



**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
Καταπονήσεων σε Καλλιέργεια Τομάτας**



Αυγουστάκη Δάφνη-Δέσποινα

**Επιβλέπων Καθηγητής
Κατσούλας Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής**

Βόλος, Ιούνιος 2016

**Θέμα Μεταπτυχιακής Διατριβής
Χρήση Αισθητήρων Μέτρησης από Απόσταση για
Ανίχνευση Καταπονήσεων σε Καλλιέργεια Τομάτας**

**Επίθετο: Αυγουστάκη
Όνομα: Δάφνη-Δέσποινα
Α.Μ.: 67**

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Κατσούλας

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

**Νικόλαος Κατσούλας, Αν. Καθηγητής Π.Θ., Επιβλέπων ΜΔΕ
Κων/νος Κίττας, Καθηγητής Π.Θ.
Ευθυμία Λεβίζου, Λέκτορας Π.Θ.**

Βόλος, Ιούλιος 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 πραγματοποίησή της.

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Κατσούλα, για την πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγησή του και την 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 Καθηγητή κ. Κων/νο Κίττα και την Λέκτορα Ευθυμία Λεβίζου, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

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

Ευχαριστώ τους φίλους μου Ειρήνη Μπρόζου, Μιλτιάδη Καρόκια, Θανάση Δόλγυρα, Χαρά Δημητριάδου, Χρήστο Κυρίτση, Άλκιστης-Ελένη Κοσμά, Κων/να Καραχρήστου, Βασίλη Δημητρακόπουλο και Κατερίνα Ευσταθίου για την έμπρακτη και ηθική υποστήριξή τους και για την κατανόησή τους, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Ελένη Δραμητινού, Παναγιώτη Αυγουστάκη και τον αδερφό μου Γιάννη Αυγουστάκη για την ολόψυχη αγάπη και οικονομική και ηθική υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία στην μητέρα μου.

Δάφνη-Δέσποινα Αυγουστάκη

Περίληψη

Η διαχείριση της θρεπτικής και υδατικής κατάστασης των καλλιεργειών είναι ένα ζωτικής σημασίας έργο για την κερδοφορία της απόδοσης των καλλιεργειών ιδιαίτερος σε καλλιέργειες θερμοκηπίου όπου σε καθημερινή βάση λαμβάνουν χώρα πολλές και διαφορετικές δόσεις θρεπτικού διαλύματος. Όταν ένα φυτό καταπονείται, η καταπόνηση αυτή μπορεί να αποδοθεί με την εμφάνιση πολλών συμπτωμάτων. Η αζωτική καταπόνηση των φυτών συγκεκριμένα, μειώνει την περιεχόμενη περιεκτικότητα της χλωροφύλλης των φύλλων και παρεμποδίζει την φωτοσύνθεση, έχοντας ως αποτέλεσμα την αλλαγή στον χρωματισμό των φύλλων. Επιπρόσθετα, επηρεάζεται η ανάκλαση της καλλιέργειας, ο φθορισμός της χλωροφύλλης καθώς επίσης και ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας των φύλλων (LAI). Η πρόωμη ανίχνευση της καταπόνησης των φυτών είναι πολύ κρίσιμη ειδικά σε εντατικά συστήματα παραγωγής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι οξείες και χρόνιες απώλειες της παραγωγικότητας. Μέχρι πρόσφατα, οι τεχνικές που αφορούν τη διαχείριση των θρεπτικών διαλυμάτων βασιζόνταν σε μεθόδους όπως είναι η μελέτη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τις καλλιέργειες εκτός εδάφους ή της έντασης του νερού του εδάφους, η μέθοδος της φυλλοδιαγνωστικής και η μέτρηση της χλωροφύλλης. Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν άμεσες πληροφορίες ως προς την περιεκτικότητα του νερού και των θρεπτικών συστατικών του φυτού ωστόσο απαιτούν την άμεση επαφή με το φυτό ή καταστροφική δειγματοληψία του φυτού ή τμήματος αυτού. Τα τελευταία χρόνια, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στη διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης της άρδευσης και θρέψης μέσω θερμικών δεικτών και δεικτών ανάκλασης. Η υπέρυθρη θερμογραφία και οι οπτικοί αισθητήρες ανάκλασης είναι μη καταστρεπτικές τεχνικές οι οποίες έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και έχουν τη δυνατότητα να καταγράφουν τη θερμική ή ανακλώμενη ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια ενός ή περισσότερων φύλλων, από απόσταση. Η χρήση αισθητήρων αυτού του τύπου, με την εφαρμογή 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 και καλλιέργειας. Στη συνέχεια ακολουθεί η θεωρητική ανάλυση της μεθόδου και της συσχέτιση δεικτών με την θρεπτική κατάσταση των φυτών, ενώ με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρουσιάζονται και αξιολογούνται οι πιο αποτελεσματικοί δείκτες για την ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης. Σύμφωνα με την παρούσα έρευνα, παρατηρείται ότι τα φυτά μπόρεσαν να ανιχνεύσουν την αζωτική καταπόνηση δέκα ημέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου που τους χορηγήθηκε. Τέλος, τα αποτελέσματα από την παρούσα έρευνα έδειξαν ότι οι δείκτες sPRI, mrSRI και mrNDVI μπορούν να αποτελέσουν σήμα ανίχνευσης διαφορετικών επιπέδων θρεπτικής καταπόνησης και ότι οι δείκτες TCARI και PRI θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τις τιμές συγκέντρωσης της χλωροφύλλης και του ρυθμού της φωτοσύνθεσης αντίστοιχα, σε πραγματικό χρόνο, από απόσταση.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	σελίδα 6
1.1. Θεωρητική ανάλυση υδροπονίας-Μέθοδοι υδρολίπανσης	σελίδα 9
1.2. Θρέψη	σελίδα 12
1.2.1. Ο ρόλος της θρέψης στην υδροπονία	σελίδα15
1.2.2. Έλεγχος της θρέψη σε υδροπονική καλλιέργεια	σελίδα17
1.2.3. Νέα μέθοδος προσδιορισμού της θρέψης μέσω της μέτρησης της ανακλώμενης ακτινοβολίας της καλλιέργειας	σελίδα18
1.2.3.1.Δείκτες ανάκλασης	σελίδα21
1.2.3.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των δεικτών ανάκλασης	σελίδα23
1.3. Αισθητήρες	σελίδα26
1.3.1. Τύποι αισθητήρων	σελίδα27
1.3.2. Πρωτόκολλο εφαρμογής και βαθμονόμηση αισθητήρων Απεικόνισης	σελίδα30
1.3.3. Μέθοδοι επεξεργασίας υπερφασματικής εικόνας	σελίδα34
1.4. Στόχος εργασίας	σελίδα37
2. Υλικά και μέθοδοι	σελίδα38
2.1. Εγκαταστάσεις και καλλιέργεια	σελίδα38
2.2.Μετρήσεις	σελίδα42
2.3.Βαθμονόμηση αισθητήρων	σελίδα46
3. Αποτελέσματα	σελίδα53
3.1.Εξέλιξη και μελέτη βιοτικών δεικτών θρεπτικής καταπόνησης	σελίδα56
3.2.Εξέλιξη καμπυλών ανάκλασης της καλλιέργειας μέσω θρεπτικής καταπόνησης	σελίδα62
3.3.Μελέτη των μεταβολών των δεικτών ανάκλασης	σελίδα72
4. Συζήτηση-Συμπεράσματα	σελίδα77
5. Βιβλιογραφία	σελίδα82

1. Εισαγωγή

Η έκταση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών αυξάνεται συστηματικά με την πάροδο του χρόνου στην περιοχή της Μεσογείου, καθώς αποτελεί την πιο παραγωγική μορφή πρωτογενούς αγροτικής παραγωγής. Στην Ελλάδα, πάνω από 56.000 στρέμματα καλύπτονται από περισσότερες από 10.000 θερμοκηπιακές μονάδες, όπου απασχολούνται περίπου 25.000 εργάτες. Η έκταση αυτή αυξάνεται χρόνο με τον χρόνο, με ρυθμό περίπου 1.500 στρέμματα/έτος (ΕΣΥΕ, 2011). Πιο συγκεκριμένα, το 50% αυτών βρίσκονται στην Κρήτη, το 25% στη Πελοπόννησο και τα υπόλοιπα διάσπαρτα στην υπόλοιπη Ελλάδα, κυρίως σε Πρέβεζα και Μακεδονία.

Ένας από τους λόγους που οδήγησαν σε αυτή την συνεχώς αυξανόμενη επέκταση των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων, είναι οι ακραίες και απρόβλεπτες κλιματικές συνθήκες (αέρας, χαλάζι, βροχές). Οι επιστήμονες μιλώντας για κλιματική αλλαγή εννοούν την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, που οφείλεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η χρήση υλικών κάλυψης σε ένα θερμοκήπιο επιτρέπει την διεύθυνση της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε διαφορετικά μήκη κύματος, εμποδίζοντας παράλληλα τη διαφυγή της θερμικής ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Έτσι, μέσα στο θερμοκήπιο επικρατεί η επιθυμητή θερμοκρασία του αέρα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η δυνατότητα ανάπτυξης φυτών σε περιοχές με δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Μία άλλη παράμετρος που ευνοεί στην ανάπτυξη των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων, είναι η μειωμένη διαθεσιμότητα του υπόγειου υδροφορέα, κυρίως στην περιοχή της Μεσογείου. Τέλος, η μόλυνση του περιβάλλοντος και η παρουσίαση προβλημάτων στην ποιότητα και την ασφάλεια των τροφίμων, καθώς επίσης και η ικανότητα των θερμοκηπίων να παρέχουν παραγωγή υψηλής ποιότητας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, συντέλεσαν ευνοϊκά στην ανάπτυξη αυτή.

Το θερμοκήπιο, είναι μια κατασκευή «κλειστού τύπου» με ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος όπου μπορούν να καλλιεργηθούν λαχανικά, φρούτα ή καλλωπιστικά φυτά. Ανάλογα με τη ρύθμιση του εσωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Οι εχθροί και οι ασθένειες των φυτών περιορίζονται σημαντικά και υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των αναγκών του φυτού ως προς την υγρασία και τη

θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των αναγκών του φυτού ως προς τη θρέψη και την άρδευση του φυτού, πετυχαίνοντας μέγιστη παραγωγή.

Ο παραδοσιακός τρόπος της καλλιέργειας των λαχανοκομικών ειδών στο θερμοκήπιο είναι κυρίως στο έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση, προβλήματα αποστράγγισης του εδάφους και συσσώρευσης αλάτων σε αυτό (λόγω της συνεχής λίπανσης) συντελούν στη μείωση της παραγωγής. Η υδροπονική τεχνική καλείται να δώσει λύση στα τεράστια προβλήματα της καλλιέργειας στο χώμα. Επί της ουσίας, καλείται να παράξει λαχανικά και φρούτα με ελάχιστο νερό, θρέψη και ελάχιστη επιβάρυνση στο περιβάλλον.

Στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις και κυρίως στην υδροπονία, η διαχείριση της άρδευσης και της θρέψης της καλλιέργειας, αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πρακτικές εφαρμογές. Ο αποτελεσματικός έλεγχος της υδρολίπανσης στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες βελτιστοποιεί την ποσότητα και την ποιότητα της παραγωγής, ενώ μειώνει στο ελάχιστο τις εισροές στο σύστημα της καλλιέργειας. Στην υπαίθρια καλλιέργεια το νερό που απαιτείται είναι περίπου 60 λίτρα ανά κιλό τομάτας. Στο κλασικό θερμοκήπιο (χώμα), αυτή η ποσότητα μειώνεται στα 25-30 λίτρα. Με το ανοιχτό σύστημα υδροπονίας (χωρίς ανακύκλωση νερού) μειώνεται στα 20 και στην περίπτωση ανακύκλωσης (κλειστό σύστημα), η ποσότητα του νερού μειώνεται στα 15 λίτρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, με τη χρήση κλειστού συστήματος, η χρήση των λιπασμάτων μπορεί να μειωθεί μέχρι και 50%. Όλες οι παραπάνω παράμετροι συντελούν σημαντικά στη μείωση του κόστους παραγωγής (Τσορομώκος, 2011).

Η υδροπονική καλλιέργεια, η οποία κερδίζει διεθνώς έδαφος έναντι των παραδοσιακών μεθόδων, στη χώρα μας παραμένει σε πολύ πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, καθώς αγγίζει μόλις το 7% (1500 στρέμματα) (ΥπΑΑΤ, 2007; Agrenda, 2007). Το ποσοστό αυτό είναι πολύ μικρό, όταν σε άλλες χώρες η υδροπονική καλλιέργεια αποτελεί είτε τον κανόνα είτε έναν πολλά υποσχόμενο και αναδυόμενο κλάδο. Ενώ, το ποσοστό των τεχνολογικά εξοπλισμένων και αυτοματοποιημένων υδροπονικών εγκαταστάσεων στη χώρα μας είναι ακόμη μικρότερο. Λόγω των παραπάνω στατιστικών, γίνεται εμφανής η ανάγκη για την εισαγωγή εξελιγμένων και αυτοματοποιημένων νέων τεχνολογιών στις υδροπονικές θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις με σκοπό την εξέλιξή τους και τη βελτιστοποίησή τους.

Μέχρι τώρα, ο έλεγχος της υδρολίπανσης στα νέας γενιάς υδροπονικής καλλιέργειας θερμοκήπια, βασίζεται κυρίως σε αισθητήρες μέτρησης υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος ή μοντέλα προσδιορισμού της διαπνοής του φυτού μέσω της ολοκλήρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι μέθοδοι αυτοί αν και δίνουν πληροφορίες σχετικά με την υδρολίπανση του φυτού παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα. Μερικά από αυτά τα μειονεκτήματα είναι η μεγάλη χρονική υστέρηση στον εντοπισμό της καταπόνησης, η έμμεση φύση της μέτρησης, η αβεβαιότητα σχετικά με το κατά πόσο είναι αντιπροσωπευτικό το αποτέλεσμα εξαιτίας των σημειακών μετρήσεων, η ανάγκη για επαφή των αισθητήρων με κάποιο τμήμα του φυτού, η ανάγκη για καταστροφή τμήματος ή συνόλου του φυτού και η πολυπλοκότητα της εφαρμογής και της αυτοματοποιημένης λήψης δεδομένων.

Στο πλαίσιο αυτό, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στη διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης της λίπανσης και της άρδευσης, με χρήση άμεσων μετρήσεων φυτικών παραμέτρων, μέσω οπτικών αισθητήρων. Η χρήση οπτικών αισθητήρων (υπερφασματική κάμερα-remote sensing) από απόσταση, δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να καταγράψει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλά ένα φυτό. Με αυτό τον τρόπο, δεν απαιτείται η μερική ή ολική καταστροφή του φυτού. Επίσης οι μετρήσεις δίνονται στον χρήστη σε πραγματικό χρόνο, από το ίδιο το φυτό χωρίς να επηρεάζονται από τις κλιματολογικές και εδαφολογικές συνθήκες που επικρατούν στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις. Η μεταβολή της ανακλώμενης ακτινοβολίας της καλλιέργειας από 400nm-2500nm, ανάλογα με τη συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος στο σπογγώδες παρέγχυμα ή της συγκέντρωσης του αζώτου στους μεσοκυττάρους χώρους, οδηγεί στην ανίχνευση διαφορετικών επιπέδων θρεπτικής και υδατικής καταπόνησης.

Παρακάτω, θα αναπτυχθεί και θα μελετηθεί η ανάπτυξη μιας μεθόδου όπου 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. Επιπλέον, θα μελετηθεί η εξέλιξη της ανακλώμενης ακτινοβολίας σε διαφορετικά μήκη κύματος ανάλογα με την θρεπτική κατάσταση του φυτού, καθώς και η

θεωρητική ανάλυση της μεθοδολογίας 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, καθώς και στα χρησιμοποιούμενα υλικά σκελετού και κάλυψης. Ανάλογα με το σχήμα των θερμοκηπίων 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 παραγωγούς ή από 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 γίνεται αντιληπτό ότι ενώ το έδαφος είναι το κυρίαρχο μέσο για την καλλιέργεια των φυτών, δεν είναι όμως πάντοτε και το ιδανικότερο, κυρίως στις περιπτώσεις διαχείρισης προβληματικών (κακή δομή και σύσταση, κακή στράγγιση, φτωχή γονιμότητα, αλατότητα, παθογόνα κ.α.) και ακατάλληλης ποιότητας υποστρωμάτων (έρημοι, παραθαλάσσιες περιοχές, βραχώδεις εκτάσεις κ.α.). Ήδη σε αρκετές χώρες του εξωτερικού, όπως είναι η Ολλανδία καλλιεργούνται τα λαχανοκομικά στο σύνολό τους σε υδροπονικές τεχνικές εκτός εδάφους.

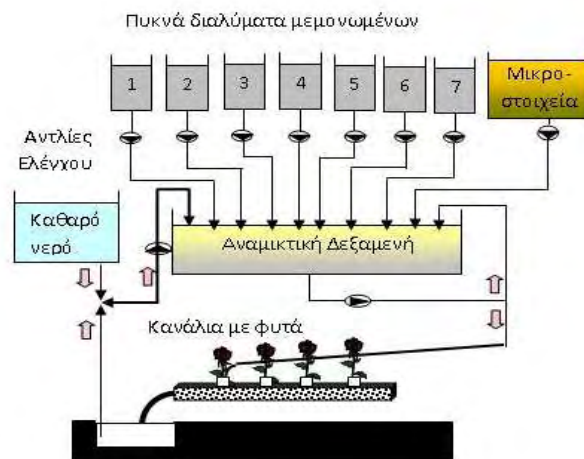
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέσω των υδροπονικών συστημάτων γίνεται ορθολογική χρήση νερού (στα κλειστά συστήματα, απώλειες νερού μόνο εξ' αιτίας της διαπνοής) και ορθολογική χρήση των λιπασμάτων (από τις ποσότητες των λιπασμάτων που εφαρμόζονται στο έδαφος, εκτιμάται ότι μόνο το 20-50% αξιοποιείται από τις καλλιέργειες) (HydroFlies, 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 η όχι υπόστρωμα για την ανάπτυξη και τη 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 (Rockwool Culture)
 - 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 (Vernooy, 1992). 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 ένα διάγραμμα ροής ενός κλειστού υδροπονικού συστήματος καλλιέργειας.



Εικόνα 1. Σύστημα λίπανσης σε κλειστό σύστημα θερμοκηπίου

Ο ρόλος της υδρολίπανσης αποτελεί πρωταρχικό μέλημα για την εκάστοτε θερμοκηπιακή καλλιέργεια. Για το λόγο αυτό, σημαντικό ρόλο στην καλλιέργεια των θερμοκηπιακών προϊόντων παίζει το σύστημα λίπανσης που τροφοδοτεί τα φυτά με όλα τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την σωστή αύξηση και ανάπτυξή τους.

Η υδρολίπανση είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές μορφές λίπανσης, λόγω του γεγονότος ότι καταφέρνει να εφαρμόσει συγκεκριμένη ποσότητα λιπαντικών στοιχείων κατευθείαν και στις ακριβείς περιοχές και θέσεις των φυτών που ποτίζονται και εκεί που αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα του φυτού. Επίσης, συντελεί στην μείωση του εργατικού κόστους και της ενέργειας για την εκτέλεση της λίπανσης. Προσφέρει τη δυνατότητα εφαρμογής των λιπασμάτων στους κατάλληλους χρόνους, ανάλογα με την καλλιέργεια και το στάδιο του βλαστικού κύκλου, χωρίς να επηρεάζεται από τον τύπο και την κατάσταση του εδάφους (καταλληλότητα εδάφους για μηχανήματα διανομής λιπασμάτων). Και τέλος, δίνει τη δυνατότητα για υψηλή ομοιομορφία διανομής των λιπασμάτων.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την παροχή των λιπασμάτων μέσω του νερού στα φυτά μπορεί να είναι (Εικόνα 2):

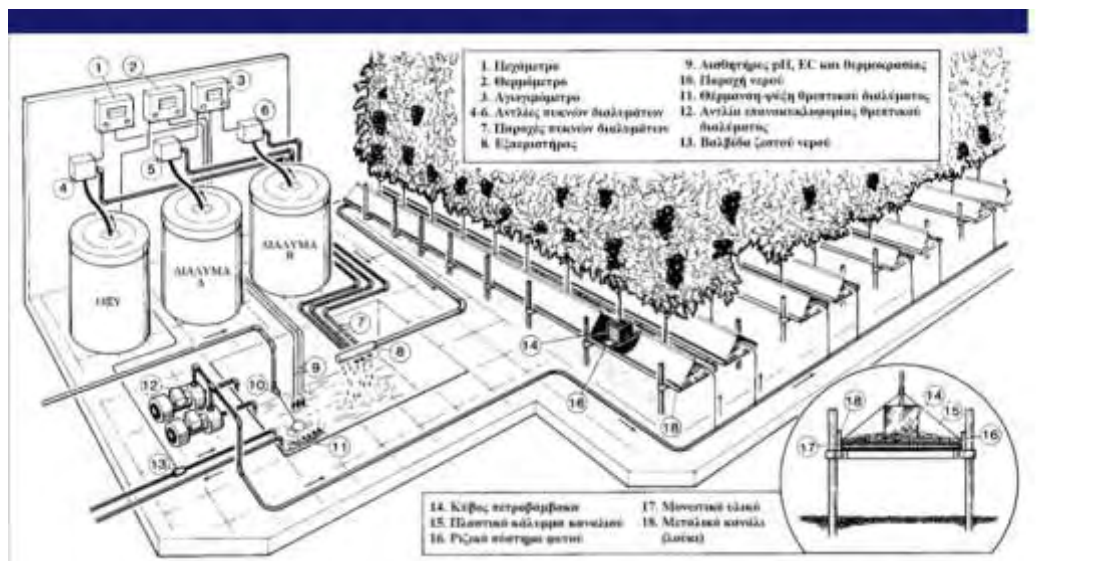
1. Υδρολιπαντήρες
2. Δοσομετρικές αντλίες

Νερό + λιπάσματα = θρεπτικό διάλυμα

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

- A. Με ανάμειξη των λιπασμάτων κατευθείαν στο νερό της άρδευσης
- B. Με χωριστό δοχείο προετοιμασίας του διαλύματος της υδρολίπανσης

Κατά την εφαρμογή του κλειστού συστήματος θερμοκηπίου, για την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων, πραγματοποιείται η χρησιμοποίηση μεμονωμένων δεξαμενών για κάθε θρεπτικό στοιχείο. Αυτό κρίνεται απαραίτητο διότι σε κάθε κύκλο του θρεπτικού διαλύματος, λόγω της διαφορετικής απορρόφησης κάθε στοιχείου από τα φυτά, το ανακυκλωμένο διάλυμα χάνει την 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 ανακυκλωμένου διαλύματος είναι ακριβής γιατί βασίζεται στην απορρόφηση κάθε στοιχείου χωριστά. Επιπρόσθετα, έχει δοθεί η δυνατότητα στους γεωργούς, για τη δημιουργία παρασκευής πολλών διαφορετικών συνταγών ανάλογα με το είδος και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας.



