0 έως 30, ανάλογα με την περιοχή του φάσματος που μελετάται κάθε φορά και συνήθως είναι ευαίσθητος στις περιβαλλοντικές διακυμάνσεις, όπως είναι η ένταση και η κλίση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει επάνω στην επιφάνεια του φύλλου.
- Φασματικός δείκτης κανονικοποιημένης κατανομής *Normalized Difference (ND)*, ο οποίος ορίζεται ως αναλογία της διαφοράς στην ανάκλαση μεταξύ δύο φασματικών περιοχών προς το άθροισμα της ανάκλασης αυτών των δύο περιοχών.

$$\text{Normalized Difference (ND)} = (\text{NIR} - \text{VISR}) / (\text{NIR} + \text{VISR})$$

όπου, NIR η περιοχή του κοντινού ή του μακρινού υπέρυθρου, VIS η περιοχή του ορατού και R η περιοχή του κόκκινου φάσματος. Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από -1 έως 1, ενώ δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις έντονες περιβαλλοντικές διακυμάνσεις.

Εκτός από τους δείκτες ανάκλασης οι οποίοι προαναφέρθηκαν (SR, ND), υπάρχουν και άλλοι σχηματισμοί δεικτών ανάκλασης. Αυτοί περιλαμβάνουν τις μέσες τιμές από συγκεκριμένες περιοχές του φάσματος (Single Bands, SB) και τη διαφορά των μετρήσεων δύο διαφορετικών περιοχών (Difference, D) (Graeff et al., 2007). Τελευταία, έχουν σχηματιστεί δείκτες, όπως ο Modified Simple Ratio (mSR)

και ο modified Normalized Difference (mND), με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ανίχνευση της υδατικής καταπόνησης.

### 1.2.3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των δεικτών ανάκλασης

Τα τελευταία 30 χρόνια, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί αρκετοί δείκτες ανάκλασης για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών του φυτού, όπως είναι ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας και ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης (Asner et al., 1998; Silleos et al., 2006). Ωστόσο, λίγοι είναι εκείνοι οι δείκτες που αξιολογήθηκαν για την ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης του φυτού. Το μεγαλύτερο ποσοστό των δεικτών αυτών, μετράει την ανάκλαση του φυτού στην περιοχή του κόκκινου και του κοντινού υπέρυθρου του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Αρκετοί ερευνητές (Schlemmer et al., 2005; Jain et al et al., 2007; και Vigneau et al., 2011) παρατήρησαν μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας της χλωροφύλλης και της ανάκλασης ανακλώμενης ακτινοβολίας της καλλιέργειας στα 525-630 nm, 640-660 nm, περίπου 705 nm, 730 nm και 930 nm. Άλλοι ερευνητές χρησιμοποίησαν στοιχεία από τις παραπάνω έρευνες, μελέτησαν τις αντίστοιχες φασματικές περιοχές για την εκτίμηση των δεικτών που συσχετίστηκαν με το περιεχόμενο σε άζωτο σε σχέση με τη μεταβολή της συγκέντρωσης αζώτου στα φύλλα. Ο Peñuelas et al. (1995) διαπίστωσε ότι ο δείκτης SIPI (Structure Insensitive Pigment Index) =  $(R_{800}-R_{445})/(R_{800}+R_{680})$  είχε υψηλή συσχέτιση με την αναλογία του λόγου των καροτενοειδών / και της χλωροφύλλης-α. Οι Zhao et al. (2005) ανέφεραν ότι οι συγκεντρώσεις αζώτου και χλωροφύλλης στα φύλλα είχαν γραμμική σχέση συσχέτισης με τους δείκτες  $R_{405}/R_{715}$  και  $R_{1075}/R_{735}$ . Οι Vigneau et al. (2011) επισήμαναν, επίσης, ότι ο δείκτης VOGREI είχε υψηλή συσχέτιση με το περιεχόμενο των φύλλων σε N, ενώ οι Padilla et al. (2014) έδειξαν ότι ο  $NDVI_{(R_{NIR}-R_{RED})} = (R_{NIR}-R_{RED})/(NIR+RED)$ , NDVI (Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης) δείχνουν υψηλή συσχέτιση με τη συγκέντρωση αζώτου.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένοι δείκτες ανάκλασης για την ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης και περιγράφονται οι μαθηματικές εξισώσεις και τα μήκη κύματος που τα περιλαμβάνουν. Οι δείκτες αυτοί έχουν συνδεθεί και

αξιολογηθεί με άλλα χαρακτηριστικά του φυτού, όπως είναι το υδατικό δυναμικό του φύλλου, η στοματική αγωγιμότητα, η διαπνοή, ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους ή του υποστρώματος, η συγκέντρωση της εδαφικής υγρασίας και το φαινόμενο της εξέλιξης του φθορισμού της χλωροφύλλης, με άλλοτε θετικά και άλλοτε αρνητικά αποτελέσματα.

Ο δείκτης *NDVI* χρησιμοποιείται ευρέως με πολλούς συνδυασμούς του φάσματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας ανάκλησης. Μετράει κυρίως στις περιοχές 680-800 nm και 490-620 nm. Πολλοί ερευνητές αναφέρουν ότι ο δείκτης *NDVI* έχει υψηλή συσχέτιση με τη βιομάζα, τη χλωροφύλλη και το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Jones et al., 2007; Liu et al., 2004). Επίσης, εξηγούν ότι ο δείκτης  $NDVI_{(800-640)} = (R_{800} - R_{640}) / (R_{800} + R_{640})$  μπορεί να είναι ένας καλός και αποτελεσματικός δείκτης για την ανίχνευση του φύλλου σε περιεκτικότητα σε άζωτο και σε βιομάζα του φυτού. Σε έρευνα που έγινε από τους Katsoulas et al., (2014) αποδείχτηκε ότι ο συγκεκριμένος δείκτης στα 680 nm και 800nm παραμένει αμετάβλητος με τις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών και πιο συγκεκριμένα της έντασης του φωτός. Σύμφωνα με τους LU Yan-li et al. (2008), ο δείκτης δίνει καλή συσχέτιση με την εξέλιξη της θρεπτικής καταπόνησης, ενώ σύμφωνα με τους Hao et al. (2010), ο δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε άζωτο. Επίσης, οι C. Panigada et al. (2010) παρατήρησαν ότι την red-edge περιοχή ο δείκτης έχει καλή συσχέτιση με τη θρεπτική καταπόνηση ( $R^2=0,62$ ). Από την άλλη, ο δείκτης στην περιοχή 490-820 nm χαρακτηρίζεται από υψηλό συντελεστή συσχέτισης, κυρίως με την εξέλιξη της βιομάζας και της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (0.8 και 0.96, αντίστοιχα) (Jones et al., 2004).

Ο δείκτης *MSR* (Software Infrared Modified Simple Ratio) μετράει κυρίως στις περιοχές 800-680 nm. Είναι ένας φασματικός δείκτης, κατάλληλος για την ανίχνευση φυλλικής επιφάνειας στις δασικές καλλιέργειες (Lagomasimo et al., 2014). Ο δείκτης *MSR* είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στον υπολογισμό προσδιορισμού της περιεκτικότητας της χλωροφύλλης, αναλύοντας τα μήκη κύματος στα οποία είναι πιο ευαίσθητη, λόγω της μεταβολής σε *Chl α*, *Chl β* και καροτονοειδή σε φυτά σόγιας, τα οποία αναπτύσσονται σε διαφορετικά επίπεδα αζώτου (N) (Reynolds et al., 2000).

Ο δείκτης *SAVI* (Soil Adjusted Vegetation Index) μετράει κυρίως στις περιοχές 800-670 nm. Είναι δείκτης βλάστησης και είναι κατάλληλος για την ανίχνευση φυλλικής επιφάνειας στις δασικές καλλιέργειες (Lagomasimo et al., 2014). Ο δείκτης

SAVI, στα αποτελέσματα μιας στατιστικής δοκιμής ANOVA, δείχνει ότι υπήρχε σημαντική διαφορά ( $p < 0,01$ ) μεταξύ των χώρων.

Ο δείκτης *MTVI2* (Modified Triangular Vegetation Index - Improved) μετράει κυρίως στις περιοχές 550-800 nm. Αυτός ο δείκτης είναι όμοιος με τον δείκτη *MTVI*, ωστόσο μπορεί να προβλέψει αποτελεσματικότερα τη φυλλική επιφάνεια. Αυτός ο δείκτης διατηρεί την ευαισθησία του στον υπολογισμό του LAI και αντιστέκεται στην επιρροή της χλωροφύλλης, χωρίς να επηρεάζεται από το εκάστοτε φόντο εδάφους των φυτών (Habudane et al., 2004). Σύμφωνα με τον Agati et al. (2012), ο δείκτης δίνει καλή συσχέτιση (0,95) με την περιεκτικότητα χλωροφύλλης στα φυτά.

Ο δείκτης *PRI* (Photochemical Reflectance Index) μετράει κυρίως στις περιοχές 531-570 nm. Σύμφωνα με τον Shrestha et al. (2012), ο δείκτης δίνει καλή συσχέτιση (0,92) σε σχέση με τα επίπεδα φωτός στην καλλιέργεια. Είναι κατάλληλος για την ανίχνευση της χλωροφύλλης και της αζωτικής περιεκτικότητας του φυτού. Επίσης, ο δείκτης *PRI* μπορεί να είναι ένα εργαλείο για την ταχεία γενική αξιολόγηση της θρεπτικής καταπόνησης, ιδιαίτερα στην περιεκτικότητα του αζώτου. Οι Kittas et al. (2014) βρήκαν χαμηλή συσχέτιση του *PRI* με την περιεχόμενη εδαφική υγρασία σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας, λόγω της χαμηλής έντασης φωτός, ενώ οι Katsoulas et al. (2014) παρατήρησαν ότι ο *PRI* της καλλιέργειας της θερμοκηπιακής ντομάτας μειώθηκε από 0.07 σε 0.04. Οι Magney et al. (2016) αξιολόγησαν τον δείκτη *PRI* με άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι, κατά το στάδιο ανάπτυξης των φυτών, ενώ τα φυτά είχαν κανονικά επίπεδα θρέψης και χαμηλή θερμοκρασία αέρα, υπήρξε μικρή ανταπόκριση του *PRI*. Οι δείκτες της μέσης τιμής μεταξύ των 530-590 nm σύμφωνα με τους Suarez et al. (2009) έχουν καλή συσχέτιση (0.82) με τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης του φύλλου. Αντίθετα, οι δείκτες της μέσης τιμής μεταξύ των 1710-2090 nm δίνουν καλή συσχέτιση (0,93) στα συγκεκριμένα μήκη κύματος για σταθερής ποσότητας αζώτου και σχετίζονται άμεσα με την περιεκτικότητα απορροφούμενης πρωτεΐνης και αζώτου που βρίσκεται στο φύλλωμα.

**Πίνακας 1.** Δείκτες ανάκλασης και οι μαθηματικές εξισώσεις που το περιλαμβάνουν

<b>Δείκτης ανάκλασης</b>	<b>Μαθηματική εξίσωση</b>
--------------------------	---------------------------

SR	$R700/R670$
SR	$R800/R670$
SR	$R450/R715$
SR	$R555/R465$
VOGREI 1	$R740/R720$
NDVI	$(R800-R680)/(R800+R680)$
sPRI	$(R560-R510)/(R560+R510)$
rNDVI	$(R750-R705)/(R750+R705)$
MSR	$((R800/R680)-1)/\sqrt{((R800/R680)+1)}$
SAVI	$(1+L)*(R800-R680)/(R800+R680+L)$
TCARI	$3*((R700-R670)-0.2*(R700-R550))*(R700/R670)$
MTVI2	$1,5*(1,2*(R800-R550)/2,5*(R670-R550))/(\sqrt{(2*R800+1)^2 - (6*R800-5*\sqrt{R670})-0,5})$
OSAVI	$(1+0,16)*(R800-R670)/(R800+R670+0,16)$
PRI	$(R531-R570)/(R531+R570)$

### 1.3 Αισθητήρες

Στη σύγχρονη εποχή, πολλά συστήματα αισθητήρων είναι πλέον διαθέσιμα και πολλές τεχνολογίες τηλεπισκόπησης έχουν χρησιμοποιηθεί, για να αποκτηθούν οι απαιτούμενες πληροφορίες (Lan et al., 2009). Η πρόοδος των τεχνικών μέτρησης ανάκλασης διαδραματίζει έναν κρίσιμο ρόλο στην ακριβή παρακολούθηση και την αξιολόγηση της ανάκλασης των φυτών. Έχουν, πλέον, χρησιμοποιηθεί αρκετές τεχνικές που στοχεύουν στην απόκτηση δεδομένων όσον αφορά την ανάκλαση των

φυτών, με σκοπό τον προσδιορισμό ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των φυτών. Υπάρχουν, όμως, ποσοτικές όσο και ποιοτικές διαφορές, εξαιτίας της έντονης παραλλακτικότητας της δομής του φύλλου αλλά και της γενικότερης άμβλυνσης της ακτινοβολίας, λόγω της διακύμανσης της γωνίας φωτισμού μέσα στο θερμοκήπιο, του προσανατολισμού και της κλίσης του φύλλου, της παρουσίας σκιάσεων και της ανάκλασης από μη φυλλικές επιφάνειες, που καθιστούν τη μέθοδο ανακριβή σε επίπεδο φυτού και καλλιέργειας.

Η ανάπτυξη του τομέα της μη-εικονικής φασματοσκοπίας έδωσε την ευκαιρία για ένα οικονομικά αποδοτικό τρόπο παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, μεγάλης κλίμακας του ανοιχτού αγρού και των θερμοκηπίων. Η βελτίωση της μη απεικονούμενης φασματοσκοπίας για την απεικόνιση της τηλεπισκόπησης οδηγεί στην απόκτηση μεγάλης ποσότητας δεδομένων ανάκλασης σε υψηλότερη χωρική ανάλυση (Lihat & Balasundram, 2010).

### 1.3.1 Τύποι αισθητήρων

Γίνεται, στη συνέχεια μια περιγραφή των τεχνικών προδιαγραφών και των κατηγοριών των αισθητήρων τηλεπισκόπησης που μετρούν την ανάκλαση του φυτού ή της καλλιέργειας στο πεδίο.

Αρχικά οι αισθητήρες ταξινομούνται σε τρεις διακριτές κατηγορίες:

- (α) φασματόμετρα και ραδιόμετρα
- (β) απεικόνισης και μη απεικόνισης και
- (γ) ενεργητικούς ή παθητικούς.

Το βασικό χαρακτηριστικό της μη-απεικονισμένης φασματοσκοπίας του εκάστοτε πεδίου (spot) είναι η ικανότητα του αισθητήρα να επιτρέπει τη συνεχή αντίχνευση σε ένα ευρύ φάσμα των φασματικών ζωνών (φασματόμετρα) ή σε μικρότερη κλίμακα, η οποία περιορίζεται σε ορισμένες φασματικές ζώνες (ραδιόμετρα). Το κύριο γνώρισμα που διακρίνει ένα φασματόμετρο από ένα ραδιόμετρο με πολλαπλές ζώνες είναι η συνεχής μέτρηση του παραγόμενου φάσματος (Milton, 1987). Ένα σύστημα αισθητήρων μη-απεικόνισης μπορεί εύκολα να μετρήσει την ακτινοβολία ανάκλασης,

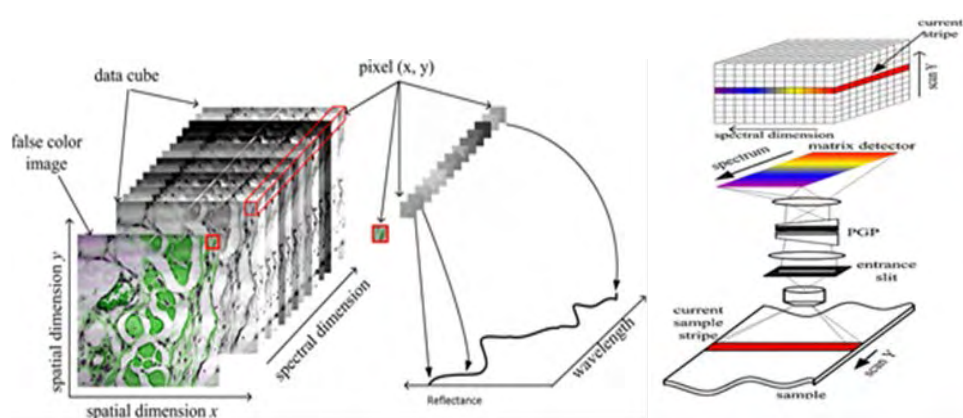
επισημαίνοντας την είσοδο των οπτικών ινών του εξοπλισμού σε ένα σημείο ή σε όλα τα σημεία του στόχου, λαμβάνοντας μετρήσεις σε θέση υψηλής ακρίβειας και τοπογραφικά προφίλ. Η απόδοση αυτών των αισθητήρων μη-απεικόνισης εξαρτάται από μια ολοκληρωμένη τεχνητή πηγή φωτός, με σκοπό να συλλέξει την ανακλώμενη ακτινοβολία από το στόχο και έτσι, γι' αυτό το λόγο αυτοί οι αισθητήρες ονομάζονται «ενεργοί αισθητήρες». Ο Milton (1987) εξέτασε για πρώτη φορά τις αρχές των παραμέτρων του τομέα της φασματοσκοπίας. Από τότε, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές τηλεπισκόπησης στο πεδίο.

Κατά την τελευταία δεκαετία, η εξέλιξη στην τεχνολογία αισθητήρων τηλεπισκόπησης στο πεδίο έχει συντελέσει στην ανάπτυξη οπτικών συστημάτων που έκανε εφικτή την ταυτόχρονη καταγραφή των διαφόρων ζωνών και των διαφόρων σημείων του στόχου. Τα συστήματα απεικόνισης επιτρέπουν να εισέρχεται το φως στον αισθητήρα μέσα από μια σχισμή, προσκρούοντας στη φωτοευαίσθητη περιοχή του ανιχνευτή, έτσι ώστε να δώσει ακριβή χωρική και φασματική ανάλυση, ενώ κάθε εικονοστοιχείο (pixel) λαμβάνει και δέχεται φως από διαφορετικές περιοχές του φάσματος (Huang & Zeng, 2001). Με βάση τις διαφορετικές καταγραφές των φασματικών ζωνών (κανάλια), οι αισθητήρες ανάκλασης μπορούν να διακριθούν σε παγχρωματικές εικόνες (1 κανάλι), έγχρωμες εικόνες (3 κανάλια), πολυφασματικές εικόνες (4-20 κανάλια) και υπερφασματικές εικόνες (πάνω από 20 κανάλια) (Willoughby et al., 1996; Kozma & Bognárand-Berke, 2010). Ο αριθμός και η θέση των ζωνών σε κάθε σύστημα παρέχει ένα μοναδικό συνδυασμό φασματικών πληροφοριών και είναι προσαρμοσμένος στις απαιτήσεις του αισθητήρα που έχουν σχεδιαστεί για τη στήριξη. Τα περισσότερα υπερφασματικά και πολυφασματικά συστήματα απεικόνισης δουλεύουν σε μια περιοχή μήκους κύματος από το ορατό έως το υπέρυθρο και συνήθως είναι παθητικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούν φυσικό φως ή εξωτερικές πηγές φωτός. Έτσι, οι αισθητήρες απεικόνισης απαιτούν καλή γνώση της σκηνής, όπως την ένταση του φωτός, την κατεύθυνση του φωτός και τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

Τα πιο πρόσφατα τεχνολογικά μηχανήματα οπτικών συστημάτων διαχωρίζονται σε συστήματα σάρωσης και συστήματα διαμόρφωσης. Οι υπερφασματικοί αισθητήρες εικόνας χρησιμοποιούν συνήθως τεχνικές σάρωσης, προκειμένου να αποκτήσουν τα δεδομένα ανακλαστικότητας από διάφορα μέρη του στόχου με καταγραφή της εικόνας. Μερικές από αυτές τις μεθόδους σάρωσης είναι η whiskbroom, η



paddlebroom και η pushbroom τεχνική. Οι Pushbroom σαρωτές έχουν γραμμική διάταξη από χιλιάδες ανιχνευτικά στοιχεία ευθυγραμμισμένα με τη μορφή cross-track και με αυτό τον τρόπο σαρώνουν όλο το πλάτος των συλλεχθέντων δεδομένων με παράλληλες κινήσεις ως προς την πλατφόρμα. Αυτή η μέθοδος σάρωσης είναι σε θέση να καλύψει το αισθητήριο υπό διάφορες μεταβλητές γωνίες και να σαρώνει σημείο προς σημείο όλη την περιοχή του ενδιαφέροντος. Σε συστήματα πλαισίου, οι εικόνες των στόχων λαμβάνονται καρέ-καρέ. Οι εικόνες μπορούν να περιγράφονται υπό διαφορετική κλίμακα, η οποία καθορίζεται από το ενεργό εστιακό μήκος των οπτικών της απομακρυσμένης συσκευής ανίχνευσης, το υψόμετρο από το οποίο αποκτάται η εικόνα και το συντελεστή μεγέθυνσης που χρησιμοποιείται στην αναπαραγωγή της εικόνας. Περισσότερες και πιο εξειδικευμένες τεχνικές πληροφορίες σχετικά με οπτικούς αισθητήρες μπορούν να βρεθούν στην ακόλουθη βιβλιογραφία των Μουρούλης (1999), Aikio (2001), Lawrence et al. (2003), Polder et al. (2003), Govender et al. (2007), Schowengerdt (2007), Vagni (2007), Chung-RuHo (2008), Panda (2012) και Li et al. (2013) (Εικόνα 4).



**Εικόνα 4.** Υπερφασματικά κύβος ενός υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης (αριστερά), Pushbroom σύστημα σάρωσης (δεξιά). Φωτογραφίες που ελήφθησαν από τους Li et al., (2013)

Μια έρευνα που αναφέρεται στους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στις διάφορες μελέτες σχετικές με τις μετρήσεις ανακλαστικότητας, πραγματοποιήθηκε μέσω Scorpus. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα, διαπιστώθηκε ότι το 11% των μελετών ακολουθεί πρωτόκολλα βασισμένα σε εργαστηριακές συνθήκες, με δειγματοληψία σε αποσπώμενα φύλλα. Αυτές οι μέθοδοι είναι χρονοβόρες και εντοπίζουν την καταπόνηση των φυτών στο φύλλωμα και όχι αποκλειστικά του φυτού ή της

καλλιέργειας κάτω από σταθερές συνθήκες. Η χρήση περισσότερου φωτός, οι εύχρηστες επίγειες μέθοδοι τηλεπισκόπησης, αξιολογούν την αξιοπιστία των μετρήσεων στον τομέα της ανάκλασης και ελαχιστοποιούν τις αποκλίσεις ακρίβειας που προκύπτουν από άλλες μεθόδους. Έτσι, οι αισθητήρες εδάφους που χρησιμοποιεί το 14% των ερευνών, βασίζονται στην επαφή με το φύλλο, για να μετρηθεί η μεταβολή της φυτικής ανάκλασης κάτω από συνθήκες αγρού.

