



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μετρητής της περιεκτικότητας των φύλλων σε
χλωροφύλλη με χρωματομετρικό προσδιορισμό μέσω της
διαπερατότητας. Η διακρίβωση του οργάνου έγινε με την
μέθοδο της φασματοφωτομετρίας

Του φοιτητή
Κατσαρώνα Σταύρου
Αρ. Μητρώου: 51909m

Επιβλέπων
Σπάσος Μιχαήλ
Αναπληρωτής Καθηγητής

Φεβρουάριος 2022

Τίτλος Δ.Ε. Μετρητής της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη με χρωματομετρικό προσδιορισμό μέσω της διαπερατότητας. Η διακρίβωση του οργάνου έγινε με την μέθοδο της φασματοφωτομετρίας

Κωδικός Δ.Ε. 1905

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Κατσαρώνας Σταύρος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Σπάσος Μιχαήλ

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 9/9/2020

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 20/2/2022

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα» στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Κατσαρώνα Σταύρου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

*«Αφιέρωση»
Στην οικογένεια μου*

Πρόλογος

Η γεωργία «ακριβείας» προσφέρει την δυνατότητα για την καλύτερη διαχείριση και ανάπτυξη των καλλιεργειών και της παραγωγής των αγροτών. Μια σημαντική παράμετρος της γεωργίας ακριβείας είναι η χρήση σύγχρονων αισθητήρων για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της ανάπτυξης και της κατάστασης των καλλιεργειών. Ο μετρητής χλωροφύλλης είναι μία συσκευή που μπορεί τόσο να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη της γεωργίας «ακριβείας» όσο και για τον έλεγχο της κατάστασης ελλείψεως του αζώτου στα φυτά, καθώς το άζωτο αποτελεί το κύριο στοιχείο για την βιοσύνθεση της χλωροφύλλης. Η περιεκτικότητα της χλωροφύλλης έχει άμεση συσχέτιση με την ποσότητα αζώτου στο φυτό και όπως ποσοτικοποιείται υποδηλώνει την υγεία του φυτού και αυτό το γεγονός χρειάζεται για να παρέχει μια εκτίμηση περαιτέρω μέτρων για να διατηρηθούν τα φυτά υγιή. Η χρήση του μπορεί να βελτιστοποιήσει την διαχείριση της λίπανσης με αζωτούχα λιπάσματα, βελτιώνοντας έτσι την παραγωγή, μειώνοντας το κόστος και προστατεύοντας το περιβάλλον από την υπερβολική ρύπανση. Οι μετρητές χλωροφύλλης που υπάρχουν στην αγορά είναι πολύ ακριβοί για τον μέσο αγρότη και για αυτό η πρόκληση είναι η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και χαμηλού κόστους μετρητή χλωροφύλλης.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και κατασκευή ενός πρότυπου φορητού ψηφιακού οργάνου μέτρησης με βάση το IoT, της περιεκτικότητας της χλωροφύλλης στα φύλλα με χρωματομετρικό προσδιορισμό χαμηλού κόστους. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, η περιεκτικότητα της χλωροφύλλης μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της ανάκλασης ή της διαπερατότητας του φωτός στα φύλλα χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο αισθητήρα στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Ως βασικό μηχανισμό ο μετρητής χλωροφύλλης χρησιμοποιεί την διαπερατότητα των φύλλων στο φως.

Το σύστημα του θαλάμου της διαπερατότητας του μετρητή χλωροφύλλης αποτελείται από τις πηγές φωτός που είναι δυο δίοδοι εκπομπής φωτός, μια στο εγγύς υπέρυθρο (LED) και μία στο ορατό (κόκκινο) και μια φωτοδίοδο το TSL2591. Ο μετρητής παρέχει στον χρήστη δύο ενδείξεις για την περιεκτικότητα της χλωροφύλλης στα φύλλα, μία σε τιμή δείκτη του λόγου των δύο μηκών φωτός και σε mg/g. Επίσης τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε εφαρμογή smartphone χρησιμοποιώντας πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth και καταγράφονται σε ένα cloud. Ο μετρητής χλωροφύλλης που κατασκευάστηκε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, έχει δοκιμαστεί σε 20 δείγματα φύλλων αμπέλου και η αξιολόγηση της ακρίβειας της μέτρησης έγινε με σύγκριση με τιμές που προέκυψαν μετά από την εξέταση των ίδιων φύλλων με την μέθοδο της φασματοφωτομετρικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει αρκετά ικανοποιητική συσχέτιση των ενδείξεων του αισθητήρα με τις πραγματικές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης (συντελεστής προσδιορισμού r^2 περίπου 0,96), υποδηλώνοντας ικανοποιητική ακρίβεια. Επίσης υπάρχει γραμμική συσχέτιση, αναφορικά και ειδικά στη συγκεκριμένη ποικιλία φύλλων αμπελιού και στο αντίστοιχο εύρος τιμών, όπου εντάσσονταν τα δείγματα που συλλέχθηκαν. Συμπερασματικά ο μετρητής χλωροφύλλης με βάση το IoT να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φθηνή και αξιόπιστη εναλλακτική λύση για άμεσες και ακριβείς επιτόπιες μετρήσεις.

Λέξεις κλειδιά: Χλωροφύλλη, λίπανση, μικροελεγκτής, άζωτο, απορρόφηση φωτός, αισθητήρες φωτός, φορητός μετρητής, φασματική ανάλυση, απορρόφηση, διαπερατότητα, Γεωργία ακριβείας, Τεχνολογία Διαδικτύου των Πραγμάτων

«Leaf chloride content meter with colorimetric determination by permeability. The instrument was developed by the method of spectrophotometry»

«Stavros Katsaronas»

Abstract

The object of this dissertation is the design and construction of a standard portable digital measuring instrument based on the IoT of the chlorophyll content in leaves with low cost colorimetric determination. According to previous studies, the chlorophyll content can be determined by reflecting or transmitting light to the leaves using a suitable sensor in the visible and near-infrared range. As a basic mechanism the chlorophyll meter uses the permeability of the leaves to light.

The permeability system of the chlorophyll meter consists of light sources which are two light emitting diodes, one in the near infrared (LED) and one in the visible (red) and one photodiode the TSL2591. The meter provides the user with two indications of the chlorophyll content in the leaves, one in the ratio value of the two light lengths and in mg / g. The results are also displayed in a smartphone application using Bluetooth communication protocol and recorded in a cloud. The chlorophyll meter manufactured as part of this work has been tested on 20 samples of vine leaves and the measurement accuracy was evaluated by comparing values obtained after the examination of the same leaves by the method of spectrophotometric analysis. The results showed that there is a fairly satisfactory correlation of the sensor readings with the actual chlorophyll concentrations (coefficient of determination r^2 about 0.96), indicating satisfactory accuracy. There is also a linear correlation, referring specifically to the specific variety of vine leaves and the corresponding range of prices, which included the samples collected. In conclusion, the IoT-based chlorophyll meter can be used as a cheap and reliable alternative for direct and accurate on-site measurements.

Keywords: Chlorophyll, fertilization, microcontroller, nitrogen, light absorption, light sensors, portable meter, spectral analysis, permeability, Precision Agriculture, Internet of Things Technology

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος εφαρμοσμένων ηλεκτρονικών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σπάσο Μιχαήλ, Αναπληρωτή Καθηγητή στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος για την πολύτιμη βοήθεια του, το ιδιαίτερο ενδιαφέρον του και την άριστη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Γεώργιο Ζαχαριάδη, Καθηγητή στο Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου για την πολύτιμη βοήθεια και συμβολή του για την υλοποίηση της φασματοφωτομετρικής ανάλυσης στο εργαστήριο του Τμήματος Χημείας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που ήταν πάντα δίπλα μου και με στήριξαν, προκειμένου να ολοκληρώσω με επιτυχία την διπλωματική μου εργασία.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract.....	vi
Κατάλογος Σχημάτων.....	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Κατάλογος Εικόνων	xii
Συνοτομογραφίες.....	xiii
Εισαγωγή.....	1
Σκοπός της εργασίας	2
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εφαρμογή της μέτρησης της χλωροφύλλης στην γεωργία ακριβείας	3
1.1 Γεωργία Ακριβείας.....	3
1.2 Βασικές αρχές Γεωργίας Ακριβείας	4
1.3 Οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της Γεωργίας Ακριβείας.....	6
1.4. Αναδυόμενες τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας	6
1.5. Αισθητήρες Γεωργίας Ακρίβειας	8
1.6. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων	11
Κεφάλαιο 2 ^ο : Φωτοσύνθεση και Φθορισμός χλωροφύλλης.....	12
2.1 Δομή και ρόλος των χρωστικών. Φωτοσυνθετικές χρωστικές	12
2.2 Παράγοντες που επιδρούν στο φθορισμό	13
2.3 Φωτοσύνθεση και Φθορισμός χλωροφύλλης	14
Κεφάλαιο 3 ^ο : Τεχνολογίες μέτρησης χλωροφύλλης- Μετρητές χλωροφύλλης.....	19
3.1 Τεχνολογίες μέτρησης χλωροφύλλης	19
3.2 Οπτικοί Μετρητές χλωροφύλλης	22
3.2.1 Περιγραφή των οπτικών διαφορών μεταξύ μετρητών.....	23
3.2.2 Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Minolta SPAD-502.....	24
3.2.3 Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Opti-Sciences CCM-200plus	25
3.2.4 Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Apogee MC-100	27
3.3 Σχετικές έρευνες.....	29
Κεφάλαιο 4 ^ο : Υλικά και μέθοδοι	33
4.1 Αρχιτεκτονική - Σχεδιασμός μετρητή χλωροφύλλης	33
4.1.1 Περιγραφή των υλικών (Hardware)	34
4.1.2 Περιγραφή του λογισμικού (Software)	39
4.1.3 Αρχή λειτουργίας μετρητή χλωροφύλλης	46
4.1.4 Διάγραμμα ροής	48
4.2 Διαδικασία μέτρησης.....	50
Κεφάλαιο 5 ^ο : Πειραματική μεθοδολογία.....	51
5.1 Συλλογή δεδομένων	51
5.2 Πειραματική μεθοδολογία εφαρμογής του αισθητήρα σε φύλλα αμπέλου	51
5.3 Μεθοδολογία της εκχύλισης από τα φύλλα	52
5.4 Μεθοδολογία της Φασματοφωτομετρίας Ορατού – Υπεριώδους	57
5.5 Αποτελέσματα εφαρμογής του αισθητήρα σε φύλλα αμπέλου και βαθμονόμηση φορητής συσκευής μέτρησης χλωροφύλλης	70
5.5.1 Αναγκαιότητα για τη βαθμονόμηση.....	70
5.5.2 Μαθηματικό μοντέλο για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα.....	73
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα.....	76
6.1 Μελλοντική επέκταση έρευνας.....	76
Βιβλιογραφία	78

Παράρτημα Α.....	83
Παράρτημα Β.....	91

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: ΤοΙΟΤ στην αγροτική επιχείρηση.....	11
Σχήμα 2.1: Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας φύλλου.....	12
Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα φθορισμομέτρου (ιδία επεξεργασία).....	14
Σχήμα 2.3: Φάσματα απορρόφησης χλωροφύλλης a, b και καροτενοειδών.....	16
Σχήμα 3.1: Λειτουργία των δύο διαφορετικών τύπων μετρητών χλωροφύλλης που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη	20
Σχήμα 3.2: Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Minolta SPAD-502	25
Σχήμα 3.3: Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Opti-Sciences CCM-200plus	27
Σχήμα 3.4: Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Apogee MC-100.....	28
Σχήμα 4.1: Σχηματική διάταξη του μετρητή χλωροφύλλης	33
Σχήμα 4.2: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διόδων εκπομπής αναφέρονται στο παράρτημα....	34
Σχήμα 4.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ESP32.....	35
Σχήμα 4.4: Αισθητήρας φωτός TSL2591	36
Σχήμα 4.5: 16x2 Character LCD - White on Blue 5V.....	37
Σχήμα 4.6: Τα τρισδιάστατα μοντέλα (σχεδίασης) του κυτίου του PCM στον 3D εκτυπωτή....	38
Σχήμα 4.7: Το σύστημα μέτρησης της χλωροφύλλης	39
Σχήμα 4.8: Στιγμιότυπο της εφαρμογής του κινητού για την καταγραφή των μετρήσεων.....	42
Σχήμα 4.9: Κομμάτια (blocks) της Node-Red που μας επιτρέπουν να λάβουμε δεδομένα στο cloud	43
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής του κινητού Android.....	45
Σχήμα 4.11: Μηχανισμός μετρητή χλωροφύλλης	47
Σχήμα 4.12: Θάλαμος μέτρησης PCM.....	48
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα ροής διαδικασίας μέτρησης της χλωροφύλλης	49
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα με συγκριτικά τα πειραματικά αποτελέσματα.....	74
Σχήμα 5.2 και 5.3: Διαγράμματα συσχέτισης για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα (ενδείξεις του στον άξονα χ) ως προς τις περιεκτικότητες χλωροφύλλης που υπολογίζονται φασματοφωτομετρικά (μετρήσεις στον άξονα y). Εντός των διαγραμμάτων δίνονται και οι εξισώσεις των αντίστοιχων καμπυλών παλινδρόμησης (ευθείες ελαχίστων τετραγώνων). Πάνω διάγραμμα: Περιεκτικότητες ως προς μάζα (mg/g). Κάτω διάγραμμα“Περιεκτικότητες ως προς εμβαδό επιφάνειας (mg/cm ²).....	75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Χρωστικές των φυτών και τα μέγιστα της απορρόφησης τους.....	13
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ορισμένων οπτικών αισθητήρων για μέτρηση χλωροφύλλης	20
Πίνακας 3.2: Περίληψη των δημοσιεύσεων σχετικά με τη σχέση της οπτική/απόλυτη συγκέντρωσης χλωροφύλλης	30
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του ESP32.....	35
Πίνακας 4.1: Μετρήσεις στην διεύθυνση http://18.220.230.131:1880/ui	44
Πίνακας 5.1: Μετρήσεις αισθητήρα για τα 20 δείγματα φύλλων αμπέλου.	71
Πίνακας 5.2: Μετρήσεις φασματοφωτομέτρου για τα 20 δείγματα φύλλων αμπέλου.	71
Πίνακας 5.3: Υπολογισμός συγκέντρωσης ολικής χλωροφύλλης ανά μάζα και ανά επιφάνεια .	72
Πίνακας 5.4: Συγκριτικά αποτελέσματα στα 20 δείγματα φύλλων από τον αισθητήρα και από το φασματοφωτόμετρο.....	73

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 5.1: Δείγματα φύλλων.....	52
Εικόνα 5.2: Προετοιμασία για την κοπή των φύλλων.....	53
Εικόνα 5.3: Κοπή τμήματος του φύλλου, διαστάσεων 2Χ2 cm.....	53
Εικόνα 5.4: Κατατεμαχισμός του δείγματος.....	54
Εικόνα 5.5: Κατατεμαχισμένο δείγμα έτοιμο για μεταφορά σε στεγνό δοκιμαστικό σωλήνα....	54
Εικόνα 5.5: Δείγματα έτοιμα για την διαδικασία εκχύλιση της χλωροφύλλης.....	55
Εικόνα 5.6: Δείγματα έτοιμα για την διαδικασία εκχύλιση της χλωροφύλλης.....	55
Εικόνα 5.7: Πειραματική διαδικασία εκχύλισης χλωροφύλλης από τα φύλλα στο ακετονικόδιάλυμα.(Αρχή εκχύλισης).....	56
Εικόνα 5.8: Πειραματική διαδικασία εκχύλισης χλωροφύλλης από τα φύλλα στο ακετονικό διάλυμα.(Πέρασ εκχύλισης μετά από 24 ώρες).....	56
Εικόνα 5.9: Το φασματόφωτομετρο ορατού υπεριώδους με την οθόνη του.....	58
Εικόνα 5.10: Κυψελίδες από χαλαζία για λήψη φασμάτων UV-Vis. Αριστερά στο άνοιγμα του οργάνου φαίνεται ο χώρος τοποθέτησης των κυψελίδων δείγματος και αναφοράς, για μέτρηση με τη διπλή δέσμη της λυχνίας του φασματοφωτομέτρου.....	58
Εικόνα 5.11: Πρόσοψη του φασματοφωτομέτρου ορατού υπεριώδους, με ενδεικτικό μήκος κύματος 652 nm και αριστερά απορρόφηση 0,185.....	59
Εικόνα 5.12: Πολλαπλά φάσματα UV-Vis, από διαλύματα αυξανόμενης συγκέντρωσης χλωροφύλλης.....	59
Εικόνα 5.13: Φάσμα δείγματος 1.....	60
Εικόνα 5.14: Φάσμα δείγματος 2.....	60
Εικόνα 5.15: Φάσμα δείγματος 3.....	61
Εικόνα 5.16: Φάσμα δείγματος 4.....	61
Εικόνα 5.17: Φάσμα δείγματος 5.....	62
Εικόνα 5.18: Φάσμα δείγματος 6.....	62
Εικόνα 5.19: Φάσμα δείγματος 7 (αραίωση 1:2).....	63
Εικόνα 5.20: Φάσμα δείγματος 8.....	63
Εικόνα 5.21: Φάσμα δείγματος 9.....	64
Εικόνα 5.22: Φάσμα δείγματος 10.....	64
Εικόνα 5.23: Φάσμα δείγματος 11.....	65
Εικόνα 5.24: Φάσμα δείγματος 12.....	65
Εικόνα 5.25: Φάσμα δείγματος 13.....	66
Εικόνα 5.26: Φάσμα δείγματος 14.....	66
Εικόνα 5.27: Φάσμα δείγματος 15(αραίωση 1:3).....	67
Εικόνα 5.28: Φάσμα δείγματος 16 (αραίωση 1:3).....	67
Εικόνα 5.29: Φάσμα δείγματος 17 (αραίωση 1:3).....	68
Εικόνα 5.30: Φάσμα δείγματος 18.....	68
Εικόνα 5.31: Φάσμα δείγματος 19.....	69
Εικόνα 5.32: Φάσμα δείγματος 20.....	69

Συντομογραφίες

PCM: Portable Chlorophyll Meter

CCI: Chlorophyll Content Index

SPAD: Soil Plant Analysis Development

PA: Precision Agriculture

IoT: Internet of Things

Εισαγωγή

Στην σύγχρονη γεωργία υπάρχουν αρκετοί παράμετροι, με την μέτρηση των οποίων μπορεί να ελεγχθεί η υγεία των φυτών. Μια από αυτές είναι η χλωροφύλλη, η οποία είναι μια σημαντική ορατή παράμετρος για την παρακολούθηση της φυσιολογικής κατάστασης των φυτών. Το έντονο πράσινο χρώμα των φύλλων που συνδέεται με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη εξαρτάται από τη περιεκτικότητα των διαφόρων θρεπτικών συστατικών όπως άζωτο, μαγνήσιο, σίδηρο, ασβέστιο, μαγγάνιο και ψευδάργυρο σε αυτό. Οι μεταβολές των τιμών τους επηρεάζουν άμεσα την ικανότητα σχηματισμού χλωροφύλλης, με επακόλουθο των αποχρωματισμό των φύλλων. Επίσης ο αποχρωματισμός των φύλλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της γήρανσης των φύλλων των βιοτικών και αβιοτικών στρες λόγω μόλυνσης από παθογόνους παράγοντες και έλλειψης νερού. Από την άλλη, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της περιεκτικότητας της χλωροφύλλης στα φύλλα των φυτών το επίπεδο των θρεπτικών ουσιών όπως το άζωτο από το λίπασμα στο έδαφος επειδή η περιεκτικότητα σε άζωτο σχετίζεται έντονα με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η έκχυση του αζώτου μέσω του εδάφους στο ριζικό σύστημα όπου η υπερβολική του ποσότητα δυνητικά ρυπαίνει τους πόρους υπόγειων υδάτων .

Για τον έλεγχο της κατάστασης της υγείας των φυτών, δηλαδή του επιπέδου αζώτου, χρησιμοποιούνται διάφορα εργαλεία με την τεχνολογία αισθητήρων να είναι ένα από αυτά, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη των φυτών με βάση την ικανότητα των φύλλων να απορροφούν, να μεταδίδουν και να αντανακλούν το φως. Αυτή η τεχνολογία έχει εφαρμοστεί στο φασματοφωτόμετρο και σε μετρητή χλωροφύλλης. Το φασματοφωτόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση χρωστικών χλωροφύλλης που εξάγονται από τα φυτά, ωστόσο είναι μια μέθοδος με μειονεκτήματα καθώς απαιτεί καταστροφή των φύλλων, είναι χρονοβόρα, με υψηλό κόστος και χρησιμοποιείται μόνο σε εργαστήρια. Επίσης οι αποστάσεις μεταξύ των χωραφιών και των εργαστηρίων είναι συνήθως πολύ μεγάλες με αποτέλεσμα η μεταφορά των φύλλων των φυτών από το χωράφι στο εργαστήριο να καθίσταται αναποτελεσματική και μη οικονομική [1].

Από την άλλη ένας μετρητής χλωροφύλλης επιτρέπει μη καταστρεπτικές μετρήσεις της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη στο πεδίο, γρήγορες και λιγότερο δαπανηρές, αλλά συνήθως λιγότερο ακριβείς, ωστόσο, οι μετρητές χλωροφύλλης που διατίθενται στην αγορά είναι ακόμα ακριβοί Van Den Berg και Perkins. Η βελτιωμένη ακρίβεια είναι ο στόχος πολλών ερευνητών και έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι που ποικίλλουν σε πολυπλοκότητα και βελτιστοποίηση.

Επί του παρόντος, στην αγορά υπάρχουν κάποιοι φορητοί μετρητές χλωροφύλλης όπως Konica Minolta SPAD 502, ο MC-100 Chlorophyll Concentration Meter, ο Chlorophyll Content Meter Model CCM-300 κ.α. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εκπομπής φωτός από δύο διόδους (περίπου 640-650 και 940-60nm) και έναν ανιχνευτή φωτός για τη διαδοχική μέτρηση της μετάδοσης μέσω φύλλων κόκκινου και κοντά στο υπέρυθρο φως εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο της διαπερατότητας της χλωροφύλλης. Ωστόσο το κόστος, αυτών των μετρητών χλωροφύλλης είναι πολύ ακριβό για τους αγρότες καθώς κάποιοι σχεδιάστηκαν αποκλειστικά για χρήση από ερευνητές και επιστήμονες. Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη στα φύλλα εκφράζονται σε μονάδες Chlorophyll Content Index (CCI) ή σε μονάδες Soil Plant Analysis

Development (SPAD).

Επιπλέον οι σύγχρονοι αγρότες μπορούν πλέον αξιοποιώντας τις επικοινωνία και τις τεχνολογίες των πληροφοριών να ελαχιστοποιήσουν τους κινδύνους και αυξήσουν την παραγωγή τους καθώς και να διερευνήσουν καινοτόμους τρόπους καλλιέργειας. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things, IoT) αποτελεί ένα μέρος της τεχνολογίας των επικοινωνιών και των πληροφοριών αναπτύσσεται ραγδαία και έχει εφαρμοστεί ευρέως σε διάφορα πεδία, όπως στη γεωργία. Το IoT είναι ένας συνδυασμός πολλών "πραγμάτων" χρησιμοποιώντας ως ραχοκοκαλιά ενός συστήματος επικοινωνίας το Διαδίκτυο για την οικοδόμηση ευφώνων αλληλεπιδράσεων μεταξύ ανθρώπων και αντικειμένων. Οι περισσότερες τεχνολογικές λύσεις IoT στον τομέα της αγροβιομηχανίας και του περιβάλλοντος επικεντρώνονται στους τομείς: της παρακολούθησης (62%), ελέγχων (25%), εφοδιασμού (7%) και προβλέψεων (6%). Οι φορητοί μετρητές χλωροφύλλης παρέχουν συνήθως μια σχετική ένδειξη της χλωροφύλλης στα φύλλα των φυτών [2].

Οι τυπικές εφαρμογές των μετρητών χλωροφύλλης περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης για την αξιολόγηση της κατάστασης των θρεπτικών συστατικών των φυτών, τις επιπτώσεις στο περιβαλλοντικό στρες και την απαίτηση λιπάσματος.

Σκοπός της εργασίας

Αυτή η διπλωματική έχει σαν σκοπό τον σχεδιασμό και κατασκευή ενός χαμηλού κόστους πρότυπου ψηφιακού φορητού οργάνου μέτρησης της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη με χρωματομετρικό προσδιορισμό. Η προτεινόμενη συσκευή μέτρησης συμπαγή σχεδιασμό που προσφέρει ευκολία χειρισμού, καθιστώντας την προσιτή οικονομικά στους αγρότες, επιτρέποντας στον χρήστη να μετράει την χλωροφύλλη με απευθείας μέτρηση στο πεδίο της καλλιέργειας, ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση των θρεπτικών συστατικών της καλλιέργειας μέσω των φύλλων της. Ο μετρητής χλωροφύλλης παρέχει έναν απλό, γρήγορο και μη καταστροφικό τρόπο αξιολόγησης του επιπέδου χλωροφύλλης, αξιόπιστες μετρήσεις καθώς η χρήση IoT πολλαπλασιάζει τα οφέλη από την χρήση της, χωρίς να απαιτείται βαθιά τεχνογνωσία από τον χρήστη της. Η αποθήκευση των μετρήσεων θα γίνεται απευθείας σε κινητό τηλέφωνο με Bluetooth, για ευκολία χειρισμού και μεγιστοποίηση του αποθηκευτικού χώρου.

Η συσκευές φορητών μετρητών χλωροφύλλης που υπάρχουν (π.χ. (SPAD 502) από την Konica Minolta) είναι αρκετά υψηλού κόστους. Για την απάντηση στην ανάγκη μιας συσκευής μέτρησης της χλωροφύλλης χαμηλού κόστους, κατασκευάστηκε αυτός ο μετρητής χρησιμοποιώντας την διαπερατότητα του φύλλου στο φως ως βασικό μηχανισμό ανιχνεύοντας το μεταδιδόμενο φως από το φύλλο χρησιμοποιώντας φασματικό αισθητήρα στην ορατή και στην εγγύς υπέρυθη περιοχή.

Αυτό σημαίνει την εξεύρεση αποδεκτών συμβιβασμών που στοχεύουν να μιμηθούν κάπως τα επαγγελματικά συστήματα, αλλά χρησιμοποιώντας εναλλακτικούς πόρους και τεχνικές. Για χάριν συντομία ο μετρητής θα αναφέρεται ως portable chlorophyll meter PCM.

Κεφάλαιο 1^ο: Εφαρμογή της μέτρησης της χλωροφύλλης στην γεωργία ακριβείας

1.1 Γεωργία Ακριβείας

Πριν από τη μηχανοποίηση της γεωργίας και την επέκταση της κλίμακας του αγροκτήματος, ο αγρότης γνώριζε πολύ καλά τα χωράφια του, επειδή περπατούσε και καλλιεργούσε συνεχώς κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και ήταν σε θέση να διαχειριστεί διάφορα μέρη του σύμφωνα με τις δικές του, δικές του ανάγκες. Για παράδειγμα, σπέρνει περισσότερους σπόρους σε μη καλλιεργημένα χωράφια, ποτίζει περισσότερο λίπασμα όπου τα φυτά φαίνονται αδύναμα και καταστρέφει τα ζιζάνια όπου βρίσκονται.

Η γεωργία ακριβείας (Precision Agriculture - PA), ή δορυφορική καλλιέργεια ή η διαχείριση καλλιεργειών για συγκεκριμένες περιοχές είναι μια έννοια διαχείρισης γεωργίας που βασίζεται στην παρατήρηση, τη μέτρηση και την ανταπόκριση στη μεταβλητότητα εντός και εντός του αγρού στις καλλιέργειες. Ο στόχος της γεωργικής έρευνας ακριβείας είναι να καθορίσει ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για ολόκληρη τη διαχείριση της εκμετάλλευσης με στόχο τη βελτιστοποίηση των αποδόσεων των εισροών διατηρώντας παράλληλα τους πόρους [3].

Η γεωργία ακριβείας αποτελεί βασικό συστατικό του τρίτου κύματος σύγχρονων αγροτικών επαναστάσεων. Η πρώτη αγροτική επανάσταση ήταν η αύξηση της μηχανοποιημένης γεωργίας, από το 1900 στο 1930. Κάθε αγρότης παρήγαγε αρκετή τροφή για να θρέψει περίπου 26 άτομα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Η δεκαετία του 1960 προκάλεσε την Πράσινη Επανάσταση με νέες μεθόδους γενετικής τροποποίησης, οι οποίες οδήγησαν σε κάθε αγρότη να ταΐσει περίπου 156 άτομα. Αναμένεται ότι μέχρι το 2050, ο παγκόσμιος πληθυσμός θα φτάσει περίπου τα 9,6 δισεκατομμύρια, και η παραγωγή τροφίμων θα πρέπει ουσιαστικά να διπλασιαστεί από τα σημερινά επίπεδα για να θρέψει κάθε στόμα. Με νέες τεχνολογικές εξελίξεις στη γεωργική επανάσταση της γεωργίας ακριβείας, κάθε αγρότης θα μπορεί να ταΐσει 265 άτομα στο ίδιο στρέμμα.

Το πρώτο κύμα της γεωργικής επανάστασης ακριβείας ήρθε με τη μορφή δορυφορικών και αεροφωτογραφιών, πρόβλεψης καιρού, εφαρμογής λιπασμάτων μεταβλητού ρυθμού και δεικτών υγείας των καλλιεργειών. Το δεύτερο κύμα συγκεντρώνει τα δεδομένα της μηχανής για ακόμη πιο ακριβή φύτευση, τοπογραφική χαρτογράφηση και δεδομένα εδάφους [4].

Η γεωργία ακριβείας στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης σε επίπεδο πεδίου όσον αφορά:

- Την επιστήμη των καλλιεργειών: συνδυάζοντας τις γεωργικές πρακτικές πιο στενά με τις ανάγκες των καλλιεργειών (π.χ. εισροές λιπασμάτων).
- Την προστασία του περιβάλλοντος: με τη μείωση των περιβαλλοντικών κινδύνων και το αποτύπωμα της γεωργίας (π.χ. περιορισμός της έκπλυσης αζώτου).
- Τα οικονομικά: με την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας μέσω πιο αποτελεσματικών πρακτικών (π.χ. βελτιωμένη διαχείριση της χρήσης λιπασμάτων και άλλων εισροών).

Η γεωργία ακριβείας παρέχει επίσης στους αγρότες πληθώρα πληροφοριών για:

- να δημιουργήσουν ένα αρχείο για το αγρόκτημά τους
 - να βελτιώσει τη λήψη αποφάσεων
 - να προωθήσει μεγαλύτερη ιχνηλασιμότητα
 - να ενισχύσει την εμπορία αγροτικών προϊόντων
 - να βελτιώσει τις ρυθμίσεις μίσθωσης και των σχέσεων με τους ιδιοκτήτες
- να ενισχύσει την εγγενή ποιότητα των αγροτικών προϊόντων (π.χ. επίπεδο πρωτεΐνης στο σιτάρι αλεύρι) [4-5].

1.2 Βασικές αρχές Γεωργίας Ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας χρησιμοποιεί πολλά εργαλεία, αλλά εδώ είναι μερικά από τα βασικά: τρακτέρ, κομπίνες, ψεκαστήρες, ζαρντινιέρες, σκαπτικά, τα οποία όλα θεωρούνται συστήματα αυτόματης καθοδήγησης. Οι μικρές συσκευές στον εξοπλισμό που χρησιμοποιεί GIS (σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών) είναι αυτό που κάνει την ακρίβεια να είναι. Μπορείτε να σκεφτείτε το σύστημα GIS ως τον «εγκέφαλο». Για να μπορέσετε να χρησιμοποιήσετε γεωργία ακριβείας, ο εξοπλισμός πρέπει να είναι καλωδιωμένος με τη σωστή τεχνολογία και συστήματα δεδομένων. Περισσότερα εργαλεία περιλαμβάνουν τεχνολογία μεταβλητού ρυθμού (VRT), παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης και σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών, δειγματοληψία πλέγματος και απομακρυσμένους αισθητήρες [6].

Ένα από τα εργαλεία της γεωργίας ακριβείας αποτελεί και ο φορητός μετρητής χλωροφύλλης ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη. Ο ζωτικός ρόλος που διαδραματίζει η χλωροφύλλη στην ανάπτυξη των φυτών, καθιστά τον ακριβή προσδιορισμό της περιεκτικότητάς της, για την οργάνωση και την βελτιστοποίηση των συνθηκών ανάπτυξης των φυτών, την διάγνωση της παθολογίας των φυτών αλλά και για σκοπούς προστασίας του περιβάλλοντος το κλειδί για την εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας σε επιστημονική βάση.

Πιο συγκεκριμένα:

- Γεωεντοπισμός: Η γεωγραφική τοποθέτηση ενός αγρού επιτρέπει στον αγρότη να επικαλύψει πληροφορίες που συλλέγονται από την ανάλυση εδάφους και υπολειμματικού αζώτου, καθώς και πληροφορίες για προηγούμενες καλλιέργειες και αντοχή στο έδαφος. Η γεωτοποθέτηση γίνεται με δύο τρόπους. Το πεδίο οροθετείται χρησιμοποιώντας έναν δέκτη GPS στο όχημα καθώς ο αγρότης οδηγεί ένα τρακτέρ στο χωράφι. Το πεδίο ορίζεται σε βασικό χάρτη που προέρχεται από εναέριες ή δορυφορικές εικόνες. Οι βασικές εικόνες πρέπει να έχουν το σωστό επίπεδο ανάλυσης και γεωμετρικής ποιότητας για να διασφαλιστεί ότι η γεωγραφική τοποθεσία είναι επαρκώς ακριβής.
- Μεταβλητές: Η μεταβλητότητα εντός και εντός του πεδίου μπορεί να προκύψει από διάφορους παράγοντες. Αυτές περιλαμβάνουν τις κλιματικές συνθήκες (χαλάζι, ξηρασία, βροχή κ.λπ.), εδάφη (υφή, βάθος, επίπεδα αζώτου), πρακτικές καλλιέργειας (μη καλλιέργεια), ζιζάνια και ασθένειες. Οι μόνιμοι δείκτες - κυρίως οι δείκτες εδάφους - παρέχουν στους αγρότες πληροφορίες σχετικά με τις κύριες σταθερές του περιβάλλοντος. Οι σημειακοί δείκτες τους επιτρέπουν να παρακολουθούν την κατάσταση μιας

- καλλιέργειας, δηλαδή να δουν αν αναπτύσσονται ασθένειες, εάν η καλλιέργεια υποφέρει από υδατική καταπόνηση, καταπόνηση αζώτου ή καταφύγιο, αν έχει υποστεί ζημιά από πάγο και ούτω καθεξής. Αυτές οι πληροφορίες μπορεί να προέρχονται από μετεωρολογικούς σταθμούς και άλλους αισθητήρες (ηλεκτρική αντίσταση εδάφους, ανίχνευση με γυμνό μάτι, δορυφορικές εικόνες κ.λπ.). Οι μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους σε συνδυασμό με την ανάλυση του εδάφους καθιστούν δυνατή τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε υγρασία. Η αντίσταση του εδάφους είναι επίσης μια σχετικά απλή και φθηνή μέτρηση [7].
- Στρατηγικές: Χρησιμοποιώντας χάρτες εδάφους, οι αγρότες μπορούν να ακολουθήσουν δύο στρατηγικές για την προσαρμογή των εισροών πεδίου:
 - Προγνωστική προσέγγιση: βασίζεται στην ανάλυση στατικών δεικτών (έδαφος, αντίσταση, ιστορικό πεδίου κ.λπ.) κατά τη διάρκεια του κύκλου καλλιέργειας.
 - Προσέγγιση ελέγχου: οι πληροφορίες από στατικούς δείκτες ενημερώνονται τακτικά κατά τη διάρκεια του κύκλου καλλιέργειας από:
 - Δειγματοληψία: ζύγιση βιομάζας, μέτρηση περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη φύλλων, ζύγιση φρούτων κ.λπ.
 - Τηλεπισκόπηση: η μέτρηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία (αέρας/έδαφος), η υγρασία (αέρας/χώμα/φύλλο), η διάμετρος του ανέμου ή του στελέχους είναι δυνατή χάρη στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και στο Internet of things (IoT)
 - Εντοπισμός μεσολάβησης: οι αισθητήρες στο όχημα μετρούν την κατάσταση των φύλλων. Αυτό απαιτεί από τον αγρότη να οδηγεί σε ολόκληρο το χωράφι.
 - Εναέρια ή δορυφορική τηλεπισκόπηση: οι πολυφασματικές εικόνες αποκτώνται και επεξεργάζονται για να προκύψουν χάρτες βιοφυσικών παραμέτρων καλλιέργειας, συμπεριλαμβανομένων δεικτών ασθένειας. Τα αερομεταφερόμενα όργανα μπορούν να μετρήσουν την ποσότητα του φυτικού καλύμματος και να διακρίνουν μεταξύ καλλιεργειών και ζιζανίων [8].
 - Οι αποφάσεις μπορεί να βασίζονται σε μοντέλα υποστήριξης αποφάσεων (μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών και μοντέλα συστάσεων) βασισμένα σε μεγάλα δεδομένα, αλλά σε τελική ανάλυση εναπόκειται στον αγρότη να αποφασίσει όσον αφορά την επιχειρηματική αξία και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. από συστήματα τεχνητής νοημοσύνης (AI) που βασίζονται σε μηχανική μάθηση και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε γιατί υιοθετείται ή δεν υιοθετείται η τεχνολογία PA, "για να συμβεί η υιοθέτηση της τεχνολογίας PA, ο αγρότης πρέπει να αντιληφθεί την τεχνολογία ως χρήσιμη και εύχρηστη. Μπορεί να είναι ανεπαρκές να υπάρχουν θετικά εξωτερικά δεδομένα για τα οικονομικά οφέλη της PA ως αντίληψη των αγροτών πρέπει να αντικατοπτρίζουν αυτές τις οικονομικές εκτιμήσεις».
 - Πρακτικές εφαρμογής: Οι νέες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών καθιστούν τη διαχείριση των καλλιεργειών σε επίπεδο πεδίου πιο λειτουργική και πιο εύκολη για τους αγρότες. Η εφαρμογή αποφάσεων διαχείρισης καλλιεργειών απαιτεί γεωργικό εξοπλισμό που υποστηρίζει τεχνολογία μεταβλητού ρυθμού (VRT), για παράδειγμα μεταβολή της πυκνότητας των σπόρων μαζί με εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού (VRA) αζώτου και

φυτοϋγειονομικών προϊόντων. Η γεωργία ακριβείας χρησιμοποιεί τεχνολογία στον αγροτικό εξοπλισμό (π.χ. τρακτέρ, ψεκαστήρες, θεριστικές μηχανές κ.λπ.):

- σύστημα εντοπισμού θέσης (π.χ. δέκτες GPS που χρησιμοποιούν δορυφορικά σήματα για τον ακριβή προσδιορισμό μιας θέσης στον πλανήτη).
- συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), δηλαδή λογισμικό που έχει νόημα για όλα τα διαθέσιμα δεδομένα.
- γεωργικός εξοπλισμός μεταβλητού ρυθμού (σπόρος, σπαρτικό) [9].

1.3 Οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις της Γεωργίας Ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας, όπως υποδηλώνει το όνομα, σημαίνει εφαρμογή ακριβούς και σωστής ποσότητας εισροών όπως νερό, λίπασμα, φυτοφάρμακα κ.λπ. τη σωστή στιγμή στην καλλιέργεια για αύξηση της παραγωγικότητας και μεγιστοποίηση των αποδόσεων της. Οι πρακτικές διαχείρισης ακριβείας της γεωργίας μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ποσότητα θρεπτικών και άλλων καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται, αυξάνοντας παράλληλα τις αποδόσεις. Οι αγρότες αποκτούν έτσι μια απόδοση της επένδυσής τους εξοικονομώντας κόστος νερού, φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων.

Το δεύτερο, ευρύτερης κλίμακας όφελος από τη στόχευση εισροών αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εφαρμογή της σωστής ποσότητας χημικών στο σωστό μέρος και τη σωστή στιγμή ωφελεί τις καλλιέργειες, τα εδάφη και τα υπόγεια ύδατα, και συνεπώς ολόκληρο τον κύκλο καλλιέργειας. Κατά συνέπεια, η γεωργία ακριβείας έχει γίνει ακρογωνιαίος λίθος της βιώσιμης γεωργίας, δεδομένου ότι σέβεται τις καλλιέργειες, τα εδάφη και τους αγρότες. Η βιώσιμη γεωργία επιδιώκει να διασφαλίσει μια συνεχή παροχή τροφίμων εντός των οικολογικών, οικονομικών και κοινωνικών ορίων που απαιτούνται για να διατηρηθεί η παραγωγή μακροπρόθεσμα.

Η γεωργία ακριβείας μειώνει την πίεση στη γεωργία για το περιβάλλον αυξάνοντας την αποδοτικότητα των μηχανημάτων και θέτοντάς τα σε χρήση. Για παράδειγμα, η χρήση συσκευών απομακρυσμένης διαχείρισης, όπως το GPS, μειώνει την κατανάλωση καυσίμου για τη γεωργία, ενώ η εφαρμογή μεταβλητών ποσοτήτων θρεπτικών ουσιών ή φυτοφαρμάκων μπορεί δυνητικά να μειώσει τη χρήση αυτών των εισροών, εξοικονομώντας έτσι κόστος και μειώνοντας τις επιβλαβείς απορροές στις πλωτές οδούς [10].

1.4. Αναδύομενες τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας είναι μια εφαρμογή πρωτοποριακών τεχνολογιών ψηφιακής γεωργίας. Πάνω από 4,6 δισεκατομμύρια δολάρια έχουν επενδυθεί σε εταιρείες τεχνολογίας γεωργίας. Πιο συγκεκριμένα:

- Ρομπότ: Τα αυτο-διευθυντικά τρακτέρ υπάρχουν εδώ και αρκετό καιρό, καθώς ο εξοπλισμός John Deere λειτουργεί σαν αεροπλάνο στον αυτόματο πιλότο. Το τρακτέρ κάνει το μεγαλύτερο μέρος της δουλειάς, με τον αγρότη να κάνει παρέμβαση για

καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Η τεχνολογία προχωρά προς μηχανήματα χωρίς οδηγό προγραμματισμένα με GPS για τη διάδοση λιπασμάτων ή οργώματος. Άλλες καινοτομίες περιλαμβάνουν ηλιακό μηχάνημα που αναγνωρίζει τα ζιζάνια και τα σκοτώνει με μια δόση ζιζανιοκτόνου ή λείζερ. Αγροτικά ρομπότ, γνωστά και ως AgBots, υπάρχουν ήδη, αλλά αναπτύσσονται εξελιγμένα ρομπότ συγκομιδής για τον εντοπισμό των ώριμων φρούτων, την προσαρμογή στο σχήμα και το μέγεθός τους και την προσεκτική απομάκρυνσή τους από τα κλαδιά.