Εικόνα 2. Σύστημα υδρολίπανσης σε θερμοκήπιο

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 δόση λίπανσης μπορεί να προκληθούν αρνητικές επιπτώσεις στη φυσιολογία του φυτού.

Είναι γνωστό πως οι απαιτήσεις των φυτών σε άζωτο ποικίλουν 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 μορφή αμμωνίας είτε με μορφή νιτρικών. Η καλλιέργεια τομάτας, απορροφά και τις δύο μορφές αζώτου (NO_3^- και NH_4^+) (Lazaridou-Athanasiadou, 2004). Όταν παρατηρείται αυξημένη αναλογία NH_4^+/N^- , τότε η βλαστική ανάπτυξη καθώς και η απόδοση της καλλιέργειας μειώνεται. 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, και προκαλεί τοξικότητα αμμωνίας.

Πιο αναλυτικά, το άζωτο είναι βασικό συστατικό πολλών οργανικών ενώσεων του κυττάρου, μεταξύ των οποίων οι πρωτεΐνες οι οποίες αποτελούν το κύριο μέρος του πρωτοπλάσματος και των νουκλεϊνικών οξέων, που περιέχουν την κωδικοποιημένη γενετική πληροφορία (Lydakis-Simadiris, 2005). Οι δύο αυτές μεγάλης σημασίας αζωτούχες ουσίες (πρωτεΐνες και νουκλεϊνικά οξέα) 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 την φωτοσύνθεση και τον 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 τη 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, 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 (Peñuelas et al., 1994). Η αύξηση του ποσού του περιεχόμενου αζώτου στα φύλλα προσδίδει μεγάλη αποτελεσματικότητα στη χρήση του νερού αυξάνοντας την αγωγιμότητα του μεσόφυλλου και μειώνοντας την αναλογία ανάμεσα στην αγωγιμότητα των στοματίων (GS) και στην αγωγιμότητα του μεσόφυλλου (GM) (Flexas et al., 2013). Στην περίπτωση που η GM μειωθεί, ο ρυθμός καρβοξυλίωσης του ενζύμου RUBISCO ανά μάζα μειώνεται, μειώνοντας ταυτόχρονα την αφομοίωση CO₂ ανά μάζα αζώτου. Ωστόσο, η φωτοσυνθετική παραγωγή και ο ρυθμός παραγωγής του RUBISCO συνδέεται στενά με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη (OM) στον ιστό του φύλλου (Schlemmer et al., 2005), ενώ το N είναι η μόνη ένωση που επηρεάζει την πραγματική εξαγωγή περιεκτικότητα χλωροφύλλης (Schlemmer et al., 2005; Silleos et al., 2006).

Επειδή το άζωτο συμμετέχει στην πρωτεϊνική σύνθεση, αλλά κυρίως στη δομή της χλωροφύλλης, τα συμπτώματα έλλειψης του εμφανίζονται αρχικά υπό μορφή χλώρωσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στα ηλικιωμένα κατώτερα φύλλα, τα οποία ως χλωρωτικά κιτρινίζουν και πέφτουν. Τα πιο νέα φύλλα (δηλαδή τα κορυφαία) 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 σ' ένα φυτό μπορεί να προσδίδει ελαφρώς πράσινο χρώμα στα ανώτερα φύλλα και κίτρινο στα κατώτερα.

Παράλληλα με τη χλώρωση αναπτύσσονται ανθοκυανίνες και μπεταλαΐνες στους μίσχους και κατά μήκος των "νεύρων" του πλατύσματος των φύλλων (Βαφειάδης, Σταματιάδου). 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 με εντονότερη ανάπτυξη του βλαστού και των φύλλων, όμως μπορεί να προκαλέσει βράχυνση της ρίζας. Στα φυτά, οι πρωτεΐνες είναι τα πλουσιότερα σε άζωτο συστατικά αφού συγκεντρώνουν περίπου το 80 με 85% του συνολικού αζώτου. Εξάλλου το άζωτο των νουκλεϊνικών 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 στα φυτά (Βαφειάδης, Σταματιάδου). Ανεξάρτητα από τη μορφή των πρωτεϊνών, αποταμιευτικές ή με ενζυμική δράση, η ποσοτική παρουσία τους επηρεάζεται από την παρεχόμενη ποσότητα αζωτούχων λιπασμάτων. Σε μελέτες που έχουν γίνει πάνω στα τεύτλα και ειδικότερα στο παντζάρι καθώς και σε υδροπονικές καλλιέργειες τομάτας, έχει βρεθεί ότι η έλλειψη αζώτου προκαλεί επίσης και μείωση στην μετακίνηση νερού από της ρίζες στα φύλλα με συνέπεια την μείωση της διαπνοής των φυτών (Βαφειάδης, Σταματιάδου).

Από την άλλη πλευρά, αν και η αύξηση της χορηγούμενης ποσότητας αζώτου έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση του γήρατος και προώθηση της αύξησης του φυτού, πέραν τούτου προκαλεί και μεταβολές στη μορφολογία του φυτού. Διαφορετικά συμπτώματα ανιχνεύονται στην περίπτωση της περίσσειας αζωτολίπανσης. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μία 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 (ομοιομορφία στην ανάπτυξη των φυτών, προγραμματισμός παραγωγής, υψηλότερες αποδόσεις), βελτιώνεται η ποιότητα και η εμφάνιση των προϊόντων, 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 το οποίο περιέχει όλα τα θρεπτικά στοιχεία (νερό και λιπάσματα δηλαδή) που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών.

Ένα πλήθος θρεπτικών συστατικών χαρακτηρίζονται απαραίτητα στην υδροπονική τεχνική, για την ανάπτυξη των φυτών εξαιτίας του ότι 1) το φυτό δεν μπορεί να ολοκληρώσει το βιολογικό του κύκλο σε συνθήκες έλλειψης του στοιχείου αυτού, 2) η επίδραση του στοιχείου αυτού είναι καθορισμένη (εξειδικευμένη) και δεν μπορεί να υποκατασταθεί από άλλο στοιχείο, 3) το στοιχείο αυτό πρέπει άμεσα να

εμπλέκεται στη θρέψη του φυτού, αποτελώντας συστατικό ενός απαραίτητου μεταβολίτη ή ενζύμου και τέλος, 4) δεν μπορεί να απορροφήσει κάποια από τα στοιχεία από κάπου αλλού, όπως 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, καθώς επίσης σε αυτό το εύρος γίνεται καλύτερη πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων. Από την άλλη πλευρά, η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται από την συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων του διαλύματος. Δεν υπάρχει κάποιος σταθερός κανόνας για το ποια είναι η άριστη ηλεκτρική αγωγιμότητα για την καλλιέργεια της τομάτας (ή για οποιαδήποτε καλλιέργεια) γιατί εξαρτάται από την αρχική αγωγιμότητα του νερού. Αν η αρχική αγωγιμότητα του νερού είναι υψηλή, κατά συνέπεια υπάρχει και υψηλή συγκέντρωση νατρίου (έντονο φαινόμενο σε παραθαλάσσιες περιοχές), οπότε κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη θρεπτικών στοιχείων με στόχο τη μείωση του ανταγωνισμού των φυτών για την πρόσληψη Ca, Na καθώς επίσης 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, όπου πρέπει να είναι ελαφρώς υψηλότερη από το αρχικό θρεπτικό διάλυμα. Για παράδειγμα, αν σε καλλιέργεια τομάτας η επιθυμητή τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι 2,5mS/cm, τότε στο διάλυμα απορροής θα πρέπει να είναι 3mS/cm (Σάββας).

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 ένατης ταξιανθίας. Μετά το τέλος της συγκομιδής των δυο πρώτων ταξικαρπιών όπου μειώνεται το φορτίο των φυτών, η σχέση αυτή πέφτει στο 2. Συνήθως, η πρακτική εφαρμογή λίπανσης σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας διαφοροποιείται ως προς το στάδιο ανάπτυξης, από την αρχή της φύτευσης μέχρι την

έναρξη της συγκομιδής, από την έναρξη της συγκομιδής μέχρι 20 ημέρες πριν το τερματισμό της καλλιέργειας και μια τρίτη μέχρι το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου.

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. Επίσης η σχέση NH_4^+/N^- επηρεάζει το PH της απορροής του θρεπτικού διαλύματος. Από πειράματα, έχει προκύψει ότι η ιδανική αναλογία NH_4^+/N^- κυμαίνεται στο 0,1, 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 καλλιέργειας 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 της καλλιέργειας (για τον έλεγχο της λίπανσης στο επίπεδο της ρίζας), με φυλλοδιαγνωστική και με μακροσκοπική παρατήρηση συμπτωμάτων. Οι μέθοδοι αυτοί παίρνουν την πληροφορία από την περιοχή της ρίζας και όχι από το ίδιο το φυτό. Σε διαφορετική περίπτωση, όπου η πληροφορία αντλείται από το ίδιο το φυτό (φυλλοδιαγνωστική, μακροσκοπική παρατήρηση κλπ.), η μέθοδος είτε είναι χρονοβόρα καθώς απαιτεί την 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. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την

κριτική συγκέντρωση είναι η ποικιλία, η ηλικία του φυτικού ιστού, το είδος του φυτικού ιστού (έλασμα, μίσχος), η εποχιακή μεταβολή κριτικών συγκεντρώσεων (μικρότερες μεταβολές Ιούνιος-Ιούλιος), οι κλιματικές συνθήκες (π.χ. βλάστηση) και η αλληλεπίδραση των θρεπτικών στοιχείων. Ωστόσο αποτελεί μία μέθοδο, που για τον εντοπισμό της ελλειψής ή περίσσειας λίπανσης χρειάζεται εργαστηριακή μελέτη των δειγμάτων και είναι αρκετά χρονοβόρα.

Αντίστοιχα, η **ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)** δε δίνει καμία πληροφορία για το είδος των αλάτων, που είναι διαλυμένα σε ένα διάλυμα, αλλά μόνο για τη συνολική τους συγκέντρωση. Παρόλα αυτά, στην πράξη η αγωγιμότητα χρησιμοποιείται σαν βασικό μέγεθος αναφοράς, τόσο κατά την παρασκευή, όσο και κατά τον έλεγχο της σύνθεσης των θρεπτικών διαλυμάτων, λόγω της ευκολίας με την οποία μετράται. Πρέπει να τονιστεί ότι η EC επηρεάζεται πρακτικά μόνο από τις συγκεντρώσεις των κύριων θρεπτικών στοιχείων και όχι από τα ιχνοστοιχεία, λόγω της πολύ μικρότερης συγκέντρωσής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η EC να μην παρέχει καμία πληροφορία σχετικά με τις συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων.

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

Μία νέα μέθοδος προσδιορισμού της θρέψης στο πεδίο, είναι η μέτρηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας του φυτού με τη χρήση αισθητήρων ανάκλασης. 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 (απορροφούμενη ακτινοβολία)
- ακτινοβολία που εκπέμπεται από το φύλλο ως αποτέλεσμα της δομής του (εκπεμπόμενη 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 επεσήμαναν τη δυνατότητα εκτίμησης της υδατικής ή θρεπτικής κατάστασης, σε διαφορετικά μήκη κύματος. Προέκυψε ότι αν και τα φύλλα των φυτών συχνά μοιάζουν όμοια, ποικίλουν ευρέως τόσο σε σχήμα όσο και σε χημική σύσταση, ενώ μεταβάλλεται η περιεκτικότητα των θρεπτικών στοιχείων στους ενδοκυτταρικούς χώρους των φύλλων. Σαν αποτέλεσμα έχει την συνεχή ποικίλη συμπεριφορά στην ανάκλαση των φυτών. Στην Εικόνα 3 παρατηρείται η απεικόνιση της εσωτερικής κατασκευής ενός φύλλου και πως η ηλιακή ακτινοβολία αντιδρά όταν προσπίπτει σε αυτό.

Συνήθως τα φύλλα απορροφούν την πλειονότητα της ακτινοβολίας, στο ορατό φάσμα (400-700nm), 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 οξειδωτική της ξανθοφύλλης, με αποτέλεσμα τα στομάτια να κλείνουν και ο ρυθμός απορρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) 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 στη ατμόσφαιρα ως ανακλώμενη ακτινοβολία ενώ το υπόλοιπο μέρος διαχέεται ως θερμότητα ή επαναεκπέμπεται ως φθορισμένη χλωροφύλλη. Επιπροσθέτως, υπό συνθήκες θρεπτικής καταπόνησης επηρεάζεται ο δείκτης φωτοσύνθεσης και συνεπώς η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια η οποία απορροφάται από το φύλλο εξαιτίας της συμμετοχής των θρεπτικών στοιχείων στη φωτοσυνθετική διαδικασία ως συστατικό των φωτοσυνθετικών ενζύμων και της χλωροφύλλης. Η περιεκτικότητα του φύλλου σε χλωροφύλλη μειώνεται, το φύλλο αλλάζει χρώμα από πράσινο σε κιτρινοπράσινο και λιγότερη ακτινοβολία χρησιμοποιείται από το φυτό. Αποτέλεσμα αυτής της δραστηριότητας είναι η αύξηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην κόκκινη περιοχή του φάσματος.

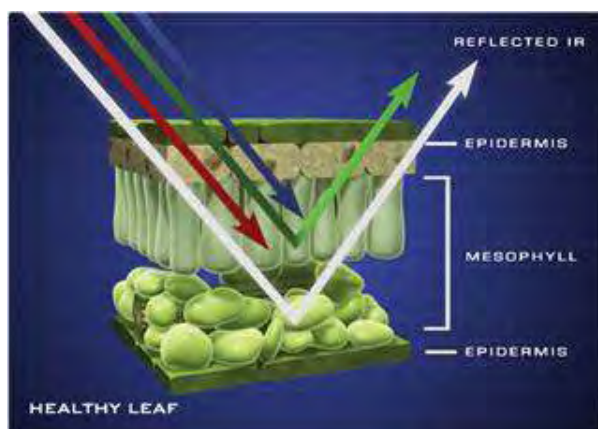
Από την άλλη πλευρά, τα φύλλα ανακλούν μεγαλύτερη ένταση της ακτινοβολίας στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου (700-1300nm). Σε αυτή την περιοχή, η ακτινοβολία προσπίπτει στο φύλλο, διαπερνά το πρώτο επίπεδο των χρωστικών και φτάνει στους μεσοκυττάρους και αεροφόρους χώρους (Τσιρογιάννης,

2010). Στη συνέχεια, η ακτινοβολία υπόκειται σε επιπλέον διάχυση και πολλαπλές ανακλάσεις, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας να επιστρέφει πίσω στο χώρο του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, η ανάκλαση στην φασματική περιοχή μεταξύ 680-750nm αντανάκλαται από την συγκέντρωση του νερού και των θρεπτικών συστατικών, ενώ η ανάκλαση στην περιοχή 750-800nm εξαρτάται κυρίως από την υδατική περιεκτικότητα των φύλλων. Η ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα από 950nm συνήθως απορροφάται από τους χυμούς του φύλλου ενώ η ακτινοβολία περίπου στα 1000nm απορροφάται από την ξηρή ουσία του φύλλου (άνθρακας και θρεπτικά συστατικά). Επιπλέον, η περιεκτικότητα του νερού στο σπογγώδες παρέγχυμα, η περιεκτικότητα του άνθρακα σε διαφορετικές μορφές (όπως σάκχαρα, κυτταρίνη, λιγνίνη και το άμυλο) στα μεσοφυλλικά κύτταρα και οι χημικές ενώσεις των θρεπτικών στοιχείων (N, P, K) στα μεσοφυλλικά κύτταρα επηρεάζουν τις φασματικές ιδιότητες των φύλλων.

Σε μήκη κύματος >1300nm, η ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας μειώνεται λόγω ισχυρής απορρόφησης της ενέργειάς της από το νερό που βρίσκεται μέσα στο φύλλο. Οι Peñuelas et al. (1997), αναφέρουν ότι η άμεση ανταπόκριση της ποσότητας του νερού που περιέχεται στους φυτικούς ιστούς, φαίνεται στις περιοχές 1400-1900nm. 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 δε μπορούν εύκολα να ενταχθούν σε αισθητήρες τηλεπισκόπησης. Σε αντίθεση με τη περιοχή NIR, στο μέσο της υπέρυθρης περιοχής (MIR 1mm-750nm), 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, λιγνίνη, άζωτο και άμυλο. Οι βασικές περιοχές απορρόφησης που δείχνουν την θρεπτική κατάσταση του φυτού βρίσκονται στα 1450nm, 1940nm και 2500nm 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 απορροφημένη 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. Οι Peñuelas et al. (1993), παρατήρησαν 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 (700-1300nm), δείχνουν πιο αντιπροσωπευτική εκτίμηση της υδατικής ή θρεπτικής κατάστασης του φυτού σε σχέση με τις τιμές ανάκλασης στο μακρινό υπέρυθρο (1300-2500nm), με την τιμή της μέτρησης να αυξάνεται κατά την εξέλιξη του υδατικού ελλείμματος, ως συνέπεια της απώλειας της κυτταρικής πίεσης σπαργής.



Εικόνα 3. Απεικόνιση ακτινοβολίας στην εσωτερική δομή φύλλου

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 και ως αποτέλεσμα να οδηγήσει στη μείωση του εύρους 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 του φυτού μπορεί να επηρεάσει την

φασματική ανταπόκριση του φυτού σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ότι η θρεπτική καταπόνηση των φυτών κατά την διάρκεια των εργαστηριακών μετρήσεων. Γι' αυτό το λόγο τιμές της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην πράσινη περιοχή του φάσματος ή στην ορατή περιοχή του φάσματος έχουν περισσότερο θόρυβο (ορίζεται το σύνολο των ανεπιθύμητων πληροφοριών, οι οποίες συνοδεύουν το σήμα και υποβαθμίζουν την ορθότητα και την ακρίβεια μίας μέτρησης) και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον φωτός).

Σύμφωνα με τους Köksal et al. (2010), ορισμένα μέρη του φάσματος μπορούν να επιλεγθούν 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 σχηματισμό φασματικών δεικτών ή δεικτών ανάκλασης (RI). Περισσότεροι από 150 φασματικούς δείκτες έχουν παρουσιαστεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών (Asner et al., 1998; Silleos et al., 2006; Borzuchowski and Sculz et al., 2010), άλλα 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 and Ranjan S. (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 (SR). 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 *Normalize Difference* (ND), ο οποίος ορίζεται ως η αναλογία της διαφοράς στην ανάκλαση μεταξύ δύο φασματικών περιοχών προς το άθροισμα της ανάκλασης αυτών των δύο περιοχών.

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

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 (SingleBands, 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 ή θρεπτικής 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., 2007 και Vigneau et al., 2011) παρατήρησαν μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας της χλωροφύλλης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας της καλλιέργειας στα 525-630nm, 640-660nm, στα 705nm, στα 730nm και στα 930nm. Άλλοι ερευνητές μελέτησαν τις αντίστοιχες φασματικές περιοχές, για την εκτίμηση των δεικτών σε σχέση με τη μεταβολή της συγκέντρωσης αζώτου στα φύλλα (Κυζερίδου, 2009). Οι Peñuelas et al., (1995) διαπίστωσαν ότι ο δείκτης $SIP1 (= (R_{800}-R_{445}) / (R_{800} + R_{680}))$ είχε υψηλή συσχέτιση με το λόγο των καροτενοειδών και της χλωροφύλλης-α. Οι Zhao et al. (2005), ανέφεραν ότι οι συγκεντρώσεις αζώτου και χλωροφύλλης στα φύλλα είχαν γραμμική συσχέτιση 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 $NDVI$ ($R_{NIR}-R_{RED}$) [= $(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$], $NDVI$ [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 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. Μετράει κυρίως στις περιοχές 680-800nm και 490-620nm. Πολλοί ερευνητές αναφέρουν ότι ο δείκτης $NDVI$ έχει υψηλή συσχέτιση με τη βιομάζα, τη χλωροφύλλη και τον 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 αποτελεσματικός δείκτης για την ανίχνευση του φύλλου σε περιεκτικότητα αζώτου και σε βιομάζα του φυτού. Σε έρευνα που έγινε από τους Katsoulas et al., (2014) υποστήριξαν ότι ο συγκεκριμένος δείκτης στα 680 και 800nm παραμένει αμετάβλητος με τις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών και πιο συγκεκριμένα της έντασης του φωτός. Σύμφωνα με τους Kim et al., (2010) ο δείκτης στην περιοχή 800-680 nm δίνει καλή συσχέτιση (0.68) με την εξέλιξη της υδατικής καταπόνησης σε δενδρύλλια μηλιάς, ενώ σύμφωνα με τους Amatyas et al., (2012), ο δείκτης στην περιοχή 800-640nm δίνει καλύτερο βαθμό συσχέτισης (0.81) με το ποσοστό της εδαφικής υγρασίας σε καλλιέργεια πατάτας. Από την άλλη πλευρά, ο δείκτης στην περιοχή 490-820nm 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 προσδιορισμό της περιεκτικότητας της χλωροφύλλης, αναλύοντας τα μήκη κύματος στα οποία είναι πιο ευαίσθητη λόγω της

μεταβολής σε Chl_a, 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 όπως και ο *MSR*, για την ανίχνευση φυλλικής επιφάνειας στις δασικές καλλιέργειες (Lagomasimo et al., 2014). Μέσω της στατιστικής μεθόδου ANOVA αποδείχτηκε ότι οι δείκτες *NDVI*, *SAVI* έδειξαν αποτελέσματα που παρουσίαζαν σημαντική στατιστική διαφορά ($p < 0,01$) με την μεταβολή του χώρου αλλά όχι και με την μεταβολή και την πάροδο του χρόνου.

Ο δείκτης *MTVI2* (Modified Triangular Vegetation Index Improved) μετράει κυρίως στις περιοχές 550-800nm. Αυτός ο δείκτης μπορεί να μετρήσει την ανάκλαση των φυτών χωρίς να επηρεάζεται από τη διακύμανση της χλωροφύλλης και την επίδραση της ανακλώμενης ακτινοβολίας του φόντου και των γειτονικών επιφανειών (Haboudane et al., 2003). Σύμφωνα με τους Giovanni et al., (2012) ο δείκτης δίνει καλή συσχέτιση (0,95) με την περιεκτικότητα χλωροφύλλης στα φυτά αγρωστωδών.

