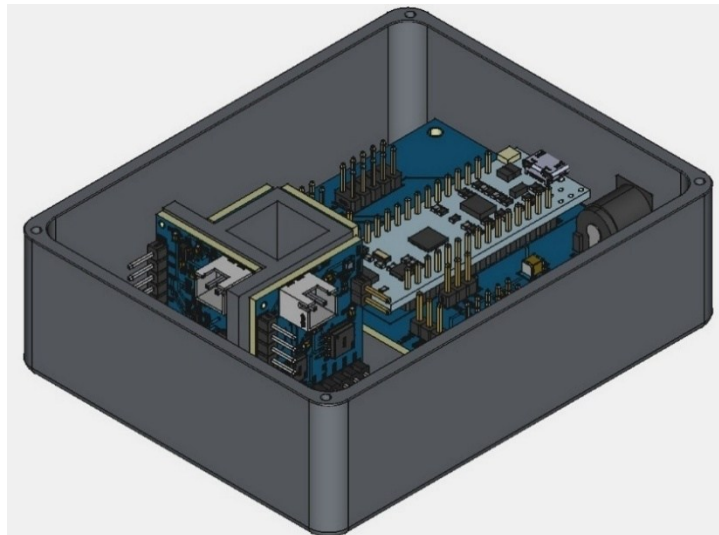


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Εργαστηριακού Μετρητή Οπτικής  
Πυκνότητας Τεχνολογίας LED-Πειραματική Εφαρμογή σε  
Καλλιέργειες Μικροφυκών»



Του φοιτητή  
Μπατζάκη Ηλία  
Αρ. Μητρώου: 52208Μ

Επιβλέπων  
Αργύριος Χατζόπουλος  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Ιούνιος 2025

Τίτλος Δ.Ε.

<<Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Εργαστηριακού Μετρητή Οπτικής Πυκνότητας Τεχνολογίας LED - Πειραματική Εφαρμογή σε Καλλιέργειες Μικροφυκών>>

Κωδικός Δ.Ε. 24311

Ονοματεπώνυμο φοιτητή Μπατζάκης Ηλίας

Ονοματεπώνυμο εισηγητή Χατζόπουλος Αργύριος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 31-10-2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 20/06/2025

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 κειμένου, 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 Μπατζάκη Ηλία του Κυριάκου 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.

*«Στη σύζυγό μου Κωνσταντία»*



## Πρόλογος

Η επιλογή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έγινε αρχικά διότι συνδυάζει την προσωπική μου αγάπη για τα ηλεκτρονικά, το περιβάλλον και τη βιολογία. Ο δεύτερος λόγος ήταν να εμβαθύνω τις γνώσεις μου στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός πλήρως λειτουργικού ενσωματωμένου συστήματος.

Κατά τη διάρκεια του έργου, ανέλαβα τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μετρητή οπτικής πυκνότητας, με εξειδίκευση στις εφαρμογές καλλιέργειας μικροφυκών. Το έργο περιλάμβανε τόσο τον σχεδιασμό των τυπωμένων κυκλωμάτων την υλοποίηση του υλικολογισμικού (firmware) στον μικροελεγκτή STM32, όσο και την ανάπτυξη της εφαρμογής ελέγχου σε περιβάλλον .NET (Windows Forms).

Μέσα από αυτή τη διαδικασία, είχα την ευκαιρία να γνωρίσω σε βάθος τον πλήρη κύκλο ανάπτυξης ενός τεχνολογικού προϊόντος: από τον σχεδιασμό του ηλεκτρονικού συστήματος και την ενσωμάτωση των αισθητήρων έως την προσαρμογή του λογισμικού στις απαιτήσεις πραγματικών μετρήσεων. Η εμπειρία αυτή με βοήθησε να αντιληφθώ τη σημασία της συνεχούς ανατροφοδότησης και της προσαρμογής σε πραγματικές συνθήκες, γεγονός που οδηγεί στη βελτιστοποίηση και την ωρίμανση της τελικής λύσης.

Πέρα από το τεχνικό σκέλος, η εργασία αυτή μου προσέφερε μια ρεαλιστική εικόνα του πώς ένα ακαδημαϊκό έργο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μια μελλοντική εμπορική εφαρμογή. Οι συνεχείς δοκιμές, οι εναλλακτικές προσεγγίσεις και η ανάγκη για λήψη τεχνικών αποφάσεων αποτέλεσαν πολύτιμη εμπειρία, η οποία θα λειτουργήσει καταλυτικά στην επαγγελματική μου πορεία.

Τέλος, η υλοποίηση της εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς το υπόβαθρο που προσέφεραν τα μαθήματα του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών, τα οποία αποτέλεσαν το αναγκαίο θεωρητικό και πρακτικό θεμέλιο για την κατανόηση και την ανάπτυξη των επιμέρους τεχνολογικών λύσεων.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος φασματικής μέτρησης της οπτικής πυκνότητας μικροφυκών. Το σύστημα βασίζεται στους φασματικούς αισθητήρες AS7263 και AS7341 της εταιρείας AMS OSRAM, σε συνδυασμό με πηγές φωτός διαφόρων μηκών κύματος που καλύπτουν περιοχές ενδιαφέροντος, όπως εκείνες που σχετίζονται με τη χλωροφύλλη και άλλους βιολογικούς δείκτες. Ο έλεγχος πραγματοποιείται μέσω μικροελεγκτή STM32G431KB, ενώ το υλικολογισμικό αναπτύχθηκε με event-driven αρχιτεκτονική και επικοινωνία μέσω USB.

Παράλληλα, σχεδιάστηκε εφαρμογή για περιβάλλον Windows (.NET Framework), η οποία επιτρέπει τη ρύθμιση παραμέτρων, την έναρξη μετρήσεων, καθώς και την απεικόνιση και αποθήκευση των φασματικών δεδομένων. Το σύστημα ενσωματώθηκε σε τρισδιάστατα εκτυπωμένο περίβλημα με εργονομική διάταξη αισθητήρων, ηλεκτρονικών και φωτεινών πηγών, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις με καλλιέργειες των ειδών *Tetrademus obliquus* και *Chlorella sorokiniana*, και καταγράφηκαν φασματικές απορροφήσεις σε διαφορετικά μήκη κύματος. Οι τιμές οπτικής πυκνότητας συσχετίστηκαν με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας, επιτρέποντας την αξιολόγηση της ακρίβειας και της γραμμικότητας του συστήματος. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν υψηλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ φασματικής απορρόφησης και συγκέντρωσης βιομάζας ( $R^2 > 0.99$ ), επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα του συστήματος για αξιόπιστες συγκριτικές μετρήσεις.

# <<Design and Development of a Laboratory Optical Density Meter Using LED Technology Experimental Application in Microalgae Cultures>>

Batzakis Ilias

## **Abstract**

The objective of this thesis was the design and development of an integrated system for measuring the optical density of microalgae through spectral analysis. The system is based on AMS OSRAM spectral sensors AS7263 and AS7341, in combination with light sources of various wavelengths targeting key absorption regions related to chlorophyll and other biological indicators. Control is implemented using the STM32G431KB microcontroller, with an event-driven firmware architecture and USB communication.

A Windows-based application (.NET Framework) was also developed, allowing for parameter configuration, measurement execution, and real-time visualization and storage of spectral data. The system is enclosed in a custom 3D-printed case that hosts all optical and electronic components in a stable and repeatable layout.

Experimental measurements were carried out using cultures of *Tetrademus obliquus* and *Chlorella sorokiniana*, with optical density values recorded at selected wavelengths. The results were correlated with dry biomass concentration to evaluate the system's accuracy and linearity. Strong linear relationships were observed between optical absorption and biomass concentration ( $R^2 > 0.99$ ), confirming the system's reliability for relative quantification in microalgae cultures.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Αργύριο Χατζόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου την εκπόνηση μιας απαιτητικής και πολυδιάστατης διπλωματικής εργασίας. Η στήριξη, η καθοδήγηση και οι εξειδικευμένες γνώσεις του αποτέλεσαν ουσιαστική βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια του έργου.

Ιδιαίτερη μνεία οφείλω στην Υποψήφια Διδάκτορα του Τμήματος Χημικών Μηχανικών ΑΠΘ κ. Γεωργία Παπαπαναγιώτου για την πολύτιμη συμβολή της σε θέματα που αφορούν την καλλιέργεια και τη διαχείριση των μικροφυκών, καθώς και στο πειραματικό σκέλος των μετρήσεων και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Η καθοδήγησή της υπήρξε καθοριστική για την επιστημονική τεκμηρίωση και αξιολόγηση του συστήματος.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή Τμήματος Χημικών Μηχανικών ΑΠΘ κ. Χρήστο Χατζηδούκα για την ευγενική παραχώρηση του εργαστηριακού εξοπλισμού και του χώρου, γεγονός που επέτρεψε την εκτέλεση συγκριτικών μετρήσεων και την αξιολόγηση του υπό ανάπτυξη οργάνου σε συνθήκες πραγματικού εργαστηριακού περιβάλλοντος.

Η συμβολή όλων των παραπάνω υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και τους ευχαριστώ ειλικρινά για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη τους.



# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract .....	vii
Ευχαριστίες .....	viii
Περιεχόμενα .....	ix
Κατάλογος Σχημάτων .....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συντομογραφίες.....	xv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή .....	1
1.1 Μικροφύκη.....	1
1.2 Βιοτεχνολογία μικροφυκών.....	3
1.3 Θεωρητικές Αρχές και Εφαρμογές της Φασματοφωτομετρίας στη Βιοτεχνολογία Μικροφυκών.....	5
1.4 Μήκη Κύματος για την Εκτίμηση της Συγκέντρωσης και του Ξηρού Βάρους.....	11
1.5 Στόχος μεταπτυχιακής εργασίας.....	14
1.6 Επίλογος.....	14
Κεφάλαιο 2ο: Υλικά Κατασκευής Συστήματος.....	15
2.1 Μικροελεγκτής.....	15
2.2 Φασματικοί Αισθητήρες.....	17
2.3 Πηγές Φωτός .....	21
2.4 ST-LED1202 .....	26
2.5 Αισθητήρας Θερμοκρασίας ADT7410.....	27
2.6 Επίλογος.....	28
Κεφάλαιο 3ο: Σχεδιασμός και Κατασκευή Πρωτοτύπων .....	29
3.1 Σχεδιασμός και κατασκευή 3D περιβλήματος συσκευής.....	29
3.2 Σχεδιασμός και Κατασκευή Τυπωμένων Κυκλωμάτων.....	30
3.3 Τελική Συναρμολόγηση και Ενσωμάτωση .....	39
3.4 Επίλογος.....	46
Κεφάλαιο 4ο: Ανάπτυξη Υλικολογισμικού και Λογισμικού Συστήματος .....	47
4.1 Αρχιτεκτονική και Δομή Υλικολογισμικού STM32 .....	47
4.2 Ανάπτυξη Windows Application.....	64
4.3 Επίλογος.....	69

Κεφάλαιο 5ο:	Πειραματική εφαρμογή.....	70
5.1	Παραδείγματα Τιμών OD και Πρακτική Ερμηνεία.....	70
5.2	Μετρήσεις και Σύγκριση με εργαστηριακό φασματοφωτόμετρο .....	71
5.3	Ποσοτικός Προσδιορισμός Λιπιδίων σε Δείγματα Μικροφυκών .....	86
5.4	Επίλογος.....	89
Κεφάλαιο 6ο:	Συμπεράσματα και Προτάσεις Βελτίωσης.....	90
6.1	Συμπεράσματα.....	90
6.2	Προτάσεις Βελτίωσης .....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Τεχνικά Σχέδια Περιβλήματος Συσκευής.....		98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Σχηματικά Διαγράμματα Κυκλωμάτων.....		101

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Απεικόνιση των οργανιδίων που υπάρχουν σε ένα τυπικό θαλάσσιο μονοκύτταρο μικροφύκος.( από Rojary et al. [12]με τροποποίηση) .....	2
Σχήμα 1.2 Διαπερατότητα του φωτός μέσω ενός δείγματος διαλύματος σε μια κυψελίδα[56].....	7
Σχήμα 1.3 Σύγκριση Οπτικής Πυκνότητας δύο ειδών <i>Chlorella Vulgaris</i> . και <i>Limnospira fusiformis</i> [59] .....	13
Σχήμα 2.1 Nucleo-G431KB (α) Επάνω Όψη (β) Κάτω Όψη[66] .....	15
Σχήμα 2.2 Κανονικοποιημένη φασματική απόκριση αισθητήρα AS7263[69] .....	17
Σχήμα 2.3 Διάταξη-Φωτοдиодων AS7341[70].....	18
Σχήμα 2.4 Κανονικοποιημένη φασματική απόκριση αισθητήρα AS7341[70] .....	19
Σχήμα 2.5 Απλοποιημένο Block Διάγραμμα AS7341[70].....	19
Σχήμα 2.6 Κατανομή φασματικής εκπομπής (Σχετικές Τιμές)[72] .....	21
Σχήμα 2.7 Σχετική ισχύς ως προς το μήκος κύματος [73] .....	22
Σχήμα 2.8 Σχετική ισχύς ως προς το μήκος κύματος[74] .....	23
Σχήμα 2.9 Σχετική ένταση ως προς το μήκος κύματος [75] .....	24
Σχήμα 2.10 Σχετικές μονάδες, (λογαριθμική κλίμακα) σε σχέση με το μήκος κύματος[76].....	25
Σχήμα 2.11 Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα LED1202[77] .....	27
Σχήμα 3.1 3D απεικόνιση περιβλήματος συσκευής με ορατές κρυφές γραμμές .....	29
Σχήμα 3.2 Τυπικές Διαστάσεις Κυψελίδων thorlabs.com(τροποποιημένη)[79].....	30
Σχήμα 3.3 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος AS7263 .....	31
Σχήμα 3.4 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας AS7263.....	32
Σχήμα 3.5 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας AS7341 .....	33
Σχήμα 3.6 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας AS7341.....	34
Σχήμα 3.7 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας πολυφασματικού LED .....	34
Σχήμα 3.8 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας MTMD6788594SMT6 .....	35
Σχήμα 3.9 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας ευρυφασματικού Led .....	36
Σχήμα 3.10 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας LUXEON IR ONYX.....	37
Σχήμα 3.11 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας LED VLMTG1400 .....	38
Σχήμα 3.12 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας VLMTG1400 .....	38
Σχήμα 3.13 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας μικροελεγτή .....	44
Σχήμα 3.14 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας του μικροελεγτή .....	45
Σχήμα 3.15 3D Απεικόνιση πλήρους ενσωμάτωσης συστήματος .....	45
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Ροής Επικοινωνίας UART .....	47
Σχήμα 4.2 Καρτέλα παραμετροποίησης σειριακής θύρας .....	65
Σχήμα 4.3 Καρτέλα Αισθητήρα AS7263 .....	66
Σχήμα 4.4 Καρτέλα Αισθητήρα AS7341 .....	67
Σχήμα 4.5 Καρτέλα Γραφικών Απεικονίσεων .....	68
Σχήμα 5.1 Γράφημα Συσχέτισης Οπτικής πυκνότητας και Διαπερατότητας.....	70
Σχήμα 5.2 Κυψελίδες με Υπερμαγνητικό Κάλιο σε διάφορες συγκεντρώσεις.....	71

Σχήμα 5.3 Γράφημα τιμών μέτρησης με HACH DR3900 .....	72
Σχήμα 5.4 Γράφημα τιμών 1ης μέτρησης με πειραματικό όργανο .....	72
Σχήμα 5.5 Γράφημα τιμών 2ης μέτρησης με πειραματικό όργανο .....	72
Σχήμα 5.6 Συγκριτικό Διάγραμμα Απορρόφησης των τριών μετρήσεων .....	73
Σχήμα 5.7 Δείγματα μικροφύκους <i>T. Oblíquus</i> σε διάφορες συγκεντρώσεις .....	74
Σχήμα 5.8 Διαδικασία φυγοκέντρωσης .....	74
Σχήμα 5.9 Διήθηση για εξαγωγή βιομάζας και προσδιορισμό ξηρού βάρους .....	75
Σχήμα 5.10 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας (DCW) στα 730 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7263 .....	76
Σχήμα 5.11 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 760 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7263 .....	78
Σχήμα 5.12 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 680 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7341 .....	80
Σχήμα 5.13 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 730 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7263 .....	82
Σχήμα 5.14 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 760 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7263 .....	83
Σχήμα 5.15 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 680 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7341 .....	85
Σχήμα 5.16 Πρότυπες συγκεντρώσεις λιπιδίων (ελαϊκό οξύ ή παρόμοιο) σε αυξανόμενες ποσότητες	86
Σχήμα 5.17 Δείγματα μικροφυκών μετά από SPV αντίδραση A1–A3 <i>Tetrademus obliquus</i> και B1–B3 <i>Chlorella Sorokiniana</i> .....	86
Σχήμα 5.18 Γράφημα σύγκρισης καμπυλών βαθμονόμησης απορρόφησης στα 530 nm για πρότυπα διαλύματα λιπιδίων, με χρήση των οργάνων HACH DR3900 και AS7341 .....	88
Σχήμα 5.19 Σύγκριση λιπιδικής περιεκτικότητας (% w/w) για <i>Chlorella sorokiniana</i> και <i>Tetrademus obliquus</i> με χρήση των HACH DR3900 και AS7341 .....	89

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Φυσικές χρωστικές ουσίες σε μικροφύκη ή κυανοβακτήρια [15] .....	2
Πίνακας 1.2 Φασματοσκοπικές Τεχνικές και Εφαρμογές.....	6
Πίνακας 2.1 Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα Nucleo-G431KB[68].....	16
Πίνακας 2.2 Συγκεντρωτικός πίνακας διαθέσιμων μηκών κύματος .....	26
Πίνακας 3.1 Διευθύνσεις I2C Συσκευών .....	39
Πίνακας 3.2 Τιμές Χωρητικότητας εισόδων εξόδων I2C Συσκευών.....	40
Πίνακας 3.3 Παράμετροι απο τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου I2C [85].....	41
Πίνακας 3.4 Τιμές ρευμάτων κατανάλωσης των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ανά λειτουργική κατάσταση.....	42
Πίνακας 3.5 Καταναλώσεις σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης AS7263.....	42
Πίνακας 3.6 Συνολικές απαιτήσεις ρεύματος σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης AS7263 .....	43
Πίνακας 3.7 Καταναλώσεις σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης AS7341.....	43
Πίνακας 3.8 Συνολικές απαιτήσεις ρεύματος σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης AS7341 .....	43
Πίνακας 3.9 Συνολικές απαιτήσεις σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης ADT7410 .....	43
Πίνακας 4.1 Πίνακας Κεφαλίδας (Κατεύθυνση Επικοινωνίας & Αναγνώριση Συσκευής).....	58
Πίνακας 4.2 Πίνακας Εντολών (PC → STM32) για AS7263 .....	59
Πίνακας 4.3 Πίνακας Εντολών (PC → STM32) για AS7341 .....	59
Πίνακας 5.1 Τιμές οπτικής πυκνότητας σε σχέση με τη διαπερατότητα .....	70
Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα τιμών Οπτικής Πυκνότητας Υπερμαγνητικού Καλίου ανά Συγκέντρωση, για δύο μετρήσεις με το πειραματικό όργανο και μία μέτρηση με το φασματοφωτόμετρο αναφοράς HACK DR3900 .....	71
Πίνακας 5.3 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Tetradismus obliquus στα 730 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 .....	75
Πίνακας 5.4 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Tetradismus obliquus στα 730 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου .....	76
Πίνακας 5.5 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Tetradismus obliquus στα 760 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 .....	77
Πίνακας 5.6 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Tetradismus obliquus στα 760 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου .....	77
Πίνακας 5.7 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Tetradismus obliquus στα 680 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 .....	79
Πίνακας 5.8 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Tetradismus obliquus στα 680 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου .....	79
Πίνακας 5.9 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Chlorella Sorokiniana στα 730 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900. ....	81
Πίνακας 5.10 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Chlorella Sorokiniana στα 730 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου. ....	81
Πίνακας 5.11 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Chlorella Sorokiniana στα 760 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 .....	82
Πίνακας 5.12 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Chlorella Sorokiniana στα 760 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου. ....	83
Πίνακας 5.13 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για Chlorella Sorokiniana στα 680 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 .....	84

Πίνακας 5.14 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για <i>Chlorella Sorokiniana</i> στα 760 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου.....	84
Πίνακας 5.15 Τιμές απορρόφησης πρότυπων διαλυμάτων λιπιδίων στα 515nm με HACH DR3900..	87
Πίνακας 5.16 Τιμές απορρόφησης πρότυπων διαλυμάτων λιπιδίων στα 515nm με αισθητήρα AS7341. .....	87
Πίνακας 5.17 Υπολογισμός λιπιδικής περιεκτικότητας (% w/w) σε δείγματα <i>Chlorella sorokiniana</i> και <i>Tetradesmus obliquus</i> με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900. ....	88
Πίνακας 5.18 Υπολογισμός λιπιδικής περιεκτικότητας (% w/w) σε δείγματα <i>Chlorella sorokiniana</i> και <i>Tetradesmus obliquus</i> με χρήση του αισθητήρα AS7341. ....	88
Πίνακας 6.1 BOM AS7263 PCB.....	101
Πίνακας 1.2 BOM AS7341 PCB.....	102
Πίνακας 1.3 BOM MTMD6788594SMT6 PCB .....	103
Πίνακας 1.4 BOM Luxeon IR Onyx PCB.....	104
Πίνακας 1.5 BOM VLMTG1400 PCB.....	105
Πίνακας 1.6 BOM Nucleo Board PCB .....	106

## Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
OD	Optical Density
Abs	Absorbance
EPS	Extracellular Polymeric Substances
PBR	Photobioreactors
RWP	Raceway Ponds
SMORP	Stacked Modular Open Raceway Ponds
CFD	Computational Fluid Dynamics
PIV	Particle Image Velocimetry
FPU	Floating Point Unit
DSP	Digital Signal Processing
FFT	Fast Fourier Transform
ECC	Error Correction Code
MCU	Micro Controller Unit
SMUX	Super Multiplexer
DAC	Digital to Analog Converter
ADC	Analog to Digital Converter
SPS	Samples Per Second
LDO	Low Dropout Regulator
SNR	Signal to Noise Ratio
RMSE	Root Mean Square Error
NRMSE	Normalized Root Mean Square Error
DCW	Dry Cell Weight





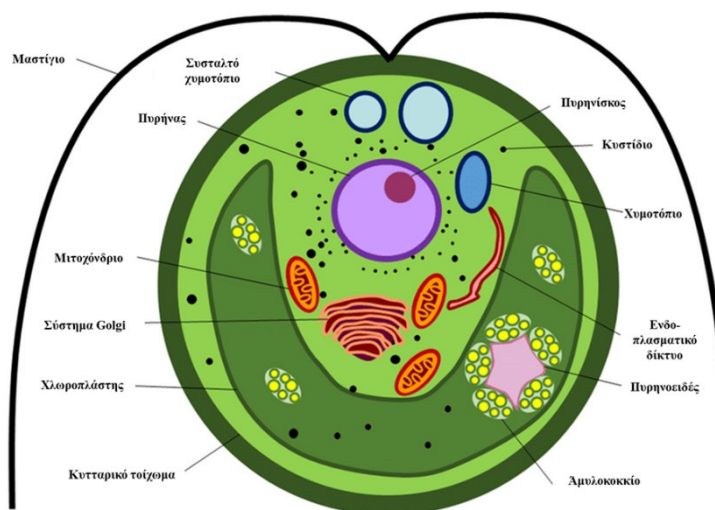
## Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

### 1.1 Μικροφύκη

Τα μικροφύκη αποτελούν μια πολυφυλετική ομάδα φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών τα οποία απαντώνται τόσο σε υδάτινα όσο και σε χερσαία οικοσυστήματα [1]. Οι φυκολόγοι ορίζουν τις φύκες ως οργανισμούς που περιέχουν χλωροφύλλη *a* και παρουσιάζουν θαλλική δομή, δηλαδή το σώμα τους δεν διαφοροποιείται σε ρίζες, βλαστούς ή φύλλα [2]. Αυτός ο ορισμός περιλαμβάνει και τα κυανοβακτήρια, παρά το γεγονός ότι ανήκουν στους προκαρυωτικούς οργανισμούς. Στην εφαρμοσμένη φυκολογία, ο όρος "μικροφύκη" χρησιμοποιείται για να περιγράψει τόσο τους ευκαριωτικούς φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς με την αυστηρή έννοια όσο και τα κυανοβακτήρια (προκαρυώτες) [3]. Μέσω της οξυγονικής φωτοσύνθεσης δεσμεύουν τον ανόργανο άνθρακα και παράγουν μια πληθώρα βιοδραστικών ενώσεων (πρωτεΐνες, λιπίδια, υδατάνθρακες, χρωστικές, βιταμίνες, αντιοξειδωτικά κ.α.) ενώ παράλληλα απελευθερώνουν οξυγόνο [4]. Τα μικροφύκη είναι υπεύθυνα για την παραγωγή έως και του 60% του οξυγόνου της ατμόσφαιρας της Γης [5], ενώ ήταν οι πρώτοι οργανισμοί που απελευθέρωσαν στοιχειακό οξυγόνο στην ατμόσφαιρα [6] και διαμόρφωσαν το σύγχρονο ατμοσφαιρικό περιβάλλον, επιτρέποντας παράλληλα την εξέλιξη αερόβιων οργανισμών, που βασίζονται στο οξυγόνο για την παραγωγή ενέργειας

#### 1.1.1 Κυτταρική Δομή Μικροφυκών

Τα ευκαρυωτικά μικροφύκη αποτελούν μια πολυφυλετική ομάδα μονοκύτταρων οργανισμών [7] και παρουσιάζουν πολύπλοκη κυτταρική δομή, αποτελούμενη από εξειδικευμένα οργανίδια (Εικόνα 1), απαραίτητα για διάφορες μεταβολικές διεργασίες του κυττάρου, όπως η φωτοσύνθεση, η παραγωγή ενέργειας και η γενετική ρύθμιση. Το κυτταρικό τοίχωμα αποτελείται κυρίως από πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες και λιπίδια και χρησιμεύει ως κρίσιμη διεπαφή μεταξύ του κυττάρου και του περιβάλλοντός του, παίζοντας σημαντικό ρόλο στην προστασία, τη δομική ακεραιότητα και την αλληλεπίδραση με το εξωτερικό περιβάλλον [8], [9]. Οι χλωροπλάστες, που βρίσκονται στο εσωτερικό του κυττάρου, περιέχουν χρωστικές όπως η χλωροφύλλη, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη φωτοσύνθεση, δεσμεύοντας το CO<sub>2</sub> για να παράγουν μεταβολίτες πλούσιους σε ενέργεια [10]. Στις θυλακοειδείς μεμβράνες των χλωροπλάστων ενσωματώνονται μόρια χλωροφυλλών και άλλων δευτερευόντων χρωστικών όπως τα καροτενοειδή, διευκολύνοντας την απορρόφηση του φωτός [11]. Στα ευκαρυωτικά μικροφύκη, ο πυρήνας περιέχει το γενετικό υλικό και ρυθμίζει τις κυτταρικές λειτουργίες. Τα μιτοχόνδρια είναι υπεύθυνα για την παραγωγή ενέργειας μέσω της κυτταρικής αναπνοής, ενώ οι βακουόλες λειτουργούν ως αποθηκευτικοί χώροι για νερό και θρεπτικά συστατικά, βοηθώντας στη διατήρηση της ομοιόστασης του κυττάρου.



Σχήμα 1.1 Απεικόνιση των οργανιδίων που υπάρχουν σε ένα τυπικό θαλάσσιο μονοκύτταρο μικροφύκος. ( από Rojary et al. [12] με τροποποίηση)

### 1.1.2 Χρωστικές στα Μικροφύκη:

Οι ευκαρυωτικοί αυτότροφοι μικροοργανισμοί διακρίνονται συνήθως ανάλογα με τις φωτοσυνθετικές χρωστικές που συλλέγουν το φως. Διαχωρίζονται σε Ροδοφύτα (κόκκινα φύκη), Chrysophyceae (χρυσά φύκη), Phaeophyceae (καφέ φύκη) και Χλωροφύκη (πράσινα φύκη). Ο φωτοσυνθετικός τους μηχανισμός είναι οργανωμένος σε ειδικά όργανα, τους χλωροπλάστες, που περιέχουν εναλλασσόμενα στρώματα λιποπρωτεϊνικών μεμβρανών (θυλακοειδή) και υδατικών στρωμάτων [12].

Τα μικροφύκη περιέχουν διάφορες χρωστικές, ανάλογα με το είδος τους [13], [14], [15]. Η χλωροφύλλη-α αποτελεί τη βασική χρωστική για τη φωτοσύνθεση, διαδραματίζοντας κεντρικό ρόλο στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε χημική. Τα καροτενοειδή, όπως το β-καροτένιο και το λυκοπένιο, συμβάλλουν στην προστασία από το φωτοοξειδωτικό στρες [16]. Παράλληλα, οι φυκοκυανίνες και οι φυκοερυθρίνες, που απαντώνται κυρίως στα κυανοβακτήρια, επιτρέπουν την προσαρμογή στο διαθέσιμο φως. Επιπλέον, οι ξανθοφύλλες συμμετέχουν τόσο στη φωτοσύνθεση όσο και στην προστασία από την έντονη ακτινοβολία.

Πίνακας 1.1 Φυσικές χρωστικές ουσίες σε μικροφύκη ή κυανοβακτήρια [15]

Χρώμα	Χρωστική	Ομάδα	Στέλεχος
Κόκκινο	Ασταξανθίνη	Chlorophyta	Chromochloris (Chlorella) zofingiensis Haematococcus pluvialis
Κόκκινο-Πορτοκαλί	Εχινενόνη	Chlorophyta	Dunaliella salina
Πορτοκαλί	B – Καροτένιο	Chlorophyta	Dunaliella salina
Κίτρινο πορτοκαλί	Ζεαξανθίνη	Chlorophyta	Dunaliella salina
Κίτρινο	Λουτεΐνη	Chlorophyta	Chlorella sorokiniana Chlamydomonas reinhardtii
Πράσινο	Χλωροφύλλη	Chlorophyta	Chlorella sorokiniana
Μπλε	Φυκοκυανοβυλίνη	Cyanophyta Rhodophyta	Synechocystis sp. PCC6803 Cyanidioschyzon merolae

### 1.1.3 Προσαρμογές σε Κατάσταση Στρες:

Όταν τα μικροφύκη εκτίθενται σε στρεσογόνους παράγοντες, όπως έντονο φως, υψηλή αλατότητα ή έλλειψη θρεπτικών ουσιών, αναπτύσσουν διάφορους μηχανισμούς προσαρμογής [17]. Συγκεκριμένα, αυξάνουν τη σύνθεση προστατευτικών χρωστικών, όπως τα καροτενοειδή, προκειμένου να προστατευτούν από το φωτοοξειδωτικό στρες [18], [19]. Παράλληλα, μεταβάλλουν τη σύνθεση των λιπιδίων τους ώστε να διατηρήσουν την ευελιξία της μεμβράνης [20], [21]. Επιπλέον, σχηματίζουν κύστες ή σώματα αποθήκευσης για τη διατήρηση ενέργειας και θρεπτικών ουσιών [22], [23]. Τέλος, εκκρίνουν εξωκυττάρια πολυμερή (EPS), τα οποία συμβάλλουν στην προστασία από μεταβολές στο περιβάλλον [24], [25].

## 1.2 Βιοτεχνολογία μικροφυκών

Η βιοτεχνολογία των μικροφυκών είναι ένας επιστημονικός κλάδος που εστιάζει στην εκμετάλλευση των μικροφυκών για βιολογικές και τεχνολογικές εφαρμογές, και περιλαμβάνει τη μελέτη, την καλλιέργεια και την εφαρμογή τους σε διάφορους τομείς, όπως η ενέργεια, η διατροφή, η υγεία και η προστασία του περιβάλλοντος [26].

Η βιοτεχνολογία των μικροφυκών βασίζεται σε μια σειρά τεχνικών που αποσκοπούν στην καλλιέργεια, την επεξεργασία και την εκμετάλλευση αυτών των μικροοργανισμών [3]. Αρχικά, η καλλιέργεια μικροφυκών πραγματοποιείται σε ειδικά διαμορφωμένα συστήματα, όπως οι φωτοβιοαντιδραστήρες (photobioreactors) και οι ανοιχτές δεξαμενές, τα οποία επιτρέπουν την παραγωγή τους σε μεγάλη κλίμακα. Αυτά τα συστήματα παρέχουν τον απαραίτητο έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων για τη βέλτιστη ανάπτυξη των μικροφυκών [27], [28].

Στη συνέχεια, η βελτιστοποίηση των συνθηκών καλλιέργειας αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής των επιθυμητών ουσιών [3]. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τον έλεγχο παραμέτρων, όπως η φωτεινότητα, η θερμοκρασία, το pH και η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των μικροφυκών [29].

Επιπλέον, η γενετική τροποποίηση των μικροφυκών έχει γίνει ένα ισχυρό εργαλείο στη βιοτεχνολογία. Με τη χρήση τεχνικών γενετικής μηχανικής, οι επιστήμονες μπορούν να βελτιώσουν την παραγωγικότητα των μικροφυκών ή να τις τροποποιήσουν ώστε να παράγουν νέες βιοενεργές ενώσεις, όπως φάρμακα ή βιοκαύσιμα [3], [30].

Τέλος, η εξαγωγή και ο καθαρισμός των προϊόντων αποτελεί το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας. Για την εξαγωγή ουσιών, όπως λιπίδια, χρωστικές και άλλες βιοενεργές ενώσεις, χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η υπερκριτική εκχύλιση [31] CO<sub>2</sub>. Αυτές οι μέθοδοι εξασφαλίζουν την αποτελεσματική απομόνωση και τον καθαρισμό των προϊόντων, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

### 1.2.1 Εφαρμογές μικροφυκών

Τα μικροφύκη παρουσιάζουν εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών, που τα καθιστά πολύτιμους βιολογικούς πόρους στη σύγχρονη βιοτεχνολογία και βιώσιμη ανάπτυξη.

Αρχικά, παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον στον τομέα των βιοκαυσίμων, λόγω της ικανότητάς τους να παράγουν λιπίδια υψηλής περιεκτικότητας, κατάλληλα για μετατροπή σε βιοντίζελ, βιομεθάνιο και άλλα ανανεώσιμα καύσιμα. Η παραγωγή βιομάζας μικροφυκών μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και σε λύματα, μειώνοντας την ανάγκη για γόνιμα εδάφη και καθαρό νερό, ενώ η αναλογία απόδοσης ανά εκτάριο είναι πολύ υψηλότερη από συμβατικές καλλιέργειες [5], [32].

Στον τομέα της επεξεργασίας λυμάτων, τα μικροφύκη έχουν αναδειχθεί ως μία αποτελεσματική λύση για τη βιολογική απορρύπανση. Μέσω της διαδικασίας της “rhycoremediation”, απομακρύνουν ρυπαντές όπως άζωτο, φώσφορο, βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις, ενώ παράλληλα δεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), συνεισφέροντας στην περιβαλλοντική απορρύπανση και στην κλιματική σταθερότητα [32], [33].

Ως τροφή και διατροφικό συμπλήρωμα, είδη όπως *Spirulina*, *Chlorella* και *Dunaliella* είναι πλούσια σε πρωτεΐνες, απαραίτητα αμινοξέα, ω-3 και ω-6 λιπαρά οξέα, καθώς και βιταμίνες και αντιοξειδωτικά. Τα μικροφύκη ενισχύουν το ανοσοποιητικό σύστημα και χρησιμοποιούνται σε μορφή σκόνης ή ταμπλέτας ως “superfoods” με παγκόσμια κατανάλωση [34], [35].

Επιπλέον, τα μικροφύκη αξιοποιούνται στη γεωργία ως βιολιπάσματα και βιοδιεγέρτες, λόγω της ικανότητάς τους να εμπλουτίζουν τα εδάφη με θρεπτικά συστατικά, να βελτιώνουν τη δομή τους και να αυξάνουν την απορρόφηση ανόργανων στοιχείων από τα φυτά. Παράγουν επίσης φυσικές ορμόνες ανάπτυξης, βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα των καλλιεργειών σε περιβαλλοντικές πιέσεις [35].

Στη φαρμακευτική βιοτεχνολογία, εξάγονται βιοδραστικά μόρια από μικροφύκη, όπως καροτενοειδή (π.χ. ασταξανθίνη), πολυσακχαρίτες, φαινολικές ενώσεις και λιπίδια, με τεκμηριωμένη αντιοξειδωτική, αντικαρκινική, αντιφλεγμονώδη και ανοσορρυθμιστική δράση. Επιπλέον, τα διατομικά μικροφύκη χρησιμοποιούνται ως φυσικοί φορείς για στοχευμένη χορήγηση φαρμάκων, λόγω της νανοπορώδους σιλικονούχας δομής τους [33], [36].

Σημαντική είναι και η χρήση των μικροφυκών στα καλλυντικά, όπου αξιοποιούνται οι φυσικές τους χρωστικές, τα ενυδατικά πολυμερή και οι αντιγηραντικές ουσίες. Η υψηλή βιοδιαθεσιμότητα και ασφάλεια των ενώσεών τους τα καθιστά κατάλληλα για προϊόντα δερματικής περιποίησης, αντηλιακά και σαμπουάν [35].

Τέλος, τα μικροφύκη χρησιμοποιούνται στην παραγωγή βιοφαρμακευτικών προϊόντων, όπως πρωτεΐνες, αντισώματα και εμβόλια, μέσω γενετικής τροποποίησης. Ως κυτταρικά συστήματα παραγωγής έχουν πλεονεκτήματα έναντι παραδοσιακών κυτταρικών καλλιεργειών λόγω του χαμηλού κόστους καλλιέργειας και της απουσίας παθογόνων για τον άνθρωπο [34], [36].

Μικροφύκη όπως τα *Oscillatoria princeps*, *Spirulina maxima*, *Aulosira fertilissima*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, *Microcystis* sp., *Pithophora odeogonia* και *Spirogyra hyalina* χρησιμοποιούνται στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων από το περιβάλλον χάρη στην ικανότητά τους να απορροφούν και να μεταφέρουν μέταλλα εντός των κυτταρικών τους οργανιδίων, κάτι που τα καθιστά πολύτιμα εργαλεία οικολογικής απορρύπανσης. Για την παραγωγή βιοκαυσίμων, ιδιαίτερα λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε λιπίδια, αξιοποιούνται είδη όπως *Chlorella emersonii*, *Chlorella protothecoides*, *Schizochytrium limacinum* και *Scenedesmus obliquus*. Στη βιοαποδόμηση συνθετικών πλαστικών (όπως PE και HDPE) συμμετέχουν τα *Scenedesmus dimorphus*, *Oscillatoria subbrevis*,

*Phormidium lucidum*, *Navicula pupula*, *Anabaena spiroides* και *Nostoc carneum*. Για την παραγωγή βιοπλαστικών αξιοποιούνται μικροφύκη πλούσια σε υδατάνθρακες και πρωτεΐνες, όπως τα *Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella vulgaris*, *Nostoc muscorum* και *Synechococcus* sp.. Όσον αφορά τη χρήση τους ως βιολιπάσματα, μικροφύκη όπως τα *Nostoc* sp., *Anabaena* sp., *Spirulina platensis*, *Acutodesmus dimorphus* και *Chlorella vulgaris* ξεχωρίζουν για την ικανότητά τους να δεσμεύουν άζωτο, να ενισχύουν τη γονιμότητα του εδάφους και να ενισχύουν την ανάπτυξη των φυτών. Τέλος, μικροφύκη όπως *Spirulina* spp., *Nostoc commune*, *Chlorella* spp., *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*, *Nannochloropsis*, *Navicula* και *Scenedesmus* χρησιμοποιούνται τόσο ως τροφή για τον άνθρωπο όσο και ως ζωοτροφή στην υδατοκαλλιέργεια και κτηνοτροφία, προσφέροντας πολύτιμα διατροφικά συστατικά όπως πρωτεΐνες, αντιοξειδωτικά και βιταμίνες [4].

### 1.2.2 Συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών

Τα συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών διακρίνονται σε κλειστά φωτοβιοαντιδραστήρια (photobioreactors, PBRs) και ανοικτά συστήματα, όπως τα κυκλικά και τα raceway ponds (RWP). Οι κλειστοί φωτοβιοαντιδραστήρες, είτε σωληνωτοί, είτε επίπεδοι, προσφέρουν αυστηρό έλεγχο στις συνθήκες καλλιέργειας, όπως το φως, η θερμοκρασία και το CO<sub>2</sub>, επιτρέποντας υψηλές αποδόσεις βιομάζας ανά όγκο συστήματος [27],[37]. Παρόλα αυτά, συνοδεύονται από υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, πράγμα το οποίο αποτρέπει τη βιομηχανική κλιμάκωση. Από την άλλη πλευρά, τα ανοικτά συστήματα, και ιδιαίτερα οι raceway και κυκλικές δεξαμενές, παραμένουν η πιο διαδεδομένη επιλογή για καλλιέργεια μεγάλης κλίμακας λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους [38],[39]. Στις raceway δεξαμενές, η ανάδευση επιτυγχάνεται με φτερωτούς τροχούς, ενώ έχουν ερευνηθεί καινοτόμες παρεμβάσεις όπως πλάγια πτερύγια και εκτροπείς ροής που μειώνουν τις νεκρές ζώνες, ενισχύουν την ανάδευση και αυξάνουν την αποδοτικότητα φωτός κατά μήκος του άξονα φωτοσύνθεσης[40]. Όπως αναφέρεται στην ανασκόπηση των Rayen et al. [38] οι κυκλικές δεξαμενές με ειδικούς αναδευτήρες (π.χ. υδροπτερύγια) παρουσιάζουν βελτιωμένη υδροδυναμική συμπεριφορά και αύξηση της συγκέντρωσης βιομάζας έως και 88% σε σύγκριση με συμβατικές διατάξεις. Επιπλέον, έχει προταθεί ένα νέο σύστημα Stacked Modular Open Raceway Ponds (SMORPs) για καλλιέργεια μικροφυκών εντός μονάδων βιοαερίου, το οποίο συνδυάζει πλεονεκτήματα και των δύο συστημάτων, μειώνοντας τη χρήση εδάφους και αξιοποιώντας παραπροϊόντα της αναερόβιας χώνευσης, όπως το υγρό κλάσμα του βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου [37]. Τέλος, η χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής CFD και τεχνικών PIV έχει επιτρέψει την ακριβή προσομοίωση και βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού και λειτουργίας των καλλιεργητικών συστημάτων, συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στην αύξηση της φωτοσυνθετικής απόδοσης [38], [39], [40].

## 1.3 Θεωρητικές Αρχές και Εφαρμογές της Φασματοφωτομετρίας στη Βιοτεχνολογία Μικροφυκών

### 1.3.1 Φασματοσκοπία και Φασματοφωτομετρία

Όταν ένα σύστημα απορροφά ενέργεια, τα ηλεκτρόνια του μπορούν να μεταβούν από μια χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη σε μια υψηλότερη, δηλαδή να διεγερθούν. Αντίστροφα, όταν επιστρέφουν σε μια χαμηλότερη στάθμη, είτε στην αρχική (θεμελιώδη) κατάσταση είτε σε μια ενδιάμεση, αποβάλλουν ενέργεια. Οι μεταπτώσεις αυτές συνοδεύονται από την απορρόφηση ή την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος, το οποίο εξαρτάται από το είδος της ηλεκτρονικής διέγερσης ή της μοριακής κίνησης (περιστροφές και δονήσεις) [41].

Η φασματοσκοπία είναι το σύνολο των τεχνικών που μελετούν την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη. Μέσω της φασματοσκοπίας, μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για τη δομή, τη σύσταση και τις ιδιότητες ατόμων και μορίων, καθώς κάθε χημικό είδος αλληλοεπιδρά με συγκεκριμένα μήκη κύματος με μοναδικό τρόπο [42]. Οι βασικές φασματοσκοπικές τεχνικές περιλαμβάνουν την απορρόφηση, την εκπομπή, και τη σκέδαση ακτινοβολίας.

Πίνακας 1.2 Φασματοσκοπικές Τεχνικές και Εφαρμογές

Τεχνική	Πεδίο Εφαρμογής	Είδος Δείγματος	Παρεχόμενη Πληροφορία
UV-Vis Absorption	Χημεία, Βιοτεχνολογία	Υγρά	Συγκέντρωση χρωστικών, OD [42]
IR (FTIR, NIR)	Οργανική Ανάλυση, Φαρμακευτική	Υγρά, Στερεά	Λειτουργικές ομάδες, οργανικά μόρια [43]
Raman	Χημεία, Υλικά	Υγρά, Στερεά, Αιωρήματα	Μοριακή δομή, συμμετρία [42], [43]
NMR (πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός)	Χημεία, Ιατρική (MRI)	Υγρά	Μοριακή δομή, περιβάλλον πυρήνων [42], [44]
AAS (Φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης)	Περιβάλλον, Βιολογία	Υγρά, Αέρια	Ποσοτικός προσδιορισμός μετάλλων [45]
AES / ICP-OES (Φασματοσκοπία ατομικής εκπομπής πλάσματος με επαγωγική σύζευξη)	Γεωχημεία, Βιομηχανία	Υγρά	Εκπομπή φωτός από μέταλλα [46]
EPR (Παραμαγνητικός συντονισμός ηλεκτρονίων)	Βιολογία, Υλικά	Στερεά, Υγρά	Ανίχνευση ελεύθερων ριζών [47]
Fluorescence (Φασματοσκοπία φθορισμού)	Βιολογία, Ιατρική	Υγρά	ανίχνευση φθοριζουσών ενώσεων [48]
MS (Mass Spectrometry) Φασματοσκοπία μάζας	Πρωτεωμική, Τοξικολογία	Οργανικά δείγματα	Ανάλυση μάζας, ταυτοποίηση μορίων [49]
XRD (Ανάλυση περίθλασης ακτίνων Χ)	Κρυσταλλογραφία, Υλικά	Στερεά	Δομή κρυσταλλικού πλέγματος [50]
XPS (Φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτίνων Χ)	Επιφανειακή Χημεία, Κατάλυση	Στερεά	Χημικές καταστάσεις επιφανείας [50]

Η φασματοφωτομετρία είναι εξειδικευμένος κλάδος της φασματοσκοπίας που εστιάζει στην ποσοτική μέτρηση της απορρόφησης ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Χρησιμοποιεί φασματοφωτόμετρο και βασίζεται στον νόμο Beer–Lambert για τον προσδιορισμό συγκεντρώσεων διαλυμένων ειδών, όπως χρωστικές, πρωτεΐνες ή κυτταρικά αιωρήματα [51].

### 1.3.2 Φασματοφωτομετρία στη Βιοτεχνολογία Μικροφυκών

Η φασματοφωτομετρία έχει αναδειχθεί σε ένα από τα βασικότερα εργαλεία για τη μη καταστρεπτική παρακολούθηση, ποσοτικοποίηση και έλεγχο της ανάπτυξης των μικροφυκών, τόσο σε εργαστηριακές καλλιέργειες όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Οι τεχνικές βασίζονται στη μέτρηση της απορρόφησης φωτός σε χαρακτηριστικά μήκη κύματος, τα οποία σχετίζονται με το περιεχόμενο των χρωστικών και την οπτική πυκνότητα του δείγματος [52].

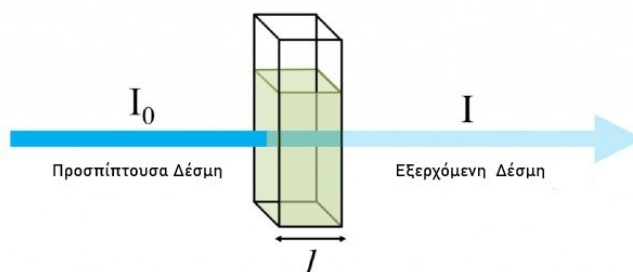
Η συνεχής παρακολούθηση OD επιτρέπει τη χαρτογράφηση των φάσεων ανάπτυξης (λανθάνουσα, εκθετική, στάσιμη) και χρησιμοποιείται σε συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών σε εργαστηριακό και βιομηχανικό περιβάλλον. Οι φασματοφωτομετρικές μετρήσεις μπορούν να ενσωματωθούν σε on-line συστήματα παρακολούθησης (UV-VIS αισθητήρες) για πραγματικό έλεγχο των συνθηκών καλλιέργειας.

Η παραδοσιακή μέθοδος εξαγωγής χλωροφύλλης είναι χρονοβόρα (24+ ώρες), διότι απαιτεί χημικούς διαλύτες και ειδική τεχνική κατάρτιση. Αντίθετα, η φασματοφωτομετρία, είναι άμεση, γρήγορη (εντός λεπτών), δεν απαιτεί χημικά αντιδραστήρια, είναι φθηνή και εφαρμόσιμη με μικρό όγκο δείγματος. Η μέθοδος της πρώτης παραγωγού είχε όρια ανίχνευσης 36–41 φορές χαμηλότερα από αυτά της εξαγωγής χλωροφύλλης σε όλους τους τύπους νερού [52].

### 1.3.3 Νόμος Bouguer- Lambert-Beer (BLB) Κλασική Διατύπωση

Ο νόμος Bouguer-Beer-Lambert, μια θεμελιώδης αρχή της φασματοσκοπίας που καθορίζει μια γραμμική σχέση μεταξύ της απορρόφησης και της συγκέντρωσης, είναι απαραίτητος για τη χημική ανάλυση και τις ποσοτικές μετρήσεις. Η απλότητά του και η ευρεία χρησιμότητά του έχουν οδηγήσει στην εφαρμογή του σε πλήθος επιστημονικών πεδίων, για τον προσδιορισμό συγκεντρώσεων ουσιών σε ποικίλα διαλύματα. Ωστόσο, οι εγγενείς παραδοχές και οι περιορισμοί αυτού του νόμου έχουν οδηγήσει σε αποκλίσεις κυρίως θεμελιώδεις, χημικές και οργανολογικές, οι οποίες ενέπνευσαν μια ένθερμη επιδίωξη τροποποιήσεων, με στόχο τη βελτίωση της ακριβείας του και τη διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής του [53], [54], [55].