- Drones και δορυφορικές εικόνες: Οι κηφίνες και η δορυφορική τεχνολογία χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας. Αυτό συμβαίνει συχνά όταν τα drones λαμβάνουν εικόνες υψηλής ποιότητας ενώ οι δορυφόροι τραβούν τη μεγαλύτερη εικόνα. Οι πιλότοι ελαφρών αεροσκαφών μπορούν να συνδυάσουν την αεροφωτογραφία με δεδομένα από δορυφορικά αρχεία για να προβλέψουν μελλοντικές αποδόσεις με βάση το τρέχον επίπεδο βιομάζας πεδίου. Οι συγκεντρωτικές εικόνες μπορούν να δημιουργήσουν χάρτες περιγράμματος για την παρακολούθηση της ροής του νερού, να καθορίσουν τη σπορά μεταβλητού ρυθμού και να δημιουργήσουν χάρτες απόδοσης των περιοχών που ήταν περισσότερο ή λιγότερο παραγωγικές.
- Το Διαδίκτυο των πραγμάτων: Το Διαδίκτυο των πραγμάτων είναι το δίκτυο φυσικών αντικειμένων εξοπλισμένων με ηλεκτρονικά που επιτρέπουν τη συλλογή και τη συγκέντρωση δεδομένων. Το IoT μπαίνει στο παιχνίδι με την ανάπτυξη αισθητήρων και λογισμικού διαχείρισης αγροκτημάτων. Για παράδειγμα, οι αγρότες μπορούν να μετρήσουν φασματοσκοπικά το άζωτο, τον φώσφορο και το κάλιο σε υγρή κοπριά, κάτι που είναι διαβόητα ασυνεπές. Στη συνέχεια μπορούν να σαρώσουν το έδαφος για να δουν πού έχουν ήδη ουρήσει οι αγελάδες και να εφαρμόσουν λίπασμα μόνο στα σημεία που το χρειάζονται. Αυτό μειώνει τη χρήση λιπασμάτων έως και 30%. Οι αισθητήρες υγρασίας στο έδαφος καθορίζουν τους καλύτερους χρόνους για το πότισμα των φυτών από απόσταση. Τα συστήματα άρδευσης μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να αλλάζουν ποια πλευρά του κορμού δένδρου ποτίζουν με βάση τις ανάγκες του φυτού και τις βροχοπτώσεις. Οι καινοτομίες δεν περιορίζονται μόνο στα φυτά - μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ευημερία των ζώων. Τα βοοειδή μπορούν να εξοπλιστούν με εσωτερικούς αισθητήρες για να παρακολουθούν την οξύτητα του στομάχου και τα πεπτικά προβλήματα. Οι εξωτερικοί αισθητήρες παρακολουθούν τα μοτίβα κίνησης για τον προσδιορισμό της υγείας και της φυσικής κατάστασης της αγελάδας, την αίσθηση σωματικών τραυματισμών και τον προσδιορισμό των βέλτιστων χρόνων για αναπαραγωγή. Όλα αυτά τα δεδομένα από τους αισθητήρες μπορούν να συγκεντρωθούν και να αναλυθούν για να ανιχνεύσουν τάσεις και μοτίβα. Ως άλλο παράδειγμα, η τεχνολογία παρακολούθησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καταστεί η μελισσοκομία πιο αποδοτική. Οι μέλισσες έχουν σημαντική οικονομική αξία και παρέχουν ζωτική υπηρεσία στη γεωργία επικονιάζοντας ποικιλία καλλιεργειών. Η παρακολούθηση της υγείας μιας αποικίας μελισσών μέσω ασύρματων αισθητήρων θερμοκρασίας, υγρασίας και CO2 βοηθά στη βελτίωση της παραγωγικότητας των μελισσών και στην ανάγνωση πρώιμων προειδοποιήσεων στα δεδομένα που θα μπορούσαν να απειλήσουν την ίδια την επιβίωση μιας ολόκληρης κυψέλης.

- Εφαρμογές Smartphone: Οι εφαρμογές smartphone και tablet γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς στη γεωργία ακριβείας. Τα smartphone έρχονται με πολλές χρήσιμες εφαρμογές που έχουν ήδη εγκατασταθεί, όπως η κάμερα, το μικρόφωνο, το GPS και το επιταχυνσιόμετρο. Υπάρχουν επίσης εφαρμογές που έχουν αφιερωθεί σε διάφορες γεωργικές εφαρμογές, όπως χαρτογράφηση πεδίου, παρακολούθηση ζώων, λήψη πληροφοριών καιρού και καλλιεργειών και πολλά άλλα. Είναι εύκολα φορητά, προσιτά και έχουν υψηλή υπολογιστική ισχύ.
- Μηχανική μάθηση: Η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με drones, ρομπότ και συσκευές διαδικτύου. Επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων από κάθε μία από αυτές τις πηγές. Στη συνέχεια, ο υπολογιστής επεξεργάζεται αυτές τις πληροφορίες και στέλνει τις κατάλληλες ενέργειες πίσω σε αυτές τις συσκευές. Αυτό επιτρέπει στα ρομπότ να παρέχουν την τέλεια ποσότητα λιπάσματος ή στις συσκευές IoT να παρέχουν την τέλεια ποσότητα νερού απευθείας στο έδαφος. Η μηχανική μάθηση μπορεί επίσης να παρέχει προβλέψεις στους αγρότες στο σημείο ανάγκης, όπως το περιεχόμενο του διαθέσιμου φυτικού αζώτου στο έδαφος, για να καθοδηγήσει τον προγραμματισμό της λίπανσης. Καθώς η γεωργία γίνεται όλο και πιο ψηφιακή, η μηχανική μάθηση θα στηρίξει την αποτελεσματική και ακριβή γεωργία με λιγότερη χειρωνακτική εργασία [11-12].

1.5. Αισθητήρες Γεωργίας Ακρίβειας

Μια σειρά τεχνολογιών ανίχνευσης χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας, παρέχοντας δεδομένα που βοηθούν τους αγρότες να παρακολουθούν και να βελτιστοποιούν τις καλλιέργειες, καθώς και να προσαρμόζονται στους μεταβαλλόμενους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως:

- Οι αισθητήρες τοποθεσίας χρησιμοποιούν σήματα από δορυφόρους GPS για τον προσδιορισμό του γεωγραφικού πλάτους, γεωγραφικού μήκους και υψόμετρου εντός των ποδιών. Απαιτούνται τουλάχιστον τρεις δορυφόροι για να τριγωνοποιήσουν μια θέση. Η ακριβής τοποθέτηση είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της γεωργίας ακριβείας. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα GPS όπως το NJRNJG1157PCD-TE1 είναι ένα καλό παράδειγμα αισθητήρων τοποθεσίας.
- Οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν το φως για τη μέτρηση των ιδιοτήτων του εδάφους. Οι αισθητήρες μετρούν διαφορετικές συχνότητες ανάκλασης φωτός σε φάσματα σχεδόν υπέρυθρου, μέσου υπέρυθρου και πολωμένου φωτός. Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε οχήματα ή εναέριες πλατφόρμες όπως drones ή ακόμη και δορυφόρους. Η ανακλαστικότητα του εδάφους και τα δεδομένα του χρώματος των φυτών είναι μόνο δύο μεταβλητές από οπτικούς αισθητήρες που μπορούν να συγκεντρωθούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία. Οι οπτικοί αισθητήρες έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό του πηλού, της οργανικής ύλης και της περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους.

- Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες παρέχουν βασικές πληροφορίες που απαιτούνται για τη γεωργία ακριβείας: pH και επίπεδα θρεπτικών συστατικών του εδάφους. Τα ηλεκτρόδια αισθητήρων λειτουργούν ανιχνεύοντας συγκεκριμένα ιόντα στο έδαφος. Επί του παρόντος, αισθητήρες τοποθετημένοι σε ειδικά σχεδιασμένα "έλκηθρα" βοηθούν στη συλλογή, επεξεργασία και χαρτογράφηση χημικών δεδομένων του εδάφους.
- Οι μηχανικοί αισθητήρες μετρούν τη συμπίκνωση του εδάφους ή τη "μηχανική αντίσταση". Οι αισθητήρες χρησιμοποιούν έναν ανιχνευτή που διαπερνά το έδαφος και καταγράφει τις δυνάμεις αντίστασης μέσω της χρήσης κυψελών φορτίου ή μετρητών παραμόρφωσης. Μια παρόμοια μορφή αυτής της τεχνολογίας χρησιμοποιείται σε μεγάλους ελκυστήρες για την πρόβλεψη απαιτήσεων έλξης για εξοπλισμό εμπλοκής στο έδαφος. Τα тенσιόμετρα, όπως το HoneywellFSG15N1A, ανιχνεύουν τη δύναμη που χρησιμοποιούν οι ρίζες στην απορρόφηση νερού και είναι πολύ χρήσιμα για αρδευτικές παρεμβάσεις.
- Οι διηλεκτρικοί αισθητήρες υγρασίας εδάφους αξιολογούν τα επίπεδα υγρασίας μετρώντας τη διηλεκτρική σταθερά (μια ηλεκτρική ιδιότητα που αλλάζει ανάλογα με την ποσότητα υγρασίας που υπάρχει) στο έδαφος.
- Οι αισθητήρες ροής αέρα μετρούν τη διαπερατότητα του εδάφους. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν σε μοναδικές θέσεις ή δυναμικά ενώ κινείστε. Η επιθυμητή έξοδος είναι η πίεση που απαιτείται για να ωθήσει μια προκαθορισμένη ποσότητα αέρα στο έδαφος σε καθορισμένο βάθος. Διάφοροι τύποι ιδιοτήτων εδάφους, συμπεριλαμβανομένης της συμπίκνωσης, της δομής, του τύπου του εδάφους και του επιπέδου υγρασίας, παράγουν μοναδικές υπογραφές αναγνώρισης.
- Οι Αγροτικοί Μετεωρολογικοί Σταθμοί είναι αυτόνομες μονάδες που τοποθετούνται σε διάφορες τοποθεσίες σε όλα τα πεδία καλλιέργειας. Αυτοί οι σταθμοί διαθέτουν έναν συνδυασμό αισθητήρων κατάλληλων για τις τοπικές καλλιέργειες και το κλίμα. Πληροφορίες όπως η θερμοκρασία του αέρα, η θερμοκρασία του εδάφους σε διάφορα βάθη, οι βροχοπτώσεις, η υγρασία των φύλλων, η χλωροφύλλη, η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία του σημείου δρόσου, η κατεύθυνση του ανέμου, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ατμοσφαιρική πίεση μετρώνται και καταγράφονται σε προκαθορισμένα διαστήματα. Αυτά τα δεδομένα συγκεντρώνονται και αποστέλλονται ασύρματα σε έναν κεντρικό καταγραφέα δεδομένων σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα. Η φορητότητά τους και οι μειωμένες τιμές καθιστούν τους μετεωρολογικούς σταθμούς ελκυστικούς για αγροκτήματα όλων των μεγεθών [22-23].

Οι τεχνολογίες ανίχνευσης παρέχουν ενεργά δεδομένα για επεξεργασία και υλοποίηση ανάλογα με τις ανάγκες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των καλλιεργειών ενώ ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ακολουθούν μερικοί τρόποι με τους οποίους η γεωργία ακριβείας εκμεταλλεύεται αυτά τα δεδομένα:

- Τα συστήματα παρακολούθησης απόδοσης τοποθετούνται σε οχήματα συγκομιδής καλλιεργειών, όπως κομπίνες και θεριστικές μηχανές καλαμποκιού. Παρέχουν απόδοση βάρους καλλιέργειας ανά χρόνο, απόσταση ή θέση GPS που μετράται και καταγράφεται σε απόσταση 30 εκατοστών.

- Η Χαρτογράφηση Απόδοσης χρησιμοποιεί δεδομένα χωρικών συντεταγμένων από αισθητήρες GPS τοποθετημένους σε εξοπλισμό συγκομιδής. Τα δεδομένα παρακολούθησης της απόδοσης συνδυάζονται με τις συντεταγμένες για τη δημιουργία χαρτών απόδοσης.
- Τα εργαλεία εφαρμογής μεταβλητού ρυθμού λιπάσματος χρησιμοποιούν χάρτες απόδοσης και ίσως οπτικές έρευνες για την υγεία των φυτών που καθορίζονται από τον χρωματισμό για τον έλεγχο κοκκωδών, υγρών και αέριων λιπασμάτων. Οι ελεγκτές μεταβλητής ταχύτητας μπορούν είτε να ελεγχθούν χειροκίνητα είτε αυτόματα μέσω ενός ενσωματωμένου υπολογιστή που καθοδηγείται από πραγματική τοποθεσία GPS.
- Το WeedMapping χρησιμοποιεί επί του παρόντος την ερμηνεία και την εισαγωγή χειριστή για τη δημιουργία χαρτών, επισημαίνοντας γρήγορα τη θέση με ένα δέκτη GPS και καταγραφικό δεδομένων. Τα περιστατικά ζιζανίων μπορούν στη συνέχεια να επικαλύπτονται με χάρτες απόδοσης, χάρτες λιπασμάτων και χάρτες ψεκασμού. Καθώς βελτιώνονται τα συστήματα οπτικής αναγνώρισης, η χειροκίνητη εγγραφή θα αντικατασταθεί σύντομα από αυτοματοποιημένα, οπτικά συστήματα τοποθετημένα στον εξοπλισμό εργασίας.
- Οι μεταβλητοί ελεγκτές ψεκασμού ενεργοποιούν και απενεργοποιούν τις εκρήξεις ψεκασμού ζιζανιοκτόνων και προσαρμόζουν την ποσότητα (και το μείγμα) του ψεκασμού που εφαρμόζεται. Μόλις εντοπιστούν και χαρτογραφηθούν οι θέσεις ζιζανίων, μπορεί να προσδιοριστεί ο όγκος και το μείγμα του ψεκασμού.
- Η τοπογραφία και τα όρια μπορούν να καταγραφούν χρησιμοποιώντας GPS υψηλής ακρίβειας, το οποίο επιτρέπει την πολύ ακριβή τοπογραφική αναπαράσταση οποιουδήποτε πεδίου. Αυτοί οι χάρτες ακρίβειας είναι χρήσιμοι όταν ερμηνεύονται χάρτες απόδοσης και χάρτες ζιζανίων. Τα όρια πεδίου, οι υπάρχοντες δρόμοι και οι υγρότοποι μπορούν να εντοπιστούν με ακρίβεια για να βοηθήσουν στον προγραμματισμό της εκμετάλλευσης.
- Η χαρτογράφηση αλατότητας γίνεται με μετρητή αλατότητας σε έλκθρο που ρυμουλκείται σε χωράφια που επηρεάζονται από την αλατότητα. Η χαρτογράφηση αλατότητας ερμηνεύει τα επερχόμενα ζητήματα καθώς και την αλλαγή της αλατότητας με την πάροδο του χρόνου.
- Τα συστήματα καθοδήγησης μπορούν να τοποθετήσουν με ακρίβεια ένα κινούμενο όχημα εντός 30 cm ή λιγότερο χρησιμοποιώντας GPS. Τα συστήματα καθοδήγησης αντικαθιστούν τον συμβατικό εξοπλισμό για ψεκασμό ή σπορά. Τα αυτόνομα οχήματα βρίσκονται υπό ανάπτυξη και πιθανότατα θα τεθούν σε χρήση στο εγγύς μέλλον.

Η γεωργία μεγάλης κλίμακας απέκτησε πρώιμη βάση στην πρακτική της γεωργίας ακριβείας. Οι ακριβοί αισθητήρες, η υποδομή και ο εξοπλισμός επεξεργασίας θα μπορούσαν ρεαλιστικά να λειτουργήσουν από αγροτικές επιχειρήσεις με επαρκή κεφάλαια διαθέσιμα για επένδυση. Όσοι επένδυσαν στη γεωργία ακριβείας είδαν όμορφες αποδόσεις όσον αφορά τις αποδόσεις των καλλιεργειών [13-14-15].

1.6. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων

Η έξυπνη γεωργία χρησιμοποιεί τεχνολογία πληροφοριών για να διευκολύνει τους αγρότες να πραγματοποιούν τις καθημερινές τους δραστηριότητες. Η επικοινωνία και η τεχνολογία των πληροφοριών θα διευκολύνουν τους αγρότες να διερευνήσουν καινοτόμους τρόπους για να ελαχιστοποιήσουν τους κινδύνους και να αυξήσουν την παραγωγή. Το Internet of Things (IoT) τα τελευταία χρόνια, ως ένα μέρος της επικοινωνίας και της τεχνολογίας των πληροφοριών αναπτύσσεται ραγδαία και έχει εφαρμοστεί ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως στη γεωργία. Το IoT είναι ένας συνδυασμός όλων των "πραγμάτων" χρησιμοποιώντας το Διαδίκτυο ως την ραχοκοκαλιά ενός συστήματος επικοινωνίας για την οικοδόμηση ευφυών αλληλεπιδράσεων μεταξύ ανθρώπων και αντικειμένων γύρω τους. Οι περισσότερες τεχνολογικές λύσεις IoT στον τομέα της αγροβιομηχανίας και του περιβάλλοντος επικεντρώνονται στην παρακολούθηση (62%), στους ελέγχους (25%), στην εφοδιαστική (7%) και στις προβλέψεις (6%) [16].

Μία από τις συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη της έξυπνης γεωργίας είναι ο μετρητής χλωροφύλλης. Αυτή η συσκευή θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κατάστασης έλλειψης αζώτου στα φυτά. Το άζωτο είναι το κύριο στοιχείο που απαιτείται για τη βιοσύνθεση της χλωροφύλλης. Χρησιμοποιώντας μετρητή χλωροφύλλης, θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί η εφαρμογή αζωτούχου λιπάσματος για την αύξηση της απόδοσης, την μείωση του κόστους παραγωγής και της μείωσης της υπερβολικής ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ο μετρητής χλωροφύλλης είναι διαθέσιμος στην αγορά, ωστόσο η τιμή εξακολουθεί να είναι πολύ ακριβή. Έτσι, η πρόκληση είναι να αναπτυχθεί ένα φτηνό και αξιόπιστο εργαλείο μετρητή χλωροφύλλης.

Χρειάζονται νέες καινοτομίες στις συσκευές μετρητή χλωροφύλλης για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών και την παροχή λύσεων στους τρέχοντες περιορισμούς των μετρητών χλωροφύλλης, συγκεκριμένα με τον εμπλουτισμό τους με τεχνολογία IoT, αποθήκευσης δεδομένων, τοποθεσίας με βάση δορυφόρους GPS και αποστολής δεδομένων στην πλατφόρμα του συστήματος εξυπηρέτησης για διαχείριση γεωργικών δεδομένων [17]



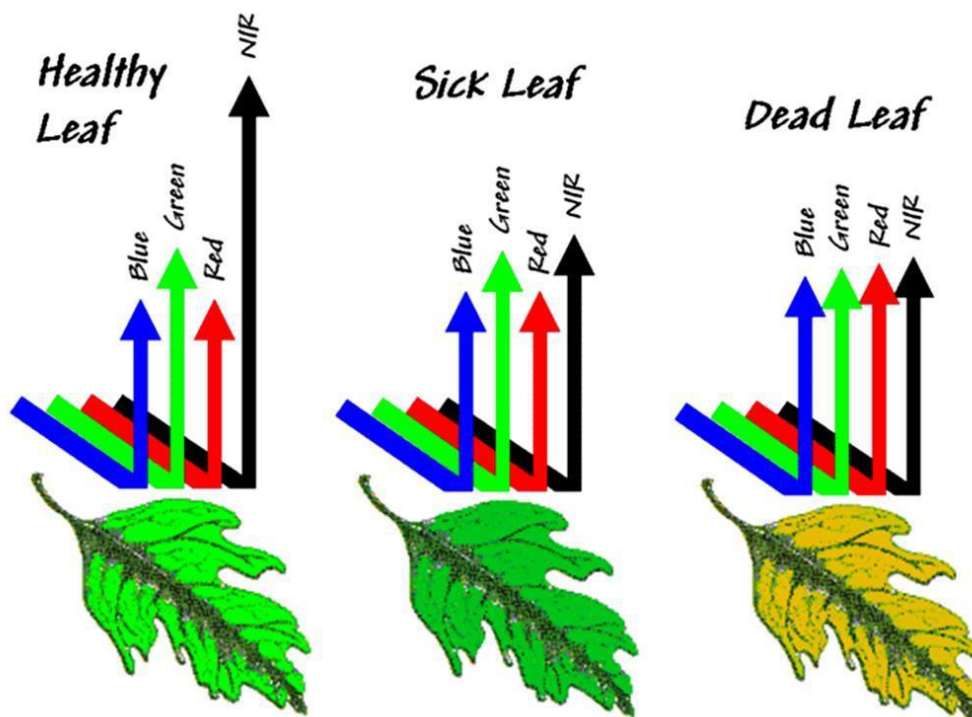
Σχήμα 1.1: Το IOT στην αγροτική επιχείρηση [17]

Κεφάλαιο 2°: Φωτοσύνθεση και Φθορισμός χλωροφύλλης

2.1 Δομή και ρόλος των χρωστικών. Φωτοσυνθετικές χρωστικές

Τα φυτά, είναι οι πρωτογενείς παραγωγοί του πλανήτη. Μπορούν να συλλάβουν το ηλιακό φως (φωτόνια) και χρησιμοποιώντας την ενέργειά του, να συνθέσουν σάκχαρα και βιομάζα.

Οι ιστοί των φύλλων συλλέγουν κυρίως το φως του ηλίου μέσω των φωτοσυνθετικών χρωστικών (χλωροφύλλες, καροτενοειδή κ.λπ.) που βρίσκονται στους χλωροπλάστες για να παραχθούν τα σάκχαρα που συνιστούν την μετατροπή της φωτεινής ακτινοβολίας σε χημική. Αυτή είναι και η αρχή της τροφικής αλυσίδας που τροφοδοτεί συνεχώς με ενέργεια τον πλανήτη και συντηρεί την ζωή σε αυτόν. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα φύλλο και η διαφοροποίηση ενός υγιούς φύλλου από ένα άρρωστο και από ένα νεκρό. Η παραγόμενη τιμή είναι αυτή που προδίδει για την ποσότητα της υγιούς βλάστησης [18].



Σχήμα 2.1: Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας φύλλου [18]

Στους χημικούς δεσμούς των μορίων των σακχάρων αποθηκεύουν την ενέργεια που λαμβάνουν από το λευκό ηλιακό φως (ορατό φάσμα). Με αυτή τους την ιδιότητα, αναδεικνύονται στην κύρια ομάδα οργανισμών που τροφοδοτούν συνεχώς με ενέργεια όλους τους άλλους ζωντανούς οργανισμούς του πλανήτη και γίνονται η αρχή της τροφικής αλυσίδας. Το κλειδί για όλη την φωτοσυνθετική διαδικασία είναι οι φωτοσυλλεκτικές κεραίες (ή "αντένες" όπως περιγράφονται αυτές οι δομές από άλλους ερευνητές - συγγραφείς) που περιέχουν ειδικά

χρωμοφόρα μόρια, τις φωτοσυνθετικές χρωστικές, που μπορούν να παρεμβαίνουν ώστε να συλλαμβάνουν τα ηλιακά φωτόνια. Σε όλη την κλίμακα των οργανισμών που έχουν την ικανότητα να φωτοσυνθέτουν, από τους κατώτερους (κυανοβακτήρια, βακτήρια) μέχρι τους ανώτερους (ανώτερα φυτά), απαντώνται διάφορα είδη φωτοσυνθετικών χρωστικών.

Ως χρωστική χαρακτηρίζεται κάθε μόριο των βιολογικών συστημάτων που απορροφά ενέργεια ακτινοβολίας στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Διαφορετικοί τύποι χρωστικών απορροφούν φως διαφορετικών μηκών κύματος. Η κάθε χρωστική χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο χρώμα, ανάλογα σε ποια περιοχή απορροφούν και ποιο τμήμα του ορατού επιτρέπουν να διέλθει ή να ανακλαστεί μέσα από ένα διάλυμά τους όπως το πράσινο, το κίτρινο, το κυανό και το ιώδες. Οι χρωστικές αυτές ονομάζονται φωτοσυνθετικές χρωστικές καθώς συμμετέχουν στη φωτοσυνθετική λειτουργία [19].

Οι βασικές φωτοσυνθετικές χρωστικές (essential pigments) των ανώτερων φυτών σε σχέση τόσο της δομής τους, όσο και του ρόλου τους, κατατάσσονται σε δύο ομάδες, κατά σειρά σημαντικότητας, τις χλωροφύλλες (Chl) και τα καροτενοειδή (Car). Είναι υπεύθυνες για τις παραλλαγές του χρώματος από το σκούρο πράσινο (χλωροφύλλη) έως το πορτοκαλί ή κίτρινο (καροτενοειδή). Η κύρια φωτοσυνθετική χρωστική είναι η Chla ενώ συμπληρωματικό ρόλο έχουν η Chlb και τα καροτενοειδή. Αυτή η διάκριση γίνεται εξαιτίας του φάσματος του ορατού φωτός (400–780nm) στο οποίο η κάθε χρωστική εμφανίζει την μέγιστη απορρόφηση. Η Chla απορροφά στο ορατό φάσμα με μέγιστο στα 670nm (κόκκινο), η Chlb απορροφά στα 650nm και τα καροτενοειδή απορροφούν στα 450nm (κυανό) [19].

Πίνακας 2.1: Χρωστικές των φυτών και τα μέγιστα της απορρόφησης τους [19]

Χρωστική	Μέγιστη απορρόφηση (nm)
Χλωροφύλλη a	420, 490, 660
Χλωροφύλλη b	435, 643
β – καροτίνη	425, 450, 480
A- καροτίνη	420, 440, 470
Ξανθοφύλλη	425, 450, 475

Η χλωροφύλλη, είναι η κυρίαρχη χρωστική ουσία των πράσινων φύλλων και η περιεκτικότητά σε ένα φύλλο, καθορίζει σε μεγάλη έκταση το ποσό της φωτοσυνθετικής ενεργής ακτινοβολίας (Photosynthetic Active Radiation, PAR) που απορροφάται από το φύλλο, το φωτοσυνθετικό ποσοστό και την παραγωγικότητα του φύλλου. Το PAR τυπικά ορίζεται ως η ακτινοβολία στην περιοχή 400-700 nm, στο φάσμα ορατού φωτός.

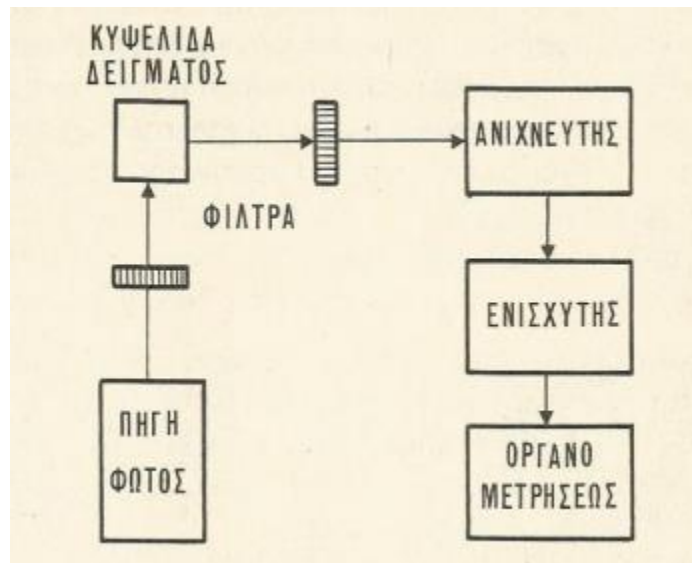
Τα καροτενοειδή από την άλλη συμμετέχουν στη πρόσληψη του φωτός (light harvesting) και σε άλλες σημαντικές φυσικές λειτουργίες, όπως την παρεμπόδιση, μέσω διάφορων μηχανισμών, των καταστροφών στα φύλλα του φυτού που προκαλούνται από τις υπερβολικές ροές της ορατής ακτινοβολίας [20].

2.2 Παράγοντες που επιδρούν στο φθορισμό

Για την εμφάνιση του φαινομένου του φθορισμού απαραίτητη προϋπόθεση είναι η

ύπαρξη της κατάλληλης δομής στο μόριο, ώστε να υπάρχει απορρόφηση ακτινοβολίας στο ορατό ή το υπεριώδες.

Στο επόμενο Σχήμα 2.2 αποτυπώνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός φθορισμομέτρου. Σε αυτό η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την πηγή φωτός διέρχεται από ένα πρωτογενές φίλτρο, οποίο επιτρέπει τη δίοδο της δέσμης που θα χρησιμοποιηθεί για τη διεγέρση των μορίων. Από την κυψελίδα δείγματος η ακτινοβολία φθορισμού εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, συνήθως όμως μετρείται υπό γωνία 90° ως προς τη διεγείρουσα ακτινοβολία, για την ελαχιστοποίηση της ανιχνεύσεως της της δέσμης διεγέρσεως και της παράσιτης ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία φθορισμού διέρχεται από ένα δευτερογενές φίλτρο (φίλτρο φθορισμού), το οποίο επιτρέπει μόνο την ταινία φθορισμού δηλαδή μικρού τμήματος της και στη συνέχεια προσπίπτει στον ανιχνευτή (φωτοπολλαπλασιαστή ή φωτοκύτταρο). Ένας ενισχυτής ακολούθως ενισχύει το σήμα εξόδου του ανιχνευτή και στη συνέχεια παρουσιάζεται σε όργανο μετρήσεως (αναλογικό ή ψηφιακό, καταγραφέα ή παλμογράφο) [21].



Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα φθορισμομέτρου (ιδία επεξεργασία)

2.3 Φωτοσύνθεση και Φθορισμός χλωροφύλλης

Η χλωροφύλλη είναι μια σημαντική ορατή παράμετρος για την παρακολούθηση της φυσιολογικής κατάστασης των φυτών, όπως το πράσινο χρώμα των φύλλων. Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη στα φυτά ελέγχεται από τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών όπως άζωτο, μαγνήσιο, σίδηρος, ασβέστιο, μαγγάνιο και ψευδάργυρος. Οι περιεκτικότητες αυτών των στοιχείων μπορούν να επηρεάσουν το σχηματισμό χλωροφύλλης, προκαλώντας έτσι αποχρωματισμό των φύλλων επηρεάζοντας έτσι την απόδοση της φωτοσύνθεσης. Από την άλλη πλευρά, ένα υπερβολικό επίπεδο θρεπτικών συστατικών όπως το άζωτο μέσω της λίπανσης, μπορεί να διαρρέυσει στο έδαφος, αφού το ριζικό σύστημα μπορεί να μολύνει τους υπόγειους

πόρους. Ο αποχρωματισμός του πράσινου στα φύλλα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της γήρανσης τους καθώς και για βιοτικές και αβιοτικές καταπονήσεις όπως η μόλυνση από παθογόνα και η έλλειψη νερού [22].

Η πρωταρχική λειτουργία των μορίων της χλωροφύλλης είναι η απορρόφηση ακτινοβολίας, η οποία παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για τη φωτοσύνθεση. Η φωτοσύνθεση συμβαίνει σε διάφορα μέρη ενός φύλλου. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στα φωτοσυστήματα και στους τύπους χλωροφύλλης. Συνήθως, τα φθορομέτρα εστιάζουν στο φωτοσύστημα II (PSII) και στη χλωροφύλλη a (Chl.a), αφού το PSII είναι το πρώτο στάδιο της φωτοσύνθεσης. Το Chla είναι παρόν στο PSII όλων των οργανισμών που παράγουν οξυγόνο και είναι η κυρίαρχη χρωστική ουσία. Η χρωστική είναι δότης ηλεκτρονίων και ως εκ τούτου, παίζει ζωτική σημασία στη φωτοσύνθεση και στη μέτρηση του φθορισμού.

Τα φυτικά φύλλα απορροφούν το φως στο φάσμα του ορατού φωτός, αλλά ιδιαίτερης σημασίας είναι τα μπλε και κόκκινα μήκη κύματος λόγω των υψηλών κορυφών απορρόφησης σε αυτά τα φάσματα. Τα φθορομέτρα γενικά υπάρχουν σε δύο παραλλαγές: μπλε και κόκκινη διέγερση μήκους κύματος. Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στα φύλλα των φυτών τυπικά εκφράζεται σε μονάδες ποσότητας ουσίας ανά επιφάνεια φύλλου, (μmolcm^{-2}) ή μάζα ανά επιφάνεια του φύλλου (mgcm^{-2}) [23].

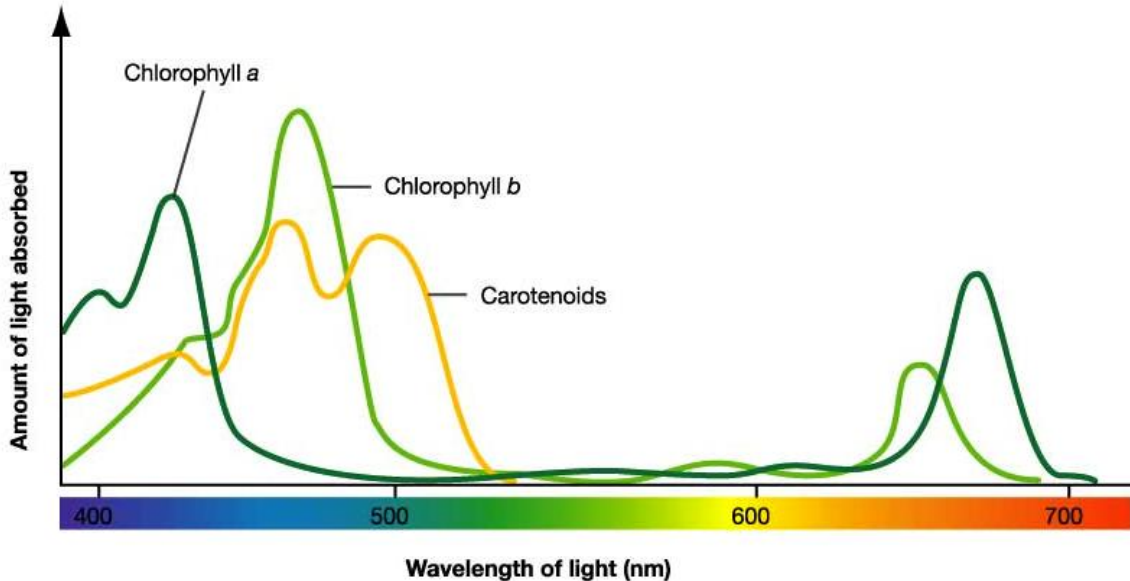
Οι χρωστικές απορροφούν το ορατό φως με την χλωροφύλλη, να απορροφά φως κυρίως από την κυανή, ιώδη και κόκκινη περιοχή του ορατού φάσματος. Έτσι δεν απορροφά καθόλου πράσινο φως, με αποτέλεσμα αυτό να ανακλάται και έτσι οι χλωροπλάστες φέρουν χαρακτηριστικό πράσινο χρωματισμό στον οποίο τα περισσότερα φυτά και φύλλα οφείλουν το χρώμα τους.

Το μόριο της χλωροφύλλης είναι μια οργανική ένωση με μαγνήσιο και έχει μια υδρόφοβη ουρά. Τα μόρια χλωροφύλλης στοιβάζονται το ένα δίπλα στο άλλο μέσα στα θυλακοειδή των χλωροπλαστών. Η χλωροφύλλη είναι αδιάλυτη στο νερό αλλά διαλύεται σε οργανικούς διαλύτες όπως ακετόνη, αιθανόλη, μεθανόλη.

Στους χλωροπλάστες των ανώτερων φυτών απαντώνται δύο είδη χλωροφυλλών οι οποίες συνδέονται στενά. Η πιο σημαντική είναι η χλωροφύλλη «a» (Chla), η χρωστική που ευθύνεται για τις πρώτες αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης. Η χλωροφύλλη «b» (Chlb) που δρα ως βοηθητικό μόριο στη φωτοσύνθεση, διαφέρει ελάχιστα χημικά από τη χλωροφύλλη «a». Η χλωροφύλλη «b» ευθύνεται για το κιτρινοπράσινο χρώμα, ενώ η χλωροφύλλη «a» για το έντονο πράσινο χρώμα, με αποτέλεσμα το κάθε φυτό να εκμεταλλεύεται το μεγαλύτερο τμήμα του φάσματος της ορατής ηλιακής ακτινοβολίας. Τα φάσματα απορρόφησης των χλωροφυλλών παρουσιάζουν μέγιστα στην μπλε και κόκκινη περιοχή του ορατού φάσματος [24].

Υπάρχουν δύο εξειδικευμένες μορφές χλωροφύλλης «a», οι οποίες ονομάζονται P680 και P700. Το P είναι από το αρχικό γράμμα της λέξης pigment που σημαίνει χρωστική. Η P680 εμφανίζει ένα μέγιστο απορρόφησης σε μήκος κύματος 680nm που αντιστοιχεί στο κόκκινο χρώμα και η P700 εμφανίζει μέγιστο απορρόφησης ελαφρά μετατοπισμένο προς μεγαλύτερο μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε 700nm. Σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 700nm, η χλωροφύλλη απορροφά πολύ μικρή ακτινοβολία επομένως υπάρχει μια απότομη μετάβαση από χαμηλή σε υψηλή διαπερατότητα κοντά στα 700nm όπου στο φάσμα μετάδοσης φύλλων ονομάζεται κόκκινο άκρο, και ακτινοβολία με μήκους κύματος μεγαλύτερο από περίπου 700nm,

κοντά σε υπέρυθρο (NIR), δεν χρησιμοποιείται για φωτοσύνθεση. Κατά τη διέγερση του φωτός, ένα φύλλο θα εκπέμπει ξανά απορροφημένο φως στην κόκκινη περιοχή, γενικά στο φάσμα των 660-800nm, κορυφώνοντας περίπου στα 690nm και 735nm. Αυτή η σχέση μεταξύ φθορισμού χλωροφύλλης και αποτελεσματικότητας είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη, και ως εκ τούτου είναι μια ισχυρή τεχνική για την παρακολούθηση της υγείας των φυτών [25].



Σχήμα 2.3: Φάσματα απορρόφησης χλωροφύλλης a, b και καροτενοειδών [25]

Η χλωροφύλλη έχει δύο κορυφές διαπερατότητας στο φάσμα φωτός, η μία κορυφή βρίσκεται στην περιοχή 600-700nm και η δεύτερη στην περιοχή 400-500nm., επίσης η χλωροφύλλη έχει σχεδόν μηδενική διαπερατότητα στην περιοχή κοντά στο υπέρυθρο.

Ο Kautsky και ο Hirsch ήταν οι πρώτοι που περιέγραψαν μια μη επεμβατική τεχνική για τη μέτρηση της υγείας των φυτών χρησιμοποιώντας φθορισμό χλωροφύλλης (CF). Είναι μια γνωστή και καλά δοκιμασμένη μέθοδος που παρέχει αποτελεσματικότητα παρακολούθησης χωρίς βλαβερές συνέπειες για τα φυτά [26].

Όταν ένα μόριο προσλαμβάνει ενέργεια κατά την φωτοδιέγερση του με απορρόφηση ενός φωτονίου, τότε αυτή δεν διατηρείται στο διεγερμένο μόριο, αλλά αποβάλλεται με διάφορους τρόπους. Αυτοί είναι συνήθως υπό μορφή θερμότητας και με εκπομπή δευτερεύουσας ακτινοβολίας η οποία ονομάζεται με το γενικό όρο φωταύγεια. Εάν ο χρόνος εκπομπής μετά την διέγερση είναι της τάξης των 10^{-9} - 10^{-6} sec, τότε η φωταύγεια χαρακτηρίζεται ως φθορισμός, ενώ όταν μεσολαβεί καθυστέρηση 10^{-4} - sec πριν από την εκπομπή χαρακτηρίζεται ως φωσφορισμός. Η μέτρηση της εντάσεως του φθορισμού, γίνεται κατά την διάρκεια της διεγέρσεως και όχι μετά τον τερματισμό της λόγω της μικρής διάρκειας του φθορισμού.

Η χρήση φθορισμού χλωροφύλλης είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την εκτίμηση της φωτοσύνθεσης των φυτών. Κατά τον φθορισμό της χλωροφύλλης εκπέμπονται από την χλωροφύλλη και τις χρωστικές ουσίες φωτόνια κόκκινου και πολύ κόκκινου φωτός (Σχήμα 2.3) nsec μετά την απορρόφηση του φωτός [27].

Η αρχή που διέπει τη χρήση του φθορισμού της χλωροφύλλης ως δείκτη φυσιολογικής κατάστασης των φυτών είναι σχετικά απλή. Το απορροφημένο φως δίνει ενέργεια και διεγείρει τα μόρια χλωροφύλλης και ακολουθεί η αποδιέγερση αυτών. Η ενέργεια επιτυγχάνεται κυρίως μέσω τριών ανταγωνιστικών διαδικασιών: φωτοσύνθεση, απώλεια ακτινοβολίας φωτονίων ή ChlF, και μη ακτινοβολική θερμική διάχυση ενέργειας (NPQ). Καθώς αυτές οι τρεις διαδικασίες διάχυσης ενέργειας ανταγωνίζονται για ενέργεια διέγερσης, οι αλλαγές σε μία διαδικασία (π.χ. φωτοσύνθεση) θα επηρεάσουν τις άλλες δύο. Ως εκ τούτου, μετρώντας το ChlF, μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για το NPQ και τη φωτοσύνθεση.

Ο φθορισμός αποτελεί ένα φαινόμενο κατά το οποίο μια ουσία που απορροφά ένα φωτόνιο γίνεται η ίδια πηγή φωτεινής ακτινοβολίας, εκπέμποντας ένα φωτόνιο μικρότερης ενέργειας και συνεπώς μεγαλύτερου μήκους κύματος. Ειδικότερα, ο φθορισμός της χλωροφύλλης παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1834 από τον David Brewster και διερευνήθηκε εκτενώς από το τους Kautsky και Hirsch (1931) (σχέση μεταξύ των φωτεινών αντιδράσεων της φωτοσύνθεσης και του φθορισμού της χλωροφύλλης α). Οι ερευνητές αυτοί διαπίστωσαν ότι όταν φωτίζονταν φύλλα που έχουν παραμείνει για αρκετή ώρα στο σκοτάδι, γινόταν μια ραγδαία άνοδος του φθορισμού, ενώ στη συνέχεια γινόταν μια σταδιακή πτώση μέχρι μια σταθερή τιμή. Τέλος, οι ίδιοι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η φάση μείωσης του φθορισμού σχετίζονταν αντίστροφα με την αύξηση στο ρυθμό αφομοίωσης CO₂ [28].