Ο δείκτης *PRI* (Photochemical Reflectance Index) μετράει κυρίως στις περιοχές 531-570nm. Σύμφωνα με τους Shrestha et al., (2012) ο δείκτης δίνει καλή συσχέτιση (0,92) μεταξύ του δείκτη και της θρεπτικής κατάστασης του φυτού, την απορρόφηση CO₂ και της αγωγιμότητας των στοματίων, σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας. Είναι κατάλληλος για την ανίχνευση της χλωροφύλλης και της αζωτικής περιεκτικότητας του φυτού. Τέλος, ο δείκτης *PRI* της μέσης τιμής μεταξύ 200-300nm μπορεί να είναι ένα εργαλείο για την ταχεία αξιολόγηση της θρεπτικής καταπόνησης ιδιαίτερα στην περιεκτικότητα του αζώτου. Οι Kittas et al., (2014) βρήκαν χαμηλή συσχέτιση του *PRI* με την περιεχόμενη εδαφική θρέψη σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας λόγω της χαμηλής έντασης φωτός, ενώ οι Katsoulas et al. (2014) παρατήρησαν ότι ο *PRI* της καλλιέργειας θερμοκηπιακής τομάτας μειώθηκε 0.07 σε 0.04 εξαιτίας της εναλλαγής των επιπέδων του. Οι Magney et al., (2016) αξιολόγησαν τον δείκτη *PRI* με άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια της αυξητικής περιόδου των φυτών και ενώ είχαν κανονικά επίπεδα θρέψης στα φυτά και χαμηλή θερμοκρασία αέρα, υπήρξε μικρή ανταπόκριση του *PRI* και ελάχιστη εξάπλωση των θρεπτικών συστατικών. Οι δείκτες της μέσης τιμής μεταξύ των 530-590nm 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 1710–2090nm δίνουν καλή συσχέτιση (0,93) στα συγκεκριμένα μήκη κύματος για σταθερής

ποσότητας αζώτου και σχετίζονται άμεσα με την περιεκτικότητα απορροφούμενης πρωτεΐνης και άζωτου που βρίσκεται στο φύλλωμα.

Δείκτης ανάκλασης	Μαθηματική εξίσωση
SR	R_{700}/R_{670}
SR	R_{800}/R_{670}
SR	R_{450}/R_{715}
SR	R_{450}/R_{715}
SR	R_{555}/R_{465}
VOGREI 1	R_{740}/R_{720}
PRI	$(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$
sPRI	$(R_{560}-R_{510})/(R_{560}+R_{510})$
rNDVI	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$
mrSRI	$(R_{750}-R_{445})/(R_{705}-R_{445})$
NDVI	$(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$
MSR	$((R_{800}/R_{680})-1)/\sqrt{((R_{800}/R_{680})+1)}$
SAVI	$(1+L)*(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680}+L)$
TCARI	$3*((R_{700}-R_{670})-0.2*(R_{700}-R_{550})*(R_{700}/R_{670}))$
MTVI2	$1,5*(1,2*(R_{800}-R_{550})/2,5*(R_{670}-R_{550}))/(\sqrt{(2*R_{800}+1)^2-(6*R_{800}-5*\sqrt{R_{670}})-0,5})$

Πίνακας 1. Δείκτες ανάκλασης

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 των ανάκλασης των φυτών. Πλέον έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές τεχνικές που στοχεύουν στην απόκτηση δεδομένων όσον αφορά την ανάκλαση των

φυτών με σκοπό τον προσδιορισμό ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των φυτών. Αρχικά οι μετρήσεις γίνονται σε εργαστηριακό επίπεδο και αργότερα, στη δορυφορική και εναέρια τηλεπισκόπηση. Υπάρχουν όμως, τόσο 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.

Την τελευταία δεκαετία, 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 των ανάκλασης των φυτών. Πλέον έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές τεχνικές που στοχεύουν στην απόκτηση δεδομένων όσον αφορά την ανάκλαση των φυτών με σκοπό τον προσδιορισμό ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των φυτών. 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 απεικονόμενης φασματοσκοπίας για την αποτύπωση της τηλεπισκόπησης οδηγεί στην απόκτησης μεγάλης ποσότητας δεδομένων ανάκλασης με υψηλότερη χωρική ανάλυση (Liaghat και Balasundram, 2010).

1.3.1. Τύποι αισθητήρων

Στη συνέχεια, γίνεται 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:

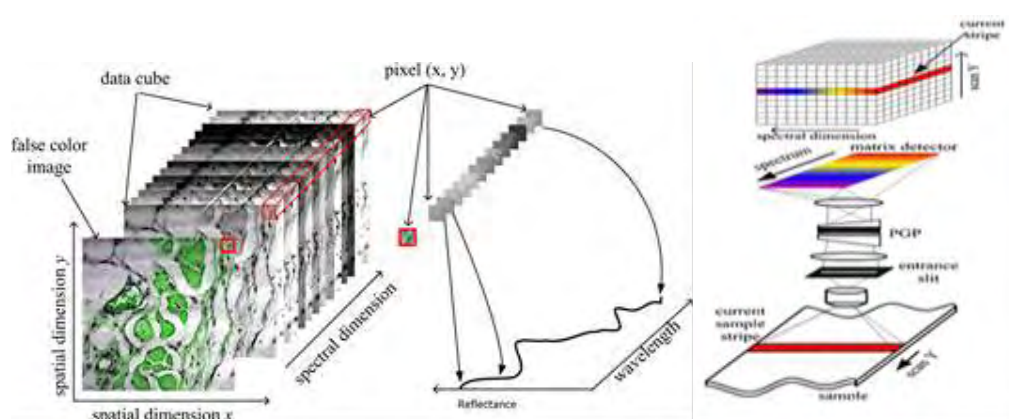
- (α) φασματόμετρα και ραδιόμετρα
- (β) απεικόνισης και μη απεικόνισης και
- (γ) ενεργητικοί ή παθητικοί.

Το βασικό χαρακτηριστικό της μη-απεικονισμένης φασματοσκοπίας του εκάστοτε πεδίου (spot) είναι η ικανότητα του αισθητήρα να επιτρέπει τη συνεχή ανίχνευση 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 εισόδο 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 έχουν συντελέσει στην ανάπτυξη οπτικών συστημάτων που έκανε εφικτή την ταυτόχρονη καταγραφή των διαφόρων ζωνών καθώς και των διαφόρων σημείων του στόχου. Τα συστήματα απεικόνισης επιτρέπουν, να εισέρχεται το φως στον αισθητήρα μέσα από μια σχισμή προσκρούοντας στην φωτοευαίσθητη περιοχή του ανιχνευτή, έτσι ώστε να δώσει ακριβής χωρική και φασματική ανάλυση, ενώ κάθε εικονοστοιχείο (pixel) λαμβάνει και δέχεται φως από διαφορετικές περιοχές του φάσματος (Huang και 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- Bognár και Berke, 2010). Ο αριθμός και η θέση των ζωνών σε κάθε σύστημα παρέχει ένα μοναδικό συνδυασμό φασματικών πληροφοριών, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στις απαιτήσεις του αισθητήρα που έχουν σχεδιαστεί για τη στήριξη του. 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 συνήθως χρησιμοποιούν τεχνικές σάρωσης προκειμένου να αποκτήσουν τα δεδομένα ανακλαστικότητας από διάφορα μέρη του στόχου με μια καταγραφή της εικόνας. Μερικές από αυτές τις μεθόδους σάρωσης είναι η whiskbroom, η paddle broom και η pushbroom τεχνική. Οι pushbroom σαρωτές έχουν μια 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 σε 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 τον 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-Ru Ho (2008), Panda (2012) και Li et al., (2013).



Εικόνα 4. Υπερφασματικός 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 Scopus. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα διαπιστώθηκε ότι το 11% των μελετών ακολουθούν πρωτόκολλα βασισμένα σε εργαστηριακές συνθήκες, με δειγματοληψία σε αποσπώμενα φύλλα. Όπως προαναφέρθηκε, 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 και 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, το 14% των ερευνών που χρησιμοποιούν αισθητήρες εδάφους, 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 βασίζονται 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 όπου 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 υλοποίηση της προσέγγισης του “speaking plant”, όπου η ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης θα 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 τη 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 (80-100cm), 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, συνίσταται 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 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 υπερφασματικοί όσο και οι πολυφασματικοί αισθητήρες απεικόνισης, 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 που 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. ανιχνευτής σκοτεινού ρεύματος, αισθητήρας θερμοκρασίας, αναγνώριση θορύβου, αριθμός των διαφραγμάτων του φακού, μεταβολή βαθμονόμησης) (Polder et al., 2003),

- Τη μεθοδολογία που ακολουθείτε κατά τη διάρκεια της μέτρησης (π.χ. ο τρόπος που η 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 και Huete, 1991; Bastiaanssen et al., 2000; Aparicio et al., 2004) και

- Οι 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 επιλεγθούν 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 καθώς επίσης προσαρμόζεται η αντιστάθμισή (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 οργάνου. 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

αντανεκλάται από το σκιασμένο έδαφος (Jackson και Huete, 1991; Aparicio et al., 2004; Eitel 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 στην βέλτιστη προσομοίωση του φυσικού φωτισμού (Graeff και Clauprein 2007; Sun et al., 2008; Katsoulas et al., 2014). Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι οι παράμετροι της κάμερας δεν είναι σταθεροί, με την 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 με την ακόλουθη διαδικασία: 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 αλγόριθμους*, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται 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. Διαφορετικές διαδικασίες συχνά συμπεριλαμβάνουν τον υπολογισμό και την εκτίμηση της ομοιότητας που χρησιμοποιείται για να συμπεριληφθεί κάθε πληροφορία σε πιθανές

κλάσεις. Οι απλούστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούν μη Επιβλεπόμενους αλγόριθμους, 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 πλευρά, 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, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα να καθορισθούν όρια εμπιστοσύνης που θα χρησιμοποιηθούν για να αφήσουν κάποια δεδομένα εκτός κλάσεων. Η διαδικασία που περιλαμβάνει για τον υπολογισμό των κλάσεων, είναι η τεχνική των ελαχίστων αποστάσεων (Schowengerdt, 2007). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μη επιβλεπόμενους αλγόριθμους είναι μεν εύκολες διαδικασίες (ουσιαστικά απαιτεί από τον αναλυτή να ορίσει μόνο τον αριθμό των φασματικών κλάσεων που επιθυμεί να διαιρεθεί το σύνολο των δεδομένων) 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 αλγόριθμους απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων δειγματοληψίας και πραγματοποιείται ακριβής απόκτηση της πληροφορίας για κάθε φασματική τάξη, χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα δεδομένα, ως δείγμα εκπαίδευσης. Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι που χρησιμοποιούν επιβλεπόμενους αλγόριθμους συμπεριλαμβάνουν τις: Parallelepiped, Minimum Distance, Maximum Likelihood, Mahalanobis Distance, Binary Encoding & 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. Συγκεκριμένα περιγράφονται οι μέθοδοι και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό, αναλύονται κάποιες λεπτομέρειες της υλοποίησης και αναφέρονται κάποια στοιχεία για το περιβάλλον στο οποίο εφαρμόστηκαν οι αλγόριθμοι. Επιπλέον, παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών με την ολοκλήρωση υλοποίησης των μεθόδων.

A. Επιβλεπόμενοι Μέθοδοι Επεξεργασίας Εικόνας

- Parallelepiped

Είναι μία απλή μέθοδος η οποία κάνει χρήση λίγων υποθέσεων για τον χαρακτήρα των κλάσεων που χρησιμοποιούνται. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι όλα τα εικονοστοιχεία στην εικόνα καλύπτουν μία συνεχή περιοχή σε n διαστάσεις του χώρου. Η Parallelepiped προσέγγιση μπορεί να μην είναι σε θέση να ταξινομή τις περιοχές.

- Minimum Distance

Βρίσκει την κάθε τιμή του εικονοστοιχείου από το σύνολο σε χώρο n -διαστάσεων, καθώς επίσης κάθε εικονοστοιχείο κατηγοριοποιείται στην κλάση στην οποία βρίσκεται κοντινότερα. Επιπρόσθετα, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να κατηγοριοποιήσει όλες τις περιοχές των n διαστάσεων που προκύπτουν. Επιτρέπει τη χρήση διαγώνιων ορίων (ως εκ τούτου, δεν 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 το οποίο δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.

- Maximum Likelihood

Αυτή η μέθοδος είναι πιο εξελιγμένη αφού δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιτύχει καλύτερο διαχωρισμό των κλάσεων. Ωστόσο είναι μία μέθοδος που απαιτεί πολύ καλή τεχνογνωσία και κατάρτιση της μεθόδου 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 αρκετή 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 την μισή μνήμη απ' ό,τι τα αρχεία που επεξεργάζονται σε μορφή ASCII και γι' αυτό τον λόγο είναι πιο εύκολη και πιο γρήγορη η επεξεργασία τους. Ωστόσο, είναι μία μέθοδος συμβατή μόνο με MAC PC (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 μία φορά και το όριο αλλαγής να κυμαίνεται στο 5% εξορισμού.

- **ISODATA**

Αυτή η μέθοδος ακολουθεί την ίδια διαδικασία επεξεργασίας με την μέθοδο των K-mean ως προς την κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων με την 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 (όπως μπορεί να είναι η διαδοχική ομαδοποίηση) και αυτή η μέθοδος είναι μη-παραμετρική, δηλαδή τα δεδομένα δεν χρειάζεται να κατανεμηθούν 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 τον σκοπό της εκάστοτε έρευνας.

1.4. Στόχος εργασίας

Βασικός σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη δεικτών θρεπτικής καταπόνησης του φυτού κυρίως σε συγκέντρωση αζώτου, που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση της υδατολίπανσης, ως μια καλλιεργητική εργασία που επηρεάζεται από το σύνολο των παραγόντων του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται αξιολόγηση μιας σειράς υφιστάμενων και

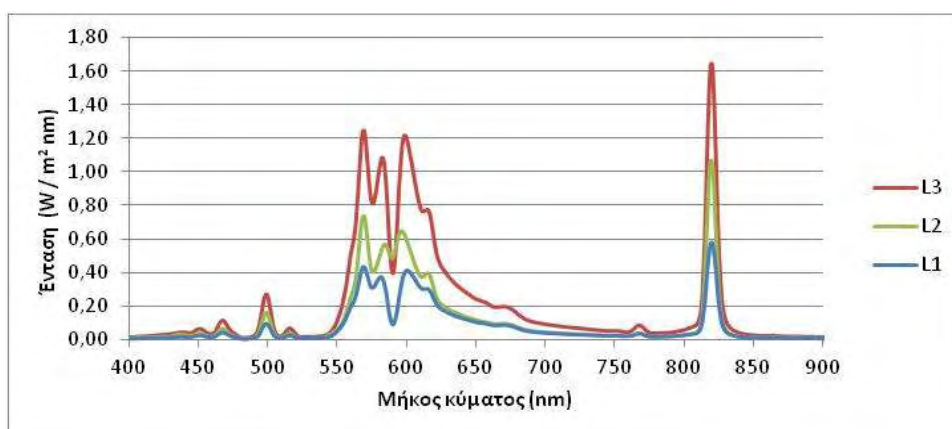
νέων δεικτών θρεπτικής καταπόνησης του φυτού που βασίζονται σε δεδομένα που προέρχονται από την ανακλώμενη ακτινοβολία της καλλιέργειας, με σκοπό τον εντοπισμό αυτών που μπορούν να έχουν πρακτική εφαρμογή για την αυτοματοποιημένη διαχείριση της άρδευσης υδατοδιαλύματος σε υδροπονική θερμοκηπιακή καλλιέργεια. Επιπλέον μελετάται η απόκριση του υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης που σχετίζεται με την θρεπτική κατάσταση του φυτού (χλωροφύλλη, άζωτο).

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1. Εγκαταστάσεις και καλλιέργεια

Στο πλαίσιο της έρευνας, υλοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων και πειραμάτων από τον Ιανουάριο μέχρι τον Απρίλιο του 2015, 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: 39ο 44' Β, 22ο 79' Α, υψόμετρο

85m). Ο θάλαμος ανάπτυξης φυτών εμβαδού 28m², με διαστάσεις, 4m πλάτος, 7m μήκος και 3m ύψος, αποτελεί κλειστό περιβάλλον ελεγχόμενων συνθηκών (CO₂, ακτινοβολία, υγρασία, θερμοκρασία) με ρυθμιζόμενη την ένταση της ακτινοβολίας μέσω λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης. Συνολικά, υπήρχαν εγκατεστημένοι 24 λαμπτήρες νατρίου (600W έκαστος), ικανοί να επιτύχουν τη μέγιστη ισχύ ακτινοβολίας στο επίπεδο των φυτών, ίση με 240W/m². 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, L3: 8:00-20:00 και L4: 9:00-19:00) ώστε να προσομοιώνουν την ένταση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για τη βελτίωση του σήματος του φωτός στην περιοχή του στόχου (70 x 100cm), προστέθηκαν 4 λαμπτήρες αλογόνου (500 W/λάμπα). Η θερμοκρασία του θαλάμου κυμαινόταν στους 25°C κατά τη διάρκεια της ημέρας των φυτών και στους 18°C κατά τη διάρκεια της νύχτας.



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.

Ο θάλαμος ήταν προσαρμοσμένος για υδροπονική καλλιέργεια αποτελούμενος από δυο διπλές σειρές και από πέντε υδροπονικούς σάκους κάθε σειρά. Για τον σκοπό των συγκεκριμένων πειραμάτων, μεταφυτεύτηκε σπορόφυτο τομάτας (*Solanum Lycopersium*), ποικιλίας “Ελπίδα”. Σε κάθε υδροπονικό σάκο τοποθετήθηκαν 3 φυτά. Στον θάλαμο χρησιμοποιήθηκε σύστημα στάγδην με ρυθμιζόμενους σταλάκτες. Κάθε σταλάκτης είχε παροχή 2L/h. Οι υδροπονικοί σάκοι περιείχαν περλίτη χωρητικότητας 33 λίτρων.



Εικόνα 5. Θάλαμος ανάπτυξης φυτών στο Βελεστίνο

Δυο μεταχειρίσεις έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια του πειράματος: φυτά με ολοκληρωμένη θρεπτική και αρδευτική μεταχείριση (υγιή φυτά) και φυτά που υπόκειντο σε θρεπτική καταπόνηση με μειωμένη δόση αζώτου (φυτά καταπόνησης). Τις οχτώ πρώτες ημέρες του πειράματος (Ημέρα 1-8), οι δύο μεταχειρίσεις λιπαίνονται σύμφωνα με το ολοκληρωμένο πρόγραμμα της θρεπτικής λίπανσης. Τις επόμενες 6 ημέρες του πειράματος (Ημέρες 10-15), η μία από τις δυο μεταχειρίσεις υπόκειντο σε θρεπτική καταπόνηση αφού δημιουργήθηκαν διαφορετικά θρεπτικά σκευάσματα με τη μισή δόση αζώτου από την αρχική και τα οποία κατέληγαν στα φυτά μέσω του συστήματος διανομής στους υδροπονικούς σάκους από διαφορετικές αντλίες απ' ότι στα υγιή φυτά. Η πειραματική διαδικασία με την μειωμένη δόση αζώτου στο 1/3 της ολοκληρωμένης, επαναλήφθηκε 3 φορές και σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί σάκοι με φυτά που προέρχονταν από τα φυτά της μεταχείρισης καθώς λόγω της υπερβολικής θέρμανσης που προκλήθηκε από τις λάμπες αλογόνου τα μπροστινά φύλλα ήταν παραμορφωμένα. Στην τελευταία επανάληψη του πειράματος, η οποία διήρκεσε 7 μέρες, στις σειρές των φυτών τα οποία είχαν ήδη υποστεί θρεπτική καταπόνηση χορηγούσαμε σκευάσματα μέσω του αρδευτικού συστήματος με μηδενική δόση αζώτου ενώ τα υγιή φυτά συνέχισαν να έχουν ολοκληρωμένο πρόγραμμα λίπανσης.

Ακολουθούν τα προγράμματα λίπανσης που ακολουθήθηκαν και στις τρεις φάσεις του πειράματος :

1. Ολοκληρωμένο πρόγραμμα λίπανσης

Control

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

2. Πρόγραμμα λίπανσης με μειωμένη δόση Αζώτου

PREPARATION OF STOCK SOLUTIONS			
Tank	Fertilizer	Chem. Form.	Kg
1	Calcium nitrate	Ca(NO ₃) ₂	0.096
1	Potassium nitrate	KNO ₃	0.000
1	Ammonium nitrate	NH ₄ NO ₃	0.393
1	Iron chelate	Fe-chelate	0.093

Low-N

Treatment

1	Magnesium nitrate	Mg(NO ₃) ₂	0.000
2	Potassium nitrate	KNO ₃	0.000
2	Magnesium sulphate	MgSO ₄	1.108
2	Potassium sulphate	K ₂ SO ₄	3.268
2	Monopotassium phosphate	KH ₂ PO ₄	0.000
2	Phosphoric acid	H ₃ PO ₄	0.865
2	Micro stock solution (S.S.)		0.500
3	Calcium chloride	CaCl ₂	1.838

3. Πρόγραμμα λίπανσης με μηδενική δόση Αζώτου

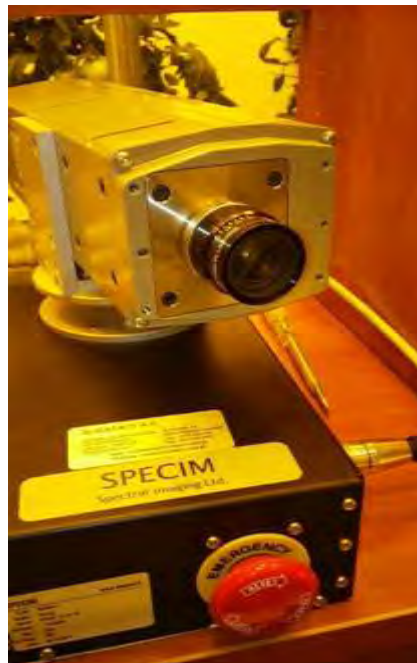
Zero-N Treatment			
PREPARATION OF STOCK SOLUTIONS			
Tank	Fertilizer	Chem. Form.	Kg
1	Calcium nitrate	Ca(NO ₃) ₂	0.000
1	Potassium nitrate	KNO ₃	0.000
1	Ammonium nitrate	NH ₄ NO ₃	0.000
1	Iron chelate	Fe-chelate	0.093
1	Magnesium nitrate	Mg(NO ₃) ₂	0.000
2	Potassium nitrate	KNO ₃	0.000
2	Magnesium sulphate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

Για τις δεξαμενές 1-5 που τοποθετήθηκαν τα λιπάσματα οι συγκεντρώσεις των χημικών σκευασμάτων αντιστοιχούσαν σε 50 λίτρα νερό.

2.2. Μετρήσεις

Η θερμοκρασία 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). Η ένταση της ακτινοβολίας εντός του θαλάμου

($R_{g,i}$, σε Wm^{-2}) μετρήθηκε μέσω πυρανόμετρων (model SKS 1110, Skyeinstruments, Powys, U.K.) τα οποία ήταν τοποθετημένοι σε απόσταση 2m από το έδαφος. Η θερμοκρασία του φύλλου (T_l , σε $^{\circ}C$) μετρήθηκε μέσω υπέρυθρων θερμογράφων (model OS5551A, Omega Engineering Inc., Manchester, USA) οι οποίοι εγκαταστάθηκαν σε απόσταση 0.9m και σε σταθερή γωνία 45° από τον κάθετο άξονα των φυτών του μάρτυρα και της καταπόνησης, αντίστοιχα (Εικόνα 8). Η υγρασία υποστρώματος (θ , %) μετρήθηκε μέσω υγρασιόμετρων (model WCM, Grodan Inc., The Netherlands) (Εικόνα 10). Τα δεδομένα των αισθητήρων καταγράφηκαν κάθε 10min από τον καταγραφέα (Zeno 3200, Coastal Environmental Systems Inc., Seattle).