Παρότι αυτές οι μέθοδοι δίνουν τα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο για το επίπεδο καταπόνησης των φυτών, δεν προτείνονται για συνθήκες θερμοκηπίου, δεδομένου ότι δεν μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα ελέγχου ή μοντέλα υπολογιστών. Επίσης, αρκετές μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται από διαφορετικά φύλλα, προκειμένου να προσδιοριστεί η καταπόνηση είτε σε επίπεδο φυτού είτε σε επίπεδο καλλιέργειας. Η πλειοψηφία των ερευνών (75%) εφαρμοσμένων μεθόδων βασίζεται στην τηλεπισκόπηση. Ωστόσο, η πλειονότητα των μελετών τηλεπαρακολούθησης (74%) χρησιμοποιεί αισθητήρες που μετρούν την ανάκλαση σε ένα σημείο ή τη μέση τιμή όλων των σημείων μιας μικρής οπτικής επιφάνειας του στόχου. Μόνο το 26% των ερευνών τηλεπισκόπησης από το 2000 και μετά, χρησιμοποιεί φασματόμετρα απεικόνισης για την ανίχνευση της φυτικής καταπόνησης και ως επί το πλείστον σε συνθήκες ανοικτού πεδίου. Η νέα γενιά επίγειων φασματοφωτόμετρων απεικόνισης παρέχει ήδη μια σημαντική βελτίωση, τη διαθεσιμότητα και τις ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες καλλιέργειας, καθώς, επίσης, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας σε ένα στάδιο, στο οποίο οι πληροφορίες από RS εικόνες χρησιμοποιούνται για την πολιτική άρδευσης και λίπανσης μεγάλης κλίμακας σε ανοιχτό αγρό (Govender et al., 2009). Ωστόσο, οι οπτικοί αισθητήρες δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται για άμεση μέτρηση της ανάκλασης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης αζώτου στα φύλλα, καθώς κάθε μήκος κύματος έχει το δικό του σφάλμα μέτρησης και απαιτεί καλή γνώση των ρυθμίσεων του αισθητήρα, όπως την ένταση του φωτός και την κλίση της ηλιακής ακτινοβολίας.

### 1.3.2 Πρωτόκολλο εφαρμογής και βαθμονόμηση αισθητήρων απεικόνισης

Για την ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης που γίνεται με βάση την καταγραφή της έντασης της ακτινοβολίας που αντανακλά το φυτό από απόσταση, προτείνεται η χρήση του υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης ως η πιο κατάλληλη μέθοδος. Το βασικό πλεονέκτημα της υπερφασματικής ανάλυσης είναι ότι ο χρήστης δε χρειάζεται να γνωρίζει εκ των προτέρων στοιχεία για το δείγμα, αφού με την επεξεργασία και την μετα-επεξεργασία, εξάγονται όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες.

Η υπερφασματική απεικόνιση είναι μία σχετικά νέα τεχνολογία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάδειξη ιδιαίτερων φασματικών χαρακτηριστικών και δεικτών, που οφείλονται στις διαφορετικές δραστηριότητες του φυτού. Τα φασματόμετρα απεικόνισης αυτού του τύπου, παράγουν ένα πλήρες, συνεχές φάσμα διαπερατότητας του φίλτρου στενής ζώνης, παρέχοντας περισσότερες πληροφορίες, με όσο το δυνατό μικρότερη αναλογία σήματος προς θόρυβο. Ο αισθητήρας θα πρέπει να βρίσκεται σε αρκετή απόσταση από το φυτό (80-100 cm), ώστε να καταγράφεται η ανακλώμενη ακτινοβολία όσο το δυνατόν μεγαλύτερης φυλλικής επιφάνειας, έτσι ώστε να είναι περισσότερο ξεκάθαρος ο διαχωρισμός του φυτού από το φόντο. Για τον ευκολότερο διαχωρισμό του φυτού από το φόντο και για να επηρεάζεται η μέτρηση όσο το δυνατό λιγότερο από τις αντανακλάσεις των γειτονικών περιοχών, συνιστάται η τοποθέτηση λευκού υλικού με μαύρη την πίσω επιφάνειά του, στο πίσω μέρος του φυτού.

Ο συντελεστής ανάκλασης, που επηρεάζεται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ρυθμίζεται με τη λήψη λευκής επιφάνειας σε συνθήκες θερμοκηπίου και ο ακριβής καθορισμός του είναι το κλειδί για τη ραδιομετρική βαθμονόμηση της εικόνας. Περαιτέρω έρευνα απαιτείται για το φασματικό καθαρισμό, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις συναρτήσεις που θα χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση της φασματικής υπογραφής της ανάμεικτης ψηφίδας (φόντο – φυτό).

Με βάση αυτά τα δεδομένα, συμπεραίνεται ότι η υπερφασματική κάμερα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μία αξιόπιστη μέθοδος για τη μέτρηση της θρεπτικής και της υδατικής κατάστασης του φυτού από απόσταση και την εξαγωγή φασματικών

δεικτών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικό επίπεδο για τη διαχείριση της θρέψης.

Τόσο οι υπερφασματικές όσο και οι πολυφασματικές κάμερες, ακολουθούν μία διαδικασία σχηματισμού εικόνας η οποία περιέχει θόρυβο. Η κατανόηση των διαφορετικών πηγών θορύβου σε ένα σύστημα απεικόνισης, μπορεί να αποβεί πολύ χρήσιμη για την αποσφαλμάτωση της μεθόδου. Οι πηγές θορύβου του αισθητήρα απεικόνισης διαχωρίζονται σε χρονικές και χωρικές. Ο χρονικός θόρυβος μπορεί να ελαττωθεί με τη χρήση ενός μέσου όρου εικόνων, ενώ ο χωρικός θόρυβος μπορεί να ελαττωθεί ή να υπολογιστεί με μία σειρά από αξιολογήσεις και βελτιώσεις των ρυθμίσεων της κάμερας σε σταθερές και μη συνθήκες φωτισμού. Ο χωρικός θόρυβος αποτελείται από το θόρυβο λήψης, που προκύπτει από την τυχαία άφιξη των φωτονίων στον ανιχνευτή, το θόρυβο σκοτεινού ρεύματος, που είναι αποτέλεσμα των ατελειών του όγκου του πυριτίου του ανιχνευτή και το θόρυβο μη ομοιόμορφης απόκρισης φωτογραφίας, λόγω διαφορετικής ευαισθησίας των εικονοστοιχείων στο φως (Burns, 1997). Για την απομάκρυνση των διαφόρων τύπων θορύβων, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και φίλτρα (ραδιομετρική βαθμονόμηση). Με τη ραδιομετρική βαθμονόμηση υπολογίζεται εκ νέου η ποιότητα της εικόνας, βελτιώνοντας τις ενδείξεις αντιστάθμισης του φωτός (gain/offset).

Επιπλέον, σε αυτού του τύπου τα οπτικά αισθητήρια όργανα, είναι πολύ σημαντική η σταθερότητα και η ομοιομορφία της ακτινοβολίας του πεδίου στο οποίο πραγματοποιείται η δειγματοληψία, γιατί μπορεί να επηρεάσει την ένταση της ανάκλασης του αντικειμένου. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τη δημιουργία ανομοιόμορφου φωτισμού μέσα σε ένα χώρο. Στην περίπτωση του θερμοκηπίου, η ανομοιομορφία του φωτισμού οφείλεται στις σκιάσεις που προκύπτουν από το σκελετό και τα φυτά, ανάλογα με τις αποστάσεις φύτευσης και το σχήμα του φυτού, αλλά και στην αντανάκλαση των γειτονικών περιοχών, όπως είναι το φόντο και το δάπεδο. Αντίστοιχα, φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να απομακρύνουν το θόρυβο της μη ομοιόμορφης ακτινοβολίας, προκαλώντας γεωμετρική διόρθωση.

Παρά το γεγονός ότι οι αισθητήρες σύγχρονης τεχνολογίας έχουν βελτιωθεί σημαντικά κατά τα τελευταία χρόνια, η μέτρηση της ανάκλασης των διαφόρων καλλιεργειών παραμένει ένα πολύ δύσκολο έργο. Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που σχετίζονται με:

- Τις παραμέτρους του τύπου του αισθητήρα που το διέπει (π.χ. ανίχνευτής σκοτεινού ρεύματος, αισθητήρας θερμοκρασίας, αναγνώριση θορύβου, αριθμός των διαφραγμάτων του φακού, μεταβολή βαθμονόμησης) (Polder et al., 2003).

- Τη μεθοδολογία που ακολουθείται κατά τη διάρκεια της μέτρησης (π.χ. ο τρόπος με το οποίο πραγματοποιήθηκε μία μέτρηση - χειρός ή με υποστήριγμα-, η απόσταση από το στόχο, το πραγματικό μέγεθος και η πυκνότητα της περιοχής του στόχου, η συχνότητα της βαθμονόμησης και η γωνία της θέασης) (Jackson & Huete, 1991; Bastiaanssen et al., 2000; Aparicio et al., 2004).

- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. συνθήκες φωτισμού, το ποσοστό της σκιάς του στόχου) (Polder et al., 2003).

Για βέλτιστη βαθμονόμηση του συστήματος απεικόνισης, ένας πρώτος κύκλος πρέπει να εκτελείται στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας γνωστές πηγές φωτός. Έτσι, η ανταπόκριση του συστήματος σε διαφορετικές φασματικές ζώνες με διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας μπορεί να καταγραφεί και να αναλυθεί, προκειμένου να επιλεγούν οι κατάλληλες ρυθμίσεις της φωτογραφικής μηχανής (η συχνότητα και ο χρόνος έκθεσης του κλείστρου) και να μειωθεί η αναλογία του σήματος ως προς το θόρυβο (ραδιομετρική βαθμονόμηση). Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, τα χαρακτηριστικά του θορύβου της εικόνας καθορίζονται και προσαρμόζεται η αντιστάθμιση (Arngren et al., 2011; Amatya et al., 2012; Brunn et al., 2010; Hu et al., 2012). Επιπλέον, προσαρμόζεται η απόκριση του οργάνου σε ένα πολυώνυμο, με σκοπό να ληφθεί η λειτουργική ανταπόκριση του οργάνου και να αξιολογηθούν τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του. Ο Katsoulas et al. (2014) περιγράφει μια μεθοδολογία βαθμονόμησης για ένα υπερφασματικό σύστημα απεικόνισης που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση κατάλληλων δεικτών ανάκλασης για την ανίχνευση της καταπόνησης των φυτών.

Υπό συνθήκες θερμοκηπίου, η κατανομή της έντασης του φωτός δεν είναι ομοιογενής. Ο φωτισμός που λαμβάνει κάθε εικονοστοιχείο (pixel) εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, τη δομή του θερμοκηπίου, τις γύρω επιφάνειες (φόντο, έδαφος) καθώς και την πυκνότητα και την αρχιτεκτονική τοποθέτηση της καλλιέργειας. Επιπλέον, η ανάκλαση στην κόκκινη περιοχή του φάσματος αναμένεται να είναι χαμηλή το πρωί και να αυξάνεται καθώς ανατέλλει ο ήλιος. Η περιοχή του κοντινού υπέρυθρου (NIR), ωστόσο, δεν επηρεάζεται όσο η κόκκινη περιοχή (R), λόγω του

υψηλού ποσοστού του φωτός που μεταδίδεται μέσα από την καλλιέργεια και αντανakλάται από το σκιασμένο έδαφος (Jackson & Huete, 1991; Aparicio et al., 2004; Eit et al., 2006).

Για να εξασφαλιστεί ένα σταθερό υπόβαθρο και να εξαλειφθεί η επίδραση της σκιάς, μία φασματικά επίπεδη μαύρη επιφάνεια θα μπορούσε να τοποθετηθεί ως φόντο (Mazzetto et al., 2009; Kittas et al., 2014), ενώ η χρήση του τεχνητού φωτισμού θα μπορούσε να συμβάλει στη σταθεροποίηση της κατοπτρικής ανάκλασης και στη βέλτιστη προσομοίωση του φυσικού φωτισμού (Graeff & Clauprein, 2007; Sun et al., 2008; Katsoulas et al., 2014). Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι οι παράμετροι της κάμερας δεν είναι σταθεροί, με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων θα μπορούσαν να εξαλειφθούν περαιτέρω τα λάθη που προέρχονται από διαφορετικές πηγές θορύβου. Οι Kim et al. (2010) αναφέρουν ότι η διαδικασία βαθμονόμησης με σκούρες εικόνες αναφοράς εκτελούνται καλύπτοντας το φακό με ένα σκούρο υλικό, ενώ λευκές εικόνες αναφοράς μπορούν να αποκτηθούν με την τοποθέτηση ενός λευκού υλικού μπροστά από το φακό υπό τον φωτισμό δωματίου. Η σκοτεινή εικόνα που λαμβάνεται αρχικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εργαστηριακή επανάληψη ως εικόνα αναφοράς και εΐθισται να λαμβάνεται υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση των μεταβολών και παραλλαγών του φυσικού φωτισμού από το εξωτερικό περιβάλλον. Έτσι, τόσο οι εικόνες αναφοράς όσο και οι κανονικοποιημένες εικόνες πρέπει να λαμβάνονται υπό τις ίδιες συνθήκες φωτισμού μέσα στο θερμοκήπιο.

### **1.3.3 Μέθοδοι επεξεργασίας υπερφασματικής εικόνας**

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι (μέσω ειδικών αλγορίθμων) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό καταπονήσεων των φυτών σε πραγματικό χρόνο. Οι πιο γνωστές μέθοδοι χρησιμοποιούν Ανελαστικούς αλγορίθμους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε μη Επιβλεπόμενους και σε Επιβλεπόμενους (Schowengerdt, 2007). Οι μέθοδοι αυτοί διαφοροποιούνται ως προς τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ορίων αποφάσεων, όπως για παράδειγμα για το αν μια πληροφορία ανήκει σε κάποια κλάση-κατηγορία ή όχι. Οι απλούστερες

μέθοδοι που χρησιμοποιούν μη Επιβλεπόμενους αλγορίθμους είναι οι ISODATA και k-means. Αυτές οι μέθοδοι δεν απαιτούν προηγούμενη γνώση της πληροφορίας που μελετάται. Χρησιμοποιούν πληροφορίες από τα ίδια τα δεδομένα, για να καθορίσουν φασματικές ομάδες που μεταφράζονται ως κλάσεις. Από την άλλη, η μέθοδος k-means απαιτεί από το χρήστη να καθορίσει επακριβώς το πλήθος των κλάσεων που επιθυμεί, για να ταξινομήσει όλες τις πληροφορίες που μελετώνται. Η διαδικασία που περιλαμβάνει για τον υπολογισμό των κλάσεων είναι η τεχνική των ελάχιστων αποστάσεων (Schowengerdt, 2007). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μη Επιβλεπόμενους αλγορίθμους είναι μεν εύκολες διαδικασίες μαζί με κάποιο βαθμό στατιστικής ακρίβειας, αλλά χρειάζεται να έχει μελετηθεί αρκετά η αναγνωριστική περιοχή (Huang, 1998; Schowengerdt, 2007). Από την άλλη πλευρά στις μεθόδους που χρησιμοποιούν Επιβλεπόμενους αλγορίθμους απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων δειγματοληψίας και πραγματοποιείται ακριβής απόκτηση της πληροφορίας για κάθε φασματική τάξη, χρησιμοποιώντας αντίστοιχα δεδομένα ως δείγμα εκπαίδευσης. Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι που χρησιμοποιούν Επιβλεπόμενους αλγορίθμους συμπεριλαμβάνουν τις: Parallelepiped, Minimum Distance, Maximum Likelihood, Mahalanobis Distance, Binary Encoding και Neural Net (Lugo & Beauchamp, 2004; Schowengerdt, 2007).

Παρακάτω γίνεται λόγος για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επεξεργασία υπερφασματικής εικόνας μέσω διαφορετικών αλγορίθμων. Μελετώνται διαφορετικοί αλγόριθμοι, από τους οποίους προκύπτουν διαφορετικές περιοχές ενδιαφέροντος του φυτού (ROIs), με σκοπό να προσδιοριστεί η τάση μεταβολής της καμπύλης ανάκλασης, λόγω της επίδρασης της θρεπτικής καταπόνησης στα φύλλα.

## **A. Επιβλεπόμενοι Μέθοδοι Επεξεργασίας Εικόνας**

### *- Parallelepiped*

Είναι μια απλή μέθοδος, η οποία κάνει χρήση λίγων υποθέσεων για το χαρακτήρα των κλάσεων που χρησιμοποιούνται. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι όλα τα εικονοστοιχεία στην εικόνα καλύπτουν μια συνεχή περιοχή σε  $n$  διαστάσεις του χώρου.

### *- Minimum Distance*

Βρίσκει την κάθε τιμή του εικονοστοιχείου από το σύνολο σε χώρο  $n$  διαστάσεων, καθώς επίσης κατηγοριοποιεί κάθε εικονοστοιχείο στην κλάση στην οποία βρίσκεται κοντινότερα. Επιπρόσθετα, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να κατηγοριοποιεί όλες τις περιοχές των  $n$  διαστάσεων που προκύπτουν. Επιτρέπει τη χρήση διαγώνιων ορίων (δε δημιουργούνται επικαλύψεις των στοιχείων στις κλάσεις). Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η Minimum Distance υποθέτει ότι η φασματική μεταβλητότητα είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις πράγμα που δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.

- *Maximum Likelihood*

Αυτή η μέθοδος είναι πιο εξελιγμένη, αφού δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιτύχει καλύτερο διαχωρισμό των κλάσεων. Ωστόσο είναι μέθοδος που απαιτεί πολύ καλή τεχνογνωσία και κατάρτιση, έτσι ώστε να περιγράφονται με ακρίβεια οι μέσες τιμές και η δομή της διασποράς των κλάσεων.

## **B. Μη Επιβλεπόμενοι Μέθοδοι Επεξεργασίας Εικόνας**

- *Mahalanobis Distance*

Με τη χρήση αυτής της μεθόδου δημιουργούνται διαγράμματα διασποράς κάθε δείγματος του συνόλου σε λειτουργία χώρου. Παρέχει τρία τμήματα πληροφοριών για τον χρήστη, τη θέση του στοιχείου (διάνυσμα) το σχήμα του στοιχείου (συνδιακύμανση) και τον προσανατολισμό του στοιχείου (κλίση και σημάδι συνδιακύμανσης). Ωστόσο, αυτή η μέθοδος απαιτεί τεχνογνωσία και κατάρτιση του φορέα καθώς και τη δημιουργία και χρήση του πίνακα συνδιασποράς.

- *Binary Encoding*

Με τη χρήση αυτής της μεθόδου δίνονται στο χρήστη αρχεία που καταναλώνουν τη μισή μνήμη από ό,τι τα αρχεία που επεξεργάζονται σε μορφή ASCII και για αυτό το λόγο είναι πιο εύκολη και πιο γρήγορη η επεξεργασία τους. Ωστόσο, είναι μια μέθοδος συμβατή μόνο με MACPC (Evening, 2005).

- *K-means*



Με τη μέθοδο αυτή επιλέγεται η περιοχή ενδιαφέροντος της εικόνας, ορίζοντας από πριν τον αριθμό των επιθυμητών κλάσεων (2, 3, 4 και 6) με την επανάληψη υπολογισμού (iteration) να πραγματοποιείται μια φορά και το όριο αλλαγής να κυμαίνεται στο 5% εξ ορισμού.

- *ISODATA*

Αυτή η μέθοδος ακολουθεί την ίδια διαδικασία επεξεργασίας με τη μέθοδο των K-means ως προς την κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων με τη σημαντική, όμως, διαφορά ότι αρχικά υποθέτει ότι ο αριθμός των κλάσεων είναι γνωστός εκ των προτέρων και αργότερα μπορεί να αλλάξει τον αριθμό των κλάσεων. Με αυτή τη μέθοδο, δεν παρουσιάζεται πόλωση των αρχικών εικονοστοιχείων της εικόνας και αυτή η μέθοδος είναι μη παραμετρική, δηλαδή τα δεδομένα δε χρειάζεται να κατατασσονται διαδοχικά. Είναι πολύ επιτυχημένη στην ανεύρεση των πραγματικών συσπειρώσεων εντός των δεδομένων, εάν βέβαια υπάρχουν αρκετές επαναλήψεις που να το επιτρέπουν. Τέλος, οι διάφορες κλάσεις, οι οποίες σώζονται σε μορφή ISODATA, ενσωματώνονται εύκολα και διαχειρίζονται μαζί με τις φασματικές υπογραφές (με επίβλεψη του χρήστη) (Bakilan, 2006).

Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται διαφορετική μέθοδος, ανάλογα με τις απαιτήσεις και το σκοπό της εκάστοτε έρευνας.

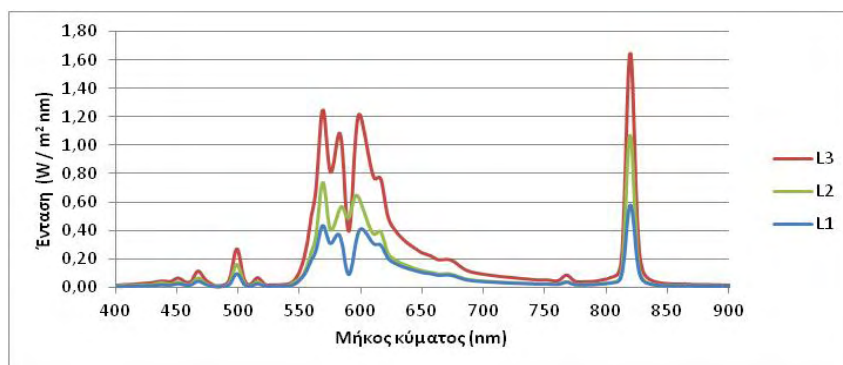
## 1.4 Στόχος εργασίας

Βασικός στόχος της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη δεικτών θρεπτικής καταπόνησης του φυτού, κυρίως σε συγκέντρωση αζώτου, που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση της υδατολίπανσης ως μια καλλιεργητική πρακτική εφαρμογή που επηρεάζεται από το σύνολο των παραγόντων του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται αξιολόγηση υφιστάμενων και νέων δεικτών θρεπτικής καταπόνησης του φυτού που μπορούν να έχουν πρακτική εφαρμογή. Επιπλέον, μελετάται η απόκριση του υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης, που σχετίζεται με τη θρεπτική κατάσταση του φυτού (χλωροφύλλη α, άζωτο).