Έτσι λοιπόν η απορρόφηση φωτονίων από ένα μόριο χλωροφύλλης, προκαλεί τη διέγερση του μορίου. Το μόριο αυτό είναι ασταθές και έχει την τάση να επανέρχεται στην αρχική του ενεργειακή κατάσταση στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Η μετάβαση στη βασική αυτή ενεργειακή κατάσταση μπορεί να επιτευχθεί με τέσσερις πιθανούς τρόπους [28]:

- Αν το μόριο της χλωροφύλλης διεγερθεί από κυανό φως, τότε το ηλεκτρόνιο θα ανέλθει στην δεύτερη διεγερμένη. Η αποδιέγερσή του στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση, γίνεται με απελευθέρωση ενέργειας με μορφή θερμότητας.
- Η αποδιέγερση από την πρώτη διεγερμένη στη βασική κατάσταση μπορεί να συνοδεύεται ή από εκπομπή θερμότητας ή από εκπομπή ακτινοβολίας μακρότερου μήκους κύματος. Η εκπομπή της ακτινοβολίας αυτής αποτελεί το φαινόμενο του φθορισμού, το οποίο διαρκεί μόλις 1⁰⁻⁹sec.
- Μεταφορά παλμού, όταν η ενέργεια διέγερσης διοχετεύεται σε γειτονικό μόριο χρωστικής.
- Αποβολή ηλεκτρονίων (διαχωρισμός φορτίου), όταν τα μόρια χλωροφύλλης Chla του φωτοχημικού κέντρου αντίδρασης εκκινούν την αλυσίδα ροής ηλεκτρονίων.

Συμπερασματικά, η φωτεινή ακτινοβολία (A), που απορροφάται από τις φωτοσυνθετικές χρωστικές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή φωτοχημικού έργου (P), να απολεσθεί ως θερμότητα (Q) ή να επανεκπεμφθεί με μορφή φθορισμού (F). Η εξίσωση που προκύπτει είναι η εξής: A=P+Q+F, κάτι που δείχνει και την ανταγωνιστική σχέση μεταξύ των διαδικασιών αυτών [28].

Επιπρόσθετα, η ενέργεια που δεσμεύεται (φωτονιακή), μπορεί να αποσβεστεί με δύο τρόπους [29]:

- Με την φωτοσυνθετική ροή ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε εκμεταλλεύσιμη χημική ενέργεια (ATP), όπου έχουμε τη φωτοχημική απόσβεση (qP)

- Και με την μη φωτοχημική της διάχυση ως θερμότητα ή φθορισμό, όπου έχουμε πληροφοριών τη μη φωτοχημική απόσβεση (NPQ), έτσι ώστε να προστατευτεί ο φωτοσυνθετικός μηχανισμός.

Η χρήση του φθορισμού της χλωροφύλλης, αποτελεί σήμερα μια μη καταστρεπτική, εύχρηστη και οικονομική μέθοδο, που χρησιμοποιείται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος μελετών των φωτοσυνθετικών χαρακτηριστικών των φυτών. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου θεωρούνται πως είναι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για τη μέτρηση, το ελάχιστο κόστος εκτέλεσης, ο μεγάλος όγκος που παρέχει και το ότι μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στο πεδίο όσο και στο εργαστήριο. Επίσης είναι μη καταστρεπτική μέθοδος, ελάχιστα επεμβατική και δεν απαιτεί ιδιαίτερες δεξιότητες και εξειδίκευση για την εφαρμογή της. Αξίζει βέβαια να αναφερθεί ότι κατά τη χρήση της μεθόδου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κάποια δεδομένα, έτσι ώστε να ενισχύεται η αξιοπιστία της μεθόδου. Τα δεδομένα αυτά αφορούν στη φυσιολογική σημασία των παραμέτρων του φθορισμού σε συνθήκες πειράματος, στην ποικιλότητα των δειγμάτων και στη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων όταν προέρχονται από διαφορετικά όργανα [30].

Κεφάλαιο 3^ο: Τεχνολογίες μέτρησης χλωροφύλλης- Μετρητές χλωροφύλλης

3.1 Τεχνολογίες μέτρησης χλωροφύλλης

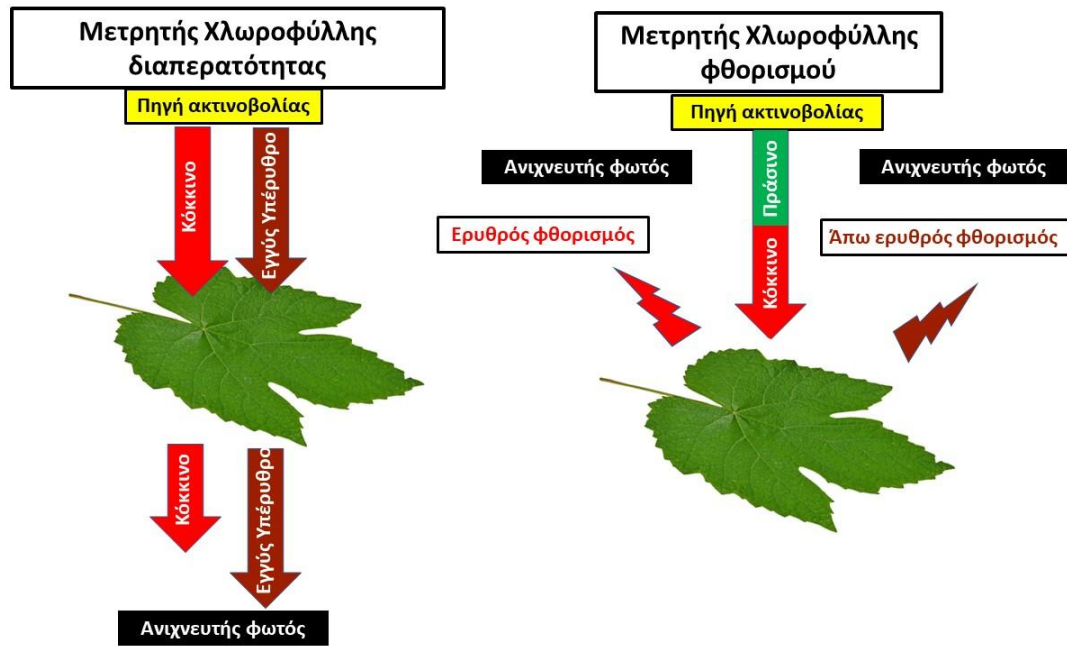
Η συγκέντρωση χλωροφύλλης φύλλου μετριέται με μεγαλύτερη ακρίβεια με εκχύλιση χλωροφύλλης σε διαλύτη ακολουθούμενη από *in vitro* μετρήσεις σε φασματοφωτόμετρο. Ωστόσο, μη καταστρεπτικές, επί τόπου, οπτικές τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για να παρέχουν σχετική ένδειξη συγκέντρωσης χλωροφύλλης φύλλου.

Ως εκ τούτου, αρκετές μελέτες έχουν γίνει για τον τρόπο μέτρησης της χλωροφύλλης (ή της έλλειψης αυτής) ένα ευρύ φάσμα ειδών και συνθηκών, χρησιμοποιώντας πολλές μεθόδους διέγερσης της χλωροφύλλης.

Σημαντικές εξελίξεις στα όργανα μέτρησης του ChlF έχουν γίνει την τελευταία δεκαετία. Για την εκτίμηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη χρησιμοποιούνται φορητοί μετρητές χειρός χλωροφύλλης, οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές μέτρησης που είτε κουμπώνουν στο φύλλο είτε τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια του φύλλου προς μέτρηση [50-51]. Οι μετρητές αυτοί καθορίζουν τη σχετική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη (chl)/ανά επιφάνεια φύλλου, όπου η μετρούμενη τιμή είναι μια αδιάστατη τιμή, ένας δείκτης (index), που σχετίζεται στενά με την πραγματική ποσότητα χλωροφύλλης στα φύλλα. Ένας τύπος μετρητών είναι αυτοί που βασίζονται στην διαπερατότητα του φωτός μέσου του φύλλου [52] και οποίοι υπολογίζουν έμμεσα τη σχετική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη ανά μονάδα επιφάνειας φύλλου. Αυτή η σχετική περιεκτικότητα του φύλλου σε χλωροφύλλη προσδιορίζεται μέσω της μέτρησης της απορρόφησης και της μετάδοσης της ακτινοβολίας από το φύλλο: α) της ακτινοβολίας κόκκινου μήκους κύματος φωτός, καθώς η χλωροφύλλη την απορροφά και β) της ακτινοβολίας εγγύς στο υπέρυθρο (NIR), την οποία δεν απορροφά η χλωροφύλλη. Υψηλές τιμές του δείκτη αντιστοιχούν σε αυξημένη απορρόφηση του κόκκινου και σε αυξημένη περιεκτικότητα χλωροφύλλης. Μετρητές με την παραπάνω τεχνολογία είναι: ο μετρητής SPAD-502 (Konica Minolta, Inc., Tokyo, Ιαπωνία), ο αισθητήρας atLEAF+ (FT Green LLC, Wilmington, DE, Ηνωμένες Πολιτείες) και ο μετρητής συγκέντρωσης χλωροφύλλης MC-100 (Apogee Instruments, Inc., Logan, UT, Ηνωμένες Πολιτείες) [31].

Ένας άλλος τύπος μετρητή για την εκτίμηση της σχετικής περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη των φύλλων, υπολογίζει μέσω της αναλογίας εκπομπής του φθορισμού της χλωροφύλλης (ChlF) της ερυθρής και της άπω ερυθρής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από την χλωροφύλλη, μετά από την διέγερση της με ακτινοβολία που κυμαίνεται από υπεριώδη (UV) έως κόκκινη. Η αναλογία αυτή του κόκκινου προς το πολύ κόκκινο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα της χλωροφύλλης στο φύλλο. Λόγω της επαναρρόφησης του κόκκινου στο εσωτερικό του φύλλου, αυτή η αναλογία μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη [57]. Αυτοί οι μετρητές αναφέρονται ως μετρητές χλωροφύλλης με βάση το φθορισμό ή ως φθοριόμετρα ή αισθητήρες που βασίζονται σε φθορισμό. Τέτοιοι μετρητές είναι ο

αισθητήρας Multiplex (Force-A, Orsay, Γαλλία) [32].



Σχήμα 3.1: Λειτουργία των δύο διαφορετικών τύπων μετρητών χλωροφύλλης που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη [32]

Αρκετοί μετρητές χλωροφύλλης που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο (Πίνακας 3.1) διαφέρουν μεταξύ τους ως προς ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- α) Η αρχή μέτρησης (δηλαδή, διαπερατότητα έναντι του φθορισμού),
- β) τα χρησιμοποιούμενα μήκη κύματος,
- γ) τις μονάδες μέτρησης και τις εξισώσεις βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε μονάδες μέτρησης.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ορισμένων οπτικών αισθητήρων για μέτρηση χλωροφύλλης [32]

Device	Manufacturer	Measuring principle	Wavelengths (nm)	Units
SPAD-502	Minolta (Tokyo, Japan)	Transmittance	650, 940	SPAD units
atLEAF+	FT Green LLC (Wilmington, DE, United States)	Transmittance	660, 940	atLEAF units
MC-100 Chlorophyll Concentration Meter	Apogee Instruments Inc. (Logan, UT, United States)	Transmittance	653, 931	CCI
MULTIPLX	Force-A (Orsay, France)	Fluorescence	635, 685, 735	SFR_R
MULTIPLX	Force-A (Orsay, France)	Fluorescence	516, 685, 735	SGR_G

CCI, Chlorophyll Content Index; SFR_R, Simple Fluorescence Ratio under red excitation; SFR_G, Simple Fluorescence Ratio under green excitation.

Οι μετρητές που βασίζονται στην διαπερατότητα του φωτός μέσω του φύλλου χρησιμοποιούν διάφορες εξισώσεις για τον υπολογισμό της τιμής μέτρησης, από τον λόγο της μετάδοσης ακτινοβολίας. Ο μετρητής SPAD-502 χρησιμοποιεί μια λογαριθμική εξίσωση που περιλαμβάνει δύο σταθερές, ενώ ο μετρητής MC-100 χρησιμοποιεί μια απλή αναλογία της μετάδοσης της ακτινοβολίας NIR και της κόκκινης ακτινοβολίας. Ο αισθητήρας atLEAF+

χρησιμοποιεί μια λογαριθμική αναλογία μεταξύ NIR και διαπερατότητα ερυθρής ακτινοβολίας, παρόμοια με αυτή του μετρητή SPAD-502. Αυτή η ποικιλομορφία των υπολογισμών των διαφόρων μετρητών, περιπλέκει τις συγκρίσεις μεταξύ τους. Δεδομένου ότι οι περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούν μόνο ένα μετρητή, υπάρχει απαίτηση για έρευνα που να παρέχει εξισώσεις που να επιτρέπουν τη σύγκριση των διαφόρων μετρήσεων από διαφορετικούς μετρητές. Μέχρι σήμερα, η έρευνα έχει παράσχει εξισώσεις μετατροπής μεταξύ του μετρητή SPAD-502 και του μετρητή MC-100 και μεταξύ του μετρητή SPAD502 και του αισθητήρα atLEAF+, αλλά οι εξισώσεις μετατροπής μεταξύ του μετρητή MC-100 και του αισθητήρα atLEAF+ και μεταξύ του αισθητήρα Multiplex και του μετρητή SPAD-502, του μετρητή MC-100 και του αισθητήρα atLEAF+, δεν έχουν δημοσιευτεί. Αποτελέσματα αρκετών μελετών αναφέρουν την ισχυρή σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης της εκχυλίσιμης χλωροφύλλης και των μετρήσεων του μετρητή χλωροφύλλης με μορφή συναρτήσεων με καμπυλόγραμμη γραφική παράσταση λόγω κορεσμού του ανιχνευτή σε υψηλές περιεκτικότητες χλωροφύλλης. Επίσης έχουν αναφερθεί τυπικές σχέσεις περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη έναντι μετρητών χλωροφύλλης για πολλά διαφορετικά είδη, ωστόσο, έχουν επίσης προταθεί διαφορετικές σχέσεις για διαφορετικά είδη και για διαφορετικές ποικιλίες εντός του ίδιου είδους [33].

Η χρήση των μετρητών χλωροφύλλης για την αξιολόγηση της κατάστασης αζώτου N της καλλιέργειας ήταν θέμα πολλών ερευνητικών εργασιών στην δεκαετία του 1980. Οι περισσότερες έρευνες με μετρητές χλωροφύλλης έχουν διεξαχθεί με μετρητές χλωροφύλλης που βασίζονται στη διαπερατότητα, αλλά πρόσφατα, έχει αυξηθεί η ερευνητική δραστηριότητα με μετρητές χλωροφύλλης που βασίζονται σε φθορισμό. Τα αποτελέσματα σύγκρισης της απόδοσης των μετρητών που βασίζονται στη μετάδοση και σε εκείνους που βασίζονται σε φθορισμό είναι άγνωστα [33].

Ορισμένες μελέτες έχουν αναφέρει μια απόκριση κορεσμού των μετρήσεων SPAD-502 σε υψηλότερες τιμές περιεκτικότητας φύλλου σε χλωροφύλλη, με μια σχεδόν γραμμική σχέση σε χαμηλότερες τιμές περιεκτικότητας φύλλου σε χλωροφύλλη [52-53-60]. Για τον μετρητή atLEAF+, οι Novichonok et al. (2016) ανέφεραν υπολογίσιμο κορεσμό σε υψηλότερες τιμές περιεκτικότητας σε chl. Επίσης μελέτες με τον μετρητή Multiplex ανέφεραν γραμμικές σχέσεις μεταξύ των δεικτών χλωροφύλλης και της περιεκτικότητας των φύλλων σε chl, χωρίς ωστόσο ένδειξη κορεσμού των δεικτών χλωροφύλλης (Remorini et al., 2011; Tremblay et al., 2012; Li et al., 2013). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος των τιμών της περιεκτικότητας σε chl των φύλλων που εξετάστηκε από ορισμένες από τις προηγούμενες μελέτες μπορεί να θεωρηθεί ως περιορισμένο. Για παράδειγμα, οι Tremblay et al. (2012) εξέτασαν την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη των φύλλων με υπερβολική λίπανση σε N σε ένα εύρος 10-40 μg/cm⁻², ενώ η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη των φύλλων με υπερβολική παροχή N μπορεί να φτάσει τα 80 μg/cm⁻² [52-56]). Λίγα είναι γνωστά σχετικά με την απόδοση των διαφόρων μετρητών χλωροφύλλης σε συνθήκες υπερβολικής λίπανσης N καθώς αποτελεί μια συνήθης πρακτική στην εντατική παραγωγή λαχανικών [34].

Συνολικά, οι μετρήσεις των μετρητών χλωροφύλλης έχουν αποδειχθεί ότι σχετίζονται στενά με την περιεκτικότητα του αζώτου N στα φύλλα των φυτών σε ένα ευρύ φάσμα καλλιεργειών, όπως τα δημητριακά, οι κόνδυλοι, λαχανικά και καλλωπιστικά φυτά [30-35].

Οι Flexas et al. (2002) και Zarco-Tejada et al. (2013) ανέφεραν ότι ο φθορισμός της

χλωροφύλλης ήταν ένας καλός δείκτης του ελλείμματος νερού σε αμπελώνες. Επιπροσθέτως, οι Schächtl et al. (2005) έδειξαν ότι ο φθορισμός της χλωροφύλλης ήταν ένας καλός δείκτης της κατάστασης αζώτου στα φυτά καλαμποκιού και σιταριού, αντίστοιχα. Αυτά τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τεχνικές μέτρησης: ενεργές τεχνικές για κλίμακα φύλλου και παθητικές τεχνικές για μετρήσεις σε κλίμακα θόλου.

Ενεργές τεχνικές, βασισμένες στη διαμόρφωση πλάτους παλμού ή η μεταβατική μέθοδος φθορισμού που προκαλείται από λέιζερ επιτρέπουν την εκτίμηση της σχετικής διακύμανση του φθορισμού χλωροφύλλης σταθερής κατάστασης (F) σε προσαρμοσμένα στο φως φυτά, η οποία σχετίζεται με την πραγματική απόδοση της φωτοσύνθεσης των φυτών. Επιπλέον, τα όργανα με ενεργή βάση επιτρέπουν επίσης τον υπολογισμό άλλων παραμέτρων ChlF, όπως ο ελάχιστος φθορισμός (Fo-εκπέμπεται απουσία φωτοσυνθετικού φωτός) και ο μέγιστος φθορισμός (Fm-εκπέμπεται μετά την εφαρμογή ενός σύντομου παλμού φωτισμού κορεσμού). Η γνώση αυτών των παραμέτρων μαζί με την απορροφημένη φωτοσυνθετική ενεργή ακτινοβολία (aPAR) είναι σημαντική για τον υπολογισμό της μεταφοράς ηλεκτρονίων για τη φωτοσύνθεση. Αφενός, επειδή οι ενεργές τεχνικές χρησιμοποιούν τεχνητό φως για να διεγείρουν το φύλλο, περιορίζονται στην εφαρμογή σε χωρικές κλίμακες που κυμαίνονται από αρκετά εκατοστά έως μερικά μέτρα [36-38].

3.2 Οπτικοί Μετρητές χλωροφύλλης

Χρησιμοποιούνται ευρέως 3 μετρητές που διατίθενται στο εμπόριο, ο Minolta, μοντέλο SPAD-502 (Spectrum Technologies, Plainfield, Ill.), ο Opti-Sciences CCM-200 (Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH) και ο Apogee MC-100. Κανένας μετρητής δεν έχει γραμμική σχέση με τη συγκέντρωση χλωροφύλλης και η αναφερόμενη σχέση συγκέντρωσης οπτικής/απόλυτης χλωροφύλλης ποικίλει ευρέως, μερικές φορές ακόμη και στο ίδιο είδος.

Οι δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι μετρητές συγκέντρωσης χλωροφύλλης είναι ο Konica Minolta, μοντέλο SPAD-502 (Konica Minolta Sensing, Inc., Sakai, Osaka, Japan) και ο Opti-Sciences, μοντέλο CCM-200 (Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, ΗΠΑ).

Και οι δύο μετρητές μετρούν τη μετάδοση δύο μηκών κύματος ακτινοβολίας μέσω των φύλλων των φυτών: κόκκινο στα 650nm περίπου και κοντά στο υπέρυθρο (NIR) στα 900 nm περίπου. Η αυξημένη συγκέντρωση χλωροφύλλης αυξάνει την απορρόφηση της κόκκινης ακτινοβολίας. Όλα τα φυτά εκπέμπουν υψηλό κλάσμα ακτινοβολίας NIR καθώς αυτά τα μήκη κύματος δεν απορροφώνται από φωτοϋποδοχείς και αυτή η μετάδοση χρησιμοποιείται ως μήκος κύματος αναφοράς.

Ένας άλλος φορητός, οπτικός μετρητής χλωροφύλλης παρουσιάστηκε πρόσφατα, ο Dualox 4 Scientific (Dx; FORCE-A, Orsay, Γαλλία). Αυτός ο μετρητής μετρά τη μετάδοση της ακτινοβολίας στα 710 και 850nm και μετατρέπει τη μέτρηση σε τιμή χλωροφύλλης σε μgcm^{-2} .

Η περιοχή δειγματοληψίας διαφέρει ως προς το εμβαδόν μέτρησης του φύλλου. Οι επιφάνειες μέτρησης των φύλλων που μετρούνται με τον CCM-200 είναι $0,71 \text{ cm}^2$, με τον SPAD-502 είναι $0,06 \text{ cm}^2$ και με τον Dx4 είναι 20 mm^2 . Οι μεγαλύτερες επιφάνειες μέτρησης παρέχουν μεγαλύτερο χωρικό μέσο όρο, αλλά οι μικρότερες μπορούν να μετρήσουν στενότερα φύλλα [39].

3.2.1 Περιγραφή των οπτικών διαφορών μεταξύ μετρητών

Τέσσερις μελέτες έχουν αναφέρει εμπειρικές σχέσεις που συσχετίζουν τις οπτικές μετρήσεις με την απόλυτη συγκέντρωση χλωροφύλλης για έναν μετρητή (μοντέλο SPAD-501) που ήταν προκάτοχος του SPAD-502. Το SPAD-501 χρησιμοποιούσε ελαφρώς διαφορετικά μήκη κύματος και επομένως δεν είναι άμεσα συγκρίσιμο με το SPAD-502 [40-43].

Οι Monje & Bugbee (1992) φαίνεται ότι ήταν οι πρώτοι που ανέπτυξαν μια εξίσωση που συσχετίζει την παραγωγή από το SPAD-502 με την απόλυτη συγκέντρωση χλωροφύλλης σε mg m^{-2} . Από τότε, έχουν προταθεί πολυάριθμες άλλες σχέσεις για μια σειρά ειδών [44].

Οι Cerovic et al. (2012). Το ακρωνύμιο «SPAD» αναφέρεται στο τμήμα της Minolta που ανέπτυξε το τμήμα ανάλυσης μετρητών, ειδικών προϊόντων. Όπως υποδηλώνει το ακρωνύμιο, το SPAD δεν έχει άμεση σχέση με τη συγκέντρωση χλωροφύλλης.

Όπως το SPAD, οι τιμές CCI που επιστρέφονται από το CCM-200 είναι μόνο σχετικοί δείκτες της συγκέντρωσης χλωροφύλλης, καθώς το CCI δεν έχει άμεση σχέση με τη συγκέντρωση χλωροφύλλης.

Πολλές μελέτες έχουν επίσης αναπτύξει εξισώσεις πρόβλεψης χλωροφύλλης χρησιμοποιώντας μετρήσεις CCI από το CCM-200 μετρητής [45-46].

Η έξοδος του CCM-200 είναι ο λόγος μετάδοσης ακτινοβολίας από μια δίοδο εκπομπής φωτός (LED) με κέντρο στα 931 nm προς τη μετάδοση ακτινοβολίας από ένα LED στα 653 nm (εγχειρίδιο χρήστη CCM-200). Αυτή η αναλογία ορίζεται ως ο δείκτης περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη (CCI).

$$CCI = \frac{\%transmission\ 931\ nm}{\%transmission\ 653\ nm}$$

Το SPAD-502 μετρά την ακτινοβολία με κέντρο στα 940 και 650 nm (Εγχειρίδιο Minolta), αλλά η εξίσωση για τη μετατροπή αυτών των μετρήσεων σε τιμή «SPAD» έχει αναφερθεί διαφορετικά σε τέσσερις δημοσιεύσεις. Η πληρέστερη εξίσωση δίνεται από τους Naus et al. (2010):

$$SPAD = k \times \log \left(\frac{\%transmission\ 940\ nm}{\%transmission\ 650\ nm} \right) + C$$

όπου k είναι ένας παντεταρισμένος συντελεστής κλίσης και C είναι μια παντεταρισμένη τιμή μετατόπισης. Τρεις άλλες δημοσιεύσεις έχουν αναφέρει λιγότερο πλήρεις εξισώσεις για τον υπολογισμό της τιμής SPAD.

Οι Uddling et al. (2007) ανέφεραν αυτήν την εξίσωση, αλλά χωρίς τη μετατόπιση C . Οι Cerovic et al. (2012) ανέφερε την εξίσωση χωρίς k ή C . Καθώς οι τιμές κλίσης και μετατόπισης είναι εμπιστευτικές, δεν είναι δυνατό να εξαχθούν τιμές SPAD από μετρήσεις μετάδοσης και δεν είναι δυνατό να εξαχθούν μαθηματικά μια εξίσωση μετατροπής μεταξύ μετρητών. Ωστόσο, καθώς τόσο οι τιμές SPAD όσο και το CCI βασίζονται σε μια αναλογία μετάδοσης σε δύο στενά συνδεδεμένα μήκη κύματος:

$$SPAD \approx k \times \log(CCI) + C$$

3.2.2 Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Minolta SPAD-502

Ο μετρητής χλωροφύλλης Konica Minolta SPAD 502 που υπάρχει στην αγορά, είναι ένας φορητός, αδιάβροχος και ελαφρύς, μετρητής κατάλληλος για την μέτρηση της περιεχόμενης χλωροφύλλης ζωντανών φύλλων. Η διαδικασία της μέτρησης δεν επιφέρει καταστροφή του φύλλου ή οποιαδήποτε άλλη αλλοίωση. Οι διαστάσεις του οργάνου είναι μικρές ώστε να μπορεί να μεταφέρεται σε μια τσέπη με βάρος τα 224 g και διαθέτει ψηφιακή οθόνη υγρών κρυστάλλων στην οποία εμφανίζονται οι μετρήσεις καθώς και διάφορα μηνύματα λειτουργίας.

Η μέτρηση γίνεται με την εισαγωγή του φύλλου στη κεφαλή μέτρησης που διαθέτει μηχανισμό κλιπ και η οποία επιτρέπει να γίνεται η μέτρηση σε χώρο αδιαπέραστο από το διάχυτο φως του περιβάλλοντος και μέτρηση αφορά μόνο δεδομένα από το συγκεκριμένο εμβαδόν διαστάσεων της κεφαλής μέτρησης.

Η απαιτούμενη επιφάνεια μέτρησης του φύλλου είναι τουλάχιστον 2x3 χιλιοστά με ικανότητα μέτρησης σχεδόν οποιοδήποτε είδους φύλλο (εκτός των βελονοειδών φύλλων των οποίων η επιφάνεια είναι πολύ μικρή).

Ο μετρητής στην πράξη μετράει την σχετική ποσότητα χλωροφύλλης του φύλλου, μέσω της διαπερατότητας του φύλλου σε δύο περιοχές μήκους κύματος φωτός, από δύο διόδους εκπομπής φωτός σε καθορισμένα μήκη κύματος (650nm και 940nm) και έναν ανιχνευτή φωτοδιόδων για τη διαδοχική μέτρηση της μετάδοσης μέσω φύλλων του κόκκινου και έγγυς στο υπέρυθρο φως. Ο μετρητής είναι ρυθμισμένος μόνο για τη μέτρηση των τιμών Chl των φύλλων οπότε τα μήκη κύματος δεν μπορούν να αλλάξουν. Ο μετρητής εκμεταλλεύομενος αυτήν την ιδιότητα της χλωροφύλλης μετράει με ακρίβεια την διαπερατότητα του φύλλου στην περιοχή του ερυθρού και του εγγύς στο υπέρυθρο. Ο μετρητής μετρά διαδοχικά τη διαπερατότητα του κόκκινου και του εγγύς στο υπέρυθρο φωτός και εμφανίζει μια επεξεργασμένη τιμή με βάση την αναλογία της μετρούμενης τάσης που παράγεται από κάθε μήκος κύματος σε σχέση με τις τιμές που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη.

Με βάση των μετρήσεων των δύο διαπερατοτήτων το όργανο του μετρητή υπολογίζει το ποσοστό της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης.

Η έξοδος αποθηκεύεται στη μνήμη του οργάνου και έως 30 μπορούν να ανακληθούν αργότερα. Το όργανο είναι επίσης σε θέση να υπολογίσει τον μέσο όρο των δεδομένων που είναι αποθηκευμένα στη μνήμη. Λόγω της απλότητας της μέτρησης, είναι εύκολο να γίνει μια νέα μέτρηση κάθε λίγα δευτερόλεπτα. Το όργανο συνοδεύεται από ειδικό φίλτρο-κρύσταλλο έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να ελέγξει ανά πάσα στιγμή εάν το όργανο λειτουργεί σωστά.

Τα ο SPAD 502 Plus ποσοτικοποιεί τις λεπτές αλλαγές ή τάσεις στην υγεία των φυτών πολύ πριν αυτές είναι ορατές στο ανθρώπινο μάτι. Πιο συγκεκριμένα:

- ✓ Μετρά άμεσα το περιεχόμενο χλωροφύλλης των φύλλων σε κλίμακα από -9,9 έως 199,9
- ✓ Θερμοκρασία λειτουργίας: 0 έως 50 0 C
- ✓ Το γράφημα τάσεων αποθηκεύει και εμφανίζει έως και 30 μετρήσεις
- ✓ Συγκρίνει τις ενδιάμεσες αναγνώσεις SPAD
- ✓ Διατίθεται με ή χωρίς ενσωματωμένο καταγραφικό δεδομένων
- ✓ Συνδέεται με οποιονδήποτε δέκτη GPS που διαθέτει επιλογή σειριακής εξόδου.
- ✓ Είναι εξοπλισμένο με εσωτερικό καταγραφικό δεδομένων και θύρα RS-232

- ✓ Καταγράφει 4.096 μετρήσεις (1.488 με πρόσθετη επιλογή GPS/DGPS)
- ✓ Προσφέρει διαμόρφωση και λήψη μετρητή με λογισμικό FieldScout® και προσαρμογέα USB-to-3.5mm-Stereo-Plug.
- ✓ Έχει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση. Με δύο κοινές αλκαλικές μπαταρίες μπορεί να εκτελέσει με επιτυχία 20.000 μετρήσεις.
- ✓ Έχει εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων (+/- 1.0 SPAD).
- ✓ Ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος μεταξύ λήψης δύο διαδοχικών μετρήσεων 2sec.
- ✓ Επαναληψιμότητα μετρήσεων +/-0.3 SPAD
- ✓ Τιμή: 3482,66 € [49]



Σχήμα 3.2: Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Minolta SPAD-502[49]

Ενώ ο μετρητής SPAD-502 έχει υιοθετηθεί ευρέως μεταξύ των ερευνητών, είναι πολύ δαπανηρός για τους περισσότερους αγρότες να το χρησιμοποιήσουν στην πράξη. Επιπλέον, ο μετρητής SPAD-502 δεν διαθέτει λειτουργία χαρτογράφησης. Δεδομένων αυτών των δύο περιορισμών, μια συσκευή χαμηλότερου κόστους που προσφέρει χαρτογράφηση θα ήταν μια χρήσιμη εξέλιξη [50].

3.2.3 Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Opti-Sciences CCM-200plus

Ο μετρητής Opti-Sciences CCM-200 Chlorophyll είναι ένας φορητός, ελαφρύς μετρητής περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλης φύλλων με αναφορές σε πάνω από 400 δημοσιευμένες επιστημονικές εργασίες και με βελτιστοποιημένο σχεδιασμό για εργασίες πεδίου. Η διαδικασία της μέτρησης είναι γρήγορη, αξιόπιστη και μη καταστρεπτική. Ο μετρητής χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε προγράμματα για την βελτίωση της διαχείρισης λιπασμάτων σε διάφορα άλλα είδη καλλιεργειών. Η επιφάνεια μέτρησης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη με σκοπό την βελτίωση του μέσου όρου του σήματος που λαμβάνεται σε αυτήν την επιφάνεια μέτρησης του δείγματος. Αυτό έχει το πλεονέκτημα σε σύγκριση με τη δειγματοληψία μικρότερης επιφάνειας, να λαμβάνονται υπόψη οι μικρές δομικές παραλλαγές στα φύλλα, που μπορούν να επηρεάσουν την επαναληψιμότητα και την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Η αξιοπιστία των μετρήσεων έχει επαληθευτεί με μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών. έχει προσδιοριστεί με συσχέτισμό με χημικές δοκιμές. Περισσότερες από 900 δημοσιευμένες

αναφορές, σε μια μεγάλη ποικιλία διαφορετικών δειγμάτων φυτών, καθορίζουν τα διαπιστευτήρια των μετρητών της σειράς CCM-200.

Ο μετρητής CCM-200plus διαθέτει τη μεγαλύτερη ενσωματωμένη μνήμη από οποιονδήποτε μετρητή χλωροφύλλης διαπερατότητας, με δυνατότητα αποθήκευσης περισσότερων από 100.000 μετρήσεων. Οι ερευνητές μπορούν να καταγράφουν μήνες μετρήσεων χωρίς να χρειάζεται να επιστρέψουν στο εργαστήριο για να κατεβάσουν δεδομένα ή να ανησυχίσουν για περιορισμένη μνήμη.

Περιλαμβάνει μια μη πτητική μνήμη flash που μπορεί να αποθηκεύσει μεταξύ 94.000 και 160.000 μετρήσεων. Η μεταφορά δεδομένων πραγματοποιείται μέσω θύρας USB στο Excel ή σε άλλα λογιστικά φύλλα. Πιο συγκεκριμένα:

Οι τεχνικές προδιαγραφές του CCM-200 είναι οι εξής:

- Παράμετροι μέτρησης: Οπτική απορρόφηση σε δύο διαφορετικές ζώνες κύματος: 653 nm (χλωροφύλλη) και 931nm (Near Infra-Red).
- Περιοχή μέτρησης: Κύκλος διαμέτρου 9,52mm (3/8 ") (71 mm²)
- Ανάλυση: .1 μονάδα CCI
- Επαναληψιμότητα: +/- 1%
- Πηγή: Προσαρμοσμένη μονάδα LED μήκους κύματος 2.
- Ανιχνευτής:
- Φωτοδίοδος πυριτίου με ενσωματωμένο ενισχυτή για μέτρηση απορρόφησης, παρακολούθηση ισχύος και αντιστάθμιση θερμοκρασίας.
- Χωρητικότητα αποθήκευσης:
- 8 Mbyte μνήμης για έως και 160.000 μετρήσεις δεδομένων ή 94.000 με πρόσθετες καταχωρήσεις δεδομένων GPS.
- Λειτουργίες δεδομένων: Μεμονωμένο σημείο, με δυνατότητα επιλογής από το μέσο όρο 1-30 πόντων και στατιστικό πρωτόκολλο 10-30 σημείων που ζητά να αντικατασταθούν τα σημεία δεδομένων πέρα από την τυπική απόκλιση των 2 σίγμα.
- Διεπαφή χρήστη: Γραφική οθόνη 128 x 32 pixel, κλειδιά για: ρύθμιση, πρωτόκολλα μέτρησης, διαγνωστικά, έλεγχο δεδομένων και εισαγωγή χρηστών από αλφαριθμητικές γραμμές σχολίων.
- Εύρος θερμοκρασίας: 0-50°C.
- Μετατόπιση θερμοκρασίας: Κυκλώματα πηγής και ανιχνευτή με αντιστάθμιση θερμοκρασίας για ελάχιστη μετατόπιση σε όλο το εύρος.
- Πηγή ενέργειας:
- 9V αλκαλική μπαταρία.
- Διάστημα αυτόματης απενεργοποίησης: 4 λεπτά (χωρίς πάτημα πλήκτρου ή λήψη δεδομένων).
- Μέγεθος: 152 (L) x 82 (W) x 25 (D) mm
- Βάρος με μπαταρία: 162gUSBδιεπαφή [51].



Σχήμα 3.3: Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Opti-Sciences CCM-200plus[51]

3.2.4 Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Apogee MC-100

Ο μετρητής συγκέντρωσης χλωροφύλλης Apogee είναι φορητός με διαδικασία μέτρησης μη καταστροφική. Η βαθμονόμηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης στα φύλλα είναι σε μονάδες μmol χλωροφύλλης ανά m^2 . Αυτό εξαλείφει τα προβλήματα με τους σχετικούς δείκτες συγκέντρωσης χλωροφύλλης. Για σκοπούς αναφοράς και σύγκρισης, ο μετρητής Apogee εξαγει επίσης σχετικές μονάδες [CCI ή SPAD] εάν είναι επιθυμητό. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν προσδιορισμό της συγκέντρωσης χλωροφύλλης στα φύλλα των φυτών για εκτίμηση της θρεπτικής κατάστασης, τις απαιτήσεις σε λιπάσματα, αξιολόγηση της καταπόνησης και βελτιστοποίηση της συγκομιδής.

Ο μετρητής μετρά την αναλογία μετάδοσης ακτινοβολίας από δύο μήκη κύματος (κόκκινο, απορροφάται έντονα από τη χλωροφύλλη και εγγύς υπέρυθρο, δεν απορροφάται από χλωροφύλλη), καθιστώντας τις μετρήσεις σχεδόν στιγμιαίες (ο χρόνος μέτρησης είναι μικρότερος από 3 δευτερόλεπτα). Αυτό διευκολύνει την ταχεία μέτρηση πολλαπλών φύλλων και την παρακολούθηση των ίδιων φύλλων με την πάροδο του χρόνου.

Η μνήμη που διατίθεται για αποθήκευση δεδομένων επιτρέπει 160.000 καταγεγραμμένες μετρήσεις. Μια θύρα μίνι USB επιτρέπει την άμεση σύνδεση με έναν υπολογιστή για λήψη δεδομένων. Ο μετρητής χλωροφύλλης έρχεται με ένα τυπικό καλώδιο mini USB σε USB για λήψη δεδομένων. Το νέο εσωτερικό GPS επιτρέπει τη γεωγραφική αναφορά δεδομένων πεδίου. Η χωρητικότητα αποθήκευσης των γεωγραφικών δεδομένων είναι 94.000 μετρήσεις.

Συγκεκριμένες ρυθμίσεις ειδών καλλιεργειών στον μετρητή περιλαμβάνουν ρύζι, σιτάρι, σόγια, κριθάρι, πιπέρι, ντομάτα, μπιζέλι, kohlrabi, πράσινο μαρούλι του Walderman, μαρούλι buttercrunch, καλαμπόκι, σόργο, ευρωπαϊκή σημίδα, σημίδα από χαρτί, βυσσινί σφενδάμι, σφενδάμι της Νορβηγίας, Γιαπωνέζικο σφενδάμι, μπόξελ, καβουρόμηλο, πασχαλιά, αμπέλι, κάνναβη, καφέ, σπανάκι, φράουλα, κεράσι, λυκίσκο, βατόμουρο και μια γενική ρύθμιση που χρησιμοποιείται για όλα τα άλλα είδη.

Ο μετρητής μετρά τη σχετική συγκέντρωση χλωροφύλλης σε μια περιοχή περίπου 64

mm² (κύκλος με διάμετρο 9mm). Περιλαμβάνεται μειωτής οπτικού πεδίου για τη μείωση της περιοχής δειγματοληψίας περίπου 20 mm² (κύκλος με διάμετρο 5mm) για φύλλα στενότερα από 9mm.

Πιο συγκεκριμένα, οι προδιαγραφές του Apogee MC-100 είναι οι εξής:

- Εμφάνιση μονάδας εξόδου μmol χλωροφύλλης ανά m² επιφάνειας φύλλου
- Περιοχή μέτρησης 63,6 mm² (τυπική διάμετρος 9mm), 19,6mm² (διάμετρος 5mm με μειωτήρα)
- Συγκέντρωση 10μmol ανά m²:συγκέντρωση χλωροφύλλης χρησιμοποιώντας τη γενική εξίσωση (λιγότερο για συγκεκριμένα είδη)
- Γραμμικότητα ± 1 %
- Επαναληψιμότητα ± 1 %
- Χρόνος απόκτησης δείγματος Λιγότερο από 3 δευτερόλεπτα
- Χωρητικότητα αποθήκευσης 8 MB για έως και 160.000 μετρήσεις δεδομένων. 94.000 μετρήσεις δεδομένων με καταχωρήσεις δεδομένων GPS
- Εσωτερική αποθήκευση GPS 8 MB για έως και 94.000 μετρήσεις δεδομένων
- Διεπαφή χρήστη: Γραφική οθόνη 50mm επί 15mm, 8 κουμπιά για έλεγχο και χειρισμό δεδομένων
- Θύρα εξόδου δεδομένων Mini-B USB που παρέχεται για κύρια μεταφορά δεδομένων, η θύρα RS-232 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με GPS για ολοκληρωμένη μέτρηση
- Μετρημένες μεταβλητές Αναλογία οπτικής μετάδοσης στα 931nm έως οπτική μετάδοση 653nm
- Εξωτερική θερμοκρασία λειτουργίας 0 έως 50 C
- Κυκλώματα πηγής και ανιχνευτή αντιστάθμισης θερμοκρασίας σε όλο το εύρος
- Διαστήματα αυτόματης απενεργοποίησης 4 λεπτά (χωρίς πάτημα ή λήψη πλήκτρου)
Απαιτήσεις ισχύος Τυπική αλκαλική μπαταρία 9 V DC
- Διαστάσεις 152mm μήκος, 82mm πλάτος, 25mm ύψος
- Μάζα 210 γρ [52].