Ο νόμος Bouguer-Beer-Lambert ή απλά ο νόμος Beer-Lambert υποστηρίζει ότι η ποσότητα του φωτός που απορροφάται από ένα διάλυμα το οποίο περιέχει μια απορροφητική ουσία είναι ευθέως ανάλογη της συγκέντρωσης και του μήκους διαδρομής του φωτός μέσω του διαλύματος (εξίσωση 1.1), απεικονίζοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ απορρόφησης και συγκέντρωσης [55].



Σχήμα 1.2 Διαπερατότητα του φωτός μέσω ενός δείγματος διαλύματος σε μια κυψελίδα[56].

$$\log_{10} \left( \frac{I_0}{I} \right) = A = \epsilon c l \quad (1.1)$$

Όπου:

$I_0$ : Ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

$I$ : Ένταση της εξασθενημένης ακτινοβολίας

$A$ : Απορρόφηση

$\epsilon$ : Μοριακός συντελεστής απορρόφησης ή μοριακός συντελεστής εξασθένησης ( $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$ )

$c$ : Συγκέντρωση του απορροφητικού είδους ( $mol \cdot L^{-1}$ ) ή ( $g \cdot L^{-1}$ )

$l$ : Μήκος της οπτικής διαδρομής.

Ο μοριακός συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και είναι μεγαλύτερος εκεί όπου η απορρόφηση είναι πιο έντονη. Οι διαστάσεις του είναι  $1/(\text{συγκέντρωση} \times \text{μήκος})$ , συνήθως εκφράζεται σε κυβικά δεκάμετρα ανά γραμμομόριο ανά εκατοστό ( $dm^3 mol^{-1} cm^{-1}$ ). Εναλλακτικές μονάδες είναι τετραγωνικά εκατοστά ανά mole ( $cm^2 mol^{-1}$ ). Αυτή η αλλαγή των μονάδων καταδεικνύει ότι το  $\epsilon$  μπορεί να θεωρηθεί ως μοριακή διατομή απορρόφησης και, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του μορίου για απορρόφηση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητά του να εμποδίζει τη διέλευση.

### 1.3.4 Ηλεκτρομαγνητική Διατύπωση του Νόμου BLB

Αν και ο νόμος Bouguer–Beer–Lambert (BBL) χρησιμοποιείται συχνά εμπειρικά στη φασματοφωτομετρία, η απορρόφηση του φωτός από την ύλη μπορεί να θεμελιωθεί μέσω των εξισώσεων του Maxwell και της κβαντικής θεωρίας της πόλωσης, συνδέοντας την απορρόφηση φωτός με τις ιδιότητες της ύλης σε μοριακό επίπεδο. Συνεπώς παρέχει μια πιο θεμελιώδη και λεπτομερή κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το φως αλληλοεπιδρά με την ύλη σε μοριακό επίπεδο, ενσωματώνοντας τις επιδράσεις της πολωσιμότητας, της ηλεκτρικής μετατόπισης, του δείκτη διάθλασης και της μοριακής διατομής απορρόφησης, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της κλασικής οπτικής και της κβαντομηχανικής [55].

Η παραγόμενη τελική εξίσωση για την απορρόφηση ( $A$ ) είναι [55]:

$$A = \frac{2\pi N_A \tilde{\nu} a'}{\epsilon_0 \ln 10} \cdot c \cdot d \quad (1.2)$$

Όπου:

$A$ : Απορρόφηση (Αδιάστατο)

$\tilde{\nu}$ : Αριθμός κυμάτων ( $m^{-1}$ )

$N_A$ : Σταθερά Avogadro ( $mol^{-1}$ )

$c$ : Συγκέντρωση ( $mol/m^3$ )

$a'$ : Πολωσιμότητα των μορίων ( $C^2 m^2 J^{-1}$ ) ή  $m^3$

$d$ : Οπτική διαδρομή ( $m$ )

$\epsilon_0$ : Διηλεκτρική Σταθερά ή Ηλεκτρική Επιτρεπτότητα ( $C^2 N^{-1} m^{-2}$ )

Η ηλεκτρομαγνητική θεμελίωση του νόμου Bouguer–Beer–Lambert δείχνει ότι η απορρόφηση  $A$  σχετίζεται άμεσα με τη φανταστική συνιστώσα του τετραγώνου του δείκτη διάθλασης  $n^2$ , ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την πολωσιμότητα και τη συγκέντρωση του δείγματος.

$$n^2 = 1 + c \frac{N_A a'}{\epsilon_0} \Rightarrow A \propto \text{Im}(n^2) \quad (1.3)$$



Σε αραιά διαλύματα, η συγκέντρωση  $c$  είναι αρκετά μικρή ώστε ο δείκτης διάθλασης  $n$  να παραμένει ουσιαστικά σταθερός. Σε αυτή την περιοχή, ο νόμος Beer–Lambert ισχύει γραμμικά και η απορρόφηση αυξάνεται αναλογικά με τη συγκέντρωση.

Ωστόσο, σε πυκνά ή ισχυρά απορροφητικά διαλύματα, η αύξηση της συγκέντρωσης προκαλεί αισθητή μεταβολή στον δείκτη διάθλασης. Αυτό οφείλεται τόσο σε ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ μορίων όσο και στην τροποποίηση του τοπικού ηλεκτρικού πεδίου που βιώνει κάθε μόριο. Η συνέπεια είναι ότι η εξασθένιση της ακτινοβολίας δεν είναι πλέον απλή εκθετική, οδηγώντας σε μη γραμμικές αποκλίσεις από τον νόμο [55].

### 1.3.5 Προϋποθέσεις και Περιορισμοί του Νόμου BLB

Η εφαρμογή του νόμου Beer–Lambert προϋποθέτει ορισμένες θεωρητικές και πειραματικές συνθήκες ώστε να εξασφαλίζεται η γραμμικότητα της απορρόφησης ως προς τη συγκέντρωση [55], [57], [58]. Οι βασικές προϋποθέσεις είναι οι εξής:

- i. Μονοχρωματική ακτινοβολία: Ο νόμος ισχύει αυστηρά μόνο όταν χρησιμοποιείται ακτινοβολία ενός και μόνο μήκους κύματος. Η χρήση πολυχρωματικού φωτός οδηγεί σε σύνθετο φάσμα απορρόφησης και, κατά συνέπεια, σε αποκλίσεις από τη θεωρητική γραμμικότητα.
- ii. Ομοιογενές και διαυγές δείγμα: Το απορροφόν είδος πρέπει να είναι πλήρως διαλυμένο και ομοιογενές στο μέσο, χωρίς αιωρούμενα σωματίδια που να προκαλούν σκέδαση.
- iii. Απουσία σκέδασης και φθορισμού: Η απορρόφηση πρέπει να είναι η μοναδική διαδικασία που επηρεάζει την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Φαινόμενα σκέδασης (π.χ. από θολά δείγματα) ή εκπομπής (π.χ. φθορισμός) αλλοιώνουν τη μετρούμενη ένταση και εισάγουν σφάλμα.
- iv. Χημική σταθερότητα: Η φασματική μέτρηση πρέπει να λαμβάνει χώρα σε χημικά σταθερό περιβάλλον. Αν συμβαίνουν αντιδράσεις κατά τη διάρκεια της μέτρησης (π.χ. αποδόμηση, αλλαγή pH, σύμπλοκα), το φάσμα μεταβάλλεται και η εξίσωση του νόμου καθίσταται μη έγκυρη.
- v. Γραμμική απόκριση μορίων στο πεδίο - Ανεξαρτησία απορρόφησης: Η απορροφητική ικανότητα κάθε μορίου θεωρείται σταθερή και ανεξάρτητη από την παρουσία άλλων μορίων ή την ένταση της ακτινοβολίας. Σε υψηλές συγκεντρώσεις ή ισχυρό φως, παραβιάζεται η υπόθεση αυτή λόγω διαμοριακών αλληλεπιδράσεων ή κορεσμού.

Πολλές από τις παραπάνω προϋποθέσεις παραβιάζονται στην πράξη, οδηγώντας σε αποκλίσεις από τον νόμο. Συνεπώς ο νόμος Beer–Lambert υπόκειται σε σημαντικούς περιορισμούς [55], [58] που προκύπτουν είτε από τη φυσική του θεμελίωση είτε από πρακτικούς παράγοντες:

#### Θεμελιώδεις ή Πραγματικοί Περιορισμοί

Οι θεμελιώδεις αποκλίσεις (ή πραγματικές αποκλίσεις) οφείλονται σε εγγενείς περιορισμούς που σχετίζονται με τις βασικές παραδοχές του νόμου Beer–Lambert. Ο νόμος αυτός ισχύει αυστηρά μόνο υπό την προϋπόθεση χαμηλής συγκέντρωσης αναλυτών, συνήθως κάτω από  $0,01\text{mol/L}$  ώστε να αποφεύγονται αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαλυμένων σωματιδίων.

Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, η ελάττωση της μέσης απόστασης μεταξύ των μορίων οδηγεί σε αλληλεπιδράσεις που μεταβάλλουν την απορροφητική συμπεριφορά του αναλύτη. Τέτοιες αλληλεπιδράσεις μπορεί να περιλαμβάνουν δεσμούς υδρογόνου, ηλεκτροστατικά φαινόμενα ή ακόμη και διαταραχές στην κατανομή φορτίου, οι οποίες επηρεάζουν την ικανότητα των μορίων να απορροφούν φως σε συγκεκριμένα μήκη κύματος.

Επιπλέον, σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεώρηση της απορρόφησης, σε υψηλές συγκεντρώσεις παρατηρείται μεταβολή στον δείκτη διάθλασης του διαλύματος, γεγονός που αλλοιώνει τη γραμμική σχέση μεταξύ απορρόφησης και συγκέντρωσης. Ενώ σε αραιά διαλύματα ο δείκτης διάθλασης θεωρείται σταθερός, σε πυκνότερα διαλύματα η συμβολή όρων ανώτερης τάξης προκαλεί απόκλιση από τη θεωρητική ευθύγραμμη συμπεριφορά και, κατά συνέπεια, περιορισμό της εγκυρότητας του νόμου.

### **Χημικοί Περιορισμοί**

Οι χημικές αποκλίσεις προκύπτουν όταν η απορροφητική συμπεριφορά του αναλύτη μεταβάλλεται λόγω της χημικής του φύσης ή των συνθηκών του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται. Παράγοντες όπως το pH, η παρουσία άλλων ιόντων ή η μεταβολή της συγκέντρωσης μπορούν να οδηγήσουν σε μετατοπίσεις της χημικής ισορροπίας του αναλύτη, επηρεάζοντας τη φασματική του συμπεριφορά.

### **Οργανολογικοί Περιορισμοί**

Οι οργανολογικές αποκλίσεις σχετίζονται με τεχνικούς περιορισμούς του φασματοφωτομέτρου ή με σφάλματα στη διαδικασία μέτρησης της απορρόφησης. Αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να προκύψουν από δύο βασικές πηγές σφάλματος.

Πρώτον, ο νόμος Beer–Lambert εφαρμόζεται αυστηρά μόνο όταν η ακτινοβολία που διέρχεται από το δείγμα είναι μονοχρωματική, δηλαδή αποτελείται από ένα μόνο μήκος κύματος. Στην πράξη, όμως, πολλές συσκευές χρησιμοποιούν πολυχρωματικές πηγές ή φίλτρα με φασματικό εύρος, γεγονός που οδηγεί σε απόκλιση από τη θεωρητικά προβλεπόμενη γραμμική συμπεριφορά, ειδικά όταν ο αναλύτης εμφανίζει έντονη απορρόφηση σε ευρύτερο φάσμα μηκών κύματος.

Δεύτερον, σημαντική πηγή σφάλματος αποτελεί η παρασιτική ακτινοβολία (stray light). Πρόκειται για φως που φτάνει στον ανιχνευτή χωρίς να έχει περάσει από το δείγμα, λόγω διαρροών ή ατελειών στον επιλογέα μήκους κύματος ή στο οπτικό σύστημα. Αυτή η πρόσθετη ακτινοβολία αυξάνει την τιμή της μετρούμενης έντασης ( $I$ ), μειώνοντας τεχνητά την υπολογιζόμενη απορρόφηση.

#### 1.4 Μήκη Κύματος για την Εκτίμηση της Συγκέντρωσης και του Ξηρού Βάρους

Οι φασματοφωτομετρικές μετρήσεις οπτικής πυκνότητας (OD) αποτελούν μια απλή και ταχεία μέθοδο εκτίμησης της συγκέντρωσης και του ξηρού βάρους (βιομάζας) μικροφυκών σε καλλιέργειες. Πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, όπου τα κύτταρα εμφανίζουν χαρακτηριστική απορρόφηση φωτός. Με κατάλληλη βαθμονόμηση, παρατηρείται υψηλή συσχέτιση της OD με το ξηρό βάρος εντός μιας συγκεκριμένης καλλιέργειας [59]. Συνήθως επιλέγονται μήκη κύματος που συμπίπτουν με τα φάσματα απορρόφησης των κύριων φωτοσυνθετικών χρωστικών, ώστε μικρές μεταβολές στην κυτταρική πυκνότητα να προκαλούν αισθητές μεταβολές στην OD. Για παράδειγμα, μια κοινή επιλογή είναι τα 680nm, όπου η χλωροφύλλη-α απορροφά έντονα στο κόκκινο, μεγιστοποιώντας την ευαισθησία της μέτρησης. Πέρα όμως από τις φασματικές κορυφές χρωστικών, χρησιμοποιούνται επίσης «τυφλά» μήκη κύματος στο εγγύς υπέρυθρο (όπου δεν απορροφούν οι χρωστικές) προκειμένου να εκτιμηθεί η θολότητα λόγω σκέδασης. Στη συνέχεια αναλύονται οι κυριότερες φασματοφωτομετρικές επιλογές μηκών κύματος και οι λόγοι χρήσης τους, καθώς και οι περιορισμοί που θέτουν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κυττάρων.

Το μήκος κύματος των 680nm έχει καθιερωθεί ως πρότυπο για την εκτίμηση της πυκνότητας μικροφυκών, διότι αντιστοιχεί σε μέγιστη απορρόφηση της χλωροφύλλης-α. Η χλωροφύλλη-α είναι η κυρίαρχη φωτοσυνθετική χρωστική στα μικροφύκη, παρουσιάζοντας έντονη κορυφή απορρόφησης στο ερυθρό μέρος του φάσματος (680nm). Έτσι, η μέτρηση OD<sub>680</sub> παρέχει άμεση ένδειξη του φορτίου σε βιομάζα. Όσο περισσότερα κύτταρα (και άρα περισσότερη χλωροφύλλη) υπάρχουν, τόσο αυξάνει η απορρόφηση σε αυτή την περιοχή. Πράγματι, πολλά πειράματα δείχνουν ότι η OD σε αυτό το μήκος κύματος συσχετίζεται ισχυρά τόσο με την αριθμητική πυκνότητα των κυττάρων όσο και με το ξηρό τους βάρος, μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση [59]. Σύμφωνα με την εργασία των Hotos et al. (2020) [60], τα 680nm αποτελούν ένα από τα πιο αξιόπιστα μήκη κύματος για τη μέτρηση της οπτικής πυκνότητας (OD) μικροφυκών, καθώς παρατηρείται μέγιστη απορρόφηση για διάφορα είδη, όπως *Nephroselmis* sp. και *Amphidinium carterae*. Η εργασία καταλήγει ότι το 680nm προσφέρει υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $R^2 > 0,99$ ) μεταξύ OD και πυκνότητας κυττάρων, καθιστώντας το ιδανική επιλογή για εφαρμογές βαθμονόμησης και παρακολούθησης βιομάζας [60]. Συχνά, το OD<sub>680</sub> συνδυάζεται και με μετρήσεις σε άλλα μήκη κύματος (π.χ. στο μπλε, 430nm, άλλη κορυφή χλωροφύλλης) για πληρέστερη εικόνα, όμως τα 680nm παραμένουν το πλέον διαδεδομένο μήκος κύματος για γρήγορη εκτίμηση της βιομάζας στο εργαστήριο.

Παρά την ευρεία χρήση του, το μήκος 680nm παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα και απαιτεί προσοχή. Ένα βασικό πρόβλημα είναι ότι η απορρόφηση σε αυτό το μήκος κύματος εξαρτάται όχι μόνο από την ποσότητα των κυττάρων αλλά και από την περιεκτικότητά τους σε χρωστικές. Διαφορετικά είδη μικροφυκών ή ακόμα και η ίδια καλλιέργεια σε διαφορετικές συνθήκες μπορεί να έχουν διαφορετικά ποσά χλωροφύλλης ανά κύτταρο. Έτσι, η βαθμονόμηση OD<sub>680</sub> προς βιομάζα μπορεί να αποδειχθεί ανακριβής όταν αλλάζει σημαντικά το περιεχόμενο χλωροφύλλης (π.χ. λόγω συνθηκών φωτισμού ή θρεπτικών συστατικών). Όπως έχει σημειωθεί, η συσχέτιση της βιομάζας με μήκη κύματος στα οποία υπάρχουν κορυφές χρωστικών (π.χ. 650–680 nm για χλωροφύλλες) μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο σφάλμα αν η συγκέντρωση των χρωστικών μεταβληθεί.

Επιπλέον, σε πυκνές καλλιέργειες η OD<sub>680</sub> ενδέχεται να υπερβεί την γραμμική περιοχή ανίχνευσης του φασματοφωτομέτρου. Τιμές απορρόφησης μεγαλύτερες από ~1 A.U. σημαίνουν ότι λιγότερο από 10% του φωτός διέρχεται από το δείγμα, κάτι που προσεγγίζει τα όρια ευαισθησίας πολλών οργάνων [59].

Για παράδειγμα, μια  $OD = 2$  αντιστοιχεί μόλις σε 1% μετάδοση φωτός, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αναξιόπιστες ενδείξεις εάν δεν γίνει αραίωση του δείγματος. Συνιστάται λοιπόν οι μετρήσεις να διατηρούνται σε  $OD \leq 1$  (μέσω κατάλληλων αραιώσεων για πολύ πυκνά δείγματα) ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων [59]. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία άλλων απορροφητικών ουσιών στο δείγμα ή θραυσμάτων κυττάρων (debris) μπορεί επίσης να επηρεάσει την  $OD_{680}$  και να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της πραγματικής ζωντανής βιομάζας [61]. Αυτοί οι περιορισμοί καθιστούν σαφές ότι οι μετρήσεις στα 680 nm πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή και, όπου είναι δυνατόν, να υποστηρίζονται από συμπληρωματικές μετρήσεις ή διορθώσεις.

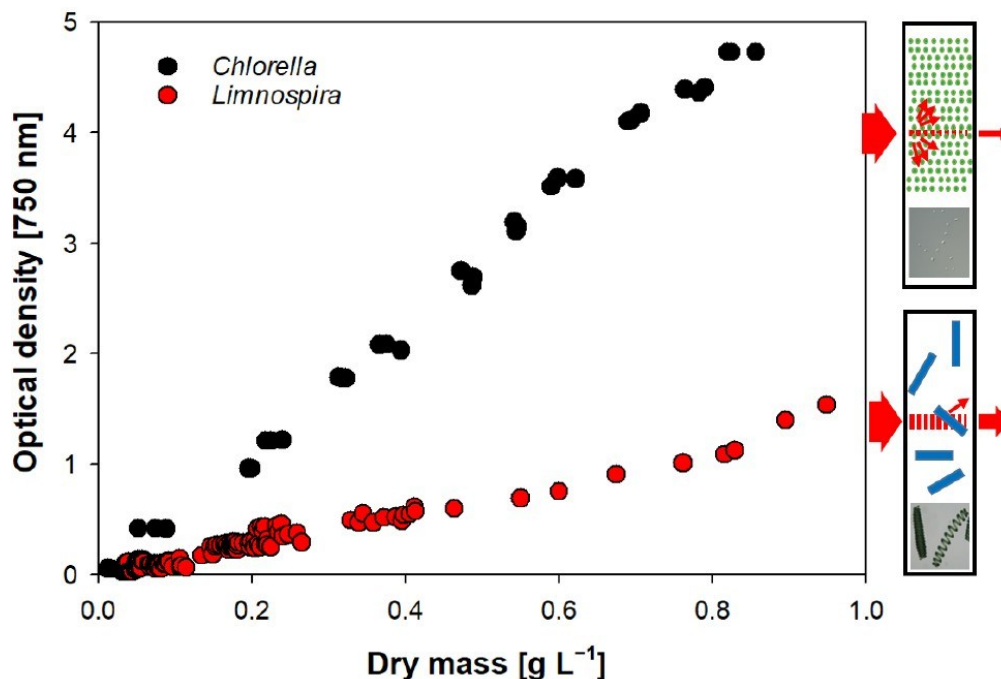
Για τη βελτίωση της ακρίβειας, είναι σύνηθες να μετράται παράλληλα η οπτική πυκνότητα σε μια περιοχή του φάσματος όπου δεν υπάρχει απορρόφηση από τις χρωστικές των μικροφυκών. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το μήκος  $\sim 730$  nm (ή γενικότερα 720–750 nm), όπου καμία φωτοσυνθετική χρωστική δεν απορροφά σημαντικά. Η οπτική πυκνότητα σε αυτό το μήκος κύματος αντανακλά κυρίως τη σκέδαση του φωτός από τα κύτταρα, δηλαδή τη θολερότητα του εναιωρήματος, ανεξάρτητα από το χρώμα των κυττάρων [62]. Έτσι, το  $OD_{730}$  χρησιμοποιείται ως μέτρο της συνολικής πυκνότητας (βιομάζας) που δεν επηρεάζεται από μεταβολές στην περιεκτικότητα σε χρωστικές. Στην πράξη, λειτουργεί ως μέτρηση αναφοράς της σκέδασης, την οποία μπορούμε να συγκρίνουμε ή να αφαιρούμε από την  $OD_{680}$  για να διαχωρίσουμε την «καθαρή» απορρόφηση λόγω χλωροφύλλης από την άχρωμη σκέδαση. Στην εργασία των Hotos et al. (2020) [60], το μήκος κύματος 750nm χρησιμοποιήθηκε συστηματικά σε είδη μικροφυκών για τη δημιουργία καμπυλών βαθμονόμησης  $OD$ –βιομάζας.

Πέραν της απλής διόρθωσης με ένα μόνο κανάλι αναφοράς, έχει αποδειχθεί ότι η χρήση περισσότερων του ενός σημείων στο υπέρυθρο μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω την ικανότητα διάκρισης και την ακρίβεια των φασματοφωτομετρικών μετρήσεων. Ένα πρόσθετο κανάλι γύρω στα 760 nm μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το κανάλι των 730 nm για να εκτιμηθεί η μεταβολή της σκέδασης συναρτήσει του μήκους κύματος (η οποία σχετίζεται με το μέγεθος και τις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων).

Ένα εντελώς διαφορετικό μήκος κύματος ενδιαφέροντος είναι το εγγύς υπέρυθρο γύρω στα 940nm, το οποίο δεν σχετίζεται με απορρόφηση χλωροφύλλης αλλά με απορροφητικές ιδιότητες μορίων που παράγουν τα ίδια τα κύτταρα. Συγκεκριμένα, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι τα ζωντανά μικροφύκη παρουσιάζουν μια χαρακτηριστική κορυφή απορρόφησης στην περιοχή 940–960nm, η οποία αποδίδεται στις ομάδες  $-OH$  της γλυκόζης [61]. Οι πράσινοι μικροοργανισμοί παράγουν γλυκόζη μέσω της φωτοσύνθεσης, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε άλλους υδατάνθρακες όπως το άμυλο, η κυτταρίνη και τα διάφορα πολυσακχαρίδια του κυτταρικού τοιχώματος. Η παρουσία λοιπόν ενός φασματικού μέγιστου κοντά στα 940nm θεωρείται ενδεικτική της συγκέντρωσης γλυκόζης (και εν γένει διαλυτών παραγώγων της) στο μέσο καλλιέργειας [61].

Η απορρόφηση σε αυτά τα μήκη κύματος είναι ασθενής αλλά μετρήσιμη και αυξάνεται σταθερά καθώς αναπτύσσεται η καλλιέργεια. Σε πειράματα με *Scenedesmus* sp., παρατηρήθηκε ότι από την πρώτη κιόλας ημέρα καλλιέργειας υπάρχει ένα σήμα στους 940–960nm, το οποίο ενισχύεται σημαντικά με την πάροδο των ημερών και την αύξηση του πληθυσμού. Επειδή η γλυκόζη αποτελεί το αρχικό προϊόν της φωτοσύνθεσης και πρόδρομη ένωση για όλα τα υπόλοιπα βιομόρια (άμυλο, κυτταρικοί πολυσακχαρίτες, γλυκολιπίδια κ.ά.), η συνεχής αύξηση της απορρόφησης σε αυτή την περιοχή συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό ανάπτυξης και τη ζωτική δραστηριότητα των κυττάρων [61]. Με απλά λόγια, ένα υψηλό ή αυξανόμενο  $OD_{940}$  υποδηλώνει ότι τα κύτταρα είναι ενεργά και συνθέτουν υδατάνθρακες. Αντίθετα, σε μια σταματημένη ή νεκρή καλλιέργεια το σήμα αυτό δεν θα παρουσίαζε την ίδια αύξηση.

Τέλος, είναι κρίσιμο να ληφθεί υπόψη ότι τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των μικροφυκών μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις φασματοφωτομετρικές μετρήσεις OD. Η σχέση μεταξύ του αριθμού των σωματιδίων (κυττάρων) και της απορρόφησης δεν είναι απλή, διότι εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και τον δείκτη διάθλασης των κυττάρων [62]. Για παράδειγμα, μικρά σφαιρικά κύτταρα όπως μιας *Chlorella* sp. σκορπίζουν περισσότερο το φως σε σχέση με μεγάλα νηματοειδή κύτταρα όπως μιας κυανοβακτηριακής *Limnospira*. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε ίση πραγματική βιομάζα (ίδιο ξηρό βάρος), το εναιώρημα με τα μικρά κύτταρα να δίνει υψηλότερη οπτική πυκνότητα από ό,τι με τα μεγάλα, λόγω της εντονότερης σκέδασης [59]. Έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι είδη με μικρότερα ή περισσότερα κύτταρα αποδίδουν μεγαλύτερες τιμές οπτικής πυκνότητας συγκριτικά με είδη που σχηματίζουν μεγαλύτερες δομές, ακόμα κι αν η μάζα τους είναι παρόμοια [59]. Επομένως, δεν είναι δόκιμη η απευθείας σύγκριση τιμών OD μεταξύ διαφορετικών ειδών χωρίς βαθμονόμηση, κάθε οργανισμός απαιτεί τη δική του καμπύλη συσχέτισης OD-βιομάζας.



Σχήμα 1.3 Σύγκριση Οπτικής Πυκνότητας δύο ειδών *Chlorella Vulgaris*. και *Limnospira fusiformis*[59]

### Μέτρηση Λιπιδίων

Οι λιπιδικές ενώσεις αποτελούν κρίσιμο δείκτη της μεταβολικής δραστηριότητας και της βιοσύνθεσης ενεργειακών αποθεμάτων στα μικροφύκη. Η ποσοτική τους προσέγγιση είναι θεμελιώδης τόσο για τη μελέτη της φυσιολογίας των μικροοργανισμών όσο και για την αξιολόγηση της καταλληλότητάς τους ως πρώτες ύλες στην παραγωγή βιοκαυσίμων τρίτης γενιάς [63]. Ωστόσο, λόγω της απουσίας χαρακτηριστικής απορρόφησης των λιπιδίων στο ορατό φάσμα, απαιτείται χημική τροποποίηση ή χρώση ώστε να καταστούν ανιχνεύσιμα φασματοσκοπικά.

Μία ευρέως χρησιμοποιούμενη χρωμογενής μέθοδος είναι η Sulfo-Phospho-Vanillin (SPV), κατά την οποία τα λιπίδια εκχυλίζονται πρώτα με οργανικούς διαλύτες και στη συνέχεια αντιδρούν με αντιδραστήριο που περιέχει θειικό οξύ και βανιλίνη, παράγοντας ένα ροζ-μωβ σύμπλοκο με μέγιστη απορρόφηση στα 525–530 nm [63], [64]. Η ένταση απορρόφησης σε αυτά τα μήκη κύματος επιτρέπει την έμμεση ποσοτικοποίηση των συνολικών λιπιδίων, με σύγκριση έναντι πρότυπων δειγμάτων γνωστής συγκέντρωσης. Παρότι η μέθοδος SPV είναι απλή και οικονομική, απαιτεί προκατεργασία,

χημική αντίδραση και φασματοφωτομετρική ανάλυση, γεγονός που αυξάνει το χρόνο και το κόστος των μετρήσεων και εισάγει πιθανά σφάλματα [65].

Συνολικά, η ανίχνευση λιπιδίων μέσω της SPV αποτελεί έμμεση αλλά αποτελεσματική μέθοδο αξιολόγησης της λιπιδικής σύστασης της βιομάζας, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για την ενεργειακή της αξία στο πλαίσιο της βιοτεχνολογίας των βιοκαυσίμων [63].

## 1.5 Στόχος μεταπτυχιακής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην αξιοποίηση της φασματοφωτομετρικής τεχνικής ως εργαλείου για την οπτική ανάλυση μικροφυκών, μέσω της μελέτης της απορρόφησης φωτός σε επιλεγμένα μήκη κύματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μέτρηση της οπτικής πυκνότητας (OD) και στην κατανόηση των βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη φασματική απόκριση βιολογικών δειγμάτων, όπως η χλωροφύλλη, τα λιπίδια και άλλοι βιοχημικοί δείκτες.

Σε πρακτικό επίπεδο, η εργασία επικεντρώνεται στη σχεδίαση και κατασκευή ενός φορητού, χαμηλού κόστους φασματοφωτομέτρου, ικανού να εκτελεί αξιόπιστες μετρήσεις οπτικής πυκνότητας μικροφυκών σε κρίσιμα φασματικά κανάλια. Οι φασματικές περιοχές επιλέχθηκαν με βάση τη βιβλιογραφία και σχετίζονται άμεσα με τη φυσιολογία και την ανάπτυξη των μικροφυκών.

Το σύστημα έχει σχεδιαστεί με σκοπό την αξιοποίησή του σε εκπαιδευτικά και ερευνητικά περιβάλλοντα, σε επιστημονικά πεδία όπως η Βιολογία, η Τεχνολογία Τροφίμων και η Γεωπονία. Μέσω της διασύνδεσης με εξειδικευμένο λογισμικό για υπολογιστή, δίνεται η δυνατότητα λήψης, απεικόνισης και ανάλυσης των μετρήσεων, προσφέροντας μια πλήρως λειτουργική εργαστηριακή εμπειρία.

Στο πλαίσιο μελλοντικής εξέλιξης, προβλέπεται η ενσωμάτωση της διάταξης σε αισθητήρα τύπου probe για *in situ* παρακολούθηση της καλλιέργειας μικροφυκών σε φωτοβιοαντιδραστήρες. Η δυνατότητα online μέτρησης της ανάπτυξης σε πραγματικό χρόνο θα διευκολύνει εφαρμογές σε βιοτεχνολογία, περιβαλλοντική παρακολούθηση και βιομηχανική παραγωγή βιομάζας.

## 1.6 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η θεμελιώδης θεωρητική βάση της εργασίας, ξεκινώντας από τη βιολογική φύση και τη λειτουργία των μικροφυκών, τις κυτταρικές και χρωστικές τους ιδιότητες, καθώς και τις προσαρμογές τους σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι κύριες βιοτεχνολογικές εφαρμογές των μικροφυκών και τα συστήματα καλλιέργειας που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και την έρευνα.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη φασματοφωτομετρική τεχνική, ως βασικό εργαλείο για την ανάλυση των μικροφυκών, και στη θεωρητική θεμελίωση του Νόμου Bouguer–Lambert–Beer. Τονίστηκαν οι προϋποθέσεις εγκυρότητας του νόμου, οι περιορισμοί του και η σημασία της κατανόησης της φασματικής απόκρισης των βιολογικών δειγμάτων για την ακριβή εκτίμηση της οπτικής πυκνότητας (OD).

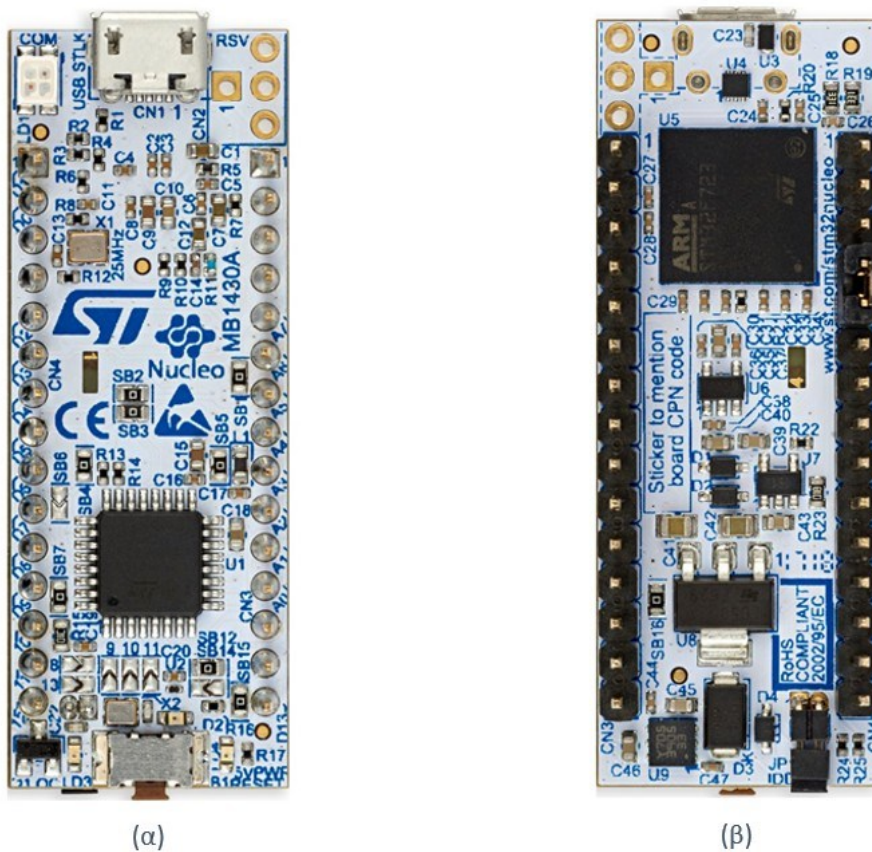
Η ολοκλήρωση του κεφαλαίου αυτού παρέχει το αναγκαίο υπόβαθρο για την κατανόηση των μετρητικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν στη συνέχεια και τη σύνδεση της βιολογικής πληροφορίας με τις οπτικές μετρήσεις.

## Κεφάλαιο 2ο: Υλικά Κατασκευής Συστήματος

Σε αυτήν την ενότητα αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μετρητή οπτικής πυκνότητας.

### 2.1 Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε για τον σχεδιασμό του συστήματος είναι ο STM32G431xB της οικογένειας STM32G431 της STMicroelectronics που ενσωματώνεται στην αναπτυξιακή πλακέτα Nucleo-G431KB [66]. Η επιλογή έγινε με γνώμονα το μικρό μέγεθος της πλακέτας και των εξαιρετικών χαρακτηριστικών του [67], [68], που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Η υψηλή υπολογιστική ισχύς, η ευελιξία επικοινωνίας και η υποστήριξη για εξωτερικά περιφερειακά τον καθιστούν ιδανικό για την εφαρμογή αυτή.



Σχήμα 2.1 Nucleo-G431KB (α) Επάνω Όψη (β) Κάτω Όψη [66]

Παρακάτω αναλύονται τα κύρια μέρη του μικροελεγκτή, της αρχιτεκτονικής του και των δυνατοτήτων του.

Πίνακας 2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Nucleo-G431KB[68]

Μέρη συστήματος	Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
<b>Πυρήνας &amp; Επεξεργαστική Ισχύς</b>	<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>Λεπτομέρειες</b>
	Πυρήνας	ARM Cortex-M4 με FPU (Floating Point Unit) και DSP (Digital Signal Processing)
	Ταχύτητα Ρολογιού	Έως 170 MHz
	FPU	Υποστήριξη single-precision (IEEE 754) για αριθμητική κινητής υποδιαστολής
	Math Accelerator	CORDIC (1-κύκλου για τριγωνομετρικές /υπερβολικές συναρτήσεις)
	Δίαυλος Δεδομένων	32-bit
<b>Μνήμη</b>	<b>Τύπος Μνήμης</b>	<b>Χωρητικότητα</b>
	Flash Memory	128 KB
	SRAM	32 KB (+16 KB με ECC)
<b>Περιφερειακά &amp; Διασυνδέσεις</b>	<b>Διασύνδεση</b>	<b>Λεπτομέρειες</b>
	I2C	2x (SMBus/PMBus)
	UART/USART	3x
	SPI	2x (με I2S)
	CAN FD	1x
	USB 2.0	Full-Speed (12 Mbps)
	ADC	2x 12-bit (4 Msps)
	DAC	2x 12-bit
	Συγκριτές (Comparators)	3x
<b>Χαρακτηριστικά Ενέργειας</b>	<b>Λειτουργία</b>	<b>Λεπτομέρειες</b>
	Τάση Λειτουργίας (MCU)	1.7V – 3.6V
	Low-Power Modes	Sleep, Stop, Standby
	Συναγερμοί (Wake-up)	Με χρονοδιακόπτες ή εξωτερικά events
<b>Ειδικές Δυνατότητες</b>	<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>Πλεονέκτημα</b>
	HRTIM (High-Resolution Timer)	Ακριβής ~184 ps resolution
	Op-Amps (Ενσωματωμένοι)	Ενίσχυση σημάτων χωρίς εξωτερικά στοιχεία
	Ασφάλεια	Hardware CRC, Προστασία Flash

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του μικροελεγκτή για την παρούσα εφαρμογή είναι η υποστήριξη πολλαπλών περιφερειακών, καθώς μπορεί να συνδεθεί ταυτόχρονα με διάφορους αισθητήρες και συσκευές μέσω των διαύλων I2C, SPI και UART. Διαθέτει υψηλή υπολογιστική ισχύ, η οποία επιτρέπει την επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, προσφέρει ευελιξία λογισμικού, καθώς υποστηρίζεται πλήρως από το STM32 HAL (Hardware Abstraction Layer) και το περιβάλλον ανάπτυξης STM32CubeIDE, διευκολύνοντας έτσι την ανάπτυξη και ενσωμάτωση του λογισμικού. Τέλος, ενσωματώνει χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως ο αλγόριθμος CRC (Cyclic Redundancy Check), ο οποίος είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την ανίχνευση σφαλμάτων κατά τη μετάδοση δεδομένων.

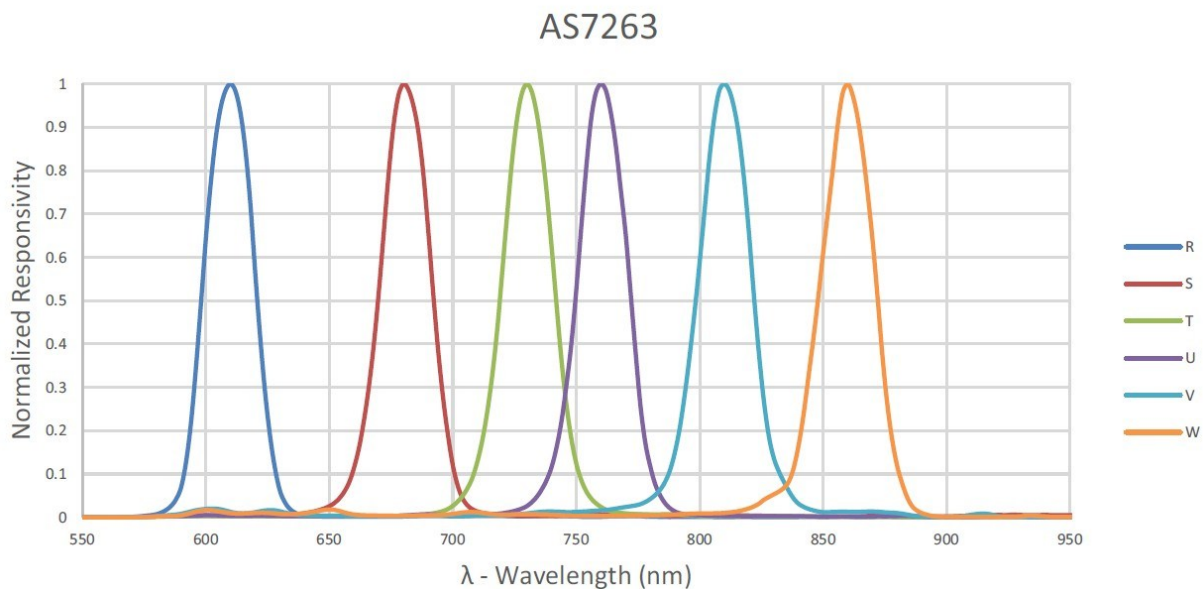


## 2.2 Φασματικοί Αισθητήρες

### 2.2.1 AS7263

Ο αισθητήρας AS7263 επιλέχθηκε για την εφαρμογή μέτρησης οπτικής πυκνότητας μικροφυκών λόγω της εξειδίκευσής του στο φάσμα του εγγύς υπέρυθρου (NIR). Το συγκεκριμένο φασματικό εύρος είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές που σχετίζονται με τη βιομάζα, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες για την εκτίμηση της συγκέντρωσης και του βιολογικού φορτίου της καλλιέργειας.

Ο AS7263 περιλαμβάνει έξι κανάλια φασματικής ανάλυσης στα μήκη κύματος 610 nm, 680 nm, 730 nm, 760 nm, 810 nm και 860 nm, με εύρος ζώνης πλήρους πλάτους ημίσειας ισχύος (FWHM) 20 nm για κάθε κανάλι όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Οι τιμές εξάγονται μέσω 16-bit ADC ανά κανάλι, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια χωρίς την ανάγκη επιπλέον επεξεργασίας [69]. Η φασματική ανίχνευση στον AS7263 βασίζεται σε έξι φωτοδιόδους με ειδικά Gaussian φίλτρα τα οποία είναι κατασκευασμένα με CMOS τεχνολογία και διαθέτουν διπλό buffer για ακεραιότητα δεδομένων. Η χρήση παρεμβαλλόμενων φίλτρων (interference filters) εξασφαλίζει, θερμική σταθερότητα, μηδενική απόκλιση με το χρόνο και ευαισθησία στη γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 2.2 Κανονικοποιημένη φασματική απόκριση αισθητήρα AS7263[69]

Ο αισθητήρας διαθέτει ενσωματωμένο προγραμματιζόμενο LED driver τύπου current sink με εύρος ρεύματος 12.5mA έως 100mA (με βήματα 12.5mA, 25mA, 50mA, 100mA), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτρονικό κλείστρο (electronic shutter) για ακριβή συγχρονισμό των μετρήσεων. Επιπλέον, το pin LED\_IND υποστηρίζει σύνδεση εξωτερικού LED για οπτική ένδειξη κατάστασης, με ελεγχόμενο ρεύμα 1mA έως 8mA.

Η επικοινωνία με το σύστημα πραγματοποιείται μέσω I<sup>2</sup>C ή UART. Η διεπαφή I<sup>2</sup>C επιτρέπει πρόσβαση σε εικονικούς καταχωρητές. Υποστηρίζονται λειτουργίες όπως επιλογή κέρδους gain (1x έως 64x), καθορισμός χρόνου ολοκλήρωσης, ανάγνωση εσωτερικής θερμοκρασίας.

Ο αισθητήρας προσφέρει διάφορους τρόπους λειτουργίας μέσω “Bank Modes”, συνεχείς ή One-Shot μετατροπές, με δυνατότητα ανάγνωσης 4 ή και των 6 καναλιών. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε διπλά

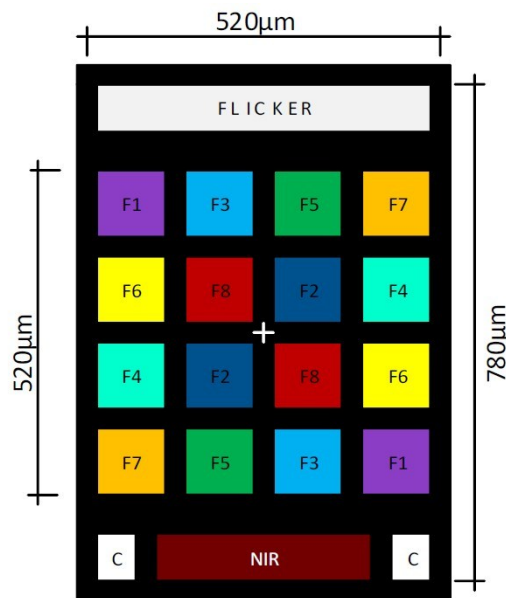
buffers, εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα των δεδομένων ακόμα και κατά τη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας.

Όσον αφορά την ενσωμάτωσή του στο σύστημα, ο AS7263 τροφοδοτείται με τάση 2.7V έως 3.6V και υποστηρίζει PC επικοινωνία στα 400kHz. Η συσκευασία του είναι τύπου LGA 20 ακίδων με διαστάσεις 4.5 x 4.7 x 2.5mm, ιδανική για ενσωμάτωση σε φορητά ή συμπαγή συστήματα. Διαθέτει επίσης ενσωματωμένο αισθητήρα θερμοκρασίας, χρήσιμο για εσωτερική αντιστάθμιση στις μεταβολές περιβάλλοντος.

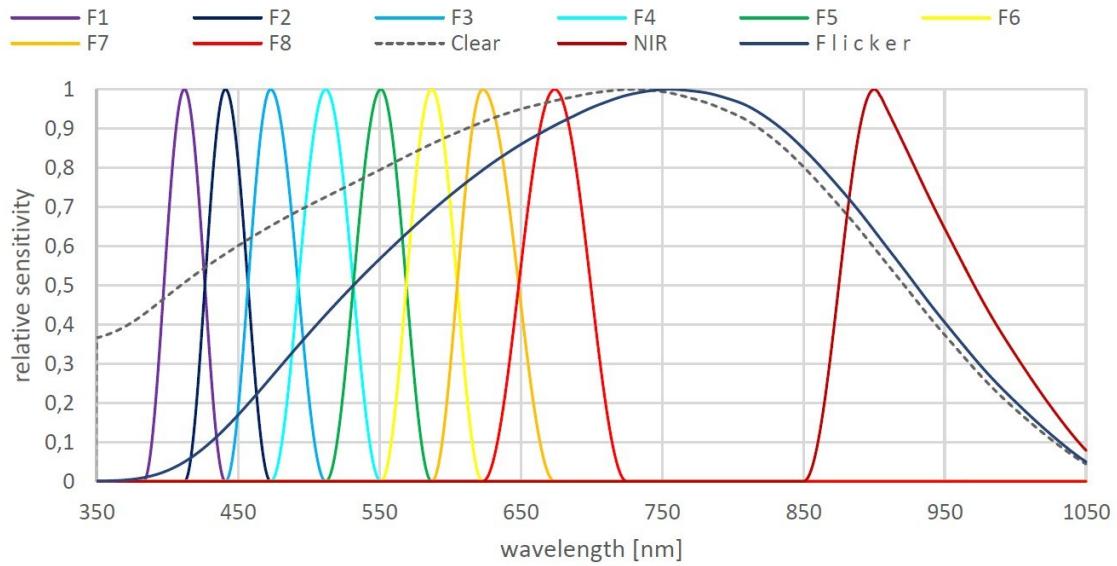
### 2.2.2 AS7341

Ο αισθητήρας AS7341 επιλέχθηκε για την εφαρμογή φασματικής ανάλυσης μικροφυκών λόγω εκτεταμένης φασματικής κάλυψης (415-910nm), που περιλαμβάνει τόσο το ορατό φάσμα (VIS) όσο και το εγγύς υπέρυθρο (NIR), επιτρέποντας τη μέτρηση βιοχημικών παραμέτρων όπως η χλωροφύλλη-a, καροτενοειδή, λιπίδια κ.α.

Η συσκευή ενσωματώνει έντεκα φασματικά κανάλια (Σχήμα 2.3), από τα οποία τα οκτώ βρίσκονται στο ορατό φάσμα, με κεντρικά μήκη κύματος στα 415nm (F1), 445nm (F2), 480nm (F3), 515nm (F4), 555nm (F5), 590nm (F6), 630nm (F7) και 680nm (F8) με εύρος ζώνης 20-40nm (FWHM). Επιπλέον, διαθέτει ένα κανάλι στο εγγύς υπέρυθρο (NIR) με μήκος κύματος 910nm, ένα κανάλι CLEAR χωρίς φασματικό φίλτρο και ένα κανάλι Flicker για ανίχνευση τρεμοπαίγματος φωτός σε συχνότητες 50/60Hz [70].



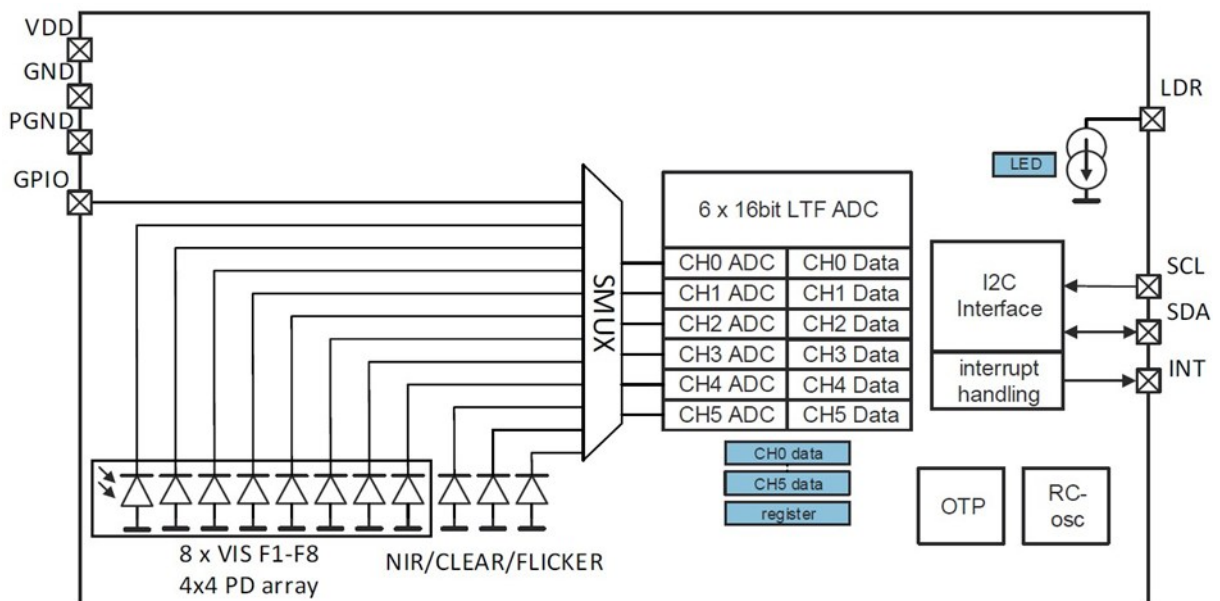
Σχήμα 2.3 Διάταξη-Φωτοдиодων AS7341 [70]



Σχήμα 2.4 Κανονικοποιημένη φασματική απόκριση αισθητήρα AS7341[70]

Οι φασματικές τιμές εξάγονται μέσω 16-bit μετατροπών αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADCs), ενώ παρέχεται δυνατότητα παραμετροποίησης της ενίσχυσης (Gain) σε εύρος από 0.5x έως 512x, καθώς και ρύθμισης του χρόνου ολοκλήρωσης της μέτρησης μέσω των καταχωρητών ATIME και ASTEP. Η δυνατότητα ρύθμισης αυτών των παραμέτρων επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζει τη μέτρηση σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια και αποφυγή κορεσμού του αισθητήρα.