## 2. Υλικά και Μέθοδοι

### 2.1 Εγκαταστάσεις και καλλιέργεια

Στο πλαίσιο της έρευνας υλοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων και πειραμάτων από τον Απρίλιο μέχρι τον Ιούλιο του 2016, στον κλειστό θάλαμο ανάπτυξης του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, που βρίσκεται στο αγρόκτημα της Σχολής Γεωπονίας του Πανεπιστημίου, στο Βελεστίνο (συντεταγμένες: 39° 44' Β, 22° 79' Α, υψόμετρο 85 m). Ο θάλαμος ανάπτυξης φυτών εμβαδού 28m<sup>2</sup>, με διαστάσεις, 4m πλάτος, 7m μήκος και 3m ύψος, αποτελεί κλειστό περιβάλλον ελεγχόμενων συνθηκών (CO<sub>2</sub>, ακτινοβολία, υγρασία, θερμοκρασία) με ρυθμιζόμενη την ένταση της ακτινοβολίας μέσω λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης (Εικόνα 5). Συνολικά, υπήρχαν εγκατεστημένοι 24 λαμπτήρες νατρίου (600W έκαστος), ικανοί να επιτύχουν τη μέγιστη ισχύ ακτινοβολίας στο επίπεδο των φυτών, ίση με 240W/m<sup>2</sup>. Οι λαμπτήρες ήταν χωρισμένοι σε 4 ομάδες των 6 λαμπτήρων και άναβαν σταδιακά σε τρεις χρονικές φάσεις (L1: 6:00-22:00, L2: 7:00-21:00 και L3: 8:00-20:00) (Διάγραμμα 1), ώστε να προσομοιώνουν την ένταση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για τη βελτίωση του σήματος του φωτός στην περιοχή του στόχου (70x100 cm), προστέθηκαν 4 λαμπτήρες αλογόνου (500 W/λάμπα). Η θερμοκρασία του θαλάμου κυμαινόταν στους 25°C κατά τη διάρκεια της ημέρας και στους 18°C κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ο θάλαμος ήταν προσαρμοσμένος για υδροπονική καλλιέργεια, αποτελούμενος από δύο διπλές σειρές. Για το σκοπό των συγκεκριμένων πειραμάτων, μεταφυτεύτηκε σπορόφυτο τομάτας (*Solanum Lycopersium*), ποικιλίας “Ελπίδα”. Στο θάλαμο χρησιμοποιήθηκε σύστημα στάγδην με ρυθμιζόμενους σταλάκτες. Κάθε σταλάκτης είχε παροχή 2 L/h.



**Διάγραμμα 1.** Περιοχές του φάσματος που εκπέμπουν οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης για τα χρονικά επίπεδα L1: 6:00-22:00, L2: 7:00-21:00 και L3: 8:00-20:00. Οι τιμές της έντασης είναι ανά νανόμετρο μήκους κύματος



**Εικόνα 5.** Θάλαμος ανάπτυξης φυτών ελεγχόμενων συνθηκών

Δύο μεταχειρίσεις έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια του πειράματος: φυτά με ολοκληρωμένη θρεπτική και αρδευτική μεταχείριση (υγιή φυτά) και φυτά που υπέκειντο σε θρεπτική καταπόνηση με μειωμένη δόση αζώτου (φυτά καταπόνησης). Τις έξι πρώτες ημέρες του πειράματος (Ημέρα 1-6), οι δύο μεταχειρίσεις λιπαίνονταν σύμφωνα με το ολοκληρωμένο πρόγραμμα της θρεπτικής λίπανσης. Τις επόμενες οχτώ ημέρες του πειράματος (Ημέρα 7-14), η μία από τις δύο μεταχειρίσεις υπέκειτο σε θρεπτική καταπόνηση, αφού δημιουργήθηκαν θρεπτικά σκευάσματα με τη 1/3 δόση αζώτου και κατέληγαν στα φυτά από διαφορετικές αντλίες και σύστημα

διανομής. Το πείραμα επαναλήφθηκε άλλη μία φορά. Τις δύο πρώτες ημέρες (Ημέρες 1-2) οι δύο μεταχειρίσεις λιπαίνονταν σύμφωνα με το ολοκληρωμένο πρόγραμμα της θρεπτικής λίπανσης. Τις επόμενες πέντε ημέρες (Ημέρες 3-7), η μία από τις δυο μεταχειρίσεις υπέκειτο σε θρεπτική καταπόνηση, αφού κατασκευάστηκαν θρεπτικά σκευάσματα με μηδενική δόση αζώτου και κατέληγαν στα φυτά από διαφορετικές αντλίες και σύστημα διανομής.

Ακολουθούν τα προγράμματα λίπανσης που ακολουθήθηκαν και στις 2 φάσεις του πειράματος (Πίνακας 2 & 3 & 4). Για τις δεξαμενές 1-5 που τοποθετήθηκαν τα λιπάσματα οι συγκεντρώσεις των χημικών σκευασμάτων αντιστοιχούσαν σε 50 λίτρα νερό.

Πίνακας 2. Ολοκληρωμένο πρόγραμμα λίπανσης

PREPARATION OF STOCK SOLUTIONS				Control
Tank	Fertilizer	Chem. Form.	Kg	
4	Calcium nitrate	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3.674	
4	Potassium nitrate	KNO <sub>3</sub>	0.762	
4	Ammonium nitrate	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0.128	
4	Iron chelate	Fe-chelate	0.093	
4	Magnesium nitrate	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.000	
5	Potassium nitrate	KNO <sub>3</sub>	0.528	
5	Magnesium sulphate	MgSO <sub>4</sub>	1.108	
5	Potassium sulphate	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.156	
5	Monopotassium phosphate	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.000	
5	Phosphoric acid	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.865	
5	Micro stock solution (S.S.)		0.500	

Πίνακας 3. Πρόγραμμα λίπανσης με 1/3 δόση Αζώτου

				Low-N
				Treatment
<b>PREPARATION OF STOCK SOLUTIONS</b>				
Tank	Fertilizer	Chem. Form.		Kg
1	Calcium nitrate	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		0.096
1	Potassium nitrate	KNO <sub>3</sub>		0.000
1	Ammonium nitrate	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		0.393
1	Iron chelate	Fe-chelate		0.093
1	Magnesium nitrate	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		0.000
2	Potassium nitrate	KNO <sub>3</sub>		0.000
2	Magnesium sulphate	MgSO <sub>4</sub>		1.108
2	Potassium sulphate	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		3.268
2	Monopotassium phosphate	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>		0.000
2	Phosphoric acid	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		0.865
2	Micro stock solution (S.S.)			0.500
3	Calcium chloride	CaCl <sub>2</sub>		1.838

Πίνακας 4. Πρόγραμμα λίπανσης με μηδενική δόση Αζώτου

PREPARATION OF STOCK SOLUTIONS			
Tank	Fertilizer	Chem. Form.	Kg
1	Calcium nitrate	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.000
1	Potassium nitrate	KNO <sub>3</sub>	0.000
1	Ammonium nitrate	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0.000
1	Iron chelate	Fe-chelate	0.093
1	Magnesium nitrate	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.000
2	Potassium nitrate	KNO <sub>3</sub>	0.000
2	Magnesium sulphate	MgSO <sub>4</sub>	1.108
2	Potassium sulphate	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3.268
2	Monopotassium phosphate	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.000
2	Phosphoric acid	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	2.485
2	Micro stock solution (S.S.)		0.500
3	Calcium chloride	CaCl <sub>2</sub>	1.887

## 2.2 Μετρήσεις

Παρακάτω θα αναλυθούν οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.

- *Μετρητής θερμοκρασίας του αέρα (T, σε °C) και η σχετική υγρασία (RH, σε %) του εσωτερικού του θαλάμου:* Μετρήθηκαν, χρησιμοποιώντας δύο αισθητήρες θερμοκρασίας-υγρασίας (model HD9008TR, DeltaOhm, Italy), οι οποίοι βαθμονομήθηκαν πριν την έναρξη των πειραμάτων και τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2m από το έδαφος. Από τα δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας υπολογίστηκε το έλλειμμα πίεσης υδρατμών (VPD).
- *Μετρητής θερμοκρασίας φύλλου (model OS5551A, Omega Engineering Inc., Manchester, USA):* Η θερμοκρασία του φύλλου (T<sub>f</sub>, σε °C) μετρήθηκε μέσω υπέρυθρων θερμογράφων (Εικόνα 6), οι οποίοι εγκαταστάθηκαν σε απόσταση 0.9 m (Εικόνα 7) και σε σταθερή γωνία 45° από τον κάθετο άξονα των φυτών του μάρτυρα και της καταπόνησης, αντίστοιχα. Τα δεδομένα των αισθητήρων

καταγράφονται κάθε 10min από τον καταγραφέα (Zeno 3200, Coastal Environmental Systems Inc., Seattle).



Εικόνα 6. Θερμογράφος υπέρυθρης ακτινοβολίας (OS550A series Range 2)



Εικόνα 7. Απεικόνιση της περιοχής των φύλλων της κόμης, η οποία μελετάται μέσω της υπερφασματικής κάμερας, έχοντας ως φόντο μαύρη επιφάνεια

• **Μετρητής ροής χυμού** (SF-SP 5 PR). Ο αισθητήρας αυτού του τύπου προσδιορίζει την ταχύτητα του ανοδικού ρεύματος του χυμού μέσα στο βλαστό, μέσω της μεθόδου που έχει αναπτυχθεί από τους Swanson και Whitfield (1981) (Conejero et al., 2007). Οι αλλαγές της κίνησης του υγρού στο εσωτερικό του βλαστού οφείλονται στη μεταβολή της τάσης και τα δεδομένα που προκύπτουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άμεση ανίχνευση της υδατικής καταπόνησης (Fernández et al., 2010). Ο

αισθητήρας τοποθετήθηκε στον τρίτο βλαστό από την κορυφή του φυτού. Η καταγραφή των δεδομένων γινόταν κάθε 10 λεπτά (Εικόνα 8).



**Εικόνα 8.** Μετρητής ροής χυμού του βλαστού

•**Μετρητής χλωροφύλλης CCM-200.** Ο μετρητής CCM-200 (Εικόνα 9) χρησιμοποιεί την απορρόφηση, για να εκτιμήσει το περιεχόμενο χλωροφύλλης στους ιστούς του φύλλου. Δύο μήκη κύματος χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απορρόφησης. Το ένα μήκος κύματος εμπεριέχεται στο εύρος απορρόφησης της χλωροφύλλης, ενώ το άλλο σκοπό έχει να αντισταθμίσει μηχανικές διαφορές, όπως για παράδειγμα το πάχος του ιστού. Ο μετρητής εκτιμάει την απορρόφηση και στα δύο μήκη κύματος και υπολογίζει μια τιμή CCI (Chlorophyll Content Index), η οποία βρίσκεται σε αντιστοιχία με την ποσότητα χλωροφύλλης στο δείγμα. Το απόλυτο περιεχόμενο χλωροφύλλης ανά μονάδα επιφάνειας δεν υπολογίζεται. (CCM-200, Chlorophyll Content Meter. Instructions Booklet, Opti-Sciences, 2003).





Εικόνα 9.Μετρητής δείκτης χλωροφύλλης των φυτών

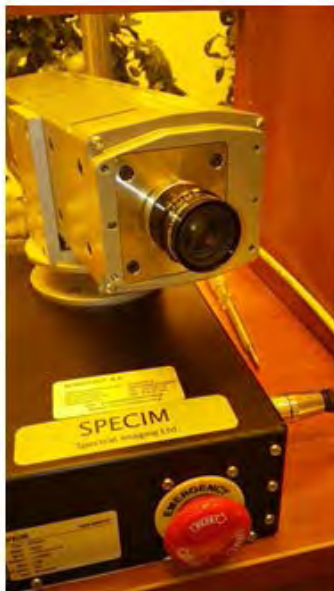
- **Φορητός μετρητής φωτοσύνθεσης:** Είναι συσκευή ανάλυσης που περιλαμβάνει μια πηγή υπέρυθρων, δείγματα κυττάρων και ανιχνευτές που έχουν βελτιστοποιηθεί για την μέτρηση του CO<sub>2</sub> και του H<sub>2</sub>O. Η συσκευή αυτή λειτουργεί με τη μέτρηση της απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η βαθμονόμησή της χρειάζεται ελεγχόμενη πίεση και θερμοκρασία, για να έχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα του CO<sub>2</sub> και του H<sub>2</sub>O κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος (Εικόνα 10).



Εικόνα 10. Φορητός μετρητής φωτοσύνθεσης

- **Υπερφασματική κάμερα (ImspecV10, Spectral Imaging Ltd, Finland).** Η ακτινοβολία που ανακλάται από το φυτό μετρήθηκε μέσω υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης που περιλάμβανε μια υπερφασματική κάμερα (Εικόνα 11), η οποία μετρούσε στην περιοχή VNIR του φάσματος 400-1000 nm και είχε χωρική ανάλυση 1312x1024 εικονοστοιχεία. Η υπερφασματική κάμερα τοποθετήθηκε σε περιστροφικό σύστημα σάρωσης τύπου *pushbroom*, για να παρέχει πλήρη καμπύλη ανάκλασης για κάθε εικονοστοιχείο, ενώ η ταχύτητα και η γωνία σκαναρίσματος ρυθμίστηκαν από το ειδικό λογισμικό spectral DAQ software. Το λογισμικό αυτό ήταν σε θέση να ελέγχει και άλλες παραμέτρους της κάμερας, όπως ήταν η χωρική ανάλυση και ο χρόνος έκθεσης του κλείστρου. Η κάμερα αποτελείται από έναν αισθητήρα τύπου CCD και έναν φακό τύπου C σταθερής εστιακής απόστασης 8mm. Ο υπερφασμα-

τικός αισθητήρας απεικόνισης τοποθετήθηκε σε απόσταση 1m από τον κάθετο άξονα της καλλιέργειας.



**Εικόνα 11.** Απεικόνιση της υπερφασματικής κάμερας Imspen, που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα

Η βαθμονόμηση του υπό εξέταση υπέρυθρου αισθητήρα απεικόνισης πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τα διεθνή πρότυπα, προσαρμοσμένα σε συνθήκες θερμοκηπίου. Μια φασματικά επίπεδη μαύρη επιφάνεια τοποθετήθηκε ως φόντο για να εξασφαλιστεί σταθερό οπτικό πεδίο απαλλαγμένο από τις σκιάσεις των γειτονικών επιφανειών. Η καμπύλη ανάκλασης του φυτού αρχικά εκφράζεται ως digital number (DN-ένταση χρώματος), ενώ στη συνέχεια απαλείφεται ο θόρυβος της συσκευής και η επίδραση της έντασης του φωτός μέσω της εξίσωσης (1)

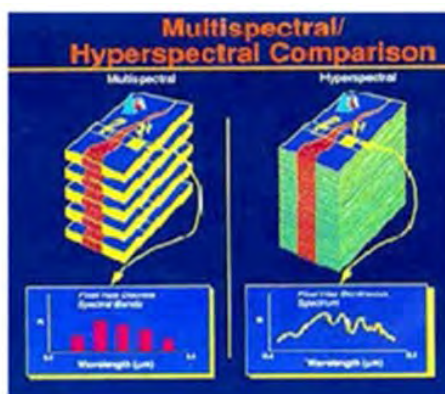
$$r = (R - D) / (W - D) \quad (1)$$

όπου  $r$  η πραγματική τιμή της ανάκλασης του φύλλου,  $R$  η μετρούμενη τιμή ανάκλασης από τον αισθητήρα,  $W$  η τιμή της ανάκλασης λευκής επιφάνειας στην αντίστοιχη τιμή της έντασης φωτός, όταν λαμβάνεται η μέτρηση και  $D$  η τιμή του σκοτεινού ρεύματος που λαμβάνεται καλύπτοντας την κάμερα με μαύρο ύφασμα. Ο συντελεστής ανάκλασης  $r$  παίρνει τιμές από 0-1. Η ανακλώμενη ακτινοβολία του φυτού καταγράφηκε στις 11:00 στις 13:00 και στις 15:00. Για την απαλοιφή

σφαλμάτων, που προκύπτουν από τη συσκευή και το φωτισμό του θαλάμου λήφθηκαν 3 διαφορετικές φωτογραφίες.

## 2.3 Βαθμονόμηση αισθητήρων

Οι αισθητήρες απεικόνισης επηρεάζονται από την πηγή φωτός, τα οπτικά φίλτρα και τους αισθητήρες καταγραφής της πληροφορίας και δίνουν μεγάλα σύνολα δεδομένων, τα οποία απαιτούν νέες μεθόδους επεξεργασίας, συλλέγονται και αναπαριστώνται με τη μορφή ενός κύβου, με χωρική πληροφορία στις διαστάσεις  $x$  και  $y$  και φασματική πληροφορία στη διάσταση  $z$ . Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται η χωρική ανάλυση ενός πολυφασματικού και ενός υπερφασματικού αισθητήρα. Για τον περιορισμό των σφαλμάτων της μέτρησης που προκύπτουν από την επίδραση των παραπάνω παραγόντων, έχουν αναπτυχθεί διάφορα στατιστικά προγράμματα και μέθοδοι.



**Εικόνα 12.** Συγκριτική αναπαράσταση πολυφασματικού και υπερφασματικού κύβου

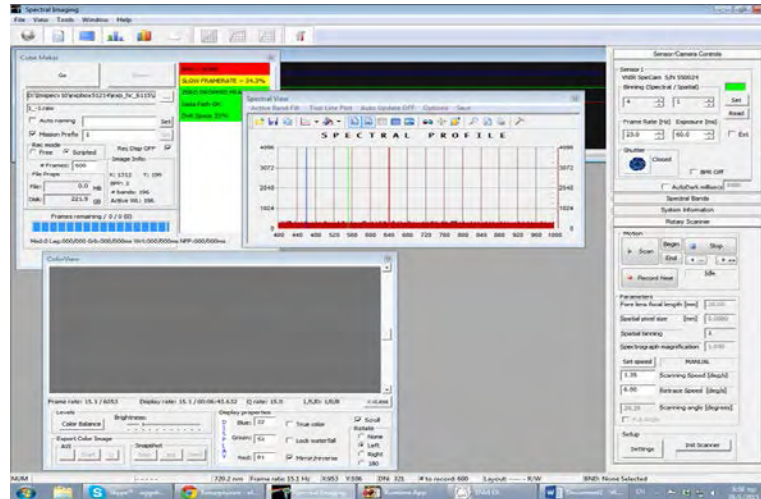
Για τη βαθμονόμηση του υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης χρησιμοποιήθηκε ένας κύκλος διεργασιών που εφαρμόζεται αρχικά σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών και στη συνέχεια στο χώρο της μέτρησης (στη συγκεκριμένη περίπτωση στο χώρο του θερμοκηπίου). Ο πρώτος κύκλος διεργασιών (σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών) πραγματοποιείται μόνο μία φορά κατά την παραλαβή της

κάμερας. Ο δεύτερος κύκλος διεργασιών επαναλήφθηκε στο χώρο στον οποίο επρόκειτο να πραγματοποιηθεί η μέτρηση.

Πρώτος κύκλος διεργασιών: Προσδιορίστηκε ο θόρυβος του σκοτεινού ρεύματος της συσκευής (Εικόνα 13), κλείνοντας τα φώτα και καλύπτοντας το φακό με μαύρο ύφασμα. Παρατηρήθηκε ότι ο θόρυβος του σκοτεινού ρεύματος αυξάνεται όσο το μέγεθος του διαφράγματος μειώνεται και όσο ο χρόνος έκθεσης του κλείστρου αυξάνεται. Τέλος, η θερμοκρασία του αισθητήρα είναι μία άλλη παράμετρος που επηρεάζει την ένταση του θορύβου.

Για τη ραδιομετρική και γεωμετρική βελτίωση της εικόνας, με βάση τις ρυθμίσεις της κάμερας, επιλέχθηκε η σωστή τιμή διαφράγματος, σύμφωνα με την ένταση της ακτινοβολίας. Οι τιμές έκθεσης της φωτεινότητας του κάδρου που θα καθορίσουν την τιμή του διαφράγματος του συγκεκριμένου αισθητήρα, προέκυψαν από μία σειρά εικονογραφήσεων λευκής επιφάνειας γνωστής ανάκλασης, στον κλειστό θάλαμο ρυθμιζόμενων συνθηκών ακτινοβολίας. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε μεταφερόμενο καρότσι παράλληλα με τα φυτά, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να καταγράφεται ο κάθετος άξονας του φυτού. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε περίπου σε 1m απόσταση από το στόχο. Η ένταση του φωτός μέσα στο θάλαμο ρυθμιζόταν ανοιγοκλείνοντας τα τέσσερα επίπεδα λαμπτήρων (4 σκάλες λαμπτήρων), ενώ ο φωτισμός της σκηνης προσδιορίστηκε μέσω του πυρανόμετρου. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι ο θόρυβος του σκοτεινού ρεύματος του αισθητήρα ομαλοποιείται και μειώνεται όσο αυξάνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο χώρο, ενισχύθηκε το σήμα του φωτός, προσθέτοντας τέσσερις λαμπτήρες αλογόνου (500 W/λάμπα) πάνω σε ένα μεταλλικό πλαίσιο (Εικόνα 16). Σε κάθε σκάλα λαμπτήρων, έγινε λήψη φωτογραφιών με διαφορετικές τιμές διαφράγματος σε μονάδες  $f$  (λόγος της εστιακής απόστασης προς τη διάμετρο του φακού):  $f/1.4$ ,  $f/2.1$ ,  $f/2.8$ ,  $f/4.2$ ,  $f/5.6$ ,  $f/8.3$ ,  $f/11$ , λαμβάνοντας φωτογραφίες από τη λευκή επιφάνεια γνωστής ανάκλασης (Εικόνα 15). Όσο πιο μεγάλος ο αριθμός  $f$ , τόσο πιο μικρό το διάφραγμα. Κάθε  $f$  αντιστοιχεί σε διπλασιασμό της ποσότητας του φωτός που περνά από το φακό, από το προηγούμενο διάφραγμα. Η ένταση του χρώματος του υπερφασματικού αισθητήρα κυμαίνεται στα 12 bit ( $2^{12}=4096$  digital numbers – DN). Ο υπερφασματικός αισθητήρας απεικόνισης δίνει την κοντινότερη τιμή έντασης του χρώματος στο πρότυπο λευκό (90%) (Εικόνα 14), όταν η τιμή του διαφράγματος είναι  $f/2.1$ . Σε τιμές διαφράγματος μεγαλύτερες από  $f/2.1$  (όπως η τιμή

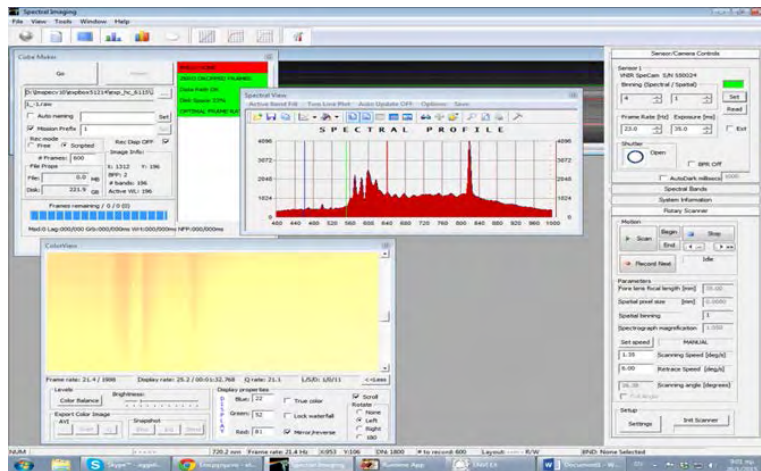
του διαφράγματος f/1.4), ο αισθητήρας δεν μπορεί να ανιληφθεί την απόχρωση του λευκού, χαρακτηρίζοντας την ως απόλυτο λευκό 100%.