Σχήμα 3.4:Μετρητής χλωροφύλλης φύλλων Apogee MC-100 [52]

3.3 Σχετικές έρευνες

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για το σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός μετρητή χλωροφύλλης χαμηλού κόστους. Ο φορητός μη καταστροφικός εξοπλισμός έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε ορισμένα είδη φυτών για την ταχεία εκτίμηση των συγκεντρώσεων Chl ή N στα φύλλα επί τόπου και επιτρέπουν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις από το ίδιο φύλλο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής [53-56].

Εφαρμόζοντας αυτή τη γνώση, έχουν διεξαχθεί ορισμένες μελέτες για την ανάπτυξη αλγορίθμων και τεχνικών οργάνων για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη ή του αζώτου (N) από το χρώμα των φύλλων σε διαφορετικές καλλιέργειες, π.χ. σιτάρι και σίκαλη, κριθάρι και ρύζι [57-58].

Οι Takeuchi et al.(2009) παρουσιάζουν την ανάπτυξη ενός απλού φθορομέτρου χλωροφύλλης PAM (pulse amplification modulation) για την παρακολούθηση των συνθηκών βλάστησης χρησιμοποιώντας έναν προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC) και έναν υπολογιστή.

Οι Maleki et al.(2012)παρουσιάζουν την ανάπτυξη μιας συσκευής για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε άζωτο σε φυτά μαρουλιού χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα TCS230 σε συνδυασμό με ένα μικροελεκτή.

Οι Lamb et al.(2011) ανέφεραν την ανάπτυξη ενός φθορομέτρου βασισμένου σε LED για ποσοτικοποίηση της χλωροφύλλης στο πεδίο και στο εργαστήριο.

Οι Sookchalearn και Abdullakasm(2017) ανέφεραν την ανάπτυξη ενός εργαλείου για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη των φυτών μανιόκα χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα TCS230 και πρόσθεσαν μια μονάδα Global Position System (GPS) για να λάβουν μια θέση κατά τη μέτρηση της να καταγράφει θέσεις περιεκτικότητας σε φύλλα φυτών σε χλωροφύλλη στο χωράφι. Αυτό θα επέτρεπε στους αγρότες να παρακολουθούν την ανάπτυξη των καλλιεργειών και να διαχειρίζονται τις καλλιέργειες με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι Kawashimakai Nakatani (1998) παρουσιάζουν μια φορητή έγχρωμη βιντεοκάμερα με έναν υπολογιστή για την εκτίμηση της περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη.

Οι Caliskan et al. (2012) χρησιμοποιούν ένα μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη συγκέντρωσης χλωροφύλλης στα φύλλα ζαχαρότευτλου με τη βοήθεια τεχνικών επεξεργασίας εικόνας.

Ειδικότερα για τους δύο πιο εμπορικά διαθέσιμους μετρητές που είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι οι Minolta, μοντέλο SPAD-502 (Spectrum Technologies, Plainfield, Ill.) και το μοντέλο CCM-200 (Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH) τα αποτελέσματα των μελετών για αυτούς τους μετρητές έχουν αναφερθεί σε περισσότερες από 30 μελέτες όπως αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα. (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Περίληψη των δημοσιεύσεων σχετικά με τη σχέση της οπτική/απόλυτη συγκέντρωσης χλωροφύλλης [61]

Meter type/Author (year)	Species
SPAD-501	
Yadava (1986)	Twenty-two unrelated species
Marquard & Tipton (1987)	Twelve unrelated species
Schaper & Chacko (1991)	Eight tropical and subtropical fruit-tree species
Dwyer <i>et al.</i> (1991)	Maize
Fanizza <i>et al.</i> (1991)	Twelve wine-grape cultivars
SPAD-502	
Gratani (1992)	Six Sclerophyllous species
Monje & Bugbee (1992)	Rice, soybean, wheat
Markwell <i>et al.</i> (1995)	Soybean and maize
Xu <i>et al.</i> (2000)	Sorghum
Bindi <i>et al.</i> (2002)	Potato
Richardson <i>et al.</i> (2002)	Paper birch
Netto <i>et al.</i> (2002)	Papaya
Yamamoto <i>et al.</i> (2002)	Sorghum and pigeon pea
Esposti <i>et al.</i> (2003)	Four citrus species
Wang <i>et al.</i> (2004)	Peace lily
Netto <i>et al.</i> (2005)	Coffee
Jifon <i>et al.</i> (2005)	Six citrus species
Cartelat <i>et al.</i> (2005)	Wheat
Uddling <i>et al.</i> (2007)	Birch, wheat and potato
Marenco <i>et al.</i> (2009)	Six Amazonian tree species
Naus <i>et al.</i> (2010)	Tobacco
Imanishi <i>et al.</i> (2010)	Flowering cherry
Coste <i>et al.</i> (2010)	Thirteen tree species of tropical rainforest
Ling <i>et al.</i> (2011)	<i>Arabidopsis thaliana</i>
Cerovic <i>et al.</i> (2012)	Kiwi, grape, wheat, and maize
CCM-200	
Richardson <i>et al.</i> (2002)	Paper birch
van den Berg & Perkins (2004)	Sugar maple
Jifon <i>et al.</i> (2005)	Six citrus species
Goncalves <i>et al.</i> (2008)	Four tropical wood species
Cerovic <i>et al.</i> (2012)	Kiwi, grape, wheat and maize

Οι Mohana Geetha *et al.* (2020) στην εργασία τους αξιοποιούν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IOT) στον τομέα της κτηνοτροφία σχετικά με την καλλιέργεια εκτάσεων για την νομή των ζώων. Το ζήτημα της απόδοσης της καλλιέργειας μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας τον συγκεκριμένο μετρητή χλωροφύλλης, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με μια κάμερα, μέσω της οποίας οι κτηνοτρόφοι μπορούν να τραβήξουν φωτογραφίες της. Αυτές οι εικόνες που συλλαμβάνονται αποστέλλονται στο σύννεφο και με την επεξεργασία τους υπολογίζεται η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και άζωτο στα φύλλα. Ο κτηνοτρόφος έχει μια ευέλικτη εφαρμογή για να δει τις εικόνες που έχουν τραβηχτεί καθώς και την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, άζωτο στα φύλλα. Λαμβάνοντας υπόψη την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και άζωτο, προτείνεται στον κτηνοτρόφο να ληφθούν μέτρα για τη βελτίωση της κερδοφορίας.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές επεξεργασίας εικόνας για την μέτρηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης στα φύλλα των φυτών σχετικά με την παρακολούθηση της υγείας των, χρησιμοποιώντας τα χρώματα RGB (Κόκκινο Πράσινο Μπλε).

Στις μελέτες αυτές, χρησιμοποιήθηκαν κάμερες για τη λήψη εικόνων των φύλλων όπου στη συνέχεια αναλύθηκαν μέσω ψηφιακής επεξεργασίας για να εξεταστεί η σχέση μεταξύ των τιμών R, G και B με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη του φυλλώματος, όπου αυτό προσδιορίζει άμεσα την ποσότητα αζώτου που υπάρχει στα φυτά. Οι μέθοδοι έχουν ως μειονέκτημα ως προς την ένταση φωτός κατά τη λήψη φωτογραφιών με χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.

Οι Amar Kumar Dey et al. (2016) στην εργασία τους προτείνουν για τη μέτρηση της χλωροφύλλης μια νέα τεχνική που περιλαμβάνει επεξεργασία εικόνας. Αυτή η μέθοδος απαιτεί έναν σαρωτή για τη σάρωση του φύλλου για τη λήψη εικόνων και η επεξεργασία των εικόνων γίνεται σε έναν υπολογιστή με πρόγραμμα Matlab. Η προτεινόμενη μέθοδος επεξεργασίας εικόνας επεξεργάζεται τα χρώματα RGB. Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη υπολογίζεται με το ιστόγραμμα της εικόνας του φύλλου αφού λαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές των R, G και B και συγκρίνονται με τις τιμές με ενός μετρητή atLEAF. Για την αποφυγή του μειονεκτήματος της έντασης του φωτός, τα φύλλα του δείγματος σαρώθηκαν αντί να ληφθούν εικόνες όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι σχέσεις μεταξύ των R, G και B με τις τιμές atLEAF βρέθηκαν να είναι γραμμικές σε όλο το εύρος και οδήγησαν σε υψηλή ακρίβεια με ισχυρή συσχέτιση. Ως δείγματα επιλέχθηκαν τυχαία δεκαπέντε φύλλα αμπέλου Betel (*Piperbetle L.*) της ποικιλίας Bangla Desi. Μετρήθηκε η συγκέντρωσή της χλωροφύλλης των φύλλων χρησιμοποιώντας τον μετρητή χλωροφύλλης atLEAF+ και στη συνέχεια σαρώθηκαν τα ίδια φύλλα χρησιμοποιώντας τον σαρωτή Cano Scan LiDE 110, με ανάλυση 300 pixel ανά ίντσα (ppi) και βάθος χρώματος 24 bit. Όπου για την εκτίμηση της χλωροφύλλης χρησιμοποιήθηκε σχετικός αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας. 1 σαρωμένες εικόνες αποθηκεύτηκαν σε μορφή .jpg και ένας σταθερός αριθμός pixel (12×12) επιλέχθηκε από τη σαρωμένη εικόνα του φύλλου από όπου λήφθηκε το ιστόγραμμα της εικόνας του φύλλου χρησιμοποιώντας το MATLAB 2010a. Τα αποτελέσματα της μεθόδου συγκρίθηκαν με τις τιμές των μετρήσεων του μετρητή χλωροφύλλης atLEAF+. μέσω μιας ανάλυσης παλινδρόμησης. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης παλινδρόμησης απόδειξε την ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της προτεινόμενης τεχνικής επεξεργασίας εικόνας και των μετρήσεων του μετρητή χλωροφύλλης. Η χλωροφύλλη που μετρήθηκε με το μετρητή atLEAF + ήταν 97,7 και της μεθόδου ότι ήταν 97,9. Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού (r^2) ήταν 95,7) που είναι μια πολύ ικανοποιητική τιμή.

Στην μελέτη των Evan et al. (2016) συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα των δυο μηχανισμών της ανακλαστικότητας και της επεξεργασίας εικόνας, όπου αναπτύχθηκε μια μέθοδος για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε άζωτο χρησιμοποιώντας δισδιάστατα δεδομένα της έγχρωμης εικόνας από το φύλλο. Οι προηγούμενες μέθοδοι για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη στα φύλλα, με συσκευές προσδιορισμού χλωροφύλλης χαμηλού κόστους εφαρμόζουν μηχανισμούς ανάκλασης φωτός, επεξεργασία εικόνας, αναλυτή χρώματος φύλλου που αναβαθμίζεται τον πίνακα χρωματισμών των φύλλων (LCC), χρησιμοποιώντας επεξεργασία εικόνας για γρήγορο προσδιορισμό αζώτου φύλλου σόγιας. Οι προηγούμενοι τύποι έρευνας μπορούν να καταλήξουν σε δύο μηχανισμούς, τον μηχανισμό ανακλαστικότητας και τον μηχανισμό επεξεργασίας εικόνας στους οποίους δεν μπορεί να αμφισβητηθεί ότι ο μηχανισμός χλωροφύλλης έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα του μηχανισμού ανάκλασης είναι από την ακρίβεια μέτρησής του λόγω ενός θαλάμου ανακλαστικότητας στο μπροστινό μέρος ενός σαρωτή και κυρίως για τη μείωση των παρεμβολών

από το εξωτερικό σήμα του περιβάλλοντος στο σαρωτή. Σε σύγκριση με τον μηχανισμό ανακλαστικότητας, ο μηχανισμός επεξεργασίας εικόνας σχεδιάστηκε για να επεξεργάζεται την είσοδο εικόνας για να ξεπεράσει ένα πρόβλημα και βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε αλγόριθμους προγραμματισμού. Η επεξεργασία εικόνας χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της έντασης του χρώματος πρασίνου της επιφάνειας του φύλλου και αναπτύχθηκε με μορφή εφαρμογής Android. Αλλά, αυτή η προσέγγιση έχει και μειονεκτήματα, σε ένα τυχαίο περιβάλλον φωτισμού που η επιφάνεια των φύλλων θα μπορούσε να συμβάλει σε σφάλμα ανάγνωσης. Ως εκ τούτου, προτάθηκε μια ιδέα συνδυασμού και των δύο πλεονεκτημάτων των περισσότερων συσκευών μηχανισμού ανακλαστικότητας με μηχανισμό επεξεργασίας εικόνας.

Αυτή η τεχνική έχει εφαρμοστεί για την εκτίμηση των τιμών SPAD από εικόνες που έχουν δημιουργηθεί από μια εφαρμογή smartphone που ονομάζεται δείκτης χρώματος (DGCI) για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε άζωτο στην επιφάνεια του φύλλου το οποίο έχει δείχνει συσχέτιση με τη χλωροφύλλη. Εάν η περιεκτικότητα σε άζωτο είναι υψηλή, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη είναι επίσης υψηλή και αντίστροφα. Προκειμένου να υπολογισθεί ο δείκτης DGCI, το SmartSPAD χρησιμοποιεί μέθοδο απεικόνισης επαφών όπου λαμβάνεται εικόνα με τη σύνδεση της κάμερας στο φύλλο. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν χρειάζεται πλέον τεχνική τμηματοποίηση στον διαχωρισμό της αναφοράς φόντου στο αντικείμενο που αποκτάται. Αλλά έχει ορισμένα μειονεκτήματα όταν η εφαρμογή Android είναι εγκατεστημένη σε άλλο smartphone που διαφέρει στις προδιαγραφές της κάμερας. Ο περιορισμός κάθε προδιαγραφής κάμερας είναι διαφορετικός και δεν μπορεί να ανιχνεύσει διαφορά μεταξύ θολής απεικόνισης και απεικόνισης μετά από εστίαση ακριβείας που αυτό αποτελεί ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου [105].

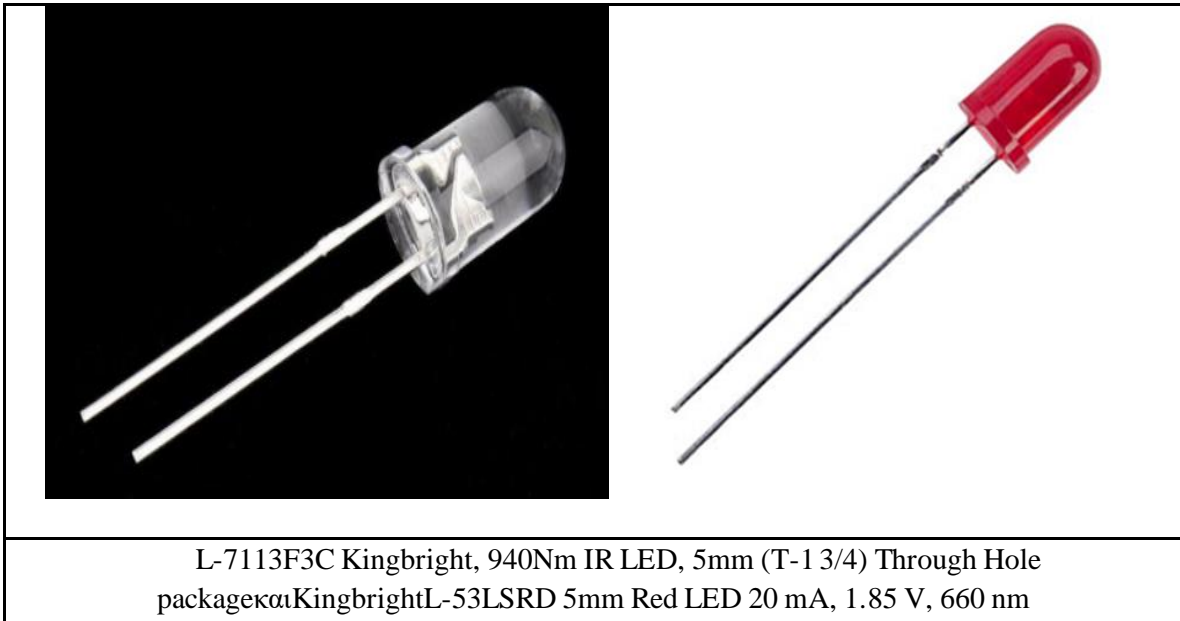
Οι Sookchalearn και Abdullakasim (2017) στην μελέτη τους ανέπτυξαν ενός αισθητήρα χαμηλού κόστους (LCS) προκειμένου να βοηθήσει τους καλλιεργητές μανιόκας να εκτιμήσουν και να χαρτογραφήσουν την περιεκτικότητα των φύλλων μανιόκας σε χλωροφύλλη. Η συσκευή αποτελείται από έναν έγχρωμο αισθητήρα που δίνει αποκρίσεις συχνότητας για το κόκκινο (R), πράσινο (G) και μπλε (B) βαθμονομημένες. Η αξιολόγηση της ακρίβειας των τριών χρωματικών τιμών των μετρήσεων συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες μετρήσεις που προέκυψαν από έναν εμπορικό αναλυτή χρώματος.

Ο αισθητήρας βαθμονομήθηκε περαιτέρω για μέτρηση συγκέντρωσης της χλωροφύλλης συσχετίζοντας τον δείκτη χρώματος των δειγμάτων φύλλων μανιόκας με τιμές που μετρήθηκαν από ένα τυπικό μετρητή χλωροφύλλης SPAD-502. Οι τιμές μέτρησης του αισθητήρα για το χρώμα των φύλλων συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις του SPAD-502 χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό σύνολο δειγμάτων φύλλων. Επίσης στη συσκευή προστέθηκε ένας δέκτης GPS για ταυτόχρονη καταγραφή της θέσης πεδίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αισθητήρας μέτρησε με ακρίβεια τα πραγματικά R, G και B και η αξιολόγηση του χρώματος των φύλλων με τον μετρητή SPAD-502 έδωσε ένα ριζικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) 0,9688 και ένα R^2 0,97, υποδηλώνοντας ικανοποιητική ακρίβεια. Ο ανεπτυγμένος αισθητήρας χαμηλού κόστους έδειξε αποτελεσματικά τη χωρική διακύμανση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη στα φυτά μανιόκας σε μια περιοχή φύτευσης [60].

4.1.1 Περιγραφή των υλικών (Hardware)

Leds

Οι εντάσεις φωτός πρέπει να είναι επαρκείς για να κορεστεί η φωτοχημεία, γιατί η επιλογή της πηγής φωτός είναι κρίσιμος παράγοντας. Ως πηγές φωτός χρησιμοποιήθηκαν δύο δίοδοι εκπομπής της εταιρείας Kingbright με μήκη κύματος εκπομπής ακτινοβολίας στο κόκκινο μήκος κύματος (L-53LSRD 5mm Red LED 20mA, 1.85V, 660nm), και στο εγγύς υπέρυθρο (near infrared) LED (L-7113F3CKingbright, 940nmIRLED, 5mm (T-1 3/4) Through Hole package).

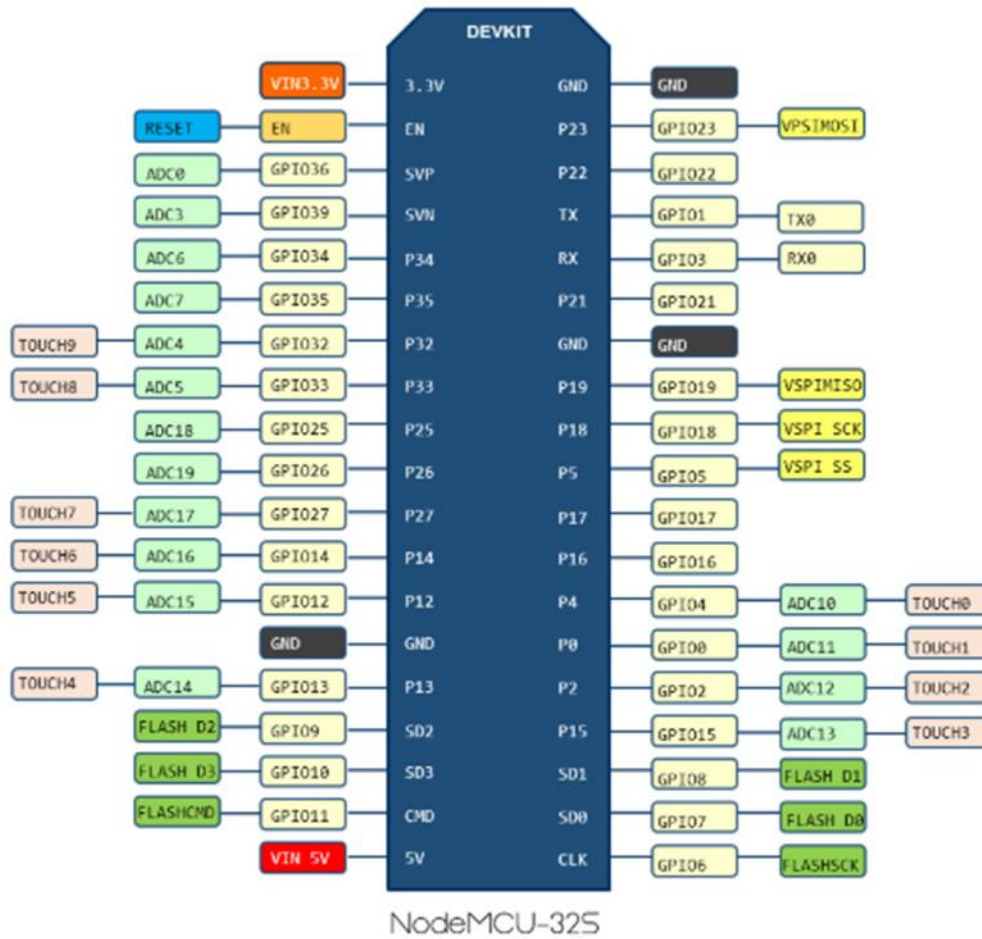


Σχήμα 4.2: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διόδων εκπομπής αναφέρονται στο παράρτημα.

Μικροελεγκτής ESP32

Για την υλοποίηση μετρητή χλωροφύλλης ως μικροελεγκτής επιλέχθηκε ο ESP32 Development Board - NodeMCU-32S της κινέζικης εταιρείας Espressif Systems, ο οποίος έχει ενσωματωμένη δυνατότητα ασύρματης δικτύωσης (Wi-Fi) και dual-mode Bluetooth. Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή έγινε λόγω του χαμηλού κόστους του, τις πολύ χαμηλές απαιτήσεις ισχύος και την δυνατότητα προγραμματισμού και εκτέλεσης κώδικα που τον καθιστά μια εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές IoT.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ESP32 φαίνονται στον παρακάτω Σχήμα 4.3 και τον Πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ESP32.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του ESP32

Κατασκευαστής	Espressif Systems
Επεξεργαστής	CPU: ESP32-D0WDQ6
Built-inFlash	32Mbit
Ασύρματες διεπαφές	WiFi mode: Station / SoftAP / SoftAP+Station WiFi protocol: IEEE802.11 b/g/n Bluetooth: Bluetooth: 4.2
Περιφερειακά	UART/GPIO/ADC/DAC/SDIO/PWM/I2C/I2S
Τάση λειτουργίας	5V
Logic level	3.3V
Εύρος συχνότητας	2.4G ~ 2.5G (2400M ~ 2483.5M)

Αισθητήρας φωτός TSL2591

Ο αισθητήρας φωτός TSL2591 είναι ένας προηγμένος ψηφιακός αισθητήρας φωτός, κατάλληλος για χρήση σε διάφορες συνθήκες φωτισμού. Σε σύγκριση με τα χαμηλού κόστους κύτταρα σουλφιδίου καδμίου, αυτός ο αισθητήρας είναι πιο ακριβής, επιτρέποντας ακριβείς υπολογισμούς lux. Η φασματική απόκριση του αισθητήρα κυμαίνεται από 300nm έως 1100 nm, με την υψηλότερη απόκριση μεταξύ 700 και 950nm, καθώς ο μετρητής χλωροφύλλης μετράει στο κόκκινο/υπέρυθρο φάσμα. Περιέχει διόδους υπέρυθρων και πλήρους φάσματος, οι οποίες μπορούν να μετρήσουν το υπέρυθρο, το πλήρες φάσμα ή το ανθρώπινο ορατό φως αντίστοιχα. Επιπλέον, οι φωτοδιόδοι έχουν υψηλή γραμμικότητα στη λειτουργία μεταφοράς εισόδου-εξόδου, η οποία, μαζί με την τυπικά γρήγορη απόκριση, καθιστώντας τον την βέλτιστη επιλογή για το σχεδιασμό του προτεινόμενου μετρητή. Ο αισθητήρας διαθέτει ρυθμιστή τάσης και μπορεί να λειτουργήσει σε τάση 3,3V-5,0V. Η ενσωματωμένη συσκευή ADC μπορεί να συνδεθεί με οποιονδήποτε μικροελεγκτή, ακόμη και αν δεν έχει αναλογική είσοδο. Η κατανάλωση ρεύματος είναι 0,4mA και λιγότερο από 5μΑ σε κατάσταση απενεργοποίησης. Η τρέχουσα κατανάλωση της συσκευής είναι εξαιρετικά χαμηλή, επομένως είναι πολύ κατάλληλη για συστήματα καταγραφής δεδομένων χαμηλής ισχύος.



Σχήμα 4.4: Αισθητήρας φωτός TSL2591

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του:

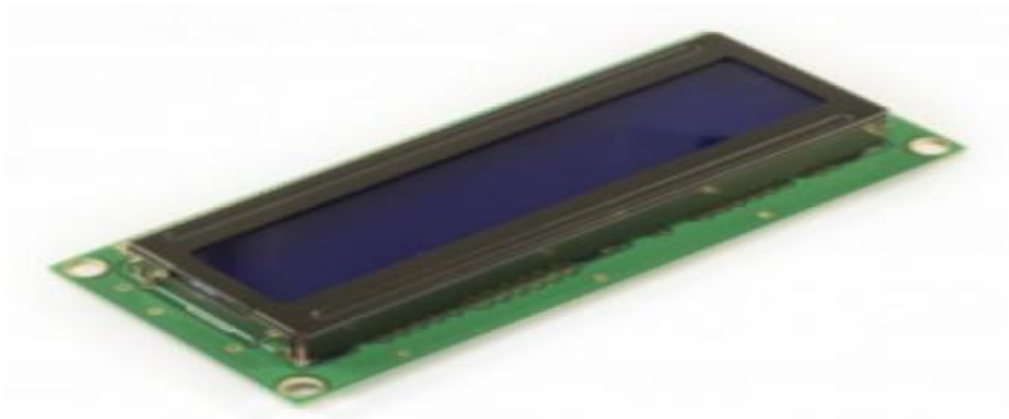
- Τύπος διεπαφής: IIC
- Εύρος τάσης: 3,3V-5V
- Αριθμός δυναμικού εύρους: 1:600.000.000
- Εύρος Lux: Ευαισθησία 188 uLux, μέτρηση εισόδου έως 88.000 lumens.
- Εύρος θερμοκρασίας: -30 ° C ~ 80 ° C
- Διαστάσεις: 19mmx16mmx1mm
- Ορισμός Pin:
- VIN: Power +
- GND: Γείωση
- SCL: Σειριακή σειρά ρολογιού I2C
- SDA: Σειριακή σειρά δεδομένων I2C

- INT: Ακίδα διακοπής

Οθόνη LCD 2X16 RC1602B

Για την βοήθεια ανάγνωσης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων από τον χρήστη επιλέχθηκε Οθόνη LCD (τύπου Hitachi HD44780) 16 χαρακτήρων και 2 γραμμών με μπλέ φόντο και λευκούς χαρακτήρες. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται παρακάτω:

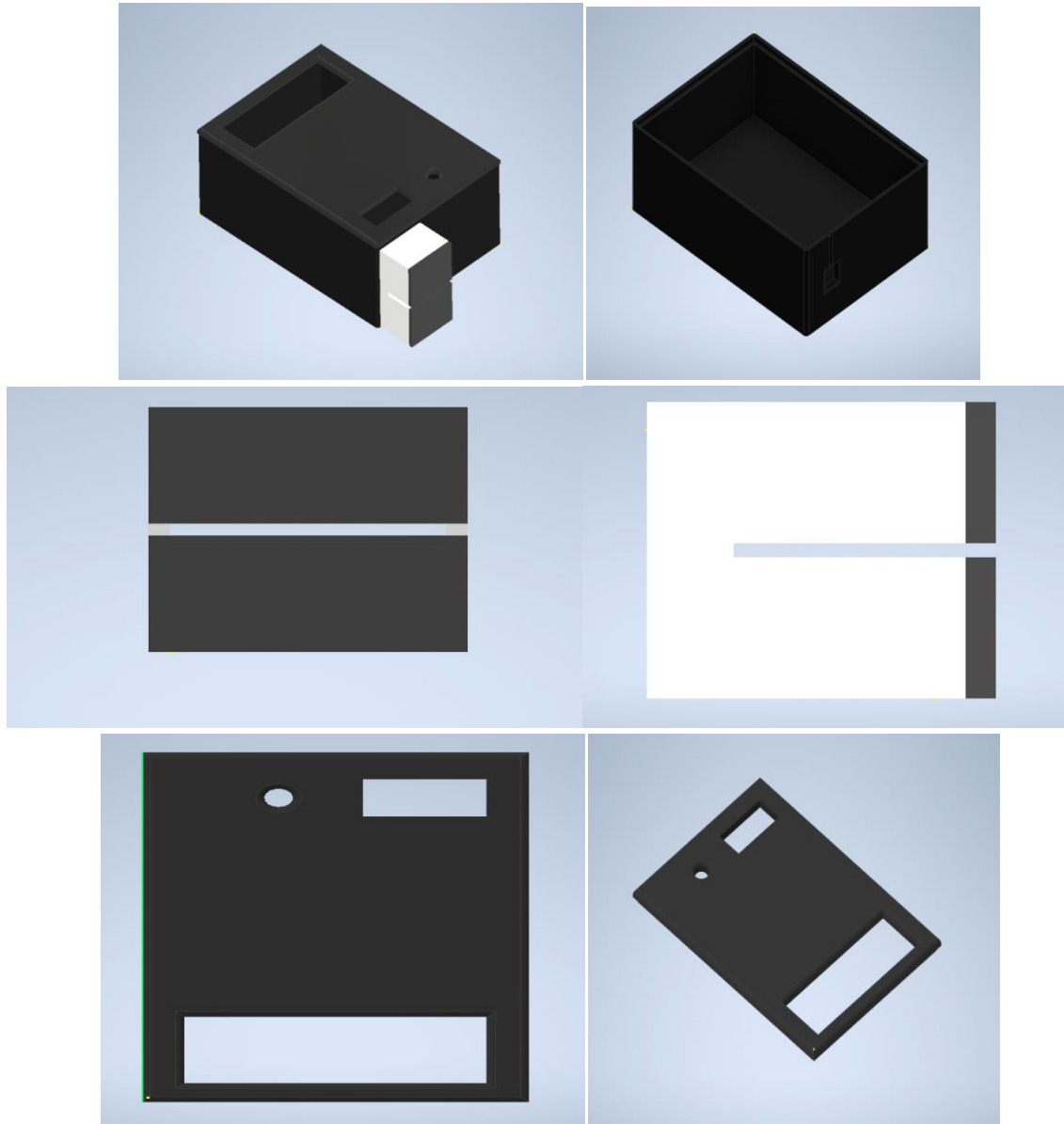
- Τύπος: Character LCD
- Αριθμός Χαρακτήρων: 16x2
- Χρώματα Οθόνης: Μπλέ
- Διασύνδεση: Parallel
- Displaytype: LCD
- Display type: Alphanumeric
- Display technology: STN Negative
- Number of characters (columns x lines): 16x2
- Backgr. colour: Blue
- Illumination: LED
- Controller type: ST7066, or equivalent
- Backlight colour: White
- Number of pins: 16
- Type of pin configuration: 1x16
- 80 x 36 x 13.2mm
- Window (H x W): 66 x 16mm
- Contactspitch: 2.54mm



Σχήμα 4.5: 16x2 Character LCD - White on Blue 5V

Μοντέλο περιβλήματος PCM

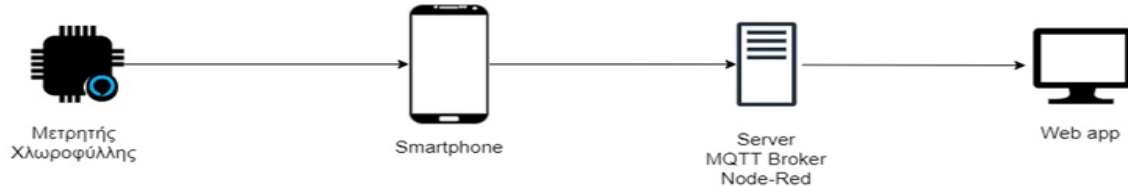
Πραγματοποιήθηκε επίσης σχεδιασμός τρισδιάστατου (3D) μοντέλου του κυτίου (περιβλήματος) του μετρητή PCM. Οι διαστάσεις του κυτίου του μετρητή PCM είναι (ΜΠΥ) $13\text{cm} \times 9,2\text{cm} \times 4,4\text{cm}$ (σχήμα 4.6) ενώ το υλικό κατασκευάστηκε με μαύρο νήμα. Το μαύρο υλικό του κουτιού επιλέχθηκε για την ελαχιστοποίηση της αντανάκλασης εσωτερικά στον θάλαμο μέτρησης. Το μοντέλο στον τρισδιάστατο εκτυπωτή σχεδιάστηκε με το λογισμικό Autodesk Inventor 2020.



Σχήμα 4.6: Τα τρισδιάστατα μοντέλα (σχεδίασης) του κυτίου του PCM στον 3D εκτυπωτή

4.1.2 Περιγραφή του λογισμικού (Software)

Το σύστημα μέτρησης της χλωροφύλλης αποτελείται από 4 μέρη (βλέπε σχήμα 4*.1), το πρόγραμμα της συσκευής, τον server, την εφαρμογή του κινητού και την ιστοσελίδα για προβολή και καλύτερη διαχείριση των καταγραφών.



Σχήμα 4.7: Το σύστημα μέτρησης της χλωροφύλλης

Για τον προγραμματισμό των εν μέρη συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής προγράμματα και συστήματα: το Visual Studio Code για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή, ένα EC2 instance της Amazon για την αποθήκευση και εκτέλεση του MQTT Server και της Node-Red και το Android Studio για προγραμματισμό της εφαρμογής του κινητού σε περιβάλλον Android [65].

4.1.2.1 Προγράμματα και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

VisualStudioCode

Το Visual Studio Code είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας πηγαίου κώδικα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μια ποικιλία γλωσσών προγραμματισμού, μεταξύ των οποίων Java, JavaScript, Go, Node.js, Python and C++. Για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή ESP32 χρησιμοποιήθηκε ένα πρόσθετο (framework) του Visual Studio Code, το Platformio (www.platformio.org), όπου συνήθως χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό ενσωματωμένων συστημάτων.

Amazon Web Services (AWS)

Η Amazon Web Services, Inc. (AWS) είναι μία θυγατρική εταιρία της Amazon που παρέχει κατ' απαίτηση πλατφόρμες για cloud computing και API σε ιδιώτες, εταιρείες και κυβερνήσεις, σε μετρημένη βάση πληρωμής. Αυτές οι υπηρεσίες web cloud computing παρέχουν μια ποικιλία βασικών αφηρημένης τεχνικής υποδομής και κατανεμημένων δομικών στοιχείων και εργαλείων υπολογιστών. Μία από αυτές τις υπηρεσίες είναι το Amazon Elastic Compute Cloud (EC2), το οποίο επιτρέπει στους χρήστες να έχουν στη διάθεσή τους ένα εικονικό σύμπλεγμα υπολογιστών, διαθέσιμο όλη την ώρα, μέσω του διαδικτύου. Οι εικονικοί υπολογιστές της AWS μιμούνται τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά ενός πραγματικού υπολογιστή, συμπεριλαμβανομένων των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας υλικού (CPU) και των μονάδων επεξεργασίας γραφικών (GPU) για επεξεργασία, τοπική/μνήμη RAM, αποθήκευση σκληρού δίσκου/SSD, μια επιλογή λειτουργικών συστημάτων, δίκτυα και προεγκατεστημένο λογισμικό

εφαρμογών όπως διακομιστές ιστού, βάσεις δεδομένων και διαχείριση σχέσεων πελατών (CRM) [65].

MQTT

Το MQTT είναι ένα ελαφρύ πρωτόκολλο δικτύου δημοσίευσης-συνδρομής που μεταφέρει μηνύματα μεταξύ συσκευών. Το πρωτόκολλο εκτελείται συνήθως μέσω TCP/IP, ωστόσο, οποιοδήποτε πρωτόκολλο δικτύου που παρέχει διατεταγμένες, αμφίδρομες συνδέσεις χωρίς απώλειες μπορεί να υποστηρίξει MQTT. Έχει σχεδιαστεί για συνδέσεις με απομακρυσμένες τοποθεσίες όπου υπάρχουν περιορισμοί πόρων ή το εύρος ζώνης του δικτύου (bandwidth) είναι περιορισμένο.

Για την λειτουργία του MQTT είναι απαραίτητη η χρήση ενός “μεσίτη” (broker) ο οποίος είναι λογισμικό που εκτελείται σε υπολογιστή (εντός των εγκαταστάσεων ή στο cloud) και θα μπορούσε να κατασκευαστεί ή να φιλοξενηθεί σε πλατφόρμες διαδικτυακά. Είναι διαθέσιμο τόσο σε εφαρμογές ανοιχτού κώδικα όσο και σε ιδιόκτητες εφαρμογές.

Ο μεσίτης λειτουργεί ως ταχυδρομείο, το MQTT δεν χρησιμοποιεί τη διεύθυνση του προβλεπόμενου παραλήπτη, αλλά χρησιμοποιεί τη γραμμή θέματος που ονομάζεται "Θέμα" και όποιος θέλει ένα αντίγραφο αυτού του μηνύματος θα πρέπει να εγγραφεί σε αυτό το θέμα. Πολλοί πελάτες μπορούν να λάβουν το μήνυμα από έναν μόνο μεσίτη (δυνατότητα από μία έως πολλές). Ομοίως, πολλοί εκδότες μπορούν να δημοσιεύουν θέματα σε έναν μόνο συνδρομητή (πολλοί προς έναν).

Κάθε πελάτης μπορεί να παράγει και να λαμβάνει δεδομένα τόσο με δημοσίευση όσο και με εγγραφή, δηλαδή οι συσκευές μπορούν να δημοσιεύουν δεδομένα αισθητήρα και να μπορούν να λαμβάνουν τις πληροφορίες διαμόρφωσης ή τις εντολές ελέγχου (το MQTT είναι ένα πρωτόκολλο αμφίδρομης επικοινωνίας). Αυτό βοηθά τόσο στην κοινή χρήση δεδομένων, όσο και στη διαχείριση και τον έλεγχο συσκευών.

Με την αρχιτεκτονική μεσίτη MQTT, οι συσκευές και η εφαρμογή αποσυνδέονται και γίνονται πιο ασφαλείς. Το MQTT χρησιμοποιεί κρυπτογράφηση TLS με όνομα χρήστη, συνδέσεις που προστατεύονται με κωδικό πρόσβασης και προαιρετικές πιστοποιήσεις που απαιτούν από τους πελάτες να παρέχουν ένα αρχείο πιστοποιητικού που ταιριάζει με αυτό του διακομιστή. Οι πελάτες δεν γνωρίζουν ο ένας τη διεύθυνση IP του άλλου.

Ο μεσίτης που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την εφαρμογή είναι ο Mosquitto MQTT broker ο οποίος εγκαταστάθηκε στο EC2 instance της AWS [66].

Node-Red

Η Node-RED είναι ένα εργαλείο ανάπτυξης λογισμικού που βασίζεται σε ένα είδος διαγραμμάτων ροής για οπτικό προγραμματισμό που αναπτύχθηκε αρχικά από την IBM για τη σύνδεση συσκευών υλικού, API και διαδικτυακών υπηρεσιών ως μέρος του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT).

Το Node-RED παρέχει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας ροής που βασίζεται σε πρόγραμμα περιήγησης ιστού, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία συναρτήσεων JavaScript. Τα στοιχεία των εφαρμογών μπορούν να αποθηκευτούν ή να μοιραστούν για

επαναχρησιμοποίηση. Ο χρόνος εκτέλεσης είναι χτισμένος στο Node.js. Οι ροές που δημιουργούνται στο Node-RED αποθηκεύονται χρησιμοποιώντας μορφή JSON [67].

AndroidStudio

Το AndroidStudio είναι το επίσημο ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) για το λειτουργικό σύστημα Android της Google, που βασίζεται στο λογισμικό IntelliJ IDEA της JetBrains και έχει σχεδιαστεί ειδικά για την ανάπτυξη εφαρμογών Android [68].

4.1.2.2 Λογισμικό μικροελεγκτή

Το λογισμικό του μικροελεγκτή είναι γραμμένο με κώδικα Arduino το οποίο είναι γραμμένο σε γλώσσα C++.

Βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν:

- Arduino.h Για χρήση των βιβλιοθηκών του Arduino
- LiquidCrystal.h Για χρήση της οθόνης LCD
- BluetoothSerial.h Για χρήση του Bluetooth της συσκευής
- Wire.h Για χρήση του αισθητήριου TSL2591
- Adafruit_Sensor.h Για χρήση του αισθητήριου TSL2591
- Adafruit_TSL2591.h Για χρήση του αισθητήριου TSL2591

Συναρτήσεις

Στη συνάρτηση **setup(void)** αρχικοποιούμε την σειριακή επικοινωνία, το Bluetooth, τα pin του αισθητήρα TSL2591, το έξωτετικό κουμπί και την οθόνη LCD.

Στη συνάρτηση **configureSensor(void)** ρυθμίζουμε το gain και τον χρόνο ενσωμάτωσης του αισθητήρα. Το gain μπορεί να είναι x1, x25 ή x428 και ρυθμίζεται ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού του χώρου. Η αλλαγή του χρόνου ενσωμάτωσης μας δίνει περισσότερο χρόνο για να μετρήσουμε το φως. Τα μεγαλύτερα χρονοδιαγράμματα είναι πιο αργά, αλλά είναι καλά σε καταστάσεις πολύ χαμηλού φωτισμού! Οι διαθέσιμες επιλογές είναι 100ms, 200ms, 300ms, 400ms, 500ms και 600ms.