Ο αισθητήρας διαθέτει ενσωματωμένο πολυπλέκτη (SMUX), επιτρέποντας δυναμική ανάθεση καναλιών στους ADCs όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Καθώς μόνο 6 ADCs είναι διαθέσιμοι ανά κύκλο ολοκλήρωσης, ως επακόλουθο η λήψη όλων των καναλιών απαιτεί δύο κύκλους. Η αρχιτεκτονική αυτή παρέχει ευελιξία αλλά απαιτεί σωστή διαχείριση μέσω λογισμικού [71].



Σχήμα 2.5 Απλοποιημένο Block Διάγραμμα AS7341 [70]

Ο AS7341 υποστηρίζει λειτουργίες συγχρονισμού με εξωτερική πηγή φωτός, με δυνατότητα ενεργοποίησης LED μέσω LDR\_Pin, με ρυθμιζόμενο ρεύμα από 4 έως 258mA (με βήμα 2mA), ελεγχόμενο μέσω των καταχωρητών LED\_DRIVE.

Η επικοινωνία του αισθητήρα με το σύστημα γίνεται αποκλειστικά μέσω διαύλου I<sup>2</sup>C, με ταχύτητα έως 400kHz και διεύθυνση Slave 0x39(Hex). Η κατανάλωση ενέργειας είναι εξαιρετικά χαμηλή, μόλις 300μΑ σε ενεργή λειτουργία και κάτω από 5μΑ σε λειτουργία ύπνου (Sleep Mode), καθιστώντας τον κατάλληλο για φορητές εφαρμογές.

Ο αισθητήρας διαθέτει ενσωματωμένο σύστημα αυτόματης αντιστάθμισης θερμοκρασίας (Auto-Zero), το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί να ενεργοποιείται περιοδικά, εξασφαλίζοντας σταθερότητα των μετρήσεων ανεξαρτήτως θερμοκρασιακών μεταβολών. Παράλληλα, υποστηρίζεται αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC) για αποφυγή κορεσμού και μεγιστοποίηση ακρίβειας.

Η φυσική του διαμόρφωση είναι OLGA-8, με διαστάσεις μόλις 3.1 x 2.0 x 1.0mm, ιδανική για ενσωμάτωση σε κυκλώματα με πολύ περιορισμένο χώρο. Περιλαμβάνονται ακίδες GPIO και INT, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συγχρονισμό ή ένδειξη κατάστασης της μέτρησης.

Στην παρούσα εφαρμογή, ο αισθητήρας AS7341 χρησιμοποιείται για την ανάλυση της φασματικής απορρόφησης των μικροφυκών σε ολόκληρο το φάσμα από το ορατό (VIS) έως το εγγύς υπέρυθρο (NIR). Οι μετρήσεις αυτές επιτρέπουν τη συσχέτιση με την πυκνότητα της βιομάζας και άλλα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα για επιστημονική μελέτη ή παρακολούθηση παραγωγής.

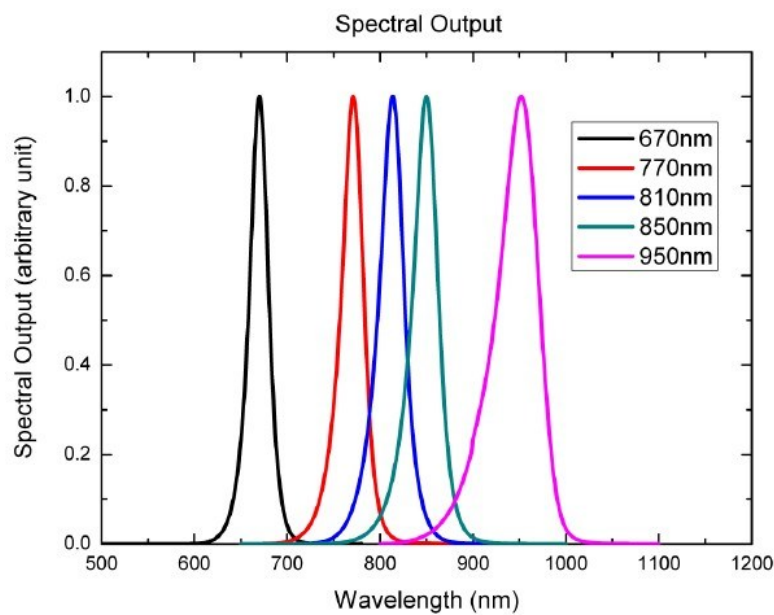
## 2.3 Πηγές Φωτός

Εδώ παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των πηγών φωτός τεχνολογίας LED που επιλέχθηκαν για τις μετρήσεις.

### 2.3.1 MTMD6788594SMT6 Multi-chip Emitter

Η πολυδιόδος LED MTMD6788594SMT6 επιλέχθηκε για την παρούσα εφαρμογή λόγω της δυνατότητάς της να εκπέμπει φως σε πέντε διαφορετικά μήκη κύματος, γεγονός που είναι σημαντικό διότι εξαλείφει την ανάγκη αλλαγής φωτεινών πηγών κατά τη μέτρηση διαφορετικών δεικτών. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να έχουμε συγχρονισμένες μετρήσεις πολλαπλών φασματικών ζωνών, μειώνοντας το χρόνο ανάλυσης.

Η πολυφασματική αυτή εκπομπή επιτρέπει την επιλεκτική διέγερση σε φασματικές περιοχές που σχετίζονται με τη συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά της βιομάζας, με τα μήκη κύματος να ανέρχονται στα 670nm, 770nm, 810nm, 850nm και 950nm. όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Κάθε LED λειτουργεί με τυπικό ρεύμα 20mA, ενώ για ειδικές λειτουργίες υποστηρίζονται μέγιστα συνεχόμενα ρεύματα από 50 έως 80mA ανάλογα με το μήκος κύματος, καθώς και παλμικά ρεύματα έως 0.5 A για συγκεκριμένες εφαρμογές χαμηλής διάρκειας [72].



Σχήμα 2.6 Κατανομή φασματικής εκπομπής (Σχετικές Τιμές)[72]

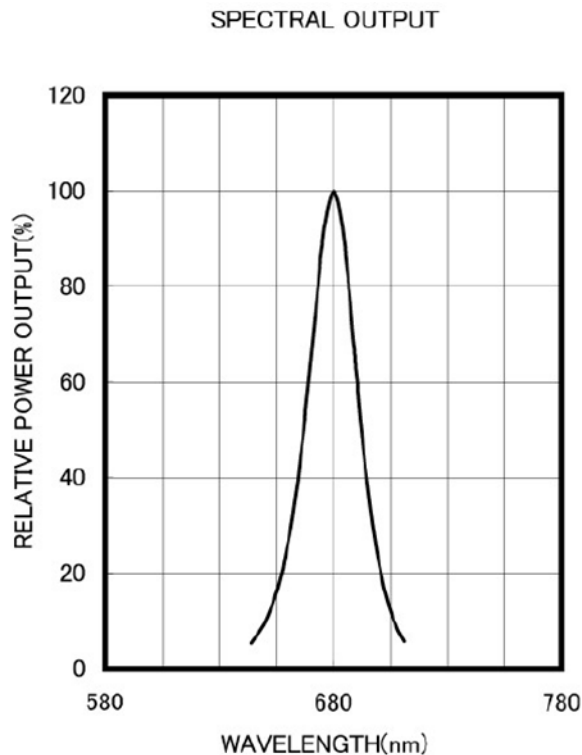
Η δυνατότητα ταυτόχρονης εκπομπής σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές, όπως στα 680 nm και 950nm, επιτρέπει τη διπλή παρακολούθηση τόσο της απορρόφησης της χλωροφύλλης ( $OD_{680}$ ) όσο και της παρουσίας γλυκόζης ( $OD_{950}$ ) μέσω του αισθητήρα AS7341.

Η κατασκευή του MTMD6788594SMT6 βασίζεται σε πακέτο PLCC-6, το οποίο προσφέρει πυκνή ενσωμάτωση των LED σε περιορισμένο χώρο. Η διάταξη αυτή το καθιστά ιδανικό για φορητά συστήματα ή συστήματα περιορισμένου μεγέθους. Το τυπικό φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος (FWHM) κυμαίνεται από 25nm έως 45 nm, με το μεγαλύτερο να παρατηρείται στο υπέρυθρο (950 nm), κάτι που επιτρέπει την κάλυψη ευρύτερων περιοχών του φάσματος αν αυτό κρίνεται επιθυμητό.

Το LED χαρακτηρίζεται από υψηλή αξιοπιστία και σταθερότητα στη φωτεινή απόδοση, στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα για επαναλαμβανόμενες και ακριβείς μετρήσεις. Η ενσωμάτωσή του στο κύκλωμα πραγματοποιείται μέσω ειδικού LED driver του LED1202 της STMicroelectronics, του οποίου η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά αναλύονται παρακάτω (ΚΕΦ 2.4).

### 2.3.2 MTE6800N2-UR

Το MTE6800N2-UR είναι ένας πομπός LED τύπου 5mm με καθαρό περίβλημα (water-clear), ειδικά σχεδιασμένος για υψηλή ισχύ εξόδου σε ευρύ γωνιακό πεδίο εκπομπής ( $\pm 35^\circ$ ). Το μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής του βρίσκεται στα 680 nm και φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος (FWHM) περίπου 30 nm, κάνοντάς το ιδανικό για εφαρμογές στο φάσμα του κόκκινου ορατού φωτός. Η τάση ορθής πόλωσης κυμαίνεται μεταξύ 1.8 και 1.95 V στα 20 mA, ενώ η τυπική ισχύς εξόδου φτάνει τα 5.5 mW. Χαρακτηρίζεται από υψηλή αξιοπιστία και χρησιμοποιείται ευρέως σε οπτικούς αισθητήρες και ιατρικές εφαρμογές [73].

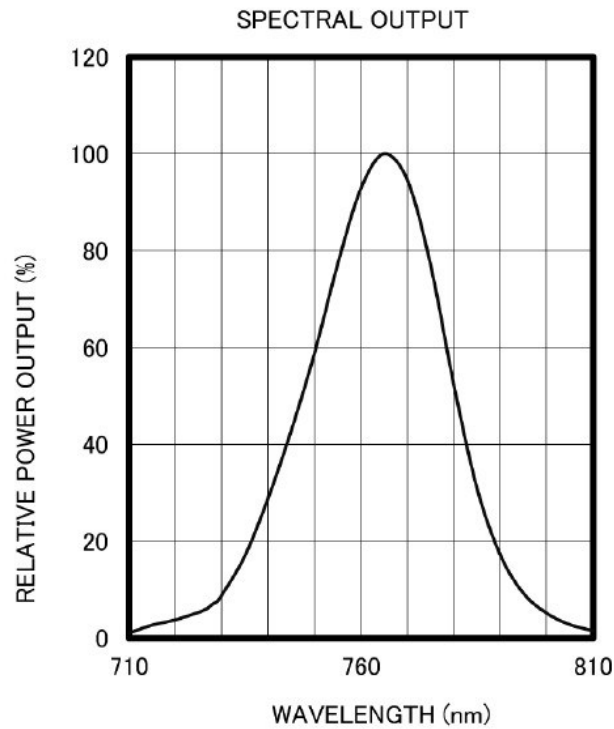


Σχήμα 2.7 Σχετική ισχύς ως προς το μήκος κύματος [73]

Το LED MTE6800N2-UR εκπέμπει φως στην περιοχή του 680 nm, τιμή που ταυτίζεται με ένα από τα κύρια φάσματα απορρόφησης της χλωροφύλλης-α, όπως έχει τεκμηριωθεί ευρέως στη βιβλιογραφία.

### 2.3.3 MTE2077N1-R

Αντίστοιχα, το MTE2077N1-R αποτελεί έναν πομπό υψηλής ισχύος και στενού γωνιακού πεδίου εκπομπής ( $\pm 8^\circ$ ), με μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής στα 765 nm, το οποίο προσεγγίζει την περιοχή του εγγύς υπέρυθρου (NIR). Το φασματικό του εύρος ημίσειας ισχύος είναι περίπου 35 nm. Η τυπική ισχύς εξόδου αγγίζει τα 8.0mW, η τάση ορθής πόλωσης κυμαίνεται μεταξύ 1.55 και 1.90V στα 20mA [74].



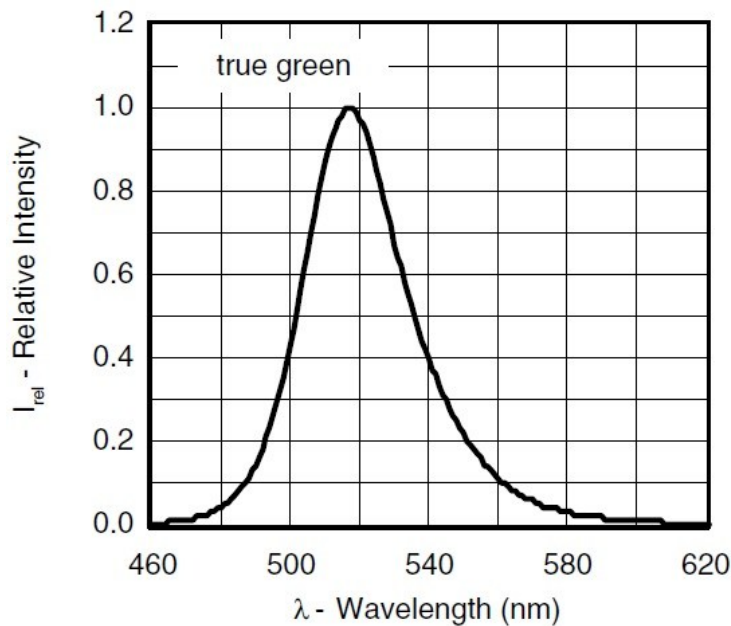
Σχήμα 2.8 Σχετική ισχύς ως προς το μήκος κύματος [74]

Το MTE2077N1-R αποτελεί LED πομπό με κορυφή εκπομπής η οποία βρίσκεται εκτός της περιοχής απορρόφησης της χλωροφύλλης-a, και εντός της περιοχής που χρησιμοποιείται για διορθώσεις θολότητας (turbidity correction) ή φασματική αναφορά.

Τελικά η χρήση του MTE2077N1-R στη συσκευή επιτρέπει τη συμπληρωματική παρακολούθηση της καλλιέργειας μέσω αναφοράς εκτός απορρόφησης, υποβοηθώντας στη γραμμικοποίηση ή διόρθωση των τιμών απορρόφησης.

### 2.3.4 LED VLMTG1400

Ο πομπός VLMTG1400 της Vishay είναι ένα υψηλής φωτεινότητας LED τεχνολογίας InGaN με αρκετά καλές οπτικές επιδόσεις σε πολύ μικρή διάσταση (SMD 0603). Το μέγιστο τυπικό μήκος κύματος εκπομπής βρίσκεται στα 525nm, το οποίο αντιστοιχεί σε "καθαρό πράσινο" σημείο του ορατού φάσματος (VIS), ενώ η τυπική φασματική κορυφή εντοπίζεται στα 518nm όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Το φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος (FWHM) είναι περίπου 35nm, κάτι που δίνει στο LED τη δυνατότητα να καλύψει περιοχές από ~507nm έως ~542nm [75]. Αυτό το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν εκπομπή στην περιοχή της πράσινης φασματικής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.9 Σχετική ένταση ως προς το μήκος κύματος [75]

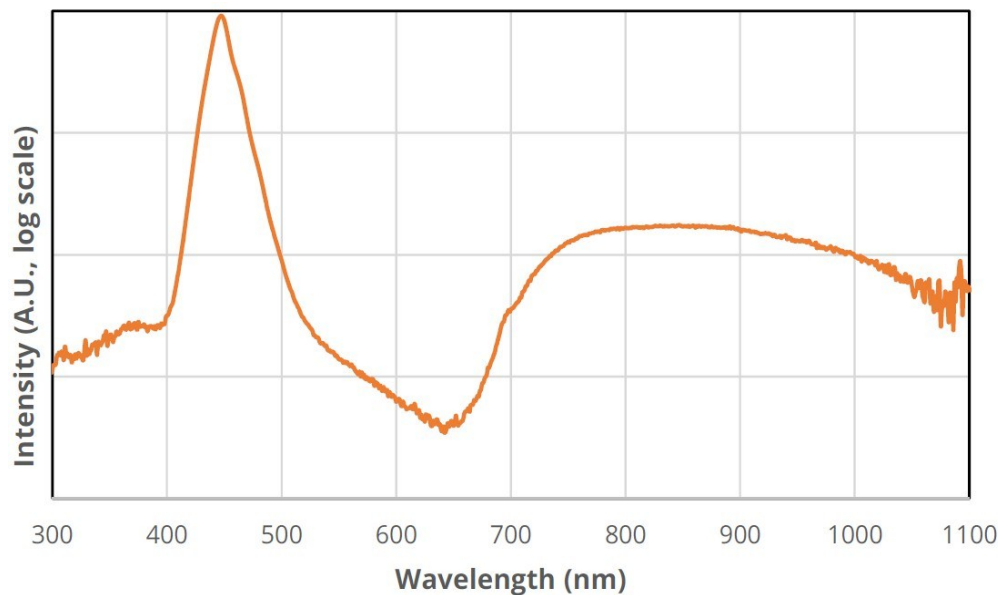
Η ένταση φωτισμού κυμαίνεται μεταξύ 1200 και 2800mcd στα 20mA, ενώ η τάση λειτουργίας ορθής πόλωσης κυμαίνεται από 2.45 έως 3.05 V, με ονομαστική τιμή τα 2.8 V.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση της γραμμικής απόκρισης του φασματικού αισθητήρα AS7341, με εστίαση στο κανάλι F4 (515nm), μέσω φασματικών μετρήσεων υπερμαγγανικού καλίου  $KMnO_4$ . Οι μετρήσεις αυτές αξιοποιήθηκαν για τον πειραματικό έλεγχο γραμμικότητας του οργάνου ως προς τη μεταβολή της απορρόφησης σε διαφορετικές συγκεντρώσεις καθώς και για μετρήσεις λιπιδίων (βλέπε ΚΕΦ 1.4).



### 2.3.5 Luxeon IR Onyx

Το LUXEON IR ONYX (L11G-0750100000000) της Lumileds είναι ένα προηγμένο LED ευρείας φασματικής εκπομπής (broadband emitter) που καλύπτει το υπέρυθρο φάσμα (IR) από 650 έως 1100 nm, προσφέροντας συνεχή και ομαλή φασματική απόδοση χωρίς έντονες κορυφές όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Η χαρακτηριστική του ιδιότητα είναι η φασματικά επίπεδη απόκριση (flat spectrum), η οποία το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές φασματοσκοπίας και υπερφασματικής απεικόνισης (hyperspectral imaging) [76]. Η συνεχής εκπομπή του σε όλο το εύρος 600–1050 nm καθιστά δυνατή την ταυτόχρονη ενεργοποίηση πολλών καναλιών φασματικών αισθητήρων όπως ο AS7341 ή ο AS7263, χωρίς να απαιτείται αλλαγή πηγής ή μηχανική μετατόπιση.



Σχήμα 2.10 Σχετικές μονάδες, (λογαριθμική κλίμακα) σε σχέση με το μήκος κύματος[76]

Η τυπική φασματική πυκνότητα ισχύος (spectral flux) στην περιοχή 750–1000 nm ξεπερνά τα 80  $\mu\text{W}/\text{nm}$ , ενώ η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς σε 350 mA αγγίζει τα 50–80 mW, με δυνατότητα αύξησης έως και 1000 mA σε παλμική λειτουργία. Η συσκευασία 2720 SMD (2.75 mm x 2.0 mm) διευκολύνει την ενσωμάτωση σε συμπαγή και φορητά κυκλώματα, ενώ η χαμηλή θερμική αντίσταση ( $19^\circ\text{C}/\text{W}$ ) διασφαλίζει σταθερή απόδοση και μακροχρόνια αξιοπιστία.

Στο πλαίσιο της παρούσας εφαρμογής, το LUXEON IR ONYX χρησιμοποιείται ως ευρυφασματική υπέρυθη πηγή για τη γενική αξιολόγηση της φασματικής απόκρισης των αισθητήρων, καθώς και για δοκιμές συστημάτων μέτρησης απορρόφησης ή σκέδασης σε δείγματα μικροφυκών. Χάρη στην ευρεία του εκπομπή, είναι ιδανικό για την ταυτόχρονη ενεργοποίηση καναλιών εγγύς υπέρυθρου αλλά και περιοχών του ορατού φάσματος, επιτρέποντας φασματική καταγραφή χωρίς την ανάγκη πολλαπλών μονοχρωματικών LEDs.

Τελικά από τα παραπάνω έχουμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα 2.2 με την αντιστοίχιση των φασματικών δυνατοτήτων των αισθητήρων με τα αντίστοιχα led .Δεν αναφέρεται ο luxeon IR Onyx διότι εκπέμπει σε ολόκληρο σχεδόν το φάσμα.

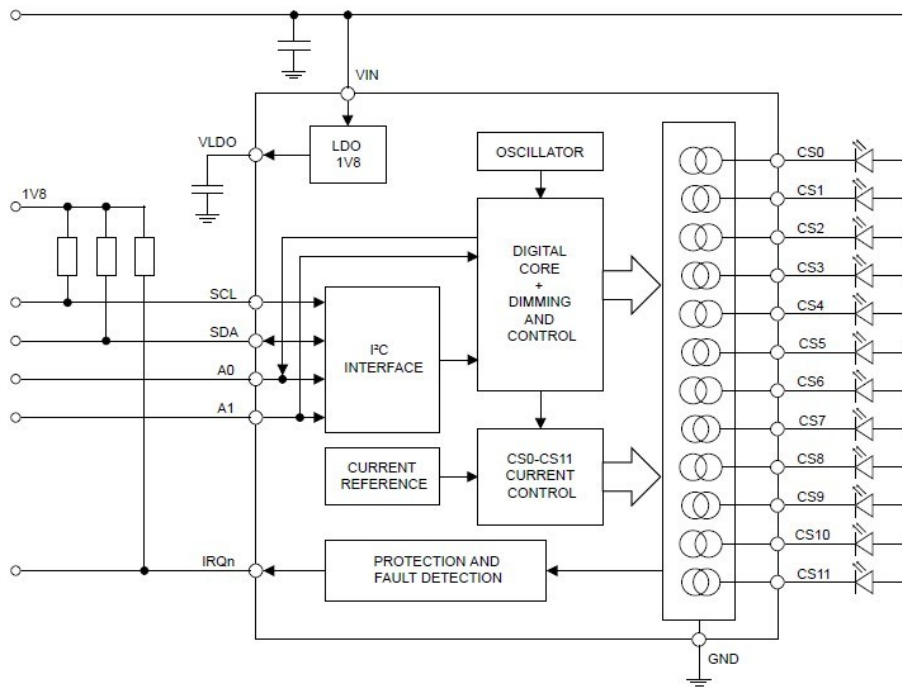
Πίνακας 2.2 Συγκεντρωτικός πίνακας διαθέσιμων μηκών κύματος

Αισθητήρας	Κανάλι	Κεντρικό μήκος (nm)	FWHM (nm)	Φασματικό Εύρος (nm)	LED
AS7341	F1	415	26	402 – 428	
	F2	445	30	430 – 460	
	F3	480	36	462 – 498	
	F4	515	39	496 – 534	VLMTG1400
	F5	555	39	536 – 574	
	F6	590	40	570 – 610	
	F7	630	50	605 – 655	
	F8	680	52	654 – 706	MTE6800N2_680
	NIR	910	(n/a)	(Δεν καθορίζεται)	MTMD678859_950
AS7263	R	610	20	600 – 620	
	S	680	20	670 – 690	MTE6800N2_680
	T	730	20	720 – 740	
	U	760	20	750 – 770	MTE2077N1_765, MTMD678859_770
	V	810	20	800 – 820	MTMD678859_810
	W	860	20	850 – 870	MTMD678859_850

## 2.4 ST-LED1202

Ο LED1202 της STMicroelectronics είναι ένας οδηγός ρεύματος 12 καναλιών σχεδιασμένος για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Διαθέτει ξεχωριστό έλεγχο έντασης για κάθε κανάλι, μέσω 8-bit αναλογικής αυξομείωσης ρεύματος (Analog Dimming) και 12-bit ψηφιακού PWM (Digital Dimming), προσφέροντας συνολική ανάλυση φωτεινότητας 20-bit ανά LED. Κάθε κανάλι μπορεί να παρέχει έως και 20mA με εξαιρετική γραμμικότητα και ακρίβεια τυπικά  $\pm 1\%$  και με χαρακτηριστική τάση περιθωρίου (Headroom Voltage) μόλις 350mV. Η συσκευή εγγυάται ικανότητα οδήγησης εξόδου στα 5V [77].

Η συσκευή υποστηρίζει επικοινωνία μέσω διαύλου I<sup>2</sup>C. Διαθέτει επίσης λειτουργία μετατόπισης φάσης, καθυστερεί την ενεργοποίηση του καναλιού για την ελαχιστοποίηση του μέγιστου ρεύματος φορτίου. Αυτή η καθυστέρηση μειώνει την κυμάτωση τάσης στη γραμμή τροφοδοσίας LED και επιτρέπει τη χρήση μικρότερου πυκνωτή φίλτραρίσματος. Αυτή η λειτουργία ελέγχεται από το Bit SHFT στον καταχωρητή διαμόρφωσης ("Configuration" Register). Επιπρόσθετα περιλαμβάνει λειτουργία εντοπισμού Open-LED και προστασία υπερθέρμανσης.



Σχήμα 2.11 Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα LED1202[77]

Στην παρούσα εφαρμογή, ο LED1202 χρησιμοποιείται για τον επιλεκτικό έλεγχο των πέντε LEDs του MTMD6788594SMT6 Multichip Emitter, με κάθε LED να οδηγείται από διαφορετικό κανάλι. Η δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένου μήκους κύματος παρέχει σημαντικό πλεονέκτημα στην ευελιξία του συστήματος.

## 2.5 Αισθητήρας Θερμοκρασίας ADT7410

Ο ADT7410 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας υψηλής ακρίβειας με 16-bit ανάλυση, που υποστηρίζει επικοινωνία μέσω I<sup>2</sup>C και διατίθεται σε μικρή συσκευασία τύπου SOIC-8. Η εσωτερική του αρχιτεκτονική βασίζεται σε ενσωματωμένο θερμικό στοιχείο και ADC μετατροπέα τύπου Sigma-Delta, επιτυγχάνοντας ανάλυση 0.0078°C στη μέγιστη ρύθμιση. Από προεπιλογή λειτουργεί σε 13-bit Mode με ανάλυση 0.0625°C, ενώ μπορεί να μεταβεί σε 16-bit Mode μέσω κατάλληλης ρύθμισης καταχωρητή[78].

Ο αισθητήρας προσφέρει ακρίβεια  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  στην περιοχή  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $+105^{\circ}\text{C}$  και λειτουργεί σε ευρύ φάσμα τάσεων από 2.7V έως 5.5V. Η χαμηλή του κατανάλωση ενέργειας, με μόλις 210μΑ σε κανονική λειτουργία και 2μΑ σε Shutdown, τον καθιστά κατάλληλο για φορητές και χαμηλής ισχύος εφαρμογές. Επιπλέον, διαθέτει προγραμματιζόμενα όρια θερμοκρασίας, και εξόδους INT (Interrupt) και CT (Critical Temperature), οι οποίες ενεργοποιούνται σε περιπτώσεις υπέρβασης ορίων θερμοκρασίας. Οι εξόδοι αυτές μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε Comparator είτε σε Interrupt Mode, προσφέροντας ευελιξία στο χειρισμό.

Η διαδικασία μέτρησης είναι αυτόματη, με δυνατότητα λειτουργίας σε συνεχή (continuous), One-Shot ή 1 SPS (1 δείγμα/δευτερόλεπτο), ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Με τη λειτουργία One-Shot,

ο αισθητήρας πραγματοποιεί μία μέτρηση και τίθεται αυτόματα σε κατάσταση Shutdown, μειώνοντας δραστικά την κατανάλωση.

Αν και τόσο ο AS7263 όσο και ο AS7341 διαθέτουν εργοστασιακή αντιστάθμιση θερμοκρασίας, η ακρίβειά της είναι περιορισμένη· για παράδειγμα, σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων του AS7263, η εσωτερική αντιστάθμιση έχει τυπική ακρίβεια  $\pm 8$  °C. Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε σημαντικό να προστεθεί ένας εξωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας, ο οποίος χρησιμοποιείται στην παρούσα εφαρμογή για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέτρησης. Η υψηλή ακρίβειά του ( $\pm 0.5$  °C στην περιοχή 0–65 °C) επιτρέπει την αξιόπιστη καταγραφή θερμικών διακυμάνσεων που ενδέχεται να επηρεάζουν τις φασματικές μετρήσεις.

Λόγω τεχνικών περιορισμών και της δυσκολίας προσομοίωσης ελεγχόμενων θερμοκρασιακών μεταβολών, δεν πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στις αποκλίσεις των τιμών των αισθητήρων. Ως εκ τούτου, η πληροφορία θερμοκρασίας χρησιμοποιείται αποκλειστικά για παρακολούθηση και όχι για την εφαρμογή αριθμητικής διόρθωσης στις μετρήσεις.

## 2.6 Επίλογος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα υλικά και τα βασικά υποσυστήματα που συνθέτουν τον μετρητή οπτικής πυκνότητας. Η επιλογή του μικροελεγκτή STM32G431KB βασίστηκε στα προηγμένα τεχνικά του χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή υπολογιστική ισχύς, η υποστήριξη πολλαπλών διαύλων επικοινωνίας και η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου εξωτερικών περιφερειακών.

Οι φασματικοί αισθητήρες AS7263 και AS7341 επιλέχθηκαν λόγω της φασματικής τους κάλυψης στο ορατό και υπέρυθρο φάσμα, επιτρέποντας τη μελέτη χαρακτηριστικών της βιομάζας και της απορρόφησης μικροφυκών. Συμπληρωματικά, οι πηγές φωτός που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτουν συγκεκριμένα φασματικά εύρη, επιτρέποντας εξειδικευμένες μετρήσεις απορρόφησης και παρακολούθηση σημαντικών βιοχημικών παραμέτρων.

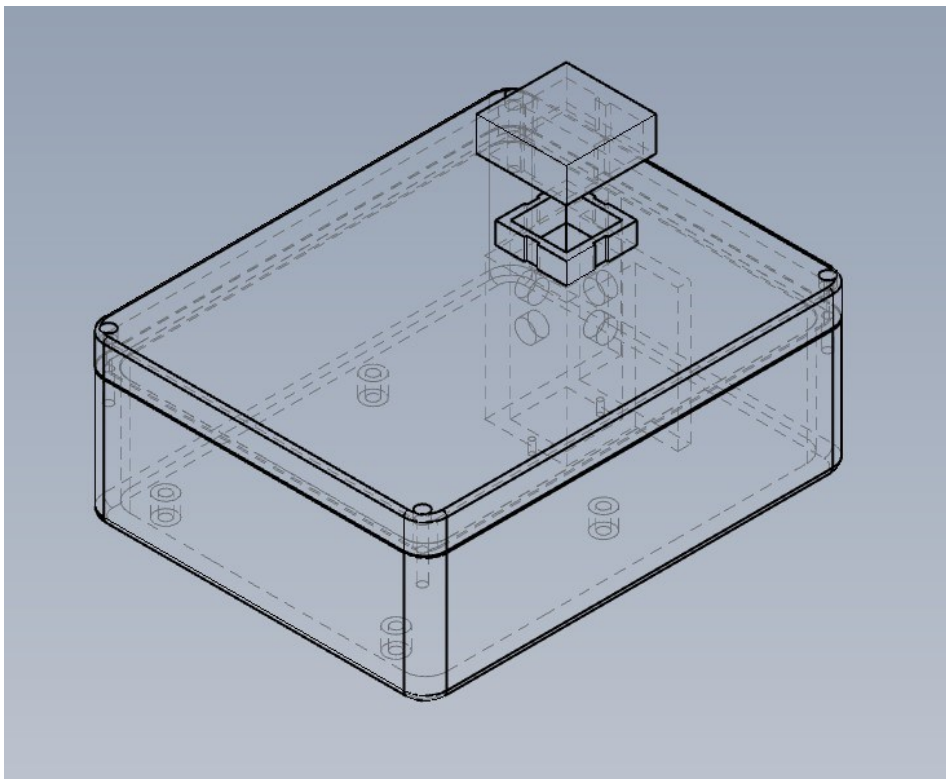
Ο οδηγός LED1202 προσέφερε ευελιξία στον έλεγχο των πηγών φωτός, ενώ ο εξωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας ADT7410 ενσωματώθηκε για την ακριβή καταγραφή θερμοκρασιακών μεταβολών που ενδέχεται να επηρεάσουν τις φασματικές μετρήσεις.

Συνολικά, η επιλογή των επιμέρους υλικών έγινε με γνώμονα την ακρίβεια, την αξιοπιστία και τη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης του συστήματος, διασφαλίζοντας έτσι τη σταθερή και αποδοτική λειτουργία του μετρητή σε ποικίλες πειραματικές συνθήκες.

## Κεφάλαιο 3ο: Σχεδιασμός και Κατασκευή Πρωτοτύπων

### 3.1 Σχεδιασμός και κατασκευή 3D περιβλήματος συσκευής

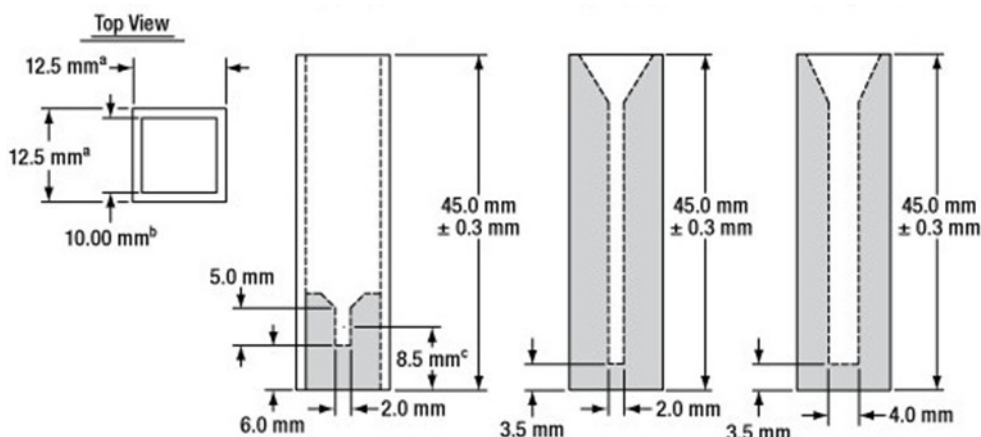
Έχοντας εκ των προτέρων προσδιορίσει τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, και λαμβάνοντας υπόψη το ιδιαίτερα μικρό τους μέγεθος καθώς και τη συνολική επιφάνεια που απαιτείται για τη συναρμολόγηση όλων των εξαρτημάτων, υπολογίστηκαν τυπικά οι διαστάσεις του περιβλήματος (μήκος και πλάτος). Επιπλέον, για τον καθορισμό του ύψους του περιβλήματος λήφθηκε υπόψη το ύψος της κυψελίδας, ώστε να εξασφαλίζεται η άνετη πρόσβαση και η εύκολη αντικατάστασή της από τον χρήστη.



Σχήμα 3.1 3D απεικόνιση περιβλήματος συσκευής με ορατές κρυφές γραμμές

Για τον σχεδιασμό του κάτω μέρους του περιβλήματος επιλέχθηκαν διαστάσεις μήκους 100mm, πλάτους 80mm και ύψους 27,8mm (βλ. Παράρτημα Α, Τεχνικό Σχέδιο 1 και 2). Για τη στερέωση της κεντρικής πλακέτας έχουν προβλεφθεί τέσσερις βάσεις στήριξης, καθώς και δύο οπές για τη στερέωση με βίδες της βάσης της κυψελίδας.

Ο σχεδιασμός της βάσης (θήκης) της κυψελίδας βασίστηκε στις τυπικές διαστάσεις των κυψελίδων, οι οποίες είναι 12,5 × 12,5mm (μήκος × πλάτος) και 45mm ύψος (βλ. Σχήμα 3.2). Οι τυπικές αποκλίσεις είναι ±0,2mm για το μήκος και πλάτος και ±0.3mm για το ύψος. Για την τοποθέτηση των πλακετών των αισθητήρων έχουν διαμορφωθεί δύο επιφάνειες στήριξης διαστάσεων 26 × 33mm και 28,8 × 33mm, όπως φαίνεται στο Τεχνικό Σχέδιο 4 του Παραρτήματος Α. Οι επιφάνειες στήριξης για τα LED είναι μικρότερες λόγω των περιορισμένων διαστάσεών τους.



Σχήμα 3.2 Τυπικές Διαστάσεις Κυψελίδων thorlabs.com(τροποποιημένη)[79]

Όσον αφορά το κάλυμμα του περιβλήματος, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να εφάπτεται πλήρως με τη θήκη της κυψελίδας χωρίς να αφήνει κενό, προκειμένου να αποτραπεί η είσοδος φωτός από τα ενδεικτικά LED των πλακετών, το οποίο θα μπορούσε να εισαχθεί ως οπτικός θόρυβος στις μετρήσεις. Το κάλυμμα στερεώνεται στο κύριο σώμα του περιβλήματος με τέσσερις βίδες, οι οποίες τοποθετούνται στις αντίστοιχες οπές στις γωνίες του καλύμματος (βλ. Τεχνικό Σχέδιο 3, Παράρτημα Α).

Τέλος, έχει σχεδιαστεί και πρόσθετο κάλυμμα για το προεξέχον μέρος της κυψελίδας, με σκοπό την πλήρη απομόνωση από το εξωτερικό φως, για τους ίδιους λόγους προστασίας της ακρίβειας των μετρήσεων (Τεχνικό Σχέδιο 5, Παράρτημα Α).

## 3.2 Σχεδιασμός και Κατασκευή Τυπωμένων Κυκλωμάτων

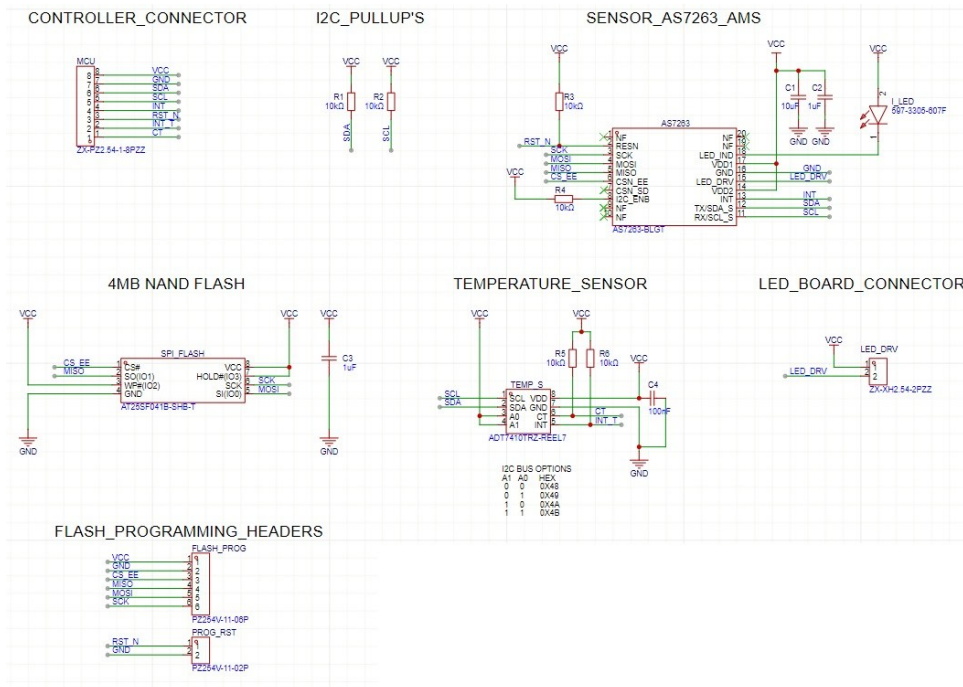
Για τον σχεδιασμό των τυπωμένων κυκλωμάτων της συσκευής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EasyEDA, μέσω του οποίου δημιουργήθηκαν τα σχηματικά διαγράμματα, το PCB layout και η τρισδιάστατη απεικόνιση των πλακετών.

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας αφορούσε τον σχεδιασμό των περιφερειακών κυκλωμάτων, ώστε να υπολογιστούν όλες οι κρίσιμες απαιτήσεις (σε σήματα και τροφοδοσίες) πριν την τελική ενσωμάτωση της πλακέτας του μικροελεγκτή. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι κατά τη φάση υλοποίησης λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες κατανάλωσης και συνδεσιμότητας.

### 3.2.1 Κύκλωμα αισθητήρα AS7263

Το κύκλωμα του αισθητήρα AS7263 (βλέπε Σχήμα 3.3) σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή (AMS/OSRAM), όπως περιγράφονται στο έγγραφο AS726x Design Considerations [80]. Ο αισθητήρας λειτουργεί σε διασύνδεση I<sup>2</sup>C και απαιτεί την παρουσία εξωτερικής μνήμης flash SPI για τη φόρτωση του υλικολογισμικού του.

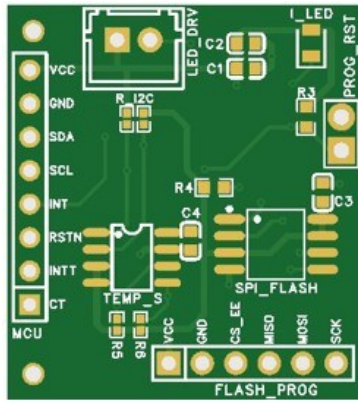
### Κεφάλαιο 3



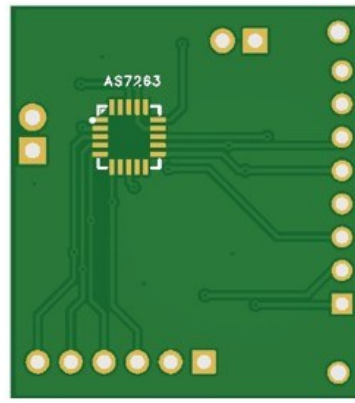
Σχήμα 3.3 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος AS7263

Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μνήμη AT25SF041B της Renesas, η οποία είναι 4 Mbit SPI flash [81], απόλυτα συμβατή με τον αισθητήρα, σύμφωνα με το Datasheet [69]. Έχουν προστεθεί και ακίδες για τον προγραμματισμό της μνήμης πάνω στην πλακέτα, καθώς και ακίδες βραχυκύκλωσης του ακροδέκτη RESN του αισθητήρα με το GND διότι κατά τον προγραμματισμό της μνήμης ο αισθητήρας πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση Reset.

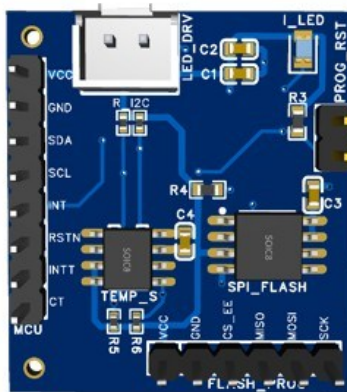
Επιπλέον τοποθετήθηκε, όπως αναφέραμε στο παραπάνω κεφάλαιο, ο αισθητήρας θερμοκρασίας ADT7410 σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή [78].



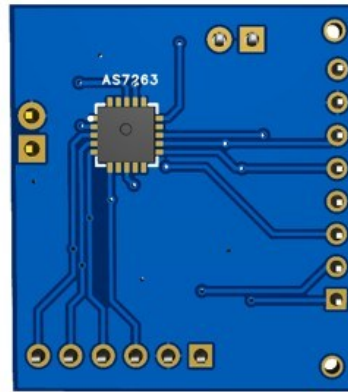
(α)



(β)



(γ)



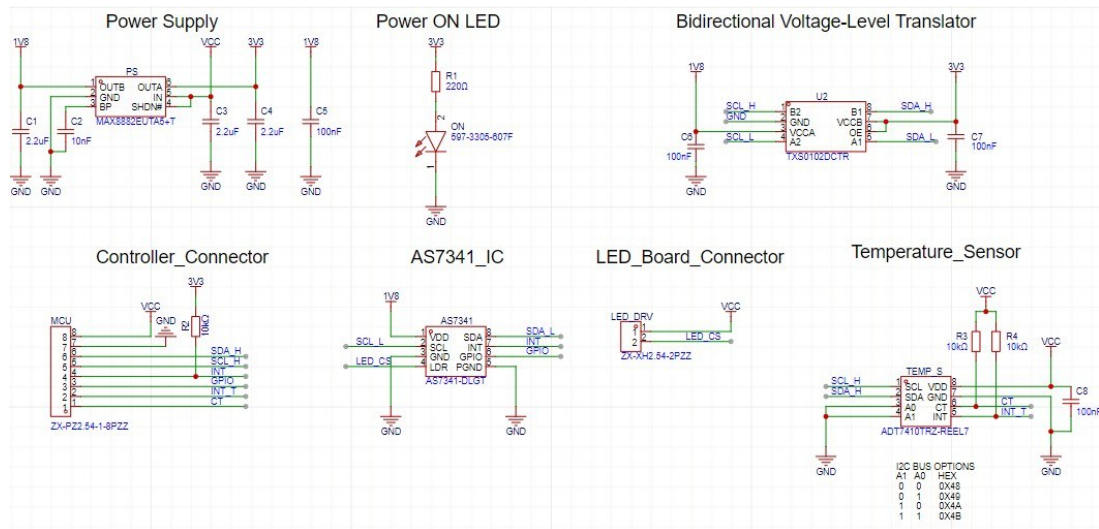
(δ)

Σχήμα 3.4 Επάνω (α), (β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ), (δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας AS7263



### 3.2.2 Κύκλωμα Αισθητήρα AS7341

Το τυπωμένο κύκλωμα που φιλοξενεί τον φασματικό αισθητήρα AS7341 (βλέπε Σχήμα 3.5) σχεδιάστηκε με βάση τις κατευθυντήριες οδηγίες του κατασκευαστή AMS/OSRAM [70],[82], ώστε να διασφαλιστεί η σωστή ηλεκτρική τροφοδοσία και η αξιόπιστη επικοινωνία μέσω διαύλου I<sup>2</sup>C.



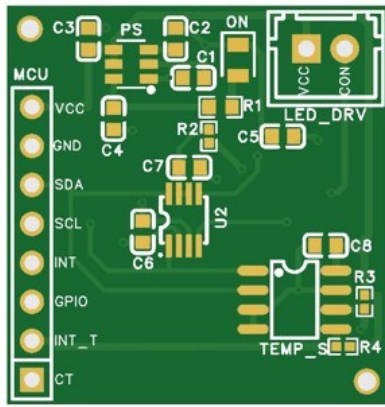
Σχήμα 3.5 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας AS7341

Για την παροχή των απαραίτητων τάσεων υλοποιήθηκε κύκλωμα τροφοδοσίας με χρήση του LDO MAX8882EUTA5+T, ο οποίος παρέχει δύο σταθεροποιημένες εξόδους. Μία έξοδο 3.3 V που χρησιμοποιείται ως τάση αναφοράς στον μετατροπέα TXS0102DCTR και μία 1.8 V, που χρησιμοποιείται για τροφοδοσία του AS7341 αλλά και ως τάση αναφοράς τάσης του διαύλου I<sup>2</sup>C [83] στον μετατροπέα. Ο λόγος που επιλέχθηκε είναι για να μπορεί η πλακέτα να χρησιμοποιηθεί και με 5V τροφοδοσία αν και αυτό δεν κρίθηκε απαραίτητο.

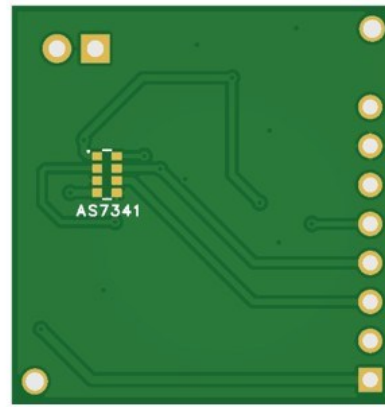
Για τη μετατροπή της στάθμης τάσης από 3.3 V του μικροελεγκτή σε 1.8 V του αισθητήρα AS7341, επιλέχθηκε ο ειδικός μετατροπέας TXS0102DCTR της Texas Instruments. Ο TXS0102 είναι κατάλληλος για εφαρμογές open-drain όπως το I<sup>2</sup>C, υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία χωρίς την ανάγκη ελέγχου κατεύθυνσης και ενσωματώνει pull-up αντιστάσεις περίπου 10 kΩ στις γραμμές επικοινωνίας. Με δεδομένο ότι το πρωτόκολλο λειτουργίας είναι I<sup>2</sup>C Fast-Mode (400 kHz), το ολοκληρωμένο κύκλωμα προσφέρει ικανότητα μετάδοσης δεδομένων έως και 2 Mbps, εξασφαλίζοντας άνετη λειτουργία χωρίς την ανάγκη εξωτερικών pull-up αντιστάσεων στο δίαυλο [84].