Εικόνα 6. Απεικόνιση της υπερφασματικής κάμερας ImSpecV10 που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.



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



Εικόνα 8. Θερμογράφος υπέρυθρης ακτινοβολίας (OS550A series Range 2)

- **Μετρητής ροής χυμού** (SF-SP 5 PR). Ο αισθητήρας αυτού του τύπου προσδιορίζει την ταχύτητα του ανοδικού ρεύματος του χυμού μέσα στον βλαστό, μέσω της μεθόδου που έχει αναπτυχθεί από τους Swanson & Whitfield (1981) (Conejero et al., 2007) (Εικόνα 9). 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 9. Μετρητής ροής χυμού του βλαστού.



Εικόνα 10. Μετρητής υγρασίας υποστρώματος Grodan.

- **Λοσίμετρα**, είναι όργανα σύνθετα με τα οποία εκτιμάται και η μεταβολή της αποθήκευσης του νερού.
- **Μετρητής χλωροφύλλης CCM-200**. Ο μετρητής CCM-200 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 (ChlorophyllContentIndex), η οποία βρίσκεται σε αντιστοιχία με την ποσότητα χλωροφύλλης στο δείγμα. Το απόλυτο περιεχόμενο χλωροφύλλης

ανά μονάδα επιφάνειας δεν υπολογίζεται. (CCM-200 , ChlorophyllContentMeter. Instructions Booklet, Opti-Sciences, 2003).



Εικόνα 11. Μετρητής δείκτη χλωροφύλλης των φυτών

- **Φορητός μετρητής φωτοσύνθεσης** : Είναι συσκευές ανάλυσης που περιλαμβάνουν μια πηγή υπέρυθρων, δείγματα κυττάρων και ανιχνευτές που έχουν βελτιστοποιηθεί για την μέτρηση του CO₂ και του H₂O. Οι συσκευές αυτές λειτουργούν με την μέτρηση της απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η βαθμονόμηση τους χρειάζεται ελεγχόμενη πίεση και θερμοκρασία για να έχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα του CO₂ και του H₂O κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος.



Εικόνα 12. Φορητός μετρητής φωτοσύνθεσης.

Η ακτινοβολία που αντανακλάται από το φυτό μετρήθηκε μέσω υπερφασματικού αισθητήρα απεικόνισης που περιλάμβανε μια υπερφασματική κάμερα (ImSpecV10, Spectral Imaging Ltd, Finland), η οποία μετρούσε στην VNIR περιοχή του φάσματος (400-1000nm) και είχε χωρική ανάλυση 1312x1024 εικονοστοιχεία (pixel). Η υπερφασματική κάμερα τοποθετήθηκε σε περιστροφικό σύστημα σάρωσης τύπου pushbroom για να παρέχει πλήρη καμπύλη ανάκλασης για

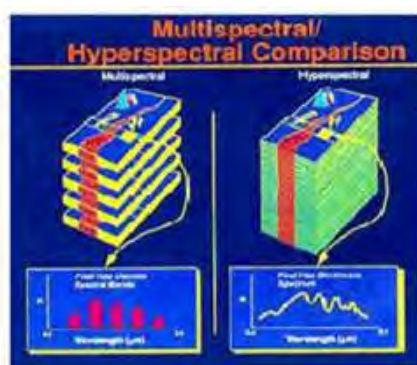
κάθε εικονοστοιχείο, ενώ η ταχύτητα και η γωνία σκαναρίσματος ελέγχθηκαν από το ειδικό λογισμικό spectral DAQ software. Το λογισμικό αυτό ήταν σε θέση να ελέγξει και άλλες παραμέτρους της κάμερας όπως ήταν η χωρική ανάλυση και ο χρόνος έκθεσης του κλείστρου. Αποτελείτο από έναν αισθητήρα τύπου CCD και ένα φακό τύπου C σταθερής εστιακής απόστασης 8mm. Ο υπερφασματικός αισθητήρας απεικόνισης τοποθετήθηκε σε απόσταση 1m από τον κάθετο άξονα της καλλιέργειας.

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 εξασφαλισθεί 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 $r=(R-D)/(W-D)$, 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 του 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 έως 1. Η ανακλώμενη ακτινοβολία του φυτού καταγράφηκε στις 11.00, στις 13.00 και στις 15.00. Για την απαλοιφή των σφαλμάτων που προκύπτουν από τη συσκευή και από τον φωτισμό του θαλάμου, λήφθηκαν 3 διαφορετικές φωτογραφίες. Λόγω του γεγονότος ότι κάποιες μέρες δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στον χώρο του θαλάμου ανάπτυξης με την υπερφασματική κάμερα στα διαγράμματα αναλύσεις παρατηρούνται κενά ανάμεσα στις επαναλήψεις.

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 και συλλέγονται και αναπαρίστανται με τη μορφή ενός κύβου, με χωρική πληροφορία στις διαστάσεις x και y και φασματική πληροφορία στη διάσταση z . Στην Εικόνα 13 απεικονίζεται η χωρική ανάλυση ενός πολυφασματικού και ενός υπερφασματικού αισθητήρα. Για τον

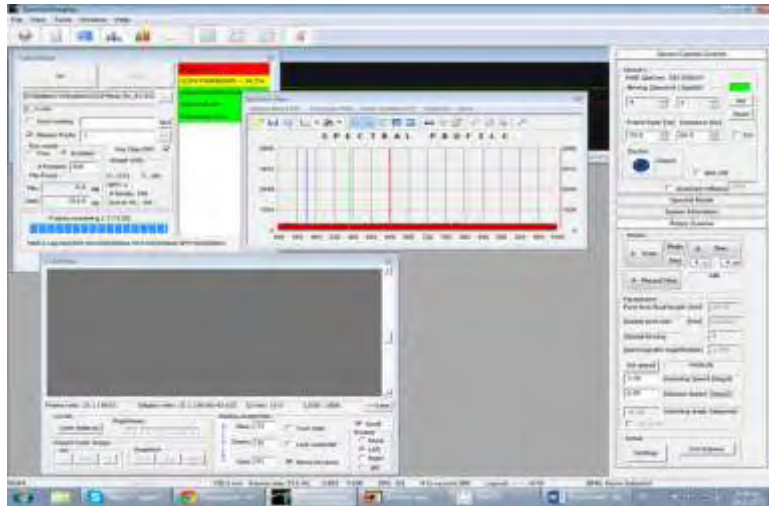
περιορισμό των σφαλμάτων της μέτρησης που προκύπτουν από την επίδραση των παραπάνω παραγόντων, έχουν αναπτυχθεί διάφορα στατιστικά προγράμματα και μέθοδοι.



Εικόνα 13. 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 μια φορά κατά την παραλαβή της κάμερας. Ο δεύτερος κύκλος διεργασιών επαναλήφθηκε στο χώρο όπου επρόκειτο να πραγματοποιηθεί η μέτρηση.

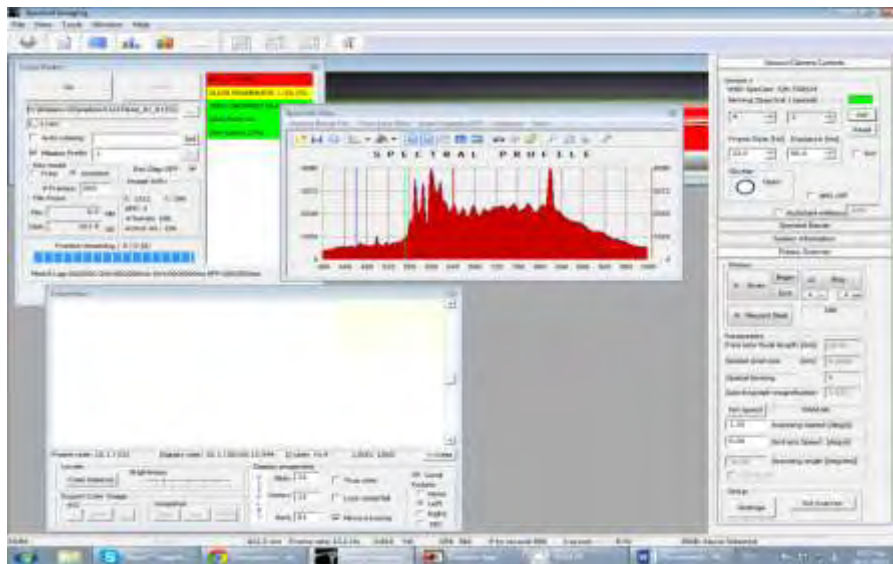
Πρώτος κύκλος διεργασιών: Προσδιορίστηκε ο θόρυβος του σκοτεινού ρεύματος της συσκευής, κλείνοντας τα φώτα και καλύπτοντας το φακό με μαύρο ύφασμα. Παρατηρήθηκε ότι ο θόρυβος του σκοτεινού ρεύματος αυξάνεται όσο το μέγεθος του διαφράγματος μειώνεται και όσο ο χρόνος έκθεσης του κλείστρου αυξάνεται. Τέλος,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



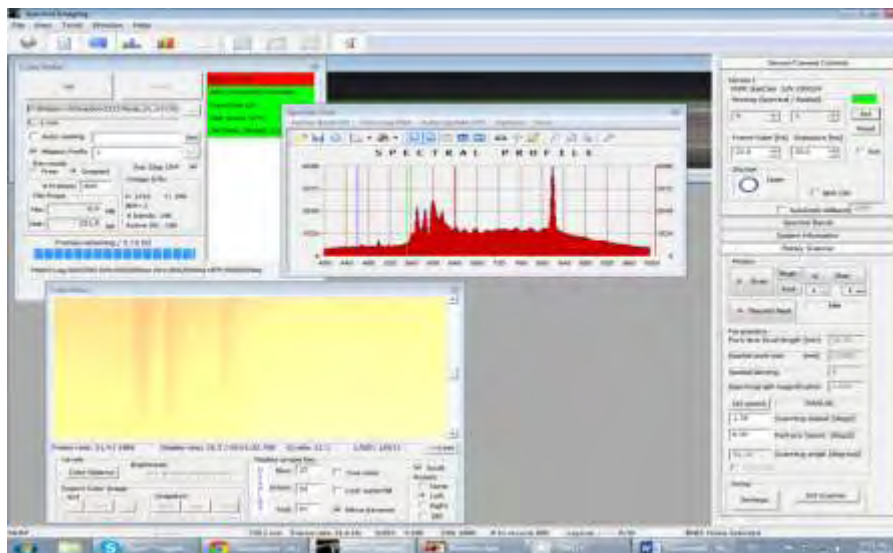
Εικόνα 14. Display προγράμματος DAQ για κλειστό κλείστρο κάμερας.

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 (Εικόνα 17). Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε περίπου 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 (500W/λάμπα) πάνω σε ένα μεταλλικό πλαίσιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 17. 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. 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 σε 12 bit (2¹²=4096 digital

numbers – DN). Ο υπερφασματικός αισθητήρας απεικόνισης δίνει την κοντινότερη τιμή έντασης του χρώματος στο πρότυπο λευκό (90%) 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 δε μπορεί να αντιληφθεί την απόχρωση του λευκού, χαρακτηρίζοντάς την ως απόλυτο λευκό 100%.



Εικόνα 15. Display προγράμματος DAQ για τον υπολογισμό του λευκού στόχου.



Εικόνα 16. Display προγράμματος DAQ για εμφάνιση θορύβου στο λευκό στόχο.



Εικόνα 17. 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. Μια αλληλουχία δοκιμών έδειξε ότι ο συνδυασμός του χρόνου έκθεσης στα 130ms με τη συχνότητα στα 500hz 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. Οι λαμπτήρες αλογόνου εκπέμπουν έντονα στην περιοχή μεταξύ των 700 και 800nm 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 η λήψη της ανάκλασης του λευκού πρότυπου σε συνθήκες έντασης της ακτινοβολίας στο χώρο της μέτρησης για την 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 εικονογράφηση. 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 18. Απεικόνιση του εσωτερικού του θαλάμου ανάπτυξης φυτών σε προσπάθεια καταγραφής λευκού στόχου με τη χρήση της υπερφασματικής κάμερας.

Από τον συγκεκριμένο αισθητήρα απεικόνισης προκύπτουν .raw αρχεία τα οποία μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερη τονική και χρωματική πληροφορία απ' ό,τι τα .jpg αρχεία, καθώς δεν υπόκειται 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 k-means στο περιβάλλον του ENVI (byExelis®). Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται ευρέως επειδή τείνει σε κάποιο όριο πολύ γρήγορα, ωστόσο η ποιότητα της τελικής

λύσης εξαρτάται πολύ από το αρχικό σύνολο των ομάδων και τον αριθμό των ομάδων που πρέπει να οριστεί εξ αρχής.

Προκειμένου να περιοριστεί περαιτέρω η αρνητική επίδραση των εξωτερικών παραγόντων στον οπτικό αισθητήρα απεικόνισης, η βελτίωση της ποιότητας της εικόνας του δείγματος πραγματοποιείται, με την παρακάτω εξίσωση:

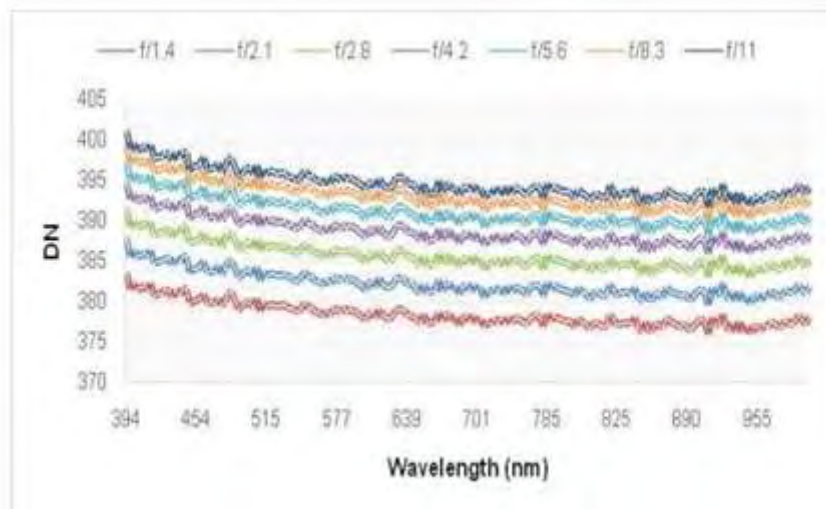
$$X(\text{comp})_{ijk} = (X(\text{meas})_{ijk} - X(\text{dark})_{jk}) / (X(\text{ref})_{jk} - X(\text{dark})_{jk}) \quad (1)$$

όπου, $X(\text{comp})_{ijk}$ η τιμή της έντασης της ανάκλασης των εικονοστοιχείων της εικόνας του δείγματος μετά τη ραδιομετρική βαθμονόμηση στις διαστάσεις i , j και k (συντελεστής ανάκλασης), $X(\text{meas})_{ijk}$ η τιμή της έντασης της ανάκλασης των εικονοστοιχείων της εικόνας του δείγματος πριν τη ραδιομετρική βαθμονόμηση στις διαστάσεις i , j και k , $X(\text{dark})_{jk}$ η τιμή της έντασης της ανάκλασης των εικονοστοιχείων της μαύρης εικόνας στις διαστάσεις j και k , $X(\text{ref})_{jk}$ η τιμή της έντασης της ανάκλασης των εικονοστοιχείων της λευκής εικόνας στις διαστάσεις j και k .

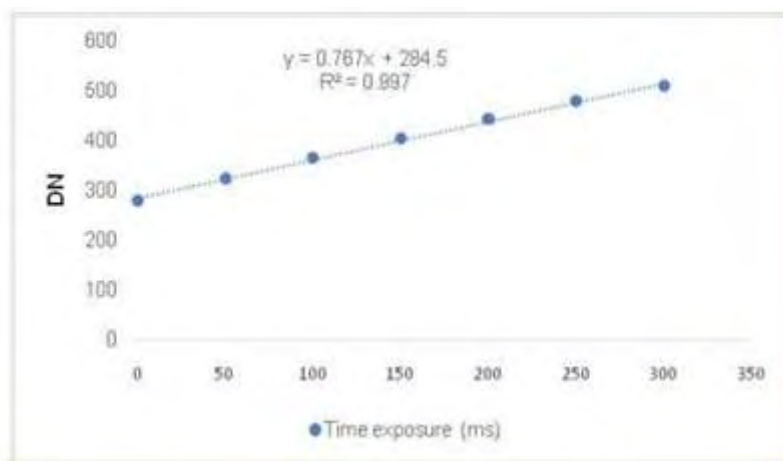
3. Αποτελέσματα

Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου ανάπτυξης κατά την περίοδο των μετρήσεων ήταν 19°C και 26°C, για τη διάρκεια της νύχτας και της ημέρας ανάλογα. Οι μέσες τιμές της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου ήταν 85% και 65%, αντίστοιχα. Στα ακόλουθα τμήματα είναι τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

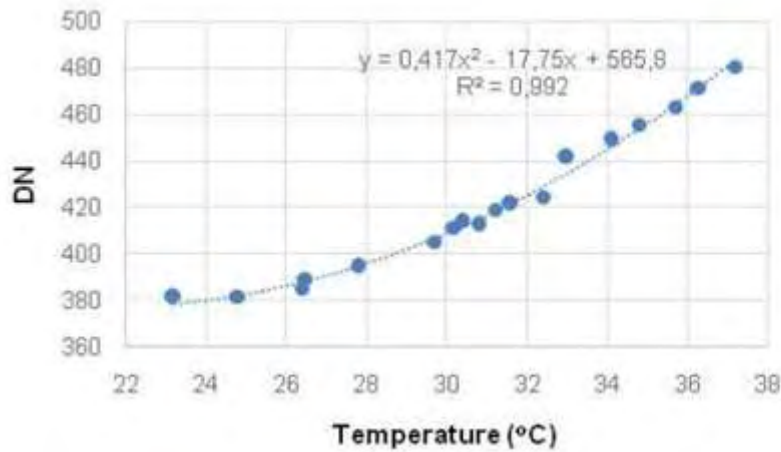
Σύμφωνα με την βαθμονόμηση των αισθητήρων που πραγματοποιήθηκε στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η παράμετρος αυτή εκφρασμένη σε DN (ψηφιακός αριθμός έντασης χρώματος) και προέκυψε ότι ο θόρυβος αυξάνεται όταν η θερμοκρασία του αισθητήρα αυξάνεται ακολουθώντας γραμμική τάση δευτέρου βαθμού. Η επιλογή ωστόσο, των κατάλληλων παραμέτρων του αισθητήρα (χωρική ανάλυση, μέγεθος διαφράγματος, χρόνος έκθεσης κλείστρου) διαμορφώνεται πάντα σε συνδυασμό με το σήμα του φωτός τη δεδομένη χρονική στιγμή, στο σημείο που γίνεται η μέτρηση. Στο Διάγραμμα 2 και 3 παρουσιάζεται η μεταβολή του θορύβου του σκοτεινού ρεύματος με τη μεταβολή του μεγέθους του διαφράγματος και του χρόνου έκθεσης του κλείστρου της υπερφασματικής κάμερας, ενώ φαίνεται καθαρά πως ο αισθητήρας CCD είναι διαφορετικά ευαίσθητος σε διαφορετικά μήκη κύματος. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2, ο θόρυβος σκοτεινού ρεύματος στην μπλε περιοχή του φάσματος (450-550nm) είναι υψηλότερος από τις άλλες περιοχές και έχει την τάση να μειώνεται καθώς το φάσμα μεταβαίνει στην κόκκινη (650-700nm) και κοντινή υπέρυθη (700-900nm) περιοχή. Ωστόσο, με βάση τις ρυθμίσεις που αναφέρθηκαν στην βαθμονόμηση των αισθητήρων, καταγράφηκε η καμπύλη ανάκλασης λευκής επιφάνειας για διαφορετικές τιμές της έντασης του φωτός στο χώρο του θαλάμου (Διάγραμμα 5).



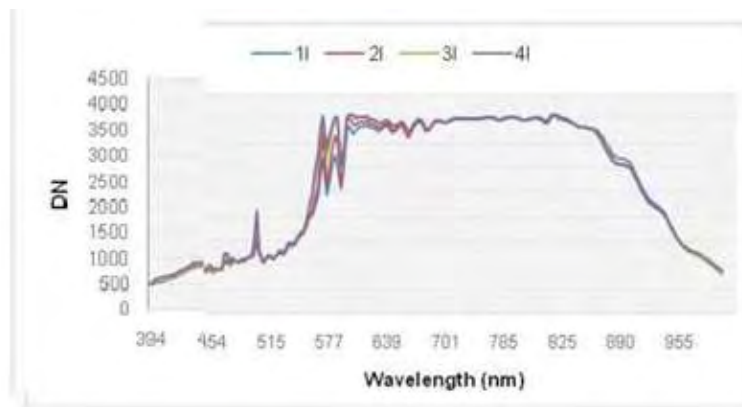
Διάγραμμα 2. Εξέλιξη θορύβου σκοτεινού ρεύματος της υπερφασματικής κάμερας εκφρασμένος σε DN (ένταση του χρώματος) ανάλογα με το μήκος κύματος του φάσματος, για διαφορετικές τιμές του διαφράγματος.



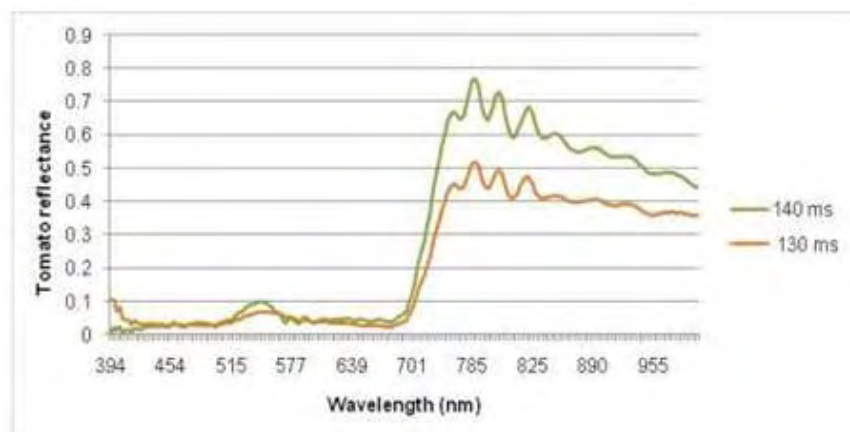
Διάγραμμα 3. Εξέλιξη σκοτεινού ρεύματος της υπερφασματικής κάμερας, εκφρασμένος σε DN (ένταση του χρώματος) για διαφορετικές τιμές του χρόνου έκθεσης του κλείστρου



Διάγραμμα 4. Εξέλιξη θορύβου του σκοτεινού ρεύματος της υπερφασματικής κάμερας, εκφρασμένος σε DN (ένταση του χρώματος) ανάλογα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του αισθητήρα



Διάγραμμα 5. Καμπύλη ανάκλασης του φωτός (4 λαμπτήρες αλογόνου και 6 λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης για κάθε επίπεδο I) όπως προέκυψε από τη λήψη υπερφασματικής φωτογραφίας της λευκής επιφάνειας, έχοντας προσαρμόσει την κάμερα στα 130ms χρόνο έκθεσης κλείστρου και f/2,1 μέγεθος διαφράγματος.