Στη συνάρτηση **advancedRead(void)** ξεκινάμε την διαδικασία μίας μέτρησης της χλωροφύλλης. Για την μέτρηση αυτή γίνονται 10 διαφορετικές μετρήσεις της υπέρυθρης και κόκκινης ακτινοβολίας που έχει περάσει από το φύλλο και έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος των μετρήσεων. Ο υπολογισμός της χλωροφύλλης δίνεται από τον λόγο της υπέρυθρης προς την κόκκινη ακτινοβολία που πέρασε από το φύλλο (όπως φαίνεται και στον τύπο παρακάτω).

$$\text{Χλωροφύλλη} = (\text{Υπέρυθρη ακτινοβολία}) / (\text{Κόκκινη ακτινοβολία})$$

Στη συνάρτηση **loop(void)**, όπου είναι και η κύρια συνάρτηση του προγράμματός μας, ξεκινάμε ελέγχοντας αν ο χρήστης πάτησε το κουμπί έναρξης που βρίσκεται επάνω στο κουτί της συσκευής. Μόλις ο χρήστης πατήσει το κουμπί ξεκινάμε την διαδικασία υπολογισμού της χλωροφύλλης και εκτυπώνουμε την τιμή στην LCD οθόνη. Μετά ο χρήστης πρέπει να

επαναλάβει την διαδικασία άλλες 2 φορές για να πάρει τον μέσο όρο των τριών μετρήσεων για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Την τέταρτη φορά που θα πατήσει το κουμπί ο χρήστης, η τιμή της χλωροφύλλης στέλνεται στο smartphone του χρήστη που έχει προ-συνδεθεί με την συσκευή με την χρήση του Bluetooth.

Τέλος ο χρήστης χρειάζεται να πατήσει το κουμπί άλλη μία φορά για να καθαρίσει την οθόνη LCD και να ξεκινήσει καινούργια μέτρηση φύλλου.

Αν ο χρήστης πατήσει το κουμπί για πάνω από 3 δευτερόλεπτα, σε οποδήποτε στιγμή της χρήσης της συσκευής, η συσκευή ακυρώνει ότι μετρήσεις έχουν γίνει και περιμένει για επόμενο πάτημα του κουμπιού. Ο Πλήρης κώδικας παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

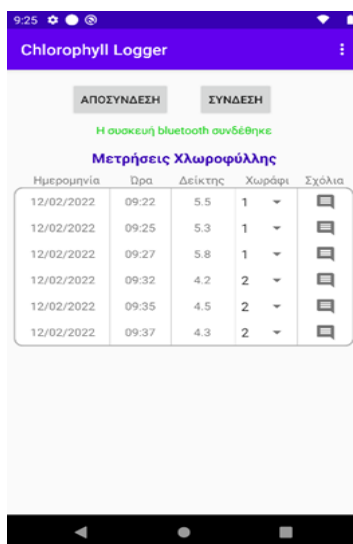
4.1.2.3 Λογισμικό εφαρμογής κινητού

Στην εφαρμογή του κινητού εμφανίζονται οι μετρήσεις της χλωροφύλλης. Στις μετρήσεις αυτές μπορούμε να προσθέσουμε σχόλια όπως και να βάλουμε έναν δείκτη χωράφι ώστε να γνωρίζουμε σε ποιο χωράφι γίνανε οι μετρήσεις.

Λειτουργία

Αφού ενεργοποιήσουμε την λειτουργία του Bluetooth στο κινητό μας, πατάμε το κουμπί “ΣΥΝΔΕΣΗ” και δημιουργούμε μια σύνδεση μεταξύ της συσκευής μέτρησης χλωροφύλλης και του κινητού (απαραίτητη προϋπόθεση να είναι ανοιχτή η συσκευή καταγραφής).

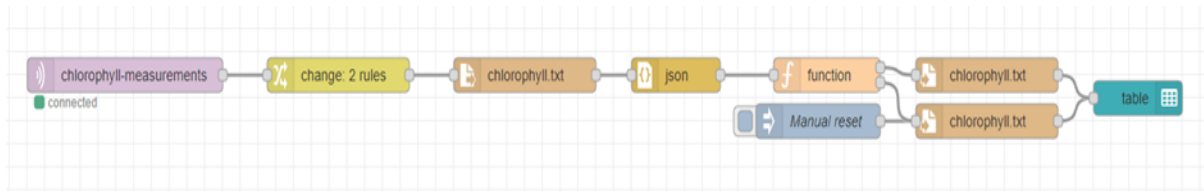
Στη συνέχεια αφού ολοκληρωθεί μια μέτρηση από την συσκευή, τα δεδομένα θα σταλούν μέσω Bluetooth στο κινητό του χρήστη και θα εμφανιστούν στην εφαρμογή. Ο χρήστης μετά μπορεί να επιλέξει σε ποιο χωράφι ανήκουν οι μετρήσεις και να προσθέσει σχόλια για την κάθε μέτρηση αν το επιθυμεί.



Ημερομηνία	Ώρα	Δείκτης	Χωράφι	Σχόλια
12/02/2022	09:22	5.5	1	
12/02/2022	09:25	5.3	1	
12/02/2022	09:27	5.8	1	
12/02/2022	09:32	4.2	2	
12/02/2022	09:35	4.5	2	
12/02/2022	09:37	4.3	2	

Σχήμα 4.8: Στιγμιότυπο της εφαρμογής του κινητού για την καταγραφή των μετρήσεων. Ο Πλήρης κώδικας παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

4.1.2.4 Λογισμικό server (Node-Red)



Σχήμα 4.9: Κομμάτια (blocks) της Node-Red που μας επιτρέπουν να λάβουμε δεδομένα στο cloud και να τα εκτυπώσουμε σε μια ιστοσελίδα.

Ο server όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4.1.2.1 αποτελείται από τον Mosquitto MQTT Broker και την Node-Red.

Ο **MosquittoBroker** μας δίνει την δυνατότητα να δημιουργούμε ένα σύνδεσμο μεταξύ συσκευών μέσω του internet/cloud (που βασίζεται στην λογική του διαδικτύου των πραγμάτων IoT).

Η **Node-Red** μας προσφέρει ένα γραφικό περιβάλλον στο cloud όπου με την βοήθεια των “blocks” (βλέπε Σχήμα 4.9) κατασκευάζουμε ροές (flows) οι οποίες μας επιτρέπουν να επεξεργαστούμε πληροφορίες που φτάνουν στον server ή που λαμβάνουμε από την βάση δεδομένων και να εκτελέσουμε κάποια ενέργεια αν επιθυμούμε. Οι λειτουργίες της Node-Red μπορούν να ενισχυθούν με την προσθήκη βιβλιοθηκών. Η βιβλιοθήκη “node-red-dashboard” μας δημιουργεί ένα σύνδεσμο (url) με μια κενή ιστοσελίδα στην οποία μπορούμε να προσθέσουμε διάφορους εν δείκτες και κουμπιά και με τη βιβλιοθήκη node-red-node-ui-table δημιουργούμε ένα πίνακα για το dashboard.

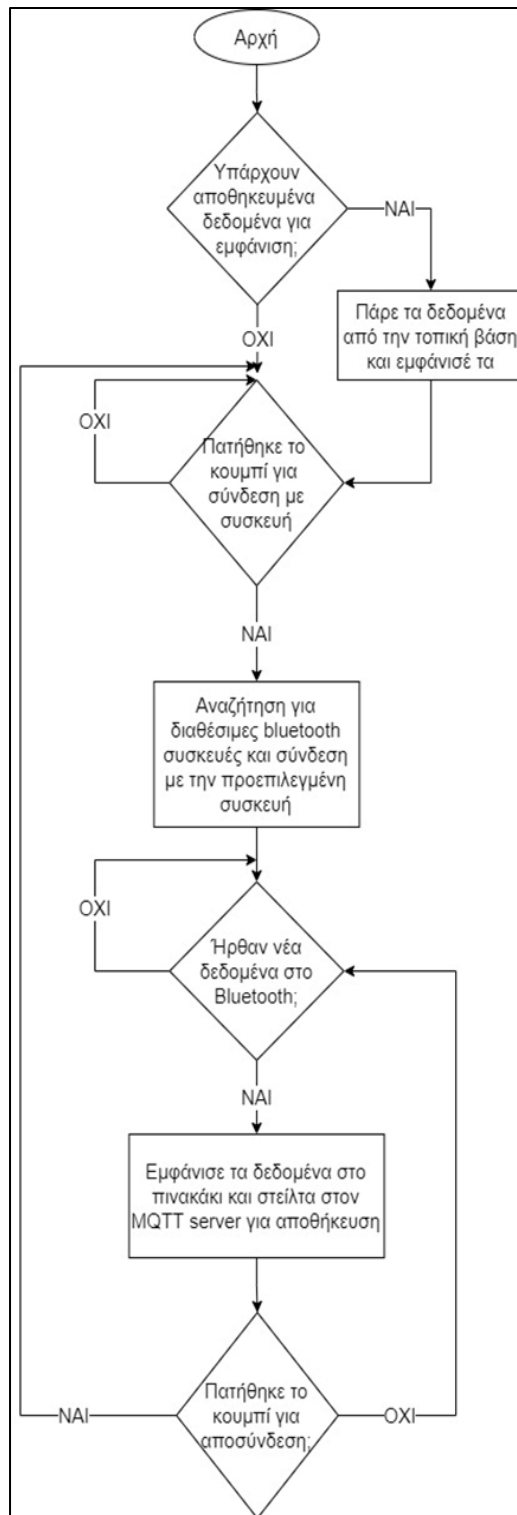
Το διάγραμμα στο σχήμα 4.9 δείχνει την ροή που κατασκευάστηκε για τον σκοπό αυτής της πτυχιακής. Η ροή πηγαίνει ξεκινάει από το αριστερό block με την λήψη του MQTT πακέτου σε μορφή JSON. Έπειτα καλούμε τις παλιές μετρήσεις που είναι αποθηκευμένες στο αρχείο chlorophyll.txt και ανάλογα με το μήνυμα το οποίο ήρθε είτε επεξεργαζόμαστε κάποια παλιά μέτρηση, προσθέτουμε μία καινούργια μέτρηση στη λίστα ή διαγράφουμε όλες τις μετρήσεις. Τέλος, εμφανίζουμε τη λίστα με τις μετρήσεις σε ένα φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον με τη χρήση του dashboard.

Οι μετρήσεις είναι διαθέσιμες στον χρήστη από την διεύθυνση <http://18.220.230.131:1880/ui>.

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις στην διεύθυνση <http://18.220.230.131:1880/ui>

Μετρήσεις χλωροφύλλης

ID	Ημερομηνία	CCI	Χωράφι	Σχόλια
0	0	0	1	
1	12/02/2022 09:20	5.5	0	
2	11/02/2022 18:05	5.31	0	
4	12/02/2022 09:32	4.2	1	
5	12/02/2022 09:35	4.5	1	
6	12/02/2022 09:37	4.3	1	



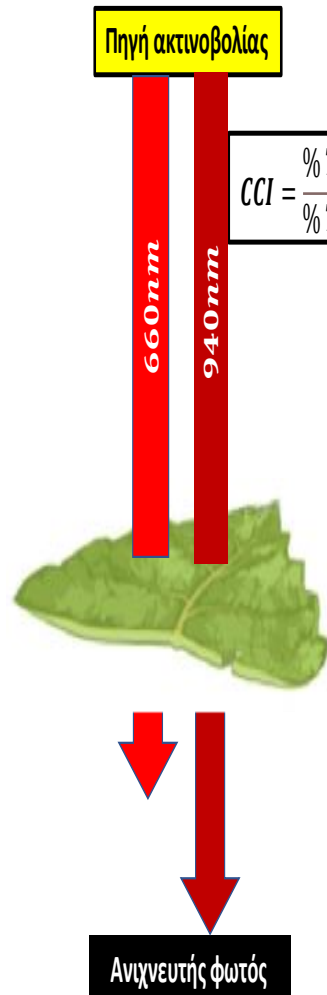
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής του κινητού Android

4.1.3 Αρχή λειτουργίας μετρητή χλωροφύλλης

Ο φορητός μετρητής χλωροφύλλης (Portable Chlorophyll Meter, PCM) είναι χαμηλού κόστους και έχει σχεδιαστεί για στιγμιαίο, μη καταστροφικό, άμεσο προσδιορισμό της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης των φύλλων. Είναι ένας οπτικός μετρητής όπου η μέτρηση λαμβάνεται με την εισαγωγή του φύλλου στην ειδική εσοχή. Για την μέτρηση, τμήμα του κάθε φύλλου εισάγεται στον θάλαμο μέσω της ειδικής εσοχής. Ο μετρητής χρησιμοποιεί λογισμικό για τη μετατροπή της διαπερατότητας των δύο μηκών κύματος φωτός κατά την μετάδοση τους μέσα από ένα φύλλο σε μονάδα χλωροφύλλης ανά μονάδα εμβαδού. Μετράει τη σχετική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη εξάγοντας μια εκτίμηση της πραγματικής συγκέντρωσης χλωροφύλλης σε μονάδες mg/g της επιφάνειας του φύλλου, η οποία σχετίζεται στενά με τη σχετική μέτρηση παρέχοντας μια εναλλακτική λύση στις καταστροφικές τεχνικές δειγματοληψίας για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης. Επιτρέπει τη μέτρηση και την παρακολούθηση των φύλλων σε ολόκληρο τον κύκλο ανάπτυξης όπως και ταχείες επαναλήψεις μετρήσεων του ίδιου φύλλου ή γρήγορη μέτρηση πολλαπλών φύλλων. Ο μετρητής λειτουργεί εκπέμποντας δύο μήκη κύματος φωτός, ένα μήκος κύματος στα 660nm (κόκκινο, μήκος κύματος που απορροφά η χλωροφύλλη) και ένα στα 940nm (εγγύς υπέρυθρο, μήκος κύματος που δεν απορροφά η χλωροφύλλη). Καθώς τα δυο μήκη κύματος προσπίπτουν στην επιφάνεια του φύλλου με τη σειρά, απορροφώνται κατά ένα μέρος και το υπόλοιπο μέσω της διαπερατότητας συλλέγεται από τον αισθητήρα. Παίρνοντας την αναλογία αυτών των μηκών κύματος, μέσω του αισθητήρα μετά το φύλλο μπορούμε να διαχωρίσουμε την ποσότητα χλωροφύλλης από το άλλο υλικό στο φύλλο.

Πιο συγκεκριμένα ο μετρητής μετράει τον λόγο της αναλογίας της διαπερατότητας της ακτινοβολίας από δύο μήκη κύματος (στο κόκκινο της ορατής περιοχής και στο εγγύς υπέρυθρο) και εξάγει τη συγκέντρωση χλωροφύλλης. Η αναλογία μετάδοσης στα 940 nm προς τη διαπερατότητα στα 660nm παρέχει ένα μέτρο σχετικής περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη επειδή τα 660nm είναι ένα φωτοσυνθετικά ενεργό μήκος κύματος εντός του εύρους της απορρόφησης της χλωροφύλλης ενώ τα 940nm είναι ένα μήκος κύματος εγγύς υπέρυθρων έξω από το εύρος απορρόφησης χλωροφύλλης, το οποίο χρησιμεύει ως μέτρηση αναφοράς για αντιστάθμιση παραγόντων των μηχανικών διαφορών μεταξύ των φύλλων (συμπεριλαμβανομένης της περιεκτικότητας σε υγρασία των φύλλων και πάχος (Zhu et al., 2012)). Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας χλωροφύλλης δίνεται σε μονάδες δείκτη index 1.0 και ο λόγος μετάδοσης στα 940nm προς 660nm ονομάζεται δείκτης περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη (chlorophyll content index, CCI). Μια τιμή μέτρησης του CCI κοντά στη μονάδα υποδεικνύει παρόμοια διαπερατότητα κόκκινης και ακτινοβολίας NIR, επομένως λίγη έως καθόλου χλωροφύλλη στο δείγμα φύλλου. Αντίστοιχα μια μέτρηση του CCI μεγαλύτερη της μονάδας υποδηλώνει μικρότερη διαπερατότητα κόκκινης ακτινοβολίας σε σχέση με την υπέρυθρη με μεγαλύτερες τιμές αναλογιών να υποδεικνύουν περισσότερη περιεκτικότητα χλωροφύλλης στο φύλλο.

Λόγος διαπερατότητας ακτινοβολιών ερυθράς (660nm) και εγγύς υπέρυθρου (940nm)



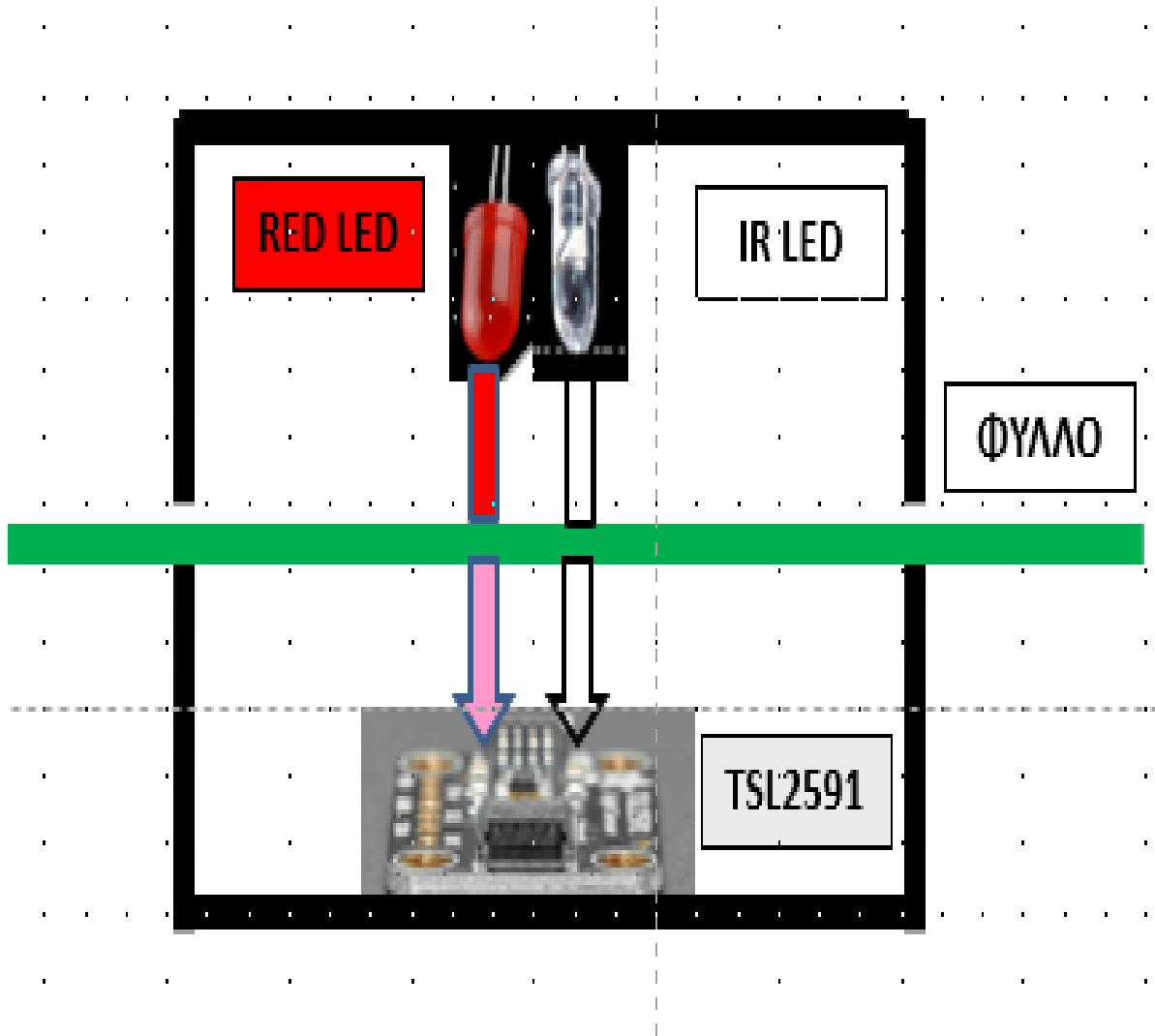
- ❖ Η χλωροφύλλη απορροφά ισχυρά την ερυθρή ακτινοβολία
- ❖ Η ακτινοβολία εγγύς του υπέρυθρου δεν απορροφάτε και μεταδίδεται σε μεγάλο βαθμό μέσα από το φύλλο
- ❖ Ο λόγος της διαπερατότητας της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας προς την ερυθρή ακτινοβολία είναι μια σχετική τιμή περιεκτικότητας χλωροφύλλης στα φύλλα
- ❖ Ο λόγος μετάδοσης στα 940nm προς 660nm ονομάζεται δείκτης περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη (CCI)

Σχήμα 4.11: Μηχανισμός μετρητή χλωροφύλλης

Ο μετρητής περιεκτικότητας χλωροφύλλης στη συνέχεια μετατρέπει το CCI, μετά την επεξεργασία τους από τον μικροελεγκτή, από μια σχετική τιμή περιεκτικότητας χλωροφύλλης στα φύλλα, σε πραγματική εκτίμηση της περιεκτικότητας χλωροφύλλης στο φύλλο με ένδειξη σε mg/g. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη LCD και μεταφέρονται και εμφανίζονται επίσης σε εφαρμογή smartphone χρησιμοποιώντας πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth, όπως στέλνονται και σε ένα cloud.

Ο μετρητής χλωροφύλλης για την διέγερση της ακτινοβολίας των δύο διόδων εκπομπής μία στο κέντρο στα 660 nm και μία στο κέντρο στα 940nm κάνει διαμόρφωση με ψηφιακό παλμό συχνότητας 20ms. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8 ο αισθητήρας φωτός, μέσα στον θάλαμο μέτρησης, είναι τοποθετημένος απέναντι και κεντραρισμένος στις δέσμες φωτός των LED μετράει την ένταση του φωτός που διέρχεται μέσω του δείγματος του φύλλου από τα εκπεμπόμενα μήκη

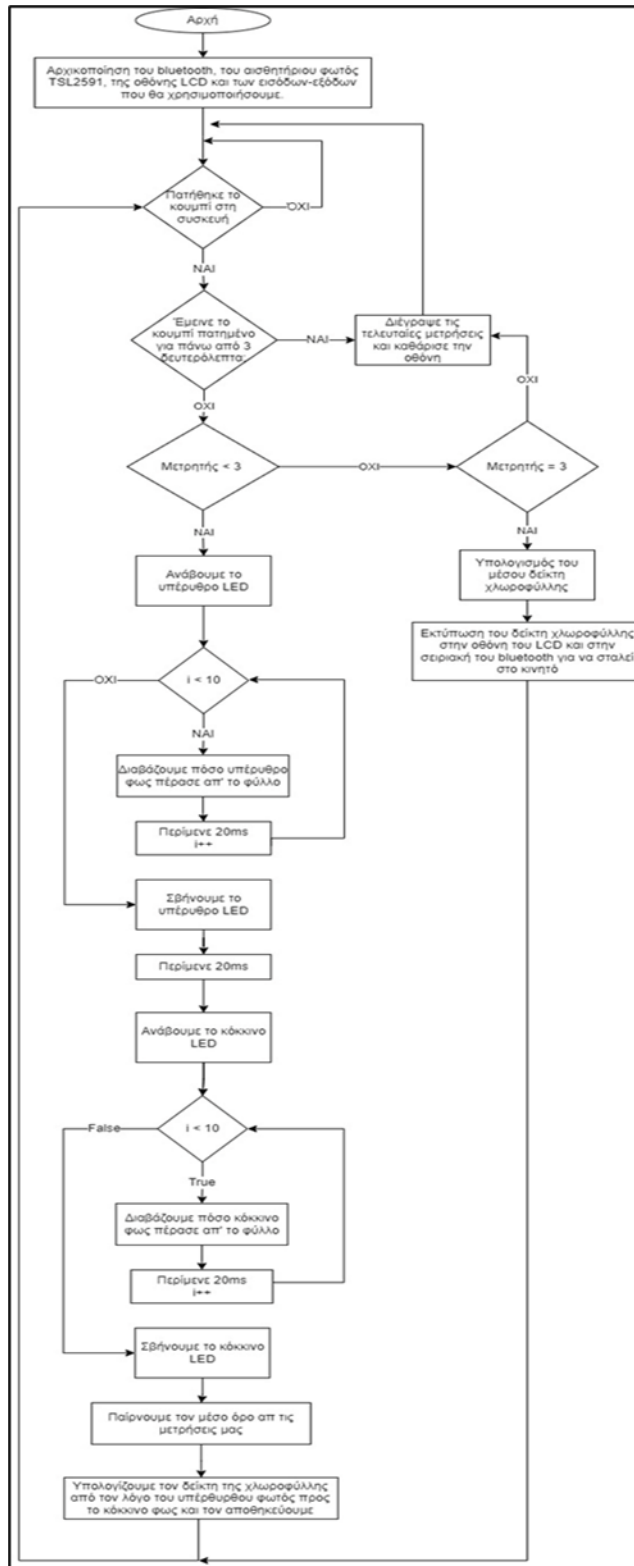
κύματος για τον προσδιορισμό της μεταφερόμενης ακτινοβολίας μέσω της διαπερατότητας των φύλλων ως τον κύριο μηχανισμό που αντιστοιχεί στη μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη. Τα ψηφιακά σήματα του αισθητήρα φωτός οδηγούνται στον μικροελεκτή ESP32 για περαιτέρω ψηφιακή επεξεργασία του μετρούμενου σήματος. Στη συνέχεια απεικονίζονται στην οθόνη LCD οι τιμές χλωροφύλλης σε μορφή index και σε mg/g.



Σχήμα 4.12: Θάλαμος μέτρησης PCM.

4.1.4 Διάγραμμα ροής

Η διαδικασία μέτρησης της χλωροφύλλης σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα ροής είναι η εξής:



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα ροής διαδικασίας μέτρησης της χλωροφύλλης

Με την έναρξη λειτουργίας του μετρητή λαμβάνει χώρα μια αρχικοποίηση του Bluetooth, TSL2591, της οθόνης LCD και των εισόδων και εξόδων που θα χρησιμοποιήσουμε. Ο μετρητής μπαίνει σε λειτουργία αναμονής για την μέτρηση.

Κατά την διαδικασία μέτρησης στην πρώτη φάση ακτινοβολείται η επιφάνεια προς μέτρηση του φύλλου, στην οποία γίνεται η εναλλαγή των δύο πηγών εκπομπής φωτός. Με το πάτημα του μπουτόν μέτρησης ενεργοποιείται πρώτα το led του εγγύς υπέρυθρου φωτός το οποίο ακτινοβολεί και καταγράφονται 10 μετρήσεις με χρόνο 20ms ανάμεσά τους. Η ένταση της διόδου ρυθμίζεται με διαμόρφωση πλάτους παλμού χρησιμοποιώντας τον μικροελεγκτή ESP32. Η λειτουργία της φωτοδίοδου TSL2591 αλλάζει την ένταση του φωτός σε έξοδο τάσης. Το ESP32 διαβάζει την έξοδο από τον αισθητήρα φωτός την τιμή για το εγγύς υπέρυθρο, γίνεται μια παύση για 20ms και στην συνέχεια επαναλαμβάνεται το ίδιο και για το led του κόκκινου φωτός. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο δείκτης της χλωροφύλλης από το λόγο της διαπερατότητας του εγγύς υπέρυθρου προς το κόκκινο φως με τον μέσο όρο των μετρήσεων από τις δύο πηγές.

Αυτός ο μηχανισμός εναλλαγής αποσκοπεί στην ανάκτηση των δεδομένων από κάθε απορρόφηση και διαπερατότητα του φωτός που πέφτει στην επιφάνεια των δειγμάτων των φύλλων. Εάν υπάρχει ταυτόχρονη ενεργοποίηση των δύο πηγών θα υπάρχει αδυναμία του αισθητήρα φωτός να διακρίνει ποιες είναι οι τιμές διαπερατότητας του κόκκινου LED και ποιες εγγύς στο υπέρυθρο. Η τιμή δείκτη Index δημιουργείται με την ανάγνωση των ψηφιακών αριθμών και από τις δύο μετατρεπόμενες πηγές φωτός, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη:

$$CCI = \frac{\% T 940nm}{\% T 660nm}$$

Το %T στην παραπάνω σχέση είναι εκατοστιαίο κλάσμα διαπερατότητας.

Στη συνέχεια από την σχέση της εξίσωσης της ευθείας παλινδρόμησης $y=0,13x-0,8324$, η ένδειξη του λόγου των σημάτων του (χ) μετατρέπεται σε ένδειξη περιεκτικότητας ολικής χλωροφύλλης (y). Εξίσωση της Ευθείας Παλινδρόμησης, περιγράφει το μαθηματικό μοντέλο μετατροπής των τιμών του λόγου διαπερατότητας του εγγύς υπέρυθρου προς το κόκκινο φως σε τελικές τιμές συγκέντρωσης ολικής χλωροφύλλης.

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη του μετρητή και στέλνονται μέσω Bluetooth στο κινητό.

4.2 Διαδικασία μέτρησης

Με την ενεργοποίηση του μετρητή εμφανίζεται στην οθόνη LCD το μήνυμα “Ready” και “Μέτρηση 1” που σημαίνει ότι ο μετρητής είναι έτοιμος για την πρώτη μέτρηση. Με το μπουτόν επιλογής μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε πέντε επιλογές «χωράφι» που επιθυμούμε στην εφαρμογή του κινητού καθώς και να σημειωθούν κάποια σχόλια. Στη συνέχεια εισάγουμε το

φύλλο στην εσοχή και πιέζουμε το μπουτόν μέτρησης. Καθώς πρέπει να κάνουμε τρεις μετρήσεις σε κάθε φύλλο, μετά την εμφάνιση της πρώτης μέτρησης εμφανίζεται στην οθόνη το μήνυμα “Μέτρηση 2” που ειδοποιεί για την 2η μέτρηση. Μετά την καταγραφή της εμφανίζεται το μήνυμα για την 3η μέτρηση “Μέτρηση 3” και αφού ολοκληρώσουμε την μέτρηση τότε εμφανίζεται στην οθόνη η τελική τιμή χλωροφύλλης με δύο τιμές, μια του index και μια σε mg/g, που αντιστοιχούν στην μέτρηση φύλλου από τον σταθμό 1. Η τιμή αυτή αποστέλλεται μέσω Bluetooth στο κινητό τηλέφωνο όπου αποθηκεύεται μέσω της εφαρμογής. Με το πάτημα πάλι του μπουτόν ο μετρητής έρχεται στην πρώτη κατάσταση όπου μπορούμε να επιλέξουμε σταθμό και να προχωρήσουμε στην νέα μέτρηση. Ταυτόχρονα η εφαρμογή του κινητού στέλνει τα δεδομένα των μετρήσεων στο cloud όπου καταγράφονται. Οι σταθμοί για επιλογή στον μετρητή είναι 5. Επίσης μπορεί να προστεθεί στο μέλλον τιμή αναφοράς, όπου εάν κάποια τιμή την υπερβαίνει τότε εμφανίζεται στην οθόνη το μήνυμα “Alarm” που σημαίνει ότι πρέπει να ελεγχθεί το φυτό καταπόνηση αζώτου.

Κεφάλαιο 5°: Πειραματική μεθοδολογία

5.1 Συλλογή δεδομένων

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από φύλλα πρέμων σε αμπέλι ποικιλίας Merlot στο χωριό Καμπάνης Κιλκίς τον Αύγουστο του 2021 όπου τα πρέμνα βρίσκονταν σε πλήρη ανάπτυξη και έτοιμα για τρύγο. Όλα τα φρέσκα φύλλα των πρέμων μετρήθηκαν επιτόπου με τον μετρητή χωρίς καταστροφή των φύλλων στις 10.00 π.μ. - 12.00 μ.μ. με τρεις επαναλήψεις μετρήσεων για το κάθε φύλλο σε είκοσι συνολικά δείγματα διαφορετικών χρωματισμών πρασίνου. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται το φύλλο αμπελιού ως εργαλείο δοκιμής υλικού είναι επειδή η φυλλώδης επιφάνεια του έχει σχετικά επίπεδη επιφάνεια, το μέγεθος φύλλου είναι κατάλληλο όπως και το πάχος του.

5.2 Πειραματική μεθοδολογία εφαρμογής του αισθητήρα σε φύλλα αμπέλου

Ο μετρητής χλωροφύλλης παρέχει εύρος τιμών σε χλωροφύλλη και σε γραμμική σχέση δείκτη CCI. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι διαφορετικά είδη φυτών έχουν την χλωροφύλλη διατεταγμένη σε διαφορετικά πακέτα, με διαφορετικούς τρόπους λόγω της διαφορετικής εσωτερικής δομής. Έτσι, όταν χρησιμοποιείται οπτικός μετρητής χλωροφύλλης, το φως μεταδίδεται διαφορετικά.

Για να γίνει μια απόλυτη μέτρηση της χλωροφύλλης πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιοι παράγοντες όπως να υπάρχει ο σωστός διαλύτη εκχύλισης, τη σωστή εξίσωση υπολογισμού και το σωστό φασματοφωτόμετρο. Με αυτούς τους παράγοντες μπορεί να εξαχθεί μια χρυσή τυπική καμπύλη για τη χλωροφύλλη, ιδανικότερη από παλαιότερες καμπύλες μελέτης όπου δεν είχαν ληφθεί υπόψη και οι τρεις παράγοντες. Ένα πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί όταν υπάρχει μόνο δείκτης, ήταν ότι μια ένδειξη δείκτη 15 και στη συνέχεια μια άλλη ένδειξη 30 στο επόμενο φύλλο δεν σημαίνει και διπλάσια χλωροφύλλη του δεύτερου φύλλου από το πρώτο. Διπλασιάζεται ο δείκτης και όχι η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η οποία μέτρηση μπορεί να είναι παραπλανητική. Έτσι ο σκοπός ήταν η ανάπτυξη ενός μετρητή χλωροφύλλης χαμηλού κόστους που θα μπορούσε να μετατρέψει μέσω του λογισμικού του τη μετάδοση σε πραγματικές μονάδες χλωροφύλλης, όχι σε σχετικό δείκτη. Αυτό επιτεύχθηκε με την εξής διαδικασία. Λήφθηκε μια οπτική μέτρηση με τον μετρητή σε ένα φύλλο αμπελιού και στη συνέχεια οριοθετήθηκε προσεχτικά η περιοχή μέτρησης όπου στην ουσία είναι η ποσότητα της χλωροφύλλης που καταγράφηκε.

Προκειμένου να εξαγάγουμε την πραγματική ποσότητα χλωροφύλλης κόπηκε η οριοθετήσα περιοχή, ζυγίστηκε, τεμαχίστηκε και υποβλήθηκε σε φασματοφωτομετρική ανάλυση όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

5.3 Μεθοδολογία της εκχύλισης από τα φύλλα

Τα δείγματα φύλλων ήταν από άμπελο, ίδιας προέλευσης ποικιλίας merlot. Αφού συλλέχθηκαν και αριθμήθηκαν, καθαρίστηκαν από σκόνη και ταξινομήθηκαν. Τα δείγματα φύλλων φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



Εικόνα 5.1: Δείγματα φύλλων

Για την ανάλυση με το φορητό αισθητήρα χαμηλού κόστους, το τμήμα του κάθε φύλλου εισάγεται στον θάλαμο μέτρησης και λαμβάνονται οι αντίστοιχες ενδείξεις του, εις τριπλούν, από όπου υπολογίζεται και η Μέση τιμή (I_{dex}).

Για τη χημική ανάλυση που έγινε την ίδια μέρα και περίπου παράλληλα με τις παραπάνω μετρήσεις, τα δείγματα φύλλων ξεπλύθηκαν σύντομα από τυχόν επιδερμικά ίχνη λίπους χεριών, με μεθανόλη. Κόπηκε τμήμα του φύλλου, διαστάσεων 2X2cm και εμβαδού περίπου 4cm², και ζυγίστηκε. Οι μάζες κυμαινόταν μεταξύ 30 και 150mg, ανάλογα με το πάχος του φύλλου. Ακολούθησε κατατεμαχισμός του και μεταφορά του σε στεγνό δοκιμαστικό σωλήνα. Τα βήματα αυτά φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



Εικόνα 5.2: Προετοιμασία για την κοπή των φύλλων.



Εικόνα 5.3: Κοπή τμήματος του φύλλου, διαστάσεων 2X2 cm



Εικόνα 5.4:Κατατεμαχισμός του δείγματος

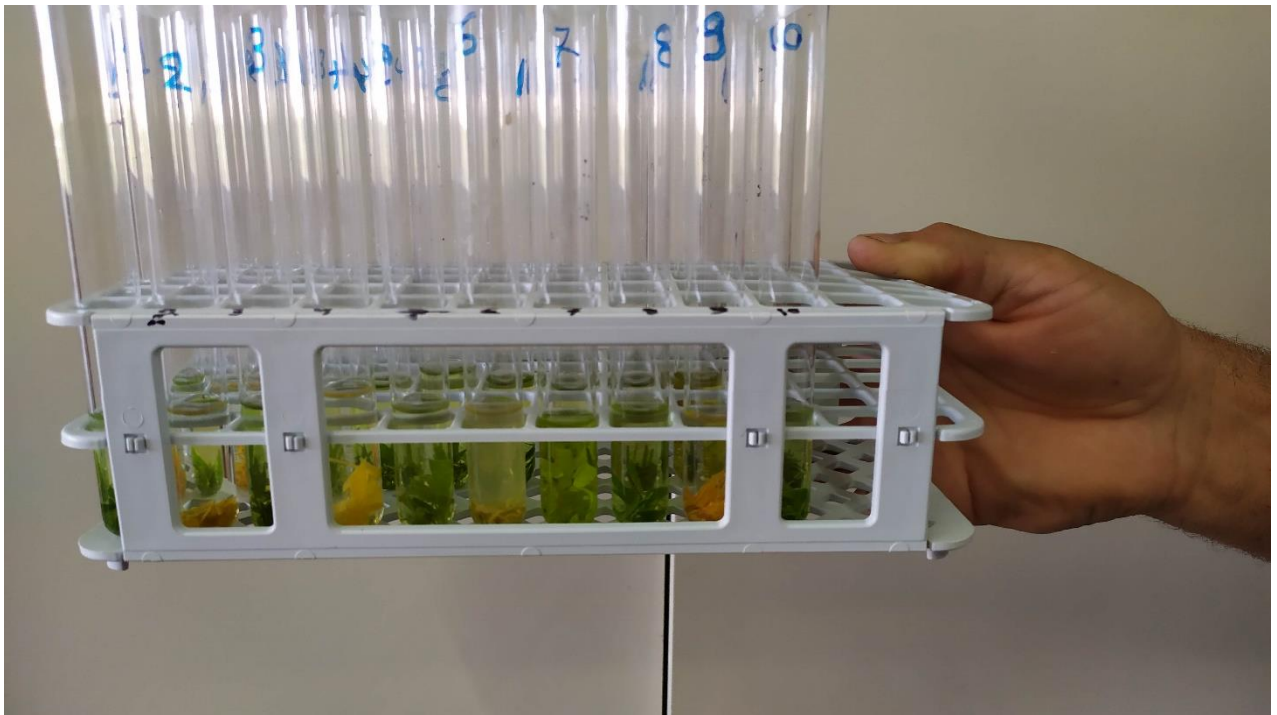


Εικόνα 5.5:Κατατεμαχισμένο δείγμα έτοιμο για μεταφορά σε στεγνό δοκιμαστικό σωλήνα

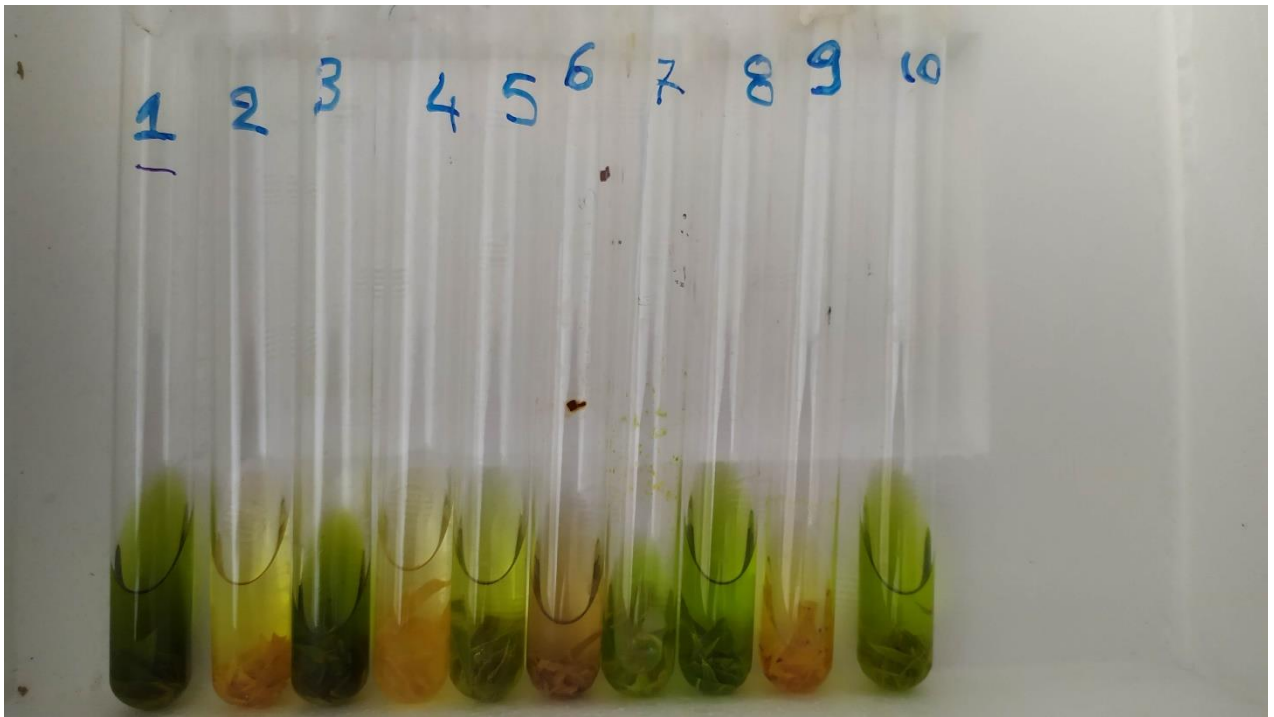
Προστίθενται στο σωλήνα 10 mL ακετονικού διαλύματος 80%, και πωματίζονται οι σωλήνες. Αφήνονται σε σκοτεινό και ξηρό μέρος για 24 ώρες, ώστε να ολοκληρωθεί η εκχύλιση της χλωροφύλλης. Τα διαλύματα που προκύπτουν φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες. Μετά από φυγοκέντριση για να απομακρυνθούν τυχόν αιρούμενα, τα διανυγμένα διαλύματα μετρούνται με το φασματοφωτόμετρο υπεριώδους.