Η τροφοδοσία του TXS0102 υλοποιήθηκε με VCCA συνδεδεμένο στην τάση 1.8 V (χαμηλής πλευράς) και VCCB συνδεδεμένο στην τάση 3.3 V (υψηλής πλευράς). Το σήμα ενεργοποίησης OE συνδεδεμένο απευθείας στο VCCA ώστε να επιτυγχάνεται αυτόματη ενεργοποίηση του κυκλώματος μόλις σταθεροποιηθούν οι τάσεις τροφοδοσίας. Για τη σταθεροποίηση των γραμμών τροφοδοσίας προστέθηκαν δύο πυκνωτές 100nF, ένας για κάθε τάση (VCCA και VCCB).

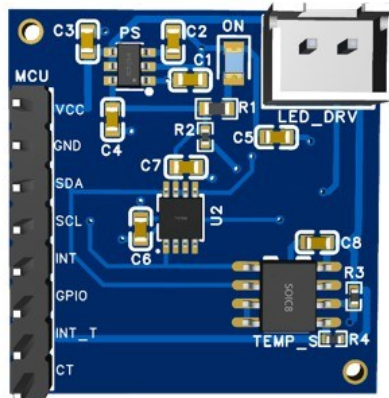
Τέλος, στην πλακέτα έχει ενσωματωθεί και ο ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας ADT7410, ο οποίος συνδέεται επίσης στον ίδιο δίαυλο I<sup>2</sup>C και επιτρέπει την παρακολούθηση των θερμικών συνθηκών της συσκευής για μελλοντική θερμική αντιστάθμιση των μετρήσεων.



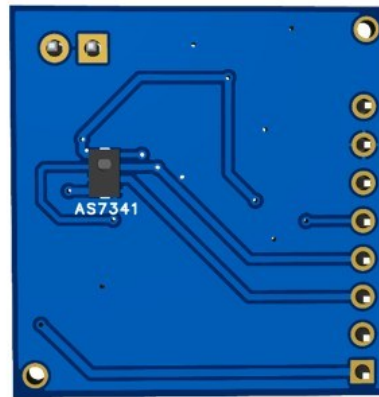
(α)



(β)



(γ)

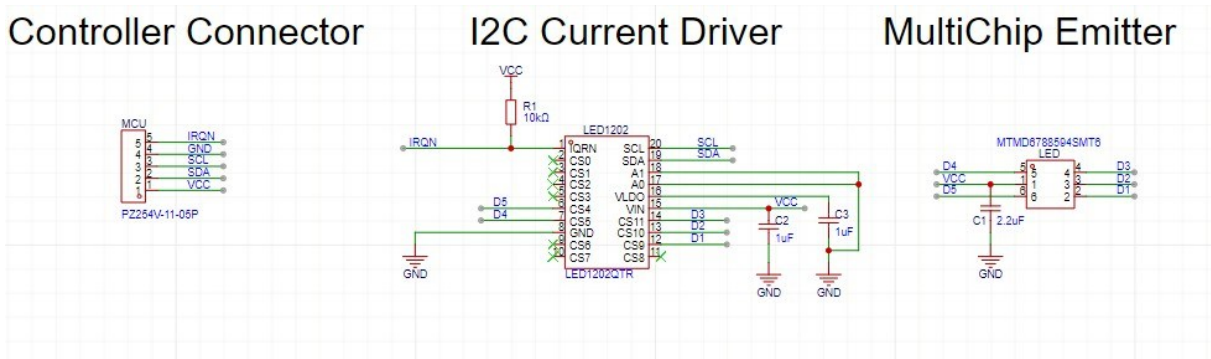


(δ)

Σχήμα 3.6 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας AS7341

### 3.2.3 Κύκλωμα πολυφασματικού LED MTMD6788594SMT6

Για τον έλεγχο και την ακριβή ρύθμιση της έντασης του πολυφασματικού εκπομπού φωτός MTMD6788594SMT6, χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα οδήγησης ρεύματος LED1202 της STMicroelectronics. Το κύκλωμα (Σχήμα 3.7) σχεδιάστηκε με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή [72], [77].



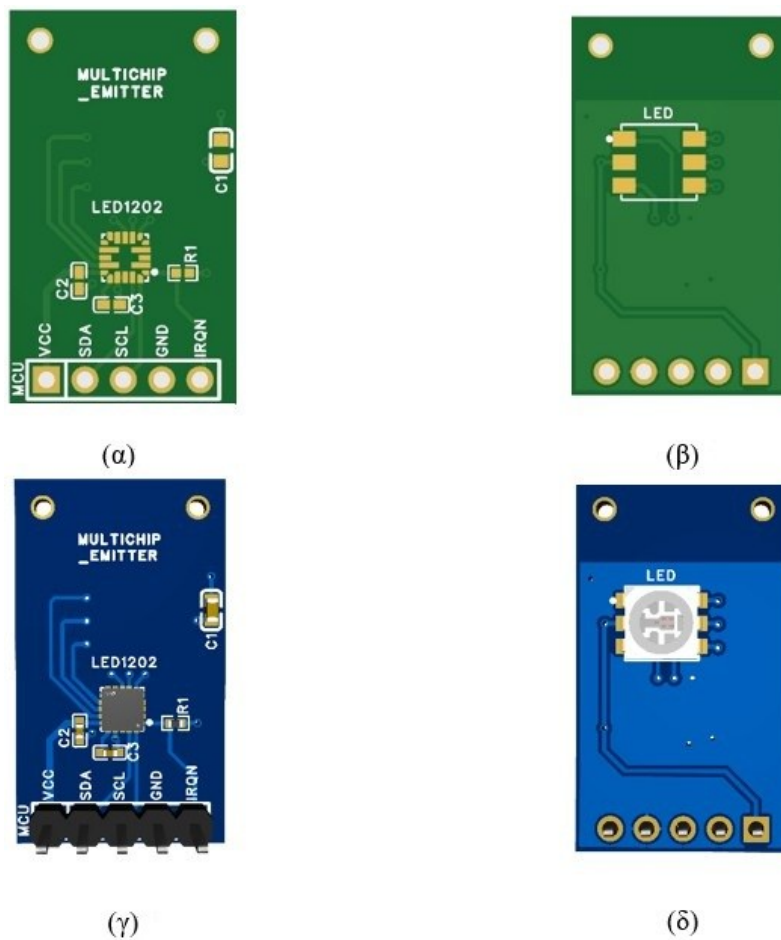
Σχήμα 3.7 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας πολυφασματικού LED

Ο LED1202 παρέχει ανεξάρτητη διαμόρφωση για κάθε κανάλι (CS0–CS11), επιτρέποντας τη ρύθμιση της έντασης ρεύματος οδήγησης με 12-bit PWM ανάλυση. Στην παρούσα διάταξη χρησιμοποιούνται τα κανάλια CS4, CS5, CS9, CS10 και CS11, τα οποία συνδέονται με τις αντίστοιχες εισόδους του εκπομπού (D1–D5). Η επιλογή του LED που ενεργοποιείται κάθε φορά πραγματοποιείται με αποστολή κατάλληλων εντολών από τον μικροελεγκτή μέσω του διαύλου I<sup>2</sup>C.

Η τροφοδοσία του LED1202 είναι 3.3V, ενώ για την σταθεροποίηση χρησιμοποιούνται πυκνωτές 1μF στα pin τροφοδοσίας VDD και VLDO. Χρησιμοποιήθηκε αντίσταση pull-up R1 (10kΩ) στο σήμα IRQN το οποίο επιτρέπει την παρακολούθηση σφαλμάτων ή γεγονότων μέσω διακοπής.

Ο πολυφασματικός εκπομπός συνοδεύεται από πυκνωτή 2.2μF για φίλτρο στην τροφοδοσία, καθώς η ταυτόχρονη ενεργοποίηση περισσότερων LED μπορεί να δημιουργήσει παροδικές πτώσεις τάσης.

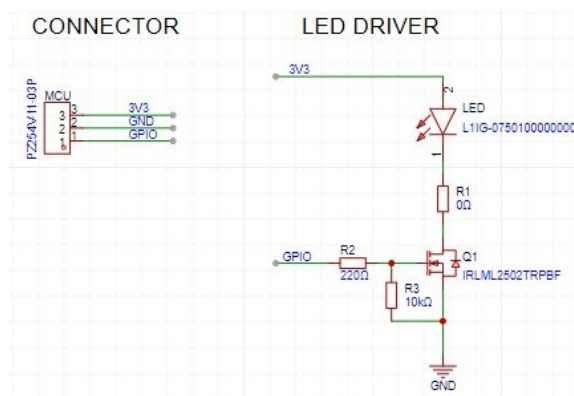
Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την επιλεκτική ενεργοποίηση μόνο ενός LED κάθε φορά και εξασφαλίζει ελεγχόμενες συνθήκες κατά τη μέτρηση οπτικής πυκνότητας με τους φασματικούς αισθητήρες.



Σχήμα 3.8 Επάνω (α),(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας MTMD6788594SMT6

### 3.2.4 Κύκλωμα ευρυφασματικού Led LUXEON IR ONYX

Για την ευρυφασματική εκπομπή ακτινοβολίας (650–1100nm), χρησιμοποιείται ο εκπομπός LUXEON IR ONYX (L1IG-0750100000000) της Lumileds. Η οδήγηση του LED υλοποιείται μέσω MOSFET IRLML2502TRPBF σε διάταξη Low-Side Switch, ώστε να ελέγχεται η λειτουργία του μέσω λογικού σήματος από τον μικροελεγκτή (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας ευρυφασματικού Led

Το LED συνδέεται με την άνοδο του στον ακροδέκτη τροφοδοσίας (είτε 3.3V είτε 5V) μέσω αντίστασης R1 τύπου 0603. Η χαρακτηριστική τάση ορθής πόλωσης του LED είναι  $V_f = 3,2\text{ V}$  για ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας 350mA. Στην περίπτωση τάσης εισόδου στα 3.3V, η αντίσταση R1 είναι τοποθετημένη ως 0Ω (jumper). Αν το κύκλωμα χρησιμοποιηθεί με 5V είσοδο, τότε στην ίδια θέση R1 μπορεί να τοποθετηθεί κατάλληλη αντίσταση περιορισμού ρεύματος, ώστε να προστατευθεί το LED από υπερένταση.

Για είσοδο 5V η  $R_1$  υπολογίζεται :

$$V_{drop} = V_{supply} - V_f$$

Άρα:

$$V_{drop} = 5 - 3.2 = 1.8V$$

Επομένως:

$$V_{drop} = (R_1 + R_{DS(on)}) \times I_{LED}$$

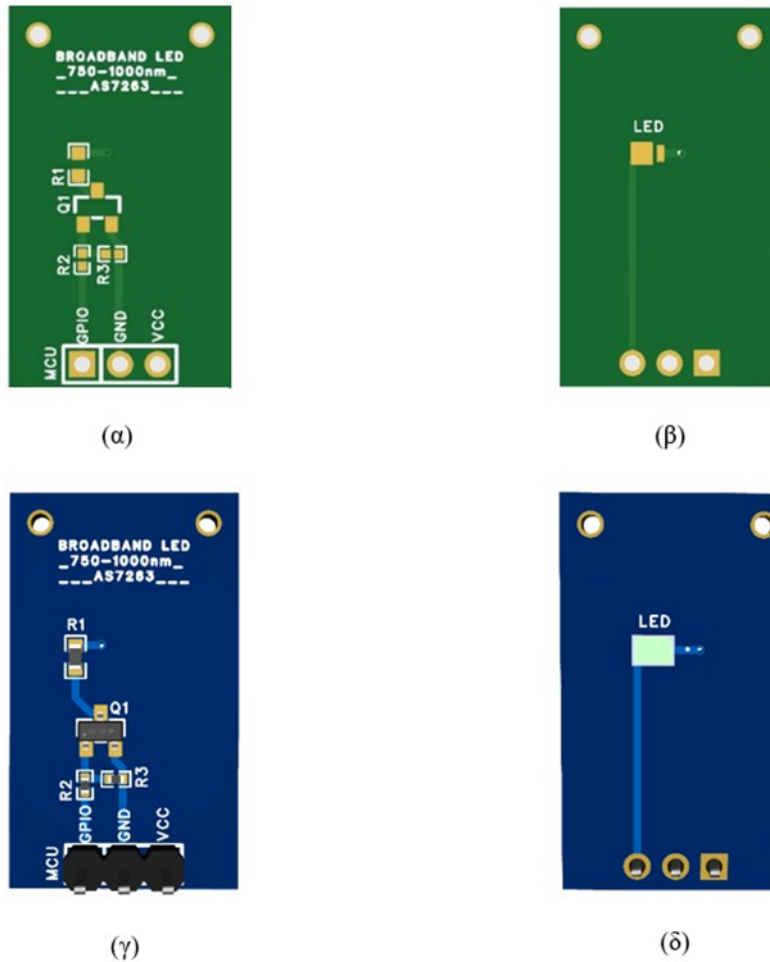
Λύνοντας ως προς  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{V_{drop}}{I_{LED}} - R_{DS(on)}$$

$$R_1 = \frac{1.8}{0.35} - 0.045$$

$$R_1 \approx 5.1\Omega$$

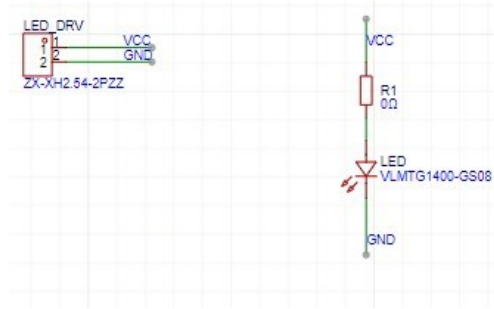
Η πύλη του MOSFET οδηγείται από τον μικροελεγκτή μέσω αντίστασης  $R2 = 220\Omega$ , η οποία περιορίζει το ρεύμα φόρτισης της πύλης, μειώνοντας τα φαινόμενα ringing και θορύβου. Τέλος η Pull-Down αντίσταση  $R3 = 10k\Omega$  διατηρεί την πύλη του MOSFET στο δυναμικό της γείωσης όταν το σήμα GPIO είναι σε υψηλή αντίσταση κατά την εκκίνηση του συστήματος, αποτρέποντας την ανεπιθύμητη αγωγή του.



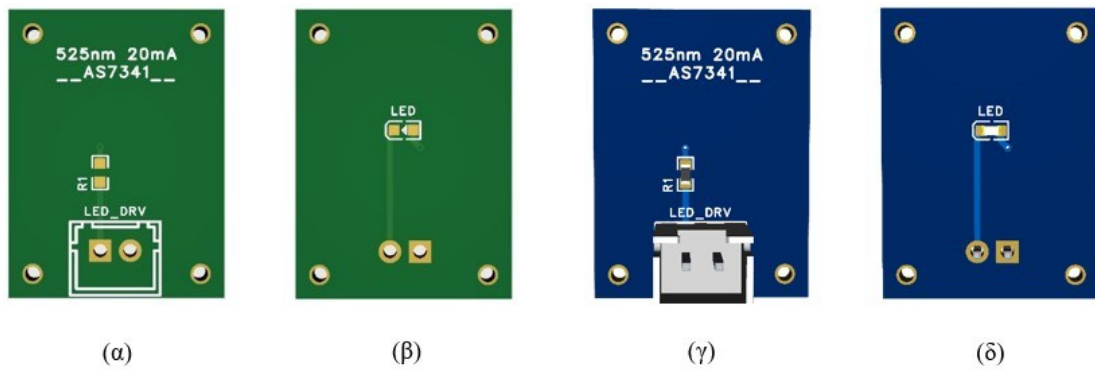
Σχήμα 3.10 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας LUXEON IR ONYX

### 3.2.5 Κύκλωμα LED VLMTG1400

Το κύκλωμα οδήγησης του LED VLMTG1400 είναι εξαιρετικά απλό. Το συγκεκριμένο LED έχει τυπικό ρεύμα λειτουργίας 20mA, και προορίζεται να οδηγείται απευθείας από τον οδηγό ρεύματος που παρέχει ο αισθητήρας AS7341, ρυθμισμένο επίσης στα 20 mA. Για τον λόγο αυτό, στο κύκλωμα (σχήμα 3.11) χρησιμοποιήθηκε jumper (αντίσταση 0 Ω) στη θέση R1, καθώς το ρεύμα καθορίζεται εσωτερικά από τον driver του AS7341 και δεν απαιτείται επιπλέον περιορισμός. Η ύπαρξη της θέσης για την αντίσταση περιορισμού (R1) σχεδιάστηκε προληπτικά, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης κατάλληλης αντίστασης αν στο μέλλον χρησιμοποιηθεί διαφορετικό LED με διαφορετικές απαιτήσεις σε ρεύμα ή τάση.



Σχήμα 3.11 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας LED VLMTG1400



Σχήμα 3.12 Επάνω (α) ,(β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ),(δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας VLMTG1400

### 3.3 Τελική Συναρμολόγηση και Ενσωμάτωση

Για την τελική ενσωμάτωση του συστήματος, ιδιαίτερα σημαντικός ήταν ο άρτιος σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος (PCB) που φιλοξενεί τον μικροελεγκτή.

Κατά τη φάση του σχεδιασμού, υπολογίστηκαν όλες οι απαιτούμενες εισοδοι και έξοδοι (I/O), λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δυνατότητες των περιφερειακών που θα ελέγχονται. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν έξοδοι για σήματα Interrupt, IRQn και Hard Reset. Επιπλέον καταγράφηκαν οι διευθύνσεις I2C των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και υπολογίστηκαν οι τιμές των pull up αντιστάσεων του διαύλου επικοινωνίας. Τέλος εκτιμήθηκαν οι ανάγκες κατανάλωσης ρεύματος σε διαφορετικά σενάρια, τόσο σε κατάσταση ηρεμίας (sleep mode) όσο και σε κατάσταση λειτουργίας (active mode), ώστε να διασφαλιστεί ότι η παροχή ισχύος του μικροελεγκτή είναι επαρκής για τη σωστή τροφοδοσία όλων των συνδεδεμένων πλακετών.

#### 3.3.1 Σύνοψη διευθύνσεων περιφερειακών (Slave) συσκευών

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διευθύνσεις όλων των συσκευών που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C.

Πίνακας 3.1 Διευθύνσεις I2C Συσκευών

Συσκευή	Παράμετρος	Τιμή (Hex)
AS7263	7-bit Address	0x49
	8-bit Address (Write)	0x92
	8-bit Address (Read)	0x93
AS7341	7-bit Address	0x39
	8-bit Address (Write)	0x72
	8-bit Address (Read)	0x73
ADT7410_1	7-bit Address	0x48
	8-bit Address (Write)	0x90
	8-bit Address (Read)	0x91
ADT7410_2	7-bit Address	0x4B
	8-bit Address (Write)	0x96
	8-bit Address (Read)	0x97
LED1202	7-bit Address	0x58
	8-bit Address (Write)	0xB0
	8-bit Address (Read)	0xB1

### 3.3.2 Υπολογισμός Pull Up αντιστάσεων

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η συνολική χωρητικότητα των διαύλων επικοινωνίας SCL και SDA, καθώς και των εισόδων των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και προσδιορίστηκαν οι τιμές των pullup αντιστάσεων ώστε να ικανοποιούνται οι χρόνοι που ορίζει το Πρωτόκολλο I2C (Fast Mode)[85].

Οι τιμές χωρητικότητας των εισόδων για κάθε ολοκληρωμένο δίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 3.2 Τιμές Χωρητικότητας εισόδων εξόδων I2C Συσκευών

Συσκευή	Σύμβολο	Παράμετρος	Ελάχιστο	Τυπικό	Μέγιστο	Μονάδα
AS7263	$C_{I/O}$	I/O capacitance (SDA, SCL)			10	pF
AS7341	$C_I$	Input pin capacitance			10	pF
ADT7410		Pin Capacitance		5	10	pF
LED1202	$C_{I/O}$	I/O capacitance (SDA, SCL)			10	pf
STM32G4	$C_{I/O}$	I/O pin capacitance		5		pf

Άρα από τα ICs αν λάβουμε υπόψιν ότι χρησιμοποιούνται δύο ADT7410 έχουμε συνολική χωρητικότητα :

$$C_{devices} \leq 55pF$$

Τα PCB traces είναι πλάτους 0.3mm και πάχους 1oz (~35μm) και έχουν χωρητικότητα περίπου 2pF/cm. Στη γραμμή SDA<sub>PCB</sub> έχουμε 8.4cm ολικό μήκος και στη γραμμή SCL<sub>PCB</sub> έχουμε 7cm μήκος. Τα καλώδια (jumper) είναι AWG24 και έχουν τυπικά 35pF/m. Οι πλακέτες που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα είναι αυτή του AS7341, του AS7263 και του LED1202 άρα κάθε γραμμή (SCL, SDA) έχει από 3 καλώδια, με το μήκος του κάθε καλωδίου στα 10cm.

Υπολογισμός χωρητικότητας γραμμών, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν παρασιτικές χωρητικότητες:

Για SDA έχουμε:

$$C_{SDA,PCB} \approx 8.4cm \times 2pF/cm \approx 16.8pF$$

$$C_{SDA,CABLE} \approx 3 \times 10cm \times 3.3pF/cm \approx 99pF$$

Άρα σύνολο έχουμε:

$$C_{SDA,TOTAL} \approx C_{SDA,PCB} + C_{SDA,CABLE} + C_{DEVICES}$$

$$C_{SDA,TOTAL} \approx 16.8pF + 99pF + 55pF \approx 170.8pF$$

Για SCL έχουμε:

$$C_{SCL,PCB} \approx 7cm \times 2pF/cm \approx 14pF$$

$$C_{SCL,CABLE} \approx 3 \times 10cm \times 3.3pF/cm \approx 99pF$$

Άρα σύνολο έχουμε:

$$C_{SCL,TOTAL} \approx C_{SCL,PCB} + C_{SCL,CABLE} + C_{DEVICES}$$

$$C_{SCL,TOTAL} \approx 14pF + 99pF + 55pF \approx 168pF$$



Υπολογισμός pullup αντιστάσεων [86]:

Μία ισχυρή pullup (μικρή αντίσταση) λόγω μεγάλου ρεύματος για το Current Sink του ολοκληρωμένου κυκλώματος, εμποδίζει την I2C είσοδο να οδηγήσει σε χαμηλό επίπεδο. Έτσι η τάση  $V_{OL}$  που διαβάζεται ως έγκυρο λογικό χαμηλό από τους απομονωτές (buffers) εισόδου καθορίζει την ελάχιστη τιμή της αντίστασης  $R_p(min)$ . Η συνάρτηση για τον υπολογισμό της είναι η παρακάτω:

$$R_p(min) = \frac{(V_{CC} - V_{OL(max)})}{I_{OL}} \quad (3.1)$$

Η μέγιστη αντίσταση περιορίζεται από τη χωρητικότητα του διαύλου  $C_{Bus}$  λόγω του χρόνου ανόδου  $t_{rise}$  από τις προδιαγραφές του προτύπου I2C. Βρίσκεται από τη συνάρτηση:

$$R_p(max) = \frac{t_{rise}}{(0.8473 \times C_{bus})} \quad (3.2)$$

Αρα για να ικανοποιείται η Fast Mode I2C επικοινωνία με τις παραμέτρους  $C_{bus} = 170pF$  και  $V_{CC} = 3.3V$  υπολογίζουμε με βάση τις τιμές του πίνακα 3.3.

$$R_p(max) = \frac{t_{rise}}{(0.8473 \times C_{bus})} = \frac{(300 \times 10^{-9})}{(0.8473 \times 170 \times 10^{-12})} = 2k\Omega$$

$$R_p(min) = \frac{(V_{CC} - V_{OL(max)})}{I_{OL}} = \frac{(3.3 - 0.4)}{3 \times 10^{-3}} = 967\Omega$$

Επομένως, μπορούμε να επιλέξουμε οποιαδήποτε διαθέσιμη τιμή αντίστασης μεταξύ  $967\Omega$  και  $2k\Omega$ .

Πίνακας 3.3 Παράμετροι από τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου I2C [85]

Παράμετρος		Standard Mode (Max)	Fast mode (Max)	Fast Mode Plus (Max)	Μονάδα
$t_r$	Rise time of both SDA and SCL signals	1000	300	120	ns
$C_{bus}$	Capacitive load for each bus line	400	400	550	pF
$V_{OL}$	Low-level output voltage (at 3 mA current sink, $V_{CC} > 2V$ )	0.4	0.4	0.4	V
	Low-level output voltage (at 2 mA current sink, $V_{CC} \leq 2V$ )		$0.2 \times V_{CC}$	$0.2 \times V_{CC}$	V

### 3.3.3 Υπολογισμός συνολικής κατανάλωσης ρεύματος

Για την σωστή τροφοδοσία του κυκλώματος υπολογίστηκαν όλες οι καταναλώσεις των περιφερειακών σε κατάσταση αναμονής και λειτουργίας (βλέπε Πίνακας 3.4). Σύμφωνα με την κατασκευή του λογισμικού του οποίου τη λειτουργία θα αναλύσουμε στο επόμενο κεφάλαιο κάθε φορά μπορούμε να ζητάμε τιμές από έναν αισθητήρα. Άρα κάθε φορά ένας μόνο αισθητήρας είναι σε κατάσταση ενεργής λειτουργίας (active mode) ενώ οι υπόλοιποι σε κατάσταση αναμονής (standby mode).

Πίνακας 3.4 Τιμές ρευμάτων κατανάλωσης των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ανά λειτουργική κατάσταση

Συσκευή	Σύμβολο	Παράμετρος	Ελάχιστο	Τυπικό	Μέγιστο	Μονάδα
AS7263	I <sub>VDD</sub>	Operating current			5	mA
	I <sub>STANDBY</sub>	Standby current		12		μA
	I <sub>IND</sub>	Indicator LED Current	1	4	8	mA
	I <sub>LED1</sub>	Driver LED Current	12.5		100	mA
AS7341	I <sub>DD</sub>	Active mode V <sub>DD</sub> =1.8V; T <sub>A</sub> =25°C		210	300	μA
	I <sub>DD</sub>	Idle mode V <sub>DD</sub> =1.8V; T <sub>A</sub> =25°C		35	60	μA
	I <sub>DD</sub>	Sleep mode V <sub>DD</sub> =1.8V; T <sub>A</sub> =25°C		0.7	5	μA
	I <sub>LED1</sub>	Driver LED Current	4		258	mA
ADT7410		Supply Current, Peak current while converting, I2C interface inactive		210	250	μA
		1 SPS mode V <sub>DD</sub> = 3.3 V, T <sub>A</sub> = 25°C		46		μA
		Supply current in shutdown mode V <sub>DD</sub> = 3.3 V, T <sub>A</sub> = 25°C		2	15	μA
		Power Dissipation 1 SPS V <sub>DD</sub> = 3.3 V, T <sub>A</sub> = 25°C		150		μW
AT25SF041B	I <sub>DPD</sub>	Deep Power-Down Current		1.2	11	μA
	I <sub>SB</sub>	Standby Current		13.3	30	μA
	I <sub>CC1</sub>	Active Current, Read (03h, 0Bh) Operation		3.3 - 4.5	4.7 - 6.5	mA
	I <sub>CC4</sub>	Active Current, Program Operation		11	16	mA
	I <sub>CC5</sub>	Active Current, Erase Operation		7	12	mA
LED1202	I <sub>Q</sub>	Quiescent current		4	8	μA
	I <sub>IN</sub>	Supply current		0.8	2	mA
	I <sub>CS_SET</sub>	Analog dimming range	1		20	mA

Επίσης κατά τη διάρκεια μετρήσεων υπάρχουν 3 περιπτώσεις χρήσης LED. Η πρώτη είναι με τη χρήση του εσωτερικού οδηγού LED του κάθε αισθητήρα, για τον AS7263 έχουμε 25mA και για το AS7341 20mA. Η δεύτερη περίπτωση είναι η χρήση του LED Driver 1202 ο οποίος είναι ρυθμισμένος να οδηγεί με 20mA. Τέλος η τρίτη περίπτωση είναι να χρησιμοποιηθεί ο ευρυφασματικός πομπός LED ο οποίος οδηγείται από το μικροελεγκτή και έχει ρεύμα λειτουργίας ορθής πόλωσης 350mA.

Πίνακας 3.5 Καταναλώσεις σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης AS7263

Συσκευή	Κατάσταση	Κατανάλωση			Μονάδα
		Ελάχιστη	Τυπική	Μέγιστη	
AS7263	Active			5	mA
AS7341	Idle		35	60	μA
ADT7410	Shutdown		2	15	μA
AT25SF041B	Active, Read		3.3 - 4.5	4.7 - 6.5	mA
LED1202	Supply/Idle		0.8	2	mA

Πίνακας 3.6 Συνολικές απαιτήσεις ρεύματος σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης AS7263

Σενάριο	Τυπική Κατανάλωση (mA)	Μέγιστη Κατανάλωση (mA)
Internal LED Driver	34.74 mA	37.68 mA
LED1202	29.74 mA	32.68 mA
Broadband Emitter	359.74 mA	362.68 mA

Πίνακας 3.7 Καταναλώσεις σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης AS7341

Συσκευή	Κατάσταση	Κατανάλωση			Μονάδα
		Ελάχιστη	Τυπική	Μέγιστη	
AS7263	Standby		12		μΑ
AS7341	Active		210	300	μΑ
ADT7410	Shutdown		2	15	μΑ
AT25SF041B	Standby		13.3	30	μΑ
LED1202	Supply/Idle		0.8	2	mA

Πίνακας 3.8 Συνολικές απαιτήσεις ρεύματος σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης AS7341

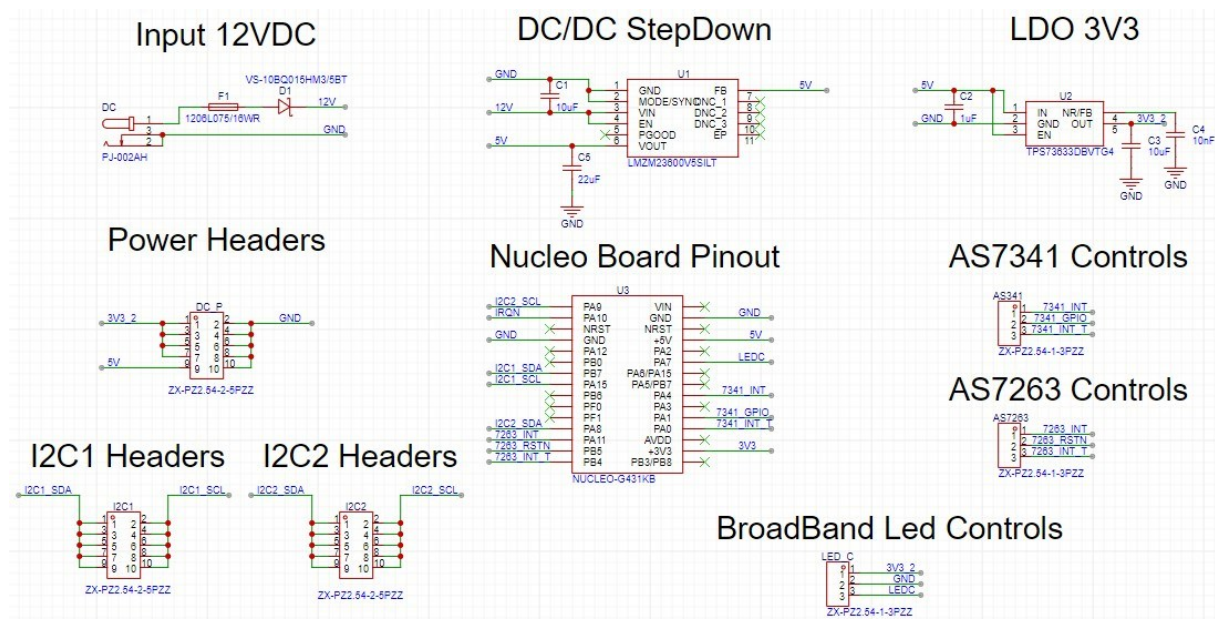
Σενάριο	Τυπική Κατανάλωση (mA)	Μέγιστη Κατανάλωση (mA)
Internal LED Driver	21.04 mA	22.36 mA
LED1202	21.04 mA	22.36 mA
Broadband Emitter	351.04 mA	352.36 mA

Πίνακας 3.9 Συνολικές απαιτήσεις σε περίπτωση λειτουργίας μέτρησης ADT7410

Συσκευή	Κατάσταση	Κατανάλωση			Μονάδα
		Ελάχιστη	Τυπική	Μέγιστη	
AS7263	Standby		12		μΑ
AS7341	Idle		35	60	μΑ
ADT7410	Converting		210	250	μΑ
AT25SF041B	Standby		13.3	30	μΑ
LED1202	Supply		0.8	2	mA
Συνολο			1.07 mA	2.35 mA	mA

### 3.3.4 Κύκλωμα Πλακέτας Μικροελεγκτή

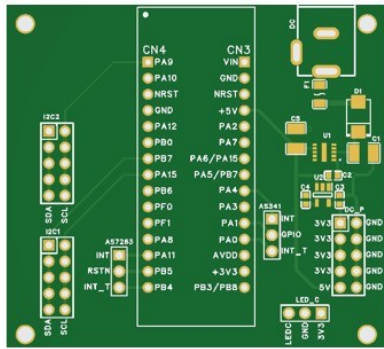
Αναφορικά με τις απαιτήσεις ισχύος του συστήματος, από τους συγκεντρωτικούς πίνακες κατανάλωσης προκύπτει ότι η συνολική κατανάλωση ρεύματος παραμένει σε κάθε περίπτωση κάτω από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο που καθορίζει ο κατασκευαστής της αναπτυξιακής πλακέτας Nucleo-G431KB [66]. Συνεπώς, η χρήση της τροφοδοσίας μέσω USB θεωρείται επαρκής για τη βασική λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, για λόγους αξιοπιστίας, σταθερότητας τάσης και λειτουργικής ευελιξίας, προβλέφθηκε και εναλλακτική δυνατότητα εξωτερικής τροφοδοσίας μέσω εισόδου 12V DC προστατευμένη με ασφάλεια (F1) και δίοδο ανάστροφης πολικότητας (D1). Η μείωση της τάσης σε 5V επιτυγχάνεται μέσω ενός DC/DC step-down μετατροπέα LMZM23600 [87]. Ακολουθώντας, για την παραγωγή σταθερής 3.3V τάσης χρησιμοποιείται γραμμικός σταθεροποιητής τάσης (LDO) τύπου TPS73633 της Texas Instruments [88].



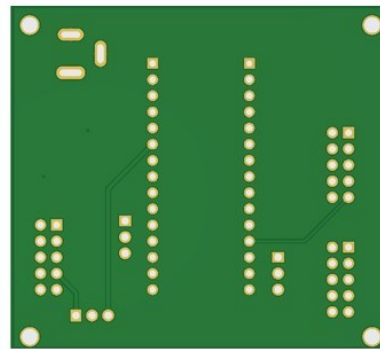
Σχήμα 3.13 Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας μικροελεγκτή

Ο μικροελεγκτής STM32G431KB σε μορφή Nucleo board είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία και διαχείριση των συσκευών. Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται ξεκάθαρα η αντιστοίχιση κάθε ακίδας εισόδου ή εξόδου με τις λειτουργίες της (SDA, SCL, GPIOs, IRQ, RST, PWM).

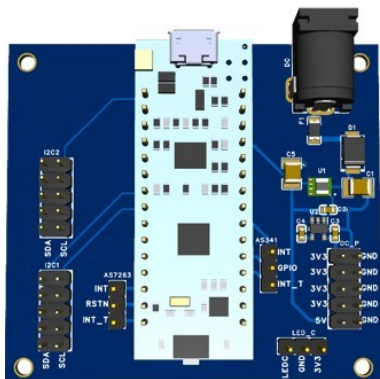
Έχουν προβλεφθεί δύο ξεχωριστές γραμμές I<sup>2</sup>C (I2C1 και I2C2), ώστε να διαχωρίζονται οι αισθητήρες και να αποφεύγονται συγκρούσεις αν χρειαστεί.



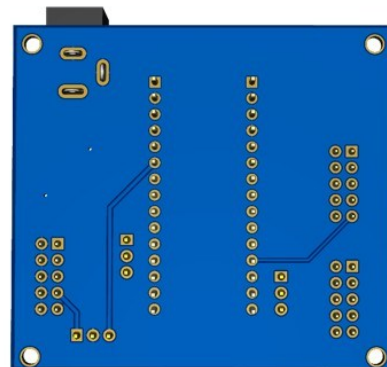
(α)



(β)



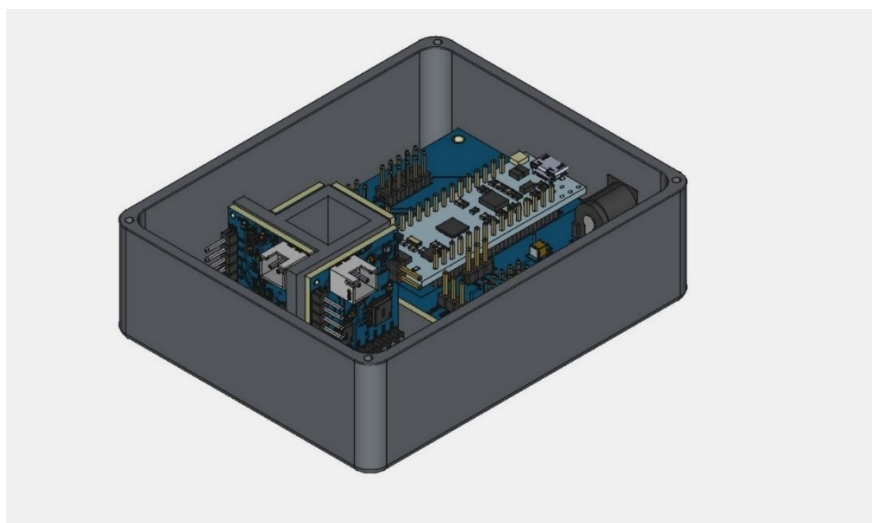
(γ)



(δ)

Σχήμα 3.14 Επάνω (α), (β) τα Gerber σχεδιαγράμματα της πλακέτας και κάτω (γ), (δ) η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας του μικροελεγκτή

Η τελική διάταξη όλων των επιμέρους πλακετών εντός της συσκευής απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.15 3D Απεικόνιση πλήρους ενσωμάτωσης συστήματος

Στην απόδοση αυτή φαίνεται η πλήρης ενσωμάτωση του συστήματος, με τη βασική πλακέτα ελέγχου (Nucleo-G431KB) τοποθετημένη στη βάση του περιβλήματος και τις αισθητήριες μονάδες (AS7263, AS7341) να βρίσκονται σε κατακόρυφη διάταξη πάνω στη βάση τοποθέτησης της κυψελίδας και ακριβώς απέναντι τους οι πλακέτες των Led.

### 3.4 Επίλογος

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται διεξοδικά ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των μηχανικών και ηλεκτρονικών υποσυστημάτων που συνθέτουν το πρωτότυπο όργανο μέτρησης οπτικής πυκνότητας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον εργονομικό και λειτουργικό σχεδιασμό του 3D περιβλήματος, με στόχο την ασφαλή και αποδοτική ενσωμάτωση όλων των απαραίτητων πλακετών και εξαρτημάτων, καθώς και την αποτελεσματική προστασία της κυψελίδας από εξωτερικό φως.

Η ανάπτυξη των τυπωμένων κυκλωμάτων ακολούθησε τις προδιαγραφές των κατασκευαστών για κάθε επιμέρους αισθητήρα και οδηγό LED, ενώ πραγματοποιήθηκε προσεκτικός υπολογισμός των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, όπως οι pull-up αντιστάσεις του διαύλου I<sup>2</sup>C και η συνολική κατανάλωση ρεύματος του συστήματος, ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα και η αξιόπιστη λειτουργία του σε όλα τα σενάρια λειτουργίας.

## Κεφάλαιο 4ο: Ανάπτυξη Υλικολογισμικού και Λογισμικού Συστήματος

### 4.1 Αρχιτεκτονική και Δομή Υλικολογισμικού STM32

Το υλικολογισμικό του μικροελεγκτή STM32G431KB έχει σχεδιαστεί με βάση μια αρχιτεκτονική καθοδηγούμενη από γεγονότα (Event-Driven), στην οποία η κύρια ροή εκτέλεσης ενεργοποιείται αποκλειστικά από γεγονότα λήψης εντολών μέσω της σειριακής επικοινωνίας (UART).

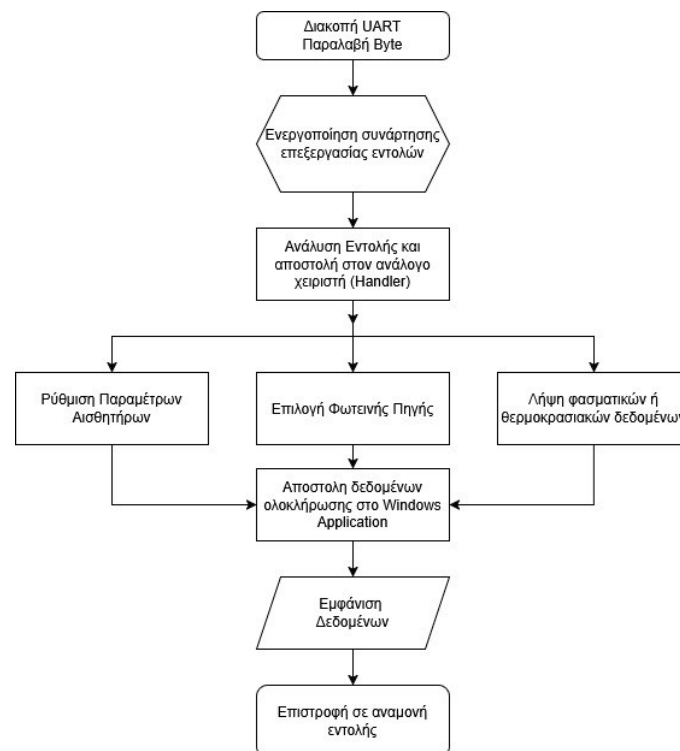
Η επικοινωνία με την εφαρμογή χρήστη (Windows application) γίνεται μέσω της εικονικής σειριακής θύρας (Virtual COM Port) που παρέχει το ST-Link, η οποία συνδέεται με τη θύρα UART2 του STM32. Η παραλαβή δεδομένων από την εφαρμογή του υπολογιστή γίνεται μέσω διακοπής UART RX interrupt, αποφεύγοντας τη χρήση συνεχούς ελέγχου (polling) στον κύριο βρόχο while(1).

Η λογική του είναι η εξής:

Μόλις ληφθεί πλήρης εντολή από τη θύρα UART, ενεργοποιείται η συνάρτηση επεξεργασίας εντολών. Η εντολή αναλύεται ώστε να εκτελεστεί η αντίστοιχη λειτουργία, η οποία μπορεί να είναι:

- I. Ρύθμιση παραμέτρων αισθητήρα
- II. Επιλογή φωτεινής πηγής
- III. Λήψη φασματικών ή θερμοκρασιακών μετρήσεων

Μετά την εκτέλεση, το αποτέλεσμα αποστέλλεται πίσω στον υπολογιστή. Με αυτό το σχήμα, η CPU του STM32 παραμένει σε χαμηλή κατανάλωση μέχρι να παραληφθεί νέα εντολή, εξασφαλίζοντας αποδοτική και άμεση απόκριση.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Ροής Επικοινωνίας UART

Η αρχιτεκτονική διατηρείται αρθρωτή και επεκτάσιμη, με ξεχωριστά Modules για κάθε υποσύστημα:

- I. Βιβλιοθήκη AS7341/AS7263 για φασματικές μετρήσεις
- II. Βιβλιοθήκη ADT7410 για μετρήσεις θερμοκρασίας
- III. Βιβλιοθήκη LED1202 & Light\_Manager για επιλογή και ενεργοποίηση φωτεινής πηγής
- IV. UART handler (main.c) για την αποκωδικοποίηση και διαχείριση εντολών

#### 4.1.1 Ανάπτυξη Βιβλιοθηκών Αισθητήρων

##### 4.1.1.1 Βιβλιοθήκη AS7263

Η βιβλιοθήκη του αισθητήρα AS7263 αναπτύχθηκε και τροποποιήθηκε κατάλληλα έχοντας ως βάση την βιβλιοθήκη (Qwiic\_Spectral\_Sensor\_AS7263) [89] της εταιρίας SparkFun©. Περιέχει δύο αρχεία το AS7263\_V2.h το οποίο περιλαμβάνει τις διευθύνσεις των καταχωρητών και τις δηλώσεις των συναρτήσεων και το αρχείο AS7263\_V2.c το οποίο περιλαμβάνει όλες τις συναρτήσεις του προγράμματος. Τα αρχεία είναι διαθέσιμα στο GitHub [90].

Οι βασικότερες συναρτήσεις της βιβλιοθήκης AS7263\_V2.c περιγράφονται παρακάτω:

##### Συνάρτηση αρχικοποίησης αισθητήρα

```
bool AS7263_init()
{
    // Perform a soft reset
    SoftReset();
    HAL_Delay(1000); // Allow sensor to stabilize after reset
    // Check sensor version
    uint8_t sensorVersion = virtualReadRegister(AS7263_HW_VERSION);
    HAL_Delay(100); // Small delay after reading the sensor version
    if (sensorVersion != SENSORTYPE_AS7263)
        return false;
    // Set LED driver current and disable bulb
    if (setLEDDrvCurrent(0b01) < 0) // 25mA
        return false;
    HAL_Delay(10);
    if (disableBulb() < 0)
        return false;
    HAL_Delay(10);
    // Set indicator LED current and disable
    if (setIndicatorCurrent(0b00) < 0) // 1mA
        return false;
    HAL_Delay(10);
    if (disableIndicator() < 0)
        return false;
    HAL_Delay(10);
    // Set integration time, gain, and measurement mode
    if (setIntegrationTime(70) < 0)
        return false;
    HAL_Delay(10);
    if (AS7263_setGain(0) < 0)
        return false;
    HAL_Delay(10);
    if (setMeasurementMode(3) < 0)
        return false;
    HAL_Delay(10);
    return true; // Initialization successful
}
```



Η συνάρτηση αυτή πραγματοποιεί πλήρη αρχικοποίηση του αισθητήρα, περιλαμβάνοντας soft reset, έλεγχο έκδοσης υλικού, ρύθμιση ρεύματος LED, απενεργοποίηση φωτισμού ένδειξης, επιλογή gain, integration time και mode. Επιστρέφει true σε επιτυχή αρχικοποίηση.

### Συνάρτηση λήψης μέτρησης με τη χρήση πηγής φωτός

```
int takeMeasurementsWithBulb()
{
    enable_light();
    // Perform the measurement
    if (takeMeasurements() < 0) {
        return -1; // Error taking measurement
    }
    disable_light();
    return 0; // Success
}
```

Ενεργοποιεί προσωρινά τον εξωτερικό φωτισμό μέσω της συνάρτησης enable\_light() (Light\_Manager.c), εκτελεί μέτρηση μέσω της takeMeasurements() και απενεργοποιεί τον φωτισμό. Χρησιμοποιείται για απόκτηση σταθερών και ελεγχόμενων μετρήσεων.

### Κύρια συνάρτηση λήψης μέτρησης

```
int takeMeasurements()
```

Εκκινεί νέα μέτρηση καθαρίζοντας πρώτα τη σημαία DATA\_RDY, υπολογίζει τον απαιτούμενο χρόνο αναμονής με βάση το integration time και το mode, και αναμένει μέχρι να ολοκληρωθεί η μέτρηση ή να προκύψει timeout.

### Συνάρτηση επιστροφής ακατέργαστης τιμής μέτρησης ενός καναλιού

```
int AS7263_getChannel(uint8_t channelRegister)
```

Επιστρέφει την ακατέργαστη (raw) μέτρηση 16-bit για ένα κανάλι του φασματικού εύρους, π.χ. R (610 nm), S (680 nm), ... W (860 nm). Χρησιμοποιείται για γρήγορη απόκτηση μετρήσεων.

### Συνάρτηση επιστροφής επεξεργασμένης τιμής μέτρησης ενός καναλιού

```
float getCalibratedChannel(uint8_t baseReg)
```

Επιστρέφει την επεξεργασμένη φασματική τιμή του επιλεγμένου καναλιού ως αριθμό κινητής υποδιαστολής (float), διαβάζοντας 4 συνεχόμενα bytes από τον αισθητήρα, τα οποία αναπαριστούν έναν αριθμό σε μορφή IEEE-754 (32-bit floating point).

Οι επεξεργασμένες τιμές έχουν ήδη υποβληθεί σε εσωτερικές διορθώσεις από το firmware του αισθητήρα, καθιστώντας τις πιο σταθερές και αξιόπιστες για συγκρίσεις με φυσικά μεγέθη, σε σύγκριση με τις ακατέργαστες τιμές (raw data), καθώς μειώνεται η επίδραση θορύβου και θερμοκρασιακών μεταβολών.

**Συνάρτηση ρύθμισης χρόνου ολοκλήρωσης της μέτρησης**

```
int setIntegrationTime(uint8_t val)
```

Ο χρόνος ολοκλήρωσης (integration time) ρυθμίζεται μέσω 8-bit καταχωρητή, με κάθε μονάδα να αντιστοιχεί σε 2.8 ms. Το εύρος ρύθμισης είναι από 0 έως 255, δηλαδή 0 ms έως περίπου 714 ms. Η παράμετρος αυτή καθορίζει τον χρόνο κατά τον οποίο ο φωτοανιχνευτής συλλέγει φως πριν γίνει μετατροπή του σήματος σε ψηφιακή μορφή (ADC). Η αύξηση του integration time οδηγεί σε υψηλότερο σήμα εξόδου και καλύτερη αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR), έως ότου η έξοδος φτάσει το μέγιστο όριο κορεσμού (saturation). Επομένως, η επιλογή της κατάλληλης τιμής εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής πηγής και την επιθυμητή ευαισθησία μέτρησης.

**Συνάρτηση ρύθμισης της ενίσχυσης του μετατροπέα**

```
int AS7263_setGain(uint8_t gain)
```

Ρυθμίζει την απολαβή του ενισχυτή του εσωτερικού μετατροπέα ADC σε ένα από τα 4 διαθέσιμα επίπεδα: 1x, 3.7x, 16x ή 64x. Η τιμή της ενίσχυσης επιλέγεται ανάλογα με την ένταση του φωτός και τις απαιτήσεις λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR).