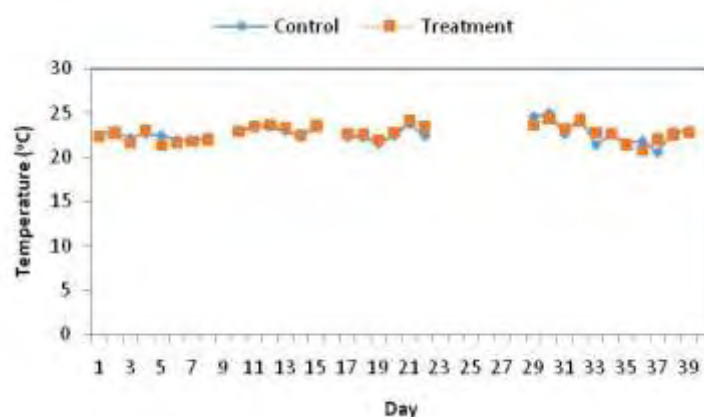
Διάγραμμα 6. Φασματική ταυτότητα του φυτού τομάτας για διαφορετικές τιμές ταχύτητας έκθεσης του κλείστρου (140 και 130ms)

Στο Διάγραμμα 6, φαίνεται η καμπύλη ανάκλασης του φυτού τομάτας για δυο διαφορετικές τιμές χρόνου έκθεσης του κλείστρου (130 και 140 ms), όπου παρατηρείται μια έντονη μεταβολή μεταξύ αυτών των δυο. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην διαφορετική ποσότητα του φωτός που διέπει το κλείστρο και είναι σε θέση να αλλοιώσει το αποτέλεσμα.

3.1. Εξέλιξη και μελέτη βιοτικών δεικτών θρεπτικής καταπόνησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ορισμένων παραμέτρων της φυσιολογίας της καλλιέργειας, τις ημέρες του πειράματος.

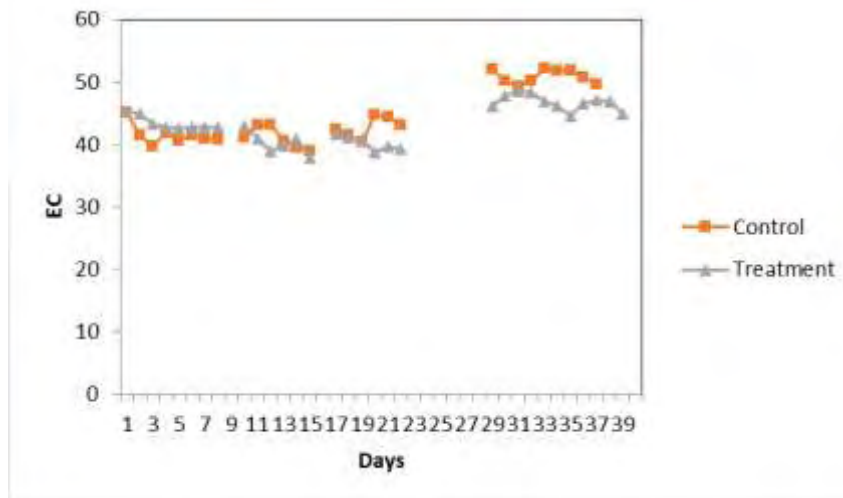
- *Εξέλιξη της θερμοκρασίας των φυτών*



Διάγραμμα 7. Μέση ημερήσια εξέλιξη της θερμοκρασίας των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες των μετρήσεων (Ημέρες 1-8: κανονική δόση N, Ημέρες 9-34: 1/3 δόση αζώτου, Ημέρες 35-40: 0 δόση N). Στρογγυλή κουκίδα γραμμής: υγιή φυτά, Τετράφωνη κουκίδα γραμμής: φυτά θρεπτικής καταπόνησης.

Στο Διάγραμμα 7 παρατηρείται η εξελικτική πορεία της θερμοκρασίας και των δύο μεταχειρίσεων. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία της καλλιέργειας κυμαινόταν μεταξύ 22°C και 25°C όλες τις ημέρες του πειράματος και καμία διαφορά δεν παρατηρήθηκε μεταξύ των μεταχειρίσεων.

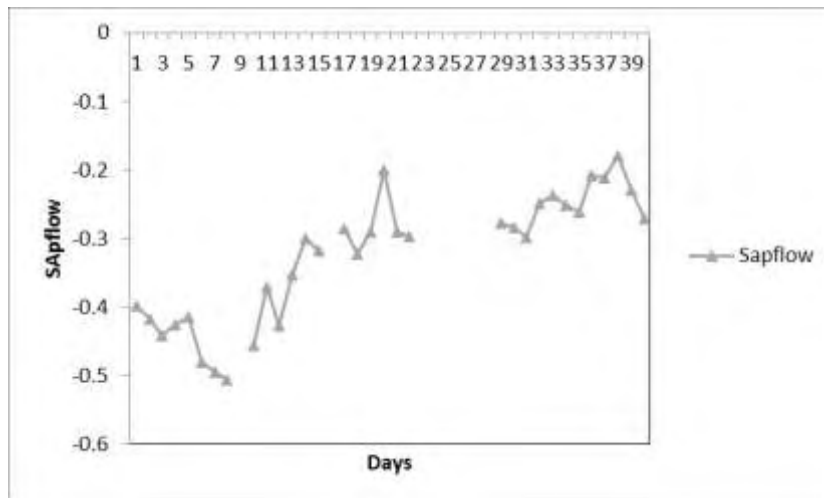
- Εξέλιξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των φυτών



Διάγραμμα 8. Μέση ημερήσια εξέλιξη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υγιή και θεραπευτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες των μετρήσεων (Ημέρες 1-8: κανονική δόση N, Ημέρες 9-34: 1/3 δόση αζώτου, Ημέρες 35-40: 0 δόση N). Τριγωνική κουκίδα γραμμή: υγιή φυτά, Τετράφωνη κουκίδα γραμμή: φυτά θεραπευτικής καταπόνησης.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 8, παρατηρείται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα των φυτών παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια του πειράματος χωρίς εμφανείς μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας στους σάκους του περλίτη των υγιή φυτών συμβαδίζουν με τις τιμές που καταγράφονται από τα φυτά που βρίσκονται σε θεραπευτική αγωγιμότητα. Ωστόσο όπως παρατηρείται από το γράφημα και ο δείκτης που αναπαριστά τα φυτά που βρίσκονται σε θεραπευτική καταπόνηση ακολουθεί την ίδια πορεία καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσης του πειράματός μας παραμένοντας σε τιμές 40-50 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

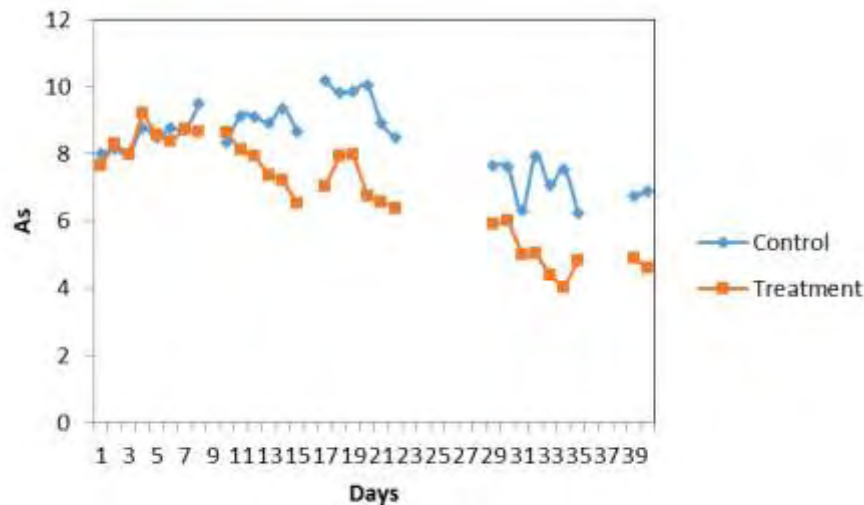
- Εξέλιξη της ροής χυμού των φυτών



Διάγραμμα 9. Μέση ημερήσια εξέλιξη της ροής των θρεπτικών στοιχείων του φυτού σε υγιή και θρεπτικά καταπονημένα φυτά, τις ημέρες των μετρήσεων (Ημέρες 1-8: κανονική δόση N, Ημέρες 9-34: 1/3 δόση αζώτου, Ημέρες 35-40: 0 δόση N). Τριγωνική κουκίδα γραμμή: φυτά θρεπτικής καταπόνησης.

Στο παραπάνω Διάγραμμα 9, παρατηρείται η ροή χυμού των θρεπτικών στοιχείων του φυτού. Σύμφωνα με τις παραπάνω πληροφορίες διαπιστώνεται ότι τα φυτά τείνουν να μειώνουν τη ροή χυμού με τα θρεπτικά, μετά την εφαρμογή της μειωμένης θρέψης καθώς γίνεται εμφανές ότι η τιμή του ρυθμού χυμού ροής μειώθηκε από το -0,4 στο -0,2 της κλίμακας από την Ημέρα 7 έως την Ημέρα 17.

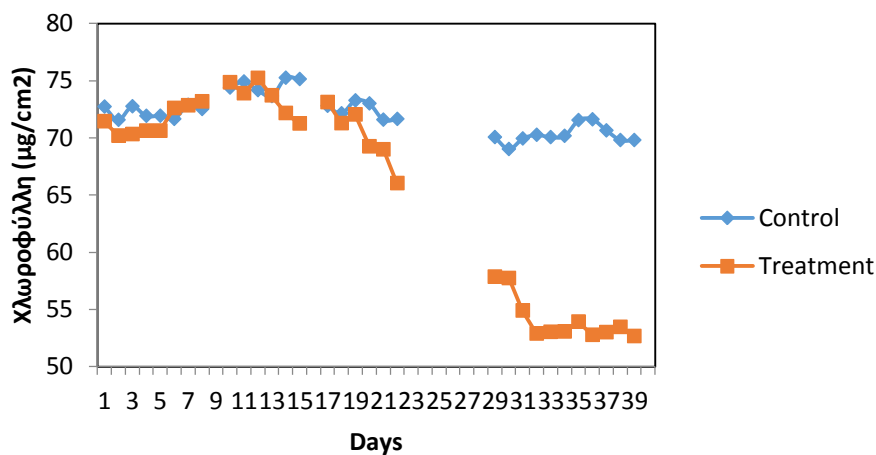
- Εξέλιξη του δείκτη φωτοσύνθεσης των φυτών



Διάγραμμα 10. Μέση ημερήσια εξέλιξη της φωτοσύνθεσης του φυτού σε υγιή και θρεπτικά καταπονημένα φυτά, τις ημέρες των μετρήσεων (Ημέρες 1-8: κανονική δόση N, Ημέρες 9-34: 1/3 δόση αζώτου, Ημέρες 35-40: 0 δόση N). Συμπαγής γραμμή: υγιή φυτά, Στρογγυλή κουκίδα γραμμή: φυτά θρεπτικής καταπόνησης.

Από το Διάγραμμα 10, παρατηρείται ότι η φωτοσύνθεση των υγιή φυτών (A_s , $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), κυμάνθηκε από 8 μέχρι $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ όλες τις ημέρες των μετρήσεων (Ημέρες 1-40). Οι A_s τιμές των θρεπτικά καταπονημένων φυτών μειώθηκαν σταδιακά, από τη δεύτερη ημέρα εφαρμογής της μειωμένης λίπανσης (Ημέρες 9-34). Το μέσο ημερήσιο ποσοστό μεταβολής μεταξύ των A_s τιμών των μεταχειρίσεων ανέρχεται στο 47.5%. Οι τιμές πλησίασαν στο $4\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, τις τελευταίες ημέρες του πειράματος (Ημέρες 35-40), όπου η συγκέντρωση αζώτου στο υδατικό διάλυμα άρδευσης ήταν μηδέν (Διάγραμμα 10). Η μέγιστη διαφορά που καταγράφηκε μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων ανέρχεται στο 3,55 την Ημέρα 34 του πειράματος.

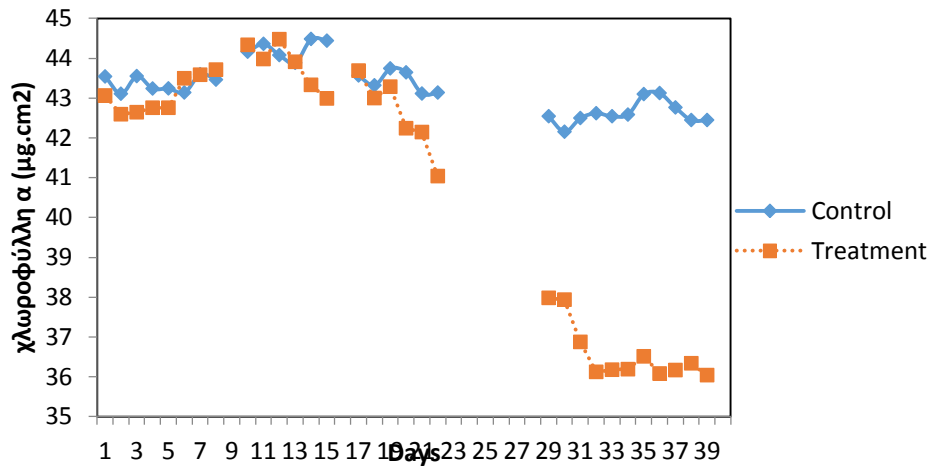
- Εξέλιξη της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των φυτών



Διάγραμμα 11. Εξέλιξη της μέσης ημερήσιας τιμής της χλωροφύλλης ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-8: κανονική δόση N, Ημέρες 9-34: 1/3 δόση αζώτου, Ημέρες 35-40: 0 δόση N). Στρόγγυλη κουκίδα γραμμή: υγιή φυτά, Τετράγωνη κουκίδα γραμμή: φυτά θρεπτικής καταπόνησης.

Στο Διάγραμμα 11 παρατηρείται μία γενική εικόνα της εξέλιξης της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των φυτών των μεταχειρίσεων. Όπως εμφανέστατα φαίνεται από το παραπάνω γράφημα η τιμή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των φυτών που βρίσκονται σε θρεπτική καταπόνηση είχε ραγδαία μείωση από την Ημέρα 13 του πειράματος (πέντε ημέρες εφαρμογής μειωμένης δόσης αζώτου). Όσο εξελίσσεται το πείραμα οι τιμές της χλωροφύλλης συνεχίζουν να μειώνονται μέχρι και το τέλος του πειράματος πλησιάζοντας την τιμή $53 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση της χλωροφύλλης των υγιή φυτών κυμαινόταν από 42 έως $44.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ όλες τις ημέρες των μετρήσεων (Ημέρες 1-40), ενώ η συγκέντρωση της χλωροφύλλης των θρεπτικά καταπονημένων φυτών, μειώθηκε σημαντικά δέκα ημέρες μετά τη μείωση του αζώτου (εφτά ημέρες μετά τη μείωση του ρυθμού της φωτοσύνθεσης) (Διάγραμμα 11). Η τιμή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των καταπονημένων φυτών ξεπέρασε την τιμή των $36 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, τις τελευταίες ημέρες του πειράματος (Ημέρες 35-40), όπου η συγκέντρωση αζώτου στο υδατικό διάλυμα άρδευσης ήταν μηδέν.

- Εξέλιξη του δείκτη χλωροφύλλης α των φυτών

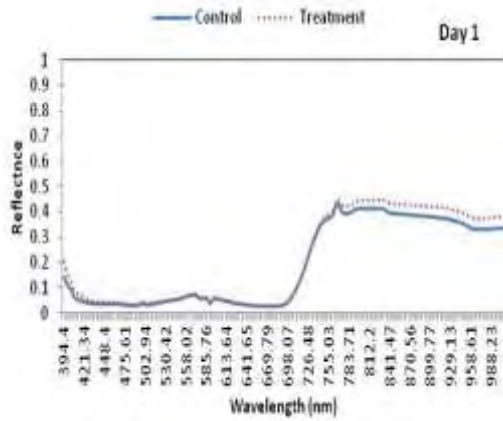


Διάγραμμα 12. Εξέλιξη της μέσης ημερήσιας τιμής της χλωροφύλλης α ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-8: κανονική δόση N, Ημέρες 9-34: 1/3 δόση αζώτου, Ημέρες 35-40: 0 δόση N). Στρογγυλή κουκίδα γραμμή: υγιή φυτά, Τετράγωνη κουκίδα γραμμή: φυτά θρεπτικής καταπόνησης.

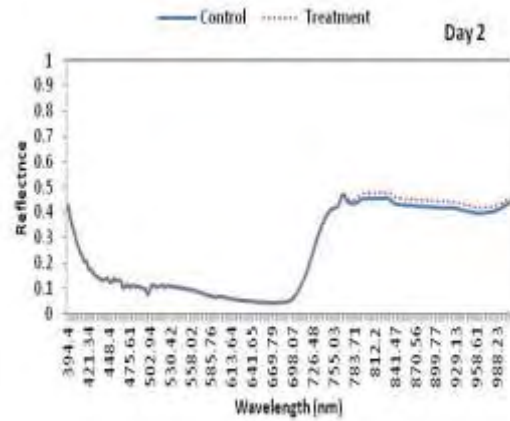
Πιο συγκεκριμένα στο Διάγραμμα 12, αναφέρονται οι τιμές του δείκτη της χλωροφύλλης α. Η χλωροφύλλη α αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα είδη χλωροφύλλης μαζί με την χλωροφύλλη β που διαφέρουν ελάχιστα στη δομή τους. Η χλωροφύλλη α διαφέρει ελάχιστα από την β και απαραίτητα για την σύνθεσή της είναι το μαγνήσιο (Mg). Η χλωροφύλλη α απορροφά ακτινοβολίες με μήκη κύματος κοντά στα δύο άκρα του ορατού φάσματος, δηλαδή το κόκκινο και το μπλε. Εκτός όμως από τη χλωροφύλλη α, τα φυτά χρησιμοποιούν και άλλες χρωστικές, που απορροφούν ακτινοβολίες με ενδιάμεσα μήκη κύματος. Με αυτό τον τρόπο γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Όσον αφορά το συγκεκριμένο πείραμα παρατηρείται από το Διάγραμμα 12 ότι η διαφοροποίηση των τιμών της χλωροφύλλης α ξεκινάει από την 19^η μέρα με ποσοστό μεταβολής 3,208% της κλίμακας και φτάνει στην τελευταία μέρα του πειράματος σε ποσοστό διαφοράς 15,097%. Η χλωροφύλλη α ξεπερνάει το 15% από την 4^η κιόλας επανάληψη το οποίο οφείλεται στην μεταβολή του αζώτου λόγω της συνταγής του λιπάσματος που προσφέραμε στα φυτά με μειωμένη δόση αζώτου.

3.2 Εξέλιξη καμπυλών ανάκλασης της καλλιέργειας μέσω θρεπτικής καταπόνησης

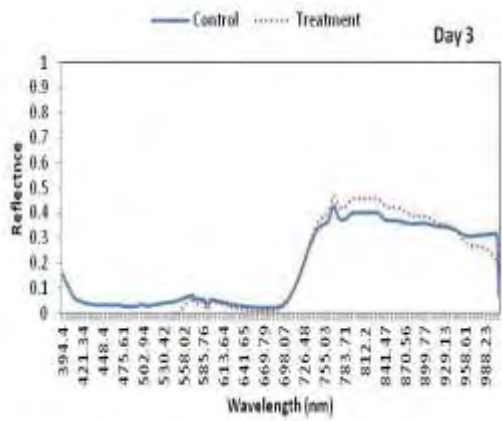
Το Διάγραμμα 13 a-h αναπαριστά την εξέλιξη του συντελεστή ανάκλασης των υγιή και καταπονημένων φυτών, τις οχτώ πρώτες ημέρες του πειράματος (1^η Επανάληψη: Ημέρες 1-8). Το δεδομένο χρονικό διάστημα τα φυτά και των δύο μεταχειρίσεων ακολουθούσαν ολοκληρωμένο πρόγραμμα λίπανσης αζώτου Την ένατη ημέρα (Ημέρα 9) του πειράματος η δόση του αζώτου μειώθηκε στο 1/3 για τα φυτά της μεταχείρισης. Στο Διάγραμμα 14a-f, παρουσιάζεται η μέση ημερήσια μεταβολή της καμπύλης ανάκλασης, όταν η δόση αζώτου μειώθηκε στο 1/3 (2^η Επανάληψη: Ημέρα 10-15). Αντίστοιχα με την πρώτη επανάληψη, καμία μεταβολή μεταξύ των δεδομένων των δύο μεταχειρίσεων δεν παρατηρήθηκε. Συνεπώς, δεν έχει γίνει αντιληπτή από τις καμπύλες ανάκλασης, η αλλαγή της αζωτούχου λίπανσης των καταπονημένων φυτών.