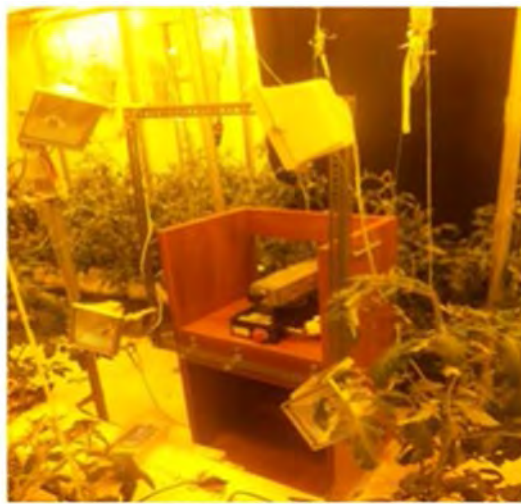
Εικόνα 13. Display προγράμματος DAQ για κλειστό κλείστρο κάμερας



Εικόνα 14. Display προγράμματος DAQ για τον υπολογισμό του λευκού στόχου



Εικόνα 15. Display προγράμματος DAQ για εμφάνιση θορύβου στο λευκό στόχο



Εικόνα 16. Θέση υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης αποτελούμενο από την υπερφασματική κάμερα, το περιστρεφόμενο σύστημα σάρωσης και το πλαίσιο λαμπτήρων αλογόνου, μέσα στο θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών

Στη συνέχεια ρυθμίζεται η ταχύτητα έκθεσης του κλείστρου, λαμβάνοντας υπόψη τις μοίρες του σκαναρίσματος και τη συχνότητα καταγραφής των εικονοστοιχείων, καθώς ο αισθητήρας εφαρμόζει *pushbroom* σύστημα σάρωσης. Μια αλληλουχία δοκιμών έδειξε ότι ο συνδυασμός του χρόνου έκθεσης στα 130 ms με τη συχνότητα στα 500 hz και τις μοίρες του σκαναρίσματος στις 0.16, δίνει καθαρές υπερφασματικές φωτογραφίες με το μικρότερο δυνατό θόρυβο, δεδομένου του σήματος του φωτός εκείνη την χρονική περίοδο. Οι παράμετροι αυτοί δεν είναι σταθεροί και πρέπει να ρυθμίζονται κάθε φορά που η ένταση του φωτός μεταβάλλεται. Ωστόσο, με βάση τις παραπάνω ρυθμίσεις καταγράφηκε η καμπύλη

ανάκλασης λευκής επιφάνειας για διαφορετικές τιμές της έντασης του φωτός στο χώρο του θαλάμου (Εικόνα 17). Από τις καμπύλες αυτές φαίνεται η ένταση ανά περιοχή του φάσματος που εκπέμπει το σήμα φωτός (λαμπτήρες αλογόνου και νατρίου) τη δεδομένη χρονική περίοδο. Προκύπτει ότι οι λαμπτήρες αλογόνου εκπέμπουν έντονα στην περιοχή μεταξύ των 700 και 800 nm και τείνουν να μειώνονται από την αριστερή και δεξιά πλευρά του φάσματος, ως αποτέλεσμα των χαμηλών τιμών του σήματος φωτός στην μπλε και υπέρυθρη περιοχή. Οι λαμπτήρες νατρίου βελτιώνουν το φωτεινό σήμα στην πράσινη και κόκκινη περιοχή του φάσματος, ωστόσο το σήμα παρέμεινε χαμηλό στην μπλε περιοχή.

Σε αυτή τη φάση έχει ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο της βαθμονόμησης του αισθητήρα, ο οποίος είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή της καμπύλης ανάκλασης των φυτών. Το επόμενο στάδιο της βαθμονόμησης (δεύτερος κύκλος διεργασιών) πραγματοποιείται στο σημείο της μέτρησης.

*Δεύτερος κύκλος διεργασιών:* Στο δεύτερο κύκλο διεργασιών γίνεται λήψη της ανάκλασης του λευκού προτύπου σε συνθήκες έντασης της ακτινοβολίας στο χώρο της μέτρησης για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του αισθητήρα απεικόνισης (συνήθως ταχύτητα ανοίγματος κλείστρου του αισθητήρα). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται λήψη σκοτεινού ρεύματος, καλύπτοντας τον αισθητήρα με μαύρο ύφασμα, για να προσδιοριστεί ο αντίστοιχος θόρυβος σκοτεινού ρεύματος. Η λήψη λευκού πρέπει να επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, ανάλογα με τη διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, στο σημείο που πραγματοποιείται η εικονογράφιση. Όμοια με τον πρώτο κύκλο διεργασιών, η χρήση εξωτερικής τεχνητής πηγής φωτός, για το σταθερό φωτισμό του στόχου κατά τη διάρκεια λήψης της μέτρησης και η τοποθέτηση μαύρου φόντου συντελούν στην ομοιομορφία των συνθηκών κατά τη διάρκεια τη λήψης.



**Εικόνα 17.** Απεικόνιση του εσωτερικού του θαλάμου ανάπτυξης φυτών σε προσπάθεια καταγραφής λευκού στόχου με τη χρήση της υπερφασματικής κάμερας

Από το συγκεκριμένο αισθητήρα απεικόνισης προκύπτουν .raw αρχεία, τα οποία μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερη τονική και χρωματική πληροφορία απ' ό,τι τα .jpg αρχεία, καθώς δεν υπόκεινται σε διαδικασία συμπίεσης, ενώ η επεξεργασία των εικόνων υφίσταται από εξειδικευμένα λογισμικά και όχι από την ίδια την κάμερα. Ο διαχωρισμός του φυτού από το φόντο γίνεται με την εντολή `kmeans` στο περιβάλλον του ENVI (by Exelis®). Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται ευρέως, επειδή τείνει πολύ γρήγορα σε κάποιο όριο, ωστόσο η ποιότητα της τελικής λύσης εξαρτάται πολύ από το αρχικό σύνολο των ομάδων.



### 3. Αποτελέσματα

Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου ανάπτυξης κατά την περίοδο των μετρήσεων ήταν 19°C κατά τη διάρκεια της νύχτας και 26°C κατά τη διάρκεια της ημέρας με μικρές διακυμάνσεις γύρω από αυτές τις τιμές. Επιπλέον, οι μέσες τιμές της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας ήταν 85% και 65% κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

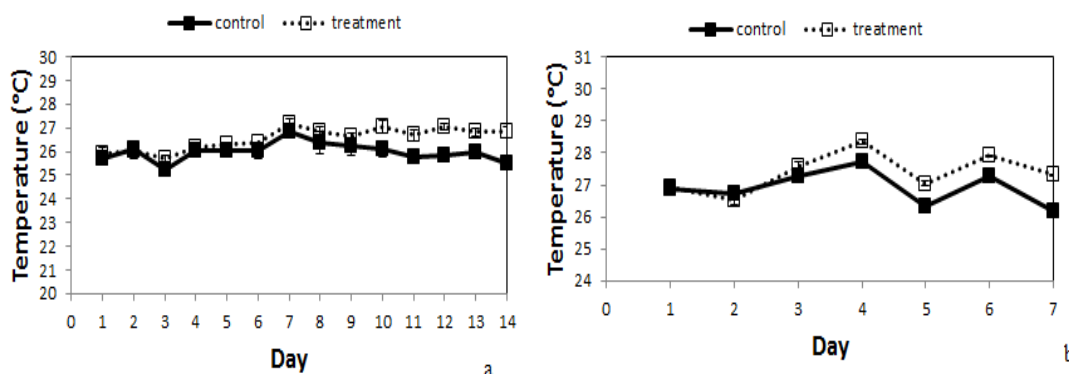
#### 3.1 Εξέλιξη της φυσιολογίας του φυτού λόγω θρεπτικής καταπόνησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ορισμένων παραμέτρων της φυσιολογίας της καλλιέργειας τις ημέρες του πειράματος, όπως είναι η θερμοκρασία, η ροή χυμού, η συγκέντρωση της χλωροφύλλης και η στοματική αγωγιμότητα των φυτών ανάλογα με τη μεταχείριση.

##### - *Θερμοκρασία φύλλου*

Στο Διάγραμμα 2a-b παρατηρείται η εξελικτική πορεία της θερμοκρασίας των φύλλων των δύο μεταχειρίσεων της πρώτης και δεύτερης επανάληψης, αντίστοιχα. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία της καλλιέργειας κυμαίνεται μεταξύ 25°C και 27.5°C κατά τη διάρκεια της πρώτης επανάληψης και μεταξύ 26°C και 29.5°C κατά τη διάρκεια της δεύτερης επανάληψης. Σύμφωνα με τα δεδομένα, η θερμοκρασία των καταπονημένων φυτών αυξήθηκε στατιστικά σημαντικά ( $p < 0.05$ ) από τη θερμοκρασία των υγιών φυτών τη δέκατη ημέρα του πειράματος της πρώτης επανάληψης (δηλαδή τέσσερις ημέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου). Η διαφορά της μέσης τιμής της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων εκείνη την ημέρα ήταν 1°C. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας των καταπονημένων φυτών παρέμειναν υψηλές τις επόμενες ημέρες της εφαρμογής της μειωμένης δόσης αζώτου (Ημέρες 11-14), με τις τιμές να κυμαίνονται στους 26.5°C

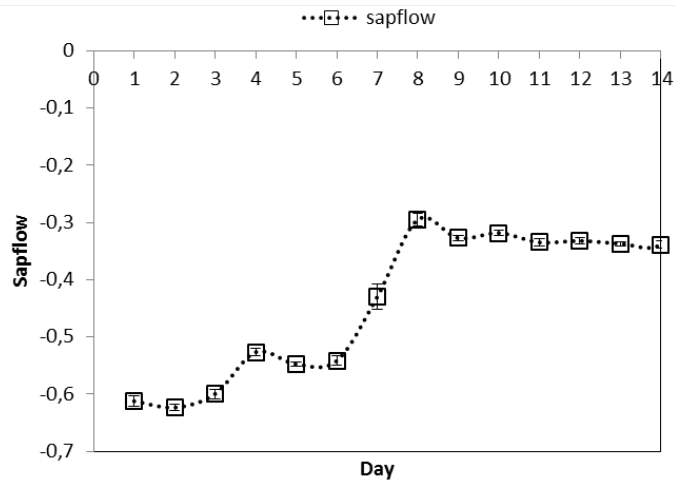
με 27,5°C. Στη δεύτερη επανάληψη του πειράματος, η θερμοκρασία των καταπονημένων φυτών αυξήθηκε ( $p < 0.05$ ) τη τέταρτη ημέρα, μετά την εφαρμογή της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 4), με την τιμή της θερμοκρασίας να αυξάνεται από 27,3 σε 28,3°C (10%). Η θερμοκρασία των καταπονημένων φυτών παρέμεινε υψηλή τις επόμενες ημέρες του πειράματος.



**Διάγραμμα 2a-b.** Μέση ημερήσια εξέλιξη της θερμοκρασίας των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών τις ημέρες των μετρήσεων α) της πρώτης επανάληψης (Ημέρες 1-6: κανονική δόση N, Ημέρες 7-14: 1/3 δόση αζώτου) και β) της δεύτερης επανάληψης (Ημέρες 1-2: κανονική δόση N, Ημέρες 3-7: 0 δόση αζώτου). Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής. Σταθερή γραμμή: μάρτυρας, διακεκομμένη γραμμή: μεταχείριση

#### - Ρυθμός ροής φυτού

Στο Διάγραμμα 3 παρατηρείται ο ρυθμός ανοδικής ροής του χυμού των θρεπτικών στοιχείων του φυτού. Σύμφωνα με τα δεδομένα, διαπιστώνεται ότι ο ρυθμός ροής χυμού κυμαίνεται από -0,6 έως -0,5 τις ημέρες πλήρους κανονικής θρέψης των φυτών (Ημέρες 1-6). Όσο η θρεπτική καταπόνηση εξελίσσεται (Ημέρα 7), ο ρυθμός ροής χυμού των φυτών μειώνεται στο -0,3 και παραμένει σταθερός τις επόμενες ημέρες. Δεν παρουσιάζονται δεδομένα ροής χυμού της δεύτερης επανάληψης, λόγω βλάβης του αισθητήρα.

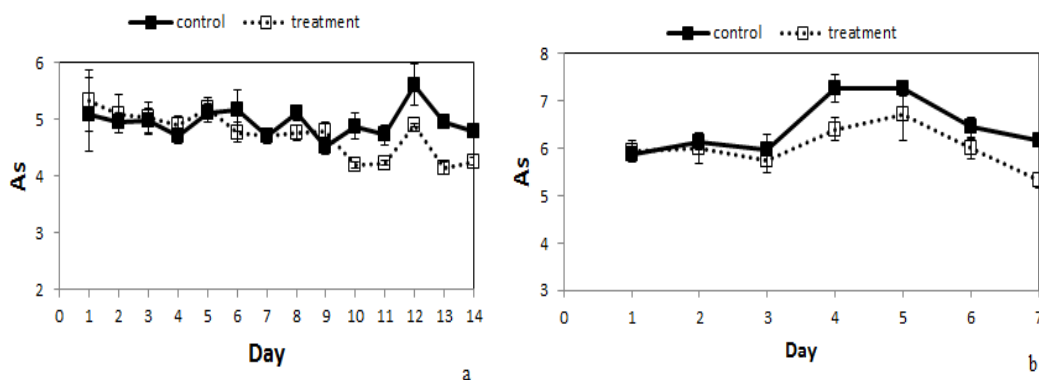


**Διάγραμμα 3.** Μέση ημερήσια εξέλιξη της ροής των θρεπτικών στοιχείων του φυτού σε υγιή και θρεπτικά καταπονημένα φυτά τις ημέρες των μετρήσεων (Ημέρες 1-6 : κανονική δόση N, Ημέρες 7-14: 1/3 δόση αζώτου). Διακεκομμένη γραμμή: φυτά θρεπτικής καταπόνησης. Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής

- *Ρυθμός φωτοσύνθεσης*

Στο Διάγραμμα 4a-b παρατηρείται ο ρυθμός μεταβολής της φωτοσύνθεσης ( $A_s$ ,  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος της πρώτης (Διάγραμμα 4a) και της δεύτερης επανάληψης (Διάγραμμα 4b). Στο Διάγραμμα 4a, παρατηρείται ότι ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των υγιών φυτών κυμαινόταν από 4,9 μέχρι 5,6  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  όλες τις ημέρες του πειράματος (1<sup>η</sup> Επανάληψη, Ημέρες 1-14). Οι  $A_s$  τιμές των θρεπτικά καταπονημένων φυτών μειώθηκαν σταδιακά από την τέταρτη ημέρα εφαρμογής της μειωμένης λίπανσης (Ημέρα 10). Η διαφορά μεταξύ των τιμών των δύο μεταχειρίσεων ήταν 0,71 μονάδες (6,9%) εκείνη την ημέρα. Ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης παρέμεινε χαμηλός για τις επόμενες ημέρες του πειράματος (4,1- 5,3  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ). Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα 4b παρατηρείται ότι ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης των υγιών φυτών ( $A_s$ ,  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) κυμαινόταν από 5,87 μέχρι 7,25  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  όλες τις ημέρες του πειράματος (2<sup>η</sup> Επανάληψη, Ημέρες 1-7). Οι  $A_s$  τιμές των θρεπτικά καταπονημένων φυτών μειώθηκαν σταδιακά ( $p < 0.05$ ) τη δεύτερη ημέρα εφαρμογής της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 4), με τη διαφορά τους να φτάνει στο 7%. Οι τιμές του ρυθμού της

φωτοσύνθεσης παρέμειναν χαμηλότερες από τις τιμές των υγιών φυτών, για τις επόμενες ημέρες (4,5 - 5,25  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ).



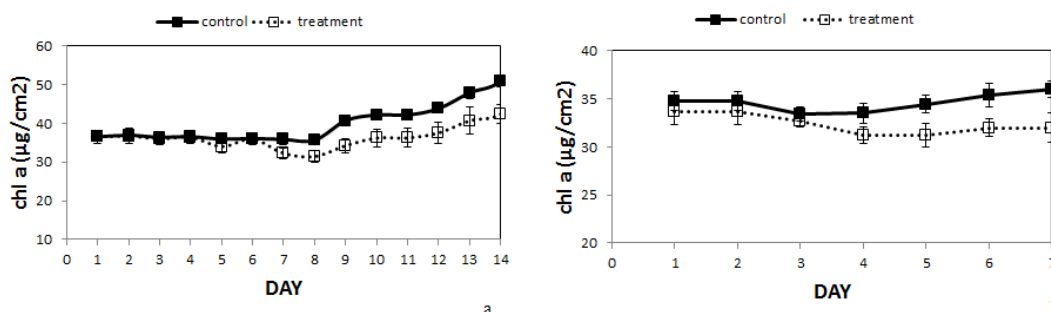
**Διάγραμμα 4a-b.** Μέση ημερήσια εξέλιξη του ρυθμού της φωτοσύνθεσης του φυτού σε υγιή και θρεπτικά καταπονημένα φυτά τις ημέρες των μετρήσεων a) της πρώτης επανάλιψης (Ημέρες 1-6: κανονική δόση N, Ημέρες 7-14: 1/3 δόση αζώτου) και b) της δεύτερης επανάλιψης (Ημέρες 1-2: κανονική δόση N, Ημέρες 3-7: 0 δόση αζώτου). Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής. Σταθερή γραμμή: μάρτυρας, διακεκομμένη γραμμή: μεταχείριση

- Συγκέντρωση της χλωροφύλλης των φυτών

Στο Διάγραμμα 5a παρατηρείται η εξέλιξη της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (Chl a,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) των φυτών των μεταχειρίσεων της πρώτης επανάλιψης. Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης έχει αυξητική τάση στα υγιή φυτά, καθώς αυξάνεται από 36,6  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (Ημέρα 1) σε 51  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (Ημέρα 14). Από την άλλη πλευρά, η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στα καταπονημένα φυτά τείνει να αυξάνεται, αλλά με μικρότερο ρυθμό. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 5a, η τιμή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των φυτών που βρίσκονται σε θρεπτική καταπόνηση, παρουσίασε μείωση την Ημέρα 10 του πειράματος (τέσσερις μέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου). Η μεταβολή αυτή είναι στατιστικά σημαντική ( $p < 0.05$ ) και ίση με 6,5%. Οι τιμές της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης παρέμειναν σταθερές αλλά χαμηλές τις επόμενες ημέρες εφαρμογής της μειωμένης δόσης αζώτου.

Στο Διάγραμμα 5b παρατηρείται η εξέλιξη της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των φυτών των δύο μεταχειρίσεων της δεύτερης επανάλιψης. Τις πρώτες δύο ημέρες

του πειράματος (2<sup>η</sup> Επανάληψη, Ημέρες 1-2), όταν τα φυτά και των δύο μεταχειρίσεων αρδεύονται με κανονική δόση αζώτου, δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή στις τιμές της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης. Όσο τα φυτά αρδεύονται με κανονική δόση αζώτου, οι Chl-a τιμές δεν παρατηρούν αυξητική τάση και κυμαίνονται από 33,5-34  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Η τιμή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των φυτών τείνει να μειώνεται δύο ημέρες μετά τη μείωση του αζώτου (Ημέρα 4). Η μεταβολή αυτή είναι στατιστικά σημαντική ( $p < 0.05\%$ ) και ίση με 7,2%. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των τιμών του μάρτυρα και της μεταχείρισης σημειώθηκε την Ημέρα 5, με τη διαφορά τους να φτάνει το 34%.

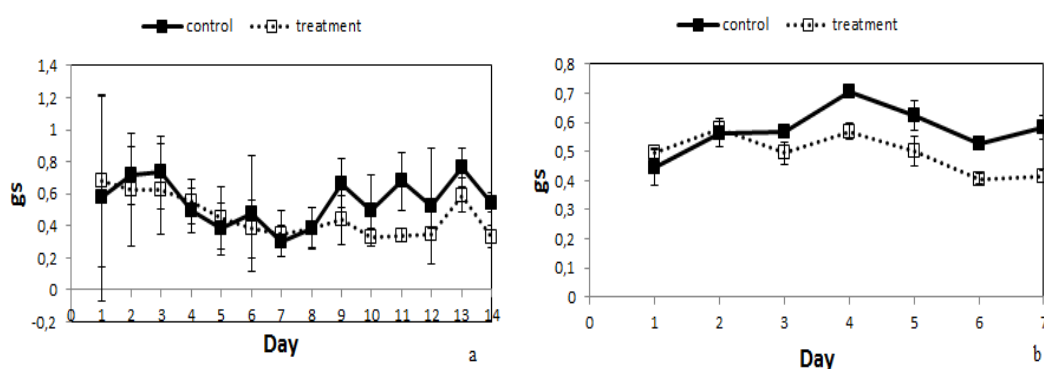


**Διάγραμμα 5a-b.** Μέση ημερήσια εξέλιξη της χλωροφύλλης ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) του φυτού σε υγιή και θρεπτικά καταπονημένα φυτά τις ημέρες των μετρήσεων a) της πρώτης επανάληψης (Ημέρες 1-6: κανονική δόση N, Ημέρες 7-14: 1/3 δόση αζώτου) και b) δεύτερης επανάληψης (Ημέρες 1-2 : κανονική δόση N, Ημέρες 3 -7: 0 δόση αζώτου). Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής. Σταθερή γραμμή: μάρτυρας, διακεκομμένη γραμμή: μεταχείριση

#### - Στοματική αγωγιμότητα

Στο Διάγραμμα 6a παρατηρείται η εξέλιξη της στοματικής αγωγιμότητας ( $\text{gs}$ ,  $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) των φυτών των δύο μεταχειρίσεων (υγιών και καταπονημένων φυτών) της πρώτης επανάληψης. Οι μετρήσεις της στοματικής αγωγιμότητας των υγιών φυτών κυμαίνεται από 0,3 έως 0,8  $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Οι  $\text{gs}$  μετρήσεις των καταπονημένων φυτών παρουσιάζουν μείωση την Ημέρα 9 (Διάγραμμα 6a). Η διαφορά μεταξύ των τιμών των δύο μεταχειρίσεων ήταν στατιστικά σημαντική ( $p < 0.005$ ) και ίση με 23% εκείνη την ημέρα. Οι τιμές των καταπονημένων φυτών παρέμειναν χαμηλές τις επόμενες ημέρες (Ημέρες 10-14) (ρυθμός μείωσης 30% ).