**Συνάρτηση επιλογής του τρόπου μέτρησης**

```
int setMeasurementMode(uint8_t mode)
```

Ορίζει τη λειτουργία μέτρησης του αισθητήρα AS7263 ελέγχοντας τη διαδικασία μετατροπής των φασματικών δεδομένων. Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί δύο ομάδες φωτοδιόδων (Bank 1 και Bank 2) για την απόκτηση φασματικών μετρήσεων και υποστηρίζει διαφορετικά modes λειτουργίας που καθορίζουν πώς και πότε εκτελούνται οι μετρήσεις.

Διαθέσιμες λειτουργίες:

- I. Bank Mode 0 (Continuous Mode): Εκτελείται συνεχής μέτρηση στις φωτοδιόδους S, T, U, V. Οι τιμές R και W μηδενίζονται.
- II. Bank Mode 1 (Continuous Mode): Εκτελείται συνεχής μέτρηση στις φωτοδιόδους R, T, U, W. Οι τιμές V και W μηδενίζονται.
- III. Bank Mode 2 (Continuous Mode): Συνεχής μέτρηση και στις δύο ομάδες (όλα τα κανάλια R, S, T, U, V, W). Απαιτούνται δύο κύκλοι ολοκλήρωσης (Integration Time) για την πλήρη συλλογή δεδομένων.
- IV. Bank Mode 3 (One-Shot Mode): Ο αισθητήρας πραγματοποιεί μία μόνο μέτρηση όλων των φασματικών καναλιών μετά από εντολή ενεργοποίησης. Η μέτρηση ξεκινά όταν το bit 1SHOT στο control register τεθεί σε 1 και ολοκληρώνεται όταν το bit DATA\_RDY ενεργοποιηθεί. Μετά την ολοκλήρωση, το 1SHOT μηδενίζεται αυτόματα από το hardware.

**Συνάρτηση επανεκκίνησης του αισθητήρα**

```
int SoftReset()
```

Εκτελεί software reset του αισθητήρα γράφοντας 1 στο 8<sup>ο</sup> bit του register CONTROL\_SETUP, επανεκκινώντας την εσωτερική λογική, το bit επιστρέφει στην τιμή 0 μετά από την ολοκλήρωση της επανεκκίνησης.

### 4.1.1.2 Βιβλιοθήκη AS7341

Η βιβλιοθήκη του αισθητήρα AS7341 αναπτύχθηκε και τροποποιήθηκε κατάλληλα έχοντας ως βάση την βιβλιοθήκη (Adafruit\_AS7341) [91] της εταιρίας Adafruit©. Περιέχει δύο αρχεία το AS7341\_V1.h, το οποίο περιλαμβάνει τις διευθύνσεις των καταχωρητών και τις δηλώσεις των συναρτήσεων και το αρχείο AS7341\_V1.c, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις συναρτήσεις του προγράμματος. Τα αρχεία είναι διαθέσιμα στο GitHub [92]

Οι κύριες συναρτήσεις περιγράφονται παρακάτω:

#### Συνάρτηση αρχικοποίησης αισθητήρα

```
bool AS7341_init(I2C_HandleTypeDef *hi2c) {
    uint8_t chip_id;
    // Read the Chip ID register
    if (HAL_I2C_Mem_Read(hi2c, AS7341_I2C_ADDRESS << 1, REG_AS7341_ID,
I2C_MEMADD_SIZE_8BIT, &chip_id, 1, HAL_MAX_DELAY) != HAL_OK) {
        return false; // Failed to read the Chip ID register
    }
    // Verify that the Chip ID matches the expected value
    if ((chip_id & 0xFC) != (EXPECTED_CHIP_ID << 2)) {
        return false; // Chip ID mismatch
    }

    powerEnable(hi2c,true);
    HAL_Delay(10);
    // Set default ATIME (Integration Time)
    setATIME(hi2c, 29);
    HAL_Delay(10);
    // Set default ASTEP (Step Time)
    setASTEP(hi2c, 599);
    HAL_Delay(10);
    // Set default Gain (1x)
    setGain(hi2c, 0x01);
    HAL_Delay(10);
    // Set default LED Current (24mA)
    setLEDCurrent(hi2c, 24);
    HAL_Delay(10);
    return true; // Initialization successful
}
```

Πραγματοποιεί την αρχικοποίηση του αισθητήρα με έλεγχο Chip ID, ενεργοποίηση τροφοδοσίας (PON), και ρύθμιση των παραμέτρων ATIME (integration time), ASTEP (step count), gain και LED ρεύματος. Επιστρέφει true σε επιτυχία.

#### Συνάρτηση λήψης μέτρησης με τη χρήση πηγής φωτός

```
bool AS7341_ReadAllChannelsWithLED(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint16_t *readings_buffer) {
    uint8_t data_buffer[12]; // Temporary buffer to read 6 channels at a time
    // Configure SMUX for low channels and start spectral measurement
    enable_light();
    setSMUXLowChannels(hi2c, true);
    enableSpectralMeasurement(hi2c, true);
    delayForData(hi2c, 0); // Wait for the data to be ready
    // Read low channels (6 channels, 2 bytes each)
    if (HAL_I2C_Mem_Read(hi2c, AS7341_I2C_ADDRESS << 1, REG_AS7341_CH0_DATA_L,
I2C_MEMADD_SIZE_8BIT, data_buffer, 12, HAL_MAX_DELAY) != HAL_OK) {
        return false; // Failed to read low channels
    }
    // Convert the low channel data into 16-bit values and store in the buffer
```

```

for (int i = 0; i < 6; i++) {
    readings_buffer[i] = data_buffer[2 * i] | (data_buffer[2 * i + 1] << 8);
}
// Configure SMUX for high channels and start spectral measurement
setSMUXLowChannels(hi2c, false);
enableSpectralMeasurement(hi2c, true);
delayForData(hi2c, 0); // Wait for the data to be ready
// Read high channels (6 channels, 2 bytes each)
if (HAL_I2C_Mem_Read(hi2c, AS7341_I2C_ADDRESS << 1, REG_AS7341_CH0_DATA_L,
I2C_MEMADD_SIZE_8BIT, data_buffer, 12, HAL_MAX_DELAY) != HAL_OK) {
    return false; // Failed to read high channels
}
// Convert the high channel data into 16-bit values and store in the buffer
for (int i = 0; i < 6; i++) {
    readings_buffer[6 + i] = data_buffer[2 * i] | (data_buffer[2 * i + 1] << 8);
}
disable_light();
return true; // Successfully read all channels
}

```

Εκτελεί μέτρηση των 10 καναλιών, χωρισμένα σε δύο ομάδες (low και high) μέσω του μηχανισμού SMUX.

### Συνάρτηση ενεργοποίησης φασματικής μέτρησης

```
bool enableSpectralMeasurement(I2C_HandleTypeDef *hi2c, bool enable_measurement)
```

Ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί το bit SPECREN στον καταχωρητή ENABLE, ώστε να ξεκινήσει η φασματική μέτρηση. Απαραίτητη προϋπόθεση πριν από κάθε ανάγνωση.

### Συνάρτηση ρύθμισης ενίσχυσης μετατροπέα

```
bool setGain(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t gain_value)
```

Θέτει τον συντελεστή ενίσχυσης μέσω του καταχωρητή CFG\_1. Διατίθενται επίπεδα από 0.5x έως 512x.

### Συναρτήσεις ρύθμισης χρόνου ολοκλήρωσης μέτρησης

```
bool setASTEP(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint16_t astep_value)
bool setATIME(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t atime_value)
```

Οι παράμετροι ATIME και ASTEP καθορίζουν τον χρόνο ολοκλήρωσης της μέτρησης σύμφωνα με τον τύπο:

$$T_{INT} = (ATIME + 1) \times (ASTEP + 1) \times 2.78 \mu s$$

Η ακριβής ρύθμιση των τιμών αυτών επιτρέπει ευέλικτο έλεγχο του integration time (συνολικός χρόνος έκθεσης των καναλιών στο φως).

### Συναρτήσεις ενεργοποίησης και ρύθμισης της έντασης του ενσωματωμένου οδηγού LED

```
bool enableLED(I2C_HandleTypeDef *hi2c, bool enable_led) {
bool setLEDCurrent(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint16_t led_current_ma)
```

Ενεργοποιούν ή ρυθμίζουν την ένταση της ενσωματωμένης πηγής φωτός μέσω των τραπεζών Bank 0/1 και register access control. Ο LED driver ρυθμίζεται σε mA (π.χ. 4–258 mA με βήμα 2 mA).

### Συνάρτηση επιλογής ομάδας καναλιών του SMUX

```
void setSMUXLowChannels(I2C_HandleTypeDef *hi2c, bool f1_f4)
```

Ο AS7341 διαθέτει εσωτερικό multiplexer (SMUX) που συνδέει τα φασματικά φίλτρα στους 6 διαθέσιμους ADCs. Αυτή η συνάρτηση ρυθμίζει τα κανάλια για ανάγνωση της ομάδας F1–F4 ή F5–F8 μαζί με κανάλια clear και NIR.

#### 4.1.1.3 Βιβλιοθήκη ADT7410

Η βιβλιοθήκη ADT7410\_V1.h αναπτύχθηκε για τη διασύνδεση του αισθητήρα θερμοκρασίας ADT7410 (Analog Devices) με μικροελεγκτή STM32G4 μέσω I2C, με βάση τις προδιαγραφές του επίσημου datasheet[78] της κατασκευάστριας εταιρείας. Περιλαμβάνει το πλήρες σύνολο συναρτήσεων που επιτρέπουν την αξιοποίηση όλων των λειτουργιών και δυνατοτήτων της συσκευής, τόσο για απλή λήψη θερμοκρασίας όσο και για τη διαχείριση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως διακοπές, όρια θερμοκρασίας και λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας. Αποτελείται από τα αρχεία ADT7410\_V1.h και ADT7410\_V1.c τα οποία είναι διαθέσιμα στο [93].

Οι κύριες συναρτήσεις περιγράφονται παρακάτω:

#### Συνάρτηση αρχικοποίησης αισθητήρα:

```
HAL_StatusTypeDef ADT7410_Initialize(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address) {
    uint8_t chip_id = 0;
    // Step 1: Read the ID register
    if (HAL_I2C_Mem_Read(hi2c, chip_address << 1, ADT7410_REG_ID, I2C_MEMADD_SIZE_8BIT,
        &chip_id, 1, HAL_MAX_DELAY) != HAL_OK) {
        return HAL_ERROR; // I2C read failed
    }
    // Step 2: Check if the ID matches 0xCx
    if ((chip_id & 0xF0) != 0xC0) {
        return HAL_ERROR; // Invalid chip ID
    }
    // Step 3: Configure the sensor (e.g., set resolution to 16-bit)
    if (ADT7410_SetResolution(hi2c, chip_address, true) != HAL_OK) {
        return HAL_ERROR; // Failed to set resolution
    }
    // Step 4: Set operation mode (e.g., SPS_Mode)
    if (ADT7410_SetOperationMode(hi2c, chip_address, 0x02) != HAL_OK) {
        return HAL_ERROR; // Failed to set operation mode
    }
    return HAL_OK; // Initialization successful
}
```

Η συνάρτηση αρχικοποίησης πραγματοποιεί αρχικά επιβεβαίωση της ταυτότητας της συσκευής μέσω της ανάγνωσης του Device ID, ώστε να διασφαλιστεί η σωστή επικοινωνία με τον αισθητήρα. Στη συνέχεια, ρυθμίζεται η ανάλυση μέτρησης στους 16-bit για μέγιστη ακρίβεια και επιλέγεται η λειτουργία μονής δειγματοληψίας (One Shot mode), κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν συνεχή παρακολούθηση θερμοκρασίας.

**Συνάρτηση ανάγνωσης θερμοκρασίας:**

```

HAL_StatusTypeDef ADT7410_ReadTemperature(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address,
float *temperature) {
    uint8_t temp_data[2];
    int16_t raw_temp;
    bool is_16bit;
    // Step 1: Check the resolution mode
    if (ADT7410_GetResolution(hi2c, chip_address, &is_16bit) != HAL_OK) {
        return HAL_ERROR; // Failed to determine resolution
    }
    // Step 2: Read the temperature registers (MSB and LSB)
    if (HAL_I2C_Mem_Read(hi2c, chip_address << 1, ADT7410_REG_TEMP_MSB,
I2C_MEMADD_SIZE_8BIT, temp_data, 2, HAL_MAX_DELAY) != HAL_OK) {
        return HAL_ERROR; // Return error status if the read operation fails
    }
    // Step 3: Combine MSB and LSB into a raw temperature value
    raw_temp = (temp_data[0] << 8) | temp_data[1];
    // Step 4: Process raw temperature based on resolution mode
    if (is_16bit) {
        // 16-bit mode: raw_temp is valid as-is
        *temperature = raw_temp / 128.0; // Convert to Celsius
    } else {
        // 13-bit mode: Shift right by 3 bits and handle sign extension
        raw_temp = raw_temp >> 3; // Keep only 13 bits
        if (raw_temp & 0x1000) { // Check the 13th bit (sign bit)
            raw_temp |= 0xE000; // Sign-extend for negative values
        }
        *temperature = raw_temp / 16.0; // Convert to Celsius
    }
    return HAL_OK; // Return success status
}

```

Η παραπάνω συνάρτηση πραγματοποιεί ανάγνωση των δύο καταχωρητών δεδομένων θερμοκρασίας (MSB και LSB) και ενώνει τα δεδομένα σε μία ακατέργαστη τιμή 16-bit. Η επεξεργασία της τιμής εξαρτάται από την επιλεγμένη ανάλυση η οποία είναι ή 16-bit, όπου η τελική θερμοκρασία υπολογίζεται με διαίρεση διά 128.0, είτε 13-bit, όπου γίνεται δεξιά ολίσθηση και διαίρεση διά 16.0. Γίνεται χρήση bit masking και shifting για τη σωστή εξαγωγή και ερμηνεία των δεδομένων.

**Συνάρτηση ανάγνωσης θερμοκρασίας σε λειτουργία One-Shot:**

```

HAL_StatusTypeDef ADT7410_ReadTempOneShotMode(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t
chip_address, float *temperature) {
    // 1. Ρύθμιση bit 5 του Configuration Register
    // 2. Delay 250 ms για μετατροπή
    // 3. Ανάγνωση τιμής
}

```

Η λειτουργία one-shot ενεργοποιείται με την εγγραφή του αντίστοιχου bit στο configuration register, προκαλώντας μία μόνο μέτρηση θερμοκρασίας. Η βιβλιοθήκη εισάγει καθυστέρηση 250 ms για να εξασφαλίσει την ολοκλήρωση της μετατροπής πριν την ανάγνωση της τιμής. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, καθώς επιτρέπει την ενεργοποίηση του αισθητήρα μόνο κατά τη διάρκεια της μέτρησης και την απενεργοποίησή του αμέσως μετά.

### Συναρτήσεις ανίχνευσης σημαιών

```
HAL_StatusTypeDef ADT7410_TLowFlag_Read(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, bool *flag);
HAL_StatusTypeDef ADT7410_ThighFlag_Read(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, bool *flag);
HAL_StatusTypeDef ADT7410_TCritFlag_Read(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, bool *flag);
```

Αυτές οι συναρτήσεις διαβάζουν τις σημαίες υπερβάσεων θερμοκρασίας (TLOW, THIGH, TCRIT) από τον αισθητήρα. Οι σημαίες αυτές ενεργοποιούνται όταν η μετρούμενη θερμοκρασία ξεπεράσει τα προκαθορισμένα όρια που έχουν οριστεί στους καταχωρητές 0x04–0x08. Στην 16-bit λειτουργία, οι σημαίες βρίσκονται στα LSB bits (0x01), ενώ στην 13-bit λειτουργία στο Status Register (0x02). Η ανάγνωσή τους είναι κρίσιμη για εφαρμογές με συναγερούς θερμοκρασίας.

### Συναρτήσεις ορισμού ορίων κατωφλίου

```
HAL_StatusTypeDef ADT7410_SetThighSetpoint(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, float temperature);
HAL_StatusTypeDef ADT7410_SetTlowSetpoint(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, float temperature);
HAL_StatusTypeDef ADT7410_SetTcritSetpoint(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, float temperature);
```

Οι συναρτήσεις αυτές ορίζουν τα θερμοκρασιακά όρια (THIGH, TLOW, TCRIT) στους αντίστοιχους καταχωρητές (0x04, 0x06, 0x08). Κάθε όριο αναπαρίσταται ως 16-bit τιμή και μετατρέπεται αυτόματα από τη συνάρτηση από °C σε δυαδική μορφή. Η ρύθμιση αυτών των ορίων είναι απαραίτητη για εφαρμογές θερμικού ελέγχου ή προστασίας υπερθέρμανσης.

### Συναρτήσεις ρύθμισης παραμέτρων

```
HAL_StatusTypeDef ADT7410_SetResolution(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, bool is_16bit);
HAL_StatusTypeDef ADT7410_SetOperationMode(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, uint8_t mode);
HAL_StatusTypeDef ADT7410_SetFaultQueue(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address, uint8_t fault_queue);
```

Ο Configuration Register (0x03) ελέγχει τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας του αισθητήρα. Η ADT7410\_SetResolution() επιλέγει ανάλυση 13-bit ή 16-bit (bit 7), η ADT7410\_SetOperationMode() ρυθμίζει τη λειτουργία (Continuous, One-Shot, SPS) (bits 5-6), ενώ η ADT7410\_SetFaultQueue() ορίζει τον αριθμό των συνεχόμενων υπερβάσεων (bits 0-1) πριν ενεργοποιηθεί μια σημαία. Αυτές οι ρυθμίσεις επηρεάζουν την ακρίβεια, την ταχύτητα δειγματοληψίας και την αξιοπιστία του συστήματος.

### Συναρτήσεις ενεργειακής διαχείρισης και Reset

```
HAL_StatusTypeDef ADT7410_Shutdown(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address);
HAL_StatusTypeDef ADT7410_WakeUp(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address);
HAL_StatusTypeDef ADT7410_Reset(I2C_HandleTypeDef *hi2c, uint8_t chip_address);
```

Η ADT7410\_Shutdown() θέτει τον αισθητήρα σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης (bits 5-6 = 0x03), μειώνοντας το ρεύμα σε <1 μΑ. Η ADT7410\_WakeUp() τον επαναφέρει σε κανονική λειτουργία, ενώ η ADT7410\_Reset() εκτελεί πλήρη επαναφορά λογισμικού, επαναφέροντας όλους τους καταχωρητές (registers) στις εσωτερικές προκαθορισμένες τιμές του κατασκευαστή, όπως αυτές παρουσιάζονται στο datasheet. Αυτές οι λειτουργίες είναι ιδανικές για εφαρμογές με μπαταρία.

#### 4.1.1.4 Βιβλιοθήκη ST Led1202

Η βιβλιοθήκη LED1202\_DRIVER\_V1 αναπτύχθηκε για τη διασύνδεση του Led Driver1202 (STMicroelectronics) με μικροελεγκτή STM32G4 μέσω I2C, με βάση τις προδιαγραφές του επίσημου datasheet [77] της κατασκευάστριας εταιρείας. Περιλαμβάνει μόνο τις συναρτήσεις που επιτρέπουν να διαχειρίζεται τους οδηγούς ρεύματος (current sinks) ώστε να ανάβουν τα led του MTMD6788594SMT6 με συγκεκριμένη ένταση ρεύματος ρυθμισμένη στα 20mA. Αποτελείται από τα αρχεία LED1202\_DRIVER\_V1.h και LED1202\_DRIVER\_V1.c τα οποία είναι διαθέσιμα στο GitHub [94].

#### Συνάρτηση αρχικοποίηση και βασικές λειτουργίες

```
void LED1202_Init(I2C_HandleTypeDef *hi2c) {
    _led_i2c = hi2c;
    LED1202_Enable();
    LED1202_DisableAll();
}
```

Η LED1202\_Init() αρχικοποιεί τον οδηγό LED1202, αποθηκεύοντας το I2C handle και ενεργοποιώντας τη συσκευή. Αμέσως μετά, απενεργοποιεί όλα τα κανάλια LED για να αποφευχθεί τυχόν ανεπιθύμητη ενεργοποίηση κατά την εκκίνηση. Αυτή η συνάρτηση πρέπει να κληθεί πριν από οποιαδήποτε άλλη λειτουργία.

#### Συνάρτηση ενεργοποίησης / απενεργοποίησης συσκευής

```
void LED1202_Enable(void) {
    uint8_t on = 1;
    led1202_write(LED1202_DEVICE_ENABLE, &on, 1);
}
void LED1202_Disable(void) {
    uint8_t off = 0;
    led1202_write(LED1202_DEVICE_ENABLE, &off, 1);
}
```

Οι συναρτήσεις LED1202\_Enable() και LED1202\_Disable() ελέγχουν την κατάσταση λειτουργίας ολόκληρης της συσκευής μέσω του register LED1202\_DEVICE\_ENABLE. Όταν η συσκευή είναι απενεργοποιημένη, όλα τα LED και οι ρυθμίσεις ρεύματος αγνοούνται. Η απενεργοποίηση είναι χρήσιμη για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης.

#### Συναρτήσεις διαχείρισης καναλιών LED

```
void LED1202_DisableAll(void) {
    uint8_t clear[2] = {0x00, 0x00};
    led1202_write(LED1202_LED_CH_ENABLE, clear, 2);
}
void LED1202_EnableChannel(uint8_t ch) {
    uint8_t reg[2] = {0x00, 0x00};
    led1202_read(LED1202_LED_CH_ENABLE, reg, 2);
    uint16_t value = (reg[1] << 8) | reg[0];
    value |= (1 << ch);
    reg[0] = value & 0xFF;
    reg[1] = (value >> 8) & 0x0F;
    led1202_write(LED1202_LED_CH_ENABLE, reg, 2);
}
```

Η LED1202\_DisableAll() εξασφαλίζει ότι όλα τα LED είναι ανενεργά γράφοντας 0x00 στους καταχωρητές ενεργοποίησης καναλιών (LED1202\_LED\_CH\_ENABLE).



Η `LED1202_EnableChannel()` ενεργοποιεί ένα συγκεκριμένο κανάλι (0–11) χωρίς να επηρεάζει τα υπόλοιπα. Διαβάζει την τρέχουσα κατάσταση, ενημερώνει το bit του καναλιού και γράφει πίσω την τιμή.

### Συνάρτηση ρύθμισης ρεύματος οδηγού LED

```
void LED1202_SetCurrent(uint8_t ch, uint8_t ma) {
    if (ma > 20) ma = 20;
    uint8_t regval = (ma * 255) / 20;
    uint8_t reg = LED1202_CHANNEL_REG(ch);
    led1202_write(reg, ®val, 1);
}
```

Η `LED1202_SetCurrent()` ρυθμίζει το ρεύμα ενός καναλιού (σε mA) με γραμμική κλιμάκωση. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα είναι 20 mA

#### 4.1.1.5 Βιβλιοθήκη Light Manager

Αυτή η βιβλιοθήκη (`light_manager.c`) σχεδιάστηκε ώστε να υλοποιεί ένα ενοποιημένο σύστημα ελέγχου για διαφορετικούς τύπους φωτεινών πηγών (LED) που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια μετρήσεων. Βασίζεται σε function pointers για ευελιξία και υποστήριξη πολλαπλών τύπων LED (Sensor Internal Driver, Nucleo GPIO, LED1202). Αποτελείται από δύο αρχεία το `Light_Manager.h` και το `Light_Manager.c` τα οποία είναι διαθέσιμα στο GitHub [95]. Παρακάτω αναλύονται οι κύριες λειτουργίες και η αρχιτεκτονική της.

#### Συνάρτηση αρχικοποίησης και συναρτήσεις βασικών ρυθμίσεων

```
void light_Manager_init(I2C_HandleTypeDef *hi2c) {
    led_i2c = hi2c;
    LED1202_Init(led_i2c);
}
void light_Manager_setSensor(uint8_t type);
void light_Manager_setSelected(uint8_t led_option);
```

Η λειτουργία `light_Manager_init()` εκτελεί την απαραίτητη προετοιμασία του συστήματος, αρχικοποιώντας τη διεπαφή I2C για επικοινωνία με τον οδηγό LED1202. Αυτή η συνάρτηση πρέπει να κληθεί στην αρχή της εκτέλεσης, πριν από οποιαδήποτε άλλη λειτουργία της βιβλιοθήκης. Οι συναρτήσεις `light_Manager_setSensor()` και `light_Manager_setSelected()` επιτρέπουν τη δυναμική ρύθμιση του τύπου αισθητήρα και της επιλεγμένης φωτεινής πηγής αντίστοιχα, προσφέροντας ευελιξία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.

#### Συνάρτηση επιλογής LED βάση `selected_led_option`

```
switch (selected_led_option) {
    case 0: light_type = LIGHT_TYPE_DRIVER; led_index = 0; break; // External driver
    case 2: light_type = LIGHT_TYPE_LED1202; led_index = 9; break; // LED1202 Channel 9
    // ... και άλλα cases
}
```

Η βιβλιοθήκη προσφέρει κεντρικές συναρτήσεις ενεργοποίησης και απενεργοποίησης. Η `enable_light()` αναλαμβάνει τη διαχείριση της επιλεγμένης πηγής φωτός βάσει της παραμέτρου `selected_led_option`. Στην περίπτωση των LED1202, η ενεργοποίηση περιλαμβάνει μια ασφαλή διαδικασία που πρώτα απενεργοποιεί όλα τα κανάλια, ρυθμίζει το επιθυμητό ρεύμα σε 20 mA (μέγιστη τιμή), και τέλος ενεργοποιεί το συγκεκριμένο κανάλι. Για εξωτερικούς οδηγούς, η βιβλιοθήκη υποστηρίζει callback functions που επιτρέπουν την ενσωμάτωση προσαρμοσμένων λύσεων.

## Χρήση Function Pointers

```
void as7341_enable(void) { enableLED(&hi2c1, true); }
void as7341_disable(void) { enableLED(&hi2c1, false); }
void as7263_enable(void) { enableBulb(); }
void as7263_disable(void) { disableBulb(); }
```

```
static LightEnableFunc driverEnableCallback = NULL;
static LightDisableFunc driverDisableCallback = NULL;

void light_Manager_setDriverCallbacks(LightEnableFunc enableFn, LightDisableFunc disableFn)
{
    driverEnableCallback = enableFn;
    driverDisableCallback = disableFn;
}
```

### 4.1.2 Επικοινωνία μέσω UART

Αυτό το τμήμα κώδικα υλοποιεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας μέσω UART για τον έλεγχο και τη διαχείριση του οργάνου μέσω της εφαρμογής. Το σύστημα βασίζεται σε δυαδικά πακέτα με συγκεκριμένη δομή, επιτρέποντας την αποστολή εντολών και τη λήψη αποτελεσμάτων. Παρακάτω εξηγούνται οι βασικές αρχές λειτουργίας.

#### Δομή Πακέτου Επικοινωνίας

Κάθε πακέτο επικοινωνίας ακολουθεί την εξής μορφή:

*[Device Code] [Command] [DataLength] [Data0]...[DataN] [Checksum]*

- I. *Device Code* (1 byte): Προσδιορίζει τον αισθητήρα (π.χ., 0xAA = AS7263, 0xCC = AS7341).
- II. *Command* (1 byte): Καθορίζει την εντολή που θα εκτελεστεί.
- III. *Data Length* (1 byte): Ορίζει το μήκος των δεδομένων που ακολουθούν.
- IV. *Data* (μεταβλητό μήκος): Περιέχει τις παραμέτρους της εντολής.
- V. *Checksum* (1 byte): Χρησιμοποιείται για έλεγχο ακεραιότητας (XOR όλων των προηγούμενων byte).

Παράδειγμα Πακέτου:

[0xAA] [0x01] [0x02] [0x10][0x20] [0xCB]

(AS7263, εντολή 0x01, 2 bytes δεδομένων, δεδομένα, checksum 0xCB)

Πίνακας 4.1 Πίνακας Κεφαλίδας (Κατεύθυνση Επικοινωνίας & Αναγνώριση Συσκευής)

Header Byte	Κατεύθυνση	Συσκευή	Περιγραφή
0xAA	PC → STM32	AS7263	Αποστολή ρυθμίσεων ή εντολών στον AS7263
	STM32 → PC		Αποστολή δεδομένων μέτρησης ή απάντησης από τον AS7263
0xCC	PC → STM32	AS7341	Αποστολή ρυθμίσεων ή εντολών στον AS7341
	STM32 → PC		Αποστολή δεδομένων μέτρησης ή απάντησης από τον AS7341

Πίνακας 4.2 Πίνακας Εντολών (PC → STM32) για AS7263

Κωδικός Εντολής	Περιγραφή	Μορφή Δεδομένων
0x01	Ρύθμιση Κέρδους	1 Byte (b00=1x, b01=3.7x, b10=16x, b11=64x)
0x02	Ρύθμιση Χρόνου Ολοκλήρωσης	1 Byte (1-255)
0x03	Ρύθμιση Ρεύματος LED	1 Byte (b00=12.5mA, b01=25mA, b10=50mA, b11=100mA)
0x04	Επαναφορά Αισθητήρα	0 Bytes
0x05	Έναρξη Μέτρησης Με LED	1 Byte (0x00 – 0x05) επιλογής LED
0x06	Έναρξη Μέτρησης Χωρίς LED	0 Bytes
0x07	Ανάγνωση Εσωτερικής Θερμοκρασίας	0 Bytes
0x08	Ανάγνωση Εξωτερικής Θερμοκρασίας (ADT7410)	0 Bytes

Πίνακας 4.3 Πίνακας Εντολών (PC → STM32) για AS7341

Κωδικός Εντολής	Περιγραφή	Μορφή Δεδομένων
0x01	Ρύθμιση Κέρδους	1 Byte (b00=1x, b01=3.7x, b10=16x, b11=64x)
0x02	Ρύθμιση Χρόνου Ολοκλήρωσης	3 Bytes (ATIME: 1 Byte, ASTEP: 2 Bytes)
0x03	Ρύθμιση Ρεύματος LED	1 Byte (4–258mA σε βήματα των 2mA)
0x04	Έναρξη Μέτρησης Με LED	1 Byte (0x00 – 0x05) επιλογής LED
0x05	Έναρξη Μέτρησης Χωρίς LED	0 Bytes
0x06	Ανάγνωση Εξωτερικής Θερμοκρασίας (ADT7410)	0 Bytes

### Εντολές AS7263

```
#define CMD_AS7263_SET_GAIN 0x01
#define CMD_AS7263_SET_INT_TIME 0x02
#define CMD_AS7263_SET_LED_CURRENT 0x03
#define CMD_AS7263_RESET_SENSOR 0x04
#define CMD_AS7263_START_ME_ULED 0x05
#define CMD_AS7263_START_ME_WLED 0x06
#define CMD_AS7263_INTERNAL_TEMP 0x07
#define CMD_AS7263_EXTERNAL_TEMP 0x08
```

### Εντολές AS7341

```
#define CMD_AS7341_SET_GAIN 0x01
#define CMD_AS7341_SET_INT_TIME 0x02
#define CMD_AS7341_SET_LED_CURRENT 0x03
#define CMD_AS7341_START_ME_ULED 0x04
#define CMD_AS7341_START_ME_WLED 0x05
#define CMD_AS7341_EXTERNAL_TEMP 0x06
#define CMD_AS7341_RESET_SENSOR 0x07
```

## Μηχανισμός Λήψης Πακέτων

Η συνάρτηση HAL\_UART\_RxCpltCallback() καλείται κάθε φορά που λαμβάνεται ένα byte μέσω UART. Ο κώδικας:

```
void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart) {
    if (huart->Instance == USART2) { // Ensure this is USART2
        if (bufferIndex == 0) {
            memset(packetBuffer, 0, sizeof(packetBuffer)); // Clear buffer before receiving
            a new packet
        }
        // Store the received byte in the buffer
        if (bufferIndex < sizeof(packetBuffer)) {
            packetBuffer[bufferIndex++] = rx_data;
        } else {
            // Buffer overflow detected, reset buffer
            printf("Buffer overflow detected. Resetting buffer.\r\n");
            bufferIndex = 0;
            memset(packetBuffer, 0, sizeof(packetBuffer));
        }
        if (bufferIndex >= 4) {
            uint8_t expectedLength = 4 + packetBuffer[2]; // 4 (header) + dataLength
            // Validate data length to prevent overflow
            if (packetBuffer[2] > MAX_DATA_LENGTH) {
                printf("Error: Invalid data length! Resetting buffer.\r\n");
                bufferIndex = 0;
                memset(packetBuffer, 0, sizeof(packetBuffer));
            }
            // Check if a full packet has been received
            if (bufferIndex == expectedLength) {
                // Copy the packet buffer into the receivedPacket structure
                receivedPacket.deviceCode = packetBuffer[0];
                receivedPacket.command = packetBuffer[1];
                receivedPacket.dataLength = packetBuffer[2];
                memcpy(receivedPacket.data, &packetBuffer[3], receivedPacket.dataLength);
                receivedPacket.checksum = packetBuffer[bufferIndex - 1];
                // Validate the checksum
                uint8_t calculatedChecksum = 0;
                for (int i = 0; i < bufferIndex - 1; i++) {
                    calculatedChecksum ^= packetBuffer[i];
                }
                if (calculatedChecksum == receivedPacket.checksum) {
                    // Packet is valid, process it
                    ProcessPacket(&receivedPacket);
                } else {
                    printf("Checksum error! Discarding packet.\r\n");
                }
            }
            // Reset buffer for the next packet
            bufferIndex = 0;
            memset(packetBuffer, 0, sizeof(packetBuffer));
        }
    }
}
```

- I. Ελέγχει για buffer overflow και επαναφέρει τον buffer αν χρειαστεί.
- II. Συλλέγει τα byte στον packetBuffer μέχρι να ληφθεί ένα πλήρες πακέτο.
- III. Επικυρώνει το μήκος των δεδομένων και τον checksum.
- IV. Αν το πακέτο είναι έγκυρο, καλεί την ProcessPacket() για να το επεξεργαστεί.

Το μέγιστο μήκος δεδομένων (MAX\_DATA\_LENGTH) περιορίζεται για να αποφευχθεί υπερχείλιση. Ο buffer επαναρχικοποιείται μετά από κάθε επιτυχημένη ή αποτυχημένη επεξεργασία.

## Ανακατεύθυνση Πακέτου

```

void ProcessPacket(Packet *packet) {
    switch (packet->deviceCode) {
        case 0xAA: // AS7263
            HandleAS7263Command(packet->command, packet->data, packet->dataLength);
            break;
        case 0xCC: // AS7341
            HandleAS7341Command(packet->command, packet->data, packet->dataLength);
            break;
        default:
            // Unknown device code
            printf("Unknown device code: 0x%02X\r\n", packet->deviceCode);
            break;
    }
}

```

Η ProcessPacket() λαμβάνει το ήδη διαμορφωμένο πακέτο το οποίο έχει, DeviceCode, command, data[], dataLength και αναλόγως το DeviceCode ανακατευθύνει την επεξεργασία στον κατάλληλο χειριστή με βάση το DeviceCode. Έτσι έχουμε δύο χειριστές έναν για κάθε αισθητήρα:

Αν το DeviceCode είναι 0xAA δηλαδή ο AS7263 την εντολή χειρίζεται η συνάρτηση:

```

void HandleAS7263Command(uint8_t command, uint8_t *data, uint8_t dataLength)

```

```

switch (command) {
    case CMD_AS7263_SET_GAIN:
        // Ρυθμίζει την απολαβή (gain) του αισθητήρα (1x, 3.7x, 16x, 64x)
        break;

    case CMD_AS7263_SET_INT_TIME:
        // Ρυθμίζει τον χρόνο ολοκλήρωσης (integration time)
        break;

    case CMD_AS7263_SET_LED_CURRENT:
        // Ορίζει το ρεύμα λειτουργίας του ενσωματωμένου LED
        break;

    case CMD_AS7263_RESET_SENSOR:
        // Επαναφέρει τον αισθητήρα (soft reset) και επανεκκινεί την αρχικοποίηση
        break;

    case CMD_AS7263_START_ME_ULED:
        // Ξεκινά φασματική μέτρηση με χρήση εσωτερικού LED
        break;

    case CMD_AS7263_START_ME_WLED:
        // Ξεκινά φασματική μέτρηση με εξωτερικό φωτισμό
        break;

    case CMD_AS7263_INTERNAL_TEMP:
        // Διαβάζει την εσωτερική θερμοκρασία του AS7263
        break;

    case CMD_AS7263_EXTERNAL_TEMP:
        // Διαβάζει την εξωτερική θερμοκρασία από τον αισθητήρα ADT7410
        break;
    default:
        // Άγνωστη εντολή
        break;
}
HAL_Delay(10);
SendResponse(0xAA, command, responseData, responseLength);

```

Αν το DeviceCode είναι 0xCC δηλαδή ο AS7341 την εντολή χειρίζεται η συνάρτηση:

```
void HandleAS7341Command(uint8_t command, uint8_t *data, uint8_t dataLength)
```

```
switch (command) {
    case CMD_AS7341_SET_GAIN:
        // Ρυθμίζει την απολαβή (gain) του αισθητήρα.

    case CMD_AS7341_SET_INT_TIME:
        // Θέτει τις παραμέτρους χρόνου ολοκλήρωσης (ATIME και ASTEP) που καθορίζουν τη
        διάρκεια ενσωμάτωσης του σήματος.

    case CMD_AS7341_SET_LED_CURRENT:
        // Ορίζει το ρεύμα οδήγησης για το εσωτερικό LED του αισθητήρα.

    case CMD_AS7341_START_ME_ULED:
        // Ξεκινά μέτρηση με χρήση LED - ενεργοποιείται το επιλεγμένο φως μέσω του light
        manager.

    case CMD_AS7341_START_ME_WLED:
        // Ξεκινά μέτρηση χωρίς χρήση LED (π.χ. με εξωτερικό φωτισμό).

    case CMD_AS7341_EXTERNAL_TEMP:
        // Διαβάζει θερμοκρασία από εξωτερικό αισθητήρα (ADT7410) και επιστρέφει τιμή τύπου
        float (4 bytes).

    case CMD_AS7341_RESET_SENSOR:
        // Επαναφέρει τον AS7341 στην αρχική του κατάσταση μέσω λογισμικού.

    default:
        Άγνωστη εντολή.
}
HAL_Delay(10);
SendResponse(0xCC, command, responseData, responseLength);
```

### Συνάρτηση αποστολής απάντησης

Η συνάρτηση `SendResponse()` είναι υπεύθυνη για τη διαμόρφωση και αποστολή πακέτου απάντησης από τον μικροελεγκτή προς την εφαρμογή του χρήστη (Windows Application) μέσω της σειριακής διεπαφής UART.

Σε περιπτώσεις ρύθμισης (π.χ. ρύθμιση απολαβής, χρόνου ολοκλήρωσης κ.λπ.), η απάντηση περιλαμβάνει απλώς μία ένδειξη επιτυχίας (0x01) ή αποτυχίας (0x02), ανάλογα με την έκβαση της ενέργειας. Ενώ σε περιπτώσεις μέτρησης (π.χ. φασματική ή θερμοκρασιακή), η απάντηση περιλαμβάνει το πλήρες σύνολο των μετρούμενων δεδομένων σε δυαδική μορφή.

```
void SendResponse(uint8_t deviceCode, uint8_t command, uint8_t *data, uint8_t dataLength) {
    uint8_t response[MAX_DATA_LENGTH + 4];
    uint8_t checksum = 0;

    // Σύνθεση πακέτου απάντησης
    response[0] = deviceCode;
    response[1] = command;
    response[2] = dataLength;

    for (int i = 0; i < dataLength; i++) {
        response[3 + i] = data[i];
    }

    // Υπολογισμός checksum με XOR
    for (int i = 0; i < 3 + dataLength; i++) {
        checksum ^= response[i];
    }
    response[3 + dataLength] = checksum;

    // Αποστολή μέσω UART
    HAL_UART_Transmit(&huart2, response, 4 + dataLength, HAL_MAX_DELAY);
}
```

Η χρήση αυτής της συνάρτησης διασφαλίζει έναν κοινό και ενοποιημένο τρόπο επικοινωνίας μεταξύ του ενσωματωμένου συστήματος και του λογισμικού του χρήστη, ανεξαρτήτως του τύπου της εντολής ή της λειτουργίας που εκτελείται.

## 4.2 Ανάπτυξη Windows Application

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική και η λειτουργία της εφαρμογής uAlgaeLab που δημιουργήθηκε με σκοπό την γρήγορη παραμετροποίηση του συστήματος μέτρησης και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Ο κώδικας της εφαρμογής βρίσκεται στο GitHub [96].

### 4.2.1 Σχεδίαση Αρχιτεκτονικής Λογισμικού

Η εφαρμογή uAlgaeLab αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα .NET χρησιμοποιώντας Windows Forms και υιοθετεί μια αρθρωτή αρχιτεκτονική με στόχο τη διαχωρισμένη διαχείριση των λειτουργικών ενοτήτων και τη διευκόλυνση της συντήρησης και επεκτασιμότητας του λογισμικού.

Ο βασικός κορμός της εφαρμογής υλοποιείται στη φόρμα MainForm, η οποία αποτελεί το κεντρικό σημείο διασύνδεσης του χρήστη με τις λειτουργίες του συστήματος. Η φόρμα περιλαμβάνει τέσσερα κύρια tabs:

- I. Serial Configuration Tab: Επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων επικοινωνίας (COM Port, baud rate κ.λπ.) με τη συσκευή STM32G431KB.
- II. AS7263 Tab: Φιλοξενεί τις εντολές παραμετροποίησης και μέτρησης για τον αισθητήρα AS7263, μέσω γραφικού περιβάλλοντος.
- III. AS7341 Tab: Παρόμοια με το προηγούμενο, για τον αισθητήρα AS7341.
- IV. Plot Tab: Υλοποιεί γραφική απεικόνιση των μετρήσεων με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης ScottPlot.

Ο χειρισμός της σειριακής επικοινωνίας με τη συσκευή γίνεται μέσω της κλάσης SerialManager, η οποία αναλαμβάνει:

- I. Την αναγνώριση διαθέσιμων θυρών COM,
- II. Τη διαχείριση της έναρξης και λήξης της σύνδεσης,
- III. Την αποστολή εντολών και την παραλαβή απαντήσεων,
- IV. Την ενημέρωση των αντίστοιχων tabs με βάση την απάντηση που λαμβάνεται.

Κάθε tab (AS7263, AS7341 κ.λπ.) ακολουθεί την αρχή μοναδιαίας ευθύνης, ενσωματώνοντας το δικό του λογισμικό χειρισμού, ώστε να διαχειρίζεται πλήρως τις λειτουργίες του αντίστοιχου αισθητήρα. Η επικοινωνία με τον μικροελεγκτή γίνεται με συγκεκριμένες εντολές UART και η απάντηση αναλύεται γραμμικά (split σε τιμές) για την προβολή στον χρήστη.

Επιπλέον, στο tab γραφημάτων γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης ScottPlot για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε γραφικές παραστάσεις. Παρέχεται επίσης δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων σε αρχείο Excel, με χρήση της βιβλιοθήκης ClosedXML.

Η παραπάνω σχεδίαση προσφέρει μια καθαρή, δομημένη προσέγγιση που διαχωρίζει την επικοινωνία, τις μετρήσεις και την παρουσίαση δεδομένων, υποστηρίζοντας την εύκολη επεκτασιμότητα της εφαρμογής σε μελλοντικές λειτουργίες.

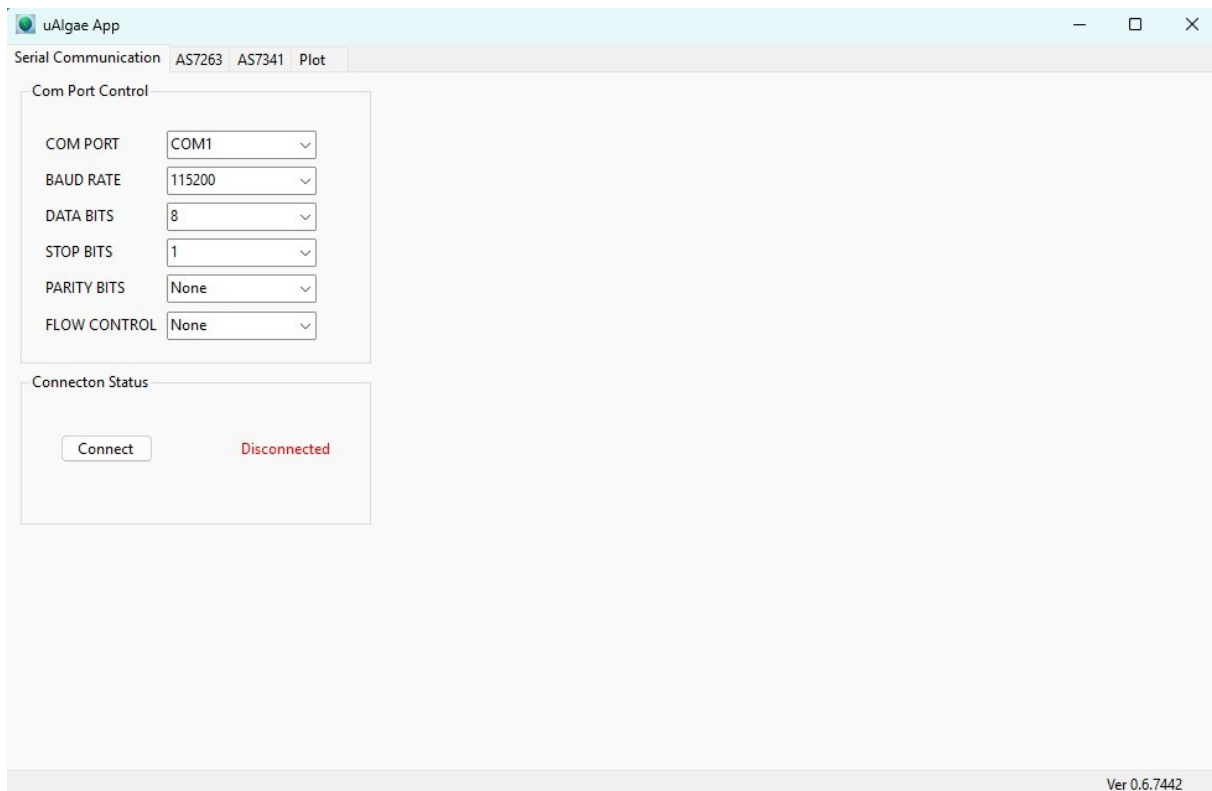


## 4.2.2 Διεπαφή Χρήστη και Λειτουργίες

Η εφαρμογή uAlgaeApp αποτελεί το βασικό γραφικό περιβάλλον για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το ενσωματωμένο σύστημα. Περιλαμβάνει διαφορετικές καρτέλες για τη ρύθμιση παραμέτρων, την έναρξη μετρήσεων και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων, με στόχο τη διευκόλυνση της λειτουργίας και την ευχρηστία κατά την πειραματική διαδικασία.

### 4.2.2.1 Καρτέλα ρύθμισης και διαχείρισης σειριακής επικοινωνίας

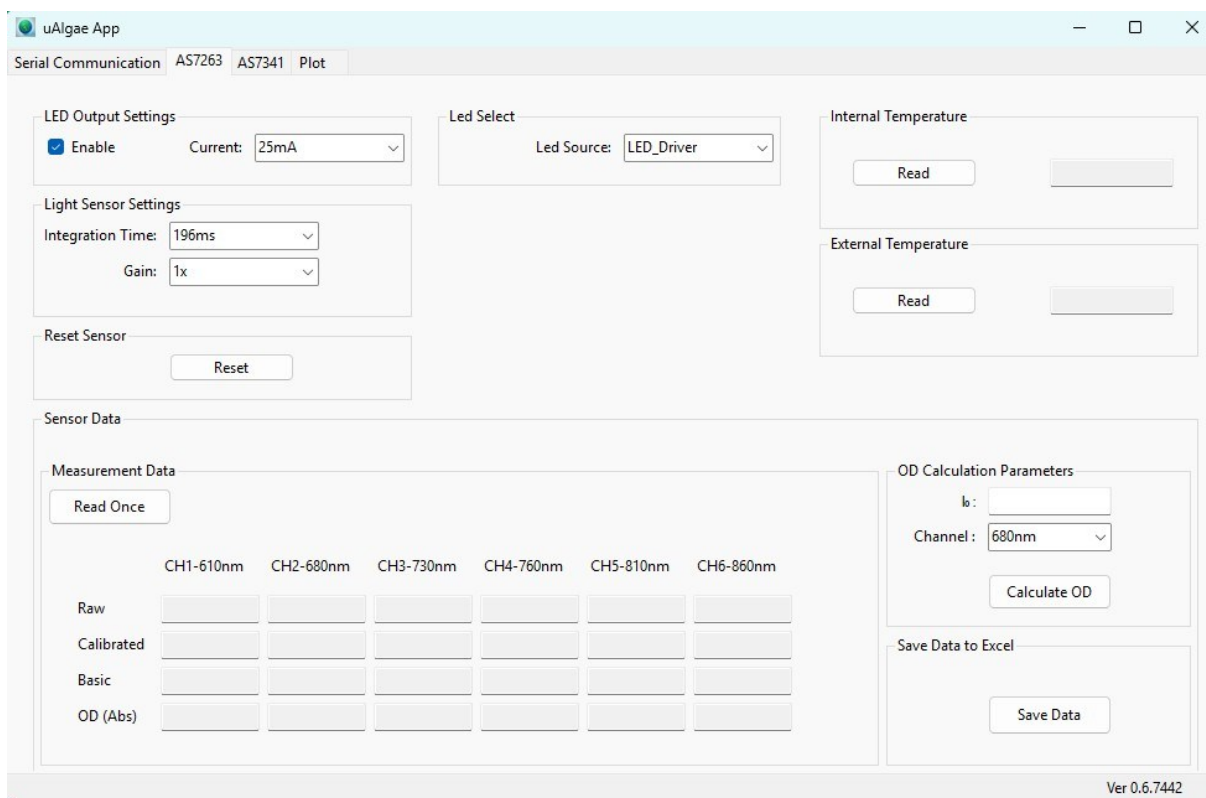
Η καρτέλα "Serial Communication" (Σχήμα 4.2) επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή μέσω εικονικής σειριακής θύρας Virtual USB Port. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει, το διαθέσιμο COM port (εμφανίζεται αυτόματα με τη σύνδεση της συσκευής), την ταχύτητα Baud Rate (π.χ., 115200 bps), τον αριθμό δεδομένων (data bits), καθώς και να ξεκινήσει/τερματίσει τη σύνδεση με το σύστημα.