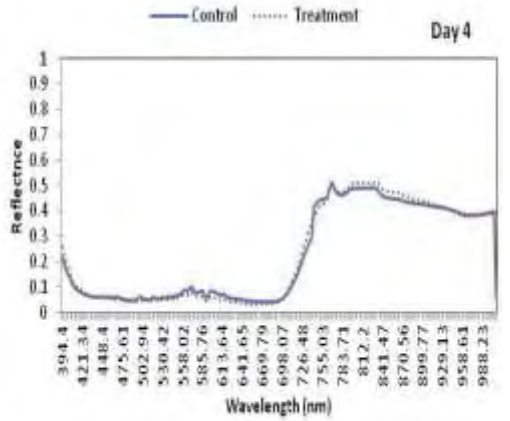
a



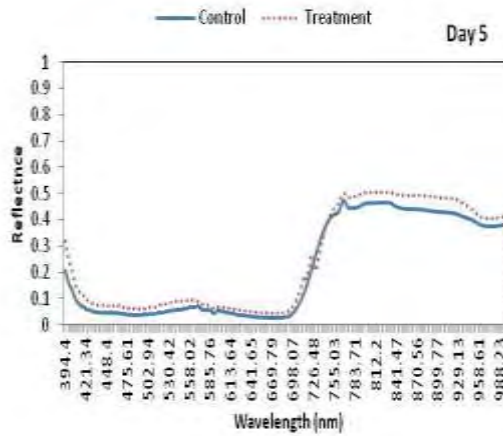
b



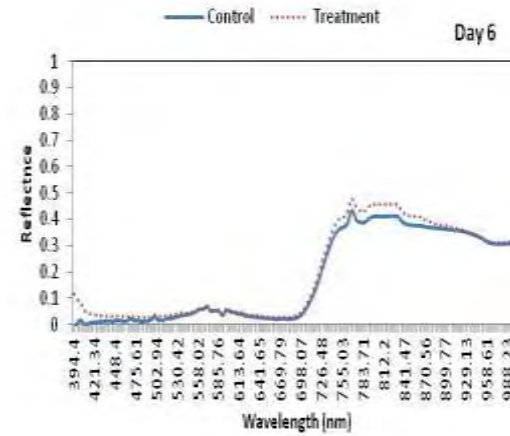
c



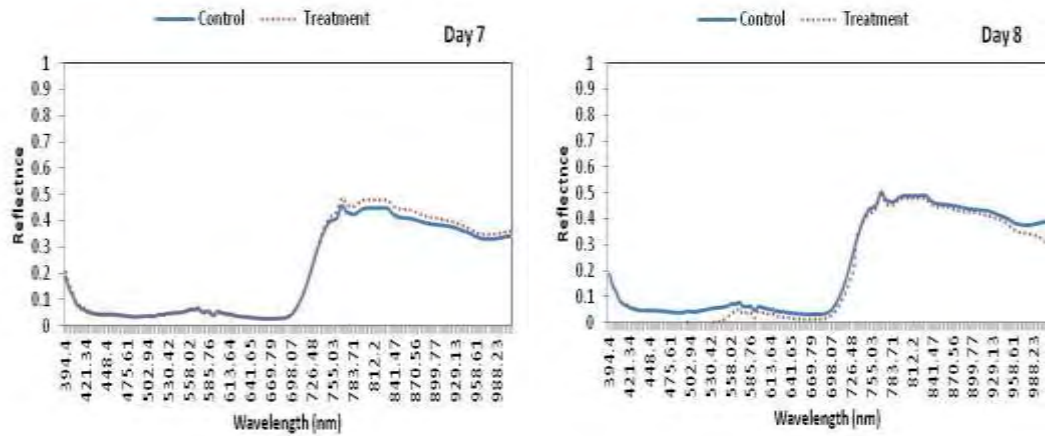
d



e



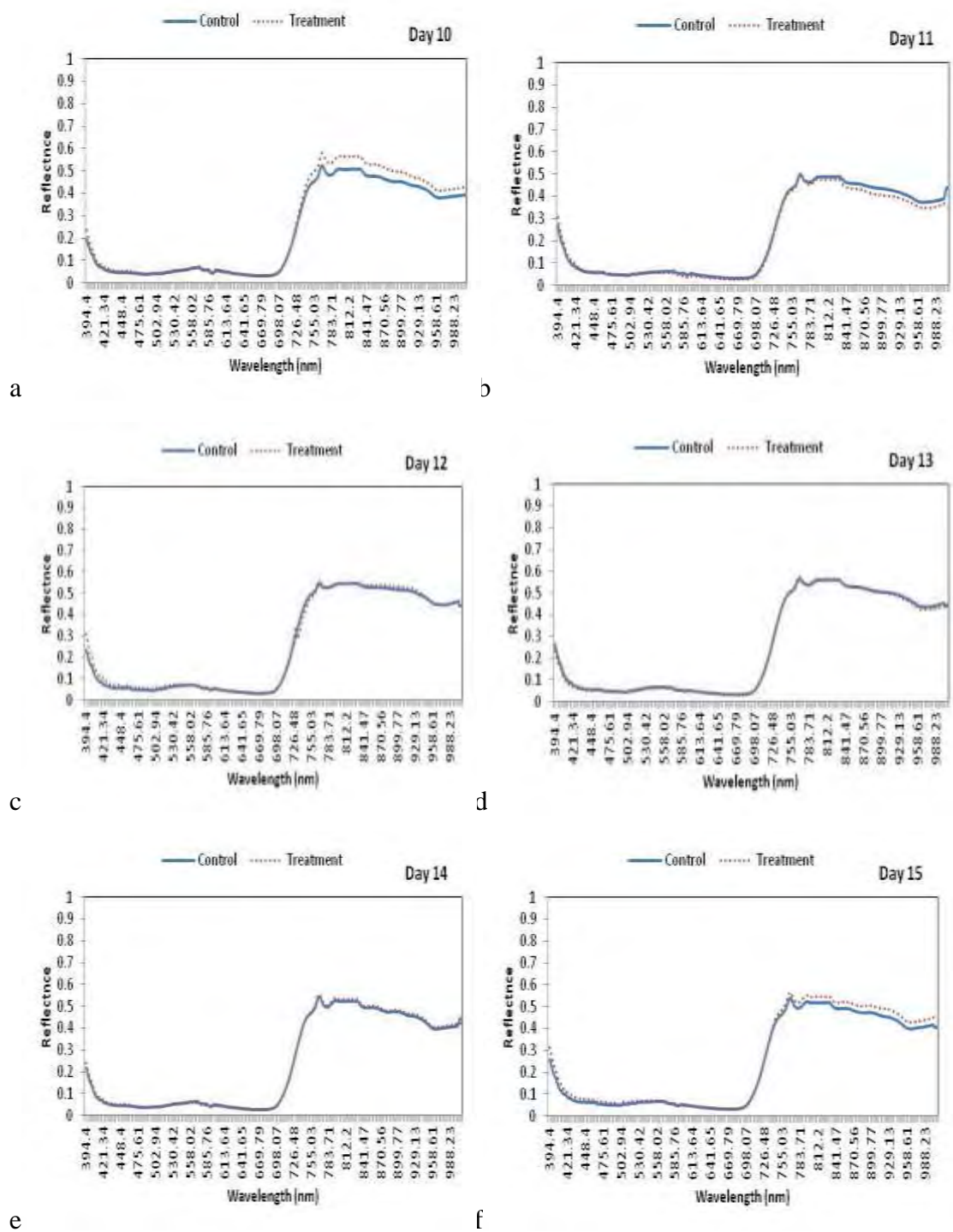
f



00

1

Διάγραμμα 13 a-h. Εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 14-15: 1/3 δόση αζώτου). Συνεχής γραμμή: υγιή φυτά, Διακεκομμένη γραμμή: θρεπτικά καταπονημένα φυτά.



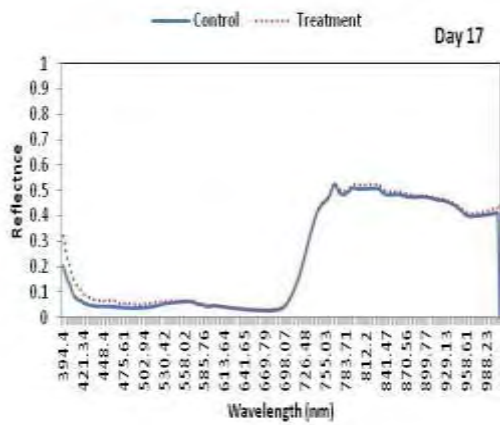
Εικόνα 14 a-f. Εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 14-15: 1/3 δόση αζώτου). Συνεχής γραμμή: υγιή φυτά, Διακεκομμένη γραμμή: θρεπτικά καταπονημένα φυτά.

Κατά τη διάρκεια της τρίτης επανάληψης (Ημέρες 17-23), η δόση του αζώτου των καταπονημένων φυτών παρέμεινε στο 1/3. Στο Διάγραμμα 14 a-f, παρατίθεται η

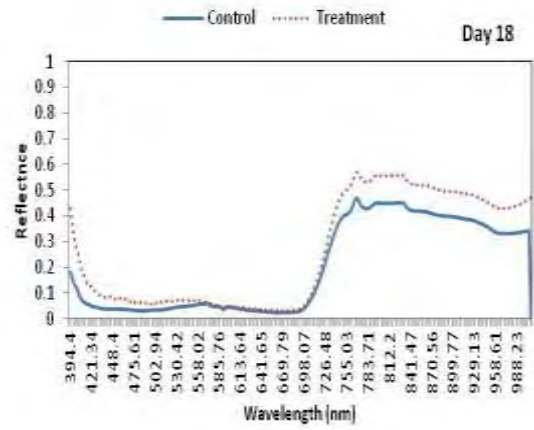
εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες της τρίτης επανάληψης. Παρατηρήθηκε ότι, η καμπύλη του συντελεστή ανάκλασης άρχισε να αυξάνεται δέκα ημέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου (Ημέρα 18), κυρίως στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος (Διάγραμμα 15b). Σε αυτή την περιοχή το φάσματος, οι τιμές του συντελεστή ανάκλασης των φυτών του μάρτυρα κυμαίνονταν μεταξύ 0,4 και 0,5. Οι τιμές του συντελεστή ανάκλασης των καταπονημένων φυτών από την άλλη πλευρά, έφτασαν μέχρι και 0,7. Οι τιμές του συντελεστή ανάκλασης των καταπονημένων φυτών είναι υψηλές για όλες τις υπόλοιπες ημέρες του πειράματος (Ημέρες 18-40) (Διάγραμμα 15 b - Διάγραμμα 17f).

Την τέταρτη επανάληψη του πειράματος (Ημέρα 29-34), η δόση αζώτου των καταπονημένων φυτών παρέμεινε στο 1/3. Στα Διαγράμματα 16 a-f παρουσιάζεται η εξέλιξη των καμπύλων ανάκλασης των δύο μεταχειρίσεων τις ημέρες της τέταρτης περιόδου. Από τα γραφήματα συμπεραίνεται ότι οι τιμές του συντελεστή ανάκλασης των καταπονημένων φυτών παρέμεινε στατιστικά σημαντικά μεγαλύτερες από τις τιμές των υγιή φυτών. Τα φυτά του μάρτυρα διατήρησαν τις τιμές του συντελεστή ανάκλασης μεταξύ 0,4 και 0,5 στην κοντινή υπέρυθη περιοχή, ενώ οι τιμές του συντελεστή ανάκλασης των θρεπτικά καταπονημένων φυτών κυμαίνονταν μεταξύ 0,7 και 0,8.

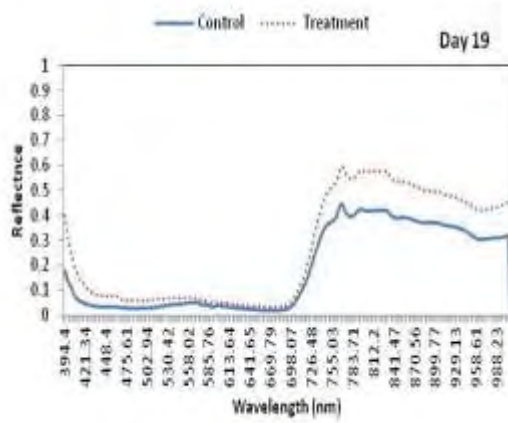
Η πέμπτη και τελευταία επανάληψη του πειράματος ξεκίνησε την Ημέρα 35 και τελείωσε την Ημέρα 40. Κατά τη διάρκεια της πέμπτης επανάληψης, η δόση του αζώτου για τα καταπονημένα φυτά, μειώθηκε στο 0. Στο Διάγραμμα 17 a-f, παρατηρείται η εξέλιξη των τιμών του συντελεστή ανάκλασης των φυτών της μεταχείρισης με μηδενική δόση αζώτου. Σε αυτή την επανάληψη η καμπύλη ανάκλασης των καταπονημένων φυτών κυμάνθηκε μεταξύ 0,7 και 0,8 στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου ενώ στα φυτά του μάρτυρα παρέμεινε σταθερή από 0,4 έως 0,5.



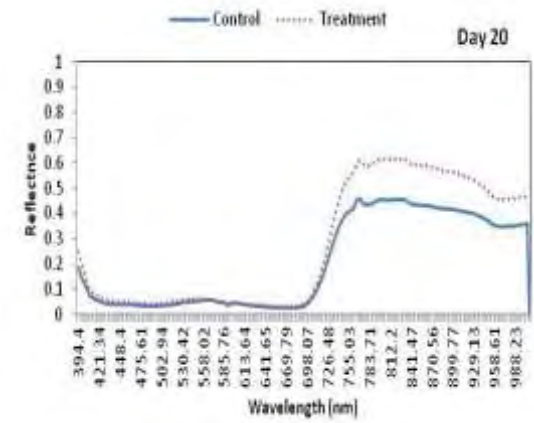
a



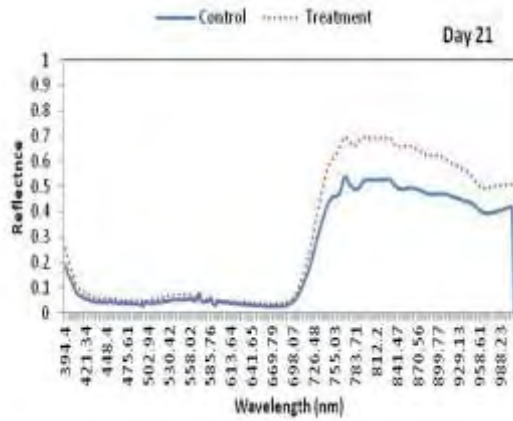
b



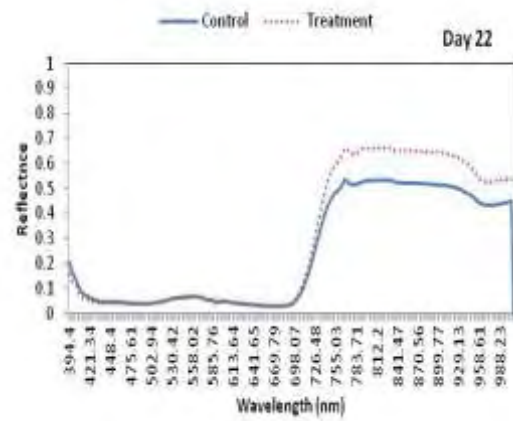
c



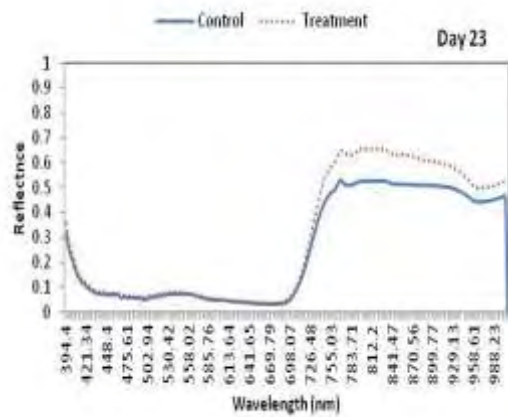
d



e

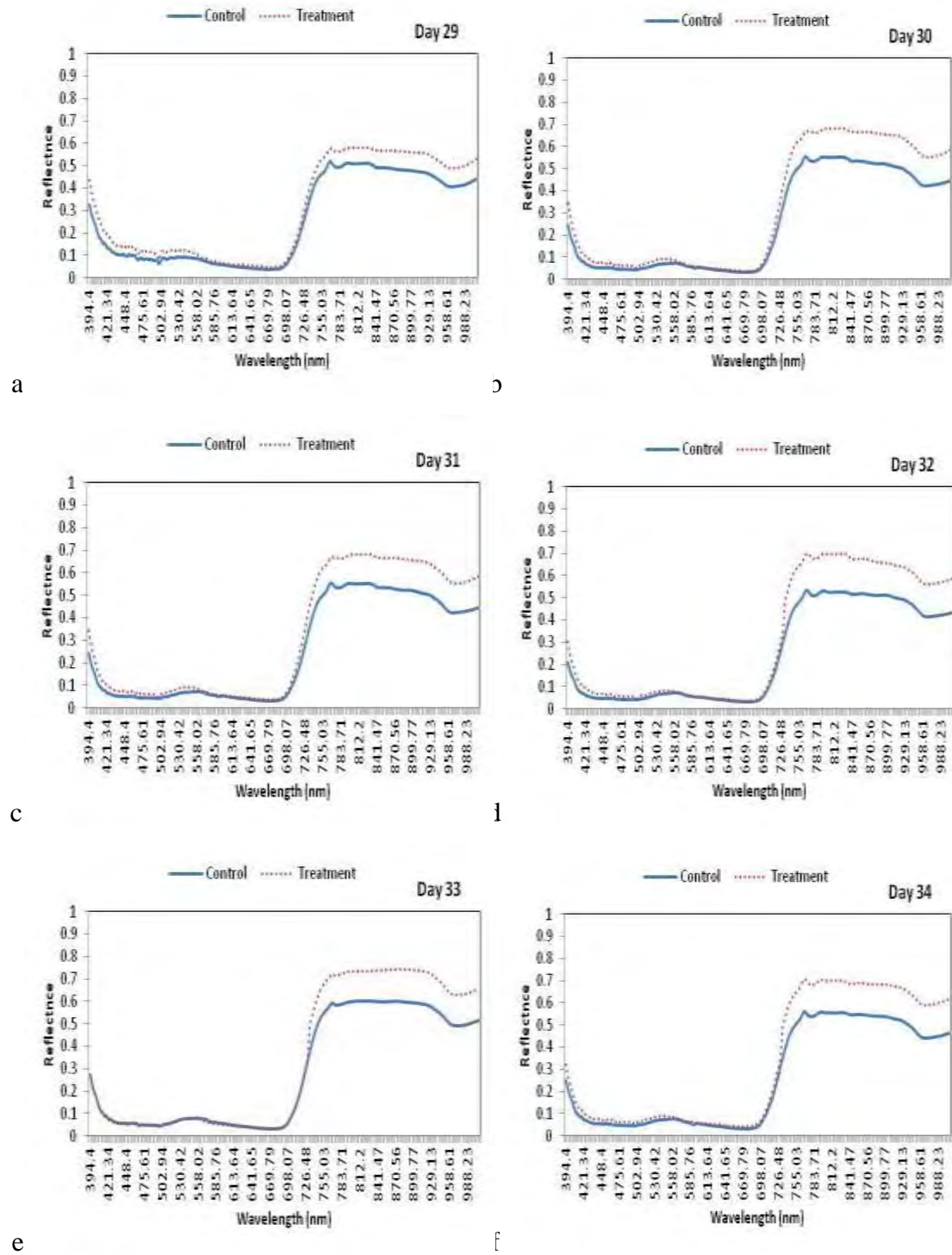


f

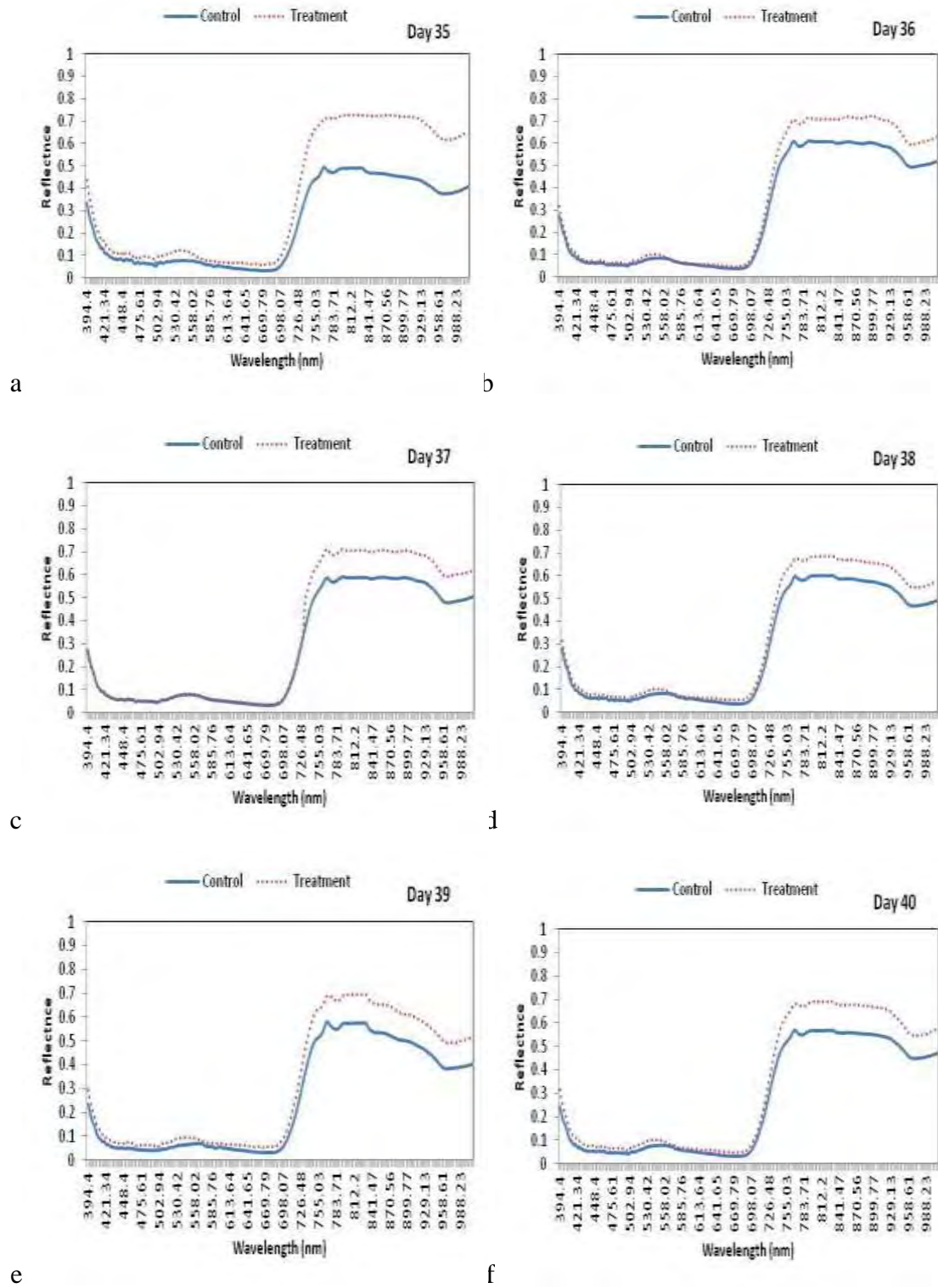


g

Διάγραμμα 15 a-g. Εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (3^η Επανάληψη: Ημέρες 17- 23: 1/3 δόση αζώτου). Συνεχής γραμμή: υγιή φυτά, Διακεκομμένη γραμμή: θρεπτικά καταπονημένα φυτά.