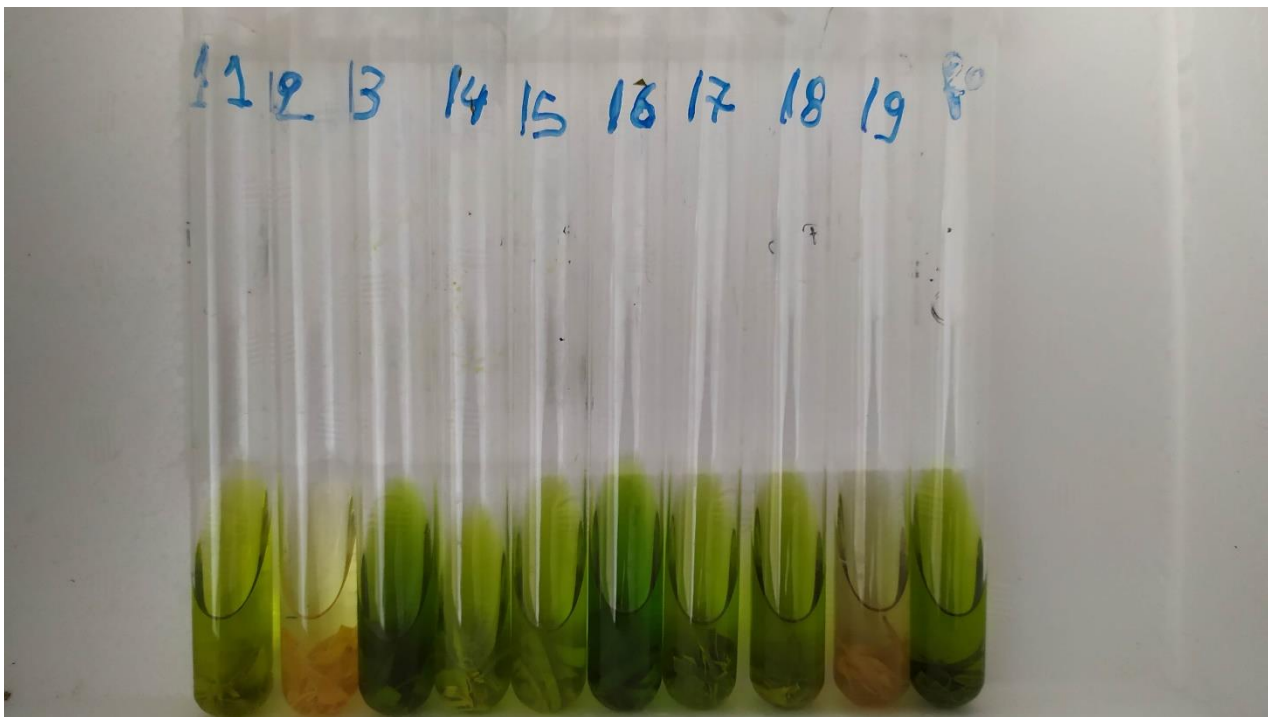
Εικόνα 5.5: Δείγματα έτοιμα για την διαδικασία εκχύλιση της χλωροφύλλης



Εικόνα 5.6: Δείγματα έτοιμα για την διαδικασία εκχύλιση της χλωροφύλλης



Εικόνα 5.7: Πειραματική διαδικασία εκχύλισης χλωροφύλλης από τα φύλλα στο ακετονικό διάλυμα. (Αρχή εκχύλισης)



Εικόνα 5.8: Πειραματική διαδικασία εκχύλισης χλωροφύλλης από τα φύλλα στο ακετονικό διάλυμα. (Πέρασ εκχύλισης μετά από 24 ώρες)

5.4 Μεθοδολογία της Φασματοφωτομετρίας Ορατού – Υπεριώδους

Η συγκεκριμένη διαδικασία χημικής ανάλυσης εφαρμόστηκε με σκοπό τον προσδιορισμό της ολικής χλωροφύλλης επειδή η φορητή συσκευή έχει δυνατότητα να προσδιορίζει την ολική χλωροφύλλη με βάση το λόγο των δύο σημάτων.

Είναι δυνατό, σύμφωνα με την γνωστή μέθοδο Arnon να χρησιμοποιηθούν οι τιμές απορρόφησης στο ορατό στα 652nm, όπου συμπίπτουν τα φάσματα της χλωροφύλλης α και της β, και να υπολογιστεί η συγκέντρωση της ολικής χλωροφύλλης από τη συνδυασμένη εξίσωση Arnon, δηλ. από τη σχέση (Συγκέντρωση = Απορρόφηση /34,5), η οποία αποτελεί προσεγγιστική εκτίμηση της περιεκτικότητας της ολικής [70].

Στους παρακάτω όμως υπολογισμούς χλωροφύλλης χρησιμοποιήθηκαν οι απορροφήσεις στα μήκη κύματος 645nm και 663nm, που αποτελούν τα μέγιστα για τη χλωροφύλλη α και β, με εφαρμογή της αναπτυγμένης σχέσης Arnot- [J. Casanova-Gascón, P. Martín-Ramos, C. Martí-Dalmau and D. Badía-Villas, NutrientsAssimilation and ChlorophyllContents for DifferentGrapevineVarieties in CalcareousSoils in the Somontano DO (Spain), Beverages 2018, 4, 90; doi:10.3390/beverages4040090]. Σημειώνεται ότι τα τελευταία χρόνια Mckinneyέχουν προταθεί από μερικούς ερευνητές διορθώσεις ή/και τροποποιήσεις των ανωτέρω σχέσεων, ώστε να δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα, καθώς και διάφορες πολυπλοκότερες βελτιώσεις της με συνυπολογισμό ποικίλων άλλων παραγόντων [Robert J. Porra, The chequeredhistory of the development and use of simultaneous equations for the accuratedetermination of chlorophylls a and b. Minireview. Photosynthesis Research 73: 149–156, 2002]. Συνεπώς για λόγους απλότητας χρησιμοποιήθηκε η παρακάτωσχέσηArnon-McKinney ως έχει, που παραμένει η πλέον χρησιμοποιούμενη μέχρι σήμερα [ArefSepehri, Ahmad Reza Golparvar, The Effect of DroughtStress on WaterRelations, ChlorophyllContent and LeafArea in CanolaCultivars (Brassic napus L.), Electronic Journal of Biology, 2011, Vol. 7(3): 49-53].

Στη σχέση αυτή, υπολογίζεται η συγκέντρωση της χλωροφύλλης (C, mg/g), με βάση τις απορροφήσεις A645 και A663x που λαμβάνονται με κυψελίδα μέτρησης πάχους α=1 cm, καθώς και τον όγκο του ακετονικού διαλύματος εκχύλισης (V, mL) και τέλος τη μάζα του δείγματος φύλλου (W, g):

$$C = (20,2 \times A645 + 8,02 \times A663) \times V \times 10^{-3} \times W^{-1} \times a^{-1}$$

Η σχέση αυτή, που αφορά ακετονικά διαλύματα (80% ή έστω 95%, με κάποιο περιθώριο σφάλματος) δίνει την συγκέντρωση ή περιεκτικότητα του ακετονικού εκχυλίσματος σε χλωροφύλλη και στη συνέχεια με αναγωγή στο ζυγισμένο και εμβαδομετρημένο δείγμα/τμήμα του φύλλου, υπολογίζεται και η περιεκτικότητα του φύλλου σε χλωροφύλλη, είτε κατά μάζα (mg/g) είτε κατά επιφάνεια (mg/cm²).

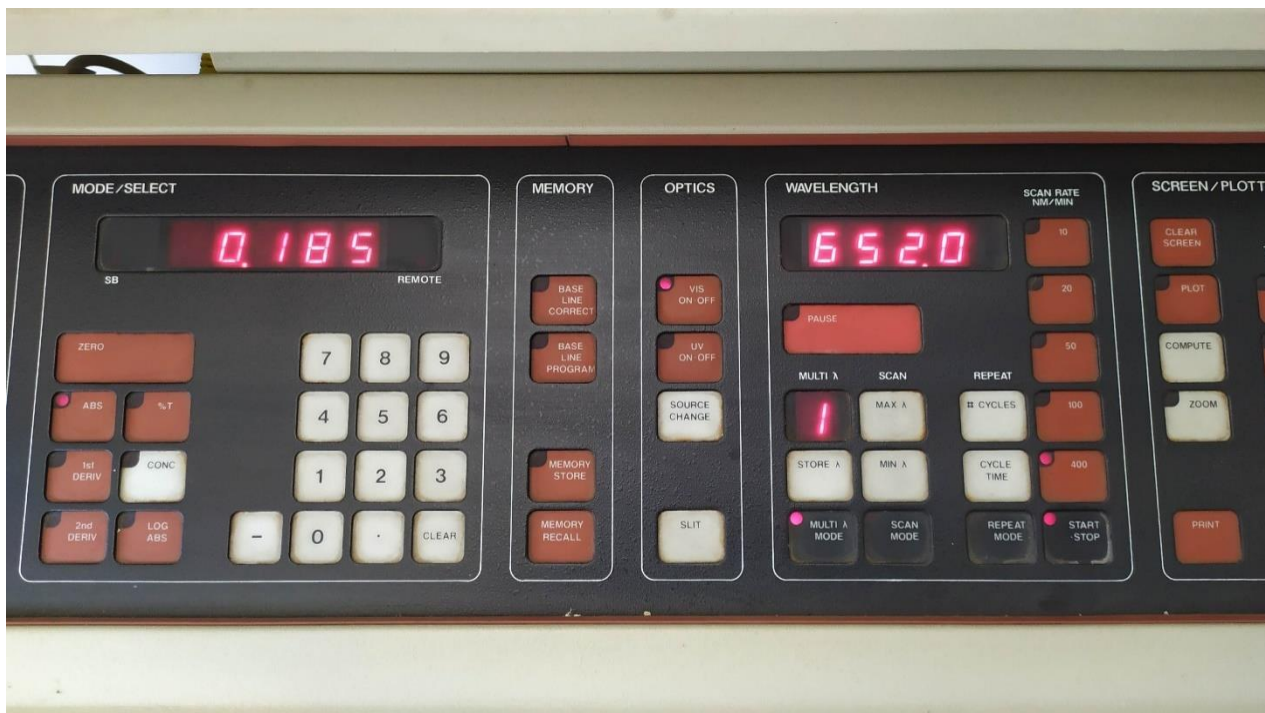
Η κυψελίδα αναφοράς γεμίζεται με καθαρό διάλυμα 80% ενώ η κυψελίδα δείγματος με το εκάστοτε εκχύλισμα. Παρακάτω στις φωτογραφίες φαίνεται η οργανολογία που χρησιμοποιήθηκε, ενδεικτικό πολλαπλό φάσμα αυξανόμενων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης καθώς και οι χαλαζιακές πωματιζόμενες κυψελίδες [70].



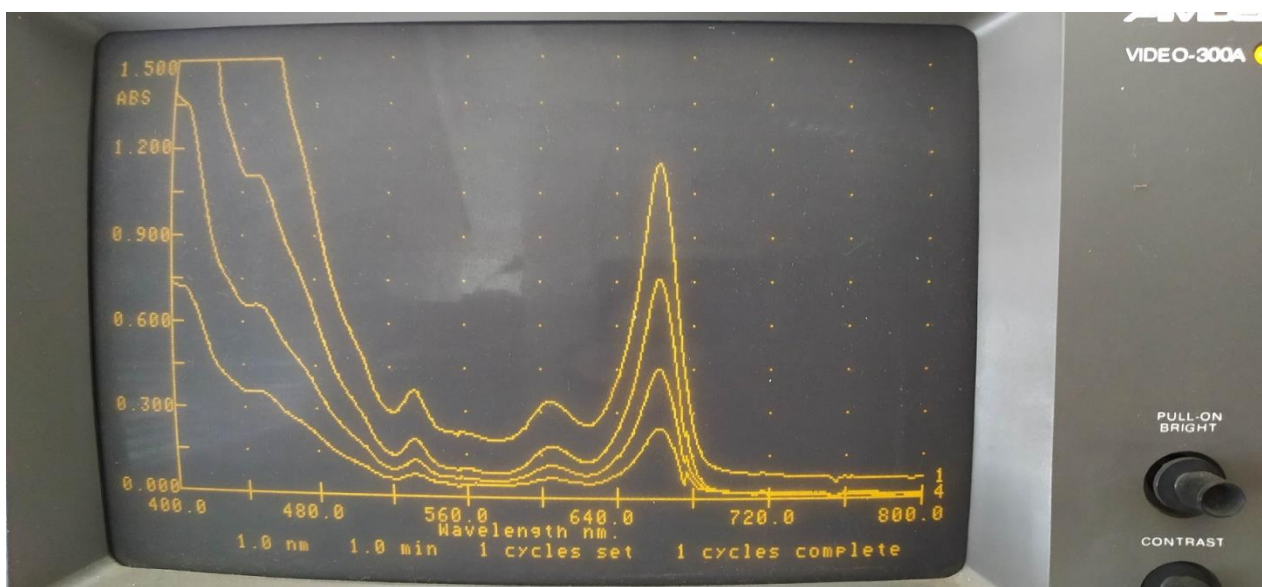
Εικόνα 5.9: Το φασματόφωτομετρο ορατού υπεριώδους με την οθόνη του.



Εικόνα 5.10: Κυψελίδες από χαλαζία για λήψη φασμάτων UV-Vis. Αριστερά στο άνοιγμα του οργάνου φαίνεται ο χώρος τοποθέτησης των κυψελίδων δείγματος και αναφοράς, για μέτρηση με τη διπλή δέσμη της λυχνίας του φασματοφωτομέτρου

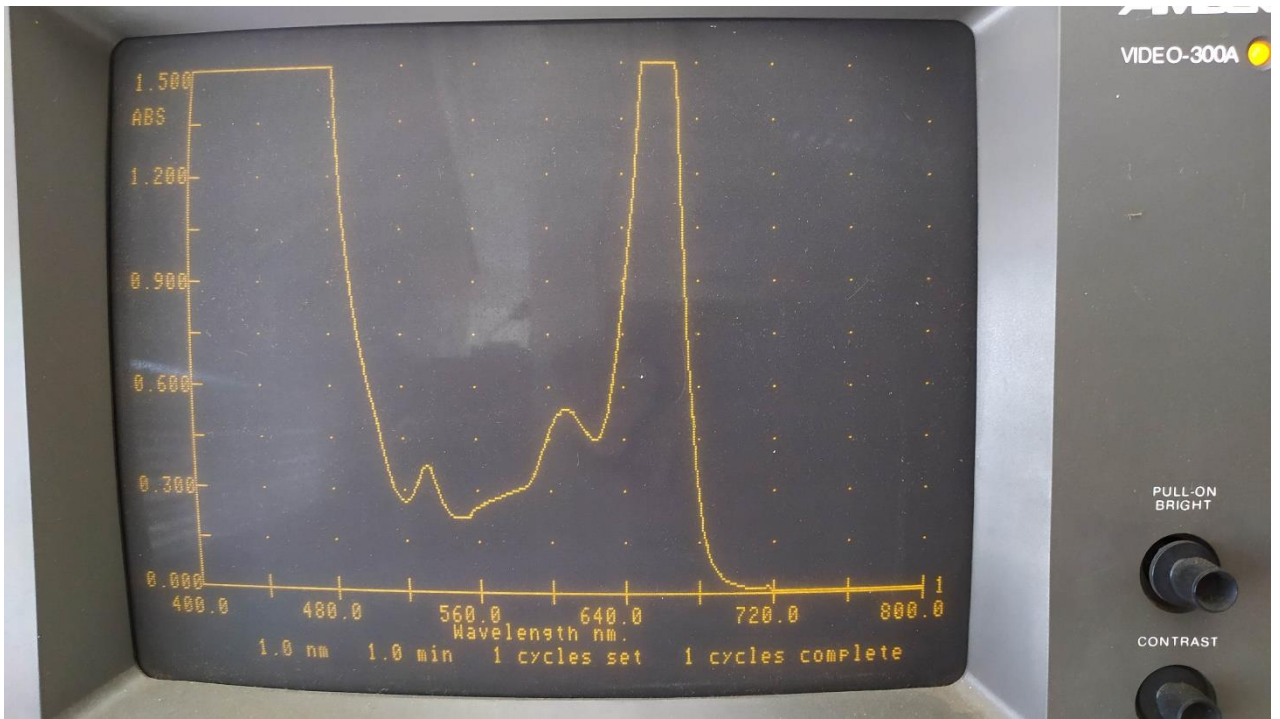


Εικόνα 5.11: Πρόσοψη του φασματοφωτομέτρου ορατού υπεριώδους, με ενδεικτικό μήκος κύματος 652nm και αριστερά απορρόφηση 0,185

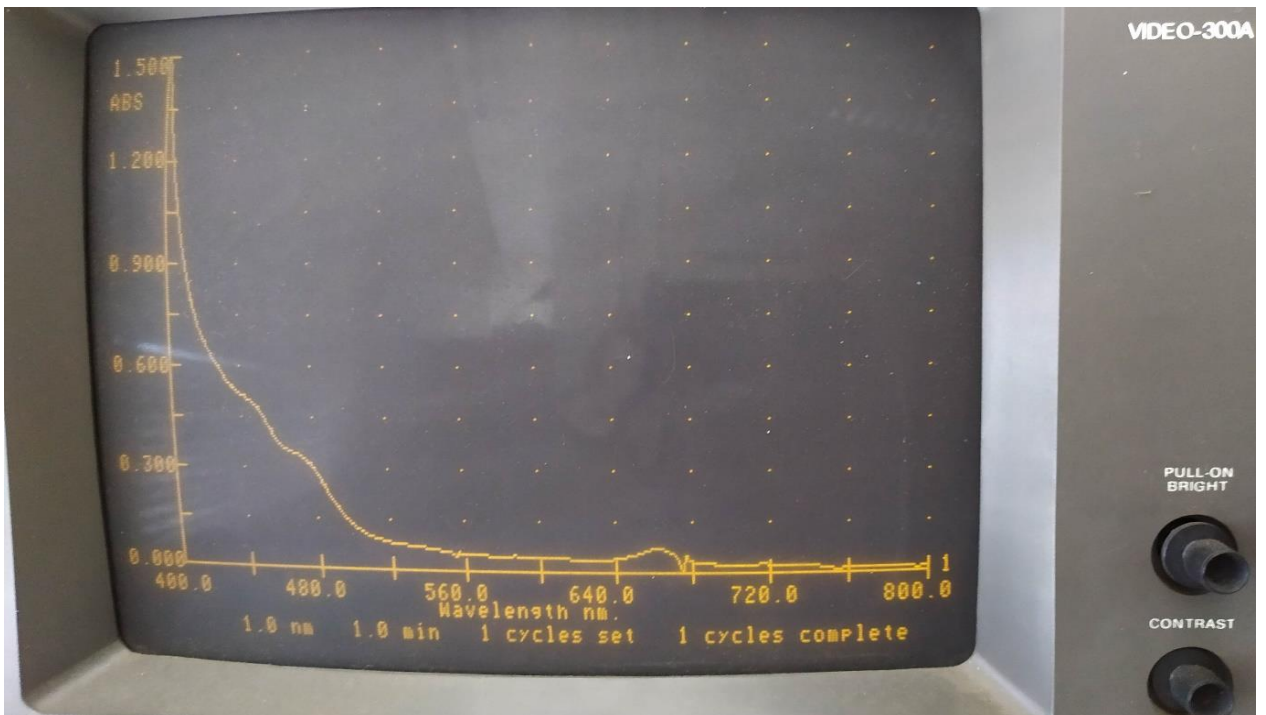


Εικόνα 5.12: Πολλαπλά φάσματα UV-Vis, από διαλύματα αυξανόμενης συγκέντρωσης χλωροφύλλης

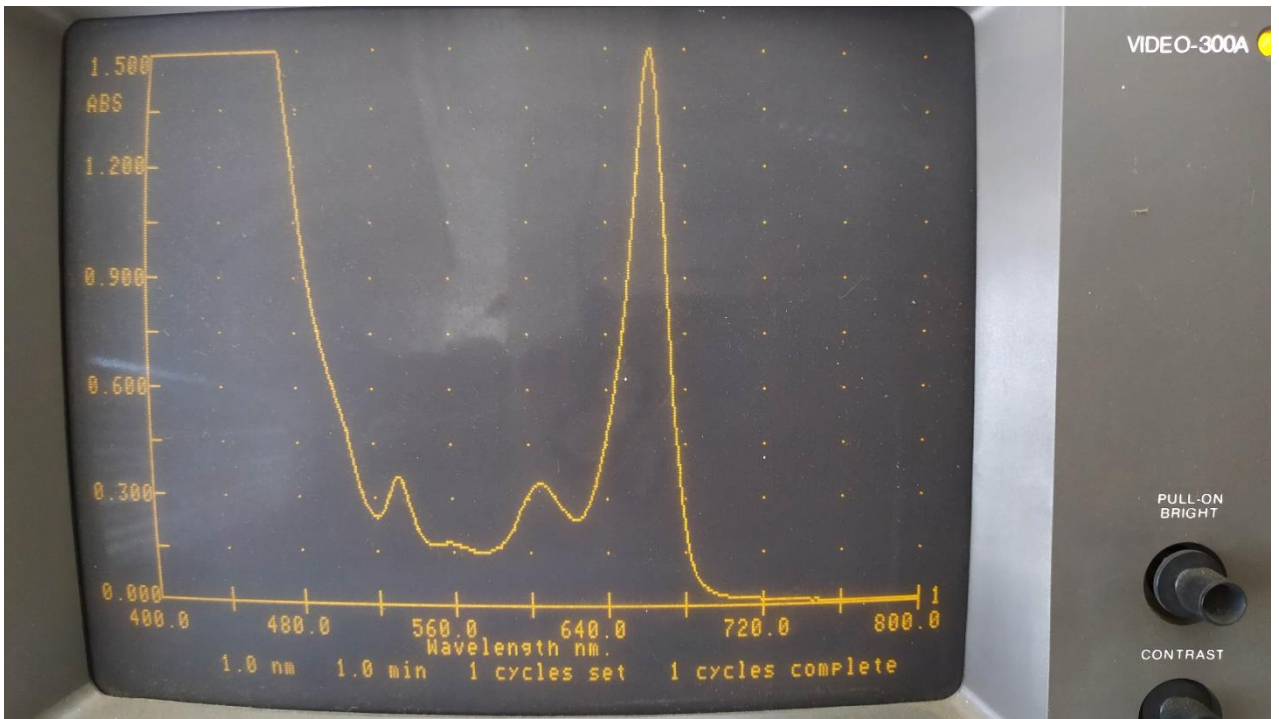
Ακολουθούν ενδεικτικά τα φάσματα στην ορατή περιοχή, των ακετονικών εκχυλισμάτων, όπως απεικονίζονται στο monitor του φασματοφωτομέτρου. Κάποια από τα φάσματα ελήφθησαν από το αρχικό εκχύλισμα, ενώ κάποια λαμβάνονταν μετά από κατάλληλη αραιώσή του εκχυλίσματος.



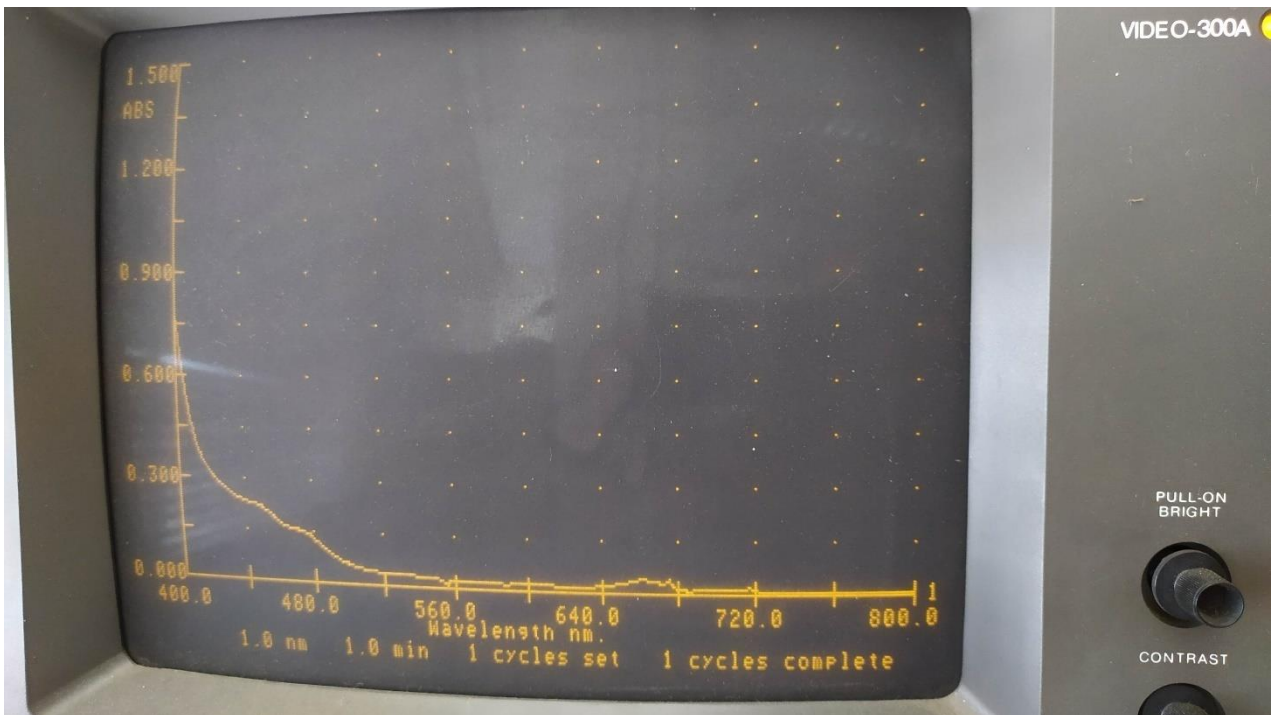
Εικόνα 5.13: Φάσμα δείγματος 1



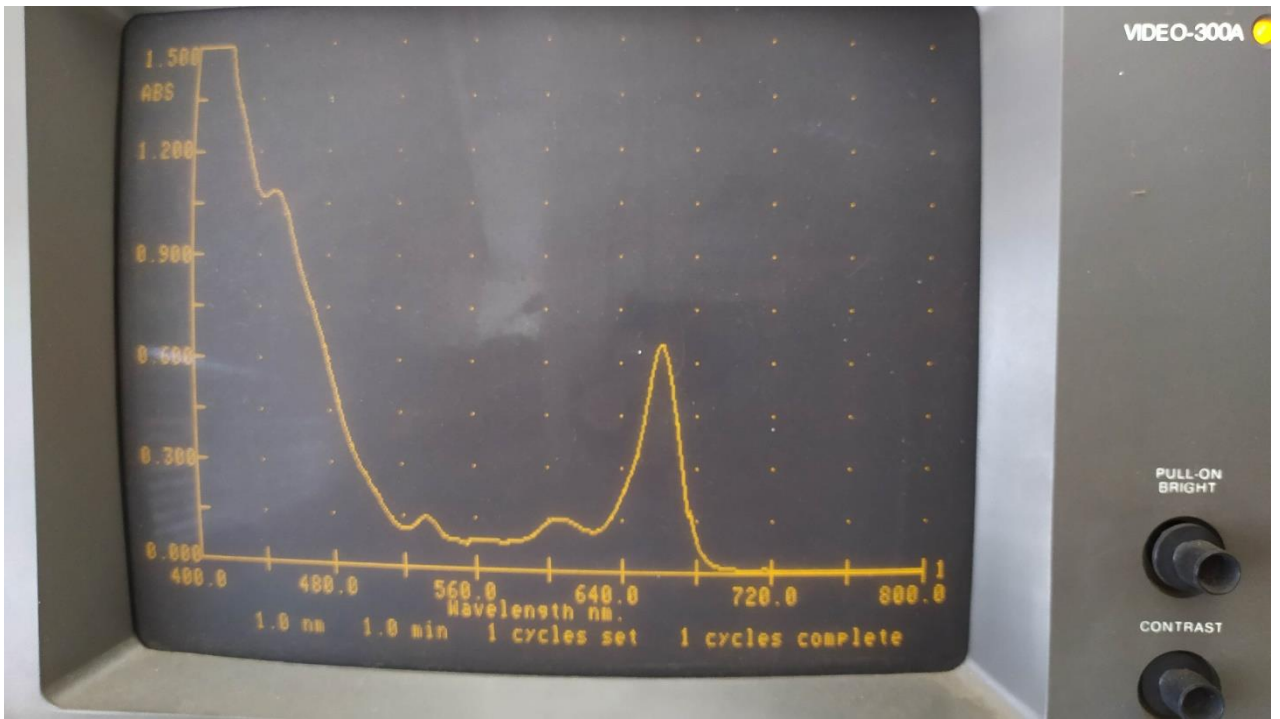
Εικόνα 5.14: Φάσμα δείγματος 2



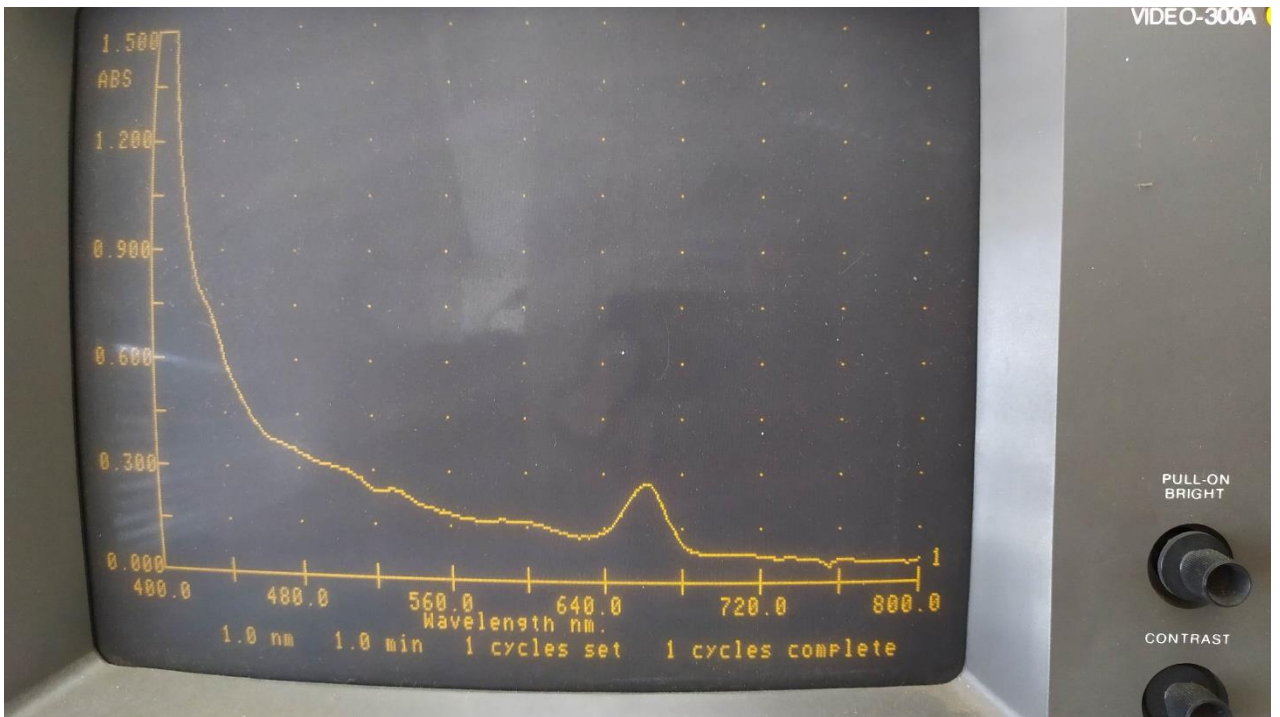
Εικόνα 5.15: Φάσμα δείγματος 3



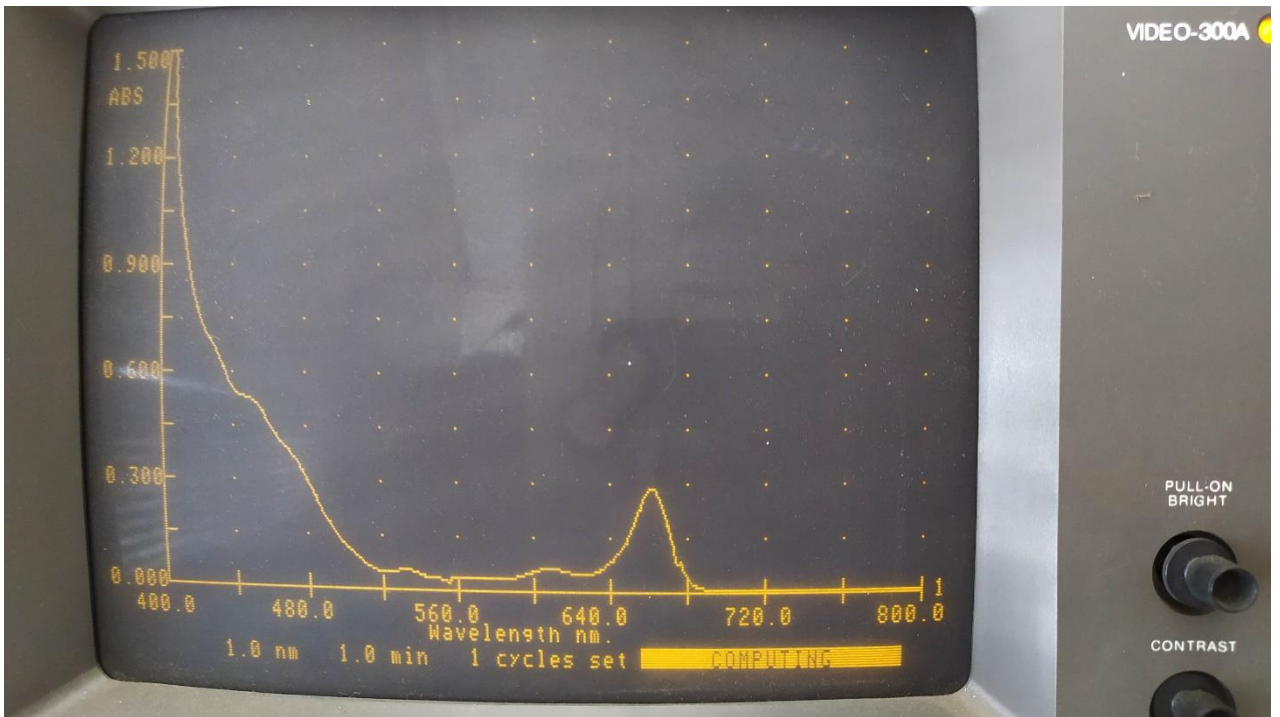
Εικόνα 5.16: Φάσμα δείγματος 4



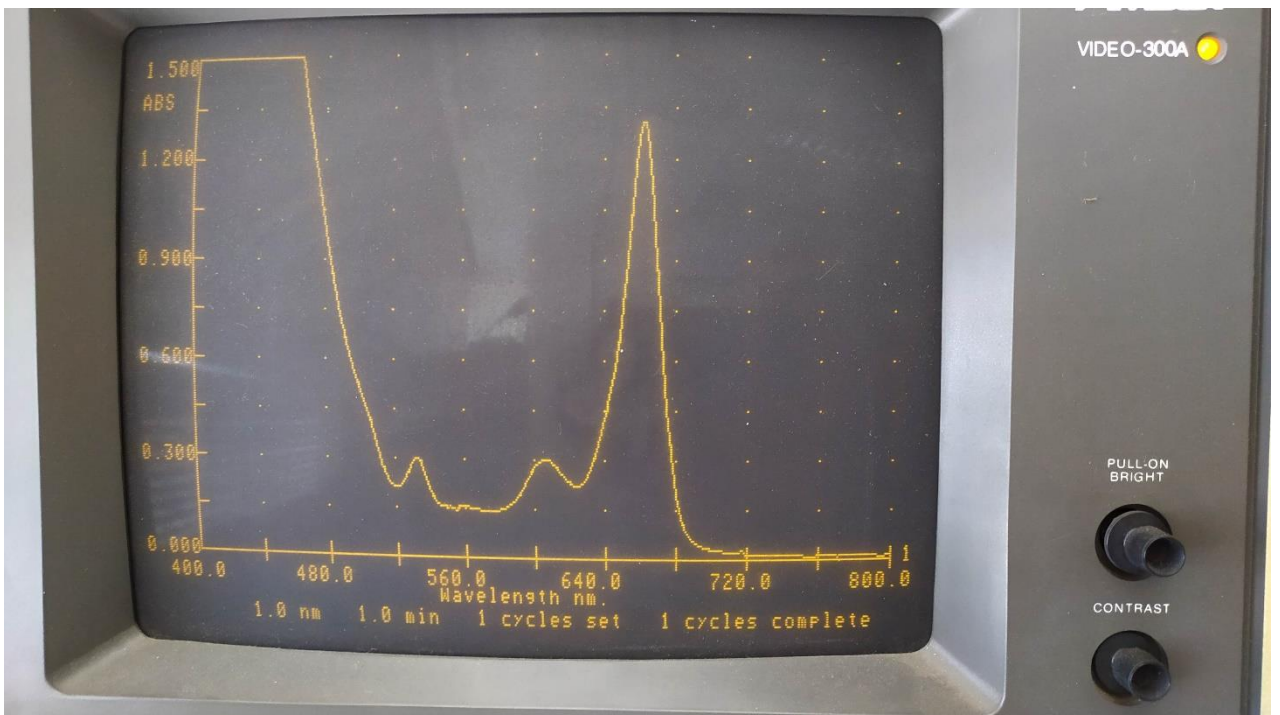
Εικόνα 5.17:Φάσμα δείγματος 5



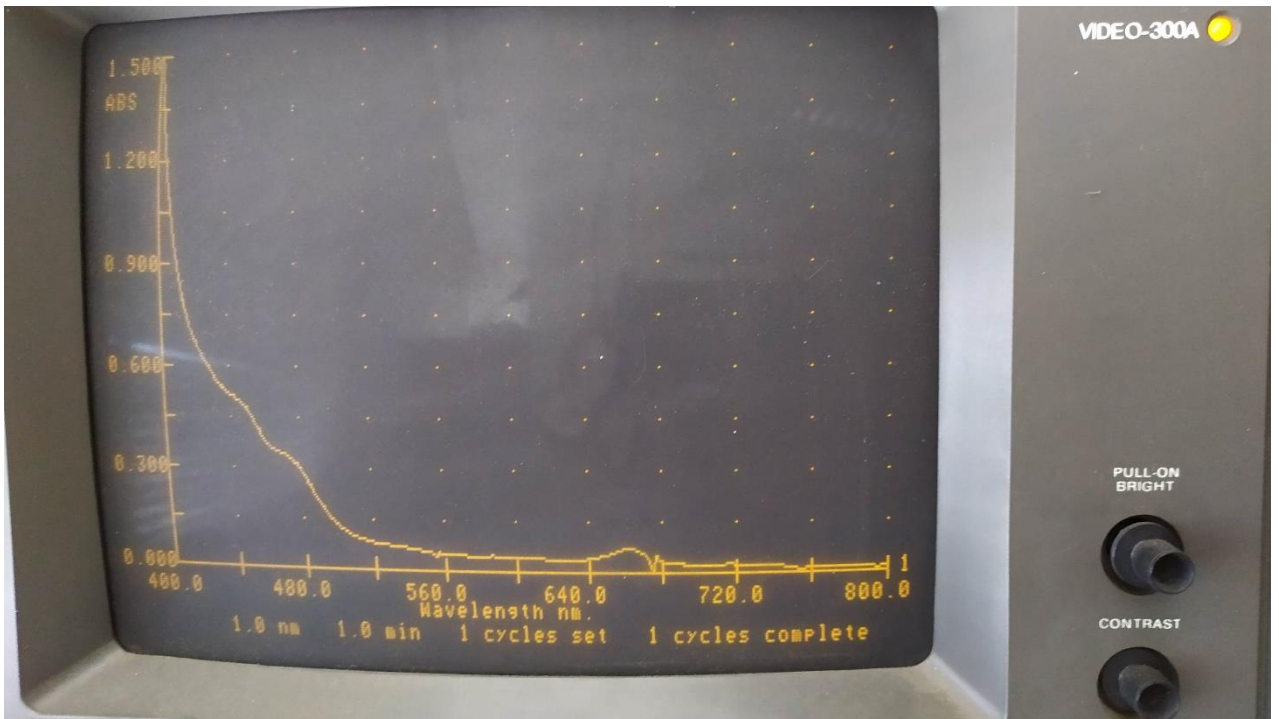
Εικόνα 5.18:Φάσμα δείγματος 6



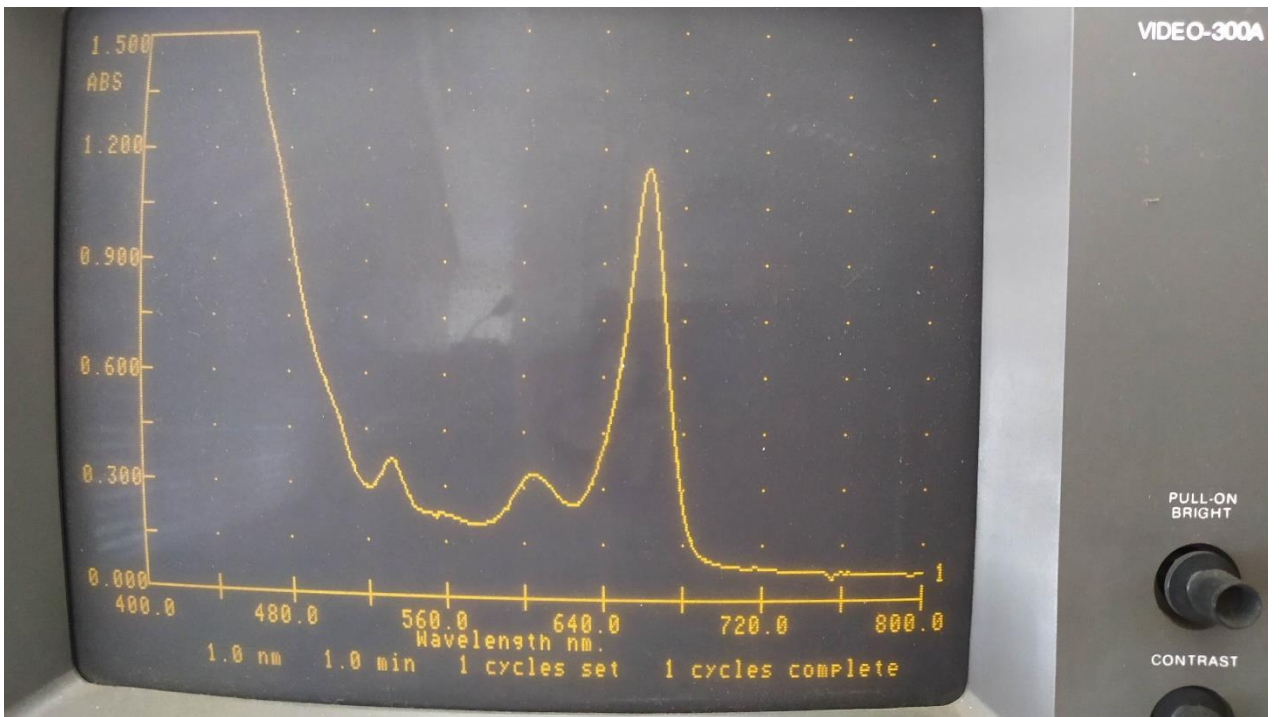
Εικόνα 5.19:Φάσμα δείγματος 7 (αραίωση 1:2)