Σχήμα 4.2 Καρτέλα παραμετροποίησης σειριακής θύρας

#### 4.2.2.2 Καρτέλα Παραμετροποίησης και ελέγχου AS7263

Η καρτέλα AS7263 (Σχήμα 4.3) παρέχει όλες τις βασικές ρυθμίσεις και λειτουργίες που σχετίζονται με τον φασματικό αισθητήρα AS7263. Ο χρήστης μπορεί, να επιλέξει την πηγή φωτισμού (LED driver / GPIO / LED1202), να ενεργοποιήσει ή απενεργοποιήσει τον εσωτερικό φωτισμό του αισθητήρα όπως και να ρυθμίσει την ένταση του ρεύματος του εσωτερικού οδηγού LED του αισθητήρα. Επιπλέον μπορεί να ρυθμίσει το χρόνο ολοκλήρωσης της μέτρησης και το κέρδος του ενισχυτή. Μπορεί να εμφανίσει την εσωτερική θερμοκρασία του αισθητήρα και την εξωτερική από τον ADT7410. Να ξεκινήσει μέτρηση και να εμφανίσει τις τιμές Raw, Calibrated και Basic (κανονικοποιημένες) στα αντίστοιχα text boxes. Αν έχει γίνει μέτρηση με καθαρό νερό μπορούμε να βάλουμε την τιμή στο πεδίο  $I_0$ , να επιλέξουμε το μήκος κύματος στο οποίο θα κάνουμε υπολογισμό της απορρόφησης και να πατήσουμε Calculate OD. Με τον τρόπο αυτό θα εμφανιστεί στο αντίστοιχο text box η τιμή της οπτικής πυκνότητας. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επανεκκίνησης του αισθητήρα και αρχικοποίησης του με τις προεπιλεγμένες τιμές, πατώντας το κουμπί Reset. Τέλος υπάρχει δυνατότητα να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα για περαιτέρω επεξεργασία πατώντας το Save Data. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται 5 ξεχωριστά αρχεία .xlsx ένα για κάθε μήκος κύματος.



Σχήμα 4.3 Καρτέλα Αισθητήρα AS7263

### 4.2.2.3 Καρτέλα παραμετροποίησης και ελέγχου AS7341

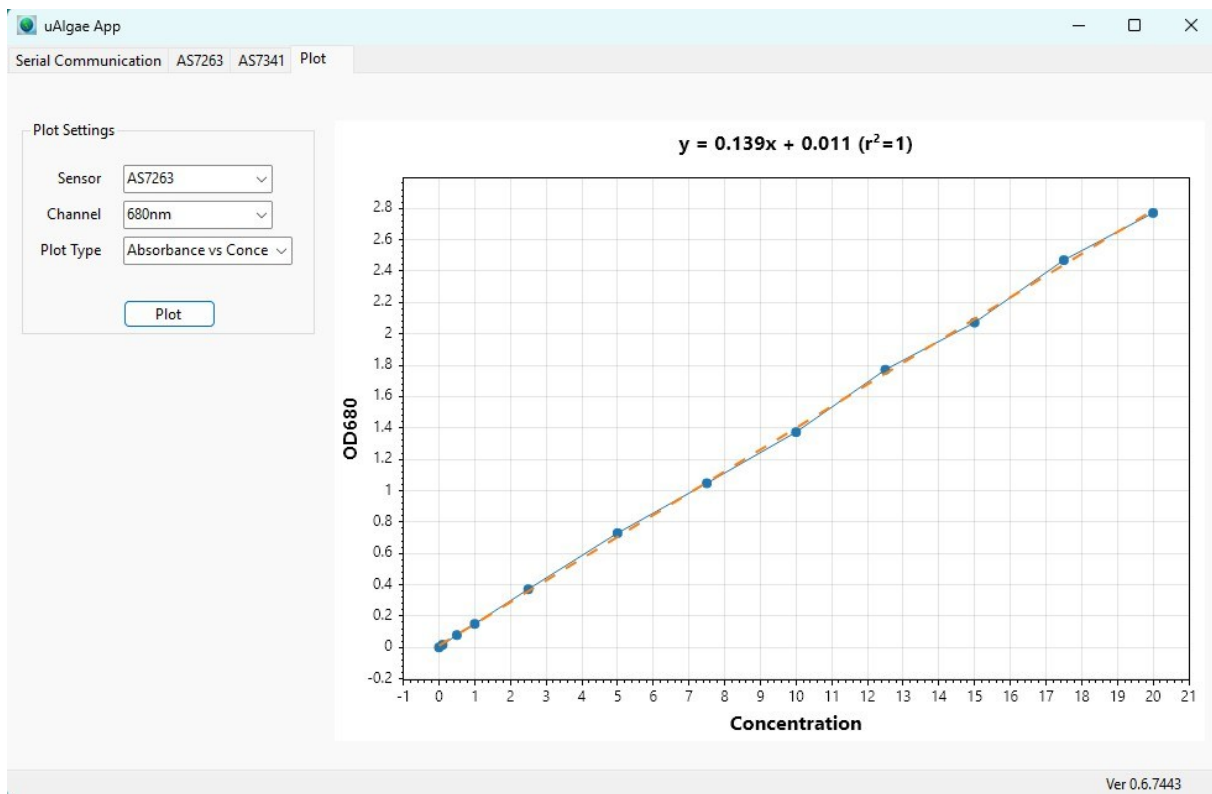
Η καρτέλα AS7341 (Σχήμα 4.4) παρέχει όλες τις βασικές ρυθμίσεις και λειτουργίες που σχετίζονται με τον φασματικό αισθητήρα AS7341. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την πηγή φωτισμού (LED Driver / GPIO / LED1202), να ενεργοποιήσει ή απενεργοποιήσει τον εσωτερικό φωτισμό του αισθητήρα όπως και να ρυθμίσει την ένταση του ρεύματος του εσωτερικού οδηγού LED του αισθητήρα. Επιπλέον μπορεί να ρυθμίσει το χρόνο ολοκλήρωσης της μέτρησης προσαρμόζοντας τα ATIME και ASTEP, καθώς και το κέρδος του ενισχυτή. Μπορεί να εμφανίσει την εξωτερική θερμοκρασία από τον ADT7410. Να ξεκινήσει μέτρηση και να εμφανίσει τις τιμές Raw και Basic (κανονικοποιημένες) στα αντίστοιχα Text Boxes. Αν έχει γίνει μέτρηση με καθαρό νερό μπορούμε να βάλουμε την τιμή στο πεδίο  $I_0$ , να επιλέξουμε το μήκος κύματος στο οποίο θα κάνουμε υπολογισμό της απορρόφησης και να πατήσουμε Calculate OD. Με τον τρόπο αυτό θα εμφανιστεί στο αντίστοιχο text box η τιμή της οπτικής πυκνότητας. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επανεκκίνησης του αισθητήρα και αρχικοποίησης του με τις προεπιλεγμένες τιμές, πατώντας το κουμπί Reset. Τέλος, υπάρχει δυνατότητα να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα για περαιτέρω επεξεργασία πατώντας το Save Data. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται 9 ξεχωριστά αρχεία .xlsx ένα για κάθε μήκος κύματος.

Σχήμα 4.4 Καρτέλα Αισθητήρα AS7341

#### 4.2.2.4 Καρτέλα γραφικών απεικονίσεων

Στην καρτέλα Plot ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που έχει αποθηκεύσει σε αρχείο excel. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη ScottPlot, μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να δει γραφήματα της απορρόφησης σε σχέση με τη συγκέντρωση και της απορρόφησης σε σχέση με το χρόνο. Στην περίπτωση της επιλογής του τύπου γραφήματος (Absorbance VS Concentration) υπολογίζει και εμφανίζει τη γραμμική μετατόπιση και τον συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ .

Ο χρήστης επιλέγει τον αισθητήρα, έπειτα το κανάλι του αισθητήρα, τον τύπο γραφήματος και πατώντας το κουμπί Plot εμφανίζεται η γραφική παράσταση.



Σχήμα 4.5 Καρτέλα Γραφικών Απεικονίσεων

Η λειτουργία γραφημάτων βοηθά στην άμεση οπτική κατανόηση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών και στην ταχύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

### 4.3 Επίλογος

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε το πλήρες λογισμικό οικοσύστημα του συστήματος μέτρησης, το οποίο αποτελείται από το υλικολογισμικό (firmware) του μικροελεγκτή STM32G431KB και τη συνοδευτική εφαρμογή χρήστη uAlgaeLab σε περιβάλλον Windows. Η υλοποίηση βασίστηκε σε αρχιτεκτονική τύπου event-driven, με τον STM32 να παραμένει σε κατάσταση αναμονής μέχρι να λάβει εντολές μέσω Uart και να επεξεργάζεται τα πακέτα με απόλυτα καθορισμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Αναλύθηκαν οι βασικές ενότητες του κώδικα, συμπεριλαμβανομένης της αποκωδικοποίησης εντολών, της εκτέλεσης ρυθμίσεων στους φασματικούς αισθητήρες AS7263 και AS7341, καθώς και της λήψης φασματικών και θερμοκρασιακών δεδομένων. Αντίστοιχα, αναλύθηκε η λειτουργία της εφαρμογής uAlgaeLab η οποία αναπτύχθηκε ώστε να παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον για τη διευκόλυνση του χρήστη.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση σχεδίασης εξασφαλίζει τόσο επεκτασιμότητα και επαναχρησιμοποίηση, όσο και ευχρηστία για το χρήστη, θέτοντας ισχυρές βάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις ή την προσθήκη νέων λειτουργιών.

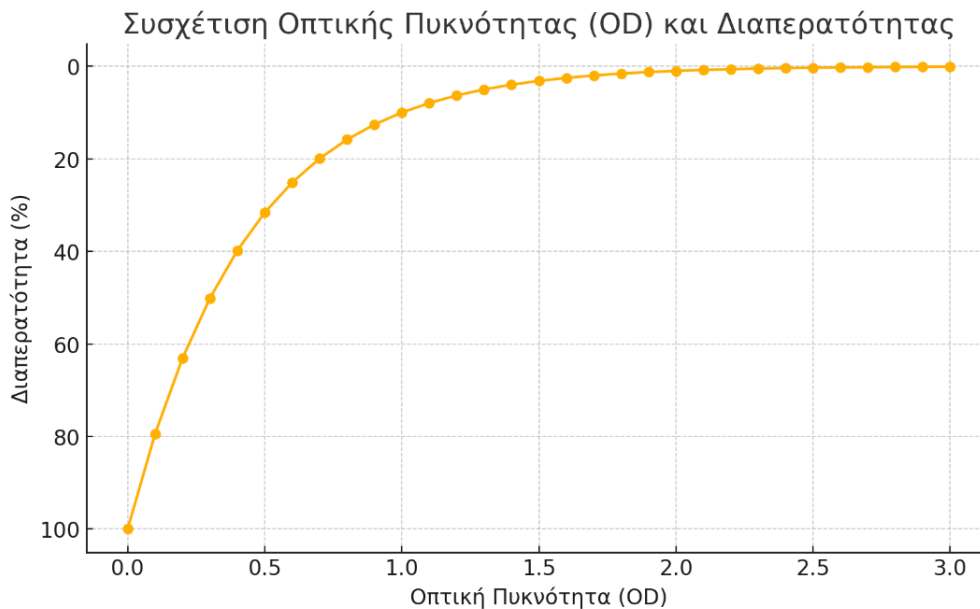
## Κεφάλαιο 5ο: Πειραματική εφαρμογή

### 5.1 Παραδείγματα Τιμών OD και Πρακτική Ερμηνεία

Πριν την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση ενδεικτικών τιμών οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη διαπερατότητα και την ποιοτική τους ερμηνεία, προκειμένου να διευκολυνθεί η κατανόηση των αποτελεσμάτων. Ο παρακάτω πίνακας και το αντίστοιχο γράφημα παρέχουν μία πρακτική αναφορά:

Πίνακας 5.1 Τιμές οπτικής πυκνότητας σε σχέση με τη διαπερατότητα

Τιμή OD	Διαπερατότητα (%)	Ερμηνεία
0.1	~79%	Πολύ χαμηλή απορρόφηση. Το δείγμα είναι σχεδόν διαφανές στο φως του συγκεκριμένου μήκους κύματος.
0.3	~50%	Η μισή ένταση της ακτίνας απορροφάται. Χρησιμοποιείται συχνά ως σημείο αναφοράς.
0.7	~20%	Σημαντική απορρόφηση. Το φως μειώνεται στο 1/5.
1	~10%	Όριο αξιοπιστίας τιμών. Συχνή τιμή σε βιολογικά δείγματα μέσης συγκέντρωσης. Απαιτείται αραιώση για αξιόπιστη μέτρηση.
2	~1%	Πάνω από 99% της ακτίνας έχει απορροφηθεί. Δείχνει πολύ υψηλή συγκέντρωση ή έντονη απορρόφηση. Απαιτείται αραιώση για αξιόπιστη μέτρηση.
3	~0.1%	Το δείγμα είναι σχεδόν αδιαφανές. Απαιτείται αραιώση για αξιόπιστη μέτρηση.



Σχήμα 5.1 Γράφημα Συσχέτισης Οπτικής πυκνότητας και Διαπερατότητας

## 5.2 Μετρήσεις και Σύγκριση με εργαστηριακό φασματοφωτόμετρο

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του συστήματος, πραγματοποιήθηκε συστηματική σύγκριση των μετρήσεων με εκείνες ενός εμπορικά διαθέσιμου, πιστοποιημένου εργαστηριακού φασματοφωτομέτρου HACH DR3900. Η διαδικασία περιλάμβανε τη λήψη παράλληλων φασματοφωτομετρικών μετρήσεων σε επιλεγμένα μήκη κύματος και για ένα εύρος συγκεντρώσεων αναλυτών, τόσο σε χημικά πρότυπα διαλύματα όσο και σε καλλιέργειες μικροφυκών. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει την ποσοτική αποτίμηση της ακρίβειας, της γραμμικότητας και της επαναληψιμότητας των μετρήσεων του φορητού οργάνου, καθώς και τη διερεύνηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών του σε σχέση με τις συμβατικές εργαστηριακές μεθόδους.

### 5.2.1 Μέτρηση οπτικής πυκνότητας Υπερμαγγανικού Καλίου

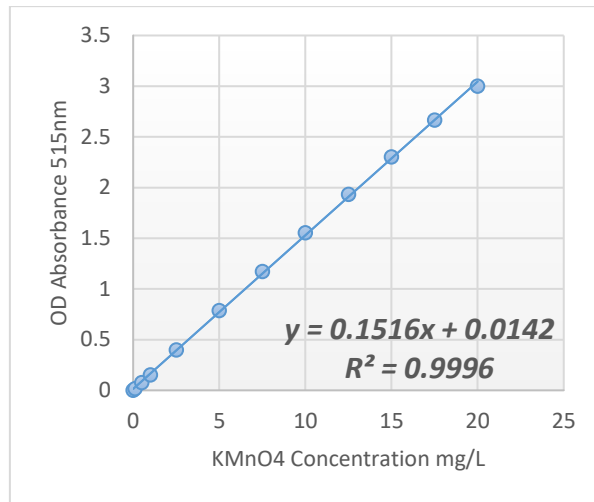
Για την αξιολόγηση της γραμμικής απόκρισης του πειραματικού οργάνου έγινε μέτρηση υπερμαγγανικού καλίου με τη χρήση του καναλιού 4 (515nm) του αισθητήρα AS7341 και του Led VLMTG1400. Το υπερμαγγανικό κάλιο  $KMnO_4$  εμφανίζει μέγιστη απορρόφηση στα 515nm [97]. Από τις μετρήσεις που έγιναν πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



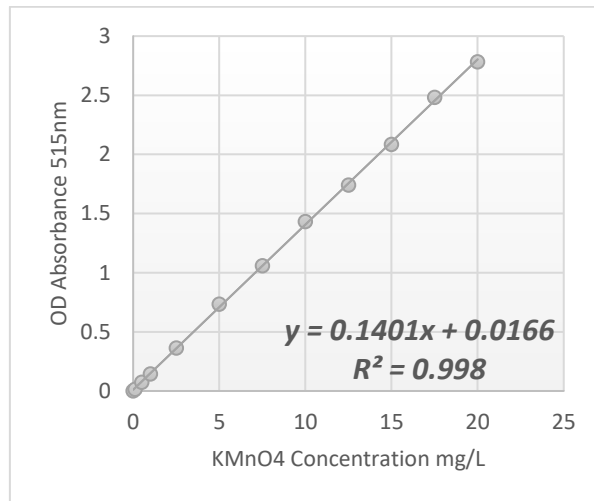
Σχήμα 5.2 Κυψελίδες με Υπερμαγγανικό Κάλιο σε διάφορες συγκεντρώσεις

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα τιμών Οπτικής Πυκνότητας Υπερμαγγανικού Καλίου ανά Συγκέντρωση, για δύο μετρήσεις με το πειραματικό όργανο και μία μέτρηση με το φασματοφωτόμετρο αναφοράς HACH DR3900

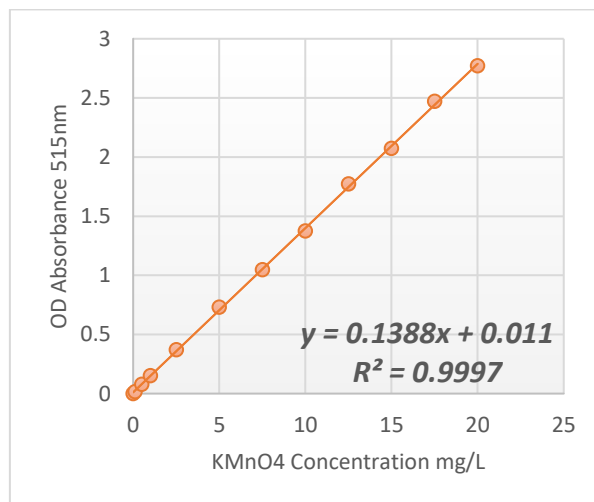
$KMnO_4$	AS7341		HACH DR3900
mg/L	OD 1 <sup>η</sup> Μέτρηση	OD 2 <sup>η</sup> Μέτρηση	OD
0	0	0	0
0.1	0.015	0.017	0.016
0.5	0.074	0.079	0.077
1	0.144	0.15	0.153
2.5	0.365	0.371	0.399
5	0.734	0.729	0.786
7.5	1.06	1.047	1.172
10	1.433	1.373	1.553
12.5	1.742	1.771	1.932
15	2.084	2.072	2.302
17.5	2.482	2.47	2.664
20	2.783	2.771	3



Σχήμα 5.3 Γράφημα τιμών μέτρησης με HACH DR3900

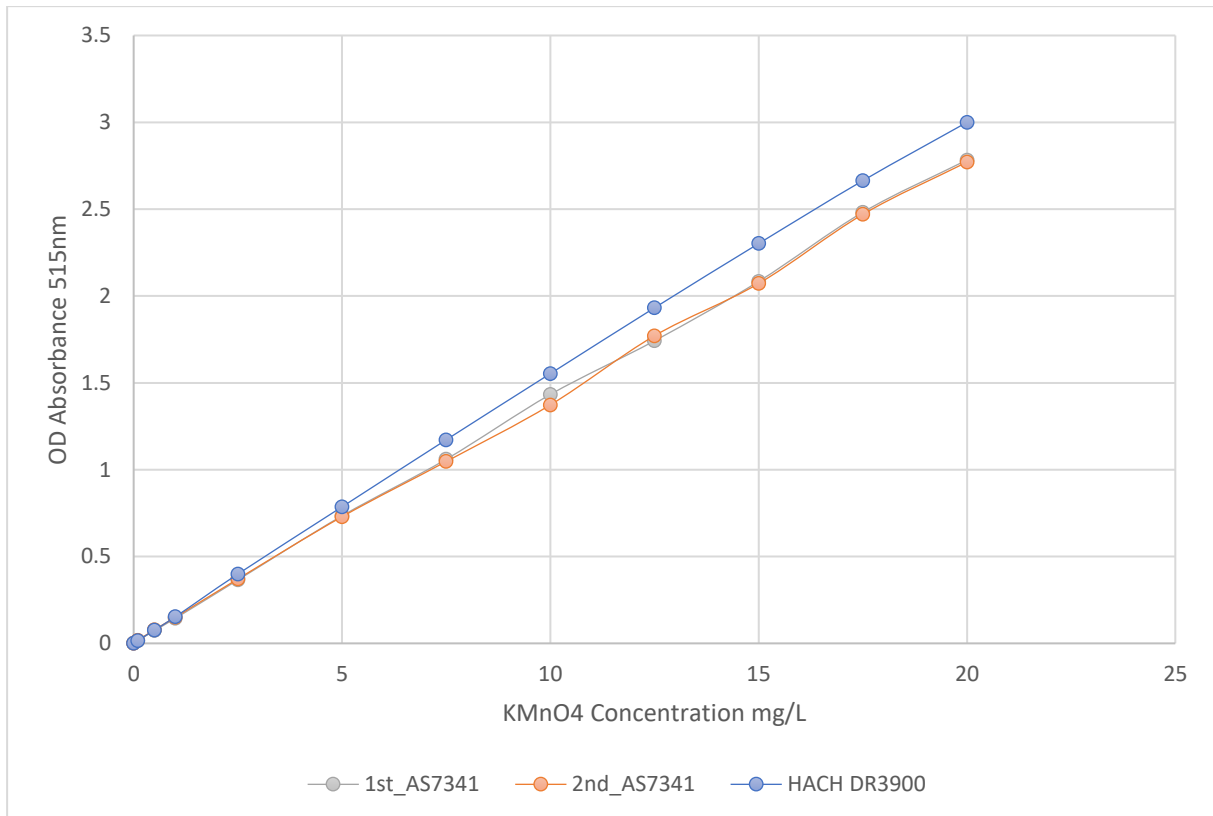


Σχήμα 5.4 Γράφημα τιμών 1ης μέτρησης με πειραματικό όργανο



Σχήμα 5.5 Γράφημα τιμών 2ης μέτρησης με πειραματικό όργανο





Σχήμα 5.6 Συγκριτικό Διάγραμμα Απορρόφησης των τριών μετρήσεων

Ο υπολογισμός του σφάλματος RMSE μεταξύ των μετρήσεων του πειραματικού οργάνου και του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 έδειξε τιμές 0.127 και 0.136 για την 1η και 2η μέτρηση αντίστοιχα. Ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου σφάλματος (NRMSE), ως λόγος του RMSE προς το εύρος τιμών του HACH DR3900, απέδωσε ποσοστά 4.25% και 4.52% αντίστοιχα για τις δύο μετρήσεις.

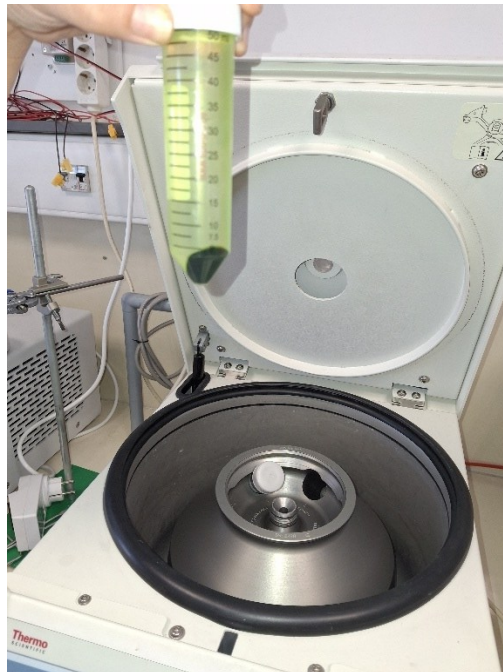
Η σύγκριση μεταξύ των δύο επαναλαμβανόμενων μετρήσεων του αισθητήρα AS7341 έδειξε πολύ μικρή απόκλιση, με RMSE = 0.021 και κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) ίσο με 0.75% ως προς το εύρος τιμών.

### 5.2.2 Μέτρηση Οπτικής Πυκνότητας *Tetrademus obliquus*

Για την αξιολόγηση του αναπτυγμένου συστήματος σε πραγματικές βιολογικές συνθήκες, πραγματοποιήθηκε φασματική μέτρηση σε δείγματα μικροφύκους *Tetrademus obliquus* (Σχήμα 5.7). Αρχικά, συλλέχθηκε καλλιέργεια του είδους και υποβλήθηκε σε φυγοκέντρηση (Σχήμα 5.8), διήθηση (Σχήμα 5.9) και ξήρανση, προκειμένου να προσδιοριστεί το ξηρό βάρος κυτταρικής μάζας (Dry Cell Weight - DCW). Η διαδικασία αυτή επέτρεψε τη δημιουργία έξι πρότυπων διαλυμάτων γνωστής συγκέντρωσης, με βάση υπολογισμούς αραιώσης του αρχικού δείγματος.



Σχήμα 5.7 Δείγματα μικροφύκους *T. Obliquus* σε διάφορες συγκεντρώσεις



Σχήμα 5.8 Διαδικασία φυγοκέντρησης



Σχήμα 5.9 Διήθηση για εξαγωγή βιομάζας και προσδιορισμό ξηρού βάρους

Για κάθε ένα από τα έξι διαλύματα πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις απορρόφησης (OD) σε επιλεγμένα μήκη κύματος, τόσο με το εργαστηριακό φασματοφωτόμετρο HACH DR3900, όσο και με το αναπτυγμένο σύστημα, το οποίο βασίζεται στους αισθητήρες AS7263 και AS7341.

Ακολουθως, οι τιμές OD που καταγράφηκαν για κάθε συγκέντρωση χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία διαγραμμάτων OD έναντι του βάρους της ξηρής κυτταρικής βιομάζας σε χιλιοστόγραμμα ανά λίτρο καλλιέργειας. Οι καμπύλες αυτές αποτέλεσαν τη βάση για τη στατιστική αξιολόγηση της γραμμικότητας των μετρήσεων και της συσχέτισης των δύο συστημάτων.

### Μέτρηση στα 730nm

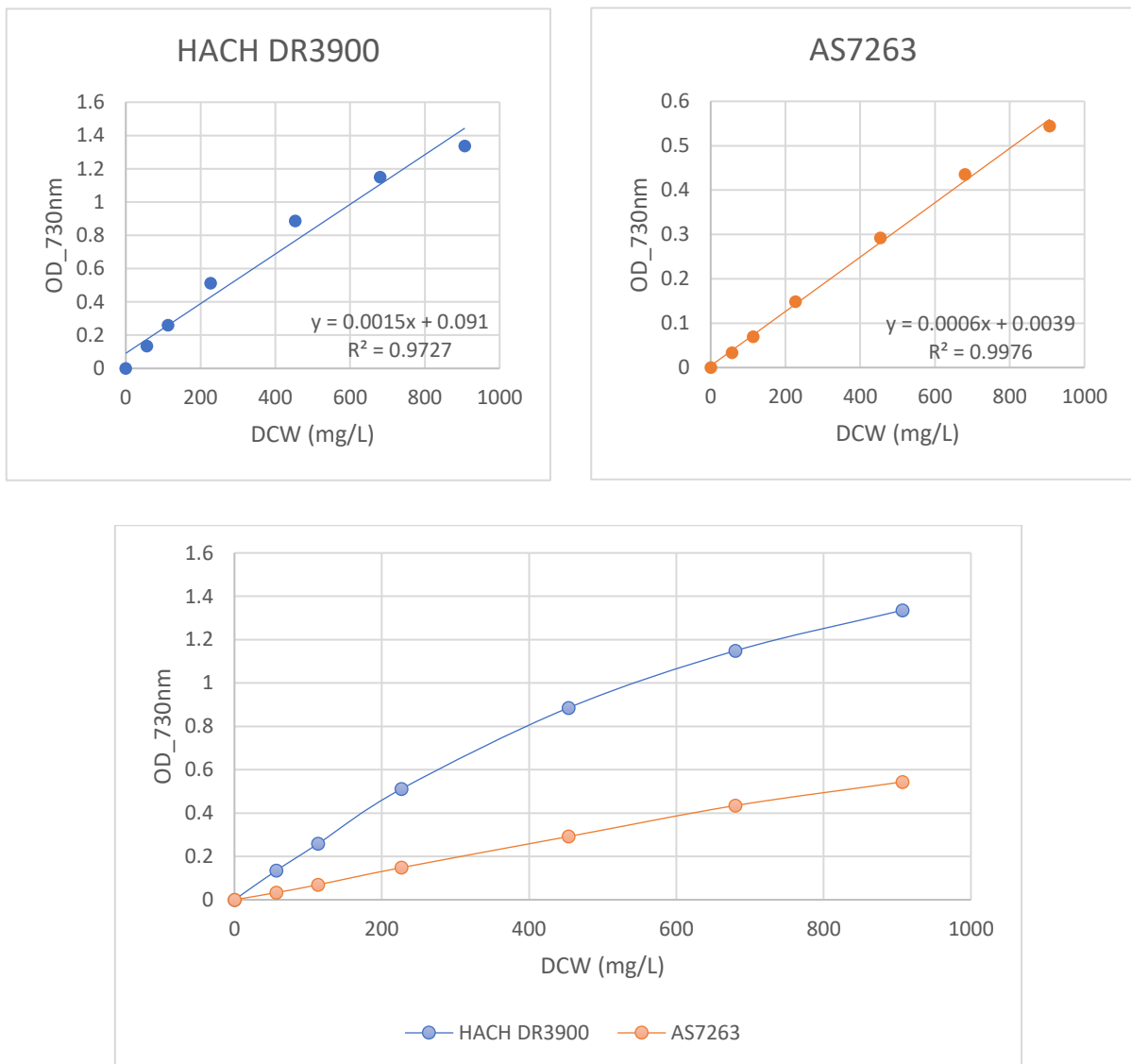
Η μέτρηση έγινε με τη χρήση του αισθητήρα AS7263 και της ευρυφασματικής πηγής φωτός LUXEON IR ONYX τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες 5.3 και 5.4

Πίνακας 5.3 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Tetrademus obliquus* στα 730 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900

mg/L	HACH DR3900				
	730nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0				
56.683	0.134333	0.136	0.133	0.134	0.001528
113.366	0.258333	0.259	0.256	0.26	0.002082
226.732	0.511333	0.5	0.521	0.513	0.010599
453.464	0.885333	0.853	0.91	0.893	0.029263
680.196	1.148667	1.111	1.169	1.166	0.032655
906.928	1.335333	1.273	1.359	1.374	0.054501

Πίνακας 5.4 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Tetrademus obliquus* στα 730 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου

	AS7263				
mg/L	730nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0				
56.683	0.033	0.027	0.035	0.037	0.005292
113.366	0.069333	0.066	0.073	0.069	0.003512
226.732	0.148333	0.149	0.148	0.148	0.000577
453.464	0.291667	0.284	0.295	0.296	0.006658
680.196	0.434667	0.445	0.426	0.433	0.009609
906.928	0.543667	0.557	0.536	0.538	0.01159



Σχήμα 5.10 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας (DCW) στα 730 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7263

Η σύγκριση των τιμών OD μεταξύ AS7263 και HACH DR3900 στο μήκος κύματος των 730 nm έδειξε  $RMSE = 0.527$  και κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) ίσο με 43.88%, υποδεικνύοντας σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο οργάνων.

Η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης των τιμών OD ως προς τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας (DCW) στα 730 nm έδειξε ότι το πειραματικό όργανο παρουσίασε πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0.9976$ , υποδεικνύοντας εξαιρετική γραμμικότητα μεταξύ απορρόφησης και συγκέντρωσης. Αντίθετα, το φασματοφωτόμετρο αναφοράς HACH DR3900 παρουσίασε  $R^2 = 0.9727$ .

### Μέτρηση στα 760nm

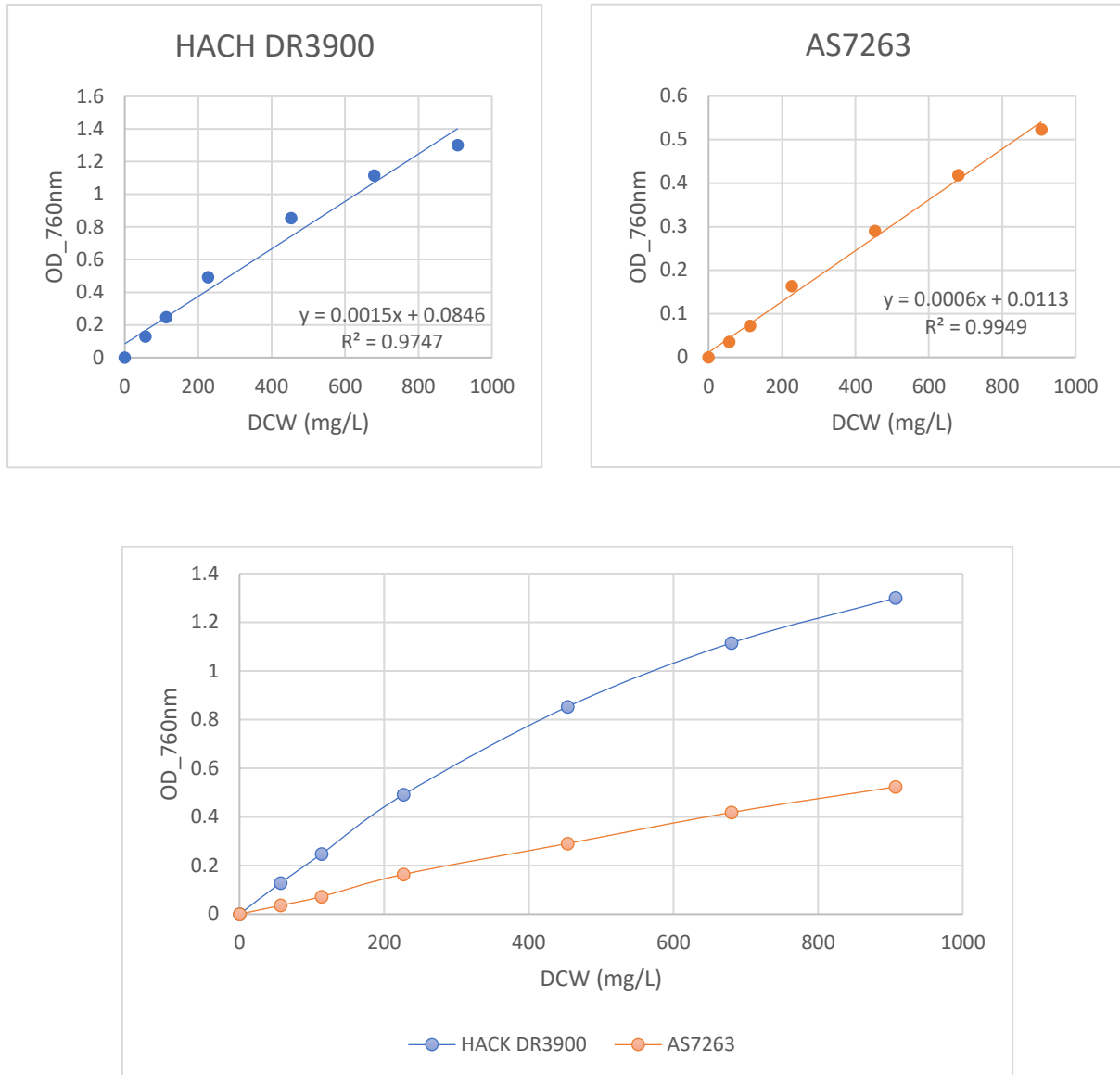
Η μέτρηση έγινε με τη χρήση του αισθητήρα AS7263 και της ευρυφασματικής πηγής φωτός LUXEON IR ONYX τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες 5.5 και 5.6.

Πίνακας 5.5 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Tetradesmus obliquus* στα 760 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900

mg/L	HACH DR3900				
	760nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0	0			
56.683	0.128	0.131	0.126	0.127	0.002646
113.366	0.247333	0.249	0.244	0.249	0.002887
226.732	0.491	0.481	0.5	0.492	0.009539
453.464	0.852667	0.82	0.876	0.862	0.029143
680.196	1.115	1.077	1.136	1.132	0.03297
906.928	1.299333	1.234	1.325	1.339	0.057012

Πίνακας 5.6 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Tetradesmus obliquus* στα 760 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου

mg/L	AS7263				
	760nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0	0			
56.683	0.035667	0.038	0.034	0.035	0.002082
113.366	0.072	0.069	0.076	0.071	0.003606
226.732	0.163333	0.164	0.167	0.159	0.004041
453.464	0.290333	0.29	0.287	0.294	0.003512
680.196	0.418	0.42	0.417	0.417	0.001732
906.928	0.523	0.528	0.518	0.523	0.005



Σχήμα 5.11 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 760 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7263

Η σύγκριση των μετρήσεων OD στα 760 nm μεταξύ του πειραματικού οργάνου και του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 ανέδειξε κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) ίσο με 43.41%, με αντίστοιχο RMSE = 0.508.

Η γραμμική παλινδρόμηση των τιμών OD ως προς τη συγκέντρωση ανέδειξε εξαιρετική συσχέτιση για το πειραματικό όργανο ( $R^2 = 0.9949$ ), η οποία υπερέβη ακόμη και την αντίστοιχη τιμή του HACH DR3900 ( $R^2 = 0.9747$ ).

**Μέτρηση στα 680nm**

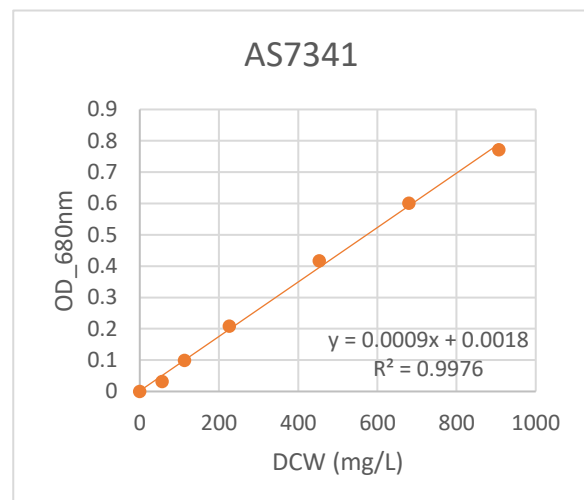
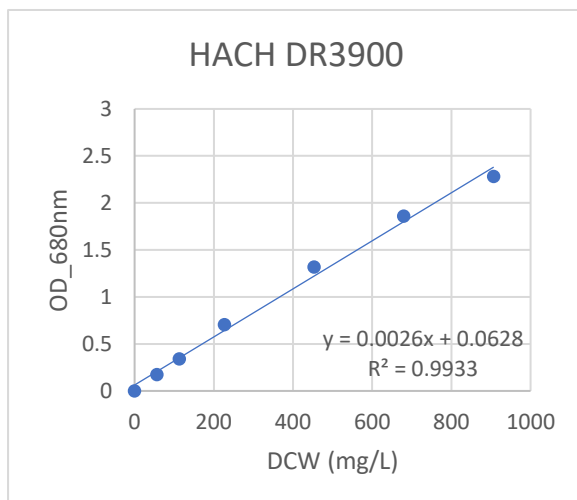
Η μέτρηση έγινε με τη χρήση του αισθητήρα AS7341 και της πηγής φωτός MTE6800N2-UR. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες 5.7 και 5.8

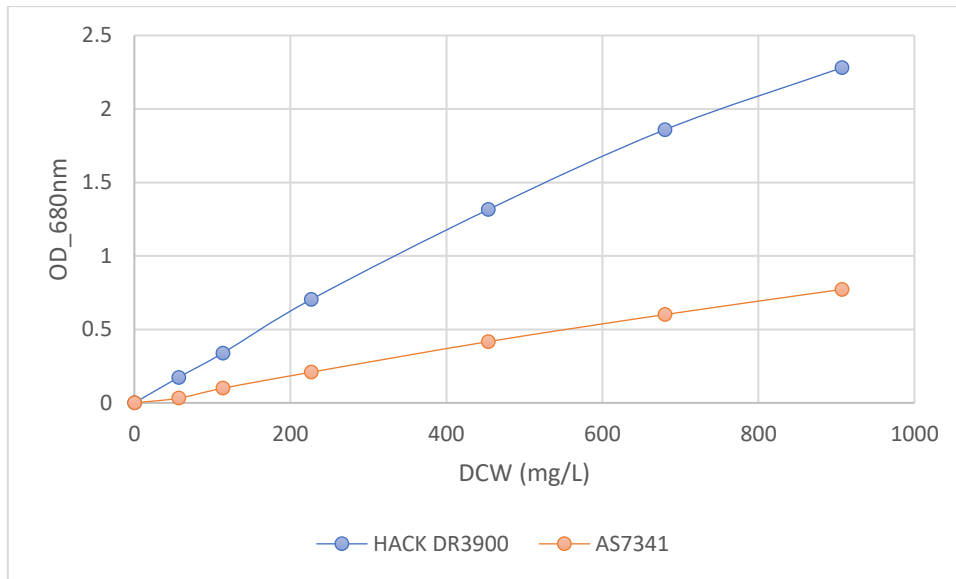
Πίνακας 5.7 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Tetradesmus obliquus* στα 680 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900

mg/L	HACH				
	680nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0	0			
56.683	0.173333	0.17	0.176	0.174	0.003055
113.366	0.339	0.331	0.343	0.343	0.006928
226.732	0.704	0.68	0.716	0.716	0.020785
453.464	1.315	1.278	1.316	1.351	0.03651
680.196	1.859	1.783	1.902	1.892	0.066008
906.928	2.280333	2.106	2.353	2.382	0.151672

Πίνακας 5.8 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Tetradesmus obliquus* στα 680 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου

mg/L	AS7341				
	680nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0	0			
56.683	0.032	0.027	0.029	0.04	0.007
113.366	0.099667	0.092	0.099	0.108	0.008021
226.732	0.209	0.2	0.209	0.218	0.009
453.464	0.416667	0.425	0.404	0.421	0.01115
680.196	0.601	0.594	0.605	0.604	0.006083
906.928	0.772	0.78	0.766	0.77	0.007211





Σχήμα 5.12 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 680 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7341

Η σύγκριση των μετρήσεων OD στα 680 nm μεταξύ του πειραματικού οργάνου και του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 ανέδειξε κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) ίσο με 43.27%, με αντίστοιχο RMSE = 0.912. Παρά τις διαφορές σε απόλυτες τιμές απορρόφησης, η γραμμική παλινδρόμηση κατέδειξε υψηλή συσχέτιση, με  $R^2 = 0.9976$  για το πειραματικό σύστημα και  $R^2 = 0.9933$  για το HACH DR3900.

### 5.2.3 Μέτρηση Οπτικής Πυκνότητας *Chlorella Sorokiniana*

Η επόμενη φασματική μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε καλλιέργεια μικροφύκους *Chlorella Sorokiniana*. Αρχικά, συλλέχθηκε καλλιέργεια του είδους και υποβλήθηκε σε φυγοκέντρηση και ξήρανση, προκειμένου να προσδιοριστεί το ξηρό βάρος κυτταρικής μάζας. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε τη δημιουργία έξι πρότυπων διαλυμάτων γνωστής συγκέντρωσης, με βάση υπολογισμούς αραίωσης του αρχικού δείγματος.

Για κάθε ένα από τα έξι διαλύματα πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις απορρόφησης (OD) σε επιλεγμένα μήκη κύματος, τόσο με το εργαστηριακό φασματοφωτόμετρο HACH DR3900, όσο και με το αναπτυγμένο σύστημα.

Ακολούθως, οι τιμές OD που καταγράφηκαν για κάθε συγκέντρωση χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία διαγραμμάτων OD έναντι του βάρους της ξηρής κυτταρικής βιομάζας σε χιλιοστόγραμμα ανά λίτρο καλλιέργειας, όπως προσδιορίστηκε από το ξηρό βάρος της κυτταρικής μάζας.



**Μέτρηση στα 730nm**

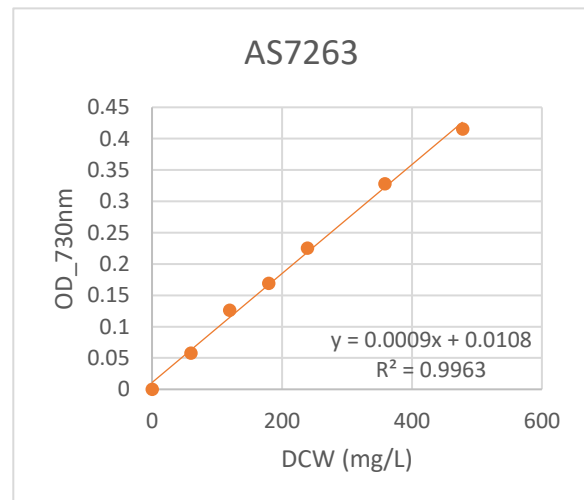
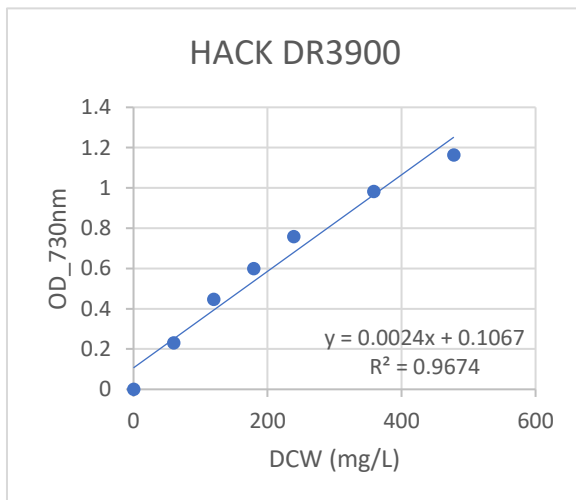
Η μέτρηση έγινε με τη χρήση του αισθητήρα AS7263 και της ευρυφασματικής πηγής φωτός LUXEON IR ONYX. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες 5.9 και 5.10

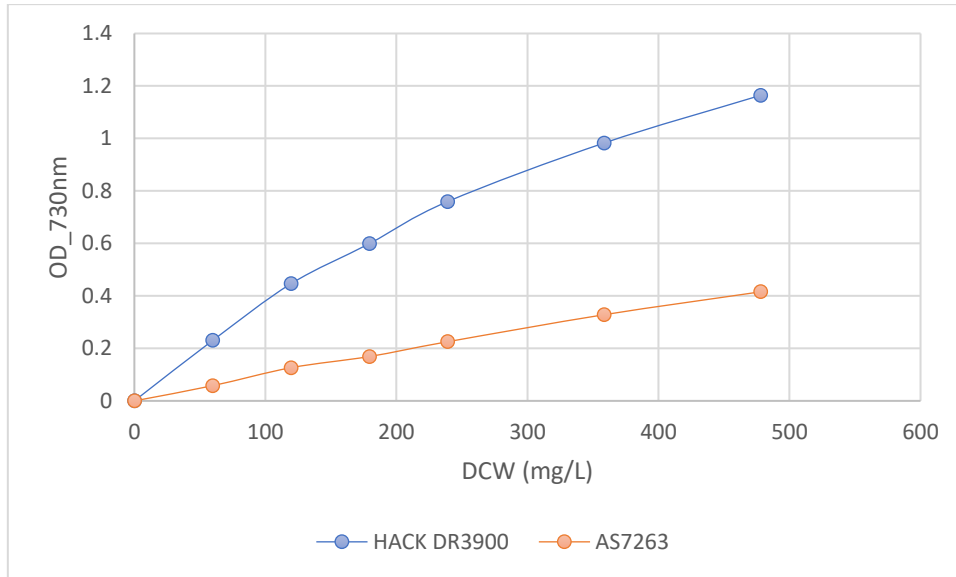
Πίνακας 5.9 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Chlorella Sorokiniana* στα 730 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900.

mg/L	HACH				
	730nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0				
59.77283	0.230333	0.223	0.233	0.235	0.006429
119.5068	0.446333	0.436	0.443	0.46	0.012342
179.2602	0.599	0.603	0.596	0.598	0.003606
239.0136	0.759333	0.758	0.761	0.759	0.001528
358.5204	0.982667	0.965	0.995	0.988	0.015695
478.0272	1.164333	1.156	1.163	1.174	0.009074

Πίνακας 5.10 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Chlorella Sorokiniana* στα 730 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου.

mg/L	AS7263				
	730nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0				
59.77283	0.058	0.059	0.058	0.057	0.001
119.5068	0.126333	0.13	0.126	0.123	0.003512
179.2602	0.169	0.167	0.168	0.172	0.002646
239.0136	0.225333	0.223	0.228	0.225	0.002517
358.5204	0.328333	0.331	0.327	0.327	0.002309
478.0272	0.415667	0.414	0.418	0.415	0.002082





Σχήμα 5.13 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 730 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7263

Η σύγκριση των μετρήσεων OD στα 730 nm μεταξύ του πειραματικού οργάνου (AS7263) και του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 για καλλιέργεια *Chlorella Sorokiniana* ανέδειξε κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) ίσο με 55.13%, με αντίστοιχο RMSE = 0.515. Παρότι το πειραματικό όργανο καταγράφει σημαντικά χαμηλότερες τιμές OD, η γραμμική παλινδρόμηση έδειξε πολύ υψηλό βαθμό συσχέτισης ( $R^2 = 0.9963$  για το AS7263), ενώ το HACH DR3900 εμφάνισε  $R^2 = 0.9674$ .