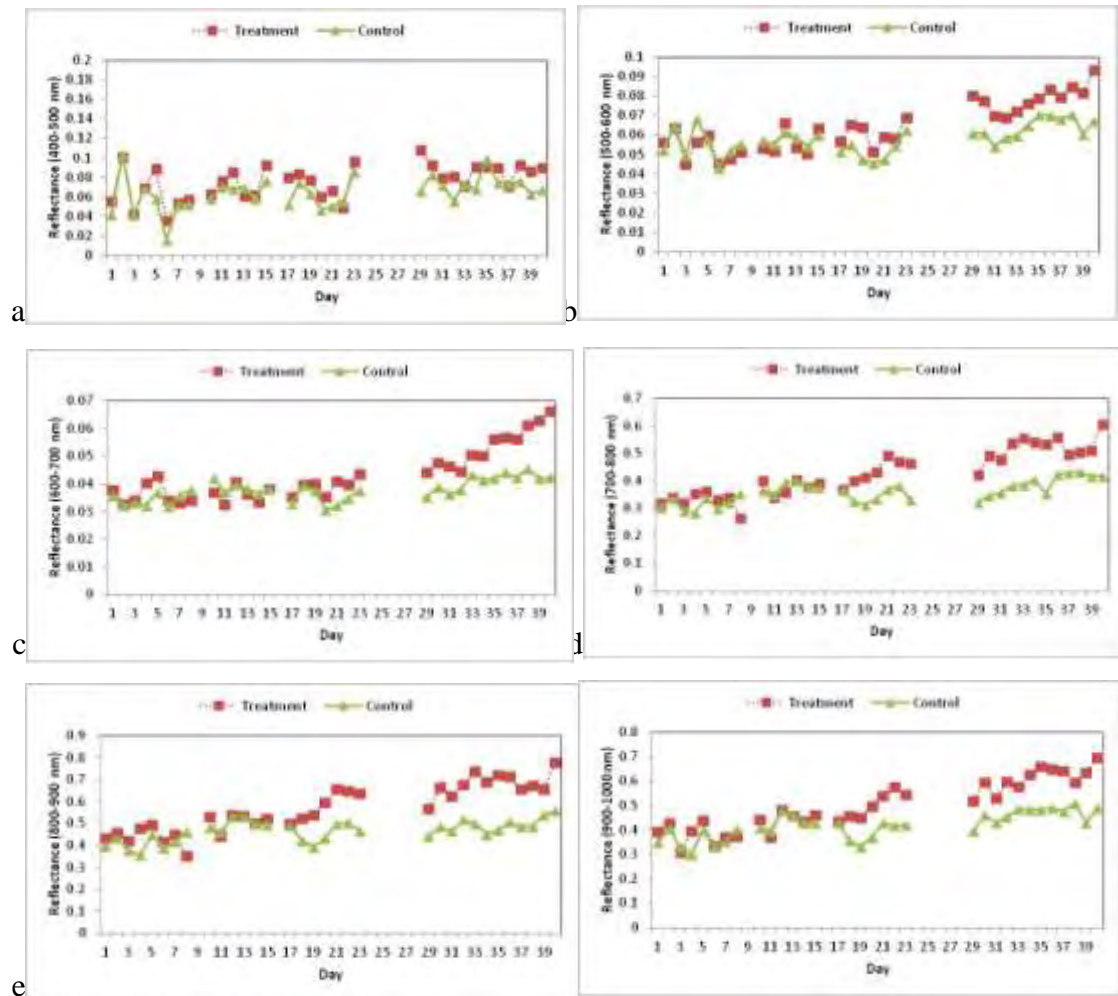
Διάγραμμα 16 a-f. Εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος. Ημέρες 33-34: Ημέρες 29-34: 1/3 δόση αζώτου. Συνεχής γραμμή: υγιή φυτά, Διακεκομμένη γραμμή: θρεπτικά καταπονημένα φυτά.



Διάγραμμα 17 a-f. Εξέλιξη της καμπύλης ανάκλασης των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 35-40: Ημέρες 35-40: 0 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 400-500nm, 500-600nm, 600-700nm, 700-800nm, 800-900nm και 900-1000nm. Παρακάτω παρατίθενται το Διάγραμμα 19 a-f των μέσων όρων και για τις δύο μεταχειρίσεις όλες τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-40).



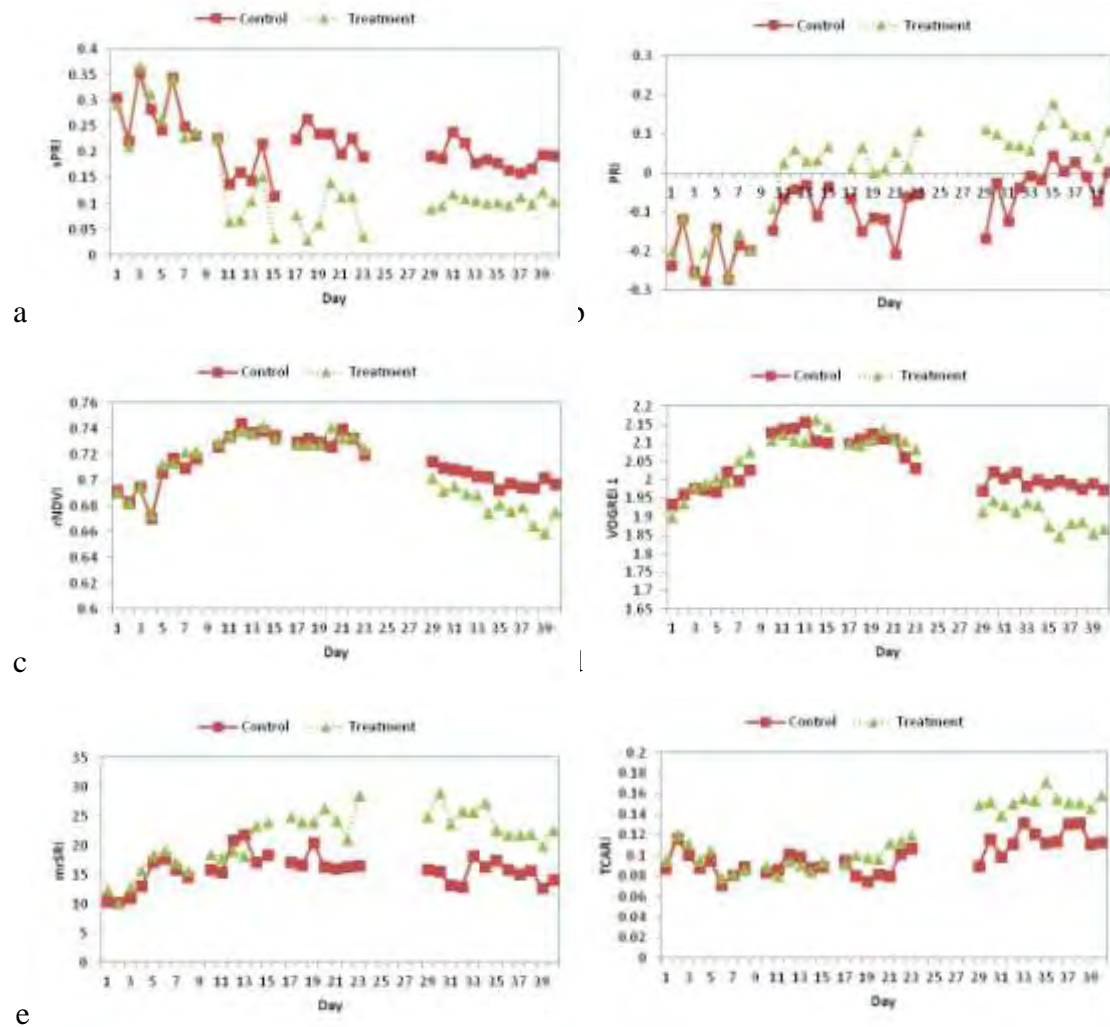
Διάγραμμα 18 a-f. Εξέλιξη της μέσης ημερήσιας τιμής του φάσματος μεταξύ (a) 400-500nm, (b) 500-600nm, (c) 600-700nm, (d) 700-800nm, (e) 800-900nm και (f) 900-1000nm των υγιή θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-8: κανονική δόση N, Ημέρες 9-34: 1/3 δόση αζώτου, Ημέρες 35-40: 0 δόση N). Τρίγωνο: υγιή φυτά, Τετράγωνο: θρεπτικά καταπονημένα φυτά.

Στο Διάγραμμα 18 a-f μελετάται η μέση τιμή της μεταβολής της καμπύλη ανάκλασης των δυο μεταχειρίσεων, στην ορατή (400-500 nm, 500-600 nm) (Διάγραμμα 18a-b), στην κόκκινη (600-700 nm) (Διάγραμμα 18c) και υπέρυθρη περιοχή του φάσματος (700-800nm, 800-900nm, 900-1000nm) (Διάγραμμα 18d-f) τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-40). Η περιοχή του φάσματος στην οποία, ο

συντελεστής ανάκλασης των θρεπτικά καταπονημένων φυτών αυξήθηκε στατιστικά σημαντικά ($p < 0.05$) μόλις εννιά ημέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης λίπανσης (Ημέρα 18), ήταν μεταξύ 700 και 800nm, 800 και 900nm και 900 και 1000nm. Η διαφορά του συντελεστή ανάκλασης μεταξύ των δυο μεταχειρίσεων στις περιοχές αυτές, ήταν ίση με 23, 24 και 28% αντίστοιχα, με το συντελεστή ανάκλασης να αυξάνεται. Στην ορατή περιοχή του φάσματος μεταξύ 500 και 600nm, η διαφορά του συντελεστή ανάκλασης μεταξύ των δυο μεταχειρίσεων την Ημέρα 18 ήταν στατιστικά σημαντική με μικρότερο ποσοστό ίσο με 19%. Ο συντελεστής ανάκλασης των καταπονημένων φυτών παρέμεινε στατιστικά σημαντικά αυξημένος τις επόμενες ημέρες της πειραματικής διαδικασίας. Από την άλλη πλευρά, ο συντελεστής ανάκλασης στην περιοχή του φάσματος μεταξύ των 400 και 500nm, δεν έδειξε κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων, όλες τις ημέρες του πειράματος.

3.3.Μελέτη των μεταβολών των δεικτών ανάκλασης

Το Διάγραμμα 19 παρουσιάζει τη μέση ημερήσια μεταβολή των τιμών των (a) sPRI, (b) PRI, (c) rNDVI, (d) VOGREI 1, (e) mrSRI και (f) TCARI των δεικτών ανάκλασης, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-40). Παρατηρήθηκε ότι, οι δείκτες PRI και sPRI ανίχνευσαν θρεπτική καταπόνηση από την τρίτη ημέρα εφαρμογής της μειωμένης λίπανσης (Ημέρα 11) και έξι ημέρες νωρίτερα από την ημέρα στατιστικά σημαντικής αύξησης της καμπύλης ανάκλασης των καταπονημένων φυτών (Διάγραμμα 19a-b). Η διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων την ενδέκατη ημέρα (Ημέρα 11) ήταν μεγαλύτερη του 50 % και για τους δυο δείκτες. Η διαφορά μεταξύ των τιμών των δεικτών παρέμεινε στατιστικά σημαντικά για τις επόμενες ημέρες του πειράματος (Ημέρες 11-40). Οι τιμές του δείκτη mrSRI των καταπονημένων φυτών ανίχνευσαν την εξέλιξη της θρεπτικής καταπόνησης πέντε ημέρες μετά την έναρξη εφαρμογής της μειωμένης λίπανσης (Ημέρα 13) και τέσσερις ημέρες πριν από την ημέρα στατιστικά σημαντικής αύξησης της καμπύλης ανάκλασης των καταπονημένων φυτών (Διάγραμμα 19e). Από την άλλη πλευρά, οι τιμές του δείκτη TCARI των καταπονημένων φυτών ανίχνευσαν την εξέλιξη της θρεπτικής καταπόνησης εννιά ημέρες μετά την έναρξη εφαρμογής της μειωμένης λίπανσης (Ημέρα 18) όμοια με τη μεταβολή της καμπύλης ανάκλασης (Διάγραμμα 19f).



Διάγραμμα 19 a-f. Μέση ημερήσια εξέλιξη των τιμών των δεικτών (a) PRI, (b) sPRI, (c) rNDVI, (d) VOGREI 1, (e) mrSRI και (f) TCARI των υγιά και θρεπτικά καταπονημένων φυτών, τις ημέρες του πειράματος (Ημέρες 1-8: κανονική δόση N, Ημέρες 9-34: 1/3 δόση αζώτου, Ημέρες 35-40: 0 δόση N) Τετράγωνο: υγιά φυτά, Τρίγωνο: θρεπτικά καταπονημένα φυτά.

Πιο συγκεκριμένα για τον κάθε δείκτη ανάκλασης:

- Δείκτης TCARI

Σύμφωνα με το παραπάνω Διάγραμμα 19f διαπιστώθηκε ότι ο δείκτης TCARI είναι ένας πολύ ελπιδοφόρος δείκτης όσον αφορά την θρεπτική καταπόνηση αφού μπόρεσε να ανιχνεύσει και να αποδώσει την μειωμένη δόση αζώτου από την Ημέρα 18 (αρχή 3ης επανάληψης). Επιπρόσθετα, συνεχίζεται η καταγραφή της διαφοράς μεταξύ των φυτών της σειράς του μάρτυρα σε σύγκριση με τα φυτά της θρεπτικής καταπόνησης αυξάνοντας σταδιακά την διαφορά μεταξύ τους, μέχρι και την Ημέρα 40 (5^η επανάληψη). Από αυτό το γράφημα παρατηρείται ότι ο δείκτης TCARI έχει

συσχέτιση με την μεταβολή της συγκέντρωσης στο φύλλο, μόνο όταν υπάρχει θρεπτική καταπόνηση. Η μέγιστη διαφορά που σημειώθηκε στις διαφορετικές τιμές ανάκλασης από τις δύο μεταχειρίσεις με βάση αυτό τον δείκτη είναι την Ημέρα 35 του πειράματος (4^η επανάληψη).

- *Δείκτης VORGEI*

Σε αυτόν τον δείκτη ανάκλασης παρατηρήθηκε από το Διάγραμμα 19d η εξέλιξη των φυτών της μεταχείρισης με την θρεπτική καταπόνηση μέσω του δείκτη βλάστησης VOGREI. Σε αυτόν τον δείκτη αρχικά παρατηρήθηκαν κάποιες διακυμάνσεις των τιμών της ανάκλασης μεταξύ των φυτών του μάρτυρα και αυτών που υπόκεινται θρεπτική καταπόνηση από την Ημέρα 13 (2^η επανάληψη). Ωστόσο, η εικόνα γίνεται πιο ξεκάθαρη και σαφής ως προς την έλλειψη αζώτου από την Ημέρα 22 του πειράματος, δηλαδή το τέλος της τρίτης επανάληψης. Αυτό υποδεικνύει το γεγονός ότι ο δείκτης VORGEI χρειάζεται περισσότερο χρόνο έκθεσης των φυτών σε αζωτική τροφοπενία έτσι ώστε να μπορέσει να φανερώσει αποτελέσματα σε φυτά τα οποία έχουν υποστεί θρεπτική καταπόνηση. Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 19d άρχισε να δίνει αποτελέσματα μετά από δώδεκα ημέρες μετά την εφαρμογή μειωμένης θρέψης. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη διαφορά στις τιμές ανάκλασης που σημειώθηκε με τον δείκτη VORGEI εμφανίζεται την Ημέρα 36 του πειράματος δηλαδή (στην πρώτη μέρα της 5^{ης} επανάληψης) όπου ξεκίνησε η μηδενική αζωτούχος θρέψη στα φυτά της μεταχείρισης.

- *Δείκτης PRI*

Στο Διάγραμμα 19b παρατίθενται τα αποτελέσματα που δόθηκαν από τον δείκτη PRI. Αυτός ο δείκτης αποδεικνύεται πολύ αποδοτικός όσον αφορά την θρεπτική καταπόνηση αζώτου αφού οι μετρήσεις που μελετήθηκαν δείχνουν την αλλαγή στην ανάκλαση των φυτών της μεταχείρισης από την αρχή της αζωτικής τροφοπενίας. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης PRI αρχίζει να εμφανίζει την απόδοση της μειωμένης δόσης αζώτου από την Ημέρα 10 του πειράματος, δηλαδή την δεύτερη ημέρα εφαρμογής μειωμένης δόσης αζώτου. Καθ' όλη τη μετέπειτα διάρκεια του πειράματος, ο δείκτης PRI συνεχίζει να καταγράφει την διαφορά των τιμών ανάκλασης μεταξύ των υγιή και καταπονημένων φυτών με την μειωμένη δόση αζώτου με σταθερή πορεία. Η μεγαλύτερη διαφορά που σημειώθηκε μεταξύ των μεταχειρίσεων ήταν την Ημέρα 29 του πειράματος δηλαδή η πρώτη μέρα της

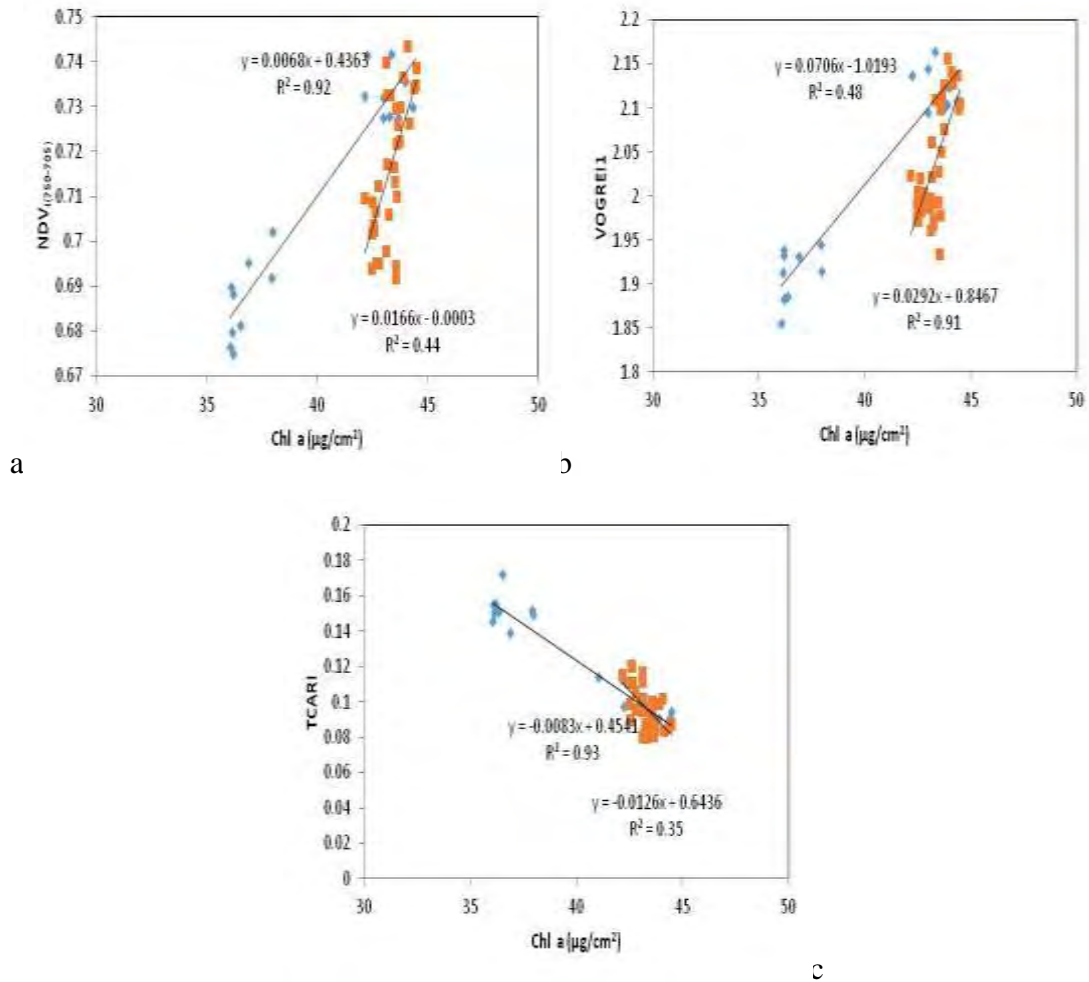
τέταρτης επανάληψης και είκοσι μία μέρες μετά την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζωτούχου λιπάσματος.

- Δείκτης *mrSRI*

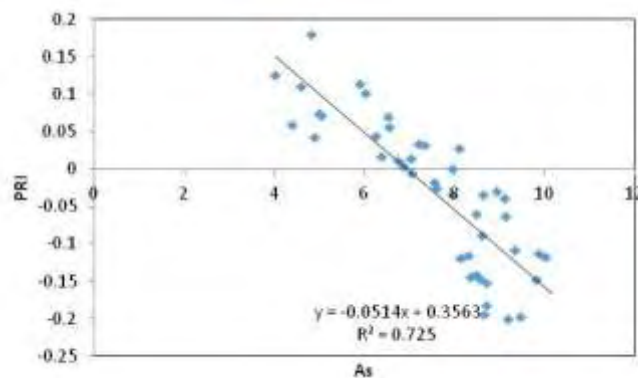
Αντίστοιχα αποδοτικός δείκτης αποδείχτηκε ο *mrSRI*, ο οποίος άρχισε να ανιχνεύει και να καταγράφει την διαφορά των τιμών ανάκλασης μεταξύ των φυτών του μάρτυρα και των φυτών της θρεπτικής καταπόνησης, έξι ημέρες μετά την εφαρμογή μειωμένης δόσης αζώτου (2η Επανάληψη: Ημέρα 14) (Διάγραμμα 19e). Σύμφωνα με το Διάγραμμα 19e, οι τιμές του δείκτη *mrSRI* συνέχισαν να αυξάνονται όσο η θρεπτική καταπόνηση εξελίσσεται (Ημέρα 17). Οι τιμές παρέμειναν υψηλές μέχρι το τέλος του πειράματος (Ημέρες 17-40). Η μεγαλύτερη ωστόσο διαφορά που καταγράφηκε μεταξύ των τιμών της ανάκλασης των δύο μεταχειρίσεων ήταν την Ημέρα 30 (22^η ημέρα από την εφαρμογή της μειωμένης δόσης αζώτου).

Η μέση ημερήσια μεταβολή των δεικτών ανάκλασης μελετήθηκε γραμμικά ως προς τη μέση μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (*Chl_a*). Ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) μεταξύ των τιμών των δεικτών $rNDVI_{(750-705)}$, VOGREI 1 και TCARI των θρεπτικά καταπονημένων φυτών και των *Chl_a* τιμών κυμάνθηκε πάνω από 0.7 (Διάγραμμα 20a-c) με τις τιμές του $rNDVI_{(750-705)}$ (Διάγραμμα 20a) και του VOGREI 1 (Διάγραμμα 20b) να μειώνονται και του TCARI (Διάγραμμα 20c) να αυξάνονται με τη μείωση των *Chl_a* τιμών. Επιπλέον, καμία συσχέτιση μεταξύ των τιμών των δεικτών των υγιή φυτών και της μεταβολής των *Chl_a* τιμών δεν παρατηρήθηκε.

Η μέση ημερήσια μεταβολή των δεικτών ανάκλασης μελετήθηκε γραμμικά και ως προς τη μέση μεταβολή του ρυθμού της φωτοσύνθεσης (*As*, $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) μεταξύ των τιμών του δείκτη PRI των υγιή και καταπονημένων φυτών και των *As* τιμών κυμάνθηκε πάνω από 0.7 (Διάγραμμα 21), με τις τιμές του PRI να αυξάνονται με τη μείωση του ρυθμού της φωτοσύνθεσης. Από την άλλη πλευρά, ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των τιμών των υπόλοιπων δεικτών των θρεπτικά καταπονημένων φυτών, με τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης ήταν μικρότερος του 0.6. Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις συσχέτισης των δεικτών VOGREI 1, TCARI και PRI με τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης και του ρυθμού της φωτοσύνθεσης αντίστοιχα, γίνεται πρόβλεψη των *Chl_a* και *As* τιμών μέσω της υπερφασματικής κάμερας (αισθητήρας καταγραφής δεδομένων φυσιολογίας φυτού από απόσταση).