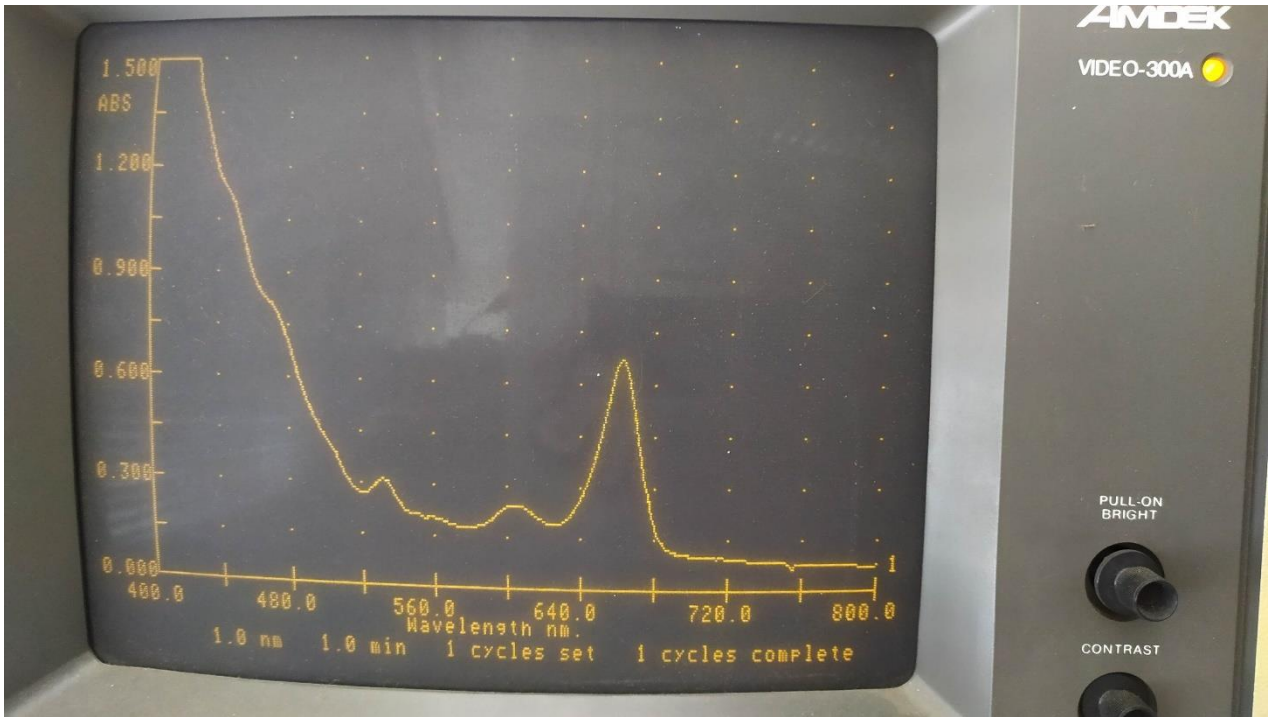
Εικόνα 5.20:Φάσμα δείγματος 8



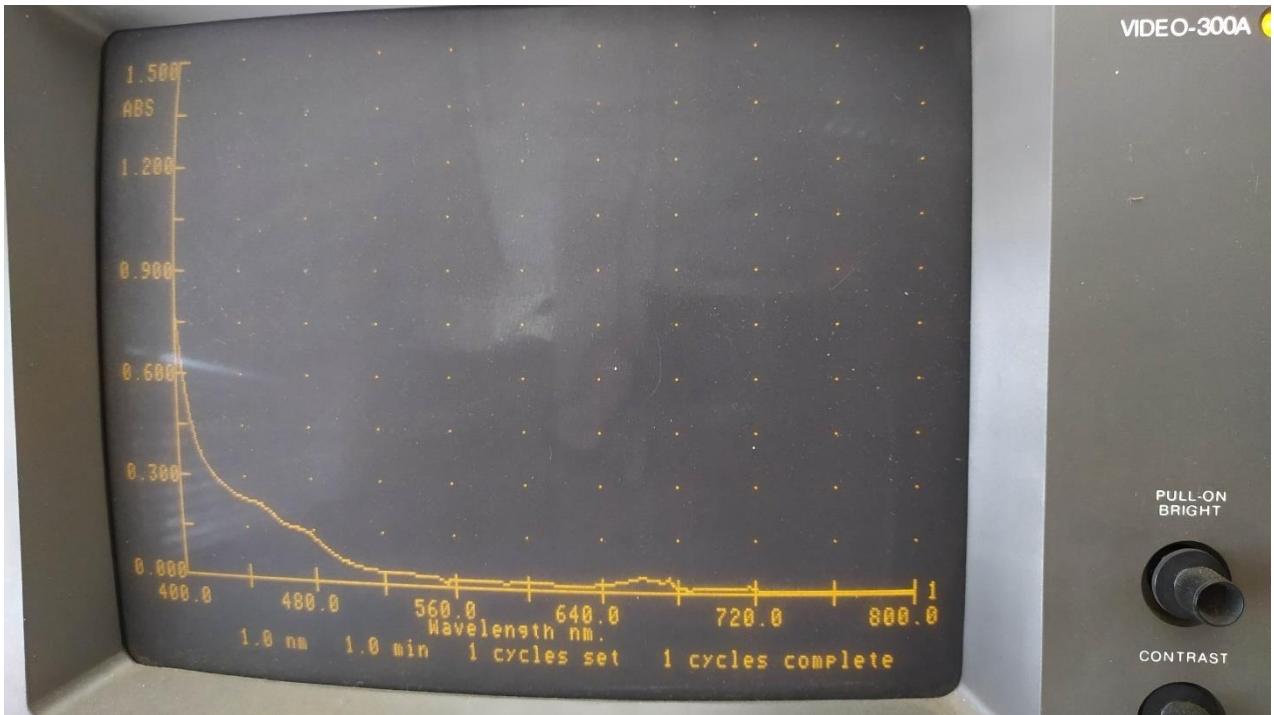
Εικόνα 5.21: Φάσμα δείγματος 9



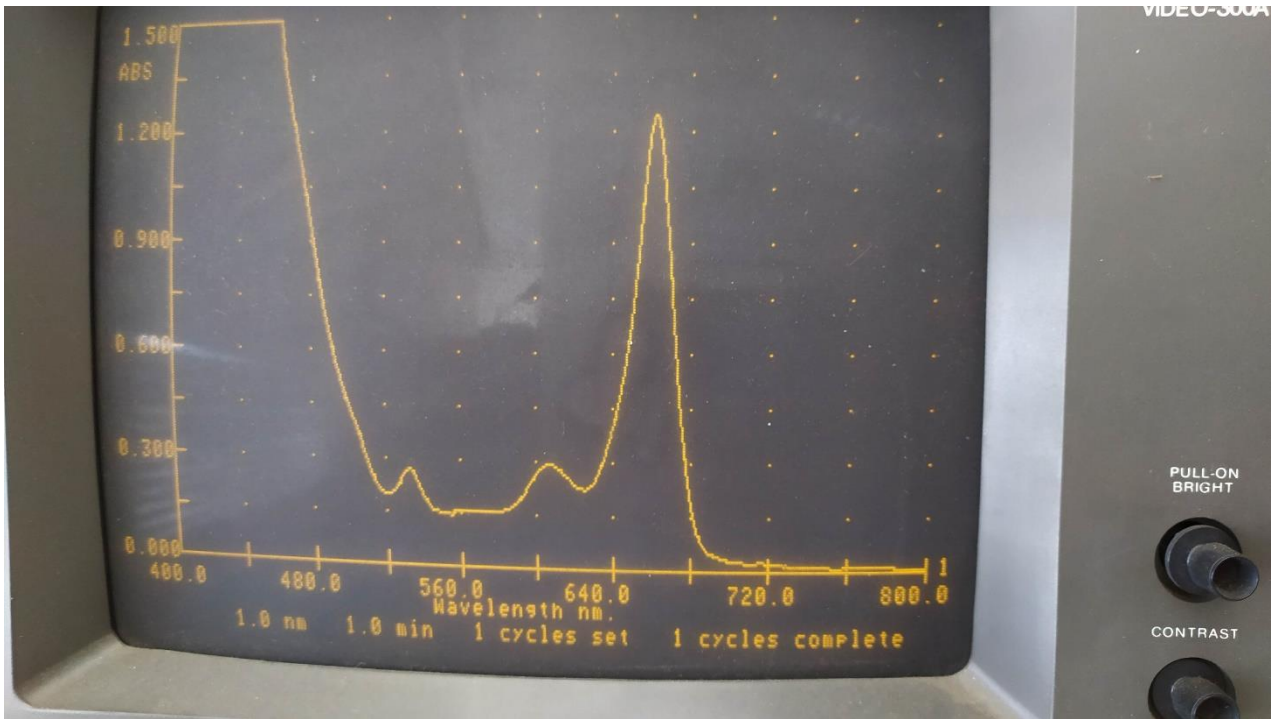
Εικόνα 5.22: Φάσμα δείγματος 10



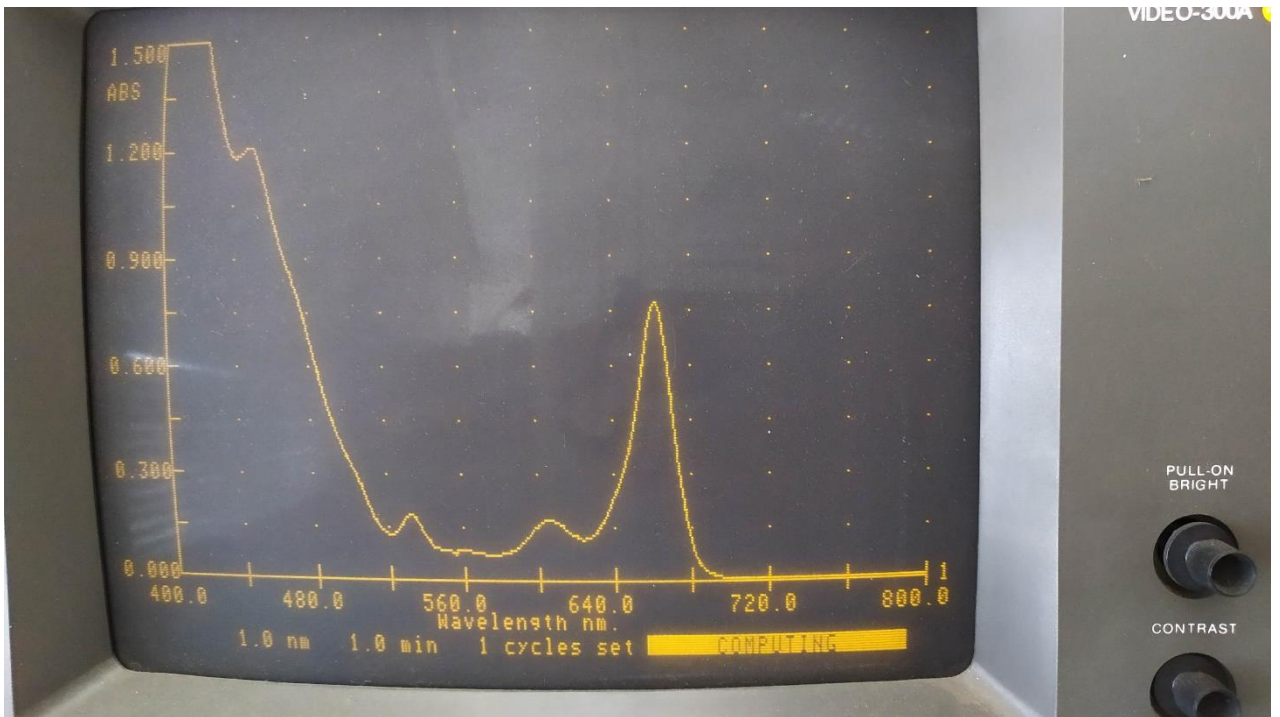
Εικόνα 5.23: Φάσμα δείγματος 11



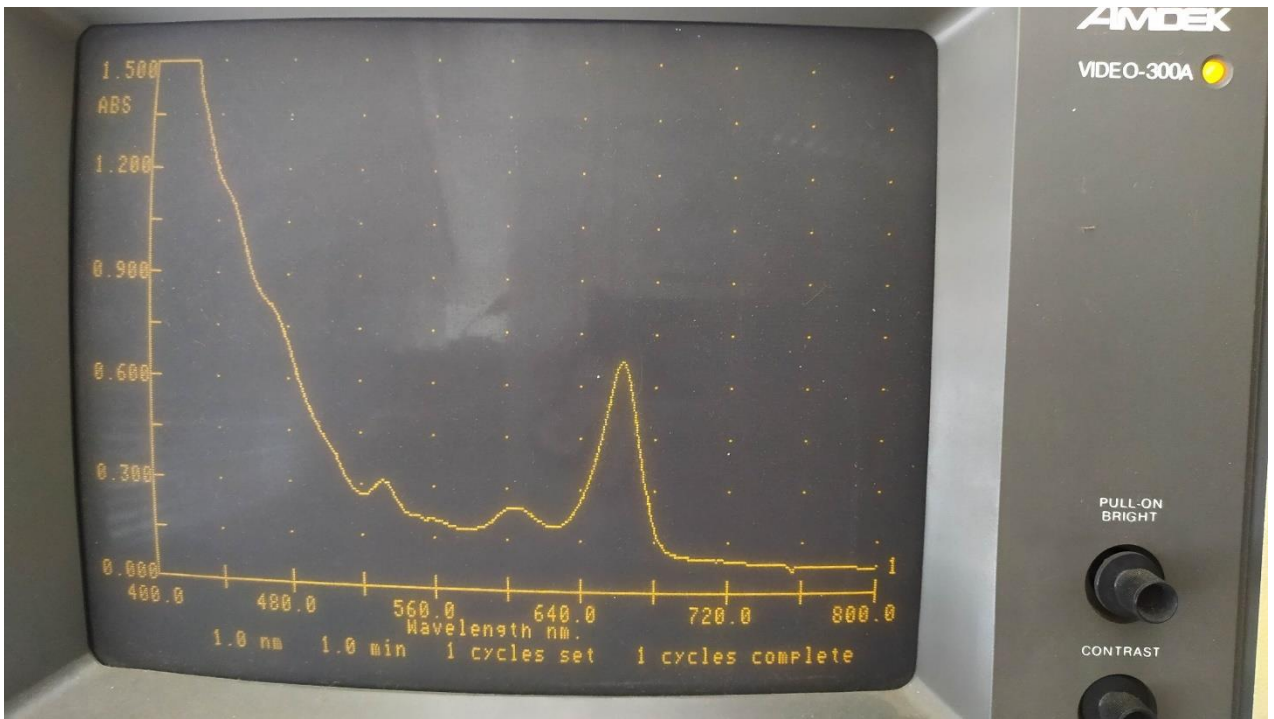
Εικόνα 5.24: Φάσμα δείγματος 12



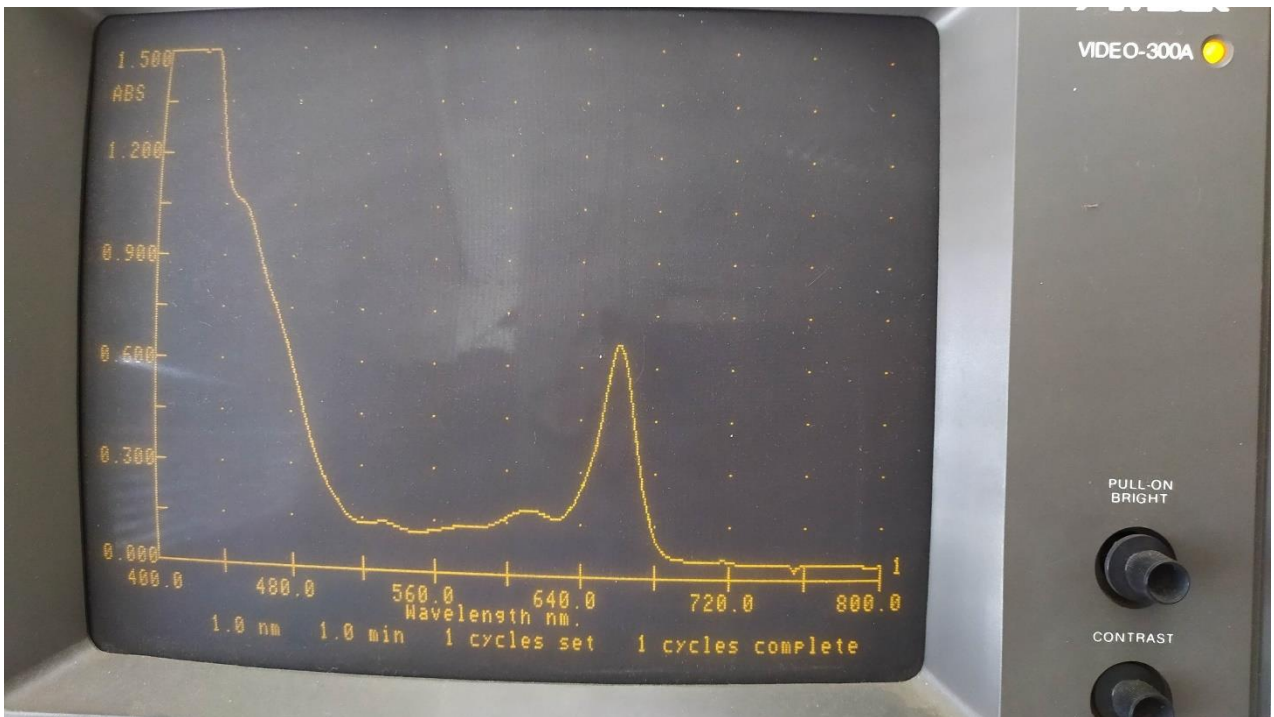
Εικόνα 5.25: Φάσμα δείγματος 13



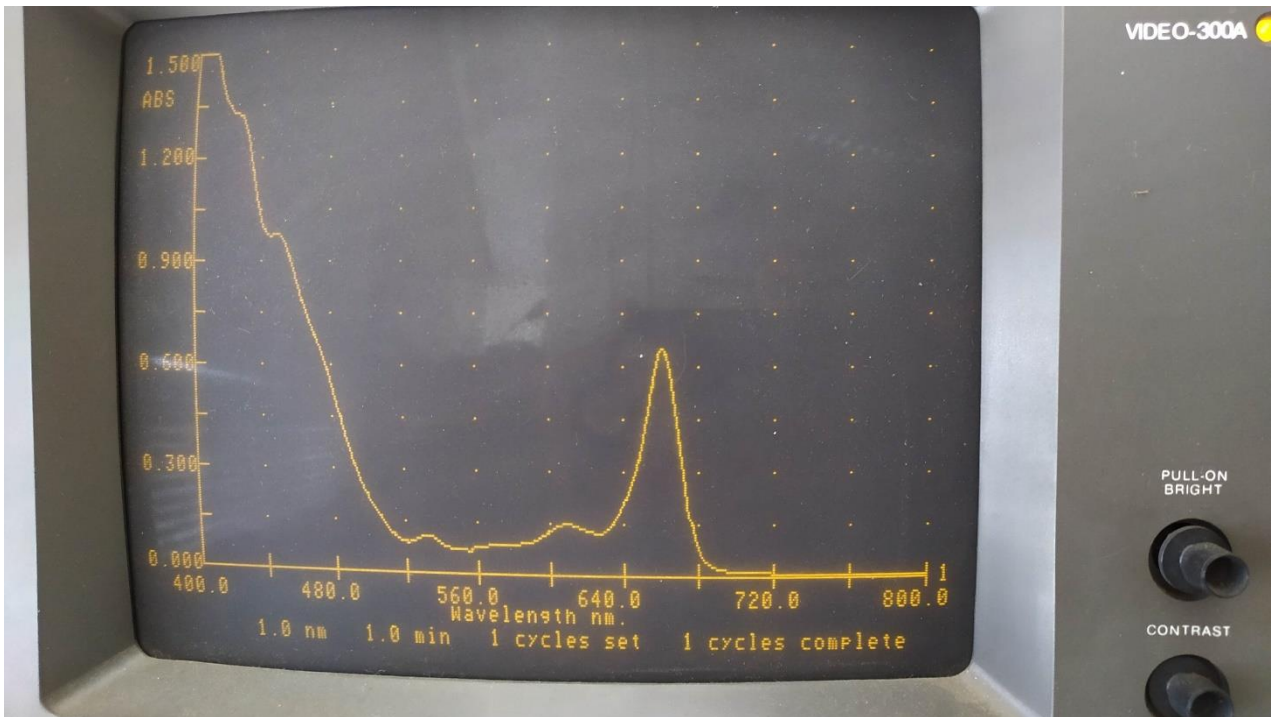
Εικόνα 5.26: Φάσμα δείγματος 14



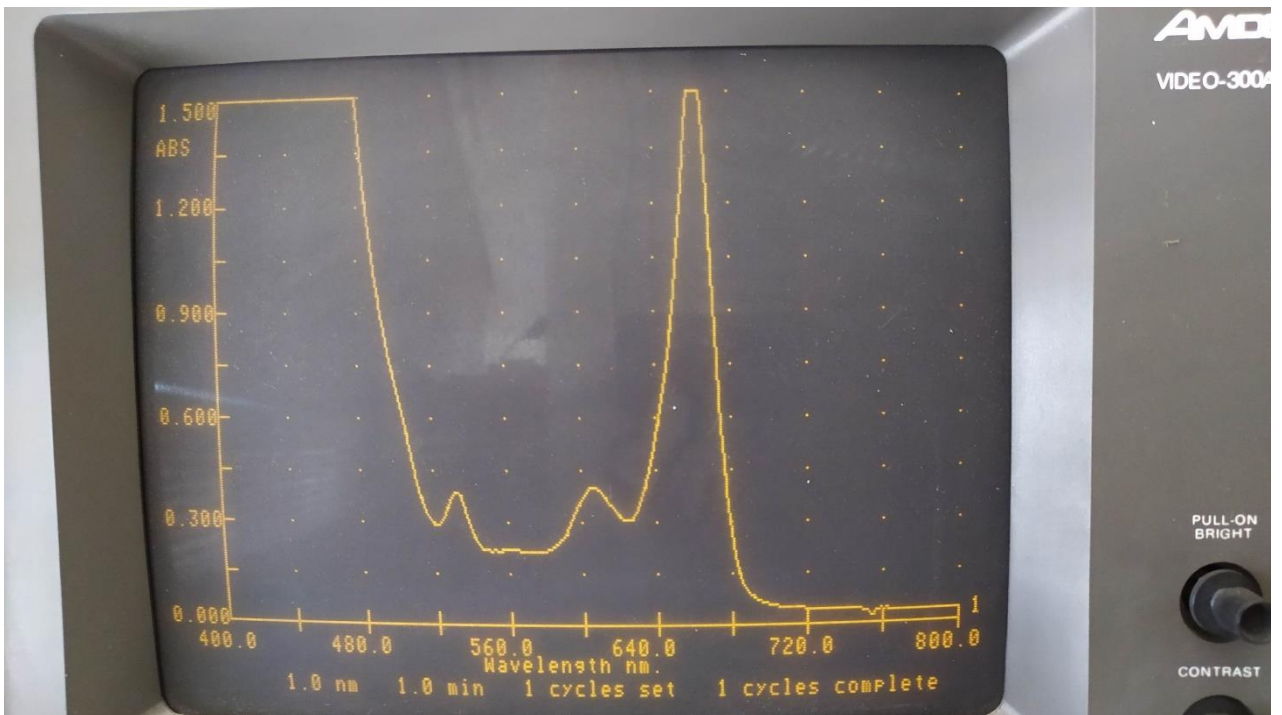
Εικόνα 5.27: Φάσμα δείγματος 15 (αραίωση 1:3)



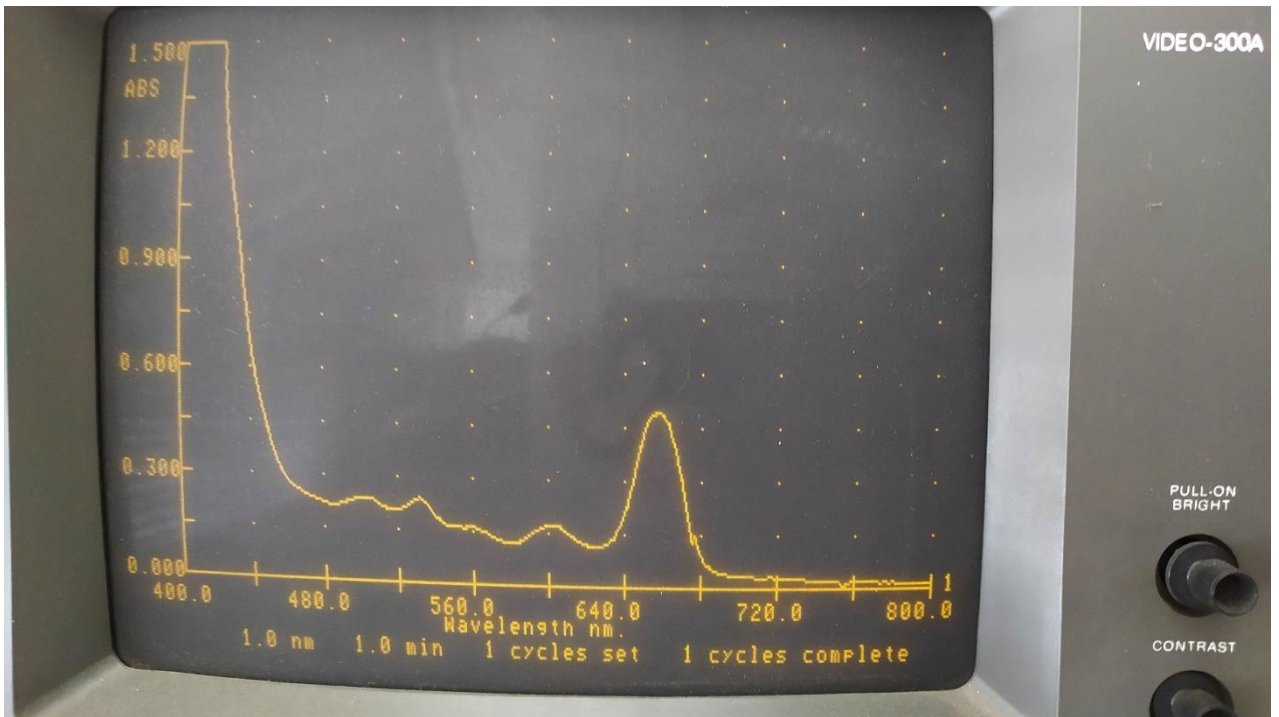
Εικόνα 5.28: Φάσμα δείγματος 16 (αραίωση 1:3)



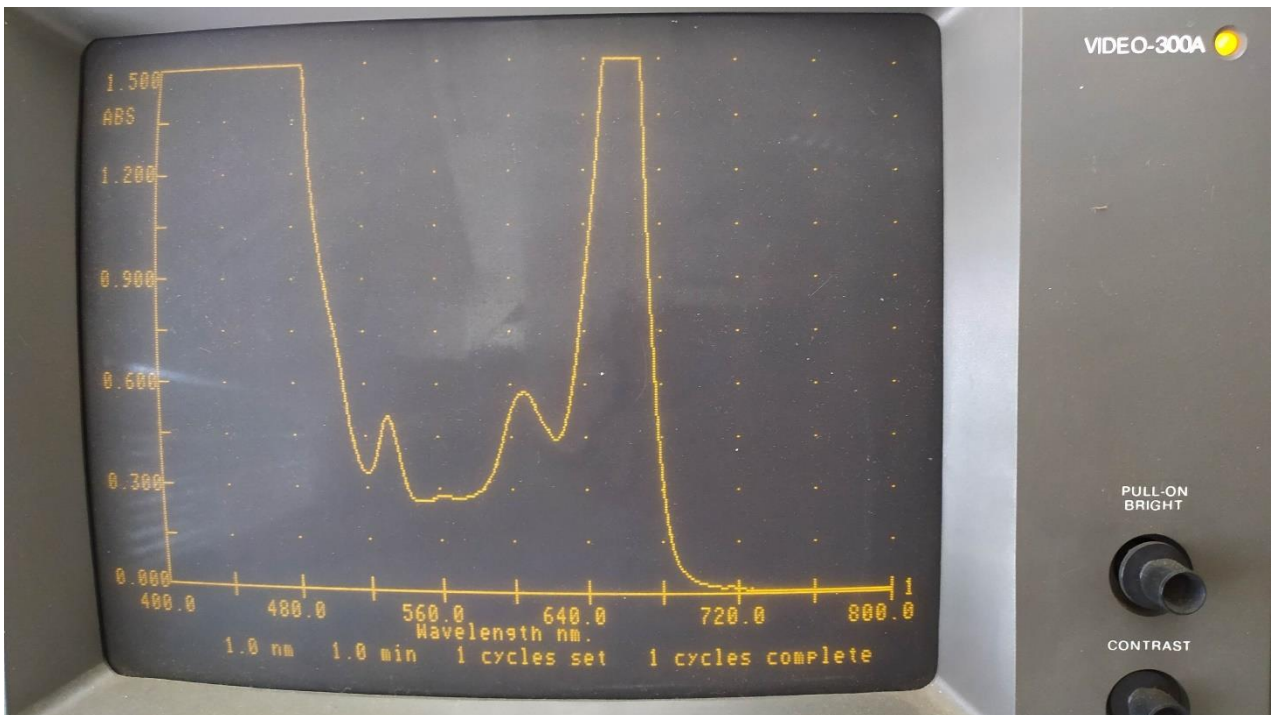
Εικόνα 5.29:Φάσμα δείγματος 17 (αραίωση 1:3)



Εικόνα 5.30:Φάσμα δείγματος 18



Εικόνα 5.31: Φάσμα δείγματος 19



Εικόνα 5.32: Φάσμα δείγματος 20

5.5 Αποτελέσματα εφαρμογής του αισθητήρα σε φύλλα αμπέλου και βαθμονόμηση φορητής συσκευής μέτρησης χλωροφύλλης

5.5.1 Αναγκαιότητα για τη βαθμονόμηση

Η αυτόματη και φορητή συσκευή μέτρησης χλωροφύλλης (τύπου ηλεκτρονικού αισθητήρα με χρήση πηγών LED και κατάλληλου φωτομετρικού ανιχνευτή, παρέχει ενδείξεις για την περιεκτικότητα της χλωροφύλλης στα φύλλα, που αντιστοιχούν στο λόγο των σημάτων των δύο, υπέρυθρου προς κόκκινου

$$\left(\frac{\text{Τστα } 940\text{nm } \%}{\text{Τστα } 660\text{nm } \%} \right)$$

Η βαθμονόμηση δοκιμάστηκε σε δύο τύπους φύλλων, δηλαδή το φύλλο με έντονο πράσινο χρώμα και το φύλλο με έντονο κίτρινο χρώμα.



Προκειμένου ο αισθητήρας να μπορεί να παρέχει εναλλακτικά και αποτελέσματα της κατά μάζα και κατά εμβαδό συγκέντρωσης της χλωροφύλλης, εφαρμόστηκε κατάλληλη διαδικασία βαθμονόμησης (calibration). Συγκεκριμένα η συγκέντρωση σε χλωροφύλλη μιας σειράς από 20 δείγματα φύλλων, με κυμαινόμενη περιεκτικότητα χλωροφύλλης μετρήθηκε με τυπική χημική ανάλυση, εφαρμόζοντας φασματοφωτομετρία Ορατού Υπεριώδους (UV-Visible Spectrophotometry), μετά από εκχύλιση της χλωροφύλλης σε ακετονικό διάλυμα 80%, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιεγράφηκε λεπτομερώς παραπάνω.

Οι ενδείξεις που ελήφθησαν από το μετρητή (λόγος των δύο σημάτων) για τα 20 δείγματα φύλλων, καθώς και η μέση τιμή τους, δίνονται παρακάτω στον Πίνακα 5.1. Τα αποτελέσματα δίνονται κατά αύξουσα σειρά της μέσης τιμής ένδειξης, που ελήφθη με τον αισθητήρα.

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις αισθητήρα για τα 20 δείγματα φύλλων αμπέλου.

Δείγμα Φύλλου	Επαναληπτικές Μετρήσεις			Μέση Τιμή
	1η	2η	3η	Ενδείξεων
12	5,17	5,20	5,22	5,20
9	5,81	5,83	5,84	5,83
4	5,90	5,90	5,90	5,90
2	6,71	6,73	6,75	6,73
6	7,36	7,29	6,76	7,14
7	8,33	8,42	8,45	8,40
19	15,95	16,53	16,46	16,31
5	19,14	19,97	20,28	19,80
11	20,85	20,98	21,10	20,98
14	23,05	22,91	22,09	22,68
10	28,40	28,54	28,27	28,40
13	31,38	31,32	31,07	31,26
15	32,05	32,39	32,57	32,34
3	37,50	37,38	36,94	37,27
8	36,57	39,19	36,62	37,46
18	39,43	39,26	38,07	38,92
1	38,10	39,55	39,32	38,99
17	46,67	46,89	47,47	47,01
16	47,63	47,55	47,64	47,61
20	53,32	53,48	54,16	53,65

Αντίστοιχα οι μετρήσεις μοριακής απορρόφησης που ελήφθησαν από το φασματοφωτόμετρο ορατού-υπεριώδους, σε μήκη κύματος 645 και 663 nm δίνονται παρακάτω στον Πίνακα 5.2. Λόγω του εύρους περιοχής καλής λειτουργίας του φασματοφωτομέτρου, όταν οι απορροφήσεις ήταν μεγαλύτερες από 0,80, τα διαλύματα αραιωνόταν και μετρούνταν εντός της περιοχής. Στη συνέχεια υπολογιζόταν οι τελικές τιμές του πίνακα.

Πίνακας 5.2: Μετρήσεις φασματοφωτομέτρου για τα 20 δείγματα φύλλων αμπέλου.

Δείγμα Φύλλου	Μάζα φύλλου (g) εμβαδού 4 cm ²	Απόρρόφηση 645nm AbsorbanceUnits, A ₆₄₅	Απόρρόφηση 663nm AbsorbanceUnits, A ₆₆₃
12	0,101	0,024	0,038
9	0,079	0,030	0,053
4	0,088	0,033	0,060
2	0,076	0,035	0,058
6	0,082	0,080	0,142
7	0,170	0,376	0,592

19	0,100	0,298	0,547
5	0,073	0,230	0,545
11	0,096	0,355	0,659
14	0,071	0,469	0,845
10	0,087	0,566	1,020
13	0,062	0,549	1,280
15	0,074	0,730	1,450
3	0,071	0,735	1,452
8	0,080	0,825	1,440
18	0,069	0,705	1,560
1	0,074	0,750	1,538
17	0,065	1,030	1,870
16	0,068	1,220	1,938
20	0,065	1,320	2,320

Οι τελικές τιμές χλωροφύλλης στη συνέχεια υπολογίστηκαν με χρήση της εξίσωσης του Arnon-McKinney, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Υπολογισμός συγκέντρωσης ολικής χλωροφύλλης ανά μάζα και ανά επιφάνεια.

Δείγμα	Arnonmodifiedequat	mg/g	mg/cm ²
Φύλλου	20,2*A645+8,02*A663	φύλλου	φύλλου
		C=20,2*A645+8,02*A663...	
12	0,790	0,078	0,002
9	1,031	0,131	0,003
4	1,148	0,130	0,003
2	1,172	0,154	0,003
6	2,755	0,336	0,007
7	12,343	0,726	0,031
19	10,407	1,041	0,026
5	9,017	1,235	0,023
11	12,456	1,298	0,031
14	16,251	2,289	0,041
10	19,614	2,254	0,049
13	21,355	3,444	0,053
15	26,375	3,564	0,066
3	26,492	3,731	0,066
8	28,214	3,527	0,071
18	26,752	3,877	0,067
1	27,485	3,714	0,069

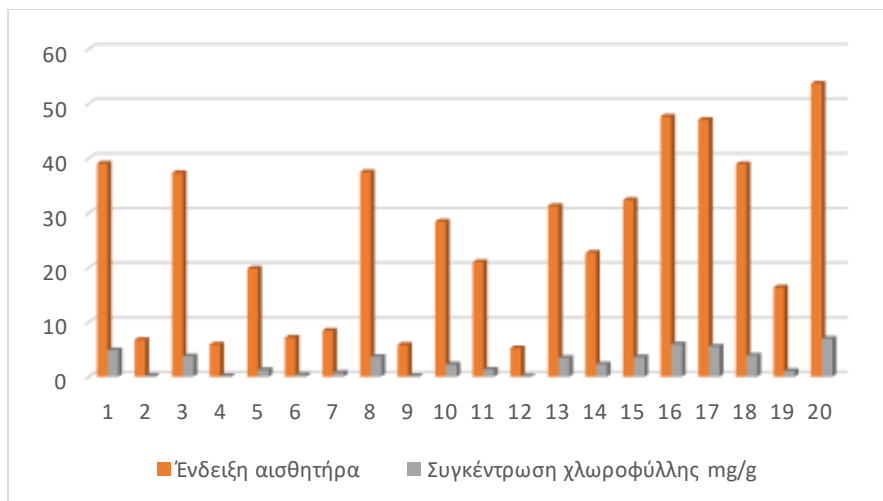
17	35,803	5,508	0,090
16	40,187	5,910	0,100
20	45,270	6,965	0,113

5.5.2 Μαθηματικό μοντέλο για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα

Στο Πίνακα 5.4 καθώς και στο διάγραμμα του Σχήματος 1 που ακολουθεί δίνονται συγκριτικά οι ενδείξεις του αισθητήρα και οι μετρήσεις του φασματοφωτομέτρου, που περιγράφονται στους παραπάνω πίνακες.

Πίνακας 5.4: Συγκριτικά αποτελέσματα στα 20 δείγματα φύλλων από τον αισθητήρα και από το φασματοφωτόμετρο.

Δείγμα	Ένδειξη αισθητήρα	Συγκέντρωση χλωροφύλλης φασματοφωτομετρικά mg/g
1	38,99	4,870
2	6,73	0,154
3	37,27	3,731
4	5,90	0,130
5	19,80	1,235
6	7,14	0,336
7	8,40	0,726
8	37,46	3,637
9	5,83	0,131
10	28,40	2,254
11	20,98	1,298
12	5,20	0,078
13	31,26	3,444
14	22,68	2,289
15	32,34	3,564
16	47,61	5,910
17	47,01	5,508
18	38,92	3,877
19	16,31	1,041
20	53,65	6,965

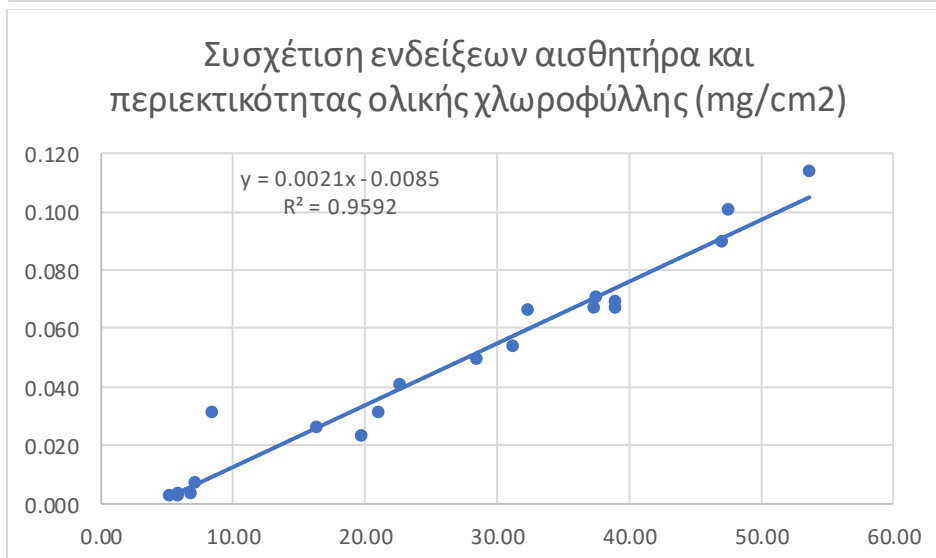
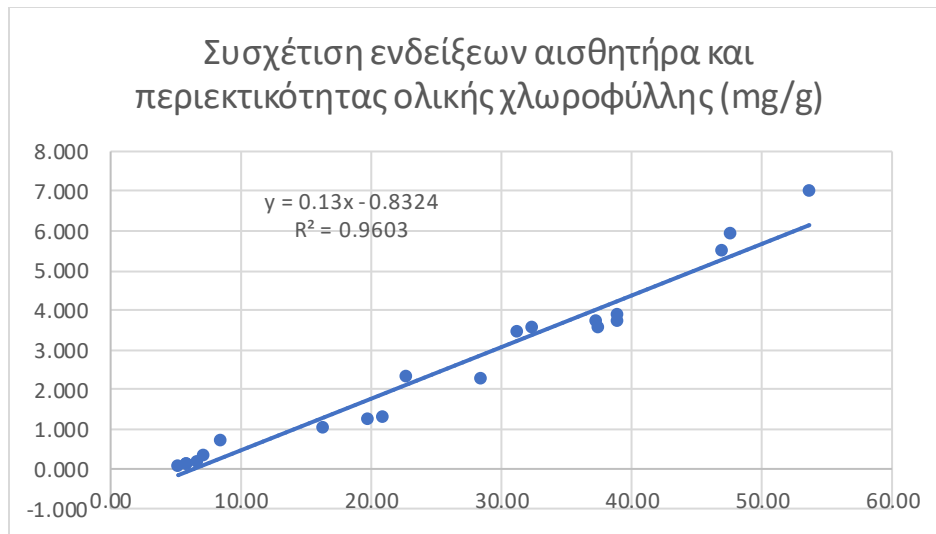


Σχήμα 5.1: Διάγραμμα με συγκριτικά τα πειραματικά αποτελέσματα

Οι τελικές τιμές χλωροφύλλης που ελήφθησαν από το φασματοφωτόμετρο συσχετίστηκαν στη συνέχεια με τις αντίστοιχες ενδείξεις του αισθητήρα για κάθε δείγμα φύλλου, με μεθοδολογία Ανάλυσης παλινδρόμησης, παρόμοια με αντίστοιχη που προτείνεται στη βιβλιογραφία [R.V. Filimon, L. Rotaru, R.M. Filimon, Quantitative Investigation of Leaf Photosynthetic Pigments during Annual Biological Cycle of Vitis vinifera L. Table Grape Cultivars, S. Afr. J. Enol. Vitic., Vol. 37, No. 1, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.21548/37-1-753>]. Εφαρμόζοντας στα αποτελέσματα της Ανάλυσης Συσχέτισης, υπολογίζεται ο Συντελεστής Προσδιορισμού (r^2) που είναι το τετράγωνο του Συντελεστή Συσχέτισης (r). Επίσης εφαρμόζοντας της Ανάλυση Παλινδρόμησης προκύπτει η Εξίσωση της Ευθείας Παλινδρόμησης, που περιγράφει το μαθηματικό μοντέλο μετατροπής των ενδείξεων του αισθητήρα σε τελικές τιμές συγκέντρωσης ολικής χλωροφύλλης.