Στο Διάγραμμα 6b παρατηρείται η εξέλιξη της στοματικής αγωγιμότητας των φυτών των μεταχειρίσεων της δεύτερης επανάληψης. Η τιμή των υγιών φυτών κυμαίνεται από 0,44-0,69  $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$  όλες τις ημέρες του πειράματος. Η τιμή της στοματικής αγωγιμότητας των θρεπτικά καταπονημένων φυτών παρουσίασε μείωση από την πρώτη ημέρα εφαρμογής της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 3). Η διαφορά μεταξύ των τιμών των δύο μεταχειρίσεων ήταν στατιστικά σημαντική ( $p < 0.005$ ) και ίση με 7% εκείνη την ημέρα. Οι τιμές των καταπονημένων φυτών παρέμειναν χαμηλές τις επόμενες ημέρες (Ημέρες 4-7) (ρυθμός μείωσης 27%).



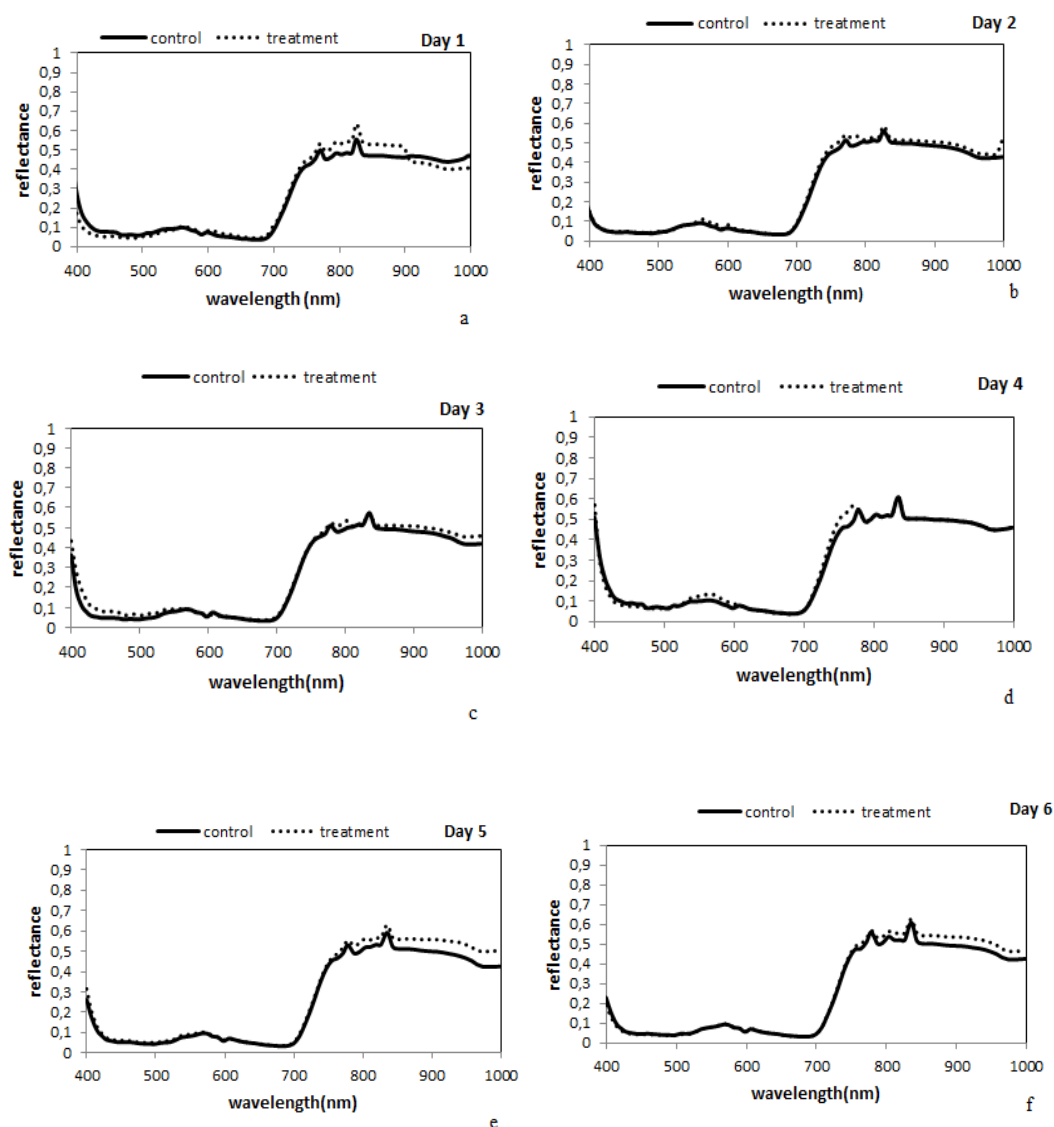
**Διάγραμμα 6a-b.** Μέση ημερήσια εξέλιξη της στοματικής αγωγιμότητας του φυτού σε υγιή και θρεπτικά καταπονημένα φυτά τις ημέρες των μετρήσεων a) της πρώτης επανάληψης (Ημέρες 1-6: κανονική δόση N, Ημέρες 7-14: 1/3 δόση αζώτου) και b) της δεύτερης επανάληψης μαζί με τα τυπικά σφάλματα (Ημέρες 1-2: κανονική δόση N, Ημέρες 3 -7: 0 δόση αζώτου). Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής. Σταθερή γραμμή: μάρτυρας, διακεκομμένη γραμμή: μεταχείριση

### 3.2 Εξέλιξη καμπυλών ανάκλασης της καλλιέργειας μέσω θρεπτικής καταπόνησης

Το Διάγραμμα 7a-f αναπαριστά την εξέλιξη του συντελεστή ανάκλασης των υγιών και καταπονημένων φυτών τις έξι πρώτες μέρες του πειράματος (Ημέρες 1-6). Το δεδομένο χρονικό διάστημα τα φυτά και των δύο μεταχειρίσεων ακολούθησαν ολοκληρωμένο πρόγραμμα λίπανσης αζώτου. Την Ημέρα 7 (Διάγραμμα 8a-h) του πειράματος, η δόση του αζώτου μειώθηκε στο 1/3 για τα φυτά της μεταχείρισης.

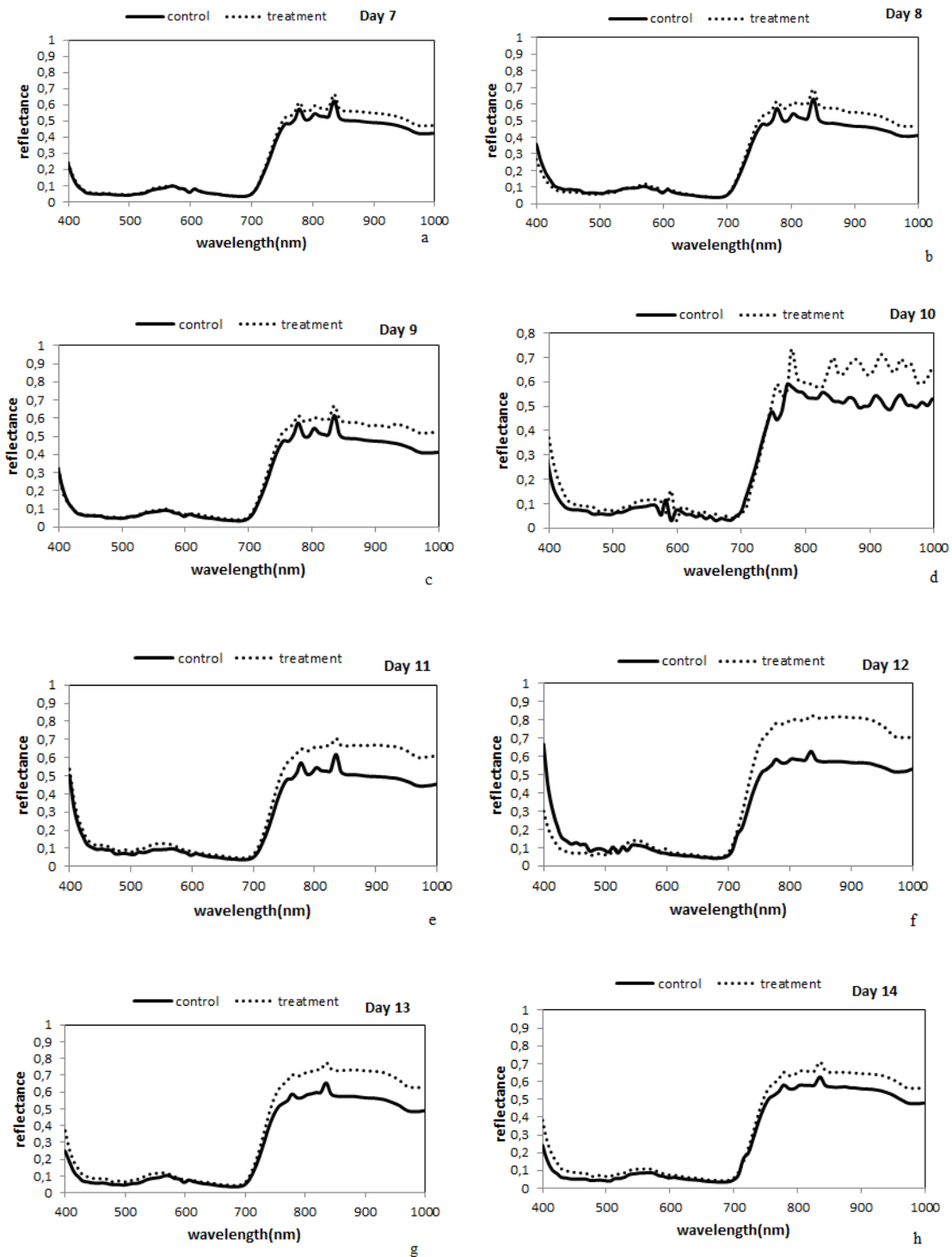
Τις πρώτες έξι ημέρες (Διάγραμμα 7a-f) από το πρώτο πείραμα, καμία μεταβολή μεταξύ των δεδομένων των δύο μεταχειρίσεων δεν παρατηρήθηκε. Καμία μεταβολή

της καμπύλης ανάκλασης των δύο μεταχειρίσεων δεν παρατηρήθηκε τις πρώτες ημέρες του πειράματος, όταν τα φυτά αρδεύονταν με κανονική δόση αζώτου. Στα παρακάτω γραφήματα, παρατηρήθηκε ότι και στις δύο σειρές δεν παρατηρείται καμία μεταβολή μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων. Μικρές τυχόν αποκλίσεις που παρατηρούνται κυρίως στην NIR περιοχή του φάσματος δεν είναι στατιστικά σημαντικές ( $p < 0.05$ ) και δε λαμβάνονται υπόψη.



**Διάγραμμα 7a-f.** Εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος. Ημέρες 1-6: κανονική δόση N. Συνεχής γραμμή: υγιή φυτά, διακεκομμένη γραμμή: θρεπτικά καταπονημένα φυτά

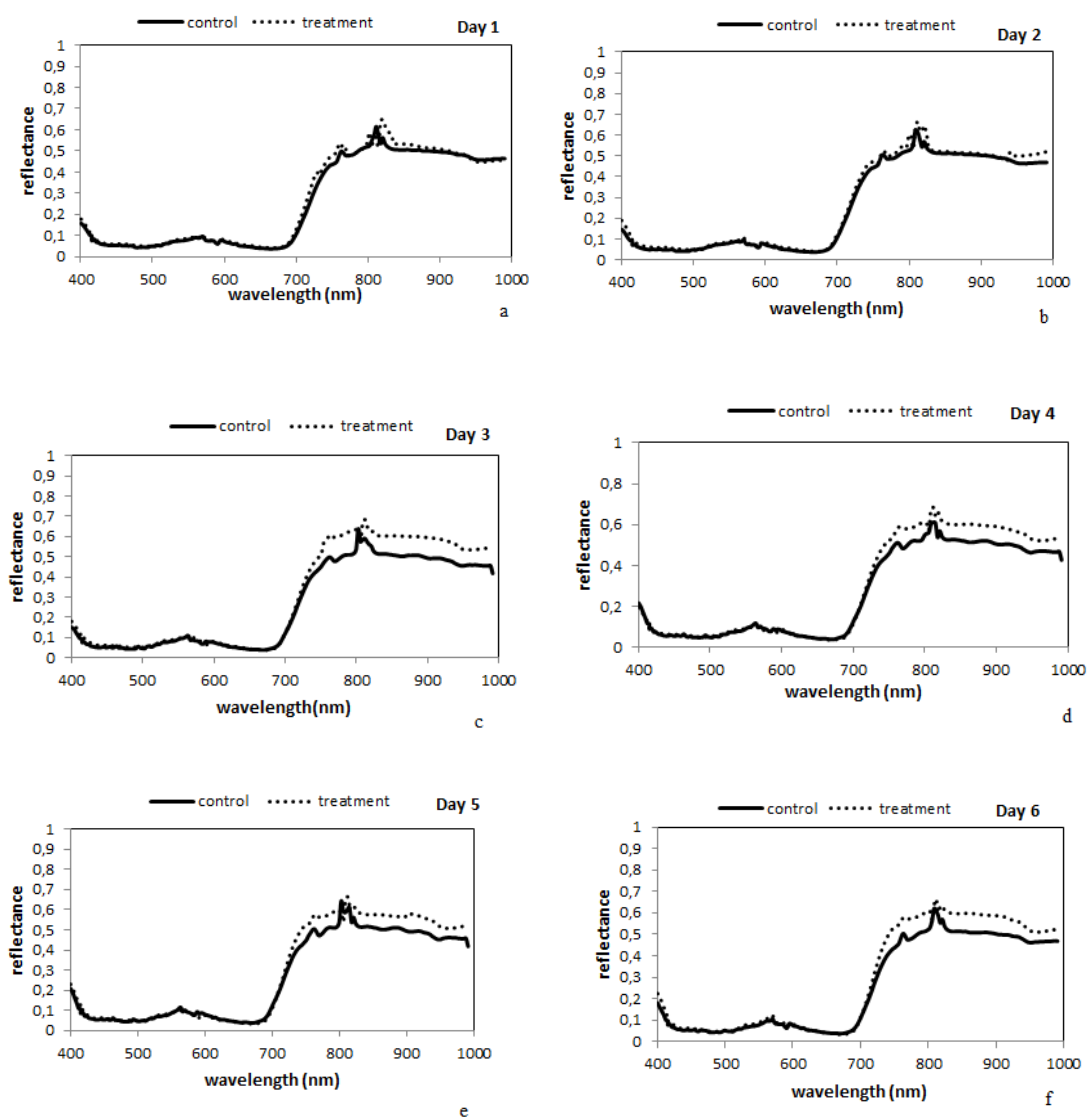
Το Διάγραμμα 8a-h αναπαριστά την εξέλιξη του συντελεστή ανάκλασης των υγιών και καταπονημένων φυτών τις ημέρες εφαρμογής της μειωμένης δόσης αζώτου (1/3N) τις ημέρες του πειράματος της πρώτης επανάληψης (Ημέρες 7-14). Η καμπύλη ανάκλασης των καταπονημένων φυτών τείνει να αυξάνεται την ένατη ημέρα (τρεις ημέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου).

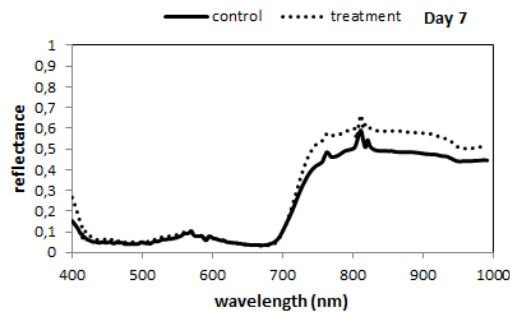




**Διάγραμμα 8a-h.** Εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος. Ημέρες 7-14: 1/3 δόση N. Συνεχής γραμμή: υγιή φυτά, διακεκομμένη γραμμή: θρεπτικά καταπονημένα φυτά

Στο Διάγραμμα 9a-g παρουσιάζονται οι καμπύλες ανάκλασης των δύο μεταχειρίσεων τις ημέρες του πειράματος κατά τη διάρκεια της δεύτερη επανάληψης. Τις πρώτες ημέρες (Ημέρες 1-2) δεν παρατηρήθηκε μεταβολή της καμπύλης ανάκλασης μεταξύ των φυτών των δύο μεταχειρίσεων, καθώς αρδεύονταν με κανονική δόση αζώτου (Διάγραμμα 9a-b). Η καμπύλη ανάκλασης των καταπονημένων φυτών τείνει να αυξάνεται ( $p < 0.05$ ) από την πρώτη ημέρα εφαρμογής της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 3), κυρίως στη NIR περιοχή.



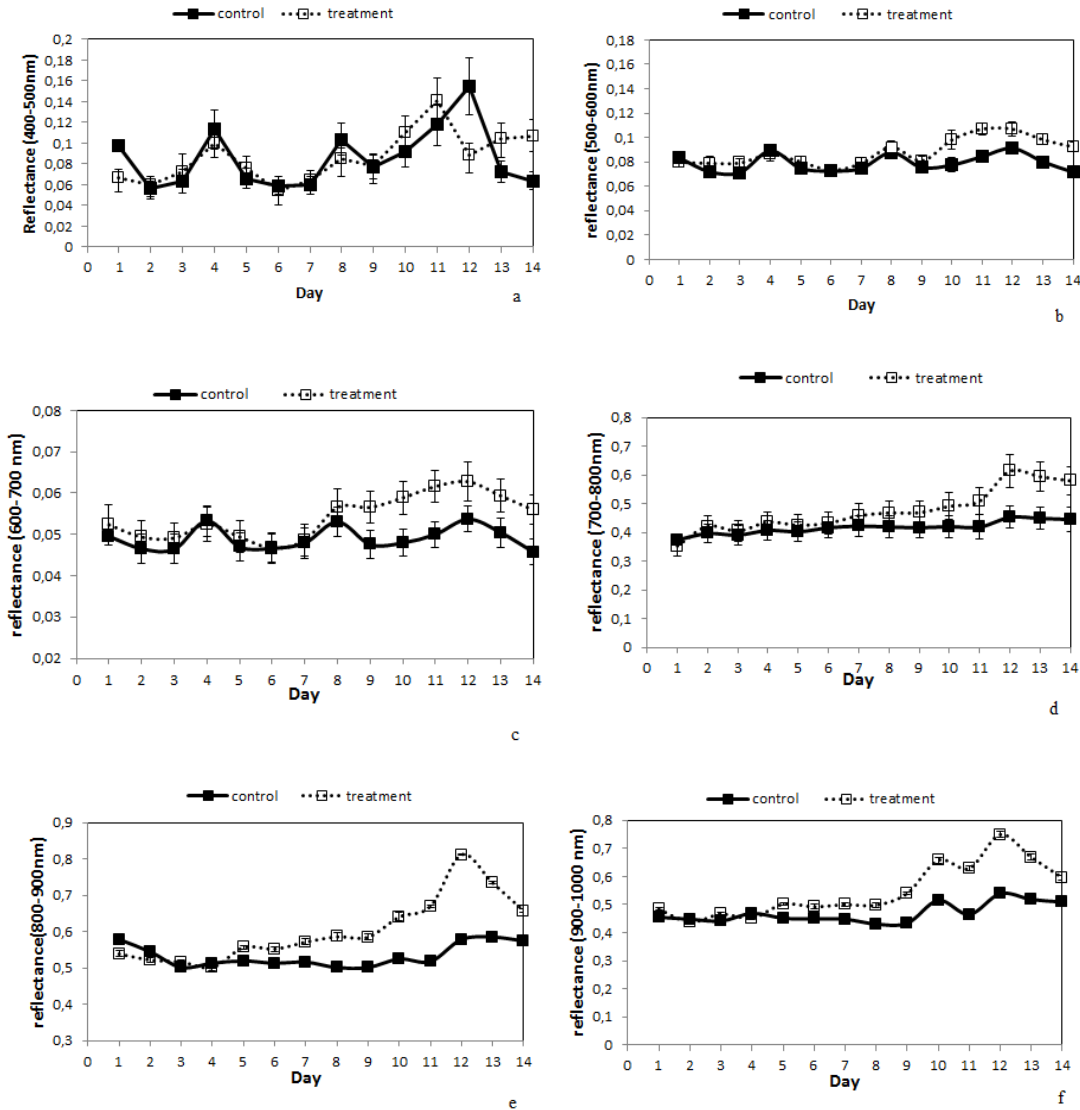


g

**Διάγραμμα 9a-g.** Εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών της δεύτερης επανάληψης. Ημέρες 1-2: κανονική δόση N και Ημέρες 3-7: μηδενική δόση N. Συνεχής γραμμή: υγιή φυτά, διακεκομμένη γραμμή: θρεπτικά καταπονημένα φυτά