### Μέτρηση στα 760nm

Η μέτρηση έγινε με τη χρήση του αισθητήρα AS7263 και της ευρυφασματικής πηγής φωτός LUXEON IR ONYX. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες 5.11 και 5.12

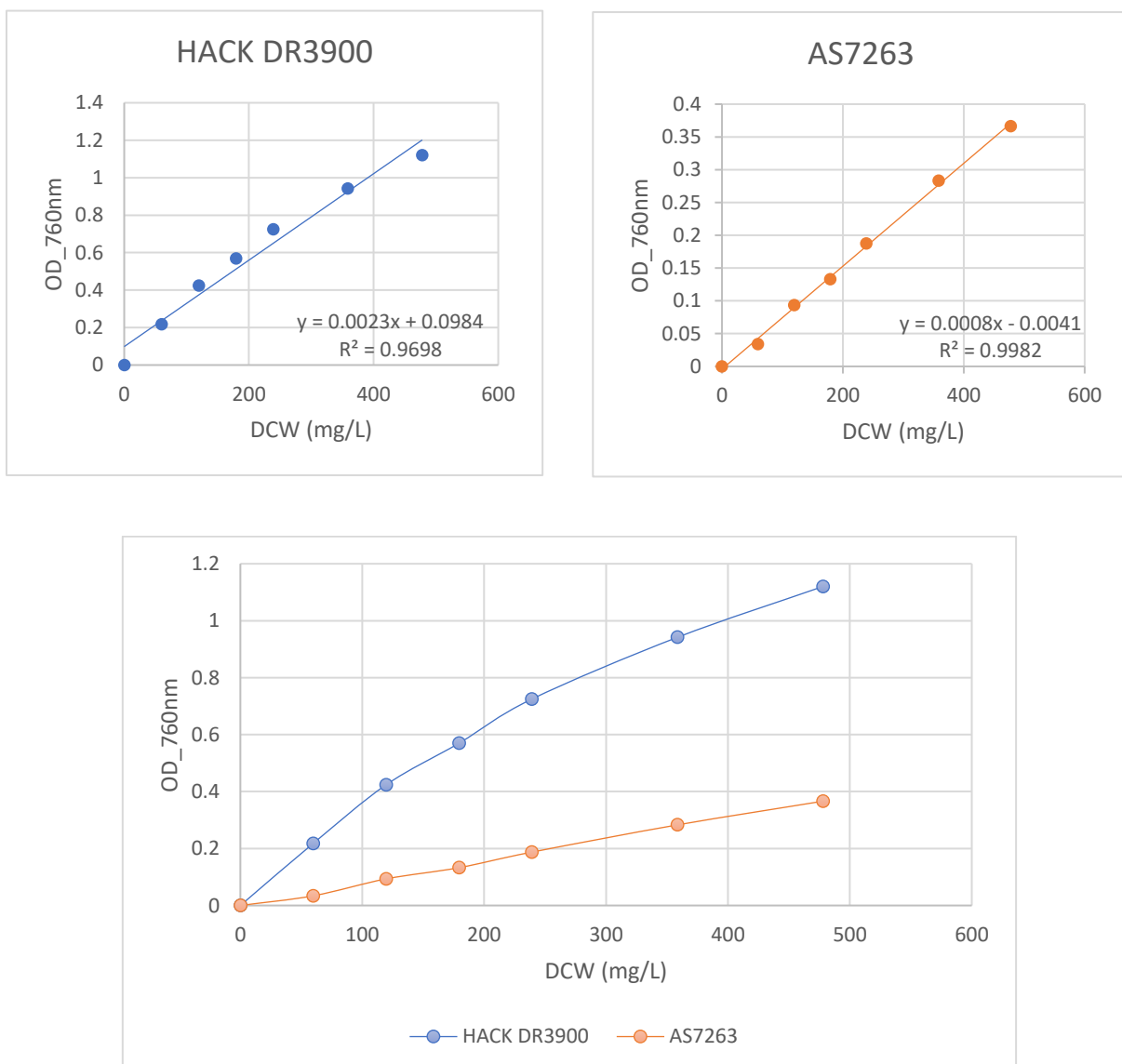
Πίνακας 5.11 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Chlorella Sorokiniana* στα 760 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900

mg/L	HACH				
	760nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0	0	0	0	0
59.77283	0.218	0.211	0.221	0.222	0.006083
119.5068	0.423667	0.413	0.423	0.435	0.011015
179.2602	0.569667	0.574	0.567	0.568	0.003786
239.0136	0.724667	0.724	0.726	0.724	0.001155
358.5204	0.941667	0.924	0.953	0.948	0.015503
478.0272	1.120333	1.112	1.119	1.13	0.009074

## Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5.12 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Chlorella Sorokiniana* στα 760 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου.

mg/L	AS7263				
	760nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0	0	0	0	0
59.77283	0.034	0.033	0.035	0.034	0.001
119.5068	0.093333	0.094	0.094	0.092	0.001155
179.2602	0.132667	0.131	0.134	0.133	0.001528
239.0136	0.187333	0.186	0.186	0.19	0.002309
358.5204	0.283	0.279	0.282	0.288	0.004583
478.0272	0.366333	0.364	0.366	0.369	0.002517



Σχήμα 5.14 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 760 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7263

Η σύγκριση των μετρήσεων OD στα 760 nm μεταξύ του πειραματικού οργάνου (AS7263) και του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 για καλλιέργεια *Chlorella Sorokiniana* ανέδειξε κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) ίσο με 57.68%, με αντίστοιχο RMSE = 0.520. Η γραμμική παλινδρόμηση έδειξε υψηλό βαθμό συσχέτισης, με  $R^2 = 0.9982$  για το AS7263 και  $R^2 = 0.9698$  για το HACH DR3900.

### Μέτρηση στα 680nm

Η μέτρηση έγινε με τη χρήση του αισθητήρα AS7341 και της πηγής φωτός MTE6800N2-UR. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες 5.13 και 5.14.

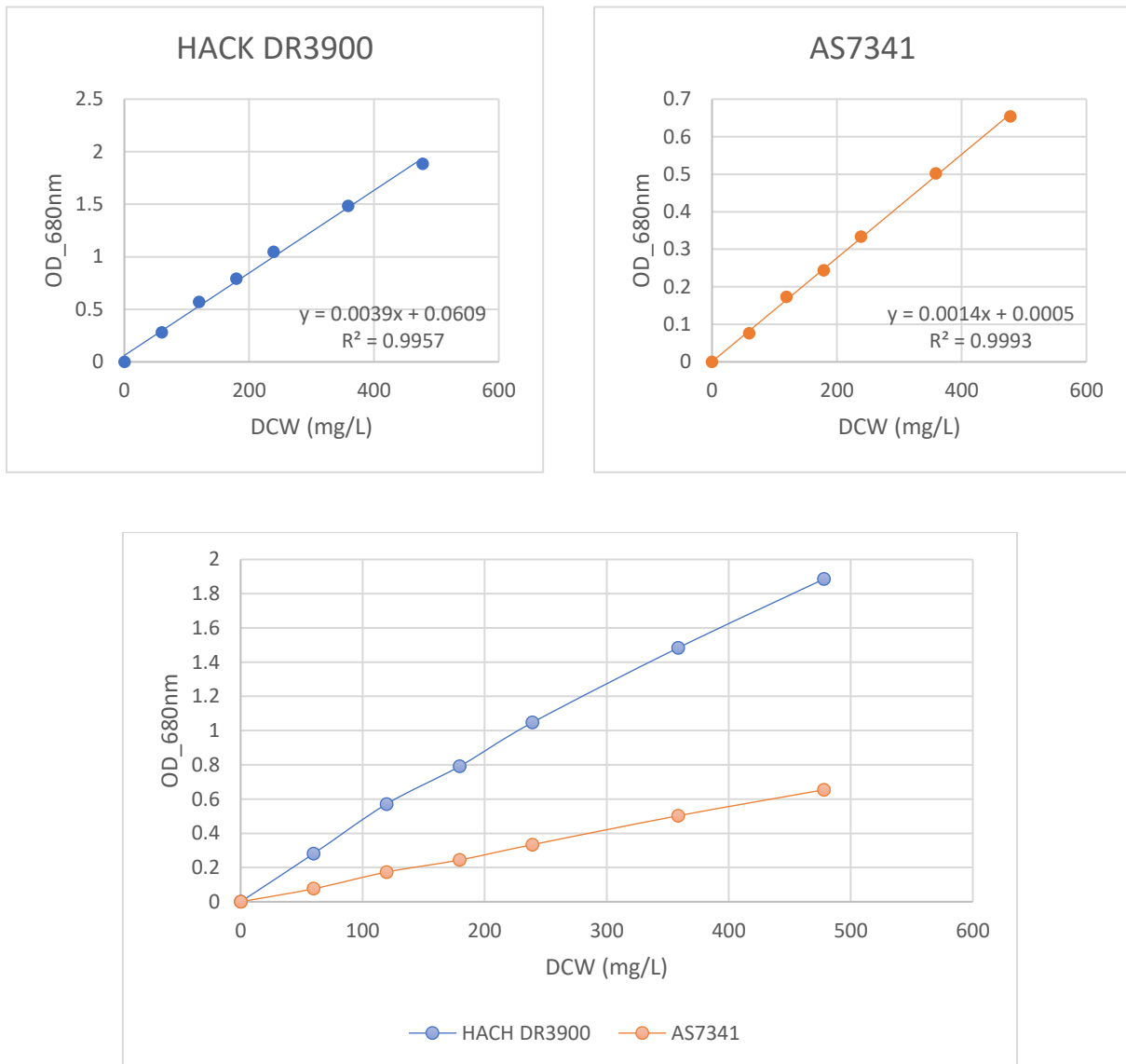
Πίνακας 5.13 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Chlorella Sorokiniana* στα 680 nm, με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900

mg/L	HACH				
	680nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0	0	0	0	0
59.77283	0.281	0.274	0.284	0.285	0.006083
119.5068	0.570667	0.556	0.573	0.583	0.01365
179.2602	0.790667	0.794	0.788	0.79	0.003055
239.0136	1.046667	1.043	1.05	1.047	0.003512
358.5204	1.483333	1.465	1.492	1.493	0.015885
478.0272	1.885667	1.88	1.878	1.899	0.01159

Πίνακας 5.14 Τιμές οπτικής πυκνότητας (OD) και τυπικής απόκλισης τριπλών μετρήσεων για *Chlorella Sorokiniana* στα 760 nm, με χρήση του πειραματικού οργάνου.

mg/L	AS7341				
	680nm				
	Average	1 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	Std
0	0	0	0	0	0
59.77283	0.076	0.08	0.07	0.078	0.005292
119.5068	0.173333	0.174	0.172	0.174	0.001155
179.2602	0.244	0.244	0.243	0.245	0.001
239.0136	0.333667	0.33	0.335	0.336	0.003215
358.5204	0.502333	0.501	0.502	0.504	0.001528
478.0272	0.654333	0.65	0.657	0.656	0.003786

## Κεφάλαιο 5

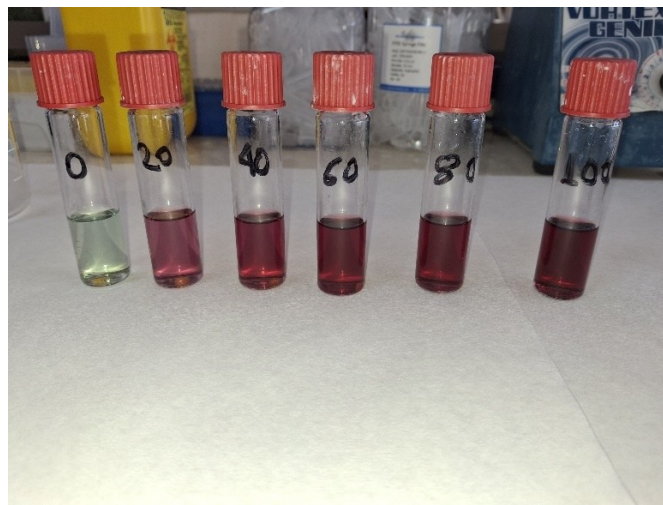


Σχήμα 5.15 Σύγκριση των μετρήσεων οπτικής πυκνότητας (OD) σε σχέση με τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας στα 680 nm, για το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900 και το πειραματικό όργανο με αισθητήρα AS7341

Η σύγκριση των μετρήσεων OD στα 680 nm μεταξύ του πειραματικού οργάνου (AS7341) και του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 για καλλιέργεια *Chlorella Sorokiniana* ανέδειξε κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) ίσο με 47.50%, με αντίστοιχο RMSE = 0.762. Η γραμμική παλινδρόμηση έδειξε εξαιρετικά υψηλό βαθμό συσχέτισης, με  $R^2 = 0.9993$  για το AS7341 και  $R^2 = 0.9957$  για το HACH DR3900.

### 5.3 Ποσοτικός Προσδιορισμός Λιπιδίων σε Δείγματα Μικροφυκών

Για τον προσδιορισμό της λιπιδικής περιεκτικότητας σε δύο διαφορετικά είδη μικροφυκών (*Chlorella sorokiniana* – ομάδα A και *Tetradesmus obliquus* – ομάδα B), εφαρμόστηκε η μέθοδος SPV και πραγματοποιήθηκε μέτρηση της απορρόφησης με τα όργανα HACH DR3900 και AS7341. Αρχικά, τα λιπίδια εξήχθησαν με χρήση μίγματος χλωροφορμίου/μεθανόλης, σύμφωνα με το πρωτόκολλο των Bligh & Dyer. Μετά την εξάτμιση του διαλύτη, τα λιπίδια υπέστησαν επεξεργασία με θειικό οξύ και προσθήκη διαλύματος βανιλίνης σε φωσφορικό οξύ, σχηματίζοντας έγχρωμο σύμπλοκο ροζ-μοβ χρώματος. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η απορρόφηση του παραγόμενου χρώματος μετριέται στα 530 nm, όπου το χρωμοφόρο σύμπλοκο εμφανίζει μέγιστο απορρόφησης [65] αλλά δεδομένου ότι το κανάλι F4 του AS7341 διαθέτει μέγιστο ευαισθησίας στα 515 nm, χρησιμοποιήθηκε αυτό το μήκος κύματος και στο HACH DR3900 για λόγους συγκρισιμότητας των μετρήσεων. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί και βελτιστοποιηθεί σε μελέτες για τον ταχύ προσδιορισμό ολικών λιπιδίων σε μικροφύκη [98].



Σχήμα 5.16 Πρότυπες συγκεντρώσεις λιπιδίων (ελαϊκό οξύ ή παρόμοιο) σε αυξανόμενες ποσότητες



Σχήμα 5.17 Δείγματα μικροφυκών μετά από SPV αντίδραση A1–A3 *Tetradesmus obliquus* και B1–B3 *Chlorella Sorokiniana*

## Κεφάλαιο 5

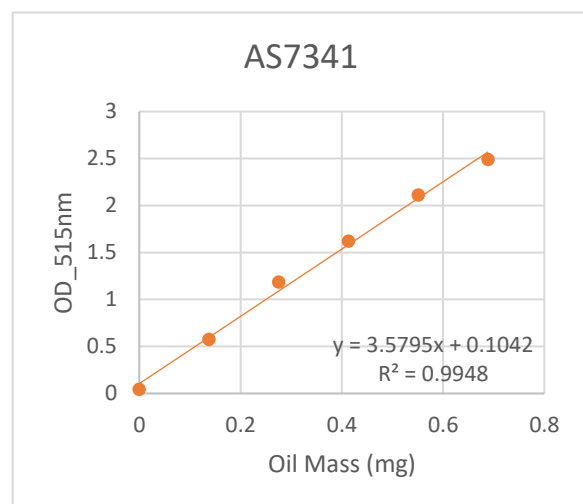
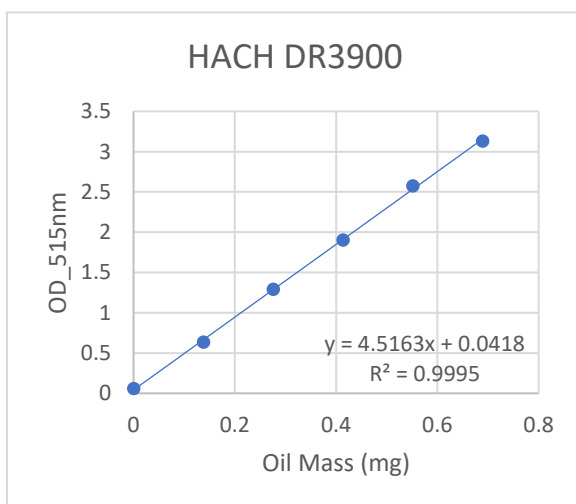
Για την κατασκευή της καμπύλης βαθμονόμησης της μεθόδου SPV, παρασκευάστηκαν πρότυπα διαλύματα λιπιδίων με προσθήκη συγκεκριμένων ποσοτήτων διαλύματος ελαίου (6.89 mg/mL) σε σωληνίσκους. Αφού εξατμίστηκε ο διαλύτης, τα πρότυπα υπεβλήθησαν σε πλήρη επεξεργασία SPV (προσθήκη θειικού οξέος, θερμική επώαση, προσθήκη αντιδραστηρίου βανιλίνης). Η απορρόφηση κάθε προτύπου μετρήθηκε στα 515nm και χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία της καμπύλης βαθμονόμησης. Ακολούθως, τα δείγματα μικροφυκών A1–A3 και B1–B3 υπεβλήθησαν στην ίδια διαδικασία, και η μετατροπή των τιμών OD σε λιπιδική μάζα (mg) έγινε βάσει της εξίσωσης παλινδρόμησης που προέκυψε από την αντίστοιχη καμπύλη βαθμονόμησης κάθε οργάνου.

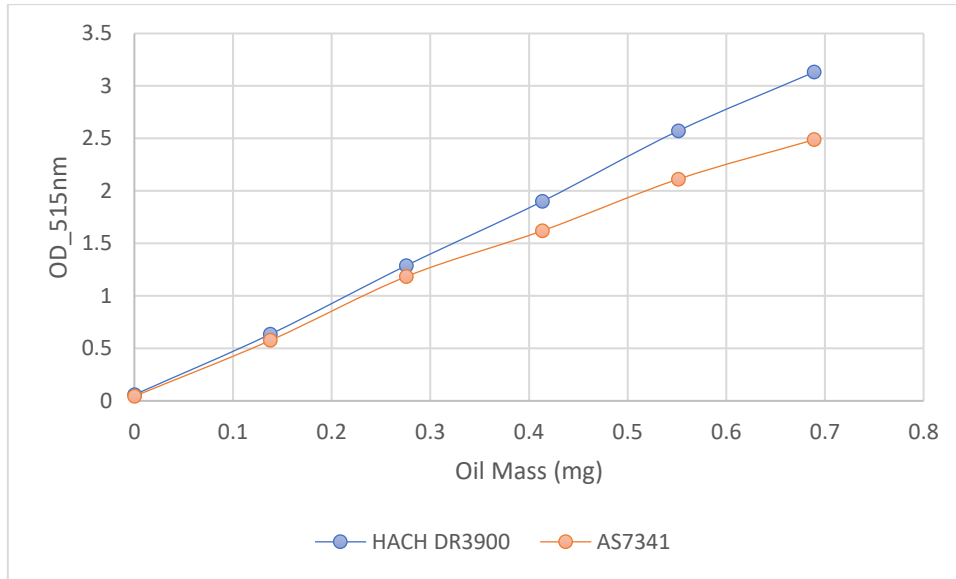
Πίνακας 5.15 Τιμές απορρόφησης πρότυπων διαλυμάτων λιπιδίων στα 515nm με HACH DR3900.

Oil (mg/ml)	Volume (ml)	Oil Mass (mg)	Abs (530 nm)
6.89	0	0	0.059
6.89	0.02	0.1378	0.635
6.89	0.04	0.2756	1.289
6.89	0.06	0.4134	1.9
6.89	0.08	0.5512	2.572
6.89	0.1	0.689	3.131

Πίνακας 5.16 Τιμές απορρόφησης πρότυπων διαλυμάτων λιπιδίων στα 515nm με αισθητήρα AS7341.

Oil (mg/ml)	Volume (ml)	Oil Mass (mg)	Abs (530 nm)
6.89	0	0	0.044
6.89	0.02	0.1378	0.576
6.89	0.04	0.2756	1.184
6.89	0.06	0.4134	1.62
6.89	0.08	0.5512	2.112
6.89	0.1	0.689	2.488





Σχήμα 5.18 Γράφημα σύγκρισης καμπυλών βαθμονόμησης απορρόφησης στα 530 nm για πρότυπα διαλύματα λιπιδίων, με χρήση των οργάνων HACH DR3900 και AS7341.

Η σύγκριση των τιμών απορρόφησης (OD) μεταξύ του πειραματικού συστήματος (AS7341) και του εργαστηριακού φασματοφωτομέτρου HACH DR3900 για τα πρότυπα διαλύματα λιπιδίων στα 515nm, ανέδειξε κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) ίσο με 2.48%, με αντίστοιχο RMSE = 0.0607. Παρά τις μικρές αποκλίσεις σε ορισμένα σημεία της καμπύλης, η συσχέτιση μεταξύ των δύο οργάνων παρέμεινε εξαιρετικά υψηλή, με συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης  $R^2 = 0.9948$  για το AS7341, έναντι 0.9995 του HACH DR3900.

Πίνακας 5.17 Υπολογισμός λιπιδικής περιεκτικότητας (% w/w) σε δείγματα *Chlorella sorokiniana* και *Tetradesmus obliquus* με χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH DR3900.

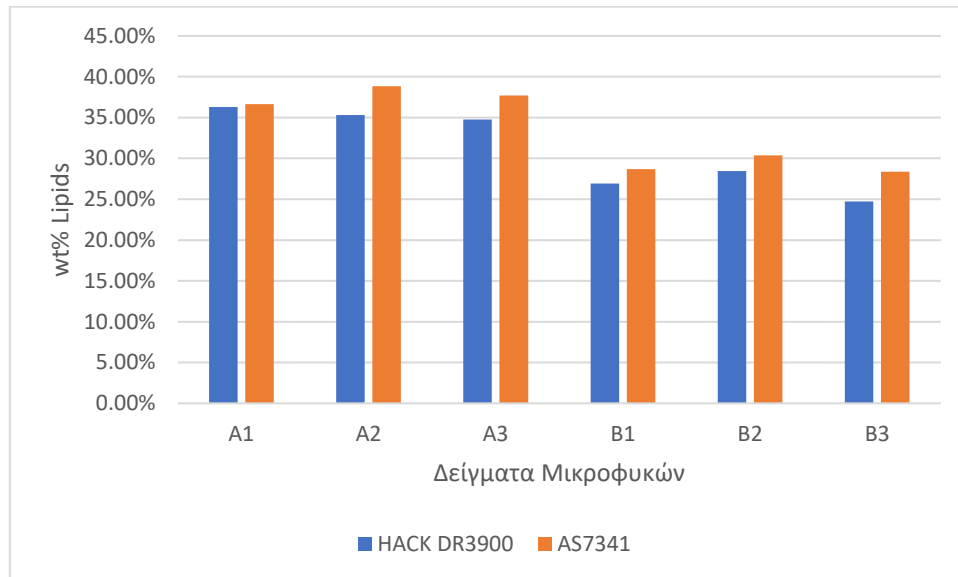
Sample	Biomass (mg)	530 nm	Lipids (mg)	wt% Lipids	Average
A1	2.06	3.419	0.747780263	36.30%	35.45%
A2	1.99	3.214	0.702389124	35.30%	
A3	1.64	2.616	0.569979851	34.75%	
B1	2.42	2.983	0.65124106	26.91%	26.70%
B2	2.22	2.895	0.631756084	28.46%	
B3	2.14	2.432	0.529238536	24.73%	

Πίνακας 5.18 Υπολογισμός λιπιδικής περιεκτικότητας (% w/w) σε δείγματα *Chlorella sorokiniana* και *Tetradesmus obliquus* με χρήση του αισθητήρα AS7341.

Sample	Biomass (mg)	530 nm	Lipids (mg)	wt% Lipids	Average
A1	2.06	2.805	0.754518788	36.63%	37.72%
A2	1.99	2.87	0.772677748	38.83%	
A3	1.64	2.317	0.618186898	37.69%	
B1	2.42	2.589	0.694175164	28.68%	29.15%
B2	2.22	2.519	0.67461936	30.39%	
B3	2.14	2.279	0.60757089	28.39%	



Οι τιμές OD μετατράπηκαν σε μάζα λιπιδίων (mg) με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης κάθε οργάνου, και στη συνέχεια υπολογίστηκε το ποσοστό λιπιδικής περιεκτικότητας ως ποσοστό επί της ξηρής μάζας (wt%). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το πειραματικό όργανο AS7341 παρείχε τιμές συγκρίσιμες με το φασματοφωτόμετρο αναφοράς HACH DR3900, με μέση απόκλιση περίπου 2.3–2.4 ποσοστιαίες μονάδες. Η *Chlorella sorokiniana* παρουσίασε υψηλότερη λιπιδική περιεκτικότητα (~36–38%), ενώ το *Tetradesmus obliquus* εμφάνισε χαμηλότερες τιμές (~26–30%).



Σχήμα 5.19 Σύγκριση λιπιδικής περιεκτικότητας (% w/w) για *Chlorella sorokiniana* και *Tetradesmus obliquus* με χρήση των HACH DR3900 και AS7341.

#### 5.4 Επίλογος

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκαν πειραματικές τιμές του πειραματικού οργάνου το οποίο βασίζεται στους αισθητήρες AS7263 και AS7341, σε σύγκριση με το εργαστηριακό φασματοφωτόμετρο HACH DR3900. Οι μετρήσεις οπτικής πυκνότητας πραγματοποιήθηκαν σε καλλιέργειες μικροφυκών *Chlorella sorokiniana* και *Tetradesmus obliquus*, τόσο για την εκτίμηση της οπτικής πυκνότητας όσο και για τον ποσοτικό προσδιορισμό της λιπιδικής περιεκτικότητας με τη μέθοδο SPV.

Η ανάλυση των δεδομένων έδειξε υψηλή συσχέτιση μεταξύ των οργάνων σε πολλά μήκη κύματος, με τιμές του συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης  $R^2$  που ξεπέρασαν το 0.99. Παράλληλα, το κανονικοποιημένο σφάλμα (NRMSE) παρουσίασε αξιοσημείωτη διακύμανση, φτάνοντας έως και το 55%, αναδεικνύοντας τις περιοχές που απαιτούν περαιτέρω βαθμονόμηση και βελτίωση. Στο σκέλος του ποσοτικού προσδιορισμού λιπιδίων, ο αισθητήρας AS7341 εμφάνισε ακρίβεια, με μέση διαφορά περίπου 2.3 ποσοστιαίων μονάδων στην υπολογιζόμενη λιπιδική περιεκτικότητα, σε σχέση με το HACH DR3900.

## Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και Προτάσεις Βελτίωσης

### 6.1 Συμπεράσματα

Αρχικά να τονίσουμε ότι κατά τη διαδικασία λήψης των αρχικών μετρήσεων αναφοράς ( $I_0$ ), με χρήση καθαρού νερού ως blank δείγματος, παρατηρήθηκε αυξημένη διακύμανση στις καταγεγραμμένες τιμές στο πειραματικό όργανο. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται κυρίως σε φαινόμενα σκέδασης και εσωτερικών ανακλάσεων εντός της κυψελίδας, καθώς η απουσία φωτοαπορροφητικών ενώσεων επιτρέπει στο φως να ακολουθεί πολλαπλές οπτικές διαδρομές. Η συνέπεια αυτού είναι να καταγράφονται διακυμάνσεις στην ένταση της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας, οδηγώντας σε σχετική αστάθεια της μέτρησης  $I_0$ . Ως επακόλουθο η αστάθεια ή διακύμανση στη μέτρηση αναφοράς ( $I_0$ ) έχει άμεσο αντίκτυπο όχι μόνο στον υπολογισμό της OD για τα δείγματα, αλλά και στην τελική δυναμική περιοχή μέτρησης (δηλαδή τη μέγιστη OD που μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια).

#### Συμπεράσματα από τη μέτρηση υπερμαγγανικού καλίου.

Η απορρόφηση του υπερμαγγανικού καλίου μετρήθηκε τόσο με το εργαστηριακό όργανο HACH DR3900 όσο και με τον αισθητήρα AS7341 στο κανάλι των 515 nm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν πολύ υψηλή γραμμικότητα και για τα δύο όργανα, με το AS7341 να εμφανίζει ελάχιστη υποεκτίμηση στις υψηλές συγκεντρώσεις (π.χ., OD = 2.78 έναντι 3.00 στα 20 mg/L).

Το σφάλμα RMSE (~0.13) και NRMSE (~4.3%) υποδηλώνουν καλή συμφωνία μεταξύ των δύο οργάνων. Οι μικρές αποκλίσεις στις υψηλές συγκεντρώσεις (>10 mg/L), όπου το HACH καταγράφει υψηλότερες τιμές OD, μπορούν να αποδοθούν σε διαφορές στο φασματικό εύρος.

Η σύγκριση μεταξύ της 1ης και 2ης μέτρησης του AS7341 έδειξε εξαιρετική σταθερότητα, με RMSE = 0.021 (NRMSE = 0.75%). Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές OD διαφέρουν κατά λιγότερο από 2% μεταξύ επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του οργάνου.

Η ομοιότητα στις κλίσεις των καμπυλών OD μεταξύ AS7341 και HACH DR3900 ( $R^2 > 0.99$ ) αποδεικνύει ότι ο αισθητήρας AS7341 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποιοτικές και ποσοτικές μετρήσεις υπερμαγγανικού καλίου. Ωστόσο, η προκαταρκτική βαθμονόμηση (π.χ., διόρθωση με γραμμική παλινδρόμηση) μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια σε υψηλές συγκεντρώσεις.

#### Συμπεράσματα από τη μέτρηση δειγμάτων μικροφυκών.

Η σύγκριση του πειραματικού συστήματος (με αισθητήρες AS7263 και AS7341) με το φασματοφωτόμετρο HACH DR3900, για δύο διαφορετικά είδη μικροφυκών (*Tetrademus obliquus* και *Chlorella Sorokiniana*), ανέδειξε σημαντικά ευρήματα τόσο ως προς την ακρίβεια όσο και ως προς τη χρησιμότητα του αναπτυγμένου οργάνου. Παρόλο που καταγράφονται μεγάλες αποκλίσεις στις απόλυτες τιμές της οπτικής πυκνότητας (OD), η εξαιρετική γραμμικότητα των μετρήσεων ( $R^2 > 0.99$  σε όλες τις περιπτώσεις) καταδεικνύει ότι το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για σχετικές μετρήσεις και παρακολούθηση τάσεων σε καλλιέργειες μικροφυκών.

Συγκεκριμένα, για το είδος *Tetrademus obliquus*, καταγράφηκαν κανονικοποιημένα σφάλματα NRMSE της τάξης του 43% στα 730 nm (RMSE = 0.527), 760 nm (RMSE = 0.508) και 680 nm (RMSE = 0.912). Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται στη διαφορά φασματικής ευαισθησίας μεταξύ των συστημάτων, το HACH χρησιμοποιεί μονόχρωμη πηγή, ενώ οι AS7263/AS7341 διαθέτουν ευρύτερα φασματικά παράθυρα.

Αντίστοιχα, για τη *Chlorella Sorokiniana*, τα αποτελέσματα έδειξαν ακόμη μεγαλύτερες αποκλίσεις στις απόλυτες τιμές OD. Στα 730 nm καταγράφηκε RMSE = 0.515 και NRMSE = 55.13%, στα 760 nm RMSE = 0.520 και NRMSE = 57.68%, ενώ στα 680 nm RMSE = 0.762 και NRMSE = 47.50%. Σε όλες τις περιπτώσεις, η γραμμική συσχέτιση μεταξύ OD και συγκέντρωσης ξηρής κυτταρικής μάζας ήταν εξαιρετική, με  $R^2 = 0.9963-0.9993$  για το πειραματικό σύστημα και  $R^2 = 0.9674-0.9957$  για το HACH DR3900.

Τα παραπάνω υποδεικνύουν ότι, αν και οι αισθητήρες υποεκτιμούν συστηματικά τις απόλυτες τιμές OD (συχνά >50%), οι τιμές των αποτελεσμάτων παραμένουν εξαιρετικά επαναλήψιμες (με πολύ χαμηλές τυπικές αποκλίσεις, π.χ. <0.01 OD), και είναι ικανοί να αναπαράγουν με αξιοπιστία τη δυναμική αύξηση της βιομάζας.

Ειδικότερα ο αισθητήρας AS7263, στα 730 και 760 nm, παρουσιάζει σταθερά υψηλή γραμμικότητα ( $R^2 > 0.996$ ) και μικρή διασπορά στις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, αλλά υποεκτιμά τις τιμές OD κατά περίπου 55–60%. Προτείνεται η χρήση πολυπαραμετρικών μοντέλων βαθμονόμησης που να συνδυάζουν πληροφορία από περισσότερα του ενός μήκη κύματος για βελτίωση της ακρίβειας.

Ο αισθητήρας AS7341, στα 680 nm, αποδίδει καλύτερα στις χαμηλές συγκεντρώσεις (<200 mg/L), αλλά εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις όσο αυξάνεται η συγκέντρωση βιομάζας. Το μήκος κύματος των 680 nm επηρεάζεται έντονα από τη χλωροφύλλη, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει φασματικές παρεμβολές.

Συνολικά, το πειραματικό σύστημα δεν μπορεί να αντικαταστήσει το φασματοφωτόμετρο HACH για απόλυτες μετρήσεις OD, λόγω του υψηλού NRMSE (>43% και για τα δύο είδη μικροφυκών). Ωστόσο, χάρη στην εξαιρετική γραμμικότητα και την επαναληψιμότητα, αποτελεί ένα ιδανικό εργαλείο για συγκριτικές μελέτες, ποιοτικό έλεγχο, και παρακολούθηση της ανάπτυξης καλλιέργειών. Επιπλέον, μπορεί να βαθμονομηθεί κατάλληλα για ποσοτικές μετρήσεις, εφόσον χρησιμοποιηθούν πρότυπα διαλύματα και αναπτυχθούν πολυμεταβλητά μοντέλα.

Συνίσταται η ξεχωριστή βαθμονόμηση του συστήματος για κάθε είδος μικροφύκους, καθώς και η αξιοποίηση συνδυαστικών μετρήσεων σε πολλαπλά κανάλια, ώστε να ενισχυθεί η ακρίβεια και η ευαισθησία στις αλλαγές της βιομάζας.

## 6.2 Προτάσεις Βελτίωσης

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εντοπίστηκαν ορισμένες δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης του συστήματος. Παρακάτω παρουσιάζονται προτάσεις βελτίωσης, τόσο σε επίπεδο λογισμικού όσο και υλικού, με στόχο την ενίσχυση της λειτουργικότητας, της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του οργάνου σε πειραματικά περιβάλλοντα.

### 6.2.1 Τροποποιήσεις στο Software

#### Δυνατότητα επιλογής πολλαπλών καναλιών για μέτρηση αναφοράς ( $I_0$ ).

Προτείνεται η επέκταση της λειτουργικότητας μέτρησης αναφοράς (blank) ώστε ο χρήστης να μπορεί να επιλέγει περισσότερα του ενός φασματικά κανάλια από τον αισθητήρα (π.χ. 730 nm και 760 nm ταυτόχρονα). Το σύστημα θα πρέπει να αποθηκεύει τις αντίστοιχες τιμές  $I_0$  για κάθε κανάλι, και στη συνέχεια να υπολογίζει αυτόματα τις τιμές OD για όλα τα κανάλια. Η δυνατότητα αυτή θα διευκολύνει πολυκαναλική παρακολούθηση απορρόφησης και θα επιταχύνει τη ροή εργασίας.

**Εφαρμογή γραμμικής βαθμονόμησης με παραμέτρους a και b ανά κανάλι.**

Η εφαρμογή μπορεί να επεκταθεί ώστε να επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει τιμές γραμμικής παλινδρόμησης (συντελεστές a και b για την εξίσωση  $DCW = a \cdot OD + b$ ) για κάθε μήκος κύματος χωριστά. Με αυτόν τον τρόπο, η τιμή OD που υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο μπορεί να μετατρέπεται αυτόματα σε συγκέντρωση ξηρής βιομάζας (DCW), προσφέροντας ποσοτικά αποτελέσματα απευθείας στην οθόνη. Η προσέγγιση αυτή καθιστά το σύστημα πιο φιλικό προς τον τελικό χρήστη και επιστημονικά πιο ολοκληρωμένο.

**Οπτικοποίηση πολλαπλών καναλιών ταυτόχρονα**

Η δυνατότητα επιλογής και προβολής περισσότερων του ενός καναλιού OD στο ίδιο γράφημα (π.χ. 680 nm + 730 nm) θα διευκολύνει τη σύγκριση και την ταυτόχρονη παρακολούθηση απορροφήσεων.

**Αυτόματη αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων μετρήσεων**

Η προσθήκη μηχανισμού αυτόματης αποθήκευσης των μετρήσεων σε αρχεία (CSV ή Excel) ανά ημέρα ή ανά project θα διευκόλυνε την οργάνωση και αρχειοθέτηση των πειραματικών δεδομένων.

**Ενίσχυση της ασφάλειας και αξιοπιστίας επικοινωνίας**

Προτείνεται η ενσωμάτωση μηχανισμών ελέγχου σφαλμάτων στη σειριακή επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και της εφαρμογής, με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας σε πραγματικές συνθήκες χρήσης. Ενδεικτικά, μπορούν να υλοποιηθούν λειτουργίες όπως, επιβεβαίωση λήψης δεδομένων (ACK/NACK), παρακολούθηση κατάστασης σύνδεσης/αποσύνδεσης, μηχανισμοί επανεκπομπής σε περίπτωση απώλειας πακέτου καθώς και ανίχνευση χρονικών υπερβάσεων (timeouts).

**6.2.2 Τροποποιήσεις στο Hardware****Αντικατάσταση του αισθητήρα θερμοκρασίας ADT7410 με τον SHT35**

Ο SHT35 προσφέρει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς οι φασματικοί αισθητήρες AS7263 και AS7341 είναι ευάλωτοι σε συνθήκες υψηλής υγρασίας. Η ενσωμάτωσή του επιτρέπει τη δυναμική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και τη λήψη διορθωτικών μέτρων κατά την ανάλυση των φασματικών δεδομένων.

**Ανασχεδιασμός του περιβλήματος με στόχο την στεγανότητα (IP rating)**

Η κατασκευή ενός περιβλήματος με πιστοποίηση IP (π.χ. IP54 ή IP65) θα προσέφερε προστασία του συστήματος από υγρασία και σκόνη, καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση σε εξωτερικούς πειραματικούς χώρους. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις οπές εισαγωγής φωτός και στη θερμική διαχείριση.

**Βελτίωση σχεδίασης της θήκης κυψελίδας**

Η τρέχουσα γεωμετρία του υποδοχέα (θήκης) της κυψελίδας φέρει τους αισθητήρες και τις πηγές φωτός πολύ ψηλά και κοντά στην επιφάνεια του υγρού δείγματος, εξαιτίας του μικρού όγκου δείγματος που χρησιμοποιείται για διευκόλυνση των αραιώσεων. Προτείνεται η σχεδίαση των οπών, η τοποθέτηση των αισθητήρων, καθώς και των πηγών φωτός 3–4 mm χαμηλότερα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. Rodríguez-Zúñiga, A. Méndez-Zavala, O. Solís-Quiroz, L. Morales-Oyervides, J. C. Montañez-Saénz, and J. R. Benavente-Valdés, “Chapter 1 - Biology and composition of microalgae and cyanobacteria,” in *Sustainable Industrial Processes Based on Microalgae*, T. Lafarga and G. Acien, Eds., Elsevier, 2024, pp. 1–22. doi: 10.1016/B978-0-443-19213-5.00001-7.
- [2] “R.E. Lee Phycology. 2nd edition, xv, 645p. Cambridge University Press, 1989.,” *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, vol. 70, no. 3, pp. 684–684, Aug. 1990, doi: 10.1017/S0025315400036742.
- [3] “(PDF) Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology, Second Edition,” in *ResearchGate*, 2024. Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/277697238\\_Handbook\\_of\\_Microalgal\\_Culture\\_Applied\\_Phycology\\_and\\_Biotechnology\\_Second\\_Edition](https://www.researchgate.net/publication/277697238_Handbook_of_Microalgal_Culture_Applied_Phycology_and_Biotechnology_Second_Edition)
- [4] N. Kalita, S. Nath, T. Chetia, B. Boruah, and P. P. Baruah, “MICROALGAE- A PROMISING TOOL FOR SUSTAINABLE FUTURE,” in *Futuristic Trends in Biotechnology Volume 3 Book 2*, First., Dr. B. Kaur, Dr. P. V. Prahladbhai, Ms. S. Y. V, Mr. K. Mondal, Dr. A. Jha, Dr. Harishchander, Dr. G. Kaur, and Ms. A. S, Eds., Iterative International Publisher, Selfpage Developers Pvt Ltd, 2024, pp. 90–104. doi: 10.58532/V3BGBT2P1CH9.
- [5] P. Show, M. Tang, D. Nagarajan, T. Ling, C.-W. Ooi, and J.-S. Chang, “A Holistic Approach to Managing Microalgae for Biofuel Applications,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 18, no. 1, p. 215, Jan. 2017, doi: 10.3390/ijms18010215.
- [6] I. Chorus and J. Bartram, Eds., *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring, and management*. London New York: E & FN Spon, 1999.
- [7] J. A. Gimpel, V. Henríquez, and S. P. Mayfield, “In Metabolic Engineering of Eukaryotic Microalgae: Potential and Challenges Come with Great Diversity,” *Front. Microbiol.*, vol. 6, Dec. 2015, doi: 10.3389/fmicb.2015.01376.
- [8] I. Demir-Yilmaz, M. Schiavone, J. Esvan, P. Guiraud, and C. Formosa-Dague, “Combining AFM, XPS and chemical hydrolysis to understand the complexity and dynamics of *C. vulgaris* cell wall composition and architecture,” *Algal Res.*, vol. 72, p. 103102, May 2023, doi: 10.1016/j.algal.2023.103102.
- [9] A. Synytsya, L. Sushytskyi, I. Saloň, T. Babayeva, and J. Čopíková, “Chapter 8 - Intracellular and extracellular carbohydrates in microalgae,” in *Handbook of Food and Feed from Microalgae*, E. Jacob-Lopes, M. I. Queiroz, M. M. Maroneze, and L. Q. Zepka, Eds., Academic Press, 2023, pp. 87–102. doi: 10.1016/B978-0-323-99196-4.00017-6.
- [10] D. F. Gomez-Casati, J. Barchiesi, and M. V. Busi, “Mitochondria and chloroplasts function in microalgae energy production,” *PeerJ*, vol. 10, p. e14576, Dec. 2022, doi: 10.7717/peerj.14576.
- [11] E. Jacob-Lopes, M. I. Queiroz, and L. Q. Zepka, Eds., *Pigments from Microalgae Handbook*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-50971-2.
- [12] L. A. Staehelin, “Chloroplast Structure and Supramolecular Organization of Photosynthetic Membranes,” in *Photosynthesis III: Photosynthetic Membranes and Light Harvesting Systems*, L. A. Staehelin and C. J. Arntzen, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 1986, pp. 1–84. doi: 10.1007/978-3-642-70936-4\_1.
- [13] C. Deepika, J. Wolf, J. Roles, I. Ross, and B. Hankamer, “Sustainable Production of Pigments from Cyanobacteria,” in *Advances in biochemical engineering/biotechnology*, 2022. doi: 10.1007/10\_2022\_211.
- [14] E. D’Alessandro and N. Antoniosi Filho, “Concepts and studies on lipid and pigments of microalgae: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 832–841, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.162.
- [15] K. J. M. Mulders, P. P. Lamers, D. E. Martens, and R. H. Wijffels, “Phototrophic pigment production with microalgae: biological constraints and opportunities,” *J. Phycol.*, vol. 50, no. 2, pp. 229–242, Apr. 2014, doi: 10.1111/jpy.12173.
- [16] M. M. Poojary *et al.*, “Innovative Alternative Technologies to Extract Carotenoids from Microalgae and Seaweeds,” *Mar. Drugs*, vol. 14, no. 11, p. 214, Nov. 2016, doi: 10.3390/md14110214.

- [17] M. González-Hourcade, D. Fernando, and F. G. Gentili, “Morphological and cellular organization of green microalgae to cope with cold stress in subarctic environment,” *Algal Res.*, vol. 75, p. 103254, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.algal.2023.103254.
- [18] M. M. Reboloso-Fuentes, A. Navarro-Pérez, F. García-Camacho, J. J. Ramos-Miras, and J. L. Guil-Guerrero, “Biomass nutrient profiles of the microalga *Nannochloropsis*,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 49, no. 6, pp. 2966–2972, Jun. 2001, doi: 10.1021/jf0010376.
- [19] A. E. Solovchenko and M. N. Merzlyak, “Screening of visible and UV radiation as a photoprotective mechanism in plants,” *Russ. J. Plant Physiol.*, vol. 55, no. 6, pp. 719–737, Nov. 2008, doi: 10.1134/S1021443708060010.
- [20] M. J. Griffiths, R. P. van Hille, and S. T. L. Harrison, “The effect of nitrogen limitation on lipid productivity and cell composition in *Chlorella vulgaris*,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 98, no. 5, pp. 2345–2356, Mar. 2014, doi: 10.1007/s00253-013-5442-4.
- [21] I. Khozin-Goldberg and Z. Cohen, “The effect of phosphate starvation on the lipid and fatty acid composition of the fresh water eustigmatophyte *Monodus subterraneus*,” *Phytochemistry*, vol. 67, no. 7, pp. 696–701, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.phytochem.2006.01.010.
- [22] H. Iwamoto, “Industrial Production of Microalgal Cell-Mass and Secondary Products - Major Industrial Species: *Chlorella*,” in *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology*, 2007, pp. 253–263. doi: 10.1002/9780470995280.ch11.
- [23] S. J. King, A. Jerkovic, L. J. Brown, K. Petroll, and R. D. Willows, “Synthetic biology for improved hydrogen production in *Chlamydomonas reinhardtii*,” *Microb. Biotechnol.*, vol. 15, no. 7, pp. 1946–1965, Jul. 2022, doi: 10.1111/1751-7915.14024.
- [24] *Algal Culturing Techniques*. 2004. Accessed: Feb. 14, 2025. [Online]. Available: <https://shop.elsevier.com/books/algal-culturing-techniques/andersen/978-0-12-088426-1>
- [25] A. Decho, “Decho AW.. Microbial exopolymer secretions in ocean environments: their role(s) in food webs and marine processes. *Oceanogr Mar Biol Ann Rev* 28: 73-153,” *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, vol. 28, pp. 73–154, Jan. 1990.
- [26] C. Posten and C. Walter, Eds., *Microalgal biotechnology: potential and production*. Berlin ; Boston: De Gruyter, 2012.
- [27] C. U. Ugwu, H. Aoyagi, and H. Uchiyama, “Photobioreactors for mass cultivation of algae,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 10, pp. 4021–4028, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.01.046.
- [28] C. Posten, “Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae,” *Eng. Life Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 165–177, Jun. 2009, doi: 10.1002/elsc.200900003.
- [29] O. Pulz and W. Gross, “Valuable products from biotechnology of microalgae,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 65, no. 6, pp. 635–648, Nov. 2004, doi: 10.1007/s00253-004-1647-x.
- [30] J. A. Gimpel, E. A. Specht, D. R. Georgianna, and S. P. Mayfield, “Advances in microalgae engineering and synthetic biology applications for biofuel production,” *Curr. Opin. Chem. Biol.*, vol. 17, no. 3, pp. 489–495, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.cbpa.2013.03.038.
- [31] R. Halim, B. Gladman, M. K. Danquah, and P. A. Webley, “Oil extraction from microalgae for biodiesel production,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 178–185, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.136.
- [32] S. K. Gupta and F. Bux, Eds., *Application of Microalgae in Wastewater Treatment: Volume 2: Biorefinery Approaches of Wastewater Treatment*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-13909-4.
- [33] L. G. Ramírez Mérida and R. A. Rodríguez Padrón, “Application of microalgae in wastewater: opportunity for sustainable development,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 11, p. 1238640, Dec. 2023, doi: 10.3389/fenvs.2023.1238640.
- [34] M. Su, L. Bastiaens, J. Verspreet, and M. Hayes, “Applications of Microalgae in Foods, Pharma and Feeds and Their Use as Fertilizers and Biostimulants: Legislation and Regulatory Aspects for Consideration,” *Foods*, vol. 12, no. 20, p. 3878, Oct. 2023, doi: 10.3390/foods12203878.
- [35] J. J. Milledge, “Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review,” *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 10, no. 1, pp. 31–41, Mar. 2011, doi: 10.1007/s11157-010-9214-7.
- [36] F. Khavari, M. Saidijam, M. Taheri, and F. Nouri, “Microalgae: therapeutic potentials and applications,” *Mol. Biol. Rep.*, vol. 48, no. 5, pp. 4757–4765, May 2021, doi: 10.1007/s11033-021-06422-w.