Τελικά προέκυψαν ένα διάγραμμα συσχέτισης καθώς και η αντίστοιχη Ευθεία Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares Curve) που περιγράφει αυτή τη συσχέτιση καλύτερα. Η εξίσωση της ευθείας αυτής αποτελεί όπως προαναφέρθηκε το μαθηματικό μοντέλο της βαθμονόμησης που εφαρμόστηκε περαιτέρω στη συσκευή. Σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία αναφέρεται η εφαρμογή διαφόρων μοντέλων και αλγορίθμων υπολογισμού που εφαρμόζονται σε κάποια εμπορικά διαθέσιμα όργανα, αλλά είτε αυτά είναι πολυπλοκότερα είτε δεν περιγράφονται λόγω πατέντας.

Δημιουργήθηκαν δύο γραφήματα συσχέτισης (Σχήμα 2) των ενδείξεων του αισθητήρα είτε ως προς απορρόφηση, είτε ως προς μάζα είτε ως προς εμβαδό. Σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις υπολογίστηκε και η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που παρατίθεται στο γράφημα καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού (r^2 ή R^2), που δίνονται μέσα στα γραφήματα.



Σχήμα 5.2 και 5.3: Διαγράμματα συσχέτισης για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα (ενδείξεις του στον άξονα x) ως προς τις περιεκτικότητες χλωροφύλλης που υπολογίζονται φασματοφωτομετρικά (μετρήσεις στον άξονα y). Εντός των διαγραμμάτων δίνονται και οι εξισώσεις των αντίστοιχων καμπυλών παλινδρόμησης (ευθείες ελαχίστων τετραγώνων). Πάνω διάγραμμα: Περιεκτικότητες ως προς μάζα (mg/g). Κάτω διάγραμμα: Περιεκτικότητες ως προς εμβαδό επιφάνειας (mg/cm²)

Κεφάλαιο 6°: Συμπεράσματα

Συμπερασματικά τα επίπεδα ολικής χλωροφύλλης που μετρήθηκαν φασματοφωτομετρικά κυμαίνονταν γενικά μεταξύ 0,1-6 mg/g, και είναι αναμενόμενα για την εποχή και την άμπελο, με κάποιες διακυμάνσεις. Οι αντίστοιχοι δείκτες του αισθητήρα κυμάνθηκαν στην περιοχή από 5-60 περίπου.

Προκύπτει παράλληλα ότι υπάρχει αρκετά ικανοποιητική συσχέτιση των ενδείξεων του αισθητήρα με τις πραγματικές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης (συντελεστής r^2 περίπου 0,96). Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα αυτά που δείχνουν γραμμική συσχέτιση αναφέρονται ειδικά στη συγκεκριμένη ποικιλία φύλλων αμπελιού και στο αντίστοιχο εύρος τιμών, όπου εντάσσονταν τα δείγματα που συλλέχθηκαν. Η γραμμικότητα της συσχέτισης είναι πιθανό να μεταβάλλεται και να υπάρχει καμπύλωση για υψηλότερες περιεκτικότητες χλωροφύλλης και μεγαλύτερες ενδείξεις του αισθητήρα.

Πρακτικά, στον κώδικα του λογισμικού του αισθητήρα όταν εντάσσεται η παραπάνω σχέση της εξίσωσης της ευθείας παλινδρόμησης, μπορεί ο αισθητήρας την ένδειξη του λόγου των σημάτων του (έστω x) να την μετατρέπει σε ένδειξη περιεκτικότητας ολικής χλωροφύλλης (y). Οι αναμενόμενες αποκλίσεις εξαρτώνται από τα υπολειπόμενα σφάλματα της καμπύλης της Ανάλυσης Παλινδρόμησης, που θα πρέπει να υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση εφαρμογής του αισθητήρα σε διαφορετικούς τύπους φύλλων.

Τέλος, εισάγοντας στον αισθητήρα μια παραμετρική τιμή είναι δυνατό να δίνει προειδοποιητική ένδειξη. Για παράδειγμα αν το επίπεδο της χλωροφύλλης όπως μετρείται από τον αισθητήρα είναι κάτω από π.χ. 25, σε συγκεκριμένη εποχή που δεν θα έπρεπε, τότε μπορεί να δείχνει ένδειξη ότι απαιτείται κάποια καλλιεργητική ενέργεια (π.χ. λίπανση, προσθήκη σιδήρου, κλπ) ή πάνω από κάποια τιμή να σημαίνει καταπόνηση αζώτου. Τις τιμές αυτές θα τις ορίζει γεωπόνος σύμφωνα με την εποχή και το πρόγραμμα λίπανσης που εφαρμόζει.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο μετρητής βαθμονομήθηκε για τον συγκεκριμένο είδος φύλλου αμπελιού. Για να μπορεί να μετρήσει και άλλες ποικιλίες φυτών θα πρέπει να επαναληφθεί η παραπάνω πειραματική μεθοδολογία για κάθε είδος φυτού, ώστε να υπάρχουν οι σχετικές βιβλιοθήκες στον μικροεπεξεργαστή ESP32, όπου με την κατάλληλη επιλογή ο χρήστης θα επιλέγει την επιθυμητή ποικιλία φυτού προς μέτρηση.

6.1 Μελλοντική επέκταση έρευνας

Σημεία τα οποία μπορεί να αποτελέσουν το θέμα μελλοντικής επέκτασης της έρευνας, είναι:

- Η μελέτη πολύ μεγαλύτερου αριθμού φύλλων συγκεκριμένης ποικιλίας.
- Η μελέτη φύλλων με πολύ μεγαλύτερες και πολύ μικρότερες περιεκτικότητες χλωροφύλλης, από διάφορες εποχές του έτους.
- Η περαιτέρω βελτιστοποίηση των συνθηκών μέτρησης και της γεωμετρίας του αισθητήρα.

- Οι δυνατές τροποποιήσεις με σκοπό τη διάκριση των τύπων τουλάχιστον των δύο χλωροφυλλών.
- Η επέκταση στη μελέτη πολλών διαφορετικών τύπων φύλλων, (άλλα είδη, πάχη, σαρκώδη και μη, λεία, στιλπνά, κλπ.), όχι μόνο φυτών αλλά και δένδρων.
- Η βελτίωση των αλγορίθμων βαθμονόμησης.
- Η εκτεταμένη μελέτη των χαρακτηριστικών επίδοσης του αισθητήρα, συμπεριλαμβανομένης της επαναληψιμότητας του, της ακρίβειάς του, της ανθεκτικότητας, κλπ.

Βιβλιογραφία

- [1] M.D. Richardson, D.E. Karcher, and L.C. Purcell, “Quantifying Turfgrass Cover Using Digital Image Analysis”, *Crop Science*, vol. 41, pp. 1884 -1888, 2001.
- [2] P. Debaeke, P. Rouet, and E. Justes, “Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: Application to durum wheat”, *J. Plant Nutr.*, vol. 29, pp. 75–92, 2006.
- [3] A. Mcbratney, B. Whelan, T. Ancev, and J. Bouma, “Future Directions of Precision Agriculture”, *Precision Agriculture*, vol. 6, pp. 7-23, 2005. .
- [4] A. Kukutai, "Can Digital Farming Deliver on its Promise?", 2016. [Online]. Available: www.agnewscenter.com.
- [5] R. Dongoski, and A. Selck, “Digital agriculture: Helping to feed a growing world”, *Performance*, vol. 9, no. 1, pp. 1-8, 2017.
- [6] Aranet, “Precision beekeeping with wireless temperature monitoring”, *Aranet*, 2016. [Online]. Available: <https://www.iotone.com/case-study/precision-beekeeping-with-wireless-temperature-monitoring/c918>.
- [7] B. Grisso, “*Precision Farming: A Comprehensive Approach*”, 2009. [Online]. Available: <http://pubs.ext.vt.edu/442/442-500/442-500.ht>
- [8] A.K. Mahlein, “Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping”, *Plant Disease*, vol. 100, doi: 10.1094/PDIS-03-15-0340-FE., 2015.
- [9] D. Herring, "Precision Farming : Feature Articles", *Earth observatory*, 2001. [Online]. Available: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/PrecisionFarming>
- [10] J. Schieffer, and C. Dillon, "The economic and environmental impacts of precision agriculture and interactions with agro-environmental policy", *Precision Agriculture*, vol. 16, pp. 46–61, 2015.
- [11] M. Sophocleous, “*Thick-Film Underground Sensors*” LAP LAMPERT, Academic Publishing, 2016. [Online]. Available: <https://www.morebooks.de/store/us/book/thick-film-underground-sensors/isbn/978-3-659-95270-8>.
- [12] M. Sophocleous, and J. K. Atkinson, “A novel thick-film electrical conductivity sensor suitable for liquid and soil conductivity measurements,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 213, pp. 417–422, 2015.
- [13] L. Ghahramani, K. McArdle, and S. Fatorić, “Minority community resilience and cultural heritage preservation: a case study of the Gullah Geechee community”, *Sustainability*, vol. 12, pp. 2266, 2020.
- [14] R. Bogue, "Sensors key to advances in precision agriculture", *Sensor Review*, vol. 37, no. 1, pp. 1-6, 2017.
- [15] F. Othmane, M. Ferrag, L. Shu, L. Maglaras, X. Wang, “Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies”, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 8, pp. 718 - 752, 2021.
- [16] I. Dumitrache, "A cyber physical systems approach for agricultural enterprise and sustainable agriculture,” In 21st International Conference on Control Systems and Computer

Science, 2017, pp. 477-484.

[17] Α. Χρυσικοπούλου, “Ανάπτυξη επιχειρηματικού μοντέλου για δημιουργία υπηρεσιών διαδικτύου των πραγμάτων σε δίκτυα 5G στην Γεωργία «Ακριβείας» (Precision Agriculture) σε ορεινές περιοχές του νομού Γρεβενών”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, ΠΑΠΕΙ, Αθήνα, 2020.

[18] Ν.Μ. Ξενούλης, “Χαρτογράφηση της αναβλάστησης του φυσικού οικοσυστήματος της περιοχής Πάρνηθας Αττικής με χρήση δορυφορικών παρατηρήσεων και γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων”, Διπλωματική Εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, 2011.

[19] G.A. Heidt, “Carnivore Biology”, *Ecology*, vol. 78, pp. 1607-1607, 1997.

[20] L.K. Kumar, S. Schmidt, and A. Skidmore, “Chapter 5: Imaging spectrometry and vegetation science, In F.D. Van Der Meer, S.M. De Jong, “Imaging Spectrometry 86 Remote Sensing and Digital Image Processing”, vol. 4, Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 62-69.

[21] Α. Παπαλάμπρου, “Μελέτη του φθορισμού της φλουορενόνης κατά την οζονόλυση 9-παραυποκατεστημένων βενζυλιδενοφλουορενιόν σε ομοιογενή και προσανατολισμένα συστήματα”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημείας, Αθήνα, 1985.

[22] P. Evan, M. Adibawa, P. Kestrelia, H. Heriyanto, and B. Tatas, “Low-cost chlorophyll meter (LCCM): portable measuring device for leaf chlorophyll”, *Proceedings of the SPIE*, vol. 10150, id. 101500V 8, 2016.

[23] J. Harbinson, and E. Rosenqvist, “An Introduction to Chlorophyll Fluorescence”, In J.R. Dell, P.M.A. Toivonen (eds.), “*Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology*”. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 1-29

[24] R. Douce, and D.W. Lawlor, “Photosynthesis”, *Annals of Botany*, vol. 87, no. 6, pp. 852–853, 2001.

[25] H. Lynch, “Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications by Hamlyn G. Jones and Robin A. Vaughan”, *The Quarterly Review of Biology*, vol. 87, pp. 165-166, 2012.

[26] K. Nickelsen, “*Explaining Photosynthesis Models of Biochemical Mechanisms, 1840-1960*”. London: Springer, 2015.

[27] R.J. Strasser, A. Srivastava, and M. Tsimilli-Michael, “The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples”, In M. Yunus, U. Pathre, and P. Mohanty (eds), “*Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation, Chapter 25*”. London: Taylor and Francis, pp. 443-480, 2000.

[28] G.H. Krause, “Photoinhibition of photosynthesis. An evaluation of damaging and protective mechanisms”, *Physiol Plantarum*, vol. 74, pp. 566-574, 1998.

[29] N.E. Ioannidis, and K. Kotzabasis, “Effects of polyamines on the functionality of photosynthetic membrane in vivo and in vitro”, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, vol. 1767, no. 12, pp. 1372-1382. 2007.

[30] F. Bussotti, R. Desotgiu, and C. Cascio, “Ozone stress in woody plants assessed with chlorophyll a fluorescence. A critical reassessment of existing data”, *Environ. Exp. Bot.*, vol. 73, pp. 19–30, 2011.

[31] F. Padilla, M. Gallardo, M. Peña-Fleitas, R. de Souza, and R. Thompson, “Proximal optical

sensors for nitrogen management of vegetable crops: a review”, *Sensors*, vol. 18, pp. E2083, 2018.

[32] N. Tremblay, Z. Wang, and Z.G. Cerovic, “Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review”, *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 32, pp. 451–464, 2012.

[33] C. Buschmann, “Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves,” *Photosynth. Res.*, vol. 92, pp. 261–271, 2007.

[34] J. Uddling, J. Gelang-Alfredsson, K. Piikki, and H. Pleijel, “Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings”, *Photosynth. Res.*, vol. 91, pp. 37–46, 2007.

[35] C. Ramos, A. Agut, A.L. and Lidon, “Nitrate leaching in important horticultural crops of the Valencian Community region (Spain)”, *Environ. Pollut.*, vol. 118, pp. 215–223, 2002.

[36] J. Flexas, J.M. Escalona S. Evain, J. Gulías, I. Moya, C.B. Osmond, H. Medrano, “Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO₂ assimilation and stomatal conductance during water-stress in C₃ plants”, *Physiologia Plantarum*, vol. 114, pp. 231–240, 2002.

[37] P. Zarco-Tejada, A. Catalina, M. Gonzalez, P. Martin, “Relationships between net photosynthesis and steady-state chlorophyll fluorescence retrieved from airborne hyperspectral imagery”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 136, pp. 247–258, 2013.

[38] J. Schächtl, G. Huber, F.X. Maidl, E. Sticklese, “Laser-induced chlorophyll fluorescence measurements for detecting the nitrogen status of wheat canopies”, *Precis Agric*, vol. 6, pp. 143–156, 2005.

[39] R. Mendoza-Tafolla, P. Juarez-Lopez, R. Ontiveros-Capurata, M. Sandoval-Villa, I. Alia Tejacal, and G. Alejo, “Estimating nitrogen and chlorophyll status of romaine lettuce using SPAD and at LEAF readings”, *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, vol. 47, pp. 1-6, 2019.

[40] U.L. Yadava U.L., “A rapid and nondestructive method to determine chlorophyll in intact leaves”, *Hortscience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, vol. 21, pp. 1449–1450, 1986.

[41] R.D Marquard, and J.L. Tipton, “Relationship between extractable chlorophyll and an in situ method to estimate leaf greenness”, *Hortscience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, vol. 22, pp. 1327–1327, 1987.

[42] G. Fanizza, C. Dellagatta, and C. Bagnulo, “Anondestructive determination of leaf chlorophyll in *Vitis vinifera*:”, *The Annals of Applied Biology*, vol. 119, pp. 203–205, 1991.

[43] H. Schaper, E.K. Chacko, “Relation between extractable chlorophyll and portable chlorophyll meter readings in leaves of 8 tropical and subtropical fruit-tree species”, *Journal of Plant Physiology*, vol. 138, pp. 674–677, 1991.

[44] O.A. Monje, and B. Bugbee, “Inherent limitations of nondestructive chlorophyll meters – a comparison of 2 types of meters”, *Hortscience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, vol. 27, pp. 69–71, 1992.

[45] J. Markwell, J.C. Osterman, and J.L. Mitchell, “Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter”, *Photosynthesis Research*, vol. 46, pp. 467–472, 1995.

[46] M. Bindi, A. Hacour, K. Vandermeiren, J. Craigan, K. Ojanpera, G. Sellden, L. Fibbi,

“Chlorophyll concentration of potatoes grown under elevated carbon dioxide and/or ozone concentrations”, *European Journal of Agronomy*, vol. 17, pp. 319–335, 2002.

[47] Z.G. Cerovic, G. Masdoumier, N. Ben Ghazlen, and G. Latouche, “A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids”, *Physiologia Plantarum*, vol. 146, pp. 251–260, 2012.

[48] J. Uddling, J. Gelang-Alfredsson, K. Piikki, and H. Pleijel, “Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings”, *Photosynthesis Research*, vol. 91, pp. 37–46, 2007.

[49] Analytika, “Μετρητές χλωροφυλλης”, 2022. [Online]. Available: <https://www.analytika.gr/product-categories-46075/metrites-chlorofyllis-chlorophyll-meters-46132/>

[50] A. Süß, M. Danner, C. Obster, M. Locherer, T. Hank, and K. Richter, “Measuring Leaf Chlorophyll Content with the Konica Minolta SPAD-502Plus – Theory, Measurement, Problems, Interpretation”, *EnMAP Field Guides Technical Report, GFZ Data Services*, 2015.

[51] Opti-sciences. Ink, “The Standard in Plant Stress Measurement Systems”, 2002. [Online]. Available: <https://www.optisci.com/index.html>

[52] Apogee Instruments, Inc., “Research grade measurement of photosynthetically active radiation (PAR), ePAR, PPF, and PPFd”, 2022. [Online]. Available: https://www.apogeeinstruments.com/quantum/?gclid=Cj0KCQIAxoiQBhCRARIsAPsvo-wV69zzFSeKAbxw3NKTTNUBEi6x-P-QbwAjiV7YNYfB9ISG6TsaAhiLEALw_wcB

[53] H. Kalaji, P. Dąbrowski, M.D. Cetner, I.A. Samborska, I. Łukasik, M. Brestic, and B.M. Panchal, “A comparison between different chlorophyll content meters under nutrient deficiency conditions”, *Journal of Plant Nutrition*, vol. 40, no. 7, pp. 1024-1034, 2017.

[54] A. Yamamoto, T. Nakamura, J.J. Adu-Gyamfi, M. Saigusa, “Relation between chlorophyll content in leaves of sorghum and pigeonpea determined by extraction method and by chlorophyll meter (SPAD-502)”, *Journal of Plant Nutrition*, vol. 25, no. 10, pp.2 295-2301, 2022.

[55] M. Abdelhamidg, T. Horiuchi, and S. Oba, “Evaluation of the SPAD value in Faba bean (*Vicia faba* L.) leaves in relation to different fertilizer applications”, *Plant Production Science*, vol. 6, no. 3, pp. 185-189, 2003.

[56] F. Padilla, R. de Souza, M.T. Peña-Fleitas, M. Gallardo, C. Giménez, R.B. Thompson, “Different responses of various chlorophyll meters to increasing nitrogen supply in sweet pepper”, *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, pp. 1752, 2018b.

[57] S. Kawashima, and M. Nakatani, “An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera”, *Annals of Botany*, vol. 81, pp. 49-54, 1998.

[58] M. Pagola, R. Ortiz, I. Irigoyen, H. Bustince, E. Barrenechea, P. Aparicio-Tejo, C. Lamsfus, and B. Lasa, “New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image color analysis: Comparison with SPAD-502”, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 65, pp. 213-218, 2009.

[59] M. Maleki, J. Massah, and M. Dehghan, Application of spectral sensor for the assessment of nitrogen content in lettuce plants”, *Australian Journal of Crop Science*, vol. 6, no. 2, pp. 188-193, 2012.

[60] T. Sookchalearn, and W. Abdullakasm, “A Low-cost Sensor for Measuring and Mapping

- Chlorophyll Content in Cassava Leaves”, *Journal of Natural Sciences*, vol. 16, pp. 183-190, 2017.
- [62] S. Kawashima, and M. Nakatani, “An Algorithm for Estimating Chlorophyll Content in Leaves Using a Video Camera”, *Annals of Botany*, vol. 81, no. 1, pp. 49–54, 1998.
- [63] D. Mohana Geetha, P. Chitra, M. Umamaheswari, “Smart fertilizer management system based on IoT chlorophyll meter”, *Materials Today: Proceedings*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.030>.
- [64] A. Kumar Dey, M. Sharma, and M.R. Meshram, "An Analysis of Leaf Chlorophyll Measurement Method Using Chlorophyll Meter and Image Processing Technique", *Procedia Computer Science*, vol. 85, pp. 12-22, 2016.
- [65] P. Evan, M. Adibawa, K. Prilianti, H. Heriyanto, T. Brotosudarmo, “Low-cost chlorophyll meter (LCCM): portable measuring device for leaf chlorophyll”, *SPIE Proceedings*, In Second International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA), Bali, Indonesia, 2016).
- [66] Amazon Web Services (2022). [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Amazon_Web_Services
- [67] MQTT (2022). [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/MQTT>.
- [68] Node-RED (2022). [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Node-RED>
- [69] Android Studio (2022). [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Android_Studio
- [70] J. Palta, “Leaf chlorophyll content”, *Remote Sensing Reviews*, 5, 207-213, 1990.

Παράρτημα Α

/* The circuit:

- * LCD RS pin to digital pin 23
 - * LCD Enable pin to digital pin 22
 - * LCD D4 pin to digital pin 21
 - * LCD D5 pin to digital pin 19
 - * LCD D6 pin to digital pin 18
 - * LCD D7 pin to digital pin 17
 - * LCD R/W pin to ground
 - * LCD VSS pin to ground
 - * LCD VCC pin to 5V
 - * 10K resistor:
 - * ends to +5V and ground
 - * wiper to LCD VO pin (pin 3)
- */

```
#include <Arduino.h>
```

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
#include "BluetoothSerial.h"
```

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
```

```
#include "Adafruit_TSL2591.h"
```

```
// Error message if Bluetooth is not enabled
```

```
#if !defined(CONFIG_BT_ENABLED) || !defined(CONFIG_BLUEDROID_ENABLED)
```

```
#error Bluetooth is not enabled! Please run `make menuconfig` to and enable it
```

```
#endif
```

```
#define RED_LED_PIN 32
```

```
#define IR_LED_PIN 33
```

```
#define BUTTON_PIN 25
```

```
BluetoothSerial BT;
```

```
Adafruit_TSL2591 tsl = Adafruit_TSL2591(2591);
```

```
const int rs = 23, en = 22, d4 = 21, d5 = 19, d6 = 18, d7 = 17;
```

```
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
```

```
float chlorophyllIndex = 0;
```

```
float chlorophyllIndexValues[3] = {0,0,0};
```

Παράρτημα Β

```
int measurementCount = 0;
float measurementSum = 0;
```

```
void advancedRead(void);
```

```
/**
 *
 * Displays some basic information on this sensor from the unified
 * sensor API sensor_t type (see Adafruit_Sensor for more information)
 */
void displaySensorDetails(void)
{
  sensor_t sensor;
  tsl.getSensor(&sensor);
  Serial.println(F("-----"));
  Serial.print (F("Sensor:   ")); Serial.println(sensor.name);
  Serial.print (F("Driver Ver:  ")); Serial.println(sensor.version);
  Serial.print (F("Unique ID:  ")); Serial.println(sensor.sensor_id);
  Serial.print (F("Max Value:  ")); Serial.print(sensor.max_value); Serial.println(F(" lux"));
  Serial.print (F("Min Value:  ")); Serial.print(sensor.min_value); Serial.println(F(" lux"));
  Serial.print (F("Resolution:  ")); Serial.print(sensor.resolution, 4); Serial.println(F(" lux"));
  Serial.println(F("-----"));
  Serial.println(F(""));
  delay(500);
}

/**
 *
 * Configures the gain and integration time for the TSL2591
 */
void configureSensor(void)
{
  // You can change the gain on the fly, to adapt to brighter/dimmer light situations
  //tsl.setGain(TSL2591_GAIN_LOW); // 1x gain (bright light)
  tsl.setGain(TSL2591_GAIN_MED); // 25x gain
  //tsl.setGain(TSL2591_GAIN_HIGH); // 428x gain

  // Changing the integration time gives you a longer time over which to sense light
  // longer timelines are slower, but are good in very low light situations!
  //tsl.setTiming(TSL2591_INTEGRATIONTIME_100MS); // shortest integration time (bright
```

Παράρτημα Β

```
light)
  // tsl.setTiming(TSL2591_INTEGRATIONTIME_200MS);
  tsl.setTiming(TSL2591_INTEGRATIONTIME_300MS);
  // tsl.setTiming(TSL2591_INTEGRATIONTIME_400MS);
  // tsl.setTiming(TSL2591_INTEGRATIONTIME_500MS);
  // tsl.setTiming(TSL2591_INTEGRATIONTIME_600MS); // longest integration time (dim
light)

  /* Display the gain and integration time for reference sake */
  Serial.println(F("-----"));
  Serial.print (F("Gain:   "));
  tsl2591Gain_t gain = tsl.getGain();
  switch(gain)
  {
    case TSL2591_GAIN_LOW:
  Serial.println(F("1x (Low)"));
    break;
    case TSL2591_GAIN_MED:
  Serial.println(F("25x (Medium)"));
    break;
    case TSL2591_GAIN_HIGH:
  Serial.println(F("428x (High)"));
    break;
    case TSL2591_GAIN_MAX:
  Serial.println(F("9876x (Max)"));
    break;
  }
  Serial.print (F("Timing:   "));
  Serial.print((tsl.getTiming() + 1) * 100, DEC);
  Serial.println(F(" ms"));
  Serial.println(F("-----"));
  Serial.println(F(""));
}

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);

  Serial.println(F("Starting Adafruit TSL2591 Test!"));

  SerialBT.begin("chlorophyllMeter"); //Bluetooth device name

  Wire.begin(5,4); // SDA, SCL
```

Παράρτημα Β

```
if (tsl.begin())
{
Serial.println(F("Found a TSL2591 sensor"));
}
else
{
Serial.println(F("No sensor found ... check your wiring?"));
while (1);
}

/* Display some basic information on this sensor */
displaySensorDetails();
/* Configure the sensor */
configureSensor();

lcd.begin(16, 2);

pinMode(RED_LED_PIN, OUTPUT);
pinMode(IR_LED_PIN, OUTPUT);
pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);

/* Calibrate sensor */
// lcd.print("Calibration");
// digitalWrite(IR_LED_PIN, HIGH);
// delay(20);
// irMax = tsl.getLuminosity(1);
// delay(20);
// digitalWrite(IR_LED_PIN, LOW);

// delay(20);

// digitalWrite(RED_LED_PIN, HIGH);
// delay(20);
// redMax = tsl.getLuminosity(2);
// delay(20);
// digitalWrite(RED_LED_PIN, LOW);

// delay(1000);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Ready!");
```

Παράρτημα Β

```
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Press button");

}

void loop(void)
{
  if(digitalRead(BUTTON_PIN) == LOW){

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Please wait..");
Serial.println("Please wait..");
delay(1500);
    // If button is pressed for too long, reset the values
    if(digitalRead(BUTTON_PIN) == LOW){
Serial.println("Reset is pressed");
delay(1500);
        if(digitalRead(BUTTON_PIN) == LOW){
measurementCount = 0;

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Resetting..");
delay(2000);

measurementCount = 4;
        }
    }

if(measurementCount < 3 ){
    /*
    In the first 3 calls, calculate the ccl and print it on the LCD
    */

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Measuring...");
Serial.println("Measuring...");

advancedRead();
chlorophilIndexValues[measurementCount] = chlorophilIndex;
```

Παράρτημα Β

```
measurementSum += chlorophilIndex;
measurementCount++;

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Measurement " + String(measurementCount));

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("CCI: ");
lcd.print(String(chlorophilIndex));
Serial.println(chlorophilIndex);
}else if(measurementCount == 3 ) {
    /*
        If it's the 3rd time, calculate the index and print it on the LCD + mobile phone
    */

    chlorophilIndex = measurementSum / 3;

    chlorophilIndex = (chlorophilIndex * 0.13) - 0.8324;

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Chlorophyll");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(String(chlorophilIndex));
    lcd.print("mg/g");
    Serial.println(chlorophilIndex);

    SerialBT.println(String(chlorophilIndex));
    measurementCount++;
}else{
    /*
        If it's the 4th time, clear the variables and LCD
    */

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Ready!");

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Press button");
```

Παράρτημα Β

```
measurementCount = 0;
measurementSum = 0;
    }
delay(1000);
    }

delay(50);
}

/*****
/*
    Shows how to perform a basic read on visible, full spectrum or
    infrared light (returns raw 16-bit ADC values)
*/
/*****/
void simpleRead(void)
{
    // Simple data read example. Just read the infrared, fullspectrum diode
    // or 'visible' (difference between the two) channels.
    // This can take 100-600 milliseconds! Uncomment whichever of the following you want to read
    uint16_t x = tsl.getLuminosity(TSL2591_VISIBLE);
    //uint16_t x = tsl.getLuminosity(TSL2591_FULLSPECTRUM);
    //uint16_t x = tsl.getLuminosity(TSL2591_INFRARED);

    Serial.print(F("[ ")); Serial.print(millis()); Serial.print(F(" ms ] "));
    Serial.print(F("Luminosity: "));
    Serial.println(x, DEC);
}

/*****
/*
    Show how to read IR and Full Spectrum at once and convert to lux
*/
/*****/
void advancedRead(void)
{
    // More advanced data read example. Read 32 bits with top 16 bits IR, bottom 16 bits full
    spectrum
    // That way you can do whatever math and comparisons you want!
    uint32_t lum = tsl.getFullLuminosity();
    uint16_t ir, full;
    ir = lum>> 16;
```

Παράρτημα Β

```
full = lum & 0xFFFF;

uint16_t irLux = 0, redLux = 0;

digitalWrite(IR_LED_PIN, HIGH);
for(int i=0; i<10; i++){
  irLux += tsl.getLuminosity(1);
  delay(20);
}
digitalWrite(IR_LED_PIN, LOW);
delay(20);

digitalWrite(RED_LED_PIN, HIGH);

for(int i=0; i<10; i++){
  redLux += tsl.getLuminosity(2);
  delay(20);
}

digitalWrite(RED_LED_PIN, LOW);
Serial.println();

Serial.print("IR LUX = "); Serial.println(irLux);
Serial.print("RED LUX = "); Serial.println(redLux);

chlorophyllIndex = ((float)irLux/10) / ((float)redLux/10) }
```

Παράρτημα Β

```
Public class MainActivity extends AppCompatActivity implements Values
Adapter.ValuesListener {
    private static final String TAG = "MainActivity";

    private BluetoothAdapter bluetoothAdapter;
    private BluetoothSocket bluetoothSocket;
    private BluetoothDevice bluetoothDevice;
    private OutputStream outputStream;
    private InputStream inputStream;
    private Thread workerThread;
    byte[] readBuffer;
    int readBufferPosition;
    volatile boolean stopWorker;

    private TextView txtStatusMessage;
    private ValuesAdapter valuesAdapter;
    private RecyclerView recyclerView;
    private List<Entry> mEntries;

    private MqttAndroidClient client;
    private MqttConnectOptions mqttConnectOptions;

    @Override
    public void onCreate(Bundle savedInstanceState) {
        super.onCreate(savedInstanceState);
        setContentView(R.layout.activity_main);

        mTxtStatusMessage = findViewById(R.id.txt_status);

        // Αρχικοποίηση του MQTT
        String clientId = MqttClient.generateClientId();
        mqttConnectOptions = new MqttConnectOptions();
```

Παράρτημα Β

```
mqttConnectOptions.setAutomaticReconnect(true);
mqttConnectOptions.setCleanSession(true);
    client = new MqttAndroidClient(this, Constants.SERVER_IP, clientId);

// Listener για το κουμπί της σύνδεσης
findViewById(R.id.btn_connect).setOnClickListener(new View.OnClickListener() {
    public void onClick(View v) {
        try {
            findBT();
            openBT();
        } catch (IOException ex) {
        }
    }
});

// Listener για το κουμπί της αποσύνδεσης
findViewById(R.id.btn_disconnect).setOnClickListener(new View.OnClickListener() {
    public void onClick(View v) {
        try {
            closeBT();
        } catch (IOException ex) {
        }
    }
});

mRvValues = findViewById(R.id.rv_values);
mRvValues.setLayoutManager(new LinearLayoutManager(this,
LinearLayoutManager.VERTICAL, false));

getSavedData();
}

/*
Αναζήτησε στην τοπική βάση αν υπάρχουν αποθηκευμένες μετρήσεις και εμφάνισέ τις στην
```

Παράρτημα Β

εφαρμογή

*/

```
private void getSavedData() {
    new Thread(() -> {
AppDatabasedb = Room.databaseBuilder(MainActivity.this, AppDatabase.class,
Constants.DB_NAME).build();
        try {
mEntries = db.entryDao().getEntries();
mValuesAdapter = new ValuesAdapter(mEntries, this);
mRvValues.setAdapter(mValuesAdapter);
            } catch (SQLiteConstraintException e) {
Toast.makeText(MainActivity.this, "Error fetching data", Toast.LENGTH_SHORT).show();
Log.e("TAG", "onCreate: " + e.getMessage());
        }
db.close();
    }).start();
}
```

/*

Έλεγξε αν είναι ανοιχτό το bluetooth και κάνε σύνδεση με την συσκευή "chlorophyllMeter" αν υπάρχει.

Τότε δείξε το μήνυμα στον χρήστη ότι συνδέθηκε η συσκευή.

*/

```
void findBT() {
mBluetoothAdapter = BluetoothAdapter.getDefaultAdapter();
    if (mBluetoothAdapter == null) {
mTxtStatusMessage.setVisibility(View.VISIBLE);
mTxtStatusMessage.setTextColor(Color.RED);
mTxtStatusMessage.setText("Το bluetooth δεν είναι διαθέσιμο");
    }

    if (!mBluetoothAdapter.isEnabled()) {
        Intent enableBluetooth = new Intent(BluetoothAdapter.ACTION_REQUEST_ENABLE);
startActivityForResult(enableBluetooth, 0);
    }
}
```

Παράρτημα Β

```
    }

    Set<BluetoothDevice>pairedDevices = mBluetoothAdapter.getBondedDevices();
    if (pairedDevices.size() > 0) {
        for (BluetoothDevice device : pairedDevices) {
            if (device.getName().equals("chlorophyllMeter")) {
mmDevice = device;
                break;
            }
        }
    }

    mTxtStatusMessage.setVisibility(View.VISIBLE);
    mTxtStatusMessage.setTextColor(Color.GREEN);
    mTxtStatusMessage.setText("Δεν βρέθηκε συσκευή");
}

/*
Ξεκινάμε την ακρόαση στην θύρα του bluetooth για νέα δεδομένα
*/
void openBT() throws IOException {
    UUID uuid = UUID.fromString("00001101-0000-1000-8000-00805F9B34FB"); //Standard
SerialPortService ID
    mmSocket = mmDevice.createRfcommSocketToServiceRecord(uuid);
    mmSocket.connect();
    mmOutputStream = mmSocket.getOutputStream();
    mmInputStream = mmSocket.getInputStream();

    beginListenForData();

    mTxtStatusMessage.setVisibility(View.VISIBLE);
    mTxtStatusMessage.setTextColor(Color.GREEN);
    mTxtStatusMessage.setText("Η συσκευή bluetooth συνδέθηκε");
}
```

Παράρτημα Β

```
/*
    Αποθήκευση και εμφάνιση των αποτελεσμάτων στην οθόνη.
*/
void beginListenForData() {
    final Handler handler = new Handler();
    final byte delimiter = 10; //This is the ASCII code for a newline character

stopWorker = false;
readBufferPosition = 0;
readBuffer = new byte[1024];
workerThread = new Thread(new Runnable() {
    public void run() {
        while (!Thread.currentThread().isInterrupted() && !stopWorker) {
            try {
                int bytesAvailable = mmInputStream.available();
                if (bytesAvailable > 0) {
byte[] packetBytes = new byte[bytesAvailable];
mmInputStream.read(packetBytes);

                for (int i = 0; i < bytesAvailable; i++) {
                    byte b = packetBytes[i];
                    if (b == delimiter) {
byte[] encodedBytes = new byte[readBufferPosition];
System.arraycopy(readBuffer, 0, encodedBytes, 0, encodedBytes.length);

                        final String data = new String(encodedBytes, "US-ASCII");
readBufferPosition = 0;

AppDatabase db = Room.databaseBuilder(getApplicationContext(), AppDatabase.class,
Constants.DB_NAME).build();

                        Calendar c = Calendar.getInstance();

                        Entry entry = new Entry();
entry.index = mEntries.size() + 1;
entry.timestamp = c.getTimeInMillis();
```

Παράρτημα Β

```
entry.value = data;

db.entryDao().insertEntry(entry);
db.close();

mEntries.add(entry);

handler.post(new Runnable() {
    public void run() {

        if (mValuesAdapter == null) {
mValuesAdapter = new ValuesAdapter(mEntries, MainActivity.this);
        }
mValuesAdapter.setmValues(mEntries);
mValuesAdapter.notifyDataSetChanged();
        }
    });
} else {
readBuffer[readBufferPosition++] = b;
    }
}
} catch (IOException ex) {
stopWorker = true;
    }
}
}
});

workerThread.start();
}

/*
```

Δημοσίευσε το μήνυμα στον MQTT Broker στον server

Παράρτημα Β

```
*/
private void publishOutputState(MqttMessage message) {
    try {
        if (client.isConnected()) {
client.publish("chlorophyll-measurements", message);
        } else {
client.connect(mqttConnectOptions).setActionCallback(new IMqttActionListener() {
            @Override
            public void onSuccess(IMqttTokenasyncActionToken) {
Log.d(TAG, "on mqtt client Success: ");
                try {
client.publish("chlorophyll-measurements", message);
                    } catch (MqttException e) {
e.printStackTrace();
                }
            }

            @Override
            public void onFailure(IMqttTokenasyncActionToken, Throwable exception) {
Log.d(TAG, "onmqttclient failure: " + exception.getMessage());
                }
            });
        }
    } catch (MqttException e) {
e.printStackTrace();
Log.d(TAG, "message failed");
    }
}

/*
Κλείσε την σύνδεση με την συσκευή του bluetooth
*/
void closeBT() throws IOException {
stopWorker = true;
```

Παράρτημα Β

```
mmOutputStream.close();  
mmInputStream.close();  
mmSocket.close();
```

```
mTxtStatusMessage.setVisibility(View.VISIBLE);  
mTxtStatusMessage.setTextColor(Color.GREEN);  
mTxtStatusMessage.setText("Η σύνδεση με τη συσκευή έκλεισε");  
}
```

```
@Override  
public boolean onCreateOptionsMenu(Menu menu) {  
getMenuInflater().inflate(R.menu.main_menu, menu);  
return true;  
}
```

```
@Override  
public boolean onOptionsItemSelected(@NonNull MenuItem item) {  
if (item.getItemId() == R.id.item_delete_all) {  
new Thread() -> {  
AppDatabase db = Room.databaseBuilder(MainActivity.this, AppDatabase.class,  
Constants.DB_NAME).build();  
try {  
db.entryDao().deleteAllEntries();  
} catch (SQLiteConstraintException e) {  
Toast.makeText(MainActivity.this, "Error fetching data", Toast.LENGTH_SHORT).show();  
Log.e("TAG", "onCreate: " + e.getMessage());  
}  
db.close();  
}).start();
```

```
JSONObject mqttObject = new JSONObject();
```

```
MqttMessage message = new MqttMessage();
```

Παράρτημα Β

```
message.setQos(2);
message.setPayload(mqttObject.toString().getBytes());
publishOutputState(message);

mEntries = new ArrayList<>();
mValuesAdapter.setmValues(new ArrayList<>());
mValuesAdapter.notifyDataSetChanged();
    }
    return super.onOptionsItemSelected(item);
}

@Override
public void onSaveClicked(Entry entry) {

    new Thread(new Runnable() {
        @Override
        public void run() {
AppDatabasedb = Room.databaseBuilder(getApplicationContext(), AppDatabase.class,
Constants.DB_NAME).build();
db.entryDao().updateEntry(entry);
db.close();
        }
    }).start();

    Toast.makeText(MainActivity.this, "Οιαλλαγή αποθηκεύτηκε",
    Toast.LENGTH_SHORT).show();
    JSONObjectmqttObj = new JSONObject();

    try {
SimpleDateFormat formatter = new SimpleDateFormat("dd/MM/yyyyHH:mm");
String dateString = formatter.format(new Date(entry.timestamp));

mqttObj.put("ID", entry.index);
mqttObj.put("Ημερομηνία", dateString);
```

Παράρτημα Β

```
mqttObj.put("CCI", entry.value);  
mqttObj.put("Χωράφι", entry.type);  
mqttObj.put("Σχόλια", entry.comments);  
JSONArray jsonArray = new JSONArray();  
jsonArray.put(mqttObj);  
jsonArray.put(true);
```

```
MqttMessage message = new MqttMessage();  
message.setQos(2);  
message.setPayload(mqttObj.toString().getBytes());  
publishOutputState(message);
```

```
    } catch (JSONException e) {  
e.printStackTrace();  
    }  
}  
}
```