### - Μέσοι όροι του συντελεστή ανάκλασης

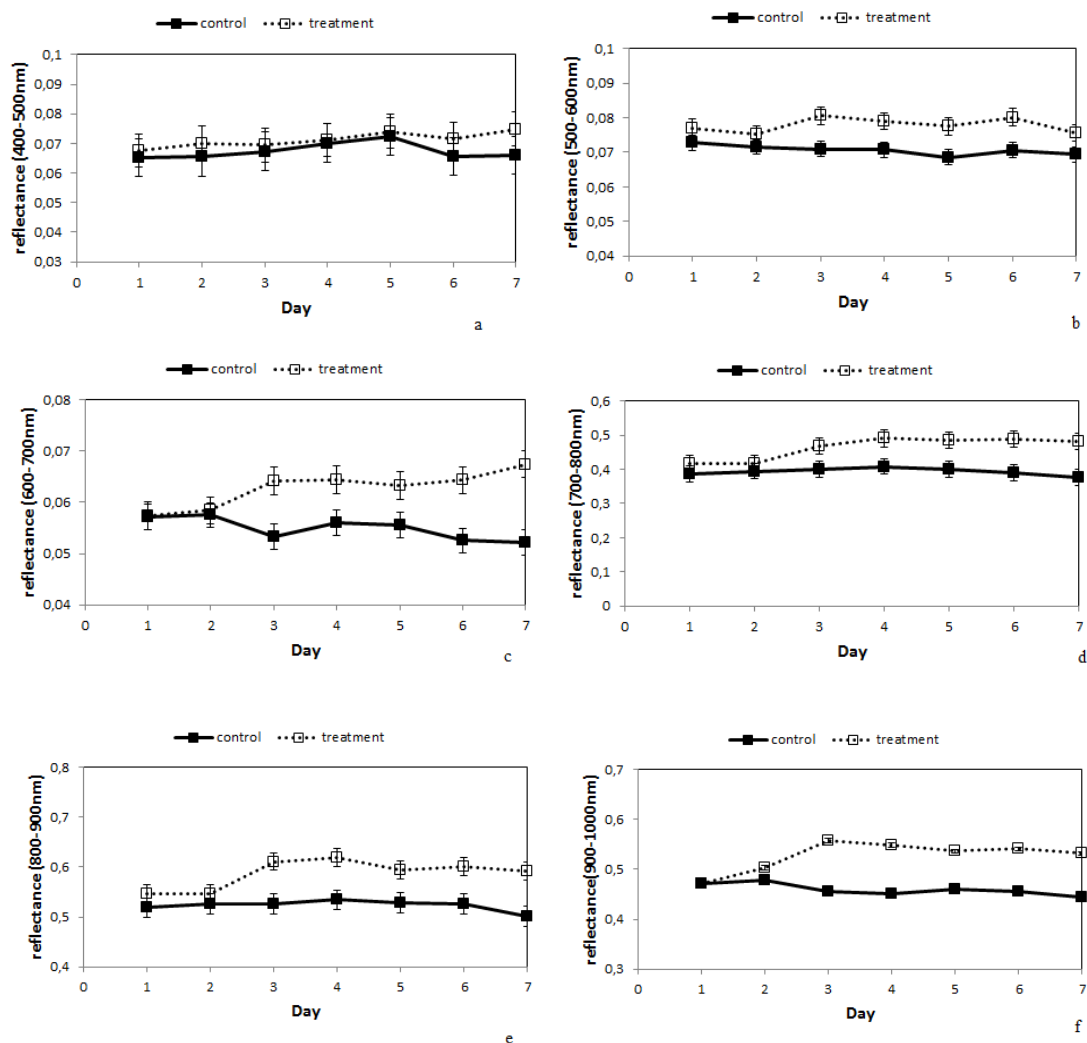
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των τιμών της ανάκλασης των φυτών μεταξύ 400-500 nm, 500-600 nm, 600-700 nm, 700-800 nm, 800-900 nm και 900-1000 nm (Διάγραμμα 10a-f) των δύο μεταχειρίσεων όλες τις ημέρες του πειράματος της πρώτης επανάληψης (Ημέρες 1-14). Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 10 a-f μελετάται η μέση τιμή της μεταβολής της καμπύλης ανάκλασης των δύο μεταχειρίσεων, στην ορατή (400-500 nm, 500-600 nm) (Διάγραμμα 10 a-b), στην κόκκινη (600-700 nm) (Διάγραμμα 10c) και υπέρυθη περιοχή του φάσματος (700-800 nm, 800-900 nm, 900-1000 nm) (Διάγραμμα 10 d-f). Η διαφορά του συντελεστή ανάκλασης μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων στις περιοχές 700-800 nm, 800-900 nm, 900-1000 nm την όγδοη ημέρα ήταν ίση με 5,2%, 8,3% και 11,5% αντίστοιχα, με το συντελεστή ανάκλασης να αυξάνεται. Στην ορατή περιοχή του φάσματος μεταξύ 500 και 600 nm, η διαφορά του συντελεστή ανάκλασης μεταξύ των μεταχειρίσεων την Ημέρα 10 ήταν στατιστικά σημαντική ( $p < 0,05$ ) με ποσοστό ίσο με 5% (καθώς οι τιμές αυξήθηκαν από 0,077 σε 0,098). Ο συντελεστής ανάκλασης των καταπονημένων φυτών παρέμεινε στατιστικά σημαντικά αυξημένος τις επόμενες ημέρες της πειραματικής διαδικασίας. Από την άλλη, ο συντελεστής ανάκλασης στην περιοχή του φάσματος μεταξύ των 400 και 500 nm, δεν έδειξε κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων, όλες τις ημέρες του πειράματος.



**Διάγραμμα 10a-f.** Εξέλιξη της μέσης ημερήσιας τιμής του φάσματος μεταξύ (a) 400-500 nm, (b) 500-600 nm, (c) 600-700 nm, (d) 700-800 nm, (e) 800-900 nm και (f) 900-1000 των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-6 κανονική δόση N, Ημέρες 7-14: 1/3 δόση αζώτου). Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής. Σταθερή γραμμή: μάρτυρας, διακεκομμένη γραμμή: μεταχείριση

Στο Διάγραμμα 11a-f, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των τιμών της ανάκλασης των φυτών μεταξύ 400-500 nm, 500-600 nm, 600-700 nm, 700-800 nm, 800-900 nm και 900-1000 nm των δύο μεταχειρίσεων όλες τις ημέρες του πειράματος της δεύτερης επανάληψης (Ημέρες 1-14). Πιο συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 11 a-f μελετάται η μέση τιμή της μεταβολής της καμπύλης ανάκλασης των δύο μεταχειρίσεων, στην ορατή (400-500 nm, 500-600 nm) (Διάγραμμα 11a-b), στην κόκκινη (600-700 nm) (Διάγραμμα 12c) και υπέρυθη περιοχή του φάσματος (700-

800 nm, 800-900 nm, 900-1000 nm) (Διάγραμμα 11d-f) τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-7). Η διαφορά του συντελεστή ανάκλασης μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων στις περιοχές 700-800 nm, 800-900 nm, 900-1000 nm την τέταρτη ημέρα ήταν ίση με 8,3%, 8,5% και 6,9% αντίστοιχα, με το συντελεστή ανάκλασης να αυξάνεται. Στην ορατή περιοχή του φάσματος μεταξύ 500 nm και 600 nm, η διαφορά του συντελεστή ανάκλασης μεταξύ των μεταχειρίσεων την Ημέρα 4 ήταν στατιστικά σημαντική ( $p < 0.05$ ) με ποσοστό ίσο με 9,6%. Ο συντελεστής ανάκλασης των καταπονημένων φυτών παρέμεινε στατιστικά σημαντικά αυξημένος ( $p < 0.05$ ) τις επόμενες ημέρες της πειραματικής διαδικασίας. Από την άλλη, ο συντελεστής ανάκλασης στην περιοχή του φάσματος μεταξύ των 400 και 500nm δεν έδειξε κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά ( $p < 0.05$ ) μεταξύ των μεταχειρίσεων, όλες τις ημέρες του πειράματος.



**Διάγραμμα 11a-f.** Εξέλιξη της μέσης ημερήσιας τιμής του φάσματος μεταξύ (a) 400-500 nm, (b) 500-600 nm, (c) 600-700 nm, (d) 700-800 nm, (e) 800-900 nm και (f) 900-1000 των υγιών και θρεπτικά

καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος της δεύτερης επανάληψης (Ημέρες 1-2 κανονική δόση N, Ημέρες 3-7: μηδενική δόση αζώτου). Οι μάρτες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής. Σταθερή γραμμή: μάρτυρας, διακεκομμένη γραμμή: μεταχείριση

### 3.3 Μελέτη των μεταβολών των δεικτών ανάκλασης

Το Διάγραμμα 12a-f παρουσιάζει τη μέση ημερήσια μεταβολή των τιμών των (a) PRI, (b) sPRI, (c) rNDVI, (d) VOGREI1, (e) mrSRI και (f) TCARI των δεικτών ανάκλασης, τις ημέρες του πειράματος της πρώτης επανάληψης (Ημέρες 1-14).

Πιο συγκεκριμένα για τον κάθε δείκτη ανάκλασης :

#### - Δείκτης PRI

Στο Διάγραμμα 12a παρατίθεται η εξέλιξη του δείκτη PRI τις ημέρες του πειράματος της πρώτης επανάληψης. Σε αυτόν τον δείκτη δεν παρατηρούνται διακυμάνσεις των τιμών της ανάκλασης μεταξύ των φυτών του μάρτυρα και αυτών που υπόκεινται θρεπτική καταπόνηση τις έξι πρώτες ημέρες. Ο δείκτης PRI αρχίζει να αυξάνεται στατιστικά σημαντικά ( $p < 0.05$ ) τέσσερις ημέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου (Ημέρα 10). Καθ' όλη τη μετέπειτα διάρκεια του πειράματος, συνεχίζει να υπάρχει διαφορά μεταξύ των τιμών ανάκλασης των φυτών του μάρτυρα και των φυτών της μεταχείρισης. Η μεγαλύτερη διαφορά που σημειώθηκε ανάμεσα στις δύο διαφορετικές σειρές μεταχείρισης (φυτά-μάρτυρας και φυτά με αζωτούχο τροφολοπενία) ήταν την Ημέρα 12 του πειράματος (17,3%).

Στο Διάγραμμα 13a παρατίθεται η εξέλιξη του δείκτη PRI τις ημέρες του πειράματος της δεύτερης επανάληψης. Αντίστοιχα με τα δεδομένα της πρώτης επανάληψης, στη δεύτερη επανάληψη δεν παρατηρούνται κάποιες διακυμάνσεις των τιμών της ανάκλασης μεταξύ των φυτών του μάρτυρα και αυτών που υπόκεινται σε θρεπτική καταπόνηση τις πρώτες δύο ημέρες, καθώς τα φυτά αρδεύονταν με κανονικό πρόγραμμα λίπανσης. Ο δείκτης PRI αρχίζει να αυξάνεται στατιστικά σημαντικά ( $p < 0.05$ ) δύο ημέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου με ποσοστό μεταβολής ίσο με 3,8%. Η μεγαλύτερη διαφορά που σημειώθηκε ανάμεσα στις τιμές του PRI μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων (φυτά-μάρτυρας και φυτά με

αζωτούχο τροφοπενία) παρατηρήθηκε την Ημέρα 6 (τέσσερις ημέρες μετά την εφαρμογή της μηδενικής δόσης αζωτικού λιπάσματος με ποσοστό μεταβολής ίσο με 5,7%).

- Δείκτης sPRI

Η εξέλιξη των φυτών της μεταχείρισης με τη θρεπτική καταπόνηση μέσω του δείκτη sPRI παρατηρείται στο Διάγραμμα 12b. Σε αυτόν το δείκτη δεν παρατηρούνται διακυμάνσεις των τιμών της ανάκλασης μεταξύ των φυτών του μάρτυρα και αυτών που υπόκεινται σε θρεπτική καταπόνηση τις έξι πρώτες μέρες (Ημέρες 1-6), καθώς δεν υπάρχει διαφορά στο πρόγραμμα λίπανσης. Ο δείκτης sPRI αρχίζει να μειώνεται λόγω της εφαρμογής της μειωμένης δόσης αζώτου, την Ημέρα 10 (4η ημέρα εφαρμογής μειωμένης δόσης αζώτου). Η μεγαλύτερη διαφορά στις τιμές ανάκλασης που σημειώθηκε για την πρώτη επανάληψη εμφανίζεται την Ημέρα 12 και Ημέρα 13 του πειράματος.

Στο Διάγραμμα 13b παρατίθεται η εξέλιξη του δείκτη sPRI τις ημέρες του πειράματος της δεύτερης επανάληψης. Αντίστοιχα με τα δεδομένα της πρώτης επανάληψης, στη δεύτερη επανάληψη δεν παρατηρούνται κάποιες διακυμάνσεις των τιμών της ανάκλασης μεταξύ των φυτών του μάρτυρα και αυτών που υπόκεινται θρεπτική καταπόνηση τις πρώτες δύο ημέρες, καθώς τα φυτά αρδεύονταν με κανονικό πρόγραμμα λίπανσης. Αντιθέτως, η διαφορά των υγιών και καταπονημένων φυτών γίνεται αισθητή ( $p < 0.05$ ) την Ημέρα 4 (δύο ημέρες μετά την εφαρμογή της μηδενικής δόσης αζώτου) με ποσοστό μεταβολής ίσο με 5,6% (όμοια με το δείκτη PRI). Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των τιμών ανάκλασης των υγιών και καταπονημένων φυτών σημειώθηκε την Ημέρα 5 και Ημέρα 6 του πειράματος (7% και 6% αντίστοιχα).

- Δείκτης rNDVI

Αντίστοιχα αποδοτικός δείκτης αποδείχτηκε ότι είναι ο rNDVI, ο οποίος από την Ημέρα 8 του πειράματος της πρώτης επανάληψης (δεύτερη ημέρα μετά την εφαρμογή μειωμένης δόσης αζώτου) άρχισε να ανιχνεύει και να καταγράφει την επίδραση της θρεπτικής καταπόνησης στα φυτά της μεταχείρισης. Παρατηρείται στο Διάγραμμα 12c ότι, όταν η θρεπτική καταπόνηση εξελίσσεται (Ημέρες 9-14), η

διαφορά μεταξύ υγιών και καταπονημένων φυτών μεγαλώνει. Η διαφορά των τιμών του δείκτη μεταξύ των μεταχειρίσεων παρουσιάζει μέγιστη τιμή την Ημέρα 14 με ποσοστό μεταβολής ίσο με 6%.

Όσον αφορά τη δεύτερη επανάληψη, ελπιδοφόρος δείκτης αποδείχτηκε ότι είναι ο rNDVI, ο οποίος από την Ημέρα 4 του πειράματος (δεύτερη ημέρα εφαρμογής μηδενικής δόσης αζώτου) άρχισε να ανιχνεύει και να καταγράφει στατιστικά σημαντική ( $p < 0,05$ ) διαφορά μεταξύ των τιμών ανάκλασης των φυτών του μάρτυρα και αυτών που βρίσκονται σε θρεπτική καταπόνηση. Καταδεικνύεται από το Διάγραμμα 13c ότι, με την εξέλιξη της θρεπτικής καταπόνησης, η διαφορά μεταξύ υγιών και καταπονημένων φυτών μεγαλώνει. Η διαφορά αυτή παρουσιάζει μέγιστη τιμή την Ημέρα 5 με ποσοστό μεταβολής ίσο με 6,7%.

#### - Δείκτης VOGREI1

Ο δείκτης VOGREI1 παρουσιάζει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων της πρώτης επανάληψης ένδειξη θρεπτικής καταπόνησης τρεις ημέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου (Ημέρα 9) (Διάγραμμα 12d). Η διαφορά του δείκτη μεταξύ των τιμών των υγιών και καταπονημένων φυτών ήταν 4% την Ημέρα 9, ενώ παρουσίασε μέγιστη τιμή την Ημέρα 10 με ποσοστό μεταβολής ίσο με 7,4%. Από την άλλη, ο δείκτης VOGREI1 κατά τη διάρκεια των μετρήσεων της δεύτερης επανάληψης παρουσιάζει ένδειξη θρεπτικής καταπόνησης τη δεύτερη μόλις ημέρα εφαρμογής της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 4) (Διάγραμμα 13d). Η διαφορά του δείκτη μεταξύ των τιμών των υγιών και καταπονημένων φυτών ήταν 3% την Ημέρα 4, ενώ παρουσίασε μέγιστη τιμή την Ημέρα 5, με ποσοστό μεταβολής ίσο με 3,9%.

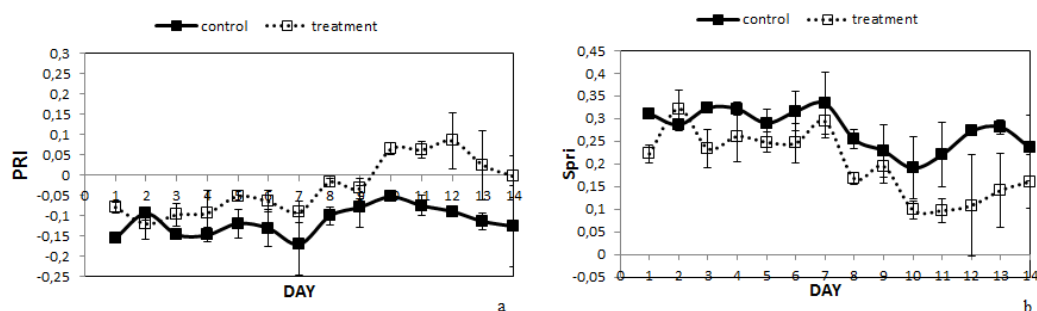
#### - Δείκτης mrSRI

Αποδοτικός δείκτης αποδείχτηκε ότι είναι επίσης ο mrSRI, ο οποίος από την Ημέρα 8 του πειράματος (δεύτερη ημέρα εφαρμογής της μειωμένης δόσης αζώτου), άρχισε να ανιχνεύει και να καταγράφει την επίδραση της θρεπτικής καταπόνησης στα φυτά της μεταχείρισης (Διάγραμμα 12e). Πιο εμφανή είναι τα αποτελέσματα προς το τέλος του πειράματος. Η μεγαλύτερη διαφορά που καταγράφηκε στις τιμές της ανάκλασης μεταξύ των δύο διαφορετικών μεταχειρίσεων με τη βοήθεια του δείκτη mrSRI ήταν την Ημέρα 11, με ποσοστό μεταβολής ίσο με 34%. Αντίστοιχα

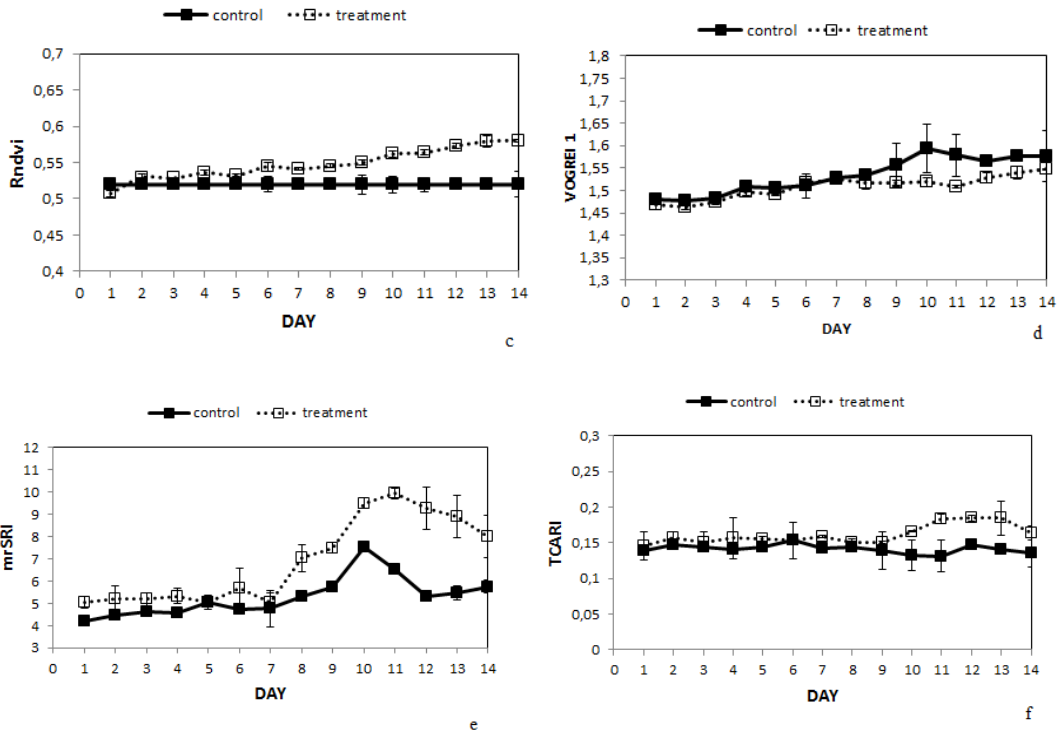
στο Διάγραμμα 13e παρατηρείται ότι ο δείκτης *nrSRI* είναι αρκετά αποδοτικός, γιατί από την πρώτη μόλις ημέρα εφαρμογής της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 3) γίνεται αισθητή η θρεπτική καταπόνηση. Μάλιστα, η μεγαλύτερη διαφορά που καταγράφηκε στις τιμές της ανάκλασης μεταξύ των δύο διαφορετικών σειρών με τη βοήθεια του δείκτη *nrSRI* ήταν η Ημέρα 7 της δεύτερης επανάληψης, με ποσοστό μεταβολής ίσο με 20%.

#### - Δείκτης TCARI

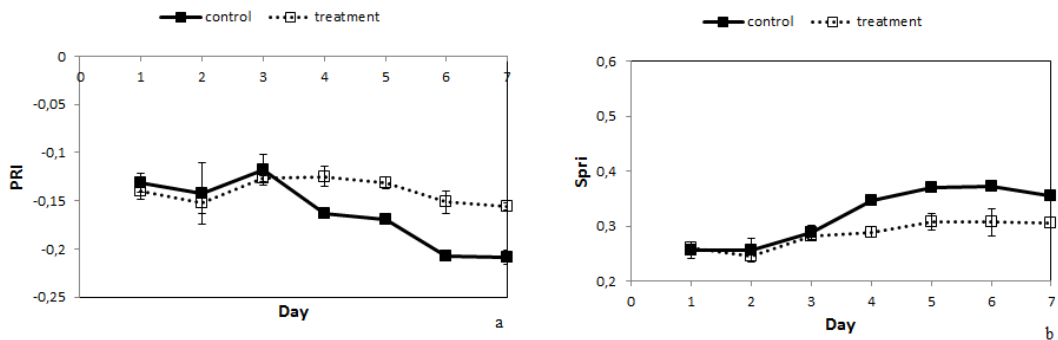
Σύμφωνα με το Διάγραμμα 12f διαπιστώνεται ότι ο δείκτης TCARI είναι ένας πολύ ελπιδοφόρος δείκτης όσον αφορά τη θρεπτική καταπόνηση, αφού μπόρεσε να ανιχνεύσει την επίδραση της θρεπτικής καταπόνησης στα φυτά της μεταχείρισης από την Ημέρα 10 (τέταρτη ημέρα εφαρμογής μειωμένης δόσης αζώτου). Επιπρόσθετα, συνεχίζεται η καταγραφή της διαφοράς μεταξύ των φυτών της σειράς του μάρτυρα σε σύγκριση με τα φυτά της θρεπτικής καταπόνησης και τις επομένους ημέρες. Η μεγαλύτερη διαφορά που καταγράφηκε στις τιμές της ανάκλασης μεταξύ των δύο διαφορετικών μεταχειρίσεων με τη βοήθεια του δείκτη TCARI ήταν την Ημέρα 10 με ποσοστό μεταβολής ίσο με 6,4%. Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα 13f παρατίθενται τα στοιχεία για τη δεύτερη επανάληψη σχετικά με τον δείκτη TCARI. Η μεγαλύτερη διαφορά που καταγράφηκε στις τιμές της ανάκλασης μεταξύ των δύο διαφορετικών σειρών με τη βοήθεια του δείκτη αυτού ήταν η Ημέρα 7 της δεύτερης επανάληψης με ποσοστό μεταβολής ίσο με 2,5%.