Διάγραμμα 20a-c. Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής των δεικτών rNDVI, VOGREI 1 και TCARI με τη μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (Chl a, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$). 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. Τετράγωνο: υγιή φυτά, Ρόμβος: θρεπτικά καταπονημένα φυτά



Διάγραμμα 21. Γραμμική συσχέτιση της μέσης ημερήσιας τιμής του δείκτη PRI με τη μεταβολή της φωτοσύνθεσης (As). Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών του δείκτη των υγιή και θρεπτικά καταπονημένων φυτών και της μεταβολής της φωτοσύνθεσης.

4. Συζήτηση-Συμπεράσματα

Οι φασματικές ιδιότητες των φύλλων δεν επηρεάζονται μόνο από την θρεπτική κατάσταση των φυτών, αλλά και από παράγοντες όπως η ηλικία των φύλλων, ο ήλιος έναντι στα φύλλα, η σκίαση των φύλλων, η ανατομία τους, το πάχος των φύλλων, οι διαφορές στις ιδιότητες της επιφάνειας των φύλλων, το υπόβαθρο του εδάφους και το άγχος το οποίο δεν σχετίζεται με τις διακυμάνσεις της περιεκτικότητας του αζώτου, τη γωνία των φύλλων και τη δομή της φυλλικής επιφάνειας. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να εισάγουν αποκλίσεις που μειώνουν τη συσχέτιση μεταξύ θρεπτικού άγχους στα φυτά του θερμοκηπίου και την φασματική απόκριση των φύλλων (Eitel et al., 2006).

Η κύρια προσπάθεια της τρέχουσας έρευνας είναι η ανάπτυξη ενός δείκτη που δεν θα επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες και το φως του ήλιου, που θα δώσει πιο λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το στρες των φυτών στην έλλειψη αζώτου, που θα χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε στιγμή και σε πραγματικό χρόνο και, τέλος, ότι θα είναι εμπορικά διαθέσιμος και οικονομικά αποδοτικός. Οι μετρήσεις των δεικτών ανακλαστικότητας υποφέρουν από την επίδραση του σήματος και της έντασης του φωτός ανάλογα με τον εκάστοτε αισθητήρα τηλεχειρισμού. 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, ως πιο κατάλληλη μέθοδος προτείνεται 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 μετά-επεξεργασία εξάγονται όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες.

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, συνίσταται η τοποθέτηση μαύρης επιφανείας στο πίσω μέρος του φυτού.

Ο συντελεστής ανάκλασης, που επηρεάζεται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ρυθμίζεται με τη λήψη λευκής επιφανείας, 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 ανάμικτης ψηφίδας (φόντο – φυτό).

Με βάση αυτά τα δεδομένα συμπεραίνεται ότι ο υπερφασματικός αισθητήρας απεικόνισης θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μία αξιόπιστη μέθοδος για τη μέτρηση της θρεπτικής κατάστασης του φυτού από απόσταση και την εξαγωγή φασματικών δεικτών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικό επίπεδο για τη διαχείριση της λίπανσης.

Παρατηρήθηκε ότι τα καταπονημένα φυτά τις μεταχειρίσεις τις πρώτες μέρες του πειράματος όπου ακολουθούν ολοκληρωμένο πρόγραμμα λίπανσης εμφανίζουν τιμές ανάκλασης παρόμοιες με αυτές που καταγράφονται και τα φυτά της σειράς του μάρτυρα (περίπου 0,4). Εν συνεχεία, από την Ημέρα 10 (2^η επανάληψη) όπου τα φυτά της μεταχείρισης αρχίζουν να δέχονται μειωμένη δόση αζωτούχου λιπάνσεως παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της δεύτερης επανάληψης όπου τα φυτά της μεταχείρισης δέχονται μειωμένη δόση αζώτου (1/3 μειωμένο άζωτο) δεν ανταποκρίνονται σε αυτή τη μεταβολή. Εν τούτοις, από την Ημέρα 18 (αρχή της 3^{ης} επανάληψης) τα φυτά της μεταχείρισης (1/3 μειωμένη δόση αζώτου) αρχίζουν να αυξάνουν τις τιμές των μέσων όρων της ανάκλασής τους και να φτάνουν μέχρι και το 0,8 αποδεικνύοντάς μας ότι έχουν αρχίσει να αντιλαμβάνονται την καταπόνηση η οποία δημιουργήθηκε.

Από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, συμπερασματικά διακρίνεται ότι στα 400-500nm δεν σημειώνεται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων για όλες της ημέρες του πειράματος. Ωστόσο στο Διάγραμμα 16α διακρίνεται ότι από την 29^η Ημέρα του πειράματος (4^η επανάληψη) είναι πλέον ανιχνεύσιμη η αζωτούχος καταπόνηση των φυτών. Το ίδιο συμβαίνει και στο Διάγραμμα 18c το οποίο αναφέρεται στους μέσους όρους των φυτών από τα 600-700nm. Το επόμενο Διάγραμμα 18d το οποίο αναφέρεται σε μέσους όρους τιμών ανάκλασης από τα 700-800nm παρατηρείται ότι σημειώνεται ιδιαίτερα σημαντική στατιστική διαφορά των τιμών από την Ημέρα 18 του πειράματος και αυτή η διαφορά αυξάνεται όλο και περισσότερο όσο το πείραμα εξελίσσεται. Το ίδιο φαινόμενο γίνεται ευδιάκριτο και στο Διάγραμμα 18e που

απεικονίζει τους μέσους όρους των ανακλάσεων από τα 800-900nm καθώς και στο τελευταίο Διάγραμμα 18f με τους μέσους όρους από τα 900-1000nm.

Τα αποτελέσματα από την παρούσα έρευνα έδειξαν ότι οι δείκτες sPRI, mrSRI και mrNDVI μπορούν να αποτελέσουν σήμα ανίχνευσης διαφορετικών επιπέδων θρεπτικής καταπόνησης. Επιπλέον, ο δείκτης TCARI και PRI θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τις τιμές συγκέντρωσης της χλωροφύλλης και του ρυθμού της φωτοσύνθεσης αντίστοιχα, σε πραγματικό χρόνο, από απόσταση. Επιπρόσθετα, οι μετρήσεις ανακλαστικότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή σημάτων συναγερμού όταν η κατάσταση του αζώτου μιας καλλιέργειας θερμοκηπίου φθάνει τα κρίσιμα επίπεδα με σκοπό να οδηγήσει στη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών. Συμπερασματικά προκύπτει ότι, οι μετρήσεις ανάκλασης και θερμοκρασίας καλλιέργειας του θερμοκηπίου θα μπορούσαν να παρέχουν μια ένδειξη συναγερμού, όταν η θρεπτική κατάσταση της καλλιέργειας βρίσκεται σε οριακά επίπεδα. Από την άλλη πλευρά, η θερμοκρασία της κόμης δε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό ανίχνευσης μειωμένης συγκέντρωσης αζώτου στην καλλιέργεια.

Η υπερφασματική απεικόνιση της ανάκλασης των φυτών σε μία καλλιέργεια θα μπορούσε να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την έγκαιρη ανίχνευση της θρεπτικής καταπόνησης των φυτών, αν και το κόστος και η πολυπλοκότητα είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής. Επίσης σημαντικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι, οι απαιτητικές μέθοδοι βαθμονόμησης των οπτικών αισθητήρων, ειδικά του υπερφασματικού συστήματος απεικόνισης, καθώς επίσης 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 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. Τέλος, η χρήση σταθερών πηγών φωτός είναι σκόπιμη για ακρίβεια ανίχνευσης καταπόνησης των φυτών με τη χρήση υπερφασματικής απεικόνισης. Η χρήση των πιο σταθερών πρωτοκόλλων φωτός είναι απαραίτητη για την παραγωγή συγκρίσιμων στοιχείων σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκηπίου.

Μια πιθανή μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη χρήση κατάλληλων δεικτών ανάκλασης για την ανίχνευση θρεπτικού στρες φυτών σε

πραγματικό χρόνο, για τον ακριβή προσδιορισμό των θρεπτικών αναγκών των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, από αισθητήρες που δεν απαιτούν την επαφή με τα φυτά και δεν είναι καταστροφικοί.

Βιβλιογραφία

Aikio M., 2001. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph. Technical Research Centre of Finland ESPOO.

Amatya S., M. Karkee, A.K. Alva, P. Larbi and B. Adhikari, 2012. Hyperspectral imaging for detecting water Stress in potatoes. Annual International Meeting Sponsored by ASABE, Paper Number 12-1345197.

Aparicio N., D. Villegas, C. Royo, J. Casadesus and J.L. Araus, 2004. Effect of sensor view angle on the assessment of agronomic traits by ground level hyperspectral reflectance measurements in durum wheat under contrasting mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing* 25:6, 1131-1152.

Arngren M., 2011. Hyperspectral NIR camera. Technical note, ver. 1.2.

Asner, G.P., 1998, Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 64:234-253

Bakilan E., 2006. Image Classification, Data Integration and Analysis. Bahar

Bastiaanssen W.G.M., D.J. Molden and I.W. Makin, 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples for research and possible applications. *Agriculture Water Management*, 46/2, 13-155.

Bonneau D., Chesneau, O., Mourard, D., B'erio, P., Clausse J. M., Delaa O., Marcotto A., Perraut K., Roussel A., Spang A., Stee P., Tallon-Bosc I., McAlister H., ten Brummelaar T., Sturmman J., Sturmman L., Turner N., Farrington C. & Goldfinger P. J., 2011. *A&A* 532, A148, doi:10.1051/0004-6361/201116742.

Borzuchowski J. and K. Schulz, 2010. Retrieval of leaf area index (LAI) and soil water content (WC) using hyperspectral remote sensing under controlled glass house conditions for spring barley and sugar beet. *Remote Sensing*. 1702-1721, ISSN 2072-4292.

Brunn A., D. Naughton, H. Weichelt, S. Douglass, M. Thiele, M. Oxfort and K. Beckett, 2010. The calibration procedure of the multispectral imaging instruments on board the rapideye TM remote sensing satellites.

Burns P. D., 1997. Analysis of image noise in multitrainment color acquisition. Ph. D. thesis, Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, USA.

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* I *Toxicon*, pp. 379–391

Chung-Ru Ho, 2008. Principle of remote sensing. National Taiwan Ocean University. Department of Marine Environmental Informatics, Chinese.

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.

Conejero W., J. J. Alarcon, Y. Garcia-Orellana, J.M. Abrisqueta and A. Torrecillas, 2007. Daily sap flow and daily trunk shrinkage measurements for diagnosis water stress in early maturing peach trees during the post-harvest period. *Tree physiology* 27, 81-88.

Eitel J.U.H., P.E. Gessler, A.M.S. Smith and R. Robberecht, 2006. Suitability of existing novel spectral indices to remotely detect water stress in *opulus* spp. *Forest Ecology and Management* 229: 170-182.

Evening M., 2005. *Adobe Photoshop CS2 for Beginners*

Fernández J. E. and M.V. Cuevas, 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 135-151.

Flexas J., U. Niinemets, A. Gallé, M.M. Barbour, M. Centritto, A. Diaz-Espejo, C. Douthe, J. Galmés, M. Ribas-Carbo, P. L. Rodriguez, F. Rosselló, R. Soolanayakanahally, M. Tomas, I. J. Wright, G.D. Farquhar and H. Medrano, 2013. Diffusional conductances to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthesis water-use efficiency. *Phot. Res.* 117(1-3):45- 59.

Gausman, H.W., W.A. Allen, R. Cardenas, and A.J. Richardson, 1971. Effects of leaf nodal position on absorption and scattering coefficients and infinite reflectance of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L. *Agron.*

Giovanni A., L. Foschib, N. Grossi, L. Guglielminetti, G. Zoran Cerovic, 2013. Fluorescence-based versus reflectance proximal sensing of nitrogen content in *Paspalum vaginatum* and *Zoysia matrella* turfgrasses Marco Volterrani, *European Journal of Agronomy*, Pages 39-51

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.

Govender M., P.J. Dye, I.M. Weiersbye, 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.

Graeff S. and W. Claupein, 2007. Identification and discrimination of water stress in wheat leaves (*triticum aestivum* L.) by means of reflectance measurements. *Irrig Sci* 2661-70.

Gutschick P. Bassiri Rad H., 1999. Extreme events as shaping physiology, ecology, and evolution of plants: toward a unified definition and evaluation of their consequences, Volume 160, Issue 1, Pages 21–42

Habudane D., Miller J.R., Pattery E., Zarco-Tejada, Strachan I.B., 2003. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crops canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote sensing of Environment*. 90: 337-352.

Hu X., L. Sun, J. Liu, L. Ding, X. Wang, Y. Li, Y. Zhang, N. Xu, and L. Chen, 2012. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, Vol. 50, No. 12, December 2012, 4915.

Huang Z. and H. Zeng, 2001. Rapid near infrared raman spectroscopy system for real time in vivo skin measurements. *Optic letters*, Volume 26, No 22, 17782-1784.

Huber JL, Huber SC, Campbell WH, Redinbaugh M.G., 1992. Reversible light/dark modulation of spinach leaf nitrate reductase activity involves protein phosphorylation. *Archives of Biochemistry Biophysics*, 296(1):58–65

HydroFlies, 2013. Ορθολογική Διαχείριση Βιοτικών και Αβιοτικών Παραμέτρων σε Υδροπονική Καλλιέργεια Τομάτας και Μαρουλιού, Πρόγραμμα Διασυνοριακής Συνεργασίας «Ελλάδα- Κύπρος 2007-2013» J. 63:87–91.

Jackson R.D. and A.R. Huete, 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11:185-200

Jain N., S. S. Ray, J. P. Singh and S. Panigrahy, 2007. Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. *Precision Agric* (2007) 8:225–239, DOI 10.1007/s11119-007-9042-0

Jones C.L., P.R. Weckler, N.O. Maness, M.L. Stone and R. Jayasekara, 2004a. Estimating water stress in plant using hyperspectral sensing. Annual International Meeting Sponsored By ASAE/CSAE, Paper Number 043065.

Jones C.L., P.R. Weckler, N.O. Maness, M.L. Stone and R. Jayasekara, 2004a. Estimating water stress in plant using hyperspectral sensing. Annual International Meeting Sponsored By ASAE/CSAE, Paper Number 043065.

Jones C.L., P.R. Weckler, N.O. Maness, R. Jayasekara, M.L. Stone and D. Chrz, 2007. Remote sensing to estimate chlorophyll concentration in spinach using multi- spectral plant reflectance. American Society of Agricultural and Biological Engineers, ISSN 0001-2351, Vol. 50 (6): 2267-2273.

Jones H.G., 2004b. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant based methods, Journal of Experimental Botany, Vol. 55, No. 407, 2427–2436.

Jones H.G., 2004b. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant based methods, Journal of Experimental Botany, Vol. 55, No. 407, 2427–2436.

Katsoulas, N., A. Elvanidi, K.P. Ferentinos, T. Bartzanas, C. Kittas. 2014. A hyperspectral imaging system for plant stress detection: calibration and preliminary results. 25th International Scientific – Experts Congress on Agriculture and Food Industry, September 25-27, Cesme-Izmir, Turkey.

Kim Y., D.M. Glenn, J. Park, H.K. Ngugi and B.L. Lehman, 2010. Hyperspectral image analysis for plant stress detection. Annual International Meeting, Paper Numbre 1009114.

Kittas C., 1990. Solar radiation of a greenhouse as a tool to its irrigation control. International Journal of Energy Research, Vol. 14, 881-892.

Kittas, C., A. Elvanidi, N. Katsoulas, T. Bartzanas, K.P. Ferentinos, 2014. Reflectance indices for the detection of water stress in greenhouse plants. 29th International Horticultural Congress (IHC2014), August 17-22, Brisbane, Australia.

Köksal E.S., Y. Güngör and Y.E. Yildirim, 2010. Spectral reflectance characteristics of sugar beet under different levels of irrigation water and relationships between growth parameters and spectral indexes. Irrigation and Drainage, 60, 187-195.

Kozma-Bognár V. and J. Berke, 2010. New evaluation techniques of hyperspectral data.

Kruse J.K., 2004. Remote sensing of moisture and nutrient stress, Ioawa State of University.

Lagomasino D., Price R. M., Herrera-Silveira J., Miralles-Wilhelm F., Merediz-Alonso G., Gomez-Hernandez Y., 2014. Connection groundwater and surface water sources in groundwater dependent coastal wetlands and estuaries: Sian

Ka'an Biosphere Reserve, Quintana Roo, Mexico. *Estuaries and Coasts*.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12237-014-9892-4>

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 08 1115. Vol. XI.

Lawrence K.C., B. Park, W.R. Windham and C. Mao, 2003. Calibration of a pushbroom hyperspectral imaging system for agricultural inspection.

Lazaridou M., Z. Parisi and B. Noitsakis, 2004. Cutting effects on water balance in the leaves of *Trifolium alexandrinum* L. *Cahiers Options Méditerranéennes*. S.I. vol. 62:95-98.

Li Q., X. He, Y. Wang, H. Liu, D. Xu and F. Guo, 2013. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: achievement and challenges. *J. Biomed. Opt.* 18(10), 100901, doi: 10.1117/1.JBO.18.10.100901.

Liaghat S. and S.K. Balasundram, 2010. A Review: The Role of Remote Sensing in Precision Agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5 (1): 50-55.

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, 3331-3342.

Lydakis-Simadiris N., 2005. Εισαγωγή στις Βιοχημικές Διεργασίες, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

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*, Volume 173, Pages 84–97

Martinez-Padilla J., L. Pérez-Rodríguez, F. Mougeot, S. Ludwige, S.M. Redpathf, 2014. Intra-sexual competition alters the relationship between testosterone and ornament expression in a wild territorial bird. *Hormones and Behavior*, Volume 65, Issue 5, Pages 435–444

Mazzetto F., A. Calcante, A. Mena, 2009. Comparing commercial optical sensors for crop monitoring tasks in precision viticulture. *J. of Ag.* (1) 11-18.

Milton E.J., 1987. Review Article Principles of field spectroscopy. Department of Geography, University of Southampton, Southampton, England.

Mouroulis P., 1999. Spectral and spatial uniformity in pushbroom imaging spectrometers. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.

Panda C., 2012. Basic principles of remote sensing. I.A.R.I., New Delhi – 110012. Sensing.6,1665-1670.

Peñuelas J., I. Filella, C. Biel, L. Serrano, R. Savé, 1993. The reflectance at the 950- 970 nm region as an indicator of plant water status. Spain.

Peñuelas J., J. Pinol, R. Ogaya and I. Filella, 1997. Estimation of plant water content by the reflectance water index WI(R900/R970).-Int.J.Remote Sens. 18:2869-287, 1997.

Peñuelas J., J.A. Gamon, A.L. Fredeen, J. Merino and C.B. Field, 1994. Reflectance Indices Associated with Physiological Changes in Nitrogen and Water Limited sunflower leaves. Rem. Sens. Environ. 48, 135-146.

Polder G., W.A.M. Gerie van der Heijden, L.C. Paul Keizer and I.T. Young, 2003. Calibration and characterization of imaging spectrographs. Near Infrared Spectrosc. 11, 193-210 (2003).

Ray, S.S., G. Das, J.P. Singh and S. Panigrahy, 2006. Evaluation of hyperspectral indices for LAI estimation and discrimination of potato crop under different irrigation treatments. International Journal of Remote Sensing, 27:24, 5373-5387, DOI: 10.1080/0143116060076300

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 functions. Water Resources Research 36: doi: 10.1029/2000WR900130. issn: 0043-1397.

Sclemmer 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

Showengerdt A., 2007. Optical radiation models. Remote Sensing (third edition), Pages 45-73,XI-XIII

Silleos G.N., 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.

Soudani, K., G. Hmimina, N. Delpierre, J. –Y. Pontauiller, 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.

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

Swanson R.H. and D.W.A. Whitfield, 1981. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *J. Exp. Bot.* 32:221-239.

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 Agricultural Technology.

Vagni F., 2007. Survey of hyperspectral and multispectral imaging technologies. Research and Technology Organization, ISBN 978-92-837-0071-5

Vernnoy C.J.M., 1992. Biochemical and Biophysical Research Communications, Volume 189, Issue 3, Pages 1255-1769

Vigneau N., M. Ecartotb, G. Rabatela and P. Roumet, 2011. Potential of field Hyperspectral Imaging as a Non Destructive Method to Assess Leaf Nitrogen Content in Wheat. *Field Crops Research*, 2011, 122 (1), 25-31.

Willoughby C.T., M.A. Folkman and M.A. Figueroa, 1996. Application of hyperspectral imaging spectrometer system to industrial inspection. *Proc SPIE*, Vol. 2599, pp.264-272.

Zakaluk, R. and R. S. Ranjan, 2008. Predicting the leaf water potential of potato plants using RGB reflectance. Canada.

Βαφειάδης Λ. και Σταματειάδου Κ., 2007. Επίδραση Νιτρικών Ιόντων στη Συσσώρευση Χρωστικών σε Υδροπονική Καλλιέργεια Παντζαριού, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μεσσολογίου.

Δανηλίδου Ε., 2010. Πειραματική Καλλιέργεια Φυτών με Στόχο Εφαρμογές για την Προστασία του Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Πατρών

Κυζερίδου Α., 2009. Εκτίμηση του Ποσού των Περιεχομένων Φωτοσυνθετικών Χρωστικών σε Καρπούς με τη Χρήση Φασμάτων της in vivo Ανακλαστικότητας

Νταρακάς Ε., 2014. Ποιοτικά Χαρακτηριστικά και Διεργασίες Επεξεργασίας Νερού, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος

Πολυράκης Γ., 2003. Περιβαλλοντική γεωργία. Εκδόσεις Ψύχαλου
Σάββας Δ., Θερμοκηπιακές Καλλιέργειες εκτός Εδάφους, Γεωπονικό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Σωτηράκογλου Α., 2006. Η Καλλιέργεια της Βιομηχανικής Ντομάτας στο
Νομό Θεσσαλονίκης, Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας Τμήμα
Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και Ανθοκομίας

Τσορομώκος Κ., 2011. Επιχειρηματικό Σχέδιο Δημιουργίας Σύγχρονης
Θερμοκηπιακής Μονάδας για την Καλλιέργεια Κηπευτικών, Σελ. 19-22

<http://ikee.lib.auth.gr/record/125778/files/GRI-2011-6227.pdf>

http://news.ari.gov.cy/content/Ydrponia_Exeiridio.pdf

<http://www.alagro.gr/kleista-systhmata/>

http://www.aua.gr/gr/dep/fit/laxanokomia/GL_ppt9.pdf

http://www.chem.uoa.gr/courses/organologia/PDF/Ch05_1xxy.pdf

<http://www.ekk.aua.gr/seminar/seminar06.pdf>

http://www.ftiaxno.gr/2009/06/blog-post_02.html

http://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/thermokipia/txn_prod_thermokipion.pdf

http://www.teidasoponias.gr/site/news/xtra/morfologia/threptika_stoixeia.pdf