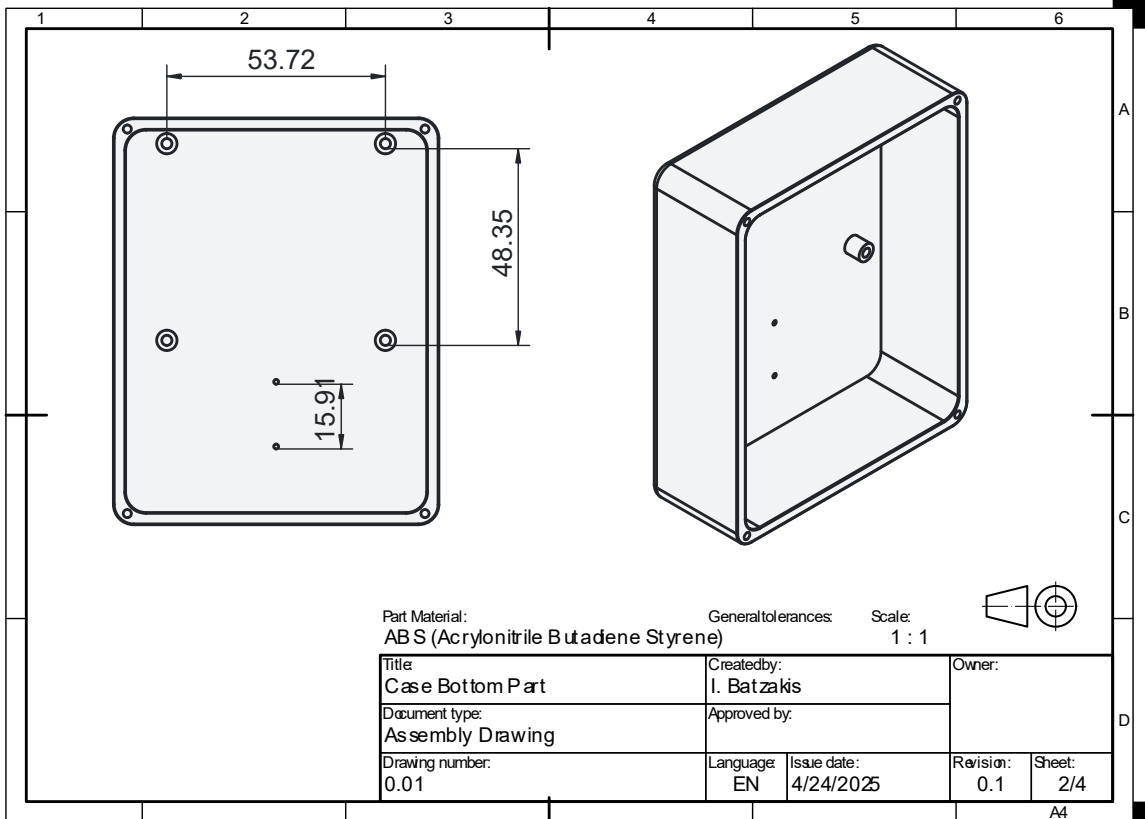
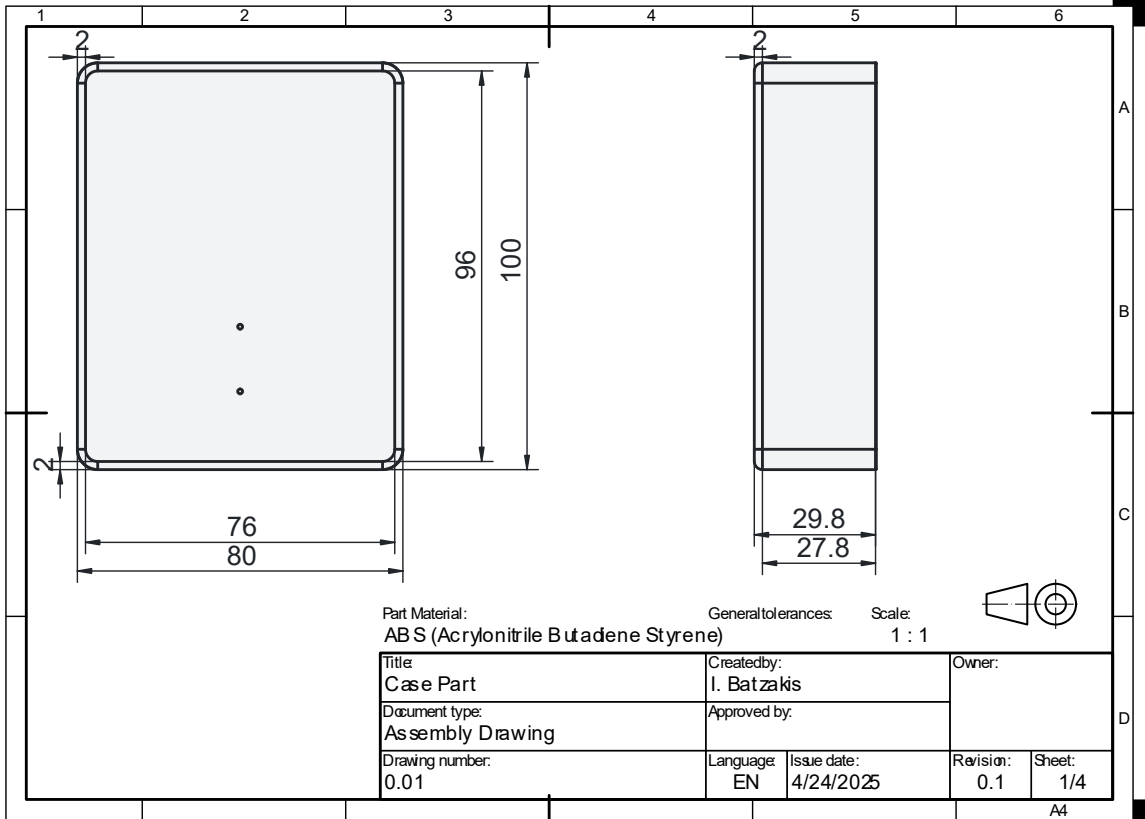
- [37] F. Romagnoli, B. Ievina, W. A. A. R. P. Perera, and D. Ferrari, “Novel Stacked Modular Open Raceway Ponds for Microalgae Biomass Cultivation in Biogas Plants: Preliminary Design and Modelling,” *Environ. Clim. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 1–19, Sep. 2020, doi: 10.2478/rtuect-2020-0050.
- [38] F. Rayen, T. Behnam, and P. Dominique, “Optimization of a raceway pond system for wastewater treatment: a review,” *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 39, no. 3, pp. 422–435, Apr. 2019, doi: 10.1080/07388551.2019.1571007.
- [39] J. Huang *et al.*, “Investigation on the performance of raceway ponds with internal structures by the means of CFD simulations and experiments,” *Algal Res.*, vol. 10, pp. 64–71, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.algal.2015.04.012.
- [40] C. Meng, J. Huang, C. Ye, W. Cheng, J. Chen, and Y. Li, “Comparing the performances of circular ponds with different impellers by CFD simulation and microalgae culture experiments,” *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 38, no. 7, pp. 1347–1363, Jul. 2015, doi: 10.1007/s00449-015-1376-9.
- [41] P. K. Mallick, *Fundamentals of Molecular Spectroscopy*. Singapore: Springer Nature, 2023. doi: 10.1007/978-981-99-0791-5.
- [42] Donald L. Pavia, Gary M. Lampman, George A. Kriz, and James R. Vyvyan, *Introduction To Spectroscopy, 5th Edition*.
- [43] Peter R. Griffiths, James A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry, 2nd Edition* | Wiley. 2007.
- [44] C. P. Slichter, *Principles of magnetic resonance, with examples from solid state physics*. New York, Harper & Row, 1963. Accessed: May 06, 2025. [Online]. Available: <http://archive.org/details/principlesofmagn0000slic>
- [45] A. Zettner, “Principles and Applications of Atomic Absorption Spectroscopy,” in *Advances in Clinical Chemistry*, vol. 7, H. Sobotka and C. P. Stewart, Eds., Elsevier, 1964, pp. 1–62. doi: 10.1016/S0065-2423(08)60372-8.
- [46] M. Thompson and J. N. Walsh, “Introduction,” in *Handbook of Inductively Coupled Plasma Spectrometry*, M. Thompson and J. N. Walsh, Eds., Boston, MA: Springer US, 1989, pp. 1–15. doi: 10.1007/978-1-4613-0697-9\_1.
- [47] “Electron Paramagnetic Resonance: Elementary Theory and Practical Applications, Second Edition | Request PDF,” *ResearchGate*, doi: 10.1063/1.2808029.
- [48] J. R. Lakowicz, Ed., “Introduction to Fluorescence,” in *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Boston, MA: Springer US, 2006, pp. 1–26. doi: 10.1007/978-0-387-46312-4\_1.
- [49] A. Pandey and M. Mann, “Proteomics to study genes and genomes,” *Nature*, vol. 405, no. 6788, pp. 837–846, Jun. 2000, doi: 10.1038/35015709.
- [50] B. D. Cullity and S. R. Stock, *Elements of X-ray Diffraction, Third Edition*. New York: Prentice-Hall, 2001.
- [51] D. Skoog, F. Holler, and S. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis, 7th edition*. Australia: Cengage Learning, 2017.
- [52] F. A. Almomani and B. Örmeci, “Monitoring and measurement of microalgae using the first derivative of absorbance and comparison with chlorophyll extraction method,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 190, no. 2, p. 90, Feb. 2018, doi: 10.1007/s10661-018-6468-y.
- [53] Y.-C. Yeh, B. Haasdonk, U. Schmid-Staiger, M. Stier, and G. E. M. Tovar, “A novel model extended from the Bouguer-Lambert-Beer law can describe the non-linear absorbance of potassium dichromate solutions and microalgae suspensions,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 11, p. 1116735, Mar. 2023, doi: 10.3389/fbioe.2023.1116735.
- [54] Y.-C. Yeh, T. Ebbing, K. Frick, U. Schmid-Staiger, B. Haasdonk, and G. E. M. Tovar, “Improving Determination of Pigment Contents in Microalgae Suspension with Absorption Spectroscopy: Light Scattering Effect and Bouguer–Lambert–Beer Law,” *Mar. Drugs*, vol. 21, no. 12, p. 619, Nov. 2023, doi: 10.3390/md21120619.
- [55] Moses Kayanda Kiteto and Cleophas Achisa Mecha, “Insight into the Bouguer-Beer-Lambert Law: A review,” *Sustain. Chem. Eng.*, pp. 567–587, Sep. 2024, doi: 10.37256/sce.5220245325.
- [56] “Beer-Lambert Law | Transmittance & Absorbance.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.edinst.com/resource/the-beer-lambert-law/>
- [57] T. G. Mayerhöfer, S. Pahlow, and J. Popp, “The Bouguer-Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure,” *ChemPhysChem*, vol. 21, no. 18, pp. 2029–2046, 2020, doi: 10.1002/cphc.202000464.

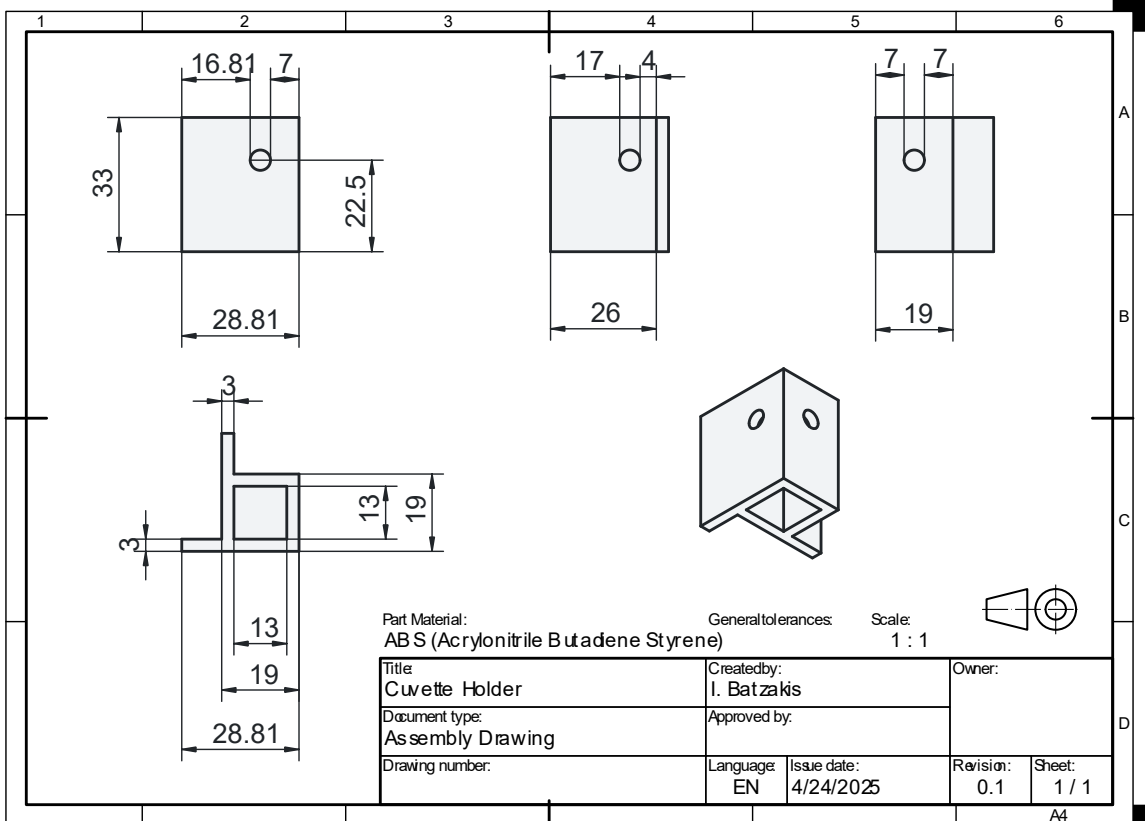
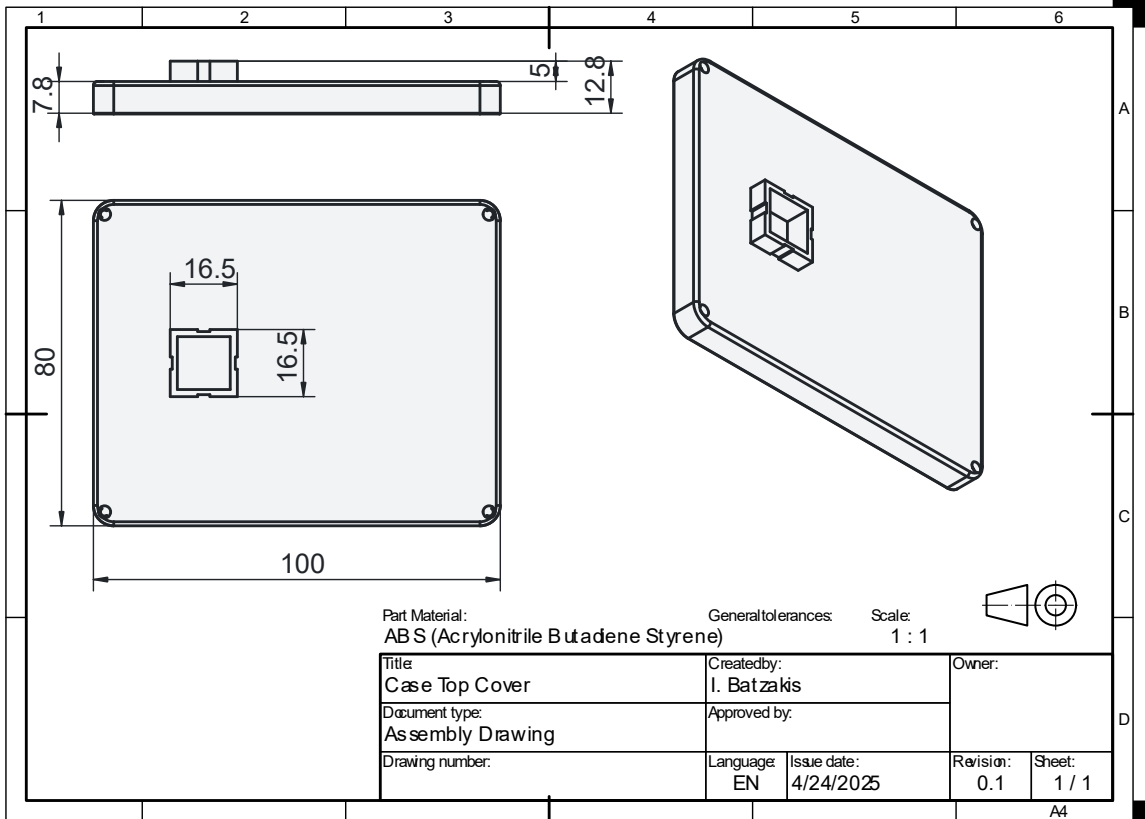
- [58] T. G. Mayerhöfer, S. Pahlow, and J. Popp, “Understanding the Limits of the Bouguer-Beer-Lambert Law,” *Spectroscopy*, pp. 29-30, 58, Aug. 2023, doi: 10.56530/spectroscopy.iq2368r9.
- [59] M. Schagerl, R. Siedler, E. Konopáčová, and S. S. Ali, “Estimating Biomass and Vitality of Microalgae for Monitoring Cultures: A Roadmap for Reliable Measurements,” *Cells*, vol. 11, no. 15, p. 2455, Aug. 2022, doi: 10.3390/cells11152455.
- [60] G. N. Hotos, D. Avramidou, and V. Bekiari, “Calibration Curves of Culture Density Assessed by Spectrophotometer for Three Microalgae (*Nephroselmis* sp., *Amphidinium carterae* and *Phormidium* sp.),” *Eur. J. Biol. Biotechnol.*, vol. 1, no. 6, Dec. 2020, doi: 10.24018/ejbio.2020.1.6.132.
- [61] V. A. Thiviyanathan, P. J. Ker, E. P. P. Amin, S. G. H. Tang, W. Yee, and M. Z. Jamaludin, “Quantifying Microalgae Growth by the Optical Detection of Glucose in the NIR Waveband,” *Molecules*, vol. 28, no. 3, p. 1318, Jan. 2023, doi: 10.3390/molecules28031318.
- [62] G. N. Hotos, “Quantity and Quality of Light on Growth and Pigment Content of *Dunaliella* sp. and *Anabaena* sp. Cultures and the Use of Their Absorption Spectra as a Proxy Method for Assessment,” Jul. 10, 2023, *Biology and Life Sciences*. doi: 10.20944/preprints202307.0629.v1.
- [63] Z. Chen, L. Wang, S. Qiu, and S. Ge, “Determination of Microalgal Lipid Content and Fatty Acid for Biofuel Production,” *BioMed Res. Int.*, vol. 2018, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1155/2018/1503126.
- [64] A. Anschau, C. S. Caruso, R. C. Kuhn, and T. T. Franco, “VALIDATION OF THE SULFO-PHOSPHO-VANILLIN (SPV) METHOD FOR THE DETERMINATION OF LIPID CONTENT IN OLEAGINOUS MICROORGANISMS,” *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 19–27, Jan. 2017, doi: 10.1590/0104-6632.20170341s20140222.
- [65] J. Park, H. J. Jeong, E. Y. Yoon, and S. J. Moon, “Easy and rapid quantification of lipid contents of marine dinoflagellates using the sulpho-phospho-vanillin method,” *ALGAE*, vol. 31, no. 4, pp. 391–401, Dec. 2016, doi: 10.4490/algae.2016.31.12.7.
- [66] STMicroelectronics, “STM32G4 Nucleo-32 Board (MB1430) – User Manual,” UM2397, Rev. 2, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/product/nucleo-g431kb>
- [67] STMicroelectronics, “Getting started with STM32G4 Series hardware development boards,” Application Note AN5093, Oct. 2019. [Online]. Available: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5093](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5093)
- [68] STMicroelectronics, “STM32G4 series advanced Arm®-based 32-bit MCUs,” Reference manual RM0440 Ver 9, Mar. 2025.
- [69] ams OSRAM AG, “AS7263 6-Channel NIR Spectral\_ID Device with Electronic Shutter and Smart Interface,” Datasheet Rev. 4.00, Nov. 2022. [Online]. Available: <https://ams.com/AS7263>
- [70] ams OSRAM AG, “AS7341 – 11-Channel Multi-Spectral Digital Sensor,” Datasheet Rev. 3.00, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://www.ams.com/AS7341>
- [71] ams OSRAM AG, “SMUX Configuration: How to Configure SMUX for Reading Out Results,” Application Note AN000666, v1-01, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://www.ams.com/AS7341>
- [72] Marktech Optoelectronics, “MTMD6788594SMT6 – Multichip Emitter,” Datasheet Rev. A, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://www.marktechopto.com/>
- [73] Marktech Optoelectronics, “MTE6800N2-UR Visible Red Emitter,” Datasheet Rev. 1, May 2012. [Online]. Available: <https://www.marktechopto.com/>
- [74] Marktech Optoelectronics, “MTE2077N1-R Visible Red Emitter,” Datasheet Rev. A, Oct. 2012. [Online]. Available: <https://www.marktechopto.com/>
- [75] Vishay Semiconductors, “VLMTG1400-GS08 True Green ChipLED,” Datasheet 84393, Rev. 1.2, Jun. 2019. [Online]. Available: <https://www.vishay.com>
- [76] Lumileds Holding B.V., “LUXEON IR ONYX – Broadband IR LED Emitter,” Datasheet DS263, Jul. 2019. [Online]. Available: <https://www.lumileds.com>
- [77] STMicroelectronics, “LED1202 – 12-channel low quiescent current LED driver,” Datasheet DS12875, Rev. 2, Feb. 2019. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/product/led1202>
- [78] Analog Devices, “ADT7410 ±0.5°C Accurate, 16-Bit Digital I2C Temperature Sensor,” Data Sheet Rev. C, 2017. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADT7410.pdf>
- [79] “Synthetic Quartz Glass Cuvettes with 10 mm Path Length.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com>

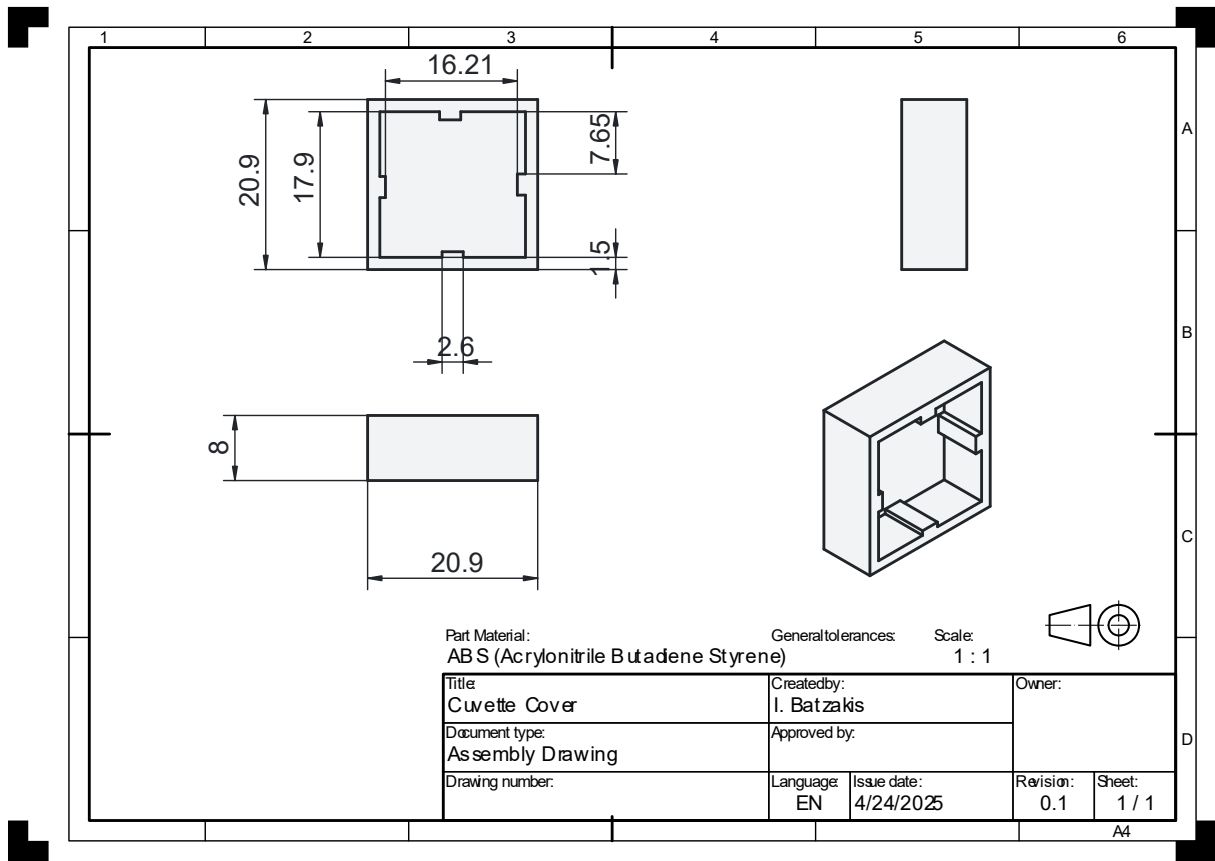


- [80]ams OSRAM AG, “AS726x Design Considerations,” Application Note v1-01, Apr. 2017. [Online]. Available: <https://www.ams.com/AS7263>
- [81]Renesas Electronics, “AT25SF041B – 4-Mbit SPI Serial Flash Memory,” Datasheet DS-AT25SF041B-190, Rev. J, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://www.renesas.com>
- [82]ams OSRAM AG, “Measure Turbidity with Spectral Sensors – AS7341 Application,” Application Note AN001055, v1-00, Sep. 2022. [Online]. Available: <https://www.ams.com/AS7341>
- [83]Analog Devices, “MAX8882/MAX8883 – Dual, Low-Noise, Low-Dropout, 160mA Linear Regulators,” Datasheet Rev. 2, May 2018. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/max8882.html>
- [84]Texas Instruments, “TXS0102 – 2-Bit Bidirectional Voltage-Level Translator,” Datasheet SCES640, Rev. J, Jul. 2023. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/TXS0102>
- [85]Texas Instruments, “A Basic Guide to I2C,” Application Note SBAA565, Nov. 2022.
- [86]Texas Instruments, “I2C Bus Pullup Resistor Calculation,” Application Report SLVA689, Feb. 2015.
- [87]Texas Instruments, “LMZM23600 – 36-V, 0.5-A Step-Down DC/DC Power Module,” Datasheet SNVSB53C, Rev. C, Mar. 2023. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/LMZM23600>
- [88]Texas Instruments, “TPS736 – Capacitor-Free, NMOS, 400mA, Low-Dropout Regulator,” Datasheet SBVS038, Rev. V, Sep. 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/TPS736>
- [89]SparkFun Electronics, *Qwiic Spectral Sensor AS726X*. (2016). C++. [Online]. Available: [https://github.com/sparkfun/Qwiic\\_Spectral\\_Sensor\\_AS726X](https://github.com/sparkfun/Qwiic_Spectral_Sensor_AS726X)
- [90]Batzakis ilias, *AS7263-for-STM32G4*. (May 2025). C. [Online]. Available: <https://github.com/Batzakis-iliias/AS7263-for-STM32G4>
- [91]Bryan Siepert, *Adafruit AS7341*. (Jul. 2023). C++. Adafruit Industries. [Online]. Available: [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_AS7341](https://github.com/adafruit/Adafruit_AS7341)
- [92]Batzakis ilias, *AS7341-for-STM32G4*. (May 2025). C. [Online]. Available: <https://github.com/Batzakis-iliias/AS7341-for-STM32G4>
- [93]Batzakis ilias, *ADT7410-Sensor-Library-For-STM32*. (May 2025). C. [Online]. Available: <https://github.com/Batzakis-iliias/ADT7410-Sensor-Library-For-STM32>
- [94]Batzakis ilias, *LED1202-Driver-for-uAlgaeApp-Project*. (May 2025). C. [Online]. Available: <https://github.com/Batzakis-iliias/LED1202-Driver-for-uAlgaeApp-Project/tree/main>
- [95]Batzakis ilias, *Light-Manager-for-uAlgaeApp-Project*. (May 2025). C. [Online]. Available: <https://github.com/Batzakis-iliias/Light-Manager-for-uAlgaeApp-Project>
- [96]Batzakis ilias, *uAlgaeApp*. (May 2025). C#. [Online]. Available: <https://github.com/Batzakis-iliias/uAlgaeApp>
- [97]A. Nuhu, M. s Sallau, and B. Tukur, “Fixed sized simplex optimization of spectrophotometric method for the quantitative determination of diclofenac in pharmaceutical preparations,” *Int. J. Adv. Res.*, vol. 3, pp. 234–245, Oct. 2015.
- [98]S. K. Mishra *et al.*, “Rapid quantification of microalgal lipids in aqueous medium by a simple colorimetric method,” *Bioresour. Technol.*, vol. 155, pp. 330–333, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.077.

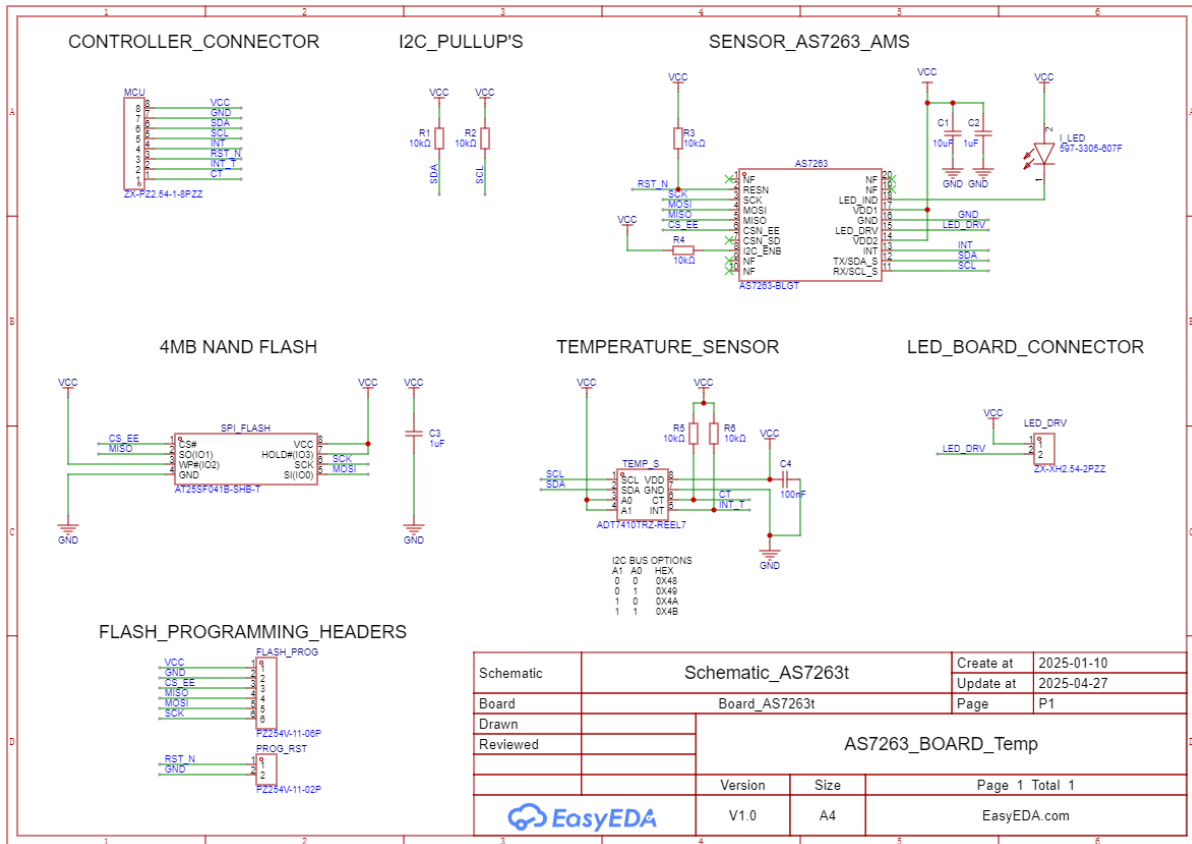
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Τεχνικά Σχέδια Περιβλήματος Συσκευής







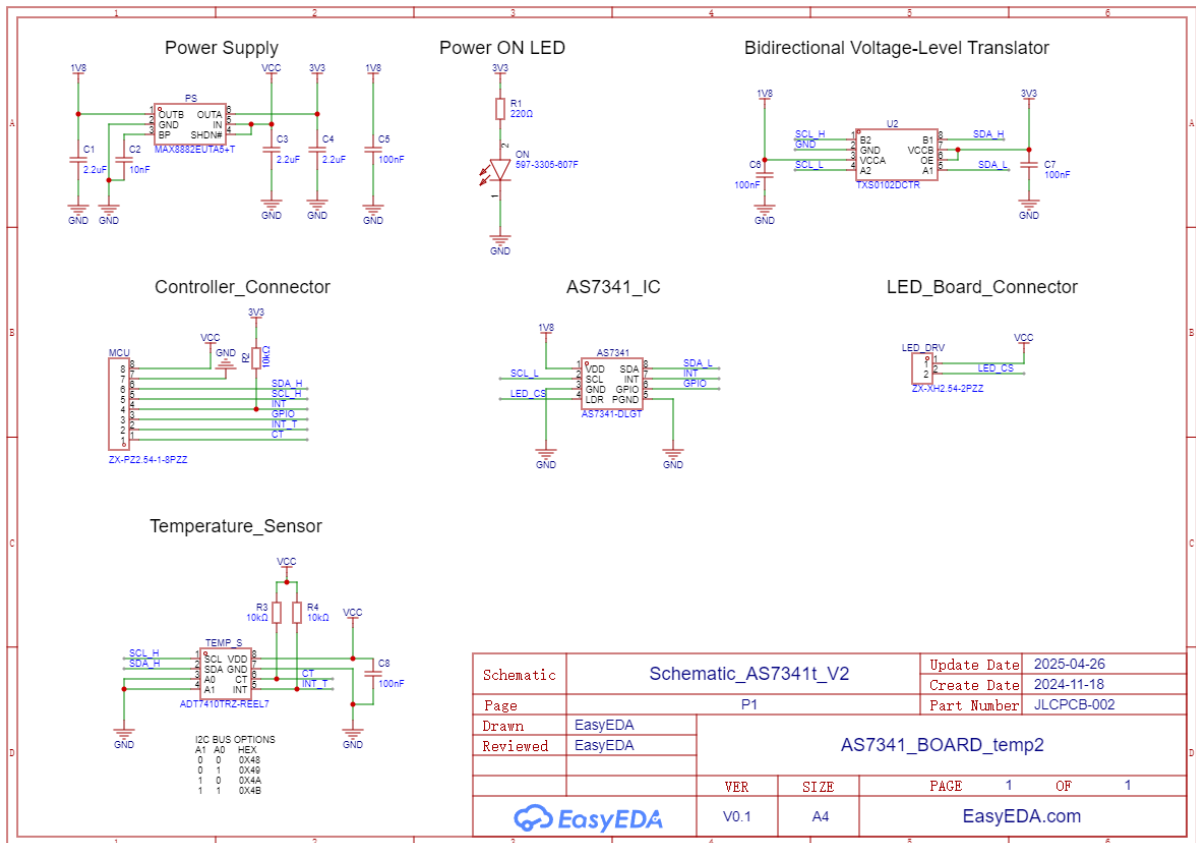
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Σχηματικά Διαγράμματα Κυκλωμάτων



Σχέδιο Α Σχηματικό Διάγραμμα Κυκλώματος αισθητήρα AS7263

Πίνακας 6.1 BOM AS7263 PCB

No.	Quantity	Comment	Designator	Footprint	Value	Manufacturer Part	Manufacturer
1	1	AS7263-BLGT	AS7263	LGA-20_L4.7-W4.5-P0.65-TL		AS7263-BLGT	AMS OSRAM
2	1	10uF	C1	C0603	10uF	GRM188Z71A106KA73D	Murata Electronics
3	2	1uF	C2,C3	C0603	1uF	0603ZC105JAT2A	KYOCERA AVX
4	1	100nF	C4	C0603	100nF	0603YC104J4T2A	KYOCERA AVX
5	1	PZ254V-11-06P	FLASH_PROG	HDR-TH_6P-P2.54-V-M		PZ254V-11-06P	XFCN
6	1	597-3305-607F	I_LED	LEDC2012X70N		597-3305-607F	Dialight
7	1	ZX-XH2.54-2PZZ	LED_DRV	CONN-TH_2P-P2.50_HX25003-2A		ZX-XH2.54-2PZZ	Megastar
8	1	ZX-PZ2.54-1-8PZZ	MCU	HDR-TH_8P-P2.54-V-M		ZX-PZ2.54-1-8PZZ	Megastar
9	1	PZ254V-11-02P	PROG_RST	HDR-TH_2P-P2.54-V-M		PZ254V-11-02P	XFCN
10	4	10kΩ	R1,R2,R5,R6	R0402	10kΩ	RC0402BR-0710KL	YAGEO
11	2	10kΩ	R3,R4	R0603	10kΩ	CRCW060310K0FKEI	VISHAY
12	1	AT25SF041B-SHB-T	SPI_FLASH	SOIC-8_L5.3-W5.3-P1.27-LS8.0-BL		AT25SF041B-SHB-T	Renesas / Dialog
13	1	ADT7410TRZ-REEL7	TEMP_S	SOIC-8_L5.0-W4.0-P1.27-LS6.0-BL		ADT7410TRZ-REEL7	Analog Devices

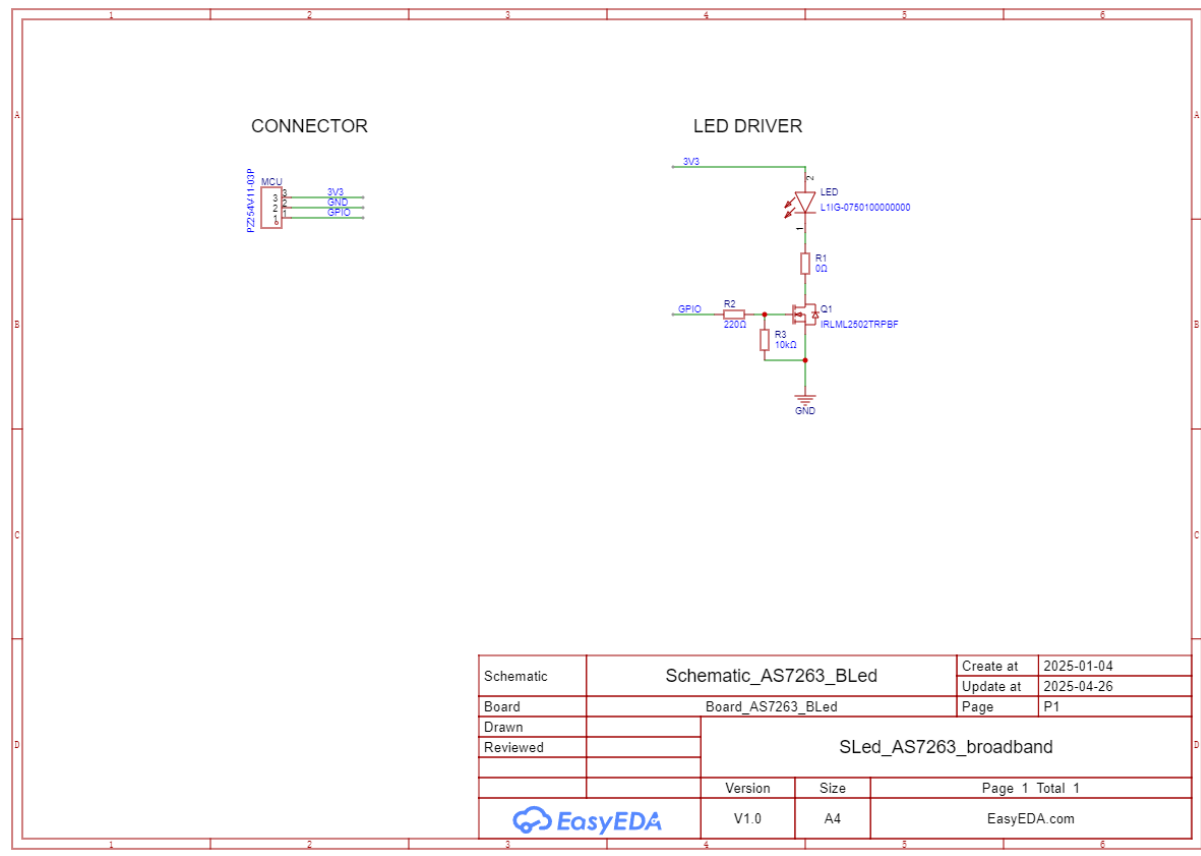


Σχέδιο Β Σχηματικό Διάγραμμα αισθητήρα AS7341

Πίνακας 1.2 BOM AS7341 PCB

No.	Quantity	Comment	Designator	Footprint	Value	Manufacturer Part	Manufacturer
1	1	AS7341-DLGT	AS7341	OLGA-8_L3.1-W2.0-P0.80-BL		AS7341-DLGT	AMS
2	3	2.2uF	C1,C3,C4	C0603	2.2uF	GRM188Z71C225KE43D	Murata Electronics
3	1	10nF	C2	C0603	10nF	GRM1885C1E103GA01J	Murata Electronics
4	4	100nF	C5,C6,C7,C8	C0603	100nF	0603YC104J4T2A	KYOCERA AVX
5	1	ZX-XH2.54-2PZZ	LED_DRV	CONN-TH_2P-P2.50_HX25003-2A		ZX-XH2.54-2PZZ	Megastar
6	1	ZX-P22.54-1-8PZZ	MCU	HDR-TH_8P-P2.54-V-M		ZX-P22.54-1-8PZZ	Megastar
7	1	597-3305-607F	ON	LEDC2012X70N		597-3305-607F	Dialight
8	1	MAX8882EUTA5+T	PS	SOT-23-6_L2.9-W1.6-P0.95-LS2.8-BL		MAX8882EUTA5+T	Analog Devices / Maxim
9	1	220Ω	R1	R0603	220Ω	560112110036	Würth Electronic
10	3	10kΩ	R2,R3,R4	R0402	10kΩ	RC0402BR-0710KL	YAGEO
11	1	ADT7410TRZ-REEL7	TEMP_S	SOIC-8_L5.0-W4.0-P1.27-LS6.0-BL		ADT7410TRZ-REEL7	YAGEO
12	1	TXS0102DCTR	U2	SSOP-8_L2.9-W2.8-P0.65-LS4.0-BR		TXS0102DCTR	Texas Instruments



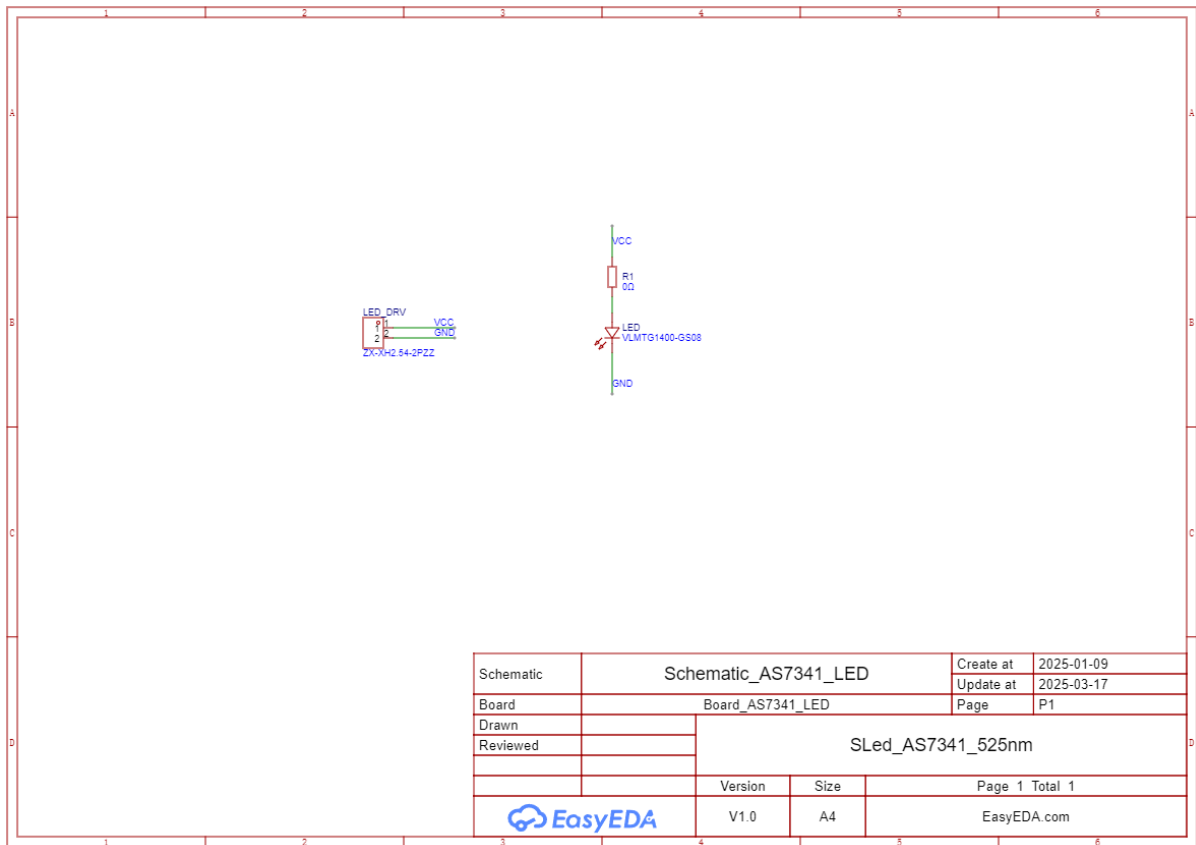


Σχέδιο D Σχηματικό Διάγραμμα κυκλώματος Ευρυφασματικού Led Luxeon IR Onyx

Πίνακας 1.4 BOM Luxeon IR Onyx PCB

No.	Quantity	Comment	Designator	Footprint	Value	Manufacturer Part	Manufacturer
1	1	L1G-0750100000000	LED	1108 (2720 metric)		L1G-0750100000000	Lumileds
2	1	PZ254V-11-03P	MCU	HDR-TH_3P-P2.54-V-M		PZ254V-11-03P	XFCN
3	1	IRLML2502TRPBF	Q1	SOT-23_L2.9-W1.3-P1.90-LS2.4-BR		IRLML2502TRPBF	Infineon
4	1	10Ω	R1	R0603	10Ω	RCP0603W10R0GEB	Vishay
5	1	220Ω	R2	R0402	220Ω	560112110036	Würth Electronic
6	1	10kΩ	R3	R0402	10kΩ	RC0402FR-0710KL	YAGEO

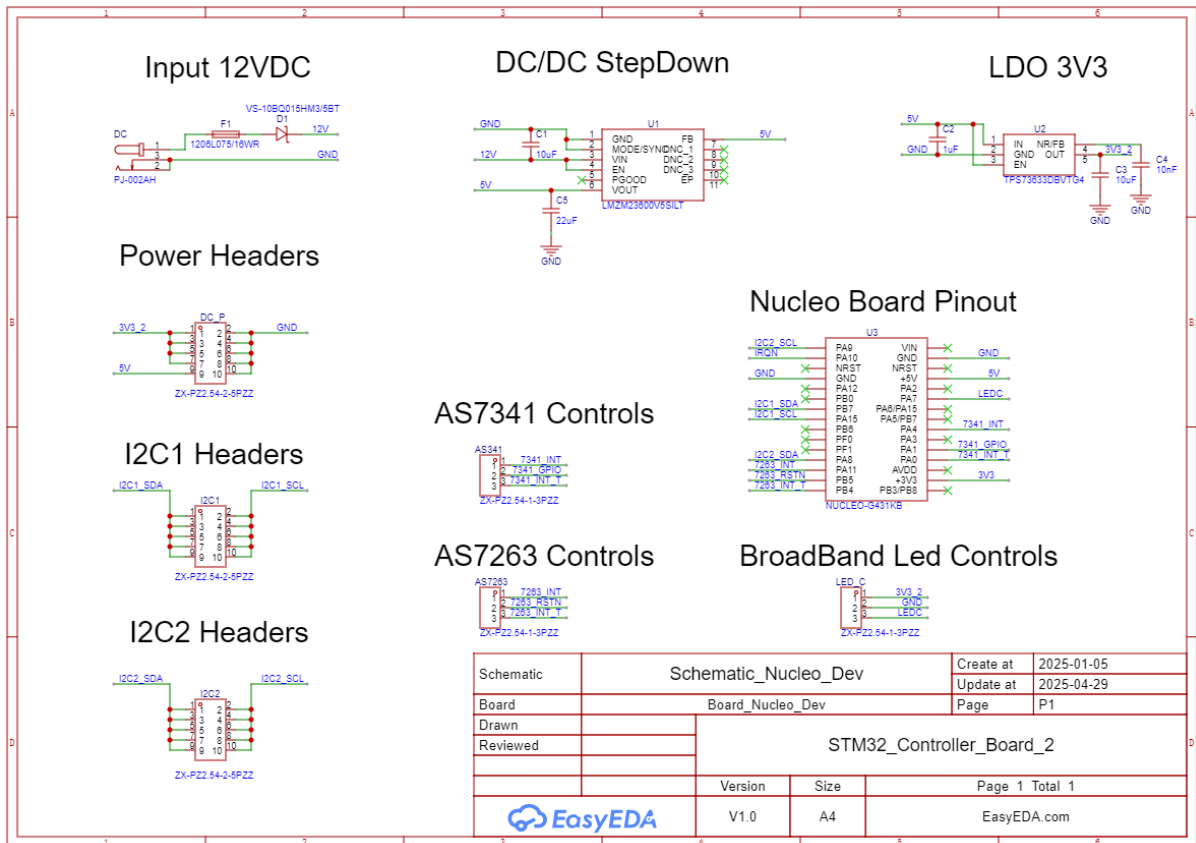




Σχέδιο Ε Σχηματικό Διάγραμμα κυκλώματος LED VLMTG1400

Πίνακας 1.5 BOM VLMTG1400 PCB

No.	Quantity	Comment	Designator	Footprint	Value	Manufacturer Part	Manufacturer
1	1	VLMTG1400-GS08	LED	LED0603-RD		VLMTG1400-GS08	VISHAY
2	1	ZX-XH2.54-2PZZ	LED_DRV	CONN-TH_2P-P2.50_HX25003-2A		ZX-XH2.54-2PZZ	Megastar
3	1	CRCW06030000Z0ED	R1	R0603	0Ω	CRCW06030000Z0ED	VISHAY



Σχέδιο F Σηματικό διάγραμμα κυκλώματος Nucleo Development Board

Πίνακας 1.6 BOM Nucleo Board PCB

No.	Quantity	Comment	Designator	Footprint	Value	Manufacturer Part	Manufacturer
1	3	ZX-PZ2.54-1-3PZZ	AS341,AS7263,LED_C	HDR-TH_3P-P2.54-V-M-1		ZX-PZ2.54-1-3PZZ	Megastar
2	1	10uF	C1	C1210	10uF	GRM32ER71H106KA12L	muRata
3	1	1uF	C2	C0603	1uF	CC0603KRX7R7BB105	YAGEO
4	1	10uF	C3	C0603	10uF	GRM188Z71A106KA73D	muRata
5	1	10nF	C4	C0603	10nF	GRM1885C1H103JA01D	muRata
6	1	22uF	C5	C1210	22uF	GRM32ER71E226KE15L	muRata
7	1	VS-10BQ015HM3/5BT	D1	SMB_L4.6-W3.6-L55.3-RD		VS-10BQ015HM3/5BT	VISHAY
8	1	PJ-002AH	DC	DC-IN-TH_PJ-002AH		PJ-002AH	SAME SKY
9	3	ZX-PZ2.54-2-5PZZ	DC_P,I2C1,I2C2	HDR-TH_10P-P2.54-V-M-R2-C5-S2.54		ZX-PZ2.54-2-5PZZ	Megastar
10	1	1206L075/16WR	F1	F1206		1206L075/16WR	Littelfuse
11	1	LMZM23600V5SILT	U1	LMZM23600SILT		LMZM23600V5SILR	Texas Instruments
12	1	TPS73633DBVTG4	U2	SOT95P280X145-5N		TPS73633DBVTG4	Texas Instruments
13	1	NUCLEO-G431KB	U3	MODULE_NUCLEO-G431KB		NUCLEO-G431KB	ST Microelectronics