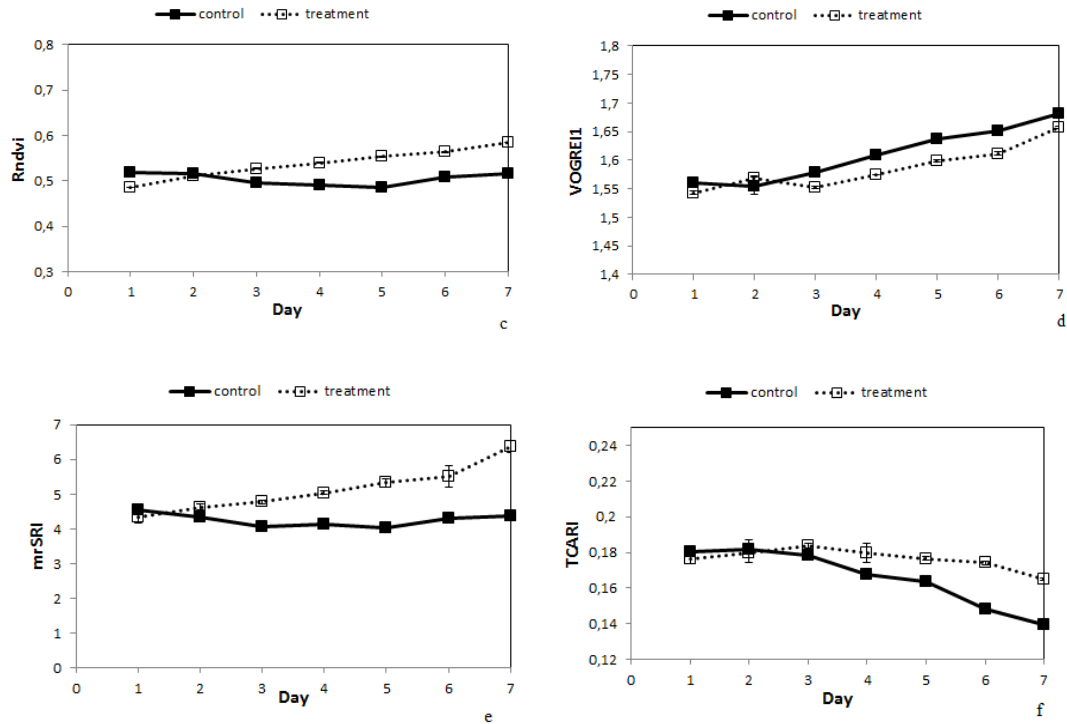






**Διάγραμμα 12a-f.** Μέση ημερήσια εξέλιξη των τιμών των δεικτών (a) PRI, (b) sPRI, (c) rNDVI, (d) VOGREI 1, (e) mSRI και (f) TCARI των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-6: κανονική δόση N, Ημέρες 7-14: 1/3 δόση αζώτου). Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής. Σταθερή γραμμή: μάρτυρας, διακεκομμένη γραμμή: μεταχείριση





**Διάγραμμα 13a-f.** Μέση ημερήσια εξέλιξη των τιμών των δεικτών (a) PRI, (b) sPRI, (c) rNDVI, (d) VOGREI 1, (e) mrSRI και (f) TCARI των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος για την δεύτερη επανάληψη (Ημέρες 1-2: κανονική δόση N, Ημέρες 3-7: μηδενική δόση αζώτου). Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής. Σταθερή γραμμή: μάρτυρας, διακεκομμένη γραμμή: μεταχείριση

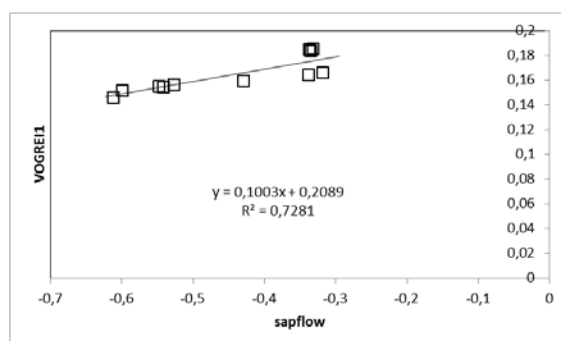
Οι παραπάνω δείκτες μελετήθηκαν και ως προς την συσχέτισή τους με τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης (Chl a), το ρυθμό της φωτοσύνθεσης, το ρυθμό ροής χυμού, της διαπνοής και της θερμοκρασίας του φύλλου με άλλοτε θετικά και άλλοτε αρνητικά αποτελέσματα. Τα δεδομένα των παραπάνω παραμέτρων μεταβιβάζονται στην μονάδα του χρόνου και υπολογίζεται η διασπορά των υγιών και καταπονημένων φυτών. Έτσι, προκύπτει η διασπορά των δεδομένων από τη διαφορά των τιμών των καταπονημένων και υγιών φυτών· παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης με τη διαφορά της τιμής του ρυθμού της φωτοσύνθεσης των καταπονημένων και υγιών φυτών και στις δύο επαναλήψεις παρουσίασαν οι δείκτες PRI και mrSRI, ενώ με τη διαφορά της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης οι rNDVI, VOGREI1, TCARI. Ο VOGREI1 ήταν ένας δείκτης που είχε υψηλό συντελεστή συσχέτισης και με τις τιμές της διαπνοής (Διάγραμμα 14).

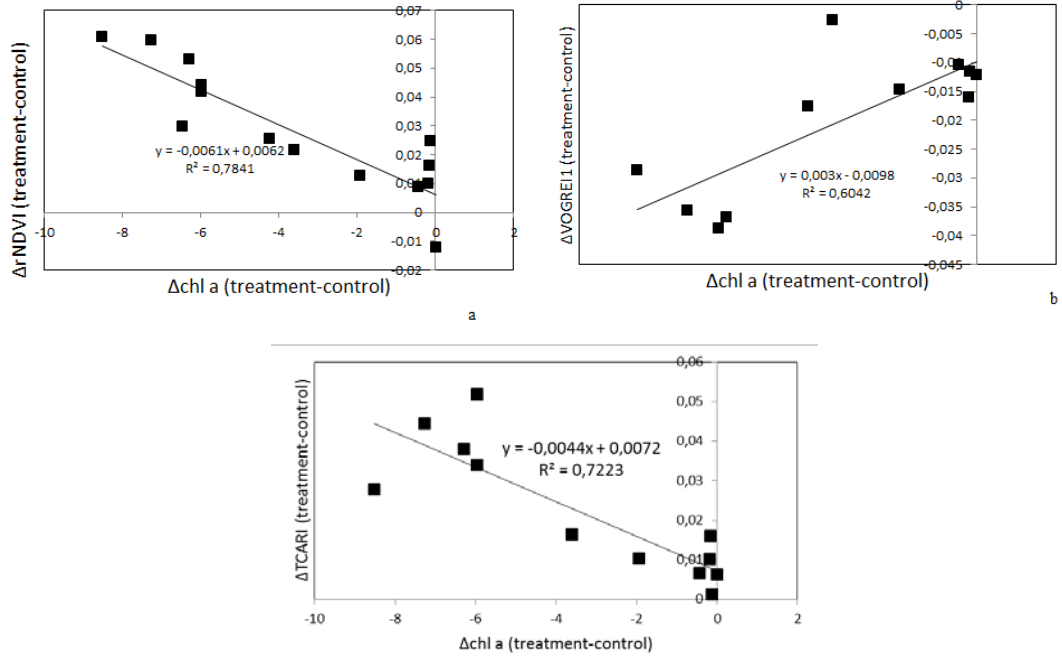
Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 15a & 16a, ο συντελεστής συσχέτισης του δείκτη  $rNDVI_{(750-705)}$  με τη Chl a κυμαίνεται κοντά στο 0.78 και 0.72, ενώ του δείκτη VOGREI 1 κοντά στο 0.60 και 0,73 την πρώτη και τη δεύτερη επανάληψη αντίστοιχα (Διάγραμμα 15b & 16b). Ο δείκτης TCARI, ωστόσο, έδωσε τον πιο ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης ίσο με 0,53 και 0,81 (Διάγραμμα 15c και 16c).

Αρκετά ικανοποιητικό συντελεστή συσχέτισης με τη διαφορά της τιμής του ρυθμού της φωτοσύνθεσης ( $A_s$ ,  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) παρουσίασαν οι δείκτες PRI και  $mSR$ . Πιο αναλυτικά, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 17a, ο συντελεστής συσχέτισης του δείκτη PRI με τη φωτοσύνθεση κυμαίνεται κοντά στο 0,73 και 0,69 (Διάγραμμα 17a & 18a), ενώ του δείκτη  $mSR$  κοντά στο 0,60 και 0,71 την πρώτη και τη δεύτερη επανάληψη αντίστοιχα (Διάγραμμα 17b & 18b).

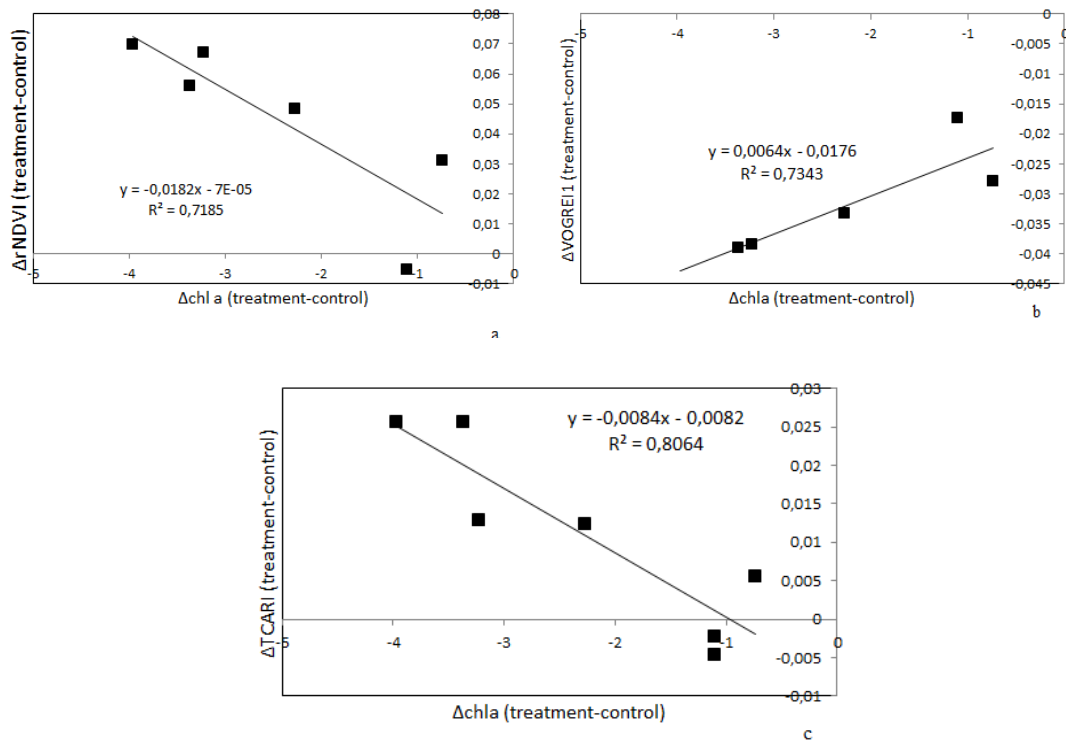
Τέλος, μελετήθηκε και η συσχέτιση μεταξύ του δείκτη VOGREI1 με την στοματική αγωγιμότητα. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής συσχέτισης του δείκτη αυτού κυμαίνεται στο 0,66 και 0,67 την πρώτη και δεύτερη επανάληψη αντίστοιχα (Διάγραμμα 19 & 20).



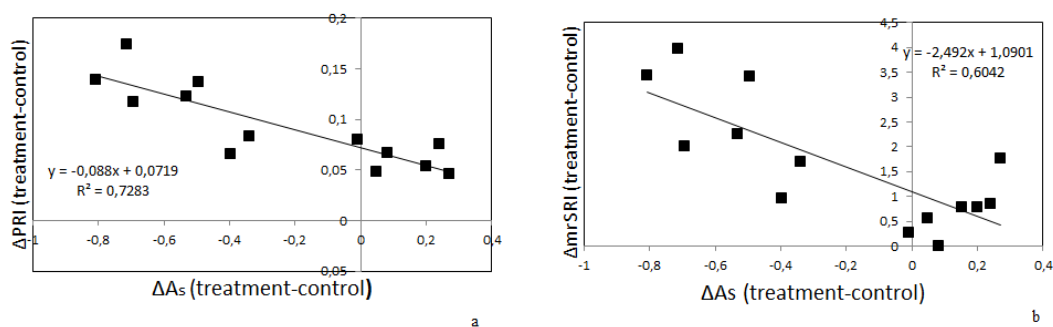
**Διάγραμμα 14.** Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής του δείκτη VOGREI1 με τη μεταβολή του ρυθμού ροής χυμού για την πρώτη επανάληψη. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών των δεικτών των θρεπτικά καταπονημένων φυτών και της μεταβολής της συγκέντρωσης της ροής χυμού



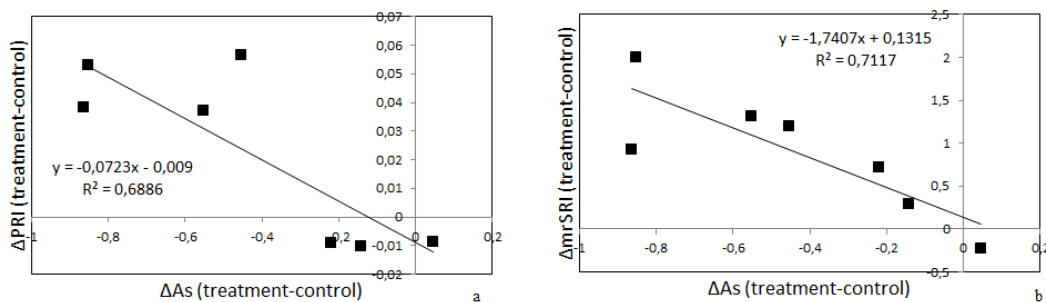
**Διάγραμμα 15a-c.** Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής των δεικτών a) rNDVI, b) VOGREI 1 και c) TCARI με τη μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης ( $Chla$ ,  $\mu g/cm^2$ ) για την πρώτη επανάληψη. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών των δεικτών των θρεπτικά καταπονημένων φυτών και της μεταβολής της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης.



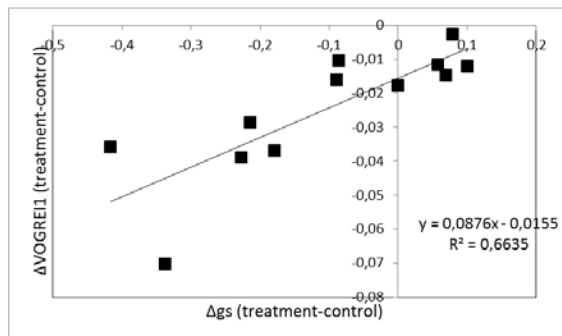
**Διάγραμμα 16 a-c.** Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής των δεικτών a) rNDVI και b) VOGREI1, c) TCARI με τη μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (Chl a,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) για τη δεύτερη επανάληψη. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών των δεικτών των θρεπτικά καταπονημένων φυτών και της μεταβολής της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης.



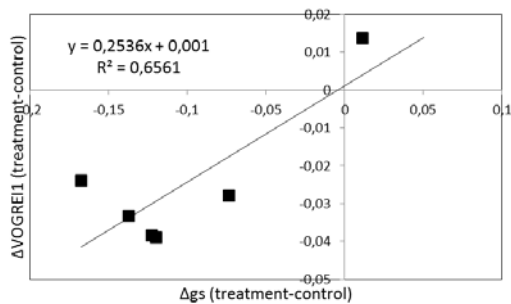
**Διάγραμμα 17a-b.** Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής του δείκτη a) PRI και b) mrSRI με τη μεταβολή της φωτοσύνθεσης (As) για την πρώτη επανάληψη. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών του δείκτη των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών και της μεταβολής της φωτοσύνθεσης.



**Διάγραμμα 18 a-b.** Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής του δείκτη a) PRI και b) mrSRI με τη μεταβολή της φωτοσύνθεσης (As) για τη δεύτερη επανάληψη. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών του δείκτη των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών και της μεταβολής της φωτοσύνθεσης.



**Διάγραμμα 19.** Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής του δείκτη VOGREI1 με τη μεταβολή της στοματικής αγωγιμότητας για την πρώτη επανάληψη. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών του δείκτη των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών και της μεταβολής της στοματικής αγωγιμότητας



**Διάγραμμα 20.** Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής του δείκτη VOGREI1 με τη μεταβολή της στοματικής αγωγιμότητας για τη δεύτερη επανάληψη. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών του δείκτη των υγιών και θρεπτικά καταπονημένων φυτών και της μεταβολής της στοματικής αγωγιμότητας

#### 4. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Οι φασματικές ιδιότητες των φύλλων δεν επηρεάζονται μόνο από τη θρεπτική κατάσταση των φυτών αλλά και από παράγοντες, όπως η ηλικία των φύλλων, η πτώση του ήλιου πάνω στα φύλλα, η σκίαση των φύλλων, η ανατομία τους, το πάχος τους, οι διαφορές στις ιδιότητες της επιφάνειας των φύλλων, το υπόβαθρο του εδάφους, η γωνία των φύλλων και η δομή της φυλλικής επιφάνειας. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να εισάγουν αποκλίσεις που μειώνουν τη συσχέτιση μεταξύ του θρεπτικού άγχους στα φυτά του θερμοκηπίου και τη φασματική απόκλιση των φύλλων (Eitel et al., 2006).

Η κύρια προσπάθεια της παρούσης έρευνας είναι η ανάπτυξη ενός δείκτη που δεν θα επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες και το φως του ήλιου, που δίνει πιο λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το στρες των φυτών στην έλλειψη αζώτου, που χρησιμοποιείται οποιαδήποτε στιγμή και σε πραγματικό χρόνο και, τέλος, ότι θα είναι εμπορικά διαθέσιμος και οικονομικά αποδοτικός. Σε καλλιέργειες θερμοκηπίου υπάρχει ανάγκη για την ανίχνευση μεταβολών ανάκλασης των φυτών σε ένα επίπεδο πάνω από το 60% της περιεκτικότητας σε θρεπτικά συστατικά του εδάφους. Ωστόσο, οι μετρήσεις των δεικτών ανακλαστικότητας υποφέρουν από την επίδραση του σήματος και της έντασης του φωτός, ανάλογα με τον εκάστοτε αισθητήρα που θα καταγράφει την πληροφορία από απόσταση. Η επεξεργασία των μετρήσεων ανάκλασης είναι το πιο σημαντικό βήμα για την απόκτηση αποδοτικών δεικτών.

Για την ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης με βάση την καταγραφή της έντασης της ακτινοβολίας που αντανακλά το φυτό από απόσταση προτείνεται ως πιο κατάλληλη μέθοδος η χρήση του υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης. Το βασικό πλεονέκτημα της υπερφασματικής ανάλυσης είναι ότι ο χρήστης δε χρειάζεται να γνωρίζει εκ των προτέρων στοιχεία για το δείγμα, αφού με την επεξεργασία και την μεταεπεξεργασία εξάγονται όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες.

Με βάση την υπερφασματική κάμερα μελετήθηκαν υγιή και θρεπτικά καταπονημένα φυτά. Παρατηρήθηκε ότι τα καταπονημένα φυτά τις πρώτες μέρες του πειράματος της πρώτης επανάληψης κατά τις οποίες ακολουθούν ολοκληρωμένο πρόγραμμα λίπανσης, εμφανίζουν τιμές ανάκλασης παρόμοιες με αυτές που καταγράφουν και τα φυτά του μάρτυρα (περίπου 0,5). Εν συνεχεία, από την ημέρα 7

(πρώτη επανάληψη) κατά την οποία τα φυτά της μεταχείρισης αρχίζουν να δέχονται μειωμένη δόση αζώτου, παρατηρείται ότι τα φυτά της μεταχείρισης ανταποκρίνονται σχετικά γρήγορα, λόγω της έλλειψης υποστρώματος. Εν τούτοις, από τη Ημέρα 10, οι τιμές των φυτών της μεταχείρισης της πρώτης επανάληψης αρχίζουν να αυξάνονται και να φτάνουν μέχρι 0.85, αποδεικνύοντας ότι έχουν αρχίσει πάρα πολύ νωρίς να αντιλαμβάνονται την καταπόνηση η οποία ασκήθηκε. Στη δεύτερη επανάληψη, τα φυτά της μεταχείρισης που δέχονται μηδενική δόση αζώτου ανταποκρίνονται στη μεταβολή αυτή από την δεύτερη κιόλας ημέρα. Καθόλη τη διάρκεια της δεύτερης επανάληψης, οι τιμές των μέσων όρων ανάκλασής τους αυξάνονται μέχρι και τη στιγμή που στο τέλος της δεύτερης επανάληψης (Ημέρα 7) έχει φτάσει η τιμή στο 0.75.

Όσον αφορά, τους συντελεστές ανάκλασης διακρίνεται ότι στα 400-500nm δε σημειώνεται στατιστικά σημαντική διαφορά ( $p < 0.05$ ) στις δυο μεταχειρίσεις. Ωστόσο, στο διάγραμμα 10a διακρίνεται ότι από την Ημέρα 10 του πειράματος της πρώτης επανάληψης είναι πλέον ανιχνεύσιμη η αζωτούχος καταπόνηση των φυτών, ενώ στη δεύτερη επανάληψη η καταπόνηση αργεί να γίνει ευδιάκριτη και γίνεται την Ημέρα 6 του πειράματος. Στο Διάγραμμα 10b, το οποίο αναφέρεται στους μέσους όρους των φυτών από τα 500-600 nm, διαπιστώνεται ότι από την Ημέρα 10 της πρώτης επανάληψης του πειράματος είναι πλέον ανιχνεύσιμη η αζωτούχος καταπόνηση των φυτών, ενώ στη δεύτερη επανάληψη γίνεται αντιληπτή η θρεπτική καταπόνηση την Ημέρα 4 (Διάγραμμα 11b). Στο επόμενο διάγραμμα (Διάγραμμα 10c), σημαντική διαφορά σημειώνεται την Ημέρα 9 στα 600-700 nm και αυτή η διαφορά αυξάνεται όλο και περισσότερο, όσο περνάνε οι ημέρες του πειράματος. Από την άλλη, στη δεύτερη επανάληψη, η θρεπτική καταπόνηση γίνεται αμέσως ευδιάκριτη ήδη από την δεύτερη ημέρα εφαρμογής της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 4) (Διάγραμμα 11c). Στα 700-800 nm εμφανή είναι τα αποτελέσματα από την Ημέρα 9 (Διάγραμμα 10d), ενώ στη δεύτερη επανάληψη γίνονται ξεκάθαρα τα αποτελέσματα την Ημέρα 4 του πειράματος (Διάγραμμα 11d). Σχετικά με τα 800-900 nm και τα 900-1000 nm, η αζωτούχος καταπόνηση των φυτών γίνεται αντιληπτή από την Ημέρα 8 του πειράματος της πρώτης επανάληψης (Διάγραμμα 10e & 11e αντίστοιχα). Για τη δεύτερη επανάληψη, στα 800-900 nm και στα 900-1000 nm (Διάγραμμα 10f & Διάγραμμα 11f), η θρεπτική καταπόνηση γίνεται ανιχνεύσιμη την τρίτη ημέρα του πειράματος.



Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι, οι δείκτες PRI, rNDVI και VOGREI ανίχνευσαν θρεπτική καταπόνηση από την τρίτη ημέρα εφαρμογής της μειωμένης δόσης αζώτου (Ημέρα 9). Ο δείκτης mrSRI ανίχνευσε θρεπτική καταπόνηση από τη δεύτερη ημέρα εφαρμογής της μειωμένης δόσης αζώτου (Ημέρα 8), ενώ οι υπόλοιποι δείκτες (sPRI και ο TCARI) ανίχνευσαν στατιστικά σημαντική διαφορά ( $p < 0.05$ ) την τέταρτη ημέρα από τη μειωμένη εφαρμογή αζώτου (1/3 N) (Ημέρα 10).

Στο Διάγραμμα 13a-f παρουσιάζεται η μέση ημερήσια μεταβολή των τιμών των (a) PRI, (b) sPRI, (c) rNDVI, (d) VOGREI, (e) mrSRI και (f) TCARI των δεικτών ανάκλασης, τις ημέρες του πειράματος της δεύτερης επανάληψης (Ημέρες 1-7). Παρατηρήθηκε ότι οι δείκτες PRI, sPRI, rNDVI και TCARI ανίχνευσαν θρεπτική καταπόνηση από τη δεύτερη ημέρα εφαρμογής της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 4). Ο δείκτης VOGREI και ο mrSRI ανίχνευσαν θρεπτική καταπόνηση από την πρώτη κιόλας ημέρα εφαρμογής της μηδενικής δόσης αζώτου (Ημέρα 3).

Η υπερφασματική απεικόνιση της ανάκλασης των φυτών σε μία καλλιέργεια θα μπορούσε να είναι χρήσιμο εργαλείο για την έγκαιρη ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης των φυτών, αν και το κόστος και η πολυπλοκότητα είναι τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της υπερφασματικής τεχνικής. Επίσης, σημαντικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι οι απαιτητικές μέθοδοι βαθμονόμησης των οπτικών αισθητήρων, ειδικά του υπερφασματικού συστήματος απεικόνισης, καθώς, επίσης, και ο προσδιορισμός του θορύβου και τα σφάλματα που προέρχονται από την εκάστοτε πηγή φωτός. Η απόδοση των δεδομένων των δεικτών ανάκλασης μπορεί να βελτιωθεί με ξεκαθάρισμα και φιλτράρισμα των μετρήσεων και αποτελούν έγκυρες εικόνες εγγραφής. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες παράμετροι στα πρωτόκολλα των οπτικών μεθόδων βαθμονόμησης των συστημάτων σε θερμοκήπια, όπως το σήμα του φωτός, οι οποίες πρέπει να αναλυθούν περαιτέρω, για να δημιουργηθούν πιο σταθερά δεδομένα. Επιπλέον, η χρήση σταθερών πηγών φωτός είναι σκόπιμη για την ακρίβεια ανίχνευσης.

Μια πιθανή μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη χρήση κατάλληλων δεικτών ανάκλασης για την ανίχνευση θρεπτικής καταπόνησης φυτών σε πραγματικό χρόνο για τον ακριβή προσδιορισμό των θρεπτικών αναγκών των θερμοκηπιακών καλλιεργειών από αισθητήρες που δεν θα απαιτούν την επαφή με τα φυτά και δεν θα είναι καταστροφικοί.

# Βιβλιογραφία

## A. Ξένη Βιβλιογραφία

1. Aiko M., 2001. Hypersprctral prism imaging spectrograph. Technical Research Centre of Finland ESPOO.
2. Amatya, S. Karkee, M. Alva, A. K., Larbi P. & Adkhikari B., (2012). Hyperspectral imaging for detecting water stress in potatoes. Annual International Meeting Sponsored by ASABE, Paper number 12-1345197
3. Aparicio N., D. Villegas, C. Royo, J. Casadesus and L Araus, 2004. Effect of sensor view angle on the assessment of agronomic traits by ground level hyper-spectral reflectance measurements in durum wheat under contrasting mediterranean conditions. International Journal of Remote sensing 25:6,1131-1152
4. Arngren M., 2011. Hyperspectral NIR camera Technical note ver. 1.2
5. Asner et al. 1998, Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies
6. Bakilan E., 2006 Image Classification, Data Integration and Analysis. Bahar
7. Blackmer et al 1996 Nitrogen defficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated canopies
8. Bonneua D., Chenaeva O., Mourard D., Berio P., Clausse J.M., Delaa O., Marcotto A., Perraut K., Roussel A., Spang A. , Stee P., Tallon-Bosc I., McAlister H., Strurmann J., Sturmann L., Turner N., Frrington C. and Goldfinger P.J., 2011
9. Borzuchowski J. and K.Schulz, 2010. Retrieval of leaf area index (LAI) and soil water content (WC) using hyperspectral remote sensing under controlled glasshouse conditions for spring barley and sugar beet. Remote sensing
10. Brunn A., D Naughton, H. Weichelt, S. Douglass, M. Thiele, M. Oxford and K. Beckett, 2010. The calibration procedute of the multispectral imaging instruments on board the rapideye TM remote sensing satellites.

11. Burns P. D., 1997. Analysis of image noise in multitrainenemetn color acquisition. Ph D thesis, Center for imaging Science,Rochester Institute of Technology, USA
12. Carlson R.W., Schaeffer Jr. R. C., La Grance R.G., Roberts C.M., Russell F.E., 1971. Some pharmacological properties of the venom of the scorpionfish *Scorpaena guttata* 1 toxicon, pp 379-391
13. Chung Ru Ho 2008, Principle of remote sensing National Taiwan Ocean University. Department of Marine Environmental Informatics, Chinese
14. C.V.M. Barton., P.R.J. Northb, Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index, Model and sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment* 78 (2001) 264 – 273
15. Clevers J.G.P.W., L. Kooistra and M.E. Schaepman, 2008, Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* , 10, 338-397
16. C. Panigada, L. Busetto, M. Meroni, S. Amaducci, M. Rossini, S. Cogliati, M. Boschetti, V. Picchi, A. Marchesi, F. Pinto, U. Rascher, R. Colombo, (2010). Edocros: Early detection of crop water and nutritional stress by remotely sensed indicators.
17. David Lagomasimo et al 2014 , Estimating major ion and nutrient concentrations in mangrove estuaries in Everglades National Park using leaf and satellite reflectance
18. E. Pattey a., I.B. Strachan, J.B. Boisvert , R.L. Desjardins, N.B. McLaughlin. Detecting effects of nitrogen rate and weather on corn growth using micrometeorological and hyperspectral reflectance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 108 (2001) 85–99
19. Evening M., 2005. Adobe Photoshop CS2 for beginners.
20. Filella et al 1995. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis
21. Francisco M. Padilla et al., 2014. Evaluation of optical sensor measurement of canopy reflectance and of leaf flavonols and chlorophyll contents to assess crop nitrogen status of muskmelon
22. Flexas et al 2013. Leaf mesophyll conductance and leaf hydraulic conductance: an introduction to their measurement and coordination

23. Gausman H.W., W.A. Allen, R. Cardenas and .J. Richardson, 1971. Effects of leaf nodal position on absorption and scattering coefficients and infinite reflectance of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L.Agron.
24. Geeske Joel, John A. Gamma and Christopher B. Field. Production Efficiency in Sunflower: The Role of Water and Nitrogen Stress
25. Giovanni Agati et al 2012, Flavonoids as antioxidants in plants: Location and functional significance
26. Giovanni Agati et al, 2012, Fluorescence-based versus reflectance proximal sensing of nitrogen content in *Paspalum vaginatum* and *Zoysia matrella* turfgrasses
27. G. Samson et al 2000. Nutrient stress of corn plants, early detection and discrimination using a compact multiwavelength fluorescent lidar
28. Govender M., K. Chetty and H.Bullock, 2007. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resources studies. School of Environment Sciences, University of Kwa Zulu – Natal
29. Govender M., P. J. Dye, I.M. Weierve, E.T.F. Witkowski and F.Ahmed, 2009. Review of commonly used remote sensing and ground – based technologies to measure plant water stress. *Water SA* , 35.: 5
30. Graeff and Claupein et al 2007, Assessing maize foliar water stress levels under field conditions using in-situ Spectroscopy
31. Habudane D., Miller J.R, Pattery E., Zarco Tejada, Strachan I.B., 2003. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies, modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote sensing of Environment* 90: 337-352
32. H. Noh, Q. Zhang 2012. Shadow effect on multi-spectral image for detection of nitrogen deficiency in corn. *Computers and Electronics in Agriculture* 83 (2012) 52–57
33. Hydrofiles, 2013. Ορθολογική Διαχείριση βιοτικών και αβιοτικών παραμέτρων σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας και μαρουλιού. Πρόγραμμα Διασυνοριακής Συνεργασίας <<Ελλάδα – Κύπρος 2007-2013>>J.63 : 87 -91
34. HU Hao, BAI You-Lu, YANG Li-Ping, LU Yan-Li, WANG Lei, WANG He, WANG Zhi-Yong, (2010). Diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat (*Triticum aestivum*) via SPAD-502 and GreenSeeker (Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural

- Sciences; Key Laboratory for Plant Nutrition and Nutrient Cycling, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)
35. Jackson R.D and .R. Huete, 1991, interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11: 185-200
  36. J. Cook et al 2013, "Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature," *Environmental Research Letters* Vol. 8 No. 2, (15 May 2013); DOI:10.1088/1748-9326/8/2/024024
  37. J. S. Schepers, T. M. Blackmer<sup>2</sup>, W. W. Wilhelm<sup>3</sup>, and M. Resende, Transmittance and Reflectance Measurements of Corn Leaves from Plants with Different Nitrogen and Water Supply *J. Plant Physiol.* 148. pp. 523-529 (1996)
  38. Jackson and Huete et al 1991, Interpreting vegetation indices
  39. Jain N., S.S.Ray, J.P.Singh and S.Panigrahy, 2007. Uses of hyperspectral data assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. *Precision Agric*(2007) 8:225-239
  40. Jones C: L ; P:R: Weckler, N:O:Maness, M:L: Stone and R. Jayasekara, 2004. Estimating water stress inn plant using hzperspectral sensing. Annual International Meeting Sponsored by ASAE/ CSAE, page number 043065
  41. J. Penuelas et al 1994, Reflectance indices associated with physiological changesin nitrogen and water-limited sunflowers leaves
  42. Julio E. Padilla et al 2014, Diffuse-reflectance mid-infrared spectroscopy reveals chemical differences in soil organic matter in different size eroded sediments
  43. Jones C.L., P.R.Weekler, N.O Maness, M.I. Stone and R. Jayasekara, 2007. Remote sensing to estimate chlorophyll concentration in spinach using multispectral plant reflectance.*American Society of Agriculture and biological Engineers*, ISSN 0001-2351
  44. Jones H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls od plant based methods, *Journal of Experimental Botanz* , Vol 55 No. 407, 2427-2436
  45. Katsoulas N., A.Evlanidi, K.P.Ferentinos, T.Bartzanas, C. Kittas, 2014. A hyperspectral imaging system for plant stress detection: calibrationand preliminarz results. 25<sup>th</sup> International Scientific – Experts Congress on Agriculture and Food Industrz, September 25-27, Cesme-Izmir. Turkey.

46. Kenan Diker; Walter C. Bausch, Potential Use of Nitrogen Reflectance Index to estimate Plant Parameters and Yield of Maize. *Biosystems Engineering* (2003) 85 (4), 437–447 doi:10.1016/S1537-5110(03)00097-7, PA Precision Agriculture
47. Kim Z., D.M.Glenn, J.Park, H.K.Ngugi and B.L.Lehman, 2010. Hyperspectral image analysis for plant stress detection. Annual International Meeting, Paper Number 1009114
48. Kittas C., 1990. Solar radiation of greenhouses as a tool to its irrigation control. *International Journal of Energz Research*, Vol 14, 881-892
49. Kittas C., A. Evlanidi, N.Katsoulas, T.Bartzanas, K.P. Ferentinos, 2014. Reflectance indices for the detection of water stress in greenhouse plants. 29<sup>th</sup> International Horticulture Congress (IHC2014), August 17-22, Brisbane Australia
50. Köksel E.S., Y.Güngör and Y.E.Yildirim, 2010. Spectral reflectance characteristics of sugarbeet under different levels of irrigation water and relationships between growth parameters and spectral indexes. *Irrigation and Drainage*, 60, 187-105.
51. Kozma-Bognar V. And J. Berke, 2010. New evaluation techniques of hyperspectral data.
52. Kruse J.K, 2004. Remote sensing od moisture and nutrient stress Iowa State of University
53. Lagomassino D., Price R.M., Herrera-Silveira J., Miralles – Willhelm F., Merediz – Alonso G., Gomez – Hernandez Y., 2014. Connection groundwater and surface water sources in groundwater coastal wetlands and estuaries: Sian Ka'an Biosphere Reserve, Quintana Roo, Mexico, *Estuaries and Coasts*.
54. Lan Y., H.Zhang, R.Lacey, W.C Hoffmann and W.Wu, 2009. Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International - the CIGR Ejournal Manuscript IT 081115*. Vol XI.
55. Lawrence K.C., B. Park, W.R. Wingham and C.Mao, 2003. Calibration of a pushbroom hyperspectral imaging system for agricultural inspections.
56. Lazaridou M., Z.Parisi and B.Noitsakis, 2004. Cutting effects on water balance in the leaves of *Trifolium alexandrium* L. *Cahiers Options Mediteraneennes*. S.I. vol 62 : 95-98

57. L.J. Zhou et al, 2012, Rapid determination of swine available energy and amino acids in corns distillers dried grains with solubles by near-infrared reflectance spectroscopy
58. Lighthart S. and S.K.Balasundram, 2010. A review the role of remote sensing in precision agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 5. 50-55
59. Liu L., J. Wang, W.Huang, C.Zhao, B.Zhang and Q. Tong, 2004. Estimating Winter Wheat plant water content using Red Edge Parameters. *International Journal of remote Sensing* 25:17, 3331-33342
60. Lydakis – Simaridis N., 2005, Εισαγωγή στις βιομηχανικές Διεργασίες, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης.
61. LU Yan-li, BAI You-lu, YANG Li-ping, WANG Lei (2008). Diagnosis on Nitrogen Status Using GreenSeeker in Spring Maize. (Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)
62. Magneya T. S., L.A. Vierlinga, J.U.H. Eitela, D.R.Hugginsc, S.R. Garrity, 2016. Response of high frequency Photochemical Reflectance Index (PRI) measurements to environmental conditions in wheat. *Remote sensing of Environment*, Vol 173, p 84-97
63. Martinez – Padilla J., L.Perez- Rodriguez, F. Mougeot., S.Ludwige, S.M.Redpathf, 2014. Intra sexua; competition alters the relationship between testosterone and ornament expression in a wild territorial bird. *Hormones and Behavior*, vol 65. Issue 5, P 435-444
64. Mazzetto F., A. Calcante, A. Mena, 2009. Comparing commercial optical sensors for crop monitoring tasks in precision viticulture. *J. ofAg.* (1) 11-18
65. Meng Bian et al 2013, Predicting foliar biochemistry of tea (*Camelia senensis*) using reflectance spectra measured at powder, leaf and canopy levels
66. Milton E.J., 1987. Review Article Principles of field spectroscopy. Department of Geography, University of Southampton, Southampton, England.
67. Mouroulis P., 1999. Spectral and spatial uniformity in pushboom imaging spectrometer. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of technology

68. Naveen J.P. Anne et al 2014, Modeling soil parameters using hyperspectra image reflectance in subtropical coastal wetlands
69. Panda C., 2012. Basic principles of remote sensing I.A.R.I. New Delhi-110012. Sensing. 6, 1665-1670
70. Penuelas et al 1997, Photochemical reflectance index (PRI) and remote sensing of plant CO<sub>2</sub> uptake
71. Polder G., W.A.M.Gerie van der Heijden, L.c. Paul Keizer and I.T.young, 2003. Hyperspectral imaging for food quality analysis and control
72. Ray S.S., G. Das J.P.Singh and S.Panigraphy, 2006. Predicted taxonomic patterns in pheromone production by longhorned beetles
73. Reynolds C.A., Jackson T.J. and Rawls W. J, 2000. Estimating soil water holding capacities by linking the food and agriculture organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer function. Water Resources Research 36.
74. Samuel W. Coleman et al, 1993. The use of near-infrared reflectance spectroscopy to define nutrient digestion of hay by cattle.
75. Schlemmer M.R., D.D.Francis, J.F.Shanahan and J.S.Scepers, 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. Agron .J 97 106-112
76. Showengerdt A., 2007. Optical radiation models. Remote sensing (third edition) Pages 45-73, XI-XIII
77. Silleos et al 2006, Evaluation of SR, NDVI and EVI for operational monitoring the condition of CORINE vegetation types
78. N. Silleos, T.K. Alexandridis, I.Z. Gitas, K.Perakis, 2006. Vegetation Indices, Advances Made in Biomass Estimation and vegetation monitoring in the last 30 years, Geocarto International, vol 21, No.4
79. W. R. L. Anderegg, "Expert Credibility in Climate Change," Proceedings of the National Academy of Sciences Vol. 107 No. 27, 12107-12109 (21 June 2010); DOI: 10.1073/pnas.1003187107.
80. Soudani, K.G. Hmimina, N.Delpiere, J.-Y.Poontailleur, M.Aubinet, D.Bonal, 2012. Ground based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. Remote Sensing of Environment, 123, 234-245



81. Suarez L., P.J.Zarco – Tejada, J.A.J. Berni, V.Gonzalez-Dugo, E.Fereres, 2009. Modelling PRI for water stress detection using radiativetransfer models. Remote sensing of environment 113, 730-744
82. Swanson R.H and D.W.A.Whitfield, 1981. Anumerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. J.Exp. Bot. 32:221-239
83. Tsirogiannis I.L., N.Katsoulas, D.Savvas, G.Karras and C.Kittas, 2010. Relationships between reflectance and water status in a greenhouse Rocket (Eruca Sativa Mill) Cultivation.Department of Floriculture and landscape Architecture.Faculty of Agriculture Technology
84. Vagni F., 2007. Survey of hyperspectraland multispectral imaging technologies. Research and Technology organization, ISBN 978-92-837-0071-5
85. Vennoy C.J.M., 1992. Biochemical and biophysical research communications, Volume 189, Issue 3, pages 1255-1769
86. Vigneau N., MM.Ecarnotb, G. Rabatela and P. Roumet, 2011. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content on wheat. Field Crops Research, 122(1), 25-31
87. Zakaluk.E and R.S.Ranjan, 2008. Predicting the leaf water potential of potato plants using RGB reflectance. Canada
88. Zhao et al 2005. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum
89. XIE Xian-Li et al 2012, Visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for prediction of soil properties near a copper smelter

## **B. Ελληνική Βιβλιογραφία**

1. Βαφειάδης Λ. και Σταματειάδου Κ., 2007. Επίδραση Νιτρικών Ιόντων στη συσσώρευση Χρωστικών σε υδροπονική καλλιέργεια Παντζαριού, τεχνολογικό εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μεσσολογγίου.
2. Δανηλίδου Ε., 2010. Πειραματική Καλλιέργεια Φυτών με στόχο εφαρμογές για την προστασία του περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Πατρών.

3. Κυζερίδου Α., 2009. Εκτίμηση του ποσού των περιεχομένων φωτοσυνθετικών χρωστικών σε καρπούς με τη χρήση φασμάτων της ίνινο Ανακλαστικότητας.
4. Νταρακάς Ε., 2014. Ποιοτικά χαρακτηριστικά και διεργασίες επεξεργασίας νερού, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Τμήμα πολιτικών Μηχανικών Τομέας υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος
5. Πολυράκης Γ., 2003. Περιβαλλοντική γεωργία. Εκδοσεις Ψύχαλου
6. Σάββας Δ., Θερμοκηπιακές Καλλιέργειες εκτός Εδάφους, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
7. Σωτηράκογλου Α., 2006. Η καλλιέργεια της βιομηχανικής Τομάτας στο Νομό Θεσσαλονίκης, Α.Τ.Ε.Ι Κρήτης Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας Τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και Ανθοκομίας.
8. Τοροσίδης Ευστάθιος. Εκτίμηση της αζωτούχου θρέψης των ποικιλιών επιτραπέζιας χρήσης Σουλτανίνας και Βικτώριας με τη χρήση των μετρητών χλωροφύλλης SPAD – 502 CCM – 200, μεταπτυχιακή εργασία
9. Τσοροκόμος Κ., 2011. Επιχειρηματικό Σχέδιο Δημιουργίας Σύγχρονης Θερμοκηπιακής Μονάδας για την Καλλιέργεια Κηπευτικών, σελ 19-22

## Γ. Ιστοσελίδες

1. [http://www.ftiaxno.gr/2009/06/blog-post\\_02.html](http://www.ftiaxno.gr/2009/06/blog-post_02.html)
2. [http://www.aua.gr/gr/dep/fit/laxanokomia/GL\\_ppt9.pdf](http://www.aua.gr/gr/dep/fit/laxanokomia/GL_ppt9.pdf)
3. <http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/gmc543e/kef4.html>
4. <http://ikee.lib.auth.gr/record/125778/files/GRI-2011-6227.pdf>
5. [http://news.ari.gov.cy/content/Ydroponia\\_Exeiridio.pdf](http://news.ari.gov.cy/content/Ydroponia_Exeiridio.pdf)
6. <http://alagro.gr/kleista-systhmata>
7. [http://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/thermokipia/tehn\\_prod\\_thermokipion.pdf](http://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/thermokipia/tehn_prod_thermokipion.pdf)
8. [http://teidasoponias.gr/site/news/xtra/morfologia/threptika\\_stoixeia.pdf](http://teidasoponias.gr/site/news/xtra/morfologia/threptika_stoixeia.pdf)
9. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CF%80%CE%AD%CF%81%CF%85%CE%B8%CF%81%CE%B7\\_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A5%CF%80%CE%AD%CF%81%CF%85%CE%B8%CF%81%CE%B7_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1)

